

PC円筒波浪制御構造物での温度ひびわれの検討

清宮 理*1・野口 孝俊*2

1. まえがき

外海からの波浪の進入から沿岸域を守るために建設される波浪制御構造物の一形式として二重円筒ケーソン堤が港湾技術研究所を中心に開発された。この構造物の実海域での適用性を検討するため、第三港湾建設局により境港で実証試験が現在行われている。この中でPCケーソン堤の建設の際、暑中コンクリート打設時の水和熱による温度上昇とひびわれの発生が懸念された。また将来さらに大型の二重円筒ケーソン堤が計画されている。ここでは壁厚も厚く、マスコンクリート対策が不可欠となる。そこで実証試験の一環として各種計器を設置して温度ひびわれの発生の可能性を調べ、PCケーソン堤の温度ひびわれの予測手法を検討することにした。本報告で

は、これら温度ひびわれの検討方法と結果について述べる。

2. 円筒波浪制御構造物の概要

図-1に構造物の概要¹⁾を示す。直径16.2mと直径8.1mの二重の円筒壁および底版、中間床版、隔壁で構成されている。円筒壁の壁厚は40cm、底版の厚さは、80cmである。外円筒の外海側は多数の開口が設けられている。円筒壁間は遊水部で、波のエネルギーをここで消費する。また内円筒には中詰め土が投入される。円筒壁には、鉛直方向と円周方向にプレストレスが導入されている。PCの導入量は、設計波浪および施工中に対して使用限界状態でコンクリート部材に引張応力が生じないように設定した。断面力の計算は、有限要素法により求めた。

表-1 コンクリートの配合

セメント 普通ポルトランドセメント(単位: kgf/m ³)					
セメント	水	細骨材	粗骨材(川砂利)	粗骨材(砕石)	混和剤
372	175	740	0	1 004	0.93
水セメント比	47%	スランプ	12 cm	空気量(%)	4.0%
骨材最大寸法	20 mm	細骨材率	43.2%	呼び強度 σ_{28}	300 kgf/cm ²

3. 使用材料

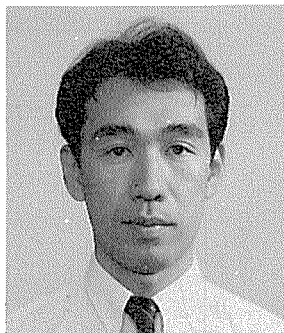
コンクリートの配合およびセメント成績を表-1および表-2に示す。セメントの種類は、普通ポルトランドセメ

表-2 セメント試験成績表

試験項目 種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強度(kgf/cm ²)			酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	塩素 (%)
			水量 (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)		3日	7日	28日				
普通ポルトランド	3.16	3 360	27.3	2-13	3-03	良	166	260	416	1.4	2.1	1.5	0.003
JIS R 5201	-	3 000 以上	-	60 min 以上	10 h 以下	良	70 以上	150 以上	300 以上	5.0 以下	4.0 以下	3.0 以下	-



*1 Osamu KIYOMIYA
運輸省港湾技術研究所
構造強度研究室長



*2 Takatoshi NOGUCHI
運輸省第二港湾建設局
京浜港工事事務所

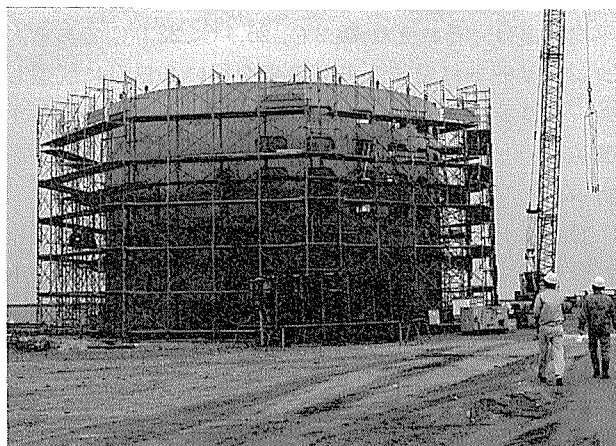


写真-1 二重円筒ケーソンの製作状況

断面図

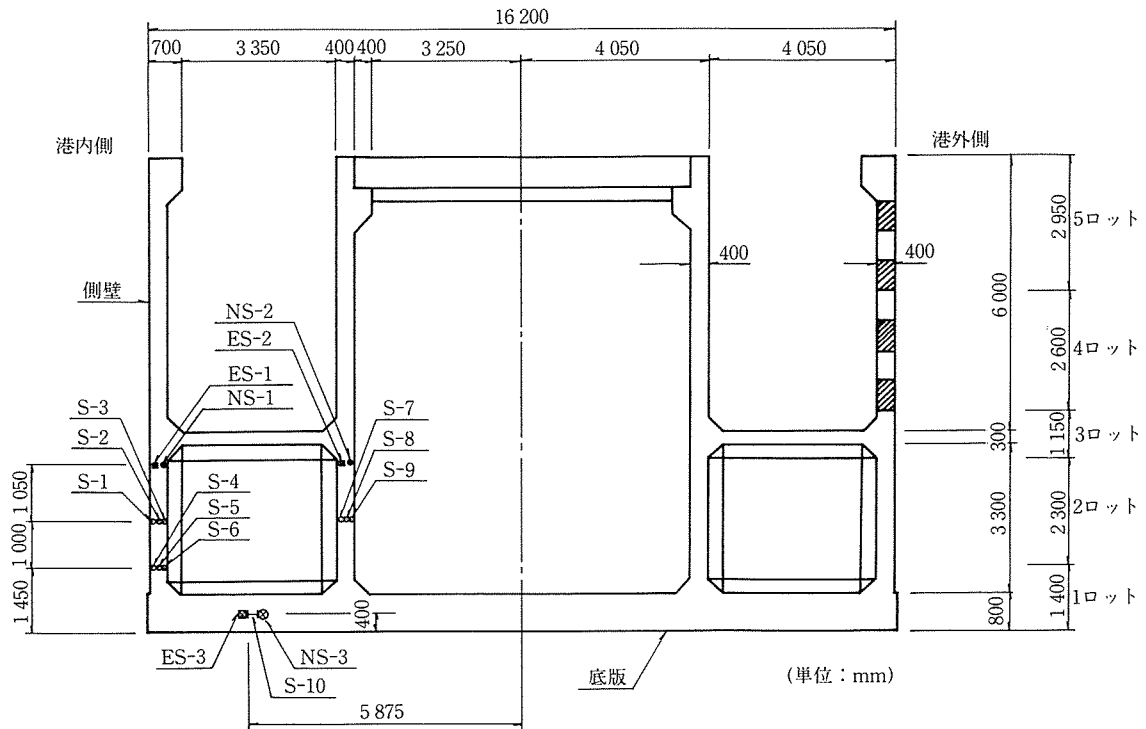


図-1 二重円筒ケーソンの形状と計測器の配置

ントである。単位セメント量は 372kgf/m^3 で水セメント比は 47% である。呼び強度は 300kgf/cm^2 である。混和材として AE 減水剤遅延形 (ポゾリス No. 8) を使用した。

4. コンクリートの打設時の状況

ケーソンは護岸岸壁上のヤードで製作した。打設コンクリート総量は、 600m^3 である。図-1 に打設リフトを示す。コンクリートの一日当りの打設量および型枠の組立などを考慮して 5 段階でコンクリート打設を行った。型枠は、鋼製で中間床版のみ木製型枠を使用した。底版の下部には 5 cm 厚の砂を敷き、この上にラバーマットを取り付けた。ケーソンの製作は、平成 2 年 6 月から 11 月までの夏期に行われた。現地の 7 月、8 月、9 月の平均気温は、それぞれ 25.2°C 、 26.4°C 、 22.0°C である。コンクリート打設後 2 日間養生を行い 3 日目に脱型した。打設後コンクリート温度がピークを迎えるまで散水養生を行い、かつ壁部上部は冠水 (5 cm~10 cm) を行った。

底版は、7 月初旬、側壁第 2 段ロッドは、7 月下旬に打設を行った。このときの気温と打設時のコンクリートの温度は、7 月初旬で午前 26.1°C 、午後 28.0°C 、7 月下旬では午前 30.0°C 、午後 31.0°C であった。

5. 温度ひびわれの発生の予測^{2),3)}

今回のように、富配合のコンクリートを円筒構造物に

暑中に打設する場合、温度ひびわれが発生しやすくなる。工事に先立ってコンクリートの温度上昇量と発生応力の予測を行った。

コンクリートの強度は土木学会式により予測した。コンクリートの熱特性については、断熱温度上昇試験を行い係数を求めた。図-2 に断熱温度上昇量を示す。セメント量が多いので、 60°C 近く温度上昇する結果となった。

部材内の温度分布は、熱伝導方程式を解いて求めるが、ここでは有限要素法で計算した。図-3 に円筒壁での有限要素法の要素分割の状況を示す。型枠部分と上端の冠水部分を熱伝達境界、底版との打ち継ぎ部分を固定温度境界とした。計算条件を表-3 に示す。上記条件により計算した、温度予測を図-4 に示す。打設温度は 30

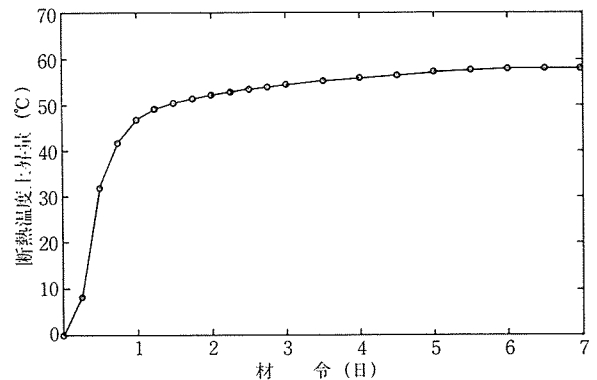


図-2 断熱温度上昇量

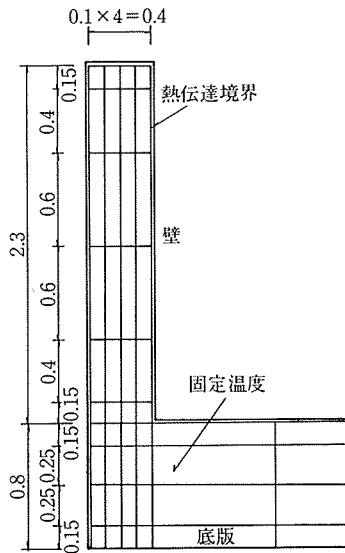


図-3 解析モデル図

表-3 温度解析条件

普通ポルトランドセメント	372 kgf/cm ³
断熱温度上昇量	Q=56.7°C, α=1.48
熱拡散率	0.004 m ² /h
熱伝導率	2.42 cal/m·h·°C
比熱	0.3×10 ⁻³ kcal/kgf·°C
密度	2.3×10 ³ kgf/m ³
打設温度	25°C
外気温	30°C
熱伝達率	7.1 kcal/m ² ·h·°C (冠水養生)
熱伝達率	12.0 kcal/m ² ·h·°C (鋼製型枠)

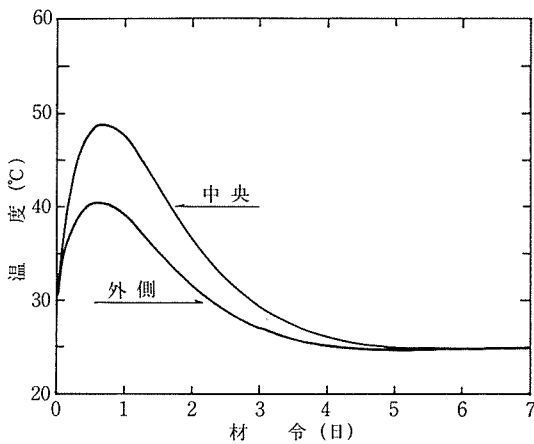


図-4 コンクリート温度の予測

°Cとし、底版コンクリートは固定温度とした。コンクリート打設後18時間後に最高温度が49.0°Cに達し、その後温度は下降し、2.5日後に定常温度まで戻った。

応力計算は有限要素法(2次元)とCPM法の2つの解析を行った。モデルは円筒部材を、円周の長さを壁長さとして計算した。発生応力を図-5に示す。部材の断面中央では温度上昇時に圧縮領域、温度の下降とともに引張領域に移行した。

ひびわれ指数を図-6に示す。発生応力はCPM法に

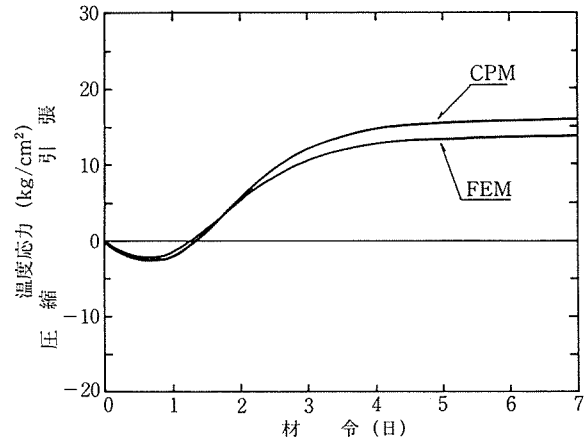


図-5 コンクリート温度応力の予測

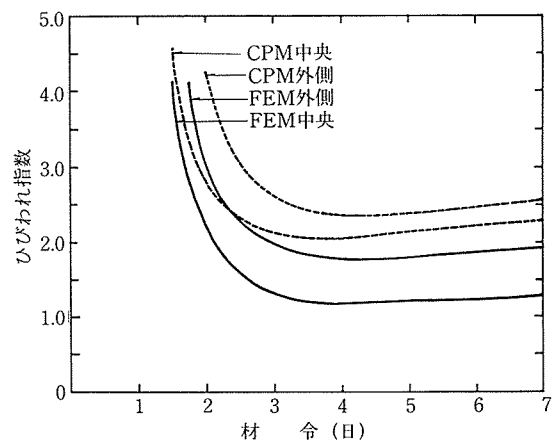


図-6 ひびわれ指数の変化の予測(CPM)

よる応力を用いている。ひびわれ指数の最小値は1.21で、ひびわれ発生の確率を土木学会施工編⁴⁾の示される値と比較すれば、ひびわれの発生の可能性は20%程度であると予測された。

6. 現場計測の概要

コンクリート打設後の円筒壁の部材内の温度とひずみ量の変化の状態を調べるため、図-1および図-7に示すように測定計器を配置した。外円筒壁、内円筒壁および底版の3箇所コンクリートひずみ計10台、有効応力計3台および無応力計3台を設置した。コンクリートひずみ計の概要を図-8に示すが、ひずみ量と温度とを同時に計測できるものを使用した。コンクリートひずみ計は、図-9に示すように円筒壁の円周方向鉄筋に固定した。図-10に概要を示すように有効応力計は、計器内の拘束体と周囲のコンクリートとの縁を切り自由伸縮による影響を取り除いたひずみを計測する。図-11に示す無応力計は、塩化ビニールとスポンジの容器内に設置し外部と計器間の応力と遮断して自由伸縮分のみのひずみを計測する。有効応力計と無応力計は、部材断面中央の円

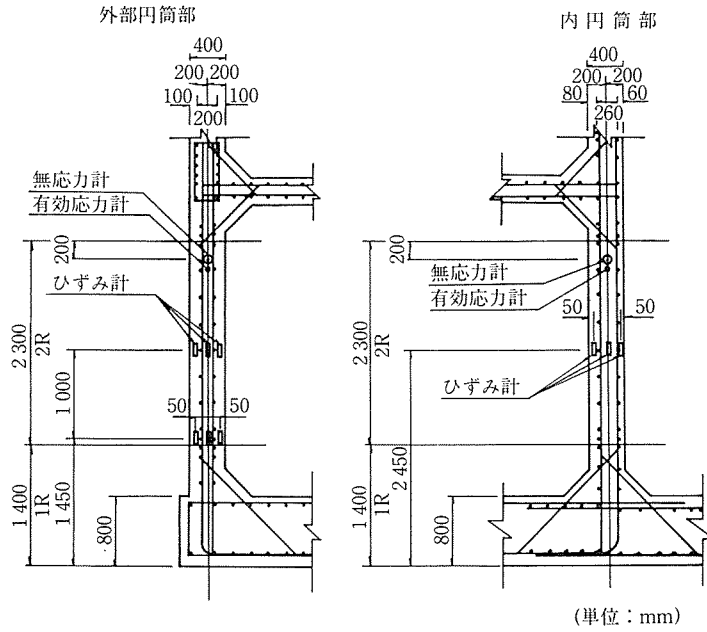


図-7 計測器の取付け位置

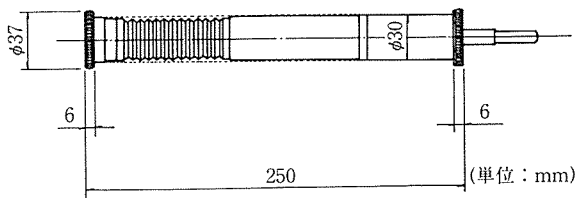


図-8 コンクリート埋込み型ひずみ計

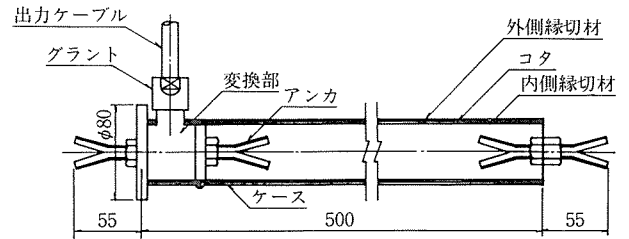


図-10 有効応力計 (単位: mm)

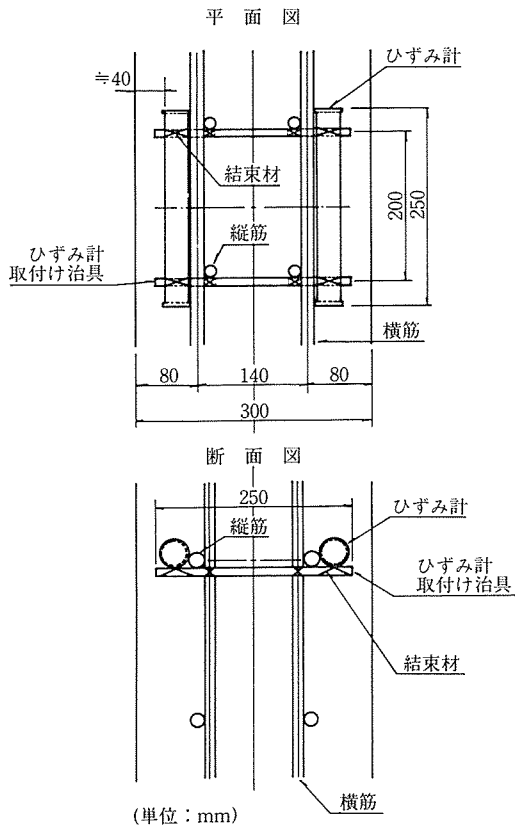


図-9 コンクリート埋込み型ひずみ計の取付け

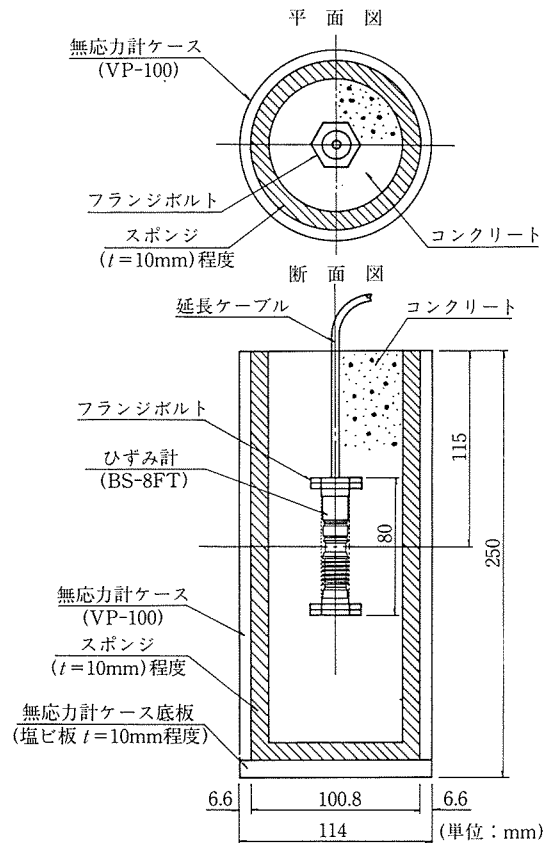


図-11 無応力計の概要

周方向に設置した。

これらの計器で得られる測定値の関連について簡単に述べる。コンクリートに生じる全ひずみ (ϵ_m) を次式で示すように部材の拘束や外力による弾性ひずみ (ϵ_i)、クリープひずみ (ϵ_c) および温度による自由伸縮ひずみ (ϵ_o) の合計と仮定する。

$$\epsilon_m = \epsilon_i + \epsilon_c + \epsilon_o \dots\dots\dots (1)$$

全ひずみは、コンクリートひずみ計で計測される。無応力計により自由伸縮ひずみが計測され温度の変化量を同時に計測しておけば、コンクリートの線膨張係数 (α_c) を得られる。有効応力計では全ひずみから自由伸縮ひずみを差し引いたひずみによる応力を計測する。この応力を有効弾性係数 (E_e) で割ればひずみとなる。有効弾性係数は、クリープ係数 (ϕ) と静弾性係数 (E_c) と次式で関連づけられる。

$$E_e = \frac{E_c}{(1 + \phi)} \dots\dots\dots (2)$$

これらの計器により各ひずみ、温度分布、線膨張係数、有効弾性係数などの温度ひびわれの判定に必要な諸数値を材令ごとに得ることができる。

これら取られた諸数値を基に内部拘束による応力と外部拘束による応力を計算できる。内部拘束による部材縁での応力増分 ($\delta\sigma_i$) は、部材内の温度差により生じるもので部材内の温度分布を対称放物線と仮定することにより次式で求まる。

$$\delta\sigma_i = \frac{2\alpha E_e}{3(1-\nu)} \Delta T_{g\max} \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、 α : コンクリートの線膨張係数
- E_e : ある材令でのコンクリートの有効弾性係数 (クリープを考慮した値)
- ν : コンクリートのポアソン比
- $\Delta T_{g\max}$: 部材最高温度と表面との温度差 (°C)

部材底面が固定されている場合、外部拘束による部材底面での応力増分 ($\delta\sigma_o$) は次式で求まる。

$$\delta\sigma_o = K_R E_e \alpha_c \Delta T_m \dots\dots\dots (4)$$

- ここで、 K_R : 外部拘束度
- α_c : コンクリートの熱膨張係数
- ΔT_m : 部材内の平均温度の温度差

ある特定の材令時と、この少し前の材令時の温度分布や諸定数を設定して応力増分を計算する。この増分を打設時から累加してある材令時の温度応力 (σ) を次式で求めることができる。

$$\sigma = \Sigma (\delta\sigma_i + \delta\sigma_o) \dots\dots\dots (5)$$

ただし外部拘束度は、円筒壁の打設高さや板厚および新たに打設したコンクリートと既に打設したコンクリートとの弾性係数の比などを基に ACI の方法⁵⁾ から求まる。ひびわれ発生の確率を表す指標としてひびわれ指数

(CI) がある。ひびわれ指数は、各材令ごとのコンクリートの引張強度と温度応力との比で求まる。

$$CI = \sigma_{t,k} / \sigma_k \dots\dots\dots (6)$$

- ここで、 $\sigma_{t,k}$: ある材令 k でのコンクリートの引張強度
- σ_k : 温度応力

7. 計測結果

7.1 温度

図-12 (a) に第 2 段ロッド中段の S-1 (外側), S-2 (中央), S-3 (内側) でのコンクリート温度の計測結果を示す。コンクリート温度は、打設後約 12 時間目に部材中央で 57.6 度の最高温度に達し、その後次第に温度は下降し、3 日後には外気温とほぼ等しくなった。図-12 (b) に第 2 段下部の S-4 (外側), S-5 (中央), S-6 (内側) の温度を示す。最高温度は 46.4°C で S-1 が設置されている中央部より低くなった。これは、既に打設を終えた底版への熱の移動によるものと考えられる。

7.2 応力

図-13 に有効ひずみの経時変化を示す。有効ひずみは実測ひずみより自由膨張ひずみを減じて算出した。コン

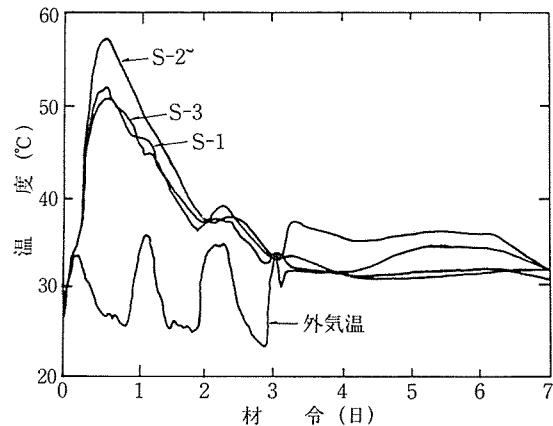


図-12(a) 温度経時変化 (2 ロッド中央)

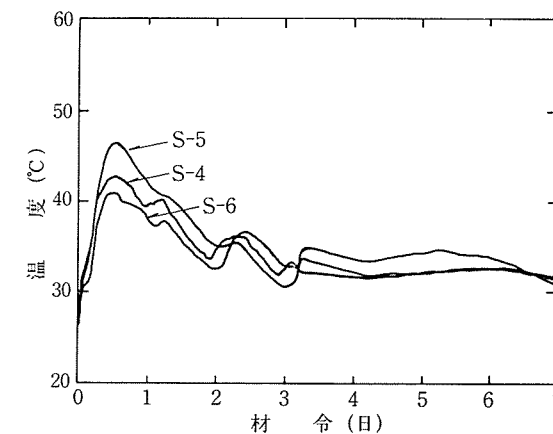


図-12(b) 温度経時変化 (2 ロッド下段)

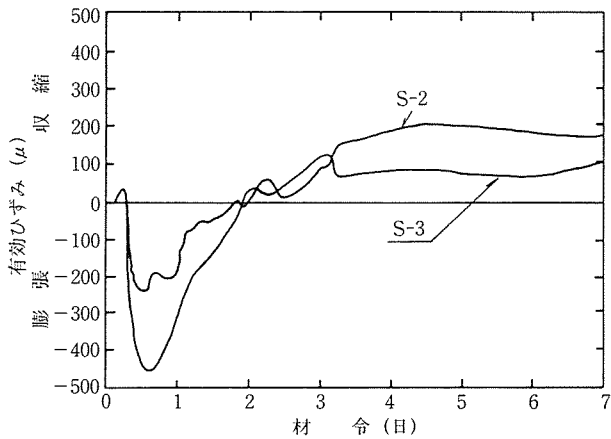


図-13 有効ひずみの経時変化

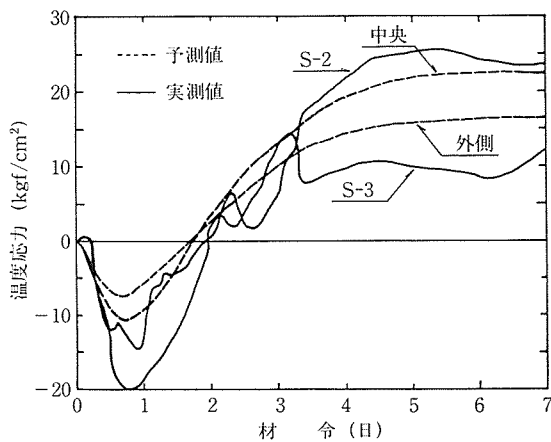


図-14 温度応力の経時変化

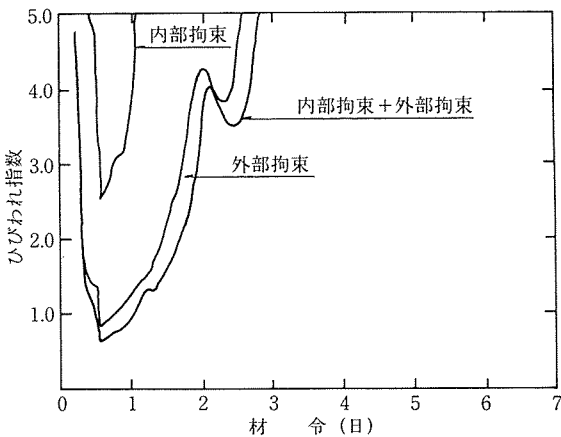


図-15 温度から算出したひびわれ指数

クリート打設後、コンクリートに圧縮ひずみが発生し、温度が降下を始めると同時に収縮になった。2日後に引張ひずみが生じ始め、3日後には220 μ ものひずみ量となった。その後はひずみ量の増加はわずかとなった。コンクリートにこれだけのひずみ量が生じると、一般的にはひびわれの発生が生じるとされている。

この有効ひずみに有効弾性係数を乗じて有効応力を算

出した結果を図-14に示す。断面中央位置は外側よりも大きな応力値を示し、圧縮応力が生じた後、温度降下とともに引張応力に転じ、引張強度の最大値は35 kgf/cm²に達した。

式(3)および(4)から求まる温度応力から得られるひびわれ指数の経時変化を図-15に示す。内部拘束によるひびわれ指数を算出すると、打設後半日程度で最小値となり、その後値は大きくなった。外部拘束のひびわれ指数の最小値は内部拘束と同時間で発生したが、ひびわれ発生確率は高い値となった。内部拘束と外部拘束による温度応力度を合計してひびわれ指数を計算すると最小値は0.7をやや下回った。

ここで外部拘束度は、第2段の打継ぎ目位置での拘束度0.92に材令ごとのコンクリートの静弾性係数の変化を考慮した修正係数(M)を乗じた値を用いた。打設後3日目での拘束度は、0.51となった。この図では、ひびわれ指数が打設後数時間して1.0以下となった。以上のひびわれ指数の検討からひびわれの発生した可能性が高いと言える。ただし、コンクリート打設を終了して型枠を外した段階で目視によるひびわれ調査を実施したところ、何箇所かにひびわれが生じていたが、ひびわれ幅の大きな顕著なひびわれは観察されなかった。

8. 計算結果と計測結果との比較

発生温度の計算予測結果と実測値は、最高温度で8.3℃差があり、最高温度の達成時間も現場の方が予測より早かった。

この原因は打設温度と外気温度を当日の実際の温度より低く見積もったことと、型枠の脱型を3日後に行った影響を予測では考慮していなかったことが原因と考えられる。そこでの条件を変更して計算を行った結果を図-16に示す。この結果、ほぼ、実測値と同様の結果となった。

この温度計測値を基に応力を再計算したものを図-14

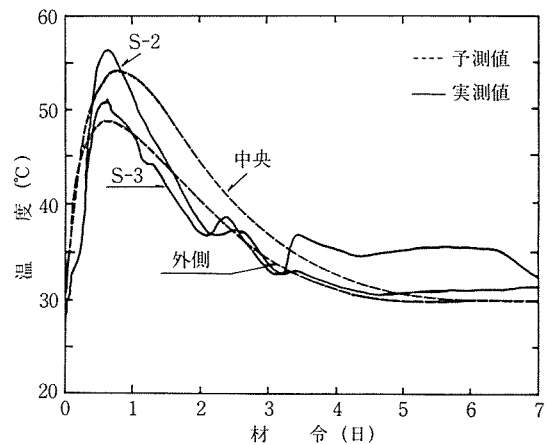


図-16 温度の予測値と実測値の比較 (FEM)

表-4 コンクリート試験結果

試験 No.	W/C (%)	S/a (%)	セメント C (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	打設温度 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm ²)			引張強度 (kgf/cm ²)			弾性係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)			断熱温度上昇量*	
							3日	7日	28日	3日	7日	28日	3日	7日	28日	K	α
1	47.0	43.2	372	13.1	4.5	29.0	3日 223	7日 344	28日 410	3日 20.0	7日 28.2	28日 32.0	3日 25.7	7日 29.6	28日 33.1	-	-
2	47.0	43.2	372	9.8	4.5	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.7	1.48

* K, αの値は材令7日までのデータで解析した。

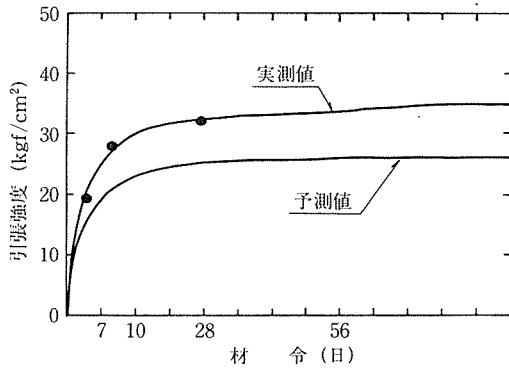


図-17 コンクリートの引張強度

に示す。温度の降下とともにひずみが引張領域に移行する現象は再現できたが、発生時期、最大引張強度などは良く一致しなかった。今回適用した壁の解析手法では円筒の拘束状態を十分に再現できなかった。

コンクリートの練り上がり性状と強度結果を表-4に示す。また、予測した引張強度と実測の測定結果との比較を図-17に示す。材令と引張強度 (f_t) の回帰式を求めると、 $f_t = t / (0.0778 + 0.0373 t)$ となり、予測値より30%も強度が大きくなった。

この引張強度の増加分を考慮してひびわれ指数を再度求め、有効応力から算出したひびわれ指数と比較したものを図-18に示す。実測値の方がひびわれ指数が若干大きいですが、温度ひびわれの発生時期などは再現できた。また、温度から算出する簡易式によるひびわれ指数は、材令ごとの拘束条件の変化やクリープなどの条件を考慮していないので有限要素法やCPMなどに比較すると差異が大きかった。

9. まとめ

境港での波浪制御用のPCケーソン堤では、単位セメント量が多く、かつ夏場にコンクリートを打設することから若令時での温度ひびわれの発生に注意が必要であった。また隔壁や中間床版などの部材と接している円筒部材の温度応力に関して知見も少ないことから、現場計測をしながらひびわれの発生状況を観察した。その結果、何本かのひびわれの発生が見られたものの、過度のひび

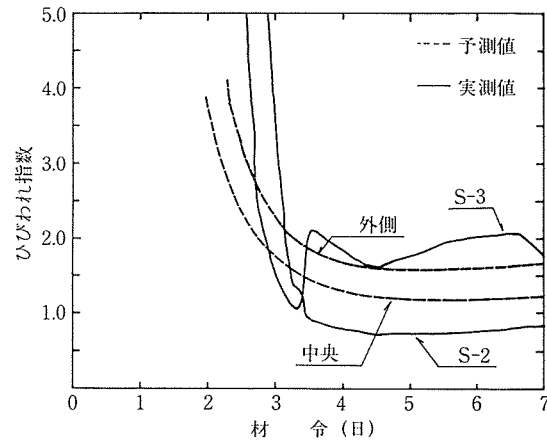


図-18 ひびわれ指数の実測値と予測値の比較

われの発生は見られず無事工事を終えることができた。今回は、ひびわれの発生予測として比較的簡単な計算手法によって検討を進めたが、ほぼ現地の状況を予測できたと考える。ただし円筒壁や開口部での部材の拘束度の考え方、計測方法やデータの整理解釈の仕方など幾つかの課題が残された。今回は、温度ひびわれに関する現場計測の概要と簡単な整理について報告するものであり、今後これらの課題に関してさらに検討を進めていき別途報告したいと考えている。

また現場計測は、運輸省第三港湾建設局の神戸調査設計事務所と境港工事事務所が実施したものである。

参考文献

- 1) 清宮理, 白崎正浩: 円筒型波浪制御構造物の構造開発, 土木学会第43回年次講演会(第V部門), 昭和63年9月, pp. 46-47
- 2) 清宮理, 野口孝俊, 横田弘: コンクリート部材の温度ひびわれ発生簡易予測法の適用例, 港湾技研資料, No. 664, 1990年5月
- 3) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1985年3月
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書・施工編, 1986年10月, pp. 119-136
- 5) ACI 207 Committee: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal Vol. 70, No. 7, July 1973, pp. 445-470

【1991年2月5日受付】