

論文 超高強度 RC 部材中の初期応力発生メカニズムに関する検討

桐山 宏和^{*1}・丸山 一平^{*2}・鈴木 雅博^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：高強度コンクリートを用いた柱部材が高軸力を受けた場合に、縦ひび割れの発生によって水平耐力が低下することが報告されているが、本研究は、この要因が自己収縮に起因するとの仮説のもと、超高強度コンクリートを用いて実大の柱模擬部材を作製し、内部のひずみを測定した。その結果、主筋方向と主筋横断方向のひずみが異なる結果となり、縦ひび割れが生じる方向と直行方向に応力が発生する可能性が示された。この傾向を解析的に確認するため、自己収縮の温度依存性を考慮した3次元有限要素解析を行ったところ、同様な傾向が再現され、縦ひび割れの発生が自己収縮に起因するとの裏付けがなされた。

キーワード：超高強度コンクリート、RC 柱、縦ひび割れ、自己収縮、温度依存性

1. はじめに

近年、高性能 AE 減水剤の開発とその性能向上や、シリカヒュームなどの反応性微粉末を混和する DSP 技術の発展にともなって高強度コンクリートの実用化が進み、実強度 150N/mm² 級のコンクリートも実用化されている¹⁾。一方で、高強度コンクリートに固有な現象である自己収縮に起因する、応力やひび割れが構造部材の性能に及ぼす影響に関しては解明の途上にある^{2), 3)}。

高強度コンクリートを用いた柱部材が高軸力を受けた場合に、縦ひび割れの発生に伴い、水平耐力が低下することが報告されている⁴⁾。本研究では、この要因が、自己収縮に起因するとの仮説をもとに、超高強度コンクリートを用いた実大部材柱を作製し、内部の温度履歴、ひずみ履歴を測定した。併せて、3次元有限要素解析を行い、定性的に柱内部に生じる応力状態に対して考察を行った。

表-1 使用材料一覧

低熱セメント(LC)	C ₃ S:29%, C ₂ S:50%, C ₃ A:4.3%, C ₄ AF:9.8%, プレーン値:3600cm ² /g, 密度:3.22g/cm ³
シリカヒューム(SF)	密度:2.24g/cm ³ , 比表面積:17.1m ² /g, SiO ₂ :95%
細骨材(S)	表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率2.31%, 粗粒率:2.85, 実積率67%
粗骨材(G)	最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.93g/cm ³ , 吸水率0.39%, 粗粒率 6.66, 実積率: 60.0%
高性能減水剤(SP)	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤

表-2 配合表

記号	セメント	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					SP % _{cm³/m³}	D* % _{cm³/m³}
					W	C	S	G	SF		
SFLC	LC	60	2.0	15	155	930	451	932	103	1.8	0.2

D:消泡材

2. 実験

2.1 使用材料

実験に使用した材料の物性を表-1に示す。本研究では、低熱ポルトランドセメント(LC)にシリカヒューム(SF)をプレミックスした結合材を用い、水粉体比 0.15 となる配合を表-2のように設定した。練り混ぜは強制 2 軸攪拌ミキサーによって行い、いずれもスランブフローで 60±5cm、空気量 2%以下となるようにした。

2.2 供試体及び測定

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助教授 博(工) (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 工修 (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

配合 SFLC を用いて、実用を想定した鉄筋比を持つ模擬柱部材 C-D41 と、C-D41 部材中の鉄筋のすべてを D6 鉄筋に置き換えた鉄筋比の小さい供試体 C-D6 を作製し、内部のひずみを鉄筋ゲージ及び埋込型ひずみ計によって測定した。図-1 に模擬柱部材の概要を示す。寸法は $900 \times 900 \times 1100\text{mm}$ であり、鉄筋比は C-D41 は 3.1%，C-D6 は 0.07% である。上下面には厚さ 100mm の発泡スチロールを配置し、鉄筋下部には発泡スチロールの破損を防ぐ目的でモルタルによるスペーサーを設置した。型枠は鋼製型枠とし、打設直後から材齢 3 日までシート養生とし、その後脱型をおこなった。図-1 に示すように、供試体中央に横方向及び縦方向に熱電対付き埋込型ひずみ計を配置するとともに鉄筋に熱電対及びひずみゲージを添付した。鉄筋に貼付したゲージに関しては、あらかじめ温度依存性を考慮できるように校正係数を実験的に求め、実ひずみを得られるようにした。また、同一バッチにより $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体に埋込型ひずみ計を用いて、同一実験室の室温下で自己収縮ひずみを測定するとともに、JIS A 1108 及び JIS A 1149 に従い $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体により材齢 3, 7, 28, 56, 91 日における室温封緘状態の圧縮強度及びヤング係数、また、JIS A 1113 に従い $\phi 150 \times 200\text{mm}$ 供試体により、割裂引張強度を計測した。併せて、材齢 28 日にコア強度および簡易断熱養生供試体(JASS5T-705⁵⁾)、標準養生供試体の圧縮強度を測定した。供試体はいずれも、実験室内に設置した。打設時期は 8 月上旬であり、練上がり温度は約 30°C であった。

2.3 実験結果

図-2 に圧縮強度と有効材齢の結果に関して示す。C-D6 バッチと C-D41 バッチはほぼ、同一の性状を示していることがわかる。また、簡易断熱養生を行った供試体の強度は、有効材齢で評価できないことが示されており、これは、シリカヒュームの水和反応の温度依存性の結果であると考えられる。

図-3 に C-D6 バッチと C-D41 バッチのヤング

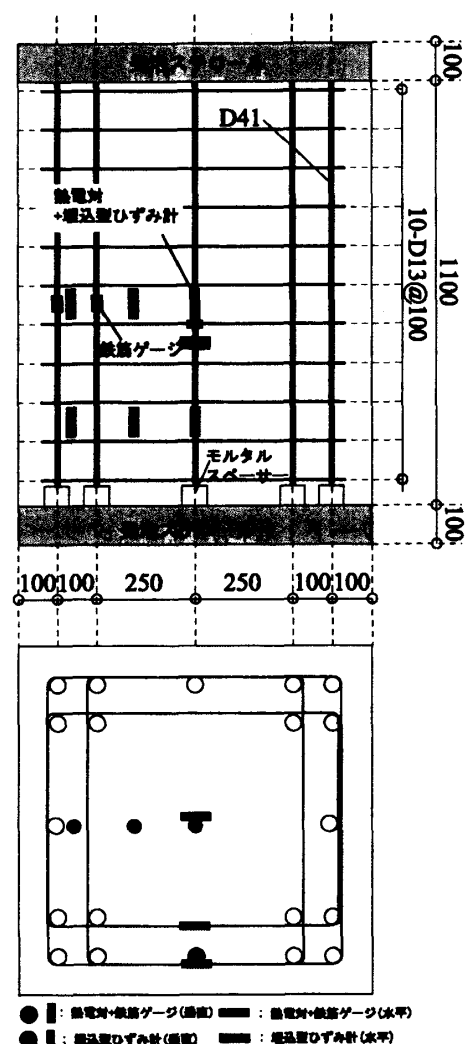


図-1 模擬柱部材(C-D41)の概要
(鉄筋位置・ゲージ位置は C-D6 も同様)

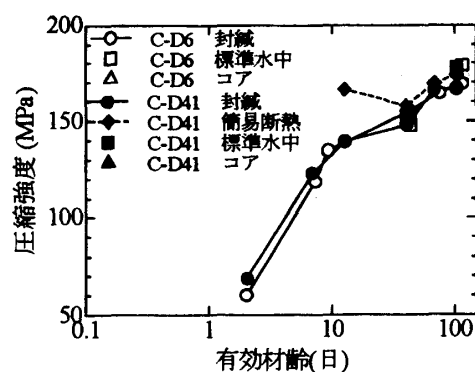


図-2 圧縮強度

率と C-D41 の割裂引張強度の実験結果を示す。ここに示されるように、圧縮強度は簡易断熱養生と封緘養生の間に差異が生じているのに対して、ヤング率には大きな差異は生じず、有効材

齢で評価できることがわかる。また、割裂引張強度は材齢 28 日に約 8MPa に達していることが確認された。

図-4 に C-D6 バッチと C-D41 バッチの自己収縮結果と、あわせて同材料・同配合による 20℃ 一定及び簡易断熱養生で最高温度 60℃ を経た鈴木らの実験結果⁹⁾についても示している。本実験による自己収縮は、平均気温約 30℃ のものであるが、20℃ 一定のものよりも小さい傾向になっている一方、簡易断熱では自己収縮の最終値は大きくなっている。なお、これらの自己収縮は実測にもとづく線膨張係数により温度ひずみを補正している¹⁰⁾。シリカヒュームを混入した一定温度履歴における自己収縮試験で、高温ほど自己収縮が小さくなる傾向は、Lura らによって報告されているが⁷⁾、そのメカニズムについては明らかになっておらず、今後の課題である。また、簡易断熱における自己収縮増大は、シリカヒュームの反応の高温時の活性化に原因があると考えられる。

図-5 に C-D41 供試体の温度履歴を示す。夏期の打設のため、中心部において最大 75℃ 程度の温度を記録した。C-D6 の温度履歴に関してもほぼ同様な結果であった。

図-6 に C-D41 供試体中のひずみを、図-7 に C-D6 供試体中のひずみの経時変化を示す。中段とは、部材中央部、下端から 550mm の地点を表し、下段とは、部材の下端から 200mm の地点を意味している。垂直方向とは、柱の主筋方向を意味し、水平方向は、主筋を横断する方向を意味する。C-D41 においては、垂直方向ひずみに関しては、基本的には高温履歴を受けた箇所ほど収縮側のひずみが大きい結果になっている。しかし、図-6 右図に示されるように水平方向のひずみに、特徴的な結果が得られた。中心部と外周部(中央から 250mm や 350mm の箇所)と比較し、中心部のひずみが小さく、その差異が 300 μ 程度になっており、中心部の垂直方向ひずみと比較しても、やはり、300 μ 程度小さい結果となった。この結果は、自己収縮の等方性を仮定

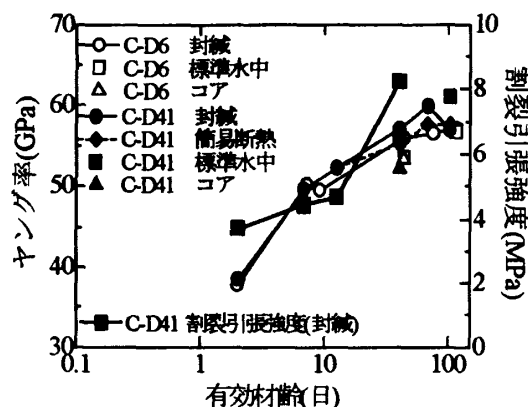


図-3 ヤング率と割裂引張強度

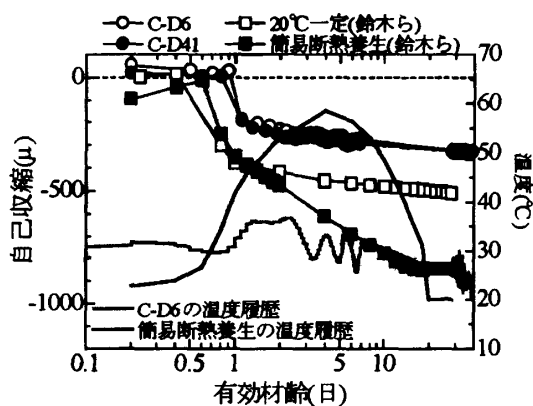


図-4 自己収縮結果
(鈴木らのデータは文献6による)

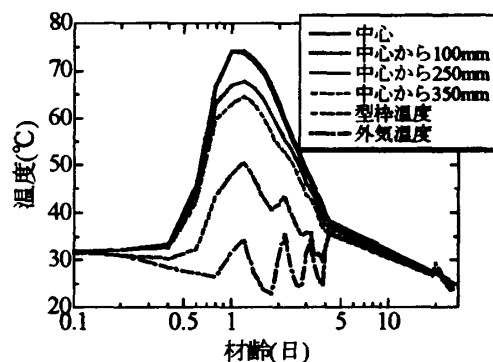


図-5 C-D41 供試体中の温度履歴

すると、水平方向の自己収縮が周囲のコンクリートによって拘束された結果、引張応力を受けていることを示唆するものである。これは、言い換えると、シリカヒュームを混入した超高強度コンクリートでは、高温履歴を受けた部位ほど自己収縮が大きくなる傾向を持つため、温度履歴が小さく自己収縮ひずみの小さい外周部の

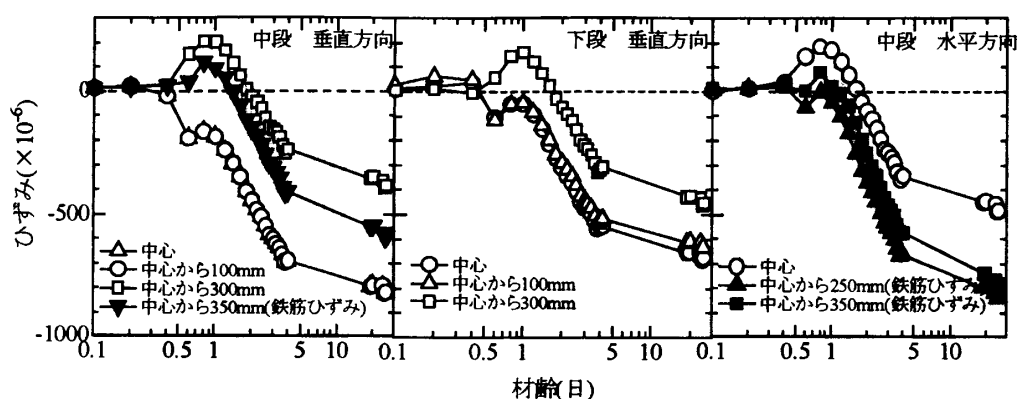


図-6 C-D41 供試体中のひずみの経時変化

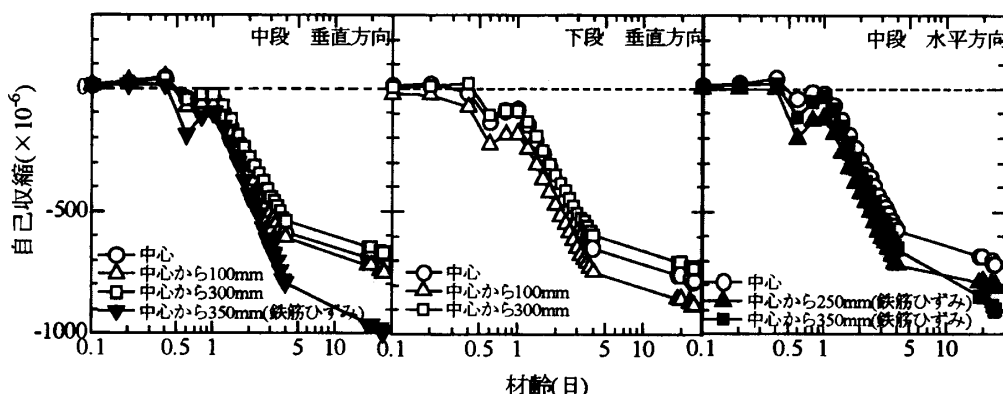


図-7 C-D6 供試体中のひずみの経時変化

コンクリートによって、内部のコンクリートの収縮が拘束されたものと考えられる。

この傾向は、図-7右図に示されるように、C-D6 供試体においても、中心で外周部のひずみより小さい傾向が確認された。ただし、C-D6 供試体に関しては、垂直方向ひずみにもおなじような傾向が見られ、中心部のひずみが外周部のひずみよりも小さくなっている。

高強度コンクリートを用いた柱部材が高軸力を受けた場合に縦ひび割れによる水平耐力の低下が報告されているが⁴⁾、本研究による内外温度差に起因して生じる自己収縮ひずみの差によって、柱内部に水平方向にも引張応力を発生させる可能性があり、この現象により、縦ひび割れの発生原因を説明できるものと考えられる。

そこで、柱中心部における柱垂直方向と水平方向のひずみ変化、および応力変化を解析により定性的に表すことができるかを次章で検討する。

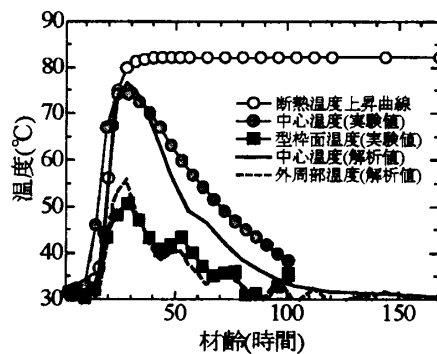


図-8 採用した断熱温度上昇曲線及び実験値と解析値の温度履歴の比較

3. 解析

本研究では、温度分布に関しては、3次元の非定常熱伝導解析によって行った。発熱に関しては、定性的傾向を把握することを目的としたため、簡易に解析のできる断熱温度上昇曲線を発熱項に用いる方法を採用した。断熱温度上昇曲線は、Maruyama らが開発したシリカヒュームを混和した高強度コンクリートの水和発熱予測を可能とする水和反応モデル CCBM によって得ら

れた値を用いた⁸⁾。予測によって得られた断熱温度上昇曲線を解析結果とともに図-8に示す。有限要素モデルは、1/8モデルとし、要素には8接点アイソパラメトリック要素を用い、接点数1704、要素数1331によってモデル化した。モデルの概要を図-9に示す。解析中、コンクリートの熱伝導率を1.2W/m/K、比熱を1.1J/g/K、熱伝達率を8.0J/m²/s/Kと設定した。

応力解析には、Satoらが提案した増分型3次元有限要素解析を採用した⁹⁾。ヤング率の進展には実験値を有効材齢に対して対数補完したものを用いた。クリープに関しては、鈴木らが提案した本研究と同一の配合によるコンクリートの実験結果をもととした、載荷時材齢の影響を考慮した次式を採用することとした。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left(\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right)^{0.3} \quad (1)$$

$$\phi_0 = 3.87 \left(E_c(t_0)/E_{c,28} - 1.0 \right)^2 + 1.16 \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 \leq E_c(t_0)/E_{c,28} \leq 0.26 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.26 \leq E_c(t_0)/E_{c,28} \\ \beta_H = 49.0 \left(E_c(t_0)/E_{c,28} - 0.26 \right) - 0.02 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$:クリープ係数、 ϕ_0 :クリープ係数の終局値、 β_H :載荷材齢の影響を考慮するための係数、 t :有効材齢、 t_0 :載荷時有効材齢、 t_1 :1日、 $E_c(t_0)/E_{c,28}$:載荷時材齢のヤング率と材齢28日のヤング率の比を表す。

線膨張係数に関しては、寺本・丸山らが提案した次式を用いた¹⁰⁾、

$$\begin{cases} \alpha(t) = 60 \exp(-0.3t) + 2 \ln(t) + 2 & t < 84 \\ \alpha(t) = 11.0 & t \geq 84 \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha(t)$:線膨張係数(μ)、 t :有効材齢(h)である。

自己収縮の温度依存性に関しては、未だメカニズムが明らかになっていないため、定性的傾向を表現するために、式(5)によって算出した。

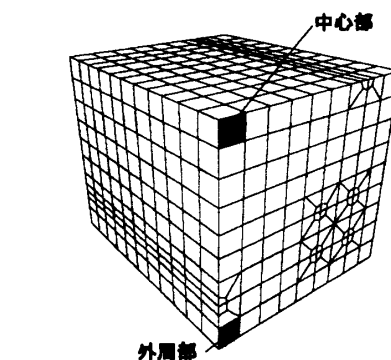


図-9 解析対象モデル

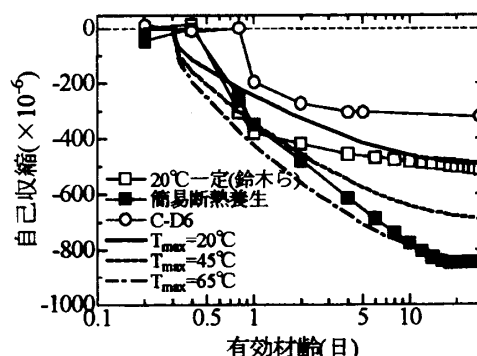


図-10 解析で用いた自己収縮式と実験値

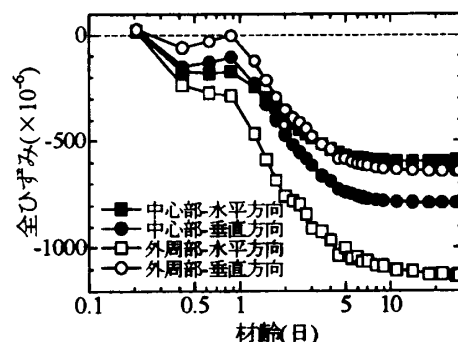


図-11 C-D41におけるひずみの経時変化
(解析箇所は図-9を参照)

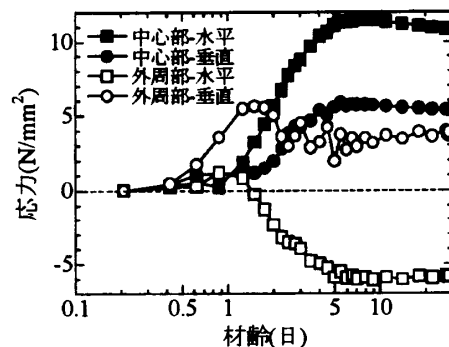


図-12 C-D41における応力の経時変化

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,max} \left\{ 1 - \exp \left(-0.8(t - 0.5)^{0.5} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{sh,max} = 500 + 8(T_{max} - 20)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t)$:自己収縮ひずみ(μ)、 t :有効材齢(日)、 T_{max} :コンクリートが受ける最大の温度履歴($^{\circ}\text{C}$)を表す。式(5)によって示される自己収縮ひずみと図-4に示したひずみの比較を図-10に示す。本式は、コンクリートが受けた最大温度履歴によって自己収縮の最終値が決まる形を取っており、解析では温度解析結果を受けて、各要素の温度履歴の最大値に基づき自己収縮ひずみを有効材齢を用いて算出し、そのひずみを等価接点力として与えた。

C-D41 供試体にはフープ筋として D13 鉄筋が用いられているが、これに関しては、線要素としてモデル化を行った。

解析結果を図-11 および図-12 に示す。ここでは、図-9に示した、中心部の要素と外周部の要素を選定し、節点の変位に基づき要素の平均ひずみ、積分点の応力平均による要素の平均応力を算出している。ここに示すように、中心部に関しては、垂直方向よりも水平方向のひずみは小さくなり、水平方向の方が大きい結果が解析によっても示された。

4. まとめ

本研究では、超高強度コンクリートを用いた柱模擬部材を作製し、内部のひずみを計測した。その結果、内外温度差による自己収縮量の差異が内部に応力を発生させることを実験及び解析によって示した。筆者らのグループは、拘束条件下で超高強度コンクリートにケミカルプレストレスにより、圧縮応力を付与することに条件付きながらも成功しており⁹⁾、本研究で示された応力を制御する可能性を見いだしている。今後は、応力制御技術を発展させ、適切な超高強度コンクリート利用を提案していきたいと考えている。

謝辞：本研究の一部は、平成 18-20 年度文部科学省科学研究費若手研究 A(代表 丸山一平、課題番号：18686045)の補助を受け実施した。

参考文献

- 1) 例えば、小室努、黒岩秀介、渡辺英義、陣内浩：150N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた RC 柱の実用化研究、コンクリート工学, Vol. 39, No. 10, pp. 9-16, 2001
- 2) 今本啓一、大谷博：超高強度鉄筋コンクリート架構試験体に生じたひび割れに関する一検討、日本建築学会構造系論文集, No. 495, pp.1-8, 1997.5
- 3) 片寄哲務、高森直樹、西田浩和、寺岡勝、高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 4) 村田義行、栗原雅之、栗研地彰、上之菌隆志、平石久廣：高強度鉄筋コンクリート造柱の縦割れに関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 155-156, 1991.9
- 5) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, pp. 228-229, 2005
- 6) 鈴木雅博、中瀬博一、丸山一平、佐藤良一、超高強度膨脹コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響、セメント・コンクリート論文集, Vol. 59, pp.375-382, 2005
- 7) P. Lura, K. van Breugel, I. Maruyama, Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-age Shrinkage of High Performance Concrete, Cement and Concrete Research, 2001, Vol.31, pp1867-1872
- 8) I. Maruyama, et. al.: Prediction of Temperature in Ultra High-Strength Concrete Based on Temperature Dependent Hydration Model, ACI SP-228, pp.1175-1186, 2005.6,
- 9) H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato : Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Joournal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, No. 2, pp.155-174, 2004
- 10) 寺本、丸山他：超高強度コンクリートの若材齢線膨脹係数に関する研究、日本コンクリート工学協会年次論文集, 2007(投稿中)