

3. 鉄筋コンクリート造耐震壁に設けたひび割れ誘発目地に関する実験

Experimental Study of Cracking Induced Joints of RC Shear Wall

佐藤 尚隆*¹ 松井 亮夫*²

要 旨

異形鉄筋をひび割れ誘発材（誘発材と称する）として目地内部に内蔵させた鉄筋コンクリート造（RC造と称する）耐震壁では、目地部分に乾燥収縮ひび割れが集中するため、耐力壁としての構造性能への影響が懸念される。本研究ではひび割れ誘発目地にひび割れが発生した RC 造耐震壁のせん断実験を行い、異形鉄筋を目地部に内蔵させた耐震壁の耐力は、目地底間寸法ではなく壁厚寸法を使用して既往のせん断強度式で安全側に評価できることを確認した。

キーワード：RC 耐震壁／乾燥収縮／誘発目地／誘発鉄筋

1. はじめに

RC 造耐震壁には乾燥収縮によりひび割れが発生する。特に壁部材は部材厚さが薄く表面積も大きいため、柱や梁の外周フレームの拘束によるひび割れが発生しやすい。壁部材におけるひび割れは建物の美観上の問題となるだけでなく、外壁においては漏水の原因にもなる。さらに、空気中の二酸化炭素がひび割れ部から進入することで中性化が進行し、鉄筋腐食を引き起こすなど、構造体の耐久性上の問題も引き起こす。そのため、有害な壁部材のひび割れを所定の壁表面を欠き込んだ目地に意図的に誘発させて、壁部材の品質を確保する方法が従来から行われてきた。

しかし、コンクリートを欠き込む場合、壁表面から目地底までの目地深さのコンクリートは構造体とみなされず、壁のせん断耐力は目地底間寸法を壁厚とみなして評価される。一方、異形鉄筋を打ち込む鉄筋挿入型ひび割れ制御工法¹⁾では、図-1に示すように誘発材を目地中央付近に配置するため、ひび割れを目地に誘発させる効果²⁾を保ちながら、欠き込まれたコンクリートにより低下した目地部の構造性能を補うことが可能となり壁のせん断耐力は壁厚で評価できると考えられる。図-2に構造壁厚の取り方を示す。

本報告は、本ひび割れ制御工法を用いた RC 耐震壁の目地部へのひび割れの誘導状況と、目地部に収縮ひび割れを誘導させた試験体の曲げせん断実験を行い、その耐力が目地底間寸法ではなく、壁厚寸法を使用して既往の設計式で評価できることを確認した経緯について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は1層1スパンの RC 耐震壁を模した、柱、梁およびスタブで囲まれた1/2スケールの試験体である。実験変数は目地の種類と位置、コンクリート圧縮強度、壁筋比とした。試験体は計5体とした。実験変数を表-1に、試験体例を図-3に、さらに目地部の断面詳細を図-4に示す。

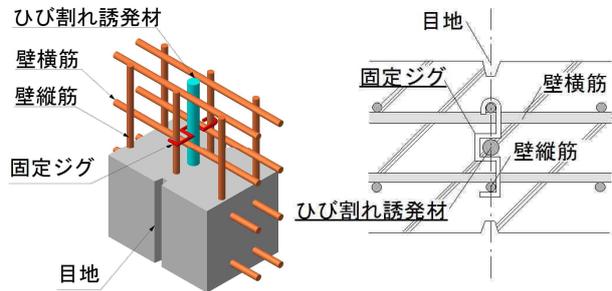


図-1 鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を用いた目地

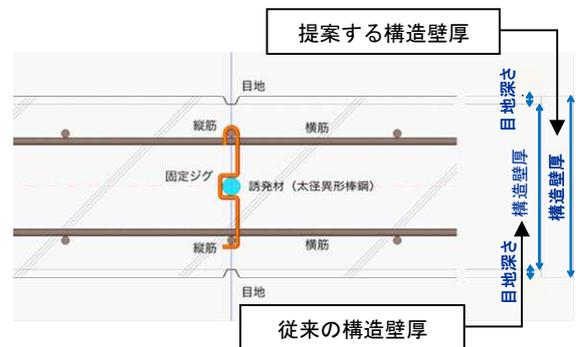


図-2 せん断強度算定時の構造壁厚

*¹ 技術研究所 *² 大阪本店建築部

試験体の寸法は、何れも同じで壁高さ 1200mm、壁内法長さ 2125mm、壁厚 100mm、柱断面 380×380mm、梁断 250×350mm とした。5 体の試験体のうち 4 体の試験体 (WP 29R20、WP65R20、WP116R20、WP116R20C) はひび割れ誘発材を内蔵した鉄筋挿入型ひび割れ制御工法の目地とし、残りの 1 体 (WP65R00) はコンクリートの断面を欠き込んだ従来の目地とした。目地を全ての試験体の壁中央に設けるとした。WP116R20C では左右の柱際に他の 4 体は左右の柱際から 180mm の位置に設置した。壁筋比は 0.29、0.65、1.16% の 3 水準とした。

2.2 使用材料

柱、梁および壁のコンクリート強度は実験時の圧縮強度が 30 N/mm² と 40 N/mm² の 2 水準となるようにした。鉄筋は梁主筋のみ SD345 を、他はすべて SD295A を使用した。ひび割れ誘発材を含む鉄筋およびコンクリートの特性を表-2(a)、(b)、(c)および(d)に示す。

表-1 実験変数

試験体	目地の種類	目地の位置	コンクリートの目標強度 (N/mm ²)	壁筋 (縦・横)	壁筋比 (%)	ひび割れ誘発材	総断面欠損率 (%)
WP65R00	切り欠き目地	中央+柱から 180mm	30	D6#98 ダブル (SD295A)	0.65	—	32
WP29R20	切り欠き目地 + ひび割れ誘発材		40	D6#221 ダブル (SD295A)	0.29	1-D16	48
WP65R20			30	D6#98 ダブル (SD295A)	0.65		
WP116R20			D6#55 ダブル (SD295A)	1.16			
WP116R20C			中央+柱際				

1) 壁厚に対するひび割れ誘発材の公称径と壁筋筋の公称径と目地深さの和の比

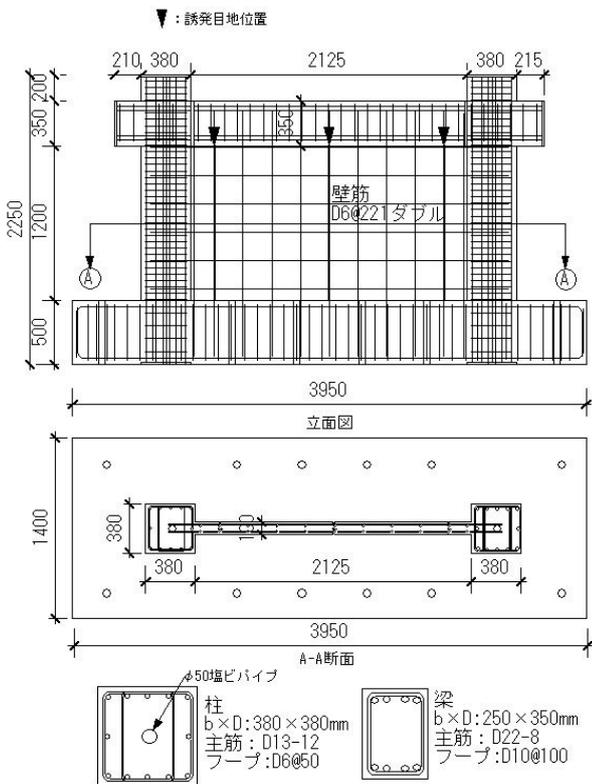


図-3 試験体図 (WP29R20)

2.3 実験方法

(1) ひび割れ誘発実験

本研究は乾燥収縮によるひび割れを目地部に集中して誘発させた RC 耐力壁の構造性能を確認するのが目的であるため、1 週時に壁型枠のみを脱型し、その後ひび割れ発生状況について調査した。

調査対象の試験体は WP65R00、WP65R20 および WP116R20 とした。計測は壁のコンクリート面に貼付した 3 軸ゲージと、目地を挟むように埋め込んだ 2 本のボルトに取付けたパイ型ゲージで行った。さらに、ひび割れスケールでひび割れ幅を観測した。図-5 に 3 軸ゲージとパイ型ゲージの位置を示す。

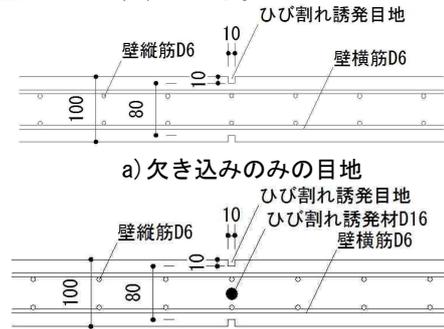


図-4 目地部の断面図

表-2 材料の特性

(a) 鉄筋の力学的特性

部位	呼び名	種別	公称断面積 (mm ²)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	弾性係数* E_s ($\times 10^4$ N/mm ²)
柱主筋	D13	SD295A	127	361	0.190	1.90
梁主筋	D22	SD345	387	373	0.205	1.91
梁あばら筋	D10	SD295A	71	341	0.180	1.88
柱帯筋・壁筋	D6	SD295A	32	382*	0.408	1.90
誘発材	D16	SD295A	199	333	0.188	1.92

(b) コンクリートの配合

試験体	配合の設計条件	水 (Kg/m ³)	セメント (Kg/m ³)	細骨材 (Kg/m ³)	粗骨材 (Kg/m ³)	S/A (%)	W/C (%)	混和剤
WP29R20	普通 30-21-15-N	185	370	910	820	53.3	50	高性能減水剤 「トレ」 SP8S 3.74
WP65R00 WP65R20 WP116R20 WP116R20C	普通 21-18-15-N	205	325	826	890	48.8	63	減水剤 「アリス」 LS 3.25

(c) コンクリートの力学的特性

試験体	柱、梁、壁			基礎スタブ
	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	弾性係数 E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)
WP29R20	40.9	2.66	2.66	42.0
WP65R00, WP65R20 WP116R20, WP116R20C	34.0	2.64	2.52	42.0

(d) コンクリートの自由収縮ひずみ

乾燥日数 (日)	0	7	14	21	28	56	91	182
21-18-15N のひずみ値 (μ) WP65R00, WP65R20 WP116R20, WP116R20C	0	-233	-369	-479	-563	-773	-877	-991
30-21-15N のひずみ値 (μ) WP29R20	0	-323	-523	-671	-755	-937	-1028	-1126

(2) 載荷実験

載荷実験は試験体の柱頭部分に一定軸力を加えながら、正負交番の水平力を加えて行った。載荷装置を図-6に示す。水平力は梁の両端部に設置した2本の3000kN油圧ジャッキを用いて載荷した。鉛直力は柱断面中央部に内蔵したPC鋼棒を用いて、両柱頭部に設置した1200kNセンターホール型油圧ジャッキを用いて載荷した。

水平方向の載荷制御は、梁中央高さにおける水平変位を下部スタブ上端から梁中央高さまでの距離で除した値である層間変形角（Rと称する）で行った。載荷サイクルは層間変形角R=0.05、0.1、0.25、0.5、0.75、1.0、1.5%で各2回ずつの正負交番の繰返しとした。なお、水平力は各々壁に対して押しと引きとした。

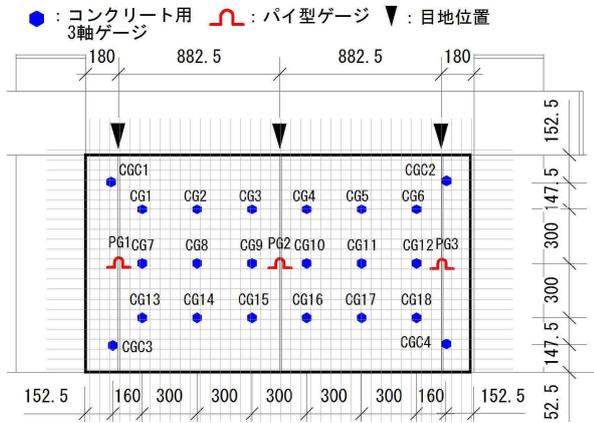
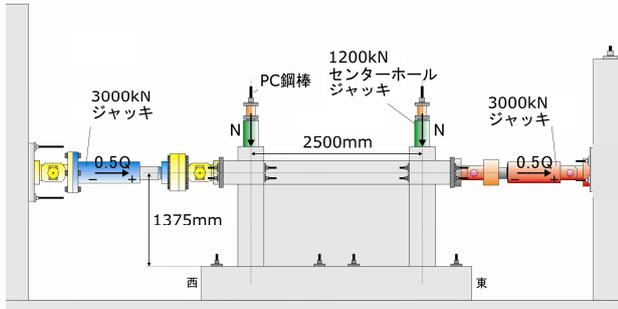
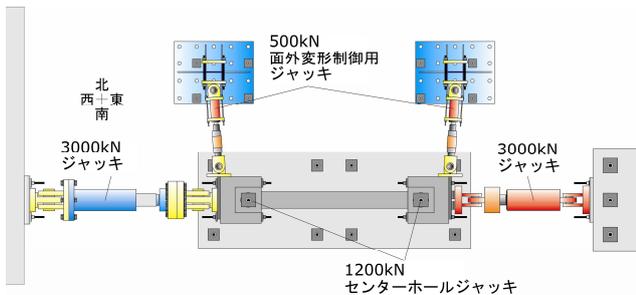


図-5 3軸ゲージとパイ型ゲージの位置



a) 立面図



b) 平面図

図-6 載荷装置

鉛直方向の載荷制御は、長期荷重に相当する鉛直力を左右の柱頭に軸力比が0.2となるように作用させ行った。さらに、壁の面外方向の制御は、壁面に対して概ね直交する方向に配した2本の油圧ジャッキで左右の柱頭部に載荷して行った。載荷方向の中心軸は上下スタブの軸と一致させた。

水平および鉛直の荷重はジャッキに取り付けたロードセルで計測した。試験体の層間変形の計測は図-7に示すように高感度変位計を設置して行った。壁の目地部分のひび割れの開きはパイ型変位計で計測した。さらに、載荷実験の初期段階で発生した壁面のひび割れ位置に、載荷途中でカンチレバ型変位計を貼り付けてひび割れの開きを計測した。

鉄筋に貼り付けたワイヤーストレインゲージの位置を図-8に示す。柱、梁では主筋と横補強筋のひずみを計測した。壁では縦筋、横筋およびひび割れ誘発材のひずみを計測した。

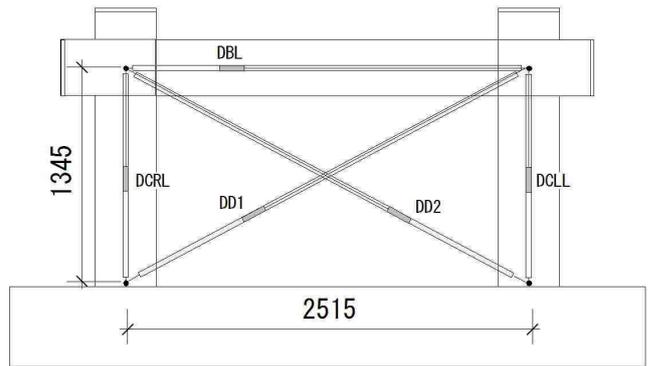


図-7 変位計位置

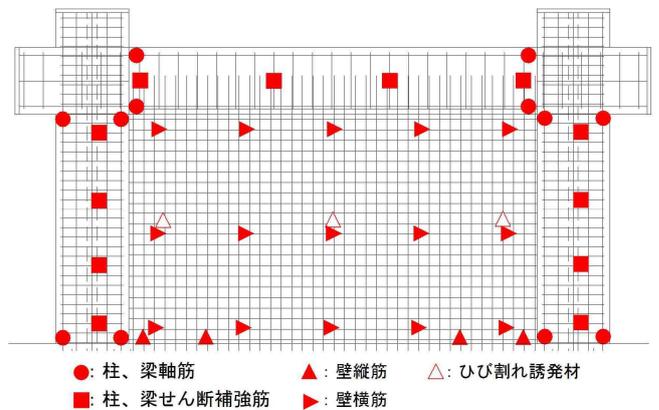


図-8 ゲージ位置

3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生状況

コンクリート打設後から載荷実験前までに発生した目地および壁面でのひび割れ発生状況を述べる。WP65R00、WP65R20 および WP116R20 のコンクリート打設後 4 週でのひび割れ状況を図-10 に示す。

図-9 に壁中央部の目地の壁内法高さの中央に設置したパイ型ゲージで計測した目地の開き量の経時変化を示す。縦軸はひび割れによる開き方向の変位を示し、横軸はコンクリート打設日からの経過日数を示す。3 体の試験体のうち最も開きが大きいののは WP65R20 で最大約 0.3mm であった。3 週目で最大に達した。WP65R20 の開きは顕著に増加したのはコンクリート打設後 2 週目付近で、数日の間に約 0.15mm 増加し、WP65R00 の開きの最大は約 0.12mm で、打設後ほぼ 3.5 週目で達した。WP116R20 では開く方向とは逆の目地幅が縮まる方向に変位が見られた。変位の最大は約 0.2mm であった。

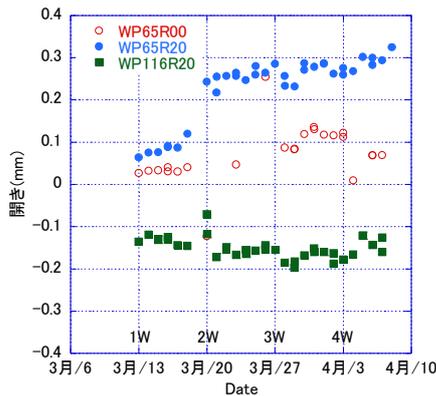


図-9 目地の開き量

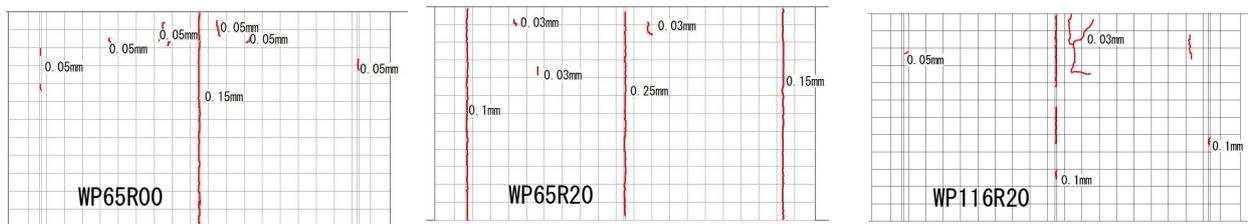


図-10 コンクリート打設後 4 週のひび割れ状況

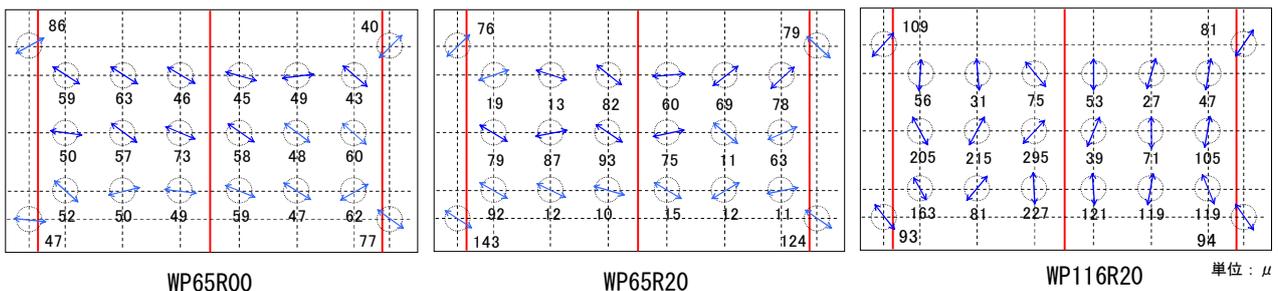


図-11 コンクリート打設後 2 週時の主ひずみ状況

壁筋比が 0.65% の WP65R00 と WP65R20 のひび割れ状況を比較する。いずれも中央部の目地に基礎スタブ上端から梁下までに繋がるひび割れが生じた。ひび割れ幅は WP65R20 の方が概ね大きく、最大で約 0.25mm であった。WP65R00 の柱近傍の左右の目地には不明瞭でありながら一部にひび割れが生じた。一方、WP65R20 の柱近傍の左右の目地には基礎スタブ上端から梁下までに繋がる明瞭なひび割れが生じた。それらの最大ひび割れ幅は、中央部よりも狭く 0.1mm と 0.15mm であった。目地以外の壁面のひび割れは両試験体に若干見られた。ひび割れ幅は WP65R00 で 0.05mm、WP65R20 では 0.03mm であった。

壁筋比が 1.16% の WP116R20 では、中央部の目地に最大約 0.1mm 幅のひび割れが発生した。そのひび割れは梁下から壁高さの半分程度まで伸びるものであった。柱近傍の左右の目地にひび割れはほとんど見られなかった。目地以外には、中央部の目地近傍に 0.03mm 幅のひび割れが見られた。

図-11 に壁表面に貼り付けた 3 軸ゲージの値から算出したコンクリート打設後 2 週目の主ひずみ値とその方向を示す。計測値はいずれも引張り方向のひずみであった。WP65R00、WP65R20 の主ひずみ方向は概ね水平に近かった。一方、WP116R20 では鉛直に近かった。

主ひずみ値は数十 μ から 300 μ 程度の値を示し、WP65R00、WP65R20 と比較すると WP116R20 の方が大きかった。WP65R00 と WP65R20 を比較すると、壁の四隅のひずみ値の方が WP65R20 において大きくなる傾向であった。

3.2 荷重変形関係

図-12 に水平せん断力(Q)と層間変形角(R)の関係を、
 図-13 に試験体の最終破壊性状を示す。

(1) 破壊経過

WP65R00 では R=0.05% で壁のせん断ひび割れが発生した。R=0.25% で柱脚の主筋が引張降伏し、R=0.5% で梁端部の主筋が引張降伏した。R=0.75% で最大耐力が 2260kN に達した。R=1.0% の 1 サイクル目で耐力が低下し始め、R=-1.0% のピークに達する直前に壁にスリップ破壊が始まり、R=1.0% の 2 回目のサイクルで急激に耐力が低下した。壁横筋、柱・梁のせん断補強筋は引張降伏しなかった。

WP29R20 では R=0.05% で壁のせん断ひび割れが発生した。R=0.25% で梁のせん断補強筋と壁中央の目地に配したひび割れ誘発材が引張降伏した。R=0.5% で柱脚の主筋が引張降伏した。R=0.75% で梁端部の主筋が引張降伏し、最大耐力が 2239kN に達した。R=1.0% の 1 サイクル目で耐力が低下し始め、WP65R00 と同じく 2 サイクル目で壁にスリップ破壊が生じ急激に耐力が低下した。壁横筋、柱のせん断補強筋は引張降伏しなかった。

WP65R20 では R=0.05% で壁のせん断ひび割れが発生した。R=0.25% で梁端部の主筋が引張降伏した。R=0.5% で柱脚の主筋が引張降伏した。R=0.75% で梁のせん断補強筋と壁中央の目地に配したひび割れ誘発材が引張降伏し、最大耐力が 2330kN に達した。R=1.0% の 1 サイクル目で耐力が低下し始め、WP29R20 と同じく 2 サイクル目で壁にスリップ破壊が生じ急激に耐力が低下した。壁横筋、柱のせん断補強筋は引張降伏しなかった。

WP116R20 では R=0.05% で壁のせん断ひび割れが発生した。R=0.5% で柱脚部の主筋が圧縮降伏した。また R=-0.5% で梁端部の主筋が引張降伏した。R=-0.75% で梁のせん断補強筋が引張降伏した。R=1.0% で壁横筋が引張降伏し、最大耐力が 2590kN に達した。R=1.0% の 2 サイクル目で耐力が低下し始め R=1.5% のピークに向かう途中でスリップ破壊が生じ急激に耐力が低下した。壁横筋、壁中央の目地に配したひび割れ誘発材は引張降伏しなかった。ただし、ひび割れ誘発材のひずみ値は降伏値近くまで達していた。

WP116R20C では R=0.05% で壁のせん断ひび割れが発生した。R=0.5% で梁端部の主筋が引張降伏した。R=-0.5% で柱脚部の主筋が圧縮降伏した。R=1.0% で壁の横筋が引張降伏し、最大耐力が 2605kN に達した。R=1.5% のピークに向かう途中でスリップ破壊が生じ急激に耐力が低下した。柱・梁のせん断補強筋、壁中央の目地に配したひび割れ誘発材は引張降伏することはなかった。ただし、ひび割れ誘発材のひずみ値は降伏値近くまで達していた。何れの試験体も破壊モードは壁部分のせん断破壊に起因するスリップ破壊であった。

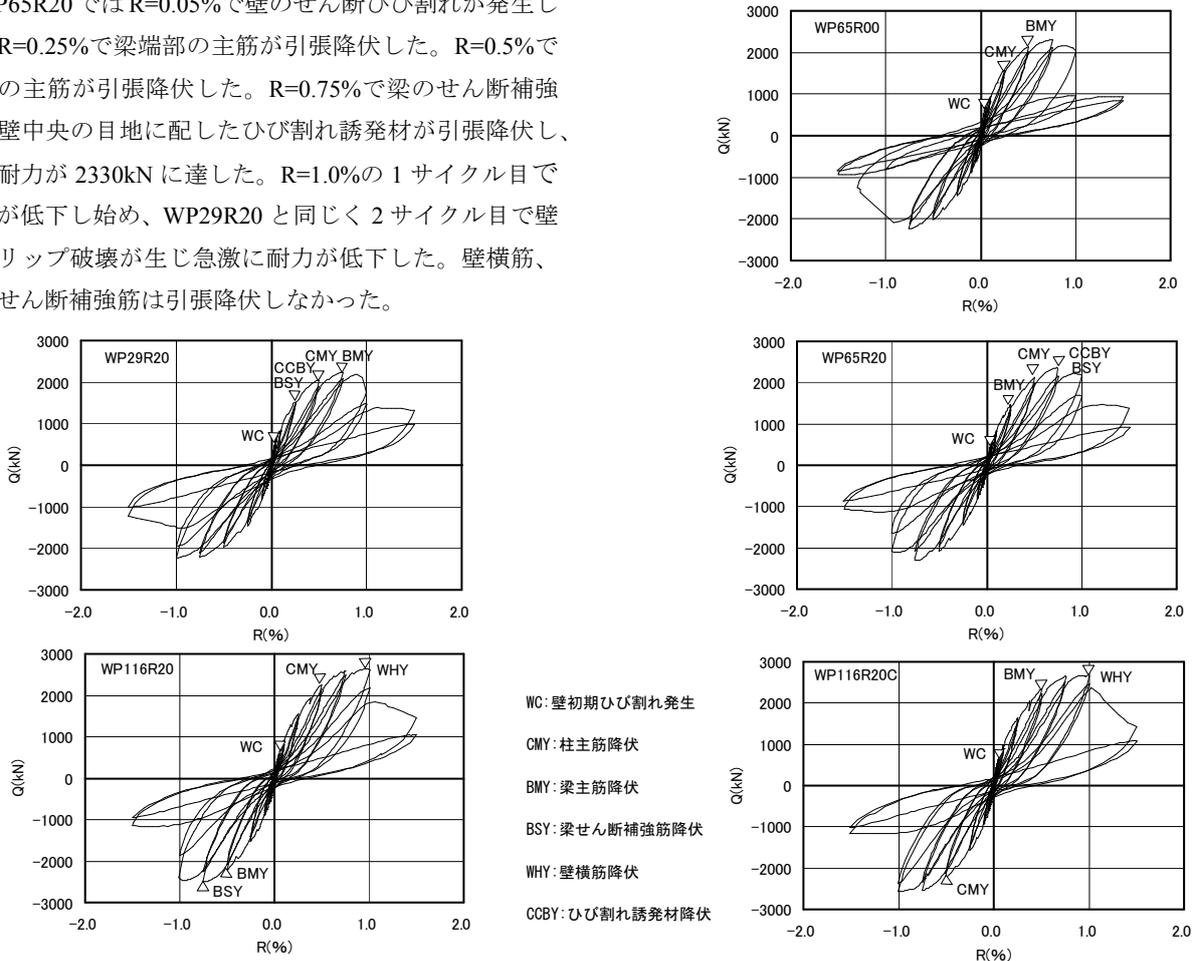


図-12 水平せん断力(Q)—層間変形角(R)の関係

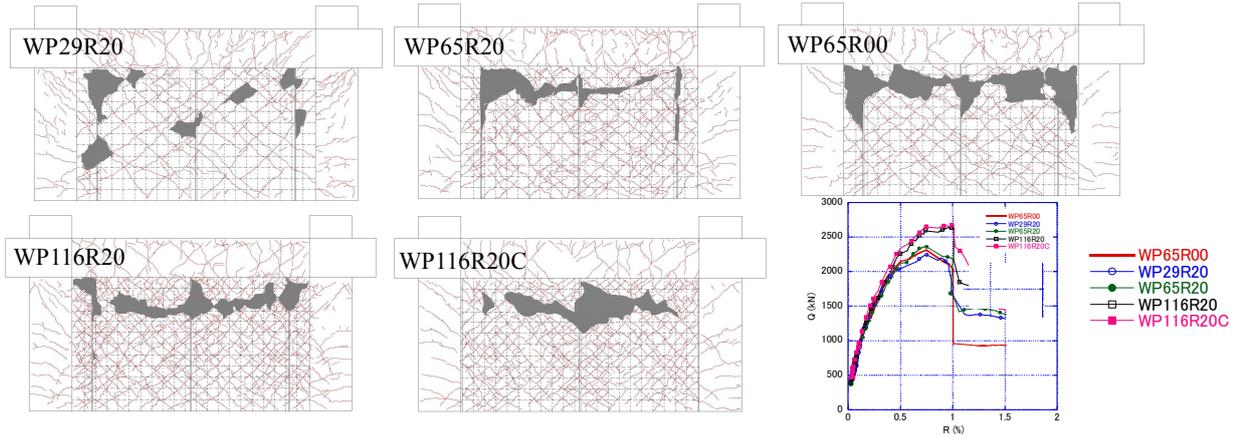


図-13 最終破壊性状

図-14 各試験体の包絡線

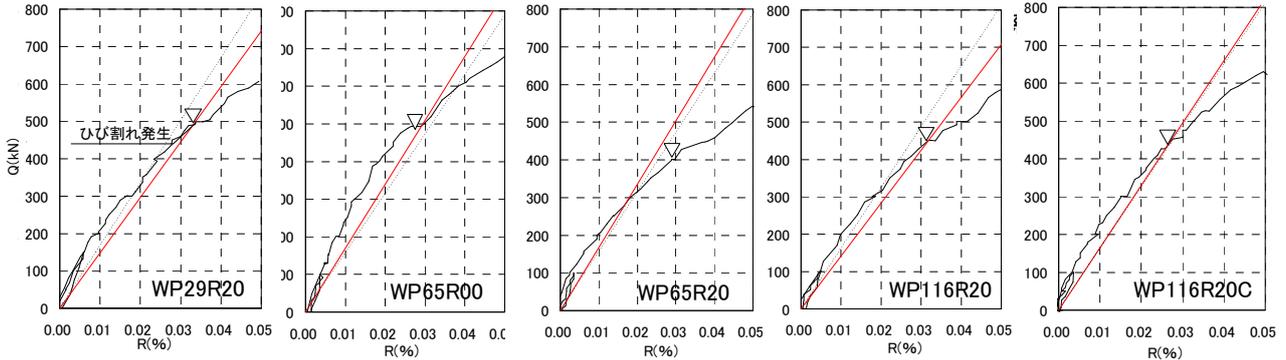


図-15 初期剛性（実線：実験値，点線：計算値）

(2) 包絡線

図-14 に各試験体の正側載荷時の包絡線を示す。R=0.25%までは各試験体ともほぼ同様の履歴をしめたが、それ以降、壁筋比に応じて包絡線に差異が見られた。WP116R20、WP116R20CはR=1.0%で最大耐力に達したが、その他の試験体ではR=0.75%で最大耐力に達した。最大耐力以降の耐力低下はWP65R00が最も著しかった。それ以外の試験体の耐力低下はばらつきが見られた。R=1.5%時の耐力はほぼ同じであった。

(3) 初期剛性

図-15にR=0.05%までのQ-R関係と計算による初期剛性と実験による初期剛性を示す。計算値は材料の実強度を用い、鉄筋の影響を考慮し、壁のみの壁厚100mmの断面とし、形状係数を1.0とした。また、実験による初期剛性はグラフの原点と壁のせん断ひび割れ発生時を結んだ直線の傾きとした。実験値の計算値に対する割合は0.87~1.08程度であった。

4. 既往のせん断強度式での耐力評価

各試験体の最大耐力と既往の計算式によるせん断強度計算値との比較を表-3に示す。計算値は壁厚100mmを用い、修正荒川 min.式による計算値(wQ_{su1})と修正広沢 mean.式による計算値(wQ_{su2})である。修正広沢 mean.式では1.35~1.46倍の比率となった。

表-3 実験値と計算値との比較

試験体	実験 最大耐力 $ex Q_{max}$ (kN)	せん断強度 計算値			
		wQ_{su1} (kN)	$ex Q_{max}/wQ_{su1}$	wQ_{su2} (kN)	$ex Q_{max}/wQ_{su2}$
WP65R00	2260	1337	1.69	1676	1.35
WP29R20	2239	1289	1.74	1550	1.44
WP65R20	2330	1337	1.52	1676	1.39
WP116R20	2590	1529	1.69	1782	1.45
WP116R20C	2605	1529	1.70	1782	1.46

修正荒川 min. 式

$$wQ_{su1} = \left\{ \frac{0.053 p_c^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot D) + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} \cdot t_c \cdot j$$

修正広沢 mean 式

$$wQ_{su2} = \left\{ \frac{0.068 p_c^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} \cdot t_c \cdot j$$

5. まとめ

本実験範囲では下記のことが分かった。

- 1) 鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を用いると、従来の目地と比較して、早期に目地内にひび割れが発生した。
- 2) 壁の初期剛性は壁厚100mmを用いて概ね評価できる。
- 3) 壁のせん断耐力は壁厚100mmを用いた修正荒川 min.式および修正広沢 mean.式で安全側に評価できる。

[参考文献]

- 1) ひび割れ誘発材を有するRC耐震壁の加力実験、浅沼組技術研究報告 No.21 2009
- 2) 建築技術性能証明評価概要報告、浅沼式ひび割れ誘発目地付き耐力壁構法、GBRC性能証明第09-04号改