

**脱地球温暖化社会へ向けた
建設工事への木材利用に関する調査・研究**

産学官共同研究報告書

平成 20 年 3 月

(財) 福井県建設技術公社

発刊にあたって（案）

（財）福井県建設技術公社は、県および市町の建設技術の向上と良質な社会資本の整備に寄与することを目的として、平成6年4月に設立されて以来、建設技術に関する研修会や講習会の開催、調査・設計マニュアルの作成、建設事業に関する受託業務などを行い、建設行政の円滑かつ効率的な執行を図るための発注者支援を行って参りました。

産学官共同研究支援事業は平成12年度より、大学と民間企業および県の機関（雪対策・建設技術研究所）が対等の立場で共通の課題に取り組み、技術研究開発の推進、建設技術の高度化を図ることを目的として始まりました。当公社につきましては、この共同研究のコーディネートを行っております。

近年、二酸化炭素による地球の温暖化が問題となっており、具体的な対策の開発が課題となっており、一つの解決策として森林による二酸化炭素の吸収があげられています。

そこで、当公社では県産材のスギを地中基礎や軟弱地盤対策に利用することで木材需要を高め、森林の活性化を促進することを目的として平成18年度から2ヶ年にわたって研究支援に取り組みました。

特に、福井県は県面積の大部分が森林で覆われており、本研究は県の特徴を活かした温暖化対策のひとつになると考えられます。

本書はその研究成果をまとめたものであり、地中基礎や軟弱地盤対策にかかわる技術の参考となれば幸いです。

最後に、この共同研究にご協力頂いた方々に対し、深く感謝申し上げます。

平成20年3月

（財）福井県建設技術公社
理事長 児玉 忠

まえがき

最近、新聞やテレビを見ていると、地球温暖化に起因する異常気象の問題や温暖化防止対策への取り組みなどを紹介する内容を目にする事が多い。しかしながら、政府が掲げる温暖化対策の数値目標と実際に行われている諸活動がもたらす効果との間には大きな隔たりがあるように感じる。したがって、このままの状況が続けば、数年先または数十年先には地球温暖化が待ったなしの事態に陥るであろうことが現実味を帯びてきた。さて、このような事態を防ぐために政府、地方自治体、民間企業、そして個人レベルで、今まで以上の何らかのアクションを起こす必要があるわけだが、我々が携わる建設事業においてはどの様な取り組みができるのであろうか。このような問題提起に対して1つの提案を行おうというのが本研究の位置づけである。

現在、地球温暖化防止対策の1つとして、森林が持つCO₂吸収能力によるカーボンストックがあり、京都議定書で定められた我が国の温室効果ガス削減目標6%のうち、3.8%をこの森林吸収に期待している。しかし、これは林業経営が適切に行われた森林が対象であり、これを実現するには国産材を積極的に利用することにより、植林→育成→伐採→流通→加工→利用→植林という林業経営のサイクルを長期的かつ安定的に循環させることが重要となる。本研究における提案は、この中の「利用」に関わるものであり、かつては基礎杭として利用されていた丸太を、軟弱地盤対策における建設資材として積極的に利用し、木材の需要拡大によりカーボンストックの増大を図ろうというものである。さらに、福井県の総面積に占める森林面積の割合は75%と全国平均に比べて高く、その中の民有人工林の樹種は90%近くがスギであるという現状を考慮し、地域材としてのスギを積極的に利用することも視野に入れている。

本研究では、財団法人福井県建設技術公社のお世話のもと、飛鳥建設株式会社北陸支店、飛鳥建設株式会社技術研究所、福井工業高等専門学校環境都市工学科、福井県土木部、福井県雪対策・建設技術研究所、福井県総合グリーンセンターの産学官の各機関が、密に連携を取りながらそれぞれの特徴を活かした研究活動を行った結果、今後の建設事業における木材の利用促進に繋がる数多くの知見と、木材利用による地球温暖化対策の有効性について本報告書にまとめることができた。

本報告書では、まず、研究成果より得られた結論を示し、第1章では本研究を着手するに至った社会的背景と経緯、第2章では本研究の具体的目的を示す。第3章では土木分野より道路橋示方書、建築分野より建築基礎構造設計指針を取り上げ、我が国における木杭の設計法の変遷について示す。第4章では福井県内に現存する木杭基礎を有する3つの橋梁を取り上げ、その概要を示す。第5章では文献調査より明らかとなった建設工事における丸太利用と腐朽状況に関する調査結果を示す。第6章では平成18年に足羽川の水越橋、幸橋、木田橋付近で掘り出された丸太の概要と、目視評価、ピロディン試験、縦圧縮試験による健全度評価の結果について示す。第7章では丸太を軟弱地盤対策に適用する際の設計法や適用事例を提案し、既存の他工法との比較により温暖化対策としての優位性を示す。そして最後に、福井県内の土木事業における木材利用事例集、福井県土木工事仕様書における木工沈床の材料へのスギ丸太の使用認可書類、福井県の基礎工設計マニュアルにおける木杭基礎に関する箇所の修正案、共同研究の成果を発表した論文リストを巻末に資料編として掲載する。

課題として、提案した丸太による軟弱地盤対策工法の実工事における信頼性を得ることが残されているが、本研究で得られた成果が、今後の我が国の森林経営の活性化、そして、地球温暖化対策につながれば幸いである。

平成20年3月

福井工業高等専門学校
環境都市工学科
准教授 吉田雅徳

産学官共同研究支援事業

研究グループ

(平成 18 年度)

安達敏憲	飛島建設株式会社	北陸支店	支店長
勝山義史	飛島建設株式会社	北陸支店	土木事業部 副主任
沼田淳紀	飛島建設株式会社	防災 R&D センター技術研究所	室長
上杉章雄	飛島建設株式会社	防災 R&D センター技術研究所	副主任研究員
向谷常松	飛島建設株式会社	防災 R&D センター技術研究所	主席技術員
吉田雅穂	福井工業高等専門学校	環境都市工学科	助教授
久保 光	福井県雪対策・建設技術研究所	環境・建設技術研究グループ	技師
源濟英樹	福井県総合グリーンセンター木材開発研究グループ		主任研究員
野村 崇	福井県総合グリーンセンター木材開発研究グループ		主事
五十嵐謙一	福井県土木部	土木管理課技術管理室	主査
免 博彦	財団法人 福井県建設技術公社		業務課長
山木忠嘉	財団法人 福井県建設技術公社	業務課	企画主査
臼井裕喜	財団法人 福井県建設技術公社	業務課	技師

(平成 19 年度)

長島道雄	飛島建設株式会社	北陸支店	支店長
勝山義史	飛島建設株式会社	北陸支店	土木事業部 副主任
沼田淳紀	飛島建設株式会社	技術研究所	室長
上杉章雄	飛島建設株式会社	技術研究所	副主任研究員
向谷常松	飛島建設株式会社	技術研究所	主席技術員
吉田雅穂	福井工業高等専門学校	環境都市工学科	准教授
久保 光	福井県雪対策・建設技術研究所	環境・建設技術研究グループ	研究員
源濟英樹	福井県総合グリーンセンター木材開発研究グループ		主任研究員
野村 崇	福井県総合グリーンセンター木材開発研究グループ		主事
五十嵐謙一	福井県土木部	土木管理課技術管理グループ	企画主査
沢崎幸夫	財団法人 福井県建設技術公社		業務課長
山木忠嘉	財団法人 福井県建設技術公社	業務課	企画主査
臼井裕喜	財団法人 福井県建設技術公社	業務課	主査

もくじ

ページ

脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究報告書

結論：脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に向けて	1
1. 研究背景	2
2. 研究目的	3
3. 基礎設計への丸太杭取扱いの変遷	4
3.1 調査方法	4
3.2 道路橋示方書	5
3.2.1 使用材料の変遷	5
3.2.2 道路橋示方書の変遷	6
3.2.3 杭頭反力の計算法	7
3.2.4 杭施工の選定基準	8
3.2.5 道路橋示方書における丸太杭の変遷	9
3.3 建築基礎構造設計指針	15
3.3.1 調査対象	15
3.3.2 記述内容の変遷	15
3.4 まとめ	23
4. 福井県内既存丸太基礎構造物事例の調査	25
4.1 調査方法	25
4.2 調査結果	25
4.2.1 下司橋	26
4.2.2 鯖江大橋	27
4.2.3 西津橋	28
5. 土木工事における丸太利用と腐朽に関する文献調査	29
5.1 調査方法	29
5.2 調査結果	33
5.3 新潟駅本屋の事例	37
5.4 まとめ	40
6. 足羽川で採取された丸太の健全性に関する調査	41
6.1 調査の概要	41
6.2 丸太堀出し地点の地盤と歴史	43
6.2.1 水越橋上流地点	43
6.2.2 幸橋地点	45
6.2.3 木田橋地点	48
6.3 樹種鑑定	50
6.3.1 林業的に生産される樹木の種類について	50
6.3.2 樹種鑑定の方法と結果	54
6.4 採取された丸太の健全性調査	57
6.4.1 目視による腐朽度評価	57
6.4.2 強度試験のための前処理	61
6.4.3 ピロディン貫入試験	63
6.4.4 縦圧縮試験	82
6.5 まとめ	86
7. 丸太地中打設による軟弱地盤対策とこれによる環境対策効果の検討	87
7.1 丸太による軟弱地盤対策方法	87
7.1.1 丸太の適用方法	87
7.1.2 パイルネット工法	88
7.1.3 パイルド・ラフト基礎	94
7.2 丸太を用いた軟弱地盤対策とセメント固化改良との環境比較	96
7.2.1 二酸化炭素排出量の算出方法	96
7.2.2 丸太を用いた軟弱地盤対策とセメント固化改良との環境性比較	98
7.2.3 丸太杭、PC杭、鋼管杭の環境性比較	101
7.3 丸太地中打設による軟弱地盤対策例	104

<資料編>

資料 1 福井県内の土木事業における木材利用事例集

資料 2 共通仕様書および設計マニュアルの修正について（本研究成果）

資料 2-1 木工沈床に使用する材料について

資料 2-2 「基礎工設計マニュアル（福井県土木部監修）」における松杭基礎の記述に関する修正案

資料 3 発表論文

結論：脱地球温暖化社会に向けた建設工事への木材利用に向けて

- (1) 脱地球温暖化社会へ向けて、建設工事においても温室効果ガス削減を目指すことが必要であり、このためには木材利用を積極的に行うべきである。一般に、建設材料としてコンクリートや鉄が使用されるが、これらと同様に木材も常に検討対象とすべきである。特に、木材の利用にあたり、過去の木材が枯渇した時代の名残や丸太はマツでなければならないといった誤解や拡大解釈もあるようなので、これらは早期に解消していく必要がある。
- (2) 建設工事への木材利用先として、軟弱地盤対策などの地下水位が浅い軟らかい地盤への丸太打設が考えられる。木材は気中で用いた場合には、燃えやすい、乾燥すると変形する、腐朽する、加工工程が増えると高価になるなどの欠点があるが、軟弱地盤対策などへの丸太打設を行えば、これらが欠点とはならない。
- (3) 丸太は、地盤中の地下水位以下では少なくとも 50 年以上は腐朽が進行しないと言える。しかしながら、地下水位は変動し、地下水位の変動域やそれ以浅では地盤中であっても腐朽が進行する場合があるので、状況によっては注意が必要である。
- (4) 建設工事で用いられる丸太と言えば一般にマツ丸太であるが、スギも同様に地盤中の地下水位以下では少なくとも 70 年以上腐朽が進行しないと言え、力学的特性を考慮した上で、マツ丸太と同様に地盤中で使用できる。なお、マツ丸太と言っても、マツ科の中にはモミ属、トガサワラ属、トウヒ属、カラマツ属、マツ属があり、それぞれ力学的特性などが異なるのにこれらが区別されずに使われている場合が多いので、注意する必要がある。
- (5) 丸太を軟弱地盤中に打設する既存の工法としては、現在パイルネット工法がある。この工法を用いることで、脱地球温暖化社会へ向けた、二酸化炭素貯蔵効果を期待することが可能となる。今後、さらに種々の丸太打設による工法を開発することで、積極的な利用促進が図られると考えられる。
- (6) 深さ 8m、広さ 1ha の軟弱地盤対策を想定しパイルネット工法を適用した場合、これによる二酸化炭素貯蔵量は 1,900t-CO₂となる。この量は 820kl のガソリン(大型の 20kl タンクローリー 41 台分)に匹敵する。さらに、丸太を用いることで、林業の活性化、これに伴う水源涵養、土砂災害防止などの効果も考えられ、工事そのものが大きな環境対策となると考えられる。
- (7) 支持杭を想定し、PC 杭、鋼管杭と丸太の二酸化炭素排出量を比較した場合、PC 杭や鋼管杭は製造時の二酸化炭素排出量が多く環境負荷が大きいですが、丸太の場合は二酸化炭素貯蔵効果がある。両者の差は、杭の許容支持力が大きくなるほど大きくなる。このような環境的な視点についても、機能とともに今後考えていく必要がある。
- (8) 木材は、土木の分野では過去の材料といった認識があるようであるが、環境といった新たな視点を取り入れたとき、見直されるべき材料である。木材の研究は、一般に気中を対象としている。本研究で示したように、木材を地中で利用することで、その利用量の拡大を図れる可能性が高く、今後この領域でのさらなる研究を推進する必要がある。

1. 研究背景

地球温暖化は、地球規模で解決しなければならない緊急な課題といえる。これを解決するためには、あるゆる分野でこれに真剣に取り組む必要がある。土木分野では、今まで土木工学的な視点で技術が進歩してきたが、これからは、このような技術面だけではなく、地球温暖化対策といった環境的な視点が必要になってきている。さらに、地球環境対策では、単に省エネ効果だけを目指すのではなく、土木工事そのものが温室効果ガス削減策となるような、より積極的な技術が必要になると考えられる。

京都議定書の温室効果ガス削減目標の内 3.8%は、森林吸収に期待している。ただし、これは林業経営が適切に行われた森林が対象であり、このためには木材の利用拡大が不可欠である。そもそも木材は、伐採しても植林を続けている限り無限の資源である。燃焼させてもカーボンニュートラルであり、一度使用した木材を燃料として使用すればエネルギー代替効果が期待できる。さらに、燃焼や腐朽させずに長期間利用すれば炭素貯蔵となり、温室効果ガス削減に寄与することとなる。現在の京都議定書では、利用方法に関わらず木材伐採は即温室効果ガス排出となるが、2013年以降の森林吸収源の取り組みでは、このような炭素貯蔵効果も考慮されると言われている。したがって、木材による炭素貯蔵は、単に温室効果ガスの削減に寄与するといっただけではなく、将来的には経済的な効果も伴うものと予想される。

現在では、セメントや鉄が大量に使われ、土木分野における木材利用率はわずか 2%程度である。しかしながら、土木工事では、古来木材を多用しており、その歴史はセメントや鉄よりもむしろ長い。土木工事に木材が使用されなくなった理由の一つに、腐朽が考えられる。木材が腐朽するには、水、空気、栄養、温度の 4 条件が揃う必要がある。地中の特に地下水位以下では空気が欠乏するので、木材が長期間健全性を保つと考えられる。このような事例として、旧丸ビルの丸太基礎が最近になって掘り出され丸太が健全であった事例がある。このように、木材は地下水以深で利用すれば、セメントや鉄以上に耐久性があり長期間機能維持する可能性がある。加えて、丸太が機能維持を果たしながらも、炭素貯蔵を果たす。日本は国土の約 2/3 は森林に覆われ、特に、福井県は県面積の約 3/4 は森林で覆われている。このような県産材を土木工事で積極的に使うことが可能となれば、社会基盤整備とともに地球温暖化対策、林野事業の活性化といった環境対策へも結びつく可能性が高い。このような木材炭素貯蔵を可能とする土木工事として、地下水位の浅い軟弱地盤対策工事や構造物基礎工事がある。

このような背景を受け、本研究では、文献調査と実際に足羽川より掘り出された丸太を調査することでその長期健全性を明らかにし、環境対策としての丸太打設による軟弱地盤対策工事の実用化に向けその可能性を検討した。

2. 研究目的

本研究は、環境対策効果のある軟弱地盤対策工事の実用化を目的とし、以下を明らかにする。

- (1)木材を利用した場合に大きな課題となる地中木材の腐朽について健全となる条件とその長期性を明らかにする。
- (2)軟弱地盤対策として丸太を用いた場合の環境対策効果を明らかにする。

これを実現するために、以下を実施する。

- (1)丸太基礎設計法の変遷の調査
- (2)福井県内の既存丸太基礎構造物事例の調査
- (3)土木工事における丸太利用と腐朽に関する文献調査
- (4)足羽川で採取された丸太の腐朽に関する調査
- (5)丸太地中打設による軟弱地盤対策とこれによる環境対策効果の検討

3. 基礎設計への丸太杭取扱いの変遷

3.1 調査方法

既往の設計方法として、土木構造および建築を対象に現在用いられている道路橋示方書（日本道路協会）と建築基礎構造設計指針（日本建築学会）の設計方法について、過去に遡り丸太杭の取り扱い方の変遷についてまとめる。

現在はこれらに木材の記述がないが、1955年（昭和30年）1月21日に「木材資源利用合理化方策」が閣議決定されており、これらの影響もあったものと推察される。

以下に、これを示す。

「木材資源利用合理化方策」（1955年（昭和30年）1月21日閣議決定）

1. 方針

わが国における森林の過伐傾向は、甚しく国土の保全を危殆に頻せしめるのみならず、木材資源の枯渇を招来することは明らかであり速かにこれら対策を樹立しなければならない。

既に昭和26年森林法の改正が行われ、これに伴い木材需給対策が閣議決定をみて森林の開発培養と木材消費の合理化等が実施せられ来つたが、更に一層その成果の完きを期する必要があるので木材資源の開発保全を図ると共に重要産業及び民生安定に対する資材を確保するため、その利用合理化に関し、次の措置を協力で推進するものとする。

2. 措置

第一 木材代替資源の使用普及の促進

(1) 建築不燃化の促進

イ、耐火建築の普及奨励を推進し国及び地方公共団体は率先垂範すると共にその建築費用の低下を図るため構造部材の規格化と設計の標準化を推進すること。

ロ、防火地域の拡大及び防火建築帯造成の造材につとめると共に用途規模により建築物の木造禁止の範囲を拡大すること。

(2) 土建材料等の耐久化の促進

橋梁、その他土木施設土木建築仮設材料、杭、柱等は、鉄鋼、軽金属、コンクリート等の耐久製品につとめて切替えるよう必要な措置を講ずると共に木材防腐を更に推進すること。

(中略)

なお以上の諸措置を推進するために必要な法制上予算上及び金融上の措置を考慮すると共に更にその実効を期するため経済審議庁に木材資源利用合理化協議会を設ける外関係業界についてもその推進体制の整備を図るものとする。

このように、森林の過伐対策として本方策が閣議決定されており、建築物の木造禁止範囲を拡大すること、杭を含めた土建材料は、鉄鋼やコンクリートに切り換えることを推進している。

3.2 道路橋示方書

3.2.1 使用材料の変遷

- ・ 古くは静岡県登呂遺跡で木杭を用いた形跡あり.
- ・ 明治時代になり杭基礎技術が海外から紹介され, 昭和 20 年代まで松丸太が広く用いられる.
- ・ 明治時代後期(1900年代)よりコンクリートや鉄筋コンクリートが橋梁下部工に用いられるようになったが, 戦前までの鉄道や道路の橋梁では, 杭基礎の場合は木杭(松)の利用が圧倒的に多かった.
- ・ 大正時代は太径・長尺の松材が不足し, アメリカから大量の松(米松)を輸入.
- ・ 直接基礎やケーソン基礎に比べ杭を打ち込む機械が必要であったため基礎形式としては新しい.
- ・ 昭和 30 年(1955 年)に政府が木材資源利用合理化方策の一環としてコンクリート杭の利用を促進.

3.2.2 道路橋示方書の変遷

道路橋示方書	設計荷重
明治 19 (1886) 年 国県道の築造標準	規定なし
大正 8 (1919) 年 道路構造令および街路構造令	街路：3,000 貫 (11,250kg) 国道：2,100 貫 (7,875kg) 府県道：1,700 貫 (6,375kg)
大正 15 (1926) 年 道路構造に関する細則案	街路：一等橋 12tf 国道：二等橋 8tf 府県道：三等橋 6tf
昭和 14 (1939) 年 鋼道路橋設計示方書案	国道および小路（Ⅰ）等以上の街路：一等橋 13tf 府県道および小路（Ⅱ）等以上の街路：二等橋 9tf
昭和 31 (1956) 年 鋼道路橋設計示方書	一級国道，二級国道，主要地方道：一等橋 20tf 都道府県道，市町村道：二等橋 14tf
昭和 39 (1964) 年 鋼道路橋設計示方書	一級国道，二級国道，主要地方道：一等橋 20tf 都道府県道，市町村道：二等橋 14tf
昭和 39 (1964) 年 鉄筋コンクリート道路橋示方書	
昭和 43 (1968) 年 プレストレストコンクリート道路橋示方書	
昭和 47 (1972) 年 道路橋示方書Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編	一級国道，二級国道，主要地方道：一等橋 20tf 都道府県道，市町村道：二等橋 14tf
昭和 48 (1973) 年 特定の路線にかかる橋，高架の技術基準について	湾岸道路，高速自動車道路，その他：43tf
昭和 53 (1978) 年 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編	
昭和 55 (1980) 年 道路橋示方書Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編・ Ⅲコンクリート橋編・Ⅳ下部構造編・ Ⅴ耐震設計編	一級国道，二級国道，主要地方道：一等橋 20tf 都道府県道，市町村道：二等橋 14tf 湾岸道路，高速自動車道路，その他：43tf
平成 2 (1990) 年 道路橋示方書Ⅰ～Ⅴ	一級国道，二級国道，主要地方道：一等橋 20tf 都道府県道，市町村道：二等橋 14tf 湾岸道路，高速自動車道路，その他：43tf
平成 5 (1993) 年 道路橋示方書Ⅰ～Ⅴ	高速自動車国道，一般国道，都道府県道， 幹線市町村道：B活荷重 25tf その他市町村道：A活荷重 25tf
平成 8 (1996) 年 道路橋示方書Ⅰ～Ⅴ	高速自動車国道，一般国道，都道府県道， 幹線市町村道：B活荷重 25tf その他市町村道：A活荷重 25tf
平成 14 (2002) 年 道路橋示方書Ⅰ～Ⅴ	高速自動車国道，一般国道，都道府県道， 幹線市町村道：B活荷重 245kN その他市町村道：A活荷重 245kN

3.2.3 杭頭反力の計算法

慣用法は明治末期（1900年代）から昭和20（1960）年代にかけて採用されていた設計法である。

$$P_{Ni} = \frac{V_0}{n} + \left(\frac{M_0}{\sum X_i^2} \right) X_i \quad (\text{式 3.2.1})$$

$$P_{Hi} = \frac{K_{Hi}}{\sum K_{Hi}} H_0 \cong \frac{H_0}{n} \quad (\text{式 3.2.2})$$

P_{Ni} : i 番目の杭の鉛直反力 (kN)

P_{Hi} : i 番目の杭の水平反力 (kN)

V_0 : 杭基礎に作用する鉛直荷重 (kN)

H_0 : 杭基礎に作用する水平荷重 (kN)

M_0 : 杭基礎に作用するモーメント (kN・m)

n : 杭の本数

X_i : 中立軸から i 番目の杭までの距離 (m)

K_{Hi} : i 番目の杭の軸直角方向バネ定数 (kN/m)

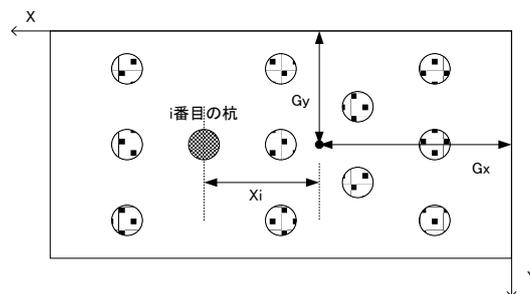


図-3.2.1 杭等の配置

3.2.4 杭施工の選定基準

(1) 既製杭で打撃工法の場合²⁾

条件	木杭	R C 杭	P C 杭	鋼管杭	
環境	水深 5m 未満の水上	◎	◎	◎	◎
	水深 5m 以上の水上	△	△	△	△
	無騒音・無振動	×	×	×	×
	構造物に近接している	△	×	×	△
	作業空間が狭い	◎	◎	◎	◎
	作業高さが低い	△	△	△	△
	有毒ガスの発生	◎	◎	◎	◎
荷重	鉛直荷重小さい (スパン 20m 以下)	○	◎	◎	△
	鉛直荷重普通 (スパン 20~50m)	△	◎	◎	○
	鉛直荷重大さい	×	◎	◎	◎
	水平荷重小さい	○	◎	◎	△
	水平荷重大さい	×	○	○	○
地質	中間層が極めて軟弱	◎	◎	◎	◎
	中間層が軟弱	◎	◎	◎	◎
	中間層が良好	◎	◎	◎	◎
	中間層に極めて硬い層がある	×	×	△	○
	中間層に大砂利層がある	×	×	×	×
	中間層に 5m 以上の細砂層がある	×	△	○	◎
	上層軟弱で下層良好	◎	◎	◎	◎
	5cm 以下のレキ層あり	×	△	△	△
	5~10cm のレキ層あり	×	△	△	△
	10~50cm のレキ層あり	×	×	×	△
地下水	地下水位地表面に近い	◎	◎	◎	◎
	地下水位支持地盤以下	×	◎	◎	◎
	湧水量が極めて多い	◎	◎	◎	◎
	地表より 2m 以上の被圧地下水	◎	◎	◎	◎
	地下水の流動が大きい	◎	◎	◎	◎
施工深度	2~5m	◎	○	△	△
	5~15m	○	◎	○	△
	15~25m	×	○	◎	○
	25~40m	×	×	△	◎
	40~50m	×	×	×	◎
	50~60m	×	×	×	◎
施工断面 (基礎の径 または辺)	15~30cm	◎	◎	△	×
	30~50cm	×	◎	◎	◎
	50~80cm	×	△	◎	◎
	80cm~1m	×	×	◎	◎
	1~1.2m	×	×	○	○
	1.2~1.5m	×	×	△	○
	1.5~2m	×	×	×	×
	2~4m	×	×	×	×
	4m 以上	×	×	×	×

※ ◎最も適している, ○適する場合が多い, △不十分な場合が多い, ×適しない

3.2.5 道路橋示方書における丸太杭の変遷

以下を対象に調べた。

- (a)道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編 1980 版⁴⁾
- (b)道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇 1976 版⁵⁾
- (c)道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇 1968 版⁶⁾
- (d)道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇 1966 版⁷⁾
- (e)道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇 1964 版⁸⁾

(1)1980 年版 (昭和 55 年版)

丸太杭の記述はない。

(2)1976 年版 (昭和 51 年版)

まえがきに以下のように記述されており、これ以降本指針で丸太杭が取り扱われなくなったことがわかる。

「・・・この指針で取り上げたくいは既製コンクリートぐい、綱ぐい、場所打ちコンクリートぐいである。木ぐいについては現在使用実績がほとんどないため本指針から除外した。・・・」

(3)1968 年版 (昭和 43 年版)

まえがきに以下のような記述があり、「3.既製ぐいの打ち込み 3.1 製作, 運搬, 貯蔵, 検査 3.1.1 木ぐい」「5. くい頭の仕上げ 5.1 木ぐい」の項目がある。

「・・・くい頭の仕上げを、木ぐい、RC ぐい、PC ぐい、綱ぐいについて規定し重要な作業であることを注意喚起した。・・・」

以下、「3.既製ぐいの打ち込み 3.1 製作, 運搬, 貯蔵, 検査 3.1.1 木ぐい」と「5.くい頭の仕上げ 5.1 木ぐい」の記述を示す。

3. 既製ぐいの打ち込み

3.1 製作, 運搬, 貯蔵, 検査

3.1.1 木 ぐ い

- (1) 木ぐいは割れなどの欠陥のない生丸太で元口から末口までおよそ一様に径が変化し、樹皮を除いた末口の径が設計図書に示す寸法以下であってはならない。
- (2) 木ぐいの両端中心点を結ぶ直線はくい外に出てはならない。
- (3) 木ぐいは打ち込み前に樹皮を取り除かなければならない。また、くい頭部および先端部は、打ち込み中に破損しないよう適切な防護をしなければならない。
- (4) 取り扱いに際しては、くいに損傷を与えぬよう十分注意しなければならない。

〔解 説〕

- (1) 通常くい材としては松などの生木を使用することが多い。その材料は強度、耐久性に悪影響を及ぼすような、大節、死節、腐れ節、割れなどの損傷を有しないものでなければならない。また、くい材として元口から末口まで径が一様に変化することは、地盤中への打ち込み上からも必要である。
- (2) 木ぐいは自然の材料であるため完全に真直なものを得るのは難かしいが、鉛直荷重伝達上から、あるいは打ち込み上からもその曲りは、くい材両端中心点を結ぶ直線がくい外に出るようなものを使用してはならない。
- (3) 木ぐいの樹皮は打ち込みのじゃまになるばかりでなく、地盤中で樹幹と分離することが多いので、打ち込み前に皮はぎをしなければならない。
同時に、すべての枝節はていねいに整形しなければならない。また、くい頭部や先端部の加工は、設計図に明示されてない場合が多いが、打ち込み中のくいの損傷を防ぐため、金具類で補強するのがよい。
くい頭は、くい中心軸に対して直角に切り、断面は円形に仕上げ、鉄輪または鉄瘤を用いる。
くい先端は截頭角錐形に正しく削り、打ち込みの際に方向のずれないようにする。
- (4) 木ぐいを長期間貯蔵する場合には、曲りや腐蝕が発生しないよう注意しなければならない。

5. くい頭の仕上げ

5.1 木 ぐ い

くい頭は打ち込み後、損傷部を切断して仕上げをしなければならない。

〔解 説〕

木ぐいは、打ち込み中の打撃力および鉄輪の取り付けなどのため頭部が変形し、弱体化していることが多いから、所要長よりやや長いくいを打ち込み、設計図にしたがって高さ、角度など正確に切断するようしなければならない。

(4)1966年版(昭和41年版)

まえがきに以下のような記述があり、木ぐいについて許容応力度などについて明確にしよとしていることがわかり、「第3篇設計 3章材料 3.4条木ぐい」と「第3篇設計 4章許容応力度および許容支持力 4.5条木ぐい」の項目がある。

「・・・また在来、木ぐいについての規程が、明確でなかったので、その規程を明らかにした。

・・・また鋼材の現場溶接部の許容応力度、木ぐいの許容応力度についても、明確に規定した。・・・」

以下、「第3篇設計 3章材料 3.4条木ぐい」と「第3篇設計 4章許容応力度および許容支持力 4.5条木ぐい」の記述を示す。

3.4条 木ぐい

- (1) 木ぐいは「くい丸太の日本農林規格(昭和35年12月1日農林省告示第1207号)」に適合するもので死節、大節のない生松丸太を標準とする。
 (2) 木ぐいは防腐処置をして用いるのを原則とする。

〔解 説〕

(1) 現在は永久橋のくい基礎に木ぐいを用いることは稀れであるが、小規模で重要度の低い橋などでは使用されることもあるので規定することにした。木材の一般的な規格としては「用材の日本農林規格」があり、素材の規格もあるが、これは主として製材を考えてつくられたものなので、くい丸太については別に規格が定められている。たゞこの規格には表-3.4にみるように節についての規定がないので、これに関して別に付け加えたものである。これを具体的に示すつぎの程度と考えよ。あわせて日本農林規格第3条のくい丸太の規格を示す。(表3.4)

- (a) 死節のないもの
 (b) 1断面に長径5cmをこえる節が2ヶ以上ないもの。
 (c) 長径5cmの節(たゞし1cm未満を除く)でも1断面に3ヶ以上ないもの。

表-3.4

欠点事項	規 準
曲 り	0.2%以下のもの
木口割れ又は引き抜け	0.5%以下のもの
目まわり	顕著でないもの
腐 れ	ないもの
きず及びあな	顕著でないもの
胴打ち	ないもの
虫食い	顕著でないもの

(2) 木ぐいは「くい基礎の設計篇6.1木ぐい」で規定しているように地下水位以下に用いるので一般的には腐食しないと考えられているが、上述の6.1の解説にも述べているように、常に水中にあっても腐食をうける場合もあるので、永久橋の基礎には安全を考慮して、原則として防腐処置を施して用いることにした。

4.5条 木 ぐ い

(1) 木ぐいの許容応力度は表12のとおりとする。ただし木ぐいの全長は地中にあるものとする。

表 12

種 類	せんい方向に対し	許容応力度 (kg/cm ²)
1. 軸方向引張応力度	平 行	50
2. 軸方向圧縮応力度	平 行	40
3. 曲 げ 応 力 度	平 行	55
4. 支 圧 応 力 度	平 行	45
	垂 直	10
5. せん断応力度	平 行	4
	垂 直	6

(2) 木ぐいの弾性係数は試験を行わない場合はせんいに平行な方向に対して 60,000 kg/cm²、直角な方向に対して 2,000 kg/cm² とする。

(3) 応力計算に用いる丸太の径は最小径とする。

〔解 説〕

- (1) 木ぐいはその全長が地中にある場合にのみ使用することができる。この許容応力度もそれを前提としてきめたものである。従来用いられている木道路橋設計示方書案の値より低減したのは常時湿潤状態にあることと、腐食、打込み中の損傷その他を考慮したためである。
- (2) 弾性係数の実測値はせんいに平行な方向に対して $6 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、直角な方向に対して $2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 程度であるが応力計算の便と安全を考慮し最低値をとった。
- (3) 用材の日本農林規格では「丸太の径は最小径とする」と定めており、また材料の性質上安全のためにこのように規定した。

(5) 1964 年版 (昭和 39 年版)

これまで道路橋の下部構造を設計するのによりどころとなる指針がなく、構造物を設計する技術者に一任されていたが、新しい設計法が開発されてくるとこれに応じた指針の作成が望まれ、これにこたえて初めて道路橋下部構造設計指針が作成された。ここで取り上げられている杭は、木ぐい、既製コンクリートぐい、場所打ちコンクリートぐい、鋼ぐいであった。

丸太杭については、「1.総則 1.2 定義」, 「5.ぐい本体の設計 5.1 完成後の荷重に対する設計」, 「5.ぐい本体の設計 5.3 ぐい頭部とフーチングの結合部」にそれぞれ記述があり、「6.構造細目 6.1 木ぐい」では項目を設け説明されている。

「1.総則 1.2 定義」には、杭の分類で以下のような記述がある。

表-1.1

種 類	製 法 お よ び 工 法		摘 要
木 ぐ い	生松丸太を多く使用する		防虫, 防腐処理をする場合もある。
コ ン ク リ ー ト ぐ い	既 製 ぐ い	R C ぐ い	パイプレーター使用による普通打込み成形方式 中実断面のものと, 中空断面のものがある。
		P C ぐ い	遠心力利用による成形方式 ほとんど中空断面である。
	場 所 打 ち ぐ い	鋼管を打込んで孔をつくり, その後に ぐいを築造する方式	鋼管は施工後抜き去る。
		掘さく孔に ぐいを築造する方式	各種の大口径掘さく機が利用される。
鋼 ぐ い	H形鋼ぐい		溶接製品, 圧延製品の両方がある。
	鋼管ぐい		

「5.くい本体の設計 5.1 完成後の荷重に対する設計」では、以下のようにヤング係数が示されている。

表-5.3

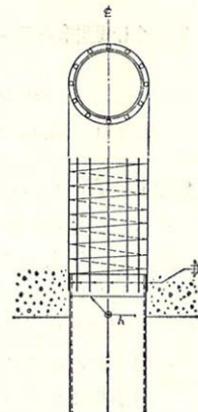
くい材料	ヤング係数 (kg/cm ²)
コンクリート (場所打ち)	210,000
コンクリート (遠心力)	350,000
鋼材	2,100,000
木材	100,000

注) ただし、鉄筋コンクリートくいの場合の断面計算ではコンクリートのヤング係数として土木学会コンクリート標準示方書に示す値をとるものとする。

「5.くい本体の設計 5.3 くい頭部とフーチングの結合部」では、以下のようにくい頭部とフーチングとの連結方法の記述がある。

(b) 鋼ぐいをコンクリート中に埋込んで作用荷重に抵抗させるとき、鋼ぐいとコンクリートとの付着力は無視する。したがって、軸方向圧縮力に対しては、くい上端の支圧のみで抵抗させることになる。もし支圧面積が不足する場合には、くい上端に十分な剛度を持つ蓋板をかぶせて支圧面積を増大させることが必要になる (図-5.7)。くい上端に働く曲げモーメントとせん断力に対しては、くい周面コンクリートの支圧によって抵抗せしめることができるが、この場合にはこの支圧応力について検討しなければならない。一般には、鋼ぐいに鋼材を溶接し、これによって定着する方法が行われている。この場合には、軸力と曲げを受ける鉄筋コンクリート部材として設計する必要がある。

軸方向引張力に対する考え方も同様である (図-5.8)。
 (c) 木ぐいの場合でも鋼ぐいと同じように木ぐいとコンクリートとの付着力はないとし、埋込長を決定しなければならない。埋込み以外の方法でフーチングと連結することは、木ぐいでは一般に行われない。



「6.構造細目 6.1 木ぐい」では、以下のように記述されている。

6. 構造細目

6.1 木ぐい

- (1) 木ぐいは、常にその全長が地下水位以下にあるようにしなければならない。
地下水位の変化が予想される場所では、最低地下水位を推定し、木ぐいがこの地下水位より上に出ないようにしなければならない。
- (2) 木ぐいは、割れ、腐れ、死に節など欠陥のない生丸太の樹皮を除いたものではなはだしい曲りのないものとする。
- (3) 木ぐいが菌または虫による被害をうける恐れのある場合には、適切な処置を施さなければならない。
- (4) くい先端は打込む地盤によく合った構造としなければならない。

(解説)

(1) 木ぐいは、安価であり、軽いため運搬が容易である、水中で使用すれば寿命が長いなどの長所も多く、広く使用されている。

しかし、酸素の供給を受ける箇所と乾湿を交互に受けると急速に腐食する。したがって、永久構造物の基礎としては地下水位以下でしか使用できない。地下水位は一定不変のものでなく、気象の関係で絶えず変動するばかりでなく、河川改修などによっても変る。設計者は使用箇所の状況変化について十分吟味しなければならない。

(2) 木ぐいは完全に真直ぐなものを得るのはむづかしく、多少曲っているのはやむを得ない。しかし、その程度がなはだしい場合には打込みが困難になるばかりでなく、くい軸方向力によって くい本体に曲げモーメントを生じ、極端な場合には破損をまねくことがある。この曲りに対しては、くいの先端と頭部とで それぞれの中心を結んだ線が くい本体をはずれないものがよい。なお、この場合、くいが先端支持ぐいであって、その軸力が大きいときには断面応力を検算しなければならない。

(3) 一般に木材は菌類と海虫によって腐食する。海中の木材が腐食する主な原因は生物による場合が多く、最も広く分布してしかも大きな害を与えるのは海虫である。海水が澄んでいるときには、特に海虫の繁殖が盛んであるから、コンクリートまたは鉄板を巻くとか、防虫剤の注入などの処置が必要になる。

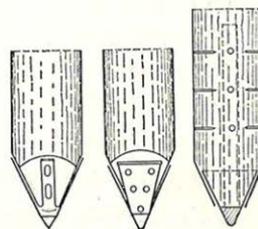


図-6.1 木ぐい頭部補強例

(4) くい先端は通常三面形または四面形に切り、打込みの抵抗を少なくする。この切取り部分の面取りが不正確なときは打込み方向のずれる原因になる。

先端の角度は 45° ~ 60° で、打込み箇所が固いほど角度を大きくとる。砂礫層または、礫、玉石まじりの地盤に打込むときは、先端保護のため金具をつける。面取り部全部を保護する場合と先端部のみ保護する場合とがある。

3.3 建築基礎構造設計指針

3.3.1 調査対象

以下を対象に調べた。

- (1)建築基礎構造設計指針 2001 年版⁹⁾
- (2)建築基礎構造設計指針 1988 年版¹⁰⁾
- (3)建築基礎構造設計規準・同解説 1974 年版¹¹⁾
- (4)建築基礎構造設計規準・同解説 1960 年版¹²⁾

3.3.2 記述内容の変遷

(1)2001 年版

(a)第 6 章杭基礎, 6.2 節杭の種類と性能, 2. 既製杭の種類と性能

「木杭については、最近ではまれに擁壁の基礎や軟弱地盤の改良のため等に用いられる程度であるため、本指針では扱わない。」

木杭については、このように記述されるのみであり、実状、建築構造物の基礎としては用いられなくなったといえる。

(2)1998 年版

(a)第 6 章杭基礎の設計, 6.1 節杭基礎設計の基本事項

「木杭は、軽微な建物や小規模の建物においては、これまでの実績はもち論、今後の使用も考えられ、その使用にあたっては、日本建築学会「小規模建築物基礎設計の手引き」を参照されたい。」

このように、建築構造物に対して、木杭は小規模な建物のみ限定された。

(3)1974 年版

(a)4 章基礎の設計, 3 節くい基礎の設計, 28 条くい材料の許容応力度

「1. 木ぐいの長期許容圧縮応力度は, まつ, からまつ, べいまつにあっては 50kg/cm^2 (5MN/m^2), その他の樹種にあっては日本建築学会「木構造設計基準・同解説」に示された常時湿潤状態にある場合の値と 50kg/cm^2 (5MN/m^2) のうち小なるほうをとる. 短期許容圧縮応力度は長期許容圧縮応力度の 2 倍とする. なお, 許容支持力は, 木ぐいの最小断面について求めるものとする.」

「7. くい材の許容引張応力度については, それぞれの材種によって, 日本建築学会「木構造設計基準・同解説」, に示された許容引張応力度を適用する. なお, 許容引張力は, 1~6 項で述べられた断面について求めるものとする.」

1. 木材の許容応力度については, 繊維方向の許容応力度として日本建築学会「木構造設計基準・同解説」に表 28.1 のような値が定められている.

表 28.1 普通構造材の繊維方向許容応力度 (単位: kg/cm^2)

樹 種			長期応力に対する値			短期応力 に対する 値 s_f
			圧 縮 Lf_c	引張り・ 曲げ Lf_t, Lf_b	せん断 Lf_s	
針 葉 樹	I 類	あかまつ・くるまつ・からまつ・ひば・ひのき・つが・べいまつ・べいひ	80	90	7	長期応力 に対する 値の 2 倍
	II 類	すぎ・もみ・えぞまつ・とどまつ・べいすぎ・べいつが	60	70	5	
広 葉 樹	I 類	か し	90	130	14	
	II 類	くり・なら・ぶな・けやき・アビトン	70	100	10	
	III 類	ラワン	70	90	6	

くいの場合には常時地下水面にあるような状態で使用することになっているから, 常時湿潤状態にある場合を適用して, 表 28.1 の値の 70% を採用する. したがって, 普通構造材で針葉樹 II 類の場合, 長期許容圧縮応力度は 42kg/cm^2 , 広葉樹 II, III 類で 49kg/cm^2 , その他はいずれも 50kg/cm^2 以上となる. 実際にくい材として使用されるのは, まつ・からまつ・べいまつがほとんどで, この場合はいずれも針葉樹 I 類に属し $80 \times 0.70 = 56\text{kg/cm}^2$ となる. 木ぐいが使用される場合は, 地盤中に打撃によって貫入設置されるであろうこと, 設置後はその状態を確認しえないことなども考慮して, 本文に示したようなまるめた値 50kg/cm^2 を採用することにした. その他の種類のものをくいとして使用する場合は, 針葉樹 I 類で 50kg/cm^2 , 同 II 類で 40kg/cm^2 , 広葉樹 I 類で 50kg/cm^2 , 同 II, III 類で 45kg/cm^2 を長期許容圧縮応力度とすればよいであろう.

木ぐいでは元口と末口で直径が変化するのが一般であるから, 材料による許容支持力を算定する場合には, その最小断面について考えなければならない.

(b)4 章基礎の設計, 3 節くい基礎の設計, 31 条木ぐい

「1. 木ぐいは割れなどの欠陥のない生丸太の樹皮を除いたもので、元口から末口までおよそ一様に径が変化し、末口の径 12cm 以上のものを使用する。」

「2. 木ぐいの両端中心線を結ぶ直線は、くい外に出てはならない。」

「3. 木ぐいはつねにその全長が地下水位下にある場合、もしくは菌害・虫害に対する適切な処置により耐久性が保証される場合以外は用いてはならない。」

「4. 木ぐいを打設するとき、その中心間隔は元口の 2.5 倍以上、かつ 60cm 以上とする。」

1. 近ごろその使用は少なくなってきたが、木ぐいの材料としては、まつ・べいまつ・からまつなどの生材となっている。ときには、くり・ひのきなども用いられることがある。これらの材料は天然のものであるため、材料についてはその形状および欠陥についてよく吟味し適材を選定しなければならない。まず、割れや、やにつぼなど強度上欠陥となるものがなく、元口から末口まで径が一様に変化するものが望まれる（元口とは材木の根元に近いほうの切口のことであり、末口とは反対側の端部のことである）。樹皮は打込みのじゃまになるとともに、地盤中で樹幹と分離するので、打込み前にくいごしらえの 1 つとしてはいしておく。摩擦ぐいとして木ぐいを使用する場合には、とくにこのことはたいせつである。くいの先端には地盤の状況によってくつ金物などの補強材を取付けるようにするが、打込み時に障害を起こさないようにするため末口の径は 12 cm 以上のものを使用することになっている。
2. 木ぐいは自然の材料であるため、完全にまっすぐなものを得るのはむずかしく、くいの中心線が多少わん曲するのはやむをえない。しかし、くい材のわん曲は打込みの際の傾斜の発生、応力伝達時の曲げ応力の発生など好ましいものではないので、その程度は経験的にくい材の両端中心線を結ぶ直線がくい材の外に出ない範囲に押えることが必要とされている。さらに、木ぐいを継ぐいとして使用する場合には、よりまっすぐなくい材を選ばなければならない。
3. 木ぐいは完全に水中に浸っていれば、建物の耐用年限に対して十分な耐久性をもっている。Chellis^{31.1)} は、ベニスの鐘楼やアムステルダム の王宮の基礎ぐいの場合について数百年から千年に及ぶ耐久性の例をあげている。しかし、木ぐいを乾湿交互にうける状態におくと急速に腐朽する。木ぐいの退化の原因は、一般の木材と同じく菌類による腐朽と白あり・甲虫による虫害がその主たるものである。クレオソートなどの防腐剤を注入するなどの方法が効果があるといわれる。木ぐいを使用する場合は、常水面以下に確実に保たれる場合を除き、耐久性について適切な処置を施すことが必要である^{31.1), 31.2)}。
4. くいの間隔の最小は施工上の観点からきめられている。従来の数多くの経験から、木ぐいの場合としては、くい径の 2.5 倍、かつ 60 cm 以上の値がとられている。

(4)1960 年版

(a)4 章基礎の設計, 3 節くい基礎の設計, 27 条くい基礎設計の基本事項

「6. 地下水位の変化が予想される場所においては、木ぐいはその耐久性が十分保証される場合のほかは用いてはならない。」

基礎の設計に関する基本的な事項は A・2 章および A・4 章 1 節に記してあるが、本条は特
にくい基礎を設計する場合に必要なことと誤りやすい事項をまとめて示したものである。
くい基礎に使用するくいの種別を本規準においては次のように分類して使用している。

(a) くいの材料および製造方法による分類

木 ぐ い

既製鉄筋コンクリートぐい { 遠心力を応用して製造するくい
その他の製造法によるくい

場所打ちコンクリートぐい { 鋼製の外かく(殻)を有するもの
鋼製の外かく(殻)を有しないもの

鋼 ぐ い

(b) くいの支持状態による分類

支 持 ぐ い

摩 擦 ぐ い

(c) 1本のくいに使用するくい材の組合せによる分類

継 ぐ い

合 成 ぐ い

(b) と (c) については総則の 3 条に定義されているとおりである。

(a) の分類については本規準では次のように用いている。

木 ぐ い

まつ・べいまつなどの木材を使用するくいを総称し、針葉樹・かつ葉樹などの樹種による区別はしていない。しかし、許容応力の算定に当っては建築基準法の規定から、すぎ・もみ・えぞまつ・べいすぎ・べいつがと他のものを区別している。

6. 6 項は本規準において旧規準よりも強調した事項である。木ぐいはコストが安く、取扱いも簡便であり、地方などでは他種のくいに比べて入手しやすいなどの利点をもっているが、地下水位上にある場合はかなり短期間に腐食する。防腐剤の表面塗布でなく防腐剤の注入などによって十分処理され腐食に対して安全であると確認された場合以外では、このことは建物の耐久性に関して重大な影響を及ぼすことになる。

近頃、都市においては深い地下室をもったビルまたは地下鉄の建設、ビル・工場などによる地下水のくみ上げ等々から地下水位の変動が著しい。

東京都大手町地区で昭和 25 年に地下 1 階の根切りを行ったときわき水で非常に悩まされた敷地のすぐ隣りで、周囲がビルで囲まれた後に掘さくした地下 2 階の工事がほとんどわき水がなく空掘りで施工できた例などもあり、地表近くの地下水面を永久的な水位と考えるかどうかは大いに検討を要する問題である。昭和の初期に木ぐいで建てられた建物が十数年を経て基礎スラブの下約 30 cm ほどが完全に腐食して故障を起し、大がかりな補修を行った例もある。同様な例は相当に多いものと思われる。

くいの腐食がその補修に当って相当な困難を伴うこと、建物の構造体に致命的な故障をおこすおそれがあることなどから、地下水位の変動のおそれがある敷地の半永久的な建物に防腐処理を施さない木ぐいを用うることは、くい基礎の設計上避けるべきであろう。

(b)4 章基礎の設計, 3 節くい基礎の設計, 28 条くい材料の許容応力度

「1. 木ぐいの長期許容圧縮応力度は, すぎ・もみ・えぞまつ・とどまつ・べいすぎおよびべいまつにあっては 40kg/cm^2 (4MN/m^2), その他は樹種にかかわらず 50kg/cm^2 (5MN/m^2) 以下とする. なお, この場合許容支持力は木ぐいの最小断面について求めるものとする. 」

「5. くい材の長期許容引張応力度についてはそれぞれの材種によって, 「木構造設計基準・同解説」, に示された長期許容引張応力度を適用する. なお, 許容引張力は, 1~4 項のそれぞれに述べられた断面について求めるものとする. 」

1. 木ぐいの長期許容圧縮応力度はすぎ・もみ・えぞまつ・とどまつ・べいすぎおよびべいつがにあっては 40kg/cm^2 , その他は樹種にかかわらず最小断面について 50kg/cm^2 以下としている. これは建築基準法施行令第 89 条第 1 項に木材の繊維方向の許容圧縮応力度として次のように定められ, かつ 3 項において基礎ぐいなど常時湿潤状態にある部分に使用するも

表 28.1 (kg/cm²)

木 材 の 種 類	基準法施行令第 89 条第 1 項許容圧縮応力度	基準法基礎ぐい許容圧縮応力度	本規準採用値	
針 葉 樹	あかまつ・くろまつ・からまつ・ひば・ひのき・つが・べいまつ・べいひ	80	56	50
	すぎ・もみ・えぞまつ・とどまつ・べいすぎ・べいつが	60	42	40
広 葉 樹	かし	90	63	50
	くり・なら・ぶな・けやき	70	49	50

のは, この値の 70% に相当する数値としなければならないと規定していることによったものである.

ボストン市の建築物法においては $32\sim 91\text{kg/cm}^2$, ニューヨーク市の建築物法では 64.5kg/cm^2 および 85kg/cm^2 , Uniform Building Code においては基本応力度の 60% 以上, かつ 70kg/cm^2 以下となっていることからこの値は妥当なものであると考えられる.

(c)4 章基礎の設計, 3 節くい基礎の設計, 30 条木ぐい

- 「1. 木ぐいは割れなどの欠陥のない生丸太の樹皮を除いたもので、元口から末口までおよそ一様に径が変化し、樹皮を除いた末口の径は 12cm 以上とする。」
- 「2. 木ぐいの両端中心線を結ぶ直線はくい外に出てはならない。」
- 「3. 木ぐいの菌害による腐朽または虫害に対しては、実状に応じて適切な処置をほどこさなければならない。」
- 「4. 木ぐいは常にその全長が地下水位下にあるように基礎の深さを定めなければならない。」
- 「5. 木ぐいの打込み中心間隔は元口の 2.5 倍以上、かつ 60cm 以上とする。」

- 通常、木ぐいの材料としてはまつ・べいまつ・からまつなどの生材が使用される。くりやひのきなども用いられることがある。これらの材料は天然のものであるため、その形状は入手材料によって随分と異なる。くいとしては 1 項に述べたようにまず応力伝達材であることから割れや、やにつぼなど強度上の欠陥のないものを使用しなければならない。くい材であるため元口から末口まで径が一樣に変化することが地盤中への打込みを考慮する場合必要である。樹皮は打込みのじゃまになるとともに地盤中で樹幹と分離するので、打込み前にくいごしらえの 1 つとして剝いておく。摩擦ぐいにあっては特にこのことは大切である。末口の径は 12 cm 以上のものを使用する。
- 木ぐいは自然の材料であるため完全に真直ぐなものを得ることは難かしく、くい中心線が多少わん曲しているのはやむを得ないようである。しかしくい材の両端中心点を結ぶ直線がくい外に出るような材は応力伝達上からも無理があり用いてはならない(図 30.1 参照)。

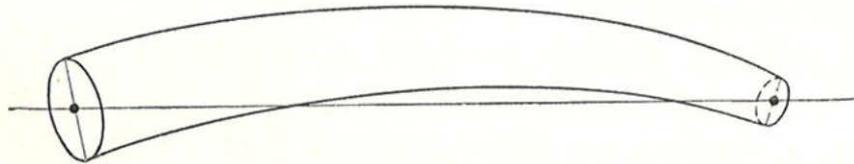


図 30.1 くい材として不可のもの

- 木ぐいは乾湿を交互にうけたりすると急速に腐食する。クレオソートなどの防腐剤を塗付するだけでなく、くい全体に注入することは非常に有効で寿命はのびるが、これとても完全に防腐することはできないといわれている。腐朽や虫害を受けないように実状に応じた対策を考慮することが必要である。
- 木ぐいは完全に水中に浸っていれば、ほとんど無限の耐久性をもっている。このことは古い建物の基礎からいくつか実証されている。ベニスの鐘塔の基礎ぐいは 1000 年以上たってもなんともなかったことが報ぜられている。この反面上述したように乾湿交互の条件では急速に腐食する。このため木ぐいを地下水面下に打込み常に水中に浸した状態で設置することは、27 条 6 項で述べたように木ぐいの原則であるが、近時都市の地下水位は変動がはげしく信頼がおけないという。木ぐい設置の場合はこの点を十分注意しなければならない。
- くいの間隔の最小は施工の点からきめられるといわれる。27 条 4 項および同解説にこのことは述べている。木ぐいにあっては 5 項の規定によってくい径の 2.5 倍、かつ 60 cm 以上と規定している。

(d)4章基礎の設計, 3節くい基礎の設計, 35条くいの継手

「2. 木ぐいの継手は上ぐいと下ぐいがある程度回転することがで、かつ曲げに抵抗しうる構造としなければならない。」

2. 木ぐいの継手は図 35.1 (A) に示すように示されてきた。実際に木ぐいの継手を使用した数多くの経験者はこれについて次のように述べている。木ぐいは自然材を使用するため、継手の上下のぐいがそれぞれに異なったくい軸の曲りやねじれをもっている。これを地中に打込む場合上下のぐいは地盤中でそれぞれに回転し、その回転の大きさ・速度・方向は別個である。このため木ぐいの継手部分には上下ぐいの間でねじれが生ずる。木ぐいは軸方向の力に対しては強いがこれと直角方向の力には弱いので、もし継手が上下ぐいのそれぞれの回転を許さないようにボルトなどで緊結してあれば継手部分に割裂を生じさせ、折れ曲ったり、はずれてしまったりまたは上ぐいまたは下ぐいがこの割裂の中にくさび状に貫入して継手の破

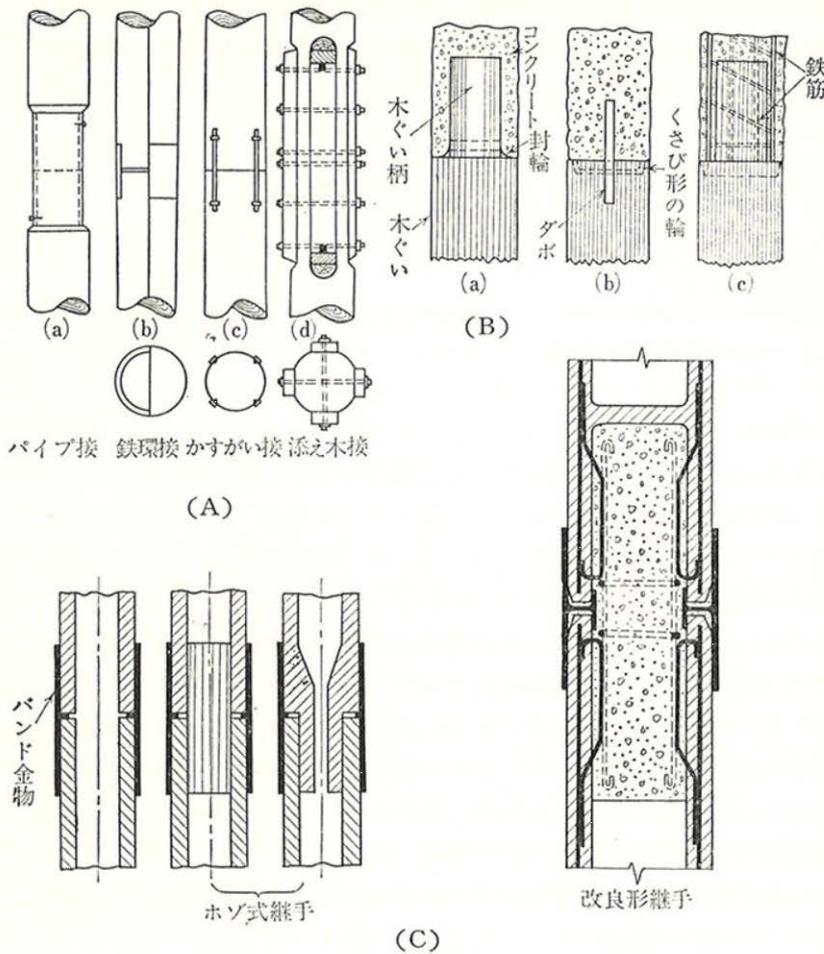


図 35.1

壊を生じさせる。このため木ぐいの継手にはある程度の回転をゆるす構造のものが必要であり、ボルトなどで縫いつけてあるのは最も危険であるというものである。またいま1つ上下ぐいが抜けないためには継手部分がはずれにくいようにしてあることと、継手部でピンとなって折れ曲らないようにある程度の曲げに抵抗できるようになっていることが必要である。

これによれば図.(A) (d) は悪いつぎ方であり、(b), (c) はある程度は回転するが、前者は折れ曲りに、後者はある程度以上の回転ともにも不完全であり推奨できない。

図.(A) (a) が最も推奨できる形式である。図.(B) では以上の原理から (c) (a) (b) の順序に信頼性がおけると思われる。

木ぐいの継手に関して大阪の某氏の推奨しているものを参考までにあげると次のようである。

木ぐいの継手金物：

製 作

- (1) PL-6 をもって円とう(塙)を造り，継手はV電気溶接とし（ウラナミにて溶接を内側まで十分につけること） $600^{\circ}\sim 800^{\circ}\text{C}$ にてアニーリングすること．中央に2箇所径 2mm 程度の空気抜を設ける．
- (2) 上下を図 35.2 のように金物で開き，くいが割れないように養生をすること．

注 意

- (a) くぎ・ボルトはぜったいに打たないこと（これはくいの割れの原因となるため）
- (b) 元口で継ぐこと．モンケンが1t以上のときは落下高さ 1m 以上に揚げないこと．モンケン重量に応じてこれに準ずるものとする．
- (c) 下ぐいの頭部が地盤まできたときくい頭を工作し継ぐものとする．

なお，木部工作は厳重とし，中央に空気抜を設けて，両方のくいが接するように正確を要する．

3. 鉄筋コンクリートぐいの継手については継手部に応力が集中しないような構造とし，かつ曲げに抵抗するものでなければならない．

鉄筋コンクリートぐいの継手は上ぐいに与えられた打撃力が継手部分で一様に下ぐいに伝達されないで，図.(C)のバンドの引かけ金具がくさびの作用をして下ぐいを破壊するなど，継手部における応力集中がコンクリートを破壊するものである．これに対しては図.(C)改良形継手などの改良方式が考案され少しずつ改良されてきている．

鋼ぐいの溶接による継手は継手のうち最も信頼性のおけるものである．

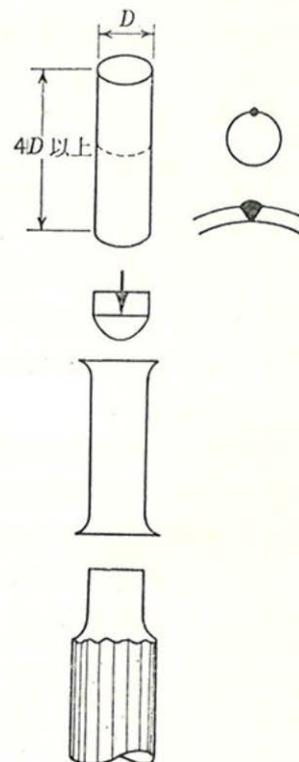


図 35.2

3.4 まとめ

道路橋示方書および建築基礎構造設計指針に見られる丸太杭（木ぐい）設計法の変遷をまとめると表-3.4.1となる。1955年に「木材資源利用合理化方策」が閣議決定されて以来、道路橋示方書では1976年以降、建築基礎構造設計指針では1988年以降、それぞれ設計書から丸太杭の項目が消えていったことがわかる。

表-3.4.1 道路橋示方書および建築基礎構造設計指針に見られる丸太杭（木ぐい）設計法の変遷

	道路橋示方書	建築基礎構造設計指針
1955年	木材資源利用合理化方策閣議決定	
1956年		
1957年		
1958年		
1959年		
1960年		建築基礎構造設計基準・同解説 「くい基礎設計の基本事項」の項で記述 「くい材料の許容応力度」の項で記述 くい基礎の設計「木ぐい」の項あり 「くいの継手」の項で記述
1961年		
1962年		
1963年		
1964年	道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇 「杭の分類」の項で記述 「くいの材料のヤング係数」の項で記述 「くい頭とフーチングの結合」の項で記述 構造細目「木ぐい」の項あり	
1965年		
1966年	道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇 材料「木ぐい」の項あり 許容応力度および許容支持力「木ぐい」の項あり	
1967年		
1968年	道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇 製作、運搬、貯蔵、検査「木ぐい」の項あり くい頭の仕上げ「木ぐい」の項あり	
1969年		
1970年		
1971年		
1972年		
1973年		
1974年		建築基礎構造設計基準・同解説 「杭材料の許容応力度」の項で記述 くい基礎の設計「木ぐい」の項あり
1975年		
1976年	道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇 指針から木ぐいが除外される	
1977年		
1978年		
1979年		
1980年		
1981年		
1982年		
1983年		
1984年		
1985年		
1986年		
1987年		
1988年		建築基礎構造設計指針 指針からは除外され、小規模建築については別の手引きを参照
1989年		
1990年		
1991年		
1992年		
1993年		
1994年		
1995年		
1996年		
1997年		
1998年		
1999年		
2000年		
2001年		建築基礎構造設計指針 指針で扱わないことが明記された
2002年		
2003年		
2004年		
2005年		
2006年		
2007年		

参考文献：

- 1) 土と基礎, No.581, 地盤工学会, 2006.
- 2) 設計・施工のための橋梁ハンドブック編集委員会：設計・施工のための橋梁ハンドブック, 建設産業調査会, p.807, 1975
- 3) 財団法人福井県建設技術公社：ふくいの道路橋（県管理道路）, p.222,274,491, 2006.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編, 1980.5.
- 5) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇, 1976.8.
- 6) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇, 1968.10.
- 7) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇, 1966.11.
- 8) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇, 1964.3.
- 9) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 485p, 2001.10.
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 430p, 1988.1.
- 11) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説, 667p, 1974.11.
- 12) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説, 474p, 1960.11.

4. 福井県内既存丸太基礎構造物事例の調査

4.1 調査方法

文献より県内に現存する木杭基礎構造物を調査した。参考とした資料は（財）福井県建設技術公社によって編纂，発行された「ふくい道路橋（県管理道路）¹⁾」である。

4.2 調査結果

資料によれば鯖江市の下司橋と鯖江大橋，小浜市の西津橋の3橋梁において橋台および橋脚に松杭基礎が使用されていたことが明らかとなった。これらの橋梁の完成年度は，それぞれ1957年（昭和32年），1957年（昭和32年），1938年（昭和13年）であり，2007年の今日も使用されていることから，それぞれ50年～69年経過後も松杭が健全な状態で機能維持を果たしていることがわかる。

4.2.1 下司橋

表-4.2.1 下司橋の緒元

橋名	下司橋	完成年度	S32年	適用示方書	S31年
架橋位置	鯖江市下司町		路線名	一般県道 福井鯖江線	
道路規格	3種1級		橋梁下の状況	吉野瀬川	
橋長	44.90m	有効幅員	9.30m	設計荷重	TL-20
支間割	13.35+17.30+13.35m				
上部工型式	3径間 RC ゲルバー桁橋				
橋台形式	A1	重力式橋台【松杭基礎】	A2	重力式橋台【松杭基礎】	
橋脚形式	壁式小判型橋脚×2基【ケーソン基礎×2基】				



写真-4.2.1 下司橋の現況写真

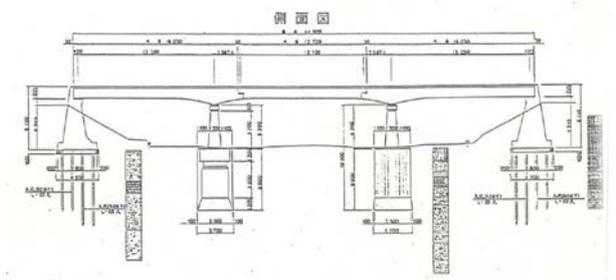
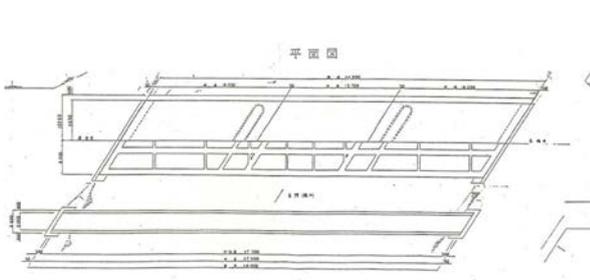


図-4.2.1 下司橋の平面図と側面図

4.2.2 鯖江大橋

表-4.2.2 鯖江大橋の緒元

橋名	鯖江大橋	完成年度	S32年	適用示方書	S31年
架橋位置	鯖江市有定町～下司町		路線名	一般県道 福井鯖江線	
道路規格	3種1級		橋梁下の状況	日野川	
橋長	174.00m	有効幅員	9.00m	設計荷重	TL-20
支間割	28.00×6m				
上部工型式	PC単純ポストテンションT桁橋6連				
橋台形式	A1	重力式橋台【松杭基礎】	A2	重力式橋台【松杭基礎】	
橋脚形式	壁式小判型橋脚×5基【ケーソン基礎×5基】				



写真-4.2.2 鯖江大橋の現況写真

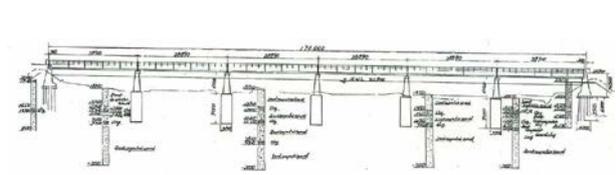
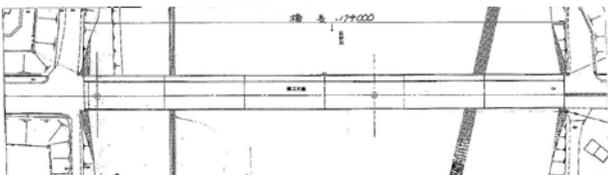


図-4.2.2 鯖江大橋の平面図と側面図

4.2.3 西津橋

表-4.2.3 西津橋の緒元表 西津橋の緒元

橋名	西津橋	完成年度	S13年	適用示方書	T15年
架橋位置	小浜市城内		路線名	一般国道162号	
道路規格	3種4級		橋梁下の状況	北川	
橋長	123.40m	有効幅員	6.00m	設計荷重	TL-6
支間割	20.00+18.15+22.04+22.00+22.04+18.15m				
上部工型式	5径間RCゲルバー桁橋+PC単純プレテンションT桁橋				
橋台形式	A1	控え壁式橋台【松杭基礎】	A2	控え壁式橋台【松杭基礎】	
橋脚形式	ラーメン式橋脚×4基【松杭基礎×4基】，壁式小判型橋脚【松杭基礎】				



写真-4.2.3 西津橋の現況写真

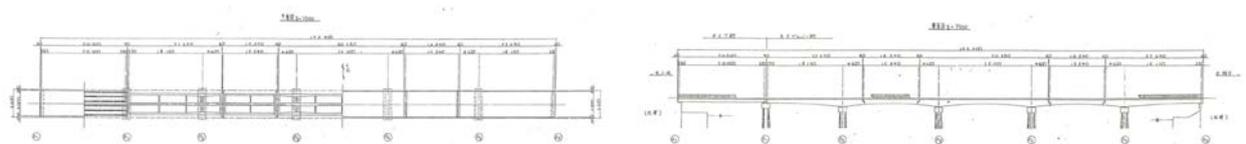


図-4.2.3 西津橋の平面図と側面図

参考文献

- 1) 財団法人福井県建設技術公社：ふくいの道路橋（県管理道路），p.222,274,491，2006.

5. 土木工事における丸太利用と腐朽に関する文献調査

5.1 調査方法

丸太基礎をはじめ木材は、土木工事に古代より使用されている。杭基礎についてみると、現在使用されているコンクリート杭や鋼管杭の歴史は浅く、木杭基礎の歴史は洋の東西を問わずむしろこれよりはるかに古い¹²⁾。そこで、建設工事への木材利用を考える上で、過去の事例を調査することが可能性を探る手掛かりとなる。

そこで、ここでは文献調査により過去の事例を集め分析を行った。

調査対象は、地中にある杭とし主に構造物基礎を対象としたが、河川工事にも木材が良く使用され、腐朽の状況を調べるには貴重なデータになると考えられることからこれらも加えた。

調査対象とした資料は以下の通りであり、53の文献に基づいた。

- (1)土木学会 年次学術講演会論文集（1999年～2006年の8年分）
- (2)地盤工学会 地盤工学研究発表会講演概要集（2002年～2006年の5年分）
- (3)その他入手した資料

調査項目は、以下の通りある。

- (1)対象構造物
- (2)木材用途
- (3)使用場所
- (4)施工時期
- (5)調査時期
- (6)設置期間(年)
- (7)樹種
- (8)木材寸法
- (9)地盤との関係
- (10)地下水位
- (11)木材の腐朽状態（地下水位以浅、地下水位変動域、地下水位以深）
- (12)その他

抽出した論文を次頁に示す。

木杭および木材基礎に関する文献調査

1/3

No.	著者名	所属	論文名	発行元	出典	発表年月	
1	皆川恵三 田村昌仁 篠塚重夫 久保豊 兼平雄吉	システム計測(株) (独)建築研究所 (財)住宅保証機構 システム計測(株) システム計測(株)	戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その1:試験概要)	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1391-1392	2006	7
2	兼平雄吉 田村昌仁 篠塚重夫 久保豊 皆川恵三	システム計測(株) (独)建築研究所 (財)住宅保証機構 システム計測(株) システム計測(株)	戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その2:試験結果)	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1393-1394	2006	7
3	久保豊 田村昌仁 篠塚重夫 皆川恵三 兼平雄吉	システム計測(株) (独)建築研究所 (財)住宅保証機構 システム計測(株) システム計測(株)	戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その3:試験考察)	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1395-1396	2006	7
4	田村昌仁 黒柳信之	独立行政法人建築研究所 パナホーム株式会社	戸建住宅における木杭の効用	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1397-1398	2006	7
5	中村博 水谷羊介	兼松日産農林㈱ 兼松日産農林㈱	松杭の支持力特性(その1)	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1399-1400	2006	7
6	増田貴之 水谷羊介	兼松日産農林㈱ 兼松日産農林㈱	松杭の支持力特性(その2)	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.1401-1402	2006	7
7	上杉章雄 沼田淳紀	飛鳥建設 飛鳥建設	岩見沢市で掘り出した木杭の強度について	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.2401-2402	2006	7
8	沼田淳紀, 上杉章雄	飛鳥建設 飛鳥建設	岩見沢市で掘り出した木杭の目視観察	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp.2403-2404	2006	7
9	飯島悠也, 片田敏行, 末政直晃, 田中剛	武蔵工業大学 武蔵工業大学 武蔵工業大学 武蔵工業大学	伝統土木技術から得られる教訓とその応用	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp.1465-1466	2005	7
10	羽矢洋 西岡英俊 西田尚史 木村礼夫	(財)鉄道総合技術研究所 (財)鉄道総合技術研究所 名古屋鉄道株式会社 JR総研エンジニアリング	木杭基礎橋脚に対する大変位載荷実験	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp.1557-1558	2005	7
11	羽矢洋 稲葉智明	(財)鉄道総合技術研究所 (財)鉄道総合技術研究所	鉄道における木杭基礎橋脚の健全度診断法概要 -その1:診断法概要-	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会, pp.1375-1376	2003	7
12	稲葉智明 羽矢洋	(財)鉄道総合技術研究所 (財)鉄道総合技術研究所	鉄道における木杭基礎橋脚の健全度診断法概要 -その2:適用例-	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会, pp.1377-1378	2003	7
13	杉村義広	杉村建築基礎研究室	日本における杭基礎の起源と変遷	地盤工学会	土と基礎, Vol.54, No.6, pp.1-4,	2006	6
14	塩井幸武	八戸工業大学	土木(道路)における杭基礎の変化・変遷について	地盤工学会	土と基礎, Vol.54, No.6, pp.9-12,	2006	6
15	神田政幸	鉄道総合研究所	鉄道における杭基礎の変化・変遷について	地盤工学会	土と基礎, Vol.54, No.6, pp.13-16,	2006	6
16	菊池喜昭	港湾空港技術研究所	港湾における杭基礎の変化と変遷	地盤工学会	土と基礎, Vol.54, No.6, pp.17-20,	2006	6
17	呉文経 三浦哲彦		粘土地盤における木杭の周面支持力評価のための鉛直載荷試験	地盤工学会	土と基礎, No.5, pp.40-42	1995	5
18	田村昌仁 富永晃司 若井明彦 久保豊 兼平雄吉	建築研究所 広島大学 群馬大学 システム計測 システム計測	小口径鋼管杭と木杭の支持力評価法に関する研究	土木学会	第61回年次学術講演会, 第3, pp.789-790	2006	9

木杭および木材基礎に関する文献調査

2/3

No.	著者名	所属	論文名	発行元	出典	発表年・月	
19	沼田淳紀 上杉章雄	飛鳥建設 飛鳥建設	岩見沢市で掘り出した木杭の腐朽状態の定量評価	土木学会	第61回年次学術講演会、第7、 pp.253-254	2006	9
20	横川勝則 塩井幸武 福井次郎 藤原稔 妹尾義隆 柳沢博美	(財)海洋架橋・橋梁調査会 八戸工業大学大学院 (独)土木研究所 海峡横断道路調査会 (財)道路保全技術センター構造物保全研究会 国交省関東地整 横浜国道事務所	建設後50年以上を経た鋼ゲルバー桁橋梁(多摩川大橋)の現況調査	土木学会	第61回年次学術講演会、第1、pp.13- 14	2005	9
21	吉田好孝 蓮上茂樹 塩井幸武 藤原稔 石田稔 矢部正明	(財)海洋架橋・橋梁調査会 (独)土木研究所 八戸工業大学大学院 海峡横断道路調査会 国交省 関東地整 横浜国道事務所 (株)長大	建設後50年以上を経た鋼ゲルバー桁橋梁(多摩川大橋)の耐震性評価	土木学会	第60回年次学術講演会、第1、pp.21- 22	2005	9
22	佐藤信彦 天野勲 宇野浩樹	(財)道路保全技術センター 基礎地盤コンサルタンツ(株) 大成建設(株)	既設橋梁における木杭基礎の健全性に関する基礎調査 - その1 木杭の施工状況調査および杭体の劣化試験 -	土木学会	第60回年次学術講演会、第3、 pp.517-518	2005	9
23	佐藤信彦 宇野浩樹 天野勲	(財)道路保全技術センター 大成建設(株) 基礎地盤コンサルタンツ(株)	既設橋梁における木杭基礎の健全性に関する基礎調査 - その2 要素試験、全体圧縮試験および曲げ荷重試験 -	土木学会	第60回年次学術講演会、第3、 pp.537-538	2005	9
24	羽矢洋 稲葉智明 太田陽一 赤坂大介	鉄道総合技術研究所 鉄道総合技術研究所 北陸鉄道株式会社 株式会社 テス	衝撃振動試験による木杭基礎橋脚補強の確認検討	土木学会	第60回年次学術講演会、第3、 pp.817-818	2005	9
25	飯島悠也 片田敏行 末政直晃 田中剛	武蔵工業大学 武蔵工業大学 武蔵工業大学 武蔵工業大学	伝統的基礎工法の支持力特性の比較	土木学会	第60回年次学術講演会、第3、 pp.733-734	2005	9
26	浜口武 井谷雅司 堤祥一 大下武志	独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所	小口径フローティング式基礎の低盛土道路への適用について	土木学会	第59回年次学術講演会、第3、 pp.961-962	2004	9
27	杉尾哲 佐藤英敏	宮崎大学 宮崎大学	河川伝統工法における木材の利用状況の調査	土木学会	第58回年次学術講演会、第2、 pp.493-494	2003	9
28	高田直俊 西田貴博	大阪市立大学 大阪市立大学	密打木杭で法尻を強化した提体の地震時挙動	土木学会	第58回年次学術講演会、第3、 pp.1243-1244	2003	9
29	浜口武 井谷雅司 堤祥一 大下武志	独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所 独立行政法人土木研究所	土木分野における間伐材利用技術の開発	土木学会	第58回年次学術講演会、第3、 pp.1269-1270	2003	9
30	高田直俊 土橋徹 天野賢志	大阪市立大学 大阪市立大学 大阪市立大学	木杭密打ちによる河川堤体の対液状化強化	土木学会	第56回年次学術講演会、第3、 pp.384-385	2001	10
31	賛田秀世 友利方彦 石井秀明	東日本旅客鉄道㈱ 東日本旅客鉄道㈱ 東日本旅客鉄道㈱	基礎木杭の健全度評価について	土木学会	第56回年次学術講演会、第4、 pp.626-623	2001	10
32	古川俊也 板垣直行	東北電力(株) 秋田県立大学	経年火力発電所水路基礎木杭の健全度調査について	土木学会	第56回年次学術講演会、第6、 pp.504-505	2001	10
33	杉尾哲 中澤隆雄	宮崎大学 宮崎大学	伝統的河川工法に用いられていた木材の強度(その3)	土木学会	第55回年次学術講演会、第2、II-144	2000	9
34	山田昌郎	運輸省港湾技術研究所	無処理および保存処理木材(スギ集成材等)の海洋暴露実験	土木学会	第55回年次学術講演会、第5、V-172	2000	9
35	稲田達夫	三菱地所設計	旧丸ビル技術調査報告「旧丸ビル」の歴史を振り返る第4章旧丸ビルの固有周期と松杭		鉄鋼技術(STRUTECH), pp.61-67	2002	6
36	加藤英雄 長尾博文 香川聡 田中俊成 伊藤嘉文 内村智	森林総研 森林総研 森林総研 森林総研 長野林総セ 小樽農林技セ	建築物の基礎杭として約70年間使用されたベイマツ丸太の強度	日本木材学会	第50回日本木材学会大会研究発表 要旨集, p.110	2000	

木杭および木材基礎に関する文献調査

3/3

No.	著者名	所属	論文名	発行元	出典	発表年月	
37	山田周平 福田達夫 小川一郎 田口典生 永井香織 真島正人	三菱地所 三菱地所 三菱地所 大成建設 大成建設 大成建設	丸ノ内ビルヂング(旧丸ビル)の構造調査 その8 松杭の鉛直載荷試験	日本建築学会	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1069-1070	2000	9
38	福田達夫 山田周平 小川一郎 田口典生 真島正人	三菱地所 三菱地所 三菱地所 三菱地所 大成建設	丸ノ内ビルヂング(旧丸ビル)の構造調査 その7 B1階およびフーチング調査結果	日本建築学会	日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1067-1068	2000	9
39	成和機工株式会社	成和機工株式会社	丸ノ内ビルヂング松杭の鉛直載荷試験報告書		成和機工株式会社, pp.1-45	1999	5
40	木方洋二 小林拓治郎 岸雅泰 清水昇 高木靖人	名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学	名古屋駅基礎木杭の50年間の変質に関する調査(第二報) -露出した杭材全部についての老朽度試験-		名大演報, No.10, pp.81-87	1990	
41	木方洋二 金川靖 奥山剛 服部芳明 高田喜久夫	名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学 名古屋大学	名古屋駅基礎木杭の50年間の変質に関する調査(第一報) -杭材の強度、老朽度試験-		名大演報, No.10, 71-80	1990	
42	川上敬介 大原明神	鳥取県林業試験所 鳥取県林業試験所	土木用材として40年近く水中に設置されていたマツ丸太の強度性能		木材工業, Vol.55, No.4, 165-169	2000	
43	佐々木晴美	北海道開発局	特集 地盤の表層安定処理工法 軟弱地盤でのくい工法による施工例		基礎工, pp.91-96	1981	2
44	斉藤迪孝	鉄道技術研究所	「特別講演」新潟地震について		第7回地震工学研究発表会, pp.39-43	1964	10
45	吉田耕作 松井保	全日本コンサル 大阪大学	地下水変動と松杭の腐食に関する事例		地下水技術, 第42巻, 第7号, pp.52-61	2000	
46	富田徹 高山明久	ピーエス三菱 ピーエス三菱	旧橋の木杭載荷試験		株式会社ピーエス三菱, 技報, 第2号, pp.20-21	2004	
47	桜井善雄	応用生態学研究所	プロジェクトレポート 粗朶沈床工 最上川における最近の施工例と本工法の環境保全上の特性		土木学会誌, Vol.89, No.6, pp.35-38	2004	6
48	三宅裕司 橋本茂 網田克明		樋門基礎杭として80年以上経過したマツ材の性能		徳島県立農林水産総合技術センター 森林業研究所研究報告, 第2号, pp.17-24	2003	
49	松岡真悟		土木・公園資材への県産材加工利用技術研究(平成11~15年度、県単) -新田川樋門改築に伴う旧樋門基礎マツ杭調査-		H13年版 愛媛県材試業務成績報告書, pp.34-35	2002	
50	松岡真悟		(7)土木・公園資材への県産材加工利用技術研究(平成11~15年度、県単) -新田川樋門改築に伴う旧樋門基礎マツ杭調査-		H12年版 愛媛県材試業務成績報告書, pp.30-31	2001	
51	Robert A. Blanchette	University of Minnesota	A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments		Elsevier, International biodegradation & biodegradation 46, pp.189-204	2000	
52	杉尾哲 中沢隆雄 瀬崎満弘	宮崎大学 宮崎大学 宮崎大学	伝統的河川工法に用いられていた木材の強度(その2)	土木学会	第47回年次学術講演会, 第2, pp.514-515	1992	9
53	杉尾哲 中沢隆雄 瀬崎満弘	宮崎大学 宮崎大学 宮崎大学	伝統的河川工法に用いられていた木材の強度	土木学会	第46回年次学術講演会, 第2, pp.218-219	1991	9

5.2 調査結果

図-5.2.1に、抽出した文献より得られた木材の用途を示す。53の文献より、47地点のデータが得られた。得られたデータの内約2割が鉄道または道路橋梁の基礎であり、約2割がビルまたは住宅の基礎であり、約4割が河川構造物であることがわかる。ここで河川構造物とは、沈床、樋門基礎、聖牛、ウッドブロック、牛枠、杭柵、板柵などである。

図-5.2.2に、得られた47地点の樹種の内訳を示す。松または松杭と記述されたものが3割である。この中には、カラマツ（カラマツ属）、アカマツ（マツ属）、ベイマツ（トガサワラ属）が含まれると考えられるが、これらを総称して松杭とすると、松杭は全体の約4割である。一方、スギも全体の約4割を占める。図-5.2.3に、構造物基礎とし、鉄道および道路橋基礎、ビル住宅基礎、火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種を示す。不明を除けば、全てがカラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭である。図-5.2.4に、河川構造物に用いられた木材の樹種を示す。約2割がアカマツ、ベイマツを含めた松杭であるが、残り8割はスギである。これは、一般的に表-5.2.1に示すようにスギはカラマツ、ベイマツと耐久性は同等で、アカマツやクロマツなどよりも耐久性が高いことや、近年聖牛のような過去使用された工法を見直し木材を使用することがあるが、この際現在大量に存在しているスギを使用したということが考えられる。

図-5.2.5に、木材の設置期間を示す。約半数が10年未満であるが、約2は50～100年であり、データの中で最

表-5.2.1 主要樹種の耐朽・耐蟻性³⁾

樹種	耐朽性				耐蟻性		
	大	中	小	極小	大	中	小
サワラ	○						
ヒノキ	○					○	
ヒバ	○				○		
ベイヒバ	○						
ケヤキ	○					○	
クリ	○					○	
ベイヒ	○					○	
ベイスギ	○						○
ホワイトメランチ	○						
スギ		○				○	
カラマツ		○					○
ミズナラ		○					○
ベイマツ		○					○
ダフリカカラマツ		○					○
イエローメランチ		○					
アカマツ			○				○
クロマツ			○				○
ツガ			○				
ブナ			○				○
ベイツガ			○				○
アビトン			○				
トドマツ				○		○	
エゾマツ				○			○
マカンバ				○			
シナ				○			
セン				○			○
シオジ				○			
ラジアタマツ				○			○
スブルー				○			
アガチ				○			
ラミン				○			○

も古いものは、浜松町駅近くの山手線と京浜東北のレンガ造アーチ高架橋の基礎であり 90 年であった。

図-5.2.6に、腐朽状態を示す。全数が 47 より多くなっているのは、一地点であっても地下水位変動域やそれより浅および深と分けて求められているものがあるからである。図-5.2.7、図-5.2.8、図-5.2.9に、それぞれ地下水位変動域以浅、変動域、変動域以深における腐朽状態を示す。地下水位変動域以浅や変動域では、健全であったものが 6 割あるが、腐朽したのも 4 割あることがわかる。一方、地下水位変動域以深では、100%健全であり、地下水位以深では腐朽が進行しないことが過去のデータからも見て取れる。

図-5.2.8は、地下水位変動域以深における樹種の割合である。また、図-5.2.11は、地下水位変動域以深における設置期間である。樹種は、カラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭が 5 割以上を占めているが、スギも 3 割近く存在していることがわかる。一般に、土木工事で用いられる木杭にはカラマツやベイマツを含めた松杭が使用されるが、スギも地下水位以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる。図中には、それぞれの樹種の内もっとも古かった年代を併記した。アカマツ、ベイマツ、松杭はいずれも 50 年以上経過したものがあり、水中下であればかなりの長期間健全な状態を保つことが確認された。一方、スギは調査した範囲では最大で 26 年であった。図-5.2.11より、地下水位変動域以深で健全であったものの半数近くは設置期間が 20 年以上と古く、長期間健全であることがわかる。

以上より、木材は地下水位変動域以深であれば樹種に関係なく、腐朽は進行せず健全であることが分かる。一般に、土木工事においては松杭が多く使われ、その理由は腐朽に対して抵抗性があるとされているが、スギであっても地下水位変動域以深であれば抵抗性が高いことがわかる。このようなことについて、三宅⁴⁾は、次のように述べている。「現在、スギ間伐材を土木資材として需要開拓する試みが全国でなされている。ところが、工事担当者には依然として根強いマツ信仰があり、スギの需要が伸び悩む原因となっている。マツ信仰とは、杭木等の土木資材には昔からマツが使われており、マツの耐久性はスギを上回るという誤解である。表 5~6 (表-5.2.1 参照) のとおり、マツの耐久性、耐犠牲性はスギを下回っており、マツが使われたのは、その時代の資源状況であると考えている。樋門の建設当時、すなわち大正 5 年の県統計書を見ると、スギ伐採材積 168 千石 (約 47 千立法) に対して、マツの伐採は 433 千石 (約 121 千立法) と多く、石あたり単価はスギ 2.88 円に対して 0.45 円と安く、土木資材として入手しやすかったと考えられる。すなわち、基礎杭にマツが使われたのは、当時の資源状況によるものと推察される。昔から河川工事にはマツが使われてきており、いつの間にか土木資材としてマツが耐久性に優れているという誤解が生じているが、こうした資源的な背景を需要先に伝えていくことも必要である。」

なお、地下水位変動域やそれ以浅においては、腐朽する場合も健全である場合もあり、どのような条件であれば腐朽が進むのか、また、腐朽するのであればどのような対策が効果的なのかを明らかにすることが今後の課題である。

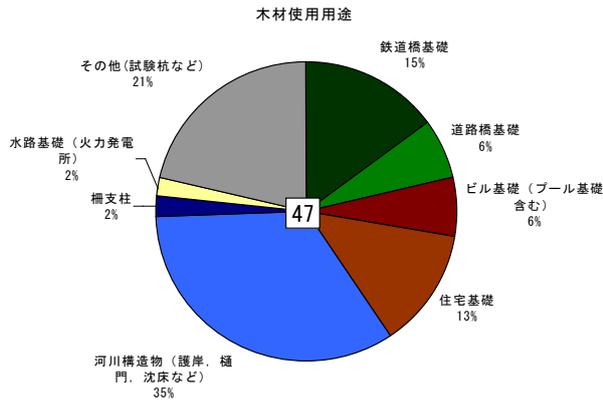


図-5.2.1 収集したデータの木材使用用途

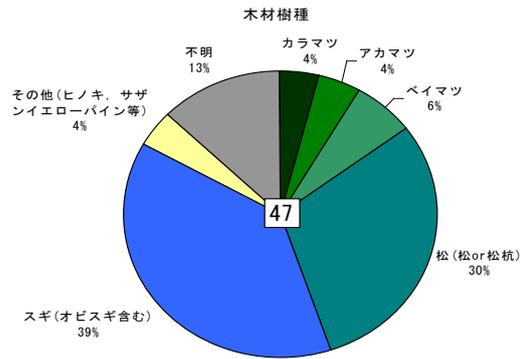


図-5.2.2 収集したデータの木材樹種

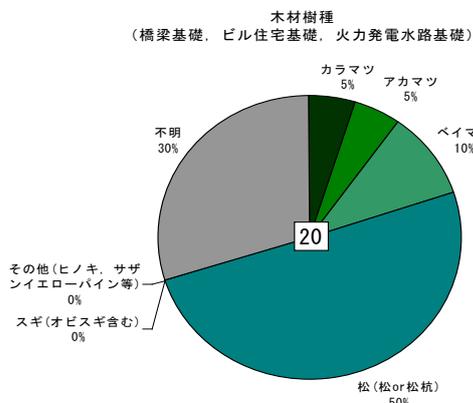


図-5.2.3 橋梁基礎・ビル住宅基礎・火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種

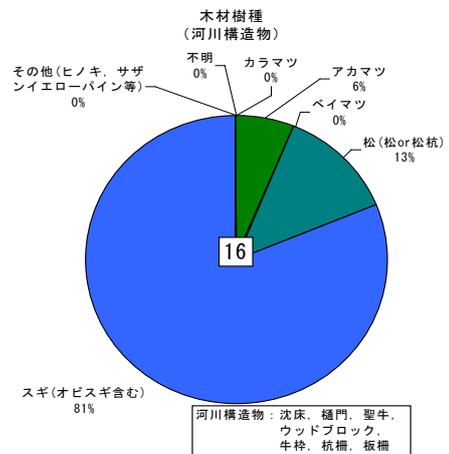


図-5.2.4 河川構造物に用いられた木材の樹種

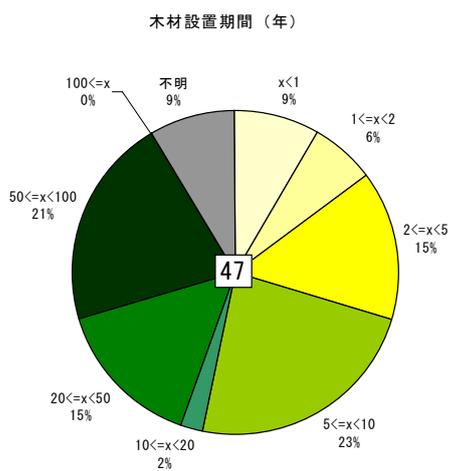


図-5.2.5 木材の設置期間

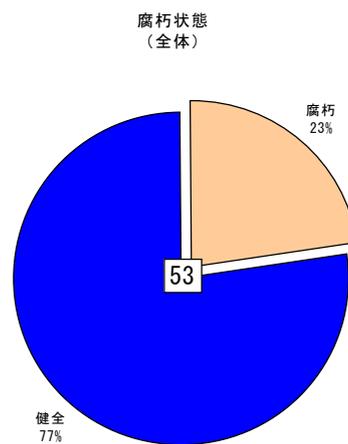


図-5.2.6 木材の腐朽状態

腐朽状態
(地下水位変動域上位)

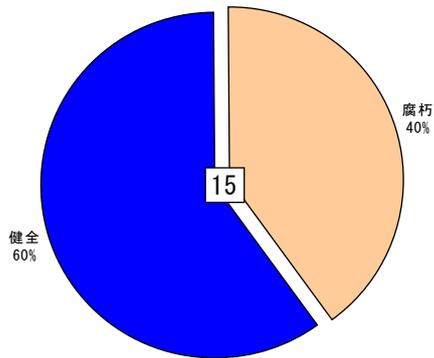


図-5.2.7 地下水位変動域以浅における腐朽状態

腐朽状態
(地下水位変動域)

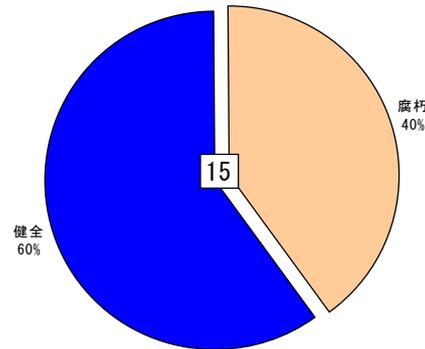


図-5.2.8 地下水位変動域における腐朽状態

腐朽状態
(地下水位変動域下位)

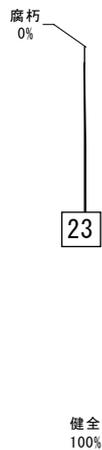


図-5.2.9 地下水位変動域以深における腐朽状態

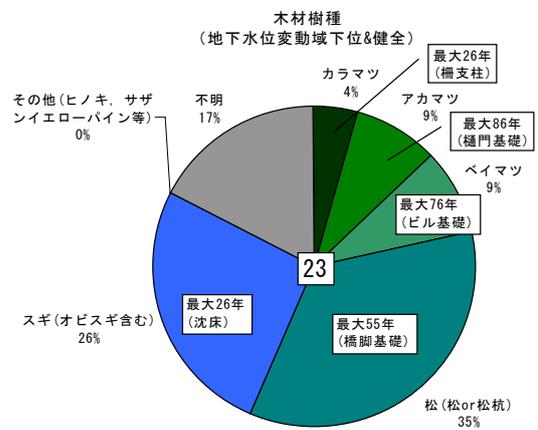


図-5.2.10 地下水位変動域以深における樹種

木材設置期間 (年)
(地下水位変動域下位&健全)

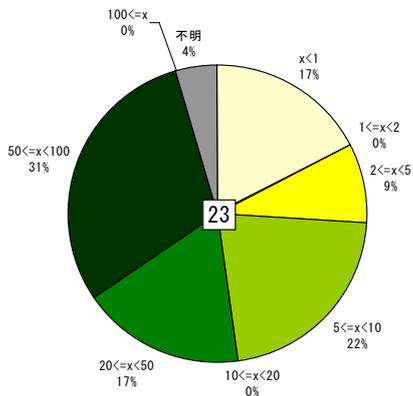


図-5.2.11 地下水位変動域以深における腐朽状態

5.3 新潟駅本屋の事例

前述の文献に含まれるが1964年新潟地震における新潟駅本屋の事例⁶⁾についてさらに検討を行う。

この地震は、1964年（昭和39年）6月16日13時01分に発生した、新潟県沖深さ40kmを震源とするマグニチュード7.5の規模のものであり、最大震度はVIであった⁶⁾。この地震による被害は、死者26名、住宅の被害は、全壊1,960棟、半壊6,640棟、床上浸水9,474棟、床下浸水5,823棟、一部損壊67,825棟であった⁶⁾。

当時の新潟駅を図-5.3.1に示す。齊藤⁵⁾によれば、地震後の新潟駅は、本屋は健在であったが、左側の手小荷物扱所、右側の支社およびコンコース上の連絡建屋は地震により若干の被害を受けたことが記されている。それぞれの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口22.5cm長さ7.5m（杭間隔約1.5m）の松丸太基礎、コンコース上の連絡建屋および支社が直径30cm長さ6mのコンクリート杭を2本継いだものであった（杭間隔不明）。

齊藤は、当時松杭を基礎に用いた事について次のように述べている、「・・・流砂現象のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12mの支持層までゆるい砂層を締固めると共に、建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし、末口22.5cm、長さ7.5mの松丸太745本（1.5m間隔程度）を打設した。・・・」つまり、松杭を用いて液状化対策を実施したわけである。

この地震では、地震直後に弓納持福夫氏が新潟市内をセスナで飛び、数多くの写真が撮影されている⁷⁾。彼は地震発生時に新潟空港で出発直前のセスナに乗っており、多くの写真はその後新潟空港を飛び立ち撮影された貴重なものである。地震によって地盤の液状化が生じると、噴砂噴水現象が生じる場合が多い。これらの写真においても新潟駅周辺では、到るところで液状化によって生じたと考えられる砂の堆積または浸水が認められる。したがって、新潟駅およびその周辺では当時地盤の液状化が発生したと考えられる。このような地盤であったにも関わらず、前述のように松丸太を打設した本屋では齊藤が意図した通りに、これが液状化対策として功を奏したことがわかる。このように丸太杭が液状化対策としても有効であることがわかる。

写真-5.3.1と写真-5.3.2は、倉西茂・高橋達夫撮影による地震後の新潟駅と新潟駅前の様子である⁸⁾。これらの写真は、倉西茂・高橋達夫が、地震後に現地調査を行った際に撮影したものと考えられ、地震発生から数日後程度に経過した時の状態と考えられる。新潟駅本屋が地震によって被害を受けていないことがわかる。また、支社が僅かに傾斜し、駅前の歩道のブロックが座屈したり浮き上がったりしていることがわかる。これらのブロックの損傷は、前述弓納持の写真の浸水領域と一致し、液状化によるものと考えられる。写真-5.3.3は、2004年7月9日に撮影した新潟駅の様子である。地震当時とほぼ同じ状態であることがわかる。したがって、本屋を支えている松丸太は、液状化対策として機能を果たし、さらに、地震後43年経過した現在もなお基礎杭としての機能を果たしているということがわかる。

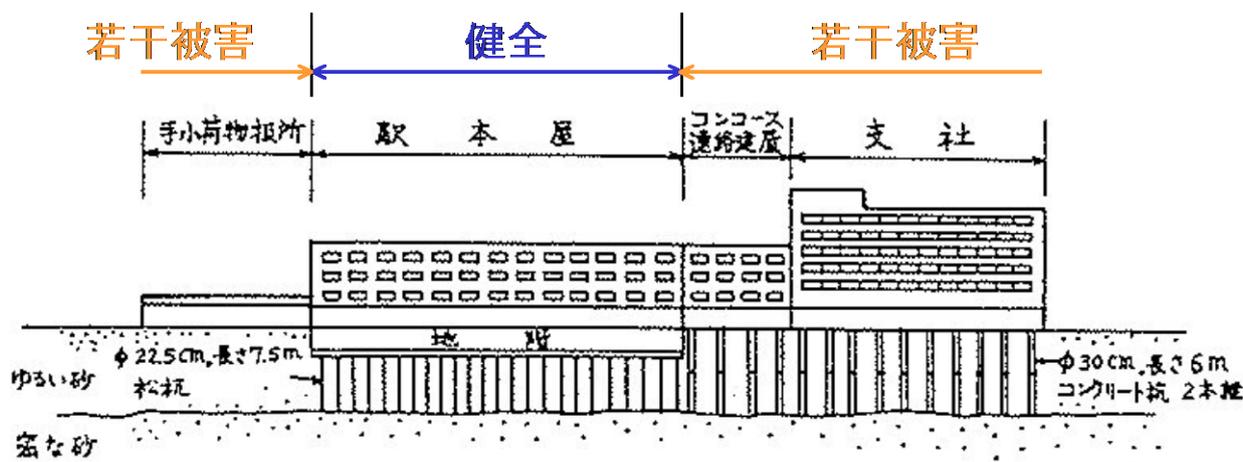


図-5.3.1 新潟駅正面建屋（文献5）に加筆



写真-5.3.1 地震後の新潟駅の様子⁷⁾ (土木学会土木図書館所蔵, 撮影: 倉西茂・高橋達夫)



写真-5.3.2 地震後の新潟駅前の様子⁷⁾ (土木学会土木図書館所蔵, 撮影: 倉西茂・高橋達夫)



写真-5.3.3 2004年時の新潟駅の様子

この場合の松丸太打設による増加相対密度を推定する。齊藤によれば、緩い砂地盤の間隙比は0.87~0.9であり、杭の打設間隔はL=1.5m程度であった。杭径は、末口がD=22.5cmである。地盤の初期間隙比を e_i とする。杭打設により地盤が押し広げられ体積が減少する率 a_s は、式-5.3.1となる。

$$a_s = \frac{\pi D^2}{4L^2} \quad \text{(式-5.3.1)}$$

これを用いて初期間隙比から杭打設により減少する間隙比 Δe は、式-5.3.2となる。

$$\Delta e = a_s (1 + e_i) \quad \text{(式-5.3.2)}$$

間隙比の減少量 Δe による相対密度の変化量 ΔD_r は、式-5.3.3で表すことができる。

$$\Delta D_r = \frac{\Delta e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100 \quad \text{(式-5.3.3)}$$

ここで、砂の最大間隙比と最小間隙比の差 $e_{\max} - e_{\min}$ は、一般的に0.3~0.6程度である。また、松丸太は末口から元口が掛けて太くなるので、元口の太さが最大30cmと仮定し、また、地盤の初期間隙比を平均的に0.885と仮定すると、松丸太打設によって増加した相対密度 ΔD_r は、 $e_{\max} - e_{\min}$ をパラメータとして図-5.3.2に示すようになる。これより $e_{\max} - e_{\min}$ が0.3だった場合には、末口から元口にかけて相対密度が11~20%、また、 $e_{\max} - e_{\min}$ が0.6だった場合には、同様に相対密度が5~10%増加したと推察される。

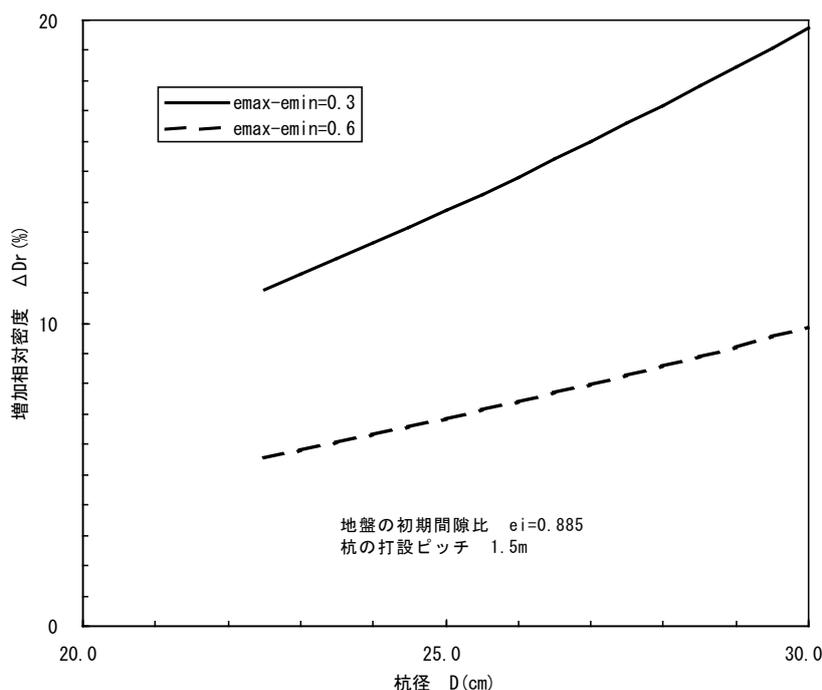


図-5.3.2 松丸太打設により増加した推定増加相対密度

5.4 まとめ

構造物基礎などの地中にある杭や河川構造物の木材について収集した53の文献より47地点のデータを分析し以下がわかった。

- (1) 地下水位変動域や地下水位変動域以浅に設置された木材は、腐朽しているものと健全なものがある。
- (2) 地下水位変動域以深に設置された木材は、樹種に関係なく100%が健全であり、このような環境下は土木資材として十分な期間健全性を保つことがわかった。
- (3) 土木資材としては一般にカラマツ、ベイマツを含めたマツが多く使われるが、スギについても同様に地下水位変動域以深では健全性を保つことがわかった。
- (4) ただし、スギの設置期間は最大で26年であり、今後さらにデータを集め、長期の健全性を明らかにする必要がある。
- (5) 1964年新潟地震で液状化対策として用いられた新潟駅本屋基礎の松丸太は、液状化対策として有効に機能し、しかもこの基礎は、43年経過した現在も基礎杭として機能を果たしている。

参考文献

- 1) 塩井幸武：土木（道路）における杭基礎の変化・変遷について，土と基礎，54-6(581)，pp.9-12，2006.6.
- 2) 佐々木晴美：軟弱地盤でのくい工法による施工例，基礎工，pp.91-96，1981.2.
- 3) 日本木材加工技術協会関西支部編：木材の基礎科学，p.90，海青社，1992.9.
- 4) 三宅裕司，橋本茂，網田克明：樋門基礎杭として80年以上経過したマツ材の性能，徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告，第2号，2003.
- 5) 斉藤 迪孝：新潟地震について，第7回地震工学研究発表会講演概要，pp.39-43，1964.10.
- 6) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，pp.350-356，1996.8.
- 7) 地盤工学会：液状化災害発生直後の新潟市街地航空写真集，1999.2.
- 8) 土木学会 URL：デジタルアーカイブス，http://library.jsce.or.jp/Image_DB/shinsai/niiigata/kuranishi/photolist.html

6. 足羽川で採取された丸太の健全性に関する調査

6.1 調査の概要

平成16年7月福井豪雨では福井市内を流れる足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生した。その後、福井県では足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業が採択され、平成16年度より5ヶ年計画で、河床掘削や橋梁架替等の工事（一部は福井縦貫線幸橋整備事業）が進められている。その工事の最中、足羽川河床より昔の橋梁の基礎と思われる丸太状の木杭が数多く発見された。

丸太が発見された地点は、図-6.1.1に示すように足羽川に架かる水越橋、幸橋、木田橋の架替工事現場であり、表-6.1.1に示すように計15本の丸太が採取された。同表は各丸

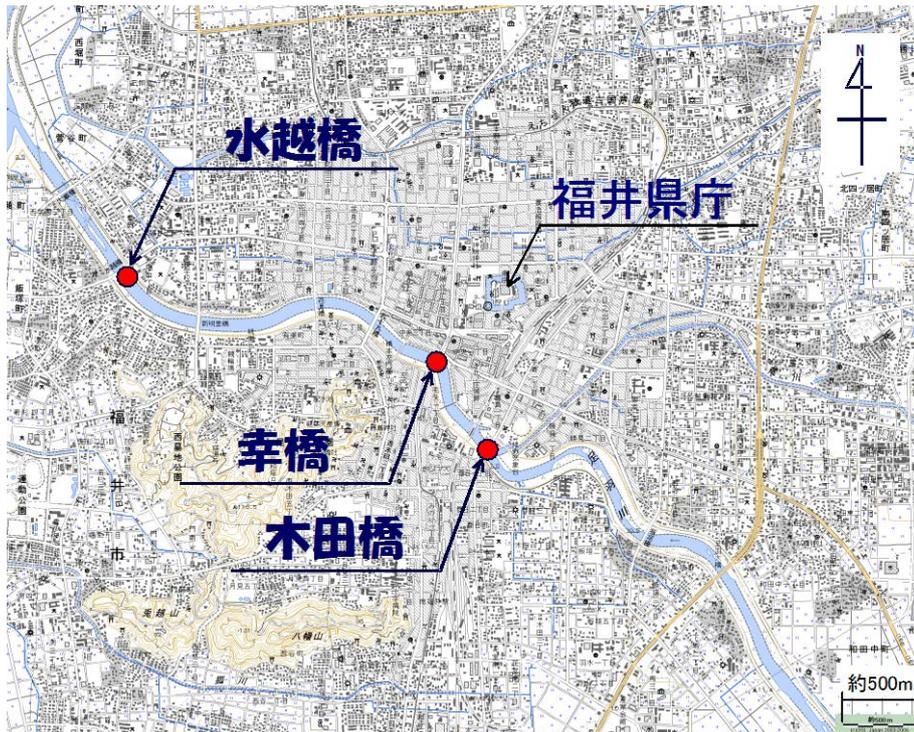


図-6.1.1 丸太の掘出し地点
(国土地理院2万5千分の1地形図「福井」に加筆)

表-6.1.1 丸太の諸元

項目	内 容															
	水越橋上流												幸橋付近		木田橋付近	
採取位置													Asw	Asw	Asw	
木杭No.	Mk01	Mk02	Mk03	Mk04	Mk05	Mk06	Mk07	Mk08	Mk09	Mk10	Mk11	Mk12	Sw01	Sw02	Kd01	
用途 (構造物名称)	橋脚基礎			護岸基礎									橋脚 (IBP7) 基礎		橋脚 (旧銭とり橋) 基礎	
施工時期	1958 (昭和33) 年と推定			1958 (昭和33) 年と推定									1932 (昭和7) 年		1928 (昭和3) 年	
調査 (採取) 時期	2006年			2006年									2006年		2006年	
設置期間	48年と推定			48年と推定									74年		78年	
樹齡 (年)	(114)	(150)	(116)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(37)	(33)	(43)	
樹種鑑定	実施			実施									実施		実施	
樹種	マツ科カラマツ属			マツ科カラマツ属 (樹種鑑定非実施のものも同様と推定)									マツ科マツ属		スギ科スギ属	
丸太全長 (m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	2.7	2.2	3.5
太口 (うち地屯飽) (m)	(3.7)	(3.6)	(3.9)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(2.4)
寸末口直径 (m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30	0.30
法元口直径 (m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	0.18	測定不能 (欠損)
地盤との関係	砂層			砂層									礫質土		多くは粘性土、杭先	
地下水位の位置	杭頭部は地盤より突出し一部河川水位より上に出る			杭頭部は地盤より突出し一部河川水位より上に出る									杭先部は地盤より突出し一部河川水位より上に出る		杭頭より上に河川水位	
水の種別	淡水			淡水									淡水		淡水	
その他	先頭に金属製キャップが付属															

*: 複数の計測結果の平均値。 **: 地中部の長さは土砂付着状況や流水による侵食痕などにより推定

太の設置状況，樹種，寸法などの諸元をまとめたものであり，そのうち9本の丸太の全容を写真-6.1.1に示した．

本章では，これらの丸太基礎の掘出し状況と歴史的背景の調査結果，ピロディン試験や圧縮試験などによる腐朽度の評価結果，および樹種鑑定の結果について報告する．なお，写真-6.1.1には各評価に用いた試験体の採取位置が示されている．

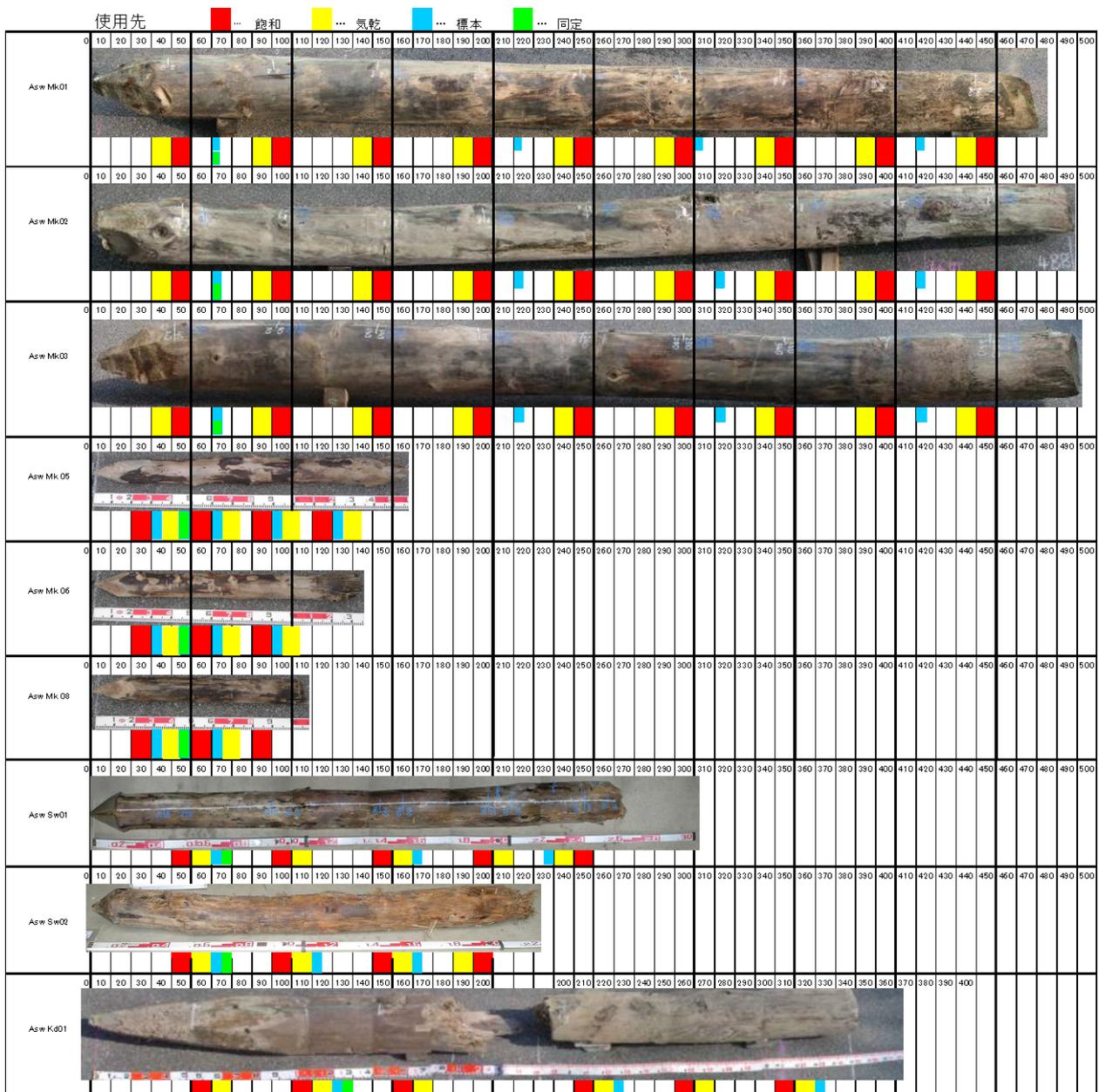


写真-6.1.1 丸太の全容と試験体の採取位置

6.2 丸太堀出し地点の地盤と歴史

6.2.1 水越橋上流地点

水越橋の約 100m 上流側の地点より、直径約 30cm 長さ約 5m の丸太 3 本と直径約 10cm 長さ 1~2m の丸太 9 本が採取された。図-6.2.1 に丸太の採取位置とボーリング位置、図-6.2.2 に地盤柱状図、写真-6.2.1 に採取地点の様子、写真-6.2.2 に丸太の搬入状況を示す。現場付近在住の技術者より、1958（昭和 33）年の橋梁拡張工事の際に設置された仮設歩道用の木橋の基礎杭との証言を得ており、設置期間は 48 年と推定できる。今回、採取された丸太の中では杭径、杭長ともに最も大きく、樹齢も 100 年以上と古かった。図-6.2.2 の柱状図に示す丸太の深度は、杭の観察より河川内の地盤表面位置を推定したものであり、杭頭は約 1m 河床より突出し、杭の大部分は砂層に貫入されていたと考えられる。



図-6.2.1 水越橋での丸太採取位置とボーリング位置

杭設置期間：推定1958年～2006年（推定48年）

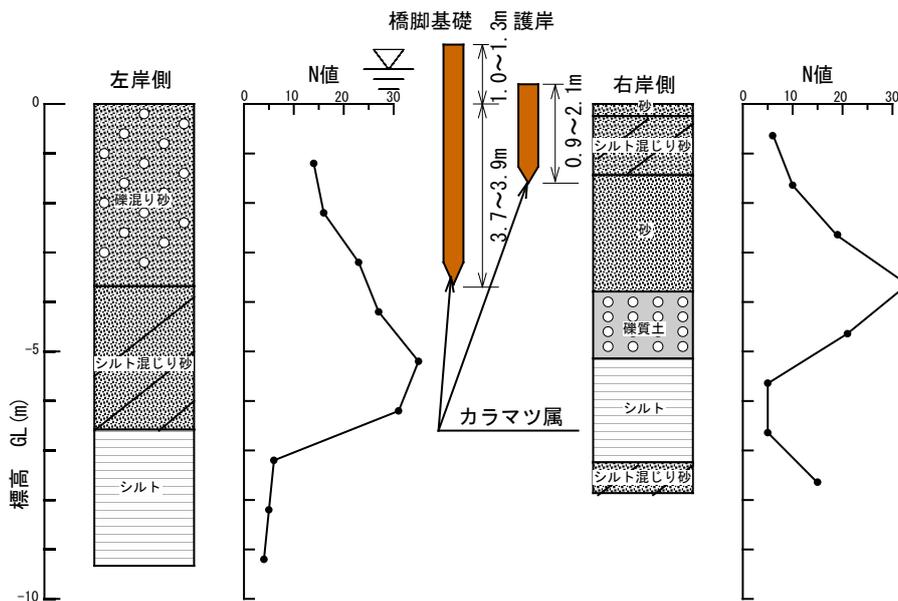


図-6.2.2 水越橋の丸太採取地点の地盤柱状図



写真-6.2.1 水越橋上流における丸太の採取状況



(a) AswMk01



(b) AswMk02



(c) AswMk03



(d) AswMk04~12

写真-6.2.2 水越橋から採取した丸太の搬入状況

6.2.2 幸橋地点

幸橋からは直径約 20cm 長さ約 2m の丸太 2 本が採取された。図-6.2.3 に丸太の採取位置とボーリング位置，図-6.2.4 に地盤柱状図，写真-6.2.3 に採取地点の様子，写真-6.2.4 に丸太の搬入状況を示す。

幸橋は、1862 年（文久 2 年）年に由利公正の提起により木造の橋が架けられ、念願が叶った当時の人々がこれを喜びこの橋を「幸橋」と呼ぶようになった。その後 1887 年（明治 20 年），1905 年（明治 38 年）に木造架け替え工事があり，1932 年（昭和 7 年）に丸太の採取された旧幸橋が鉄筋コンクリート橋として架け替えられている。この時期は、西洋文化と日本文化が融合した独自の文化が華やかだった時期で、このようデザインが橋の

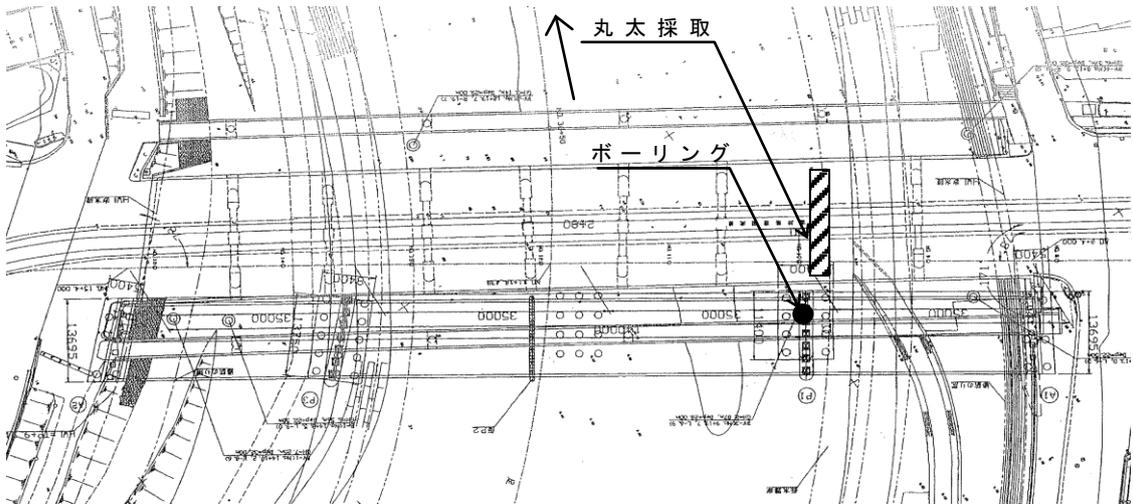


図-6.2.3 幸橋での丸太採取位置とボーリング位置

杭設置期間：1932年～2006年（74年間）

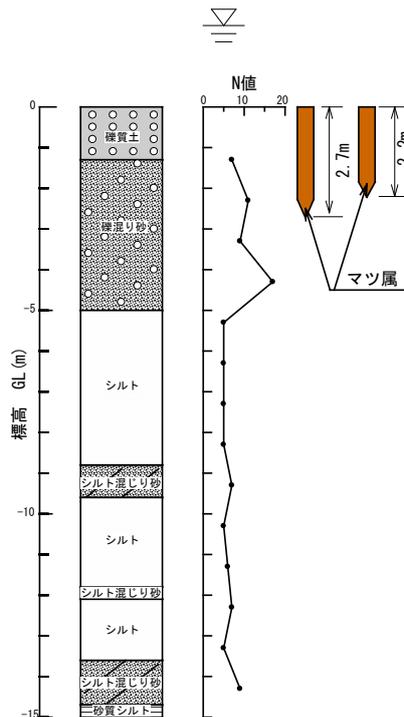


図-6.2.4 幸橋の丸太採取地点の地盤柱状図



写真-6.2.3 幸橋における丸太の採取状況



写真-6.2.4 幸橋から採取した丸太の搬入状況



写真-6.2.5 昭和初期建設当時の幸橋²⁾

形態、高欄、親柱等に取り入れられている¹⁾。この橋は1948年福井地震を経験していることになる。写真-6.2.5に昭和初期建設当時の旧幸橋を示す。

採取された丸太は1932（昭和7）年に架け替えられた橋のP7橋脚基礎として使用されていたものであり、設置期間は74年と推定できる。丸太の採取作業は鋼矢板で川を締切り行われ、写真-6.2.3に示すように河床には多数の丸太が0.9～1.0mの間隔で打設されており、杭長は1.4m～5.7mとばらついていた。なお、採取された丸太の詳細位置は不明である。図-6.2.4の柱状図に示すように、表層付近に礫質土と礫混じり砂層があり、比較的N値も大きいことから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

6.2.3 木田橋地点

木田橋からは直径 30cm 長さ 3.5m の丸太 1 本が採取された。図-6.2.5 に丸太の採取位置とボーリング位置，図-6.2.6 に地盤柱状図，写真-6.2.6 に採取地点の様子，写真-6.2.7 に丸太の搬入状況を示す。

採取位置は現在の木田橋近くに架かっていた 1928（昭和 3）年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり，設置期間は 78 年と推定できる。記録によれば，銭とり橋は 1928 年（昭和 3 年）に森田末松さんが私費 3 万円を投じて有料橋とし，1936 年（昭和 11 年）まで続いたとされている。したがって，この橋も 1948 年福井地震を経験していることになる。

丸太は川のほぼ中央にあり，河川を鋼矢板で締切り河床面まで水位を下げて掘り出され

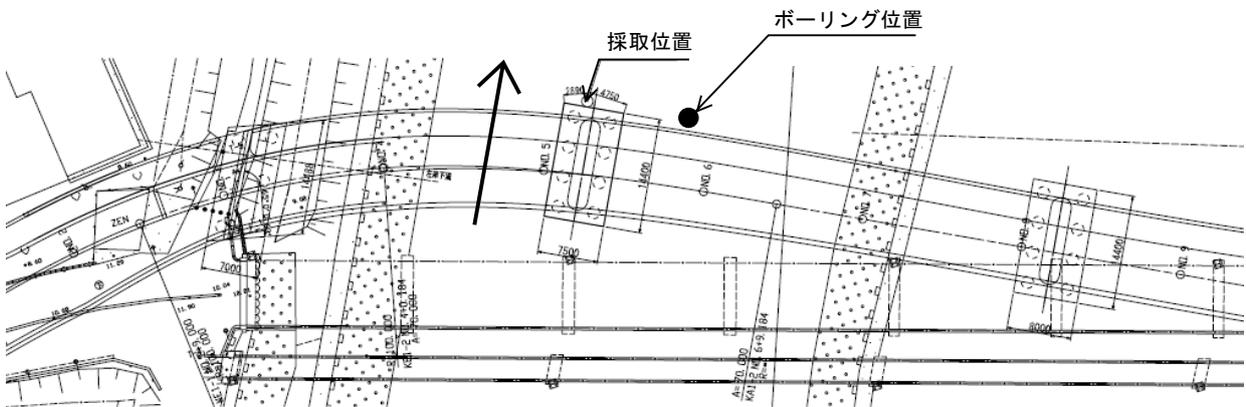


図-6.2.5 木田橋での丸太採取位置とボーリング位置

杭設置期間：1928年～2006年（78年間）

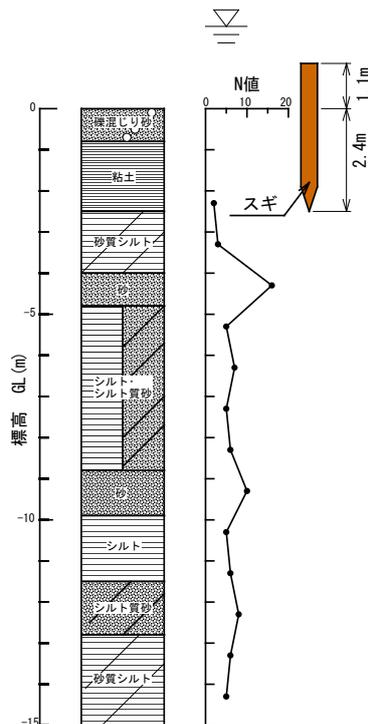


図-6.2.6 木田橋付近の地盤柱状図



写真-6.2.6 木田橋における丸太の採取状況



写真-6.2.7 木田橋から採取した丸太の搬入状況

た．掘出し時には杭頭部約 1.4m が地盤より上に出ていたが，試験室に搬入された丸太を観察すると，杭頭部約 1.1m が長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり，その上部が地盤表面より突出していたと考えられる．図-6.2.6 に示すように杭頭部が 1.1m ほど地盤より突出していたとすると，粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり，杭の大部分は粘土層内にあったと考えられる．杭頭部は水中に没していたと考えられるが，渇水期には水位面より上に存在していたと推測できる．

6.3 樹種鑑定

6.3.1 林業的に生産される樹木の種類について

植物の分類について図-6.3.1に示した. 林業的に生産され木杭に用いられる樹種は, 針葉樹が一般的である. また, 表-6.3.1に日本産裸子植物の一覧を示す. 種名に「マツ」と付いても, 必ずしもマツ属ではないことが分かる.

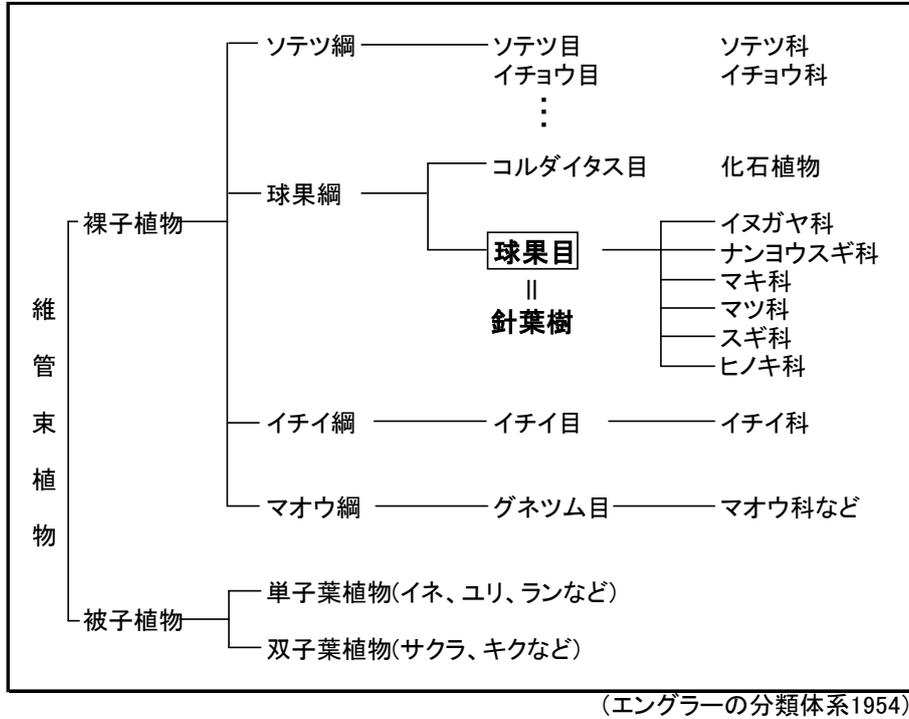


図-6.3.1 植物の系統樹 (文献3)を参考に作成)

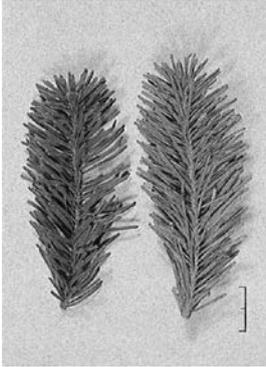
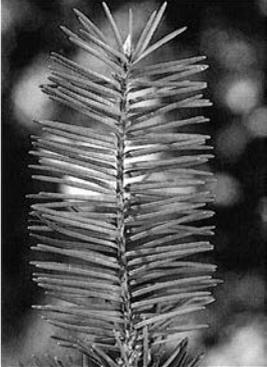
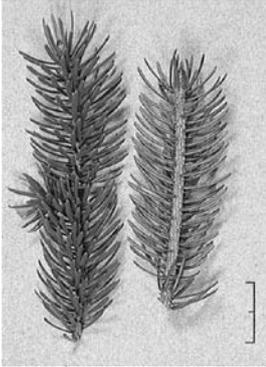
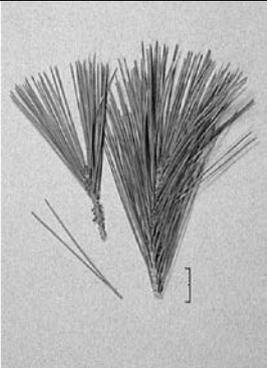
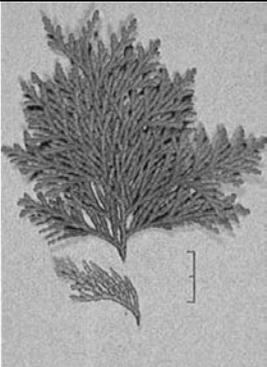
表-6.3.1 日本産の裸子植物（広義の針葉樹）（文献3）を参考に作成）

科	属	種	変種・品種
ソテツ科	ソテツ属	ソテツ	
イチイ科	イチイ属	イチイ	キャラボク
	カヤ属	カヤ	チャボガヤ
イヌガヤ科	イヌガヤ属	イヌガヤ	ハイイヌガヤ、チョウセンマキ
マキ科	マキ属	イヌマキ	ラカンマキ
		ナギ	ホソバナギ
マツ科	モミ属	ウラジロモミ	—
		オオシラビソ	
		シラビソ	—
		アカトドマツ	アオトドマツ
		モミ	—
	ツガ属	ツガ	—
		コメツガ	
	トガサワラ属	トガサワラ	—
	トウヒ属	イラモミ	—
		ハリモミ	—
		アカエゾマツ	—
		エゾマツ	トウヒ
		ヒメバラモミ	アズサバラモミ
		ヒメマツハダ	—
	ヤツガタケトウヒ	—	
	カラマツ属	カラマツ	アカミカラマツ
	マツ属	クロマツ	ニシキマツ
		リュウキュウマツ	—
		アカマツ	ジャノメアカマツ、タギョウショウ
		ハイマツ	—
		ヒメコマツ	キタゴヨウ
		ハッコウダゴヨウ	—
		(タカネゴヨウ)	ヤクタネゴヨウ
チョウセンゴヨウ	—		
スギ科	コウヤマキ属	コウヤマキ	—
	スギ属	スギ	セツカンスギ、ヨレスギなど
ヒノキ科	ヒノキ属	ヒノキ	アオノクジャクヒバ、シダレヒノキなど
		サワラ	オウゴンシノブヒバ、イトヒバなど
	ネズコ属	ネズコ	—
	アスナロ属	アスナロ	フイリアスナロ、ヒノキアスナロ
	ビャクシン属	ネズミサシ	—
		ハイネズ	—
		(セイヨウネズ)	リシリビャクシン、ミヤマネズ、ホンドミヤマネズ
		シمامロ	オキナワハイネズ
イブキ		ミヤマビャクシン、カイズカイブキなど	
7科	17属	39種(41種)	—

・タカネゴヨウ(中国・台湾)とセイヨウネズ(ヨーロッパ)は日本列島に自生しない。

針葉樹は果実（マツカサ）の形態により分類されるが、同じ属では葉の形態も似通っている。表-6.3.2に、林業的に生産される代表的な針葉樹について、分類ごとに写真を示した。

表-6.3.2 代表的な針葉樹の分類および葉の形態
(種名の*は、写真を掲載した種。写真の縦棒は2cmを表す。)

科	マツ科		
属	モミ属	トガサワラ属	トウヒ属
種(例)	トドマツ*, モミなど	トガサワラ, ベイマツ* (ダグラスファー) など	アカエゾマツ, エゾマツ*, ドイツトウヒなど
写真			
科	マツ科		
属	カラマツ属	マツ属	
種(例)	カラマツ*, グイマツ (ロシアカラマツ) など	クロマツ, リュウキュウ マツ, アカマツ*, ヒメ コマツなど	
写真			
科	スギ科	ヒノキ科	
属	スギ属	ヒノキ属	
種(例)	スギ*	ヒノキ*, サワラなど	
写真			

写真の出典：ベイマツ／参考文献³⁾，それ以外／参考文献⁴⁾

以下に、丸太基礎に用いられる代表的な樹種の性質について示す。

表-6.3.3 丸太基礎に用いられる代表的な樹種の分布および木材の性質
(カラマツとグイマツを除く樹種の「曲げヤング係数」から「衝撃曲げ吸収エネルギー」までは文献6, その他は文献5より整理)

科名 (科の学名)	マツ科 (PINACEAE)					スギ科 (TAXODIACEAE)
属名 (属の学名)	トガサワラ属 (<i>Pseudotsuga</i>)	カラマツ属 (<i>Larix</i>)		マツ属 (<i>Pinus</i>)		スギ属 (<i>Cryptomeria</i>)
種名 (別名)	バイマツ (ダグラスファー)	カラマツ	グイマツ (シトマツ, ロシアカラマツ)	アカマツ	クロマツ	スギ
分布	北米西部, 太平洋沿岸地方	日本特産. 本州北部～中部に自生. 北海道の主要な植栽樹種	樺太, 千島, カムチャツカ, 沿海州, 中国東北, シベリア	本州・四国・九州(屋久島まで)・朝鮮に自生	本州・四国・九州・朝鮮南部(済州島)	日本特産. 本州・四国・九州(屋久島まで)
木材概要	堅硬で長大材が得られる. 材質はスギとマツの中間, 強度はマツに匹敵する.	針葉樹中比較的重硬.	堅硬強靱. その他材質はカラマツに似て一層重剛.	概して強い.	アカマツに比べ, 重硬で, 幹の曲がりが多く, 辺材, 樹脂分が多い.	加工工作容易.
気乾比重	0.55	0.50	0.55	0.52	0.54	0.38
絶乾比重	0.51	0.48	—	0.48	0.51	0.35
曲げヤング係数 (kN/mm ²)	12.5	10.0	—	11.5	10.5	7.5
縦圧縮強さ (N/mm ²)	42	45	—	45	45	35
縦引張り強さ (N/mm ²)	103	85	—	135	135	90
曲げ強さ (N/mm ²)	71	80	—	90	85	65
せん断強さ (N/mm ²)	7.2	8.0	—	9.5	9.0	6.0
衝撃曲げ吸収エネルギー (J/cm ²)	5.9	4.5	—	5.0	5.0	3.5
耐久・保存性	耐久・保存性は高い	心材の水中之での耐久性には定評がある.	—	心材は水中では保存性が高い. 辺材への防腐剤の注入は容易.	中庸だが水湿によく耐える. 辺材の防腐剤注入は最も容易.	心材において中庸, 辺材は低い. 防腐剤の浸透は辺材において比較的容易.
主な用途	建築(とくに大構造物用材), 土木(電柱・橋梁・枕木), 車両, 船舶, 合板, 製紙パルプ等	土木(坑木・電柱・枕木・橋梁), 建築, 船舶, 製紙パルプ, 間伐材の地形杭・農漁業用・堤防用材等	船舶, 家具, 建築, 電柱, 橋梁, 枕木, 器具などカラマツに準ずる.	建築, 土木(橋梁・枕木・坑木・樋), 船舶, 車両, 家具(仏壇), 器具(曲物・桶・樽・棺等), 包装, 薪炭等	アカマツと大差はない.	非常に広汎. 建築(柱・板類一般)はもとより, 建築, 土木(電柱), 船舶, 車両, 家具, 包装, 器具(桶樽・下駄・箸)等

6.3.2 樹種鑑定の方法と結果

(1) 鑑定対象

今回の調査では、木田橋付近にて橋脚基礎 1 本（試料番号 AswKd01），幸橋付近にて橋脚基礎 2 本（AswSw01～02），水越橋上流にて橋脚基礎 3 本（Asw01～03）および護岸基礎の杭丸太 9 本（Asw04～12）が掘り出された。木田橋付近および幸橋付近にて掘り出された丸太は 3 本とも鑑定を実施したが、水越橋付近にて採取された丸太については、外観より全て同一の樹種と推定されたため、橋脚基礎は 3 本のうち 2 本、護岸基礎は 9 本のうち 2 本について樹種鑑定を実施した。

(2) 樹種鑑定方法

採取した丸太を厚さ数 cm の輪切りに切断し、その一部を解剖学的性質に基づく樹種鑑定に供した。この方法では、基本的には種名までは特定できず、属名（種の一段階上の分類単位）までの鑑定となる。樹種鑑定は、独立行政法人森林総合研究所に依頼し、同研究所 木材特性研究領域 組織材質研究室 農学博士 安部久氏により実施された。作業手順を以下に示す。

- (a) 木口面の一部をカッターナイフで削り、木材の木口面（横断面）、柁目面（放射断面）、板目面（接線断面）の 3 断面を正しく見定める。次にこの 3 断面から出来るだけ薄く、厚さむらのないように切片を削り取る。
- (b) 削り取った切片をスライドガラス上に並べ、数滴のグリセリンを垂らし、カバーガラスをかぶせる。
- (c) 150 度のホットプレートで数分間熱し、気泡を出す。
- (d) 各面の切片を光学顕微鏡で検鏡する。各面において、特徴を見定めることにより樹種を鑑定した。識別のポイントは次のとおり。
 - ・木口面：年輪の移行の緩急、樹脂道、樹脂細胞の存否
 - ・柁目面：水平樹脂道の存否、らせん肥厚の存否
 - ・板目面：分野壁孔の形、放射仮道管の存否、仮道管壁の形状、有縁壁孔の形状と配列様式

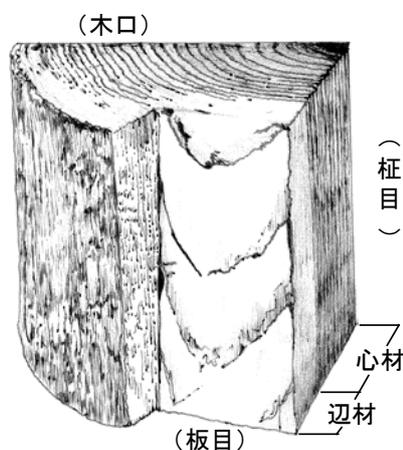


図-6.3.2 木材の 3 断面（文献 7）を参考に作成）

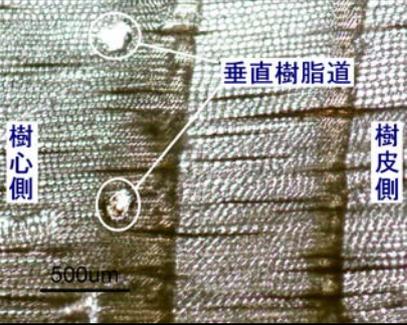
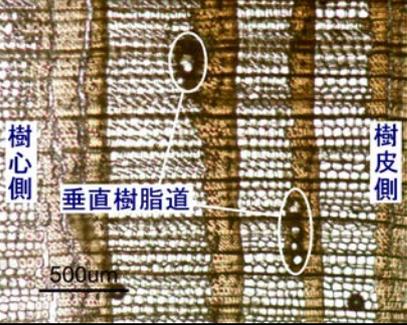
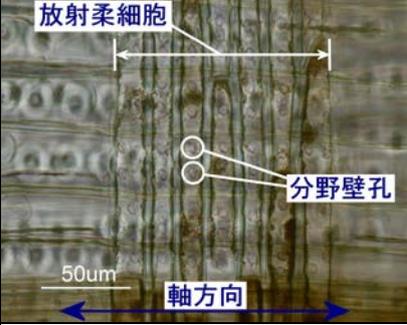
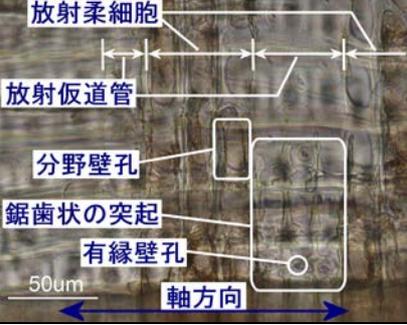
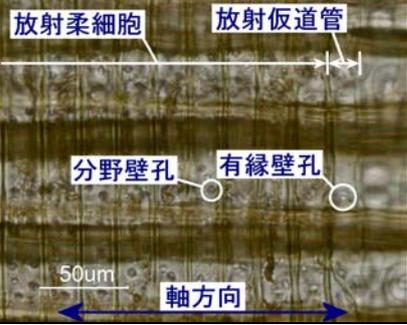
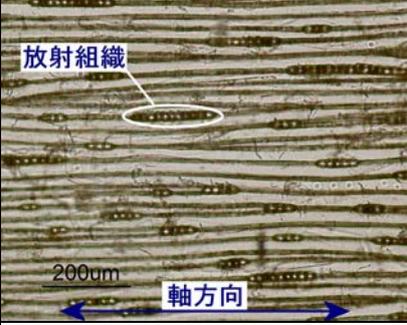
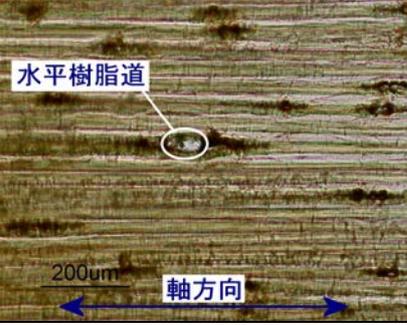
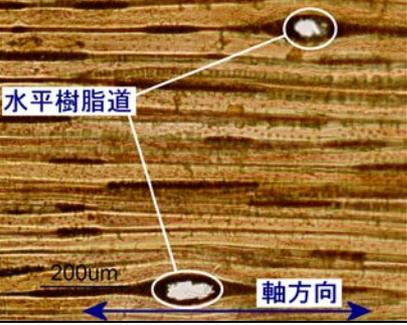
(3) 鑑定結果

表-6.3.4 に鑑定結果を、表-6.3.5 に各樹種の識別点を顕微鏡写真とともに示す。樹種鑑定の結果、木田橋付近で採取されたものはスギ（スギ属は一属一種であるため）、幸橋付近のものはマツ属の一種（アカマツかクロマツだと思われる）、水越橋上流のものはカラマツ属の一種（年輪が密であることからロシアカラマツであると思われる）であった。

表-6.3.4 樹種鑑定結果

採取地点	試料No.	太さ (末口直径)	樹種鑑定結果：和名／学名	
			科名	属名
木田橋付近	AswKd01	0.30m	スギ科／TAXODIACEAE	スギ属／ <i>Cryptomeria</i>
幸橋付近	AswSw01	0.17m	マツ科／PINACEAE	マツ属(<i>Sylvestris</i> 節)／ <i>Pinus</i> (sect. <i>Sylvestris</i>)
	AswSw02	0.17m	マツ科／PINACEAE	マツ属(<i>Sylvestris</i> 節)／ <i>Pinus</i> (sect. <i>Sylvestris</i>)
水越橋上流	AswMk01	0.31m	マツ科／PINACEAE	カラマツ属／ <i>Larix</i>
	AswMk02	0.27m	マツ科／PINACEAE	カラマツ属／ <i>Larix</i>
	AswMk05	0.11m	マツ科／PINACEAE	カラマツ属／ <i>Larix</i>
	AswMk08	0.11m	マツ科／PINACEAE	カラマツ属／ <i>Larix</i>

表-6.3.5 各樹種の識別点一覧

	スギ属 木杭 No. AswKd01	マツ属 (Sylvestris 節) 木杭 No. AswSw01	カラマツ属 木杭 No. AswMk01
木口面での識別点	 <ul style="list-style-type: none"> 年輪の移行がやや急である。 垂直樹脂道が存在しない。 樹脂細胞が存在する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 年輪の移行が急である。 垂直樹脂道が存在する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 年輪の移行が急である。 垂直樹脂道が存在する。
柁目面での識別点	 <ul style="list-style-type: none"> 分野壁孔がスギ型である。 放射仮道管が存在しない。 	 <ul style="list-style-type: none"> 分野壁孔が窓型である。 放射仮道管が存在し, 仮道管壁に鋸歯状の突起が存在する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 分野壁孔がトウヒ型である。 放射仮道管が存在する。
板目面での識別点	 <ul style="list-style-type: none"> 水平樹脂道が存在しない。 	 <ul style="list-style-type: none"> 水平樹脂道が存在する。 	 <ul style="list-style-type: none"> 水平樹脂道が存在する。

6.4 採取された丸太の健全性調査

6.4.1 目視による腐朽度評価

(1) 評価方法

表-6.4.1 に示す「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準（JIS K 1571:2004）」に従い、写真-6.4.1 に示すように目視により丸太の腐朽度を判定した。同表に示す基準を参考に、A, B, C の 3 名の評価者が丸太の状況を目視で観察し各自で判定を行った。

なお、水越橋上流で護岸基礎として使用されていた丸太 9 本（AswMk04～12）については、腐朽の程度についてはいずれも同程度のように見えたので、割れていない（全周が残っている）ことおよび大きな節（こぶ）が無いことを基準として、AswMk05, 06, 08 の 3 本を試験対象とした。後述する強度試験等もこの 3 本について実施した。

表-6.4.1 腐朽度の評価基準⁸⁾

腐朽度	観察状態
0	健全
1	部分的に軽度の腐朽
2	全面的に軽度の腐朽
3	2の状態の上に部分的に激しい腐朽
4	全面的に激しい腐朽
5	腐朽によって形が崩れる



写真-6.4.1 目視観察の状況

(2) 評価結果

図-6.4.1～図-6.4.9 に AswMk01, AswMk02, AswMk03, AswMk05, AswMk06, AswMk08, AswSw01, AswSw02, AswKd01 の腐朽度評価の結果を示す。それぞれの判定の標高は各区間の中央値とし、実線は 3 者の平均値である。同図より、GL-1m 以深では評価度の平均値が 1 以下となっており、健全であることがわかる。

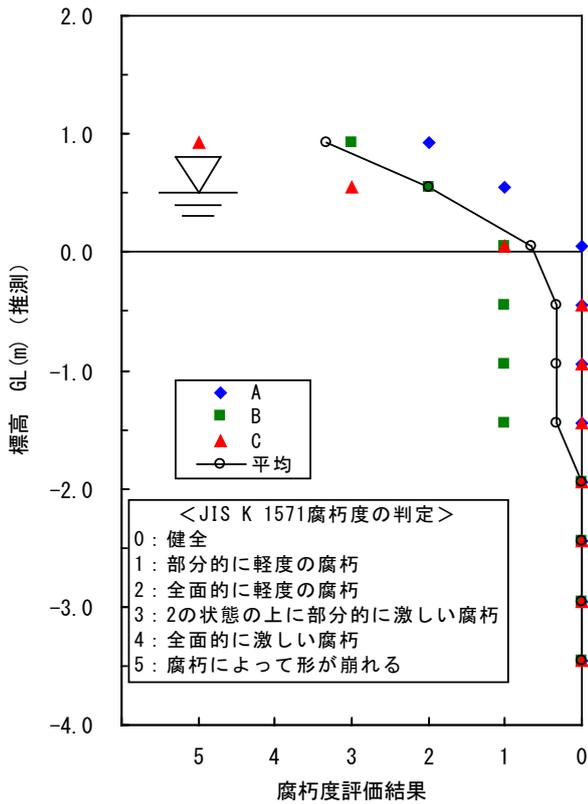


図-6.4.1 腐朽度評価結果

(AswMk01:水越橋上流地点, カラマツ属)

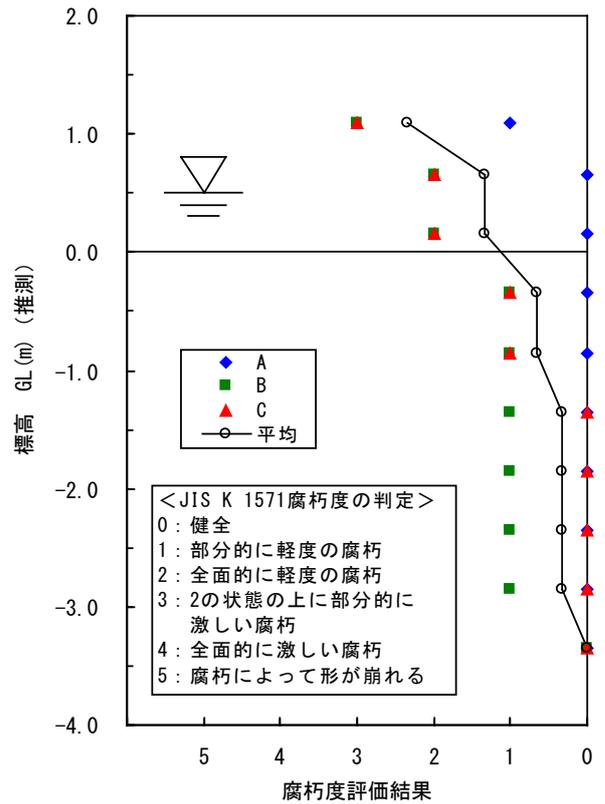


図-6.4.2 腐朽度評価結果

(AswMk02:水越橋上流地点, カラマツ属)

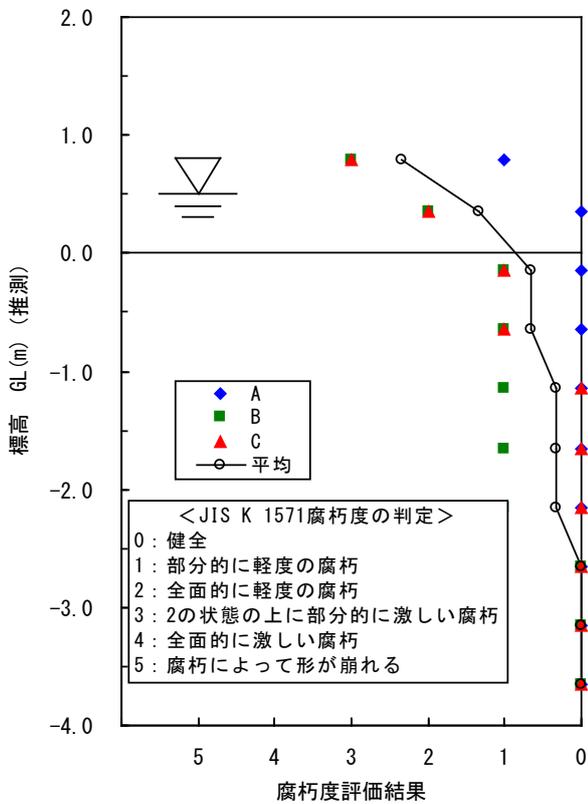


図-6.4.3 腐朽度評価結果

(AswMk03:水越橋上流地点, カラマツ属)

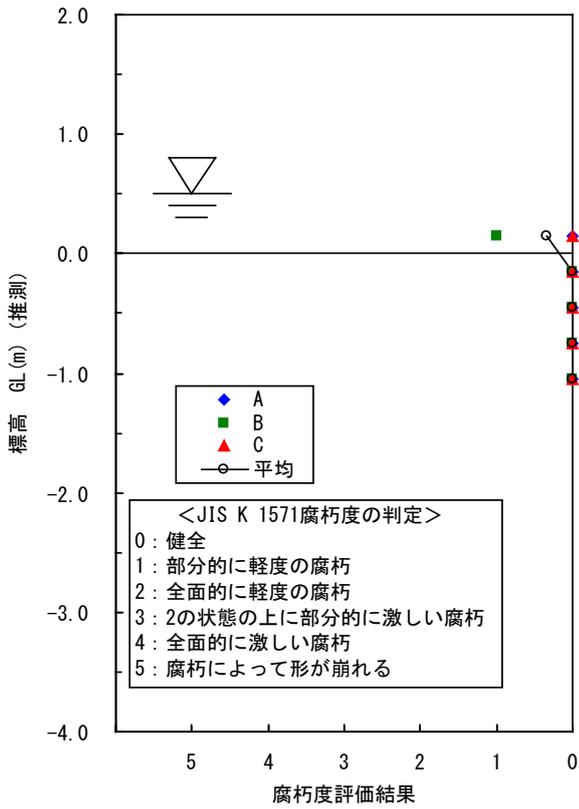


図-6.4.4 腐朽度評価結果

(AswMk05:水越橋上流地点, カラマツ属)

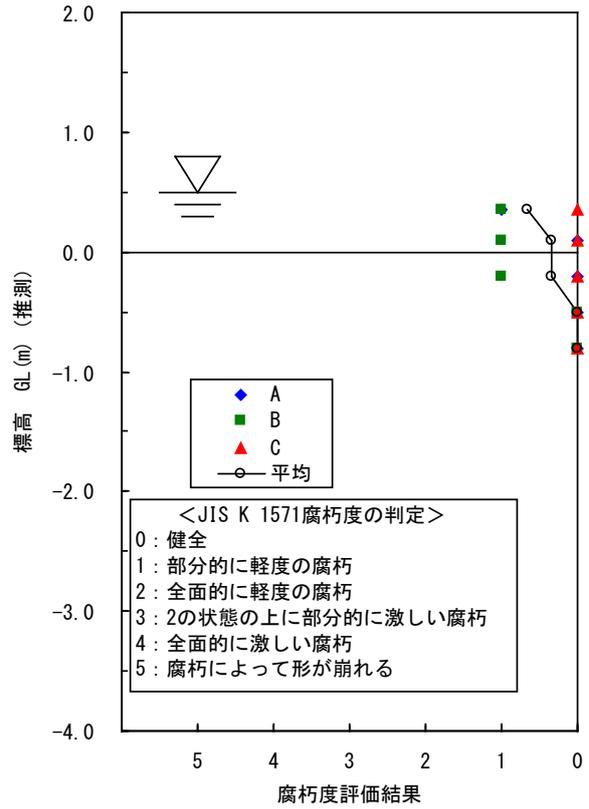


図-6.4.5 腐朽度評価結果

(AswMk06:水越橋上流地点, カラマツ属)

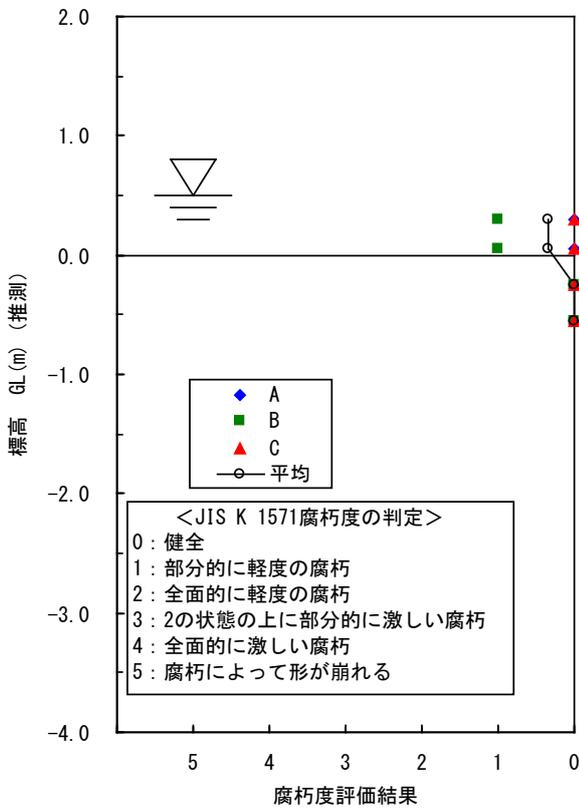


図-6.4.6 腐朽度評価結果

(AswMk08:水越橋上流地点, カラマツ属)

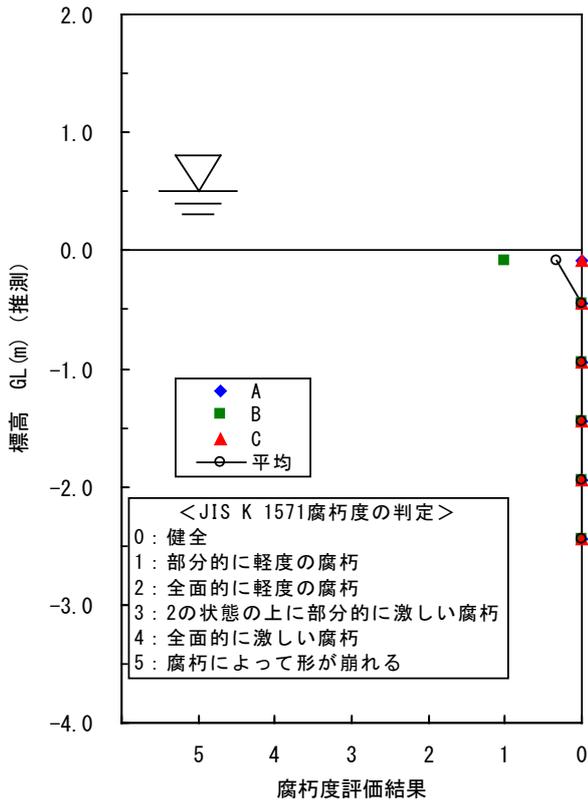


図-6.4.7 腐朽度評価結果
(AswSw01:幸橋地点, マツ属)

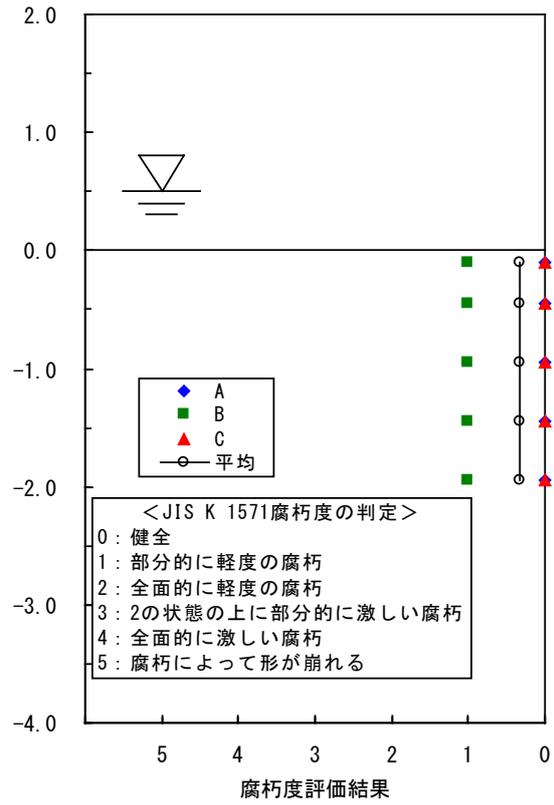


図-6.4.8 腐朽度評価結果
(AswSw02:幸橋地点, マツ属)

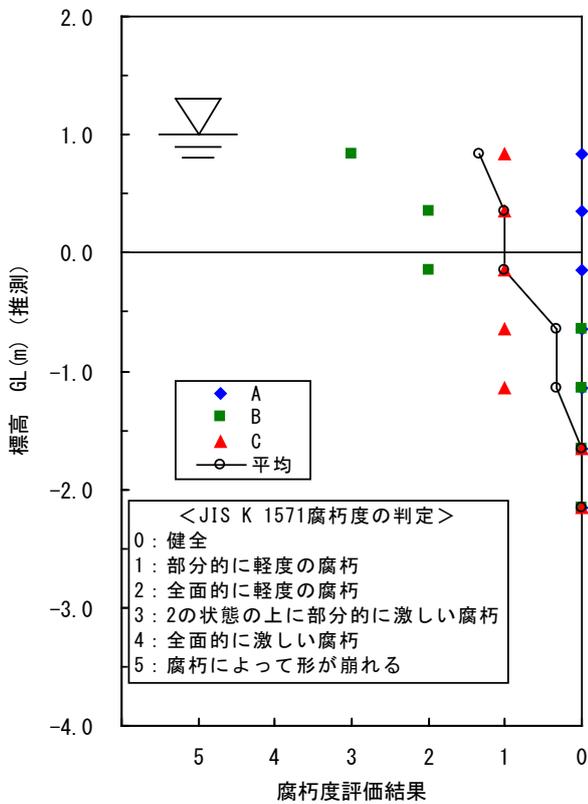


図-6.4.9 腐朽度評価結果
(AswKd01:木田橋地点, スギ属)

6.4.2 強度試験のための前処理

(1) 丸太の切断

丸太の切断面を整合する位置に合わせ，丸太の長手方向に水平に基準となる線をペイントマーカなどで引いた．杭をまず 50cm 間隔に切断した．つぎに，切断面からそれぞれ上方 10cm および 20cm の位置で切断した．これにより厚さ 10cm の円盤が 50cm ピッチにつき 2 枚作製される．また，切断した各断片（円盤以外を含む）に当該丸太の番号および全体の中での部位が分かる番号と上下の印をペイントマーカで丸太側面に書いた．以下に各丸太への番号の付け方を示す．

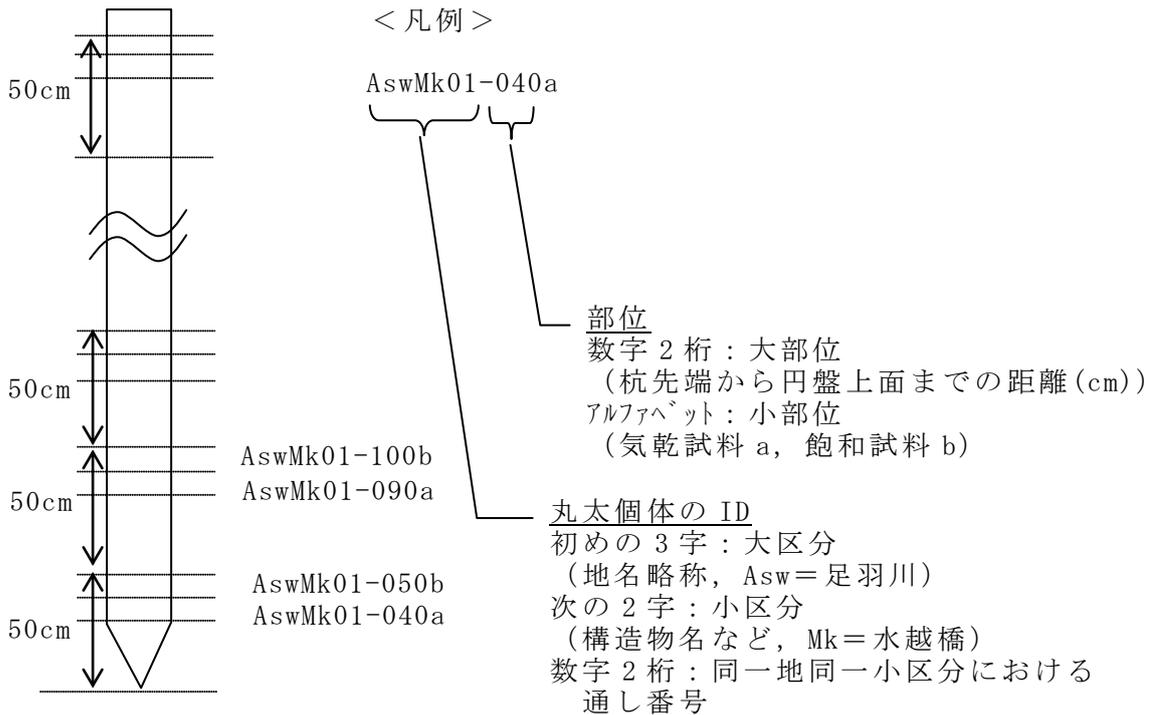


図-6.4.10 丸太個体および断片への番号の付け方

a の円盤は室内に放置し気乾状態とし，b の円盤は後述する方法で飽和（飽水）化した．
 a の円盤はひび割れを防ぐため，芯までチェーンソーで切れ目を入れた．また，各木材について円周面と円盤面の写真を撮影し，断片の脇には例えば「AswMk01-030-040」と書いた名札とスケールを置いた．

各丸太における円盤採取位置は，前出の写真-6.1.1 に示した．



写真-6.4.2 木材切断状況

(2) 飽和化

地中に埋設された木材は、湿った条件下であることが多いと考えられる。木材の強度は含水率により影響されることから、地中での強度を検討するために木材を湿潤状態にて試験することとし、bの記号で示す円盤については飽和化（飽水化）を実施した。

飽和化は、次のように行った。まず、図-6.4.11に示す真空チャンバーに厚さ約10cmの輪切り状にした木材を入れ、チャンバー内を真空状態にして半日程度放置する。つぎに、チャンバー内を真空状態に保ったまま十分に脱気した水をチャンバー下部より流し込み、木材を十分に脱気水に浸す。さらに、この状態で半日以上真空状態を保つ。その後、上のバルブを開放しチャンバー内を大気圧に戻す。この時に木材が浮き上がるようであれば再度バルブを閉じ、チャンバー内を真空状態に保ち、さらに数日間放置する。大気圧に戻した状態で、さらに3日以上水に浸したまま放置する。なお、一度飽和化した木片は試験に供するまで別容器にて水に浸したまま保管した。また、圧縮試験用供試体はこのように飽和化した木片より切り出し、試験まで水に浸して保管した。

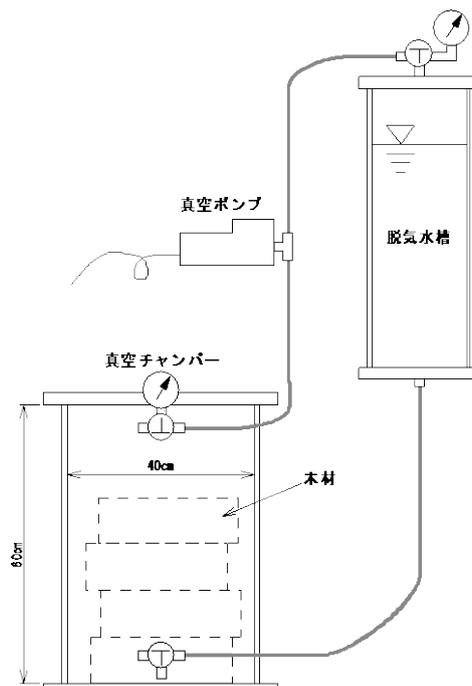


図-6.4.11 木材の飽和化に用いた真空チャンバー

6.4.3 ピロディン貫入試験

(1) ピロディン貫入試験の概要

ピロディンとは一定に圧縮されたばねの力で鋼製のピンを木材に突き刺し、そのピンの貫入深さを測定することにより、木材の密度や腐朽・劣化を判定する試験機である。貫入量は 40 mm まで測定可能であり、一般に半径方向（年輪の中心に向かう方向）に測定した場合において、30～35mm 以上で腐朽・劣化していると判断される。写真-6.4.3 にピロディン試験機を示す。



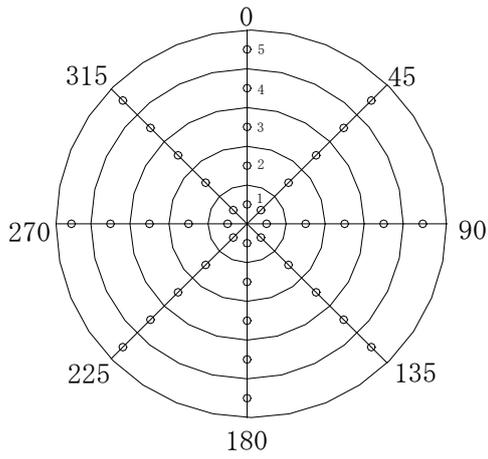
写真-6.4.3 ピロディン試験機

(2) 円盤面の試験

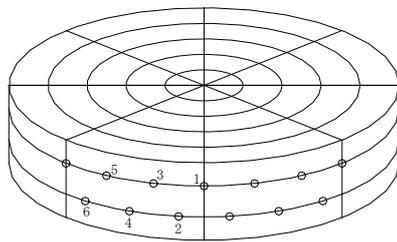
円盤面においてピロディンを貫入する位置は杭頭方向を上とした場合の円盤上面である。円盤の中心から外周方向へ 45 度の角度ごとに 1 本、計 8 本の直線を引き、8 本の各直線について中心から外側までを 10 等分した場合の、中心から 1, 3, 5, 7, 9 番目の位置に印を付け、計 40 点を試験位置とした。なお、これらの点は中心側から昇順で番号をつけた（図-6.4.12 および写真-6.4.3 参照）。まず、40 点の試験位置にペイントマーカーで印をつけ、それを写真に撮影した後に試験を実施した。なお、腐朽やひび割れ等による異常部がある場合は測定点より除外し、径の小さい丸太の場合には図-6.4.13 のように測定点を減らして計測を行った。

(3) 円周方向の試験

円盤面の試験において記した線によりできた円周面の 8 区画を利用して、各区画で上下に 3 点ずつ計 6 点、円周全体では計 48 点の試験位置を設定し試験を行った。まず、円盤面の上下から各 3cm の位置の円周面上に 2 本の線を引き、その線上に隣り合う試験位置同士の距離が均等になるよう 48 点の試験位置を設定し、ペイントマーカーで印をつけた。そして、試験位置を 4 方向から写真撮影した後に試験を実施した（図-6.4.12 および写真-6.4.4 参照）。測定点はひび割れ等異常部を避けた。なお、腐朽やひび割れ等による異常部がある場合は測定点より除外し、径の小さい丸太の場合には図-6.4.13 のように測定点を減らして計測を行った。

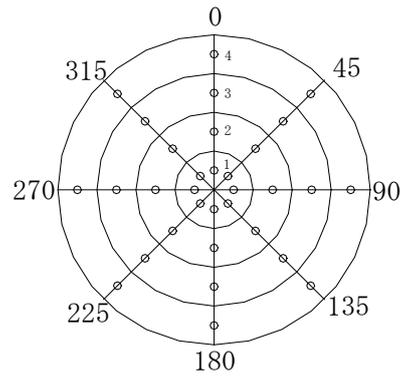


(a) 円盤面

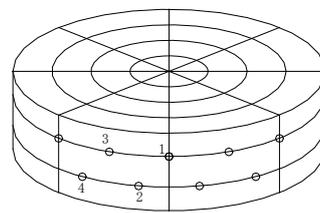


(b) 円周面

図-6.4.12 測定点の説明図



(a) 円盤面



(b) 円周面

図-6.4.13 測定点の説明図

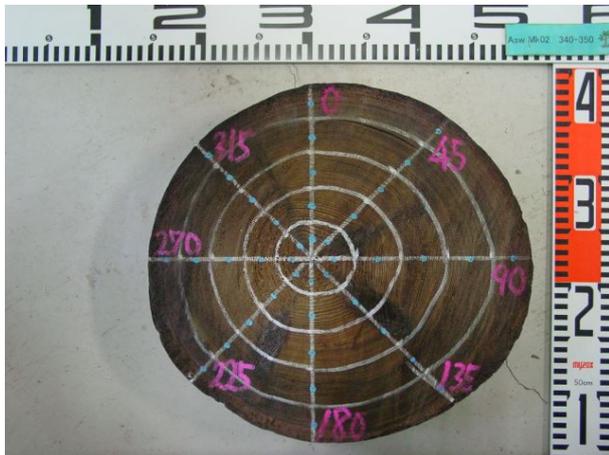


写真-6.4.3 円盤面での測定位置

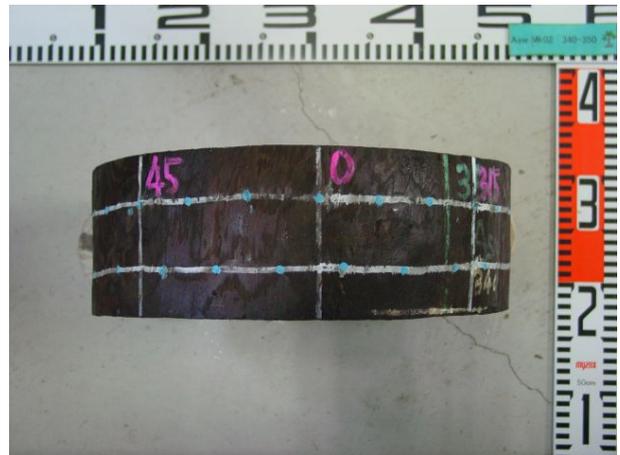


写真-6.4.4 円周面での測定位置



写真-6.4.5 ピロディン試験の実施状況

(4) ピロディン試験の結果

各木杭の深さ方向のピロディン貫入量について、飽和資料および気乾資料それぞれの結果をまとめたものを図-6.4.4 から図-6.4.22 に示す。各グラフには見やすさのために腐朽の目安となる貫入値 30mm の線を引いた。同図から、半径方向の貫入量は気乾状態および飽和状態の双方においていずれの木杭においても基本的に 30mm を下回っており、腐朽していないことが明らかとなった。軸方向の貫入値は 30mm を超えている場合があるが、これは腐朽していない木材においても木材の軸に近い部分などでは一般的な値である。また写真-6.4.6 から写真-6.4.19 に各木杭の代表的な円盤の写真を示した。

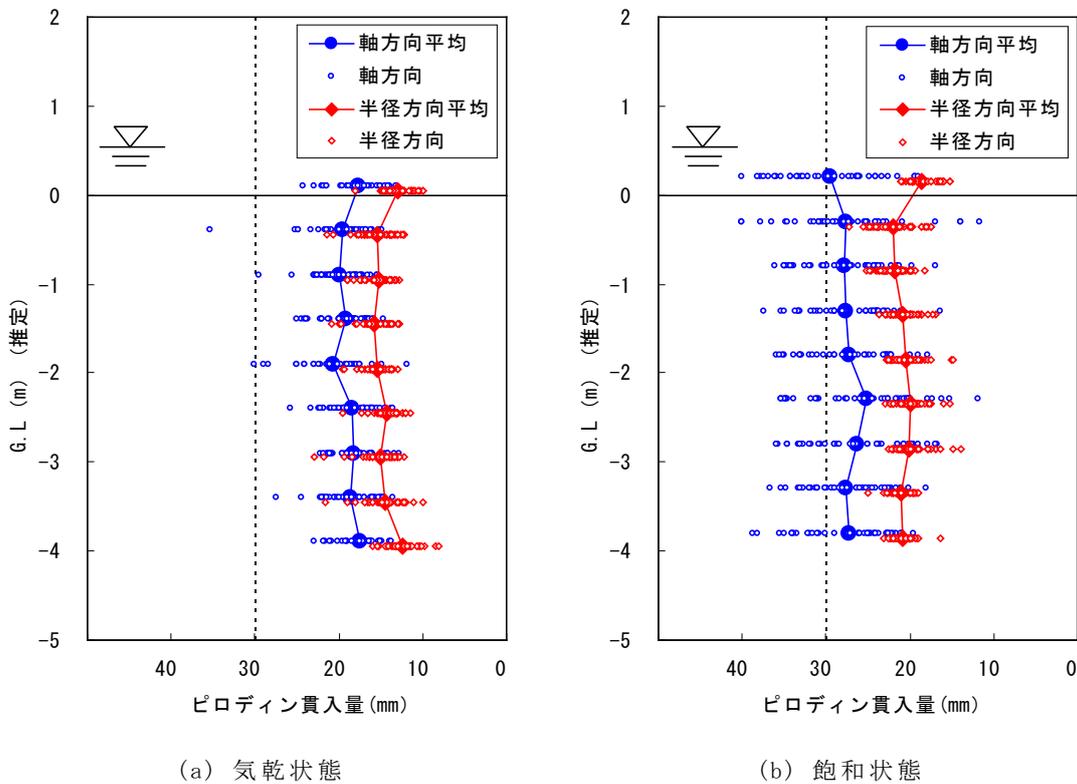


図-6.4.14 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk01:水越橋上流地点, カラマツ属)

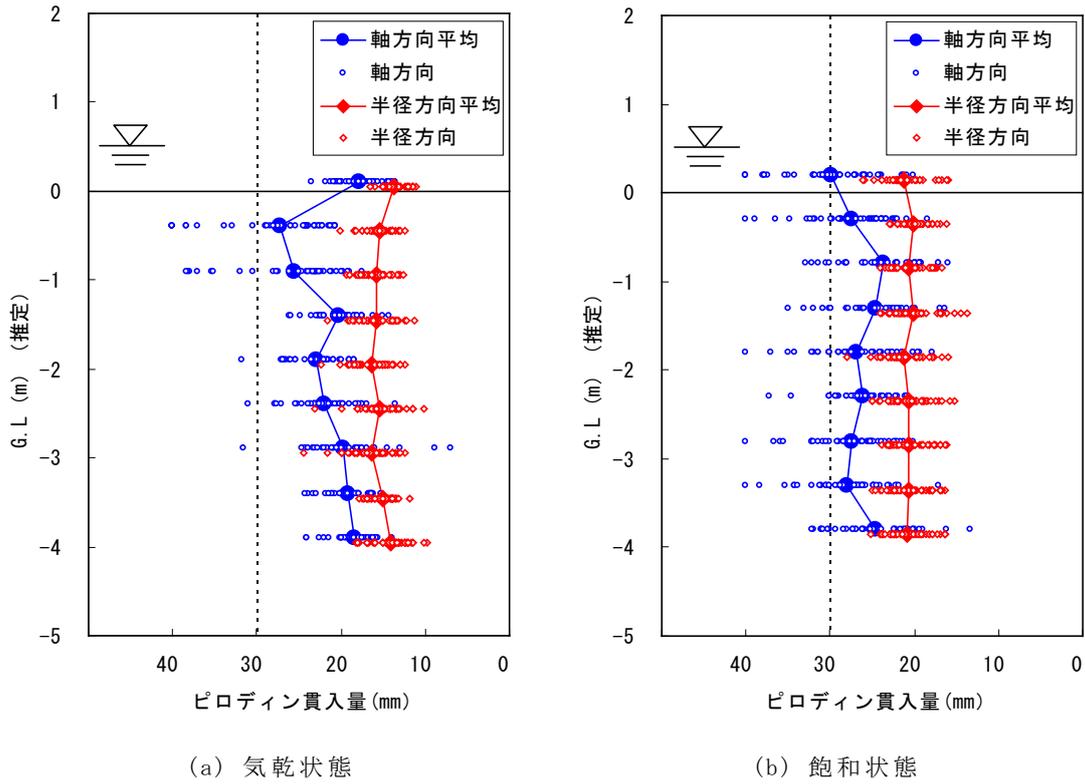


図-6.4.15 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk02:水越橋上流地点, カラマツ属)

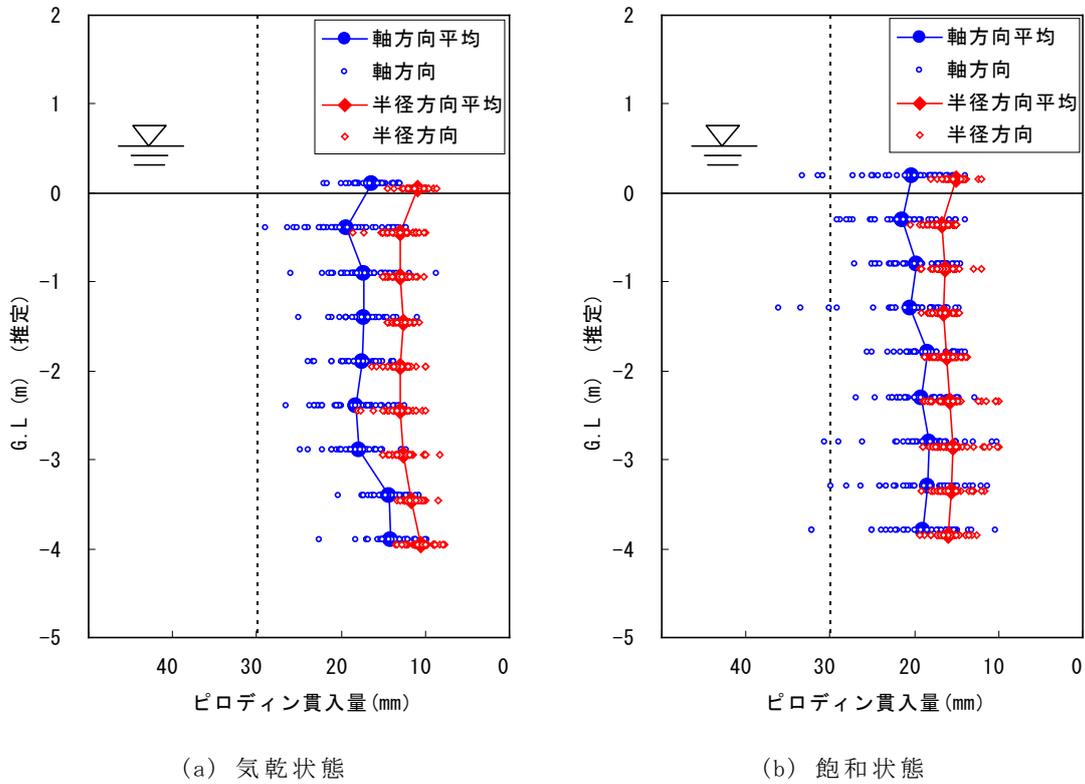


図-6.4.16 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk03:水越橋上流地点, カラマツ属)

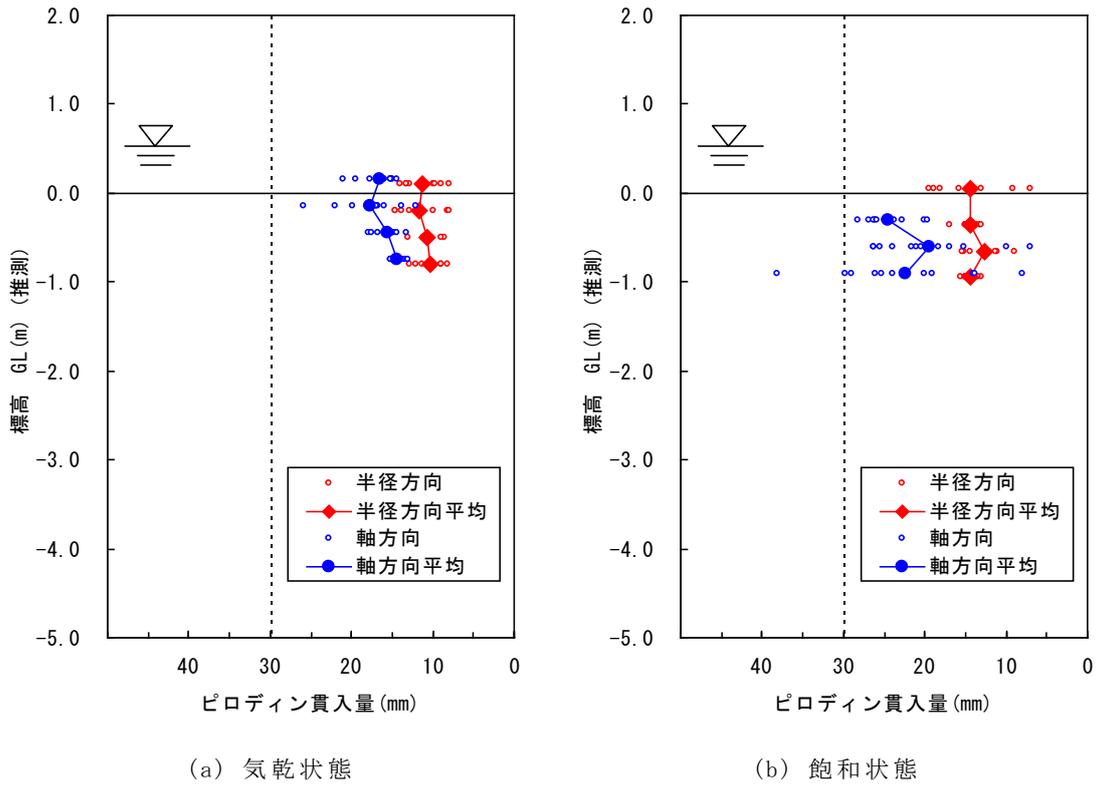


図-6.4.17 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk05:水越橋上流地点, カラマツ属)

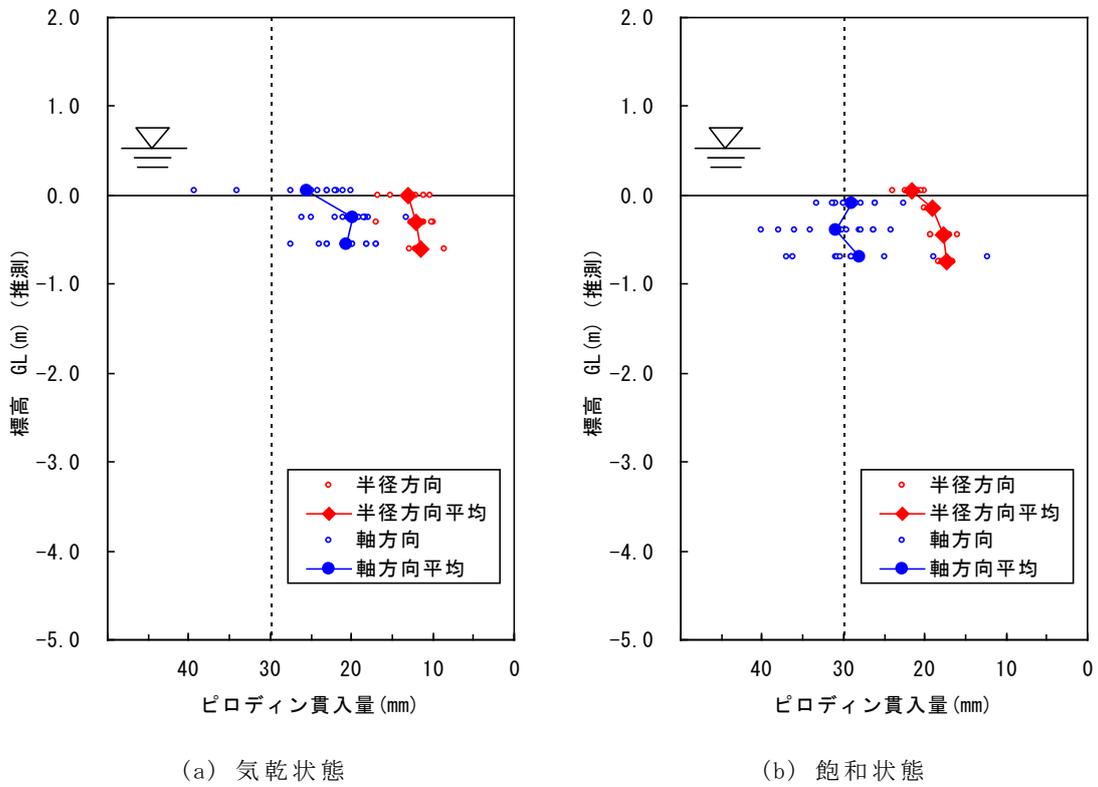


図-6.4.18 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk06:水越橋上流地点, カラマツ属)

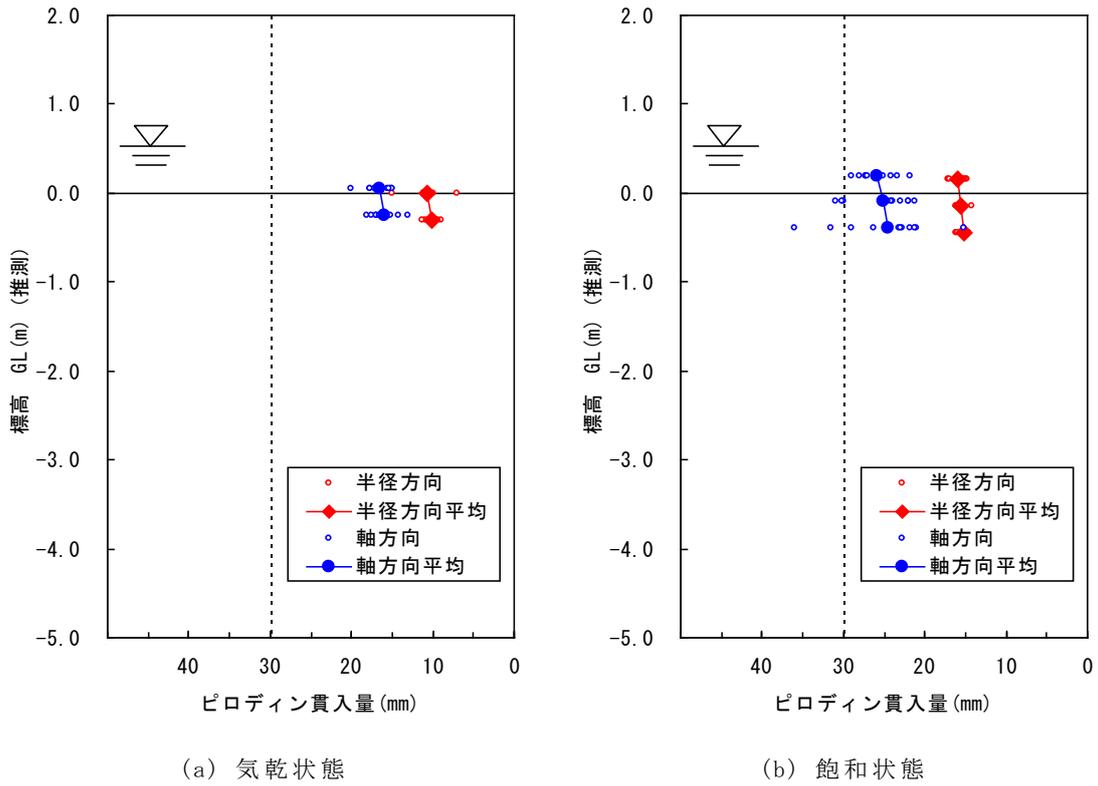


図-6.4.19 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswMk08:水越橋上流地点, カラマツ属)

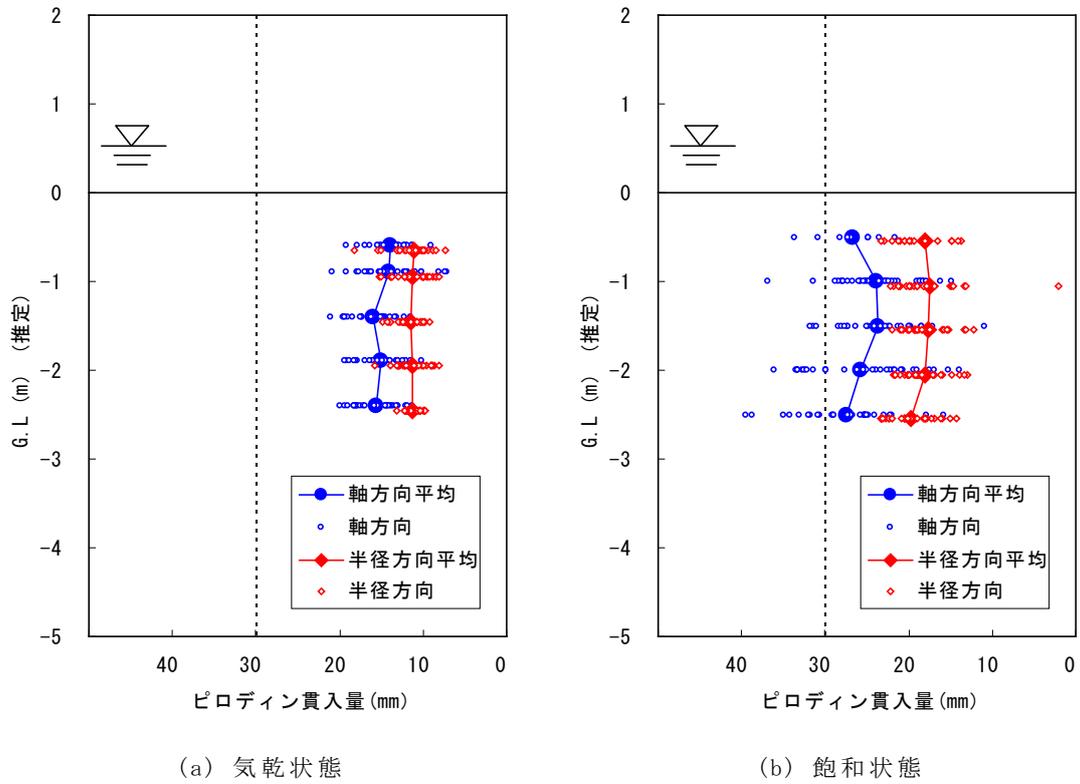


図-6.4.20 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswSw01:幸橋地点, マツ属)

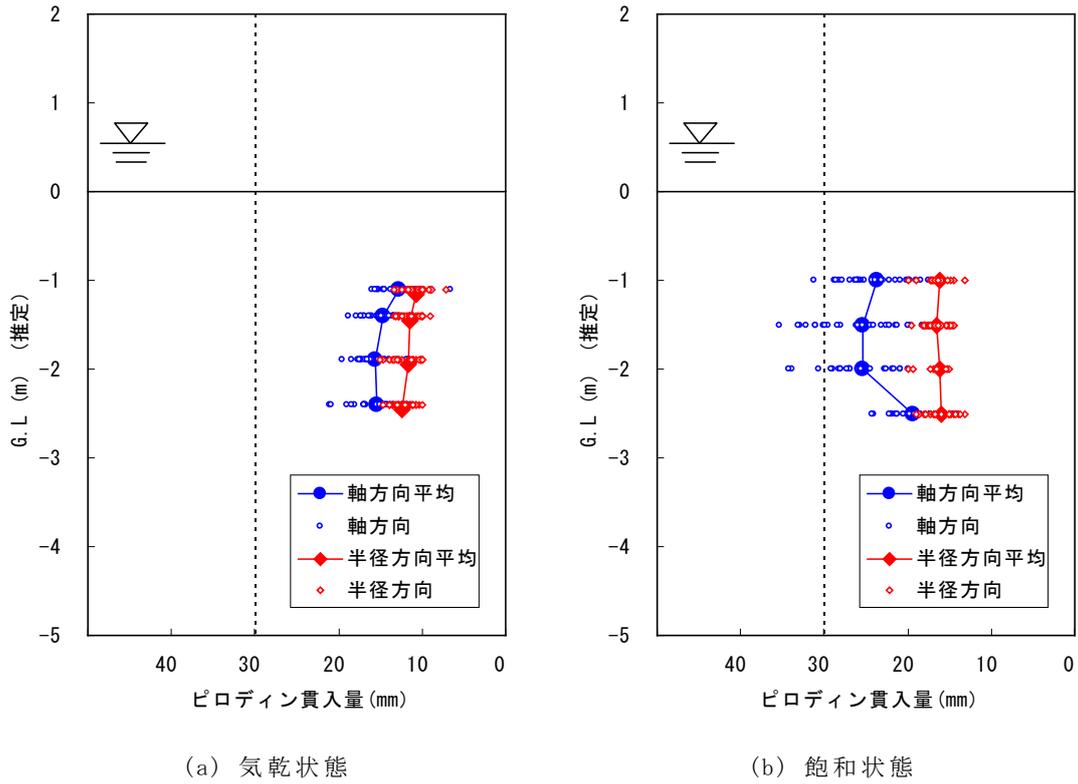


図-6.4.21 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswSw02:幸橋地点, マツ属)

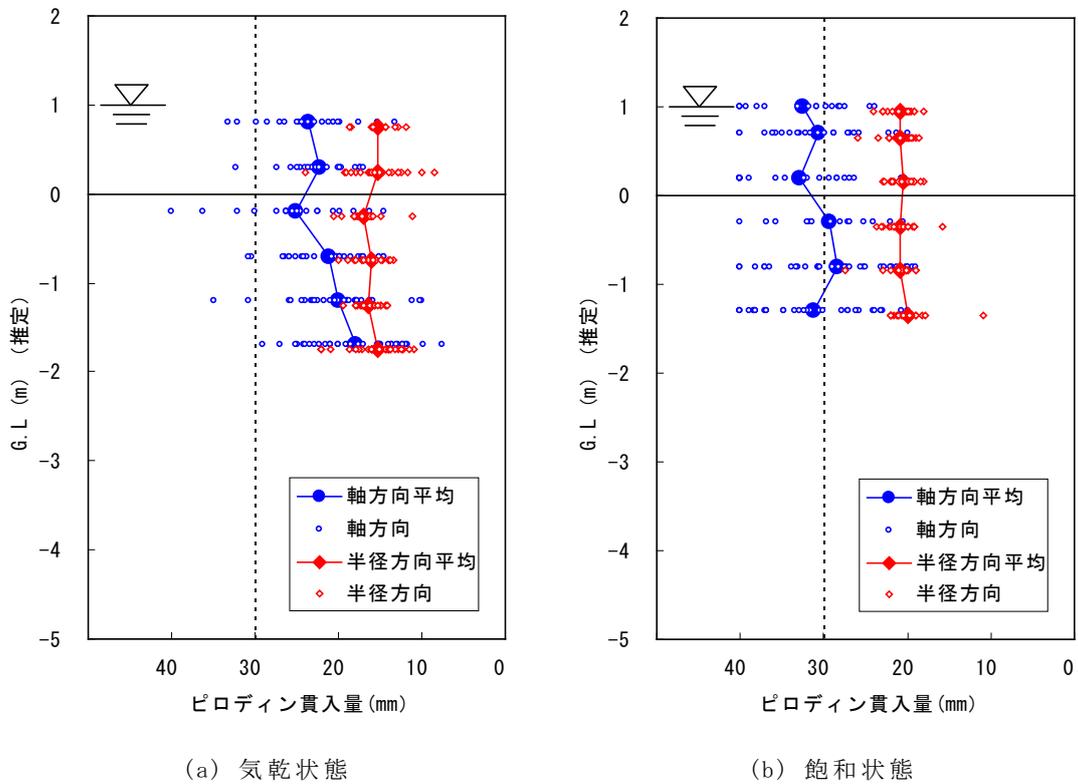
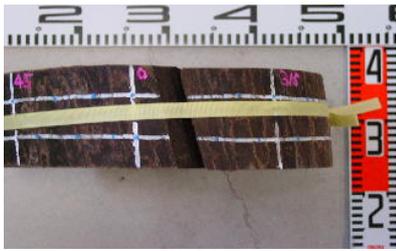
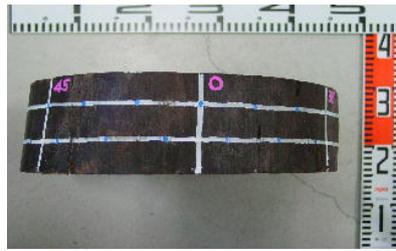


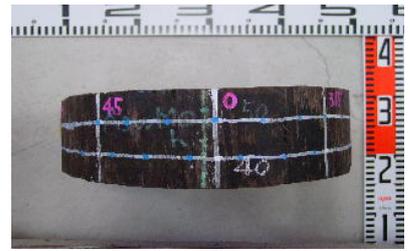
図-6.4.22 ピロディン試験の深さ別貫入量 (AswKd01:木田橋地点, スギ属)



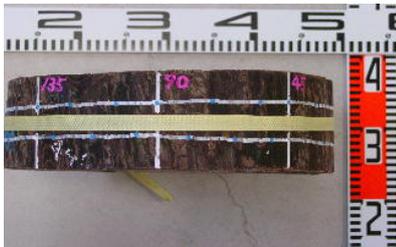
000°



000°



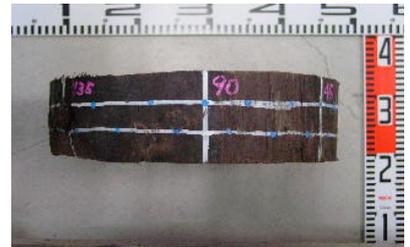
000°



090°



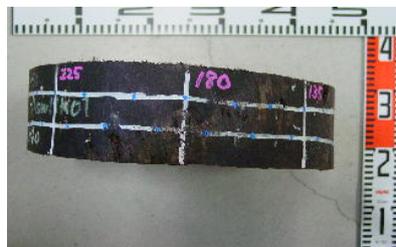
090°



090°



180°



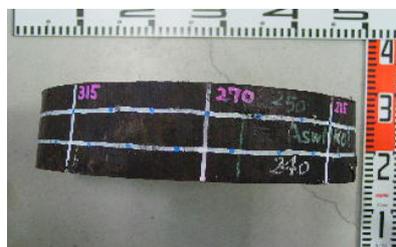
180°



180°



270°



270°



270°



surface



surface



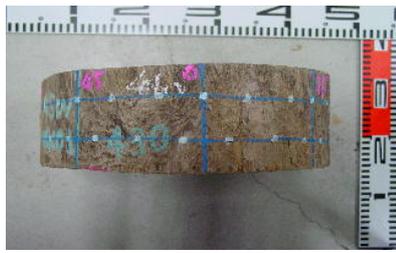
surface

(a) 杭先端から 450cm

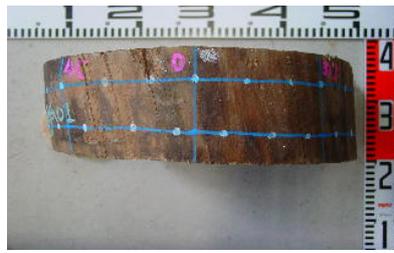
(b) 杭先端から 250 cm

(c) 杭先端から 50cm

写真-6.4.6 AswMk01, 飽和
(水越橋上流地点, カラマツ属)



000°



000°



000°



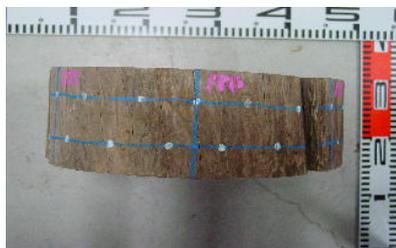
090°



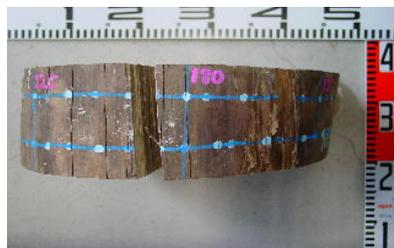
090°



090°



180°



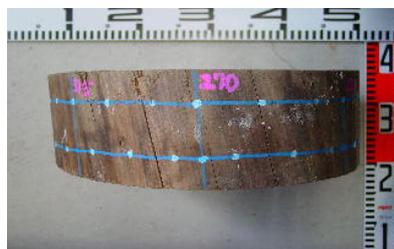
180°



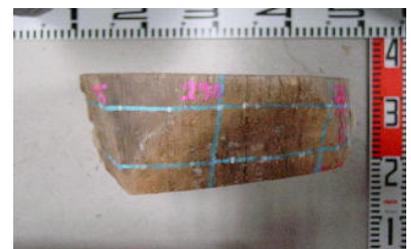
180°



270°



270°



270°



surface



surface



surface

(a) 杭先端から 440cm

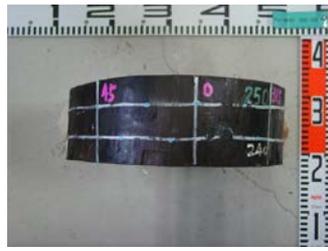
(b) 杭先端から 240cm

(c) 杭先端から 40cm

写真-6.4.7 AswMk01, 気乾
(水越橋上流地点, カラマツ属)



000°



000°



000°



090°



090°



090°



180°



180°



180°



270°



270°



270°



Surface



Surface



Surface

(a) 杭先端から 450cm

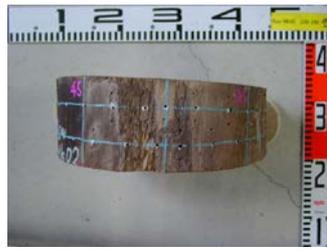
(b) 杭先端から 250cm

(c) 杭先端から 050cm

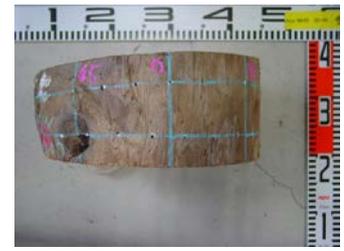
写真-6.4.8 AswMk02, 飽和
(水越橋上流地点, カラマツ属)



000°



000°



000°



090°



090°



090°



180°



180°



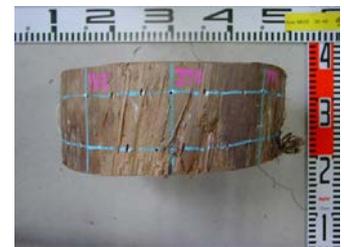
180°



270°



270°



270°



Surface



Surface



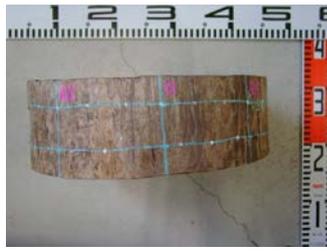
Surface

(a) 杭先端から 440cm

(b) 杭先端から 240cm

(c) 杭先端から 40cm

写真-6.4.9 AswMk02, 気乾
(水越橋上流地点, カラマツ属)



000°



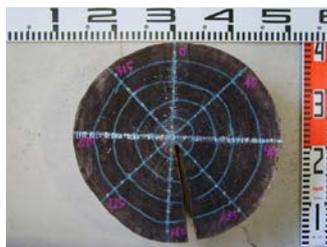
090°



180°



270°

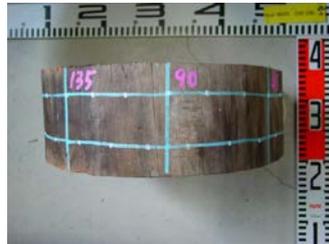


Surface

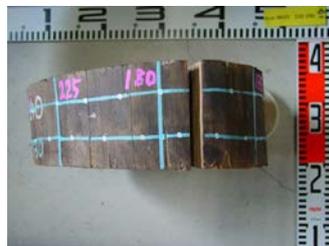
(a) 杭先端から 440cm



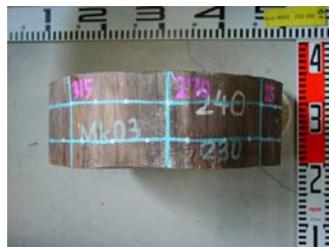
000°



090°



180°

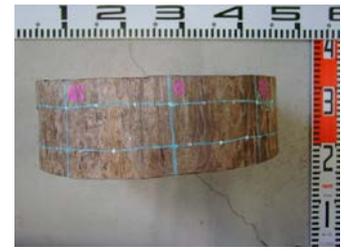


270°



Surface

(b) 杭先端から 240cm



000°



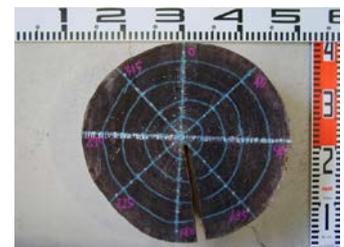
090°



180°



270°



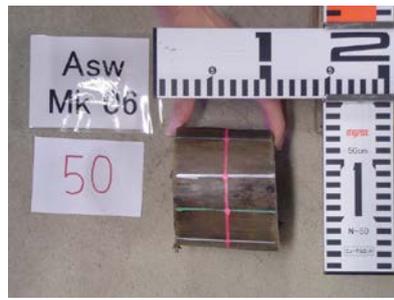
Surface

(c) 杭先端から 40cm

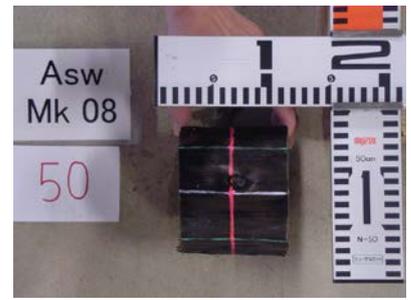
写真-6.4.10 AswMk03, 気乾
(水越橋上流地点, カラマツ属)



000°



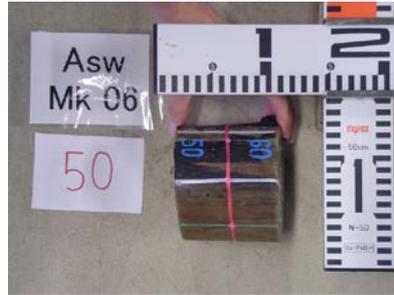
000°



000°



090°



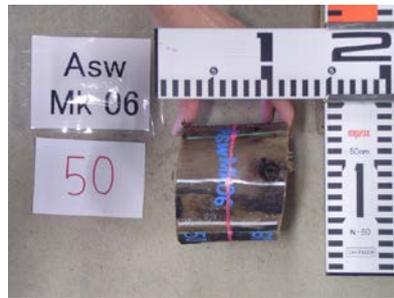
090°



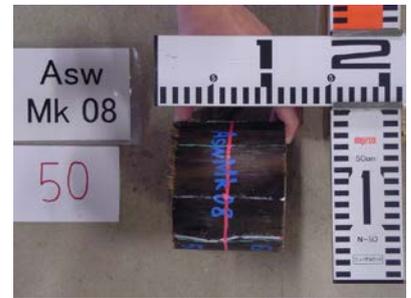
090°



180°



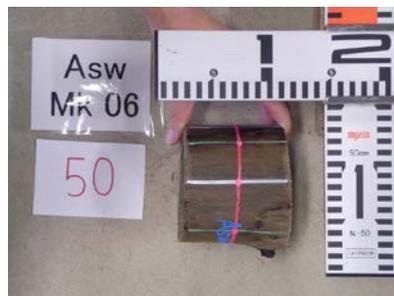
180°



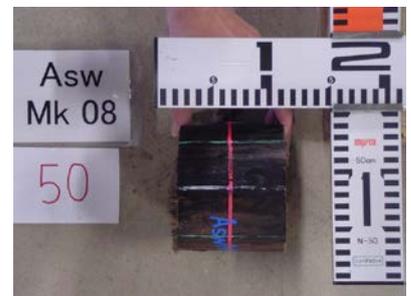
180°



270°



270°



270°



surface
杭先端から 60cm



surface
杭先端から 60cm



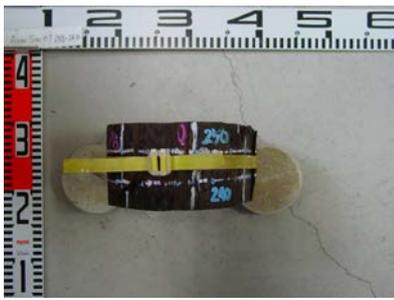
surface
杭先端から 60cm

写真-6.4.11 AswMk05, 飽和
(水越橋上流地点, カラマツ属)

写真-6.4.12 AswMk06, 飽和
(水越橋上流地点, カラマツ属)

写真-6.4.13 AswMk08, 飽和
(水越橋上流地点, カラマツ属)

(写真中の紙片に記された数字 (50) は杭先端から円盤下面までの距離(cm)を示したもの)



000°



090°



180°

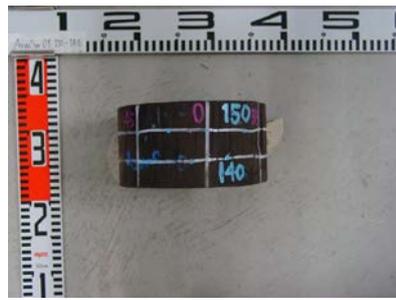


270°

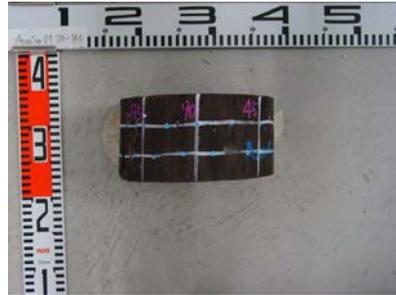


surface

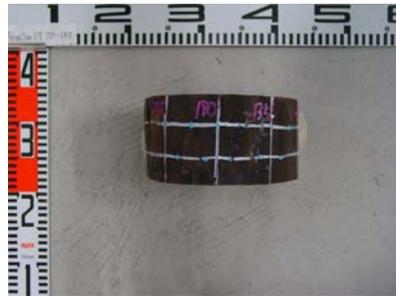
(a) 杭先端から 250cm



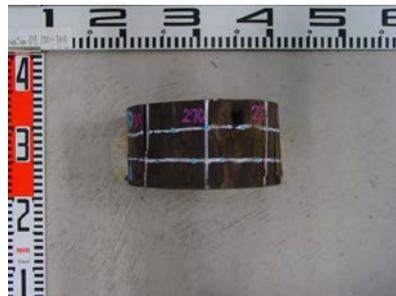
000°



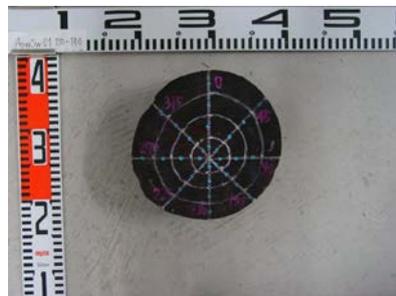
090°



180°

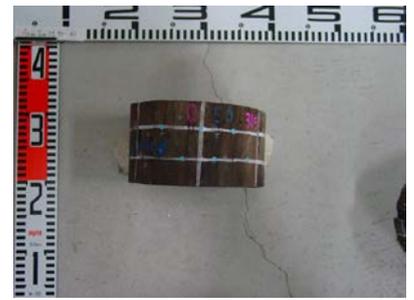


270°



surface

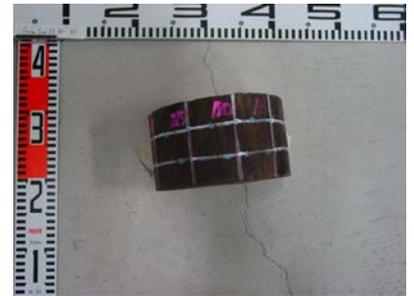
(b) 杭先端から 150cm



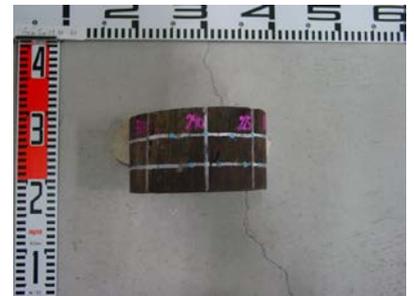
000°



090°



180°



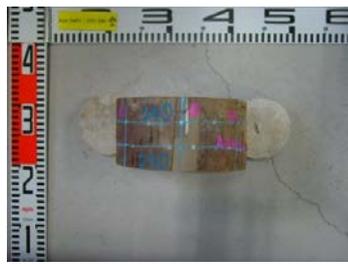
270°



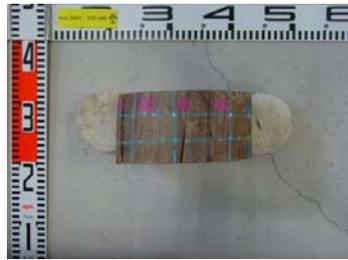
surface

(c) 杭先端から 50cm

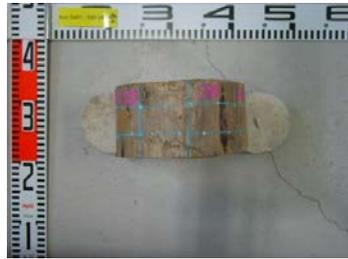
写真-6.4.14 AswSw01, 飽和
(幸橋地点, マツ属)



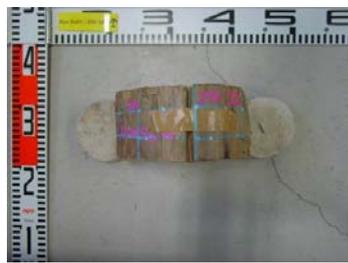
000°



090°



180°

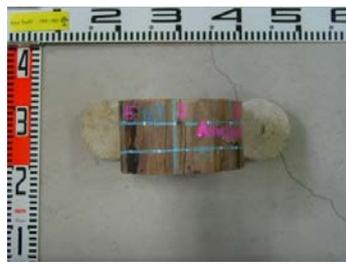


270°



Surface

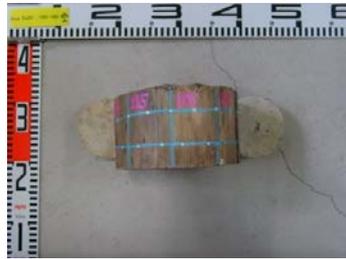
(a) 杭先端から 240cm



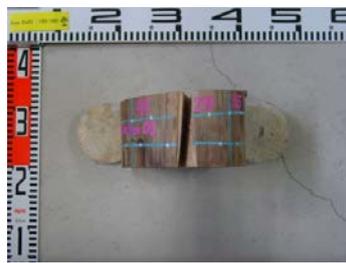
000°



090°



180°



270°

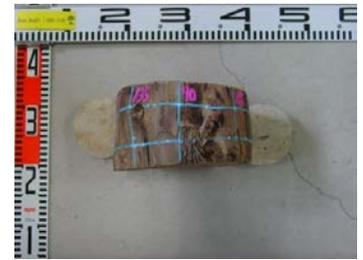


Surface

(b) 杭先端から 160cm



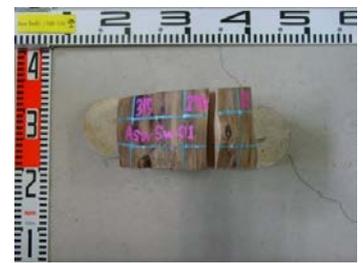
000°



090°



180°



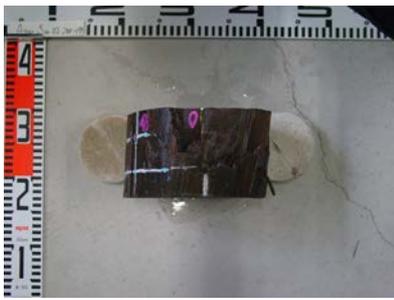
270°



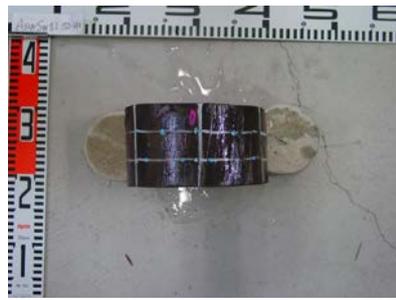
Surface

(c) 杭先端から 110cm

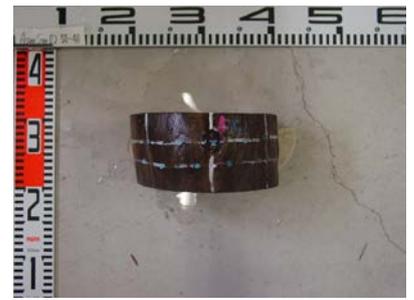
写真-6.4.15 AswSw01, 気乾
(幸橋地点, マツ属)



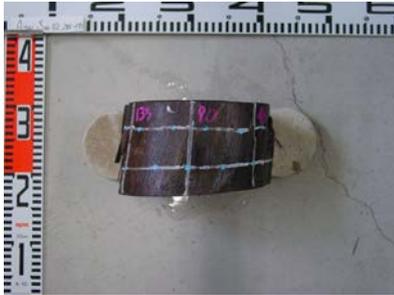
000°



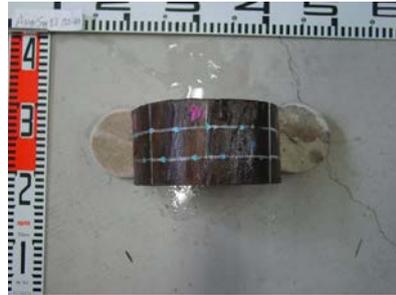
000°



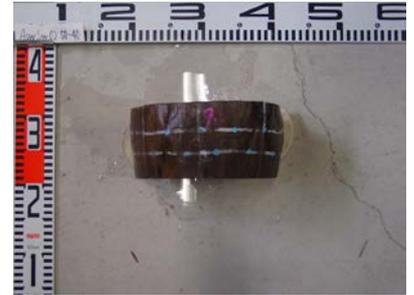
000°



090°



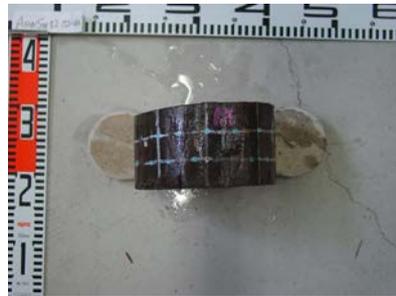
090°



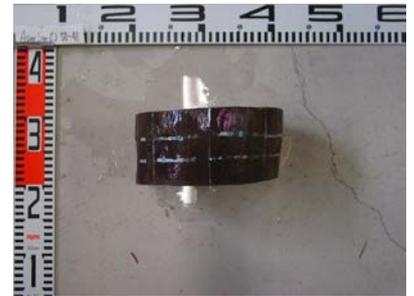
090°



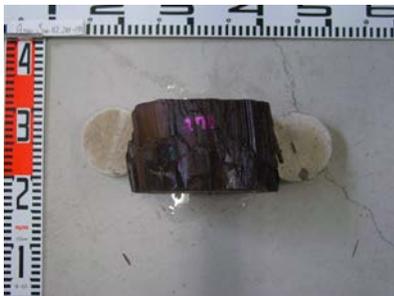
180°



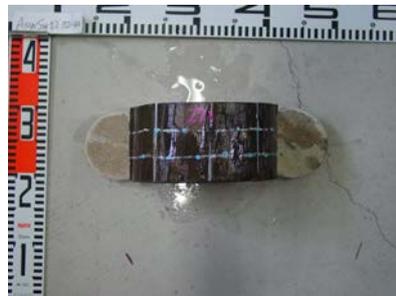
180°



180°



270°



270°



270°



surface



surface



surface

(a) 杭先端から 200cm

(b) 杭先端から 150cm

(c) 杭先端から 50cm

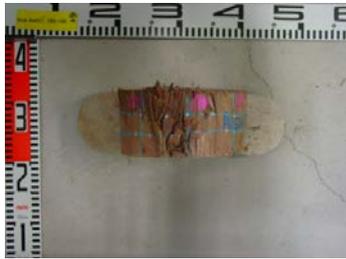
写真-6.4.16 AswSw02, 飽和
(幸橋地点, マツ属)



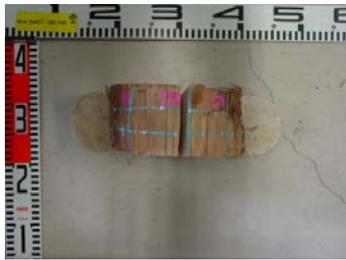
000°



090°



180°

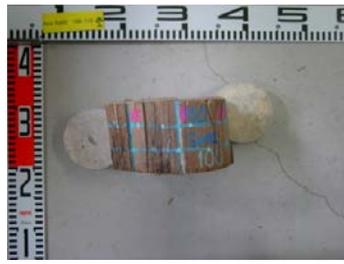


270°



surface

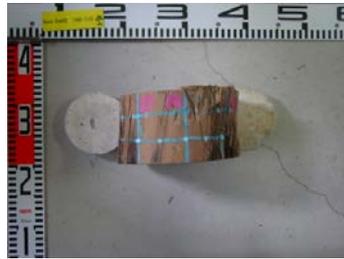
(a) 杭先端から 190cm



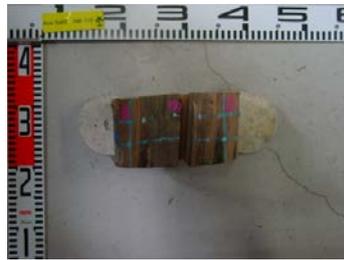
000°



090°



180°

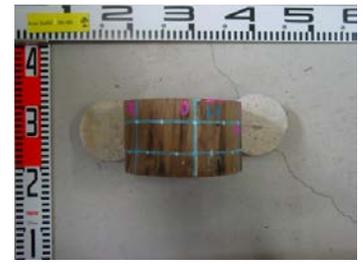


270°

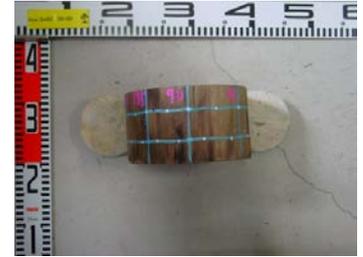


Surface

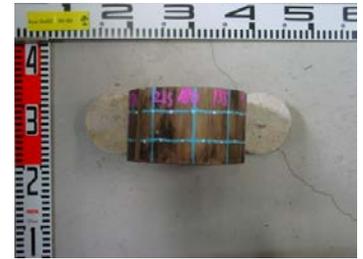
(b) 杭先端から 110cm



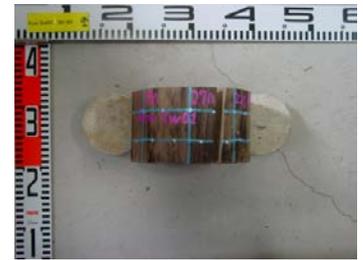
000°



090°



180°



270°



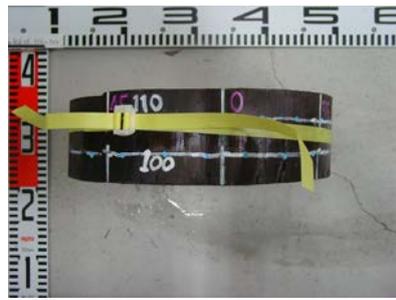
Surface

(c) 杭先端から 60cm

写真-6.4.17 AswSw02, 気乾
(幸橋地点, マツ属)



000°



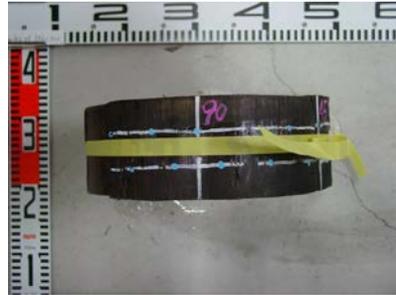
000°



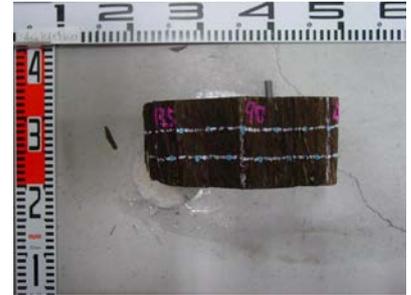
000°



090°



090°



090°



180°



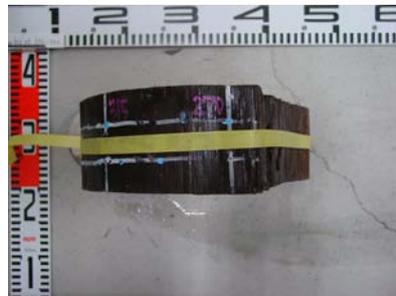
180°



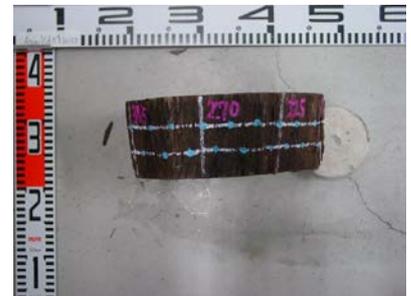
180°



270°



270°



270°



surface



surface



surface

(a) 杭先端から 160cm

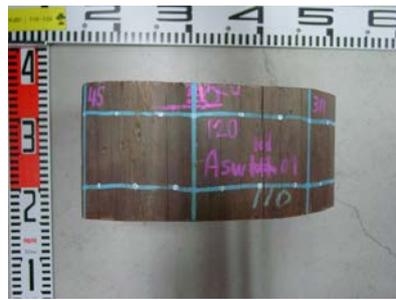
(b) 杭先端から 110cm

(c) 杭先端から 60cm

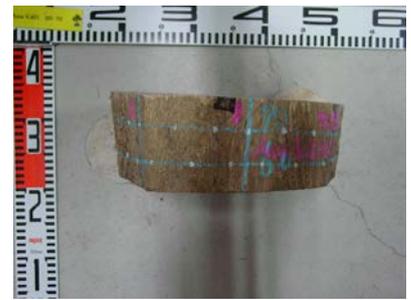
写真-6.4.18 AswKd01, 飽和
(木田橋地点, スギ属)



000°



000°



000°



090°



090°



090°



180°



180°



180°



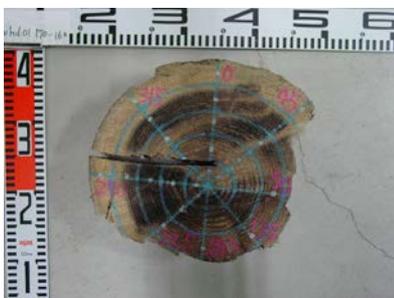
270°



270°



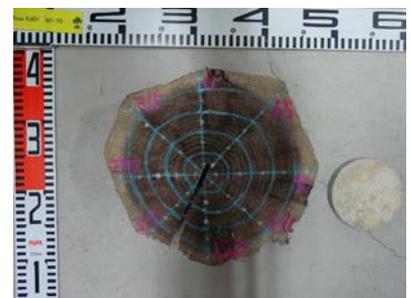
270°



surface



surface



surface

(a) 杭先端から 170cm

(b) 杭先端から 120cm

(c) 杭先端から 70cm

写真-6.4.19 AswKd01, 気乾
(木田橋地点, スギ属)

6.4.4 縦圧縮試験

(1) 概説

JIS (JIS Z 2101-1994) に準拠し木材試験体の縦圧縮試験および平均年輪幅と含水率の測定を行った。

(2) 試験体の形成

試験体はピロディン試験を行った円盤から取り出した。写真-6.4.20 に示すように中心から4方向の断面中心部と周辺部に分けて切り出し成形した。これにより試験用円盤1枚につき最大8個の試験体が成形される。しかし、腐朽等により所定の位置から試験体が採取できない場合には採取位置を適宜変更した。試験体は横断面が正方形の直六面体とし、その寸法は、横断面の1辺の長さ30mm (JISでは20mm~40mm)、高さ60mm (JISでは横断面の辺長の2~4倍)を目安とした。試験体はJISに示されるように、その長手方向を繊維方向に平行にし、その両端面を長手方向に垂直かつ平行にするように心がけた。なお、切り出した飽和試料は水中で保管し、気乾試料は室温20℃、湿度65%の恒温恒湿室に1ヶ月以上保管し、含水率12%になるよう調整した。

切り出された試験体には円盤番号、方向(基準線を0度として)、位置(中心部か周辺部か)が分かるように記号を明記し、さらに上下を明示した。記号は「045to090_IN」のように記載した。ここで、「045」は基準線を0度とした場合の時計回りに45度の位置を表し、「045to090」で45度と90度の位置の間にあることを表している。また、「IN」は中心部を表し、周辺部は「OUT」で表すこととした。

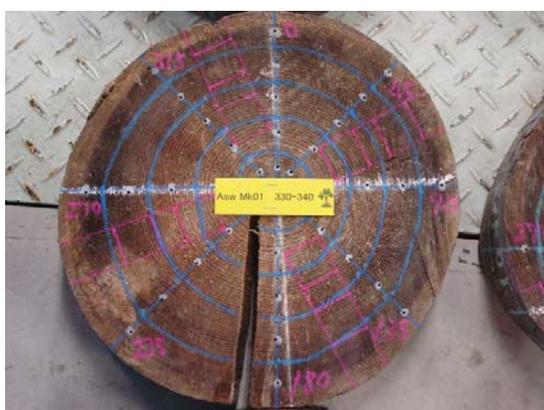


写真-6.4.20 圧縮試験用試験体の採取位置



写真-6.4.21 試験体への番号記入例

(3) 試験概要

写真-6.4.22 に示す万能試験機(株インストロン, No. 5581)を用いて圧縮試験を実施した。試験は変位制御で行い、平均荷重速度はJISに従い毎分9.80N/mm²以下とした。なお、この試験では球座は使用していない。

試験体の寸法は、試験前にノギスにて横断面の縦横をそれぞれ3点ずつ、また、高さを3点ずつ計測した。また、写真-6.4.23 に示すように、試験体の横断面において、年輪の直交方向に計測した年輪の幅をその本数で除することにより平均年輪幅を算出した。なお、年輪の両端部が側方の辺に達していない年輪は測定対象外とした。質量は試験前に電子ば

かりで計測し、試験後には 105 度に設定した恒温装置で 24 時間以上乾燥させ 乾燥質量を計測した。また、試験直前と試験直後の写真を試験体側面について 4 方向から撮影した。写真-6.4.24 と写真-6.4.25 に試験前後の試験体の状況を示す。

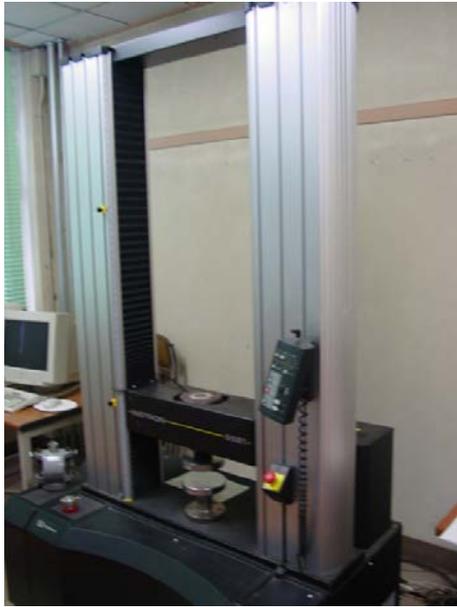


写真-6.4.22 万能試験機



写真-6.4.23 平均年輪幅の測定



写真-6.4.24 試験直前の試験体

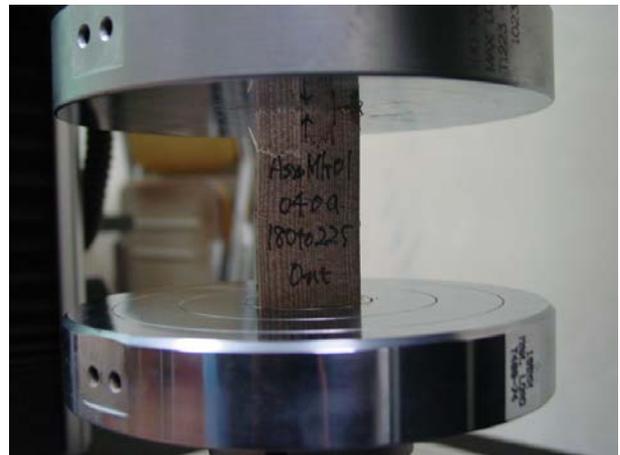


写真-6.4.25 試験直後の試験体

(4) 試験結果および考察

試験結果の代表例として、図-6.4.23 に木田橋の木杭（樹種：スギ属）について深度ごとの縦圧縮強さを示した。比較のために、1974年版日本建築学会「木構造設計基準・同解説」に示された杭材に関する普通構造材の繊維方向許容応力度⁹⁾（本書19ページに前掲）のスギについての数値（長期応力に対する値、気乾状態、図中に「許容応力度」と表示）および、その湿潤状態に適用する値（気乾状態の70%、図中に「同湿潤時」と表示）の線を、さらにスギの標準的な圧縮強度（木材工業ハンドブック⁶⁾に掲載の平均値、図中に「気乾材標準値」と表示）の線を示した。

この図から、このスギ属の木杭の縦圧縮強度は標準的な値よりは弱いものの、許容応力度よりは高い値となっており、強度が大きく低下した訳ではなく健全性を保っていると評価された。これによりスギ属が木杭として利用できる可能性が、ピロディン試験だけでなく圧縮強度の結果からも示された。

また、図-6.4.24 に圧縮試験より求めた試験体の応力ひずみ関係を示した結果の一例を示した。飽和状態では気乾状態より強度が低いことが確認された。

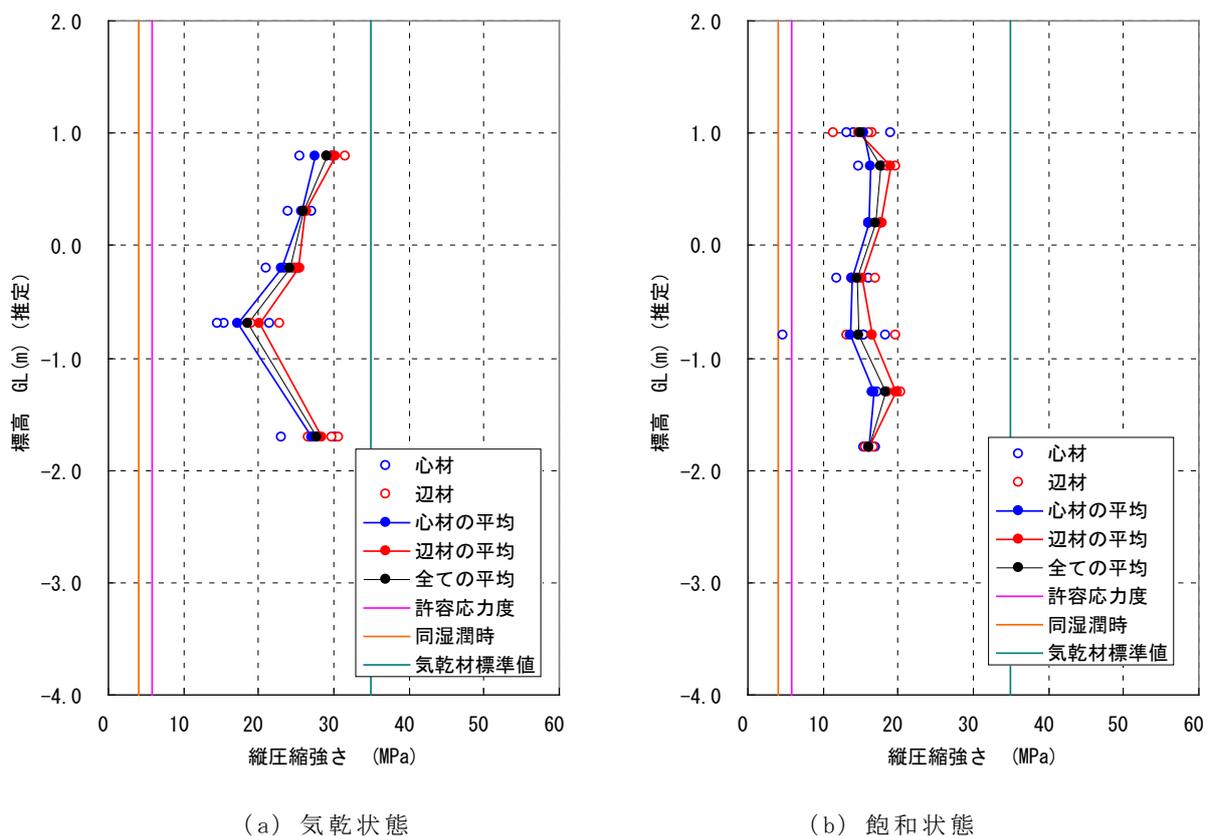
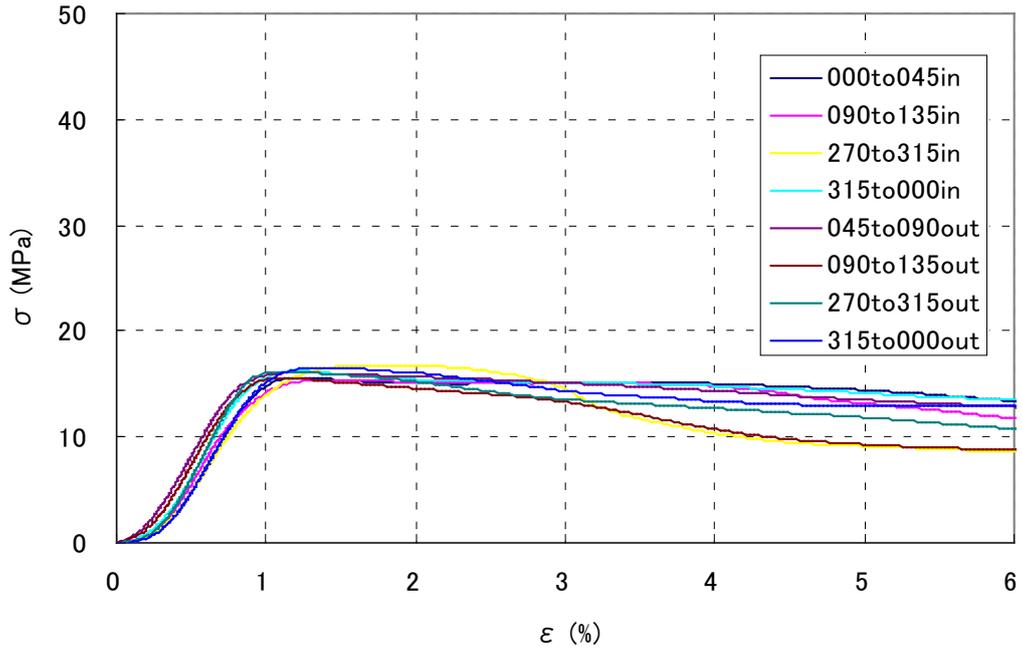


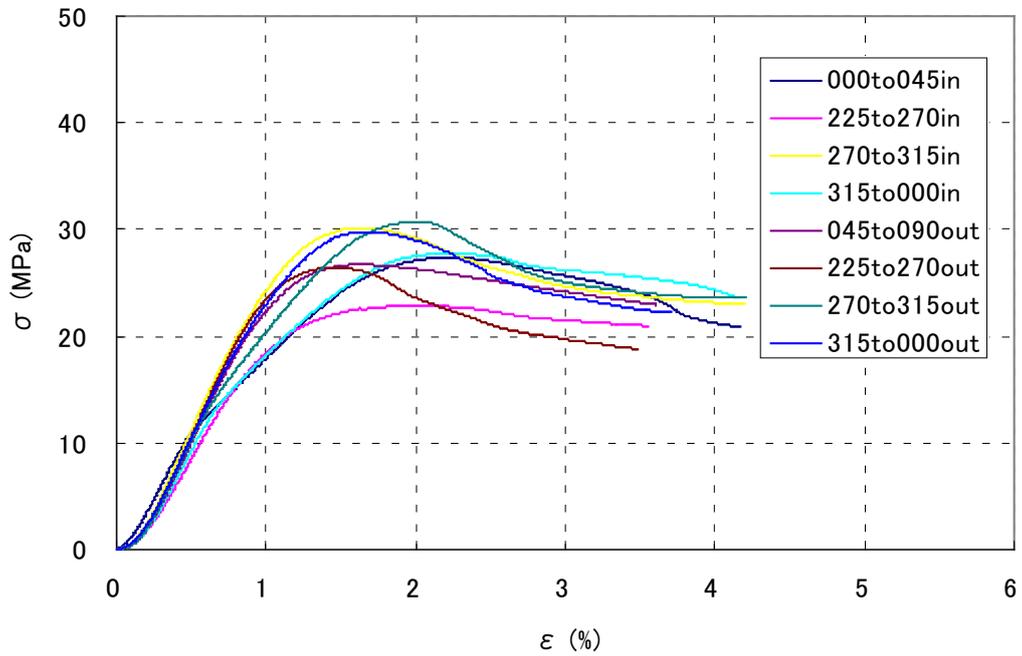
図-6.4.23 深度ごとの縦圧縮強さ（採取地：木田橋付近，樹種：スギ属）

（図中の「辺材」は木材の外周側から切り出した試験体（先述の試験体位置記号が「OUT」で表されるもの）を意味しており，木材構造上の辺材ではない部分も含む。）



[AswKd01_060b]

(a) 木田橋（飽和試料，スギ属，杭先端付近）



[AswKd01_070a]

(b) 木田橋（気乾試料，スギ属，杭先端付近）

図-6.4.24 試験体の応力ひずみ関係の例

6.5 まとめ

当該調査により、次のことが明らかになった。

- ・足羽川の3地点より旧橋梁や護岸基礎と考えられる木杭は、48年～78年経過したものであり、その樹種は、マツ科カラマツ属、マツ属とスギ科スギ属であった。
- ・採取された木杭は、目視観察した限りでは、河床より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの、地中に埋まっていた部分に関しては極めて健全な状態であった。
- ・ピロディン試験によって、各木杭が基本的に腐朽していないということが定量的に評価された。特に木田橋で採取されたスギ属（スギ）については、78年間地中で埋まっていたものであるが、縦圧縮強さについても健全性を保っていたと評価された。このことからスギの間伐材を木杭として利用できる可能性が示されたといえる。
- ・採取された木杭を基礎とした旧幸橋、および、地震時における橋の使用は不明であるが木田橋の前にあった銭とり橋の基礎は、1948年福井地震にも耐えており、耐震性についても木杭は決して低いものではないといえる。

また、解析上の課題として以下が残された。

- ・縦圧縮強度については、スギ属以外の木杭では結果が大きくばらついた。これには欠点（節など）の有無、含水率、心材・辺材や成熟材・未成熟材の分布と供試体採取位置などの影響が考えられるが、関係が複雑であると考えられ、明確な傾向を見出すに至らなかった。今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 福井県：幸橋景観整備計画，2006.6.
- 2) 山口恵一郎編集代表：日本図誌大系中部Ⅱ，朝倉書店，p.329，1974.
- 3) 中川重利：検索入門 針葉樹，保育社，1994.
- 4) 佐藤孝夫：新版 北海道樹木図鑑 [増補版]，亜璃西社，2006.
- 5) 貴島恒夫他：原色木材大図鑑，保育社，1962.
- 6) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック改訂4版，丸善，pp.194-195，2004.
- 7) 島地 謙，伊東隆夫：図説木材組織，地球社，pp.82-83，1982.
- 8) JIS K 1571:2004「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準」
- 9) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，667p，1974.11.

7. 丸太地中打設による軟弱地盤対策とこれによる環境対策効果の検討

7.1 丸太による軟弱地盤対策方法

7.1.1 丸太の適用方法

文献調査および足羽川より採取された丸太の調査結果より、以下がわかった。

丸太が現在地中基礎として使われなくなった理由として、丸太の腐朽に対する不安が上げられる。丸太の腐朽は、水、空気、栄養、温度の4つの条件が全て揃うことにより生じ、このうちの一つでも欠ければ腐朽は生じない¹⁾。したがって、例えば地下水中であれば腐朽が生じないと考えられる。しかし、実際の地盤は、地盤内で上下方向の水位変動があり、また、水平方向への流れが生じているのが一般的であり、このような変動する地下水位条件下で、地盤中に打設された丸太に対する腐朽に対する安定性はあまり明確にされていない。

このように変動する地下水に対し、大きく3つの領域が想定される。地下水変動の最下位以下、地下水位変動域、地下水位変動の最上位以上の土中である。地下水変動の最下位以下の領域であっても、地下水は流動しており、特に地下水面付近では空気との接触があり溶存酸素も存在しているので、腐朽の発生を全く否定できるとは考えられない。また、地下水位変動域では、空気との接触が考えられるが、水浸もするので腐朽が生じない可能性も考えられる。さらに、地下水位変動の最上位以上の土中では、4つの条件が揃うこととなるが、土中の酸素の供給は少ないので必ずしも腐朽しやすいとは言えない。このような理由から、実際の地盤中での状況を把握することが重要となる。

実際にはさらに、地盤面以上も考えられるが、ここでは対象としない。多くの木材研究は、むしろ地盤面以上の、気中域で行われており、これらの研究成果が参考になる。

以下、本調査結果より得られた3領域における結論を示す。

(1) 地下水変動の最下位以下

調査の範囲内では、樹種に関係なく、この領域では丸太の腐朽は、少なくとも50～100年のオーダーで考えても進行しないと考えられる。

一般的な丸太の強度と比較し、地盤中の丸太はやや圧縮強度や曲げ強度が低くなる傾向や、丸太の表面がやや劣化する場合もあるが、機能低下を及ぼすような強度低下や、杭心までに及ぶ劣化へはいたらない。また、丸太は一般的にカラマツやベイマツを含むマツが圧倒的に多いが、スギを含む他の樹種についてもこのような傾向は同様であった。特に、スギが他の樹種と同様に地下水位以下では腐朽が進行しないことが分かったことは、森林の多くがスギである福井県にとっては大きな成果である。さらに、文献によれば、海岸埋立地などの海水域についても同様に腐朽が進行しないことがわかった。

(2) 地下水位変動域

足羽川ではこのような事例を見つけられなかったが、文献調査によればこの領域では腐朽が進行しないという事例の方が多くあり、腐朽事例も多くあり、明確な結論を得られない。したがって、今後このような領域での腐朽が進行する条件を明らかにすることと、これに対する対策技術が今後の課題だと考えられる。このようなことが明らかになるまで、当面は杭頭部のこのような領域について防腐処理を行うなどの処置が場合によって必要である。

(3) 地下水位変動の最上位以上の土中

前節の(2)と同様である。

以上を踏まえ、丸太による軟弱地盤対策工法を考えた場合、地下水位変動最下位以下で丸太を使用した場合には樹種に関係なく腐朽の進行は考えらず、防腐などの対策を行うことなく打設が可能である。しかしながら、地下水位変動域以上の領域では腐朽が認められた事例があることから、現時点では何らかの対策を実施する必要がある場合もある。このような対策とし、①丸太を必ず地下水位変動の最下位以下に打設し、その上部は砂などで埋め戻す方法、②丸太上部には何らかの処置を行い腐朽を進行させないことが考えられる。また、丸太を支持杭とした場合に比較し、単なる軟弱地盤対策の改良材とした場合には、杭自体の強度にそれほど依存する必要がなくなり設計も容易であると考えられる。

7.1.2 パイルネット工法

前節 7.1.1 のような丸太の適用範囲で現存する軟弱地盤対策工法として、パイルネット工法²⁾が上げられる。現在では、この他に丸太を積極的に使用し軟弱地盤における構造物基礎としたり軟弱地盤対策とする工法は皆無であり、パイルネット工法を除き、丸太は主要工事から姿を消したと言っても過言ではない。

パイルネット工法は、1975年（昭和50年）8月の石狩川を襲った大洪水を契機に、泥炭性地盤に緊急に河川堤防を盛土するために開発された、「軟弱地盤上の盛土安定工法」である。1976年以来、河川堤防をはじめ、道路および鉄道などの盛土や路盤・路床の確保に対して、全国的に600件以上適用されている。この工法は、軟弱地盤上に多数の丸太（またはコンクリート杭などの既製杭）を適当な深さまで打設して、杭頭部を連結部材で緊張し、その上からサンドマットなどで埋め込み、さらにその上に土木用シートを敷設した後、盛土を行うものである（特許第1374368号）。この工法は、盛土荷重が直接地盤上に作用せず、単杭または群杭効果により深部に作用するので、すべり破壊および塑性流動の発生を防ぎ、自由性を有した杭、連結部材、土木用シートなどの緩和作用で軟弱地盤となじみがよく、これらの相乗効果により盛土の安定を確保している。

パイルネット工法の設計方法を以下に示す²⁾。

(1) 安定の検討

(a) 単杭とした鉛直支持に対する検討

$$Q_a = \alpha_p Q_p + \alpha_f Q_f > V \quad (\text{式-7.1.1})$$

ここで、 Q_a ：杭1本当たりの許容鉛直支持力

α_p 、 α_f ：各荷重状態に対する安全係数

常時 $\alpha_p = \alpha_f = 0.5$

一時 $\alpha_p = \alpha_f = 0.7$

V ：各荷重状態における杭1本当たりの作用鉛直力

Q_p ：単杭の基準先端支持力

$$Q_p = 30 N_{ave} A_p \quad (\text{砂質土の場合})$$

$$Q_p = 4.5q_u, \text{ または, } 10N_{ave}A_p \quad (\text{粘性土の場合})$$

ここで, N_{ave} : 杭先端地盤における N 値 (木杭の場合は小さくとるのがよい)

q_u : 杭先端地盤における一軸圧縮強度

A_p : 杭の先端面積

Q_f : 単杭の最大周面支持力

$$Q_f = U \sum f_i l_i$$

$$f = 0.3N + 3 \leq 5 \text{ tf/m}^2 \quad (\text{砂質土の場合})$$

$$f = q_u / 2, \text{ または, } N \leq 5 \text{ tf/m}^2 \quad (\text{粘性土の場合})$$

ここで, U : 杭の周長

f_i : 各土層の杭の最大周面支持力度

l_i : 各土層の厚さ

f : 杭の最大周面支持力度

N : 土層の N 値

q_u : 粘性土層の一軸圧縮強さ

ただし, $N < 2$ (沖積粘性土), $q_u \leq 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の土層が存在する場合は, その土層およびそれより上方にある土層の周面支持力は無視する.
また, ネガティブフリクションについては, 考慮しない.

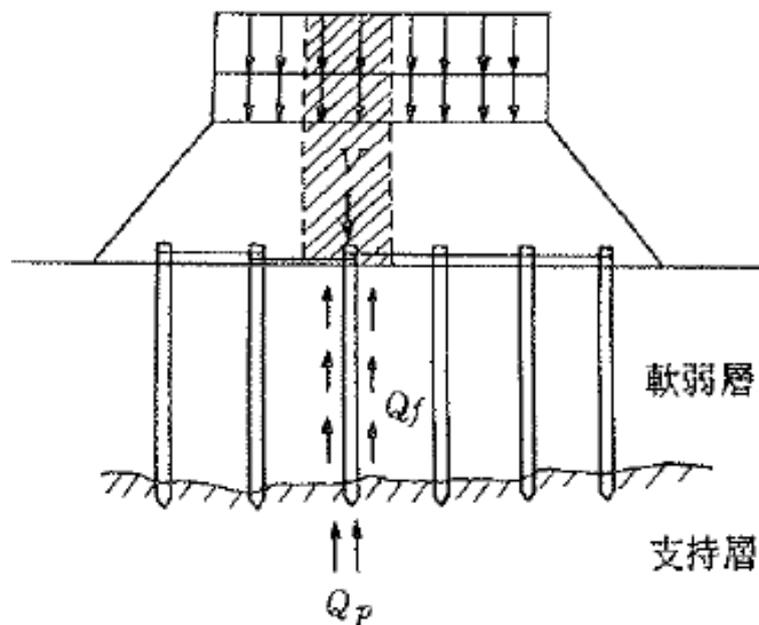


図-7.1.1 単杭としての検討²⁾

(b) 群杭とした場合の検討

$$Q_{ag} = \frac{1}{F_s} (Q_{fg} + Q_{pg}) > N_g \quad (\text{式-7.1.2})$$

ここで、 Q_{ag} ：群杭とした場合の許容鉛直支持力

F_s ：各荷重状態に対する安全率（常時：2，一時：1.5）

Q_{fg} ：群杭の有効周面における最大周面支持力

Q_{pg} ：群杭の有効面積における極限鉛直支持力

N_g ：群杭に作用する鉛直力

なお、すべりに対しては、この工法は比較的低い盛土を対象にしており、また、盛土による増加荷重は杭によって下層地盤に伝えられる工法であるため、一般的には検討は不要である。ただし、**図-7.1.3**に示すような腹付け盛土などで盛土が高い場合においては、すべりに対して適切な方法により検討する必要がある。

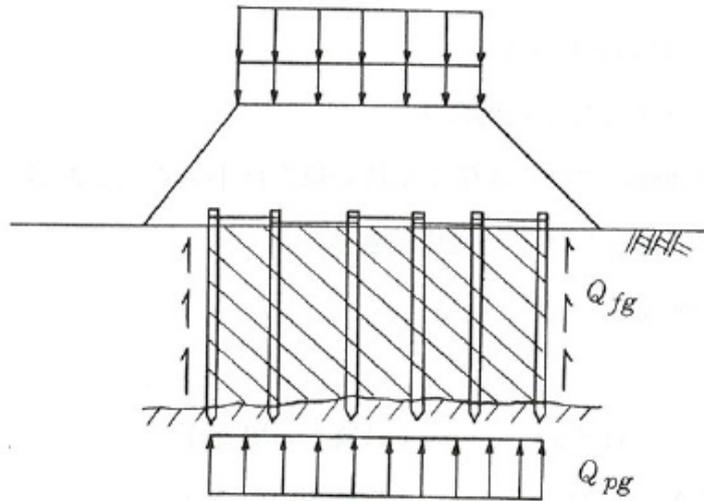


図-7.1.2 群杭としての検討²⁾

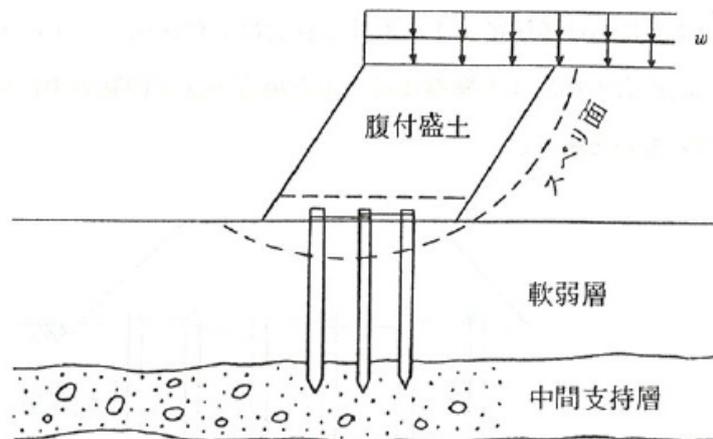


図-7.1.3 円弧すべりの検討が必要な場合²⁾

(2) 鉄筋の検討

鉄筋の分担荷重 P (一時) ($D > 2\gamma_2$)

$$P = D^2(\gamma_t H + w_1 + w_2) - \left\{ \gamma_1^2 \pi h_1 \gamma_t + \frac{(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}{2} \pi h_2 \gamma_t + \gamma_2^2 \pi (w_1 + w_2) \right\} \quad (\text{式-7.1.3})$$

横鉄筋の分担分 P_y

$$P_y = P \frac{D \cdot \frac{D}{4}}{D^2} = \frac{P}{4} \quad (\text{式-7.1.4})$$

斜め鉄筋の分担分 P_s

$$P_s = \frac{P}{2} \left(\frac{D^2 - \frac{D^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot 4}{D^2} \right) = \frac{P}{4} \quad (\text{式-7.1.5})$$

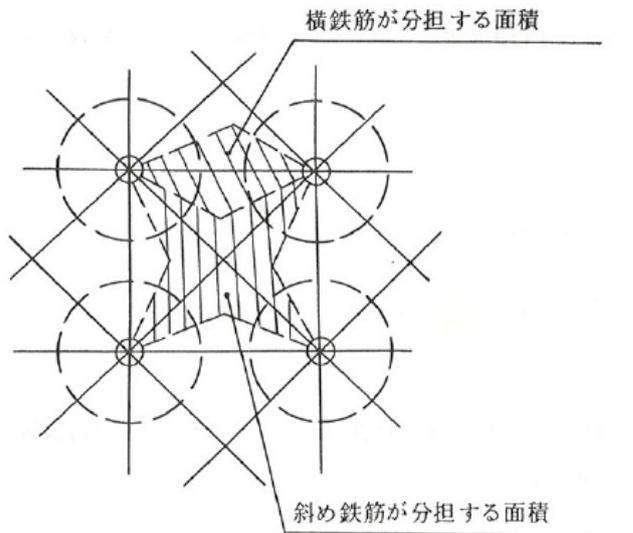
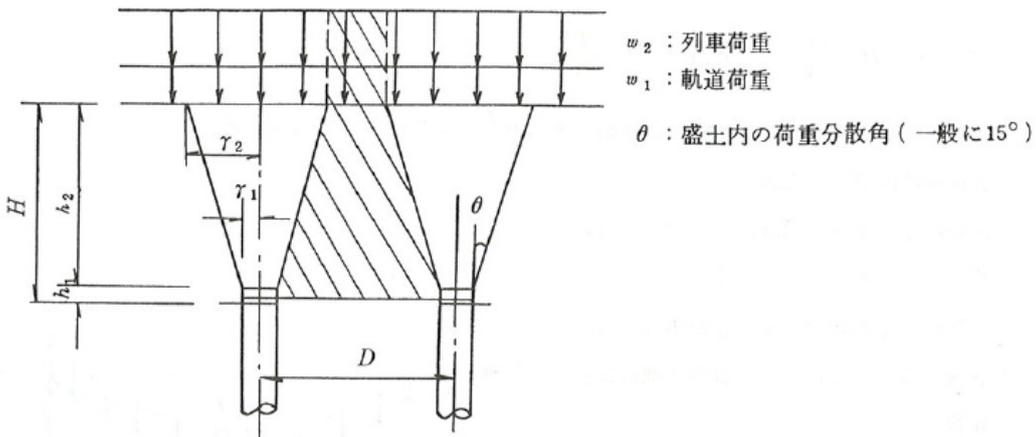


図-7.1.4 鉄筋の分担荷重²⁾

各鉄筋に作用する張力は、ケーブル理論に基づき式-7.1.6 より求めることができる。ただし、鉄筋の曲げ剛性は無視する。

$$T = \sqrt{H^2 + w^2 \left(\frac{l}{2} - x \right)^2} \quad (\text{式-7.1.6})$$

したがって、最大張力は両支点で発生し、式-7.1.7 となる。

$$T_{\max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{wl}{2} \right)^2} \quad (\text{式-7.1.7})$$

$$H = \frac{wl^2}{8f}$$

$$w = \frac{P_s}{l} = \frac{P}{4l}$$

ここで、たわみ量 f は未知数であるが、0.1m と仮定して求める。

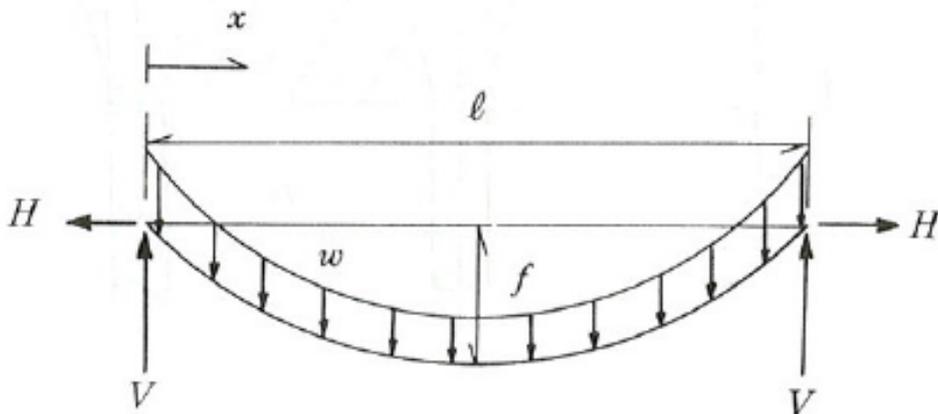


図-7.1.5 放物線ケーブル²⁾

(3) 補強ネットの検討

補強ネットの検討は、将来沈下によってネットが鉄筋上に定着した事を想定し、式-7.1.8より検討する。

$$T = \sqrt{H^2 + \left(\frac{wl}{2}\right)^2} \quad (\text{式-7.1.8})$$

ここで、T：ネットの引張応力 (tf/m)

$$H = \frac{wl^2}{8f}$$

$$w = \frac{P_y}{A}$$

$$= \frac{\frac{P}{4}}{D * \frac{2}{D} * \frac{1}{2}} = \frac{P}{D^2} (\text{tf/m}^2)$$

ここで、l：ネットの有効幅を考えたスパン（最大スパンの2/3）

$$l = \frac{2}{3} * \frac{D}{2} = \frac{D}{3} (\text{m})$$

ここで、f：ネットの計算仮定上のたわみ量（0.1m）

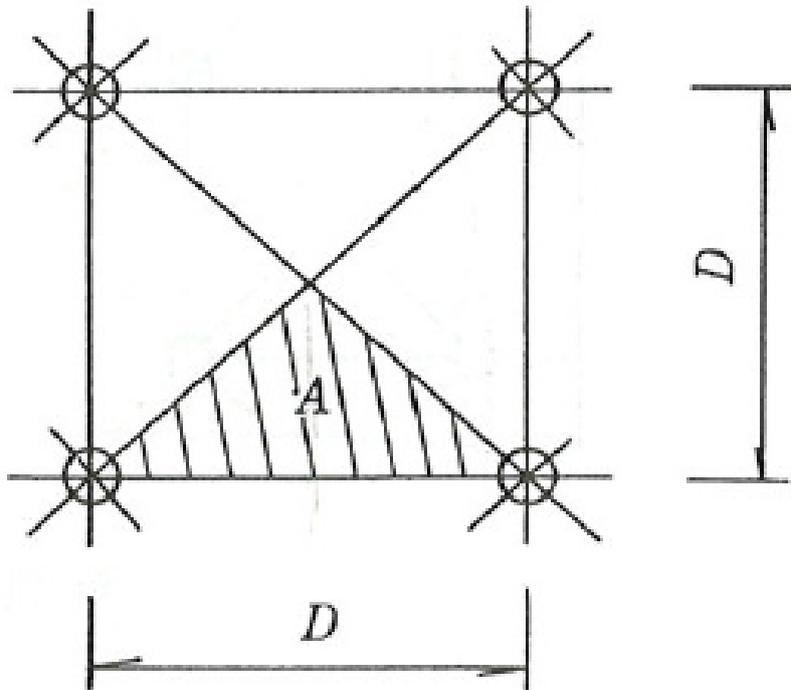
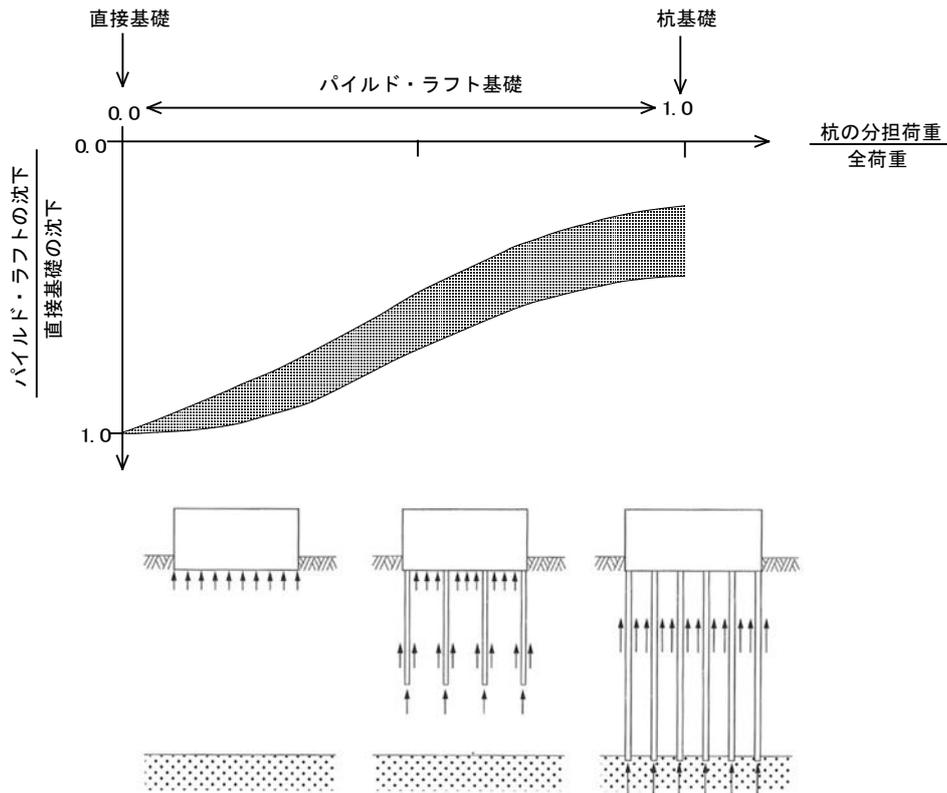


図-7.1.6 ネットの分担面積²⁾

7.1.3 パイルド・ラフト基礎³⁾

以下参考のためにパイルド・ラフト基礎 (Piled Raft Foundation) の簡易計算法³⁾を示す。

パイルド・ラフト基礎は、**図-7.1.7**に示すように、直接基礎と杭基礎の中間的な基礎形式であり、直接基礎と杭基礎が複合して荷重に抵抗する。**図-7.1.8**は、基礎の荷重度からみた適用範囲を直接基礎の荷重度と基礎幅の関係で示したものである。許容支持力の直線は一般に右上がりであり、この直線の下側は支持力的に安定な領域である。許容沈下量から決められる荷重度は右下がりの曲線となり、この曲線より下側が沈下に対して安定な領域となる。直接基礎は、この両者の下側の領域で直接基礎が設計可能であり、これより上



(a)直接基礎 (b)パイルド・ラフト基礎 (c)杭基礎

図-7.1.7 基礎形式の比較^{3), 4)}を参考に作成

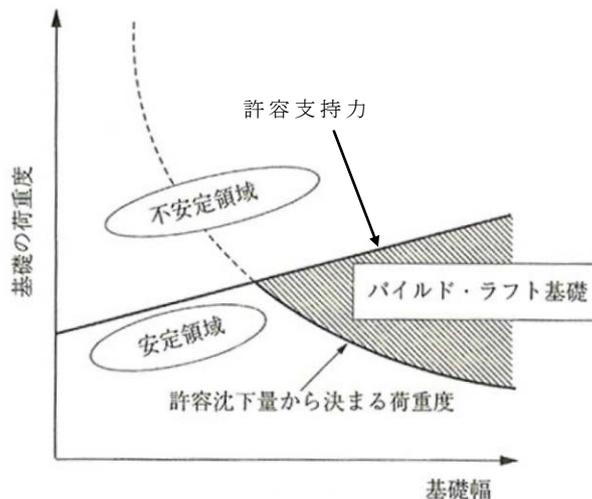


図-7.1.8 基礎の荷重度からみた適用範囲³⁾

側で杭基礎などが適用される。さらに、図中の網明け部分は、支持力では安定であるが沈下では問題となる領域でパイルド・ラフト基礎が有効となる。

この基礎形式の適用性が高い地盤条件は、直接基礎としての支持力は十分であるが沈下や不同沈下が課題となる場合で、例えば、直接基礎としての支持地盤が比較的硬質の粘土あるいは密度の高い砂でその下部での沈下が課題となる場合である。逆に、不適切な場合は、表層地盤の強度が著しく小さい軟弱な粘性土や液状化のおそれのある緩い砂地盤などである。

設計は、まず、直接基礎と杭の負担荷重を設定し、この荷重に対し地盤の鉛直支持力、活動抵抗に対する抵抗性と、沈下量の評価と、杭の仕様、本数、配置などの設定をおこなう。

鉛直支持力と活動抵抗については、杭の抵抗を無視し直接基礎と同様の扱いを行う。

沈下に対しては、次のような簡易計算法によりパイルド・ラフト基礎の沈下量と、杭と基礎の荷重分担比を求めることができる。ただし、このような計算が可能であるのは、パイルド・ラフト基礎の平面規模が杭長に比べて大きく、平面形状が整形であり、荷重分布がほぼ均等で杭配置が規則的かつ杭径、杭長がほぼ等しい摩擦杭を用いる場合である。

直接基礎とパイルド・ラフト基礎の鉛直ばね定数比は、式-7.1.9 で表される。

$$\frac{k_r}{k_{pr}} = \frac{\{1 - 0.64(k_r/k_p)\}(k_r/k_p)}{1 - 0.6(k_r/k_p)} \quad (\text{式-7.1.9})$$

ここで、 k_{pr} ：パイルド・ラフト基礎の平均鉛直ばね定数

k_p ：摩擦群杭の平均鉛直ばね定数

k_r ：直接基礎の平均鉛直ばね定数

また、杭が分担する荷重は、式-7.10 で示される。

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2(k_r/k_p)}{1 - 0.8(k_r/k_p)} \quad (\text{式-7.1.10})$$

ここで、 P_p ：摩擦群杭の負担荷重

P_r ：直接基礎の分担荷重

7.2 丸太を用いた軟弱地盤対策とセメント固化改良との環境比較

軟弱地盤対策や構造物基礎としての丸太地中打設と、同目的の他工法との間で、二酸化炭素排出量に関して比較を行った。

7.2.1 二酸化炭素排出量の算出方法

(1) 対象としたライフステージ

二酸化炭素（以下、CO₂と記す）排出量を算出するライフステージとして、ここでは材料製造段階のみを取り扱うこととする。

建設構造物のライフサイクルには、材料製造段階、施工段階、供用段階、維持管理段階、解体廃棄段階の5つのステージが考えられる。しかし、施工段階以降に関するCO₂排出量原単位データは現時点では十分に整備されていない。このためここでは、施工段階以降を考えず、材料製造段階でのCO₂排出量のみを算出し比較を行った。

(2) 使用した基礎データ

本報告書では、材料の製造段階におけるCO₂排出量を算出するにあたり、各材料の製造段階におけるCO₂排出量原単位を既往の文献から求め、これに各材料の使用量を乗じてCO₂排出量とした。使用した各材料のCO₂排出量原単位を表-7.2.1に示す。各材料について文献により原単位の値が異なっている。本報告書では、計算に使用する材料全てについて原単位が求められている「日本建築学会の建築物のLCAツール⁵⁾」に記載の値を用いた。また、木材については、打設した丸太杭の材積より、木材の乾燥密度（全乾比重）を0.5t/m³として質量を求め、これに単位質量当たりのCO₂量を乗じて、CO₂貯蔵量として算出した。

文献5)では、(独)国立環境研究所発行の3EID（産業連関表による環境負荷原単位データブック、Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables）⁸⁾を元に値が算出されている。3EIDでは、産業連関表を利用して、主要な素材についての生産者価格当りのCO₂排出量やその他の環境負荷の原単位が算出され、示されている（一部の年度や部門では購入者価格当りの原単位も示されている）。産業連関表は、各産業間の取引が金額で示されたものであり、各素材を生産する産業が、何円分の材料や燃料を用いて何円分の製品（素材）を生産したかが分かる。このため、産業連関表をさかのぼって行けば、ある素材を生産するのに要した材料や燃料の量が採掘時までさかのぼ

表-7.2.1 使用した原単位

資材名称	出典	文献上の名称	単位(*)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ /*)
セメント	文献5)	セメント（ポルトランド）	t	0.86
	文献6)	ポルトランドセメント	t	0.77
PCコンクリート	文献5)	セメント製品	t	0.34
鉄筋	文献5)	普通鋼小棒	t	0.94
	文献6)	鉄筋鉄骨 電気炉鋼	t	0.77
鋼管	文献5)	普通鋼鋼管	t	1.39
木材	木材乾燥質量当りの炭素量 ⁷⁾ より算出	—	t	-1.84

て計算できるので、各素材の価格当りの CO_2 排出量原単位が求められる。文献5)に示された原単位は、この 3EID における金額当りの排出量原単位に、物量 (t や m^3) 当りの価格を乗じることにより、物量当りの排出原単位を求めたものである。

文献9)によれば、この方法で求めた原単位を用いる場合には次のことに注意する必要がある。「同じ部門の原単位に該当する商品(複数)は全て、「単価に比例して物量あたりの生産に伴う排出量も大きくなる」と仮定したことに」なる。つまり、「同じ部門に該当する製品が A と B あり、A の単価が B の 2 倍だったら、A の生産に伴う排出量も B の 2 倍大きい」となる。また、3EID の方式は、LCA の産業連関分析法 (IO-LCA) と呼ばれるインベントリ分析の方式であるが、この方式には、「個々の製品の生産過程の特徴を反映した排出量が計算されない(あくまで平均的な製品の排出量(利点でもありますが))。」「一つの部門に該当する商品やサービスは複数存在することが多く、原単位はそうした多種の製品の平均的な単位生産額あたりの排出量を示す。」などの弱点がある。これらのことを踏まえた上で計算結果を見る必要がある。

また、文献5)では、産業連関表に示された素材を複合して生産される製品(例えば PC 杭など)については、その製品の単位物量あたりの各素材の物量について、各素材の原単位を乗じることによって算出されている(例えば PC 杭であれば、「セメント製品」と「普通鋼小棒(熱間圧延鋼材)」の値を用いて算出されている。)

文献6)では、各種燃料や材料の採掘から製品生産までの各段階での CO_2 排出量を既往文献等から求め、これら各段階の値を積み上げることによって、製品の CO_2 排出量原単位を求めている。文献5)よりも細かい見方ではあるが、今回比較を行う工法にて使用する材料を網羅することができなかったため、原単位は文献5)のものを使用した。

なお、環境省および国立環境研究所では、今回比較を行う工法にて使用する材料に関して、物量あたりのオーソライズされた CO_2 排出原単位を示していない。

木材については、木材 1t 当りの炭素量を文献7)より 0.5t-C/t-wood (木材の元素組成 50%) とした。 $1\text{t-CO}_2=3.67\text{t-C}$ (分子量の比 44/12) より、木材 1t 当りの CO_2 貯蔵量は $1.84\text{t-CO}_2/\text{t-wood}$ となる。

7.2.2 丸太を用いた軟弱地盤対策とセメント固化改良との環境性比較

(1) 想定地盤モデル

軟弱地盤対策としての丸太を用いた工法とセメント固化改良について，その環境性を比較した．比較は，地盤モデルを想定して行った．

想定地盤モデルを図-7.2.1に示す．

軟弱地盤対策対象面積は， $100\text{m} \times 100\text{m} = 1\text{ha}$ とした．

(2) 対象とした工法

木材を利用した工法として先述の「パイルネット工法」を想定した．セメント固化改良工法としては，深層混合処理工法を想定した．深層混合処理工法にはいくつかの方法があるが，想定地盤モデルに適した中圧噴射機械攪拌方式（CMS システム）を適用した．図-7.2.2にパイルネット工法の概要図を，図-7.2.3に深層混合処理工法の概要図を示す．

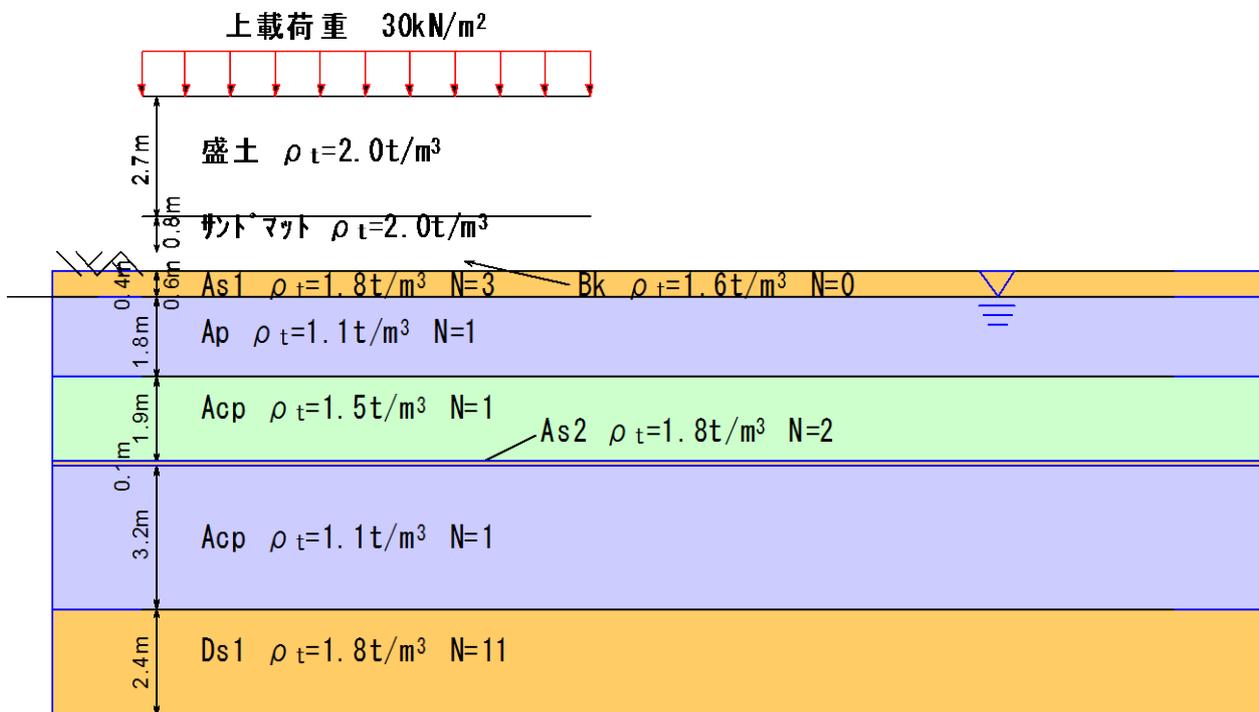


図-7.2.1 想定地盤モデル

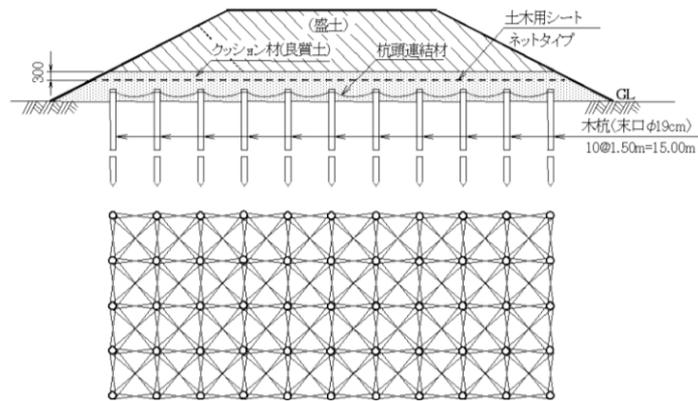
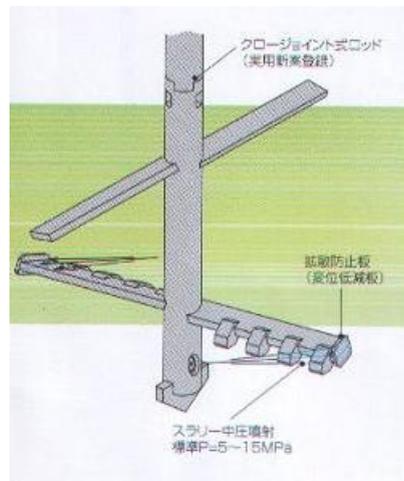


図-7.2.2 パイルネット工法の概要図（パイルネット工法協会提供）



CMSシステム施工手順

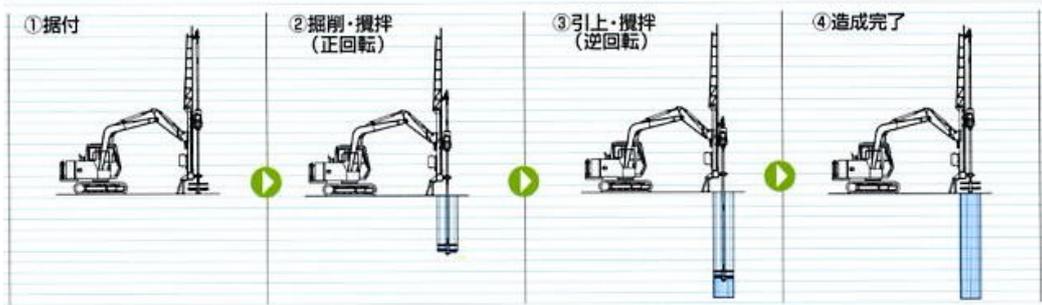


図-7.2.3 深層混合処理工法の概要図（㈱富士建 HP より）

(3) 各工法の設計と評価結果

各工法の設計結果と、当該設計による材料の量、およびそれから算出した CO₂ 排出量を表-7.2.2 に整理した。

木材は打設すればするほど CO₂ の排出がマイナス、つまり CO₂ 貯蔵されていくが、セメント固化改良工法では、逆に CO₂ が大幅に排出されることが分かった。また、このような軟弱地盤対策工事によって貯蔵される CO₂ 量は 1,900t-CO₂ であり、両者の差は、10,500t-CO₂ にもなることも分かった。

なお、施工段階での CO₂ 排出量については計算していないが、バックホウで杭を地盤に圧入していく木材利用工法と、機械による攪拌およびスラリー状セメント系固化材の噴射を行う深層混合処理工法とでは、後者のエネルギー消費（すなわち CO₂ 排出）の方がかなり大きいと考えられ、施工時の CO₂ 排出量を加算した場合には、両者の差はさらに広がるものと考えられる。

ガソリン 1ℓあたりの燃料使用による CO₂ 排出量は 2.31kg-CO₂/ℓ である¹⁰⁾（環境省）。ちなみに同表によれば、灯油は 2.51kg-CO₂/ℓ、軽油は 2.64kg-CO₂/ℓ である。これより、ここで想定した軟弱地盤対策で貯蔵した CO₂ 1,900t-CO₂ と、両者の差 10,500t-CO₂ をガソリンに換算すると、それぞれ、820kl と 4,550kl となる。大型の 20kl タンクローリーを想定すると、それぞれ 41 台分と 228 台分相当だと言いうことが分かる。

IPCC（気候変動に関する政府間パネル、Intergovernmental Panel on Climate Change）の第 4 次評価報告書第 3 作業部会報告書¹¹⁾（2007 年 5 月 4 日経済産業省環境省報道発表資料）によると、「2030 年を見通した削減可能量は、予測される世界の排出量の伸び率を相殺し、さらに現在の排出量以下にできる可能性がある。2030 年における削減可能量は、積み上げ型の研究によると、炭素価格が二酸化炭素換算で 1 トンあたり 20 米ドルの場合は、年 90～170 億トン（二酸化炭素換算）であり、炭素価格が同様に 100 米ドルの場合は、年 160～310 億トン（二酸化炭素換算）である。」とされている。これより、CO₂ 価格が平均的な値として US\$50/t-CO₂ とし、これを円に換算し ¥6,000/t-CO₂ とすると、CO₂ 1,900t-CO₂ と、両者の差 10,500t-CO₂ は、それぞれ、11.4 百万円、63 百万円にもなる。

表-7.2.2 工法の違いによる CO₂ 排出量の比較（1ha あたり）

工法	木材利用工法	セメント固化改良工法
施工数量	杭径=0.2m, 杭長=8m, 打設ピッチ 1.1 m, 本数=8,281 本, 木材総量=1,040t(0.5t/m ³ として)	改良径 1.6m, 改良深さ=8m, 改良ピッチ 2.1m, 改良本数=2,268 本, セメント量=0.25t/m ³ ×1.1 セメント総量=10,027t
施工日数	90 日	220 日
工費比率	1.0	1.7
CO ₂ 計算方法	木杭総量× 木材原単位	セメント総量×セメント原単位
CO ₂ 排出量 (材料分)	▲1,900t-CO ₂	8,600t-CO ₂

7.2.3 丸太杭, PC 杭, 鋼管杭の環境性比較

丸太基礎は、構造物基礎としては既成杭（完成品の杭を地中に設置する方法）に分類される。現在用いられている主要な既成杭として、鋼管杭と PC 杭（プレストレスを与えられたコンクリート杭）が挙げられる。丸太基礎、鋼管杭および PC 杭について、材料製造時の二酸化炭素排出量を比較した。丸太基礎については、カラマツとスギの2樹種を対象とした。

異なる種類の杭を比較するための基準として、軸方向許容支持力を用いた。許容支持力を 45t, 80t, 120t の3段階に設定し、それぞれの許容支持力を満足する杭の寸法を杭の種類ごとに検討し、杭種類間で比較を行った。実際に杭基礎を設計する場合には、軸方向許容支持力のみを考慮する訳ではないが、詳細に検討しようとするれば地盤や構造物によってケース・バイ・ケースとなることが考えられ、比較を単純にするため今回は軸方向許容支持力のみを基準とした。

材料製造時の二酸化炭素排出量は、まず各杭を構成する各材料（鉄、コンクリートおよび木材）の質量（杭基礎長さ 1m 当り）を求め、これに文献5)より引用した各材料製造時の CO₂ 排出量原単位 (t-CO₂/t) を乗じた。CO₂ が蓄積されていれば、値はマイナスで示される。CO₂ の排出段階としては、材料製造時の後に、製品製造時、運搬時、施工時が続くが、今回は簡易な比較として材料製造時のみの値を比較した。

比較結果を図-7.2.4 に、計算の過程を表-7.2.3 に示す。

計算の結果、材料のみの比較では当然ながら、鋼管杭と PC 杭では材料製造時に二酸化炭素を排出しているのに対し、丸太基礎では材料において二酸化炭素が大きく蓄積されていることが示された。一方、比重や強度の異なる二つの樹種について、同等の支持力を得るためには重量が同等となり、結果として二酸化炭素の蓄積量がほぼ同じとなったことは興味深い。

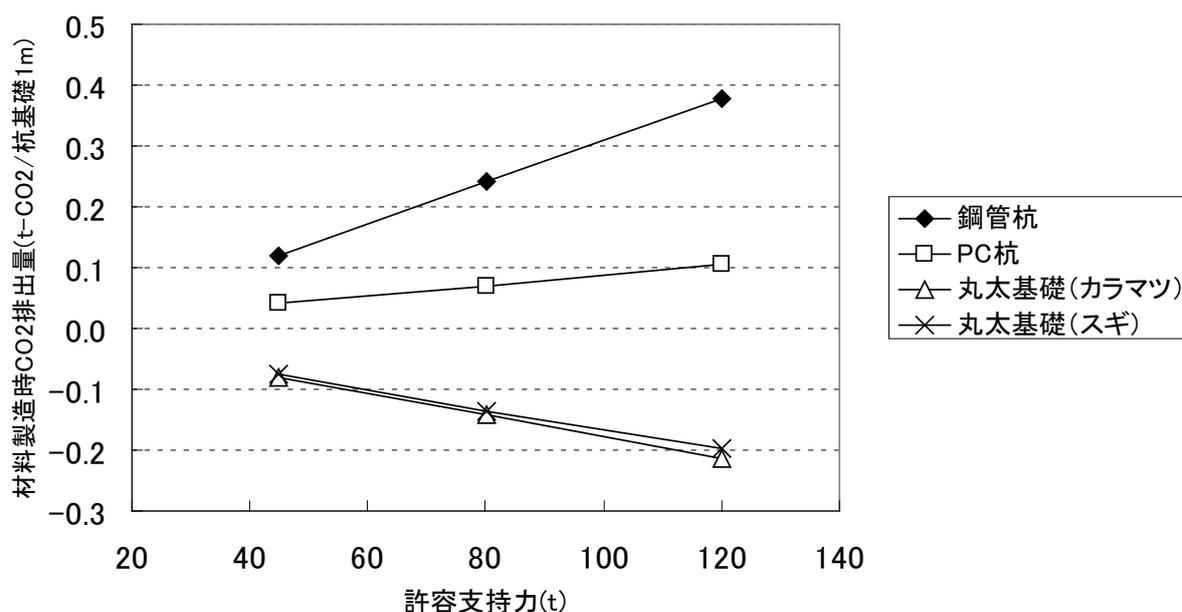


図-7.2.4 許容支持力別の各種既成杭の材料製造時の CO₂ 排出量

表-7.2.3 各種既成杭の材料製造時 CO2 排出量計算

ケース1
許容支持力 45t の場合

杭種別	鋼管杭	PC杭	丸太基礎		
丸太基礎樹種	—	—	カラマツ	スギ	
直径(外径)(mm)	400	300	340	270	
厚さ(mm)	9	60	—	—	
PC杭種類	—	A種	—	—	
PC鋼線断面積(cm ²)	—	2.31	—	—	
杭本数	1	1	1	2	
許容支持力(t)	45	50	45.4	45.8	
単位重量(kg/m)	鋼管	86.8	—	—	
	鉄筋	—	1.81	—	
	セメント製品	—	117.19	—	
	木材	—	—	43.6	40.1
	合計	86.8	119	43.6	40.1
杭材料製造時	鋼管	0.121	—	—	
CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /杭1m)	鉄筋	—	0.002	—	
	セメント製品	—	0.040	—	
	木材	—	—	-0.080	-0.074
	合計	0.121	0.042	-0.080	-0.074

丸太基礎樹種	許容圧縮応力度(kg/cm ²)	断面積(cm ²)	直径(cm)	本数	支持力(t)	乾燥比重	乾燥重量(kg/m)
カラマツ	50	907.46	34	1	45.4	0.48	43.6
スギ	40	572.265	27	2	45.8	0.35	40.1

* PC杭について、鉄筋の比重は7.85とした。

材料製造時単位CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /材料1t)	鋼管	鉄筋	セメント製品	木材
	1.39	0.94	0.34	-1.84

ケース2
許容支持力 80t の場合

杭種別	鋼管杭	PC杭	丸太基礎		
丸太基礎樹種	—	—	カラマツ	スギ	
直径(外径)(mm)	600	400	320	300	
厚さ(mm)	12	75	—	—	
PC杭種類	—	A種	—	—	
PC鋼線断面積(cm ²)	—	3.85	—	—	
杭本数	1	1	2	3	
許容支持力(t)	80	80	80.4	84.8	
単位重量(kg/m)	鋼管	174	—	—	
	鉄筋	—	3.02	—	
	セメント製品	—	195.98	—	
	木材	—	—	77.2	74.2
	合計	174	199	77.2	74.2
杭材料製造時	鋼管	0.242	—	—	
CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /杭1m)	鉄筋	—	0.003	—	
	セメント製品	—	0.067	—	
	木材	—	—	-0.142	-0.136
	合計	0.242	0.069	-0.142	-0.136

丸太基礎樹種	許容圧縮応力度(kg/cm ²)	断面積(cm ²)	直径(cm)	本数	支持力(t)	乾燥比重	乾燥重量(kg/m)
カラマツ	50	803.84	32	2	80.4	0.48	77.2
スギ	40	706.5	30	3	84.8	0.35	74.2

* PC杭について、鉄の比重は7.85とした。

材料製造時単位CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /材料1t)	鋼管	鉄筋	セメント製品	木材
	1.39	0.94	0.34	-1.84

ケース3
許容支持力 120t の場合

杭種別	鋼管杭	PC杭	丸太基礎		
丸太基礎樹種	—	—	カラマツ	スギ	
直径(外径)(mm)	800	500	320	280	
厚さ(mm)	14	90	—	—	
PC杭種類	—	A種	—	—	
PC鋼線断面積(cm ²)	—	5.39	—	—	
杭本数	1	1	3	5	
許容支持力(t)	120	50	120.6	123.1	
単位重量(kg/m)	鋼管	271	—	—	
	鉄筋	—	4.23	—	
	セメント製品	—	296.77	—	
	木材	—	—	115.8	107.7
	合計	271	301	115.8	107.7
杭材料製造時	鋼管	0.377	—	—	
CO ₂ 排出量	鉄筋	—	0.004	—	
	セメント製品	—	0.101	—	

丸太基礎樹種	許容圧縮応力度(kg/cm ²)	断面積(cm ²)	直径(cm)	本数	支持力(t)	乾燥比重	乾燥重量(kg/m)
カラマツ	50	803.84	32	3	120.6	0.48	115.8
スギ	40	615.44	28	5	123.1	0.35	107.7

* PC杭について、鉄の比重は7.85とした。

材料製造時単位CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /材料1t)	鋼管	鉄筋	セメント製品	木材
	1.39	0.94	0.34	-1.84

数値の由来：

鋼管杭に関して、許容支持力に対応する杭の直径は、文献12)の p.78, (2)に示された小林勲氏提案の値を参考とした。この杭に対応する厚さ、単位質量などの値は、文献12)の

pp.28-29 を参照した。PC 杭に関して、許容支持力に対応する杭の直径，厚さ，種別，鋼線断面積，単位重量（合計）は，文献13)を参照した。

丸太基礎に関して，許容圧縮応力度は，文献14)の「4 章基礎の設計，3 節くい基礎の設計，28 条くい材料の許容応力度」の「表 28.1 普通構造材の繊維方向許容応力度」を参照した。乾燥密度（全乾比重）は文献15)を参照した。

7.3 丸太地中打設による軟弱地盤対策例

丸太を用いた軟弱地盤対策として今後適用していくことが可能だと想定される事例を以下に示す。

(1) 上載荷重がほとんど無いか小さい場合

- ・ 道路
- ・ 駐車場
- ・ グラウンド
- ・ コンテナを含む資材置き場
- ・ 構造物周囲
- ・ 航路
- ・ 埋立地空港補助施設
- ・ 上下水などの埋設管路

道路、駐車場、グラウンド、資材置き場など

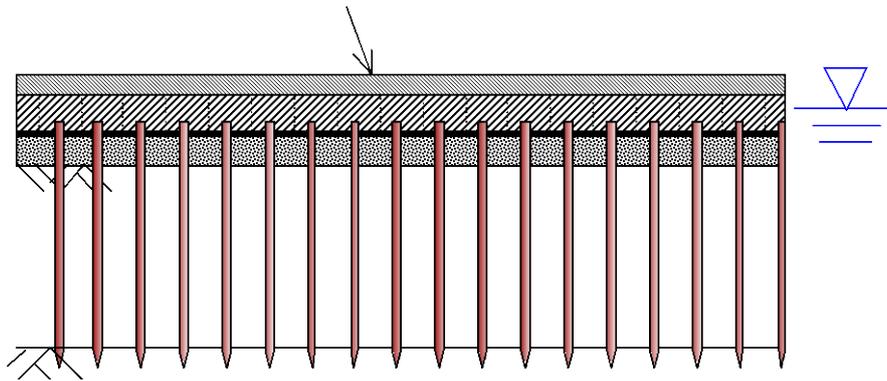


図-7.3.1 道路・駐車場・グラウンド・資材置き場などへの適用例

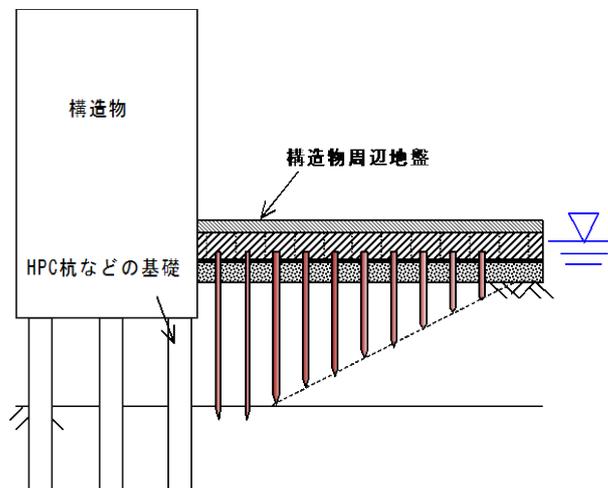


図-7.3.2 構造物周辺への適用例

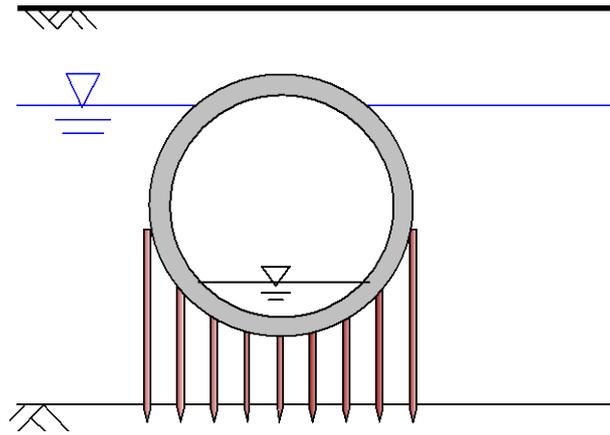


図-7.3.3 上下水などの埋設管路への適用例

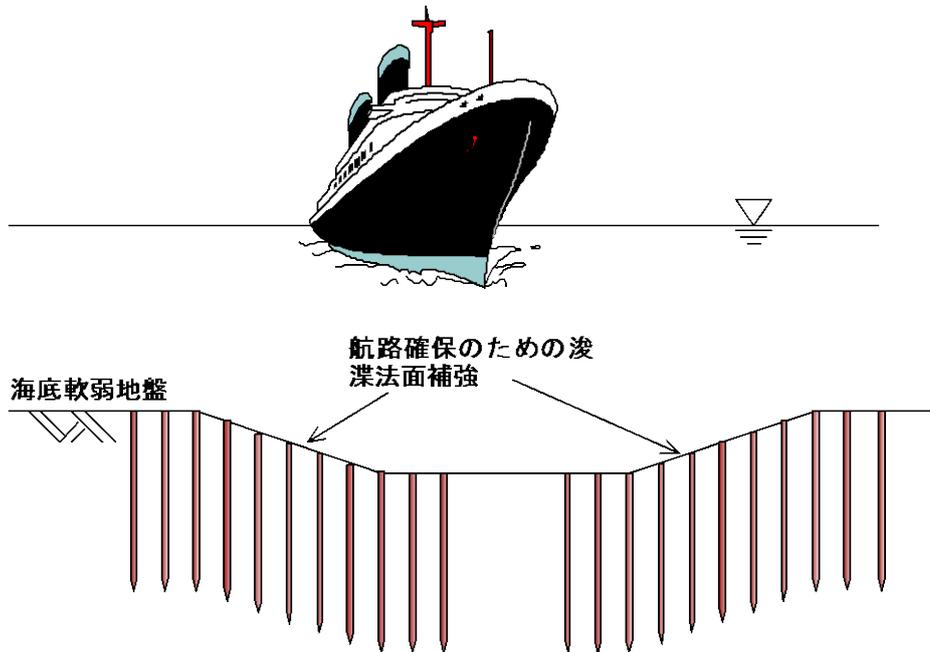


図-7.3.4 航路などへの適用例

(2) 上載荷重が中程度に大きい場合

- ・ 戸建て住宅
- ・ 小規模倉庫
- ・ 工場・低層ビル
- ・ 公園
- ・ 水路

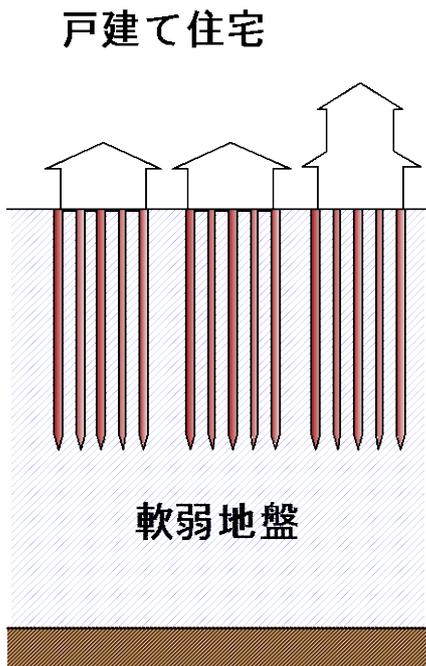


図-7.3.5 戸建て住宅への適用例

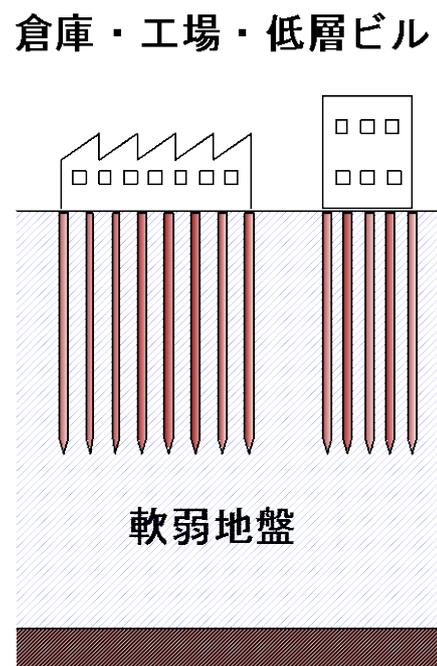


図-7.3.6 倉庫・工場・低層ビルへの適用例

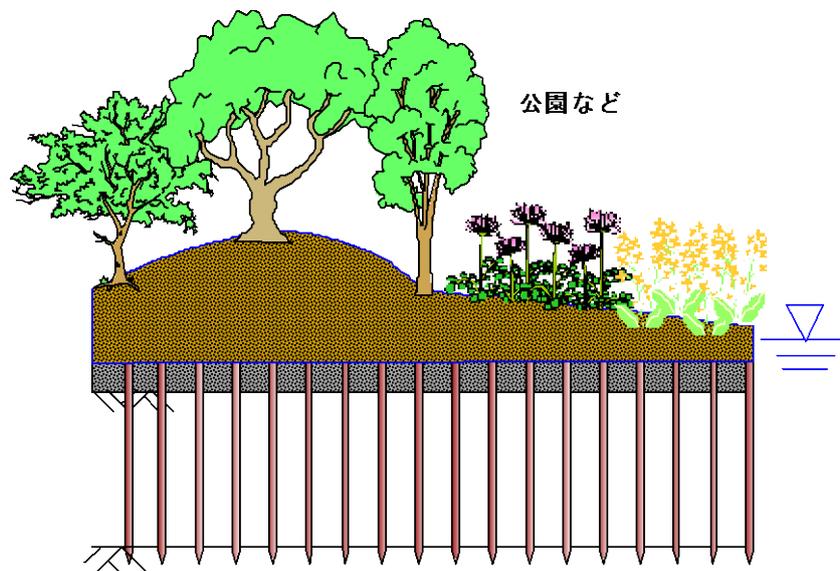


図-7.3.7 公園などへの適用例

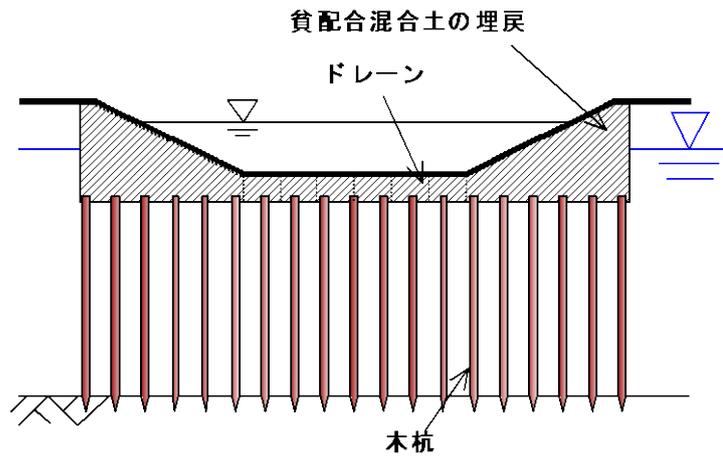


図-7.3.8 水路への適用例

(3) 上載荷重が大きい場合

- ・ 盛土（河川堤防，スーパー堤防，道路盛土）
- ・ 盛土（鉄道）
- ・ 埋立地空港滑走路

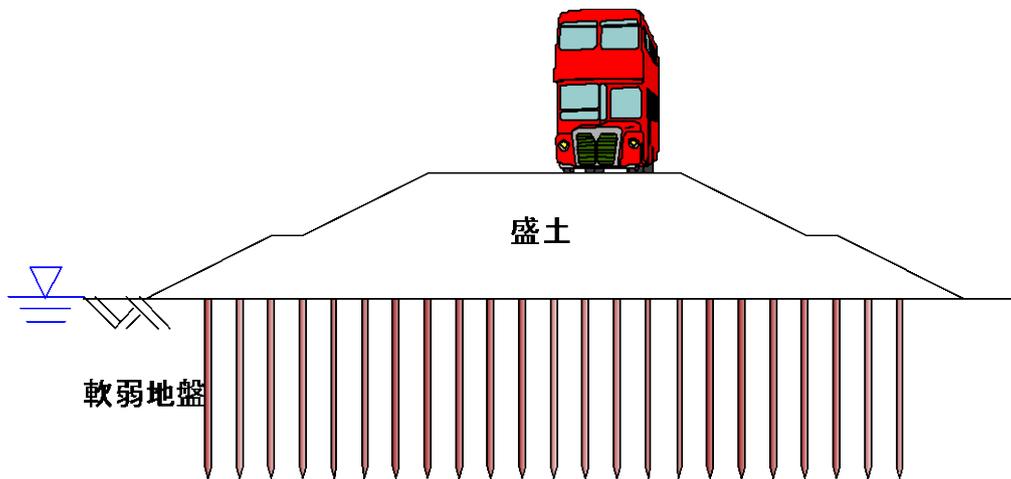


図-7.3.9 河川堤防・スーパー堤防・道路盛土への適用例

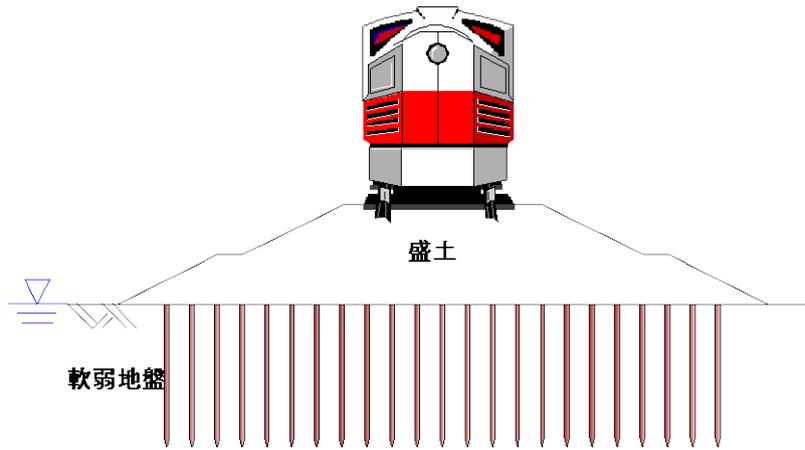


図-7.3.10 鉄道盛り土への適用例

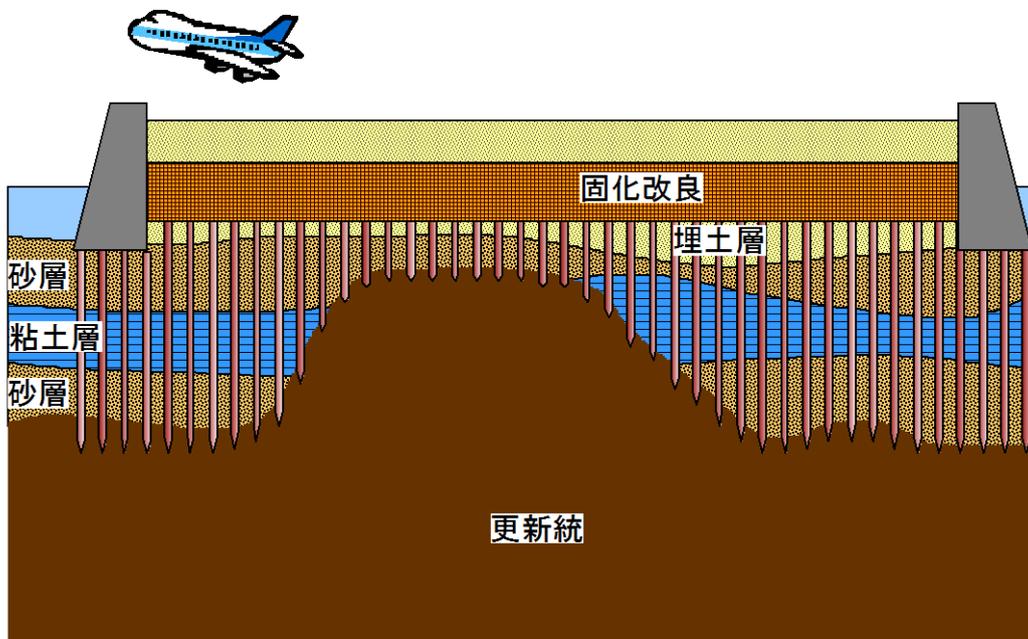


図-7.3.11 埋立地空港への適用例

参考文献：

- 1) 日本木材保存協会：2.1.3 腐朽の発生と進行，木材保存学入門改訂版，pp.68-75
- 2) 鉄道総合技術研究所：杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き，1987.9.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.339-348，2001.10.
- 4) 地盤工学会：基礎の沈下予測と実際，地盤工学・実務シリーズ 12，p.129，2000.2.
- 5) 日本建築学会：建築物の LCA ツール ver.4.0，日本建築学会，ワークシート「複合原単位」，「資材構成」，「原単位」，2005. 12.
- 6) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その 2），コンクリート技術シリーズ 62，p.32-40，2004.
- 7) 高橋徹，中山義雄編：4.1 元素組成，木材科学講座 3 物理，海青社，p.23，1995.3.
- 8) 南齋規介，森口祐一，東野 達：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3IED)－LCA のインベントリデータとして－，独立行政法人国立地球環境研究所 地球環境センター，2002.
- 9) 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター：よくあるご質問，3EID ホームページ，独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターURL.
- 10) 環境省地球環境局地球温暖化対策課 URL：温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果，平成 12 年 9 月環境庁温室効果ガス排出量算定方法検討会，2000.9.，
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h1209/02.pdf>
- 11) 環境省 URL：経済産業省環境省：気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 4 次評価報告書第 3 作業部会報告書(気候変動の緩和策)の公表について，報道発表資料，2007.5.4.，
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/press_070504.pdf
- 12) 新日本製鐵株式会社：鋼管杭の手引，新日本製鐵株式会社，p.28，29，78，1985.
- 13) PC パイルハンドブック編集委員会編：PC パイルハンドブック，山海堂，p.18，1970.
- 14) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準・同解説，667p，1974.11.
- 15) 貴島恒夫 他：原色木材大図鑑，保育社，1962.

- 図-7.1.1 単杭としての検討
- 図-7.1.2 群杭としての検討
- 図-7.1.3 円弧すべりの検討が必要な場合
- 図-7.1.4 鉄筋の分担荷重
- 図-7.1.5 放物線ケーブル
- 図-7.1.6 ネットの分担面積
- 図-7.1.7 基礎形式の比較
- 図-7.1.8 基礎の荷重度からみた適用範囲
- 表-7.2.1 使用した原単位
- 図-7.2.1 想定地盤モデル
- 図-7.2.2 パイルネット工法の概要図（パイルネット工法協会提供）
- 図-7.2.3 深層混合処理工法の概要図（㈱富士建 HP より）
- 表-7.2.2 工法の違いによる CO2 排出量の比較（1ha あたり）
- 図-7.2.4 許容支持力別の各種既成杭の材料製造時の CO2 排出量
- 表-7.2.3 各種既成杭の材料製造時 CO2 排出量計算
- 図-7.3.1 道路・駐車場・グラウンド・資材置き場などへの適用例
- 図-7.3.2 構造物周辺への適用例
- 図-7.3.3 上下水などの埋設管路への適用例
- 図-7.3.4 航路などへの適用例
- 図-7.3.5 戸建て住宅への適用例
- 図-7.3.6 倉庫・工場・低層ビルへの適用例
- 図-7.3.7 公園などへの適用例
- 図-7.3.8 水路への適用例
- 図-7.3.9 河川堤防・スーパー堤防・道路盛土への適用例
- 図-7.3.10 鉄道盛り土への適用例
- 図-7.3.11 埋立地空港への適用例

資料 1

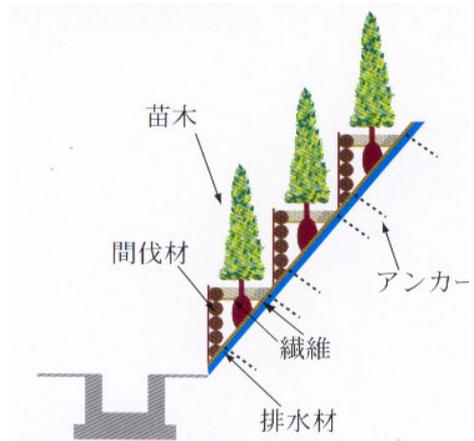
福井県内の土木事業における木材利用事例集

福井県内の土木事業における木材利用事例集

1. 福井県における木材を利用した土木技術の開発事例

○ 仮設間伐材と繊維を用いた法面工法の技術開発

間伐材は強度や材質が一定でないことや、耐用年数がはっきりしていないこと、あるいは間伐材の発生場所が主に山間地で使用現場まで遠く運搬コストが割高となることなどから、その利用が限られているのが現状です。このため、間伐材を仮設の土留めの柵として使い、長期の安定を図るために、繊維と排水材を用い、繊維に根がからむことにより法面から木が土塊ごと崩れるのを防止する工法です。



仮設間伐材と繊維を用いた法面工



敷設実験（根回り繊維敷設状況）【H15. 4】



試作品の設置状況（全景）【H18.7】

○ 廃プラスチックと廃木材チップを利用した舗装の技術開発

プラスチック廃棄物を解重合・低粘度化して得たワックス状樹脂を接着材とし、廃木材等を骨材とし、環境負荷の低減を目的とした材料を用い、その配合等から経済的で耐久性と衝撃吸収性を兼ね備え、景観性等にも配慮した歩道等における舗装技術の開発を行っています。廃棄物を有効利用しておりますので地球環境にやさしい技術です。



遊歩道施工状況

2. 福井県内での木材利用実施例



木製ダム工（大飯郡おおい町名田庄下）



木柵工（越前市小野）



木製ブロック積工（小浜市飯盛）



木工沈床工（福井市間山町）



丸太水路工（越前市長五町）



木製ガードレール（福井市大名町）



木道 (敦賀市池河内)



木製歩道橋 (敦賀市沓見)



丸太防風柵 (あわらし市波松)



木製浮島 (福井城址 お堀)

資料 2

共通仕様書および設計マニュアルの修正について (本研究成果)

- ・ 資料 2-1 木工沈床に使用する材料について
- ・ 資料 2-2 「基礎工設計マニュアル（福井県土木部監修）」における松杭基礎の記述に関する修正案

河第 1094 号
平成19年10月11日

各出先機関の長 様

河 川 課 長

木工沈床に使用する材料について

河川工事の木工沈床の施工に使用する方格材および敷成木については、これまで福井県土木工事共通仕様書第2編河川編において、生松丸太の使用を義務付けてきたところである。

しかし、以下の理由により、生松丸太に加えて杉丸太の使用を認めることとする。またその使用にあたっては、「特記仕様書（下記参照）」に明示することとしたので、通知するとともに関係者に周知願います。

本通知は、10月15日以降発注契約の工事に適用することとするが、これ以前に契約済み・設計中・設計済みの工事については対象外とする。ただし対応可能なものについてはできるだけ対応すること。

1 理由

- (1) 木材は、水中では、材質に関係なく腐朽しない。
- (2) 全国的に沈床工の材料として杉の使用を認めている。
- (3) 福井県では松材の市場性が縮小している。
- (4) 杉間伐材の利用促進を図る必要がある。

2 特記仕様書記載例

木工沈床の施工については、使用する方格材および敷成材は、生松丸太もしくは杉丸太としなければならない。

担当：河川課河川整備 G (内 3393、3394) TEL 0776-20-0481 FAX 0776-20-0659

「基礎工設計マニュアル（福井県土木部監修）」※における松杭基礎の記述に関する修正案

※ 基礎工設計マニュアル 平成 17 年 7 月 【監修】福井県土木部 【編著】財団法人 福井県建設技術公社

■p. 311

第 8 章 その他の基礎

8-1 基礎の種類

1. その他の杭基礎

< 現行 >

- 1) 松杭基礎 主に、小構造物に使用される松丸太による杭基礎で、元口から末口まで一様に径が変化するものを用いる。なお、杭全長が常に地下水位面以下にあるようにすること。
大きな水平力を受ける構造物には用いない（継ぎ杭は原則として考えない）。

↓

< 修正案 >

- 1) 木杭基礎 主に、小構造物に使用される丸太による杭基礎で、元口から末口まで一様に径が変化するものを用いる。樹種としてはスギまたはマツを使用する。なお、腐朽防止のため杭全長が常に地下水位面以下にあるようにする必要があるが、杭頭が水位変動域に位置する場合には腐朽する場合もあるので必要に応じ防腐処理を施すこと。
大きな水平力を受ける構造物には用いない（継ぎ杭は原則として考えない）。

■p. 313

8-2 設計手法

< 現行 >

1. 木杭(松杭基礎)の支持力の計算方法

↓

< 修正案 >

1. 木杭の支持力の計算方法

☆Comment

< 現行 >

1. 松杭基礎の支持力

【留意点】松杭基礎の採用にあたっては、①上部構造が小構造物であること、②大きい水平力を受けないこと、③重要な構造物でないこと、④地下水位の変動がないこと（杭全長が常に地下水位面以下にあること）、⑤歩道部に設けられる構造物の基礎で、局所的な施工であること、⑥車道部にあっては、仮設または仮設に準じる構造物の基礎であることを採用の条件として、主管課とも協議のうえ十分検討する。

↓

< 修正案 >

1. 木杭基礎の支持力

【留意点】木杭基礎の採用にあたっては、①上部構造が小構造物であること、②大きい水平力を受けないこと、③重要な構造物でないこと、④杭全長が常に地下水位面以下にあること、⑤地下水位の変動域においては必要に応じ防腐処理を施すこと、⑥歩道部に設けられる構造物の基礎で、局所的な施工であること、⑦車道部にあっては、仮設または仮設に準じる構造物の基礎であることを採用の条件として、主管課とも協議のうえ十分検討する。

■p. 314

2) 圧縮に対する応力度の算定式および許容応力度は、以下のとおりである。

杭の軸方向圧縮応力度 (N/mm²) :

$$\sigma_c = P_v / A_p \leq 6 \text{N/mm}^2 \quad \dots (8-2-2)$$

ここに P_v : 杭の鉛直反力 (N)

A_p : 杭の断面積 (mm²)

< 現行 >

なお、上記の許容応力度は、「道路土工－仮設構造物指針」p. 54 表 2-6-9 木材の許容応力度（仮設構造物に適用するため、短期扱い；えぞまつ、とどまつに該当）を 1.5 で割った値である。

↓

< 修正案 >

なお、上記の許容応力度は、「道路土工－仮設構造物指針」p. 54 表 2-6-9 木材の許容応力度（仮設構造物に適用するため、短期扱い；スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガに該当）を 1.5 で割った値である。

■p. 315

8-3 設計計算例

< 現行 >

8-3 L型擁壁の計算例（松杭基礎）

1. 設計条件

L型擁壁を下記に示す条件のもとで設計する。

(1) 構造様式および形状寸法

構造形式 L型プレキャスト擁壁

基 礎 杭基礎：松杭（末口 18cm） ※ 図-8.3.1 構造寸法 → 松丸太（末口 18cm）

↓

< 修正案 >

8-3 L型擁壁の計算例（木杭基礎）

1. 設計条件

L型擁壁を下記に示す条件のもとで設計する。

(1) 構造様式および形状寸法

構造形式 L型プレキャスト擁壁

基 礎 杭基礎：木杭（末口 18cm） ※ 図-8.3.1 構造寸法 → 丸太（末口 18cm）

< 現行 >

3. 松杭基礎

(1) 設計の基本

松杭は、他の杭に比べて耐力が劣ることや、品質にバラツキが多いことから、一般に重要な構造物では使用されていないが、稀に小構造物で用いられることがある。したがって、このような場合の支持力の検討手法は、簡易なものが望ましいことから、以下の方法により検討を行う。

松杭の支持力で、鉛直方向は道示Ⅳ（下部構造編）の極限支持力推定式から算出する。また、水平方向の変位量の照査は、水平荷重が小さい条件で本基礎形式が適用されることから、ここではこれを無視して検討を行う。



< 修正案 >

3. 木杭基礎

(1) 設計の基本

木杭は、他の杭に比べて耐力が劣ることや、品質にバラツキが多いことから、一般に重要な構造物では使用されていないが、稀に小構造物で用いられることがある。したがって、このような場合の支持力の検討手法は、簡易なものが望ましいことから、以下の方法により検討を行う。

木杭の支持力で、鉛直方向は道示Ⅳ（下部構造編）の極限支持力推定式から算出する。また、水平方向の変位量の照査は、水平荷重が小さい条件で本基礎形式が適用されることから、ここではこれを無視して検討を行う。

< 現行 >

考え方の Point

松杭の耐久性が疑問視されるため適用が限定されるが、松杭基礎の設計手法を確立することで掲載した。 水平力が小さい条件で適用されることから、水平方向に対する検討は、杭頭変位量が微少であると~~考え~~計算を省略している。



< 修正案 >

考え方の Point

2005年に発効された京都議定書では、我が国の温室効果ガスの削減目標6%のうち3.8%を森林による吸収によるものとしている。この数値は管理の行き届いた優良な森林によりもたらされるものであるため、この目標を達成するには木材の植林、育成、伐採、流通、加工、利用という森林管理のサイクルを循環させる必要がある。したがって、県土の4分の3が森林である福井県において優良な森林面積を増やし、間伐材等の木材の長期的、安定的な需要の確保を行うことが地球温暖化防止に大きく寄与できるものと思われる。この様な社会的背景より、土木事業においても木杭の積極的な使用を推進していく必要があると言える。

資料 3

発表論文

No.	著者	タイトル	発表先	ページ
1	沼田淳紀 上杉章雄 吉田雅穂 久保光	土木工事における木材利用の文献調査	第42回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2211-2212, 2007.7.	資 3-1
2	吉田雅穂 沼田淳紀 上杉章雄 久保光	足羽川における木杭の掘出し調査	第42回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2213-2214, 2007.7.	資 3-3
3	上杉章雄 沼田淳紀 久保光 吉田雅穂	足羽川で採取された木杭の樹種評価	第42回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2215-2216, 2007.7.	資 3-5
4	沼田淳紀	木材利用の文献調査	第42回地盤工学研究発表会, DS-3 歴史的な地盤構造物の構築・保存技術について, 資料-7, pp.33-35, 2007.7.	資 3-7
5	久保光 上杉章雄	足羽川における木杭基礎の掘出し調査	平成19年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 調査・計画・設計部門 I, No.9, 2007.7.	資 3-11
6	沼田淳紀 上杉章雄 吉田雅穂 久保光 源濟英樹 野村崇	土木で用いられた木材の腐朽に関する事例調査	第57回日本木材学会大会, Q09-1300, 2007.8.	資 3-15
7	上杉章雄 沼田淳紀 吉田雅穂 久保光 源濟英樹 野村崇	足羽川の橋梁基礎に用いられた木杭の掘出し調査	第57回日本木材学会大会, Q09-1315, 2007.8.	資 3-17
8	沼田淳紀 上杉章雄 吉田雅穂 久保光 野村崇	足羽川で採取した木杭調査の概要	第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.85-90, 2007.8.	資 3-19
9	吉田雅穂 沼田淳紀 上杉章雄 久保光 源濟英樹 野村崇	足羽川で掘り出された木杭の健全度調査	土木学会第61回年次学術講演会概要集, 第7部, pp.183-184, 2007.9.	資 3-25

土木工事における木材利用の文献調査

木杭, 地球温暖化, 樹種

飛島建設	国際会員	沼田淳紀
飛島建設	正会員	上杉章雄
福井工業高等専門学校	正会員	吉田雅穂
福井県雪対策・建設技術研究所		久保 光

1. はじめに

京都議定書が 2008 年より実施される。これにより、日本は 2008 年～2012 年の平均のCO₂排出量を 1990 年水準比 6%削減する目標を達成しなければならない。この目標値達成のために、あらゆる角度から検討を行う必要がある。また、これを単に数値目標とせず、これを機会に持続可能な社会へ向けて今後どのような方向へ建設事業が進むべきかを考えるべきだと考える。そこで、筆者らは、一つの方向性として、建設材料に古来多く使われてきた土や木を復活させることを考えている¹⁾。

丸太基礎をはじめ木材は、土木工事に古代より使用されている。杭基礎についてみると、現在使用されているコンクリート杭や鋼管杭の歴史は浅く、木杭基礎の歴史は洋の東西を問わずむしろこれよりはるかに古い²⁾³⁾。そこで、建設工事への木材利用の現状を探るために、過去の土木工事における木材利用について文献調査を行った。

2. 調査方法

調査の目標は、特に木材使用時に課題となる腐朽についての現状である。そこで、調査対象は、主に構造物基礎を対象とした地中にある木杭と、河川工事に使用される木材とした。調査対象とした資料は、(1)土木学会年次学術講演会論文集 (1999 年～2006 年の 8 年分)、(2)地盤工学会地盤工学研究発表会講演概要集 (2002 年～2006 年の 5 年分)、(3)その他であり、全部で 53 の文献である。なお、紙面の都合上文献名は割愛させて戴く。

調査項目は、(1)対象構造物、(2)木材用途、(3)使用場所、(4)施工時期、(5)調査時期、(6)設置期間、(7)樹種、(8)木材寸法、(9)地盤との関係、(10)地下水位、(11)木材の腐朽状態 (地下水位以浅、変動域、地下水位以深)、(12)その他である。

3. 調査結果

53 の文献より、47 地点のデータが得られた。得られたデータの内約 2 割が鉄道または道路橋梁の基礎であり、約 2 割がビルまたは住宅の基礎であり、約 4 割が河川構造物である。ここで河川構造物とは、沈床、樋門基礎、聖牛、ウッドブロック、牛棹、杭柵、板柵などである。47 地点の樹種の内訳は、松または松杭と記述されたものが 3 割である。この中には、カラマツ (カラマツ属)、アカマツ (マツ属)、ベイマツ (トガサワラ属) が含まれると考えられるが、これらを総称して松杭とすると、松杭は全体の約 4 割である。一方、スギも全体の約 4 割を占める。図-1に、構造物基礎とし、鉄道および道路橋基礎、ビル住宅基礎、火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種を示す。不明を除けば、全てがカラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭である。図-2に、河川構造物に用いられた木材の樹種を示す。約 2 割がアカマツ、ベイマツを含めた松杭であるが、残り 8 割はスギである。これは、一般的にスギはカラマツ、ベイマツと耐朽性は同等で、アカマツやクロマツなどよりも耐朽性が高い⁴⁾ことや、近年聖牛のような過去使用された工法を見直し木材を使用することがあり、この際現在大量に存在しているスギを使用したということが考えられる。図-3に、木材の設置期間を示す。約半数が 10 年未満であるが、約 2 割は 50～100 年であり、データの中で最も古いものは、浜松町駅近くの山手線および京浜東北線のレンガ造アーチ高架橋基礎の 90 年であった。

図-4～図-6に、それぞれ地下水位変動域以浅、変動域、変動域以深における腐朽状態を示す。地下水位変動域以浅や変動域では、健全であったものが 6 割あるが、腐朽したのも 4 割であることがわかる。このように、地下水位変動域以浅では、腐朽する場合としない場合があるようであり、今後どのような条件でこのような差が生じるのかを明らかにしていく必要がある。一方、地下水位変動域以深では、100%が健全であり、地下水位以深では腐朽が進行しないことが過去のデータから明らかとなった。

図-7に、地下水位変動域以深における樹種の割合を示す。樹種は、カラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭が 5 割以上を占め、スギも 3 割近く存在している。一般に、土木工事用の木杭にはカラマツやベイマツを含めた松杭が使用されているが、スギも地下水位以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる。図中には、それぞれの樹種の内、最も古かった年代を併記した。アカマツ、ベイマツ、松杭はいずれも 50 年以上経過したのものがあり、水中下であればかなりの長期間健全な状態を保つことが確認された。一方、スギは調査した範囲では最大で 26 年であった。

以上より、今回の調査範囲で木材は、地下水位変動域以深であれば樹種に関係なく、腐朽は進行せず健全であることが分かった。一般に土木工事においては松杭が多く使われ、腐朽に対しても抵抗性が高いように思われているが、スギであっても地下水位変動域以深であれば抵抗性が高いことがわかる。このような松杭への誤解について三宅⁵⁾は、次のように述べている。「現在、スギ間伐材を土木資材として需要開拓する試みが全国でなされている。ところが、工事担当者には依然として根強いマツ信仰があり、スギの需要が伸び悩む原因となっている。マツ信仰とは、杭木等の土木資材には昔からマツが使われており、マツの耐久性はスギを上回るという誤解である。(中略)マツの耐朽性、耐犠牲性はスギを下回っており、マツが使

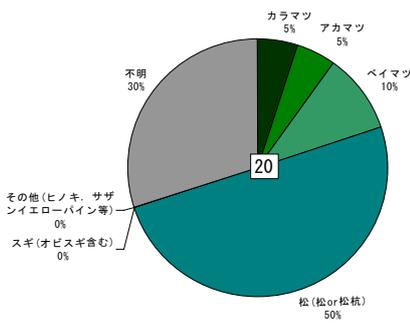


図- 1 鉄道および道路橋基礎, ビル住宅基礎, 火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種

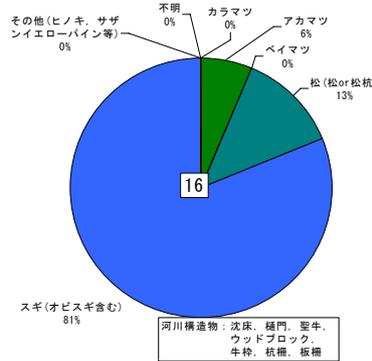


図- 2 河川構造物に用いられた木材の樹種

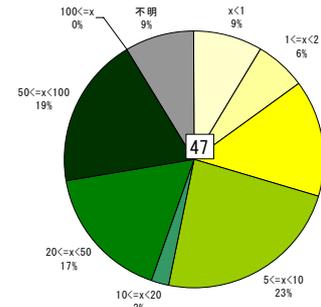


図- 3 木材の設置期間

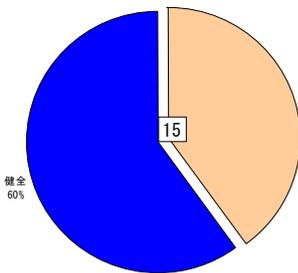


図- 4 地下水位変動域以浅における腐朽状態

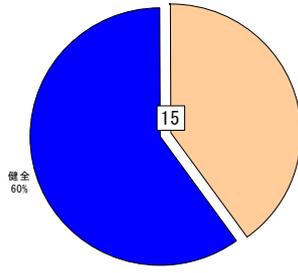


図- 5 地下水位変動域における腐朽状態

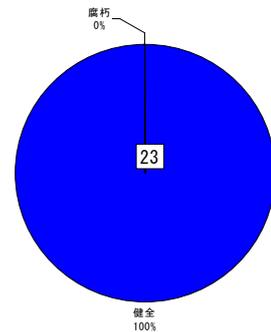


図- 6 地下水位変動域以深における腐朽状態

われたのは, その時代の資源状況であると考えている. 樋門の建設当時, すなわち大正 5 年の県統計書を見ると, スギ伐採材積 168 千石 (約 47 千立法) に対して, マツの伐採は 433 千石 (約 121 千立法) と多く, 石あたり単価はスギ 2.88 円に対して 0.45 円と安く, 土木資材として入手しやすかったと考えられる. すなわち, 基礎杭にマツが使われたのは, 当時の資源状況によるものと推察される. 昔から河川工事にはマツが使われてきており, いつの間にか土木資材としてマツが耐朽性に優れているという誤解が生じているが, こうした資源的な背景を需要先に伝えていくことも必要である.]

なお, 旧建築基礎構造設計基準⁵⁾によればスギは, アカマツ, クロマツ, カラマツ, ベイマツと比べると圧縮強度は低く, 木材の分野ではスギの耐朽性はカラマツ, ベイマツと同等でありアカマツやクロマツよりもむしろ優れている⁴⁾とされている.

4. まとめ

- (1) 地下水位変動域や地下水位変動域以浅に設置された木材は, 腐朽しているものと健全なものがある.
- (2) 地下水位変動域以深に設置された木材は, 樹種に関係なく 100%が健全であり, このような環境下では土木資材として十分な期間健全性を保つことがわかった.
- (3) 土木資材としては一般にカラマツ, ベイマツを含めたマツが多く使われるが, スギについても同様に地下水位変動域以深では健全性を保つことがわかった.
- (4) 収集されたスギは, 設置期間が最大で 26 年であり, 今後さらにデータを集め長期健全性を明らかにする必要がある.

謝辞: 本研究は, 福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである. 関係各位に心より感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第 14 回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp.97-102, 2006.8.
- 2) 塩井幸武: 土木 (道路) における杭基礎の変化・変遷について, 土と基礎, 54-6(581), pp.9-12, 2006.6.
- 3) 佐々木晴美: 軟弱地盤でのくい工法による施工例, 基礎工, pp.91-96, 1981.2.
- 4) 屋我副良, 河内進策, 今村祐嗣編: 木材科学講座 12 保存・耐久性, 海青社, p.80, 1997.3.
- 5) 日本建築学会: 建築基礎構造設計基準・同解説, 技報堂, p.193, 1960.11.
- 6) 三宅裕司, 橋本茂, 網田克明: 樋門基礎杭として 80 年以上経過したマツ材の性能, 徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告, 第 2 号, 2003.

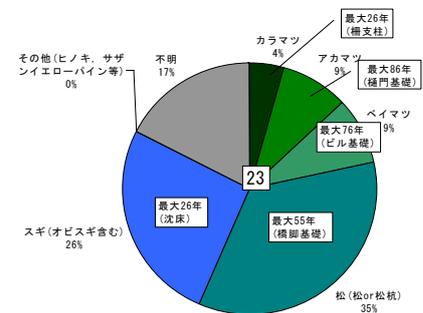


図- 7 地下水位変動域以深における樹種

足羽川における木杭の掘出し調査

木杭, 地球温暖化, 樹種

福井工業高等専門学校 正会員 ○吉田雅徳
 飛島建設 国際会員 沼田淳紀
 飛島建設 正会員 上杉章雄
 福井県雪対策・建設技術研究所 久保 光

1. はじめに

平成 16 年 7 月福井豪雨では福井市内を流れる足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生した。その後、福井県では足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業が採択され、平成 16 年度より 5 ヶ年計画で、河床掘削や橋梁架替等の工事（一部は福井縦貫線幸橋整備事業）が進められている。その工事の最中、足羽川河床より昔の橋梁の基礎と思われる丸太状の木杭が数多く発見された。ところで、著者等は地球温暖化対策の手段として木材の地中貯蔵によるカーボンストックに着目し、かつては土木工事において使用されてきた木杭利用の復活を提案している¹⁾。しかし、金属やコンクリートに比べて木材の場合は腐朽による強度低下の心配があるため、現在では木材が基礎杭として利用される事例は極めて少ないのが現状である。しかしながら、近年、長期間地中や水中にあった木杭が健全な状態で発掘された事例が数多く報告されており²⁾、それらの腐朽程度や強度特性を定量的に明らかにすることは非常に意義深いことと考えられる。そこで、本文では足羽川において掘り出された木杭の概要について報告する。

2. 調査結果

木杭は足羽川の水越橋、幸橋、木田橋の架替工事現場において発見された。各橋梁の位置を図-1 に示す。また、各地点で掘り出された木杭の諸元を表-1、掘出し地点の様子を写真-1、地盤柱状図を図-2 に示す。



図-1 木杭の掘出し地点

(国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図「福井」に加筆)

(1) 水越橋

水越橋の約 100m 上流側の地点より、直径約 30cm 長さ約 5m の木杭 3 本と直径約 10cm 長さ 1~2m の木杭 9 本が掘り出された。現場付近在の技術者より、1958 (昭和 33) 年の橋梁拡張工事の際に設置された仮設歩道用の木橋の基礎杭との証言を得ており、設置期間は 48 年と推定できる。今回、掘り出された木杭の中では杭径、杭長ともに最も大きく、樹齢も 100 年以上と古かった。図-2 (a) の柱状図に示す木杭の深度は、杭の観察より河川内の地盤表面位置を推定したものであり、杭頭は約 1m 河床より突出し、杭の大部分は砂層に貫入されていたと考えられる。

表-1 木杭の諸元

項目	内容															
	水越橋上流												幸橋付近		木田橋付近	
木杭No.	Asw Mk01	Asw Mk02	Asw Mk03	Asw Mk04	Asw Mk05	Asw Mk06	Asw Mk07	Asw Mk08	Asw Mk09	Asw Mk10	Asw Mk11	Asw Mk12	Asw Sw01	Asw Sw02	Asw Kd01	
用途 (構造物名称)	橋脚基礎			護岸基礎									橋脚 (旧P7) 基礎		橋脚 (旧銭とり橋) 基礎	
施工時期	1958 (昭和33) 年と推定			1958 (昭和33) 年と推定									1932 (昭和7) 年		1928 (昭和3) 年	
調査 (採取) 時期	2006年			2006年									2006年		2006年	
設置期間	48年と推定			48年と推定									74年		78年	
樹齢 (年) *	(114)	(150)	(116)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(37)	(33)	(43)	
樹種鑑定	実施	実施	-	-	実施	-	-	実施	-	-	-	-	実施	実施	実施	
樹種	マツ科カラマツ属			マツ科カラマツ属 (樹種鑑定非実施のものも同種と推定)									マツ科マツ属		スギ科スギ属	
丸太寸法	全長 (m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	2.7	2.2	3.5
うち地中部 (**)	(3.7)	(3.6)	(3.9)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(不明)	(2.4)
末口直径 (m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30	
元口直径 (m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	測定不能 (欠損)	
地盤との関係	砂層			砂層									礫質土		多くは粘性土。杭先端部は砂質シルト層	
地下水位の位置	杭頭部は地盤より突出し一部河川水位より上に出る			杭頭部は地盤より突出し一部河川水位より上に出る									地盤表面より上に河川水位		杭頭より上に河川水位	
水の種別	淡水			淡水									淡水		淡水	
その他													先端に金属製キャップが付属			

* : 複数の計測結果の平均値。 ** : 地中部の長さは土砂付着状況や流水による侵食痕などにより推定

Investigation of Timber Piles dug in Asuwagawa River

Masaho Yoshida (Fukui National College of Technology), Atsunori Numata (Tobishima Corporation), Akio Uesugi (Tobishima Corporation) and Hikaru Kubo (Snow Management & Construction Technology Research Center of Fukui Pref.)



(a) 水越橋

(b) 幸橋

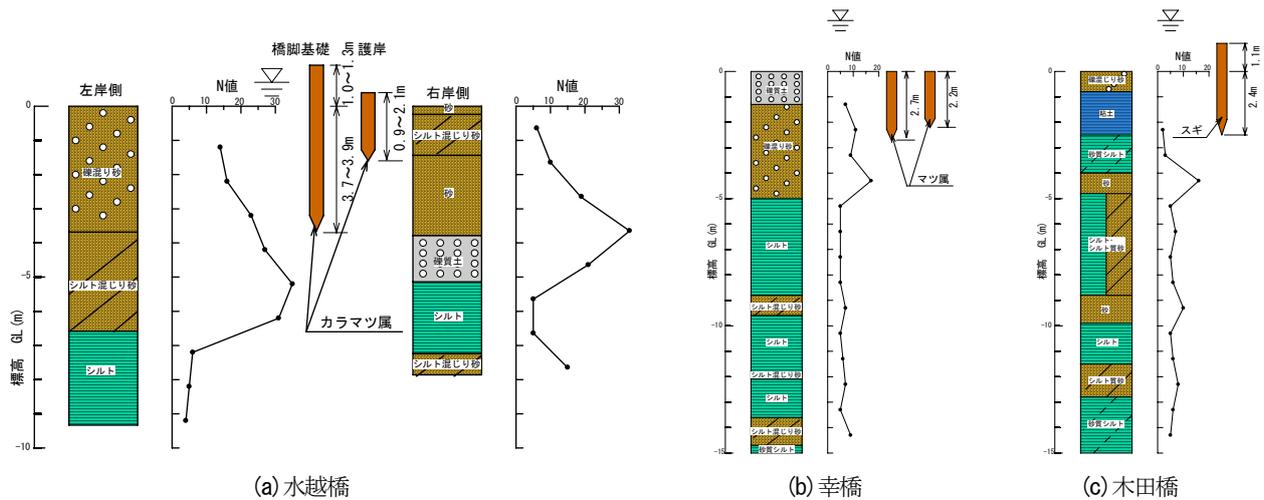
(c) 木田橋

写真-1 木杭の掘出し状況

杭設置期間：推定1958年～2006年（推定48年）

杭設置期間：1932年～2006年（74年間）

杭設置期間：1928年～2006年（78年間）



(a) 水越橋

(b) 幸橋

(c) 木田橋

図-2 木杭掘出し地点の地盤柱状図

(2) 幸橋

幸橋からは直径約20cm長さ約2mの木杭2本が掘り出された。幸橋は1932（昭和7）年に木橋から鉄筋コンクリート橋に架け替えられたが、掘り出された木杭はそのP7橋脚基礎として使用されていたものであり、設置期間は74年と推定できる。掘出し作業は鋼矢板で川を締め切り行われ、写真-1(b)に示すように河床には多数の木杭が0.9～1.0mの間隔で打設されており、杭長は1.4m～5.7mとばらついていた。図-2(b)の柱状図に示すように、表層付近に礫質土と礫混じり砂層があり、比較的N値も大きいことから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

(3) 木田橋

木田橋からは直径30cm長さ3.5mの木杭1本が掘り出された。掘出し位置は現在の木田橋近くに架かっていた1928（昭和3）年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり、設置期間は78年と推定できる。木杭は川のほぼ中央にあり、河川を鋼矢板で締め切り河床面まで水位を下げて掘り出された。掘出し時には杭頭部約1.4mが地盤より上に出ていたが、試験室に搬入された木杭を観察すると、杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり、その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。図-2(c)に示すように杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたとすると、粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり、杭の大部分は粘土層内にあっただと考えられる。杭頭部は水中に没していたと考えられるが、渇水期には水面より上に存在していたと推測できる。

3. まとめ

福井県足羽川の河床より掘り出された丸太状の木杭を調査した結果、最も古いもので78年前に打設されたものであることが明らかとなった。目視による評価ではあるが、河床より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの、地中に埋まっていた部分に関しては非常に健全な状態であった。また、幸橋と木田橋の木杭はいずれも1948（昭和23）年の福井地震を経験しており、木田橋の木杭は当時あまり活用されていなかったと考えられるスギであったことが大変興味深い。今後は掘り出された木杭の強度試験を実施し腐朽程度について定量的に検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第14回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp. 97-102, 2006. 8. 2) 沼田淳紀, 上杉章雄, 吉田雅穂, 久保 光: 土木工事における木材利用の文献調査, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007. 7.

足羽川で採取された木杭の樹種評価

木杭, 地球温暖化, 樹種

飛島建設 正会員 ○上杉章雄
 飛島建設 国際会員 沼田淳紀
 福井県雪対策・建設技術研究所 久保 光
 福井工業高等専門学校 正会員 吉田雅徳

1. はじめに

地球温暖化対策の一つとして木材の積極的な利用が考えられる。筆者らは木材の木杭としての利用可能性を再考するため、福井県足羽川で過去に打設された木杭を掘り出し、各種試験を実施した。このうち本報では木杭の樹種鑑定結果について述べる。木杭はよく「松杭」と言われるが、一口に「松」といっても、アカマツ（マツ属）、カラマツ（カラマツ属）、ベイマツ（トガサワラ属）、トドマツ（モミ属）、エゾマツ（トウヒ属）などがあり、その性質（強度や耐朽性）は樹種により異なる。筆者らは本報に先行する研究で木杭に関する文献調査を実施し、53 の文献から 47 地点のデータを得た。しかし、このうち構造物基礎として用いられた 20 件の事例のうち、樹種が明記されているのはわずか 3 件であり、残りは松、松杭、明記無しであった¹⁾。このように土木分野では樹種を明確にせずには木材の調査を行っている例が多いことから、よく確認すればスギなどが使用されている可能性もあり、樹種鑑定は重要な調査項目である。

2. 試験方法

(1) 木杭の採取地点および本数

調査対象は、福井県足羽川における足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業および福井縦貫線幸橋整備事業によって、3 つの橋の近傍から掘り出された木杭である²⁾。各調査地点における木杭の用途と採取本数は、木田橋付近にて橋脚基礎 1 本、幸橋付近にて橋脚基礎 2 本、水越橋上流にて橋脚基礎 3 本（長さ約 5m）および護岸基礎の杭丸太 9 本（長さ約 1~2m）である。なお、水越橋付近にて採取された木杭については、外観より全て同一の樹種と推定されたため、橋脚基礎は 3 本のうち 2 本、護岸基礎は 9 本のうち 2 本について樹種鑑定を実施した。

(2) 樹種鑑定

採取した木杭を厚さ数 cm の輪切りに切断し、その一部を解剖学的性質に基づく樹種鑑定に供した。この方法では、基本的には種名までは特定できず、属名（種の一段階上の分類単位）までの鑑定となる。樹種鑑定は、独立行政法人森林総合研究所に依頼し、同研究所 木材特性研究領域 組織材質研究室 農学博士 安部久氏により実施された。作業手順を以下に示す。

- 1) 木口面の一部をカッターナイフで削り、木材の木口面（横断面）、柀目面（放射断面）、板目面（接線断面）の 3 断面を正しく見定める。次にこの 3 断面から出来るだけ薄く、厚さむらのないように切片を削り取る。
- 2) 削り取った切片をスライドガラス上に並べ、数滴のグリセリンを垂らし、カバーガラスをかぶせる。
- 3) 150 度のホットプレートで数分間熱し、気泡を出す。
- 4) 各面の切片を光学顕微鏡で検鏡する。

各面において、特徴を見定めることにより樹種を鑑定した。識別のポイントは次のとおり。

- ・木口面：年輪の移行の緩急、樹脂道、樹脂細胞の存否
- ・柀目面：水平樹脂道の存否、らせん肥厚の存否
- ・板目面：分野壁孔の形、放射仮道管の存否、仮道管壁の形状、有縁壁孔の形状と配列様式

3. 結果

表-1 に鑑定結果を、表-2 に各樹種の識別点を顕微鏡写真とともに示す。樹種鑑定の結果、木田橋付近で採取されたものはスギ（スギ属は一属一種であるため）、幸橋付近のものはマツ属の一種（地域性を考えればアカマ



図-1 搬入された木杭の状況(No.AswKd01)

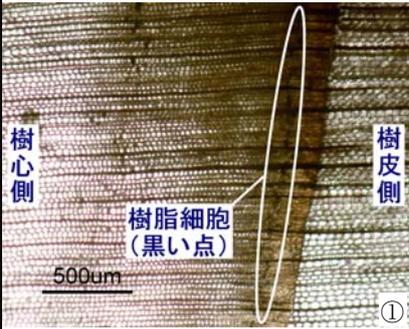
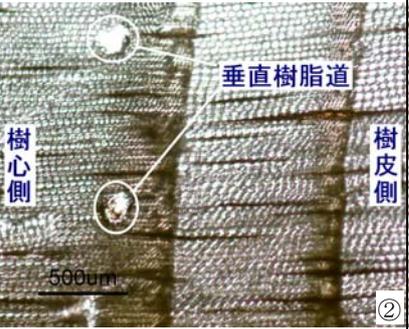
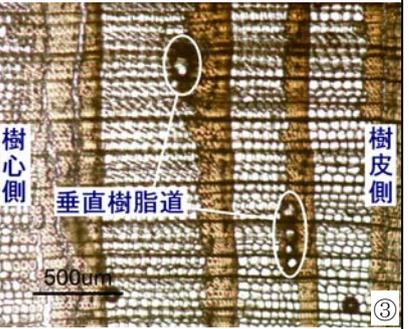
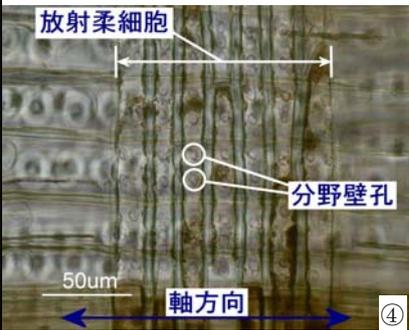
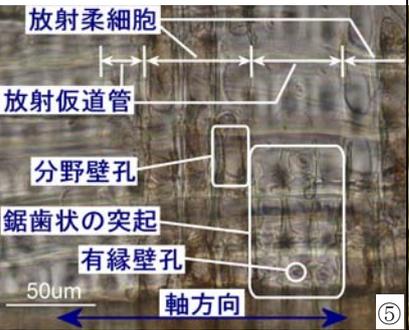
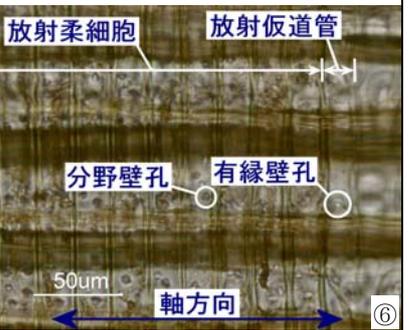
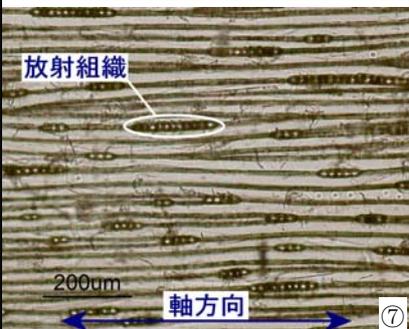
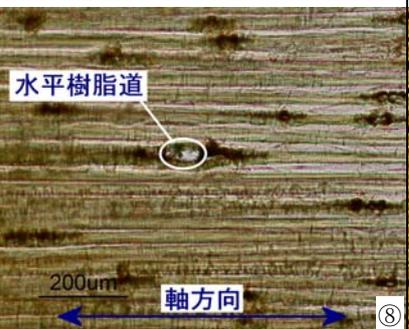
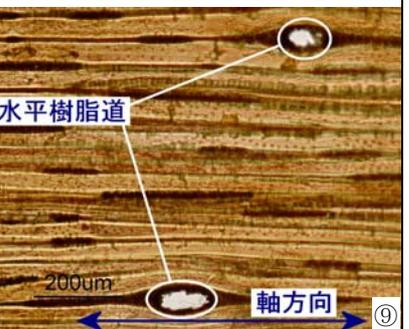
表-1 採取された木杭の樹種鑑定結果

採取地点	木杭No.	太さ (末口直径)	樹種鑑定結果：和名/学名	
			科名	属名
木田橋付近	AswKd01	0.30m	スギ科/TAXODIACEAE	スギ属/ <i>Cryptomeria</i>
幸橋付近	AswSw01	0.17m	マツ科/PINACEAE	マツ属(<i>Sylvestris</i> 節)/ <i>Pinus</i> (sect. <i>Sylvestris</i>)
	AswSw02	0.17m	マツ科/PINACEAE	マツ属(<i>Sylvestris</i> 節)/ <i>Pinus</i> (sect. <i>Sylvestris</i>)
水越橋上流	AswMk01	0.31m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/ <i>Larix</i>
	AswMk02	0.27m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/ <i>Larix</i>
	AswMk05	0.11m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/ <i>Larix</i>
	AswMk08	0.11m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/ <i>Larix</i>

Tree species of timber piles dug up from Asuwa River

Akio UESUGI (Tobishima Corporation), Atsunori NUMATA (Tobishima Corporation), Hikaru Kubo (Snow Management & Construction Technology Research Center of Fukui Pref.) and Masaho YOSHIDA (Fukui National College of Technology)

表-2 各樹種の識別点一覧

	スギ属 木杭 No. AswKd01	マツ属 (Sylvestris 節) 木杭 No. AswSw01	カラマツ属 木杭 No. AswMk01
木口面での識別点	 <p>①</p> <ul style="list-style-type: none"> ・年輪の移行がやや急である. ・垂直樹脂道が存在しない. ・樹脂細胞が存在する. 	 <p>②</p> <ul style="list-style-type: none"> ・年輪の移行が急である. ・垂直樹脂道が存在する. 	 <p>③</p> <ul style="list-style-type: none"> ・年輪の移行が急である. ・垂直樹脂道が存在する.
柁目面での識別点	 <p>④</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分野壁孔がスギ型である. ・放射仮道管が存在しない. 	 <p>⑤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分野壁孔が窓型である. ・放射仮道管が存在し, 仮道管壁に鋸歯状の突起が存在する. 	 <p>⑥</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分野壁孔がトウヒ型である. ・放射仮道管が存在する.
板目面での識別点	 <p>⑦</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水平樹脂道が存在しない. 	 <p>⑧</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水平樹脂道が存在する. 	 <p>⑨</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水平樹脂道が存在する.

ツだと思われる), 水越橋上流のものはカラマツ属の一種(年輪が密であることからロシアカラマツであると思われる)であった。なお, いずれの木杭も地中に埋まっていた部分に関しては, 非常に健全な状態²⁾であった。前述の文献調査では, スギについては埋設期間 26 年の事例が最長¹⁾であったが, 今回採取したスギではそれを超える 78 年²⁾であった。

4. まとめ

(1) 福井県足羽川から橋脚基礎などに利用されていた木杭を掘り出して樹種を鑑定したところ, カラマツ属の一種, マツ属(アカマツ・クロマツ等)の一種の他に, スギも使用されていたことが分かった。

(2) 掘り出されたスギは健全であり, スギ間伐材を木杭(基礎など地中に埋設する用途)に利用できる可能性が示された。

謝辞: 本研究は, 福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものです。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄, 吉田雅穂, 久保 光: 土木工事における木材利用の文献調査, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007.7.
- 2) 吉田雅穂, 沼田淳紀, 上杉章雄, 久保 光: 足羽川における木杭の掘出し調査, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007.7.
- 3) 島地 謙, 伊東隆夫: 図説 木材組織, 地球社, pp.82-83, 1982.

木材利用の文献調査

木杭, 地球温暖化, 樹種

飛島建設

国際会員○沼田淳紀

1. はじめに

京都議定書の約束期間が 2008 年よりいよいよ始まる。日本は 2008 年～2012 年の平均の温室効果ガス排出量を 1990 年水準比 6%削減する目標を達成しなければならない。日本の温室効果ガスは、1990 年以降むしろ増加しており、2004 年度は前年度から 0.2% (約 300 万 t-CO₂) 減少したものの、基準年の 1990 年比では減少ではなく 8.0% 増となっている (2006.5.25 環境省発表)。このように温室効果ガス削減は厳しい状況にあり、あらゆる角度から可能性を検討する必要がある。

2. 背景

この解決策の一つとして、建設材料に古来多く使われてきた木を復活させることが考えられる¹⁾。図-1 は、日本の木材、粗鋼、セメントの国内生産量を CO₂ ストック量換算し、その推移を示したものである¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。木材は生産量の材積から CO₂ 量を求め生産時の CO₂ 排出量を差し引いたものを CO₂ ストック量とし、粗鋼とセメントは生産時の CO₂ 排出量をマイナスのストック量として示した¹⁾。図中、下向きが CO₂ 排出量であり、上向きが CO₂ ストック量となる。なお、木材は例えば燃焼すればストックとはならないが、排出ともならない (カーボンニュートラル)。図中には、目安のために目標とされる京都議定書に示される基準年 1990 年の CO₂ 排出量の 6% の値を示した。

高度経済成長期に、CO₂ 排出側となるセメントと粗鋼の生産が増え、逆に CO₂ ストック側となる木材の生産が減少していることがわかる。1950 年代に着目すると、木材の CO₂ ストック量はセメントと粗鋼の CO₂ 排出量の合計を上回っており、仮に生産した木材全てがストックされ、セメント、粗鋼、木材だけで CO₂ ストック量を考えると、1950 年代の CO₂ 収支はストック側となり、これが継続されれば温室効果ガスは年々削減されることとなる。

その後高度経済成長を経てこの関係は全く逆転し、セメントと粗鋼の CO₂ 排出量の合計は、木材の CO₂ ストック量の 10 倍以上となっている。このように、建設業の主要材料であるセメント・鉄・木材は、高度経済成長期前には 3 者の CO₂ 収支はストック側であったものが、高度経済成長を機にその総量は温室効果ガスを大量に発生する側に転じてきたことがわかる。当時、地球環境問題を意識する風潮はほぼ皆無であったと考えられるが、京都議定書の約束期間が開始される現在、地球環境といった視点で建設材料のあり方を考え直す必要がある。

そもそも「土木」の語源は、中国武帝の時代の書物「淮南子 (えなんじ)」に記された「土を築き木を構えて・・・」という「築土構木」にあるとされている⁶⁾。土とともに木材は古来土木の主要材料であり、セメントや鉄を大量に使い始めたのはせいぜい 50 年程度の僅かな期間である。例えば、地盤工学的な問題として杭基礎についてみると、現在使用されているコンクリート杭や鋼管杭の歴史は浅く、木杭基礎の歴史は洋の東西を問わずむしろこれよりはるかに古い⁹⁾¹⁰⁾。そこで、建設工事への木材利用の現状と歴史を探り、これを将来に活かすべきである。このために、過去の土木工事における木材利用について文献調査を行った。ここでは特に、現在木材を利用とした際に問題となる、腐朽に着目して分析を行った。

3. 調査方法⁸⁾

調査対象は、主に構造物基礎を対象とした地中にある木杭と、河川工事に使用される木材とした。調査対象とした資料は、(1)土木学会年次学術講演会論文集 (1999 年～2006 年の 8 年分)、(2)地盤工学会地盤工学研究発表会講演概要集 (2002 年～2006 年の 5 年分)、(3)その他であり、9)～63)に示す 53 の文献である。

調査項目は、(1)対象構造物、(2)木材用途、(3)使用場所、(4)施工時期、(5)調査時期、(6)設置期間、(7)樹種、(8)木材寸法、(9)地盤との関係、(10)地下水位、(11)木材の腐朽状態 (地下水位以浅, 変動域, 地下水位以深)、(12)その他である。

4. 調査結果

53 の文献より、47 地点のデータが得られた。図-2 に得られたデータの木材利用用途を示す。得られたデータの約 2 割が鉄道または道路橋梁の基礎であり、約 2 割がビルまたは住宅の基礎であり、約 4 割が河川構造物である。ここで河川構造物とは、沈床、樋門基礎、聖牛、ウッドブロック、牛枠、

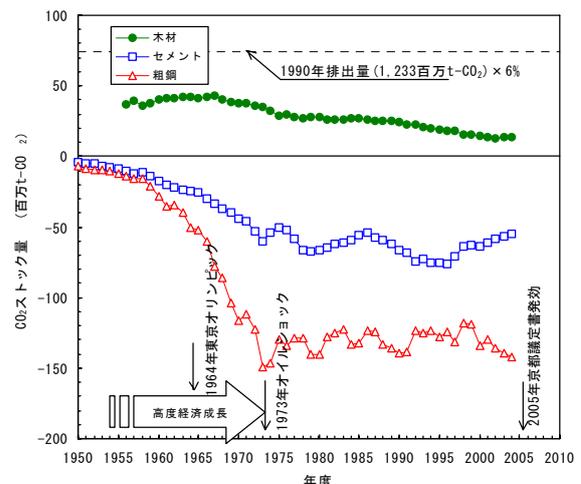


図-1 日本のセメント・粗鋼・木材生産量の CO₂ ストック量換算の推移²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾¹⁾

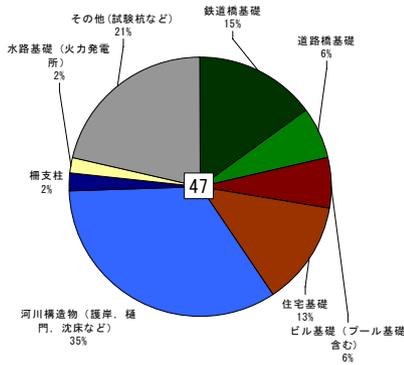


図-2 収集したデータの木材使用用途

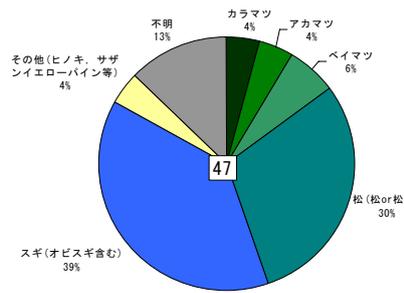


図-3 収集したデータの木材樹種

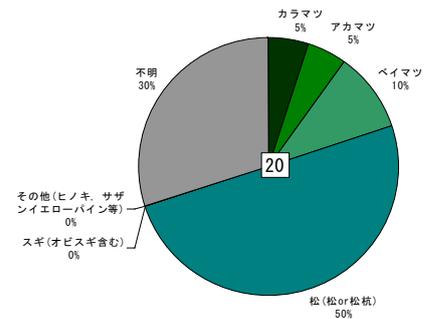


図-4 鉄道および道路橋基礎, ビル住宅基礎, 火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種

杭柵, 板柵などである。図-3に, これらの樹種の内訳を示す。松または松杭と記述されたものが3割である。この中には, カラマツ (カラマツ属), アカマツ (マツ属), ベイマツ (トガサワラ属) が含まれると考えられるが, これらを総称して松杭とすると, 松杭は全体の約4割である。一方, スギも全体の約4割を占める。図-4に, 構造物基礎とし, 鉄道および道路橋基礎, ビル住宅基礎, 火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種を示す。不明を除けば, 全てがカラマツ, アカマツ, ベイマツを含めた松杭である。図-5に, 河川構造物に用いられた木材の樹種を示す。約2割がアカマツ, ベイマツを含めた松杭であるが, 残り8割はスギである。これは, 一般的にスギはカラマツ, ベイマツと耐朽性は同等で, アカマツやクロマツなどよりも耐朽性が高い¹¹⁾ことや, 近年聖牛のような過去使用された工法を見直し木材を使用することがあり, この際現在大量に存在しているスギを使用したということが考えられる。図-6に, 木材の設置期間を示す。約半数が10年未満であるが, 約2割は50~100年であり, データの中で最も古いものは, 浜松町駅近くの山手線および京浜東北線のレンガ造アーチ高架橋基礎の90年であった。

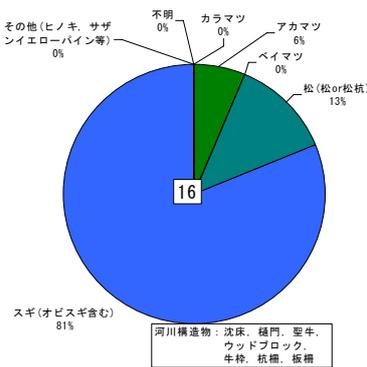


図-5 河川構造物に用いられた木材の樹種

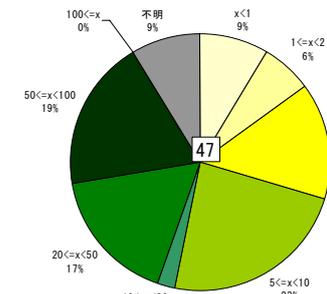


図-6 木材の設置期間

図-7~図-9に, それぞれ地下水変動域以浅, 変動域, 変動域以深における腐朽状態を示す。地下水変動域以浅や変動域では, 健全であったものが6割あるが, 腐朽したのも4割であることがわかる。このように, 地下水変動域以浅では, 腐朽する場合としない場合があるようであり, 今後どのような条件でこのような差が生じるのかを明らかにしていく必要がある。一方, 地下水変動域以深では, 100%が健全であり, 地下水以深では腐朽が進行しないことが過去のデータから明らかとなった。

図-10に, 地下水変動域以深における樹種の割合を示す。樹種は, カラマツ, アカマツ, ベイマツを含めた松杭が5割以上を占め, スギも3割近く存在している。一般に, 土木工用用の木杭にはカラマツやベイマツを含めた松杭が使用されているが, スギも地下水以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる。図中には, それぞれの樹種の内, 最も古かった年代を併記した。アカマツ, ベイマツ, 松杭はいずれも50年以上経過したものがああり, 水中下であればかなりの長期間健全な状態を保つことが確認された。一方, スギは調査した範囲では最大で26年であった。

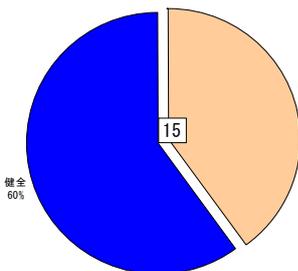


図-7 地下水変動域以浅における腐朽状態

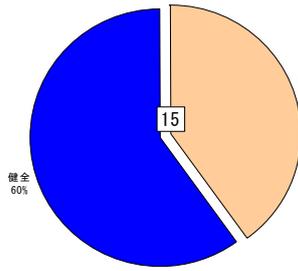


図-8 地下水変動域における腐朽状態

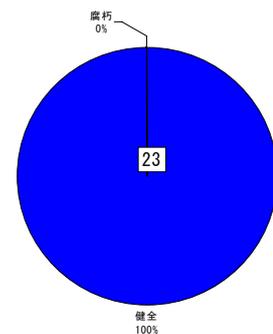


図-9 地下水変動域以深における腐朽状態

以上より、今回の調査範囲で木材は、地下水位変動域以深であれば樹種に関係なく、腐朽は進行せず健全であることが分かった。一般に土木工事においては松杭が多く使われ、腐朽に対しても抵抗性が高いように思われているが、スギであっても地下水位変動域以深であれば抵抗性が高いことがわかる。このようなスギよりもマツの方が耐久性が高いという松杭への誤解について三宅¹²⁾は、次のように述べている。「現在、スギ間伐材を土木資材として需要開拓する試みが全国でなされている。ところが、工事担当者には依然として根強いマツ信仰があり、スギの需要が伸び悩む原因となっている。マツ信仰とは、杭木等の土木資材には昔からマツが使われており、マツの耐久性はスギを上回るという誤解である。(中略)マツの耐朽性、耐犠性はスギを下回っており、マツが使われたのは、その時代の資源状況であると考えている。樋門の建設当時、すなわち大正 5 年の県統計書を見ると、スギ伐採材積 168 千石 (約 47 千立法) に対して、マツの伐採は 433 千石 (約 121 千立法) と多く、石あたり単価はスギ 2.88 円に対して 0.45 円と安く、土木資材として入手しやすかったと考えられる。すなわち、基礎杭にマツが使われたのは、当時の資源状況によるものと推察される。昔から河川工事にはマツが使われてきており、いつの間にか土木資材としてマツが耐朽性に優れているという誤解が生じているが、こうした資源的な背景を需要先に伝えていくことも必要である。」

なお、旧建築基礎構造設計基準⁷⁾によればスギは、アカマツ、クロマツ、カラマツ、ベイマツと比べると圧縮強度は低く、耐朽性はカラマツ、ベイマツと同等でありアカマツやクロマツよりもむしろ優れている¹¹⁾。

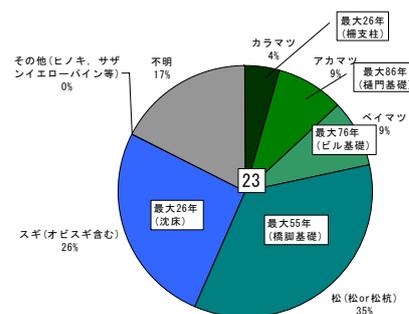


図-10 地下水水位変動域以深における樹種

5. まとめ

- (1) 地下水位変動域や地下水位変動域以浅に設置された木材は、腐朽しているものと健全なものがある。
- (2) 地下水位変動域以深に設置された木材は、樹種に関係なく 100%が健全であり、このような環境下では土木資材として十分な期間健全性を保つことがわかった。
- (3) 土木資材としては一般にカラマツ、ベイマツを含めたマツが多く使われるが、スギについても同様に地下水位変動域以深では健全性を保つことがわかった。

スギはスギ花粉の問題もあり可能な限り使用すべき材料である。しかし、収集されたスギは、設置期間が最大で 26 年であり、今後さらにデータを集め長期健全性を明らかにする必要がある。また、古来土木材料として木材は多数使用されており、現在もなお使用されている構造物も存在している。今後このような構造物を明らかにするとともに、当時どのような設計が行われたかも明らかにしていく必要がある。

謝辞: 本研究は、福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第 14 回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp.97-102, 2006.8.
- 2) セメント協会: セメントハンドブック 2005 年度版, p.7, 2005.6. (1969 年以前はセメント協会資料)
- 3) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼統計要覧 2005, p.57, 2005.10.
- 4) 経済産業省: 通商白書
- 5) 農林水産省 URL: 木材需給 (供給) 量累年統計
- 6) 日野幹雄: 「土を築き木を構えて—私の土木史—」, 森北出版, 1994.3.
- 7) 日本建築学会: 建築基礎構造設計基準・同解説, 技報堂, p.193, 1960.11.
- 8) 沼田淳紀, 上杉章雄, 吉田雅徳, 久保光: 土木工事における木材利用の文献調査, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007.7. (投稿中)
- 9) 塩井幸武: 土木 (道路) における杭基礎の変化・変遷について, 土と基礎, 54-6(581), pp.9-12, 2006.6.
- 10) 佐々木晴美: 軟弱地盤でのくい工法による施工例, 基礎工, pp.91-96, 1981.2.
- 11) 屋我嗣良, 河内進策, 今村祐嗣編: 木材科学講座 12 保存・耐久性, 海青社, p.80, 1997.3.
- 12) 三宅裕司, 橋本茂, 網田克明: 樋門基礎杭として 80 年以上経過したマツ材の性能, 徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告, 第 2 号, 2003.
- 13) 皆川恵三, 田村昌仁, 篠塚重夫, 久保豊: 戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その 1: 試験概要), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1391-1392, 2006.7.
- 14) 兼平雄吉, 田村昌仁, 篠塚重夫, 久保豊, 皆川恵三: 戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その 2: 試験結果), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1393-1394, 2006.7.
- 15) 久保豊, 田村昌仁, 篠塚重夫, 皆川恵三, 兼平雄吉: 戸建て住宅のための木杭および鋼管杭の支持力に関する研究 (その 3: 試験考察), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1395-1396, 2006.7.
- 16) 田村昌仁, 黒柳信之: 戸建住宅における木杭の効用, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1397-1398, 2006.7.
- 17) 中村博, 水谷羊介: 松杭の支持力特性 (その 1), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1399-1400, 2006.7.
- 18) 増田貴之, 水谷羊介: 松杭の支持力特性 (その 2), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1401-1402, 2006.7.
- 19) 上杉章雄, 沼田淳紀: 岩見沢市で掘り出した木杭の強度について, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.2401-2402, 2006.7.
- 20) 沼田淳紀, 上杉章雄: 岩見沢市で掘り出した木杭の目視観察, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.2403-2404, 2006.7.
- 21) 飯島悠也, 片田敏行, 末政直晃, 田中剛: 伝統土木技術から得られる教訓とその応用, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.1465-1466,

- 2005.7.
- 22) 羽矢洋, 西岡英俊, 西田尚史, 木村礼夫: 木杭基礎橋脚に対する大変位載荷実験, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.1557-1558, 2005.7.
- 23) 羽矢洋, 稲葉智明: 鉄道における木杭基礎橋脚の健全度診断法概要—その 1: 診断法概要—, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1375-1376, 2003.7.
- 24) 稲葉智明, 羽矢洋: 鉄道における木杭基礎橋脚の健全度診断法概要—その 2: 適用例—, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1377-1378, 2003.7.
- 25) 杉村義広: 日本における杭基礎の起源と変遷, 土と基礎, Vol.54, No.6, pp.1-4, 2006.6.
- 26) 神田政幸: 鉄道における杭基礎の変化・変遷について, 土と基礎, Vol.54, No.6, pp.13-16, 2006.6.
- 27) 菊池喜昭: 港湾における杭基礎の変化と変遷, 土と基礎, Vol.54, No.6, pp.17-20, 2006.6.
- 28) 呉文経, 三浦哲彦: 粘土地盤における木杭の周面支持力評価のための鉛直載荷試験, 土と基礎, No.5, pp.40-42, 1995.5.
- 29) 田村昌仁, 富永晃司, 若井明彦, 久保豊, 兼平雄吉: 小口径鋼管杭と木杭の支持力評価法に関する研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 第 3, pp.789-790, 2006.9.
- 30) 沼田淳紀, 上杉章雄: 岩見沢市で掘り出した木杭の腐朽状態の定量評価, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 第 7, pp.253-254, 2006.9.
- 31) 横川勝則, 塩井幸武, 福井次郎, 藤原稔, 妹尾義隆, 柳沢博美: 建設後 50 年以上を経た鋼ゲルバー桁橋梁 (多摩川大橋) の現況調査, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 第 1, pp.13-14, 2005.9.
- 32) 吉田好孝, 運上茂樹, 塩井幸武, 藤原稔, 石田稔, 矢部正明: 建設後 50 年以上を経た鋼ゲルバー桁橋梁 (多摩川大橋) の耐震性評価, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 1, pp.21-22, 2005.9.
- 33) 佐藤信彦, 天野勲, 宇野浩樹: 既設橋梁における木杭基礎の健全性に関する基礎調査—その 1 木杭の施工状況調査および杭体の劣化試験—, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 3, pp.517-518, 2005.9.
- 34) 佐藤信彦, 宇野浩樹, 天野勲: 既設橋梁における木杭基礎の健全性に関する基礎調査—その 2 要素試験全体圧縮試験および曲げ載荷試験—, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 3, pp.537-538, 2005.9.
- 35) 羽矢洋, 稲葉智明, 太田陽一, 赤坂大介: 衝撃振動試験による木杭基礎橋脚補強の確認検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 3, pp.817-818, 2005.9.
- 36) 飯島悠也, 片田敏行, 末政直晃, 田中剛: 伝統的基礎工法の支持力特性の比較, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 3, pp.733-734, 2005.9.
- 37) 浜口武, 井谷雅司, 堤祥一, 大下武志: 小口径フローティング式基礎の低盛土道路への適用について, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 第 3, pp.961-962, 2004.9.
- 38) 杉尾哲, 佐藤英敏: 河川伝統工法における木材の利用状況の調査, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 第 2, pp.493-494, 2003.9.
- 39) 高田直俊, 西田貴博: 密打木杭で法尻を強化した提体の地震時挙動, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 第 3, pp.1243-1244, 2003.9.
- 40) 浜口武, 井谷雅司, 堤祥一, 大下武志: 土木分野における間伐材利用技術の開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 第 3, pp.1269-1270, 2003.9.
- 41) 高田直俊, 土橋徹, 天野賢志: 木杭密打ちによる河川堤体の対液状化強化, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 第 3, pp.384-385, 2001.10.
- 42) 鷺田秀世, 友利方彦, 石井秀明: 基礎木杭の健全度評価について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 第 4, pp.626-623, 2001.10.
- 43) 古川俊也, 板垣直行: 経年火力発電所水路基礎木杭の健全度調査について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 第 6, pp.504-505, 2001.10.
- 44) 杉尾哲, 中澤隆雄: 伝統的河川工法に用いられていた木材の強度 (その 3), 土木学会第 55 回年次学術講演会, 第 2, II-144, 2000.9.
- 45) 山田昌郎: 無処理および保存処理木材 (スギ集成材等) の海洋暴露実験, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 第 5, V-172, 2000.9.
- 46) 稲田達夫: 旧丸ビル技術調査報告「旧丸ビル」の歴史を振り返る第 4 章旧丸ビルの固有周期と松杭, 鉄鋼技術(STRUTEC), pp.61-67, 2002.6.
- 47) 加藤英雄, 長尾博文, 香川聡, 田中俊成, 伊藤嘉文, 内村智: 建築物の基礎杭として約 70 年間使用されたベイマツ丸太の強度, 第 50 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.110, 2000.
- 48) 山田周平, 稲田達夫, 小川一郎, 田口典生, 永井香織, 真島正人: 丸ノ内ビルディング (旧丸ビル) の構造調査 その 8 松杭の鉛直載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.1069-1070, 2000.9.
- 49) 稲田達夫, 山田周平, 小川一郎, 田口典生, 真島正人: 丸ノ内ビルディング (旧丸ビル) の構造調査 その 7 B1 階およびフーチング調査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.1067-1068, 2000.9.
- 50) 成和機工株式会社: 丸ノ内ビルディング松杭の鉛直載荷試験報告書, 成和機工株式会社, pp.1-45, 1999.5.
- 51) 木方洋二, 小林拓治郎, 岸雅泰, 清水昇, 高木靖人: 名古屋駅基礎木杭の 50 年間の変質に関する調査 (第二報) —露出した杭材全部についての老朽度試験—, 名大演報, No.10, pp.81-87, 1990.
- 52) 木方洋二, 金川靖, 奥山剛, 服部芳明, 高田喜久夫: 名古屋駅基礎木杭の 50 年間の変質に関する調査 (第一報) —杭材の強度、老朽度試験—, 名大演報, No.10, pp.71-80, 1990.
- 53) 川上敬介, 大原明神: 土木用材として 40 年近く水中に設置されていたマツ丸太の強度性能, 木材工業, Vol.55, No.4, pp.165-169, 2000.
- 54) 佐々木晴美: 特集 地盤の表層安定処理工法 軟弱地盤でのくい工法による施工例, 基礎工, pp.91-96, 1981.2.
- 55) 斎藤迪孝: 「特別講演」新潟地震について, 第 7 回地震工学研究発表会, pp.39-43, 1964.10.
- 56) 吉田耕作, 松井保: 地下水変動と松杭の腐食に関する事例, 地下水技術, 第 42 巻, 第 7 号, pp.52-61, 2000.
- 57) 富田徹, 高山明久: 旧橋の木杭載荷試験, 株式会社ピーエス三菱技報, 第 2 号, pp.20-21, 2004.
- 58) 桜井善雄: プロジェクトリポート 粗朶沈床工 最上川における最近の施工例と本工法の環境保全上の特性, 土木学会誌, Vol.89, No.6, pp.35-38, 2004.6.
- 59) 松岡真悟: 土木・公園資材への県産材加工利用技術研究 (平成 11~15 年度、県単) —新田川樋門改築に伴う旧樋門基礎マツ杭調査—, H13 年版 愛媛県材試業務成績報告書, pp.34-35, 2002.
- 60) 松岡真悟: (7) 土木・公園資材への県産材加工利用技術研究 (平成 11~15 年度、県単) —新田川樋門改築に伴う旧樋門基礎マツ杭調査—, H12 年版愛媛県材試業務成績報告書, pp.30-31, 2001.
- 61) Robert A. Blanchet: A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments, Elsevier, International biodeterioration & biodegradation 46, pp.189-204, 2000.
- 62) 杉尾哲, 中沢隆雄, 瀬崎満弘: 伝統的河川工法に用いられていた木材の強度 (その 2), 土木学会第 47 回年次学術講演会, 第 2, pp.514-515, 1992.9.
- 63) 杉尾哲, 中沢隆雄, 瀬崎満弘: 伝統的河川工法に用いられていた木材の強度, 土木学会第 46 回年次学術講演会, 第 2, pp.218-219, 1991.9.

足羽川における木杭基礎の掘出し調査

福井県 雪対策・建設技術研究所 研究員 久保 光
飛島建設株式会社 技術研究所 副主任研究員 上杉章雄

1. はじめに

地球温暖化対策と再生可能な資源の有効利用の一方策として、木材丸太を建設事業の地中基礎や軟弱地盤強化対策として、積極的に活用することが考えられる。木杭基礎は古くから用いられてきたが、近年では、腐朽による耐久性の課題からあまり使用されなくなってきた。しかし、木材丸太を基礎として用いることは、多くは焼却されて二酸化炭素として空気中に排出される炭素を、木材として長期的に、地中に固定できると考える。このように、建設事業に木材丸太を用いれば一度に利用される木材の量が格段に増える。また、木材丸太には、従来のマツに加え、腐朽調査の結果によっては、スギ間伐材の利用も可能と考えられる。このような木杭基礎の利用が促進されれば、木材需要の拡大およびスギ間伐材の有効利用が促進され、地球温暖化防止や森林の防災機能の向上、林野事業の活性化にも繋がると考えられる。本研究は、木杭基礎の利用促進の大きな課題となっている木材腐朽に関する調査を行い、耐久性を実証するため行った。

2. 調査内容

平成 16 年 7 月福井豪雨では、福井市内を流れる足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生し、その後、福井県では 5 ヶ年で足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業による河床掘削や橋梁架替等の工事(一部は福井縦貫線幸橋整備事業)が進められた。この工事の最中に河床より昔の橋梁の基礎や護岸の基礎である丸太状の木杭が多数発見されたので、これらを掘り出し、腐朽についての調査を実施した。

調査は、木杭丸太の用途、施工時期、寸法の計測を行った。木杭はよく「松杭」といわれるが、一口に「松」といってもアカマツ(マツ属)、カラマツ(カラマツ属)、ベイマツ(トガサワラ属)、トドマツ(モミ属)、エゾマツ(トウヒ属)などがあり、その性質(強度や耐久性)は樹種により異なることから、樹種鑑定を行った。また、木材は、空気、水、栄養、温度の 4 条件が満足されなければ腐朽しないため、ボーリング柱状図から、地盤と木杭基礎の関係を調査した。木杭丸太の腐朽度は、目視による「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準(JIS K 1571:2004)」により判定した。木田橋から掘出した木杭丸太は、ピロディン試験(ピン貫入試験)により腐朽度を評価した。

3. 調査結果

各地点で掘り出された木杭基礎の諸元を表 - 1 に示す。地盤柱状図を図 - 1、2、3

に示す。ピロディン試験結果を図 - 4 に示す。以下に詳細を記述する。

表 - 1 木杭基礎の諸元

項目	内 容															
	水越橋上流												幸橋付近		木田橋付近	
採取位置	Asw Mk01 ~ Asw Mk12												Asw Sw01	Asw Sw02	Asw Kd01	
用途 (構造物名称)	橋脚基礎			護岸基礎									橋脚 (旧P7) 基礎		橋脚 (旧銭とり橋) 基礎	
施工時期	1958年 (S33年) と推測			1958年 (S33年) と推測									1932年 (S7年)		1928年 (S3年)	
調査 (採取) 時期	2006			2006									2006		2006	
設置期間 (年)	48年と推測			48年と推測									74年		78年	
樹種鑑定	実施	実施		実施			実施						実施	実施	実施	
樹 種	カラマツ属 (樹種鑑定非実施のものも同種と推定)												マツ属		スギ	
丸太寸法	全長 (m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	2.7	2.2	3.5
	(うち地中部 (m)*)	(3.7)	(3.6)	(3.9)	(不明)	(不明)	(不明)	(2.4)								
	末口直径 (m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30
	元口直径 (m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	測定不能 (欠損)
地盤との関係	砂層			砂層									礫質土 杭先端部は礫混じり砂層		多くは粘性土、 杭先端部は砂質シルト層	
地下水水位位置	杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る			杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る									地盤表面より上に河川水位		杭頭より上に河川水位	
水の種別	淡水			淡水									淡水		淡水	
木杭腐植状況	地上部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	地下水水位以浅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	地下水水位変動域	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	-	-	健全
	地下水水位以深	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全	健全
その他													先端に金属製キャップが付属、			

* : 地中に存在した部分の長さは土砂付着状況や流水による侵食痕などにより推測したもの。

3.1 水越橋

水越橋の約 100m 上流側の地点から、直径約 30cm 長さ約 5m の木杭 3 本と直径約 10cm 長さ 1~2m の木杭 9 本を掘り出し詳細な調査を行った。現場付近在住の技術者より、1958 (昭和 33) 年の橋梁拡張工事の際に設置された仮設歩道用の木橋の基礎杭と護岸の基礎杭との証言を得ており、設置期間は 48 年と推定できる。樹種鑑定を行った結果、カラマツ属の一種 (年輪が密であることからロシアカラマツであると思われる。) であることがわかった。

杭設置期間: 推定 1958年 - 2006年 (推定 48年)

今回、掘出した木杭丸太の中で、仮設歩道用の木橋の基礎杭として用いられた木杭丸太は、杭径、杭長ともに最も大きかった。図 - 1 の柱状図に示す木杭丸太の深度は、杭の観察より河川内の地盤表面位置を推定したものであり、杭頭は約 1m 河床より突出し、杭の大部分は砂層に貫入されていたと考えられる。目視による腐朽度は、地下水水位変動域及び、地下水水位以深で健全であった。

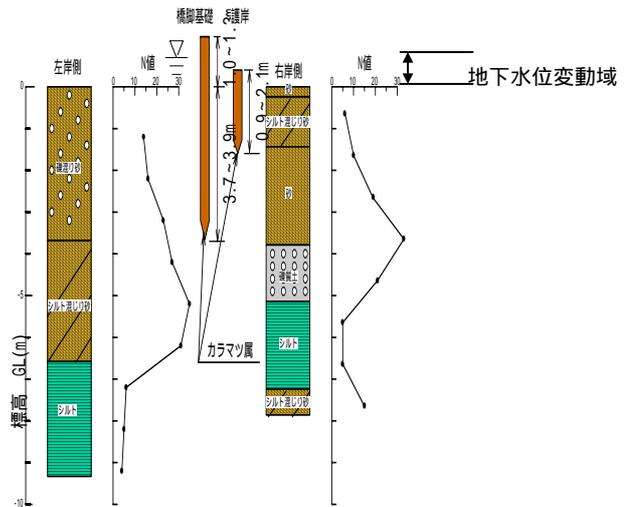


図 - 1 地盤柱状図 (水越橋)

3.2 幸橋

幸橋からは、直径約20cm長さ約2mの木杭2本を掘り出し詳細な調査を行った。幸橋は、1932(昭和7)年に木橋から鉄筋コンクリート橋に架け替えられたが、掘り出された木杭はそのP7橋脚基礎として使用されていたものであり、設置期間は74年と推定できる。樹種鑑定を行った結果、マツ属の一種(地域性を考えればアカマツであると思われる。)であることがわかった。掘出し作業は鋼矢板で川を締切り行われ、河床には多数の木杭が0.9~1.0mの間隔で打設されており、杭長は1.4m~5.7mとばらついていた。また、木杭先端には、打込み時の破損を防止するための鉄製の保護が取付けられていた。図-2の柱状図に示すように、表層付近に礫質土と礫混じり砂層があり、比較的N値も大きいことから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

目視による腐朽度は、地下水位変動域及び、地下水位以深で健全であった。

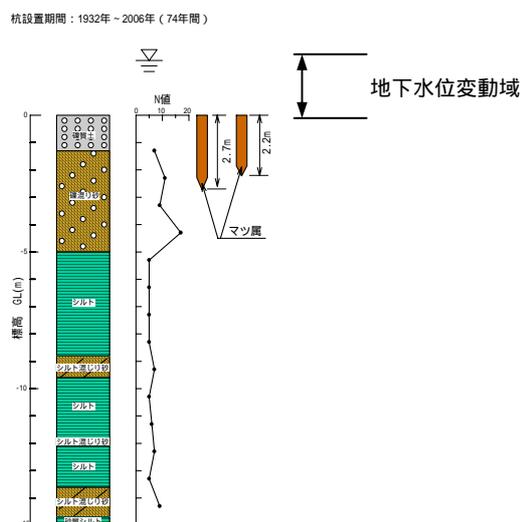


図-2 地盤柱状図(幸橋)

3.3 木田橋

木田橋からは直径30cm長さ3.5mの木杭1本を掘り出し、詳細な調査を行った。掘出し位置は現在の木田橋近くに架かっていた1928(昭和3)年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり、設置期間は78年と推定できる。樹種鑑定を行った結果、スギであることがわかった。木杭丸太は川のほぼ中央にあり、河川を鋼矢板で締切り河床面まで水位を下げて掘り出した。掘出し時には杭頭部約1.4mが地盤より上に出ていたが、杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり、その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。図-3に示すように杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたとすると、粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり、杭の大部分は粘土層内にあったと考えられる。杭頭部は水中に没していたと考えられるが、湯水期には水位面より上に存在していたと推測できる。目視による腐朽度は、地下水位変動域及び、地下水位以深で健全であった。

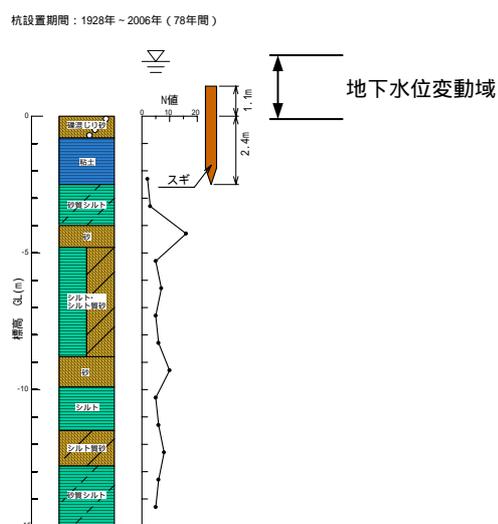


図-3 地盤柱状図(木田橋)

図 - 4は、木杭丸太の腐朽度を評価するために行ったピロディン試験の結果を示す。貫入量が大きい方が軟らかいことを示し、25～30 mm以上の値が腐朽の目安となる。試験に用いた試料は、掘り出した木杭丸太を深度方向に50 cm間隔で切り出した厚さ10 cmの円盤状のものであり、気乾状態で作製した。貫入方向は木杭丸太断面の幹軸方向(円盤面)と木杭丸太側面より幹軸直交方向(円周面)の2通りとし、それぞれ計40点及び計48点の計測点を設けた。円盤面では貫入位置によるばらつきが大きい傾向が見られるが、平均値で判断すると、ほとんどの深さで貫入量が30 mmを下回る結果となっており、腐朽がみられず健全性を有していることがわかった。

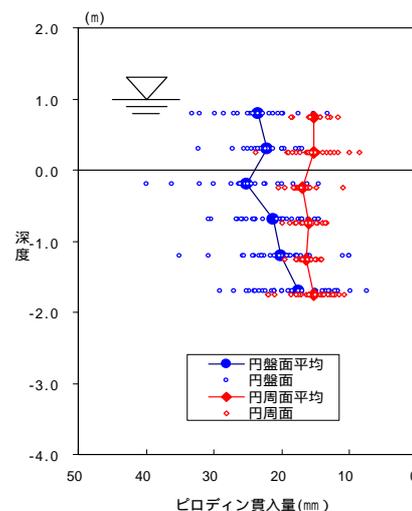


図 - 4 ピロディン試験結果

4. まとめ

福井県足羽川の河床より掘り出された丸太状の木杭を調査した結果、最も古いもので78年前に打設されたものであることが明らかとなった。目視による評価では、河床より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの、地中に埋まっていた部分に関しては、腐朽はみられず非常に健全な状態であった。よって、地下水位変動域以深に設置された木杭は、腐朽が全くといっていいほどみられないことから、このような環境下では、十分な期間健全性を保つと考えられる。さらに、ピロディン試験の結果(木田橋)から、掘り出した木杭丸太は、腐朽がみられず健全性を有していることがわかった。また、幸橋と木田橋の木杭はいずれも1948(昭和23)年の福井地震を経験しており、耐震性にも優れている可能性がある。木田橋の木杭は、当時圧倒的にマツが多用されていた中で、スギが使われていた点で貴重な事例であると考えられる。

5. 今後の課題

過去の木杭利用の文献調査を行った結果、地下水位以深に設置された木杭には腐朽がみられないことが分かった。しかし、地下水位変動域やそれ以浅において、腐朽する事例も見受けられることから、最も効果的な腐朽対策技術を開発することが課題である。

6. 終わりに

本調査は、福井県建設技術公社の協力のもと、産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」として実施されたものである。ここに記して、関係各位に感謝の意を表す。

土木で用いられた木材の腐朽に関する事例調査

(飛鳥建設(株)) ○沼田淳紀, 上杉章雄, (福井高専) 吉田雅穂,
(福井県雪対策・建設技術研) 久保 光, (福井県総合グセ) 源濟英樹, 野村 崇

【緒言】

京都議定書が 2008 年より実施される。これにより、日本は 2008 年～2012 年の平均のCO₂排出量を 1990 年水準比 6%削減する目標を達成しなければならない。この目標値達成のために、あらゆる角度から検討を行う必要がある。また、これを単に数値目標とせず、これを機会に持続可能な社会へ向けて今後どのような方向へ建設事業が進むべきかを考えるべきだと考える。そこで、筆者らは、一つの方向性として、建設材料に古来多く使われてきた土や木を復活させることを考えている¹⁾。

丸太基礎をはじめ木材は、土木工事に古代より使用されている。杭基礎についてみると、現在使用されているコンクリート杭や鋼管杭の歴史は浅く、木杭基礎の歴史は洋の東西を問わずむしろこれよりはるかに古い²⁾³⁾。そこで、建設工事への木材利用の現状を探るために、過去の土木工事における木材利用について文献調査を行った。

【調査方法】

調査の目標は、特に木材使用時に課題となる腐朽についての現状である。そこで、調査対象は、主に構造物基礎を対象とした地中にある木杭と、河川工事に使用される木材とした。調査対象とした資料は、(1)土木学会年次学術講演会論文集(1999年～2006年の8年分)、(2)地盤工学会地盤工学研究発表会講演概要集(2002年～2006年の5年分)、(3)その他であり、全部で53の文献である。なお、紙面の都合上文献名は割愛させて戴く。

調査項目は、(1)対象構造物、(2)木材用途、(3)使用場所、(4)施工時期、(5)調査時期、(6)設置期間、(7)樹種、(8)木材寸法、(9)地盤との関係、(10)地下水位、(11)木材の腐朽状態(地下水位以浅、変動域、地下水位以深)、(12)その他である。

【結果および考察】

53の文献より、47地点のデータが得られた。得られたデータの内約2割が鉄道または道路橋梁の基礎であり、約2割がビルまたは住宅の基礎であり、約4割が河川構造物である。ここで河川構造物とは、沈床、樋門基礎、聖牛、ウッドブロック、牛柵、杭柵、板柵などである。47地点の樹種の内訳は、松または松杭と記述されたものが3割である。この中には、カラマツ(カラマツ属)、アカマツ(マツ属)、ベイマツ(トガサワラ属)が含まれると考えられるが、これらを総称して松杭とすると、松杭は全体の約4割である。一方、スギも全体の約4割を占める。図-1に、構造物基礎とし、鉄道および道路橋基礎、ビル住宅基礎、火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種を示す。不明を除けば、全てがカラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭である。図-2に、河川構造物に用いられた木材の樹種を示す。約2割がアカマツ、ベイマツを含めた松杭であるが、残り8割はスギである。これは、一般

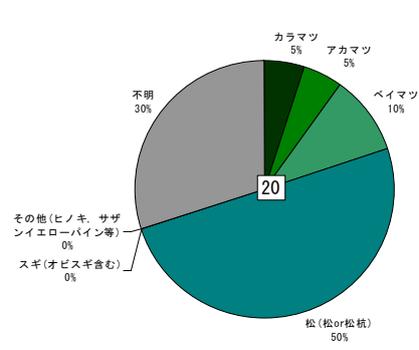


図-1 鉄道および道路橋基礎、ビル住宅基礎、火力発電所水路基礎に用いられた木材の種類

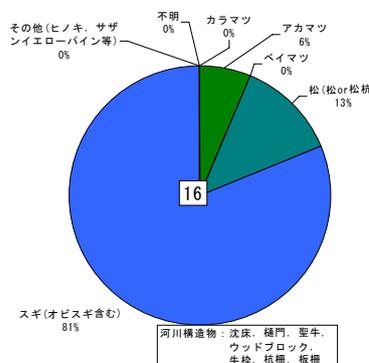


図-2 河川構造物に用いられた木材の種類

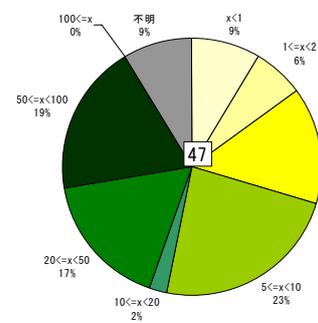


図-3 木材の設置期間

的にスギはカラマツ, ベイマツと耐朽性は同等で, アカマツやクロマツなどよりも耐朽性が高い⁴⁾ことや, 近年聖牛のような過去使用された工法を見直し木材を使用することがあり, この際現在大量に存在しているスギを使用したということが考えられる. 図-3に, 木材の設置期間を示す. 約半数が10年未満であるが, 約2割は50~100年であり, データの中で最も古いものは, 浜松町駅近くの山手線および京浜東北線のレンガ造アーチ高架橋基礎の90年であった.

図-4~図-6に, それぞれ地下水位変動域以浅, 変動域, 変動域以深における腐朽状態を示す. 地下水位変動域以浅や変動域では, 健全であったものが6割あるが, 腐朽したのも4割であることがわかる. このように, 地下水位変動域以浅では, 腐朽する場合としない場合があるようであり, 今後どのような条件でこのような差が生じるのかを明らかにしていく必要がある. 一方, 地下水位変動域以深では, 100%が健全であり, 地下水位以深では腐朽が進行しないことが過去のデータから明かとなった.

図-7に, 地下水位変動域以深における樹種の割合を示す. 樹種は, カラマツ, アカマツ, ベイマツを含めた松杭が5割以上を占め, スギも3割近く存在している. 一般に, 土木工専用の木杭にはカラマツやベイマツを含めた松杭が使用されているが, スギも地下水位以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる. 図中には, それぞれの樹種の内, 最も古かった年代を併記した. アカマツ, ベイマツ, 松杭はいずれも50年以上経過したのものがあ, 水中下であればかなりの長期間健全な状態を保つことが確認された. 一方, スギは調査した範囲では最大で26年であった.

以上より, 今回の調査範囲で木材は, 地下水位変動域以深であれば樹種に関係なく, 腐朽は進行せず健全であることが分かった. 一般に土木工事においては松杭が多く使われ, 腐朽に対しても抵抗性が高いように思われているが, スギも地下水位変動域以深であれば抵抗性が高いことがわかる.

【まとめ】

- (1) 地下水位変動域や地下水位変動域以浅に設置された木材は, 腐朽したものと健全なものがある.
- (2) 地下水位変動域以深に設置された木材は, 樹種に関係なく100%が健全であり, このような環境下では土木資材として十分な期間健全性を保つことがわかった.
- (3) 土木資材としては一般にカラマツ, ベイマツを含めたマツが多く使われるが, スギについても同様に地下水位変動域以深では健全性を保つことがわかった.

謝辞: 本研究は, 福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである. 関係各位に心より感謝申し上げます.

【参考文献】

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第14回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp.97-102, 2006.8.
- 2) 塩井幸武: 土木(道路)における杭基礎の変化・変遷について, 土と基礎, 54-6(581), pp.9-12, 2006.6.
- 3) 佐々木晴美: 軟弱地盤でのくい工法による施工例, 基礎工, pp.91-96, 1981.2.
- 4) 屋我嗣良, 河内進策, 今村祐嗣編: 木材科学講座12 保存・耐久性, 海青社, p.80, 1997.3.

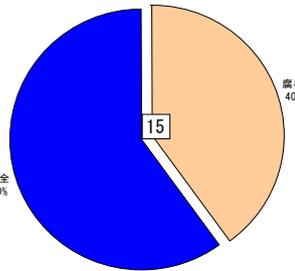


図-4 地下水位変動域以浅における腐朽状態

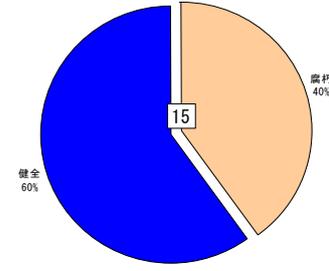


図-5 地下水位変動域における腐朽状態

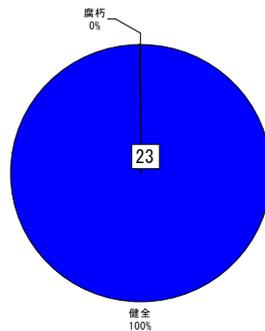


図-6 地下水位変動域以深における腐朽状態

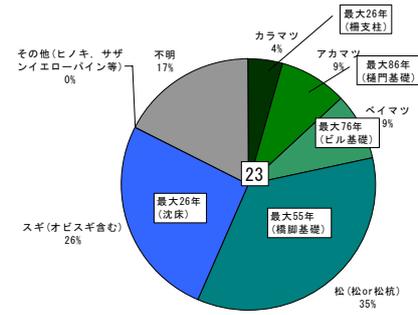


図-7 地下水位変動域以深における樹種

足羽川の橋梁基礎に用いられた木杭の掘出し調査

(飛島建設(株)) ○上杉章雄, 沼田淳紀, (福井高専) 吉田雅穂,
(福井県雪対策・建設技術研) 久保 光, (福井県総合グセ) 源濟英樹, 野村 崇

【緒言】

地球温暖化対策の一つとして木材の積極的な利用が考えられる。建設分野では構造物基礎として古来より木杭が用いられてきたが、近年ではあまり利用されていない。これは腐朽に対する不安感が一因であると考えられる。筆者らは木材の木杭としての利用可能性を再考するため、福井県足羽川で過去に打設された木杭を掘り出し、樹種を鑑定するとともに健全性を評価した。

【調査方法】

(1) 木杭の採取地点

調査対象は、福井県足羽川における足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業および福井縦貫線幸橋整備事業によって、3つの橋の近傍から掘り出された木杭である。図-1 に木杭採取地点を、写真-1 に木杭掘出し地の概況を、写真-2 には採取された木杭の様子を示した。

(2) 目視による腐朽度評価

木杭を洗浄後、表面を軸方向 50cm ごとに区分し、各区分の表面について「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準 (JIS K1571:2004)」に準じて腐朽度を評価した。評価は3名で行い、平均値を求めた。

(3) ピロディン試験

掘り出した木杭から深度方向に 50cm 間隔で厚さ 10cm の円盤を切り出し、これについて放射方向 (表面) 48 点のピロディン試験を実施した。なお円盤は、気乾状態と飽水状態の2通りの水分状態のものを作成し試験に供した。試験方法の詳細は文献¹⁾を参照されたい。

(4) 樹種鑑定

採取した木杭を解剖学的性質に基づく樹種鑑定に供 (国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図「福井」に加筆) した。この方法では、基本的には種名までは特定できず、属までの鑑定となる。樹種鑑定は、独立行政法人森林総合研究所に依頼し、同研究所 木材特性研究領域 組織材質研究室 農学博士 安部久氏により実施された。なお、水越橋付近にて採取された木杭については、外観より全て同一の樹種と推定されたため、12 本中 4 本を樹種鑑定に供した。

【結果および考察】

表-1 に調査結果の一覧を示す。樹種鑑定の結果、地点ごとに樹種が異なっていた。いずれの木杭も地中に埋まっていた部分に関しては、健全な状態であった。図-2 に木田橋付近にて採取されたスギの杭 (木杭 No.AsWkD01) の調査結果を示す。ピロディン試験結果では気乾および飽水の両試料ともに貫入量が 30mm を下回っており、健全性を有していることが明らかとなった。

構造物基礎としての木杭は、一般に「松」が良いと言われ、「松杭」とも呼ばれる。筆者らは本報に先行する研究で土木分野における木材利用に関する文献調査を実施し、53



図-1 木杭の掘り出し地点



写真-1 木杭掘出し地の例 (水越橋上流)

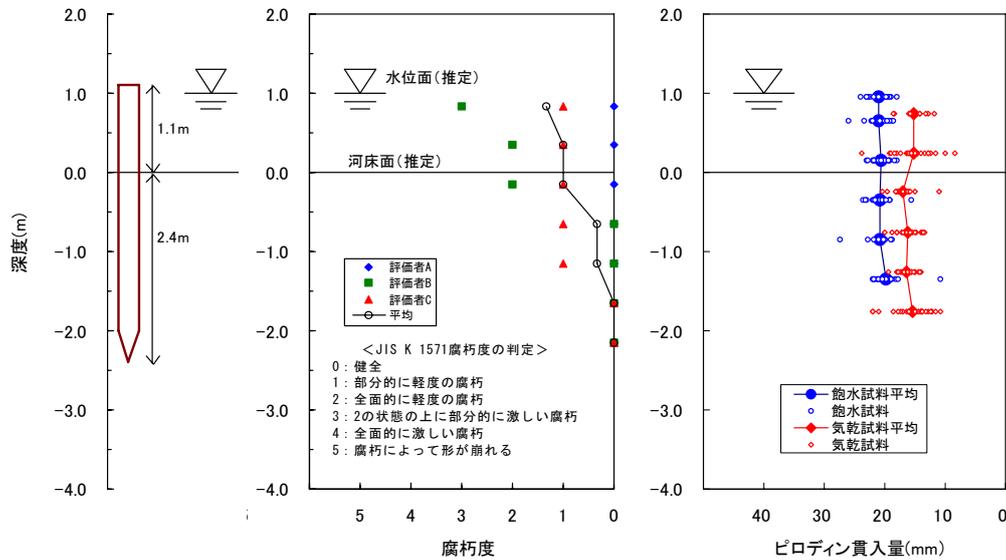


写真-2 搬入された木杭 (No.AsWkD01)

表-1 調査結果一覧

項目	内 容												幸橋付近		木田橋付近	
	水越橋上流												Asw Sw01	Asw Sw02	Asw Kd01	
採取位置	Asw Mk01	Asw Mk02	Asw Mk03	Asw Mk04	Asw Mk05	Asw Mk06	Asw Mk07	Asw Mk08	Asw Mk09	Asw Mk10	Asw Mk11	Asw Mk12				
木杭No.																
用途 (構造物名称)	橋脚基礎			護岸基礎									橋脚 (旧P7) 基礎		橋脚 (旧銭とり橋) 基礎	
施工時期	1958 (昭和33) 年と推定			1958 (昭和33) 年と推定									1932 (昭和7) 年		1928 (昭和3) 年	
調査 (採取) 時期	2006年			2006年									2006年		2006年	
設置期間	48年と推測			48年と推測									74年		78年	
年輪数*	114	150	116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37	33	43	
樹種鑑定	実施	実施	—	—	実施	—	—	実施	—	—	—	—	実施	実施	実施	
樹 種	カラマツ属 (樹種鑑定非実施のものも同種と推定)												マツ属		スギ属	
丸太寸法	全長 (m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	2.7	2.2	3.5
	(うち地中部 (m)**)	(3.7)	(3.6)	(3.9)	(不明)	(不明)	(不明)	(2.4)								
末口直径	(m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30	
	(m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	測定不能 (欠損)
地盤との関係	砂層			砂層									礫質土、杭先端部は礫混じり砂層		多くは粘性土、杭先端部は砂質シルト層	
地下水水位位置	杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る			杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る									地盤表面より上に河川水位		杭頭より上に河川水位	
水の種別	淡水			淡水									淡水		淡水	
その他													先端に金属製キャップが付属。			

* : 複数の計測結果の平均値。 ** : 地中部の長さは土砂付着状況や流水による侵食痕などにより推定。



(a) 木杭位置イメージ (b) 目視による腐朽度評価結果 (c) ピロディン試験結果

図-2 木杭 (No.AsWkd01) 調査結果

の文献から 47 地点のデータを得た。しかし、このうち構造物基礎として用いられた 20 件の事例のうち、調査結果に木杭の樹種が明記されているのは 3 件であり、残りは松、松杭、明記無しであった²⁾。このように土木分野では樹種を明確にせずに木材の調査を行っている例が多く、今回確認されたスギの木杭は貴重な事例であると考えられる。前述の文献調査では、スギについては埋設期間 26 年の事例が最長²⁾であったが、今回採取したスギではそれを超える 78 年であった。

【まとめ】

- (1) 福井県足羽川から橋脚基礎などに利用されていた木杭を掘り出して樹種を鑑定したところ、カラマツ属 (年輪が密でありロシアカラマツと推察)、マツ属の種の他に、スギも使用されていた。
- (2) 掘り出されたスギは健全であり、スギ間伐材を木杭 (基礎など地中に埋設する用途) に利用できる可能性が示された。

謝辞：本研究は、福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施した。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 沼田淳紀, 上杉章雄 : 掘り出した木杭の腐朽評価の試み, 第 56 回日本木材学会大会研究発表要旨集, T09-1315, 2006.8.
- 2) 沼田淳紀, 上杉章雄, 吉田雅穂, 久保 光, 源濟英樹, 野村 崇 : 土木で用いられた木材の腐朽に関する事例調査, 第 57 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 投稿中, 2007.8.

足羽川で採取した木杭調査の概要

○沼田淳紀¹・上杉章雄¹・吉田雅徳²・久保光³・野村崇⁴¹飛鳥建設・²福井工業高等専門学校・³福井県雪対策・建設技術研究所・⁴福井県総合グリーンセンター

1. はじめに

2008年より京都議定書の約束期間がいよいよ開始される。日本は、2008年～2012年の間の年間平均温室効果ガス排出量を1990年水準比6%削減しなければならないこととなる。1990年以降の温室効果ガスは現在むしろ増加しており、この目標達成は決して容易ではない。生産時にCO₂排出量の大きいセメントや鉄の国内生産量は、1950年代以降の高度経済成長期に爆発的に増加し、1973年のオイルショック頃よりある幅を持って頭打ちとなっているが、その生産量は1950年初期と比較すると10倍から数十倍となっている。一方、大気中のCO₂削減に寄与する木材の国内生産量は、1960年代をピークに減少を続け、現在ではピーク時の1/3以下となり¹⁾、林業は衰退するにいたった。これには建設事業も大きく関わってきたといえる。そこで、筆者らは、地球温暖化対策を考慮した持続可能な建設事業を進める上で、建設材料の一つの方向性として図-1に示すような、土、石、木といった天然材料をもっと積極的に使用することを提案している¹⁾。特に、木材は、現在では土木工事の本工事で積極的に使用することはほぼ皆無となってしまったが、「土木」という表現からもわかるように古来使用されてきている。木材を大量に使用すると逆にCO₂排出に繋がると勘違いされる場合があるが、木材利用の増加は間伐や植林といった林業の活性化に繋がるとともに、仮に木材を燃焼させてもカーボンニュートラルなのでCO₂増加とはならない¹⁾。京都議定書に示される日本の温室効果ガス削減目標6%の内3.8%は森林吸収をあてにしているが、これは整備された森林が対象である。このような整備された森林経営を行うためには、地域材(国産材)による木材利用が必要であり、これを促進するために林野庁では、現在約2,000万m³である木材利用量をさらに500万m³増加させる目標を掲げている(林野庁「地球温暖化防止森林吸収源10カ年対策」)。杭基礎についてみると、現在使用されているコンクリート杭や鋼管杭の歴史は浅く、木杭基礎の歴史は洋の東西を問わずむしろこれよりはるかに古い²⁾³⁾。このような長い歴史を持つ土木技術を復活させることで、土木事業を進めつつも、地球温暖化対策や林業の活性化といったことまでも同時に進めていくことが必要になってきていると考える。

しかしながら、木材は腐朽する場合があります建設材料としては不安要因も多い。そこで、ここではまず文献調査により木材の使用事例を調査した⁴⁾。次に、福井県足羽川にて実際に橋脚基礎などに用いられていた木杭を掘出し調査を実施した⁵⁾⁶⁾。本論文では、これらの概要について述べる。

2. 文献調査⁴⁾

2.1 調査方法

建築の基礎工事を含めた土木事業への木材利用を考え、地中にある木杭と河川工事に使用された木材について、これらに対する腐朽に関する文献調査を行った。調査対象とした資料は、(1)土木学会年次学術講演会論文集(1999年～2006年の8年分)、(2)地盤工学会地盤工学研究発表会講演概要集(2002年～2006年の5年分)、(3)その他であり、関連する53の文献を収集した。なお、紙面の都合上これらの文献名は割愛させて戴く。これらについて、(1)対象構造物、(2)木材用途、(3)使用場所、(4)施工時期、(5)調査時期、(6)設置期間、(7)樹種、(8)木材寸法、(9)地盤との関係、(10)地下水位、(11)木材の腐朽状態(地下水位以浅、変動域、地下水位以深)、(12)その他、以上の項目について調査した。

2.2 調査結果

53の文献より、47地点のデータが得られた。得られた

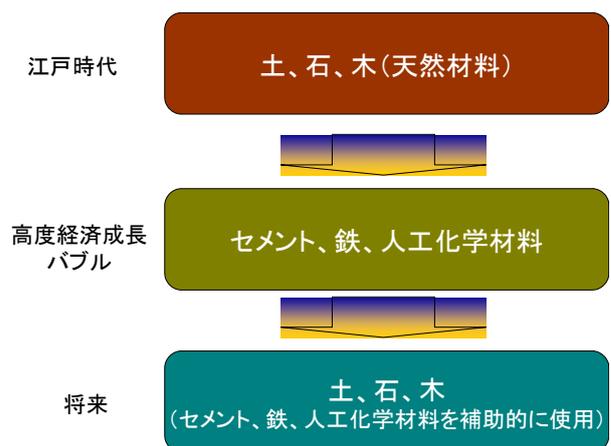


図-1 地球温暖化対策を考慮した持続可能な建設事業を進める上での建設材料の方向性

Outline of investigation for woodpiles dug up from Asuwa River
Atsunori Numata¹, Akio Uesugi¹, Masaho Yoshida², Hikaru Kubo³ and Takashi Nomura⁴ (¹Tobishima Corporation, ²Fukui National College of Technology, ³Snow Management & Construction Technology Research Center of Fukui Prefecture and ⁴Fukui Prefectural General Green Center)

KEY WORD : Woodpile, Global warming, Dug up investigation, Type of wood, Decay

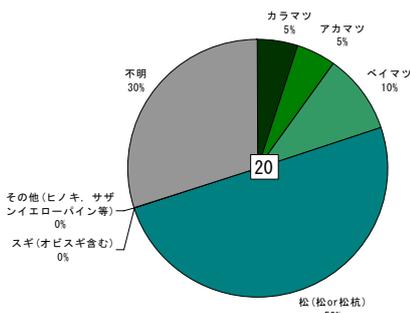


図-2 鉄道および道路橋基礎，ビル住宅基礎，火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種

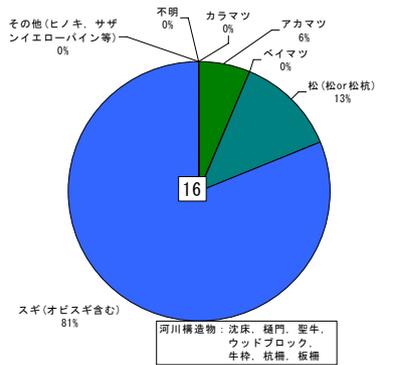


図-3 河川構造物に用いられた木材の樹種

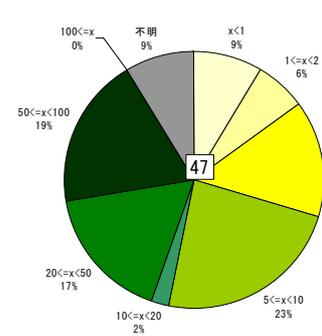


図-4 木材の設置期間

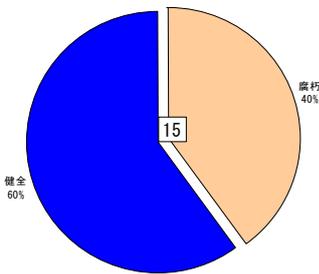


図-5 地下水位変動域以浅における腐朽状態

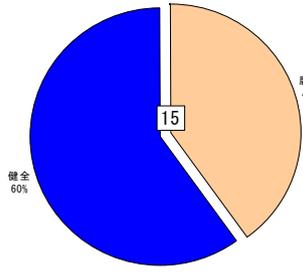


図-6 地下水位変動域における腐朽状態

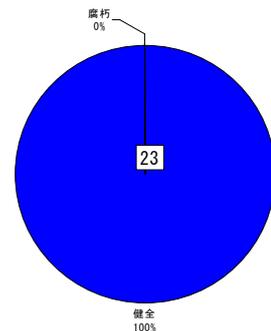


図-7 地下水位変動域以深における腐朽状態

データの内約2割が鉄道または道路橋梁の基礎，約2割がビルまたは住宅の基礎，約4割が河川構造物である。ここで河川構造物とは，沈床，樋門基礎，聖牛，ウッドブロック，牛柵，杭柵，板柵などである。47地点の樹種の内訳は，松または松杭と記述されたものが3割である。この中には，カラマツ（カラマツ属），アカマツ（マツ属），ベイマツ（トガサワラ属）が含まれると考えられるが，これらを総称して松杭とすると，松杭は全体の約4割である。全国的にはスギ花粉の問題もあり，木材の中でもスギの使用が課題の一つであるが，スギも全体の約4割を占める。旧建築基礎構造設計基準⁷⁾によればスギは，アカマツ，クロマツ，カラマツ，ベイマツと比べると圧縮強度は低く，木材の分野ではスギの耐朽性はカラマツ，ベイマツと同等でありアカマツやクロマツよりもむしろ優れている⁸⁾。しかし，一般に土木工事においては松杭が多く使われ，腐朽に対しても抵抗性が高いように思われている。

図-2に，構造物基礎とし，鉄道および道路橋基礎，ビル住宅基礎，火力発電所水路基礎に用いられた木材の樹種を示す。不明を除けば，全てがカラマツ，アカマツ，ベイマツを含めた松杭である。図-3に，河川構造物に用いられた木材の樹種を示す。約2割がアカマツ，ベイマツを含めた松杭であるが，残り8割はスギである。これは，一般的にスギはカラマツ，ベイマツと耐朽性は同等で，アカマツやクロマツなどよりも耐朽性が高い⁸⁾ことや，近年聖牛のような過去使用された工法を見直し木材を使用することがあり，この際現在大量に存在しているスギを使用したということが考えられる。図-4に，木材の設置期間を示す。約半数が10年未満であるが，約2割は50～100年であり，データの中で最も古いものは，90年であった。

木材は，空気，水，栄養，温度の4条件が満足されなければ腐朽しない。地下水位を想定すると，地下水位以下では空気がないので腐朽は発生しないと考えられる。しかしながら，地下水位は常に変動しており，実際には木材腐朽に対する地下水位を単純には決められない。また，地盤中であっても通気性の悪い地盤やその逆もあると考えられ，これらの条件がどのように木材腐朽に寄与するかは全く不明である。そこで，地下水位の条件を，地下水位変動域以浅，変動域，変動域以深の3つに分類した。

図-5～図-7に，それぞれ地下水位における腐朽状態を示す。なお，腐朽状態の判別は，それぞれの文献に従った。目視による判別も多く含んでいる。地下水位変動域以浅や変動域では，健全であったものが6割あるが，腐朽したもの

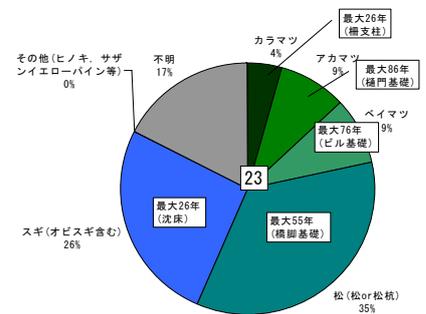


図-8 地下水位変動域以深における樹

も4割であることがわかる。このように、地下水位変動域以浅では、腐朽する場合としない場合があり、今後どのような条件でこのような差が生じるのかを明らかにしていく必要がある。一方、地下水位変動域以深では、100%が健全であり、地下水位以深では腐朽が進行しないことが過去のデータから明らかとなった。

図-8に、地下水位変動域以深における樹種の割合を示す。樹種は、カラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭が5割以上を占め、スギも3割近く存在している。一般に、土木工用木杭にはカラマツやベイマツを含めた松杭が使用されているが、スギも地下水位以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる。図中には、それぞれの樹種の内、最も古かった年代を併記した。アカマツ、ベ

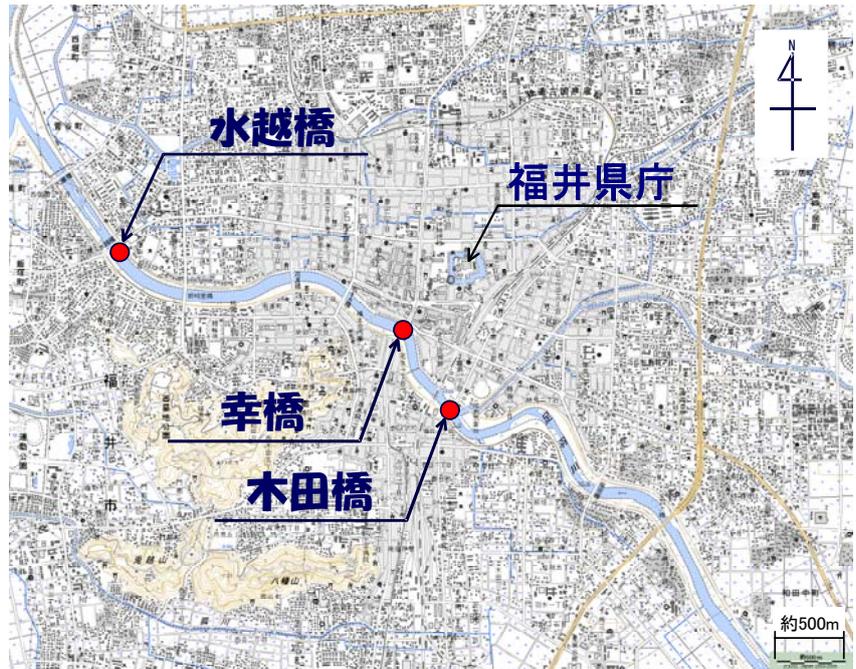


図-9 木杭の掘出し地点
(国土地理院2万5千分の1地形図「福井」に加筆)



(a)水越橋



(b)幸橋



(c)木田橋

写真-1 掘出し前の木杭の状況

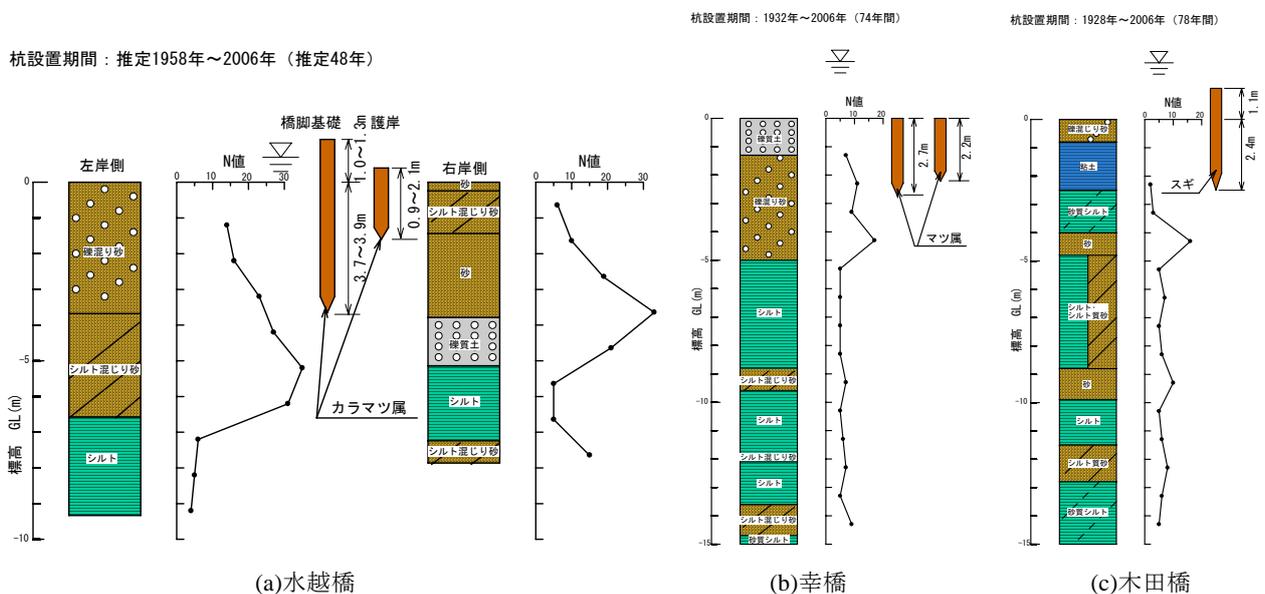


図-10 木杭掘出し地点の地盤柱状図

イマツ, 松杭はいずれも50年以上経過したものがあり, 水中下であればかなりの長期間健全な状態を保つことが確認された. 一方, スギは調査した範囲では最大で26年であった.

以上より, 今回の調査範囲で木材は, 地下水位変動域以深であれば樹種に関係なく, 腐朽は進行せず健全であることが分かった. 松杭は腐朽に対しても抵抗性が高いように思われているが, スギであっても地下水位変動域以深であれば抵抗性が高いことがわかった.

3. 足羽川における木杭の掘出し調査⁵⁾

3.1 調査位置

2004年7月福井豪雨では福井市内を流れる足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生し, その後, 福井県では5ヶ年で足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業による河床掘削や橋梁架替等の工事(一部は福井縦貫線幸橋整備事業)が進められた. この工事の最中河床より昔の橋梁の基礎である丸太状の木杭が数多く発見されたので, これらを掘出し腐朽に対する調査を実施した. 図-9に, 木杭の掘出し地点を示す. それぞれ, 現在の水越橋, 幸橋, 木田橋付近である.

3.2 年代の推定と地盤特性

木杭がいつ頃に施工されたのかを調査し設置期間を求めることで, どの程度の期間で木杭が腐朽するのか, または, 腐朽しないのかといったことを明らかにすることが可能となる. 写真-1に掘出し前の木杭の状況を示す. また, 図-10に木杭掘出し地点の地盤柱状図を示す. なお, 採取された木杭の目視観察によれば, 木杭は河床より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの, 地中に埋まっていた部分に関しては極めて健全な状態であった.

(1)水越橋

写真-1(a)に, 水越橋における木杭の状況を示す. 水越橋の約100m上流側の地点より, 直径約30cm長さ約5mの木杭3本と直径約10cm長さ1~2mの木杭9本が採取された. 現場付近在住の技術者より, 1958(昭和33)年の橋梁拡張工事の際に設置された仮設歩道用の木橋の基礎杭との証言を得た. これより, 設置期間は48年と推定できる. 今回, 掘出された木杭の中では杭径, 杭長ともに最も大きく, 年輪数も100年以上と古かった. 図-10(a)にこの地盤柱状図と, 図-11にその位置図を示す. 木杭の深度は, 杭の観察より河川内の地盤表面位置を推定したものであり, 杭頭は約1m河床より突出し, 杭の大部分は砂層に貫入されていたと考えられる.

(2)幸橋

写真-1(b)に, 幸橋における木杭の状況を示す. 幸橋からは直径約20cm長さ約2mの木杭2本が採取された. 採取時には河床には多数の木杭が0.9~1.0mの間隔で打設されており, 杭長は1.4m~5.7mとばらついていた. 図-12に木杭の採取位置とボーリング位置を示す. これより, 木杭は旧幸橋のP7橋脚基礎として使用されていたものであったことが分かる. 幸橋は, 1862年(文久2年)年に由利公正の提起により木造の橋が架けられ, 念願が叶った当時の人々がこれを喜びこの橋を「幸橋」と呼ぶようになった. その後1887年(明治20年), 1905年(明治38年)に木造架け替え工事があり, 1932年(昭和7年)に木杭の採取された旧幸橋が鉄筋コンクリート橋として架け替えられている. この時期は,

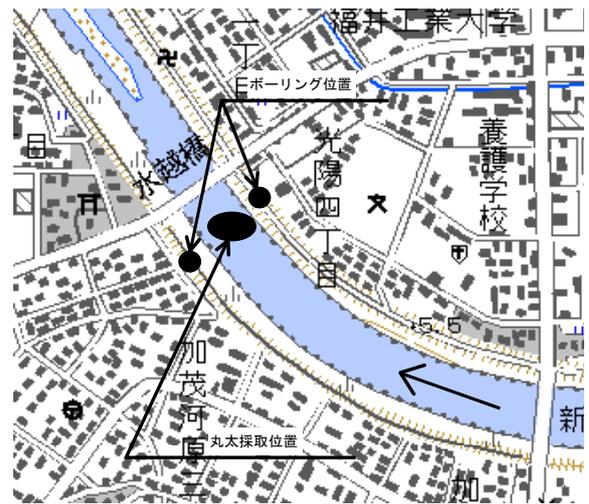


図-11 水越橋付近での木杭採取位置とボーリング位置 (国土地理院2万5千分の1地形図「福井」に加筆)

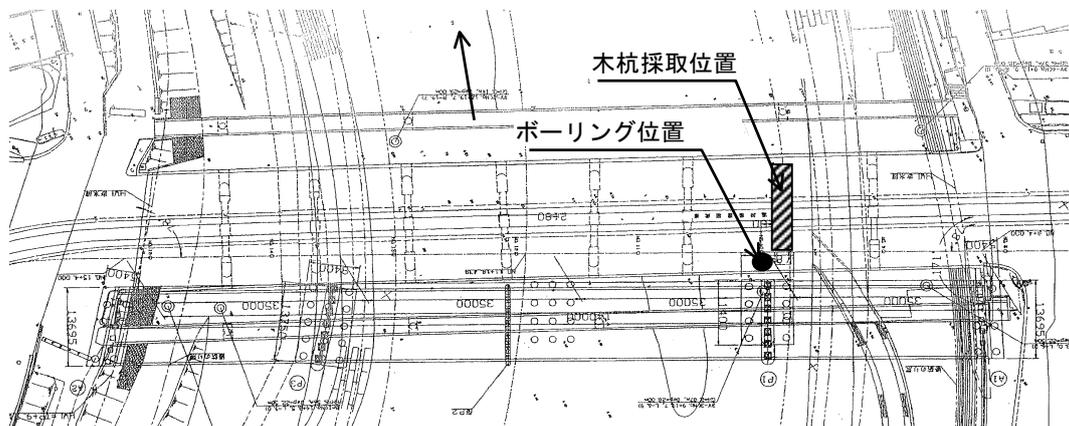


図-12 幸橋での木杭採取位置とボーリング位置

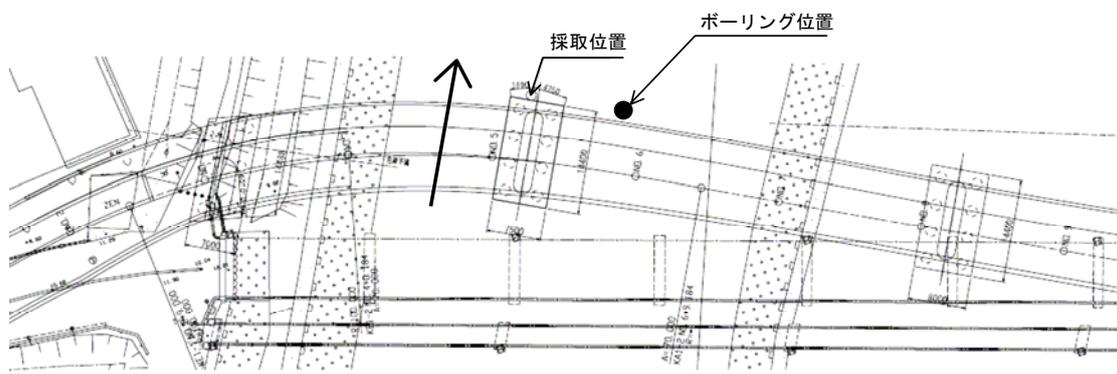


図-13 木田橋での木杭採取位置とボーリング位置

表-1 足羽川で採取された木杭の樹種判定結果

採取地点	試料No.	太さ (末口直径)	樹種鑑定結果：和名/学名	
			科名	属名
水越橋	AswMk01	0.31m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/Larix
	AswMk02	0.27m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/Larix
	AswMk05	0.11m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/Larix
	AswMk08	0.11m	マツ科/PINACEAE	カラマツ属/Larix
幸橋	AswSw01	0.17m	マツ科/PINACEAE	マツ属(Sylvestris節)/Pinus (sect. Sylvestris)
	AswSw02	0.17m	マツ科/PINACEAE	マツ属(Sylvestris節)/Pinus (sect. Sylvestris)
木田橋	AswKd01	0.30m	スギ科/TAXODIACEAE	スギ属/Cryptomeria

西洋文化と日本文化が融合した独自の文化が華やかだった時期で、このようデザインが橋の形態、高欄、親柱等に取り入れられている。旧幸橋は1945年の福井大空襲や1948年福井地震にも耐え、2001年の橋梁架替え工事に至っている⁹⁾。以上より、採取された木杭の設置期間は74年と推定できる。図-10(b)に地盤柱状図を示す。表層付近に礫質土と礫混じり砂層があり、比較的N値も大きいことから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

(3)木田橋

写真-1(c)に、木田橋における木杭の状況を示す。木田橋からは直径30cm長さ3.5mの木杭1本が採取された。図-13に木杭の採取位置とボーリング位置を示す。採取位置は現在の木田橋近くに架かっていた1928(昭和3)年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり、設置期間は78年と推定できる。記録によれば、銭とり橋は1928年(昭和3年)に森田末松氏が私費3万円を投じた有料橋であり、1936年(昭和11年)まで続いたとされている。木杭は、川のほぼ中央にあり、採取時には杭頭部約1.4mが地盤より上に突出していたが、試験室に搬入された木杭を観察すると、杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり、その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。図-10(c)に示すように杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたとすると、粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり、杭の大部分は粘土層内にあったと考えられる。杭頭部は水中に没していたと考えられるが、渇水期には水位面より上に存在していたと推測できる。

4. 樹種評価⁶⁾

木杭はよく「松杭」と言われるが、一口に「松」といっても、アカマツ(マツ属)、カラマツ(カラマツ属)、ベイマツ(トガサワラ属)、トドマツ(モミ属)、エゾマツ(トウヒ属)などがあり、その性質(強度や耐朽性)は樹種により異なる。そこで、足羽川で採取された木杭について樹種鑑定を行い、それぞれの属を明らかにした。水越橋については、長い木杭3本の内2本、短い木杭9本の内2本、幸橋は2本、木田橋は1本について鑑定を行った。樹種鑑定方法は、文献6)を参照されたい。なお、鑑定は独立行政法人森林総合研究所木材特性研究領域組織材質研究室の安部久博士によるものである。

表-1に樹種の鑑定結果を示す。この結果、水越橋上流のものはカラマツ属(年輪が密であることからロシアカラマツであると思われる)、幸橋付近のものはマツ属(地域性を考えればアカマツだと思われる)、木田橋付近で採取されたものはスギ属(スギ属は一属一種)であることがわかった。

5. 調査結果

以上の結果を表-2にまとめた。足羽川の3地点より旧橋梁や護岸基礎と考えられる木杭は、48年~78年経過したものであり、その樹種は、マツ科カラマツ属とスギ科スギ属であった。採取された木杭は、目視観察した限りでは、河床

表-2 足羽川で採取された木杭の調査結果概要

項目	内 容															
	水越橋上流											幸橋付近		木田橋付近		
採取位置												Asw Sw01	Asw Sw02	Asw Kd01		
木杭No.	Asw Mk01	Asw Mk02	Asw Mk03	Asw Mk04	Asw Mk05	Asw Mk06	Asw Mk07	Asw Mk08	Asw Mk09	Asw Mk10	Asw Mk11	Asw Mk12				
用途(構造物名称)	橋脚基礎			護岸基礎									橋脚(旧P7)基礎		橋脚(旧銭とり橋)基礎	
施工時期	1958年(S33年)と推測			1958年(S33年)と推測									1932年(S7年)		1928年(S3年)	
調査(採取)時期	2006			2006									2006		2006	
設置期間	48年と推測			48年と推測									74年		78年	
年輪数*	114	150	116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	33	43	
樹種鑑定	実施	実施	-	-	実施	-	-	実施	-	-	-	-	実施	実施	実施	
樹種	マツ科カラマツ属			マツ科カラマツ属(樹種鑑定非実施のものも同種と推定)									マツ科マツ属		スギ科スギ属	
丸太寸法	全長(m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	2.7	2.2	3.5
	(うち地中部)*	(3.7)	(3.6)	(3.9)	(不明)	(不明)	(不明)	(2.4)								
	末口直径(m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30
	元口直径(m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	測定不能(欠損)
地盤との関係	砂層			砂層									礫質土 杭先端部は礫混じり砂層		多くは粘性土 杭先端部は砂質シルト層	
地下水位の位置	杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る			杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る									地盤表面より上に河川水位		杭頭より上に河川水位	
水の種別	淡水			淡水									淡水		淡水	
その他														先端に金属製キャップが付属。		

*: 複数の計算結果の平均値, **: 地中部の長さは土砂付着状況や流水による浸食痕などにより推定

より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの、地中に埋まっていた部分に関しては極めて健全な状態であった。木田橋で採取されたスギでは、78年間地中で健全であったことが確認された。また、採取された木杭を基礎とした旧幸橋、および、地震時における橋の使用は不明であるが木田橋の前にあった銭とり橋の基礎は、1948年福井地震にも耐えており、耐震性についても木杭は決して低いものではないといえる。

6. まとめ

- (1) 木材腐朽は、空気の存在しないところでは発生しないと考えられ、これを考慮し地中の木杭を評価する場合、地下水位変動域以浅、変動域、変動域以深の3つの領域に分類することができる。
- (2) 地下水位変動域や地下水位変動域以浅に設置された木材は、腐朽しているものと健全なものがある。
- (3) 地下水位変動域以深に設置された木材は、樹種に関係なく100%が健全であり、このような環境下では土木材料として十分な期間健全性を保つといえる。
- (4) 土木材料としては一般にカラマツ、バイマツを含めたマツが多く使われるが、スギについても同様に地下水位変動域以深では健全性を保つことがわり、少なくとも78年程度の年月では全く健全な状態を保つことがわかった。
- (5) 足羽川で採取された幸橋付近と木田橋付近で採取された木杭は、1948年福井地震を耐えており、このような木杭の耐震性は決して低いものではないと考えられる。

なお、今後採取した木杭について、さらに定量的な調査を実施する予定である。

謝辞：本研究は、福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 沼田淳紀・上杉章雄：地球温暖化対策のための木材利用の可能性について，第14回地球環境シンポジウム，土木学会，pp.97-102，2006.8.
- 2) 塩井幸武：土木（道路）における杭基礎の変化・変遷について，土と基礎，54-6(581)，pp.9-12，2006.6.
- 3) 佐々木晴美：軟弱地盤でのくい工法による施工例，基礎工，pp.91-96，1981.2.
- 4) 沼田淳紀・上杉章雄・吉田雅穂・久保光：土木工事における木材利用の文献調査，第42回地盤工学研究発表会発表講演集，投稿中，2007.7
- 5) 吉田雅穂・沼田淳紀・上杉章雄・久保光：足羽川における木杭の掘出し調査，第42回地盤工学研究発表会発表講演集，投稿中，2007.7.
- 6) 上杉章雄・沼田淳紀・久保光・吉田雅穂：足羽川で採取された木杭の樹種評価，第42回地盤工学研究発表会発表講演集，投稿中，2007.7.
- 7) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準・同解説，技報堂，p.193，1960.11.
- 8) 屋我嗣良・河内進策・今村祐嗣編：木材科学講座12 保存・耐久性，海青社，p.80，1997.3.
- 9) 福井県：幸橋景観整備計画，2006.6.

足羽川で掘り出された木杭の健全度調査

福井工業高等専門学校
飛鳥建設防災R&Dセンター 正会員 沼田淳紀, 上杉章雄
福井県雪対策・建設技術研究所 正会員 久保 光
福井県総合グリーンセンター 源濟英樹, 野村 崇

1. はじめに

現在, 地球温暖化防止対策として, 温室効果ガスを対象とした排出源対策とCO₂の吸収源対策の2つが提案されているが, このうち後者では, 森林が持つCO₂吸収能力などを活用した様々なカーボンストックの技術開発が行われている。京都議定書で定められた我が国のCO₂削減目標6%のうち, 森林吸収による削減目標は3.9%となっているが, 近年の林業の低迷等により, その実現は非常に困難な状況にある。したがって, 地球温暖化防止のためには人工林の手入れを適切に行うことが必要であり, 国産材を積極的に利用することにより, 植林→育成→伐採→流通→加工→利用→植林という森林管理のサイクルを安定的に循環させることが重要となる。ところで, 我が国における木材利用を用途別で見ると建築用と製紙用がそのほとんどを占めており, 土木事業における利用は約2%と非常に少ないのが現状である。

これらのことを背景に, 著者等は地球温暖化防止対策の一手段として木材の地中貯蔵によるカーボンストックに着目し, かつては土木工事において使用されてきた木杭利用の復活を目指し, 木材を地盤中に打設して軟弱地盤対策等に活用することを提案している¹⁾。しかし, 鉄やコンクリートに比べて木材の場合は腐朽による強度低下の心配があるため, 近年では木材が基礎杭として利用される事例は極めて少ないのが現状である。しかしながら, 文献調査によれば, 地下水位変動域以深に設置された木材は, 樹種に関係なく健全であり, このような環境下では土木資材として十分な期間, 健全性を保つことが明らかとなっている²⁾。本研究は平成18年に福井県福井市を流れる足羽川で掘り出された木杭の健全性を調査することを目的としており, 今後の土木事業における木材利用の可能性について検討するものである。なお, 本文では木田橋で採取されたスギの木杭の調査結果について述べる。

2. 掘出し調査

2004年7月福井豪雨では足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生した。その後, 足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業が採択され, 2004年度より5ヶ年計画で, 河床掘削や橋梁架替等の工事(一部は福井縦貫線幸福橋整備事業)が進められている。その工事の最中, 足羽川に架かる水越橋, 幸福橋, 木田橋の各地点より橋梁基礎等に利用された丸太状の木杭が数多く発見された³⁾。

このうち, 木田橋からは末口直径30cm, 長さ3.5mの木杭1本が掘り出された(写真-1, 2参照)。樹種はスギ科スギ属であり⁴⁾, 年輪数は約43年であった。掘出し位置は現在の木田橋近くに架かっていた1928年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり, 設置期間は78年と推定できる。木杭は川のほぼ中央にあり, 河川を鋼矢板で締切り河床面まで水位を下げて掘り出された。掘出し時には杭頭部約1.4mが地盤より上に出ていたが, 試験室に搬入された木杭を観察すると, 杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり, その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。図-1に示すように杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたとすると, 粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり, 杭の大部分は粘土層内にあったと考えられる。杭頭部は水中に没していたと考えられるが, 渇水期には水位面より上に存在していたと推測できる。

3. 健全度調査

図-2は「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準(JIS K 1571:2004)」に従い, 目視により腐朽度を判定した結果である。同図に示す基準を参考にA, B, Cの3名の評価者が木杭の状況を観察し判定を行った。なお, 同図に示す河床面と水位面は図-1より推定した位置である。同図より, 河床面より下の部分, すなわち, 常に地盤中に存在していたと推測される部分は被害度が1以下となっており, 河床面上よりも腐朽程度が低いことが確認できる。

図-3は木材の軟質腐朽の程度を調べるピロディン試験の結果である。貫入量が大きいが軟らかいことを示し, 25~30mm以上の値が腐朽の目安となる。試験に用いた試料は, 掘り出した木杭を深度方向に50cm間隔で切り出した厚さ

キーワード: 地球温暖化, 木杭, スギ, 腐朽, ピロディン

連絡先: 〒916-8507 福井県鯖江市下司町 Tel&Fax:(0778)62-8305 Email:masaho@fukui-nct.ac.jp



写真-1 木杭の掘出し状況



写真-2 木杭の全容

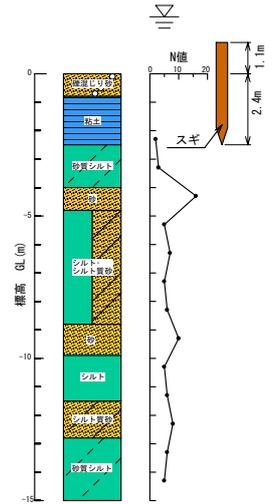


図-1 木杭掘出し地点の地盤柱状図

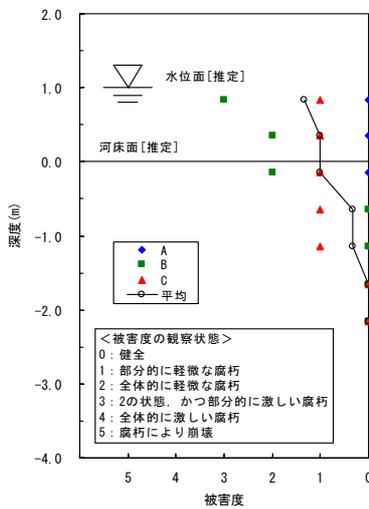
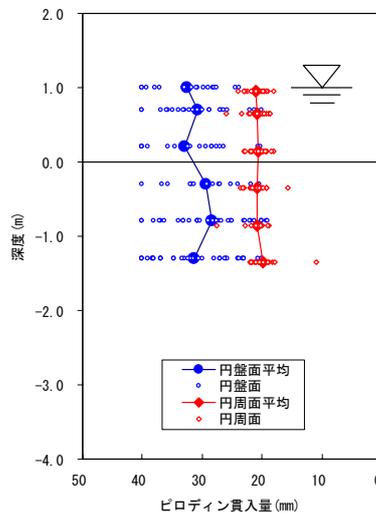
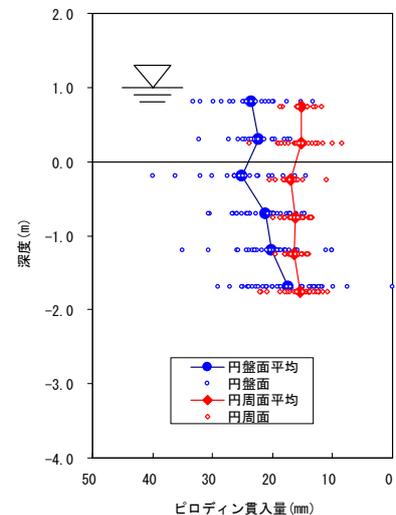


図-2 目視による腐朽度評価の結果



(a) 飽和試料



(b) 気乾試料

図-3 ピロディン試験の結果

10cmの円盤状のものであり、飽和状態と気乾状態の2通りの保管方法で作製した。貫入方向は木杭断面の幹軸方向（円盤面）と木杭側面より幹軸直交方向（円周面）の2通りとし、それぞれ計40点および計48点の計測点を設けた。試験方法の詳細は文献5)を参照されたい。同図より、スギは晩材と早材の密度差が著しい樹種であるため、円盤面では貫入位置によるばらつきが大きい傾向が見られるが、平均値で判断すると両試料ともにほとんどの深さで貫入量が30mmを下回る結果となっており、健全性を有していることが明らかとなった。

4. まとめ

足羽川で掘り出された設置期間78年のスギの木杭の健全度調査の結果、河床面下に存在した部分は腐朽程度が低く健全性を有していることが明らかとなった。今後は圧縮試験等を行い、より定量的な評価を行っていく予定である。

謝辞：本研究は平成18年度福井県建設技術公社産学官共同研究支援事業「脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究」の一部として実施したものである。関係各位に記して謝意を表す。

参考文献 1) 沼田淳紀, 上杉章雄: 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について, 第14回地球環境シンポジウム, 土木学会, pp. 97-102, 2006. 8. 2) 沼田淳紀, 上杉章雄, 吉田雅穂, 久保 光: 土木工事における木材利用の文献調査, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007. 7. 3) 吉田雅穂, 沼田淳紀, 上杉章雄, 久保 光: 足羽川における木杭の掘出し調査, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007. 7. 4) 上杉章雄, 沼田淳紀, 久保 光, 吉田雅穂: 足羽川で採取された木杭の樹種評価, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中, 2007. 7. 5) 上杉章雄, 沼田淳紀: 岩見沢で掘り出した木杭の強度について, 第41回地盤工学研究発表会発表概要集, pp. 2401-2402, 2006. 7.

脱地球温暖化社会へ向けた
建設工事への木材利用に関する調査・研究
～産学官共同研究報告書～
平成 20 年 3 月 発行

編 集 研究開発グループ
発 行 〒910-0005 福井市大手 2-9-10 (電気ビル 1F)
(財) 福井県建設技術公社
連 絡 先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472
飛島建設株式会社 技術研究所
電話 04-7198-1101
印 刷 〒910-0856 福井市勝見 3-6-13
西川印刷(株)