

論文

[1191] 低発熱型セメントを使用したマスコンクリートの温度応力特性について

西川正夫*1・藤原敏晴*2・守分敦郎*1・沢井 真*3

1. はじめに

マスコンの温度応力対策の一つの方向として「コンクリートの発熱の抑制」があり、この観点からクーリング、低発熱セメントの使用等が実施されている。今回打設を計画された開門前扉室底版部は、厚さ3.5mで打設量4,900m³におよぶ大規模な構造物であり、温度ひびわれの発生が懸念された。そこで、温度応力対策のために種々の検討がなされ、低発熱型高炉セメントB種を使用することが決定された。一方、このセメントを使用したマスコン等の大量打設の例が少ないため、施工時には温度応力に関する実施工レベルでのデータを得るべく、温度計、ひずみ計、有効応力計等の計器が設置され計測が実施された。ここでは、この計測より得られた結果等から、低発熱型高炉セメントB種を使用したマスコンクリートの物性、挙動特性等について検討した。

2. 計測概要

今回施工された構造物は開門前扉室であり、厚さ3.5m（平面寸法37m*35m）の底版、湾曲してその両端が幅4.5mの柱で拘束された側壁で構成されている。底版部は、S.C.P工法（砂杭を衝撃荷重を利用して打設し、良く締った杭群を造成し、軟弱地盤の強化を図る工法）により改良された粘性土に打設された鋼管杭（φ900mm, c. t. c5000mm）を基礎としている。このうち、計測を実施した場所は底版部である。構造の概要および計測機器設置位置を図-1に、コンクリートの配合を表-1に、コンクリートに使用した材料を表-2にそれぞれ示す。

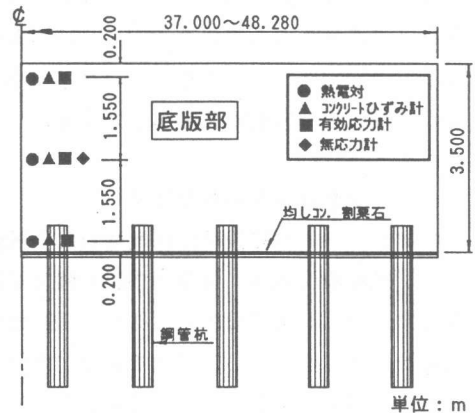


図-1 構造の概要および計測機器設置位置

表-2 使用材料

材料種別	使用材料名
セメント	低発熱型高炉セメントB種
混和剤	SP-9R（高性能AE減水剤） PZ-No. 775S
細骨材	海砂
粗骨材	砕石 2005
石 粉	石灰石粉

3. セメントの断熱温度上昇特性

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	W 水	C セメント	L 石粉	S 細骨材	G 粗骨材	Ad 9R	Ad 775S
53.8 %	48.3 %	156 kg	290 kg	30 kg	848 kg	960 kg	4.35 kg	0.8A

*1 東亜建設工業（株）技術研究所（正会員）

*2 運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所

*3 東亜建設工業（株）大阪支店（正会員）

今回使用されたセメントは、ベースセメントとしての中熱ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混入した低発熱型高炉セメントB種である。このセメントを使用して表-2に示す配合により打設温度15℃で断熱温度上昇試験を行った結果を図-2に示す。今回使用されたコンクリートの配合では、初期に発熱が遅延する傾向がみられた。従って、今回の試験結果を(1)式の形で近似した。[1]

$$T = K(1 - (1 + a \cdot t) e^{(-a \cdot t)})$$

$$= 28.0 \cdot (1 - (1 + 1.01 \cdot t) e^{(-1.01 \cdot t)}) \quad \text{----- (1)}$$

T : 断熱温度上昇量 (℃)

K : 終局温度上昇量 (℃)

a : 実験常数 (発熱速度)

t : 材令 (日)

終局温度上昇量は28.0℃程度で、コンクリート標準示方書に示される高炉セメントB種での推定値45.0℃の約62%程度であり、コンクリートの発熱量の低減に極めて有効であるといえる。

4. コンクリートの強度特性

コンクリートの打設時に採取された供試体について、圧縮強度試験、引張（割裂）強度試験を実施した（20℃、水中養生）。材令と圧縮強度との関係を図-3に示す。この結果より、今回のセメントを使用したコンクリートにおいても、適切な係数 a、b を定めることにより、材令と圧縮強度との関係をコンクリート標準示方書に示される式を用いて十分な精度で近似できることが理解される。つぎに圧縮強度と引張強度との関係を図-4に示す。圧縮強度が200kgf/cm²以下では、コンクリート標準示方書に示される式の値が若干大きくなっているが、200kgf/cm²以上では実測値の方が大きくなる傾向にある。

5. 計測結果の検討

5. 1 温度およびひずみ計測結果

温度計測結果を図-5に、断面内の温度分布を図-6に示す。温度の分布状況は、発熱が十分でない「60時間後」の場合を除いて、最高温度到達

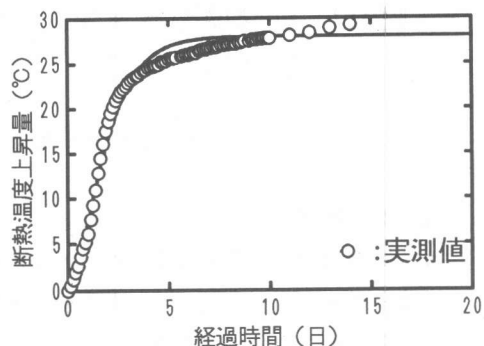


図-2 断熱温度上昇量

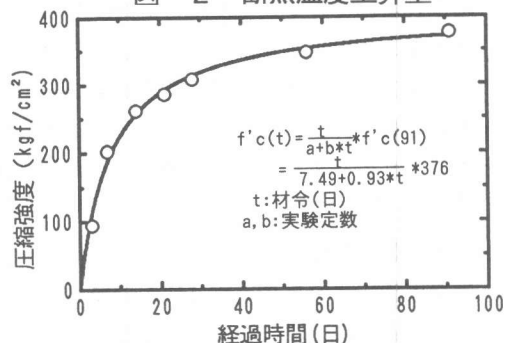


図-3 材令と圧縮強度との関係

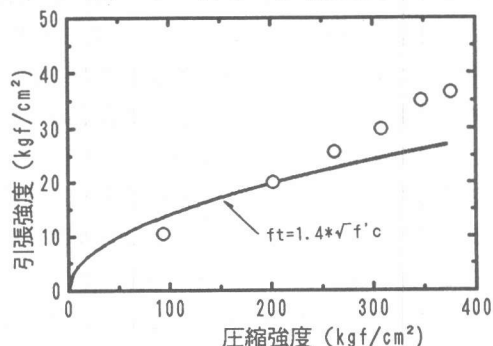


図-4 圧縮強度と引張強度との関係

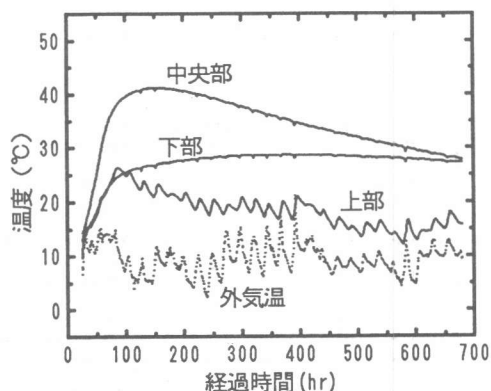


図-5 温度の経時変化

付近の「140時間後」や温度降下している「360時間後」「600時間後」における形状はよく類似しており、内部拘束的な温度差がみられる。

断面内の拘束ひずみ分布を図-7に示す。コンクリート温度が最高値に達する「140時間後」までは、上部、下部で引張ひずみ、中央部で圧縮ひずみが見られるが、温度が降下するにしたがって、全体的に圧縮側に变化する傾向がみられる。

5. 2 内部拘束ひずみについての検討

当該構造物は、前述の通り改良された軟弱地盤に打設された杭を基礎としており、内部拘束が支配的であると考えられる〔2〕。従ってここでは内部拘束状態での検討を行った。〔3〕

断面内の有効ひずみの分布は、例えば最高温度付近「140時間後」では中央が圧縮、上部と下部で引張のひずみとなっている。一方、平面保持の原則から断面内のひずみ分布は直線となる。従って、温度上昇降下の過程でコンクリートが外部拘束を受ける場合、外部拘束ひずみの分布は直線となり、その直線からずれる部分が内部拘束ひずみとなる。また同様に、断面内のコンクリート温度分布より内部拘束に關与する温度差と外部拘束に關与する温度差を分離することができる(図-8)。ここで得られた内部拘束に關与する温度差にコンクリートの線膨張係数を掛けることにより、温度計測結果から内部拘束ひずみが算出される。図-9に断面中央部でのひずみ計測結果より抽出された内部拘束ひずみと、温度計測結果より推定される内部拘束ひずみの経時变化を示す。なお、コンクリートの線膨張係数($\alpha=8.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)は、無応力計の計測結果より算定した。これによると、温度上昇時には、温度より推定されるひずみと計測値は良く一致しているが、降下時には、推定値が計測値に比べて圧縮側の値を示す傾向がみられた。

5. 3 有効応力についての検討

断面各部の有効応力の計測結果を図-10に示す。これによると、中央部では打設直後から圧縮

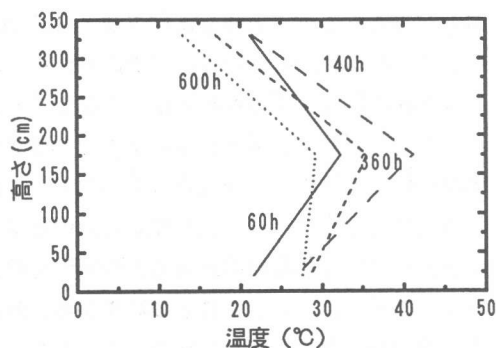


図-6 断面内の温度分布

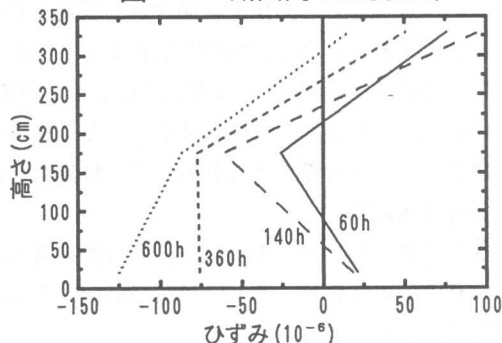


図-7 断面内の拘束ひずみ分布

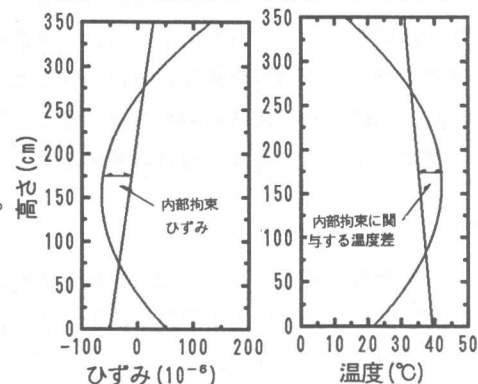


図-8 内部拘束に關与するひずみ・温度

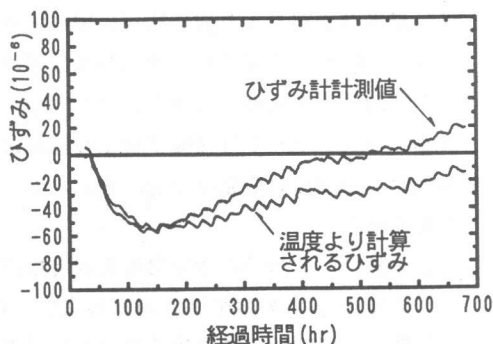


図-9 内部拘束ひずみの経時变化

応力がみられるが、上部および下部では「90時」付近で「3.0kgf/cm²」程度の引張応力がみられた。このときの温度ひびわれ指数は、下部で「5.2」であった。つぎに、前項と同様の手法で、断面中央部の有効応力計により測定された応力から抽出された内部拘束応力と、前項で算定した内部拘束ひずみより推定される内部拘束応力の経時変化を図-11に示す。また、これらの結果から有効静弾性係数の低減率を算定した結果を図-12に示す。これによると、応力が圧縮側から引張側に移行する付近では、計算上低減率が急変するものの、温度上昇時にはほぼ80~120%程度となり、温度下降時には20~25%程度に収束する。なお、低減率にはクリープの影響も含まれるため、算定に使用する弾性係数を

$(E(t) = 1.5 \times 10^4 \sqrt{f' C(t)}, E(t): \text{有効材令} t \text{ 日の有効静弾性係数}, f' C(t): \text{有効材令} t \text{ 日の圧縮強度})$ とした。

このような低減率を考慮することにより、低発熱型高炉セメントB種を使用したスラブ形状のマスコンクリートの内部拘束応力は、前項に示すような方法により、温度計測結果より実用的な精度で推定することが可能であると考えられる。

6. おわりに

低発熱型高炉セメントB種を実施工で使用し、計測結果から検討した結果以下に示すことが明かとなった。

- 1) 低発熱型高炉セメントB種の温度上昇量は、高炉セメントB種に比較して約62%程度であり、コンクリートの発熱抑制の観点から極めて有効である。
- 2) 温度計測結果より内部拘束に關与する温度差を抽出して算出された内部拘束ひずみは、ひずみ計測結果より得られる内部拘束ひずみと比較的よく一致した。
- 3) 今回の施工条件における、コンクリートの弾性係数の低減の傾向を明らかにした。

なお、コンクリート打設終了後1カ月経過した時点で、底版部のひびわれ発生状況の調査を実施したが、ひびわれの発生は認められなかった。

【参考文献】

- [1] 平賀他：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会 1982.9, p.7
- [2] 関島：マスコンクリートにおける基礎くい群の拘束度の推定方法、セメント技術年報、Vol136, 1982
- [3] マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパフォーマンシング、日本コンクリート工学協会 1985.11

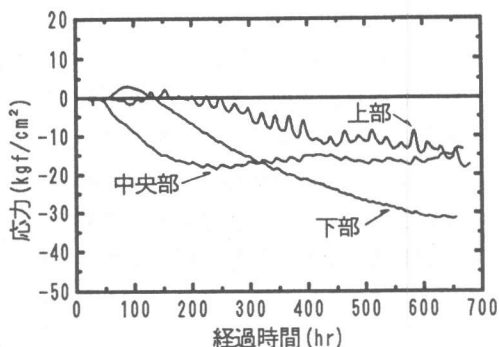


図-10 有効応力の経時変化

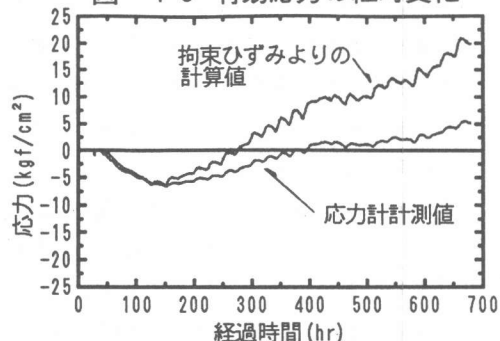


図-11 内部拘束応力の経時変化

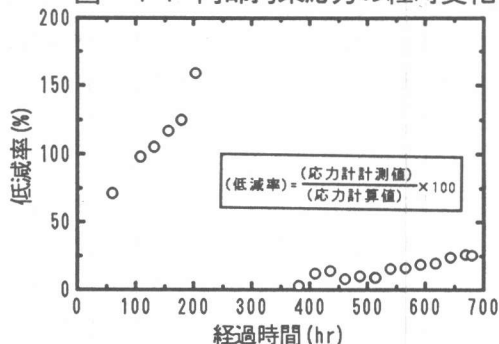


図-12 有効静弾性係数の低減率