

# 構造細目及び照査内容に見る既設木杭基礎の設計の考え方と今後の課題

河野哲也・七澤利明・中谷昌一

## 1. はじめに

木杭は現在の道路橋基礎の材料としては使用されていないものの、既設道路橋基礎の中には木杭基礎が採用されているものがある。既設木杭基礎が採用されていた当時は道路橋示方書<sup>1)</sup>（以下「道示」という。）のような統一的な設計法を示した基準がなく、既往の設計実績や教科書に記載されている内容などを参考に諸元が定められていたようである。

一方、安全な社会インフラを維持し続けることを目的として、既設橋梁の耐震補強や長寿命化修繕計画等がすすめられている。その中で、既設木杭基礎については、多くの場合、構造や諸元が不明であること、当時の設計法が不明であること、構造的な特長に照らした地震時挙動が不明であることなどから、耐震性の評価が困難という課題を抱えている。諸元については非破壊検査などで構造を計測することが一般的な既設基礎の調査で行われているが、木杭の場合は必ずしも非破壊検査の適用性が高いとは言えない<sup>2)</sup>。また、上述の通り当時は基準がなかったために設計法が明確でなく、再現設計により構造や性能を推定することも困難である。

そこで筆者らは、木杭基礎の構造細目や諸元、設計法を明らかにするため、全国から既設木杭基礎の設計図書を収集し、内容を分析した。

## 2. 諸元および構造細目の調査

全国から収集した既設木杭基礎の設計図面および設計計算書は合計307橋分であり、このうち情報が明らかな基礎（462基）に対して、諸元および構造細目を確認した。

以下では、杭間隔（杭の本数）と杭とフーチングの定着状況の調査結果について示す。いずれも基礎の耐震性を評価するために必要な項目であるものの、木杭の場合は材質の特性上、非破壊検査

技術での推定が困難という課題を有している<sup>2)</sup>。

### 2.1 杭間隔

杭間隔と杭径が明らかな257基を対象として、橋軸方向の杭間隔と杭径の比を整理した結果を図-1に示す。4~6Dの間隔を有している基礎が最も多く、現行道示における杭基礎の標準的な杭間隔である2.5Dよりも総じて大きな値となっており、フーチングの面積に占める杭の面積が小さいことが分かる。ただし、その値は最小値で2D、最大値で12Dとばらつきが大きく、標準的にどの程度の間隔か示すことは難しい。なお、後述するように、設計法の分析結果からも杭間隔を類推するだけの情報は得られなかった。

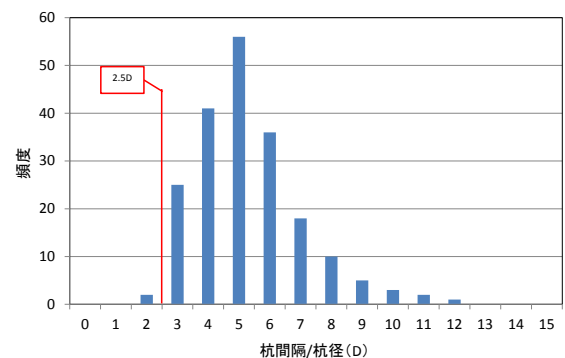


図-1 橋軸方向の杭間隔 / 杭径の度数分布

### 2.2 杭とフーチングの結合方法

杭とフーチングの結合方法については、462基中390基で明らかにできた。調査の結果、いずれの基礎も杭頭を一定長さだけ埋め込んだだけの構造であり、H14道示<sup>3)</sup>に示す方法Bのように鉄筋で補強する方法が採用されていたものはなかった。また、杭頭位置は①フーチング下面コンクリートの下にある均しコンクリート内にある場合、②フーチング下面コンクリートとフーチング下面鉄筋の間にある場合の2種類であり、前者が72%、後者が28%であった。H14道示における方法Aではフーチング下面鉄筋よりもさらに上側まで杭を埋め込むこととされているが、方法Aに示すような結合方法の事例は見られなかった。

①、②いずれの場合も杭がフーチング下面鉄筋よりも低い位置に留まっていることから、杭と

Design Method of the Timber Pile Foundations Estimated from the Structure Details and Matters for Investigation and Future Issues.

フーチングとの結合状況はH14道示に基づく構造よりも結合度合いが低いと想定される。3. の設計方法の調査・分析において詳述するように、既設木杭基礎の設計では木杭を部材として照査している事例はなかった。フーチングとの結合度合いを低い状態に留めることで、杭に大きな曲げモーメントが作用しないようにし、結果として木杭の部材照査が不要となっていた可能性がある。

### 2.3 構造緒元に関するまとめ

杭間隔についてはばらつきが大きく、標準的な値を示すことは困難であった。現状の非破壊検査技術で評価することも難しいため<sup>2)</sup>、木杭基礎において諸元が残っていない場合には、当面フーチング下面までを掘削して目視により確認する必要がある。

一方、杭とフーチングの結合方法については、全ての事例で杭頭がフーチング下面鉄筋よりも低い位置に留まっており、道示に示す構造よりも結合度合いが低いことが分かった。

## 3. 設計方法の調査・分析

次に、各基礎の設計計算書を確認して設計方法・計算方法を調べ、既設木杭基礎はどのような照査を満足するように設計されていたのかを分析する。

本調査にあたって対象としたのは、2. で対象とした307橋のうち基礎に関する詳細な設計計算書が残っていた14橋である。これら14橋の設計年代と照査内容を表-1に示す。調査対象とした橋梁は1920年代後半から1950年代に竣工したものである。収集した307橋の竣工年代を調べたところ、木杭基礎が採用されていたのは1920年代後半から1960年代後半の約40年間であったことから、これら14橋は概ね全年代を網羅できていると考えられる。なお、1960年代から木杭基礎の採用が減少した理由としては、昭和39(1964)年に発行された下部構造設計指針<sup>4)</sup>基礎の設計篇<sup>4)</sup>(以下「指針」という。)において、既製杭や場所打ち杭という木杭以外の杭種に対して基準となる設計法が示されたことが大きいと考えられる。

14橋のうち、地震時の照査が実施されていた橋梁は11橋である。その設計水平震度は0.1~0.3である。架橋地点の地盤種別は不明であるため、現行道示との値を比較することはできないが、概

ね現行道示のレベル1地震時の設計水平震度と同等の地震荷重が考慮されていると考えられる。

表-1 設計計算法の分析に用いた橋梁の情報

橋梁名	竣工年	耐震設計*	鉛直支持**	滑動**	転倒**	杭体応力**
A橋	1927	×	○	○	×	×
B橋	1927	0.10	○	○	○	×
C橋	1928	0.20	×	×	○	×
D橋	1928	×	×	×	×	×
E橋	1930	0.20	×	×	×	×
F橋	1932	0.30	○	×	○	×
G橋	1932	0.20	○	○	×	×
H橋	1934	×	×	○	×	×
I橋	1937	0.15	×	×	×	×
J橋	1949	0.30	×	×	○	×
K橋	1959	0.20	○	×	×	×
L橋	不明	0.20	×	×	×	×
M橋	不明	0.10	○	×	×	×
N橋	不明	0.30	○	○	×	×

\* : ×は耐震設計に関する記載がなく、耐震設計をしていないと考えられるもの。数値が記載されている橋梁は耐震設計がなされている橋梁であり、数値は設計水平震度を示す。

\*\* : ×は当該照査に関する記載がなく、照査していないと考えられるもの。D橋、E橋、I橋、L橋はフーチングの部材照査のみ記載されていた。

各橋梁で行われていた照査を表-1に合わせて示す。14橋に対して実施されていた照査は、大きく分けて①鉛直支持、②滑動、③転倒、④フーチングの部材照査の4つに分けられる。ここで、②、③は現行道示の杭基礎の設計では行われていない。一方、現行道示に示すような杭体の部材照査については、実施事例はなかった。以下では、現在の設計法と比べて特徴的な内容を有する①~③の照査の詳細を述べる。

### 3.1 鉛直支持の照査

鉛直支持については14橋中7橋で照査を行っていることが確認できた。なお、地震時の照査を行っている橋梁では、常時の照査が行われず地震時についてのみ照査されている場合がある。

具体的な照査方法を図-2に示す。既設木杭基礎の鉛直支持の照査は、多数の杭のうち最も大きな荷重が作用する一本の杭に着目して実施されていた。ここで、最も大きな荷重が作用する杭とは、土圧などによる偏心荷重や地震時のような繰り返し荷重によってフーチングが回転する際に最も大きな押し込み力が作用する杭であり、最外縁に位置

する杭である。最外縁の杭に作用する押込み力は、フーチングに作用する鉛直・水平荷重およびモーメントを考慮して算出された地盤反力度分布に、当該杭が負担する面積（杭間隔）を乗じて求められていた。ここで、最外縁に作用する最大地盤反力度  $q_{max}$  は、道示における直接基礎の設計と同じ方法で算出されていた。すなわち、荷重の偏心量  $e$  が基礎幅の  $1/6$  以下で、地盤反力度分布の形状が台形分布となる場合は式(1)、荷重の偏心量  $e$  が  $1/6$  以上で地盤反力度分布が三角形分布となる場合は式(2)により求められていた。

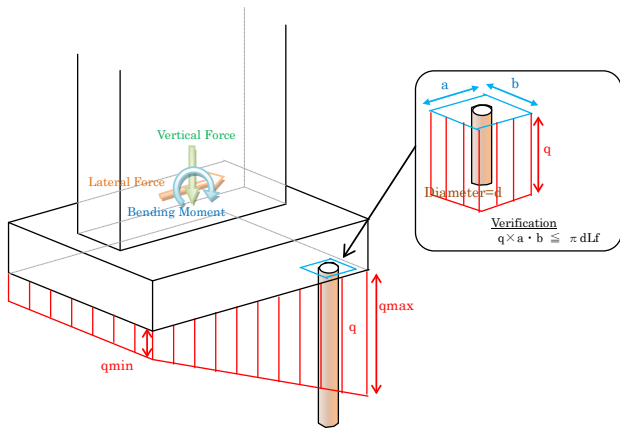


図-2 木杭基礎における支持力照査方法

$$q_{max} = (V / (LB)) \times (1 + 6e/B) \quad \text{式(1)}$$

$$q_{max} = 2V / Lx, \quad x = 3 \times (B/2 - e) \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $V$ ：基礎底面に作用する鉛直荷重、 $L$ 、 $B$ ：基礎の奥行、幅、 $e$ ：荷重の偏心量、 $x$ ：底面反力の作用幅である。

一方、抵抗側である杭の支持力は、杭の周面積に周面摩擦力度を乗じて算出されていた。周面摩擦力度の値に関する設計図書等の記載は「 $0.1f/m^2$ 程度と仮定する」などと記載されている程度であり、例えば載荷試験に基づく設定など、値の設定根拠を確認することができなかった。ただし、各橋梁の周面摩擦力度の値が異なっていたこと、S39指針において「杭の支持力は原則として載荷試験から求めなければならない」と記載されていることなどから、当時は周面摩擦力度の設定方法について確立された知見がなく、個々に設計者の判断により定められていた可能性がある。

支持力照査については安全率が明らかな形で適用された形跡はなく、6橋については、最外縁の杭に作用する荷重が杭の支持力以下であることを確認していた。ただし、残りの1橋については、

杭に作用する荷重が杭の支持力を若干上回っているにもかかわらず、支持力照査を満足するものとみなす、と記載されていた。このことから、支持力を算出する際の周面摩擦力度に安全率が加味されていた可能性がある。また、現行道示では常時とレベル1地震時で安全率が異なっているため、どちらが諸元の決定要因になるか一義的には定まらないが、前述の通り既設木杭基礎の設計では地震時の照査を行っている場合で常時の照査が行われていない場合があった。この理由として、常時と地震時で安全率を変えず、供用期間中に発生する最大荷重である地震時の荷重に対して、杭の支持力以下であればよいと判断していたものと推察される。

### 3.2 滑動の照査

滑動については、5橋で照査を行っていた。いずれも現行の直接基礎の滑動の照査とほぼ同じであり、照査位置であるフーチング下面に作用する水平荷重が、フーチング下面に発生する摩擦抵抗力を上回らないことを確認していた。

フーチング下面に作用する荷重は、地震時の照査を行っている基礎については地震時に作用する鉛直荷重に設計水平震度を乗じて求められており、常時の照査のみ行っている基礎については橋台背面土圧などが考慮されていた。

フーチング下面の滑動抵抗力は、フーチング下面に作用する鉛直荷重に摩擦係数を乗じて算出されていた。摩擦係数の値については「摩擦係数を0.3と仮定すれば」と記載されているものもあることから、周面摩擦力度と同様に確立された設定方法はなく、設計者が何らかの考えに基づき仮定していたものとみられる。

### 3.3 転倒の照査

転倒については、4橋で照査を行っていることが確認できた。照査の荷重状態はいずれも地震時であった。4橋における照査方法・照査値は、いずれも現行道示の直接基礎のレベル1地震時の転倒照査と同じであった。すなわち、曲げモーメントによる偏心を考慮した鉛直荷重の作用位置がフーチングの中心から  $1/3$  以内であることを照査するものである。ここで、荷重の作用位置をフーチングの中心から  $1/3$  以内に収めるということは、フーチングの半分の領域が地盤に接していることを意味する。

### 3.4 設計方法に関するまとめと今後の課題

以上のように、既設木杭基礎では現在の杭基礎のような照査ではなく、鉛直支持・滑動・転倒という直接基礎と同様の照査が行われていた。すなわち、木杭を一種の地盤改良材とみなし、木杭により改良された地盤上の直接基礎として安定照査を行っていたものと考えられる。2. で述べた杭とフーチングの結合度合いが低いこととも、こうした設計の考え方と整合する。

一方で、現存する既設木杭基礎の性能を評価しようとする場合に、以下の三つの課題が浮かび上がる。

一つ目は、フーチングへ浅く埋め込んだだけの結合構造の場合に、大地震時にフーチングや杭がどのような挙動や抵抗特性を有するかが不明確であるという点である。今回行った調査においても、このような条件における挙動を実験等により確認した事例はみられなかった。このため、筆者らは実験等を実施して既設木杭基礎の挙動について研究を行っているところであり<sup>5)</sup>、今後も研究を進めて木杭基礎の構造条件に対応した解析モデル等を提案していく必要がある。

二つ目は、杭体に対する照査が行われていないことである。杭とフーチングとの結合度合いが現行道示に示す方法と比べて低いとはいえ、コンクリート内に一定程度根入れされているため、地震時等においてある程度の水平力や曲げモーメントは杭体に伝わる。当時の設計では杭体の破壊に対する照査は行っていないが、地震の規模や根入れ程度等によっては破壊に至る可能性も否定できない。これに関しては、前述の解析モデルを確立して杭に発生する断面力を適切に評価するとともに、木杭の曲げ耐力・せん断耐力等を載荷試験等により明らかにしていく必要がある。

さらに、木杭が腐食している場合、耐力の低下

が生じることが考えられるため、どのような環境条件の場合に木杭に腐食が生じるか、また、必要に応じて腐食の程度と耐力との関係についても明らかにする必要がある。なお、筆者らがこれまで行った数橋の既設橋の木杭に対する現地調査では、腐食が生じていた事例は確認されていない。木杭表面に防食対策が施されているなど予防策が講じられていたことや没水条件にあったことが理由として考えられる。

三つ目には、周面摩擦力度など照査に用いている値の妥当性が不明確であるという点である。これに関しては、既設木杭基礎の性能評価を行う際に地盤調査等を実施し、現在の基準に示す推定法を準用して評価して行くことが考えられる。

### 4. まとめ

既設木杭基礎の設計図面および設計計算書を収集・分析し、構造細目や当時の設計方法について明らかにした。今後も3.4に示す課題への対応を進め、既設木杭基礎の性能評価に資するよう研究成果をまとめていきたい。

最後に、既設木杭基礎の設計図書に関する調査にご協力いただいた道路管理者のみなさまに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、2012.3.
- 2) 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、第53巻、第12号、pp.56～57、2011.
- 3) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、2002.3.
- 4) (社) 日本道路協会：下部構造設計指針くい基礎の設計篇、1964.
- 5) 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.

河野哲也



土木研究所構造物メンテナンス  
研究センター橋梁構造研究グループ  
主任研究員、博士  
(工学)  
Dr. Tetsuya KOHNO

七澤利明



土木研究所構造物メンテナンス  
研究センター橋梁構造研究グループ  
上席研究員  
Toshiaki NANAZAWA

中谷昌一



土木研究所構造物メンテナンス  
研究センター橋梁構造研究グループ  
長、工博  
Dr. Shoichi NAKATANI