

論文 コンクリートの自己収縮応力試験方法に関する実験

中川隆夫*¹・大野義照*²

要旨：コンクリートの自己収縮応力試験において、試験体形状・拘束鉄筋径を要因に実験を行い、鉄筋ひずみ分布より定着長、試験体形状を検討するとともにクリープ解析によって自己収縮応力を計算した。その結果、異形鉄筋材 D25 あるいは D32 を埋設した一様断面試験体の材齢 28 日におけるコンクリートの収縮応力は、それぞれ 1.84N/mm^2 と 2.24N/mm^2 であり、材齢 28 日の割裂引張強度の 36.1% と 44% であった。試験体両端の定着長は 30cm 程度で、本実験で用いた試験体長 1m は十分な長さであった。試験体両端の定着部の断面を大きくした試験体では、一様断面の場合より収縮応力は大きくなった。また逐次計算によるクリープ解析によって収縮応力を捉えることができた。

キーワード：自己収縮、収縮応力、拘束試験、試験体形状、クリープ解析、拘束の程度

1. まえがき

高強度コンクリートのように水セメント比が小さく、単位セメント量の多いコンクリートでは自己収縮が大きく、初期材齢におけるひび割れ発生原因となる¹⁾。自己収縮によるひび割れは、コンクリートの収縮ひずみが鉄筋や型枠などによって拘束されて引張応力が発生し、その応力が引張強度を超えると生じる。引張応力には自己収縮や拘束の程度他にコンクリートのヤング係数やクリープ性状が大きく関係する。これらを総合的に評価する方法として、JCI の自己収縮研究委員会から自己収縮応力試験法が提案されている^{1), 2)}。この試験法は、断面中央に拘束材として異形棒鋼 D32 を埋設した長さ 1.5m、断面 10×10cm の角柱を試験体とし、付着を切った中央 30cm 間の鉄筋ひずみから収縮応力を求めるものである。

試験体の長さは、コンクリートへの鉄筋の定着長さで決まるものであるが、JCI の試験法ではその定着長さは、かなり余裕をもって定められている。またひび割れが生じる場合、断面が一様であるとひび割れがひずみゲージを貼付した中央 30cm 区間に生じるとは限らず、ひび割れ発生の確

認ができないこともある³⁾。

本報告では、試験体形状、拘束鉄筋断面積を要因に、JCI 委員会の試験法に準じた収縮応力試験を行い、試験体の必要長さ・形状、拘束鋼材量と収縮応力、収縮応力の発生時期等について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および試験体の種類

コンクリートは、普通ポルトランドセメント、細骨材は海砂 7 : 山砂 3 の混合砂、粗骨材は碎石および混和剤に高性能減水剤を用いた、水セメント比 24%、単位セメント量 625kg/m^3 、細骨材率 (s

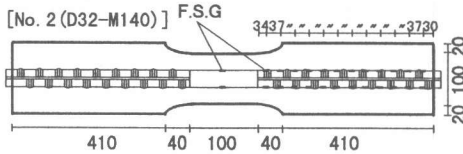
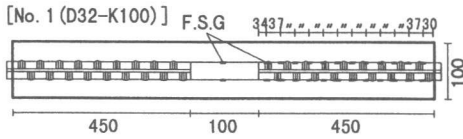
表-1 コンクリート強度

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
1	29.9	2.9	25.4
3	63.5	—	33.5
7	64.2	3.5	36.6
14	74.1	4.5	37.4
28	83.9	5.1	40.8

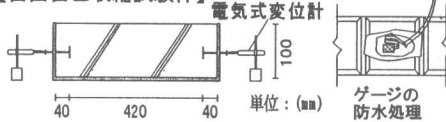
* 1 大阪大学技官 工学部建築工学科 (正会員)

* 2 大阪大学教授 工学部建築工学科 工博 (正会員)

【鉄筋拘束試験体一例】



【自由自己収縮試験体】



図一 試験体の形状

/a) 42.9%のレディーミクストコンクリートを使用した。表一にコンクリートの強度試験結果を示す。

試験体の形状を図一に、その種類を表二に示す。拘束鉄筋はD32, D25 および D19 の3種類で、長手方向の中央 10cm 間はリブとふしを切削し、テフロンシート(厚さ 0.1mm)を三重巻きにして付着を切っている。この区間の拘束鉄筋比(リブ・ふしを除いた鉄筋断面積/コンクリート断面積)は、それぞれ 6.78% (D32), 4.41% (D25) および 2.34% (D19) である。J C I 委員会の試験法では、外部拘束型のひび割れ試験体にならって中央 30cm 区間を試験区間とし、この区間の付着が切っているが、外部拘束型の試験体では検長 20~30cm の機械的ひずみ計でコンクリートのひずみを測定するのに対し、本試験では鉄筋に貼付したひずみゲージより鉄筋ひずみを測定することから付着を切った試験区間は 10cm とした。試験体の長さは、前回の試験³⁾ から定着長はかなり短くてよいことが分かったので、1m とした。コンクリート試験体の形状は、全長にわたって断面が 10×10cm と一様なものと、中央 10cm 区間を 10×10cm とし、拘束定着部の幅を 14cm および 12cm に広げたものの3種類である。定着部の断面を大きくしたのは、一様断面ではひび割れの発生位置が鋼材断面

表一 試験体の種類

番号	記号	鉄筋種・径	くびれ	定着部幅
No. 1	D32-K100	D32	無	100mm
2	D32-M140	D32	有	140
3	D25-K100	D25	無	100
4	D25-M140	D25	有	140
5	D25-M120	D25	有	120
6	D19-M140	D19	有	140
7	AT-K100	自己収縮	無	100
8	AT-K140	自己収縮	無	140
9	CR-K100	クリープ	無	100

No. 1~6: 拘束自己収縮応力試験体

No. 7, 8: 自由自己収縮試験体

No. 9: クリープ試験体

が切削されていない分鋼材断面積が大きい定着部になる可能性が大であること、コンクリート表面はアルミ箔でシールされているためゲージを貼付している試験区間にひび割れが生じないとひび割れの発生を確認できないためである³⁾。試験体は各々3体製作した。

自由自己収縮試験体は高さ 10cm×幅 10cm×長さ 50cm の角柱体2体と幅の異なる 10cm×14cm×50cm の角柱体1体およびクリープ試験体は 10cm×10cm×50cm の角柱体4体(載荷材齢: 2種類, 各2体)を製作した。型枠は厚さ 12mm の合板で製作した。

2. 試験方法, 測定方法および測定項目

試験は 20±2℃, R. H. 65±5% の恒温・恒湿室で実施した。試験体の製作および試験はコンクリートの自己収縮試験方法(案)¹⁾ならびに自己収縮応力試験方法(案)¹⁾に準拠し、組み立てた型枠の底面にテフロンシート(厚さ 0.1mm)を敷き、さらに型枠内側の側面、端面および底面にポリエステルフィルム(厚さ 0.1mm)を敷いてコンクリートと型枠が接触しないようにした。コンクリートの打設終了後直ちに表面仕上げを行い、ポリエステルフィルム(厚さ 0.1mm)で表面を覆い、さらに湿布で覆った。打ち込み後、材齢 1.0 日で脱型し、直ちに試験体全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)

でシールした。

拘束自己収縮試験体のコンクリートの自己収縮応力は、円形加工した鉄筋中央部に対面に貼付した箔ひずみゲージ(F.S.G)で測定した鉄筋ひずみより求めた。

定着部の鉄筋のひずみ分布は各鉄筋径においてコンクリート部外端から 10 ヶ所、ふしを削らずふしとふしとの間に F.S.G を対面に貼付して求めた。なお、ゲージの保護及び防水処理は、付着性能への影響を最小限にするため、図-1 中に示したように狭い範囲でゲージやリード線をエポキシ系の接着剤で覆い、その硬化後、更に液化させた合成ゴムで二層塗りしている。

自由自己収縮ひずみは両端部に埋設したゲージプラグ間(検長: 42cm)の変位量を電気式変位計($500 \times 10^{-6}/\text{mm}$)で測定した。

クリープ試験は材齢 1.0 日と 3 日に 2 体一組で持続応力($6\text{N}/\text{mm}^2$)を載荷し、変位は試験体の 4 側面において検長 30cm 間をコンタクトストレーンゲージ(C.S.G)で測定した。

コンクリート温度は各試験体において断面中央に熱電対を埋設して測定した。

鉄筋ひずみおよびコンクリート温度の測定はコンクリートの打設時から、自由自己収縮ひずみの測定はコンクリートの凝結試験における始発時から開始した。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリート内部温度、自由自己収縮ひずみ、クリープ係数

(1) コンクリート内部温度

試験体のコンクリート内部温度の経時変化を図-2 に示す。コンクリートの打込時温度は 18°C で、材齢 0.8 日に内部温度は最大になった。その時の温度は $29 \sim 31^\circ\text{C}$ で、埋設鉄筋断面積が小さい程高い傾向にあった。

(2) 自由自己収縮ひずみ

凝結の始発(9時間30分)時からの自由自己収縮ひずみの経時変化を図-3 に示す。図中の曲線は最小二乗法で求めた近似曲線である。断面が 10

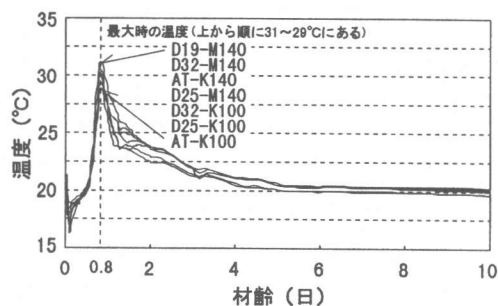


図-2 コンクリート内部温度

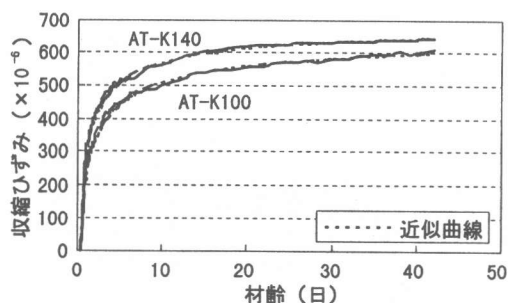


図-3 自由自己収縮ひずみ

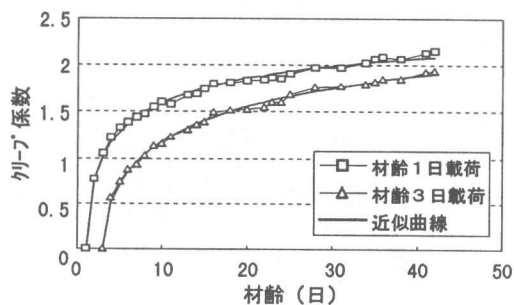


図-4 クリープ係数

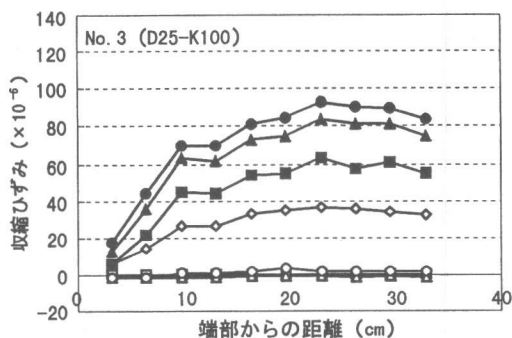
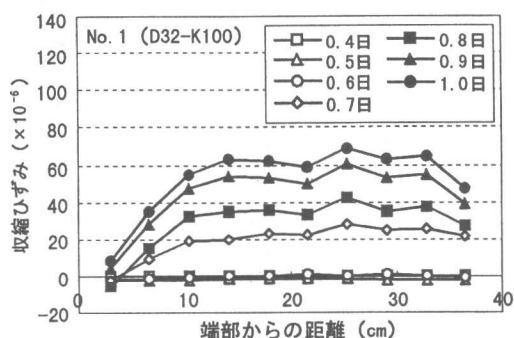
×14cm の方が 10×10cm の収縮ひずみより材齢 1.0 日で 25%、材齢 7 日で 10%程度大きい。

(3) クリープ係数

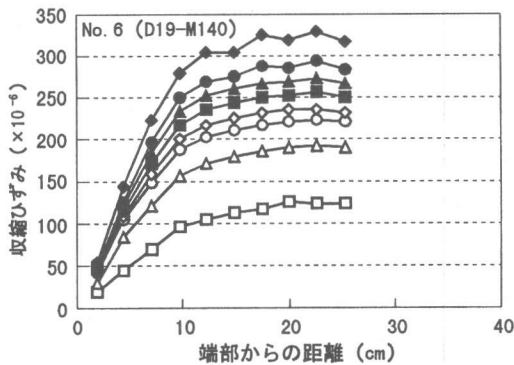
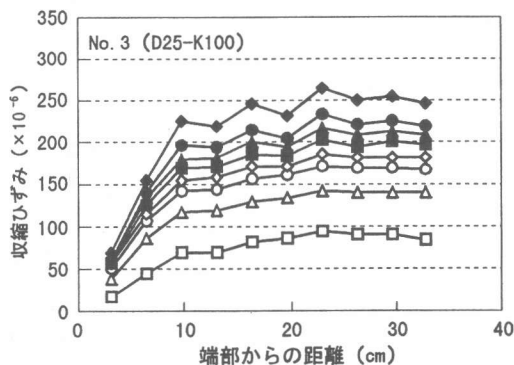
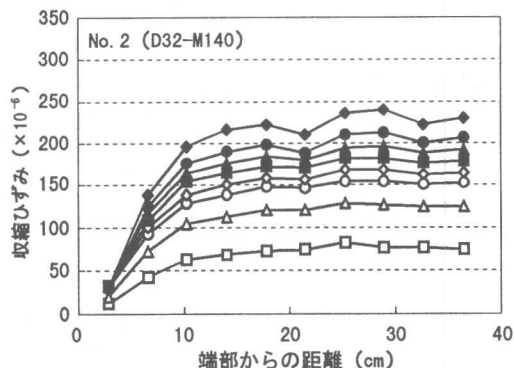
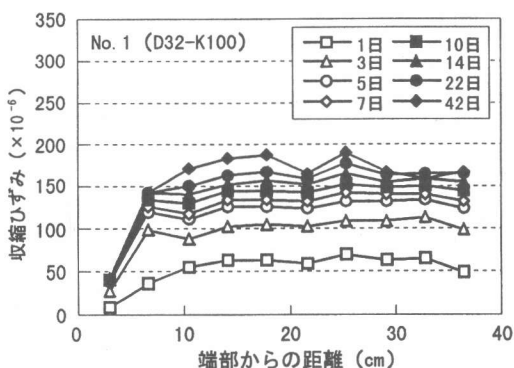
図-4 にクリープ係数の経時変化も示す。図中の曲線は最小二乗法で求めた近似曲線である。

3.2 定着長さ

図-5 に定着部の鉄筋ひずみ分布を示す。(a) 図は材齢 1.0 日まで、(b) 図は材齢 1.0 日以降のひずみ分布を示している。(a) 図から 0.6 日と 0.7 日の間から鉄筋に収縮ひずみが生じ始めたことが分かる。コンクリートの収縮はそれ以前から生じているが、コンクリートの強度・ヤング係数が



図一 5 (a) 定着部の鉄筋ひずみ (材齢 1.0 日まで)



図一 5 (b) 定着部の鉄筋ひずみ (材齢 1.0 日以降)

小さく、拘束応力は生じていない。No.1(D32-K100)試験体についてみると、材齢1.0日では端部から4番目のゲージ位置で定着されているとみなせることができる。材齢とともに鉄筋の応力が増加しても同じ位置で定着されており、収縮応力とともに付着強度が大きくなっていることが分かる。No.1では4番目のゲージ貼付位置、すなわち外端部から14.9cmの位置で定着されているとすると、その位置での材齢1.0日と7日の鉄筋ひずみは、 62.9×10^{-6} と 133×10^{-6} で、14.9cm区間の

平均付着応力度を求めると 0.69N/mm^2 と 1.47N/mm^2 となる。この値は材齢1.0日と7日における圧縮強度の約1/43と1/44である。

鉄筋比が小さい程鉄筋応力は大きくなるので、定着長さは15cm(No.1)~25cm(No.6)と、長くなる傾向にあるが、本実験のコンクリートの範囲では30cmで充分と言えよう。

3. 3 中央鉄筋ひずみ

埋設した鉄筋のふしを取り除き付着を切っている中央部のひずみの経時変化を図一6に示す。

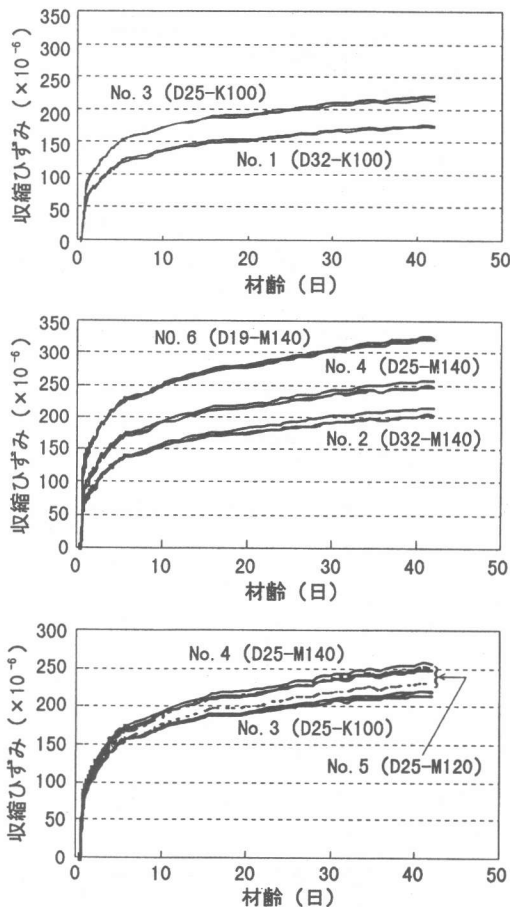


図-6 中央部の鉄筋ひずみ

鉄筋径が小さくなる程、鉄筋による拘束が小さくなることから鉄筋ひずみは大きくなっている。コンクリート試験体形状が一様断面のものと両端の断面が大きいものを比較すると後者の方が収縮ひずみが大きくなっている。これは鉄筋のコンクリート部への固定端が、付着を切った中央10cm区間の両端ではなく、くびれに沿ってコンクリート断面が大きくなる定着部内にあると考えられ、固定端間のコンクリートと鉄筋の縮み量(変位)が等しいという条件のもとで、固定端間の変断面を含んだコンクリートの平均断面積が大きく、したがって鉄筋比は小さくなり、鉄筋ひずみが大きくなるものと考えられる。したがって、変断面の影響が鉄筋ひずみ、すなわち後述のようにコンクリート応力に現れることに留意する必要がある。

3. 4 コンクリートの収縮応力

中央鉄筋ひずみより算出したコンクリートの収縮応力の経時変化を図-7に示す。収縮応力は自己収縮の経時変化に応じて材齢6日までに急速に大きくなっている。材齢28日における一様断面の試験体では、D32を埋設したNo.1では 2.24N/mm^2 、D25を埋設したNo.3では 1.84N/mm^2 の収縮応力が生じている。これは材齢28日の割裂引張強度のそれぞれ44%と36.1%である。この種の試験においてひび割れを発生させるか否かは試験の目的によっていずれの場合もあり得るが、D32を埋設した場合、ひび割れ発生の可能性は高いと言える。両端の定着部を大きくした試験体では、前述の理由により一様断面の場合よりコンクリートの収縮応力は大きくなっている。最も収縮応力が大きい試験体はNo.2(D32-M140)で材齢28日における収縮応力は 2.65N/mm^2 で材齢28日の割裂引張強度の52%である。

逐次計算法⁴⁾による解析値も図-7中に示す。解析には、コンクリートの自己収縮ひずみ $\varepsilon_f(t)$ は図-3に示した材齢42日までの断面 $10 \times 10\text{cm}$ の実験値を近似した式(1)を用いた。クリープ係数は、図-4に示した荷重材齢1.0日のクリープ曲線を基準曲線とし、荷重時材齢の影響 $\kappa(\tau)$ は文献5)からの式(3)を用いた。ヤング係数は表-1の実験値をほぼ近似できるCEB-FIP Model Code 1990の式を修正した式(4)¹⁾を用いた。

$$\varepsilon_f(t) = (t - t_0)^{0.55} / (2.99 + 1.56(t - t_0)^{0.55}) \cdot 0.001 \quad (1)$$

$$\phi_t(t) = \kappa(\tau) \cdot (t - \tau)^{0.6} / (0.977 + 0.367(t - \tau)^{0.6}) \quad (2)$$

$$\kappa(\tau) = 6 / (5 + \sqrt{\tau}), \kappa(1) = 1 \quad (3)$$

$$E_c(t) = E_{28} \cdot \exp(0.0622(1 - ((28 - a_E) / (t - a_E))^{0.5})) \quad (4)$$

ここに、 t : 材齢(日)

t_0 : 始発時間(日)

$\kappa(\tau)$: 荷重時材齢 τ の影響曲線

E_{28} : 材齢28日のヤング係数

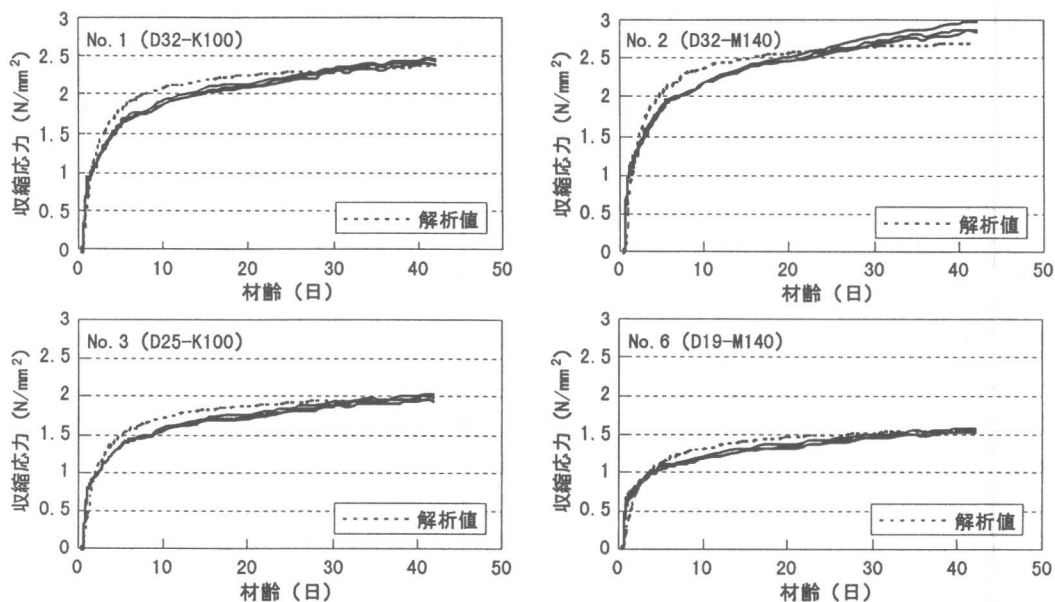


図-7 コンクリートの収縮応力

a_E : 凝結時間の影響による係数で, 0.65 とする。

解析値は, 材齢 10 日前後で実験値より若干大きめであるが, 全般にわたって両者は良好な対応を示している。なお, 定着部の断面が大きく, くびれを有する試験体では, 鉄筋は付着を切った中央 10cm 区間から両側 9cm 定着部に入った位置でコンクリートに固定されているとして計算している。

4. まとめ

材齢 1.0 日で 257×10^{-6} , 28 日で 522×10^{-6} の自己収縮ひずみのコンクリートを用いて, 自己収縮応力試験における試験体形状, 鉄筋の定着長などについて検討した結果をまとめると次のとおりである。

- 1) コンクリートの収縮応力は材齢 0.6 日と 0.7 日の間から発現し, 材齢 6 日頃までに急増, その後は緩やかな増加傾向を示している。
- 2) 異形鉄筋材 D25 あるいは D32 を埋設した一様断面試験体の材齢 28 日におけるコンクリートの収縮応力は, それぞれ 1.84 N/mm^2 と 2.24 N/mm^2 であり, 材齢 28 日の割裂引張強度の 36.1% と 44% であった。

3) コンクリートの収縮応力は, 埋設鉄筋径が大きいほど大きく, また試験体の定着部の断面を大きくした試験体は, 一様断面の試験体より収縮応力は大きくなった。

4) 試験体両端の定着長は 15cm~25cm で, 本実験で用いた試験体長 1m は十分な長さであった。

5) 逐次計算によるクリープ解析により収縮応力をとらえることができた。

謝辞

本研究の実施に際して, 協力を得たタイコー(株)生コンクリート千里工場長植木憲一氏, 本学学生林田都芳君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996. 11
- 2) 竹内良ほか: 高強度コンクリートの自己収縮応力の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 751-756, 1997
- 3) 大野義昭・中川隆夫・山本純大: コンクリートの自己収縮応力試験方法の検討, セメント・コンクリート論文集, No. 51, pp. 630-635, 1997
- 4) 太田寛ほか: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, 第 3 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 25-28, 1981
- 5) A. M. Neville: Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed; North-Holland, 1970