

# Evaluation of Stability of Mass Concrete using a back analysis Based on measurement of temperature

Kazunobu Matsumoto<sup>A)</sup>, Osamu Makishima<sup>B)</sup>, Osamu Hirimuda<sup>C)</sup>, Akifumi Takeuchi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Tobishima Corporation, Research Institute of Technology  
5472 Kimagase, Noda-shi, Chiba, 270-0222

<sup>B)</sup> Tobishima Corporation, Civil design department  
2 Sanban-cyo, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8332

<sup>C)</sup> KEK work office, JV of Tobishima, Tekken and Rinkai  
140-8 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

## Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) has been constructing at KEK Toukai Campus. The beams accelerated in 50GeV Synchrotron are led to Nuclear and Particle Physics Facility through the switch yard 138m long. The concrete sections of switch yard are very thick because of the radiation shield. So heat of hydration with concrete hardening becomes higher. It was expected that a leak of water promoted by the crack occurred by temperature-stress. We carried out adequacy of installation block division (12 blocks), adoption of low heat cement to suppress the generation of heat and analytical approach based on measurement of temperature of concrete. In this paper, we re-evaluate the long-term stability of this mass concrete structure, and report it about upshot of these countermeasures.

## 温度計測に基づいた逆解析によるコンクリートの安定性評価

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構・東海キャンパスにおいて大強度陽子加速器施設〔J-PARC〕が建設されている。50GeVシンクロトロンにおいて加速されたビームは全長138mのスイッチヤードを経て原子核・素粒子実験施設へ導かれる。スイッチヤード部の構造は、図1、2に示すように、放射線遮蔽のためコンクリート断面が非常に大きい。そのためコンクリート硬化に伴う水和熱も大きく、それに起因する温度応力によるひび割れが、漏水を助長する恐れがある。スイッチヤード建設工事<sup>1)</sup>を行うにあたって、以下の3項目の対策を講じた。

- ① 打設ブロック割の適正化 (5→12ブロック)
- ② 発熱を抑えるための低熱型セメントの採用
- ③ コンクリート内部温度計測を用いた解析的アプローチ

項目③は、コンクリート内部の温度計測結果をもと

に、逆解析手法<sup>2)</sup>を用いて温度特性値を再設定し、それを用いた当該構造物の長期的安定性の再評価を行うものである。

本稿では、これらの結果について報告する。

### 2. 温度計測

#### 2.1 目的

コンクリートは硬化過程で化学反応に伴い発熱する。その時、温度変化に伴う部材の変形(伸縮)が拘束されている場合には応力が発生する。部材中心部の温度が上昇して表面部との温度差が大きくなると、中心部では表面部よりも大きく伸びようとするため、表面部では内部拘束による引張り応力が生じる。これがそのときのコンクリート引張り強度を上回ると、表面にひび割れが発生する。一方、中心部の温度がピークに達すると温度降下過程に移行して

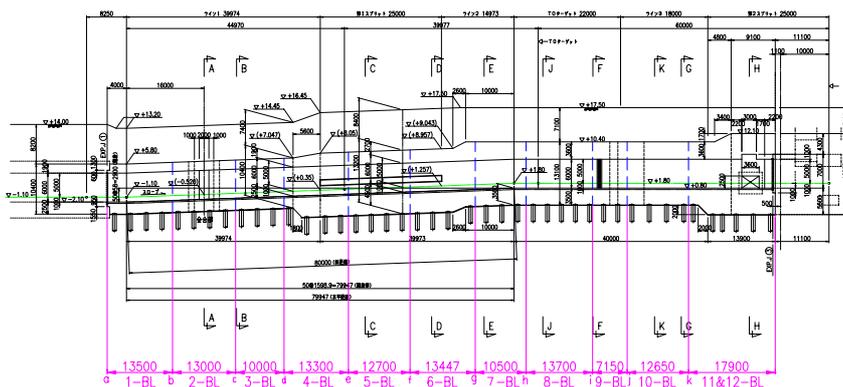


図1：ブロック側面図

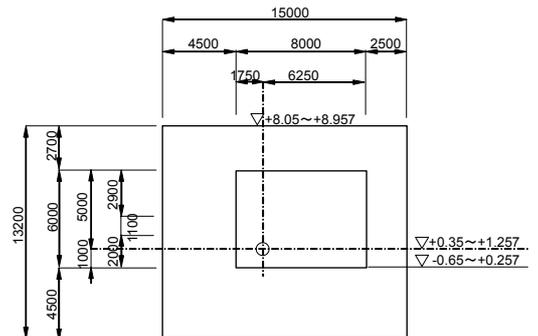


図2：ブロック5断面図

部材が収縮しようとするが、このとき部材が拘束（外部拘束）されていると、変形が阻害されて引張り応力が生じ、これがそのときの引張り強度を上回るとひび割れが発生する。このような温度変化によるひび割れに関して、打設後のコンクリートの温度性状を詳細に計測した事例は少ない。低熱型セメント採用の妥当性の検証と当該構造物の長期的安定性を評価する目的で、躯体内部の温度分布及び経時変化の計測を行った。

2.2 計測位置

事前の温度応力解析によれば、ひび割れ指数（発生引張り応力／許容引張り応力）が最も小さく、ひび割れ発生確率の高い断面は図2に示すブロック5であることが分かった。したがってこのブロックを計測対象とした。

2.3 計測機器設置

水平および垂直方向の熱伝達を検討するために合計12個の熱電対を、図3に示すようにコンクリート断面内に配置した。

3. 逆解析

3.1 解析手法

通常のマスコングリートの熱伝導解析では、材料特性、境界特性および施工条件が事前に設定されてから、コンクリートの水和反応に伴う内部温度の履歴を求めることになる。一方、ここで用いる逆解析手法とは、クランク・ニコルソン法を用いた有限要素法の非定常熱伝導解析に非線形計画法を応用したものである。式(1)に示すように施工後のコンクリート構造物のある位置で計測された温度と、解析された温度の残差平方和J（目的関数）が最小となるように熱特性値や熱境界特性値を同定するものである。

$$J = \sum_{i=1}^n (T_i - t_i)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad \text{式(1)}$$

ただし：  $T_i$  : 解析した温度  
 $t_i$  : 計測された温度  
 $n$  : 計測点数

3.2 解析モデル

打設されたコンクリートの内部発熱量と表面の熱伝達係数を同定する時の解析モデルを図3に示す。解析モデルは構造物の1/4相当をモデル化した2次元有限要素モデルとする。図中の▲印は、同定に用いた計測点を示す。図3の解析モデルの下端および頂版側部（右側）は断熱境界、上端および左端は、計測された外気温を外部温度とする熱伝達境界とし、内側側面は、計測されたトンネル内部温度を外部温度とする熱伝達境界とする。節点数は424、要素数は436となる。

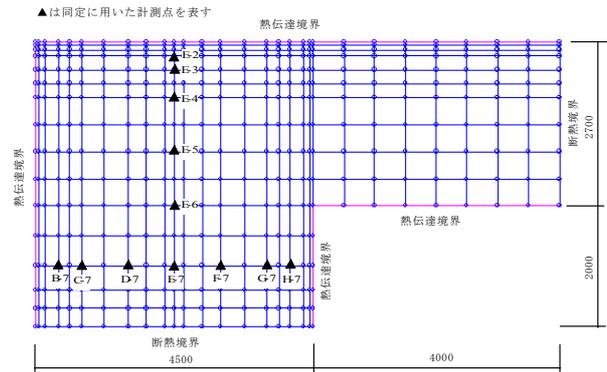


図3：解析モデル図

表1：コンクリート熱特性値

	単位	コンクリート
密度 $\rho$	kN/m <sup>3</sup>	23.00
熱伝導率 $\lambda_c$	W/m·°C	2.70
比熱 $C_c$	kJ/kg·°C	1.15

なお、解析に用いるコンクリートの熱特性値を、表1に示す。また、境界条件となる外気温は、構造物側方に設置した熱電対による計測温度と、トンネル内部に設置した電子温度計による計測温度を用い、同定間隔は、コンクリート打設直後を除いて6時間とし、検討期間は計測開始より1ヶ月間とする。

3.3 解析結果

同定された内部発熱量を図4に示す。

内部発熱量を式(2)で近似する。

$$T = K \times (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)) \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $t$ は経過日数、 $K$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数である。同定した近似式は、式(3)となった。

$$T = 43 \times (1 - \exp(-0.4 \cdot t^{1.2})) \quad \text{式(3)}$$

式(3)（図4の青線）では初期温度上昇挙動を再現できないため、設計上は逆解析同定値（図4の赤線）をそのまま用いる方が再現性がよいと考えられる。

次に、熱伝達係数は気象条件に大きく影響され、0~30程度の範囲でばらつく。平均値を計算すると、以下のようなになる。

- ・型枠面（外壁）：4 W/m<sup>2</sup>°C
- ・型枠面（内壁）：3.5 W/m<sup>2</sup>°C
- ・露出面（上面）：10 W/m<sup>2</sup>°C

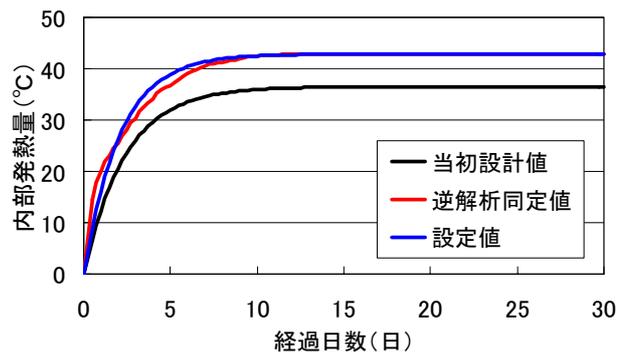


図4：内部発熱量

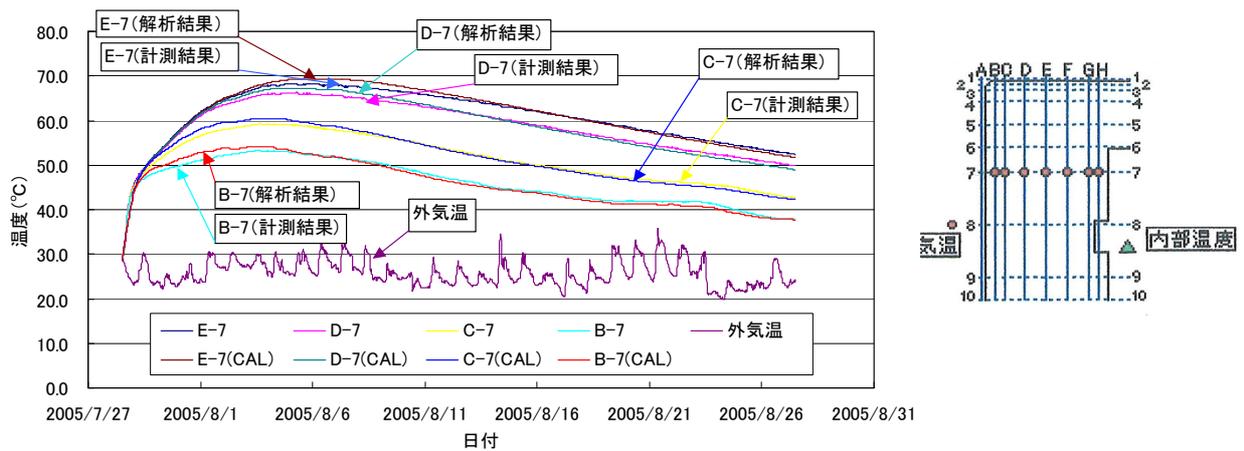


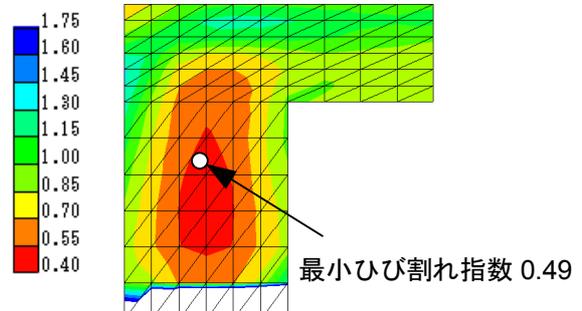
図5：計測結果と逆解析結果に基づく解析結果比較図

#### 4. 計測された温度状態と再評価結果

逆解析より内部発熱量および熱伝達係数が得られた。それを用いた解析結果と計測結果との比較を図5に示す。内部の温度変化の状況をほぼ忠実に再現できており、逆解析によって得られた値の妥当性が示された。逆解析で得られた内部上昇温度は、事前の解析結果より6℃も高い結果となった。図6に最小ひび割れ指数分布を示す。図7に最小ひび割れ指数を記録した位置でのひび割れ指数の履歴を示す。図7から分かるように壁部材中央部の最小ひび割れ指数は、事前の解析で得られた0.62に比べて0.49と若干低下する結果となり、ひび割れ発生確率はやや高い傾向にある。

解析による最大引張応力の発生位置における引張応力の履歴を図8に示す。材齢250日（2006年4月上旬）において最大応力の発生が予想されたが、有害なひび割れ発生は抑制することができた。

本工事のようなマッシュなコンクリート構造物では、温度ひび割れの完全防止は困難であるが、それらの抑制や無害化には、低熱型セメントの採用は有効であり、さらに、本工事のように事前解析の予測から対策をとることや再評価によって熱特性値や熱境界特性値などの解析条件の完成度を逐次高めていくことが重要と考える。



最小ひび割れ指数 0.49

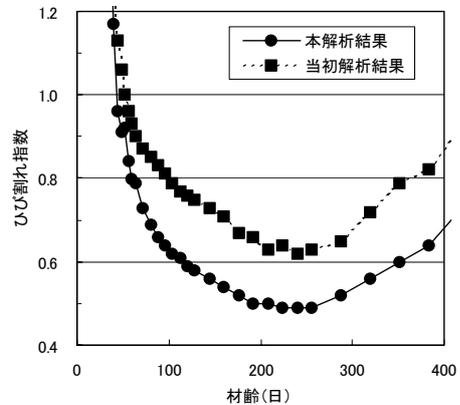


図7：ひび割れ指数履歴

#### 5. 謝辞

本工事の実施並びに本報告のまとめにあたって、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の吉岡正和教授および宮原正信係長に多大な助言を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 高橋昌秀, 蛭牟田修, 竹内明文, 榎島修, 田中斉：加速器施設のコンクリート構造物における防水対策, 第3回日本加速器学会, 2006.8 (投稿中)
- [2] 近久博志, 津崎淳一, 荒井幸夫, 桜井春輔：逆解析手法によるマスコンクリートの熱伝達係数の評価, 土木学会論文集 V No.451, pp.39~47, 1992.8

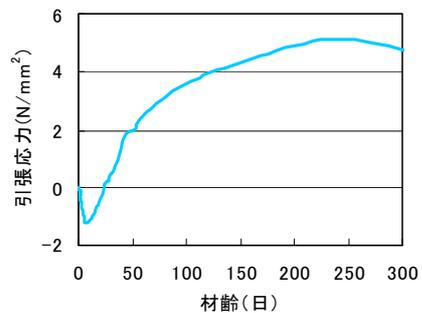


図8：引張応力履歴（最大値発生位置）