

### 3層合板型枠を用いた壁式橋脚の温度解析

Temperature analysis of wall-type pier using three layered plywood form

(株)北未来技研 正員 朝倉啓仁 (Keiji Asakura)  
 (株)清都組 清都一章 (Kazuaki Kiyoto)  
 (株)北未来技研 正員 山崎通人 (Michihito Yamazaki)

#### 1. まえがき

通常の合板型枠を用いた橋脚の施工では、柱や壁の高さ等の規模によりコンクリートを数回に分けて打設するのが一般的である。この様な中、合板型枠の再利用率が優れた3層合板型枠を用いて、柱を1日で施工することのできる「CF工法(キャンパーフォーム工法)」の施工実績が増えてきている。

本報告では、このCF工法により施工された道路橋の壁式橋脚について、3層合板型枠を用いた施工の温度ひび割れの評価を行うことを目的として、温度計測による3層合板型枠の熱伝達率の設定および温度ひび割れの検討を行った結果を報告するものである。

#### 2. 橋脚工事の概要

橋脚工事の概要を下記に示す。また、構造寸法を図-1に示す。

使用するコンクリートの設計基準強度は  $ck=24 \text{ N/mm}^2$  で、セメントは高炉セメントB種(BB)を用いる。その配合を表-2に示す。  
 打設間隔は、壁部(高さ9.0m×幅11.0m×厚さ1.5m)を1日で施工する。

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							AE (C×%)
			W	C	G1	G2	S1	S2	S3	
52.2	41.4	5.5±1.5	155	297	650	433	230	231	294	0.01

コンクリートの打設日は、  
 フーチング部 ~ 平成23年9月29日(木)  
 壁部 ~ 平成23年10月11日(火)  
 壁部の養生期間は、  
 側面 ~ 3層パネル型枠を用いて3日間設置  
 天端 ~ 湛水(30mm)で3日間

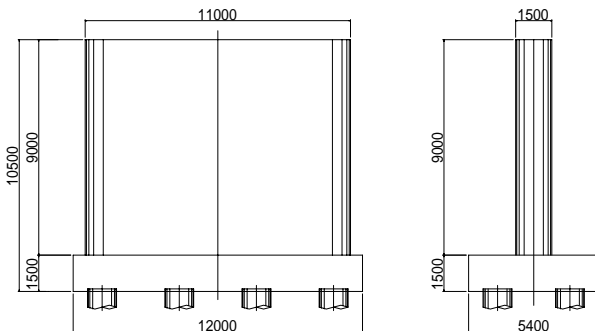


図-1 構造寸法

#### 3. 温度測定による熱伝達率の設定

コンクリートの温度解析する際の境界条件の一つに型枠の熱伝達率があるが、標準的な養生方法に応じて熱伝達率の参考値が示されており、例えば合板12mmの熱伝達率は  $8 \text{ W/m}^2$  である。

3層合板型枠の熱伝導率は、合板の厚みを3倍とすることで、 $4.6 \text{ W/m}^2$  と想定される。しかしながら、3層合板型枠の熱伝導率の測定例はないことから、温度計測を実施し、温度解析によりこれに合致する熱伝達率を設定するものである。すなわち、今回の施工条件を反映した固有の熱伝達率ということが出来る。

##### (1) 温度測定

壁式橋脚の規模から、最大温度の箇所や壁基部の温度ひび割れ予想箇所と想定される位置に熱電対を設置し、天端に配置した温度計測器まで配線し、自動的に温度を計測、記録した。温度計測にあたっては、計測作業が容易でコストが安価な計測機器(写真-1)を選定した。

壁に配置した熱電対の位置は図2の黒丸箇所を示す。

計測数は、壁12点、外気温1点、計測間隔は1時間毎とした。



写真 1 温度計測器

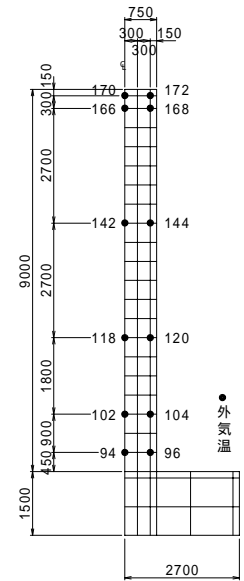


図 2 計測位置図

##### (2) 温度解析

解析はコンクリート標準示方書(土木学会)に準じて行うものとし、「マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム」(社団法人日本コンクリート工学協会)を使用し、有限要素法による2次元非定常熱伝導解析、通称2次元FEM温度解析を実施した。

##### 1) 施工入力条件

温度解析においては、施工時に得られた測定値を用いて温度解析を行った。表-3に温度解析条件、表-4に解析要素の材料定数、表-5に断熱温度上昇量等を示す。コンクリートの打込み温度は、フーチング部で20、

壁部で 16 との結果が得られた。この結果から、断熱温度上昇式に用いる  $r$  と  $Q$  の値は表-5 のとおりとなる。

解析モデルを図-3 に示す。モデルは、地盤、フーチング部、壁部から構成し、中央より右半分を四角メッシュに分割した。フーチング部を第1リフトとし、壁部は1日での打設であるが10等分して第2から第11リフトとする。

表 - 3 温度解析条件

1) セメント種類	: 高炉セメントB種 (BB)
2) 単位セメント量	: $C = 297 \text{ kg/m}^3$
3) 設計基準強度	: フーチング部 $ck = 24 \text{ N/mm}^2$ たて壁部 $ck = 24 \text{ N/mm}^2$
4) 打設間隔	: たて壁部を1日で打設 解析上は、たて壁部を10分割し、10時間で打設する
5) 打設日	: フーチング部 9月29日 (木) たて壁部 10月11日 (火)
6) 打込み温度	: フーチング部 20 たて壁部 16
7) 外気温	: 実測値の日平均気温
8) 養生期間	: 側面~型枠設置期間 3日間 天端~湛水 (30mm) 3日間
9) 脱型日	: フーチング部 10月3日 (月) たて壁部 10月15日 (土)

表 - 4 材料定数

項目	コンクリート	地盤
比熱 $C$ ( $\text{W/m}$ )	1.155	1.084
熱伝導率 ( $\text{W/m}$ )	2.700	1.969
密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	2300	1800
熱膨張率 (/)	0.00001	-

表 - 5 温度上昇速度に関する常数と終局断熱温度上昇量

項目	フーチング部	たて壁部
単位セメント量 ( $\text{kg/m}^3$ )	297	
打込み温度 ( )	20	16
$r$	0.683	0.578
$Q$ ( )	50.51	51.03

### 2) 対流境界入力条件

解析モデルと外気との対流境界条件は熱伝達率で表され、型枠の種類、養生方法、外気の風速等を考慮して表-6のとおり定めた。

側面型枠である3層合板型枠の熱伝達率は、ケースを発砲スチロールと同程度、ケースを合板の1/2程度、ケースを中間値と仮定した。

なお、3層パネルの熱伝達率の参考値は  $4.6 \text{ W/m}^2$  である。これは、合板の熱伝達率を  $8 \text{ W/m}^2$ 、外気に触れる面の熱伝達率 ( ) を  $14 \text{ W/m}^2$ 、合板厚  $12\text{mm}$  の条件から、合板の熱伝導率 ( )  $0.25 \text{ W/m}$  を導き、これを3倍の厚さとして下式より計算したものである。

$$= 1 / ( 1 / + 0.012 \times 3 \text{層} / ) = 4.6 \text{ W/m}^2$$

天端は湛水深さ  $10\text{mm}$  以上  $50\text{mm}$  未満、また型枠撤去後の外気に触れる面の熱伝達率は風速  $2 \sim 3\text{m/s}$  に対応した  $12 \sim 14 \text{ W/m}^2$  の上限  $14 \text{ W/m}^2$  と仮定した。

本橋脚の底版、壁の施工は鋼矢板による締切り内で行

われたことから、脱型後も風速がきわめて穏やかな状態であった。外気面の熱伝達率は風速  $1\text{m/s}$  当たり  $2.3 \sim 4.6 \text{ W/m}^2$  程度の増加といわれていることから、下限値を風速なしに相当する  $6 \text{ W/m}^2$  と仮定した。

### 3) 外気温入力条件

解析に用いた外気温は、実測値から算出した日平均を用いた。外気温の実測値と日平均は図-4のとおりとなる。

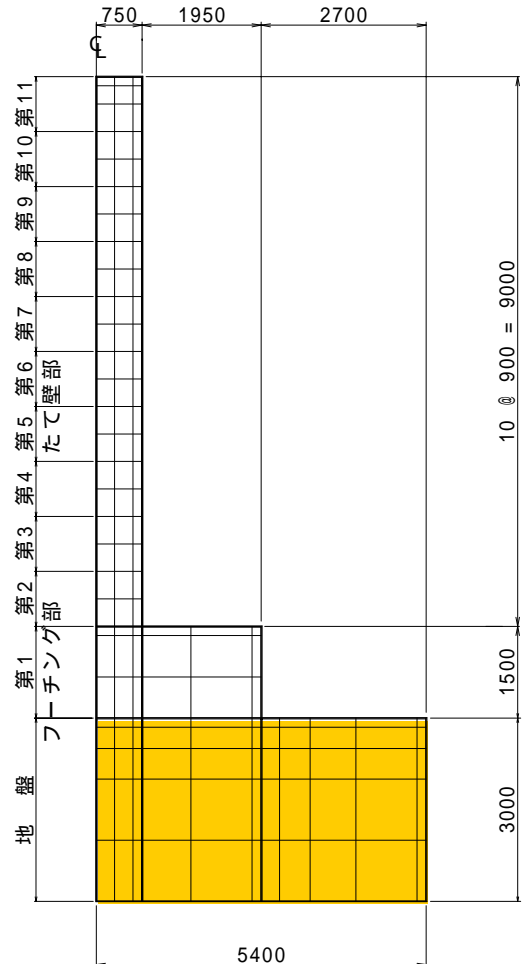


図 - 3 温度解析モデル

表 - 6 コンクリートの熱伝達率

対流境界条件	値
<側面型枠 (3層パネル)>	
ケース 発砲スチロールと同程度	2 ( $\text{W/m}^2$ )
ケース と の中間値	3 ( $\text{W/m}^2$ )
ケース 合板の値の1/2	4 ( $\text{W/m}^2$ )
参考: 発砲スチロール (厚さ50mm) +シート	2 ( $\text{W/m}^2$ )
参考: 側面型枠 (合板12mm)	8 ( $\text{W/m}^2$ )
<天端>	
湛水50mm未満	8 ( $\text{W/m}^2$ )
<外気>	
風速2~3m/s対応の12~14W/m <sup>2</sup> 上限	14 ( $\text{W/m}^2$ )
締切り内を風速無しと仮定した下限	6 ( $\text{W/m}^2$ )

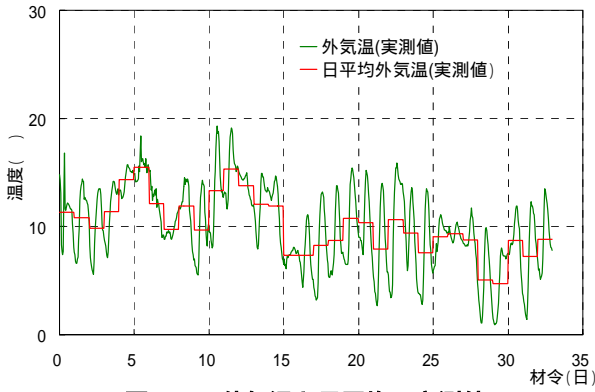


図 4 外気温と日平均の実測値

(3) 3層合板型枠の熱伝達率の設定

図-5 に、中央側 142 節点と参考として表面側 144 節点の温度解析結果と実測値を示す。なお、図中に表示されている材令は、壁部第 2 リフトが打設される材令 12 日を材令 0 日として表示している。以下、壁部の第 2 リフト打設を材令 0 日とする。

解析値と温度実測値との考察を以下に示す。

躯体中心部の 142 節点では、温度ピークが解析値で 4 日、実測値で 3.5 日頃と多少ずれているが、最高温度は熱伝達率 2 W/m<sup>2</sup> の値と実測値が近い結果となった。ピークからの下降勾配は各熱伝達率とも実測値と近似している。特に熱伝達率 2 W/m<sup>2</sup> (ケース ) は、材令 10 日までの値が実測値とほぼ一致している。また、材令 20 日以降の温度履歴は一律に実測値が解析値より高い値で推移しているが、これは埋戻しや日射の影響と思われる。

躯体外面側の 144 節点では、大局的には解析値の熱伝達率 2、3、4 W/m<sup>2</sup> (ケース ) の解析値の傾向の中で推移しているものの、実測値は外気温の日温度変化の影響を受け波形となっていることから、熱伝達率の設定においては参考値として扱った。

以上の結果から、今回の施工条件の基での 3 層合板型枠の熱伝達率は 2W/m<sup>2</sup> と推定される。この値は 3 層合板型枠の熱伝達率の参考値 4.6 W/m に比較して低い傾向にあるが、これは締切り内での施工のため風速の影響が小さかったこと、埋戻し土の温度の影響など、本現場での施工環境を反映したものと想定される。

3 層合板型枠の熱伝達率は通常の合板型枠 ( 8 W/m<sup>2</sup> ) に比べ小さく、保温効果が期待されることが分かった。このことは、温度下降勾配が緩やかとなり、温度応力が小さくなる効果が期待される一方で、発現温度のピーク値を上げ温度応力を大きくする効果もある。ただし、今回の施工は工程の関係からピーク温度発現前に型枠を撤去しており、保温効果を期待した施工とはしていない。

4. 層合板型枠の温度ひび割れ指数

前項の温度解析結果から温度応力解析を行い、3 層合板型枠を用いた本施工の温度ひび割れ指数を算出した。

壁に発生する温度ひび割れ指数の履歴を、温度応力が厳しくなる中央側下端部の中で最小値を示す 102 節点の

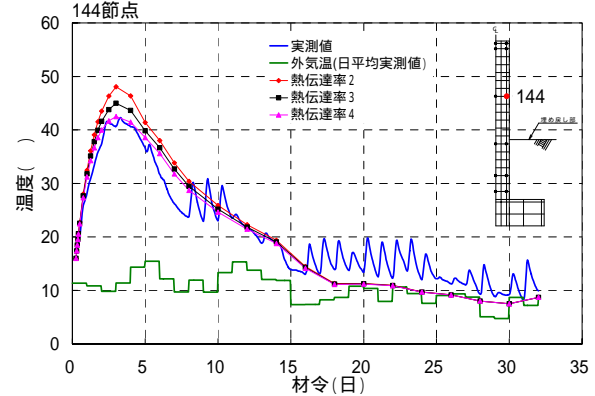
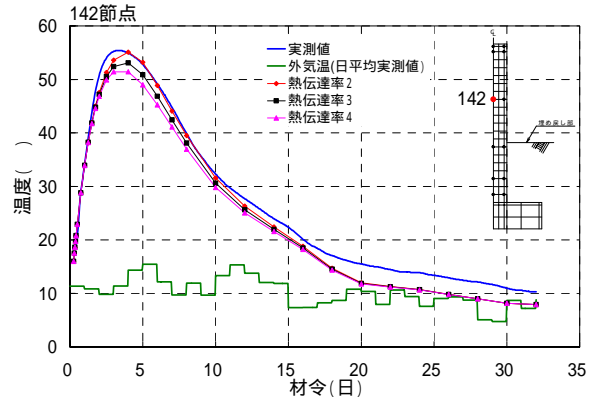


図 - 5 温度解析結果と実測値

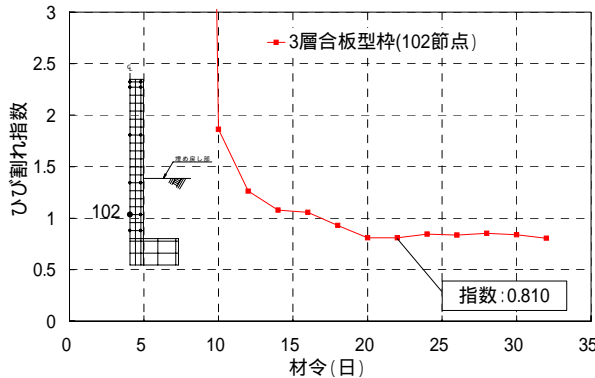


図 6 温度ひび割れ指数 (着目点履歴)

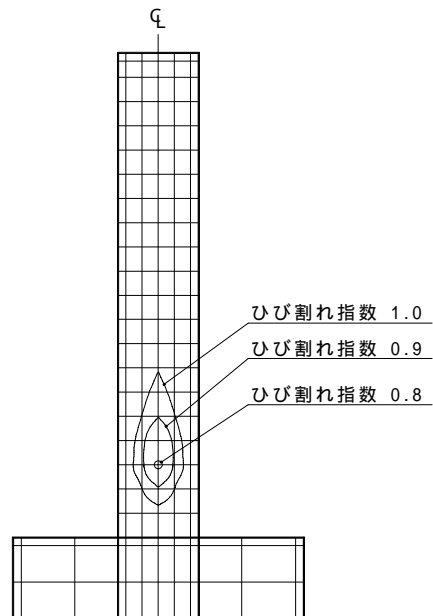


図 7 温度ひび割れ指数 (コンター図)

ひび割れ指数を図-6に示す。

3 層合板型枠での温度ひび割れ指数の最小値は 0.810 (102 節点)で、材令 20 日頃に発生している。この 102 節点のひび割れ指数は、材令 18 日に 1 を下回り、その後継続している。

次に、102 節点の温度ひび割れ指数が 1 以下となる引張応力発生範囲をコンター図として図-7に示す。

ひび割れ指数が 1 以下となる領域は、壁下端から壁高の約 1/3 の範囲にあり、引張領域のひび割れ指数は平均すると 0.89 程度である。この値は、ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係からは、ひび割れ発生確率 90% 程度であり、ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合に近い値である。

橋脚完成後に目視によりひび割れの有無を確認したが、壁部にはひび割れの発生は認められなかった。このことから解析結果と符号する結果と考えられる。

## 5. まとめ

3 層合板型枠を用いた壁式橋脚の温度解析の結果を以下にまとめる。

- ・ 3 層合板型枠の施工から温度解析を行い、熱伝達率を推定した。今回の施工条件下では、 $2 \text{ W/m}^2$  であった。

- ・ 3 層合板型枠の熱伝達率は、通常の合板型枠 ( $8 \text{ W/m}^2$ ) に比べ小さく、保温効果が期待されることが分かった。
- ・ この高い保温効果を生かした施工とするためには、温度解析・温度応力解析を実施し、メリットを生かした計画とすることが望ましい。
- ・ 今後は、種々の条件下での温度測定を実施し、熱伝達率の精度を高めていきたい。

謝辞：本報告で使用した温度測定結果は、当該工事にて請負者がコンクリートの品質向上を目的として計測したものである。データの提供を頂きました(株)草別組に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書 (設計編) 2007 年 12 月
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 平成 20 年 11 月
- 3) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学 - 凍上被害とその対策 - 2009 年 12 月