

論文 蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関する研究

齋藤 寛泰^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・阪口 裕紀^{*3}・森本 博昭^{*4}

要旨：蒸気養生を実施したプレキャストコンクリート部材(以下, PCa 部材)は, 蒸気養生前後において温度・乾燥状態により大きな体積変化を生じ, ひび割れが発生することがある。本論文では, 蒸気養生中および蒸気養生後における PCa 部材の内部温度と内部相対湿度の変化を計測して, 体積変化の状況を検討した。さらに, 内部温度と湿度の計測結果をもとに温度応力と乾燥収縮応力解析を実施し, 応力発現性状の推定を行った。その結果, 表面近傍の内部相対湿度は蒸気養生中から低下し, 脱型後からさらに大きな湿度低下が生じることにより, 乾燥収縮応力によるひび割れの発生の危険性が增大することが明らかとなった。

キーワード：プレキャストコンクリート, 蒸気養生, 内部相対湿度, 乾燥収縮応力, 温度応力

1. はじめに

プレキャストコンクリート部材(以下, PCa 部材)製造には生産効率の向上を目的として, 蒸気養生が一般的に実施されている。蒸気養生時には, コンクリートの水和反応が活性化されるため急激な温度上昇が生じる。このため, 蒸気養生を終了して脱型する際に PCa 部材内部に大きな温度勾配と湿度勾配が発生し, 表面近傍においてひび割れ発生の危険性が高くなることが報告されている¹⁾。これまでに, 蒸気養生時の PCa 部材の挙動やひび割れに関していくつかの報告がある²⁾⁴⁾。また, 蒸気養生時の注意事項として, コンクリート標準示方書施工編 2007 において, 最高温度と昇温速度および養生時間について記述がある⁵⁾。一方, 蒸気養生時の強度発現特性について, セメント協会より報告がなされている⁶⁾。しかしながら, 蒸気養生時の PCa 部材の初期応力やひび割れの性状について報告された事例は少ないのが現状である。そこで本論文では, 蒸気養生した PCa 部材のひび割れ制御手法を検討する基礎資料を得ることを目的として, ボックスカルバート部材を対象とした蒸気養生を含めた製造段階における部材内の温度と相対湿度を計測した。得られた計測結果を用

いて FEM による初期応力解析を実施し, 温度応力と乾燥収縮応力の発現性状について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用配合

表-1 に本研究で使用した示方配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³)を使用した。細骨材には川砂(表乾密度: 2.60 g/cm³)を使用した。粗骨材には川砂利(表乾密度: 2.64 g/cm³)を使用した。混和剤は高性能減水剤(ポリカルボン酸系)を使用した。

表-2 に材齢 19 日の強度試験結果を示す。

2.2 供試体の形状寸法

実験対象は, ボックスカルバート形状とした。図-1 に供試体の正面図, 右側面図を示す。また, 図-2 に供試体の正面配筋図を示す。図より, 鉄筋は D10,13,16 を使用した。かぶり厚は, 30 mm とした。コンクリート供試体内部の温度分布と相対湿度分布を計測するために, 熱電対と湿度センサーを配置した。図-1 中の黒丸位置の断面方向において計測を行った。図より, センサー類の配置箇所は右側壁部の上端部から 1250 mm とし, 側壁長手方向端部から 750 mm とした。図-3 に供試体断面内におけるセン

表-1 示方配合

スランプ	水セメント比	細骨材率	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
cm	%	%	kg/m ³				
19	44	43	170	386	760	1007	3.088

表-2 強度試験結果(材齢 19 日)

圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
46.5	31.7	4.8

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学生 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教 博士(工学) (正会員)

*3 九栄コンクリート工業株式会社 技術開発部 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

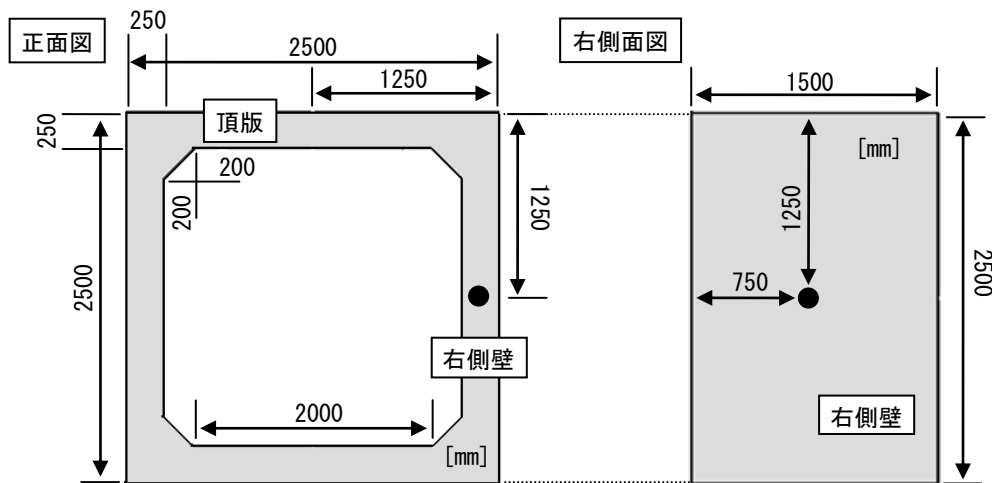


図-1 供試体概要

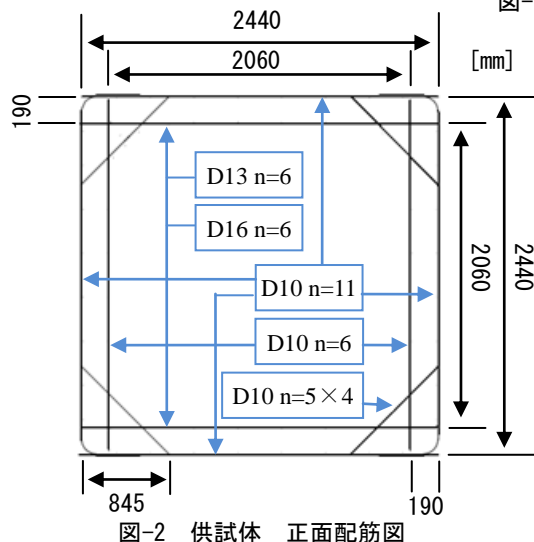


図-2 供試体 正面配筋図

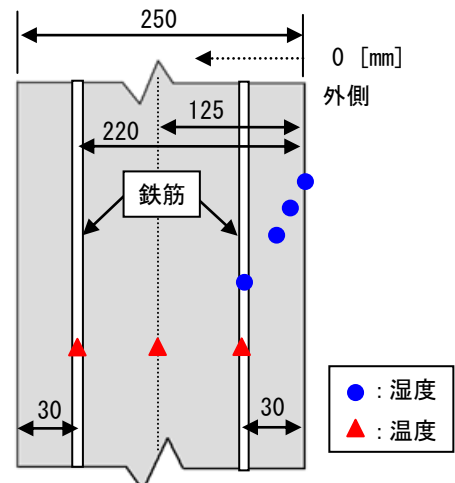


図-3 計測断面図

サーの配置状況を示す。熱電対はT型熱電対を使用した。図より、熱電対の設置位置は外側表面から30,125,220mmとした。湿度センサー(詳細は2.3で後述)の設置位置は、外側表面から0.5,10,30mmとした。

2.3 セラミック湿度センサー

本研究ではコンクリート内部の相対湿度を計測するために、セラミック湿度センサー(N社製)を使用した。この湿度センサーは、本研究グループにおいてこれまでにコンクリート内部の湿度計測に使用しているものである⁷⁻⁸⁾。写真-1にセラミック湿度センサーの概要を示す。セラミック湿度センサーは多孔質性セラミックに水分が吸着することで、電気抵抗が変化する原理を利用し相対湿度変化を測定するものである⁹⁾。セラミック湿度センサーの測定精度は30~80%の範囲で±3%であり、その他で±5%である。使用する湿度センサーの高湿度領域における計測状況を確認するために、環境試験室内で校正試験を実施した。使用する湿度センサーを温度20±2℃の環境試験室内に配置し、相対湿度70%~95%の範囲で変化させセンサーの計測値と環境試験室計測盤の指示値から校正関数を求めた。図-4に校正試験結果を示す。その結果、セラミック湿度センサーと指示値との

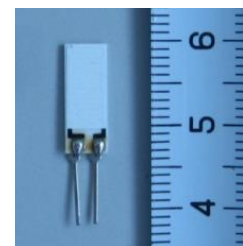


写真-1 セラミック湿度センサー

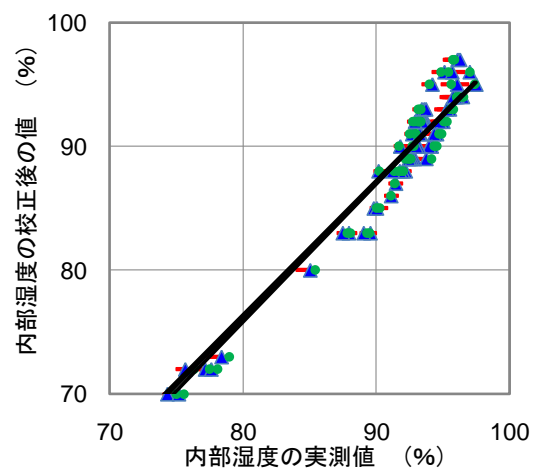


図-4 校正試験結果

関係は1次関数で精度よく近似できることがわかり、この近似関数をもとに計測値の補正を行った。なお、95%以上と70%以下の湿度については、校正関数を外挿して推定した。相対湿度の補正では温度変化も重要な要因となるが、本論文では温度20℃における校正関数を用いた。

2.4 供試体の作製と蒸気養生方法

使用した供試体は、PCa工場内で作製し蒸気養生を行い脱型後、所定の位置で計測を行った。供試体は、鉄筋籠にセンサー類を設置したものを作製し、所定の型枠に配置した。鉄筋籠を配置した型枠に、コンクリートを打設し蒸気養生室に移動した。蒸気養生室での供試体の設置状況を写真-2に示す。写真に示すように、供試体は型枠を立てて打設された。以降、カルバートの内側空間を型枠内側、カルバートの外側を型枠外側とする。図-5に蒸気養生の温度パターンを示す。打設から脱型までに必要な積算温度は250℃・hrを目標とした。図より、外気温を10℃として前養生時間を3時間とした。その後、10℃から40℃まで3hrで上昇させ、40℃を2hr保持した。その後、自然冷却を行い脱型した。脱型後、ストックヤードに移動し自然養生を行いながら、28日間にわたり温度と相対湿度の計測を行った。



写真-2 供試体の作製状況

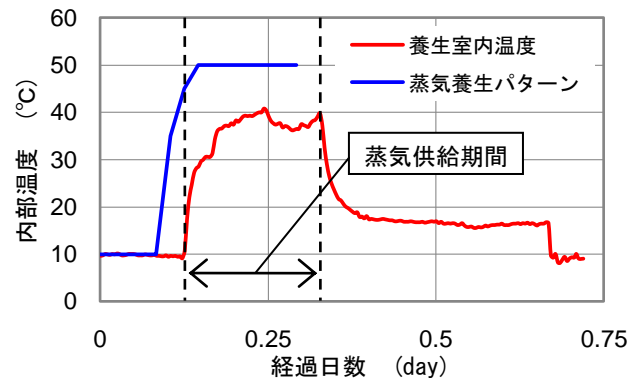


図-5 蒸気養生パターン

が47℃に達した時、30mm位置の温度は40℃程度あり、約7℃程の温度差が生じている。220mm位置の温度は45℃であり、30mm(40℃)よりも高くなっている。これは、型枠内側の空間に蒸気による熱が籠ったためである。

3. 実験結果と考察

3.1 内部温度の計測結果

図-6に材齢7日までの断面内の温度の経時変化を示す。図より、蒸気養生によって養生室内の温度が上昇するに伴い、コンクリート内部の温度が上昇していることがわかる。これは、蒸気加熱に加え水和反応による発熱によるものと考えられ、供試体断面中心の最高温度は材齢0.6日で46℃に達した。養生室への蒸気の供給は、材齢0.4日で終了しているが、水和反応が活発に起こっているため供試体中心の温度は継続して上昇している。中心温度

3.2 内部相対湿度の計測結果

次に、図-7に材齢7日までの供試体内部の湿度の経時変化を示す。図より、蒸気が供給されている期間は雰囲気湿度が100%となっている。蒸気の供給が止まったあとも湿度は100%を保持したが、材齢0.3日以降に湿度は低下し始め、脱型した時点で61%まで低下した。また、天候の変化によって湿度は増減していることが分かる。供試体表面の湿度は、蒸気養生中はほぼ100%を示しているが、供試体を脱型した0.8日以降に急激な湿度の低下がみられ、材齢1.5日で70%まで低下している。次に、供試体表面から5mmと10mmの位置の湿度は、蒸

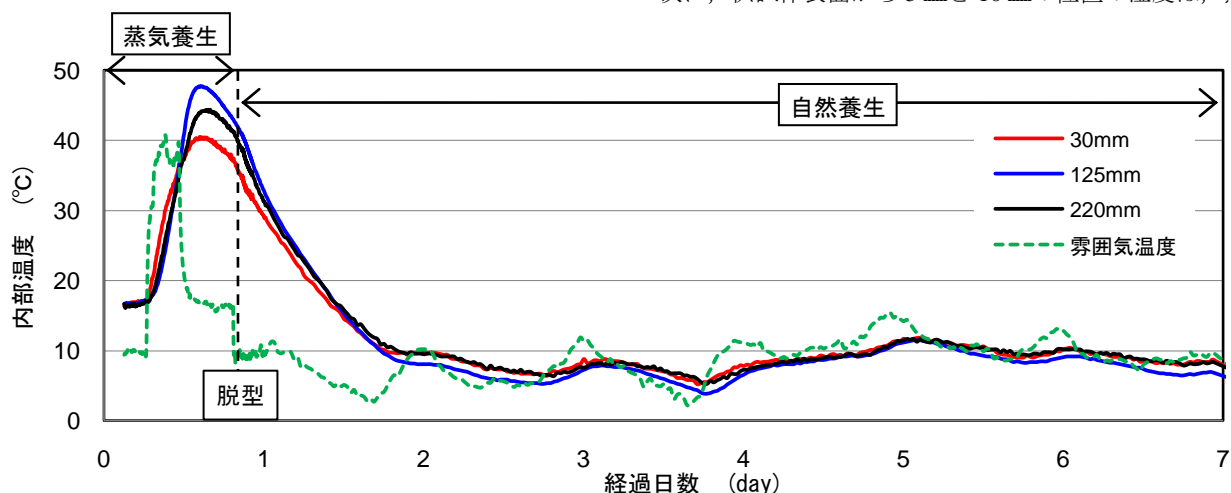


図-6 断面内の内部温度の経時変化

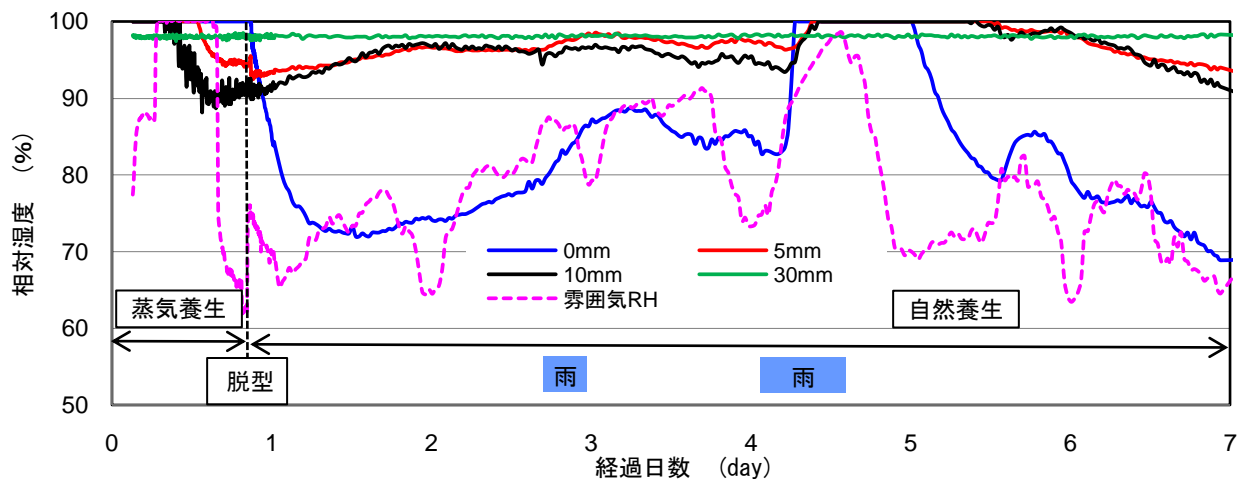


図-7 断面内の相対湿度の経時変化

気養生中である材齢 0.6 日でそれぞれ 96%と 89%まで低下している。これは、温度の上昇により飽和蒸気圧が急増するため相対湿度が低下した可能性がある。さらに、脱型後 5mm と 10mm 位置で湿度の上昇がみられるが、これも雰囲気温度の低下により水分の逸散は生じているにも関わらず飽和蒸気圧の減少により相対湿度が増大したとも考えられる。供試体表面から 30mm 位置の相対湿度は、温度変化が比較的緩やかで、しかも水分の逸散が小さいため 95%以上を保持している。いずれにしても、図-6, 7 より蒸気養生直後には、急激な温度低下と湿度の低下によって、表面部に大きな収縮応力が生じ、ひび割れの危険性が高くなることが確認できた。

4. 蒸気養生時における PCa 部材の初期応力解析

4.1 解析概要

解析には、初期応力解析ソフト JCMAC3 を使用した。本解析ソフトは、従来の温度応力解析に加えて、コンクリートの湿気移動解析より乾燥収縮応力解析を実施できるという特徴がある。図-8 に解析対象であるボックスカルバートの 1/4 モデルを示す。また、解析に用いた物性値を表-3 に示す。ここで、断熱温度上昇特性、ヤング係数、圧縮強度、引張強度に用いた式を、式(1)～(4)に示す。なお、断熱温度上昇特性については、蒸気養生を考慮して上昇速度に関する係数の値を推奨値の約 70%増とした。

$$Q(t) = 60.657(1 - e^{-2.15t}) \quad (1)$$

$$E(t) = \varphi(t) \times 6.3 \times 10^3 \times f'c(t)^{0.45} \quad (2)$$

$$fc(t) = ((t - 0.37)/(3.219 + 0.883(t - 0.37))) \times 49.36 \quad (3)$$

$$ft(t) = 0.13 \times f'c(t)^{0.85} \quad (4)$$

ここに、 t : 有効材齢(日)、 $Q(t)$: 断熱温度上昇特性 (°C)、 $E(t)$: ヤング係数 (MPa)、 $\varphi(t)$: クリープに関する補正係数: 材齢 3 日までは $\varphi = 0.73$ 、材齢 5 日以降は $\varphi = 1.0$

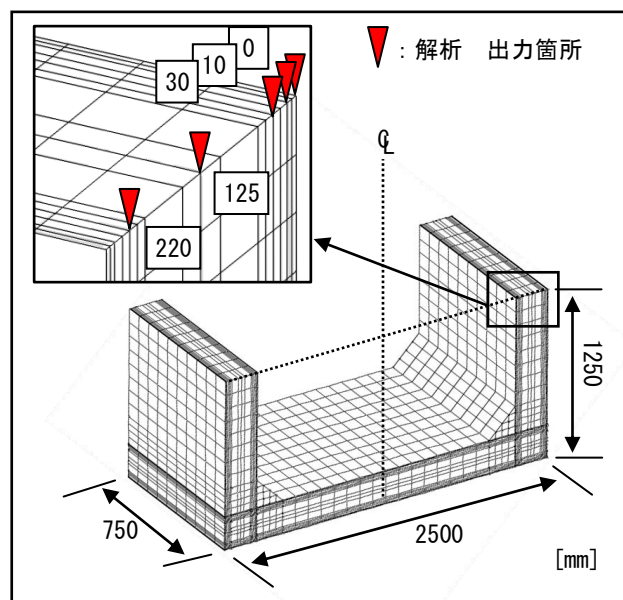


図-8 ボックスカルバート 解析(1/4)モデル

表-3 コンクリートの物性値

熱伝導率	W/m°C	2.7
密度	kg/m³	2300
比熱	kJ/kg°C	1.15
断熱温度上昇特性	°C	式(1)
初期温度	°C	17
ポアソン比	-	0.2
ヤング係数	MPa	式(2)
圧縮強度	MPa	式(3)
引張強度	MPa	式(4)
クリープ構成則	-	有効弾性係数法(JSCE)
設計基準強度	MPa	40

表-4 鉄筋の物性値

熱膨張係数	$\mu / ^\circ\text{C}$	10
ヤング係数	MPa	2.1×10^5
降伏応力	MPa	345

(材齢 3 日から 5 日までは直線補間), $f_c(t)$: 圧縮強度(MPa), $f_t(t)$: 引張強度(MPa)

また, 熱伝達面における熱伝達係数は, 打設後から蒸気養生終了までは供試体の型枠内側は断熱状態とし, 外側は $8(W/m^2\cdot^\circ C)$ に設定した。これは, 蒸気養生中にボックスカルバートの型枠内側では蒸気による熱が籠ることを考慮したためである。そして, 蒸気養生終了後から脱型完了までは内側, 外側ともに $8(W/m^2\cdot^\circ C)$ とし, 脱型後は $14(W/m^2\cdot^\circ C)$ とした。また, ボックスカルバート内部の鉄筋は, トラス要素として考慮した。表-4 に鉄筋の物性値を示す。

4.2 実験結果と解析結果の比較

(1) コンクリート内部の温度履歴

図-9-a) に, 材齢 2 日までのコンクリート内部温度について, 外側から 30,125,220mm の実験値と解析値の比較を示す。図より, 30mm の位置の最高温度は解析値が $45^\circ C$ に対して, 実測値は $40^\circ C$ 程度ある。中心部の最高温度は解析値も実測値も $46^\circ C$ 程度ある。30mm と 220mm の位置の最高温度は解析値が $45^\circ C$ に対して, 実測値は $40^\circ C$ と $45^\circ C$ 程度である。解析値は, 実測値よりも早く温度が上昇し始めている。これは, 解析で入力した断熱温度上昇式の影響と考えられる。蒸気養生時における適正な断熱温度上昇特性の評価については今後の検討課題としたい。

(2) コンクリート内部の相対湿度

図-9-b) に, 材齢 2 日までのコンクリート内部の相対湿度変化について, 外側から 0,10,30mm の実験値と解析値の比較を示す。図より, 供試体表面(0mm)の湿度の実測値は, 材齢 0.8 日の脱型直後から急激に低下し始め, 材齢 1 日で 72%まで低下した。解析値も同様に低下し, 1.5 日で 77%まで低下している。その後は停滞しているが, これは供試体をストックヤードに移動した際, 天候が雨だったため雰囲気相対湿度が上昇したことによるものと考えられる。次に 10mm の位置の実測値は, 蒸気養生終了後から 90%程度まで低下しているのに対し, 解析値は材齢 1 日まで低下がみられない。これについては, 前述のように実測値は温度による飽和蒸気圧の変化の影響が現れたとも考えられるが, 実験と解析の両面からの更なる検討が必要である。30mm の位置の湿度は, 実測値と解析値ともに 98%と 100%で高湿度を保持していることがわかる。以上より, 表面から 0mm と 30mm の位置で非常に大きな湿度勾配が生じることが, 実験および解析により明らかとなった。

(3) 各応力の経時変化

図-10-a) に, 供試体表面から 0,30,125,220mm の位置における温度応力の解析結果を示す。中心部は材齢 0.8 日

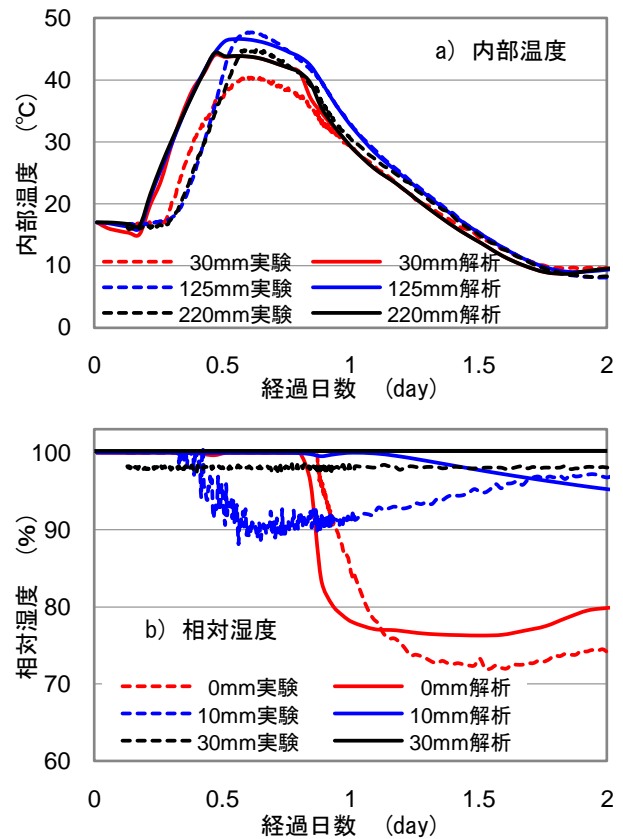


図-9 実験結果と解析結果の比較

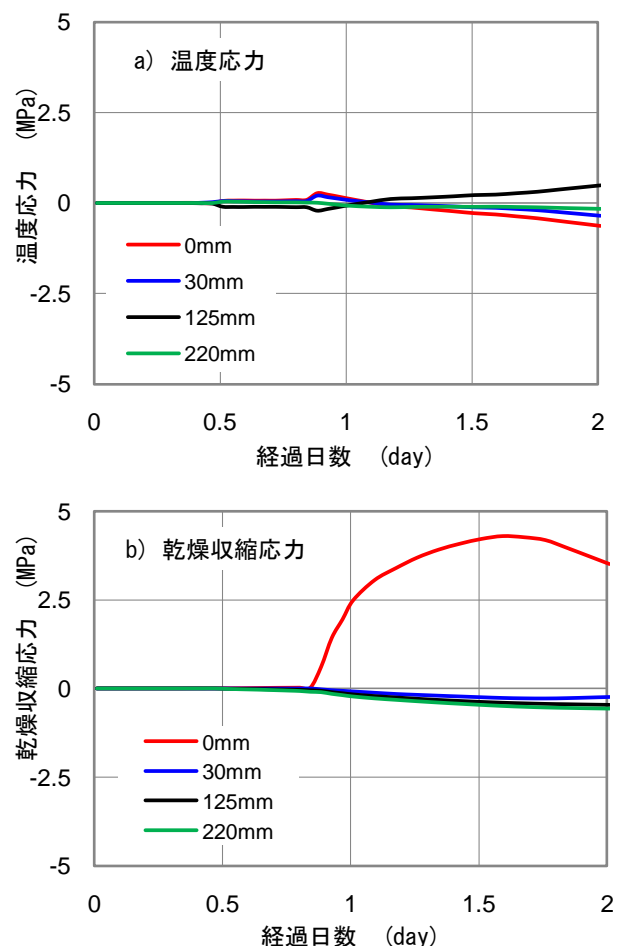


図-10 温度応力と乾燥収縮応力の解析値

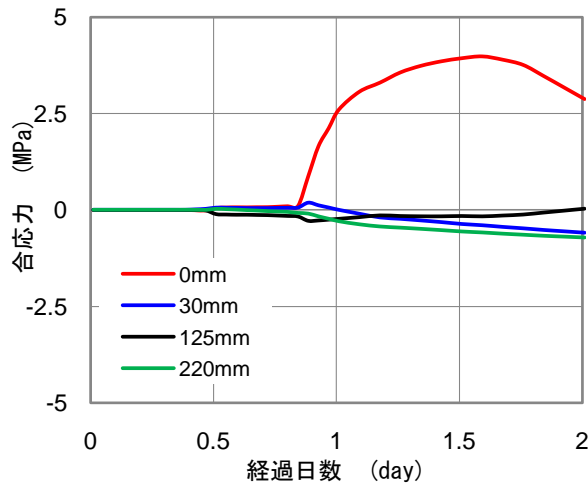


図-11 合応力の解析値

で圧縮応力が 0.2MPa 生じているが材齢 1 日で反転し、材齢 2 日で引張応力が 0.5MPa 生じている。0mm では、材齢 0.8 日で引張応力が 0.26MPa 生じているが、材齢 1 日で反転し、材齢 2 日で圧縮応力が 0.6MPa 生じている。しかし、解析値での温度応力はさほど大きくはない。

次に、図-10-b)に供試体表面から 0,30,125,220mm の位置における乾燥収縮応力の解析結果を示す。脱型前ほどの位置も応力は発現していないが、材齢 1.6 日に 0mm 位置において、最大で 4.3MPa の引張応力が急激に生じていることが分かる。内部は 30,125,220mm とともに、圧縮応力が約 0.5MPa 生じている。

図-11 に温度応力と乾燥収縮応力との合応力の解析結果を示す。図より、表面部 0mm において材齢 1.6 日で引張応力が 4.0MPa 生じているが、内部では大きな応力は生じていない。以上、解析的な検討から PCa 部材の表面には脱型直後から乾燥に伴う湿度勾配が生じて、大きな引張応力が発生することが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では蒸気養生を施した PCa 部材の温度と湿度を計測するとともに、一連の初期応力解析を実施した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 蒸気養生中の部材の温度について、実験値と解析値は良く対応した。ただし、断熱温度上昇特性については、温度上昇速度係数を割り増すとともに、熱伝達率については状況に応じて適切に設定する必要があることが明らかとなった。
- (2) 表面付近の相対湿度の変化について、実験値と解析値は比較的良い対応を示すことが確認された。
- (3) 表面から断面方向に 10mm 位置までの相対湿度は、雰囲気温度ならびに相対湿度に比較的敏感に影響

されることが明らかとなった。表面から 30mm 位置では、高い相対湿度を維持することが確認できた。

- (4) 応力解析の結果より、乾燥収縮応力の引張側の最大値は 4.0MPa 程度となり、大きな引張応力が作用している結果となった。一方、温度応力の引張側の最大値は 0.5MPa 程度であった。以上より、脱型直後にコンクリート表面近傍で乾燥収縮に伴う大きな引張応力が急激に生じ、ひび割れの危険性が増大することが明らかとなった。

今後は、様々な環境条件や部材形状についてさらに相対湿度、温度、ひずみの実測と解析を進める予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、丸栄コンクリート工業株式会社今尾工場に多大なご協力を頂いた。また、解析の実施にあたり、岐阜大学大学院 Han Ha Shen 氏に多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 遠藤友紀雄，田代藤雄，森本博昭，小柳治：蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について，コンクリート工学年次論文報告集，pp.1305-1310, Vol. 18. No.1, 1996
- 2) 阿波稔，大塚浩司，諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひびわれ，コンクリート工学年次論文報告集，pp.567-572, 1310, Vol. 15. No.1, 1993
- 3) 武井一夫：蒸気養生中における薄肉部材の乾燥水量に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，pp.667-672, Vol.19.No.1, 1997
- 4) 小田部裕一，寺野宜成，鈴木康範：膨張コンクリートの蒸気養生製品への適用性，コンクリート工学年次論文報告集，pp.145-150, Vol.20, No.2, 1998
- 5) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書，施工編 2007
- 6) セメント協会：蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告 F-53，2006
- 7) 小澤 満津雄，糟谷 守，森本 博昭：コンクリートのクリープと内部水分移動に関する研究，第 61 回セメント技術大会，pp.232-233, 2007
- 8) 小澤 満津雄，内田 慎哉，王 若平，鎌田 敏郎，森本 博昭：AE 法による高強度コンクリートの爆裂発生過程の評価：土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 1, pp.16-29, 2009
- 9) 南任靖雄：センサと基礎技術，工学図書，1994.