

論文 超高強度コンクリートの自己収縮性状に関する研究

今本 啓一^{*1}・大谷 博^{*2}

要旨：超高強度コンクリートを用いた構造部材のひび割れを検討する上で、自己収縮の影響を考慮することは重要である。本研究では各種調合の超高強度コンクリートの自己収縮性状をマチュリティによって評価する実験を行い、その適用性を検討するとともに、実験から得られた自己収縮ーマチュリティ関係式を用いて、温度応力に自己収縮の影響を加味した解析を行った。また、自己収縮ーマチュリティ関係式に対する実測値の標準誤差が、解析応力の変動係数に及ぼす影響についても検討した。

キーワード：超高強度コンクリート、自己収縮、マチュリティ、応力解析、変動係数

1. はじめに

コンクリートの自己収縮は、結合材の水和反応に起因する。この収縮は普通コンクリートでは非常に小さく潜在的であるが、水結合材比を小さくし、またシリカフュームなどの微粉末混和材を使用して高強度化することにより顕在化する傾向のあることが最近の研究を通じて指摘されている[1]。また一方で、高強度コンクリートなど富調合コンクリートを用いた部材に、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していることも報告されており[2]、これらのひび割れに及ぼす自己収縮の影響を考慮することは、今後高強度・超高強度コンクリートを用いた部材のひび割れを検討する上できわめて重要であると考えられる。

コンクリートの自己収縮現象を部材レベルで検討するためには、寸法拡大に伴う水和熱の影響、部材の置かれる環境条件などの影響について把握しておくことが必要である。特に温度の影響についてはコンクリートの自己収縮が水和反応に起因すると考えられるため、大きいことが予想される。温度条件の異なる状況下での自己収縮は、田澤博士、宮澤博士らの研究及びその他により、マチュリティによって一律に評価できる可能性のあることが指摘されているが[3][4]、本研究では、より広範囲かつ更なるデータの集積を図ることを目的とし、その適用範囲の確認及び調合の違いによる自己収縮の進行度合いの傾向を検討する実験を行うことにした。また、実験により得られた自己収縮ーマチュリティの関係式（推定式）を用いて、温度応力解析に自己収縮の影響を加味した解析を簡易モデルを用いて行うとともに、自己収縮の推定値に対する実測値の標準誤差（推定値と実測値の差の標準偏差）が、解析によって求められた応力の変動係数に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

材料の諸性質を表1、セメントの化学成分及び鉱物組成を表2、コンクリートの調合及び自己収縮測定温度条件を表3に示す。コンクリートの自己収縮は、試験体表面をアルミ箔テープでシールした状態で、埋込み型歪み計(KM100B)により測定した。アルミ箔テープによるシールの適性については、水セメント比60%，単位水量185kg/m³のコンクリートの重量変化率測定試験を別途行い、

*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 同上 主任研究員 (正会員)

シールなしの試験体は材齢1ヶ月で-2.75%, シールありの試験体は同材齢で-0.00%の結果を得ることによりその性能を確認した。なお本実験における自己収縮の測定では、並行して凝結試験を行い、凝結開始時間を原点とした。

表1 材料の諸性質

セメント	普通ポルトランドセメント(N) 比重3.16 比表面積3380cm ² /g 早強ポルトランドセメント(S) 比重3.14 比表面積4440cm ² /g 高ピーライト系セメント(LC) 比重3.20 比表面積4160cm ² /g
水	上水道水
細骨材	相模川水系川砂 比重2.64 吸水率1.16%
粗骨材	奥多摩産碎石 M.S15mm 比重2.64 吸水率1.07%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
混和材	シリカフューム(SF):SiO ₂ 84.9% 平均粒径約0.1~0.3μ

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	
普通ポルトランドセメント(N)								
21.6	4.9	2.8	64.4	55.0	21.0	8.0	9.0	
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	
高ピーライト系セメント(LC)								
25.2	3.1	2.8	63.7	35.0	46.0	3.0	9.0	

表3 コンクリートの調合及び自己収縮測定温度条件

調合記号	セメント種類	水結合材比%	S/a%	SF置換率%	W(kg/m ³)	Air%	混和剤添加率%	測定温度条件	
N30-0	普通セメント	30.0	45.0	0	165	2.0	1.0	20°C及び50°C	
N23-0				0					
N23-10				10					
N23-25		23.0	25	25		4.5			
S23-10	早強セメント			10					
LC23-10	高ピーライトセメント			10					

3. 実験結果

異なる温度状況下における材齢と自己収縮歪みの関係を図1~6に示す。

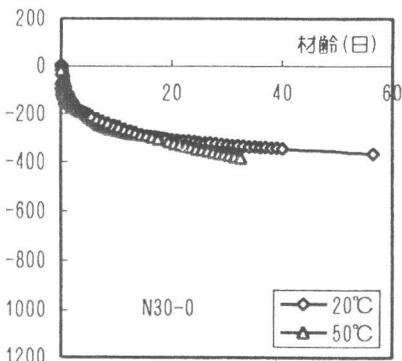


図1 材齢と自己収縮の関係(N30-0)

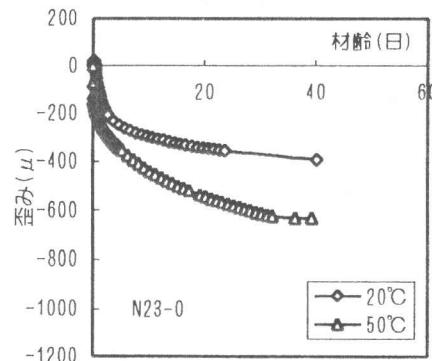


図2 材齢と自己収縮の関係(N23-0)

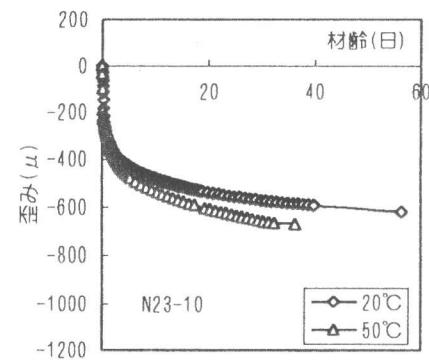


図3 材齢と自己収縮の関係(N23-10)

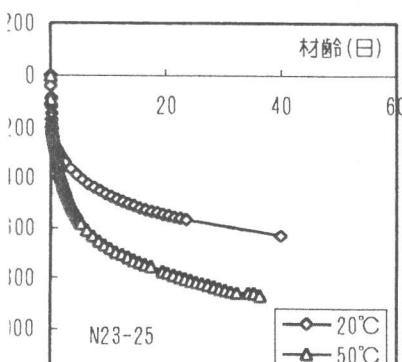


図4 材齢と自己収縮の関係(N23-25)

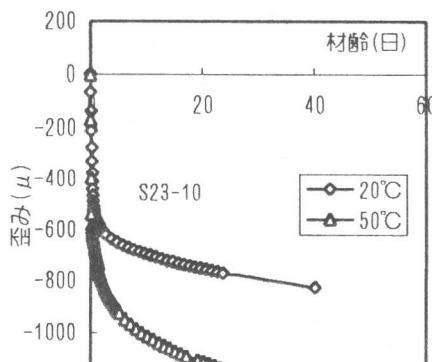


図5 材齢と自己収縮の関係(S23-10)

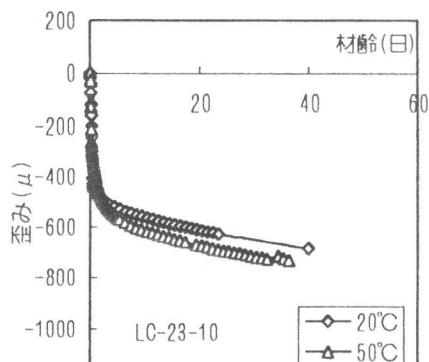


図6 材齢と自己収縮の関係(LC23-10)

本実験では材齢 50 日程度までの自己収縮の測定を行っているが、この範囲内ではいずれの調合においても養生温度が高いほど、歪みが大きくなる傾向がみられる。実際の部材の温度条件は様々であるので、コンクリートの自己収縮歪みによって部材に生じる収縮応力度を定量化するためには、自己収縮歪みの進行に及ぼす温度の影響を加味した評価を行う必要がある。そこで材齢をマチュリティに換算した自己収縮の進行を図 7~12 に示す。これによるといずれの調合においても、温度条件の異なる自己収縮は同様の進行状況を呈しており、マチュリティによって自己収縮を一律に評価する考え方方が可能であることが伺える。

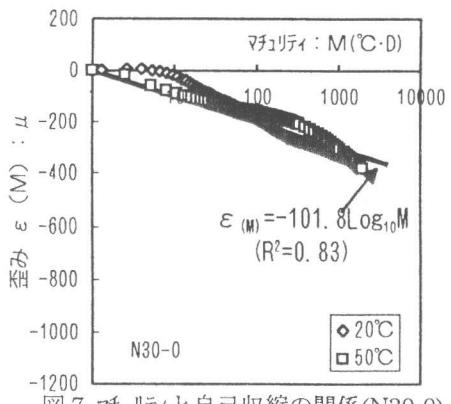


図 7 マチュリティと自己収縮の関係(N30-0)

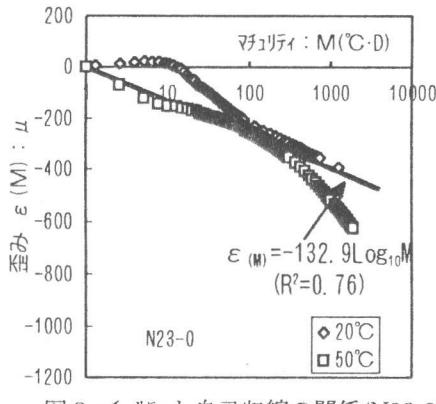


図 8 マチュリティと自己収縮の関係(N23-0)

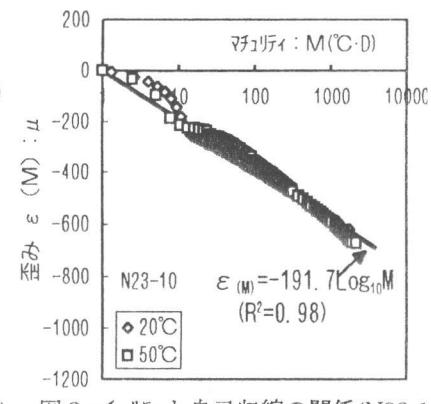


図 9 マチュリティと自己収縮の関係(N23-1)

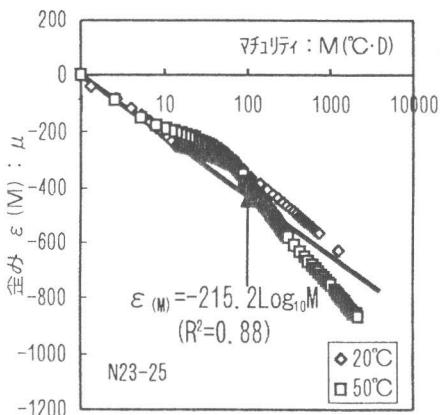


図 10 マチュリティと自己収縮の関係(N23-25)

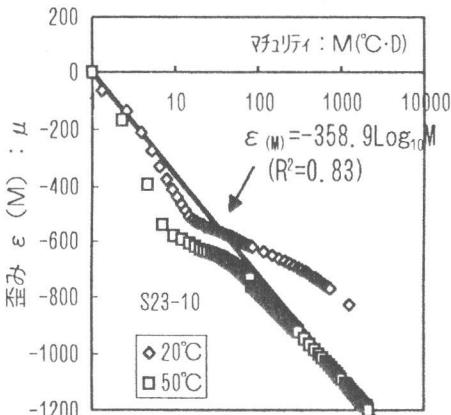


図 11 マチュリティと自己収縮の関係(S23-10)

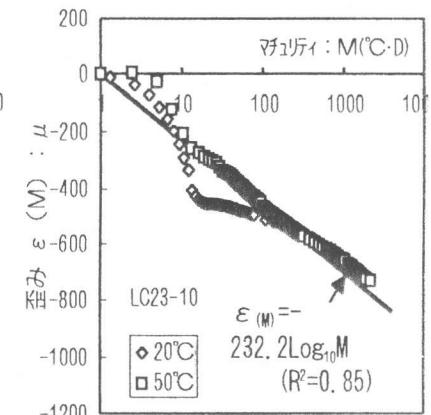


図 12 マチュリティと自己収縮の関係(LC23-10)

各調合の自己収縮歪みーマチュリティの関係を線形回帰することにより得られた結果を表 4 及び図 13 に示す。コンクリートの自己収縮をマチュリティによって評価した結果、水結合材比が小さくなるほど、シリカフューム置換率が大きいほど自己収縮歪みの進行が大きく、更にセメントの種類別では、早強ポルトランドセメントを用いることにより、自己収縮歪みの進行が著しくなっている。これらの点は既往の研究報告で指摘されている傾向とほぼ類似している [1] [4]。シリカフュームを 10% 置換している普通ポルトランドセメントと高ビーライト

系セメントについては、ビーライト含有量が多く、エーライト含有量が小さい高ビーライト系セメントの方が、同一マチュリティにおける自己収縮歪みが本来は小さくなるべきとも思われるが、既

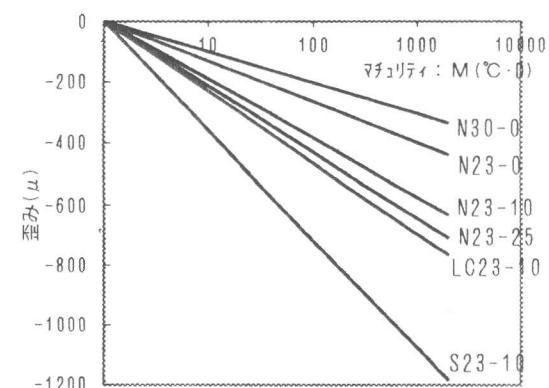


図 13 マチュリティと自己収縮の関係

往の研究 [4] においてもシリカフュームを用いて水結合材比を 23%とした実験（このときのシリカフューム置換率は 25%）で、両セメント種別間で有意差が見られていない。原因として、測定の原点をコンクリートの凝結始発時間にしており、また低水結合材比においてシリカフュームを使用することによる交互作用なども考えられるが、詳細については今後検討を重ねてゆきたい。

表 4 マチュリティと自己収縮の関係

調合記号	回帰式 M:初期温度°C・D	標準誤差(μ)
N30-0	$\varepsilon(M) = -101.8 \cdot \log_{10}M$	30.0
N23-0	$\varepsilon(M) = -132.9 \cdot \log_{10}M$	64.7
N23-10	$\varepsilon(M) = -191.7 \cdot \log_{10}M$	13.2
N23-25	$\varepsilon(M) = -215.2 \cdot \log_{10}M$	58.7
S23-10	$\varepsilon(M) = -358.9 \cdot \log_{10}M$	86.6
LC23-10	$\varepsilon(M) = -232.2 \cdot \log_{10}M$	50.3

4. 応力解析

自己収縮の影響を検討するため、自己収縮とマチュリティとの間に見出された関係式(表 4 参照)を基に、温度応力に自己収縮の影響を取り込んだ試算を行う。対象とするコンクリートは N30-0 及び N23-10 で、解析モデルは図 14 に示す外部拘束型試験体とし、拘束率は一定（30%）とした。被拘束体には、断面 60cm 角の部材を想定し、FEM 解析によって求められた温度履歴（打設温度 20°C）を与えた(図 15)。ヤング率及び割裂強度については実験によって求められたデータを近似し、クリープ係数については CEB-FIP のモデルコードを使用した [5]。これらを表 5 に示す。応力は、図 16 に示す、重ね合わせの考え方により算出した(式(1)) [6]。

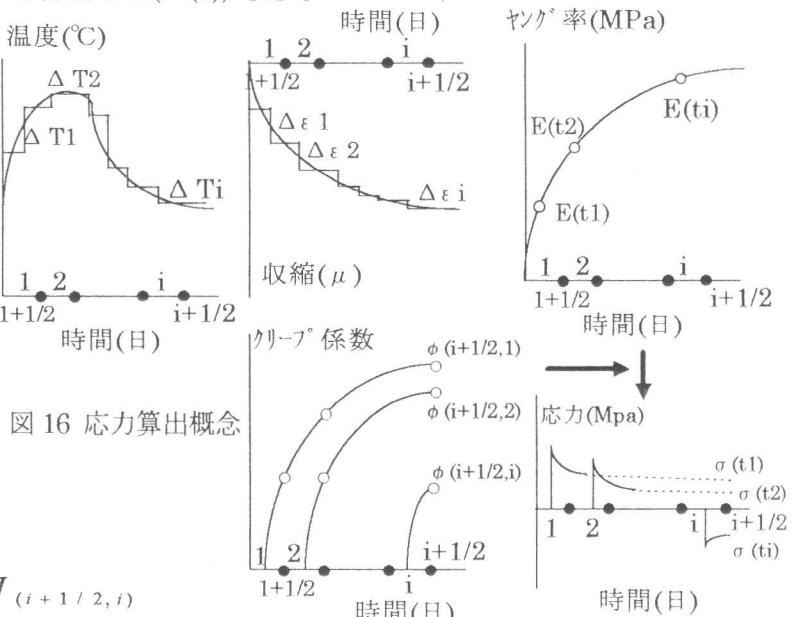
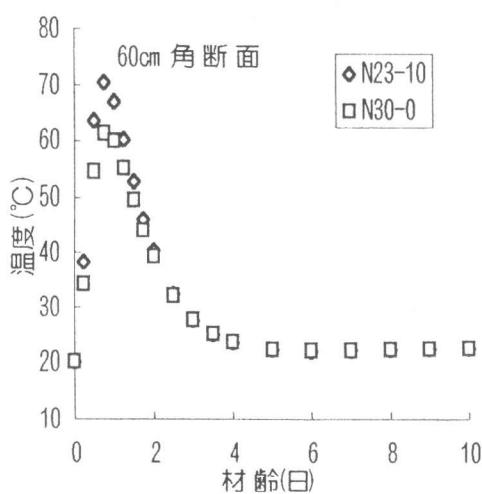


図 16 応力算出概念

$$\Delta \sigma_{(i+1/2, j)} = \Delta \varepsilon_{(i+1/2, j)} / J_{(i+1/2, i)}$$

$$J_{(i+1/2, i)} = \frac{1}{E(i)} + \frac{\phi_{(i+1/2, i)}}{E_{28}}$$

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^i \Delta \sigma_{(i+1/2, j)} \quad \cdots \text{式(1)}$$

$\Delta \sigma_{(i+1/2, j)}$: j 日で載荷された $i+1/2$ 日での変動応力
 $\phi_{(i+1/2, j)}$: j 日で載荷された $i+1/2$ 日でのクリープ係数,
 E_i : 材齢 I 日でのヤング率, E_{28} : 材齢 28 日でのヤング率

図 14 拘束試験体モデル

表 5 材料の力学特性

調合記号	ヤング率(GPa) M:マチュリティ(°C・D)	割裂強度(MPa) M:マチュリティ(°C・D)	クリープ係数
N30-0	$36.4 [-0.12(\log_{10}M)^2 + 0.74\log_{10}M - 0.17]$	$5.01 [-0.23(\log_{10}M)^2 + 1.42\log_{10}M - 1.20]$	CEB-FIP'90
N23-10	$39.0 [-0.04(\log_{10}M)^2 + 0.36\log_{10}M - 0.27]$	$5.26 [-0.21(\log_{10}M)^2 + 1.11\log_{10}M - 0.48]$	同上

解析結果を図 17, 18 に示す。拘束率を 30%（拘束材のヤング率を 200GPa とした場合、断面積率約 8%に相当）とした場合、コンクリートに生じる応力は N30-0(水結合材比 30%)の場合、温度応力は割裂強度の最大約 30%であるが、これに自己収縮応力が重なると仮定すると、コンクリートに生じる応力は割裂強度の最大約 76%に達する。また自己収縮が大きい N23-10(水結合材比 23%, シリカフューム置換率 10%)では、温度応力は N30-0 の場合とほぼ同等(31%)であるが、これに自己収縮応力が重なると、コンクリートに生じる応力は割裂強度を上回り、ひび割れ発生の可能性が増大する。いずれの調合においても、コンクリートに生じる自己収縮による応力は、温度応力と比較して、同等かもしくはそれ以上となる計算結果となっており、高強度・超高強度コンクリートを用いた部材の温度ひび割れを検討する場合、自己収縮の影響についても考慮する必要がある。

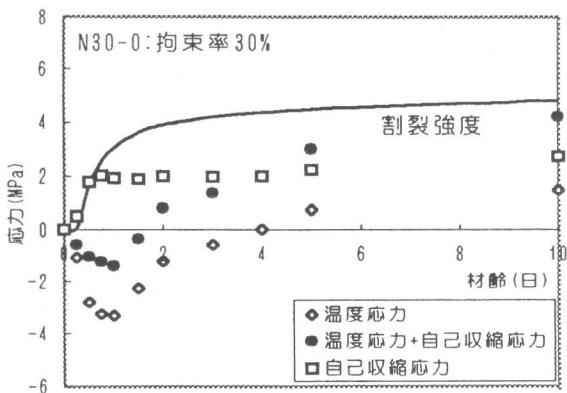


図 17 応力解析結果(N30-0)

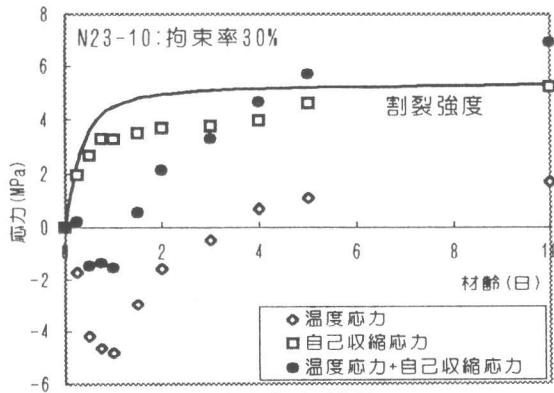


図 18 応力解析結果(N23-10)

5. ばらつき（変動係数）の検討

表 4 に示した、マチュリティと自己収縮の関係式から求められる推定値は実測値に対し、同表に示すような標準誤差（推定値と実測値の差の標準偏差）をもっている。これが任意のマチュリティにおいて存在すると仮定する。一方、材料の力学特性（ヤング率等）にもばらつきがあり、これも平均値に対し正規分布するものと仮定すると、以下の式(2)で算出した応力度の平均値及び標準偏差は近似的に式(3)及び(4)により求められる。

$$\sigma = R_t \cdot \varepsilon \cdot E_e \quad \dots \quad (2) \quad R_t: \text{拘束率}, \quad \varepsilon: \text{自由収縮歪み}, \quad E_e: \text{クリープ係数を考慮した有効ヤング率}$$

ε の平均値を ε_a , 標準偏差を ε_s , E_e の平均値を E_{ea} , 標準偏差を E_{es} とした場合,

$$\sigma_a = \varepsilon_a \cdot E_{ea} \quad \dots \quad (3), \quad \text{ここで } \sigma_a: \sigma \text{ の平均値}$$

$$\sigma_s^2 = \varepsilon_s^2 \cdot (R_t \cdot E_{ea})^2 + E_{es}^2 \cdot (R_t \cdot \varepsilon_a)^2 \quad \dots \quad (4), \quad \text{ここで, } \sigma_s: \sigma \text{ の標準偏差}$$

各調合について、本実験で得られた関係式(表 4)から推定した自己収縮歪みの標準誤差の、応力解析値の変動係数に及ぼす影響を図 19 に示す。拘束応力の算出では、マチュリティ 840($^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$)時点の収縮歪みを用い、拘束率を 20%とし、ヤング率についてはクリープを考慮した上で、一律 30GPa とし、変動係数を 0.1 とした。各調合の解析応力の変動係数は、収縮歪みの標準誤差を考慮することにより 0.04~0.1 に増加し、特に収縮歪みの標準誤差が大きい N23-0 の解析応力の変動係数の増加が顕著である。コンクリートの割裂強度の変動係数を 0.1 とし、ひび割れ発生確率を図 20 に示すモデルによって表現する場合、N23-10 では、有効弾性係数の変動のみを考慮した場合のひび割れ発生確率を 5%と設定しても、収縮歪みの変動係数（標準誤差／推定値）が増加するに従い、ひび割れ発生確率は図 21 に示すように増加する。これを目安に、図 19 の各調合の変動係数に応じたひび割れ発生確率をみると、ひび割れ発生確率を、収縮歪みを考慮しない場合に 5%と仮定した場

合でも、それぞれ7~15%程度に増加する。自己収縮の進行はマチュリティにより定性的に評価できるが、ひび割れ解析に取り込む際には、収縮歪みの推定値の変動係数が、ひび割れ発生確率に影響を及ぼす可能性がある。今後更にデータの集積をはかり、その定量化をはかる必要がある。

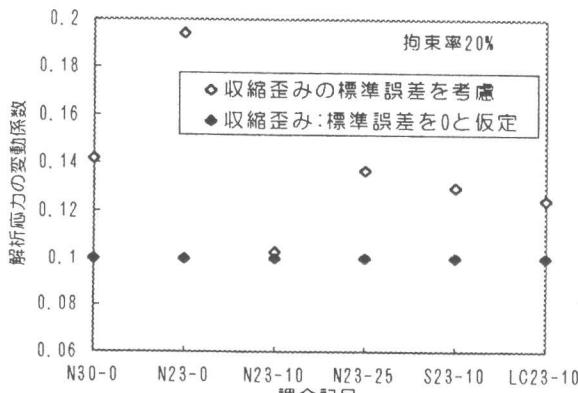


図 19 各調合の解析応力の変動係数

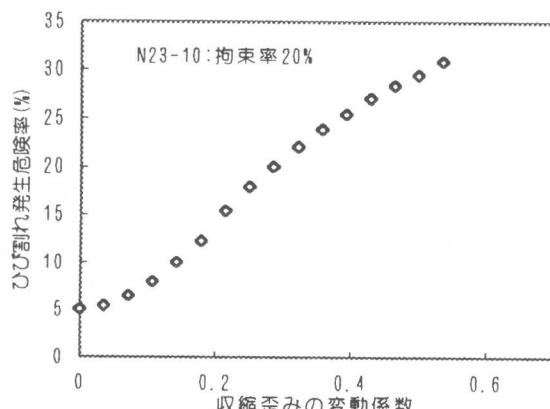


図 21 変動係数とひび割れ発生確率の関係

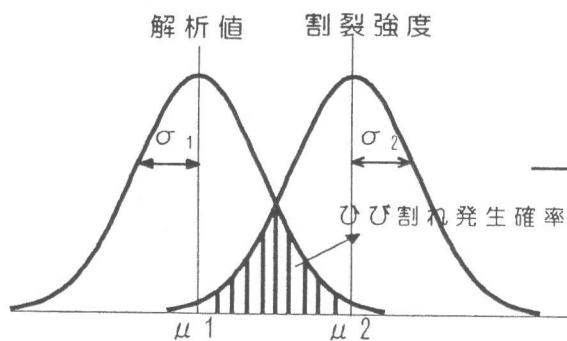
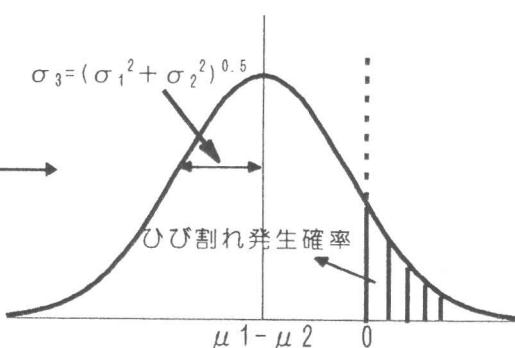


図 20 コンクリートのひび割れ発生確率



6. まとめ

本実験は以下にまとめられる。

- ①温度条件の異なる状況下での自己収縮は、マチュリティにより評価できる。
- ②高強度・超高強度コンクリートの温度ひび割れ解析を行う場合には、自己収縮の影響についても考慮する必要がある。
- ③マチュリティから自己収縮を推定して応力を解析する場合、推定値の標準誤差がひび割れ発生確率の変動に及ぼす影響は無視できない可能性があるので、今後の資料の蓄積が必要である。

参考文献

- [1] 田澤栄一,宮澤伸吾: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,pp561~566,1993
- [2] 今本啓一,大谷博ほか:超高強度コンクリートの諸物性に関する研究,日本建築学会学術講演梗概集,pp273~288,1994
- [3] E.Tazawa,Y.Matuoka,S.Miyazawa,S.Okamoto:Effect Of Autogenous Shrinkage On Self Stress In Hardening Concrete,Int.Symp.On Thermal Cracking In Concrete At Early Ages,Munchen,pp.221-228,Oct.1994
- [4] 今本啓一,大谷博:高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol17,pp1061~1066,1995
- [5] CEB-FIP Model Code,1990
- [6] R.SATO,W.H.DILGERandI.UJIKE:Deformation And Thermal Stress Of Concrete Beams Constructed In Two Stages,Int.Symp.On Thermal Cracking In Concrete At Early Ages,Munchen,pp.313-320,Oct.1994