

# 論文 側方筋を有する T 型 RC 梁の曲げ耐力評価に関する数値解析的検討

小室 雅人<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、圧縮側フランジ部のコンクリートが拘束効果を受ける T 型 RC 梁の耐荷性状を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、応力-ひずみ関係の異なる 2 種類の断面分割法および三次元弾塑性有限要素解析を実施し、実験結果との比較によりその妥当性に関する検討を行った。その結果、(1) 鉄筋の塑性硬化を考慮し、コンクリートの終局圧縮ひずみを適切に設定することにより、断面分割法を用いて耐荷性状を概ね推定できること、(2) コンクリートに分布ひび割れを適用し、鉄筋を埋め込み鉄筋要素でモデル化した有限要素解析は、実験結果の荷重-変位関係等を精度よく再現できること等が明らかになった。

**キーワード:** T 型 RC 梁, 耐荷性状, 拘束効果, 断面分割法, 有限要素法

## 1. はじめに

一般に曲げが卓越する RC 梁の耐荷性状を評価する手法の一つとして、断面分割法（あるいはファイバーモデル）がある。この手法は、部材断面を中立軸に平行に分割し、それぞれの分割要素に対して応力とひずみの関係および分担面積を与えることにより、簡易に部材の非線形特性を考慮することができる特徴を有している。また、同手法は曲げ破壊型の RC 梁の終局耐力を精度よく評価可能であることから、現在実務にも広く用いられている。

一方、この手法はせん断補強筋などによる拘束効果を適切に考慮することができない。そのため、RC 橋脚などの柱部材等に同手法を適用する場合には、それらの拘束効果をコンクリートの応力-ひずみ関係に反映させて、解析を行う必要がある<sup>1)</sup>。

RC 梁部材においても、上縁コンクリートの圧壊を防止するために、圧縮側断面を一部拡幅するような T 型断面梁の場合には、圧縮側フランジ部のコンクリートは横拘束筋等によって拘束効果を受ける。したがって、このような T 型 RC 梁の場合に対して、断面分割法を適用しその耐荷性状を適切に評価するためには、応力-ひずみ関係にコンク

リートの拘束効果を反映させる必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では圧縮側フランジのコンクリートが拘束効果を受ける T 型 RC 梁の耐荷性状を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的として、断面分割法および有限要素法を用いた三次元弾塑性数値解析を行い、別途実施した静的 3 点曲げ試験結果と比較することにより、それらの適用性に関する検討を行った。ここでは、断面分割法に用いる応力-ひずみ関係として、(1) 土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>（以後、標準示方書）に基づく場合の他、(2) 三次元弾塑性解析結果を参考にして、各部材の応力-ひずみ関係を修正した場合の 2 種類について検討を行っている。なお、本弾塑性解析には、構造解析用汎用プログラム DIANA9.3<sup>3)</sup>を用いている。

## 2. 実験概要

図-1には、本数値解析で対象とした試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、断面寸法（梁幅×梁高）が 150×500 mm を基本とし、幅 350 mm、高さ 100 mm のフランジを設けた T 型断面である。なお、梁の転倒

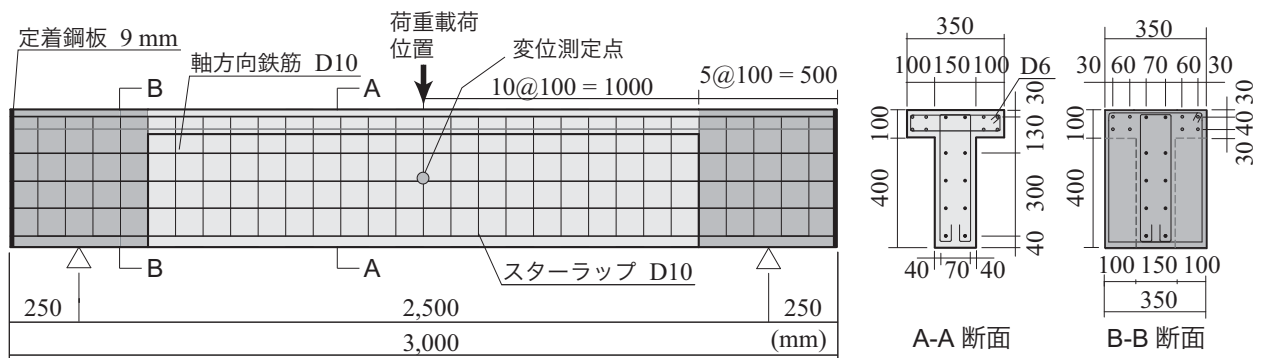


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および計測項目

\*1 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの材料物性値

| 材料     | 圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) | 引張強度<br>$f_t$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_c$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_c$ |
|--------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| コンクリート | 28.8                 | 2.2                 | 18.4                | 0.2              |

表-2 鉄筋の材料物性値

| 呼び径 | 降伏強度<br>$f_y$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_s$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_s$ | 備考             |
|-----|---------------------|---------------------|------------------|----------------|
| D10 | 376                 | 200                 | 0.3              | 軸方向鉄筋 / スターラップ |
| D6  | 295                 |                     |                  | 横拘束筋           |

表-3 試験体の設計耐力値

| 曲げ耐力<br>$P_{usd}$ (kN) | せん断耐力<br>$V_{usd}$ (kN) | せん断余裕度<br>$\alpha$ |
|------------------------|-------------------------|--------------------|
| 109.0                  | 521.2                   | 4.78               |

を防止するために両支点部近傍の 500 mm 区間は矩形断面としている。純スパン長は 2,500 mm，せん断スパン比は 2.72 である。

軸方向鉄筋およびスターラップには D10 を用い、100 mm 間隔で格子状に配置している。また、フランジ部には D10 の軸方向鉄筋を計 10 本配置し、それらを D6 の横拘束筋を用いて閉合させている。なお、軸方向鉄筋はいずれも RC 梁の端部に設置した厚さ 9 mm の鋼板に溶接定着し、定着長を節約している。表-1 および表-2 には、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋の材料物性値を示している。コンクリートの圧縮強度は  $f'_c = 28.8$  MPa，鉄筋の降伏強度は、D10 で  $f_y = 376$  MPa，D6 で  $f_y = 295$  MPa である。

表-3 には、標準平方書<sup>2)</sup>に準拠して算出した試験体の静的設計耐力値を示している。なお、せん断耐力は  $\gamma_b = 1.0$  として算出している。これより、本試験体はせん断余裕度  $\alpha (= V_{usd}/P_{usd}) > 1.0$  であることより、静荷重時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。

荷重は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて実施した。測定項目は、荷重  $P$  およびスパン中央点変位  $\delta$  (以降、単に変位) であり、それぞれ静荷重測定用ロードセルおよび非接触型レーザ変位計を用いて測定した。写真-1 には実験状況を示している。なお、写真-1 に示すように、試験体は円柱状の支点治具によって支えられているものの、実験時において支点治具がコンクリートにめり込む現象は生じていないことを確認している。

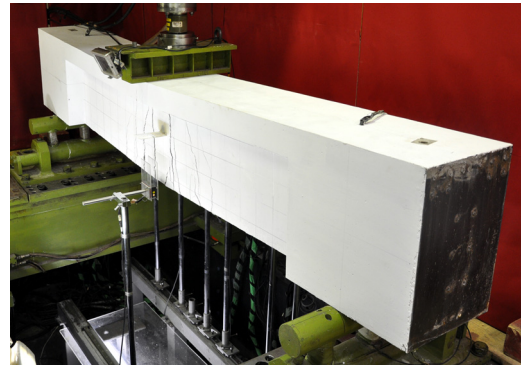


写真-1 実験状況

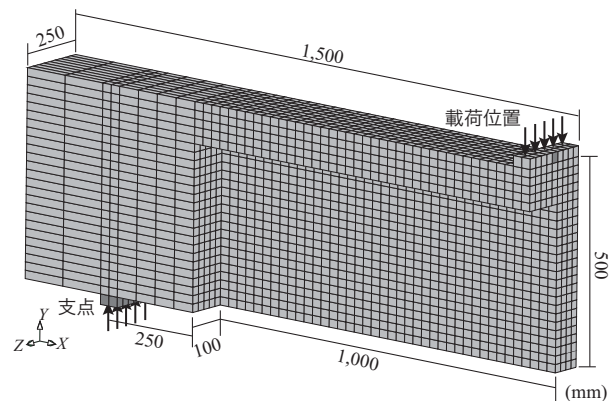


図-2 要素分割状況

### 3. 数値解析の概要

#### 3.1 三次元弾塑性解析

##### (1) 要素分割状況

図-2 には、解析に用いた要素分割状況を示している。解析モデルは RC 梁の対称性を考慮し、スパンおよび断面方向に 2 分割した 1/4 モデルとした。コンクリートは、8 節点固体要素を用いてモデル化している。軸方向鉄筋、スターラップおよび横拘束筋は、DIANA に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。この要素は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との完全付着を仮定し、鉄筋要素のひずみを周囲のコンクリート要素から算出するため、節点の位置によらず簡易に鉄筋要素を配置できる特徴を有している。

なお、本数値解析では、支点部における応力集中を避けるために、幅 50 mm の鉄板要素を配置している。また、荷重点部には実験時と同様に幅 50 mm の鉄板要素を配置している。また、解析は荷重点部鋼板要素の上面節点に強制変位を与えることにより実施した。

境界条件は、解析対象の連続性を考慮し、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部は節点の鉛直方向変位成分を拘束している。

##### (2) 材料構成則

本研究では、コンクリートのひび割れ開口などの幾何学

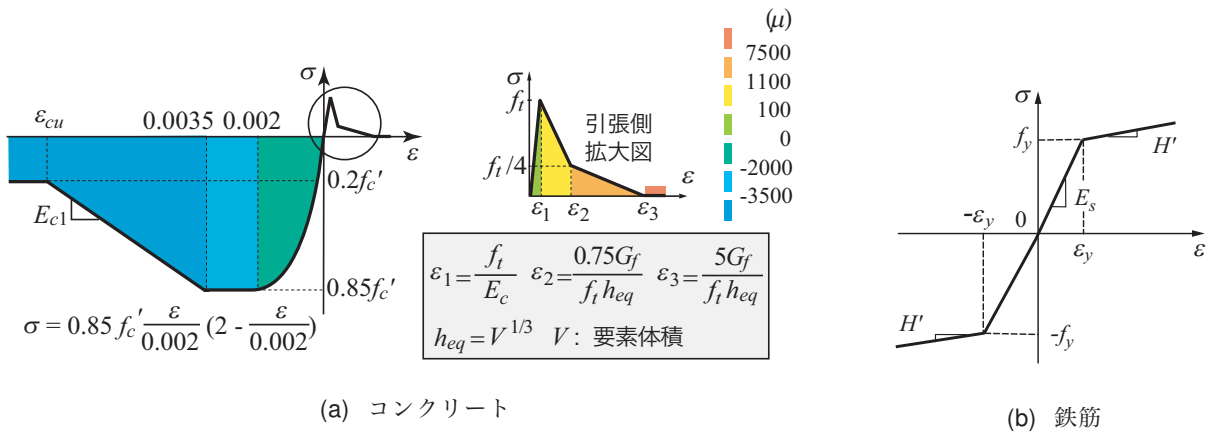


図-3 材料構成則 (三次元弾塑性解析)

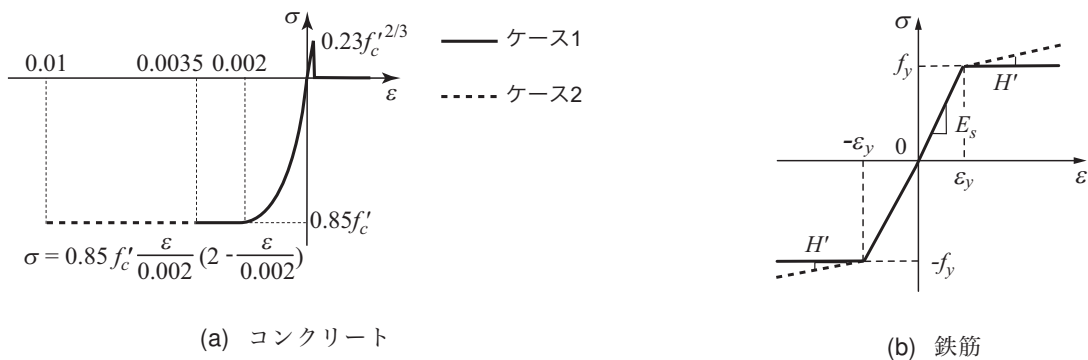


図-4 応力-ひずみ関係 (断面分割法)

的不連続現象を再現するために、コンクリート要素には分布ひび割れモデルを適用して解析を実施している。

図-3 (a) には、コンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度  $f'_c$  を用いて、圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  までは標準示方書<sup>2)</sup>に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$  以後は初期弾性係数の  $0.05$  倍で  $0.2f'_c$  まで線形軟化するモデルとした<sup>4)</sup>。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を適用しており、内部摩擦角を  $30^\circ$  としている。

一方、引張側には、標準示方書<sup>2)</sup>による引張軟化曲線を適用した。図中の  $V$ 、 $h_{eq}$  および  $G_f$  はそれぞれ要素の体積、等価要素長およびコンクリートの引張破壊エネルギーである。 $G_f$  は CEB-FIP Model Code<sup>5)</sup>に基づいて、次式のように定義している。

$$G_f = G_{f0}(f'_c/f_{cm0})^{0.7} \quad (1)$$

ここで、 $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$ 、 $G_{f0}$  は粗骨材径に対応して決定される定数である。本研究では、粗骨材径を実験に即して  $15 \text{ mm}$  と設定した。その結果、 $G_{f0} = 0.029 \text{ N/mm}$  となる。

なお、本研究で適用した分布ひび割れモデルの場合には、引張側の軸方向ひずみのコンターレベルが図中の  $\epsilon_1$  に達した時点でひび割れが発生し、 $\epsilon_3$  に達した時点でひび割れが

表-4 断面分割法における各パラメータと解析ケース

|       | 終局圧縮ひずみ<br>$\epsilon_{cu} (\mu)$ | 鉄筋の塑性硬化係数<br>$H'$     |
|-------|----------------------------------|-----------------------|
| ケース 1 | 3,500                            | 無視                    |
| ケース 2 | 10,000                           | 考慮 ( $H' = 0.01E_s$ ) |

開口することを意味している。本解析の場合には、各ひずみレベルは  $\epsilon_1 \approx 100 \mu$ 、 $\epsilon_2 \approx 1,100 \mu$ 、 $\epsilon_3 \approx 7,500 \mu$  となる。

軸方向鉄筋および他の鉄筋には、図-3 (b) に示すような塑性硬化係数  $H'$  を考慮した弾塑性体モデルを適用した。本研究では、塑性硬化係数  $H'$  を弾性係数  $E_s (= 200 \text{ GPa})$  の  $1\%$  と仮定している。なお、硬化則には等硬化則を用い、降伏は von Mises の降伏条件に従うものとした。

### 3.2 断面分割法

本研究では、断面分割法として、表-4 に示すように前述のコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を用いて、(1) 示方書に準拠して鉄筋を完全弾塑性体と仮定し、上縁コンクリートのひずみが終局圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  に達するまでとした場合(ケース 1)、および(2) 後述の FEM 解析結果に基づき、上縁コンクリートの終局圧縮ひずみを  $10,000 \mu$  とし、かつ鉄筋に塑性硬化係数 ( $H' = 0.01E_s$ ) を考慮した場

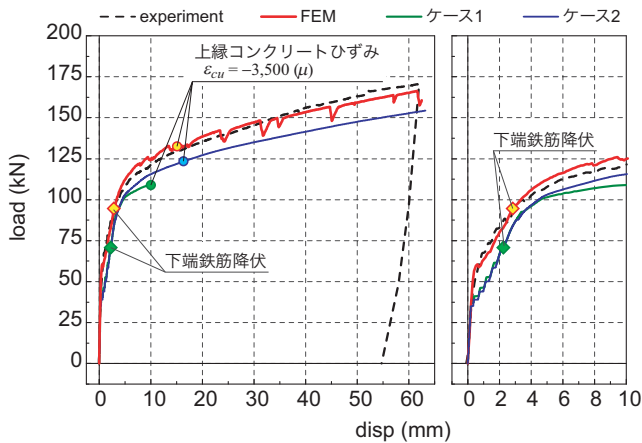


図-5 荷重-変位関係

合(ケース2)の2種類について検討している。図-4には、両ケースで仮定したコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。ここで、ケース2におけるコンクリートの応力-ひずみ関係において、圧縮側に関しては3,500  $\mu$  以降の圧縮軟化挙動を考慮していない。また、引張側に関してもケース1と同様に引張強度に達した時点で応力を伝達しないものとし、引張軟化挙動は考慮していない。これは、前述のとおり示方書に準拠した応力-ひずみ関係を用いる場合における断面分割法の適用性について検討を行うためである。なお、断面分割法における要素分割長は5 mm (100分割)とした。

#### 4. 実験結果、解析結果および考察

##### 4.1 耐荷性状

図-5には、実験結果より得られた荷重-変位関係を、有限要素法および断面分割法による数値解析結果と比較して示している。また、図中には、下端鉄筋の降伏時および上縁コンクリートの圧縮ひずみが-3,500  $\mu$  到達時の位置を示している。表-5には、実験結果と数値解析結果の最大耐力およびその比を示している。なお、解析における最大耐力は、ケース1を除き実験終局時変位  $\delta = 62$  mmの値である。

図より、破線で示す実験結果から、荷重初期(約50 kN)にコンクリートのひび割れ発生に伴い剛性が低下していることが分かる。また、変位が3 mm程度において、鉄筋の降伏により再び剛性勾配が緩やかに減少している。最終的には、上縁コンクリートに圧壊が生じたため実験を終了している。

次に、FEMによる数値解析結果を見ると、実験結果にほぼ対応して剛性勾配が変化していることが分かる。また、鉄筋降伏直後における荷重荷重が実験結果よりも若干大きく示されているものの、降伏後の剛性勾配や最大荷重値なども含めた荷重-変位関係は実験結果を精度よく再現して

表-5 最大耐力の比較

| 実験結果<br>(kN) | FEM 解析<br>(kN) | 断面分割法 (kN) |        |
|--------------|----------------|------------|--------|
|              |                | ケース 1      | ケース 2  |
| 170.8        | 166.3          | 108.9      | 153.7  |
|              | (0.97)         | (0.64)     | (0.90) |

( ) 内の数値は実験結果と解析結果の比である

いることが分かる。また、表-5より、FEM解析による最大耐力と実験値との比は3%程度と小さいことが分かる。これより、コンクリート要素に分布ひび割れモデルを適用した本解析手法を用いることによって、T型RC梁の耐荷性状をほぼ適切に再現できることが明らかになった。

断面分割法による数値解析結果に着目すると、いずれのケースにおいても、初期剛性低下時の荷重は実験結果およびFEMによる数値解析結果よりも若干小さく評価されている。また、示方書に準拠し鉄筋の塑性硬化を考慮しないケース1では、変位5 mm程度から剛性が低下し、約10 mm程度で上縁コンクリートが終局圧縮ひずみ ( $\epsilon_{cu} = 3,500 \mu$ ) に達して、計算を終了している。これは、仮定した応力-ひずみ関係には拘束効果の影響が考慮されていないため、耐荷性状を適切にできないことを暗示している。

一方、鉄筋の塑性硬化を考慮したケース2の場合には、荷重を実験結果よりも小さく評価するものの、鉄筋降伏後の剛性勾配は実験結果とほぼ対応していることが分かる。また、表-5より、ケース2と実験結果の最大耐力比は0.9程度とケース1に比べて格段に高いことが分かる。なお、終局変位は約63 mmに達しケース1の場合と比較して6倍程度向上しており、かつ実験終局時の変位と良く対応している。これより、T型RC梁に断面分割法を適用する場合には、鉄筋の塑性硬化を考慮し、かつコンクリートの終局圧縮ひずみを適切に設定することによって、耐荷性状を概ね推定できるものと考えられる。

##### 4.2 破壊性状

図-6には、各変位段階における実験状況およびFEM解析結果によるコンクリートの軸方向ひずみ分布図を示している。図中の引張側のコンターレベル(100, 1,100, 7,500  $\mu$ )は、図-3(a)に示す  $\epsilon_1$  (ひび割れ発生ひずみ)、 $\epsilon_2$  および  $\epsilon_3$  (ひび割れ開口ひずみ) にほぼ対応している。

まず、図-6(a)に示す初期剛性低下時について見ると、数値解析結果では荷重点直下の梁下端中央部に曲げひび割れが生じているのが分かる。一方、実験結果からは図-5に示すように初期剛性の低下が確認できるものの、図-6(a)の写真からはひび割れの確認はできない。しかしながら、数値解析結果は実験結果における初期剛性の低下をほぼ適切に再現していることより、実験時においても梁下端中央部に微細なひび割れが発生しているものと推察される。

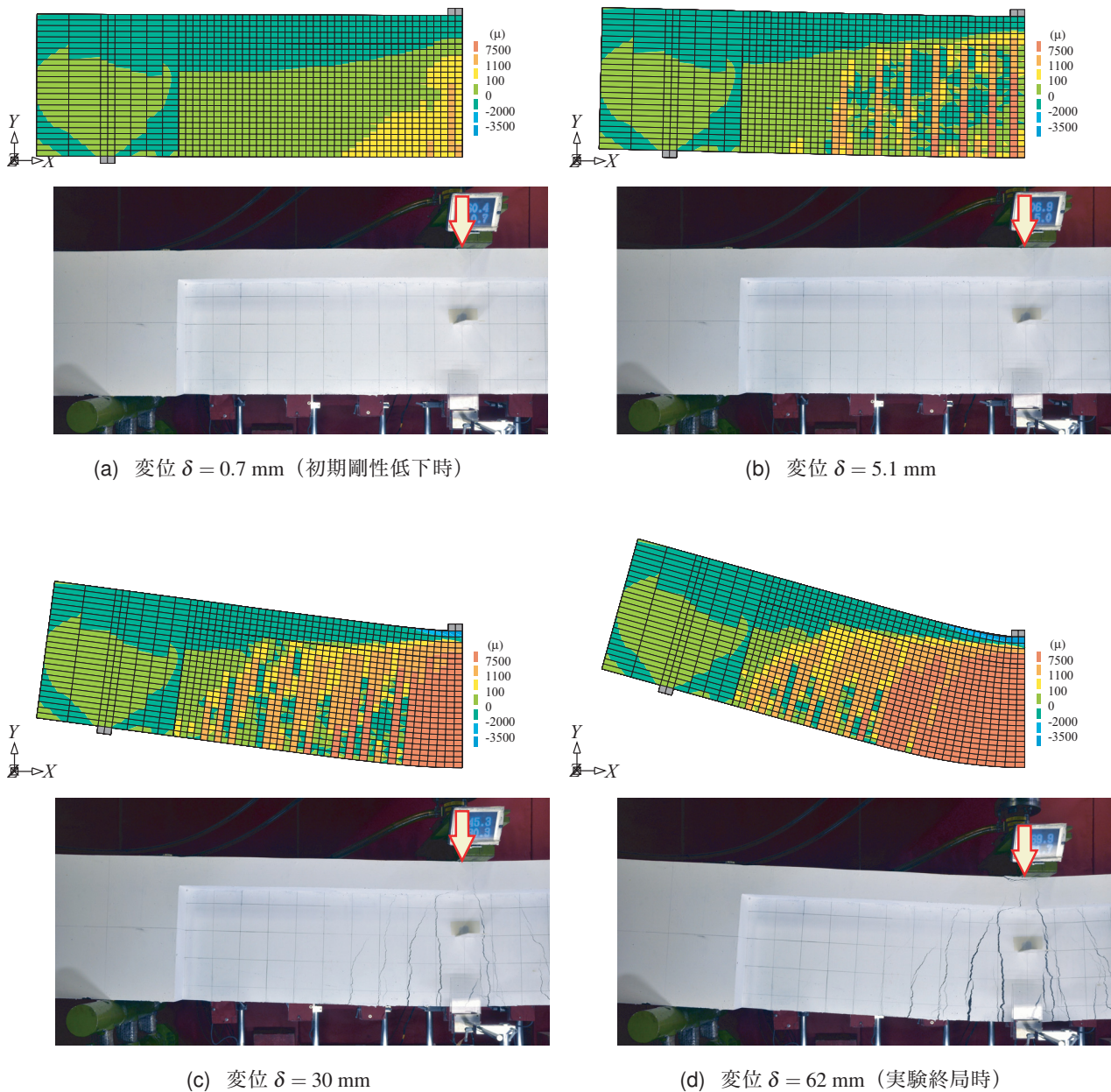


図-6 FEM 解析による軸方向ひずみ分布と実験結果の比較(変形倍率 5 倍)

次に、剛性勾配が緩やかに低下する変位  $\delta = 5.1 \text{ mm}$  ( 図-6 b 参照) 時点の状況を見ると、実験結果では梁中央部に曲げひび割れが明瞭に発生している。一方、数値解析結果では梁中央部から支点方向の範囲に複数のひび割れ開口程度のひずみ ( $\epsilon > 7,500 \mu$ ) が発生しており、実験結果のひび割れ状況をほぼ適切に再現しているものと考えられる。なお、数値解析結果より、実験結果においても梁中央部から支点方向の範囲に複数の微細な曲げひび割れが生じているものと推察される。

図-6 (c) に示す変位  $\delta = 30 \text{ mm}$  時点の状況を見ると、実験結果から荷重点直下の曲げひび割れが開口し、ひび割れが上フランジまで進展していることが分かる。数値解析結

果においても上フランジまで大きなひずみが発生している。また、スパン中央から  $200 \text{ mm}$  の領域において、ひび割れの開口を示す程度のひずみが発生しており、実験結果のひび割れ分布とよく対応している。

実験終局時( 図-6 d 参照)に着目すると、実験結果では梁中央部に発生した曲げひび割れが大きく開口するとともに、荷重点直下のコンクリート上縁に圧壊によるひび割れが生じているのが分かる。数値解析結果においても、ひび割れ開口程度のひずみが実験結果のひび割れ領域とほぼ等しい領域に分布していることから、数値解析結果は実験結果のひび割れ性状を大略再現しているものと判断される。さらに、上縁コンクリートの軸ひずみは  $10,000 \mu$  程度を示

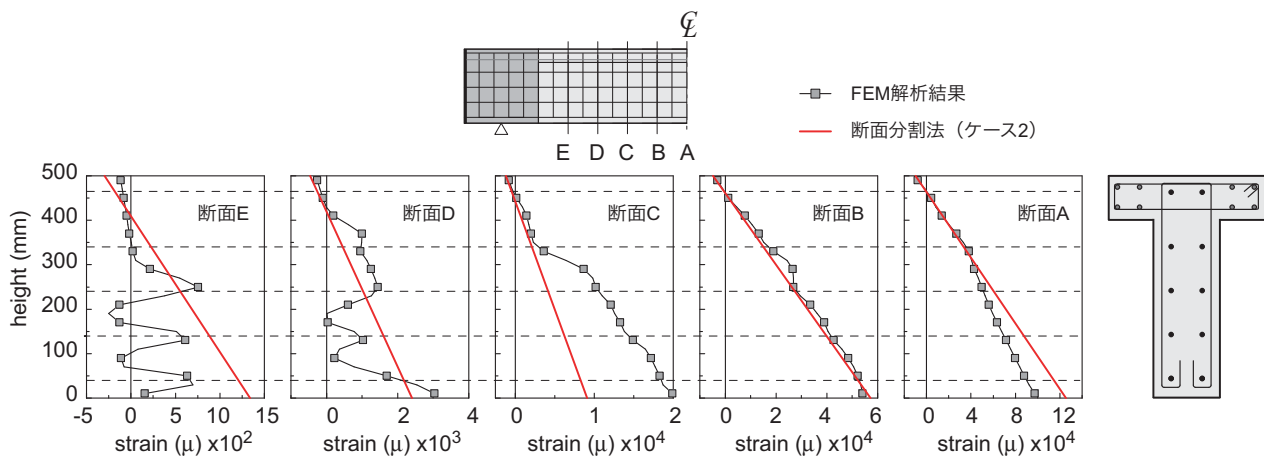


図-7 実験終局時におけるコンクリートの軸方向ひずみ分布の比較

しており、数値解析結果はT型RC梁フランジコンクリートの圧壊現象をほぼ再現できているものと推察される。

以上より、コンクリート要素に分布ひび割れモデル、軸方向鉄筋やスターラップおよびフランジの横拘束筋に埋め込み鉄筋要素を適用した提案の解析手法を用いることによって、実験結果の破壊性状は大略再現可能であることが確認された。

#### 4.3 コンクリートの軸方向ひずみ分布

図-7には、FEM解析および断面分割法から算出される梁断面の高さ方向軸ひずみ分布を比較して示している。着目断面はスパン中央から支点部に向かって200 mm間隔(断面A~E)とし、実験終了時( $\delta = 62$  mm)について整理している。なお、断面分割法による解析結果はケース2を適用する場合の結果である。また、図中の破線は軸方向鉄筋の位置を示している。

図より、荷重点直下の断面Aに着目すると、下端から300 mmまでの領域では、FEMによる数値解析結果が断面分割法による解析結果よりも小さく示されているものの、それよりも上方の領域では、両者が非常によく対応していることが分かる。断面Bでは両者ほぼ等しいひずみ分布を示している。断面Cでは、断面Aとは異なりFEMによる数値解析結果が断面分割法による解析結果よりも大きな軸ひずみが生じている。なお、断面DおよびEでは、FEMによる数値解析結果が複雑な分布性状を示している。これは両断面が支点部に近く複雑な応力分布を示すことに加え、着目断面近傍にひび割れが発生している(図-6d参照)ことによるものと推察される。なお、終局時における荷重点直下の中立軸は、梁下端から450 mm程度の位置に存在し、未だ上フランジ内にあることが分かる。

#### 5. まとめ

本研究では、圧縮側フランジ部のコンクリートが横拘束筋等によって拘束効果を受けるT型RC梁の耐荷性状を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的として、三次元弾塑性有限要素法および断面分割法による数値解析を行った。断面分割法の適用検討においては、各材料に対して2種類の応力-ひずみ関係を設定し、その適用性に関する検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 鉄筋の塑性硬化を考慮し、かつコンクリートの終局圧縮ひずみを適切に設定する場合には、断面分割法を用いることによってT型RC梁の耐荷性状を概ね推定できる。
- 2) コンクリートに分布ひび割れを適用し、かつ鉄筋を埋め込み鉄筋要素でモデル化した三次元弾塑性有限要素解析は、実験結果の荷重-変位関係および破壊性状を精度よく再現できる。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 2) (社)土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書・設計編, 2007.
- 3) Nonlinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 4) N. Kishi, G.F. Zhang, H. Mikami: Numerical cracking and debonding analysis of RC beams reinforced with FRP sheet, *J. Compos. for Constr.*, 9(6), pp. 507-514, 2005.
- 5) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.