

AFRP シートを用いた壁式 RC 橋脚の靱性補強における貫通鉄筋配置の効果に関する実験的研究

Effects of on Location of After-Installation Rebar on
Ductility of Wall-Type RC-Pier Strength with AFRP Sheet

北海道開発土木研究所 構造研究室 ○正員 畑山 朗 (Akira Hatakeyama)
北海道開発土木研究所 構造研究室 正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
榊長 大 札幌支店 正員 長谷川 正 (Tadashi Hasegawa)
室蘭工業大学 建設システム工学科 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

RC 橋脚に対するアラミド繊維シート (以下 AFRP シート) 巻き付けによる靱性補強に関しては、各研究機関において研究が進められており、拘束されたコアコンクリートの応力-ひずみ関係として、コンクリートの応力が最大応力に達する以前は AFRP シートを弾性係数比で帯鉄筋に換算し、最大応力以降は引張強度比で帯鉄筋に換算する手法が提案されている。¹⁾

しかしながら、このようなコアコンクリートの拘束効果に関しては、円形断面、正方形断面、あるいは辺長比 1:1.5 以下の正方形に近い矩形断面 RC 柱によって確認実験がなされているのみで、壁式橋脚のような辺長比の大きな長方形断面については、その拘束効果に関する検証がなされていないのが現状である。

著者らは、長方形断面の長辺方向に貫通鉄筋を配置して AFRP シートのはらみ出しを拘束する工法を考案し、壁式 RC 橋脚に対する AFRP シート巻き付け補強の適用性確認を目的とした載荷実験を行ってきた。

これまでの実験で、AFRP シート巻き付け補強に貫通鉄筋を併用することにより、段落しを有する壁式 RC 橋脚の段落し部における脆性的な破壊を抑制し、靱性能が大きく向上すること等が明らかとなった。²⁾

本研究では、壁式 RC 橋脚基部に生ずる塑性ヒンジ近傍における貫通鉄筋配置および AFRP シート補強量に着目し、靱性能向上効果に関する検討を行った。

死荷重に相当する荷重を一定荷重として載荷する鉛直方向ジャッキ、地震時慣性力に相当する水平力を交番載荷する水平方向ジャッキ、および RC 橋脚試験体、それらを支持する架台で構成されている。

2. 2 実験方法

実験は、上部工死荷重に相当する鉛直荷重 150kN を軸力として一定に保持した状態で、水平ジャッキによる水平方向交番載荷を行うことにより実施した。

交番載荷は、軸方向鉄筋の降伏ひずみを材料試験より得られた $1,700\mu$ と設定し、橋脚基部の鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の載荷点変位を降伏変位 δ_y 、その時点の荷重を降伏荷重 P_y とし、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ ・・・と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷する方法とした。

繰り返し載荷回数は、各変位振幅毎に 3 回とした。終局変位は、最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始める点 (δ_{u1})、および 1 回目載荷時における正負いずれかの載荷荷重が降伏荷重 P_y を下回った時点 (δ_{u2}) の 2 種類を定義した。

2. 3 実験試験体

試験体は、既設橋梁で一般的に見られる壁式 RC 橋脚を想定し、実橋脚の 1/4 程度の規模のものをを用いた。図-2 に試験体の形状・配筋概要図を示す。

2. 実験概要

2. 1 実験装置

図-1 に実験装置概要図を示す。本実験装置は、上部工

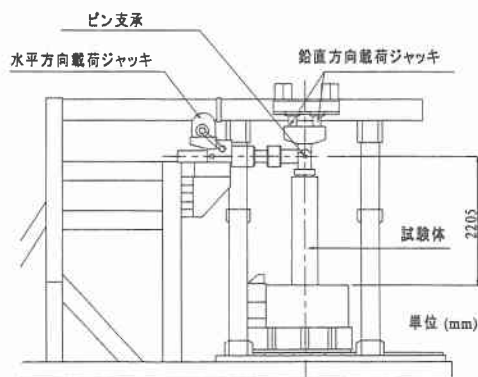


図-1 実験装置概要図

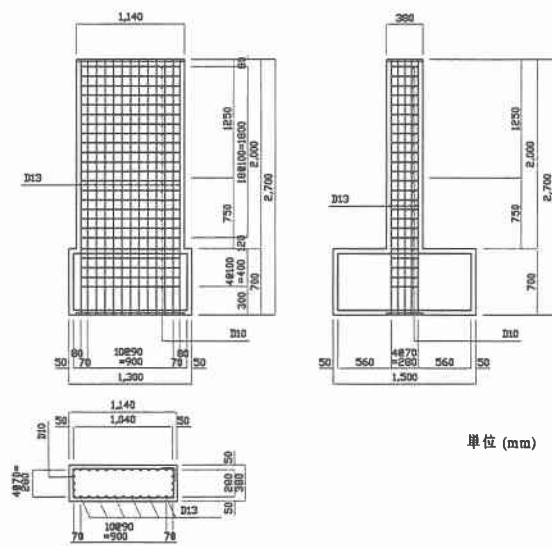
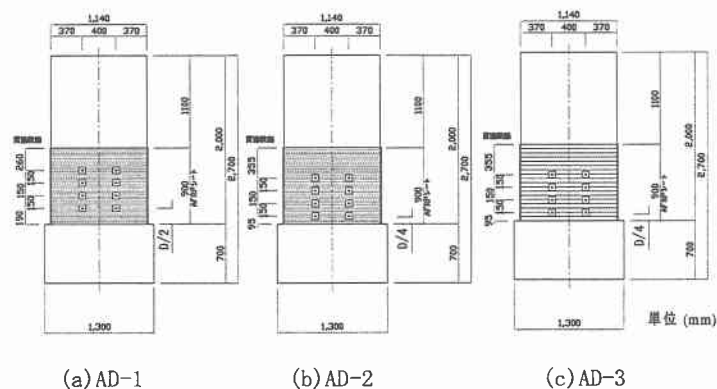


図-2 試験体形状・配筋概要図



図－3 試験体補強概要図

試験体形状は、躯体高 2.0m、断面寸法 0.38×1.14m の長方形断面（辺長比 1:3）であり、引張主鉄筋比は $P_t=0.45\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.2\%$ である。

なお、本実験では、AFRP シートおよび貫通鉄筋による補強効果を確認することを目的としているため、横拘束筋は帯鉄筋のみとし、中間拘束筋は配置しないものとした。

実験時のコンクリートの平均圧縮強度は $f'_c=26.0\text{MPa}$ 、鉄筋は SD345 材を用い、その平均降伏点強度は 362MPa であった。

柱基部靱性補強範囲は、一般的には 1.5D (D:橋脚壁厚) 程度確保していれば、補強効果を発揮できるとされている¹⁾が、AFRP シート巻き付けを行った場合には、かぶりコンクリートの剥離が防止され、断面の抵抗モーメントが増大することから、補強範囲上端部での損傷を防止するため、柱基部より 900mm (2.4D) の範囲とした。

また、壁式橋脚の断面長辺方向における AFRP シートのはらみ出しを防止し、コアコンクリート拘束効果を向上させるために、AFRP シートと貫通鉄筋によって拘束される断面がほぼ正方形となるように、D13 鉄筋 (SD345) を用いた貫通鉄筋を 1 断面に 2 本配置している。

なお、これまでの実験では、柱基部最下段貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長 ($L_p=0.5D$) 以上とした場合、補強範囲下端で AFRP シートのはらみ出しが発生している。²⁾

そこで、本研究では、1) 柱基部貫最下段貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長 ($0.5D=190\text{mm}$) としたケース、および 2) 塑性ヒンジ長の 1/2 ($0.25D=95\text{mm}$) としたケースの 2 種類とした。

また、過度に靱性補強を施した場合、引張主鉄筋の破断などの影響が考えられることから、道路橋示方書における $\rho_s \leq 0.018$ を考慮し、靱性補強量の上限值として、貫通鉄筋と帯鉄筋の体積比

$$\rho_s = 4A_s / (s \cdot d)$$

と、AFRP シートの体積比

$$\rho_{AF} = 4n_p t_{AF} / d_{AF}$$

を合計した補強材の体積比 $\rho_s + \rho_{AF} \leq 0.018$ と仮定し、 $\rho_s + \rho_{AF}$ が上限値程度となるように AFRP シート、貫通鉄筋による補強量を設定した。

ここで、 s : 横拘束筋の高さ方向間隔、 d : 横拘束筋の有効長、 n_p : AFRP シートの積層数、 t_{AF} : AFRP シート 1 層当たりの厚さ、 d_{AF} : AFRP シートの有効長である。

表－1 に試験体の補強一覧、図－3 に補強概要図を示す。

表－1 試験体補強一覧

試験体	貫通鉄筋高 (基部より)	AFRPシート量	ρ_s	ρ_{AF}	$\rho_s + \rho_{AF}$
N-0	—	—	0.0020	—	0.0020
AD-1	190mm	AK40 2層	0.0086	0.0041	0.0127
AD-2	95mm	AK40 2層	0.0153	0.0041	0.0194
AD-3	95mm	AK40 1層	0.0153	0.0020	0.0173

3. 実験結果および考察

3. 1 荷重－変位関係

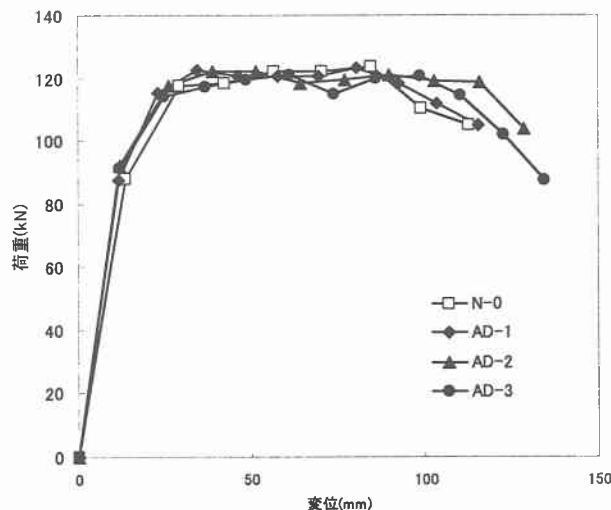
表－2 に実験結果の一覧を示す。表中の δ_y 、 P_y は降伏時の載荷点変位、載荷荷重を、 P_a は載荷荷重の最大値を示している。表中、終局変位は、最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始める点の変位を δ_{u1} 、載荷荷重が降伏荷重 P_y を下回る時点の変位を δ_{u2} としている。

表より、補強を施した各試験体の降伏変位は無補強の N-0 試験体と比較して 85% 程度の小さな値を示しており、AFRP シート巻き付けや貫通鉄筋による拘束効果により、載荷初期のひび割れ発生が抑制された影響であるものと考えられる。

終局変位 δ_{u1} は、N-0 試験体が 84.4mm (6 δ_y) であるのに対して、AD-1 試験体では 80.4mm (7 δ_y)、AD-2 試験体では 115.7mm (9 δ_y)、AD-3 試験体では 98.6mm (8 δ_y) を示し、前述した $\rho_s + \rho_{AF}$ が大きいほど、終局変位 δ_{u1} 、塑性率 δ_{u1} / δ_y とともに向上する結果となった。

表－2 実験結果一覧

試験体	変位 (mm)			荷重 (kN)		終局塑性率	
	δ_y	δ_{u1}	δ_{u2}	P_y	P_a	δ_{u1} / δ_y	δ_{u2} / δ_y
N-0	14.2	84.4	112.6	88.1	123.6	6	8
AD-1	11.8	80.4	115.6	87.7	123.2	7	10
AD-2	12.2	115.7	128.5	92.3	122.2	9	10
AD-3	12.0	98.6	134.6	91.5	121.0	8	11



図－4 荷重－変位包絡線

終局変位 δu_2 は、N-0 試験体が 112.6mm (8 δy) であるのに対して、AD-1 試験体では 115.6mm (10 δy)、AD-2 試験体では 128.5mm (10 δy)、AD-3 試験体では 134.6mm (11 δy) を示し、AD-3 試験体が終局変位 δu_2 、塑性率 $\delta u_2 / \delta y$ ともに最も大きな値を示す結果となった。

最下段貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長 (0.5D=190mm) とした AD-1 試験体の場合、終局変位 δu_1 、 δu_2 ともに N-0 試験体とほぼ等しい値を示していることから、AFRP シートと貫通鉄筋による拘束効果が十分に発揮されていないものと推測される。

3. 2 試験体損傷状況

写真-1 に補強を施した各試験体の実験終了後の破壊性状 (試験体正面) を示す。

段落し無しの N-0 試験体は、1 δy 載荷時に高さ方向に 20cm 程度の間隔でひび割れが発生した。3 δy 載荷以降では柱基部のみに損傷が集中し、6 δy 載荷時にかぶりコンクリートがはらみ出し (δu_1)、8 δy 載荷時に主鉄筋破断により急激に荷重が低下し、終局状態 (δu_2) に至った。

AD-1 試験体は、載荷初期段階では基部断面のひび割れが徐々に開口し、その後 7 δy 載荷時に柱基部から最下段貫通鉄筋下端までの 20cm 程度の区間において AFRP シートが大きくはらみ出して荷重が低下し始め (δu_1)、10 δy 載荷時に主鉄筋の破断により急激に荷重が低下し、終局状態 (δu_2) に至った。

AD-2 試験体は、載荷初期段階では AD-1 試験体と同様に基部断面のひび割れが徐々に開口し、その後、9 δy 載荷時に柱基部から 25cm 程度の位置における AFRP シートがはらみ出し (δu_1)、その直後の 10 δy 載荷時に主鉄筋破断により急激に荷重が低下し、終局状態 (δu_2) に至った。

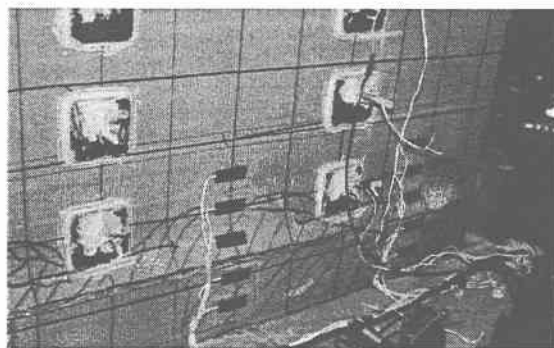
AD-3 試験体は、載荷初期段階に高さ方向に 10cm 程度の間隔でひび割れが生じるとともに、基部断面のひび割れが徐々に開口した。その後、8 δy 載荷時に柱基部から 20cm 程度の AFRP シートがはらみ出し (δu_1)、徐々に荷重が低下した後、11 δy 載荷時に主鉄筋破断により急激に荷重が低下し、終局状態 (δu_2) に至った。最終状態では、最下段貫通鉄筋定着座金端部にて AFRP シートの破断が認められた。

これらの結果より、荷重低下直後に主鉄筋破断により終局に至った AD-2 試験体 ($\rho_s + \rho_{AF} = 0.0194$) の場合、靱性補強の上限に近い状態であり、補強材の体積比 $\rho_s + \rho_{AF}$ の上限値は、0.018~0.020 程度であると考えられる。

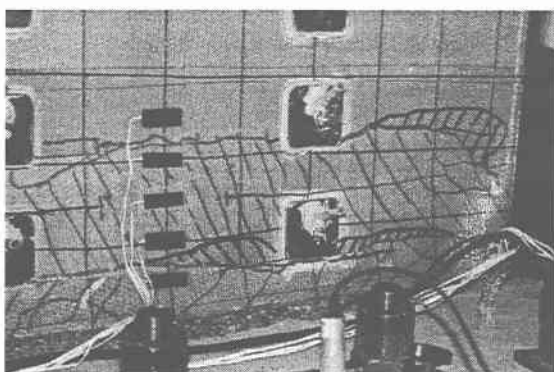
3. 3 履歴吸収エネルギー量

図-5 に終局変位 δu_1 までの履歴吸収エネルギー量の累積値と水平変位との関係を示す。履歴吸収エネルギー量は、各変位振幅 ($\delta / \delta y$) における荷重-変位関係より算出している。

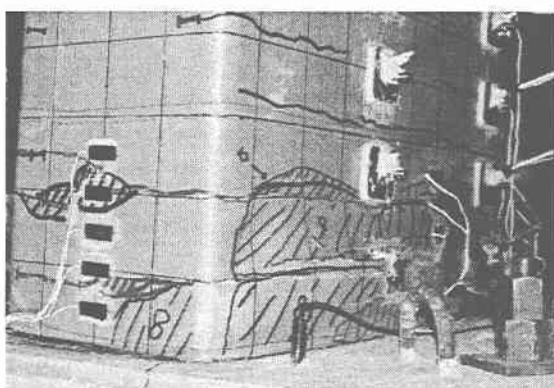
図より、終局変位 δu_1 までの履歴吸収エネルギーの累積値は、N-0 試験体が 131.9kNmm であるのに対して、AD-1 試験体では、135.6kNmm と、ほぼ等しい値となっている。また、AD-2 試験体は 221.0kNmm、AD-3 試験体は 276.8kNmm と、補強材体積比の増加に伴い、履歴吸収エネルギー量が増加していることがわかる。



(a) AD-1



(b) AD-2



(c) AD-3

写真-1 試験体損傷状況 (橋脚基部)

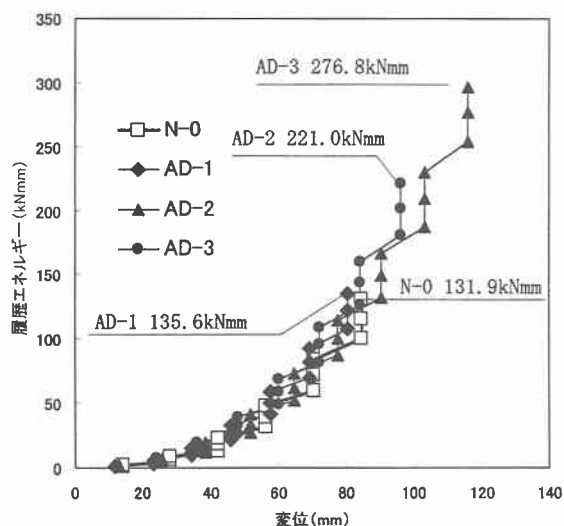


図-5 履歴吸収エネルギー量 (δu_1 時)

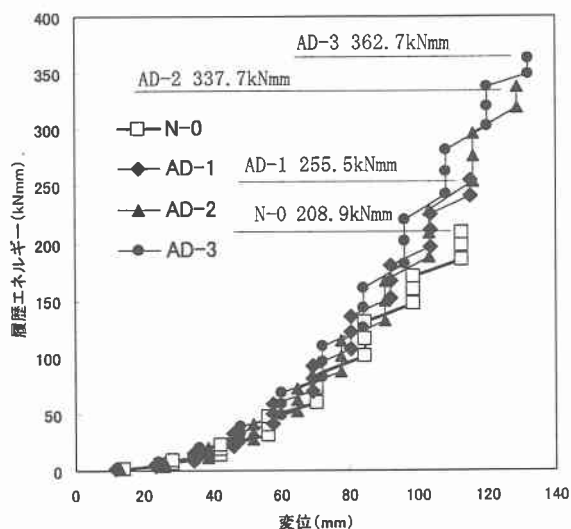


図-6 履歴吸収エネルギー量 (δu_2 時)

図-6には、終局変位 δu_2 までの履歴吸収エネルギー量の累積値と水平変位との関係を示している。

図より、終局変位 δu_2 までの履歴吸収エネルギーの累積値は、N-0 試験体が 208.9kNmm であるのに対して、補強を施した各試験体は、AD-1 が 255.5kNmm、AD-2 が 337.7kNmm、AD-3 が 362.7kNmm と、それぞれ増加している。

これらの結果より、AD-1 試験体では補強効果が十分に発揮されていないこと、補強材体積比の最も大きな AD-2 試験体と比較して、 δu_1 以降の荷重低下が緩やかな AD-3 試験体が最終状態までの履歴吸収エネルギーが最も大きな値を示しており、AD-2 試験体の補強量が過大であることが分かる。

3.3 AFRP シートひずみ分布

図-7に、補強を施した各試験体の基部から上方に300mmの区間におけるAFRPシートのひずみ分布を示す。

図より、AD-1 試験体では、 $7\delta y$ 荷重以降、貫通鉄筋より下側の部分においてひずみが増加している。

AD-2 試験体では、 $8\delta y$ 荷重までは微小な値を示していたひずみが $10\delta y$ 荷重時に基部から100mmの区間で急激に増加している。

AD-3 試験体では、 $8\delta y$ 荷重まで緩やかに増加したひずみが、 $9\delta y$ 、 $10\delta y$ 荷重時に急激に増加している。ひずみが増加している区間は、AD-1 試験体と同程度である。

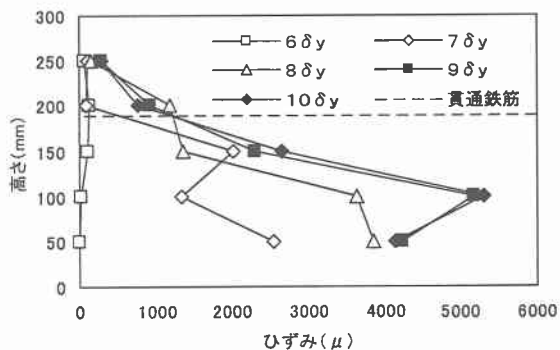
これらの結果より、貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長の $1/2$ ($0.25D=95\text{mm}$) とした場合、AFRP シートのはらみ出しが効果的に抑制されているものと考えられる。

なお、AD-3 試験体のひずみ増加区間が AD-2 試験体より広く、AD-1 試験体とほぼ同程度となったのは、貫通鉄筋定着座金端部におけるシート破断の影響であるものと考えられる。

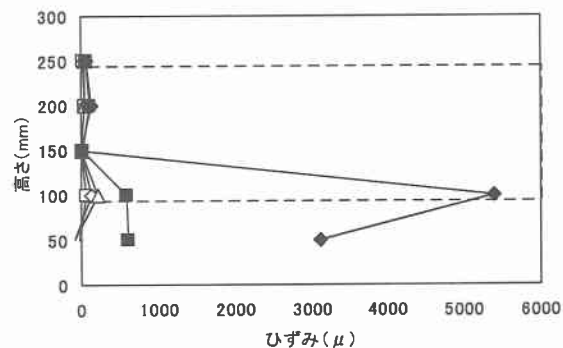
4. まとめ

壁式 RC 橋脚基部塑性ヒンジ付近の貫通鉄筋配置および AFRP シート補強量に着目し、靱性能向上効果に関する検討を行った。

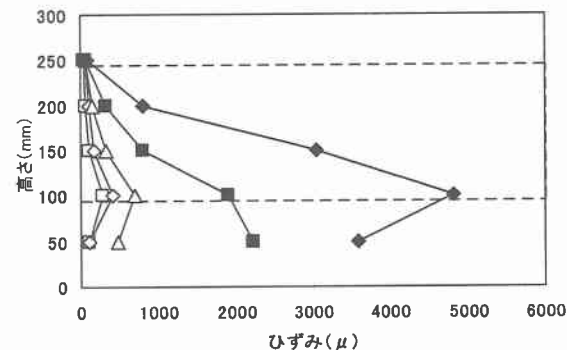
本研究により得られた結果を以下に示す。



(a) AD-1



(b) AD-2



(c) AD-3

図-7 AFRP シートひずみ分布

- (1) 最下段貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長 ($0.5D=190\text{mm}$) とした場合には、AFRP シート、貫通鉄筋による拘束効果が十分に発揮されない。
- (2) 最下段貫通鉄筋位置を塑性ヒンジ長の $1/2$ ($0.25D=95\text{mm}$) とした場合、最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始める変位 (δu_1) が大きくなり、塑性率が向上する。
- (3) $\rho_s + \rho_{AF} = 0.0194$ とした場合、荷重低下直後に主鉄筋破断により終局に至る破壊形態を示したことから、補強材の体積比 $\rho_s + \rho_{AF}$ の上限値は、 $0.018 \sim 0.020$ 程度であると考えられる。

参考文献

- (1) 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），1998
- (2) 畑山ほか：AFRP シートを用いた壁式 RC 橋脚の段落し部補強に関する実験的研究，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 1405-1408