論文 高靭性セメント複合材料を用いた梁の曲げひび割れ挙動に関する 数値解析的研究

菊地 俊文^{*1}·三橋 博三^{*2}

要旨:本研究では,高靭性セメント複合材料について行った圧縮試験および直接引張試験の 結果から構成則のモデル化を行った。その高靭性セメント複合材料を用い,引張鉄筋を配し た曲げ部材について,非線形有限要素法による数値解析を行い,3点曲げ試験の結果との比 較検討により、上述のモデルの妥当性を確認した。また,有限要素寸法を変化させることで, 曲げひび割れ挙動に対する影響を検討した。

キーワード:高靭性セメント複合材料,非線形有限要素法,有限要素寸法

1. はじめに

曲げモーメント作用下あるいは引張応力作用 下における複数ひび割れと、これに伴う擬似ひ ずみ硬化を特徴とする高靭性セメント複合材料 を対象とした数値解析が行われているが,解析 に用いる構成則やひび割れモデルなどの妥当性 については十分に検証されていないのが現状で ある。理由の一つに,現在まで高靭性セメント 複合材料の利用を念頭においた実験が多く,解 析モデルの検証を行うための要素実験のデータ が十分でないことが挙げられる。優れた材料特 性を部材性能に生かす合理的な性能評価法を確 立するためには,より詳細な分析が必要である。 とりわけ非線形有限要素法解析は,材料特性が 部材あるいは構造物の破壊過程,耐力,変形能 など影響を及ぼすメカニズムを分析することを 目的とした場合、有力な手法となる。

本論文では,非線形有限要素法解析を用いて, 圧縮及び直接引張試験による実験結果から比較 的簡易な構成則のモデル化を行う。その高靭性 セメント複合材料を用いて作製し,引張鉄筋を 配した曲げ部材を対象とした実験及び解析を行 い,解析モデルの適用性を検証したものである。 2. 実験概要

2.1 構成材料及び調合

高靭性セメント複合材料の構成材料として, 早強ポルトランドセメント(C),シリカフューム (SF),7号珪砂(S),高性能 AE 減水剤(SP),ポリ エチレン繊維(PE)(繊維長 6mm,直径 12µm),ス チールコード(SC)(繊維長 32mm,直径 450µm) を用いた。また,調合を表-1に示す。

2.1 圧縮試験概要

JIS A1180 に準じた圧縮試験方法の概要図を図 - 1に示す。50 - 100mm 円柱供試体に対して, コンプレッソメータ(標点間距離: 50mm)を装着 して変位を測定し,応力-ひずみ(変位を標点間 距離で除して算出)関係を求めた。

2.2 直接引張試験概要

東北工業大学,秋田宏教授らによる直接引張 試験方法¹⁾の概要図を図-2に示す。これは中央 部に切り欠きを設置した100×100×400mm角柱 供試体に対して,切り欠き部(切り欠き幅:3mm) をまたいで供試体両側面にパイ型変位計(標点間

表 - 1 調合

		11 1	리이 디				
W/B	SF/B	S/B	SP/B	PE	SC		
[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[vol.%]	[vol.%]		
45	15	40	1.5	1.0	1.0		
B: binder = $C + SF$							

*1 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工博 (正会員)



図 - 3 3 点曲げ試験概要図

距離: 90mm)を設置し,変位制御によって荷重を 加えている。更に載荷時の供試体4面のひずみ 測定を常時行い,ひずみの先行した部分に曲げ 付加荷重を加える事によって引張面を平行に保 つ載荷方法である。この方法により変位を測定 し,応力-ひずみ(変位を標点間距離で除して算 出)関係を求めた。

2.3 引張鉄筋を配した梁の曲げ試験概要

解析の対象となった引張鉄筋を配した梁の3 点曲げ試験方法の概要図を図 - 3 に示す。100 × 100 × 840mm の角柱供試体に対して,有効せい 80mm の位置に D10 の異形鉄筋を1本埋設した ものである。また鉄筋の引き抜けを考慮し、鉄 筋を側面の鉄板によって固定した。載荷は変位 制御によって行い,供試体3体(EXP-1,2,3)そ れぞれの荷重と載荷点変位を測定した。

3. 非線形有限要素法解析

解析は,有限要素法プログラム ATENA²⁾を用 いて,四角形要素による平面応力解析を行った。 ひび割れモデルは回転ひび割れモデルを採用し た。回転ひび割れモデルでは、主応力の方向は 主ひずみの方向と一致し,ひび割れ面にはせん 断ひずみは発生せず,2つの直交する主応力だ けが定義される。載荷中に主ひずみの軸が回転 すると、それにあわせてひび割れの方向も回転 する。

3.1 解析モデル

引張鉄筋を配した梁の曲げ試験に対して,四 角形平面応力要素を使った有限要素モデルを図 4に示す。変形の対称性を考慮して梁の2分 の1を解析対象とした。

3.2 鉄筋モデル

鉄筋は完全付着とし,離散型棒要素を使った



完全弾塑性モデルとした。また,セメント系材 料と比較して,高靭性セメント複合材料ではテ ンションスティフニング効果がより大きく,降 伏後も累加強度効果が生じることから,本解析 では高靭性セメント複合材料に埋設された鉄筋 の両引き試験により得られた結果³⁾を用いて,鉄 筋の物性を変化させることにより,擬似的に累 加強度効果を導入することについても検討する。 これは鉄筋の降伏強度に対して,鉄筋周辺の高 靭性セメント複合材料の最大強度を上乗せし, 鉄筋と高靭性セメント複合材料の複合効果とし て考えたものである。これらの鉄筋モデルの応 力-ひずみ関係を図-5に示す。

3.3 構成則

破壊・塑性モデルは,ひずみを弾性ひずみ, 塑性ひずみ,破壊ひずみに分解し,2軸応力場 に対しては塑性ひずみ成分を Menetrey-Willam 降 伏基準で,破壊ひずみ成分を Rankin 破壊規準で それぞれ独立に評価するモデルである。

3.4 構成則モデル

圧縮構成則モデルを図 - 6 に示す。圧縮強度 の3分の2に達するまでは線形弾性モデルとし, そのひずみ以降で(圧縮応力 / 圧縮強度) - 等価 塑性ひずみ関係により求めている。等価塑性ひ ずみは式(1)より算出した。

$$\mathcal{E}_{eq}^{p} = \mathcal{E}_{c} - \mathcal{E}_{c}^{e} \tag{1}$$

式中, \mathcal{E}_{eq}^{p} は等価塑性ひずみ, \mathcal{E}_{e} は圧縮ひずみ, \mathcal{E}_{e}^{e} は初期ひび割れ発生時のひずみである。ここ で \mathcal{E}_{e}^{e} は実験値より得られた圧縮強度が3分の2 に達した時の歪みとした。

引張構成則モデルを図 - 7 に示す。ひび割れ 発生以前は線形弾性モデルとし,ひび割れ発生 以降は応力 - 破壊ひずみ関係により求めている。 破壊ひずみは式(2)により算出した。

$$\mathcal{E}^f = \mathcal{E}_t - \mathcal{E}_t^e \tag{2}$$

式中, ε^{f} は破壊ひずみ, ε_{t} は引張ひずみ, ε_{t}^{e} は 初期ひび割れ発生時のひずみである。ここで ε_{t}^{e} は実験により得られた応力 ひずみ関係におい て,初期応力が急激に低下した時の歪みとした。

上記の構成則モデルを用いて,圧縮試験より 得られた応力 - ひずみ関係(図 - 8)の実線から, (圧縮応力 σ_c / 圧縮強度 f_c) - 等価塑性ひずみ \mathcal{E}_{eq}^p 関係(図 - 9)を,また直接引張試験より得ら れた応力 - ひずみ関係(図 - 10)の実線から,(引



張応力 σ_{t} / ひび割れ発生強度 f_{to}) - 破壊ひずみ ε^{f} の関係(図 - 11)を得た。また解析に用いた高 靭性セメント複合材料の材料物性値を表 - 2 に 示す。

3.5 有限要素寸法

高靭性セメント系複合材料は引張応力下にお いて複数ひび割れを特徴とする。しかし,切り 欠きが設置された直接引張試験においては,切 リ欠き付近に応力集中が生じる。パイ型変位計 (以下,変位計)の標点間距離 L(L:90mm)の範囲 においても,切り欠き付近とそれより離れた地 点では破壊の進行状況は異なる(図 - 12)。本解析 においては変位計の標点距離間で測定された変 位 を有限要素寸法 L_m(以下,要素寸法)で,除 して,ひずみに変換する際に,その要素寸法を 5mm,10mm,20mm とした mesh シリーズを3 シリーズ(mesh5, mesh10, mesh20),また,変位 を標点間距離で除して,ひずみ換算したもので



表	-	2	材料物性值
23		~	

材料之	弾性係数	圧縮強度	引張ひび割れ発生強度
17 17 1	[GPa]	[MPa]	[MPa]
高靭性セメント 複合材料	15.3	41.5	2.96

要素寸法を 10mm, 20mm とした Base mesh シリ ーズを 2 シリーズ(Base mesh10, Base mesh20)の 計5シリーズの比較を行った。

4. 実験及び解析結果

実験によって得られた荷重 - 載荷点変位関係 を図 - 13 に示す。載荷点変位 2.5mm 付近で鉄筋 降伏後,曲げひび割れが生じ,荷重の増加とと もに曲げひび割れの数が増加する。最大荷重付 近に近づくにつれて,梁中央付近にひび割れが 多数発生し,一部が局所化した。また,載荷点 変位 18mm 付近では載荷点での圧縮ひび割れが 確認できる供試体(EXP-1,3)もあった。

解析より得られた荷重 - 載荷点変位関係を実 験結果の平均値と合わせて図 - 14 に示す。図よ り初期剛性に関しては,全てのシリーズで概ね 良好な対応を示している。しかし,最大強度に 関しては,全てのシリーズで過小評価している。 また,特に mesh20 は実際の挙動に近い結果を示 した。mesh5 では解が収斂せず,十分な結果が得 られなかった。非線形有限要素解析においては, 要素寸法を小さくすると,計算量が増えると共 に,要素ごとの破壊基準に達しやすくなるので, 要素寸法を適切に考える必要がある。

鉄筋の構成則モデルとして累加強度効果を考 慮した解析より得られた荷重 - 載荷点変位関係 を実験結果の平均値と合わせて図 - 15 に示す。 図より初期剛性に関しては,全てのシリーズで 概ね良好な対応を示している。また,最大強度 に関しては,mesh5を除くシリーズで概ね良好な 対応を示しているが,最大荷重後の挙動に違い が確認できる。Base mesh10, Base mesh20 では最 大荷重後に荷重の急激な低下を示すが, mesh10, mesh20 ではそれが緩やかである。また,要素寸 法が大きくなるほど最大荷重後の急激な荷重の 低下が緩和される傾向にある。本解析では,mesh シリーズは変位計による変位を要素寸法で除し て,変換させていることから,要素寸法が小さ いほど,高靭性セメント複合材料の引張変形性 能は上がるものとしている。しかしながら,数 値解析上では逆の現象が起こっているが,これ は要素寸法を小さくした影響よりも要素ごとの



破壊基準に達しやすくなる影響の方が大きい可 能性と圧縮構成則の影響も大きく寄与している 可能性が考えられる。また, Base mesh シリーズ では要素寸法によって挙動も異なることから, 要素寸法効果が生じていることが確認できる。 また,要素寸法が同一の Base mesh10, mesh10 及び Base mesh20, mesh20を比較すると, mesh シリーズのほうが実際の挙動により近いことが 確認できる。変位計による測定値を用いてひず みに換算した実験結果を解析に適用する場合に は,実際の破壊状況も含めて検討する必要があ ることを表しているものと考えられる。

最終破壊状況を図 - 16 に mesh10 及び mesh20 における最終ステップ(強制変位 20mm 時)のひ び割れ幅 0.1mm 以上についてのひび割れ状況を 図 - 17 に示す。図より実際のひび割れ状況に比 べて,解析の方が,実際のひび割れ範囲の2倍 程度の広範囲に分布していることがわかる。最 大ひび割れ幅については実験値で5.5~7.0mmに 対して,最終ステップの解析値で3.5mm 程度で あり,また要素寸法が大きいほど最大ひび割れ 幅が大きくなる傾向にあった。解析では,要素 単位で均一な材料としてみなされるために,全 体にひび割れが進行し,実験結果ほどの局所化 が生じなかったものと思われる。破壊モードに ついては,実験及び解析ともに曲げひび割れか ら始まって,載荷点近傍の圧縮ひび割れに至っ ており,概ね同じ傾向を示した。

5. まとめ

本研究で,得られた結果をまとめると以下の ようになる。

- 1) 累加強度効果を考慮した場合,考慮しない場合より良好な結果を得られた。
- 2) 要素寸法効果を示すとともに,適切な要素寸 法を選択する必要性を示した。
- 今回用いた非線形有限要素法では,ひび割れ が顕著に表現されたが,破壊モードについて は概ね同じ傾向を示した。

謝辞

本研究における直接引張試験は,東北工業大 学の秋田宏教授との共同研究として実施したも のである。また,本研究の一部は鹿島学術振興





図 - 17 ひび割れ状況

財団の援助を得たイタリア・トリノ工科大学と の共同研究の成果である。ここに記し,謝意を 表します。

参考文献

- 秋田 宏ほか:コンクリートの直接引張試験 で得られる引張強度の精度に関する検討,コ ンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.105-112, 2001.5
- Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, Prague, Feb.2004
- 3) 三橋 博三ほか:高靭性セメント複合材料に 埋め込まれた異形鉄筋周りの付着ひび割れ とテンションスティフニング,高靭性セメン ト複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.1-8,2003.12