

論文 鉄筋量の回復に平面格子状 FRP を用いた繊維補強埋設型枠工法を適用した RC 梁の曲げ耐荷性能

天野 佳絵^{*1}・玉井 宏樹^{*2}・平山 翼^{*3}・審良 善和^{*4}

要旨： 栈橋上部工における補修工法として用いられている既存の繊維補強埋設型枠工法に、より施工性を高めるため、主鉄筋量の回復として平面格子状 FRP を活用した新たな埋設型枠工法を提案した。その新工法を適用した RC 梁の曲げ耐荷特性について非線形 FEM 解析及び実験により明らかにした。その結果、RC 梁の主鉄筋を型枠とグリッドで置き換えた場合、健全 RC 梁と同程度の終局荷重まで補修できるものの、ひび割れ発生以後から終局までの剛性不足が懸念される結果となった。そこで、型枠内の FRP シート厚さに着目した検討を実施し、シート厚さを増すことで、健全 RC 梁以上の剛性を確保できることが分かった。

キーワード： 繊維補強埋設型枠、静的曲げ載荷試験、非線形 FEM 解析、補修工法、RC 梁

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路、橋梁、トンネル等の多くのインフラ構造物では経年劣化が進み大規模な補修補強を必要としている。特に港湾構造物においては 2040 年には供用後 50 年を経過する岸壁の割合が 8 割を超え、これを更新・補修する費用が港湾施設事業費の 8 割を占めるとの試算もある。さらに栈橋の上部工では、鉄筋腐食とそれによるコンクリート片の剥落が致命的損傷につながる深刻な問題となっていることから、鉄筋防食に対する断面修復や表面被覆に基づく対策を講じることが多い。ただし、海上施工は、潮の干満をはじめとする環境面での制約が多く、使用する補修材料や作業双方において極めて過酷な条件を伴う。また、近年の社会環境の中で高齢化・若年層の建設業離れなどに伴う労働力不足により、現地で熟練した作業員を確保することが困難な状況下であり、軽量化、省力化、簡便化に優れた工法が求められる。さらには、港湾需要の変化にともない、重機の大形化、荷役の重量化による疲労への対応など、補強効果のある工法へのニーズも格段に高まっている。こうした背景により、より施工性に優れた新たな埋設型枠工法の開発を最終目標としている。

そこで、本研究では、著者らの研究グループで過去に開発した、簡便で施工性に優れた「GFRP を用いた繊維補強埋設型枠（適用実績例を図-1 に示す）」と、差し筋・添え筋など作業員の大きな負担となっている煩雑な手順を省くために、主鉄筋量の回復に平面格子状 FRP（以降、FRP グリッドと称す）を活用した、新たな補修工法（以降、新工法と称す）の開発を進めている。



図-1 繊維補強埋設型枠工法の適用実績

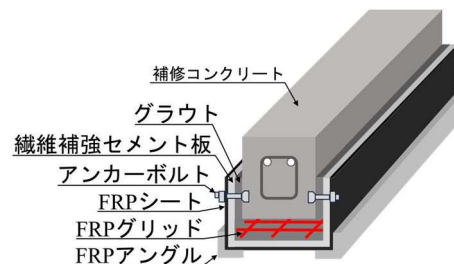


図-2 新工法の概要図

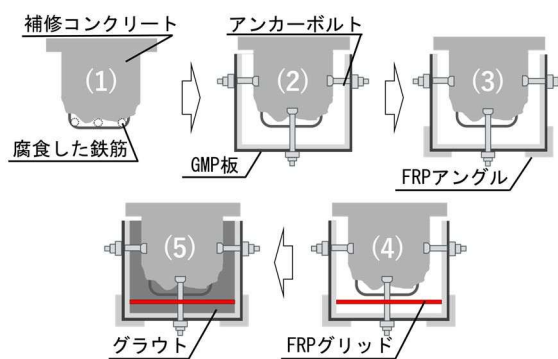


図-3 施工手順（新工法）

*1 ダイキ工業株式会社 技術営業部（正会員）

*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博(工)（正会員）

*3 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 修士課程学生

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学プログラム 准教授 博(工)（正会員）

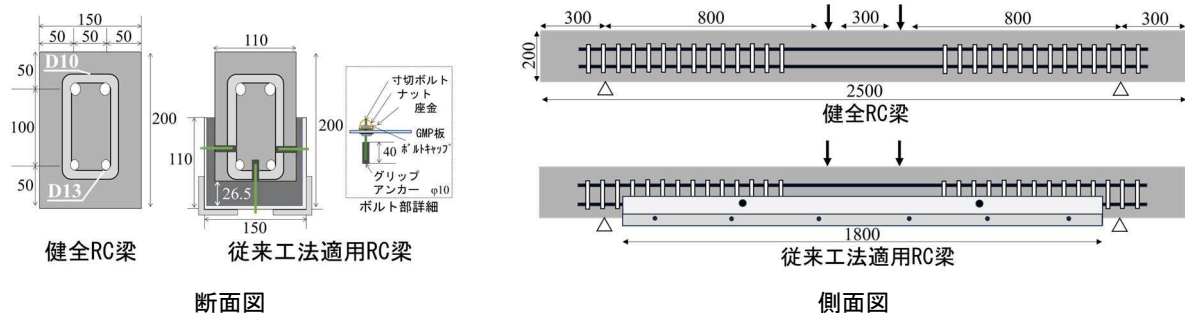


図-4 形状寸法 (単位: mm)

本稿ではフェーズを5段階に分けて記す。フェーズ1では、繊維補強セメント板とFRPシートの複合板から成る既存の埋設型枠を用いた工法(以降、従来工法と称す)を適用したRC梁の耐力性状を静的載荷試験により明らかにした。フェーズ2では、埋設型枠を用いた場合の構造性能が不明確な部分もあるため、影響評価のための要素検討として載荷試験の非線形FEM解析を実施し、再現可能な妥当な解析モデルを構築し、曲げ耐力特性を明確にした。さらに、フェーズ3では、構築した既存の埋設型枠工法の解析モデルをベースとし、FRPグリッドを組み合わせた新工法の非線形FEM解析を実施し、曲げ耐力特性を把握した。次のフェーズ4では事前解析を対象とした実証実験を実施した。最終フェーズでは、事前解析・実証実験で明らかになった結果をもとに、型枠寸法を変化させた非線形FEM解析を実施し、より補修効果の高い形状寸法について検討を行った。

2. 対象とした工法概要

ベースとなる既存の繊維補強埋設型枠工法、いわゆる従来工法は、栈橋の上部工補修工法として用いられる「GFRPを用いた繊維補強埋設型枠工法」²⁾である。繊維補強セメント板(フレキシブルボード)とFRPを複合化したGMP板(Glass flakes Molded Plates)を使用し、防錆剤を添加した高流動・無収縮グラウトを流し込むことを特徴としている。既出の埋設型枠工法³⁾と大きく異なる点として、型枠はグラウトを保持する剛性を持ち、アンカーボルトで補修コンクリートに固定することで支保工を必要としない点が挙げられる。また、FRPシートが外的因子の侵入を遮断するため再劣化が起りにくい。型枠・鉄筋・グラウト・劣化した補修コンクリートを一体化させることで更新費用よりも低価格で建設当時と同水準のコンクリート構造物まで補修することができる。

新工法では取替鉄筋の代わりに、前述した従来工法のアンカーボルトにFRPグリッドを固定させ、グラウト層に配置する。新工法の概要図を図-2に示す。

図-3に、現時点で想定している新工法の施工手順を以下に示す。(1) まず不良部(不良鉄筋など)のはつり

を行い、(2) 梁の寸法を取り、GMP板を製作しアンカーボルトでコンクリートに固定し、(3) FRP製L型アングルを取り付け、(4) アンカーボルトにFRPグリッドを固定させ、(5) 最後に型枠内に無収縮モルタル(グラウト)を注入し、コンクリートと型枠を一体化する。

次に、本研究におけるFRPグリッド種は、主鉄筋の置き換えに用いることから、図-4に示す健全RC梁断面寸法において、単鉄筋コンクリート矩形断面を仮定し、D13鉄筋およびFRPグリッドのRC断面に対する断面二次モーメント⁴⁾を比較した。なお、選定候補となるFRPグリッドは格子間隔50×50(mm)の筋断面積の異なるCR4、CR5、CR6、CR8グリッドで、軸方向ロッド3本をそれぞれグラウト層中心部(圧縮縁から180mm)に配置するものと仮定した。その結果、D13鉄筋との比較ではCR8グリッドの2枚重ねが最も適当であったが、施工上の観点において2枚重ねは非現実的であることから、CR8グリッド(筋断面積26.4[mm²], 引張強度1,400[MPa], 引張弾性率100[GPa])1枚かつ埋設型枠部材の複合効果により、耐力・剛性回復を期待することとした。また、グリッド配置位置について、本供試体のグラウト層厚さは約26.5(mm)であるため、グリッド配置位置の影響は小さい。よって最も付着が担保されるグラウト層中心部に配置した。ただし、本研究は梁部材の影響評価のための要素検討であるが、実際の設計においては、FRPグリッド配置位置による有効高さに関して検討する必要がある。

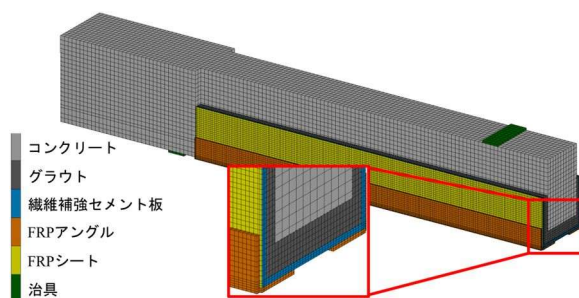


図-5 解析モデル概要図

3. 従来工法適用 RC 梁に対する検討

健全 RC 梁および断面欠損させた RC 梁に従来工法を適用した RC 梁の 2 種類の耐荷性能を明らかにするため、4 点曲げ静的載荷試験、および、非線形 FEM 解析を実施した。対象の梁の形状寸法ならびに載荷点を図-4 に示す。なお、実験および解析ともに、形状寸法・載荷条件はすべて同様に実施した。

3.1 解析モデル概要（従来工法適用 RC 梁）

従来工法適用 RC 梁の解析モデル概要を述べる。本解析には汎用非線形有限要素解析コードである MSC. Marc を用いた。対称性を考慮して、スパン方向 1/2 部をモデル化した。図-5 に示す解析モデル図より、コンクリート、グラウト、繊維補強セメント板、FRP アングル、アンカーボルトは 8 節点 6 面体ソリッド要素、鉄筋は 2 節点トラス要素、FRP シートはシェル要素で忠実にモデル化した。コンクリートと鉄筋は節点を共有させ、完全付着を仮定した。また埋設型枠部材における各界面は、繊維補強セメント板-FRP シート間はセメント系部材と強化プラスチック部材の界面であり、本工法部材の中では唯一、親和性が低い。また、繊維補強セメント板は載荷初期段階でのひび割れが発生し、そこから付着破壊の進展が想定される。そこで、インターフェイス要素⁹⁾を用いてこの界面には付着滑りを考慮した。この要素は、要素表面と底面の相対変位に対する応力で表現され、本研究ではバイリニア型の付着構成則を用いた。付着強度は開口変位の変数として導入され、初期の可逆的な反応に続いて、臨界開口変位に達した段階で不可逆的な反応が起こるという特徴を持つ。その他、FRP シート-FRP アングル間は節点共有の完全付着を仮定した。また、コンクリートグラウト間およびグラウト繊維補強セメント板間における界面は、節点-セグメント手法による接触制御⁹⁾を行い、グルー接触（完全付着）を仮定した。境界条件は支点部をローラー支点とし、対称面は梁軸方向を拘束した。

3.2 材料構成則

表-1 に仮定した各材料特性値を示す。

(a) コンクリートおよびグラウト

図-6 に解析で用いた各材料の構成則を示す。コンクリート、グラウトの降伏条件は線形 Mohr-Coulomb 則に従う。図-6 (a) に示すようにコンクリート引張側の構成則として、ひび割れ発生後のひずみ軟化を考慮し、引張強度以降は Bazant ら⁹⁾によって提案された式(1)、(2)に基づいて、要素寸法に応じた勾配を有する線形軟化を仮定した。

$$E_c = \left(\frac{1}{E} - \frac{2G_f}{f_t^2 h} \right)^{-1} \quad (1)$$

表-1 仮定した材料特性

材料	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
コンクリート	39.7 (従来) 31.5 (新)	2.84 (従来) 2.29 (新)	30	0.2
鉄筋 (D13・D10)	降伏強度 (MPa) 295 (従来) 367 (新)	440 (従来) 500 (新)	188	0.3
グラウト ⁷⁾	88.4 (従来) 95.4 (新)	5.84 (従来) 6.30 (新)	29.7 (従来) 26.7 (新)	0.3
繊維補強セメント板 ⁸⁾	45	18	13	0.2
FRPシート	—	0.0115 (破断ひずみ)	8.2	0.3
FRPアングル	—	379	30.5	0.3
塩ビ製アングル	—	18.4	1.1	0.38

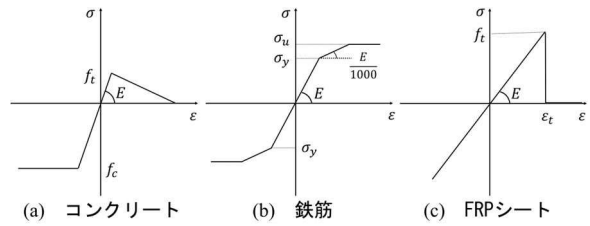


図-6 材料構成則

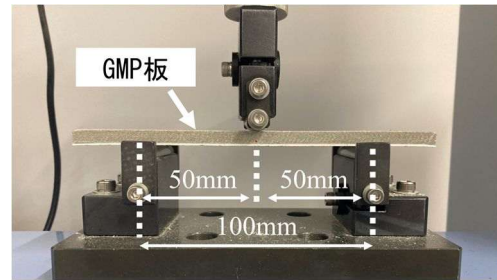


図-7 GMP 板の要素試験概要

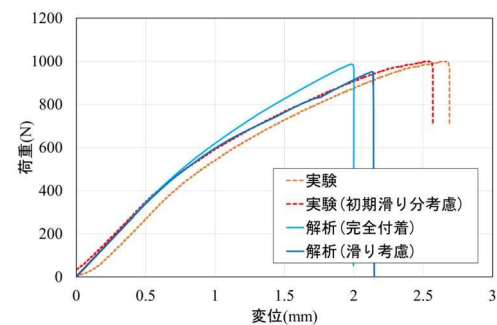


図-8 GMP 板の要素試験（荷重-スパン中央変位）

$$G_f = \frac{1}{100} (d_{max})^{\frac{1}{3}} f'_{ck}{}^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$h = \sqrt[3]{V} \quad (3)$$

ここに、 E ：静弾性係数、 E_c ：軟化係数、 f_t ：引張強度 (MPa)、 G_f ：破壊エネルギー (N/m)、 d_{max} ：粗骨材の最大径(20mm)、 f'_{ck} ：圧縮強度 (MPa)、 h ：平均要素長 (mm)、 V ：要素の体積 (mm³)。

コンクリート圧縮側の構成則については、圧縮強度に達した後、その強度を維持するものとする。グラウトは脆性的な破壊を再現するため、引張強度に達した後、カットオフとした。コンクリートおよびグラウトは分散ひび割れモデルとした。

(b) 鉄筋

鉄筋は、von Mises に従う等方硬化型の弾塑性体とした。また、図-6 (b) に示すようにトリリニアモデルとし、降伏ひずみに達した後のひずみ硬化係数を 1/1000 と設定した。

(c) GMP 板（繊維補強セメント板+FRP シート）

繊維補強セメント板はコンクリートと同様、線形 Mohr-Coulomb 則に従う降伏条件とした。また FRP シートは等方弾塑性体を仮定し、図-6 (c) に示すように、引張側における応力-ひずみ関係は、引張強度まで線形弾性で、破断ひずみに達すると応力がゼロとなる線形-破断モデルを構築した。また、基本的に材料特性には材料試験値または一般値を用いているが、付着特性については、繊維補強セメント板表面の材料強度が非常に弱く、付着試験を実施することは困難である。そこで、別途実施した要素試験（図-7 参照）の結果をもとに材料パラメータ（粘着エネルギー、臨界開口変位、最大開口変位）を同定した。要素試験の実験結果と解析結果の比較を図-8 に示す。図に示すように実験の要素試験の境界条件等による支点滑りの影響差（初期勾配）を考慮した実験結果（赤点線）と比較すると、荷重低下した際の変位の差異は多少あるものの、解析においても実験と同様の両材料間の付着の影響を考慮できており、本手法を用いる

ことで GMP 板の力学特性を再現できた。

(d) FRP アングル

FRP アングルにおいても、引張強度に達した時点でカットオフされるものとした。

3.3 載荷条件および収束条件

載荷は実験と同様 300mm スパンとし、変位制御による増分解析法とした。収束計算には、最も一般的に用いられる Newton-Raphson 法を採用した。また収束判定基準は残差の相対判定を採用し、その時点の計算で得られる最大の反力を分母、残差を分子とする比である収束許容値が 0.1 以下であれば収束したとみなす。

3.4 従来工法適用 RC 梁における実験・解析結果

図-9, 10 に実験および解析結果を示す。なお、図-10 に示すひずみ値は、圧縮側コンクリートおよび引張側主鉄筋のスパン中心部で計測したものを示す。この結果から、従来工法適用 RC 梁は曲げひび割れ発生後の部材剛性が、健全 RC 梁と比較して大きく増加し、GMP 板のパネル割れにより急激に荷重低下する挙動を示し、終局となった。最大耐力差は約 1.8 倍となり、補修工法としては十分な曲げ耐力を有することが確認でき、過剰な補修設計であることが示唆される。また、両供試体ともに破壊モードは曲げ引張破壊であった。実験と解析結果を比較して、健全 RC 梁、従来工法適用 RC 梁ともに各イベント荷重・曲げ剛性・ひずみ分布が概ね一致していることから、従来工法適用 RC 梁に対して、再現可能な解析モデルが構築できたと言える。

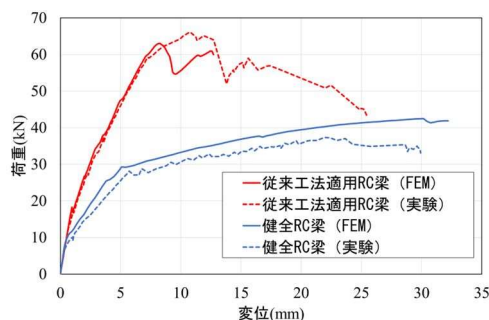


図-9 荷重-変位関係（従来工法適用 RC 梁）

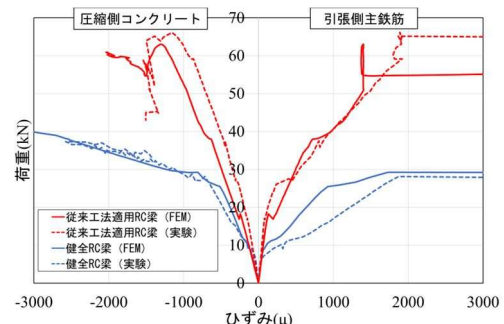
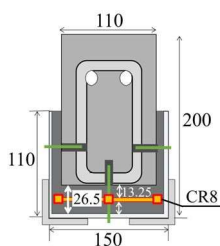
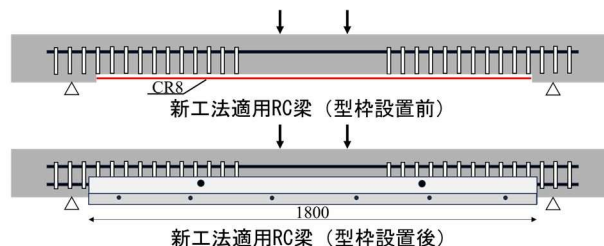


図-10 荷重-ひずみ関係（従来工法適用 RC 梁）



断面図



側面図

図-11 形状寸法（新工法適用 RC 梁）

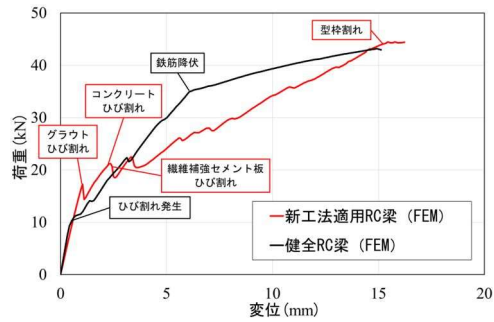


図-12 事前解析結果（荷重－変位関係）

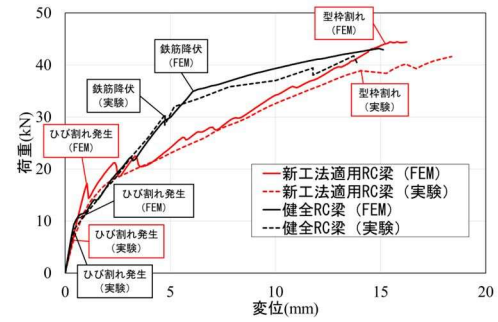


図-13 事前解析との比較（荷重－変位関係）

4. 新工法適用 RC 梁に対する検討

4.1 解析モデル概要（新工法適用 RC 梁）

3.4 に示した従来工法を対象とした妥当な解析モデルを用いて、主鉄筋を FRP グリッドに置換えた新工法の RC 梁モデルを作成した。新工法適用 RC 梁の断面図、側面図を図-11 に示す、そして表-1 に仮定した材料特性を示す。また、従来工法モデルからの変更点について、以下に記す。まず、既往の従来工法適用 RC 梁に関する研究⁹⁾により、補強部材ではなくグラウト漏れ防止の施工上の役割を想定した FRP アングルの、過大な補剛効果が確認されたため、新工法を対象とした供試体においては、塩ビ製アングルに材料変更した（材料モデルは FRP シートと同様）。また FRP グリッドは、事後の曲げ載荷試験において破断強度まで到達しない想定であるため、線形弾性体とし、FRP グリッド－グラウト間の界面は、埋め込み要素機能による完全付着を仮定した。

4.2 新工法適用 RC 梁の事前解析結果

健全 RC 梁（形状寸法および載荷方法は従来工法検討時と同様）と、断面欠損させた RC 梁に新工法を適用した梁の 2 種類の解析結果を図-12 に示す。結果から、両供試体ともにひび割れ発生までは同じ剛性をたどり、それ以降、新工法適用 RC 梁では、グラウト、母材コンクリート、繊維補強セメント板の順にひび割れが発生し、その影響により曲げ剛性が、健全 RC 梁と比較して、大きく減少していることが確認できる。その後、鉛直変位の増加に伴い荷重は増加し続け、約 40kN 時点で型枠割れ（FRP シート破断）となった。両供試体を比較して、終局荷重はほぼ同程度であり、RC 梁の引張側主鉄筋を、型枠および FRP グリッドで置き換えることで、耐力回復が期待できることを確認できた。ただし、両供試体における、ひび割れ発生後の曲げ剛性の差については、さらなる検討が必要であることが明らかとなった。

4.3 静的載荷試験による実証実験

上述した、新工法適用 RC 梁を対象とした事前解析に対する実証実験として、3 章と同様の載荷方法により 4 点曲げ載荷試験を実施した。供試体寸法は事前解析と同様とし、健全 RC 梁と新工法適用 RC 梁の 2 種類の曲げ

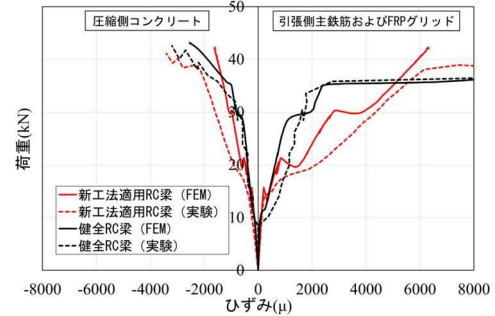


図-14 事前解析との比較（荷重－ひずみ関係）

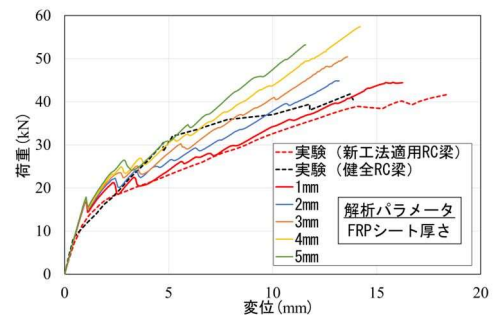


図-15 FRP シート厚さによる曲げ剛性への影響（荷重－変位関係）

耐力特性を比較した。

4.4 実験結果および事前解析との比較

事前解析および実験を比較した結果を図-13, 14 に示す。なお、図-14 に示すひずみ値は、圧縮側コンクリートおよび引張側主鉄筋、FRP グリッドのスパン中心部で計測したものを示す。まず、健全 RC 梁の結果においては、ひび割れ発生・鉄筋降伏・最大耐力と各イベント荷重、そして曲げ剛性も精度よく再現できていることが確認できる。

次に、新工法適用 RC 梁においても、概ね精度よく実験結果と同様の曲げ剛性を再現できていて、各イベント荷重についても概ね一致しているが、ひび割れ発生荷重に差異があった。これはコンクリート－グラウト界面を完全付着と仮定しているため、解析値の方が高い値を示したのと考えられる。また、実験において、両供試体の破壊形態は曲げ引張破壊で終局となり、事前解析と同

様に、終局荷重は同程度であることが確認できた。

4.5 繊維補強型枠内 FRP シートの厚さによる影響

以上の結果から、解析・実験結果ともに、主鉄筋を型枠+FRP グリッドで置き換えることで、健全 RC 梁と同耐力まで補修できることが確認できたが、新工法適用 RC 梁の曲げ剛性は、健全 RC 梁と比較して不足しており、さらには、供用後の使用状態となり得る箇所であるため、元の曲げ剛性と同等以上の剛性回復が必要である。ただし、格子間隔 50×50 (mm) における CR8 グリッド以上の規格は流通しておらず、グリッドの規格変更は困難である。そこで、型枠内の FRP シート厚さに着目し、シート厚さ (1~5mm) をパラメータとした非線形 FEM 解析を実施した。解析結果 (荷重-変位関係) を図-15 に、母材コンクリートの最大耐力時のひび割れ分布性状比較を図-16 に示す。なお、FRP シート 2~4mm モデルにおいては、型枠割れ (FRP シート破断) に到達する前段階で、コンクリート・グラウト・繊維補強セメント板のひび割れが広範囲に発生し、解が収束しなくなった点を終局としている。結果から、FRP シート厚さを 5mm に設定することで、梁下面の引張剛性の多くを負担でき、健全 RC 梁と同程度以上の曲げ剛性を確保することが確認できた。また、FRP シート 1mm モデルと 5mm モデルとの母材コンクリートのひび割れ分布比較により、FRP シートを増厚させた場合、ひび割れ抵抗性が高く、ひび割れ幅やひび割れの進展が抑えられることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、ベースとなる複数の層構造を有した従来工法適用 RC 梁の引張側主鉄筋を、FRP グリッドに置き換えた新工法を提案し、新工法を適用した RC 梁の曲げ耐荷特性を解析及び実験により明らかにした。さらに、新工法適用 RC 梁の剛性不足を補う目的で、型枠内の FRP シートに着目した検討を行った。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 新工法適用 RC 梁における非線形 FEM 解析により、RC 梁の引張側主鉄筋を、型枠と FRP グリッドに置き換えた場合、終局荷重は健全 RC 梁と同程度までの回復が期待できることが確認できた。ただし、ひび割れ後の剛性が不足することがわかった。
- (2) 新工法適用 RC 梁における実証実験により、曲げ剛性およびイベント荷重を概ね追従できる、妥当な解析モデルを構築できた。
- (3) 型枠の FRP シート厚さをパラメータとした非線形 FEM 解析を実施し、新工法適用 RC 梁の FRP シートを 5mm とすることで、不足する曲げ剛性を回復できることが確認できた。また、FRP シートを増厚させることで、母材コンクリートのひび割れ進展を抑

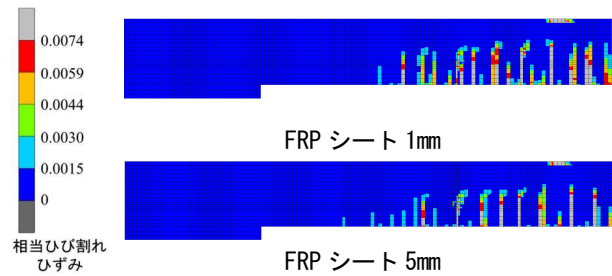


図-16 母材ひび割れ分布性状 (最大耐力時)

えられることが分かった。

今後は、本稿で実施していない FRP シート以外の型枠寸法の検討、そして実施工に向けた実構造物との相関関係を明確にしていく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご尽力を賜りました、エスエルテック株式会社の箱嶋きらら氏、鹿児島大学大学院の正田詩織氏、九州工業大学および関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山内浩, 柏原裕彦, 古川元一: 港湾施設の維持管理と課題について, コンクリート工学, 47 巻 9 号, pp.82-85, 2009.9
- 2) GF プロテクト工法 (ダイキ工業株式会社): <https://daiki-kogyo.co.jp/gfprotect>, (閲覧日: 2025 年 1 月 9 日)
- 3) FRP 永久型枠工法 (東亜建設工業株式会社): <https://www.toa-const.co.jp>, (閲覧日: 2025 年 1 月 9 日)
- 4) 構造設計株式会社, 中日本建設コンサルタント株式会社: 鉄筋コンクリート矩形梁の設計計算プログラム “KUKU” 利用者のための解説書, 土木工学設計プログラミングアーカイブ資料 2.1, 2002
- 5) MSC. Software, Marc 2021.1 Volume A: Theory and User Information 2020
- 6) Bazant Z.P., Oh B.H.: Crack band theory for fracture of concrete, Materials and Structures 16, pp.155-177, 1983
- 7) 國本拓也, 田嶋和樹, 白井伸明: グラウト材の力学的性能の破壊エネルギーの実験的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.673-678, 2008
- 8) 小尾博俊: 鉄筋腐食により劣化した RC 梁の耐荷性能に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, pp.235-240, 2019
- 9) 平山翼, 玉井宏樹, 天野佳絵, 箱嶋きらら: 繊維補強永久型枠工法を適用した RC 梁の耐荷性能に関する実験及び数値解析的検討, 土木構造・材料論文集, 第 40 号, 2024