

報文 木杭の支持力機構と耐久性

水谷 羊介*

1. はじめに

この表題を見て「木杭なんか……今さら？」と思うかもしれない。しかしながら、現存する軟弱地盤に建造する旧構造物の多くは、今もなお木杭で支えられている。近年も旧丸ビルや東京駅などの地下からも木杭が発見されており、地盤補強としてそれらの構造物を支え続けた話題は記憶に新しいと思う。耐震基準などない時代に作られた巨大な建造物の東京駅（1914年の竣工）だったが、東京駅周辺は家康が江戸に入るころはすぐそばまで海であった。そこに松杭約1万本（長さ8m）を地下に埋設して駅舎を支えてきた。その間に発生した関東大震災（1923年発生）からも、東京駅舎を守り抜いてきた。掘り返してみると、100年前の丸太にもかかわらず腐ることなく駅を支え続けてきたことがわかっている。また、その多くがまだ腐ったり割れたりすることなく健全な姿であった。さらに、この木杭は一般的な鉄筋コンクリートの杭の強度とさほど変わらないのである。どんなにコンクリートが頑丈でも、寿命はせいぜい70年。木杭のその実績にははるかに及ばない。木杭は適用範囲を明確にし設計施工を確実に行えば、現代でも十分な地盤補強工法である。

2. 支持力機構^{1), 2)}

本節では、木杭の形状など樹種による違い、それらが粘性土地盤・砂質土地盤の支持力にどう影響するのか、また既存工法との比較など、木杭の支持力機構を解明するために行なったいくつかの実験を紹介する。試験に使用した杭は表-1に示すとおりで、杭No.1～5までは小口径鋼管杭（杭No.1～4は先端閉塞ストレート杭、No.5に関しては先端拡底杭）であり、一般的に小規模建築物の

地盤補強工法として使用されているものである。杭No.6～17はすべて木杭であるが、杭No.6～9は松杭をストレート状に加工した杭であり、杭No.10～13については杭No.6～9と同径の杉杭を用意した。また、杭No.14～17は木杭の杭形状が及ぼす効果として、木杭は一般的に元口（杭頭部）が末口（杭先端）より緩やかに杭径が増加するテーパー状となっている。そこで原本をモデル化し、松杭をテーパー状（写真-1に示すように相対する面が対照的に傾斜している円錐状の部分）に加工した。また、No.14および15の元口径は同径であるが、相対する面の傾斜角（以後、テーパー角）を2倍変化させた。杭No.16および17は杭の中間部直径を同径とし、テーパー角を変化させたものである。鉛直載荷試験については施工後28日の養生期間後、地盤工学会基準『くいの鉛直載荷試験方法・同解説』準拠し実施した。まず、小口径鋼管杭と木杭の比較結果であるが、図-1より松杭と杉杭で比較した場合、材種による違いはほとんど生じていないことが分かる。また類似杭径で比較した場合、木杭（松杭および杉杭とも）はすべての杭径において小口径鋼管杭の支持力 R_a を上回っていることがわかった。木杭の支持力は

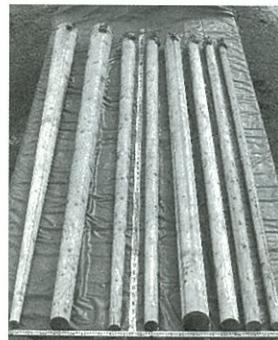


写真-1 試験に用いた木杭

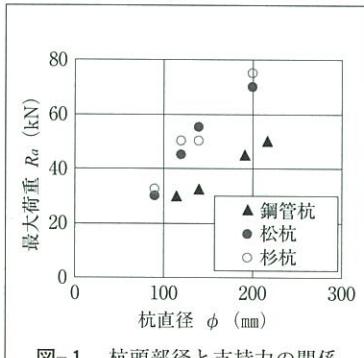


図-1 杭頭部径と支持力の関係

表-1 試験杭諸元

杭No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
各部寸法 (mm)	A	114.3	139.8	190.7	216.3	139.8	90	120	140	200	90	120	140	200	280	280	190	153
	B	114.3	139.8	190.7	216.3	139.8	90	120	140	200	90	120	140	200	210	140	127.5	127.5
	C	114.3	139.8	190.7	216.3	350	90	120	140	200	90	120	140	200	140	70	85	102
最大荷重 (kN)	30	32.5	45	50	45	30	45	55	70	32.5	50	50	75	110	80	65	65	
杭長 (m)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
杭種	鋼管	鋼管	鋼管	鋼管	拡底	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	松杭	

A : 杭頭部（元口） B : 杭中部 C : 杭先端部（末口）

*MIZUTANI Yōsuke 兼松日産農林株 ジオテック事業部 技術部 部長、博士(工学) | 東京都千代田区麹町3-2

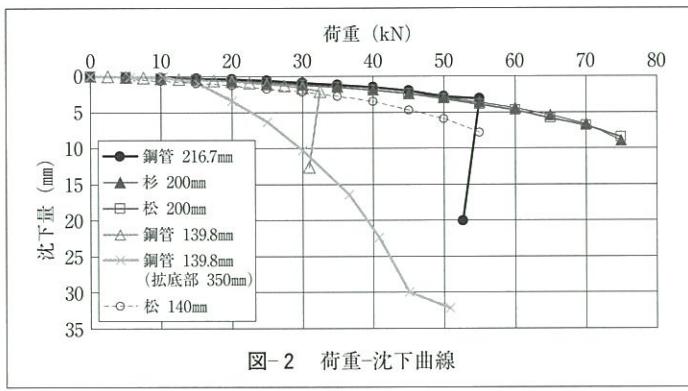


図-2 荷重-沈下曲線

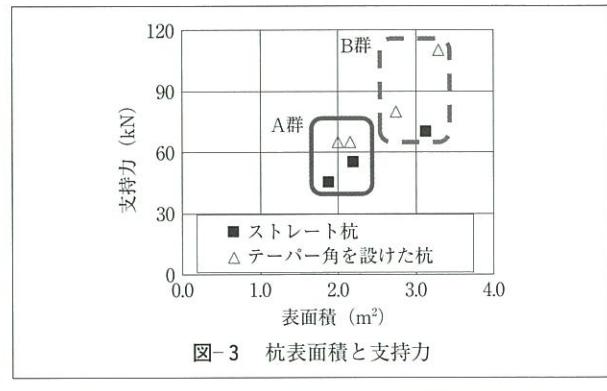


図-3 杭表面積と支持力

表-2 松杭試験結果

杭No		6	7	8	9	14	15	16	17
各部寸法 (mm)	A	90	120	140	200	280	280	190	153
	B	90	120	140	200	210	140	127.5	127.5
	C	90	120	140	200	140	70	85	102
テーパー角 (度)	0	0	0	0	0.80	1.20	0.60	0.29	
杭周面表面積 (m ²)	1.41	1.88	2.20	3.14	3.30	2.75	2.16	2.00	
最大荷重 (kN)	杭頭	30	45	55	70	110	80	65	65
	先端	24	6.71	8.68	41.07	0.613	0.153	0.226	0.325
荷重伝達率 (%)	80	14.91	15.78	58.67	0.56	0.19	0.35	0.50	
周面摩擦力 (kN/m ²)	4.24	20.31	21.06	9.21	33.16	29.05	29.99	32.29	

A : 杭頭部(元口) B : 杭中部 C : 杭先端部(末口)

小口径鋼管杭の支持力と比較すると、概ね3～5割程度増加する傾向にあった。ただし、本実験は超軟弱地盤で実施されており、杭先端部分はN値が2にも満たない超軟弱層に定着されているため、実際の小口径鋼管杭の使用方法とはかなり異なる。実際には、確実な支持層に定着することが前提となっているため、必ずしも実杭のデータと一致することは限らないことに注意が必要である。

さらに、図-2は杭No.4（小口径鋼管杭φ216.3mm）と杭No.9（松杭φ200mm）および杭No.13（杉杭φ200mm）の荷重-沈下曲線を示したものである（参考までにNo.2, No.5およびNo.7も記載した）。小口径鋼管杭、木杭とともに初期荷重時の沈下量はほとんど差が生じていない。だが、小口径鋼管杭は一定の荷重に達すると沈下量が増大し、降伏点に達していることが明確に現れるのに対し、木杭は荷重の増加に追随し沈下量も増加していく傾向があり、小口径鋼管杭の支持力機構と異なって結果が得られた。

表-2は、テーパー角を設けた杭の支持力について、松杭の鉛直載荷試験をまとめたものである。ストレート状の形状になっている杭はNo.6～9であり、杭No.14～17はテーパー角を設けた杭である。表-2より、ストレート状の杭における周面摩擦力は概ね10kN/m²～20kN/m²なのに対し、テーパー角を設けた杭では約30kN/m²であることがわかった。また、図-3は杭表面積と支持力の関係を表したもので、面積の増加に伴って支持力が大きくなっているが、表面積が同等のA群（2m²前後）およびB群（3m²前後）を見ると、A・B群ともに同じ表面積であっても、テーパー角を設けた杭の方がいずれも高い

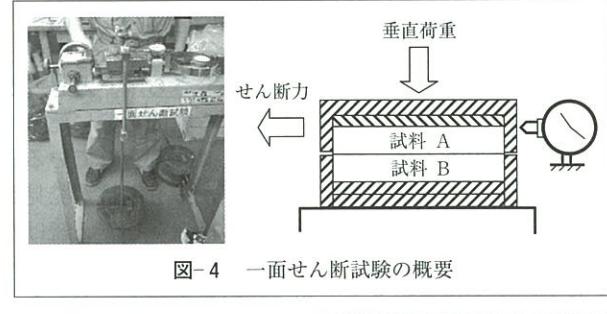


図-4 一面せん断試験の概要

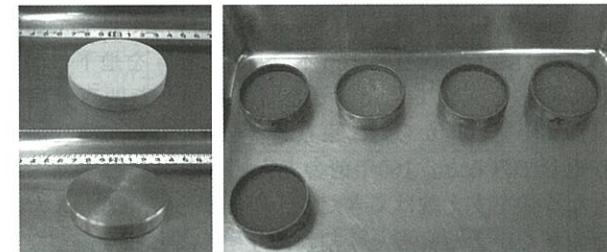


写真-2 使用した試料の1例 (左上：試料B = 米松、左下：試料B = 鉄、右：試料A = 標準砂)

表-3 試験パターン

		試料A	
		粘土(沖積粘土)	砂(標準砂)
試料B	木杭(木材)	Case1	Case3
	鋼管杭(鋼材)	Case2	Case4

支持力を発現する傾向が得られた。また、杭頭部が同径のNo.14とNo.15を比較してみると、全体の支持力としてNo.14の方が大きくなっているのが分かるが、このような結果は杭周面積の大きさの違いによるものであると予測できる。また同結果は、テーパー角を増加することにより単に周面摩擦力が増加するわけではないことを示している。

次に、これら杭周面の単位面積当たりの摩擦力を把握するために、室内試験において図-4（左）に示す試験装置を用い、杭の摩擦面をせん断装置のせん断面と仮定し供試体を作成した。供試体は写真-2に示すように直径60mm、厚さ20mmの円板形のものを上下2層に分け、せん断面をせん断箱の位置に合わせた。上段（試料A）は地盤とし、砂（標準砂〈搅乱〉、湿潤密度：18kN/m³、含水比W_n：16.4～17.6%）と粘土（沖積粘土〈不搅乱〉と湿潤密度：17kN/m³、含水比W_n：48.6～50.3%）を採用し、下段（試料B）は杭材とし、木材（米松）と鋼材(STK400)を採用した。試験パターンを表-3に示

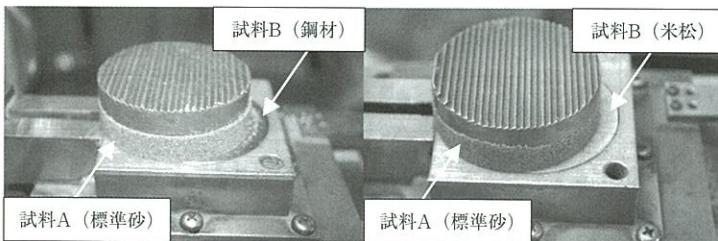


写真-3 試験終了後の状況（左が標準砂と鋼材、右が標準砂と米松）

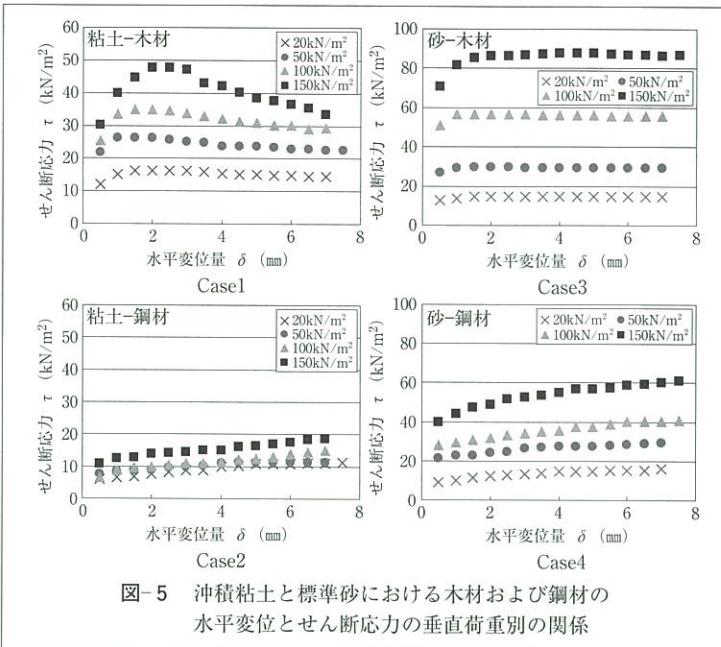


図-5 沖積粘土と標準砂における木材および鋼材の水平変位とせん断応力の垂直荷重別の関係

す。試料は、図-4（右）に示すような上下に分かれたせん断箱に入れ、一定の垂直応力のもとで上箱にせん断力を加える。そのとき試料に生ずるせん断抵抗を検力計で測定した。垂直荷重は、試料が現場で受ける応力の範囲を含んで4段階（20, 50, 100, 150kN/m²）に変えて試験した。また、せん断速度は砂で0.2mm/min, 粘性土で0.02mm/min程度で行った。写真-3に各土質における鋼材と木材の摩擦力の試験終了後の状況を、また図-5に砂地盤および粘性土地盤を想定した試験結果を示す。これらは各荷重段階における水平変位とせん断応力の関係を示しており、ほとんどの荷重段階において砂および粘土試料において、木材のせん断応力が鋼材のせん断力を上回っていることが分かる。また、木材は比較的早いせん断変位量でピーク強度が発生しているのに対し、鋼材の場合は載荷重と比例する関係が得られた。次に図-6, 7は垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係である。横軸に垂直応力、縦軸にせん断応力を、各段階の垂直応力とせん断強さとの直線関係から土の内部摩擦角 ϕ と粘着力 c を求めた。

本結果より両者とも7mm変位時の結果であるが、摩擦力に寄与する内部摩擦角および粘着力が、鋼材よりも木材の方が大きく示す傾向にあることが分かる。また、別途木材の膨張圧を把握するため、木材の膨張試験を行ったところ、木材の吸水作用による膨張圧は120kN/m²～150kN/m²であった。養生による木材の摩擦力のデータはまだ十分に取れていないが、鋼材にはない木材の周辺

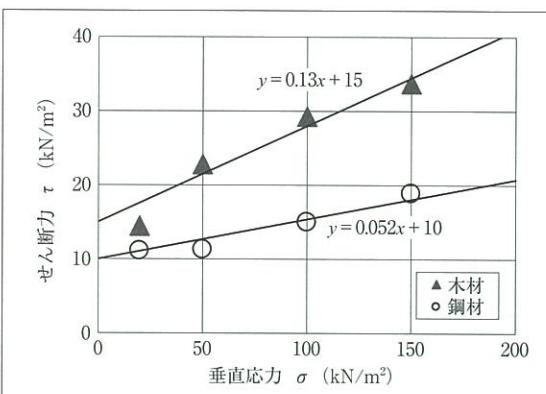


図-6 沖積粘土における木材および鋼材の垂直応力とせん断応力の関係

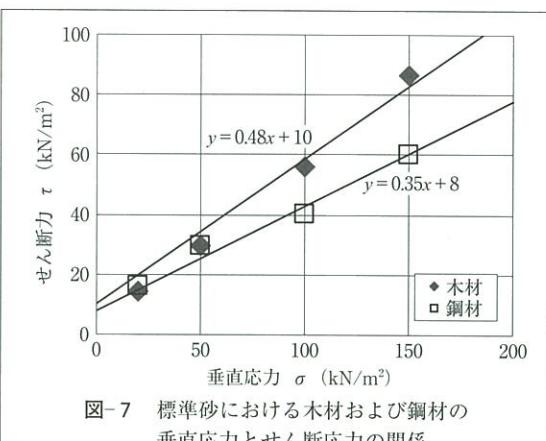


図-7 標準砂における木材および鋼材の垂直応力とせん断応力の関係

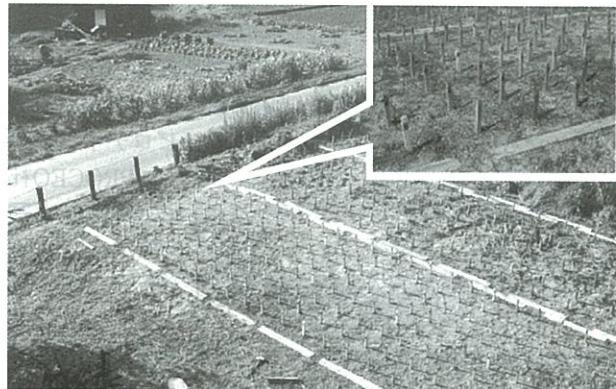


写真-4 試験ヤード（耐久性試験）

土含水吸収膨張圧は、木杭の周面摩擦力に少なからず寄与しているものと考えられる。

3. 木杭の耐久性^{3), 4)}

木材の腐朽する条件として、栄養・水分（含水約28%以上）・湿度・酸素の4条件が揃わなければならない。木杭の場合、地中利用が前提であり、大気中の条件より安全側であり腐朽しにくい環境といえるが、近年では木材の耐久性が求められる部分では防腐・防蟻剤技術を用い、耐久性をさらに高めている。本節は、木杭の野外耐久試験を行った木杭の耐久性についての一考察である。

本試験例は、愛知県知多郡美浜町の社有野外試験地（写真-4）にて、スギ辺材（柵目）を3cm×2cm×45

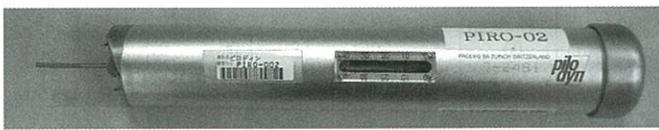
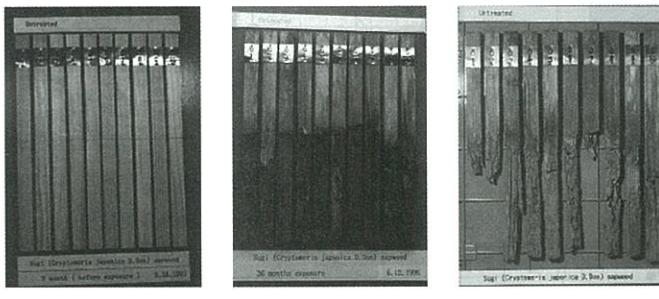
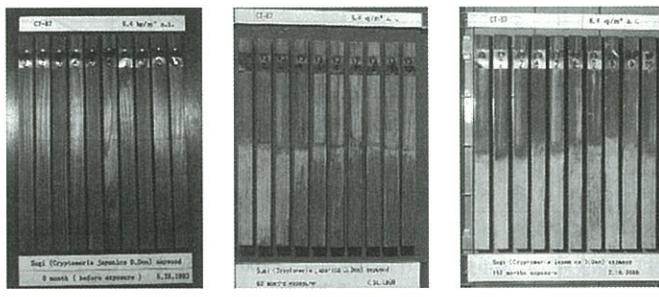


写真-5 Pilodyn試験機



1993. 5 (0ヶ月) 1993. 7 (経過1年) 2006. 2 (経過4年)
撮影時期と経過年数 (無処理杭)



1993. 5 (0ヶ月) 1993. 7 (5年2ヶ月) 2006. 2 (12年8ヶ月)
撮影時期と経過年数 (処理杭)

cmに製材したものを約22.5cm地中部に押し込み、1993年5月31日～2006年2月9日まで設置暴露した。供試体総数40体のうち無処理が20体、残りの20体は加圧注入処理加工（処理薬液は銅系薬剤を使用、以下「処理杭」という）したものである。木材の劣化試験はピロディンを用いて測定することとし、測定機器はスイスPROCEQ社製Pilodyn（ストライカーピン径2.5mm、ピン長42mm）（写真-5）を使用し、ストライカーピンを材面に直角に貫入するように打ち込み、その打込み量を P_d とし測定を行った。

写真-6は無処理の杭であるが、無処理の杭に関しては早いもので1年、遅くとも3年程度で朽ちてしまうことから、処理材との比較のため継続的に補給交換している。そのため写真撮影時の設置暴露経過期間は処理杭と単純に比較できないものである。写真は試験前、経過1年、経過4年目の状況を示す。写真-7は処理杭であり、試験前、経過5年2ヶ月、経過12年7ヶ月の状況を示す。無処理の杭は中部（地際部）付近から劣化が進行し、1年後には中部から下部にかけ劣化が進行しているのがわ

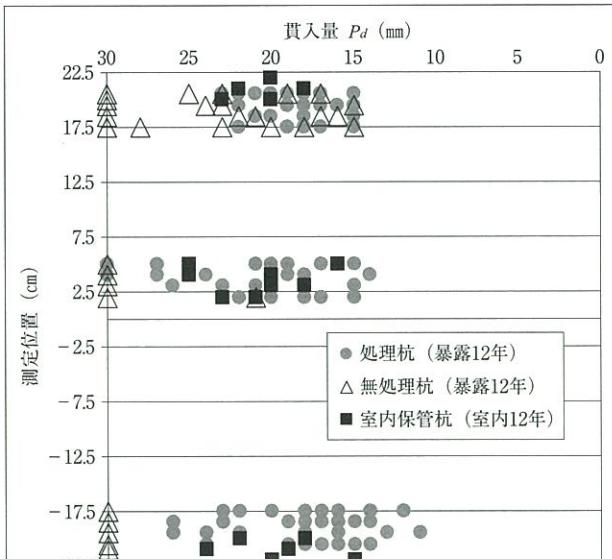


図-8 Pilodyn試験結果

かる。一方、処理した杭は、色褪は確認されるが、中部・下部（地中部）ともに断面の欠損および劣化は確認されなかった。図-8に示すように、 P_d 値は無処理杭で頭部（暴露部）が15mm～30mm以上、中部が21mm～30mm以上、下部30mm以上（腐食が激しいため測定不能）に分布している。それに対し、処理杭は頭部が15mm～23mm、中部が15mm～30mm、下部11mm～26mmに分布していた。

4. まとめ

以上の試験結果をまとめると、耐久性に関しては、従来の木杭に比べ防腐・防蟻処理を施することで飛躍的に耐久性を向上させることができあり、支持力性能に関しては、現在、小規模建築物の地盤補強工法として用いられている小口径鋼管杭と比較しても同等程度の支持力性能が得られた。このような試験結果から、木杭は十分に小規模建築物レベルの荷重に対する地盤補強工法として適用可能と考えている。木杭のさらなる普及展開に向けて研究を継続していきたい。

■参考文献

- 1) 水谷羊介他：木杭の支持に関する（その2），第46回地盤工学会，2011. 7.
- 2) 中村博他：木杭の支持力特性（その2），第46回地盤工学会，2007. 7.
- 3) 水谷羊介，中村博：木杭の支持力特性（その1），日本建築学会大会，2008. 9.
- 4) 水谷羊介他：木杭の部材および支持力特性（その1），日本建築学会大会，2007. 8.