

論文 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

徐泰錫*¹・中川隆夫*²・大野義照*³・李維*⁴

要旨：鉄筋コンクリート(RC)壁における収縮ひび割れ性状(ひび割れ幅, 本数)を調べるために, RC 壁を模した試験体を作製し, 収縮拘束ひび割れ試験を行った。試験体は全長 2500mm(拘束区間 2000mm), 拘束(柱・梁)部材断面 250×250mm, 壁幅 350mm, 壁厚 100mm で, 壁体中に鉄筋を 2 本(鉄筋比 0.4%)と 3 本(鉄筋比 0.6%)埋設した。前報において提案した付着解析によるひび割れ幅の予測法¹⁾と, ひび割れ幅と本数の算定式²⁾の適合性を検討した。

キーワード：収縮ひび割れ性状, RC 壁, 収縮拘束ひび割れ試験, 付着解析, 算定式

1. はじめに

前報¹⁾では, 一軸外部拘束 RC 部材の収縮ひび割れ性状に及ぼす補強鉄筋の効果を調べることと付着解析によるひび割れ予測法の適合性を検討することを目的とし, 複数のひび割れが材齢の経過と共に順次発生するように試験体長さを長くした収縮拘束ひび割れ試験を行った。その結果, RC 部材の収縮ひび割れ幅を, 先に提案した付着解析法で予測することができることを確かめた。本報では, RC 壁の収縮ひび割れ性状(ひび割れ幅, 本数)を調べ, 付着解析によるひび割れ予測法の適合性を検討することを目的とし, 鉄筋を 2 本(鉄筋比 0.4%)と 3 本(鉄筋比 0.6%)埋設した試験体長 2500mm(拘束 2000mm), 壁幅 350mm, 壁厚 100mm, 拘束材の断面 250×250mm(鉄筋比: 5, 6%)の RC 壁を模した収縮拘束ひび割れ試験体を製作した。実験では, 埋設鉄筋とコンクリートのひずみ分布, ひび割れ数及びひび割れ幅の経時変化を測定した。なお, 前報²⁾において提案したひび割れ幅や本数の算定式の適合性も検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

コンクリートの調査を表-1 に示す。コンクリー

トはレディーミクストコンクリートを用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを, 細骨材は海砂(表乾密度 2.56g/cm³)と砕砂(表乾密度 2.66g/cm³)を混合(1:1)したものを, 粗骨材は碎石(表乾密度 2.68g/cm³)を, 混和剤は AE 剤を使用した。収縮拘束ひび割れ試験の埋設鉄筋には横ふし異形棒鋼 D10(降伏点応力度は 382 MPa)を用いた。同一養生条件下におけるコンクリートの力学的性質を表-2 に示す。

表-1 コンクリート調査

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G		
53	46	194	366	775	933	18	4.5

表-2 コンクリートの力学的性質

材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
7	18	1.43	20.4
14	22	1.70	20.5
28	26	1.95	21.0

2.2 試験体の形状と種類

収縮拘束ひび割れ試験体および壁と拘束材のダミー試験体の形状/寸法を図-1 に示す。収縮拘束ひび割れ試験体は RC 壁を模したもので, 壁の厚さは 100mm, 拘束材の断面は 250×250mm である。試験体は 2 体で, 表-3 に示すように, 壁には異形鉄

*1 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 院生 工修(正会員)
 *2 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 助手 (正会員)
 *3 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授 工博(正会員)
 *4 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 院生

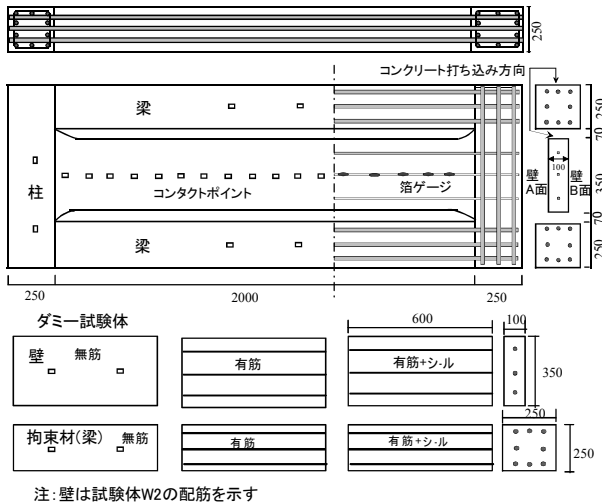


図-1 収縮拘束ひび割れ試験体とダミー試験体

表-3 収縮拘束ひび割れ試験体の種類

試験体名	鉄筋量		
	壁	拘束材-梁	拘束材-柱
W1	2-D10(0.4%)	8-D22(5%)	10-D22(6%)
W2	3-D10(0.6%)	同上	同上

筋 D10 が 2 本(鉄筋比 0.4%)または 3 本(0.6%)配筋されている。壁のひび割れ幅開口への梁拘束材の拘束を除くため壁と梁の間は 70mm の隙間を設けている。また、拘束材は全面銀箔テープでシールして、拘束材内に埋設した鉄筋の拘束によるひび割れの発生を防いだ。なお、壁の上・下面もシールしている。コンクリートの打設は図-1 中の矢印で示すように試験体は縦打ちで、壁へのコンクリートの打ち込みは、壁と拘束材(梁)の間の 70mm の隙間より行った。収縮拘束ひび割れ試験体の外に壁および拘束材(梁)のみの収縮ひずみを調べるために無筋及び有筋のダミー部材試験体を作製した。なお、有筋部材の壁については 4 側面を、拘束材(梁)については全面をシールした試験体も製作した。

2.3 実験方法及び測定方法

試験は 20±1℃, R.H.60±5% の恒温・恒湿室で実施した。各試験体ともコンクリート打設後、湿潤養生を行い、材齢 7 日に型枠を脱型し、以後は気中養生を行った。収縮拘束ひび割れ試験体の測定項目は拘束材のひずみ、壁の鉄筋とコンクリートのひずみ及びひび割れ幅で、鉄筋ひずみは試験体

W1 は上列の鉄筋に、W2 は中央の鉄筋に拘束区間 2000mm において 100mm 間隔で箔ゲージを 17 箇所貼付し、4 時間毎に計測した。コンクリートのひずみはコンタクトストレインゲージ(C.S.G)を用いて、埋設鉄筋位置に沿った A, B 両面において 17 区間を検長 100mm で測定した。箔ゲージ、コンタクトポイントの貼付位置を前掲の図-1 に示す。ひび割れ幅も検長 100mm の C.S.G を用いて測定した。ひび割れ幅の測定位置は後掲の図-7 中に示す。収縮およびクリープひずみは C.S.G を用いて、検長 300mm で測定した。クリープ試験(形状: 100×100×500mm, 持続圧縮応力: 6MPa)は材齢 14 日に載荷し、測定を開始した。

3. 付着解析によるひび割れ幅算定法

3.1 初ひび割れの発生

解析フローを図-2 に示す。拘束応力度がひび割れ発生強度 f_{cr} に達するとひび割れが生じるとするとその時の収縮ひずみ ϵ_{sh} は式(1)で与えられる。ひび割れが発生する前の拘束度は力の釣り合い条件から式(2)が得られる。ここで、壁筋は拘束度の計算に殆ど影響しないので、壁筋による拘束の影響は無視した。ひび割れ発生強度は式(3)³⁾で与える。ここで、既往の実験結果⁴⁾を基に強度低減係数(k)を 0.6 にした。

$$\epsilon_{sh} = f_{cr} / E_c' / R \quad (1)$$

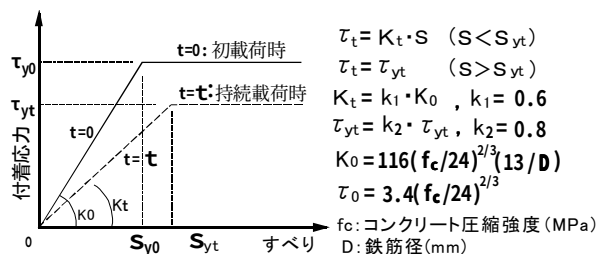
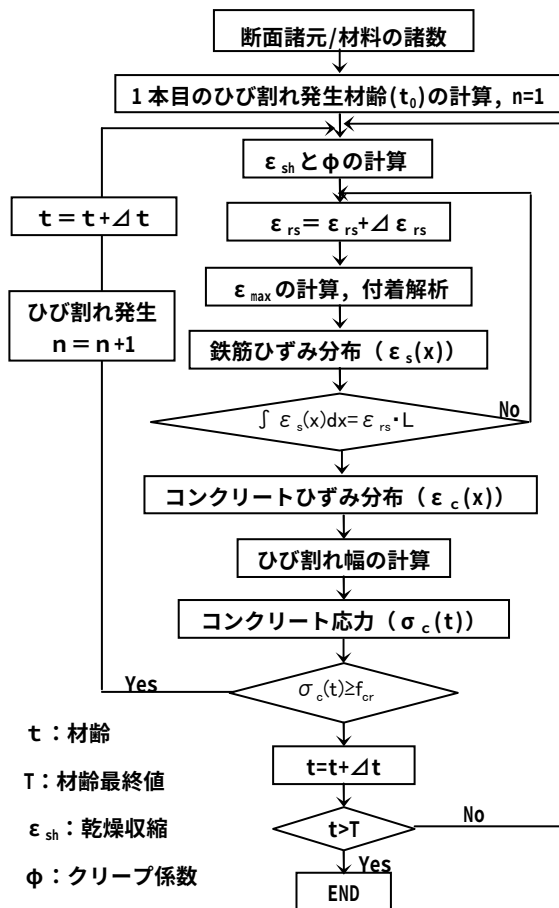
$$R = \frac{A_{sb} \cdot E_s + A_{cb} \cdot E_c'}{A_{sb} \cdot E_s + (A_{cb} + A_{cw}) E_c'} \quad (2)$$

$$f_{cr} = k \cdot 0.291 \cdot f_c^{0.637} \quad (3)$$

ここに、 f_{cr} : ひび割れ発生強度、 E_c' : 等価ヤング係数($E_c / (1 + \phi)$)、 ϕ : クリープ係数、 R : 拘束度、 f_c : コンクリート圧縮強度、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 A_{sb} : 梁筋の断面積、 A_{cb} : 梁のコンクリート断面積、 A_{cw} : 壁のコンクリートの断面積、 ϵ_{sh} : 収縮ひずみ、 k : 0.6

3.2 ひび割れ発生後

ひび割れ発生後は、銀箔テープでシールされた拘束材においてはコンクリートの収縮は生じていないので、拘束試験体における拘束材の圧縮



力とひび割れ断面における鉄筋の引張力の和が零である釣り合い条件から式(4)が得られる。

$$\varepsilon_{rs}(A_{sb} \cdot E_s + A_{cb} \cdot E_c') + \varepsilon_{s\max} \cdot A_{sf} \cdot E_s = 0 \quad (4)$$

また、拘束材の収縮変形と鉄筋の収縮変形が等しいことから

$$\mathcal{E}_{rs} \cdot L = \int_0^L \mathcal{E}_s(x) \cdot dx \quad (5)$$

が成り立つ。

ここに、 ε_{rs} ：拘束材のひずみ、 $\varepsilon_s(x)$ ：鉄筋ひず

み分布, $\varepsilon_{\text{stmax}}$: ひび割れ位置の鉄筋ひずみ, A_{st} :
壁筋の断面積, L : 拘束区間の長さ

時間 t におけるコンクリートの収縮ひずみ ε_{sh} において、 ε_{rs} を増やししながら式(4)からひび割れ断面における鉄筋応力($\sigma_s = \varepsilon_{rs}(A_{sb} \cdot E_s + A_{cb} \cdot E_c')/A_{st}$)を求め、付着解析を行って、鉄筋ひずみ分布を求める。付着解析に際し、付着応力-すべり関係は図-3 に示す bi-linear モデルの持続載荷時のモデル⁵⁾を用いた。次に、鉄筋ひずみ分布の全長にわたる積分値が拘束材の変形($\varepsilon_{rs} \times L$)と同じである条件を満足するまでこの計算を繰り返す。条件を満足するとコンクリートひずみ分布を求め、鉄筋ひずみとコンクリートひずみの差を全区間にわたって積分してひび割れ幅を計算する。この時コンクリート応力 σ_c が引張強度 f_{cr} より小さい場合は時間 t を増やし計算を繰り返す。 σ_c が f_{cr} より大きくなると次のひび割れが発生する。

4. 実験結果および考察

4.1 収縮ひずみとクリープ係数

ダミー試験体の収縮ひずみの経時変化を図-4に示す。解析では壁筋の拘束を無視しているのでその影響を考慮するために有筋の壁ダミー試験体の収縮ひずみの回帰式を求めて解析に用いた。クリープ係数の経時変化を図-5に示す。クリープ係数は載荷時期の影響⁶⁾を考慮した式($k(\tau)=8.74/(5+\sqrt{\tau})$), τ : 載荷時の材齢(日), $k(14)=1$)を用いた。

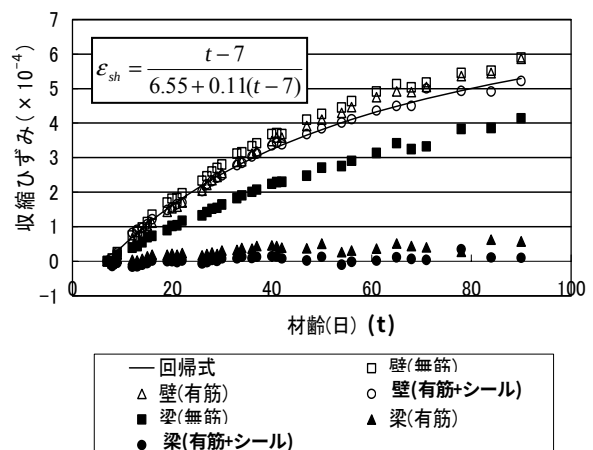


図-4 ダミー試験体の収縮ひずみ

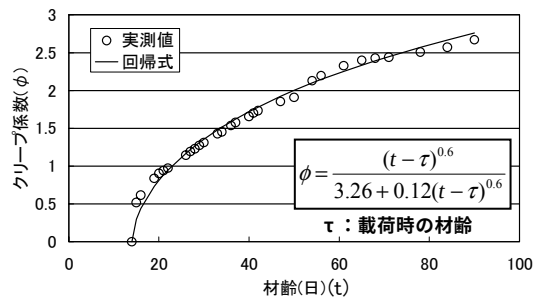


図-5 クリープ係数

4.2 収縮拘束ひび割れ試験

(1) 収縮拘束ひび割れ試験体の拘束度の変化

収縮拘束ひび割れ試験体(W1, W2)の拘束度の変化を図-6に示す。試験体 W1 と W2 の拘束度は殆ど同じで、実線で示す W1 の解析値とほぼ一致している。なお、解析値はひび割れ発生までは式(2)による弾性解析で、ひび割れ発生後には付着解析により求めた。ひび割れが発生するまでの拘束度は約 0.85、発生後には約 0.95 でひび割れの発生によって拘束度が徐々に大きくなっている。ここで、拘束度 R の実測値は式(6)から求めた。

$$R = (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_r) / \varepsilon_{sh} \quad (6)$$

ここで、 ε_{sh} : 自由収縮ひずみ(無筋の壁ダミー試験体の収縮ひずみ)

ε_r : 拘束収縮ひずみ(拘束収縮ひび割れ試験体における拘束材(梁)の収縮ひずみ)

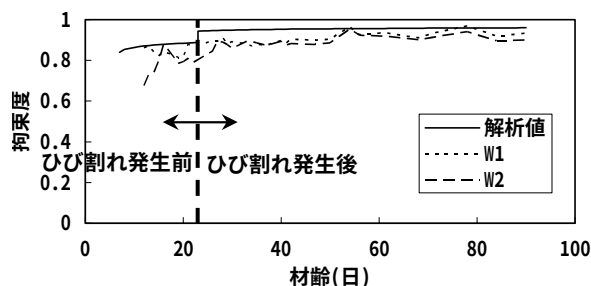


図-6 拘束度の経時変化

(2) ひび割れ発生状況と鉄筋ひずみ分布

図-7 にひび割れ状況と鉄筋ひずみ分布を示す。試験体 W1, W2 にいずれも貫通したひび割れが1本ずつ発生している。W1 では試験体中心から

200mm 離れた位置に材齢 24 日にひび割れが発生し、その時のひび割れ位置の鉄筋ひずみは約 94 μ で、材齢 90 日には約 1200 μ となっている。W2 では試験体中心から約 400mm 離れた位置に材齢 23 日にひび割れが発生し、その時のひび割れ位置の鉄筋ひずみは約 24 μ で、材齢 90 日には約 850 μ となっている。図-7 から鉄筋比に応じてひび割れ位置における鉄筋ひずみが小さくなっていることが分かる。また、ひび割れから約 300mm 以上離れた位置のひずみはほぼ一様に収縮しており、この位置では鉄筋とコンクリート間にすべりは生じていないものと考えられる。

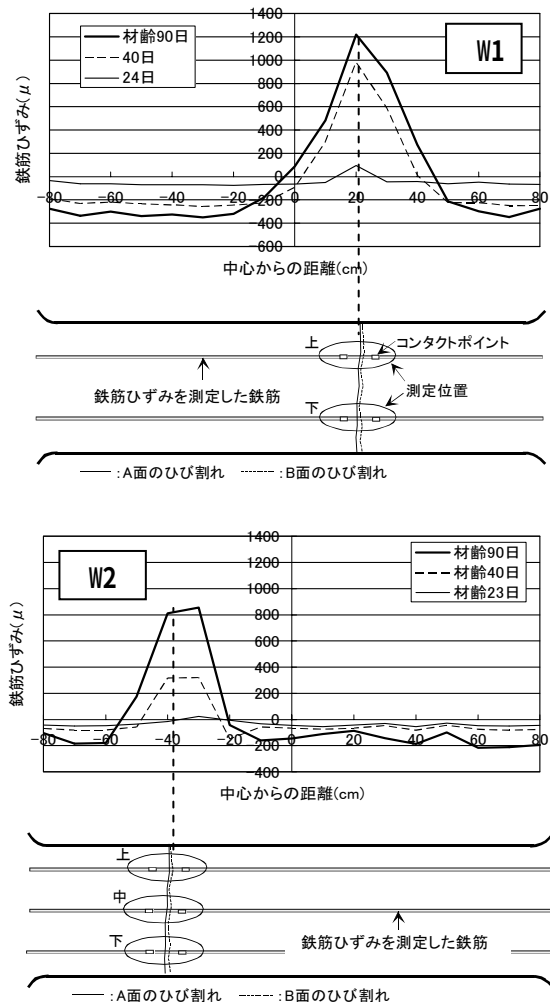


図-7 鉄筋ひずみ分布

図-8 に材齢 90 日における鉄筋とコンクリートのひずみ分布の実測値と解析値を示す。ここで、ひび割れ位置における拘束は局部的に解放される

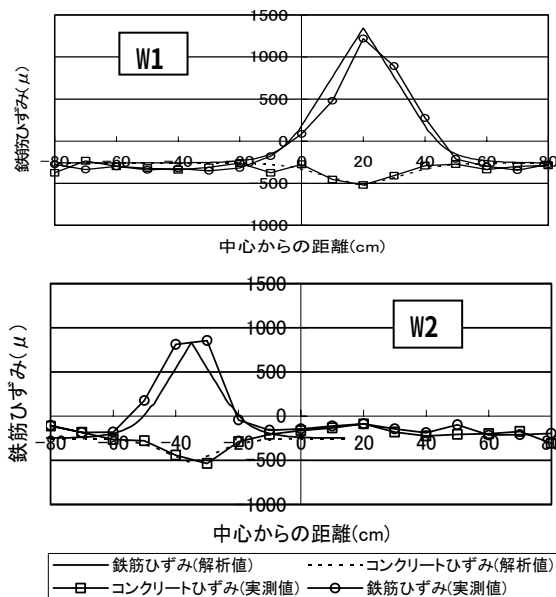
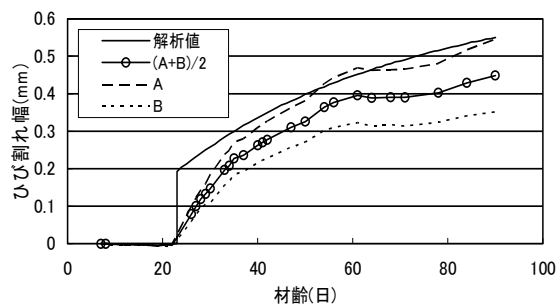


図-8 ひずみ分布の解析値と実測値の比較

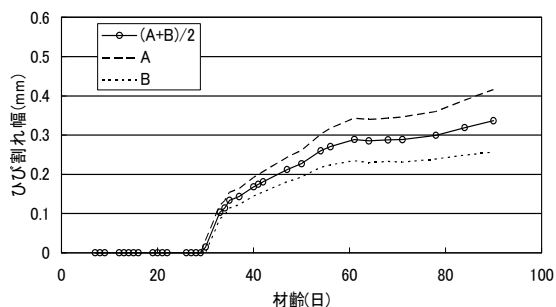
ので、ひび割れ位置におけるコンクリートの収縮ひずみはダミー試験体のひずみとした。鉄筋とコンクリートのひずみ分布の解析値は実測値とほぼ一致している。

(3) ひび割れ幅の経時変化

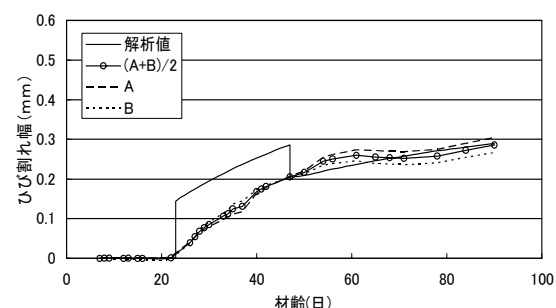
図-9 に材齢 90 日までのひび割れ幅の経時変化を示す。(a)(b)図に試験体 W1 の上, 下の鉄筋位置, (c)(d)図に試験体 W2 の中と上, 下の鉄筋位置でのひび割れ幅を示している。位置によりひび割れ幅は異なり, W1, W2 いずれも上部のひび割れの幅が大きい。これはコンクリートの収縮が上部の方が大きいことによると考えられる。図中には解析値も示している。ひび割れ本数の解析値は W1 は 1 本, W2 は 2 本である。試験体 W1 のひび割れ幅の解析値は実測値より若干大きく, W2 の解析値は上, 中の鉄筋位置の実測値とほぼ一致している。表-4 に材齢 90 日におけるひび割れ幅の実測値, 解析値および計算値を示す。解析値は鉄筋とコンクリートのひずみ分布の解析値の差の積分値であり, 計算値は鉄筋とコンクリートひずみ分布の実測値の差の積分値である。W1 と W2 の上の鉄筋位置の実測値はそれぞれ 0.46 と 0.32mm で鉄筋比に応じて制御されている。また, W2 の中の鉄筋位置の実測値は 0.29mm で解析値とほぼ



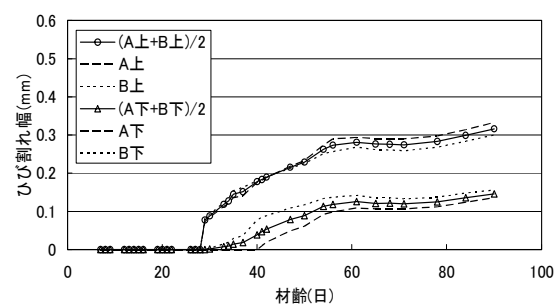
(a) 試験体 W1 の上の鉄筋位置でのひび割れ幅



(b) 試験体 W1 の下の鉄筋位置でのひび割れ幅



(c) 試験体 W2 の中の鉄筋位置でのひび割れ幅



(d) 試験体 W2 の上, 下の鉄筋位置でのひび割れ幅

記号(A,B,上,中,下)の説明は図-1, 図-7を参照

図-9 ひび割れ幅の経時変化

一致している。また, 前報²⁾において提案したひび割れ幅(W)の算定式(式(7))と本数(n)の算定式(式(8))や既往の算定式⁷⁾⁸⁾⁹⁾による計算結果を表-5に示す。既往の3つの式は式(7)よりひび割れ幅を小さく評価している。また, Gilbertの式はひび割れ数をかかなり多めに評価している。

$$W = (0.0018f_c + 0.048) \cdot p_t^{-1.79} \cdot K \quad (7)$$

ここで、 $K = 1.0$ (D10 の場合)

$= 1.33$ (D13 の場合)

$$n = K_{p_t} \cdot K_L \cdot K_{f_c} \cdot K_{sh} \cdot K_\phi \cdot K_R \cdot K_D \cdot n_0 \quad (8)$$

ここで、 $n_0 = 2.1$

$$K_{p_t} = 4.69p_t - 0.787, \quad K_L = 0.16L + 0.027$$

$$K_{f_c} = -0.02f_c + 1.53, \quad K_{sh} = 0.003\varepsilon_{sh} - 0.82$$

$$K_\phi = -0.36\phi + 1.52, \quad K_R = 3.62R - 0.82$$

$$K_D = 1.00 \text{ (D10 の場合)} = 0.76 \text{ (D13 の場合)}$$

ここで、 f_c ：コンクリート強度(MPa)， p_t ：鉄筋比(%)， L ：壁長(m)， ε_{sh} ：乾燥収縮(μ)， ϕ ：クリープ係数， R ：拘束度

表-4 ひび割れ幅 (材齢90日)，単位：mm

試験体 記号	実測値				解析値 (計算値)
	位置	A 面	B 面	平均	
W1	上	0.56	0.35	0.46	0.55 (0.58)
	下	0.42	0.26	0.34	
W2	上	0.33	0.30	0.32	0.27 (0.34)
	中	0.31	0.27	0.29	
	下	0.14	0.16	0.15	

表-5 算定式の比較

計算式	試験体	ひび割れ幅	ひび割れ数
算定式 ²⁾ 式(7)，式(8)	W1(0.4%)	0.49mm	0.6本
	W2(0.6%)	0.23mm	1.1本
Base&Murry 式 ⁷⁾	W1(0.4%)	0.24mm	1.4本
	W2(0.6%)	0.16mm	1.9本
Gilbert 式 ⁸⁾	W1(0.4%)	0.25mm	2.2本
	W2(0.6%)	0.12mm	4.5本
修正 Base&Murry 式 ⁹⁾	W1(0.4%)	0.22mm	2.0本
	W2(0.6%)	0.13mm	3.2本

5. まとめ

RC 壁を模した試験体 2 体 W1(鉄筋比 0.4%)と W2(鉄筋比 0.6%)の収縮拘束ひび割れ実験を行った結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 試験体 W1 と W2 の拘束度は殆ど同じで、解析値とほぼ一致している。ひび割れが発生するまでの拘束度は約 0.85，発生後には約 0.95 でひび割れ発生によって拘束度が徐々に大きくなった。
- (2) 試験体 W1, W2 のいずれもひび割れは貫通し、1 本ずつ発生している。付着解析による鉄筋

とコンクリートのひずみ分布解析値は実測値とほぼ一致している。

- (3) 試験体 W1, W2 のひび割れ幅の材齢 90 日における実測値は 0.46mm と 0.29mm で付着解析による解析値は実測値とほぼ一致している。
- (4) 既往の算定式(Base&Murry 式，Gilber 式，修正 Base&Murry 式)による計算結果は前報において提案したひび割れ幅の算定式よりもひび割れ幅を小さく評価している。また，Gilbert の式はひび割れ数をかなり多めに評価している。

謝辞：本研究は平成 17 年度科学研究費補助金(基盤研究 C,研究代表者：大野義照)の助成を得た。

参考文献

- 1) 中川隆夫,徐泰錫,大野義照,李維：収縮ひび割れに及ぼす鉄筋比の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28, No.1, pp.575～580, 2006
- 2) 徐泰錫,中川隆夫,大野義照：鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れの幅と間隔，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28, No.1, pp.557～562, 2006
- 3) 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.74, 2006
- 4) 中川隆夫,大野義照,徐泰錫,松田成貴：フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26, No.1, pp.483～488, 2004
- 5) 鈴木計夫,大野義照,李振宝,太田崇士：持続荷重下における異型鉄筋の付着応力～すべり関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.2, pp.51～56, 1992
- 6) A.M. Neville: Creep of Concrete, Plain Reinforced and Prestressed, North-Holland, 1970
- 7) Base, G.D. and Murray: New Look at shrinkage Cracking, Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, Vol.CE 24, No.2, pp.171～176, 1982
- 8) Gilbert, R.I.: Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members, ACI Structural Journal, Vol.89, No.2, pp. 141 ～ 149, March-April 1992
- 9) 橋田浩：鉄筋コンクリート造外壁の収縮ひび割れ幅と本数の簡易推定式の提案，日本建築学会学術講演梗概集(近畿)，A-1, pp.645～646, 2005