

論文 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

佐藤 尚隆^{*1}・濱田 真^{*2}・松井 亮夫^{*3}・坂下 雅信^{*4}

要旨：乾燥収縮ひび割れをひび割れ誘発目地に集中させるため、ひび割れ誘発材としての異形鉄筋を目地内部に内蔵させる工法を用いた鉄筋コンクリート造 (RC 造) 耐震壁では、目地部分に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。しかし、目地部に内蔵させた異形鉄筋により、目地部のひび割れ面での応力伝達性能は低下するものではないと考えられる。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、目地部に内蔵させた異形鉄筋を有する耐震壁の耐力を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 壁, 乾燥収縮, 誘発目地, 誘発鉄筋, せん断強度

1. はじめに

コンクリートは乾燥収縮及び温度応力によりひび割れが発生する。特に壁部材は表面積が大きい部材厚さが薄いため、また柱や梁の外周フレームによる拘束を受けるのでひび割れが発生しやすい。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。またひび割れ部から二酸化炭素が進入することにより中性化が進行し、鉄筋腐食を促進するなど、構造体の耐久性においても問題がある。そのため、このように有害な壁部材のひび割れを所定の場所に意図的に誘発させて、ひび割れ部分を処理することにより壁部材の品質を確保する方法として壁にひび割れ誘発目地を設ける方法は従来から行われてきた。

しかし、壁の表面に誘発目地を設ける方法では、意匠上、構造計算上などの理由で深い目地を設けることができないため、目地部分にひび割れを完全に誘発させることができず、目地以外の壁面にひび割れが発生することが起こった。このような RC 壁のひび割れの問題を解決するために、壁の目地部のコンクリートに異形鉄筋を打ち込む鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を考案した。この工法は、挿入する異形鉄筋と壁の縦筋によって目地部分でのコンクリートの厚さを減少させ、深い切欠き目地を設けることなくコンクリートの断面欠損率を上げ、目地部へのひび割れの誘発を有効に促すものである。図-1 に鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を用いた目地の概要を示す。この工法のひび割れ誘発の効果については実施工物件で確認しており、適正に施工された物件では壁面のひび割れはほとんど発生していない。

このような目地部へのひび割れの集中のため、構造的

な見地から、目地のひび割れの耐震壁の構造性能への影響が懸念された。しかし、目地部に内蔵される異形鉄筋は一般的な構造部材と同様に、コンクリートとの付着性能を有し、また、鉄筋の節でのインターロッキング効果などを考慮すると、目地によって切り欠かれた壁を鉄筋によって補強していると考えられる。本報告は、本ひび割れ制御工法を用いた耐震壁の模型試験体を作製し、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、その耐力を確認することを目的とする。

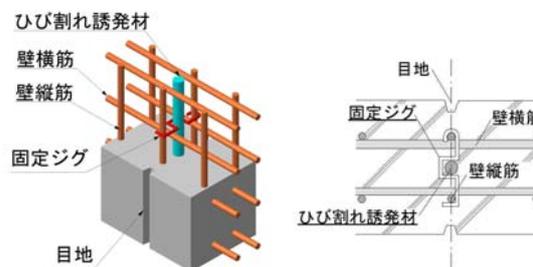


図-1 鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を用いた壁の目地

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は1層1スパンのRC造耐震壁を模した、柱、梁及びスタブで囲まれた1/2スケールの模型試験体である。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-2に、目地部の断面詳細を図-3に示す。

試験体の寸法は、何れも同様で、壁高さ1200mm、壁内法長さ2125mm、壁厚100mm、柱断面380×380mm、梁断面250×350mmとした。5体の試験体のうち4体の試験体(WP29R20,WP65R20,WP116R20,WP116R20C)には

*1 浅沼組技術研究所 (正会員)

*2 熊谷組技術研究所 (正会員)

*3 浅沼組建築部 (正会員)

*4 京都大学工学研究科・助教 博士(工学) (正会員)

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、その他の1体(WP65R00)はコンクリートの断面を切り欠いた従来の目地とした。目地位置は壁中央と左右の柱近くの3箇所とし、WP116R20Cのみ柱際りに設置し、他の4体は柱際から180mmの位置に設置した。コンクリート強度は30,40N/mm²の2水準とWP29R20のみ40N/mm²とした。壁筋比は0.29,0.65,1.16%の3水準とした。

2.2 使用材料

試験体に使用したコンクリート及び鉄筋について示

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	1-D16	48
WP29R20	切り欠き目地 + ひび割れ誘発材		40	D6#221 ダブル(SD295A)	0.29		
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縦筋の公称径と目地深さの和の比

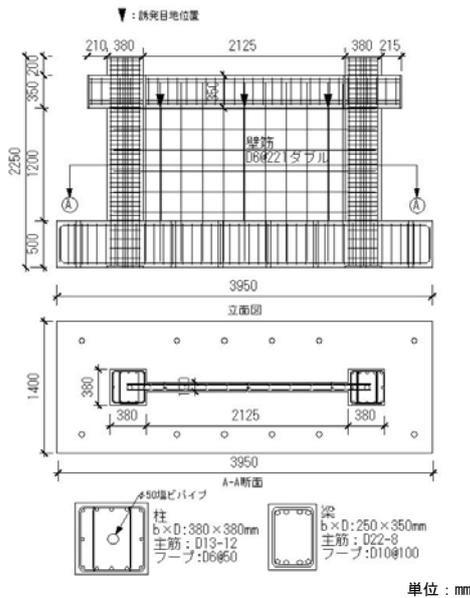


図-2 試験体図 (WP29R20)

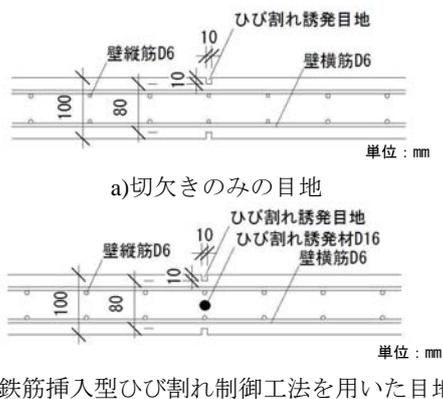


図-3 目地部の断面図

す。柱、梁及び壁のコンクリート強度は実強度30N/mm²と40N/mm²の2水準とした。鉄筋は梁主筋のみSD345

を使用し、他はすべてSD295Aを使用した。コンクリート及び鉄筋の特性を表-2(a),(b),(c)及び(d)に示す。

2.3 実験方法

コンクリート打設後から載荷実験実施までのひび割れ誘発実験と載荷実験について説明する。

(1) ひび割れ誘発実験

本研究は乾燥収縮によるひび割れが目地部に集中して誘発された耐力壁の構造性能を確認するのが目的であるため、コンクリート打設後の養生期間に相応のひび割れが目地部に発生することを確認する必要がある。そこで、試験体のコンクリート打設後、1週間で壁型枠を脱型し、それ以降の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及びWP116R20とし、計測は壁のコンクリート面に3軸ゲージと目地の高さ方向の中央部に貼り付けたパイ型ゲージで行う、同時にひび割れスケールでひび割れ幅を観測した。図-4に3軸ゲージとパイ型ゲージの位置を示す。

表-2 材料の特性

(a) コンクリートの配合

試験体	配合の設計条件	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	370	913	818	53.4	50	
WP65R00 WP65R20 WP116R20 WP116R20C	普通 21-18-15-N	325	826	890	48.8	63	

(b) 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 (×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

(c) コンクリートの自由収縮ひずみ

養生日数(日)	0	7	14	21	28	35	63	98	189
21-18-15Nのひずみ値(μ)	0	0	-233	-369	-479	-563	-773	-877	-991
30-21-15Nのひずみ値(μ)	0	0	-323	-523	-671	-755	-937	-1028	-1126

(d) 鉄筋の力学的特性

部位	呼び名	種別	降伏強度σ _y (N/mm ²)	降伏ひずみε _y (%)	弾性係数E _s (N/mm ²)
柱主筋	D13	SD295A	361	0.190	1.90
梁主筋	D22	SD345	373	0.205	1.91
梁あばら筋	D10	SD295A	341	0.180	1.88
柱帯筋・壁筋	D6	SD295A	382	—	1.90
誘発材	D16	SD295A	333	0.188	1.92

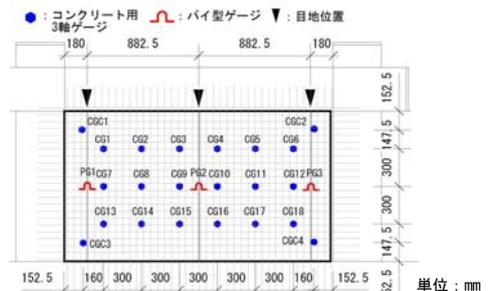


図-4 3軸ゲージとパイ型ゲージの位置

(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与えて行った。載荷装置を図-5に示す。水平方向の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。鉛直方向の力は、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。

水平方向の載荷の制御は、梁中央高さにおける水平変位をスタブ上端から梁中央高さまでの距離で除した値を層間変位角（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回ずつ正負交番の繰り返しとした。なお、載荷時の左右の水平力は各々壁に対して押しと引きとし、絶対値で同じ値に制御した。

鉛直方向の載荷の制御は、長期荷重に相当する鉛直力として左右の柱頭に軸力比0.2となるように軸力を作用させた。また、壁の面外方向の制御は左右の柱頭部に壁面に対しておおよそ直交する方向に配置した2本の油圧ジャッキで上下スタブの載荷方向の中心軸を一致させた。

水平荷重及び鉛直荷重に関する計測はジャッキに取り付けたロードセルで行った。試験体の層間変形の計測は図-6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。また、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ー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-7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、横筋及びひび割れ誘発材のひずみを計測した。

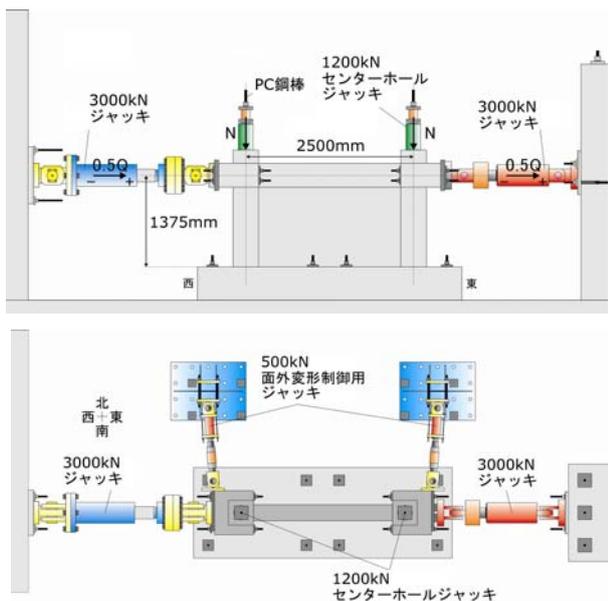


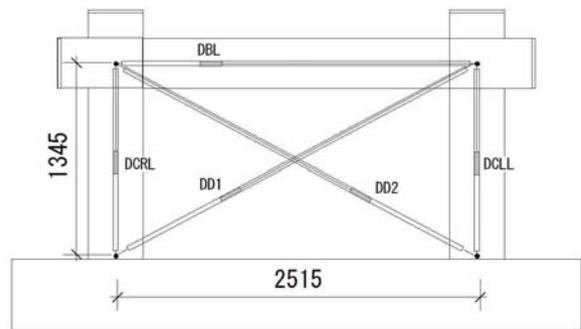
図-5 載荷装置

3. 実験結果

3.1 ひび割れ誘発状況

コンクリート打設後から載荷実験実施までに発生した目地及び壁面のひび割れ発生状況について述べる。

図-8に壁中央部の目地の壁内法高さの半分の位置に設置したパイ形ゲージで計測した目地部の開き量の経時変化を示す。縦軸は目地の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かったのはWP65R20で最大で0.3mm程度で、打設後ほぼ3週目で達した。WP65R20の開きが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0.15mm程度の増加が見られた。WP65R00では開きの最大は0.12mm程度で、打設後ほぼ3.5週目で達した。WP116R20では開き方向とは逆の目地が閉じる方向に変位が見られた。変位の最大は0.2mm程度であった。



単位：mm

図-6 変位計位置

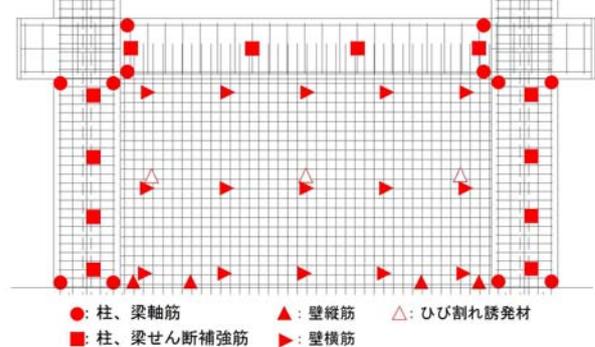


図-7 ケージ位置

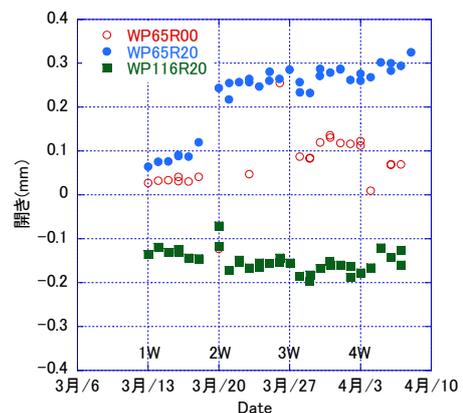


図-8 目地部の開き量

図-9にWP65R00,WP65R20及びWP116R20のコンクリート打設後4週でのひび割れ状況を示す。

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は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0.25mm程度であった。WP65R00の左右の柱近傍の目地には一部にひび割れが生じたが明瞭なものではなかった。一方、WP65R20の左右の柱近傍の目地には壁中央の目地のひび割れと同様に、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。それらの最大ひび割れ幅は、中央部のものより狭く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では0.05mmで、WP65R20では0.03mmであった。

壁筋比が1.16%のWP116R20では、中央の目地に最大0.1mm程度の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。左右の柱近傍の目地にはひび割れはほとんど見られなかった。目地以外の壁面のひび割れは、中央の目地近傍に0.03mm幅のひび割れが広がった。

図-10に壁表面に貼り付けた3軸ゲージの計測値によって算出した主ひずみ値とその方向を示す。いずれもコンクリート打設後2週目の計測値によるもので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、概ね水平方向に近かった。一方、WP116R20ではその方向は鉛直方向に近かった。

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のほうが

それらの値は大きかった。WP65R00とWP65R20で比較すると、WP65R20の壁の四隅のひずみ値の方が大きくなる傾向であった。

3.2 荷重変形関係

図-11,12に水平せん断力(Q)と層間変位角(R)の関係と試験体の最終破壊性状をそれぞれ示す。

(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、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回目のサイクルでは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することはなかった。

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、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することはなかった。

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

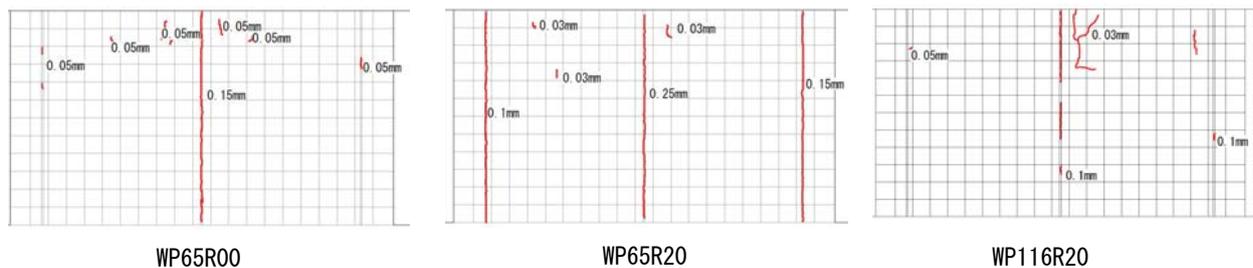


図-9 コンクリート打設後4週のひび割れ状況

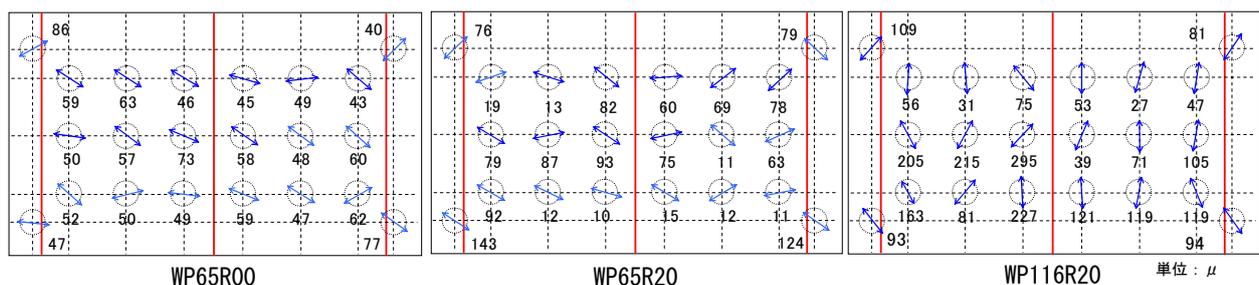


図-10 コンクリート打設後2週時の主ひずみ状況

で耐力が低下し始め、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することはなかった。

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=1.0%で壁の横筋が引張降伏し、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。

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。

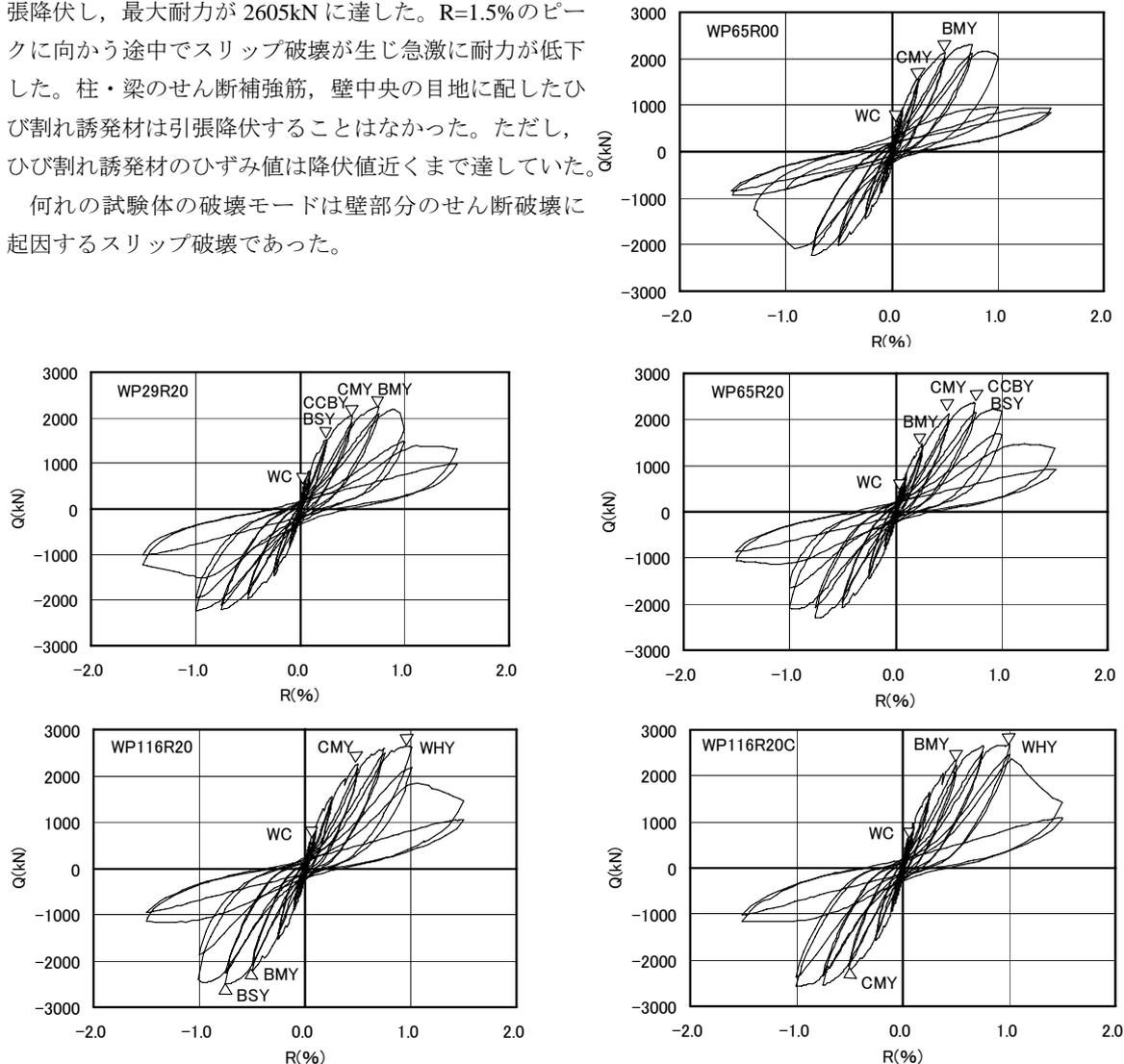
何れの試験体の破壊モードは壁部分のせん断破壊に起因するスリップ破壊であった。

(2) 包絡線

図-13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、壁筋比に応じて曲線に差異が見られた。WP116R20, WP116R20Cでは最大耐力にR=1.0%で達したが、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の低下はWP65R00が最も著しかった。それ以外の試験体の耐力低下の程度にはばらつきがあったが、R=1.5%時の耐力はほぼ同じであった。

(3) 初期剛性

図-14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。



WC:壁初期ひび割れ発生 CMY:柱主筋降伏 BMY:梁主筋降伏 BSY:梁せん断補強筋降伏
WHY:壁横筋降伏 CCBY:ひび割れ誘発材降伏

図-11 水平力(Q)―層間変形角(R)関係

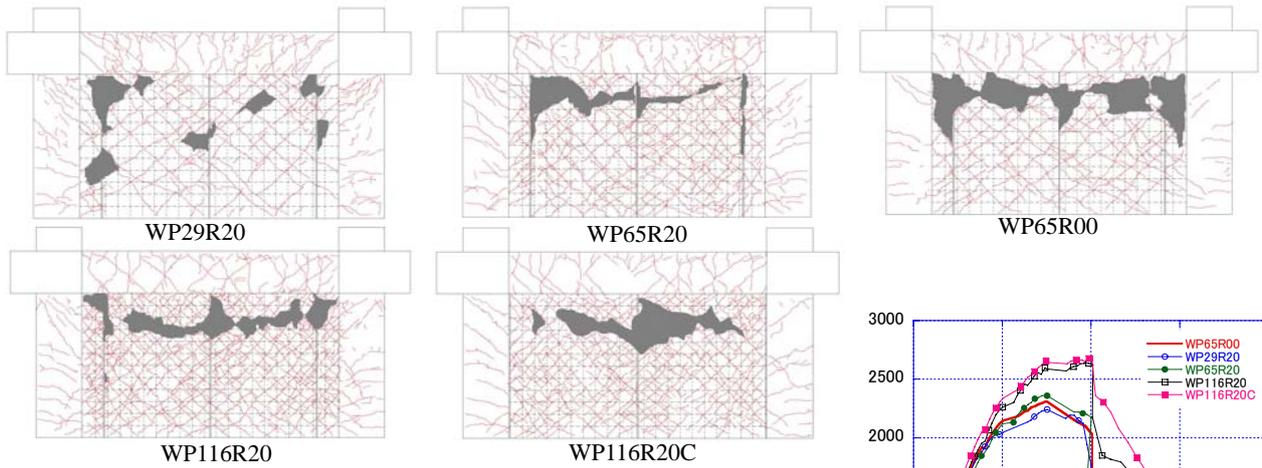


図-1 2 最終破壊性状

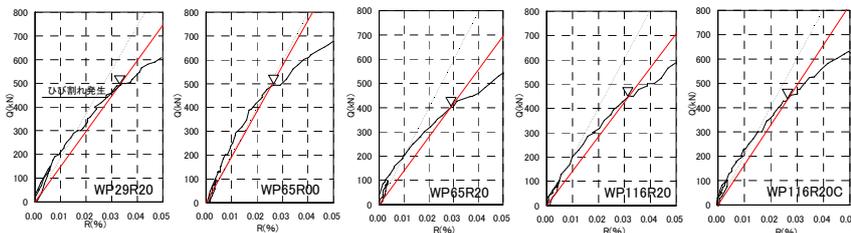


図-1 4 初期剛性（実線：実験値，点線：計算値）

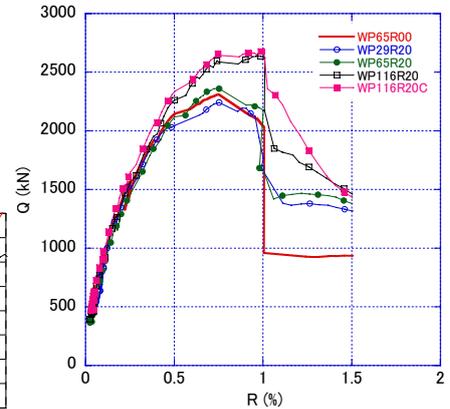


図-1 3 Q-R 関係の包絡線

WP65R00は計算値と実験値がほぼ一致したが、他の試験体では実験値が計算値を下回った。実験値の計算値に対する割合は0.72~0.90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比較した表を表-3に示す。既往のせん断強度式による計算値は修正荒川 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。修正荒川 min.式による計算値と実験値との比較では、実験値は計算値の1.52~1.74倍の比率となった。修正広沢 mean.式による計算値と実験値との比較では、実験値は計算値の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 (kN)	せん断強度 計算値			
		wQ_{su1} (kN)	$exQ_{max}/$ wQ_{su1}	wQ_{su2} (kN)	$exQ_{max}/$ 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

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

・修正広沢 mean.式

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

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、壁面の柱近傍に設けた目地にもひび割れが発生した。
- (2) 壁筋比が1.2%程度になると、目地内へのひび割れの誘導が困難になる。
- (3) 鉄筋挿入型ひび割れ制御工法を用いた耐力壁の水平力に対するせん断耐力は既往の計算式で安全側に評価できる。

謝辞

本研究は民間企業10社（淺沼組，熊谷組，五洋建設，大日本土木，東亜建設工業，東急建設，飛鳥建設，西松建設，NIPPO，長谷工コーポレーション）で実施した成果の一部をまとめたものである。関係者の皆さまに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010年版
- 2) 日本建築センター：建築物の構造関係技術基準解説書，2007年版
- 3) 森浩二，他：鉄筋コンクリート造耐力壁のひび割れ制御工法の開発：その3 ひび割れ誘発材を有する耐力壁の加力実験，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，pp.481-482，2009