

BFRP メッシュ補強モルタル部材への 非線形 FEM 解析の適用に関する研究

名城大学[院] ○佐藤大地 名城大学 岩下健太郎, 森政嘉

JCK 株式会社 稲垣廣人, 呉智仁

榎屋ティスコ株式会社 佐藤讓得, 松本信行, 高見肇, 神崎豊裕

The Applicability of Nonlinear FEM Analysis to the BFRP Mesh Reinforced Mortar

Daichi SATO, Kentaro IWASHITA, Masayuki MORI, Hirono INAGAKI, Zhiren WU,

Yutaka SATO, Nobuyuki MATSUMOTO, Hajime TAKAMI and Toyohiro KANZAKI

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を有することが求められている。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、飛躍的に大きな靱性を許容する材料である短繊維補強コンクリートが注目されている。著者らは、優れた靱性を持つバサルト繊維を格子形状に成型したバサルト繊維複合材 (BFRP) メッシュに着目し、それを混入させることによりセメントモルタルの靱性の向上を図る研究に着手した。本研究では BFRP メッシュ補強モルタルの曲げ試験を行うとともに、破壊挙動を適切に把握可能な解析手法の構築を目的として、BFRP メッシュを構成する BFRP 棒の引張強度のばらつきを考慮した三次元有限要素法 (FEM) による弾塑性解析を試みた。

2 実験概要

BFRP メッシュ補強モルタルの詳細寸法を図-1 に示す。コンクリート標準示方書における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 で供試体下部から 20mm の高さに BFRP メッシュを配置している。実験パラメータは BFRP メッシュの枚数(0 枚, 3 枚, それぞれ CM-N, CM-B3 と呼称する。)と BFRP メッシュの付着確保のための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。塗布量は 1 面あたり 200g/m²) とし、それぞれの供試体について 3 体の実験を行った。事前塗布時の塗厚は塗布量をエポキシ樹脂の比重で除した値、すなわち 0.169mm である。BFRP メッシュは、0°、90° 方向に一本 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・成型したものである。供試体のスパン方向には BFRP メッシュ 1 枚あたり 14 本の BFRP 棒が混入される。各種材料の物性値を表-1 に示す。

3 解析概要

BFRP 棒の引張試験より得られた引張強度 σ_f と繊維含有率 V_f の関係を図-3 に示す。BFRP メッシュを構成する BFRP 棒の断面積 A_f を BFRP メッシュの総断面積 A_{all} で除し、その値を繊維含有率 $V_f(\%)$ と呼称する。BFRP メッシュのエポキシ樹脂を含めた見かけ上の弾性率 E_{f-ave} および引張強度 σ_{f-ave} は式(1)、(2)で求めた。

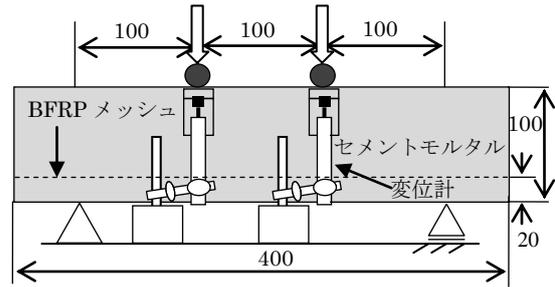


図 - 1 BFRP メッシュ補強モルタルの詳細寸法

表 - 1 材料の物性値

BFRP メッシュ	平均繊維含有率 $V_{f-ave}(\%)$	50
	1 枚の断面積 $A_f(\text{mm}^2)$	2.07
エポキシ樹脂	比重 (g/cm^3)	1.08
	引張強度 $\sigma_e(\text{N}/\text{mm}^2)$	45
	引張弾性率 $E_e(\text{kN}/\text{mm}^2)$	1.5
セメントモルタル (材齢 28 日)	圧縮強度 $f'_c(\text{N}/\text{mm}^2)$	35.9
	割裂引張強度 (N/mm^2)	2.70

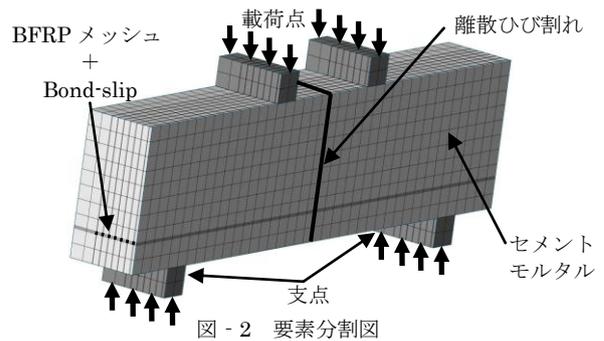


図 - 2 要素分割図

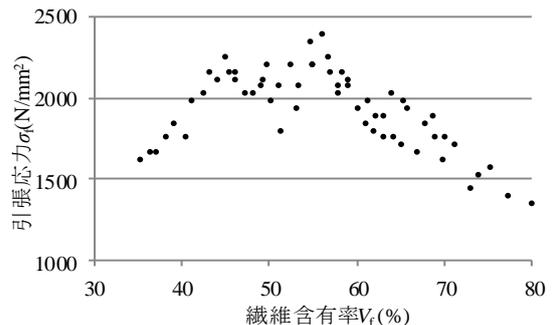


図 - 3 BFRP 棒の引張応力と繊維含有率の関係

$$E_{f-ave} = \frac{E_f A_f + E_c (A_{all} + A_{et} - A_f)}{A_{all}} \quad (1)$$

$$\sigma_{f-ave} = \frac{\sigma_f A_f + \sigma_e (A_{all} + A_{et} - A_f)}{A_{all}} \quad (2)$$

事前含侵時のエポキシ樹脂の断面積 A_{et} はスパン方向に混入される BFRP 棒の断面積の平方根を塗厚で乗じた値、すなわち、 0.119mm^2 となる。CM-B3 について、BFRP メッシュを構成する BFRP 棒の引張強度 σ_f のばらつきを考慮して図-3 を参考に以下のケースの解析を試みた。すなわち、試験体内のスパン方向の BFRP 棒のうち、最外側の引張強度を 1400N/mm^2 , 1800N/mm^2 , 2100N/mm^2 とし、最内側までそれぞれ 100N/mm^2 ずつ増分するケース (CM-B3-C1, CM-B3-C2, CM-B3-C3 と呼称する。) を試みた。CM-B3-W について、エポキシ樹脂の事前含侵により BFRP メッシュを構成する BFRP 棒のばらつきは小さいと考えられるため、試験体内のすべての BFRP 棒の引張強度を 2300N/mm^2 , 2500N/mm^2 , 2700N/mm^2 としたケース (CM-B3-W-C1, CM-B3-W-C2, CM-B3-W-C3 と呼称する) を試みた。解析には汎用ソフト DIANA (Ver.9.4) を使用した。モデルは供試体の対称性を考慮して供試体のスパン方向に 2 等分割した 1/2 モデルである。図-2 にモデルを示す。セメントモルタルおよび供試体のスパン方向の BFRP メッシュはソリッド要素でモデル化した。供試体の断面方向の BFRP メッシュは 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。セメントモルタル要素について、圧縮側は、圧縮試験から得られた圧縮破壊強度 f'_c を用いて圧縮ひずみ 3500μ まではコンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 3500μ 以降はピーク応力を維持するものとした。引張側は、同示方書の線形軟化モデルを用いて定式化した。BFRP メッシュ要素は引張応力 σ_f に達した時点で破断したと見なされるモデルを用いた。ここで、本解析では、BFRP メッシュ補強モルタルの実挙動に即して BFRP メッシュの破断や引抜け性状を評価するため、セメントモルタル部、セメントモルタル-BFRP メッシュ間に界面接合要素を適用した離散ひび割れモデル、Bond-slip モデルを配置してひび割れの開口、BFRP メッシュのすべりをモデル化した。本解析は、載荷点に配置した鋼板要素の中央接点部に強制変位を与え、収束計算に、初期剛性法を用いることにより実施した。

4 結果と考察

曲げ試験においては CM-B3, CM-B3-W はひび割れ開口後、荷重が増加するひずみ硬化が見られた。また、最大荷重時の BFRP メッシュの破断性状は CM-B3 のケースでは BFRP 棒が一本ずつ段階的に破断し、CM-B3-W のケースではすべての BFRP 棒が急激に破断するものであった。前項で構築した解析モデルを用いて解析を行った結果および実験結果より、荷重-変位関係を図-4, 図-5 に示す。CM-B3 の解析ケースでは、モルタル部と BFRP

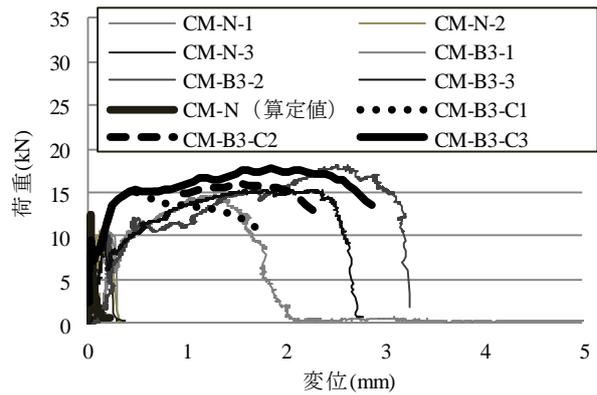


図-4 荷重-変位関係

(実験値と算定値の関係, CM-B3)

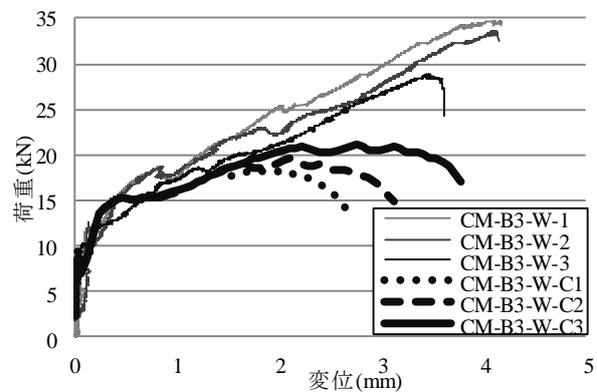


図-5 荷重-変位関係

(実験値と算定値の関係, CM-B3-W)

メッシュの付着力が小さいことに起因する数本の BFRP 棒への引張応力の集中、それに伴う段階的な破断性状が見られた。そのうち、CM-B3-C2, CM-B3-C3 は実験結果をよく表現出来ている。CM-B3-W の解析ケースでは、エポキシ樹脂の事前塗布により引張応力が BFRP メッシュ全体に分散、それに伴う全ての BFRP 棒の急激な破断性状が見られた。そのうち、CM-B3-W-C3 は実験結果をよく表現出来ている。よって本研究の FEM 解析手法により実験結果とほぼ同様の破壊挙動を表現可能であるものと推察される。

5 まとめ

本研究では BFRP メッシュ補強モルタルの破壊挙動を適切に把握可能な解析手法の構築を目的として BFRP メッシュを構成する BFRP 棒の引張強度のばらつきを考慮した FEM 解析を試みた。その結果、破壊挙動をよく表現出来た。また、エポキシ樹脂の事前塗布を行ったケースにおいても同様に破壊挙動をよく表現出来た。

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、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。