

V-38

RC 柱の段落とし部に縦貼りした FRP シートの曲げ付着性状

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 計測技販(株) 正員 佐 藤 良 一
 室蘭工業大学 学生員 栗 橋 祐 介
 室蘭工業大学 ○学生員 新 井 茂 雄

1. はじめに

近年、道路、鉄道橋脚に代表される大規模インフラ施設の老朽化や、阪神・淡路大震災を契機として地震防災の重要性が再認識されたことに伴い、構造物の耐震補強工事が盛んに行われている。補強工法としては従来の鋼板補強工法に加えて、施工性、耐食性に優れた繊維強化プラスチック(以下 FRP)シートを用いた補強工法も多く採用されている。著者らはこの補強工法に着目し、主として FRP シート巻き付けによる橋脚のせん断補強効果や靱性能改善効果¹⁾、FRP シートを部材軸方向に縦貼りすることによる曲げ補強効果²⁾について様々な観点から検討を行ってきた。しかしながら、曲げ補強を目的として RC 柱部材に接着した FRP シートの曲げ付着性状に関する定量的な把握は未だ不十分である。特に橋脚段落とし部を曲げ補強する場合を想定して、FRP シートの曲げ付着性状等を詳細に検討した例は極めて少ない。

このような観点から、本研究では FRP シートを用いた段落としを有する RC 部材の効率的な曲げ補強法の確立を目的として、RC 柱段落とし部に接着した FRP シートの曲げ付着性状を実験的に検討した。本研究では特に、FRP シートの材料や目付け量が曲げ補強効果に与える影響に着目して検討を行っている。実験は単調載荷および交番載荷で行い、載荷方法の違いによる付着性状の比較も同時に行っている。計測項目は水平荷重、水平変位、段落とし部の鉄筋および FRP シート各点に発生するひずみである。

2. 実験の概要

2.1 試験体

表-1 に本実験で用いた試験体の一覧を示す。試験体名の第一項目は貼り付けたシートの種類(N: 無補強, A: アラミド繊維, 以下 AFRP, C: 炭素繊維, 以下 CFRP)とシート目付け量との組み合わせを表し、第二項目は載荷方法(M: 単調載荷, C: 交番載荷)を表している。本実験では補強材として目付け量の異なる3種類の AFRP シートを用いており、CFRP シートは単調載荷実験でのみ用いた。表-2 に FRP シートの力学的特性を示す。

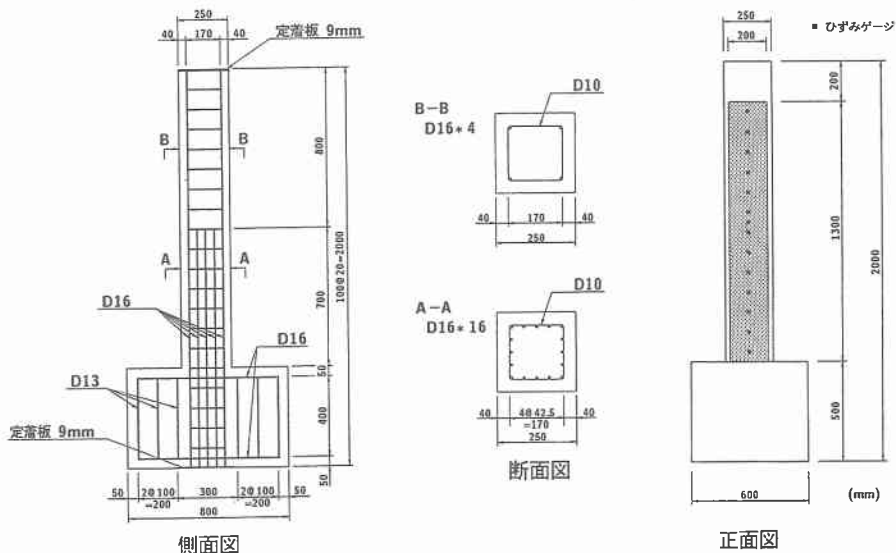
図-1 には試験体の形状寸法と配筋位置および FRP シートの貼り付け状況を示している。実験に用いた試験体の断面寸法は 25 × 25 cm で柱部の高さは 150 cm である。段落としはフーチング上面から高さ 70 cm の位置に設定し、この位置で主筋を 16 本から 4 本に減少させている。本研究では段落とし部に接着した FRP シートの曲げ付着性状に着目していることより、補強後も段落とし部で終局に至るように断面設計している。その結果、主筋には

表-1 試験体の一覧

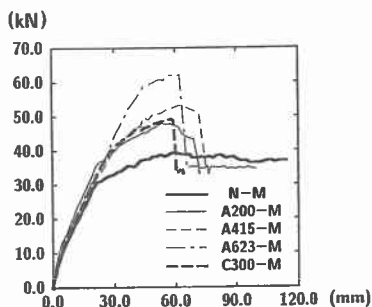
試験体名	補強材	目付け量 (g/m ²)	載荷方法
N-M	無補強	-	単調載荷
A200-M	AFRP	200	
A415-M		415	
A623-M		623	
C300-M	CFRP	300	
N-C	無補強	-	交番載荷
A200-C	AFRP	200	
A415-C		415	
A623-C		623	

表-2 FRP シートの力学的性質

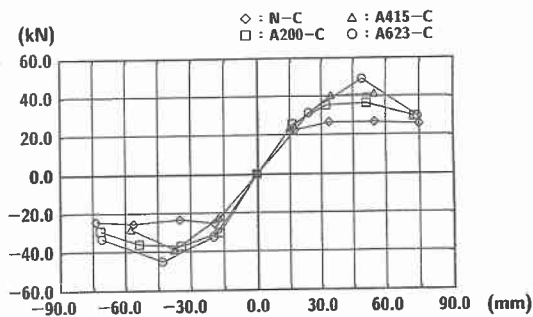
補強材	目付け量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)
AFRP	200	0.138	126.51	2.48
	415	0.286		
	623	0.429		
CFRP	300	0.167	230.46	4.07



図－１ 試験体の形状寸法および FRP シート貼り付け状況



図－２ 荷重－変位関係 (単調載荷)



図－３ 荷重－変位関係 (交番載荷)

D16 (SD345) を用い、スターラップには D10 (SD295A) を用いて 10 cm ピッチで配筋した。実験時におけるコンクリートの材令は 146 日、平均圧縮強度は 32.87 MPa、ポアソン比は 0.17 である。

本実験では試験体基部から高さ方向 130 cm の範囲に幅 20 cm の FRP シートを縦貼りし、単調載荷実験では正方向の加力面に、交番載荷実験では正負方向の加力面に貼り付けている。なお、シートを接着するコンクリート面には FRP シートの付着性能の向上に有効であるブラスト処理 (処理深さ 2.1 mm) を施している。ひずみゲージは FRP シートの中心線上に 10 cm 間隔および段落とし位置に貼り付けている。

2.2 実験方法

実験はジャッキ式水平繰返し載荷装置を用いて行った。ジャッキは柱上部に取り付けた治具とジョイントを介してピン結合されており、柱が変形しても一様に水平力が作用する構造となっている。なお、加力位置は基部から 165.5 cm のピン結合をした位置である。単調載荷実験では柱を正方向に加力してジャッキのストロークが限界に達するか、もしくは FRP シートが剝離するまで載荷を行った。交番載荷実験では試験体が補強後も段落とし部で終局に至るように設計されていることより、段落とし位置における主筋降伏時の載荷点変位 (降伏変位 δ_y) を決定した上で、 δ_y を基準にして $2\delta_y$, $3\delta_y$... と振幅を漸増させて正負方向に繰返し載荷を行った。繰返し回数は各振幅ごとに 3 回とし、各振幅正載荷時 1 回目の荷重が降伏変位時の荷重 (降伏荷重 P_y) を下回るか、もしくは FRP シートが剝離するまで載荷を行った。

3.実験結果および考察

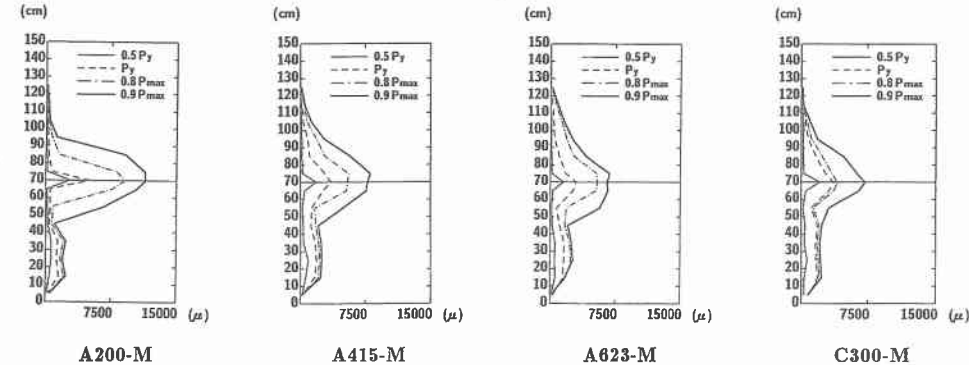
3.1 荷重－変位関係

図－2 に単調載荷試験体の荷重－変位関係を示す。FRP シート補強試験体の載荷荷重は、無補強試験体 N-M と異なり主筋降伏後も大きく増加し、シート剝離後は N-M の荷重－変位関係にすりついている。図－3 に交番載荷試験体の荷重－変位関係の包絡線を示す。包絡線には各載荷振幅時の正負 1 回目の荷重と変位を用いている。図より、無補強試験体 N-C の最大荷重は 1 δ_y 時の荷重と大差はないが、補強試験体の荷重は 1 δ_y 以後も増加していることがわかる。また、シートの目付量の大きい試験体において各振幅時の荷重が大きく示されている。

表－3 に本実験の結果を取りまとめた。表中のシート剝離変位は単調載荷実験ではシート剝離時の変位、交番載荷実験ではシート剝離時の変位振幅である。なお、交番載荷実験においてシートの剝離は表中の変位振幅到達前で生じているが値を切り上げて表記している。A623-M については荷重と変位の挙動は計測できたものの荷重の較正值が不確かなため () を付けた参考値とした。最大荷重は載荷方法に関係なくシートの目付量の増加とともに大きくなっている。なお、交番載荷実験の最大荷重と最大荷重時変位は、単調載荷実験と比較して若干小さく、最大荷重で約 80 %，最大荷重時変位で 80 ～ 90 % となっている。このことから、FRP シートの材料特性および目付量が同様であっても載荷方法により実験結果が異なることに留意する必要があると考えられる。

表－3 実験結果

試験体名	最大荷重 P_{max} (kN)	最大荷重時 変位 (cm)	シート剝離 変位
N-M	40.11	6.04	-
A200-M	48.05	5.59	6.76 (cm)
A415-M	53.54	6.29	7.32 (cm)
A623-M	(62.11)	6.25	6.26 (cm)
C300-M	49.33	5.87	5.94 (cm)
N-C	33.24	5.37	4 δ_y
A200-C	39.52	5.13	4 δ_y
A415-C	44.42	5.20	3 δ_y
A623-C	49.92	4.35	3 δ_y



図－4 シートのひずみ分布 (単調載荷)

3.2 FRP シートのひずみ分布性状

図－4 に単調載荷試験体の 0.5 P_y , P_y , 0.8 P_{max} , 0.9 P_{max} 時におけるシートのひずみ分布を示す。単調載荷実験において発生するひずみは 0.5 P_y 時において段落とし位置を頂点にした三角形分布を示している。この時シートの目付量が少ない A200-M に発生するひずみは他に比べて大きい。また、図より荷重の増加とともにひずみが徐々に増大し、ひずみの発生範囲は拡大していることがわかる。

図－5 に交番載荷試験体の各変位振幅正載荷 1 回目におけるシートのひずみ分布を示す。交番載荷実験においても、各試験体の 1 δ_y 時に発生するひずみは目付量によって明確な差が現れていない。段落とし部近傍でひずみの分布勾配が急激に大きくなる部分では主鉄筋が降伏し、断面の変形曲率が增大しているものと判断される。このことは A415-C, A623-C 試験体において主鉄筋の降伏領域が段落とし部より上部に 10 cm 程度、下部に 15 cm 程度広がっていることを暗示している。

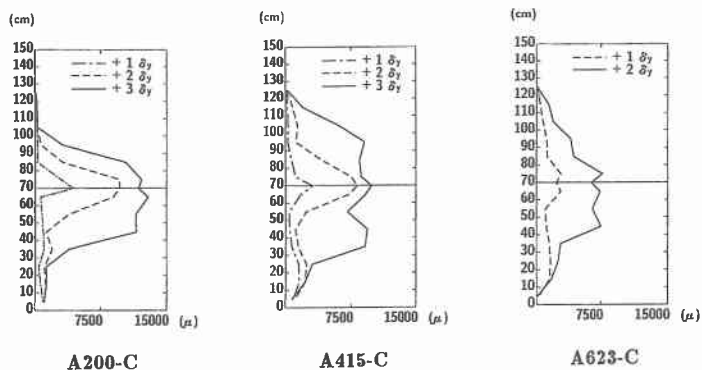


図-5 シートのひずみ分布 (交番载荷)

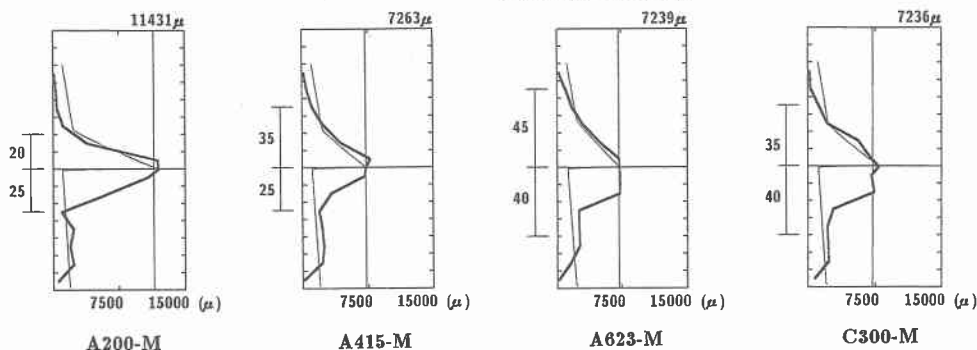


図-6 計算終局変位時におけるシートのひずみ分布 (単調载荷)

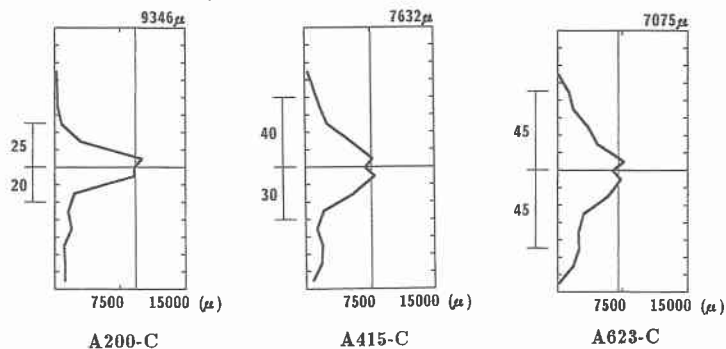


図-7 計算終局変位時におけるシートのひずみ分布 (交番载荷)

図-4の単調载荷および図-5の交番载荷におけるひずみ分布性状を比較すると、最終的に大きなひずみの分布範囲は単調载荷では段落とし上部に 25 ~ 35 cm 程度、下部に 25 cm 程度であるのに対し、交番载荷では段落としの上部に 30 ~ 60 cm、下部に 30 ~ 40 cm 程度と広範囲に渡っていることがわかる。これは小さい振幅で交番载荷することによりシートの付着界面が劣化し、単調载荷の場合と比較してシートの剝離現象がより進行することを暗示している。

3.3 FRP シートの曲げ付着性状

図-6, 7に単調载荷試験体および交番载荷試験体の計算終局変位時における実測のシートひずみ分布を示す。なお、図中には付着強度を算定するために、後述のピーリングによる押し抜きが生じている区間を含むシートのひずみの平均値 (平均ひずみ) および段落とし位置からひずみがほぼ 0 に収束するまでの長さ (付着抵抗長さ) を示している。また、図-6には、計算より求めた段落とし部での発生ひずみが実験値と

ほぼ同程度となった時点の計算ひずみ分布を細線で示している。図よりシート目付量が同等である場合にはひずみの分布性状は載荷方法に関わらずほぼ同様であることがわかる。また、シート目付量の増加とともに平均ひずみは小さくなり、付着抵抗長さは増加する傾向にあることがわかる。

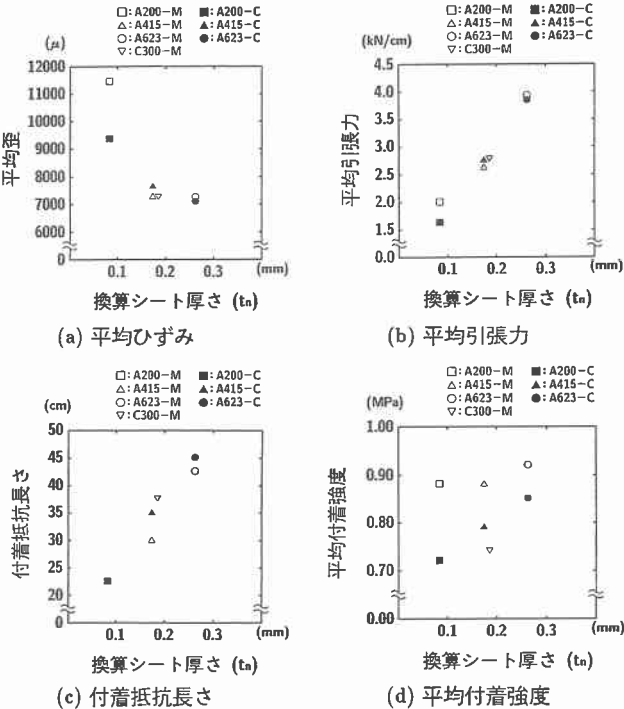
ここで、計算ひずみ分布は段落としの上部では実験値を比較的精度良く再現しているが、下部では全く実験値と対応していない。これは、実験動では曲げモーメント分布に基づいた理論的な性状と異なり、段落とし下部の柱幅程度の領域が既に塑性化した段落とし上部断面の影響を受け、コンクリートの損傷も相まって変形曲率が大きくなったためと推察される。

表－４に図－６, ７から求められるシートの曲げ付着特性を整理した。また、図－８にはシートの曲げ付着特性と換算シート厚さ t_n との関係を示している。表中、平均引張力は平均ひずみにシートの弾性係数とシート厚さを乗じたものであり、付着抵抗長さは段落とし上部と下部の平均値である。また、平均付着強度は平均引張力を付着抵抗長さで除した

ものである。換算シート厚さは鋼材との弾性係数比を考慮したシート厚さ（以下、シート厚さ）である。なお、図中単調載荷実験の結果は白抜き、交番載荷実験の結果は黒塗りの印で示している。(a)図より、平均ひずみは単調載荷実験では A200-M を除いてほぼ同程度であることがわかる。これに対し、交番載荷実験の平均ひずみはシート厚さの増加に対応して減少している。(b)図の平均引張力はシート厚さの増加に対応して増大している。なお、C300-M と軸剛性がほぼ同程度である A415-M の平均引張力に大きな差はない。(c)図より、付着抵抗長さは実験方法によらずシート厚さの増加に対応してほぼ線形に増加しており、C300-M の方が A415-M よりも若干長くなっている。付着抵抗長さは全体的な傾向として単調載荷実験よりも交番載荷実験の場合で長い。(d)図より、平均付着強度は 0.7 ～ 0.9 MPa 程度であり、シート厚さの増加に伴って若干増加する傾向にあると考えられる。また、補強量が同程度である場合には、付着強度は交番載荷実験よりも単調載荷実験で大きくなっている。これは交番載荷によるシートの接着面の劣化などが影響を与えているものと考えられる。なお、C300-M はシートの軸剛性が同等な A415-M よりも平均付着強度が小さいが、これはシートの平均付着抵抗長さが長いためである。ここで、既存の文献³⁾では FRP シートの許容付着強度を 0.44 MPa と規定しているが、本実験結果からもこの規定値は十分安全側といえる。

表－４ FRP シートの曲げ付着特性

試験体名	平均ひずみ (μ)	平均引張力 (kN/cm)	付着抵抗長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
A200-M	11431	2.00	22.5	0.88
A415-M	7263	2.63	30.0	0.88
A623-M	7239	3.93	42.5	0.92
C300-M	7236	2.78	37.5	0.74
A200-C	9346	1.63	22.5	0.72
A415-C	7632	2.76	35.0	0.79
A623-C	7075	3.84	45.0	0.85



図－８ FRP シートの曲げ付着特性図

4 破壊性状

図-9に単調載荷試験体の実験終了後における破壊状況を示す。

N-Mでは加力面において段落とし位置で曲げひびわれが発生し、断面中央部近傍から斜めひびわれへと移行している。実験ではこのひびわれが部材圧縮縁まで進行して角折れし、終局状態となっている。一方、曲げ補強した A200-M、A415-Mでは段落とし位置から上下 10 ～ 15 cm の範囲に発生した曲げひびわれが、斜めひびわれへと移行している。その後は変位の増加に伴い、あたかも段落とし近

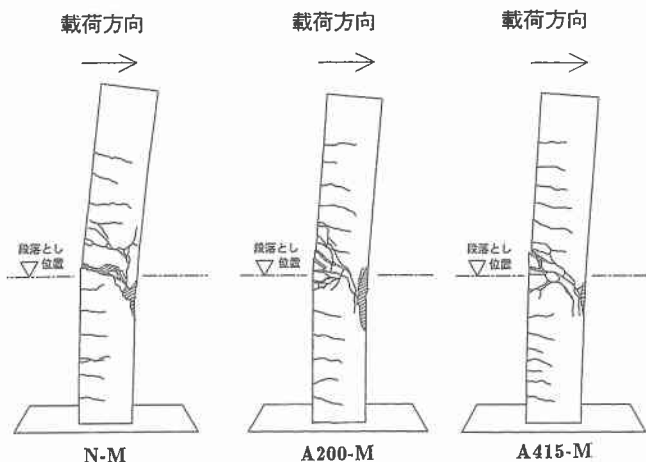


図-9 終局破壊状況

傍のコンクリート塊が引張側へ押し抜けるような形で、部材にせん断ずれが発生している。終局時には、このせん断ずれ量の増大によりピーリング現象(シートの引き剥がれ)が顕著に現れ、シートの完全剥離に至っている。この破壊過程は FRP シートで曲げ補強した RC 梁の一点載荷実験⁴⁾の場合と極めて類似している。また、各試験体における曲げひびわれの本数はほぼ同程度である。本来、シートを貼り付けることで曲げひびわれの分散効果が期待できるものであるが、本実験の場合にはその効果が発揮される前に段落とし部で斜めひびわれが卓越しシートが剥離したものと考えられる。

5. まとめ

本実験では段落としを有する RC 柱に FRP シートを縦貼りして2種類の載荷方法で実験を行い、FRP シートの付着性状を検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを要約すると以下のとおりである。

- (1) 同じ材料特性、目付量の FRP シートを貼り付けた試験体でも、交番載荷実験は単調載荷実験に比べて最大荷重が約 20 %、平均付着強度は約 10 ～ 15 % 減少し、耐力、付着性状には差が生じる。
- (2) FRP シートに発生するひずみの分布性状は載荷方法やシートの目付量によって変化し、交番載荷の場合は単調載荷の場合よりもひずみの発生範囲が拡大する。
- (3) シートの付着抵抗長さはシートの目付量の増加に伴って長くなり、平均付着強度はシートの目付量に応じて若干増加する傾向にある。また、平均付着強度は交番載荷の場合よりも単調載荷の場合で若干大きい値を示す。

参考文献

- 1) 三上浩, 佐藤昌志, 谷本俊充, 松岡健一: アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靱性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, NO.18, Vol.2, pp.1457 - 1462, 1996
- 2) 岸徳光, 三上浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着性状に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, pp.1399-1410, 1999.3
- 3) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法, 設計・施工要領(案), 1997
- 4) 三上 浩, 岸 徳光, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートを接着した RC 梁の耐荷性状に与える接着範囲の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1549-1554, 1999.