

鉄筋コンクリート外壁のひびわれに関する研究（その4）

—— 一方向拘束ひびわれ幅の予測式 ——

小柳光生 増田安彦
中根 淳

A Study on Shrinkage Cracks in Reinforced Concrete Walls (Part 4)

—— Prediction Analysis of Cracking Widths due to Restrained Volume Change in One-Way Concrete Members ——

Mitsuo Koyanagi Yasuhiko Masuda
Sunao Nakane

Abstract

Experiments were conducted with reinforcement ratio and mix proportions as parameters in order to study cracking of concrete due to restraint of drying shrinkage. Part 1 of this report described comparison studies of results of measurements on crack widths made over a period of one year and a half.

The present part describes the proposed method for analysis of cracking widths with the cracked portion as a bond spring model, and calculated crack widths and number of cracks are compared with experimental values.

概 要

前報¹⁾ではコンクリートの乾燥収縮が拘束されて発生するひびわれ挙動について調べるため、鉄筋量、調合をパラメータにして壁を模擬した拘束試験体を製作し、約1年半にわたるひびわれ幅の動きを測定し、その結果を各要因について整理し、報告した。

本報告では、ひびわれ部を付着バネモデルとして、逐次的に収縮応力を解析する方法を使って、ひびわれ幅算定式を提案した。また前報での実験結果と比較検討し、ひびわれ幅および本数ともにほぼ近似していることを確認した。

1. はじめに

鉄筋コンクリート造外壁に発生するひびわれは、美観上の他、漏水や耐久性状からも問題がある。この種のひびわれを制御するには、ひびわれ挙動の適切な予測に基づく設計手法の確立が望まれるものの、いまだ十分解明されていないのが実情である。

この報告は、主原因である乾燥収縮に起因するひびわれ挙動について、その予測式を誘導するとともに、既に報告した拘束ひびわれ実験結果¹⁾と比較検討し、その算定式の妥当性を確認する。

2. 既存のひびわれ幅算定方法

曲げ部材のひびわれに関する予測式は、これまでかなり提案されているが、壁部材を対象にした引張ひびわれ幅についての予測式の提案はまだ少ない。

Hughes ら²⁾は、(コンクリート引張強度×断面積)と(鉄筋とコンクリートの付着強度×付着面積)の関係式からひびわれ間隔を決定し、これに収縮などによる変形を乗じてひびわれ幅を求める式を提案しているが、コンクリートのクリープ特性や拘束度合いが考慮されていないことや、鉄筋が多いとひびわれ間隔が一律に小さくなる傾向があるな

どあくまで略算法である。

K. S. Stephen ら³⁾は、乾燥収縮によるひびわれ発生後の挙動について、ひびわれ部を付着すべり剛性と仮定した構成式から釣り合い方程式で計算し、ひびわれ本数の進展を求めているが、付着すべり剛性を弾性体、クリープ考慮についても修正弾性係数に置換した弾性計算であるため、経時的な変化を正確に把握してはいない。

国内では、温度ひびわれを対象とした佐藤らの実用計算法の提案⁴⁾などがあるが、コンクリートの特性の経時的な変化を考慮したものではない。

3. ひびわれ幅予測解析式

3.1 本解析法の特徴

本解析法の特徴は、①乾燥収縮やクリープあるいは弾性係数の経時的な変化を考慮し、逐次的に追跡していること、②初ひびわれ後の挙動について、付着すべり剛性を考慮した構成式に組み直して計算していること、③付着すべり剛性の設定を実験データなども参考にして弾塑性体としていることなどがあげられる。

そのため、ひびわれの動きをよりの確に把握することが出来る。

3.2 仮定条件

- (1) 断面内の応力や歪は、一様分布とし、平面保持が成り立つ。
- (2) コンクリートクリープ性状は、圧縮に対して引張りに対しても同一とし、Davis-Glanville の法則および Whitney の法則が成り立つ。
- (3) ひびわれが発生する引張限度歪（弾性+クリープ）は、 200×10^{-6} とする。
- (4) ひびわれ部の剛性は、鉄筋応力との関数式で表わされる弾塑性付着バネとする。
- (5) 拘束部材の剛性は、弾性体とする。
- (6) 計算は、逐次増分法を使用する。

3.3 解析式の誘導

(1) ひびわれ発生前の収縮応力解析

任意時間における自己歪増分： ΔCR は、収縮増分： $\Delta \epsilon_{sh}$ の他にクリープ増分： $\Delta \epsilon_{cr}$ が作用するため、これらの和で表わされる。

$$\Delta CR = \Delta \epsilon_{sh} + \Delta \epsilon_{cr} \quad \dots\dots\dots(1)$$

この自己歪増分が外部拘束材などで拘束されるとそこに軸力増分： ΔPN が発生する。

この時、変形に関する釣り合い式は、下式で示される。

$$\Delta \epsilon_0 = \Delta CR + \Delta PN / (E_c \cdot A_c) \quad \dots\dots\dots(2)$$

一方、力の釣り合い式は、下式で示される。

$$K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot L + (K_1 + K_3) \cdot \Delta \epsilon_0 \cdot L = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

この(2), (3)式を解けば、未知数 $\Delta \epsilon_0$, ΔPN が得られる。

$$K_1 = A_s \cdot E_s / L \quad K_2 = A_c \cdot E_c / L$$

$$K_3 = a_s \cdot E_s / L$$

- $\Delta \epsilon_0$: コンクリート位置歪増分
- E_c : コンクリート弾性係数（経時変化考慮）
- A_c : コンクリート断面積
- A_s : 外部拘束材（鉄骨）断面積
- a_s : 内部鉄筋材断面積
- L : スパン長さ

なお、自己歪増分： ΔCR は、時間ステップ $j-1$ から j までの総和とすると

$$\Delta CR = \sum_{i=1}^{j-1} (\Delta PN_i / A_c \cdot E_c) \cdot (\Phi_{i,j} - \Phi_{i,j-1}) + \Delta \epsilon_{sh}$$

$\Phi_{i,j}$: i ステップで応力が作用し、 j ステップまでのクリープ係数

(2) ひびわれ発生直後の解析

ひびわれが発生すると、その瞬間にコンクリート引張軸力が減少する。ひびわれ直後にコンクリート軸力が PN から PN' に変化するとすればコンクリートの変形と拘束材の変形の釣り合い条件から、下式が得られる。

$$W_0 - (PN - PN') / K_2 = (PN - PN') / (K_1 + K_3) \quad \dots\dots\dots(4)$$

なお、ひびわれ部は、内部鉄筋だけでその軸力を負担すると考えると、ひびわれ幅： W_0 と軸力の関係は、下式で示される。

$$W_0 = PN' / K_4 \quad \dots\dots\dots(5)$$

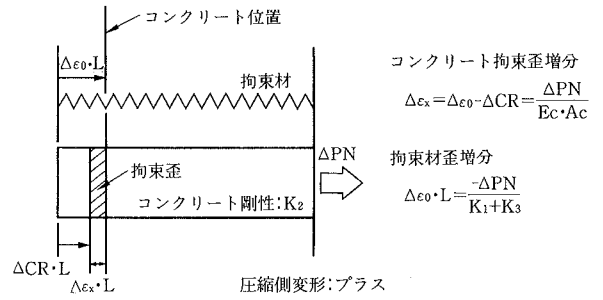


図-1 収縮応力の発生

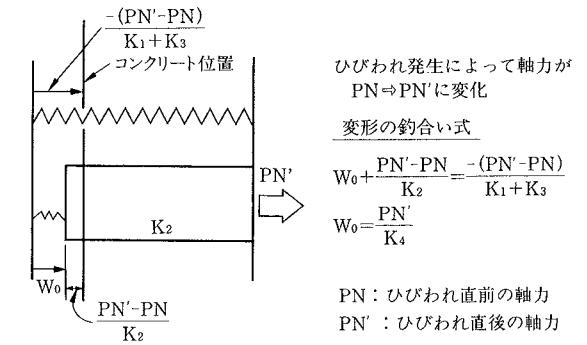


図-2 ひびわれ直後の変形の釣り合い

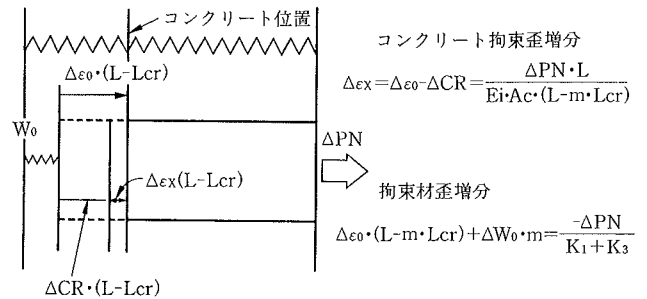


図-3 ひびわれ後の収縮応力増分の釣り合い

W_0 : ひびわれ幅 K_4 : 鉄筋とコンクリートの付着すべり剛性（後述）

この(4), (5)式を解けば、未知数 W_0 , PN' が求まる。これらの式を整理すると、 m 本のひびわれ発生時における釣り合い式は

$$PN' - PN = PN / (K_4 / K_2 + K_4 / (K_1 + K_3) + m) \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。

(3) ひびわれ発生以降の解析

ひびわれ発生に伴うひびわれ近傍は、鉄筋との付着すべり剛性だけで軸力を保持することとし、その部分のコンクリート剛性は無視する。その影響範囲をひびわれ1本当たり L_{cr} とする。

初ひびわれ後の力の釣り合い式(3)は、付着すべり剛性が加わるため下式で示される。

$$K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot (\Delta \epsilon_0 \cdot (L - L_{cr}) + \Delta PN / K_4) = 0 \quad \dots\dots\dots(3')$$

この(3')とコンクリートに作用する軸力増分は、 $\Delta PN = K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - L_{cr})$ になるという式を使えば、前述のひびわれ発生前と同様に、未知数 $\Delta \epsilon_0$, ΔPN が得られるが、付着すべり剛性: K_4 は後述するように PN' の関数であるため、各算定ステップ毎に変化した(接線モジュラス)を使う。

なお、ひびわれ本数が m 本の場合、(3') は下式となる。

$$K_2 \cdot (\Delta \epsilon_0 - \Delta CR) \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + (K_1 + K_3) \cdot (\Delta \epsilon_0 \cdot (L - m \cdot L_{cr}) + m \cdot \Delta PN / K_4) = 0 \quad \dots\dots\dots(3)''$$

3.3 付着すべり剛性の設定

(1) 概要

ひびわれ幅を算定する場合、ひびわれ部の付着すべりの考え方に大きく影響されるため適切な設定を行なうことは、特に重要である。ここでは、付着すべり剛性という考え方を導入してひびわれ部のモデル化を(5)式で示している。

一般に、付着に関する基本微分方程式は下式で表わされるがここではこの微分方程式を

$$\frac{d^2 Sx(t)}{dx^2} = \frac{1+n \cdot p}{Es \cdot as} \cdot \psi \cdot \tau x(t)$$

ψ : 鉄筋周長 n : ヤング係数比 p : 鉄筋比

解くにあたり、付着機構をボンドリンクという考え方から、水平剛性のみをもつバネにモデル化して解析している。また、間隔 ℓ 毎で、付着バネを設置するが各区間のコンクリートの変形を無視して、 $n \cdot p = 0$ としている。モデル図を図-5に示す

この付着バネは、鉄筋とその周辺のコンクリートの相対的なずれ変位と力の伝達、変形に関して連続性を有しており、以下に示す連立方程式から解を求めることができる。

n 個の付着バネに対して、力の釣り合い式は、

$$P_0 = P_{1,a} + P_{1,b}$$

$$P_1 = P_{2,a} + P_{2,b}$$

.....

$$P_{n-1} = P_{n,a} + P_{n,b}$$

なお、 $P_{n-1,a} = Ks \cdot (S_{n-1} - S_n)$, $P_{n-1,b} = Kw \cdot S_{n-1}$ である。

Kw : 付着バネ ($= \psi \cdot k \cdot \ell$) Ks : 鉄筋剛性 ($= Es \cdot As / \ell$)

この時、 k とは付着応力: τ と相対すべり: S の関係式 $\tau = k \cdot S$

で表わされる係数である。この付着応力と相対すべりの関係については数多くの報告があるため、これらを参考に基本曲線を図-6の太線のように設定する^{4)~6)}。

この曲線は、 $\tau \leq 20 \text{ kg/cm}^2$ までは $K_0 = 8 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$ の比例関係で、それ以降、曲線式である。

(2) 例題解析

①付着応力と相対すべりに関する係数 k は、図-6を用いている。

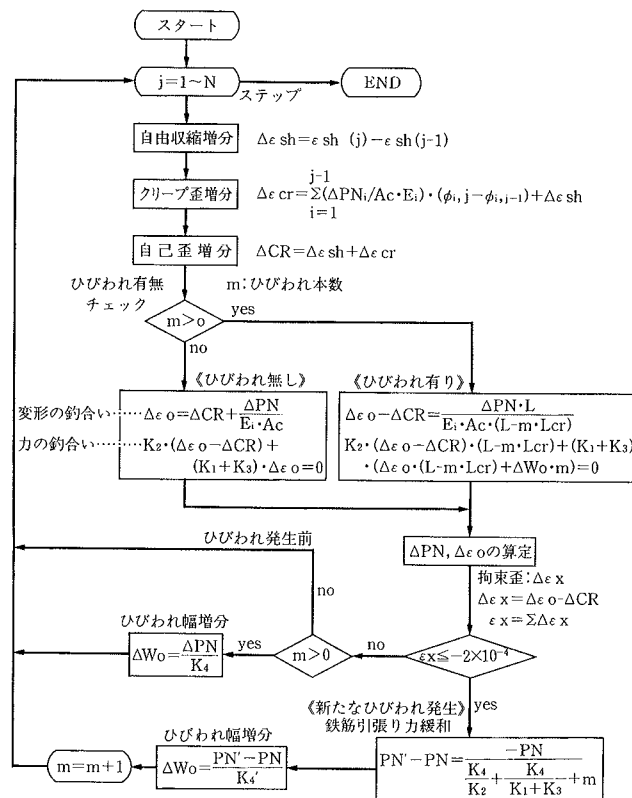


図-4 ひびわれ幅解析フローチャート

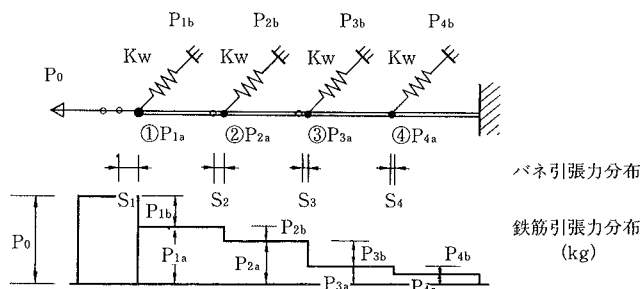


図-5 付着バネのモデル図

②加力端から 40 cm 位置を固定点とする。自由端のすべり変形はゼロとする。

③付着バネの間隔: ℓ は、2.5 cm ピッチとする。バネ節点は16個使用。

④鉄筋は、以下に示す実験例と同じく D13 とする。

この例題解析結果を筆者らが実施した付着試験体の片引き試験結果⁷⁾と比較して図-7に示す。ほぼ良く一致していることが確認されたので、この解析結果を(5)式の軸力とひびわれ幅に関する係数: K_4 を決定するための数式として使用する。

すなわちこの解析結果を分数式で示すと、

$$\text{抜け出し量: } S_L = \sigma_s / (257 - 35 \cdot \sigma_s) \quad (\text{cm})$$

となる。また、ひびわれ幅は、われの両側から抜け出すため、 W_0 と PN の関係は、

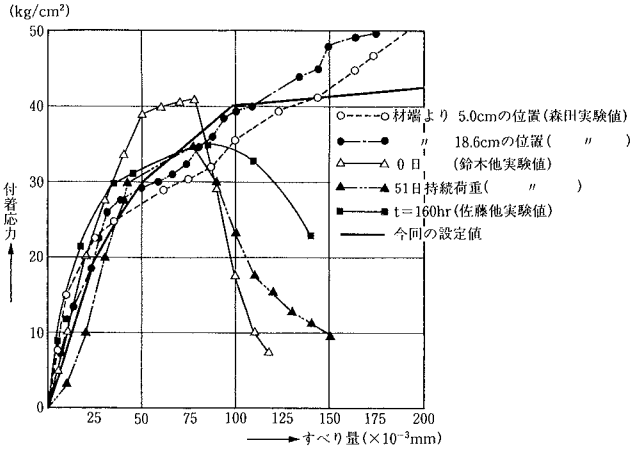


図-6 付着応力-すべり量関係式

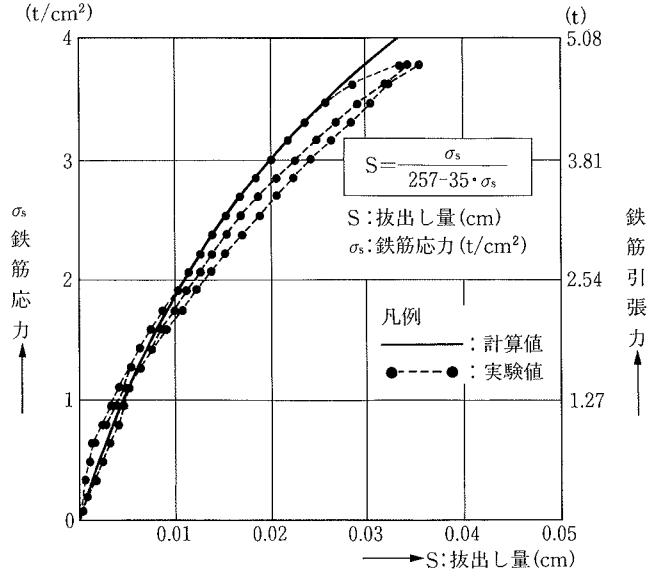


図-7 拔出し量計算結果と実験値

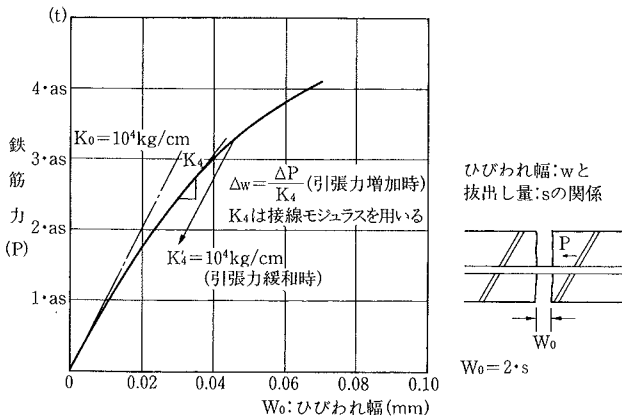


図-8 ひびわれ幅と鉄筋力の関係

$$W_0 = 2 \cdot S_L = 2 \cdot (PN/as) / (257 - 35 \cdot (PN/as)) \quad \dots\dots\dots(5)$$

で示される。

(3) 付着すべり剛性の設定

今回、増分法で解析しているため、鉄筋の引張増分に対しては(5)式の接線モジュラスを K_4 として用いる。ただし、新たなひびわれ発生時での鉄筋引張力緩和(圧縮増分)に対しては $K_4 = 1 \times 10^4 \text{ kg/cm}$ を使用する。(これは除荷時に一般に残留すべりが見られることを考慮したものである。)

4. 拘束ひびわれ実験データとの比較

4.1 拘束ひびわれ実験概要

ここでは、ひびわれ予測式の妥当性を調べるため、例題解析として、既に所報 No. 36 で報告した拘束ひびわれ実験結果との比較を行なう。この実験は、壁厚 15 cm, 内のりスパン 250 cm と試験体としては規模が大きく、鉄筋量や調査をパラメータとしながらかなり高い拘束度で、ひびわれの相違を比較したものである。拘束試験体の状況を図-9に示す。試験体は、上下1対の計7組からなる。表-1に内訳を示す。No. 2 試験体の配筋状況を図-10に示す。

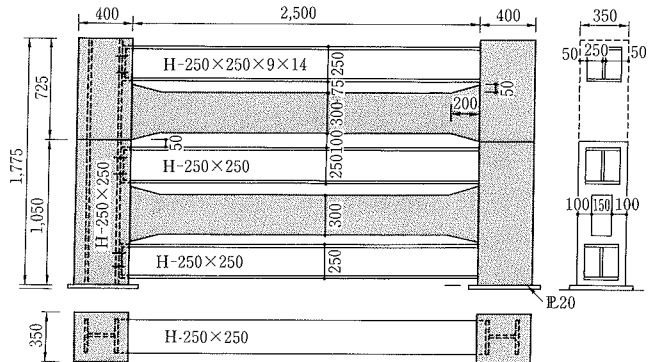


図-9 拘束試験体の外観図

コンクリートダミーの自由収縮測定結果を図-11に示す。コンタクトゲージを用いて測定した各試験体両面のひびわれのうち最大ひびわれ幅の動きを図-12~14に示す。この測定値は、ひびわれを含む 10 cm 標点間の読み取り値をそのままひびわれ幅と見なした。また最大ひびわれ幅の大きさと鉄筋量の関係を図-15に示す。

材令1年時点のひびわれ状況(0.04 mm 以上)をスケッチして図-16に示すが、最大ひびわれを有するどちらか片面だけを表わした。

4.2 ひびわれ幅算定定数

仮定条件は、3.2を適用する。また実験データが既知のもののは極力その数値を用いる。

コンクリート断面: 450 cm²,

外部拘束フレーム断面: 92 cm²,

コンクリート弾性係数⁷⁾: $14000\sqrt{210 / (0.75 + 7/t)}$

(t: 材令日数)

この設定は実験値ともほぼ一致している。圧縮・引張とも同一とする。

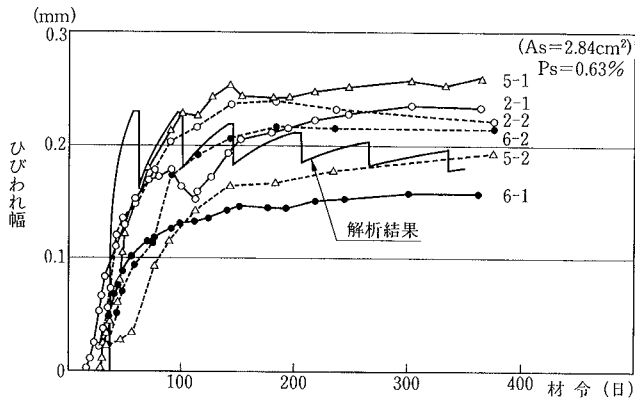


図-12 最大ひびわれ幅の動き 実験値と解析値

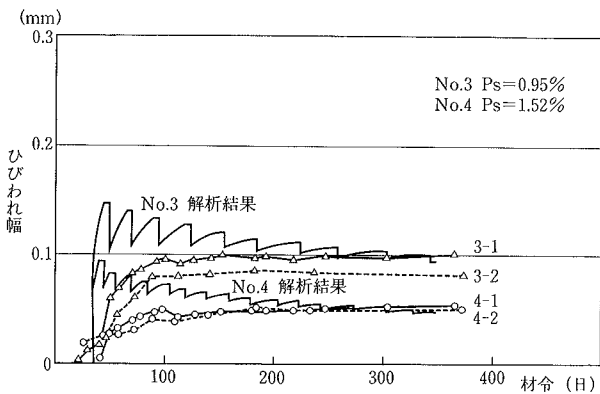


図-13 最大ひびわれ幅の動き 実験値と解析値

クリープ係数⁷⁾: $\Phi(\tau, t) = 3 \times 0.132 \cdot \ln(t - \tau + 1) \cdot 10.3 / (5 + \sqrt{\tau})$

τ : 載荷材令 (日数) t : コンクリート材令 (日数)

乾燥収縮歪は、CEB-FIP モデルコード (1978年) を基本式としながら収縮実験値に合うように係数 ϵ_{s0} を決める。算定に使用した曲線式を図-11に示すが、単位水量の違いによる収縮差は殆ど無かったので、No. 1~No. 6 と同一曲線 ($\epsilon_{s0} = 0.0011$) とし、No. 7 は $\epsilon_{s0} = 0.0006$ を使用した。

ひびわれ影響範囲 $L_{cr} = 12.5$ cm, 演算ピッチは 5 日毎, 350日のステップまで行なう。

4.3 解析結果と実験値の比較

(1) 解析結果

鉄筋量の違う 3 タイプ (No. 1~No. 6) および収縮低減剤を使用した 1 タイプ (No. 7) の計 4 種類について最大ひびわれ幅を解析し、その結果を図-17に示す。

新たなひびわれが発生すると、その瞬間に最大幅は、多少減少している。内部鉄筋量が多くなるほど最大幅は小さいが、ひびわれ本数は増加する傾向にある。

いずれも 2 本目のひびわれが発生する直前に最大値を示し、その後、ピークはわずかずつ減少しているが、これは引張限度歪: 200×10^{-6} という仮定条件のためであると思われる。

表-1 拘束試験体の内訳

試験体 No.	配筋法 (主筋)	内部鉄筋量 (%)	調 合 計 画			要 因
			(cm) スランブ	(kg/m³) 単位水量	(%) 水セメント比	
No.1	2-D6	0.28	18	170	58.5	鉄筋量少
No.2	4-D10	0.63				標準
No.3	6-D10	0.95				鉄筋量多
No.4	4-D10 2-D16	1.52	21	185	58.5	大径鉄筋
No.5	4-D10	0.63	12→18	158		軟練り
No.6			18	170		硬練り
No.7						収縮低減剤使用

* 各No.毎に上, 下 2 体ずつの試験体からなる。

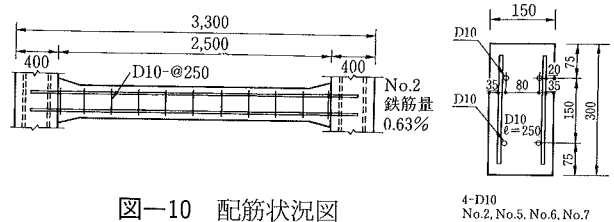


図-10 配筋状況図

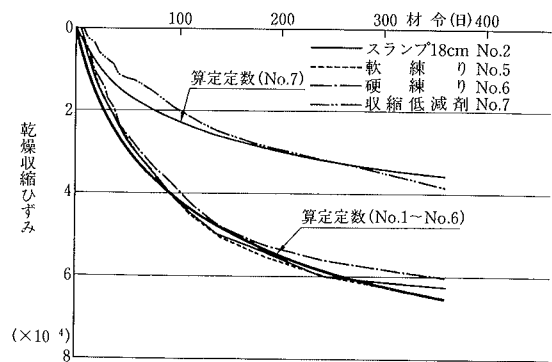


図-11 乾燥収縮ひずみ算定定数

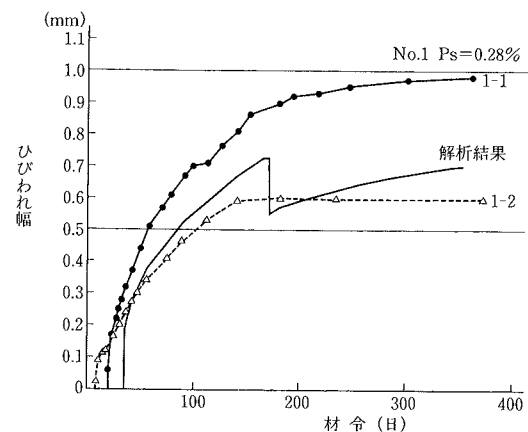


図-14 最大ひびわれ幅の動き 実験値と解析値

(2) 実験値との比較

ひびわれ発生は No. 1~No. 6 で 35 日, No. 7 で 95 日という結果であった。解析結果と実験値を比較して図-18に示す。実験値は多少バラついているが、平均としてこれらはおおよそ一致していた。

ひびわれ幅の動きを実験値と比較して、図-12~14の中に表示しているが、内部鉄筋量によってひびわれ幅がかな

り相違する状況など、全体的にその挙動はよく一致している。

材令350日までに発生したひびわれ本数の解析結果と実験結果を比較して表-2に示す。全体として、ほぼ一致している。No.4試験体の場合、解析結果のひびわれ本数の方が多いが、実際にはここに挙げたもの他に、微細なひびわれが認められており、その影響と考えられる。

また主筋に平行な鉄筋は250ピッチに、しかもコンクリート表面に近い位置に配筋しており、この影響も考えられる。

5. ケーススタディによる要因分析

5.1 算定要因の概要

本解析法を用いて、収縮ひびわれに及ぼす各種要因の影響を比較検討する。対象は外壁とするが、一方向材としてひびわれを検討する。壁の拘束は、おもに梁材であるため断面比を 拘束材(梁)：壁 = 1：1 と設定する。また、拘束材の弾性係数は $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし、材令的に変化しない、またクリープしないものとする。

検討する要因の内訳を以下に示す。

- (1) 鉄筋量：0.4%，0.6%，0.8%
- (2) スパン：6.0 m
- (3) 収縮差： 3×10^{-4} ， 4×10^{-4} ， 5×10^{-4}

(ほぼ1年時点での拘束材との収縮差)

5.2 解析結果

解析の結果を整理して、図-19に示す。

今回の解析条件の範囲では、以下のことが分かった。

- ・ひびわれ幅を制御するためには、鉄筋量を多くすること、ひびわれ本数を少なくするためには、収縮差を小さくするのが最も効果的であることが確認された。
- ・はり(拘束材)と壁の収縮差が 3×10^{-4} であると、ひびわれ間隔は 3.0 m 程度であるが、収縮差が 4×10^{-4} 以上になると、ひびわれ本数が多くなり、ひびわれ間隔は、1.0～

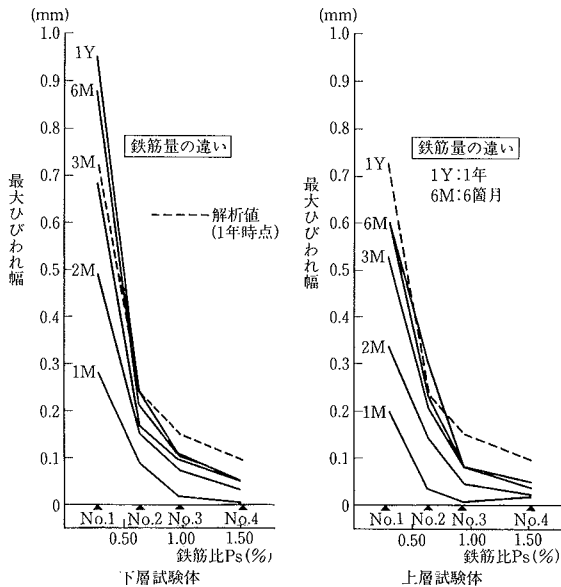


図-15 最大ひびわれ幅と鉄筋量

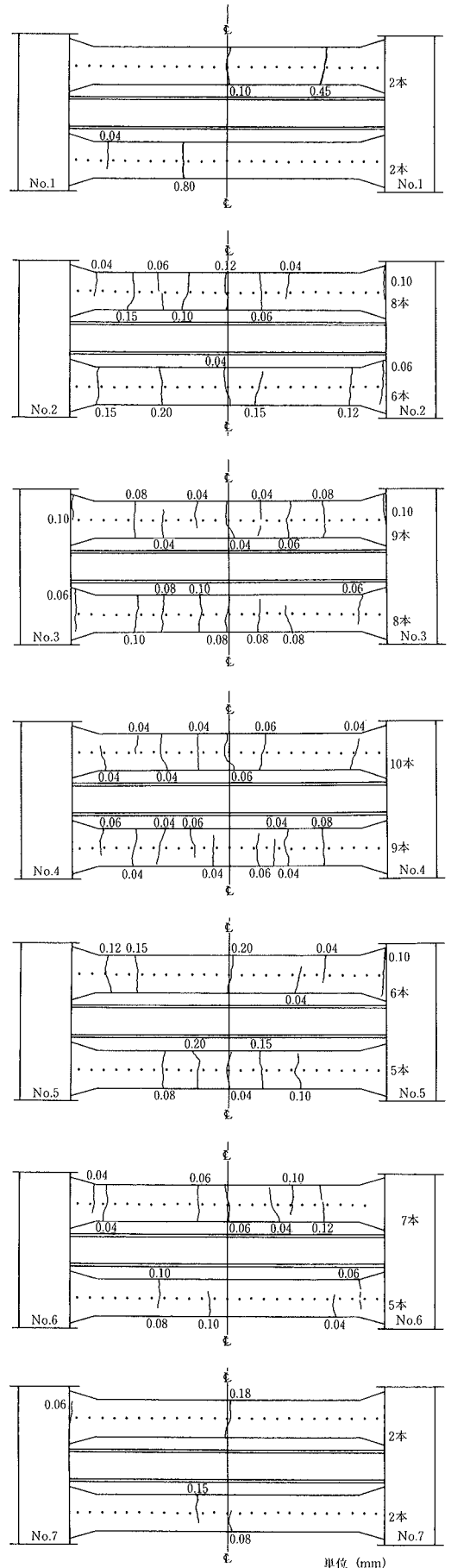


図-16 試験体のひびわれ状況（1年時点）

表-2 ひびわれ本数の比較（材令1年）

試験体 No.	下層試験体		上層試験体		解析結果 (本数)	備考
	表面	裏面	表面	裏面		
No.1	1	2	2	2	2	ひびわれは 目視で0.04mm 以上をカウントした。
No.2	6	7	8	6	7	
No.3	6	8	4	9	11	
No.4	9	7	10	8	16	
No.5	5	4	6	6	7	
No.6	5	5	7	4		
No.7	2	2	2	2	2	

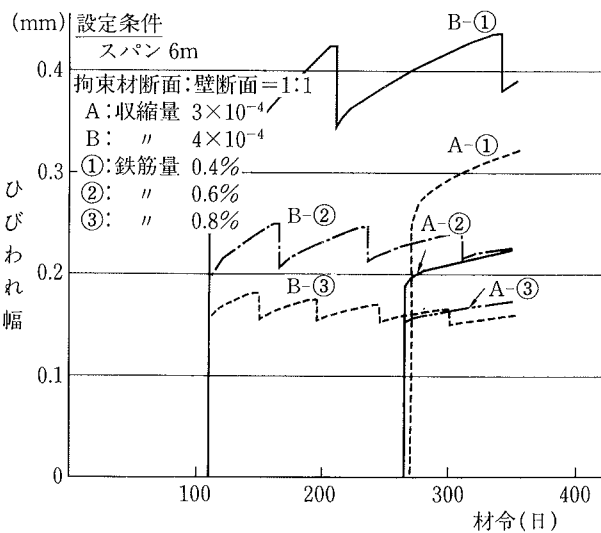


図-19 ケーススタディによるひびわれ幅解析結果

1.5 m となる。

- また、ひびわれ幅を 0.3 mm 以下に制御するためには、内部鉄筋量を 0.6% 以上（断面積比）にする必要があり、0.2 mm 以下に制御するためには、0.8% 以上にする必要がある。
- 0.2 mm 以下の小さなひびわれも防止するためには、誘発目地を 2~3 m 以下の間隔に設けて、収縮差を 3×10^{-4} 以下にする必要がある。

6. まとめ

コンクリートの収縮によって発生するひびわれ幅の動きを逐次的に解析する手法を提案した。また、拘束ひびわれ実験結果と比較検討し、ほぼ近似することを確認した。さらに、実用的な拘束度を用いて、ケーススタディによる要因検討を行なった。

付記

この研究は計画当初から技術研究所 武田寿一所長のご指導を受けて、まとめることができました。厚くお礼申し上げます。

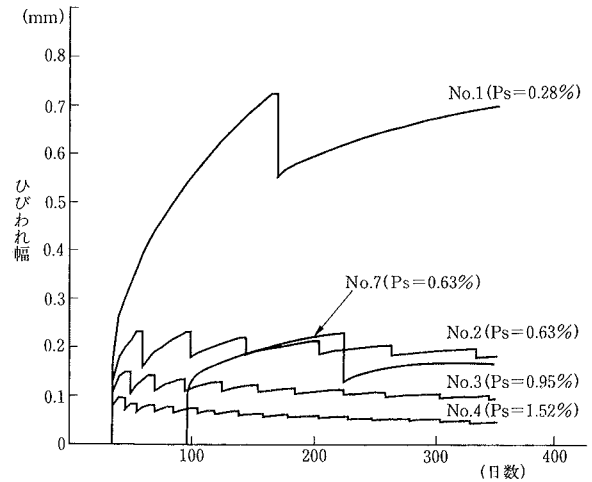


図-17 ひびわれ幅の解析結果

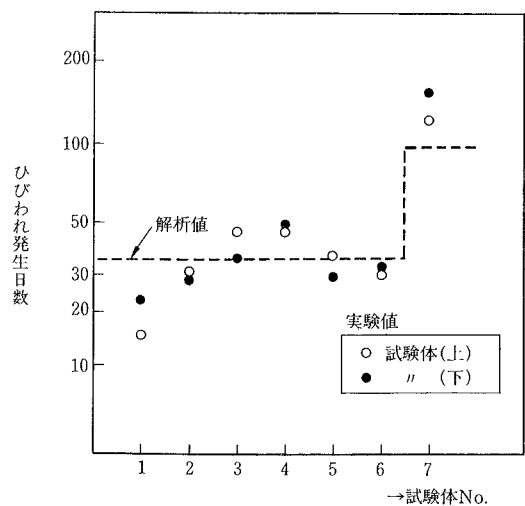


図-18 貫通ひびわれ発生日数の比較

参考文献

- 1) 武田, 中根, 小柳, 増田: 鉄筋コンクリート外壁のひびわれに関する研究(その1), 大林組技術研究所, No. 36, p. 115~119, (1988)
- 2) B. P. Hughes: Controlling shrinkage and thermal Cracking, Concrete, Vol. 6, No. 5 p.39~44, (1972. 5)
- 3) K. S. Stephen Tam and Andrew Scanlon: Analysis of Cracking Due to Restrained Volume Change in Reinforced Concrete Members, ACI JOURNAL, p. 658~667, (1986. 7/8)
- 4) 長瀧, 佐藤, 小島: 水和熱による温度ひびわれ幅の実用算定法, コンクリート工学年次講演会論文集, p. 1~4, (1985)
- 5) 鈴木, 大野, 横田: 持続荷重下における異形鉄筋の付着特性, 日本建築学会大会梗概集, p. 757, (1986. 8)
- 6) 六車, 森田, 富田: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, p. 6, (1967. 1)
- 7) A. M. Neville: Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, p. 453, (1970)