

## 樹脂接着による炭素繊維シートと鋼板の付着挙動検討

張 広鋒<sup>1</sup>・星隈 順一<sup>2</sup>・堺 淳一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博（工）（独）土木研究所構造物メンテナンス研究センター 研究員（〒305-8516 つくば市南原 1-6）

<sup>2</sup>正会員 博（工）（独）土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員（〒305-8516 つくば市南原 1-6）

<sup>3</sup>正会員 博（工）（独）土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員（〒305-8516 つくば市南原 1-6）

### 1. はじめに

連続繊維シート（以下、FRP）を主要補強材とする鉄筋コンクリート（RC）橋脚の耐震補強技術は、補強によって死荷重の増加が少なく、またハンドリングの面からも施工に優れる等のメリットがあるため、河川橋などのように施工や工期等の制約条件の多い現場への適用が期待できる。ただし、FRPシートは、引張強度が高いが、破断ひずみが小さく伸び性能が低いため、RC橋脚の基部のように曲げ耐力を向上させて、かつ高い変形性能が要求される部位の耐震補強には適用することが困難と考えられる。そこで、著者らは、炭素繊維シート（CFRP）を主要補強材としつつ、地震時に塑性ヒンジとなる橋脚基部については鋼板巻立てを併用した工法を考案し、耐震補強技術構築のための検討を進めてきている<sup>1),2)</sup>。

図-1に、提案している補強工法のイメージ図を示す。この工法は、塑性ヒンジとなる基部の補強には伸び性能の高い鋼板による鋼板巻立て工法、塑性ヒンジとならない躯体部の補強には軽量で引張強度の高いCFRPによる巻立て工法を用い、鋼材とCFRPのそれぞれの力学特性を生かす併用工法である。補強のメカニズムとしては、アンカーボルトと鋼板の組み合わせによって基部の曲げ耐力・じん性補強を行い、鋼板を介して基部アンカーボルトによる曲げ耐力の増加分を躯体部に巻き立てたCFRPに負担させることにより、橋脚全体の耐震性能を向上させるものである。ここで、鋼板とCFRPの接合部は、施工性を配慮し、樹脂を用いて接着することとしている。このため、CFRPと鋼板の接着接合部が新たな弱点部とならないよう、また、所定の基部の曲げ耐力が十分に発揮できるようにするために、CFRPと鋼板間の接着を確保することが重要である。

本研究では、本補強工法におけるCFRPと鋼板の接着接合部の設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、CFRPと鋼板の付着性能を把握するため

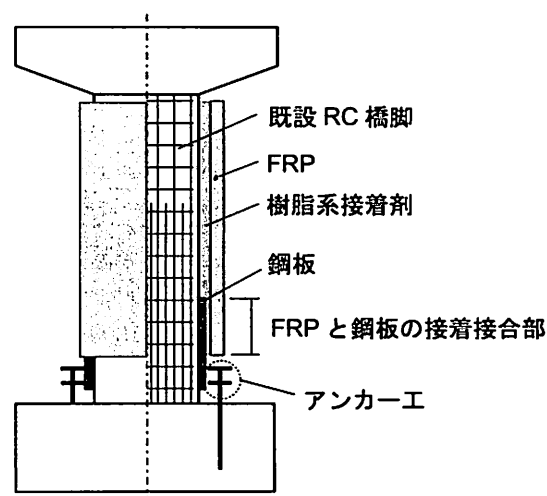
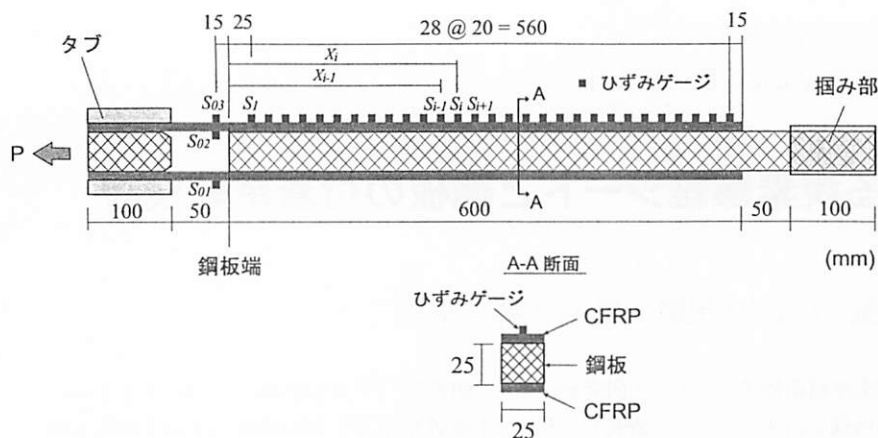


図-1 提案の補強工法のイメージ図

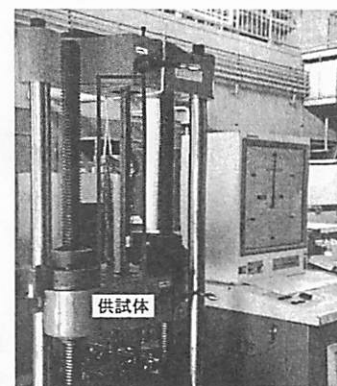
の実験的検討およびその数値解析的検討を行った。ここでは、一方向引張力を受ける場合における付着界面の力学挙動を実験的に検討した上、三次元有限要素法を用い、実験結果から求めた界面の付着応力-すべり関係や有効付着長の妥当性検討を数値解析的に試みた。本論文は、引張実験結果について概説するとともに、数値解析手法の概要および検討結果を報告するものである。

### 2. 実験概要

図-2に、本研究に用いた供試体の概要図を示す。供試体は、断面25mm×25mmのSS400圧延鋼材の両面にCFRPを接着して製作したものである。接着範囲は600mmとした。2面のうちの1面のCFRP上には、20mm間隔でひずみゲージを設置した。実験では、接着層数を1～4に変化させた4ケースを設け、各ケースに対してそれぞれ3体を実施した。表-1に供試体の一覧を示



(a) 供試体



(b) 実験実施状況

図-2 供試体概要および実験方法

表-1 供試体の一覧

| 実験<br>ケース | 接着長<br>(mm) | 片側接着<br>層数 | 供試体数                  |
|-----------|-------------|------------|-----------------------|
| 1層供試体     | 600         | 1層         | 3体 (No.1, No.2, No.3) |
| 2層供試体     | 600         | 2層         | 3体 (No.1, No.2, No.3) |
| 3層供試体     | 600         | 3層         | 3体 (No.1, No.2, No.3) |
| 4層供試体     | 600         | 4層         | 3体 (No.1, No.2, No.3) |

表-2 材料特性の一覧

| 材料         | 項目                           | 実験値                   |
|------------|------------------------------|-----------------------|
| CFRP       | 目付量 (g/m <sup>2</sup> )      | 600                   |
|            | 設計厚さ (mm)                    | 0.333                 |
|            | 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )    | 2.45×10 <sup>5</sup>  |
|            | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )    | 3,400                 |
| エポキシ<br>樹脂 | 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )    | 2.202×10 <sup>3</sup> |
|            | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )    | 71.8                  |
|            | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )    | 47.0                  |
|            | 引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 17.6                  |

す。表-2に、CFRPと樹脂の材料特性の一覧を示す。

引張実験は、図-2に示すように、300 kN 万能試験機を用いて行った。荷重速度は0.5～1.0 mm/minとし、CFRPが全面剥離するまで荷重を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 破壊状況

供試体の両付着界面の破壊形態を調べるために、実験では、いずれの供試体に対しても両面のCFRPが全面に剥離するまで荷重した。実験終了後における付着界面の破壊状況を観察した結果、概ね2種類の破壊形態を確認した。一つは、樹脂とCFRP間に剥離が生じ、樹脂が鋼板側に付着したままで全面剥離に至った破壊形態、もう一つは、樹脂と鋼板間に剥離が生じ、樹脂がCFRP側に付着したままで全面剥離に至った破壊形態である。本実験の結果は、殆どの供試体は、樹脂とCFRP間の剥離によって全面剥離に至った。

#### (2) 荷重-変位関係

図-3に、例として各実験ケースのNo.1供試体の荷重と鋼材端におけるCFRPの変位関係（以降、単に荷重-変位関係）を示す。これらの結果は、いずれが、片面のCFRPが完全に剥離した時点までの結果である。それ以降は、荷重が急激に低下し、ひずみ値の変動も大き

くなるが、本研究の検討目的に照らし、図-3には示していない。なお、ここに示す変位とは、鋼板端におけるCFRPの変位とし、ひずみを積分して計算した値である。

また、後述の考察の便宜上、図には、剥離開始時□、剥離範囲が第3～5番目のゲージまで進行した時点△、剥離範囲がおおよそ200、300、400、500mmまで進行した時点②～⑤、および最大荷重時ⓧを示している。ここで、CFRPの剥離の開始は、図-2に示すように、ひずみゲージ $S_1$ の値を用い、 $S_{02}$ と $S_{03}$ の平均値と比較することによって判定することとした。すなわち、 $S_1$ のひずみ値は、 $S_{02}$ と $S_{03}$ の平均値と同値もしくは近い値（同値とならない場合）となった時点剥離開始時とした<sup>3)</sup>。時点△は、鋼板端から第3～5番目のゲージにおいて、剥離が判定しやすいゲージを対象とし、そのゲージまでに剥離が進行した時点とした。これは、後述の付着応力-すべり関係を検討するために、剥離がある程度に進行した時点かつひずみ値の変動が未だ大きくならない時点の結果を得るためである。第3番目と第5番目のゲージの鋼板端からの距離は、それぞれ65 mmと105 mmである。一方、時点②～⑤については、指定位置にある $S_i$ ゲージのひずみ値が、 $S_{i-1}$ と同程度の値となった時点とした。剥離の進行に伴い、ひずみ値の変動が大きくなり、剥離範囲を正確に判定することが困難となる。こ

[P] 剥離開始時      [1] 剥離範囲：鋼板端から第3～5番目のゲージまで  
 [M] 最大荷重時      [2]～[5] 剥離範囲：鋼板端からおおよそ 200, 300, 400, 500 mm

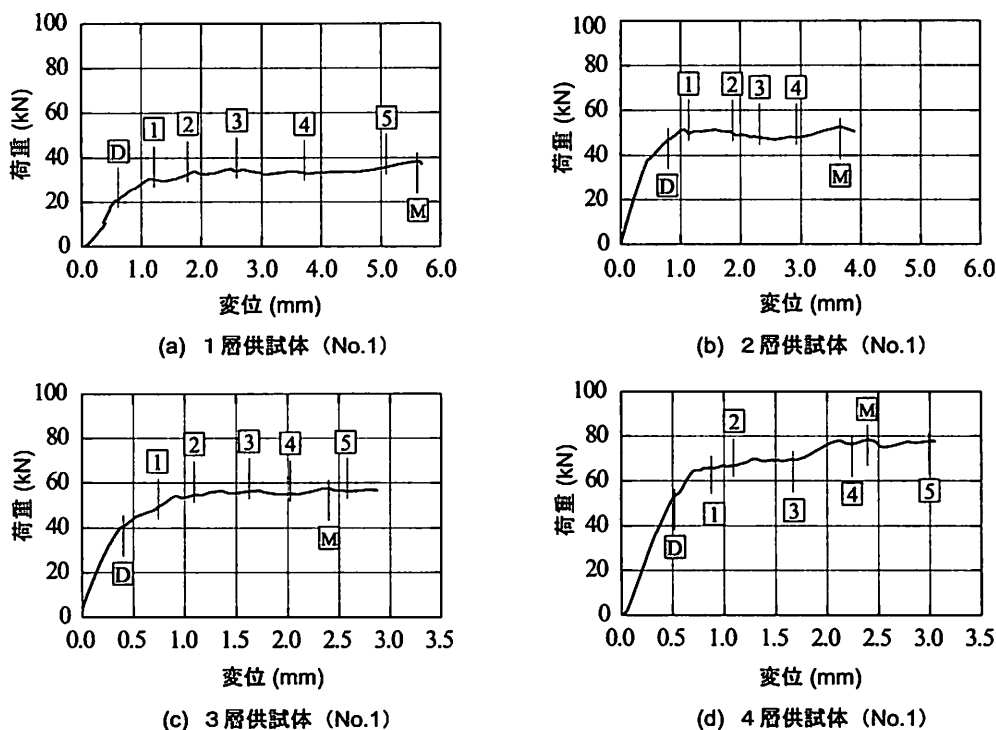


図-3 荷重-変位関係

ここに示す時点[2]～[5]は、あくまでも剥離進行範囲の一つの目安として用いた。

図-3より、いずれの供試体においても、剥離開始時付近より曲線の剛性勾配が明瞭に低下していることが見られる。剥離開始後も、荷重の増加があるが、剥離範囲がおおよそ100mmまで進行した変位時点[1]付近からは、殆ど荷重が増加しなくなり、ほぼ同程度の耐力を維持したままでCFRPの全面剥離に至った。なお、(b)図に示す2層供試体の場合は、ひずみを計測した側のCFRPシートの剥離範囲が500mm程度に達する前に反対側のCFRPが完全に剥離したため、時点[5]を示していない。

### (3) CFRPのひずみおよび界面の付着応力

図-4に、各実験ケースのNo.1供試体に対して、図-3に示す各々の変位時点および荷重が20kNになった時点におけるCFRPのひずみ分布、界面の付着応力の分布および付着応力-すべり関係を示す。ここで、荷重が20kNになった時点は、剥離が生じる前のひずみ分布を示すための目安荷重として示しており、いずれの供試体も剥離が未だ生じていない荷重レベルである。

荷重20kN時では、 $S_{03}$ ゲージのひずみ値が最も大きく、定着部に向かって一方的に下がる分布形状を示す。剥離開始時では、 $S_1$ ゲージのひずみ値が $S_{03}$ と同値とな

る。その後における各時点の結果を見ると、変位レベルの増加に伴い、剥離領域が徐々に掴み部側にシフトしていく傾向が分かる。剥離した区域では、ひずみ値の変動があるが、概ね同程度の値を示している。

図-4に示す界面の付着応力は、CFRPのひずみを用い、式(1)より求めた。なお、計算では、ひずみゲージ間を直線分布としている。

$$\tau(x) = \frac{d\sigma(x)}{dx} \cdot t = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \cdot E_f \cdot t \quad (1)$$

式中の $E_f$ と $t$ はCFRPの弾性係数と厚さである。いずれの供試体の結果より、付着応力が発生した領域は、概ね三角形分布となり、変位レベルの増加に伴って掴み部側にシフトしていくことが分かる。

また、式(1)により求めた付着応力を縦軸とし、CFRPの鋼板に対するすべり量を横軸として付着応力-すべり関係を求めた。図より、各結果間のばらつきが大きいことが分かる。ここで、文献4), 5)を参考にして、付着応力-すべり関係を図-5に示すバイリニアモデルと仮定し、 $\tau_u$ 、 $\delta_1$ および $\delta_u$ は、3体分の試験結果の平均値より求めることとした。平均の取り方としては、 $\tau_u$ 、 $\delta_1$ を求める際には剥離開始時と変位時点[1]の平均、 $\delta_u$ を求める際には変位時点[1]のみの平均とした。その理由は、剥離開始時では、鋼板端における付着応力が未だゼロまで軟化し



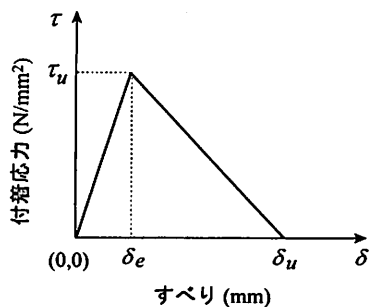


図-5 付着－すべり関係

表-3 付着応力  $\tau_u$ , すべり量  $\delta_e$ ,  $\delta_u$  の一覧

| 実験<br>ケース | $\tau_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\delta_e$<br>(mm) | $\delta_u$<br>(mm) |
|-----------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1層供試体     | 14.7                             | 0.11               | 0.30               |
| 2層供試体     | 17.3                             | 0.14               | 0.29               |
| 3層供試体     | 17.0                             | 0.14               | 0.28               |
| 4層供試体     | 20.3                             | 0.14               | 0.23               |

表-4 解析ケースの一覧

| 解析<br>ケース | 接着<br>層数 | 接着長さ<br>(mm) | 接着長さの決定<br>方法 |
|-----------|----------|--------------|---------------|
| 1-1       | 1層       | 600          | 実験供試体と同じ長さ    |
| 1-2       | 1層       | 100          | 有効付着長の範囲の上限値  |
| 1-3       | 1層       | 80           | 有効付着長の範囲の下限値  |
| 2-1       | 2層       | 600          | 実験供試体と同じ長さ    |
| 2-2       | 2層       | 160          | 有効付着長の範囲の上限値  |
| 2-3       | 2層       | 100          | 有効付着長の範囲の下限値  |
| 3-1       | 3層       | 600          | 実験供試体と同じ長さ    |
| 3-2       | 3層       | 180          | 有効付着長の範囲の上限値  |
| 3-3       | 3層       | 120          | 有効付着長の範囲の下限値  |
| 4-1       | 4層       | 600          | 実験供試体と同じ長さ    |
| 4-2       | 4層       | 200          | 有効付着長の範囲の上限値  |
| 4-3       | 4層       | 140          | 有効付着長の範囲の下限値  |

ていないため、 $\delta_u$  を求めることができないためである。表-3に、上述の方法より求めた各実験ケースの  $\tau_u$ ,  $\delta_e$  および  $\delta_u$  の値を示す。

一方、図-4に示す付着応力の分布をひずみ分布と照らし合わせると、付着応力が発生する領域は、ひずみ値が増加し始める位置から完全に剥離した位置までの範囲となることが分かる。これらの結果より、ある荷重レベルにおいて、付着抵抗に寄与する接着範囲は限定的となり、この範囲を超える接着部分は付着抵抗に寄与しないことが言える。そこで、この範囲の長さを有効付着長と定義し、本検討では、剥離発生時 ④、変位時点 ②～④に対して有効付着長を調べた。ここで、変位時点 ⑤と最大荷重時では、剥離範囲は接着範囲の端部付近まで進行し、付着応力がゼロにならない場合が多いため、こ

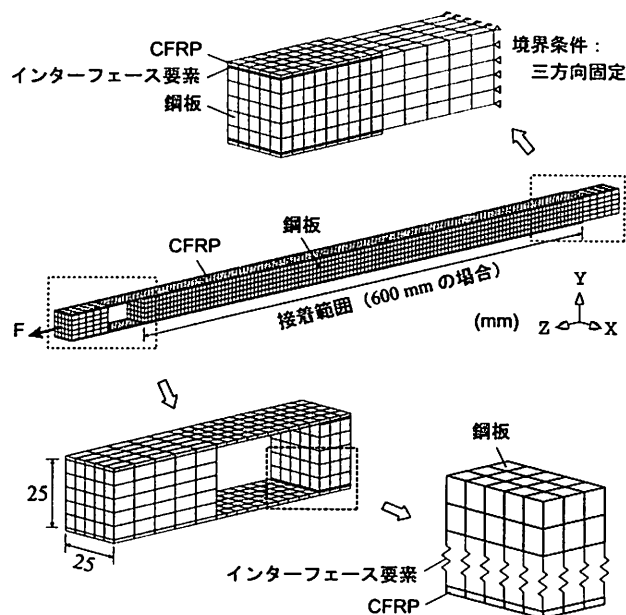


図-6 解析モデル

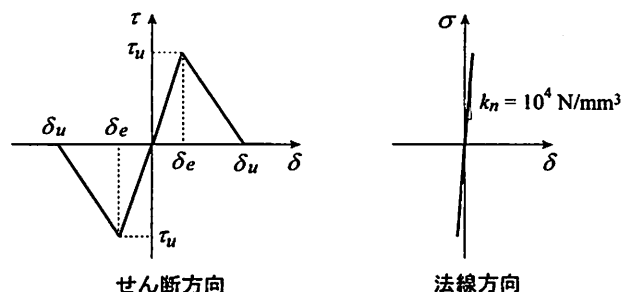


図-7 インターフェース要素に適用した応力－相対変位関係

これらの結果を対象外とした、ゲージ間隔 (20mm) の整数倍で有効付着長を整理した結果、1層の場合は 80～100mm, 2層の場合は 100～160mm, 3層の場合は 120～180mm, 4層の場合は 140～200mm となった。接着層数が多いほど、有効付着長が長くなる傾向が見られる。また、荷重－変位関係と合わせて考察すると、CFRPの接着長さが有効付着長以上確保されていれば、接着接合部の耐荷性能は接着層数のみに影響されることが考えられる。

#### 4. 数値解析的検討

三次元有限要素法に基づいた数値解析を用い、実験結果から求めた付着応力－すべり関係や有効付着長の妥当性を解析的に検討した。解析では、実験時と同様に接着層数を 1～4 層に変化させた 4 シリーズを解析対象とし、各シリーズに対して接着長さを変化させた 3 つの解析ケースを設けた。表-4に、解析ケースの一覧を示す。ここで、接着長さを変化させた 3 つの解析ケースについては、接着長さを 600mm とした解析ケースは、実験

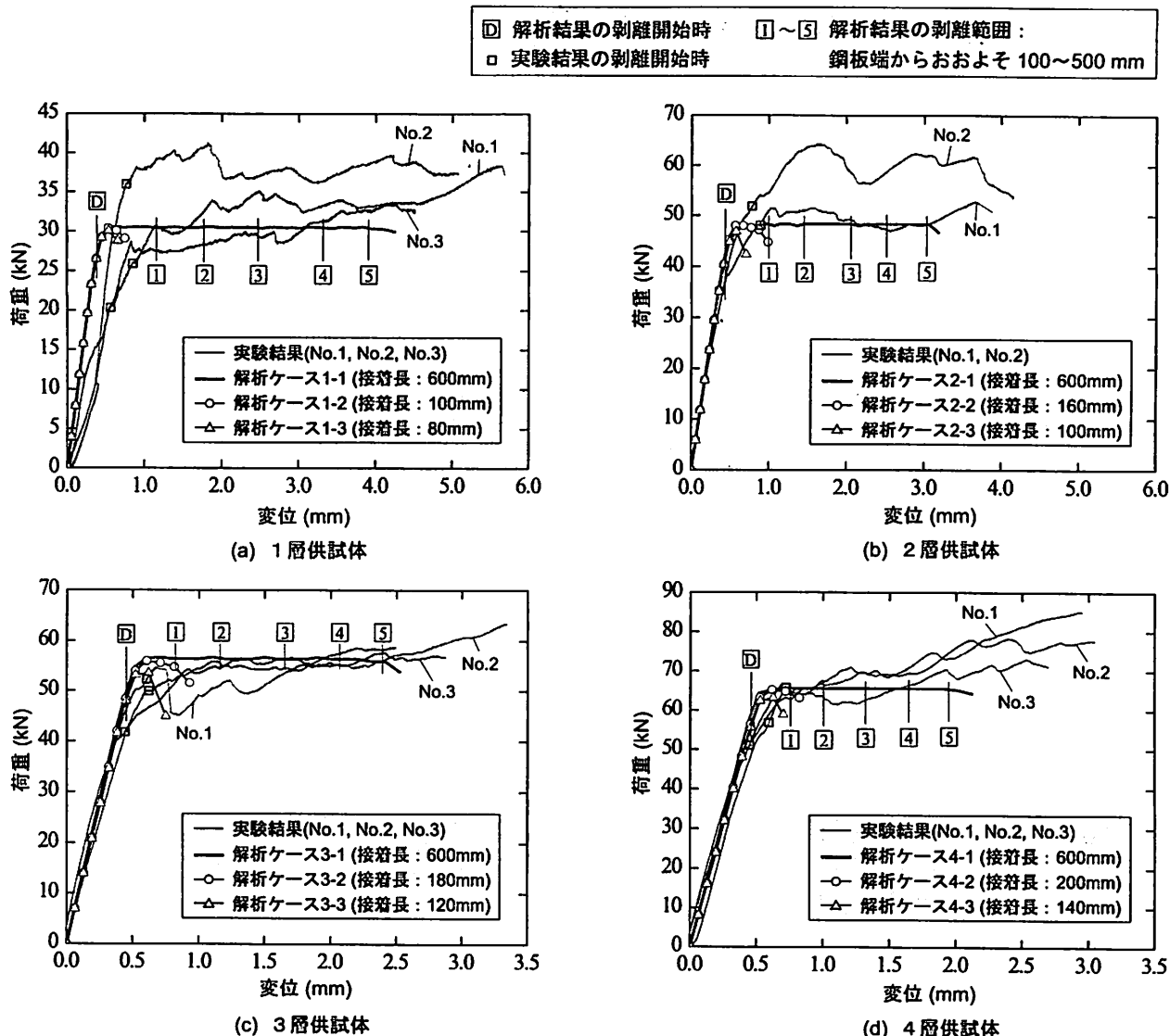


図-8 荷重-変位関係に関する比較

結果から求めた付着応力-すべり関係の妥当性を検討するためのものである。他の2解析ケースは、接着長さは、それぞれ、実験結果から求めた有効接着長の範囲の上限値および下限値とし、接着長さの影響を検討するためのものである。なお、解析では、構造解析用汎用コード DIANA 9.3<sup>6)</sup>を用いた。

#### (1) 解析方法

本研究では、CFRPと鋼板の付着界面の力学挙動を詳細に検討可能とするため、離散ひび割れ手法を用いて付着界面をモデル化することとした。具体的には、鋼板とCFRPの要素間に予めインターフェース要素(interface element)<sup>6)</sup>を配置し、インターフェース要素に適切な応力-相対変位関係を適用することにより、鋼板とCFRPの要素間の相対変位およびそれに応じて生じる付着応力、両者間の剥離をモデル化することである。図-6に、接着長を600mmとした解析ケースの解析モデルを例として示す。解析では、ソリッド要素を用いて鋼板とCFRP

をモデル化し、両者間の付着界面の全面にわたってインターフェース要素を配置した。

図-7に、インターフェース要素に適用した応力-相対変位関係を示す。せん断方向(図-6のZとX方向)には、図-5に示す付着応力-すべり関係を適用し、 $\tau_u$ 、 $\delta_1$ および $\delta_u$ の値は、接着層数に応じて表-3に示す結果を適用した。法線方向(図-6のY方向)には、鋼板とCFRPの両者間の分離が生じないように、剛性勾配 $k_n$ を有する線形関係と設定した。ここで、解析の安定性を考慮し、 $k_n = 10^4 \text{ N/mm}^3$ とした<sup>6)</sup>。また、鋼板とCFRPの材料モデルについては、実験時では鋼板の降伏やCFRPの破断等が発生していないため、解析では両方とも弾性体とした。

なお、解析では、強制変位により荷重を与え、CFRPの剥離が全接着区間に至るまで解析を行った。

#### (2) 解析結果および考察

図-8に、荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果

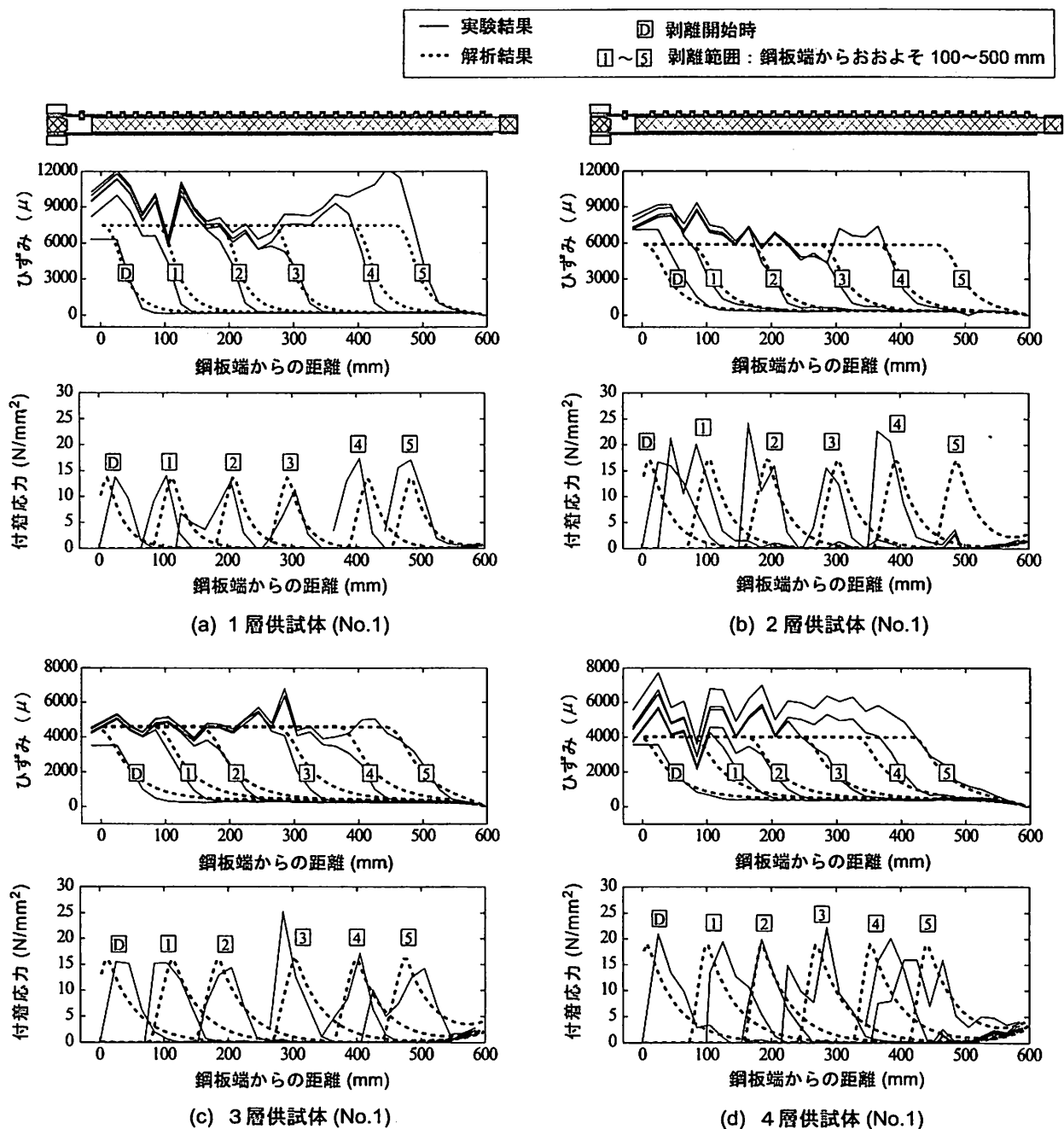


図-9 CFRPのひずみ分布に関する比較

との比較を示す。これらの解析結果は、いずれもCFRPの全面剥離が生じる直前のステップまでの結果である。また、図-3と同様に、図には、接着長を600mmとした解析結果におけるCFRPの剥離開始時D、CFRPの剥離が鋼板端からおおよそ100~500mmの範囲までに進行した時点②~⑤を示している。ここで、解析結果のCFRPの剥離開始時は、鋼板端におけるCFRPと鋼板間のすべり量が図-5に示す $\delta_e$ に達し、付着応力が軟化し始める時点とした。

接着長を600mmとした各解析ケースの解析結果より、剥離開始時までは、1層接着の場合は、実験結果より高い剛性を示すが、2~4層接着の場合は、実験結果と良く一致していることが伺える。剥離が生じた後において

は、荷重が僅かに増加した後、荷重が増加しなくなり、CFRPの剥離が全接着区間に至ったまでに同程度の荷重レベルを維持した。一方、剥離が生じた後の実験結果は、供試体間のばらつきが大きく、同一供試体においても接着区間に沿って荷重の変動が大きく現れている。ただし、3章にも説明したように、剥離がある程度の範囲に進行した後、荷重が増加しなくなる傾向がある。剥離が生じた後の解析結果は、実験結果の傾向を再現できたと考えられる。

また、接着長さを有効付着長の範囲の上下限值とした両解析ケースにおいて、接着層数にかかわらず、剥離開始時までは、両解析ケースとも、接着長を600mmとした解析ケースと同様な曲線を示すことが分かる。剥離が

生じた後においては、両解析ケースとも荷重の増加があったが、接着長さを有効付着長の範囲の下限值としたケースの最大荷重は、接着長を 600mm とした解析結果を下回っている。しかしながら、剥離開始時までに着目すると、CFRP の接着長さを有効付着長の範囲の下限值としても、接着長を 600mm とした場合と同程度の耐荷性能を有することが言える。また、接着長さを有効付着長の範囲の上限値とした解析ケースの最大荷重は、接着長を 600mm とした解析ケースと同程度の値を示す。これより、CFRP の接着長さをこの上限値より長くしても最大荷重が増えないことが分かる。これは、3 章に述べた実験結果より得られた結論と同様である。また、これらの解析結果より、本実験で求めた有効付着長は、接着層数に応じて接着接合部が有すべき耐荷性能を保有させるための最短接着長さとして有効であることが数値解析的に確認できた。

図-9 に、CFRP のひずみ分布および界面の付着応力分布に関する解析結果を実験結果との比較を示す。ここで、各実験ケースの No.1 供試体の実験結果を例として図に示している。ひずみ分布の比較図より、剥離した区間のひずみ値や剥離の先端部におけるひずみ分布に関する解析結果は、実験結果と大略一致していることが分かる。また、界面の付着応力の分布を見ると、解析結果は実験結果の三角形分布を概ね再現できたと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、鋼板と CFRP を併用する RC 橋脚の耐震補強工法において、その要素技術となる CFRP と鋼板の付着性能を把握するための実験的・数値解析的検討を行った。本研究で得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

- 1) CFRP と鋼板の接着接合部に有効付着長が存在する。有効付着長より長く接着しても、接着接合部の耐荷性能が増加しないことが実験的・数値解析的に分かった。有効付着長は、接着層数が多いほど長くなる傾

向がある。本研究の範囲内では、目付量  $600\text{g/m}^2$  の CFRP を 1, 2, 3 および 4 層を接着した場合の有効付着長は、それぞれ、80~100mm, 100~160mm, 120~180mm および 140~200mm となっている。

- 2) CFRP と鋼板の付着界面における付着応力-すべり関係をバイリニアモデルと仮定し、実験結果より各パラメータの値を整理した。本研究で整理した付着応力-すべり関係を適用した数値解析は、実験結果の荷重-変位関係や CFRP のひずみ分布を概ね再現できた。また、整理した付着応力-すべり関係を含めた本研究の解析手法は、FRP シート-鋼板接着接合部の耐力評価に適用可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 張 広鋒, 運上茂樹: 主鉄筋段落し部を有する RC 橋脚の耐荷性能グレードアップ補強工法の一検討, 第 12 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.47-52, 2009.1.
- 2) 張 広鋒, 星隈順一, 堺 淳一: 炭素繊維シートと鋼板による RC 橋脚の耐震補強とその効果, 土木技術資料, Vol. 51, pp.20-23, 2009.12.
- 3) 張 広鋒, 星隈順一, 堺 淳一: RC 橋脚の耐震補強に用いる FRP-鋼板接着接合部の付着挙動, 構造工学論文集, Vol. 56A, 2010.3 (投稿中) .
- 4) Xia, S.H. and Teng, J.G.: "Behaviour of FRP-to-steel bonded joints", *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS 2005)*, Hong Kong, 2005, pp.411-418.
- 5) Fawzia, S., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. and Rizkalla, S.H.: "Preliminary bond-slip model for CFRP sheets bonded to steel plates", *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2006)*, Miami, USA, 2006.12
- 6) DIANA User's Manual (9.3), TNO DIANA BV.