

既製鉄筋コンクリート杭のせん断耐力評価式に関する一考察 ～ 載荷実験およびFEM解析によるPHC杭式の適用性の検証～

藤岡健祐・江口康平・大住道生

1. はじめに

平成8年道路橋示方書より前の基準で設計された道路橋基礎は、当時の基準では考慮していなかったレベル2地震動に対する照査を満足せず、耐震補強が必要とされる事例が多い。一方、熊本地震など実際の地震被害において確認された基礎杭の被害は必ずしも多くない。ただし、新設橋では使用されていない既製鉄筋コンクリート杭（以下「RC杭」という。）等については、一部の橋でせん断破壊による重篤な被害が生じている場合もある。このため、RC杭等のせん断耐力を適切に評価し、地震に対する耐荷性能が不足する基礎杭を抽出する方法を確立する必要がある。

RC杭は、その改良品であるPHC杭の開発により、現在では道路橋に用いられることがないため、平成29年道路橋示方書・同解説¹⁾（以下「H29道示」という。）に具体的な照査法が規定されていない。H14道示²⁾以前の規定では、RC杭及びPHC杭を含む既製コンクリート杭のせん断耐力評価においてははりのせん断耐力評価式が準用されていた。一方、既往の研究³⁾により、PHC杭のせん断耐力評価においては、実験で確認したせん断耐力がはりのせん断耐力評価式による推定値を大きく上回ることが確認されており、H29道示では新たに合理化されたせん断耐力評価式が規定されている。

そこで、本研究では、RC杭のせん断耐力評価の合理化を目的として、載荷実験並びにFEM解析によるパラメトリックスタディを実施し、各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響を確認した。さらに、RC杭に対するH29道示に基づくPHC杭のせん断耐力評価式の適用性について検証した。

2. 既製コンクリート杭のせん断耐力評価法

2.1 H14道示に基づくはりのせん断耐力評価式

式(1)～(4)に示すはりのせん断耐力評価式²⁾（以下「はり式」という。）は、修正トラス理論に

基づき、コンクリートが負担するせん断耐力 S_c とせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 S_s の和でせん断耐力を評価している。既製コンクリート杭に対してはり式を適用する場合は、正負交番繰り返し載荷の影響に関する補正係数 c_c 、有効高 d に関する補正係数 c_e 、軸方向引張鉄筋比に関する補正係数 c_{pt} 、許容せん断応力度 τ_c の積の値をコンクリートの許容せん断応力度を1.5倍した値を用いることがH14道示IV12.10.5に解説されている。

なお、はり式ではせん断スパン比（せん断スパン a /有効高 d ）の影響は考慮されていない。また、過去の研究⁴⁾よりはり式は、コンクリートの負担するせん断耐力を小さく評価する傾向にあることが報告されている。一方で、せん断補強筋が負担するせん断耐力は、修正トラス理論に基づく算定式がそのまま用いられ、せん断補強筋形状が円形であることにより、矩形の場合に比べてその補強効果が低減される影響⁵⁾が考慮されていない。

$$P_s = S_c + S_s \quad \text{----- (1)}$$

$$S_c = c_c c_e c_{pt} c_N \tau_c b d \quad \text{----- (2)}$$

$$= 1.5 \tau_c c_N b d \quad \text{----- (3)}$$

$$S_s = \frac{A_w \sigma_{sy} d (\sin \theta + \cos \theta)}{1.15 s} \quad \text{----- (4)}$$

2.2 H29道示に基づくPHC杭のせん断耐力評価式

式(5)～(8)に示すH29道示に規定されるPHC杭のせん断耐力評価式¹⁾（以下「PHC杭式」という。）は、多数のPHC杭のせん断載荷試験結果に基づく実験式である。PHC杭式ではコンクリートが負担できるせん断応力度 τ_1 、せん断補強筋が負担できるせん断応力度 τ_2 、軸力によって増加するせん断応力度 τ_3 の和に、有効面積（ $b_e j$ ）と部分係数（ ξ_1 、 ξ_2 、 Φ_u ）を乗じた値をせん断耐力として評価している。コンクリートが負担できるせん断応力度の算出式(6)は、修正荒川式⁶⁾の第一項を基に、PHC杭の試験結果を踏まえ補正係数（ k_u 、 k_p ）を調整したもので、寸法効果、引張鉄筋比及びせん断スパン比の影響が見込まれている。また、せん断補強鉄筋が負担できるせん断応

力度に対して、せん断補強鉄筋が円形であることによる補強効果の低減を考慮している。なお、既製RC杭とPHC杭の相違点であるコンクリート強度 σ_{ck} 及びプレストレス σ_{ce} の有無については、式(6)で直接その値が考慮されるため、追加のパラメータを考慮する必要は無い。また、式(6)の原型となった修正荒川式はRC梁のせん断載荷試験結果に基づく実験式であるため、本来RC構造への適用における課題は小さいと考えられる。

$$S_d = \xi_1 \xi_2 \Phi_u (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) b_e j \quad \text{----- (5)}$$

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u k_p (\sigma_{ck} + 17.7)}{a/d + 0.115} \quad \text{----- (6)}$$

$$\tau_2 = 0.516 P_w \sigma_y \quad \text{----- (7)}$$

$$\tau_3 = 0.102 \{ \sigma_{ce} + N / (b_e j) \} \quad \text{----- (8)}$$

3. 実験及び再現解析

3.1 実験概要

既往の実験⁷⁾では、既設橋梁より撤去されたRC杭を用いて、せん断破壊に着目した静的載荷試験を行っている。ここでは、せん断破壊が確認された杭径450mm、せん断スパン450mm（せん断スパン比 ≈ 1.0 ）のケースの実験結果のみを記す。図-1に載荷試験の概要図、表-1に供試体諸元及び実験結果、図-2に実験終了後の状況写真を示す。図-2より、載荷側の治具下面と圧縮側下端を結ぶような斜め方向のせん断ひび割れが進展しており、実験後のはつり調査により、ひび割れ位置においてスパイラル鉄筋の破断が確認された。

実験で計測された最大荷重とはり式及びPHC杭式による推定値を比較する。なお、本稿においては、はり式による推定値は、フーチングの設計²⁾に用いられるせん断スパン比によるコンクリート負担分の割増係数 c_{dc} 及びせん断補強鉄筋負担分の低減係数 c_{ds} を準用して、せん断スパン比による影響を考慮するものとした。また、PHC杭式による推定値は安全係数を考慮せず（種々の部分係数を全て1.0として）算出した。したがって、はり式による推定値は安全側に評価される値であるのに対して、PHC杭式による推定値は生値（特性値）を示している。表-1より、はり式による推定値は実験値に対して2倍以上の安全余裕を有している。一方、PHC杭式による推定値は実験値に対して16%程度安全側の評価であり、比較的精度よくせん断耐力を評価できている。

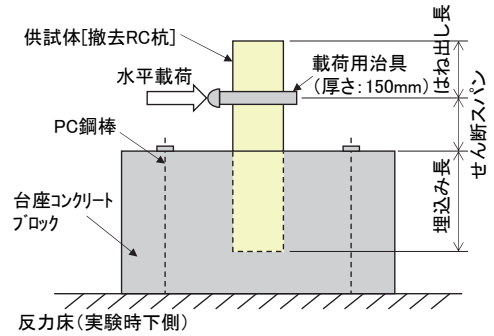


図-1 RC杭の載荷試験概要図

表-1 供試体諸元、実験結果、せん断耐力推定値

杭径(有効高d) [mm]		450 (410)	
せん断スパンa [mm]		450	
壁厚t [mm]		80	
コンクリート強度 σ_{ck} [N/mm ²]		71.9	
配筋	軸方向鉄筋	降伏強度(N/mm ²)	273.1
		径[mm]・本数	19・16
	スパイラル鉄筋	引張強度[N/mm ²]	615.5
		径[mm]・ピッチ[mm]	6・100
①実験で計測された最大荷重[kN]		532.9	
②はり式による推定値[kN] (①/②)		240.8 (2.21)	
③PHC杭式による推定値[kN] (①/③)		458.0 (1.16)	

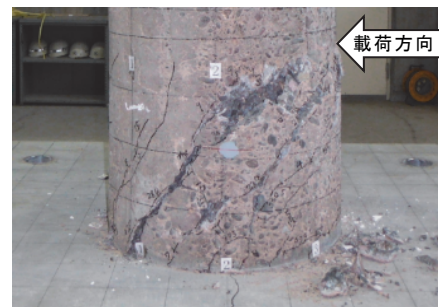


図-2 RC杭載荷試験の実験終了後の損傷状況

3.2 FEMによる再現解析

3.1で示した実験ケースを対象に、FEM解析による再現解析を行い、後述するパラメトリックスタディにおけるFEMモデルの妥当性を確認する。解析モデルは、図-3に示す実験におけるせん断スパン間を抽出した3次元モデルを用いた。端部の拘束条件は、下端を全方向固定とし、上端を載荷軸方向以外の変位及び回転を自由として設定した。

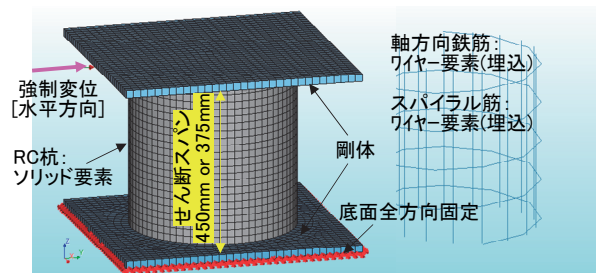


図-3 RC杭のFEM再現解析モデル

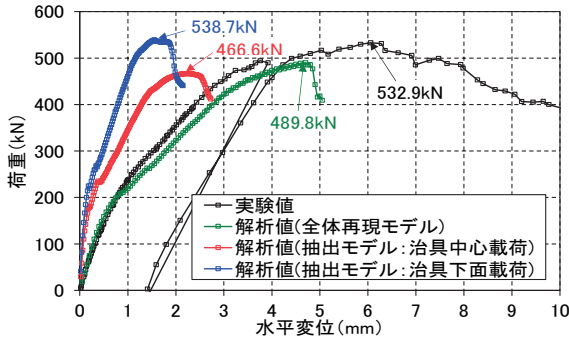


図-4 実験及び再現解析による荷重-変位関係

ここで、実験において、せん断ひび割れ上端が載荷用治具の下面付近に確認されたことから、再現解析においては、せん断スパン上端を治具中心位置又は治具下面位置とした場合の2ケースで解析を行った。解析で使用したコンクリートの物性値および鉄筋の応力-ひずみ関係は、材料試験結果から設定した。

図-4に、実験及び各解析ケースの荷重変位関係を示す。両解析ケースとも実験値と比べて初期剛性が大きい、これは解析モデルにおいて杭上下端を剛結しているため、杭のコンクリートブロックからの抜け出しや、杭と治具の境界面のずれに起因する変位が含まれないこと等が要因であると考えられる。これらの影響については、別途載荷用治具及び固定コンクリートブロックをモデル化の対象に含めた全体再現モデルで検証することにより、初期剛性を含めて精度よく再現できることを確認した。ここでは、全体再現モデルにおける荷重変位関係を図-4に併記し、詳細は割愛する。最大荷重に着目すると、実験値及び全体再現モデルによる解析値は、せん断スパン上端を治具中心とした場合と治具下面とした場合の解析値の間の値を示している。したがって、実際のせん断スパン上端は治具中心～治具下面の間に位置すると考えられる。

4. FEM解析によるパラメトリックスタディ

既製RC杭の適用範囲においてFEM解析によるパラメトリックスタディを実施し、各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響を確認するとともに、各せん断耐力評価式の妥当性を検証する。解析モデルは、せん断スパンが明確であり、耐力算出において一定の妥当性が確認された3.2のせん断スパン抽出モデルを用いた。

検証の対象とするパラメータは杭径、せん断スパン、コンクリート強度、軸方向鉄筋量、スパイラル鉄筋量、スパイラル鉄筋材料、軸力とした。杭径はJISA5372で規定される $\Phi 300 \sim \Phi 600$ の範囲で3ケース、せん断スパン比は0.5～2.5の範囲で4ケースを対象とした。コンクリート強度は過去のJIS規格値を参考に27、35、40、50N/mm²(参考検討)、の4ケースを対象とした。軸方向鉄筋量はJISにおける軸方向鉄筋比による分類A種(3%未満)、B種(3～5%)、C種(5%以上)に対応する3ケース(2.7%、4.0%、5.4%)を対象とした。スパイラル鉄筋量は、鉄筋径により設定し、 $\phi 3.2 \sim 12.0$ mm及びスパイラル鉄筋を配置しない場合の計5ケースを対象とした。スパイラル鉄筋材料は過去の採用実績等を参考にSWM-B(鉄線)、SR235、SD295、SD345の4ケースを対象とした。軸力は既設橋の事例を参考に0～600kNの範囲で4ケースを対象とした。なお、各検証においては、着目するパラメータのみを変更し、その他のパラメータは固定している。

解析結果においては全ケースでせん断破壊型の破壊形態が確認された。各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響を確認するため、各パラメータの基準ケースに対する解析値及び各せん断耐力評価式による推定値の変動率を図-5に示す。コンクリート強度及びスパイラル鉄筋材料の影響に対しては、解析値と各せん断耐力評価式による推定値は概ね近い変動率を示している。一方、杭径、せん断スパン比、軸方向鉄筋比、スパイラル鉄筋径、軸力の影響に対しては、はり式と比べてPHC杭式による推定値の方が解析値と近い変動率を示している。杭径及び軸方向鉄筋比の影響に対しては、

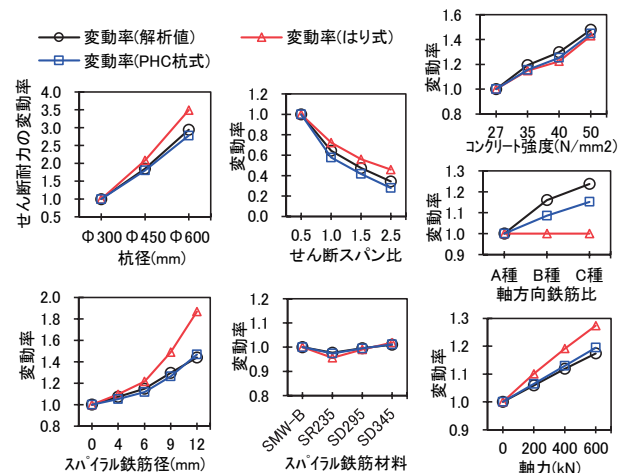


図-5 各パラメータに対するせん断耐力の変動率

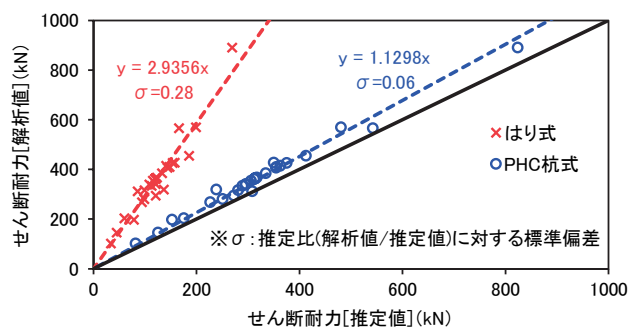


図-6 解析値と各せん断耐力式における推定値の関係

はり式において有効高及び軸方向鉄筋比に関する補正係数を一定値で規定していることから、それらの影響を考慮しきれず、実験値と乖離が生じたと考えられる。また、スパイラル鉄筋径の影響に対しては、はり式においてせん断補強鉄筋が円形であることによる補強効果の低減が考慮されておらず、せん断補強鉄筋の補強効果を大きく見積もる傾向があることが確認できる。さらに、はり式においては軸力の影響を大きく評価し、せん断スパン比の影響を小さく評価する傾向が確認できる。

解析値と各せん断耐力評価式による推定値の関係を図-6に示す。はり式による推定値は、解析値に対して3倍程度の安全率が確保されている。一方で、PHC杭式による推定値は解析値に対して13%程度安全側に評価することが確認された。また、各せん断耐力評価式による推定比（解析値/推定値）の標準偏差を比較すると、PHC杭式ははり式と比べて推定比のばらつきが小さく、比較的精度よくせん断耐力を評価できている。

5. まとめ

本研究では、載荷実験及びFEM解析により、RC杭のせん断耐力評価に対するPHC杭式の適用性について検証した。その結果、パラメトリックスタディで対象とした条件においては、PHC杭

式により、安全側であることを担保しつつ、各パラメータの影響を精度よくせん断耐力に考慮できることが確認された。一方で、従来のはり式においては、実験値または解析値に対して、2～3倍程度の安全率が確保されていることが確認された。

今後の課題としては、PHC杭式は多数のPHC杭のせん断載荷試験結果に基づく実験式であるが、今回RC杭に対する実験でせん断破壊が確認されたケースが少ないことから、主にFEM解析結果との比較によりせん断耐力評価式の妥当性を検証している。そのため、解析では考慮されていない杭の製造方法や使用材料、品質管理基準のばらつきが推定式の信頼性に及ぼす影響については今後検証が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は、土木研究所と高速道路総合技術研究所、首都高速道路株式会社との共同研究の中で実施された。ここに記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

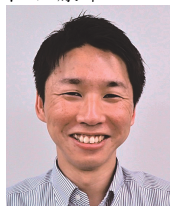
- (1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、2017.11
- (2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、2002.3
- (3) 土木研究所、早稲田大学、コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭の性能評価手法の高度化に関する共同研究報告書第494号、2017.7
- (4) コンクリートパイル建設技術協会：PHC杭のせん断耐力実験報告書、1997.3
- (5) 岸田慎二、堀井昌博、桑原文夫、林静雄：大口径PHC杭のせん断終局強度の計算方法に関する研究、日本建築学会構造系論文集第532号、pp.103～110、2000.6
- (6) 荒川卓：鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について、コンクリート・ジャーナル、vol.8、No.7、pp.11～20、1970.7
- (7) 河口大輔、鬼木浩二、澤田守、大住道生：撤去杭を用いた既製RC杭のせん断破壊に着目した実験的検討、第21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.17～22、2018.7

藤岡健祐



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
交流研究員
FUJIOKA Kensuke

江口康平



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
研究員、博士（工学）
Dr. EGUCHI Kohei

大住道生



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、博士（工学）
Dr. OHSUMI Michio