

論文 炭素繊維シートと鋼板のせん断付着特性に関する研究

LE PHUONG TUNG^{*1}・日野 伸一^{*2}・金田 一男^{*3}・田崎 賢治^{*4}

要旨：海上部に架設している橋梁橋脚の耐震補強工法としては、多数の工法が適用されている。本研究は炭素繊維シートと機械継手を用いた鋼板による混合巻立て工法を一つの橋脚の耐震補強に適用する前提で、その基本となる炭素繊維シートと鋼板の継手部のせん断付着強度に関する試験計画、試験結果およびその適用性を示すものである。また、本論文では、炭素繊維シートと鋼板のせん断付着特性を把握する目的で、その付着部における力学的な分析および有限要素解析を行い、試験結果との比較検討を行った。更に、炭素繊維シートと鋼板による混合巻立て工法を設計できるために付着長と引張耐力の関係を考察した。

キーワード：炭素繊維シート、鋼板、機械継手、せん断付着強度、有限要素法、耐震補強、橋脚

1. はじめに

RC 橋脚の耐震補強工法として従来から鉄筋コンクリート、鋼板および炭素繊維シートによる巻立て工法等がある^{1),2),3)}。しかし、これらの工法のコンクリートの打設、鋼板の溶接および炭素繊維シートの貼付等は、陸上施工を前提条件としている。水中部および地下水位の高い箇所の RC 橋脚の耐震補強にこれらの工法を適用する場合、止水工が必要となり、特に水中にある RC 橋脚を補強する場合は、止水工と同時に仮栈橋工等も必要である。

一方、海上に架設している橋梁の橋脚回りに止水工や仮栈橋工を施工することは容易ではなく、仮に施工可能であっても多大な費用が必要であり、海環境への負荷も増加する。そのために、幾つかの止水工が不要で、かつ水中施工可能な耐震補強工法が開発された^{4),5)}が、施工の際に仮栈橋工や施工架台の建設が依然として必要である。一方、機械継手を用いた鋼板巻立て工法⁶⁾は、台船による水中施工が可能であるため、仮栈橋工や施工架台の工事費が高い箇所において、経済性に有利である。

しかし、機械継手を用いた鋼板巻立て工法を気中部まで適用する場合、経済性が炭素繊維シートによる巻立て工法より劣る。また、補強範囲が高くなると縦横両方向に機械継手が必要となり、経済性のみではなく施工性も悪くなる。

以上を背景に、著者らは炭素繊維シートと機械継手を用いた鋼板による RC 橋脚の混合巻立て補強工法を提案し、実際の橋梁耐震補強設計に応用した。本論文では、以上で提案した混合巻立て補強工法のうち、炭素繊維シートと鋼板の継手部を研究対象とし、地震時において生じる引張力を伝達できるように、炭素繊維シートと鋼板のせん断付着強度に関する試験計画、試験結果、有限要

素法(以下：FEM 解析と呼ぶ)と試験結果の妥当性検討およびその適用性について示す。

2. 試験概要

2.1 混合巻立て工法の概要

炭素繊維シートと機械継手を用いた鋼板による RC 橋脚の混合巻立て補強工法のイメージは図-1 に示す。即ち、この工法は機械継手を用いた鋼板による巻立て工法を、水中部から設計水位に余裕高(1/2 波高+飛沫の影響+継手長)を加算した気中部まで適用させ、それより上の気中部には炭素繊維シートによる巻立て補強を行うものである。

機械継手を用いた鋼板巻立て工法⁶⁾は、橋脚周りの補強鋼板を図-2 に示すような機械継手を用いて併合させ、現場(水中)での溶接が省かれるものである。

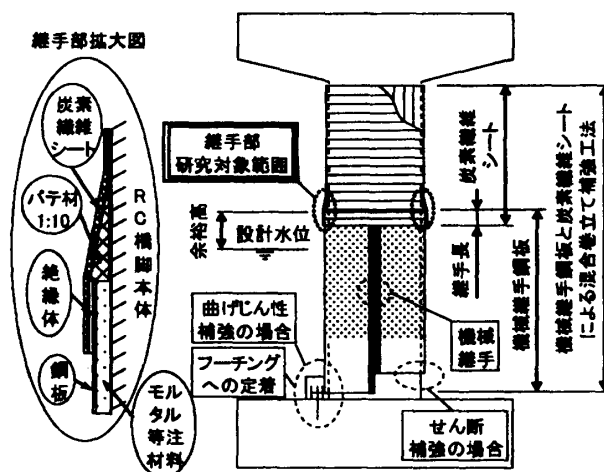


図-1 RC 橋脚の混合巻立て工法イメージ図

*1 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 (株) ホープ設計 技術管理部構造部長 工修 (正会員)

*4 大日本コンサルタント(株) 技術部保全計画室主幹 工博 (正会員)

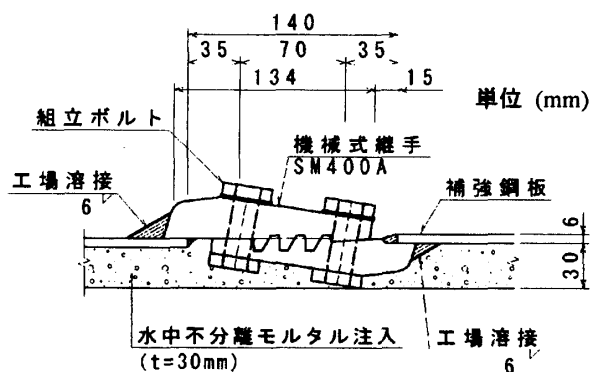


図-2 機械継手断面図



写真-1 試験機および試験体設置状況

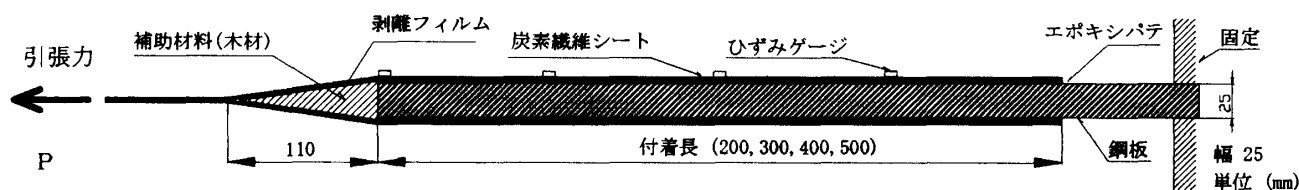


図-3 かみ合わせ鋼板と炭素繊維シートの継手部試験体概要図

また、炭素繊維シートによる巻立て工法は、海上の気中部においても吊足場による施工が可能であり、経済性も優れている。しかし、このような混合巻立て工法は、地震時の橋脚曲げ変形に伴い、補強鋼板に生じる引張力を炭素繊維シートまで伝達する必要がある。また、この引張力は図-1 に示す継手長範囲内に生じる鋼板と炭素繊維シートとのせん断付着強度に左右されるため、現段階では未だ十分に研究されていたとは言えない。

過去の研究^{7,8)}では、継手長が最大 50mm までの試験を行い、鋼板と炭素繊維シートとのせん断付着強度は、付着長さが長くなるほど小さくなる傾向があると指摘されている。しかし、実際の RC 橋脚の曲げ耐震補強に必要な炭素繊維シートと鋼板とのせん断付着強度が大きく、過去の試験結果のみでは不十分である。

補強時に生じる段差の擦付け勾配 1:10 を考慮したくさび状の補助材料(木材)を挿入し、また、試験時の偏心力を無くすために鋼板の両面に炭素繊維シートを貼付ける方法を採用している。なお、くさび状の補助材料の表面に付着力を生じさせないように剥離フィルムを挿入した。継手部に関しては鋼板両面の定着範囲にプライマーを塗布し、プライマー硬化後に更に 3mm 厚エポキシパテを塗布して炭素繊維シートを接着し、室温にて 7 日間以上養生した後に実験を行った。また、炭素繊維の表面にひずみゲージを一定の間隔で貼り付けた。

表-1 は試験体の概要、表-2 は材料特性および写真-1 は試験機および試験体設置状況をそれぞれ示す。

なお、表-1 中の FTS-C1-30 と FTS-C1-60 は炭素繊維シートの型番であり、30 と 60 はそれぞれ炭素繊維シート

2.2 試験体の計画および載荷試験の概要

実際の RC 橋脚の耐震補強工事は、定着部のせん断付着強度を確保するために、機械継手を用いた鋼板巻立て工法の施工を先行させ、その外側に炭素繊維シートを定着させる。図-1 の継手部拡大図に示すように、鋼板表面と既設橋脚のコンクリート表面に鋼板厚や注入材の厚みによる段差が生じるため、鋼板と炭素繊維シートとの軸心が一致しない問題がある。更に、炭素繊維シートと鋼板の間に電位差による電流が流さないように絶縁体を挿入する必要がある。このような RC 橋脚の耐震補強の実態を考慮した上、載荷偏心の影響を少なくするために参考文献 3) の付着強度試験を参考し、図-3 に示すような炭素繊維シートと鋼板との定着部の試験体を考案した。この試験体は、鋼板の頭部に実際の RC 橋脚の鋼板巻立て

表-1 試験体概要

試験体 No	鋼板表面 下地処理	付着長 (mm)	シート層数 (片側)		試験体数
			FTS-C1-30	FTS-C1-60	
B-200	サンドブラスト処理	200	1層	2層	3
B-300	(74~105 μm)	300	-	4層	3
B-400		400	-	5層	3
B-500		500	-	6層	3

表-2 材料特性

鋼板	引張強度 (N/mm ²)	450
	弾性係数 (N/mm ²)	2.1x10 ⁵
	ポアソン比	0.3
炭素繊維シート	引張強度 (N/mm ²)	3400
	弾性係数 (N/mm ²)	2.45x10 ⁵
	ポアソン比	0.2
	設計厚さ mm	0.333
	繊維目付 (g/m ²)	600
エポキシパテ	弾性係数 (N/mm ²)	2.1x10 ³
	ポアソン比	0.2
	引張せん断強度 (N/mm ²)	16

300 と 600g/m² 目付を意味する。また、表-2 中の材料特性値は公称値である。

表-1 に示すように、試験体の付着長が 200～500mm までの 4 タイプ、各タイプの試験体数が 3 体である。また、試験体に使用した鋼板、炭素繊維シートおよびエポキシパテの材料特性は表-2 に示すとおりである。

載荷試験には、RUE300kN 型万能試験機を用い、試験機および試験体の設置状況を写真-1 に示した。また、図-3 に示すように炭素繊維シートの端部を引張ることによって炭素繊維シートに引張力を与え、それと鋼板との接着境界面のせん断剥離破壊に至るまで変位制御で試験を行った。試験速度は JSCE-E541-2000「連続繊維シートの引張試験方法(案)」に準拠し、0.5～1.2mm/分とした。試験する際に試験体に与えた荷重と変位の関係、炭素繊維シートのひずみ分布および最大破断荷重を計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 試験体の破壊モード

写真-2 は、引張試験完了後の試験体の破壊状況を例として示す。試験機から炭素繊維シートに載荷速度 0.5～1.2 mm/分に相当する荷重を与えたが、最初、先端部付近のエポキシパテと鋼板とのせん断応力が集中的に増加し、引張荷重の増加に伴い先端部から末端部に向かってせん断応力も次第に増大する分布を示すことが後述の 3.3 から推測される。更に、引張荷重を増加すると、せん断応力度が限界値に達し、大きな破断音に伴ってエポキシパテが完全に鋼板から離れ、その時の引張荷重が最大となり試験も終了した。なお、試験時と試験完了後の観察から、炭素繊維シートとエポキシパテとのせん断破壊およびエポキシパテ層のせん断破壊が確認できず、全ての試験体が写真-2 に示すようなエポキシパテと鋼板との間の剥離型破壊モードとなっている。

3.2 荷重—変位関係

図-4 は、載荷荷重と試験体の軸方向変位(以下：変位と呼ぶ)との関係を示す。なお、試験結果はいずれも各タイプ 3 体の平均値として考察している。同図から分かるように、試験体 B-400 と B-500 の荷重-変位関係がほぼ直線であるが、試験機と試験体の掴み不良と思われる原因で、試験体 B-200 と B-300 においては、最初の段階で荷重が増加せずに変位のみが増加する現象が現れている。しかし、変位が 5 mm を超えた時点で荷重-変位関係が線形関係となり、本研究では荷重-変位関係の初期勾配を直接的に利用しないため、試験結果への影響はないと判断される。B-200 および B-300 における初期変位域を除いては、付着長の差異に関わらず、荷重—変位曲線の勾配はほぼ同等であるといえる。



写真-2 試験完了後の試験体状況

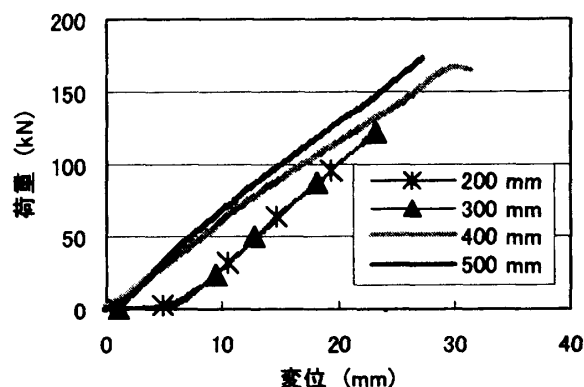


図-4 荷重—変位関係

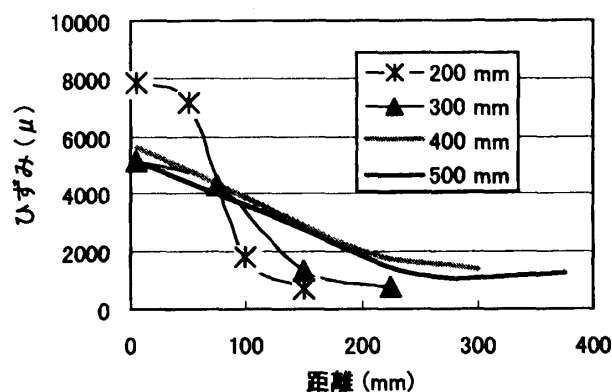


図-5 最大荷重時のひずみ分布図

3.3 最大荷重時のひずみ分布

図-5 に最大荷重時の各タイプ試験体における炭素繊維シートのひずみと試験体の先端から注目する位置までの距離との関係を示す。なお、ひずみゲージ貼付位置は先端から 5mm の位置が各試験体で共通であり、残りは先端から付着長の 1/4、1/2 と 3/4 の位置とした。

図-5 から分かるように、試験体 B-200 の炭素繊維シートの先端部におけるひずみが 8000 μ に近く、他の試験体と比較して 1.5 倍以上の結果となっている。また、先端部より 50mm 離れた位置からひずみが急速に減少している。この結果から、付着長の最も短い試験体 B-200 のせん断付着応力度は先端部に集中していることがわかる。一方、他の試験体の試験結果を観察すると、先端部では大きなひずみが確認され、先端部からの距離の増大に伴って、そのひずみが穏やかに減少する傾向である。更に、試験体 B-300 の場合では、先端部より 100mm 離れた位置からひずみが急速に減少しているが、試験体 B-400、B-500 では 250 mm 程度までほぼ一定の減少率で減少し

ている。これは各試験体の付着長の大小によって、炭素繊維シートに生じる最大応力度の発生位置が異なる可能性があると考えられる。

以上の試験結果から、付着長の短い試験体ほどせん断付着応力度が先端部に集中しやすい傾向があり、付着長が長くなることによって先端部における応力集中が緩和されるものと考えられる。

3.4 最大荷重および平均付着強度

最大荷重を炭素繊維シート幅で除したものを単位幅当たり最大荷重と定義する。参考のため別途目的で行った付着長 50～150 mm の同様試験結果^{7,8)}と今回の試験結果を合わせ、図-6 に炭素繊維シート単位幅当たりの最大荷重と付着長の関係を示す。試験結果により、付着長が増加するとともに炭素繊維シートの単位幅当たり最大荷重がほぼ直線的に増大することがわかった。

最大荷重を付着面積で除したものを平均付着強度と定義し、それを用いて付着効果を評価する。図-6 において、平均付着強度を単位幅当たり最大荷重-付着長関係の線形近似直線($y=ax+b$)の勾配として示す。これより、試験結果による線形近似直線の勾配、すなわち平均付着強度は 6.42 N/mm^2 となった。

図-7 に図-6 と同じ試験結果の最大荷重時の平均付着強度と付着長の関係とその対数近似曲線($y=a\log(x)+b$)を示す。なお、これらの近似は、試験結果を最も精度よく定式化できる形を採用した。付着長が増加するとともに平均付着強度が 16.8 から 7.4 N/mm^2 に低下することが確認できた。付着長を大きくすることにより、炭素繊維シートとエポキシの界面に作用する平均付着強度は低減することがわかった。なお、この付着強度はあくまでも貼付したシート全面幅で最大荷重を除した平均値であり、応力分布不均等性によって付着長を大きくしても負担する荷重に限界がある。

4. 試験結果と解析結果との比較検討

4.1 剥離荷重の算定

炭素繊維シートと鋼板の接着部の応力状態を解明し、剥離が発生する時に作用する引張力を評価するために炭素繊維シートと鋼板の接着部の微小要素を取り出した。図-8 に試験体の微分要素にはたらく力のつり合いを示す。この力のつり合いを用いて次の炭素繊維シートの応力分布式とエポキシパテのせん断応力分布式が求められる⁹⁾。

炭素繊維シートの引張力分布式

$$P_{cx} = P \left((1-\eta) \cosh \alpha x - \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \sinh \alpha x + \eta \right) \quad (1)$$

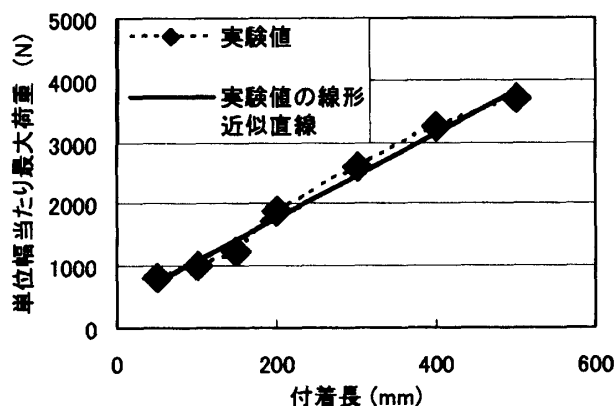


図-6 単位幅当たり最大荷重-付着長の関係

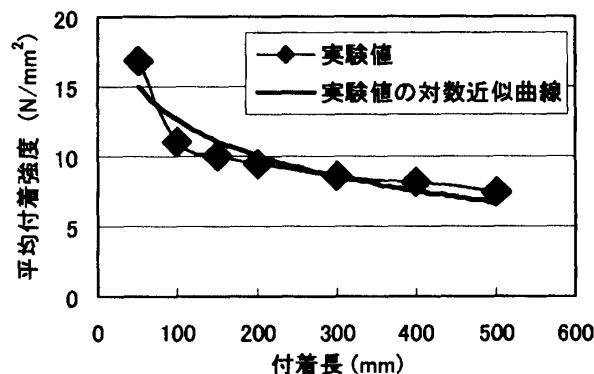


図-7 平均付着強度-付着長の関係

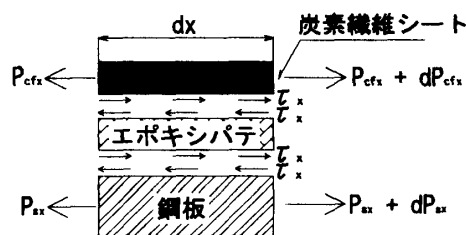


図-8 微分要素の力釣り合い図

パテエポキシのせん断応力分布式

$$\tau_x = \frac{P\alpha}{b_d} \times \left\{ \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \cosh \alpha x - (1-\eta) \sinh \alpha x \right\} \quad (2)$$

ただし

$$\alpha^2 = \frac{G_s}{t_s} \left(\frac{1}{E_d b_d t_d} + \frac{1}{E_s b_s t_s} \right) b_d \quad \eta = \frac{\beta}{\alpha^2}$$

$$\beta = \frac{G_s}{t_s} \frac{b_d}{E_s b_s t_s} \quad G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$$

x : 試験体の先端から注目する位置までの距離(mm)

P_{cx} : 先端から x 位置での炭素繊維シートの引張力 (N/mm^2)

τ_x : 先端から x 位置でのエポキシパテの付着せん断応力 (N/mm^2)

P : 試験体の先端に作用する引張力(N)

L : 炭素繊維シートの付着長(mm)

E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性係数(N/mm²)

E_s : 鋼板の弾性係数(N/mm²)

E_a : エポキシパテの弾性係数(N/mm²)

t_{cf} : 炭素繊維シートの厚さ(mm)

t_s : 鋼板の厚さ(mm)

t_a : エポキシパテの厚さ(mm)

G_a : エポキシパテのせん断弾性係数(N/mm²)

b_{cf} : 炭素繊維シートの幅(mm)

b_s : 鋼板の幅(mm)

荷重が増加するとともに炭素繊維シートと鋼板の境界面であるエポキシパテ層に発生する付着応力も増加する。この付着応力がエポキシパテの引張せん断強度に達したとき、はじめて炭素繊維シートが剥離する。その剥離は鋼板の先端部から末端部へ進展する。今回はエポキシパテの引張せん断強度を 16 N/mm² (表-2) とし、付着応力がこの引張せん断強度を超えた時点における荷重を剥離荷重とする。この計算方法により、付着長 200~500 mm 試験体に対する剥離荷重を算定するとそれぞれ 408, 589, 674, 747 N となった。

一方、「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」³⁾では、先端部に初めて炭素繊維シートが鋼板から剥離した時の荷重を剥離荷重と定義している。剥離荷重は式(3)により求める。

$$P_h = \sqrt{G_f \times 2b_{cf}^2 \times E_{cf} \times t_{cf}} \quad (3)$$

G_f : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm): 界面剥離が生じるのに必要な単位付着面積当たりのエネルギー量

P_h : 剥離荷重 (N)

文献 3)では、 $G_f=0.5$ を規定している。この計算方法を用い、付着長 200~500 mm 試験体に対する剥離荷重を求めるとそれぞれ 404, 571, 639, 700 N となった。

以上の2つ算定方法による剥離荷重の計算値と実験による最大荷重の比較を図-9に示す。せん断応力式による結果と界面剥離エネルギーによる結果にはきわめて良い一致がみられた。前者の計算方法は、全ての材料を完全弾性体として力の釣合いと変形の合理性を基に、炭素繊維シートと鋼板の付着の挙動を連続的に表せる方法であり、後者の計算方法は、剥離条件を基に炭素繊維シートと鋼板の付着挙動を剥離時点だけに表せる方法である。

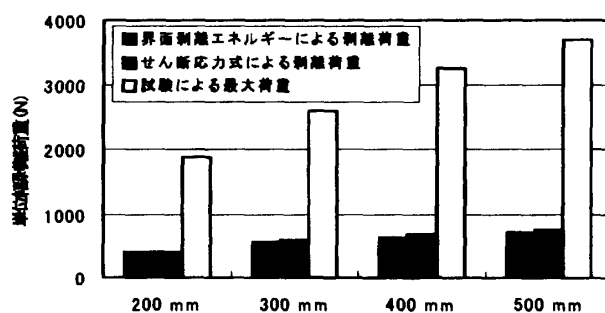


図-9 剥離荷重計算と実験の最大荷重

また、本試験では、最大荷重の試験値と剥離荷重算定値の比が 4.53~5.28 となり、かなり安全側の評価となっている。式(3)では界面剥離破壊エネルギー G_f は 0.5 としたが、この値は連続繊維シートとコンクリートの付着の剥離荷重を求めるための設計用値であり、本試験のような連続繊維シートと鋼板の付着についての適用性に対する界面剥離破壊エネルギーを適正検討する必要がある。

4.2 FEM 解析

試験体の接着部の炭素繊維シートの主応力分布を再現するために FEM 解析を行った。解析試験体は図-10に示すように補助材料の勾配を考慮した上、要素分配してモデル化した。試験体の対称性を考慮し、上半分を解析対象とした。すべての要素は 4 節点四角平面応力要素を使用した。図-10に示すように、鋼板要素、炭素繊維シート要素、鋼板と炭素繊維シートの間に位置するエポキシパテ要素を設けた。なお、これらの要素は完全弾性体として扱い、その材料特性値は表-2に示すとおりである。要素の最小寸法は 0.2 mm であり試験体の先端に位置し、要素寸法は試験体の端末方向に向かって次第に大きくなる。本解析は土木学会³⁾が定義する接着界面のせん断剥離を対象とし、炭素繊維シートと鋼板の相対挙動の解析を行った。

4.3 解析結果と試験結果との比較検討

図-11に剥離荷重時における各タイプ炭素繊維シートの軸方向応力度を実験結果、FEM による解析結果および 4.1に求めた炭素繊維シートの引張力分布式(1)による計算応力度と比較したものである。付着長 200 mm の試験体を除いて、他の試験体の解析結果と応力分布式に

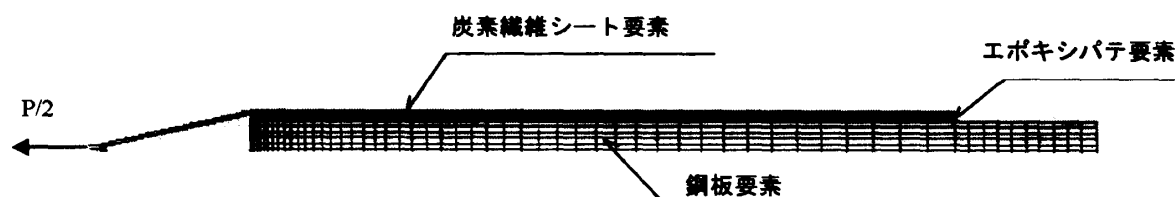


図-10 解析モデル

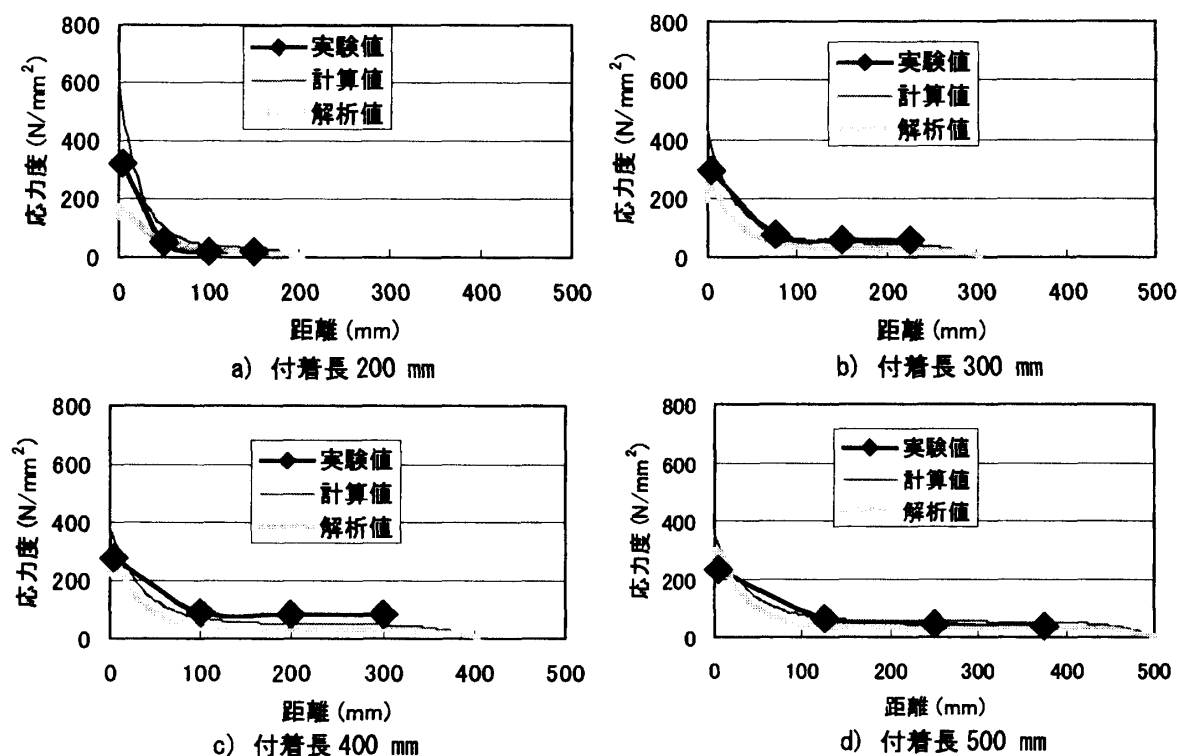


図-11 剥離荷重時の炭素繊維シート応力分布

よる計算結果および実験結果がよく一致している。したがって、解析モデルが適切だと考えられる。これらの結果から、炭素繊維シートに作用する応力度については、試験体の先端から 100 mm までの間では他の区間に比べて非常に大きな応力集中が見られた。グラフに示すように 100 mm 以降の区間における炭素繊維シート応力の急激な低下が表現できた。しかし、FEM 解析では、応力分布の把握を目的としたため、最大荷重に対する評価はできていない。これについては今後の課題としたい。

5. まとめ

本論文では、炭素繊維シートと鋼板のせん断付着特性を実験的および解析的に考察し、その結果は以下に示す。

(1) 付着長が 100 mm の範囲では、単位幅あたりの最大荷重は付着長の増加にともないほぼ直線的に増加し、その勾配すなわち平均付着強度は 6.42 N/mm^2 となることがわかった。ただし、付着長が短い場合には初期すべりの影響を留意する必要があると思われる。

(2) 土木学会に示された界面剥離破壊エネルギー式を用いて算出した最大荷重は、本論文に示す試験結果をかなりの程度過小評価し、剥離荷重の試験値と計算値の比が 4.53~5.28 という高い安全率を示した。今後、炭素繊維シートと鋼板の付着強度評価に適用できる界面剥離破壊エネルギーの検討が必要である。

(3) 炭素繊維シートが鋼板から剥離する前の状態を FEM 解析や応力分布式で再現することができ、今後、こ

れらの手法によるせん断付着強度の評価が可能と考えられる。

参考文献：

- 1) 社団法人 日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料，1997.8
- 2) 阪神高速道路公団保全施設部：RC 橋脚耐震補強設計・施工要領(案)，1997.7
- 3) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.7
- 4) 例えば：社団法人 道路保全技術センター：道路保全・建設技術審査証明報告書，プレキャストパネルによる橋脚の水中耐震補強工法，PRISM 工法，(技審証第 0013 号)，2002.8
- 5) 例えば：NETIS：登録番号 QS-980057-A，PC コンファインド工法
- 6) 例えば：社団法人 道路保全技術センター：道路保全・建設技術審査証明報告書，機械継ぎ手を用いた鋼板巻立て工法，(技審証第 0008 号)，2002.2
- 7) 田中良典，杉山哲也：炭素繊維シートの基本的物性，第 51 回土木学会年次学術講演会講演梗概集，1996.10
- 8) 財団法人 土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン(案)，2002.7
- 9) 岳尾弘洋：CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol 20, No 1, pp.431-436, 1998