

論文

[1187] コンクリート構造物の熱伝達に関する養生水の影響

近久博志\*1・中原博隆\*2・筒井雅行\*3・桜井春輔\*4

1. はじめに

養生時の養生水の蒸発に伴う気化熱や顕熱は、マスコンクリート構造物の温度ひび割れに大きく影響を及ぼすとされているが、試験や現場計測によって検討した研究は少ない。このため、ダム等の重要構造物では、構造物毎の個別の検討に任されているのが現状である。これに対して、ここでは、まず、コンクリートの供試体を用いて、恒温恒湿の室内で湛水養生時の養生面における熱収支について調べる。そして、開発してきた逆解析手法[1]を用いて、得られた試験結果から養生面における熱伝達係数を同定し、その結果に基づいて、湛水養生中のコンクリート構造物の表面における養生水の顕熱や気化熱について考察する。

2. 逆解析手法[1]

通常のマスコンクリートの熱伝導解析では、材料特性、境界特性及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。これに対して、ここで用いる逆解析手法は、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り、施工後のコンクリート構造物のある位置での計測された温度と解析された温度との残差平方和J（目的関数）

$$J = \sum_{i=1}^n (T_i - t_i)^2 \rightarrow \min \dots \dots (1)$$

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

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。

3. 湛水蒸発試験

3.1 試験装置

試験装置と熱電対の埋設位置を図-1に示す。試験に用いた供試体は、一辺40cm、厚さ10cmで、側面を断熱材で覆っており、底面から可変装置付きのヒ

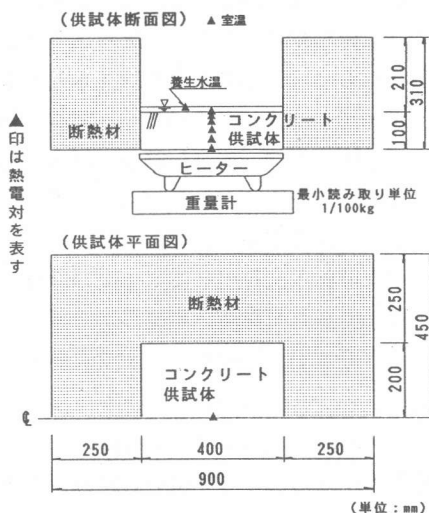


図-1 試験装置

表-1 コンクリートの配合表

最大寸法 mm	スラグ cm	空気量 %	W/C %	s/a %
13	16	3.0	53.9	50

単位量 (kg/m³)				
C	W	S	G	混和剤
317	171	898	904	0.793

28日強度:326 kg/cm<sup>2</sup>、セメント:普通ポルトランドセメント、水:水道水、細骨材:鹿島産川砂(FM=2.69)、粗骨材:多摩産砕石13mm(FM=6.22)、混和剤:AE減水剤(ネズリNo70)

\*1 飛鳥建設(株)技術本部構造技術部課長、工博(正会員)  
 \*2 飛鳥建設(株)技術本部構造技術部(正会員)  
 \*3 飛鳥建設(株)技術本部構造技術部  
 \*4 神戸大学教授 工学部建設学科、工博

ータで加熱できるようになっている。そして、重量計（最小読み取り単位：1/100 kg）を用いて、ヒータ、供試体および養生水の総重量（以下重量と呼ぶこととする）を測定し、養生水の蒸発量を算定する。実験に使用したコンクリートの配合と熱特性試験結果を表-1と表-2に示す。

### 3.2 試験方法

室温 20℃、湿度 60%、無風状態に保たれた恒温恒湿室内で試験を実施した。供試体の内部温度と養生水温が室温で安定したことを確認した後に供試体底面を加熱し、供試体の内部温度、養生水温、重量の変化および室温を測定する。なお、養生水温については、定常状態になるまで測定できるように、コンクリート表面から 5 mm 離れた位置での水温を測定した。

湛水深さは約 1.0 cm とし、養生水がすべて蒸発し、表面が乾くまで、約 35 時間供試体底面を加熱した。

### 4. 評価方法

本逆解析手法を用いて、上記の試験によって得られた温度計測結果から養生面における熱伝達係数を同定する。解析に使用した次元有限要素モデルを図-2に示す。図中に▲印で示した節点は、逆解析時に入力値として用いた計測点を表す。

供試体の養生面は室温を外部温度とする熱伝達境界とし、底面は計測温度を入力値とする温度指定境界とする。同定間隔を 1 時間とし、養生面における 1 時間毎の平均的な熱伝達係数を求める。このため同定された熱伝達係数は、養生水の蒸発に伴う気化熱による熱流出も含めた値として評価されることになる。

### 5. 計測結果

試験中の供試体の内部温度、養生水温および室温の経時変化図を図-3に示す。図中の測点記号は、図-2の計測点に対応している。試験開始後の供試体の内部

表-2 熱特性試験結果

密度 t/m <sup>3</sup>	比熱 kcal/kg·°C	熱拡散率 m <sup>2</sup> /hr	熱伝導率 kcal/m·hr·°C
2.406	0.210	0.00348	1.76

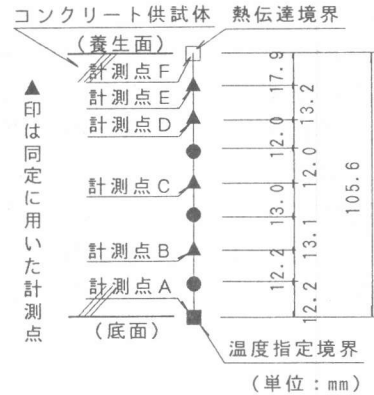


図-2 解析モデル

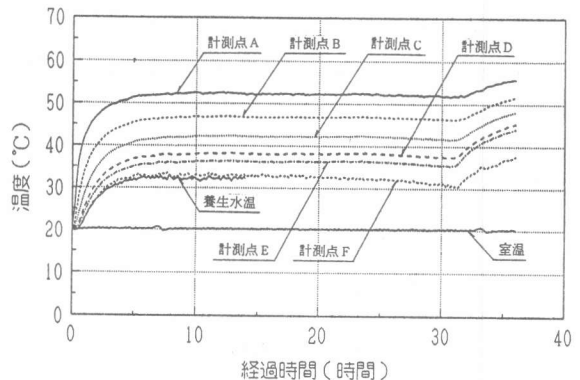


図-3 供試体の内部温度

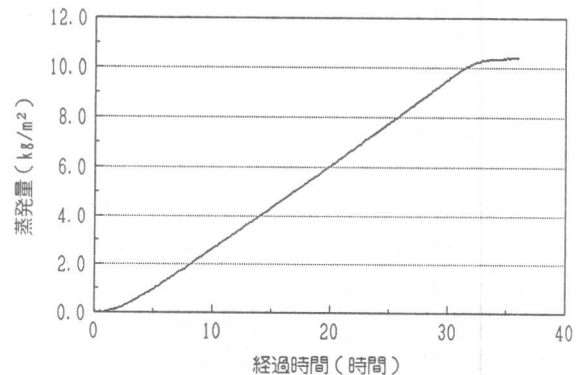


図-4 養生水の蒸発量

温度は、底面に近い測点から順に温度が上昇し、試験開始後約 10 時間で定常状態になった。養生水がすべて蒸発し、養生面が乾燥する直前に、供試体の内部温度は若干ではあるが、一旦低下傾向を示し、その後上昇している。

養生水の蒸発量の変化を図-4に示す。養生水は供試体の温度が上昇するに従って次第に暖められ、試験開始 5 時間以降はほぼ定常状態になる。この時、養生水の蒸発速度もほぼ定常状態になり、 $0.334 \text{ kg/m}^2\cdot\text{hr}$  を示している。

## 6. 解析結果

### 6.1 供試体の内部温度

試験開始後 12 時間と表面が乾く付近の供試体の内部温度の計測結果と解析結果とを比較すると、図-5、6 のようになり、良く一致している様子がわかる。

### 6.2 同定された熱伝達係数

同定された熱伝達係数の経時変化図を図-7に示す。同定された熱伝達係数は試験開始後、養生水の顕熱の影響を受けて大きな値を示すことになる。その後、水温が上昇して顕熱の影響が少なくなるに従って、同定された熱伝達係数も  $26 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$  程度の次第に安定した値を示すようになる。そして、僅かであるが養生面が乾く直前で一旦増加傾向を示すことになるが、完全に乾いた状態では、無養生状態の熱伝達係数 ( $10 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ ) になる。

### 6.3 供試体の養生面における熱収支

養生面における熱収支の関係を次式のような算定式に仮定し、図-8に経時変化図を示す。

$$Q_t = Q_v + Q_s + Q_w \dots\dots(2)$$

ここで、

$$Q_t: \text{全流出熱量} (= \alpha \cdot \Delta T_{ca}) \quad (\text{kcal/m}^2\cdot\text{hr})$$

$$Q_v: \text{養生水の気化熱量} (= G \cdot L) \quad (\text{kcal/m}^2\cdot\text{hr})$$

$$Q_s: \text{養生水の顕熱量} (= c \cdot W \cdot \Delta T_w/A) \quad (\text{kcal/m}^2\cdot\text{hr})$$

$$Q_w: \text{養生水の熱伝達熱量} (= Q_t - Q_v - Q_s) \quad (\text{kcal/m}^2\cdot\text{hr})$$

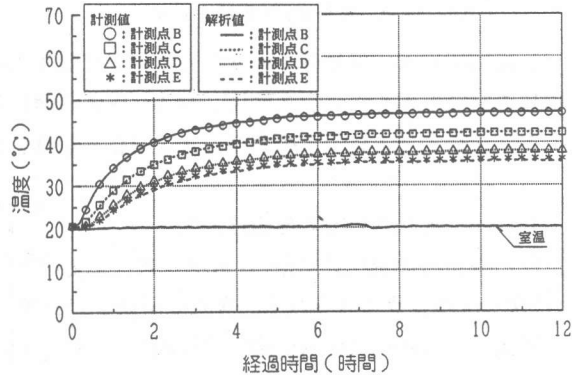


図-5 供試体の内部温度比較図 (試験開始後12時間)

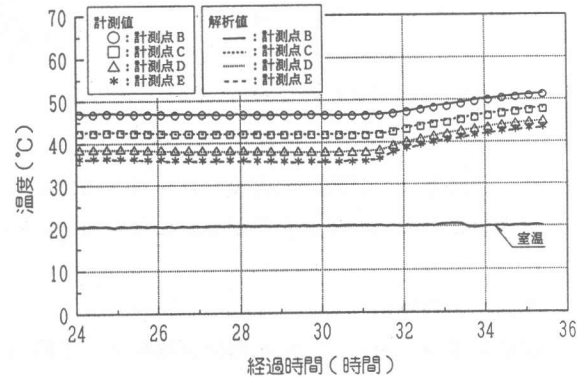


図-6 供試体の内部温度比較図 (表面が乾く時)

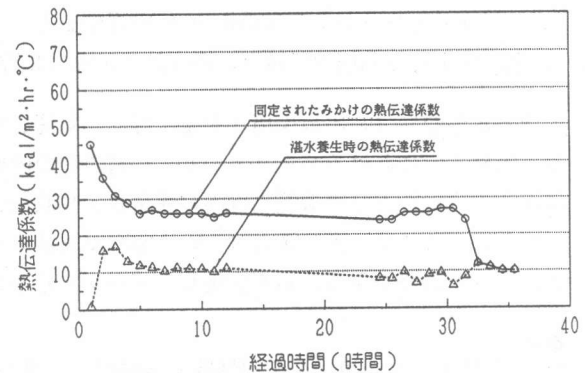


図-7 同定された熱伝達係数

- $\alpha$  : 同定された熱伝達係数 (kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C)
- $\Delta T_{ca}$  : 供試体表面温度と室温の温度差 (°C)
- $G_a$  : 養生水の蒸発速度 (kg/m<sup>2</sup>·hr)
- $L$  : 養生水の蒸発潜熱 (kcal/kg)
- $c$  : 養生水の比熱 (kcal/kg·°C)
- $W$  : 養生水の重量 (kg)
- $\Delta T_w$  : 単位時間当たりの養生水の温度上昇速度 (°C/hr)
- $A$  : 養生面の面積 (m<sup>2</sup>)

試験開始直後、供試体の温度上昇に伴って養生水の温度が上昇するため、養生水の顕熱による熱量の割合が多くなる。その後、水温が定常状態になってくると、蒸発速度も定常状態になってくる。このときの養生水の蒸発による気化熱量は、全流出熱量の約 6 割である。

#### 6.4 湛水養生時の熱伝達係数

湛水養生時の熱伝達係数  $\alpha_w$  は、式(2)から次のように表される。次式を用いて算出された熱伝達係数の経時変化図を図-7に示す。

$$\begin{aligned}
 Q_w &= \alpha_w \cdot \Delta T_{ca} \\
 &= Q_t - Q_v - Q_s \\
 &\dots\dots\dots(3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_w &= (\Delta T_{ca})^{-1} (Q_t - Q_v - Q_s) \\
 &\dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

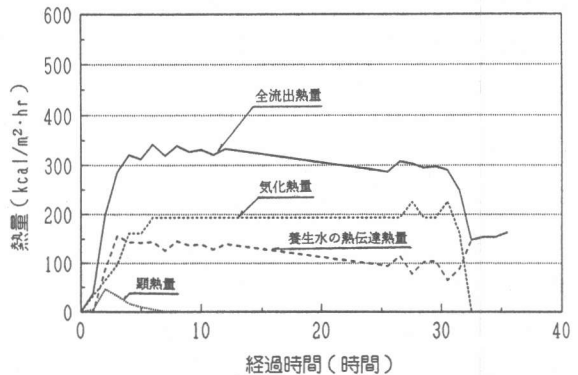


図-8 コンクリート表面の熱収支

熱伝達係数は、試験開始直後、16~17 kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C程度の大きな値を示すことになるが、その後次第に減少し、養生面が乾く時には約 8 ~ 9 kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C 程度の値になる。

#### 7. おわりに

逆解析手法を用いて、湛水蒸発試験によって得られた温度計測結果から熱伝達係数を同定した。その結果、次のことが分かった。

- 1) 同定された湛水養生時の見かけの熱伝達係数は 26 kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C程度であり、養生水の蒸発に伴う気化熱量が全流出熱量の 6 割程度を占めている。
- 2) 湛水養生時の熱伝達係数は、湛水深さの減少に伴って若干ではあるが小さくなる。

養生水の蒸発は、周辺環境(気温、湿度、風速、日射等)に大きく影響を受けることになるため、実施工時におけるマスコンクリート構造物の内部温度の予測に関しては、現地の施工状況や環境を十分に勘案した構造物表面の熱量収支や熱伝達係数を設定する必要があると思われる。

また、ここでは、湛水深さ 1 cm の室内試験結果だけからの考察であり、今後、さらに湛水深さが違った試験や現場計測を実施し、データを積み重ねたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 近久博志・津崎淳一・中原博隆・桜井春輔：現場計測に基づくマスコンクリート構造物の熱特性の評価のための逆解析手法、材料、日本材料学会、42巻、475号、1993.4 (印刷予定)
- 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、No. 451、V-17、pp. 39-47、1992.8