

PC 杭に対する PHC 杭のせん断耐力算定式の適用性の検討

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○有馬 俊, 江口 康平, 大住 道生

1. はじめに

既製PC杭基礎は、現行のH29道路橋示方書¹⁾（以降、道示）に具体的な照査法の規定のない部材であり、従前の規定では、せん断耐力の評価にはりのせん断耐力評価式が準用されていた。既製PC杭に対してこのように評価されたせん断耐力を用いて、当時の基準では考慮していなかったレベル2地震動に基づく外力から算出される応答を照査すると、補強が必要と判断される事例が多い。ただし、地震により道路橋の既製PC杭がせん断破壊した事例は知られていない。そこで、PC杭のせん断耐力を合理的に評価する方法を確立するため、土木研究所では模型PC杭を用いた載荷試験²⁾及び再現解析による考察³⁾を行ってきた。本稿では、PC杭のせん断耐力をH29道示に規定されるPHC杭のせん断耐力算定式（以降、PHC杭式）で評価することの適用性を検証した結果を報告する。

2. 実験を踏まえた PHC 杭式の適用性の検証

文献 2)で報告された載荷試験概要を図-1 に示す。同文献では、杭径 $\phi 500(\text{mm})$ の同一諸元の PC 杭に対してせん断スパン比の計画値を 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 とした 4 ケース（以降、Case-1~4）の実験を行うとともに、実験結果と複数の推定法によるせん断耐力を比較し、最も実験値に近い PHC 杭式に基づく推定値でも実験値の 1/2 倍程度に評価されることを報告している。この要因について、文献 3)では、せん断破壊となった Case-1（図-2 参照）に対する再現解析により治具の拘束の影響を確認し、計画したせん断スパンは載荷点と支点の各治具芯間であるのに対して、実験のせん断スパンは各治具内々間（図-1 参照）となった可能性を指摘している。

一方、治具により支点部の杭体の回転が拘束されると、曲げモーメント分布が計画とは異なるとともに、せん断スパンも計画より短くなった可能性が考えられる。図-3 に、単純支持となる場合と支点部が拘束される場合における断面力の模式図を示す。なお、各ケースにおいて治具直下にもひび割れが確認された状況から、支点部は完全に拘束されたわけではないと考えられる。

以上の観点に基づき、改めて Case-1 を対象とした FEM 解析を行いせん断スパンを考察した。FEM 解析では、材料試験結果から決まらないパラメータは感度解析を行い文献 3)と比べて再現性を向上した解析モデルを用いた。具体的には、杭と治具の間の界面のせん断方向の剛性を変更するとともに、コンクリートの全ひずみひび割れモデルにおいて、引張軟化曲線に Hordijk モデル⁴⁾、圧縮曲線に放物線モデル⁵⁾、横方向ひび割れによる圧縮強度の低減に Vecchio and Colins モデル⁶⁾、せん断伝達に Al-Mahaidi モデル⁷⁾を用いた。

図-4 に、実験値及び再現解析による解析値のせん断力換算の荷重-変位関係を示す。実験の履歴を概ね再現できており、最大荷重の比率は、解析値/実験値 $\approx 1.02(902\text{kN}/883\text{kN})$ で大差ない。図-5 に、解析の最大荷重時のコンクリートのひび割れ形状図と荷重急落直後のコンクリートのひび割れ幅分布図を示す。実験と同様に、最大荷重時には載荷点間の下面ひび割れと載荷点~支点間の斜めひび割れの発達、荷重急落直後には載荷点付近のコンクリート

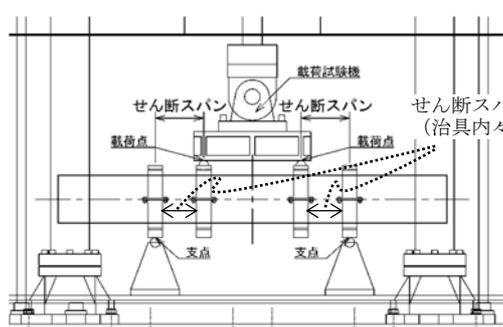


図-1 載荷試験概要



図-2 Case1 のせん断破壊の状況

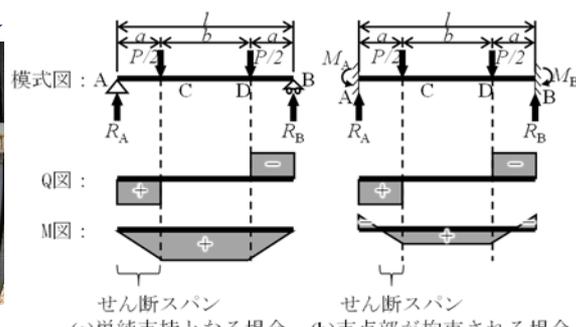


図-3 断面力の模式図

キーワード PC 杭, せん断耐力, FEM 解析

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 CAESAR TEL. 029-879-6773

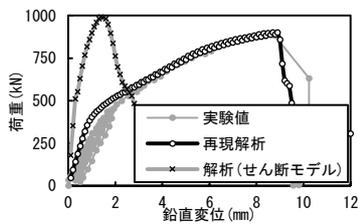


図-4 荷重—鉛直変位関係

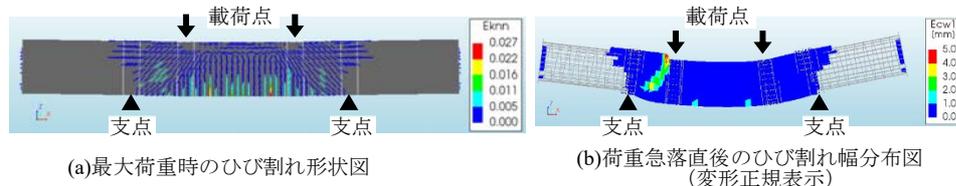


図-5 コンクリートのひび割れ特性

表-1 実験又は解析結果と推定耐力の結果一覧

	実験による検証			解析による検証								
	Case-1	Case-2	Case-3	φ 300			φ 700			φ 1200		
杭径(mm)	φ 500			0.5	1.5	2.5	0.5	1.5	2.5	0.5	1.5	2.5
せん断スパン比	0.55	0.82	1.10	0.5	1.5	2.5	0.5	1.5	2.5	0.5	1.5	2.5
せん断 耐力(kN)	883	697	518	339	161	157	1403	718	628	2916	1581	1276
PHC 杭式	775	603	486	300	141	104	1079	547	422	2250	1205	959
推定比	1.14	1.16	1.06	1.13	1.14	1.51	1.30	1.31	1.49	1.30	1.31	1.33

が破壊するとともにせん断ひび割れの大きな進展が確認された。以上より、実験を概ね再現できていることが確認された。

続いて、実験における片側の支点と載荷点の各治具芯間のみを抽出したモデル（以降、せん断モデル）を用いてせん断スパンを明確にした条件で FEM 解析を行い実験のせん断スパンを考察した。せん断モデルでは、両端を固定条件に、片側を支点、反対側を載荷点とすることで、曲げモーメントは端部で最大、中央部で 0、せん断スパンは実験における載荷点と支点の各治具芯間の 1/2 倍になるように設定した。図-4 に、せん断モデルによる解析値を併記する。ここでは、せん断耐力に着目しているため最大荷重のみに着目する。最大荷重の比率は解析値（せん断モデル）/実験値 $\approx 1.13(993\text{kN}/883\text{kN})$ となった。これより、実験のせん断スパンは、計画値の半分となる支点と載荷点の中央～治具芯相当よりも若干大きいと考えられる。

以上を踏まえて、表-1 に、実験結果とせん断スパンを支点と載荷点の中央～治具芯間の条件として PHC 杭式により算出したせん断耐力の比較結果一覧を示す。なお、実験のせん断スパンはこれより大きいと考えると PHC 杭式によるせん断耐力は表の値より小さくなる。また、Case-2, 3 について文献 2) では曲げ破壊と評価していたが、PC 鋼材のひずみや載荷点～支点間の斜めひび割れの発達によりその延長上のコンクリートが局部圧壊した後に荷重が急落した状況から、せん断耐力として評価することとした。推定比（実測に基づくせん断耐力/PHC 杭式によるせん断耐力）は、1.1 程度で安全側の評価であり、せん断耐力を PHC 杭式で評価することに一定の妥当性が確認された。

3. 実験以外の諸元に対する FEM 解析による PHC 杭式の適用性の検証

既設の PC 杭は、メーカーヒアリング結果より φ 300～1200(mm)が用いられていることから、この範囲における上下限と中間の代表諸元として φ 300, 700, 1200(mm)に対して、それぞれせん断スパン比を 0.5, 1.5, 2.5 とした場合のせん断モデルによる FEM 解析を行い、実験以外の諸元に対する PHC 杭式の適用性を検証した。表-1 に、解析結果と推定耐力の結果一覧を示す。推定比（解析に基づくせん断耐力/PHC 杭式によるせん断耐力）は、いずれのケースも 1.1 以上で安全側の評価であることが確認された。

4. まとめ

実験 3)により得られたせん断耐力は、両端を固定条件としたせん断モデルによる解析値よりも若干小さいことが確認されたことを踏まえて、実験のせん断スパンを支点と載荷点の中央～治具芯間として PHC 杭式によりせん断耐力を評価することの妥当性を確認した。さらに、杭径 φ 300, 700, 1200 を対象に実験を妥当に評価できる方法で解析し、解析値に対して PHC 杭式で評価するせん断耐力には 1 割以上の安全余裕があることを確認した。以上より、今回の検討範囲における PC 杭のせん断耐力は、PHC 杭式により安全側に評価できることが示された。

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) 河口ら:せん断破壊に着目した PC 杭の模型実験, 第 22 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, 2019.7.

3) 河口ら:PC 模型杭載荷試験におけるせん断耐力の解析的検討, 土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集, 2020.8.

4) Hordijk, D. A. : Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD Delft University of Technology, 1991

5) Feenstra, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, 1993

6) Vecchio, F. J., and Collins, M. P. : Compression response of cracked reinforced concrete., J. Str. Eng., ASCE 119, 12 (1993), 3590-3610.

7) Al Mahaidi, R. S. H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979.