

既製 RC 杭を用いた既設杭基礎の地震時限界状態の評価手法に関する一検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○鬼木 浩二, 岡田 太賀雄, 大住 道生

1. はじめに

既設橋の耐震補強では、橋脚のみならず、基礎への影響を含めた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。古い基準で設計された既設杭基礎のうち、特にコンクリート杭基礎については、耐震性に劣る構造細目となっていることから脆性的な破壊に至る懸念がある。そこで、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、杭基礎模型を用いた実験を別途実施した。その結果、設計上せん断破壊型と評価される杭基礎模型であるが、実験で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、最終的に押込み側の杭体がせん断破壊に至った。本稿では、せん断耐力の評価として、どの杭体も同一の耐力があるとして評価するのではなく、実際には各杭体の作用軸力と作用せん断力は杭体毎に異なることが想定されることから、解析的な検討により杭体毎の作用軸力や作用せん断力を評価し、軸圧縮力に応じたせん断耐力を杭体毎に評価することで、破壊特性について再現可能であるかどうかを確認する。

2. 既製 RC 杭を用いた既設杭基礎模型のモデル化概要

図-1 に示す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に、既往の実験供試体はセットアップされており、その実験供試体の設置状況を踏まえた解析モデル(図-2)とした。杭基礎モデルは、水平载荷方向に対し 3 本、载荷直角方向に 2 本の計 6 本配置となる立体ラーメン構造形式であり、水平挙動に伴い杭に作用する軸力変動を考慮するため、逐次内部計算可能なファイバー要素(図-3)を用い、曲げ非線形性を考慮したはり部材とした。杭体コンクリートの応力-ひずみ曲線は、設計では道路橋示方書(以降、道示と呼称) IV 下部構造編²⁾に準拠するが、本検討では最大耐力以降の耐力や変形能を検証するため、道示 V 耐震設計編³⁾に準拠することを基本(Case1)とした。なお、かぶりコンクリート部分には帯鉄筋による横拘束応力は生じないことから、コアコンクリートとかぶりコンクリートでは応力-ひずみ曲線が異なる。また、道示 V 編³⁾に準拠した応力-ひずみ曲線では実験を再現することが難しかったため、Mander らによって提案されたモデル⁴⁾を参考に、図-4 に示すようなコンクリートの軟化勾配を便宜的に設定した Case2 も行った(表-1)。コンクリートの引張抵抗は無視し、軸方向鉄筋のみで抵抗させた。軸方向鉄筋の応力-ひずみ曲線は鉄筋の引張試験結果に基づきバイリニア型の移動硬化則を基本とした。フーチングは剛なはり要素でモデル化し、鉛直荷重が各杭に均等に作用するものとして死荷重状態を再現させた。杭の下端は完全固定の境界条件とした。载荷方法は、実験条件と同様に一定の鉛直荷重の下、基準変位 δ_y の整数倍の水平変位を各载荷ステップで繰り返す正負交番の漸増载荷とした。

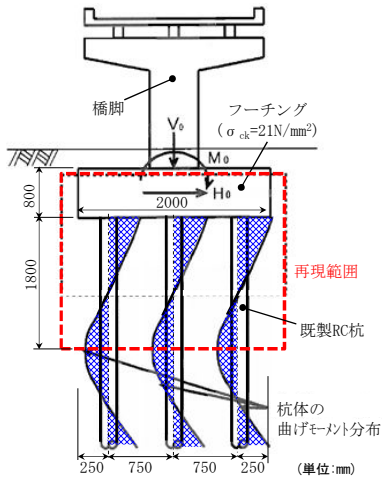


図-1 杭基礎における地震時の荷重状態

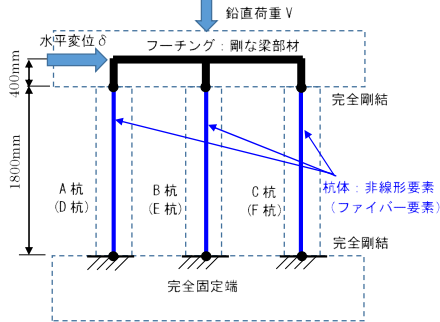


図-2 解析モデル

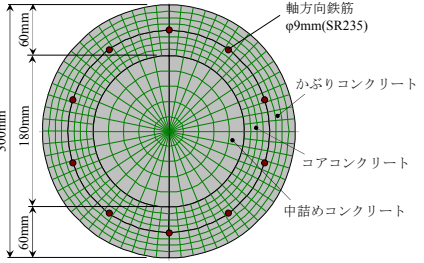


図-3 杭体ファイバー断面(中詰部)

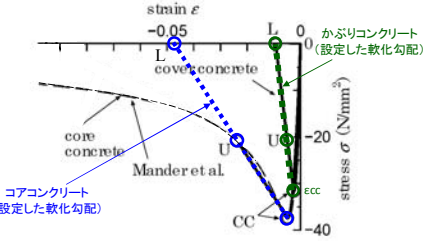


図-4 Mander ら⁴⁾の応力-ひずみ関係と本解析モデル(Case2)の設定

表-1 解析ケース

Case	コアコンクリート	かぶりコンクリート
1	横拘束効果の考慮(道示 V 編)	道示 V 編
2	横拘束効果の考慮(Mander ら)	Mander ら

キーワード 道路橋基礎, 既製 RC 杭, 既設杭基礎, 地震時限界状態, ファイバー要素, 評価手法

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター TEL : 029-876-6773

3. コンクリートの材料構成則が杭の履歴特性に与える影響

図-5 に水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線の解析(点線)と実験値(黒色の実線)の比較した結果を示す。これより、Case2 では最大荷重以降の挙動についても Case1 に比べて実験値に近い結果であることが分かる。ここで、杭基礎全体の挙動を再現できていると考えられる Case2 に着目して各杭列ごとの軸力変動状況(図-6)を確認した。なお、実験値の軸力は、曲げの影響が小さい各杭体中央の断面位置のひずみより軸剛性比を乗じて算定した。これより、最大荷重時のみならず、最大荷重時以降についても各杭列の軸力変化は実験値と近似していると言える。さらに、各杭の損傷状況についても確認した。コンクリートの剥落が目視で確認できる $\pm 6\delta_y$ 時や、図-7 に示すように、かぶりコンクリートが剥落した $\pm 8\delta_y$ 時等の損傷状況を再現できているものと考えられる。なお、図-7 中の損傷範囲はコンクリートの応力度が零(L 点)に至った範囲とした。よって、Case2 は実験で確認された損傷状況及びその際に各杭体に作用していた軸力及びせん断力を再現できているものと考えられる。

4. 既製 RC 組杭の作用せん断力とせん断耐力の評価

前述した既製 RC 杭の破壊特性を踏まえ、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。せん断耐力は、道示^{2),3)}のせん断耐力評価式が安全側に設定されていることを踏まえて、文献 1)を参考に、コンクリートが負担するせん断耐力に中詰めコンクリート、寸法効果とばらつきの影響を考慮するとともに、スパイラル鉄筋が負担するせん断耐力も考慮できると仮定して算出した。さらに、本検討ではコンクリートが負担するせん断耐力に軸方向圧縮力の影響も考慮した。また、かぶりコンクリートの剥落後のせん断耐力については、コンクリートはりのせん断抵抗機構を踏まえ、コンクリートが負担できるせん断耐力がどの程度か明確ではないため考慮せず、スパイラル鉄筋が負担できるせん断耐力は既往の実験¹⁾によるせん断破壊時のひび割れ角度が 20° 程度であることを考慮して、この破壊面と交差するスパイラル鉄筋が道示^{2),3)}で規定される上限値 345N/mm^2 に達すると仮定して算出した。図-8 は Case2 における各杭列の作用せん断力とせん断耐力を示す。これより、各杭体のせん断耐力は作用軸力に応じて差があるものの、各杭体の作用せん断力の差に対して小さいことが分かる。ここで、作用せん断力が押込み側で大きくなるのは、押込み軸力に伴って曲げ耐力が大きくなるためと考えられる。そのため、押込み側の杭(C 杭)は先行してせん断破壊しやすい傾向であることが確認できるが、せん断耐力の評価ができていないので、破壊特性の再現までには至っていない。なお、せん断耐力の評価については、中空円形断面における側方鉄筋の影響や圧縮軸方向鉄筋の影響等さらなる分析・検討が必要である。

5. まとめ

本稿では、既往の実験結果¹⁾に基づいて、曲げやせん断に対する耐力特性を評価する手法を検討した。その結果、杭体毎の作用軸力や作用せん断力を評価し、軸圧縮力に応じたせん断耐力を杭体毎に評価することで、押込み側の杭が先行してせん断破壊しやすい傾向であることを確認した。今後はより精度の高いせん断耐力評価の検討を行うとともに、さらに実際の条件に近い地盤を含めた挙動についても確認し、杭体毎の作用力やせん断耐力を評価する手法を検討していきたい。

参考文献

- 1) 岡田太賀雄ら：既製 RC 杭基礎模型を用いた正負交番載荷試験，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。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2002。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2012。
- 4) Mander etc.：Theoretical stress-strain model for confined concrete, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988。

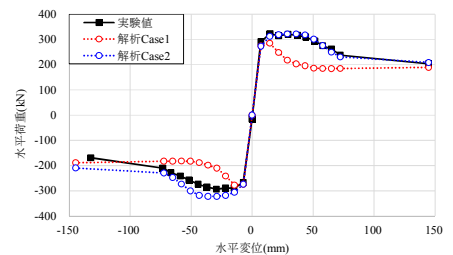


図-5 水平荷重と水平変位の関係

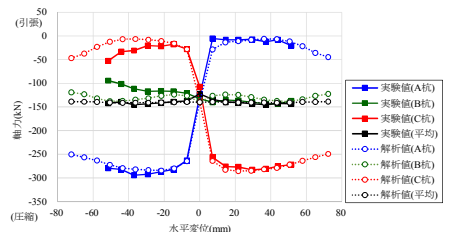
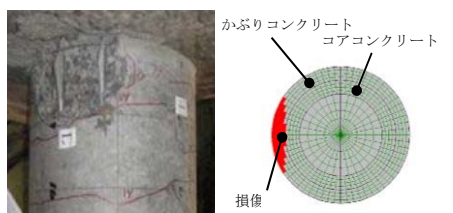


図-6 各杭列の軸力変動状況(Case2)



(a)損傷写真¹⁾ (b)解析上の損傷範囲
図-7 押込み杭の損傷状況($\pm 8\delta_y$ 時, Case2)

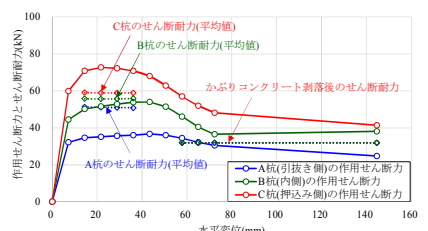


図-8 各杭のせん断力とせん断耐力評価