

論文 誘発材に異形鉄筋を用いた RC 造耐震壁の長期ひび割れ性状に関する研究

松井 亮夫*1・木村 仁*2・谷 昌典*3・西山 峰広*4

要旨: 異形鉄筋のひび割れ誘発材を目地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, 誘発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せず, 耐震壁の構造性能にも影響しないことが過去の実験で明らかとなっている。本研究では RC 造耐震壁のひび割れ誘発実験を行い, 目地部に内蔵させた誘発鉄筋を有する壁は従来の普通目地を設置した壁と比較して, ひび割れを高い確率で目地内に誘導でき, ひび割れの分散により最大ひび割れ幅を抑制できることを確認した。大野法による計算値は, 各試験体の最大ひび割れ幅とよく対応していることを確認した。

キーワード: RC 壁, 乾燥収縮, 誘発目地, 誘発鉄筋, 最大ひび割れ幅

1. はじめに

著者らは過去に耐震壁試験体 (RC 造耐震壁を模した柱, 梁及び基礎スタブで囲まれた 1/2 スケールの模型試験体) を使用した収縮ひび割れ誘発実験¹⁾を行った。その実験結果では, 誘発材として異形鉄筋を挿入した目地を用いると従来の普通目地と比較して, 早期に目地内にひび割れが発生し, 壁面の柱近傍の目地にもひび割れが発生することが分かった。また, 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となることも分かった。しかし, 誘発材となる鉄筋の有無による壁表面のひずみ分布については, 明確な差異が見られなかった。試験体の設置場所により, 日射に起因するコンクリート表面の温度変化などが異なることが要因と考えられた。

そこで, 同一条件下において試験体を作製・保管し, 誘発材の有無による壁表面と内部の収縮ひずみ分布を計測することとした。試験体の作製・保管は, 日射およびコンクリート表面温度の変化の影響が小さい屋内で実施した。本論文では, 収縮ひび割れの誘発メカニズムを解明するため, 欠き込み目地+断面中央の誘発材と壁縦筋が異形鉄筋の試験体と従来の欠き込み目地だけの試験体の計 2 体のひび割れ状況を比較した。また, 壁内部のひび割れ進展状況を把握するための開口の定点撮影および既往のひび割れ幅算定結果と実験の比較について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

耐震壁試験体の諸元を表-1に示す。試験体は 2 体で, 変動因子は誘発材率と総断面欠損率とする。

写真-1に試験体と計測位置, 図-1, 2に試験体を

示す。試験体の寸法は, 壁内法高さ 1200mm, 壁内法長さ 2125mm, 壁厚 100mm (目地底間距離 80mm), 柱断面 380×380mm, 梁断面 250×350mm とした。2 体の試験体のうち 1 体 (WC65D16VD6) は D16 のひび割れ誘発材 1 本と壁縦筋 D6 を 2 本内蔵した目地 (総断面欠損率: 48%) とし, 1 体 (WC65NS) はコンクリートの断面を切り欠いた従来の目地のみ (総断面欠損率: 20%) とした。目地は壁両面に設置し, 寸法は幅 10mm, 深さ 10mm, 位置は壁中央と左右柱際から 180mm の位置の計 3 箇所とした。コンクリートの目標圧縮強度は 40N/mm², 壁筋比は 0.65%とした。また, 各目地の高さの中央付近に, ひび割れの内部進展状況を観察するため 100×200mm の貫通開口を設けた。

表-1 試験体の諸元

試験体名	構造壁厚 (mm)	目地底間距離 (mm)	コンクリート目標強度 (N/mm ²)	壁筋比 (%)	目地部の壁縦筋	誘発材	誘発材率 (%)	総断面欠損率 (%)
WC65D16VD6 (誘発鉄筋あり)	100	80	40	0.65	2-D6	1-D16	20	48
WC65NS (目地のみ)					-	-	0	20

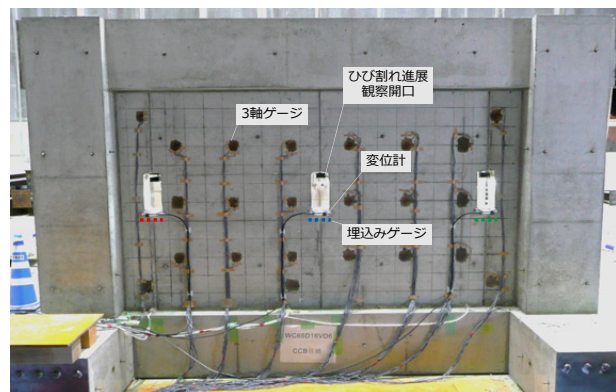


写真-1 試験体と計測装置

*1 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 博士後期課程 (正会員)

*2 京都大学 工学部 建築学科

*3 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 使用材料

柱、梁および壁に使用したコンクリートは、材齢4週（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱試験体3本の平均値、空中養生）の実強度で圧縮強度 41.2N/mm^2 、静弾性係数 $2.76 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。コンクリートの特性を表-2に示す。なお、自由収縮ひずみの計測は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱試験体2体の中央内部のひずみを埋込みゲージで測定した。材齢4日目の脱型後は2面乾燥とし、非乾燥面（4面）はアルミ箔テープで保湿し、壁試験体のそばに静置した。鉄筋のヤング係数は $E_s = 2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ とし、梁主筋のみSD345を使用し、他は全てSD295Aを使用した。

2.3 ひび割れ誘発実験

本論文では、コンクリート打設（7月3日）後から16週目までの観察状況について述べる。

柱、梁および壁のコンクリート打設後、材齢4日目で

壁型枠を脱型（脱型時強度： 26.3N/mm^2 ）し、それ以降のひび割れ発生状況と収縮ひずみ分布について調査した。打設後から16週目までの室内の温度は $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 、湿度は概ね $60 \sim 80\%$ であった。計測は、壁の表面に貼り付けた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い、同時にクラックスケール（最小計測幅： 0.05mm ）でひび割れ幅を観測した。図-3に3軸ゲージとパイ型ゲージの位置を示す。一方、壁内部には埋込みゲージを設置し、打設以降の収縮ひずみ値を計測した。表-3および図-4に埋込みゲージ（検長 60mm ）の設置位置を示す。なお、計測値は、全ての計測器設置完了後の7月7日（材齢4日目）の17時を0値とし、計測のインターバルは30分とした。試験体の底面には、左右の基礎スタブと床との摩擦による拘束を緩和するテフロンシート（厚さ 6mm 、2枚重ね）を設置した。

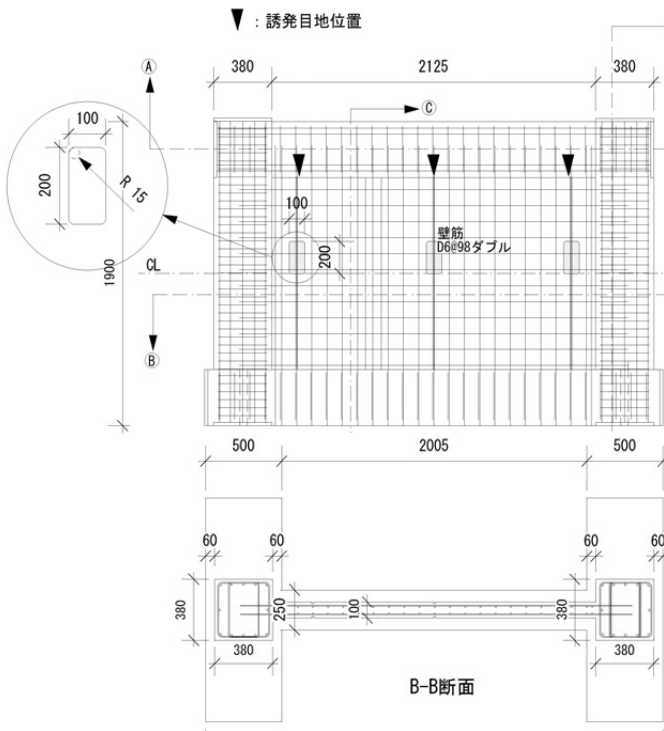


図-1 試験体

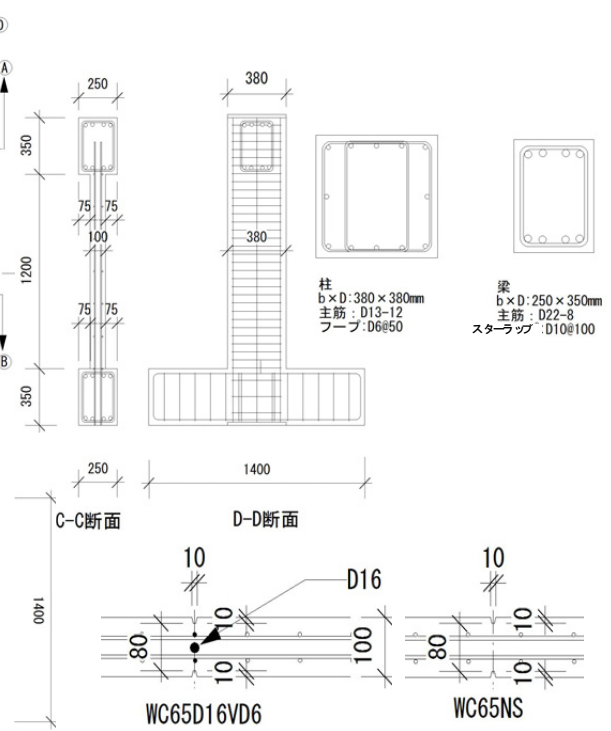


図-2 目地部の断面図

表-2 材料の特性

(a) コンクリートの配合

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 (%)
普通 27-21-15N	366	850	840	50.8	50.5

(b) コンクリートの力学的特性

圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	柱、梁、壁		基礎スタブ
	弾性係数 E_c ($\times 10^4\text{N/mm}^2$)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)
41.2	2.76	3.5	47.2

(c) コンクリートの自由収縮ひずみ

養生日数(日)	0	4	14	21	28	35	63	98
27-21-15Nのひずみ値(μ)	0	0	-107	-144	-195	-244	-337	-468

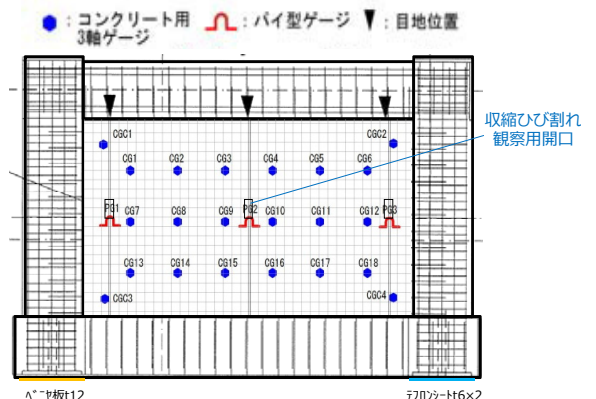


図-3 3軸ゲージとパイ型ゲージの位置

表-3 埋込みゲージの設置位置

試験体名	ひずみゲージ横方向		縦方向	横方向
	壁中央-横	目地間		
WC65D16VD6	壁中央-横	目地間	-	各目地部 (3点)
WC65NS	壁中央-横	隅部	目地間	壁中央-下
				各目地部 (3点)

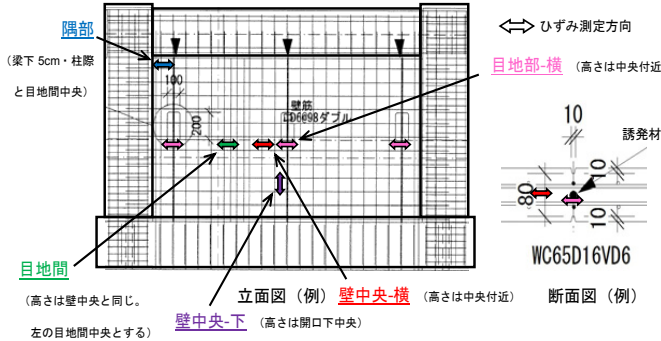


図-4 埋込みゲージの設置位置

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 16 週目までに発生した目地および壁面のひび割れ発生状況について述べる。

図-5 に目地の壁内法高さの半分の位置に設置したパイ型ゲージ (変位計) で計測した目地の開き量の経時変化を示す。横軸は打設以降の日付を示す。2 体の試験体のうち開きが最も大きかったのは WC65NS の中央目地の 0.27mm で、打設後ほぼ 16 週目で達した。その時点での柱近傍の目地の開き量は、左が -0.01mm、右が 0.01mm で、ほとんど変形が生じていなかった。なお、

WC65NS の開きが顕著に増加したのは打設後 3 週目付近で、数日間で 0.1mm 程度の増加が見られた。一方、WC65D16VD6 の開きの最大は中央目地の 0.17mm で、こちらも打設後ほぼ 16 週目で達した。その時点での柱近傍の目地の開き量は、左の目地が 0.11mm、右の目地が 0.10mm で、中央目地と同様に左右の目地にも 0.1mm 以上の変形が生じていた。

図-6、図-7 に WC65D16VD6 と WC65NS の打設後 4 週目および 16 週目での目地部のひび割れ発生状況を示す。図中の数値は、クラックスケールにより計測したひび割れ幅 (mm) である。但し、0.05mm 未満の微細なひび割れの表記は除外している。なお、目地以外の壁面のひび割れが両試験体に見られたが、ひび割れ幅はいずれも 0.05mm 未満の微細なひび割れであった。打設後 4 週目では、いずれも中央の目地の一部にのみひび割れが生じていたが、打設後 16 週目では壁の上下を結ぶひび割れに進展した。打設後 16 週目では、ひび割れ幅は WC65NS の方が概ね大きく、最大で 0.25mm であった。WC65NS の柱近傍の目地にも一部にひび割れが確認できたが明瞭なものではなかった。一方、WC65D16VD6 の柱近傍の目地には壁中央の目地のひび割れと同様に、概ね壁の上下を結ぶひび割れが生じた。その最大ひび割れ幅は、中央の目地が 0.15mm であるのに対して、左目地が 0.15mm、右目地は 0.1mm であった。これらの値は、変位計による計測値と同様の傾向を示しており、左右の目地へのひび割れの分散により最大ひび割れ幅を抑制している。

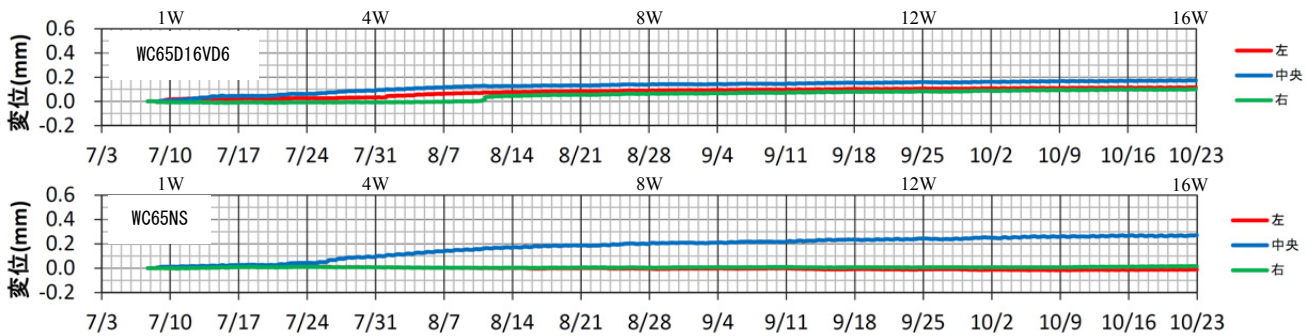


図-5 目地部の開き量

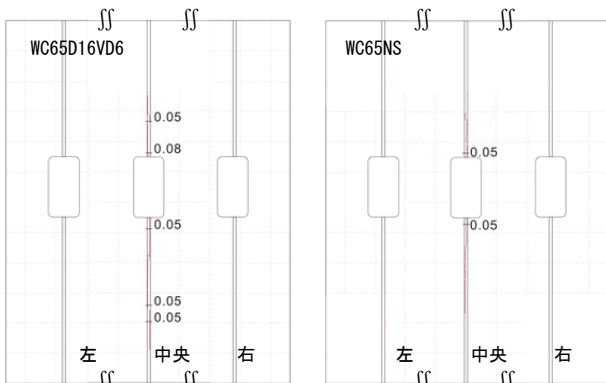


図-6 打設後 4 週目のひび割れ状況

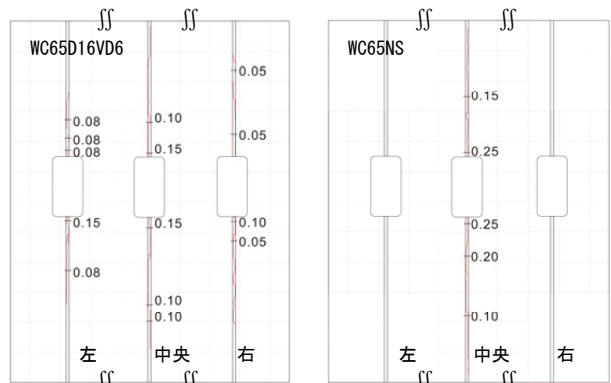


図-7 打設後 16 週目のひび割れ状況

3.2 壁表面における主ひずみの値および方向

図-8, 図-9, 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および方向を示す。最大 (S1) および最小 (S2) 主ひずみの値を示しており, 引張りは正值で赤矢印, 圧縮は負値で青矢印, 最大主ひずみの方向 (θ) は水平方向からの角度で反時計回りを正としている。打設後2週目までは, いずれの壁も引張り側の値を示していたが, 打設後2週目以降は目地部のひび割れの発生に伴って, 壁表面は圧縮側に移行する傾向が確認された。図-8は打設後2週目の計測値によるもので, WC65D16VD6の最大主ひずみの値は -42μ から 87μ の値を示し, WC65NSでは 2μ から 94μ の値を示していた。図-9は打設後4週目の計測値によるもので, いずれの壁も2週目の値から概ね圧縮側の値に移行しており, WC65D16VD6の最大主ひずみの値は -135μ から 114μ の値を示し, WC65NSでは -85μ から 27μ の値を示していた。図-10は打設後16週目の計測値によるもので, いずれの壁も概ね圧縮側のひずみであり, 最大主ひずみの方向は, 概ね水平方向に近かった。最大主ひずみの値は -40μ から -230μ 程度の値を示し, いずれ

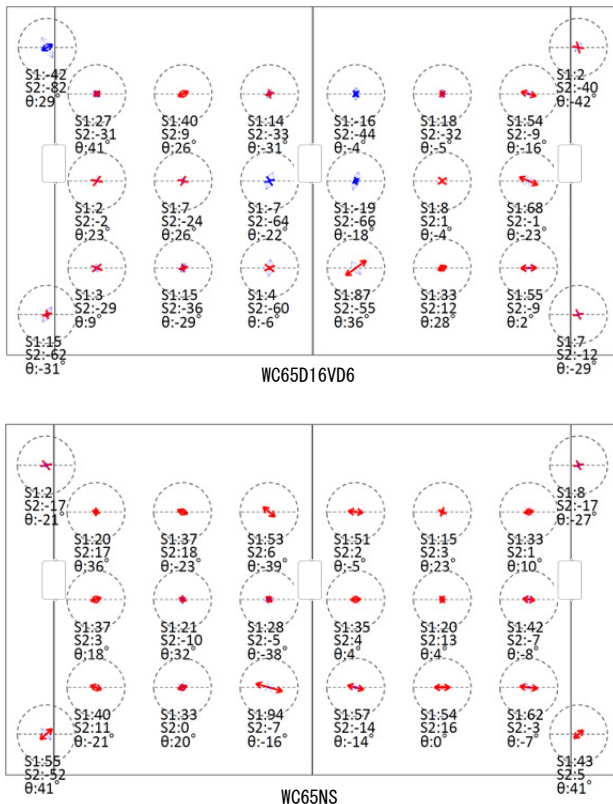
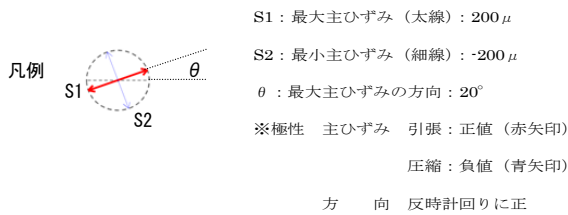


図-8 打設後2週目の主ひずみ状況

も同様の値を示していた。また, 壁の四隅においても, 同様の値と方向であった。

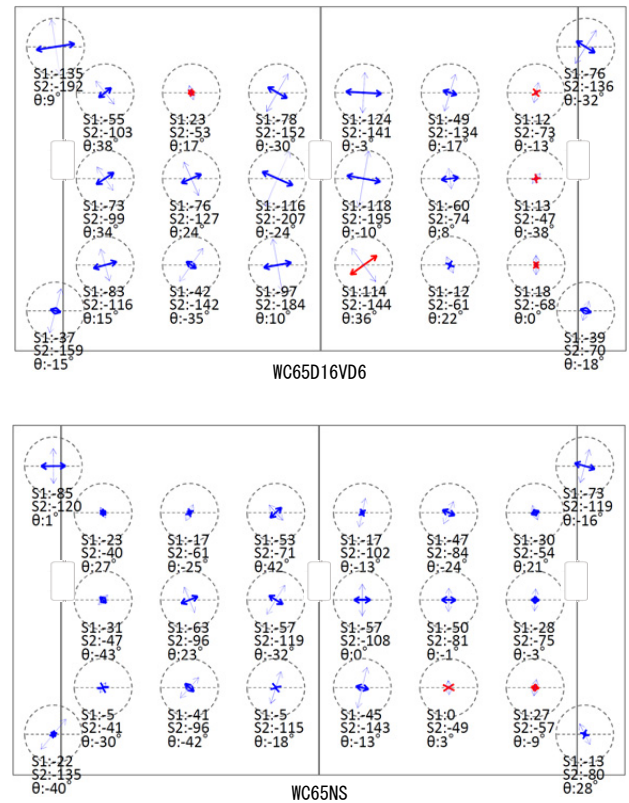


図-9 打設後4週目の主ひずみ状況

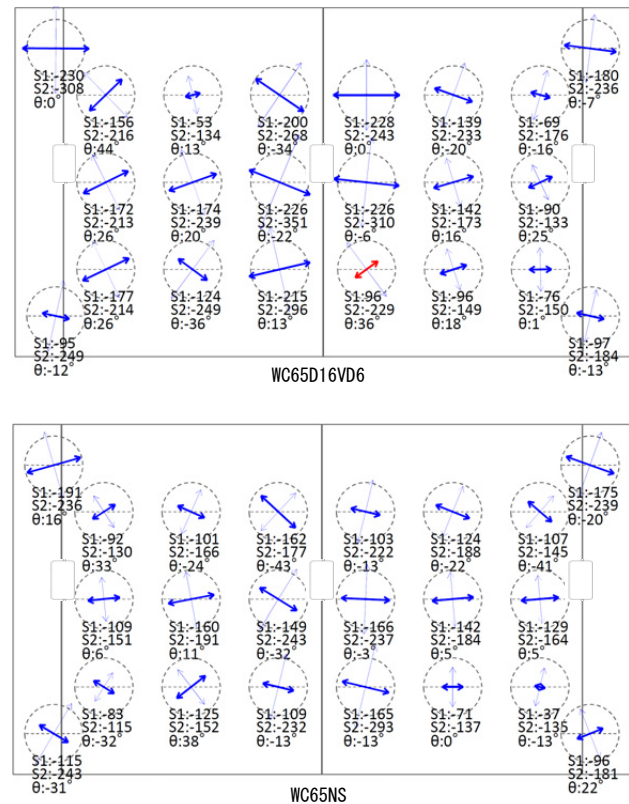
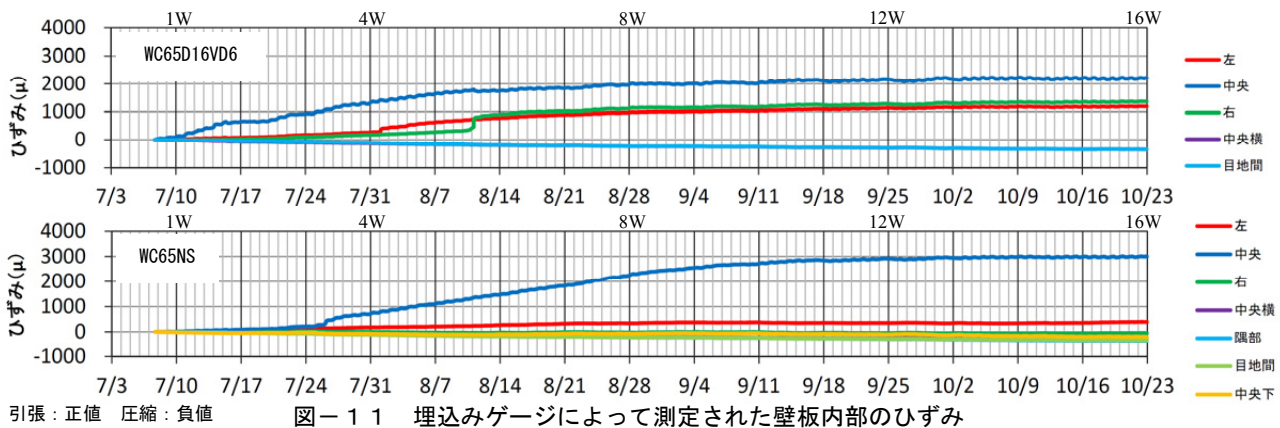


図-10 打設後16週目の主ひずみ状況



引張：正值 圧縮：負値 図-1-1 埋込みゲージによって測定された壁板内部のひずみ

3.3 内部ひずみの発生傾向

図-1-1に壁内法高さの半分の位置の目地部に内蔵された埋込みゲージによって測定された壁板内部のひずみの経時変化を示す。横軸は打設日以降の日付を示す。WC65D16VD6の中央目地では打設後7日目程度からひずみが進展し始め、16週目で2200 μ 程度(ひび割れ幅換算:0.13mm)となった。柱近傍の左右の目地では、4週目経過後以降にひずみが進展し始め、16週目で左が1200 μ 程度、右が1370 μ 程度となった。なお、左の目地は打設後29日目、右の目地は打設後40日目にひずみ値が大きく増加しているが、これは3.1で前述した変形量の変動時期と一致している。一方、WC65NSの中央目地では打設後23日目程度から収縮ひずみが進展し始め、16週目で3000 μ 程度(ひび割れ幅換算:0.18mm)となった。しかし、柱近傍の左右の目地では、ひずみが進展することなく、16週目経過時点でも左が390 μ 程度、右が-50 μ 程度であった。なお、目地部のひずみの増大に伴い、いずれの壁においても中央横や目地間および隅部の横方向に設置した埋込みゲージのひずみ値が減少して圧縮側(-280~-370 μ 程度)に移行していることが確認できた。

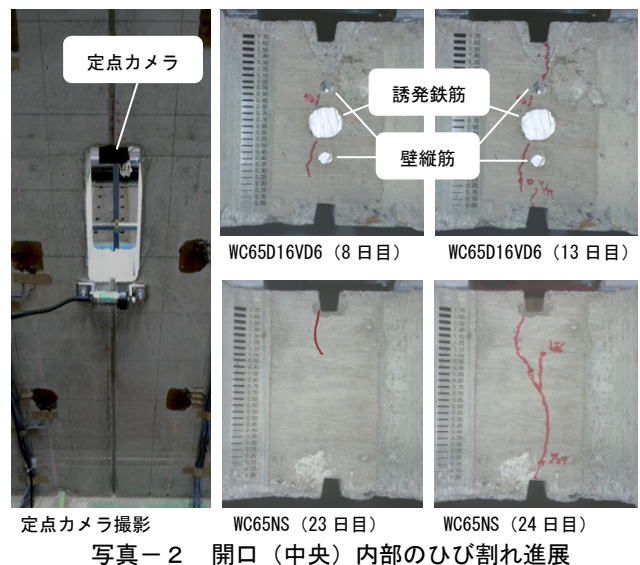
以上のことから、目地部の埋込みゲージによる計測値は、3.1で述べた目地のひび割れによる開き方向の変形の傾向とほぼ一致する。

3.4 壁中央開口内部のひび割れ進展

写真-2に壁の中央の開口部に設置した定点カメラによる観察結果を示す。撮影のインターバルは、打設後の1ヶ月間は30分、その後は4時間とした。WC65D16VD6では、壁内部のひび割れ誘発材の近傍で8日目に発生したひび割れが13日目(開口下の内部ひずみ値:577 μ)にかけて徐々に壁表面方向へ進展したのに対し、WC65NSでは、13日目に目地底の角で発生したひび割れが24日目(開口下の内部ひずみ値23日目:294 μ →24日目:558 μ)に一気に内部方向へ進展した。

4. 既往研究との比較検証

4.1 大野法によるひび割れ幅算定



収縮ひび割れ幅の予測には、今回の検証では付着の影響のみならずコンクリートのクリープや引張強度等の各種要因が考慮できる大野法²⁾を使用することとした。等価付着消失長さ L_b は式(1)で与えられる。

$$L_b = K_{sh} K_{fc} K_d K_\rho K_\sigma \cdot L_b(0) \quad (1)$$

ここに、 K_{sh} :収縮ひずみの L_b への影響係数、 K_{fc} :コンクリート圧縮強度の L_b への影響係数、 K_d :鉄筋径の L_b への影響係数、 K_ρ :鉄筋比の L_b への影響係数、 K_σ :鉄筋応力の L_b への影響係数、 $L_b(0)$:基本断面における等価付着消失長さ、壁全長の長さ変化と壁横筋の長さ変化が等しいことから、ひび割れ位置の鉄筋応力 σ_s に関する2次方程式である式(2)を解く。

$$0.03mXY\sigma_s^2 + \{L + 0.56mXY + 0.003m\varepsilon_{sh}(t, t_0)E_sXY\}\sigma_s + \{(0.56mX - \lambda L)Y + (1 - \lambda)L\}\varepsilon_{sh}(t, t_0)E_s = 0 \quad (2)$$

ここに、 m :ひび割れ本数、 $X:K_{sh}K_{fc}K_dK_\rho \cdot L_b(0)$ 、 $Y:1/(n \cdot \rho)$ 、 L :壁長(mm)、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$:コンクリートの自由収縮ひずみ、 E_s :壁横筋のヤング係数(N/mm²)、 λ :拘束度、 n :ヤング係数比(= E_s/E_c)、 ρ :鉄筋比(= A_s/A_c)、 E_c :コンクリートのヤング係数(N/mm²)、 A_s :壁横筋の総断面積(mm²)、 A_c :コンクリートの断面積(mm²)

文献3)の(2)式を用いて得られたひび割れ発生前の拘束度0.65をどの材齢においても使用している。算出され

た σ_s を用いて、式(3)より、コンクリート応力 σ_c を求める。

$$\sigma_c = \rho(\sigma_s + \varepsilon_{sh}(t, t_0) \cdot E_s) / (n \cdot \rho + 1) \quad (3)$$

本来、ここで使用する鉄筋比は式(2)で用いた値である。しかし、誘発目地断面においてコンクリートの断面積が減少するので、誘発目地断面でのコンクリート応力が目地以外の断面に比べて大きくなる。よって、誘発目地断面においてひび割れが発生すると考えられ、ここでの鉄筋比の算出の際には壁厚を目地底間距離とした。また、WC65D16VD6 においてはコンクリートと D16 誘発鉄筋および D6 壁縦筋の間に粘着力は発生せず、一体となって挙動しないものと考えて、その投影面積も合わせて差し引いた断面積から鉄筋比を算出した。算出された σ_c が割裂引張強度よりも大きい時はひび割れ本数 m を増やすこととし、 σ_c が割裂引張強度より小さくなるまで繰り返す。その際に求められた σ_s と式(4)を用いてひび割れ幅 w が得られる。なお、割裂引張強度は、いずれのケースでも4週での実験値である $\sigma_f=3.5 \text{ N/mm}^2$ を使用した。

$$w = \{\varepsilon_{st} + (\varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_{creep})\} \times L_b \quad (4)$$

ここに、 ε_{st} :ひび割れ位置の鉄筋ひずみ(= σ_s/E_s)、 ε_{creep} :コンクリートのクリープひずみ

コンクリートのクリープひずみは、材齢 28 日までは $\varepsilon_{sh}(t, t_0)/6$ 、材齢 56 日以降は $\varepsilon_{sh}(t, t_0)/3$ を用いた。

図-1-2 に算定ひび割れ幅と目地開き量の経時比較を示す。図中の点線はひび割れ本数を固定して算出した値、実線はひび割れ本数を式(3)によって判定して算出した値、棒グラフは実際の目地の開き量を表している。WC65D16VD6 は全ての材齢において、計算値は最大の目地開き量の計測値によく対応した。一方、WC65NS の材齢 91 日においては、計算値と最大の目地開き量の計測値に大きな差が見られるが、ひび割れ本数 1 本として算出したコンクリート応力は、割裂引張強度に極めて近い値を示しており、仮にひび割れ本数を 2 本として計算し

た場合には計算値と最大の目地開き量の計測値がよく対応した。

5. まとめ

本実験および既往研究との比較検証で以下のことが分かった。

- (1) 目地部に異形鉄筋を有する壁 (WC65D16VD6) は、従来の普通目地 (WC65NS) を設置した壁と比較して、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左右の目地にもひび割れが発生するため、ひび割れの分散により最大ひび割れ幅が抑制できる。
- (2) 3 軸ゲージの計測値によって算出した壁表面の最大主ひずみ値は、乾燥初期は引張り側の値を示し、時間の経過と共にひび割れが生じて長期では圧縮側の値に変わり、その方向はいずれも水平方向に近い。
- (3) 目地部の埋込みゲージによる計測値は、目地の開き方向の変位の傾向とほぼ一致する。
- (4) 目地部の埋込みゲージによる計測値は、中央目地のひずみ値の進展が最も早く、続いて左右の目地のひずみ値が進展する。
- (5) 壁の観察用開口内部のひび割れ性状については、目地部に異形鉄筋を有する壁では、内部の誘発材の近傍で発生したひび割れが壁表面方向へ進展した。これに対し、従来の普通目地を設置した壁では、目地底の角で発生したひび割れが内部方向へ進展した。
- (6) 大野法による計算値は、各試験体の最大の目地開き量とよく対応した。また、両試験体の目地位置でのコンクリート断面積 (誘発材と壁縦筋の投影面積を差し引いたもの)、およびそれを用いて求めた鉄筋比の差によって生じるひび割れ本数の違いが、ひび割れ幅に反映された結果となった。

謝辞

本研究は民間企業 11 社 (淺沼組, 熊谷組, 西松建設, 東亜建設工業, NIPPO, 飛鳥建設, 大日本土木, 長谷工コーポレーション, 東急建設, 五洋建設, 共立建設) で実施した成果の一部をまとめたものである。実験協力を頂きました竹沢建設および計測テクノをはじめ、関係者の皆さまに謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤尚隆, 濱田真, 松井亮夫, 坂下雅信: 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, コンクリート工学年次論文集, pp.307-312, 2014
- 2) 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, pp.80-83, 2006
- 3) 徐泰錫, 中川隆夫, 大野義照, 李維: 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れ幅に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.663-668, 2007

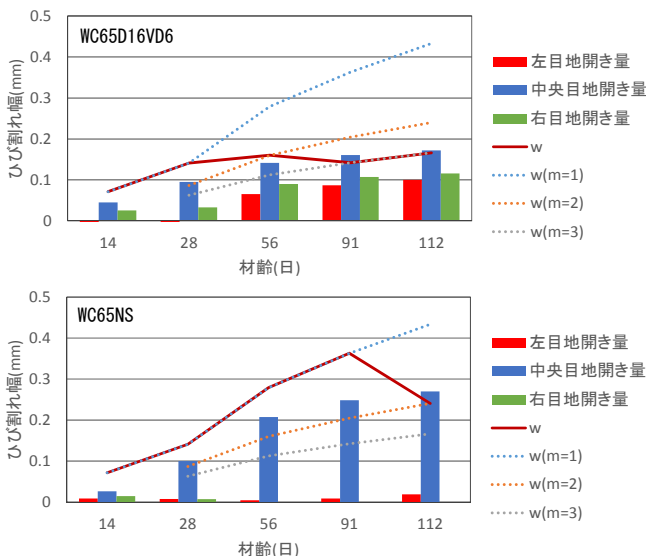


図-1-2 算定ひび割れ幅と目地開き量の経時比較