

ひび割れ誘発材を有する耐震壁に関する検討

A Study of Shear Wall with Contraction Joint to Control the Shrinkage Crack

田野 健治 KENJI TANO

建築生産計画部 松井 幸一郎 KOUICHIROU MATSUI

小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA

本報告では、耐震壁の収縮ひび割れの制御に有効なひび割れ誘発材の選定結果と、選定したひび割れ誘発材を用いた耐震壁の水平加力実験結果を記述している。収縮ひび割れ試験により、ひび割れ誘発材として壁厚に対して約 40%相当の幅を持つ平鋼が適当であることがわかった。また、ひび割れ誘発材として平鋼を採用した耐震壁は、ひび割れ誘発材のない耐震壁とほぼ同様な耐震性能を有することを確認した。

キーワード：耐震壁、ひび割れ誘発材、収縮ひび割れ試験、水平加力実験

This report describes the selection of the contraction joint to control shrinkage crack and experimental results of a loading test of shear wall with the contraction joint. As a result of dry shrinkage cracking test, flat bar with about 40% of wall thickness in width turned out to be effective in controlling shrinkage crack. And as a result of a loading test of shear wall with contraction joint, it was confirmed that there were no different between the seismic performance of the wall with the contraction joint and that of without joint.

Key Words: Shear Wall, Contraction Joint, Dry Shrinkage Cracking Test, Loading Test

1. はじめに

建物の外壁では、柱・梁により周辺が拘束されているために、乾燥収縮や気温の変動などによりひび割れが多数発生し、美観を損ねるだけでなく漏水や耐久性の低下を招くことがある。その対処方法の一つとして、一般的にはひび割れの分散を防ぎ、ひび割れの集中を図る目的で収縮目地を設けることが行われている。参考に図-1に「鉄筋コンクリート造建物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」¹⁾に示されている外壁の収縮目地の一例を示す。しかし、収縮目地の設置のみでは、ひび割れの分散抑止・集中効果に乏しく、現状の外壁には無数のひび割れの発生が報告されている。この問題を受け、本検討では、従来型の収縮目地よりもひび割れ集中率が高く、経済的なひび割れ誘発材の選定を行うこととした。

一方、耐震壁などにひび割れ誘発材を積極的に取り入れることは、有効断面積の減少という観点から望ましくないとされており、ひび割れ誘発材を有する耐震壁の耐震性能が報告されている^{2)~4)}。本報告においても同様に、収縮ひび割れ試験によって選定したひび割れ誘発材

を有する耐震壁の水平加力実験を行い、耐震性能を確認することとした。

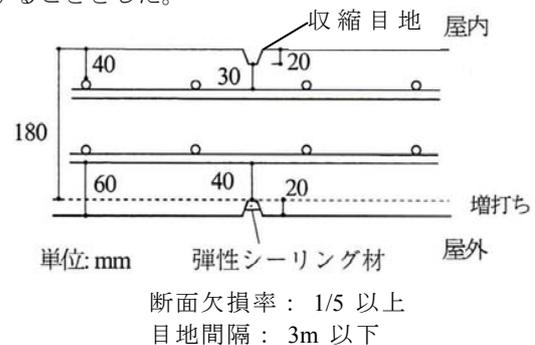


図-1 外壁の収縮目地の例¹⁾

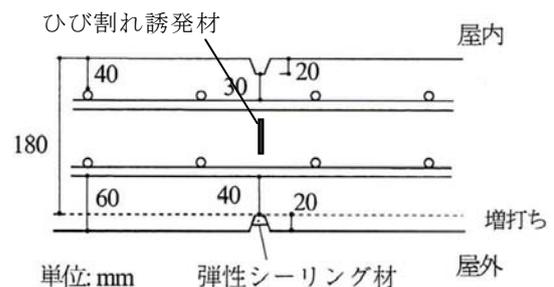


図-2 ひび割れ誘発材の設置例 (例: 平鋼)

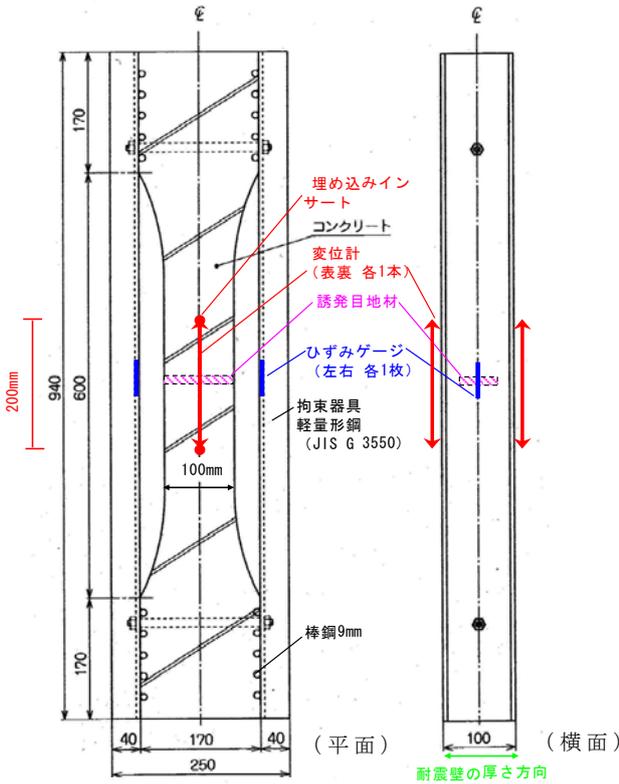
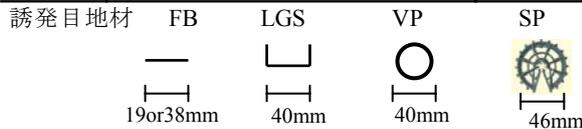


図-3 試験体形状および計測位置

表-1 収縮ひび割れ試験体一覧

試験体	誘発材の仕様	断面欠損率 (%)
No. 1 -1 -2	平鋼 19×3.0mm (FB19)	19
No. 2 -1 -2	平鋼 38×3.0mm (FB38)	38
No. 3 -1 -2	軽量形鋼 40×20×1.6mm (LGS)	40
No. 4 -1 -2	塩ビ管 φ40mm (VP)	40
No. 5 -1 -2	プラスチック製ドーナツ形スペーサー (SP)	46
No. 6 -1	目地なし	0



2. 収縮ひび割れ試験概要

図-2にひび割れ誘発材が平鋼の場合の設置例を、図-3に収縮ひび割れ試験に用いた試験体の形状および計測位置を、写真-1に型枠およびひび割れ誘発材設置状況を、写真-2に計測状況を示す。試験体は JIS A 1151 「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」を参考に製作した。試験体中央の L=600mm 区間では断面が端部から徐々にくびれ中央の最小断面位置では 100×100 mm の矩形となっており、その中央部分に断面欠損率 (コンクリート断面積 100×100mm に対するひび割れ誘



写真-1 型枠およびひび割れ誘発材設置状況



写真-2 計測状況

発材の面積の比) および仕様を変えたひび割れ誘発材を配置している。また、コンクリートの両側面には軽量形鋼を配し、軽量形鋼とコンクリートとの接触面には 9mm の棒鋼を溶接してコンクリート試験体の収縮を拘束している。コンクリート設計基準強度はすべての試験体で $F_c = 36\text{N/mm}^2$ とし同一バッチのコンクリートを打設した。付録 1 にコンクリートの配合報告書を示す。

計測項目は、試験体両面の 200mm 区間における材軸方向の変位および軽量形鋼の中央位置の材軸方向のひずみおよび室内の温度と湿度である。表-1に収縮ひび割れ試験体一覧を示す。試験体に設置するひび割れ誘発材の種類は平鋼 幅 19×厚さ 3.0mm (以下, FB19), 平鋼 38×3.0mm (以下, FB38), 軽量形鋼 40×20×1.6mm (以下, LGS), 塩ビ管 直径 40mm (以下, VP), プラスチック製のドーナツ形スペーサー 直径 100mm (以下, SP) の 5 種類である。No.6-1 は比較のために、ひび割れ誘発材を設けない試験体である。試験体は No.6-1 を除き、各ひび割れ誘発材に対して 2 体ずつ製作し、総数は 11 体である。計測は、試験体の底板および試験体中央のくびれ部分の型枠を撤去した後のコンクリート材齢 7 日目に開始した。計測期間は、2007 年 10 月 18 日から同年 11 月 28 日である。試験場所は、施工試験建物の 1 階室内である。

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験日数 (日)	材齢 (日)	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 ($\times 10^4$)N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
0	7	32.5	2.67	2.5
7	14	36.0	2.91	2.8
14	21	38.5	2.90	3.6
21	28	38.1	2.96	3.4
78	85	44.6	3.01	3.7

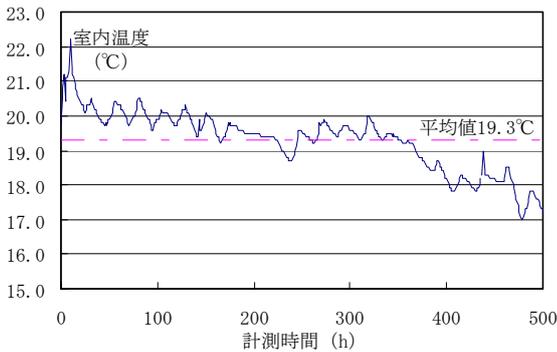


図-4 コンクリート打設時からの経過時間と室内温度

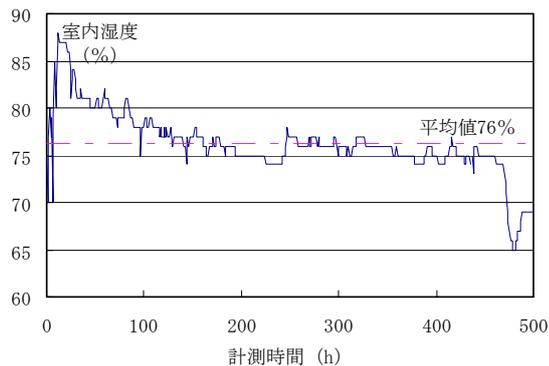


図-5 コンクリート打設時からの経過時間と室内湿度

3. 収縮ひび割れ試験結果

表-2に収縮ひび割れ試験のコンクリートの材料試験結果を、図-4にコンクリート打設時からの経過時間と室内温度の関係を、図-5に同様に経過時間と室内湿度の関係をひび割れの発生した500時間までについて示す。コンクリート強度は強度の発現が十分になされたと考えられる材齢85日において圧縮強度44.6N/mm²、割裂強度3.7N/mm²であった。後述するが、試験体にひび割れが生じたのはコンクリート材齢10~21日であるので、表-2から圧縮強度、割裂強度ともに強度発現段階であった。計測期間は秋季から冬季にかけてであったので、室内温度は徐々に低下しており、平均で19.3度であった。湿度は計測500時間以降でほぼ安定しており、平均で76%であった。

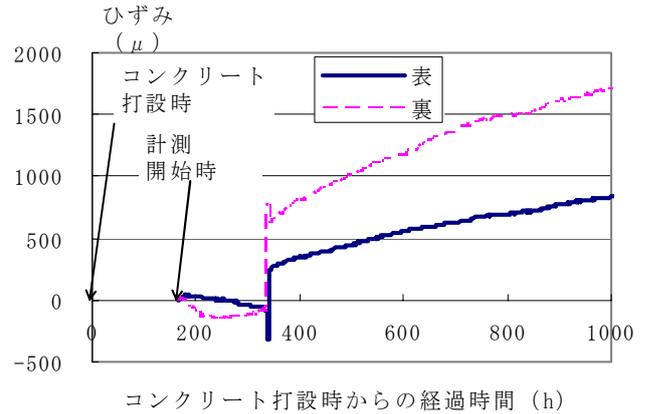


図-6 コンクリート部のひずみの経時変化 (No.2-1)

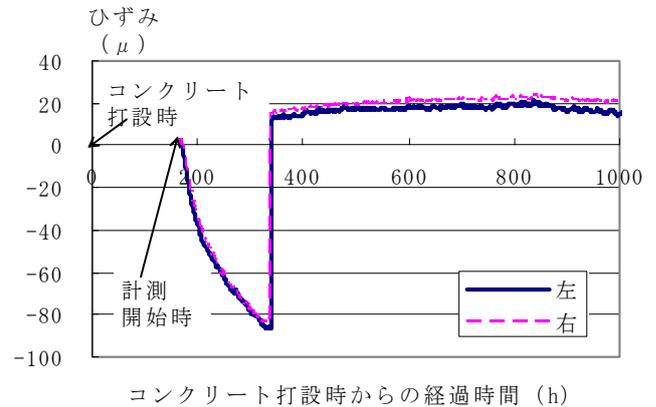


図-7 軽量形鋼のひずみの経時変化 (No.2-1)

表-3 収縮ひび割れ試験結果一覧

試験体	目地材	断面欠損率 (%)	ひび割れ箇所	ひび割れ発生時間 (h)	ひび割れ発生時鋼材ひずみ (μ)
No. 1-1	FB19	19	目地部外	484	-110
No. 1-2			目地部外	382	-95
No. 2-1	FB38	38	目地部	338	-84
No. 2-2			目地部	294	-82
No. 3-1	LGS	40	目地部外	415	-91
No. 3-2			目地部	347	-89
No. 4-1	VP	40	目地部	317	-79
No. 4-2			目地部外	298	-72
No. 5-1	SP	46	目地部	249	-65
No. 5-2			目地部	223	-49
No. 6-1	目地なし	0	-	491	-107

一例として図-6にNo.2-1試験体のコンクリート部中央200mm間の平均ひずみの経時変化を、同様に図-7に軽量形鋼のひずみの経時変化を示す。なお、図中のひずみはプラスが引張ひずみ、マイナスが圧縮ひずみである。コンクリートのひずみは、計測開始後、徐々に圧縮側に大きくなり、ひび割れの発生に伴い引張側に転じ、その後は、収縮によるひび割れの拡大とともに引張ひずみが大きくなっている。鋼材のひずみは、計測開始後、コンクリートと同様に徐々に圧縮側に大きくなり、ひび割れの発生に伴い開放され、その後は一定の引張りひずみを生じている。一定となった引張ひずみは、コンクリート打設時から計測開始時まで発生したコンクリートの収縮ひずみである。なお、ほかの試験体もひずみの挙動は、ほぼ同様な傾向であった。

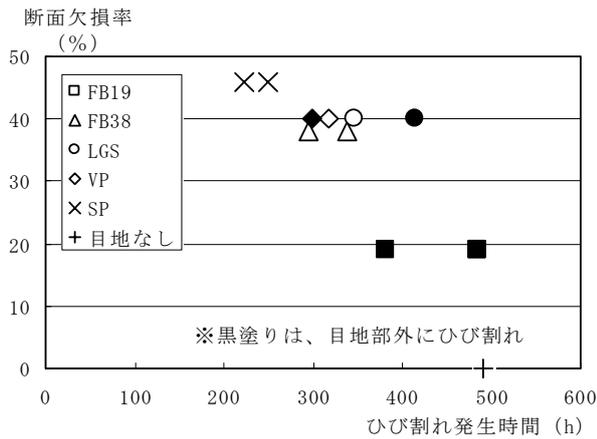


図-8 ひび割れ発生時間と断面欠損率の関係

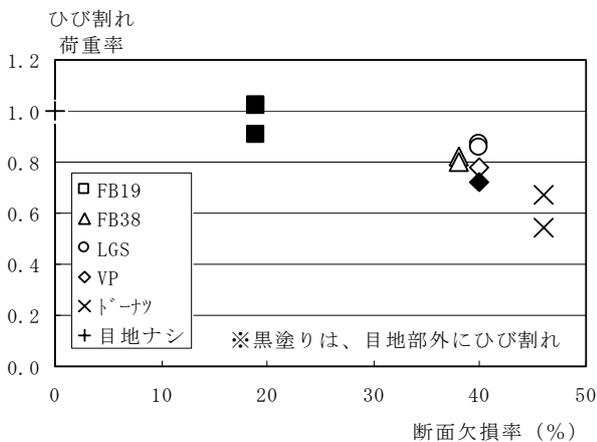


図-9 断面欠損率とひび割れ荷重率の関係

表-3に収縮ひび割れ試験結果一覧を示す。ひび割れの発生時間については、試験体の目視と軽量形鋼のひずみを合わせて判断した。ひび割れは、ひび割れ誘発材の位置に発生する場合もあるが、計測用の埋め込みインサート位置など、目地部外にも生じる場合があった。その傾向は、断面欠損率が小さいものほど顕著であった。図-8にひび割れ発生時間と断面欠損率の関係を示す。おおむね、断面欠損率が大きいほどひび割れ発生時間が早い関係にあることがわかる。また、断面欠損率40%程度で異なるひび割れ誘発材を用いたFB38, LGS, VPの試験体を比較すると、LGSを用いたNo.3のひび割れ発生時間がほぼ同様な断面欠損率のFB38を用いたNo.2, VPを用いたNo.4と比べて若干遅い。このことはLGSがコの字の形状であり、ほかの2試験体と比べて誘発目地材とコンクリートとの接地面積が大きいことによるのではないかと推測される。

図-9に断面欠損率とひび割れ荷重率の関係を示す。ここで示すひび割れ荷重率とは、目地なしの試験体のひび割れ発生時の鋼材ひずみを基準にして、各々の試験体の

表-4 水平加力試験体一覧

試験体	ひび割れ誘発材	その他
No. 1	-	-
No. 2	平鋼 (幅26mm, 厚さ3mm)	-
No. 3	平鋼 (幅26mm, 厚さ3mm)	横筋付着除去区間50mm

共通: $F_c=30N/mm^2$, 柱軸力比 0.1

表-5 水平加力試験体の材料試験結果

(コンクリート)

試験体	材齢 日	圧縮強度 N/mm^2	弾性係数 $(\times 10^4) N/mm^2$	割裂強度 N/mm^2
No. 1	72	38.7	2.63	3.2

(鋼材)

部位	種類	断面積 mm^2	降伏点 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	弾性係数 $(\times 10^5) N/mm^2$	降伏ひずみ $\mu (\times 10^3)$	伸び %
壁筋	D6 (SD295)	32	402 [※]	546	1.96	4167 [※]	16.2
柱主筋	D16 (SD490)	199	375	556	1.97	1916	25.1
柱帯筋	D6 (SD295)	32	365 [※]	537	1.94	3927 [※]	24.3

※0.2%オフセット法

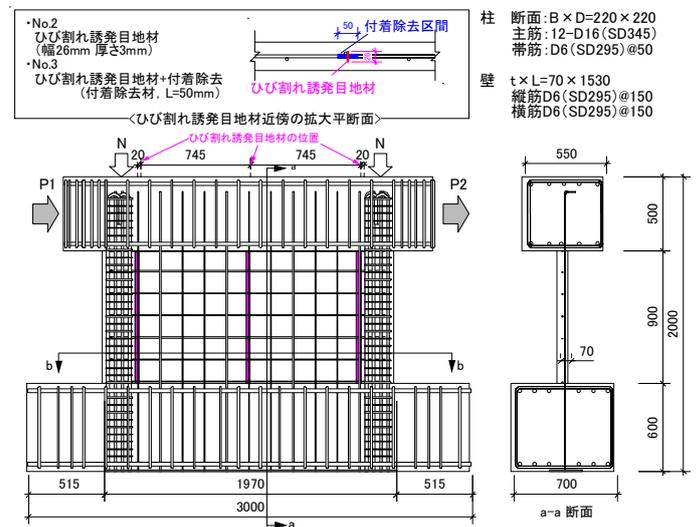


図-10 水平加力試験体の配筋およびひび割れ誘発材の詳細

ひび割れ発生時の鋼材ひずみの割合を表したものである。各試験体で使用している軽量形鋼は同種のもので、ひび割れ発生時の荷重の割合と同義である。ひび割れ荷重率は、目地部の断面欠損率が大きくなるほど、小さくなる傾向にある。つまり、断面欠損率が大きいほど、目地部にひび割れが生じやすいことを示している。以上の結果および経済性や施工性を考慮して、ひび割れ誘発材に平鋼 38×3.0mmを採用することとした。

4. 耐震壁の水平加力実験概要

収縮ひび割れ試験結果や経済性・施工性を参考に、平鋼 (FB) を用いた断面欠損率40%程度のひび割れ誘発目地材を設けることによって、耐震壁の収縮ひび割れの分散を抑制し、ひび割れを集中させる方策をとることとした。引き続き、採用したひび割れ誘発材を有する耐震

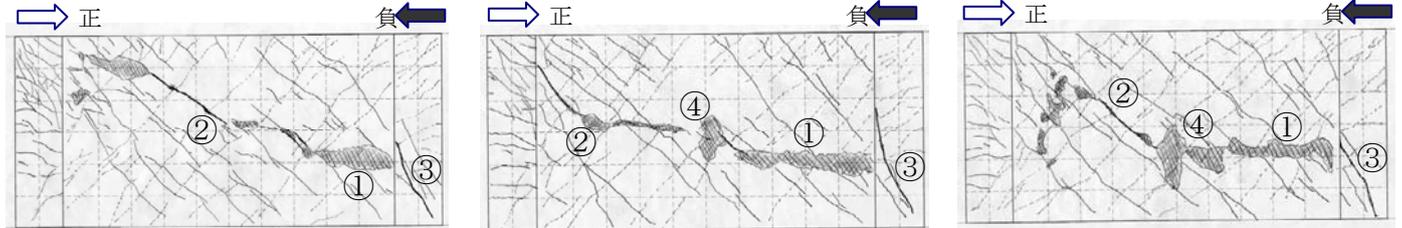


No.1 (ひび割れ誘発材なし)

No.2 (ひび割れ誘発材あり)

No.3 (誘発目地材 + 横筋付着除去)

図-11 加力前のひび割れ状況

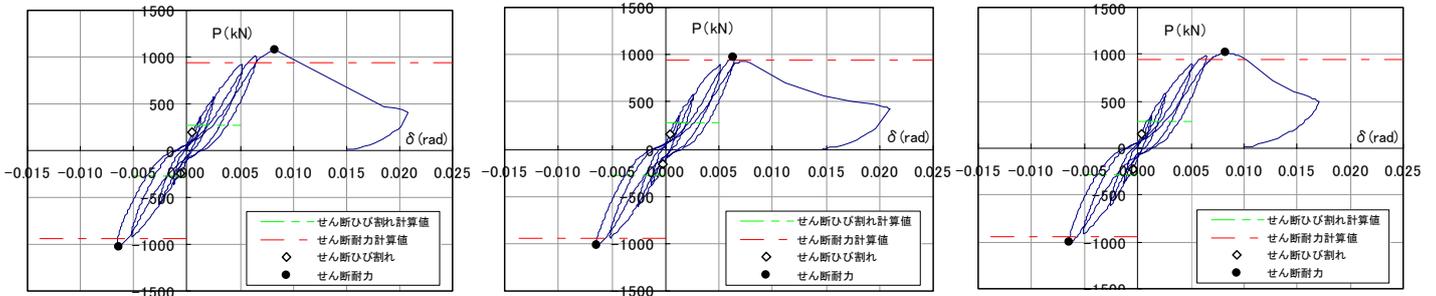


No.1 (ひび割れ誘発材なし)

No.2 (ひび割れ誘発材あり)

No.3 (誘発目地材 + 横筋付着除去)

図-12 最終ひび割れ状況



No.1 (ひび割れ誘発材なし)

No.2 (ひび割れ誘発材あり)

No.3 (誘発目地材 + 横筋付着除去)

図-13 荷重-変形角関係

壁の水平加力実験を行ったので、その結果について報告する。

表-4に水平加力試験体一覧を、表-5に水平加力試験体の材料試験結果を示す。また、図-10に水平加力試験体の配筋およびひび割れ誘発材の詳細を示す。試験体は総数3体であり、図-10に示すように1,750mmスパンの1層の耐震壁で、側柱断面は220×220mm、壁厚は70mm、壁内法高さは900mm、壁せん断補強筋比は2.05%、コンクリート設計基準強度30N/mm²はともに共通である。実験要因は、ひび割れ誘発材の有無、ひび割れ誘発目地を貫通する横筋の付着除去部の有無であり、No.1はひび割れ誘発目地を設けない試験体、No.2はひび割れ誘発材を設けた試験体、No.3はひび割れ誘発目地を設けて、さらにひび割れ誘発材を貫通する横筋の付着を一部除去した試験体である。No.3の横筋の付着の除去は、ひび割れ誘発後のひび割れの集中率を高くする効果を狙ったものである。

加力は、脚部を反力床に固定し、左右の柱に軸力比0.1 ($=0.1B \cdot D \cdot F_c$)の一定軸力N (142kN)を作用

させ、加力梁端部の一端に圧縮力P1を、他端にP1と同じ大きさの引張力P2を同時に加えた。載荷履歴は、層間変形角 $R=\pm 1/1000, \pm 1/500, \pm 1/250, \pm 1/200, \pm 1/150\text{rad}$ を各1回とした後に押し切りとした。

5. 耐震壁の水平加力実験結果

図-11に加力前のひび割れ状況を示す。試験体は、コンクリート打設から実験開始までに約2ヶ月間の養生期間をとった。その間に、乾燥収縮による壁板中央の縦ひび割れ(ひび割れ誘発目地があるものは、目地に沿って)、壁板隅角部の斜めひび割れが発生したものの、試験体相互でのひび割れ状況に大きな違いはなかった。

(1) 加力中のひび割れ状況と最終破壊状況

図-12に最終ひび割れ状況を示す。ひび割れ発生過程は、ひび割れ誘発材の有無に関わらず、ほぼ同様であった。 $R=\pm 1/1000\text{rad}$ サイクルの+1/2500~1/1875rad時に加力方向に対して斜め45度方向のせん断ひび割れが発生

表-6 各強度の実験値と計算値の比較

試験体	せん断ひび割れ強度			せん断終局強度		
	実験値	計算値	eQsc	実験値	計算値	eQsu
	eQsc (kN)	cQsc (kN)	cQsc	eQsu (kN)	cQsu (kN)	cQsu
No. 1	196	278	0.71	1070	944	1.13
No. 2	161	278	0.58	972	944	1.03
No. 3	156	278	0.56	1013	944	1.07

〔ひび割れ強度計算式〕⁵⁾

$$V_c = \tau_{scr} t_w l_w / x_w$$

$$\tau_{scr} = \sqrt{(\sigma_t^2 + \sigma_t \cdot \sigma_0)}$$

t_w : 耐震壁の壁厚, l_w : 側柱中心間距離, x_w : 形状による補正係数,

σ_t : コンクリートの引張強度, σ_0 : 鉛直荷重による壁板の圧縮応力度

〔せん断終局強度計算式〕⁶⁾

$$cQsu = \left\{ \frac{0.068 P_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/Q \cdot D + 0.12}} + 2.7 \sqrt{P_{se} \cdot \sigma_{sh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} b_e \cdot j$$

P_{te} : 等価引張鉄筋比, F_c : コンクリート設計標準強度,

P_{se} : 壁厚 b_e とした時の水平せん断補強筋比, σ_{sh} : 水平せん断補強筋の降伏点,

b_e : 等価長方形断面に置き換えた場合の壁厚

した。その後、 $R=\pm 1/1500$ rad サイクルでは、柱に曲げひび割れが発生するとともに、せん断ひび割れの数も増加している。 $R=\pm 1/250$ rad サイクルでは、壁板中央にせん断ひび割れが発生し、 $R=\pm 1/200$ rad サイクルでは、ほぼ壁全面にせん断ひび割れが生じた。その後、各試験体ともに $R=\pm 1/150$ rad サイクル後の押し切り時に、せん断破壊した。

破壊は壁板下部の圧壊からはじまり（図示①）、壁板上部の隅角部方向に斜めひび割れが進展（図示②）して、その後、柱を貫通（図示③）して、耐力が低下した。なお、ひび割れ誘発材を設けたNo.2, No.3では、壁中央部の圧壊（図示④）が①の圧壊とほぼ同時に生じた。

（2）各実験値と計算値の比較

図-13 に荷重-変形角関係を示す。試験体の履歴形状は、ひび割れ誘発材の有無に関わらず $R=\pm 1/200$ rad サイクルまでは、ほぼ同様であった。その後、 $R=\pm 1/150$ rad サイクルでは、ひび割れ誘発材を設けたNo.2の破壊時耐力が、ほかの試験体に比べて若干小さいものの、ほぼ同様な破壊傾向を示した。また、各グラフ上には、せん断ひび割れ強度の計算値およびせん断終局強度の計算値を合わせて示している。また、表-6に各強度の実験値と計算値の比較を示す。せん断ひび割れ強度の計算値に対する実験値の比率 $eQsc/cQsc$ は0.56～0.71となっており、計算値は実験値を上回っている。一方、せん断終局強度の計算値に対する実験値の比率 $eQsu/cQsu$ は1.03～1.13となっており、よい対応を示している。

以上より、ひび割れ誘発材の有無に関わらず、ほぼ同様なひび割れ性状、履歴性状を示すことを確認した。また、せん断ひび割れ強度⁵⁾および、せん断終局強度⁶⁾の算定に既往の強度計算式を用いることによって、計算値は実験値をおおむね良好に評価できることを確認した。

6. まとめ

ひび割れ集中率が高く経済的な、ひび割れ誘発材の選定を目的とした収縮ひび割れ試験および、選定したひび割れ誘発材を有する耐震壁の水平加力実験を行った結果、以下の知見を得た。

〔収縮ひび割れ試験結果より〕

- ①ひび割れ誘発材によるコンクリート断面の断面欠損率が大きいほど、ひび割れ発生時間が短くなる。
- ②コンクリート断面の断面欠損率が大きいほど、目地部にひび割れが生じやすい。
- ③収縮ひび割れ試験結果および経済性、施工性を考慮して、断面欠損率約40%の平鋼をひび割れ誘発材として選定した。

〔水平加力試験結果より〕

- ①ひび割れ誘発材に平鋼を利用した耐震壁の水平加力実験を実施した結果、ひび割れ誘発材の有無に関わらず、ほぼ同様なひび割れ性状、履歴性状を示すことが確認された。
- ②せん断ひび割れ強度およびせん断終局強度は、既往の強度算定式によりおおむね良好に評価できることがわかった。

参考文献

- 1) 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、日本建築学会、2006
- 2) 大谷 博、今本 啓一：耐震壁に誘発目地を設ける研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1,pp.1095-1096,1998.8
- 3) 小柳 光生、川口 徹、増田 安彦：耐震壁に使用する誘発目地の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2,pp.473-474,2002.8
- 4) 安部 弘康 ほか：ひび割れ誘発目地付き耐力壁に関する実験的研究（その1）（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1,pp.207-210,2005.9
- 5) 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、日本建築学会、1997
- 6) 広沢 雅也 ほか：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究（その1 3）せん断終局強度について、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系分冊 ,pp.1613-1614,1976.10

〔付録 1〕

レディーミクストコンクリート配合報告書 No. 1												
SMCテック 株式会社 殿					平成 19 年 10 月 10 日							
株式会社 内山アドバンス 柏工場 千葉県柏市富里 3-3-1 TEL: 04-7146-0181 FAX: 04-7145-7393					配合計画者名 飯生 昌之							
工 事 名 称		三井住友建設技術研究所										
所 在 地		千葉県流山市駒小518-1										
請 入 予 定 時 期												
本 配 合 の 適 用 期 間												
コンクリートの打込み箇所												
配 合 の 設 計 条 件												
呼び方	コラーの種類 による記号	呼び強度	スラブ又はスラブ厚 cm	粗骨材の最大寸法 mm	ミリの種類 による記号							
	普通	30	18	20	N							
指 定 事 項	ミリの種類	呼び強度に記載	空気量	4.5 %								
	骨材の種類	使用材料欄に記載	軽量ミリの単位容積質量	-								
	粗骨材の最大寸法	呼び強度に記載	コラーの温度	最高・最低								
	ワザリ物反応抑制対策の方法	A	水ミラ比の上限值	-								
	骨材のワザリ物反応性による区分	使用材料欄に記載	単位水量の上限值	-								
	水の区分	使用材料欄に記載	単位ミリア量の下限値又は上限値	-								
	選別材料の種類及び使用量	使用材料及び配合表欄に記載	蒸気化後のミラ増大量	-								
塩化物含有量	0.30 kg/m ³ 以下	-										
呼び強度を保證する材齢	28 日	-										
使 用 材 料												
セメント	生産者名	太平洋セメント (株)			密 度 g/cm ³	3.16	N _{10.0eq} %	0.55				
混和材①	製品名	-	種 類	-	密 度 g/cm ³	-	N _{10.0eq} %	-				
混和材②	製品名	-	種 類	-	密 度 g/cm ³	-	N _{10.0eq} %	-				
骨 材	No.	種 類	産地又は品名	ワザリ物反応性による区分	粒の大きさの範囲	粗粒率又は容積率	容積率 g/cm ³					
	①	砂	茨城県行方市欠橋産・陸砂	A 洗砂法	5	2.30	-					
	②	砂	栃木県佐野市間馬町産・砂	A 洗砂法	5以下	3.10	-					
粗 骨 材	①	砕石	栃木県佐野市間馬町産・砕石	A 洗砂法	20~5	60.0	-					
	②	砕石	茨城県東茨城郡城里町産・砕石	A 化学法	20~5	60.0	-					
	③	-	-	-	-	-	-					
混和剤①	製品名	フローリックSV		種 類	AE減水剤 標準形1種		N _{10.0eq} %					
混和剤②	製品名	-		種 類	-		-					
混和剤③	製品名	-		種 類	-		-					
細骨材の塩化物量		① 0.000 %	②	水の区分		地下水、上澄水						
配 合 表 (kg/m ³) 下段 (L/m ³)												
セメント	混和材①	混和材②	水	細骨材①	細骨材②	細骨材③	粗骨材①	粗骨材②	粗骨材③	混和剤①	混和剤②	混和剤③
370	-	-	183	522	224	-	489	488	-	3.70	-	-
118	-	-	183	202	85	-	183	183	-	-	-	-
水セメント比		49.5 %		水結合材比		-		%		細骨材率		
細骨材混合比(質量)		砂:砂砂=70:30		粗骨材混合比(質量)		砕石2005(砕石):砕石2005(砂砂)=50:50						
備考										規格区分: JIS 該当品		