

# 1. ひび割れ誘発材を有する RC 耐力壁の加力実験

## Loading Tests of RC Shear Walls with Bar Inducing Crack

森 浩二\* 松井 亮夫\*<sup>2</sup>  
池内 昌志\*<sup>2</sup> 井上 亮輔\*<sup>2</sup>

### 要 旨

ひび割れ誘発材として太径の異形鉄筋を使用した場合における、RC 耐力壁の構造性能への影響を調べるため、ひび割れ誘発材の有無と壁筋比をパラメータとした RC 耐力壁の加力実験を行った。実験の結果、ひび割れ誘発材の有無による初期剛性や破壊形式の違いは見られず、耐力の低下につながる現象も見られなかった。また、せん断強度式などの各種の設計評価式に対しては、安全側の評価を示しており、RC 耐力壁に対する既存の評価式に基づいた設計が可能であることが確認された。

キーワード：ひび割れ誘発目地／太径異形鉄筋／RC 耐力壁／加力実験

### 1. はじめに

RC 壁のひび割れ対策の一つに、ひび割れ誘発目地の設置が挙げられる。ひび割れ誘発目地は、目地による断面欠損により収縮ひび割れを誘発させるものであるが、耐力壁では、壁筋のかぶり厚さとの関係から目地深さを大きくすることができないため、ひび割れの誘発に必要な断面欠損率を確保することが困難である。したがって、目地位置に断面欠損材を設置することによって、断面欠損率を確保する手法がとられることが多い<sup>1)</sup>。

ひび割れ誘発目地の内部に埋設する断面欠損材は、断面欠損率を確保すると同時に、剛性が高く、かつ、耐力に悪影響を与えないことが要求される。本開発では、上記の条件を満たす材料として、太径の異形鉄筋を採用し、施工方法の検討と、収縮ひび割れ誘発の効果の検証を行ってきた<sup>2)</sup>。本報では、ひび割れ誘発材として異形鉄筋を耐力壁に埋設した場合の、耐力、剛性、その他の構造特性が、既存の耐力壁と同様に評価可能であることを確認するために行った架構実験の結果について述べる。

### 2. ひび割れ誘発目地の構造

図-1 に、本工法におけるひび割れ誘発目地を設置した耐力壁の水平断面図を示す。ひび割れ誘発目地部は、目地、壁縦筋、および、ひび割れ誘発材が一行に配置され、壁縦筋とひび割れ誘発材は各材料の断面中心が一直線となるようにジグで固定される。ひび割れ誘発材は、太径の異形鉄筋を用い、断面欠損率が不足する場合には、複数の異形鉄筋を配置して対応する。また、ひび割れ誘発材に使用する異形鉄筋は、通常の鉄筋と同様に、特別

な表面処理を行わないものを使用する。

なお、本工法におけるひび割れ誘発目地は、壁縦筋も断面欠損材として作用するとみなすため、断面欠損率の算定は式(1)により行う。

$$eR_{wd} = (\sum d_j + \sum d_{ws} + \sum d_t) / t_w \quad (1)$$

$eR_{wd}$  : 断面欠損率

$\sum d_j$  : 目地深さの総和 (mm)

$\sum d_{ws}$  : 壁縦筋の径の総和 (mm)

$\sum d_t$  : ひび割れ誘発材の径の総和 (mm)

$t_w$  : 壁厚 (mm)

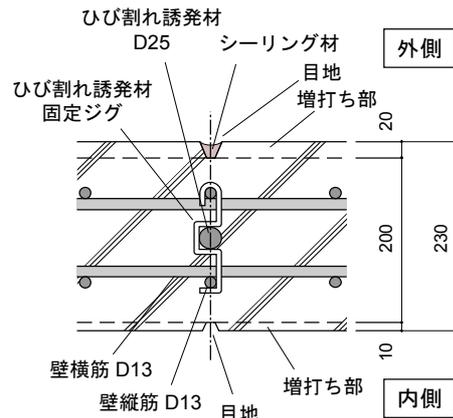


図-1 ひび割れ誘発目地の構造 (例)

\*技術研究所構造研究グループ \*<sup>2</sup>大阪本店建築部技術グループ

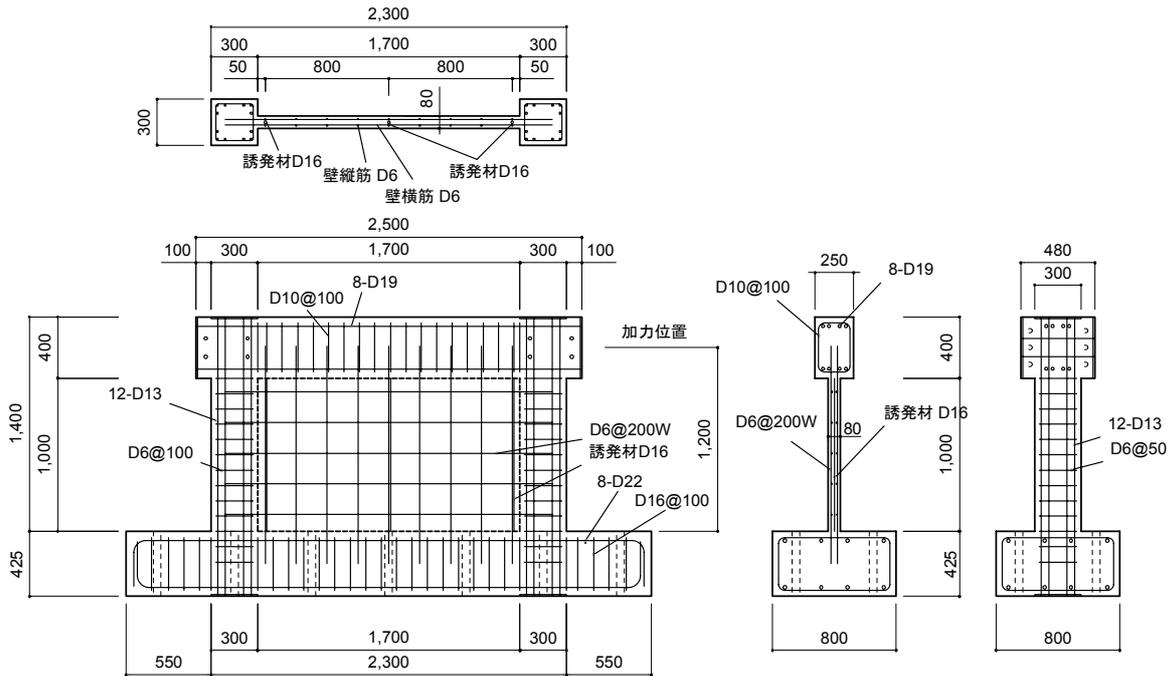


図-2 試験体図 (WP40R20)

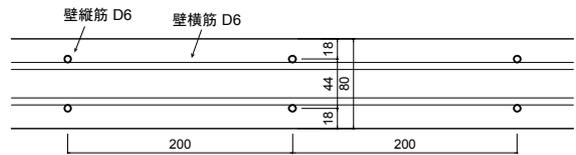
### 3. 実験概要

#### 3.1 試験体

柱スパン 6m の耐力壁に対し、縮尺率 1/3 相当として 1 層 1 スパンの RC 造耐震壁試験体を製作した。コンクリートの設計基準強度 ( $F_c$ ) は  $36\text{N/mm}^2$  とし、壁板の内法長さ×高さを  $1700\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 、壁厚を  $80\text{mm}$ 、柱断面を  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、梁断面を  $250\text{mm} \times 400\text{mm}$  とした。柱の主筋量は破壊形式がせん断破壊先行となるように定め、梁の主筋量は、壁のせん断耐力に対して梁主筋が引張降伏することのないように定めた。また、柱および梁のせん断補強筋量は RC 規準<sup>3)</sup>の規定によった。

実験のパラメータは、ひび割れ誘発材の有無および壁筋比とし、ひび割れ誘発材を配置しないものを標準試験体 (WP40R00) とし、壁筋比を 0.4% とした。ひび割れ誘発材を配置する試験体は 2 体 (WP40R20、WP80R20) とし、誘発材率 (構造壁厚に対するひび割れ誘発材径の比) が 20% となるよう、D16 の異形鉄筋を壁の中央と、両柱際近辺の壁縦筋位置 (柱際から 50mm) に合わせて配置し、スペーサーで固定した。壁筋は全試験体とも D6 の複筋配置とし、壁筋間隔 200mm (壁筋比 0.4%) を 2 体 (WP40R00、WP40R20)、壁筋間隔 100mm (壁筋比 0.8%) を 1 体とした。なお、壁縦筋とひび割れ誘発材との鉄筋あき確保のため、壁縦筋を外側とした。

WP40R00 (壁筋比0.4%, 誘発材率0%, 総断面欠損率15%)



WP40R20 (壁筋比0.4%, 誘発材率20%, 総断面欠損率35%)



WP80R20 (壁筋比0.8%, 誘発材率20%, 総断面欠損率35%)



図-3 試験体壁断面図

試験体の構造諸元を表-1に、鉄筋とコンクリートの力学的性質を表-2に、試験体の形状とひび割れ誘発材を図-2、図-3に示す。

表-1 試験体諸元

(a) 共通事項

部材	断面 b×D (mm)	主筋	$\rho_g$ (%)	せん断 補強筋	$\rho_w$ (%)
側柱	300×300	12-D13 (SD295A)	1.69	2-D6@100 (SD295A)	0.21
加力梁	250×400	8-D19 (SD345)	2.29	2-D10@100 (SD295A)	0.57

(b) 試験体一覧

試験体	壁厚 t (mm)	壁筋 (縦・横)	壁筋比 $\rho_s$ (%)	ひび割れ 誘発材	誘発材 率*1 (%)	総断面 欠損率*2 (%)
WP40R00	80	D6@200W (SD295A)	0.4	—	0	15
WP40R20				3-D16	20	35
WP80R20		D6@100W (SD295A)	0.8			

\*1 壁厚に対するひび割れ誘発材の径の比

\*2 壁厚に対するひび割れ誘発材の径と壁縦筋の径の和の比

表-2 材料試験結果

(a) 鉄筋

部位	呼び径	種別	降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
柱主筋	D13	SD295A	355	490	1.86
梁あばら筋	D10	SD295A	380	517	1.85
柱帯筋、壁筋	D6	SD295A	371	514	2.04
ひび割れ誘発材	D16	SD295A	340	494	1.84

(b) コンクリート

試験体	圧縮強度 $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_c$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
WP40R00	36.7	2.69	2.96
WP40R20	37.8	2.40	2.87
WP80R20	39.4	2.50	2.93

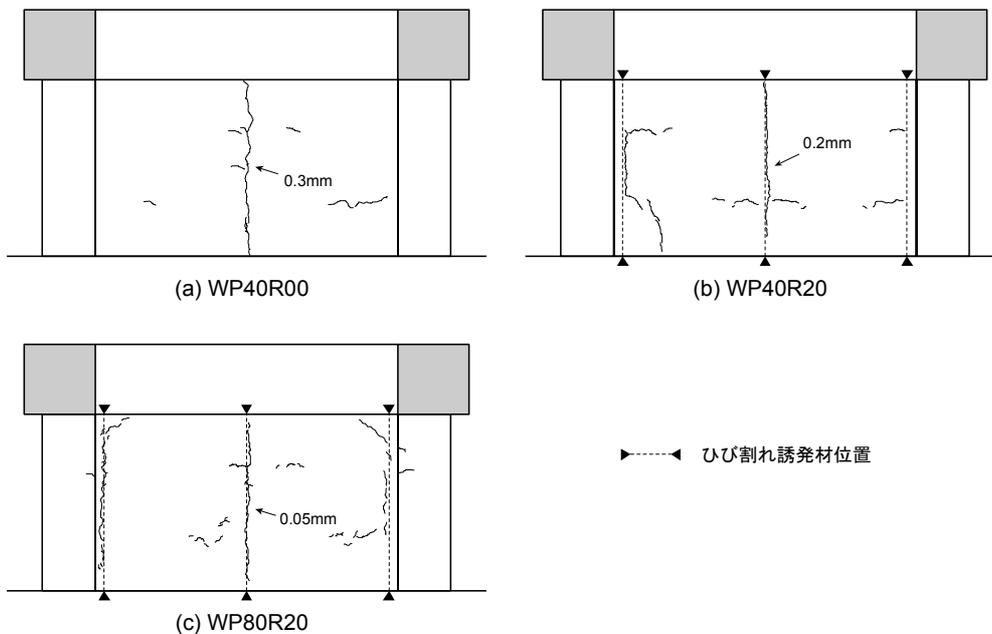


図-4 収縮ひび割れ発生状況

### 3.2 収縮ひび割れ発生状況

試験体のコンクリート打設後、材齢3日で脱型し、乾燥収縮によるひび割れの発生状況を観察した。材齢10日で試験体 WP40R20 の壁中央のひび割れ誘発材設置箇所に縦方向の収縮ひび割れが発生した。その後、材齢13日で WP40R00 の壁中央部に、材齢14日で WP80R20 の壁中央のひび割れ誘発材位置にそれぞれ収縮ひび割れが発生した。

載荷直前(材齢6~7週)のひび割れ発生状況を図-4に示す。ひび割れ誘発材を設置していない WP40R00(図

4(a))では収縮ひび割れの発生は壁中央1箇所のみで、ひび割れ幅は0.3mmであったのに対し、ひび割れ誘発材を設置した WP40R20(図-4(b))ではひび割れ誘発材位置の2箇所に収縮ひび割れが発生し、ひび割れ幅は0.2mmであった。一方、ひび割れ誘発材を設置し、壁筋比が0.8%の WP80R20(図-4(c))では、収縮ひび割れは3箇所に発生し、ひび割れ幅は0.05mmとなっており、ひび割れ誘発材と壁筋によって収縮ひび割れが分散し、ひび割れ幅が小さくなっていることが確認された。

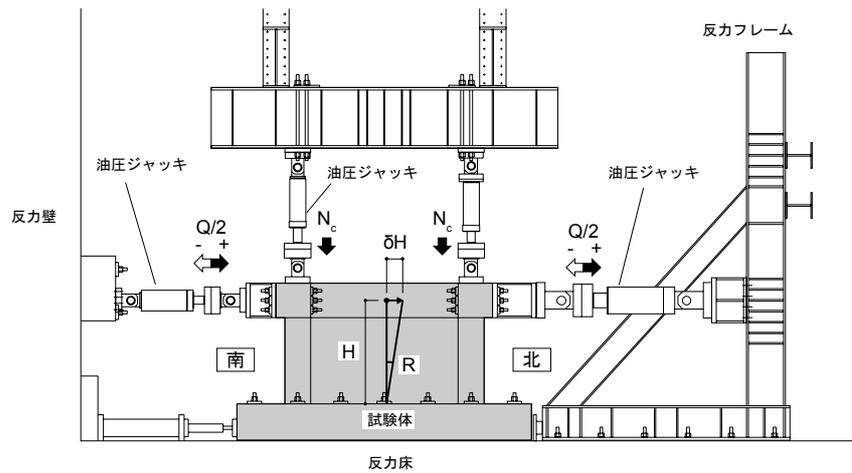


図-5 加力装置

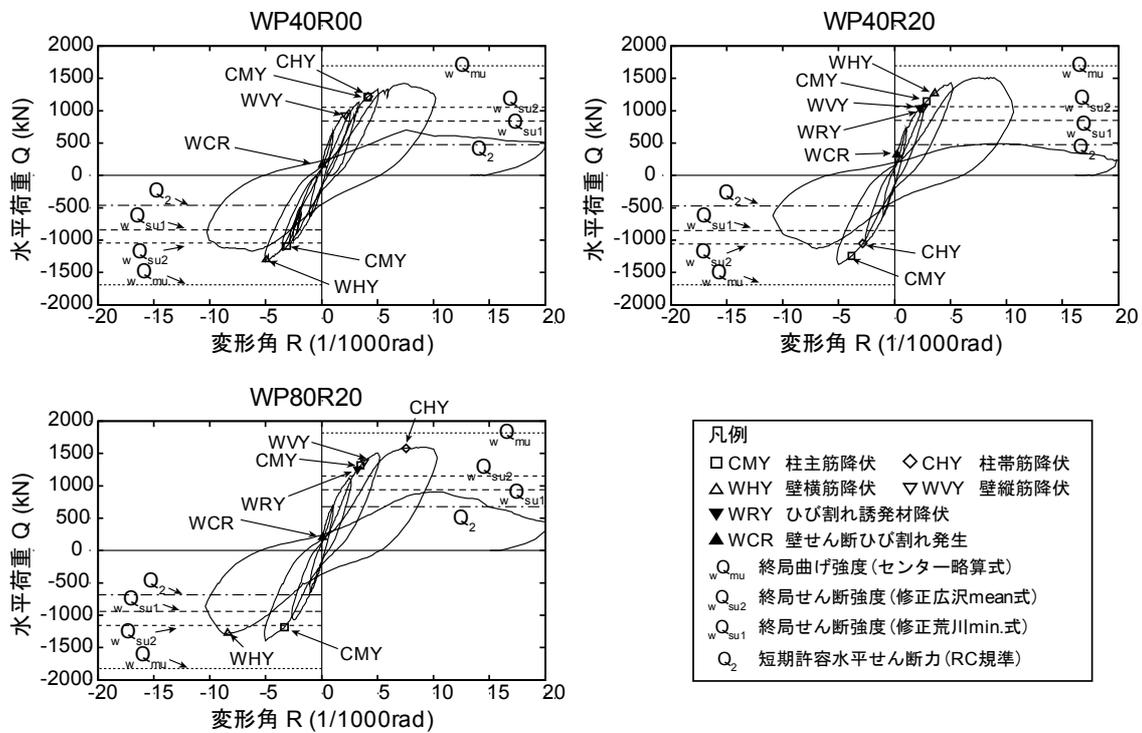


図-6 荷重変形関係

### 3.3 加力方法

加力装置を図-5に示す。試験体両側柱の頂部に一定の軸方向力  $N_c$  ( $2N_c=784\text{kN}$ 、柱軸力比 0.12) を加えた状態で、上部梁の中心軸に試験体両側から水平力を加えた。載荷履歴は図中左方向載荷を正とする正負交番載荷とし、上部梁中央の水平変位に基づく変形角 ( $R = \delta H / H$ 、 $\delta H$ : 壁脚部に対する加力点位置の水平変形量、 $H$ : 壁脚部から加力点位置の高さ) に対して、 $R = \pm 1/1000$ 、 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$  の各1回の載荷を行った後、正加力方向に  $1/50$  まで単調載荷を行った。

### 3.4 実験経過

荷重変形関係を図-6に、最終ひび割れ状況を図-7に、各種強度と耐力計算値の一覧を表-3に示す。試験体の実験経過はほぼ共通しており、 $R=0.1\sim 0.3/1000$  で壁にせん断ひび割れが発生し、 $R=0.5\sim 1.5/1000$  で柱にせん断ひび割れが発生した。 $R=3\sim 4/1000$  で柱主筋の引張降伏後、 $R=7\sim 10/1000$  で実験時最大強度となり、その後、壁横筋に沿ったひび割れが拡大し、耐力が大きく低下した。また、最終破壊モードは壁板のスリップ破壊となった。以下に各試験体実験経過の詳細を述べる。

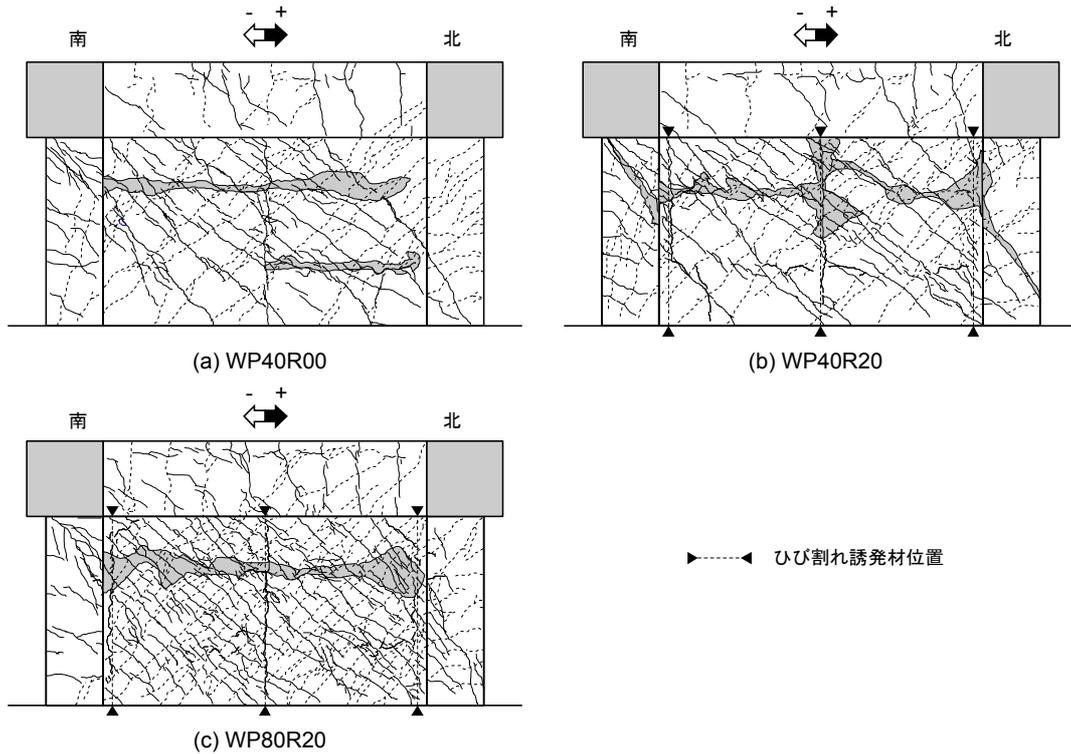


図-7 最終ひび割れ状況

表-3 試験体耐力一覧

試験体	初期剛性		ひび割れ荷重		最大荷重	曲げ強度	せん断強度	
	実験値 $K_{exp}$ (kN/mm)	計算値 $K_{cal}$ (kN/mm)	実験値 (kN)	$V_c$ (kN)	$Q_{max}$ (kN)	${}_w Q_{mu}$ (kN)	${}_w Q_{su1}$ (kN)	${}_w Q_{su2}$ (kN)
WP40R00	1498	1564 (0.96)	160	431 (0.37)	1418	1729 (0.82)	842 (1.68)	1047 (1.35)
WP40R20	1107	1579 (0.70)	321	436 (0.74)	1509	1729 (0.87)	853 (1.77)	1063 (1.42)
WP80R20	1451	1601 (0.91)	204	442 (0.46)	1599	1886 (0.85)	939 (1.70)	1155 (1.38)

( ) 内の数値は計算値に対する実験値の比を表す

$K_{cal}$  : 弾性剛性計算値、 $V_c$  : せん断ひび割れ強度、 ${}_w Q_{mu}$  : 終局曲げ強度時せん断力、

${}_w Q_{su1}$  : 修正荒川 min. 式 (式 (2))、 ${}_w Q_{su2}$  : 修正広沢 mean 式 (式 (3))

修正荒川 min. 式

$${}_w Q_{su1} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot D) + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh} + 0.1 \sigma_0} \right\} \cdot t_e \cdot j \quad (2)$$

修正広沢 mean 式

$${}_w Q_{su2} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh} + 0.1 \sigma_0} \right\} \cdot t_e \cdot j \quad (3)$$

$t_e$  : 等価壁厚(mm)、 $D$  : 耐力壁の全長(mm)、 $j$  :  $7/8 \cdot d$  (mm)、 $p_{te}$  : 等価引張鉄筋比 (%)、

$d$  :  $D - D_c/2$  ( $D_c$  は圧縮側柱のせい) (mm)、 $p_{wh}$  : 等価水平せん断補強筋比、

$\sigma_{wh}$  : 水平せん断補強筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_0$  : 全断面積に対する平均軸方向応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、

$M/(Q \cdot D)$  : シアスパン比

その他特記なき記号は技術基準解説書<sup>4)</sup>による

(1) WP40R00 (ひび割れ誘発材なし、壁筋比 0.4%)

変形角  $R=0.10/1000$  で南側柱頭部付近の壁に  $45^\circ$  方向のせん断ひび割れが発生し、 $R=0.88/1000$  で梁北側に引張ひび割れが発生した。 $R=2.5/1000$  までに南側柱にせん断ひび割れと曲げひび割れが発生し、壁の対角線方向にせん断ひび割れが発生し、壁の縦筋が降伏した。変形角  $R=5/1000$  までの载荷の過程で、 $R=3/1000$  の時点でスタブにすべりが生じたため、一旦除荷した後、再载荷を行った。その後、 $R=4.2/1000$  で南側の柱脚部の引張側主筋、柱頭部のせん断補強筋が降伏した。 $R=7.3/1000$  で最大荷重となり、 $R=10/1000$  まで荷重が徐々に低下した。 $R=10/1000$  では壁横筋に沿ったコンクリートの剥離が観察された。 $R=10/1000$  の繰り返しで壁横筋に沿った壁板のずれ変形とコンクリートの剥離が顕著になり、耐力は大きく低下した。最終破壊モードは柱のせん断破壊および壁板のスリップ破壊であり、スリップ部周辺はコンクリートが剥落し、壁縦筋の局部変形が観察された。

(2) WP40R20 (ひび割れ誘発材有り、壁筋比 0.4%)

変形角  $R=0.26/1000$  で壁中央上部に  $45^\circ$  方向のせん断ひび割れが発生し、 $R=0.88/1000$  で梁北側に引張ひび割れが、 $R=0.99/1000$  で南側柱にせん断ひび割れが発生した。 $R=2.5/1000$  までに壁の対角線方向にせん断ひび割れが、南側柱に曲げひび割れが発生し、壁筋とひび割れ誘発材が降伏した。 $R=8.6/1000$  で最大荷重となり、その後荷重が大きく低下した。 $R=10/1000$  では壁横筋に沿ったコンクリートの剥離が観察された。 $R=10/1000$  の負荷側では標準試験体と同様に、壁横筋に沿った壁板のずれ変形およ

びコンクリートの剥落が顕著になったほか、壁中央部のひび割れ誘発材に沿ったコンクリートの剥離が観察された。最終破壊モードは、柱のせん断破壊および壁板のスリップ破壊であり、スリップ部周辺でコンクリート剥離や壁縦筋の局部変形が観察されたほか、中央部ひび割れ誘発材の局部変形とその周辺のコンクリートの剥離が観察された。

(3) WP80R20 (ひび割れ誘発材有り、壁筋比 0.8%)

変形角  $R=0.12/1000$  で南側柱付近の壁に  $45^\circ$  方向のせん断ひび割れが発生し、 $R=0.66/1000$  で梁北側に引張ひび割れが発生した。 $R=2.5/1000$  までに南側柱にせん断ひび割れと曲げひび割れが発生した。 $R=3\sim 4/1000$  で柱主筋、壁縦筋、ひび割れ誘発材が降伏した。 $R=9.4/1000$  で最大荷重となり、 $R=10/1000$  で壁横筋に沿って  $45^\circ$  方向の細かいひび割れが多数発生しており、負荷側で壁横筋に沿った位置にコンクリートの剥離が観察された。最終破壊モードは、柱のせん断破壊および壁板のスリップ破壊であり、スリップ部周辺でコンクリート剥離や壁縦筋の局部変形が観察された。他の試験体とは異なり、壁の対角線方向のひび割れは発生しなかった。

3.5 包絡線

試験体の荷重変形関係の包絡線を図-8に示す。荷重は表-3に示した修正広沢 mean 式<sup>4)</sup>によるせん断強度計算値  $wQ_{su2}$  によって基準化した。修正荒川 min. 式<sup>4)</sup>によるせん断強度計算値  $wQ_{su1}$  に対する  $wQ_{su2}$  の比、 $wQ_{su2}/wQ_{su1}$  は全試験体で 1.23~1.25 とほぼ一定であり、基準化に用いるせん断強度計算値として  $wQ_{su1}$  を用いた場合と  $wQ_{su2}$

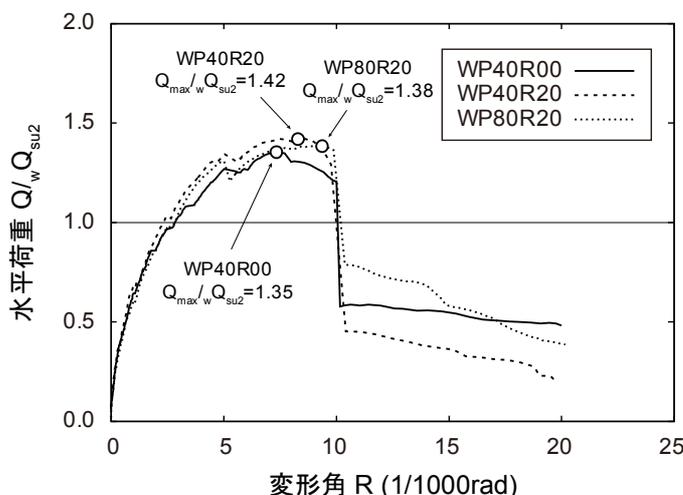
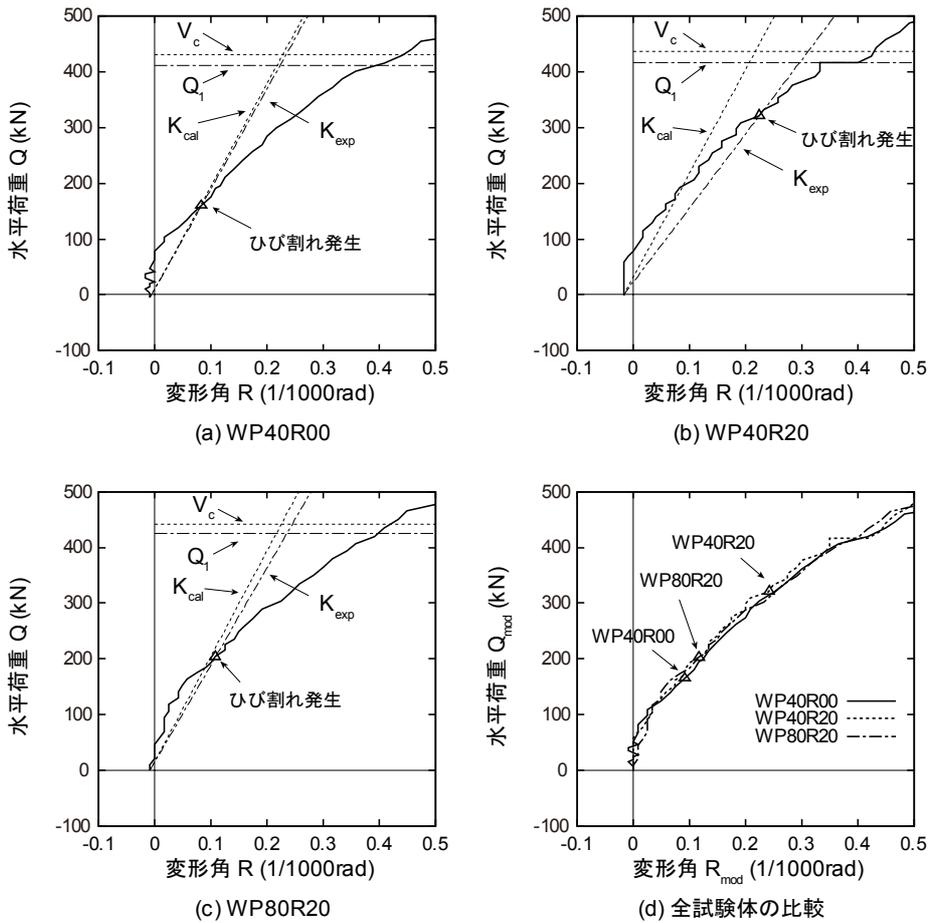


図-8 荷重変形関係包絡線



$K_{exp}$  初期剛性実験値（ひび割れ発生時の割線剛性）  
 $K_{cal}$  初期剛性計算値  
 $Q_1$  許容水平せん断力（RC 規準改定案<sup>5)</sup>）  
 $V_c$  ひび割れ強度（靱性指針<sup>6)</sup>）  
 $R_{mod}$ ,  $Q_{mod}$  軸力導入後を原点として修正した変形角、荷重

図－9 初期剛性

を用いた場合で、荷重変形関係の特徴に大きな違いはない。

図－8によれば、変形角  $R=2.5/1000$  までの包絡線形状はほぼ同一で、ひび割れ誘発材の有無や壁筋比の違いによる差がないことがわかる。 $R=5/1000$  付近では標準試験体 WP40R00 にスタブのすべりによる追加の除荷載荷が加わった影響によって、剛性がやや小さくなっているが、最大荷重時までの包絡線形状はおおむね相似である。最大荷重時の変形角は  $R=7\sim 10/1000$  と若干のばらつきが見られるものの、耐力が大きく低下する  $R=10/1000$  までは WP40R20、WP80R20 とともに、標準試験体の WP40R00 の荷重を上回っている。これは、壁のスリップ破壊に対してひび割れ誘発材がダボとして作用したことに起因すると考えられる。

### 3.6 初期剛性

試験体の初期の荷重変形関係を図－9 (a)～(c)に示す。図中には、初期剛性計算値  $K_{cal}$ 、初期剛性実験値  $K_{exp}$ 、目視によるひび割れ発生時点  $\Delta$  をあわせて示した。初期剛性実験値  $K_{exp}$  は、各試験体の加力時におけるひび割れ発生時点での割線剛性としている。また、図中に RC 規準改定案<sup>5)</sup>による許容水平せん断力  $Q_1$ 、靱性指針<sup>6)</sup>によるひび割れ強度  $V_c$  を示した。図－9 (d)では、各試験体の軸力導入後の状態を基に荷重変形関係の原点補正を行ったものを示した。

ひび割れ発生時の荷重は、いずれも許容水平せん断力  $Q_1$  を下回っており、規準などで仮定されるよりも早期にひび割れが生じていることがわかる。また、 $Q_1$  に対する実験値の比は  $0.37\sim 0.74$ 、初期剛性の実験値に対する計算

値の比は 0.70~0.98 と、ひび割れ発生時期とその割線剛性に試験体間のばらつきが見られるが、図-9 (d)に見られるように荷重変形関係の形状には差がないため、ひび割れ誘発材や壁筋比の影響ではなく、ひび割れ観察のばらつきによる影響であると考えられる。

#### 4. まとめ

ひび割れ誘発材の有無をパラメータとした RC 造耐力壁についての実験結果から、以下の知見が得られた。

- 1) 破壊モードは、ひび割れ誘発材の有無によらず、いずれの試験体も壁板のスリップ破壊となった。試験体 WP40R20 では、ひび割れ誘発材の周辺のコングリートの剥落が生じたが、壁板のスリップ変形に伴うひび割れ誘発材の局部変形によるものであり、破壊モードへの影響は見られない。
- 2) 最大荷重時せん断力は、いずれの試験体もせん断強度計算値を上回っており、安全側の評価となった。修正広沢 mean 式に対する実験値の比は、ひび割れ誘発材を有する試験体 WP40R20 では 1.42 と、標準試験体の 1.35 に比べてやや高くなっている。この要因として、ひび割れ誘発材のダボ作用が考えられる。
- 3) 初期剛性は、いずれの試験体もほぼ一致しており、ひび割れ誘発材の設置による影響は見られない。

これらの知見から、ひび割れ誘発材の設置が耐力壁の性状に与える影響は小さく、一般の RC 造耐力壁と同様の評価が可能であると考えられる。

#### [参考文献]

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説、2006
- 2) 山崎順二、松井亮夫、佐藤尚隆、井上亮輔：鉄筋コンクリート壁のひび割れ誘発目地工法の開発、浅沼組技術研究所報、No.19、pp.51-56、2007
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1999
- 4) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：建築物の構造関係技術基準解説書、2007
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準の改定について、2008 年度日本建築学会大会構造部門 (RC 構造) パネルディスカッション資料、2008
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1997