

論文 高強度コンクリートラーメンの自己収縮応力 2次元 FEM 解析

早川 智浩*¹・許 明*²・佐藤 良一*³・今本 啓一*⁴

要旨：高強度コンクリートを用いたラーメン実大モデルの自己収縮および水和熱による拘束応力とそれぞれの占める程度を数値解析的に検討した。解析方法は 2 次元 FEM を用い、クリープの影響は Step-by-Step 法に基づいて考慮した。クリープ係数は実測値に基づき、CEB-FIP MODEL CODE 1990 を修正し、載荷時材齢の影響を考慮した。検討の結果、自己収縮はひび割れ発生に大きく影響することが数値解析上明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート,鉄筋コンクリートラーメン,自己収縮応力,温度応力,FEM

1. はじめに

水結合材比の小さい高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート (RC) では、しばしば温度応力だけでは説明の付き難いひび割れが発生する。その原因として、水和熱による温度の急激な変化とともに、大きな自己収縮が発生し、外部拘束体に加えて鉄筋コンクリート部材の内部に配置された鉄筋が拘束するために、コンクリートに大きな自己収縮拘束応力が発生することが考えられる。したがって、高強度コンクリートを用いた RC 構造のひび割れの検討においては、温度変化に起因する応力に加えて自己収縮に起因する応力の影響を考慮する必要があると考えられ、研究もいくつか行われている。しかし、多くは静定の棒材を対象としたものであって、温度応力とともに自己収縮応力も併せて発生する不静定構造を対象としたものはほとんどなく、両者の影響度の解明は強く望まれていた。

そこで本研究は、上記の問題の解明に資するため、高強度コンクリートを用いた RC ラーメンの水和熱と自己収縮に起因する拘束応力の、重ね合わせの原理に基づくクリープ解析を行い、それぞれの全応力に占める割合とともに発生原因別の割合を数値解析的に検討し、この種のコンクリートおよびこの種の構造物にお

ける自己収縮応力の工学的重要性を確認することを目的とする。併せて、実大モデルのひび割れ状況と比較し、ひび割れ発生の根拠を考察した。

2. 解析対象の概要

2. 1 高強度コンクリートラーメンの概要

解析対象としたラーメン試験体を図-1 に示す。これは高強度コンクリートにおいて発生する温度や自己収縮ひずみを実測し、それぞれによる応力の占める大きさについて、実物大モデルによる検証を行うために作成した試験体である。

試験体は、コンクリートの標準養生 28 日圧縮強度が約 120N/mm² の RC で、柱およびはりの横断面積に対する鉄筋比はそれぞれ 1.32%、1.65%である。柱は、厚さ 30cm の土間コンクリート上に打込まれ、12 本の軸方向筋すべてが、

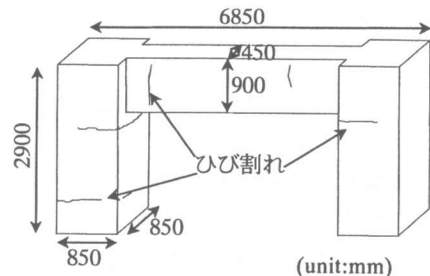


図-1 解析対象ラーメン試験体

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科, 工博 (正会員)

*4 東急建設 (株) 技術研究所建築材料研究室研究員, 工修 (正会員)

およそ 15cm 深さの径 13mm のアンカー筋に接合されている。ひび割れは、図一1 に示す位置に発生し、材齢 7 日の脱型時に観察された。

2. 2 温度及び自己収縮ひずみ計測結果

ラーメン試験体の柱高さ方向中心部に図一2 に示す柱の脚部①、②および中央高さ付近③、④、⑤で熱電対により計測した温度の内、端部③、中間部④、中心部⑤の温度を図一3 に示す。脚部の温度はこれらよりおよそ 10℃低かった。また、寸法 600×600×600mm で厚さ 200mm のスタイロフォームで断熱された供試体で測定された自己収縮ひずみを図一4 に示す。温度の計測原点はコンクリートの打込み直後時点からとし、自己収縮の計測原点は JCI 委員会報告書¹⁾ における自己収縮の定義に基づき、打込み後 0.21 日を凝結始発時間とした。これらは解析モデルで取り扱う時間原点である。ラーメン試験体の温度は打込み後約 15 時間で最高温度に達し、その後、材齢 5.75 日程度で外気温とほぼ等しくなっている。本解析では打込み後から材齢 5.75 日までの時間を対象とした。

2. 3 ひび割れ発生条件

ひび割れ発生時の応力について、牧角ら²⁾ は、割裂引張強度の 70% としている。したがって、実測値より求められた硬化過程の割裂引張強度を用い、ひび割れ発生応力は次式のようになる；

$$\sigma_t = 0.7\sigma_{t(840)} \left\{ 0.37(\log(M))^2 + 2.0\log(M) \right\}$$

σ_t : ひび割れ強度 (N/mm²)

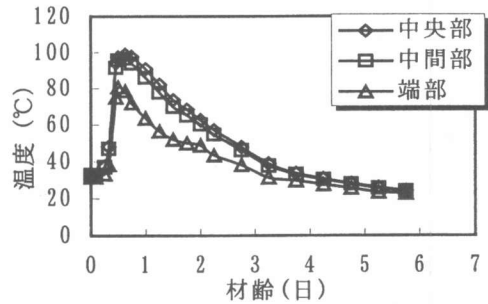
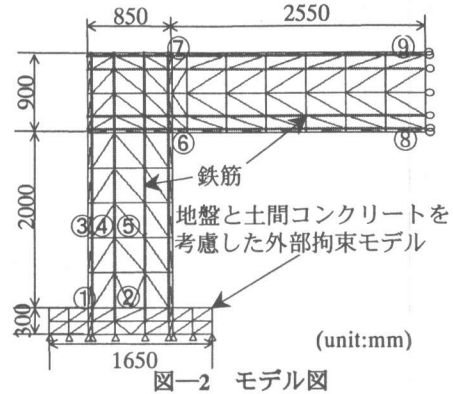
M : 積算温度 (°C・日)

$\sigma_{t(840)}$: 積算温度 840 (°C・日) における割裂引張強度で 6.7 N/mm²

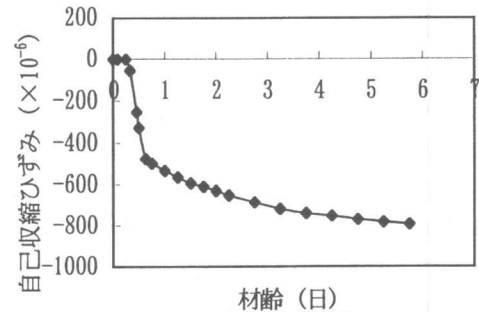
3. 高強度コンクリートラーメン解析

3. 1 解析手法

高強度コンクリートの自己収縮応力の大きさに影響を及ぼす要因は、自己収縮、ヤング係数、クリープ係数であり、収縮量とコンクリートの力学的性質が関与する点で、温度応力、乾燥収縮応力と基本的に同じである。そして、この自



図一3 温度履歴



図一4 自己収縮履歴

己収縮応力はクリープの重ね合わせの原理に基づく Step-by-Step 法により精度よく把握できることが示されている³⁾。そこで重ね合わせの原理を適用した温度応力の解析方法を、鉄筋拘束による自己収縮応力を解析できるように改良した Step-by-Step 2 次元有限要素法⁴⁾を用いることとした。拘束は土間コンクリートの下端の全節点で水平、鉛直方向ともに剛結とした。地盤剛性や地盤と土間コンクリートの相対変位の影響は、不明な点が多いので、土間コンクリートのヤング係数を 3 種類変化させ、外部拘束条件

の相違の影響を相対的に検討した。

一般に、タイムステップ $t_{j-1/2}$ と $t_{j+1/2}$ の間 t_j に生じた体積変化が t_j まで拘束されることにより生じるコンクリートの全増分ひずみは、重ね合わせが成立するとすれば、以下のように示される；

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j) &= \Delta \varepsilon_{c,cr}(t_{i+1/2}, t_j) \\ &+ \Delta \varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}) + \Delta \varepsilon_{as}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}) \\ &+ \Delta \varepsilon_{ds}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし $\Delta \varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j)$: 全増分ひずみ

$\Delta \varepsilon_{c,cr}(t_{i+1/2}, t_j)$: 増分弾性ひずみ
+ 増分クリープひずみ

$\Delta \varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})$: 増分温度ひずみ

$\Delta \varepsilon_{as}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})$: 増分自己収縮ひずみ

$\Delta \varepsilon_{ds}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})$: 増分乾燥収縮ひずみ

シリカフュームを使用した高強度コンクリートの外部への水分の逸散は、材齢 3 ヶ月で表面から 2cm の範囲でしか生じていないとする Larrard ら⁵⁾の研究に基づいて、ここでは乾燥収縮ひずみ ε_{ds} は無視できるものと仮定する。よって、式(1)から増分弾性ひずみ+増分クリープひずみは以下ようになる；

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{c,cr}(t_{i+1/2}, t_j) &= \{\Delta \varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j) - \Delta \varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}) \\ &- \Delta \varepsilon_{as}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\} \end{aligned} \quad (2)$$

したがって、コンクリートの応力とひずみの関係は、剛性マトリクス $[D_c]$ を用い、以下のようになる；

$$\{\Delta \sigma_c(t_{i+1/2}, t_j)\} = [D_c] \{\Delta \varepsilon_c(t_{i+1/2}, t_j) - \Delta \varepsilon_T(t_{j+1/2}, t_{j-1/2}) - \Delta \varepsilon_{as}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\} \quad (3)$$

ここに $\{\Delta \sigma_c(t_{i+1/2}, t_j)\}$: ステップ t_j の $t_{i+1/2}$ におけるコンクリートの増分応力

$[D_c]$: 剛性マトリクスで、

$$[D_c] = \frac{E_c(t_{i+1/2}, t_j)}{(1-\nu^2)} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 ν : コンクリートのポアソン比

$E_c(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j の $t_{i+1/2}$ における有効ヤング係数

また、有効ヤング係数は次の通りである；

$$E_c(t_{i+1/2}, t_j) = E_c(t_j) \left[1 + \phi(t_{i+1/2}, t_j) \times E_c(t_j) / E_c \right] \quad (5)$$

$E_c(t_j)$: ステップ t_j におけるヤング係数

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j で応力が発生しステップ $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数

E_c : 標準養生材齢 28 日のヤング係数

トラス要素でモデル化した鉄筋の応力-ひずみ関係は以下のように示される；

$$\Delta \sigma_s(t_{i+1/2}, t_j) = E_s \times \{\Delta \varepsilon_s(t_{i+1/2}, t_j) - \Delta \varepsilon_{sr}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})\} \quad (6)$$

ただし $\Delta \sigma_s(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j の $t_{i+1/2}$ における鉄筋の増分応力

$\Delta \varepsilon_s(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j の $t_{i+1/2}$ における鉄筋の増分ひずみ

$\Delta \varepsilon_{sr}(t_{j+1/2}, t_{j-1/2})$: $t_{j-1/2}$ から $t_{j+1/2}$ までの鉄筋の増分温度ひずみ

E_s : 鉄筋のヤング係数

鉄筋とコンクリートの付着は完全結合とした。

3. 2 若材齢時のコンクリートの力学モデル

Step-by-Step 法に基づく応力解析の精度を高めるために、高強度コンクリートの若材齢時のクリープ挙動及びヤング係数の発現を可能な限り正確に把握する必要がある。本解析ではラーメン試験体と同じ配合のコンクリートによる若材齢クリープ試験およびヤング係数試験に基づいて、CEB-FIP MODEL CODE 1990(MC90)の次式に示す修正式⁶⁾を用いた；

$$\begin{aligned} \phi(t_{i+1/2}, t_j) &= \phi_0 \\ &\times \left\{ \frac{(t_{i+1/2} - t_j) / t_j}{\beta_{II} + (t_{i+1/2} - t_j) / t_j} \right\}^{0.3} \end{aligned} \quad (7)$$

ϕ_0 : 終局クリープ係数で、

$$\phi_0 = \phi_1 \times [(a-1)/(a-t_j^b)] \quad (8)$$

β_{II} : クリープの進行速度を決める係数で、

$$\beta_{II} = c \times t_j - d \quad (9)$$

t_j : MC90 による有効材齢

t_i : 1 日

ラーメンに用いた早強セメントに対して実験をもとに定めると、次のようになる。 $\phi_1=1.68$, $a=2.03$, $b=-1.03$, $c=4.52$, $d=1.45$ である。

一方、若材齢のヤング係数については、

$$E(t_j) = E_c \times \exp\left\{s_E \left[1 - \left(\frac{28 - a_E}{t_j - a_E}\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (10)$$

早強セメントに対して、実験定数 s_E 、 a_E は、それぞれ 0.0978, 0.432 である。

以上のモデルを用いてヤング係数とクリープ係数の経時変化の計算結果をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。

3. 3 解析結果

コンクリートに生じる全応力は、地盤と土間コンクリートから成る外部拘束体の拘束による外部拘束自己収縮応力と外部拘束温度応力、鉄筋拘束による自己収縮応力、断面内の非線形温度分布による内部拘束温度応力より構成されるものと考え、これらを把握するため、表-1 の 5 種類の解析ケースを設定した。また、各応力をそれぞれ個別に抽出するのは困難な場合があるため表-2 に示すように求まると仮定した。表中の各応力の変数はそれぞれの応力の成分を表すものとする。

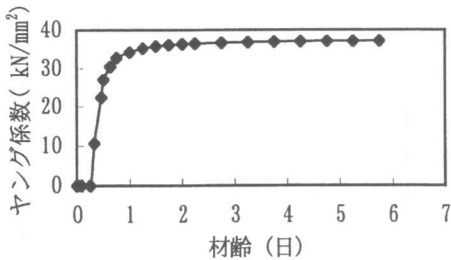


図-5 ヤング係数の経時変化

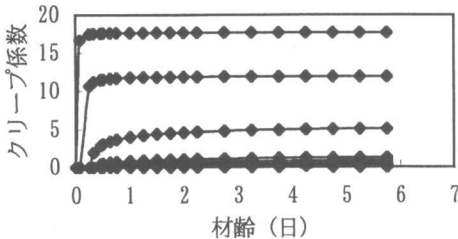


図-6 クリープ係数の経時変化

外部拘束の程度の影響を調べるために、外部拘束モデルのヤング係数を 4.9, 20.6, 39.2kN/mm² と仮定した。ちなみに土間コンクリートのヤング係数は 20.6kN/mm² であった。したがって、拘束モデルのヤング係数は 20.6kN/mm² より小さい値が実際に近いと考えられる。

応力の評価に際しては、引張応力が卓越すると考えられる図-2 に示す柱脚基部④、はり隅角部⑥、はりスパン中央⑧に着目した。鉄筋拘束と外部拘束自己収縮応力および温度応力の重ね合わせが成立するものと仮定し、部材の温度が外気温とほぼ等しくなった材齢 5.75 日の応力解析結果を表-3 に示す。表中の σ_1 は最大主応力を示し、方向は最大主応力方向を示す。しかし、主応力では、各成分により主方向角が異なり、総和が 100%にならないため、柱では鉛直方向 (y 方向)、はりでは水平方向 (x 方向) の応力を示すことにした。

表-3 によれば、拘束体ヤング係数が 4.9kN/mm² で、柱脚基部およびはりスパン中央の場合、全温度応力は、引張応力を低減する作用をしている。これは内部拘束温度応力によるものであり、拘束体の剛性が小さく外部拘束応力が小さいためである。はり隅角部では、全温

表-1 応力の発生原因と影響度の検討方法

ケース	要因	自己収縮		水和熱	
		外部拘束	鉄筋拘束	外部拘束	内部拘束
①		○	○	○	○
②		○	○		
③		○	$A_s=0$		
④				○	○
⑤				○	平均温度
備考		$\alpha_s = \alpha_c = 0$		$\varepsilon_{as} = 0$	

注) α_s , α_c : 鉄筋, コンクリートの線膨張係数

A_s : 鉄筋の断面積, ε_{as} : 自己収縮ひずみ

平均温度: 面積による平均温度

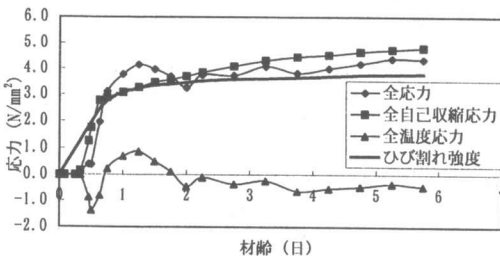
表-2 原因別各種応力評価方法

全応力	σ	①			
全自己収縮応力	σ_{as}	②	全温度応力	$\sigma_{\Delta T}$	④
外部拘束自己収縮応力	$\sigma_{as,e}$	③	外部拘束温度応力	$\sigma_{\Delta T,e}$	⑤
鉄筋拘束自己収縮応力	$\sigma_{as,s}$	②-③	内部拘束温度応力	$\sigma_{\Delta T,i}$	④-⑤

度応力は引張応力を増大させるが、その比率はほぼ 6%程度であって、これらの部位においても自己収縮応力が卓越することには変わらない。しかし、外部拘束温度応力は約 50%以上でありその影響度は高い。鉄筋拘束自己収縮応力は、鉄筋比が 2%以下であっても、はりスパン中央のように 30%以上占める場合があり、その影響は無視すべきでないことがわかる。

また、拘束体の剛性が高くなるにつれ、温度応力の影響度が高くなり、全自己収縮応力の比率が低下するが、それでも自己収縮応力の影響は高い。これは、一つには、外部拘束温度応力の場合、温度上昇時と下降時で発生応力の正負が逆で打ち消しあうこと、さらに高強度コンクリートのようにヤング係数の発現速度が速い場合には、上昇、下降時の発生応力の絶対値が、普通強度コンクリートより近いためと考えられる。

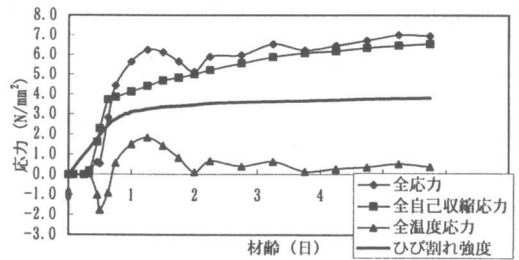
次に、実際に最も近いと考えられる拘束体ヤング係数を 4.9kN/mm²としたときの、①、⑥、⑧の全応力、全自己収縮応力および全温度応力の発現性状をひび割れ強度と比較して図一7、図一8、図一9 に示す。解析上は、これらの図に示すとおり、すべて材齢 0.7 日あたりでひび割れ強度を越えており、このときの卓越応力は、全自己収縮応力と内部拘束温度応力によるものと判断できる。柱脚基部およびはりスパン中央では、ひび割れは、ひび割れ発生材齢は確認されていないが、材齢 7 日の脱型時のひび割れ観察を説明できるものである。はりスパン中央では、ひび割れは観察されていないが、これは、



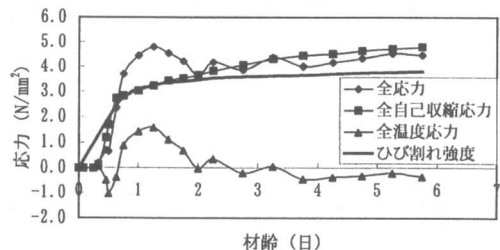
図一7 柱脚基部①における各種応力(Y方向)

表一3 拘束応力の割合

応力の種類	拘束体の弾性係数 (kN/mm ²)	柱脚基部 ①	はり隅角部 ⑥	はりスパン中央下端 ⑧
全応力 σ_1 (N/mm ²) (主応力方向) (deg)	4.9	4.5 (58.0)	8.2 (21.7)	4.6 (179.0)
	20.6	9.0 (51.6)	9.7 (18.5)	5.9 (179.1)
	39.2	10.9 (48.9)	10.1 (17.6)	6.3 (179.2)
全応力 σ_x または σ_y (N/mm ²)	4.9	4.5	7.2	4.6
	20.6	9.0	8.8	5.9
	39.2	10.9	9.3	6.2
全自己収縮応力 (%)	4.9	110.4	94.3	107.6
	20.6	80.2	85.6	94.7
	39.2	74.7	83.3	91.4
全温度応力 (%)	4.9	-10.4	5.7	-7.6
	20.6	19.8	14.4	5.3
	39.2	25.3	16.7	8.6
外部拘束自己収縮応力 (%)	4.9	82.1	70.5	74.6
	20.6	69.5	67.4	69.9
	39.2	66.5	66.3	68.4
鉄筋拘束自己収縮応力 (%)	4.9	28.3	23.8	33.0
	20.6	10.7	18.2	24.8
	39.2	8.2	17.0	23.0
外部拘束温度応力 (%)	4.9	48.3	58.2	61.7
	20.6	52.5	58.5	61.3
	39.2	53.7	58.7	61.3
内部拘束温度応力 (%)	4.9	-58.7	-52.5	-69.3
	20.6	-32.6	-44.1	-56.0
	39.2	-28.4	-41.9	-52.7



図一8 はり隅角部⑥における各種応力(X方向)



図一9 はりスパン中央下端⑧における各種応力(X方向)

一つには弾性計算を行っているため、先行ひび割れによる応力低下を考えていないためと考えられる。

最後に、拘束体ヤング係数を 4.9kN/mm^2 としたときの 5.75 日における全応力、全温度応力、全自己収縮応力の変形図を図—10、図—11、図—12 に示す。これらの図に示すとおり、変形状況は全温度応力に対して、全自己収縮応力の影響は大きくなっているのがわかる。また、自己収縮によるはりスパン中央でのたわみは、全応力に対して約 85%を占めており変形の主要な原因となっている。

4. まとめ

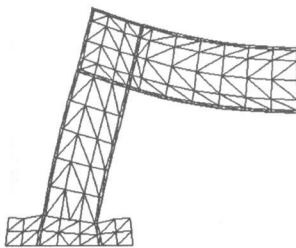
本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) クリープ係数、ヤング係数等、コンクリートの若材齢時の各物性を正確に把握した上で、温度と自己収縮ひずみの実測値を用い、Step-by-Step 法に基づいて2次元FEM解析を行うことにより、実構造物に生じた部材断面を貫通するひび割れ発生を再現した。
- 2) 温度安定時、外部拘束体モデルのヤング係数が $4.9\text{kN/mm}^2 \sim 39.2\text{kN/mm}^2$ の範囲、柱脚基部外縁、はり隅角部下縁、はりスパン中央下縁の3部位の条件の下で、全応力に占める全自己収縮応力の比は少なくとも70%以上であった。
- 3) 高強度コンクリートを用いたRC構造物のひび割れ制御には、自己収縮の抑制が

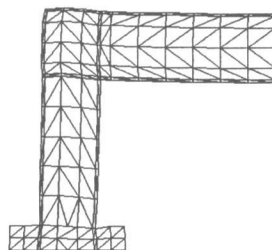
極めて重要である。

参考文献

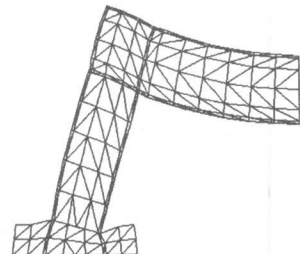
- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書，1996.11
- 2) 牧角龍憲，徳光善治：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.5，pp.185-188，1983
- 3) Ryoichi Sato, Ming Xu and Yang Yang :Stresses of High-Strength Concrete Due to Autogenous Shrinkage Combined with Hydration Heat of Cement, Proceedings: ACI International Conference, High-Performance Concrete, Malaysia, SP-172,pp.837-852,1997
- 4) 筒井英之，佐藤良一，許明：高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No50,pp.478-483,1996
- 5) Larrard F.D and Bostvironnois.J.L.:On the Long-Term Strength Loses of Silica-Fume-High-Strength Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.35. No.155 pp.109-119,1991
- 6) 宮澤伸吾，今本啓一，大谷博，佐藤良一：超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ係数，第51回土木学会年次講演会講演梗概集第5部，pp578-579,1996



図—10 全応力による変形



図—11 全温度応力による変形



図—12 全自己収縮応力による変形