

砂地盤かつ地下水位以浅に位置する 木杭の耐久性評価

水野 弘二¹・藤原 寅士良²・野澤 伸一郎³・水谷 羊介⁴

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所 (〒370-8543 群馬県高崎市栄町6-26)

E-mail: ko-mizuno@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-6)

E-mail: t-fujiwara@jreast.co.jp

³フェロー会員 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-6)

E-mail: s-nozawa@jreast.co.jp

⁴正会員 兼松サステック株式会社 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町3-3-2)

E-mail: ymizutani@ksustech.co.jp

古くから構造物の基礎として利用されてきた木杭に関して、施工後 100 年以上経過し、地下水位以浅かつ砂質土中にある場合の耐久性を評価した。評価方法として、木杭の目視確認、木杭周辺の土質調査、部材性能確認のための実大の木杭を用いた一軸圧縮試験と縦圧縮試験、表面劣化を確認するためのピロディン試験、支持性能確認のための鉛直載荷試験を行った。その結果、杭頭部から最大 1.5m の範囲を除き健全であり、木杭の強度や支持力は建設当時の設計値や許容応力度を満足している点を確認した。評価した木杭は、地下水位以浅に 90 年以上位置し、松を使用した含水率 45~80%の木杭であり、木杭周辺の土質は、細粒分含有率 15~25%程度、自然含水比 20~30%程度の砂質土であった。以上の木杭と同程度の物性を有する木杭は著しく劣化しないと言える。

Key Words : *wooden pile, durability, compression test, loading test, pilodyn test, railway brick viaduct*

1. はじめに

支持力を十分に有さない地盤への対応として、木杭は古くから使用されてきた。現在でも、1932年に完成した宮崎県庁舎¹⁾や、1942年に完成した多摩川大橋²⁾といった構造物に木杭の基礎が使用されており、完成から数十年経過した今も供用されている。鉄道構造物においても、明治時代初期の鉄道黎明期から多くの構造物に使用されている。例えば、1910年に開業した東京~新橋駅間のレンガアーチ高架橋の基礎³⁾や、1958年に開業した新潟駅本屋の基礎⁴⁾において使用されている。また、日本において既製コンクリート杭が使用されたのが1935年⁵⁾からであることから、それ以前に建造された橋脚や橋台等、重量物を支持する構造物の基礎には木杭が採用され、多くの木杭が現存していると推定される。これらの木杭の基礎からなる構造物は、施工後数十年、数百年と経過してもその機能を発揮しながら存在しており、木杭の劣化や腐朽から沈下や傾斜等の変状が生じた事例は少ない。

しかし、都市部における地下水汲み上げ、地下工事、

季節変動等により、木杭の施工後に地下水位が変動し、地下水位以浅に曝露された木杭が多く存在しており、木杭が劣化しているのではないかという指摘がある。このような背景から、建設後に環境の変化に曝された木杭の長期耐久性を把握することは、現在供用し続けている木杭を有する構造物の今後の維持管理の観点からも非常に有用である。

また、木杭を有する構造物の改築工事においては、木杭を撤去し新たにコンクリートや鋼材によって杭基礎を構築する事例が多い。さらに、本設利用のみならず、改築工事において、仮設の支持杭として既存の木杭を利用すれば工事のコストダウンが可能となるが、そのような木杭の適用事例は少ない。その理由は、木材は腐朽、劣化することが多いという先入観が一般的にあり、長期耐久性について不明な点が多いためと考えられる。

木杭の長期耐久性に関する既往の研究では、「82年以上前に施工された木杭に部分的な腐朽は見られるが、木杭全体的には健全であることが確認されている」点⁶⁾や、「115~116年埋設されていた木杭に表面の腐朽は認

められたが木杭内部は健全であった」点⁹が報告されており、その部分的、表面的な腐朽が発生した原因が地下水位の変動によるものと推定されている。

また、地下水位以浅でも木杭が粘性土に覆われていれば、腐朽に対して高い耐久性がある点¹⁰が確認されている。更に、地下水位以浅かつ砂質土中に位置する木杭の耐久性については、文献7)において、「地表部に粘性土があり、一定の含水比を有する砂質土に設置された木杭であれば、著しい劣化が発生していない」点が確認されているが、各種試験に基づく定量的な耐久性評価はなされていない。

そこで本論では、東京駅北通路整備工事に伴い撤去される施工後100年以上が経過し、地下水位変動により長期間地下水位以浅に位置した履歴を有し、砂質土中にある樹種が松である木杭を対象とし、耐久性を評価する。評価方法として木杭の形状、状態の目視調査を行い、木杭周辺の地盤の粒度分布、地盤の含水比および木杭の含水率を測定する。次に、実大の木杭の一軸圧縮試験、木杭から木片を切り出し実施した縦圧縮試験、表面劣化を把握するためのピロディン試験を行い、木杭の部材性能を確認する。更に、鉛直載荷試験を行い支持性能を確認する。なお、実大の木杭の一軸圧縮試験、ピロディン試験については、木杭軸方向の強度、貫入量の確認や、木杭摘出後の時間経過による影響に関する試験も実施する。

上記の結果および考察を踏まえ、建築基礎構造設計基準⁸⁾に示す木材の許容応力度や、設計支持力、ピロディ

ン試験における腐朽の目安と比較することで木杭の健全性を評価する。更に既往の研究で実施されている木杭の縦圧縮試験、載荷試験結果とも比較し、長期間地下水位以浅かつ砂質土中に位置する木杭の耐久性に関する知見を述べる。

2. 東京駅レンガ高架橋に使用された木杭の概要と地下水位の変動履歴

耐久性を評価する木杭は、1910年に開業した東京～新橋駅間のレンガアーチ高架橋の内、東京駅構内のレンガアーチ高架橋（以下、東京駅レンガ高架橋）の基礎に使用されていた木杭である。本章では東京駅レンガ高架橋に使用された木杭の概要や周辺の地質条件を述べるとともに、東京駅付近の地下水位の変動履歴と木杭の位置関係について、過去の地下水位観測記録を踏まえて推察する。

(1) 東京駅レンガ高架橋に使用された木杭の概要

東京駅の平面図を図-1に、検討対象とする東京駅レンガ高架橋の断面図を図-2に示す。耐久性を評価する木杭は、東京駅北通路整備工事の施工状況から採取しやすい位置にあった呉服橋架道橋と北通路橋台に使用されていた木杭である。いずれも乗降客用の通路である北口通路を支えていた木杭である。文献2)によると、東京駅付近

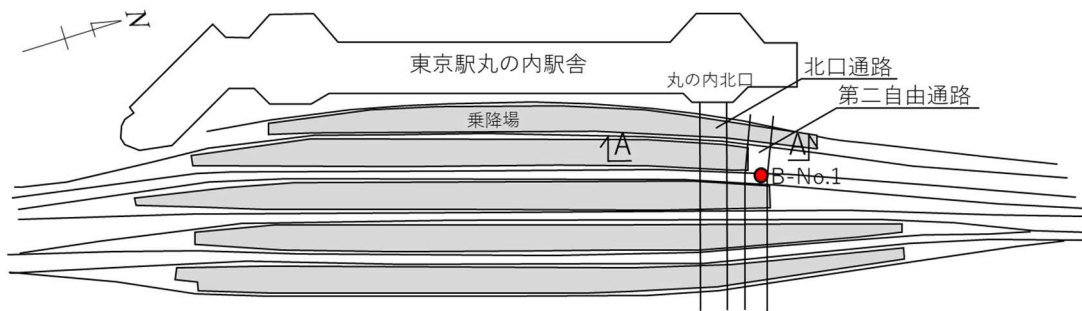


図-1 東京駅平面図

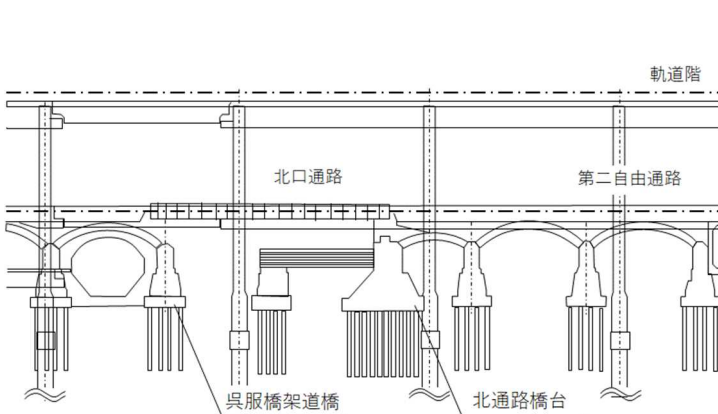


図-2 東京駅レンガ高架橋断面図 (A-A断面)

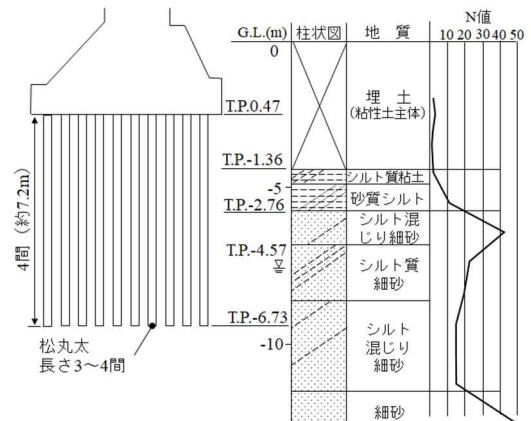


図-3 北通路橋台付近柱状図 (B-No.1)

のレンガアーチ高架橋に用いられた木杭の長さは、三～四間(約 5.4~7.2m)であり、材料として陸奥、羽後、常陸、甲斐の国産材の松丸太を使用したと記載されている。また、1本の木杭には 15tf の荷重が作用することとして設計されていた。

(2) 東京駅レンガ高架橋周辺の地質

耐久性を評価する木杭近傍の地質柱状図および木杭の位置を図-3 に示す。柱状図より杭頭部から深さ 1.8m 程度(杭頭部 T.P.0.47~T.P.-1.36 間)までは、粘性土が主体となる埋土層が存在している。埋土層以深(T.P.-1.36~T.P.-2.76 間)には、シルト質粘土や砂質シルトといった沖積粘性土層が存在している。粘性土以深(T.P.-2.76 以深)は、シルト混じり細砂や細砂から成る沖積砂質土層が存在している。また、地質調査時(2009年)の地下水位は T.P.-4.57 に位置していた。

(3) 東京駅レンガ高架橋周辺の地下水位の変動

図-4 に、東京駅付近の観測井で計測した地下水位に基づき推定した地下水位の変動履歴および木杭の位置を示す。地下水位の変動履歴の推定方法については、1950年以前の地下水位は文献9)に記載されている東京駅付近の様々な井戸の自然水位を示し、1950年以降の地下水位は、内山下町橋 BL(山手線有楽町・新橋間に位置するレンガアーチ高架橋)に設置された観測井の記録¹⁰⁾によるものである。また、2000年以降の地下水位は、文献7), 11)に示す新橋駅の地下水位測定記録から推定した。

図-4 より高架橋建設当初、杭頭部付近に位置していた地下水位は、1920年以降低下傾向にあり、1931年頃には杭先端(杭長を四間とすれば、杭先端は T.P.-6.73m)よ

り深い位置まで低下した。以降も、戦後高度経済成長期における経済活動の活性化に伴う地下水過剰揚水により、1965年頃には建設当初の地下水位より 40m 以上低下した。1965年以降は地下水揚水規制の効果により回復傾向に転じ、2010年頃には杭先端部付近まで地下水が復位しているものと推測される。図-3 に示す木杭近傍の地質調査結果(2009年実施)では、地下水位は T.P.-4.57m に位置しており、地下水位は杭先端部付近にあることが想定される。これは、図-4 に示す 2010年頃の東京駅付近の地下水位と同程度の位置である。これらの関係から、今回評価を行う東京駅レンガ高架橋の木杭は 1931~2010年頃の約 80年間は完全に地下水位以浅に位置していたものと考えられる。

3. 木杭の埋設状況と採取した木杭の形状、目視状態調査

東京駅北通路整備工事に伴い、これまで東京駅北通路付近のレンガアーチ高架橋を支持してきた木杭は撤去される。木杭の多くは作業効率の面から周辺地盤と共に機

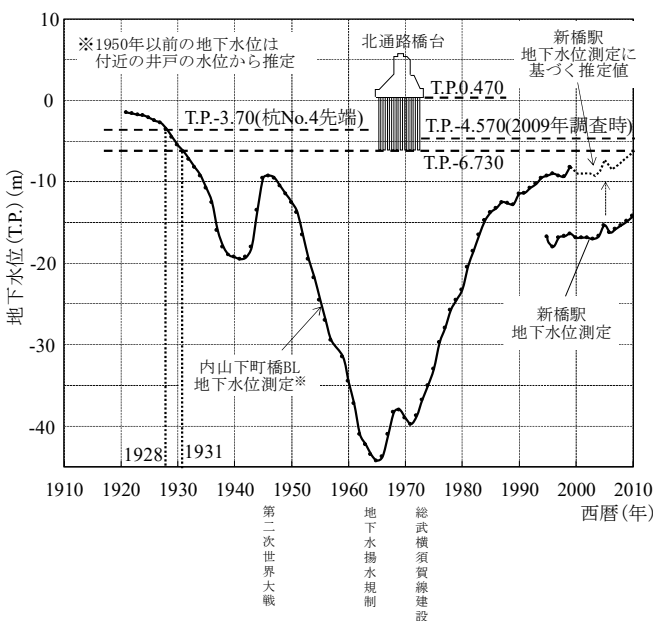


図-4 東京駅付近の地下水位



図-5 橋台と杭頭部の接続状況



図-6 橋台フーチングの基礎砕石

表-1 採取した木杭一覧

杭番号	元口径 (mm)	末口径 (mm)	杭長 (mm)	試験時期
No.1	280	277	3120	採取直後
No.2	274	270	3470	
No.3	253	248	3080	
No.4	310	287	4170	3ヶ月後 (曝気)
No.5	240	272	3560	
No.6	250	270	3560	水中養生
No.7	310	220	3990	

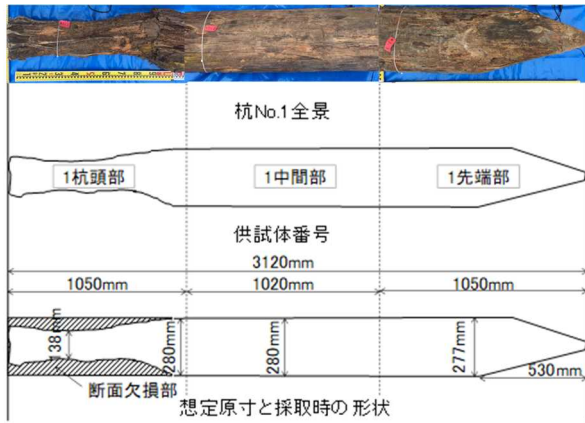


図-7 木杭の形状測定結果 (杭 No.1)

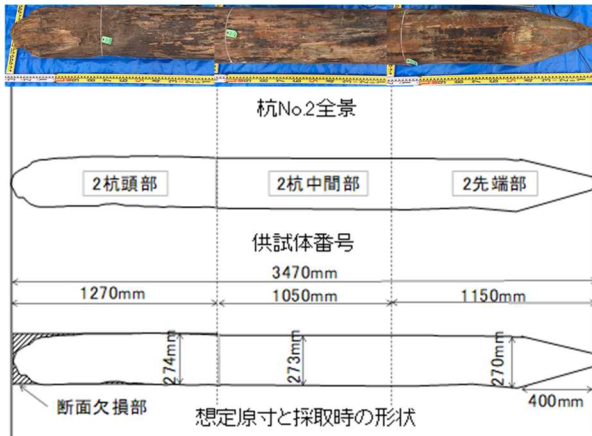


図-8 木杭の形状測定結果 (杭 No.2)

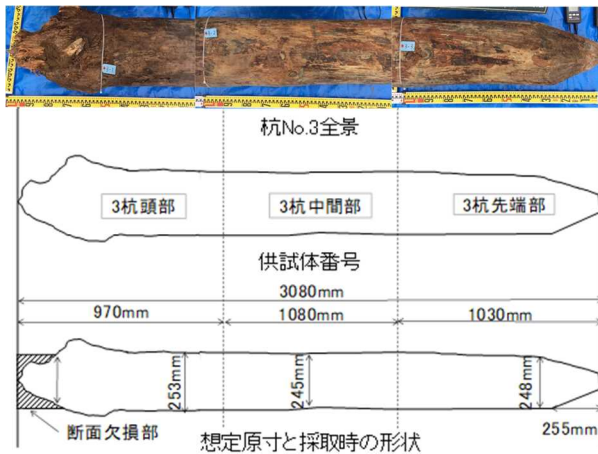


図-9 木杭の形状測定結果 (杭 No.3)

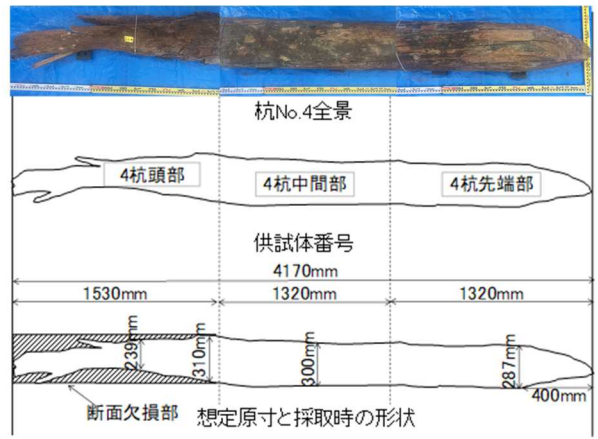


図-10 木杭の形状測定結果 (杭 No.4)

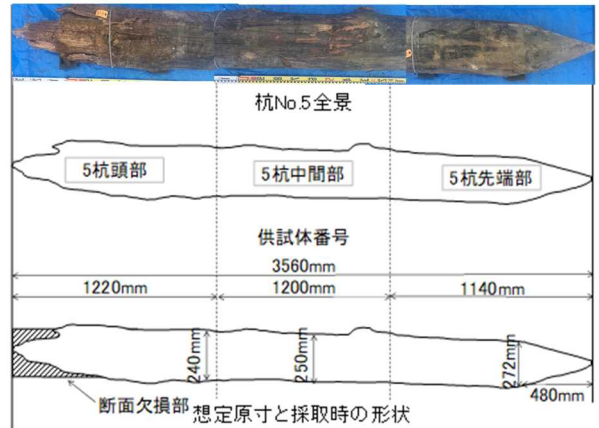


図-11 木杭の形状測定結果 (杭 No.5)

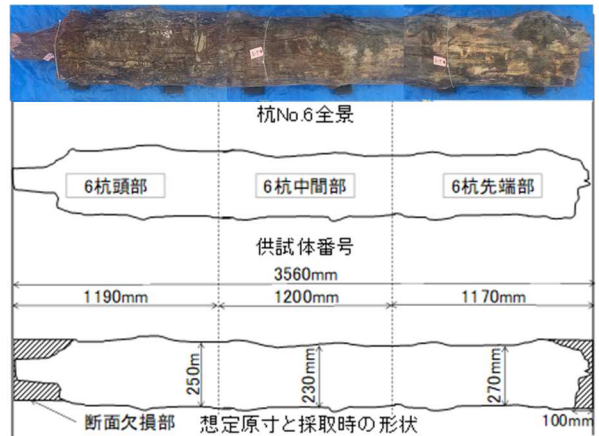


図-12 木杭の形状測定結果 (杭 No.6)

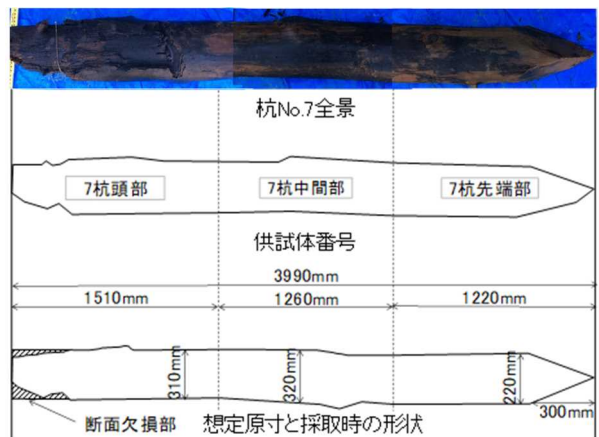


図-13 木杭の形状測定結果 (杭 No.7)

械掘削により撤去されるが、今回耐久性を評価する木杭については、木杭を傷つけないように周辺地盤を掘り下げた後に引き抜き、採取した。本章では、周辺地盤を掘り下げた際に確認した橋脚や橋台との杭頭部の接続状況や、採取した木杭の形状および木杭表面の状態を目視により確認した結果を述べる。なお、採取した木杭は図-2に示す北通路橋台の木杭である。

(1) 橋台と杭頭部の接続状況

図-5 に橋台フーチングと木杭頭部の接続状況を、図-6 に橋台と地盤の界面から確認された基礎碎石を示す。木杭は、高さ 1m 程度の橋台フーチングに対して、1D~2D (D: 杭径) 程度埋め込まれている状態であった。また、地盤と橋台フーチングの境界部にはφ 300~400mm 程度の割栗石と碎石が混合された基礎碎石層が存在していた。

(2) 採取した木杭の形状および表面状態

採取した木杭の形状を表-1 に、形状測定結果を図-7~13 に示す。表中の元口は杭頭部の杭径を、末口は杭先端部の杭径を示す。形状図は採取した木杭の全景写真から描いた。杭頭部付近の断面欠損部の形状は、健全部の形状を延長して描いた。以降の耐久性評価試験において、木杭軸方向の強度分布を確認するため、杭頭部、杭中間部、杭先端部に3分割した。

採取した木杭の杭長は3~4m程度であり、文献2)に記載された東京駅付近のレンガアーチ高架橋の杭長(3~4間(約 5.4~7.2m)) と比べ、短い杭であった。木杭は杭頭部で断面欠損しているものが多く、表面が軟化していた。杭 No.4 の断面欠損の範囲が最も広く、その範囲は杭頭から 1.5m 程度であった。一方、杭中間部から先端部にかけては断面欠損が見られず、いずれの木杭も目視確認において健全な状態であった。また、周辺地盤を杭先端付近まで掘り下げたが、地下水は確認されなかった。

採取した木杭先端部の標高は T.P.-2.61~3.7m(杭頭部 T.P. 0.47m から杭長を減じた値)であり、図-3 に示す柱状図に合せるとシルト混じり細砂層 (N値 20~40程度) に位置する。採取した木杭が想定より短かった理由として、このN値が比較的高いシルト混じり細砂層に達したため、施工時に高止まりしたものと考えられる。木杭先端部の標高は、最も杭長の長い No.4 の杭で T.P.-3.7m であり、これを図-4 の東京駅付近の地下水位に示すと、1928年頃より木杭先端が深まで地下水位が低下した(木杭が完全に曝露した)ものと想定される。更に 2010 年頃の地下水位よりも木杭は高い位置にあり、木杭採取時(2017年)には地下水位が確認されなかった。以上より、今回採取した木杭は 1928~2017 年の約 90 年間、常に地下水位に浅に位置していたものと考えられる。

図-14 に採取直後の木杭の表面状態を示す。採取した木杭の周面には、木杭間の土(以下、一般部の土)と比べて明らかに固結した土が付着していた。固着した土は、軟化や断面欠損が見られた杭頭部付近には付着していなかった。固着した土は、手では落とすことができず、バールで削ぎ落とすことで木杭表面を露出させた。

木杭の樹種は、国立研究法人 森林総合研究所 木材加工・特定研究領域 組織材質研究室で鑑定した結果、マツ科、マツ属であり、年輪数は 53~59 であった。

4. 採取した木杭周辺の土質および木杭の含水率と木杭に固着していた土

2.では、木杭近傍の地質調査結果から周辺の地質条件について述べた。本章では、木杭周辺の地盤を掘り下げた際に採取した土の粒度分布や自然含水比、木杭の含水率を確認し、目視調査結果を踏まえた木杭の健全性について推察する。また、木杭に固着していた土の顕微鏡観察結果から木杭の保水性について推察する。

(1) 木杭周辺の地盤の粒度分布と含水率

木杭周辺地盤の掘り下げに伴い、土試料を採取し、土の粒度試験 (JIS A 1204)、地盤材料の工学的分類 (JGS 0051)、土の含水比試験 (JIS A 1203) を行った。

粒径加積曲線を図-15 に、試験結果を木杭周辺の土質としてまとめたものを図-16 に示す。地盤を掘り下げた

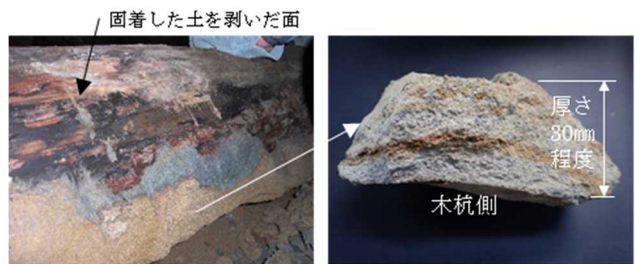


図-14 採取した木杭に固着していた土

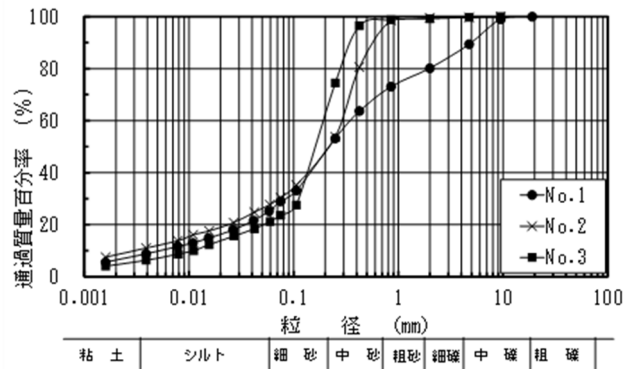
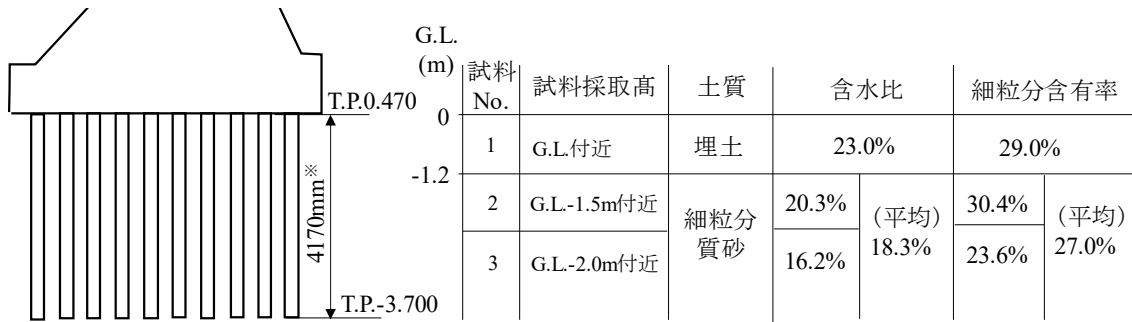


図-15 粒径加積曲線



※採取した木杭の中で最も長い杭No.4の杭長

図-16 木杭周辺の土質

際に露出した土の色調や混入物から、杭頭部より 1.2m 程度は埋土と判断した。埋土以深は細粒分質砂であった。埋土の細粒分含有率は 29.0%，細粒分質砂の細粒分含有率は 23.6～30.4%（平均 27.0%）であった。また、自然含水比は埋土は 23.0%，細粒分質砂は 16.2～20.3%（平均 18.3%）であった。

目視調査により、採取した木杭は杭頭付近において、断面欠損や表面の軟化が確認された。過去に行われた地下水水位の変動履歴を受けたと想定される木杭の調査においても、「埋戻し土で囲われた杭頭付近に腐朽の見られた」⁴⁾ ¹²⁾ことが確認されており、今回の調査結果と調和的である。木材の腐朽には水、空気（酸素）、温度の 3 条件が揃う必要がある。地表面付近は雨水等による水の侵入、その後の乾燥による空気の介在が繰り返し生じるものと想定される。更に径が大きく透水性の高い基礎砕石（図-6）により、地表面付近は水が侵入しやすい状態にあったものと考えられる。杭頭部で一様に腐朽が見られたことも雨水の侵入、乾燥を繰り返し受けたことで腐朽菌が侵攻したことが一因として考えられる。また、東京～新橋駅間レンガアーチ高架橋の木杭は、8 基のスチームハンマーと 12 基の手巻杭打ち器を使用し、地盤に打ち込んでいた²⁾。杭打ち込み時の衝撃を考えると、杭頭部は建設時に損傷していた可能性も考えられる。

一方、杭中間部や杭先端部の木杭は目視調査において、何れも健全な状態であった。地下水水位以浅で経年木杭が健全であった事例として、十代田らの調査¹²⁾において、旧東京都庁舎で経年 57 年の砂質泥土に位置する木杭が変色のみで材強度に劣化がなかった事例や、国鉄本庁舎で経年 24 年の粘性土に位置する木杭に強度低下が認められなかった事例がある。その他にも、地下水水位以浅であっても、木杭周囲が粘性土であれば高い耐久性がある点が確認されている¹³⁾。一方、砂質土中の木杭が健全であった事例は少ないが、東京駅丸の内駅舎において、「地表部に粘性土があり、細粒分含有率が 15%程度、自然含水比が 30%程度ある砂質土に設置された松を樹種と



※厚さ 10mm

図-17 木杭の含水率測定試験体

した木杭が、著しい劣化が発生していない」ことが確認されている⁷⁾。今回の調査においても、細粒分含有率 25%程度、自然含水比 20%程度の砂質土に位置する、樹種が松である木杭に著しい劣化が発生しておらず、砂質土の条件によっては、木杭は健全な状態を保つものと考えられる。今回と東京駅丸の内駅舎の条件を合せると、細粒分含有率が 15～25%程度、自然含水比が 20～30%程度の砂質土中にあれば、樹種が松である木杭は健全である可能性がある。

(2) 木杭の含水率

杭頭部、杭中間部、杭先端部からそれぞれ供試体を切り出し、含水率の測定を行った。図-17 に供試体の形状写真を示す。供試体は丸太形状のまま厚さ 10mm で切り出し、木材の試験方法（JIS Z 2101）に基づき測定を行った。試験体は目視で軟化している範囲を除いて採取しているが、軟化している範囲が広がった杭 No.1、杭 No.4 の杭頭部はその範囲を含んだ試験体を採取している。木杭は採取直後にビニールに包み、養生した上で試験場に運搬した。運搬後、ビニールを剥がし、杭 No.1～3 はすぐに試験を行い、杭 No.4～6 は 3 ヶ月間、空調のない室内で曝露した状態で保管した上で試験を行った。なお、保管期間は 2017 年 3 月～6 月までの 3 ヶ月間であり、その間の室内の平均気温は 18.3℃、平均湿度は 62.3%であった。

試験結果を表-2 に示す。採取直後の木杭の含水率は45.3~92.4% (平均 62.5%) であり、周辺地盤の含水比(図-16 に示す平均 18.3%) と比べ高い状態であった。3 ヶ月間曝露した後の木杭の含水率は 16.4~40.2% (平均 27.0%) であった。曝露させた後の木杭を目視で確認したが、表面が劣化している様子はなかった。

一般に木杭は、空気に触れる状態(不飽和状態)になると、腐朽するものと考えられているが、今回の採取直後の木杭の含水率は、軟化がみられた杭 No.1 杭頭部を除いて 45.4~80.4%であり、不飽和状態にあったが健全であることが確認された。暴露後、含水率が低下した木杭でも表面の劣化は確認されなかったが、低下した含水率での土中における性状は不明であり、今後更なる検証が必要である。よって土質条件と合せると、地下水位が浅に位置し、粘性土の介在がない木杭が健全である条件は、杭頭部から1.5m以深で細粒分含有率15~25%程度、自然含水比20~30%程度の砂質土に覆われ、含水率45~80%程度の樹種が松である木杭であることが確認された。

(3) 木杭に固着していた土の顕微鏡観察

図-18 に一般部の土と木杭周面に固着していた土の顕微鏡写真を示す。

顕微鏡観察結果より、木杭周面に固着していた土は一般部の土に比べ、間隙が少なく密な状態であった。

4.(2)で述べたように、固着した土を剥いだ状態で木杭を曝露すると、含水率は3 ヶ月程度で6割程度低下することや、周辺の土の含水比より木杭の含水率が高かった

ことを考慮すると、この密な状態にある固着した土により木杭の含水率が保持されていた可能性が考えられる。

5. 木杭の強度特性

本章では、木杭の健全性を定量的に評価するために、丸太形状に切り出した木杭を用いた実大一軸圧縮試験と縦圧縮試験を行う。実大一軸圧縮試験では、木杭軸方向の強度を設計支持力と比較し健全性を評価する。また、曝露させることで木杭の強度に与える影響を確認する。縦圧縮試験では、建築基礎構造設計基準⁹⁾に示す、松の許容応力度と比較し健全性を評価する。更に過去に東京駅付近で行われた試験結果と比較し、経年による木杭の強度変化についても確認する。

(1) 実大一軸圧縮強度試験

a) 木杭の軸方向の強度

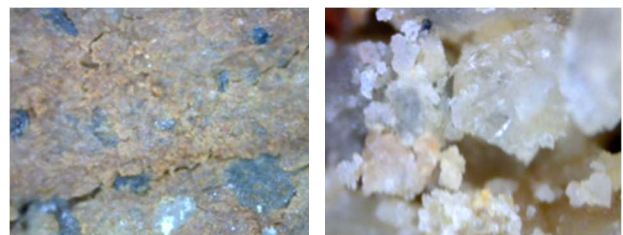
試験状況を図-19 に、計測器の配置図を図-20 に示す。試験は一軸圧縮試験機を用いて、毎分 9.8N/mm² の荷重速度で圧縮し、最大荷重値から圧縮強度を求めた。試験体の詳細を表-3 に示す。表中の杭頭部からの位置は、杭頭部から各試験体中央部までの長さを示している。平均年輪幅は杭 No.毎に平均半径を求め、それを年輪数で除して算出した。節占有率は、杭直径に対する材面の最大節幅の割合である。試験体は、採取直後の木杭を高さ約 500mm で丸太形状のまま杭頭部、杭中間部、杭先端部の3箇所から切り出した。杭頭部の試験体は、軟化している範囲は避け、目視で比較的健全であった範囲を選んで採取した。試験体はビニールで養生した上で試験場に運搬し試験を行った。なお、杭 No.1 杭頭部については、断面欠損の範囲が広いため試験体は採取していない。

試験時の荷重変位関係の一例を図-21(a), (b)に、最大荷重および最大圧縮強度を図-21(c), (d)の実線に示す。

図-21(c), (d)には後述する木杭採取 3 ヶ月後に行った試験結果(杭 No.4~6)も破線で併せて示す。杭頭からの

表-2 木杭の含水率測定結果

杭 No.	部位	含水率(%)		測定時期					
			平均						
1	杭頭	92.4	84.2	62.5	採取直後				
	中間	79.9							
	杭先端	80.4							
2	杭頭	45.4	52.3			62.5	採取直後		
	中間	57.5							
	杭先端	53.9							
3	杭頭	45.3	50.9					62.5	採取直後
	中間	48.3							
	杭先端	59.1							
4	杭頭	27.7	21.3	27.0	3 ヶ月後				
	中間	19.7							
	杭先端	16.4							
5	杭頭	40.2	30.0			27.0	3 ヶ月後		
	中間	23.8							
	杭先端	26.0							
6	杭頭	21.1	29.7					27.0	3 ヶ月後
	中間	37.6							
	杭先端	30.5							



(a) 杭に固着していた土 (b) 一般部の土

図-18 木杭に固着した土と一般部の土の顕微鏡写真 (500倍拡大)



図-19 実大一軸圧縮試験状況

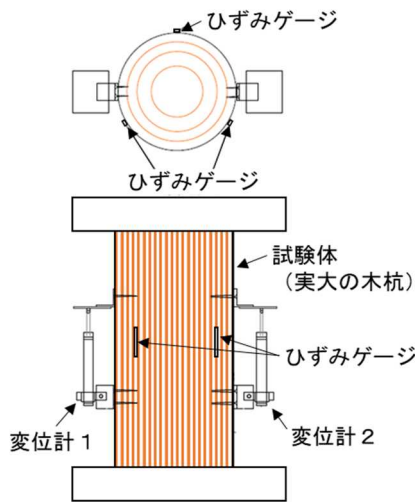


図-20 実大一軸圧縮試験計測器の配置

位置で比較すると、杭頭部（杭頭部から 600～700mm の位置）の圧縮強度は杭中間部、杭先端部と比べ低い値であった。節があった杭 No.3 の圧縮強度は、他に比べて極端に低いことはなく、節占有率により強度に与える影響は確認されなかった。また、平均年輪幅は 2.1～2.6mm と微細な違いあり、これによる強度への影響は少ないものと考えられる。

杭頭部の試験体は表面に軟化が見られず、比較的健全であった範囲を選んだが強度は低い値であった。これは、その上部の軟化している範囲の影響を受けているためと考えられる。また、文献 13)によると新材の松杭の実大一軸圧縮強度は平均 16.5N/mm² であり、今回の結果はそれを下回っている。しかし、図-21(c)の最大荷重を見ると、設計支持力である木杭 1 本あたり 15tf (約 150kN) に対して十分な圧縮強度を有しているといえる。

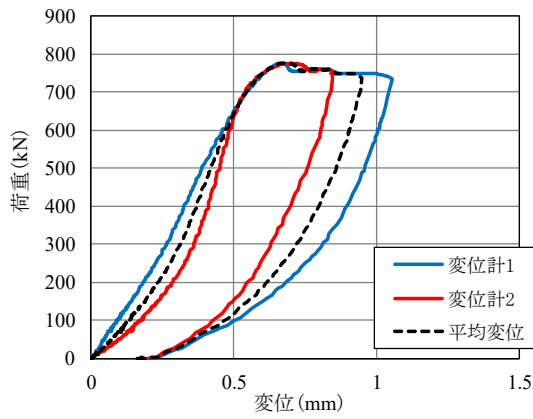
b) 曝露による木杭の強度変化

採取した木杭を含水率測定と同条件で室内で曝露した状態で 3 ヶ月間保管した後に、前項と同様の方法で実大一軸圧縮試験を行った。試験体の詳細を表-3 に示す。

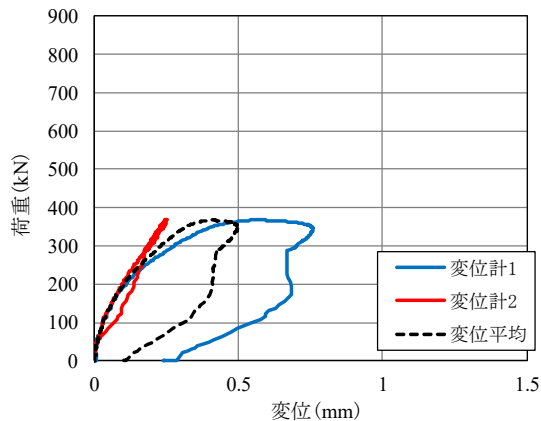
圧縮試験結果を図-21(c), (d)の破線に示す。図-21(d)の圧縮強度を見ると、杭頭部の圧縮強度は、3.8～6.5N/mm² (平均 5.2N/mm²) であり、採取直後の試験結果 (平均 8.4N/mm²) と比べ低い値であった。杭中間部の圧縮強度は、杭 No.4 (杭頭部から 1400mm の位置) を除き、曝露による影響は少なかった。杭先端部杭 No.5, 杭 No.6 の圧縮強度は、採取直後の試験結果よりも高いが、杭 No.4 の圧縮強度は採取直後より低い値であった。また、採取直後の密度と比べ、3 ヶ月後の密度は、例えば、杭 No.6

表-3 実大一軸圧縮試験試験体概要

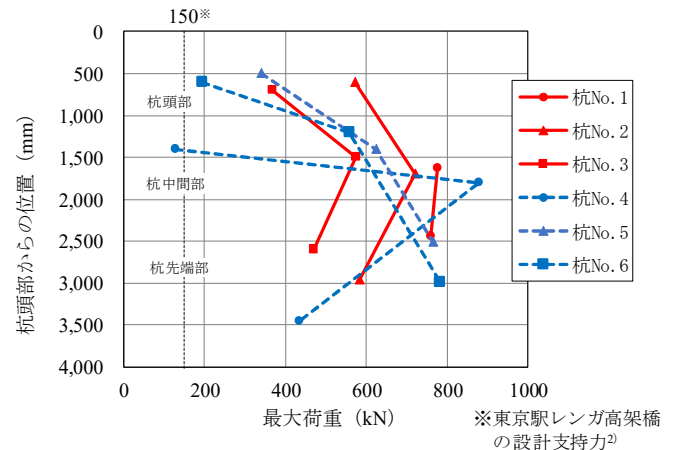
杭 No.	部位	杭頭部からの位置(mm)	試験体高さ(mm)	直径(mm)	質量(kg)	密度(g/cm ³)	平均密度	試験時期	年輪数	平均年輪幅(mm)	節占有率(%)	
1	杭中間	1630	518	279	20.9	0.66	0.60	採取直後	57	2.4	0	
	杭先端	2440	457	277	16.8	0.61					0	
2	杭頭	600	457	274	18.0	0.67			53	2.6	0	
	杭中間	1700	534	273	18.3	0.59					0	
3	杭先端	2960	542	270	17.9	0.58			58	2.1	36	
	杭頭	700	425	253	10.6	0.49					14	
4	杭中間	1500	502	245	15.5	0.65		0.46	3ヵ月後	59	2.3	19
	杭先端	2600	504	249	14.2	0.58						0
5	杭頭	1400	568	238	10.0	0.39				57	2.3	0
	杭中間	1800	597	288	19.8	0.51						0
6	杭先端	3460	566	284	14.2	0.39				58	2.2	13
	杭頭	500	515	257	10.1	0.38						0
5	杭中間	1400	541	261	13.9	0.48	57		2.3	0		
	杭先端	2510	510	255	12.2	0.47				0		
6	杭頭	600	512	255	8.9	0.34	58		2.2	0		
	杭中間	1200	497	254	14.2	0.56				18		
6	杭先端	2980	515	245	15.8	0.65	58		2.2	0		
	杭頭	600	512	255	8.9	0.34				0		



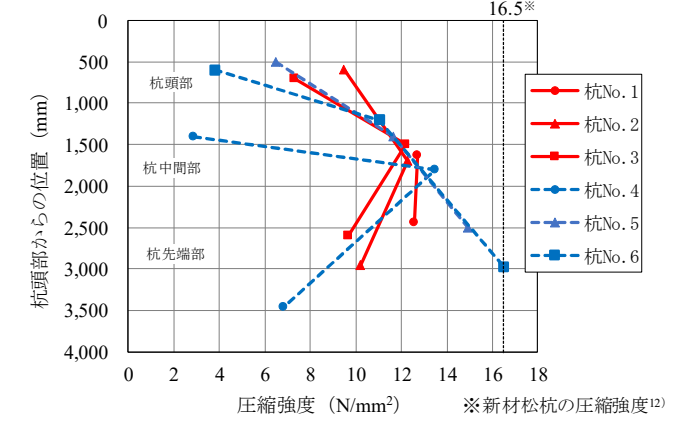
(a) 荷重変位関係 (杭 No.1 杭中間)



(b) 荷重変位関係 (杭 No.3 杭先端)



(c) 最大荷重 (kN)



(d) 圧縮強度 (N/mm²)

図-21 実大一軸圧縮試験結果

杭頭で 0.34g/cm^3 なのに対し、杭先端は 0.65g/cm^3 であり、ばらつきが大きかった。

杭中間部で杭 No.4 のみ圧縮強度が低いのは、図-10 に示すように杭 No.4 は軟化している範囲が広く、試料の採取位置である杭頭部から 1400mm においてもそのような状態にあったためである。杭先端部で杭 No.4 のみ圧縮強度が低いのは、杭 No.5、杭 No.6 と比べ密度が小さいためである。3 ヶ月後の密度にばらつきが大きいのは、採取直後は水分を多く含み、ある程度一定の密度であったが、平均密度が 0.60 から 0.46 に減少しているように、乾燥により水分が抜けたことで木材そのものの密度として計測されたため、木材としてのばらつきが表れたものと考えられる。

木杭の表面に軟化が確認された杭頭部付近は、3 ヶ月間曝露したことにより更に強度が低下したが、目視調査により健全であった杭中間部や杭先端部は、強度低下しないあるいは上昇する結果となった。杭中間部や杭先端部は、気中に曝露することで含水率が低下し、強度が上昇するものと考えられる。杭頭部も含水率は低下するが、表-3 に示すように杭中間部や杭先端部に比べ密度が小さく、疎な状態であるため強度が低いものと考えられる。

一般に気中に曝露された木杭は腐朽し、すぐに強度低下するものと考えられるが、これらの結果は、木杭の表面に断面欠損や軟化が生じていなければ、3 ヶ月程度曝露したとしても強度低下しないことを示すものである。

(2) 縦圧縮試験

試験は JIS Z 2101 木材の試験方法に準じて実施した。試験状況を図-22 に示す。試験は毎分 9.8N/mm^2 の荷重速度で試験体を圧縮し、最大荷重値から縦圧縮強度を求めた。試験体の詳細を表-4 に、試験体の採取位置を図-23 に示す。試験体は 1 辺 20mm の立方体に切り出して採取し、杭頭部、杭中間部、杭先端部の 3 箇所で行った。

過去に東京～新橋駅間レンガアーチ高架橋で行われた縦圧縮試験においては、様々な含水率の木杭で試験を行っている^{10) 14)}。また、一般に繊維飽和点(含水率 30%程度)を境に木材の強度は急激に変化することが確認されており、含水率が強度に与える影響は大きい。そこで本試験では、採取直後に水中養生した木杭(図-13 杭 No.7)を用いて、飽和状態(水中養生直後)、繊維飽和状態(含水率 30%以下)、絶乾状態(含水率 0%)の試験体

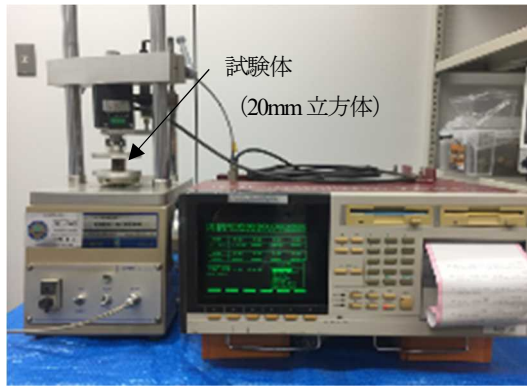


図-22 縦圧縮試験状況

表-4 縦圧縮試験 試験体概要

試験体	試験体の寸法(mm)	杭No.7					
		杭頭部		杭中間部		杭先端部	
		心材	辺材	心材	辺材	心材	辺材
試験体の寸法(mm)	20×20×20						
飽和	試験体数	9	8	9	8	9	8
	試験時密度	0.97	1.13	1.13	1.11	1.08	1.10
	試験時含水率	139.2	190.6	101.7	191.1	167.7	168.6
	試験時含水率	139.2	190.6	101.7	191.1	167.7	168.6
繊維飽和	試験体数	9	8	9	8	9	8
	試験時密度	0.46	0.46	0.44	0.48	0.48	0.47
	試験時含水率	15.1	21.2	6.98	9.71	18.6	24.1
	試験時含水率	15.1	21.2	6.98	9.71	18.6	24.1
絶乾	試験体数	9	8	8	7	9	8
	試験時密度	0.39	0.39	0.46	0.38	0.40	0.39
	試験時含水率	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	試験時含水率	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

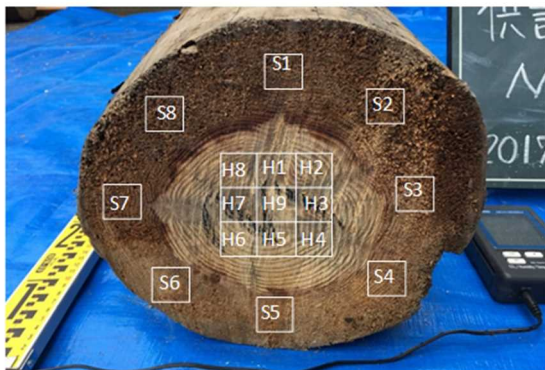


図-23 試験体採取位置

を作成し縦圧縮試験を行う。得られた縦圧縮強度と含水率の関係から指数近似曲線を描き、含水率毎の縦圧縮強度を推定できるようにする。その結果と過去に行われた縦圧縮試験結果を比較し、木杭の強度変化を確認する。

試験結果を図-24に示す。図中には東京駅レンガ高架橋と同様の仕様で同時期に施工²⁾され、過去に縦圧縮試験が行われた第三有楽橋の試験結果(2000年実施)¹⁴⁾と第四有楽橋の試験結果(1960年頃実施)¹⁰⁾を併せて示す。また、破線で建築基礎構造設計基準⁸⁾におけるまつ、べいまつ、からまつの湿潤状態における許容応力度を併せ

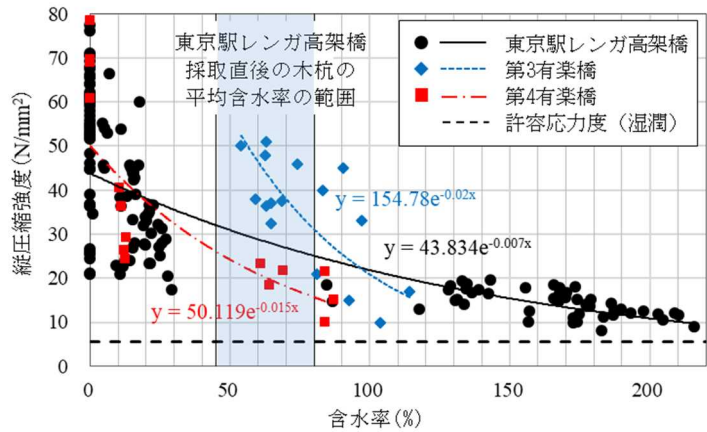


図-24 縦圧縮試験結果

て示す。曲線は各試験結果の指数近似曲線である。

縦圧縮強度にばらつきは見られるものの、許容応力度以上の結果が得られている。また、東京駅レンガ高架橋の木杭採取時の含水率(表-2に示す45~80%程度)の範囲で近似曲線を比較すると、過去の調査結果と比較しても極端な強度低下は確認されなかった。

許容応力度以上の圧縮強度が得られており、木杭は健全であると言える。また、過去の試験結果は最も古いもので、1960年頃(経年60年程度)に実施された縦圧縮試験の結果である。それと比較しても大きな値が得られていることから、少なくとも60年程度は部材強度が低下していないことが確認された。

6. 木杭面の劣化

木杭表面の劣化具合を確認するため、ピロディン試験を行った。ピロディン試験は、打込みエネルギー6Jで直径2.5mmのピンを、試験体に打ち込む試験であり、腐朽が進行した木材ほどその貫入量が大きくなる。

(1) 試験概要

試験の状況を図-25に、試験の概要を図-26に示す。木杭の周面から杭心に向かって90°ずつ(1断面4箇所)ピンを打込み、貫入量を測定した。試験は杭頭部(杭頭から1m程度)、杭中間部(杭頭から1.5m程度)、杭先端部(杭頭から2.5m程度)でそれぞれ行い、木杭の軸方向の劣化度を確認した。併せて、曝露させたことによる影響を確認するために、含水率測定と同条件で保管した後も試験を行った。試験時期は、採取直後、3日後、7日後、1ヵ月後、2ヵ月後、3ヵ月後に行った。試験を行った木杭は表-1に示す杭No.1~5である。

(2) 試験結果

a) 木杭軸方向の劣化度

図-27 に杭頭からの位置毎にまとめた木杭採取直後のピロディン貫入量の計測結果を示す。なお、ピロディン貫入量は、1 断面 4 箇所ずつ行った試験結果を平均値として整理した。



図-25 ピロディン試験状況

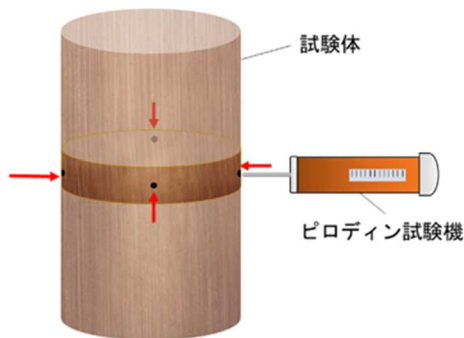


図-26 ピロディン試験概要

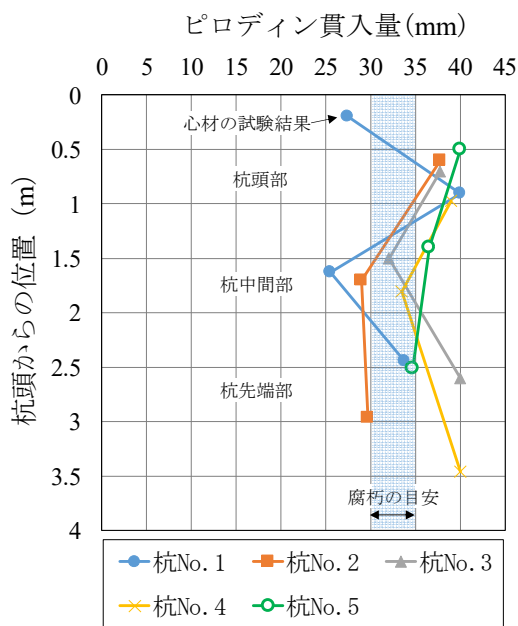


図-27 ピロディン試験結果 (測定位置別)

試験の結果、杭頭部の貫入量は 28~40mm (平均 37mm)、杭中間部の貫入量は 26~37mm (平均 31mm)、杭先端部の貫入量は 30~40mm (平均 35mm) であった。

杭 No.1 杭頭からの測定位置 200mm の貫入量は、他の杭頭部の結果と比べ小さい値となった。これは図-7 に示すように杭 No.1 は断面欠損が大きく、杭頭から 200mm の位置では、杭表面ではなく心材の貫入量となっていたためである。この結果を除くと、杭頭部の平均貫入量は 39mm となる。以上より、杭頭部の貫入量が最も大きく、杭頭部が最も劣化している結果であった。また、何れの貫入量もピロディン試験の貫入量において腐朽の目安となる 30~35mm を超えている。しかしながら、縦圧縮強度 (5.(2)) は許容値を満足する値が確認されており、実大一軸圧縮強度 (5.(1)) は設計値以上の結果が確認されていることから、構造物を支持するために必要な強度は十分有していたものと判断できる。

b) 時間経過による影響

室内で曝露させた日数とピロディン貫入量の関係を図-28 に示す。試験結果より、気中に曝露する時間が長くなるほど貫入量は小さくなる傾向が確認された。さらにそれらは杭頭部以外の結果だけで見ると、より顕著に確認された。

これは、気中に曝露したことにより木杭表面が乾燥したことで、表面強度が上がった為と考えられ、大気中の腐朽が発生しなかったことが確認された。

7. 木杭の載荷試験

5.では、木杭の部材性能について評価を行い、設計支持力や許容応力度に対して木杭の圧縮強度は十分高いことを確認した。また、過去の縦圧縮試験結果と比較して

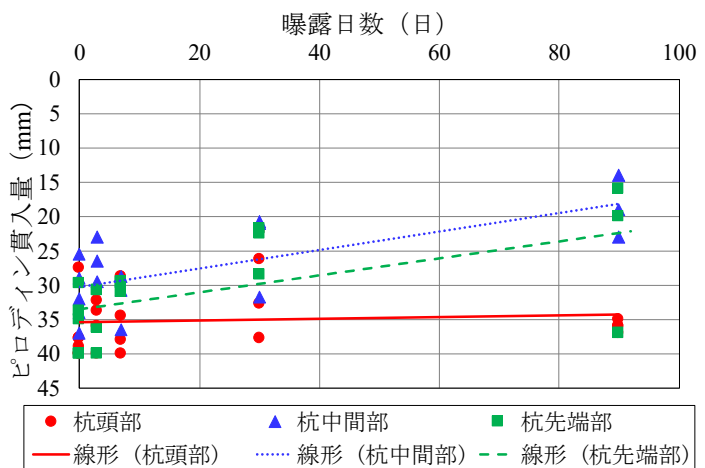


図-28 ピロディン試験結果 (曝露日数別)

も、圧縮強度の低下は見られず、木杭部材の健全性が確認された。本章では、木杭の鉛直載荷試験を行い、その結果から木杭の支持性能について、設計支持力や過去の試験結果と比較することで評価する。

(1) 試験概要

図-29に載荷試験の状況を、図-30に載荷試験の概要を示す。試験に用いた木杭は、図-2に示す呉服橋架道橋の木杭である。試験は、杭の押し込み試験方法(JGS 1811-2002)に準じて行い、載荷は連続載荷方式とした。加力装置として容量500kNの油圧ジャッキを使用し、荷重増減の操作は油圧ポンプにより行った。油圧ジャッキの反力は、木杭直上の既設高架橋の横桁を使用した。計測にあたっては基準点となる基準梁を杭頭付近に設置し、そこに変位計を取り付け、沈下量の計測を行った。木杭載荷面の状態を図-31に示す。載荷試験を行った木杭においても、杭頭部は軟化していた。そのため、その範囲(杭頭部から1000mm程度)を予め切断した上で載荷試験を行った。切断箇所の杭径は約260mmであった。

(2) 試験結果

載荷試験結果を図-32に示す。図中には、東京駅レンガ高架橋と同様の仕様で同時期に木杭が施工された高架橋で、過去に載荷試験が行われた第一有楽橋の試験結



図-29 載荷試験状況

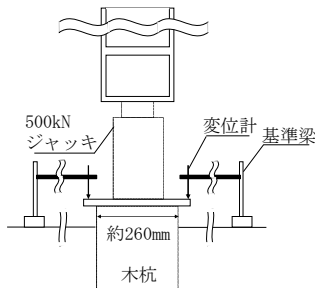


図-30 載荷試験概要



図-31 木杭載荷面の状態

果(1956年実施)¹⁴⁾と第三有楽橋の試験結果(2000年実施)¹⁰⁾を併せて示す。試験結果一覧を表-5に示す。

試験結果より、東京駅レンガ高架橋の木杭の降伏荷重はおおよそ200kNであった。

設計支持力は杭1本あたり15t(約150kN)であるため、弾性範囲内にあり、設計支持力を満足している。また、過去の試験結果と比較すると今回の降伏荷重は同程度あるいは若干低いものの、過去に試験を行った木杭よりも、東京駅レンガ高架橋の木杭は杭長が短いため、それを考慮するとほぼ同等の結果が得られているものと考えられる。比較した試験結果は最も古いもので1956年に評価された値であり、約60年前から支持性能は大きく低下していないことが確認された。

8. まとめ

本論では、施工後100年以上が経過し、地下水位以浅に位置し、かつ砂質土中にある樹種が松である木杭を対象とし、その耐久性を評価するため、採取した木杭の目

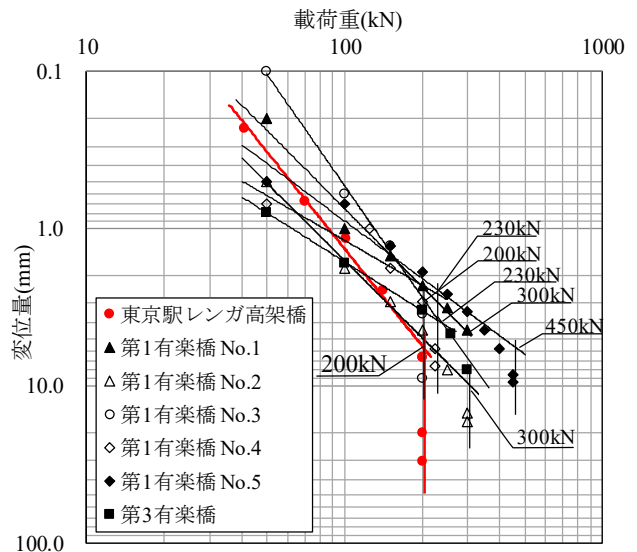


図-32 載荷試験結果

表-5 東京～新橋駅間レンガアーチ高架橋で行われた載荷試験結果一覧

高架橋	杭径(mm)	杭長(m)	降伏荷重(kN)	評価時期	
第1有楽橋	No.1	290	6.35	300	1956年
	No.2	260	8.50	300	
	No.3	300	6.35	200	
	No.4	220	7.10	230	
	No.5	450	6.47	450	
第3有楽橋	220	-	230	2000年	
東京駅レンガ高架橋	260	3m程度	200	2017年	

視による調査や、木杭周辺の土質調査、圧縮試験による部材性能の確認、鉛直載荷試験による支持性能の確認を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 採取した7本の木杭の目視調査を行った結果、すべての木杭で杭頭部付近に軟化や断面欠損が見られた。軟化や断面欠損の範囲は杭頭部から最大1.5mであった。しかし、杭頭部以深の木杭は何れも健全であった。杭頭部が軟化や断面欠損した要因として、地表面からの雨水の侵入、乾燥を繰り返し受けたことで腐朽菌が侵襲したことや、杭施工時の打撃による衝撃により建設時より損傷していた可能性が考えられる。
- (2) 実大一軸圧縮試験と縦圧縮試験により、木杭の部材性能を確認した。その結果、杭中間部や杭先端部の圧縮強度と比べ、杭頭部付近の圧縮強度は低い傾向にあったものの、建設時の設計支持力や許容応力度に対して十分な圧縮強度を有しており健全であった。また、約60年前の縦圧縮試験結果と同等の縦圧縮強度が得られ、部材性能が低下していないことが確認された。
- (3) 鉛直載荷試験により、木杭の支持性能を確認した結果、建設時の設計支持力を満足していることが確認された。また、約60年前の鉛直載荷試験結果と同等の支持力が得られ、支持性能が低下していないことが確認された。
- (4) 実大一軸圧縮試験やピロディン試験により、3ヵ月間、木杭を曝露させたことによる影響を確認した。その結果、杭頭部を除き、曝露後の木杭の圧縮強度は採取直後の圧縮強度と同等以上の結果となった。また、ピロディン貫入量は、曝露期間が長いほど小さくなった。以上の結果より、杭頭部を除き、3ヵ月間木杭を曝露しても劣化しないことが確認された。
- (5) 採取した木杭は樹種が松であり、地下水位以浅に90年以上位置し、砂質土中に埋設されていたが、杭頭部最大1.5m以深の木杭は健全であった。既往の研究と今回の土質条件を合わせると、細粒分含有率15~25%程度、自然含水比20~30%程度の砂質土に位置する木杭は著しく劣化しないと言える。また、木杭の含水率は45~80%であり不飽和状態であったが著しい劣化は発生していなかった。以上、地下水以浅で砂質土中であっても、今回調査した木杭と同程度の物性、土質を有する木杭は著しく劣化しないと言える。

長期間地下水位以浅に位置し、かつ砂質土中の木杭であっても、細粒分含有率や自然含水比、木杭の含水率によっては健全であると考えられる。地下水位以浅の木杭が腐朽しやすいことは事実であるが、今回の様に木杭が置かれている環境によっては劣化しないこともある。そのような知見を増やしていくことが、現在共用している木杭を基礎とする構造物の維持管理の観点からも重要である。地下水位以浅に位置し、砂質土中にある木杭が健全であることを確認し、その条件を整理した今回の結果は、同様の条件化に置かれた木杭の耐久性を評価するための指標となるものである。

参考文献

- 1) 土木学会木材工学特別委員会：JSCE 木材利用ライブラリー，005 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，pp. 9-15, 2012.
- 2) 鉄道院東京改良事務所：東京市街高架鉄道建築概要，1914.
- 3) 土質工学会：構造物基礎入門，土質工学会，1980.
- 4) 中村裕昭，濱田政則，本山寛，沼田淳紀：80年前に施工された木杭の健全性調査，第44回地盤工学研究発表会，pp. 1791-1792, 2009.
- 5) 中村裕昭，安村直樹，沼田淳紀，上杉章雄：中央合同庁舎地下から採取された木杭の健全性評価，土木学会第63回年次学術講演会，pp. 841-842, 2008.
- 6) 沼田淳紀，桃原邦夫，久保光：地中における地盤条件と3年経過までの丸太の耐久性。土木学会第67回年次学術講演会，Vol. 67, CS12-007, pp. 13-14, 2012.
- 7) 野澤伸一郎，藤原寅士良：東京駅丸の内駅舎に使用された木杭の耐久性，土木学会論文集 C, Vol72, No. 4, pp. 300-309, 2016.
- 8) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準・同解説，1974.
- 9) 池田俊雄：新橋赤レンガ物語，基礎工，Vol. 41, No. 1, pp. 62-69, 2013.
- 10) 東日本旅客鉄道(株)：東京レンガ高架橋維持管理に関する技術検討会報告書，2002.
- 11) 野澤伸一郎：鉄道における橋梁の長寿命化に向けた技術の現状と将来展望，橋梁と基礎，Vol. 44, No. 8, pp. 21-24, 2010.
- 12) 十代田三郎，神山幸弘：経年木杭の力学的性質並に含水率調査報告，日本建築学会論文報告集，第88号，1963.
- 13) 三宅裕司，橋本茂，網田克明：樋門基礎杭として80年以上経過したマツ材の性能，徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告，2号，pp. 17-24, 2003.
- 14) 石田一郎，河野通之：第一有楽橋架道橋の橋台基礎改築工事，東工，第9巻，第1号，pp. 4-17, 1958.

(2018. 5. 31 受付)

THE DURABILITY EVALUATION OF WOODEN PILES LOCATED IN SANDY STRATA AND ABOVE WATER TABLE

Koji MIZUNO, Torajiro FUJIWARA, Shin-ichiro NOZAWA
and Yousuke MIZUTANI

In this study, we tried to evaluate the durability of wooden piles which have been applied to structure foundations and were constructed at approx.100 years ago. The objective wooden piles have been located in sandy strata and above water table. In order to evaluate the durability, we conducted the visible confirmation of wooden pile surfaces, the soil investigations around wooden piles, and pilodyn tests. Furthermore, in order to confirm the strength and the bearing capacity, we conducted the uni-axial compressive tests of sampled wooden piles, the vertical compressive tests for cubic cut specimens of wooden piles, and vertical loading tests.

According to these test results, we can confirm that the wooden piles are sound excluding approx.1.5m from the pile head and good enough to have the strength and the bearing capacity to the design value set at the time of construction. The wooden piles have been above water table for more than 90 years, are made of pines whose water content is 45-80%. And the soil around them are sandy soil whose fine-grained fraction content is 15-25%, and natural water content is 20-30%. These results indicate that the wooden piles which have the similar characteristics and exist in similar conditions would not be severely deteriorated.