

論文 コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討

林田都芳^{*1}・大野義照^{*2}・中川隆夫^{*3}

要旨:コンクリートの自己収縮応力試験は、コンクリート角柱体の断面中央に埋設した拘束用の異形鉄筋のひずみ測定によって行われる。本報では試験体長・試験体形状・拘束鉄筋の種類・同径を要因に自己収縮応力実験を行い、これらの影響要因の試験体の定着長ならびに収縮応力に及ぼす影響を検討した。また、クリープ解析によって自己収縮応力を計算した。試験体両端の定着長は20cm程度で、鉄筋の表面形状によって若干異なった。収縮応力は材齢0.5~0.6日から発生した。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つた。

キーワード:自己収縮、収縮応力、拘束試験、試験体形状、鉄筋の種類、クリープ解析

1. まえがき

高強度コンクリートでは、自己収縮による変形が鉄筋や型枠などで拘束されることによって収縮応力が発生し、初期材齢においてひび割れが発生することがある。その自己収縮応力を評価する試験方法がJCIの自己収縮研究委員会から提案されている¹⁾。その方法は、10×10cmのコンクリート断面中央に拘束材として異形鉄筋D32を埋設した長さ1.5mの角柱を試験体とし、異形鉄筋の中央30cm区間のふしを削り付着を切った部分の鉄筋ひずみから収縮応力を求めるものである²⁾。この種の試験体の長さは鉄筋のコンクリートへの定着長で決まるものであるが、JCIの試験体の定着長はかなり余裕を持って定められている。既報³⁾では水セメント比24%、材齢1日の自己収縮が257×10⁻⁶のコンクリートを用いて必要な定着長を検討した結果、定着長は15~25cmであり試験体長は1.0mで十分であることなどを報告した。本報告では、鉄筋のふし形状の異なる3種類の鉄筋を用いて、その定着長への影響を調べるとともに、ひび割れの発生も想定しきびれのある変断面の収縮応力への影響も検討した。

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、海砂7:山砂3の混合砂の細骨材、碎石の粗骨材、高性能減水剤を用いた、レディミクストコンクリートを使用した。コンクリートの調合および強度試験結果をそれぞれ表-1, 2に示す。

試験体の形状を図-1に示す。また、試験体の種類を表-3に示す。拘束鉄筋の径はD32およびD25の2種類であり、D32については図-1中に示すよ

表-1 コンクリート調合表

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
24	42.9	729	175	625	871

表-2 コンクリート強度

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
0.5	1.4	0.1	0.6
1	49.1	3.2	27.4
3	70.2	3.8	35.0
7	72.8	4.0	35.0
14	75.5	4.1	36.3
28	81.9	4.7	39.0

*1 大阪大学院生 大学院工学研究科建築工学専攻

(正会員)

*2 大阪大学教授 大学院工学研究科建築工学専攻

工博 (正会員)

*3 大阪大学技官 大学院工学研究科建築工学専攻

(正会員)

【鉄筋拘束試験体一例】

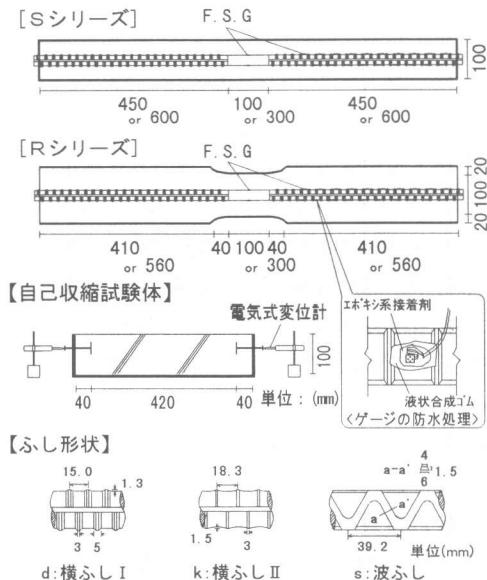


図-1 試験体の形状

表-3 試験体の種類

番号	記号	鉄筋種 ・ふし形状	くびれの 有無	試験体長 (cm)	定着部幅 (mm)
No.1	D32-S15d	D32-d	無	150	100
2	D32-S10d	// · d	無	100	100
3	D32-R15d	// · d	有	150	140
4	D32-R15k	// · k	有	150	140
5	D32-R15s	// · s	有	150	140
6	D32-R10d	// · d	有	100	140
7	D25-S10d	D25-d	無	100	100
8	D25-R10d	// · d	有	100	140
9	AT-100	自己収縮	無	50	100
10	AT-140	自己収縮	無	50	140
11	CR-100	クリープ	無	50	100

うな市販の3種類の鉄筋を用いた。また、鉄筋の中央10cmまたは30cm区間は、リブとふしを除いて付着を切ってある。後者の長さはJCIの試験法にならったものである。付着を切った区間の拘束鉄筋比(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6.16% (D32) および3.80% (D25) である。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として定着部の幅を14cmに広げたものの2種類である。定着部の断面を大きくした理由は、一様断面では、リブとふしが切削されている中央部分よりも、定着部のほうが鉄筋

断面積が大きく、したがって拘束鉄筋比が大きくなるので、ひび割れの発生位置が定着部になる可能性が大であること、および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⁾。試験体数は、No.1,2,6,7は各3体、No.3,8は各2体、No.4,5は各1体製作した。

自己収縮試験体は高さ10cm×幅10cm×長さ50cmの角柱と幅の異なる10cm×14cm×50cmの角柱各2体製作し、クリープ試験体は10cm×10cm×50cmの角柱4体(載荷材齢:2種類、各2体)を製作した。

2.2 試験方法、測定方法および測定項目

試験は、20±2°C、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、コンクリートの打設終了後直ちに表面仕上げを行い、ポリエチレンフィルム(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。

拘束試験体のコンクリートの自己収縮応力は、鉄筋中央部に對面に貼付した箔ゲージ(F.S.G)による鉄筋ひずみ測定値から求めた。定着部の必要長さは、鉄筋のふしとふしとの間に貼付したF.S.Gによって測定した定着部の鉄筋のひずみ分布から検討した。なお、ゲージの保護および防水処理は、付着特性への影響を最小限にするため、図-1中に示すようにゲージを狭い範囲でエポキシ系の接着剤で覆い、その硬化後、更に防水用液状ゴムで二層塗りしている。

自己収縮ひずみは、両端部に埋設したゲージブラグ間(検長:42cm)の変位量を電気式変位計(500×10⁻⁶/mm)で測定した。クリープ試験は材齢1日および3日に2体一組で持続応力(6N/mm²)を載荷した。変位の測定は、試験体の4側面において検長30cmのコンタクトストレインゲージ(C.S.G)を行った。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。コンクリートの打込時温度は18°Cで、内部温度は材齢0.8日に最大34~41°Cとなった。その後、材齢4日で室温に低下した。

3. 試験結果および考察

3.1 自己収縮ひずみ、クリープ係数

凝結の始発(9時間)状態からの自己収縮ひずみの経時変化を図-2に示す。以下、材齢は始発時からの経過時間とした。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10×10cmと10×14cmの収縮ひずみは、ほぼ同様な経時変化を示している。

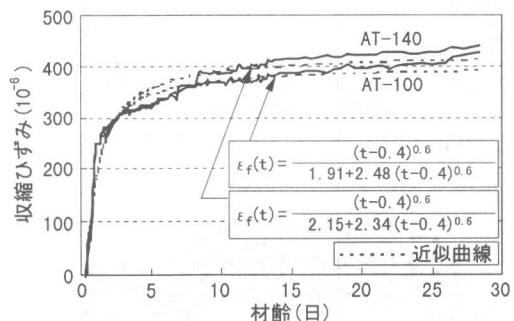


図-2 自己収縮ひずみの経時変化

クリープ係数は、材齢28日において載荷材齢1日および3日ともほぼ0.5であり、最小自乗法で求めた近似曲線は次のとおりである。

$$\text{載荷材齢1日} \quad \phi_1(t) = \frac{(t-1)^{0.6}}{6.86 + 0.928(t-1)^{0.6}} \quad (1-a)$$

$$\text{載荷材齢3日} \quad \phi_3(t) = \frac{(t-3)^{0.6}}{4.66 + 1.26(t-3)^{0.6}} \quad (1-b)$$

t:コンクリート材齢(日)

3.2 定着長

自己収縮応力試験体において、鉄筋ひずみが端から徐々に増え一定になった位置で、鉄筋はコンクリートに完全に定着されている。したがって、端からこの位置までの距離を定着長とする。

図-3に定着部の鉄筋ひずみ分布を示す。(a)図は、材齢1日まで、(b)図は材齢1日以降のひずみ分

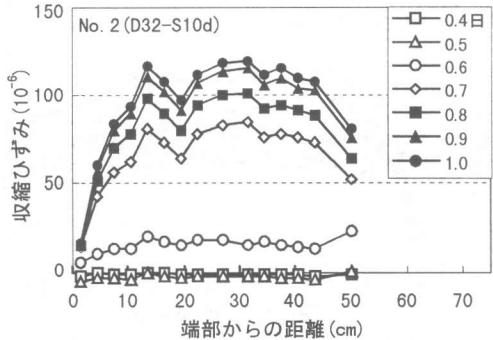


図-3(a) 定着部の鉄筋ひずみ
(材齢1.0日まで)

布を示している。(a)図から0.5日~0.6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およびヤング係数が小さく、拘束応力は生じていない。

(b)図のNo.1(D32-S15d)試験体において、材齢1日では端から6~7番目のゲージ位置より内側では鉄筋ひずみはほぼ同じで、定着長は20cmとみなすことができる。時間の経過とともに鉄筋ひずみが増加し鉄筋応力が増えても、定着長は変わらない。このことから、付着強度が材齢とともに大きくなっているといえる。他の2種類の鉄筋においても、定着長は時間が経過しても変化しなかった。鉄筋表面形状の定着長に及ぼす影響は、横ふしIのd(No.3)に比べ、横ふしIIのk(No.4)および波ふしIのs(No.5)が2~3cm長くなっている。また、拘束鉄筋断面積が小さくなると収縮ひずみが大きくなり、鉄筋応力は大きくなるので、No.2(D32-S10d)の定着長15~20cmに対して、No.7(D25-S10d)の定着長は30cmと長くなる。

図-4に定着部のτ-S関係を示す。付着応力は、定着部の各ゲージ貼付位置での鉄筋ひずみを読みとり、その鉄筋ひずみの差から求めた。すべり量は、すべりの生じていない領域の鉄筋ひずみを基準として、すべり量を求めようとする位置までの鉄筋ひずみに対して台形公式による積分を行って求めた。各材齢におけるτ-S関係において、傾き(剛性)は変わらず、時間の経過とともに付着強度

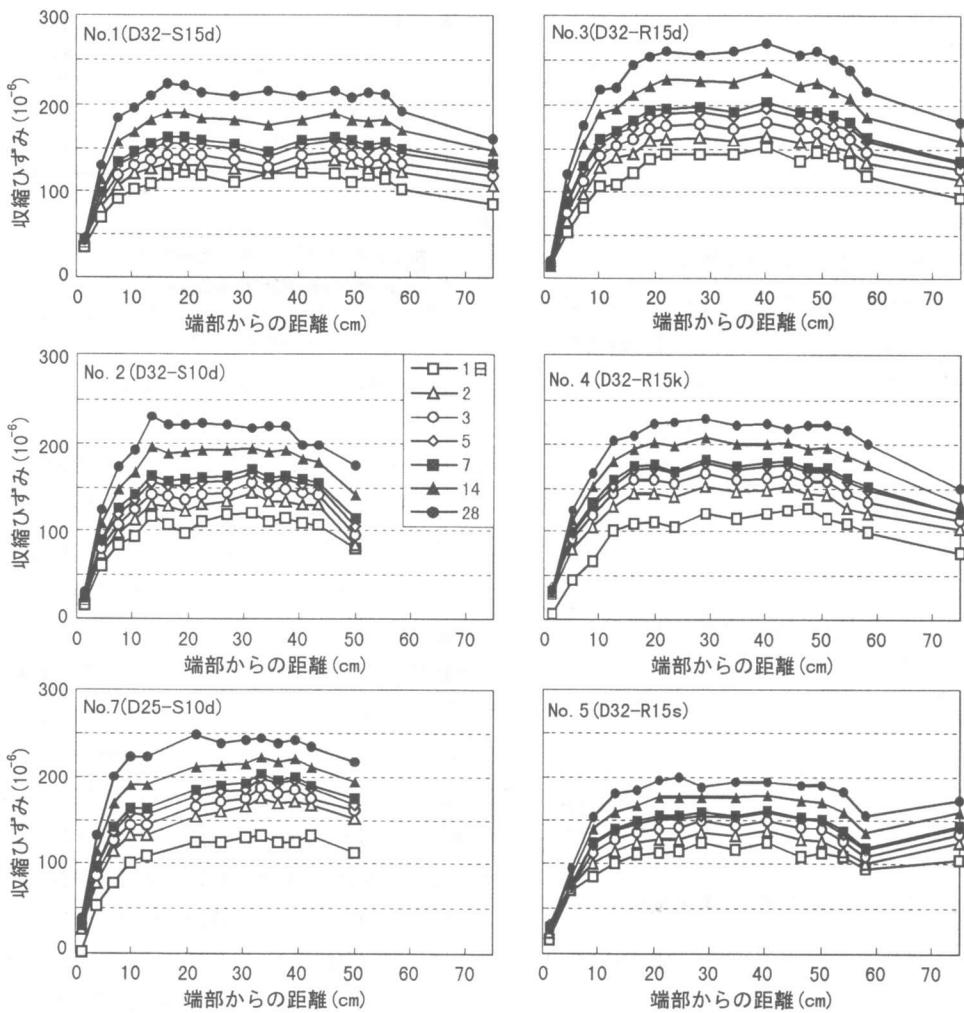


図-3(b) 定着部の鉄筋ひずみ(材齢1日以降)

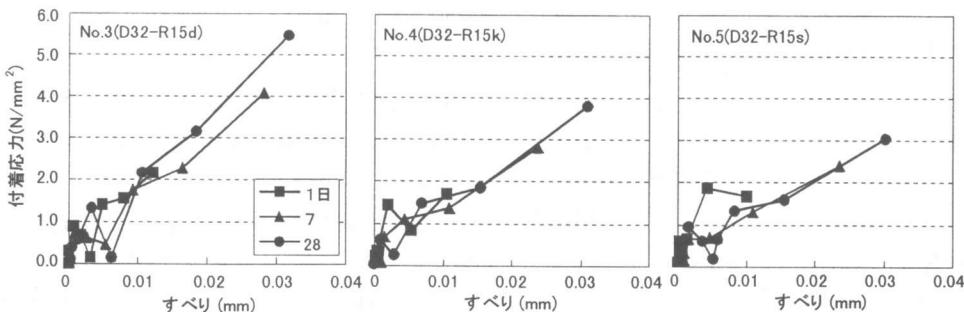


図-4 定着部の τ -S 関係

は大きくなっていることが分かる。また、3種類の鉄筋では横ふし I の d が最も剛性も付着強度も大きく他より定着長が短くなることがわかる。

3.3 コンクリートの収縮応力

鉄筋のふしを除き付着を切っている中央部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の一例を図-5に示す。同図には、試験体断面形状および鉄筋径の異なる試験体の収縮

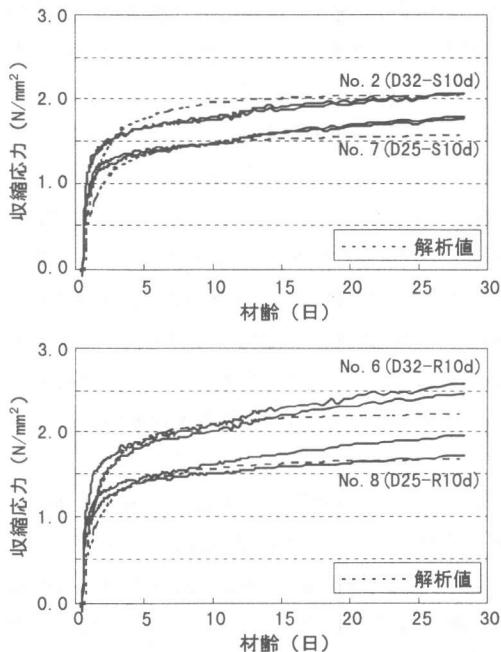


図-5 コンクリートの収縮応力

応力のみを示している。その他の試験体の結果を省略しているのは、試験体長と鉄筋表面形状は定着長には影響するが、その定着長が十分である限り収縮応力には影響しないからである。

収縮応力は自己収縮の経時変化に応じて材齢4日まで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.2 (D32-S10d) は 2.07N/mm^2 、D25を埋設したNo.7は 1.79N/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44.0%および36.0%である。両端の定着部を大きくした試験体では、一様断面の場合より収縮応力が大きくなっている。これは鉄筋のコンクリートへの固定端が中央10cm区間の両端でなく、くびれに沿ってコンクリート断面が大きくなる定着部があり、一様断面の場合より鉄筋比が小さくなることによるものと考えられる³⁾。

最も収縮応力が大きい試験体はNo.6であり、材齢28日における収縮応力は 2.52N/mm^2 で割裂引張強度の53.6%である。同図中に逐次計算法⁴⁾による解析値も示す。

解析において、コンクリートの自己収縮ひずみ $\varepsilon(t)$ は図-2に示した実験値の収縮応力発生時からの経時変化を近似した式(2)を用いた。ただし、収縮応力の発生時を0.55日とする。クリープ係数は前記の載荷材齢1日のクリープ曲線(式1-a)を基準曲線とし、載荷時材齢の影響 $\kappa(\tau)$ は文献⁵⁾からの式(3)を用いた。ヤング係数は表-2の実験値をほぼ近似しているCEB-FIP Model Code 1990の式(4)を用いた。

$$\varepsilon_f(t) = \frac{(t - 0.55)^{0.6}}{2.29 + 2.37(t - 0.55)^{0.6}} \quad (2)$$

$$\kappa(\tau) = \frac{6}{5 + \sqrt{\tau}} \quad (3)$$

$$E_c(t) = E_{28} \cdot \exp(0.0622(1 - \sqrt{\frac{28 - a_E}{t - a_E}})) \quad (4)$$

ここで、 t : コンクリート材齢(日)

$\kappa(\tau)$: 載荷時材齢 τ の影響曲線

E_{28} : 材齢28日のヤング係数

a_E : 凝結時間の影響による係数で0.63とする

計算値は、実測値と概ね一致している。なお、定着部の断面が大きく、くびれを有する試験体では、鉄筋の付着を切った中央10cm区間から両側10cm定着部に入った位置で、鉄筋はコンクリートに固定されているとして計算した。

3.4 拘束率

図-6に一様断面の場合の拘束率((自己収縮ひずみ・コンクリートひずみ)/自己収縮ひずみ)の経時変化を実線で示す。拘束率は、材齢2日ほどではば一定になり、その後の変化は少ない。拘束率は埋設鉄筋径が大きいほど大きく、D32,D25,D19およびD16の拘束率は、それぞれおよそ65%,55%,41%および34%である。図中のD32とD25の点線は、鉄

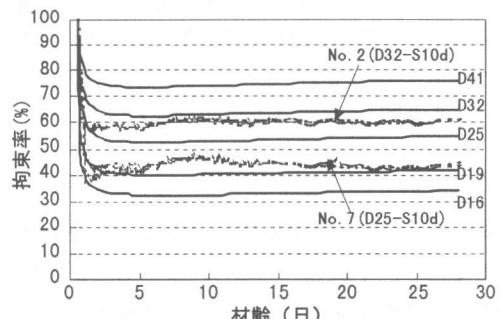


図-6 拘束率の経時変化

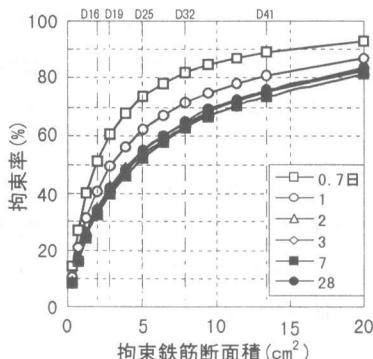


図-7 拘束率と拘束鉄筋断面積

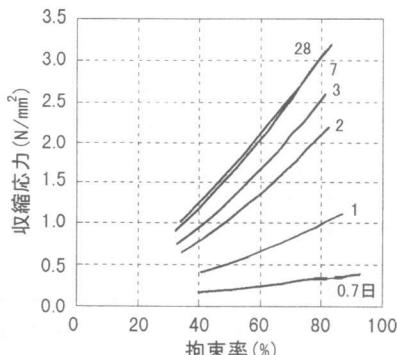


図-8 収縮応力と拘束率

筋ひずみの実験値から算出した拘束率の経時変化である。実験値が解析値より小さいのは、中央部の鉄筋断面が切削されている分断面積が小さくなっているからである。

本試験のような自己収縮応力試験における拘束鉄筋の径を選択する際の資料として、前述のコンクリートに関する諸数値を用いて求めた拘束率と拘束鉄筋断面積の関係を図-7に、収縮応力と拘束率の経時変化を図-8に示す。拘束率は材齢2日で一定値に達し、その後の変化はない。また、収縮応力は拘束率とほぼ線型関係にある。これらの図より、拘束率を介しておおよその拘束鉄筋の径と収縮応力との関係が理解できる。

4.まとめ

鉄筋の表面形状や鉄筋径の定着長に及ぼす影響、コンクリート試験体形状の収縮応力に及ぼす影響を調べた実験結果、ならびに応力解析により検討した結果をまとめると次のようになる。

1) 時間経過とともに収縮応力は増加するが、同時に付着強度も増加するので、鉄筋の定着長の時間に伴う変化はなく、3種類のD32の定着長は20～25cmであった。鉄筋径が小さくなると鉄筋応力が増えるためD25の定着長はD32より増加したが30cmであった。したがって、拘束鉄筋としてD32およびD25を用いた試験体長は1.0mで十分であった。
2) 収縮応力は、材齢0.5～0.6日から発生し材齢4日まで急増した。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、 2.07N/mm^2 であり、割裂引張強度の44%であった。

3) コンクリートの収縮応力は、拘束鉄筋の径が大きいほど大きい。また、定着部の断面を大きくした試験体は、拘束鋼材比が小さくなるので一様断面の試験体より収縮ひずみは大きくなり、収縮応力は大きくなつた。

4) 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。また、自己収縮応力試験における拘束鉄筋径の選定のための資料に、クリープ解析によって拘束鉄筋比と拘束率、拘束率と収縮応力の関係を求めた。

謝辞

本研究の実施に際して、協力を得たタイコー㈱千里工場長 植木憲一氏ならびに本学建築工学専攻大学院生 柳 浩峻君、同研究生 劉 勇君に謝意を表します。

参考文献

- 1) J C I,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) 中川隆夫,大野義照：コンクリートの自己収縮応力試験方法に関する実験コンクリート工学年次論文報告集,Vol.20,No.2,pp.751-756,1998
- 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