

005

JSCE 木材利用ライブラリー

国内の構造物基礎における木材利用事例と 設計方法の変遷

2012年3月

公益社団法人 土木学会 木材工学特別委員会

土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会

(一般社団法人日本森林学会・一般社団法人日本木材学会・公益社団法人土木学会)

公益社団法人 土木学会 木材工学特別委員会
地中海利用小委員会 委員構成

土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会
(一般社団法人日本森林学会・一般社団法人日本木材学会・公益社団法人土木学会)

2012年3月

役割	氏名	所属	執筆担当責任者
委員長	沼田 淳紀	飛島建設(株)	第1章, 第4章, 2.2.2, 3.2, 3.5, 4.1
副委員長	桃原 郁夫	(独)森林総合研究所	2.2.5, 2.2.6
幹事	本山 寛	飛島建設(株)	第2章, 2.1.1
	五十嵐一朗	昭和マテリアル(株)	
	五十嵐幸毅	昭和マテリアル(株)	
	池田 浩明	昭和マテリアル(株)	4.3.5
	梅田 修史	(独)森林総合研究所	
	久保 光	福井県雪対策・建設技術研究所	2.1.2
	正田 大輔	(独)農研機構 農村工学研究所	4.2
	末次 大輔	佐賀大学	2.2.1, 2.2.3, 4.4.3
	菅原 広二	(株)寒風	
	辻 浩平	ジャパンホームシールド(株)	
	辻井 修	(株)間組	第1章, 第3章, 3.3, 4.3.1
	手塚 大介	兼松日産農林(株)	
	中村 裕昭	(株)地域環境研究所	
	仁多見俊夫	東京大学	
	Hemanta Hazarika	九州大学	
	濱田 政則	早稲田大学	
	原 忠	高知大学	
	林 重徳	日本建設技術(株)	第1章, 2.1.3, 2.2.4, 4.4.3
	深谷 敏史	ジャパンホームシールド(株)	
	松島 健一	(独)農研機構 農村工学研究所	
	三浦 哲彦	(株)軟弱地盤研究所	3.1, 4.3.4, 4.4.1
	水谷 羊介	兼松日産農林(株)	4.3.2, 4.3.3
	森 満範	(地独)北海道立総合研究機構 林産試験場	
	山田 昌郎	(独)港湾空港技術研究所	3.4
	山口 秋生	越井木材工業(株)	
	吉田 雅徳	福井工業高等専門学校	2.1.2
	(甲本 達也	佐賀大学)	3.6, 4.3.1
	(宮副 一之	(株)九州構造設計)	4.4.2
	(松本秀次郎	(株)九州パイリング)	4.3.4
	(喜連川聰容	(株)軟弱地盤研究所)	3.1, 4.3.4

()内は、ライブラリー作成協力者

国内の構造物基礎における木材利用事例と設計方法の変遷

もくじ

	ページ
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 歴史的木材基礎の事例	3
2.1 歴史に残る代表的な木材基礎	3
2.1.1 旧相模川橋脚	3
2.1.2 幸橋	5
2.1.3 諫早眼鏡橋	7
2.2 現在も活躍する代表的な木材基礎	9
2.2.1 佐賀城	9
2.2.2 新潟駅	10
2.2.3 宮崎県庁舎の木杭基礎	12
2.2.4 干拓堤防の木材基礎	13
2.2.5 多摩川大橋	15
2.2.6 学士会館	16
第 3 章 木杭基礎設計法の変遷	19
3.1 明治時代の木杭・木材の設計施工法の考え方	19
3.2 道路橋	21
3.3 鉄道	29
3.4 港湾	33
3.5 建築基礎	50
3.6 農業土木	58
第 4 章 現在における木材基礎設計法	61
4.1 地中における木材利用に関する法的規制	61
4.2 代表的な杭基礎設計法の比較	65
4.3 木材基礎が記載されている設計方法の事例	72
4.3.1 農業土木	72
4.3.2 小規模建築物	77
4.3.3 建築分野で使用されている木杭工法（環境パイル工法）	81
4.3.4 水路用ボックスカルバート・L型擁壁基礎の設計マニュアル（佐賀県）	85
4.3.5 パイルネット工法の実例	89
4.4 現状における木材利用事例と試み	93
4.4.1 佐賀県の戸建て住宅における木杭利用の現状	93
4.4.2 佐賀県農業用排水路の例（クリーク）	97
4.4.3 ラフト & パイル工法の施工試験	103

第1章 はじめに

杭基礎の最初は洋の東西を問わず、木杭基礎である¹⁾。国内では、現在の相模川左岸の国道1号線付近に位置する国史跡「旧相模川橋脚²⁾」(茅ヶ崎市)が、発見された橋脚としては日本最古のものとして1924年(大正13年)に史跡保存の指定がなされている。この橋脚は、1198年(建久9年)に相模川に架けられたとされる勿論木製で、樹種はヒノキである。

また、海外では例えばヴェネツィアの木杭基礎が有名である。15世紀中頃～16世紀に栄えた海の都“ヴェネツィア”では、総ての構造物の基礎は、軟弱地盤(泥)中に打ち込まれた木杭の上に木桁を組み、その上にイストリア石を敷いたものである。基本的な都市区画と構造等や基礎も当時のままであり、海水・泥中における“木材基礎”の400年を超す耐久性を実証する事例である。文献から、都市内の運河に架かる有名な石橋「リアルト橋」の基礎断面、並びに「ヴェネツィア建築の基礎」の概要を紹介する。

「リアルト橋(図-1.1)」³⁾は、アントニオ・ダ・ポンテの設計で、支間約26m、1588年に着工し、1592年に完成した。従って、完成後約420年を経過している。地盤は軟弱で沈下し易いため、約6,000本の木杭がびっしりと固めて打ち込まれ、アーチの重量が橋台に斜めに作用するため、石を斜めに積み上げる工夫がされている。橋の上には、商店の入る小間割りが石造りで最初から設けられており、橋台に作用する荷重は相当なものとなる。約420年を経過した現在も、大きな変状は無いようで、設計・施工の素晴らしさとともに、海水・泥中における木材基礎の耐久性には、驚嘆させられる。

「ヴェネツィア建築の基礎(図-1.2)」⁴⁾は、『まずはじめに、なるべく硬い材質の木材を選び、20cmの角か丸で2mから5m程の杭を多量に製造する。そして、その先端を釘のようにとがらせておく。こうして造られた多量の杭を、沼(泥)地の中にすき間もできないように打ち込んでいくのである。』⁴⁾と記述されている。特に、建物の壁や柱の下、運河に沿う部分では、集中的に、また深めに杭が打たれているとのことである。このような基礎地盤づくりは、度重なる火災の危険から、木造建築を止め石造りになった15世紀になってからであろうとのことである。従って、海水・泥中における木材基礎には、少なく見込んでも400年を超す耐久性が実証されていることになる。

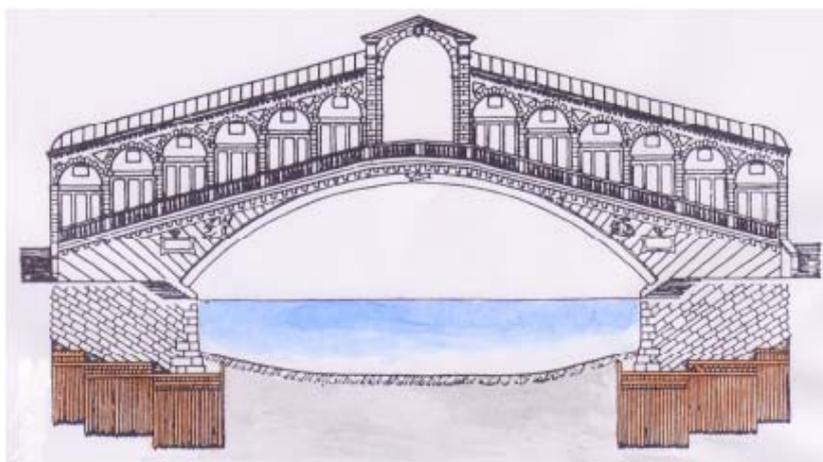


図-1.1 リアルト橋の木材基礎³⁾⁵⁾

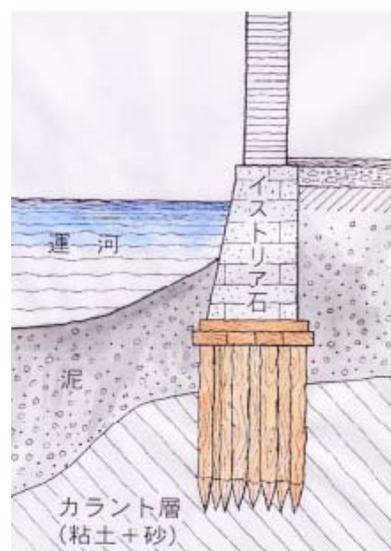


図-1.2 ヴェネツィア建築の基礎⁴⁾

木杭はこれ以降も広く用いられていた。国内では、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、第2次世界大戦の影響もありこれらの杭は普及せず。1950年代まで木杭の利用が圧倒的に多かった。木杭基礎の多くは松丸太で、大正時代には太径で長尺の松材が不足し、アメリカから大量の松（ベイマツ）が輸入された。その後、1955年（昭和30年）に「木材資源利用合理化方策」を政府が閣議決定した頃より、コンクリート杭の需要が伸び始め、一方で木杭は姿を消していった¹⁾。

この「木材資源利用合理化方策」は、枯渇の危機にあった森林の保護を目的としたもので、木材資源の利用から鉄鋼やコンクリートへの転換を促すものであった。ここには、土建材料等の耐久化の促進として、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り替えるよう必要な措置を講ずるとともに木材防腐を更に推進すべきことが示されている。さらに、1959年（昭和34年）には、日本建築学会が「建築防災に関する決議」を行い、建築物の火災や風水害の防止を目的として、特に危険の著しい地域に対する建築制限のひとつとして「木造禁止」を提起した。さらに、1964年（昭和39年）には丸太の輸入関税がゼロになる完全自由化が行われた、このような状況下、国産木材の供給量は、1960年（昭和35年）の約5,000万m³をピークに、その後減少を続け、2000年（平成12年）には自給率が20%を下回る状況となった。この間、日本の森林資源は豊富となったが、林業は疲弊していった。

森林資源が豊富であるにもかかわらず、木材の自給率は減少する一方であったが、2009年（平成21年）に「森林・林業再生プラン」を林野庁が発表した。ここには、2020年（平成32年）までに木材自給率を現在の24%から50%に引き上げる目標が示された。さらに、2010年（平成22年）には「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が制定された。このように、木材の使用は一度は制限されてきたが、これからからは積極的に利用しようという流れになりつつある。

木杭を始めとする木材の地中利用についても、このような影響を受けてきたと考えられる。今後、かつては大量に使われてきた地中における木材利用を復活させ、木材利用の拡大をはかるためにも、国内の歴史的事例と設計法の変遷を整理しておく必要があると考える。そこで、本書では、国内における木材基礎の歴史的事例と設計方法の変遷を示し、現在における設計法をまとめた。

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) 茅ヶ崎市教育委員会：史跡旧相模川橋脚, 2008.
- 3) チャールズ・シンガー他：技術の歴史6 ルネサンスから産業革命へ，筑摩書房，pp.373, 1978
- 4) 塩野七生：海の都の物語～ヴェネツィア共和国の一千～，新潮文庫, pp.53-55,2009.6.

引用出展

- 5) 合田良實：土木と文明，鹿島出版会, pp.184-192,1996.3.

第2章 歴史的木材基礎の事例

本章では、2.1節で歴史的建造物に使用されていた木材基礎の事例、2.2節で近代に建造され今もなお木材基礎で支えられ健全性を保っている建造物の事例について紹介する。なお、本ライブラリには掲載していないが、今もなお木材基礎で支えられ健全性を保っている建造物の代表例とし、東京駅駅舎、松本城なども挙げられる。

2.1 歴史に残る代表的な木材基礎

2.1.1 旧相模川橋脚¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

(1) 史跡の概要

旧相模川橋脚は、神奈川県茅ヶ崎市の南西部に位置する国史跡である。本史跡は、1923年（大正12年）の関東大震災と翌年1月の地震により液状化が発生し、水田だった場所から木が浮き出てきたことにより発見された。発見当時、現地調査を行った沼田頼輔（歴史学者）により、本史跡は鎌倉時代初期、稲毛重成が相模川に架けた橋と推定された。その後、神奈川県の仮指定を経て1926年（大正15年）に本史跡は国史跡となり、溜池状の保存池で保存されていた。しかし、80年の歳月が経ち橋脚の一部に腐朽が見られたため、2001年（平成13年）から保存整備を実施し現在に至っている。

(2) 史跡の位置

本史跡は、神奈川県茅ヶ崎市町屋に所在し（図-2.1参照）、史跡の名称になった相模川からは、東に1.5kmの地点に位置する。史跡位置は、旧河道の地形にあたり、周辺地域の地名（中河原）からもそのことがうかがえる。

(3) 史跡の種類と状況

木製橋脚

現在確認されている橋杭は10本で規則的な配置をしている。配置から見る橋杭間の長さは、東西間の平均が4.35m、南北間が10.55m。橋杭の関係は、



「史跡 旧相模川橋脚」より

図-2.1 史跡位置



「史跡 旧相模川橋脚」より

写真-2.1 発見当時の状況



写真-2.2 現在の状況

東西方向の3本が対となり、南北方向に4列の配置をとるものと考えられる。南側の2本が未検出だが、この場所が無かったとすると橋としての構造は成立しないため、何らかの原因で無くなったものと考えられる。上記より推測される橋の大きさは、橋幅 9m、橋の長さが 40m、橋杭の断面は円形であり、直径が 65cm 以上である。断面観察では、外皮、辺材は確認されず、加工後と考えるとかなり大きな材料を使用したものと考えられる。

木製土留め

発見された遺構は、厚板、角柱、礫（玉石）等により構成、土留めの機能を意図したものと推定。この土留め遺構は、川岸の保護を目的とした護岸遺構の可能性が高い。年輪年代測定等から鎌倉時代前半と推定される。

(4) 史跡の調査結果

木の浮き上がりと液状化の状況

旧相模川橋脚では、橋脚の周囲で液状化が発生した場合は、浮き上がり量がわずかであったが、橋脚周囲ではなく地下の液状化層で液状化が生じた場合は、浮き上がり量が大きかった。大きな浮き上がりの原因は、GL-1m にある細礫および粗砂からなる砂礫層が液状化し、砂礫層上面に粘性土層があるため蓋をされた状態となり、水圧が異常に上昇したためと考えられる。

周辺地盤の地質調査結果

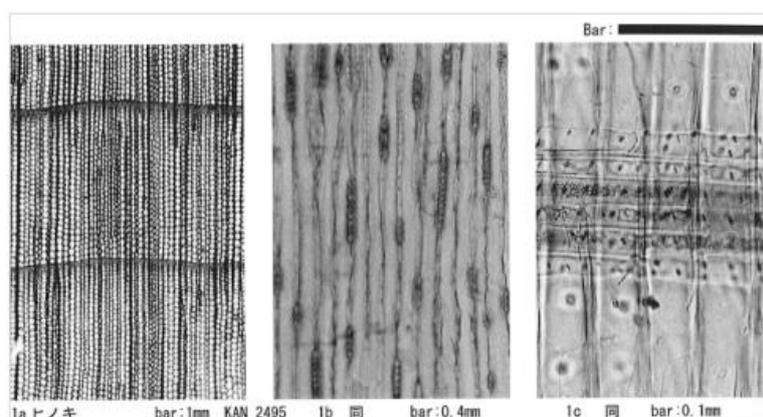
旧相模川橋脚周辺の地盤は、表層が水田等による粘性土が層堆積しており、その下が葉理構造のある砂層と砂礫層の互層となっている。液状化は、下部の砂礫層で生じている。

樹種の推定

橋脚9点について樹種を同定した。同定は、木材組織の横断面、接線断面、放射断面の3方向を光学顕微鏡により観察し現生標本と比較をすることにより行った。その結果、橋脚はすべてヒノキであった。(図-2.2 参照)

炭素年代測定結果

旧相模川橋脚の木片について、加速器質量分析法(AMS法)により放射性炭素年代測定を実施した。その結果、約1700年前前後と約1000年前前後という推定結果が得られた。しかし、歴史学者沼田頼輔氏によると、この橋は1198年(建久9年)に建設されたと推定されている。これは橋杭保護のため、後に防腐塗料としてコールタールが塗られた試料があることから、石炭を原料とするコールタールが測定結果に影響を与えたものと考えられる。このため、コールタールの影響のない試料結果を優先すると、約1000年前よりも新しい年代と推定される。



「史跡 旧相模川橋脚」より

図-2.2 樹種鑑定 木材組織顕微鏡写真

2.1.2 幸橋⁷⁾⁸⁾

(1) 調査概要

2004年(平成16年)7月の福井豪雨では、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、福井県では河床掘削や橋梁架替工事等、災害復旧工事が進められたが、その工事の最中、足羽川に架かる幸橋(以下、旧幸橋と称す。)の橋脚基礎から写真-2.3に示すように多数の丸太状の木杭が発見された。これら発見された丸太のうち、直径約20cm、長さ約2mの木杭2本を掘り出し、寸法の計測や腐朽に関する調査、ならびに、丸太の用途や施工時期の調査を2006年(平成18年)に実施した。

図-2.3は旧幸橋の位置を示したものであり、同位置は2007年(平成19年)に竣工した現幸橋のすぐ下流側である。図-2.4に、旧幸橋の概要を示す。旧幸橋は、左右岸の橋台の間に、P1~P8の8橋脚があった。掘り出された丸太は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。写真-2.4に、旧幸橋のP7橋脚の全景を示す。ところで、幸橋は1862年(文久2年)に明治維新期に活躍した福井藩士の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)に木造橋の架け替え工事があり、1932年(昭和7年)に丸太が掘り出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。したがって、この橋は1948年(昭和23年)の福井地震を経験していることになるが、地震による被害は極めて軽微であったことが明らかとなっている⁸⁾。

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。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)」およびピロディン試験(ピン貫入試験)により腐朽度を評価した。

(2) 調査結果

丸太は、0.9~1.0mの間隔で打設されており、杭長は1.4~5.7mとばらついていた。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具が取付けられていた。また、樹種鑑定の結果、マツ科マツ属であることが明らかとなった。図-2.5に示すように、丸太は、河川水位以深に打設されており、河床下部にはN値の比較的大きい礫質土と礫混じり砂層があることから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

JIS K 1571に示される腐朽度の判定を実施した結果、腐朽程度は低く、極めて健全であることが明らかとなった。木材劣化微生物の生育には、水分と空気は欠かせないものであり、温度には菌の活動に適した状態が存在し、栄養は木材自身がそれとなる。本調査地点においては、地盤中の地下水位以下では空気が遮断されており、このことが、丸太が長期間健全性を保ったことに大きく寄与したことが実証された。したがって、このような状態が維持されれば、丸太は100年を優に超える長期間、健全性を保つものと考えられ、構造物の耐用年数を考慮しても十分耐久性を満足する材料だといえる。



写真-2.3 橋脚を取り除き杭頭部が現れた様子

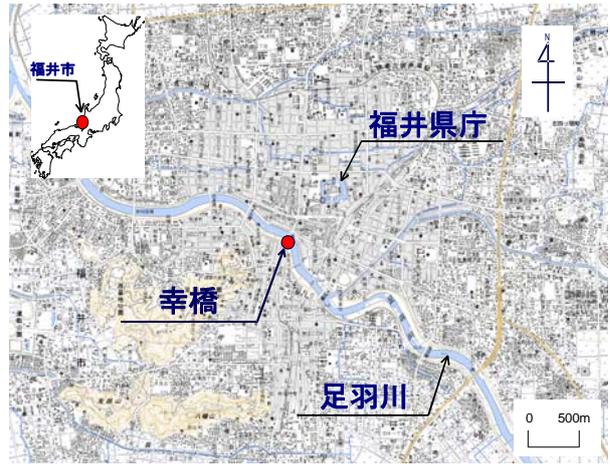


図-2.3 幸橋の位置

(国土地理院2万5千分の1地形図「福井」に加筆)

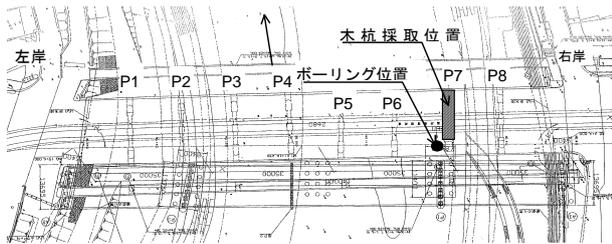


図-2.4 旧幸橋の概要



写真-2.4 旧幸橋のP7橋脚の全景

杭設置期間：1932年～2006年（74年間）

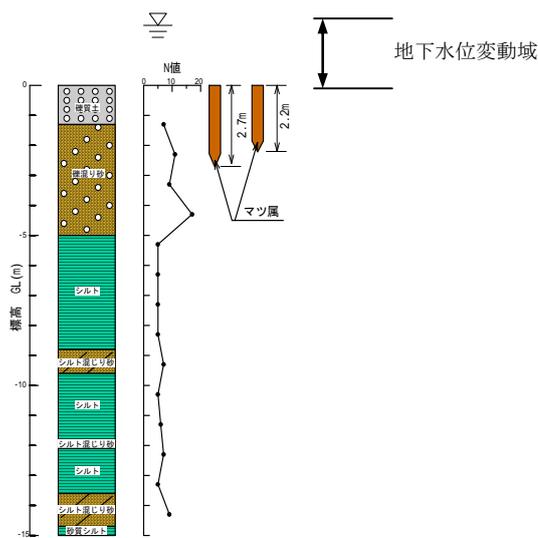


図-2.5 木杭掘出し地点の地盤柱状図

2.1.3 諫早眼鏡橋

(1) 諫早眼鏡橋の概要と移設の経緯

諫早眼鏡橋は、有明海に注ぐ本明川を跨ぐ橋として、河口から約 5km の位置に架設されていたもので、江戸時代末期の天保 9 年（1838 年）5 月に着工し、翌天保 10 年（1839 年）8 月には竣工し渡り初め式が行なわれた。完成した橋は、橋長約 40m（径間：約 18.1m の 2 径間）、拱矢（アーチ高：約 5.4m）の石組二連拱橋（二連のアーチ石橋）、所謂“眼鏡橋”である（写真-2.5）⁹⁾。

設計者は、諫早領士の公文四郎右衛門と中島十郎兵衛で、長崎の中島川に架かる石橋の秘伝を持つ池部長十郎に習ったものと推察されている¹⁰⁾¹¹⁾。

眼鏡橋は、1957 年（昭和 32 年）7 月の諫早大水害においても崩壊せず、流木を塞ぎ止め被害を拡大させる元兇として爆破される計画であった。しかし、当時の諫早市長野村義平の尽力によって、アーチ石橋として我国最初の国指定“重要文化財”となり、移設のために発掘されその基礎構造が明らかになった。

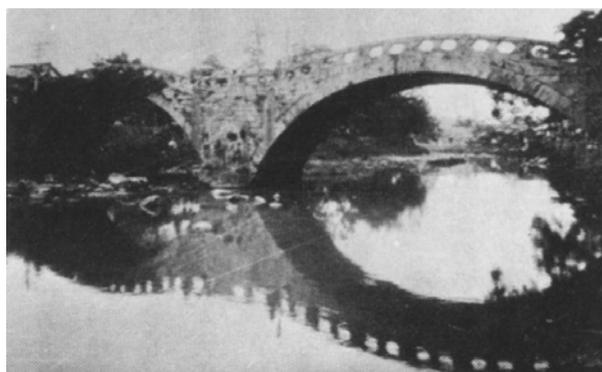


写真-2.5 被災前の水面に映る眼鏡橋

(2) 眼鏡橋の中央橋脚の基礎構造

アーチ石橋の中でも最も重要な中央橋脚の基礎からは、左右のアーチ力を受止める“基礎石”と“基礎敷石”、さらにその下にはきれいに敷並べた“枕木状木材”が発掘された（写真-2.6、2.7）。枕木状木材は、松の厚板材で、寸法は幅 40cm、厚さ 25cm、長さ 4.6～5.0m と記録されている。（後出・



写真-2.6 中央橋脚の基礎石



写真-2.7 基礎敷石の下の枕木状木材

伊藤氏所蔵の図面中に記載されたメモより)

さらに、枕木様の角材の下には、硬い砂礫層を掘込んだような状態で有明海の濁土が詰まっており、その中に打ち込まれていた“木杭” 53 本が発掘されている（写真-2.8）。木杭は、直径約 12～15cm、長さ 1.3m～1.5m で、その先端は削がれていたが、平方当たり約 40t の荷重を受けた杭の先端としては潰れが少なく（写真-2.9）、木杭の短さとともに、詰まった濁土について、

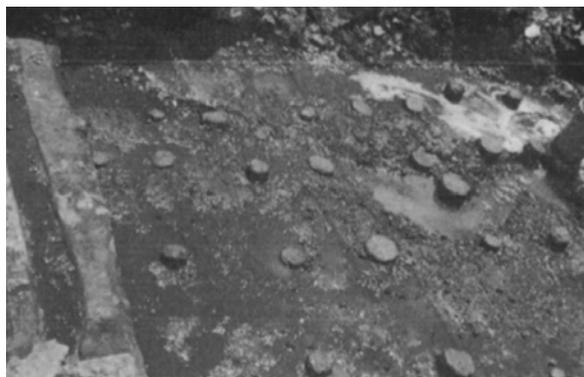


写真-2.8 基礎の木杭の配置

発掘時の大きな疑問（謎）とされていた。

当時発掘調査に関わった伊藤秀敏氏（元諫早市土木課技師）への聴き取り調査(2011年（平成23年）9月実施)では、『枕木状木材と木杭の樹種はいずれも“松”であったと記憶している。また、杭の削ぎ痕はつきりしており、腐朽はまったく見られなかった』とのことであった。（写真-2.9 参照）



写真-2.9 基礎木杭の先端の状態

さらに、アーチ石の継ぎ目には、太い鉄棒が入っており、鉄筋コンクリートの鉄筋の役割を果たしていたとのことである。また、アーチ石橋で、アーチの次ぎに重要な壁石の構造にも、興味ある技法が駆使されていた。その1つが、細長い石材を平行に積み重ねただけでなく、上流側と下流側の長い壁石を橋の中で合い欠ぎに組み合わせる“鎖石工法”を用いていたことである¹⁰⁾¹¹⁾。

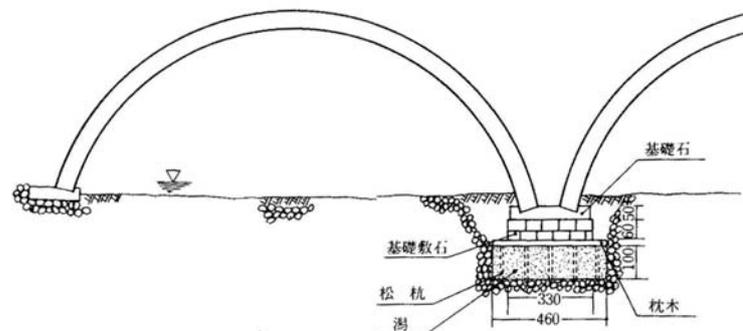
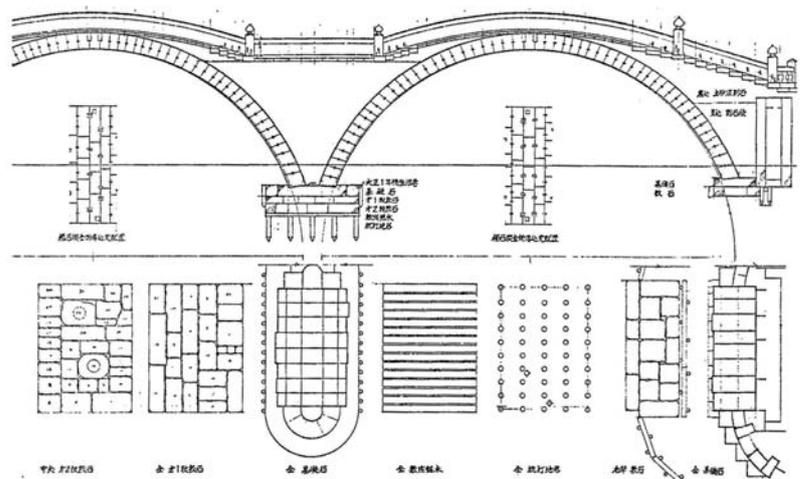


図-2.6 眼鏡橋の断面図（上図：文献12、下図：文献9）

図-2.6 は、眼鏡橋の断面図⁹⁾¹²⁾である。両橋台は、基岩および硬い砂礫層に基礎を置いていることから、中央橋脚の木杭と潟土を詰めた基礎構造は、地震の横揺れを吸収する“減振・柔構造”を意図したものであろう⁹⁾¹⁰⁾と推察している。その根拠の一つとして、当時より約45年前に発生した“島原大変・肥後迷惑”（※脚注参照）の際の地震と津波でも、軟弱地盤上の墓石に倒壊が少なかったことに学んだのではないかと推察している。

“島原大変・肥後迷惑”

島原近辺では1792年（寛政4年）4月中旬より群発地震に見舞われていたが、1792年（寛政4年）5月21日（旧暦では、4月1日）に、2度の強い地震の後、雲仙岳眉山が崩壊し（崩壊土量：3億4000万 m^3 ）有明海に傾れ込んだため、10m以上の高さの津波（最大遡上高：57m）が発生した。その津波により、肥前・肥後両国で1万5千名の人命が失われた。崩壊時の地震動については、1989-1991年（平成1～3年）の普賢岳噴火時の震源分布等から、マグニチュードは6.4、最大加速度が水平264.1gal、鉛直74.7gal（太田(1969)¹³⁾、土木研究所(1992)）と推定されている。

2.2 現在も活躍する代表的な木材基礎

2.2.1 佐賀城

佐賀城は軟弱粘土が厚く堆積する佐賀平野に築かれた平城で、天正年間に整備された龍造寺氏の旧村中城を、鍋島直茂・勝茂親子が慶長13年（1608年）～慶長16年（1611年）にかけて拡張したものである。石垣の木材基礎は今からおよそ180年から400年前に設置されたと考えられており、現代に至るまでほとんど腐朽することなくその機能を果たしていた。現在、佐賀城の石垣は天保期の状態に復元されている。出土時に健全な状態であった胴木は、現在も復元石垣の胴木として使用されている。

石垣の基礎には根曲がりした松が胴木として使われていた（写真-2.10）。石材と接する胴木上面は平らに加工され、胴木の下には枕木が敷かれホゾで固定されていた。胴木と石垣のずれを防ぐための木杭が打設されていたり、基礎下部に栗石が敷かれていたりしており、胴木の安定性や、支持力を得る工夫が施されていた。胴木は石垣基礎の他にも石樋や建築物の基礎に使われており、佐賀城では木材が構造物基礎の主材料として使われていたことが確認された¹⁴⁾。

木材を胴木として使用したのは、軟らかい粘性土が堆積していることから¹⁵⁾、柔軟な木材を面的に使用して上載荷重を地盤に分散させたり、不同沈下を抑制するねらいがあったものと考えられる。また、同地域は地下水位が高く、地下水以下あるいは地下水位が変動する粘性土地盤に基礎を設置することになるので、腐朽に対して高い耐久性を確保できたという点も、木材を工夫して使っていた理由であると考えられる。



(a) 湾曲した石垣の胴木基礎



(b) 角材に加工された胴木



(c) 胴木のずれ防止杭



(d) 石樋の胴木基礎

写真-2.10 佐賀城の木材基礎¹⁴⁾

2.2.2 新潟駅

1964年（昭和39年）新潟地震で液状化が一般的に知られていないときに液状化対策として木杭が用いられ、その杭が現在もお機能を果たしている事例を紹介する¹⁶⁾。

1964年（昭和39年）新潟地震は、1964年（昭和39年）6月16日13時01分に発生し、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¹⁷⁾。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棟である。斉藤と当時国鉄職員の方の話や当時の資料によれば、新潟駅と地震による被害は以下の通りである¹⁷⁾。

当時の新潟駅を図-2.7に示す。新潟駅は、主にRC造地下1階地上4階建ての駅本屋と、地上6階建ての支社からなる。これらの基礎は、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PCコンクリート杭（2本継ぎ、杭間隔不明）であった。基礎の木杭は1956～1957年（昭和31～32年）頃に打設され、新潟駅本屋は1958年（昭和33年）に開業した。地下水位は、当時地下水のくみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったためちょうど規制ができ、GL-0.5m程度であった。

地震後、ホームへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には噴砂が多数確認されており、地震後直後の写真¹⁸⁾においても噴砂噴水を確認することができる。したがって、新潟駅では明らかに激しい液状化が生じたと言える。これにより、車庫や事務室などは沈下傾斜し、ホームは約45cm沈下し、駅前広場も全体的におおよそ40～50cm沈下した。さらに、支社は不同沈下が10cm程度生じ駅前広場側に傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、木杭で支えられた本屋は健全であった。このように本屋が健全であったのは、当時では極めて珍しいが液状化対策を施した結果だと考えられる。斉藤は、当時木杭基礎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。・・・」¹⁷⁾

写真-2.11と写真-2.12に、地震後と現在の新潟駅の様子を示す。新潟駅が、当時のままであることがわかる。本屋は、地震後被害がなかった事から、2012年（平成24年）の現在もお当時の木杭基礎のまま使用されている。1964年（昭和39年）新潟地震において液状化対策の機能を果たし、杭打設後56年経過後も基礎としての機能を維持しているといえる。なお、支社は若干の傾斜を生じたが、杭の調査を実施し、その後もそのまま使われている。

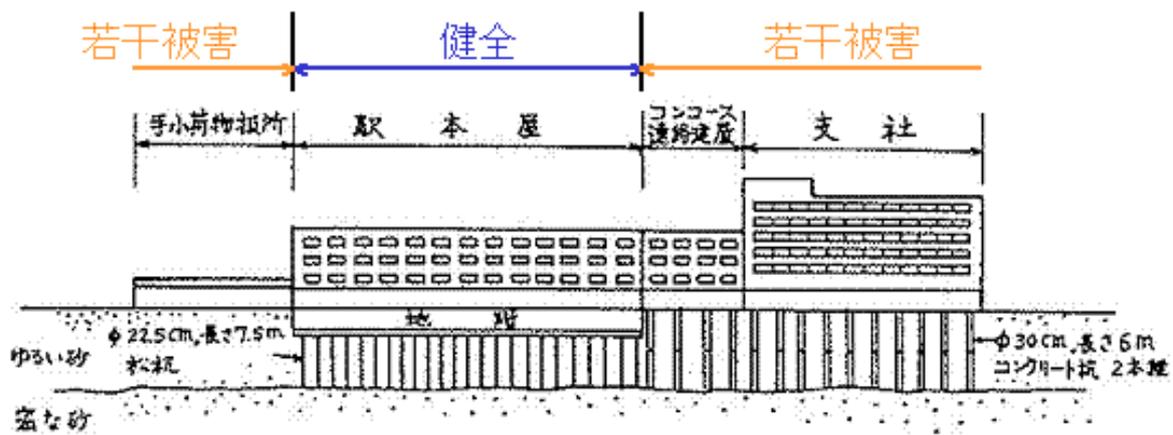


図-2.7 新潟駅正面建屋（文献17に加筆）



写真-2.11 地震直後の新潟駅の様子¹⁹⁾
(土木学会土木図書館所蔵、撮影：倉西茂・高橋達夫)



写真-2.12 近年の新潟駅の様子 (2004年撮影)

2.2.3 宮崎県庁舎の木杭基礎²⁰⁾

宮崎県庁舎は1932年（昭和7年）に建設された鉄筋コンクリート3階（一部4階）建てのゴシック建築である。竣工から80年が経過した現代でも本庁舎として使用されている（写真-2.13）。基礎には木杭を併用するフーチング基礎が使用されている。フーチング下には栗石が敷かれて、その下に長さ約3.6m（12尺）、末口約15cm（0.5尺）の丸太が、およそ50cmピッチで打設されている（図-2.8）。

当時作成された地質柱状図には「軽石混り砂」や「砂利混り土気ヲ帯ビタル砂」と記述されており、基礎地盤は礫質土あるいは砂質土であると推定される（図-2.9）。地下水面は地表面からおよそ1mの深さにある。木杭は地表面下約2mを掘削した後に打設されており、地下水面よりも1m以深に設置されている（写真-2.14）。



写真-2.13 現在の宮崎県庁舎

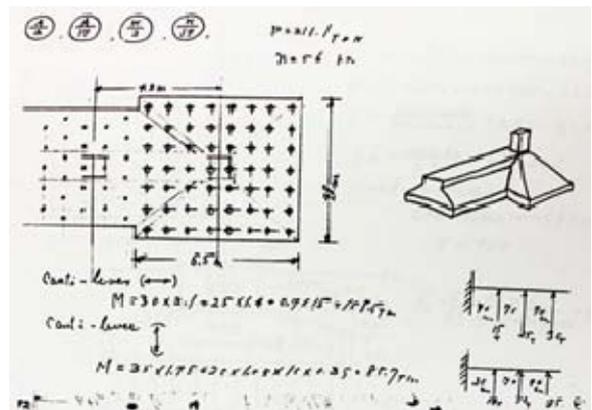


図-2.8 当時に作成された基礎の設計書

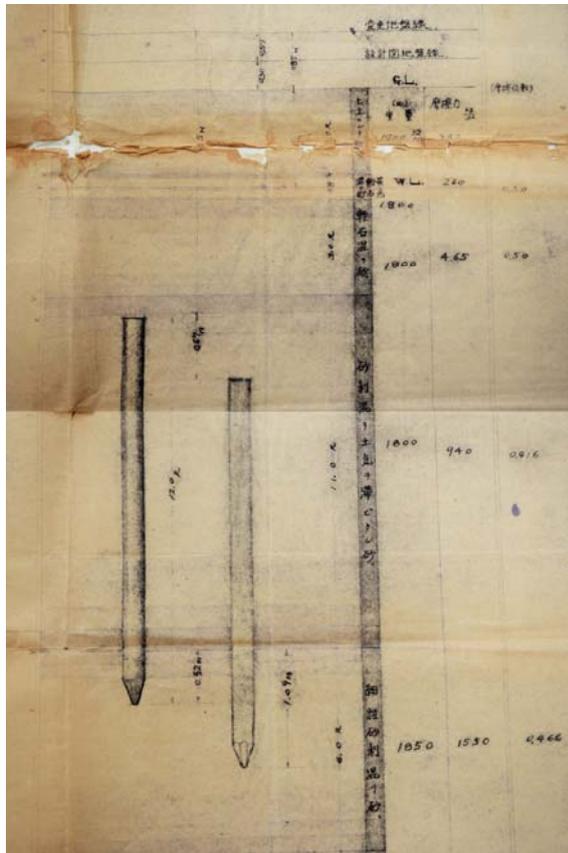


図-2.9 当時に作成された地質柱状図



写真-2.14 建設当時の様子（木杭打設）

2.2.4 干拓堤防の木材基礎²¹⁾²²⁾

(1) 有明海沿岸の干拓

閉鎖性湾海で干満差が大きく、波浪も比較的穏やかな有明海沿岸では、13世紀前半には堤防の構築を伴った新田開発＝干拓が盛んに行なわれてきた。干拓堤防の構築には、軟弱地盤の基礎対策として様々な工夫・技術が必要である。干拓は、搦工〔※脚注参照〕に始まって、敷粗朶、捨石および枕木状や胴木状に敷設した木材、打設杭など、多くの木材が用いられている。

(2) 柳河藩干拓「黒崎堤」の木材基礎

ここでは最初に、柳河藩干拓史上最大の干拓地で、貞享2年（1685年）に完成し、約200町の規模の“黒崎開”の堤防である「黒崎堤」について紹介する。図-2.10は、黒崎堤築堤当時の汐受土居の概念を示した絵図面である。海側を緩勾配にし、のり先に枝木・乱株を設け、葦野と捨石が描かれている。次ののり面には松を植えると記されている。

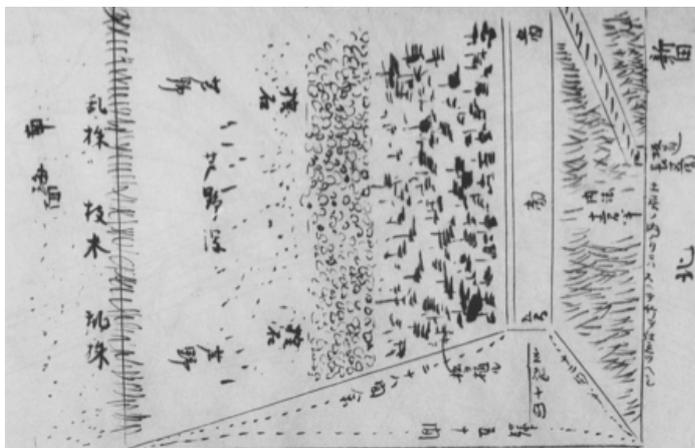


図-2.10 黒崎堤の汐受土居の絵図面

絵図の場所ではないが、2006年（平成18年）に発掘調査された柳河藩干拓「黒崎堤」の現場状況を写真-2.15に、発掘された木材基礎を写真-2.16に示す。

のり先部には、木杭が打設され、築堤荷重によって傾斜している状況である。掘られた範囲では、下に松の枝葉を敷き、その上に木材を横たえた状態である。発掘直後には、松の枝葉が明瞭に残っており、木材や杭に腐朽の様子はなく、ほぼ健全な状態である。



写真-2.15 「黒崎堤」と発掘調査現場



写真-2.16 発掘された木杭、木材と松枝葉

(3) 「昭和搦」干拓の堤防護岸の木杭基礎

次に、昭和初期の干拓地「昭和搦」の堤防護岸が、約30年後の台風（1960年（昭和35年）7月）で決壊した後、出現した防波堤（パラペット）基礎の木杭を紹介する。

写真-2.17は破堤している状況を、また、写真-2.18は潮が引いた後、干潮時に出現した防波堤（パラペット）とそれを支える基礎の木杭を示している。有明海は干満差が大きく最大約6mに達し、通常、湾奥部でも満潮時には約3mの潮位差がある。破堤する程の激しい波浪・流速と引き潮によって、防波堤（パラペット）の下が大きく侵食されている。しかも、この“昭和搦堤”は、築堤後約30年を



写真-2.17 破堤箇所から激しく流入する海水



写真-2.18 干潮時の残った木杭と波返し

経過しており、且つ其れ程密に詰めて打設された木杭ではなくても、激しい波浪と流速に耐えて、重いパラペットを支えている木杭基礎の様子は驚異的である。

“^{からみこう} 搦工 ”

従来（古来）の“干拓”工事の際に、最初に行われるもので、干拓の予定線に沿って“粗朶”を並べて木杭等で固定し、数年～十数年間に亘って放置する（これを“搦工”と呼ぶ）。流速が遅くなる“粗朶搦”とその周辺には、浮泥や底泥が^{から}搦まり堆積するとともに、干潟に生息する二枚貝類等の底棲生物も集まり、貝殻等も蓄積し低いマウンドを形成する。そのような場所に“敷粗朶”や“捨石”等を行い、本堤の構築へと進む（(2)「黒崎堤」参照）。このように“搦工”は、“干拓”の最初に行う工事であることから、行った場所や時代を冠して、干拓地を“大授搦”や“昭和搦”のように呼称することがある。“搦工”は、物理的意味だけでなく、底棲生物の移住に要する時間と空間を確保するもので、環境と生物にとっても重要な意味がある。“搦工”に象徴されるように、“古来の干拓”は、生物や環境、時間と共生するもので、“自然”と敵対するものではない。

2.2.5 多摩川大橋

多摩川大橋（写真-2.19）は、1939年（昭和14年）の鋼道路橋設計製作示方書案により、当時の1等橋の自動車荷重13tfで設計された橋長436m、幅員22.8mのゲルバー形式12径間鋼桁橋で、下部工が1942年（昭和17年）、上部工が1949年（昭和24年）に完成している²³⁾。この橋は現在、交通量や車両重量の増大、設計基準や耐震基準の見直し等により、今後10～20年の間に架け替えられることが想定されているが、掛け替えを前提とした調査が近年おこなわれ、その中で木杭の健全性についても報告された。



写真-2.19 多摩川大橋

これらの調査では、上部構造に塗装はがれ等の劣化や局部的な腐食が生じているのが確認されたが、主部材や支承に重大な損傷が確認されなかったこと、橋台および橋脚の松杭基礎が地下水位以下にあり、かつ下部構造に異常が認められないこと等から松杭基礎は健全であることが報告されている²⁴⁾。また、基礎構造の最大耐力が支承や橋脚よりも大きく、また、松杭基礎はその健全性に問題がないと判断されることなどから、影響のある基礎構造躯体の損傷や残留変形などが生じることはないことも報告されている²⁵⁾。

今後定期的な点検や適切な維持管理を行うことにより、架け替えまでの今後10～20年の間、現橋の健全性は維持でき²⁴⁾、下部構造については目標とした耐震性能を確保できるとの判断が示されている²⁵⁾。

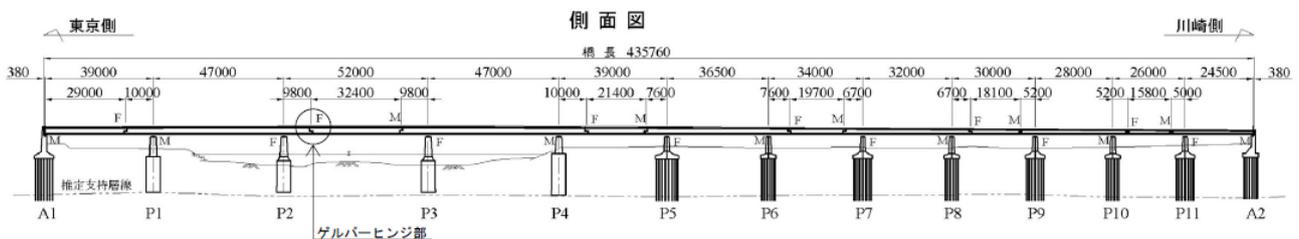


図-2.11 多摩川大橋側面図（出典：文献25）

2.2.6 学士会館

国の登録有形文化財に指定されている学士会館（旧館）（写真-2.20）は、佐野利器、高橋貞太郎の設計及び監督により 1926 年（大正 15 年）着工、1928 年（昭和 3 年）竣工の地下 1 階、地上 4 階建て、建坪 1200m²、総床面積 5418m²の鉄骨鉄筋コンクリート構造の建物である²⁶⁾。

学士会館（旧館）の建設に際しては、地盤面より約 3m を総掘し、そこに長さ 16.7m、末口 24cm、元口 30～42cm のベイマツ丸太 700 本がパイルドライバーにより 1.5m 間隔で砂利層まで打ち込んでいた。杭打ち後は、杭頭より 30cm 水平に根伐し、砂利 6cm、割栗石 24cm を敷き込んだ後、杭頭から 9cm 程度下まで胴突きし、その後捨打コンクリートを 9cm 打ち込み、さらにフェルト等による防水加工が施された²⁷⁾。

設計では杭 1 本の許容支持力を 17tf で計算したが、実際の結果はいずれも 20～23t 内外の値を示し、竣工後の記録には「大建築に往々見るが如き沈下は毫も認められないのである」と記されている²⁸⁾。

その後、1937 年（昭和 12 年）には学士会館（新館）が竣工するが、こちらにも長さ 15.2～18.2m、末口 24～27cm のベイマツ丸太 610 本が打設されている²⁷⁾。

1984 年（昭和 59 年）に会館周辺の地下水位が一部低下していることが観察されたことから、ベイマツ杭の健全性調査がおこなわれた。掘り出されたベイマツ杭を試験したところ、設計許容耐力（17tf）を上回る耐力が保持されていることが確認された²⁸⁾。このとき掘り出された杭の一部は、現在、学士会館 1 階の談話室に展示されており、見学可能である（写真-2.21）。

学士会館は旧館・新館とも、現在に至るまで会議場、宴会場、宿泊施設等として使用されている他、その歴史を感じさせる内装から映画・TV・雑誌等のロケ地としても活用されている。



写真-2.20 学士会館



写真-2.21 掘り出されたベイマツ杭

参考文献

- 1) 茅ヶ崎市教育委員会：史跡 旧相模川橋脚, 2008.
- 2) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡 旧相模川橋脚 解説シート 1 概要編, 2008.3.
- 3) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡 旧相模川橋脚 解説シート 2 橋脚編, 2008.3.
- 4) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡 旧相模川橋脚 解説シート 3 保護の歩み編, 2008.3.
- 5) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡 旧相模川橋脚 解説シート 4 地震編, 2008.3.
- 6) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡 旧相模川橋脚 解説シート 5 保存整備編, 2008.3.
- 7) (財) 福井県建設技術公社：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, pp.41-86,2008.
- 8) 吉田雅穂, 沼田淳紀, 久保光, 福井地震を経験した木杭基礎構造物の調査, 第 29 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.129-130, 2010.
- 9) 山口祐造：九州の石橋を訪ねて<前編>, (有)昭和堂印刷, pp.152-213,1974.12
- 10) 山口祐造：石橋物語<上>, (財) 地域開発研究所, pp.207,1978.
- 11) 諫早市役所：諫早大水害二十周年復興記念誌：山口祐造<眼鏡橋物語>, (有)昭和堂印刷, pp.118-129,1977.
- 12) 太田静六：眼鏡橋-日本と西洋の古橋, 理工図書, p.45, 1980.
- 13) 太田一也：眉山崩壊の研究-1 .崩壊機構について島原火山温泉研究所研究報告 5, pp.6-35,1969.
- 14) 佐賀県教育委員会：佐賀城石垣, 佐賀城公園整備工事報告書, 県史跡「佐賀城跡」本丸土塁石垣に関する調査・復元工事報告, 佐賀県文化財調査報告書第 161 集, 2005.3.
- 15) 佐賀県佐賀土木事務所：佐賀城公園整備委託報告書, 2001.10.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 土木学会 URL：デジタルアーカイブス, http://library.jsce.or.jp/Image_DB/shinsai/niiyata/kuranishi/photolist.html
- 20) 宮崎県：県庁舎建築修繕(五), 1932.
- 21) 福岡県教育委員会：一般国道208号線高田大和バイパス関係埋蔵文化財調査報告 第1集, 干拓遺跡(旧柳河藩領), pp.15-35,1994.3.
- 22) 国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所：パンフレット
- 23) 酒井吉永, 村越潤, 塩井幸武, 藤原稔, 深沢哲也, 吉田好孝：建設後 50 年以上を経た鋼ゲルバー桁橋梁(多摩川大橋)の載荷試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.23-24,2005.9.
- 24) 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 60 回年次学術講演会, pp.13-14,2005.9.
- 25) 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, pp.21-22,2005.9.
- 26) 建築資料研究会：最新建築設計叢書第一期(学士會館), 1928.
- 27) 学士会館事務局内部資料
- 28) 学士会：学士会百年史, 1991.

第3章 木杭基礎設計法の変遷

ここでは、明治時代の木杭基礎の設計法や、各分野における木杭基礎設計法の変遷を紹介する。

3.1 明治時代の木杭・木材の設計施工法の考え方

1955（昭和30年）ごろまで、土木構造物基礎、建築基礎や仮設工事などに木杭・木材が広く使われてきた。これらの設計施工における考え方の源流は、明治期に遡ると思われる。明治時代の建築土木技術を知ることができる文献として、1899年（明治32年）に刊行された瀧大吉著「建築学講義録」¹⁾がある。そのなかの木杭・木材の設計施工に関する考え方を以下に紹介する。

(1) 地質の分類

地質については次の6種類に分類している。岩石層（いわ）；砂利層（じゃり）；沙層（すな）；粘土層（ねばつち）；並土層（つち）；泥土層（どぶどろ）。岩石には“雨風に曝されてぐずぐずになる”ものがあり、粘土には固いもの非常に軟弱なものまで幅広く、泥土は“昔の海に泥が自然に埋りたる東京のごとき土地”に多く“一番に難儀なるもの”と記述している。

(2) 木杭

留杭あるいは基礎杭に関する次のような記述がある。

留杭・山留について

留杭については砂利・砂層に対するものとして、**図-3.1**に示すように角杭を並べたもの（第十三図）、丸杭両面を太鼓落としに削って杭同士の密着を高めたもの（第十四図）、丸杭を突き並べたもの（第十五図）の3種類が紹介されている。丸杭を突き並べたものは杭間に隙間が生じるため細かい砂層には適さないとしている。角杭を並べた留杭の効果は大きいと第十四図の場合と大差はない。長さが十尺を超えると杭間に隙間ができて効能を失うので、定規杭と板杭をボルト締めした工法を推奨している。

山留については、**図-3.2**に示すように地質のよしあしによって使分ける3種類の方法を紹介している。第二十図は“土の稍や堅きもの”に適用するもので、根切りして板を縦にあてて木材で突っ張る方法である。第二十一図は前述したよりは“余程締めりわるき土地”に適用するもので、立て板を敷き詰めて胴木を入れて木材で突っ張る方法である。第二十二図は“沙の如きグズグズくずれるところ”に用いるもので横矢板と胴木を入れて木材にて突っ張る方法である。

留杭として板杭を用いる場合は**図-3.3**（図第十七）に示すように片刃とすることで、“前に打ちたる杭の方にヒシト付きて”隙間を防ぐことができるとの記述がある。

圖三十第



圖四十第

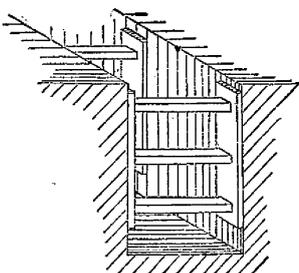


圖五十第

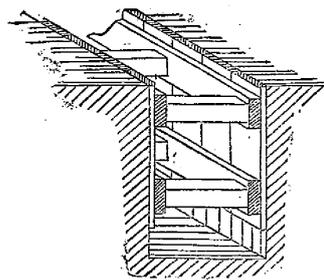


図-3.1 留杭の種類（地質の第二類）¹⁾

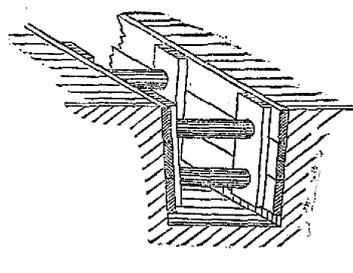
圖十二第



圖一廿第



圖二十二第



圖七十第

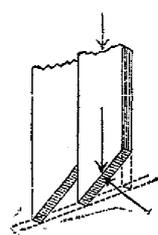


図-3.2 地質ごとに使い分ける留の種類

図-3.3 板杭の刃

基礎杭

地盤が固い場合には木杭先端を尖らし、鉄の打ち物の沓（鉄沓）をはかせる。鉄沓には、図-3.4 に示す一般的なもの（第十八図）とアメリカの方法（第十九図）がある。打設時の杭頭の鉄輪は反復使用できる。

基礎杭の施工について、軟弱層（泥土層）が浅い場合における記述がある。具体的には、図-3.5（第二十六図）に示すように、根切りをした後に木杭先端を堅い地層まで打込み、杭間の地盤については一尺五寸～三尺（約45cm～90cm）まで掘削してから砂利を入れて締固めれば、地盤の強度は増加し杭が動くこともない、と記述されている。その上には“十文字の木組”が多用されてきたが、杭頭の不揃いからくる“ヤリソコナイ”を避けるため、今後は「り」部分にコンクリートを打設することを推奨すると記している。

軟弱層（泥土層）が深い場合は図-3.6（第二十九図）のように、まず留杭を打って内部の地盤が逃げるのを止めてから中一面に杭を打込むと杭間は締固められて地盤は堅くなる。「い」の留杭は「ろ」の杭より3～6尺長くする。留杭で囲まれた一体的基礎（複合地盤）として機能させることを推奨している。“杭長は末口の24倍を超えざれば曲がることなし”としている。

“杭打地業の代わりに厚き筏を土中に組み立て”基礎となす筏基礎は“試したる話を聞かず”、“ベニスという市にて大きな建物の基礎に厚み四十尺の筏”を用いた例を紹介し、“随分に銭の入る法なり”と記している。

(3) 木材の特性について

木材の腐朽については、『絶へず湿り居る故腐ることなし』との記述があり、土中や水中に用いる木は桧木でも木杭でも絶えず濡れていれば腐ることはないとしている。現在では、木材は水中に存置して空気に触れない状態にすれば経年に対しても十分な耐久性を有していることが周知のことであるが、明治時代にも経験的にこのことが知られていた。

また、木材の乾き方に関しては、木材の生木の重みに対して2割軽いものは『生乾き』といい大工工事に用いること、3割以上軽いものは『本乾き』といい差物仕事に用いること、という記述がみられる。

第十八図

第十九図

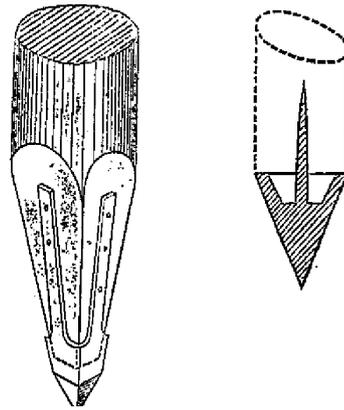


図-3.4 基礎杭の鉄沓の種類¹⁾

第二十六図

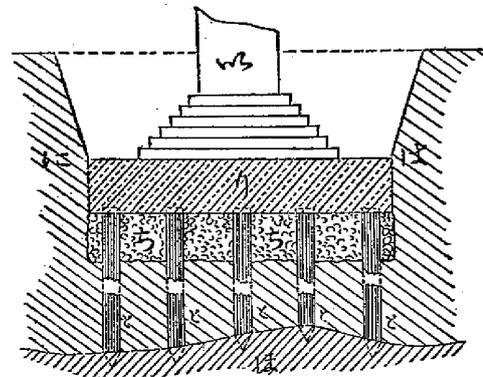


図-3.5 軟弱層（泥土層）が浅い場合における基礎杭の施工¹⁾

第二十九図

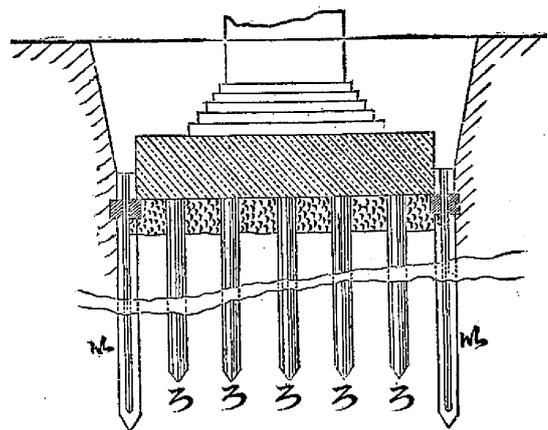


図-3.6 軟弱層（泥土層）が深い場合における基礎杭の施工¹⁾

3.2 道路橋

(1) 「道路橋示方書」の変遷

表-3.1 に、道路橋示方書の変遷を示す。

表-3.1 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

(2) 「道路橋示方書」における木ぐい基礎の記述の変遷

1964年版（昭和39年版）²⁾

これまで道路橋の下部構造を設計するのに拠り所となる指針がなく、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、これに応じ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（現在一般的に「木杭」と書くが、当時の表記倣いここでは主に「木ぐい」と記す。）、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。

木ぐいについては、「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、杭の分類で表-3.2 以下のような記述がある。

表-3.2

種 類		製 法 お よ び 工 法		摘 要
木 ぐ い		生松丸太を使用する		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。
			遠心力利用による成形方法	
	場 所 打 ち ぐ い	P C ぐ い	プレテンション方式	ほとんど中空断面である。
			ポストテンション方式	
		鋼管を打込んで孔をつくり、その後にくいを築造する方式	鋼管は施工後抜き去る。	
		掘さく孔にくいを築造する方式	各種の大口径掘さく機が利用される。	
鋼 ぐ い		H形鋼ぐい 鋼管ぐい		溶接製品、圧延製品の両方がある。

「5.ぐい本体の設計 5.1 完成後の荷重に対する設計」では、表-3.3 のようにヤング係数が示されている。

表-3.3

ぐ 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、鉄筋コンクリートぐ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。

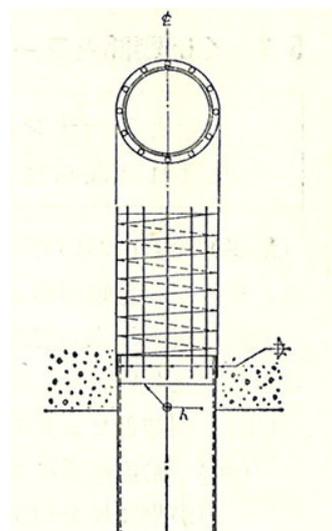


図-3.7

- (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-3.7)。くい上端に働ら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-3.7)。

- (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が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わる。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、多少曲がっているのはやむを得な

い。しかし、その程度がは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全体に曲げモーメントを生じ、極端な場合には破壊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外れないものがよい。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。

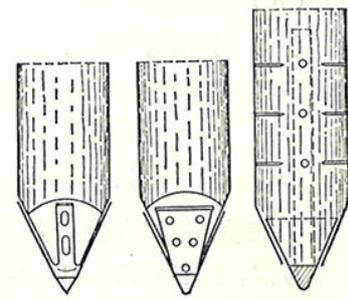


図-3.8 木ぐい頭部補強例
(先端部と考えられる)

- (3) 一般に木材は菌類と海虫によって腐食する。海水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。

- (4) くい先端は通常三角形または四角形に切り、打込みの抵抗を少なくする。この切り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、打込み個所が多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。

1966年版(昭和41年版)³⁾

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う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しにぶしを標準とする。
- (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と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ヶ所以上ないもの。
- (c)長径5cmの節（たゞし1cm未満を除く）でも1断面に3ヶ所以上ないもの。

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-5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-3.5

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 6,000 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 $6 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ kg/cm²、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。

1968年版（昭和43年版）⁴⁾

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变化することは、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いない場合が多いが、打ち込み中のくいの破損を防ぐため、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、断面が円形に仕上げ、鉄輪または鉄帽を用いる。

くい先端は截頭角錐形に正しく削り、打ち込みに際して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にしなければならない。

1976年版（昭和51年版）⁵⁾

まえがきに以下のように記述されており、これ以降本指針で木ぐい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。・・・」

1980年版（昭和55年版）⁶⁾

木ぐいの記述はない。

まとめ

以上の道路橋示方書における木ぐい基礎に関する記述の変遷をまとめて、表-3.6に示す。1955年に「木材資源利用合理化方策」が閣議決定されて以来、記載事項が減少し、1976年以降設計書から木ぐいの項目が消えていったことがわかる。

表-3.6 道路橋示方書における木ぐい基礎の記述の変遷

道路橋示方書	
1955年	木材資源利用合理化方策閣議決定
1960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
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
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
1974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
1988年	
2001年	

3.3 鉄道

1955年（昭和30年）1月21日に閣議決定された「木材資源利用合理化方策」以降、鉄道基礎構造物に関する主な技術基準における木杭に関する記述は次のような変遷を辿る。

(1) 1961年（昭和36年）制定資料

基礎構造物の設計に関する規準ではなく、若手技術者の急速な養成と全般的な能率向上を目的として作成された工事設計資料集である。木杭に関しては以下のような記述がある。

「在来は杭打基礎といえ、ほとんどすべてが木杭打ち基礎であった。しかし現在では、既成コンクリート杭が目ざましく進出している。・・・木杭の特質としては次のような点がある。a. 資材の入手運搬が容易なこと b. 打ち込みが比較的容易なこと c. 常水面以下では相当の耐久力をもつこと・・・」

以下、文献の抜粋を示す。

(i) 木杭

在来は杭打基礎といえ、ほとんどすべてが木杭打ち基礎であった。

しかし現在では、既成コンクリート杭が目ざましく進出している。

この傾向はコンクリート杭の製法、工法などが進歩発達し、以前より容易に入手、施工できるようになって、おのおのの杭がそれぞれの特徴によって適したところに用いられるようになったためである。

木杭の特質としては次のような点がある。

- a. 資材の入手運搬が容易なこと
- b. 打ち込みが比較的容易なこと
- c. 常水面以下では相当の耐久力をもつこと

その他小規模な杭打ち工事、長い杭長を要しない摩擦杭などの工事、へんぴな土地における杭打工事などには有利である。しかし常水面以下であっても恒久的な高層建築の基礎に木杭を用いるのは、アンバランスであり、適当とはいえない。

木杭の材種としては、松、米松がもっとも多く普通枝をとり去った生材が用いられる。

(2) 1967年（昭和42年）制定資料

日本国有鉄道における基礎構造物の設計に関する規準として最初にまとめられたものである。杭基礎設計の章の冒頭で以下のような記述があり、木杭が使用されていた様子が伺われる。

「・・・打込みグイは木グイ、プレキャストコンクリートグイ、または鋼グイを打込んで施工するもので・・・」

「第27条 木グイ」と「第64条 木グイの施工」の項目があり、「木グイは全長が常に地下水面下にある場合をのぞいて、原則としてこれを用いてはならない。」「木グイは割れなどの欠陥のない生松丸太の樹皮を除いたもので元口から末口まで一様に径が変化し、樹皮を除いた末口は12cm以上とする。」「木グイ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施さなければならない。」「クイ先端には適切なる角度をつけ、また必要により沓にて防護すること。またクイ頭部には損傷を防ぐためのキャップなどを用いて防護すること。」「継グイを用いる場合は、必要な強度を得られる設計とし、一群のクイは同一断面で継がないこと。」などの記述がある。

以下、文献の抜粋を示す。

(木グイ)

第 27 条 木グイは全長が常に地下水面下にある場合をのぞいて、原則としてこれを用いてはならない。

(解説) 土木構造物は一般に耐久性が必要であるので、木グイの腐食に対して安全度が期待できる場合にのみ用いられる。その全長が水中にあれば腐食に対して安全であるので、木グイが用いられるのは、その全長が完全に地下水位以下にある場合である。この地下水位は上下に変動し、また都会地では年々低下する傾向があるので注意する必要がある。木グイの使用にあたっては次の事項に注意する必要がある。

- (1) 木グイは割れなどの欠陥のない生松丸太の樹皮を除いたもので元口から末口まで一様に径が変化し、樹皮を除いた末口は 12cm 以上とする。
- (2) 木グイの両端中心点を結ぶ直線はクイ外に出てはならない。
- (3) 木グイ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施さなければならない。

(木グイの施工)

第 64 条 木グイの施工にあたり下記の事項を考慮しなければならない。

- (1) 第 27 条を参照し、木グイの性質を理解し使用しなければならない。
- (2) クイ先端には適切なる角度をつけ、また必要により沓にて防護すること。またクイ頭部には損傷を防ぐためのキャップなどを用いて防護すること。
- (3) 継グイを用いる場合は、必要な強度が得られる設計とし、一群のクイは同一断面で継がないこと。

(解説)

- (2) クイの先端は、打込みやすくするために円錐形、多角錐形などにけずるのが普通であるが、砂、砂利などの場合には、三角錐とする方が打込みやすい。また必要により鉄沓などで防護することもある。普通、錐形の高さは直径の 1~2 倍となるが地盤が硬くなる程先端は鈍にする。

また、打込み中クイ頭の損傷を防ぐため鉄製のキャップなどで防護すること。

- (3) 継手は弱点となるのでなるべく継手のないように設計すべきであるが、さけ得ない時は所定の強さが得られる構造にしなければならない。

図-3.9 はその一例である。

一群のクイ継手を同

じ高さに作ると弱点が集中することとなり、構造上望ましくないのでさけなければならない。

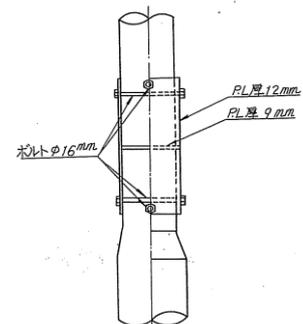


図-3.9 木グイ継手例

(3) 1974 年 (昭和 49 年) 制定資料

土木構造物の設計に関する規準類の体系的な整備が進められ、その一部を構成するものとして制定されたものである。上述した技術基準の中で、木杭に関する記述が最も充実している。

基礎形式選定表に木ぐいが記載されており、木杭が使用されていた様子が伺われる (表-3.7)。また、「第 29 条 基準の許容応力度 (表-3.8)」「第 61 条 くいの設計断面」「第 88 条 木ぐい」

の項目があり、「木ぐいは、全長が常に地下水面以下にあるように設計しなければならない。」「木ぐいは、末口 12cm 以上としなければならない。」「くいの先端角度は、45° ～60° とし、砂レキ質の地盤に用いる場合には、保護金具をつけるものとする。」「木ぐいには、原則として、継手を用いてはならない。」「木ぐいが菌又は虫により被害をうけるおそれがある場合には、その対策を講じなければならない。」などの記述がある。

以下、文献の抜粋を示す。

表-3.7 基礎形式選定表

基礎形式		設計条件	打込みくい					場所打ちコンクリートくい			ケーソン		
			直接基礎	木ぐい	RCぐい	PCぐい	鋼ぐい	RC Dぐい	ベントぐい	アースドリルぐい	深礎	オーブンケーソン	ニューマチックケーソン
荷重規模	橋台橋脚	200t以下	○	○	○	○	○	△	△	△	△	×	×
	1基当り	200～500	○	△	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	常時+	500～1500	○	×	△	△	△	△	○	○	○	△	△
	一時荷重	1500以上	○	×	×	×	△	△	△	△	△	○	○
支持方式	完全支持	Df 0～5m	○	○	△	△	△	×	×	×	△	△	△
		5～10	△	○	○	○	△	△	△	△	○	△	△
	Df: 支持層の深さ	10～20	×	×	×	×	○	△	○	○	○	○	○
		20～30	×	×	△	△	○	○	○	○	△	△	△
		30～60	×	×	×	×	○	○	△	△	×	△	△
	不完全支持		△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	
	摩擦支持		×	○	○	○	△	×	×	×	×	×	
支持層面の状態	平たん(30°程度以下)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	傾斜(30°程度以上)		△	×	△	△	△	○	△	△	○	△	△
中間層の状態	粘性土 N値	4以下		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		4～10		×	△	○	○	○	○	○	○	○	○
		10～20		×	×	△	○	○	○	○	○	○	○
	砂層 N値	15以下		△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		15～30		×	△	○	○	○	○	○	○	○	○
		30以上		×	×	×	△	○	△	△	△	△	△
		粘着性のないゆるい砂(N値10以下の層が5m程度以上ある場合)		○	○	○	○	△	△	△	△	△	△
中間層と支持層の状態	れき・玉石・転石 無		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		10cm以下	×	△	△	△	○	○	△	△	○	○	○
		10～30cm	×	×	×	△	×	△	×	○	○	○	○
		30cm以上	×	×	×	×	×	△	×	△	△	○	○
表面強度	普通の場合		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	軟弱な粘性土N値2以下		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	ゆるい飽和した砂質土(N値10以下)		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
			△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
表層の地形	平たん(10°以下)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	傾斜(10°以上)		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
環境	水上施工		△	○	○	○	○	○	×	△	×	△	△
	騒音振動対策		○	△	×	×	×	△	△	△	△	△	△
	隣接構造物に対する影響防止		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	作業空間の狭い場合		○	△	×	×	△	△	×	×	○	△	△
工期	1基礎あたりの工期		○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△
	同時施工性		○	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○

○印は、原則として条件に適合する場合
 ×印は、原則として条件に不適合な場合
 △印は、条件に不適合とはいえないが、
 なお検討を要するもの

表-3.8 木ぐいの基準の許容応力度（松） （単位 kg/cm²）

	繊維方向	繊維直角方向
許容引張応力度	50	—
許容圧縮応力度	40	—
許容曲げ応力度	55	—
許容せん断応力度	4	6
許容支圧応力度	45	6

88 木ぐい

- (1) 木ぐいは、全長が常に地下水面下にあるように設計しなければならない。
- (2) 木ぐいは、末口 12cm 以上としなければならない。
- (3) くいの先端角度は、45° ~60° とし、砂レキ質の地盤に用いる場合には、保護金具をつけるものとする。
- (4) 木ぐいには、原則として、継手を用いてはならない。
- (5) 木ぐいが菌又は虫により被害をうけるおそれがある場合には、その対策を講じなければならない。

(4) 1986 年（昭和 61 年）制定資料

日本国有鉄道の委託を受け、土木学会がとりまとめたものである。木杭についての記述は完全に姿を消す。

(5) まとめ

現在に至るまでの鉄道基礎構造物に関する主な技術基準⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾の変遷と木杭に関する記載の一覧をまとめて、表-3.9 に示す。1986 年に木杭に関する記述は姿を消した。この理由は今後調査すべき事項である。

表-3.9 現在に至るまでの鉄道基礎構造物に関する主な技術基準⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾の変遷と木杭に関する記載の一覧

制定年	基準の名称	木杭設計に関する記載
1961年	工事設計資料便覧	・杭打基礎のほとんどすべてが木杭打ち基礎との記載あり
1967年	土構造物の設計施工指針(案)	・「クイ基礎の設計」の章に「木グイ」の項あり ・「クイ基礎の施工」の章に「木グイ」の節あり
1974年	建造物設計標準解説 基礎構造物及び抗土圧構造物	・「設計計画の基本方針」の項で記述 ・「基準の許容応力度」の項で記述 ・「くいの設計断面」の項で記述 ・「くいく体の設計」の章に「木ぐい」の項あり
1986年	国鉄建造物設計標準解説 —基礎構造物 抗土圧構造物—	・指針から木ぐいが除外

3.4 港湾

(1) 1860～1910 年頃（明治期）

明治期には海外の港湾技術が導入され、小樽、横浜、神戸などに大規模な港湾が築造された。当時の港湾築造技術の集大成である「築港」（廣井勇著）¹¹⁾から、木材および木材基礎についての記述を以下に抜粋した。（なお、原文の旧仮名づかいを一部現代仮名づかいに改めた。）

前篇 第四章 工事用材

木材は淡水中に在りては永遠に保存するものなりといえども海水にありては海虫のため侵食せられその甚だしきものに至りてはわずかに1ヶ年を出でずして巨材の半ばその形を失うことあり

普通海虫に二種あり 一つは船虫（*Teredo*）と称しその体ほとんど透明にして頭部には白き薄甲を冠き尾は褐色の二股を有せり その始めて木材に蝕入するやその体極めて小なるにより外面より見るときは僅々針眼大の痕跡を印するに過ぎざるもその内部に入るに及んでは漸次成長しその大なるものに至りては径6分（≒18mm）長1尺5寸（≒45cm）のものあり しかれども北地にありては通常径3分（≒9mm）長1尺（≒30cm）に過ぎず船虫の木材を襲撃するや多くは海面に近き部分に在り 而してその猛烈なる場合に至りては木材は外觀においてほとんど異状なきも内部は全く蜂の巣の如きものあり

他の一種は俗に海虱（*Limnoria*）と称し身長1分（≒3mm）余に過ぎず その状あたかもえびの如くまた虱の如きものにして船虫の如く直に内部に侵入することなく外部より漸次これを蚕食し船虫と相待ちて共に木材を襲撃するものなり

海虫侵食の度は木材によりこれを異にす すなわち松類を皮付のまま使用するときはその皮の存在する間はこれを嫌うの傾向あり 樺、楠、檜等に至りては他材に比しその侵食やや遅緩なり 南米及び西印度等の地方に産するグリーンハート（*Nectandra Rodiaei*）は虫害を被ること極めて少なきにより閘門その他の工事に使用すること少なからず

海虫予防の方法は普通木材に烟脂（*Creosote*）を含ましむるを以て最良とす また銅もしくは鉄板を以てこれを覆うにあり しかれどもこれいづれも永久に有効なるべきものにあらざれば木材を海中に使用するときには土中に埋設するにあらざるよりは早晚侵食を免れざるを以て仮設工事を除くの外にはこれを使用すること稀なり

（引用者註：「船虫」と「海虱」の現在の標準和名はそれぞれフナクイムシ、キクイムシである。）

後編 第二章 繫船岸

海底の地質軟弱の度を加えるときは前記の方法によれば捨石基礎の面積をして広かつ大ならしむるを要するを以て杭打に依り基礎を造るを優れりとす 杭は通常径30cm内外のものを使用しその載荷力は軟柔なる地層にありては略々左式に依りこれを知ることを得べし

$$L = Wh / 6s$$

L は安全なる最大荷重

W は鉄槌の重量

h は鉄槌墜落の高さ

s は鉄槌最終の墜落に依り生ずる杭透入の度

但し最終墜落の際杭頭の潰拉せざるに注意すべし

杭はその頭を切り揃え枕梁を架し床を張り又は直接にコンクリートを杭頭に布設してそ

圖 六 十 二 第

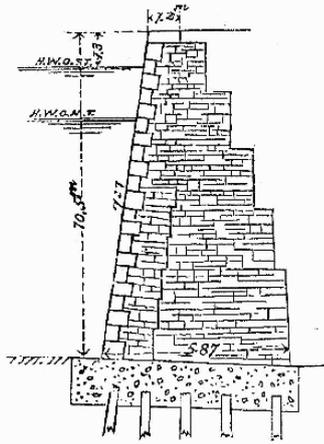


図-3.10 ル・ハーブル
港岸壁断面¹¹⁾

圖 七 十 二 第

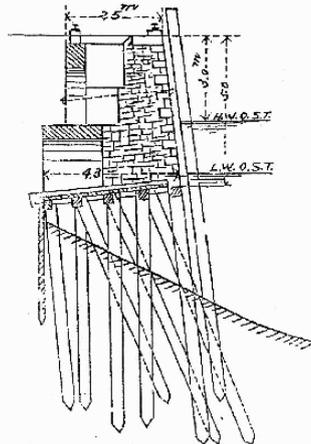


図-3.11 ハンブルク港
岸壁断面¹¹⁾

圖 八 十 二 第

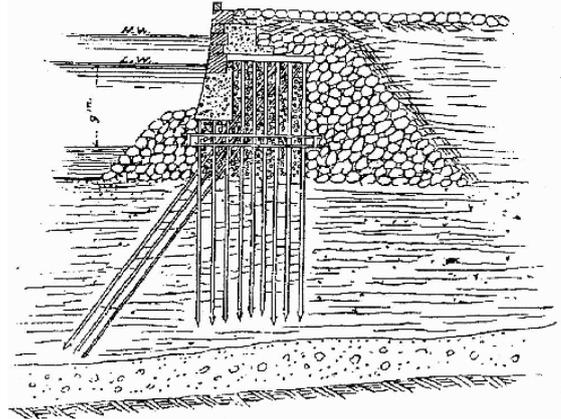


図-3.12 ニューヨーク港護岸断面¹¹⁾

の礎と為し上部の構造に着手すること前記の数例につき記述せし所の如し

第二十六図 (図-3.10) はル・ハーブル港に於ける岸壁一部の断面にしてその海底は砂に泥を交え充分堅固ならざるが故に杭を以て基礎を造れり すなわち杭を1mないし1.2mの離間に打ちその前列に当たるものはこれを傾斜せしめ以て背部の地圧に対抗せしむるものと為せり 杭頭は略々これを打ち揃えて上に厚さ1.5m幅7.25mの場所詰コンクリートを施し以て壁の基礎と為せり 壁は上幅2m下幅5.9mにして表面は切石積とし内部は粗石積と為せり

前記の場合に在りて地質のなお甚だしく軟弱なるときは杭の全部を傾斜せしめ以て壁の前方に傾倒するを予防することを得べし

第二十七図 (図-3.11) に示すものはハンブルク港に於ける岸壁の一部にして長さ10m内外の杭を傾斜して打込み枕梁を架設しまた矢板を以て土留と為し基礎を造れり 壁はその上幅2.5mの多きを有すといえどもその半は径間6mのきょう (引用者註:「きょう」の字は木偏に共) より成るを以て重量を減ずること多く壁の前面に立てたる杭は船摩りの目的に外ならず この如き構造は海虫の害なき個所に限り施設することを得るものとす

杭打の法に至りてはその周囲の摩擦力の多きを得る場合には壁の重量を支うることを得べしといえども横圧に対しては別に適當の設備を施さざるべからず すなわち前記アムステルダム及びルーアン港の岸壁に於ける如く鉄桿を以て控えを取るかもしくは捨石を以てその周囲を固むるにあり その実例に至りてはニューヨーク港の護岸に於いて見る所なり 該港沿岸の海底は概ね適當の深さに於いて硬層の存するありて杭のこれに達するときは至大の載荷に耐ゆるものなりといえどもその一部分に於いては泥の深さ60mに達するありて試に長さ30mの杭を打込むときは些少の抵抗を呈するに過ぎずといえども打込後数日を経過するときは能く20余tの載荷に耐ゆるに依り左の方法を以て第二十八図

(図-3.12) に示す如き断面を築造せり すなわち築壁の第一着には浚渫機を以て該個所の柔泥を干潮面以下9mまでに掘り下げやや粘質の泥砂に達しこれに径15cm内外の粗石を投入しその左右にはやや大形のものを投ぜり ここに於いて図中示す如く杭を打ち横を以て繋ぎ枕梁を架設し張板を為し浮起重機を以てその上に70tのコンクリート塊を布置し上部には普通の構造を施せり

以上のように、「工事用材」の章では、木材を海水中で使用する場合には海虫害が問題となる

こと、樹種による天然耐久性やクレオソートや銅板被覆などによる海虫害防除は完全ではないこと、土中に埋設される場合以外は海虫害が甚だしいことから仮設工事以外の利用がまれであることなどが記述されている。「繫船岸」の章で紹介されている欧米の岸壁や護岸の基礎杭としての木杭の使用例においても、基本的に土中に埋設して使用されており、海水と接する木杭は海虫害の無い個所に限り使用できるとしている。

(2) 1910～1945 年頃（大正～昭和初期）

次に、大正から昭和初期の港湾技術者に広く用いられた教科書である「港工学」（鈴木雅次著）¹²⁾から、木材に関する記述を抜粋する。

第五章 築港用材 第一節 木材

築港用材料の種類は頗る多数であるが、その中で築港工事に於いて、特別の関係をもつもののみを摘出して論ずる。

木材の長短と用途 木材は海水中にて海虫のため、著しく蚕食せらるるの欠点を持つため、永久的の用材と言うことが出来ない。

しかし価格が安く、取扱が便であるため、棧橋その他に於いて相当広く用いらる。なおまた多少の屈撓性を有するため、防舷材（フェンダー）、繫船杭（ドルフィン）などには他に代え難い必要材である。

また地中に没するものは海虫の害少なき為、基礎杭として最も多く利用せらるる。

[註] 我国に於ける木材の単位は、石であって、また時に、尺^メをも用いる。

$$1 \text{ 石} = 10 \text{ 立方尺} = 0.28 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ 尺}^{\text{メ}} = 12 \text{ 立方尺} = 0.33 \text{ m}^3$$

また荷役などに於いて木材の石を噸数に換算するには、次の率による。

$$4 \text{ 石} = 1 \text{ 噸}$$

木材の虫害 木材を侵す海虫の主なるものは、船虫（Teredo）と海虱（Limnoria）である。

虫害の著しき部分は、潮汐干満の差の部分であって、水中深く日光の透さざる所に至れば、この虫害は著しく減少する。また地中に没する部分には虫害も腐食もない。

なお淡水の流れ込む港に於いて、この虫害は比較的少ない。また著しき汚水の中には海虫が少ない。

米国の港の棧橋は、多く木杭を以て造られよく十数年を保つが、本邦の沿岸には、木材の虫害甚だ多く、わずか数年にしてその用をなさざるものが多い。

虫害防止 の方法として木材にクレオソート等の薬品を、多量に注入したものは成績が好い。

また木材の表面一杯に小釘を沢山に打って、これを防止することもある、あるいは銅板、鉄板を張る方法もある、またコンクリートにて覆う場合もある。

次にターペンタイン等の南洋材には、海虫が付き難い。

[註] 一般に木材を侵す海虫を大別すれば、軟体類と甲殻類となる、而して船虫は前者、海虱は後者を代表する。

船虫（Teredo）は細長き軟体の頭部に小さい甲を有しその中に口がある、また尾は二つに分かれておる、この虫は木の内部に食い込んで成長する。

その大きさは、不同であって鉛筆大から長さ 45cm に及ぶものがある、この船虫と同種のものに Bankia、Martesia などある。



船虫
図-3.13^{3.12)}



海虱
図-3.14^{3.12)}

海虱 (Limnoria) は全身があたかも蝦の如く甲殻を以て被われ、また多数の逞しき足と鋏とを持つ小虫である、この虫は木材の外皮より次第に内部へ蚕食する。

この虫の大きさはあたかも米粒の如く、長さ 0.3~0.6cm、またその幅は長さの約三分の一位である。

この海虱と同種のものに Chelura、Sphaeroma 等がある。

[註] 虫害調査には既設の木構造に於ける、蚕食状況を実際に調べ、あるいは試験用の木材を永く海中に浸してこれを検することもある (Dock & Harbour authority 1929. 9月号参照)。

[註] 本邦の港湾に於いて普通の木材は二、三年にして駄目になるが、クレオソート注入材では約 10 年はずつであろう、ただし米国に於いてクレオソートの注入量は 14~20 ポンド/立方尺 (≒228~326kg/m³) であつて、なるべくターアシッドの含有量の多いクレオソートがよい。

[註] 虫害の少ない南洋材には、既述のターペンタインの外に、グリーンハート、ブラウグミ、ジェラ、鉄木等がある。

日本材にして比較的侵されないものを列記すれば、檜、楠、榿、檜等である。

また松材も生皮を被れる間だけは、侵されることがやや少ない。

[註] 海虫の少ない水は既に記した如く、淡水と汚水とであるが、その外、貯木場の溜水にして、もし木渋を多量に含む所には海虫は住まない。

第十八章 岸壁構造一般 第二節 岸壁の種類

杭打擁壁式 の岸壁の工費は、重量擁壁式より一般に安く、矢板式より高い。また施工設備、工事期間などについても、略々両者の中間に位する。

なおその耐久性に於いては、もしその設計に留意するならば、矢板式に勝ることが出来る、しかし下部の杭が木材であるならば、多少は虫害その他の腐蝕を受けるが為め、重量擁壁式の如き永久性を持たない。ただし名古屋の岸壁の如く、木杭を総て土中に没したものは、容易に腐蝕しない。なおこの様式は、耐震的の設計をなすに便利なこともある。

三様式の適否 前述の長短によって知らるるが如く、一般に重量擁壁式は、重要な永久的の岸壁を造る場合に適し、矢板式は工費に比して、能率ある岸壁を欲する場合、例えば民間経営の埠頭などには、最も好適である。而して杭打擁壁式は、その中庸を望む場合に採用せられる、ただしこの杭打擁壁式は既述の如く、耐震的に設計し得るがため、本邦に於いては、将来相当に望ある様式というべきである。

杭打擁壁式の岸壁形状

上部 の形状は重量擁壁式のものと同様である、ただこの場合には、下の杭打部に乗る場所を広くするために、壁体の横断面は L 形をなすものが多い。ただしドイツにおいて以前から行われたものは、-3.15 に示すが如く、杭の頭に木板の棚を広く張って、埋立の土砂を支え、またその前部に壁体を載せておいた、しかし今日の実例は、主として鉄筋コンクリートの L 形壁を用うようになった (名古屋岸壁図 (-3.16) 参照)。

次に下部の形状は、大略次の二種に分かつことが出来る。

- (1) 杭打部の前方に矢板を有するもの (名古屋岸壁)
- (2) 杭打部の後方に矢板を有するもの (ケーニヒベルグ岸壁)

前方に矢板を持つものは、その矢板が相当に長くなるが、しかしこの岸壁は後者に比して、船の衝撃に強く、また木杭の腐蝕も少ない。

なお杭打の形状においても大略次の二つに分ち得る。

- (1) 総ての杭を垂直に打つもの
- (2) 抗張杭と抗压杭とを用いたもの

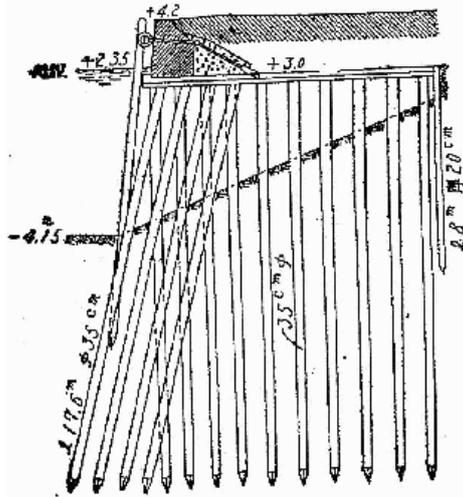


図-3.15 ケーニヒベルグの杭打擁壁式岸壁¹²⁾

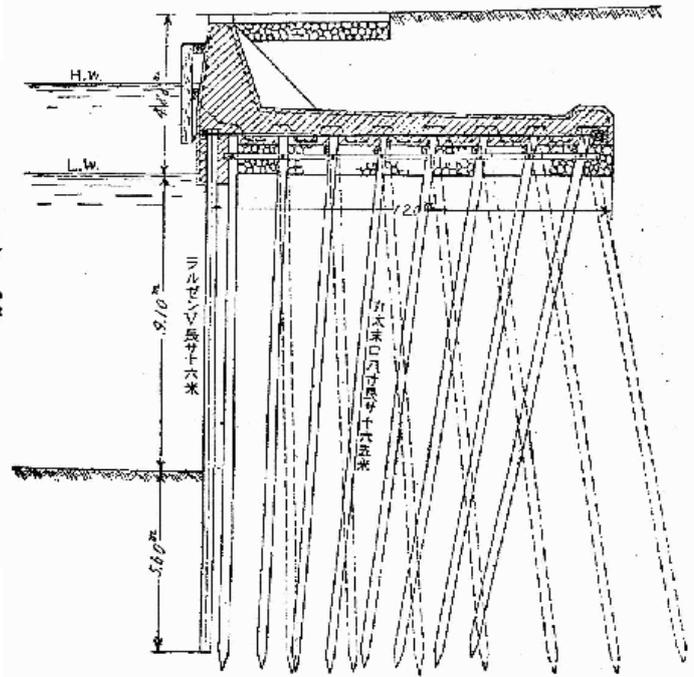


図-3.16 杭打擁壁式の岸壁 (名古屋港)¹²⁾

前者の垂直杭のみのものは、施工が容易であるが、土圧と船の衝撃とに対しては、後者に劣るものがある。

(3) 1945 年頃 (昭和 20 年代)

1950 年 (昭和 25 年) 5 月、わが国初の港湾技術基準である「港湾工事設計示方要覧」¹³⁾が、港湾協会から発行された。この要覧の「繫船岸設計示方書」には、木材および木材基礎について以下の記述が見られる。

第 3 章 材料及許容応力

3.1 木材

木材は海中における主要部材には用いてはならない。ただし防舷材はこの限りでない。

※木材は薬品の注入等に依って海蟲に対する抵抗力を相当増加することができるが、本邦においては木材の虫害甚だ多く、永久的の用材としては使うことは出来ない。

3.7 基礎杭の支持力

基礎杭の許容応力度は載荷試験から得た限界支持力の 1/2 以下にとる。載荷試験はなるべく三本以上の杭を一組として行うものとする。

※杭の許容支持力の算定には種々の公式があり、軽易な構造物の基礎杭にはこれらを用いてよいが (この場合安全率は 4 程度をとる) 重要な構造物の基礎杭に対しては載荷試験を行うことが望ましい。

第 8 章 栈橋

8.1 分類

栈橋を主として支柱によって次の如く分類する。鉄栈橋、鉄筋コンクリート杭栈橋、鉄筋コンクリート管はめ込み木杭栈橋、鉄筋コンクリート円筒および円筒構栈橋、橋脚式栈橋。

8.4.1 鉄筋コンクリート杭

※(中略)鉄筋コンクリート杭には基礎地盤中に打込まれる部分を木杭として継足したのものもある。

木杭に鉄筋コンクリート管をはめ込みそのすき間にコンクリートを流し込み、鉄筋コンクリート杭の代用をすれば耐力は劣るが工費が安く工期も早い。

また、この要覧の「防波堤設計施工標準」には、以下の記述がある。

1.8 石枠堤

石枠堤とは木造の枠を据え、中に粗石を詰めて直立部としたものを言う。この型式は波高大ならざる所、腐蝕を受けざる所、木材の豊富な場合にのみ使用される。

なお基礎の固い場合には枠を積重ねたものを用い、基礎が土砂の場合には杭を並べたものを使用する。

1.8.1 石枠堤の法 枠の外側の杭は垂直が多いが傾斜をつける場合には0.2割程度とする。

1.8.2 詰石の大きさ 詰石の大きさは枠組を通らぬ程度の大きさのものを外側に用いればよい。

さて、この当時設計・施工された栈橋の例として、1954年(昭和29年)完成の横浜港高島三号栈橋(図-3.17)がある。この栈橋は厚さ30mの軟弱な粘土層の上に築造された長さ200m、幅70m、水深10m、上載荷重 $3t/m^2$ の耐震的な栈橋である。当時運輸省京浜港工事事務所長であった比田正氏により設計の詳細が報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。以下に木杭基礎に関する設計上の要点を列挙した。

- ・基礎構造は、鉄筋コンクリート製のケーソンを木杭(摩擦杭)で支持する構造である。
- ・設計は、木杭の現地載荷試験結果、木杭を用いて昭和4年に竣工後25年間健全な高島一号栈橋の解析結果、Terzaghi & Peck (1948)やTschebotarioff (1952)など海外の土質力学の文献等に基づいて行われている。
- ・杭の中心間隔は、Terzaghi & Peckの提唱に従い最大杭径の3倍以上とし、元口40cmに対し1.5mとしている。

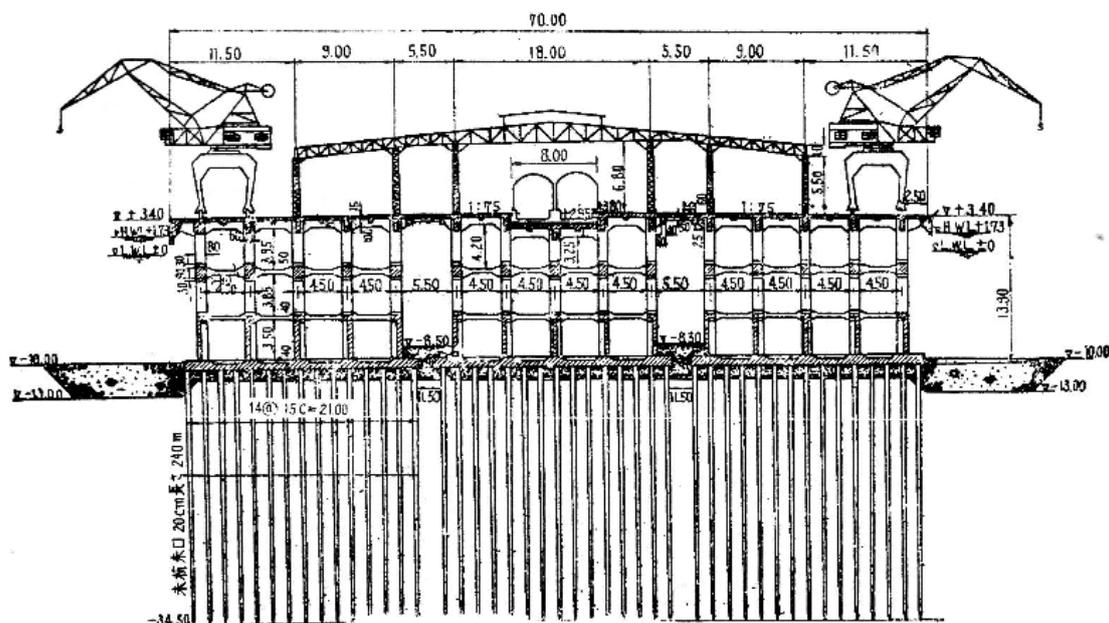


図-3.17 高島三号栈橋横断面¹⁴⁾

- ・杭周粘土の平均粘着力（せん断強度）は、 0.3kg/cm^2 （ $=3\text{t/m}^2$ ）として設計している。
- ・木杭の樹種は、ベイマツを使用している。
- ・木杭の強度や必要な寸法は、以下のように設定している。「松の軸方向の圧縮強度は平均 500kg/cm^2 で最小 280kg/cm^2 とされている。仮に末口 23cm とすればその断面積は 415cm^2 であるが、 $415 \times 500 = 207,500\text{kg}$ 208t の圧縮強度である。安全率は木材の場合は一般に高くとるが、之は極力下げて4にとっても設計荷重は $208/4 = 52\text{t}$ が最大の処である。基礎地盤が極めて強度が大であっても、支持杭の先端が材質の強度から考えて 50t 以上の荷重を受けることは相当な危険を予想される。摩擦杭として考える場合は粘土の粘着力 $C = 0.25\text{kg/cm}^2 = 2.5\text{t/m}^2$ とすれば、末口 20cm 長 25m の杭の表面積は 21m^2 であるから、摩擦としての支持力は $2.5 \times 21 = 52.5\text{t}$ となる。高島栈橋の場合は支持杭としての基礎の長さは $30 \sim 35\text{m}$ を必要とするに比して、摩擦杭の場合は上記の計算で $C = 0.25\text{kg/cm}^2$ として計算しても根入長は 25m で済み、然も略々同等の支持力を得られる。」
- ・鋼管杭による支持杭と、木杭による摩擦杭の経済性を比較し、木杭による摩擦杭が1億円安価（総工費は8.5億円）であるとして採用している。
- ・取付部栈橋と呼ばれる部分では、杭が海水と接する部分にはコンクリート杭を使用し、土中に埋まる部分には木杭を使用している。長さ 15m 、断面 55cm ないし 60cm 角のコンクリート杭の下に、長さ 15m 、末口 23cm と長さ 18m 、末口 20cm の木杭の継杭を使用している。
- ・木杭の継手には、鋼管（厚さ 9mm 、長さ 1.2m 、内径 $30 \sim 38\text{cm}$ ）を使用している。

(4) 1955～1965年頃（昭和30年代）

「港湾工事設計示方要覧」の発刊から9年後の昭和34年（1959年）、第1回の改訂版が「港湾工事設計要覧」¹⁶⁾として刊行された。この要覧には、木材および木材基礎に関して以下のような記述がある。

第1編 防波堤および海岸保全施設 第4章 高潮対策施設 4.3 護岸 4.3.4 護岸の構造 (2) 傾斜護岸 (b) 堤体

堤体は不等沈下を考慮して基礎ぐいを施工し、その接合部は固結する。基礎ぐいは原則としてコンクリートぐいまたはコンクリート矢板とし、木ぐいの場合は地下水位より上に出るものは、クレオソート注入材を使用する。

第2編 けい船岸 第6章 材料および許容応力度 6.1 木材

木材は主として仮設材として用いられ、防玄材および地下水面以下に打込まれた基礎ぐいを除いては、重要な港湾構造物の主要部材として用いることは、耐久性より考慮して望ましくない。

注1) 港湾工事に使用される木材のおもなものは、表-3.10の通りである。

表-3.10 港湾工事に使用されるおもな木材¹⁶⁾

材名	おもな用途
アカマツ	基礎ぐい、さん橋ぐいおよびけた、防玄材、ドルフィン、船架
クロマツ	基礎ぐい、さん橋ぐいおよびけた、防玄材、ドルフィン、船架
スギ	さん橋げたおよび版、足場材、型わく
カラマツ	基礎ぐい、さん橋ぐい、けたおよび版
ベイマツ	基礎ぐい、さん橋ぐいおよびけた、防玄材、ドルフィン、船架
カシ	くい打ち用のクッション
ナラ	防玄材、船架

熱帯材は高価ではあるが、腐食、海虫に強く強度も大きい。使用されるものには、ターペンタイン、カポール、チーク、ユーカリプタス、グリーンハートなどがある。

注 2) 木材の防腐処理に関しては、木材防腐特別措置法（昭和 28 年 8 月 1 日 法律 112 号）がある。

注 3) 防腐処理法としては、表面処理法（木材の表面を焼く炭化法、または木材の表面にコーラール、クレオソート等を塗布する塗布法）または防腐剤注入法（木材を加熱または加圧してクレオソート油などを注入するか、あるいは落差をつけて硫酸銅水溶液を注入する方法）がある。

注 4) 海虫による被害をふせぐためにも、前項の防腐処理は有効であるが、これによって完全に虫害をふせぐことは期待できない。なおこのために、海中部分の木材の表面をコンクリート、鉄板、細いワイヤー等で被覆することもある。

注 5) 木材の強度は、同一種類であっても一定しないので、一般的な許容応力度を規定することは困難であるが、木道路橋設計示方書案の規定が参考になる。（資料 8.1 参照）

資料 8 許容応力度

8.1 木道路橋設計示方書案（昭和 15 年 11 月 内務省）の抜すい

第 15 条 木材

木材の許容応力は次の値を標準とする。

表-3.11 木材の許容応力¹⁶⁾

種 別	材 種	軸方向引張（純断面に付）繊維に平行 kg/cm ²	軸方向圧縮（総断面に付）繊維に平行 kg/cm ² l/r < 100 の場合*	曲げ引張（純断面に付）圧縮（総断面に付）繊維に平行 kg/cm ²	支 圧		剪 断	
					繊維に平行 kg/cm ²	繊維に直角 kg/cm ²	繊維に平行 kg/cm ²	繊維に直角 kg/cm ²
針葉樹	杉、松、桧の類	80	70-0.48l/r	90	80	20	8	12
闊葉樹	樺、栗、檜、樫の類	110	80-0.58l/r	120	110	35	12	18

* l/r 100 の場合には種別にかかわらず次式によるものとす

$$220,000 / (l/r)^2 \quad l = \text{部材の長さ(cm)} \quad r = \text{部材断面の最小回転半径(cm)}$$

（引用者註：闊葉樹（カツヨウジュ）は、広葉樹のことである。純断面はボルト孔や切欠きによる欠損部分を除いた断面であり、総断面は欠損部分を含めた断面である。）

表-3.12 繊維に斜方向の支圧応力¹⁶⁾

種 別 \ 繊維となす角度	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90
針 葉 樹 kg/cm ²	80	73	59	46	36	32	29	25	22	21	20
闊 葉 樹 kg/cm ²	110	103	88	72	58	53	49	42	38	36	35

第 2 編 けい船岸 第 9 章 矢板式けい船岸およびセル式けい船岸 9.1 矢板式およびたな式けい船岸 9.1.11 たな版およびたなぐいの設計

注 5) たなぐいは一般に、虫害や腐食を受けやすい位置にあり、その劣化は全体の安定に致命的な影響を生じやすいから、くい防食には、特に念を入れなければならない。

第 2 編 けい船岸 第 10 章 さん橋および横さん橋 10.2 各さん橋の特徴 10.2.1 くい式さん橋

注 2) 木ぐい式さん橋は虫害や腐食を受けやすいから、永久構造物としては用いないのが普通である。

第3編 しゅんせつおよび埋立 第5章 埋立工事 5.1 土留護岸

仮護岸等としてよく用いられるものに石わく護岸、木さく護岸、トレンチシート、築堤等がある。

(1) 石わく護岸

1箇 10～60kg の雑石を1～4割の斜面こう配で積上げ、仮土留とするものである。場合によっては松丸太で石わくを組立て、中に雑石を詰めた形式もとられる。

(2) 木さく護岸

0.6～0.9m 間隔に松丸太を打ちこれに腹起材を取付けて2～3本ごとに打った控えぐいに番線または鉄筋で緊結する。さく板は18～30mm厚のものを使用するが、その代りに粗ださくを施し、背面にむしろを張ることもある。なおこの護岸には高さによって1段式と2段式とがある。またいずれの場合も間隙からの土砂漏出を防止しなければならない。

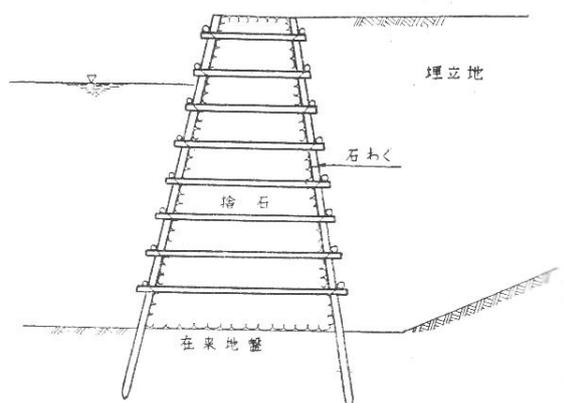


図-3.18 石わく護岸¹⁶⁾

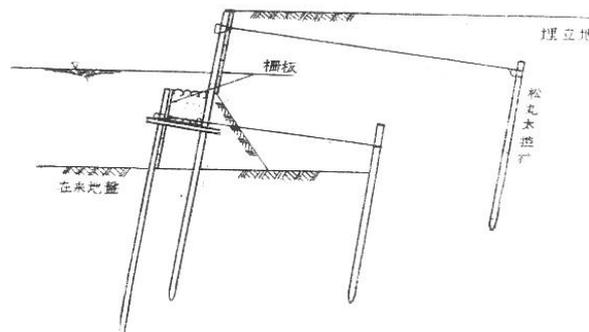


図-3.19 二段木さく護岸¹⁶⁾

(5) 1965～1975年頃（昭和40年代）

「港湾工事設計要覧」1959年（昭和34年）の改訂が1964年（昭和39年）に企画され、運輸省港湾局に「設計標準作成委員会」が設置された。百名近くの人々が各自の専門分野について執筆し、「港湾構造物設計基準」と題して第1～5編が1967年（昭和42年）、第6～10編が1968年（昭和43年）に発刊された¹⁷⁾。この改訂時に初めて、箱書き（枠内に基準本文、枠外に解説が書かれる形式）が採用されている。以下に木材関係の記述を抜粋した。

第3編 材料 第1章 木材 1.1 木材の品質

1.1.1 普通構造用木材の品質

普通構造用木材として使用する木材の品質は、JAS S11 木工事の規定を準用する。品質の選定にあたっては特に次の事項に留意しなければならない。

- (1) 大きな応力を受ける引張材および接合部には、節腐れ、繊維の傾斜などの欠点の少ないもので、なるべく乾燥したものを使用する。
- (2) 大きな圧縮力をうける部材は、とくに割れ、わん曲などの欠点の少ないものを使用する。
- (3) 腐朽の恐れのある主要構造部に対しては、なるべく耐久性の大きな樹種の材を用いる。

[解説]

- (1) ここにいう普通構造用木材とは、木グイ材を除いた構造用木材のことをいう。重要な港湾構造物の主要部材として木材を用いることは、耐久性が小さいので好ましくないが、やむをえず使用する場合は本章を適用する。

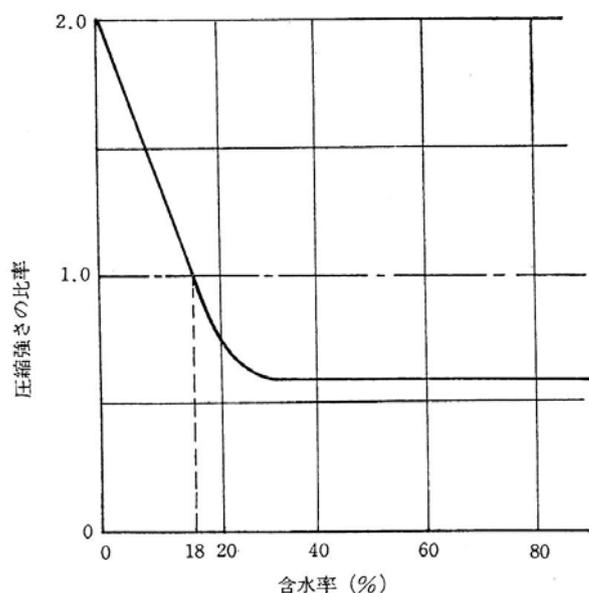


図-3.20 含水率と圧縮強さとの関係¹⁷⁾

- (2) 普通構造材として使用する木材の品質は、JAS S11 に各構造部ごとに指示してあるのでこれを準用する。
- (3) 構造材としては、なるべく乾燥材を使用すべきことはいうまでもない。含水率が 30% を超えると圧縮強度は約半減することがある。一例をあげると図-3.20 のとおりである。
(引用者註：図-3.20 の出典は、福田武雄“木構造学”(1949年) p.5 であり、W. Stoy の 1935 年の論文から福田が引用した図が元になっている。なお“木構造学”の図では圧縮強さの比率 1.0 のときの含水率が 18% ではなく 17% となっている。)
- (4) 港湾工事に使用される主な木材とその用途は表-1.1 のとおりである。(引用者註：表-1.1 は、1959 年版要覧の表(表-3.11,表-3.12) とほぼ同じ内容なので省略。)

1.1.2 木グイ材の品質

木グイ材としては、耐久性、強度などの点からマツ材（アカマツ、クロマツ）の生材がもっとも適当である。クイの選定にあたっては次の事項に留意しなければならない。

- (1) 割れなどの欠点のない生丸木の樹皮を取除いた元口から末口までの径がほぼ一様なものとする。
- (2) クイ材の曲りの限度はクイ頭とクイ先とを結ぶ中心線がクイ外に出ないものとするか、または長さの 0.5% 以内とする。

[解説]

クイ材としては、耐久性、強度などの点からマツ材の生材がもっとも適当とされている。まれにクリ、スギ、ヒノキ、モミなども使用されることがある。国産のマツ材では最大長 15m 程度が限界である。輸入材としてはベイマツがよく知られており、最大長は 25m 前後のものもある。

1.2 木材の許容応力度

1.2.1 一般

木材の強度は、その構造物に要求される変形上の制限も考え合わせ、実際に使用する木材に対して各種の原因による強度の増減を総合的に考慮し決定する。

[解説]

木材の強度は材種、含水率、その他の要因により非常に異なるのが普通であり、その安全率もこれを見越した見掛上の安全率となっている。すなわち、最大強度に対して許容応力度は非常に低く、安全率が約 8 程度になるように規定している。これは実際に使用される木材の各種要因による強度の低下ならびに表-3.13 に示されているように同種材でもその強度の最大最小に極端な開きがあることによるのである。

表-3.13 国産木材の強度表 (単位 kg/cm²)¹⁷⁾

	気乾比重			圧縮強さ				引張強さ			曲げ強さ			せん断強さ		
	最大	最小	平均	繊維に平行			繊維に直角	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
				最大	最小	平均										
スギ	0.69	0.30	0.39	598	216	(202) 400		775	198	(52) 477	1173	315	(48) 576	71	37	(59) 52
スギ			0.43			300	33			387			462			69
ヒノキ	0.61	0.34	0.46	754	268	(204) 517		1090	333	(56) 573	1290	450	(44) 804	102	56	(51) 72
ヒノキ・			0.46			427	52.3			387			498			69
サワラ	0.55	0.25	0.33	493	221	339		436	131	(21) 279	765	330	(20) 468	59	43	49
モミ	0.71	0.29	0.43	643	209	(204) 445		1065	200	(55) 505	1140	345	(45) 637	86	50	(60) 65
モミ・	0.52					453	35.9			210			452			73
ツガ	0.72	0.40	0.50	914	317	(175) 546		915	302	(44) 579	1360	510	(45) 749	98	62	83
ツガ・			0.57			470	51.1			468			526			76
アカマツ	0.84	0.38	0.53	779	280	(224) 515		1171	211	(59) 574	1328	420	(51) 734	97	62	(78) 82
アカマツ・			0.50			393	51.0			239			418			55
クロマツ	0.70	0.46	0.54	629	295	(80) 440		1109	306	(19) 579	1260	480	(20) 703	97	56	(31) 76
エゾマツ	0.52	0.42	0.41	458		(2) 458		510	469	(2) 490	600	585	(12) 590	59		(3) 59
ブナ	0.85	0.41	0.71	824	322	(108) 488		1168	333	(32) 874	1553	645	(29) 953	122	70	(58) 98
クリ	0.78	0.44	0.50	568	219	(112) 353		1116	364	(28) 578	990	390	(30) 582	73		(50) 64
オオナラ	0.98	0.54	0.80	986	331	(10) 459		1380	435	(12) 901	1020	510	(18) 786	100		(23) 79
アカガシ	1.20	1.06	1.14	663	414	(14) 547		1633	939	(5) 1160	1230	1170	(4) 1204	154		(4) 154
ヒバ			0.48			369	38.1			329			450			51

- () は試験片数、無印は大蔵省臨時建築部調査報告による。
 ・印は林業試験所報告 No.6 による。(青木楠男, 土木材料)

(1) 繊維方向の木材の許容応力は表-3.14 の値を標準とする。

表-3.14 普通構造用木材の許容応力度 (単位 kg/cm²)¹⁷⁾

種類	引張	圧縮	曲げ	支圧		せん断	
				平行	垂直	平行	垂直
針葉樹	80	70-0.48	90	80	20	8	12
カツ葉樹	110	80-0.58	120	110	35	12	18

= l/r 100 の場合は種別にかかわらず次式により計算する。

$$220,000 / (l/r)^2$$

ここに l ; 部材長 (cm) r ; 部材断面の最小回転2次半径 (cm)

異常時荷重に対しては 1.5 倍してよい。

(2) 繊維に斜方向の支圧許容応力度は表-3.15 の値を標準とする。

表-3.15 繊維に斜方向の許容支圧応力度 (単位 kg/cm²)¹⁷⁾

繊維との角	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
針葉樹	80	73	59	46	36	32	29	25	22	21	20
カツ葉樹	110	103	88	72	58	53	49	42	38	36	35

地震時荷重に対しては 1.5 倍してよい。

(3) 許容応力度の増減

(a) 常時湿潤状態にあるものに対しては、表-3.14、表-3.15 の値の 70% とする。

(b) 直接雨露にさらされる構造物は状況に応じて表-3.14、表-3.15 の値の 80% とする。

(c) 仮設を目的とする構造物の常時荷重に対する許容応力度の値を(a)、(b)に関係なく仮設期間に応じて次のようにすることができる。

1 週間以内 表-3.14、表-3.15 の値の 1.30 倍

1 週間～1 カ月 表-3.14、表-3.15 の値の 1.25 倍

1 カ月～3 カ月 表-3.14、表-3.15 の値の 1.20 倍

1.2.2 普通構造用木材の許容応力度

[解説]

(1) 繊維方向の許容応力度

1940 年 11 月 (昭和 15 年 11 月) の内務省国土局で定めた木道路橋設計示方書 (案) の許容応力度に準じている。

引張材は純断面につき、圧縮材は総断面について計算するものとする。

(2) 繊維に斜方向の許容支圧応力度

本文の値はハンキンソン (Hankinson) の公式によって算出されたものであり、一般によく一致するといわれている。ハンキンソン公式は次式のとおりである。

$$n = pq / (p \sin^2 + q \cos^2)$$

ここに p, q ; 繊維に平行と直角方向の支圧強さ (kg/cm²)

n ; 繊維に θ の方向に力が働くときの支圧強さ (kg/cm²)

(3) 許容応力度の増減

(a) 湿潤状態の場合

木材の中に含まれる水分は木材の強さに著しい影響を及ぼす。とくに圧縮強さに対してその影響は大きい。木材の含水率 (木材の乾燥重量に対する水の重量の比で、わが国では 18% を気乾材の標準の含水率とする) が 80% 以上になると、圧縮強さは気乾材の強さの約 60% になり、それ以上水分が増しても強さはほとんど変わらない。引張強さももちろん水分

の多少によって変化するが、圧縮強さほど大きな変化は受けない。十分に湿った木材の引張強さは気乾材の約70%と見てよい。各応力度とも一応この低減率によって低減するものとした。

(引用者註：「含水率が80%以上となると」は「含水率が30%以上となると」の誤りではないと思われる。)

(b) 無被覆の構造物

無被覆の構造物は雨露にさらされているから、含水率が大きく強度の低下が考えられるので、状況に応じて低減を行なう。

(c) 仮設を目的とする構造物とは、コンクリートの型わく、支保材、仮設足場などである。

1.2.3 木グイ材の許容圧縮応力度

木グイ材の常時の許容圧縮応力度は、スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイツガについては40 kg/cm²、その他は樹種にかかわらず部材の最小断面について50 kg/cm²以下とする。ただし1.2.2 普通構造物用木材の許容応力度の圧縮応力度の式を用いて計算した値と比較し、いずれか小さい値を採用する。

表-3.16 木グイ材の許容圧縮応力度 (単位 kg/cm²)¹⁷⁾

木材の種類		常時応力度	異常時許容応力度
針葉樹	アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	50	常時の1.5倍
	スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ	40	常時の1.5倍
カツ葉樹	カシ	50	常時の1.5倍
	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	50	常時の1.5倍

[解説]

本文の規定は内務省国土局、木道路橋設計示方書(案)に準じたものである。

1.3 木材の接合

木構造の接合方式は、構造物あるいは構造物部の所要の性能を考慮して選定しなければならない。

[解説]

- (1) 一般に剛性が要求される接合部に対しては、接着接合またはくぎ接合、ねばり強さが要求される接合部に対しては、ボルト接合、ジベル接合、胴付きあるいは突付け接合が適当である。
- (2) 設計にあたっては、次の事項に注意しなければならない。
 - (a) 接合部付近には、なるべく欠点、とくに丸身および節の少ない材を使用する。
 - (b) 継手はなるべく応力の大きい位置を避ける。
 - (c) 並列する構造部材の接合部は、なるべく同一平面に並ばないように配置する。
 - (d) 主要な接合部においては、力の作用線が接合部の抵抗力の図心を通るように接合部を配置する。やむをえずこれができない場合には偏心の影響を考慮する。
 - (e) 曲げをとまなう材の継手にそえ板を使用する場合には、とくにその構造に注意を要する。
 - (f) 構造物の変形によって接合部に2次応力が生ずるおそれのある場合には、これを考慮する。
 - (g) 引張材をそえ板継ぎする場合、そえ板断面積の和は所要断面積の1.5倍以上とする。
 - (h) 引張仕口において引張材の余長をなるべく大きくする。

- (i) 材の乾燥によってゆるみを生ずる接合部に対しては、これを随時締め付けるように設計する。

1.4 木材の保守

木材を虫害および腐食の多いところに使用する場合には、これらを防止するよう努めなければならない。

[解説]

- (1) 木材の欠点は虫害、腐食および材質のぜい（脆）弱性にある。とくに海岸、港湾構造物に対して比較的短期間に大被害を与える海虫については十分な防ぎよ（禦）対策が必要である。
- (2) 防腐工法の種類としては、構造物自体を防雨、防湿にし、換気を十分にして木材の防腐を行なう構造法によるものと、木材に防腐剤を注入、浸漬ないしは塗布などの処理を施して防腐する防腐剤処理法によるものがある。木材防腐剤ならびに木材防腐処理法は日本工業規格および日本農林規格（JAS S11 防腐処理法）を参照のこと。
- (3) 防食工法の種類としては、木材表面をコンクリートその他で被覆する被覆法と、木材に防食剤を注入、浸漬ないしは塗布などの処理を施す防食剤処理法が主なものである。

第5編 基礎 第6章 クイ基礎 6.5 細部設計

6.5.3 継手

- (4) 木グイ、鉄筋コンクリートグイおよびプレストレストコンクリートグイの継手

木グイ、鉄筋コンクリートグイおよびプレストレストコンクリートグイの継手は、水平力あるいは引抜き力が作用する場合には用いないことがのぞましい。

6.5.6 木グイ

木グイは、その全長が常に地下水位以下にあるようにすることがのぞましい。

[解説]

木グイは水中で使用すれば寿命が長いが、酸素の供給を受ける箇所では乾湿を交互に受けると急速に腐食する。地下水位の変化が予想される場所では、最低地下水位より上に木グイが出ないようにすることがのぞましい。

第8編 けい留施設 第5章 たな式けい船岸

5.6.3 たなグイの設計

[解説]

(8) 木グイを用いる場合はクイが地下水位より上に出ないように設計し、虫害を考慮して防腐処理を行なうことがのぞましい。木材の防腐処理については、第3編 1.4 木材の保守を参照のこと。

(6) 1975年～1999年（昭和50年代～平成11年）

昭和54年（1979年）の改訂版¹⁸⁾では、基準の本文ならびにその内容を補足し適用範囲を明確にする解説のみが記載され、本文の背景・参考事項・本文の適用範囲外の解決方策・その他の資料は、運輸省内部資料「港湾施設設計指針」に記載されることとなった。木材に関する記述については、箱書きの内容は改訂前とほぼ同じであるが、[解説]として記述されていた内容は、1.1.1[解

説](1)を除いて記載されなくなった。また箱書き部分では、仮設建造物の許容応力度の割り増しについての記述が削除された。

平成元年（1989年）の改訂版¹⁹⁾では、木材に関する記述に変更はない。

平成11年（1999年）の改訂版²⁰⁾では、木材に関して若干の変更（許容応力度の表の削除、木質構造設計規準の参照、ボードウォーク・集成材の追加等）があり、下記のように記述されている。

第3編 材料 第6章 木材

6.1 木材の品質

6.1.1 普通構造用木材

普通構造用木材として使用する木材は、製材の日本農林規格（JAS）の規定に適合するか、又はこれと同等以上の品質を有するものとする。

[解説]

普通構造用木材とは、木杭材を除いた構造用木材のことをいう。重要な港湾建造物の主要部材として木材を用いることは、耐久性が小さいので好ましくないが、やむをえず使用する場合は本章を適用する。

[参考]

- (1) 品質の選定に当たっては、その用途が、引張材、圧縮材、接合材のいずれかによって、節腐れ、繊維の傾斜、割れ、わん曲等に着目し、また、主要構造部材に対しては、なるべく腐朽のおそれがなく、耐久性の大きな樹種の木材を用いる。
- (2) 近年、ボードウォークの材料として、輸入材が多く使用されているが、使用材の選定に当たっては、加工・仕上性、美観的要素、耐摩耗性、耐火性を考慮の上、なるべくメンテナンスの必要がなく、耐久性の優れた樹種の木材を用いる。

6.1.2 木杭材

木杭材としては、耐久性、強度等の点からマツ材（アカマツ、クロマツ）の生材が最も適当である。

[解説]

- (1) 木杭材の選定に当たっては、次の事項を考慮する。
 - (a) 割れ等の欠点のない樹皮を取り除いた生丸木の元口から末口までの径がほぼ一樣なものとする。
 - (b) 杭材の曲がりの限度は杭頭と杭下端とを結ぶ中心線が杭外に出ないものとするか、又は長さの0.5%以内とする。
- (2) 木杭材としては、耐久性、強度等の点からマツ材の生材が最も適当とされている。

6.2 木材の許容応力度

6.2.1 一般

木材の強度は、その建造物に要求される変形上の制限も考え合わせ、各種の要因による強度の増減を総合的に考慮して決定する。

[解説]

木材の強度は、材種、含水率、その他の要因により非常に異なるのが普通であり、その安全率もこれを見越した見掛け上の安全率となっている。

6.2.2 普通構造用木材の許容応力度

普通構造用木材の許容応力度は、湿潤等による強度の減少や異常時荷重に対する割増しを考慮して適切に定める。

[参考]

- (1) 針葉樹製材の繊維方向の許容応力度は、建築基準法施行令（昭和 25 年政令第 338 号）第 89 条による。
- (2) 木材の繊維方向の許容応力度及び繊維直交方向の許容圧縮応力度は、日本建築学会「木質構造設計規準」による。

6.3 集成材の品質

構造物に使用する集成材は、構造用大断面集成材の日本農林規格（JAS）に適合するか、又は、これと同等以上の品質を有するものとする。

6.3.1 集成材の許容応力度

集成材の許容応力度は、使用目的に応じて適切に定める。

[参考]

繊維方向及び繊維直交方向の許容応力度は、日本住宅・木材技術センター：木橋設計施工の手引 木橋づくり新時代、1995 年 1 月、pp.23-24 による。

6.4 木材の接合

木構造の接合方式は、構造物又は構造部材の所要の性能を考慮して選定する。

6.5 木材の保守

木材を虫害又は腐食の多いところに使用する場合には、これらによる被害を防止するよう努める。

[解説]

木材の欠点は虫害、腐食および材質の脆弱性にあり、特に港湾構造物に対して比較的短期間に大きな被害を与える海虫について十分な防御対策が必要である。

(7) 現行の基準

平成 19 年（2007 年）の改訂版²¹⁾は、基準を定める省令および告示の性能規定化に伴い、参考資料という位置付けになった。この改訂版基準では、木材について全面的に書き改められ、以下のような構成となっている。

第 3 編 作用及び材料強度条件編 第 11 章 材料 6 木材

6.1 一般

- (1) 強度性能、(2) 耐久性、(3) 環境性、(4) その他

6.2 強度性能

- (1) 含水率、(2) 荷重継続期間、(3) 丸太の基準強度特性値

6.3 耐久性

- (1) 劣化要因

(a) 菌類、(b) 昆虫類、(c) 海虫類、(d) 気象因子

(2) 劣化対策

(a) 天然高耐久材の使用、(b) 保存処理、(c) メンテナンス

主な内容としては、6.1 では他の建設材料と比較した木材の特色と、港湾の施設に木材を利用する際に配慮すべき性質について列挙している。6.2 では、木材の強度特性値の設定や部材としての耐力の照査を、日本建築学会「木質構造限界状態設計指針（案）・同解説」に基づいて行うことを推奨している。また、含水率が木材の強度、寸法、比重に及ぼす影響について述べている。6.3 では、使用環境（屋内、屋外（気中、地中、淡水中、海水中）、含水状態（乾燥、湿潤、飽和））ごとの主な劣化要因（木材腐朽菌、シロアリ、乾材害虫、フナクイムシ、キクイムシ、風化（weathering）等）および劣化対策について概要を紹介している。

(8) 港湾基準の木材関係の記述の変遷（まとめ）

昭和 25 年（1950 年）に初の基準が作成されてから、概ね 10 年ごとの 6 回の改訂を経て、現行の基準に至っている。各版での木材関係の記述の変遷を表-3.17 に示した。

表-3.17 港湾の基準における木材関係の記述の変遷

発行年	基準の名称	木材に関する主な記述
昭和 25 年 (1950 年)	港湾工事設計示方要覧	海中の主要部材・永久用材への使用を禁止 鉄筋コンクリート管はめ込み木杭栈橋、石枠堤について記述
昭和 34 年 (1959 年)	港湾工事設計要覧	重要構造物の主要部材としての使用は望ましくない旨を記述 許容応力度の表を掲載 石枠護岸、木柵護岸について記述
昭和 42 年 (1967 年)	港湾構造物設計基準	普通構造用木材の品質は、JAS S11 木工事の規定を準用 含水率と強度の関係について解説 木杭材の許容応力度の表を掲載 木材の接合・保守について記述 基礎の木杭について注意事項を記述
昭和 54 年 (1979 年)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	本文の背景・参考事項・本文の適用範囲外の解決方策・その他 の資料を削除
平成元年 (1989 年)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	変更なし
平成 11 年 (1999 年)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	許容応力度は木質構造設計規準に準拠 ボードウォーク・集成材について記述
平成 19 年 (2007 年)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	木材の特色、含水率の影響、荷重継続時間の影響、使用環境ご との劣化要因等について記述

的な建物に防腐処理を施さない木ぐいを用うことは、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 40 kg/cm^2 (4MN/m^2)、その他は樹種にかかわらず 50 kg/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 40 kg/cm^2 、その他は樹種にかかわらず最小断面について 50 kg/cm^2 以下としている。これは建築基準法施工令第 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 64.5 kg/cm^2 および 85 kg/cm^2 、Uniform Building Code においては基本応力度の 60% 以上、かつ 70 kg/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。

表-3.18

(kg/cm^2)

木 材 の 種 類		基準法施行令第 89 条 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

(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。」

1. 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。くい素材であるため元口から末口まで径が一様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つとして剥いておく。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12cm以上のものを使用する。
2. 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-3.21 参照)

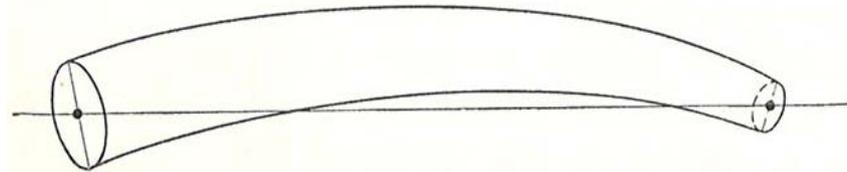


図-3.21 くい材として不可のもの

3. 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布するだけでなく、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。
4. 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。
5. くいの間隔の最小は施工の点からきめられるといわれている。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60cm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き、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-3.22(A)に示すように示されていた。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、継手の上下のくい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く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、折れ曲がったり、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う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が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-3.22(A)(d)は悪いつぎ方であり、(b)、(c)はある程度は回転するが、前者は折れ曲がりに、後者はある程度以上の回転とともに不完全であり推奨できない。

図-3.22(A)(a)が最も推奨できる形式である。図-3.22(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。

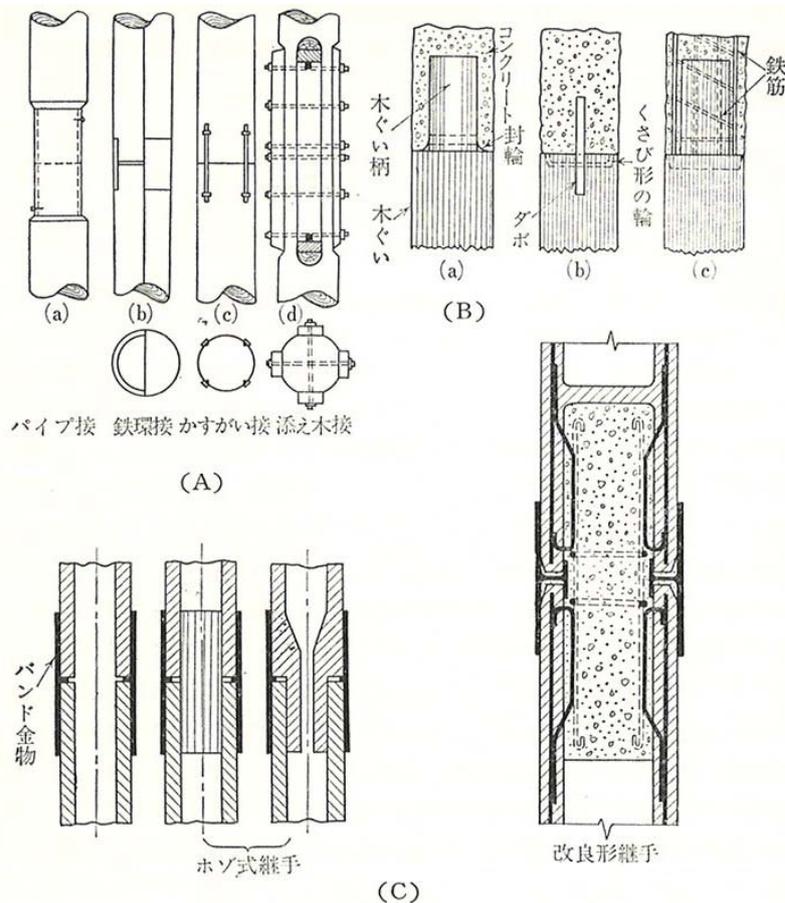


図-3.22

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 でもって円とう（壻）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° ～ 800° 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-3.23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。が1t以上のときは落下高さ1m以上揚げないこと。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、木部工作は嚴重とし、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-3.22(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-3.22(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で最も信頼性のおけるものである。

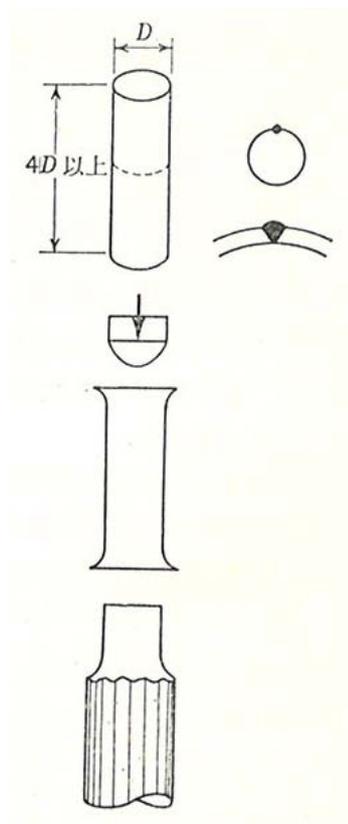


図-3.23

(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、べいまつにあつては 50 kg/cm^2 (5MN/m^2)、その他の樹種にあつては日本建築学会「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 50 kg/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-3.19のような値が定められている。

表-3.19 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 $L f_c$	引張り・ 曲げ $L f_t, l f_b$	せん断 $L f_s$	
針葉樹	I類	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	90	7
	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・アピトン	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-3.19の値の70%を採用する。したかつて、普通構造材で針葉樹類の場合、長期許容圧縮応力度は 42 kg/cm^2 、広葉樹類で 49 kg/cm^2 、その他はいずれも 50 kg/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 50 kg/cm^2 を採用することにした。その他の種類のをくいとして使用する場合は、針葉樹類で 50 kg/cm^2 、同類で 40 kg/cm^2 、広葉樹I類で 50 kg/cm^2 、同II、III類で 45 kg/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 12cm 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持っている。Chellis は、ベニスの鐘楼やアムステルダム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挙げている。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。
4. くいの間隔の最小は施工上の観点から決められている。従来为数多くの経験から、木ぐいの場合としては、くい径の 2.5 倍、かつ 60cm 以上の値がとられている。

1998 年版（平成 10 年版）²⁴⁾

(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。

2001 年版（平成 13 年版）²⁵⁾

(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) まとめ

以上の建築基礎構造設計指針における木杭基礎に関する記述の変遷をまとめて、表-3.20 に示す。1955年（昭和30年）に「木材資源利用合理化方策」が閣議決定されて以来、記載事項が減少し、1988年（昭和63年）以降設計書から木杭の項目が消えていったことがわかる。

表-3.20 建築基礎構造設計指針における木杭基礎の記述の変遷

建築基礎構造設計指針	
1955年	
1960年	建築基礎構造設計規準・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
1964年	
1966年	
1968年	
1974年	建築基礎構造設計規準・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
1976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
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

3.6 農業土木

(1) 農業土木における木杭利用の歴史

農業土木歴史研究会編著による「大地への刻印」²⁶⁾によれば、わが国の木杭利用の歴史は、朝鮮半島から九州北部に、水稲耕作と金属器の使用が伝わって誕生した弥生農耕文化とともにある。その例として挙げられるのが、弥生期の水田を代表する登呂遺跡（静岡県静岡市）である。登呂遺跡は、広大な平野の一角にある 10a 足らずの水田跡であるが、水田中央部に用水と排水を調節できる水路が設けられ、矢板と木杭の列を張り巡らして畦をつくり、50 以上の長方形の区画に分けられている。しかし一方、1978 年（昭和 53 年）に福岡県板付遺跡では弥生水田遺跡の下部層に、畦をめぐらし、畦には木杭をびっしり打ち込んだ縄文晩期の水田遺跡が発見されたという。このことから稲作の歴史も遡ることが考えられ、木杭利用の歴史も縄文後期に遡ることになるかもしれない。板付遺跡では木杭を鉛直に打ち込んだ直立型の簡単なものであるが、古墳期始め頃の古照遺跡（愛媛）^{こでら}（**図-3.24**）や纏向遺跡（奈良県）^{まきむく}では木杭が合掌式に組み合わされた高度なものが発見されている（大地への刻印）。このようにして木杭を用いた井堰の開発により、水田と耕地を組み合わせることで耕地が拡大されてきたことが伺える。

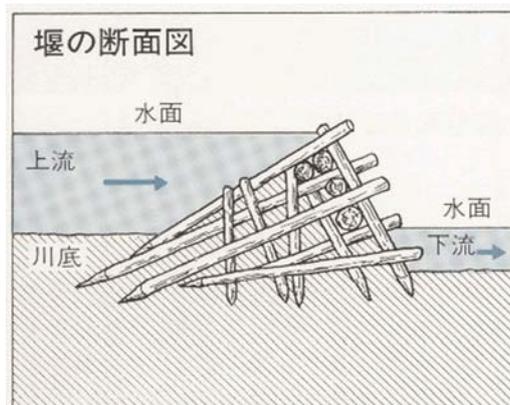


図-3.24 古照遺跡（松山市教育委員会）

井堰の開発への木杭の利用例として、福島県の八幡堰と埼玉県庄兵衛堰をを紹介する。八幡堰は 1899 年（明治 32 年）に農業用水を取水するために建設されたもので、基礎の工法は当時一般的であった土台木である。これは地盤へ基礎杭として松丸太を打ち込んでから、杭頭の周囲に木材で枠を組み、中に砂利や栗石を敷詰めた後に突き固めて、その上に捨てコンクリートを打設した方式である。基礎杭の松丸太は堰本体が長さ 4.5m、末口 15cm が 84 本、樋管部分が長さ 3m、直径 9cm が 40 本使われている。杭配置間隔は 1m 程度。庄兵衛堰は 1907 年（明治 40 年）庄兵衛堀川に同じく農業用水を取水するために建設されたもので、基礎の工法も当時一般的だった土台木である。埼玉県立文書館に設計原図、杭頭切取図、設計仕様書が保存されているようである。これによると、洗練された設計図、断面図の表記や記号の使い方は現代の設計図と大差ないという。杭の支持力や安全率をある程度考慮した設計理論も導入されている。

近年の農業土木事業における木杭の利用は沖積平野における水路工などの構造物の安定のために用いられてきた。この場合、杭は摩擦杭として取り扱われ、杭の先端支持力は考慮されない場合がほとんどである。また、摩擦杭の安全率は 4 が用いられ支持杭の場合の 3 に対して大きく、支持力の安全性が支持杭に劣っているとみなされている。新潟平野では液状化を考慮した木杭基礎が設計施工され、1964 年（昭和 39 年）の新潟地震ではその周囲が液状化したにもかかわらず無被害であり、打設後 50 年以上経過しても基礎として有効に使用されているという。

しかし、農業土木構造物もボックスカルバートなどコンクリート製で大型かつ大きな重量の構造物となるにつれ、コンクリート杭や鋼管杭が急



写真-3.1 杭柵工法によるクリーク斜面の改修

速に普及し、木杭の利用は激減してきているのが現状である。しかしまた一方、地域によっては、例えば佐賀県の場合、佐賀平野の老朽化して法尻が洗掘されたクレーク斜面の修復に佐賀県産材の杉を用いた杭柵工法（写真-3.1）を採用するなど、コンクリート構造物にあまり頼らない（セメントを使用しないので CO₂ 削減効果に繋がる）、景観や水生生物に優しい環境保全型の木杭を利用した工法が再考されてもいる。また、新潟県では県産材のマツ・スギの木杭の利用を推進すると共に、木杭を摩擦杭として利用するに当たり杭先端抵抗力を積極的に評価している。

参考文献

- 1) 瀧大吉, 建築学講義録, pp.1-341,1899.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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, 道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編, 1980.5.
- 7) 日本国有鉄道 東京工事局, 工事設計資料便覧 第2編 諸表・設計・施工, 1961.10.
- 8) 日本国有鉄道建設局, 土構造物の設計施工指針(案), 1967.12.
- 9) 日本鉄道施設協会, 建造物設計標準解説 基礎構造物及び抗土圧構造物 日本国有鉄道編, 1974.6.
- 10) (社)土木学会, 国鉄建造物設計標準解説一基礎構造物 抗土圧構造物一, 1986.3.
- 11) 廣井勇, 改訂 築港, 丸善, 1907.
- 12) 鈴木雅次, 港工学, 1932.
- 13) 港湾協会, 港湾工事設計示方要覧, 1950.
- 14) 比田正, 高島三号棧橋基礎の設計について, 土と基礎, 第1巻, 第1号, pp.56-66,1953.
- 15) 比田正, 軟弱地盤上に築造した高島3号棧橋の設計について, 土木学会論文集32号, pp.33-39, 1956.
- 16) 日本港湾協会, 港湾工事設計要覧, 1959.
- 17) 日本港湾協会, 港湾構造物設計基準, 1967.
- 18) 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979.
- 19) 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989.
- 20) 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 21) 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 22) 日本建築学会, 建築基礎構造設計規準・同解説, pp.474,1960.11.
- 23) 日本建築学会, 建築基礎構造設計規準・同解説, pp.667,1974.11.
- 24) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, pp.430,1988.1.
- 25) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, pp.485,2001.10.
- 26) 農業土木歴史研究会編著, 大地への刻印, 全国土地改良事業団体連合会, 1996.

第4章 現在における木材基礎設計法

4.1 地中における木材利用に関する法的規制

地中における木材利用については、各種設計マニュアルから木材に関する記述がほとんど消滅しているが、使用を認めないといった直接的な規制は見当たらない。

法的大系を道路を例にとり、図-4.1 に道路技術基準の体系を示す。ここに示す、道路構造令（昭和45年10月29日政令第320号、改正平成15年7月24日政令第321号）の（橋、高架の道路等）第三十五条の第1項には、「橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路は、鋼構造、コンクリート構造又はこれらに準ずる構造とするものとする。」とされており、木材利用について明確な規制とはなっていないが、構造は、鋼構造またはコンクリート構造を基本とすべきことが記述されている。

また、建築基準法との関係では、建築基準法施行令（昭和25年11月16日政令第338号、最終改正平成23年3月30日政令第46号）には、（用語の定義）第三条に、用語として基礎や基礎杭が構造耐久上主要な部分と定義され、（構造部材の耐久）第三十七条には「構造耐力上主要な部分で特に腐食、腐朽又は摩損のおそれのあるものには、腐食、腐朽若しくは摩損しにくい材料又は有効なさび止め、防腐若しくは摩損防止のための措置をした材料を使用しなければならない。」と記されている。さらに、（基礎）第三十八条第6項には、「建築物の基礎に木ぐいを使用する場合には、その木ぐいは、平家建の木造の建築物に使用する場合を除き、常水面下にあるようにしなければならない。」と記されている。

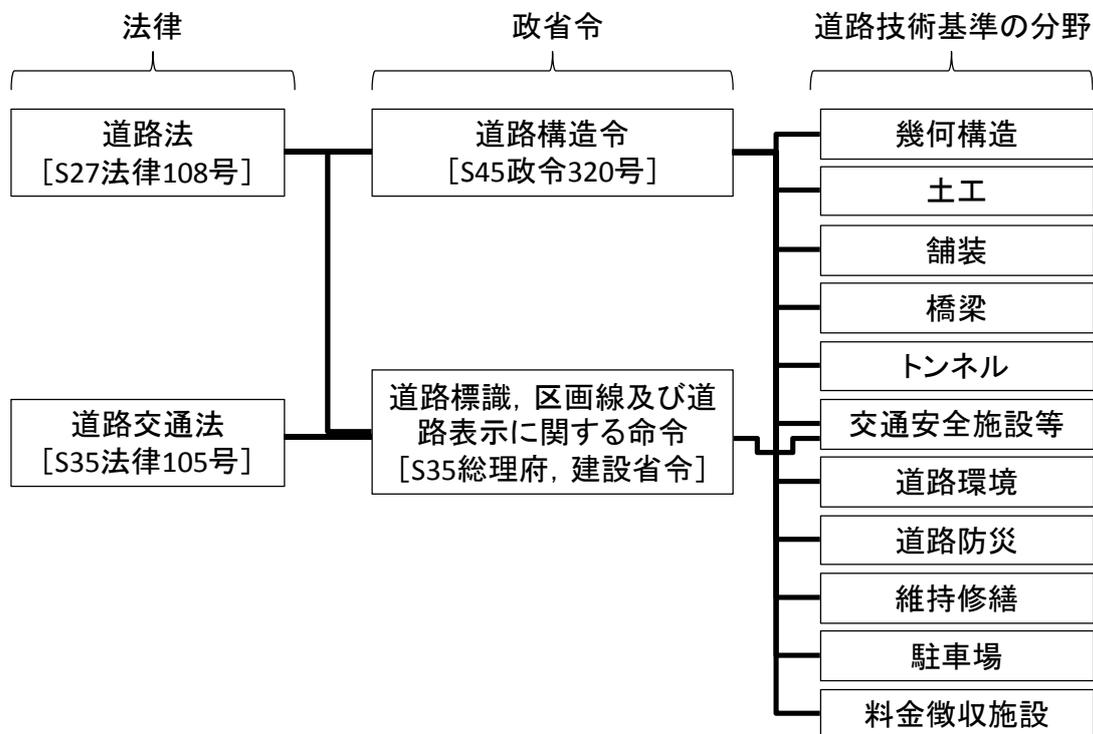


図-4.1 道路技術基準の体系（国土交通省）

表-4.1 に、以下の基準類における木材の記述について、規制、規制的な記述、木材に関する記述についてまとめた。いずれも、強い規制を示すものはないが、規制的な記述は散見される。一方で、木材使用について記述のないものが多く、このことが使用にあたって間接的に制限を与えているものと考えられる。

- ・日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編（2002 年 2 月）
- ・日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV各構造編（2002 年 3 月）
- ・日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（2002 年 3 月）
- ・日本道路協会：道路土工要綱（1990 年 8 月）
- ・日本道路協会：道路土工－施工指針（1986 年 11 月）
- ・日本道路協会：道路土工－軟弱地盤対策工指針（1986 年 11 月）
- ・日本道路協会：道路土工－排水工指針（1987 年 6 月）
- ・日本港湾協会：港湾の施設の技術上の規準・同解説（2007 年 7 月）
- ・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物（2000 年 6 月）
- ・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物（2007 年 1 月）
- ・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（1999 年 10 月）
- ・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理基準（構造編） 土構造物（盛土・切土）（2007 年 1 月）
- ・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理基準（構造編） 基礎構造物・抗土圧構造物（2007 年 1 月）
- ・日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2001 年 10 月）
- ・日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案（2006 年 11 月）
- ・日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針（2008 年 2 月）
- ・日本建築学会：小規模建築物基礎設計の手引き（1988 年 1 月）
- ・日本建築学会：小規模建築物基礎設計例集（2011 年 2 月）
- ・福井県土木部：基礎工設計マニュアル（2005 年 7 月）

表-4.1 各基準類における木材に対する規制的な記述と木材の使用に関する記述

分類	基準類	規制	規制的な記述	木材に関する記述
道路関連(1) 道路橋示方書・同解説 ((社)日本道路協会)	I 共通編 (2002年2月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。	・「3章使用材料」に鋼材(10頁)とコンクリート(6頁)があるが木材はない。 明確な規制的な記述はないが、鋼材は「強度、伸び、じん性等の機械的性質、化学組成、有害成分の制限、厚さやそり等の形状寸法等の特性や品質の確かなものでなければならない」、コンクリートは「強度、変形性能、耐久性や施工に関するワーカビリティ等の特性はや品質の確かなものでなければならない」との記述があり、木材もこれに従う必要があるように読み取れる。	・「2.2.1 死荷重」にある「表-2.2.1 材料の単位重量 (KN/m ³)」に、木材 8.0 (くぎ、かすがい、ボルトなどの金具を含む)、という記載がある。
	IV 下部構造編 (2002年3月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。	・「4章許容応力度」の章にコンクリート、鉄筋、構造用鋼材、PC 鋼材が示されているが、木材の記述はない。 ・「6章耐久性の検討」では「・・・経年的な劣化による影響を考慮するものとする。」とあり、特に鉄筋コンクリートに対する中性化、塩害、凍結融解、化学的腐食に対する記述が示されている。 ・「12章」杭基礎の設計には、特に規制的な記述はないが、構造細目には、PHC 杭、RC 杭、場所打ち杭、鋼管杭、鋼管ソイルセメント杭、SC 杭のみが示され、木杭は示されていない。ただし、基礎は防風時や地震時に対して許容の水平変位以下にすることが示されており、剛性の小さい木材は不利になっている。	
	V 耐震設計編 (2002年3月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。		
道路関連(2) 道路土工 ((社)日本道路協会)	道路土工要綱 (1990年8月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。		
	道路土工施工指針 (1986年11月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。		・「4-3-9 特殊な工法」には、「地盤や土構造物を補強するために木、竹、そだなどを用いる方法が古くから用いられているが、近年になってこれら天然材料のほかに鋼材や合成高分子材などの人工材料を盛土に敷設し、土構造物の機能を高める工法が普及してきている。」とし、帯鋼、ジオテキスタイルなどが紹介されている。
	道路土工軟弱地盤対策指針 (1986年11月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。	・「4-4-4 腹付け盛土(3)パイルネット工法」が、腹付盛土で沈下抑制効果があったことが紹介されている。ただし、木材の記述はない(パイルネット工法は、現在ほとんど木杭を用いるが、鋼管杭やコンクリート杭でもよく設計方法は同じであり、同様に使用できることとなっている。) ・「5-12-1 くい工法」が示されているが、単に「くい」の記述のみであり、木材についての記述はない。	
	道路土工排水指針 (1987年6月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。		・「6-2-1 盛土施工時の排水(2)砂質土の場合」にマツ丸太を用いた編籠工の事例が紹介されている。
港湾	港湾の施設の技術上の基準・同解説 ((社)日本港湾協会、2007年7月)	・「第4編施設編、第2章技術基準対象施設に共通する事項、2.基礎、2.4杭基礎、2.4.6杭基礎の性能照査一般(4)継手、(8)木杭の継手」に、「木杭の継手は、水平力又は引抜き力が作用する場合には用いないことが望ましい。」という、規制的な記述がある。	・「第4編施設編、第5章係留施設、6.浮桟橋、6.1性能照査の基本、(12)」に、「木製は、工費は安い、水密性が劣り、腐朽、虫害を受けやすいため耐久性に乏しい。水密性の確保、防腐処理のため、しばしば引き揚げて修理を行う必要がある。」というやや規制的な記述がある。	・「第3編編用及び材料強度条件編、第11章材料、6.木材、6.1一般、6.2強度性能、(1)含水率、(2)荷重継続期間、(3)丸太の基準強度特性値、6.3耐久性、(1)劣化要因、(2)劣化対策」に、木材の性能についての解説がある(4ページ)が、規制的な記述はない。 ・「第4編施設編、第5章係留施設、9.係留施設の附帯設備等、9.2防衝設備、9.2.3防舷材の配置、(9)」に、「木材防舷材は、係留施設前面に連続して取り付けられることが多い。しかし、8~13m間隔に防衝工を取り付ける集中方式をとることもある。」という記述がある。規制的な記述はない。
鉄道(1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 ((財)鉄道総合技術研究所)	基礎構造物・抗土圧構造物 (2000年6月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。	・「3.3盛土等との接続に関する検討」に杭網(パイルネット)工法の記載があるが、木杭についての記述はない。	
	土構造物 (2007年1月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。		・「3.5軟弱地盤対策工の設計」に木杭を用いた杭網工法の記載がある。
	耐震設計 (1999年10月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。		
鉄道(2) 鉄道構造物等維持管理基準(構造編) ((財)鉄道総合技術研究所)	土構造物(盛土・切土) (2007年1月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。 ・木材に関する記述はない。		
	基礎構造物・抗土圧構造物 (2007年1月)	・木材の使用に対して、直接的な規制的な記述はない。	・「付属資料3 基礎の特性と変状」に桐木工、木杭に関する記載があるが、「木杭は、明治初年の鉄道創始期から昭和20年代の終り頃までの長い間、構造物基礎として広く用いられてきた。しかし、地下水位以上では腐朽するおそれがあるため、地下水位が深いと	

			<p>ころではフーチングを深く掘り下げなければならぬこと、大径の長い杭材の入手が困難なこと、継手に問題があることなどの欠点があり、さらにコンクリート杭の発達により信頼度の高い大型の杭が大量に安価に入手できるようになったことから、近年ではほとんど用いられなくなっている。」と記述されている。</p>	
建築	<p>建築基礎構造設計指針 ((社)日本建築学会, 2001年10月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p>	<p>・「4.8 節地盤改良(2)建築における地盤改良の適用」に示される事例に、木杭による旧基礎を全面固化改良で基礎補強する事例が示されている。</p> <p>・「6.2 節杭の種類と性能」に、「・・・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。」と記述されている。</p>	
	<p>建築基礎のための地盤改良設計指針案 ((社)日本建築学会, 2006年11月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p> <p>・木材に関する記述はない。</p>		
	<p>小規模建築物基礎設計指針 ((社)日本建築学会, 2008年2月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p>	<p>・「第7章地盤補強の設計, 7.2 節杭状地盤補強工法, 2.使用材料, (2)木杭」には、「外皮をはぎ、防腐処理を施さない場合には、腐食しないように地下水面に設置する必要がある。」と記述されている。</p>	<p>・「第7章地盤補強の設計, 7.1 節基本事項, 1.地盤補強工法の選定」に、「小口径杭として木杭が記述されている。」</p> <p>・「第7章地盤補強の設計, 7.2 節杭状地盤補強工法, 1.支持力および沈下」に、「小口径杭工法としては、木杭・一般構造用炭素鋼管を用いた小口径鋼管杭、既製コンクリート杭が多く使用されている。」と記述され、木杭の施工方法も記述されている。</p> <p>・「第7章地盤補強の設計, 7.2 節杭状地盤補強工法, 2.使用材料, (2)木杭」があり、末口径 D=100~200mm 程度の針葉樹材(まつ・カラマツ・ペイマツなど)が一般に用いられていることが示されている。</p> <p>・「第7章地盤補強の設計, 7.2 節杭状地盤補強工法, 3.杭状地盤補強の長期許容支持力, (2)杭状地盤補強の長期許容圧縮力」に、木杭は普通構造材の70%程度の値を用いることとし、5000kN/m²とすることが記述されている。</p>
	<p>小規模建築物基礎設計の手引き ((社)日本建築学会, 1988年1月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p>		<p>・「6章基礎の設計, 6.3 基礎の種類とその設計, 6.3.5 杭基礎」に、「[木杭] 一般に針葉樹材を用い、杭径は先端(末口)ではかる。外皮をはぎ、先端をペンシル状に削る。最大長さは9m程度である。地下水面に打ち込まれた木杭はほとんど腐朽しない。地下水がないときには、腐朽処理をした木杭が用いられることがあるが、その耐久性についてはまだよくわかっていない。」と記述されている。</p>
	<p>小規模建築物基礎設計例集 ((社)日本建築学会, 2011年2月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p>		<p>・「第3章地盤補強を要する直接基礎の設計例, 3.4 節支持層が浅い場合の木杭の設計」と「同, 3.5 節支持層が深い場合の木杭の設計」が、記述されている(26頁)。</p>
福井県	<p>基礎工設計マニュアル(福井県土木部監修, 2005年7月)</p>	<p>・木材の使用に対して、直接的な規制の記述はない。</p>	<p>・「第8章その他の基礎, 8-1 基礎の種類, 3. その他の杭基礎, 1)木杭基礎」が記述され、腐朽防止のため杭全長が常に地下水位以下にする必要があること、大きな水平力を受ける構造物には用いない、継ぎ杭は原則考えないことが示されている。</p> <p>・「第8章その他の基礎, 8-2 設計手法, 7. 木杭(杭基礎)の支持力の計算方法」が、示されているが、「木杭の信頼度から、設計手法については参考扱いとする」と記述されている。</p>	<p>・「第8章その他の基礎, 8-3 設計計算例」に、木杭基礎の計算例が示され、考え方のPointに、「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。このような社会的背景より、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。」と記述されている。</p>

4.2 代表的な杭基礎設計法の比較

鉄道構造物等設計標準・同解説 (2000)¹⁾と道路橋示方書・同解説 (2002)²⁾、建築基礎構造設計指針 (2001)³⁾、港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007)⁴⁾、杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き (1987)⁵⁾、以上5つの基準の支持力式についてまとめた上で、比較を行う。

(1) 鉄道構造物等設計標準・同解説¹⁾

鉛直支持に対する検討は以下のとおりである。

$$\gamma_i \frac{v_d}{R_{vd}} < 1.0 \quad (4.1)$$

ここで、 γ : 構造物係数 (1.0~1.2)

v_d : 杭頭に作用する設計鉛直力

R_{vd} : 杭頭における設計鉛直支持力である。

単杭の設計鉛直支持力 R_{vd} は以下のように計算する。

$$R_{vd} = f_{rf} R_f + f_{rp} R_p \quad (4.2)$$

ここで、 R_{vd} : 単杭の設計支持力 (kN)

R_f : 単杭の最大周面摩擦力 (kN)

R_p : 単杭の基準先端支持力 (kN)

f_{rf} : 杭の周面支持力に対する地盤抵抗係数 (0.3~1.0)

f_{rp} : 杭の先端支持力に対する地盤抵抗係数 (0.3~1.0)

f_{rf} と f_{rp} の値は限界状態によって決まる。

以下、設計鉛直支持力 R_{vd} を計算するための各係数についての説明を示す。

最大周面摩擦力

単杭の最大周面摩擦力 R_f は、

$$R_f = U \sum r_i l_i \quad (4.3)$$

ここで、 U : 杭の周長(m)

r_i : 各土層の杭の最大周面支持力度(kN/m²)

l_i : 各土層の厚さ(m)である。

最大周面支持力度 r の算定は、打込み杭と場所打ち杭で異なり、打込み杭の場合最大周面支持力度 r は

$$\text{砂質土} : r = 3N + 30 < 150 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.4)$$

$$\text{粘性土} : r = q_u / 2 \text{ または } 10N < 150 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.5)$$

ここで、 r : 土層の最大周面支持力度(kN/m²)

N : 土層の N 値

q_u : 粘性土層の一軸圧縮強さ(kN/m²)である。

場所打ち杭の場合、最大周面支持力度 r は

$$\text{砂質土} : r = 5N < 200 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.6)$$

$$\text{粘性土} : r = q_u / 2 \text{ または } 10N < 150 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.7)$$

基準先端支持力

単杭の基準先端支持力 R_p は、

$$R_p = q_p A_p \quad (4.8)$$

ここで、 q_p : 単杭の基準先端支持力度(kN/m²)

A_p : 単杭の先端面積(m²)である。

打込み杭の場合、単杭の基準先端支持力度 q_p は

$$\text{砂質土} \quad : q_p = 300N < 10000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.9)$$

$$\text{砂礫} \quad : q_p = 300N < 15000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.10)$$

$$\text{硬質粘性土 or 軟岩} \quad : q_p = 4.5 q_u \text{ または } 100N < 20000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.11)$$

場所打ちの場合、単杭の基準先端支持力度 q_p は

$$\text{砂質土} \quad : q_p = 300N < 3500 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.12)$$

$$\text{砂礫} \quad : q_p = 100N < 7500 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.13)$$

$$\text{硬質粘性土 or 軟岩} \quad : q_p = 3 q_u \text{ または } 60N < 9000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.14)$$

ここで、 N : 土層の N 値

q_u : 杭先端地盤における一軸圧縮強さ(kN/m²)である。

(2) 道路橋示方書・同解説²⁾

杭の許容支持力は、

$$R_a = \frac{\gamma}{n}(R_u - W_s) + W_s - W \quad (4.15)$$

ここで、 R_a : 杭頭における杭の軸方向許容押し込み支持力(kN)

n : 安全率(2~4)

γ : 推定法の相違による安全率

(支持力算定法 : 1.0, 鉛直載荷試験 : 1.2)

R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力

W_s : 杭で置換えられる部分の土の有効重量(kN)

W : 杭および杭内部の土の有効重量 (kN)である。

とする。

極限支持力 R_u の支持力推定式は

$$R_u = q_d A + U \sum L_i f_i \quad (4.16)$$

ここで、 A : 杭の先端面積(m²)

q_d : 杭先端における単位面積当たりの極限支持力度(kN/m²)

U : 杭の周長(m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚(m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面支持力度(kN/m²) である。

杭先端における極限支持力度 q_d の推定は、**図-4.2** の打込み杭(N 値は 40 を上限とする)と**表-4.2** の場所打ち杭のように行う。

杭周面に働く最大周面摩擦力度 f_i の推定法は

打ち込み工法

$$\text{砂質土} : 2N (< 100) \quad (4.17)$$

$$\text{粘性土} : c \text{ または } 10N (< 150) \quad (4.18)$$

場所打ち工法

$$\text{砂質土} : 5N (< 200) \quad (4.19)$$

$$\text{粘性土} : c \text{ または } 10N (< 150) \quad (4.20)$$

となる。

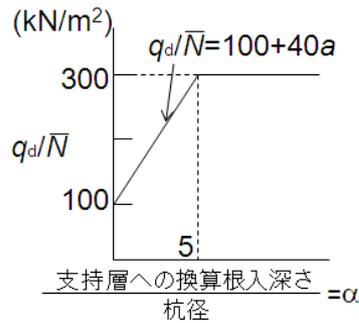


図-4.2 打込み杭の極限支持力度算定手法

表-4.2 場所打ち杭の極限支持力度算定手法

地盤種類	杭先端の極限支持力度(kN/m ²)
砂れき層および砂層 (N>30)	3000
良質な砂れき層 (N>50)	5000
硬質粘土層	3q _u

ただし、q_uは一軸圧縮強度(kN/m²)、Nは標準貫入試験のN値

(3) 建築基礎構造設計指針³⁾

杭の終局支持力、すなわち極限支持力 R_u は、次式で表わされる。

$$R_u = R_p + R_f \quad (4.21)$$

$$R_p = q_p A_p \quad (4.22)$$

$$R_f = R_{fs} + R_{fc}, \quad R_{fs} = \tau_s L_s \phi, \quad R_{fc} = \tau_c L_c \phi \quad (4.23)$$

ここで、R_p：極限先端支持力

q_p：極限先端支持力度(kN/m²)

A_p：杭の先端面積(m²)

R_f：極限周面摩擦力(kN)

R_{fs}：砂質土部分の極限周面摩擦力 (kN)

R_{fc}：粘性土部分の極限周面摩擦力 (kN)

τ_s：砂質土の極限周面摩擦力度 (kN/m²)

τ_c：粘性土の極限周面摩擦力度 (kN/m²)

L_s：砂質土部分の長さ(m)

L_c：粘性土部分の長さ(m)

φ：杭周の長さ (m)である。

また、極限先端支持力度 q_p (kN/m²)と極限周面摩擦力度 τ (kN/m²)の算定手法について表-4.3 に示す。

(4) 港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁾

杭基礎の静的最大軸方向押込み抵抗力は、次のように表わす。

$$P_0 = R_p + R_f = R_t \quad (4.24)$$

ここで、P₀：軸方向押込み荷重

R_p：杭の先端抵抗力

R_f：杭の周面摩擦力である。

$$R_{pd} = \gamma_{Rp} R_{pk}, \quad R_{fd} = \gamma_{Rf} R_{fk} \quad (4.25)$$

表-4.3 極限先端支持力度と極限周面摩擦力度の算定

	極限先端支持力度 q_p (kN/m ²)		極限周面摩擦力度 τ (kN/m ²)	
	砂質土	粘性土	砂質土 τ_s	粘性土 τ_c
打込み杭	$q_p=300\bar{N}$ \bar{N} :杭先端から下に 1d, 上に4d間の平均 N 値(d:杭径)	$q_p=6c_u$ c_u :土の非排水せん 断強さ(kN/m ²)	$\tau_s=2.0N$ N :杭周面地盤の平均 N 値 (上限 $N=50$)	$\tau_c=\beta c_u$ $\beta=\alpha_p L_f$ $\alpha_p:0.5-1.0$ $L_f:0.7-1.0$ (上限 $c_u=100$ (kN/m ²))
	$q_p=0.7q_c$ q_c :杭先端から下に1d, 上に4d間の平均 q_c 値(kN/m ²)(q_c :静的貫入試験結果)			
	上限値 $q_p=18000$ (kN/m ²)			
場所打ち コンク リート杭	$q_p=100\bar{N}$ \bar{N} :杭先端から下に 1d, 上に4d間の平均 N 値(d:杭径)	$q_p=6c_u$ c_u :土の非排水せん 断強さ(kN/m ²)	$\tau_s=3.3N$ (上限 $N=50$)	$\tau_c=c_u$ (上限 $c_u=100$ (kN/m ²))
	上限値 $q_p=7500$ (kN/m ²)			
埋込み杭	$q_p=200\bar{N}$ \bar{N} :杭先端から下に 1d, 上に4d間の平均 N 値(d:杭径)	$q_p=6c_u$ c_u :土の非排水せん 断強さ(kN/m ²)	$\tau_s=2.5N$ (上限 $N=50$)	$\tau_c=0.8c_u$ (上限 $c_u=125$ (kN/m ²))
	上限値 $q_p=12000$ (kN/m ²)			

添え字 k および d は、それぞれ特性値および設計用値を示す。

α_p, α_f : 0.4-0.66 の部分係数。(添え字 p, f は係数の各条件を表している。)

打撃工法による打ち込み杭の先端支持力は砂質土地盤で、

$$\text{砂質土地盤} : R_{pk} = 300N A_p \quad (4.26)$$

ここで、 R_{pk} : 杭先端の抵抗力特性(kN)

A_p : 杭先端の有効面積(m²)

N : 次のように定義された N 値 $N = \frac{N_1 + \bar{N}_2}{2}$ ($N_1 (<50)$: 杭先端位置での N 値、 $\bar{N}_2 (<50)$: 杭先端より上方へ $4B$ までの範囲内の平均 N 値)

B : 杭の直径または幅(m)

$$\text{粘性土地盤} : R_{pk} = 6c_p A_p \quad (4.27)$$

ここで、 c_p : 杭先端位置での非排水せん断強度(kN/m²)

打撃工法による杭周面抵抗力は、

$$R_{fk} = \sum \bar{r}_{fki} A_{si} \quad (4.28)$$

ここで、 R_{fk} : 杭周面抵抗力の特性値(kN)

\bar{r}_{fki} : i 層の平均周面抵抗力(kN/m²)

A_{si} : i 層の杭周面積(m²)である。

また、砂質土地盤では、

$\bar{r}_{fki} = 2\bar{N}$ (\bar{N} : i 層の平均 N 値)

粘性土地盤では $\bar{r}_{fki} = \bar{c}_a$ (\bar{c}_a : i 層の平均付着力(kN/m²))である。

砂質土地盤中に打ち止めされた杭の先端支持力理論によって推定する方法もある。

中掘り杭など打込み杭以外では、鉛直載荷実験を行い、抵抗力特性を確認することが望ましい。抵抗力を推定するのに道路橋示方書・同解説を参考とする。

港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)には、木材の性能照査設計もあり、木杭の継手では、木杭の継手は、水平力または引抜き力が作用する場合には用いないことが望ましい。また、木杭の先端では、木杭の先端は、通常、三面形又は四面形に切り、打込み抵抗を少なくする。礫や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付けるなどの記述がある。

(5) 杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き⁵⁾

単杭とした場合の検討

$$Q_a = \alpha_p Q_p + \alpha_f Q_f > V \quad (4.29)$$

ここで、 Q_a : 杭1本当たりの許容鉛直支持力

Q_p : 単杭の基準先端支持力

Q_f : 単杭の基準周面支持力

α_p, α_f : 各荷重状態に対する安全係数

V : 各荷重状態における杭1本あたりの作用鉛直力である。

さらに、

$$\text{砂質土の場合: } Q_p = 30NA_p \quad (4.30)$$

$$\text{粘性土の場合: } Q_p = 4.5q_u A_p \text{ または } 10NA_p \quad (4.31)$$

ここで、 A_p : 杭の先端面積

N : 杭先端地盤における N 値

q_u : 杭先端地盤における一軸圧縮強さである。

$$\text{砂質土の場合: } Q_f = U \sum f_i l_i \quad (f = 0.3N + 3 \leq 5 \text{ (tf/m}^2\text{)}) \quad (4.32)$$

$$\text{粘性土の場合: } Q_f = U \sum f_i l_i \quad (f = q_u / 2 \text{ または } N \leq 5 \text{ (tf/m}^2\text{)}) \quad (4.33)$$

ここで、 U : 杭の周長

f_i : 各土層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である。

ただし $N < 2$ (沖積粘土)、 $q_u \leq 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の土層が存在する場合には、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ものとする。

(6) 各設計基準の比較

表-4.4 は、本節で使用した式で、打込み杭の基準値を比較した表である。また、表-4.5 に、安全率を見込んだ正味の先端と周面最大支持力度を示す。具体的には、下記のとおりである。

・鉄道構造物等設計標準・同解説

式(4.1)と式(4.2)の γ と f_{fr} or f_{fp} より安全率を 0.25~1 と見込む。

先端支持力度については式(4.9)と式(4.10)、式(4.11)の最大値を用いて下記のように計算する。

$$\text{砂} : (0.25 \text{ or } 1) \times 10,000 = 2,500 \text{ or } 10,000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{砂礫} : (0.25 \text{ or } 1) \times 15,000 = 3,750 \text{ or } 15,000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{粘性土 or 軟岩} : (0.25 \text{ or } 1) \times 20,000 = 5,000 \text{ or } 20,000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

周面支持力度も式(4.4)と式(4.5) の最大値を用いて同様に計算する。

$$\text{砂質土} : (0.25 \text{ or } 1) \times 150 = 37.5 \text{ or } 150 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{粘性土} : (0.25 \text{ or } 1) \times 150 = 37.5 \text{ or } 150 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

・道路橋示方書・同解説

式(4.15)の γ と n より安全率を 0.25~0.6 と見込む。

先端支持力度は、図-4.2 より最大値を決めて計算を行う。

$$(0.25 \text{ or } 0.6) \times 12,000 = 3,000 \text{ or } 7,200 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

表-4.4 各設計における極限先端支持力度と極限周面摩擦力度算定のための N 値等の比較表

		鉄道構造物等設計 標準・同解説 (2000)	道路橋示方書・ 同解説 (2002)	建築基礎構造 設計指針 (2001)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説 (2007)
先端 支持 力度	砂質土	$N < 33$	$N < 40$	$N < 60$	$N < 50$
	砂礫	$N < 50$		-	-
	硬質粘性土 &軟岩	$q_u < 4400, N < 200$		$c_u < 3000$	c_p
周面 支持 力度	砂質土	$N < 40$	$N < 50$	$N < 50$	N
	粘性土	$q_u < 300, N < 15$	$N < 15$	$c_u < 100$	c_a

(単位 : kN/m²)

表-4.5 各設計における安全率込みの正味最大支持力度

		鉄道構造物等設計 標準・同解説 (2000)	道路橋示方書・ 同解説 (2002)	建築基礎構造 設計指針 (2007)	港湾の施設の技術上の 基準・同解説 (2007)
先端支 持力度	砂質土	$2,500 < q_p < 10,000$	$3,000 < q_d < 7,200$	$q_p < 18,000$	$6,000 < q_p < 9,900$
	砂礫	$3,750 < q_p < 15,000$			-
	硬質粘性土 &軟岩	$5,000 < q_p < 20,000$			
周面支 持力度	砂質土	$37.5 < r_f < 150$	$25 < f_i < 60$	$\tau_s < 100$	
	粘性土	$37.5 < r_f < 150$	$37.5 < f_i < 90$	$\tau_c < 100$	

(単位 : kN/m²)

周面支持力度も式(4.17)と式(4.18) の最大値を用いて同様に計算する。

$$\text{砂質土} : (0.25 \text{ or } 0.6) \times 100 = 25 \text{ or } 60 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{粘性土} : (0.25 \text{ or } 0.6) \times 150 = 37.5 \text{ or } 90 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

- ・ 建築基礎構造設計指針

表-4.3 から抜粋した値を記載している。

- ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説

式(4.25)より、部分係数を 0.4-0.66 とし、式(4.26)より N 値を最大 50、 $A_p=1.0$ とした場合の計算を行っている。さらに、表-4.6 に、各設計から使用条件に応じた安全率を示す。

表-4.6 各設計における安全率

	建築 (2007)	鉄道 (2000)	道路橋(2002)		港湾(2007)		パイルネット (2000)
			支持杭	摩擦杭	先端	周面	
常時	-	-	3	4	-	-	2
長期使用限界 状態	-	10/3	-	-	-	-	-
暴風時, レベル 1 地震時	-	-	2	3	-	-	1.43
使用限界状態	3	2.5	-	-	-	-	-
損傷限界状態	1.5	-	-	-	-	-	-
レベル1地震 動に関する変 動状態	-	-	-	-	100/66 (2)	100/66	-
終局限界状態	1	2	-	-	-	-	-
地震時使用限 界状態	-	10/6	-	-	-	-	-
地震時終局限 界状態	-	1	-	-	-	-	-

() 内の数値は、不完全と思われる支持層内に杭先端を止める場合

4.3 木材基礎が記載されている設計方法の事例

4.3.1 農業土木

(1) 仕様書等における木杭基礎に関する記載

土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書・技術書⁶⁾において、松杭の使用条件として以下のように記載されている。

「水路の杭基礎として松杭を使用する場合の杭径は末口径とし、他の摩擦杭に準じた設計を行ってよい。ただし、松杭は原則として常時地下水面下となる地盤で使用する。」

また、農林水産省の土木工事共通仕様書⁷⁾において、3-4-2 既製杭工の節で木杭工について以下のように記載されている。

「受注者は、基礎杭丸太の材質について設計図書に示されていない場合、樹皮をはいだ生松丸太とし、有害な曲がり、腐朽、裂目等欠点のない材料を使用しなければならない。また、杭の曲がり、両端の中心を結ぶ直線から外れないものを使用しなければならない。」

「杭の先端は、角錐形に削るものとし、角錐の高さは杭径の1.5倍を標準とする。杭頭は、杭の中心線に対して直角に切らなければならない。」

(2) 農業土木における木杭基礎の設計指針

農業土木における木杭基礎の設計指針は一般には農林水産省土地改良計画設計基準が用いられるが、各地方自治体でも独自に設計指針を策定・利用している。ここでは、沖積平野を抱える佐賀県と新潟県における設計指針を紹介する。

佐賀県県土づくり本部は、これまで使用していた水路用ボックスカルバートの木杭—底盤系基礎～設計マニュアル（第1版、平成17年制定）を2010年（平成22年）改訂した。これには農業土木分野だけでなく土木分野の産・官・学の技術者や研究者が関わっている。その主な改訂点は以下のようである。

主な改訂点

設計マニュアル改訂版の基本的な考え方は第1版と変わらないが、留意すべき主な改訂点は次の通りである。

- a) ボックスカルバートに作用する荷重のうち水重は特別な場合を除いて考慮しないこと。
- b) 施工中の安全性照査においては、木杭の周面支持力（安全率1.0、第1版）に加え、底盤の支持力を2.0として考慮してよいこと。
- c) 適用範囲：内空寸法1m×1m程度以上で3m×3m程度までの水路用ボックスカルバートに加えて、360°コンクリート基礎のパイプカルバートにも適用できるものとする。
- d) 木杭の末口径と長さ：設計において木杭寸法を決める際に木杭の生産・流通の実態との整合を図った（水路用ボックスカルバートの木杭—底盤系基礎～設計マニュアル（改訂版）⁸⁾「1.5 木杭末口径の考え方」pp.7-8を参照）。
- e) 使用した記号・用語：姉妹品として2008年9月（平成20年9月）に発刊した「プレキャストL型擁壁（H 2m）の木杭—底盤系基礎設計マニュアル（第1版）」との整合を図っている。

適用範囲（従来と同じ）

以下の全てに該当する場合に適用する。

- a) 沈下を許容する設計条件である。
- b) 内空段面は、1m×1m～3m×3m程度とする。
- c) 対象は県土づくり本部発注事業とする。ただし、国土交通省所管事業の場合、当面、県単独事業に

限る。

新潟県農地部は、基礎木杭の設計にあたっての基本的な考え方、設計、施工及び施工管理方法について以下のように策定している⁹⁾。

基礎木杭は土木構造物の基礎としての支持力を期待するものとする：・鉛直荷重のみを考慮し杭頭部は拘束されていない構造とする・樹種は針葉樹（マツ、スギ）とする・また木杭の選定に当たっては県産材の利用促進に努めるものとする。

基礎木杭の設計方針：摩擦杭に準じた設計を行うものとするが以下の点を考慮する・先端抵抗力を考慮するものとする・許容支持力算定にあたっての安全率は3とするものとする・周面摩擦力算出にあたって N 値 2 以下の層でも最大周面摩擦力度を N 値から推定できるものとする。

許容支持力の算定方法：1本の木杭の許容支持力は、地盤から決まる杭の極限支持力に対し、安全率 $n=3$ （常時・摩擦杭の場合、地震時の設計は対象としない）を確保して次式により算出する。

$$R_a = (1/n)R_u$$

ここで、 R_a ：杭の許容支持力（kN）

n ：安全率（=3）

R_u ：地盤から決まる杭の極限支持力（kN）

地盤から決まる杭の極限支持力：

$$R_u = q_d \times A + U \times (L_i \times f_i)$$

ここで、 R_u ：地盤から決まる杭の極限支持力（kN）

q_d ：杭先端における単位面積当たりの極限支持力（kN/m²）

A ：杭先端面積（m²）

U ：杭の周長（m²）

L_i ：周面摩擦力を考慮する層の層厚（m）

f_i ：周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度（kN/m²）。

杭先端の極限支持力度（ q_d ）の算出：杭先端の極限支持力度は次式により算定する。

$$\overline{q_d} / \overline{N} = 100 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

ここで、 \overline{N} ：杭先端地盤の設計用 N 値

$$\overline{N} = (N_1 + \overline{N}_2) / 2$$

N_1 ：杭先端位置の N 値

\overline{N}_2 ：杭先端から上方へ $4D$ の範囲における平均 N 値

周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 f_i （kN/m²）の算出（打込み杭工法）：

砂質土に対して $f_i = 2N$ （100）

粘質土に対して $f_i = c$ 又は $10N$ （150）（ c は地盤の粘着力(kN/m²)、 N は標準貫入試験の N 値）

(3) 農業土木における木杭基礎の設計・施工例

佐賀県県営ほ場整備事業（2004年（平成16年3月））¹⁰⁾

基礎の検討における基礎工設計方針は「暗渠工・合流工の基礎工は基礎地盤の支持力を算定し、支持力が不足する場合には不足分を松杭（摩擦杭）により支持させることとする。但し、基礎地盤の支持力のみで支持できる場合であっても近傍地区の施工事例から、安全のため松丸太 150、 $L=5.0\text{m}$ を @1.5m で配置する。基礎地盤の長期許容支持力度は次式により算定する。

$$q_a = (1/3) (\cdot c \cdot N_c + \cdot 1 \cdot B \cdot N + \cdot 2 \cdot D_f \cdot N_q)$$

ここで、 q_a ：長期許容支持力度（kN/m²）

c : 基礎地盤面下の粘着力 (kN/m²)
 γ_1 : 基礎地盤面下にある土の単位体積重量 (kN/m³)
 γ_2 : 基礎地盤面上にある土の単位体積重量 (kN/m³)
 α, β : 形状係数 (表-4.7、 B : 長方形の短辺長、 L : 長方形の長辺長)
 N_c, N, N_q : 支持力係数 (表-4.8、内部摩擦角 ϕ の関数)
 D_f : 基礎に近接した最低地盤面から基礎荷重面までの深さ (m)
 B : 基礎荷重面の最小幅 (m)。

表-4.7 α 及び β の値

基礎荷重面の形状	連続	正方形	長方形
	1.0	1.3	$1+0.3B/L$
	0.5	0.4	$0.5-0.1B/L$

表-4.8 支持力係数

	N_c	N	N_q
0°	5.3	0.0	3.0
5°	5.3	0.0	3.4
10°	5.3	0.0	3.9
15°	6.5	1.2	4.7
20°	7.9	2.0	5.9
25°	9.9	3.3	7.6
28°	11.4	4.4	9.1
32°	20.9	10.6	16.1
36°	42.2	30.5	33.6
40° 以上	95.7	114.0	83.2

佐賀県営経営体育成基盤整備事業（2008年（平成20年））¹¹⁾

本事業は、農業用排水路を整備改善し、農作業の効率化及び維持管理の簡素化を目的として地区全体の用排水路を幹線水路・支線水路・小水路の3タイプに分けて、法面崩壊部の保護を行うため、木柵工の検討を行ったものである。参照した適用基準は表-4.9による。

○設計計画

基本条件の検討：検討の標準図を図-4.3に示す。

- ・法面の崩壊高さについて：
幹線水路部は、約1.0m程度（計算上0.95m）とする。支線水路は、約0.7m程度とする。
小水路は、0.3m程度とする。
- ・小段幅について：
幹線・支線水路は、0.5mとし小水路は、0.3mとする。
- ・設計地盤面の考え：
軟弱地盤の場合0.5m下げるとの考えがあるが、今までの施工済区間での実績等を踏まえ、その多くが形状を維持している事等を考慮し、杭柵工については、その1/2の0.25mを用い計算を行う。

表-4.9 参考にした適用基準

名 称	編 集 ・ 監 修	制改定年月
土地改良事業計画設計基準—設計『水路工』	農 業 土 木 学 会	平成13年2月
土地改良事業計画設計基準—設計『農道』	農 業 土 木 学 会	平成17年3月
土地改良事業計画設計基準—設計『ダム』	農 業 土 木 学 会	平成15年4月
コンクリート標準示方書	土 木 学 会	平成14年3月
セメント系固化工材による地盤改良マニュアル第3版	セ メ ン ト 協 会	平成15年9月
調査・測量・設計業務共通仕様書	佐賀県県土づくり本部	平成20年1月

- ・残留水位の考え方：
崩壊地盤面までの高さ (h_1+h_2) の1/3 に 設計地盤面0.25mを加算
幹線 $1.15/3m + 0.25m = 0.63m$ 0.65m
支線 $0.85/3m + 0.25m = 0.53m$ 0.55m、
小水路 $0.45/3m + 0.25m = 0.40m$
- ・上載荷重：
幹線道路($W=5.5m$ 以上)：10kN/m²
幹線道路($W=4.0m$ 以上5.5m未満)：7kN/m²
道路($W=4.0m$ 未満)：5kN/m²
耕作地（トラクター荷重）：5kN/m²
- ・路部の荷重載荷位置（肩からの離れ位置）：
幹線道路は、ガードレール等を考慮し0.8mとする、路肩の考えより農道のため、0.25m取る。
- ・畦畔について：

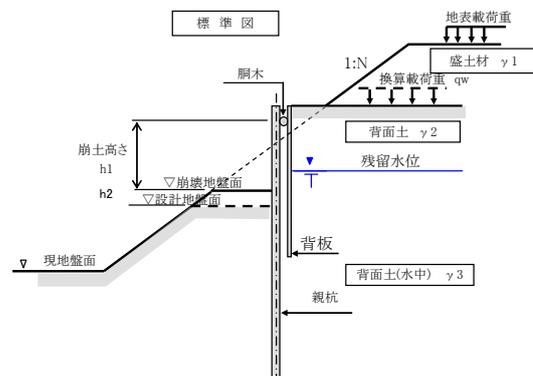


図-4.3 設計標準図

当地区は、現地調査の結果畦畔幅が $W=1.0\text{m}$ あり、計算上、肩端部より 1.2m 離れで計算する。なお、小水路は、 50cm する。(計算 0.7m)

・土の単位体積重量について：

道路部 $\gamma_1=18\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_2=15\text{kN/m}^3$ (多少圧密を受けた地山と見なす)

水中 $\gamma_1'=9\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_2'=6\text{kN/m}^3$

耕作地 $\gamma_1=18\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_2=14\text{kN/m}^3$

水中 $\gamma_1'=9\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_2'=5\text{kN/m}^3$

・地盤の条件：

粘性地盤の粘着力 $c=10\text{kN/m}^2$ 、

変形係数($\gamma \cdot E_0$)= 2100kN/m^2 ($210 \cdot c=210 \times 10=2100$ より算出)

圧密平衡係数 $K_c=0.3$

・許容応力度：

木材の種類は、佐賀県産材の利用促進を進めるため、スギ材とし曲げ許容応力度 $\sigma_a=7.0\text{N/mm}^2$ とする。安定が保てない場合、マツ材 ($\sigma_a=9.0\text{N/mm}^2$) の使用を検討する。

・使用材料の考え方：

胴木 最少 90mm を用いる

脊板 (厚さ) 幹線、支線： 24mm 、小水路： 15mm

○用排水路タイプ及び断面形状の検討

先の計算条件に基づき、各用排水路の形状を図-4.4 と図-4.5 に示す。

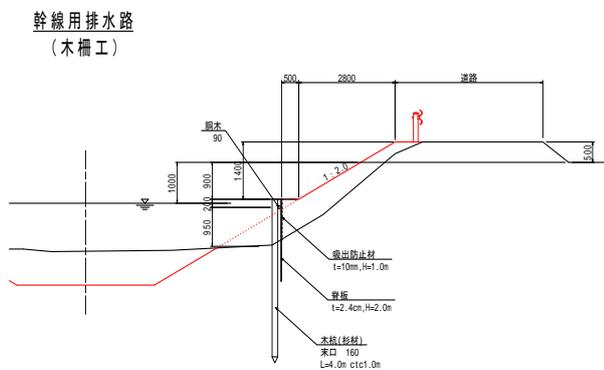


図-4.4 幹線用排水路木柵工断面図

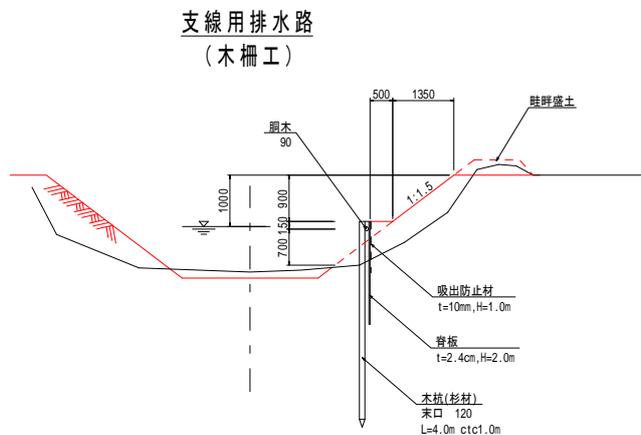


図-4.5 支線用排水路木柵工断面図

4.3.2 小規模建築物

(1) 設計方針

小規模建築物に用いられる木杭は小口径杭工法としての位置付けがされており¹²⁾、荷重データ、地盤データ、施工現場の敷地状況、搬入路の状況及び使用する施工機械の性能に加え、杭頭深度と常水面深さの関係などを総合的に判断し、設計を行う。また、施工完了後は載荷試験によってその支持力を確認する。図-4.6 にその設計フローを示す¹³⁾。なお、小規模建築物に用いられる木杭の設計は建築物の荷重データ、地盤データ、施工現場の敷地状況および搬入路の状況、使用する施工機械の性能に加え、杭頭と常水面深さとの関係などの確認を行い、総合的に判断し、設計を行う。また、施工完了後は載荷試験によってその支持力を確認する。図-4.6 にその設計フローを示す。なお、小規模建築物とはRC3階建て以下を言う。

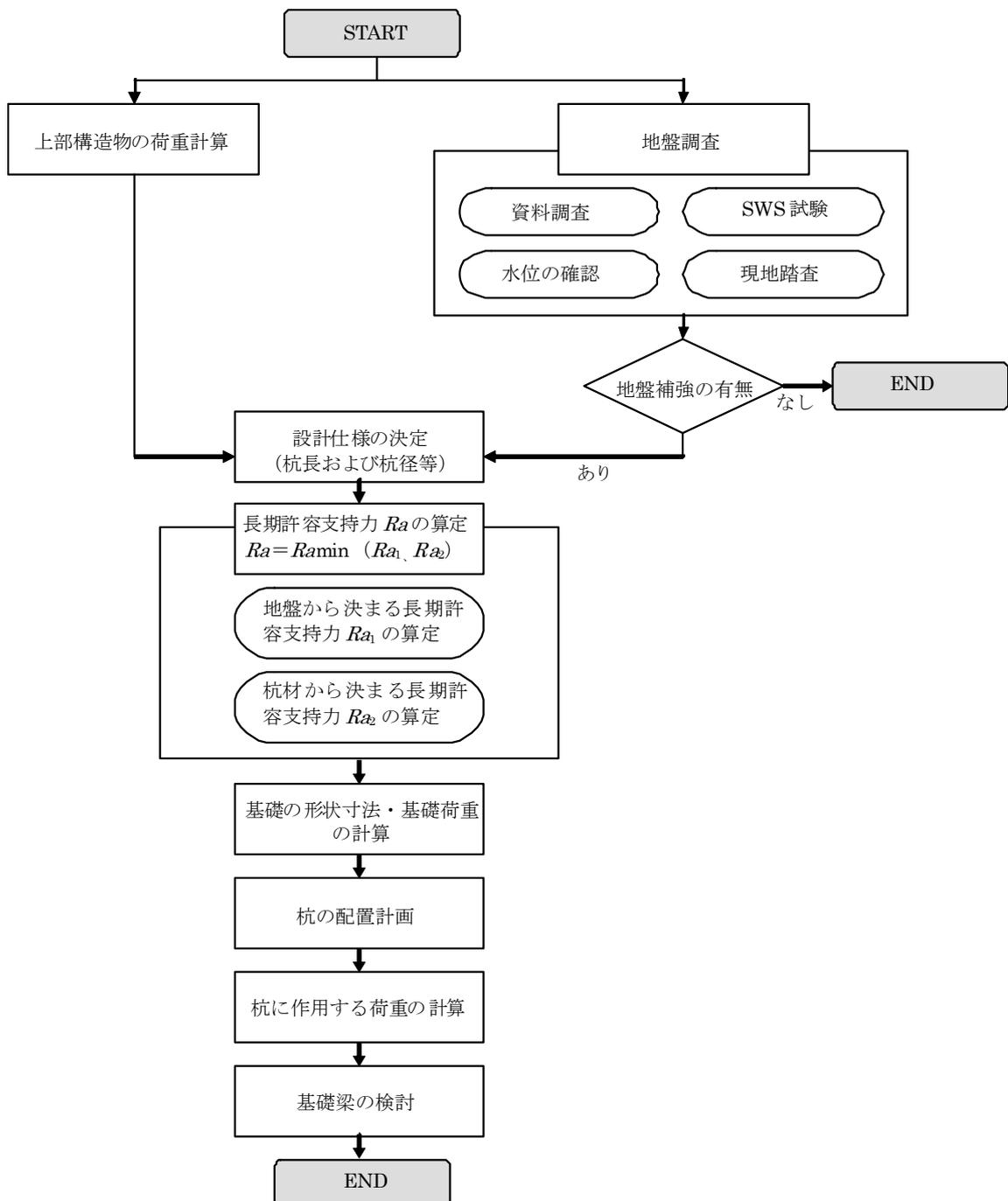


図-4.6 木杭の設計フロー

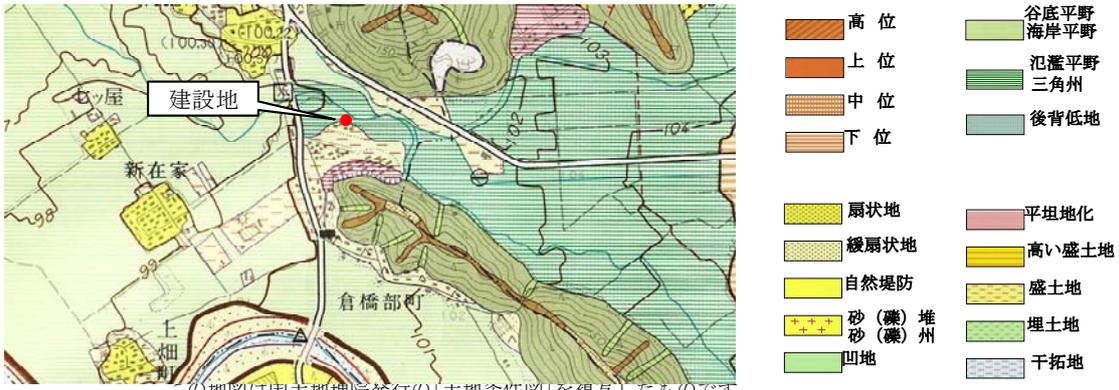
(2) 鉛直支持力の検討

ここでは、(1)の方針のもと設計事例を紹介する。

地盤概要

図-4.7 に敷地周辺の土地条件図を示す。敷地東側は後背湿地が広がっている軟弱な地盤となっていて、主に水田として利用されている。土地条件図によれば、当敷地はその東側の後背湿地の上に盛土された造成地であることが分かり、現地踏査においても側溝の蛇行、前面道路のひび割れなど不均質で軟弱な地盤で不同沈下の可能性を示す現象が見られた。

周辺の既存ボーリングデータおよび図-4.8 に示すスウェーデン式サウンディング試験（以下、SWSと記す）試験の結果から次のように地盤の構成が推定された。



この地図は国土地理院発行の「土地条件図」を複写したものです

図-4.7 敷地周辺の土地条件図

JIS A 1221 スウェーデン式サウンディング試験																			
調査名		様所				試験日		2009年10月22日											
調査位置		試験者				試験者													
測点 No		1		標高		調査深度		8m 地下水位 0.5m											
荷重# kN	半回転数 No	貫入深さ D m	貫入量 L cm	1mあたり 半回転数 Nsw	記事	推定土質 柱状図	fsw						換算 N値						
							0.25	0.5	0.75	1.00	20	40	60	80	100	120	140	160	
1.00	2	0.25	0.25	8															2.54
1.00	4	0.50	0.25	16	レキにあたる														3.07
1.00	0	0.75	0.25	0	緩自沈														3.00
0.75	0	1.00	0.25	0	緩自沈														2.25
0.75	0	1.25	0.25	0	緩自沈														2.25
0.50	0	1.50	0.25	0	緩自沈														1.50
0.50	0	1.75	0.25	0	緩自沈														1.50
0.75	0	2.00	0.25	0	緩自沈														2.25
0.75	0	2.25	0.25	0	緩自沈														2.25
0.7	0	2.50	0.25	0	緩自沈														2.2
0.75	0	2.75	0.25	0	緩自沈														2.25
1.00	0	3.00	0.25	0	緩自沈														3.00
1.00	1	3.25	0.25	4															3.20
1.00	8	3.50	0.25	32															4.60
1.00	9	3.75	0.25	36															4.80
1.00	8	4.00	0.25	32															4.60
1.00	10	4.25	0.25	40															5.00
1.00	10	4.50	0.25	40															5.00
1.00	12	4.75	0.25	48															5.40
1.00	21	5.00	0.25	84															7.20
1.00	22	5.25	0.25	88															7.40
1.00	24	5.50	0.25	96															7.80
1.00	22	5.75	0.25	88															7.40
1.00	25	6.00	0.25	100															8.00
1.00	20	6.25	0.25	80															7.00
1.00	23	6.50	0.25	92															7.60
1.00	24	6.75	0.25	96															7.80
1.00	24	7.00	0.25	96															7.80
1.00	23	7.25	0.25	92	砂音														8.16
1.00	30	7.50	0.25	120	砂音														10.04
1.00	40	7.75	0.25	150	砂音														12.05
1.00	45	8.00	0.25	150	砂音														12.05

共通書式に

図-4.8 スウェーデン式サウンディング試験のデータ

- ・表層部 0.5m までは盛土であり、表層部より 0.5m から 3.0m まで連続して $W_{sw}=0.5\text{kN}\sim 1.0\text{kN}$ で自沈する粘性土層がある。
- ・3.0～7.00m においては $N_{sw}=4\sim 76$ の自沈のない粘性土層がある。
- ・7.00m より下部の地盤は $N_{sw}=92$ 以上の砂質土地盤が連続している。

木杭の諸元

杭材は強靱さおよび真直な材料が求められることから、「ベイマツ（無等級品）」を採用する。告示 H12-1452 第七号によりベイマツの圧縮に対する基準強度 F_c は、 22.2N/mm^2 と定められており、また、建築施行令第 89 条により木杭の長期に生ずる力に対する許容応力度は $1.1F_c/3$ の 70%（含水率影響係数）としていることから繊維方向の長期許容圧縮応力度 f_c は下記の通りとする。

$$f_c = 1.1F_c/3 \times 10^3 \times 0.7 = 1.1 \times 22.2/3 \times 10^3 \times 0.7 = 5698 \quad 5000 \text{ kN/m}^2$$

また、耐久性を考慮し、防腐剤処理を行った用材を使用する。

木杭の長期許容鉛直支持力の検討

布基礎に木杭を用いるが、直接基礎としての支持力は見込まない。また、杭頭に作用する水平力によって生じる曲げモーメントが布基礎に伝達しないよう杭頭部は基礎スラブと杭頭間には 100mm の厚さの砕石を敷く。従って、水平力は考慮しないものとし、長期許容鉛直支持力 R_a は以下の式 (4.34) により算定する。

$$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2}) \quad (\text{kN}) \quad (4.34)$$

ここで、
 R_a : 木杭の長期許容鉛直支持力 (kN)
 R_{a1} : 地盤から定まる木杭の長期許容鉛直支持力 (kN)
 R_{a2} : 杭材から決まる木杭の長期許容圧縮力 (kN)

a) 地盤から定まる長期許容鉛直支持力の検討

$$R_{a1} = \frac{1}{3}(R_p + R_f) \quad (4.35)$$

ここで、
 R_p : 木杭先端部における極限先端支持力 (kN)
 R_f : 木杭周面の地盤による極限摩擦力 (kN)

木杭先端部の下部地盤が砂質土の場合、小規模指針 (7.2.3) 式より

$$R_p = \alpha \times \bar{N} \times A_p \quad (4.36)$$

また、木杭先端部の下部地盤が粘性土の場合、小規模指針 (7.1.1) 式および (7.2.4) 式より

$$c = \frac{1}{2} \times q_u = \frac{1}{2} (45 \times W_{sw} + 0.75 \times N_{sw}) \quad (4.37)$$

$$R_p = 6 \times c \times A_p \quad (4.38)$$

ここで、
 α : 先端支持力係数, =200
 \bar{N} : 杭状補強地盤から下に 1 D, 上に 1 D の範囲における N 値の平均値
 D : 木杭末口径 (m)
 A_p : 木杭の先端断面積 (m^2)
 c : 木杭先端下部粘性土層の粘着力 (kN/m^2)
 q_u : 一軸圧縮強さ (kN/m^2)
 W_{sw} : 荷重の大きさ (kN)

N_{sw} : 貫入量 1m 当りの半回転数

ここで、木杭先端部の下部地盤が粘性土であるため、式 (4.37) により極限先端支持力を求める。
木杭先端の \overline{N}_{sw} は木杭先端から上に 1 D 下に 1 D の平均であるから (図-4.9 参照)、

$$\overline{N}_{sw} = (96 + 88) / 2 = 92$$

$$c = \frac{1}{2} (45 \times 1.00 + 0.75 \times 92) = 57.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

極限先端支持力は、

$$R_p = 6 \times 57.0 \times (0.17)^2 \times 3.14 / 4 = 7.8 \text{ (kN)}$$

また、極限周面摩擦力は小規模指針 (7.2.5) 式で算定される。

$$R_f = D \times \sum (\tau_d \times L_i) \times \pi \text{ (kN)} \quad (4.39)$$

ここで、 τ_d : 木杭に作用する各層の極限周面摩擦応力度 (kN/m²)
 で粘性土の場合 $\tau_d = c$
 砂質土の場合 $\tau_d = \frac{10}{3} N$ とする。

L_i : 各層の層厚 (m)

粘性土層 (0.5~5.25m)、このとき、 W_{sw} 0.5kN は算入しない。

$$\overline{W}_{sw} = (0.75 \times 6 + 1.0 \times 11) / 16 = 0.968$$

$$\overline{N}_{sw} = (4 + 32 + 36 + 32 + 40 + 40 + 48 + 84 + 88) / 16 = 25.25$$

平均粘着力は次の通りである。

$$c = (45 \times 0.968 + 0.75 \times 25.25) / 2 = 31.2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\tau_d = c = 31.2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

砂質土層 (対象なし)

よって、極限周面摩擦力は

$$R_f = 0.17 \times (31.2 \times 4.25 + 0) \times 3.14 = 70.78 \text{ (kN)}$$

なお、このときの粘性土層の L_i は W_{sw} 0.5 を除いた層厚とする。

以上の結果から、地盤によって決まる長期許容鉛直支持力は、

$$R_{a1} = 1/3 \times (7.8 + 70.78) = 26.1 \text{ (kN)}$$

b) 杭材から定まる長期許容圧縮力

木杭の長期許容圧縮力 R_{a2} は、

$$R_{a2} = f_c \times A_p \text{ (kN)} \quad (4.40)$$

ここで、 f_c : 木杭の長期許容圧縮応力度

$$R_{a2} = 5000 \times (0.17)^2 \times 3.14 / 4 = 113.4 \text{ (kN)}$$

以上より、木杭の長期許容鉛直支持力は次のようになる。

$$R_a = \min(R_{a1}, R_{a2}) = 26.1 \text{ (kN)}$$

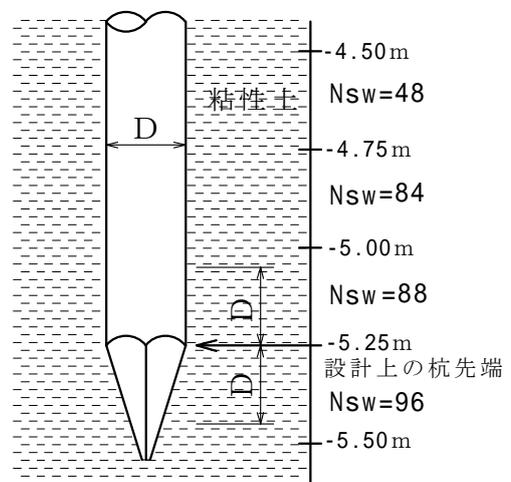


図-4.9 杭先端の概要

4.3.3 建築分野で使用されている木杭工法（環境パイル工法）

(1) 本工法の開発趣旨及び概要

木杭を用いた地盤補強技術は土木・建築分野の別なく大変古くから用いられており、多くの施工実績が報告されている。しかしながら、従来の技術においては、腐朽やシロアリ等に対する影響が懸念され、耐久性が著しく劣ると考えられていた。また、設計を行う際に必要になる支持力係数等の数値が明確化されていなかったため経験則により杭配置を行っていた。そこで、本工法では、弱点とされた耐久性に関しては、建築物の土台等の構造部材において利用されている防腐・防蟻処理技術を利用することにより耐久性を飛躍的に向上させるとともに多くの木杭（円柱状に加工した）に対して載荷試験を実施することで支持力機構を解明した。具体的に本工法は、円柱状に成形した木材を圧入専用重機にて地盤中に無回転で圧入し、これを地盤補強材として利用する工法である。また、本工法では、常水面で浅での木製補強材の利用を可能とするため、JAS 認定品もしくは AQ 認証品である防腐・防蟻処理を施した補強材を用いることとしている。さらに、補強材の確実な支持能力を確保するために、施工時の圧入力による品質管理を行うこととしている。

(2) 適用範囲

地盤補強材の諸元

本工法で使用する地盤補強材の材質はベイマツ、カラマツ、スギ及びヒノキであり、いずれも JAS に適合する目視等級二級以上の材料を用いることになっており、円柱状に加工された地盤補強材の外径は 120mm、140mm、160mm 及び 180mm のいずれかの径となっている。また、地盤補強材 1 本当たりの材長に関しては最大で 6.0m となっている。

防腐・防蟻薬剤

本工法で使用する地盤補強材に加圧注入される防腐・防蟻薬剤は表-4.10 に示されたものである。

表-4.10 環境パイル工法の地盤補強材に加圧注入される薬剤

使用する薬剤	CUAZ（銅・アゾール化合物系木材保存剤） ACQ（銅・第四級アンモニウム化合物系木材保存剤）
薬剤の状態	水溶性
薬剤の品質	薬剤の品質は、「木材保存剤」（JIS K 1570）に準ずる
薬剤の注入方法	薬剤の処理方法は、「木材加圧式防腐処理方法」（JIS A 9002）とする
注入された地盤補強材の品質	注入された地盤補強材の品質は、「JAS 認定品」もしくは、「AQ 認証品（優良木質建材等認証）」 ¹⁾ とする

1)：(財)日本住宅・木材技術センター

施工上の適用範囲

本工法の最大施工深さは外径 120mm、160mm 及び 180mm に関しては 6m（継手不可）、外径 140mm に関しては 12m（継手 2ヶ所まで可能）となっている。また、適用地盤としては、先端地盤が粘性土地盤、砂質土地盤及び礫質土地盤となっており、周面地盤においては、粘性土地盤及び砂質土地盤である。また、適用建物として、地上 3 階以下、建築物高さ 13m 以下、軒高 10m 以下、延べ面積 2,500m² 以下及び 2m 以下の擁壁に限られる。

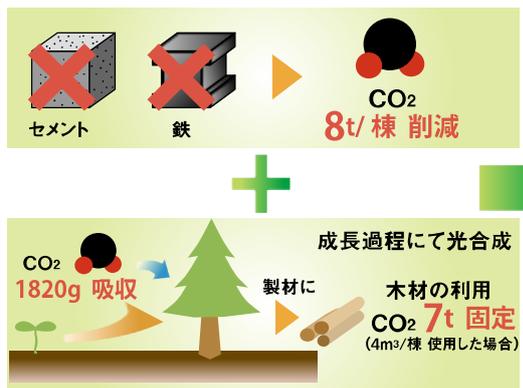


図-4.10 従来工法から環境パイル工法に変更した場合のCO₂排出量削減効果イメージ図

表-4.11 針葉樹の構造用製材のJASに適合する目視等級によるものの基準強度 (H12 建告 1452) (N/mm²)

区分	甲種構造材		乙種構造材	
	等級	圧縮	等級	圧縮
べいまつ	一級	27.0	一級	27.0
	二級	18.0	二級	18.0
からまつ	一級	23.4	一級	23.4
	二級	20.4	二級	20.4
すぎ	一級	21.6	一級	21.6
	二級	20.4	二級	20.4
ひのき	一級	30.6	一級	30.6
	二級	27.0	二級	27.0

(2) 来の地盤補強工法との比較

環境パイル工法が対象としている建物は既述の通り小規模建築物に限られるが、このような小規模建築物においては従来、バックフォー等の重機を用いて紛体状のセメント系固化材と現状地盤を攪拌し、平面上に改良地盤を築造する表層改良工法、専用の重機を用いて現状地盤中にスラリー状にしたセメント系固化材を地盤中に注入していき、混合攪拌することで円柱状の改良体を築造する柱状改良工法、既成杭（RC もしくは鋼管等）を支持層まで貫入する方法が用いられている。これらの工法は材料としてセメント系固化材や鉄を使用しており、材料の製造過程においては多くのCO₂が排出されている。例えば、セメント系固化材を1t製造するためには0.8tのCO₂が、鉄を1t製造するためには2tものCO₂が排出されていると言われて¹⁴⁾。一般的な住宅を考えた場合、柱状改良工法では約10tのセメント系固化材を使用し、鋼管杭の場合には約4tの鉄を使用するため、材料製造時に排出されるCO₂はいずれも8t/棟程度になると考えられる（図-4.10 参照）。これら既存の地盤補強工法に比べ、環境パイル工法は天然材料である木材を使用している。木材は成長過程において光合成を行い、CO₂の固定効果が得られる。一般的な小規模建築物の場合に環境パイル用の材料として約4m³程度の木材を使用することからそのCO₂固定効果は実に7t/棟にも上る。図-4.10 からもわかる通り、従来工法（柱状改良もしくは鋼管杭）から環境パイルに変更することによりCO₂削減効果が発揮できる。

(3) 本工法の支持力

地盤補強材の長期許容軸方向力

本工法に使用する木材は既述の通り、JAS に適合する目視等級二級以上の材料を用いることになっている。表-4.11 に示す通り、樹種毎の基準強度が JAS で定められており、この基準強度を用いて式 (4.41) より長期許容軸方向力を算定する。式 (4.41) 中の a 及び b は低減係数であるが、 a は継ぎ手による低減率であり、1ヶ所当り 20%の低減となり、最大で 40%の低減となる。また、 b は長さ径比による低減であり、施工長が 9.5m を超えた場合には長期許容軸方向力が低減される。

$${}_L R_a' = A_S \cdot {}_L f_C \cdot (1 - a - b) \quad (4.41)$$

ここで、 ${}_L R_a'$: 地盤補強材軸部の長期許容軸方向力 (kN)

A_S : 地盤補強材軸部の実断面積(m²)

${}_L f_C$: 長期許容圧縮応力度 (kN/m²)

$${}_L f_C = 1.1 \times F_C \times 0.7/3$$

F_C : 針葉樹の構造用製材の JAS に適合する目視等級によるものの

基準強度

a : 継ぎ手による低減率 (1 箇所当り 0.2、最大 2 箇所まで)

b : 長さ径比による低減率 $b = (\text{長さ}/\text{径}-70) / 100$

地盤補強材の長期許容鉛直支持力

本工法の長期許容鉛直支持力は式 (4.42) に示す通りであり、地盤補強材先端部の支持力係数 α_{sw} 、周面地盤が砂質土の場合の周面摩擦力係数 β_{sw} 及び周面地盤が粘性土の場合の周面摩擦力係数 γ_{sw} は多数の荷重試験結果より得られた本工法独自の値となっている。また、実設計においては、安全性をさらに向上させるため、いずれの外径においても長期許容鉛直支持力は 50kN/本を上限値として定められており、各地盤条件においても表-4.12 に示すような一覧表から長期許容鉛直支持力を選定することにより設計を行っている。

$${}_L R_a = \frac{1}{3} R_u \quad (4.42)$$

ここで、 ${}_L R_a$: 地盤補強材の長期許容鉛直支持力 (kN)

R_u : 地盤補強材の極限鉛直支持力 (kN)

地盤補強材の極限鉛直支持力 R_u は、SWS 試験結果より以下の式を用いて算出する。

$$R_u = \{ \alpha_{sw} \overline{N}' A_p + (\beta_{sw} \overline{N}'_S L_S + \gamma_{sw} \overline{N}'_C L_C) \varphi \}$$

ここで、 α_{sw} : 地盤補強材先端部の支持力係数 (=225)

\overline{N}' : SWS 試験結果から求められた N' 値の地盤補強材先端部上部 1D 及び下部 1D の平均値 (D : 地盤補強材直径)。 N' 値の算定方法は式 (4.43) 及び (4.44) に示す。

A_p : 地盤補強材先端有効断面積 (m^2)

β_{sw} : 周面地盤が砂質土の場合の周面摩擦力係数 (=22)

\overline{N}'_S : 地盤補強材が砂質土層に接する部分の N' 値の平均値。 N' 値の算定方法は式 (4.43) 及び (4.44) に示す。

L_S : 地盤補強材が砂質土層に接する部分の長さ (m)

γ_{sw} : 周面地盤が粘性土の場合の周面摩擦力係数 (=25)

\overline{N}'_C : 地盤補強材が粘性土層に接する部分の N' 値の平均値。 N' 値の算定方法は式 (4.43) 及び (4.44) に示す。

L_C : 地盤補強材が粘性土層に接する部分の長さ (m)

φ : 地盤補強材の周長 (m)

また、SWS 試験結果からの N' 値の算出方法は次式によるものとする。

$$N' = 2W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (\text{砂質土層}) \quad (4.43)$$

$$N' = 3W_{sw} + 0.05N_{sw} \quad (\text{粘性土層}) \quad (4.44)$$

ここで、 W_{sw} : SWS 試験における荷重 (kN)

N_{sw} : SWS 試験における貫入 1m 当りの半回転数 (回)

表-4.12 長期許容鉛直支持力算定表 (φ140mm 継ぎ手 1 箇所カラマツ、スギ)

(単位: kN)

地盤補強材長 (m)	先端地盤より上下1Dの平均N' 値											
	1 N' 2				2 < N' ≤ 3				3 < N' ≤ 5			
2.0	8	14	21	33	9	15	22	35	10	16	23	36
2.5	9	17	25	41	10	18	26	43	12	20	28	44
3.0	11	21	30	50	12	22	31	50	13	23	32	50
3.5	12	24	35	50	14	25	36	50	15	26	37	50
4.0	14	27	40	50	15	28	41	50	16	29	42	50
4.5	16	30	45	50	17	31	46	50	18	32	47	50
5.0	17	33	50	50	18	35	50	50	20	36	50	50
5.5	19	37	50	50	20	38	50	50	21	39	50	50
6.0	21	40	50	50	22	41	50	50	23	42	50	50
6.5	22	43	50	50	23	44	50	50	24	45	50	50
7.0	24	46	50	50	25	47	50	50	26	49	50	50
7.5	25	50	50	50	26	50	50	50	28	50	50	50
8.0	27	50	50	50	28	50	50	50	29	50	50	50
8.5	29	50	50	50	30	50	50	50	31	50	50	50
9.0	30	50	50	50	31	50	50	50	32	50	50	50
9.5	32	50	50	50	33	50	50	50	34	50	50	50
10.0	33	50	50	50	35	50	50	50	36	50	50	50
10.5	35	50	50	50	36	50	50	50	37	50	50	50
11.0	37	50	50	50	38	50	50	50	39	50	50	50
11.5	38	50	50	50	39	50	50	50	41	50	50	50
12.0	40	50	50	50	41	50	50	50	42	50	50	50

地盤補強材長 (m)	先端地盤より上下1Dの平均N' 値											
	5 < N' ≤ 7				7 < N' ≤ 10				10 < N'			
2.0	12	19	25	38	15	21	27	40	18	24	31	44
2.5	14	22	30	46	16	24	32	48	20	28	36	50
3.0	15	25	35	50	18	27	37	50	21	31	41	50
3.5	17	28	40	50	19	31	42	50	23	34	45	50
4.0	19	32	44	50	21	34	47	50	24	37	50	50
4.5	20	35	49	50	23	37	50	50	26	41	50	50
5.0	22	38	50	50	24	40	50	50	28	44	50	50
5.5	24	41	50	50	26	44	50	50	29	47	50	50
6.0	25	44	50	50	27	47	50	50	31	50	50	50
6.5	27	48	50	50	29	50	50	50	33	50	50	50
7.0	28	50	50	50	31	50	50	50	34	50	50	50
7.5	30	50	50	50	32	50	50	50	36	50	50	50
8.0	32	50	50	50	34	50	50	50	37	50	50	50
8.5	33	50	50	50	35	50	50	50	39	50	50	50
9.0	35	50	50	50	37	50	50	50	41	50	50	50
9.5	36	50	50	50	39	50	50	50	42	50	50	50
10.0	38	50	50	50	40	50	50	50	44	50	50	50
10.5	40	50	50	50	42	50	50	50	45	50	50	50
11.0	41	50	50	50	44	50	50	50	47	50	50	50
11.5	43	50	50	50	45	50	50	50	49	50	50	50
12.0	44	50	50	50	47	50	50	50	50	50	50	50

周面地盤種別	平均N' 値
	1 N' 2
	2 < N' ≤ 3
	3 < N' ≤ 5
	5 < N'

※長期許容鉛直支持力の最大は50kN/本とする。

※オーガーにて先行掘削した部分は地盤補強材長に含めない。

※先端地盤が粘性土の場合においては先端N' 値は7を上限とする。

$$N' = 2W_{SW} + 0.067 N_{SW} \text{ (砂質土)}$$

$$N' = 3W_{SW} + 0.050 N_{SW} \text{ (粘性土)}$$

4.3.4 水路用ボックスカルバート・L型擁壁基礎の設計マニュアル（佐賀県）

(1) マニュアル作成の背景

軟弱粘土地盤が広く深く堆積している佐賀低平地では、全国版の各種設計マニュアルでは対応できないことがあり、地域に蓄積された経験と知恵を盛り込んだ地域版マニュアルを作成したいとの要望が少なくない。木杭基礎設計マニュアルもそのような背景の中で纏められた。

佐賀平野では、大戦前後においては函渠・橋梁・樋門・樋管などの小規模構造物や、戸建て住宅の基礎は木杭が普通であった。それらの中には、現在も機能しているものが少なくない。1955年（昭和30年）に森林乱伐を制限するために閣議決定された「木材資源利用合理化方策」が一つの契機となつて、次第に各種設計マニュアルから木杭の項目が姿を消していったとされている。

佐賀大学においては1995年（平成7年）頃から木杭の支持力メカニズムに関する研究を始めた¹⁵⁾。佐賀県、建設省武雄河川工事事務所などの協力を得て、木杭の粘土地盤での周面支持力に関する現場試験が行われ¹⁶⁾、木杭利用への機運が高まった。2003年（平成15年）に「木材利用研究会」が発足し、地域での木材利用研究が組織的に行われるようになった。2005年（平成17年）水路用ボックスカルバートの木杭－底盤系基礎～設計マニュアル(第1版)¹⁷⁾、2008年（平成20年）プレキャストL型擁壁(H 2m)の木杭－底盤系基礎～設計マニュアル(第1版)¹⁸⁾、2009年（平成21年）水路用ボックスカルバートの木杭－底盤系基礎～設計マニュアル(改訂版)¹⁹⁾を発行してきた。木杭研究の経緯と木杭の特徴については2009年12月（平成21年12月）に行われた「木材利用シンポジウム in 佐賀」²⁰⁾の報告で詳述している。

木杭の長所を要約すると、軽量性、施工容易性、テーパー効果、杭周面水膜の吸収性、周面地盤との密着性である。木杭－底盤系基礎とした場合には、構造物の底盤支持力と木杭の周面支持力とを協働させることが可能である。木杭の短所は、材料の寸法・形状にバラツキがあり品質管理の面で注意が必要であること、地下水位より上で使用するときには防腐・防虫・防蟻対策が必要であることである。

(2) 水路用ボックスカルバートの木杭－底盤系基礎～設計マニュアル

木杭－底盤系基礎は作用荷重を木杭の周面支持力と構造物底面に作用する地盤反力とが協働して支えるという特徴のほかに、フローティング形式であり構造物と道路面との段差発生が緩和されるといふ利点を有している。その支持機構については文献¹⁷⁾²⁰⁾などに述べている。作用外力はまず杭群により支えられる。杭群の周面支持力は作用荷重より十分に小さく設定する。その結果、構造物は杭を押込み、底盤は確実に地盤に接触するという考えである。

実際の設計では、杭群と底盤支持力の各概算値を推定しておき、まず安全率3で底盤支持力を求め、残りの荷重を安全率1.5で杭に支持させるように計算を進める。マニュアルを纏める過程において、木杭支持力に対する安全率の考え方が佐賀県土木部系と農林部系で異なっていた。木材利用研究会では現場載荷試験の結果を提示し、末口直径を表面積計算に用いることで隠れた安全率1.2～1.5が担保されることを説明し、木杭－底盤系基礎の支持力特性を説明するなどの作業を経て木杭周面支持力の安全率を1.5とするとの合意を得た。また、打設時における既設杭への影響（抜け上がり）を避けるために木杭－底盤系基礎における木杭配置は1m²当り1本程度とした。

改訂版¹⁹⁾においては、設計において慣例的に考慮されてきた函内水重は特別な場合を除いて考慮しないこととした。従来の木杭の仕様については、末口15cm長さ5mという固定的な考えが普及していたが、これは供給側の標準仕様（末口14cm、長さ4m）と異なり、そのことが木杭使用上の隘路になっていることが判明した。この問題を解決するために、マニュアルにおける木杭仕様を供給側に合わせることにした。図-4.11に水路用ボックスカルバートの木杭-底盤系基礎の設計フローを示している。

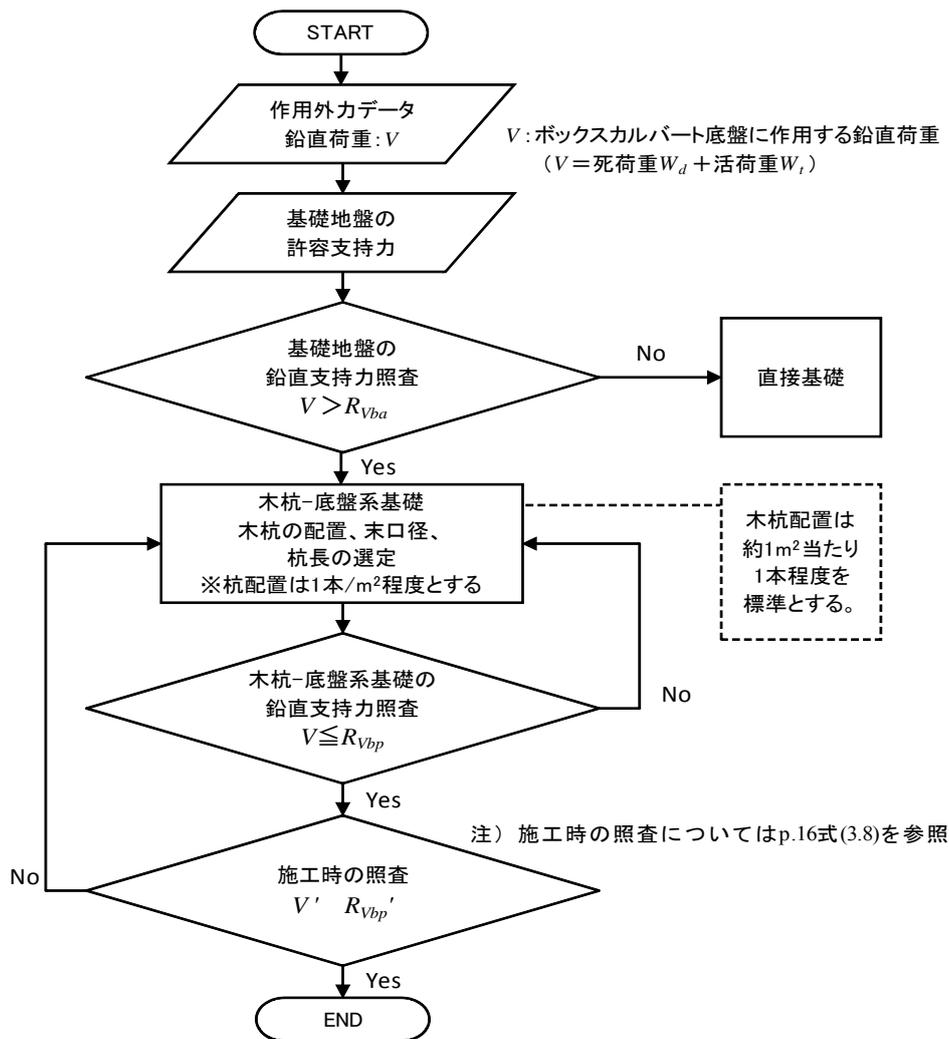


図-4.11 水路用ボックスカルバートの木杭-底盤系基礎の設計フロー

(3) プレキャストL型擁壁 (H 2m) の木杭-底盤系基礎～設計マニュアル

佐賀県内でのL型擁壁の施工実績、規模、基礎形式等について、過去5年間にわたり調査を行ったところ、98%は高さH 2mであり、しかもその多くは歩道を対象としていることが判明した¹⁷⁾。そこでマニュアルで対象とする擁壁は2m以下とした。小型のL型擁壁の設計では、土圧による水平力をどのように評価するかが問題となる。従来の設計法で計算すると擁壁前面側に大きな荷重強度が作用することになり、この荷重に適合させるために長い木杭が必要となる。2m以下のL型擁壁では、裏込め土に建設発生土を石灰改良して用いることが少なくない。これらの土質材料の粘着力はほとんどの場合20kN/m²を超えていることを現場試験で確認した。例外的に小さい粘着力値11kN/m²を用いたとしても擁壁に掛かる土圧はマイナスとなる¹⁷⁾。これらのことを考慮して、本マニュアルの設計においては図-4.12に示すように、歩道を対象とする場合に限り土圧計算は行わず、裏込め土荷重および群集荷重のみを考慮して杭の末口直径・長さを決定することとした。

一般部擁壁(車道部)の場合は土圧計算を行って杭の寸法を決定する。土圧による水平力の影響を考慮するときは一般の計算法に基づいて行うが、過去の実績から判断できる木杭長さに比べて、計算によって求めた杭長さは過大であるとの印象は否めない。L型擁壁のマニュアルを纏める過程において、木材利用研究会に大学メンバーを迎え、共同研究として木杭-底盤系基礎を用いたプレキャストL型擁壁に対して2度にわたる現場載荷試験を実施した²¹⁾²²⁾。この解析結果を設計の基礎資料とした。

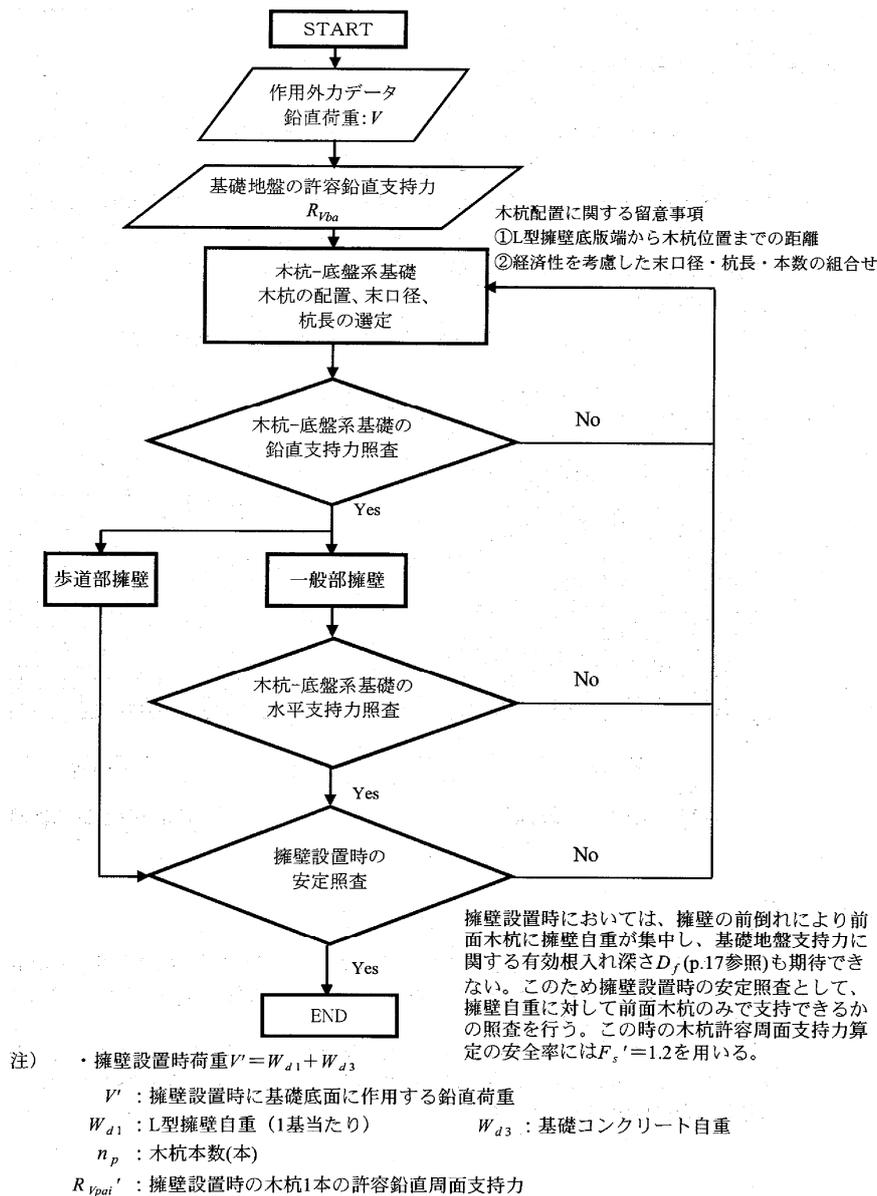


図-4.12 L型擁壁 (2m 以下) 木杭—底盤系基礎の設計フロー²²⁾

(4) マニュアル普及に向けての課題

木杭供給者と利用者のコミュニケーション: 木杭寸法に関する調査の過程において、木杭生産者・施工者・設計者・発注者の間におけるコミュニケーション不足が木杭の流通を阻害している実態が明確になった。設計者は供給側の実情を知らない状態で一律に末口直径 15cm、長さ 5m の木杭を指定していた。標準的に生産される木材寸法は、15cm に近いものとしては 14cm か 16cm、長さ標準は 4m であり 5m 材は特注品扱いであるという実態を認識した²³⁾。この課題を克服するために、木材利用研究会に生産者に参加してもらい、各種木杭 (長さ: 3, 4, 6m, 末口直径: 14, 16, 18cm) について末口直径ならびに元口直径の頻度分布を調査依頼した。また、「佐賀県土木工事施工管理の手引き」の材料管理基準のあり方を見直し、末口直径 14cm、長さ 4m の木杭を積極的に使うようにした。末口直径 14cm 木材の実測データ中央値は 15cm 以上であるという調査結果に基づいて、末口直径 14cm 杭の設計計算においては 15cm を使用してよいこととした¹⁷⁾¹⁹⁾。

ボックスカルバート基礎における木杭利用の促進：最近の傾向として、軟弱地盤上に設けるボックスカルバート基礎は深層混合処理工法による改良体で支持する考え方が広まりつつある。しかし、小規模のボックスカルバートの場合には、地盤改良のためのプラント設置などを必要とする深層混合処理工法はコスト高になる。その意味で、木杭―底盤系基礎の優位性が見直されてきている。ボックスカルバート工事において、国補助金事業では木杭利用することに躊躇する場合があるようである。この壁を超えるための関門として、木杭基礎とした場合のボックスの沈下量予測の方法が確立できていないことが挙げられる。最近施工されたボックスカルバートの一部は沈下が計測されているので、データを解析してこの問題をクリアすることになっている。

L型擁壁基礎における木杭利用の促進：プレキャストL型擁壁の基礎に木杭―底盤系基礎を用いる工事も発注されている。現行のマニュアルは歩道部に用いる壁高1.2m以下の場合を対象としており、設計上の水平土圧は考慮しなくてよい。しかし、その他のケースでは水平土圧を無視することはできない。その結果、地盤反力分布は壁側で大きくなるので、これに合わせた長尺の木杭を用いざるを得ない。もしジオテキスタイルなどを裏込め土中に敷設することで底盤に作用する反力分布を均等化できれば、相対的に値段の安い短い杭を配置することが可能となる。このアイデアを確認するための現場実験が行われ、ほぼ推定されたとおりの結果が報告されている²²⁾。

謝辞：木材利用研究会（宮副一之会長）では木杭に関する種々の現場実験、調査解析を進めてきており、ここで紹介した調査研究の成果はそれらの一部である。同研究会のメンバーをはじめ、木材利用に取り組んでおられる佐賀県県土づくり本部、佐賀県土木建築技術協会、佐賀県県土づくりコンサルタンツ協会の関係各位のご努力に敬意と感謝の意を表します。

4.3.5 パイルネット工法の実例

(1) はじめに

パイルネット工法とは、軟弱地盤上に木杭を打込み、杭頭部間を専用のテンション材で連結しネット状を形成後、その上にサンドマットを造成し、土木安定シートを敷設する軟弱地盤改良工法である。また、本工法は1976年（昭和51年）から2010年（平成22年）までに数多く施工されており、大量に木杭を使用するため、大量の炭素を地中に固定化することが特徴である。「泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル」²⁴⁾に掲載されている泥炭性軟弱地盤対策工25種類の内、本工法は二酸化炭素を削減（固定化）できる工法の一つでもある。

(2) パイルネット工法の設計概念

パイルネット工法は、「泥炭性軟弱地盤における河川堤防の設計・施工指針」²⁵⁾に基づき設計が行われている。この設計方法は、群杭方式による理論が適用されている。上載荷重が群杭の働きによって、杭と杭間の地盤が一体となり、上載荷重を深層の杭先端に伝え、安定する構造となっている。群杭効果を考慮した杭1本当りの極限支持力は、式(4.45)で求められる。群杭の模式図を図-4.13に示す。

$$R_d = \frac{A(q_d - P) + U \cdot D_f \cdot S}{n} \quad (4.45)$$

ここで、 R_d : 杭1本当りの極限支持力

A : ブロックの底面積

q_d : ブロック底面の極限支持力

P : ブロック底面に使用する杭と土の単位面積当りの重量

U : ブロックの周長

D_f : 杭の根入長さ

S : 杭周面の土のせん断抵抗

n : ブロック内の杭本数

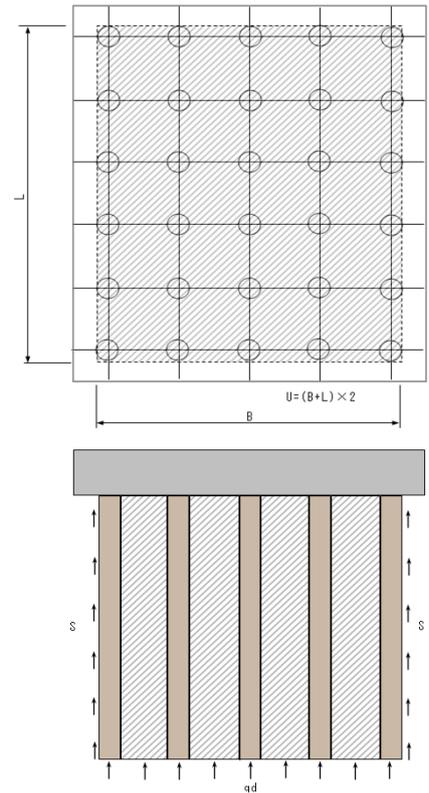


図-4.13 群杭の模式図

(3) パイルネット工法の事例

北海道岩見沢市内で施工されたパイルネット工法の事例を紹介する。

本施工事例は、未圧密の腐植土混じりシルト層が深く堆積する敷地にて施工された。図-4.14に施工箇所の代表地層構成を示す。

当該地に建設予定のショッピングモール内駐車場では、盛土や交通荷重により圧密沈下やすべり破壊が懸念され、店舗の営業にも支障をきたす恐れがあった。このため、パイルネット工法により地盤の沈下防止と安定化を図った。

標尺	層高	層厚	層深	柱状	土質	色調	相対	相対	記	孔内水位	標準貫入試験	
											深	打撃回数
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	分	調	調	度	事	(m)	(回)	
		0.40	0.45		表土							
1		1.10	1.50		シルト					1.10	0	
2					腐植物混じりシルト					1.00	0	
3										2.00	0	
4										3.10	0	
5										4.00	0	
6		4.50	6.00		砂					4.10	0	
7		0.80	6.80		シルト					4.20	0	
8		1.00	7.80		泥炭					4.30	0	
9		0.60	8.40		シルト					4.40	0	
10		1.95	10.35							4.50	0	

図-4.14 施工箇所地層構成

使用した木杭の諸元及び打込機械を表-4.13 に、木杭の配置図を図-4.15 に、標準図を図-4.16 に示す。使用した木杭の総材積は 5,100m³ 以上であり、炭素削減量を式 (4.46) より二酸化炭素削減量に換算し求めると、本施工事例では、約 4,700t の CO₂ を削減 (固定化) したことになる。

$$\text{二酸化炭素削減量} = \text{木材使用量} \times \text{丸太気乾比重} \times \text{炭素含有率} \times \text{二酸化炭素換算係数} \quad (4.46)$$

ここで、丸太気乾比重：カラマツ 0.50、スギ 0.38²⁶⁾、

炭素含有率：木材重量の 50%²⁷⁾

二酸化炭素換算係数：44/12

杭打ち作業においては、表土がすきとられ、N 値が 0 と非常に軟弱な状態が予想されたため、杭打機等の転倒防止に十分な対策を講じなければならず、敷鉄板養生による荷重分布を図ることとした。一連の施工状況を写真-4.1～写真-4.6 に、施工件数を表-4.14 に示す。

表-4.13 使用した木杭の諸元、打込機械

杭長 (m)	杭径 (mm)	本数 (本)	総材積 (m ³)	打込機械
6.0	180	2,258	489.0828	0.45 m ³ バックホウ
6.5	180	7,287	1709.8946	0.45 m ³ バックホウ
7.0	180	3,042	809.7044	0.7 m ³ バックホウ
7.5	180	2,426	691.8649	0.7 m ³ バックホウ
8.0	180	1,878	600.9600	0.7 m ³ バックホウ
8.5	180	2,405	817.7000	三点式杭打機
合		計	5119.2066	

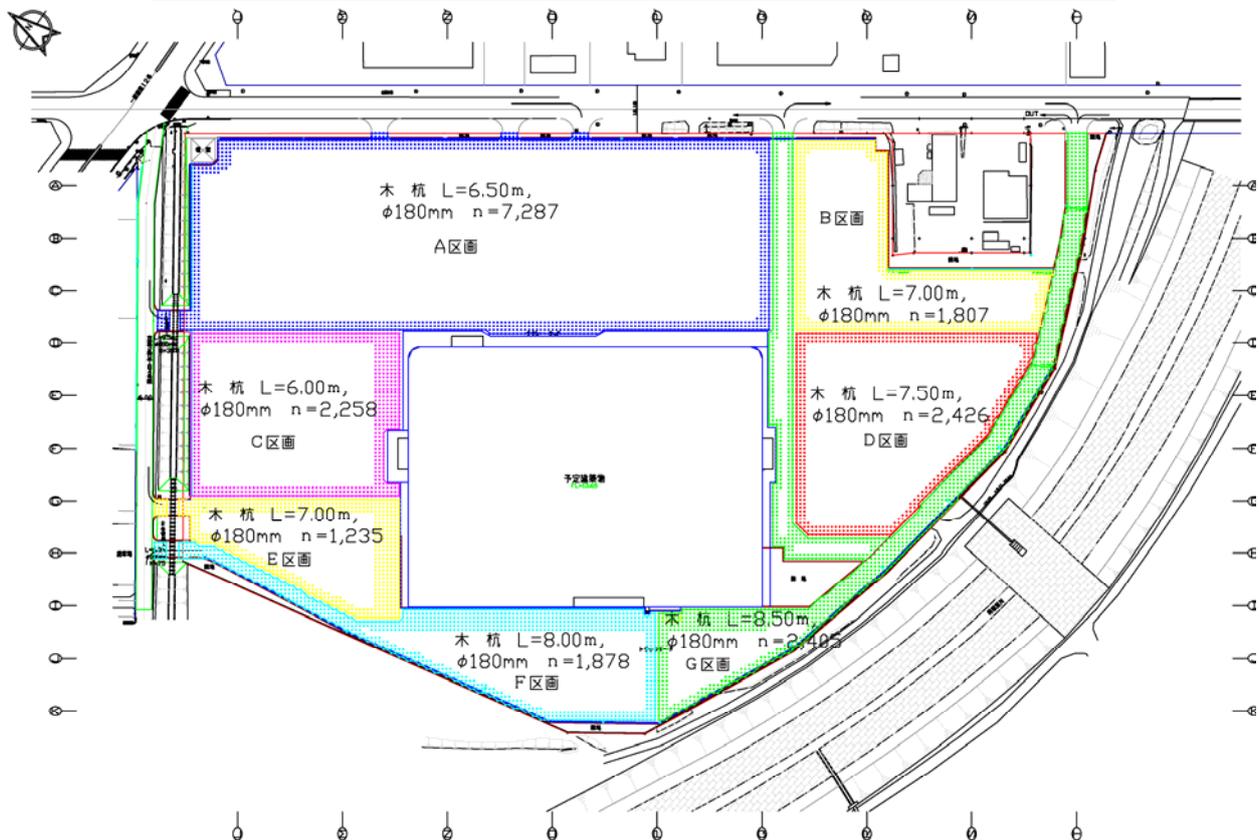
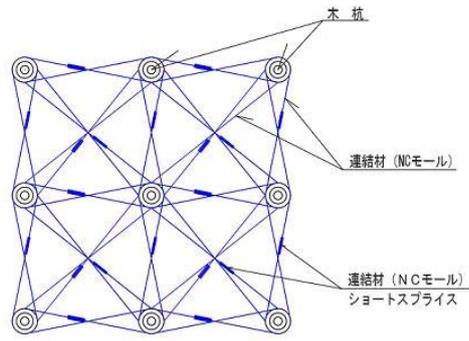
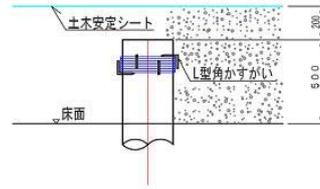


図-4.15 木杭配置図

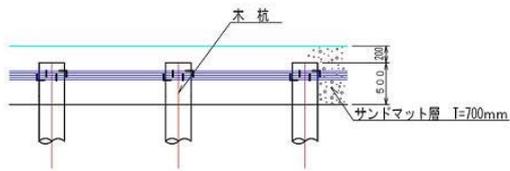
杭頭連結詳細図



杭頭部詳細図



側面図



L型角かすがい

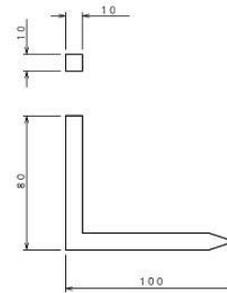


図-4.16 パイルネット工法標準図



写真-4.1 バックホウによる打込



写真-4.2 三点式杭打機による打込



写真-4.3 杭間連結状況



写真-4.4 サンドマット敷設



写真-4.5 土木安定シート敷設



写真-4.6 サンドマット敷設

表-4.14 施工件数（2011年（平成23年）4月現在）

年 度	発 注 数
昭 和 51～54 年 度	71 件
昭 和 55 年 度	14 件
昭 和 56 年 度	9 件
昭 和 57 年 度	6 件
昭 和 58 年 度	7 件
昭 和 59 年 度	12 件
昭 和 60 年 度	9 件
昭 和 61 年 度	12 件
昭 和 62 年 度	24 件
昭 和 63 年 度	21 件
平 成 元 年 度	22 件
平 成 2 年 度	31 件
平 成 3 年 度	34 件
平 成 4 年 度	23 件
平 成 5 年 度	37 件
平 成 6 年 度	26 件

年 度	発 注 数
平 成 7 年 度	28 件
平 成 8 年 度	22 件
平 成 9 年 度	16 件
平 成 10 年 度	20 件
平 成 11 年 度	20 件
平 成 12 年 度	22 件
平 成 13 年 度	32 件
平 成 14 年 度	36 件
平 成 15 年 度	21 件
平 成 16 年 度	17 件
平 成 17 年 度	17 件
平 成 18 年 度	8 件
平 成 19 年 度	6 件
平 成 20 年 度	9 件
平 成 21 年 度	12 件
平 成 22 年 度	1 件

(4) おわりに

パイルネット工法は、炭素の大量固定といった特徴の他に、木杭自然木を使用するので、六価クロム等の溶出の心配が無く自然環境保全を図る上でも有利である。このように、この工法は、木材の特徴を活かした工法の一つである。

4.4 現状における木材利用事例と試み

4.4.1 佐賀県の戸建て住宅における木杭利用の現状

2005年3月（平成17年3月）に佐賀平野の軟弱地盤地域における戸建て住宅基礎に関するアンケート調査を実施した。基礎補強工法に関する質問に対して、およそ33%は木杭を使用しているとの回答を得た。この調査により、木杭を使用した理由、問題点などが推測できた。調査結果の詳細な分析は文献に示している²⁸⁾。本文では、軟弱地盤地帯において木杭基礎を採用する場合の設計の考え方、木杭を地下水位より下に打設するための工夫、長い杭を必要とする場合の継杭の方法、などについても述べた。

(1) 戸建て住宅基礎に関するアンケート調査

佐賀平野の軟弱地盤地帯では、戸建て住宅の建設においては不同沈下、段差発生などの障害を起こすことが少なくない。その実態を把握するため2005年3月（平成17年3月）に、代表的な軟弱地盤地域である川副町、諸富町、東与賀町、久保田町の4町（当時）を対象として全戸（およそ1000戸）にアンケート調査票を配布し、基礎型式、基礎補強工法、基礎工費、住宅に関する問題、などについて回答を求めた。アンケートの回収率は約11%であった。

調査項目は、築年数、建物形式、建築面積、地盤調査の有無・方法、基礎の型式、基礎補強工法、基礎補強に要した費用、住宅に関する問題の有無、問題の内容、などである。

基礎補強としての木杭利用

図-4.17に基礎補強の種類についての調査結果を示す。回答全体で見ると、木杭（松杭）使用は32%と最も高い割合であった。他の基礎補強工法の割合は、浅い地盤改良12%、鋼管杭（小口径）8%、深い基礎6%、何もしていない31%、その他11%であった。何もしていないという回答には、建て替えであったために新たに基礎補強は行わなかったという場合が含まれていると推察する。川副町・諸富町では何もしていない割合が高いが、東与賀町・久保田町では、深い地盤改良や鋼管杭など新しい基礎の補強の割合が高かった。前者では古くからの住宅が多いのに対して、後者地区では宅地開発が進んでいて新築住宅が多く、新しい基礎補強工法への関心が高いことを示唆している。

基礎補強工法による問題の有無

図-4.18に基礎補強工法ごとの問題の有無についての調査結果を示す。問題ないという回答は、木杭（松杭）では約54%、深い地盤改良と鋼管杭では76~78%と高い回答率であった。問題の具体的内容については、どの基礎の補強方法においても建具に隙間が生じる問題が多く、約30%程度を占めた。土間コンクリートの亀裂という回答が深い地盤改良と鋼管杭では比較的多く、特に鋼管杭においては

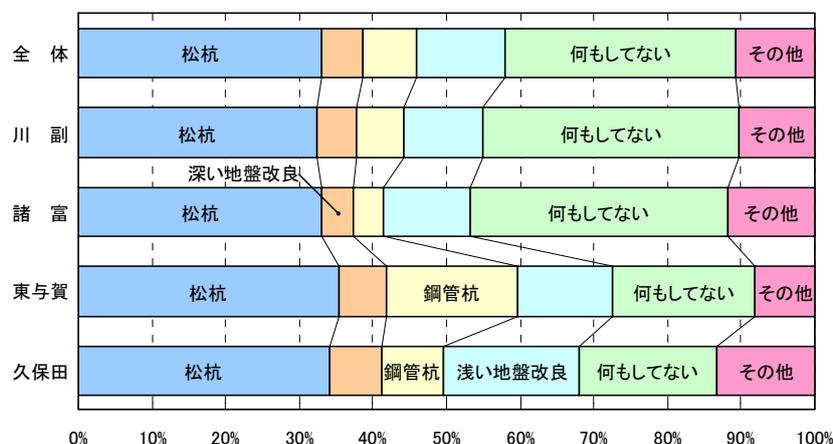


図-4.17 各町と基礎の補強の関係

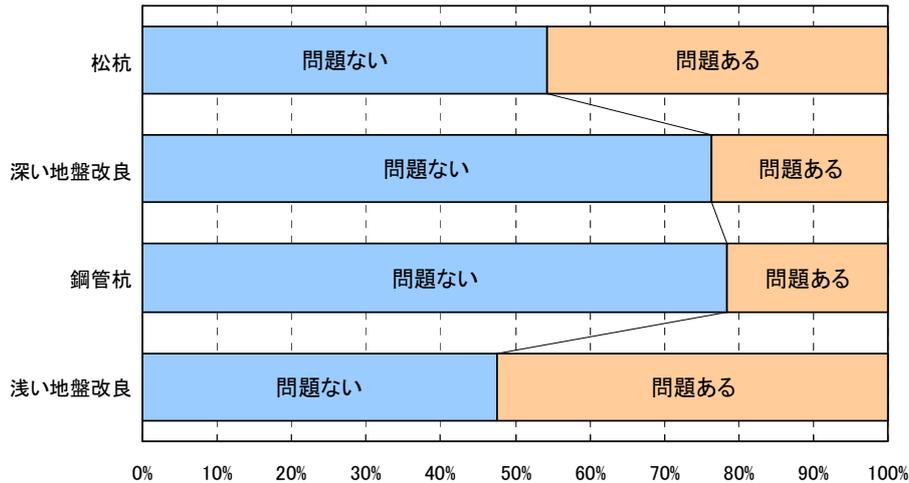


図-4.18 基礎の補強における問題の有無

約 30%を占めた。これは、建物と外構との間に段差や不同沈下が生じていることを示唆している。最近普及し始めた鋼管杭工法では、杭先端を支持層（ N 値 15～20 以上の層）につけるので建物の不同沈下に問題は生じない反面、周辺地盤に設けられる外構の圧密沈下に起因する段差発生に関心が向けられないことによる。この問題は建て主と住宅会社との間でトラブルとなる場合がある。一方、木杭（松杭）では建物自身もある程度沈下するので、段差・不同沈下の問題が発生する割合は低く、今回の調査でも約 5%程度の低い値であった。

図-4.19 に基礎の補強に要した費用の比較を示す。木杭（松杭）では、50 万円未満の回答が約 33%、50～100 万円の回答は約 31%を占めた。このことから、木杭（松杭）は他の工法より安価であり、このことが基礎工法として木杭を選ぶことにつながっていると推察される。

図-4.20 に基礎の補強方法と築年数との関係を示す。木杭（松杭）は年代に関係なく基礎補強として採用されてきたことがわかる。基礎補強は何もしていないという回答は、築後 25 年以上が約 66%を占めているが、これは以前は基礎補強への意識が低く、最近になって高まってきたことを示唆している。

アンケート調査結果のまとめ

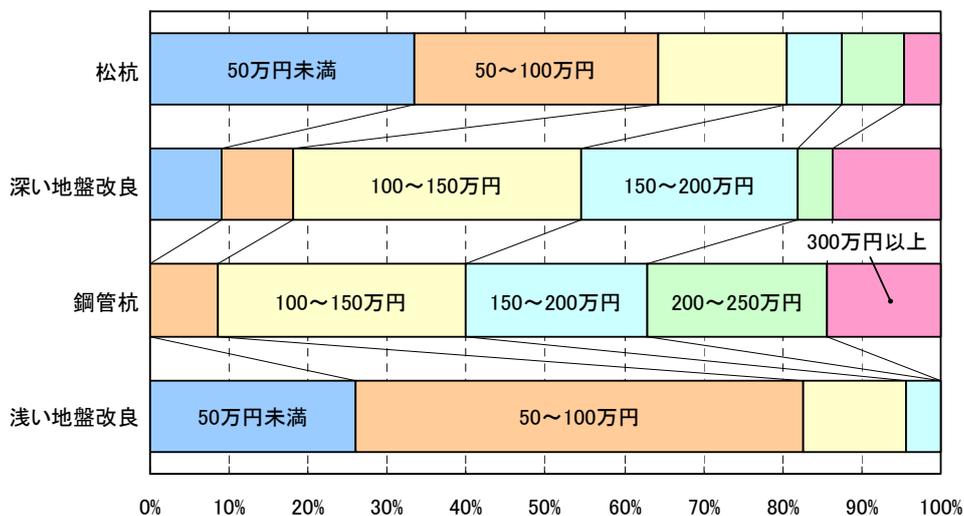


図-4.19 基礎の補強に要した費用

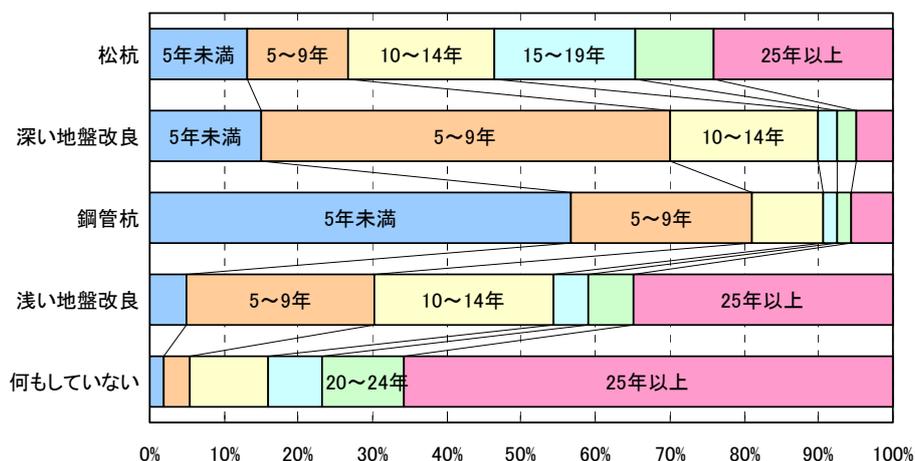


図4.20 基礎の補強方法と築年数との関係

木杭（松杭）は、工費が安く、長年の経験があるために現在も広く使われている。設計・施工においては、地盤調査に基づき木杭の打設長さを適切に設計すること、地下水より上部への対策（地下水位では十分な耐久性がある）を講じること、などが重要になってくる。木杭によるいわゆる浮き基礎形式では、住宅と外構との間の不同沈下の問題は少ないと考えられる。

(2) 地盤調査について

戸建て住宅の地盤調査の方法として、スウェーデン式サウンディング試験（SWS 試験）が主流となっている。SWS 試験は、ボーリング調査や標準貫入試験に比べて安価であるが、ロッド先端の磨耗や表層付近の比較的硬い層の影響などを受けるため、地盤種別の特定が困難な場合も少なくない。地盤特性をより詳細に把握できる調査方法として、最近開発されたスクレイドライバー・サウンディング試験（SDS 試験）がある²⁹⁾。SDS 試験は、SWS 試験装置を改良し、従来の測定項目「鉛直荷重」に加えて、「回転トルク」とロッド1回転あたりの「貫入量」の3つを同時に測定でき、これらのデータから沖積層、洪積層、腐植土層の土質を判定することが可能である。費用はSWS 試験並みであり、今後の普及が期待される。調査箇所については、建物部分の四隅と中央で実施され、中央の調査深度を大きくすることが多い。宅地内での土質変化が懸念される場合には全ての箇所において調査深度を大きくすることが望まれる。

(3) 住宅建設に関する留意点

佐賀平野では農業用排水路としてクリークが縦横無尽に張り巡らされており、その総延長は1,500kmにも及ぶ。クリークは、圃場整備事業により統廃合が進められ、古いクリークは埋め立てられクリーク跡としていたところに潜在しており、大正初期から現在までにほぼ50%のクリークが消滅しているとの報告もある³⁰⁾。クリーク跡が潜在する地盤上に住宅を建設した場合、原地盤との特性が異なるため、不同沈下などの障害の原因となることがある。したがって、旧地形図などを利用して宅地の履歴にも配慮する必要がある。

道路際に住宅を建設する場合にも注意が必要である。道路に近い部分の地盤では交通荷重の影響を受け、地盤の強度が増加している。このような地盤上に厚さが一定の盛土を施工して、圧密沈下が落ち着く前に建物が設けられると、道路から離れるにしたがって沈下量が大きくなり不同沈下などの障害を引き起こすことになる。これとは反対に、新設道路に近い地盤は、舗装荷重と交通荷重の影響を受ける結果、道路方向に向かって沈下量が大きくなる場合が起こり得る。道路際の宅地に建物を建設する場合には、利用状況や交通量の影響を考慮して、道路から距離を置いて建物を設けることが望ましい。このような不同沈下の発生が懸念される場合には、長尺木杭を設計・施工する必要性がでてくる。長尺木杭が得られない場合は、木杭と木杭を継いで施工することになる。木杭の継ぎ方には様々



写真-4.7 トップコンクリートの施工状況

な方法が使用されてきたが、佐賀平野で使われている一つとして直径 30mm、長さ 400mm の鋼管を用いて杭を継ぐという方法がある。

(4) 木杭の設計・施工について

先で述べたように佐賀平野においては、古くから地盤補強として木杭が広く利用されている。その理由として、工費が安く、長年の経験が蓄積されていることが挙げられよう。木杭を設計・施工する場合には次のことに留意する必要がある。

杭を地下水位以下に保つこと

木材は水中に存置すれば経年に対しても十分な耐久性を有している。このことは、江戸時代の木杭遺構が全国的に残っていることのみならず、地下水位以下に埋設されてきた縄文遺跡や弥生遺跡においてもほとんど腐蝕していない木質材が発見されていることでも実証されている³¹⁾。

住宅基礎として木杭を用いる場合、地下水位以下に木杭が位置するように設置する必要がある。その場合、地下水は地表面から 1~2m 程度の深さに位置することから、木杭を地下水位以下にするため、写真-4.7 に示すように、杭頭に 1~2m 程度のコンクリート杭（トップコンクリート）を継ぎ足すことがなされている。

杭の支持力

住宅基礎に木杭を用いた場合、杭の周面支持力に関する安全率の設定³²⁾、支持力評価における木杭—底盤系の導入などが考えられてよい³³⁾。木杭の周面支持力はコンクリート杭や鋼管杭に比べて、テーパー効果や杭周面の水膜吸収効果があること³²⁾、木杭の周面支持力とべた基礎に接する地盤支持力を合計することなどにより、より合理的な設計・施工が可能となる。

4.4.2 佐賀県農業用排水路の例（クリーク）

(1) はじめに

佐賀平野には、1500kmにも及ぶクリークがあり、その中の800kmは土水路となっているため法面の侵食が生じており、隣接する道路や農地では、通行や営農に支障が生じている箇所も出てきている。800kmの内、幹線420kmでは、主に「クリーク防災機能保全対策事業」により、年8kmずつコンクリートブロック等で整備が進められているが、このペースでは幹線のみでも50年を要する。また、これまでの工法では800kmの整備には、1000億～1200億円が必要となり、財政面でも問題となっている（佐賀新聞2009.9.20朝刊）。

このような中、木材利用研究会（佐賀）では、法面崩壊メカニズムを推測するとともに、従来、部分的な護岸や応急対策として施工されていた木杭柵工法に焦点を置き、木材腐朽軽減に長寿命化、低コスト化、などを考慮した工法を佐賀中部農林事務所に提案し、2010年（平成22年）10月に試験施工が実施された。今回、この内容を紹介して、これからのクリークにおける木材の設計法について探っていきたい。

(2) これまでの工法と木杭柵工の課題

これまでクリーク防災機能保全対策事業で実施されている護岸は、円弧すべりの検討や抗土圧体としての検討により、コンクリート柵渠や、ブロックマット、地盤改良、などを組み合わせた工法が施されている。工事費は約15万円/m～20万円/m（クリーク両岸）となっており、800kmを施工した場合の事業費は、1200億円ほどとなる。

一方、木杭板柵工は4～5年で水際部分上方で腐朽が生じることから、これまでは部分的な護岸や応急対策として利用されてきたが、工事費は、3.5万円/m、（クリーク両岸）程度と低廉である。このようなことから、恒久的な社会基盤であるクリークを維持するためには、木材の恒久的な位置づけを行い、低コスト化を図っていかざるを得ない。また、地元での管理を考慮すると、維持・補修の観点からも木杭柵の活用による低コスト化の必要性がある。尚、木杭柵工活用には、以下の課題への対応が不可欠である。

- ）新たな法面侵食メカニズムの確立
- ）木材の長寿命化要因の確定

(3) クリーク法面侵食の現状

県内のクリーク法面の状況は、**写真-4.8**のように、雨水によるガリ侵食、腐朽した木柵（板柵）部



写真-4.8 クリーク崩壊状況



写真-4.9 応急対策施工状況



写真-4.10 既設腐朽木柵と新規木柵状況

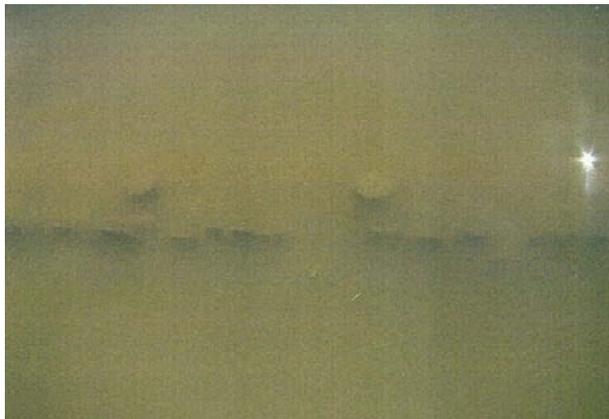


写真-4.11 クリーク内採取木材



写真-4.12 採取木杭断面写真

分からクリーク内への土砂流出、などにより、クリーク施工時の一定勾配の斜面は維持されておらず、大半は、法面上部を残し、中下面は5分勾配から垂直の勾配となっている。上記の現象は、背後地が道路の場合、田面の場合を問わず、同様に生じており、これまで検討されてきた円弧すべりの作用とは異なる法面侵食メカニズムとして考える必要がある。

(4) 木材腐朽の原因

木材に付着した胞子が発芽し、その菌糸が木材中で生育、増殖していくためには、栄養、水、空気（酸素）、温度、pH、光などが必要であるとされている。

「木材科学講座 12 保存・耐久性」³⁴⁾では以下のように述べている。「特に、木材腐朽菌は好気性菌であり、酸素がない状態では成長できず、木材中で腐朽菌が生育するためには、材の20%程度の空隙があればよいとされている。昔から木材を保管する方法として、水中に貯木することが行なわれてきた。これは木材の空隙にある空気を追い出し、好気性菌である木材腐朽菌による腐朽を生じさせないようにするためである。」つまり、水位以下に常時木材を位置させることが重要である。写真-4.9、写真-4.10は、水位より上方に位置して腐朽した背後に同様の木杭柵工法で施工されている状況であり、短期間での腐朽による機能低下は避けられない。

(5) クリークの水中に約25年浸水された木柵木杭の採取試験

クリークに木杭柵工として約25年前に施工され、写真-4.11のように水中に常時位置した木杭を採取し、含水率測定、ピロデイン測定、ヤング係数測定、を実施した。

試験片としては、背板、木杭（小）、木杭（大）、の3種類とし、採取後直ちに測定した。測定結果の

表-4.15 ピロデイン測定値による腐朽度評価表

腐朽度	打ち込み深さ (mm)	耐久性の目安 (スギ材 φ100mm の場合)
小	20 未満	良好な状態を維持している
中	20~30 未満	やや耐久性が低下している
大	30~40 未満	かなり耐久性が低下している
極大	40 以上	著しく耐久性が低下している

概要は以下のとおりである。

i) 背板

含水率は、217.2%、ピロデイン測定は腐朽が進み測定不能

ii) 木杭 (小)

含水率は、95.3%、ピロデイン測定値は、22.2、ヤング係数は 63.8 (tf/cm³)

iii) 木杭 (大)

含水率は、117.7%、ピロデイン測定値は、20.7、ヤング係数は 70.1 (tf/cm³)

以上の結果より、下記のことが判った。

a) 背板については、板厚不足で腐朽が進行していること。

b) 木杭については、表-4.15 のピロデイン測定値による腐朽度評価表³⁵⁾により、良好な状態を維持していることが判明した。写真-4.12 採取木杭断面写真でも健全な断面が確認される。

c) 木杭については、ヤング係数の標準値 70 (tf/cm³) 程度であり、健全である。

(6) クリーク法面侵食メカニズムの解析

クリーク法面侵食メカニズムについては、『木材利用シンポジウム in 佐賀 基調講演 (三浦哲彦) 冊子³⁶⁾pp.21-22』に掲載されている図-4.21 ように、下記が考えられる。

のり面の乾燥収縮によるひび割れ発生

水位上昇や降雨によるひび割れへの水浸入

水位降下・水圧による局部崩壊、表面土流出

木柵部腐朽・空隙発生

法面下部土砂流出

短冊状に法面下部より侵食

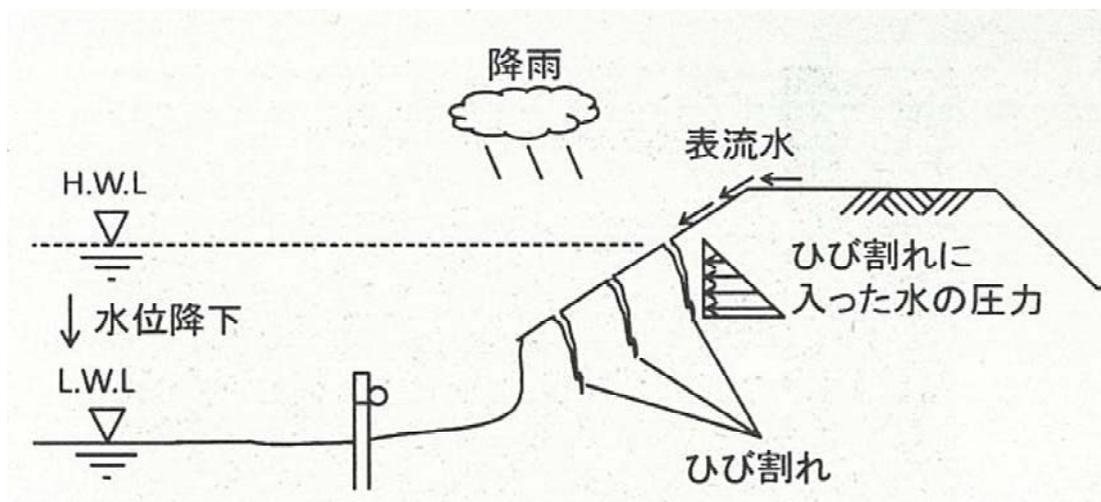


図-4.21 クリーク法面侵食のメカニズム

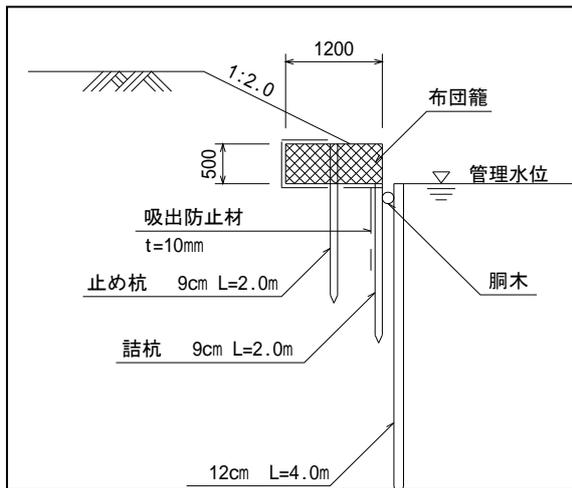


図-4.22 第1案断面図



写真-4.13 第1案施工状況

また、図-4.21 のようにクリークの水位変動や波浪も大きく影響していると判断できる。さらに、《堀干し》等の際に適宜行われていたクリークの維持活動の低下もひとつの要因の一つと推測される。

(7) クリークへの恒久的木材活用に向けた工法提案

提案工法の条件

木材腐朽の原因やクリーク法面侵食メカニズムから、試験施工提案における条件を以下のように設定した。

- i) 水中部では、永年経過しても強度は維持されるので、木杭頭部をクリーク水位以下とする工法
- ii) 水中でも板柵の腐朽度が大きいので、現在の板柵に変わる工法
- iii) 水位変動による法面侵食崩壊を軽減できる工法
- iv) これまでの施工費を踏まえ、施工単価が従来の木杭柵工の3倍を越えない工法

提案内容

第1案

木杭（12、 $L=4\text{m}$ ）の頭部を管理水位まで下げ、管理水位より上方0.5mに布団籠（ $1.2\text{m} \times 0.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ ）を設置し、布団籠中央に木杭（9、 $L=2\text{m}$ ）を施工する。

木杭の背面には、胴木を介して従来の背板（ $t=24\text{mm}$ 、 $L=2\text{m}$ ）を施す工法と、詰杭（9、 $L=2\text{m}$ ）を施す工法の2タイプとする。

第1案断面図を図-4.22に示し、写真-4.13に施工状況を示す。（写真では、施工の為管理水位より水位は下がっている）

第2案

木杭（12、 $L=4\text{m}$ ）の頭部を管理水位まで下げ、管理水位より上方の法面にブロックマット（法長1.2m）を施工する。

木杭の背面には、胴木を介して従来の背板（ $t=24\text{mm}$ 、 $L=2\text{m}$ ）を施す工法と、詰杭（9、 $L=2\text{m}$ ）を施す工法の2タイプとする。

第2案断面図を図-4.23に示し、写真-4.14に施工状況を示す。

提案工法の検証について

試験施工箇所には、試験測定するための採取用として、木杭（9、 $L=2\text{m}$ ）及び板柵（ $t=24\text{mm}$ 、 $L=2\text{m}$ ）を設置高さを変えて、3種類施工する事とした。

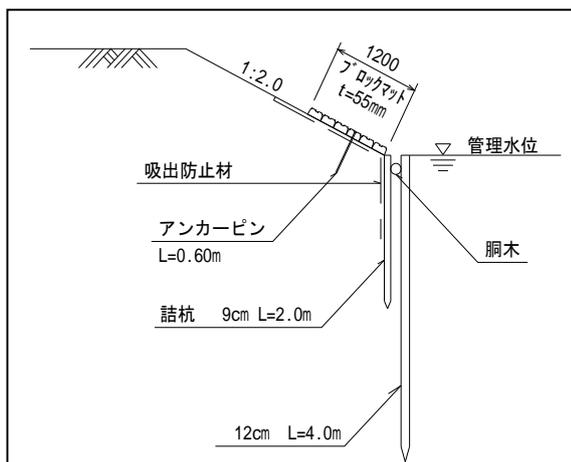


図-4.23 第2案断面図

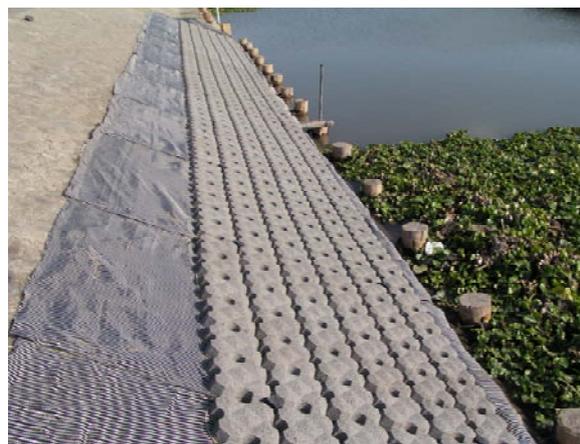


写真-4.14 第2案施工状況

尚、採取用木材の高さは、管理水位、管理水位プラス 0.25m、管理水位プラス 0.5m の位置とし、この3種類を1セットとして、3回引き抜き試験を実施できるようにした。

試験年としては、施工年 2010.10 から、1回 (3年経過)、2回目 (5年経過)、3回目 (10年経過) としている。試験内容は下記のとおりである。

i) ピロデイン測定

木杭頭部より 1cm ごとに杭長さ ($L=2m$) 分を実施す。

ii) 含水率測定

木杭頭部より杭長さ ($L=2m$) 分を実施する。水面近傍は密に (1cm ごとに) 実施する。含水率測定に際しては、「フシ」の有無で変化するので、記事に残す。(フシがあると含水率が大きくなる) 含水比測定に関しては、杭の鉛直方向変化測定に加え、断面方向の相違についても測定する。

iii) 腐朽菌測定

木杭頭部より杭長さ ($L=2m$) 分を実施する。なお、土の種類によっても腐朽菌の種類が異なることから、現地土の採取測定も実施する。腐朽菌の採取・測定に関しては、今後検討して行く。

iv) 木杭内酸素測定

木杭内酸素量を測定する。木杭内酸素量の測定に際しては、今後の課題である。土中の酸素量も測定する。

(8) これからのクリーク木柵設計について

佐賀県内のクリーク法面の状況は、前述のように、雨水や波浪によるガリ侵食、腐朽した木柵 (板柵) 部分からクリーク内への土砂流出、などにより、中下面は 5 分勾配から垂直の勾配となっている。この現象は、背後地が道路の場合、田面の場合を問わず、同様に生じており、今回示したクリーク法面侵食メカニズムの妥当性が高いと考えられる。

砂分が多い粘性土の法面では、法面ひび割れ後の短冊状に下方に倒れる侵食が生じ、法面侵食を助長している。

応急対策で多く施工されている木柵では、管理水位より木杭頭部が出ていること、土留めに薄い板が使用されていたこと、などから木材腐朽が進み、法面侵食メカニズムの誘因の 1 つとなっている。

以上のようにクリーク法面侵食によるクリーク機能低下は多くの要因が作用していると考えられる。そのため、これからのクリーク防災事業では、今回示したクリーク法面侵食メカニズムを参考に、総合的・俯瞰的分析に計画を進めていくことが重要である。とくに、クリーク木柵設計に際しては、法面ひび割れ原因対策やクリーク底面に堆積した法面侵食土の浚渫など総合的は視点で計画を進めてい

くことが必要である。

今回の試験施工と今後実施していく検証結果は、これからのクリークへの木柵活用に際して貴重なデータを与えてくれると確信している。応急対策として施工されている木柵工の設計に際して、抗土圧構造として解析されてきている現状の検証も可能になると考えられる。

また、今後のクリークの維持管理は地元管理へ移行していくことが考えられるため、木材の規格寸法等や工法の決定に際しては、交換のしやすさや木材供給にも配慮が必要である。

(9) おわりに

これからのクリーク維持を目的とする整備計画に際し、新たに法面侵食システムを考慮した工法を立案していくことにより、応急対応としてのみ採用されてきた木杭柵工の恒久的活用の可能性がある。

さらに、今回の提案工法の採用が図られると、800km で、浚渫の有無の課題は残るが、数百億円のコスト縮減が図られることとなる。

試験施工地には、3年後、5年後、10年後、に引き抜き採取できる仕掛けを施しており、期待すべき結果を確信している。

今後共、クリークは佐賀平野の農業を下支えする恒久的な社会基盤である。今回の試験施工における木杭活用法の有効性について検証結果の公表を重ねて行き、今後のクリーク整備への貢献を果たしていきたい。

4.4.3 ラフト & パイル工法の施工試験

「ラフト&パイル工法」は、軟弱地盤域における堤防や海岸護岸の盛土基礎ならびに建築構造物基礎として、間伐材を多用して軟弱地盤を補強するもので、これまで、佐賀大学低平地研究センターが中心となって模型実験や数値解析による研究と設計法に関する開発を行ない、施工方法や経費等については主に日本建設技術株式会社が検討を進めてきた。ここでは、本工法開発の背景と着想の経緯とともに、日本建設技術株式会社が、(財)佐賀県地域産業支援センター等からの2010年(平成22年)度助成金を受けて、佐賀市川副町(佐賀空港敷地内)で実施した現地「施工試験」の概要と結果を紹介する。

(1) 本工法開発の背景と着想の経緯

佐賀県の人工林率³⁷⁾は67%と我国で最も高く、2009年(平成21年)には森林環境税を導入するなど森林整備を促進する努力がなされている。しかし、大量に発生する間伐材の有効な用途とその枝葉の処理方法などが確立されていないため、多くは“切り捨て間伐”として現地に放置されているのが現状であり、豪雨による土石流発生時に流木として二次被害拡大の原因となることが危惧されている。間伐材とその枝葉を有効且つ大量に利用する方法の確立は、森林整備によるCO₂の排出削減・吸収促進とともに、地域の豪雨・土砂災害の防災・減災対策としても、極めて重要な課題である。

一方、干満差が大きく、我国の干潟の40%にも達する広大な干潟が分布する有明海の沿岸低平地の地盤は、我国でも有数の鋭敏な粘性土である“有明粘土”等で構成されている軟弱地盤地帯である。この地域では、大きな干満差と遠浅の干潟を利用し古くから干拓が行なわれ、我国でも有数の穀倉地帯である広大な佐賀低平地が形成されてきた。従って、佐賀平野の大部分の地盤高は、現在でも朔望満潮位より低く、更に、急速に進行する温暖化に伴う海面上昇によって、広大な面積が水没する蓋然性が極めて高い。IPCC第三次報告書(TRA)において、30年後(2042年)にも+2℃の気温上昇が予測される中、現在より気温が2℃高かったとされる縄文海進最盛期(約6,000年前)の有明海湾奥部の復元海水準が+2.3mであることから、温暖化・海面上昇対策としての海岸護岸と感潮河川堤防の補強・

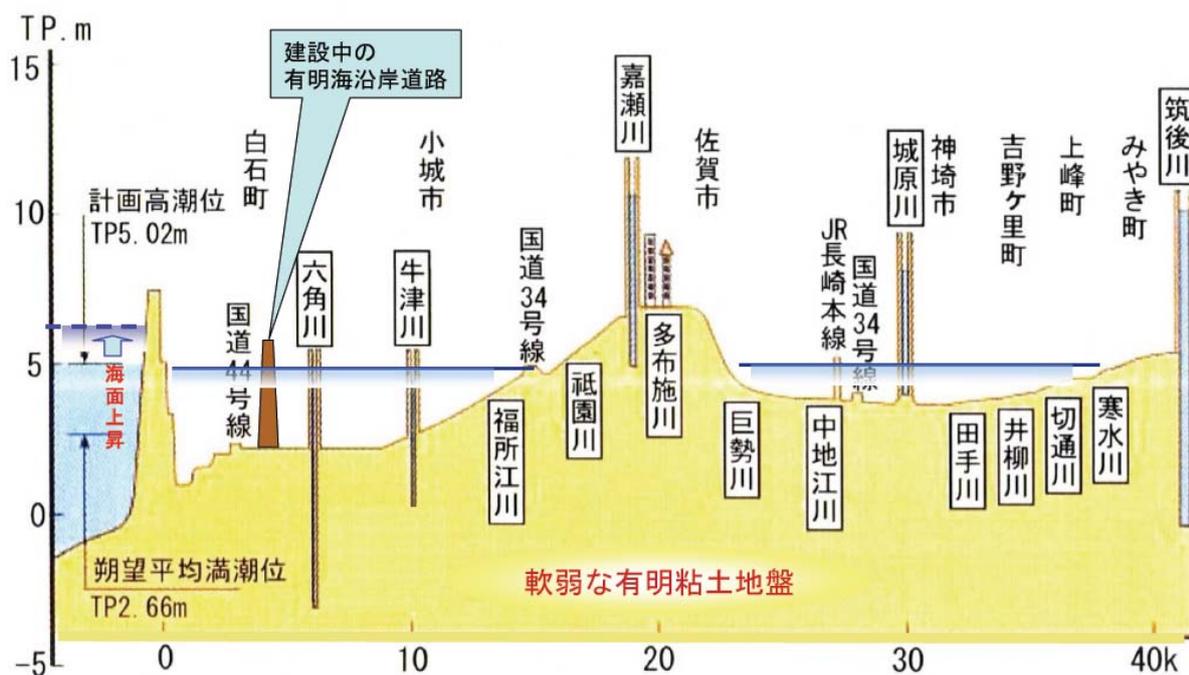


図-4.24 佐賀低平地の標高断面概念図

嵩上げ³⁸⁾は喫緊の課題である (図-4.24)。

また、佐賀平野地盤の地下水は、広域地盤沈下を引き起こす程、大量に且つ長期にわたって揚水されてきたため、一部では塩水化が進行している上、今後、海面上昇による地下水の塩水化圧力は増大する。従って、海岸護岸・感潮河川堤防の基礎に用いる材料・工法は、海水環境下でも十分な(数百年の)耐久性が確認できるものでなければならない。しかし、約20年前に石灰混合処理工法で築造された感潮河川堤防において、漏水、湿地・泥濘化や洗掘、沈下等の深刻な変状が数多く発生し、関連する調査と研究³⁹⁾によって、石灰やセメント系「混合固化処理土」の耐久性に大きな問題点が明らかになった。他方、17世紀中頃に築造された柳河藩の干拓黒崎堤防の基礎からは、敷き詰められた木材と枝葉(マツ)、並びに木杭が健全な状態で検出された。この干拓堤防の高さは約6mで、堤防法尻の位置には外側に変位した列状の木杭が検出され、盛土基礎の木材は横たえられた状態で、その下にはマツの枝葉が敷き詰められていた。このような木杭並びに横たえられた木材と枝葉の状態から、木杭については軸方向の抵抗力ではなく主に横抵抗力を期待していること、また、敷き詰められた枝葉が木材の抵抗をより効果的にしていることなどが考察された。そして、「ラフト&パイル工法」は、この黒崎堤に用いられている木材基礎の構造等をヒントに着想されたもの⁴⁰⁾である。

(2) 「施工試験」の目的

「ラフト&パイル工法」は、地元山地域から産出される“間伐材”を多用するとともに、その際に大量に発生する“枝葉”をも有効に利用し、また、その施工方法においても、特殊な建設重機を必要とせずユンボショベル等の“汎用的な建設機械”を用いて、地場の建設業者と技術者でも施工可能な工法の開発を目指している。今回実施した「施工試験」は、助成事業への応募から審査・採択、並びに実施の日程上、事前調査の期間を確保できず実質的な試験期間は9ヵ月足らずであった。そのため現場試験の主要な目的を、建築構造物の基礎を想定した現場において、簡易な建設機械による施工手順と施工速度等の確認と問題点を調べ、施工マニュアル並びに施工歩掛り等の基礎資料を得ることとし、「施工試験」として位置づけられた。

(3) ラフト&パイル工法の概要

当該工法は、安定した地下水位が比較的に高く、軟弱地盤で荷重による圧密沈下が相当程度見込める地盤で用いることを基本としている。理由は、基本構成(造)体である木製のラフト(筏)とパイル(列杭)をドライワーク状態で施工し、その後地下水位以下に沈めることにより、数百年に及ぶ長期

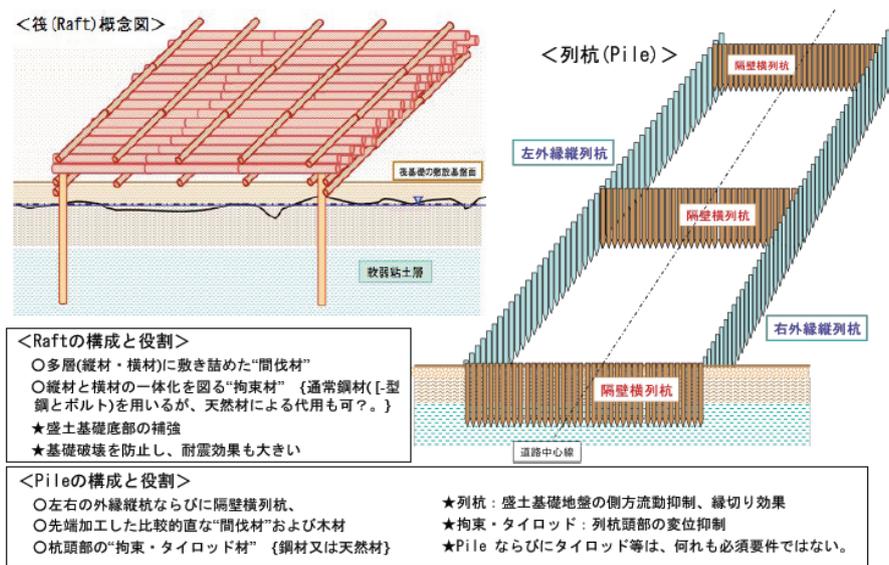
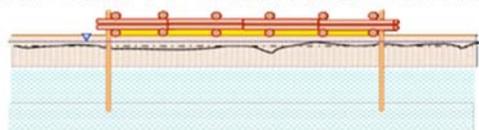
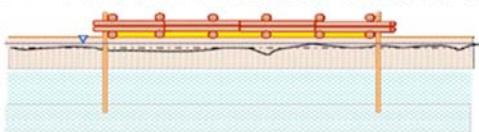


図-4.25 ラフト&パイル工法の基本構成と役割

(1) 列杭(Pile)を打設・タイロッドで連結し、筏基礎(Raft)を組み立てる。



(2) プレローディング等によって「筏と列杭基礎」を地下水位以下に沈める。



(3) 盛土や構造物本体を施工する。

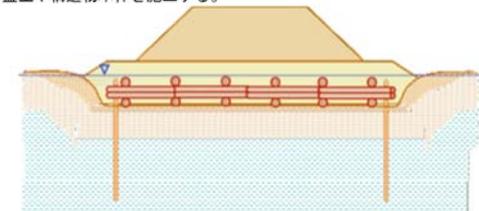


図-4.26 標準的な施工手順

の耐久性を確保するためである。ラフト&パイル工法の基本構成と役割、および基本的な施工手順を次に示す。

基本構成

図-4.25 には、筏(ラフト)と列杭(パイル)構造の概念ならびに夫々の主な役割を示している。

標準的な施工手順

図-4.26 は、ラフト&パイル基礎の標準的な施工手順を示したものである。安定した地下水位は比較的高いが、プレロード等による圧密沈下が小さく、地下水位以下に木材基礎(ラフト&パイル)を沈めることが不十分な場合には、ラフトの施工時に一時的に地下水位を低下させて地盤を必要な深さまで掘り下げ、ドライワークでラフトとパイルを施工した後覆水させ、基礎の木材を恒常的な地下水位以下に保持する方法も、十分有効である。

ラフト&パイル工法の特長

当該工法は、人工林間伐・森林整備によるCO₂の吸収促進並びに耐久性材としての木材利用によるCO₂のストック化により、二重の意味で温暖化対策に貢献するとともに、軟弱地盤の基礎工法としても、次に挙げるように多くの特長を持っている。

- a) 木材基礎は、地下水環境が海水・淡水に拘わらず、また木材の樹種によらず、地下水位以下に保持することによって、数百年を越す耐久性を確保できることが実証されている。
- b) 直径や長さの不揃いな間伐材だけではなく、強風で揉まれた木や根曲りした木等、通常の木材としての用途に不向きな木材も、ラフト(筏)材として利用することが可能である。
- c) 多層のラフトを組むことにより、版構造の基礎を構築することができ、かつラフトの縦材および横材の層数と本数等を変化させることで、設計段階で版の剛性を二次元的にコントロールすることが

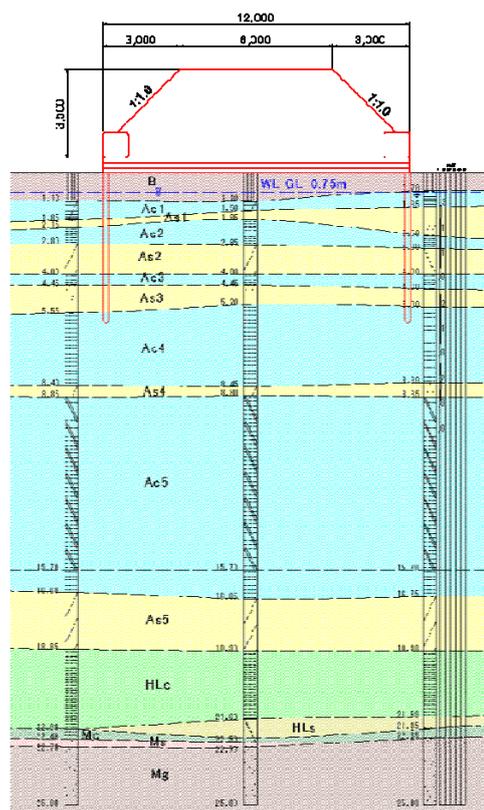


図-4.27 試験地の地質断面

表-4.8 支持力係数

	N_c	N	N_q
0°	5.3	0.0	3.0
5°	5.3	0.0	3.4
10°	5.3	0.0	3.9
15°	6.5	1.2	4.7
20°	7.9	2.0	5.9
25°	9.9	3.3	7.6
28°	11.4	4.4	9.1
32°	20.9	10.6	16.1
36°	42.2	30.5	33.6
40°以上	95.7	114.0	83.2

可能である。

- d) パイル（列杭）頭部の変位をタイロッド等で抑止し、且つラフト基礎と一体化することで、盛土時の側方流動を効果的に抑制することができる。
- e) パイルの列数と本数および杭の間隔や長さ等は、事前の地盤調査の地質状態に応じて効果的な設計を行なうことができる。
- f) 軟弱地盤における版構造のラフト基礎は盛土の底部破壊を抑止し、盛土内破壊を発生させない範囲で、盛土の急速施工が可能である。
- g) 版構造のラフト基礎と一体化したパイルは、当然地震時においても効果的に盛土の破壊を抑止できるとともに、液状化する地盤上の盛土では沈下や変形、側方流動に対する高い安全性を確保することができる。
- h) 両パイルの内側・ラフト基礎下の地盤に、バーチカルドレーン工法や大気圧密工法を併用することにより、周囲への影響低減と工期短縮など、より効果的な設計・施工が可能である。
- i) 線形構造物の盛土等を横断する道路や水路・樋管等のカルバートボックスを、ラフト基礎に抱き込む形で設置することで、段差や変形差を抑制することが可能である。

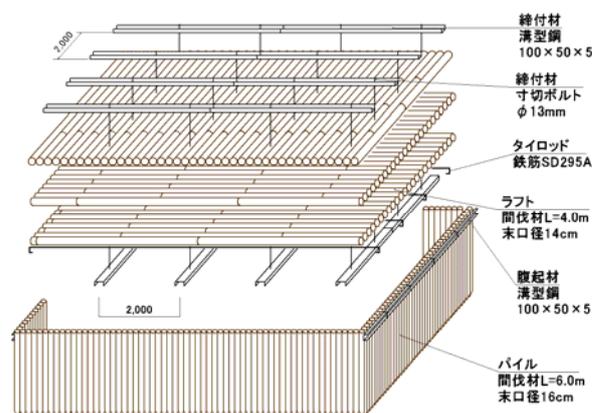


図-4.28 「施工試験」の概略構造



写真-4.15 列杭の打設

(4) 「施工試験」の実施場所と地盤

現場「施工試験」の場所は、有明海沿岸の佐賀空港南側の敷地内である。試験区において実施したボーリング調査結果を基に作成した地質断面図と試験体の断面を、**図-4.27**に示す。当該地の地質は、筑後川に近い粘性土と砂質土が互層状態であり、上部約5.5mでは砂質土層が卓越している。

(5) 「施工試験」の概要

「施工試験」の概略構造を、**図-4.28**に示す。試験規模は、建築等の構造物基礎を想定して12m×12m平方とした。周囲に直径20cm～24cm、長さ6mのパイル（列杭）を打設した後、盛土荷重による地盤の側方変位を抑制するため、パイル頭部に腹起材を設置し、タイロッドで連結した。ラフトは、定尺4mの間伐材を多層に敷き詰めるため、上下の締付材（溝型鋼）を寸切りボルトを用いて連結し、版構造を形成した。タイロッドと寸切りボルトに作用する張力を鉄筋計により計測した。また、ラフト上面に5個の沈下板並びに中央測線上のパイル傍に連続地中変位測定孔と測線上の5箇所に地表変位杭を設置し、ラフトの沈下とたわみ並びに地中と地表面の変位を計測した。また、地盤の粘土層に、4個の間隙水圧計と5個の層別沈下計を設置して、地盤の圧密沈下量とその進行状況を計測した。試験盛土の形状は、**図-4.27**に示すように、一段目にトンバグを設け、平均盛立て速度0.75m/dayで、高さ3.5mまで盛り上げた。全盛土重量は、約600tである。



写真-4.16 間伐材の設置



写真-4.17 締付材の設置

(6) 施工手順と使用機械等

実施した「施工試験」の施工手順ならびに使用機械等を以下に示す。

整地・仮設工：ブルドーザー等

パイル（列杭）工

a) 木杭 $L=6\text{m}$ の打設： 木杭の打設は、写真-4.15 に示すように、汎用的なバックホウ (0.7m^3) に杭打設用のアタッチメントを取り付けて実施した。

b) 腹起材・タイロッドの設置： 杭頭の外側に溝型鋼 ($100 \times 50 \times 5\text{mm}$) を設置し、タイロッドとして異形鉄筋 SD295A を溶接した。

ラフト（筏）工

a) 締付材の設置： 溝型鋼 ($100 \times 50 \times 5\text{mm}$) に寸切りボルトを取り付けたものを、一定の間隔で設置した。

b) 間伐材 $L=4\text{m}$ の設置： 写真-4.16 に示すように、木材の継手が同断面に集中しないよう、間伐材を配置した。

c) 締付材の設置および締付け： 写真-4.17 に示すように、ガスを用いて孔を開けた溝型鋼 ($100 \times 50 \times 5\text{mm}$) に、寸切りボルトを通しナットで固定した。

盛土工： バックホウ (0.7m^3) およびハンドガイド式の振動ローラを用いて転圧を行い、盛土高さ 3.5m まで盛り立てた。

(7) 「施工試験」の観測結果と考察

ラフトの沈下と変形

ラフト上面に設置した沈下板の沈下量、図-4.29 に示す。また、図-4.30 は、盛土開始後 1 日目と盛土開始 5 日目（盛土完了時）並びに 143 日目の沈下量から求められるラフトの形状変化を示す。盛土開始後 1 日で、約 10cm の即時沈下が観測されており、これはパイルの頭部にラフトを敷設しているため、ラフトと地盤面に生じていた空間量を示していると考えられる。また、ラフトの両端にはパイ

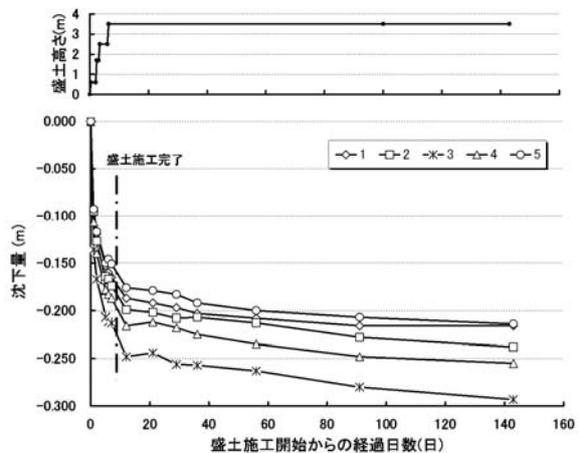


図-4.29 盛土高と沈下板の経時変化

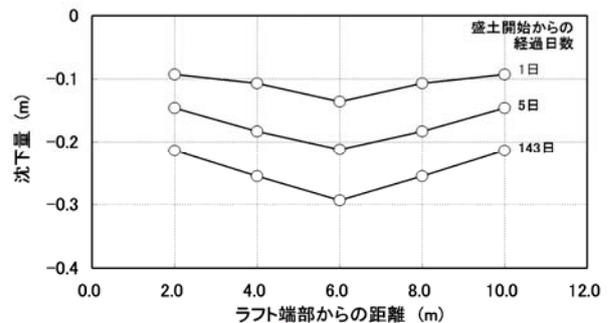


図-4.30 ラフトの沈下形状

ルからの上向きの力が作用しているため、ラフト中央が大きな沈下量となっている。その後 5 日目ならびに 143 日目の沈下形状は、中央部が幾分大きいものの、ほぼ相似形を示しており、地盤の圧縮・圧密によるものである。

地盤内の層別沈下

各粘土層における沈下量の測定結果を、**図-4.31** に示す。盛土荷重による沈下が確認された層は Ac2～Ac5 の粘土およびシルト層であった。沈下量としては、盛土施工開始から 143 日後の段階で、上部のシルト質粘土層の Ac2～Ac3 における沈下量が 5.9cm、中間部の粘土層 Ac4 が 3.8cm、下部の粘土層 Ac5 が 3.3cm、さらに、最下粘土層（下部蓮池層）HLc が 1.0cm であった。

地中変位（側方変位）

挿入型傾斜計を用いて測定した地中の水平変位の測定結果から、砂層に比べて粘土およびシルトで形成された地層における側方変形が優勢であり、打設したパイル先端部である深度 6m 付近が最も大きく約 15mm 程度変位することを確認した。また、表土付近は側方に変動していないことから、タイロッドの拘束により、杭頭付近における地盤の水平変形が抑制されている。従って、パイルには上から 2～3m 付近に最も大きな曲げ応力が作用していると推察された。

粘性土層の間隙水圧

粘性土層に埋設した間隙水圧計による過剰間隙水圧の経時変化を、**図-4.32** に示す。盛土荷重による過剰間隙水圧の明確な発生を観測した層は Ac2、Ac4、Ac5 の粘土層およびシルト層である。Ac2 では、過剰間隙水圧が生じるが層厚が 1.00m 程で、上下を砂層に挟まれており、過剰間隙水圧は 3 日程度で消散した。Ac4 では、粘土層の層厚が 3.25m で、Ac2 と比べて排水距離が長いことから、過剰間隙水圧はやや緩やかに消散した。Ac5 は層厚が 8.05m と比較的厚く分布していることから、発生した過剰間隙水圧は、Ac2 と Ac4 と比べて緩やかに 10 日程度で消散した。図を割愛した HLc における過剰間隙水圧は、多少増減は見られるものの、周期的であることから、潮汐の影響によるものと考えられる。上記の結果から、圧密現象が生じたのは、Ac1～Ac5 の粘土およびシルト層であり、いずれも、盛土の施工開始から 2 週間ほどで過剰間隙水圧はほぼ消散していることを確認した。

パイルの頭部連結タイロッドの軸力

パイルの頭部連結タイロッドに生じた軸応力を、**図-4.33** に示す。グラフのプラスの値は引張応力を表しており、盛土荷重によりタイロッドに引張応力が生じていることを確認した。地中の水平変位の結果と併せて、タイロッドによりパイル杭頭の側方変形が抑制されていることを確認した。

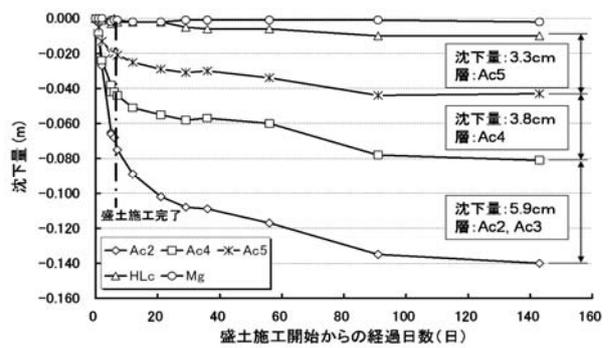


図-4.31 各粘性土層の沈下量の経時変化

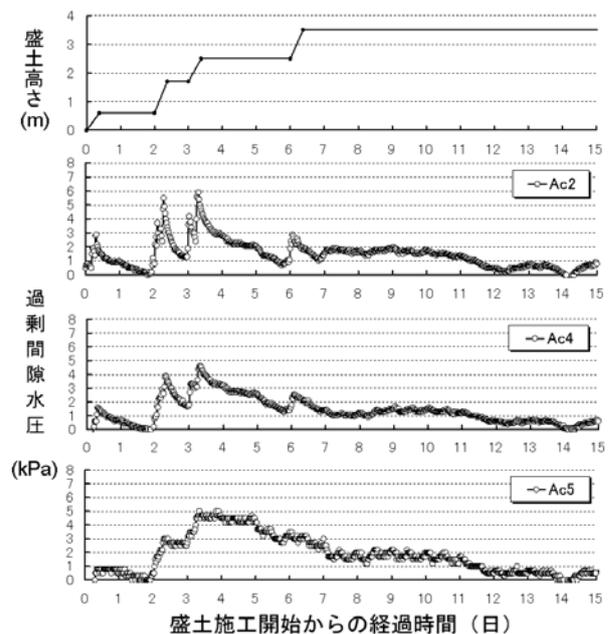


図-4.32 粘性土層の間隙水圧の変化

ラフトの締付材の連結ボルトの軸力

ラフトの上下締付材を連結するボルトに生じた軸応力を、図-4.34 に示す。タイロッドと同様、引張応力が生じていることが確認できる。盛土荷重によりラフトにたわみが生じていることから、ラフトのたわみ変形に伴い締付材の連結ボルトに引張応力が生じたことが推察できるが、その値は小さい。

(8) まとめ

建築構造物の基礎を想定した今回の「施工試験」により、「ラフト&パイル工法」の施工が、特殊な重機を用いることなく、汎用的な建設機械と地場建設業者の技術で十分可能であることが確認できた。また、施工手順と施工速度等を把握し、施工マニュアル並びに施工歩掛り等の基礎資料を得ることができた。現場における実物大試験により、ラフト&パイル工法における、盛土荷重による沈下や地中の側方変形などの地盤の変形特性を確認することができた。また、タイロッドがパイル杭頭の側方変形に対する抑制効果を有していることや、締付材がラフトのたわみ変形に対する抑制効果を有していることが確認できた。しかし、場所や地盤地質条件ならびに時間的制約から、「施工試験」で実測された圧密沈下量は、当初の想定よりかなり小さかった。今後より大きな圧密沈下が予測できる地盤条件での「実証実験」を実施し、設計・施工方法・マニュアル等を確認する予定である。

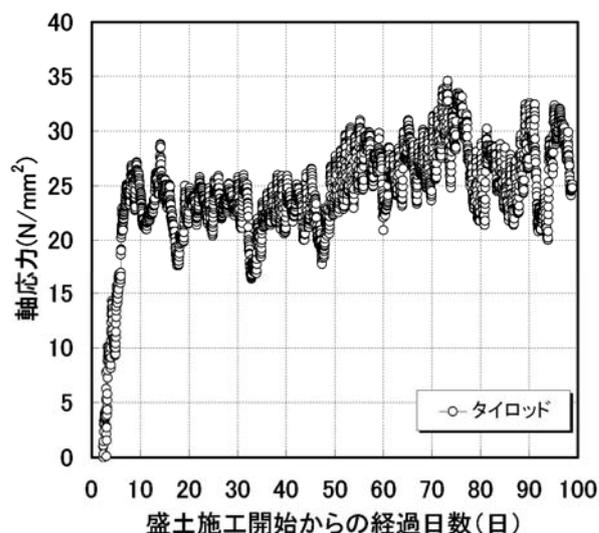


図-4.33 タイロッドの軸力の変化

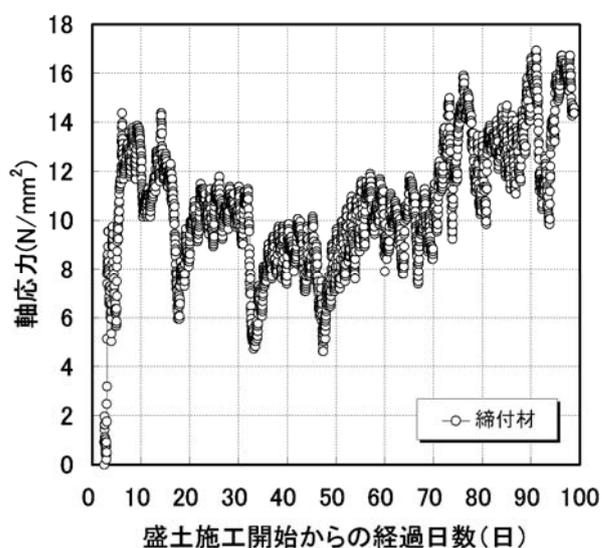


図-4.34 締付けボルトの軸力の変化

謝辞： 「4.4.2 佐賀県農業用排水路の例（クリーク）」では、佐賀県県土づくり本部、(財)佐賀県土木建築技術協会、(社)佐賀県県土づくりコンサルタント協会の会員には、幾重の検討を頂いた。佐賀県林業試験場では、木材試験に御協力を頂いた。「4.4.3 ラフト & パイル工法の施工試験」は、佐賀県が実施している「2010年（平成22年）度佐賀中小企業応援基金事業」の支援を得て行ったものである。財団法人佐賀県地域産業支援センターの方々には、多大なるご助力を頂いた。関係各位にここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2000.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.
- 3) 日本建設学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)，2007.
- 5) 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.
- 6) 土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」 基準書・技術書，農林水産省農村振興局，pp.278，2001.
- 7) 土木工事共通仕様書，農林水産省農村振興局，2011.
- 8) 佐賀県県土づくり本部・(社)佐賀県土づくりコンサルタント協会・(財)佐賀県土木建築技術協会，水路用ボックスカルバートの木杭一底盤系基礎～設計マニュアル(改訂版)～，2009.
- 9) 新潟県農地部，基礎木杭設計指針，2011.
- 10) 佐賀県佐賀中部農林事務所・アジア航測株式会社，平成15年度県営ほ場整備事業 兵庫東部地区 第1号委託報告書，2004.
- 11) (株)精工コンサルタント，県経営体 第5211011-003号 蓮池地区 県営経営体育成基盤整備 事業委託報告書(佐賀県佐賀中部農林事務所発注)，2009.
- 12) 日本建築学会，小規模建築物基礎設計指針，2008.
- 13) 日本建築学会，小規模建築物基礎設計例集，2010.
- 14) (社)セメント協会 LCA プロジェクト，文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター：科学技術動向，2009.5.
- 15) 三浦哲彦，呉文経，中村六史，一瀬智郎：軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察，土木学会論文集，No.517/III-31，63-72，1995.
- 16) 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 43(5)，pp.40-42，1995.
- 17) 佐賀県県土づくり本部・(社)佐賀県県土づくりコンサルタント協会・(財)佐賀県土木建築技術協会：「プレキャストL型擁壁(2m以下)の木杭一底盤系基礎～設計マニュアル(第1版)」，2008.9.
- 18) 佐賀県県土づくり本部・佐賀県県土づくりコンサルタント協会他：「水路用ボックスカルバートの木杭一底盤系基礎～設計マニュアル」，2005.
- 19) 佐賀県県土づくり本部・(社)佐賀県県土づくりコンサルタント協会・(財)佐賀県土木建築技術協会：「水路用ボックスカルバートの木杭一底盤系基礎～設計マニュアル(改訂版)」，2009.12.
- 20) 三浦哲彦：木材利用の過去・現在・近未来，木材利用シンポジウム in 佐賀，pp.11-24，2009.
- 21) 宮副一之，福岡仁，竜田尚希，日野剛徳：木杭一底盤系基礎を用いたプレキャストL型擁壁の現場載荷試験(速報)，低平地研究，No.17，pp.41-48，2008.
- 22) 福岡仁，竜田尚希，宮副一之，日野剛徳：L型擁壁における長期静的荷重時・ダンプトラック走行時の杭頭荷重と光ファイバー式ジオグリッドのひずみについて，低平地研究，No.19，pp.11-16，2010.
- 23) 三浦哲彦：佐賀県における産官学一体となった木材利用への取り組み，木材工業，Vol.63，No.12，pp.616-619，2008.
- 24) 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所，泥炭性軟弱対策マニュアル，2011.
- 25) 財団法人 北海道開発協会，泥炭性軟弱地盤における河川堤防の設計・施工指針，1982.
- 26) 財団法人 日本木材総合情報センター，<http://www.jawic.or.jp/kurashi/jtree/s7-karamatsu.htm>，<http://www.jawic.or.jp/kurashi/jtree/s10-sugi.htm>，2011.11.10.
- 27) 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構森林研究本部 林産試験，<http://www.fpri.asahikawa.hokkaido.jp/dayori/0707/2.htm>，2011.11.10.

- 28) 喜連川聰容, 三浦哲彦, 松本秀次郎: 佐賀平野軟弱地盤地域の戸建住宅基礎に関するアンケート調査結果, 軟弱地盤, pp.59-65, No.3, 2006.5.
- 29) 田中剛, 大和真一: 新スウェーデン式サウンディングによる佐賀平野沖積層の調査事例～従来工法との比較～, 軟弱地盤, pp.38-48, No.7, 2010.5.
- 30) 藤川和之, 原義徳, 逆瀬川方久, 三浦哲彦: 佐賀平野における帯状構造物の地盤調査間隔について, 土と基礎, Vol.52, No.11, pp.20-22, November,2004.
- 31) 三浦哲彦: 基調講演 木材利用における過去・現在・近未来, 木材利用シンポジウム in 佐賀 講演集, pp.11-24, 2009.12.
- 32) 三浦哲彦, 呉文経, 中村六史, 一瀬智郎: 軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.517/ -31, pp.63-72, 1995.
- 33) 佐賀県県土づくり本部, (社) 佐賀県県土づくりコンサルタンツ協会, (財) 佐賀県土木建築技術協会: 水路用ボックスカルバートの木杭ー底盤系基礎～設計マニュアル(改訂版)～, 66p, 2009.12.
- 34) 屋我嗣良, 河内進策, 今村祐嗣: 木材科学講座 12 保存・耐久性, pp.74-75, 1997.
- 35) 山口修, 山浦好孝: 木製構造物耐久性調査中間報告書(林道編), 2007.2.
- 36) 三浦哲彦: 木材利用シンポジウム in 佐賀基調講演冊子, pp. 21-22, 2009.12
- 37) 佐賀県: 佐賀県森林・林業統計要覧, pp.2-21, 2010.12.
- 38) 末次大輔, 林重徳, 原弘行: 筏基礎と列杭による河川堤防の側帯盛土基礎の現場試験, 木材利用研究論文集, Vol.9, pp.11-70, 2010.9.
- 39) 原弘行, 林重徳, 末次大輔, 水城正博: 海水環境下における石灰処理土の性状変化に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.21-30, 2010.1.
- 40) 末次大輔, 林重徳: 間伐材を利用した盛土基礎に関する模型実験, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, pp.357-358, 2009.9.