

# 実物大コンクリート杭載荷試験により明らかになった 高強度鉄筋（SD490）の有効性

鈴木慶吾・後庵満丸・河野哲也・七澤利明・秋山充良

## 1. はじめに

近年、道路橋基礎に用いる既製コンクリート杭は、耐震性の向上が要求されており、断面力が大きくなる区間では従前より多くのスパイラル鉄筋を配筋するようになってきている。一方で、平成24年度に改定された道路橋示方書(以下、道示)の中では、新たにSD390、SD490までの鉄筋が標準的に使用可能になった。高強度な鉄筋の使用は、所要の耐震性能を確保するために必要な鉄筋量が普通強度鉄筋を用いた場合よりも削減可能となり、既製コンクリート杭の製造の省力化などをもたらすことが期待される。

こうした背景から、現在土木研究所では早稲田大学及び(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、既製コンクリート杭の鉄筋(せん断補強鉄筋)に高強度鉄筋を用いた場合の耐力及び変形能に関する研究を行っている。本稿では、このうちせん断耐力の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

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。載荷荷重は、一方向繰返し載荷で行い、道示せん断耐力式から算出したレベル1設計時のせん断力より求めた荷重(以下、L1荷重)まで載荷し、その後、同様に算出したレベル2設計時のせん断力から求めた荷重(以下、L2荷重)まで載荷した。さらに、目視で曲げひび割れ、あるいは斜めひび割れの発生時の荷重を確認する。

試験状況及び試験装置の概要を写真-1及び図-1に、せん断試験時での荷重サイクルを図-2に示す。



写真-1 試験状況

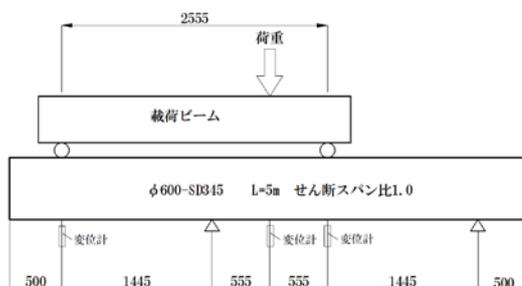


図-1 試験装置概要(例)

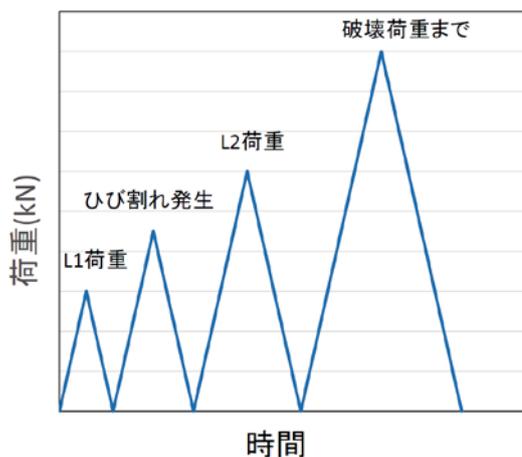


図-2 荷重サイクル例

### 2.2 試験体

試験体は、全5ケースとする。せん断補強鉄筋にSD490を用いたφ600のNo.3を標準ケースとし、

- ・SD345を用いたもの(No.1)
- ・せん断スパン比を変えたもの(No.2)
- ・中詰めコンクリートを打設したもの(No.4)
- ・杭径をφ1000としたもの(No.5)

とした。

表-1に試験体仕様、表-2に試験体種類を示す。  
 なお、表-1の括弧内の数値は、SD345を使用した場合の $\rho_s$ との比を示す。

杭体内には、せん断補強鉄筋のひずみを測定するため図-3に示す4箇所にはずみゲージを配置した。また、杭表面には、3軸ゲージを図-4に示すようにA側、C側に3組ずつ配置した(写真-2)。

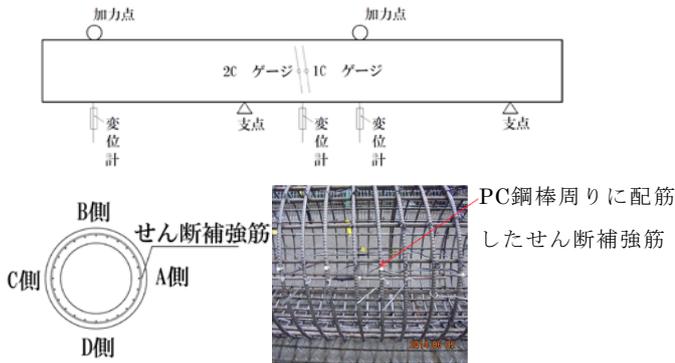


図-3 計測箇所とせん断補強筋

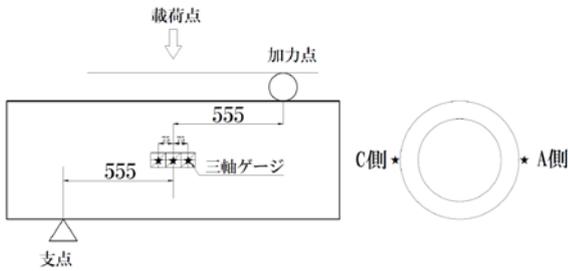


図-4 3軸ゲージ取付け位置



写真-2 3軸ゲージ取付け状況

表-1 試験体仕様 (規格値)

杭径 $\phi$ (mm)		600	1000
杭種		B	B
P	線径-本	9-24	10-46
	断面積 $A_p$ (mm <sup>2</sup> )	1536	3611
C	配置径 (mm)	510	890
	せん断補強鉄筋	SD345	SD490
せん断補強筋	降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	345	490
	線径(mm)	10	10
	断面積 $A_h$ (mm <sup>2</sup> )	71.33	71.33
	間隔s(mm)	70	100
	有効径d(mm)	529	900
	$\rho_s = 4A_h/sd$	0.00785 (1.0)	0.00549 (0.70)
$\rho_s \cdot \sigma_y$		2.709	2.694

括弧内の数値は、SD345を使用した場合の $\rho_s$ との比

表-2 試験体種類

試験杭		杭長 L (mm)	杭径 d (mm)	肉厚 t (mm)	せん断 スパン 比	中 詰 め
No	名称※					
1	600- SD345	5000	600	90	1.0	—
2	600- SD490	5000	600	90	0.5	○
3		5000	600	90	1.0	○
4		5000	600	90	1.0	—
5	1000- SD490	7000	1000	130	1.0	—

※杭径-せん断補強鉄筋種類

### 3. 試験結果

#### 3.1 試験結果の概要

材料試験結果を表-3に、杭の荷重試験結果を表-4に示す。表-4中、斜めひび割れせん断力は、目視によりひび割れが確認された時の荷重をせん断力に換算したものである。また、計算値は、道示IV5.2.3(式a)及びコンクリート標準示方書[設計編:標準] 解2.4.6(式b)に示されているせん断耐力式<sup>1),2)</sup>により算出した。

表-4に示すように、せん断耐力の実測値は式aの計算値の約1.5~3.1倍と大きく上回る結果となった。一方、式bに対しては約1.0~1.4倍と比

較的精度のよい結果となっている。なお、曲げ破壊したケース (No.3, No.5) については、せん断耐力は実測値以上となるため、式aの計算値との差は更に大きくなるが、いずれも終局時には斜めひび割れが相当進展していたため、実測値から大幅に上回ることはないものと推察される。

表-3 材料試験結果

No	材料試験結果				
	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	コンクリートの圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断補強鉄筋の降伏強度 $\sigma_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	中詰めコンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
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	—

表-4 杭の載荷試験結果

No	試験結果				
	斜めひび割れ発生せん断力 (実測値) (kN)	せん断耐力(kN)			破壊形状
		実測値	計算値		
			式a	式b	
1	271	905	603 (1.50)	844 (1.07)	せん断
2	769	1883	615 (3.06)	1363 (1.38)	せん断
3	583	1143	602 (1.89)	886 (1.29)	曲げ
4	379	1001	587 (1.70)	827 (1.21)	せん断
5	1068	2372	1621 (1.46)	1845 (1.28)	曲げ

( ) は実測値/計算値、式a:現行道示式、式b:土木学会式

### 3.2 試験結果の分析及び考察

#### 3.2.1 高強度鉄筋を用いることによる影響

SD345使用(No1)及びSD490使用(No4)のせん断補強鉄筋の荷重-ひずみ曲線 (せん断区間中心) を図-5、図-6に示す。

図-5、図-6から、せん断補強鉄筋は、SD345使

用(No.1)とSD490使用(No.4)ともに斜めひび割れ発生時以降に降伏していることが確認できる。また、表-4の試験結果からSD345使用(No.1)とSD490使用(No.4)のせん断耐力の実測値/計算値(式a)の比は、SD345使用(No.1)が1.5とSD490使用(No.4)が1.7であり大きな差異はない。さらに、斜めひび割れ発生からせん断耐力までの変位の差を比較しても両者に大きな違いがなく、損傷・破壊形態についても差異がないことが確認できた。

以上より、既製コンクリート杭のせん断補強鉄筋にSD490を用いた場合のせん断補強効果は、SD345の70%程度の鉄筋量としても同等であることがせん断実験により確認された。

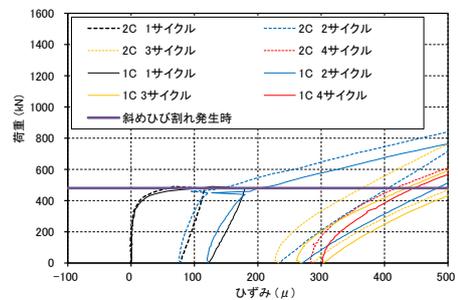


図-5 試験体No.1 せん断補強鉄筋 荷重-ひずみ曲線

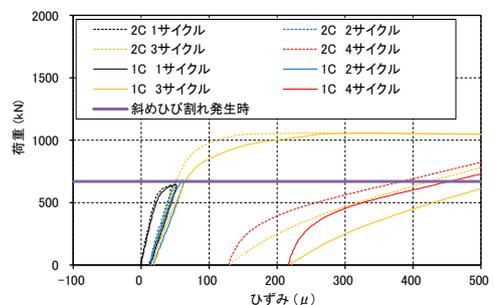


図-6 試験体No.4 せん断補強鉄筋 荷重-ひずみ曲線

#### 3.2.2 中詰めコンクリートの効果

No.3のせん断補強鉄筋の荷重-ひずみ曲線 (せん断区間中心) を図-7に示す。

表-4から、中詰め有り(No.3)の目視にて確認された斜めひび割れ荷重 (以下、斜めひび割れ荷重) は、中詰め無し(No.4)より1.5倍程度大きく、中詰めコンクリートの杭中空部への充填は、斜めひび割れ荷重の増加に大きく寄与したと思われる。一方、せん断耐力の値を比較すると斜めひび割れ荷重後の耐力増加に関して差異がないことが分かる。また、図-6及び図-7を見ると、せん断補強鉄筋の挙動は、中詰め有り(No.3)と中詰め無し(No.4)ともに斜めひび割れ発生以降に同様な挙動

を示していることが分かる。

写真-3から、中詰め有り (No.3) と中詰め無し (No.4) の供試体について、斜めひび割れの杭軸方向からの角度を比較すると、中詰め有り (No.3) が水平方向から1:3程度、中詰め無し (No.4) が1:4程度の傾きでひび割れが発生しているのが確認できた。これは、他の中詰め有り/無しの供試体でも同様であった。中詰め無し (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、中詰め有り (No.3) の杭と比べて水平に近い傾きで発生・進展したものと推察される。

また、式bは、せん断スパン比が小さい場合、タイドアーチ的な性状を示すことからコンクリートが負担できるせん断力が大きくなるディープビーム効果を考慮した算定式であり、同式では中空部材に対する適用性が明確でないが、表-3に示すようにNo.4の実測値/計算値の比は1.21であり、ディープビーム効果を考慮した式bの精度は高いことが確認できた。

以上より、中詰めコンクリートの有無で斜めひび割れ荷重や斜めひび割れの角度に違いがでること、およびディープビーム効果を見込んだ計算式を用いることにより、中詰め無しの場合でもせん断耐力を比較的高い精度で推定できることが分かった。

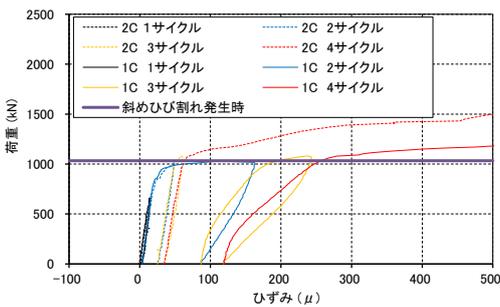


図-7 試験体No.3 せん断補強鉄筋 荷重-ひずみ曲線



試験体No.3(中詰め有り)



試験体No.4(中詰め無し)

写真-3 試験体No.3とNo.4 斜めひび割れの形状

#### 4. まとめ

今回の載荷試験により、SD490 をせん断補強鉄筋として用いた場合にも鉄筋が降伏してせん断耐力に寄与し、SD345 の 70%程度の鉄筋量としても同等のせん断抵抗力を発揮することが分かった。また、現行の道示式では実際の杭のせん断耐力を著しく過小評価していることが分かった。今後はこうした効果を定量的に見込むことが出来る精度の高いせん断耐力推定式について検討していくとともに、せん断補強鉄筋を SD490 にしたことによる曲げ塑性化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) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編:標準] 2012年制定

鈴木慶吾



(独)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  
Keigo SUZUKI

後庵満丸



(一社)コンクリートパイル建設技術協会 技術委員  
Mitsumaru GOAN

河野哲也



(独)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(工)  
Dr.Tetsuya KOHNO

七澤利明



(独)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  
Toshiaki NANAZAWA

秋山充良



早稲田大学創造理工学部 社会環境工学科 教授、博(工)  
Dr.Mitsuyoshi AKIYAMA