

既製RC杭を用いた既設杭基礎の地震時限界状態の評価に関する実験的研究

岡田太賀雄・鬼木浩二・河野哲也・星隈順一

1. はじめに

道路橋の耐震設計では、大地震時には橋脚基部に損傷を誘導してエネルギー吸収を図り、補修に時間を要する基礎には損傷が生じないように設計する考え方が採られることが一般的である。一方で、既設橋に対する耐震補強の検討を実施する場合には、当該橋に求められる耐震性能に応じて、どの部材でエネルギー吸収を図る考え方とするかの思想を個々の橋の条件ごとに検討し、その思想に基づいて補強を要する部材の選定やその補強設計が行われる。したがって、耐震補強で目標としている橋の耐震性能の水準によっては、基礎で大地震時におけるエネルギー吸収を図る考え方も採り得ることになる。

この考え方に基づく橋の耐震性能の照査では、当該橋の基礎の構造条件や周辺地盤に関する適切な情報とともに、その基礎がどのような塑性変形能あるいは破壊特性を有しているのかに関する技術的情報も必要となる¹⁾ ²⁾。特に、橋脚の耐震補強の検討においては、基礎への影響を含め橋全体として耐震性能が確保できるようにする必要がある。それゆえに、既設橋の基礎が現況において保有している耐力や塑性変形能を精度よく評価し、その結果を適切に照査に反映できるようにすることが設計実務の現場からも求められている。

しかしながら、既設橋の基礎形式には多くの種類があり、また、特に古い基準で設計された基礎の塑性変形能や破壊特性に関する知見もまだ少な

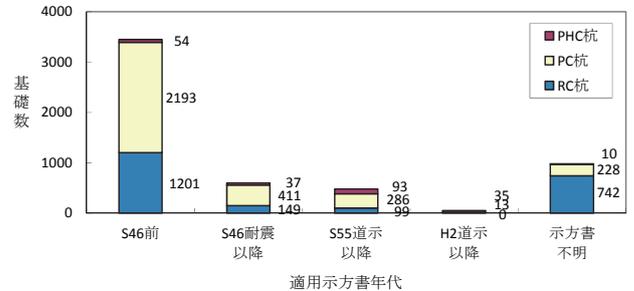


図-2 設計年代別の基数変遷(全 5,551 基)²⁾

いのが現状である。そこで、本研究では、古い基準により設計された既製RC杭を用いた既設杭基礎の地震時限界状態を検証することを目的として、大型模型を用いた気中での正負交番載荷実験を行った。本稿では、その実験結果に基づき、既設橋の既製RC杭基礎の耐力、塑性変形能について得られた知見を報告する。

2. 既設橋に用いられている基礎形式

図-1は、1960年代と1990年代に建設された直轄国道の橋で用いられている基礎形式の実態を調査した結果である²⁾。これより、1960年代の杭基礎では、1990年代以降の主流である場所打ち杭よりも既製コンクリート杭の方が多く用いられていたことがわかる。次に、既製コンクリート杭の基数変遷を設計年代と杭種ごとに示した結果が図-2である²⁾。既製コンクリート杭は、昭和46年の道路橋耐震設計指針³⁾よりも前の基準で設計されている事例が多く、また、そのような古い年代においてはPHC杭よりもRC杭が多いことがわかる。このような調査結果を踏まえ、本研究では、既製RC杭の破壊性状に関する知見が十分ではなく、また過去の震災においても被災事例があることから古い年代に設計された既製RC杭を対象として選定した。

3. 既製RC杭基礎模型の正負交番載荷実験

3.1 実験に用いた既製RC杭基礎模型

実験で用いた既製RC杭基礎の詳細を図-3に示す。配筋条件等の詳細は、昭和46年よりも前の時代の製造で、実際に橋の杭基礎として用いられ、

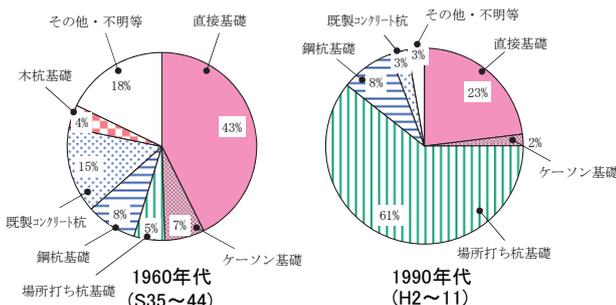


図-1 各基礎形式の割合²⁾

供用後に撤去された既製RC杭のはつり調査⁴⁾に基づいて設定した。既製RC杭模型は外径300mm、内径180mmの中空断面で、軸方向鉄筋は直径9mmの丸鋼であり、用心鉄筋としてその周囲を直径3.2mmの鉄線が螺旋状に巻き付けられている(以下、スパイラル筋と呼ぶ)。この鉄線はJIS G3532に基づく普通鉄線(SWM-B)であり、降伏点が明確ではなく、塑性変形直後に破断する特性があり、引張強さのみが定められた材質(ϕ 3.2mmにおける引張強さは540~1130N/mm²)である。

本実験では、図-4に示すように、地震時における杭頭部付近の荷重状態を再現できるよう、写真-1に示すような荷重セットアップとした。杭基礎模型の構造形式としては、水平荷重方向に対し3本、荷重直角方向に2本の計6本の配置とし、中心間隔は杭基礎において一般的な杭径の2.5倍とした。杭とフーチングの結合条件は剛結合とし、杭径に相当する300mmを埋め込んだ。また、中詰めコンクリートは、図-3に示すように、杭頭先端から杭径の1.5倍に相当する450mmの範囲に打設した。なお、詳細は後述するが、文献5)及び6)に基づく計算を行うと、本杭基礎模型はせん断破壊型と評価される構造条件である。

3.2 荷重実験の方法

本実験では、一定の鉛直荷重の下、曲げモーメントMを水平力Hで除した値(M/H)を2.5mに保ちながら水平力を正負交番荷重させた。鉛直荷重は、杭体の平均圧縮応力度が2N/mm²程度となるよう杭1本当たり137.2kN(合計824kN)の荷重を作用させた。本来、鉛直荷重やM/Hの値は橋の構造条件や地盤条件によって変わるが、本実験では、一般的な杭基礎の設計例を参考として設定した。水平力の荷重は、基準変位 δ_y の整数倍の水平変位を各荷重ステップにおいて3回繰返す漸増荷重とした。基準変位は道路橋示方書⁵⁾に規定される杭基礎の降伏となる状態とし、杭基礎模型の3列の杭に取り付けられた軸方向鉄筋のひずみが3列とも降伏値に達した時点の水平変位である7.2mmを基準変位 δ_y とした。

なお、実際の杭基礎の耐力は地盤抵抗の影響も受けるため、地盤も含めた実験とする方法もあるが、本研究では、杭体に生じる損傷の進展プロセスを観察することに主眼をおいて、気中での実験

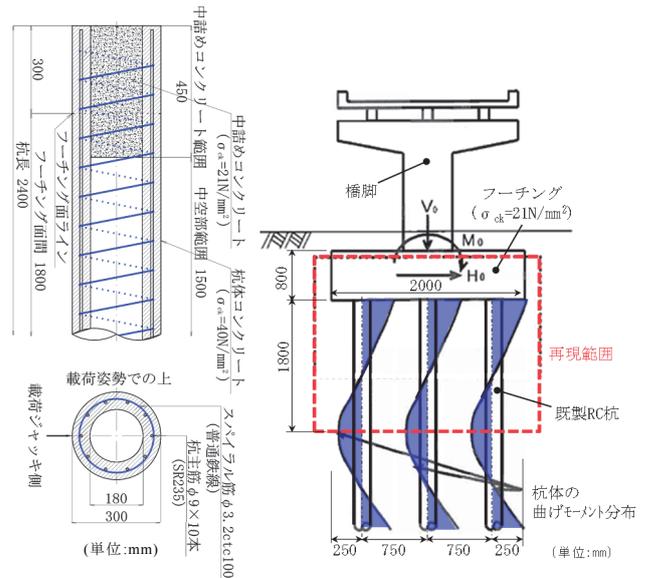


図-3 実験に用いた既製RC杭模型

図-4 杭基礎における地震時の荷重状態

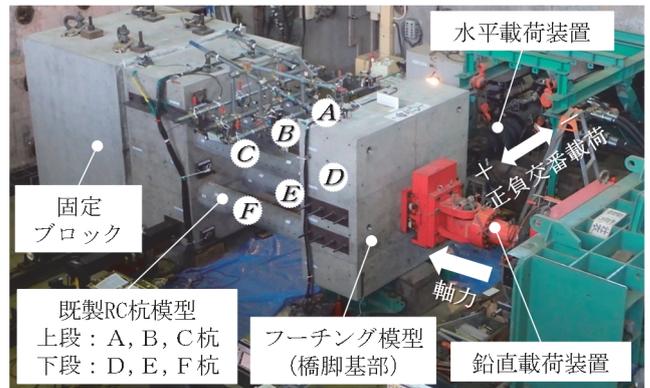


写真-1 杭基礎模型の設置状況

方法を採用した。

3.3 塑性変形能と最終的な破壊特性

図-5に荷重実験により得られた水平荷重と水平変位の関係を示す。5 δ_y の荷重ステップ以降において杭頭部近傍のかぶりコンクリートの剥落が始まり、8~9 δ_y 時において杭の軸方向鉄筋がはらみだすことにより、6本の杭のうちの4本の杭でスパイラル筋が破断した(写真-2)。そして、このような損傷に伴い、水平荷重も徐々に低下してきている。

10 δ_y の荷重ステップの後、最終的な破壊形状を検証するために±20 δ_y の荷重を行った。その結果、正側の荷重では、B、C、E杭の杭頭部近傍に縦方向のひび割れが発生する損傷(写真-3)が生じ、負側の荷重では荷重変位が130mm程度に達した段階で、押し込み側となったA杭及びD杭の杭頭部近傍においてせん断破壊(写真-4)が生じた。

なお、杭体に生じた塑性変形や最終的なせん断破壊によって杭基礎全体として鉛直力を支持する

機能にどのような影響が生じるかを検証するため、作用させた鉛直荷重と水平変位の関係を整理した結果が図-6である。これより、 $-20\delta_y$ の載荷でA杭及びD杭にせん断破壊が生じた後も、杭基礎全体としては所定の鉛直荷重を保持できていることがわかる。これは、全ての杭がせん断破壊したわけではなく、杭基礎全体としては鉛直力を支持する機能が喪失する状況までには至っていないことを示している。

4. 既製RC杭のせん断耐力の評価

前述したとおり、文献5)及び6)によりせん断破壊型と評価されていた既製RC杭基礎模型は、実際には、塑性変形能を発揮しながら、コンクリートの剥落及びスパイラル筋の破断等が生じた後に、最終的には押し込み側の杭体がせん断破壊に至った。このような破壊の特性を踏まえ、既製RC杭のせん断耐力の評価の考え方について検討を行った。

図-7は、文献6)~8)に基づいてそれぞれせん断耐力を試算し、実験により計測された水平力(6本の杭体に作用するせん断力の合計値)の最大値と比較して示したものである。ここで、既製RC杭のスパイラル筋は、そもそも設計上は見込まない用心鉄筋の扱いであり、また中詰めコンクリートの打設範囲もせん断破壊面全体に配置されていないことから、設計上見込まないのが一般的である。ただし、本稿ではこれらがせん断抵抗に寄与した場合の影響について確認するため、見込むことができる最小限のせん断耐力も試算して示している。ここで、スパイラル筋の降伏点については明確ではなく、引張強さのばらつきも大きいことから、文献6)で規定される上限値 345N/mm^2 として評価した。実験結果によれば、最大水平荷重は正側で 320.8kN 、負側で 291.5kN であり、文献6)により評価されるせん断耐力よりも大きな水平荷重に抵抗できていることがわかる。さらに、 $10\delta_y$ 相当の塑性変形レベルまではせん断破壊に至ってなく、この塑性変形レベルまでは少なくとも実験で計測された各載荷ステップにおける最大水平荷重よりも大きなせん断耐力を杭基礎全体として保有していたことを意味している。

また、文献6)によるせん断耐力の評価に加え、仮にスパイラル筋や中詰めコンクリートが作用せん断力への抵抗に寄与すると仮定してせん断耐力

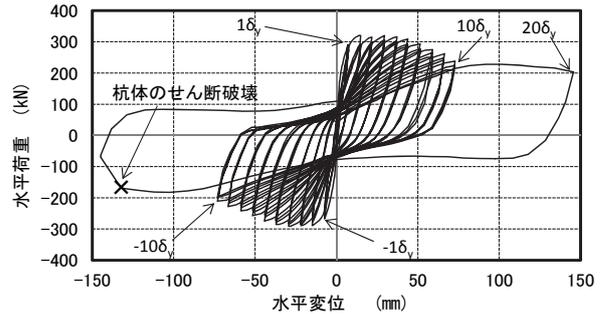


図-5 水平荷重-水平変位の関係



写真-2 E杭のスパイラル筋の破断状況(+9 δ_y 時)



写真-3 E杭のひび割れ状況(+20 δ_y 時)

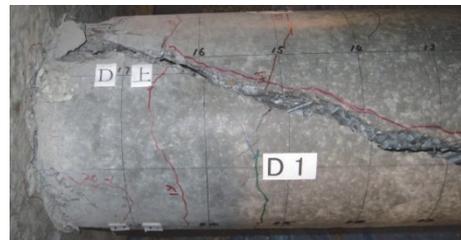


写真-4 D杭のせん断破壊の状況(-20 δ_y 時)

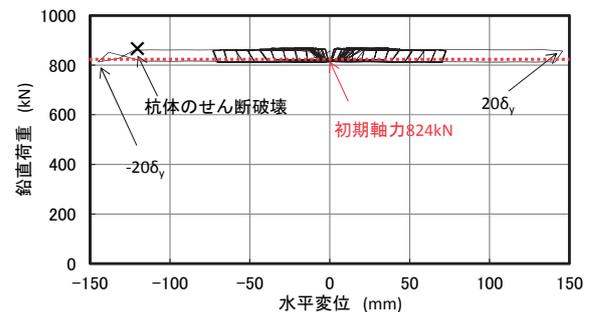


図-6 鉛直荷重-水平変位の関係

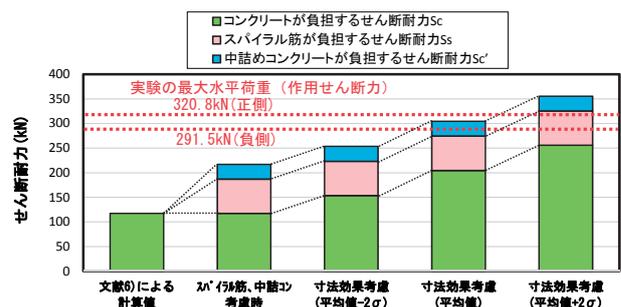


図-7 既製RC杭基礎模型のせん断耐力の評価結果

を算出した結果と比較しても、実験で得られた最大水平荷重には達していない。このような評価結果となる理由の一つとしては、文献6)では、既製RC杭におけるコンクリートが負担するせん断応力度は $\tau_a = c_c \cdot c_e \cdot c_{pl} \cdot \tau_c = 1.5 \tau_c$ として規定されており、特に杭径の小さい既製RC杭に対して、有効高 d に関する効果 c_e が安全側の設定となっていることが挙げられる。そこで、文献7)及び8)に基づいて寸法効果の及ぼす影響を考慮し、さらにコンクリートが負担するせん断応力度として、平均値($\tau_c = 0.72d^{0.33}$)、並びに平均値から標準偏差 σ の±2倍相当分のばらつきを考慮してせん断耐力をそれぞれ試算した。その結果、寸法効果やばらつきの影響を考慮したとしても、コンクリートが負担するせん断耐力のみでは291.5kNの水平荷重に抵抗できたという今回の実験結果を説明できない。すなわち、スパイラル筋または中詰めコンクリートについても少なからず作用せん断力に対する抵抗に寄与していると考えられる。

一方、最終的にせん断破壊となった20 δ_y の荷重ステップにおける水平荷重は168.9kNであった。このようにせん断耐力が低下し、せん断破壊に至った理由としては、前述したとおり、せん断破壊時には既にその前の荷重ステップにおいてスパイラル筋が計4本切れており、スパイラル筋が負担するせん断耐力が低下したこと、また軸方向鉄筋が確認できるほどコンクリートが剥落しており、コンクリートが負担するせん断耐力が低下したことも挙げられる。

5. おわりに

昭和46年よりも前の時代に設計された既製RC杭を対象として、その限界状態を把握するために杭基礎模型を用いた気中での正負交番荷重実験を行った。今回の実験ケースでは、計算上せん断破

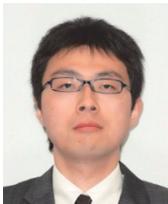
壊型と評価される既製RC杭基礎模型であるが、実際は塑性変形能を発揮しながら、コンクリートの剥落及びスパイラル筋の破断等が生じた後に、押し込み側の杭体がせん断破壊に至った。また、文献6)に基づいて算定される既製RC杭のせん断耐力は安全側の評価となっていること、スパイラル筋や中詰めコンクリートはせん断耐力として考慮できる可能性があることも確認された。

このように、一般には安全側の判断から考慮されていない項目であっても、既設の構造部材における実際の条件を適切に検証することにより、合理性のある効果については耐震性能の評価において考慮する考え方もある。既設杭基礎の耐震評価の検討がより合理的に実施できるように、既製RC杭のせん断抵抗メカニズムについて、さらに検討していきたい。

参考文献

- 1) 木村嘉富、大越盛幸、中野正則、福井次郎、横山功一：杭基礎の変形特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.44A、pp.1597~1606、1998.3
- 2) (独)土木研究所：既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究、土木研究所資料、第4168号、pp.2~129、2010.5
- 3) (社)日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説、1972.4
- 4) 鬼木浩二、岡田太賀雄、河野哲也、末崎将司、星隈順一：既設橋梁から撤去した既製RC杭を用いた耐震性能に関する実験的研究、第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.27~34、2015.7
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012.3
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、2002.3
- 7) 河野広隆、渡辺博志、菊森佳幹：大型RCはり供試体のせん断強度に関するデータ集、土木研究所資料、第3426号、1996.1
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編に関する参考資料、p.207、2015.3

岡田太賀雄



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員
Takao OKADA

鬼木浩二



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
Koji ONIKI

河野哲也



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員、博(工)
Dr. Tetsuya KOUNO

星隈順一



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員、現国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長、博(工)
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA