

埋込配置鉄筋に対する AFRP シート巻立てによる拘束効果に関する検討

Investigation on confined effect of AFRP sheet jacketing on embedded retrofit rebar

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 寺澤貴裕 (Takahiro Terasawa)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 佐藤 京 (Takashi Sato)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 秋本光雄 (Mitsuo Akimoto)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 葛西 聡 (Satoshi Kasai)
室蘭工業大学大学院 正 員 小室雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

既設 RC 橋脚の耐震補強を行う場合、鉄筋コンクリートや鋼板による巻立てが一般に適用される場合が多い。しかしながら、現地条件、設計条件などの制約から橋脚の断面寸法をできるだけ変えない耐震補強技術が求められる場合もある。

著者らは、耐震補強後においても RC 橋脚の断面寸法をできるだけ変えずに橋脚の水平耐力および変形性能の両方を向上させ、かつ経済的な耐震補強技術の開発を目的として、図-1 に示している柱コンクリートのかぶり部に設けた溝に水平耐力向上を目的とした耐震補強用軸方向鉄筋（以下、耐震補強鉄筋）を埋め込み配置し、エポキシ樹脂により固定し、さらにじん性補強を目的としてアラミド繊維シート（以下、AFRP シート）により巻立てる補強工法を提案し、検討を行っている。

これまでの研究¹⁾から、提案の補強法においても水平耐力の向上は図ることができたが、柱基部において軸方向鉄筋が座屈後に低サイクル疲労によって破断し終局に至ることを確認している。軸方向鉄筋の破断により終局に至る場合、水平耐力が急激に低下することになるため、終局状態を軸方向鉄筋の破断から基部コンクリートの圧壊に移行させることが必要であると考えている。そのためには、水平耐力向上に必要な耐震補強鉄筋量の算定に加え、低サイクル疲労破断の評価も行うことが必要であると考えられる。そこで、鉄筋座屈長、鉄筋径、水平変

位などをパラメータとして、鉄筋破断までの繰り返し載荷回数を評価した式²⁾（以下、瀧口らの式）およびマイナー則による累積損傷度を用いて、鉄筋の低サイクル疲労破断評価を試みた結果、軸方向鉄筋が破断すると評価した水平変位（以下、評価破断変位）と正負交番載荷試験における水平耐力低下変位は概ね対応していた。しかしながら、評価破断変位の計算結果に与える軸方向鉄筋座屈長の影響が大きく、本補強法においては AFRP シートで拘束された状態における耐震補強鉄筋の座屈長を精度よく算定する必要があることが分かった。そこで、塑性座屈解析から座屈長の算定を試みた結果、本補強法における耐震補強鉄筋には実際の純かぶりコンクリート厚よりも大きな拘束効果が作用している可能性が示唆された。

以上のことから、本稿では本補強法における耐震補強鉄筋に対する AFRP シート巻き立てによる拘束効果に関する検討を行った。

表-1 試験体諸元

記号		補強前	補強後	
			AF2-D10	AF2-D13
柱寸法		□600mm×600mm 高さ 1,800mm		
軸方向鉄筋		8-D13 SD345		
帯鉄筋		D10ctc250 SD345		
耐震補強用軸方向鉄筋		—	8-D10 SD345	8-D13 SD345
アラミド繊維シート		—	350g/m ² 周方向 1 層 1,200mm	350g/m ² 周方向 1 層 1,500mm
鉄筋比	p_t (%)	0.28	0.44	0.56
	p_w (%)	0.095		
	ρ_s (%)	0.22		
設計計算 耐力 ^(*)	P_u (kN)	75.8	108.1	107.42
	P_s (kN)	159.7	519.7	511.3
	P_s / P_u	2.11	4.81	4.76

p_t ：軸方向鉄筋比、 p_w ：帯鉄筋比、 ρ_s ：横拘束筋の体積比、
 P_u ：道路橋示方書³⁾に基づく曲げ終局耐力、 P_s ：道路橋示方書³⁾に基づくレベル 2 タイプ I 地震動に対するせん断耐力、^(*)：設計計算耐力は各材料強度を用いて算出

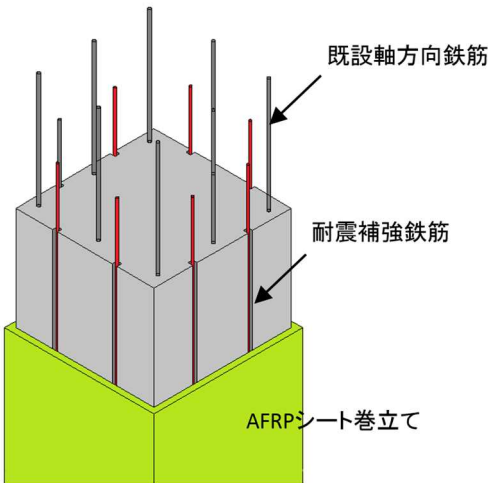
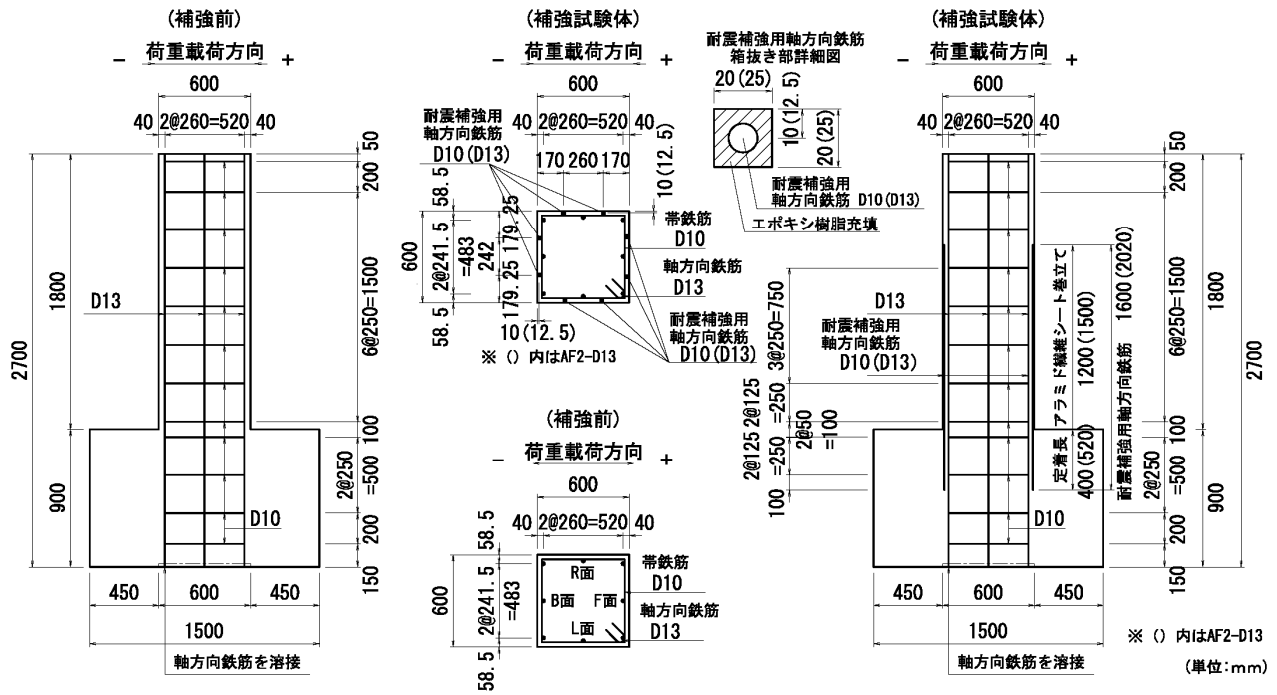
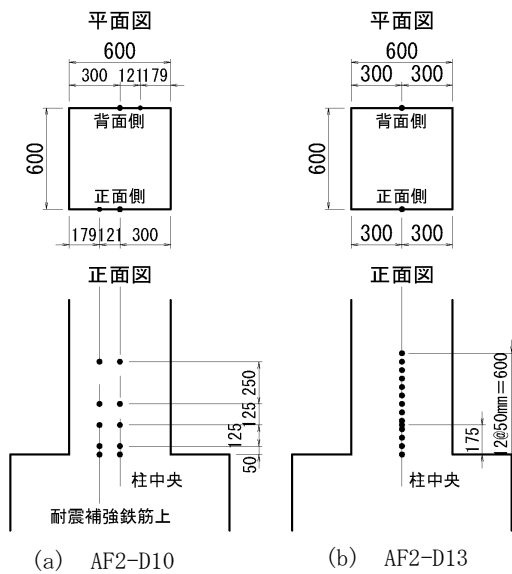


図-1 埋込配置鉄筋と AFRP シートによる補強



図－2 試験体形状、配筋図



図－3 AFRP シートひずみ計測位置

2. 検討試験体

表－1には検討に用いた試験体の諸元を示している。試験体は文献1)のAF2試験体及び耐震補強鉄筋径をD13とした試験体である。本稿では文献1)の試験体名に耐震補強鉄筋径を付記しAF2-D10、耐震補強鉄筋径をD13とした試験体とAF2-D13と表記している。AF2-D10試験体は、補強後の水平耐力が補強前の約1.5倍となるように設計した試験体、またAF2-D13は、AF2-D10試験体の低サイクル疲労破断の評価、及び最適補強鉄筋量の検討⁴⁾に基づき、耐震補強鉄筋径をD13とした試験体である。試験体、荷重試験及び低サイクル疲労破断評価及び、最適補強鉄筋量検討の詳細については、文献1)及び文献

4)を参照されたい。図－2には試験体形状及び配筋図を示している。柱部の断面寸法は $600 \times 600 \text{ mm}$ 、柱高さは1,800mmである。耐震補強鉄筋は柱各面に2本ずつ配筋し、橋脚全体の水平耐力を向上させるためにフーチングに定着している。それらは試験体製作時にあらかじめ設けたかぶり部の矩形断面及びフーチングの円形断面箱抜き部にエポキシ樹脂により固定している。AFRPシートは、低弾性・高強度シート(アラミド2)を使用し、目付量 350 g/m^2 、幅500mmのシートを柱基部から1,200mmまたは1,500mmの高さまで、柱の周方向に1層巻き付けている。図－3にはAFRPシートのひずみを計測した位置を示している。AF2-D10試験体は、柱中央及び耐震補強鉄筋位置上に、またAF2-D13は柱中央にそれぞれひずみゲージを貼付け、柱周方向のAFRPシートひずみを計測している。

3. AFRP シートのひずみ

図－4には正負交番荷重試験における荷重点水平変位とAFRPシートひずみの関係を示している。ここでは、荷重試験結果^{1), 4)}より、いずれの試験体においても基部から高さ100mm程度の範囲で座屈し、はらみ出しが生じていたことから、基部及び基部から高さ50mm位置におけるAFRPシートひずみに着目した。図より、AF2-D10試験体では背面側(図－2におけるB面)基部の鉄筋位置にのみ顕著なひずみが観測されている。それは荷重点水平変位約25mmから、またAF2-D13試験体では背面側基部以外の点で荷重点水平変位約30mmから、AFRPシートのひずみが増加し始めることが分かる。図－5には正負交番荷重の荷重－変位履歴に前述のAFRPシートのひずみが増加し始める水平変位を赤破線で示している。図より、AFRPシートのひずみが増加し始める変位は、いずれの試験体においても概ね水平耐力の最大

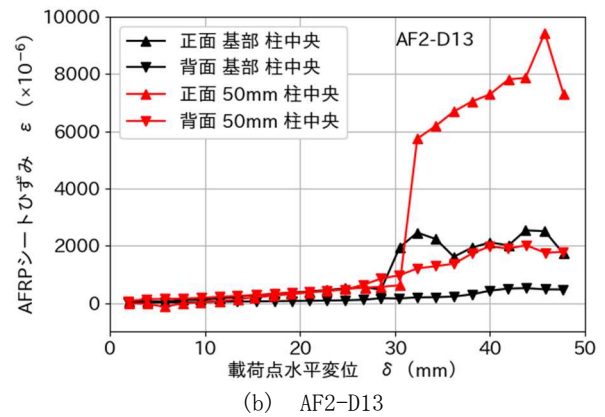
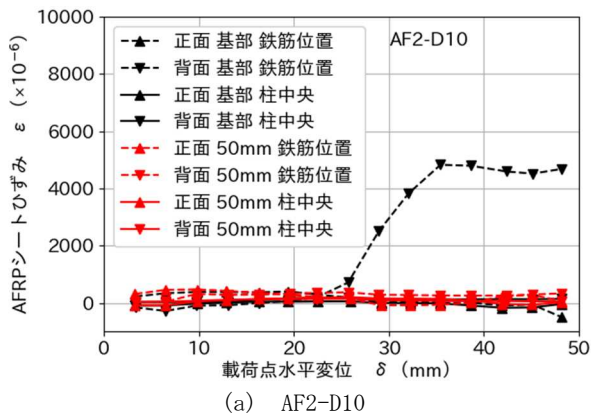


図-4 荷役点水平変位と AFRP シートひずみの関係

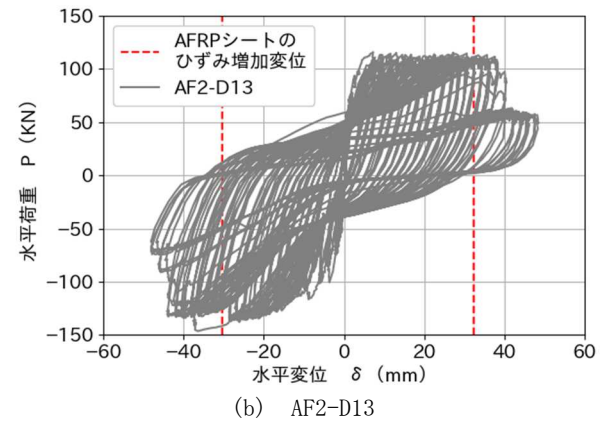
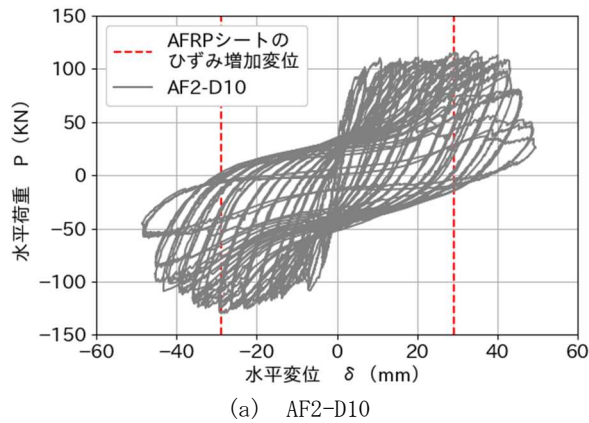


図-5 正負交番荷役試験の履歴と AFRP シートのひずみ増加水平変位

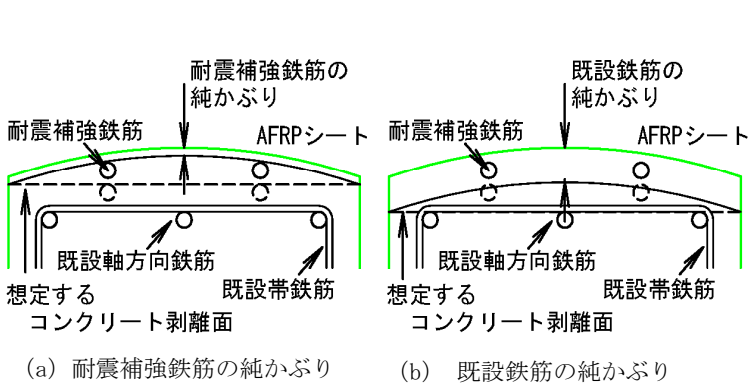


図-6 耐震補強鉄筋のはらみ出しに抵抗する想定かぶり厚

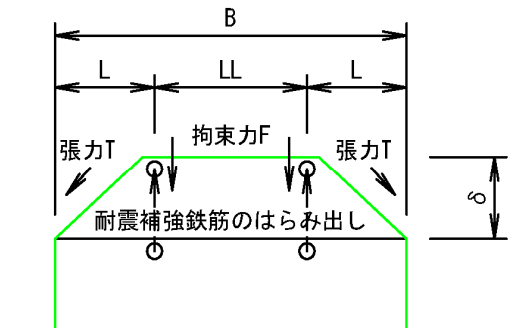


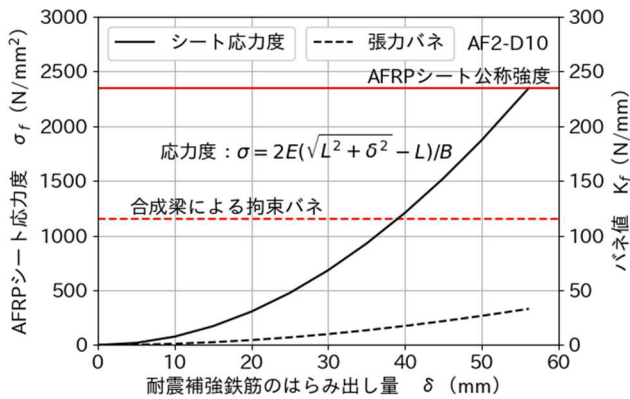
図-7 耐震補強鉄筋のはらみ出しによる AFRP シート張力

値近傍または、耐力低下域の変位と対応することが分かる。このことから、AFRP シートによる拘束効果を考慮したコンクリートの応力度 (σ) - ひずみ (ϵ) 曲線⁵⁾において、基部の圧縮側コンクリートが最大応力 σ_{cc} となるひずみ ϵ_{cc} を過ぎ σ - ϵ 関係の負勾配領域に入ったこと、つまりコンクリートに AFRP シートによる拘束効果が生じる変位領域に達しているものと推察される。

4. 耐震補強鉄筋の塑性座屈解析概要

耐震補強鉄筋の座屈解析⁷⁾は、土木研究所資料(以下、土研資料)で提案されている手法⁹⁾に即し、軸方向鉄筋がコアコンクリート及びかぶりコンクリートのバネで左右から拘束される 2 次元骨組モデルに準じて行った。

本補強法では、かぶりコンクリート表面に AFRP シートを巻き付けているため、宮田らの研究⁷⁾に準じて、かぶりコンクリートと AFRP シートからなる合成梁としてかぶりコンクリート部をモデル化し拘束バネ(以下、合成梁バネ)を設定した。また、耐震補強鉄筋はかぶりコンクリートに埋め込み配置されるため、帯鉄筋による拘束は無視し、かぶりコンクリートの曲げ剛性が耐震補強鉄筋のはらみ出しに抵抗するモデルを設定した。図-6には合成梁バネを設定した際に想定したかぶりコンクリートの剥離面を示している。耐震補強鉄筋のはらみ出しに抵抗するかぶりコンクリートの厚さを耐震補強鉄筋の純かぶり厚(5.24 mm)及び既設軸方向鉄筋のかぶりコンクリート厚(33.65 mm)の2ケースとして解析を行っ



図－8 耐震補強鉄筋のはらみ出し量とAFRPシート
応力度及び拘束バネ値の関係

た結果、後者において解析結果と載荷試験結果の座屈長が概ね対応していた。このことから、本補強法における耐震補強鉄筋は純かぶりをほとんど有さないが、既設鉄筋の純かぶりと同程度の厚さのコンクリートの座屈拘束を受けていることが示唆された。

5. AFRPシート張力によるはらみ出し拘束への影響

前述の図－4に示したように、正負交番載荷試験においては耐震補強鉄筋のはらみ出しにともないAFRPシートにひずみが発生している。よって、AFRPシートには張力が発生していることが推察されることから、そのシート張力の鉄筋のはらみ出し方向成分が前述の合成梁バネに及ぼす影響について検討を行った。ここではAFRPシート張力の影響についてのみ検討するため、図－7に示している鉄筋のはらみ出しに伴いAFRPシートが台形状に変形するモデルにて検討を行った。なお、図中において耐震補強鉄筋間のシート（距離：LL）においても伸びが発生すると考えられるが、ここでは微量量と考えその影響は無視し、式－1によりAFRPシートひずみを算出した。

$$\varepsilon = \frac{2}{B}(\sqrt{L^2 + \delta^2} - L) \quad (\text{式－1})$$

ここで、 ε ：AFRPシートのひずみ、 B ：柱断面幅、 L ：柱断面端部から耐震補強鉄筋までの距離、 δ ：耐震補強鉄筋のはらみ出し量である。

図－8には式－1及び応力－ひずみ関係から算出したPD-AF2試験体諸元における耐震補強鉄筋のはらみ出し量とシート応力度の関係及び、耐震補強鉄筋のはらみ出し量と式－2により算出したシート張力によって発生する拘束バネ（以下、張力バネ）の関係を示している。図にはAFRPシートの公称強度及び、前述の塑性座屈解析で設定した既設鉄筋の純かぶりをを用いて算出した合成梁バネの値もプロットしている。

$$K_f = \frac{F}{\delta} = \frac{T}{\sqrt{L^2 + \delta^2}} = \frac{n_f \cdot t \cdot s \cdot \sigma}{\sqrt{L^2 + \delta^2}} \quad (\text{式－2})$$

ここで、 K_f ：AFRPシート張力による拘束バネ、 F ：AFRPシート張力による鉄筋1本あたりの拘束力、 T ：耐震補強鉄筋のはらみ出しに伴い発生するAFRPシートの張力、 n_f ：AFRPシートの層数、 t ：AFRPシート1層

当りの厚さ、 s ：拘束バネの配置間隔（=10mm） σ ：AFRPシートの応力度である。

図より、AFRPシートの応力度は鉄筋のはらみ出し量の増加に伴いほぼ2次関数的に増加し、はらみ出し量約56mmで公称強度に達することが分かる。また、張力バネは合成梁バネより小さく、特にはらみ出し量が小さい領域ではその差が顕著である。はらみ出し量が増加するとAFRPシートに発生する張力も増加するため、張力バネの値も増加するが、AFRPシートが破断に至るはらみ出し量においても張力バネは合成梁バネの3割程度であった。このことから、合成梁バネに張力バネの与える影響は小さく、塑性座屈解析においては張力バネの影響は無視して問題ないと考えられる。以上より、本補強法における耐震補強鉄筋は、既設鉄筋の純かぶりと同程度の厚さのコンクリートの座屈拘束を受けており、はらみ出し過程においても既設鉄筋と同等の補強効果を有しているものと推察される。

6. まとめ

本研究の範囲内から、得られた知見を示すと、以下の通りである。

- 1) 軸方向鉄筋のはらみ出しによって生じるAFRPシート張力による鉄筋のはらみ出し拘束効果の影響を評価した結果、AFRPシートの伸びによる張力の影響は小さく無視できると考えられる。
- 2) 本補強法における耐震補強鉄筋は純かぶりをほとんど有さないが、既設鉄筋の純かぶりと同程度の厚さのコンクリートの座屈拘束を受けていることが確認できた。

参考文献

- 1) 寺澤貴裕，秋本光雄，西 弘明：埋込み配置した耐震補強鉄筋とAFRPシート巻立て補強を施したRC橋脚の正負交番載荷試験，コンクリート工学年次論文集，pp.937-942，2019.7
- 2) 瀧口将志，池永貴史，大塚久哲：RC柱部材の交番載荷試験における軸方向鉄筋破断評価，土木学会第63回年次学術講演集，部門V，pp.939-940，2008.9
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.3
- 4) 寺澤貴裕，秋本光雄，葛西 聡：埋込配置した耐震補強鉄筋とアラミド繊維シート巻立て補強を施したRC橋脚の正負交番載荷試験，第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.385-390，2019.7
- 5) 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），pp.11-12，1998.1
- 6) 土木研究所：軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に推定手法に関する研究，土木研究所資料第4257号，2013.3
- 7) 宮田秀太，澤田守，中尾尚史，大住道生：巻立て補強された鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価，構造工学論文集，Vol.65A，pp.250-263，2019.3