

論文

[2067] RC はりの長期ひび割れ幅に及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響

李 振宝*1・大野義照*2・鈴木計夫*3

1. まえがき

持続荷重下における鉄筋コンクリート（以下RCと略記）梁のひび割れ幅は圧縮側コンクリートのクリープによる鉄筋応力の増大、鉄筋の付着作用の減少（以下付着クリープと略記）による鉄筋ひずみの増加、およびひび割れ間コンクリートの収縮によって増大することが明らかにされている[1][2][3]。圧縮側コンクリートのクリープによる鉄筋応力の増大は既往の研究[4]によりほぼ解明されているが、付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮のひび割れ幅への影響は定量的に把握されるまでには至っていない。

本論では、この付着クリープおよびコンクリートの乾燥収縮のひび割れ幅の増加に対する影響に注目し、これらを考慮した長期ひび割れ幅算定式を付着理論に基づいて誘導した。また、予めスリットを入れてひび割れを生じさせた単純梁の持続荷重実験を行い、持続荷重下におけるひび割れ幅の増加を調べ、その影響要因を検討し、算定式の適合性を確認した。

2. 長期ひび割れ幅計算法

ひび割れ幅はひび割れの両側のコンクリートからの鉄筋の抜け出しからなると考え、鉄筋とコンクリート間の付着応力（ τ ）～すべり（ S ）関係を導入して、付着解析よりその計算式を誘導する。なお、持続荷重下において新たなひび割れが発生しないひび割れ定常状態を対象とし、ひび割れ間隔の算定には建築学会P R C指針解説のひび割れ間隔計算式[5]を用いる。

2. 1 付着解析の弾性解に基づく基本式

梁引張側のひび割れ間の部分を取り出した両引きモデル（図1）において、 $\tau \sim S$ 関係は、図2に示すような完全弾塑性であるとする[6]。

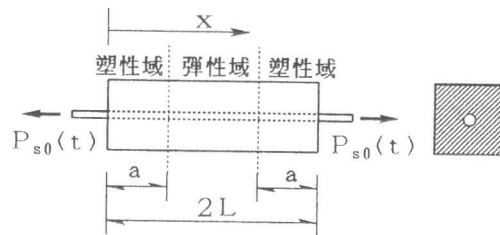


図1 両引きモデル

$\tau \sim S$ 関係が弾性域にある場合、付着解析[6]より持続荷重下における鉄筋の端部すべり量（抜け出し）を求めると、次のようになる。

$$S = \frac{e^{\alpha(t)L} - e^{-\alpha(t)L}}{\alpha(t)(e^{\alpha(t)L} + e^{-\alpha(t)L})} \left(\frac{P_{s0}(t)}{E_s A_s} + S_h(t) \right) \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \alpha(t) = \sqrt{\frac{1+n'p}{E_s A_s} UK_t} \quad (2)$$

$$n' = \frac{E_s}{E_c}, \quad E_c' = \frac{E_c}{1+\phi_t}, \quad p = \frac{A_s}{A_c}$$

E_s, A_s, U : 鉄筋のヤング係数、断面積、周長

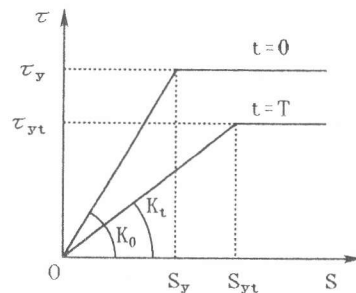


図2 $\tau \sim S$ 関係

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻（正会員）

*2 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

*3 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

$E_c, A_c, \phi_t, S_h(t)$: コンクリートのヤング係数、断面積 (梁においては有効断面 [7])、クリープ係数、自由乾燥収縮ひずみ

ひび割れ幅はひび割れの両側からの抜け出しからなり、(1)式より

$$W_{av} = 2S = 2Lq(t)(P_{S0}(t) / E_s A_s + S_h(t)) = L_{av}q(t)(\epsilon_{S_{max}}(t) + S_h(t)) \quad (3)$$

ここに、 W_{av} : 平均ひび割れ幅、 L_{av} : 平均ひび割れ間隔、 $L_{av} = 2L$ 、 $\epsilon_{S_{max}}(t)$: 持続荷重中時刻 t におけるひび割れ断面の鉄筋ひずみ、 $q(t)$: 付着特性に関する係数、平均鉄筋ひずみとひびわれ断面鉄筋ひずみとの比を表している。

$$q(t) = \frac{e^{\alpha(t)L} - e^{-\alpha(t)L}}{\alpha(t)L(e^{\alpha(t)L} + e^{-\alpha(t)L})} = \frac{ch(\alpha(t)L)}{\alpha(t)L} \quad (4)$$

ここに、 $ch(\alpha(t)L)$ は $\alpha(t)L$ の双曲正切関数で、 $q(t)$ と $\alpha(t)L$ の関係を図 3 に示す。同図から付着特性を表す $\alpha(t)$ およびひびわれ間隔 $L_{av}(=2L)$ が大きくなるに従って $q(t)$ が小さくなる。すなわち、コンクリートの鉄筋に対する拘束作用が大きくなるのがわかる。

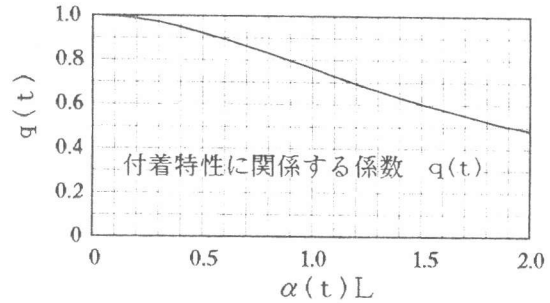


図 3 $q(t) \sim \alpha(t)L$ 関係

2. 2 付着解析の弾塑性解を考慮した修正

$\tau \sim S$ 関係が弾塑性両域にわたる場合、 $\tau \sim S$ 関係における塑性域が長くなるに従って、鉄筋の抜けだしの弾塑性解と弾性解との差が大きくなる。なお、弾塑性解は $\tau \sim S$ 関係の弾塑性を考慮した解で、弾性解は全域にわたって $\tau \sim S$ 関係を弾性とする解である。そこで、弾塑性解および弾性解を求め、次の数値シミュレーションにより弾性解 (3) 式を修正する。既往の実験結果 [6] に基づき、 $\tau \sim S$ 関係は次のように設定する。

$$\tau_{y0} = 40 \text{ kgf/cm}^2, \quad K_0 = 10000 \text{ kgf/cm}^3, \quad \tau_{yr} = 0.75\tau_{y0}, \quad K_t = \left[\frac{0.25 + 0.5t^{0.2}}{t^{0.2}} \right] K_0$$

ここに、 t : 持続荷重経過日数

(1) 鉄筋応力の影響

鉄筋応力が大きくなるに従って、 $\tau \sim S$ 関係における塑性域が長くなる。図 4 に示す有効断面を用い、ひびわれ間隔 $l_{av} = 20 \text{ cm}$ として鉄筋応力の影響を検討する。付着解析の弾塑性を考慮した抜け出しの弾性解に対する比を a_1 とし、その鉄筋応力に伴う変化を図 5 に示す。鉄筋応力 $\sigma_{S_{max}}$ が

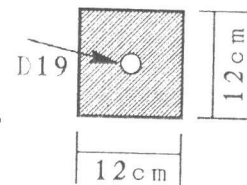


図 4 有効断面

1000 kgf/cm^2 までは $\tau \sim S$ 関係は弾性域にあり、それ以降は塑性域も現れ、 $\sigma_{S_{max}}$ の増加とともに a_1 がほぼ直線的に増加する。 a_1 と $\sigma_{S_{max}}$ の関係を簡単に式で表すと次のようになる。

$$a_1 = \begin{cases} 1 & \sigma_{S_{max}} \leq 1000 \\ 1 + (\sigma_{S_{max}} - 1000) \times 0.15 / 2000 & \sigma_{S_{max}} > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

(2) ひび割れ間隔の影響

鉄筋応力と同様にひび割れ間隔が大きくなると、

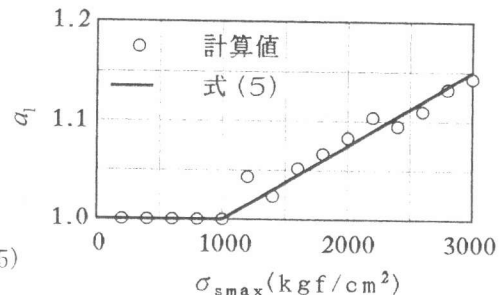


図 5 修正係数 a_1

τ ~ S 関係における塑性域が長くなる。弾塑性解の弾性解に対する比において、鉄筋応力の影響を除いたひびわれ間隔の影響を考慮する修正係数を図6(a)に示す。 a_2 はひび割れ間隔の増加とともにほぼ直線的に増加し、また鉄筋応力の大きい方がひびわれ間隔の影響も大きくなる。なお、算定は上記の(1)項と同様に図4に示した有効断面を用いて行った。以上の関係を式で表すと次のような式となる。

$$a_2 = \begin{cases} 1 & (\sigma_{S_{max}} \leq 1000 \text{ kgf/cm}^2) \\ 1 + (\ell - 20)(\sigma_{S_{max}} - 1000) \times 0.15 / 20000 & (\sigma_{S_{max}} > 1000 \text{ kgf/cm}^2) \end{cases} \quad (6)$$

図6(a)に示した a_2 の計算結果を(6)式の a_2 で割ったものを図6(b)に示す。その値は0.98から1.05の範囲にあり、(6)式が妥当であるといえる。

以上をまとめると、付着解析の弾塑性性を考慮した長期ひび割れ幅の計算式は次のようになる。

$$W_{a_2} = q'(t) L_{a_2} (\varepsilon_{S_{max}} + S_h(t)) \quad (7)$$

$$\text{ここに、} q'(t) = a_1 a_2 q(t) \quad (8)$$

ただし、 $a_1 a_2 \geq 1$

$q'(t)$ は付着解析の弾塑性性を考慮した付着に関する係数である。

3. 実験概要

3.1 試験体の種類と形状

試験体の種類を表1に示す。試験体の形状は持続荷重装置と合わせて図7に示す。実験要因は持続鉄筋応力、ひび割れ間隔、断面せいおよび圧縮筋の有無とし、引張鉄筋のかぶり厚さは5cmとした。ひびわれ間隔22cmは既往の計算式[5]から得た値で、12cmはゲージの検長を考慮してそのほぼ1/2として定めた。このようなひびわれ間隔を得るために等曲げスパン内にスリットを設けた。実験は恒温恒湿室および地下室の2カ所で行い、それぞれの乾燥収縮およびクリープ測定用のコントロール試験体を作成した。

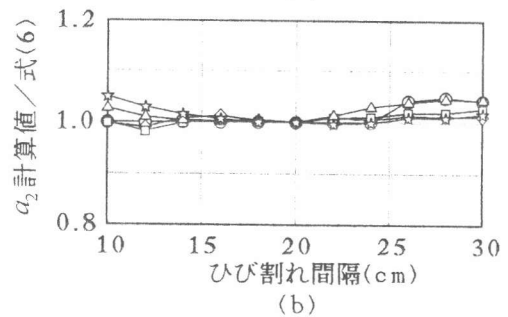
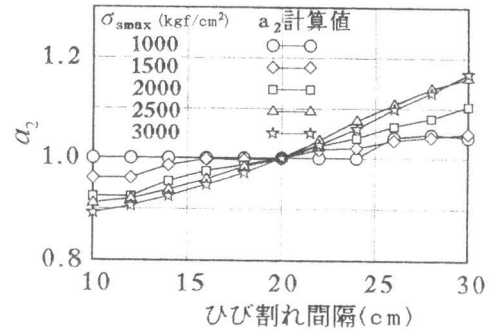


図6 修正係数 a_2

表1 試験体の種類

試験体名	断面 b×D (cm)	持続 鉄筋応力 (kgf/cm ²)	ひび割れ 間隔 (cm)	圧縮 筋の 有無	試験 場所
N0.1	12×24	2000	22	無	恒温 恒湿 室
N0.2			12		
N0.3		1000	22	有	
N0.4			22		
N0.5	12×42	0	22/12*	無	地下 室
N0.6		2000	22		
N0.7		1000			
N0.8		2000	22/12*	有	
N0.9					
N0.10		0		無	
N0.11	12×24	鉄筋なし			

*等曲げスパンの1/2スパンは22cmで、他の1/2スパンは12cmである。

表2 コンクリートの力学的性質

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
18	336	24.7	2.37×10^5

3. 2 使用材料

コンクリートは早強ポルトランドセメント、山砂および碎石を使用したレディミクスコンクリートを用いた ($W/C=47\%$ 、単位水量 $W=194\text{kg}$)。表 2 に持続載荷開始時の力学的性質を示す。鉄筋はD19の横ふし異形鉄筋SD345を用いた。

3. 3 載荷方法および測定項目

試験体は載荷の2日前まで湿布養生し、コンクリート材齢18~19日に載荷した。持続載荷方法は前掲

の図 7 に示す。鉄筋ひずみは検長2mmのワイヤストレーンゲージ (以下W.S.Gと略記) で、たわみはダイヤルゲージで測定した。鉄筋位置ひび割れ幅は検長4cmのコンタクトストレーンゲージ (以下C.S.Gと略記) で、圧縮側コンクリートのひずみは検長10cmのC.S.G、ひびわれ間のコンクリートひずみは検長10cmと4cmのC.S.Gで測定した。なお、コンクリートの乾燥収縮は梁断面と同じ断面の角柱試験体で測定し、クリープ試験体は梁幅と同じ12×12cm断面の角柱試験体を用いて行った (持続圧縮応力 42kgf/cm^2)。図 8 に乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$ の経時変化を示す。図中の曲線は最小2乗法によって求めた近似曲線である。載荷経過日数133日におけるクリープ係数 ϕ_t は2.2である。

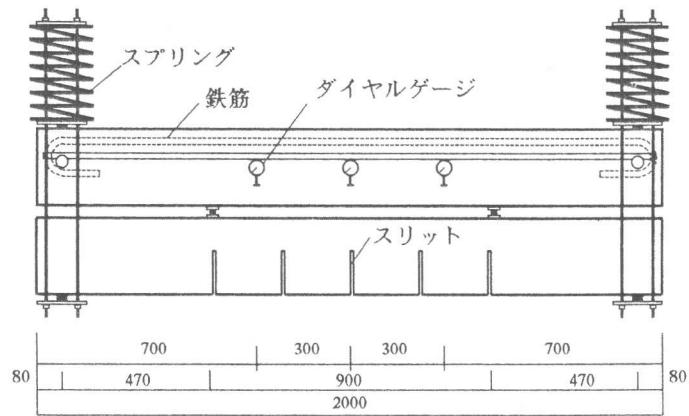


図 7 試験体形状および持続載荷装置

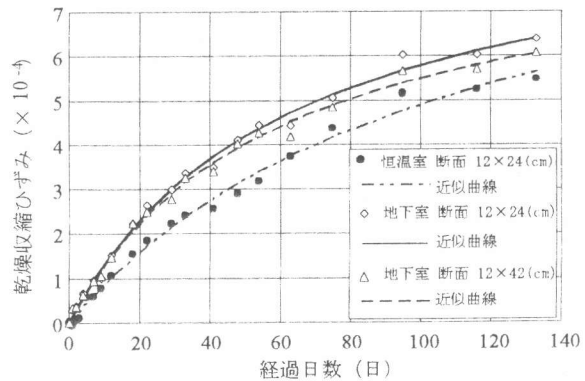


図 8 乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$

4. 実験結果および考察

4. 1 単調載荷時のひび割れ幅

図 9 に単調載荷時の荷重 P と平均ひび割れ幅 w との関係の一例 (試験体NO.1) を示す。記号○は実測値で、曲線は前述の長期ひび割れ幅計算式(7)を用い、 $t=0$ として計算した値である。ひび割れ幅は荷重の増加とともにほぼ直線的に増加している。計算値はほぼ実測値を捉えている。なお、計算にはひび割れ位置の鉄筋ひずみは実測値を用いた。

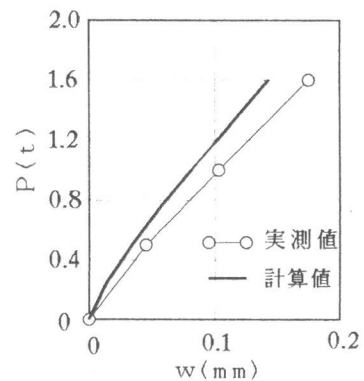


図 9 荷重 P ~ひびわれ幅 w 関係

4. 2 鉄筋ひずみの経時変化

図 10 に試験体NO.1およびNO.3のひび割れ位置鉄筋ひずみ ($\epsilon_{S_{max}}$) および平均鉄筋ひずみ ($\epsilon_{S_{av}}$) の経時変化を示す。記号は実測値で、曲線は等価ヤング係数を用いた断面解析により求めた $\epsilon_{S_{max}}$ の計算値である。NO.1の $\epsilon_{S_{av}}$ は付着クリープによって1日目に大きく増大している。

4. 3 ひび割れ間コンクリートの収縮

鉄筋位置コンクリート表面において測定した、ひび割れ間コンクリートの持続載荷開始後の収縮ひずみ ϵ_{sh} の自由乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$ に対する割合 β を図 1 1 に示す。 ϵ_{sh} には付着クリープによってコンクリートの引張応力が減少したことによる収縮ひずみが僅かながら含まれているので、持続載荷開始後数日間は ϵ_{sh} が $S_h(t)$ より大きくなる場合もあるが、時間経過とともにその影響は弱まり、 β はほぼ一定値を保持し、0.8~1.0となっている。

この β が 1.0 以下であることは鉄筋とコンクリート間の付着によってコンクリートの収縮ひずみが拘束されていることを示している。 β を (8) 式の $q'(t)$ で割った値を図 1 2 に示す。この値は β と同様な傾向を示しているが、ひび割れ間隔、鉄筋応力など

に関係なく、ほぼ 1.0 に収束している。これは前述の長期ひびわれ幅算定式における $q'(t) \cdot S_h(t)$ を用いて、コンクリートの乾燥収縮のひびわれ幅に対する影響が考慮できることを示している。

4. 4 ひび割れ幅の経時変化

図 1 3 に持続荷重下におけるひび割れ幅増加量の経時変化の一例 (NO.6) を示す。記号●は実測値で、曲線は (7) 式による計算値である。点線はひび割れ位置鉄筋ひずみの増加によるひび割れ幅の増加 Δw_c を、破線は Δw_c と付着クリープによるひび割れ幅の増加 Δw_b との和を、実線はそれとコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の増加 Δw_{sh} との和を示す。ひびわれ幅は持続載荷開始後 1 日間に付着クリープによって大きく増大し、その後は乾燥収縮およびクリープにより緩やかに増加している。計算値は実測値とよく一致している。

図 1 4 に各試験体の持続載荷開始後 133 日目におけるひびわれ幅の増加量 Δw とその各要因別による増加量 Δw_c 、 Δw_b 、 Δw_{sh} を示す。この図から次のようなことがいえる。ひび割れ間隔

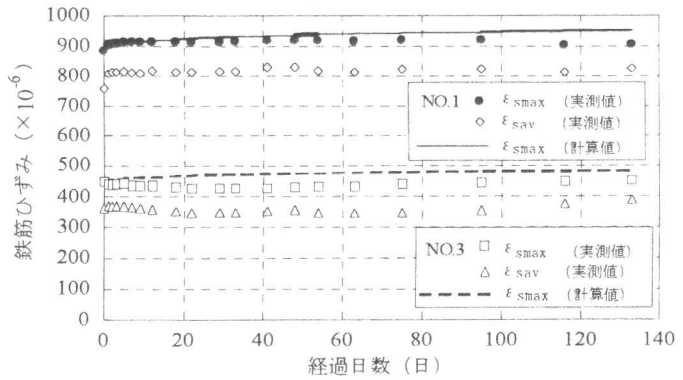


図 1 0 鉄筋ひずみの経時変化

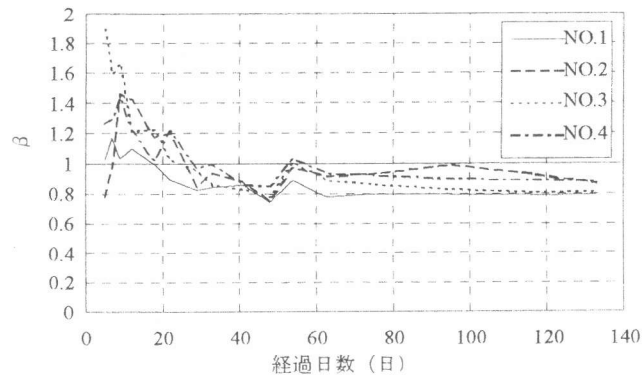


図 1 1 β の経時変化

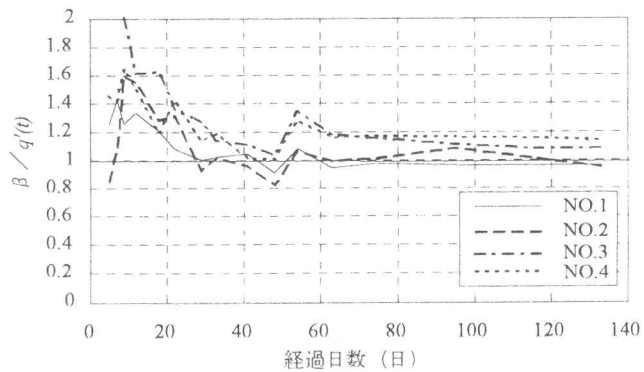


図 1 2 $\beta/q'(t)$ の経時変化

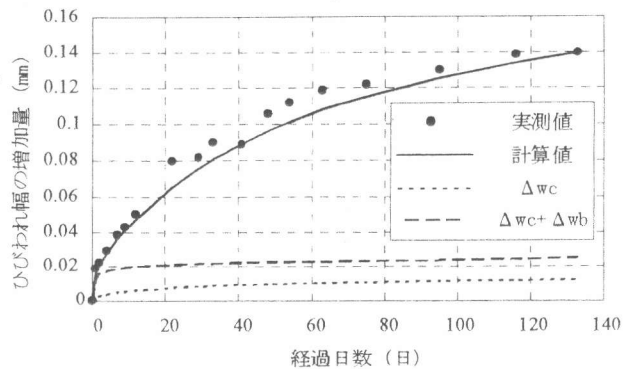
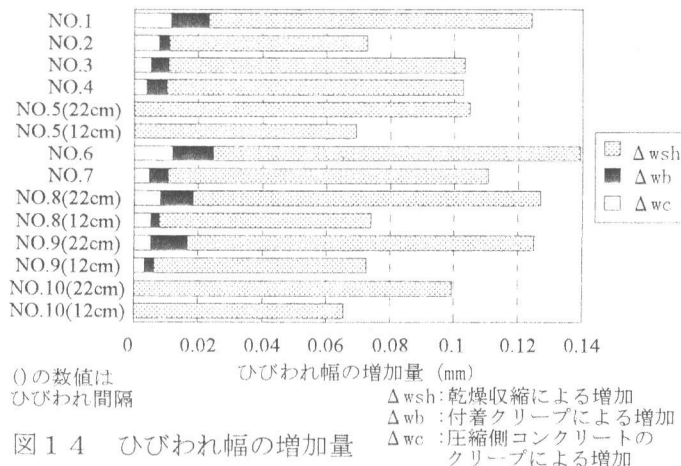


図 1 3 ひびわれ幅の経時変化の一例 (NO. 6)

の大きい試験体では3つの要因によるひび割れ幅の増加量はともに大きいので、全体のひび割れ幅増加量も大きくなる。持続鉄筋応力が大きい試験体では圧縮側コンクリートのクリープおよび付着クリープによるひび割れ幅の増加量も大きい。梁せいの大きい試験体では鉄筋応力の増加と乾燥収縮量が若干小さいので、ひび割れ幅の増加量は若干小さい。圧縮筋を有する試験体の



()の数値は
ひびわれ間隔

図14 ひびわれ幅の増加量

ひびわれ幅の増加量 (mm)
 Δw_{sh} : 乾燥収縮による増加
 Δw_b : 付着クリープによる増加
 Δw_c : 圧縮側コンクリートのクリープによる増加

ひび割れ幅増加量は若干小さい。全体的に（持続鉄筋応力0の試験体NO.5とNO.10を除く）持続荷重下におけるひび割れ幅増加に及ぼす乾燥収縮の影響が大きく、 Δw_{sh} は Δw の約80~90%を占め、その他の Δw_c と Δw_b はそれぞれともに約4~10%を占めている。

5. まとめ

以上の解析および実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 付着理論に基づき、コンクリートの付着クリープや乾燥収縮の影響を考慮した長期ひび割れ幅計算式を誘導した ((7)式)。それにより単調載荷時のひび割れ幅および持続荷重下におけるひび割れ幅の増加を捉えることができた (図9、図13)。
- 2) 持続載荷開始後133日において、乾燥収縮によるひび割れ幅の増加量は全増加量の約80~90%を占め、その影響が大きい。圧縮側コンクリートのクリープおよび付着クリープによるひび割れ幅の増加量の全増加量に占める割合はそれぞれ約4~10%である (図14)。

謝辞：実験の実施およびデータ整理において本学大学院生西永雅一君、同五味久忠君、同劉鍵君の協力を得たことを記して謝意を表す。

参考文献：

- [1] L.A.Lutz, N.K.Sharma and P.Gergely: Increase in Crack Width in Reinforced Concrete Beams under Sustained Loading, Journal of ACI, pp.538~546, September, 1967
- [2] 横道英雄・角田与史雄・小野薫：鉄筋コンクリートのひび割れ制御に関する2, 3の研究、セメント技術年報 XX III, pp557~561, 1968
- [3] J.M.Illston and R.F.Stevens: Long-Term Cracking in Reinforced Concrete Beams, Proc.Instrn.Civ.Engrs, Part2, 53, pp.445~459, December, 1972
- [4] たとえば、岡田清：鉄筋コンクリート梁のクリープ応力近似解、土木学会誌、36-5, pp.29~32, May, 1951
- [5] 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説、pp.112~113, 1986
- [6] 大野義照・李振宝・鈴木計夫：持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力~すべり関係、日本建築学会構造系論文集、第459号、1994.5
- [7] 鈴木計夫・大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究 その1 初期ひびわれ幅について、日本建築学会構造系論文報告集、第303号、pp.9~19, 1981.5