

論文 エポキシ樹脂で付着確保した BFRP メッシュ補強モルタルの曲げ挙動

佐藤 大地*1・岩下 健太郎*2・稲垣 廣人*3・高見 肇*4

要旨: 大規模地震災害を背景に、コンクリート構造物およびその構成材料に対してより大きな靱性が求められている。本研究では、格子状のバサルト繊維メッシュをエポキシ樹脂で含浸・成形した BFRP メッシュを混入させることでモルタルの靱性向上を図った。このとき、所定の性能が発揮されるためには BFRP メッシュの付着確保が重要であるため、本研究では、打設前にメッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布することにより付着を確保した。このように性能を向上・安定化させたモルタルの曲げ挙動を実験的に検討し、性能の向上効果を検証した。また、有限要素法に基づく解析モデルを構築し、実験結果を評価した。

キーワード: BFRP メッシュ, バサルト繊維, モルタル, エポキシ樹脂, 曲げ挙動, 有限要素法

1. はじめに

大規模な地震による災害を背景に、土木構造物に対して大きな靱性が求められている。そうした中、終局時には微細で高密度の複数ひび割れが形成することにより、大きな靱性を許容する材料である短繊維混入コンクリートが注目されている。著者らは、短繊維のように分散性を考慮する必要が無く、メッシュ状でモルタルとの付着を確保できるバサルト繊維複合材 (BFRP) メッシュに着目し、その混入によりモルタルのひび割れ発生後の曲げ靱性の向上を図る研究を開始した。しかし、基礎的な性状を把握することを目的に実験を行ったところ、BFRP メッシュを混入したモルタルの曲げ試験において、BFRP メッシュの部分剥離や段階的な部分破断、そして、それに伴う荷重の不安定化が生じた。

そこで、本研究では BFRP メッシュの付着確保を目的として、打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布する方法を採用した。既報¹⁾において、この方法により既設のコンクリート表面に FRP を接着した場合と同程度の付着強さが確保できることが実験的に示されている。本研究では打設前にエポキシ樹脂を塗布することにより曲げ特性を向上・安定化させたモルタルの曲げ挙動を実験的に検討し、その効果を検証した。また、有限要素法に基づく解析モデルを構築し、実験結果を評価した。

2. 実験方法

BFRP メッシュ混入によるモルタルの強度や靱性の向上効果、およびこの混入モルタルの曲げ挙動を評価するため、コンクリート標準示方書[規準編]²⁾における JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠した寸

法、すなわち、幅 100mm×高さ 100mm×長さ 400mm の供試体を作製し、曲げ試験を実施した。打設したモルタルは重量比で水：普通ポルトランドセメント：珪砂 5号が 0.7:1:2 となるよう配合した。実験パラメータは BFRP メッシュの枚数 (0 枚, 1 枚, 2 枚, 3 枚, それぞれ CM-N, CM-B1, CM-B2, CM-B3 と呼称する。) とエポキシ樹脂の事前塗布による接着の有無 (事前塗布を行った供試体を CM-B3-W と呼称する。エポキシ樹脂の可使時間は 25 ± 10 分, 塗布量は 1 面あたり 200g/m², 塗布後 10 分以内にモルタルを打設した) とし、それぞれの供試体について 3 体の実験を行った。BFRP メッシュは、0°, 90° 方向に 1 本 200tex のバサルト繊維紐を 4.2mm 格子間隔で編んだバサルト繊維メッシュをエポキシ樹脂で含浸・成形したものである。供試体の幅内にはメッシュ 1 枚あたり 14 本の BFRP 棒が混入される。BFRP メッシュの詳細寸法を図-1 に、各種材料の物性値を表-1 にそれぞれ示す。BFRP メッシュについては BFRP 棒 (1 本) の引張試験を 10 本行い、平均値を物性値として採用した。また、モルタルの物性については 3 体の φ100mm×200mm の円柱供試体 3 体の試験結果を平均した値を採用した。モルタル供試体は、打設後に屋外環境下で湿布養生を行い、

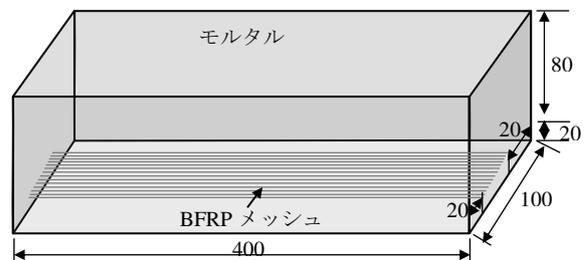


図-1 BFRP メッシュの詳細寸法

*1 名城大学 大学院理工学研究科建設システム工学専攻 (学生会員)

*2 名城大学 理工学部建設システム工学科 (正会員)

*3 JCK (株) 代表取締役 (正会員)

*4 榎屋ティスコ (株) 商品開発室 室長

表-1 材料の物性値一覧

BFRP メッシュ	引張強度 σ_f (N/mm ²)	2210
	引張弾性率 E_f (kN/mm ²)	91.0
	1枚の断面積 A_f (mm ²)	2.07
	繊維含有率 V_f (%)	50
エポキシ樹脂	引張強度 σ_e (N/mm ²)	45
	引張弾性率 E_a (kN/mm ²)	1.5
モルタル (材齢 28 日)	圧縮強度 (N/mm ²)	35.9
	割裂引張強度 (N/mm ²)	2.70

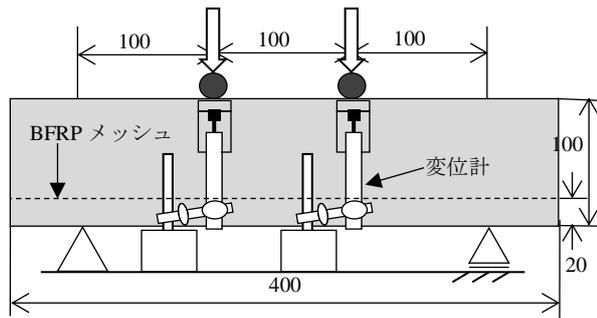


図-2 4点曲げ試験の詳細

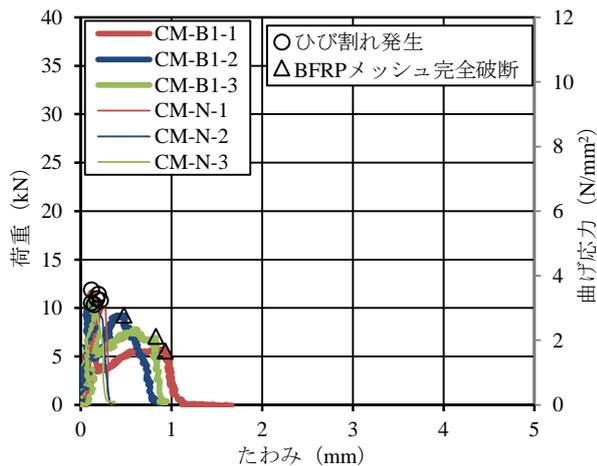


図-3 荷重-たわみ関係 (CM-B1, CM-N)

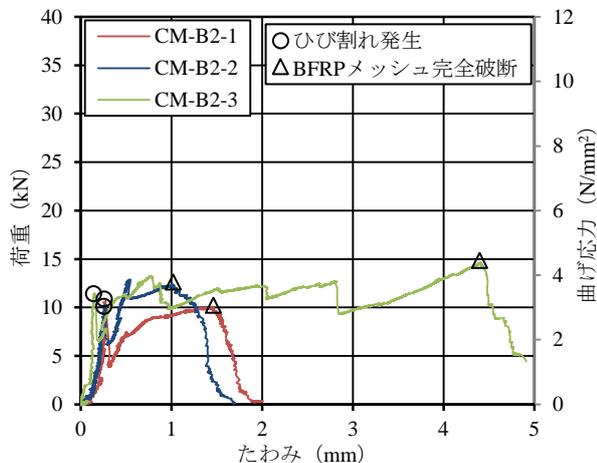


図-4 荷重-たわみ関係 (CM-B2)

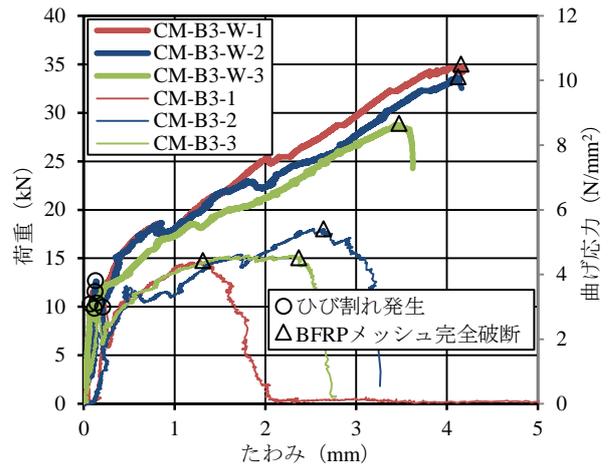


図-5 荷重-たわみ関係 (CM-B3-W, CM-B3)

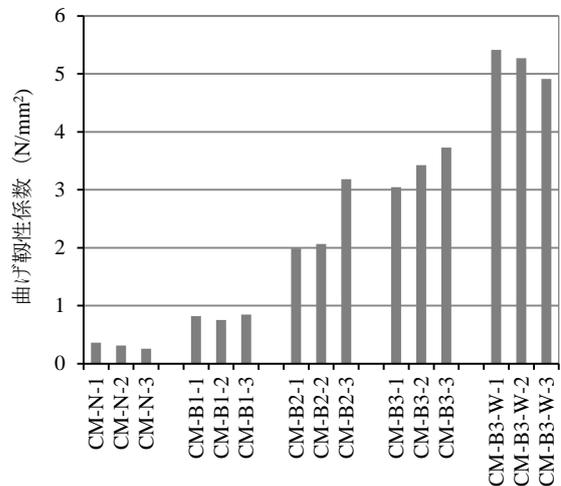


図-6 曲げ靱性係数一覧

28日間の養生後に2000kN加圧試験機により4点曲げ試験を実施した。曲げ試験の状況を図-2に示す。計測機器及び項目は、荷重および、供試体両側面の各載荷点に設置した変位計により測定したたわみ(平均値)とした。

3. 実験結果と考察

4点曲げ試験の結果より、荷重(曲げ応力)-たわみ曲線を図-3, 図-4, 図-5に、式(1)より求めた曲げ靱性係数の一覧を図-6に、ひび割れ分布状況を図-7にそれぞれ示す。図中のBFRPメッシュ完全破断は、14本のBFRP棒すべてが破断し、供試体が2つに割れる直前の地点を示す。また、曲げ応力はJSCE-G 552-2010「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」²⁾に規定されている式(2)より算出した。

$$f_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (1)$$

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (2)$$

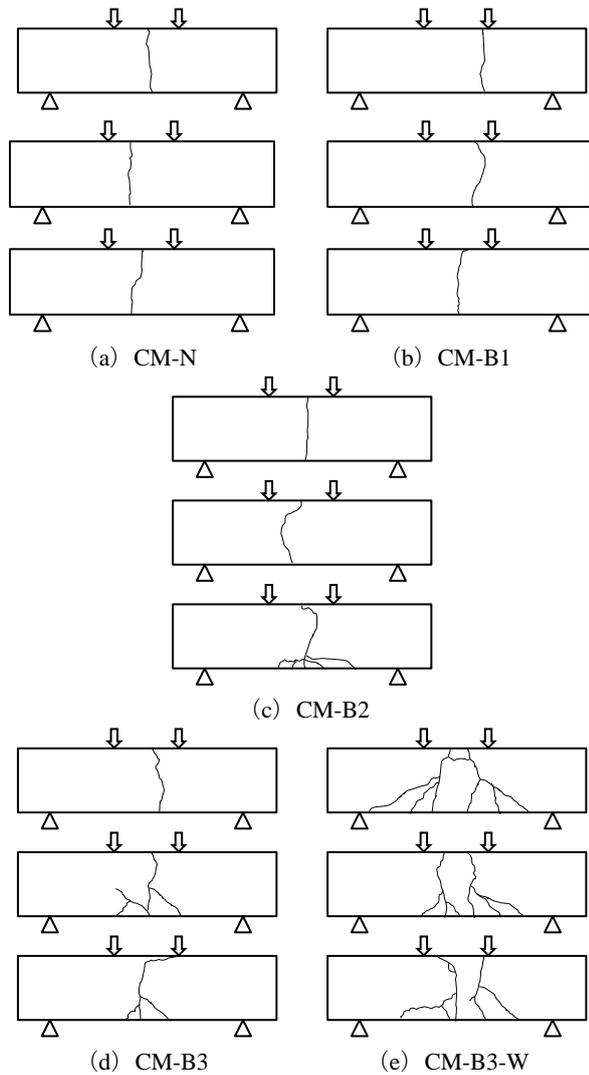


図-7 ひび割れの分布状況

ここで、 \bar{f}_b は曲げ靱性係数、 T_b は荷重-たわみ曲線における δ_{tb} までの面積、 δ_{tb} はスパンの $1/150$ となるまでの載荷点のたわみ、 l はスパン、 b は破壊断面の幅、そして h は破壊断面の高さ、 P は荷重である。

CM-N のケースでは、供試体のスパン中央部に 1 本のひび割れが発生して 2 つに割れ、載荷を継続できなくなったが、CM-B1 のケースでは 1 本のひび割れ発生後、一時的にひび割れ発生直前における荷重の 50% 程度低下するも、その後はやや荷重が増加するひずみ硬化が見られた。また、CM-N のケースに比べて最大荷重は向上しないが、終局破壊時のたわみは 410%、曲げ靱性係数は 161% それぞれ増加した。さらに、CM-B2、CM-B3 と補強量が大きいほど、このひずみ硬化がより明確に表れ、CM-N のケースに比べて最大荷重、終局破壊時のたわみ、曲げ靱性係数のすべてについて増加した。また、破断後にひび割れ近傍を観察したところ、CM-B1 および CM-B2 については剥落や引き抜けは確認できなかったが、CM-B3 についてはひび割れから両端に向かって

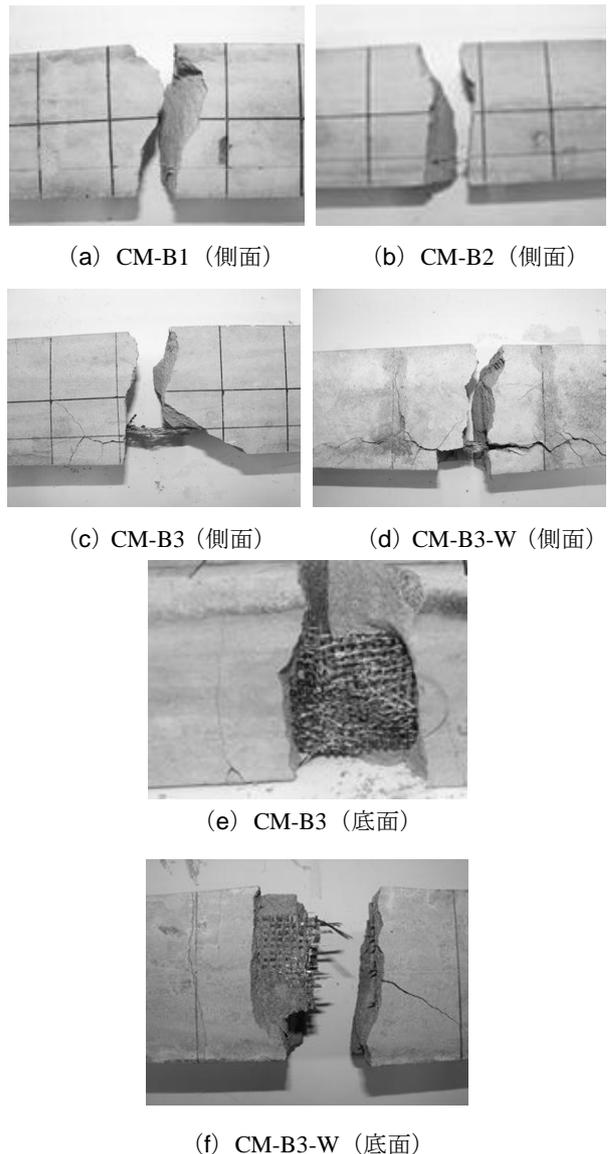


写真-1 BFRP メッシュの破断状況

50mm 程度離れた箇所新たにひび割れが生じ、写真-1 に示すように BFRP メッシュの引き抜けや段階的な部分破断、かぶりの剥落が生じた。以上から、CM-B3 のようにある程度補強量が大きいケースでは、BFRP メッシュの引き抜けやすべりが生じ、メッシュを構成する 14 本の BFRP 棒間に均一に引張応力が作用せず、荷重が $\pm 1\text{kN}$ 程度変動する現象が多数回に渡り生じたことから、BFRP メッシュの付着確保が重要な課題と考えられた。

そこで、本研究では、モルタルの打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布することにより付着確保を図った。図-5 に示した CM-B3-W と CM-B3 の荷重-たわみ曲線と図-6 に示した曲げ靱性係数より、CM-B3-W のケースでは、CM-B3 のケースに比べて最大荷重は 63%~134%、最大荷重時のたわみは 40%~206%、曲げ靱性係数は 32%~78%、それぞれ向上した。また、CM-B3 のケースでは最大荷重と BFRP メッシュ完全破断

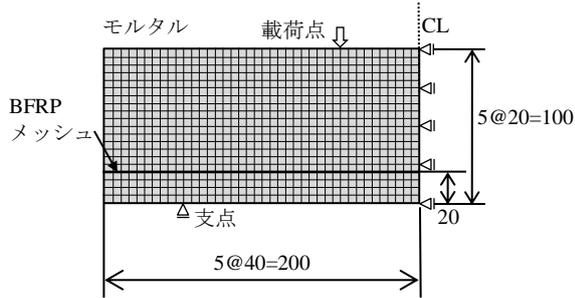


図-9 有限要素解析モデル

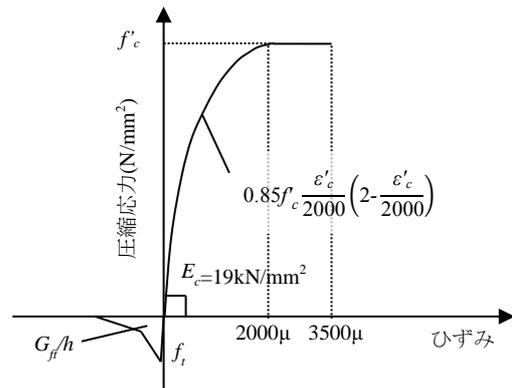
時のたわみがばらついているが、CM-B3-W ではばらつきが制御されている。よって、モルタルの打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布することにより、BFRP メッシュ混入モルタルの曲げ耐力や靱性が向上し、その性能は安定化されることが実験的に明確となった。

4. 有限要素法に基づく解析

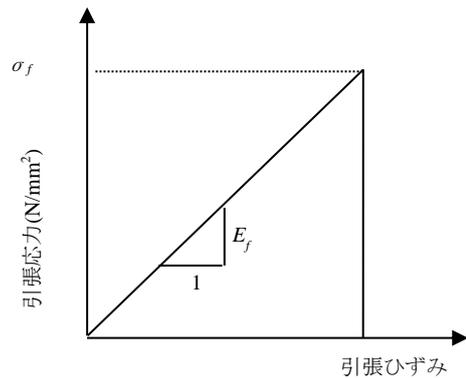
4.1 有限要素解析モデルの構築

解析には汎用ソフト DIANA (Ver9.4) を使用した。解析対象は、供試体の対称性を考慮してスパン方向に 2 等分割した 1/2 モデルである。図-9 に要素分割図を示す。モルタルはアイソパラメトリック平面応力要素、BFRP メッシュは梁要素を用いてそれぞれモデル化した。モルタルおよび BFRP メッシュの構成則を図-10 (a) および図-10 (b) にそれぞれ示す。解析に使用したひび割れモデルは、分布ひび割れモデルの 1 つである直交固定ひび割れモデルとした。モルタルの圧縮上昇域はコンクリート標準示方書 [設計編]³⁾ に基づいて定式化し、圧縮軟化は考慮せずピーク応力を保つものとし、終局ひずみを 3500μ とした。引張上昇域はモルタルのヤング率 E_c の弾性体とし、同示方書における引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルを用いて、要素の等価長さ h を用いてひび割れ幅をひずみに変換している。なお、引張破壊エネルギー G_f は 0.03N/mm と仮定した。

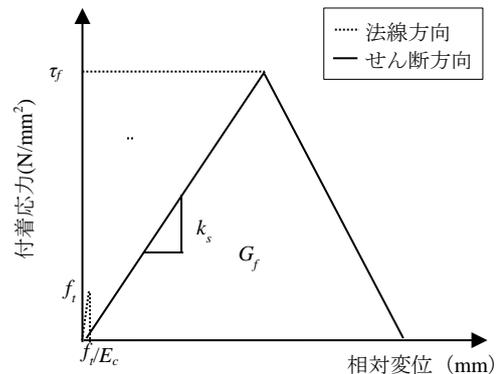
CM-B1, CM-B2, CM-B3-W のケースについては、実験においてモルタルと繊維メッシュの間にすべりが認められなかったため、モデルにおいても両者間を完全付着とした。ただし、CM-B3 のケースについては、実験において BFRP メッシュのすべりが認められたため、モルタルと BFRP メッシュの要素間に界面接合要素を配置し付着応力と接着界面に対する法線方向およびせん断方向の相対変位(すべり)を定義した。その形状は、図-10 (c) に示すように、法線方向は、モルタルの引張強度まで線形で推移し引張強度に到達後応力を開放するモデル、せん断方向は付着応力 τ_f に達するまでせん断剛性 k_s の弾性体とし、 τ_f を超えた後は線形に減衰するものとした。また、この線と相対変位軸とに囲まれた箇所の面積を G_f



(a) モルタル



(b) BFRP メッシュ



(c) 界面接合要素

図-10 材料構成則

とした。ここで、著者らの研究⁴⁾を参照して、 k_s は 10N/mm^3 、 τ_f は 15N/mm^2 、 G_f は 30N/mm とした。また、解析は荷重点部の中央節点に強制変位を与えることにより実施した。

4.2 有限要素解析結果と考察

前項で構築した解析モデルを用いて解析を行った結果より、荷重-たわみ曲線を図-11～図-15 に示す。CM-N, CM-B1, CM-B2 のケースでは、荷重たわみ曲線の形状が類似しており、ひび割れ発生後のひずみ硬化領域もある程度評価できている。また、CM-B3 のケースでも、ひび割れ発生前の剛性およびひび割れ発生後のひずみ硬化領域における剛性については、実験値と解析値で

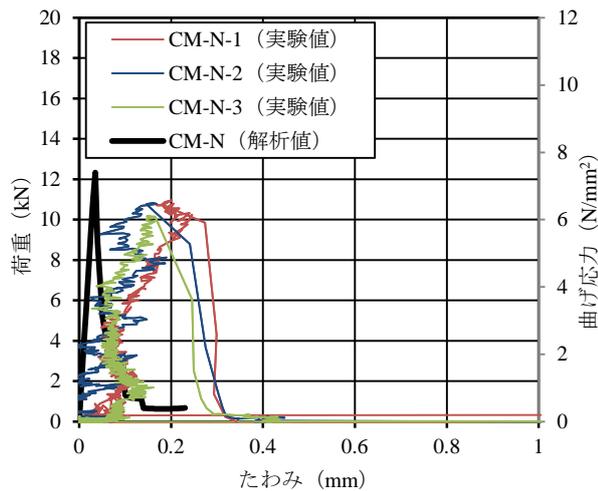


図-11 荷重-たわみ関係
(実験値と解析値の比較, CM-N)

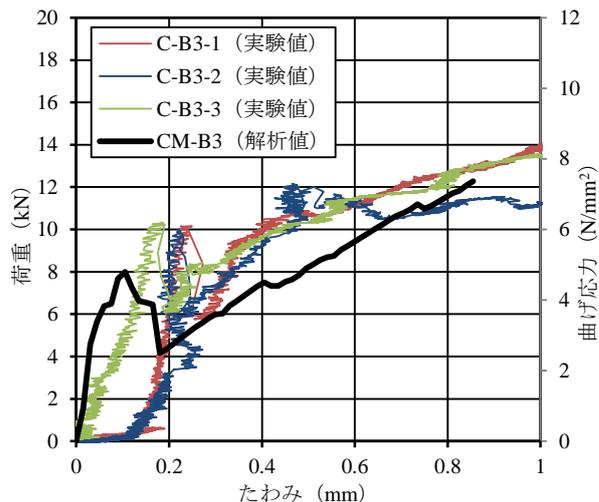


図-14 荷重-たわみ関係
(実験値と解析値の比較, CM-B3)

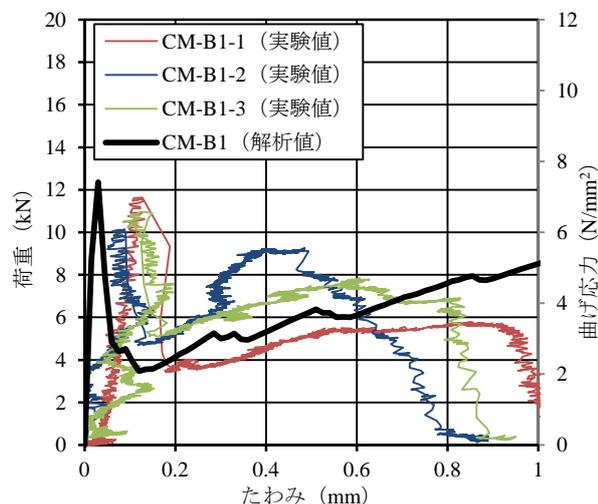


図-12 荷重-たわみ関係
(実験値と解析値の比較, CM-B1)

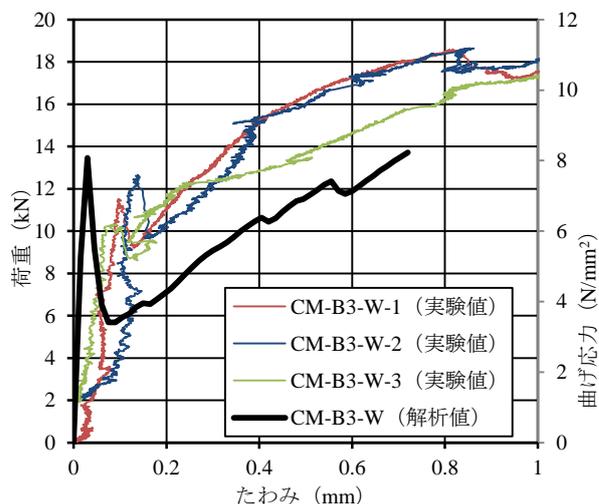


図-15 荷重-たわみ関係
(実験値と解析値の比較, CM-B3-W)

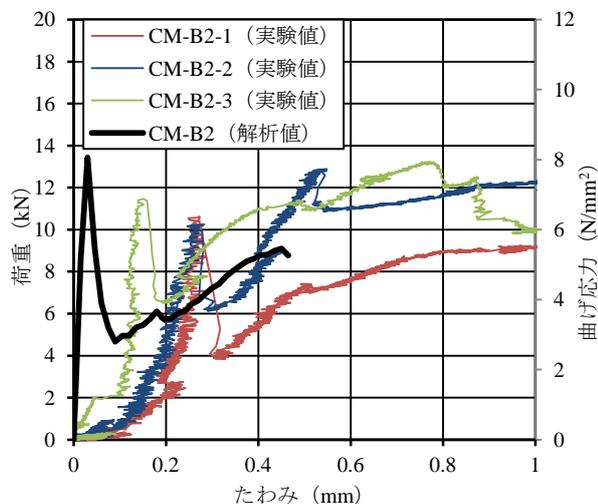
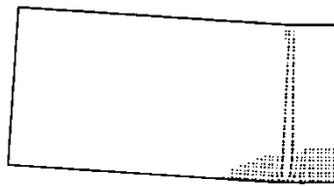
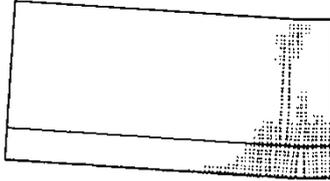


図-13 荷重-たわみ関係
(実験値と解析値の比較, CM-B2)

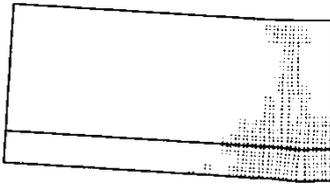
類似しており、安全側には評価できている。しかし、荷重-たわみ曲線の全体に渡って、荷重がやや低く算定されている。これは、界面要素の構成則をうまく設定できていないためと考えられる。そこで、今後はより付着強度を高めたケースで検討を進めたいと考えている。さらに、CM-B3-W のケースでも、ひび割れ発生前の剛性およびひび割れ発生後のひずみ硬化領域における剛性については、実験値と解析値で類似しており、安全側には評価できている。しかし、ひび割れ発生に伴う荷重低下後の領域において、荷重が全体にやや低く算定されている。これは、モルタルの構成則における軟化領域に対し、BFRP メッシュによる拘束が寄与しているためと考えられる。そこで、今後はモルタルの構成則における軟化領域について詳細に検討を進めたいと考えている。一方、有限要素解析の出力より、ひび割れ分布状況を図-16に



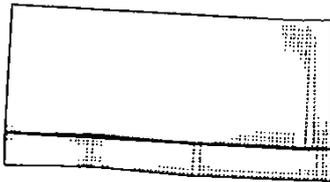
(a) CM-N



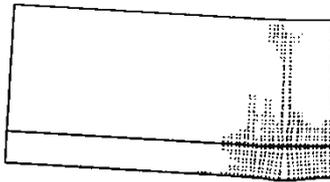
(b) CM-B1



(c) CM-B2



(d) CM-B3



(e) CM-B3-W

図-16 ひび割れ分布図（解析結果）

示す。いずれのケースでも実験と解析のひび割れ位置はある程度類似している。図-16 (d) CM-B3 のケースにおける支点付近および底面に沿ったひびわれは実験時におけるかぶりの剥落を表現していると考えられる。しかし、(e) CM-B3-W において実験時に発生した荷重点から支点までの斜めひび割れは表現されていない。これについては、解析に用いるひび割れモデルに関連する設定を再検討することが重要と考えられる。

5. まとめ

本研究では、打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布することにより付着を確保した BFRP メッシュ補強モルタルの曲げ挙動を実験的に検討し、性能の向上効果を検証した。また、有限要素法に基づく解析モデルを構築し、その妥当性を評価した。本研究の実施によ

り得られた主な成果を以下に纏める。

- (1) モルタルの打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布することで、BFRP メッシュの付着が確保され、その結果、最大荷重、最大荷重時のたわみ、曲げ靱性係数が向上されることが実験的に示された。
- (2) 有限要素解析を行った結果、BFRP メッシュによる補強量が比較的小さく、モルタルが引張弾性領域にある内に BFRP メッシュが破断に至るケースでは、全体に渡って荷重-たわみ曲線を評価できた。また、補強量が比較的大きく、実験において BFRP メッシュの局所的なすべりが生じたケースでも、BFRP メッシュ表面に界面要素を設定することで、ひび割れ発生前の剛性およびひび割れ発生後のひずみ硬化領域における剛性のある程度評価できた。ただし、全体的に荷重がやや低く算定される傾向が見られた。よって、今後は界面要素の構成則を詳細に再検討したいと考えている。
- (3) モルタルの打設前に BFRP メッシュ表面にエポキシ樹脂を塗布したケースについて有限要素解析を行った結果、ひび割れ発生前の剛性およびひび割れ発生後のひずみ硬化領域における剛性についてはある程度評価できた。しかし、ひび割れ発生に伴う荷重低下後の領域において、荷重が全体にやや低く算定された。これは、モルタルの構成則における軟化領域に対し、BFRP メッシュによる拘束が寄与しているためと考えられる。よって、今後はモルタルの構成則における軟化領域について詳細に検討を進めたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、平成 24 年度に私立大学戦略的基盤研究形成支援事業として採択され設置された「名城大学自然災害リスク軽減研究センター(代表者:小高 猛司)」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 岩下健太郎, 呉智深, 三島勇人: ウェットボンディングによる FRP-RC ハイブリッド T 型梁の曲げ性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp. 1747-1752, 2007.7
- 2) コンクリート標準示方書 [規準編], 土木学会, 2010
- 3) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2010
- 4) 岩下健太郎, 呉智深, 坂本宏司: 水中エポキシパテによる連続繊維グリッド複合材の定着性能と向上法に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp. 214-222, 2007.4