

# 高靱性セメント複合材料耐震壁のFEM解析

渡部 憲\* 白都 滋\* 大岡 督尚\* 小澤 潤治\*

要約： 近年、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料（以下、DFRCCと略記）に関する研究が活発に行われている。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料で、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料である。DFRCCをRC構造物の耐震要素として効果的に適用しようとする場合、実験を実施して限られた実験的知見を適切に解釈し一般化を行うことが重要である。そのための一助となる補完データを得る手法として数値計算があり、中でもFEMはRC部材の詳細な応力分布や破壊状況等を把握できる有望な解析手法である。

本研究では、DFRCC耐震壁の水平載荷実験結果を対象としてFEM解析による性能評価手法の妥当性を検証した。その結果、本研究で示したFEM解析手法は、DFRCC耐震壁の性能評価手法の1つと成り得る可能性の高いこと等の知見が得られた。

キーワード： 耐震壁、DFRCC、ビニロン繊維、軟化挙動、FEM

- 目次：
- 1. はじめに
  - 2. 解析対象とした耐震壁水平載荷実験の概要
  - 3. コンクリートおよびDFRCCの軟化挙動
  - 4. FEM解析の概要
  - 5. FEM解析結果（第1ステップ：基準解析）
  - 6. FEM解析結果（第2ステップ：パラメータ解析）
  - 7. FEM解析結果（第3ステップ：繰り返し解析）
  - 8. まとめ

## 1. はじめに

近年、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料（以下、DFRCCと略記）に関する研究が活発に行われている。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料で、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料である。

DFRCCをRC構造物の耐震要素として効果的に適用しようとする場合、実験を実施して限られた実験的知見を適切に解釈し一般化を行うことが重要である。そのための一助となる補完データを得る手法として数値計算があり、中でもFEMはRC部材の詳細な応力分布や破壊状況等を把握できる有望な解析手法である。

本研究では、DFRCC耐震壁の水平載荷実験結果を対象としてFEM解析による性能評価手法の妥当性を検証する。

## 2. 解析対象とした耐震壁水平載荷実験<sup>2)</sup>の概要

表1に示す2体の耐震壁試験体に関する水平載荷実験

表1 耐震壁水平載荷実験概要

試験体名		RC	NMV
柱	コンクリート種類	N1	N2
	断面B×D(mm)	240×240	
	主筋	SD345 12-D13 P <sub>R</sub> =2.65%	
	帯筋	SD295A D6#50 P <sub>w</sub> =0.53%	
壁	コンクリート種類	N1	DFRCC
	断面B×D(mm)	60×1760	
	縦横筋	SD295A D6#200 P <sub>s</sub> =0.27%	
載荷計画		±1/6400(1), ±1/3200(1), ±1/1600(1), ±1/800(1), ±1/400(1), ±1/200(1), ±1/100(1)	±1/800(1), ±1/400(1), ±1/200(2), ±1/100(2), ±1/50(2)
層間変形角R(rad.) =水平変形/1400mm			

結果を解析的検討の対象とした。試験体は、図1に示すように実大の1/3スケールを想定し、柱断面が240×

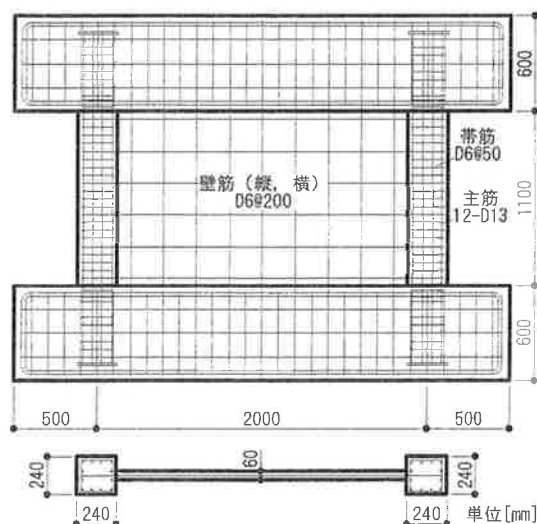


図1 耐震壁試験体

240mm, 柱脚から上部スタブ中心間距離 (h) が1400mmとなっている。RC 試験体は普通強度コンクリート (N1), NMV 試験体はDFRCCをそれぞれ壁パネルに使用している。

荷重は図2に示すように, 各柱にコンクリート圧縮強度の1/6が作用するように軸力を制御した, 正負交番の繰り返し水平荷重で, 試験体の水平変形を h (=1400mm)

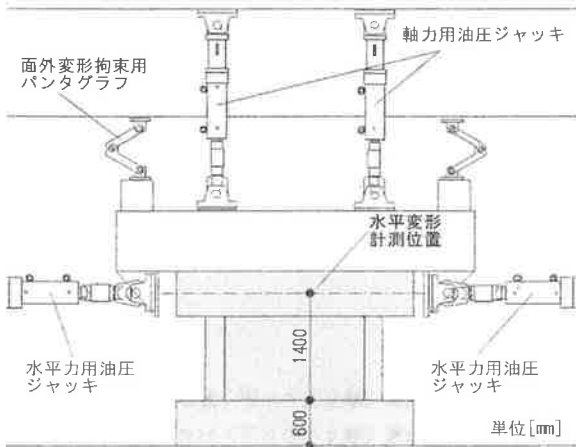


図2 荷重方法

表2 コンクリートおよびDFRCCの調合 (a) 調合条件

調合名	W/C (wt.%)	s/a (vol.%)	S/C (wt.%)	繊維体積混入率 (vol.%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )
N1	54.3	48.0	226	—	195
N2	58.4	49.9	276	—	185
DFRCC	60.0	100	191	2	334

(b) 使用材料

調合名	C	S	G	繊維
N1	早強セメント	山砂: 砕砂=3:7(最大寸法: 5mm)	砕石(最大寸法: 10mm)	—
N2	普通ポルトランドセメント	山砂(最大寸法: 2.5mm)	—	—
DFRCC	普通ポルトランドセメント	山砂(最大寸法: 2.5mm)	—	ピニロン(径: 0.1mm, 長さ: 24mm, 弾性係数: 25GPa, 引張強度: 1100MPa)

表3 コンクリートおよびDFRCCの強度試験結果

名前	試験体		圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )
	部位	調合				
RC	柱, スタブ, 壁	N1	28.6	2.21	21.9	2.25
	柱, スタブ	N2	27.7	2.51	24.6	2.33
NMV	壁	DFRCC	26.2	2.35	14.1	2.06

[注] DFRCCの引張強度は, 割裂引張試験時のひび割れ発生強度から算出

表4 鉄筋の強度試験結果

名前	試験体		鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	伸び率 (%)
	部位	調合					
RC	柱主筋	N1	D13(SD345)	384	541	206	27.4
	柱, 壁補強筋	N2	D6(SD295A)	335	631	201	23.5
NMV	柱主筋	NMV	D13(SD345)	374	516	190	19.3
	柱, 壁補強筋	NMV	D6(SD295A)	306	484	193	19.3

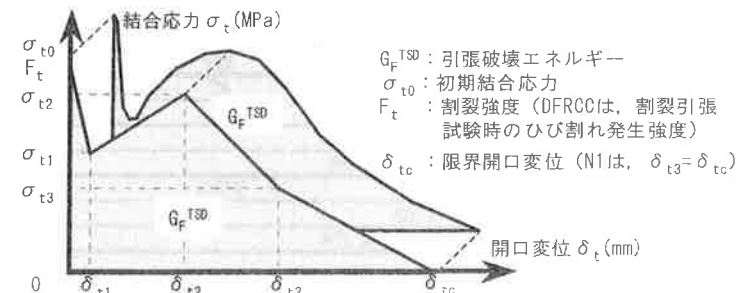


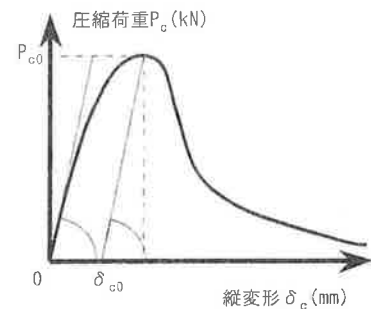
図3 引張軟化挙動の評価

で除した値(層間変形角R(rad.))を管理する変位制御で行った。実験で使用したコンクリートおよびDFRCCの調合を表2に, 水平荷重実験時のコンクリートおよびDFRCCの強度試験結果を表3に示す。また, 実験で使用した鉄筋の強度試験結果を表4に示す。

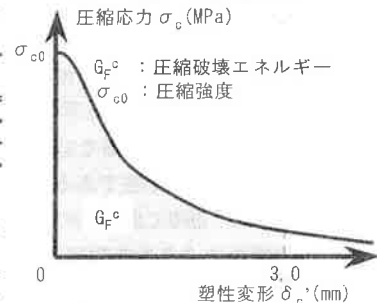
### 3. コンクリートおよびDFRCCの軟化挙動

コンクリートおよびDFRCCの引張軟化挙動は, 逆解析法<sup>3)</sup>を適用して評価した。つまり, 切欠き梁3点曲げ試験体のひび割れ進展解析を行い, 予測された荷重-荷重点変位関係が実験結果と適合するように, 多直線近似引張軟化曲線を同定した。そして図3に示すように, 同定された引張軟化曲線を, N1に対しては3直線で<sup>4)</sup>, DFRCCに対しては4直線で簡略化した。なお, 軟化開始点はN1に対しては割裂引張試験時の割裂強度, DFRCCに対しては割裂引張試験時のひび割れ発生強度とした。

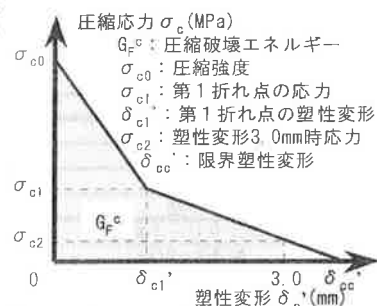
コンクリートおよびDFRCCの圧縮軟化挙動を特徴づける破壊力学パラメータの評価方法を図4に示す<sup>5)</sup>。まず, 実験により計測された圧縮荷重(P<sub>c</sub>)—縦変形(δ<sub>c</sub>)関係を圧縮応力(σ<sub>c</sub>)—塑性変形(δ<sub>c</sub><sup>o</sup>)関係に変換する(図



(a) 荷重—縦変形関係



(b) 応力—塑性変形関係



(c) 2直線近似応力—塑性変形関係  
図4 圧縮軟化挙動の評価

4 (a)および(b)参照)。次に、 $\delta_c'$  が3.0mmまでの $\sigma_c - \delta_c'$  曲線で囲まれる面積 (図4 (b)の網掛け部分) を求める。この面積は圧縮破壊エネルギー ( $G_f^c$ ) と呼ばれ、破壊力学パラメータと見なされる。最後に、実測の $\sigma_c - \delta_c'$  関係を、図4 (c)に示すように2直線近似した。

4. FEM解析の概要

本解析では、DFRCC耐震壁の水平載荷実験結果を対象として、DFRCCの引張および圧縮軟化挙動を考慮した2次元非線形FEM解析を行った。なお、解析コードとして汎用構造解析プログラムDIANA<sup>®</sup>を用いた。

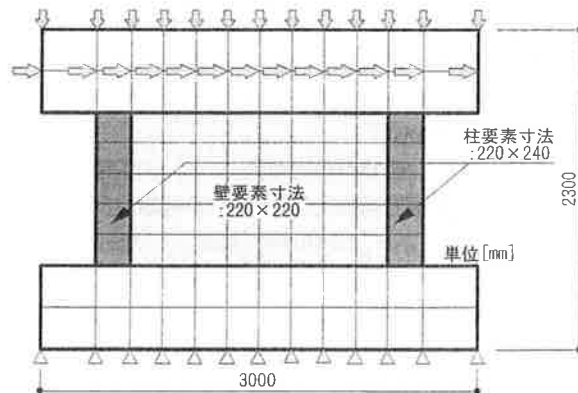
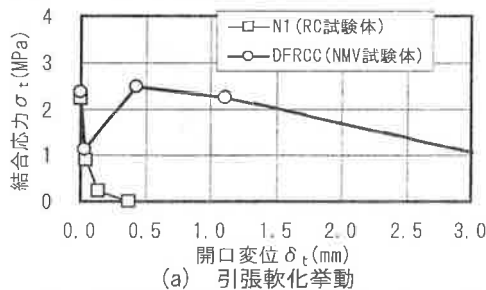


図5 耐震壁試験体のモデル化

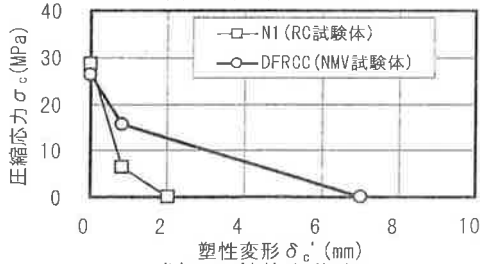
表5 引張および圧縮破壊エネルギー

名前	試験体		引張破壊エネルギー $G_f^{TSD}$ (N/mm)	圧縮破壊エネルギー $G_f^c$ (N/mm)
	部位	調査		
RC	柱, スタブ, 壁	N1	0.155	18.45
	柱, スタブ	N2	0.155	17.87
NMV	壁	DFRCC	5.525	45.22

$G_f^{TSD}$ : 逆解析法により得られた多直線近似引張軟化曲線の $\delta_{tc}$ までの引張破壊エネルギー (耐震壁実験時)。N2については引張破壊エネルギー試験を行っていないためN1の値を使用。  
 $G_f^c$ : 圧縮試験により得られた圧縮破壊エネルギー。



(a) 引張軟化挙動



(b) 圧縮軟化挙動

図6 引張および圧縮軟化挙動

4.1 試験体のモデル化

試験体は平面応力状態にあると仮定して、図5に示すように要素分割を行った。コンクリートおよびDFRCCは4節点アイソパラメトリック要素、柱主筋はトラス要素でモデル化し、鉄筋とコンクリート間の付着すべりを考慮した。柱せん断補強筋および壁筋は埋込み鉄筋要素によってモデル化し、鉄筋とコンクリートまたはDFRCC間の付着は完全であると仮定した。

4.2 構成素材の構成則

破壊基準としてコンクリートおよびDFRCCの圧縮側はVon Mises、引張側はテンションカットオフ基準を適用し、鉄筋はVon Mises降伏基準とした。なお、試験体上下スタブは弾性体と仮定した。

(1) コンクリートおよびDFRCC

解析では、前掲図3および4に示した材料評価手法を用いて引張および圧縮軟化挙動のモデル化を行なった。実測値を近似した引張および圧縮軟化挙動を図6に示す。また、破壊エネルギーを表5に示す。

引張側の1軸応力-ひずみ関係として、上昇域は引張強度まで弾性とした。下降域は図6 (a)に示すように、普通強度コンクリートは3直線で<sup>4)</sup>、DFRCCは4直線で簡略化した引張軟化モデルとした。

圧縮側の1軸応力-ひずみ関係として、上昇域は圧縮強度の1/3を折れ点とする2直線でモデル化した。下降域は図6 (b)に示すように、2直線で簡略化した圧縮軟化挙動とした。

コンクリートおよびDFRCCのひび割れは分布ひび割れモデルとし、ひび割れの進展挙動を記述するために、全ひずみをソリッド部分のひずみとひび割れ部分のひずみに分解し、ひび割れ部分に対して式(1)の構成方程式を設定した<sup>5)</sup>。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{nn}^{cr} \\ \tau_{nt}^{cr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_I & 0 \\ 0 & D_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{nn}^{cr} \\ \gamma_{nt}^{cr} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{nn}^{cr}$  および  $\tau_{nt}^{cr}$ :  $n-t$ 座標系におけるひび割れ応力、 $\varepsilon_{nn}^{cr}$  および  $\gamma_{nt}^{cr}$ :  $n-t$ 座標系におけるひび割れひずみ、 $n$ および $t$ : ひび割れに垂直な方向および平行な方向、 $D_I$ : ひび割れに垂直な材料剛性、 $D_{II}$ : ひび割れせん断剛性であり、式(2)のように定義される。

$$\beta = \beta \cdot G / (1 - \beta) \quad (2)$$

ここに、 $\beta$ : せん断剛性低下率、 $G$ : せん断剛性である。分布ひび割れモデルを用いる場合、図6 (a)に示す引張軟化挙動の開口変位を基準長さで除してひずみに変換する必要がある。本解析では要素代表長さ ( $L_e$ ) を要素面積 ( $A$ ) の関数、つまり  $L_e = \sqrt{2A}$  と仮定し<sup>6)</sup>、開口変位 ( $\delta_t$ ) を式(3)により  $\varepsilon_{nn}^{cr}$  に変換している。

$$\varepsilon_{nn}^{cr} = \delta_t / \sqrt{2A} \quad (3)$$

図2 (b)に示す圧縮軟化挙動についても、塑性変形 ( $\delta_c'$ ) を式(4)により塑性ひずみ ( $\varepsilon_{nn}^{pc}$ ) に変換している。

$$\varepsilon_{nm}^{pc} = \delta_c' / \sqrt{2A} \quad (4)$$

ひび割れコンクリートのせん断剛性低下率 ( $\beta$ ) については、単純に  $\beta$  をひび割れ幅に関係なく 0.125 の一定値とした。

#### (2) 鉄筋の応力-ひずみ関係

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、第2勾配の剛性はヤング係数の1/100とした。また、柱主筋とコンクリート間には界面要素を設け、CEB-FIP Model Code 1990<sup>7)</sup>で提案されている付着応力-すべり関係を適用した。

#### 4.3 解析方法

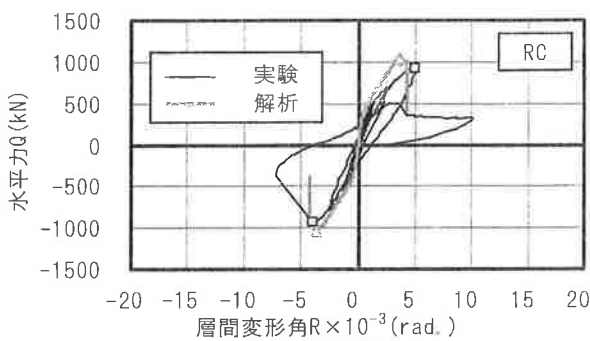
解析では、まず所定の軸力をスタブ上部に載荷した後、水平方向の等変位増分を各載荷節点に負荷する変位制御型の単調漸増載荷を行なった。また、非線形反復解析法としてNewton-Raphson法を採用し、不釣り合い力は当該ステップで解放した。

#### 5. FEM 解析結果 (第1ステップ: 基準解析)

図7に実験および解析で得られた水平力(Q)-層間変形角(R)関係を示す(図中□印: 実験最大耐力点, △印: 解析最大耐力点)。いずれの解析結果とも実験結果と比較して、初期剛性および柱に曲げひび割れが発生した後、壁パネルにせん断ひび割れが伝播する過程の剛性を高めに評価している。また、最大耐力については過大に評価しており、最大耐力以降の靱性も予測できていない。

#### 6. FEM 解析結果 (第2ステップ: パラメータ解析)

前章の結果を踏まえ、選定した解析の変動因子を表6に示す。収縮ひび割れ、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性および要素代表長さの影響について検討する。



#### 6.1 水平力-層間変形角関係

##### (1) 収縮ひび割れの影響に関する検討 (解析 I)

実験では、いずれの試験体とも、載荷前に壁パネルコンクリートまたはDFRCCの収縮に伴うひび割れの存在が確認されている。収縮ひび割れを再現するため、本解析では、収縮ひび割れが発生する程度の初期ひずみ (RC試験体: 100  $\mu$  および NMV 試験体: 200  $\mu$ ) を壁パネルに導入した。

水平力(Q)-層間変形角(R)関係に関する実験結果と解析結果 (解析 I) の比較を図8に示す (図中□印: 実験最大耐力点, △印: 各解析最大耐力点)。いずれの試験体とも、初期剛性は実験結果とよく一致している。一方、柱に曲げひび割れが発生し、壁パネルにせん断ひび割れが伝播する過程の剛性はやや高めに評価している。

##### (2) ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性の影響に関する検討 (解析 II)

解析 II では、RC 試験体を対象として、ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性を式(5)により考慮した<sup>9)</sup>。

$$\lambda = \sigma_{c0}' / \sigma_{c0} = 1 / (0.8 - 0.34 \varepsilon_1 / \varepsilon_c) \leq 1.0 \quad (5)$$

ここに、 $\lambda$ : 圧縮強度低減係数,  $\sigma_{c0}'$ : ひび割れコンクリートの圧縮強度 (MPa),  $\varepsilon_1$ : パネルの平均引張主ひずみ,  $\varepsilon_c$ : コンクリートの圧縮強度時ひずみである。

なお、解析に使用した圧縮強度低減係数 ( $\lambda$ ) は 0.81 である。

図8 (a)によれば、Q-R関係に関する解析結果 (解析 II) は、概ね実験結果と一致している。

##### (3) 要素代表長さの影響に関する検討 (解析 III・IV)

DFRCCを壁パネルに使用したNMV試験体の最大耐力以降の靱性を評価する場合、引張軟化挙動を適切にFEM解析に導入しなければならない。つまり、( $L_c$ )を適切に仮定

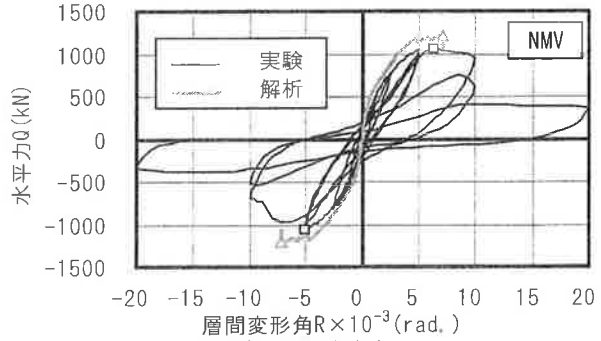


図7 水平力-層間変形角関係 (第1ステップ: 基準解析)

表6 解析要因 (第2ステップ: パラメータ解析)

解析ケース	解析対象試験体	コンクリートおよびDFRCC			
		収縮ひび割れの考慮	ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性考慮	要素代表長さ $L_c$ (mm)	
				引張側	圧縮側
解析 I	RC, NMV	有	無	311	311
解析 II	RC		有		
解析 III	NMV		無	56.6	
解析 IV			有		

する必要があり、引張破壊の局所化を特徴づけるのはひび割れである。解析Ⅲでは、実験において $R=1/200\text{rad}$ .時に壁パネルに観察されたひび割れ状況から平均ひび割れ間隔を評価し、これを $L_c$ として導入した。

図8(b)に $Q-R$ 関係に関する解析結果(解析Ⅲ)を示す。解析の最大耐力は実験結果よりも若干高めに予測されているものの、 $Q-R$ 関係の形状は最大耐力以降も実験結果と近似している。

ここで、NMV試験体に対して、ひび割れコンクリートの圧縮強度劣化特性<sup>9)</sup>を考慮した解析を行った(解析Ⅳ、図8(b)参照)。なお、解析に使用した圧縮強度低減係数( $\lambda$ )は0.81である。ひび割れコンクリートの圧縮劣化特性を考慮することにより、最大耐力を精度よく推定できることがわかった。

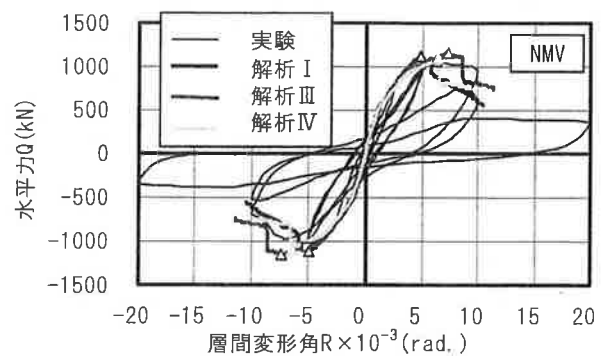
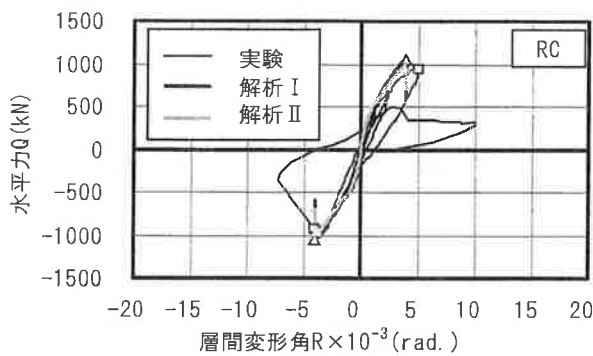
6.2 試験体破壊状況

解析で得られたRC試験体(解析Ⅱ,  $R=1/231\text{rad}$ .)およびNMV試験体(解析Ⅲ,  $R=1/200\text{rad}$ .)の引張主ひずみ

分布を図9(a)および(b)に示す。なお、図中の着色は引張主ひずみの大きさを表しており、引張主ひずみが大きくなるほど濃色で示している。また、図10にRC試験体およびNMV試験体の実験時最終破壊状況スケッチを示す。RC試験体に注目すると、図9(a)の破線で囲んだ狭い領域に大きな引張主ひずみが集中している。一方、NMV試験体では、狭い領域に大きな引張主ひずみが集中することなく、同程度の大きさの引張主ひずみが壁パネルの広い領域に発生している。このことは、DFRCCを耐震壁に使用した場合、ひび割れが壁パネルの広い領域に分散することを示しており、実験時のひび割れ状況とも合致する。すなわち、本解析手法を用いることにより壁パネルにDFRCCを使用した場合のひび割れ制御効果を説明可能である。

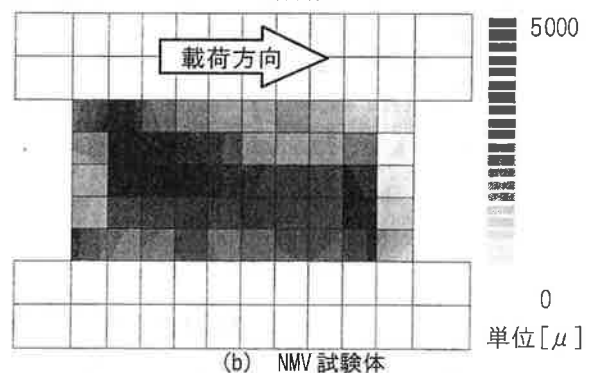
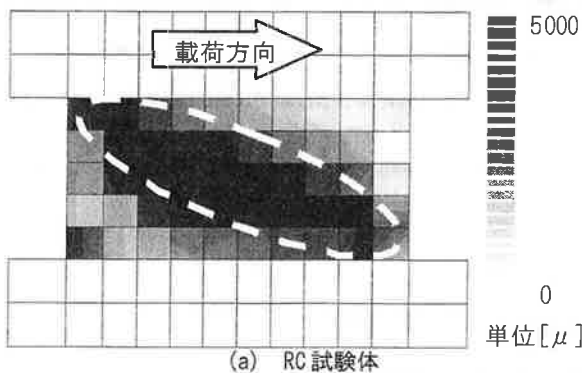
7. FEM解析(第3ステップ:繰り返し解析)

図11にNMV試験体(解析Ⅳ)の繰り返し解析結果を示す。繰り返しにおけるDFRCC構成則は図12に示すように、



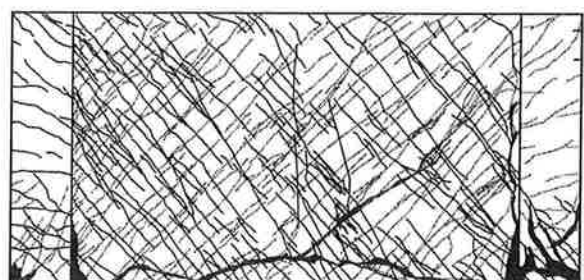
(a) RC試験体 (b) NMV試験体

図8 水平力-層間変形角関係(第2ステップ:パラメータ解析)



(a) RC試験体 (b) NMV試験体

図9 引張主ひずみ分布(第2ステップ:パラメータ解析)



(a) RC試験体 (b) NMV試験体

図10 実験時最終破壊状況

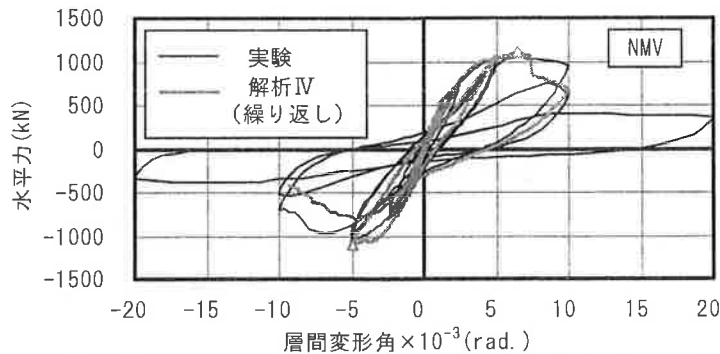


図11 水平力-層間変形角関係(第3ステップ:繰り返し解析)

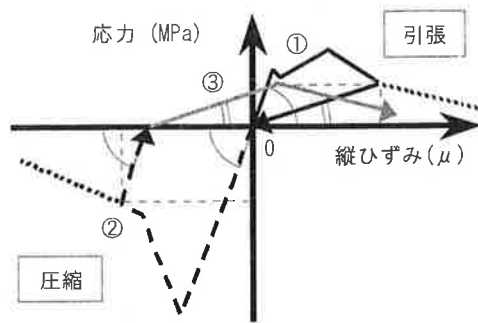


図12 DFRCCの繰り返し構成則

圧縮側の除荷・再負荷は初期剛性に従い、引張側の除荷は原点指向とした。Q-R関係に関する実験結果と解析結果はほぼ一致しており、本研究で示した解析手法はDFRCCを耐震壁として用いた場合の性能評価手法の1つと成り得る可能性が高い。

#### 8. まとめ

本研究では、DFRCC耐震壁の水平荷重実験結果を対象

#### 謝辞

FEM解析に際し有益なるご助言を頂いた、日本大学 理工学部 建築学科の白井伸明教授および森泉和人助手に謝意を表します。また、破壊力学パラメータの評価に際し有益なるご助言を頂いた、東京都立大学大学院 工学研究科 建築学専攻の橘高義典教授に謝意を表します。さらに、試験体製作に際し材料を提供して頂いた、(株)クラレ、クリスタルクレイ(株)、太平洋セメント(株)、(株)ポゾリス物産に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，128pp.，2002. 1
- 2) 白部 滋，小澤潤治，渡部 憲，中村洋行：ビニロン繊維補強セメント系材料を用いた耐震壁の実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.53-54，2001
- 3) コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，426pp.，2001. 5
- 4) 大岡督尚，橘高義典，渡部 憲：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響，日本建築学会構造系論文集，第529号，pp.1-6，2000. 3
- 5) 渡部 憲，大岡督尚，白井伸明，森泉和人：各種コンクリートの圧縮軟化挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，2000. 6
- 6) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research, 1999.
- 7) CEB: CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford, 1993
- 8) Vecchio, F. J., Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, pp.219-231, March-April 1986

## FEM ANALYSIS ON DUCTILE VINYLON FIBER REINFORCED MORTAR SHEAR WALL

K.Watanabe, S.Hakuto, T.Oh-oka, and J.Ozawa

The objective of the present study is to investigate elasto-plastic behavior of the ductile vinylon fiber reinforced mortar shear walls by means of the finite element procedure, which incorporated the material models formulated on the basis of the fracture mechanics concept. The variables for the test and analysis include the type of concrete and mortar in the shear wall panels.

The following findings were obtained through this study:

- 1) The up-grading and damage control effects of the ductile vinylon fiber reinforced mortar were verified by both the test and analysis.
- 2) The FE analysis procedure can simulate elasto-plastic shear behavior of the ductile vinylon fiber reinforced mortar shear walls.