

コンクリートの収縮による応力の算定方法 に関する基礎的研究

佐 藤 文 則

三 島 徹 也

白 根 勇 二

渡 部 正

要 旨

鉄筋コンクリート構造物の設計法は、性能照査型設計に移行する動向を見せており、施工段階のひび割れ照査を温度応力だけでなく、自己収縮および乾燥収縮による収縮応力も考慮する必要性が生じてきている。著者らは、このような背景から既存の温度応力解析機能に加えて、自己収縮および乾燥収縮を考慮できる統合型プログラムを開発した。

本研究では、本プログラムの解析精度を把握するため検証用の自己収縮および乾燥収縮に関する実験を行い、高強度・高流動コンクリートあるいは通常のコンクリートの収縮性状を把握した。試験による収縮試験結果と解析結果との比較検討を行い、本プログラムのコンクリート応力に関する推定精度を把握した。その結果、本解析プログラムは硬化初期からの発生応力を精度良く推定することが可能であり、実用上問題のないレベルでコンクリートの体積変化によるひび割れを検討することが可能であることが確認できた。

キーワード 解析プログラム／自己収縮／乾燥収縮／コンクリート／温度応力

目 次

- | | |
|------------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 解析結果との比較 |
| 2. 統合型解析プログラムの概要 | 5. まとめ |
| 3. 検証試験 | |

BASICAL STUDY ON CALCULATING METHOD OF STRESS ON ACCOUNT OF CONCRETE SHRINKAGE

Fuminori SATO
Yuji SHIRANE

Tetsuya MISHIMA
Tadashi WATANABE

Synopsis:

We will design reinforced concrete structure by performance based design after this ,then we shall consider the stress of autogenous shrinkage and drying shrinkage as well as thermal stress in construction stage. Therefore, we developed the new analysis program that could consider the effects of autogenous shrinkage and drying shrinkage. In this study we carried out the examination on these phenomenon of self compacting high strength concrete and normal concrete to confirm the analysis accuracy, compared analysis results with examination results. As a result, we confirmed that this analysis program could estimate with enough accuracy and use to check the crack on account of concrete volume change.

1. はじめに

平成 11 年度に土木学会標準示方書「施工編」が性能照査型の内容に改訂された。改訂に伴い施工段階で発生するひび割れが、構造物の安全性、水密性、気密性、耐久性、美観などを損なうおそれのある場合には、施工段階におけるひび割れ照査を行わなければならないこととなった。また、近年、建築構造物、土木構造物に限らず、高強度コンクリートや高流動コンクリートの適用事例が増加しており、今後益々このような傾向が強くなることが予想される。これらのコンクリートは高強度化や自己充填性の確保のため、通常のコンクリートに比べて必然的に低水セメント比となり、単位セメント量が多くなるため、自己収縮ひずみが大きくなることも指摘されている。したがって、施工段階におけるひび割れの照査では、セメントの水和に起因するひび割れとして、温度解析によって算定される温度分布に基づく体積変化と自己収縮による体積変化を評価し、加えて乾燥によって生じるひび割れも同時に考慮しなければならない。¹⁾そこで、本研究では既存の温度応力解析プログラムをもとに、自己収縮と乾燥収縮を同時に取り扱える統合型プログラムを開発し、その解析精度を検証することとした。本報は、その検証試験の結果と解析精度について報告するものである。

2. 統合型解析プログラムの概要

本統合型解析プログラムは、当社開発の温度応力解析プログラム「MASCOTS」をベースに開発されたものであり、重ね合わせの原理が成立するという仮定の基に、セメントの水和に起因する温度変化、自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの体積変化を同時に取り扱うことが可能である。今回機能を拡張した部分は、自己収縮と乾燥収縮の項目であり、これらの評価には、時間依存性を考慮した次の土木学会ないしは日本コンクリート工学協会にて提案されている予測式を採用している。また、本プログラムは WINDOWS 版に対応しており解析時のプリポスの処理は対話形式となり非常に操作性が優れたものとなっている。

2.1 自己収縮予測式

自己収縮予測式は、次の日本コンクリート工学協会による提案式を採用している。²⁾

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \varepsilon_{c0} \beta(t) \quad [1]$$

$$\varepsilon_{c0} = 3070 \exp \left\{ -7.2(W/B) \right\} \quad [2]$$

$$\beta(t) = 1 - \exp \left\{ -a(t - t_0)^b \right\} \quad [3]$$

ここに、

γ : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数 (普通ポルトランドセメントの場合 $\gamma = 1.0$)

ε_{c0} : 自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)

$\beta(t)$: 自己収縮の進行を表す関数

W/B : 水結合材比

a, b : 定数

t_0 : 凝結の始発 (日)

t : 材齢 (日)

t および t_0 はコンクリート温度によって次式で補正する。

$$t \text{ および } t_0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad [4]$$

ここに Δt_i : コンクリート温度が $T^\circ\text{C}$ である日数 (日)

$T_0 = 1^\circ\text{C}$

2.2 乾燥収縮予測式

乾燥収縮予測式は、収縮ひずみの大きさおよび進行速度を、これらに大きな影響を与える環境の湿度、部材寸法の影響を考慮した土木学会による提案式を採用している。³⁾

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[1 - \exp \left\{ -0.108(t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad [5]$$

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 \left[1 - \exp(RH/100) \right] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2 \quad [6]$$

ここに、

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: コンクリート材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

RH : 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

W : 単位水量 (kg/m^3) ($130 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg}/\text{m}^3$)

V : 体積 (mm^3) S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($100 \text{ mm} \leq V/S \leq 300 \text{ mm}$)

t および t_0 は乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日) であり式 [4] で補正する。

3. 検証試験

3.1 検証試験の目的

新たに組み込んだ乾燥収縮および自己収縮モデルの妥当性と本解析プログラムの解析精度を検討するため、一軸鉄筋拘束によるコンクリートの収縮応力に関する検証試験を行った。試験概要を以下に示す。

3.2 試験ケース

試験は、コンクリートの配合を次の 4 水準に設定して収縮応力に関する試験を行うものとした。コンクリートの配合は、室内配合試験により表-2 のように選定した。使用材料は表-3 に示すとおりである。

表-1 試験条件

試験ケース	コンクリートの種類
ケース1	自己収縮が問題となると思われる 高強度・高流動コンクリート
ケース2	ケース1の配合を基本とした乾燥収縮低減剤 を混和した高強度・高流動コンクリート
ケース3	普通ポルトランドセメントを用いた 土木用一般コンクリート
ケース4	高炉セメントB種を用いた 土木用一般コンクリート

表-3 使用材料

水	水道水
セメント	ケース1 低熱ポルトランドセメント 比重 3.21
	ケース2 普通ポルトランドセメント 比重 3.26
	ケース3 普通ポルトランドセメント 比重 3.26
	ケース4 高炉セメントB種 比重 3.04
細骨材	大井川産川砂 表乾比重 2.62
粗骨材	両神産碎石 表乾比重 2.72
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系と 架橋ポリマーの複合体
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
乾燥収縮低減剤	低級アルコールのアルキレンオキシド付加物 ⁵⁾

3.3 試験方法

試験は、各コンクリートの自己収縮および乾燥収縮に起因する応力の検討を行うため、拘束条件下におけるコンクリートの収縮による応力の測定と無拘束条件下における収縮ひずみの測定を行った。なお、無拘束条件下における収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみが分離できるように、養生条件を2種類に設定して測定した。測定期間中の養生条件を図-1に示す。供試体の数は各試験ケースに対して2体とした。

(1) 拘束試験

コンクリートの収縮応力の測定は、図-2に示すJCIの「コンクリートの自己収縮試験方法（案）」に準拠して行うものとした。なお、気中養生時には供試体長手方向

拘束条件

養生条件

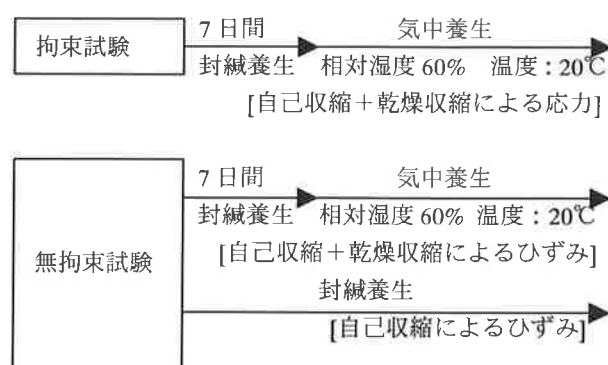


図-1 養生条件

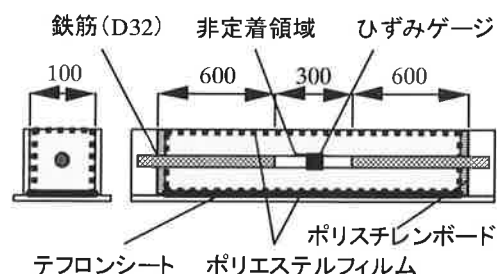


図-2 試験方法

の2面と端面を低弾性のエポキシ樹脂でシールし2面乾燥状態とした。測定項目は、供試体中の鉄筋ひずみ、鉄筋の温度、コンクリート温度とした。²⁾

(2) 無拘束試験

無拘束試験は、JCIの「超流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠して行った。⁴⁾気中養生の場合には、拘束試験と同様に2面乾燥状態とした。測定項目は、埋め込み型ひずみ計によるコンクリートひずみと熱電対によるコンクリート温度とした。なお、これらの試験で得られた測定値は、拘束試験供試体の鉄筋とコンクリートの

表-2 コンクリートの配合

試験ケース	配合条件						単位量(kg/m ³)											
	粗骨材最大寸法 (mm)	スラン プ フ ロ ー (cm)	空 気 量 (%)	水 セ メ ン ト 比 (%)	単位粗骨材絶対容積 (ℓ / m ³)	細骨材率 (%)	水	セ メ ン ト	細骨材	粗骨材	高性能 A E 減水剤	A E 減水剤	乾燥収縮低減剤					
1	20	65 (12) スラン プ	5.5	29.5	280	54.6	160	542	882	761	1.0	-	-					
2					407	42							160	291	774	1107	-	6.0
3					405										770	1102	-	-
4																	-	-

釣り合いの関係より次式のように整理することができる。

$$\sigma_c = \frac{A_s \cdot E_s \cdot (\varepsilon_s - \alpha_s \cdot \Delta T_s)}{A_c} = E_c \cdot (\varepsilon_c - \alpha_c \cdot \Delta T_c - \varepsilon_v) \quad [8]$$

$$= E_c \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_{creep}) \quad [9]$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{aut} + \varepsilon_{sh}$$

ここに、

σ_c : コンクリートの収縮応力(N/mm²) A_s : 鉄筋断面積(cm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数(N/mm²) ε_s : 鉄筋ひずみ(μ)

α_s : 鉄筋の線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)

ΔT_s : 鉄筋の温度変化($^\circ\text{C}$)

A_c : コンクリートの断面積(cm²)

E_c : コンクリートの有効ヤング係数(N/mm²)

ε_c : コンクリート実ひずみ(cm²)

α_c : コンクリートの線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)

ΔT_c : コンクリートの温度変化量($^\circ\text{C}$)

ε_a : コンクリートの弾性ひずみ(μ)

ε_{creep} : クリープひずみ(μ) ε_{aut} : 自己収縮ひずみ(μ)

ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ(μ)

(3) コンクリートの基本物性試験

拘束試験によるコンクリートの収縮応力を評価するため、表-4 に示す基本物性を把握した。

表-4 基本物性項目

測定項目	方法
圧縮強度	各コンクリートの養生は、拘束試験と同一とし、材齢 1,3,7,14,28,56 日の 6 材齢で試験を行った。試験は、JIS A 1108-1999 および JSCE-G502-1999 に準拠した。
ヤング係数	
始発時間	拘束試験体作製時に、同一パッチのコンクリートより試料を採取し、試験は ASTM C 403 の貫入抵抗によるコンクリートの凝結時間試験に準拠した。

3.4 試験結果

基本物性試験、拘束試験、無拘束試験の結果を以下に示す。

(1) コンクリートの基本物性

各コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、凝結試験結果は、図-3～図-4、表-5 に示す通りである。なお、コンクリートの始発時間が、自己収縮開始時間となる。

表-5 コンクリートの凝結試験結果

試験ケース	始発時間 hr : min	終結時間 hr : min
ケース 1	6 : 43	9 : 53
ケース 2	7 : 19	10 : 58
ケース 3	5 : 56	8 : 50
ケース 4	7 : 17	11 : 01

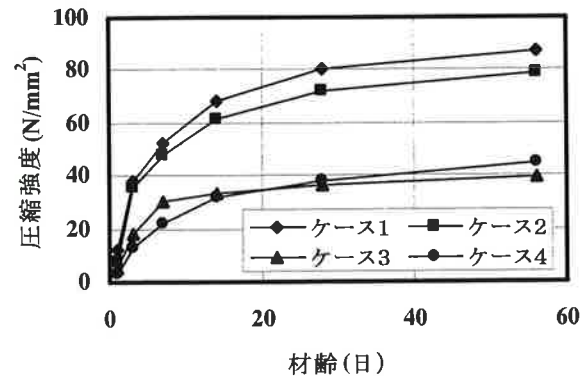


図-3 材齢と圧縮強度との関係

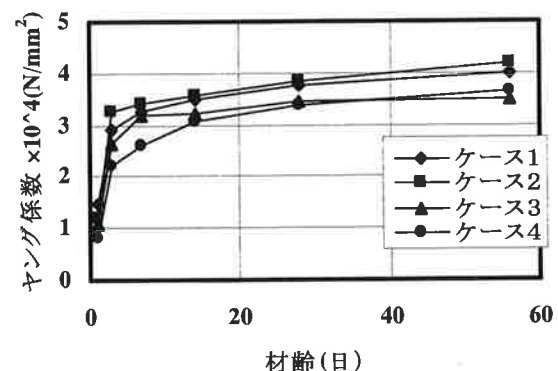


図-4 材齢とヤング係数との関係

(2) コンクリートの収縮性状

図-5 に自己収縮試験結果を、図-6 に乾燥収縮試験結果を示す。なお、図中のひずみは供試体 2 本の平均値を示している。自己収縮ひずみは、材齢初期において水結合材比が小さく、単位結合材量が多い高強度・高流動コンクリートが最も大きい。しかしながら、長期材齢では高炉セメント B 種を用いた通常配合が最も大きな結果を示した。

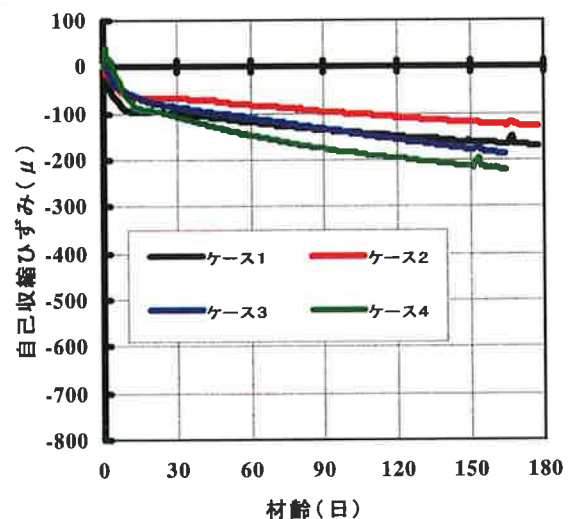


図-5 自己収縮試験結果

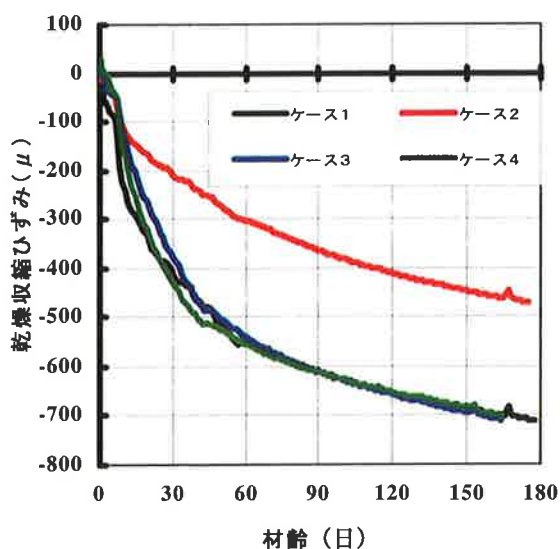


図-6 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験によると、乾燥収縮低減剤を添加したケース 2 を除いて、いずれの配合でもほぼ同様のひずみ履歴を示し、乾燥材齢約 6 ヶ月で約 700 μ となった。また、乾燥収縮低減剤は、乾燥収縮だけでなく、自己収縮に対しても有効であり、6kg/m³の混入量で 25%程度の収縮量の低減効果があることを確認できた。

(3) コンクリートの収縮応力とひび割れ抵抗性

拘束試験によるコンクリートの応力履歴を図-7 に示す。これよりコンクリートには、材齢 7 日までは自己収縮による応力により約 0.5N/mm²の引張応力が発生し、その後自己収縮と乾燥収縮の影響により引張応力が徐々に増加している。また、コンクリートの引張応力が急激に低下する現象は、ひび割れ発生に伴う応力開放を示すものであり、これによりひび割れ発生時期を特定することができる。ひび割れの発生時期は、コンクリートの種類により異なり、ひび割れ発生時期が長いほどひび割れ抵抗性に優れたコンクリートと言える。各ケースにおけるひび割れ発生時期は、表-6 の通りである。なお、ひび割れ発生時期は、2 供試体の平均値とした。ただし、ケース 2 は、1 供試体にしかひび割れが発生しなかったため、1 供試体のデータで記述した。

表-6 ひび割れ発生時期と発生応力

試験ケース	ひび割れ発生時期	ひび割れ発生時の引張応力
ケース 1 高強度・高流動	38.8 日	2.47N/mm ²
ケース 2 ケース 1 + 乾燥収縮低減剤	48.3 日	1.75N/mm ²
ケース 3 普通ポルトランドセメント一般配合	39.1 日	2.04N/mm ²
ケース 4 高炉セメント B 種一般配合	20.8 日	1.76N/mm ²

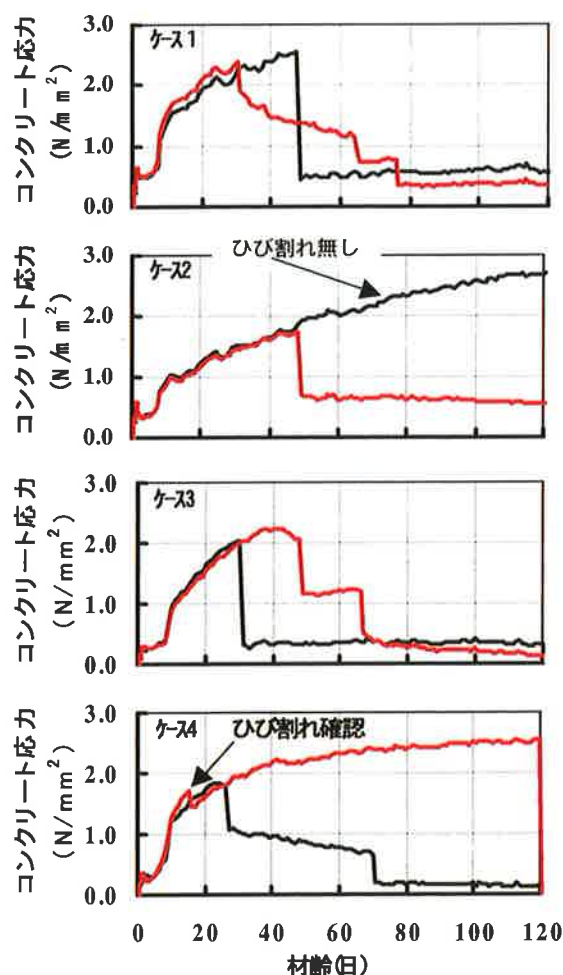


図-7 拘束試験体の応力履歴

ひび割れ発生時期より判断すると乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートが最もひび割れ抵抗性が高く、逆に高炉セメント B 種を用いた一般的なコンクリートは、ひび割れ発生時期が早くひび割れ抵抗性に劣る結果となった。これは、自己収縮および乾燥収縮によって発生した収縮ひずみの履歴は他のコンクリートと同じであるが、材齢初期における強度発現性能が他のコンクリートに比べて劣っていることに起因している。

4. 解析結果との比較

本解析プログラムの検証を行うため、自己収縮および乾燥収縮に関する解析を行い、無拘束試験および拘束試験による自己収縮ひずみ履歴、乾燥収縮ひずみ履歴およびコンクリートの応力履歴結果との比較検討を行った。

4.1 自己収縮ひずみに関する検証

自己収縮の予測値は、2.1 のように定義できる。なお、比較の対象としては自己収縮ひずみが問題となる高強度・高流動コンクリートのケース 1, 2 とした。自己収縮ひずみを算定する際に必要な入力値は、水結合材比、セメントの種類、凝結試験結果より表-7 のように設定した。

図-8 に自己収縮のひずみ履歴を示す。

表-7 入力値

入力項目	入力値
γ : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数	0.3
W/B : 水結合材比	0.295
a : 自己収縮の進行速度に関する定数	0.6
b : 自己収縮の進行速度に関する定数	0.5
t_0 : 凝結の始発	0.28 日

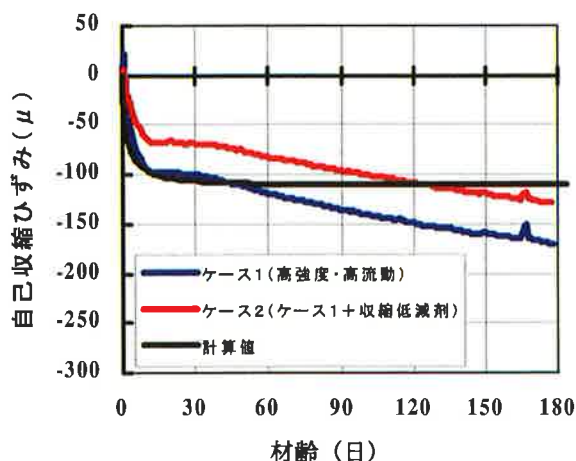


図-8 自己収縮ひずみ履歴の比較

自己収縮の予測式は、低熱ポルトランドセメントを用いた高強度・高流動コンクリートの自己収縮性状を材齢 60 日程度まで精度良く推定できていることが分かる。ただし、長期材齢になると予測式は、自己収縮ひずみの増分がほとんど無いのに対して、実験値は材齢と共に増加する傾向を示している。本試験では半年後の実験値と計算値の自己収縮量の差は約 50μ 程度となった。また、乾燥収縮低減剤を添加したケース 2 の自己収縮性状はケース 1 の高強度・高流動コンクリートの 75% 程度の収縮量を示しており、この低減率を予測式に反映することで乾燥収縮低減剤の効果を評価できると考えられる。

4.2 乾燥収縮ひずみに関する検証

無拘束試験において材齢 7 日より湿度 60%、温度 20°C の乾燥条件下においた場合について実験値と計算値との比較を行った。図-9～図-12 にその結果を示す。なお、収縮ひずみの最終値を算定するのに必要な体積表面積比は、予測式の適用範囲を超えているが、供試体の乾燥条件より $V/S=50\text{mm}$ として算定している。試験結果より乾燥収縮低減剤を使用したケース 2 を除いて、実験値と計算値が概ね一致しており、通常使用されているコンクリートの収縮性状を表す予測式としては実用上十分な精度であると思われる。なお、本予測式の適用範囲は 70N/mm^2 までとなっているが、検討したコンクリート強度が

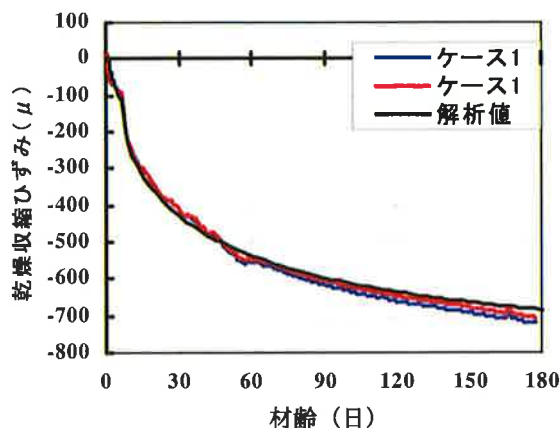


図-9 乾燥収縮ひずみ履歴 (ケース 1)

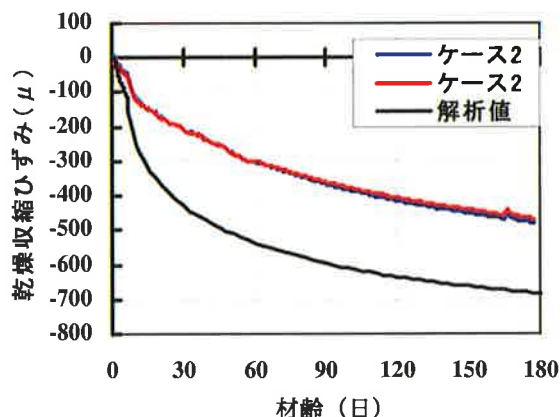


図-10 乾燥収縮ひずみ (ケース 2)

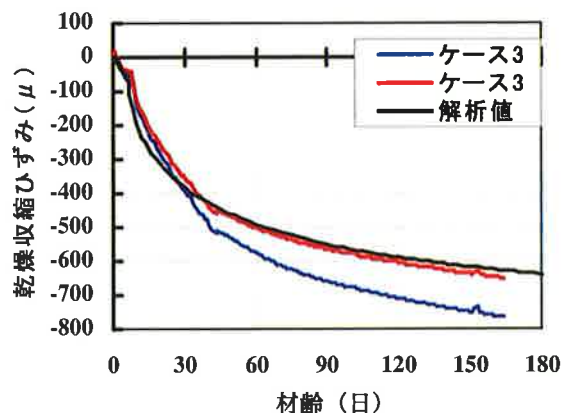


図-11 乾燥収縮ひずみ (ケース 3)

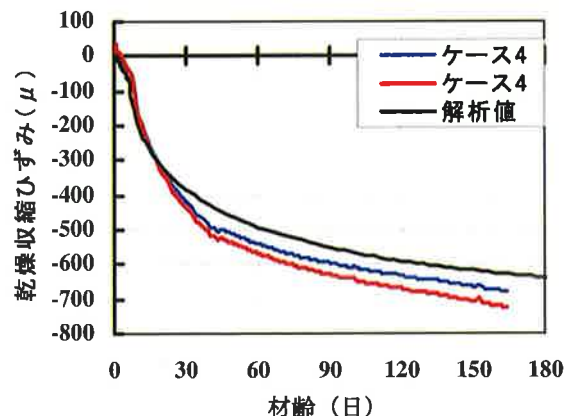


図-12 乾燥収縮ひずみ (ケース 4)

80N/mm² を越える高強度領域にある高強度・高流動コンクリートの場合にも、十分な精度で収縮ひずみを取り扱うことができることが確認できた。乾燥収縮低減剤を用いたケース2についても、乾燥収縮低減剤の効果をケース1の高強度・高流動コンクリートの収縮ひずみの最終値に修正係数として乗じることにより推定精度を向上させることが可能と考えられる。修正係数としては、本実験の範囲では乾燥収縮低減剤の低減効果より0.75程度が適当であると思われる。

4.3 コンクリート応力に関する検証

収縮によって発生するコンクリートの応力を適切に評価できるかどうか検討するため、鉄筋による拘束条件をモデル化し解析を行い、実験値との比較を行った。

(1) 解析モデル

鉄筋により拘束された試験体を図-13のようにモデル化した。なお、鉄筋はトラス要素を用い定着区間600mmの部分は、付着特性を完全付着として解析した。また、応力の境界条件は、X,Y方向拘束無しとした。

(2) コンクリートの基本物性

コンクリートの硬化特性は、基本物性試験結果をもとに表-8のように設定した。なお、各コンクリートの収縮ひずみは、図-6に示した試験によるひずみ履歴を入力値として与え解析し、硬化初期からの発生応力を的確に評価できるか検討した。

表-8 コンクリートの硬化特性

項 目		ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
ポアソン比		0.2			
線膨張係数(μ/℃)		10			
圧縮強度 $f_c(t)$ (N/mm ²)	1 日	116	73	53	28
	3 日	373	352	179	127
	7 日	514	468	294	213
	14 日	669	602	325	314
	28 日	785	708	357	370
	56 日	857	769	387	435
引張強度(N/mm ²)		$f_t = 0.35\sqrt{f_c(t)}$			
ヤング係数(N/mm ²)		$E_c = 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c(t)}$			
クリープモデル		CEB/FIP 90 モデル			

(3) 鉄筋の基本物性と付着特性

鉄筋の基本物性および付着特性は、表-9のとおりとした。

表-9 鉄筋の基本物性

項 目	物性値
断面積(cm ²)	6.09
ヤング係数(N/mm ²)	1.88×10^5
線膨張係数($\mu/\text{℃}$)	10
定着区間の付着特性	完全付着

(4) 解析値と実験値との比較

各ケースにおいて自己収縮および乾燥収縮による発生応力に関して、実験値と解析値の比較を行った。図-14～図-17にその結果を示す。解析値と実験値の比較の結果、いずれのケースにおいても、硬化初期から供試体にひび割れが発生するまでの応力履歴はほぼ一致しており、精度良くコンクリートに発生する応力性状を評価できていることが分かる。また、今回の解析では、コンクリートのクリープモデルとして CEB/FIP 90 のモデルコードを採用したが、応力履歴がほぼ一致していることから、初期材齢からのクリープに対しても実用上問題なく適用できると思われる。また、ひび割れの発生時期は、解析値と実験値とは大きく異なる結果となった。これは、ひび割れ発生までの応力履歴がほぼ一致していることから、ひび割れ発生規準が実際の現象と異なっていることに起因していると考えられる。言い換えれば、圧縮強度から引張強度を推定する際の推定精度を上げることにより、ひび割れ発生時期も的確に評価できることになる。ただし、解析は応力解析の入力値として無拘束試験で得られた実際のひずみ履歴を使用している。そのため、通常の場合には、このひずみ履歴を先に示した自己収縮および乾燥収縮の予測式を用いて定義することになり、この予測式の推定精度が応力やひび割れ発生の評価に大きく影響することとなる。これらの収縮に関する予測式は、セメントや混和材の種類等の適用範囲も限られていることや、気温、湿度等の環境条件に非常に敏感である等の事項を十分考慮にいれて適用することが重要となる。

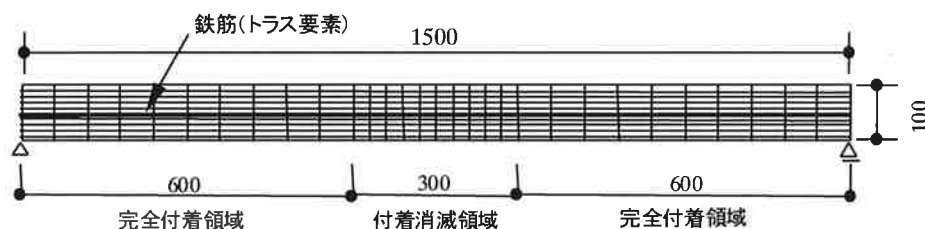


図-13 拘束試験の解析モデル

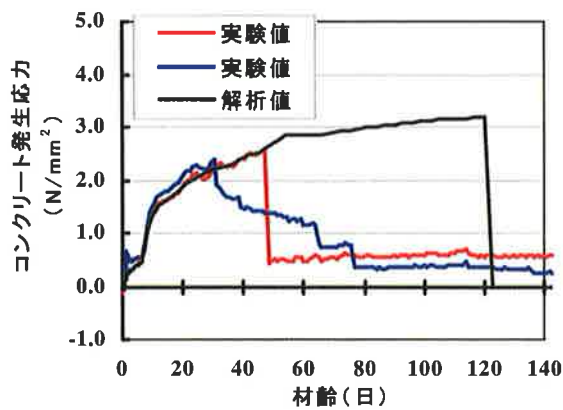


図-14 コンクリートの応力履歴（ケース 1）

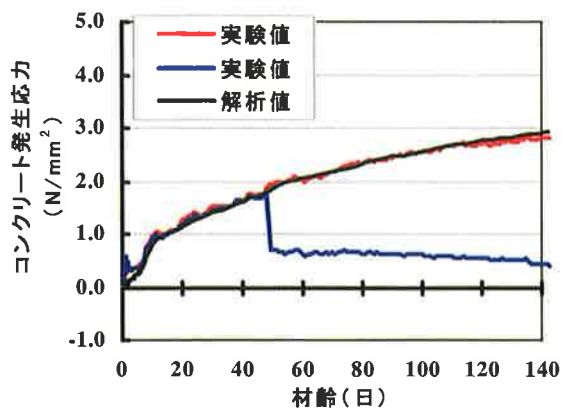


図-15 コンクリートの応力履歴（ケース 2）

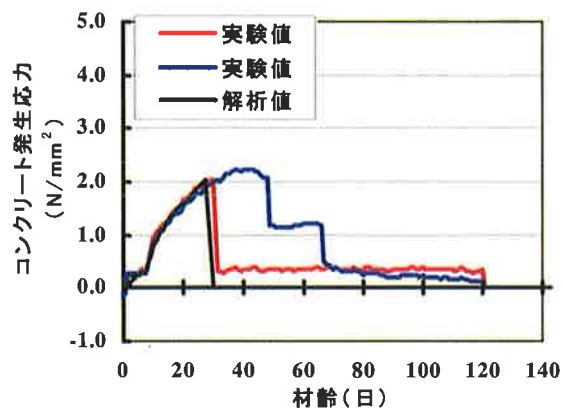


図-16 コンクリートの応力履歴（ケース 3）

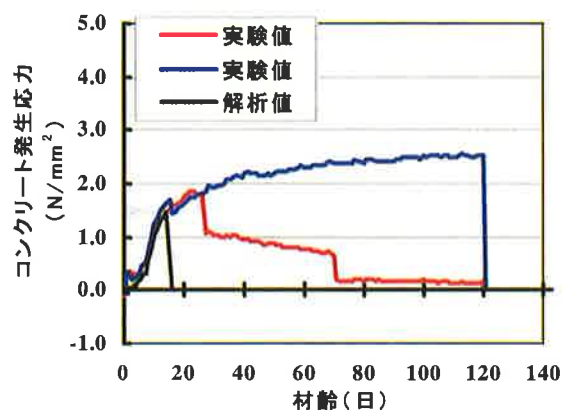


図-17 コンクリートの応力履歴（ケース 4）

5. まとめ

本研究は既存の温度応力解析に加えて、コンクリートの自己収縮および乾燥収縮を取り扱うことができる統合型解析プログラムの概要、および実験によるコンクリートの収縮試験結果と本プログラムによる解析結果との比較検討を行ったものである。本研究により得られた知見は、以下に示すとおりである。

- (1) 本プログラムに組み込んだ自己収縮および乾燥収縮の予測式は、本実験の範囲では実用上問題の無い範囲でコンクリートの収縮性状を推定することができる。
- (2) 自己収縮および乾燥収縮によって発生するコンクリートの応力は、コンクリートのクリープ特性を考慮することにより硬化初期からの的確に評価することができる。ただし、ひび割れ発生時期の推定精度を向上させるためには、コンクリートの引張強度を適切に選定する必要がある。
- (3) 自己収縮ひずみは、セメント種類や水結合材比の影響を大きく受ける。高強度・高流動コンクリートの場合には自己収縮ひずみが大きくなり問題となることが予想されるが、本実験からも分かるように低熱ポルトランドセメントを使用することにより自己収縮量を大きく抑制することができ高強度・高流動化を図る上で非常に有効な材料と言える。
- (4) 乾燥収縮低減剤は、乾燥収縮だけでなく自己収縮に対しても収縮ひずみを低減するのに有効であり、その効果は無添加の場合の約 75% に低減できることが確認できた。

このように、本解析プログラムはコンクリートの体積変化によるひび割れを検討する上で実用上十分な精度であり、今後、施工段階におけるひび割れの照査に利用できるとと思われる。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 施工編 平成 11 年版 耐久性照査型, 社団法人土木学会
- 2) 自己収縮研究委員会報告書, 社団法人日本コンクリート工学協会, 1996
- 3) コンクリート標準示方書 設計編 平成 8 年制定, 社団法人土木学会
- 4) 超流動コンクリート研究委員会 報告書Ⅱ, 社団法人日本コンクリート工学協会, 1994
- 5) 富田六郎: コンクリート用有機系収縮低減剤の作用機構およびその効果に関する実証的研究, 博士論文, 1994

Handwritten calculations:

$$\begin{array}{r}
 1.6 \\
 1.26 \\
 \hline
 96 \\
 32 \\
 \hline
 1.6 \\
 20.16
 \end{array}$$

Other numbers: 0.35, 0.29, 0.25, 0.99, 35, 80, 100, 200.