

論文 施工時における膨張コンクリートの膨張性試験方法の提案

閑田徹志^{*1}・百瀬晴基^{*2}・保利彰宏^{*3}

要旨：膨張コンクリートの施工における品質管理に用いることを目的として、環境温度が変化する養生条件で適用可能な新しい膨張性試験方法を提案した。JIS 法と対比して、コンクリート種類および環境温度を要因とした検証実験を行い、提案試験法の適用性を確認した。また、実工事に適用して躯体のひずみ実測値と比較した結果、本試験法の結果が躯体挙動の傾向をよく反映しており、施工管理上非常に有効であることが明らかとなった。

キーワード：膨張材、膨張性試験、施工管理、温度ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を与える収縮ひび割れを抑制するため、いわゆる収縮補償用として膨張コンクリートの使用例が増加している。しかし、膨張コンクリートの施工時において、膨張性能の管理には確立した試験方法がなく、期待どおりの膨張性を発揮したか工事に際して証明することは容易でないのが現状である。

膨張コンクリートの膨張性試験として、例えば JIS A 6202 附属書 2 の拘束 B 法（以下 JIS 法）がある。この方法により、土木学会膨張コンクリート設計施工指針¹⁾では、膨張ひずみを 150 μ 以上 250 μ 以下とすることが求められている。しかし、JIS 法は、設備が整った試験室環境で、試練りの一環として工事前に実施する方法で、養生温度が変化する工事環境での膨張性能を確認する用途としては適当でないと考えられる。

このような背景を受け、本研究では前記 150 μ 以上 250 μ 以下の所要の膨張ひずみが施工において発揮されていることを確認するため、新しい膨張性試験を提案すべく実験検討を実施する。実験では、JIS 法と提案方法を比較するため、異なる環境温度下での試験を実施し、提案方法の適用性について検証を行うとともに、工事に適用した実例について述べる。

2. 提案する膨張性試験の概要

提案方法は膨張性品質管理試験と称し、温度変化を伴う工事環境で養生した膨張コンクリートの初期膨張量を把握することを目的とする。温度変化を伴う場合、温度ひずみの影響をどのように考慮するかが論点となり、その具体的な方法について以下に述べる。

提案試験方法の概要を図-1に示す。この図のように、JIS 法の拘束治具を用い、膨張ひずみを鋼棒の中央部に貼付した自己温度補償型ひずみゲージにより計測する。また、ひずみゲージに近接して熱電対を設置し、コンクリート温度を連続計測し、膨張ひずみ ϵ_{exp} の評価を式(1)～(3)にて行う。温度変化を伴う場合の膨張ひずみは、見かけのひずみ挙動（全ひずみ ϵ_{all} ）から温度ひずみ ϵ_T を差し引いて評価する必要がある。

$$\epsilon_{exp}(t) = \epsilon_{all}(t) - \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{all}(t) = \epsilon_m(t) - \alpha_g \cdot \{T_c(t) - T_c(0)\} \quad (2)$$

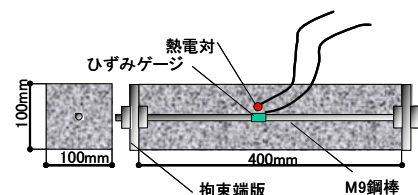


図-1 膨張性品質管理試験の概要

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D.（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 建築生産グループ 研究員（正会員）

*3 電気化学工業（株） 特殊混和材事業部 博士（工学）（正会員）

$$\varepsilon_T(t) = \alpha_c \cdot \{T_c(t) - T_c(0)\} \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_m(t)$: ひずみゲージ計測値、 t : 凝結始発を始点とする材齢(日)、 $T_c(t)$: コンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)、 α_c : コンクリート線膨張係数($\mu/^{\circ}\text{C}$)、 α_g : ひずみゲージの自己温度補償用の線膨張係数

上記の提案試験方法の妥当性を検証する目的で行った実験について以下に述べる。また、 ε_{exp} を算出するためには、 α_c が既知でなければならない。 α_c は配合や材料により $6 \sim 13 \mu/^{\circ}\text{C}$ 程度と大きく異なることが知られているため²⁾、対象コンクリートの α_c を簡易にかつ精度よく評価する方法についても以下で検討する。

3. 実験計画

3.1 膨張性実験の計画

表-1は膨張性実験の概要である。実験要因は、コンクリート種類、試験方法、養生条件である。コンクリート種類に関し、 α_c に大きな影響を与えることが予想される粗骨材種類を変えて2水準とした。コンクリートの使用材料および調合についてはそれぞれ表-2と表-3に示した。試験方法は、提案方法に加え、比較のため JIS 法を実施した。また、表-1に示すように、3種類の養生条件を設定して、これらの要因を組合せ合計8条件の試験を実施した。供試体はそれぞれの条件について3個とした。

表-1の養生条件は、現場で膨張コンクリートの膨張性について確認することを想定して設定した。この表で、 20°C 封かんと 20°C 水中の組合せは標準的な JIS 法の養生条件を模擬し、 5°C 封かんと 20°C 水中の組合せは冬季の工事で練混ぜたコンクリートで供試体を作製し、その後試験室へ移送して JIS 法を実施することを想定した。また、 5°C 封かんと 5°C 水中の組合せは、冬季の現場で提案方法を実施することを想定した。

冬季施工の工事における JIS 法の適用については、例えば 5°C などの想定される工事環境温度で基長を取り、その温度でその後の養生と膨張性試験を実施することも考えられる。しかし、実際には、本研究で実施する養生条件に近い方

表-1 膨張性実験の概要

記号	コンクリート	試験方法	実験要因	
			養生条件	
			材齢2日まで	材齢7日まで
S-20-K	硬質砂岩(S)	提案法	20°C 封かん	20°C 水中
S-20-JIS		JIS法	20°C 封かん	20°C 水中
S-5-K		提案法	5°C 封かん	5°C 水中
S-5-JIS		JIS法	5°C 封かん	20°C 水中
L-20-K	石灰岩(L)	提案法	20°C 封かん	20°C 水中
L-20-JIS		JIS法	20°C 封かん	20°C 水中
L-5-K		提案法	5°C 封かん	5°C 水中
L-5-JIS		JIS法	5°C 封かん	20°C 水中

表-2 使用材料の一覧

材料	種類	品質
セメント	普通ポルトランド	-
粗骨材	硬質砂岩碎石(S)	表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 実積率63.7%
	石灰岩碎石(L)	表乾密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 実積率63.6%
細骨材	山砂・砕砂混合	表乾密度 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$
膨張材	石灰CSA複合系	-

表-3 コンクリート調合

コンクリート種類	粗骨材種類	水結合材比(%)	膨張材量(kg/m^3)	s/a(%)	空気量(%)	スランブ(cm)
S	硬質砂岩	50	20	44	4.5	18
L	石灰岩					

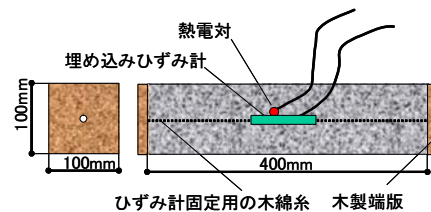


図-2 線膨張係数測定実験の概要

法にて管理が実施されていることが報告されている³⁾。これは、工事の環境温度が常に変動すること、JIS 法の仕様が 20°C 環境での実施に限定されていることなどによると考えられる。

3.2 線膨張係数の推定

(1) 線膨張係数の簡易推定方法

膨張性品質管理試験の供試体を用いて、線膨張係数の測定のための試験を別途実施することなく、簡便に α_c を推定する方法を提案する。線膨張係数の測定について例えば文献4)の方法があるが、標準的な方法は確立されておらず、使用目的に合わせた方法が種々用いられている⁵⁾。本研究では、表-1の S-20-K および L-20-K の供試体より得られた温度とひずみの時間差分データの相関から、 α_c を推定することを試みた。

(2) 線膨張係数測定実験

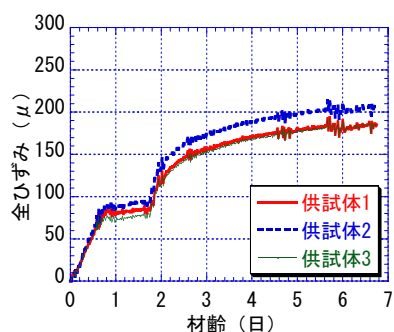
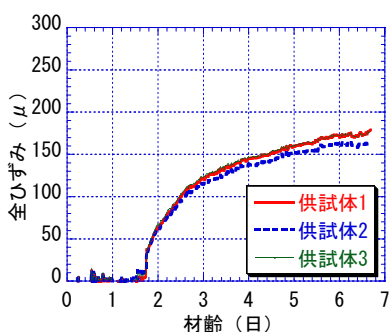
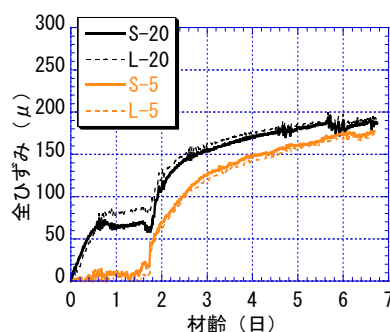
前述の簡易推定方法の妥当性を検証するため、図-2に示す供試体を用いて、線膨張係数を実測

表－4 線膨張係数測定実験の条件

コンクリート種類	粗骨材種類	養生条件		
		材齢2日まで	材齢7日まで	材齢7日以降
S	硬質砂岩	20℃	20℃	アルミテープで封かん後 20℃で養生、材齢28日から線膨張係数の測定を実施
L	石灰岩	封かん	水中	

表－5 フレッシュ試験の結果

コンクリート種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	CON温度 (℃)	単位容積質量 (kg/L)
S調合	17.3	4.0	19.9	2.30
L調合	19.0	4.0	20.5	2.32

図－3 提案試験法の測定結果
(L-20-K)図－4 提案試験法の測定結果
(L-5-K)図－5 実験要因が与える影響
(提案方法)

した。使用するコンクリートは表－3の2種類であり、それぞれのコンクリートについて2個の供試体を作製した。供試体の中央部には埋込みひずみ計と熱電対を配置した。

表－4は実験条件の一覧である。供試体は材齢2日で脱型するまで20℃で封かんとし、脱型後は20℃水中で材齢7日まで養生した。その後、アルミテープで封かんして20℃にて材齢28日まで養生した後、恒温恒湿室に設置した水槽内でコンクリート温度変化に対するひずみの差分を測定した。環境温度は10℃から40℃の間にて10℃刻みで変化させ、2日間は一定の環境温度を保持し、コンクリート温度が環境温度とほぼ同一になったことを確認した。

4. 実験結果と考察

4.1 膨張性実験の結果

コンクリートは、S調合およびL調合に関し、それぞれ90Lを強制2軸ミキサーにて練り混ぜ、表－1の各供試体を打設した。表－5にフレッシュ性状を示す。練上がり温度は両コンクリートとも20℃程度であった。練り上がったこれらのコンクリートを直ちに20℃および5℃の恒温恒湿室に運び、それぞれの供試体の打設を行った。

図－3および図－4には、膨張性品質管理試験

で得られた全ひずみ ε_{all} をL-20-KおよびL-5-Kのそれぞれ3本の供試体の結果について示してある。この図から、供試体間のばらつきが比較的少ない安定した傾向を示していることがわかる。図－5は、実験要因ごとの結果の比較で、各要因を代表する値は3供試体の平均である。この図で粗骨材種類による差は小さいが、養生温度の影響が見られる。材齢7日までの膨張量には養生温度による顕著な差がないが、打設から材齢2日の脱型までの挙動に関し、5℃の場合には20℃と異なりほとんど膨張が見られないことが特徴的である。養生温度が低い場合には、初期膨張ひずみの発現が緩慢になることが知られており、その影響と考えられる。

図－6および図－7はJIS法の結果でありL-20-JISおよびL-5-JISのそれぞれ3体の供試体の結果を示している。また図－8にはそれぞれの実験要因ごとの平均値を比較してある。図－8において、養生温度の違いにより試験結果が大きく異なっていることがわかる。養生温度5℃の場合には、供試体を脱型後すぐに20℃の環境へ移設し、直ちに長さ変化を計測しているため、供試体温度が20℃よりも低かったと推測され、この温度差による温度ひずみの影響により、収縮側の値が計測されたと考えられる。寒冷地で

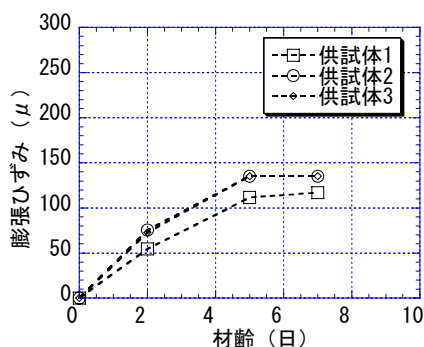


図-6 JIS法の測定結果
(L-20-JIS)

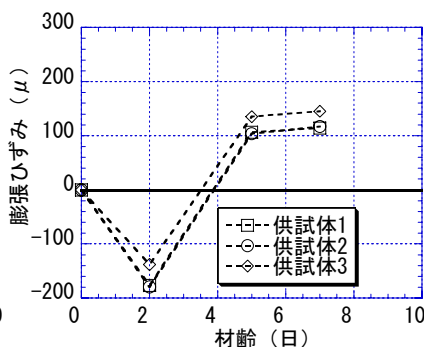


図-7 JIS法の測定結果
(L-5-JIS)

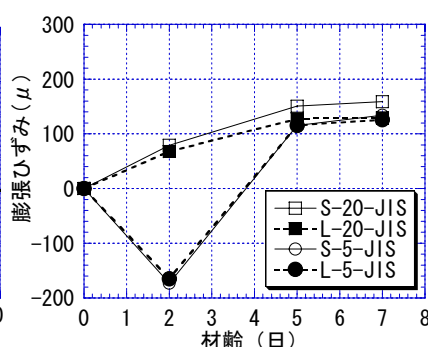


図-8 実験要因が与える影響
(JIS法)

の JIS 法の計測において、類似の現象と考えられるデータが既往の文献に示されている³⁾。

4.2 線膨張係数に関する実験結果

簡易推定では、膨張性実験が終了した後、材齢 14 日から 21 日まで供試体を屋外の水槽中に設置し、温度とひずみの経時変化を連続計測した。時間間隔を 3 時間に設定して温度とひずみの時間差分の相関を表した例が図-9および図-10で、線形回帰した結果が図中に示してある。両者には 90%以上の高い相関があり、回帰直線の傾きが α_c に相当する。表-6に測定結果をまとめたが、3本の供試体による結果は比較的安定しており、これらの平均にて α_c を評価した。

線膨張係数測定実験の結果例を図-11と図-12に示す。ひずみと温度の測定は 1 時間間隔にて実施した。この結果から、恒温恒湿室の温度を変更して 36 時間経過後にはコンクリート温度がほぼ安定すると判断し、環境温度一定期間 2 日間の残り 12 時間のデータの平均温度と平均ひずみを用いて α_c を計算した。その結果が表-7で、2 供試体の平均で α_c を代表した。

表-7中の S 調合と L 調合の試験結果を表-6と比較すると、両者よく一致しており、簡便な簡易推定方法でも一定の精度を有していると考えられる。今回の実験では、簡易推定法と線膨張係数測定実験の測定材齢に差があったが、この差の影響は小さかったと判断される。

4.3 膨張性試験法の比較

図-13と図-14は 2 つの試験方法で得られた

膨張ひずみ ε_{exp} の結果の比較である。ただし、JIS 法では $\varepsilon_{exp} = \varepsilon_{all}$ 、提案試験法の供試体では、脱型以降のコンクリート温度が設定よりも 2～3℃高かったため、前節で推定した線膨張係数を用いて ε_T を補正してある。図-13の 20℃の場合、両試験法の結果は同様の傾向を示し、提案試験法が JIS 法の結果をほぼ再現できることがわかる。ただし、両者の若干の差異は、計測方法の差に起因すると考えられ、この差異の詳細な検討については今後の課題である。図-14は、5℃の結果であり、両者の違いは顕著である。

上記の結果から、工事環境における膨張性確認を目的とした場合、JIS 法よりも提案方法が妥当であると考えられる。JIS 法を工事で適用する場合、工事での環境温度が未知であるため、基長を測定する温度や養生温度を実態に即して決定することができない。また、JIS 法の仕様に沿って 20℃により試験を実施しようとする、本実験の 5℃の場合に例示するように、コンクリートのひずみの原点(例えば凝結始発時)と長さ変化試験の原点が異なり、試験の適用性に疑問を生じる。これに対し、提案方法では変動する養生温度による影響を適切に考慮できる点で前記目的に適していると考えられる。

5. 工事への適用

膨張性品質管理試験を S 造 2 階建の研究施設建築(述べ床面積 2040m²)の 2 階床スラブの施工に適用した例について以下に述べる。床ス

ラブは、フラットデッキを用いた厚さ 160mm、全鉄筋比 1.1%の仕様で、調合概要など適用条件を表-8に示す。この床スラブの施工にあたり、膨張性品質管理試験用の供試体を採取するとともに、躯体の温度およびひずみの現場計測を行った。現場計測の概要を図-15に示す。計測点は3点で、SC-1はスラブのはり平行方向の面内ひずみ、SC-2は同じくはり直行方向、SC-3は、はりフランジ材軸方向のひずみ計測点である。これら測定点は、厚さ方向の中央(表面より80mm)の位置に設定した。膨張性試験用の供試体は材齢1日で脱型した後、躯体の養生条件に合わせて現場封かん養生とし、材齢7日から14日までの温度とひずみのデータから線膨張係数

の簡易推定を実施した。

計測結果を図-16および図-17に示す。また図-18は、計測結果から簡易推定した線膨張係数 $10.4 \mu / ^\circ\text{C}$ をもとに、温度ひずみを補正した膨張ひずみの経時変化である。躯体計測点のひずみについても、膨張性試験の供試体と同じく式(1)~(3)で温度ひずみを補正した。なお、計測期間中に床スラブには軽微な施工荷重のみが載荷され、ひずみ挙動に与える影響は無視できる範囲と判断した。図-18に示すように、材齢7日までに膨張性試験の膨張ひずみが 200μ を超え、膨張挙動は概ね収束しつつあることがわかった。この膨張ひずみは文献1)における所要の値である 150μ 以上 250μ 以下を満足しており、躯体の

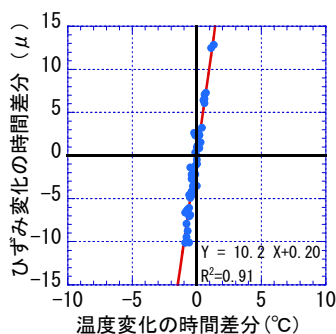


図-9 線膨張係数の簡易推定結果 (S 調合)

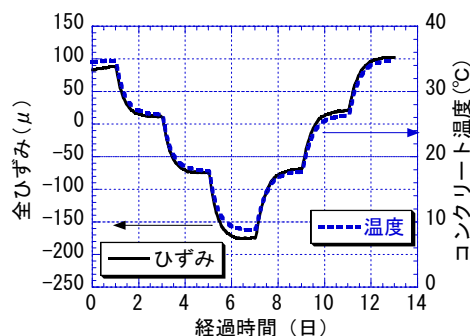


図-11 線膨張係数測定試験の結果 (S 調合)

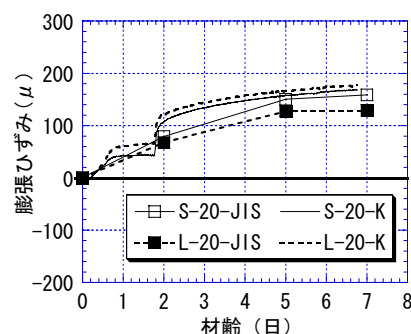


図-13 膨張ひずみに与える試験方法の影響(養生温度 20°C)

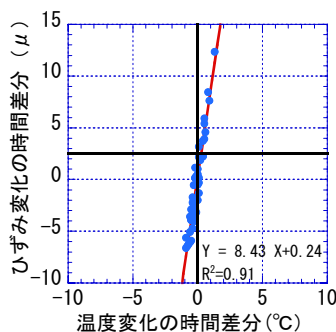


図-10 線膨張係数の簡易推定結果 (L 調合)

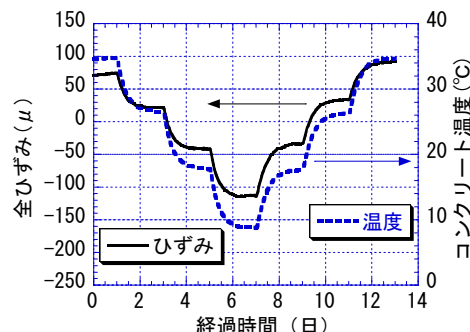


図-12 線膨張係数測定試験の結果 (L 調合)

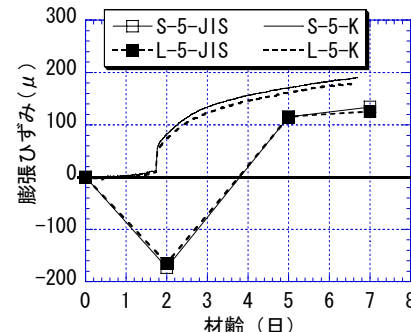


図-14 膨張ひずみに与える試験方法の影響(養生温度 5°C)

表-6 線膨張係数の簡易推定結果 (単位 $\mu / ^\circ\text{C}$)

コンクリート種類	供試体番号	測定値	平均
S	1	10.2	10.3
	2	10.6	
	3	10.2	
L	1	8.43	8.24
	2	8.44	
	3	7.86	

表-7 線膨張係数測定実験の結果 (単位 $\mu / ^\circ\text{C}$)

温度変化 (設定温度)	S調合			L調合		
	供試体1	供試体2	平均	供試体1	供試体2	平均
40→30°C	8.5	9.2	10.2	7.4	6.3	8.00
30→20°C	9.4	10.0		8.1	7.3	
20→10°C	10.4	11.1		9.0	7.9	
10→20°C	11.6	12.0		9.9	9.0	
20→30°C	10.1	10.4		8.4	7.8	
30→40°C	9.5	9.7		7.7	6.9	

湿润養生をこの時点で打ち切る際の有力な判断材料とした。

図-18に示すように、膨張性品質管理試験の結果は、躯体挙動の傾向をよく表しており、施工管理上有益な情報を得ることができる。先に述べたように、低温時の膨張コンクリートの膨張材の水和および膨張挙動は緩慢であることが知られており、十分な水和が進まないうちに湿润養生を打ち切った場合、遅れ膨張などの不具合が懸念される。この工事で用いたように、部材の湿润養生の期間をこの膨張性試験から判断することは、非常に有用と考えられる。ただし、一般に躯体コンクリートが受ける拘束は試験供試体よりも大きく、前者の膨張ひずみは后者よりも小さくなる傾向に留意が必要である。

6. まとめ

本研究では、工事における膨張コンクリートの初期膨張性能を確認する目的で新しい膨張性試験を提案し、その妥当性について実験的な検証を行い次の結論を得た。

- (1) 提案方法は 20℃における拘束 B 法の結果を概ね再現可能である。
- (2) 提案方法によれば、温度が 20℃と異なる打設および養生の環境条件における膨張ひずみの経時変化として妥当な値が得られた。
- (3) 提案方法を工事に適用した結果、構造躯体の膨張挙動の傾向を把握可能で、膨張ひずみの工事用管理試験として有用な方法であることが明らかとなった。

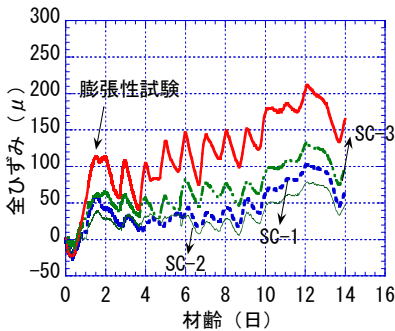


図-16 現場適用におけるひずみ計測結果

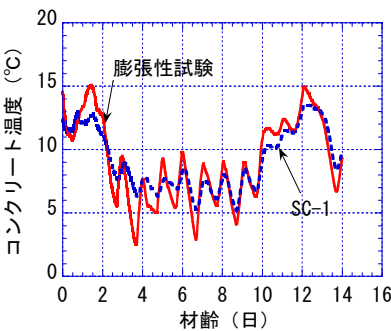


図-17 現場適用における温度測定結果

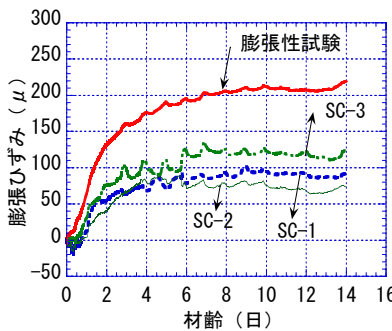


図-18 現場適用における膨張ひずみ挙動

参考文献

- 1) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー75，1993
- 2) Neville, A. M.：コンクリートバイブル，技報堂出版，pp.471，2004
- 3) 谷口英明ほか：寒冷地における収縮補償用コンクリートの膨張特性，膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム論文集，pp.13-20，2003
- 4) 高橋大祐：線膨張係数測定方法，建材試験情報，vol. 27，No. 3，pp.13-16，1991
- 5) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会，pp.91，2006

表-8 実工事適用の概要

部材	打設時期	呼び強度	スラフ (cm)	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m³)	膨張材量 (kg/m³)	粗骨材種類	細骨材種類
デッキスラブ	冬季	30	15	49.5	175	20	角閃岩碎石	山砂・角閃岩砕砂混合

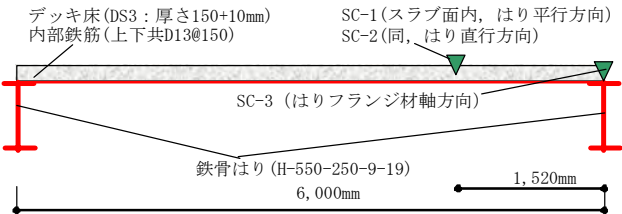


図-15 現場計測の概要