

残留ひび割れと段階施工を考慮した炭素繊維シート緊張接着補強解析

小沼技術士事務所 正会員 小沼 恵太郎 九州工業大学 正会員 幸左 賢二
九州工業大学大学院 非会員 藤井 康彦 修成コンサルタント(株) 正会員 栗根 聡

1. はじめに

ひび割れ損傷を受けた RC 中空床版の補強工法として、緊張力を導入した炭素繊維シートの接着補強工法が提案されている。そこで本研究では、使用状態に発生するひび割れと、炭素繊維シート緊張接着補強の施工工程を考慮した、弾塑性 FEM 解析による補強シミュレーションを行なった。

2. 解析モデル

本研究に先立ち、実在する RC 中空床版をモデル化した RC 梁供試体を用いて、補強前荷重による残留ひび割れの再現、炭素繊維シート緊張接着補強、補強後荷重の順に、実構造物の使用状態および補強手順を踏まえた繰返し荷重試験を実施した。この実験に対し、同様の段階を踏まえた補強解析を行った。

図-1 に解析モデルを、図-2 に使用した要素の応力-ひずみモデルを示す。コンクリートは、圧縮側に Drucker-Prager の破壊基準を、引張側に最大主応力基準を設定し、とくに引張側の履歴特性について、緊張力の導入効果とひび割れ性状を考慮するために、減衰が小さく除荷する際に 0 点に向かう原点指向型モデルとした。鉄筋は圧縮・引張側共に等方硬化則を用いたバイリニア型の履歴特性を設定した。炭素繊維シートは完全弾性体とし、コンクリート-炭素繊維シート間は完全付着とした。

図-3 に段階施工解析の概要を示す。本解析では、まず健全な状態の梁モデルに対し、実験の補強前荷重で測定された最大変位が発生するまで荷重増分荷重を行い(図-3-a)、この状態から除荷した後の残留ひずみ状態を損傷梁モデルとする(図-3-b)。次に、損傷梁モデルを初期状態とし、これに炭素繊維シートや接着面のモデルを追加した後、炭素繊維要素に緊張力を導入することによって補強後の状態を再現し(図-3-c)、補強後荷重を行なった(図-3-d)。

3. 解析結果

実験および解析の荷重-変位関係を図-4 に示す。段階施工解析を用いた損傷梁の補強解析を行うために、残留ひび割れ状態の再現を行った。実験の初期荷重は実橋の損傷状態を基準とし、解析の初期荷重は実験の初期荷重での最大変位 14.86mm を基準に 14.95mm まで荷重増分荷重を行った。その結果、残留ひび割れ幅が実験で 0.258mm、解析で 0.257mm となり、ほぼ同じ挙動を示した。

炭素繊維シートに緊張力を導入することで生じる梁の曲げ上げ効果(変位の減少)は実験で 0.58mm、解析で 0.85mm となった。また、補強後は荷重が 915kN に達する辺りで勾配が低下し始める挙動が解析でもみられた。ついで、0.4Py 時

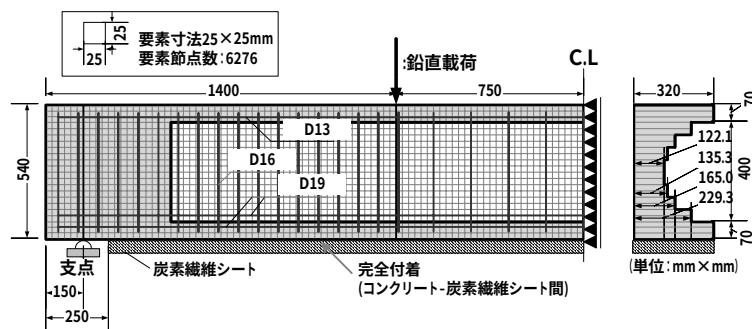
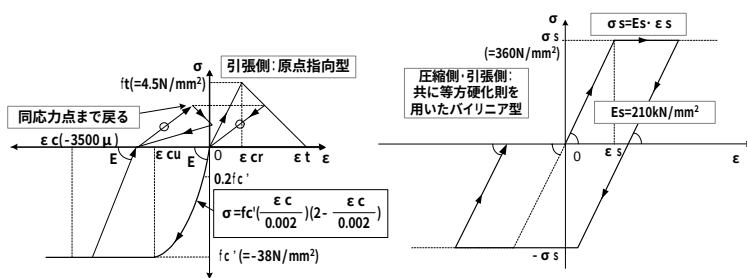


図-1 要素分割図



コンクリート履歴モデル

鉄筋履歴モデル

図-2 各要素の応力-ひずみモデル

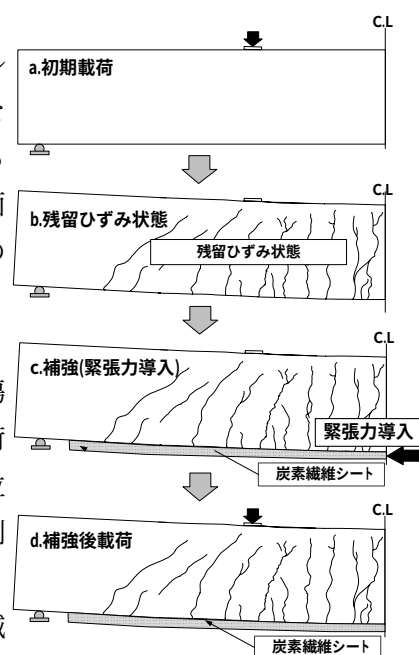


図-3 段階施工解析概要

ら P_y 時までの傾き(以後、一次剛性と呼ぶ)を算出すると、補強前で一次剛性は実験で 56.8N/mm^2 、解析で 52.2N/mm^2 、補強後の一次剛性は実験で 71.2N/mm^2 、解析で 78.8N/mm^2 であり、補強前後の剛性の向上が解析上でも再現されたことが確認できた。

図-5 に荷重-平均ひび割れ幅関係を示す。実験では π ゲージにより 5 箇所(P-1~P-5)のひび割れ幅の測定を行ない、解析では実験におけるひび割れ発生時のコンクリートでの x 軸方向の伸び量を微小と考え、土木学会コンクリート標準示方書によって算出した設計ひび割れ間隔ごとに区切った要素の x 軸方向のコンクリート要素における伸び量をひび割れ幅とした。これらの平均の値を平均ひび割れ幅とする。これより、補強前载荷の除荷時までは解析結果が実験結果とよく一致しているものの、緊張力導入時による平均ひび割れ幅の減少量が図-6 に示すように、実験で 0.14mm (0.27mm から 0.13mm)、解析で 0.04mm (0.26mm から 0.22mm)と異なっていることがわかる。ただし、簡便的に土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式を適応して降伏後のひび割れ幅を求めると、実験より得られた緊張力導入時の主鉄筋ひずみの減少量(156μ)より、ひび割れ幅は 0.03mm と算出され、解析結果により近い値であることが分かる。さらに、図-6 に示す実験および解析による平均ひび割れ幅に併せて、実験で測定したひび割れごとの幅の挙動を見ると、P-3 のひび割れ幅が除荷時で 0.82mm 、緊張力導入後で 0.19mm と、他と比較して大きく変動していることが分かる。したがって、緊張力導入時の平均ひび割れ幅に差が生じた原因として、実験ではひび割れ損傷の局所化が生じたが、本解析手法ではこの現象が表現できなかったためと考えられる。

図-7 に炭素繊維シートの破断ひずみに対する発生ひずみの割合を示す。補強後勾配が低下する以前、 $1.3P_y$ ($1.5\delta_y$)までの炭素繊維シートの使用率は実験で 49% 、解析で 45% と同様であり、補強後勾配の低下以前の使用状態における炭素繊維シートの挙動は定性的に再現された。

4. まとめ

- (1) 損傷梁の補強シミュレーションに段階施工 FEM 解析手法を用いることで、緊張力導入時にひび割れ幅(実験で 0.14mm 、解析で 0.04mm 減少)と変位(実験で 0.58mm 、解析で 0.85mm 減少)の低減を確認でき、緊張補強時による梁の挙動が定性的に再現できた。
- (2) 段階施工 FEM 解析手法を用いることで、補強前の剛性(実験で 56.8N/mm^2 、解析で 52.2N/mm^2)に対して補強後の剛性(実験で 71.2N/mm^2 、解析で 78.8N/mm^2)が増加したことが確認でき、本手法で緊張補強による剛性向上効果が定性的に再現できた。

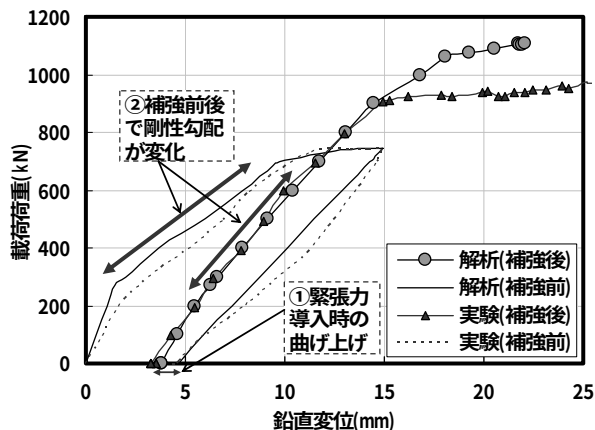


図-4 荷重-変位関係

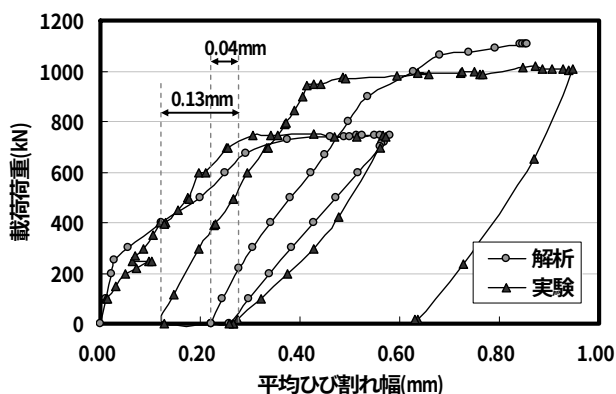


図-5 荷重-平均ひび割れ幅関係

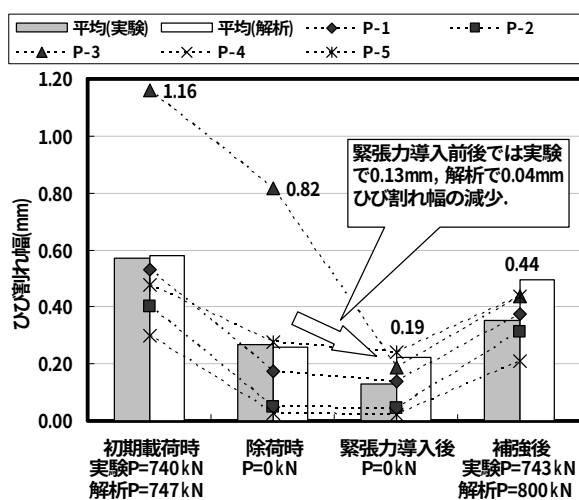


図-6 各状態のひび割れ幅挙動

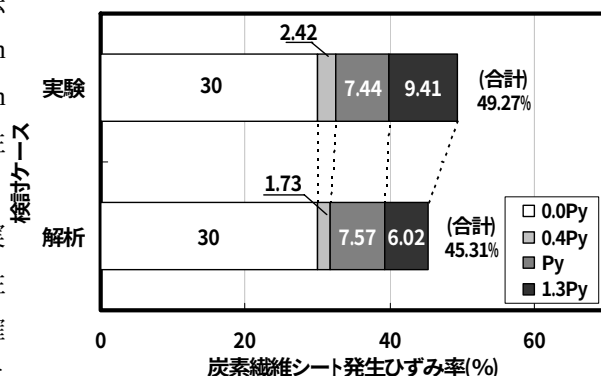


図-7 炭素繊維シートのひずみ