

有限個別要素法による鉄筋コンクリート構造物の破壊シミュレーション

(株)大林組 正会員 ○松田 武, 山本 修一, 米澤 健次, 佐藤 伸

1. はじめに

有限要素法におけるコンクリートに生じるひび割れの一般的な表現方法として分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルがある。分散ひび割れモデルは要素内に一様なひび割れ状態を仮定する方法で、要素の剛性を変化させることでひび割れを平均的に表現するモデルであり、ひび割れ幅の拡大はひずみの増大によって表現される。ただし、ひび割れ間隔やひび割れ幅を把握できない部分に短所がある。一方、離散ひび割れモデルは要素と要素の間を切り離して、ひび割れを幾何学的に表現する方法であるが、予めひび割れ位置を特定する必要があるところに短所がある。このようにコンクリート構造物のひび割れを考慮する解析では、解析の目的によって用いる構成モデルを使い分ける必要があり、ひび割れ位置の特定や、ひび割れ幅、ひび割れ本数を特定したい場合などはある程度の仮定が必要となる。そこで、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ形態や破壊挙動を適切に表現する解析モデルの構築を目的として、連続体に対する解析手法である有限要素法と不連続体に対する解析手法である個別要素法を結合した有限個別要素法¹⁾を用いて、繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート製有開口壁のせん断破壊実験のシミュレーション解析を行い、手法、モデルの適用性について検討を行った。

2. 有限個別要素法の概説

有限個別要素法は連続体であったものが外力等によって破壊し不連続体となる過程やその後の挙動をシミュレーションするのに有用である。ここでは、軍事分野や鉱山分野で多くの利用実績があり、コンクリートの破壊現象に対しても適用性が認められている解析コードELFEN²⁾を用いる。ELFENでは有限要素内の主応力がコンクリートの引張強度に達した場合のひび割れについて次のいずれかの方法が選択できる。①主応力方向と直行する面で有限要素を2分割し、分割面には個別要素法と同様な接触モデルを設定する。②要素を2分割する代わりに、要素構成面のうち面の方向がひび割れ面に最も近い要素構成面にひび割れが生じたものとして、その面に個別要素法と同様な接触モデルを設定する。

3. 解析対象試験体

本研究で対象としたのは萩尾ら³⁾による有開口耐震壁の繰り返し载荷試験で、試験体の詳細を図-1に示す。加力は図-1に示すとおり、左右の柱に一定軸力を载荷し、水平方向には1,000kNのオイルジャッキにて片押し、正負繰り返し载荷を4サイクル行った後、Push-overにより破壊させている。試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の力学特性を表-1および表-2に示す。図-2に実験の破壊状況(Push-over時)を示す。破壊は開口隅角部から柱へと抜けるせん断破壊に至った。

4. 解析モデル

本研究で用いた解析モデルを図-4に示す。解析モデルは3次元4節点要素を用いて、壁板部および柱部は弾塑性モデル、上下スラブは弾性体とした。鉄筋はビーム要素を適用し弾塑性モデルとした。なお、鉄筋の交差部は2重節点を設けて応力伝達しないようにモデル化した(後述のモデル2, 3)。本解析では引張強

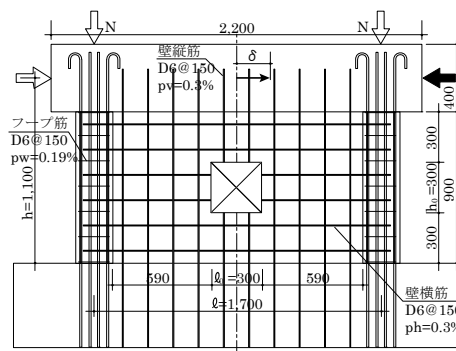


図-1 試験体配筋図および加力図

表-1 試験体コンクリートの力学定数

ヤング係数 GPa	圧縮強度 MPa	引張強度 MPa
21.2	22.0	2.0

表-2 試験体に用いた鉄筋の力学定数

	ヤング係数 GPa	降伏応力 MPa	最大強度 MPa
D6	195	371	472
D13	191	359	507



図-2 実験の破壊状況 (Push-over時)

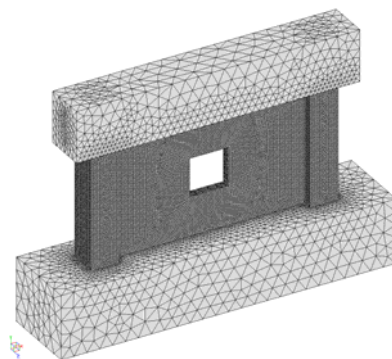


図-3 解析モデル

キーワード 有限個別要素法, FDEM, コンクリートのひび割れ

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組東京本社原子力本部原子力環境技術部 TEL03-5769-1309

度に達した部位のひび割れの発生方法は計算速度または安定性の観点から前述した②の方法(要素を分割する代わりに要素構成面のうち面の方向がひび割れ面に最も近い要素構成面にクラックが生じたものと仮定する方法)を採用し、解析精度を向上させるため初期の有限要素メッシュを細かくした。破壊条件はコンクリートを Mohr-Coulomb、鉄筋を Von-Mises とした。なお、コンクリートの引張軟化特性には破壊エネルギーを適用した。表-3 および表-4 に解析に用いた材料物性値を示す。

表-3 コンクリートの材料物性値

ヤング係数 (GPa)	21.2
ポアソン比	0.2
密度 (kg/m ³)	2400
粘着力 (MPa)	8.5
内部摩擦角 (°)	45
ダイレイタンシ角 (°)	15
引張強度 (MPa)	2
破壊エネルギー (Nm)	50

表-4 鉄筋の材料物性値

	D6	D13
ヤング係数 (GPa)	195	191
ポアソン比	0.3	0.3
密度 (kg/m ³)	7800	7800
降伏応力 (MPa)	371	359

5. 解析結果

鉄筋コンクリートの有開口耐震壁の繰り返し水平載荷試験は、せん断変形が卓越するため、コンクリートのメッシュの大きさや鉄筋の鉛直鉄筋と水平鉄筋の結合状態が大きく影響を及ぼすと考えられる。そのため、鉄筋コンクリートの有開口耐震壁の繰り返し載荷試験結果における破壊シミュレーション解析は表-5 に示す3つのモデルで実施した。

試験結果と解析結果(モデル 2, 3)の水平荷重と水平変位の関係を図-4 に、Push-over 時における各モデルの解析ひび割れ状況図を図-5 に示す。荷重と変位の関係は4 サイクル目まで再現性は良好で、Push-over 時の試験ピーク程度までは解析は実験と一致するが、その後も解析ではひずみ硬化に類似した形で耐力増加が見られ、軟化挙動を示す実験結果とは異なる。解析ひび割れ状況はモデル 2 の損傷領域が大きいが、荷重と変位の関係では違いが現れていない。

表-5 解析モデルケース

	モデル1	モデル2	モデル3
コンクリート	細かいメッシュ ・ 312,114 要素 ・ 15mm 以下の大きさ	粗いメッシュ ・ 162,803 要素 ・ 20mm 以下の大きさ	細かいメッシュ ・ 312,114 要素 ・ 15mm 以下の大きさ
鉄筋	・ 3,834 要素 ・ 鉛直と水平鉄筋の結合	・ 3,834 要素 ・ 鉛直と水平鉄筋の結合せず	・ 3,834 要素 ・ 鉛直と水平鉄筋の結合せず

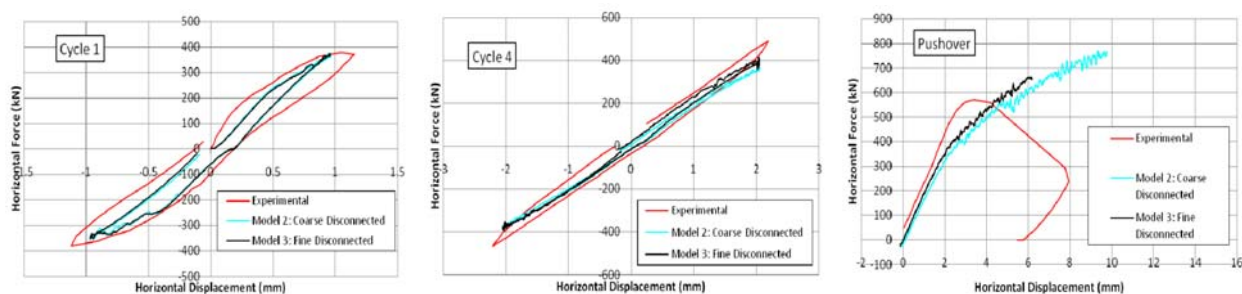


図-4 水平荷重と水平変位の関係

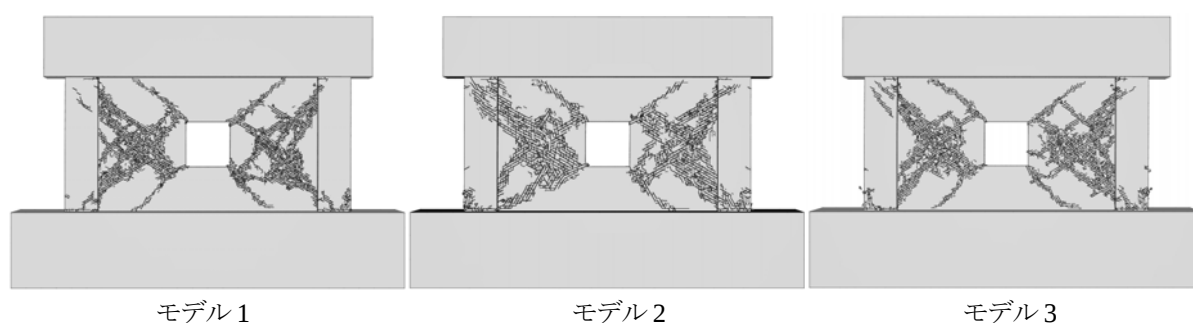


図-5 解析ひび割れ状況図

6. まとめ

破壊シミュレーション解析では、コンクリート部のメッシュの大きさと鉛直と水平鉄筋の結合の有無を設定し実施し、交番載荷時のひび割れ発達状況と荷重～変位関係の再現性はいずれのモデルも良好だが、Push-over 時の軟化挙動の再現ができないことを確認した。今後、ひび割れ直交方向のコンクリートの圧縮強度の劣化の考慮やひび割れ面のせん断伝達特性、鉄筋の抜け出しなどを考慮して検討を進めたい。

参考文献

- 1) ADAM TOBY BERE : COMPUTATIONAL MODELLING OF LARGE-SCALE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DUBJECT TO DYNAMIC LOADING, DOCTORAL THESIS, UNIVERSITY OF WALES, MARCH 2004.
- 2) Rockfield software Ltd : ELFEN 2.8 Specification Overview, 1998.
- 3) 萩尾ら：既存耐震壁の新規開口補強に関する研究(その2 小さい開口を有する耐震壁)、建築学会大会, pp.459-460, 2007.08