

論文

[1007] 鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力

宮澤伸吾<sup>1</sup>・田澤栄一<sup>2</sup>・佐藤 剛<sup>3</sup>・佐藤克俊<sup>4</sup>

1. まえがき

従来、セメントの水和にともなう生じるコンクリートの自己収縮はその値が小さいため[1]、ひびわれの解析には無視されてきた。しかし、高性能減水剤やシリカフェームを用いて水セメント比を小さくした超高強度コンクリートでは極めて大きな自己収縮が生じることが明らかとなった[2]-[5]。従って、コンクリートの体積変化に起因する自己応力としては乾燥収縮応力[6]や温度応力ばかりでなく、超高強度コンクリートでは自己収縮応力が大きくなりひびわれ発生の原因になるものと推測される[7]。

以上のような観点から本研究では、超高強度コンクリートを用いたRC部材において、自己収縮が内部鉄筋で拘束されることにより生じる自己応力（自己収縮応力）について実験的に検討した。自己収縮応力に及ぼす水セメント比や鉄筋比の影響を乾燥収縮応力と比較しながら検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には風化花崗岩系山砂（比重、2.61、吸水率2.0%）粗骨材には流紋岩質碎石（最大寸法20mm、比重2.71）、混和剤にはメタクリル酸誘導体を含む特殊高分子スルホン酸塩系の高性能減水剤を用いた。一部の配合ではシリカフェーム（エジプト産）を用いたが、粉末タイプで比表面積は160,000cm<sup>2</sup>/gである。鉄筋は横ふし型異形鉄筋SD295AでD13, D19およびD25を用いた。コンクリートの配合は、表1に示すようにW/(C+SF)=0.17, 0.30, 0.40とした。高性能減水剤の添加率は、セメントに対する固形分重量比で示した。なお図中で配合は水結合材比(%) - シリカフェーム置換率(%) - 高性能減水剤添加率(%)と略記した。

2. 2 供試体の作製・養生・測定方法

表2は、試験要因を示したものである。供試体は定着長を考慮して10×10×120cmとし、断面中心に軸方向鉄筋を埋め込んだ（鉄筋比は0~4.96%）。

木製型枠を横に寝かせ、型枠による拘束を防ぐために底面に厚さ10mmの発泡スチロールをしき、さらに型枠の内側全面にビニールシートをしきその中にコンクリートを打設した。水分の逸

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					ad. (%)	Slump (cm)	Slump flow (cm)	air (%)
		W	C	SF	S	G				
1.7	3.1	160	846	94	400	886	*	18.5	34	2.3
3.0	3.7	160	533	0	610	1040	0.3	26.0	60	4.8
4.0	4.0	180	450	0	655	980	0.1	9.5	—	0.4

\*:1.8-2.5

表2 実験条件

W/(C+SF) (%)	SF/(C+SF) (%)	Steel ratio (%)		
		1.05	2.77	4.97
17	10	●	●▲	●
30	0	●	●▲	●
40	0	●	●▲	●

●:Sealed,▲:Dried

\* 1 広島大学助手 工学部第四類（建設系）、工博（正会員）  
 \* 2 広島大学教授 工学部第四類（建設系）、工博（正会員）  
 \* 3 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻  
 \* 4 広島大学 工学部第四類（建設系）

散を防ぐために打設から脱型時まで表面をビニールシー  
トおよび湿布で覆った。材令24時間で脱型した後、密封  
養生または乾燥養生を行った。密封供試体はひびわれ観  
察のため2側面はビニールシートで、その他の面はアル

ミ箔粘着テープでシールし20℃室内に静  
置した。乾燥供試体は2側面を露出させ  
その他の面はアルミ箔粘着テープでシー  
ルし20℃、50%R.H.室内に静置した。供試  
体は立てて静置した。図1に示すように  
供試体の長さ変化を埋め込みゲージ（無  
筋のみ）、またはコンタクトチップによ  
り測定した。鉄筋は図2のように半割に  
したものを溝切り加工し、5mmのひずみ  
ゲージをエポキシ系接着剤により接着し

た。材令24時間程度まではコンクリート温度が若干上昇するので、温度の実測値を基に埋め込み  
ゲージおよび鉄筋に貼ったゲージの測定値を補正した。なお、各条件についてひずみ計測用供試  
体を1本作製し、RC供試体の場合はひびわれ観察用にさらに2本作製した。

### 3. 自己収縮に及ぼす配合の影響

図3は、埋め込みひずみゲージにより求めた  
無筋コンクリートの長さ変化を打ち込み直後  
を原点にして示したものである。密封供試体のひ  
ずみすなわち自己収縮ひずみは $W/(C+SF) = 0.40$   
および0.30の場合は、材令2ヶ月でそれぞれ  
 $70 \times 10^{-6}$ および $170 \times 10^{-6}$ 程度であったが、 $W/(C+SF) = 0.17$ の場合は凝結直後から自己収縮が生じ  
材令2ヶ月で $800 \times 10^{-6}$ と極めて大きくなった。  
図4は、供試体表面に張り付けたコンタクトチ  
ップにより材令24時間を原点にして測定した結  
果であるが、図3に示した埋め込みゲージの結果  
とほぼ一致した。

図5は、図4のデータを各材令ごとに示した  
ものである。 $W/(C+SF) = 0.40$ および0.30の場合、  
密封供試体に比べて乾燥供試体の収縮ひずみが  
大きくなっているのに対し、 $W/(C+SF) = 0.17$ の  
場合は、両者の収縮ひずみがほぼ等しくなった。  
従って、 $W/(C+SF) = 0.17$ の場合、乾燥供試体にお  
ける収縮ひずみの大部分は自己収縮によるもの  
で乾燥の影響は極めて小さいと考えられる。図  
6は、鉄筋コンクリートの供試体表面のひずみ

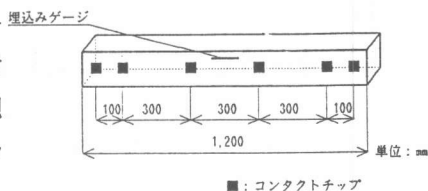


図1 コンクリートのひずみの測定方法

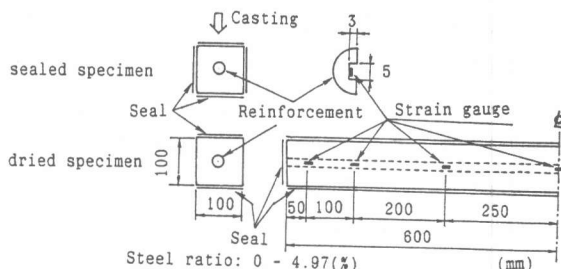


図2 鉄筋の加工およびひずみの測定方法

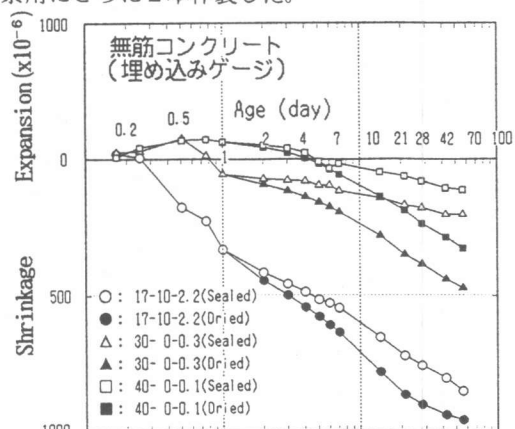


図3 無筋コンクリートの長さ変化  
(埋め込みゲージ)

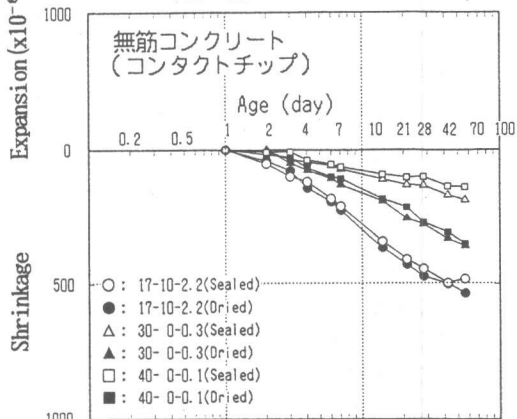


図4 無筋コンクリートの長さ変化  
(コンタクトチップ)

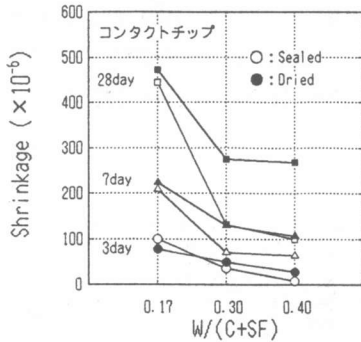


図5 無筋コンクリートの長さ変化率

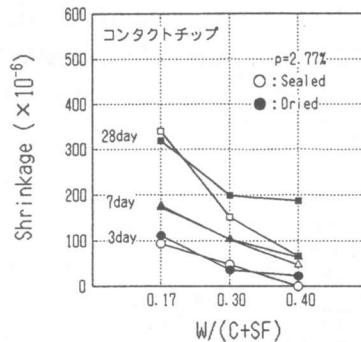


図6 鉄筋コンクリートの長さ変化率

の測定結果を示したものであるが、無筋コンクリートの場合と同様の傾向が認められた。

#### 4. 自己収縮応力

表3は、鉄筋コンクリート供試体と同様に、材令1日で脱型後密封養生または乾燥養生した供試体により求めた、圧縮強度、割裂引張強度、圧縮載荷時の静弾性係数を示したものである。

図7は、鉄筋のひずみ分布を示したものである。本実験の条件では定着長は20cm程度であると考えられる。図8～11は、鉄筋の定着長を除いた部分のひずみの測定値を用い、拘束力がコンクリート断面に一樣に作用すると仮定して計算したコンクリートの自己応力の経時変化を示したものである。

いずれの鉄筋比の場合でも密封供試体における引張の自己応力（自己収縮応力）は、 $W/(C+SF)$ が減少するにしたがい増加した。また、 $W/(C+SF) = 0.30$ 以下の場合には材令1日以前に自己収縮応力が生じた。 $W/(C+SF) = 0.17$ でD25を用いた密封供試体は材令28日で $\sigma_{seir} = 32.5 \text{ kgf/cm}^2$ でひびわれが発生し、図12に示すようにひびわれ部の鉄筋のひずみおよびコンクリート表面の収縮ひずみは応力解放により急減に減少した。

図13は、自己収縮応力に及ぼす鉄筋比の影響を示したものである。いずれの配合においても鉄筋比の増大と共に自己収縮応力は増加した。

図14は、自己応力に及ぼす養生方法の影響を示したものである。 $W/(C+SF) = 0.30$ および0.40の場合には、密封供試体に比べて乾燥供試体の自己応力が大きく、乾燥により自己応力は増大することを示している。これに対し、 $W/(C+SF) = 0.17$ の場合には、両者の自己応力はほぼ同じであり、自己応力の発生原因の大部分が自己収縮によるもので乾燥により自己応力はほとんど増大しないことを示している。

図15は、密封供試体と乾燥供試体の自己応力

表3 コンクリートの力学的性質

W/(C+SF) (%)	養生	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		弾性係数 ( $\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )		
		1日	3日	28日	3日	28日	1日	3日	28日
		0.17	密封	570	728	37.9	45.1	2.67	3.37
0.17	乾燥	567	873	38.7	59.0		3.30	3.42	
0.30	密封	353	540	29.8	40.7	2.42	3.50	4.42	
0.30	乾燥	319	571	34.0	39.8		3.15	3.50	
0.40	密封	208	369	22.8	38.9	1.63	2.53	3.77	
0.40	乾燥	205	393	24.9	39.2		2.58	3.13	

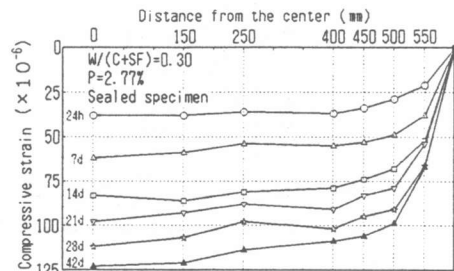


図7 鉄筋のひずみ分布

の関係を示したものである。自己応力は、自己収縮応力と乾燥収縮応力の重ね合わせであると考え、各配合における自己収縮応力の寄与率を同図に示している。これより乾燥供試体に生じる自己応力のうち、 $W/(C+SF)=0.40$ では約30%、 $W/(C+SF)=0.30$ では約50%が自己収縮によるものであることが解る。

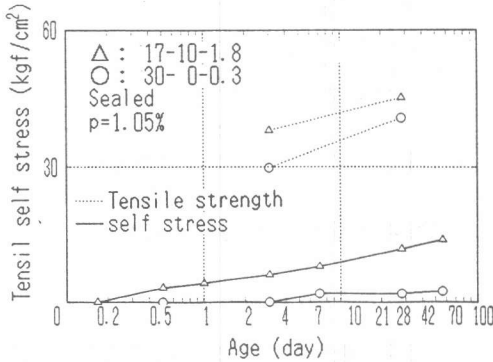


図8 コンクリートの自己応力の経時変化

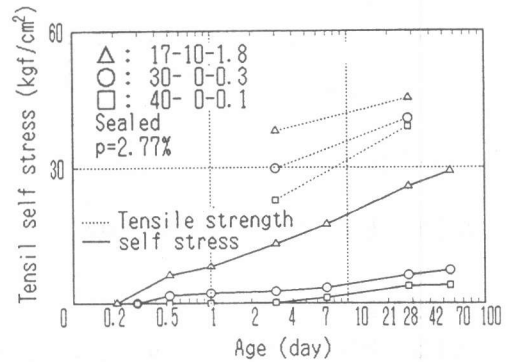


図9 コンクリートの自己応力の経時変化

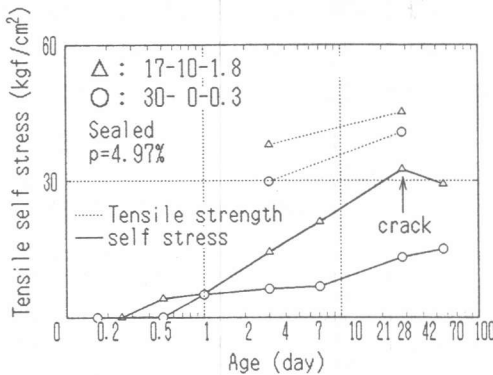


図10 コンクリートの自己応力の経時変化

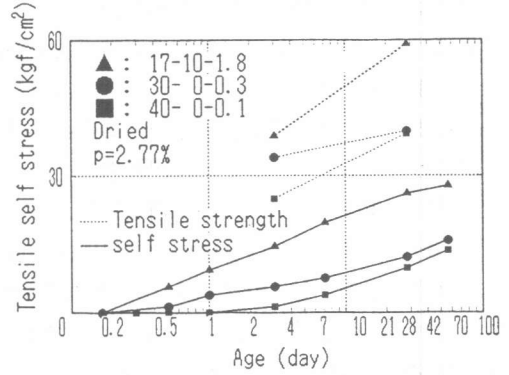


図11 コンクリートの自己応力の経時変化

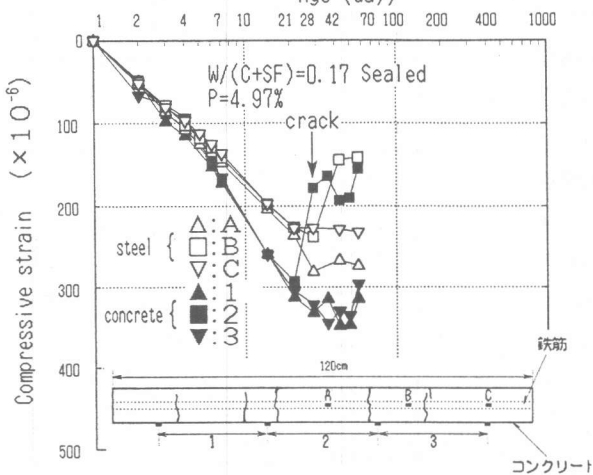


図12 鉄筋とコンクリートの収縮ひずみ

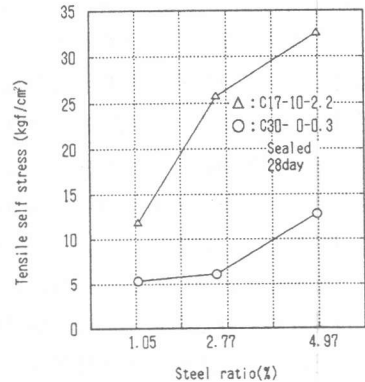


図13 鉄筋比とコンクリートの自己応力の関係

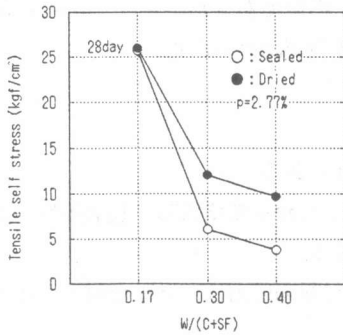


図14 コンクリートの配合と自己応力の関係

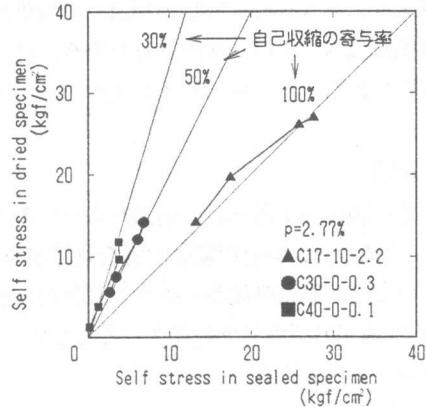


図15 密封供試体の自己応力と乾燥供試体の自己応力の関係

### 5. 自己収縮応力によるクリープ特性

RC部材において、自己収縮および乾燥収縮が鉄筋により拘束された場合のコンクリートのクリープ係数を下式により求めた。ただし $E_e$ としてはクリープ係数を求める材令における圧縮載荷時の値、また $\epsilon_f$ および $\epsilon_r$ としては供試体表面に張り付けたコンタクトチップから求めた値を用いた。

$$\text{ここで、 } \phi = E_e / E_o - 1 \quad (1)$$

$$\text{ただし、 } E_e = \sigma_{\text{self}} / (\epsilon_f - \epsilon_r) \quad (2)$$

$\epsilon_f$ : 無筋コンクリートのひずみ,  $\epsilon_r$ : 鉄筋コンクリートのひずみ

$\sigma_{\text{self}}$ : 自己応力,  $E_e$ : 有効弾性係数,  $E_o$ : 静弾性係数,  $\phi$ : クリープ係数

図16はクリープ係数の経時変化を示したものである。なお、材令24時間以前のRC供試体のひずみのデータがないので、クリープ係数は24時間以降の値で示すこととした。従って、実際のクリープ係数は図に示した値より若干大きな値になるものと思われる。また、自己収縮応力および拘束ひずみの測定値が小さい条件については、クリープ係数を十分な精度で求めることが困難であったので除外し、そのほかの条件について算出した。

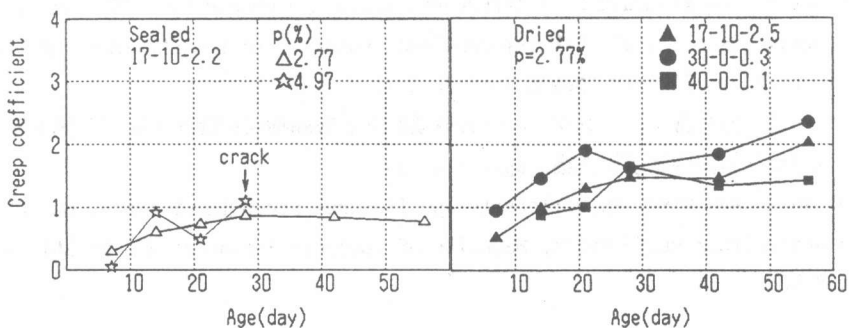


図16 コンクリートのクリープ係数の経時変化

図16より、 $W/(C+SF)=0.17$ の場合、密封供試体において自己収縮が鉄筋で拘束されたときのクリープ係数は材令1日を原点とした場合、材令2ヶ月で1程度であった。また、乾燥供試体のクリープ係数は密封供試体のそれと比べて若干大きくなる傾向が認められた。

## 6. 結論

本研究の範囲内で得られた結論をまとめると以下の通りである。

- (1) コンクリートの自己収縮は水結合材比が小さくなるにしたがって増大し、超高強度コンクリートにおいては、凝結直後から極めて大きな自己収縮を生じる。
- (2) 自己収縮が内部鉄筋で拘束されることにより生じる自己収縮応力は、水結合材比が小さくなるにしたがって大きくなる。
- (3) 超高強度コンクリートが乾燥を受ける場合、自己応力の発生原因としては自己収縮が主であり、乾燥収縮の影響は少ない。すなわち、乾燥を受けなくても大きな自己応力が生じる。
- (4) 水結合材比が極めて小さく鉄筋比が大きい鉄筋コンクリートでは、自己収縮応力のみにより貫通ひびわれを生じることがあり得る。
- (5) 自己収縮応力によるクリープ係数 ( $\phi$ ) は、乾燥を受ける場合のそれより若干小さくなる傾向が認められ、材令2ヶ月で  $\phi = 1$  程度となる。

本研究の一部は、平成4年度の文部省科学研究費補助金およびセメント協会研究奨励金により行われた。記して感謝の意を表す次第である。

## 参考文献

- 1) Davis, H.E. : Autogenous volume change of concrete, Proc. ASTM, 40, pp.1103-1110, 1940
- 2) Tazawa, E. and Miyazawa, S. : Autogenous shrinkage of cement paste with condensed silica fume, 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, pp.965-986, Istanbul, 1992.5
- 3) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛, セメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.684-689, 1992.12
- 4) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛, 小西謙二郎: コンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992
- 5) Tazawa, E. and Miyazawa, S. : Autogenous shrinkage caused by self desiccation in cementitious material, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, Volume IV, pp.712-718, New Delhi, 1992.11
- 6) 牧角龍憲, 徳光善治: コンクリートの乾燥収縮と収縮拘束に関する研究, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.21-24, 1981
- 7) Tazawa, E. and Miyazawa, S. : Tensile and flexural strength of cement mortar subjected to non-uniform self-stress, Magazine of Concrete Research, 44, No.161, pp.241-248, 1992.12