

論文 高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究

今本 啓一*1 大谷 博*2

要旨：本研究は高強度・超高強度コンクリート用いた構造部材に発生するひび割れを防止することを目的とするものである。本報は特にこの種のコンクリートの収縮挙動に及ぼす自己収縮の影響 [1] に着目し、各種試験体を用いた場合のコンクリートの収縮特性について示すものである。

実験の結果、既往の報告 [1] において指摘されているように、この種のコンクリートの自己収縮は通常のコンクリートと比較して極めて大きく、実大部材に用いた場合の試験体表面部では、内在する自己収縮応力に乾燥収縮応力が付加されることにより、ひび割れ強度に近い引張応力が発生することが明らかとなった。

キーワード：高強度・超高強度コンクリート、自己収縮、自己収縮応力、実大試験体

1. はじめに

コンクリートの高強度化を図るためには高いセメント量とともにシリカフューム等の微粉末混和材の混入が不可欠である。しかしながらシリカフューム等の混入により普通コンクリートと比較して自己収縮が極めて大きくなり、これを用いた部材には温度応力、乾燥収縮応力以外に自己収縮に伴う応力が内在する可能性のあることが近年指摘されている [2]。

本研究ではこの種の高強度・超高強度コンクリート等、高粉体系コンクリートを用いた部材に発生するひび割れの原因・防止方法を把握・策定することを目的とし、室内における小型供試体及び屋外における実大規模の供試体を用いた各種試験を行ったのでここに報告するものである。

2. 小型供試体を用いた室内実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料を表 1、セメントの化学成分及び鉱物組成を表 2 に示す。

表 1 使用材料

材料	名称・産地(記号)	諸物性
セメント	早強ポルトランドセメント(S)	比重 3.14 比表面積 4440cm ² /g
	普通ポルトランドセメント(N)	比重 3.16 比表面積 3330cm ² /g
	高比レイト系セメント(LC)	比重 3.20 比表面積 4190cm ² /g
細骨材	津久井産砕砂 君津産山砂	混合比 8:2 比重 2.64 吸水率 1.16%
粗骨材	奥多摩産碎石	最大径 13mm 比重 2.64 吸水率 1.07%
混和材	シリカフューム(SF)	比重 2.2 比表面積 230000cm ² /g SiO ₂ 88.0%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	

表 2 化学成分及び鉱物組成

化学成分(%)					鉱物組成(%)			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
早強ポルトランドセメント(S)								
20.3	4.9	2.7	64.9	64.0	10.0	8.0	8.0	
普通ポルトランドセメント(N)								
21.8	4.9	2.9	64.2	53.0	23.0	8.0	9.0	
高比レイト系セメント(LC)								
25.3	3.0	2.8	63.7	35.0	46.0	3.0	9.0	

*1: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)

*2: " " " 主任研究員 (")

(2) 試験項目及び試験方法

本実験で行った試験項目を表3に示す。自己収縮は試験体表面にパラフィンで被覆し(図1)、重量変化を確認(材齢91日の平均重量変化率:0.04%)することにより、また乾燥収縮は表面無処理として測定を行った。コンタクトゲージによる測定は加水後の材齢24時間を原点とし、埋込み型歪計による測定は凝結試験の始発時間を原点とし、 $20 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 、 $60 \pm 10\% \text{R.H.}$ の試験室において試験体縦置き状態でを行った。自己収縮応力については試験体に埋設した軸方向鉄筋に歪ゲージを貼付け、凝結始発時間を原点として測定を開始した(図1)。なお拘束試験体の埋設鉄筋径はD13(鉄筋比1.27%)、及びD22(鉄筋比3.87%)の2種類とした。各鉄筋の物性を表4に示す。

表3 試験項目

硬化コンクリート試験
①自己収縮 ②乾燥収縮
③若材齢強度・弾性率試験
④自己収縮応力 ⑤凝結試験

表4 鉄筋の物性

鉄筋径	弾性係数 ($\times 10^4 \text{kgf/cm}^2$)	応力と歪みゲージの関係*注
D13	2.05	$\sigma_t = 0.675 \times \varepsilon$
D22	2.10	$\sigma_t = 0.688 \times \varepsilon$

*注:50t7ムスーを用いた拘束鉄筋の引張校正試験における鉄筋応力(σ_t)とゲージの出力歪み(ε)の関係

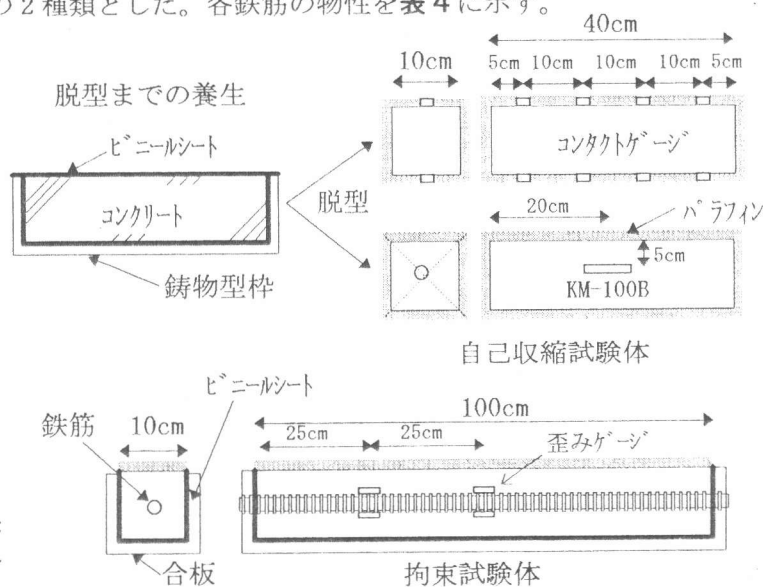


図1 試験体の概要

(3) 調合条件及び試験の組み合わせ

調合条件及び試験の組み合わせを表5に示す。試験は○印のものについて行った。

表5 調合条件及び実験の組み合わせ

調合記号*1	セメント種類	W/(C+SF) (%)	S/a (%)	SF置換 率(%)	W kg/m ³	Ad. (C+SF)×%	自己収縮 測定:コンタクトチップ	乾燥収縮 測定:KM100B	自己収縮 測定:歪みゲージ
S23-45-0	早強 ポルトランド セメント(S)	23.0	45.0	0	165	4.5	○	○	
S23-38-10			38.0				○	○	
S23-45-10			45.0	10.0			○	○	
S23-50-10			50.0				○	○	
S23-45-25				25.0			○	○	○
S30-45-0		30.0	45.0	0		1.0	○	○	
S45-45-0		45.0		0		0.6	○	○	
N23-45-0	普通 ポルトランド セメント(N)	23.0	45.0	0	165	4.5	○	○	○
N23-38-10			38.0				○	○	○
N23-45-10			45.0	10.0			○	○	○
N23-50-10			50.0				○	○	○
N23-45-25				25.0			○	○	○
N30-45-0		30.0	45.0	0		1.0	○	○	○
N45-45-0		45.0		0		0.6	○	○	○
LC23-45-0	高ビークライト 系セメント (LC)	23.0	45.0	0	165	4.5	○	○	
LC23-45-10				10.0			○	○	
LC23-45-25				25.0			○	○	○

*1:調合記号(例)S23-45-10→早強セメント-水結合材比23(%) -細骨材率45(%) -シリカフェム置換率10(%)

2.2 試験結果

(1) 自己収縮・乾燥収縮歪み測定結果

[コンタクトゲージによる測定] シリカフォームを混入することによりコンクリートの自己収縮は大きくなる傾向にあり、置換率 25%とした場合、無混入のものに対し材齢 91 日で 1.9~2.8 倍の収縮歪みがみられる(図 2)。また水結合材比の低下(45→23%)による自己収縮歪みの増加は 1.1~1.2 倍と比較的小さい(図 3)。セメントの種類別自己収縮歪みは(図 4)長期材齢において早強セメントが最も大きく、高ビークライト系セメントが最も小さくなる傾向が見られるが、シリカフォーム置換率を 25%とした場合、材齢 91 日では高ビークライト系セメントの自己収縮歪みは普通セメントの 0.9 倍程度となり、両者に明確な差はみられなくなる(図 4 中●印)。自己収縮歪みと細骨材率の関係(図 5)では、細骨材率の変化に伴う自己収縮歪みの変化は殆どみられず、本要因の自己収縮に及ぼす影響は小さい結果となった。コンクリートの乾燥収縮に自己収縮が含まれていると仮定した場合、乾燥収縮に占める自己収縮の割合 α [(自己収縮歪み)/(乾燥収縮歪み)] は、水結合材比が小さくなるほど(図 6)、また長期材齢(材齢 91 日)においてはシリカフォーム置換率が大きくなるほど(図 7)大きくなる傾向にあり、水結合材比 23%(図 6)では α は 50~70%、またシリカフォーム混入率 25%(図 7)では α は 70~80%と増大する(図 7)。

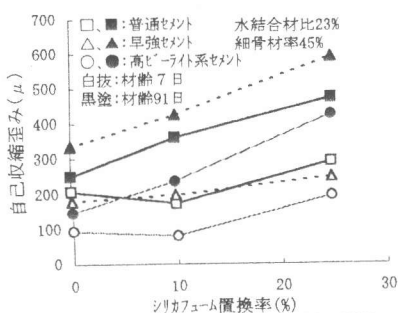


図2 シリカフォーム置換率と自己収縮の関係

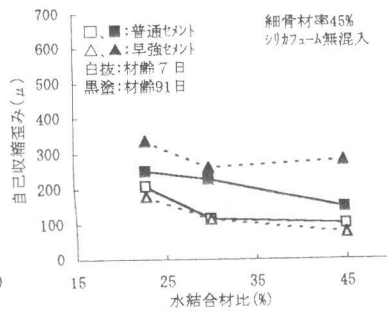


図3 水結合材比と自己収縮の関係

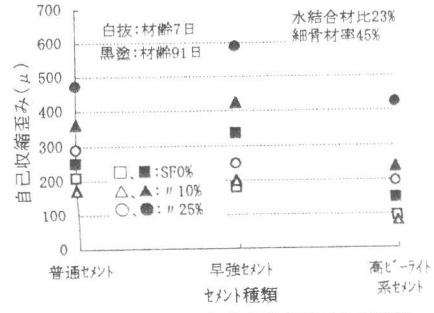


図4 セメント種類と自己収縮歪みの関係

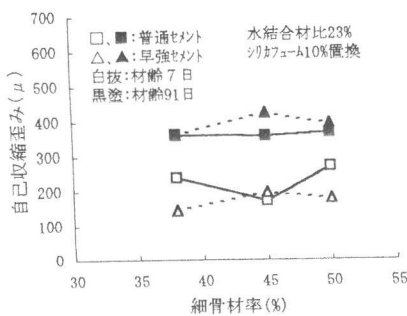


図5 細骨材率と自己収縮の関係

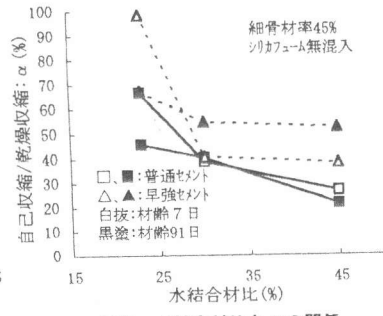


図6 水結合材比と α の関係

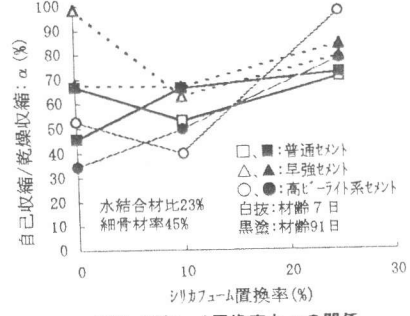


図7 シリカフォーム置換率と α の関係

[埋め込み型歪み計(KM100B)による測定] 自己収縮・乾燥収縮歪み履歴を図 8, 9 に示す。コンクリートの自己収縮は比較的初期材齢(材齢 10 日位迄)での進展が顕著であり、材齢 91 日を基準とした場合、材齢 10 日程度で約 70%(N23-45-0 は約 90%)前後の収縮歪みを呈している。シリカフォームを混入したものは長期にわたり収縮が進行する傾向がみられるが、無混入のものは初期においてシリカフォーム混入のものより自己収縮が著しい反面、その後(材齢 5 日位以降)の進行が緩慢になる傾向がみられる。乾燥収縮歪みについてはシリカフォームを混入したものほど大きくなる点で自己収縮の場合と同じ傾向にあるが、乾燥による影響が付加された分、収縮歪みは大きくなる(脱型材齢 24 時間)。

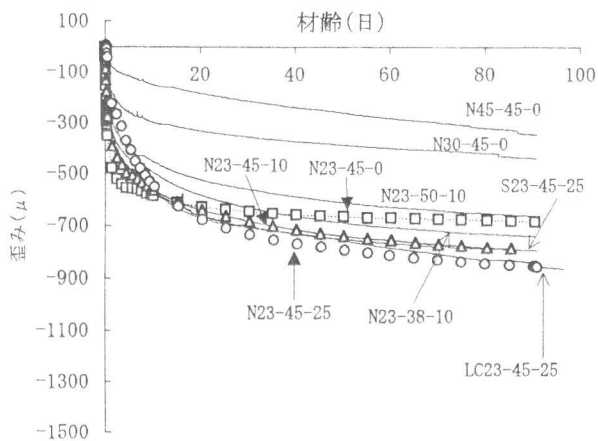


図8 自己収縮歪み履歴

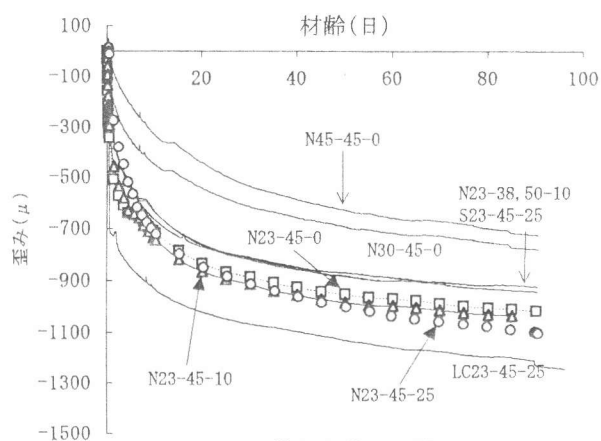


図9 乾燥収縮歪み履歴

(2) 鉄筋による自己収縮拘束歪み測定結果

鉄筋による拘束力がコンクリート断面に一樣に分布するものと仮定し、鉄筋の出力歪みを表5に示す関係から校正することにより算出した自己収縮応力履歴を図10に示す。シリカフューム無混入のものでも鉄筋比を3.87%(D22)とした場合は材齢5日前後で15 kgf/cm²、材齢80日以降で25 kgf/cm²程度の拘束応力が発生し、早強セメントを用い、シリカフュームを25%混入した場合は材齢5日前後で15 kgf/cm²、材齢80日以降で35 kgf/cm²程度の拘束応力が発生している。ここで試験体に埋設した鉄筋の中心部に発生した歪みと鉄筋比及びコンクリートの自己収縮歪みの関係についてまとめたものを図11, 12に示す。鉄筋に発生する歪みは鉄筋比を大きくすることによって、コンクリートの種類及び材齢(収縮量)に関わらずほぼ一定の勾配をもって低下する傾向を示している(図11)。また、コンクリートの自己収縮歪み量が大きくなることによって、鉄筋比の大小に関わらずほぼ一定の勾配をもって増加する傾向も示しており、図中に示す式によって直線回帰することができる(図12)。

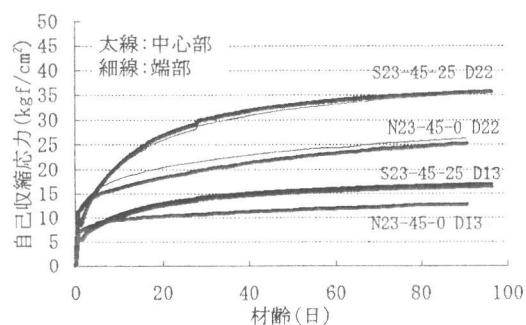


図10 応力履歴

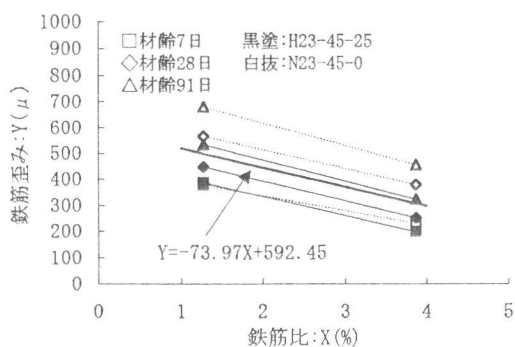


図11 鉄筋歪みと鉄筋比の関係

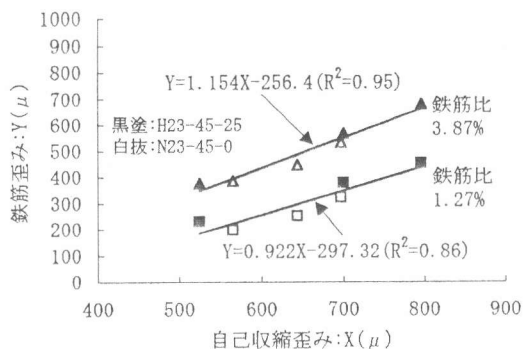


図12 鉄筋歪みと自己収縮の関係

以上の傾向を基に、本実験の範囲内で鉄筋歪み ϵ_s を鉄筋比 a_t 及び自己収縮歪み量 ϵ_a の2つのパラメータで示すと下式(1)となる。

$$\epsilon_s = -A \times (a_t / 100) + B \times \epsilon_a + C \cdots (1)$$

ϵ_s : 拘束率(%) a_t : 鉄筋比(%)
 ϵ_a : 鉄筋比(%) A, B, C: 実験定数

3. 実大規模部材の収縮測定試験

3.1 実験概要

(1) 使用材料及び計画調合

使用材料及び計画調合を表 6, 7 に示す。

表 6 計画調合

W/C (%)	S/a (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)*
30.0	48.0	165	550	800	873	0.56

*：セメント重量に対する割合

表 7 使用材料

材料	名称・産地	諸物性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16
細骨材	津久井産砕砂	比重 2.64 吸水率 1.16%
粗骨材	津久井産碎石	比重 2.66 吸水率 1.07%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	

(2) 試験体概要

試験体の概要を図 13 に示す。

埋め込み型歪み計は同図に示す位置に埋設し、小型試験体 (N30-45-0) の凝結始発時間を原点として測定を開始した。尚試験体は材齢 7 日で脱型し、その後は雨水防止のシート養生とした。

また、プラスチックモールド内に歪み計を埋め込み試験体に埋設したのはコンクリートの水分の移動・逸散の無い状態 (図 15 中無乾燥状態) の収縮歪みを測定することを目的としたためである。

(3) 試験結果

部材の温度履歴を図 14、自由収縮試験体の歪み履歴を図 15 に示す。試験体端部の収縮歪みは乾燥収縮の影響を受け、中心部の収縮歪みよりも大きくなっている。また中心部における収縮性状はモールド

に埋め込んだ歪み計とほぼ同一の挙動をしていることから、中心部におけるコンクリートの収縮挙動は水分の移動・逸散を受けない状態のものであると推察される。

部材の拘束応力履歴を図 16 に示す。応力算出は若材齢時の弾性係数を考慮し、クリープ係数は材齢の関数で示されている式 [3] を用いた。中心部の応力履歴は図 15 でも示したように水分の移動・逸散が無い状態での挙動であると考えられるが、材齢 3 日の段階で約 20kgf/cm² の応力が内在しており、端部では図 14 にも示すように外気の変動の影響を大きく受けるとともに材齢 15 日前後から乾燥収縮による応力が次第に付加され、ひび割れ発生の可能性が大きくなっている。

同一試料による 20℃における自己収縮とダミー試験体内各位置におけるモールド内の歪みについて、コンクリートの線膨張率を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度変動による膨張・収縮を補正し、積算温度を横軸にとった場合の歪み履歴を図 17 に示す。線膨張率が仮定であるため温度による変動を厳密には補正しきれていないが試験体中の各位置の歪みと自己収縮は似通った挙動を呈している。この点に関しては今後資料の蓄積を図り、評価の妥当性を検証する必要があると考える。

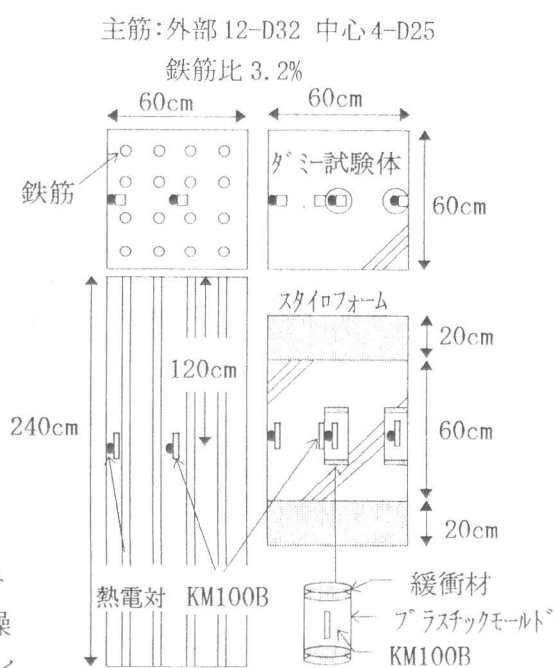


図 13 試験体概要

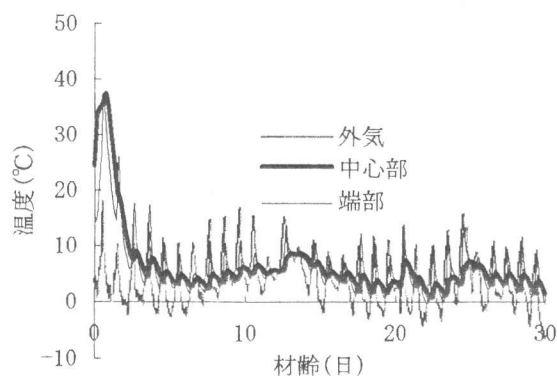


図14 実大試験体の温度履歴

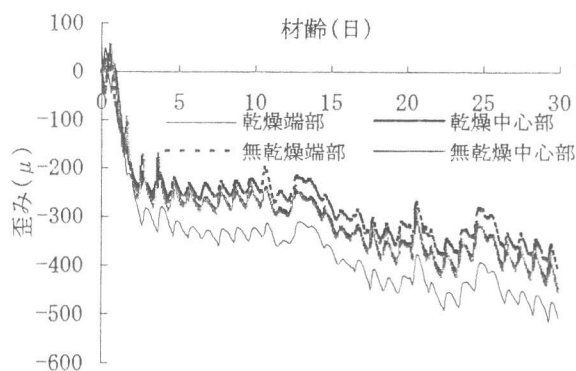


図15 自由収縮試験体の歪み履歴

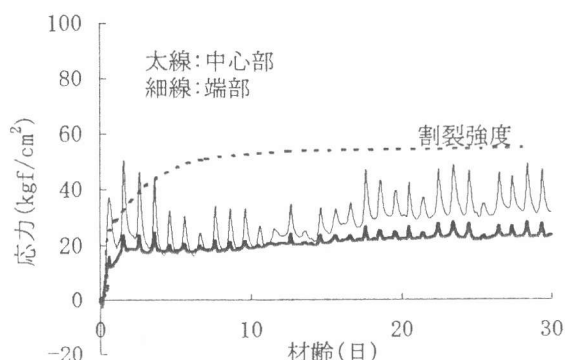


図16 部材拘束応力履歴

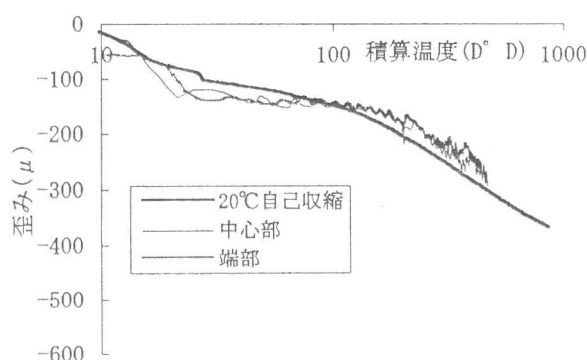


図17 積算温度と収縮歪みの関係

4. 結語

本実験は以下にまとめられる。

1. コンクリートの自己収縮は高強度・超高強度コンクリート等高粉体系コンクリートでは普通コンクリートと比較して大きくなり、特にシカუმを混入したものは長期材齢にわたり収縮が進行する。
2. コンクリートの自己収縮を拘束する部材軸方向の鉄筋に発生する歪みは本実験の範囲では鉄筋比及びコンクリートの自己収縮歪み量と相関がみられた。
3. 高強度コンクリートを用いた実大部材(断面 $60 \times 60 \text{ cm}$)の中心部は水分の移動の無い状態での収縮挙動を示すと解釈することができる。応力について、端部では中心部と比較して外気温の変動及び乾燥収縮による応力が付加される。
4. 自己収縮歪み量の推定式 [4] と積算温度による自己収縮の評価及び軸方向鉄筋比、自己収縮歪み量等から鉄筋に生じる歪み(拘束率)を算定することにより、温度応力解析に自己収縮応力を加味した解析が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] 田澤栄一・宮沢伸吾: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, Vol14, No. 1, pp561~566, 1993
- [2] 宮沢伸吾・田澤栄一:鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol15, No. 1, pp57~62, 1993
- [3] 青木治雄・清川博:超高強度コンクリートの実用性と品質の研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 1991, 1414
- [4] 田澤栄一・宮沢伸吾:自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 47, 1993