

論文 埋め込み配置した軸方向鉄筋補強 RC 柱のアラミド繊維シートによる拘束効果に関する実験的検討

寺澤 貴裕*1・葛西 聡*2・小室 雅人*3

要旨 : RC 橋脚の断面寸法や重量を可能な限り変更しない新たな震補強工法の開発を最終目的として、柱コンクリートかぶり部に軸方向鉄筋を埋め込み配置するとともに、アラミド繊維シートによる巻立て補強法を提案し、その効果を実験的に検証した。ここでは、特に埋め込み鉄筋に対するシートの拘束効果に着目した。その結果、1) 軸方向鉄筋のはらみ出しによって生じるシート張力による拘束効果は、塑性座屈解析においては無視できること、2) 提案の補強法における耐震補強鉄筋は、はらみ出す過程において既設鉄筋のかぶり及び帯鉄筋と一体となって挙動しており、既設鉄筋と同等の補強効果を有していることを確認した。

キーワード : 耐震補強, アラミド繊維シート, 鉄筋座屈, 低サイクル疲労, 拘束効果

1. はじめに

既設 RC 橋脚の耐震補強を行う場合には、鉄筋コンクリートや鋼板による巻立て工法が適用される場合が多い。しかしながら、鉄筋コンクリート巻立て工法は、補強後に橋脚の断面寸法が増加するため、高架橋など桁下空間を利用する場合や道路に隣接する橋脚においては、利用空間や建築限界に影響を及ぼすことが懸念される。また、河川橋脚の場合には河積阻害率が大きくなる欠点を有している。さらに、補強後の橋脚重量も増加するため、基礎工への負担増が設計上の課題になる場合もある。そのため、架橋位置や既設構造などへの制約条件から、補強後においても橋脚の断面寸法や重量を可能な限り変えないための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橋脚の断面寸法や重量を可能な限り変えず、橋脚の水平耐力および変形性能を向上させ、かつ経済的な耐震補強技術の開発を目的として、図-1に示す耐震補強工法を提案し、検討を行っている¹⁾。提案の補強法は、橋脚の柱コンクリートかぶり部に水平耐力向上を目的とした軸方向鉄筋（以下、耐震補強鉄筋）をエポキシ樹脂により埋め込み配置し、さらにじん性能向上を目的としてアラミド繊維シートを巻立てる工法である。

これまでに行った小型 RC 橋脚試験体の正負交番載荷試験及び検討結果¹⁾から、提案の補強法においても道路橋示方書・同解説²⁾及び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）³⁾に準拠した設計を行うことで、水平耐力の向上を図ることができることを確認している。しかしながら、軸方向鉄筋が柱基部において座屈後、低サイクル疲労によって破断し終局に至ることも確認されている。軸方向鉄筋の破断

により終局に至る場合には、水平耐力が急激に低下することから、低サイクル疲労破断を回避し、基部コンクリートの圧壊で終局に至るように破壊モードを移行させることが必要である。

著者らの既往の研究¹⁾においては、中村らによる鉄筋単体での低サイクル疲労による破断までの繰返し載荷回数を評価した式⁴⁾を荷重-変位($P-\delta$)関係に拡張し、鉄筋座屈長、鉄筋径、水平変位などをパラメータとした瀧口らの式⁵⁾及びマイナー則による累積損傷度を用いて、提案の補強法における耐震補強鉄筋の低サイクル疲労を評価した。その結果、瀧口らの式及びマイナー則を用いて評価した破断変位（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。このことから、水平耐力の向上に必要として算定した補

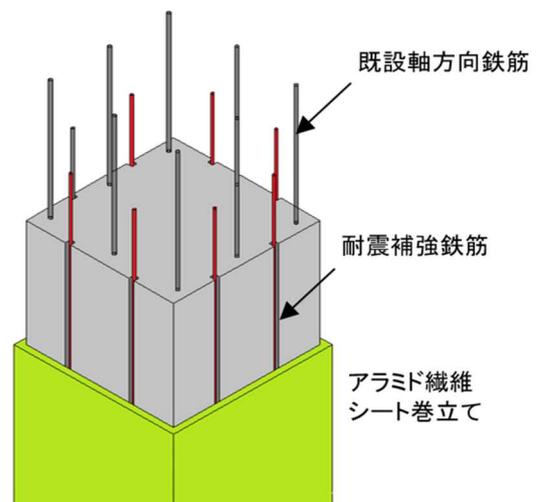


図-1 埋め込み配置鉄筋とアラミド繊維シート巻立てによる耐震補強

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム研究員/室蘭工業大学大学院 博士後期課程 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム上席研究員

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科もの創造系領域 教授 博 (工) (正会員)

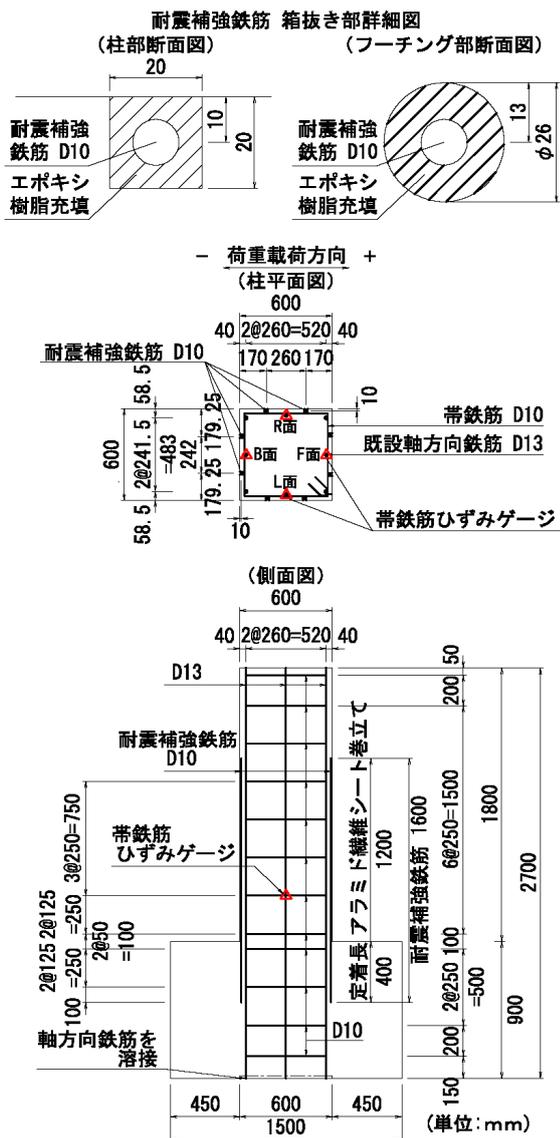


図-2 試験体形状、配筋図

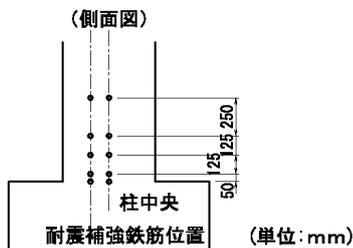


図-3 アラミド繊維シートのひずみ計測位置

強鉄筋に対して低サイクル疲労評価を行うことで、基部コンクリートの圧壊を終局とする最適耐震補強鉄筋量を算定できる可能性が示された。一方で、評価破断変位の計算結果に与える鉄筋座屈長の影響が大きいこと、また提案補強法においてはアラミド繊維シートで拘束された状態における鉄筋の座屈長を精度よく算定評価する必要があることも確認された。そこで、鉄筋の塑性座屈解析を用いて座屈長の算定を試みた結果、提案の補強法にお

表-1 試験体諸元

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

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²⁾に基づく曲げ終局耐力, P_s : 道路橋示方書²⁾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

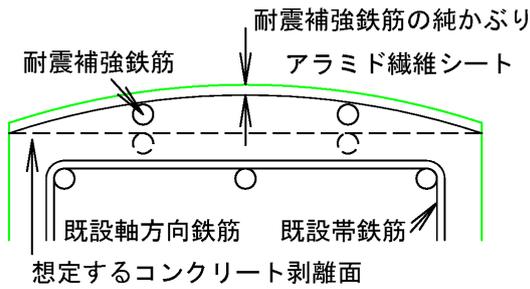
ける耐震補強鉄筋は、柱外側に配置されることから純かぶりをほとんど有していないものの、実際のかぶり厚よりも大きな拘束効果を受けている可能性が示唆された。したがって、鉄筋座屈長を適切に評価するためにはシートの拘束効果の影響を適切に把握する必要があるものと考えられる。

このような背景より、本研究では提案補強法の最適補強鉄筋量を算定するために重要と考えられる耐震補強鉄筋に対するアラミド繊維シートの拘束効果に着目し、検討を行った。

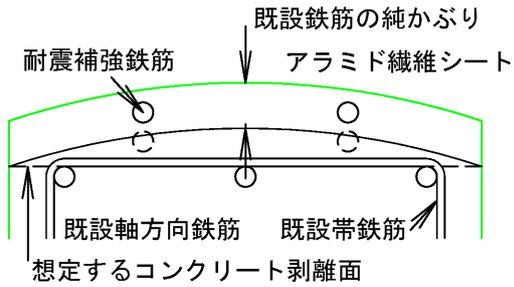
2. 検討に用いた試験体及び既往の検討概要

2.1 試験体概要

検討に用いた試験体は文献1)のAF2試験体である。試験体、正負交番載荷試験の詳細については、文献1)を参照されたい。図-2には試験体の形状、配筋図及び、帯鉄筋ひずみを計測した位置を示している。また、表-1には諸元をそれぞれ示している。柱部の断面寸法は□600×600mm、柱高さは1,800mmの小型RC橋脚試験体である。耐震補強鉄筋は、補強後の水平耐力が補強前の約1.5倍となるように文献2)及び文献3)に準拠して設計し、SD345 D10を柱各面に2本ずつ配筋した。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



ケース a : 耐震補強鉄筋の純かぶり厚



ケース b : 既設鉄筋の純かぶり厚

図-4 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想定厚さ

びフーチング部の円形断面箱抜き部に配置し、エポキシ樹脂により固定した。アラミド繊維シートは、低弾性・高強度タイプのアラミド繊維シート（アラミド 2，目付量 350g/m²）を柱の周方向に 1 層巻き付けた。帯鉄筋のひずみは、基部から高さ 300mm の帯鉄筋の柱各面中央部にひずみゲージを貼付け、柱周方向のひずみを計測した。図-3 にはアラミド繊維シートのひずみを計測した位置を示している。試験体の柱中央及び耐震補強鉄筋位置上のアラミド繊維シートにひずみゲージを貼付け、柱周方向のひずみを計測した。

2.2 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¹⁾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拘束される 2 次元骨組モデルに準じて行った。提案の補強法では、かぶりコンクリート表面にアラミド繊維シートを巻き付けていることから、かぶりコンクリートによる拘束バネは、土研資料に示されているかぶりコンクリートの剥落を考慮した非線形バネではなく、宮田らの手法⁷⁾を参考にした。この手法は、アラミド繊維シート及びかぶりコンクリートの曲げ剛性がともに軸方向鉄筋のはらみ出しに抵抗するものと仮定し、両者からなる合成梁が単純梁として抵抗するとしたものであり、バネ定数 K_{sc} は次式(1)で示されている。

$$K_{sc} = \frac{384E_c I_{sc}}{5nd^3} \quad (1)$$

ここで、 E_c : かぶりコンクリートのヤング係数 (N/mm²)、 I_{sc} : かぶりコンクリートと補強材料（ここでは、アラミド繊維シート）の合成断面からなる断面 2 次モーメント (mm⁴)、 d : 帯鉄筋の有効長 (mm)、 n : 帯鉄筋の有効長で囲まれるブロックに含まれる圧縮側軸方向鉄筋の本数である。

図-4 には前述の宮田らの手法を参考とした抵抗バネ（以下、合成梁バネ）を設定する際に想定したかぶりコンクリートの厚さを示している。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ているため、帯鉄筋による拘束効果は無視し、梁状の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とした。

ここでは、耐震補強鉄筋のはらみ出す際のかぶりコンクリートが剥離する面を、耐震補強鉄筋の純かぶり厚（ケース a: 5.24mm）及び既設軸方向鉄筋の純かぶり厚（ケース b: 33.65 mm）の 2 種類と仮定して座屈解析を行った。その結果、載荷試験結果の座屈長 100mm に対して、解析結果はケース a で座屈長 420mm、ケース b で座屈長 120mm と評価され、後者において解析結果と載荷試験の座屈長が概ね対応したことから、提案の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、座屈によってはらみ出す際には、既設鉄筋の純かぶりと同程度の厚さのコンクリートの拘束を受けている可能性があることが示唆された。また、かぶりコンクリートのみの抵抗バネとアラミド繊維シートを考慮した合成梁バネのバネ定数を比較すると、合成梁バネ定数はかぶりコンクリートのみの抵抗バネの約 1.1 倍であった。このことから、座屈解析におけるかぶりコンクリート抵抗バネに与えるアラミド繊維シート剛性の影響は小さいことが明らかになった。

3. アラミド繊維シートのひずみ

図-5 には正負交番載荷試験における載荷ステップ毎のアラミド繊維シートの周方向ひずみを示している。ここでは、基部から高さ 300mm までのひずみをプロットしている。また、ひずみは耐震補強鉄筋のはらみ出しによりアラミド繊維シートに引っ張りが生じると考えられる載荷方向（正面側では正側載荷時、背面側では負側載荷時）における、各載荷ステップの繰り返し回数 3 回の算術平均とした。図-5 (a) より、正面側（図-2 における F 面）では、耐震補強鉄筋上及び柱中央ともに基部から高さ 300mm にのみ顕著なひずみ変化が確認された。それらは $8\delta_y$ から $9\delta_y$ の載荷時にかけて増加し始め、 $12\delta_y$ で最大となった後、減少に転じていることが分かる。図-5 (b) より、背面側（図-2 における B 面）では、正面側と同様に耐震補強鉄筋上及び柱中央ともに、基部か

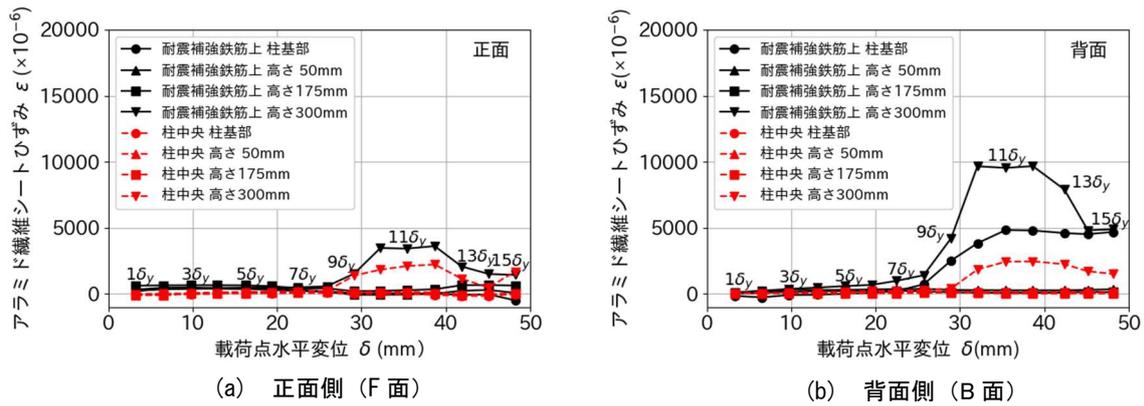


図-5 アラミド繊維シートのひずみ

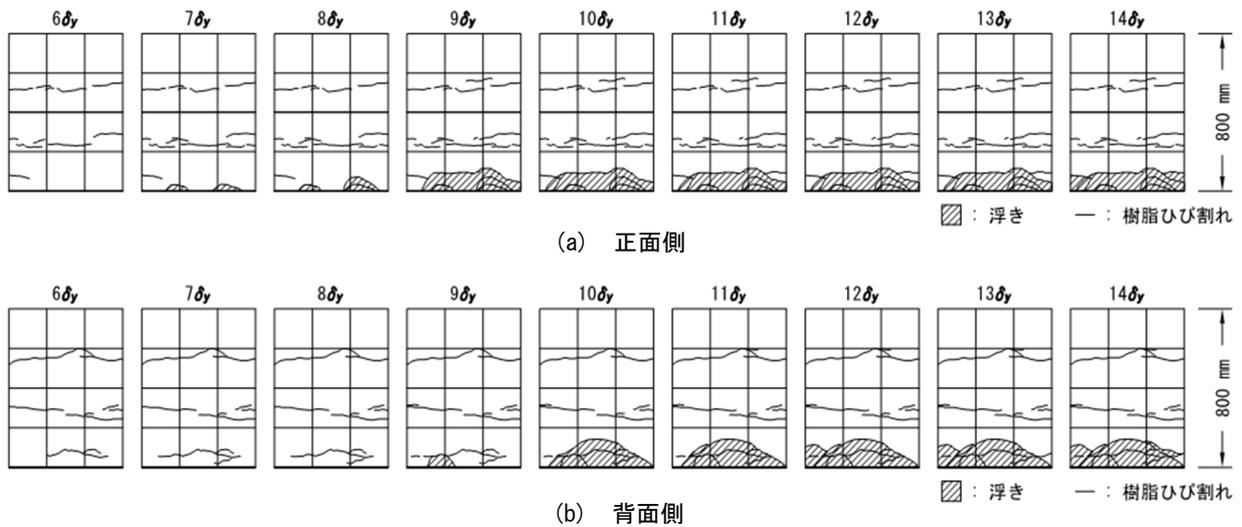


図-6 アラミド繊維シートの損傷・浮き状況

ら高さ 300mm に顕著なひずみ変化が確認できる他、耐震補強鉄筋上の柱基部においても顕著なひずみ変化が確認できる。基部から高さ 300mm のひずみは、荷重ステップ $7\delta_y$ から $10\delta_y$ の荷重時にかけて増加し始め、 $11\delta_y$ または $12\delta_y$ の荷重時に最大となった後、減少に転じている。一方、耐震補強鉄筋上の柱基部のひずみは、荷重ステップ $8\delta_y$ から $9\delta_y$ の荷重時にかけて大きく増加し、 $11\delta_y$ の荷重時に最大となった後、荷重終了までほぼ同程度の値で推移した。

図-6 には柱基部から高さ 800mm までの試験体正面及び背面における荷重ステップ $6\delta_y$ から $14\delta_y$ までのアラミド繊維シートの浮き、含浸樹脂のひび割れ（以下、ひび割れ）の発生状況を示している。図-6 (a) より、正面側においては高さ 250mm 程度及び 500mm 程度に多くのひび割れが発生していることが分かる。また、シートの浮きは $7\delta_y$ 荷重時に耐震補強鉄筋上の基部から発生し、その範囲は $9\delta_y$ 荷重時までには高さ 100mm 程度まで拡大している。その後の荷重ステップでは浮き範囲の拡大は確認できないが、 $14\delta_y$ 荷重時において再度、隅角部に浮きが発生していることが分かる。図-6 (b) より、背面側に

おいては、高さ 80mm 程度、300mm 程度及び高さ 550mm 程度に多くのひび割れが発生していることが分かる。また、シートの浮きは $9\delta_y$ 荷重時に耐震補強鉄筋上の基部から発生し、その範囲は $10\delta_y$ 荷重時までには高さ 150mm 程度まで拡大している。その後は、 $12\delta_y$ 及び $14\delta_y$ 荷重時に隅角部に浮きが発生していることが分かる。

アラミド繊維シートひずみの変化と比較すると、前述の図-5 (a) に示している正面側においてはシートに浮きが発生した高さ 100mm 程度までの領域では、ひずみの変化は確認できなかった。顕著なひずみ増加が見られた基部から高さ 300mm においては、ひび割れは発生したものの顕著なシートの浮きや損傷は確認されていない。図-5 (b) に示している背面側においても高さ 300mm におけるシート状況とひずみの増加傾向は正面側と同様であることが分かる。一方、耐震補強鉄筋上の柱基部においては、荷重ステップ $9\delta_y$ からのシートひずみの増加傾向とシートの浮き発生状況は概ね一致している。このことから、このシートひずみは、耐震補強鉄筋のはらみ出しによってアラミド繊維シートが剥離し、シートに伸びを発生させたことによるものと推察される。

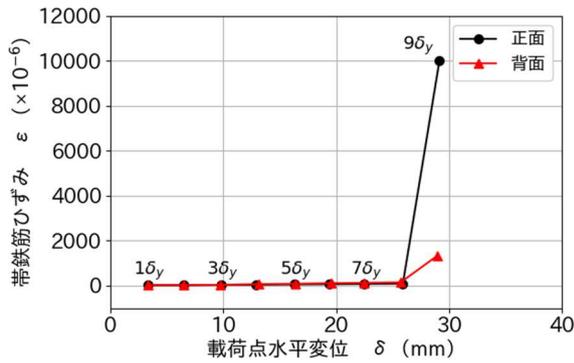


図-7 帯鉄筋のひずみ変化

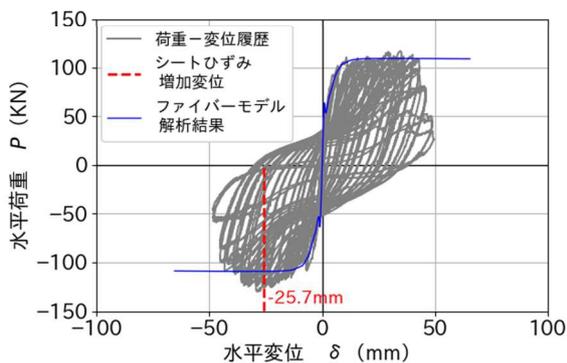


図-8 荷重-変位履歴とアラミド繊維シートひずみの増加変位

4. 帯鉄筋のひずみ

図-7には正負交番載荷試験における載荷点水平変位毎の帯鉄筋ひずみを示している。帯鉄筋のひずみは、図-2に示すように、基部から高さ300mmの位置に貼付したひずみゲージ出力であり、シートひずみと同様に、既設軸方向鉄筋のはらみ出しにより帯鉄筋に引っ張りが生じると考えられる載荷方向（正側載荷では正面側、負側載荷では背面側）における各載荷ステップの繰り返し回数3回の算術平均である。なお、 $10\delta_y$ 以降はリード線の断線が確認されたことより、ここでは $9\delta_y$ までをプロットしている。

図より、帯鉄筋ひずみは、 $8\delta_y$ まではほぼ零の値を示しているものの、 $9\delta_y$ 時に大きく増加している。これは、図-5に示す基部から高さ300mmにおけるアラミド繊維シートのひずみ増加傾向と一致していることから、アラミド繊維シートのひずみは、帯鉄筋のはらみ出しによって生じたものであると推察される。

5. 荷重-変位履歴とひずみ変化の関係

図-8には正負交番載荷の荷重-変位履歴に前述の図-5(b)に示している背面側基部のアラミド繊維シートひずみが増加し始める水平変位（以降、シートひずみ増加変位）($8\delta_y=25.7\text{mm}$)及び、ファイバーモデル解析による荷重-変位関係を併せて示している。図より、シ

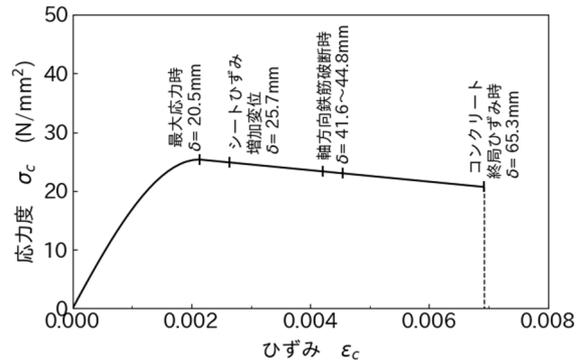


図-9 シートによる拘束効果を考慮したコンクリートの応力度-ひずみ曲線

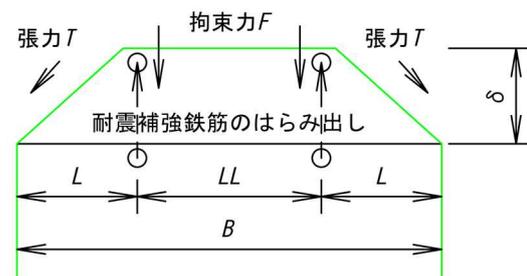


図-10 耐震補強鉄筋のはらみ出しにより発生するシート張力

ートひずみ増加変位は、概ね水平耐力の最大値近傍と対応していることが分かる。また、ファイバーモデル解析結果は荷重-変位履歴の包絡線と特に正側でよく一致していることが分かる。図-9にはファイバーモデル解析でコンクリートに設定したアラミド繊維シートによる拘束効果を考慮した応力度(σ)-ひずみ(ϵ)関係及び、各解析ステップのコンクリートひずみに対応する水平変位を併せて示している。 σ - ϵ 関係で応力度が最大となる水平変位は20.5mmである。前述のシートひずみ増加変位は σ - ϵ 関係の負勾配領域にあり、コンクリートにアラミド繊維シートによる拘束効果が生じている領域に達していることが確認できる。しかしながら、載荷試験においては $13\delta_y \sim 14\delta_y$ (41.6~44.8mm)において軸方向鉄筋の破断により耐力低下が顕在化したため、終局ひずみまでの拘束効果は確認できなかった。

6. シート張力によるはらみ出し拘束への影響

前述したように、正負交番載荷試験において耐震補強鉄筋のはらみ出しにともないアラミド繊維シートにひずみが発生している。よって、アラミド繊維シートには張力が発生していると推察されることから、そのシート張力による鉄筋のはらみ出し拘束バネ（以下、張力バネ）について検討を行った。ここではシート張力の影響についてのみ検討するため、図-10に示している鉄筋のはらみ出しに伴いアラミド繊維シートが台形状に変形する

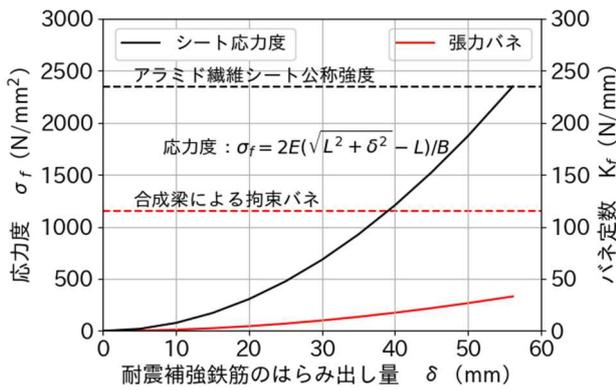


図-1 1 耐震補強鉄筋のはらみ出し量とシート応力度、バネ定数の関係

モデルを用いて検討を行った。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、ここでは微量と考えその影響は無視し、式(2)よりシートひずみを算出した。

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

ここで、 ε ：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-1 1には式(2)及びフックの法則 ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) から算出した検討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 (σ_f) の関係及び式(3)により算出した耐震補強鉄筋のはらみ出し量と張力バネの関係を示している。図にはアラミド繊維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用いて算出した合成梁バネの値も併せて破線で示している。

$$K_f = \frac{F}{\delta} = \frac{T}{\sqrt{L^2 + \delta^2}} = \frac{n_f \cdot t \cdot s \cdot \sigma_f}{\sqrt{L^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

ここで、 K_f ：シート張力による拘束バネ、 F ：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シートの張力、 n_f ：シートの層数、 t ：シート1層当りの厚さ、 s ：拘束バネの配置間隔(=10mm)、 σ_f ：シートの応力度である。

図より、アラミド繊維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、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割程度であることが確認される。

一方、塑性座屈解析に使用する、軸方向鉄筋の座屈長に影響を与えるバネ定数は、はらみ出し初期の値で評価することから、塑性座屈解析において張力バネの与える影響は小さく、その影響は無視して問題ないと考えられ

る。以上のことから、耐震補強鉄筋は、はらみ出す過程において前述の図-4 ケース b に示す既設鉄筋のかぶり及び帯鉄筋と一体となって挙動していると考えられることから、純かぶりをほとんど有していないが、耐震補強鉄筋のみが単独ではらみ出すことはなく、既設鉄筋と同等の補強効果を有していると考えられる。

7. まとめ

本研究では、提案の補強法におけるアラミド繊維シートによる耐震補強鉄筋に対する拘束効果に関する検討を行った。本研究の範囲で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アラミド繊維シート張力による鉄筋のはらみ出し拘束効果を評価した結果、はらみ出し量が小さい領域においてシート張力による拘束効果はかぶりコンクリートによる拘束効果に比べて小さく、塑性座屈解析においてはシート張力の影響は無視できる。
- (2) 提案の補強法における耐震補強鉄筋は、はらみ出す過程において既設鉄筋のかぶり及び帯鉄筋と一体となって挙動していることから、既設鉄筋と同等の補強効果を有している。

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, Vol.41, No.2, pp.937-942, 2019.7
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002
- 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), 1998
- 4) 土木学会コンクリート技術シリーズ 48: コンクリート構造物の耐震性能照査技術－現状と将来展望－, pp.36-37, 2002
- 5) 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
- 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
- 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