

論文 温度応力の抑制対策に対する材料評価方法に関する一考察

小田部裕一*¹・鈴木康範*²・稲葉洋平*³・溝淵利明*⁴

要旨: 温度応力や収縮応力によるひび割れはコンクリート構造物の初期欠陥となるため、これまで主に、使用材料、施工方法等によって、その抑制対策が講じられてきた。本研究では、温度応力によるひび割れ対策として、低熱ポルトランドセメントやそれと膨張材または収縮低減剤を組合せた効果について、一軸拘束試験装置を用いて評価した。さらに、試験結果を基に温度応力解析に用いる見かけのヤング係数の算定を行った。

キーワード: 低熱ポルトランドセメント, 膨張材, 収縮低減剤, 温度応力, 一軸拘束試験装置

1. はじめに


コンクリート構造物のライフサイクルを考えていく上で、構造物の初期状態を把握することは重要である。塩害や中性化による対策として鉄筋のかぶり部分を十分に設けた場合でも、温度ひび割れ等が生じることによって、健全部に比べ劣化進行が促進されると予想されるため、初期ひび割れ発生状況を定量的に把握することは、コンクリート構造物の耐久性を評価する上で重要な課題である。特に初期欠陥となる温度ひび割れや収縮ひび割れに対しては、事前に十分検討する必要がある。近年、温度応力に関しては、解析技術の飛躍的な向上により、以前より増して精度の高い解析が行えるようになってきている。しかしながら、温度応力は実構造物における計測データが少ないこと、若材齢時のヤング係数、引張強度およびクリープ係数等の特性値が明確でないことから、現段階では実構造物に即した解析を行うことが難しい。また、膨張材等の材料による温度応力やひび割れ抑制効果を解析で定量的に把握することが難しいのが現状である。そこで、温度ひび割れ低減対策の評価を目的として、「Temperature-Stress Testing Machine (T.S.T.M)」^{1),2),3)}等の温度応力

をシミュレートした一軸拘束試験装置（以下、温度応力シミュレーション装置と称す）を用いた材料評価手法が重要であると考えられる。

本研究は、温度応力や収縮による体積変化に起因するひび割れ抑制について、低熱ポルトランドセメント（以下、低熱セメントと称す）に膨張材または収縮低減剤を加えた場合のひび割れ抑制効果について材料の観点から定量的に評価したものである。さらに、一連の試験結果を基に温度応力解析に用いる見かけのヤング係数の算定を試行した結果について報告するものである。

2. 試験概要

2.1 試験装置の概要

温度応力シミュレーション装置は、セメントの水和発熱によるコンクリートの発熱過程を忠実に再現できるものである。また、発熱過程における熱膨張および温度降下における収縮を任意の拘束条件下で制御できるように（温度変化以外の膨張、収縮成分も含む）、アクチュエータによるひずみ、荷重制御機構を設けている。温度応力シミュレーション装置に用いる供試体は、図 - 1 に示すように任意の拘束度を与える供

* 1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 (正会員)

* 2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所関東技術センター所長 工博(正会員)

* 3 鹿島建設(株)技術研究所建築技術研究部 工修 (正会員)

* 4 法政大学 工学部 土木工学科 工博 (正会員)

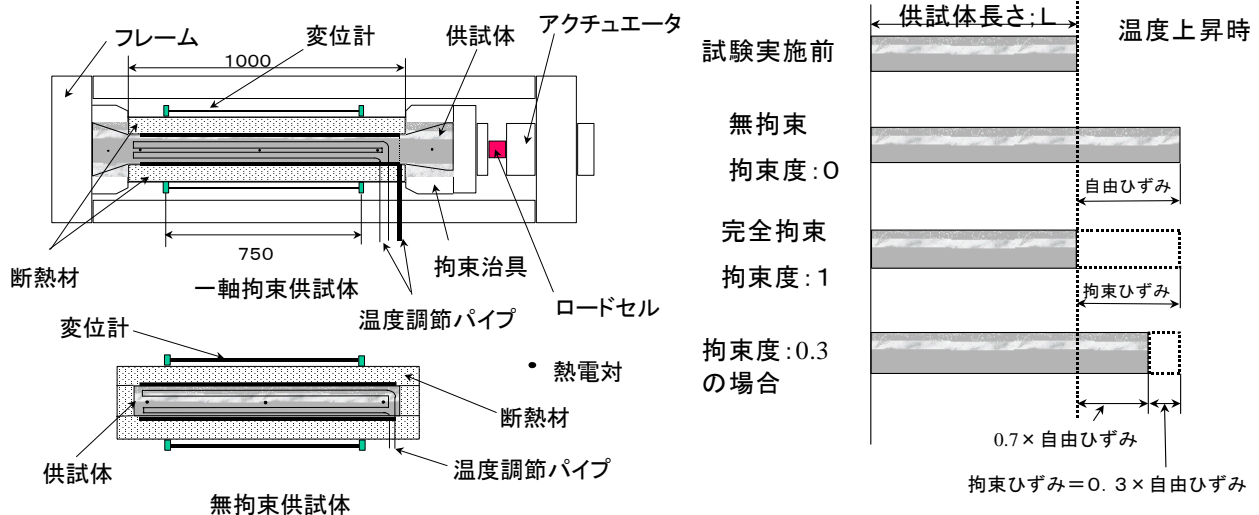


図 - 1 温度応力シミュレーション装置概要

試体（以下，拘束供試体と称す）および無拘束状態の供試体（以下，無拘束供試体と称す）で構成されている。拘束供試体は，無拘束供試体の温度，ひずみの測定値を基に制御される。

2.2 試験方法

本研究では，表 - 1 に示した検討ケースについて試験を行った。

表 - 1 検討ケース

ケース No. (記号)	検討項目	セメント種類	膨張材量 (kg/m ³)	収縮低減剤量 (B×%)
1 (L)	低熱セメントの効果	低熱	0	0
2 (L+Ex)	膨張材の効果		15	0
3 (L+SRA)	収縮低減剤の効果		0	0.5
4 (BB)	比較対象	高炉 B 種	0	0

温度応力シミュレーション装置による試験では，事前に断熱温度上昇特性を求め，対象構造物（厚さ 2.0m の底版上の高さ 6.0m，幅 1.5m の側壁，外気温は東京都の 4 月～5 月末の日平均気温を採用）の温度解析を行い，その解析結果を温度入力値とした。また，装置による応力測定その他，温度入力値と同様の温度履歴を受けた場合の強度特性も把握した。

温度応力シミュレーション装置の試験開始は，凝結始発時間とした。コンクリートの発熱は始発時間前からであるが，ひずみ測定用に埋設した標準棒がコンクリートと同調するためには，コンクリートがある程度自立する必要があるため，よって，本検討では試験開始を凝結始発時間とした。また，試験期間は，ひび割れが生じた場合はその時点までとし，ひび割れが生じない場合は 2 週間以降に，拘束供試体を強制的に 2 / 日で冷却し，ひび割れを発生させるようにした。

2.3 材料およびコンクリート配合

試験に用いた材料およびコンクリートの配合は，表 - 2，表 - 3 に示す。

表 - 2 使用材料

セメント	低熱セメント (密度 3.24g/cm ³) 高炉セメント B 種 (密度 3.05g/cm ³)
細骨材	千葉県君津産山砂 (密度 2.57g/cm ³)，高知県鳥形山産石灰石砕砂 (密度 2.68g/cm ³) (容積比 6:4 で使用)
粗骨材	高知県鳥形山産石灰石砕石 (密度 2.7g/cm ³)
膨張材	加ソウムサルホレート系
収縮低減剤	ポリオキシル系
減水剤	リグニルスルホン酸系

表 - 3 コンクリート配合

No.	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)						
		W	C	E	S	G	SRA	Ad
1	50	150	300	0	818	1069	0	0.75
2			285	15	818	1069	0	0.75
3			300	0	818	1069	1.5	0.75
4			300	0	810	1069	0	0.75

C : セメント, E : 膨張材, S : 細骨材

G : 粗骨材, SRA : 収縮低減剤, Ad : 減水剤

表 - 3 における単位膨張材量は, 収縮補償用コンクリートとして, 標準養生における材齢 7 日の一軸拘束膨張量 (JIS A 6202 付属書 2 の B 法による) が 150 ~ 250 μ になるよう定めた。収縮低減剤は, 膨張材と併用した今後の検討を勘案し, 単位膨張材量 15kg/m³ とした場合に, 上記膨張量範囲になる量を別途試験で定めた。

2.4 試験項目

試験項目は, 温度応力シミュレーション試験の他, フレッシュ性状確認のためのスランプ, 空気量試験, 凝結試験である。さらに, 標準養生と温度履歴を与えた封緘養生で, 圧縮強度, 割裂引張強度, ヤング係数を測定した。

3. 試験結果

3.1 強度特性

強度特性値は温度応力解析に用いる重要なデータである。しかし, これらのデータは標準養生供試体によるものを用いることが多い。圧縮強度や割裂引張強度の関係は, 材料 乾燥状態, 材齢および温度の影響によって変化すると指摘があり⁴⁾, 温度応力解析に用いるデータとして, 材料 (膨張材や収縮低減剤の影響) や温度履歴を受けた場合の影響を適切に評価する必要がある。よって, ここでは各ケース間の標準養生供試体と温度履歴供試体それぞれの圧縮強度と引張強度および圧縮強度とヤング係数の関係を式(1), (2)の近似式を用いて比較した。

$$f_t(t) = a \cdot f_c(t)^b \quad (1)$$

$$E(t) = c \cdot f_c(t)^d \quad (2)$$

ここに, $f_c(t)$ は材齢 t 日の圧縮強度, $f_t(t)$ は材

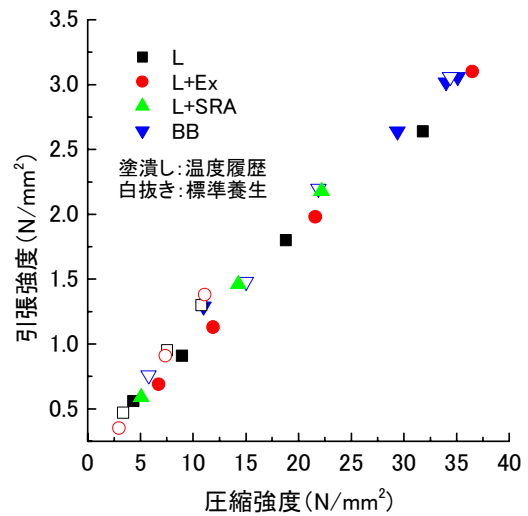


図 - 2 圧縮強度と引張強度の関係

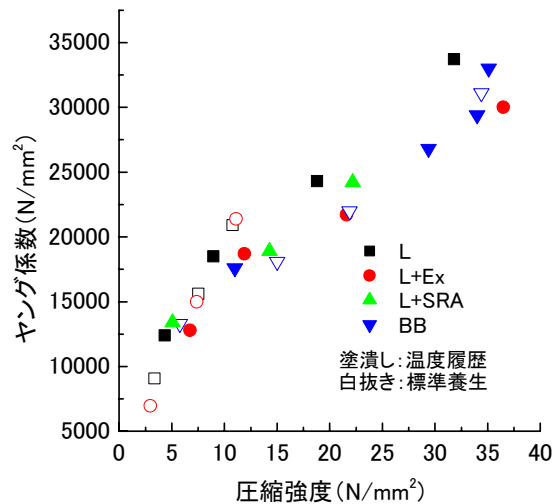


図 - 3 圧縮強度とヤング係数の関係

齢 t 日の引張強度, $E(t)$ は材齢 t 日のヤング係数, a, b, c, d は定数である。ただし, $b = 0.8$, $d = 0.5$ (一般的に適合性が得られた数値) とした。

圧縮強度と引張強度の関係を図 - 2 に示す。上記関係では, 材料や養生条件の相違によらず, 何れも同様な関係にあることが分かる。近似式の定数で比較した場合, 何れも a の値は 0.17 ~ 0.19 の範囲にあり, 今回の結果において圧縮強度と引張強度の関係は, 材料や養生条件の影響が少ないといえる。

圧縮強度とヤング係数の関係を図 - 3 に示す。図 - 3 より、圧縮強度と引張強度の関係とは異なり、各ケースによる相違が認められる。各ケースにおける近似式の定数 c の値を表 - 4 に示す。

表 - 4 式(2)の c の値

ケース	温度履歴	標準養生
L	5893	5905
L+Ex	4950	---
L+SRA	5207	---
BB	5211	5026

表 - 4 より、養生条件の影響は比較的少ないものの、材料の影響が大きい結果になった。特に、低熱セメントと低熱セメントに膨張材を加えたケースとの差異が大きくなっており、膨張材を混和することによって、同一圧縮強度に対するヤング係数が小さくなっている。ヤング係数は、応力算定に重要なパラメータであり、温度応力解析の入力値として、的確な条件設定が必要である。なお、膨張材の混和によって、圧縮強度が 10N/mm^2 以上に相当するヤング係数が無混和の場合に比べて小さくなることから、引張応力の緩和も期待できる。

3.2 応力測定結果

温度応力シミュレーション装置による応力測定結果を図 - 4、拘束ひずみと応力の関係を図 - 5 に示す。

図 - 4 から、各ケースのひび割れ発生時期は、BB の材齢 4 日に対して、低熱セメントをベースとしたケースでは、試験期間の 2 週間でひび割れの発生は認められなかった。そこで、拘束供試体を強制的に冷却したところ（試験期間後 4 日間）、L にはひび割れが確認された。応力の発生状況は、L+Ex の場合、L に比べて約 0.4N/mm^2 大きな圧縮応力が発生しており、圧縮応力の増分がそのまま引張応力の低減に寄与している。また、L+SRA の場合、圧縮応力は L と同等であるが、圧縮応力減少区間、引張応力増加区間における応力の変化率は L に比べ

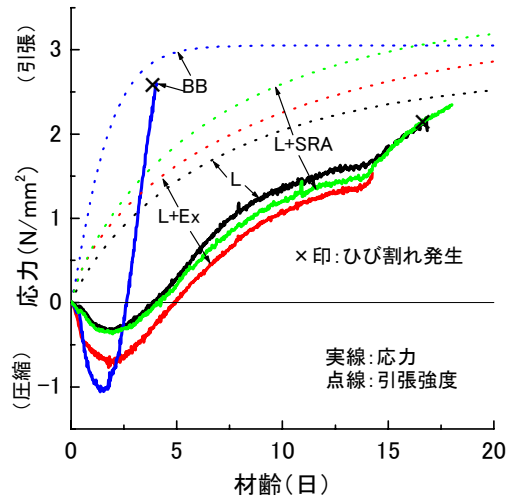


図 - 4 応力測定結果

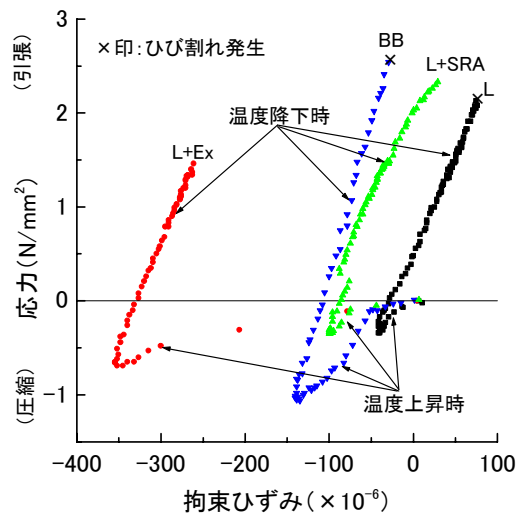


図 - 5 応力とひずみの関係

て小さくなっており、材齢 14 日時点での引張応力は L に比べて約 0.15N/mm^2 低減された。なお、材齢 14 日のひび割れ指数（引張強度 / 引張応力）を比較した場合 L の 1.41 に対して、L+Ex が 1.83、L+SRA が 1.93 となった。図 - 4 中に示した点線は引張強度の変化を示しており、ひび割れ発生応力は引張強度より何れも 1 割程度小さな値となった。この低減割合は著者の一人が提案するものとほぼ一致しており⁵⁾、温度応力解析における引張強度の低減率として必要であると考えられる。

図 - 5 から、温度降下時の傾きをそれぞれ比較すると、低熱セメントをベースとしたケース

は、何れも同等であったが、BB では若干大きくなった。また、引張応力領域でのひずみ量を引張限界ひずみとした場合、L の 108×10^{-6} に対して、BB は 80×10^{-6} であった。L+SRA では引張応力領域でのひずみ量が L を上回る 120×10^{-6} に達してもひび割れの発生は認められなかった。したがって、温度応力抑制に対する材料評価の観点から、高炉セメント B 種の使用に比べて、低熱セメントの使用は有効であるといえる。また、低熱セメントをベースとし膨張材または収縮低減剤を組み合わせることによって、温度応力抑制、ひび割れ抑制効果が更に高まることが確認できた。

3.3 クリープを考慮した有効ヤング係数の算定

温度応力解析においては、強度、線膨張係数、ヤング係数、クリープの特性値が必要である。特に、クリープの評価については、一般にコンクリートを弾性体と仮定した有効ヤング係数によりクリープ現象を評価する方法が用いられ、なかでも、クリープの評価をヤング係数に対し材齢依存型の補正係数を乗じて表現している⁶⁾。

本研究では、まず、実験的に得られた力学的特性値や温度応力シミュレーション装置の無拘束供試体から得られた線膨張係数を用いた応力解析値と応力測定値が合致する解析に用いる上での見かけのヤング係数を同定した。本来、この同定には線膨張係数の時系列的变化を的確に捉え、その数値を入力することが望ましいが、今回の検討では、図 - 6 に示した温度上昇時と降下時における温度とひずみの関係から求めた線膨張係数それぞれの平均値を与えた場合について見かけのヤング係数を同定した。ただし、L+Ex は、膨張材の膨張ひずみによって時系列的に線膨張係数が大きく異なるため、線膨張係数を一般的な値である 10×10^{-6} / とした。

図 - 7 に示すように、応力の測定値と解析値はほぼ一致する結果が得られた。次に、見かけのヤング係数と実測のヤング係数の比較を図 - 8 に示す。BB は全域において見かけのヤ

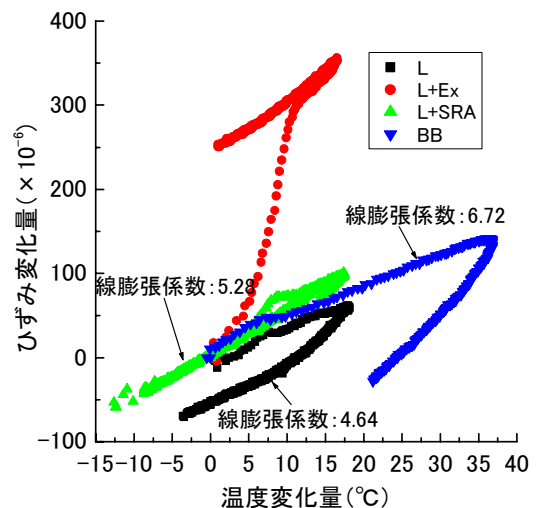


図-6 温度とひずみの関係

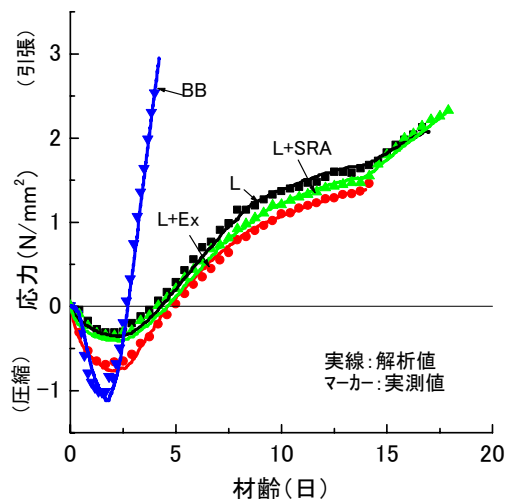


図-7 応力解析結果

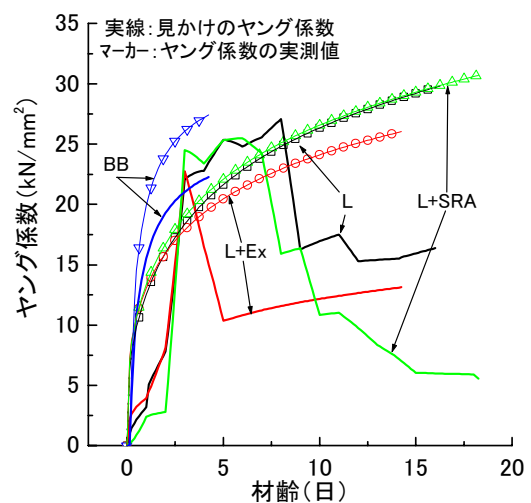


図-8 ヤング係数の比較

グ係数が実測のヤング係数を下回る結果となっ

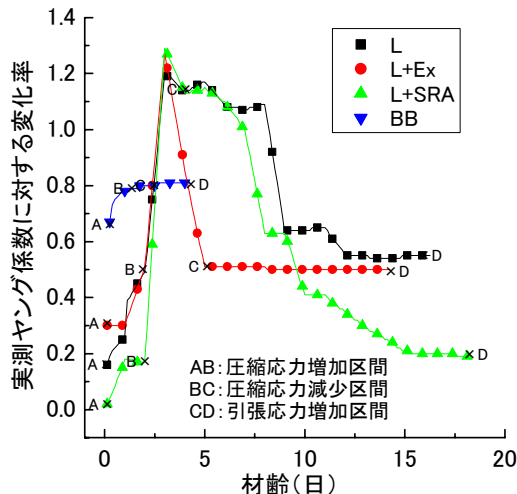


図-9 ヤング係数の変化率

た。それに対して、LとL+SRAは、圧縮応力減少区間から引張応力が増加し始める区間において見かけのヤング係数が実測値を上回っている。また、L+Exは、圧縮応力減少区間で見かけのヤング係数が実測値を上回った後、急激に減少している。実測のヤング係数に対する見かけのヤング係数の変化率を比較すると、図-9に示すように低熱セメントを用いた場合、前述の区間において変化率が1.1~1.3にまで変化するが、引張応力が卓越する区間では、0.5程度となる。L+SRAはその数値が徐々に減少し、0.2まで変化している。このように、低熱セメントを用いた場合、解析上の見かけのヤング係数が、それと組合せる材料によって特徴的な変化を示した。さらには、圧縮応力発生時における膨張材による膨張成分を線膨張係数にうまく反映させることによって、膨張材や収縮低減剤の影響がより明確なものになると考えられる。

4. まとめ

- (1) 今回の検討範囲において、圧縮強度と引張強度の関係には、材料や養生条件の影響が少ないことが判明した。ただし、圧縮強度とヤング係数の関係は、結合材の影響が大きいことが明らかになった。
- (2) 温度応力、ひび割れ抑制に対し、低熱セメ

ントの使用は効果的であった。さらに、低熱セメントに膨張材または収縮低減剤を組合せることによって効果が高いといえる。

- (3) 低熱セメントを用いた場合、解析上用いる見かけのヤング係数は、高炉セメントB種に比べて、特徴的な変化を示した。特に引張応力が卓越する時期では、実測値に対して見かけのヤング係数が大きく減少する結果となった。

参考文献

- 1) Breitenbucher R. and Mangold M. : Minimization of Thermal Cracking in Concrete Members at Early Ages , Proceeding of the International RILEM Symposium , pp.205 ~ 212 , Oct. 1994
- 2) Schoppel K., Plannerer M. and Springenschmid R. : Determination of Restraint Stresses and of Material Properties during Hydration of Concrete with the Temperature-stress Testing Machine , Proceeding of the International RILEM Symposium , pp.153 ~ 160 , Oct. 1994
- 3) Schrage I. and Summer Th. : Factors Influencing Early Cracking of high strength concrete , Proceeding of the International RILEM Symposium , pp.237 ~ 244 , Oct. 1994
- 4) コンクリート標準示方書改訂小委員会：最新のマスコンクリート技術，コンクリート技術シリーズ No.14 ,土木学会 ,pp.8 ~ 10 , 1996.11
- 5) 溝淵利明，横関康祐，信田佳延：一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討，コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集，pp.61 ~ 68 , 1998
- 6) 平成11年版コンクリート標準示方書(施工編)耐久性照査型，土木学会，pp.35 , 1999