

# 論文 炭素繊維シートを用いた既存 RC 有開口耐震壁の補強効果に関する非線形有限要素解析

余湖 兼右<sup>\*1</sup>・後藤 康明<sup>\*2</sup>・城 攻<sup>3</sup>

要旨：炭素繊維シート補強を行った窓開口を有する耐震壁を対象として，汎用有限要素解析ソフトを用いて，補強位置の違いが荷重変形挙動に及ぼす影響を解析的に再現することと，耐震壁に作用する水平力の柱と壁の分担割合を検討することを目的として解析を行った。炭素繊維シートの補強効果として，柱部材ではコンクリートの拘束効果とせん断補強効果を考慮し，耐震壁ではせん断補強効果を考慮することで解析値が実験値と良い対応を示した。

キーワード：鉄筋コンクリート，耐震壁，耐震補強，炭素繊維シート，有限要素解析

## 1. はじめに

既存建物の耐震補強方法を開発する目的で，当研究室では1995年から柱や耐震壁を対象に炭素繊維シート(以下，CFシート)を利用した補強・補修方法を実験的に検討してきた。本研究はCFシート補強を行った窓開口を有する耐震壁を対象として，汎用有限要素解析ソフト ATENA (ver.2.1.11)を用いて，CFシートを用いた耐震壁の荷重変形挙動を数値解析的に再現することと，耐震壁に作用する柱と壁の水平力の分担割合を検討することを目的として解析を行う。

## 2. 解析対象試験体およびモデル化

### 2.1 対象試験体

解析対象試験体は当研究室で2000年度に行ったCFシートの補強箇所をパラメータとした窓開口付耐震壁である<sup>1)</sup>。図-1に示す通り無補強耐震壁試験体(開口比0.4)WA-04C-00を基に，柱をCFシート補強したWA-04C-C3，それに袖壁補強を加えたWA-04C-CW3，さらに垂壁・腰壁を補強したWA-04C-CO3の4体である(以下，WA-04C-を略す)。

### 2.2 試験体のモデル化

図-1の4種の試験体に関して，CFシートの補強箇所の違いを考慮できるモデル化を行った。

図-2に解析モデル図を示す。モデルの寸法，開口位置は実験試験体と一致している。4節点平面応力要素を用い，柱・壁部分では1辺が50mmの正方形になるように要素分割し，梁スタブ及

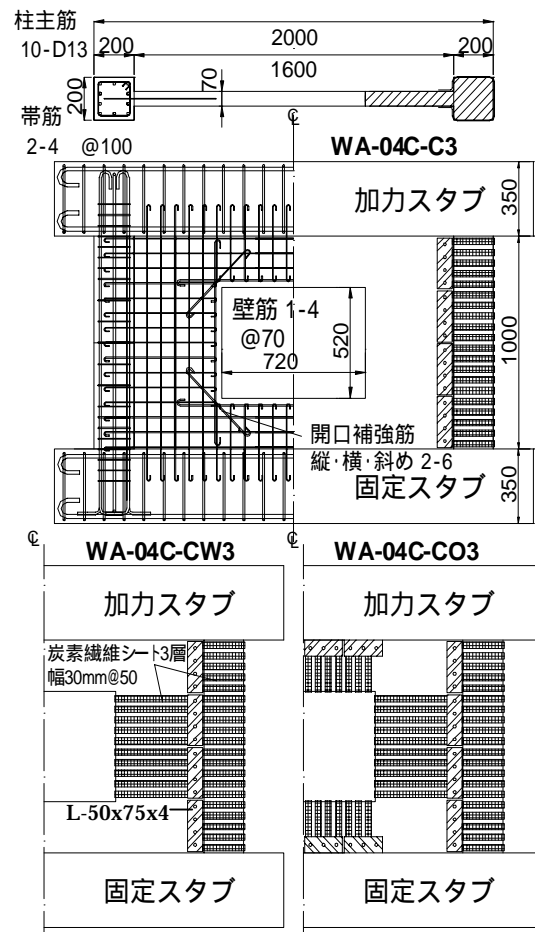


図-1 解析対象試験体

\*1 NTT ファシリティーズ 建築事業本部 工修 (正会員)

\*2 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

び鉄骨製加力装置部分は検討対象ではないためソフト標準の自動分割によった。鉄筋は実験の試験体設計図に基づき全鉄筋を忠実に埋込み鉄筋要素でモデル化し、完全付着とした。

支持条件は、モデル下端を水平・鉛直方向共に固定した。荷重は実験と同様に、まず柱のコンクリート圧縮耐力の 1/6 に相当する柱軸力を各柱幅の真上の加力装置と上梁の境界に等分布荷重で加え、これを維持しながら加力装置部上端右端に強制水平変位 0.1 mm / step を与えた。実験では繰り返し加力を行ったが、解析では単調載荷とした。

### 2.3 材料および構成則

材料特性値は表 - 1 , 2 に示すように基本的に実験時に行われた材料試験での値を用いた。コンクリートの応力 - ひずみ関係は圧縮上昇域

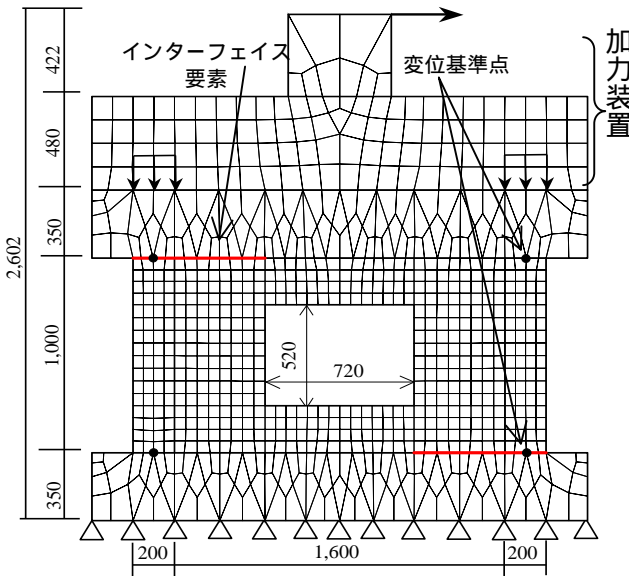


図 - 2 解析モデル

表 - 1 コンクリート特性値

解析モデル	$E_c$ [GPa]	$F_{cu}$ [MPa]	$f_c$ (壁・梁) [MPa]	$w_d$ [mm]	$F_{cu}$ [MPa]	$f_c$ (柱) [MPa]
WA-04C-00	27.66	0.2	25.06	21.3	25.06	21.3
WA-04C-C3	29.02		28.94	24.6	30.94	26.3
WA-04C-CW3	27.88		25.65	21.8	27.41	23.3
WA-04C-CO3	28.21		26.59	22.6	28.35	24.1
解析モデル	$f_t$ [MPa]	$G_f$ [N/mm]	$c$	ひび割れ後の 圧縮強度低減係数	せん断保 持係数	
WA-04C-00	2.20	$5.14 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$	0.8 (最終収束値)	(剛性低下) 変数型 ( $\alpha_1$ の関数)	
WA-04C-C3	2.39	$5.66 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$			
WA-04C-CW3	2.17	$5.24 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-3}$			
WA-04C-CO3	2.19	$5.35 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$			

$F_{cu}$ : Cube strength はプログラムのデフォルト値

に CEB-FIP'90 の提案式を用い、ひずみ軟化域は塑性変位  $w_d$  を定義して決まる直線とした(図 - 3)。 $w_d$  の算出では Nakamura ら<sup>2)</sup>の圧縮破壊エネルギー( $G_{fc}$ )を用いた。引張上昇域は引張強度まで線形で表し、軟化域は Hordijk の実験に基づく指数関数を用いて破壊エネルギーを考慮して表現した。鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニア型とした。加力装置は降伏強度を設けない弾性平面応力要素とし、実験の加力装置の曲げ剛性と等価になるように厚さ 300mm とした際の弾性係数值を与えた。

### 2.4 CF シートのモデル化

CF シートの補強効果を柱と壁で次のように別々に考えた。

#### (1)コンクリートの拘束効果[柱コンクリート]

コンクリートに CF シートを巻くと、横拘束効果により圧縮強度が増大する。中塚ら<sup>3)</sup>の研究を参考にしてその増大割合を算出し(本研究では約 7%)、また強度後も低下を示さない結果を得たため、構成則でも図 - 3 に示すように設定した。

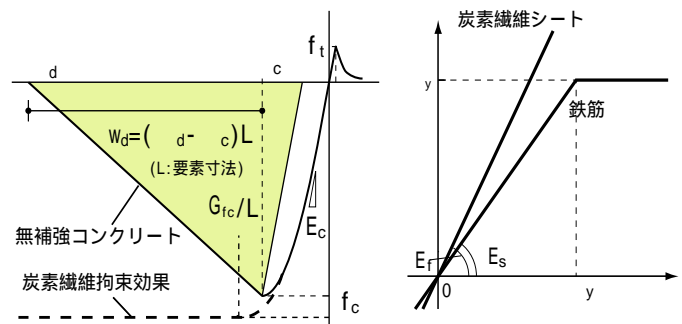


図 - 3 材料の - モデル

表 - 2 鉄筋特性値

使用位置	種別	$y$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]
柱補強筋	4	365	189	12.7
壁筋				
開口補強	6	426	198	28.0
梁補強筋	D10	369	177	66.9
柱主筋	D13	396	165	118.3
梁主筋	D19	359	168	280.8

表 - 3 CF シート特性値

設計厚さ [mm]	設計強度 [MPa]	設計弾性率 [GPa]
0.111	3480	231

## (2)せん断補強効果

部材軸と直交して貼付したCFシートはせん断補強筋と同様の機能があると考え、これを分散鉄筋要素としてモデル化した。材料構成則は降伏強度を定めないLinear材料で設定した。CFシートは方向性があり、シートの繊維方向には強い抵抗性能があるが直交方向には効かないので、分散鉄筋量としては繊維方向には実際の補強筋量とし、繊維直交方向は0とした。従って、試験体と同様に柱と袖壁部は水平方向に、垂壁・腰壁部は鉛直方向に設定した。

### 2.5 柱・壁・梁境界部のモデル化

実験ですべりが観察された引張側袖壁・柱上部と圧縮側袖壁・柱下部は圧縮域であるため、そこにインターフェイス要素を配してモデル化した。この要素は接触方向の挙動とすべり方向の挙動を表現できる。図-

4に示すように、接触方向は引張側の限界値としてコンクリート引張強度を設定し、すべり方向では接触圧によってすべり強度をCoulomb摩擦で考慮できる。摩擦抵抗の初期値である粘性係数はコンクリートのせん断強度と考えた。

## 3. 解析結果および考察

### 3.1 荷重変形関係

図-5に各試験体の荷重変形関係を実験値(正加力時包絡線)と比較して示す。荷重Qは水平加力点での反力、層間変形角Rは両柱の層間変位の平均値を柱高さで除した値である。解析は実験にて十分な耐力低下を示した $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度まで行った。

各試験体とも解析値は実験値に近い挙動となった。最大耐力解析値は無補強(00)と柱補強(C3)

表-4 インターフェイス要素特性値

解析モデル	$K_{tt}[\text{MN}/\text{m}^3]$	$K_{nn}[\text{MN}/\text{m}^3]$	$f_t[\text{MPa}]$	C [MPa]	tan
WA-04C-00	$2.68 \times 10^5$	$6.48 \times 10^5$	2.2	3.04	0.1763 =10°
WA-04C-C3	$2.72 \times 10^5$	$6.53 \times 10^5$	2.39	3.51	
WA-04C-CW3	$2.63 \times 10^5$	$6.31 \times 10^5$	2.17	3.11	
WA-04C-CO3	$2.66 \times 10^5$	$6.38 \times 10^5$	2.19	3.23	

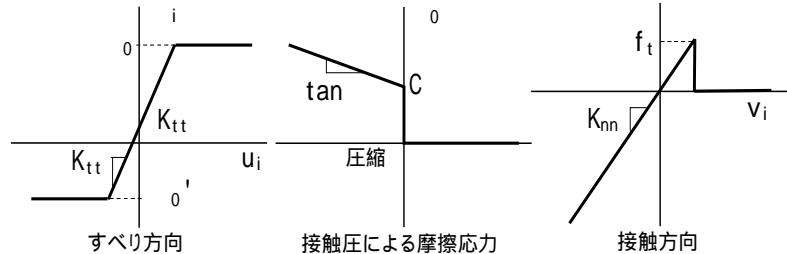


図-4 インターフェイス要素構成則

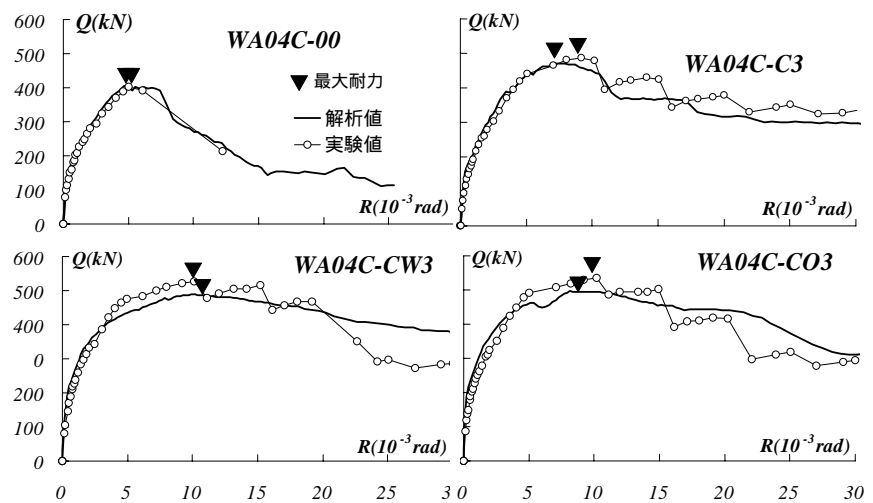


図-5 荷重変形関係

試験体では実験値とほぼ一致し、壁補強試験体(CW3,CO3)では小さくなったが、その差は5%以内であった。変形挙動では最大耐力時変位は00のみ実験値と一致している。荷重値解析値の推移は、壁補強試験体では2体ともに最大耐力前は実験値よりも低い、大変形時には大きくなった。図-6に解析結果の比較を示す。柱の補強に加えて袖壁のみを補強したCW3はさらに腰壁・垂壁を補強したCO3よりも実験において耐力以降の挙動が優れていたが、解析では $25 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降に現れた。この原因については開口左隅角部においてコンクリートの破壊領域が局所化したことによると考えられる。

### 3.2 破壊性状

図-7に全試験体の最大耐力時のひび割れ図を示す。ひび割れはコンクリート要素の積分点

位置で評価し、太さはひび割れ幅を表すが、スケールは全試験体で統一していない。

(a)無補強試験体(00)：実験では最大耐力時までに両袖壁部にせん断ひび割れが集中して発生し、それが柱に伸展するとともに柱と袖壁のせん断破壊が生じて大きな耐力低下を示した。 $R=0.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  で壁筋が降伏し、柱主筋の降伏も観察された。解析では袖壁部コンクリートの主引張ひずみ度の増大が最大耐力後に大きくなり、袖壁部のひび割れ幅が拡幅した。 $R=1.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時に袖壁部の水平筋が降伏している。また、また、最大耐力後の柱部コンクリート主圧縮ひずみ度の増大も大きいため、袖壁部のせん断破壊と柱のせん断破壊が生じたと判断できる。

(b)柱補強試験体(C3)：実験では袖壁部のせん断破壊が顕著となり、コンクリートが大きく剥落した。解析では最大耐力後に袖壁部コンクリートの主引張ひずみ度の増大が大きく、袖壁部のひび割れが拡幅し、せん断破壊が起きた。

(c)柱、袖壁補強試験体(CW3)：実験では開口隅角部のコンクリートに大きな損傷が生じ、大変形時には袖壁付柱として挙動していた。解析

では、実験と同様の位置でコンクリートが大きく破壊して破壊域が腰壁垂壁に広がった。実験では  $R=5.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 、解析では  $R=6.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$  に引張側柱脚主筋が降伏した。また、実験では観察されなかったが解析では  $R=3.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$  に袖壁の水平筋が降伏している。

(d)柱、袖壁、垂・腰壁補強試験体(CO3)：実験では開口隅角部に発生したひび割れが袖壁方向へ水平に伸展して拡幅し、耐力以降はその部分とそれに囲まれる袖壁コンクリートが大きく破壊した。解析では垂壁引張側開口隅角部にコンクリートの損傷が集中したが、圧縮側袖壁下部

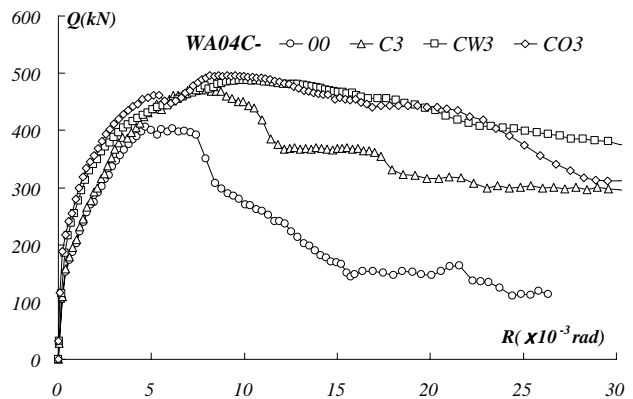


図 - 6 解析結果の比較 (荷重変形関係)

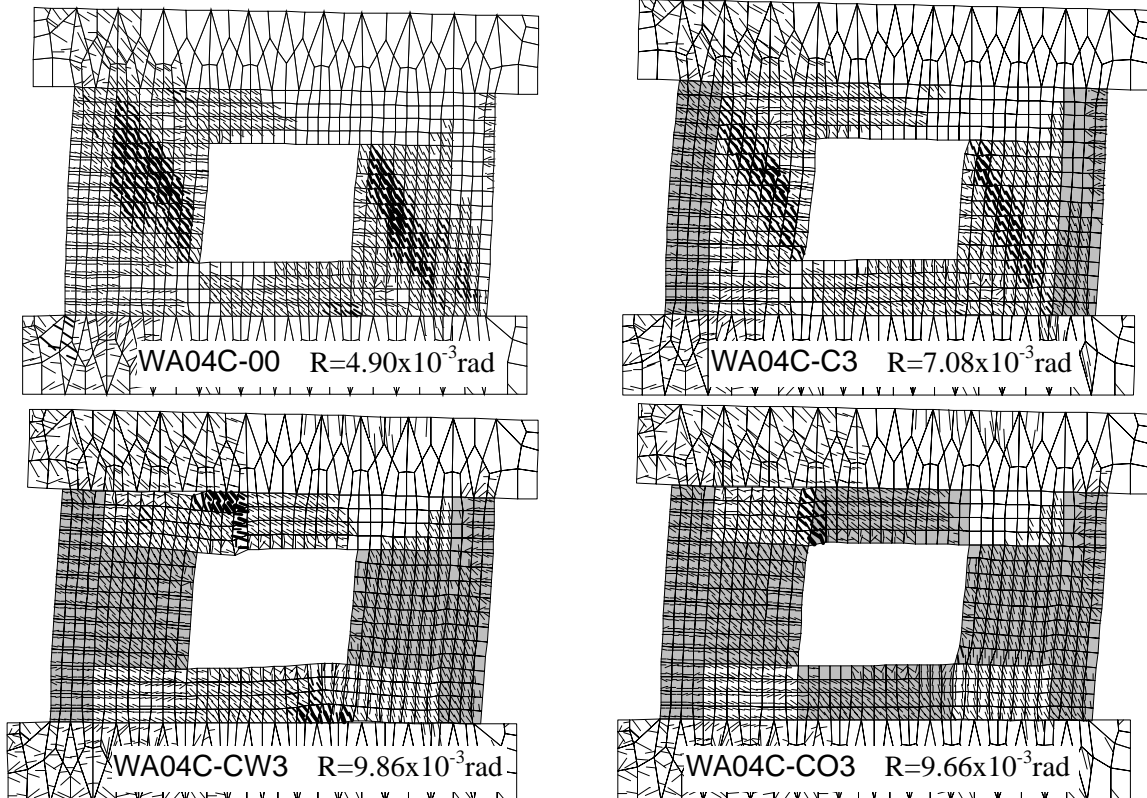


図 - 7 最大耐力時ひび割れ図 (薄塗りは補強位置を示す。加力装置は除いた。)

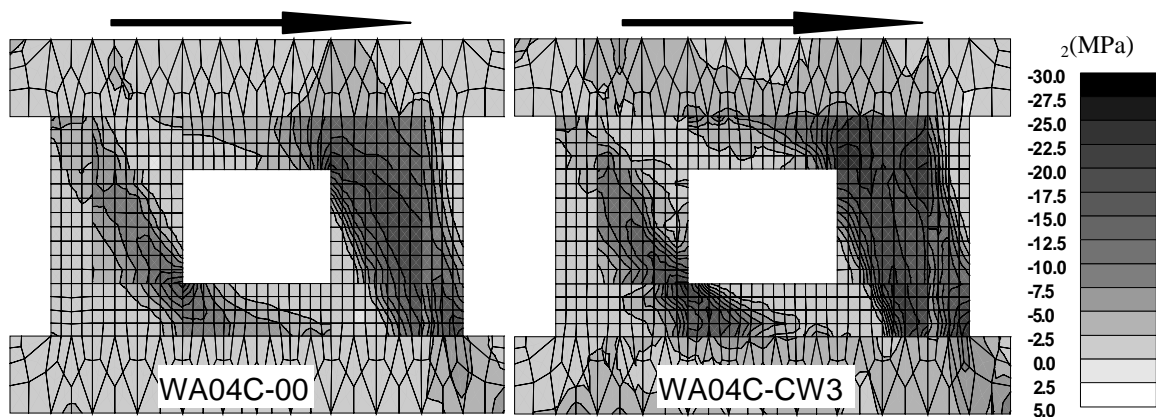


図 - 8 コンクリート主圧縮応力度分布

で実験と一致する破壊が生じた。実験では，開口両壁板上下がせん断破壊したが，解析でも同様の破壊が生じた。

### 3.3 主応力分布

図 - 8 に 00 と CW3 試験体の最大耐力時コンクリート主圧縮応力度分布を示す。両試験体ともに開口を挟む両袖壁に圧縮ストラットが形成されているが，圧縮側の袖壁の応力度が大きくなっている。主応力度は圧縮側柱脚部と圧縮側袖壁の柱との境界部で大きく，ほぼ一軸圧縮強度に達している。柱コンクリートの主応力度分布は両試験体でそれ程差はみられないが，壁の主応力度はCW3の方がシート補強した圧縮側袖壁部で全域に渡って大きくなっている。図 - 9 に袖壁に配した CF シートの主応力度分布を示す。最大耐力時に引張側袖壁上部で最も大きな引張応力が生じて約 900MPa となっているが，引張側下部と圧縮側上部の一部で圧縮応力が生じている部分が見られる。これは，解析ソフトの設定上，シートの構成則が引張側と圧縮側で対称としているためこのような現象が生じてしまった。実際には CF シートが圧縮応力を負担するとは考えられないため，構成則を改善する必要があると思われる。

### 3.4 各部の水平力分担

最大耐力時に作用するせん断力の柱・壁部の分担割合について，柱・壁各部のせん断耐力値の累加方法と比較する。累加法では壁と柱のせん断耐力を表 - 5 脚注の式<sup>1)</sup>から算出して単純に合計した。その際，シートの有効係数は実験

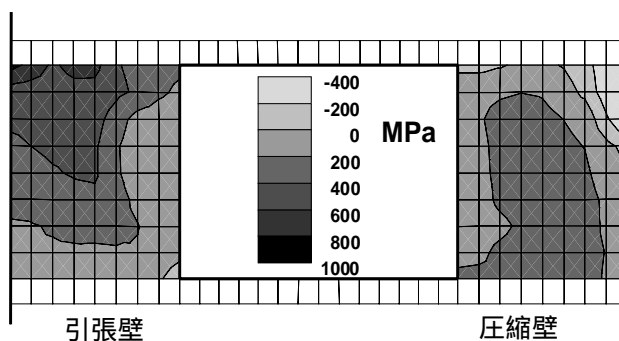


図 - 9 CF シート主応力度分布 (CW3)

時に計測したひずみ値から，柱では 2/3，壁では 0.1 として算定した。この方法で求めた計算値は実験値よりも 1 ~ 2 割程度大きくなった。解析値は図 - 10 に示す算定位置に近い要素積分点において最大耐力時の  $\sigma_{xy}$  を抽出し，要素の支配面積との積により得た値を合計して水平せん断力とした。柱と壁の挙動を別々に考える累加法から導き出した壁部と柱部の水平力の分担率は，どの試験体も壁部は総水平力の 34 ~ 46%，柱部は 54 ~ 66% 程度の分担率となっている。一方，解析では，壁部が 70 ~ 81%，柱部が 19 ~ 30% となった。この結果から，壁と柱が一体になることによって柱の拘束による壁の負担力増大があったと考えられる。柱を CF シート補強した C3 は，無補強試験体に比べて解析値の柱部負担率が減少している。これは，柱でのシートの補強効果とせん断効果を考慮したのに負担率が減少したことになるが，柱の補強により壁への拘束度が増大し，無補強に比べ壁の負担力が大きく増大したためによると考えられる。しかし，柱 CF シートの両効果のモデル化については，解析結果の精度を含めてさらに検討すべきであると

表 - 5 水平力分担割合

試験体名 (最大耐力)	算定法	柱負担分 (kN)	負担率 (%)	壁負担分 (kN)	負担率 (%)	Qcal (kN)	cal/exp
WA-04C-00 exp=389kN	累加式	257	59.0	178	41.0	435	1.12
	解析	74	19.3	310	80.7	385	0.99
WA-04C-C3 exp=486kN	累加式	370	66.0	190	34.0	560	1.15
	解析	83	18.4	366	81.6	449	0.92
WA-04C-CW3 exp=516kN	累加式	353	54.2	298	45.8	651	1.26
	解析	146	30.5	332	69.5	478	0.93
WA-04C-CO3 exp=523kN	累加式	357	54.3	301	45.7	658	1.26
	解析	144	29.0	353	71.0	497	0.95

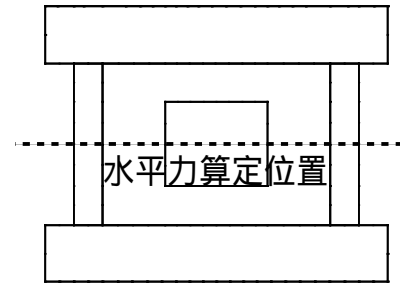


図 - 10 水平力算定位置

$$Q_{cal} = \gamma \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (\sigma_B + 17.7)}{\sqrt{M/(QD) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_s \sigma_{sy} + \alpha \cdot p_f \sigma_f} + 0.1 \sigma_0 \right\} b_e \cdot j$$

γ : シートの有効係数 0.67(柱) 0.1(壁) p<sub>f</sub> : CFシート補強比 p<sub>f</sub> : CFシート破断強度  
 p<sub>s</sub> : せん断補強筋比 σ<sub>sy</sub> : 補強筋降伏強度 o : 開口比(壁) σ<sub>0</sub> : 軸応力度 [SI 単位]

00	5.8	27.8	52.9	13.5
C3	4.6	31.2	50.4	13.8
CW3	7.9	31.5	38.0	22.6
CO3	7.6	31.7	39.3	21.4

図 - 11 水平力の各部負担割合(%)

考えられる。図 - 11 に全試験体の解析結果からせん断分担割合をより細かく分割して示す。主応力分布でも見られたように、圧縮側の壁および柱の負担割合が大きく、全体の約 60~70%を負担している。解析結果から判断して、シート補強による影響は柱のみの補強の場合には大きな違いが見られないが、袖壁の補強を追加すると圧縮側柱の負担が大きくなった。これは、壁のせん断耐力が増大することで、柱により大きなせん断力が作用したと考える。

#### 4. まとめ

炭素繊維シートで補強した RC 有開口耐震壁を対象に非線形 2 次元有限要素解析を行い、以下の結果を得た。

1)CF シートの補強効果を柱ではコンクリート拘束効果とせん断補強効果、壁ではせん断補強効果と考えモデル化した解析は、荷重変形関係、破壊性状の実験との対応が良かった。

2)解析では、水平加力時に圧縮壁・柱のコンクリート圧縮応力レベルが大きいことを示した。

3)水平力の負担割合を実験結果の評価で行った累加式と比較したところ、壁と柱の負担割合はやや異なる結果を得た。有限要素解析結果により、開口位置での水平力は圧縮側の壁と柱によって 60%以上が負担されることを示した。

4)水平力負担について CF シートで柱を補強する効果は顕著に現れなかったこと、壁のシートに圧縮応力が生じたことなどから、CF シート効果のモデル化に改良の余地がある。

[謝辞] 本研究は平成 16 年度東京工業大学建築物理センター共同研究として行った。解析には北海学園大学・隅廣 洋君の協力を得た。

#### 参考文献

- 1) 宇都宮, 北野, 後藤, 城: 炭素繊維シートを用いた窓開口付耐震壁の耐震補強に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, pp.991-996, Vol.23, No.1, 2001.7
- 2) Nakamura, Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999. 10
- 3) 中塚, 小牟禮, 田垣: 炭素繊維シートを用いたコンファインドコンクリートの軸応力度 - 軸ひずみ度特性, コンクリート工学論文集, Vol.9, No.2, pp.65-77, 1998
- 4) 松裏, 北野, 後藤, 城: 炭素繊維シートを用いた RC 造有開口耐震壁の耐震補強・補修効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, pp.1249-1254, Vol.24, No.2, 2002.6