

RC巻立て耐震補強において既設フーチングに定着させる SD490群鉄筋の定着特性

井上崇雅¹・篠原聖二²・星隈順一³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 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 博（工） 阪神高速道路株式会社 技術部（前 独立行政法人土木研究所 主任研究員）
(〒541-0056 大阪府大阪市中央区太郎町4-1-3)

³正会員 博（工） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

1. はじめに

平成24年に改定された道路橋示方書¹⁾では、従来の規定よりも降伏点の高い高強度鉄筋（SD390,SD490）をRC橋脚の軸方向鉄筋として使用することができるようになった。既設橋脚に対するRC巻立て工法による耐震補強を行う場合にも、フーチングに定着させる軸方向鉄筋に高強度鉄筋を用いることができるようになれば、鉄筋本数すなわちフーチングに設ける削孔数を低減でき、施工性の向上が期待されるところである。

しかしながら、設計基準強度21N/mm²の既設フーチングに対して定着させる軸方向鉄筋として高強度鉄筋を使用する場合、定着長をどのように確保しておくべきかが重要な技術的課題となる²⁾。SD490の単鉄筋を既設フーチングを想定したコンクリートに定着させた場合の正負交番載荷下での定着特性については既に検証されているが³⁾、実橋脚では複数本の軸方向鉄筋が隣接して定着される状態となることから、この群鉄筋の条件下における定着特性についても検証しておく必要がある。

そこで、本研究では、SD490の群鉄筋を既設フーチングに模した普通強度のコンクリートにあと施工により定着させた場合の定着特性について正負交番定着試験により検証を行った。なお、RC巻立て工法においてSD490を軸方向鉄筋に適用するにあたっては、フーチングも含めた橋脚模型供試体に対する正負交番載荷実験による検証も別途必要であるが、本文で示す内容は、あくまで高強度鉄筋の既設フー

チングへの定着に関する要素的な基本特性についてまず検討を行ったという位置付けである。

2. 定着特性試験の概要

(1) 実験装置

写真-1に載荷セットアップ状況、図-1に載荷セットアップ図を示す。供試体は軸方向鉄筋が水平となる方向に設置し、載荷梁に3本の軸方向鉄筋を固定させた。なお、3本の鉄筋にほぼ均等に力が導入できるように載荷梁には十分な剛性を持たせている。また、図-1に示すように3本の軸方向鉄筋の両側にPC鋼棒を設置し、引張荷重と圧縮荷重を与えるための油圧ジャッキをそれぞれ取り付けた。

供試体は、RC巻立て補強工法においてフーチングに軸方向鉄筋を定着させる場合を想定し、あと施工により定着する方法とした。鉄筋の材質は高強度



写真1 載荷セットアップ状況

鉄筋 SD490 と、従前から使用されている SD345 の 2 種類とし、実橋への適用を想定し D35 の異形鉄筋とした。また、本実験では群鉄筋の定着特性に依存すると考えられる鉄筋間隔および定着長に着目し、表-1 に示す 6 ケースについて検討を行った。軸方向鉄筋のあと施工による定着は、実際の工事と同様な施工手順で行った。すなわち、コンクリートには鉄筋径+17mm の径で定着長+50mm の深さまでコアドリルを用いてコア削孔を施し、孔内の清掃を行ってからエポキシ樹脂系接着剤を充填し、軸方向鉄筋を定着させた。なお、軸方向鉄筋とコンクリートの定着特性を検討できるよう、コーン破壊が生じる場合を想定した範囲内には補強鉄筋は配筋していない。また、ジャッキ位置に関しても、定着特性に影響が生じないよう離隔を確保した。フーチングのコンクリートの圧縮強度は既設橋における実際の設計基準強度(21N/mm²を想定)を大幅に上回ることがないように留意して製作した。実験に用いた鉄筋の引張強度およびコンクリートの圧縮強度は、それぞれ表-2 および表-3 のとおりである。

計測は軸方向鉄筋の変位およびひずみとし、変位計は図-1 に示すようにセットした。すなわち、フーチング上面から高さ 110mm の位置に設置した変位計 A により、この 110mm の区間の鉄筋のひずみによる変位、フーチング内での鉄筋の引張ひずみによる伸び出し変位および定着不足の場合に生じる鉄筋の抜け出しによる移動量の和を計測した。また、

定着先端部からフーチング裏面にワイヤーを通し、ワイヤーを変位計 B に取り付けることにより鉄筋の定着先端部の移動量を計測した。ひずみはフーチング上面から 10mm の位置に鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより計測を行った。

(2) 載荷方法

RC巻立て補強された柱部材の軸方向鉄筋の定着部における正負交番載荷試験の状態により近づける

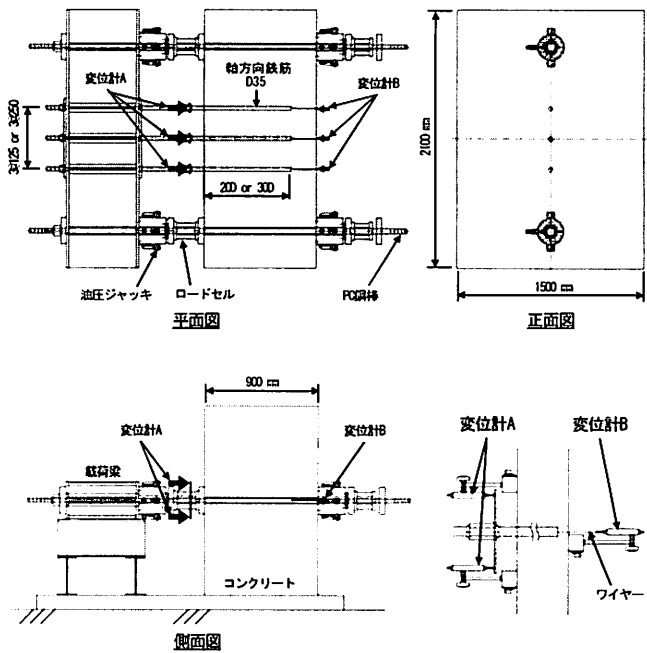


図-1 載荷セットアップ図

表-1 試験ケース

Case	軸方向鉄筋				
	呼び名	材質	間隔 L(mm)	中心間隔 L/D	定着長
1	D35	SD345	125	3.6	20D
2			250	7.1	
3		SD490	125	3.6	20D
4			250	7.1	
5			125	3.6	30D
6			250	7.1	

表-2 鉄筋の引張強度試験結果

項目	単位	Case-1,2 SD345 (D35)	Case-3,4,5,6 SD490 (D35)
降伏荷重	kN	362	510
降伏強度	N/mm ²	378.1	533.0
降伏ひずみ	—	1904 μ	2692 μ
引張荷重	kN	550	668
引張強度	N/mm ²	575.0	698.0
弾性係数	kN/mm ²	198.6	198.0
破断伸び	—	26.0%	22.3%

表-3 コンクリートの圧縮強度試験結果

項目	単位	Case-1 SD345 @125-20D	Case-2 SD345 @250-20D	Case-3 SD490 @125-20D	Case-4 SD490 @250-20D	Case-5 SD490 @125-30D	Case-6 SD490 @250-30D
設計基準強度	N/mm ²	21	21	21	21	21	21
実験時圧縮強度	N/mm ²	23.1	21.3	23.7	23.0	22.6	23.0

ため、鉄筋の引張強度試験結果から求められる軸方向鉄筋の降伏ひずみが計測された時点での変位計Aの変位量を基準変位 δ_0 とし、引張側の荷重では δ_0 の整数倍の変位を、圧縮側の荷重では δ_0 時の引張荷重と同じ絶対値の荷重となるように荷重し、それぞれ3回ずつ正負交番に繰返す漸増荷重を最大10 δ_0 の引張変位の荷重ステップまで行った。ただし、圧縮荷重に対しては、荷重セットアップの構造上、実験を実施する上での安全性が確保できる範囲内で荷重を行った。このため、一部の荷重ステップにおいて、目標とする圧縮荷重まで到達できていない場合がある。

3. 実験結果

図-2, 図-3 に各実験ケースにおいて変位計 A で計測した荷重－変位関係および 1 δ_0 におけるフーチ

ング上面のひび割れ状況図を示す。なお、図中に示す降伏荷重は表-2 の鉄筋の引張強度試験の結果得られた降伏荷重を 3 倍（本実験での鉄筋本数）したものである。図-4 に各ステップの最大引張荷重を荷重した時点での変位計 B で計測した定着先端部の軸方向鉄筋の移動量を示す。また、写真-2, 写真-3 には試験終了後のフーチング上面のひび割れ状況を示した。

(1) 鉄筋強度の影響

定着長 (20D) と中心間隔 (3.6D) が同じで、鉄筋の強度が異なる Case-1 (SD345) および Case-3 (SD490) を比較すると、図-4 に示すように SD345 を用いた Case-1 は、定着先端部の軸方向鉄筋の移動量は 6 δ_0 までは変位は殆ど生じていないが、7 δ_0 以降になると増加している。一方、図-2 (a) に示す荷重－変位関係の履歴曲線をみると、6 δ_0 までと 7 δ_0 以降で

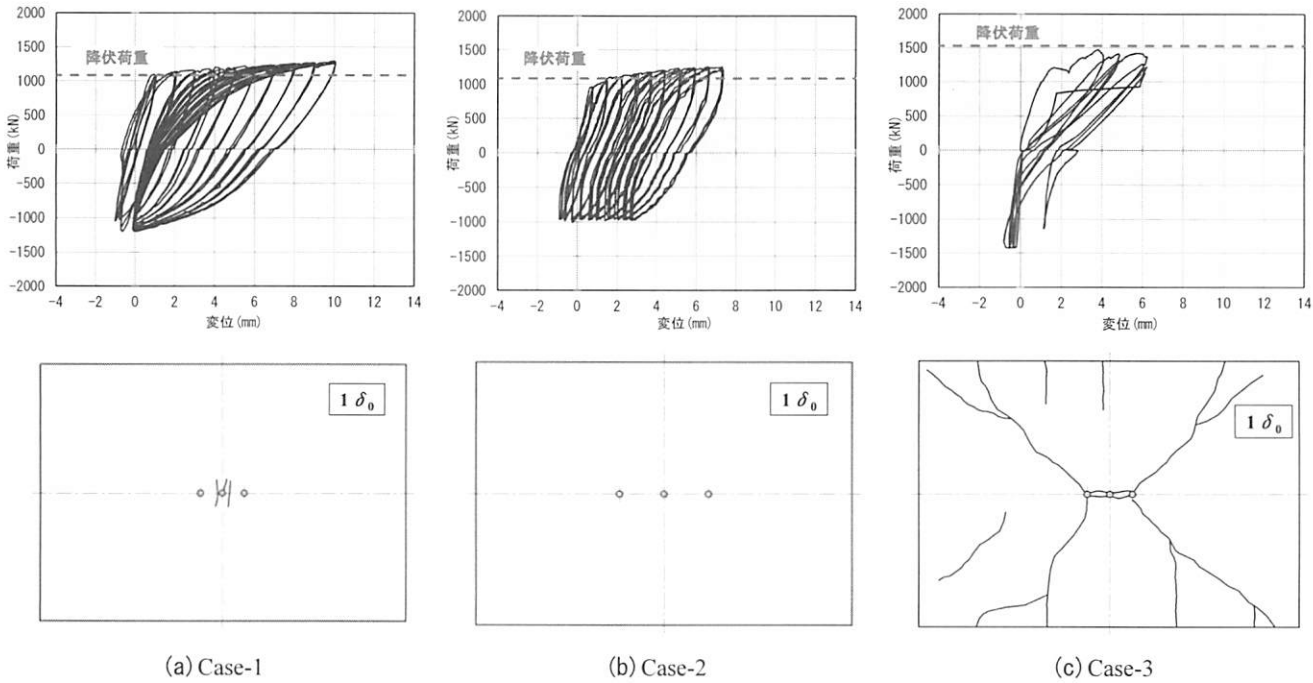


図-2 荷重－変位関係および 1 δ_0 におけるフーチング上面のひび割れ状況図(1)

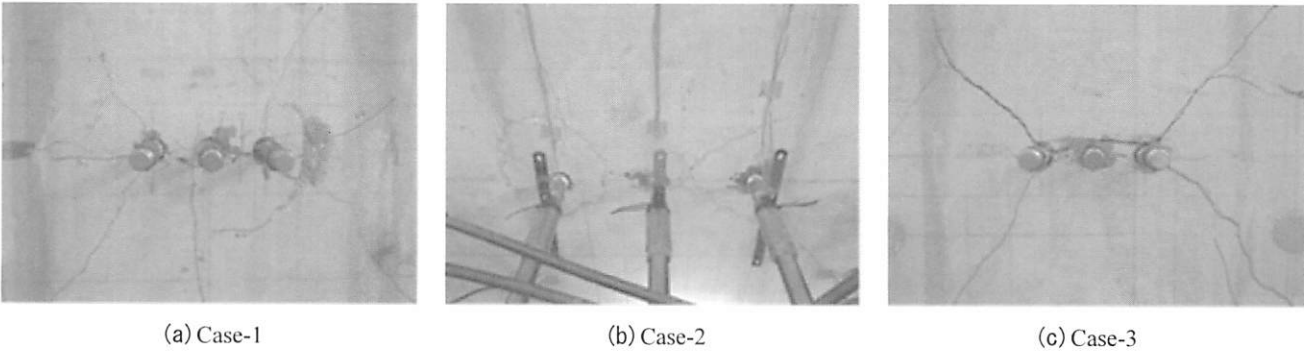


写真-2 試験終了後のフーチング上面のひび割れ状況(1)

の各ステップにおけるループに有意な変化は認められない。したがって、 $10\delta_0$ で1.7mm程度の抜け出しは生じているものの、RC橋脚の塑性変形能に大きな悪影響が生じる程度ではない範囲であると考えられる。

一方、SD490を用いたCase-3は図-2(c)に示すように、初期荷重 $1\delta_0$ の引張荷重が1200kN付近で変位が急激に伸び、その後、3.8mmまで到達したが、 $2\delta_0$ での3回目の引張荷重途中で軸方向鉄筋がコンクリートから抜け出し、試験は終了した。

定着長を20D、中心間隔を7.1DとしたCase-2(SD345)およびCase-4(SD490)と比較すると、図-4に示すようにCase-2における定着先端部の移動量は、 $10\delta_0$ で0.1mm程度と非常に小さく、定着機能は十分に確保できていると考えられる。一方、Case-4では、 $10\delta_0$ まで降伏荷重相当の引張荷重を保持することができたが、荷重変位の増加に伴って

定着先端部の移動量も大きくなっており、 $10\delta_0$ の定着先端部の移動量は3.06mmとなった。図-3(a)に示す履歴曲線においても、履歴曲線で囲まれる面積（吸収エネルギー）が小さくなっていることがわ

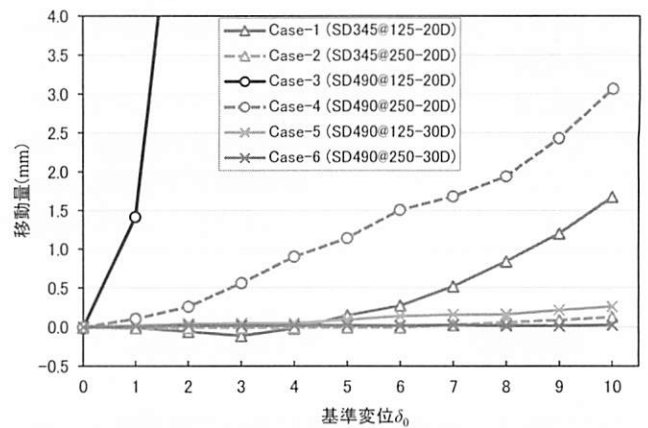


図-4 定着先端部の軸方向鉄筋の移動量

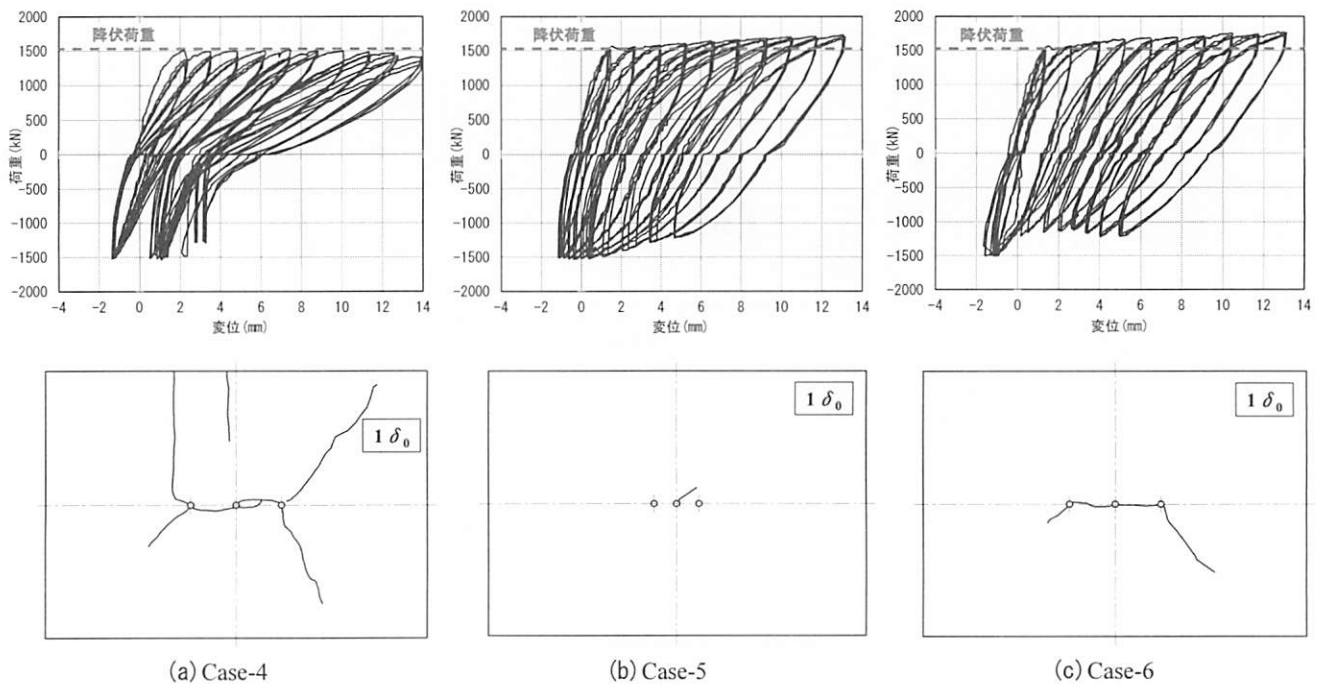


図-3 荷重-変位関係および $1\delta_0$ におけるフーチング上面のひび割れ状況図(2)

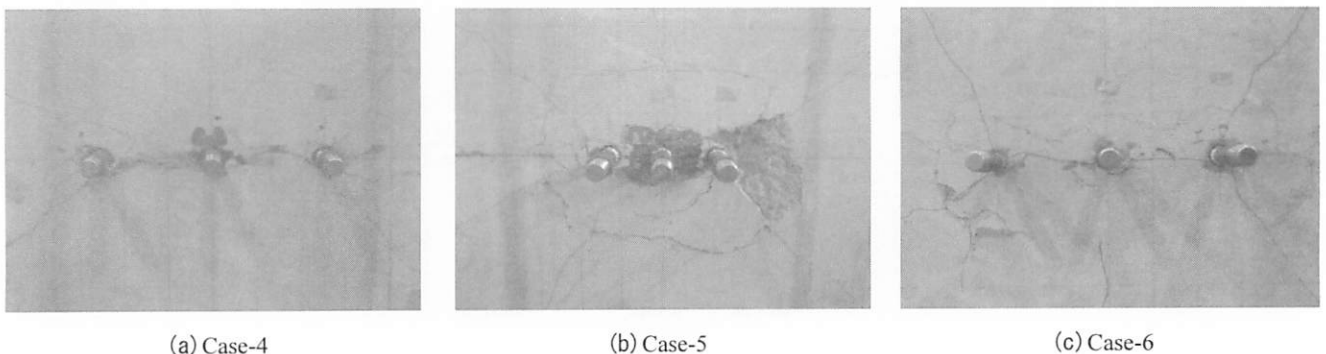


写真-3 試験終了後のフーチング上面のひび割れ状況(2)

かる。これは、図-4 に示したように、定着先端部の移動による影響が要因となっていると考えられる。

以上より、定着長を 20D とした条件下では、SD345 については定着機能が確保できていると考えられるが、SD490 については鉄筋が抜け出した Case-3 や、定着先端部の移動量が大きな値となった Case-4 の結果より、定着機能は確保できていないと言える。

(2) 鉄筋の中心間隔による影響

a) SD490を定着長20Dで定着させる場合

前述したように、Case-3 は軸方向鉄筋が抜け出す結果となった。軸方向鉄筋の定着部周辺におけるコンクリートのひび割れ状況は、 $1\delta_0$ の時点で3本の鉄筋の間および両端の鉄筋位置からフーチングコンクリートの側端方向に向かう放射状のひび割れが発生した。最終的に鉄筋がコンクリートから抜け出した時のひび割れ状況は、写真-2(c)に示すように $1\delta_0$ 時に生じたひび割れの幅が広がって鉄筋が抜け出るような性状であった。写真に示すように、3本の鉄筋間にひび割れが繋がったことにより、鉄筋周辺のコンクリートが破壊し、鉄筋の定着機能が低下したことで、軸方向鉄筋が抜け出しまでに至ったと考えられる。

Case-4 では載荷変位の増加に伴い定着先端部の移動量が大きくなり、また、履歴曲線では吸収エネルギーが小さくなっている。ひび割れ状況は、Case-3 と同様な結果となり、 $1\delta_0$ の時点で3本の鉄筋の間および両端の鉄筋から放射状にひび割れが発生し、載荷変位が大きくなるに従い、新たなひび割れが生じるのではなく、このひび割れの幅が大きくなる挙動を示した(写真-3(a))。

以上のことから、SD490を軸方向鉄筋として用いる場合、定着長が20Dの長さではそもそも定着機能が確保できていないため、Case-3とCase-4の比較により中心間隔の影響について言及することはできない。

b) SD490を定着長30Dで定着させる場合

SD490 を 30D の定着長により定着させた Case-5(3.6D)および Case-6(7.1D)は、図-3(b), (c)に示すように、Case-5 では $10\delta_0$ で 1731kN、変位は 13.1mm、Case-6 では $10\delta_0$ で 1770kN、変位は 13.1mm と類似した結果であり、また履歴曲線もほぼ同様となっている。 $10\delta_0$ の定着先端部の移動量は、Case-5 で 0.26mm、Case-6 で 0.03mm と中心間隔が 3.6D の Case-5 の方が中心間隔 7.1D の Case-6 に比べ移動量はわずかに大きいものの、定着先端部

の移動量はともに小さく、定着機能は確保できていると考えられる。

試験終了後のひび割れ状況は、写真-3(b), (c)に示すように軸方向鉄筋の定着周辺で3本の軸方向鉄筋を囲うように円状にひび割れが形成されている。これは、軸方向鉄筋がコンクリート定着内部からフーチング上面に向かい、円錐状に応力が分布され抵抗しているために形成されたものと考えられる。

よって、定着長として 30D を確保している条件下では、中心間隔を 3.6D とした場合と 7.1D とした場合の差は有意ではないと考えられる。

(3) 定着長の影響

SD490 を同じ中心間隔(3.6D)で定着させているが、定着長が異なる Case-3(20D)および Case-5(30D)を比較する。前述したように、Case-3 は鉄筋が抜け出したため定着機能は満足できていないが、Case-5 は定着機能は確保できていると考えられる。

また、中心間隔を 7.1D とした Case-4(20D)および Case-6(30D)で比較しても、前述したとおり Case-4 では載荷変位の増加に伴い定着先端部の移動量が大きくなり、また、履歴曲線では吸収エネルギーが小さくなっている一方で、定着長を 30D とした Case-6 では、定着先端部の移動量は殆ど生じず、また、履歴曲線においても Case-4 に比べエネルギー吸収ができています。

これらの比較結果からも、前述したように、SD490 の定着長として 20D は十分でないこと、定着長として 30D を確保していれば定着機能は確保できていることが確認できる。

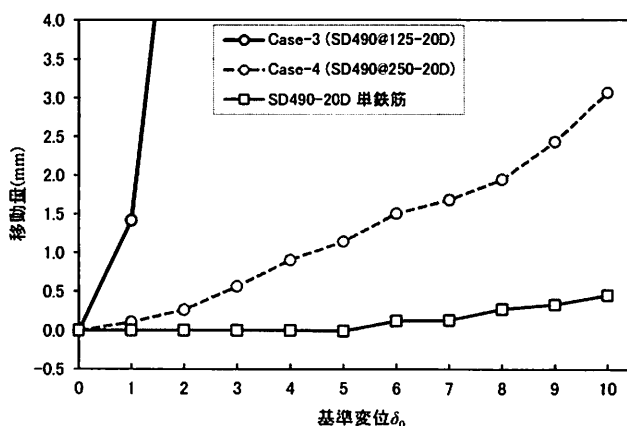


図-5 群鉄筋となることが定着先端部の軸方向鉄筋の移動量に及ぼす影響

(4) 群鉄筋による影響

著者らのグループが別途実施した単鉄筋での定着試験³⁾で得られた定着先端部の軸方向鉄筋の移動量と、単鉄筋の定着試験と同じ条件（SD490で定着長20D）のCase-3およびCase-4との比較をした結果を図-5に示す。単鉄筋の10 δ_0 での移動量は0.45mmであるのに対し、Case-3とCase-4では前述したように大きな値となった。これは群鉄筋の影響度が大きくなるにつれ、隣接し合う鉄筋と鉄筋の間に生じるひび割れが大きくなって定着機能が低下し、定着先端部の移動量が増加したことによるものと考えられる。

定着長を20Dとした条件では、単鉄筋で定着試験を行うと定着機能が確保できていると評価できるような結果が得られたのに対し、群鉄筋とした場合では定着特性は有意に変化し、定着機能としては十分ではない結果であった。この実験結果は定着特性の検証の観点からは重要であり、RC巻立て工法のように複数の軸方向鉄筋をフーチングに近接して定着させるような場合において、その軸方向鉄筋の材質を高強度化していく場合には、群鉄筋による影響についても検証しておくことが重要であることを示唆していると言える。

4. まとめ

本研究では、既設のRC橋脚に対して耐震補強を目的としてRC巻立て補強を行う場合において、SD490を軸方向鉄筋として活用しようとする際に課題となる群鉄筋による既設フーチングへの定着特性を検証することを目的として、正負交番荷重下での定着実験を行った。RC巻立て工法においてSD490を軸方向鉄筋に適用するにあたっては、フーチングも含めた橋脚模型供試体に対する正負交番荷重実験

による検証も別途必要であるが、本文で示したSD490の鉄筋の定着実験の範囲内から得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 設計基準強度 21N/mm² 程度の既設フーチングに対してSD490を軸方向鉄筋として20Dの定着長により群鉄筋の状態で定着させた場合は、その鉄筋の中心間隔として3.6Dのときは鉄筋が抜け出し、7.1Dまで大きくしても抜け出しまでは生じなかったものの、定着先端部の移動量が大きな値となり、定着機能としては十分ではなかった。
- (2) SD490を30Dの定着長で定着させた場合には、中心間隔を3.6D及び7.1Dとした場合の両ケースともに定着機能が確保できることを確認した。
- (3) 定着長を20DとしたSD490の定着試験の結果によれば、単鉄筋で試験をした場合と3本の群鉄筋で試験をした場合で、定着特性に有意な違いが確認された。RC巻立て工法のように複数の軸方向鉄筋をフーチングに近接して定着させるような場合において、その軸方向鉄筋の材質を高強度化していく場合には、群鉄筋による影響についても検証しておく必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成24年3月。
- 2) 既設橋の耐震補強設計に関する技術資料，国総研資料第700号，土研資料第4244号，平成24年11月。
- 3) 榎本武雄，篠原聖二，星隈順一：RC巻立て耐震補強におけるSD490軸方向鉄筋のフーチングへの定着特性，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，pp.827-828，2014。