

論文 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れ幅の予測

大野義照*1 中川隆夫*2 劉勇*3 岸本一蔵*4

要旨: 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れ幅の算定に用いる等価付着消失長さに及ぼす各種要因の影響を調べ, 等価付着消失長さの計算式を導いた。その付着消失長さを用いて両端が拘束された鉄筋コンクリート壁におけるコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の予測を行い, 精算解である付着解析による予測結果と比較し, 妥当な結果が得られた。

キーワード: 乾燥収縮, ひび割れ, ひび割れ幅の予測, 鉄筋コンクリート壁

1. はじめに

通常のコンクリートを用いる限り鉄筋コンクリート(RC)部材の乾燥収縮によるひび割れの発生を防ぐことは困難であり, RC 壁では誘発目地を設けてひび割れを集中させたり, あるいは鉄筋によりひび割れを分散させるなどの対策がとられている。鉄筋によるひび割れ制御に関しては, ひび割れ発生時に鉄筋が降伏しないように最小鉄筋比が定められている¹⁾ものの, 鉄筋の制御効果が定量的に予測・評価されるまでには至っていない。その理由は, 壁の乾燥収縮ひび割れ幅を予測できないことにある。

既報^{2),3)}において, 一軸拘束RC試験体における乾燥収縮ひび割れ幅を, 付着解析によってひび割れ発生後の鉄筋ひずみ分布を捉えることによって, 長期にわたって計算できることを示した。また, 等価付着消失長さの概念を導入した簡単なひび割れ算定式を提案した。その算定式の特徴はは次の通りである。

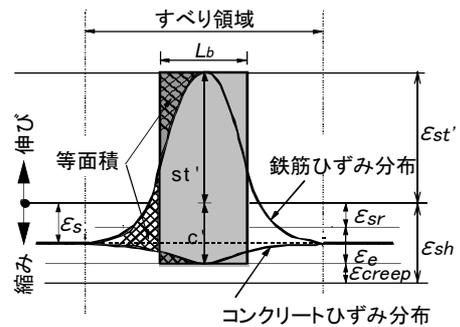
RC 壁体における乾燥収縮ひび割れ近傍の鉄筋およびコンクリートひずみの分布は図-1 のようになる。ひび割れが発生するとひび割れ位置の鉄筋ひずみは st' となり, 一方ひび割れ近傍のコンクリートのひずみは拘束から解放され, $sh - creep$ となる。ひび割れ幅は鉄筋の伸びとコンクリートの収縮変形の差で, 図の鉄

筋ひずみとコンクリートひずみの2つの曲線で囲まれる部分の面積に相当する。

同図の網掛け部分の面積が等しくなるように長さ L_b を定義すれば, ひび割れ幅は式(1)で計算される。ここに, L_b を等価付着消失長さと呼ぶ。記号は図-1中に示している。

$$w = \left\{ \epsilon_{st'} + (\epsilon_{sh} - \epsilon_{creep}) \right\} \times L_b \quad (1)$$

本報では, 付着解析によって鉄筋ひずみ分布を求めてひび割れ幅を算定し, 上式から L_b を求めることにより, 各種要因の L_b へ及ぼす影



- ϵ_{sh} : ひび割れ発生直前の自由乾燥収縮
- ϵ_{sr} : ひび割れ発生直前の外部拘束によって拘束されたコンクリートひずみ
- ϵ_e : ひび割れ発生直前のコンクリートの伸び弾性ひずみ
- ϵ_{creep} : コンクリートのクリープひずみ
- $\epsilon_{st'}$: ひび割れ位置の鉄筋ひずみ
- ϵ_s : すべり領域外の鉄筋ひずみ

図-1 ひび割れ近傍模式図

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

響を調べ、実用的な L_b 算定式を誘導する。次に RC 壁の収縮ひび割れ幅を L_b を用いて算定し、付着解析による精算解と比較した。

2. 等価付着消失長さ L_b の算定

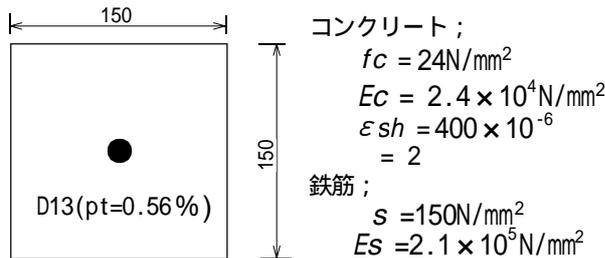
基準断面と基本設定値から L_b を求め、次にパラメータの組み合わせで各要因を種々変化させて L_b に及ぼす各要因の影響を調べ、その影響を係数で表現した。

なお、 L_b は前述のように付着解析^{4),5)}によって鉄筋ひずみ分布やひび割れ幅を計算し、それらを用いて式(1)から算出した。

2.1 基準断面とパラメータ

(1) 基準断面

基準断面は異形鉄筋 D13 を配した正方形断面とし、コンクリートおよび鉄筋の諸数値は次のとおりである。



ここに、 s : ひび割れ位置の鉄筋応力
 E_c : コンクリートの弾性係数
 sh : 乾燥収縮、 α : クリープ係数
 f_c : コンクリート強度

(2) パラメータ

- 1) 鉄筋径: D10, D13, D16
- 2) $s=50, 100, 150, 200 \text{ N/mm}^2$
- 3) $E_c=2.1 \times 10^4, 2.4 \times 10^4, 2.7 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
- 4) $sh=200 \times 10^{-6}, 400 \times 10^{-6}, 600 \times 10^{-6}, 800 \times 10^{-6}, 1000 \times 10^{-6}$
- 5) $\alpha=1, 2, 3$
- 6) $f_c=21, 24, 27, 30, 33, 36 \text{ N/mm}^2$

なお、付着応力度 - すべり S 関係は完全弾塑性型曲線とし、次式を用いている⁶⁾。なお、

持続載荷を考慮して K_t, τ_{yt} を与えている。

$$\tau = K_t S \quad (< y)$$

$$\tau = \tau_{yt} \quad (> y)$$

$$K_t = 0.6 K_0 \quad (2)$$

$$\tau_{yt} = 0.75 \tau_0 \quad (3)$$

ただし、 $K_0 = 11600 \times (f_c / 24)^{2/3} \times (13 / D)$

$$\tau_0 = 34.3 \times (f_c / 24)^{2/3}$$

D : 鉄筋径

2.2 等価付着消失長さ

(1) 基準断面の L_b

基準断面の L_b を計算して 300.2mm を得た。他の L_b と区別するため基準断面の L_b を $L_b(0)$ とする。

$$L_b(0) = 300 \text{ mm}$$

(2) 各要因の L_b におよぼす影響

各要因を変化させて L_b を求め、 $L_b(0)$ に対する比率を求める。

まず、ひび割れ位置の鉄筋応力 50, 100, 150, 200 N/mm^2 において、乾燥収縮を $200 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ まで変化させて L_b の $L_b(0)$ に対する比率 K_{sh} を求めると図 - 2 のようになる。同図では各鉄筋応力における K_{sh} を実線で結んでいる。乾燥収縮が大きくなると L_b も大きくなり、乾燥収縮と K_{sh} の関係はほぼ一次の関係にあり、鉄筋応力が大きくなると一次式の傾きは大きくなるがその傾きの変化は小さいので L_b を次の一次式で表すことにする。同式を図中太破線で示す。

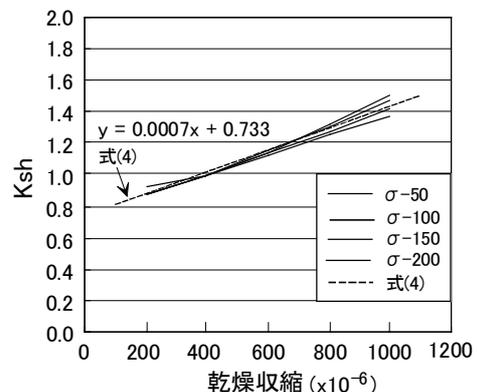


図-2 乾燥収縮の影響 (K_{sh})

$$K_{sh} = 0.0007 \sigma_{sh} + 0.733 \quad (4)$$

次にコンクリート圧縮強度 f_c と $L_b / L_b(0)$ ($= K_{f_c}$) との関係を求めると図-3のようになり、コンクリートの付着強度を f_c の関数で与えているので f_c が増加すると L_b は小さく、すなわち K_{f_c} は小さくなる。両者の関係を一次式で表すと次式が得られた。

$$K_{f_c} = -0.019 \times f_c + 1.4622 \quad (5)$$

クリープ係数 と $L_b / L_b(0)$ ($= K$) との関係を求めると図-4のようになり、の影響は小さいが ϕ が増加すると L_b はわずかながら小さくなる。両者の関係を一次式で表すと次式が得られた。

$$K = -0.0131 \times \phi + 1.025 \quad (6)$$

同様に鉄筋径と $L_b / L_b(0)$ ($= K_d$) との関係を求めると図-5のようになり、鉄筋応力の影響は小さく、両者の関係を一次式で表すと次式が得られた。

$$K_d = 0.0681 \times D + 0.106 \quad (7)$$

壁に用いられる鉄筋は、通常 D10, D13, D16 の3種類であるので、これらの鉄筋について K_d をそれぞれ 0.78, 1.0, 1.19 とする。

最後にひび割れ位置の鉄筋応力 と $L_b / L_b(0)$ ($= K$) との関係乾燥収縮が異なる場合について求めると図-6のようになる。が大きくなると L_b は大きくなり、乾燥収縮の K への影響は小さく、両者の関係を一次式で表すと次式が得られた。

$$K = 0.003 \times \sigma + 0.560 \quad (8)$$

なお、コンクリートの弾性係数の L_b への影響は小さく $L_b / L_b(0)$ はほぼ1であり、また、通常の壁で想定される断面では、コンクリート断面が変化しても $L_b / L_b(0)$ はほぼ1であるので、コンクリートの弾性係数やコンクリート断面積

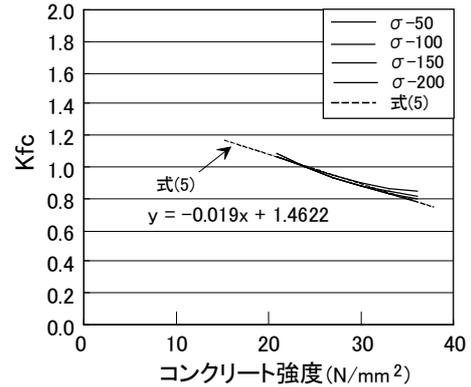


図-3 コンクリート強度の影響 (K_{f_c})

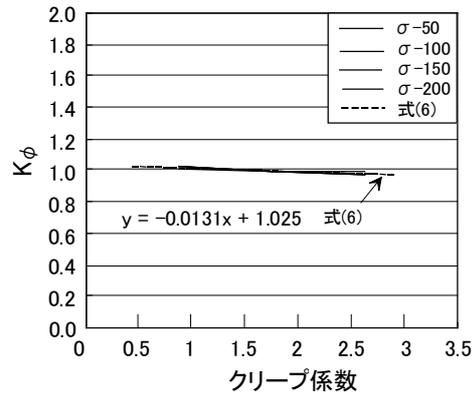


図-4 クリープの影響 (K_ϕ)

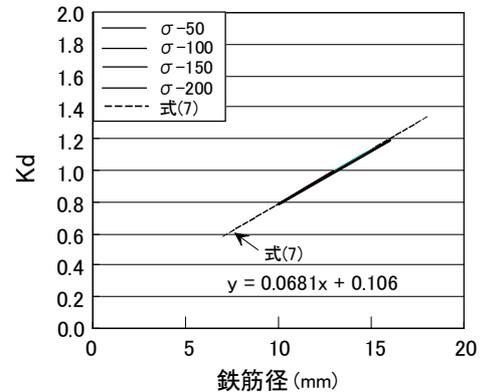


図-5 鉄筋径の影響 (K_d)

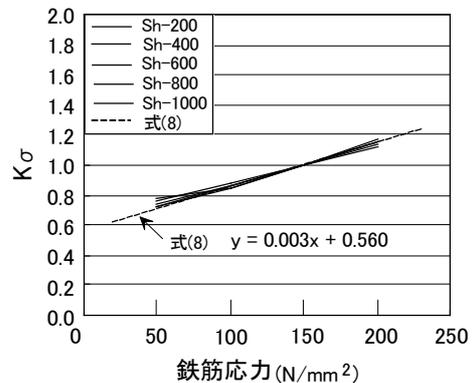


図-6 鉄筋応力の影響 (K_σ)

の影響は、考慮しない。

以上まとめると、等価付着消失長さ L_b の算定式として次式が得られる。

$$L_b = K \cdot L_b(0) \quad (9)$$

$$L_b(0) = 300(\text{mm})$$

$$K = K_{sh} \cdot K_{fc} \cdot K_d \cdot K_\phi \cdot K_\sigma$$

$$K_{sh} = 0.0007 \times \varepsilon_{sh} + 0.733$$

$$K_{fc} = -0.019 \times f_c + 1.46$$

$$K_d \text{ は } K_{d10} = 0.78(D10)$$

$$K_{d13} = 1.00(D13)$$

$$K_{d16} = 1.19(D16)$$

$$K_\phi = -0.013 \times \phi + 1.025$$

$$K_\sigma = 0.003 \times \sigma + 0.560$$

L_b の計算式(9)の適合性を検討するために式(9)から計算した L_b と付着解析から求めた L_b の比を表 - 1 に示す。その比率は 0.93 ~ 1.04 の範囲にあり、式(9)は妥当であるといえる。

表-1 付着解析から求めた L_b 値に対する
計算式から求めた L_b 値の比

パラメータ		$\sigma=500$	$\sigma=1000$	$\sigma=1500$	$\sigma=2000$
sh	200	0.93	1.02	1.02	0.99
	400	1.00	1.03	1.03	1.01
	600	1.00	1.02	1.03	1.03
	800	0.97	1.01	1.03	1.04
	1000	0.94	0.99	1.02	1.04
fc	21	1.00	1.02	1.01	0.99
	24	1.00	1.03	1.03	1.02
	27	1.00	1.04	1.04	1.03
	30	0.98	1.03	1.04	1.03
	33	0.96	1.01	1.02	1.02
	36	0.92	0.98	1.00	1.00
D	10	1.00	1.03	1.03	1.01
	13	1.00	1.03	1.03	1.02
	16	1.00	1.03	1.03	1.02
	1	1.00	1.03	1.02	1.01
	2	1.00	1.03	1.03	1.02
	3	1.00	1.04	1.03	1.02

3. RC 壁の収縮ひび割れ幅の算定

3.1 RC 壁と算定条件

ひび割れ幅算定対象の RC 壁を図 - 7 に示す。壁厚さは 100mm で、異形鉄筋 D13 が 150mm 間隔で配置されている。壁長は 10m で、両端は完全に拘束され、壁全長の長さ変化はないものとする。幅の算定対象のひび割れは高さ方向中央

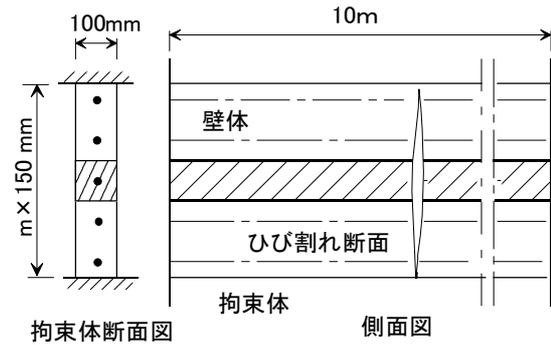


図-7 RC壁

位置のひび割れとし、一軸拘束状態にあるものとする。

材料の諸数値

コンクリート圧縮強度; $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$

コンクリートヤング係数; $E_c = 2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

コンクリート引張強度; $f_t = 1.7 \text{ N/mm}^2$

($= 24 \times 1/10 \times 0.7$)

乾燥収縮の最終値; $sh_n = 400 \times 10^{-6}$

1 本目のひび割れは、クリープ係数 μ を 0.5 とし、等価ヤング係数 $E_c' = E_c / (1 + \mu)$ を用いてひび割れ発生時の乾燥収縮を計算すると、 f_t / E_c' より、 $1.7 / (2.5 \times 10^4) \times 1.5 = 100 \times 10^{-6}$ となり、乾燥収縮 100×10^{-6} の時に発生する。

3.2 付着解析によるひび割れ幅の予測

ひび割れ幅算定のフローを図 - 8 に示す。

解析手順：

1) 乾燥収縮 $sh = 100 \times 10^{-6}$ で、ひび割れ位置の鉄筋応力 s の初期値を与え、付着解析によって鉄筋ひずみ分布を求め、部材全長 10m にわたって鉄筋ひずみを積分し、積分値が 0 になるまで s を増加させて繰り返す。積分値が 0 の時にひび割れ幅を計算する。その時の鉄筋応力は 154 N/mm^2 、ひび割れ幅は 0.21 mm である。

2) 乾燥収縮 sh を増加させ、1) の計算を繰り返す。乾燥収縮が 130×10^{-6} の時 2 本目のひび割れが発生する。その直前のひび割れが 1 本として計算されるひび割れ幅は 0.30 mm 、ひび割れが 2 本として計算されるひび割れ幅は 0.24 mm である。図 - 9 に 2 本目のひび割れ発生直後のひずみ分布を示す。

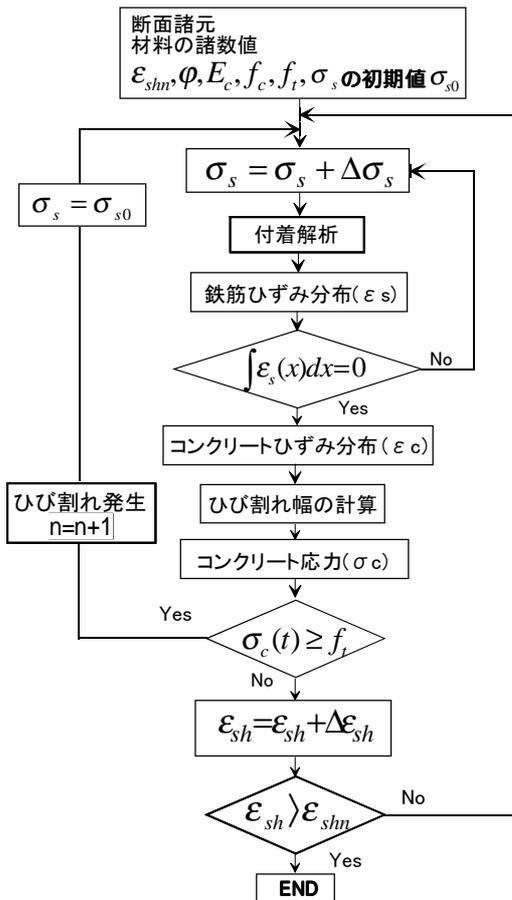


図-8 ひび割れ幅算定フロー

3) 以下，乾燥収縮 sh が 400×10^{-6} まで繰り返す。計算結果をまとめて表 2 に示す。

$sh = 190 \times 10^{-6}$ の時に 4 本目のひび割れが発生する。その時のひび割れ幅は 0.26mm ，その直前の 3 本目のひび割れ幅は 0.31mm である。

図 10 に 4 本目のひび割れが生じた時のひずみ分布を示す。

$sh = 400 \times 10^{-6}$ では 11 本のひび割れが生じ，その幅は 0.27mm である。なお，実際には早く発生したひび割れの幅は長期にわたって後から発生したひび割れより大きいと考えられるが，本計算においてはひび割れ発生順序は考慮されていない。

3.3 L_b を用いたひび割れ幅の算定

ひび割れ位置の鉄筋応力，コンクリートひずみが分かればひび割れ幅 W は式(1)から計算される。

ひび割れ位置の鉄筋ひずみは壁全長の長さ変化がないことより次式から計算される。

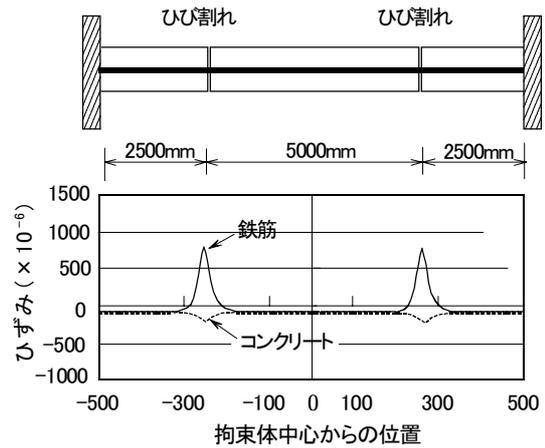


図-9 2本目のひび割れ発生直後のひずみ分布

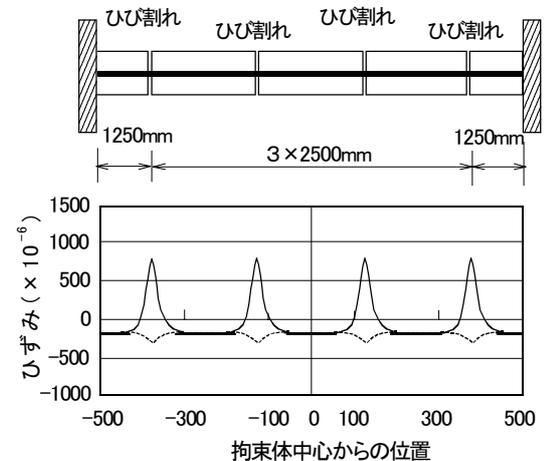


図-10 4本目のひび割れ発生直後のひずみ分布

$$nLb \times st' - (L - nLb) \times s = 0 \quad (10)$$

ここに， L ：壁全長

st' ：ひび割れ位置の鉄筋ひずみ

n ：ひび割れ本数

s ：すべり域外の鉄筋ひずみ(図 1 参照)

ひび割れ位置の鉄筋ひずみすなわち鉄筋応力 s を与えると，次式より s が計算され，式(10)が成り立つまで収束計算を行う。

$$s = Ps/Es/As \quad (11)$$

$$Ps = P - Pc$$

$$P = s \times As$$

$$Pc = (P/As/Es - sh)/(1/Es/As - 1/Ec'/Ac)$$

ここに，

P ：ひび割れ位置の鉄筋の引張力

Ps ：すべり域外の鉄筋の圧縮力

Pc ：すべり域外のコンクリートの引張力

As ：鉄筋断面積

Ac ：コンクリート断面積

前述のように1本目のひび割れは $sh = 100 \times 10^{-6}$ で発生する。 $sh = 100 \times 10^{-6}$ で、 s の初期値を与え、式(9)を用いて L_b を計算し、式(10)が成り立つまで収束計算を行い、ひび割れ幅を計算する。次に sh を増加させ、同様な計算を行い、すべり領域外のコンクリート応力 c を次式より求める。

$$c = Pc/Ec'/Ac \quad (12)$$

c がコンクリートの引張強度 ft に至るまで乾燥収縮 sh を増加させる。 c が ft に達し、2本目のひび割れが発生すると式(10)が成り立つまで繰り返して s を求めてひび割れ幅を計算する。

以下、乾燥収縮が最終値 400×10^{-6} に達するまで繰り返す。

算定結果を表-3に示す。付着解析による計算結果と比較しほぼ妥当な結果が得られている。

RC壁のひび割れ幅予測式を G.D.Base and M.H.Murray も提案している⁶⁾。上述の算例について同式により算定すると、ひび割れ本数6本、ひび割れ幅は 0.17mm で、本計算値よりひび割れの本数が少なく、ひび割れ幅はかなり小さい。これは付着消失長さに対応するすべり域を小さく評価しているためと考えられる。

4. まとめ

本報告で得られた成果をまとめると次のようになる。

- 1) RC壁の収縮ひび割れ幅の算定に用いる等価付着消失長さ L_b におよぼす各種要因の影響を調べ、それらの影響を考慮した L_b の算定式を導いた。
- 2) 両端が固定され全長の変化のないRC壁の収縮ひび割れ幅を精算解である付着解析および L_b を用いた略算解によって計算し、略算解の妥当性を確認した。なお、G.D.Baseらの提案式はひび割れ幅をかなり小さく算定している。

表-2 付着解析によるひび割れ幅算定結果

ひび割れ数 n		乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	鉄筋応力 (N/mm^2)	ひび割れ幅 (mm)
1	A	100	154	0.21
	B	130	195	0.30
2	A	130	162	0.24
	B	160	192	0.31
3	A	160	165	0.25
	B	190	189	0.31
4	A	190	164	0.26
	B	210	179	0.30
9	A	320	142	0.26
	B	350	152	0.29
10	A	350	138	0.26
	B	380	146	0.29
11	A	380	134	0.25
	—	400	138	0.27

A: ひび割れ発生時, B: 次のひび割れの発生直前

表-3 L_b を用いたひび割れ幅算定結果

ひび割れ数 n		乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	鉄筋応力 (N/mm^2)	ひび割れ幅 (mm)
1	A	100	153	0.21
	B	130	196	0.31
2	A	130	162	0.24
	B	160	192	0.31
3	A	160	164	0.26
	B	190	187	0.32
4	A	190	164	0.27
	B	220	181	0.32
9	A	330	141	0.29
	B	360	147	0.32
10	A	360	135	0.29
	B	390	140	0.32
11	A	390	131	0.30
	—	400	132	0.31

A: ひび割れ発生時, B: 次のひび割れの発生直前

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準
- 2) 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報告集, Vol. 25, No.1, pp.437-442, 2003
- 3) 中川隆夫, 大野義照, 山本純大, 鈴木計夫: コンクリートの収縮ひび割れ性状に及ぼす初期養生, 単位水量, 鉄筋量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.745-750, 1997
- 4) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 太田寛: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.25~28, 1988
- 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) 岩田樹美, 李振宝, 大野義照: 端部筋の抜け出しを考慮した鉄筋コンクリートスラブの長期たわみ算定, 日本建築学会構造系論文集, 第510号, pp.145~152, 1998.8
- 7) G.D.Base and M.H.Murray: New Look at Shrinkage Cracking, Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, Vol.CE24, No.2 pp.171-176, 1982