

# 論文 石灰石骨材を用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討

中里 剛\*1・中山 英明\*2

**要旨:** 石灰石骨材と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに橋脚中心部を想定した温度履歴を与えた時の圧縮強度および自己収縮を測定し、線膨張係数の実測値を用いた温度応力解析により温度ひび割れの可能性を評価した。また、一軸拘束試験によりコンクリートのひび割れ抵抗性を評価した。その結果、石灰石骨材を用いたコンクリートは、線膨張係数が小さく、かつ自己収縮ひずみが小さくなるため、山砂と硬質砂岩砕石を用いるより温度ひび割れ指数が高くなった。また、一軸拘束試験では、鉄筋との線膨張係数の違いにより初期材齢で引張応力が大きくなるものの、本試験の範囲ではひび割れは認められなかった。

**キーワード:** 石灰石骨材, マスコンクリート, 線膨張係数, 温度ひび割れ指数, 一軸拘束試験, 引張応力

## 1. はじめに

近年、社会資本の整備では新設構造物の長寿命化が要求されている。コンクリート構造物の耐久性を向上させるには、ひび割れの発生を抑制することが重要である。ひび割れの発生要因は多岐にわたるが、比較的部材厚が小さい壁状やスラブ状コンクリートでは、乾燥収縮に起因したひび割れを抑制する必要がある。筆者らは、石灰石骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性が向上することを明らかにしている<sup>1)</sup>。一方、部材厚が大きいマスコンクリートでは温度変化による体積変化に起因した温度ひび割れを抑制する必要がある。温度ひび割れの抑制対策には、温度上昇の抑制や温度変化に対する体積変化を低減するために、膨張材の使用や線膨張係数の小さい材料の使用が考えられる。特に、石灰石骨材は他の岩種に比べて線膨張係数が小さいため<sup>2)</sup>、石灰石骨材の使用はマスコンクリートの温度応力を低減できる可能性があると考えられる。

そこで、石灰石骨材と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの熱的性質と事前の温度解析で求めた橋脚中心部を想定した履歴を与えた時の圧縮強度や自己収縮を測定し、線膨張係数の実測値を用いた温度応力解析により温度ひび割れの可能性を評価した。また、一軸拘束試験によりコンクリートのひび割れ抵抗性を併せて評価した。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

#### (1) 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(N)を用いた。骨材には、石灰石砕砂(LS)および石灰石砕石(LG)を、比較用として山砂(S)および硬質砂岩砕石(G)を用いた。

#### (2) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの配合は、骨材の組み合わせが異なる2水準とし、水セメント比は材齢28日におけるコンクリートの設計基準強度が30N/mm<sup>2</sup>となる条件の水セメント比55%とした。

表-1 使用材料一覧

材料	記号	種類と品質
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , C <sub>3</sub> S: 57%, C <sub>3</sub> A: 10%)
細骨材	S	山砂 (表乾密度: 2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.57%, FM: 2.54)
	LS	石灰石砕砂 (表乾密度: 2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.57%, FM: 2.36, 微粒分: 3.2%)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (表乾密度: 2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.61%, 微粒分: 0.35%, 実積率: 61.0%)
	LG	石灰石砕石 (表乾密度: 2.71g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.30%, 微粒分: 3.7%, 実積率: 63.2%)
混和剤	AD	主成分: リグニンスルホン酸化合物 とポリオール複合体

表-2 コンクリートの配合

記号*1	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	LS	G	LG
N-SG	55.0	47.1	163	297	865	—	1004	—
N-LSLG		45.0	165	300	—	842	—	1035

目標スランプ 12cm, 目標空気量 4.5%

混和剤添加率 C×0.25%

\*1 記号は、セメント種類-細骨材・粗骨材の組合せ

\*1 三菱マテリアル(株)セメント研究所 副主任研究員(正会員)

\*2 三菱マテリアル(株)セメント研究所 主任研究員(正会員)

## 2.2 試験項目および試験方法

### (1) 断熱温度上昇

空気循環式断熱温度上昇試験装置により材齢 28 日までの断熱温度上昇量を測定した。

### (2) 圧縮強度

JIS A 1108 : 2006 「コンクリートの圧縮強度試験方法」により試験材齢 1 日, 3 日, 7 日, 28 日, 91 日の圧縮強度を測定した。養生は, 図-1 に示す橋脚モデルで表-2 の N-SG を用いたコンクリートの温度解析を行い, その結果得られた部材中心部の温度 (図-2) を温度追従養生槽で模擬して行った (以下, 温度履歴養生と略す)。また, 比較として標準養生の圧縮強度も測定した。

### (3) 自己収縮

図-2 に示す温度履歴養生下での自己収縮ひずみは, JCI 「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠した図-4 に示す供試体を用い, 材齢 28 日まで測定した。温度履歴養生下での自己収縮の算出は, 測定された総ひずみから温度変化にともなうひずみ (温度変化×線膨張係数の実測値) を差し引いて求めた。なお, 比較として温度 20°C での自己収縮も測定した。

### (4) 線膨張係数

コンクリートの線膨張係数は, 図-4 の自己収縮を測定した供試体 (材齢 28 日以降) を用い, 図-3 の温度条件でのコンクリートのひずみより算出した。また, 骨材原石よりコア (φ25×50mm) を採取し, コアの中心部両側に取り付けた自己温度補償型ゲージを用いて骨材原石の線膨張係数も測定した。

### (5) 一軸拘束試験

コンクリートに発生する引張応力を JCI SAS3-2 「コンクリートの自己収縮応力試験方法」に準拠した一軸拘束試験によって測定した。一軸拘束試験の供試体形状および寸法を図-5 に示す。供試体寸法は 100×100×600mm とし, 供試体本数は 3 本とした。なお, 供試体寸法については事前に定着長の長さの検討を行い, 100×100×1500mm の供試体と同様の拘束応力が得られることを確認した。

供試体の型枠は, 側面および下面にテフロンシートを貼り付け, コンクリート供試体の中心になるように拘束鉄筋 (異形棒鋼 (SD345), 拘束鉄筋比は 7.98%) を配置した。拘束ひずみは, 鉄筋中央部両側に取り付けた自己温度補償型ゲージで測定し, 供試体の温度は中央付近に設置した熱電対で測定した。

供試体の成形後は, 水分の逸散が無いように表面を湿布で覆い, 図-2 に示す温度履歴養生をした。なお, 供試体は材齢 1 日で脱型し, 供試体の全面をアルミテープでシールした後にラップを巻いて封かん状態にした。

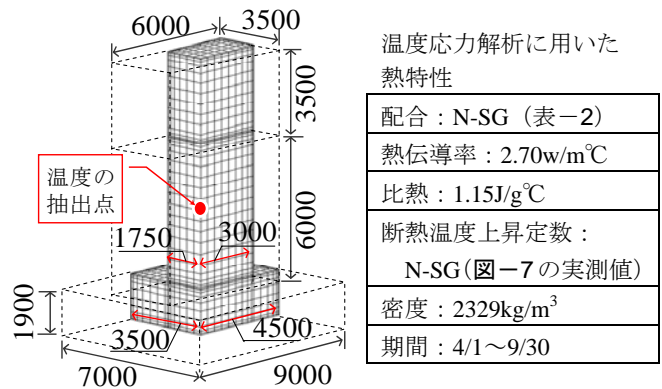


図-1 温度解析に用いたモデルと熱特性【単位: mm】

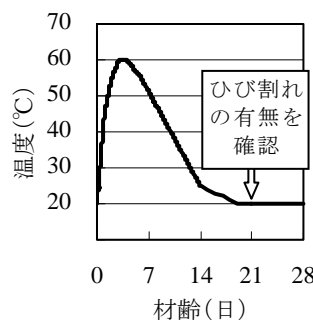


図-2 温度履歴 (温度解析の結果)

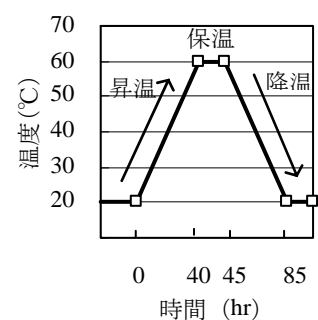


図-3 線膨張係数測定のための温度条件

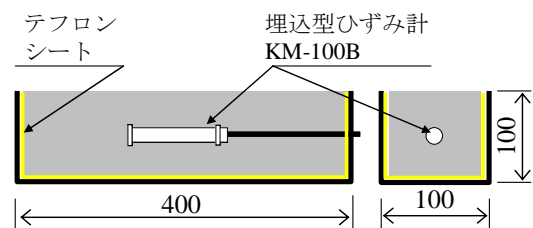


図-4 自己収縮ひずみ測定のため供試体【単位: mm】

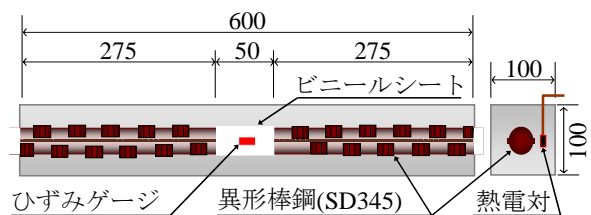


図-5 一軸拘束供試体の形状・寸法【単位: mm】

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 熱的性質

#### (1) 線膨張係数

コンクリートと骨材原石の温度とひずみの関係を図-6 に示す。なお, 図-3 に示す温度条件による温度上昇の開始と温度下降の終了時のひずみ差はほぼ 0 となり, 自己収縮が収束したことを確認した。

石灰石砕砂と石灰石砕石を用いたコンクリート (以下 LSLG) は, 山砂と硬質砂岩砕石を用いたコンクリート

(以下 SG) より線膨張係数が  $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  小さくなった。石灰石砕石 (LG) の線膨張係数が硬質砂岩砕石 (G) よりも小さいことが影響していると考えられる。

### (2) 断熱温度上昇

骨材の種類が異なるコンクリートの断熱温度上昇曲線を図-7 に示す。なお、図中には測定した断熱温度上昇を式(1)により近似して求めた断熱温度上昇定数を示す。

$$Q_{(t)} = Q_{\infty} \cdot (1 - \exp^{-\gamma t}) \quad (1)$$

ここに、

$Q_{(t)}$  : 材齢  $t$  日における断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )

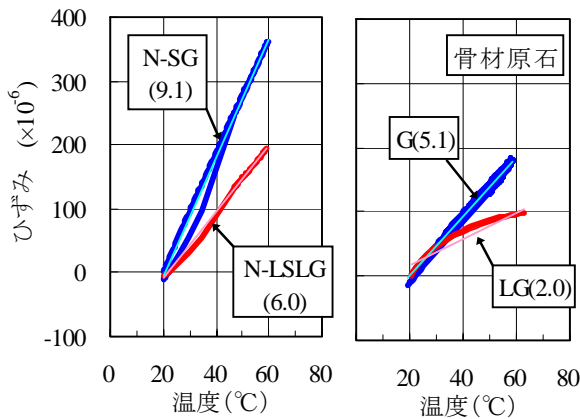
$Q_{\infty}$  : 終局断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\gamma$  : 温度上昇速度に関する定数

LSLG の断熱温度上昇速度に関する定数は、SG に比べ 0.3 程度大きくなった。一方、終局断熱温度上昇量は、骨材岩種の影響は認められなかった。

### 3.2 圧縮強度

骨材の種類が異なるコンクリートの圧縮強度を図-8 に示す。標準養生では、LSLG の圧縮強度は SG に比べいずれの材齢でも高くなった。これは、石灰石砕砂のほうが山砂よりもペーストとの付着力が高くなるためと考



注) 凡例中の ( ) 内は線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

図-6 温度とひずみの関係

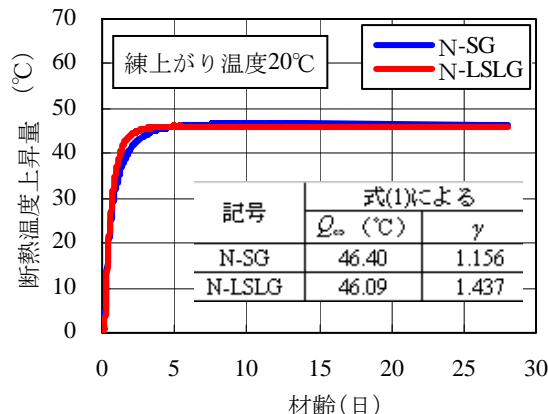


図-7 断熱温度上昇曲線

えられる。また、石灰石骨材の微粒分がセメント中の  $\text{C}_3\text{A}$  と反応してカルシウムカーボアルミネート水和物などを生成し、セメント遷移帯が緻密化した<sup>3)</sup>ためと考えられる。

温度履歴養生では、LSLG の圧縮強度が SG に比べて材齢 1 日で高くなった。一方、その後の強度増進は緩やかとなり、材齢 91 日では  $2 \sim 3 \text{N}/\text{mm}^2$  低くなった。

### 3.3 自己収縮ひずみ

凝結始発時間を起点とした有効材齢と自己収縮ひずみの関係を図-9 に示す。

温度履歴養生における LSLG の自己収縮ひずみは、SG に比べ  $100 \times 10^{-6}$  程度小さくなった。また、 $20^{\circ}\text{C}$  一定とした養生での LSLG の自己収縮ひずみは、SG に比べ  $50 \sim 60 \times 10^{-6}$  小さくなった。このことから、石灰石骨材を用いたコンクリートは、養生条件によらず、自己収縮ひずみが小さくなることが明らかになった。

### 3.4 温度応力解析

#### (1) 解析モデル

市販の三次元 FEM により、線膨張係数の違いを考慮して温度応力解析を行った。解析モデルを図-10 に示す。

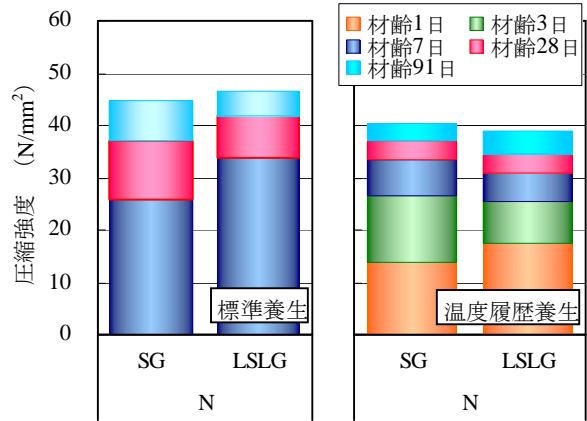


図-8 コンクリートの圧縮強度

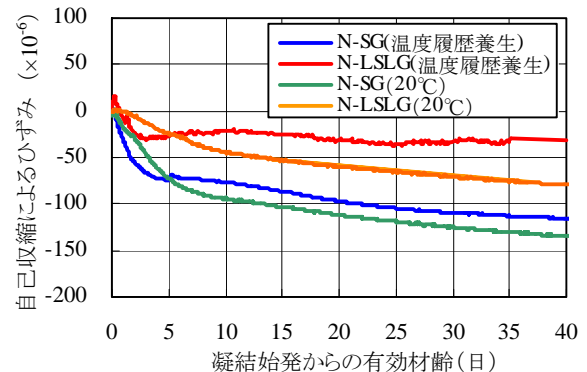


図-9 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

本試験での解析は、構造物の寸法の影響を考慮し、表-3に示す3水準について行った。

(2) 解析条件

コンクリートの解析条件を表-4に示す。圧縮強度は、図-8に示す実測値をもとに、式(2)により骨材の種類別に有効材齢との関係で表し、温度応力解析に用いた。

$$f'c_{(te)} = \frac{t_e}{a + bt} \times f'c_{(91)} \quad (2)$$

ここに、

$f'c_{(te)}$  : 有効材齢  $t_e$  日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'c_{(91)}$  : 有効材齢 91 日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$a, b$  : セメントおよび骨材種類別の定数

(3) 温度応力解析結果

構造物の寸法と骨材の種類が異なるコンクリートの最小温度ひび割れ指数を図-11に示す。

コンクリートの最小温度ひび割れ指数は、構造物の寸法が大きいくほど低くなった。また、構造物の寸法により値は異なるものの、LSLGの最小温度ひび割れ指数はSGに比べ0.25~0.45高くなった。石灰石骨材を用いたコンクリートは線膨張係数が小さいため、発生する温度応力が小さくなったためと考えられる。

3.5 コンクリートの温度応力の低減効果の検証

コンクリートの線膨張係数は、マスコンクリートの温度応力に大きな影響を及ぼす。このため、マスコンクリートの中心部を想定した温度履歴下でのコンクリートの温度応力の低減効果を検証した。

温度とコンクリートの実ひずみの関係を図-12に示す。なお、図においては正が膨張、負が収縮を示している。LSLGを用いたコンクリートのひずみは、温度上昇時でSGに比べ80×10<sup>-6</sup>小さくなった。また、温度降下時ではSGに比べ100×10<sup>-6</sup>程度大きくなった。線膨張係数や自己収縮の影響と考えられる。

図-12のコンクリートの実ひずみより算出したコンクリートの応力を図-13に示す。ここで、コンクリートの応力は式(3)および式(4)により算定した。ここで、マスコンクリートの拘束度は、既往の研究<sup>4)</sup>を参考に0.3と仮定し、本試験では一定拘束を受ける場合の応力として算出した。なお、コンクリートの弾性係数および圧縮強度は本試験の実測値を用い、式(4)にはマスコンクリートにおけるクリープの影響を考慮した。

$$\sigma_C = E_{C(t)} \cdot \varepsilon_C \cdot K_R \quad (3)$$

$$E_{C(t_e)} = \varphi_{(t_e)} \times 0.693 \times 10^4 f_{c(t_e)}^{0.444} \quad (4)$$

ここに、

$\sigma_C$  : コンクリートの応力(N/mm<sup>2</sup>)

表-3 解析モデルの寸法

	幅 B (m)	長さ L (m)
Case1	2.5	7
Case2		15
Case3	5.0	

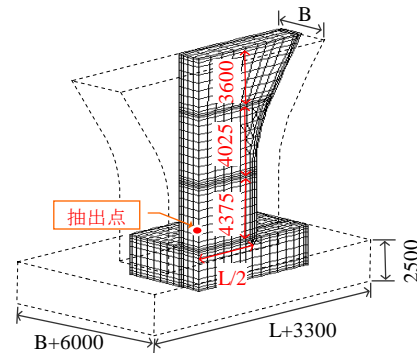


図-10 解析モデル (単位: mm)

表-4 コンクリートの解析条件

解析項目	N-SG	N-LSLG
セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	297	300
熱伝導率(W/m・°C)	2.70	
比熱(J/g・°C)	1.15	
断熱温度	$Q_\infty$	46.4
上昇*	$\gamma$	1.16
線膨張係数(10 <sup>-6</sup> /°C)*	9.1	6.0
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2300	
圧縮強度*	$a$	4.84
	$b$	0.98
	$f'c_{(91)}$	40.5
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	$ft = 0.268 fc^{0.663}$ *	
弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	$Ec = \varphi \times 0.693 \times 10^4 fc^{0.444}$ *	
クリープ低減係数	温度上昇時: $\varphi = 0.42$ <sup>4)</sup> 温度降下時: $\varphi = 0.65$ <sup>4)</sup>	
自己収縮(×10 <sup>-6</sup> )	116	38
ポアゾン比	0.20	

施工場所: 東京, 打込み日: 4/15, 打込み温度 20°C  
 地盤: 砂質土を想定, \*本実験の実測値より求めた推定式

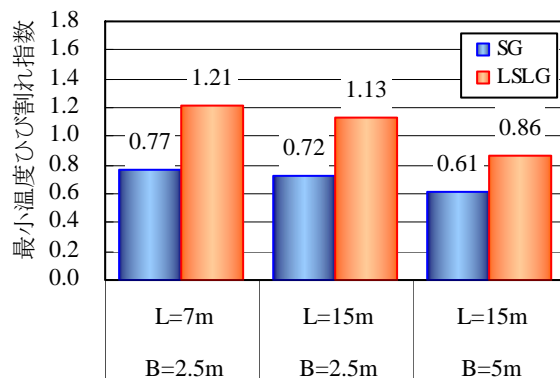


図-11 コンクリートの最小温度ひび割れ指数

- $K_R$  : 拘束度( $E_C / E_R = 60$  以上,  $H / L = 0.10$  より算出した  $0.3^{4)}$   
 $\varepsilon_C$  : コンクリートの実ひずみ  
 $\phi_{(t_e)}$  : コンクリートのクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数( $=0.65^{5)}$   
 $E_{C(t_e)}$  : 有効材齢  $t_e$  日における弾性係数( $N/mm^2$ )  
 $t_e$  : 有効材齢(日),  $f'c_{(t_e)}$  : 材齢  $t_e$  日における圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

温度上昇時においてはコンクリートに圧縮応力が発生し、その応力は LSLG を用いたコンクリートのほうが SG より  $1N/mm^2$  程度小さくなった。温度降下時においては、コンクリートに引張応力が発生し、その応力は LSLG のほうが SG より  $0.5N/mm^2$  程度小さくなった。

以上により、線膨張係数の小さい LSLG をマスコンクリートに用いると、温度応力を低減できることが明らかになった。

### 3.6 鉄筋とコンクリートの線膨張係数の違いによりコンクリートに生じる応力の検証

線膨張係数の小さいコンクリートを鉄筋コンクリート構造物に用いた場合、鉄筋とコンクリートの線膨張係数の違いにより鉄筋近傍にひび割れが生じる可能性がある。

そこで、温度履歴を与えた条件で一軸拘束試験を行い、鉄筋に生じるひずみを測定し、コンクリートに発生する応力の検証を行った。

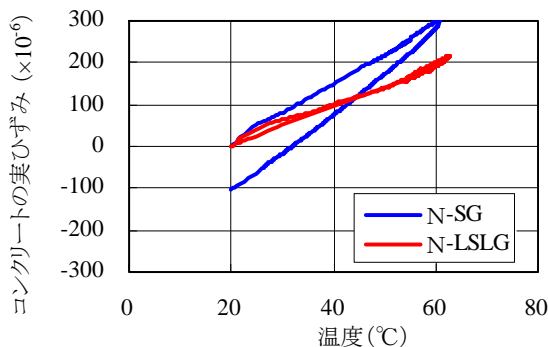


図-12 温度とコンクリートの実ひずみの関係

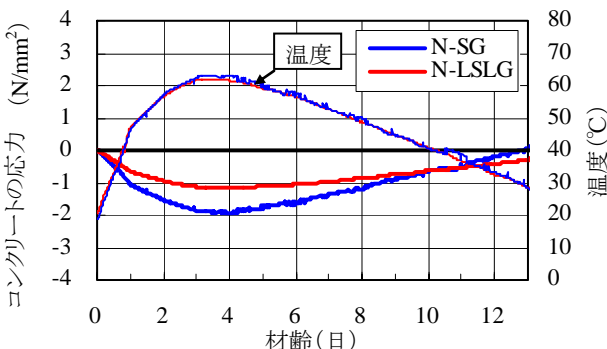


図-13 コンクリートの応力と温度の推移

#### (1) 鉄筋のひずみ

温度と鉄筋のひずみの関係を図-14 に示す。なお、図-14 に示す値は供試体 3 本の平均値である。

温度上昇時に生じた鉄筋のひずみは LSLG を用いたコンクリートのほうが SG より  $50 \times 10^{-6}$  大きくなった。また、温度降下時に生じた鉄筋のひずみも LSLG を用いたコンクリートのほうが SG より  $50 \times 10^{-6}$  程度大きくなった。鉄筋のひずみは、コンクリートと鉄筋の線膨張係数 ( $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ) が異なるために生じたと考えられる。特に、LSLG を用いたコンクリートの線膨張係数は SG よりも約  $3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  小さく、温度変化に伴う鉄筋の膨張および収縮をコンクリートが拘束し、コンクリートに引張応力および圧縮応力を発生させたと推察される。

#### (2) 鉄筋とのひずみの差により生じるコンクリートの応力

図-14 の鉄筋に生じたひずみより算出したコンクリートの応力と引張強度の推移を図-15 に示す。ここで、コンクリートの応力は式(5)により算出した。また、コンクリートの引張強度は、筆者らが提案した関係式<sup>1)</sup>を用いて算出した。

$$\begin{aligned} \sigma_c &= -E_s \cdot \varepsilon_s \cdot p \cdot \phi(t_e) \\ &= -E_s \cdot \varepsilon_s \cdot \left( \frac{A_s}{A_c} \right) \cdot \phi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、

$\sigma_c$  : コンクリートの応力( $N/mm^2$ )

$p$  : 拘束鉄筋比( $=7.98\%$ )

$A_s$  : 鉄筋の中心部断面積 ( $=739mm^2$ )

$A_c$  : コンクリートの断面積( $mm^2$ )

$E_s$  : 鉄筋のヤング係数 ( $=21 \times 10^4 N/mm^2$ )

$\varepsilon_s$  : 鉄筋のひずみ

$\phi(t_e)$  : コンクリートのクリープ影響が大きいことによるヤング係数の補正係数 ( $=0.65^{5}$ )

温度上昇時の引張応力は、LSLG を用いたコンクリートのほうが SG より 20~40% 大きくなった。また、温度降下時の圧縮応力は、LSLG を用いたコンクリートのほうが SG より 30% 程度大きくなった。線膨張係数の小さい LSLG を用いたコンクリートでは、鉄筋との線膨張係数の差異に起因する引張応力が大きくなると考えられたが、目視観察の結果、ひび割れは認められなかった。図-15 に示すように、コンクリートのクリープの低減係数を  $0.65^{5}$  として算出した引張応力は割裂引張強度と同程度となっている。しかし、ひび割れが認められなかったことから、初期材齢でのコンクリートのクリープがこれよりも大きく、引張応力が緩和されたためと考えられる。

本試験では一般的な土木構造物の鉄筋比に比べ、拘束鉄筋比を 7.98% と拘束が大きい条件で実施したが、この



条件でもひび割れは認められなかった。したがって、一般的なマスコンクリートに石灰石骨材を用いても鉄筋との線膨張係数の差に起因した応力によるひび割れは発生しないと判断できる。

#### 4. まとめ

石灰石骨材と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの熱的性質と橋脚中心部を想定した温度履歴を与えた時の圧縮強度と自己収縮を調べ、温度応力解析により温度ひび割れの可能性を評価した。また、鉄筋とコンクリートの線膨張係数の差異によるひび割れの検証を一軸拘束試験により行った。石灰石骨材を用いたコンクリートについて、以下の事項が判明した。

- (1) 線膨張係数は、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものより  $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  小さくなった。
- (2) 断熱温度上昇の速度に関する定数は、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものに比べて大きくなった。しかし、終局断熱温度上昇量は骨材の種類の影響は明瞭ではなかった。

- (3) 標準養生での圧縮強度は、いずれの材齢でも山砂と硬質砂岩砕石を用いたものに比べて高くなった。
- (4) 温度履歴養生での自己収縮ひずみは、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものに比べて、 $100 \times 10^{-6}$  程度小さくなった。また、 $20^{\circ}\text{C}$  一定とした養生でも  $50 \sim 60 \times 10^{-6}$  小さくなった。
- (5) 温度応力解析による最小温度ひび割れ指数は、構造物の寸法により値は異なるものの、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものに比べて  $0.25 \sim 0.45$  高くなった。
- (6) 温度上昇時の圧縮応力および温度降下時の引張応力は、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものより  $0.5 \sim 1.0 \text{N/mm}^2$  程度小さくなり、マスコンクリートの温度応力を低減できる。
- (7) 橋脚中心部を想定した温度履歴を与えた時の一軸拘束試験では、線膨張係数の違いにより初期材齢でのコンクリートの引張応力が山砂と硬質砂岩砕石をよりも高めとなるが、本試験の範囲ではひび割れは発生しなかった。

以上により、石灰石骨材を用いたマスコンクリートの温度ひび割れに対する抵抗性は、山砂と硬質砂岩砕石を用いたものより向上すると判断できる。

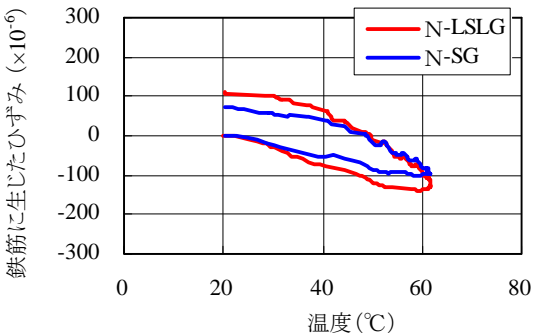


図-14 温度と鉄筋に生じたひずみの関係

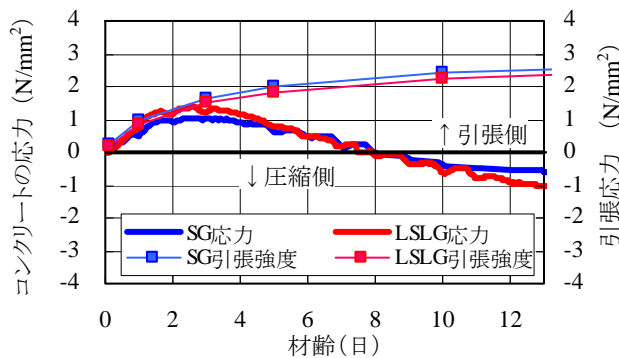


図-15 コンクリートの応力と引張強度の推移

#### 参考文献

- 1) 中山英明, 鳴瀬浩康, 吉田浩一郎, 白石良太: 石灰石骨材を使用したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.541-546, No.1, 2009
- 2) 後藤貴弘, 久芳昭二, 高尾 昇, 中山英明, 佐々木彰, 白石良太: コンクリートの線膨張係数に関する基礎的研究, 宇部三菱セメント研究報告, No.9, pp.39-48, 2008
- 3) 橋田 浩, 田中博一: 石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮と骨材特性に関する研究 その1 コンクリートの乾燥収縮と強度特性に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.815-816, 2008
- 4) 永山ほか: コンクリートダム温度応力解析(II), 土木技術資料, 22-9, pp.26-31, 1980
- 5) (社)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指針 2008, pp.52-53, 2008