

# [7] コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学工学部)  
 正会員 大野 義照 (大阪大学工学部)  
 正会員 中川 隆夫 (大阪大学工学部)  
 正会員 太田 寛 (大阪大学工学部)

## 1 まえがき

コンクリートの乾燥収縮によるひびわれ発生には、コンクリートの諸特性のなかで乾燥収縮の他にクリープ、弾性係数および引張強度が関係する。これらの特性は材令とともに変化し、かつ互いに関連しており、各特性を独立に検討してコンクリートのひびわれ抵抗性能を判定するのは困難であり、直接コンクリートのひびわれ抵抗性能を判定する簡便な方法が望まれる。

従来、この種の試験装置としてボルトの付着力によってコンクリート試験体を拘束鋼材へ固定する一軸外部拘束型の方法が用いられてきたが、この固定方法ではボルトの断面積や付着表面積およびコンクリートとの付着性状がコンクリート試験体の拘束鋼材への固定度に大きく影響してあいまいな固定状態となり、そのためひびわれ発生材令等の試験結果もそれらに大きく左右されるばかりでなく解析による測定結果の検討も充分おこなうことが出来なかった。そこで筆者らは新しい固定方法による外部拘束型のひびわれ試験装置を考案した。本装置の特徴は初期材令から固定度が完全であることの他に、装置の製作が簡単でかつ繰り返し使用も容易であること、拘束鋼材断面積を変えることによって任意の拘束の程度が得られること等にある。

本報告は提示した装置のコンクリート試験体の拘束鋼材への固定方法の検討、コンクリート試験体の自由乾燥収縮性状とJISに規定された長さ変化試験用供試体の乾燥収縮性状との対応、コンクリート試験体の変断面であることの収縮応力に及ぼす影響および拘束鋼材断面積のひびわれ発生材令におよぼす影響等を実験およびクリープ解析によって調べ、本収縮拘束ひびわれ試験装置の有用性を明らかにしたものである。

## 2 収縮ひびわれ試験装置の概要

考案した収縮拘束ひびわれ試験装置を図1に示す。本装置におけるコンクリート試験体の拘束鋼材(みぞ形鋼)への固定方法は、完全固定を期して拘束鋼材のコンクリートに接する個所にずれ止め用の鉄筋を溶接するとともに用心のため乾燥開始時にボルトで圧着する方法(A)、またはずれ止めの鉄筋を増してボルト圧着をしない方法(B)による。本方法では拘束装置の繰り返し使用を容易にするため、すなわち試験終了後装置の分解を容易にするため2本の拘束鋼材は緊結していない。固定方法(B)のボルトはコンクリート打設時に鋼材間の距離を正確に保つことが主目的である。

コンクリート試験体の形状はJISに規定されたコンクリートの長さ変化試験用供試体の寸法(10・10・40cm)に対応させるために中央部分の長さ30cmの区間の断面を10x10cmとし、この部分にひびわれが生じ、かつ応力集中が生じないように緩やかに固定部分まで断面を増し固定部分の断面は10・17cmとした(図2参照)。拘束間隔はひびわれの発生を肉眼で容易に確認できるように60cmとした。コンクリート試験体の重量は31kgで鋼材の重量を加算しても2人で容易に運ぶことができる。

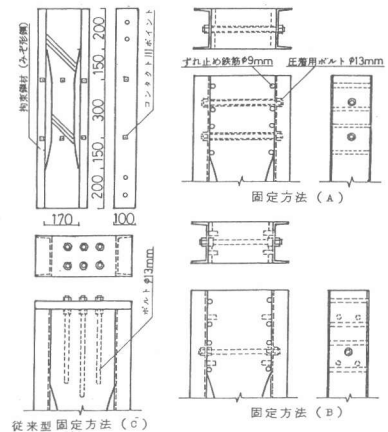


図1. 収縮拘束ひびわれ試験装置と固定方法

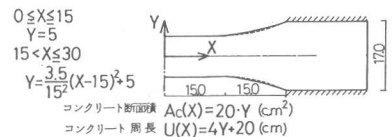


図2. コンクリート試験体の形状

### 3 実験概要、結果および考察

#### 3-1 コンクリート試験体の拘束鋼材への固定方法について (実験Ⅰ)

図3に示すせん断試験によってずれ止め鉄筋と圧着力の効果を確かめてから、固定方法(A)と従来のボルトの付着力による固定方法(O)(図1参照)の比較を取縮拘束ひびわれ試験によって行なった。方法(A)におけるずれ止め鉄筋は3本、各ボルトの締めつけ力は2tonで、方法(O)におけるボルトは6-φ13で全付着面積は461cm<sup>2</sup>である。拘束鋼材断面積は2×8.1cm<sup>2</sup>である。なお圧着によって生ずる試験体中央部測定区間部分の圧縮応力は、ポアソン比を $\frac{1}{6}$ 、ヤング係数比を10として計算すると0.3kg/cm<sup>2</sup>弱でその影響は無視できる程小さい。

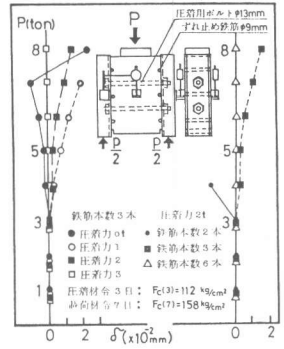


図3. 固定部のせん断試験

試験に用いたコンクリートは、w/cが60%の普通ポルトランドセメント、川砂、川砂利コンクリートで、材令28日における圧縮および割裂引張強度はそれぞれ241kg/cm<sup>2</sup>および26.3kg/cm<sup>2</sup>である。

試験体は、材令5日迄恒温恒湿室(20±1℃, 60±5%)で湿布養生を行ない、同日脱型した。試験体A(固定方法A)は脱型後、トルクレンチを用いてボルトを締めた。拘束鋼材およびコンクリートのひずみは、検長30cmのコンタクトゲージで、ひびわれ幅は検長10cmの同ゲージで測定した。

試験結果を表1、図4に示す。図4から試験体Aのコンクリートのひずみ $E_c$ と鋼材ひずみ $E_s$ は等しく、固定度は完全であると見なせるのに対して、試験体Oでは $E_c$ は $E_s$ よりかなり大きく、固定度が劣っていることがわかる。このために拘束の程度を表わす指標として(1)式で定義される拘束率Kは、試験体A、Oは同じ断面積の鋼材で拘束されておりながら表1に示すように試験体Aの約70%に対して試験体Oは約60%と小さく、ひびわれの発生日(乾燥開始後の日数)も試験体Oは試験体Aよりも大幅に遅くなっている。したがって「まえがき」で述べたように同じ拘束鋼材を用い同じコンクリートであっても固定度によってひびわれ発生日が異なり、またコンクリートの引張ひずみ能力を表わすとも見なせる拘束率も異なってくるので、拘束ひびわれ試験を行なうに際しては固定度を明確にすなわち完全固定とすることが肝要である。

表1. 試験結果 (実験Ⅰ)

試験体	ひびわれ発生日(日)	自由収縮ひずみ $E_f$ ( $\times 10^{-5}$ )	試験体ひずみ $E_c$ ( $\times 10^{-5}$ )	拘束率(%)	ひびわれ幅(mm)
A	1	24	2.9	1.0	0.10
	2	20	2.5	0.70	0.09
	3	22	2.8	0.86	0.10
C	1	74	5.0	1.9	0.22
	2	61	4.5	1.8	0.23

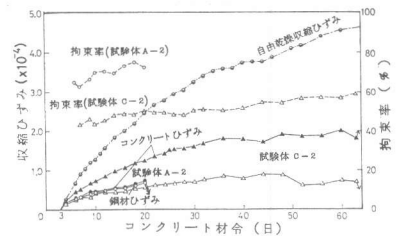


図4. 拘束試験体のひずみと拘束率

$$\text{拘束率 } K = (E_f - E_c) / E_f \quad (1) \quad E_f: \text{自由収縮ひずみ}$$

#### 3-2 拘束試験体の自由乾燥収縮ひずみについて (実験Ⅱ)

拘束コンクリート試験体は変断面であるため中央30cm間(断面10×10cm)の試験区間の自由乾燥収縮ひずみは、断面が大きく乾燥が遅い隣接部コンクリートからの水分の移動や、試験中央部側面での拘束鋼材との空間が30mmで自由収縮試験体と環境条件が異なることによって、乾燥収縮試験体(10×10×40cm)の収縮ひずみより小さくなる危がある。そこで拘束コンクリート試験体の一端を自由にして、試験体中央部分の自由収縮ひずみを調べた。

試験に用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメント、川砂、川砂利コンクリート(w/c=60%、単位水量183kg/m<sup>3</sup>)である。

試験体は材令7日迄湿潤養生を行ない、試験体は恒温恒湿室で保存した。試験体の個数は各2個で、ひずみの測定には検長30cmのコンタクトゲージを用いた。

試験結果を図5に示す。同図から拘束試験体中央部の収縮ひずみ

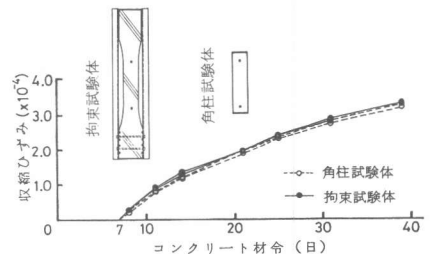


図5. 拘束試験体と角柱試験体の自由収縮ひずみ

は角柱試験体 (10x10x40cm) の収縮ひずみと等しく、角柱試験体の収縮ひずみを拘束試験体の自由乾燥収縮ひずみと見なせることが分る。

### 3-3 拘束鋼材断面積について (実験III)

収縮拘束ひびわれ試験を促進試験とみなせば、拘束鋼材の断面積を大きくして早期にひびわれを発生させることが望ましいが、コンクリートの諸性状は材令によって変化するため、早すぎると誤った結論を導く恐れがある。またひびわれの発生が早い程、発生時のひびわれ幅は小さくその確認が容易でない等の試験方法における問題もある。そこで本装置の拘束鋼材断面積  $A_s$  を主要因として拘束ひびわれ試験を行なった。試験体の種類を表2に示す。試験体の個数は各3個で、固定は図1に示した方法 (B) によった。また拘束試験の他にクリープ試験 (圧縮応力  $60\text{kg/cm}^2$ 、荷材令14日) も行なった。

使用材料は普通ポルトランドセメント、川砂 (表乾比重2.54、吸水量1.85%) および砕石 (2.60、1.20%) で、コンクリートの調合および拘束試験体と同一条件下においた材令28日の強度を表3に示す。

乾燥開始材令は7日で、それ迄湿布養生を行なった。試験室の環境条件は温度  $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60\pm 5\%$  である。

実験結果を図6、図7に示す。図6は試験体 I-1 のコンクリートひずみ  $\epsilon_c$  と鋼材ひずみ  $\epsilon_s$  を示したものであるが、いずれの試験体

においても  $\epsilon_c$  は  $\epsilon_s$  と等しく、固定方法 (B) による固定もほぼ完全とみなせる。図7は拘束鋼材断面積  $A_s$  とひびわれ発生日 (乾燥開始日からひびわれが貫通した日迄の日数) との関係を示したものである。ひびわれ発生日は  $A_s$  が増すと当然のことながら早くなる傾向にあるが、調合 I、II のいずれのコンクリートにおいてもその差異は同種の3体の試験体におけるばらつきに比較して顕著なものではない。しかし  $A_s$  が大きい程、初ひびわれの発生から貫通まで日数を要する傾向にあり、また貫通時のひびわれ幅も小さいので、ひびわれの確認の容易さの点からも必要以上に  $A_s$  を増してひびわれの発生を早めることは望ましくないとと思われる。

なお、筆者らは  $A_s=16.2\text{cm}^2$  の装置を用い、単位水量等を主要因にして各種骨材のコンクリートの拘束ひびわれ試験を行ってきたが、川砂利および砕石コンクリートのひびわれ発生日は 7~34日、その時のひびわれ幅は  $0.06\sim 0.12\text{mm}$ 、人工軽量骨材コンクリートは同じく 28~68日、 $0.10\sim 0.14\text{mm}$  でひびわれの発生を容易に確認でき、またその発生個所は試験体 75体のうち 63体は中央30cm区間内で、残り12体もその近傍5cm以内であった。

### 4 クリープ解析

コンクリートの諸性状の材令にともなう変化を考慮できる逐次計算によって、コンクリート試験体の形状および拘束鋼材断面積の収縮応力等におよぼす影響を検討した。

#### 4-1 計算式

コンクリート試験体の拘束鋼材への固定は完全であるとする拘束区間  $l$  内での両者の変形が等しいという条件から (2) 式が導かれる。

$$\int_0^l \Delta E_j(x) dx - \int_0^l \sum_{j=1}^k \frac{\Delta P_j}{E_j A_c(x)} (1 + \varphi(t_i, \tau_j)) dx = \int_0^l \sum_{j=1}^k \frac{\Delta P_j}{E_s A_s} \quad (2)$$

$l=60\text{cm}$ 、試験体の形状を直線と2次曲線で近以し (図2参照)、また乾燥収縮ひずみは (表面積/体積)<sup>1/2</sup> にはほぼ比例するので (周長/断面

表2. 試験体の種類 (実験III)

試験体	コンクリート調合	拘束鋼材断面積 $A_s$ (cm <sup>2</sup> )
I	1	10.34
	2	16.20
	3	47.40
II	1	10.34
	2	16.20
	3	47.40

表3. コンクリートの調合と28日強度

コンクリート調合	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
I	59	177	300	720	1028	5.4	275	30.9
II	59	220	373	712	863	21.0	276	29.7

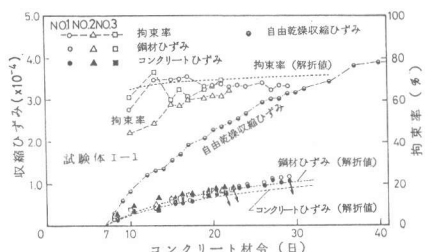


図6. 拘束試験体のひずみと拘束率

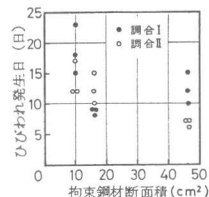


図7. ひびわれ発生日

記号の説明

$\Delta E_j(x)$ : 位置  $x$  における  $\Delta t_j$  間の自由乾燥収縮ひずみの増加分,

$\Delta P_j$ :  $\Delta t_j$  間のコンクリートに生じた引張力の増加分,

$E_j$ :  $t_j$  におけるコンクリートの弾性係数,  
 $\varphi(t_i, \tau_j)$ :  $\tau_j$  で荷重されたコンクリートの  $t_i$  におけるクリープ係数,

$E_s$ : 拘束鋼材の弾性係数,

$A_c$ : 試験体中央区間のコンクリート断面積,

$U$ : 試験体中央区間のコンクリートの周長.

積)<sup>1/2</sup> に比例すると仮定すると、(3)式が得られる。

$$0.978 \sum_{j=1}^l \Delta E_j - 0.917 \sum_{j=1}^l \frac{\Delta P_j}{E_j A_c} (1 + \varphi(t_i, \tau_j)) = \sum_{j=1}^l \frac{\Delta P_j}{A_c E_s} \quad (3)$$

4-2 計算に用いた諸数値

乾燥収縮  $\epsilon_f$  とクリープ係数  $\varphi(t)$  は実験Ⅲの試験結果を双曲線式に近似的に(4)、(5)式を、載荷時材令  $\tau$  のクリープにおよぼす影響曲線  $f_c(\tau)$  と弾性係数  $E_c(t)$  は文献4)にならいそれぞれ(6)、(7)式を用いた。

$$\epsilon_f(t-7) = \frac{(t-7) \times 10^{-4}}{3.787 + 0.149(t-7)} \quad (4) \quad \varphi(t-14) = \frac{(t-14)^{0.6}}{3.907 + 0.276(t-14)^{0.6}} \quad (5)$$

ただし、 $t$ : コンクリート材令(日)

$\tau$ : 載荷時材令(日)

$F_c$ : 28日圧縮強度

$$f_c(\tau) = 8.75 / (5 + \sqrt{\tau}), \quad f_c(14) = 1 \quad (6) \quad E(t) = 14000 \times \left\{ F_c / (0.75 + \tau/t) \right\}^{1/2} \text{ kg/cm}^2 \quad (7)$$

4-3 計算結果と考察

(1) コンクリート試験体の形状の影響  $A_S = 16.2 \text{ cm}^2$  のコンクリート試験体中央部のひずみ  $\epsilon_c$  と鋼材ひずみ  $\epsilon_s$  および拘束率  $K$  を図8に示す。同図中の破線はコンクリート試験体の断面が一様の場合 ( $10 \times 10 \text{ cm}$ ) の値である。本試験体の場合、 $\epsilon_c$  は  $\epsilon_s$  より若干小さくなること、拘束率は一様断面の場合より約4%、収縮応力は4~6%大きくなる程度であること、また拘束率は材令とともに増加するがその増加量は小さいことがわかる。前掲の図6に試験体I-1 ( $A_S = 10.34 \text{ cm}^2$ ) の計算結果を破線で示す。計算結果は実験結果と良く対応している。

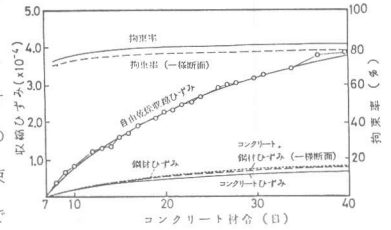


図8. 拘束試験体のひずみと拘束率

(2) 鋼材断面積  $A_S$  の影響  $A_S$  を変化させて収縮応力  $\sigma_c(t)$  および拘束率を計算した結果を図9に、図9の  $\sigma_c(t)$  曲線をそれぞれ材令28日における値  $\sigma_c(28)$  で除して求めた値を図10に示す。同図中には同様に求めて乾燥収縮曲線も示す。図10から  $A_S$  が異なっても各  $\sigma_c(t)$  曲線は互いに相対であること、また乾燥収縮の進行には比例して  $\sigma_c(t)$  は増大することが分る。  $\sigma_c(t)$  曲線が互いに相対であることから  $A_S = 16.2 \text{ cm}^2$  の場合を1として  $\sigma_c(28)$  の比率でもって  $A_S$  の収縮応力におよぼす影響の程度を図11に示した。これらのことから実験Ⅲの  $A_S$  の範囲ではひびわれ発生材令に大きな差異は生じないと言えよう。なお図11中には収縮応力  $\sigma_c$  を鋼材ひずみの測定値から算出することを考慮して  $\sigma_c = 15 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$  に対応する鋼材ひずみも示した。

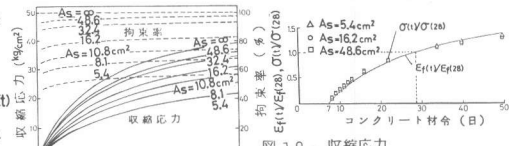


図9. 収縮応力、拘束率

図10. 収縮応力と乾燥収縮曲線

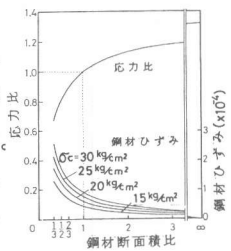


図11. 鋼材断面積と収縮応力

5 まとめ

コンクリート試験体の拘束鋼材への固定方法を改良した外部拘束型の収縮拘束ひびわれ試験装置について検討を行なった結果をまとめると次のとおりである。

- (1) ボルトの圧着力によって固定する従来の方法は固定度があいまいなのに対して提案した固定方法は簡単かつその固定度はほぼ完全である(図4、図6参照)。
- (2) 拘束コンクリート試験体の試験区間の自由乾燥収縮ひずみは、JISに規定された長さ変化試験用供試体の収縮ひずみに等しい。(図5参照)。
- (3) 拘束コンクリート試験が変断面であることの影響は一様断面の場合より拘束率は4%、収縮応力は4~6%大きくなる程度である ( $A_S = 16.2 \text{ cm}^2$  図8参照)。
- (4) 本実験においては、拘束鋼材断面積  $A_S$  が  $10.34 \sim 47.4 \text{ cm}^2$  の範囲ではひびわれ発生材令に大きな差違は認められなかった(図7参照)。

参考文献

- 1) 鈴木、大野、中川：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験、建築学会大会梗概集 昭和51年10月
- 2) 鈴木、大野、中川：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験装置とその実用化について、建築学会大会梗概集 昭和52年10月
- 3) 鈴木、大野、中川：コンクリートの乾燥収縮ひびわれに及ぼす単位水量および乾燥開始材令の影響、昭和53年10月
- 4) A.M.Neville: Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed; North-Holland, 1970
- 5) 池水、大島：コンクリートの材令に伴う乾燥収縮・クリープおよび強度に関する研究、建築学会論文報告集第215号