

論文 温度応力低減を目的とした部分的プレクーリングおよび低熱ポルトランドセメントの部分使用の効果について

江渡正満*¹・丸山久一*²

要旨：マスコンクリート構造物では水和熱に起因する温度応力により温度ひび割れが発生する。温度応力を低減するにはこれまで各種対策が講じられているが、より低コスト且つ効果的な対策が望まれている。このようなことから、本論文は底版状マスコンクリート構造物における温度応力を低減する方法として、プレクーリングあるいは低熱ポルトランドセメントの部分使用に着目し、その効果を実験的および解析的に検討した結果について取りまとめたものである。

キーワード：マスコンクリート、温度応力、プレクーリング、低熱ポルトランドセメント

1. はじめに

大型半地下構造物やLNG地下式貯槽の底版に代表される内部拘束による温度応力が卓越するマスコンクリート構造物において、温度応力によって生じるひび割れを制御する場合、比較的多く用いられる方法は、保温養生の採用、低熱セメントの使用、打設ブロック寸法の変更などである。またこれらの対策で温度ひび割れが制御できない恐れがある場合は、プレクーリングやパイプクーリングなどのさらに進んだ対策が講じられる。

温度ひび割れ制御対策を計画する場合は、各種対策の得失を念頭に置き、効果、施工性、経済性などについて総合的な検討が行われるが、特に経済性が重要な判断指標となる。

また、温度ひび割れ制御対策を立案する場合、温度応力を精度よく推定する必要がある。温度応力の推定は、現在有限要素法を用いた増分法による弾性解析が行われるのが一般的である¹⁾。この場合、推定精度に大きく影響するクリープの取り扱い、一般に有効ヤング係数として評価する。有効ヤング係数を設定する際の静ヤング係数に対する補正係数 Φ については、種々の

研究報告がされているが^{2)~5)}、その研究例が少なく、実測にもとづいた測定データの積み重ねが必要と考えられる。

以上より本研究は、内部拘束応力の卓越するマスコンクリート構造物に発生する温度応力低減対策として、より低コスト化が図れると考えられる低熱ポルトランドセメントの部分使用およびプレクーリングの部分使用^{6), 7)}の効果に対する評価ならびに有効ヤング係数の評価を実験的および解析的検討することを目的として行ったものである。

2. 低熱ポルトランドセメントおよびプレクーリングの局部使用の有効性

2. 1 内部拘束により発生する表層の温度応力の発生メカニズム

簡単のために図-1に示すようにコンクリート部材(厚さ H)を内部(線膨張係数 α_1 、厚さ h_1 、ヤング係数 E_1)と表層(α_2 、 h_2 、 E_2)に分けて考え、ある時刻間に断面平均でそれぞれ ΔT_1 と ΔT_2 の温度上昇が生じたとする。この場合表層に発生する応力に直接起因するひずみ(拘束ひずみ)増分 $\Delta \epsilon_2$ とそれによ

*1 清水建設株式会社 土木本部技術第一部課長 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学教授 工学部環境建設系 ph.D. (正会員)

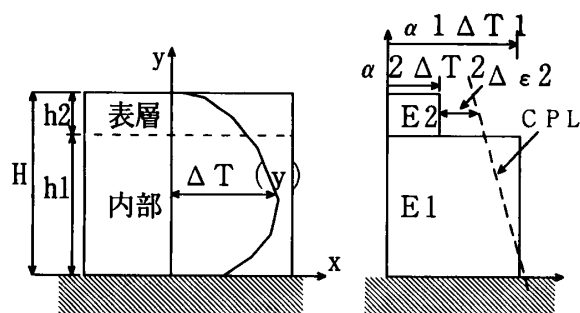


図-1 内部拘束応力の発生メカニズム

り発生する応力（温度応力）増分 $\Delta \sigma_2$ は、コンベンションライン（CPL）⁸⁾ の考えを適用すると以下ようになる。

$$\Delta \epsilon_2 = \alpha_1 \Delta T_1 (1 - \alpha_2 \Delta T_2 / \alpha_1 \Delta T_1) \times K \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_2 = E_2 \times \Delta \epsilon_2 \quad (2)$$

$$K = 1 / \{1 + (E_2/E_1)(h_2/h_1)\}$$

$$\times [1 - 1 / \{1 + \{1 + (E_2/E_1)(h_2/h_1)\} \{1 + (E_2/E_1)(h_2/h_1)\} \} (E_1/E_2)(h_1/h_2)(h_1/H)^2/3]$$

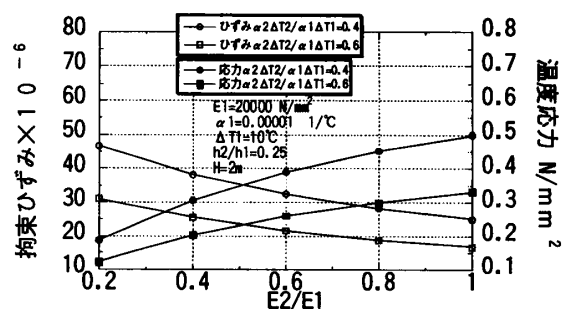
底版表層に発生する応力を規定するものは、表面と内部の自由膨張量比 $\alpha_2 \Delta T_2 / \alpha_1 \Delta T_1$ 、ヤング係数比 E_1/E_2 、厚さ比 h_2/h_1 である。

2. 2低熱ポルトランドセメントの表層使用の有効性

これまで、低熱ポルトランドセメントを底版状マスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として使用する場合、その低発熱性に着目しリフト全厚に対して同セメントを使用している。しかし、同セメントは普通セメントや高炉セメントに比べて一般的に高価であるため、ここでは低熱ポルトランドセメントのヤング係数の発現速度が遅いことに着目し、同セメントを部分的に使用することを考える。図-2は、式(1)より、拘束ひずみおよび温度応力と E_1/E_2 の関係を示したものである。これより、 E_2/E_1 が低いほど拘束ひずみは増加するが、表層のヤング係数 E_2 の低下が勝り、結果的に表層の温度応力は低下する。これが低熱ポルトランドセメントを部分的に使用する効果である。

2. 3 プレクーリングの表層使用の有効性

図-3は、底版状マスコンクリートにおいて

図-2 ヤング係数比 (E_2/E_1)

と拘束ひずみおよび温度応力の関係

プレクーリングを表層のみに使用した場合の部材内の温度変化を模式的に示したものである。コンクリート打設後、コンクリート内部の温度は、水和熱や部材内の熱移動、境界との熱収支により分布を持つことになるが、表層をプレクーリングした場合は、打設時点において表層部分と外気温度および冷却していない内部コンクリートとの間に温度差が生じる。プレクーリングにより冷却した表層部分の温度上昇は、水和熱に加えて温度差により加速される。このため式(1)における $\alpha_2 \Delta T_2 / \alpha_1 \Delta T_1$ が1に近づき、拘束ひずみ $\Delta \epsilon_2$ は低下し、温度応力が低減する。

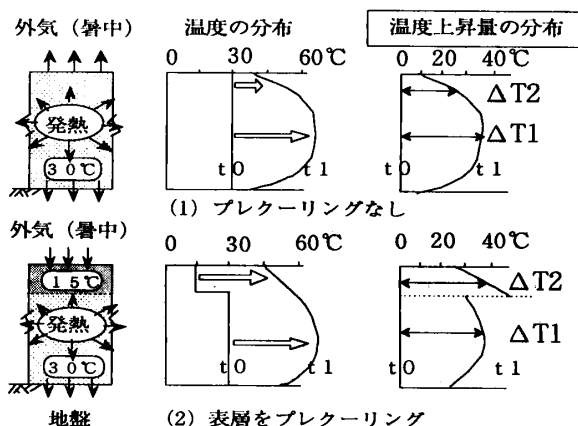


図-3 部材内の温度変化模式図

3. 実験および結果の概要

3. 1 試験体の概要

(1) 形状寸法および埋設計器

図-4に試験体の形状寸法および埋設計器の設置位置を示す。表-1に埋設計器の仕様を示す。試験体側面は、底版状の構造物の温度分

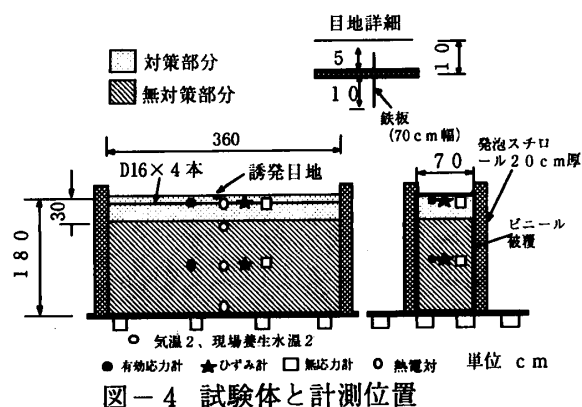


表-1 計器の種類と設置個数

計器の種類	製造会社	型番	個数
温度計	東京測器	C-C	16
ひずみ計	東京測器	KM-100B	6
有効応力計	東横エルメス	GK-100-505	6
無応力計	東京測器	KMF-51	6

布を再現するために、厚さ20cmの発泡スチロールにより断熱している。したがって部材内の温度変化は上下方向が卓越する。試験体内部および表層にはこの温度分布によって発生するひずみや温度応力を測定するための埋め込み型ひずみ計と有効応力計を設置した。有効応力計は、計器内部に打設コンクリートを充填することで、変換器の一部として機能することにより、コンクリートに発生する応力を直接計測するものである。また、埋め込み型ひずみ計の測定値は、温度応力に起因するひずみ（拘束ひずみ）と温度膨張ひずみを含んだ全ひずみであるため、埋め込み型ひずみ計を周囲から絶縁した容器に置いて温度膨張ひずみそのものを計測する計器（無応力計）を別途設置した。さらに、これら計器の温度特性を補正するために、熱電対を設置した。また、表層には対策の差をひび割れ発生有無により評価できるように、ひび割れ誘発目地を設置した。

本試験は温度応力のみに着目するため、乾燥収縮ひずみが無視できるように、試験体全面をビニール被覆した。また材齢初期の上面からの水分逸散防止を確実にするため、打設後材齢1日まで湿潤した養生マットを上面に敷いた。

(2) 試験ケースおよび配合

表-2に試験ケースを示す。ケース1は、温度

表-2 試験ケース

ケース	対策	打設範囲
1	なし	早強
2	表層プレクーリング打設	対策 早強
3	表層低熱コンクリート打設	早強

表-3 コンクリートの配合

種類	スラブ cm	W/C %	air %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
早強	12	50	4.5	4.3	175	350	742	1014	2.8
低熱	12	56	4.5	5.0	163	292	905	933	2.34

設計基準強度 35N/mm²

保証材齢 早強28日、低熱91日

Ad 高性能 A E 減水剤

応力が顕著に発生する早強セメントを用いたコンクリート（以下早強コンクリート）を用いて全厚を打設した。ケース2は、プレクーリングの部分使用に関するケースであり、下層の150cm範囲に25℃程度の早強コンクリートを打設した後、ただちに表層の30cmのみに事前に10℃程度にプレクーリングした早強コンクリートを打設した。ケース3は、下層の150cm範囲に早強コンクリートを打設した後ただちに表層の30cmのみに低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下低熱コンクリート）を打設した。

(3) 材料特性

20℃水中養生および現場水中養生した試験体の強度試験結果より、積算温度M(℃・時間)との関係を求めた結果を以下に示す。

$$\text{早強コンクリート: } f'c = M / (31.35 + 0.0241M)$$

$$\text{低熱コンクリート: } f'c = M / (176.3 + 0.0279M) \quad (3)$$

単位 N/mm²

3. 2 実験結果

図-5に内部と表層の温度計測結果を示す。図-6に温度応力計測結果、図-7に拘束ひずみの計測結果を示す。

これより、プレクーリング（ケース2）や低熱コンクリートを部分使用した試験体（ケース3）は、実施しない試験体（ケース1）に比較して、温度応力および拘束ひずみが低減しており、部分使用の効果が認められる。なお、図-2の傾

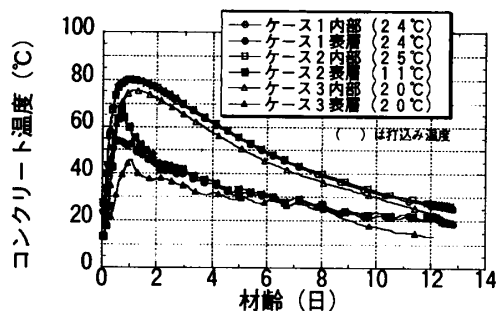


図-5 温度計測結果

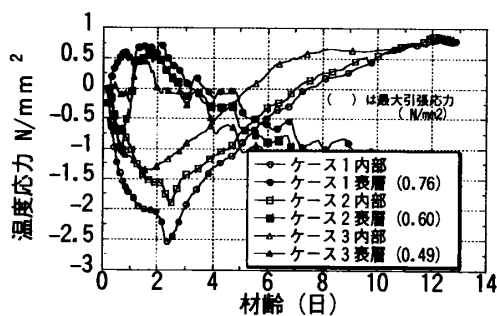


図-6 温度応力解析結果

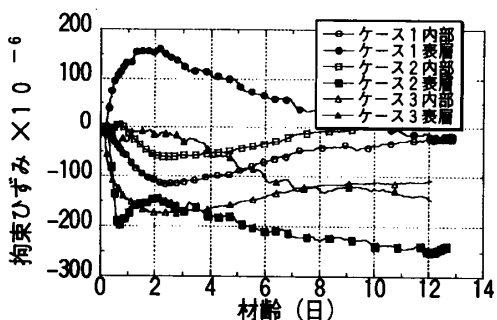


図-7 拘束ひずみ測定結果

向と異なり、ケース3の表層の拘束ひずみがケース1に比べて小さいが、これは実験から得られるケース3の $\alpha_2 \Delta T_2 / \alpha_1 \Delta T_1$ がケース1に比べて大きいことが考えられる。

また、ひび割れ誘発目地部にはケース1は0.08mm幅、ケース3は0.06mm幅のひび割れが発生した。ケース2はひび割れの発生は認められなかった。

4. プレクーリングおよび低熱コンクリートの部分使用の効果に関する解析的検討

4.1 検討方針

プレクーリングおよび低熱コンクリートの部分使用による温度応力の低減効果を解析的に比較検討する。温度応力解析にはクリープの表現方法として有効ヤング係数を用いた有限要素法を

用いる。

まず、温度実測値を解析で再現する。その結果を用いた温度応力解析では、有効ヤング係数設定の際必要となる静ヤング係数の補正係数 Φ は以下の方法で求める。⁵⁾

①実測拘束ひずみ ϵ および実測温度応力 σ と材齢-実測値の関係を、多項式の最小二乗法などで回帰し、測定結果の代用値とする。

②回帰結果を用いて各材齢に対して補正係数 Φ を求める。

$$E_{\text{eff}}(t) = \Delta \sigma(t) / \Delta \epsilon(t) \quad (4)$$

$$\text{早強: } E = 0.25 \times 10^5 f_c^{0.41939} \quad (5)$$

$$\text{低熱: } E = 0.42 \times 10^5 f_c^{0.3395} \quad (6)$$

単位 kgf/cm²

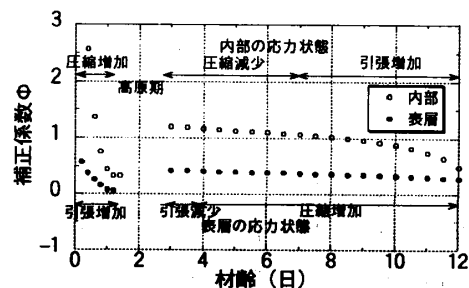
$$\text{補正係数 } \Phi = E_{\text{eff}}(t) / E \quad (7)$$

Δ : 時間増分に対する増分

各対策の効果を同一条件で比較するために、補正係数 Φ や線膨張係数 α は実験から得られた値の平均を用いる。

4.2 計測結果にもとづいた補正係数 Φ の設定
補正係数 Φ と材齢との関係の一例(ケース1)を図-8に示す。これまでの研究によれば補正係数 Φ は、温度応力の状態に応じて設定すべきとの報告がある。^{2)~5)} そのため本論では「圧縮応力増加」「圧縮応力減少」「引張応力増加」「引張応力減少」などの応力状態に応じて Φ を整理する。

表-4は補正係数 Φ の計算結果である。試験体内部に設置した埋設計器では、材齢ごく初期(材齢半日まで)と「圧縮応力減少域」で1.0を上回る結果が得られた。補正係数 Φ は1.0

図-8 補正係数 Φ の変化(ケース1)

以下と考えられるが、理由としては、極若材齢での計測器精度、静ヤング係数の設定精度や、回帰式精度などが考えられる。

一方、表層に設置した計器に関する Φ については、ケース2、3において材齢1日付近での養生マット撤去による急激な引張応力の増加時以外は $\Phi \leq 1.0$ となった。

相対比較を目的とした対策の効果の解析では、表-4に示すような補正係数の全平均を対象にし、且つ $\Phi \leq 1.0$ として用いた。

表-4 補正係数 Φ 計算結果（平均値）

位置	ケース	圧縮増加	圧縮減少	引張増加
内部	1	1.48(0.47)	1.13	0.85
	2	1.30(0.61)	1.33	0.78
	3	0.62	1.22	0.52
	全平均	0.57	1.23	0.72
表層		引張増加	引張減少	圧縮増加
	1	0.25	0.42	0.36
	2	0.52	*	0.68
	3	*	*	0.61
	全平均	0.39	0.42	0.55

() は、1.0以下の値に対する平均値

*は、測定値変動が大きいため検討対象外とした。

4. 3 解析モデルおよび境界条件

図-9に解析に使用した解析モデルおよび境界条件を示す。

表-5に温度応力解析定数を示す。線膨張係数は、無応力計の測定結果より温度上昇期と下降期について求めた。

4. 5 温度応力解析結果

温度実測値（図-5）を解析的に再現した結果を用いて温度応力解析を行った。温度解析値がほぼ2、3℃の範囲内で実測を再現した段階

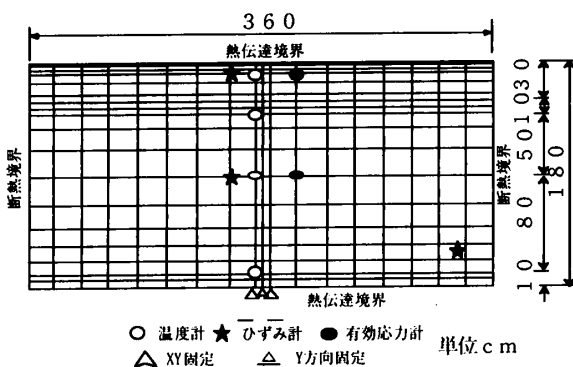


図-9 解析モデル

表-5 応力解析定数

種 類	数 値
有効ヤング係数	表-5 参照
ポアソン比	0.2
線膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$) $\times 10^{-6}$	ケース1：表層 温度上昇期 6.85
	温度下降期 9.08
	内部 温度上昇期 7.60
	温度下降期 8.97
	ケース2：表層 温度上昇期 12.8
	温度下降期 10.2
	内部 温度上昇期 7.36
	温度下降期 8.48
	ケース3：表層 温度上昇期 7.20
	温度下降期 9.40
	内部 温度上昇期 5.98
	温度下降期 8.28
全平均	8.5

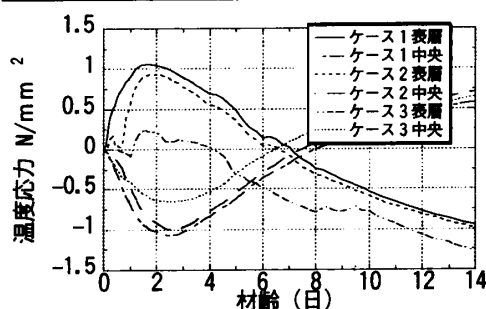


図-10 各対策の解析的比較（温度応力）

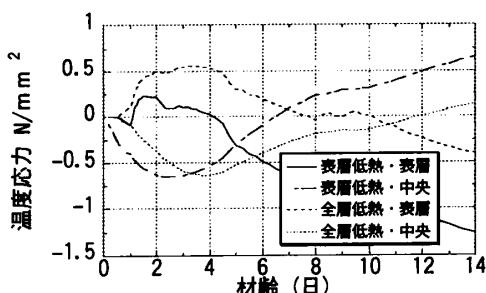


図-11 各対策の解析的比較（温度応力）

で温度応力解析に移行した。温度応力解析結果を図-10に示す。図-11は、全層を低熱コンクリートで打設した場合の解析結果について示したものである。これより、プレクーリング（ケース2）および低熱コンクリートを部分使用したケース（ケース3）に温度応力低減効果が認められる。また、全層を低熱コンクリートで打設する場合に比べて、表層のみに打設する場合が、より温度応力が低減する結果となった。このことは、図-2に示すように、表層に低熱コンクリートを打設する場合に（E2/E1 $\leq$ 1）となることによる応力減少効果が、全層を低熱コンクリートで打設する場合（E2/E1=1）における $\alpha_2 \Delta T_2 / \alpha_1 \Delta T_1$ が

1に近づくことによる応力低減効果を上回った結果と考えられる。

5. 有限要素法による温度応力予測精度

前章ではプレクーリングおよび低熱コンクリートの部分使用をすることで温度応力が低減できることがわかった。しかし、解析結果(図-10)は個々の試験体の実測結果(図-6)をよく再現できているとは言えない。

前章では各ケース同一条件とした補正係数 Φ と線膨張係数 α について、ここでは各試験体個々の値(表-4、5)を用いて解析した。

一例として応力変動の比較的大きいケース2について、図-12、13に解析結果を示す。これらより、補正係数 Φ 、線膨張係数 α を適切に評価することで温度応力の予測精度が向上することが認められる。

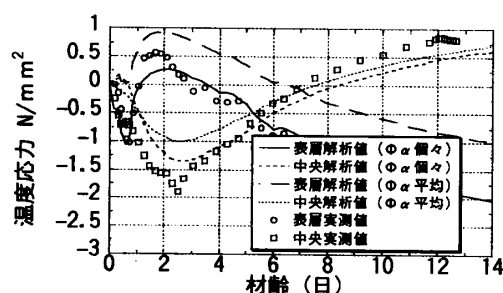


図-12 温度応力解析結果(ケース2)

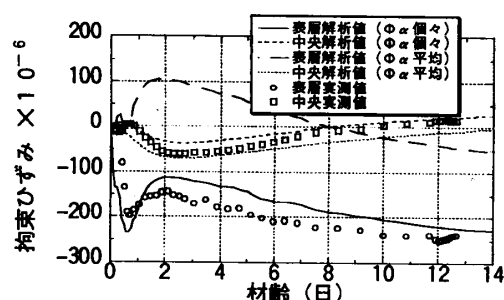


図-13 拘束ひずみ解析結果(ケース2)

6. まとめ

内部拘束が卓越するマスコンクリート構造物の温度応力低減対策として、プレクーリングおよび低熱コンクリートの部分使用に対する評価、ならびに有限要素法解析に使用する有効ヤング係数の評価に関し、実験的および解析的に検討した。

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 実験の結果、全層を早強コンクリートを用いて打設した場合に比べて、表層をプレクーリングする場合あるいは表層を低熱コンクリートを用いて打設することで温度応力を低減できる。
- (2) 実験で認められた上記の傾向は、有限要素法による解析においても認められる。
- (3) 有効ヤング係数法を用いた有限要素法解析により温度応力を精度よく推定するためには、「圧縮増加」「圧縮減少」などの応力変動状態に応じた補正係数 Φ と、線膨張係数 α を適切に評価する必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会 自己収縮研究委員会報告書, p123, 1996. 11
- 2) 野村, 上原, 梅原: クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 15, NO. 1, p1121-1126, 1993
- 3) 平本, 入矢, 梅原: 若材齢コンクリートのクリープを考慮した有効弾性係数の算定, 土木学会第51回年次学術講演会, p820-821, 平成8年9月
- 4) 平本, 入矢, スプラック, 梅原: 若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 19, NO. 1, p775-780, 1997
- 5) 江渡, 丸山, 野添: マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討, 構造工学論文集, vol 45, p27-34, 1999. 4
- 6) 江渡, 小野: マスコンクリートの局部クーリングに関する解析的検討, 土木学会第47回年次学術講演会, p868-869, 平成4年9月
- 7) Eto, M., Maruyama, K. and Ono, S.: Effectiveness of partially cooling system for massive concrete structures, FOURTH CANMET/ACI/JCI, p831-853, 1998
- 8) (社)日本コンクリート工学協会 マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, p123, 1996. 11