

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

河口 大輔¹・鬼木 浩二²・澤田 守³・大住 道生⁴

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 元交流研究員（同上）
（現：大日本コンサルタント株式会社 インフラ技術研究所 調査研究部）

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 主任研究員（同上）

⁵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

既設橋の耐震性能評価を行うにあたっては、地震時に橋がどのような挙動を示すのかを把握する必要があるが、特に古い基準で設計された基礎については、レベル2地震動に対する耐震性能の照査を行っていなかったことからどのような破壊性状となるのか知見が十分ではなく、限界状態についても明確ではない。また、既設橋基礎に対しては限界状態と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。

本実験では、既設橋梁より撤去された既製RC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、杭径及びせん断スパン比をパラメータとした既製RC杭の載荷試験結果について報告する。

表-1 試験ケース

Case	杭径	せん断スパン比	軸方向鉄筋	スパイラル筋
1	300	1.0	丸鋼φ9mm 7本	φ4mm
2	300	1.5		
3	450	1.0	丸鋼φ19mm 16本	φ6mm
4	450	1.5		



写真-1 試験状況（Case-4の例）

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、杭径外径300mm及び外径450mmの撤去されたRC杭におけるせん断破壊に着目するために、それぞれの杭径において、せん断スパン比を1.0及び1.5となる供試体を作成した。

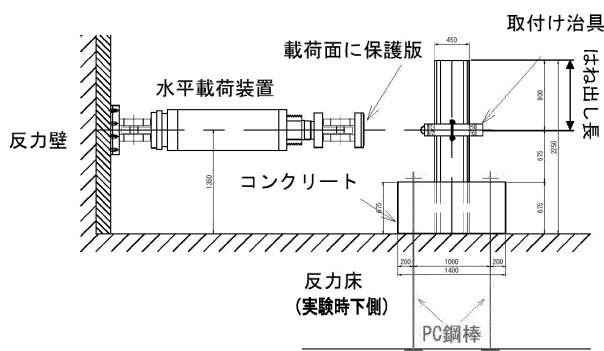


図-1 試験概要（Case-4の例）

(2) 載荷方法

載荷方法は、片持ちばり形式による1点載荷であり、杭の片端をコンクリートブロックにて固定し、耐力床にPC鋼棒により固定した試験体に載荷した。

載荷パターンは単調増加方式による漸増載荷とし、破壊（終局）に至るまでとした。載荷制御方法は、変位急増点まで荷重制御とし、それ以降は変位制御で載荷を行った。なお、計測はCase-1及びCase-2では、2kNピッチ、Case-3及びCase-4では5kNピッチである。

(3) 試験体

試験体の諸元を表-2に示す。使用する撤去杭は、Case-1及びCase-2で使用する杭は50年程度、Case-3及びCase-4で使用する杭は60年程度供用された実橋に用いられた外径300mm及び外径450mmの既設RC杭である。これらの杭は、撤去時には既にひび割れ（以下、既存ひび割れと呼称）が生じており、載荷試験を行うにあたって、既存ひび割れの少ない箇所を選定して、試験体として用いるものとした。

各杭体の断面状況は図-2に示す。Case-1及びCase-2において使用する杭は、外径が300mm、内径が180mmで、コンクリート厚60mmの中空断面である。配筋状況は、軸方向鉄筋が $\phi 9\text{mm} \times 7$ 本、軸方向鉄筋を取り囲むように配置されたスパイラル鉄筋は $\phi 4\text{mm}$ で間隔は100mm程度である。Case-3及びCase-4において使用する杭は、外径が450mm、内径が290mmで、コンクリート厚は80mmの中空断面である。配筋状況は軸方向鉄筋が $\phi 19\text{mm} \times 16$ 本、軸方向鉄筋を取り囲むように配置されたスパイラル鉄筋は $\phi 6\text{mm}$ で間隔は100mm程度である。

切り出す杭長は、せん断スパン比、コンクリートブロックへの埋め込み長及び載荷位置からのね出し長に応じた長さとし、せん断破壊先行となるように、曲げが卓越する範囲において既存ひび割れの影響が最小限となるよう決定した。試験体を埋め込むコンクリートブロックは設計基準強度 40N/mm^2 とし、各試験体の埋め込み長を確保し、載荷装置の高さを変えずにそれぞれの試験体の載荷位置となるように厚さを設定した。また、各試験体におけるね出し長は、Case-1及びCase-2については、 $1D=300\text{mm}$ 、Case-3及びCase-4については、 $2D=900\text{mm}$ とするものとしたが、 $2D$ 以上確保できないCase-3については、 $1D=450\text{mm}$ として、端部にエンドプレートを設置することで抜け出し防止の措置とした。

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り、試験体を切り取った杭体からコア、主鉄筋及びスパイラル筋をそれぞれ3本採取した。な

表-2 試験体諸元

Case	杭径 (mm)	切り出し長 (mm)	せん断 スパン比	せん断スパン長 (mm)	載荷はね出し長 (mm)	埋込み長さ (mm)
1	300	1050	1.0	300	300 (1D)	450
2	300	1200	1.5	450	300 (1D)	450
3	450	1800	1.0	450	450 (1D)	900
4	450	2250	1.5	675	900 (2D)	675

※試験体No. 3は、はね出し長を2D採取できないので1D+端部エンドプレート補強とした

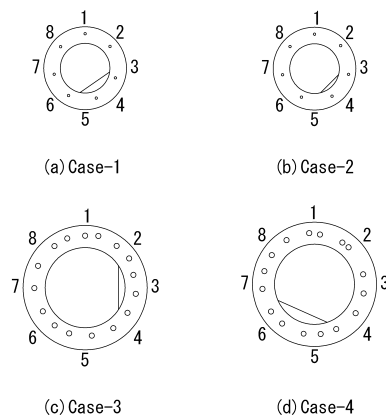


図-2 試験体断面

表-3 材料試験結果

Case		1	2	3	4
杭径 (mm)		300		450	
コンクリート	圧縮強度 (N/mm^2)	67.8	71.2	71.9	53.5
	弾性係数 (kN/mm^2)	45.3	48.0	51.9	43.7
	降伏応力度 (N/mm^2)	351.0	372.5	273.1	249.1
軸方向鉄筋	降伏ひずみ (μ)	1792	1884	1536	1262
	弾性係数 (kN/mm^2)	207.4	208.2	207.8	212.1
	引張強度 (N/mm^2)	788.5	796.2	615.5	670.1
スパイラル鉄筋	弾性係数 (kN/mm^2)	201.4	204.5	197.9	194.7
	0.2% 永久伸びに 対する応力 (N/mm^2)	696.8	703.6	574.5	619.6

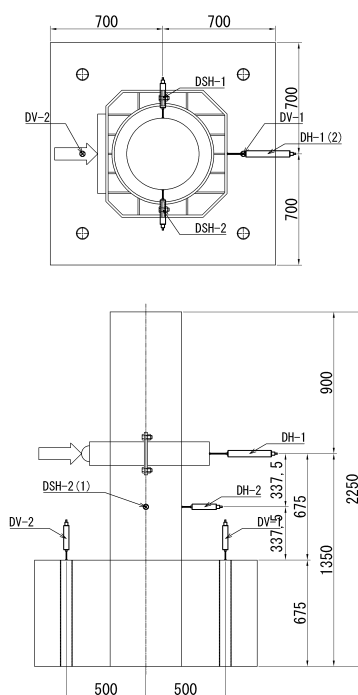


図-3 変位計設置箇所 (Case-4の例)

お、コアの採取にあたっては、鉄筋を避けて出来る限り大きく採取しようとしたが、採取できたコアは直径30mm程度であり、JIS規格の100mmよりも小さいものとなったが、圧縮強度が当時のRC杭のJIS規格である35N/mm²よりも大きな値であったため、補正はしていない。

(4) 測定項目

杭の変位を測定するために、図-3に示す位置に変位計を設置し、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。ただし、本実験では、撤去杭を用いているため、鉄筋のひずみについては計測していない。

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変位の関係を図-4に、また、各試験体における損傷状況の写真を写真-2、ひび割れ状況図を図-5に示す。図-5においては、既存ひび割れを細い破線、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、載荷位置及び載荷方向を網掛け及び矢印で表した。

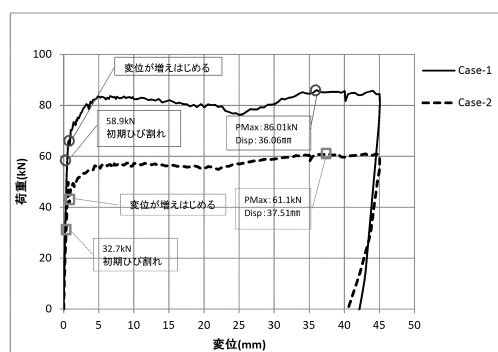
Case-1の損傷状況は、58.9 kNで載荷位置直下の杭とコンクリートブロックの接合部にひび割れが発生し、65.9 kNで変位が増大しはじめ、その後、80 kN付近まで荷重が増加した。荷重が増加する過程で載荷位置と杭側面のコンクリートブロック接合部を結ぶような斜め方向のひび割れも発生したが、その後は変位及び初期ひび割れの幅が増大するのみで耐力はほぼ一定のまま、耐力低下には至らなかった。これは、軸方向鉄筋が丸鋼であるため、ひび割れ幅が広がると同時に軸方向鉄筋の付着切れと伸び出しが生じていたためと考えられる。

Case-2の損傷状況も、Case-1と同様な荷重－変位関係を示し、32.7 kNで載荷位置とコンクリート接合部の中間付近に曲げひび割れと考えられるひび割れが生じ、41.4 kNで変位が増大しはじめ、荷重は60 kN付近まで増加した。荷重が増加する過程で杭とコンクリートブロックの接合部にひび割れが生じ、変位が増加するにつれて、ひび割れ箇所付近のコンクリートブロックの浮き・剥離が生じた。最終的には耐力をほぼ一定に保ったまま変位及びコンクリートブロック接合部のひび割れ幅が増大し、耐力低下には至らなかった。これは、丸鋼の軸方向鉄筋の付着切れと伸び出しが生じていたためと考えられる。

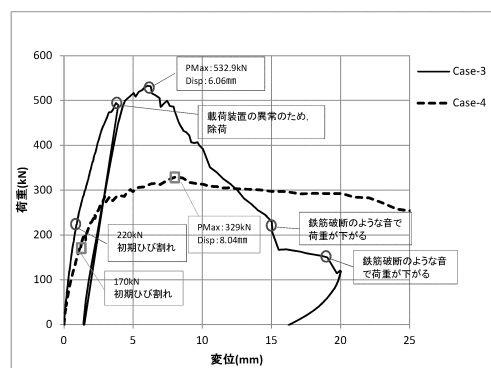
Case-3では、221.1 kNで引張側となる載荷位置と

圧縮側のコンクリートブロック接合部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、532.9 kN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15mm及び19mm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、コンクリートブロックとの接合部から、160mm程度及び265mm程度の高さに位置するスパイラル鉄筋において破断を確認した。

Case-4では、171.1 kNで曲げひび割れが発生し、200 kNまで荷重が増加する間に、複数の曲げひび割れが発生したが、その後は斜めひび割れが発生し、329 kNで最大荷重を迎え、その後は変位が増大し、徐々に耐力低下が確認できた。斜めひび割れが発生してからは、斜めひび割れの進展が支配的であったが、最大荷重以降は圧縮側のコンクリートブロックとの接合部に浮き・剥離が発生し、その進展が支配的となった。斜めひび割れはCase-3と同様に、引張側となる載荷位置から圧縮側のコンクリートブロック接合部を結ぶような状態であったが、最終的にはCase-3のように鉄筋破断による急激な耐力低下もなく、脆性的な破壊には至らなかった。これは、Case-1及びCase-2と同様に、丸鋼である軸方向鉄筋の付着切れと伸び出しが生じていたためであると考えられる。

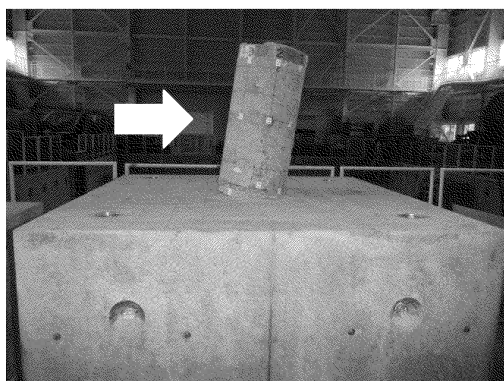


(a) Case-1及びCase-2

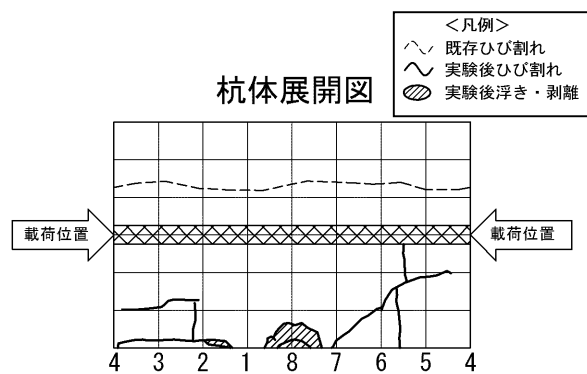


(b) Case-3及びCase-4

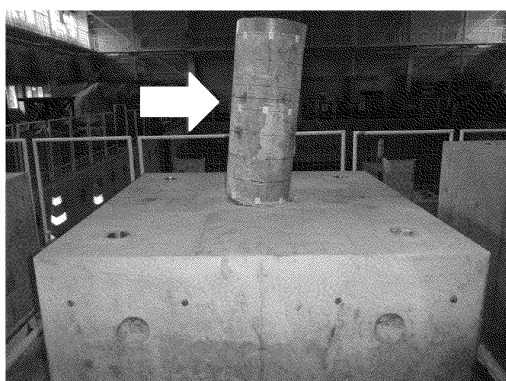
図-4 荷重－変位関係



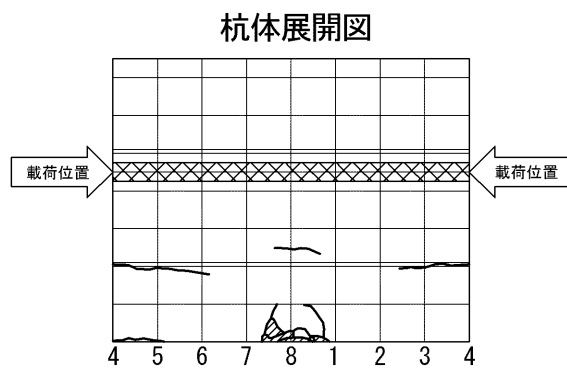
(a) Case-1



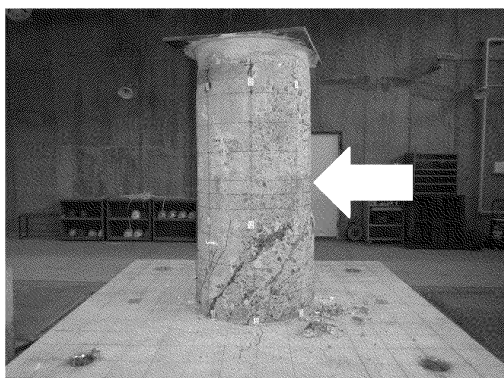
(a) Case-1



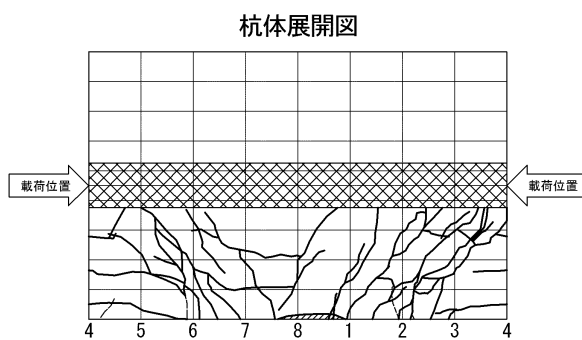
(b) Case-2



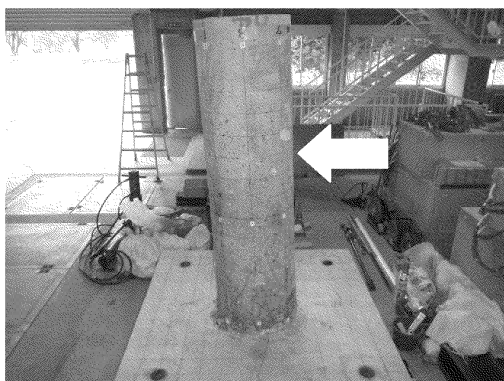
(b) Case-2



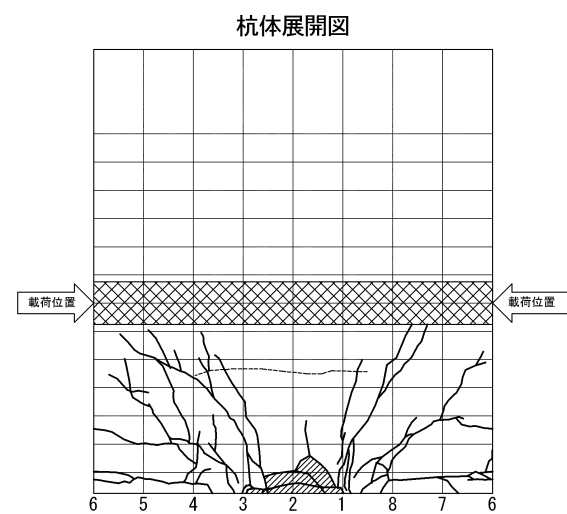
(c) Case-3



(c) Case-3



(d) Case-4



(d) Case-4

写真-2 各試験体における損傷状況

図-5 ひび割れ状況

(2) 既製RC杭のせん断耐力

既設橋梁から撤去した既製RC杭を用いた載荷試験の結果から既製RC杭の耐荷性能が確認できた。

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想定された破壊形態を表-4に示す。この耐力は既製RC杭のせん断についての記述がある平成14年道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾に基づいて算出し、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、せん断スパン比の補正係数を踏まえた鉄筋の負担するせん断耐力を算出した。

杭径300mmであるCase-1及びCase-2においては、曲げ破壊先行となる。これは、軸方向鉄筋が少なく、杭の有する曲げ耐力が低いためと考えられる。載荷試験結果からも曲げ破壊であると考えられる。

杭径450mmであるCase-3及びCase-4においては、せん断破壊先行となる。

以上より、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-3に着目し、せん断耐力について実験結果との比較により、その要因について考察する。

Case-3は、想定された破壊形態と同様にせん断破壊となったが、載荷試験結果では最大荷重が532.9 kNであったのに対して、算出されたせん断耐力は437.7 kNであり、算出した耐力を大きく上回ることが確認できる。平成14年道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾におけるせん断耐力の算出においては、既製RC杭のせん断耐力はコンクリートが負担するせん断耐力とせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の和で表される。コンクリートが負担するせん断耐力 S_c は以下の式で表される。

$$S_c = c_c \cdot c_e \cdot c_{pt} \cdot c_N \cdot \tau_c \cdot b \cdot d = c_N \cdot \tau_a \cdot b \cdot d$$

ここで、

c_c : 荷重の正負交番繰返し作用の影響に関する補正係数

c_e : 有効高 d に関する補正係数

c_{pt} : 軸方向引張鉄筋比 p_t に関する補正係数

c_N : 軸方向圧縮力による補正係数

τ_c : 許容せん断応力度

b : 部材断面幅で $t \cdot \pi^{0.5}$ 、ここで t は杭の肉厚

d : 部材有効高で $h/2 + 2\sqrt{(2r_s)/\pi}$

h : 等積箱形断面の腹部の合計幅 $1/2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot D$

r_s : 円中心から主鉄筋重心までの距離

τ_a : 道路橋示方書IV下部構造編(H14.3)に基づき、

$$c_c \cdot c_e \cdot c_{pt} \cdot \tau_c = 1.5 \tau_c$$

である。

既製RC杭の許容せん断応力度についてはH14年の

表-4 算出した耐力と破壊形態

Case		1	2	3	4
杭径 (mm)		300		450	
せん断スパン		1.0	1.5	1.0	1.5
曲げ	ひび割れ曲げモーメント M_c (kN・m)	3.7	3.7	14.5	14.5
	M_c 作用時荷重 (kN)	12.3	8.2	32.2	21.5
	初降伏曲げモーメント M_y (kN・m)	12.9	12.9	155.5	155.5
	M_y 作用時荷重 (kN)	43.1	28.8	345.6	230.4
	終局曲げモーメント M_u (kN・m)	16.3	16.3	213.9	213.9
	M_u 作用時荷重 (kN)	54.4	36.3	475.3	316.8
せん断	コンクリートが負担するせん断耐力 S_c (kN)	148.7	93.9	413.2	224.2
	鉄筋が負担するせん断耐力 S_s (kN)	7.3	10.9	24.5	36.8
	合計せん断耐力 S (kN)	156.0	104.8	437.7	261.0
破壊形態		曲げ	曲げ	せん断	せん断

道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾に規定されており、設計基準強度が40N/mm²の場合、 $\tau_a = 0.54$ N/mm² (=1.5×0.36) である。Case-3では材料試験結果よりコンクリートの圧縮強度が71.9N/mm²であることから、既製RC杭の許容せん断応力度の元となっている道路橋示方書IIIコンクリート橋編³⁾の規定に基づき、設計基準強度が50～60N/mm²の許容せん断応力度を外挿して求めた $\tau_a = 0.76$ N/mm²を用いて評価することとした。軸方向圧縮力による補正係数 c_N は、軸力が零であることから、下限値である $c_N = 1.0$ と設定した。

また、せん断スパン a が有効高 d の2.5倍以下となるため、道路橋示方書IV下部構造編²⁾の規定に基づき、せん断スパン比によるコンクリートの負担するせん断耐力に割増し係数 c_{dc} を乗じて評価した。Case-3ではせん断スパン比が1.0の場合となる $c_{dc} = 4.0$ と設定した。

次に、図-6に示すように寸法効果の及ぼす影響を検討した文献5)、6)を参考にコンクリートが負担するせん断耐力について評価を行い、Case-3の実験結果より妥当性の確認を行う。Case-3の試験体の有効高 d は384mmであることから、文献5)、6)に基づきコンクリートが負担することができせん断応力度を算出すると、 $\tau_c = 0.99$ N/mm²である。これを用いて算出した結果を表-5に示す。

文献5)、6)における寸法効果を考慮したせん断耐力を算出した結果、せん断耐力は562.7 kNとなり、実験結果とほぼ等しくなり、文献1)において推定された実験結果に対して平成14年道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾に基づいて算出したせん断耐力の評価値が過小となる要因の妥当性が確認された。

また、Case-4においては、想定されたせん断破壊には至らず、コンクリートブロックとの接合部の損傷が支配的となった。ひび割れの状況を確認すると、斜めひび割れがかなり進展していたが、最終的に軸方向鉄筋の付着切れ・伸び出しが生じたと考えられる。軸方向鉄筋の付着切れ・伸び出しについては、

曲げ破壊となった Case-1及びCase-2においても確認でき、3試験体の損傷の進展状況を確認すると、初降伏時の直後からコンクリートブロックとの接合部における損傷が支配的となっており、付着切れ・伸び出しが生じると考えられる。以上を踏まえると、Case-4においては算出した耐力において、初降伏時荷重が261.0kN、せん断耐力が217.6kNと僅差であり、載荷試験では、鉄筋の付着切れ・伸び出しが先行したため、せん断破壊に至らなかったと考えられる。ただし、本実験は撤去杭を用いた実験であったため、軸方向鉄筋のひずみを計測することができていない。これについては、今後検討する必要がある。

4. まとめ

既設橋梁から撤去された既製RC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。

- ・せん断破壊に至った試験体において、文献1)において推定された、実験結果に対して平成14年道路橋示方書・同解説IV下部構造編²⁾に基づいて算出したせん断耐力の評価値が過小となる要因について、文献5), 6)における寸法効果を考慮したせん断耐力を算出した結果、実験値とほぼ等しくなった。
- ・せん断破壊に着目するために、せん断スパン比を小さく設定した試験体において載荷実験を行ったが、軸方向鉄筋が丸鋼であったことにより、最終的に鉄筋の付着切れ・伸び出しと考えられる破壊が支配的となったものが3ケースあった。ただし、本実験は撤去杭を用いているため、鉄筋のひずみは計測できておらず、これらについては今後検討を行う必要があると考える。

謝辞： 本研究に関連する撤去部材の入手にあたって、島根県及び京都府をはじめ、多くの方々に御協力いただきました。御協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鬼木浩二, 岡田太賀雄, 河野哲也, 末崎将司, 星隈順一：既設橋梁から撤去した既製RC杭を用いた耐震性能に関する実験的研究, 第18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, 2015.7.
- 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) (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, 2002.3.

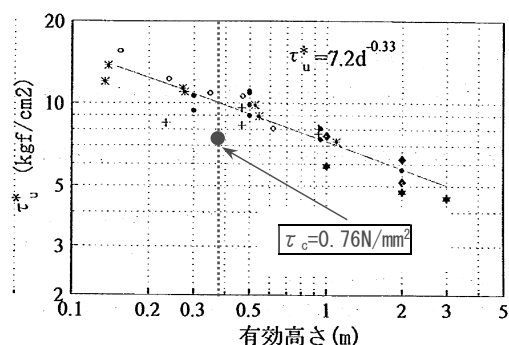


図-6 鉄筋コンクリート部材のせん断載荷試験に基づく寸法効果の影響 (文献5), 6)に加筆)

表-5 Case-3のせん断耐力
(コンクリートのせん断耐力を文献3), 4)に基づき
平均値に設定した場合)

Case		3
杭径 (mm)		450
せん断スパン比		1.0
有効高d (mm)		384
H14道示	コンクリートが負担するせん断耐力Sc (kN)	413.2
	鉄筋が負担するせん断耐力Ss (kN)	24.5
	合計せん断耐力S (kN)	437.7
寸法効果を考慮した場合	コンクリートが負担するせん断耐力Sc (kN)	538.2
	鉄筋が負担するせん断耐力Ss (kN)	24.5
	合計せん断耐力S (kN)	562.7
実験結果 (kN)		532.9
実験結果 / 寸法効果を考慮したせん断耐力		0.95

- 4) 福井次郎, 白戸真大, 梅原剛：ディープビームやフーチングのせん断耐力に関する研究, 土木研究所資料第3841号, 2001.11
- 5) 河野広隆, 渡辺博志, 菊森佳幹, 大型RCはり供試体のせん断強度に関するデータ集, 土木研究所資料, 第3426号, 1996.1
- 6) (社)日本道路協会：「道路橋」に関する地区講習会講義要旨, 1996.