

既設木杭基礎の耐震性能検証法に関する調査

研究予算：運営交付金

研究期間：平成 22～平成 24

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：七澤利明，西田秀明，谷本俊輔，
河野哲也

【要旨】

社会資本設備の安全性を確保するためには、古い橋梁の耐震性を評価し、必要に応じて耐震補強を行う必要がある。耐震性の評価にあたっては、基礎の性能の評価も重要となる。しかし、昭和 40 年以前に多用されていた木杭基礎は、昭和 50 年代以降にはほとんど使用されなくなったことから基礎の性能評価に関する研究は行われておらず、その耐震性は明らかではない。特に、大地震に対して要求される性能を満足しているかどうかは不明であり、道路橋の維持管理上の大きな課題となっている。また、耐震性を評価するにあたっては諸元を把握しておく必要があるが、既設木杭基礎の中には諸元が不明なものも多い。そこで本研究では、まず、非破壊検査による諸元推定法の木杭への適用性を検証するため、実橋に対して試験を行った。さらに既設木杭基礎の地震時挙動を確認することを目的とし、遠心場における加振実験を実施した。

キーワード：橋，既設木杭基礎，耐震性

1. まえがき

昭和 40 年代頃までは、道路橋基礎として木杭基礎が採用されていた。昭和 50 年代に入ると既製コンクリート杭や場所打ち杭、鋼管杭の開発により、木杭基礎が採用されることは皆無となり、それに伴って木杭基礎の性能評価、設計法に関する研究が進められることはなくなった。その一方で、既設道路橋の耐震性評価にあたっては基礎を含めた耐震性の評価が重要である。しかし、上述のように木杭基礎が採用されていた年代は古く、また、その性能評価に関する知見は少ない。そのため、既設木杭基礎がどの程度の性能を有しているかは明らかでなく、道路橋の耐震性評価や耐震補強を行う上で大きな課題となっている。さらに、既設橋の耐震性評価にあたってはその諸元を正確に把握することが必要であるが、既設木杭基礎については設計年代が古く、設計当時の設計図面や設計計算図書が残存していないために諸元が不明なものもあり、そもそも耐震性の評価が不可能な橋梁も存在する。

そこで、本研究では、既設木杭基礎を対象とし、その諸元を推定方法および地震時挙動の評価方法を明らかにするため研究を行った。

緒元の推定に関しては、非破壊検査手法により評価できるかどうかを試みた¹⁾。本研究で採用した非破壊検査手法は、木杭基礎以外の基礎に対しては、ある程度の精度で諸元を推定できることが確認されているも

のである²⁾。本研究では、木杭を有する実橋に対してこの非破壊検査手法による調査を行い、杭長や杭配置、フーチングへの埋め込み長を探查できるかどうか、試みた。また、地震時挙動の評価に関しては、大地震時の既設木杭基礎の挙動を調べることを目的として、遠心場において加振実験を行った。

2. 非破壊検査による諸元調査法の適用性の検討

2.1 探查項目と探查方法

本試験の探查項目は、杭長・杭のフーチングへの根入れ長、杭間隔である。

杭長と杭間隔はボアホールレーダにより、杭のフーチングへの根入れ長は地表面レーダにより探查した。地表面レーダはフーチング上面を橋軸直角方向に走査させた。図-1 に、探查箇所を示す。

ボアホールレーダは、探查対象構造物の周辺にボーリング孔を設置して、その中にレーダアンテナを挿入し、送信アンテナから電磁波を放射してその反射波を受信アンテナで受信することで、近傍の構造物の有無を推定する方法である。図-1 に示すように、杭長は鉛直のボーリング孔 (図-1 中の赤色のライン) を用いて、杭間隔は斜めボーリング孔 (図-1 中の青色のライン) を用いて探查することで精度良く推定することができ、鋼管杭等に対して実績がある。

地表面レーダは主に地表面から電磁波を放射して地

中に電磁波を透過し、地中の物体からの反射波を捕捉することで、地中の物体の位置を推定する手法である。本調査ではこれを応用して杭頭根入れ長を推定することを試みた。すなわち、図-1に緑色のラインで示すように、フーチング上面から探査して、木杭がある部分では杭頭で反射し、杭が無い部分はフーチング下端面で反射すると期待されるため、これを分析することで杭のフーチングへの根入れ長を評価することができるかどうかを試みた。

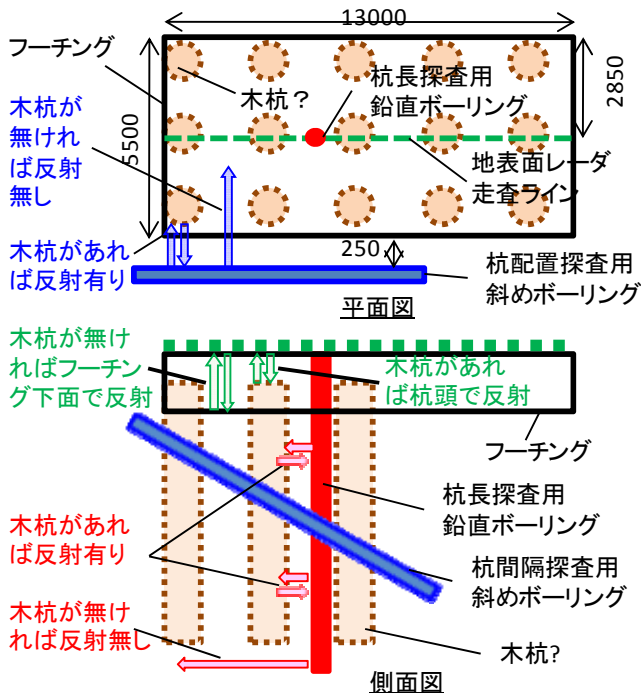


図-1 探査箇所

2.2 探査結果

図-2に、ボアホールレーダによる杭長および杭間隔の探査結果を示す。なお、図-2には、探査後に地盤を掘削して目視で確認した結果および設計図書に記載されていた配置図に基づいて書き起こした木杭の配置図も合わせて示している。同図中に示したコンターがボアホールレーダにより計測された反射波の強さを表わしており、反射波の強い順に白・紫・黄で表わしている。図の右側に配置されている鉛直方向のコンターが杭長の探査結果であり、図の左上から右下にかけて斜めに配置されているコンターが杭間隔の探査結果である。

杭長の探査結果を見ると、深度 1.35m 付近に色彩に大きな乱れが見られる。さらに、この深度から鉛直下向きに継続して比較的強い反射が確認され、11.2m 付

近で途切れている。以上から、深度 1.35m 位置が杭頭付近と思われ、1.35m~11.2m 付近までの約 10m が杭であると推定される。管理者が保管している設計図書においても杭長 10m 程度と記載されており、杭長を精度良く推定できたと思われる。

一方、杭間隔の探査結果を見ると、木杭位置として推定された杭位置は、目視で確認された位置とずれており、その精度は必ずしも高くない。杭長探査では微弱であっても反射波が連続するため概ね推定できるのに対し、杭間隔の探査では数十 cm というわずかな杭幅からの微弱な反射波をうまくとらえられないため、精度が悪くなっていると推定される。ボアホールレーダにより木杭間隔を推定するためには、杭幅程度の大きさの木材を確実に捕捉できるレベルの性能を有する計測機器や探査法の開発・改良が期待される。

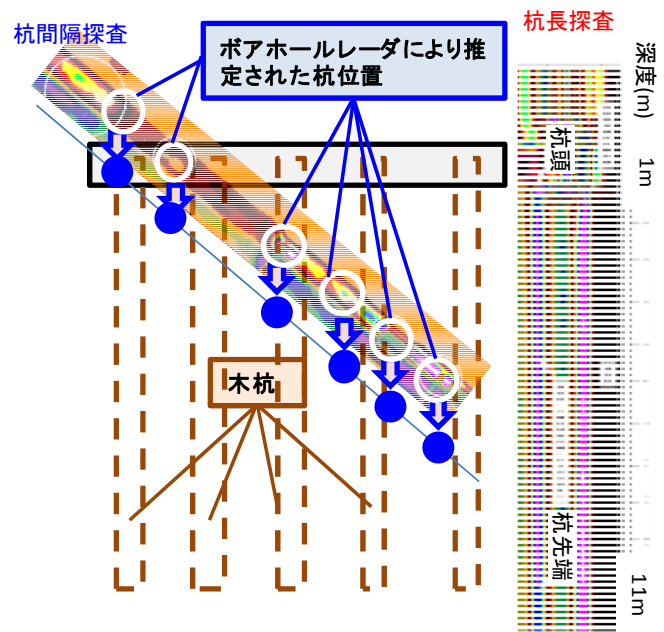


図-2 ボアホールレーダによる杭長・杭配置探査結果

図-3に地表面レーダによる探査結果を示す。図-3より、深さ 0.3m 付近に強い反射波が確認された。この反射波は水平方向に帯状に分布していることから、フーチングの上面鉄筋から反射したものと思われる。その一方で、フーチングの下面鉄筋が配されていると思われる表面から 1.5m 付近やそれ以深については、鉄筋や杭の存在を伺い知るような傾向は見られない。杭頭位置だけでなく、0.3m 付近で捕捉された鉄筋と同じ材質の下面鉄筋の存在を確認できなかったのは、電磁波が下面鉄筋位置まで十分に透過しなかったためと推察される。

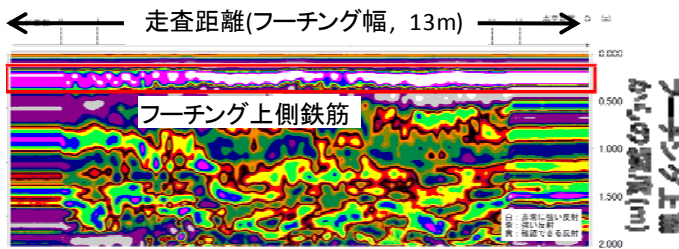


図-3 地表面レーダによる杭頭位置探索結果

2.3 まとめ

非破壊検査による諸元調査法の木杭への適用性を調べるため、実橋に対して試験的に調査した。その結果、ボアホールレーダによる杭長については比較的精度良く推定できた。一方、ボアホールレーダによる杭間隔や地表面レーダによる杭のフーチングへの根入れ長については推定できなかった。今後、計測機器や探査法の開発・改良が期待されるものの、当面は杭間隔についてはフーチング下面まで地盤を掘削して目視により確認する、杭のフーチングへの根入れ長さについてはフーチングの一部を研る等の方法により調べることが考えられる。

3. 加振実験による既設木杭基礎の挙動の評価

3.1 はじめに

前述の通り、木杭基礎は、昭和50年代以降にはほとんど使用されなくなったために近年の研究実績が少ない。特に、平成7年に発生した兵庫県南部地震のような大地震に対しては、既設木杭基礎がどのように挙動するのかは明らかではない。そこで、筆者らは既設木杭基礎の大地震時における地震時挙動を確認することを目的とし、遠心場における加振実験を実施した。

3.2 実験概要

図-4 に実験概要を示す。実験は(独)土木研究所の大型三次元振動台実験施設にて50Gの遠心場で行った。土槽は長さ1500×高さ500×幅300mmの剛土槽であり、土槽の左右に後述する橋梁模型を一体ずつ設置した。

地盤構成や橋梁諸元は、昭和7年に建設された実橋を想定してモデル化した。地盤は緩い砂からなる表層と、軟弱粘性土層、および最下層の砂層(排水層)の三層からなる。いずれの砂層も加振による液状化は発生させなかった。地盤材料は砂層に江戸崎砂、粘性土層にカオリンASP-100を用いた。橋梁模型の諸元は図-1に示す通りであり、下部構造躯体、フーチングおよび

約200本の木杭からなる。木杭は対象橋梁の杭とほぼ同じ曲げ剛性を有する木部材でモデル化した。杭先端は軟弱粘性土中において土槽底面に着底されておらず、いわゆる不完全支持状態にある。また、杭頭結合状況を実橋の図面で調べた結果、フーチング下面のかぶりコンクリートに根入れされている程度であり、剛結とは言えずその結合度は不明確である。そこで、本研究では、フーチング内に十分埋め込んでさらにグラウトを注入して杭とフーチングを剛結としたケース(以後、杭基礎タイプ)と、フーチングと杭を結合せずに杭の上にフーチングを載せたケース(以後、直接基礎タイプ)の2ケースを実験対象とした。2ケースともフーチングおよび下部構造躯体は同じものであり、アルミで作製した剛体である。

入力地震動は、道路橋示方書V耐震設計編⁴⁾において規定されているレベル2地震のType II地震動を想定し、兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で計測されたNS成分の地震動記録を振幅調整したものを土槽底面に入力した。入力した地震動の時刻歴を、図-5の最上段に示す。

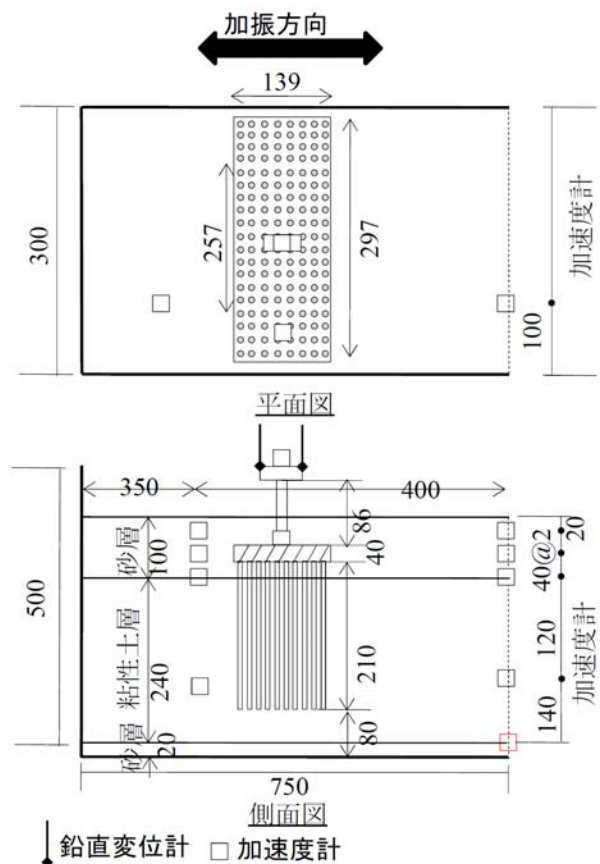


図-4 実験概要 (1 ケース分)

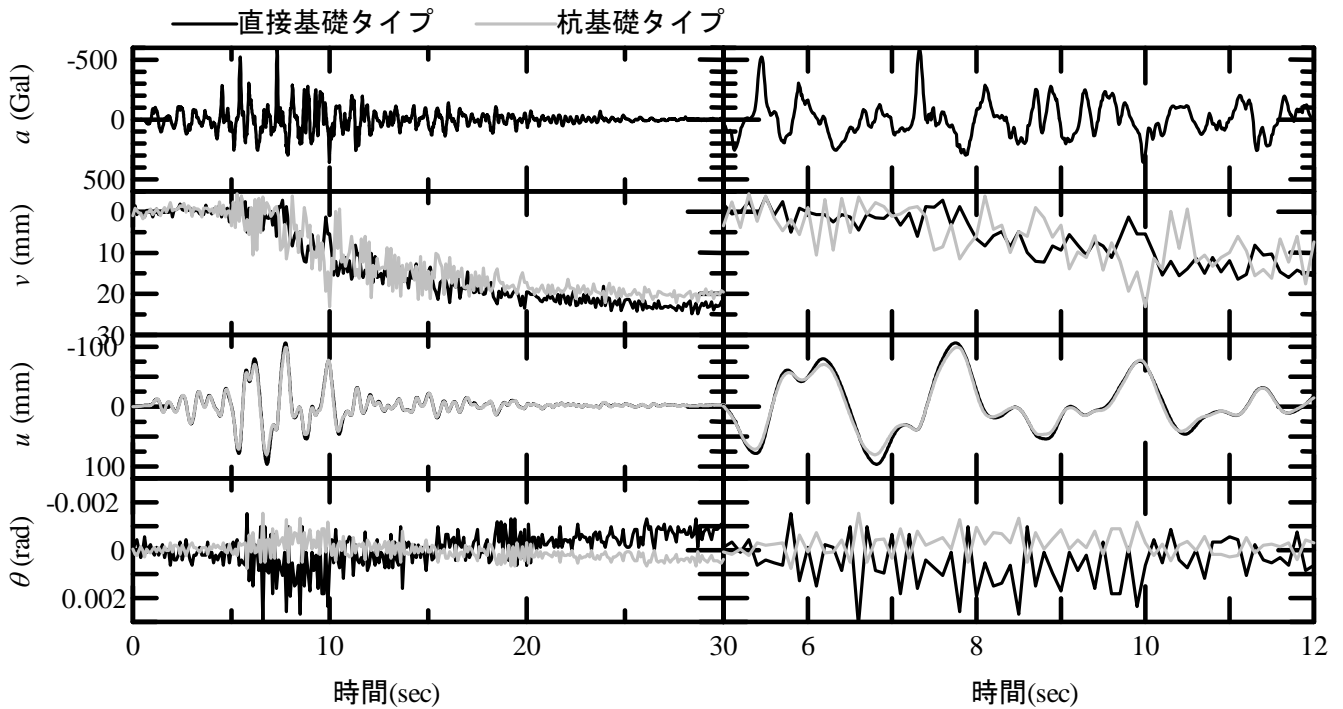


図-2 入力地震動，構造物の応答値の時刻歴(左：全時刻，右：主要動の時刻の拡大図) (a : 入力地震動， v : 上部構造の鉛直変位， u : フーチングの水平変位， θ : 回転角)

3.3 実験結果

本文で示す実験結果は全て実寸換算した値である。

図-5 に入力地震動の加速度，構造物の応答値(v : 上部構造の鉛直変位， u : フーチングの水平変位， θ : 上部構造およびフーチングの回転角)の時刻歴を示す。なお、実験終了後に目視で確認したところ、杭体に加振による破断や曲がり等の有意な損傷は確認されなかったことから、下記に示す応答値は杭体の損傷以外の要因によって生じたものである。

鉛直変位 v は、図-4 に示した二つの鉛直変位計で計測された記録の平均値であり、沈下を正として示している。後述するその他の応答値と同様に、主要動に達する付近($t = 5$ 秒~12 秒程度)以降に沈下が増大している。残留変位は、杭基礎タイプで約 20 mm、直接基礎タイプで約 25 mm であり、直接基礎タイプの方がやや大きかった。フーチングの水平変位 u は、フーチングに取り付けられた加速度計により計測された加速度を二階積分して求めたものである。フーチングの水平変位は直接基礎タイプの方がやや大きい値を示しているものの、両タイプで大きな違いは見られない。また、残留変位はほとんど生じなかった。

回転角は、図-4 に示した加振方向に取り付けた二つの鉛直変位計により計測された変位の差分を、変位計間の距離で除して求めた。前述の通り、本実験で使用

した模型のフーチングおよび下部構造躯体は剛であるため、上部構造位置の回転角は基礎底面の回転角とほぼ同じである。回転角の応答値は直接基礎タイプの方が大きかった。これは、杭基礎タイプでは、杭の引抜き・押込み支持力によりフーチングの浮上り・押込みを制御したのに対し、杭とフーチングが結合されていない直接基礎タイプではそのような制御が作動しなかったためと考えられる。特に主要動付近においては直接基礎タイプの回転角が 0 に戻っていないことから、この時間帯にフーチングの片端が浮き上がっており、他端側のフーチングのみが地盤に接地していることが分かる。すなわち、フーチングの浮上りによって、基礎を支持する地盤の抵抗面積(木杭の本数)が加振前より減少したため、接地側の地盤には加振前よりも大きな荷重が作用していることを意味する。また、直接基礎タイプでは最終的に僅かながら残留回転角が生じている。これは、接地側の基礎端部の地盤が塑性化したためであると考えられる。

3.4 実験結果から推察される既設木杭基礎の地震時の挙動

上記の実験結果からみるに、直接基礎タイプと杭基礎タイプの地震時挙動は以下のものであると推察される。直接基礎タイプでは、回転挙動による浮上りに伴っ

て基礎の端部下の地盤が塑性化するとともに、端部の木杭が沈下する。その結果、基礎を支持する地盤の面積が小さくなり、地盤の支持力が低下する。そのため、鉛直変位が増加したものと推察される。これは、木杭の無い直接基礎³⁾や改良地盤に支持された直接基礎⁴⁾とよく似た挙動である。一方、浮上りおよびフーチング底面地盤の塑性化が生じない杭基礎タイプでは、杭体が損傷していないことから、杭頭はフーチングと同じような挙動を示したと考えられる。すなわち、フーチングと杭が一体となったまま、地盤の塑性化に伴い、沈下が増加したものと推察される。本実験の対象基礎は杭先端が支持層に根入れされていないため、木杭の周面摩擦力が基礎の挙動の支配的な要因となっている。その点から言えば、本実験で対象としたような不完全支持の条件にある基礎等にとっては、2章で述べた非破壊検査法において木杭の杭長を推定できたことは耐震性を評価するうえで非常に有用であると考えられる。

4. まとめ

既設木杭基礎の耐震性を評価するにあたっての前提となる諸元の把握について、実橋に対して非破壊検査による諸元調査を行い、非破壊検査による諸元の推定精度を確認した。また、既設木杭基礎の大地震時の挙動を評価するために、遠心場において加振実験を実施した。本研究で得られた主な成果は、以下の通りである。

- ・木杭の杭長および杭の配置間隔を調べることを目的に、ボアホールレーダによる探査を行った。その結果、杭長は評価することができた一方で、杭の間隔は評価できなかった。

- ・杭のフーチングへの根入れ深さを調べることを目的に、地表面レーダによる探査を行った。その結果、地表面レーダでは杭のフーチングへの根入れ深さを推定することはできなかった。

- ・今後、杭の配置やフーチングへの根入れ深さを探査できる機器の開発が求められるが、当面の方法としてはフーチング下面まで掘り出し、目視により木杭位置を確認する、フーチングコンクリートを一部はつるなどが考えられる。

- ・既設木杭基礎の大地震時の挙動を確認することを目

的として、遠心場での加振実験を行った。

- ・杭とフーチングが結合されていないケースでは、浮き上がりに伴って端部の木杭が沈下することでフーチングを支持する面積が減少する傾向がみられ、その結果、残留回転角が生じた。これは、木杭のない直接基礎や、接円式固化体に支持された直接基礎と同様の傾向である。

- ・杭とフーチングを剛結としたケースでは、杭がフーチングに結合されていないと仮定したケースに比べて変位が小さかった。これは、杭の周面摩擦力によって引抜抵抗が期待できるためであると考えられる。

なお、本研究は、(独)土木研究所 CAESAR、大阪市建設局、東京都建設局、横浜市道路局による「大都市圏における橋梁の保全・更新技術に関する協力協定」における検討の一環で実施された。また、諸元調査については、阪神高速道路(株)、大阪市建設局各位にご協力頂いた。ここに記し、謝辞とする。

参考文献；

- 1) 河野哲也, 七澤利明, 中谷昌一: 既設木杭基礎の非破壊検査による諸元探査事例, 土木技術資料, Vol. 53, No. 12, pp. 56-57, 2011.11.
- 2) 建設省土木研究所他: 橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル(案), 土木研究所共同研究報告書, 第 236 号, 1999.11.
- 3) 河野哲也, 七澤利明, 中谷昌一: 既設木杭基礎の遠心場における加振実験, 第67回土木学会年次学術講演会, 3-037, 2012.9.
- 4) 福井次郎, 中谷昌一, 白戸真大, 河野哲也, 斉藤隆: 直接基礎の地震時残留変位に関する繰返し載荷実験, 土木研究所資料 4027 号, 2007.
- 5) 谷本俊輔, 河野哲也, 佐藤洋, 白戸真大, 中谷昌一: ブロック式・接円式固化体上の橋梁直接基礎の挙動に関する研究, 地盤工学ジャーナル, 2010.

STUDY ON SEISMIC ADEQUACY VERIFICATION METHOD OF EXISTING WOOD PILE FOUNDATIONS

Abstract :

To continue using safe infrastructure, it is important to evaluate the seismic performance of old bridges, and reinforce them. To evaluate the seismic performance of the bridges, it is important to evaluate the seismic performance of the foundations. But, it is not clear the seismic performance of the wood pile foundations. And there are many wood pile foundations that the pile length and disposition are not clear. So, in this study, non-destructive tests were carried for the real bridge to verify whether the pile length, and so on, can be estimate by these tests. Next, the shaking test was conducted under the centrifuge condition to check the seismic movement of the wood pile foundations.