

論文 コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析

籠橋 忍^{*1}・伊藤 佑樹^{*2}・堀部 謙^{*3}・森本 博昭^{*4}

要旨：本研究では，乾燥収縮によるひずみと応力の解析ならびに乾燥収縮応力と温度応力の合成応力の挙動について検討した。その結果，各種配合のコンクリートについて，相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係が得られた。また，温度応力と乾燥収縮応力との合成応力は，乾燥収縮応力の影響で極く表面近傍で引張応力となる。長期的には，乾燥収縮ひずみは，その大きさおよび内部への進展は増大するので，部材全体の合成応力に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

キーワード：乾燥収縮ひずみ，乾燥収縮応力，水分移動，湿気移動，温度応力

1. はじめに

乾燥収縮ひずみの解析を行うためには，まず，コンクリート中の水分移動に伴う乾燥収縮ひずみの発現性状を明らかにする必要がある。コンクリート中の水分移動に伴う乾燥収縮ひずみの発現性状は，図 - 1 に示すように，コンクリート中の水分移動解析より得られる相対湿度分布に，コンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係を適用し推定することが可能である。本研究では，コンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係を実験により明らかにするとともに，コンクリート構造物の乾燥収縮によるひずみと応力の解析を行った。さらに，乾燥収縮ひずみ解析と並行して温度応力解析も実施して，

乾燥収縮ひずみと温度応力の合成応力の挙動についても明らかにした。

2. コンクリート中の湿気移動解析¹⁾

コンクリート中の湿気移動解析の基礎となる湿気移動則として次式を用いる。

$$J = \lambda_p S \left(\frac{dP}{dn} \right) \quad (1)$$

ここで， J ：湿流 (g/hr)， S ：湿流が通過する面積 (m²)， λ_p ：透湿率 (g/hr・m・mmHg)， P ：コンクリート中の蒸気圧 (mmHg)である。ただし，コンクリート中の蒸気圧 P と相対湿度 RH との関係は次式で表せる。

$$P = P^* \left(\frac{RH}{100} \right) \quad (2)$$

ここで， P^* ：コンクリート中の温度(K)に対する飽和蒸気圧 (mmHg)， RH ：コンクリート中の相対湿度 (%)である。

式(1)の湿気移動則から，次の湿気移動の非線形支配方程式が導かれる。

$$\left(\frac{dq}{dP} \right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \nabla (\lambda_p \nabla P) + \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad (3)$$

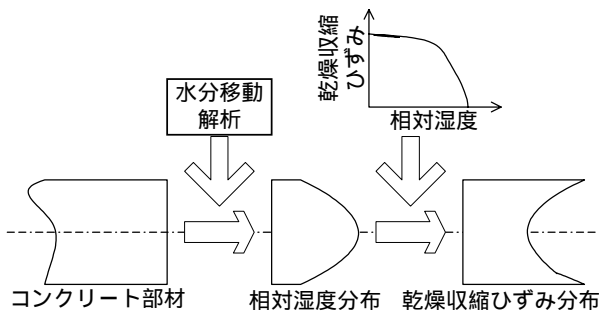


図 - 1 乾燥収縮ひずみの解析

*1 大日本土木(株) 修士(工学)(正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*4 岐阜大学 教授 工学部社会基盤工学科 工博(正会員)

また、境界条件式として、次式を仮定することができる。

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P - P_c) f_\omega \quad (4)$$

ここで、 q : 湿気密度 (g/m^3)、 $(dq/dP)_p$: 湿気容量 ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{mmHg}$)、 (dq/dt) : 水和による湿気密度変化 ($\text{g}/\text{hr} \cdot \text{m}^3$)、 t : 時間 (hr)、 α : 蒸発率 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$)、 P_c : コンクリート周囲の蒸気圧 (mmHg)、 f_ω : 空気流動に関する係数である。すなわち、支配方程式(3)を境界条件式(4)のもとで解けばよいことになる。

3. コンクリートの収縮ひずみの計測

3.1 実験概要

図 - 2 に示すように、 $30 \times 30 \times 300\text{mm}$ の小型角柱供試体の $30 \times 30\text{mm}$ 断面中央に温度・相対湿度計測用の小孔を設け、側面には 250mm 間隔で長さ変化計測用のゲージプラグを埋設した。なお、小孔は打設前に型枠の所定の位置に設置した鋼管 (10mm) を凝結後に取り去ることにより成形した。供試体の両端にはシール (封緘処理) を施し、他の4面から乾燥させた。供試体は材齢1日で脱型し、封緘処理および小孔中央に小型電気湿度計 (S社, SK-80P4型) を設置した後、乾燥開始材齢まで湿布養生および封緘養生を行った。乾燥開始後の小孔中の温度・相対湿度は小型電気湿度計を用いて計測し、供試体の長さ変化はフーゲンベルガーひずみ計を用いて計測した。実験は環境試験室内で行い、温度は 20°C 一定、相対湿度は図 - 3 に示すようにコントロールした。

供試体の乾燥収縮ひずみの計測は、供試体中心 (小孔中央) の相対湿度と周囲の相対湿度がほぼ同一となるとともに、供試体の重量が一定となるまで継続した。このようにして、ある相対湿度に対する乾燥収縮ひずみ量が求まった後、周囲の相対湿度をさらに低下させ、それ以降は同様の手順で計測を続けた。

本研究で行った実験概要をまとめて表 - 1 に示す。表 - 1 に示すように、本研究では乾燥収

縮ひずみの発現性状に及ぼすコンクリートの配合 (W/C, W) と供試体温度の影響を検討することにした。供試体の温度コントロールは、コンクリート中に埋設した温床線で行った。コンクリートの配合を表 - 2 に示す。最大骨材寸法は 10mm を用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

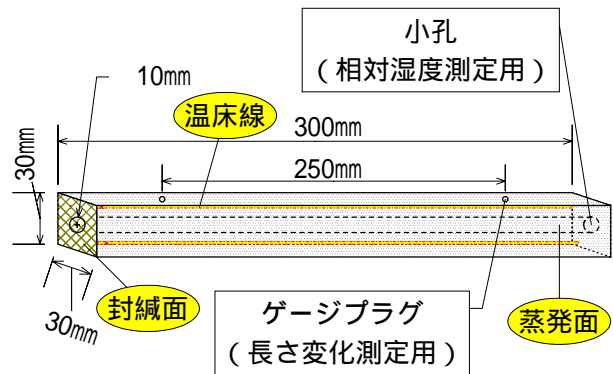


図 - 2 長さ変化供試体

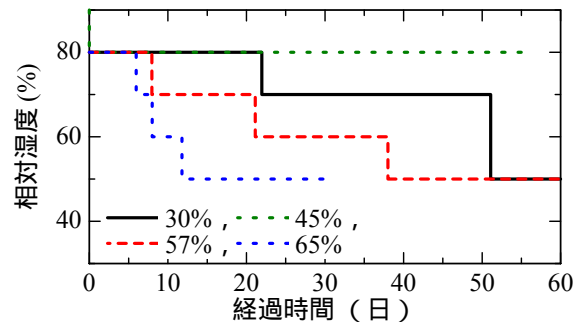


図 - 3 環境試験室

表 - 1 実験種類

W/C (%)	乾燥開始材齢 (日)	供試体温度 (°C)	環境条件
30	7	40	温度 20°C 一定、相対湿度 80% から段階的に変化
	7	20	
45	7	40	
57	1	20	
	1	40	
65	1	40	
	1	20	

表 - 2 示方配合

W/C (%)	スランプ (cm)	Air (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	C	S	G	Ad
30	18.0	3.8	44.2	132	440	840	1060	22^{*1}
45	7.0	4.2	42.1	153	342	760	1046	1.37^{*2}
57	8.0	4.5	41.1	175	309	726	1041	1.24^{*2}
65	8.0	4.5	44.1	189	292	770	976	0.73^{*2}

*1 : 高性能AE減水剤, *2 : AE減水剤

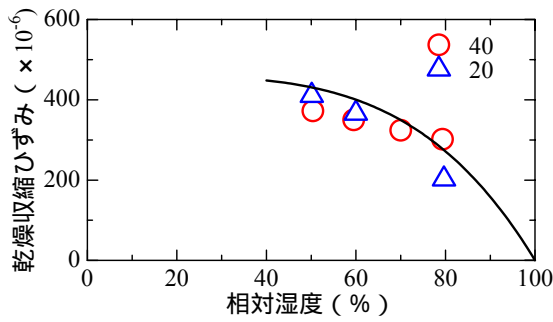


図 - 4 相対湿度と乾燥収縮ひずみ (W/C=30%)

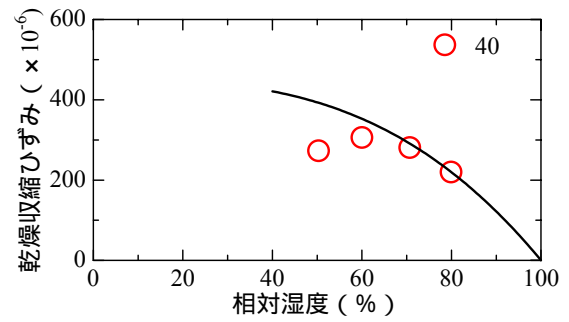


図 - 5 相対湿度と乾燥収縮ひずみ (W/C=45%)

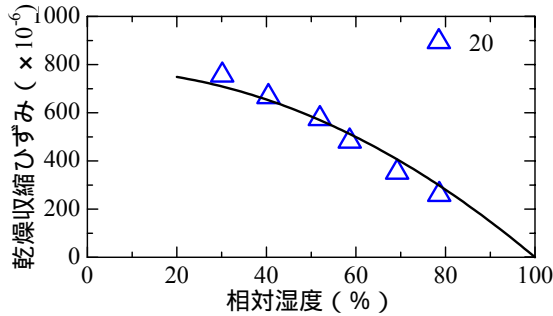


図 - 6 相対湿度と乾燥収縮ひずみ (W/C=57%)

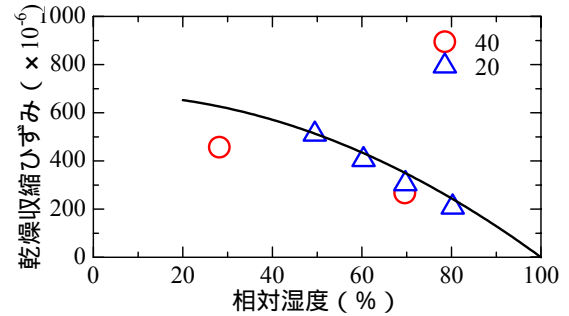


図 - 7 相対湿度と乾燥収縮ひずみ (W/C=65%)

3.2 実験結果

図 - 4 ~ 7 に供試体の小孔中の相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係の実験結果を示す。供試体の乾燥収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみ実測値を自己収縮ひずみ実測値で補正して求めた。図 - 4 ~ 7 より、相対湿度に対する乾燥収縮ひずみは、全体としてはW/CあるいはWが大きくなると増大する傾向にある。特に、W/C=45% (W=153) から W/C=57% (W=175) への変化に伴う乾燥収縮ひずみの増大が大きい。しかし、W/C=30%と W/C=45% および W/C=57%と W/C=65%それぞれの間には大きな差異はない。これは、W/C=45%から W/C=57%に変化する段階で、コンクリートの微細構造が大きく変化するためであると考えられる。図 - 4 および図 - 7 から、乾燥収縮ひずみの発現速度はコンクリート温度が高いほど大きくなるが、周囲の相対湿度と平衡に達した時の相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係は、コンクリート温度 40 と 20 とでは大差はない。

式(4)はコンクリート中の相対湿度 RH と微細空隙水のポテンシャル ψ との関係を表した式である。

$$RH = 100 \times \exp\left(\frac{\psi M_v}{RT}\right) \quad (4)$$

ここで、 ψ : 微細空隙水のポテンシャル (J/kg), M_v : 水蒸気の分子量 (kg/mol), R : 気体定数 (8.3143J/mol·K), T : 絶対温度 (K)である。

式(4)中の微細空隙水のポテンシャル ψ は乾燥収縮ひずみの駆動力になると考えられる。従って、式(4)はコンクリート部材中の乾燥収縮ひずみが、相対湿度分布からほぼ一義的に推定できる可能性のあることを示唆している。

コンクリートの湿気移動解析から得られる部材中の相対湿度分布に、図 - 4 ~ 7 の相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係を適用することにより、部材断面における乾燥収縮ひずみの分布を推定することが可能である。

4. 乾燥収縮応力と温度応力の合成応力解析

4.1 解析概要

図 - 8に示すように、橋脚柱部 (10000 × 4000mm) の水平断面をモデル化して、乾燥収縮ひずみおよび乾燥収縮応力の解析を実施するとともに、温度および温度応力の解析も実施して、乾燥収縮応力と温度応力との合成応力につ

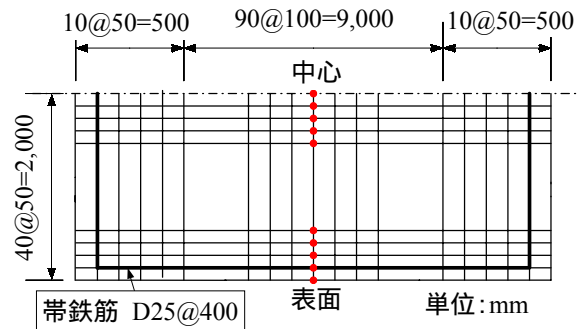
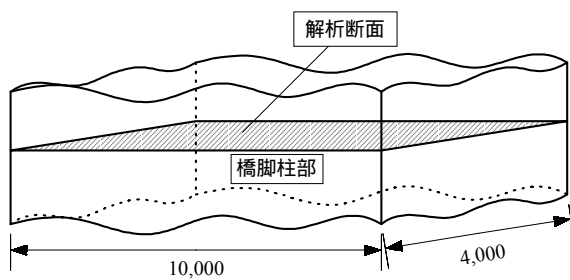


図 - 8 解析モデル

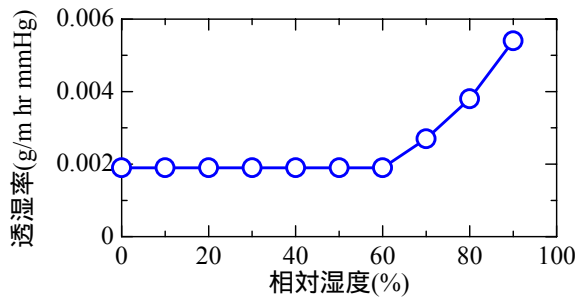


図 - 9 透湿率の相対湿度依存性

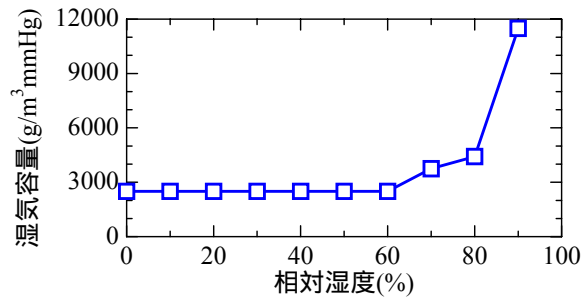


図 - 10 湿気容量の相対湿度依存性

表 - 3 温度に関する物性値

		単位	数値
コン ク リ ー ト	比熱	kcal/kg・	0.22
	密度	kg/m ³	2300
	熱伝導率	kcal/m・hr・	2.0
	熱伝達率	kcal/m ² ・hr・	10.0
	断熱温度 上昇式	Q γ	61.4 -

表 - 4 解析条件

	単位	数値
コンクリートの打ち込み温度		20.0
周囲の温度		20.0
周囲の相対湿度	%	50.0
解析期間	日	90

いて検討した。

コンクリート中の湿気移動に関する物性値¹⁾は、図 - 9 ~ 10に示すように、透湿率 λ_p および湿気容量 $(dq/dP)_p$ は相対湿度の関数として評価した。また、蒸発率 α は著者らの実験²⁾をもとに $\alpha = 0.3$ (g/m²・hr・mmHg)とした。空気流動に関する係数は $f_w = 1$ とした。水和による湿気密度変化 (dq/dt) はないものとした。一方、温度解析では表 - 3に示すコンクリート標準示方書³⁾に記載される物性値を用いた。湿気移動および温度解析における解析条件を表 - 4に示す。なお、コンクリート中の湿気移動は水和熱により促進されると考えられるが、著者らが提案する湿気移動解析法ではこれを考慮することができる。そこで、水分移動に及ぼす水和熱の影響を無視した解析も比較のために実施した。

乾燥収縮応力解析および温度応力解析では、 $f'_{ck}(28) = 82.9$ (N/mm²)として、有効弾性係数を用いた。そして、その評価にあたっては土木学会式³⁾を適用して、材齢の影響を考慮した。コンクリートと鉄筋の熱膨張係数は 10×10^{-6} (1/)、コンクリートのポアソン比は0.2とした。また、相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係はW/C=30%の実験結果を適用した。

4.2 解析結果

図 - 11 に温度の経時変化、図 - 12 に相対湿度の経時変化を示す。図 - 11 から、コンクリートの温度は材齢 2 ~ 3 日付近でピークに達し、その後は周囲温度 20 に近づいていく。最高温度は、中心では 78、表面では 40 となる。図 - 12 から、コンクリート表面の相対湿度は材齢とともに低下し、材齢 90 日では 56%程度に達する。表面から 100mm の位置では相対湿度

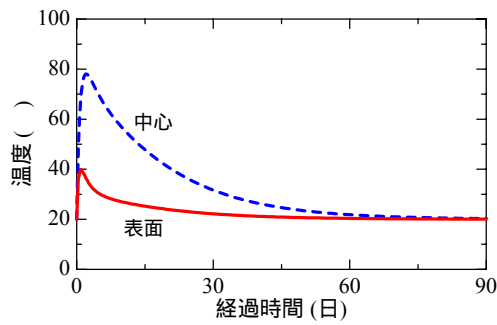


図 - 11 温度変化

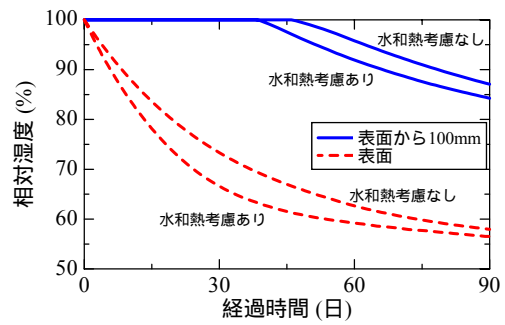
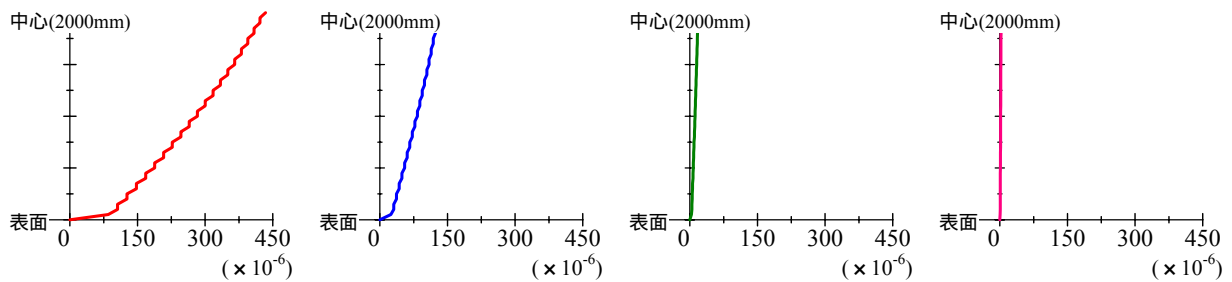


図 - 12 相対湿度変化

温度ひずみ



乾燥収縮ひずみ

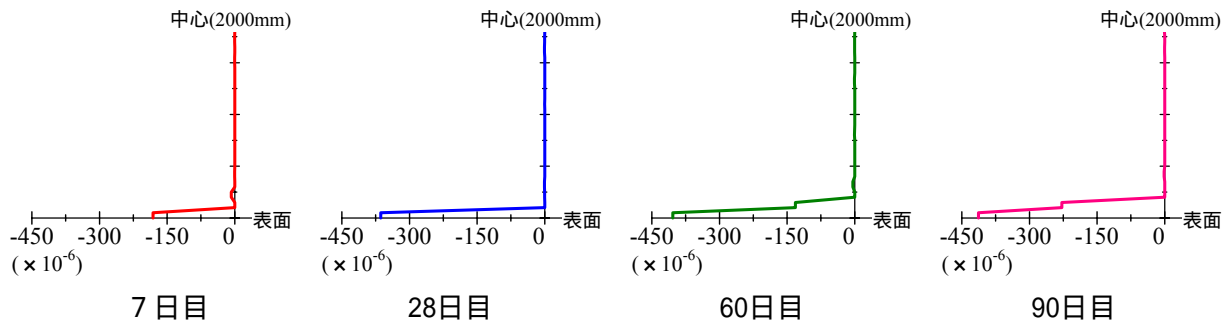


図 - 13 部材断面のひずみ分布

の変化は極めて緩やかとなり、材齢50日付近まで相対湿度の低下は生じない。すなわち、部材の乾燥は極めて表面的である。湿気移動解析で水和熱の影響を考慮した解析結果から、水和熱によって湿気移動（乾燥）が促進されることが確認できる。

図 - 13に部材断面のひずみ分布、図 - 14に部材断面の応力分布の解析結果を示す。図 - 13から、温度ひずみは部材の温度上昇期に部材中の温度分布に対応した形で発生し、温度の降下に伴い減少していく。一方、乾燥収縮ひずみの進行は緩やかである。材齢90日時点では、表面から200～300mm程度の範囲でのみ乾燥収縮ひずみが発生している。ただし、その量は比較的大きく、乾燥収縮ひずみの発生は表面的であるこ

とがわかる。部材内部への乾燥収縮ひずみの進行は、この後も緩やかに長期間にわたり進行していくと考えられる。

図 - 14から、温度応力は内部拘束応力の典型的パターンを示し、表面では引張から圧縮へ、一方、中心では圧縮から引張へと変化する。これに対して、乾燥収縮応力は乾燥収縮ひずみの発生性状から、その発生は表面から200～300mmの範囲にとどまっている。しかし、局部的に大きな引張応力が発生する。温度応力と乾燥収縮応力の部材表面での合成応力は、乾燥収縮応力の影響で極く表面近傍で引張応力となる。長期的には、乾燥収縮応力はその大きさおよび部材内部への進展は大きくなるので、部材全体の合成応力に大きな影響を与えると考える。

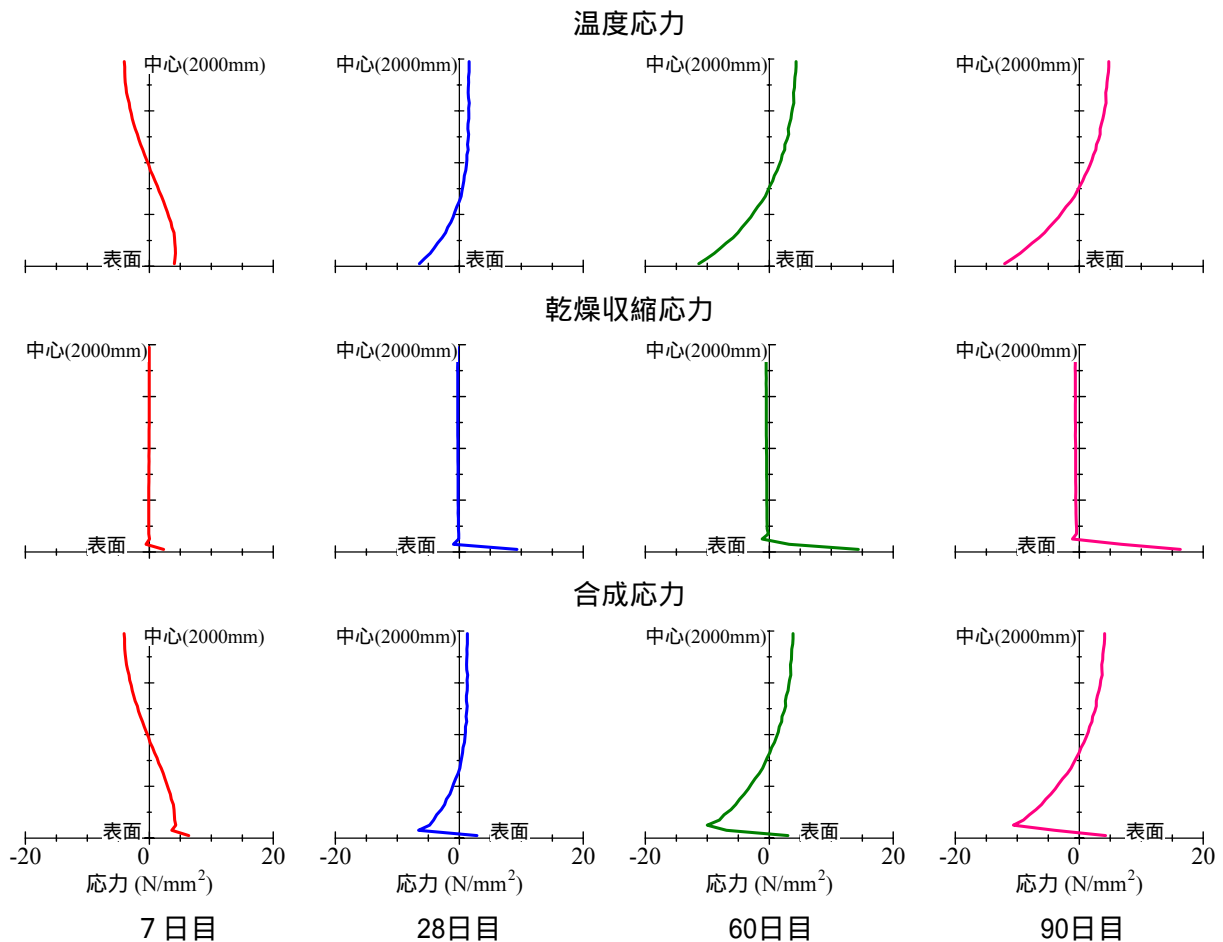


図 - 14 部材断面の応力分布

5. まとめ

本研究では、乾燥収縮によるひずみと応力の解析ならびに、乾燥収縮応力と温度応力の合成応力の挙動について明らかにした。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 各種配合のコンクリートについて、相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係が得られた。
- (2) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、 W (W/C) が増大すると大きくなる傾向を示した。特に、 W/C が 45% から 57% に変化する段階で大きく増大する傾向が認められた。
- (3) 相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係には、供試体温度の影響は明確に認められなかった。
- (4) 水和による温度上昇により、コンクリート中の水分移動（乾燥）が促進される。
- (5) 乾燥収縮応力は、少なくとも材齢90日程度までは表面から200～300mmの範囲内で大きな引張応力となる。

- (6) 温度応力と乾燥収縮応力との合成応力は、乾燥収縮応力の影響で極く表面近傍で引張応力となる。長期的には乾燥収縮応力はその大きさおよび内部への進展は増大するので、部材全体の合成応力に大きな影響を及ぼすと考えられる。

参考文献

- 1) 籠橋 忍, 秦 泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.685-690, 2001.
- 2) 堀部 謙, 伊藤佑樹, 籠橋 忍, 森本博昭: コンクリート表面からの水分蒸発に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.521-522, 2002.
- 3) 土木学会: 平成11年版 コンクリート標準示方書 設計編.