

既製RC杭基礎における杭列ごとのせん断抵抗機構に着目した終局状態評価の解析的検討

鬼木 浩二¹・岡田 太賀雄²・大住 道生³

¹正会員 修(工) (国研)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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) (国研)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 (同上)

³正会員 修(工) (国研)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 (同上)

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。そのため、合理的に耐荷性能を評価して、耐震補強の必要性や優先度を適切に判断できる評価手法の構築が求められている。

しかしながら、古い基準で設計されたコンクリート杭基礎の塑性変形能や破壊特性に関する知見もまだ少ないのが現状である。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気中での荷重実験¹⁾を別途実施した。その結果、設計計算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。杭基礎におけるせん断耐力の評価として、新設橋の設計では解析手法の簡便さや解析に用いる定数の推定精度等を理由に、死荷重による杭頭での軸力に応じて割増しを行った杭1本あたりのせん断耐力が、どの杭体も同一の耐力があると仮定して、杭本数倍した値を杭基礎全体のせん断耐力として評価されている。しかし、既設橋の耐荷性能を合理的に評価するためには、各杭体の作用軸力と作用せん断力が異なるラーメン構造としての挙動となることが想定されることから、杭列ごとの応答を適切に評価するとともに、その応答を踏まえた杭列ごとの曲げやせん断に対する耐力特性を評価する

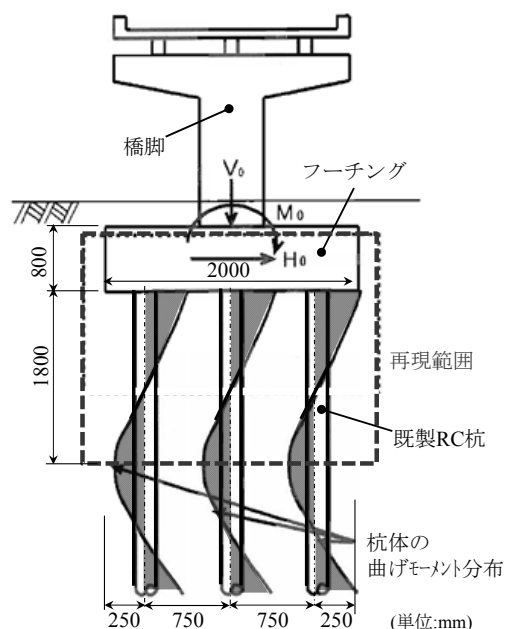


図-1 杭基礎における地震時の荷重状態

手法が考えられる。

そこで、本稿では、気中での既製RC杭基礎の破壊特性を踏まえたラーメン構造としてのせん断抵抗機構を把握することを目的に、解析的に杭列ごと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列ごとに評価することで、破壊特性について再現可能であるか検討を行ったものである。

2. 既製RC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

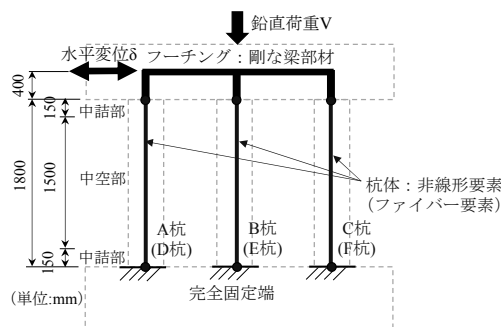


図-2 解析モデル

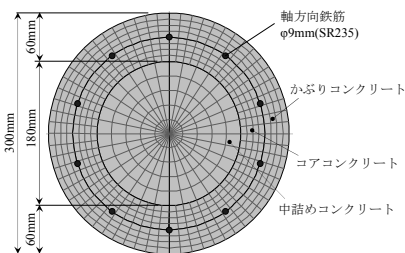


図-3 杭体ファイバー断面(中詰部)

えた解析モデル(図-2)とした。杭基礎モデルは、水平載荷方向に対し3本、載荷直角方向に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、本検討では最大荷重時以降の耐荷力や塑性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-ひずみ曲線では最大荷重時以降の実験を再現することが難しかったため、終局ひずみ以降の挙動を再現できる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簡易的に設定したCase2も行った(表-1)。ここで、軟化勾配を設定するにあたって、使用ソフト上折れ点を設けることができなかったため、Manderらの応力-ひずみ曲線を直線で表現し、実験結果を再現できるように設定した。具体的には、コアコンクリートの軟化勾配の制御点として最大圧縮応力 σ_{cc} に達するときのひずみ ε_{cc} を用い、 $0.5\sigma_{cc}$ に達するときのひずみを $10\varepsilon_{cc}$ とし、またその2点を結ぶ直線を $\sigma=0$ まで延長することとした。横拘束を受けないかぶりコンクリートの軟化勾配については、最大応力点と $0.5\sigma_{cc}$ 時のひずみを $3\varepsilon_{cc}$ とした点を結ぶ直線で設定した。コンクリートの引張抵抗は無視し、軸方向鉄筋

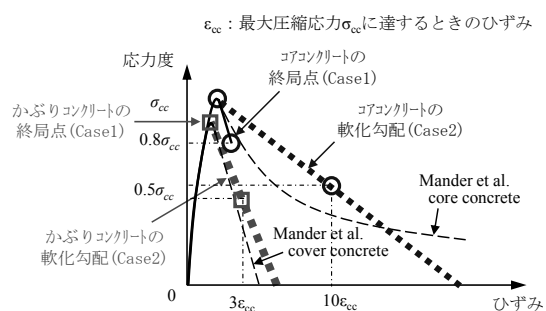


図-4 杭体コンクリートの応力-ひずみ曲線

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

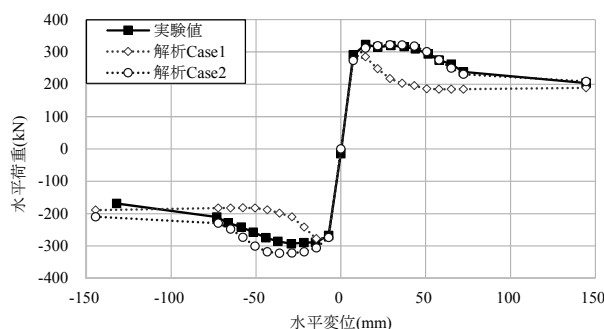


図-5 水平荷重と水平変位の関係(杭基礎全体)

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。載荷方法は、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載荷ステップで繰り返す正負交番の漸増載荷とした。

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(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に着目して、材料試験で得られた弾性係数と断面積を乗じて算定した。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杭列ごとの軸力変化は実

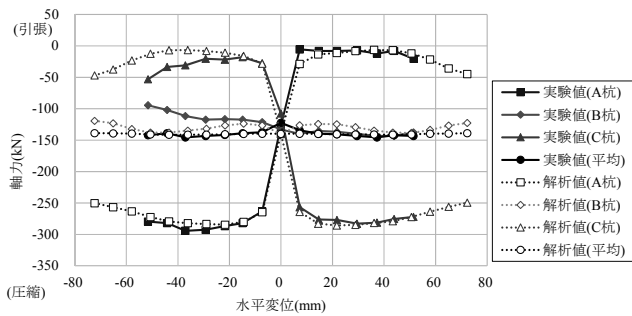


図-6 杭列ごとの軸力変動状況(Case2)

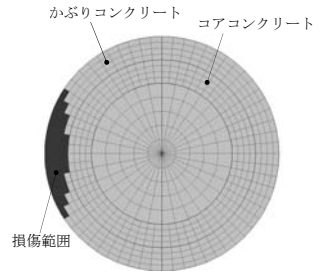


図-7 F杭(押込み側)における±8δ_y時の損傷状況比較(Case2)

表-2 杭列ごとの作用せん断力とせん断耐力（最大荷重時）

No	杭列	杭体諸元				作用軸力 N(kN)	作用せん断力 S _{max} (kN)	せん断耐力P _s (kN)			P _{S3} /S _{max}
		杭径D (mm)	肉厚t (mm)	コンクリートの 圧縮強度σ _c (N/mm ²)	軸方向鉄筋の 降伏強度 σ _y (N/mm ²)			道示 ^{2),3),8)} P _{S1}	二羽ら ⁵⁾ +軸力 ⁶⁾ P _{S2}	渡辺ら ⁷⁾ (二羽ら+軸力) P _{S3}	
1	引抜き側	300	60	66.5	355.0	13	37	47	47	60	1.62
2	中央	300	60	66.5	355.0	124	54	51	53	66	1.22
3	押込み側	300	60	66.5	355.0	283	73	54	62	75	1.03
合計(6本分)						842	327	303	325	401	1.23

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。図-7に示すように、コンクリートの剥落が目視で確認できる±6δ_y時や、かぶりコンクリートが剥落した±8δ_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、図-4に示すようにコンクリートの応力度が零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杭列ごと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. 杭列ごとの作用せん断力とせん断耐力評価

前述した既製RC杭の破壊特性を踏まえ、既製RC杭基礎における杭列ごとのせん断耐力評価の考え方について検討を行った。

表-2は、道示^{2),3)}の式、二羽ら⁵⁾の式に軸力の影響⁶⁾を見込んだもの、二羽らの式に軸力の影響と渡辺ら⁷⁾が提案した側方向鉄筋や圧縮軸方向鉄筋の影響を見込んだものと計3つのせん断耐力を試算し、再現解析より算出した杭列ごとの作用せん断力と比較して示したものである。

道示式については、せん断耐力を算出するにあたって、設計上ばらつきの影響を考慮する必要があるが、本検討では再現解析より求めた作用せん断力との比較を行うため、コンクリートが負担できるせん断応力度 τ_c の平均値を示す実験式⁸⁾(1)を用いた。

$$\tau_c = 0.72 \times d^{-0.33} \times \left(\frac{24}{\sigma_{ck}} \right)^{-1/3} \times \left(\frac{1.2}{p_t} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

ここで、 d ：有効高さ(m)、 σ_{ck} ：コンクリートの設計

基準強度(N/mm²)、 p_t ：引張鉄筋比(%), である。

二羽らの式には、道示と同様、軸力の影響を見込むことで、部材に圧縮応力が作用し、引張応力を著しく減少させるため、曲げせん断ひびわれの発生を抑制する効果を加味した。文献6)によると、軸力の効果には、部材寸法効果が存在しないことが報告されていることから、軸力負担分として $S_d \cdot M_0 / M_d$ を加算する方法で算出した。

ここで、 S_d ：部材に作用するせん断力、 M_0 ：軸方向力によるコンクリートの応力度が部材引張縁で零となる曲げモーメント、 M_d ：部材に作用する曲げモーメント、である。

また、スパイラル鉄筋は、そもそも設計上見込まない用心鉄筋であることから、また、中詰コンクリートは、打設範囲が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する影響を考慮することとし、見込むことができる最小限のせん断耐力(道示及び二羽ら)を試算した。なお、スパイラル鉄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、道示^{2),3)}で規定される上限値345N/mm²として算出した。しかしながら、道示式及び二羽らの式に軸力の影響を見込んだせん断耐力と作用せん断力との差が大きかった。

この差が大きくなる要因としては、道示式や二羽らの式には側方向鉄筋や圧縮軸方向鉄筋の影響が見込めていないこと等が考えられる。矩形断面RCはりの側方鉄筋による効果としては、曲げせん断ひび割れ面と交差する鉄筋がせん断抵抗に寄与すること、また、柱や杭などに用いる円形断面RC部材では、

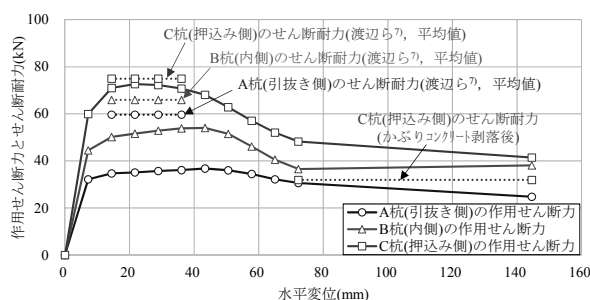


図-8 杭列ごとの作用せん断力とせん断耐力

側方鉄筋だけでなく、円形効果により圧縮軸方向鉄筋についても曲げせん断ひびわれのせん断抵抗に寄与することが報告されている⁷⁾。本稿でも円形RC断面を対象としていることから、この側方向鉄筋や圧縮軸方向鉄筋の効果を見込めると仮定して、渡辺ら⁷⁾が提案した式(2)のように鋼材断面積を換算した方法でせん断耐力を算出した。なお、文献⁷⁾より、式(2)の適用性について検証した二羽らの式を用いた。

$$A_s' = \sum A_{si} \cdot (d_i / d_1)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 A_{si} ：各段の軸方向鉄筋断面積(mm²)、 d_i ：圧縮縁からi段目の軸方向鉄筋位置までの距離(mm)、 d_1 ：圧縮縁から最下段の軸方向鉄筋位置までの距離(mm)、である。

その結果、せん断耐力が作用せん断力を上回り、最大荷重時にはせん断破壊に至らないという実験結果を再現し得るせん断耐力の評価が可能であることを確認した。

次に、最大荷重時以降の応答及び耐力の相対関係を確認するため、杭列ごとの作用せん断力とせん断耐力(渡辺ら⁷⁾)を示すとともに、かぶりコンクリート剥落後における押込み側杭(C杭)のせん断耐力についても整理した結果を図-8に示す。ここで、かぶりコンクリート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/mm²に達すると仮定して算出した。これより、かぶりコンクリートの剥落後からせん断破壊時までの途中経過については明確ではないものの、最大荷重時からせん断破壊時の耐力に漸近して低下することを想定した場合、押込み側の杭では先行してせん断破壊しやすく、引抜き側の杭ではせん断破壊しにくい傾向であることが確認できる。

5. まとめ

既製RC杭を用いた杭基礎模型の実験結果¹⁾を踏まえて、杭列ごとのせん断抵抗機構を把握することを目的として、解析的に杭列ごとの曲げやせん断に対する耐力特性を評価する手法の検討を行った。本検討により確認できた事項を以下に示す。

- ・ファイバー要素を用いた数値解析により、杭列ごとの軸力変動状況を再現でき、杭列ごとの作用せん断力についても算出可能である。
- ・RC杭のせん断耐力評価には、軸圧縮力の影響以外に、側方向鉄筋や圧縮軸方向鉄筋の影響を考慮することで、より合理的な評価ができることを確認した。ただし、本検討は気中における杭基礎の耐力評価であり、実際の杭基礎の耐力は地盤抵抗の影響も受けるため、地盤抵抗も含めた耐力特性の評価手法についても今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 岡田太賀雄, 鬼木浩二, 河野哲也, 星隈順一: 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) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2002.
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.
- 4) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. of Struct. Engrg., ASCE*, Vol.114, No.8, pp. 1804-1826, 1988.
- 5) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, Vol.372, pp.167-176, 1986.
- 6) 建設省土木研究所: 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書—高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計指針(案)一, 共同研究報告書, 第138号, 1995.
- 7) 渡辺健, 大石峻也, 米花萌, 二羽淳一郎: 中実円形断面鉄筋コンクリートはりのせん断耐力評価に関する実験的研究, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol. 67, No.2, pp. 200-212, 2011.
- 8) 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.