

## [108] 乾燥収縮ひびわれを予測する収縮応力解析方法

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が拘束されることにより生じる収縮応力を算定する方法として、Neville<sup>1)</sup>および Rusch<sup>2)</sup>が提案する2つの方法がある。これらの方法はいずれも、重ね合わせの法則によりクリープ解析を行うとともに、実構造物に適用できるクリープ係数算定式を示したものである。しかしながら、いずれもクリープ係数に関しては数多くの実験データに基づいて求めているが、乾燥収縮ひびわれ発生に至るまでの収縮応力に関しては実験による裏付けがなされていない。また、解析例も1年以上の比較的長期間にわたる例を対象としており、数週から数ヶ月で生じる乾燥収縮ひびわれへの適合性は確認されていない。

そこで本研究では、外部拘束方法により実際に乾燥収縮ひびわれを発生させ、かつその時点までの収縮応力の経時変化を測定した実験結果<sup>3),4)</sup>と前述の2方法を用いた解析結果との比較を行い、短期間の場合でも精度よく収縮応力を推定できる手法を検討した。また、その手法を用いて実構造物を対象として、構造物の剛性や寸法ならびにコンクリートの強度を種々変化させた場合の収縮応力およびひびわれ制御について考察した。

## 2. 収縮応力解析方法

純粋に乾燥収縮だけにより生じる収縮応力は、初期応力が0であるとともに、乾燥収縮ひずみの増加に伴って生じる応力増分に対してクリープが関与するため、応力変化が未知であるときの漸増応力条件下のクリープ解析を行う必要がある。従って、適当な時間間隔 $\Delta t$ で段階的に応力が増加するものとして、逐次的に適合条件と平衡条件を満足しながら数値積分する方法がとられる。この各段階における応力増分について、Neville は各時間間隔の中間で集中して生じるとし、Rusch はクリープを生じさせる応力は間隔内で一定であるとそれぞれ仮定している。

さて、時間 $t_i$ におけるコンクリートのひずみ $\epsilon_{,i}$ は、収縮応力による弾性ひずみ $\epsilon_{ei}$ とクリープひずみ $\epsilon_{ki}$ および応力と独立したひずみ $\epsilon_{si}$ の和 $\epsilon_{,i} = \epsilon_{ei} + \epsilon_{ki} + \epsilon_{si}$ として表される。いま、引張応力およびひずみを正として、 $\epsilon_{si}$ を自由収縮ひずみ $(-\epsilon_{fi})$ とし、時間 $t_j$ における収縮応力を $\sigma_{ct,j}$ とすると、Neville の方法による $\epsilon_{,i}$ は次式で表される。

$$\epsilon_{,i} = \sum_{j=1}^i \frac{1}{E_{c,j-1/2}} (\sigma_{ct,j} - \sigma_{ct,j-1}) (1 + \phi_{i,j-1/2}) - \epsilon_{fi} \quad \text{----- (1)}$$

また、Rusch の方法による $\epsilon_{,i}$ は次式で表される。

$$\epsilon_{,i} = \sum_{j=1}^i \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{E_{c,j}} + \frac{1}{E_{c,j-1}} \right) (\sigma_{ct,j} - \sigma_{ct,j-1}) + \frac{\phi_{i,j}}{2 E_{c,28}} (\sigma_{ct,j} + \sigma_{ct,j-1}) \right\} - \epsilon_{fi} \quad \text{---- (2)}$$

(1)、(2)式において、 $E_{c,j}$ は時間 $t_j$ におけるコンクリートの弾性係数であり、 $\phi_{i,j}$  および $\Phi_{i,j}$  は時間 $t_j$ において載荷された応力による時間 $t_i$ までのクリープ係数で、それぞれNeville およびRusch が提案するものである (詳しくは文献 1), 2) 参照)。

一方、外部拘束方法により線拘束 (断面内で均等にひずみを一方向に拘束すること) されたコンクリートの時間 $t_i$ におけるひずみ $\epsilon_{,i}$ は、平衡条件から

$$\epsilon_{,i} = - \frac{A_c}{E_k A_k} \sigma_{ct,i} \quad \text{ここに、} A_c, A_k: \text{コンクリートおよび拘束材の断面積、} E_k: \text{拘束材の弾性係数} \quad (3)$$

で表される。(3)式を(1)および(2)式に代入することにより、各時間 $t_i$ における $\sigma_{ct,i}$ が求まるが、(1)および(2)式による解析をそれぞれCase 1 および 2 とし、また弾性係数 $E_c$ を一定の $E_{c,28}$  (材令28日における弾性係数) とした場合の解析をCase 1' および 2' とする。

コンクリートの弾性係数 $E_c$ は、通常圧縮強度 $f_c$ の関数式で与えられ、また $E_c$ の材令 $t$  (日) によ

る変化も  $f_c$  の材令による変化に追従するとして取り扱われている。ここでは、 $f_c - E_c$  の関係式として実験供試体の結果と近似する  $A C I^{5)}$  の式を、 $t - f_c$  の関係式として Neville<sup>1)</sup> の式を用いた。それらを次に示す。

$$E_c = 15000 \sqrt{f_c} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots (4)$$

$$f_c = \frac{f_{c,28}}{0.75 + 7/t} \quad \text{ここに、} f_{c,28}: \text{材令28日における圧縮強度} \quad (5)$$

また、自由収縮ひずみ  $\epsilon_{fi}$  は、各実験供試体について最小二乗法によって求めた近似双曲線式により推定した。

$$\epsilon_{fi} = \frac{t_i}{a + b t_i} \quad \text{ここに、} \quad a, b: \text{実験定数} \quad (6)$$

解析値と比較する実験結果としては、表-1に示すように、拘束条件および乾燥開始材令  $t_a$  をそれぞれ変化させた実験の結果を用いた。また、収縮応力の測定値は、コンクリートと拘束材が連動することを確認して、平衡条件から拘束材のひずみより求めている。

### 3. 解析結果

解析結果の1例として、III-A0 供試体について、クリープ係数の基本値を変化させた場合の結果を図-1~図-4に、時間間隔を変化させた場合の結果を図-5および図-6に示す。これらの図から、いずれのCaseにおいても、収縮応力の経時変化の傾向やその大きさについて解析値と実験値に大きな差はないことがわかる。すなわち、収縮応力のような漸増応力負荷条件下では、たとえ応力比が0.3~0.4以上の高い応力を受ける場合であっても、乾燥収縮ひびわれが発生する応力程度まではクリープひずみが応力に比例するとして十分的確に解析できるといえる。また、相対湿度などの環境条件やコンクリートの配合条件から定められるクリープ係数の基本値  $\phi_N$  あるいは  $\phi_{f0}$  に関しては、図-1~図-4にみられるように、それらの値の変化による解析値の差異は少なく、これらクリープ係数の基本値にあまり厳密な値を用いる必要はないと考えられる。

表-1. 乾燥収縮拘束試験の実験条件

実験 No.	供試体 No.	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ac (cm <sup>2</sup> )	Ak (cm <sup>2</sup> )	$t_a$ (日)	(6) 式の実験定数	
								a	b
I	I-A	50	332	317	150	2.654	2	0.0411	0.000934
	I-B					4.022			
	I-C					5.670			
	I-D					7.602			
	I-E					9.818			
II	II-A	50	324	360	150	7.602	2	0.0188	0.00151
	II-B					3	0.0188	0.00138	
	II-C					7	0.0143*	0.00179*	
	II-D					14	0.0143	0.00179	
	II-E					28	0.0123	0.00188	
III	III-A0	50	324	364	150	7.602	2	0.0247	0.00124
	III-A1			9.028					
	III-B0			5.670					
	III-B1			7.096					
				363					

$t_a$ : 乾燥開始材令  
\*: II-C の自由収縮供試体が不備のため、II-D の自由収縮ひずみの値を用いる。

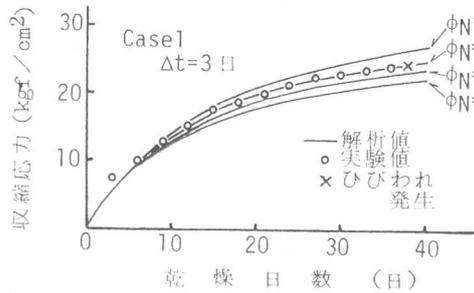


図-1 Case 1 による収縮応力

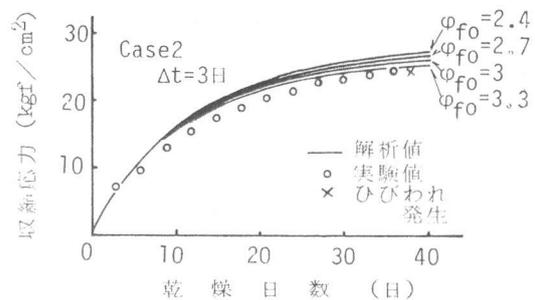


図-3 Case 2 による収縮応力

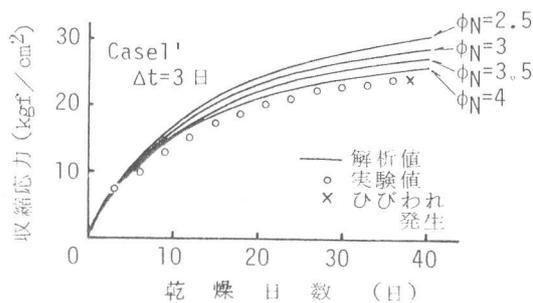


図-2 Case 1' による収縮応力

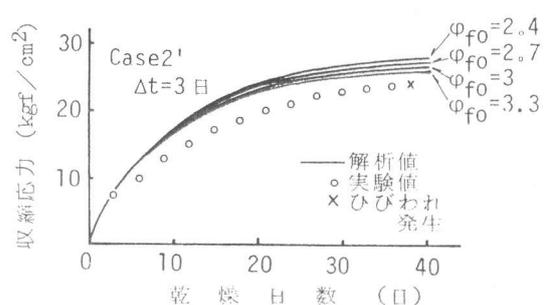


図-4 Case 2' による収縮応力

しかしながら、Case1'の解析結果は実験値より大きな値を示し、Case1の結果に比べて15%程度の差が生じており、とくに乾燥初期においてその差が大きくなっている。これは、弾性係数  $E_c$  が  $E_{c,28}$  より小さい時点の解析に  $E_{c,28}$  を用いたことにより、同一ひずみに対する応力を過大に算定したためと考えられ、収縮応力解析において、とくに初期材令に乾燥を開始した場合には、 $E_c$  の材令による変化は無視出来ないといえる。

次にCase2は、Case1の結果に比べて初期に大きな応力を算定している。これは、Ruschの提案するクリープ係数が荷初期においてNevilleの提案するそれより小さいためと考えられる。また、図-5および図-6にみられるように、Case1に比べてCase2では時間間隔の影響が顕著に表れている。これらのCase1とCase2の解析結果の差異は他の条件下でも同様の傾向がみられた。このことから、乾燥初期において収縮ひずみ速度が大きい部材の解析には、Case1がより適していると考えられる。

図-7~図-9に、他の条件下における実験結果とCase1の解析結果との比較を示す。図にみられるようにCase1は、拘束度および乾燥開始材令が変化した場合でも、ならびに長期間にわたる場合でも実験値に対してはほぼ一致するかやや大きな収縮応力を算定し、過大でなくかつ安全側の値を与えている。従って、乾燥収縮ひびわれが発生するような部材における収縮応力解析方法としては、Case1が最も適当であるといえる。

#### 4. 実構造物への応用

実構造物において乾燥収縮ひびわれを予測する場合、部材寸法の影響ならびに拘束条件を十分考慮する必要がある。ここでは、部材寸法の指標として有効部材厚さ  $d_m$  ( $2 \times$  断面積 / 乾燥にさらされる表面積) を用いた。また、拘束条件として、弾性材 ( $E_k, A_k$ ) で拘束されたコンクリート ( $E_c, i, A_c$ ) の剛性分担率  $\alpha, i$  を用いた。

$$\alpha, i = \frac{1}{1 + E_{c,i} A_c / E_k A_k} \quad \text{ただし } 0 \leq \alpha, i \leq 1 \quad (7)$$

この  $\alpha, i$  は、 $\alpha, i = 1$  のときコンクリートの変形が完全に拘束されることを表す。

解析はCase1の方法に次に述べる諸数値を用いて行い、 $d_m, \alpha, i$  および  $f_c$  の影響について検討した。

自由収縮ひずみの推定式としては、実用範囲内でのW/Cによる差は少ないとして、池永ら<sup>6)</sup>が提案する式にW/C=0.5、 $W=170\text{kg/m}^3$ を代入し、相対湿度を60% R.H.として、

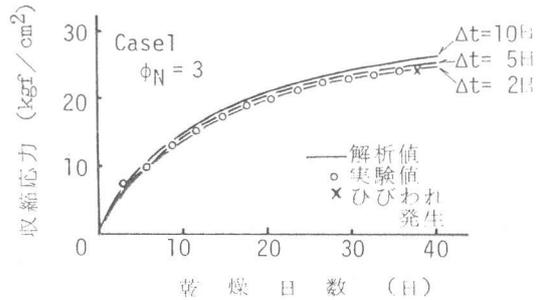


図-5  $\Delta t$ を変化させたCase1による収縮応力

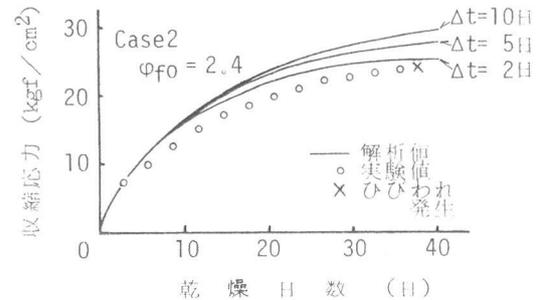


図-6  $\Delta t$ を変化させたCase2による収縮応力

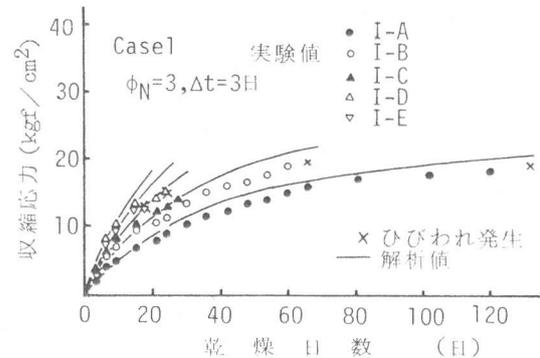


図-7 実験Iの結果とCase1による収縮応力

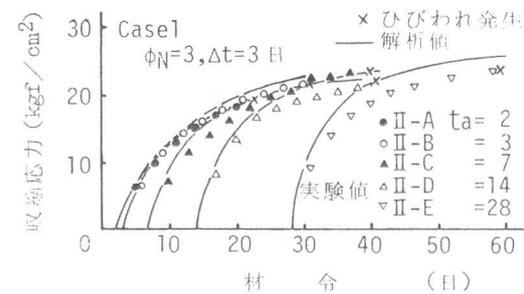


図-8 実験IIの結果とCase1による収縮応力

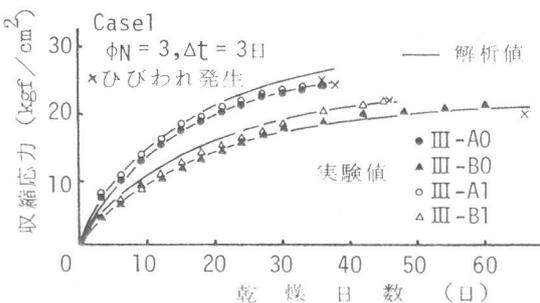


図-9 実験IIIの結果とCase1による収縮応力

$$\epsilon_{fi} = \frac{2.654 t_i}{3.15 + 0.16 t_i} \sqrt{\frac{1}{d_m}} \quad (\times 10^{-6}) \quad \text{-----(8)}$$

を用いた。クリープ係数  $\phi_{i,j}$  は、 $d_m = 6\text{cm}$  の場合  $\phi_N = 3$  がよく適合した先の結果から、次式を用いた。

$$\phi_{i,j} = 9.96 \sqrt{\frac{1}{d_m}} \frac{\ln(t_i - t_j + 1)}{5 + \sqrt{t_j + t_a}} \quad \text{-----(9)}$$

拘束度としては、(7)式に  $E_{c,28}$  を代入した値  $\alpha$  を用い、 $\alpha_{,i}$  は次式で算定した。

$$\alpha_{,i} = \frac{1}{1 + (1/\alpha - 1) E_{c,i}/E_{c,28}} \quad \text{-----(10)}$$

また、引張強度  $f_t$  は  $f_c/12$  とし、ひびわれ発生条件として既に報告した  $\sigma_{ct} = 0.7 f_t$  を用いた。

図-10に解析結果の1例として、 $\sigma_{ct}$ 、 $f_t$  および  $\sigma_{ct}/f_t$  の経時変化を示すが、乾燥日数100日程度を過ぎるといづれの値もごくわずかしき増加しないことがわかる。そこで、乾燥日数100日における  $\sigma_{ct}/f_t$  を求め、 $\alpha$  との関係を描いたのが図-11である。図中の曲線と  $\sigma_{ct}/f_t = 0.7$  の線が交わった点がひびわれ発生の限界拘束度  $\alpha_{cr}$  を表し、これより右側の  $\alpha$  ではひびわれが発生することになる。コンクリートの圧縮強度が高くなるにつれて  $\alpha_{cr}$  は大きくなっており、これは弾性係数の増加に伴う  $\sigma_{ct}$  の増加よりも  $f_t$  の増加の方が大きいためと考えられる。

この  $\alpha_{cr}$  と  $f_{c,28}$  の関係を各  $d_m$  について求め、さらに任意の  $\alpha_{cr}$  に対応する  $f_{c,28}$  と  $d_m$  の値を求めて描いたのが図-12である。実構造物における乾燥収縮ひびわれを防止するには、設計条件から定まる任意の有効部材厚さを有する部材において、構造条件から定まる任意の拘束度  $\alpha$  に対応する圧縮強度をこの図から求め、その値を下限値としてコンクリートの28日圧縮強度を定めればよいと考えられる。

## 5. 結論

(1) 乾燥収縮ひびわれが発生するまでの収縮応力は、(1)式により十分に確に推定することができる。

(2) 乾燥初期における収縮応力の解析値は、それ以降の解析に大きく影響するため、よりの確に求めることが重要である。

(3) 弾性計算から求まるコンクリートの剛性分担率を拘束度とみなすことにより、構造面における乾燥収縮ひびわれの制御対策を論じることができる。

## 参考文献

- 1) Neville, A.M.: Creep of Concrete. North-Holland, 1970.
- 2) Rusch, H.: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮 (百島祐信訳). 鹿島出版会, 1976.
- 3) 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.
- 4) 牧角、松下: コンクリートの収縮ひびわれ補強鉄筋量に関する研究. セメント技術年報37, 1983.
- 5) ACI Committee 318: ACI 318-71, 1971.
- 6) 池永博威、大島久次: コンクリートの乾燥収縮に伴うひびわれ発生限界に対する水セメント比、使用単位セメント量に関する研究. 日本建築学会論文報告集No.217, 1974.
- 7) 牧角、徳光: コンクリートの乾燥収縮ひびわれ発生条件に関する研究. 第5回コンクリート工学年次講演論文集, 1983.

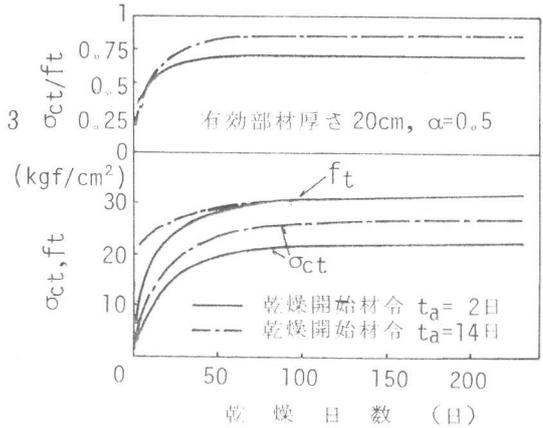


図-10  $\sigma_{ct}$ 、 $f_t$  および  $\sigma_{ct}/f_t$  の経時変化

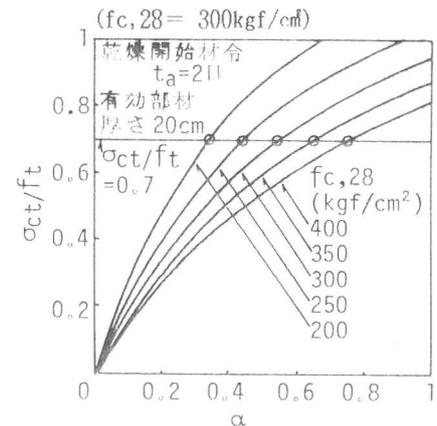


図-11  $\alpha$  と  $\sigma_{ct}/f_t$  との関係

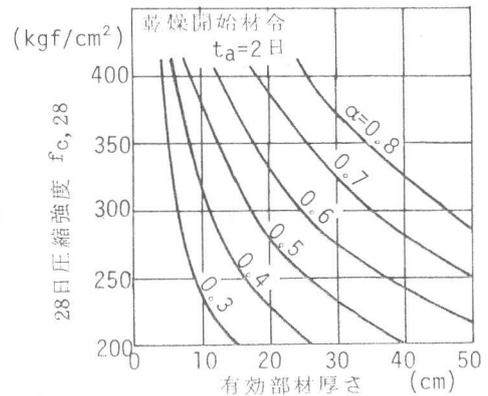


図-12 有効部材厚さと  $f_{c,28}$  との関係