

論文 自己復元性のある連層壁の開発に関する研究

浦塚 正伸^{*1}・江崎 文也^{*2}・李文聰^{*3}・田中 照久^{*4}

要旨: 自己復元性のある連層壁を開発するため、壁縦筋脚部をアンボンド化し、壁板断面中央に高強度アンボンド鉄筋を用いた一定軸力下の水平力載荷実験を行った結果、連層壁にほとんどひび割れが生じず、残留変形が小さく、自己復元機能を発揮できることが確認できた。この連層壁をモデルとした連層壁を並列に配置し、鉄骨境界梁をPC鋼棒の締付けにより耐震壁に取り付けた鉄骨境界梁付並列耐震壁について、一定軸力下の水平力載荷実験を行った結果、壁はひび割れを生じず、紡錘形の荷重変形履歴性状を示すエネルギー吸収の大きい架構となることが分かった。

キーワード: 自己復元性, 連層耐震壁, アンボンド, 高強度鉄筋, 鉄骨境界梁

1. 序

RC建築物の終局強度型設計指針¹⁾では梁崩壊や連層耐震壁脚部の曲げ破壊に伴う全体崩壊形式となるように計画している。この方法では梁の塑性化に伴う床スラブの損傷や残留変形による修復の困難などの問題が残されていることから、自己復元性のあるアンボンド主筋を用いたRC柱が提案された³⁾。しかし、提案された柱はエネルギー吸収および水平耐力が小さく層破壊となる恐れがあることから、この柱の特性を生かすためには水平耐力の大きい連層耐震壁とエネルギー吸収の大きい境界梁の併用が必要不可欠である。この役目を果たす連層耐震壁として転倒降伏型耐震壁が提案されている⁴⁾。この壁は、脚部と頂部は大きなせん断抵抗と安定した履歴性状を有するCFT短柱、中間部は壁厚の厚いRC壁で構成され、大きな水平耐力とエネルギー吸収に優れた性能を有していることが実験で実証されている。しかしながら、脚部のCFT柱が塑性化しているため、塑性化した鉄骨境界梁を取り外したとしても自己復元性のある柱により残留変形が生じた連層壁を引き戻すことができるかどうかは疑問である。そこで連層壁に復元性の機能を持たせるため、水平断面中央部にアンボンドPC鋼棒を配置した自己復元性のある連層耐震壁(アンボンドRC連層耐震壁)を考案した。この連層耐震壁を境界梁で繋ぎ、塑性化した境界梁を取り除くことができれば上述の問題は解決できると考え、アンボンドRC連層耐震壁2体を並列配置し、鉄骨境界梁をPC鋼棒の締付けにより接続した構造形式を提案する。

本研究の目的は、アンボンドRC連層耐震壁そのものの履歴性状、及びアンボンドRC連層耐震壁を並列配置して鉄骨境界梁で接続した構造形式について、境界梁部分で

のエネルギー吸収性能及び履歴性状を実験的に明らかにするとともに、実験後に鉄骨境界梁が容易に取り外すことができるかを明らかにする。本論は、これらの結果について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体名はイ-ロ-ハ-ニの4つの識別記号で示した。イは、06:2006年度の試験体, 08:2008年度の試験体を示す。ロは、それぞれ、UBW:主筋及び壁縦筋脚部をアンボンドとした試験体, UBWB:主筋および壁縦筋脚部をアンボンドとした壁を梁で連結した試験体を示す。ハは、連層壁のせん断スパン比の値を、ニは、軸力比($=N/(tL\sigma_b)$, N:壁に作用する鉛直荷重, t:壁厚, L:壁長さ, σ_b :コンクリート圧縮強度)の値をそれぞれ示す。それぞれの試験体は、一般的な事務所建築物の連層壁を想定したおよそ縮尺1/4の試験体である。壁厚を厚くしてせん断破壊を防止し、縦筋の定着部をアンボンド化することにより曲げ破壊モードとなるよう設計している。耐震壁の中央に高強度鉄筋(PC鋼棒13)を配置し、鉄筋を弾性状態に収まるように設計することで、提案している連層耐震壁の自己復元性を確保させている。壁縦筋脚部や壁断面中央部に配置したPC鋼棒のアンボンド化は表面をビニールチューブで被覆することにより行った。UBWB-1.5-0.05は前述した自己復元性のあるアンボンドRC連層壁2体を並列に配置させ、鉄骨境界梁を20のPC鋼棒の締付けにより取り付け、連結したものである。表-1に使用材料の力学的性質、表-2に試験体一覧を示す。図-1に06-UBW-2-0.075の試験体形状、図-2に08-UBWB-1.5-0.05の試験体形状、図-3に08-UBWB-1.5-0.05の鉄骨境界梁

*1 福岡大学大学院工学研究科建設工学専攻(正会員)

*2 福岡大学工学部建築学科教授・工博(正会員)

*3 福岡大学工学部建築学科助教・博士(工学)(正会員)

*4 福岡大学工学部建築学科助手(正会員)

形状, 図 - 4に08-UBWB-1.5-0.05の鉄骨境界梁のゲージ貼付位置, 図 - 5に06-UBW-2-0.075の配筋とゲージ貼付位置を示す。

位置, 図 - 6に08-UBWB-1.5-0.05の配筋とゲージ貼付位置を示す。

表 - 1 使用材料の力学的性質

(1)鉄筋

試験体名	種別	a (cm ²)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	ϵ (%)
08-UBWB-1.5-0.05	D6	0.32	378	535	185	14.1
	D13	1.27	353	521	182	26.7
	13φ(PC)	1.32	1210	1273	176	11.2
06-UBW-2-0.075	D6	0.32	378	535	185	14.1
	D13	1.27	360	534	190	18.6
	13φ(PC)	1.32	1243	1272	201	8.7

a : 断面積 σ_y : 降伏点応力度 σ_u : 引張強度 E : ヤング係数 ϵ : 伸び

(2)鉄骨

試験体名	鋼材	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)
08-UBWB-1.5-0.05	[-75×40×5×7	300	451	192

σ_y : 降伏点応力度 σ_u : 引張強度 E_s : ヤング係数

(3)コンクリート

試験体名	σ_B (MPa)	E_c (GPa)	ϵ_c (%)
08-UBWB-1.5-0.05	23.4	25.0	0.195
06-UBW-2-0.075	27.9	25.6	0.163

σ_B : シリンダー圧縮強度 E_c : ヤング係数 ϵ_c : 圧縮強度時のひずみ

表 - 2 試験体一覧

試験体名	柱			壁		PC鋼棒
	断面積	主筋	帯筋	縦筋	横筋	
08-UBWB-1.5-0.05	150 × 150 (mm×mm)	4-D13	D6@50(h < 225mm)	2-D6	D6@50(h < 225mm)	2-13φ
06-UBW-2-0.075			D6@100(h > 225mm)	6-D6	D6@100(h > 225mm)	

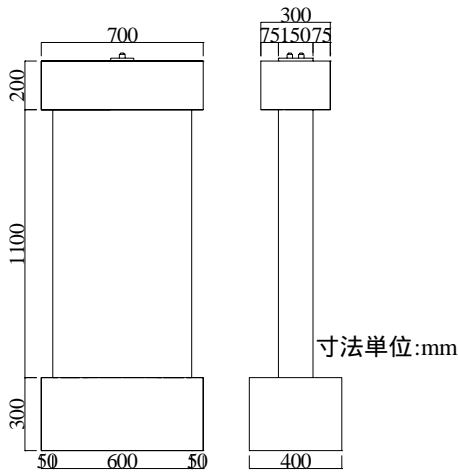


図 - 1 06-UBW-2-0.075試験体形状

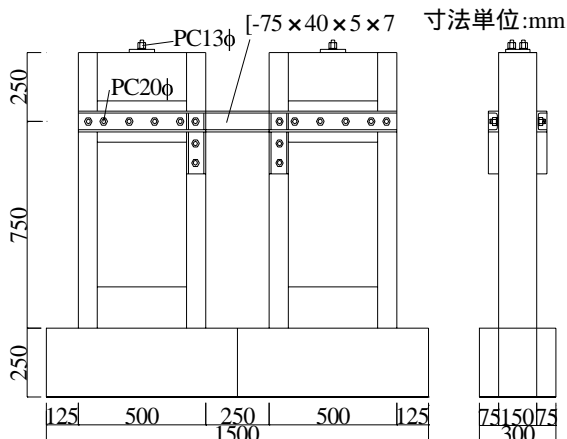


図 - 2 08-UBWB-1.5-0.05試験体形状

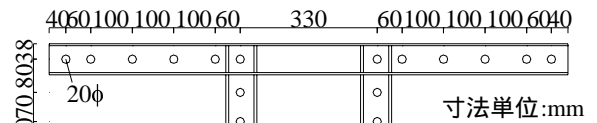


図 - 3 08-UBWB-1.5-0.05鉄骨境界梁形状

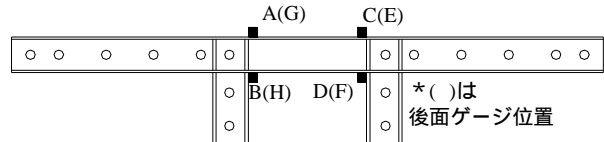


図 - 4 08-UBWB-1.5-0.05鉄骨境界梁ゲージ貼付位置

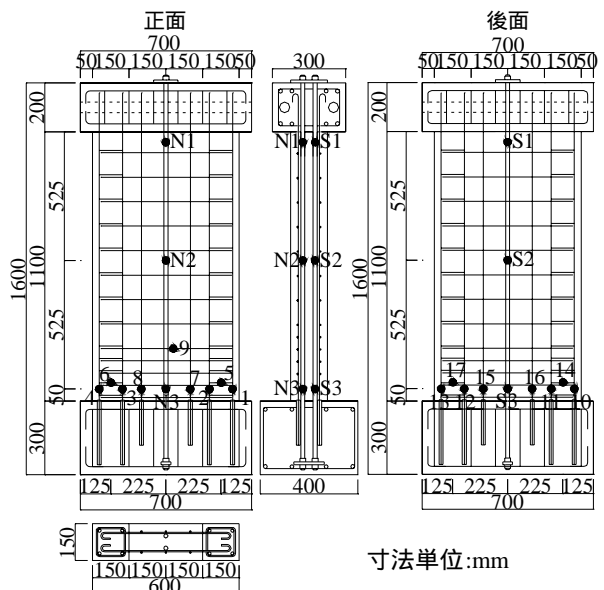


図 - 5 06-UBW-2-0.075配筋とゲージ貼付位置

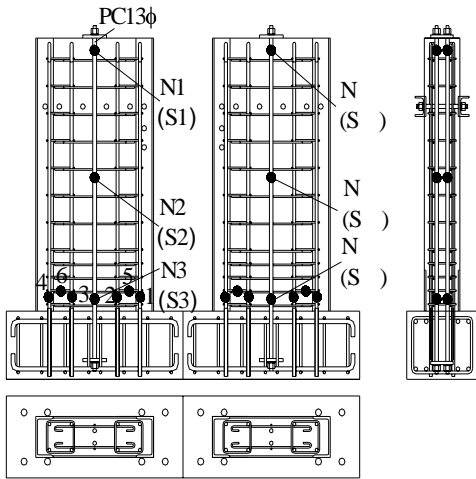


図 - 6 08-UBWB-1.5-0.05配筋とゲージ貼付位置

2.2 荷重方法および荷重プログラム

図 - 7 に 06-UBW-2-0.075 試験体の荷重装置, 図 - 8 に 08-UBWB-1.5-0.05 試験体の荷重装置を示す。各実験は, 一定軸力を荷重した後, 部材角 R を 0.5% ずつ増減させ, 前者は部材角 2.5% まで, 後者は水平荷重が直接加わる壁の部材角がほぼ 3% まで正負交番繰り返し荷重を行った。

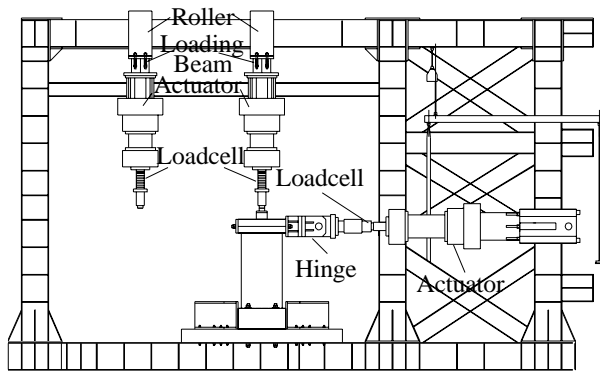


図 - 7 06-UBW-2-0.075 試験体荷重装置

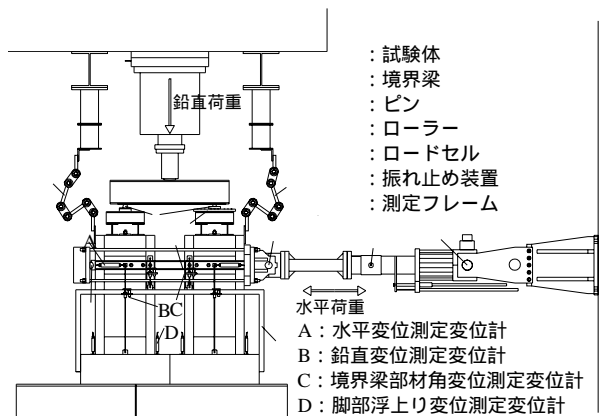


図 - 8 08-UBWB-1.5-0.05 試験体荷重装置

2.3 測定方法

図 - 9 に 06-UBW-2-0.075 試験体測定装置を示す。これ

らの変位計は基礎梁にボルトで固定された変位測定用フレームに取り付けられている。変位計 1 は試験体両面の梁下に配置されており, 平均して水平変位, 変位計 2 は試験体両面梁下の中央に配置し全体の鉛直変位, 変位計 3 は片面で側柱の伸びを計測した。

図 - 10 に 08-UBWB-1.5-0.05 試験体測定装置を示す。基礎に取り付けたフレーム, または境界梁に溶接した高ナットやアングルを利用して水平変位計 (A ~ D), 鉛直変位計 (1 ~ 4), 境界梁部材角変位計 (a ~ d), 脚部浮き上がり変位計 (あ ~ え) を取り付け, 変位測定を行った。

鉄筋または鉄骨梁のひずみについては, 図 - 4 ~ 6 に示す位置にゲージを貼り付け, ひずみを測定した。試験体の変化については, 目視によるスケッチ及びカメラ撮影で記録をした。

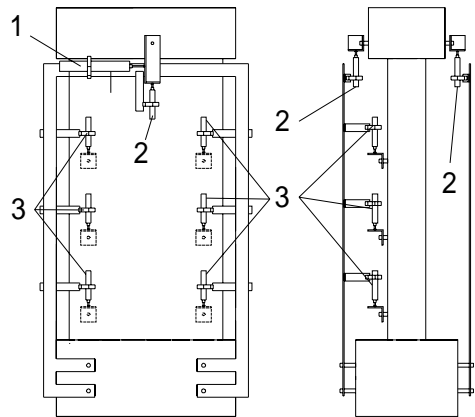


図 - 9 06-UBW-2-0.075 試験体測定装置

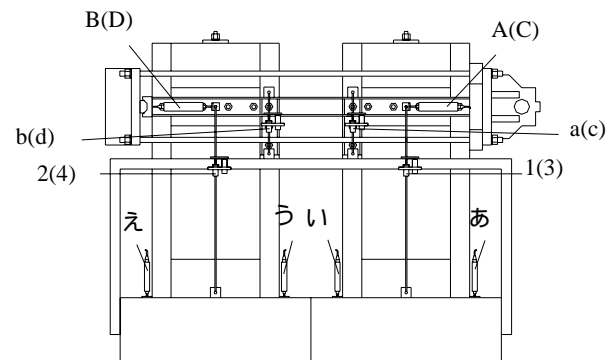


図 - 10 08-UBWB-1.5-0.05 試験体測定装置

3. 実験概要

3.1 履歴性状及び水平耐力

実験は 06-UBW-2-0.075 試験体が部材角 2.5%, 08-UBWB-1.5-0.05 試験体は変位計の測定が不可能となった部材角 2% で終了した。06-UBW-2-0.075 試験体と 08-UBWB-1.5-0.05 試験体の実験結果を表 - 3 耐力算定結果を表 - 4 に示す。図 - 11 各試験体の水平荷重 Q と平均部材角 R (水平変位計の平均を材長で除した値) の関係, 図

- 12に各試験体の材軸方向の平均ひずみ ε_v と平均部材角 R の関係を示す。06-UBW-2-0.075試験体の材軸方向平均ひずみは、図-9に示す2つの鉛直変位計2の平均を、また、08-UBWB-1.5-0.05試験体の材軸方向平均ひずみは、図-10に示す4つの鉛直変位計1~4の平均をそれぞれ測定間距離で除して求めた。図-11には曲げによる水平耐力計算値¹⁾を破線で示している。(1)~(4)式により求めた試験体の曲げ耐力計算値がせん断耐力を下回り、曲げ破壊モードであることを確認した。図-11に示すように、06-UBW-2-0.075試験体の水平耐力実験値は、計算値より小さく、エネルギーをほとんど吸収していないことが分かる。一方、08-UBWB-1.5-0.05試験体の場合は、エネルギー吸収の大きい紡錘形の履歴性状を示し、境界梁の曲げ降伏耐力とPC鋼棒の軸力を用いて求めた(5)~(12)式に示す両側壁脚部の曲げ耐力によって計算した水平耐力の和が、実験値 Q_u に近い値となっていることが分かる。図-12に示すように、部材角の増大とともに連層壁が鉛直方向に伸び、部材角が0になると伸びもほとんど0になることがわかる。

1) 06-UBW-2-0.075試験体曲げ耐力算定

$$N_c = N_r + N \quad (1)$$

$$x_n = N_c / \sigma_B b \quad (2)$$

$$M_u = M = N_c (D - x_n) / 2 \quad (3)$$

$$Q_u = M_u / h_w \quad (4)$$

N_c : コンクリートに作用する軸力, N_r : PC鋼棒のひずみゲージにより求めた引張力による付加軸力, N : 鉛直荷重, σ_B : コンクリート圧縮強度, M_u : 脚部の曲げモーメント, D : 壁断面せい, x_n : 圧縮縁より中立軸までの距離, h_w : 反曲点高さ, Q_u : 曲げによる水平耐力

2) 08-UBWB-1.5-0.05試験体曲げ耐力算定

$$Q_p = 2M_p / L \quad (5)$$

$$M_1 = M_2 = Q_p L_0 \quad (6)$$

$$N_1 = N / 2 + Q_p + T_1 \quad (7)$$

$$N_2 = N / 2 + Q_p + T_2 \quad (8)$$

$$M_{u1} = 0.5 N_1 D (1 - N / b D \sigma_B) \quad (9)$$

$$M_{u2} = 0.5 N_2 D (1 - N / b D \sigma_B) \quad (10)$$

$$Q_{u1} = (M_{u1} + M_1) / h_0 \quad (11)$$

$$Q_{u2} = (M_{u2} + M_2) / h_0 \quad (12)$$

Q_p : 境界梁せん断力, M_p : 境界梁全塑性モーメント, L : 境界梁の内法長さ, $M_1 = M_2$: 境界梁による壁頂部の曲げモーメント, L_0 : 壁の芯から境界梁の反曲点までの長さ, N_1 : 左壁に作用する軸力, N_2 : 右壁に作用する軸力, T_1 : 左壁PC鋼棒引張力, T_2 : 右壁PC鋼棒引張力, M_{u1} : 左壁脚部の曲げモーメント, M_{u2} : 右壁脚部の曲げモーメント, Q_{u1} : 左壁の曲げによる水平耐力, Q_{u2} : 右壁の曲げによる水平耐力

表-3 実験結果

試験体名	Q_u (kN)		R_u (%)	
	+	-	+	-
06-UBW-2-0.075	87.6	-79.2	2.5	-2.5
08-UBWB-1.5-0.05	233	-211	2.2	-2.0

表-4 耐力算定結果

試験体	曲げ耐力	せん断耐力 ²⁾	
		(学会式)	(大野・荒川式)
08-UBWB-1.5-0.05	正面左壁 正面右壁	130kN 95.5kN	168kN 161kN
06-UBW-2-0.075		121kN	138kN

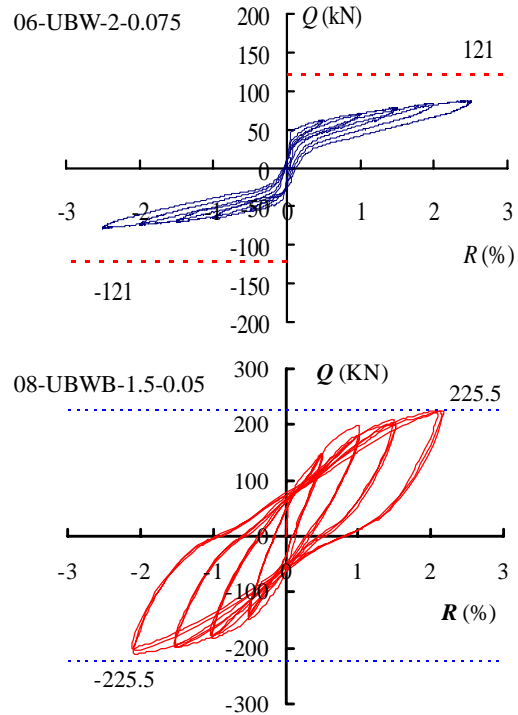


図-11 各試験体の水平荷重 Q と平均部材角 R の関係

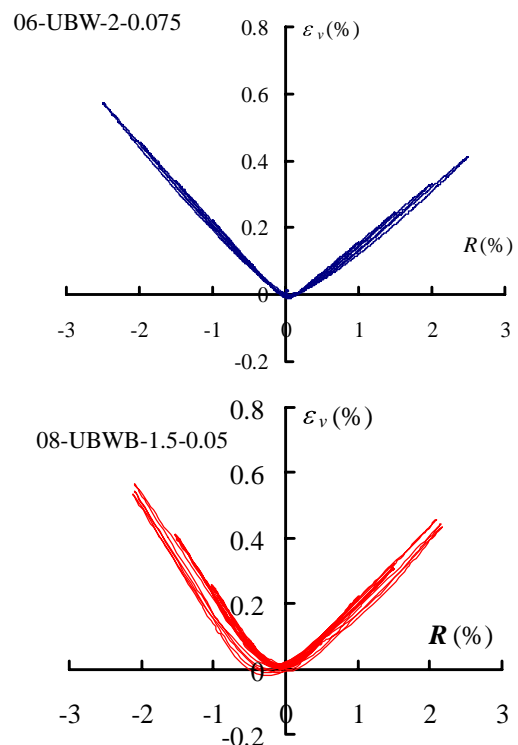


図-12 各試験体試験体の材軸方向の平均ひずみ ε_v と平均部材角 R の関係

3.2 鉄筋のひずみ

図 - 13 に 06-UBW-2-0.075 試験体と 08-UBWB-1.5-0.05 試験体それぞれの鉄筋のひずみ ε と平均部材角 R の関係を一部示す。どちらの試験体も鉄筋とコンクリートの付着がないため、ほとんどひずみが生じていないことが分かる。

3.3 PC 鋼棒のひずみ

図 - 14 に 06-UBW-2-0.075 試験体と 08-UBWB-1.5-0.05 試験体それぞれの PC 鋼棒のひずみ ε と平均部材角 R の関係を示す。図中には破線で PC 鋼棒の降伏ひずみを示しているが、いずれも降伏ひずみには達していないので PC 鋼棒は弾性状態である。そのため除荷後に水平変形を戻す力が働き、残留変形が小さくなったと思われる。

3.4 鉄骨境界梁のひずみ

図 - 15 に鉄骨梁のひずみ ε と平均部材角 R の関係を示

す。図中に破線で鉄骨境界梁の降伏ひずみを示した。平均部材角 $1 \sim 1.5\%$ 程度で降伏したことがわかる。

3.5 鉄骨境界梁部材角

図 - 16 に鉄骨境界梁部材角 R_1 と平均部材角 R の関係を示す。境界梁降伏近傍から R の増大と同程度以上の部材角が生じていることがわかる。また、写真 - 1 に境界梁降伏時の変形状態を示す。梁端部で降伏している。

3.6 連層壁脚部浮き上がり

図 - 17 に連層壁脚部浮き上がり回転角 と平均部材角 R の関係、図 - 18 に水平荷重 Q と部材角 R 及び脚部浮き上がり回転角 の関係を示す。これらによれば、境界梁降伏近傍以降は境界梁の部材角が大きくなったため、水平力を載荷している側の壁の部材角が他の壁の部材角より大きくなっている。また、連層壁の部材角は連層壁脚部の回転変形により生じていることが分かる。

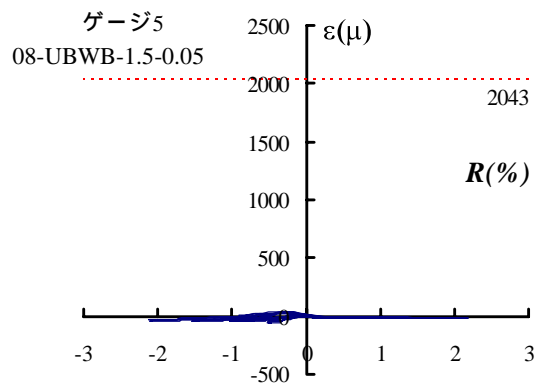
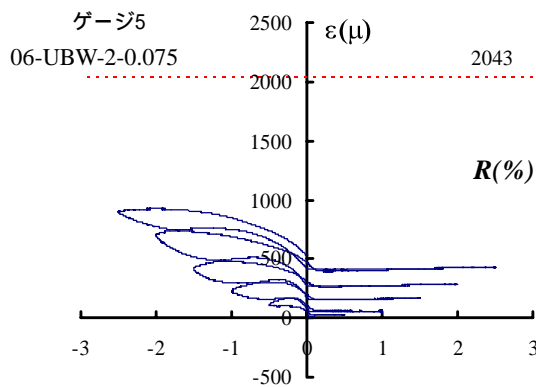


図 - 13 各試験体の鉄筋のひずみ ε と平均部材角 R の関係

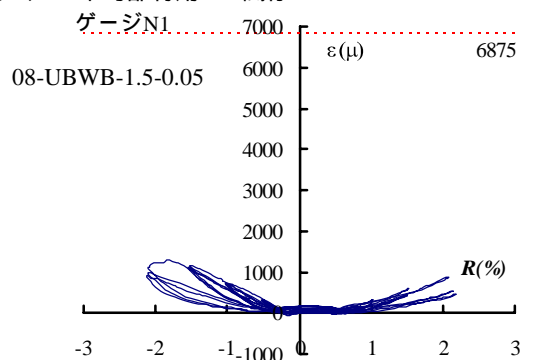
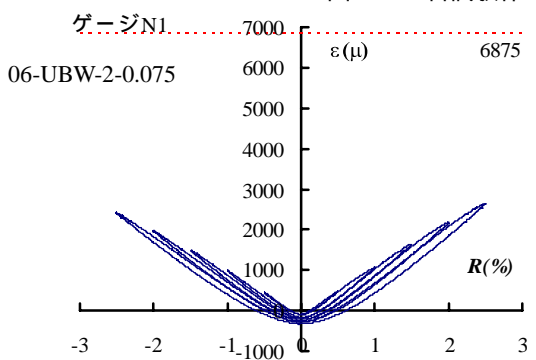


図 - 14 各試験体の PC 鋼棒のひずみ ε と平均部材角 R の関係

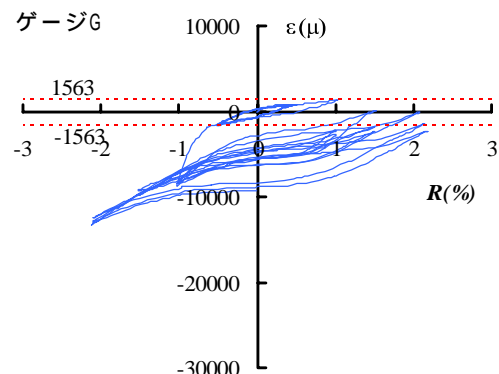
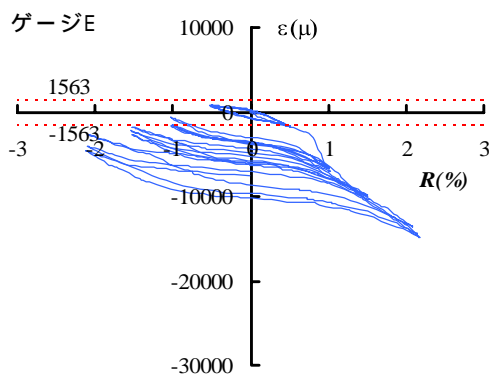


図 - 15 08-UBWB-1.5-0.05 試験体の鉄骨境界梁のひずみ ε と平均部材角 R の関係

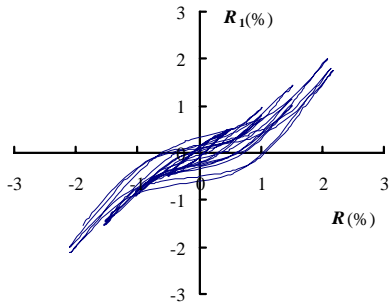


図 - 16 鉄骨境界梁部材角 R_1 と平均部材角 R の関係



写真 - 1 鉄骨境界梁端部の降伏

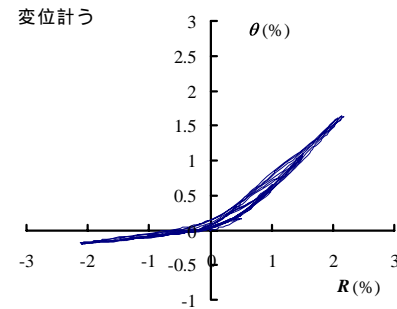
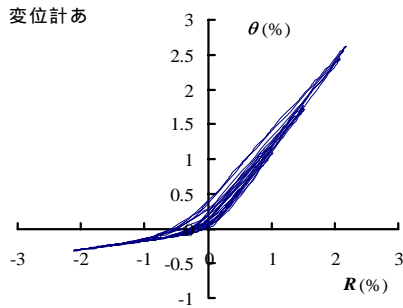


図 - 17 浮き上がり回転角 と平均部材角 R の関係

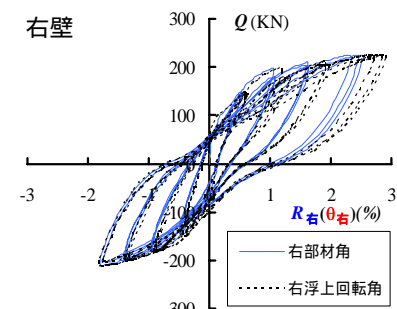
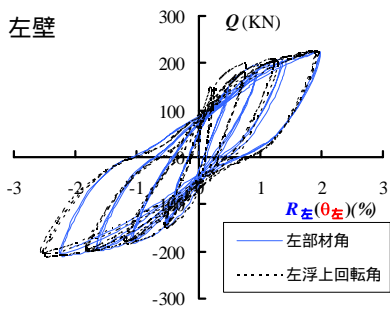


図 - 18 水平荷重 Q と部材角 R 及び浮き上がり回転角 の関係

4. 結論

壁縦筋脚部をアンボンド化し、水平断面中央に高強度アンボンド鉄筋を配筋した連層壁の一定軸力下の水平力載荷実験、及びこれらの壁をモデルとした連層壁を並列配置し、鉄骨境界梁をPC鋼棒の締付けにより連層壁を取付けて架構を構成した鉄骨境界梁付並列耐震壁の一定軸力下の水平力載荷実験を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) アンボンドRC耐震壁は、水平変形が増大しても脚部の曲げひび割れが拡大するだけで他の箇所の損傷はほとんど生じることがなかった。水平変形が増大しても残留変形がほとんど生じることがないので、自己復元機能が発揮できることが確認できた。
- 2) 鉄骨境界梁で連結したアンボンド並列耐震壁は、水平変形が増大しても壁はひび割れを生じず、境界梁でエネルギーを吸収する紡錘形の履歴性状を示し、平均部材角 $1 \sim 1.5\%$ で境界梁は降伏した。実験後は境界梁を除くことができ、壁は若干の浮き上がりは見られたがほぼ元の位置に戻った。これらの実験結果から、本論で提案する

並列連層耐震壁は、エネルギー吸収の大きい履歴性状を示すことができるとともに、塑性化した鉄骨境界梁を容易に取り外すことができ、復元性に富んだ連層耐震壁とすることができる見通しが得られた。

謝辞

試験体製作にあたって平成20年度研究室の卒論生、大学院生、及び福岡大学工学部建築学科技術職員平國久雄氏にお世話になった。ここに、関係者各位に感謝します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、日本建築学会、1990
- 2) 日本建築学会: 建築設計における保有耐力と変形性能 (1990)、pp.401-403
- 3) 田中睦、江崎文也、小野正行、河本裕行: 高強度アンボンド主筋を用いたRC柱の履歴性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.2、pp.181-186、2004
- 4) 崎野健治、上枝豊、日高桃子: 転倒降伏型耐震壁に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、第584号、pp.177-184、2004.10