

RC 多方向ひび割れモデルを組み込んだ有限要素解析による非線形挙動の比較検討

(株)コムスエンジニアリング 正会員 ○福浦尚之
 東京大学 フェロー会員 前川宏一

1. はじめに

土木構造物の多様な検討フェーズに対する解析においては高機能の汎用解析プログラムの利用が進んでおり、鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）の非線形性を取り入れた解析を適用していく場面において汎用解析プログラムが持つ各種機能と組み合わせた解析を行うことは、土木構造物の挙動評価において有用性および実用性があるものと考えられる。これらの汎用プログラムにはユーザーが所要の非線形特性をモデル化して要素の応力ひずみ関係に反映し、これを全体機能と組み合わせて解析ができる機能（以後、ユーザーサブルーチンと称す）を備えているものもある。

本報は、著者らによる空間平均化多方向ひび割れモデル¹⁾（図-1）をユーザーサブルーチンに組み込み、その適用性について基本的な検討をしたものである。土木構造物を解析対象とする 2 つの汎用 FEM プログラム^{2, 3)}（以後、FEM-A,B と称す）を用い、比較解析を行う。なお、解析実施にあたって要素分割は同一とした。

2. 比較解析

まず、正負交番荷重を受ける耐震壁⁴⁾について解析を行った。解析モデルおよび適用物性を図-2 に示す。解析に用いた要素は 4 節点平面応力要素である。解析結果と実験との比較を図-3 に示す。実験との整合性は比較的良好であり、FEM-B の結果は最大荷重および最大荷重に至る剛性が FEM-A より少し高くなっている。FEM プログラムの差異によることが考えられる。

次に、せん断破壊する梁部材の解析を行った。解析対象は、材料非線形解析によるせん断耐力の照査に用いる際の解析コードの部材係数を評価するためのモデル⁵⁾の内、集中荷重を受ける No1~9 部材である（表-1）。解析は表-1 に示すように 4 節点平面応力要素を用いて部材高さ方向に要素を 3 分割し、強制変位を与える解析を行って最大荷重を求めた。図-4 にモデルのせん断耐力に対する解析最大荷重の比率について比較を示す。荷重比率は 0.76~1.35 (FEM-A), 1.05~1.39 (FEM-B) と FEM-A の方がばらつきは大きく、個別のケースでも異なる傾向を示すものもある。また、荷重比率が大きいケースがある点については、一般的な 4 節点要素では“せん断ロッキング”の影響により剛性が高く評価される場合があることがその要因の一つとなっていることが考えられる。そこで、“せん断ロッキング”の改善に効果があるとされる 3 つの要素タイプ、a) 4 節点非適合モード要素、b) 8 節点 2 次要素、c) 8 節点 2 次要素次数低減積分型を FEM-B を用いて解析を行った。比較結果を図-5 に示す。モデルのせん断耐力に対する解析の最大荷重比率は 0.86~1.25 (要素 a), 0.84~1.15 (要素 b), 0.73~1.22 (要素 c) であり、全体的に最大荷重が低下する傾向になっておりモデル耐力値との適合性は向上しているものと考えられる。

梁のせん断破壊は局所的な変形（ひずみ）の進展が全体の挙動を支配する現象であることから、プログラム間の差異、および有限要素の定式化による差異が生じやすいものと考えられる。同じ RC 材料モデルを組み込んだユーザーサブルーチンを使ったとしても、汎用 FEM プログラムのプラットフォームが異なれば解析結果は異なり得ることが比較解析より示された。したがって、解析コードの部材係数の評価にはユーザーサブルーチン単独の評価ではなく、組み込んだ形での有限要素法解析ソフトウェアの評価を行うことで適切に安全係数が設定される点に留意が必要と考えられる。

次に、十字加力を受ける円筒形耐震壁⁶⁾を対象とした比較解析を行った。図-6 にモデルを示す。解析は 4 節点シェル要素を用いて FEM-B のみで行い、実験との比較を行った。図-7 に示す比較結果より、部材降伏に至る剛性は解析が高いものの、最大荷重・繰り返し載荷挙動について実験との整合性がよいと判断される。

3. まとめ

RC の多方向ひび割れモデルを組み込んだ 2 つの有限要素法解析ソフトウェアを用い、RC の非線形挙動を実験との比較により検討した。解析の精度は主として材料非線形モデルに依存することはいうまでもないが、組み込み先の有限要素解析フレームによっても、解析結果は同一とならないことが確認された。これは、汎用プログラムの要素モデル（shear lock 解除の有無等）、繰り返し非線形求解法などに依存するものと思われる。その利用に際しては、非線形解析結果は材料モデルのみならず、使用する有限要素の定式化等によっても結果が異なることを前提に、結果に対する安全余裕度を評価しなければならない。

キーワード：鉄筋コンクリート、耐震壁、せん断破壊、せん断耐力、材料非線形解析、有限要素法

連絡先：〒113-0023 東京都文京区向丘 1-1-17 タカサキヤビル 6F TEL 03-3868-0580

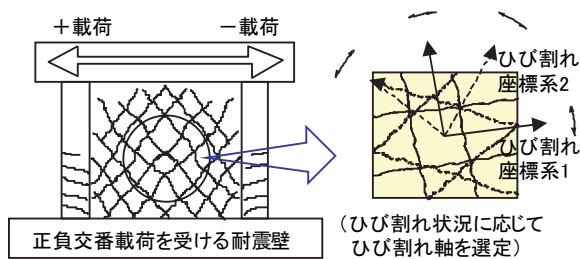
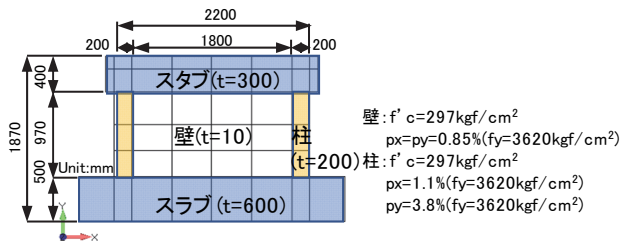
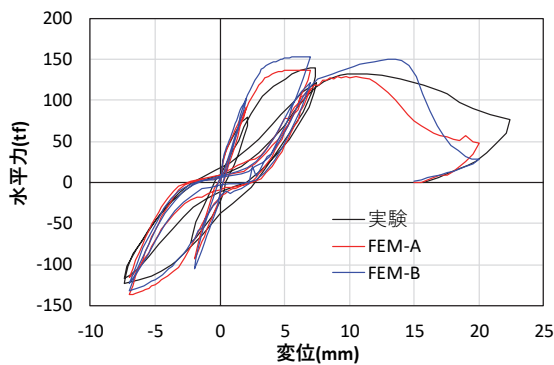
図-1 多方向ひび割れモデル¹⁾図-2 耐震壁供試体と解析モデル⁴⁾

図-3 耐震壁の荷重変位関係の比較

表-1 モデルケース⁵⁾と解析モデル (No. 1)

モデルケースNo.		モデルのせん断耐力(kN)
集中荷重部材	1 No. 1~9の基本ケース	475
	2 a/dの効果: 短	1187
	3 a/dの効果: 中	324
	4 a/dの効果: 長	294
	5 コンクリート圧縮強度の効果	581
	6 引張鉄筋比の効果	329
	7 寸法の効果	1587
	8 軸力の効果	350
	9 せん断補強の効果	855

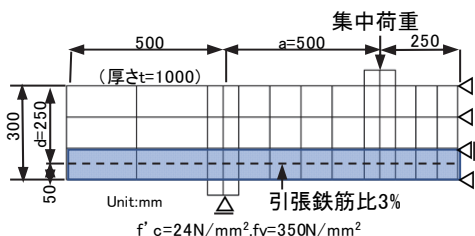


図-4 せん断耐力比率の比較 (1)

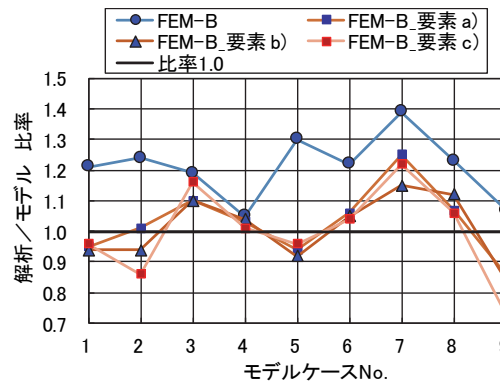


図-5 せん断耐力比率の比較 (2)

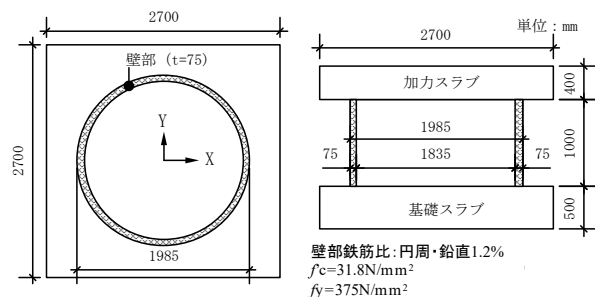
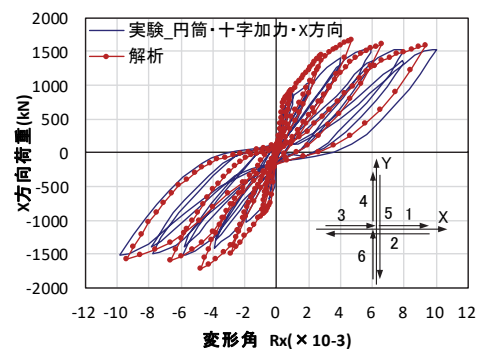
図-6 十字加力を受ける円筒試験体⁶⁾

図-7 円筒試験体の荷重変位関係の比較(FEM-B)

[参考文献]

- (1) 福浦尚之, 前川宏一: 非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp177-195, 1999.11
- (2) TDAPIII使用手引書: アーク情報システム, 2015.4
- (3) Abaqus 6.14 Analysis User's Guide: © Dassault Systèmes, 2014
- (4) 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム-解析モデル検証用試験体の実験データ集-: JCI-C6, 1983.10.
- (5) 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル: 土木学会, 2005.6
- (6) 小野英雄, 北田義夫, 渡辺英義, 西川孝夫: 水平2方向同時加力を受けるRC造立体耐震壁のせん断耐力・変形性能に関する実験的研究, 建築学会構造系論文集, No.582, pp.123-132, 2004.8