

計測結果にもとづく低熱ポルトランドセメントの温度応力に関する一考察

日本国土開発 正会員 ○ 山内 匡
正会員 佐原 晴也

1. はじめに

橋台の縦壁において、セメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れの発生が懸念されたことから、温度ひび割れ制御対策として、セメントの水和熱自体を低く抑えることのできる低熱ポルトランドセメントを使用した。本報は、その際に行った計測結果をもとに、温度応力解析の信頼性および低熱ポルトランドセメント使用した場合における温度応力に関するコンクリートの物理的特性について報告するものである。

2. 計測概要

橋台の形状は、フーチング厚さ 2.0m、縦壁厚さ 2.0m、高さ 10.5m である。計測箇所はスパン長 16.6m の縦壁中央付近とし、この断面内に図 - 1 に示すような計器類を設置した。縦壁のコンクリート打設は 2 リフト(4.5m、6.0m)施工とし、1 リフトの高さ 2m、3m、4m の断面中心部に、熱電対、ひずみ計、有効応力計、無応力計を埋め込んだ。

3. 解析概要

解析の信頼性について検証するため、実施工時の外気温等を入力データとした事後温度応力解析を三次元 F E M 解析によって実施した。縦壁 1 リフトの施工はフーチング打設後 13 日目、縦壁 2 リフトはフーチング打設後 50 日目とし、コンクリート打設温度は縦壁 1 リフトで 30℃、縦壁 2 リフトで 16.5℃ とした。

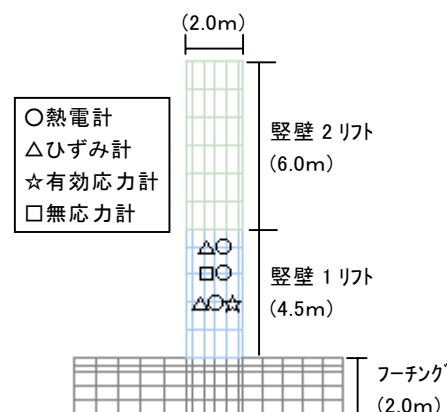


図 - 1 計器設置位置（断面図）

(1) 温度特性

温度解析時のコンクリートおよび地盤の温度特性は土木学会コンクリート標準示方書をもとに、低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇特性はセメントメーカーの技術資料をもとに設定した。ただし、合板型枠の熱伝達率については、隣接する構造物において事前に行った表面部における温度実測値および事後温度解析結果をもとに、 6.0W/m^2 の値を用いた。

(2) コンクリートの力学特性

低熱ポルトランドセメントの圧縮強度の推定式は、所定の材齢における圧縮強度試験結果と積算温度（ Σ （平均養生温度+10℃）×時間）の関係から、引張強度および有効弾性係数の推定式は土木学会コンクリート標準示方書から設定した。コンクリートの熱膨張係数の値については、1 リフトの高さ 3m の断面中心部に設置した無応力計のひずみと温度変化量の関係（図 - 2）から設定した。熱膨張係数は、硬化初期において材齢によって変化したがる、本解析においては $11.9 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ の一定の値（温度降下時）を用いた。

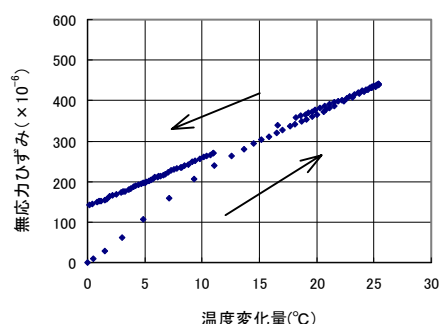


図 - 2 温度変化量と無応力ひずみの関係

4. 実測値と解析値の比較

4.1 コンクリート温度

縦壁 1 リフトにおける、実測および解析のコンクリート温度履歴を図 - 3 に示す。高さ 2m の断面中心部は、実測の最高温度が 55℃ に対し解析値は 57℃、高さ 4m の断面中心部では、実測の温度が 52℃ に対し解析値は 51℃ と近い値を示している。挙動についても同様な動きをみせており、特に、2 リフトのコンクリート打設による、1 リフト上部（高さ 4m）のコンクリート温度上昇の挙動についても精度の高い解析ができています。

4.2 コンクリートの全ひずみ

キーワード マスコンクリート 低熱ポルトランドセメント、温度応力解析、弾性係数、クリープ
連絡先：〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1 (TEL)046-285-3339 (FAX)046-286-1642

ひずみ計による実測と解析の全ひずみ履歴(図 - 4)の挙動は同様な動きをみせている。高さ 2mの断面中心部では、最高温度付近で 100μ 程度の膨張ひずみが生じ、一方、高さ 4mの断面中心部では、フーチングによる拘束の影響を受けにくいから、 170μ 程度の大きな膨張ひずみが生じている。上述したように、2 リフトのコンクリート打設による 1 リフト上部のコンクリート温度上昇量は、実測値と解析値はほぼ同じであったが、ひずみの実測値については解析値ほどの増大はみられていない。

4.3 コンクリート応力

高さ 2mの断面中心部における、有効応力計による実測と解析のコンクリート応力履歴を図 - 5 に示す。解析値は実測値に比べ明らかに大きい引張応力を示し、ひび割れ指数の最小値についても 2 リフトのコンクリート打設後において 0.66 と、ひび割れ発生危険性が十分に考えられる値であったが、実施工後には温度応力によるひび割れは全くみられなかった。また、ひずみと同様、2 リフトのコンクリート打設による実際の応力の増大は解析値ほど大きくない。有効応力計による測定精度や測点数を考慮すると、実測値が正しいとはいえない面もあるが、実際に温度ひび割れが発生しなかったことから、少なくとも解析値は実応力に比べて大きな値を示していると考えられる。

有効応力の実測値と有効ひずみ(全ひずみ - 温度ひずみ)の変化量をもとに推定した有効弾性係数の経時変化を図 - 6 に示す。同図には積算温度から(1)式(土木学会コンクリート標準示方書)によって求めた有効弾性係数も併記した。

$$E_e(t) = \Phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f_c(t)} \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\Phi(t)$: 弾性係数の補正係数

$f_c(t)$: 積算温度による材齢 t 日の圧縮強度 (N/mm^2)

実測値から推定した有効弾性係数は、(1)式によって求めた値に比べて小さい。コンクリート温度やひずみの実測値は解析値にほぼ近い値が得られていることに対し、コンクリート応力の解析値が実測値に比べ大きい値を示している一因としては、解析時に使用した弾性係数の補正係数の影響が考えられる。一般にコンクリートのクリープ特性を考慮した弾性係数の補正係数は、材齢 3 日まで 0.73、材齢 5 日以降は 1.0 としているが、本測定結果からは、更に小さな補正係数が妥当なことが考えられる。弾性係数の補正係数は、コンクリート材料および配合、温度履歴や部材寸法など様々な要因が関係することから、同じ条件において、他のセメントを使用した場合についても検証を行う必要があるが、低熱ポルトランドセメントの特長として、水和発熱量の低減効果の他に、クリープ等による応力緩和が大きくなる可能性が考えられる。

5. まとめ

コンクリート温度は解析によって信頼性の高い推定ができることが確認された。ひずみはある程度信頼性のある推定ができるものの、2 リフトのコンクリート打設が 1 リフトへ及ぼす影響は実測値より過大になる。

低熱ポルトランドセメントの特長として、水和発熱量の低減効果の他に、クリープ等による応力緩和が大きくなる可能性が考えられる。

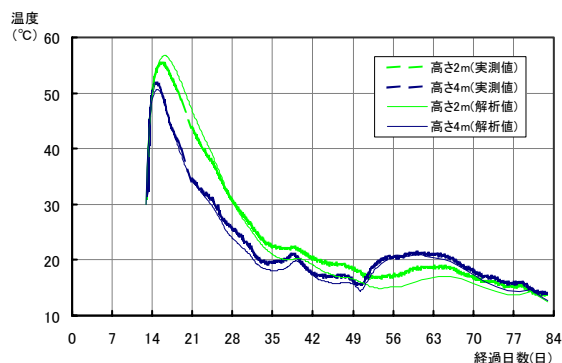


図 - 3 コンクリート温度履歴

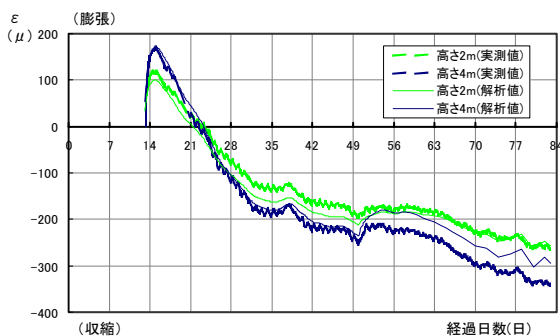


図 - 4 全ひずみ履歴

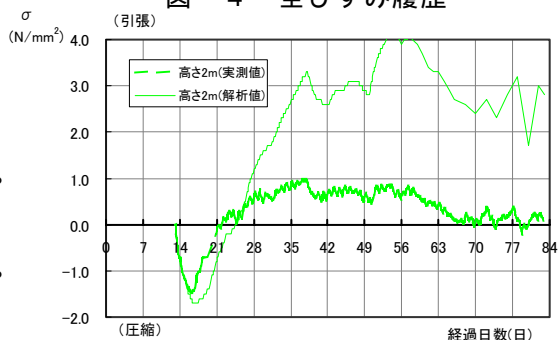


図 - 5 コンクリート応力履歴

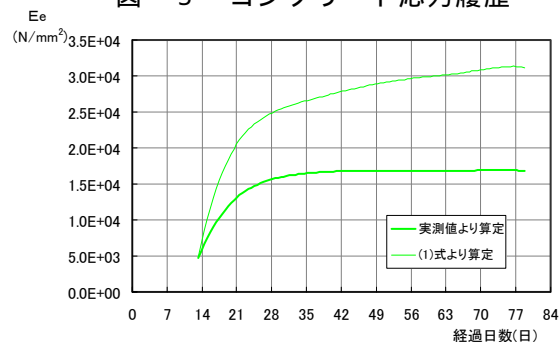


図 - 6 有効弾性係数の経時変化