

FRP 吹付けによる補強された柱の FEM 解析

鉄建建設 正会員 武田康司

鉄建建設 正会員 松岡 茂

鉄建建設 正会員 松尾庄二

1. はじめに

施工上制約を受ける鉄筋コンクリート高架橋の柱部材の耐震補強工法として、新素材（連続繊維・短繊維）による補強が注目されている。筆者らは、ガラス繊維（短繊維）と樹脂を混合し吹付ける FRP 吹付け耐震補強工法を開発した。開発にあたっては、変形性能確認実験として実橋脚の 1/2 モデルおよび実物大の柱供試体による正負水平交番載荷を行い、その補強効果についてすぐれた耐震性能を有する結果を得た。そこで本研究では、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）により補強された柱の耐力および変形性能の評価を行うため、実験に使用した柱供試体と対応した柱モデルによる FEM 解析を行い、その結果と実験結果を比較することによりそのモデルの妥当性を検証した。なお、破断まで弾性的な挙動を示す新素材の弾性係数に着目し、本モデルと同条件で他の新素材（連続繊維）で補強を行った場合の FEM 解析を併せて行い、両者の変形性能への影響について検討した。

2. FEM のモデル化

構造解析対象の柱モデルは図-1 に示すように、コンクリート部は4節点アイソパラメトリック要素、柱部とフーチング部の接合部には摩擦接触要素を用いた。また鉄筋はトラス要素とし、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）は等方性材料の4節点アイソパラメトリック要素とした。なお、フーチング部は拘束し、コンクリートとGFRPの付着は柱コーナーのみを考慮した。

コンクリートの応力-ひずみ曲線は図-2 に示すように、最大圧縮強度に達するまではコンクリート標準示方書の2次曲線モデルを用い、それ以降はGFRPの破断ひずみまでコンクリートの最大応力を一定に保持するものとした。また、コンクリートの引張軟化曲線は図-3 に示すように直線モデルとした。なお、鉄筋は弾-完全塑性モデルとし、弾性係数を $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏強度を 343MPa とした。GFRP は弾性係数を $4.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度を 100MPa とし、破断を考慮したモデルを用いた。

3. 解析条件

表-1 に解析条件を示す。荷重条件は、実験では正負交番載荷試験を行っているが、解析では単調増加荷重とし柱下端より 110cm (40-40、70-40)、250cm (80-80) の箇所に強制変位荷重を与えた。柱のモデルの断面は 40cm × 40cm (40-40)、70cm × 40cm (70-40) および 80cm × 80cm (80-80) で、せん断スパン比の違う実験と対応したものとし、その変形性能と破壊形式について検討した。

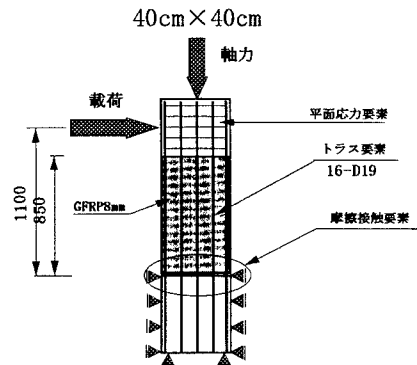


図-1 柱モデル

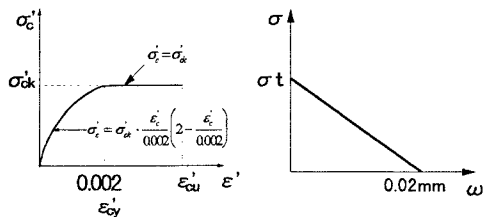


図-2 応力-ひずみ曲線

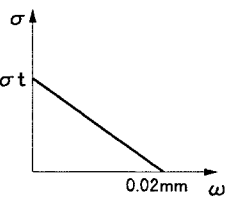


図-3 引張軟化曲線

表-1 解析条件

解析条件	40-40	70-40	80-80
コンクリート圧縮強度	32.4MPa	32.4MPa	30.9MPa
鉄筋の降伏強度	343MPa	343MPa	343MPa
帯鉄筋の有無	無し	無し	無し
GFRP の補強率	4 %	4 %	2 %
軸方向鉄筋比	2.9%	2.5%	2.5%
軸力比	0.0303	0.0303	0.127
せん断スパン比	3.06	1.67	2.84

キーワード：GFRP、FEM解析、応力ひずみ曲線、弾性係数

〒286 成田市新泉 9-1 TEL 0476-36-2355 FAX 0476-36-2380

4. 実験結果とFEM解析結果の比較

柱断面 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ でせん断スパン比を 3.06、軸方向鉄筋比 2.9%、軸力比が 0.0303 の場合について、実験結果と計算結果による水平荷重と水平変位の関係を図-4に示す。図のように水平変位は実験値が 26.5mm に対して計算値 25.2mm とほぼ一致している。水平荷重は、実験値に比較して計算値は若干低くなった。これは、鉄筋のひずみ硬化域における最大引張強度の違いによるものと考えられる。

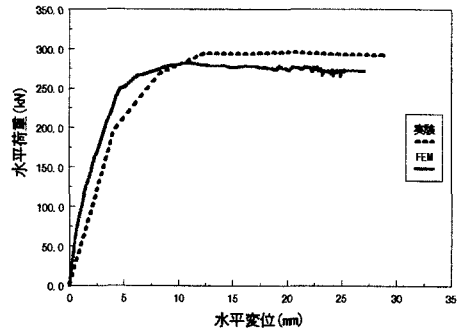


図-4 水平荷重－水平変位

柱断面 $70\text{cm} \times 40\text{cm}$ でせん断スパン比 1.67、軸方向鉄筋比 2.5%、軸力比 0.0303 の場合と柱断面 $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ でせん断スパン比 2.84、軸方向鉄筋比 2.5%、軸力比 0.127 の場合の実験結果と計算結果による水平荷重－水平変位の関係を図-5に示す。水平変位は $70\text{cm} \times 40\text{cm}$ のとき実験値が 18.6mm に対して計算値は 17.6mm とほぼ一致している。一方、 $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ のとき実験値と計算値は差が大きくなった。これはFEM計算では、コンクリートの応力－ひずみ曲線の軟化域を考慮していないためと考えられる。なお、最大荷重はいずれも実験値とほぼ一致している。各ケースの計算では、いずれも柱基部の曲げひび割れが先行し、最終的に圧縮側のひずみが 25000μ に達して終了した。

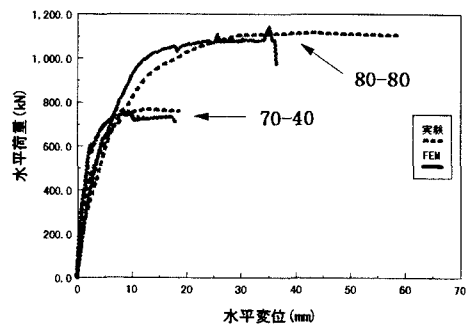


図-5 水平荷重－水平変位

5. 他の新素材との比較

GFRPより引張強度が高く弾性係数の小さい新素材（連続繊維）に着目し、それを本モデルに適用した場合のFEM解析を行い、GFRPの計算結果との比較を行った。図-6に水平荷重－水平変位の関係を示す。また、計算に用いた新素材の物性値は、GFRPより引張強度を高く、弾性係数を小さくし、柱軸方向の引張強度は考慮しないものとした。なお、他の解析条件はGFRPと同様とした。

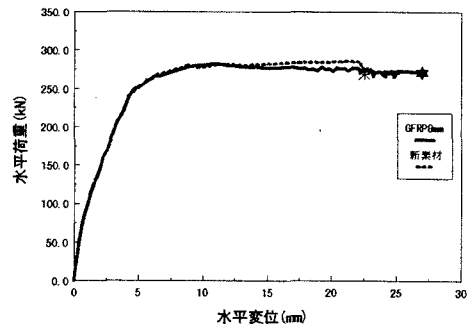


図-6 水平荷重－水平変位

図のように新素材を本モデルに適用した場合、最大荷重は両者ほとんど変わらず、変位量はGFRPが 25.2mm に対して新素材が 22.2mm と 11.9% 減少した。これは、荷重－変位曲線の形状もほぼ一致していることから補強材料の柱軸直交方向の最大伸び量の差によるものと考えられる。

6. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 実験に対応した本モデルによるFEM解析結果は、GFRPの破断時までコンクリートの最大応力を保持した場合に、実験結果とほぼ一致することが確認できた。
- (2) GFRPより引張強度が高く、弾性係数の小さい新素材（連続繊維）を本モデルに適用した結果、変形量はGFRPより 11.9% 減少する。
- (3) GFRPおよび新素材を本モデルに適用した結果から、柱の変形量は補強材の最大伸び量によって変化するものと考えられる。