

論文 炭素繊維シートで補強された角柱体コンクリートの力学的特性と RC 造補強壁の変形性能評価への適用に関する考察

鈴木 健太^{*1}・松井 智哉^{*2}・林 和宏^{*3}・斎藤 大樹^{*4}

要旨:本研究ではCFシートで補強された長方形断面をもつ角柱体コンクリートの力学的特性を把握することを目的として、断面形状、補強繊維量などを変数としたCFシートによる補強を施したコンクリート試験体の要素実験を行った。さらに要素実験に基づいてCFシート補強壁の変形性能の評価法について検討を行った。要素実験より、CFシートによる補強が長方形断面コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は小さいが、応力軟化性状に影響を及ぼすことを明らかにした。要素実験結果を用いたCFシート補強壁の終局限界変形の計算結果は過小評価を与える結果となった。

キーワード:炭素繊維シート補強, 拘束コンクリート, 角柱体, 圧縮強度, 終局限界変形

1. はじめに

2010年チリ地震において大破に至ったRC造建物の特徴的な被害として、柱なし連層耐震壁が曲げ破壊したことが大きく注目されたことから¹⁾、柱なし壁を対象に炭素繊維シート(以下、CFシート)を用いた補強方法に関する研究を行ってきた^{2), 3)}。曲げ破壊型耐震壁を対象とした実験的研究からCFシートを壁脚部に巻くことにより、変形性能が向上することが確認できた。また、壁脚部の端部に部分的に巻いた方が、より効果的に変形性能を向上させることができることが明らかになった。

しかしながら、変形性能の評価法の提案までは至っておらず、課題として、CFシートを巻くことによって補強されたコンクリートの力学的特性を把握することが挙げられる。円柱体および正方形断面の角柱体については、文献4), 5)などに示されている。しかし本研究で対象としている耐震壁の補強される断面は長方形である。

そこで、本研究ではCFシートで補強された長方形断面をもつ角柱体コンクリートの力学的特性を把握することを目的として、CFシートによる補強を施したコンクリート試験体の要素実験を行った。さらに要素実験に基づいてCFシート補強壁の変形性能の評価法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 および図-1 に本研究で使用する角柱体コンクリート試験体の一覧および概要図を示す。実験変数は、断面形状、幅 b (短辺)に対する奥行 H (長辺)の比 H/b 、幅 b に対する長さ L の比 L/b 、炭素繊維シートの補強量、

炭素繊維シートの種類、矩形断面の面取り半径である。

試験体の基本形状は、150mm(幅)×150mm(奥行)×300mm(長さ)(幅:奥行:長さ=1:1:2)、 $R=15\text{mm}$ として、表-2に示すように形状に関する変数は、 $H/b=1, 2, 3, 4$ 、 $L/b=2, 3$ とした。用いたCFシートの種類は一般型と中弾性型の2種類である。また、CFシートによる補強量は、一般型の目付量 200g/m^2 で1層巻き、一般型の目付量 200g/m^2 で2層巻き、一般型の目付量 300g/m^2 で1層巻き、一般型の目付量 300g/m^2 で2層巻き、中弾性型の目付量 300g/m^2 で1層巻きの計5種類を変数にとっている。試験体の面取り半径は15mmと30mmの2種類である。

CFシートの貼り付け方は、まず試験体側面をグラインダーで研磨し、エポキシ樹脂を試験体側面にローラーで含浸させ、次に、コテを用いて試験体側面にプライマーを均一に塗布し、再びエポキシ樹脂を試験体側面に含浸させる。その後、炭素繊維シートを緊張しながら貼り付ける。最後に、炭素繊維シートの上から再度エポキシ樹脂をローラーで塗布する。なお、CFシートは試験体形状に関わらず、CFシートの重ね合わせ長さは100mmで巻き付けた。

2.2 使用材料

使用したコンクリートの調合表を表-2示す。コンクリートの呼び強度は 24N/mm^2 である。炭素繊維シートの機械的性質を表-3に示す。

2.3 試験方法および計測計画

載荷方法は2000kN圧縮試験機を用いた一軸圧縮試験とした。

図-2に変位計測位置を示す。計測した変位は試験体

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学専攻 院生 (学生会員)

*2 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学系 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学系 助教 博士 (工学) (正会員)

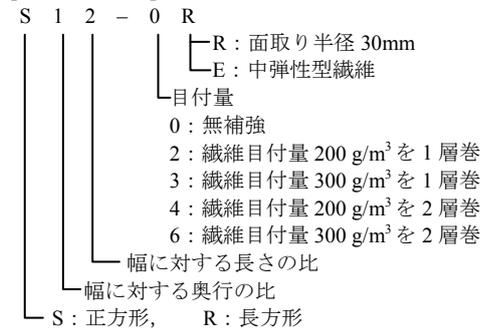
*4 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学系 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体	P_f (%)	b (mm)	H (mm)	L (mm)	H/b	L/b
S12-0	0	150	150	300	1	2
S12-2	0.105					
S12-3	0.157					
S12-4	0.209					
S12-6	0.315					
S12-3R	0.157					
S12-3E	0.154					
S13-0	0	150	300	450	2	3
S13-3	0.157					
R22-0	0					
R22-2	0.066					
R22-3	0.1					
R22-3R	0.1					
R23-0	0					
R23-3	0.1					
R32-0	0	100	300	200	3	2
R32-2	0.07					
R32-3	0.106					
R32-3R	0.106					
R33-0	0					
R33-3	0.106					
R42-0	0			100		
R42-2	0.054					
R42-3	0.081					
R42-3R	0.081					
R43-0	0					
R43-3	0.081					
R43-3	0.081					
R43-3	0.081					

p_f : 炭素繊維シート補強比 $p_f = 2t/D$, t : 炭素繊維シート厚さ(mm), D : 試験体対角方向の長さ

【試験体の名称】



の全長検長区間を基本とし、 $L/b=3$ の試験体では全長検長区間の内側に計測治具を取り付け、S13 および R23 シリーズは 300mm, R33 および R43 シリーズ 200mm の特定検長区間を設け計測を行った。なお、各検長区間における変位は、試験体の東西南北の4か所で計測を行った。また、繊維周方向のひずみを試験体長さ方向の中央位置においてひずみゲージにより測定した。図-3 に計測位置の例を示す。

3. 実験結果

3.1 繊維補強量の影響

図-4 に同一形状ごとの応力-ひずみ関係を示す。なお、図中のマーカーは終局軸ひずみ(繊維破断時ひずみ)を示しており、急激な応力低下とひずみの増大が生じたとき、あるいはひずみゲージから計測された炭素繊維の

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
57	315	179	880	972	3.15

表-3 炭素繊維シートの機械的性質 (製品仕様表より)

繊維タイプ	目付量 (g/m ³)	シート厚さ(mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
一般型	200	0.111	1.80	3400 (4445)	230 (249)
	300	0.167	1.80	3400 (4728)	230 (249)
中弾性型	300	0.163	1.84	2400 (3344)	440 (444)

() 内は樹脂含浸後の材料試験による数値

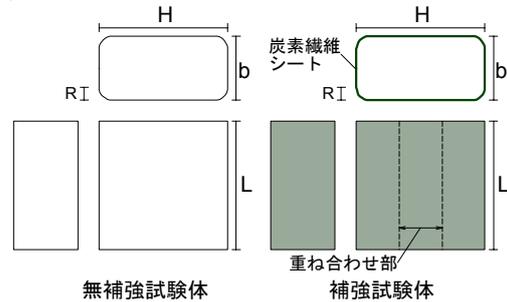


図-1 試験体概要図

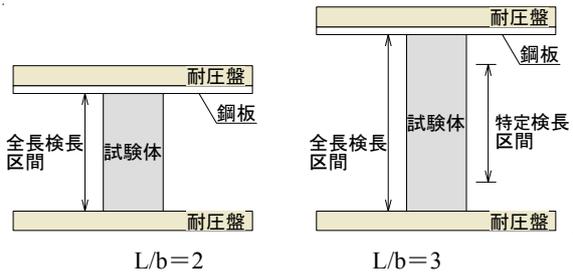


図-2 変位計測位置

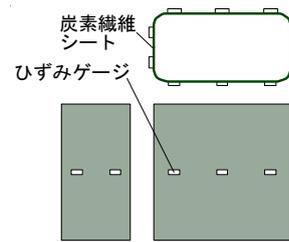


図-3 ひずみゲージ貼り付け位置の例

ひずみが急激に低下したときとした。

$H/b=1$ の正方形試験体である S12 シリーズをみると補強を施すことによって圧縮強度が増大することがわかる。また、圧縮強度に達した後、応力は低下するが補強量が多いほどその応力軟化勾配は緩やかになる。さらに補強量の多い試験体 S12-4 および S12-6 では応力が再度上昇していくことが確認できる。

長方形断面である R22, R32 および R42 シリーズでは、補強を施すことによる圧縮強度の上昇はみられなかった。しかしながら、無補強試験体では圧縮強度に達した後、

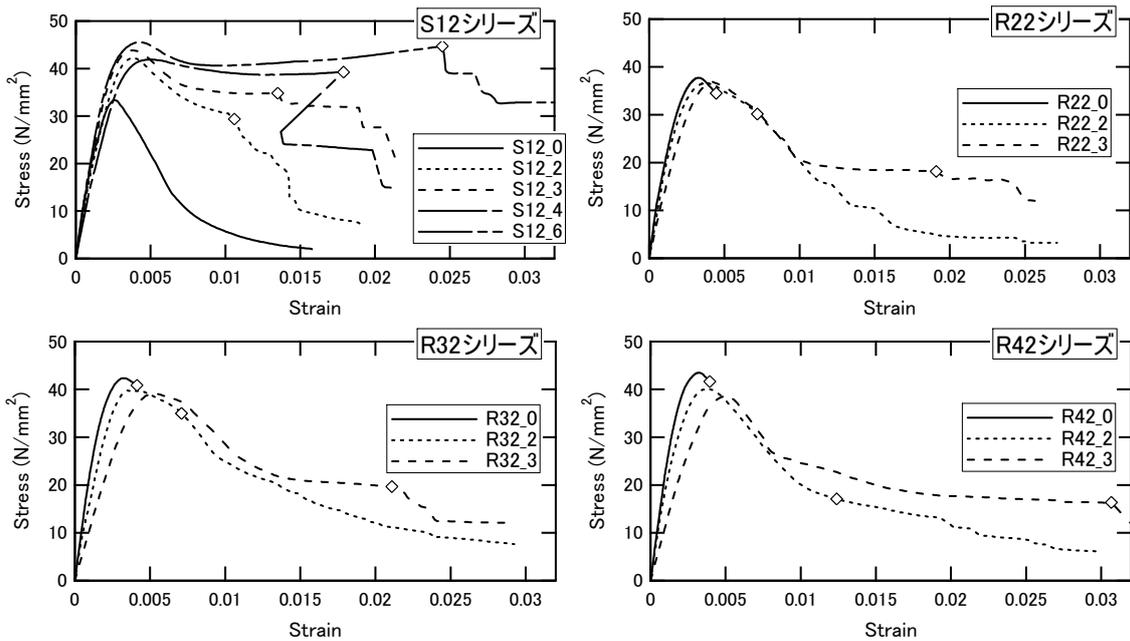


図-4 応力-ひずみ関係：補強量の影響

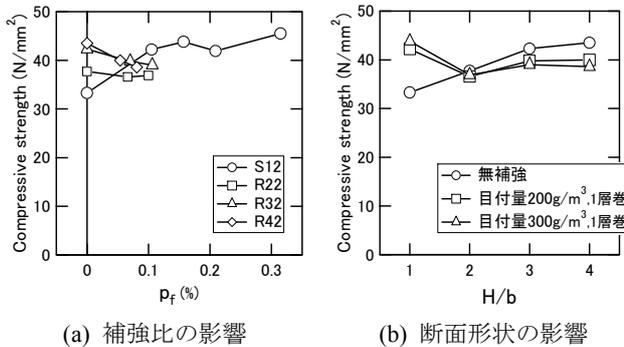


図-5 圧縮強度の比較

斜めひび割れの発生により急激な応力低下とひずみの増大が生じ脆性的な破壊に至っているが、補強した試験体では圧縮強度に到達直後の脆性的な破壊はみられなかった。また、目付量 300 g/m³の繊維を用いた試験体では、ひずみ度がおよそ0.01以降の領域で圧縮強度の半部程度の応力を保持しており、補強量は応力軟化域の性状に影響を及ぼしていることが確認できる。

図-5(a)は、補強比と圧縮強度の関係である。図-4でも述べたとおり、正方形断面のS12シリーズでは補強量の増大とともに圧縮強度が増大する傾向がみとれるが、長方形試験体では、強度に影響を及ぼしていない。

3.2 断面形状の影響

図-5(b)に H/b と圧縮強度の関係を示す。無補強の試験体では H/b が大きくなると圧縮強度が増加し、補強試験体では H/b が大きくなると圧縮強度が低下する傾向がみとれるが現時点で理由は不明である。

図-6 に断面形状を変数として応力-ひずみ関係を示す。

無補強試験体の図をみると断面の幅に対する奥行の

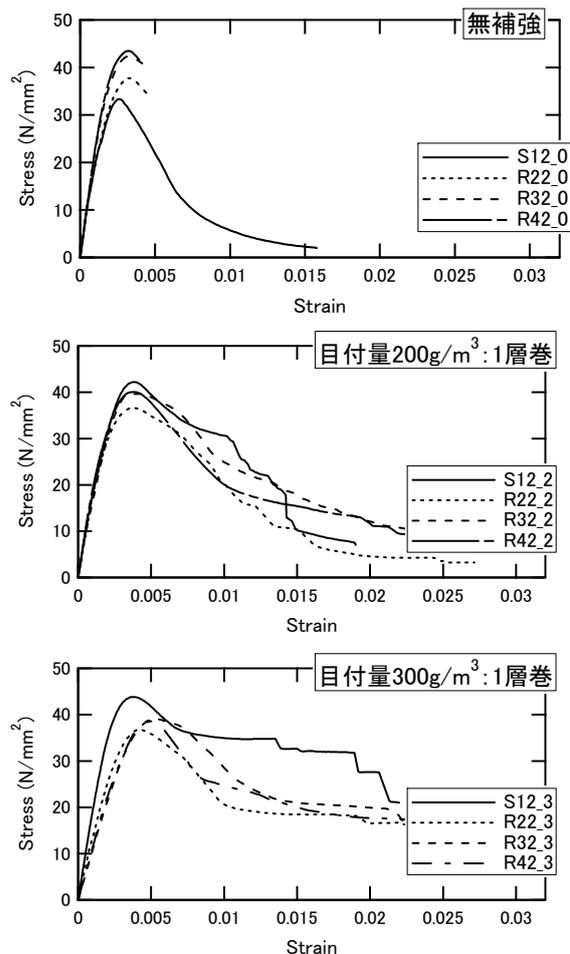


図-6 応力-ひずみ関係：断面形状の影響

比 H/b が大きいと圧縮強度が大きくなる傾向にある。無補強試験体において形状によって圧縮強度が異なるが原因については不明である。繊維目付量 300 g/m³を1層巻の試験体をみると、圧縮強度に達して応力が低下した後、

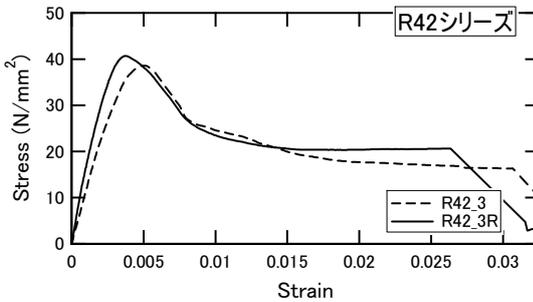
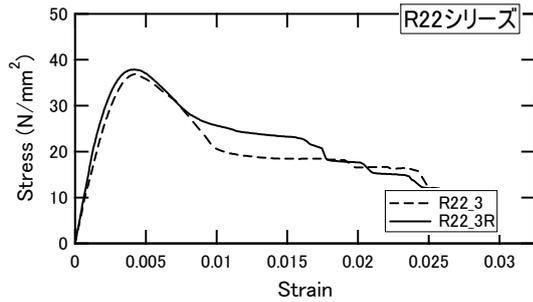


図-7 応力-ひずみ関係：面取り半径の影響

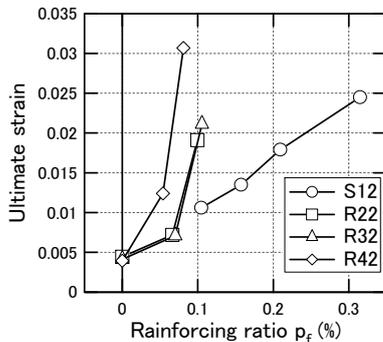


図-8 補強比と終局軸ひずみの関係

応力がほぼ一定となる領域があるが、正方形試験体 S12-3 は 8 割程度の応力を維持している。長方形断面の試験体も同じように応力が一定となる領域があり、そのときの応力は H/b に拘わらず圧縮強度の半分程度である。 H/b が 2~4 の範囲では応力の軟化性状に大きな差異はみられないことが確認できる。

3.3 面取り半径の影響

図-7 に面取り半径が異なる試験体の比較を示す。

試験体 R22 を見ると面取り半径が 15mm から 30mm になると基本的には圧縮強度に影響を及ぼさないが応力軟化域で応力の増加が見られる。しかし試験体 R42 になると応力の増大の程度は小さい。なお、補強比は、試験体 R22 は 0.1%、試験体 R42 は 0.081% である。

3.4 終局ひずみ

図-8 に補強比 p_f と終局軸ひずみの関係を示す。終局軸ひずみは図-4 で示したものである。

図より補強比が大きくなると終局軸ひずみは大きくなっていくことが確認できる。また、 H/b が大きくなると補強比が小さくても終局軸ひずみは大きくなるが、これ

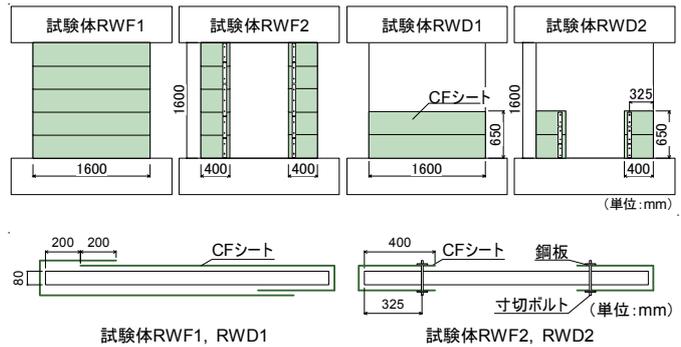


図-9 補強壁試験体概要図

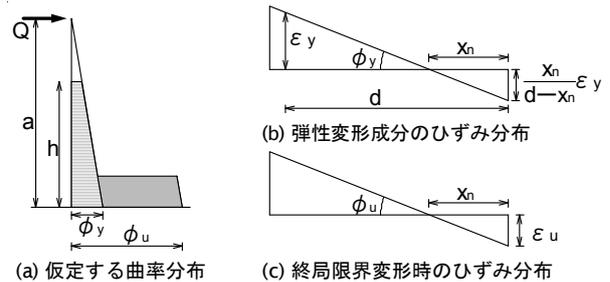


図-10 仮定する曲率とひずみの分布

は円形に近い正方形断面と比べて長方形断面になると周方向のひずみが小さく、拘束効果が弱くなり長辺側に膨らみやすいためである。

4. RC 造補強壁の変形性能の推定に関する考察

4.1 終局限界変形の評価法

ここでは、図-9 に示すような CF シートによって補強された柱なし RC 造壁^{2), 3)}を対象として、その終局限界変形の評価法について検討を行う。なお、本実験は一定軸力下で静的漸増繰り返し水平力载荷を行った曲げせん断実験である。終局限界変形について考察するにあたって曲げ変形を対象にするものとし、次のようなモデルを考える。終局限界変形 R_u は弾性変形 R_y と塑性変形 R_p の足し合わせとする (式(1))。曲率分布は図-10 のように仮定する。弾性変形成分は、台形分布を仮定していることから式(2)で算定されることになり、このときの危険断面の曲率は壁端部縦筋の中心位置が鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y に達するときの曲率 ϕ_y とする。塑性変形成分は圧縮縁のコンクリートが限界圧縮ひずみ ϵ_u に達したときの曲率を式(3)のように表すと式(1)、(3)より式(4)で算出される。なお、終局限界変形付近の曲率分布は壁脚部に集中して生じていることは文献 2), 3) において確認されている。

$$R_u = R_y + R_p \quad (1)$$

$$R_y = \left(\frac{h}{2} - \frac{h^2}{6a} \right) \phi_y \quad (2)$$

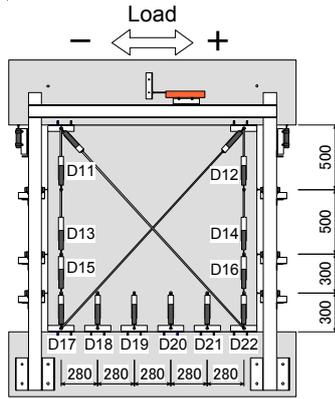


図-11 変位計測位置

表-4 要素実験による
終局軸ひずみ

試験体名	終局ひずみ
R22-3	0.0191
R22-3R	0.0174
R23-3	0.0136
R32-3	0.0211
R32-3R	0.0232
R33-3	0.0245
R42-3	0.0307
R42-3R	0.0264
R43-3	0.0187
average	0.022

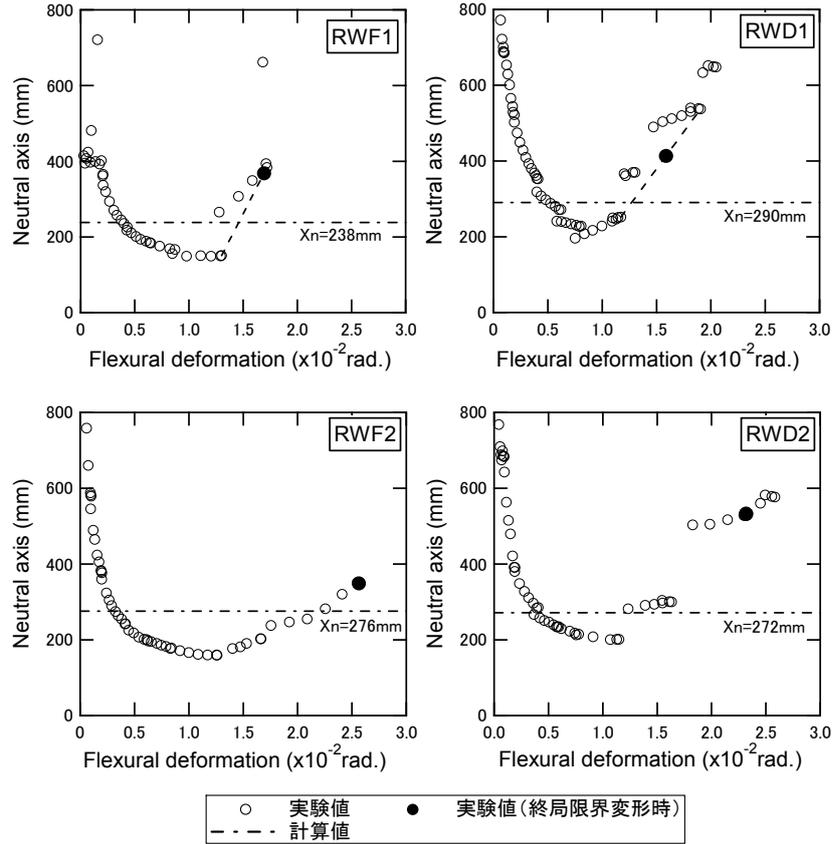


図-12 中立軸位置

$$\phi_u = \frac{\epsilon_u}{x_n} \quad (3)$$

$$R_p = L_p (\phi_u - \phi_y) = \frac{L_p}{x_n} \left(\epsilon_u - \frac{x_n}{d - x_n} \epsilon_y \right) \quad (4)$$

以上の算出方法で終局限界変形を評価するには、中立軸長さ x_n 、終局限界変形時の圧縮縁のコンクリートの圧縮ひずみ ϵ_u および塑性ヒンジ長さ L_p を適切に評価することが重要である。次節では、2、3章で示した実験結果に基づいて補強壁の終局限界変形の算定に用いる x_n 、 ϵ_u および L_p について検討を行う。

4.2 終局限界変形時の x_n 、 ϵ_u および L_p に関する検討

まず、中立軸位置について RC 造補強壁実験での計測データから得られた中立軸位置と算定式による中立軸位置の比較検討を行う。

実験での中立軸位置の算出は、図-11 に示す試験体脚部に設置した変位計で計測された鉛直変位を線形補間し変位が 0 となる位置を中立軸位置として算出した。また、算定式の中立軸位置は(5)式を用い中立軸位置を算出した。

$$x_n = \frac{N + \sum a_i \sigma_y}{0.85 f_c t} \quad (5)$$

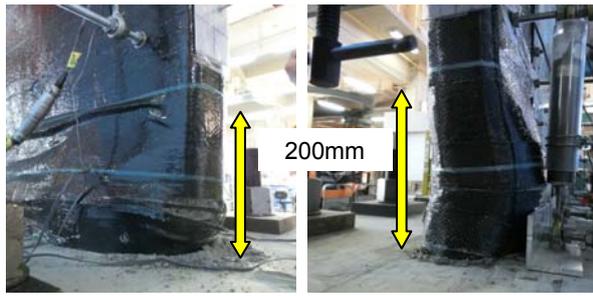
ここで、 N ：軸力、 a_i ：引張鉄筋断面積、 σ_y ：引張鉄筋の降伏応力、 f_c ：コンクリート強度、 t ：壁厚である。

図-12 に実験における中立軸位置の推移と算定式による中立軸位置を示す。曲げ変形は図-11 に示すように高さ方向に 4 分割して計測した変位量から平面保持を仮定して各区間の平均曲率を求め、これにより生じる水平変形の和として算出した。終局限界変形時の中立軸位置は黒丸で示しており、終局限界変形は試験体の耐力が最大耐力の 80% に低下したときの変形として算出した。また、履歴曲線上に終局限界変形がない試験体は 1 サイクル目ピーク時値の線形補間により算出した。

実験値と算定値の中立軸位置は試験体 RWF2 においては近い値であったが、全体的に算定値では中立軸位置を過小評価する傾向にある。

次に、 ϵ_u について CF シート補強を施したコンクリート要素実験結果を用い検討を行う。表-4 に 3 章で述べた要素実験から得られた終局軸ひずみを示す。対象とした試験体は、CF シートの目付量が RC 造補強壁試験体と同程度（試験体 RWF2, RWD2 : 0.1%）の角柱体試験体である。

要素実験結果から CF シート補強を施したコンクリートの終局軸ひずみは 0.0136 から 0.0307 の間で計測され、平均値は 0.022 であった。表-5 の補強壁の終局限界変形時の圧縮縁の鉛直ひずみ ϵ_u と要素試験による終局ひずみの平均値を比較すると、端部補強である試験体 RWD2 での ϵ_u は平均値と比較し実験値が 2 倍程度大きくなったが、



(a) RWD1 (R=1/33rad) (b) RWF2 (R=-1/50)

図-13 壁脚部の損傷状況

表-5 CF シート補強壁の終局限界変形

試験体	実験値			計算値
	R_u ($\times 10^{-2}$ rad.)	ϵ_u	x_n (mm)	R_u ($\times 10^{-2}$ rad.)
RWF1	1.69	-0.020	368	1.93
RWF2	2.56	-0.031	349	1.68
RWD1	1.59	-0.025	412	1.60
RWD2	2.31	-0.056	531	1.71

全体補強である試験体 RWF1 および試験体 RWD1 では概ね同程度の値である。

最後に L_p について考察を行う。図-13 に補強壁試験体の脚部の損傷状況を示す。補強壁試験体の脚部の損傷状況から塑性ヒンジ長さを観察すると、およそ 200mm の範囲で CF シートの損傷および膨らみが確認できた。よって、 L_p は 200mm (壁厚の 2.5 倍、壁せいの 0.125 倍) 程度であると考えられる。

4.3 計算結果

表-5 に終局限界変形時の実験値一覧および終局限界変形の計算値を示す。終局限界変形の計算において、 x_n は(5)式に示す算定式、 ϵ_u は要素試験結果から 0.022、 L_p は RC 造補強壁実験から 200mm とした。

終局限界変形の実験値と計算値を比較する。全体補強である試験体 RWF1 および試験体 RWD1 では、結果として実験値の ϵ_u と計算に用いた ϵ_u が同程度となったため、終局限界変形の計算値は実験値と概ね近い値となった。端部補強である試験体 RWF2 および試験体 RWD2 では計算値は実験値の 7 割前後と小さめの評価を与える結果となっている。理由としては要素実験によるコンクリートの終局時圧縮ひずみと補強壁の終局時の圧縮縁のコンクリートひずみに乖離があるためである。

5. まとめ

本研究では CF シートで補強された長方形断面をもつ角柱体コンクリートの圧縮試験を行った。さらに実験結果に基づいて CF シート補強壁の変形性能に関する検討

を行った。

- (1) CF シートによる補強が長方形断面コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は小さい。
- (2) CF シートによる補強が長方形断面コンクリートの応力軟化域において影響を及ぼしており、応力は一旦低下するものの軸ひずみが 0.01 以降も圧縮強度の半分程度の応力を負担している。
- (3) 補強比が大きくなると CF シート補強角柱体コンクリートの終局ひずみは大きくなる。
- (4) CF シート補強コンクリートの要素実験に基づいて CF シート補強壁の変形性能の評価を試みた。結果として端部補強をした壁の限界変形は小さめの評価を与える結果となった。より適切に評価するためには終局時の圧縮ひずみを推定する必要がある。

謝辞

本研究は、JST/JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」(研究代表者：山崎文雄、千葉大学教授)の補助を受けて実施された。また、補強試験体の製作にあたっては、東レ株式会社より資材提供および技術指導のご協力を頂いた。大学院生の酒井貴志氏、学部生の橘一仁氏、金澤優樹氏には、実験の計画・実施・分析にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2010 年チリ・マウレ沖地震被害調査報告書，2012
- 2) 松井智哉，内村恭平，斎藤大樹，Roy Reyna：鉄筋コンクリート造柱なし壁の曲げ破壊に対する炭素繊維シート補強に関する基礎研究，第 14 回日本地震工学シンポジウム，pp.816-825，2014.12
- 3) 松井智哉，内村恭平，酒井貴志，斎藤大樹：炭素繊維シートによる補強を施した RC 造柱なし壁の変形性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.847-852，2015.7
- 4) 中塚佑，小牟禮，田垣欣也：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.2，1998.7
- 5) American Concrete Institute: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures ACI 440.2R-08, 2008