論文 鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生順序のひび割れ幅への影響

徐泰錫*1 大野義照*2 中川隆夫*3 岸本一蔵*4

要旨: 収縮ひび割れの発生順序がひび割れ幅に及ぼす影響を把握するために,二つのひび割れが 生じる長さの収縮拘束ひび割れ試験体を作製した。同時に,両引試験体も作製し,繰返し載荷実 験によってひび割れ発生順序のひび割れ幅に及ぼす影響を調べた。その結果,収縮拘束試験体で は二つのひび割れの発生日の差が小さく発生順序の影響は明瞭ではなかった。両引試験体では減 力時と加力時の鉄筋ひずみ分布ならびにひび割れ幅を比較することによって,ひび割れ発生順序 について考察した。また,付着解析によって収縮拘束ひび割れ試験体におけるひび割れ幅を計算 した。

キーワード:ひび割れの発生順序,収縮拘束ひび割れ試験,両引試験,付着解析,ひび割れ幅

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮による鉄筋コンクリー ト部材のひび割れ幅の算定法を前報¹⁾において述 べた。そこでは付着解析によって鉄筋ひずみとコ ンクリートひずみ分布を求め,そのひずみの差を 積分することによってひび割れ幅を計算した。実 験に用いた試験体は,収縮拘束ひび割れ試験体の 断面中央に鉄筋を埋設したもので,試験体の長さ は軸方向の中央にひび割れが一つ生じる長さであ り、ひび割れ幅の計算値は実験結果とほぼ一致し、 計算方法の妥当性を示した。一方,一般に鉄筋コ ンクリート壁においては複数のひび割れが発生す る。前報²⁾においては壁の拘束率を100%とし, 鉄筋ひずみの長さ方向の積分値が零であることを 条件に乾燥収縮の増加とともにひび割れの幅と数 が増えていくことを解析より求めた。そこでは、 複数のひび割れが生じた場合のそれらの幅は同じ 値として計算される。

本報告では,ひび割れの発生順序のひび割れ幅 に及ぼす影響を把握するために,二つのひび割れ が生じる長さの収縮拘束ひび割れ試験体を作製し た。また,両引試験体も作製し,繰返し載荷によ ってもひび割れ発生順序のひび割れ幅に及ぼす影 響を調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

コンクリートは普通ポルトランドセメントを用 いたレディーミクストコンクリートで,**表**-1に コンクリートの調合を,**表**-2にコンクリートの 力学的性質を示す。スランプは 20.5cm,空気量は 4.4%であった。鉄筋は横ふしの異形鉄筋 D10,D13 を用いた。

表 - 1 コンクリートの調合

		調	合			フニンプ	穴生旦
W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				エス里	
(%)	(%)	W	С	S	G	(CIII)	(%)
57	45.8	184	340	766	945	20.5	4.4

表-2 コンクリートの力学的性質

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
7	24	1.6	22.6
14	26	1.9	23.5
28	29	2.2	21.4

2.2 試験体の種類と形状

試験体の種類と形状をそれぞれ表 - 3と図 - 1 に示す。試験体は異形鉄筋を埋設した一軸拘束ひ

*1	大阪大学工学研究科	建築工学専攻	院生	(正会員)
*2	大阪大学工学研究科	建築工学専攻	教授	工博(正会員)
*3	大阪大学工学研究科	建築工学専攻	助手	(正会員)
*4	大阪大学工学研究科	建築工学専攻	講師	工博(正会員)



び割れ試験体(以下拘束試験体と呼ぶ,試験体記号 R)と両引試験体(試験体記号LB)である。

拘束試験体は2つのひび割れが生じるように拘 束区間を1200mmとし,ひび割れ位置を指定する ため2箇所にスリットを設けた。

両引試験体も同様に2個所にひび割れが生じる ようスリットを設け,全長1800mmとした。埋設 した鉄筋にはひずみ測定のためほぼ50mm間隔で 検長1mmの箔ゲージを貼付した。

2.3 実験方法及び測定方法

(1) 一軸拘束ひび割れ試験体

コンクリート材齢7日まで恒温恒湿室(20±2 60±5%)で湿潤養生を行い,型枠脱型後同室で 測定を開始した。鉄筋ひずみは4時間間隔で自動 計測した。ひび割れ幅はスリットを跨ぐ打設面, 底面を検長 100mm のコンタクトストレインゲー ジ(精度 1/1000mm)で測定した。

(2) 両引試験体

試験はコンクリート材齢 30~32 日に実施した。 両引試験は実構造物の壁における新たなひび割れ の発生による鉄筋応力の変動を想定して鉄筋応力 100N/mm² および 200N/mm² 相当の荷重階におい てその応力の 1/2 の荷重まで減力した繰返し載荷 を各1回行った。測定項目は鉄筋ひずみとひび割 れ幅で,拘束試験体と同じように測定した。なお, 載荷速度(鉄筋応力)は約 10N/mm²/分で,収縮による鉄筋応力の増加速度より早く,付着クリープは 生じていない³⁾が,鉄筋応力の変動によるひび割 れ幅への影響は検討できると考えられる。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの乾燥収縮・クリープ係数

図-2に付着解析に用いる材齢 52 日までの乾燥 収縮ひずみおよびクリープ係数の経時変化を示す。



3.2 収縮拘束実験

(1) 鉄筋ひずみ分布

図-3に拘束試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。 試験体 RD10 は材齢 9 日にスリット A, B 位置に ひび割れがほぼ同時に発生した。RD13-1 は材齢9 日に一つ目のひび割れが B に発生し, 材齢 10 日 に二つ目のひび割れが A に発生した。RD13-2 は 材齢 12 日に A に発生し, 材齢 13 日に二つ目のひ び割れが B に発生した。図には二つ目のひび割れ 発生前後と材齢 48 日の鉄筋ひずみ分布を示して いる。これらの図から一つ目と二つ目のひび割れ 位置の鉄筋ひずみの大きさと鉄筋ひずみ分布の形 状がほぼ一致していることが分かる。また二つ目 のひび割れが発生したときの一つ目の鉄筋応力の 変化を調べる目的で , (b') , (c')図に二つ目のひび 割れが発生したときのひずみ分布の拡大図を示す。 RD10 は一つ目と二つ目のひび割れがほぼ同時に 発生し,鉄筋ひずみ分布の変化を捉えることがで きなかった。RD13-1 は二つ目のひび割れの発生に よって B の鉄筋応力が約 3.57N/mm² 減少し, RD13-2 は約 3.78N/mm²減少した。二つ目のひび割 れにより一つ目のひび割れ位置の鉄筋応力が減少

1500 材齢9日 鉄筋ひずみ (×10⁻⁶) 1200 材齢9日 材齢48日 900 600 300 40 40 20 В 300 600 中央からの距離 (cm) (a) RD10 の鉄筋ひずみ分布 1500 材齢9日 材齢10日 材齢48日 鉄筋ひずみ (×10⁻⁶) 1200 900 600 300 В ′4N 40 20 300 600 中央からの距離 (cm) (b) RD13-1 の鉄筋ひずみ分布 200 材齢9日 材齢10日 鉄筋ひずみ (×10⁻⁶) 100 60 -40 -\20 Ň 20 ∖\40 Æ0 F '100 -200 中央からの距離 (cm) (b') RD13-1 (拡大図) 1500 材齢12日 材齢13日 材齢48日 1200 鉄筋ひずみ (×10⁻⁶) 900 600 300 40 -40 -20 Ć 20 60 А В 30 -600 中央からの距離 (cm) (c) RD13-2 の鉄筋ひずみ分布 300 材齢12日 材齢13日 鉄筋ひずみ (×10⁻⁶) 200 100 -60 -20 20 40 60 4h h A В 100 200 中央からの距離 (cm) (c') RD13-2 (拡大図)

したのは新たなひび割れの発生による拘束率の低

図-3 鉄筋ひずみ分布

下によるものである。また材齢 48 日における二つ のひび割れの鉄筋ひずみの大きさはほぼ一致して いる。

(2) ひび割れ幅の経時変化

図 - 4にひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割 れは各試験体とも A, B の打設面,底面のいずれ かに発生し,RD10とRD13-2のひび割れは数日後 に貫通した。RD13-1 は B のひび割れが貫通した が,A のひび割れは底面まで貫通せず,その後試 験体中央部分の底面に三つ目ひび割れが発生した。 材齢 48 日のひび割れ幅の実測値(打設面,底面の 平均値)と計算値,解析値を表-4に示す。ひび割



表 - 4 ひび割れ幅の実測値と計算値

試験体 記号	スリット 位置	ひび割れ 発生日	実測値	計算値	解析值	
0040	А	9	0.18	0.20	0.18	
RD10	В	9	0.26	0.22		
DD12 1	А	10		0.12	0.15	
KD13-1	В	9	0.16	0.15	0.15	
DD12 2	А	12	0.16	0.18	0.15	
KD13-2	В	13	0.18	0.19	0.15	

材齢:48日,単位(mm)

れ幅の計算値は実測鉄筋ひずみ分布とコンクリートひずみ分布で囲まれる面積から求めている。なおコンクリートのひずみ分布は実測鉄筋ひずみ分布から求まる鉄筋応力を用いて計算により求めた。 表-4からA,B位置のひび割れ幅の差,すなわちひび割れ発生順序の影響が小さいことが分かる。

3.3 **両引試験**

(1) 鉄筋ひずみ分布

図 - 5 に両引試験における加力時の鉄筋ひずみ 分布を示す。LBD10 は荷重 15kN でスリット B に ひび割れが生じ,18 kN で二つ目のひび割れが A に発生した。24.5kN では三つ目のひび割れが試験 体中央部分に発生した。LBD13-1 は荷重 6kN で B に,7 kN で A にひび割れが発生した。15 kN で は三つ目のひび割れが試験体中央部分に発生した。 LBD13-2 では荷重 4kN で A に,9kN で B にひび 割れが発生し,22kN で三つ目のひび割れが試験体 中央部分に発生した。ひび割れ位置 A,B の鉄筋 ひずみとひずみの分布形状は各試験体ともほぼ一 致している。なお,LBD10 は三つ目のひび割れが 発生したとき B のひび割れ位置で鉄筋が降伏した。 (2) 荷重とひび割れ幅の関係 図 - 6 に荷重とひび割れ幅の関係を示す。前述 のように RC 壁における新たなひび割れの発生に よる鉄筋応力の減少を想定して,鉄筋応力度 100N/mm² および 200N/mm² において(図中の X, Y)1/2の荷重まで減力し,繰返し載荷を行ってい る。ただし,LBD10では2つ目のひび割れが生じ た鉄筋応力度 250N/mm² 時点(W)で減力し,繰 返し載荷を行った。ひび割れはスリットA,Bに おいて,試験体LBD10,LBD13-2 は異なる荷重階 で,試験体LBD13-1 は同じ荷重階で発生した。い ずれの場合もA,B位置にひび割れが生じた後, A,B位置のひび割れ幅は同程度となっている。

減力時のひび割れ幅を表 - 5 に示す。b は減力 開始時のひび割れ幅,c は減力時の幅,d は再加力 時の幅,a は減力時の荷重と同じ初荷重時の幅で ある。この表からひび割れ幅の回復量が小さいこ とが分かる。これは減力時の鉄筋ひずみ分布の図 -7に示されているようにひび割れ位置の鉄筋ひ ずみは荷重に応じて減少しているがそれ以外の鉄 筋ひずみの回復が認められないからである。これ らのことから,RC 壁のような実部材において収 縮ひび割れが順次発生する場合,既に生じている







表 - 5 減力時のひび割れ幅(mm)



90

(c) LRD13-2 図 - 7 繰り返しによる鉄筋ひずみ分布の変化

0

中央からの距離 (cm)

30

60

-60

-30

-90

ひび割れの新たなひび割れの発生に起因する鉄筋 応力の緩和によるひび割れ幅の回復は小さく,鉄 筋応力緩和量が大きいと新たなひび割れ幅との差 は大きいが(c-b に対応する),鉄筋応力が増加し

新たな応力域に達すると両ひび割れ幅の差は小さ くなること(d-bに対応する)が考えられる。

3.4 付着解析によるひび割れ幅の算定

(1) 拘束試験体の鉄筋ひずみ

一軸拘束試験体の拘束鋼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ことか 5

$$\varepsilon_{RS} \cdot E_s \cdot A_{SR} + \varepsilon_{s\max} \cdot A_s \cdot E_s = 0 \tag{1}$$

同じく拘束鋼材の収縮変形と鉄筋の収縮変形が等 しいことから

$$\mathcal{E}_{RS} \cdot L = \int_0^L \mathcal{E}_s(x) \cdot dx \tag{2}$$

が得られる。

ここに, ε_{RS} :拘束鋼材のひずみ, $\varepsilon_{S}(x)$:鉄筋 ひずみ分布, \mathcal{E}_{\max} :ひび割れ位置の鉄筋ひずみ, E_s, E_c :鉄筋およびコンクリートのヤング係数, $A_{\rm S}$:鉄筋断面積, $A_{\rm SR}$:拘束鋼材断面積, L: 拘束区間の長さ

また,鉄筋のひずみ分布はひび割れ位置の引張 応力度が $E_x \times \varepsilon_{max}$ として付着解析によって求め る。ひび割れ幅は,鉄筋ひずみ分布とコンクリー トひずみ分布で囲まれた面積として計算する。

付着解析では,図-8に示す bi-linear モデル³⁾ を用い,乾燥収縮およびクリープ係数は実測値を 用いた。図-9にひび割れ発生後の解析のフロー チャートを示す。



(2) 解析結果

図-10 に材齢 48 日における拘束試験体の鉄筋 ひずみ分布の実測値と解析値を示す。ひび割れ位 置の鉄筋応力および鉄筋ひずみ分布の解析値は実 測値の鉄筋ひずみ分布とよく一致している。材齢 48 日におけるひび割れ幅の解析値を前掲の表-4に示す。解析値は実測値とほぼ一致している。

4. まとめ

本実験結果をまとめると次のようになる。 (1) 拘束ひび割れ試験体では 2 つ目のひび割れが 生じた瞬間,1 つ目のひび割れ位置の鉄筋応力が 若干減少し,両位置の鉄筋ひずみはほぼ等しくな ったが,ひび割れ幅は一つ目のひび割れが若干大 きかった。しかし,時間の経過とともにひび割れ 幅へのひび割れ発生順の影響は認められなくなっ た。

(2) 両引き試験体の繰返し載荷試験結果から,二 つ目のひび割れの発生によって鉄筋応力が減少し ても一つ目のひび割れ幅の回復は小さいこと,再 度応力が増加し新たな応力に達すると二つのひび 割れの幅は同程度となることが推察される。

(3) 拘束ひび割れ試験体におけるひび割れ幅の時間経過による変化を付着解析によって捉えることができた。

参考文献

 1) 劉 勇,大野義照,中川隆夫:鉄筋コンクリート 部材の乾燥収縮ひび割れ幅算定法の検討,コンク リート工学年次論文集, Vol. 25, No.1, pp.437~ 442,2003

2) 中川隆夫,大野義照,徐泰錫,岸本一蔵:鉄筋コン クリート壁における乾燥収縮ひび割れ幅の算定方 法,コンクリート構造物の長期性能照査支援モデ ルに関するシンポジウム,日本コンクリート工学 協会,pp.345~350,2004

3) 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

