

[53] 拘束状態下の乾燥収縮に対する鉄筋の影響

正会員 徳光善治（九州大学工学部）

正会員 ○牧角龍憲（九州大学工学部）

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮によるひびわれを鉄筋で制御する場合、ひびわれを分散してひびわれ幅を小さくすることを目的として、必要鉄筋量の種々の算定式が示されている。しかしながら、それらの算定式は、主に完全拘束状態下で算定され、従来の用心鉄筋比に比較してかなり大きな鉄筋比を必要とするため、とくに断面が大きい場合やコンクリート強度が高い場合、実際に用いにくいことが多い。

そこで本研究は、収縮目地間や底部などの一部が拘束された構造物など完全拘束でない部材に関する算定方法をとらえる基礎として、コンクリートの乾燥収縮拘束下の埋設鉄筋のひずみを測定し、完全拘束でない場合の鉄筋応力について実験的に検討したものである。

2. 実験の概要

実験は2シリーズに分けて行った。シリーズ1では埋設鉄筋のコンクリートの乾燥収縮に対する追随性を調べるため、異形棒鋼D10, D16, D22をそれぞれ $10 \times 10 \times 75\text{cm}$ の供試体の断面中心に埋設し、鉄筋ひずみを測定した（図1）。鉄筋ひずみは、鉄筋表面にワイヤストレイン1mmゲージを貼付し、その上をワックスでコーティングし、さらにビニルマスチックテープで被覆して15cm間隔で測定した。同時に自由収縮も断面中央に埋込みゲージを埋設して測定した。これらの供試体は2本を1組とした。

シリーズ2では、外部拘束下の埋設鉄筋の挙動を調べるために、図1に示す $\varnothing 19\text{mm}$ 2本で外部拘束した $10 \times 15 \times 50\text{cm}$ 供試体中にD10を埋設し、鉄筋ひずみおよび拘束応力を測定した。その際、かぶりの影響もとらえるために $10 \times 50\text{cm}$ の面だけを乾燥面とし、乾燥面から鉄筋中心位置までの距離を2.5cmおよび5cmとして対称位置にD10を配置した。乾燥面以外は塩化ビニル塗料を二層塗りして乾燥を防いだ。鉄筋ひずみはシリーズ1と同じ方法で15cm間隔で測定した。

この外部拘束方法による拘束度は約40%で、埋設鉄筋の鉄筋比は0.95%である。また、外部拘束しない供試体も同時に作製し、同様に鉄筋ひずみを測定した。

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は海砂（比重2.59, 吸水量1.13%, F.M 2.49）を、粗骨材は角閃岩碎石（最大寸法20mm, 比重2.97, 吸水量0.54%）を、鉄筋はSD30を使用した。

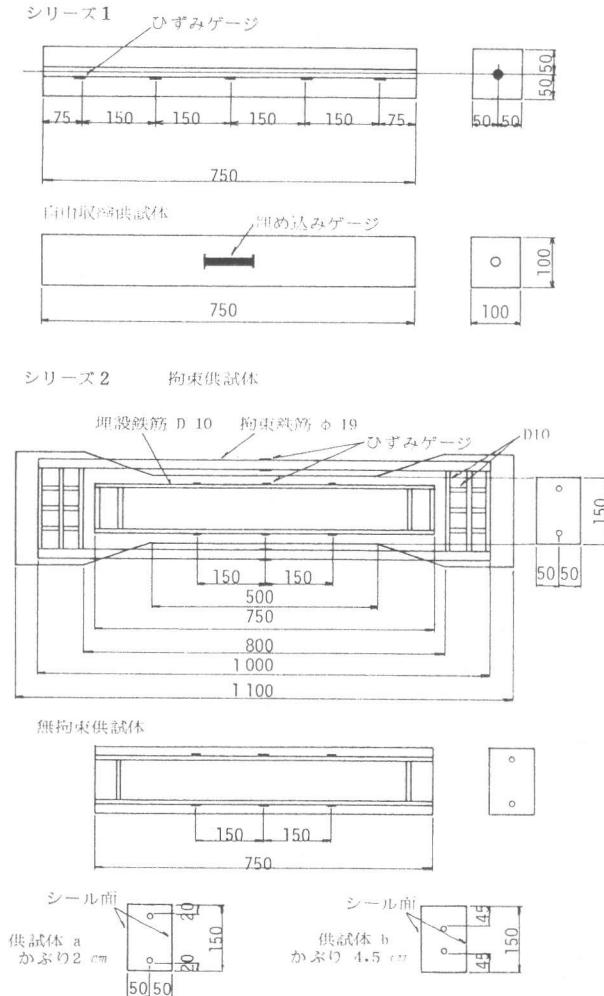


図1 供試体の形状寸法

コンクリートの配合は、水セメント比50%，細骨材率42%で、水、セメント、細骨材、粗骨材の単位量はそれそれぞれ $162, 324, 757, 1199 \text{ kg/m}^3$ である。また無塩化物タイプA E 減水剤を 2430 cc/m^3 用いた。スランプは5土1cmで空気量は4%である。供試体は材令1日で脱型し、標準養生した後、材令2日から恒温恒湿室(20°C, 60% R.H.)に移して測定を開始した。

3. 実験の結果および考察

図2に、鉄筋ひずみのコンクリートの乾燥収縮による経時変化を示す。測定値は、定着長を考慮して中央3ヶ所の最大値と最小値をそれぞれ示している。

図にみられるように、D10は自由収縮に追随して増加しているのに対し、D22では60日前後から、D16では80日前後からほぼ一定の値となっている。これは、付着によりコンクリートの収縮が鉄筋に伝達されるため、付着力の限界によるものと考えられ、この一定値における鉄筋径と付着力の関係を次式で求めて表1に示す。

$$S = \frac{\epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s}{u} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ϵ_s, E_s, A_s, u ：それぞれ鉄筋のひずみ、弾性係数、断面積、周長、

D16とD22はほぼ同じ算定値で、鉄筋がコンクリートの収縮に追随する限界を示すと考えられる。これに対し、D10の値は100日の時点を求めているが、他の値に比して小さく図2の傾向どおりさらにひずみが増加することがうかがえる。

また、鉄筋拘束によるプラスチックフローを次式³⁾で求め、収縮応力との関係を図3に示す。

$$C = \epsilon_f - \frac{\sigma_{ct}}{E_c} + \frac{\Delta\ell}{\ell} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\epsilon_f, E_c, \sigma_{ct}$ ：それぞれコンクリートの自由収縮、弾性係数、収縮応力、 $\Delta\ell/\ell$ ：部材のひずみ、この場合鉄筋の平均ひずみ、収縮の場合は負

図にみられるように収縮応力が大きくなるにつれプラスチックフローも指数関数的に増

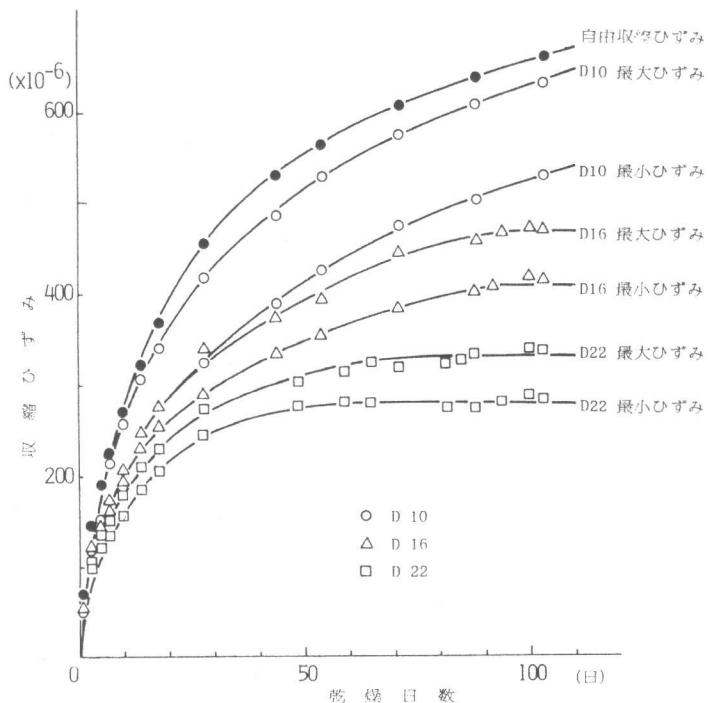


図2 鉄筋ひずみの経時変化(シリーズ1)

表1 鉄筋径と付着力の関係

鉄筋径	断面積 cm²	周長 cm	ひずみ × 10⁻⁶	S kg/cm
D 22	3.871	7	280 ~ 330	325 ~ 383
D 16	1.986	5	410 ~ 470	342 ~ 392
D 10	0.713	3	525 ~ 630	262 ~ 314

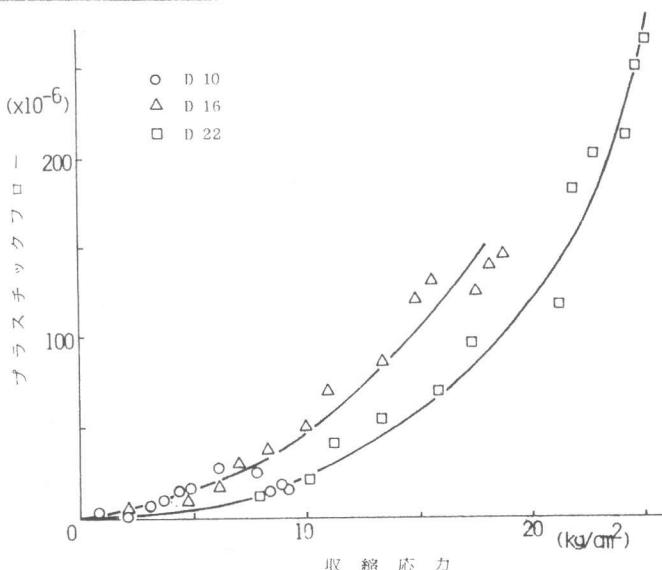


図3 収縮応力とプラスチックフローの関係(シリーズ1)

加しているが、収縮応力が 10kg/cm^2 以下では小さくこのことからもD10はかなりの収縮ひずみまでコンクリートに追随すると考えられ、その鉄筋応力も無視できないことがわかる。

図4に外部拘束供試体の埋設鉄筋と拘束鉄筋および無拘束鉄筋の埋設鉄筋のひずみ変化を示すがひびわれ発生前を除けば外部拘束下においても埋設鉄筋がコンクリートの収縮ひずみに追随することがわかる。この時の拘束供試体の自由収縮に対するひずみの比は約60%であった。

供試体a(かぶり2cm)と供試体b(かぶり4.5cm)の鉄筋は、拘束無拘束にかかわらずほぼ同じ挙動を示しており、拘束供試体におけるひびわれ発生日数は供試体aが46日、供試体bが43日と同じ時期であった。これらのことから表面から5cm以内では、収縮に及ぼす鉄筋の影響はほぼ同じであると考えられる。

ひびわれ発生前10日前後から、外部拘束下の鉄筋ひずみは増加しなくなり、ひびわれ発生直前に少し減少し、拘束鉄筋ひずみとほぼ等しくなっている。これは、鉄筋がコンクリートに追随しなくなったためではなく、(2)式で示したコンクリートのプラスチックフローの増加とそれによる断面内応力の均一化のためと考えられる。さらに図5に供試体aの収縮応力とプラスチックフローとの関係を筆者らが先に行なった無筋拘束供試体⁴⁾と合わせて示すが、後者が全面乾燥であることを考慮すればほぼ同じプラスチックフローの増加傾向を示していることからもうかがえる。

図6にひびわれ発生位置を示すが、供試体a、bいずれも鉄筋ゲージ位置近くに発生した。このひびわれ発生時の鉄筋応力は次式で算定される。

$$\sigma_{s_1} \cdot Pe = \sigma_{ct} - \sigma_{s_2} \cdot Pe \quad \dots \dots (3)$$

ただし σ_{s_1} : ひびわれ位置の鉄筋応力

σ_{s_2} : ひびわれから十分離れた位置における鉄筋応力(圧縮)

σ_{ct} : コンクリートの収縮応力

Pe : 鉄筋比

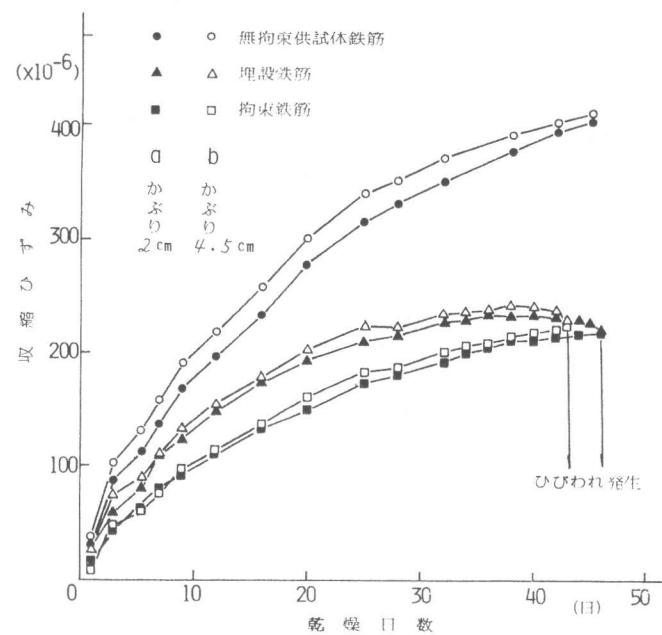


図-4 鉄筋ひずみの経時変化(シリーズ2)

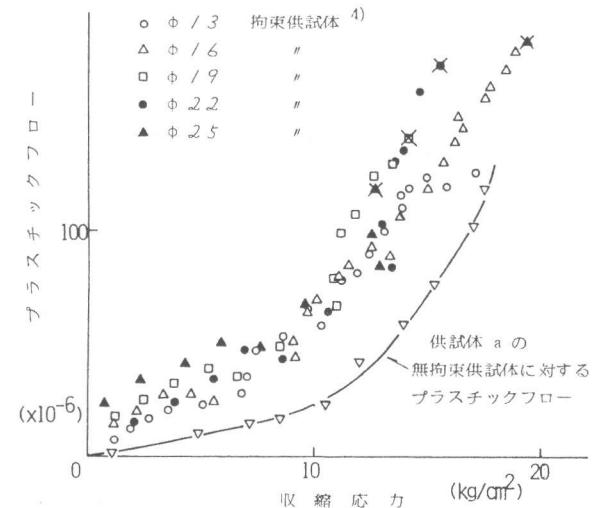


図-5 収縮応力とプラスチックフローの関係

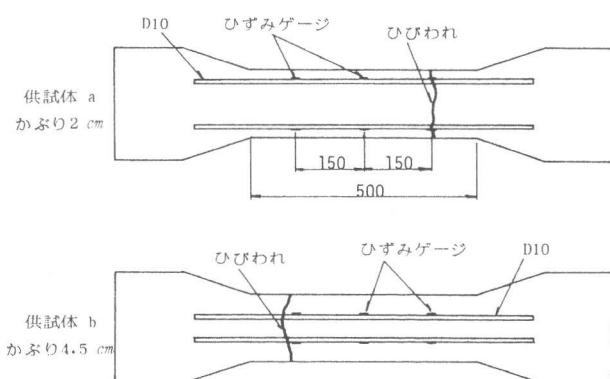


図-6 ひびわれ発生位置

図7に拘束供試体aのひびわれ発生前後の各鉄筋ひずみの変化を示す。ひびわれ発生時の拘束鉄筋および埋設鉄筋のひずみをそれぞれ図中に示しているが、コンクリートの収縮応力を外部拘束のみより算定すると(3)式の各項は

$$\sigma_{s1}Pe = 64.6 \times 2.1 \times 0.00951 = 12.90 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{ct} = 23.2 \times 2.1 \times 0.03781 = 17.70 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{s2}Pe = 24.7 \times 2.1 \times 0.00951 = 4.93 \text{ kg/cm}^2$$

となり、(3)式は十分成立する。

また図7にみられるように、ひびわれ発生後も拘束鉄筋ひずみはかなり大きな値で、拘束が解放されていないことを示し、ひびわれから離れた位置の鉄筋のひずみも増加している。このことは、ひびわれ発生後も収縮応力が鉄筋に伝達され、あらたにひびわれを発生させるひびわれ分散を裏付けているといえる。

しかしながら、ひびわれ位置の鉄筋ひずみは引張側に増加しており、発生後20日間で約 150×10^{-6}

の増加を示している。また最大ひびわれ幅も発生時0.15mmであったのが、20日後には0.25mmまで増加した。この最大ひびわれ幅の算定式としてひびわれ両側からの鉄筋の抜け出しを考慮した次式⁵⁾がある。式中の ϵ_{co} や τ_0

$$w = \left(\frac{\sigma_{s0}}{E_s} - \epsilon_{co} + \epsilon_{sh} \right) \frac{d}{Pe} \cdot \frac{F_t}{\tau_0} \cdot \frac{1}{2} \quad \dots \dots \dots (4)$$

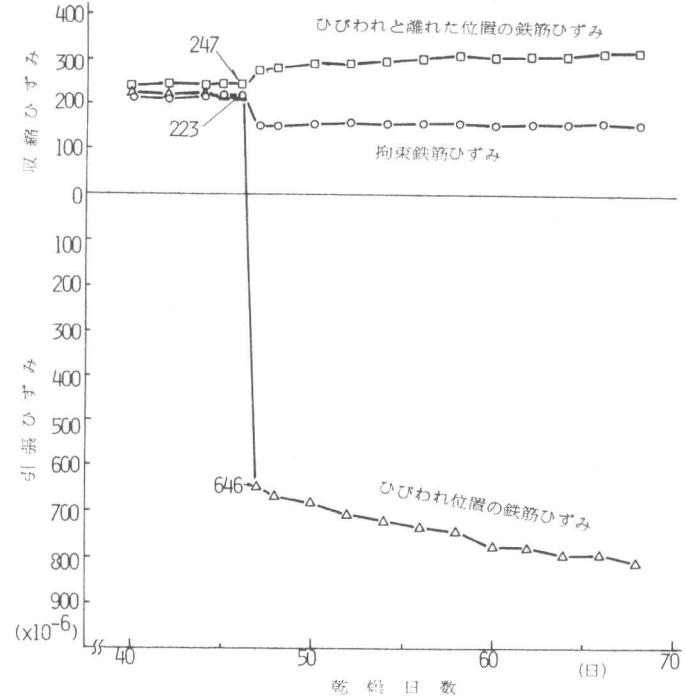


図7 ひびわれ発生前後の鉄筋ひずみの変化

が未知ではあるが、かりに $\epsilon_{sh}=\epsilon_{co}$ とすると 鉄筋の抜け出し量 $\ell_w (=d \cdot F_t / 4Pe \cdot \tau_0)$ は、ひびわれ発生時で37.5cm 20日後で45.8cmとなり、ひびわれから15cm離れた鉄筋ひずみが収縮ひずみの増加を示すことと矛盾する。さらに $\sigma_{s2}=0$ としても、 ℓ_w はひびわれ発生時で23.2cm、20日後で31.3cmとなり同じく矛盾する。かぶり4.5cmの供試体においても最大ひびわれ幅は同一で、鉄筋ひずみも同じ挙動を示していることから、最大ひびわれ幅算定にあたっては、 ϵ_{co} の検討が必要であると考えられ、今後検討する予定である。

4. 結論

- 1) 収縮制御鉄筋として主に用いられるD10は、コンクリートの収縮ひずみにかなり大きな値まで追随する。
- 2) 完全拘束でない拘束下では、鉄筋はコンクリートと一体となって収縮するため、拘束程度により鉄筋ひずみが異なると考えられ、最大ひびわれ幅も完全拘束状態と異なる状態として算定する必要がある。
- 3) 鉄筋を対称に配置する場合、かぶり2cmと4.5cmでは、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす鉄筋の影響に差異はみられない。

最後に本実験に協力してくれた吉野猛君（佐賀県庁）に謝意を表する。

参考文献

- 1) 小阪義夫、森田司郎、鉄筋コンクリート構造、丸善、1975、2) F. Leonhardt (森田司郎、角徹三訳)、鉄筋コンクリートの配筋法の要点について、コンクリートジャーナル、vol.5 No.4、1967、3) G.Pickett. Shrinkage stress in concrete. jour. ACI, Feb.1946,
- 4) 牧角、徳光、コンクリートの乾燥収縮拘束とひびわれ発生に関する研究、セメント技術年報 34、1980、5)狩野芳一、鉄筋コンクリート構造の設計、丸善