

論文 マスコンクリートの温度応力低減を目的とした低熱ポルトランドセメントの部分使用工法の開発

江渡 正満*¹・丸山 久一*²・武藤 和久*³・大内 雅典*⁴

要旨：本研究は、版状のマスコンクリート構造物の温度応力を低コストかつ効果的に低減する目的で、表層部のみに低発熱形セメントを使用したコンクリートを打設する工法を開発し、その効果を試験施工および解析を通じて検討したものである。検討の結果、温度応力を効果的に低減できる低発熱形セメントの使用範囲は全厚の10%程度であること、通常のセメントを用い保温養生を施す場合や、低発熱形セメントを全厚に用いる場合に比べて温度応力が低減し、ひび割れ制御に対して効果的な工法であることを確認した。

キーワード：マスコンクリート、温度応力、低熱ポルトランドセメント、低コスト化

1. はじめに

現在、温度ひび割れの制御対策は種々実施されている。対策の立案に当たっては、各種対策の得失を念頭に置き、その効果、施工性、経済性などについて総合的な検討が行われるが、特に経済性は重要な判断指標となる。例えば、底版状構造物に着目した場合、対策としてリフト分割施工や保温養生¹⁾などが一般に用いられる。しかし、このような方法は構造物がマッシュになる程その後の工程に影響し、結果的にコストの増大につながる。一方、工程に大きな影響を与えずに温度ひび割れを制御するためには、低熱ポルトランドセメントのような、より低発熱形のセメントの使用²⁾やプレクーリング³⁾あるいはパイプクーリング⁴⁾などの抜本的な対策が必要となる。しかしこのような対策は高額となる。このように効果、工程、コストの3者を適切なレベルで満足するような制御対策技術は、

現在のところ必ずしも確立されておらず、施工現場では、おうおうにして十分な対策が採れず、竣工を待たずに温度ひび割れを生じてしまうケースが多いのが実状である。

筆者らは、このような実情を改善するために、版状構造物の低コストかつ効果的な温度ひび割れ制御対策として、低発熱形セメントを用いたコンクリートを底版の表層のみに打設（部分使用）することを提案し、その効果を試験体において確認した⁵⁾。本工法は、部分使用による材料コストの低減および無保温あるいは保温養生期間の短縮によるコスト低減を目的として考案したものである。

本研究は、部分使用の範囲の解析的検討と実施工への適用を通じて、同工法の温度応力低減効果および温度ひび割れ制御効果を検討したものである。

*1 清水建設（株） 土木本部技術第一部課長 工博（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）

*3 日本鉄道建設公団 東京支社 横浜鉄道建設所副所長

*4 清水建設（株） 土木横浜支店 工事長

2. 低発熱形セメントの部分使用の有効性

2. 1 温度応力低減メカニズム

図-1に示すように版状コンクリート部材(厚さH)を部位1(線膨張係数 α_1 , 厚さ h_1 , ヤング係数 E_1)と部位2(α_2 , h_2 , E_2)に分けて考える。部位1, 2はそれぞれ内部と表層に相当する。いま, ある時刻間に断面平均でそれぞれ ΔT_1 と ΔT_2 の温度変化が生じたとする。この場合部位2(温度ひび割れを議論する場合に着目すべき, 底版の表層)には, 平面保持を仮定すると, 応力に直接起因するひずみ(拘束ひずみ)増分 $\Delta \varepsilon_2$ が生じ, それにより応力(温度応力)増分 $\Delta \sigma_2$ が発生する。

$\Delta \varepsilon_2$, $\Delta \sigma_2$ はコンペンセーションラインの考えを適用すると以下ようになる⁵⁾。

$$\Delta \varepsilon_2 = (\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2) \times K \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_2 = E_2 \times \Delta \varepsilon_2 \quad (2)$$

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

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

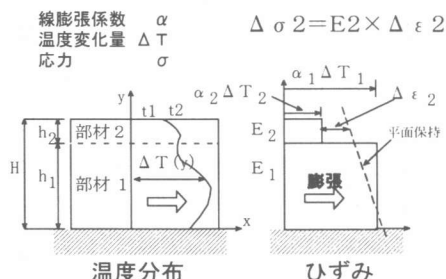


図-1 拘束ひずみ $\Delta \varepsilon$ と温度応力 $\Delta \sigma$

今, 以下の3種類のタイプを考える。

タイプ1: 全厚Hに通常のセメントを用いる。

タイプ2: 表層のみを低発熱形セメントを用いる。

タイプ3: 全厚Hを低発熱形のセメントを用いる。

なお, 低発熱形のセメントは通常のセメントに比べて, 発熱速度や強度発現が小さいとし, 簡単のため部位2の高さ h_2 は一定とする。

図-2に, これら3タイプの部位1, 2の温度の経時変化, 部位2のヤング係数の発現とそれによって発生する拘束ひずみを模式図として示す。

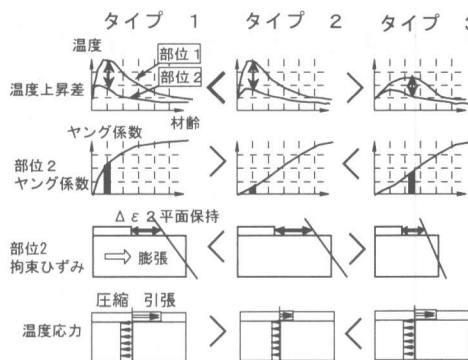


図-2 各タイプの比較

これらタイプを相対的に比較すると,

①部材中心(部位1)の最高温度上昇 ΔT_1 は, タイプ1, 2では大差ない。タイプ3が最も低い。

②表層(部位2)の最高温度は, タイプ1, 2では大差ない。タイプ3が最も低い。

③部位2に発生する拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_2$ に影響する部位1, 2の温度差($\Delta T_1 - \Delta T_2$)は, タイプ1, 2では大差ない。タイプ3が最も小さい。

④部位1, 2とも同一セメントであるタイプ1, 3では, (1)式より各部位のヤング係数比 E_2/E_1 が同値($=1$)となる。したがって $\Delta \varepsilon_2$ は, $(\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2)$ が支配要因となり, 線膨張係数 α が同値とすれば, タイプ1 > タイプ3となる。また E_2 が小さいタイプ2はタイプ1に比較して $\Delta \varepsilon_2$ が増加する。以上より $\Delta \varepsilon_2$ の大小関係は, タイプ2 > タイプ1 > タイプ3となる。

⑤部位1と部位2の温度差が最大になる時期は, 概ね部位1が最高温度を示す時期であり, 発熱速度の遅いタイプ3はタイプ1, 2に比較して後期となる。すなわち, 部位2の温度応力 $\Delta \sigma_2$ を評価する場合, (2)式の E_2 の大小関係は, タイプ1 > タイプ3 > タイプ2となる。

⑥ $\Delta \sigma_2$ の大小関係は, 一般的にはタイプ1 > タイプ3である。さらにタイプ3は $\Delta \varepsilon_2$ は小さいがその時点での E_2 が大きいので, 温度上昇速度や強度発現速度の状態にもよるが, タイプ2に比べて $\Delta \sigma_2$ が大きくなる。すなわち $\Delta \sigma_2$ の大小関係は, タイプ1 > タイプ3 > タイプ2となり, 表層に低熱形セメントを用いた場合が最も $\Delta \sigma_2$ が小さくなる。

2. 2部分使用範囲の検討

ここでは、版の表層に発生する温度応力 $\Delta\sigma_2$ の最大値が最も小さくなるような、低熱形セメントを用いる範囲を2次元FEM解析により求めた。図-3に構造物形状、表-1に解析定数を示す。図-4、5に表層の温度応力が最大を示した材齢での、温度応力の厚さ方向断面の分布と表層に発生する最大温度応力と低発熱形セメントの使用範囲との関係を示す。表層に低発熱形セメントを打設することにより、温度応力が低減している。また使用範囲を増やすにしたがって再び温度応力は増加している。温度応力をもっとも低減できる低発熱形セメントの使用範囲は全厚さに対して10%程度であることが認められる。

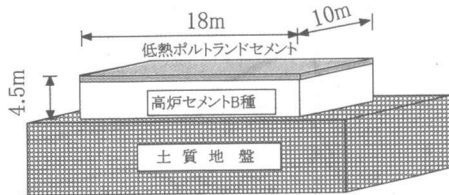


図-3 構造物形状

表-1 解析定数

種 類	単 位	数 値
打込み温度	℃	32
断熱係数 λ	W/m℃	低熱: $Q(t)=37.1(1-\exp(-0.38t))$ 高炉B: $Q(t)=41.5(1-\exp(-1.26t))$
熱伝導率	W/m℃	コンクリート 2.7
熱容量	KJ/m ³ ℃	コンクリート 2645
熱伝達率	W/m ² ℃	14
外気温度	℃	27
地盤初期温度	℃	20
圧縮強度 f_c	N/mm ²	低熱 42.5×t/(20.1+0.78×t) 高炉B 43.4×t/(9.5+0.898×t) t: 材齢 (日)
有効ヤング係数	N/mm ²	$\Phi \times 4700 \times f_c^{0.5}$ Φ : クリープ補正係数
地盤ヤング係数	N/mm ²	30
ポアソン比		0.2

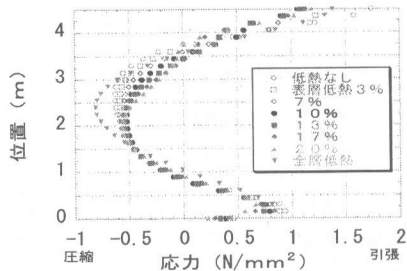


図-4 温度応力の分布

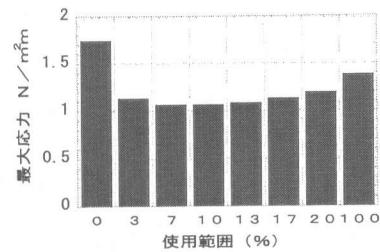


図-5 低発熱形セメントの使用範囲と最大応力

3. 試験施工対象構造物の概要

3. 1 構造物の形状寸法

試験施工は開削トンネル躯体部底版において行った。A方は底版厚さ2mの全厚に高炉セメントB種（以下記号BB）を適用し、B方は前節のデル解析の結果をもとに全厚2mの10%である表層20cmに低熱ポルトランドセメント（以下記号L）を打設した。

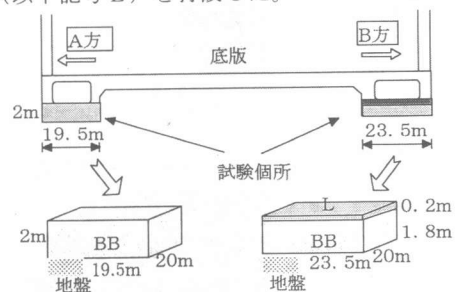


図-6 試験箇所

3. 2 事前の検討結果

本構造物の形状寸法、打設条件に基づいて以下の解析を有限要素法を用いて行った。なお、熱伝達係数は、散水養生では14 W/m²℃、養生マットは、5 W/m²℃とした。

ケース1：全層BB打設+散水養生（参考解析）
ケース2：全層BB打設+養生マット7日間養生（施工実施）

ケース3：全層L打設+散水養生（参考解析）
ケース4：表層20cm L打設+散水養生（施工実施）

ケース5：表層20cm L打設+養生マット7日間養生（参考解析）

図-7に温度差が最大となる時点の部材中心と表面温度、図-8に表層の最大引張応力の値、図-9に温度ひび割れ指数の最小値を示す。

表層 20cm L 打設+散水養生（ケース 4）は全層 BB 打設+保温養生（ケース 2）に比べ温度応力は大きく低減する。また温度ひび割れ指数の改善も認められる。また、全層 L セメントを打設する場合よりも温度応力は低減している。

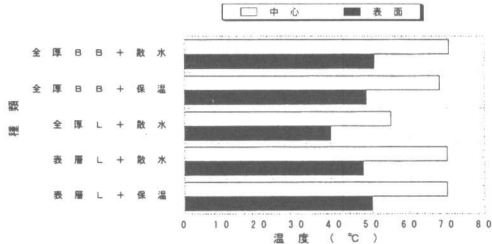


図-7 部材中心と表面の温度

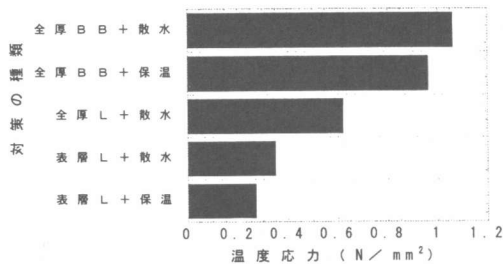


図-8 表層の最大引張応力

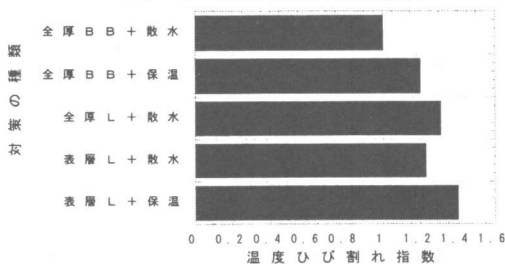


図-9 表層の温度ひび割れ指数（最小値）

3. 3 施工日時

コンクリート打設日は、以下のとおりである。

A方：（全厚 BB 使用）：平成 11 年 8 月 26 日

B方：（表層 L セメント使用）：同 8 月 6 日

3. 4 計器設置位置と計器の種類

表-2 に計器の種類と個数を示す。図-10 に計器設置位置を示す。

表-2 計器の種類と個数

計器の種類	製造会社	型番	個数
温度計	東京測器	C-C	7
ひずみ計	東京測器	KM-100B	2
有効応力計	東横エルメス	GK-100-505	2
無応力計	東京測器	KMF-51	2

注) 熱電対は外気 1 点含む

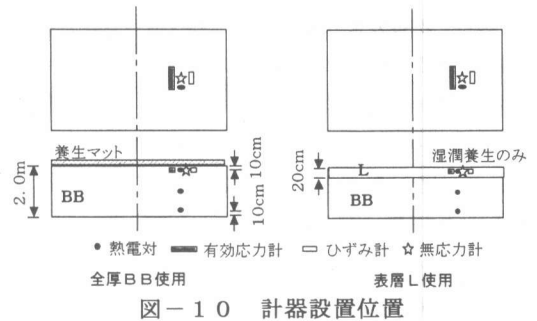


図-10 計器設置位置

4. 計測結果と考察

4. 1 温度計測結果

図-11, 12 に、温度計測結果（材齢と温度の関係）を示す。部材内部の最高温度は約 70°C であり、ほぼ計画時点での解析値（図-7）と一致している。

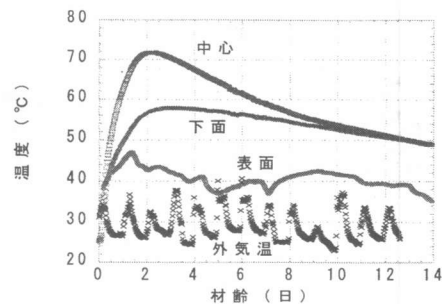


図-11 温度計測結果（全厚 BB 打設+保温）

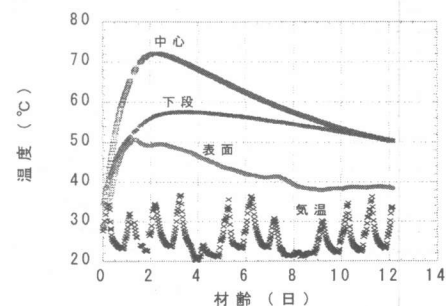


図-12 温度計測結果（表層 L 打設）

一方、部材内温度差に着目すると、全厚に BB セメントを使用しかつ保温養生した場合は、解析値が最大 20.5°C (=69-48.5) となっている（図-7 参照）のに対し、実測は最大 29°C (=72-43) である（図-11 参照）。これは水温の低い地下水が絶えず保温養生区間に流れ込み、表面を

冷却したことが一因と考えられる。湧水はA方が多かった。一方、表層にLセメントを使用した場合については、解析値が最大 22.5℃(=70-47.5)に対し、実測値は最大 22℃(=72-50)であり、ほぼ一致している。

4. 2 温度応力低減効果に関する考察

(1) 計測結果の修正と効果の評価

表層に発生する温度応力は、コンクリート内部と表面の部材内温度差に起因して生じるが、BBセメントを全厚に使用したケースの部材内温度差は、保温養生しているにもかかわらず前述のように最大 29℃で、Lセメントを表層に使用し保温しないケース（同最大約 22℃）より大きくなっている。これは事前解析や一般的知見とは相違している。この相違は、セメントの種類や打設工法に起因したものでなく、打設日の違いや打設個所の環境の違いなどの外的要因に起因したものと考えられた。そこで、計測結果を同一条件で論じるために、ここでは部材中心と表面の温度差の程度が計画時と同様になった場合を想定して、以下のような修正を施した。

①図-7より計画時点での部材内最大温度差を設定する。

②図-11, 12より計測から得られる部材内最大温度差を設定する。

③計画時と計測時との部材内最大温度差の比率を計算し(①/②)、これを温度応力や拘束ひずみの計測結果に乗じる。

以上の修正を施した結果を、図-13, 14に示す。これらより、Lセメントを表層に使用した場合は、BBセメントを全厚に使用し且つ表面を保温したケースに比べて、温度応力が1/2～1/3程度に低減している。なお、事前解析と同程度の温度状態を想定したにもかかわらず、温度応力が事前解析(図-8)より低下している。この要因の一つに、表層に配置された鉄筋の存在による拘束ひずみの低減が考えられる。本構造物には、表層に主筋 D25ctc125 が2段、配力筋 D19ctc250 が配置されている。図

-15, 16は、式(1), (2)を用いて拘束ひずみと温度応力を計算し、実測値とともに示したものである。鉄筋ありのケースは鉄筋と

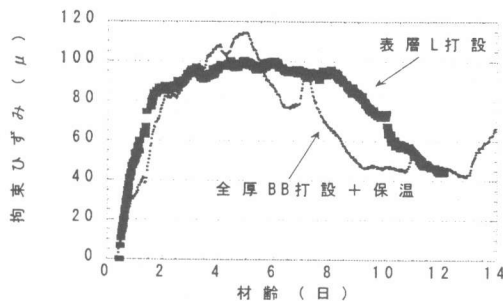


図-13 修正した拘束ひずみの計測結果

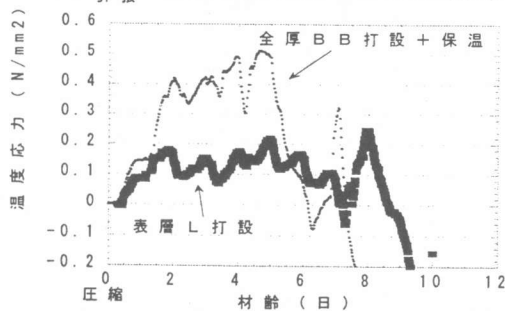


図-14 修正した温度応力の計測結果

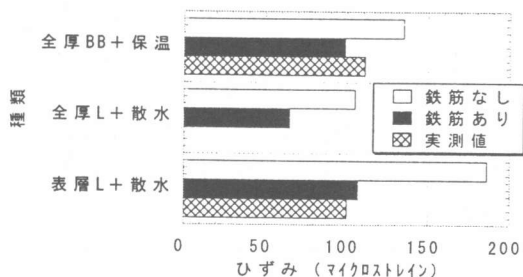


図-15 拘束ひずみの計算結果(鉄筋考慮)

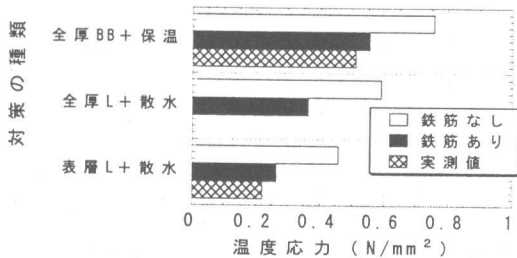


図-16 温度応力の計測結果(鉄筋考慮)

コンクリートの付着が完全であると仮定し、表層のヤング係数 E_2 を鉄筋量に応じて増したも

のである。これより鉄筋を考慮することで温度応力や拘束ひずみが30～40%低減し、実測値に近づくことが分かる。

(2) 温度ひび割れ指数の評価

図-17に、修正した温度応力計測結果をもとに、材齢と温度ひび割れ指数の関係を示す。使用した物性値は以下のとおりである。

$$\text{引張強度}^{6)} = 0.35 \times (\text{圧縮強度})^{0.5}$$

$$\text{圧縮強度} = t / (1.113 + 0.024 \times t) : \text{Lセメント}$$

$$= t / (0.238 + 0.025 \times t) : \text{BBセメント}$$

いずれも実測強度を材齢 t で回帰した。

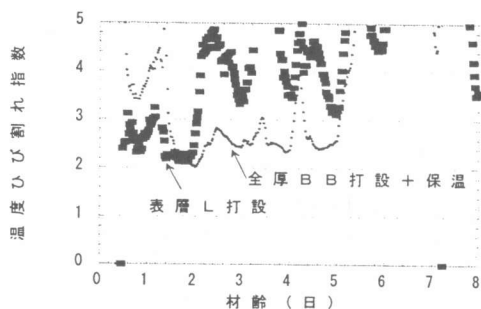


図-17 温度ひび割れ指数の計測結果

温度ひび割れ指数の最小値は、全厚にBBセメントを打設しかつ保温養生した場合は2.05、表層にLセメントを打設し保温養生しない場合は2.15であり、若干提案工法の方が大きい。なお、いずれのケースも温度ひび割れの発生は認められなかった。

提案工法は温度応力の低減効果が著しいため、更にマスコンクリートになった場合は、保温養生なしやあるいは簡単な保温養生を実施するだけで、低コスト且つ効果的に温度ひび割れが制御できると考えられる。

5. まとめ

低発熱形セメントの部分使用による温度応力の低減効果を、底版コンクリートにおける計測結果に基づいて確認した。本検討で得られた結論を以下に列挙する。

①FEMによるパラメータ解析の結果、温度応力を最も低減できる低発熱形セメントの表層使用の

範囲は底版の全厚に対して10%程度である。

②計測結果をもとに、提案工法(表層にLセメントを使用したコンクリートを打設する)の効果を評価した。その結果、提案工法は従来工法(全厚にBBセメントを使用しかつ保温養生した場合)に比べて、温度応力は1/2～1/3に低減した。

③提案工法の温度ひび割れ指数は、従来工法を若干上回った。特に提案工法は、温度応力の低減効果が大きいことから、更にマスコンクリートとなった場合には、保温養生なしあるいは簡単な保温養生を行うことで、低コスト且つ効果的に温度ひび割れを制御できると考えられる。

参考文献

- 1) 江渡正満, 新美勝之, 高木健次, 野平明伸, 若林雅樹: マスコンクリートの保温養生に用いる養生材の効果に関する実験的検討, 第53回土木学会年次学術講演会, pp.720～721, 1998.10
- 2) 神山英幸, 野本健司, 西垣和弘: スラブ基礎における普通セメントと低熱セメントの温度応力計測解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol17, pp.1097～1102, 1995.6
- 3) 大澤賢修, 福田信幸, 森 敏昭, 小野 定, 江渡正満: 液体素室を用いたダムコンクリートのプレクーリング施工, コンクリート工学, Vol26, No5, pp.21～29, 1988.5
- 4) 中込秀樹, 西 洋司, 田島仁志, 高橋三雄: 吊り橋アンカレイジのマスコンクリート対策, コンクリート工学, Vol29, No4, pp.37～49, 1991.4
- 5) 江渡 正満, 丸山久一, 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol21, pp.1147～1152, 1999.7
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[平成8年度版]施工編, 17章マスコンクリート, pp.137～193, 1996