

SD490を用いたPHC杭のせん断耐力評価に関する実験的研究

国立研究開発法人土木研究所 正会員 工修 ○宮原 清
 (一社)コンクリートパイル建設技術協会 後庵 満丸
 早稲田大学理工学術院 博士 (工学) 秋山 充良

Abstract : Although high-strength materials have been used in the concrete components to increase the structural capacity or to improve the construction works, it is still unclear whether the conventional design method can be applied to high-strength concrete components. In this research, shear resistance of precast high-strength concrete pile with shear reinforcement having yield strengths more than 600 MPa was investigated experimentally. The effect of yield strength of shear reinforcement, concrete infilling, and shear span ratio on the shear behavior of the pile is discussed.

Key words : PHC pile, shear reinforcement, shear test, high-strength rebar

1. はじめに

近年、道路橋においては必要な鉄筋が多くなり、過密配筋による施工性の低下が生じている。このような背景から、平成 24 年度に改定された道路橋示方書(以下、道示という)の中では、従来の道示で規定されていた SD345 よりも高強度の SD390, SD490 の許容応力度などが示され¹⁾、過密配筋の緩和が期待される。ただし、高強度鉄筋の適用性は軸方向鉄筋として使用する場合のみ確認されており、せん断補強を目的として使用する場合の適用性については確認されていない。これより、道示において高強度鉄筋を軸方向鉄筋以外の鉄筋に使用する場合の許容応力度は、SD345 と同じ値とすることが規定されている。例えば、既製コンクリート杭の PHC 杭のせん断補強として配筋されるスパイラル鉄筋は、依然多くの鉄筋が必要である。PHC 杭のスパイラル鉄筋に高強度鉄筋を用いることの適用性が確認され、従来の SD345 よりも大きな許容応力度を定めることができれば、PHC 杭本体の設計(鉄筋量)を合理化することができる。

こうした背景から、現在(国研)土木研究所では早稲田大学および(一社)コンクリートパイル建設技術協会との共同研究により、PHC 杭のスパイラル鉄筋に高強度鉄筋を用いる場合のせん断耐力や塑性変形能を確認することを目的とした検討を行っている。本稿では、このうちせん断耐力の照査と検討のために行った載荷試験結果について報告する。

2. 試験方法

2.1 試験方法

試験状況および試験装置の概要を写真-1 および図-1 に示す。せん断試験は、既製コンクリート杭のせん断破壊が確認できる張出しばり形式の載荷方法で実施した。作用させた荷重は図-2 に示すように一方向繰返し荷重であり、4つのサイクルからなる。1 サイクルは、道示 IV のレベル 1 地震時の設計を満たす最大荷重(以下、「L1 荷重」という)まで載荷した後、除荷するものである。2 サイクルは、目視により斜めひび割れが確認されるまで載荷した後、除荷するものである。3 サイクルは、道示 IV に示されるせん断耐力が発揮される荷重(以下、「L2 荷重」という)まで載荷した後、除荷するものである。4 サ



写真-1 試験状況

イクルは、杭が破壊するまで載荷した後、除荷するものである。また、計算値は、道示 IV 5.2.3¹⁾に示されているせん断耐力式(式(1))により算出した。

$$P_{S1} = S_c + S_s \quad (1)$$

$$S_c = c_N \tau_a b d \quad (2)$$

$$S_s = A_w \sigma_{sy} d (\sin\theta + \cos\theta) / 1.15s \quad (3)$$

ここに、 P_{S1} :せん断耐力 (N), S_c :コンクリートが負担するせん断耐力(kN), c_N :軸方向圧縮力による補正係数で、 $c_N = 1 + M_0 / M_o$ 。ただし、 $1 \leq c_N \leq 2$, M_0 :軸方向圧縮力により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で $M_0 = N I_c / A_c y$ (N・mm), M :部材断面に作用する曲げモーメント (N・mm), N :部材断面に作用する軸方向圧縮力 (N), I_c :部材断面の図心軸に関する断面二次モーメント (mm⁴), A_c :部材断面積 (mm²), y :部材断面の図心より部材引張縁までの距離 (mm), τ_a :許容せん断応力度 (= 1.5×0.85 とする) (N/mm²), d :部材断面の有効高 (mm) で $h/2 + 2\sqrt{2} r_s / \pi$, h :等積箱形断面の部材断面の部材高 (mm), r_s :円中心から主鉄筋重心までの距離 (mm), b :部材断面幅 (mm) で $t \cdot \pi^{0.5}$, t :杭体の肉厚 (mm)である。また、 S_s :せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 (kN), A_w :間隔 s および角度 θ で配置される斜引張鉄筋の断面積 (mm²), σ_{sy} :斜引張鉄筋の降伏点 (N/mm²), s :斜引張鉄筋の部材軸方向の間隔 (mm), θ :斜引張鉄筋が部材軸方向となす角度 (°)である。

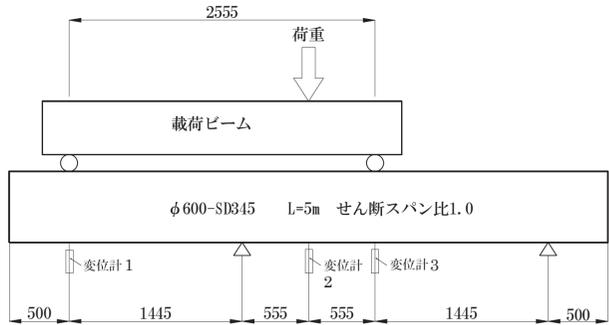


図-1 試験装置概要 (例)

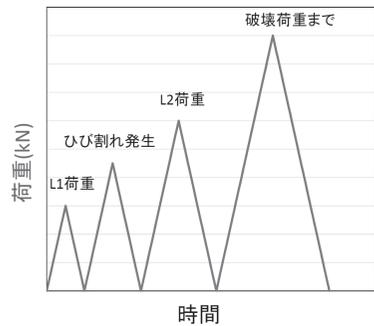


図-2 荷重サイクル例

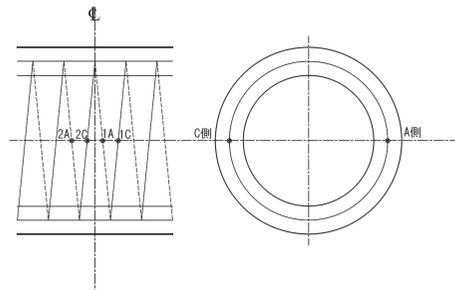


図-3 せん断補強鉄筋のひずみ計測箇所

2.2 試験体

実験ケースおよび試験体の諸元は、表-1 に示すとおりである。供試体のパラメータは、スパイラル鉄筋の種類のほか、杭のせん断耐力に影響すると考えられる中詰めコンクリートの有無、杭径、せん断スパン比をパラメータとした 5 体である。スパイラル

表-1 実験ケース

No	杭長	杭径	肉厚	せん断スパン比	中詰め	PC 鋼棒			せん断補強鉄筋					スパイラル鉄筋の体積比 $\rho_s = 4A_h / s d^*$	$\rho_s \cdot \sigma_y$	
	L	D	t			径-本	断面積 A_p	配置直径	種類	降伏強度 σ_y	径	断面積 A_h	間隔 s			有効径 d
	m	mm	mm	-	-	mm-本	mm ²	mm	-	N/mm ²	mm	mm ²	mm	mm		
1	5.0	600	90	1	無	9-24	1536	510	SD345	345	10	71.33	70	529	0.00785 (1.0)	2.71
2	5.0	600	90	0.5	有	9-24	1536	510	SD490	490			100	529	0.00549 (0.7)	2.69
3	5.0	600	90	1	有	9-24	1536	510	SD490	490			100	529	0.00549 (0.7)	2.69
4	5.0	600	90	1	無	9-24	1536	510	SD490	490			100	529	0.00549 (0.7)	2.69
5	7.0	1000	130	1	無	10-46	3611	890	SD490	490			60	900	0.00528	2.59

*: () 内の数値は、SD345を使用した場合の ρ_s との比

鉄筋の種類は、従来から使用されている SD345 (No. 1) と高強度鉄筋の SD490 (No. 2~5) の二種類とした。なお、 $\rho_s \cdot \sigma_y$ が 2.45 以上、かつ同等となるように設定した¹⁾。また、杭径は道路橋基礎として使用される実績から、600 mm (No. 1~4) と 1000 mm (No. 5) の二種類とした。せん断スパン比は、既往の荷重試験²⁾を参考に 0.5 (No. 2) と 1.0 (No. 1, 3~5) とした。中詰めコンクリートの有無の影響は、杭径 600mm, スパイラル鉄筋 SD490 の杭を用いて検討する。なお、中詰めコンクリートの打設範囲は、杭の全長である。せん断補強鉄筋のひずみを測定するため、杭体内の図-3 に示す位置にひずみゲージを配置した。さらに、杭の変位を計測するために、図-1 に示す位置に変位計を設置した。

3. 試験結果

3.1 試験結果の概要

各ケースで得られた 4 サイクル目の荷重と変位の関係を図-4 に示す。この変位は図-1 に示す変位計 2 で測定したものである。なお、この変位計で測定した変位には、荷重の初期において荷重治具に使用されているゴムの変形分を含んでいる。そのため、杭体に最初のひび割れが生じる直前の剛性を用いてこのゴムの変形分を除去した結果を図-4 には示している。荷重試験で確認された斜めひび割れ発生時のせん断耐力および破壊時のせん断耐力、最終的な破壊形状を表-2 に示す。表-2 において、斜めひび割れ発生時のせん断力(実測値)は、目視により斜めひび割れが確認されたときの荷重荷重をせん断力に換算したもので、せん断耐力(実測値)は、荷重が低下したときの荷重荷重をせん断力に換算したものである。

図-4 に示すように、いずれのケースにおいても、荷重により、荷重の低下が確認されている。No. 1, No. 2 および No. 4 の最終的な破壊形態はせん断破壊であった。一方、No. 3 および No. 5 は、曲げによるひび割れの進展が顕著であり、PC 鋼材の降伏が確認されたことから、最終的な破壊形態は曲げ破壊であった。そのため、No. 3, 5 のせん断耐力は表-2 に示した値以上になると考えられるが、斜めひび割れも相当進展していたため、表-2 の値と大きくは変わらないものと考えられる。

表-2 には、2.1 で示した式(1)および次に示すコンクリート標準示方書[設計編:標準] 解 2.4.6³⁾に示されているディープビームに対するせん断耐力式(式(4))により算出した計算値も併せて示している。なお、計算値の算出にあたり、杭の諸元や材料強度など、いくつかのパラメータについては、実測結果および材料試験結果を用いている(表-3 参照)。

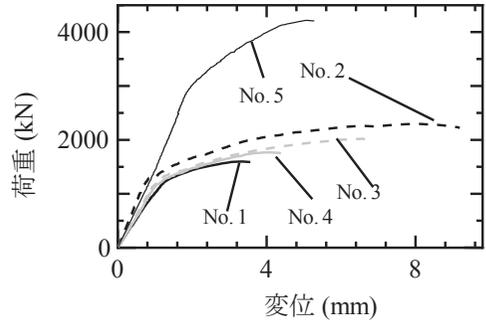


図-4 荷重-変位の関係

表-2 杭の荷重試験結果

No	斜めひび割れ発生時のせん断力(実測値) P_c (kN)	せん断耐力 (kN)			$P_M - P_c$ (実測値)	破壊形状
		実測値 P_M	計算値*			
			式(1)	式(4)		
1	271	905	603 (1.50)	844 (1.07)	634	せん断
2	769	1883	615 (3.06)	1363 (1.38)	1114	せん断
3	583	1143	602 (1.89)	886 (1.29)	560	曲げ
4	379	1001	587 (1.70)	827 (1.21)	622	せん断
5	1068	2372	1621 (1.46)	1845 (1.28)	1304	曲げ

*: () 内の数値はせん断耐力の(実測値/計算値)の値 K_s

表-3 材料試験結果

No	材料試験結果				
	杭径 D (mm)	肉厚 t (mm)	コンクリートの圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	せん断補強鉄筋の降伏強度 σ_{sy} (N/mm ²)	中詰めコンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)
1	602	107	92.4	413	—
2	600	107	112.9	610	39.2
3	600	101.3	116.2	610	38.3
4	600	94.8	113.0	610	—
5	1000	146	106.3	610	—

$$V_{dd} = (\beta_d + \beta_w) \beta_p \beta_a \alpha f_{dd} b_w d \quad (4)$$

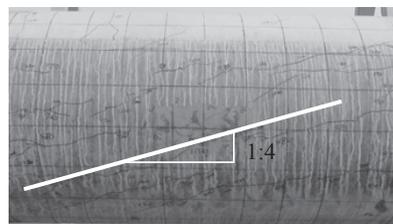
ここに、 V_{dd} ：設計せん断圧縮破壊耐力 (N)、 α ：支圧板の部材軸力方向長さ (r) の影響を考慮する係数で $\alpha = (1 + 3.33 r/d) / (1 + 3.33 \cdot 0.05)$ 、 $f_{dd} = 0.19 \sigma_c^{0.5}$ (N/mm²)、 $\beta_d = 1000 / d^{0.25}$ 、 $\beta_w = 4.2^3 100 p_w^{0.5} (a/d - 0.75) / f'_{cd}{}^{0.5}$ (≥ 0)、 $\beta_p = (1 + 100 p_v^{0.5}) / 2$ (≤ 1.5)、 $\beta_a = 5 / (1 + (a_v / d)^2)$ 、 b_w ：腹部の幅 (mm) で $t \cdot \pi^{0.5}$ 、 d ：単純梁の場合は載荷点、片持ち梁の場合は支持部前面における有効高さ (mm)、 a_v ：支持部前面から載荷点までの距離 (mm)、 $p_v = A_s / (b_w d)$ 、 A_s ：引張側鋼材の断面積 (mm²)、 p_w ：せん断補強鉄筋比で $p_w = A_w / (b_w s_s)$ 、ただし、 $p_w < 0.002$ となる場合は $p_w = 0$ とする。 A_w ：区間 s_s における部材軸と直行するせん断補強鉄筋の総断面積 (mm²)、 s_s ：部材軸と直行するせん断補強鉄筋の配置間隔 (mm)、 σ_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) である。

表-2 に示すように、せん断耐力の実測値と計算値の比率 K_S は、式(4)を用いる場合 (K_{S2}) は約 1.0~1.4、式(1)を用いる場合 (K_{S1}) は約 1.5~3.1 である。道示の式(1)は、斜め引張り破壊する RC 部材のせん断耐力の設計値を得るためのものであり、せん断スパン比が小さく、せん断圧縮破壊となる RC 部材のせん断耐力を過小評価する。

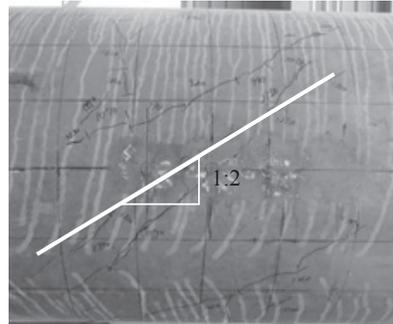
3.2 試験結果の分析および考察

3.2.1 高強度鉄筋を用いることによる影響

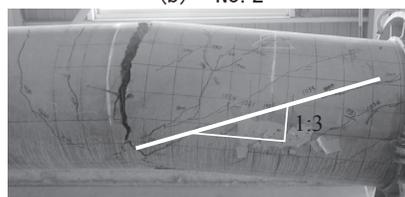
スパイラル鉄筋に SD345 を使用した No.1 と、SD490 を使用した No.4 について、表-2 に示した斜めひび割れ発生時のせん断力 P_c 、せん断耐力 P_M を比較すると、いずれの値についても、No.1 よりも No.4 の方が大きい。杭径が 600 mm の杭について、荷重とスパイラル鉄筋に取り付けたひずみゲージにより計測されたひずみの関係を図-5 に示す。縦軸は荷重 P 、横軸はせん断補強鉄筋のひずみの値を示している。図-5 より、せん断補強鉄筋の鉄筋の種類によらず、せん断補強鉄筋のひずみは斜めひび割れが発生するのと同様に急増していることから、斜めひび割れ発生後にせん断補強鉄筋が荷重を負担していることが分かる。また、斜めひび割れ発生後にせん断補強鉄筋が降伏していること、写真-2 に示すようにせん断ひび割れの角度など、損傷・破壊形態についてもせん断補強鉄筋の強度による差異がないことが確認できた。表-1 に示されるように、 $\rho_s \cdot \sigma_y$ が一定の条件であれば、鉄筋の種類によらず、せん断補強鉄筋の荷重に対する抵抗メカニズムは同様であると推察される。さらに、表-1 に示すように、No.4 のせん断補強鉄筋量は No.1 の 70%程度である一方で、表-2 に示すように、せん断補強鉄筋のせん断抵抗分を表す最大荷重 P_M と斜めひび割れ発生荷重 P_c の差 ($P_M - P_c$) は No.1 と No.4 ではほぼ同じである。以上より、既製コンクリート杭のせん断耐力は、鉄筋の種類が異なる場合でも $\rho_s \cdot \sigma_y$ を一定と



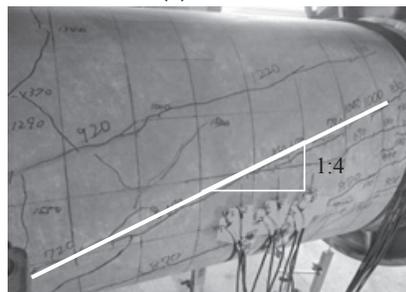
(a) No. 1



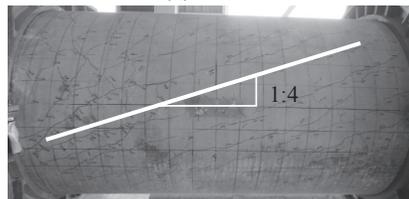
(b) No. 2



(c) No. 3



(d) No. 4



(e) No. 5

写真-2 実験終了後の状況

すれば同等となることが分かった。なお、せん断補強鉄筋のひずみが増加し始めるのは斜めひび割れ発生後であることから、斜めひび割れ発生荷重が No. 4 の方が大きかった要因は、せん断補強鉄筋の違いによるものではなく、コンクリートの圧縮強度の違いが影響したと考えられる。

表-2 に示した K_{S1} を見てみると、No. 1 が 1.50、No. 4 が 1.70 であり、SD490 を用いた場合は SD345 を用いた場合に比べて実験値とのかい離が大きい。この要因としては、前述のとおり No. 1 と No. 4 でせん断耐力に差が生じた要因が斜めひび割れ発生荷重が異なるためであり、これを考慮するためには計算においてコンクリート強度の違いを考慮する必要があるが、式(1)の計算値の算出にあたってはコンクリートの許容せん断応力度を一定 ($\tau_a = 1.5 \times 0.85$) としたためであると考えられる。 K_{S2} は、No. 1 が 1.07、No. 4 は 1.21 であり、 K_{S1} と同様に高強度鉄筋を用いた No. 4 の方が実験値とのかい離が大きい。この要因は、式(4)はコンクリートの抵抗力を評価する式であり、コンクリートの圧縮強度の関数となっていることから各杭のコンクリートの実強度を考慮できている一方で、鉄筋の強度の違いは考慮できないことが要因と考えられる。以上より、いずれの式においても一定の精度で実験値を推定できるものの、杭径や構造諸元、あるいはコンクリートやせん断補強鉄筋の強度の範囲がある程度限定される PHC 杭を対象とした、高精度なせん断強度評価式を作成する必要がある。

図-5 には、せん断補強鉄筋として SD490 を使用した杭径 1000 mm の No. 5 の結果も併せて示している。No. 1、No. 4 と同様に、No. 5 のせん断補強鉄筋のひずみも、斜めひび割れ発生以降に急増している。以上より、せん断補強鉄筋が荷重に対して抵抗する効果は、杭径の違いによらず期待できることが分かった。また、表-2 に示すように K_{S1} は 1.46、 K_{S2} は 1.28 であり、No. 1 や No. 4 の値と大きく変わらない。以上から、式(1)、式(4)ともに、せん断補強鉄筋に高強度鉄筋を用いる場合にも、杭径の影響を適切に考慮できているものと考えられる。

3.2.2 中詰めコンクリートの効果

表-2 から、中詰めコンクリートを杭体中心の中空部に充てんした No. 3 の P_c は、中詰めコンクリートを充てんしていない No. 4 の P_c の約 1.5 倍である。表-3 に示すように、No. 3 と No. 4 の杭体のコンクリートの圧縮強度はほぼ同じであることから、No. 4 に比べて No. 3 の方が大きな P_c が得られた要因は、中詰めコンクリートが斜めひび割れ荷重の増加に寄与したためであると思われる。一方、 $P_M - P_c$ はいずれのケースにおいても約 600 kN であり、中詰めコンクリートが斜めひび割れ荷重後の耐力増加に与える影響は小さいことが分かる。写真-2 に示すように、No. 3 と No. 4 の試験体について、斜めひび割れの杭軸方向からの角度は、No. 3 が水平方向から 1:3 程度、No. 4 が 1:4 程度であることが確認できた。これは、No. 1、No. 5 でも同様であった。No. 4 の場合、断面形状が円筒のため押しつぶされた形で変形するため、No. 3 の杭と比べて水平に近い傾きで斜めひび割れは発生・進展したものと推察される。その一方で、図-6 を見ると、せん断補強鉄筋のひずみの

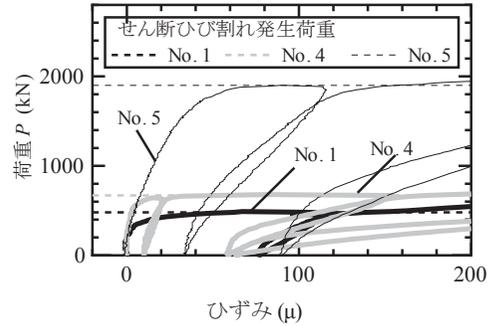


図-5 作用荷重とスパイラル鉄筋のひずみの関係 (No. 1, No. 4, No. 5)

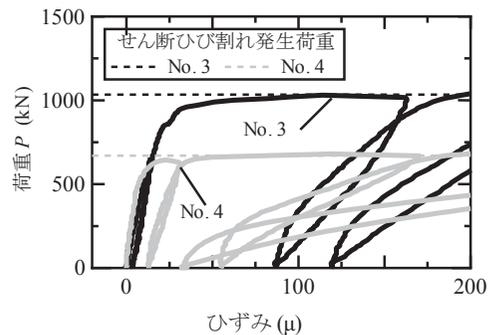


図-6 作用荷重とスパイラル鉄筋のひずみの関係 (No. 3, No. 4)

履歴は、No. 3, No. 4 とともに斜めひび割れ発生以降に同様な挙動を示している。以上から、中詰めコンクリートの有無によって斜めひび割れ発生までの耐力や損傷の状況は異なるものの、斜めひび割れ発生以降に発揮されるせん断補強鉄筋の抵抗メカニズムに与える影響は小さいことが分かる。

表-2 に示した K_S を見てみると、 K_{S1} は No. 3 が 1.89, No. 4 が 1.70 である。式(1)においては中詰めコンクリートの影響は考慮していないため、No. 3 の比率は、No. 4 よりも大きな値となっている。 K_{S2} は No. 3 が 1.29, No. 4 は 1.21 である。式(4)についても中詰めされている部材に対する適用性は確認されていないものの、比較的精度よく評価できている。

3.2.3 せん断スパン比の影響

せん断スパン比を 0.5 とした No. 2 と、1.0 とした No. 3 の供試体に対する載荷試験において、荷重とせん断補強鉄筋に生じたひずみの関係を図-7 に示す。せん断スパン比を 0.5 とした No. 2 においても、他のケースと同様に斜めひび割れが発生した後にせん断補強鉄筋のひずみが急増しており、荷重に対してせん断補強鉄筋が抵抗要素として機能していることが分かる。

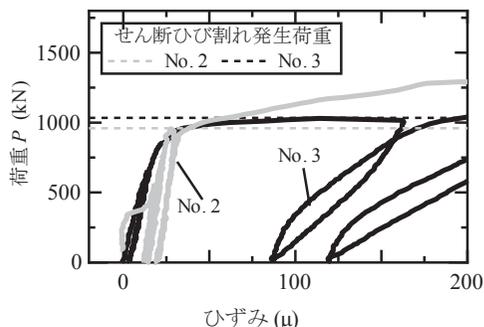


図-7 作用荷重とスパイラル鉄筋のひずみの関係 (No. 2, No. 3)

表-2 に示したせん断耐力を見てみると、No. 2 は No. 3 の約 1.6 倍の値が得られている。また、写真-2 に示すように、No. 2 のせん断ひび割れの角度は 1:2 程度であり、No. 3 に比べて急である。これは、せん断補強鉄筋を有する鉄筋コンクリートに荷重が作用するとタイドアーチ的な耐荷メカニズムが生じてコンクリートの耐力が増加するが、この効果はせん断スパン比が小さいほど強くなるためである。No. 2 の K_{S1} は 3.06 であり、他のケースに比べて大きな値となっている。一方で、 K_{S2} は 1.38 であり、他のケースと大きな違いはない。No. 2 においては、式(1)においてはディープビーム効果を考慮していない一方で、式(4)ではこの効果を考慮できているためである。以上より、ディープビーム効果を考慮したせん断耐力式を提案することにより、せん断耐力を精度よく評価できるようになるものと考えられる。

4. まとめ

今回の載荷試験により、杭径やせん断スパン比によらず、SD490 をせん断補強鉄筋として用いた場合にも鉄筋のひずみの増加が確認され、SD345 をせん断補強鉄筋として用いた場合と同様に、荷重に対して有効に抵抗することが分かった。以上から、SD490 をせん断補強鉄筋として用いることで、鉄筋量の縮減が可能になると考えられる。ただし、本実験は $\rho_s \cdot \sigma_y$ が 2.45 を確保した条件で行われており、それを下回る場合に、この考察が成り立つのかは別途の検討が必要である。その一方で、いくつかのせん断耐力の評価方法により求められる計算値と実験値を比較した結果、せん断補強鉄筋の種類によらず安全側の結果を与えるものの、せん断補強鉄筋に SD490 を用いた場合は、SD345 を用いた場合の推定精度に比べて実測値とのかい離が大きいことが分かった。今後は実際のせん断耐力を精度よく評価できる手法を検討するとともに、せん断補強鉄筋を SD490 にしたことによる曲げ降伏後の変形能の違いについて検討し、高強度鉄筋を用いた場合のPHC杭の設計法について提案していきたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3
- 2) (社)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
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編:標準] 2012年制定