

せん断破壊に着目したP C杭の模型実験

河口 大輔¹・澤田 守²・大住 道生³

¹正会員 （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

古い基準で設計された既設道路橋基礎では、レベル2地震動に対する耐震性能の照査を満足しないことが多く、耐震補強が必要と判断されることも多い。しかし、実際には基礎の被害は多くは確認されておらず、耐震性能の評価精度を向上させる必要があると考えられ、既設橋基礎に対しては、耐荷機構に照らして限界状態を超えないことを照査する方法を構築することで、より適切かつ合理的に耐震性の評価が可能となると考えられる。

本研究では、PC杭を再現した模型杭を用いて、せん断に対する耐力、破壊形態を確認し、地震時における限界状態を評価することを目的として載荷試験を行った。本稿では、せん断スパン比をパラメータとしたPC模型杭の載荷試験結果について報告する。

2. 試験方法

(1) 試験ケースの決定

試験状況及び試験装置の概要を写真-1及び図-1に示す。試験ケースは、表-1に示す4ケースであり、その内訳は下記のとおりである。本実験では、PC杭が製作されていた当時の規格に合わせて製作した杭径500mm、壁厚90mmの模型杭を用いて、せん断破壊に着目するために、せん断スパン比を1.0・1.5・2.0・2.5とする供試体を作成した。

(2) 載荷方法

載荷方法は、JIS A 5363において杭のせん断耐力試験方法と定められている単純ばり形式載荷とした。

載荷試験は、Case-2～Case-4の供試体は、土木研究所所有の大型構造物繰返し載荷装置を用いたが、

Case-2での載荷試験において、最大荷重が載荷装置の上限に達したため、より大きな耐力を有すると判断されるCase-1においては、30MN大型構造部材万能試験機を用いて載荷を行った。

表-1 試験ケース

Case	せん断スパン比	杭径 (mm)	壁厚 (mm)	配筋		コンクリート 強度 (N/mm ²)
				PC鋼材 (有効プレストレス)	スパイラル 鉄筋	
1	1.0	500	90	φ9×24本 (10N/mm ²)	φ6	50
2	1.5					
3	2.0					
4	2.5					

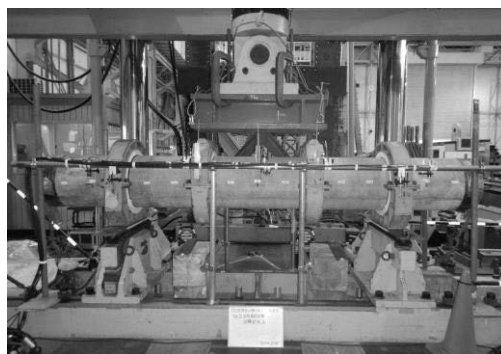


写真-1 載荷試験概要

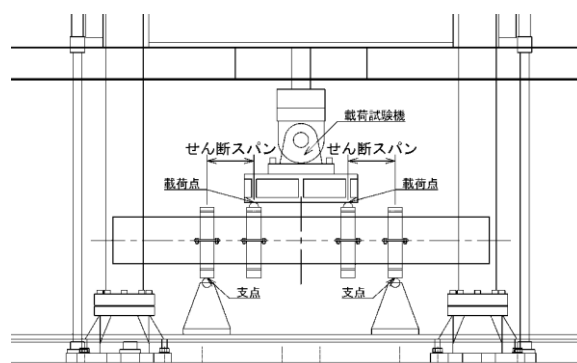


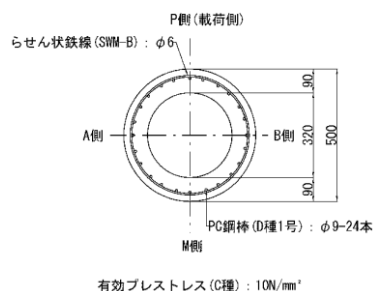
図-1 載荷試験概要図

表-2 試験体諸元

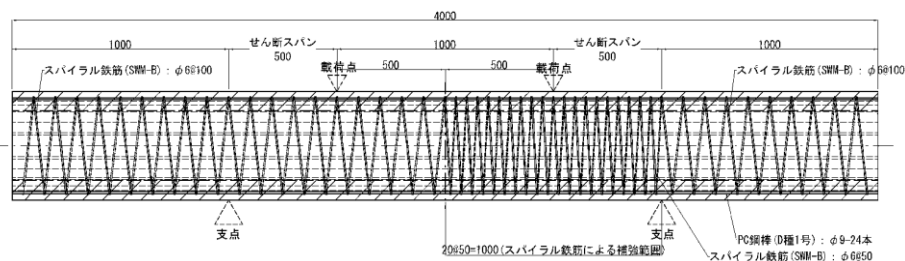
Case	杭径 (mm)	杭長 (mm)	せん断 スパン比	せん断スパン長 (mm)	想定破壊 形態
1	500	4000	1.0	500	せん断破壊
2		4000	1.5	750	
3		5000	2.0	1000	
4		5000	2.5	1250	

表-3 材料試験結果

Case		1	2	3	4
杭 径 (mm)		500			
コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	68.6	71.0	67.2	61.6
	弾性係数 (kN/mm ²)	39.8	39.1	37.6	37.3
軸方向鉄筋 (PC鋼材)	降伏応力度 (N/mm ²)	1371.0			
	引張強度 (N/mm ²)	1564.0			
	弾性係数 (kN/mm ²)	198.2			
スパイラル鉄筋	引張強度 (N/mm ²)	617.0			

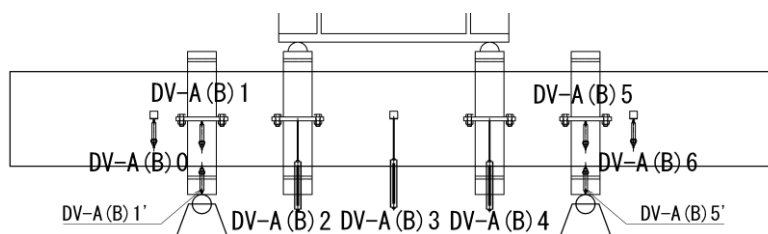


(a) 断面図

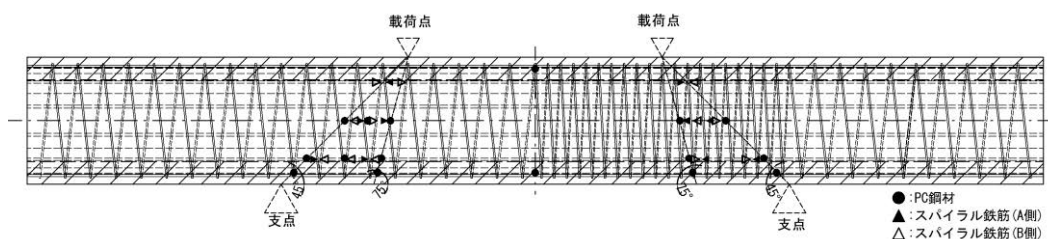


(b) 配筋図 (Case-1 の例)

図-2 PC杭試験体



(a) 変位計設置箇所



(b) ひずみゲージ設置箇所 (Case-1 の例)

図-3 計測箇所

荷重パターンは単調増加方式による漸増荷重とし、破壊（終局）に至るまでとした。荷重は荷重制御で行い、適宜、変位制御へと切り替えを行った。なお、計測は荷重制御時は、5kN～10kNごと、変位制御時は0.1mm～0.3mmごととした。

(3) 試験体

試験体の諸元を表-2に示す。使用する試験体は、PC杭が製作されていた当時の諸元を再現し、製作した模型杭であり、外径500mm、有効プレストレスは、10N/mm²とした。

試験体の断面状況と配筋状況を図-2に示す。製作したPC杭は、外径が500mm、内径が320mmで、コ

ンクリート厚90mmの中空断面である。配筋状況は、軸方向にPC鋼材がφ9mm×24本、軸方向のPC鋼材を取り囲むように配置されたスパイラル鉄筋はφ6mmとし、間隔は100mmとしたが、片側は中心からの支点までの範囲において50mmとした。

杭長は、せん断スパン比に応じた長さとし、せん断スパン比の小さいCase-1及びCase-2では、杭長L=4.0m、せん断スパン比の大きいCase-3及びCase-4では、杭長L=5.0mとした。

表-3に材料試験結果を示す。各値は3試験体の平均値である。コンクリート圧縮強度は、杭体製造時に採取したコンクリートによる外径200mm、高さ300mm、コンクリート厚40mmの遠心供試体を用い

て載荷試験当日に圧縮強度試験を行い、PC鋼材及びスパイラル鉄筋の引張試験は、杭体に用いた材料を使用して、製造時に試験を行った。

(4) 測定項目

杭の変位を測定するために、変位計を設置し、載荷試験中における杭体のひび割れや剥離等の変状が生じた時点での、荷重及び変位を測定した。また、主にせん断ひび割れが想定される範囲におけるPC鋼材及びスパイラル鉄筋にひずみゲージを設置した。

図-3に変位計及びひずみゲージ設置箇所を示す。

3. 試験結果

(1) 試験結果の概要

試験の結果として、各試験体での荷重と支間中央部での鉛直変位計により計測された変位の関係を図-4に示す。また、各試験体における載荷終了後のひび割れ状況図を図-5に示す。図-5においては、載荷実験によるひび割れを太い実線、載荷実験による浮き・剥離を斜線網掛け、載荷位置及び支点を矢印及び網掛けで表した。

Case-1の損傷状況は、900 kNで引張側となる載荷点間の下面側に曲げひび割れが、載荷点と支点を結ぶような斜め方向のひび割れが発生し、その後も荷重の増加に伴って多数の斜め方向のひび割れが生じ、1765kNで最大荷重を迎えた。最大荷重以降は、耐力低下とともに変位が増大し、変位が10mm程度となった際、鉄筋破断のような音がして、荷重が急激に下がり、せん断破壊となった。載荷終了後、杭体をはつり、鉄筋の状態を確認したところ、載荷点と支点の中間部においてスパイラル鉄筋の破断を確認した。2点載荷を行っているため、Case-1供試体のせん断耐力は、最大荷重の半分となる882.5kNであると考えられる。載荷終了後の試験体状況及び鉄筋状況を写真-2に示す。

Case-2では、735 kNで載荷点間の下面側に曲げひび割れが発生した。その後、870 kNで載荷点と支点を結ぶような斜めひび割れが発生した。その後は荷重の増加とともにひび割れが進展し、1393 kNで最大荷重を迎えたが、急激な耐力低下は起きず、変位が20mm付近になったところで、載荷点周辺のコンクリートが圧壊し、曲げ破壊となった。

Case-3の損傷状況は、Case-2と同様の荷重-変位関係を示し、540 kNで載荷点間の下面側に曲げひび割れが生じ、750 kNで載荷点と支点を結ぶような斜めひび割れが発生した。その後、ひび割れの進展は確認できたが、1035kNで最大荷重を迎えたが、急激な

耐力低下は発生しないまま、変位が26mm付近となったところで載荷点付近の圧壊により、曲げ破壊となり終局を迎えた。

Case-4では、387 kNで載荷点間の下面側に曲げひび割れが生じ、600 kNで載荷点と支点を結ぶような斜めひび割れが発生した。その後、荷重及び変位の増加に伴い、ひび割れの進展が確認されたが、Case-2及びCase-3と同様に急激な耐力低下にいたることはなく、787kNで最大荷重を迎えた後、変位が30mm程度となったところで、載荷点間中央上面のコンクリートが圧壊し、曲げ破壊となった。

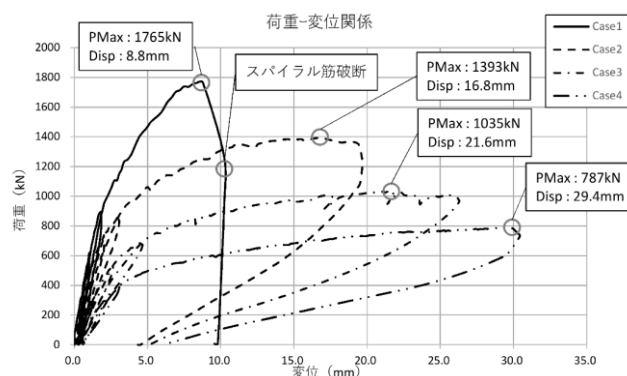
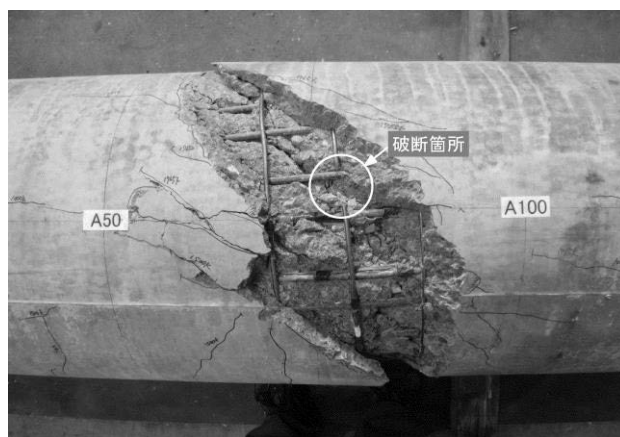


図-4 荷重－変位関係

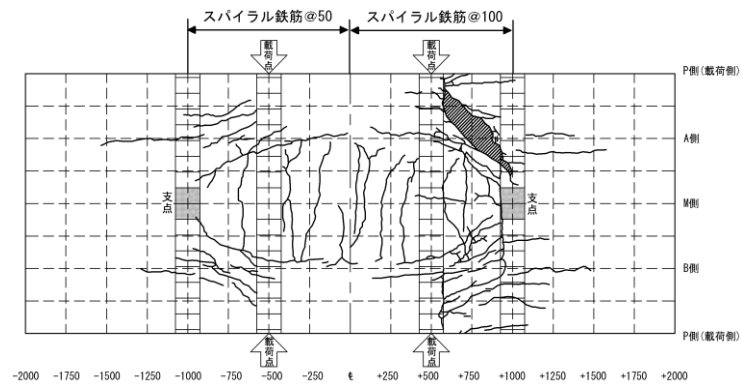


(a) 試験体状況

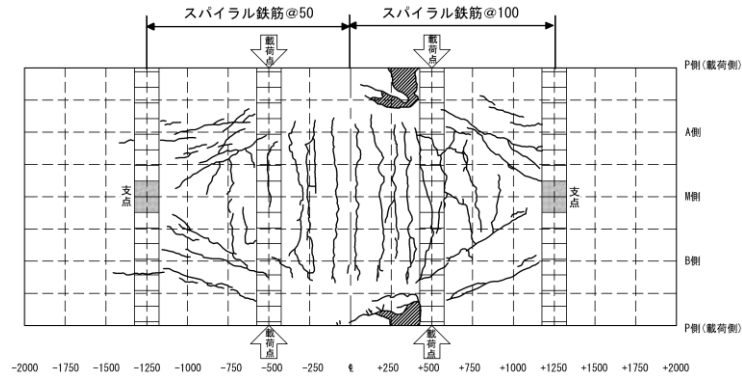


(b) 鉄筋破断箇所

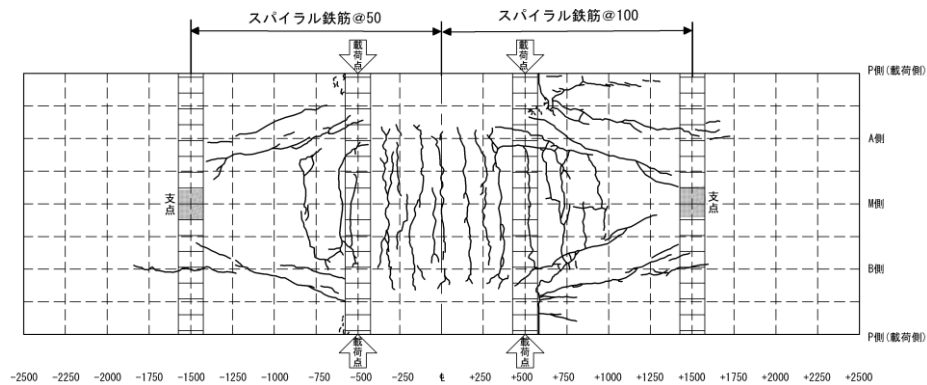
写真-2 Case-1 試験体



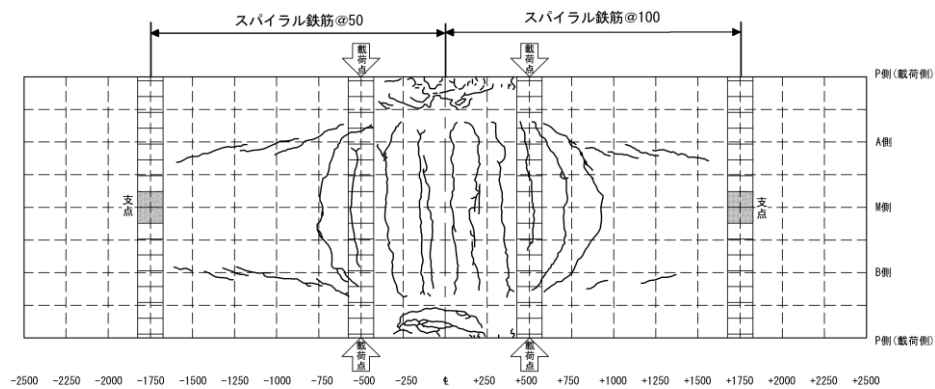
(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3



(d) Case-4

図-5 ひび割れ状況

(2) 既製RC杭のせん断耐力

Case-1からCase-4までの各試験体における耐力を算出した結果及びその耐力から想定される破壊形態と載荷試験における実際の破壊形態を表-4に示す。

曲げ耐力については、平成29年道路橋示方書・同解説Ⅲ編に準拠し、算出した。

PC杭のせん断耐力については、レベル2地震動に対する照査が規定された平成8年道路橋示方書・同解説Ⅳ¹⁾より記載が削除されており、せん断耐力算出式は定義されていない。また、平成29年道路橋示方書・同解説Ⅳ²⁾よりPHC杭のせん断耐力算定式(以下、H29道示PHC杭式と呼称)が新たに設定され、PC杭とPHC杭の構造上の大きな違いはコンクリート強度のみであることから、本実験におけるPC杭のせん断耐力は以下に示すH29道示PHC杭式で算出を行った。さらに、せん断耐力においては、スパイラル鉄筋もせん断力に抵抗するものと考え、文献3)を参考にスパイラル鉄筋の降伏強度を295N/mm²と仮定してせん断耐力を算出した。ただし、スパイラル鉄筋の間隔については、載荷位置それぞれで100mm及び50mmと設定したが、Case-1においてせん断破壊が起こったのは100mmピッチとした箇所であったため、スパイラル鉄筋間隔を100mmピッチとして算出した。

耐力算出の結果、Case-1～Case-4の全ケースにおいて想定された破壊形態は、せん断破壊先行となった。しかし、載荷試験の結果、実際にせん断破壊に至ったのは、せん断スパン比を1.0としたCase-1のみであった。

次に、せん断破壊先行と想定され、載荷試験においてもせん断破壊となったCase-1に着目し、H29道示PHC杭式以外の式においてもせん断耐力を算出し、比較を行った。比較を行うせん断耐力式は、H29道示PHC杭式、平成29年道路橋示方書・同解説Ⅲ⁴⁾に規定されているせん断耐力式(以下、H29道示Ⅲ編式と呼称)、平成24年道路橋示方書・同解説Ⅳ⁵⁾において規定されていた既製コンクリート杭のせん断耐力式におけるコンクリートのせん断応力度 τ_c を

文献6)を参考にPC杭に合わせ、0.65と設定するもの(以下、H24道示式と呼称)、コンクリート標準示方書⁷⁾に規定されているせん断耐力式に二羽らの式⁸⁾によるせん断スパンの影響及び軸力により増加するせん断耐力を考慮したもの(以下、土木学会式+軸力増加分と呼称)とした。

H29道示PHC杭式より推定されるせん断耐力 S_d は、

$$S_d = \xi_1 \xi_2 \Phi_u (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) b_e j \quad (1)$$

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u k_p (\sigma_{ck} + 17.7)}{a/d + 0.115} \quad (1a)$$

$$\tau_2 = 0.516 P_w \sigma_y \quad (1b)$$

$$\tau_3 = 0.102 \left(\sigma_{ce} + \frac{N}{b_e j} \right) \quad (1c)$$

ここで、 τ_1 はコンクリートが負担できるせん断応力度の特性値、 τ_2 はせん断補強筋が負担できるせん断応力度の特性値、 τ_3 は軸力によって増加するせん断応力度の特性値である。

H29道示Ⅲ編式より推定されるせん断耐力 S_{usd} は、

$$S_{usd} = \xi_1 \xi_2 (\Phi_{uc} S_c + \Phi_{us} S_s) + \xi_1 \xi_2 \Phi_{up} S_p \quad (2)$$

$$S_c = k \tau_r b_w d + S_d \frac{M_0}{M_d} \quad (2a)$$

$$S_s = c_{ds} k \left(\sum \frac{A_w \sigma_{syd} (\sin \theta + \cos \theta)}{1.15 a} \right) \quad (2b)$$

$$S_p = A_p \sigma_{pe} \sin \alpha \quad (2c)$$

ここで、 S_c はコンクリートが負担できるせん断力の特性値、 S_s はせん断補強筋が負担できるせん断力の特性値、 S_p はPC鋼材の引張力が負担できるせん断力の特性値である。

H24道示式より推定されるせん断耐力 P_s は、

$$P_s = S_c + S_s \quad (3)$$

$$S_c = c_c c_e c_{pt} c_N \tau_c b d = 1.5 \tau_c c_N b d \quad (3a)$$

$$S_s = \frac{A_w \sigma_{syd} (\sin \theta + \cos \theta)}{1.15 s} \quad (3b)$$

ここで、 S_c はコンクリートが負担するせん断耐力、 S_s は斜引張鉄筋が負担するせん断耐力である。ただし、式(3a)において杭のせん断耐力を算出する際には、 $c_c \cdot c_e \cdot c_{pt} \cdot \tau_c = 1.5 \tau_c$ として算出する。

土木学会式+軸力増加分によるせん断耐力 V_{yd} は、

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad (4)$$

$$V_{cd} = \frac{\alpha \beta_d \beta_p f_{vcd} b_w d}{\gamma_b} + S_d \frac{M_0}{M_d} \quad (4a)$$

$$V_{sd} = \left\{ \frac{A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{S_s} \right\} \frac{z}{\gamma_b} \quad (4b)$$

ここで、 V_{cd} はせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力、 V_{sd} はせん断補強鋼材によりうけもたれる設計せん断耐力である。さらに、軸力増加分としては、式(4a)において、H29道示Ⅲ編式より

表-4 算出した耐力と破壊形態

Case		1	2	3	4
杭径(mm)		500			
せん断スパン		1.0	1.5	2.0	2.5
曲げ耐力	ひび割れ曲げモーメント M_c (kN・m)	154.1	154.3	155.3	154.8
	M_c 作用時荷重 (kN)	308.2	205.7	155.3	123.8
	初降伏曲げモーメント M_y (kN・m)	337.4	339.1	336.4	332.0
	M_y 作用時荷重 (kN)	674.9	452.1	336.4	265.6
	終局曲げモーメント M_u (kN・m)	386.0	390.0	383.5	372.3
	M_u 作用時荷重 (kN)	771.9	520.0	383.5	297.8
せん断耐力 (H29道示PHC式)		455.5	353.9	287.5	243.5
想定破壊形態		せん断			
実際の破壊形態		せん断	曲げ	曲げ	曲げ

$S_d \frac{M_0}{M_d}$ を準用した。

式(1)～式(4)を用いて、それぞれ算出したCase-1の推定せん断耐力と実験結果との比較を表-5に示す。Case-1の載荷実験では、最大荷重の直後にせん断破壊で終局を迎えており、供試体のせん断耐力は、882.5kNである。対して各式により推定されるせん断耐力及び実験結果における割合は、H29道示PHC杭式で455.5kN(52%)、H29道示Ⅲ編式で327.6kN(37%)、H24道示式で333.2kN(38%)、土木学会式+軸力増加分で、353.0kN(40%)となった。なお、本稿では、実験結果との比較を行うためH29道示PHC杭式及びH29道示Ⅲ編式における部分係数は全て1.0として、せん断耐力を算出した。

ここで、各式において推定されたせん断耐力について、内訳をみると、コンクリート負担分の占める割合が大きい。式(2)及び式(4)では、式(1)及び式(3)と比較すると、全体に占める割合及び推定値が小さくなる。また、せん断補強筋負担分の締める割合は小さく、これは、せん断補強筋として見込んでいるスパイラル鉄筋が、径の細い鉄線であることが要因であると考えられ、式(1)～式(3)において、せん断補強筋負担分については、それぞれの式から算出された値を見ても、ほぼ同様の結果となっており、各式の違いによる影響は少ないと思われる。ただし、式(4)においては、せん断補強筋負担分にはせん断スパン比の影響が考慮されておらず、道示式のように低減をしていないため他式より大きな値となっていると考えられる。また、プレストレス力によって増加するせん断力は、式(2)及び式(4)で大きな値となり、推定値の60%程度を占める結果となった。

推定せん断耐力において、大きな割合を占めるコンクリート負担分のせん断力は、H29道示PHC式が最も大きな値となっている。これは、H29道示PHC杭式は過去のPHC杭の実験結果⁹⁾を踏まえて規定された式であり、これまでの杭のせん断耐力式は、H24道示式のようにはりのせん断耐力式に安全余裕を大きく見込むことで算出されていたため、推定値と実験結果の乖離が大きくなっていたが、H29道示PHC杭式においては、既製コンクリート杭の円環断面への適用性などが高いことから、推定値がより大きくなっていると考えられる。しかし、本研究における載荷試験結果と比較すると、推定値が実験値の50%程度となっており、乖離が小さいとは言えず、実験結果との乖離の要因、PHC杭以外の既製コンクリート杭への適用の可否等については、今後の検討が必要であると考えられる。

表-5 各式におけるせん断耐力比較

せん断耐力推定式	H29道示PHC式	H29道示Ⅲ編式	H24道示式	土木学会式+軸力
コンクリートが負担するせん断力 (kN)	347.3	108.0	261.0	116.0
コンクリート負担分の割合	0.76	0.33	0.78	0.33
鉄筋が負担するせん断力 (kN)	17.2	15.7	12.2	33.0
鉄筋負担分の割合	0.04	0.05	0.04	0.09
軸力によって増加するせん断力 (kN)	91.0	204.0	60.0	204.0
軸力増加分の割合	0.20	0.62	0.18	0.58
合計せん断耐力S (kN)	455.5	327.6	333.2	353.0
実験結果 (kN)	882.5			
推定値 / 実験結果	0.52	0.37	0.38	0.40

※スパイラル鉄筋の降伏強度は295N/mm²と仮定

4. まとめ

PC杭を再現した模型杭を用いて、せん断に対する耐力、破壊形態を確認し、地震時における限界状態を評価することを目的として載荷試験を行った。本実験における確認事項を以下に示す。

- 1) せん断破壊に着目するために、せん断スパン比をパラメータとして載荷試験を行ったが、せん断破壊に至ったものは、せん断スパン比を1.0としたCase-1のみであった。
- 2) せん断破壊に至った試験体において、式(1)～式(4)を用いてそれぞれ算出した推定せん断耐力と実験結果を比較すると、推定値が最も実験結果と近くなったH29道示PHC杭式においても、推定値が実験結果の50%程度であった。実験結果と推定値の乖離の要因分析とせん断耐力推定方法について引き続き検討していく予定である。

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，1996.12.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2017.11.
- 3) (社)コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル-土木編，2003.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，2017.11.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2012.3.
- 6) (社)コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル-土木編，1992.
- 7) (公社)土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 8) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，vol.372，pp167-176，1986.8
- 9) 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，共同研究報告書第494号，2017.7.