

論文 CFRP 筋を用いたコンクリート壁の耐震性能に関する研究

沈 富強*1・孫 玉平*2・竹内 崇*3・趙 軍*4

要旨：超高強度弾性体である炭素繊維強化ポリマー（CFRP）筋を用いたコンクリート壁の耐震性能に及ぼす軸力の影響を明らかにすることを目的として、3 体の実物大のコンクリート壁の試験体を作製して、軸力比を実験変数とした一定軸力下における繰り返し載荷実験を実施した。その結果、CFRP 筋を用いたコンクリート壁は、安定した耐力を保持すると共に残留変形を小さく抑えることのできる、drift-hardening 性状を有すること並びに、軸力比の増加とともに、drift-hardening 性状を維持できる部材角が低下することを明らかにした。また、付着すべりの影響を考慮した解析手法の CFRP 筋コンクリート壁への適用性を検証した。

キーワード：コンクリート壁, CFRP 筋, 耐震性能, drift-hardening 性状, 残留変形

1. はじめに

近年、設計基準で想定されたレベルを超えた巨大地震が多数発生し、建物ならびに都市インフラに大きな被害を与えた。被災した建物は、地震動による倒壊を免れたとしても、塑性化による大きな永久変形が残り、建物としての機能を失い、修復に多くのコストを要することもある。一方、建物の機能の回復には多くの時間と費用がかかるだけでなく、地域社会の早期復旧及び復興を妨げるおそれもある。特に発電所、病院などといったライフライン構造物においては、地震後の救命活動を迅速に開始する必要がある、地震後の機能維持性能が極めて重要となる。そのためにも、これらの建物の耐震性能としては、今後発生しうる巨大地震に対しても、**図-1**を示す安定した耐力維持と、残留変形を小さく抑えられることが、重要と考えられ、著者らはこれらの性能を drift-hardening 性状と呼んでいる。

耐震壁は、建築構造物の中で広く使用されている耐震部材である。従来のコンクリート耐震壁は、塑性変形及び損傷を許容することで、靱性を確保し、地震エネルギーを吸収することを目的として設計される。そのため、地震後に過大な変形が残り、直ちに機能を回復できない場合がある。前述の問題を解決するために、drift-hardening 性状を備える新しい耐震壁が必要であると考えられる。

従来のコンクリート壁に起因する問題を解決する方法の一つは、壁の補強材として、高強度補強材料を使用することである²⁾。炭素繊維強化ポリマー（CFRP）筋は、高耐蝕性、高い引張強度ならびに線形弾性応力ひずみ関係を有し、コンクリート構造物の一部または全部の鉄筋の代わりに使用して性能を向上させることができる³⁾。

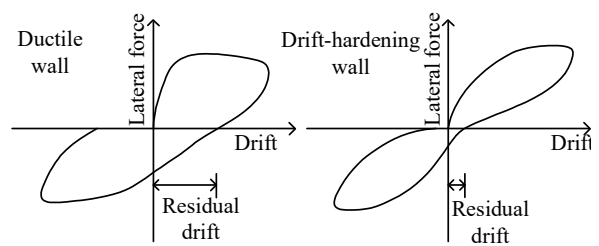


図-1 繰り返し履歴性状の比較

本論の目的は、CFRP 筋を用いたコンクリート壁の耐震性能を実験ならびに解析により明らかにすることである。そのため、3 体の実物大の CFRP 補強コンクリート壁を作製し、一定軸力下における繰り返し実験を行った。コンクリート壁の境界要素では、補強筋材に生じる応力とひずみが非常に大きくなるため、CFRP 筋を縦補強材として壁の境界要素に配置した。壁の履歴性能を評価するために、CFRP 筋の付着すべりの影響を考慮した解析を行った。解析結果と実験結果を比較することで解析方法の妥当性と精度を検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

CFRP 筋を用いたコンクリート壁の耐震性能を検証するために、壁の境界要素の縦補強材として CFRP 筋を用いた 3 体の実物大のコンクリート壁を作製し、実験した。試験体 3 体の配筋は同じであり、詳細を**図-2**に示す。そして、**表-1**に試験体一覧を示す。壁面は高さ 2360mm、幅 1280mm、厚さ 200mm であり、上下に加力スタブを有する。水平力の載荷点は下スタブの上面から 2560mm の高さであり、せん断スパン比は 2.0 である。

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*4 鄭州大学 力学及び安全工程学院 教授 博士(工学)

表-1 試験体一覧

試験体名	a/D	n	境界要素		壁面		Q_{exp} (kN)		R_{exp} (%)	
			縦筋	帯筋	縦筋	横筋	正側	負側	正側	負側
CFRPHW1	2	0.17	8-CFRP 筋	HPB300@50	HRB335@62	壁脚 600mm 以上 HRB335@70 壁脚 600mm 以下 HRB335@50	847.0	791.0	1.86	1.42
CFRPHW2		0.26					859.6	855.0	1.08	1.38
CFRPHW3		0.33					950.9	902.9	1.16	0.88

ここに、a/D: セン断スパン比, n: 軸力比, Q_{exp} : 最大水平力, R_{exp} : Q_{exp} 時部材角

表-2 材料特性

種別	d (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y ($\mu\epsilon$)	δ (%)	E_s (GPa)
HPB300	6	28.3	414.8	529.4	1860	19.4	223
HRB335	8	50.3	361.3	502.6	1599	19.2	226
CFRP 筋	12	113.1	-	2310.3	-	-	143

ここに、d: 直径, A_s : 断面積, f_y : 降伏点応力, f_u : 引張強さ, ϵ_y : f_y 時ひずみ, δ : 破断伸び, E_s : 弾性係数, HPB 及び HRB はそれぞれ中国の規格(GB 1499.2-2007)に従う丸鋼及び異形鉄筋を表す。

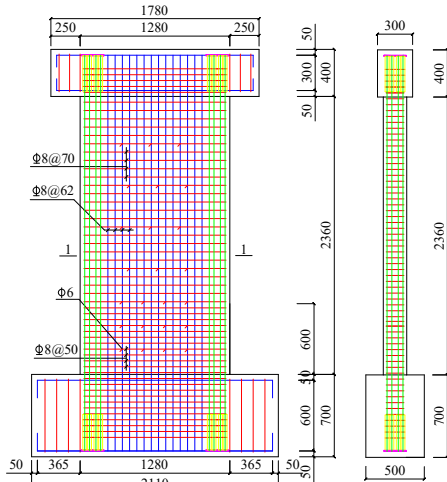


図-2 試験体の配筋詳細

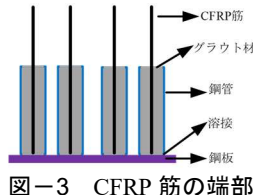


図-3 CFRP 筋の端部固定



CFRP 筋 異形鉄筋

図-4 CFRP 筋と異形鉄筋



図-5 荷装置

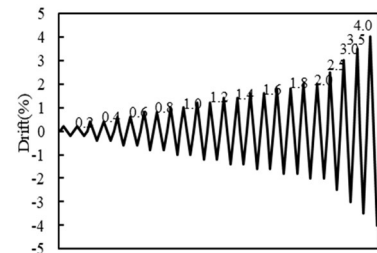


図-6 荷プログラム

壁の境界要素に縦筋として CFRP 筋 (直径 12mm) を 8 本配置し, 50mm の間隔を持つ円形の帯筋 (直径 6mm) の丸鋼 HPB300 を配置した。その他に, 壁面には直径 8mm の異形鉄筋 HRB335 を縦鉄筋として, 約 62mm 間隔でダブル配筋した, 縦補強筋比は 0.8% である。横筋には, 直径 8mm の異形鉄筋による 135 度フックを有するフープを用い, ヒンジゾーンを強化させるために 600mm の高さより下では 50mm 間隔で配筋し, それ以上の高さでは 70mm で配筋した。横補強筋比は, それぞれ 1.0% と 0.7% である。

CFRP 筋の定着に関しては, 図-3 に示すように, 厚さ 10mm の鋼板に溶接した長さ 330mm の鋼管スリーブ内に CFRP 筋の両端を配し, 高強度の非収縮グラウト材 (圧縮強度 60MPa) を充填することで固定した。溶接は, 被覆アーク溶接によるすみ肉溶接であった。実験変数は, 軸力レベルであり, 試験体名を CFRPHW1, CFRPHW2,

CFRPHW3 として, それぞれ軸力比 0.17, 0.26, 0.33 で荷を行った。

2.2 材料特性

図-4 に示す CFRP 筋の外観のように, CFRP 筋は普通の丸鋼および異形鉄筋と異なる。CFRP は, 外径が 12mm, 溝の深さが約 1mm である。普通の異形鉄筋に比べて表面の凹凸が小さく, 丸鋼と異形鉄筋の中間的な付着性能を持つ。

表-2 に使用した補強材の引張試験結果を示す。CFRP 筋は 2310.3MPa の高い引張強度を持ち, 引張強度で破損するまで線形弾性特性を示すため, 降伏段階がなかった。

コンクリートには, レディミクストコンクリートを使用した。65 日のコンクリート立方体 (150mm) の圧縮試験結果でのコンクリート強度は 57.2MPa であった。

2.3 加力及び荷方法

図-5 に示す荷装置によって, 試験体に一定の軸力

下での正負交番繰り返し水平力を载荷した。2500kN MTS サーボ制御油圧アクターを使用して、正負繰り返し水平力を加えた。軸力は2つの最大容量 2000kN の油圧ジャッキによって導入した。油圧ジャッキが試験体の水平変位に追従できるように、ジャッキと反力フレームの間にはスライド機構を設けた。軸力は全テストの間に油圧オイルポンプによってリアルタイムで自動的に一定値に調節される。

図-6 に载荷プログラムを示す。正負交番繰り返し水平力は部材角により制御され、部材角は、水平力载荷点の水平変位をせん断スパン (2560mm) で除することにより算出した。载荷プログラムは部材角 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, 1.6%, 1.8% と 2.0% の各変位振幅での 2 回ずつの正負交番繰り返し载荷と部材角 2.5%, 3.0%, 3.5% と 4.0% の変位レベルでの 1 回ずつの正負交

番繰り返し载荷である。

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れ及び破壊性状

载荷終了後のひび割れ図と壁パネルのコンクリートの損傷をそれぞれ図-7 と図-8 に示す。図-7 の赤線は正側の载荷時に生じたひび割れ、青線は負側の载荷時に生じたひび割れである。壁パネルの損傷は、軸力比によらず、いずれの試験体も同様に次のように進展した。まず水平力の作用で曲げひび割れが発生し始めた。水平変位が大きくなると、曲げひび割れが伝播し続け、せん断ひび割れを伴いながら、境界要素に配置した縦鉄筋が降伏し始めた。载荷が続くと、かぶりコンクリートの剥離が見られ、その後、試験体は水平力のピークに達した。実験の終了は、コンクリートの圧壊あるいは CFRP 筋の圧

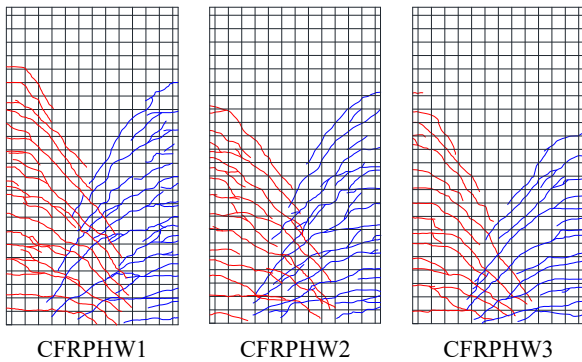


図-7 ひび割れ図

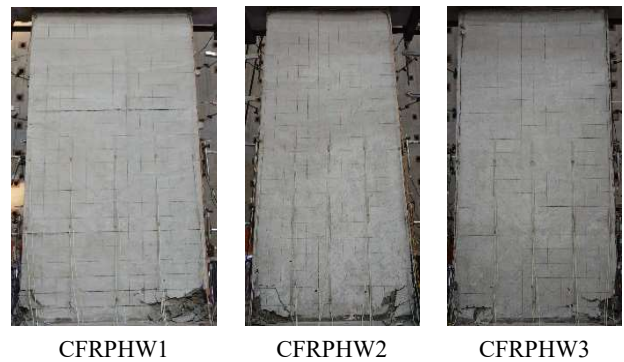


図-8 実験後試験体の損傷

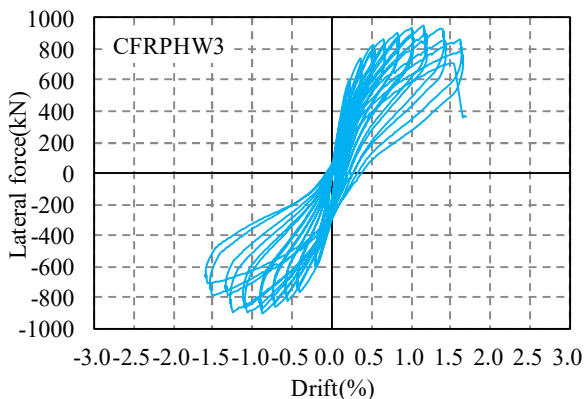
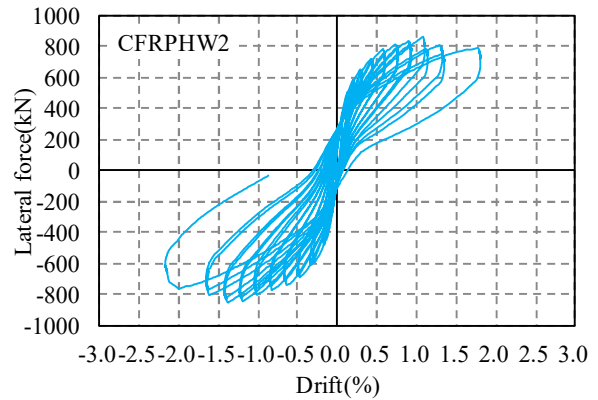
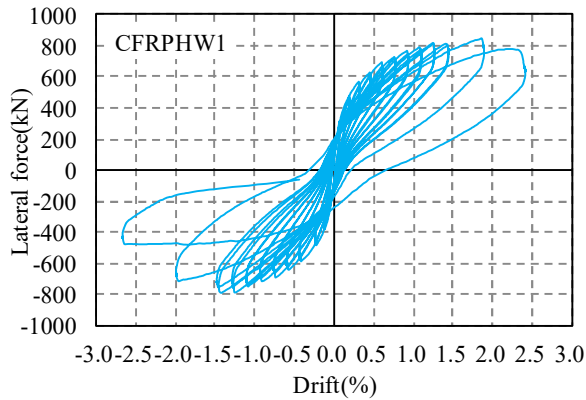


図-9 水平力—部材角関係の実験結果

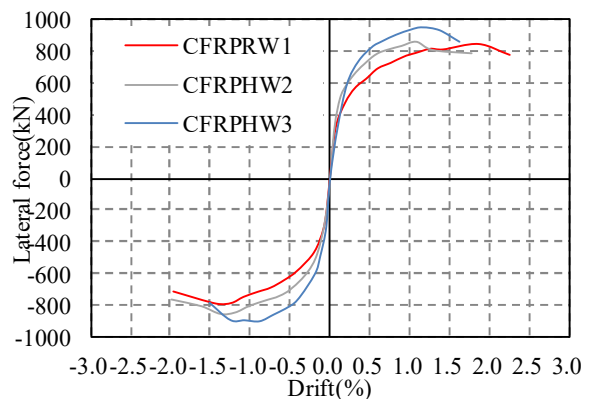


図-10 水平力—部材角関係の包絡線の比較

縮破壊により、コンクリート壁の耐震性能が大きく低下することで迎えた。

試験体 CFRPHW1 は部材角 0.06% で曲げひび割れが発生した。部材角 0.27% でせん断ひび割れが発生し、境界要素の縦鉄筋が降伏した。部材角 0.75% で圧縮側コンクリートに縦ひび割れが発生し、少量の剝離が発生した。部材角 1.64% の時に最大耐力に達し、大きい圧縮応力で圧縮側壁脚部の CFRP 筋が圧縮破壊した。その後、部材角 2.45% で耐力は大きく下がり、実験終了した。

試験体 CFRPHW2 は試験体 CFRPHW1 と同じ部材角で曲げひび割れとせん断ひび割れ発生し、境界要素に配置した縦鉄筋が降伏ひずみに達した。一方、水平力は部材角 1.23% で圧縮側の CFRP 筋が圧縮破壊し、試験体 CFRPHW1 より早期にピークを迎えた。その後、部材角 1.89% で実験を終了した。

試験体 CFRPHW3 は部材角 0.07% で曲げひび割れが発生し、部材角 0.27% でせん断ひび割れと壁脚部の縦鉄筋の降伏が発生した。部材角 0.77% で圧縮側壁脚部のコンクリートの剝離が始まり、部材角 1.02% で圧縮側壁脚部の CFRP 筋の圧縮破壊が発生し、最大水平力に達した。その後、部材角 1.58% で耐力が大きく低下し、実験を終了した。

表-1 に示すように正負の最大耐力には最大 6% 程度の差が見られるが、これは CFRP 筋の圧縮破壊が生じるタイミングが正負で異なったためと考えられる。

ひび割れの発生位置に対する軸力の影響は明らかであり、軸力比が増加するにつれて、ひび割れが発生する高さが低くなり、ひび割れの伝播が抑制された。

3.2 繰り返し履歴性状

図-9 に実験で得られた各試験体の水平力一部材角関係を示す。軸力比 0.17 および軸力比 0.26 を受けた試験体 CFRPHW1 および試験体 CFRPHW2 は、部材角 1.8% まで安定した水平抵抗力を示し、drift-hardening 性状を示した。試験体 CFRPHW3 の水平耐力は、部材角 1.2% まで drift-hardening 性状を示しており、その後、高軸力によるコンクリートの圧壊と CFRP 筋の圧縮破壊により低下した。軸力に依らず、いずれの試験体も原点指向性の履歴性状を示した。

3.3 水平力一部材角関係の包絡線

各ドリフトレベルの最初のサイクルでの正負ピーク水平力を図-10 に示す。なお、中国の建物の耐震試験仕様書 (JGJ/T101-2015) に従って、水平力がピーク後に最大値の 85% となった時点を終局部材角とし、その点を下回ったデータは図中にプロットしていない。

図-10 から分かるように、最大水平力は軸力が増加するにつれて増加したが、ピーク時部材角および終局部材角は反対に減少する傾向を示した。試験体 CFRPHW2 および試験体 CFRPHW3 は、試験体 CFRPHW1 と比べて、最大耐力がそれぞれ 4.7% および 13.2% 高い。壁の変形能力に対する軸力の影響に関しては、試験体 CFRPHW1 が

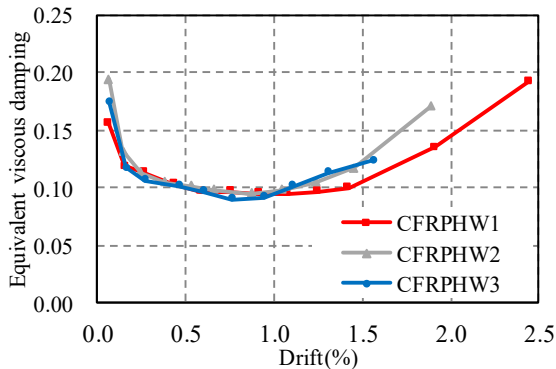


図-11 等価粘性減衰定数の比較

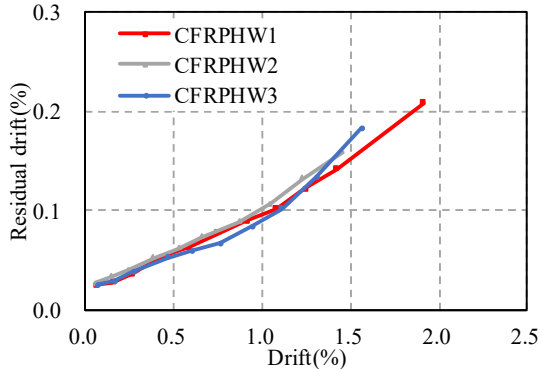


図-12 残留部材角の比較

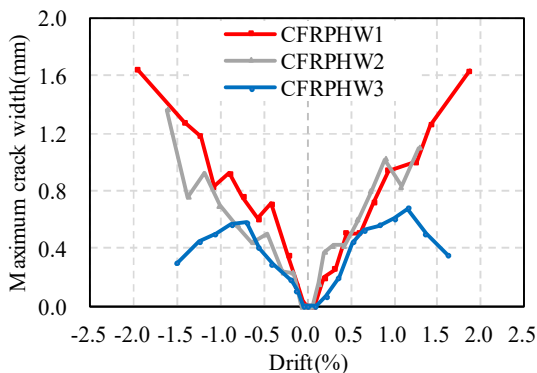
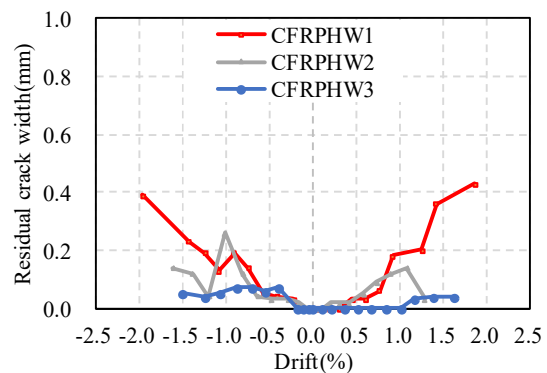


図-13 最大と残留ひび割れ幅の比較



最も終局部材角が大きく、試験体 CFRPHW2 より 11.7%、試験体 CFRPHW3 よりも 34.7%大きい。

3.4 等価粘性減衰定数

各試験体のエネルギー吸収能力を評価する等価粘性減衰定数を図-11 に示す。等価粘性減衰定数の計算方法を参考文献 5) に詳細に説明する。各試験体の実験結果を比較すると、部材角 1.5% まで試験体間の差はほとんど見られない。等価粘性減衰定数は部材角 0.5%~1.5%の間では 0.10 でほぼ一定値に保ち、その後、部材角の増加とともに増加する傾向を示した。

3.5 残留部材角及び残留ひび割れ幅

図-12 に各試験体の残留部材角の実験結果を示す。試験体 CFRPHW1 は、部材角 1.9% から除荷した後の残留部材角は 0.2% であり、ピーク時から水平変形が 89% 回復したことが分かる。試験体 CFRPHW2 と試験体 CFRPHW3 も高い原点指向性を示し、最大部材角から除荷した後、それぞれ最大部材角から変形が 87% と 88% 回復した。また、高軸力比 0.33 まででも壁の 1.5% 部材角から除荷した後の残留部材角は 0.5% 未満である。FEMAP58-1⁶⁾ に基づくと、建物の修理不可能確率は、中央値が 1.0% の残留部材角で、分散が 0.3 の対数正規分布である。0.5% 部材角の時の修復不可能確率は 2% であり、この時の修復可

能確率は 98% であり、高い修復性を有することがわかる。

図-13 は各試験体の水平力のピーク時の最大ひび割れ幅と除荷後の残留ひび割れ幅の実験結果を示す。残留変形と同様に、残留変形と同様に、残留ひび割れ幅もピーク時と比べて大きく減少していることが分かる。最大部材角のサイクルでのピーク時に対する残留時のひび割れ幅の割合は、試験体 CFRPHW1, CFRPHW2, CFRPHW3 でそれぞれ 25%, 7%, 15% であった。

前述の実験結果により、CFRP 筋をコンクリート壁の境界要素に配置することで、安定した耐力と小さな残留変形および残留ひび割れ幅という drift-hardening 性状の耐震目標を達成できることがわかる。一方で、軸力の増加に伴い、CFRP 補強壁の終局部材角が小さくなるため、より厳密に変形量を制御する必要がある。

4. 解析による履歴挙動評価

4.1 解析概要及び解析仮定

実験と並行して、CFRP 筋で補強されたコンクリート壁の履歴性能の解析的評価を試みた。前述のように、高い引張強度と完全な線形弾性の特性を持つ CFRP 筋は、弾塑性性状を示す普通強度の異形鉄筋とは挙動が大きく異なる。また、極めて高い応力が生じるため、コンクリート中の CFRP 筋のすべりが避けられない。そのため、一般的な鉄筋補強コンクリート壁を評価するための平面仮定に基づく従来の解析方法では、CFRP 筋で補強された壁の合理的な予測を提供できない。そこで高強度鉄筋

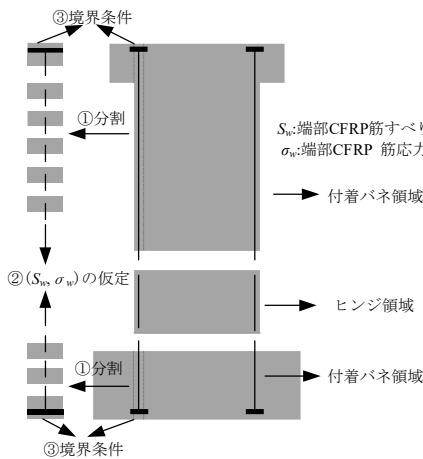


図-14 壁のモデル化と付着バネ領域の概要

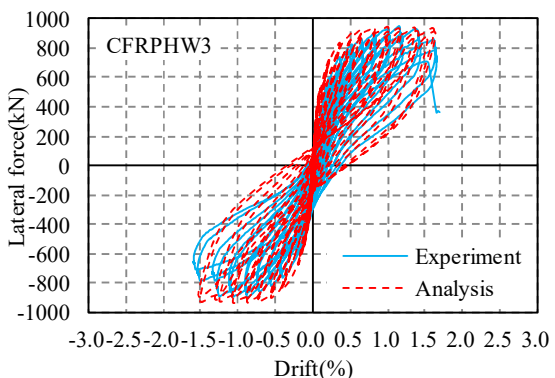
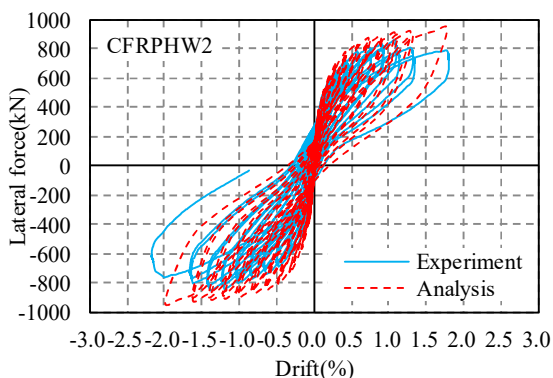
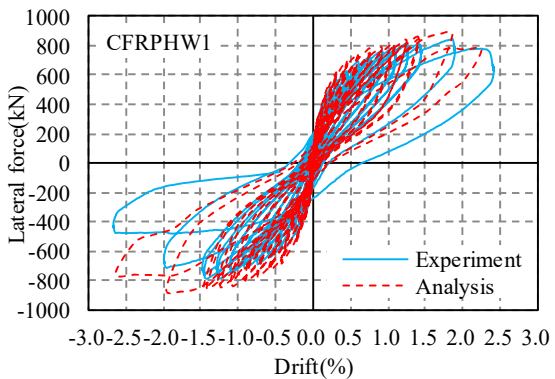


図-15 水平力—部材角関係の解析結果と実験結果の比較

を主筋に用いたコンクリート部材に対して提案されている付着すべりを考慮できる部材解析手法^{7,8)}を本試験体の解析に適用した。

提案されている数値解析方法は、有限バネ法に基づいて縦補強筋の付着すべりの影響を考慮する。本解析で用いる仮定は以下の通りである。

- (1) コンクリートは引張応力を負担しない
- (2) コンクリート部分は平面保持の仮定が成り立つ
- (3) ヒンジ領域内で CFRP 筋のひずみ分布は一様である
- (4) 部材の変形はヒンジ領域に集中する

これらの仮定に基づいて、壁は高さに沿って三つの領域に分割された。図-14 に壁のモデルと付着バネ領域の概要を示す。CFRP 筋の応力ひずみ関係は完全弾性のモデルを用い、付着応力-すべり量関係モデルは参考文献 8)を参照されたい。コンクリートのモデルは参考文献 9)で提案されたモデルを用いた。解析手順は、まず付着バネ領域で端部 CFRP 筋の抜け出し量 S_w を仮定し、付着応力-すべり量関係より塑性ヒンジ領域内の CFRP 筋のひずみと応力を求め、塑性ヒンジ領域の断面ではファイバー法を用いて断面の曲げモーメント-曲率解析手順を行う。CFRP 筋の応力ひずみ関係は弾性として解析し、解析結果において、生じる応力が引張強さに到達しないことを確認した。引抜き試験結果に応じて、CFRP 筋の付着強度は 11MPa とした。そして、参考文献 10)に基づく、ヒンジ領域長さは 640mm (壁せいの 0.5 倍) とした。

4.2 解析結果と実験結果の比較

図-15 に水平力一部材角関係の実験値と解析結果の比較を示す。図-15 より分かるように、いずれの試験体についても、実験で確認された残留変形を小さく抑えられた原点指向性の履歴性状を、本解析によって適切に予測できた。そして、本解析により求めた試験体の履歴性状は、CFRP 筋が破壊し始める部材角まで実験結果より約 5%程度高く評価したことがわかる。

5. まとめ

本研究は、境界要素に CFRP 筋を縦筋として用いたコンクリート壁の耐震性能の解明を目的として、軸力が壁の耐震性能に及ぼす影響に関する検討を実験と解析的に行い、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート壁の境界要素に CFRP 筋を配置すると、0.33 の高軸力下でも、壁に部材角 1.5%まで安定した耐力を持たせ、残留変形を小さく抑えることができる。
- (2) 軸力比が高いほど、CFRP 補強コンクリート壁が安定した drift-hardening 性状を発揮できる最大部材角が低くなった。
- (3) CFRP 筋の付着すべりを考慮した数値解析により、コンクリートが圧壊あるいは CFRP 筋が破断するま

での CFRP 補強壁の履歴性状を合理的に予測することができる。

今後の課題として、本試験体の降伏耐力の設定、CFRP 筋のひずみ履歴性状の解明が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は中日政府間国際共同研究(National Key R&D Program of China, 2016YFE0125600)と、中国教育部創新團隊發展計畫(Program for Innovative Research Team of Education Ministry of China, IRT_16R67)の支援を得た。また、本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院生曾令昕氏及び鄭州大学大学院生司晨哲氏の多くの協力を得た。

参考文献

- 1) Yuan, W., Zhao, J., Sun, Y. and Zeng L.: Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Walls Reinforced by PC Strands, Engineering Structures, Vol.175, pp.577-590, 2018
- 2) Sun, Y., Cai, G. and Takeuchi, T.: Seismic Behavior and Performance-based Design of Resilient Concrete Columns, Applied Mechanics and Materials, Vol.438-439, pp.1453-1460, 2013
- 3) Zhao, Q., et al.: Experimental Investigation of Shear Walls Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars under Cyclic Lateral Loading, Engineering Structures, Vol.191, pp.82-91, 2019
- 4) 中華人民共和國住房和城鄉建設部：建築抗震試驗規程，中国建築工業出版社，pp.23, 2015
- 5) Chopra AK.: Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 2017
- 6) FEMA: Seismic Performance Assessment of Buildings, FEMA P-58-1, 2012
- 7) Sun, Y., Fukuhara, H., Kitajima, H.: Analytical Study of Cyclic Response of Concrete Members Made of High-strength Materials, Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 2006
- 8) 船戸佑樹，孫玉平，竹内崇，蔡高創：スパイラル溝を有する超高強度鉄筋の付着特性のモデル化と柱部材の履歴解析への応用，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.157-162，2012.7
- 9) 北島英樹，福原武史，陳静，孫玉平：高強度 RC 部材の耐震性能評価法の提案，日本建築学会九州支部研究報告，第 44 号，pp.349-352，2005.3
- 10) Park R. and Paulay T.: Reinforced Concrete Structures, Wiley, 1975