

論文 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

松井 智哉^{*1}・内村 恭平^{*2}・酒井 貴志^{*2}・斎藤 大樹^{*3}

要旨：筆者らは、鉄筋コンクリート造柱なし壁の曲げ破壊に対して炭素繊維シートを用いて補強を施し、その補強効果について実験的に検討し、変形性能の向上などその補強効果を確認してきた。本論ではダブル配筋で端部拘束筋を有する柱なし壁を対象に静的加力実験を実施し、補強効果を把握するとともに曲げ解析におけるコンクリートの材料モデルの適用性について検討を行った。その結果、炭素繊維シートによる補強を施すことで、壁脚部のコンクリートの圧壊が遅延し、変形性能が向上することなどの補強効果を確認した。

キーワード：RC 造柱なし壁、炭素繊維シート補強、静的加力実験、曲げ破壊

1. はじめに

ペルーの RC 造建物においては、端部縦筋とメッシュ筋を用いた矩形断面の壁 (low ductile wall) が構造要素として用いられている¹⁾。鉄筋も少量で、柱もなく、脆性的な破壊が予想される構造要素である。一方で柱のない RC 造耐震壁については、2010 年チリ地震において柱のない連層耐震壁が曲げ圧縮破壊したことが大きく注目されている。²⁾

そこで、文献 3) においては、柱のない壁の曲げ破壊に対して炭素繊維シート (以下、CF シート) を用いて補強を施し、その補強効果を実験的に検討している。実験結果より、RC 造柱なし壁に CF シートによる補強を施すことで、最大耐力以降の耐力低下が緩やかとなり、変形性能は向上することを示した。また、部分的に壁端部に炭素繊維シート補強を施した試験体の終局変形は、壁全体に亘って補強を施した試験体よりも大きいことが確認された。

この先行研究での試験体はシングル配筋の壁であったが、本研究では、ダブル配筋で端部拘束筋を有する柱なし壁を対象に静的加力実験を実施し、補強効果について確認を行う。また、変形性能を把握するとともに曲げ解析におけるコンクリートの材料モデルの適用性について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体形状図および試験体配筋図を図-1、図-2 に示す。試験体は RC 造柱なし壁を対象とした計 3 体で、実験変数は CF シートによる補強の有無および補強範囲である。試験体は 2/3 スケールとし、その基本性状は、壁内法高さ 1600mm、壁長さ 1600mm、

壁厚 80mm、端部縦筋は 6-D10、壁縦横筋は D4@120 ダブル ($p_w=0.29\%$) であり、破壊形式は 3 体共に曲げ破壊型となるように計画した。なお、ペルーにおける low ductile wall は壁厚 100mm 程度、端部縦筋 3-D13 相当、壁筋 $\phi 5.5@150$ (壁筋比 0.16%) 程度である。研究対象として low ductile wall にとどまらず、チリ地震での被災建物で観察された曲げ破壊が生じた連層壁 (壁厚 150~300mm、壁筋比 0.2~0.33%) も想定しているため、low ductile wall と比べると配筋量の多い壁となっている。

試験体 WD は基本性状を把握するための無補強試験体である。試験体 RWD1 は、壁脚部から 650mm の高さに、壁全長に亘り CF シートを巻きつけ、試験体 RWD2 は壁脚部から 650mm の高さに、壁の両端部に部分的に CF シートを巻きつけて補強した。また、補強試験体の端部は、半径 13mm の面取りを施している。

CF シートの貼付け方法は、表面研磨、プライマーおよびパテを塗布の後、エポキシ樹脂を壁面に塗布し、人力およびローラーで塗布・含浸させた。また、上下のシートは 10mm 重ねて貼り付けた。試験体 RWD2 においては

表-1 試験体一覧

試験体	WD	RWD1	RWD2
壁長さ(mm)	1600		
壁高さ(mm)	1600		
壁厚(mm)	80		
端部縦筋	6-D10		
端部拘束筋	D4@120		
壁縦横筋	D4@120 ダブル ($p_w=0.29\%$)		
補強形式	無補強	脚部全長 1600×650mm	脚部端部 325×650mm

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

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

*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 教授 博士 (工学) (正会員)

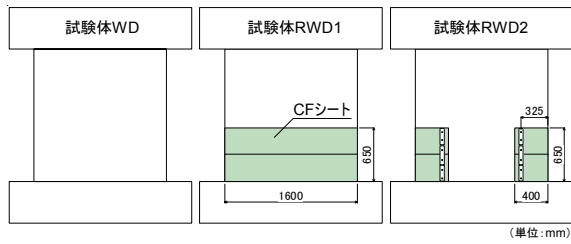


図-1 試験体形状

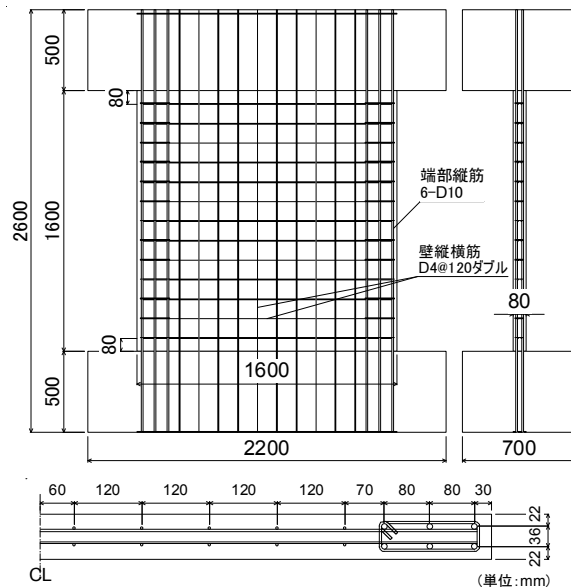


図-2 配筋図

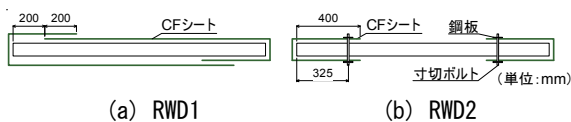


図-3 CF シートの貼り付け

鋼板 (PL-6) および寸切ボルト (M10) により CF シートを定着させた。

コンクリート、鉄筋および CF シートの材料特性を表-2、表-3 および表-4 に示す。使用材料は、普通コンクリート (設計基準強度 24N/mm^2)、鉄筋 D10, D4 (SD295A) である。CF シートは、一方向高強度クロス UT70-30G の幅 330mm を用いた。

2.2 荷重方法

荷重装置の概要を図-4 に示す。荷重は水平力の正負繰り返し荷重とした。さらに、2 台の鉛直オイルジャッキにより、 273kN の一定軸力 ($N=0.08l_w t_w F_c$, ここで、 l_w : 壁長さ、 t_w : 壁厚、 F_c : コンクリートの圧縮強度) を試験体頂部に作用させ、また、せん断スパン比が 1.5 となるように作用せん断力に対応させて鉛直ジャッキを制御することにより試験体頂部に付加モーメントを作用させた。実験では上スタブで計測した水平変位 δ を計測位置の高さ h (1985mm) で除した変形角 $R=\delta/h$ で制御した。

表-2 コンクリートの材料特性

試験体	σ_B (N/mm^2)	E_c (N/mm^2)	ϵ_{c0} (μ)	f_t (N/mm^2)	材齢 (日)
WD	26.7	23700	2200	2.7	37
RWD1	26.5	23000	2250	2.5	42
RWD2	28.3	23800	2500	3.0	53

σ_B : 圧縮強度, E_c : 弾性係数, ϵ_{c0} : 圧縮強度時ひずみ, f_t : 引張強度

表-3 鉄筋の材料特性

	σ_y (N/mm^2)	E_s (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	使用箇所
D4	365	186000	524	壁縦横筋 端部補強筋
D10	371	182000	508	端部縦筋

σ_y : 降伏強度, E_s : 弾性係数, σ_u : 引張強度

表-4 炭素繊維シートの材料特性 (製品仕様表より)

繊維重量 (g/m^3)	シート 厚さ (mm)	密度 (g/cm^3)	引張 強度 (kN/mm^2)	弾性 係数 (kN/mm^2)	幅 (mm)
300	0.167	1.80	3.4	230	330

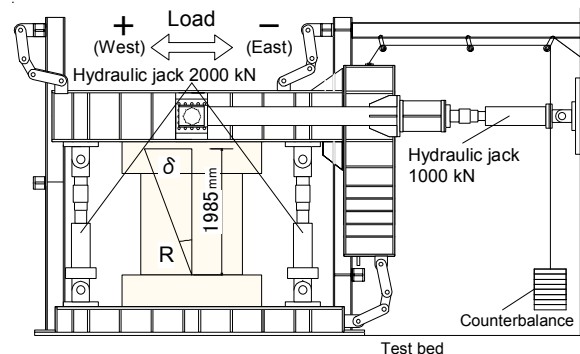


図-4 荷重装置

また、加力サイクルは $R=1/800\text{rad}$ を 1 サイクル行った後、 $R=1/400, 1/200, 1/133, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33\text{rad}$ の 2 サイクルずつの繰り返し荷重とした。

2.3 計測方法

変位は、上部スタブでの水平変位、壁高さを 4 分割した軸方向変位、壁板の部分変位を変位計によって測定した。鉄筋の歪は、端部縦筋、壁の縦横筋、CF シート表面の主要な位置に歪ゲージを貼り測定した。さらに、繰り返し荷重における第 1 サイクルのピーク時と除荷時においてクラックスケールを用いてひび割れ幅を計測した。

3. 実験結果

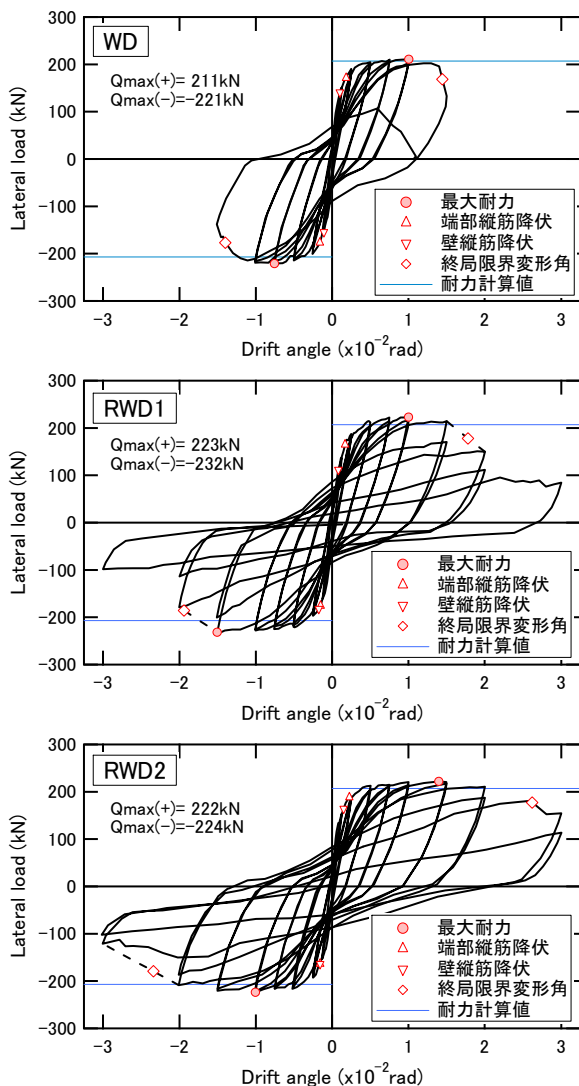
3.1 破壊性状と水平荷重-変形角関係

各試験体の水平荷重-変形角関係を図-5 に示す。図

—5 中には略算式⁴⁾による曲げ耐力の計算値を示している。図—6 に壁脚部の破壊状況を示す。

無補強試験体 WD では、 $R=1/800\text{rad}$ のサイクルで曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生し、壁脚部において壁縦筋の降伏が確認された。 $R=1/400\text{rad}$ のサイクルで端部縦筋が降伏し、 $R=1/133\text{rad}$ のサイクルで最大耐力に達した。 $R=1/100\text{rad}$ の2回目のサイクルで脚部にコンクリートの剥落が見られ、その後の $R=1/67\text{rad}$ のサイクルで急激な耐力低下とともに脚部コンクリートが圧壊し、端部縦筋の座屈が確認された (図—6(a))。

試験体 RWD1 では、試験体 WD と同様に $R=1/800\text{rad}$ のサイクルで曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生し、壁脚部において壁縦筋の降伏が確認された。また、 $R=1/400\text{rad}$ のサイクルで端部縦筋が降伏した。最大耐力は $R=1/67\text{rad}$ のサイクルで記録した。また、CF シートを巻いた壁脚部の端部が膨らみ始め、その後の荷重サイクルで、CF シートの膨らみは大きくなっていくとともに膨らみの範囲は壁の内側に進行し、耐力低下が見られ



図—5 水平荷重—変形角関係

た (図—6(b))。 $R=1/33\text{rad}$ のサイクルでは、CF シートの破断が発生した。

試験体 RWD2 では、 $R=1/800\text{rad}$ のサイクルで曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生し、 $R=1/400\text{rad}$ のサイクルで端部縦筋および壁縦筋の降伏が確認された。 $R=1/100\text{rad}$ のサイクルで最大耐力に達し、 $R=1/50\text{rad}$ のサイクルで CF シートを巻いた壁脚部の端部が膨らみ始め荷重サイクルの進行とともに CF シートの膨らみは大きくなり耐力は低下していった (図—6(c))。 $R=1/33\text{rad}$ のサイクルでは、CF シートの破断が発生した。また、コンクリートの圧壊の進行とともに鋼板が曲がり始めるが変形性能に影響はないと考えられる。

3.2 曲率分布と変形成分

図—7 に各サイクルの1サイクル目ピーク時における壁高さ方向の曲率分布を示す。曲率は、図—8 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各区間の平均曲率として求めた。

どの試験体も荷重サイクルの進行とともに、曲率が脚部に集中して増加していく傾向が確認できる。特に壁全長に亘ってCFシートを巻いた試験体RWD1においては、下から2番目の計測区間の曲率が小さく、ほとんどの曲率は脚部で発生していることが伺える。

図—9 に正荷重ピーク時における曲げ変形とせん断変形の割合を示す。曲げ変形は図—8 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。せん断変形は水平変位より曲げ変形を除いたものとして算出した。なお、下スタブからの鉄筋の抜け出しによる変形は、最下段の変位計(D17, D22)から得られる曲げ変形に含まれることになる。

全試験体において曲げ変形の割合が80%程度であり、全体の変形を大半を占めている。また、脚部コンクリー



(a) 試験体 WD ($R=1/67$)



(b) 試験体 RWD1 ($R=1/50$)



(c) 試験体 RWD2 ($R=1/50$)

図—6 壁脚部の破壊状況

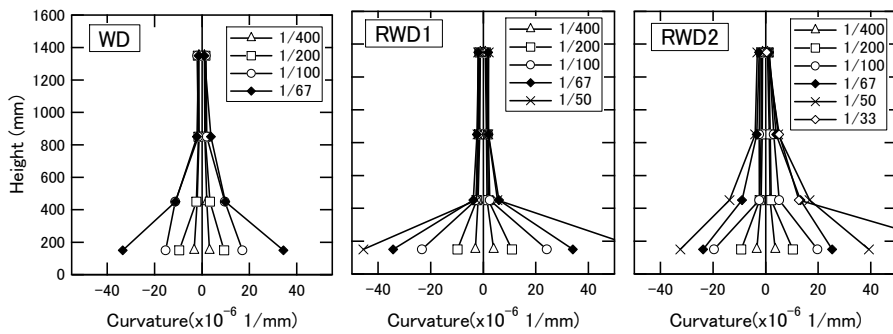


図-7 壁高さ方向の曲率分布

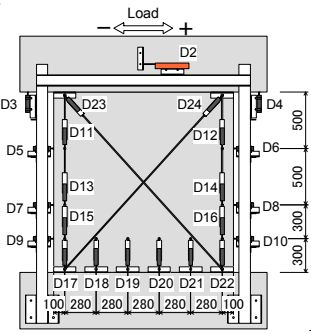


図-8 変位計計測位置

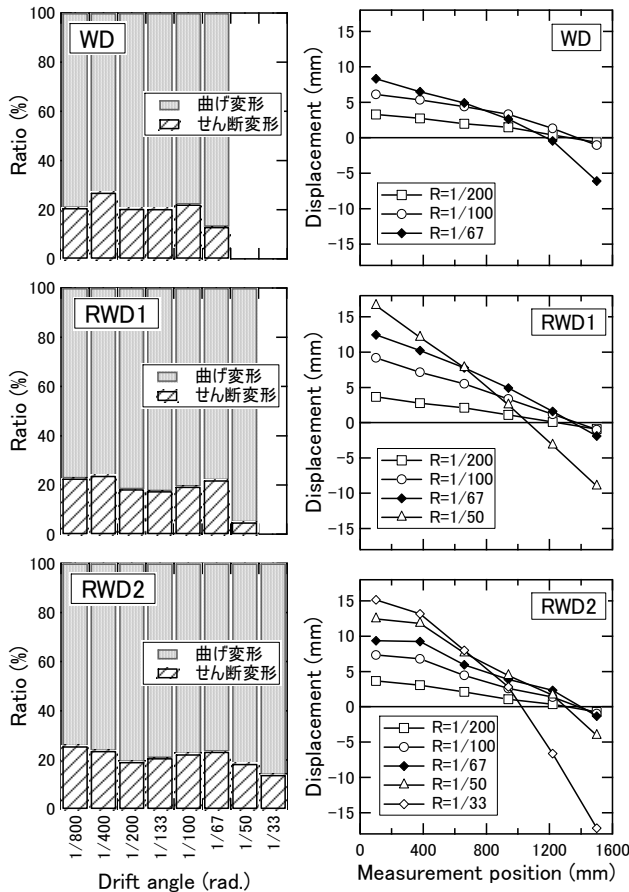


図-9 変形成分

図-10 脚部の変形分布

トの圧壊が生じる载荷サイクルになると曲げ変形が増大していることが確認できる。

3.3 壁脚部の変形分布

図-10 に正载荷ピーク時の壁脚部の変形分布を示す(図-8 中の変位 D17~D22)。全試験体において耐力が急激に低下する変形サイクルまで変位が直線的に分布しており、平面が保持されていることが確認できる。

3.4 壁脚部のコンクリートの鉛直ひずみ

図-11 に壁脚部の圧縮側端部コンクリートの鉛直ひずみを示す。鉛直ひずみは、図-8 に示す変位計 D22 により得られたひずみである。なお縦軸の負方向が圧縮方向である。無補強試験体 WD の鉛直ひずみは、-0.01 程度かつ終局限界変形角付近から急激に増大していることが確認できる。補強試験体における終局限界変形角付近

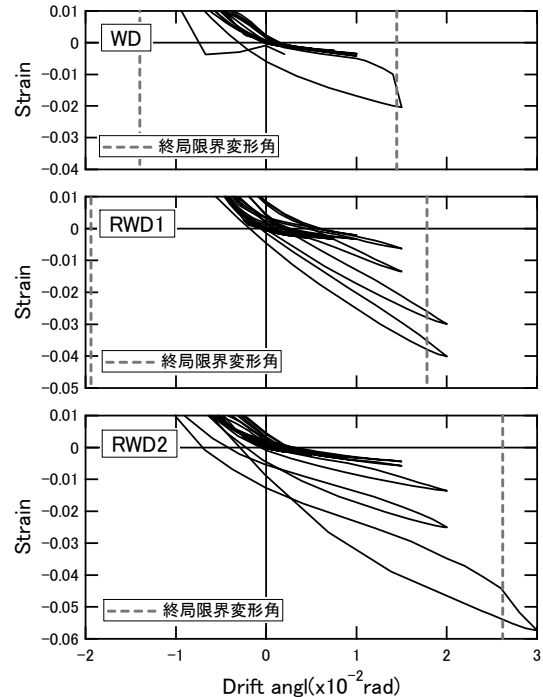


図-11 壁脚部のコンクリートの鉛直ひずみ

のひずみは、試験体 RWD1 では-0.03 程度、試験体 RWD2 では-0.04 程度となっており、無補強試験体の終局限界変形角時に比べて大きい。このことから、CF シート補強を施すことにより、コンクリートは、無補強のコンクリートに比べて大きいひずみにおいても圧縮応力を負担していることが推察される。

3.5 CF シートの繊維方向ひずみ

図-12 に各サイクルピーク時の CF シートの繊維方向のひずみを示す。ひずみは図-13 に示す位置の壁面両面の 2ヶ所で計測したものである。

試験体 RWD1 では、終局限界変形角付近では 3000 μ 程度のひずみが発生している。一方で部分的に補強をした試験体 RWD2 では、終局限界変形角時には 5000 μ 程度のひずみが発生しており、試験体 RWD1 に比べて大きいひずみが発生していることが見てとれる。これは、壁脚部コンクリートの圧壊の進行とともに生じる膨張に対し、試験体 RWD2 では試験体 RWD1 よりも狭い拘束範囲で CF シートおよび寸切りボルトが抵抗しているためと考えられる。

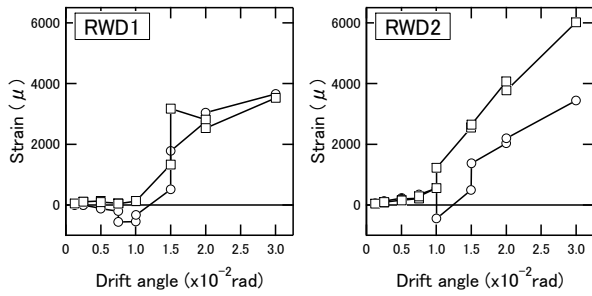


図-12 CF シートのひずみ

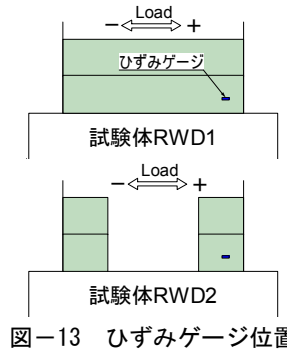


図-13 ひずみゲージ位置

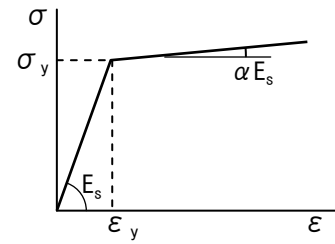


図-16 鉄筋モデル

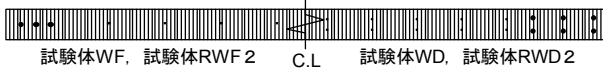


図-14 ファイバーモデル

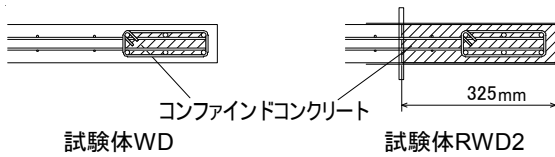


図-15 拘束効果の適用範囲

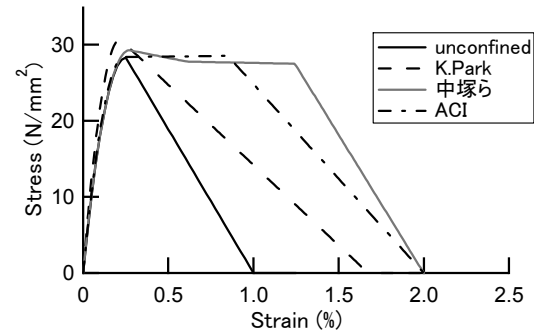


図-17 コンクリートモデル (試験体 RWD2 の場合)

4. 曲げ解析

4.1 解析方法

本章では、平面保持を仮定した曲げ解析を実施し、CF シートの拘束効果（コンクリートのモデル化）が解析結果に及ぼす影響について検討する。ここでは、無補強試験体 WD と試験体 RWD2 の 2 体を対象に解析を行った。試験体 RWD1 は壁全体（細長い断面）を CF シートで巻いているため 4.2 節で示す拘束コンクリートのモデルの適用範囲を大きく外れると考え解析対象から除外した。図-14 に試験体のファイバーモデルを示す。解析においては、要素の厚さを 1cm として 160 分割している。断面は試験体脚部と下スタブの境界としており、コンクリート要素と鉄筋要素から構成される。また、拘束効果を考慮するコンクリートの範囲を図-15 に示す。拘束筋によって囲まれた領域と CF シートによって補強された領域である。なお、拘束筋と CF シートを有する試験体 RWD2 では CF シートの拘束効果のみを考慮してコンクリート要素をモデル化する。

4.2 材料モデル

鉄筋要素には、図-16 に示す Bi-linear 型モデルを用い、鉄筋降伏後の剛性は弾性係数の 1/100 とした。実験において試験体 WD では $R=1/100\text{rad}$ のサイクルで鉄筋の座屈の兆候が見られたこと、主な解析の目的を終局限界変形の評価精度の確認としていることから、鉄筋は解析全体を通して圧縮応力を負担しないものとした。

試験体 RWD2 で用いたコンクリート要素の応力-ひずみ関係を図-17 に示す。拘束効果を考慮しない場合のコンクリートモデルについては、応力上昇域は hognestad

表-5 コンクリートモデル各種特性値 (試験体 RWD2)

	K.Park	中塚ら	ACI
圧縮強度(N/mm ²)	30.7	29.3	28.5
強度上昇率	1.08	1.03	1.01
圧縮強度時ひずみ	0.002169	0.002711	0.002381
終局破壊点ひずみ	0.01698	0.01243	0.00885

モデルを用い、圧縮強度以降の軟化域は、圧縮強度時のひずみの 4 倍のひずみで応力が 0 となるように直線でモデル化した (以下、unconfined モデル)。拘束効果を考慮する場合は、拘束筋による拘束効果を考慮した K.Park モデル⁵⁾、CF シートによる拘束効果を考慮した中塚らのモデル⁶⁾、ACI モデル⁷⁾の 3 種類を用いて解析を行った。なお、中塚らおよび ACI モデルにおける終局破壊以降は文献 8) の CF シートで補強したコンクリート供試体の軸圧縮試験を参考にし、終局破壊点以降の応力はひずみが 2% に到達したときに応力が 0 になるように直線的に低下するものとした。また、コンファインドコンクリートのモデル化の影響を把握するため、全試験体で unconfined モデルを用いた解析を行った。補強試験体の試験体 RWF2 と試験体 RWD2 で中塚らのモデルと ACI モデル、端部拘束筋のある試験体 WD と試験体 RWD2 では K.Park モデルを適用した。

4.3 解析結果

図-18 に実験および解析における曲げモーメントと曲率の関係を示す。実験による曲率は、図-8 に示す D17 および D22 の変位計から得られた曲率を用いている。また、解析および実験における終局時曲率は耐力が最大耐

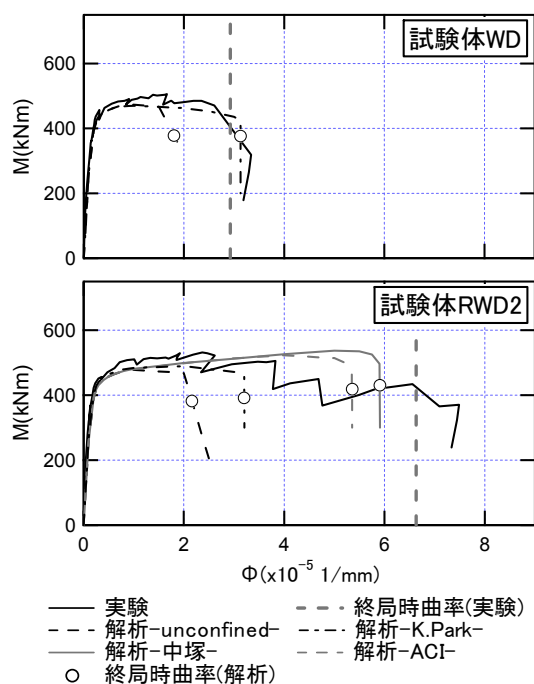


図-18 M- Φ 関係の比較

力の80%まで低下した時の曲率とした。

無補強試験体 WD では、拘束筋の効果を考慮したモデルで解析での終局時曲率と実験による終局時曲率はよく一致する結果が得られた。

補強試験体 RWD2 については、CF シートによる拘束効果を考慮することで unconfined モデルや K. Park モデルに比べて、終局時曲率が大きくなっており、コンクリートのモデル化の影響が反映されていることが確認できるとともに実験値に近づく結果が得られた。中塚らのモデル、ACI モデルを適用した解析によって、CF シート補強を施した試験体の変形性能が向上する現象を模擬できることを確認できたが、終局時のひずみは過小評価となっている。安全側に評価するという観点ではよいが、CF シートによるコンファインドコンクリートのモデル化については改善の余地があると考えられる。

5. まとめ

炭素繊維シートによる補強を施した RC 造柱なし壁を対象に静的加力実験を行い、構造性能を把握するとともに、曲げ解析手法について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 炭素繊維シートによる補強を施すことにより、壁脚部のコンクリートの圧壊が遅延し、変形性能が向上することを確認した。
- 2) 炭素繊維シートによる補強を施すことにより、コンクリートは無補強試験体の終局限界変形角時に比べ、大きなひずみにおいても圧縮応力を負担していることを確認した。

- 3) 無補強試験体の曲げ解析においては、解析での終局時曲率と実験による終局時曲率がよく一致する結果が得られた。
- 4) 補強試験体の曲げ解析については、CF シートによる拘束効果を考慮したモデルを適用することで、実験結果に対し安全側に評価していることが確認できたが、コンファインドコンクリートのモデル化については改善の余地があると考えられる。

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。学部生の鈴木健太君には、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) Carlos Zavala, Patricia Gibu, etc : Cyclic Behavior of low ductility walls Considering Perpendicular Action, Journal of Disaster Research, Vo8, No2, pp312-319, 2013.3
- 2) 日本建築学会：2010年チリ・マウレ沖地震被害調査報告書，2012
- 3) 松井智哉，内村恭平，斎藤大樹，Reyna Salazar Roy Ericksen: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 pp816-824，2014
- 4) 日本建築センター：2007年度版 建築物の構造関係技術基準解説書，2007
- 5) Robert Park, M.ASCE, etc : Ductility of Square Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, Vol.108, No.4, pp929-950, 1982.4
- 6) 中塚侑，小牟禮健一，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-ひずみ度特性，コンクリート工学論文集第9巻第2号 pp65-78，1998.7
- 7) ACI Committee 440 : Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08, 2008.7
- 8) 宮内克之，井上正一，黒田保，小林朗：連続繊維シート補強の剛性がコンクリート柱の横拘束効果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp865-870, 2001.7