

大型 PC 反力床，壁の温度ひびわれの検討

清 宮 理*
野 口 孝 俊**
横 田 弘***

1. まえがき

運輸省港湾技術研究所では、各種港湾施設の力学的な検討を行うために大型構造実験施設を建設中である。この施設の中心は、試験体や載荷装置を固定したり反力を取るためのプレストレストコンクリート製の反力床と反力壁である。この施設では、1280 m³ の多量のコンクリートを打設し、かつ部材厚さも厚いので、温度ひびわれに対する検討が不可欠である。そこで、コンクリート打設から施設の建設が終了するまでのコンクリート内部の温度応力を予測した。また、有害なひびわれの発生に至らないように適切な材料の選定、クーリングや養生などの施工管理を行った。また施工中は、温度計、コンクリートひずみ計などの測定計器をコンクリート内部に埋設して施工管理の参考とした。ここでは、これらの温度ひびわれの検討結果について報告する。

2. 反力床と壁の構造

図-1 に施設の概要を示す。壁は厚さが 2 m、高さが床面より 7 m で、L形をしている。床は厚さが 1.5 m で面積が 247.5 m² である。床の下部は、地下室であ

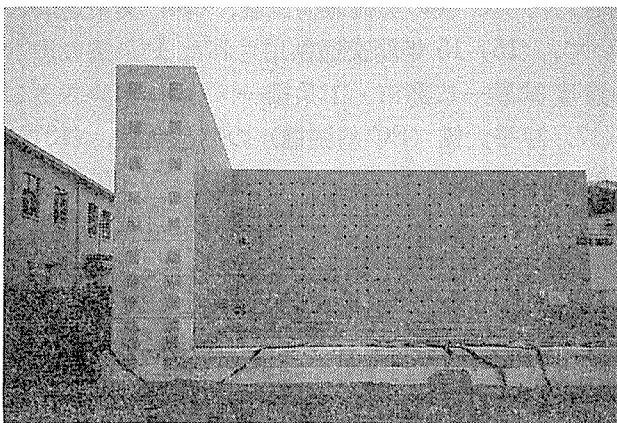


写真-1 反力床-壁全景

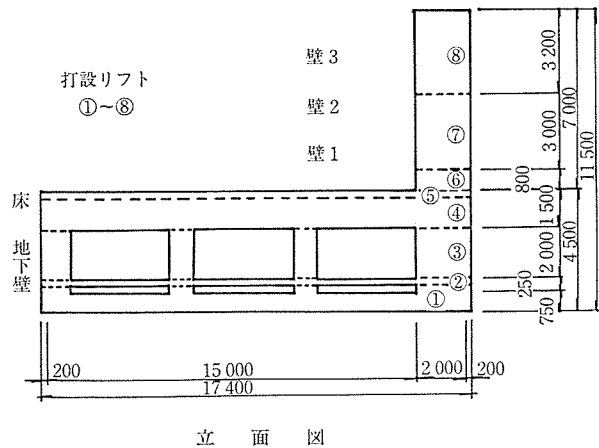
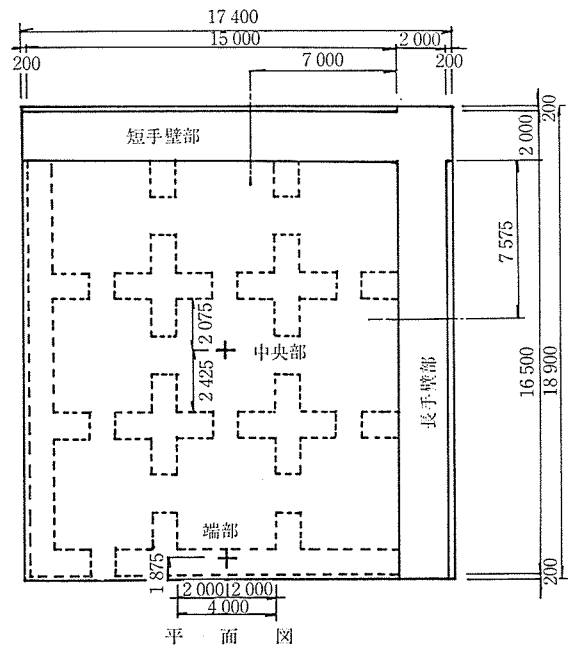


図-1 反力床-壁の構造と打設リフト

る。壁には、最大 33 kgf/cm²、で床には最大で 49 kgf/cm² のプレストレス量が導入されている。実験時の外力として壁には 200 tfm/m の曲げモーメント、100 tf/m のせん断力を想定して壁と床の設計を行った。その結果、最大曲げモーメントは 3927 tf/m、最大せん断力は 4405 tf である。

* Osamu KIYOMIYA : 運輸省港湾技術研究所構造部構造強度研究室長

** Takatoshi NOGUCHI : 運輸省港湾技術研究所構造部構造強度研究室

*** Hiroshi YOKOTA : 運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官

表-1 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 硫 化 硫 黄 (%)	強 熱 減 量 (%)	塩 素 (%)
			水 量 (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)		1 日	3 日	7 日	28 日				
高炉セメント	3.04	3920	29.6	2-55	4-12	良	—	133	218	434	3.6	2.1	1.2	0.005
JIS R 5211	—	3000 以上	—	60 min 以上	10 h 以下	良	—	60 以上	120 以上	290 以上	6.0 以下	4.0 以下	3.0 以下	—

表-2 コンクリートの配合

配合 1						
配合表 (kgf/m ³)						
セメント	水	細骨材	粗骨材 (川砂利)	粗骨材 (碎石)	混和剤	
340	158	765	527	535	3.40	
水セメント比	46.5%	スランプ	12 cm	空気量 (%)	4.0%	
骨材最大寸法	25 mm	細骨材率	42.4%	呼び強度 σ_{56}	400 kgf/cm ²	
配合 2						
配合表 (kgf/m ³)						
セメント	水	細骨材	粗骨材 (川砂利)	粗骨材 (碎石)	混和剤	
314	146	801	0	1073	3.14	
水セメント比	46.5%	スランプ	8 cm	空気量 (%)	4.0%	
骨材最大寸法	25 mm	細骨材率	43.1%	呼び強度 σ_{56}	400 kgf/cm ²	

3. 使用材料

コンクリートの種類は、打設時の温度上昇をできるかぎり抑制できるように選定した。今回の工事では施工規模を考慮して、セメントの種類および単位セメント量の調整で対応し高炉セメントB種を使用した。セメントの成績表を表-1に示す。単位セメント量が 314 kgf/m³ と 340 kgf/m³ の2種類の配合を設定した。この配合を表-2に示す。粗骨材として静岡県大井川産川砂利（硬質砂岩）と山口県美弥市伊佐産碎石（石灰石）の2種類を使用した。

4. コンクリートの打設計画

図-1に打設リフトも併せて示す。施工性、1日当りのコンクリート打設量、コンクリート温度の上昇量などを考慮して、全部で8リフトとした。

床の打設ではコンクリート量が多くなり、リフト間の打設間隔が長くなるため、遅延剤を用いた。

温度上昇を少なくするには、放熱性の高い鋼製型枠がよい。しかし、部材厚さが厚く断面内の温度勾配が大きな構造物では、温度降下時に逆に温度差を広げる結果となるため、木製型枠のような保温製のよい型枠が良い¹⁾。このため壁では側面に木製型枠を設置し、床では下面に木製型枠を設置した。また、コンクリート上面では冠水養生を実施した。コンクリート表面の過冷却を防止し、部材全体の温度降下速度が大きくなり過ぎないように、脱型時期を通常（打設後3日～7日）より遅くして、打

設後1か月程度とした。さらに寒冷期に脱型を行うので、風、雪の影響を考慮し、シートにより脱型後のコンクリート表面の保温を継続した。

5. 温度ひびわれの発生の予測

プレストレストコンクリート用の富配合のコンクリートでは、温度ひびわれが発生しやすくなる。したがって、工事に先立って温度ひびわれが発生するの否かの判断を Schmidt 法²⁾により検討した。温度予測は床、壁の第1リフトおよび第2リフトについて実施した。解析モデルの概要を図-2に、解析条件を表-3に示す。

断熱温度上昇量は、工事で使用するコンクリートを用

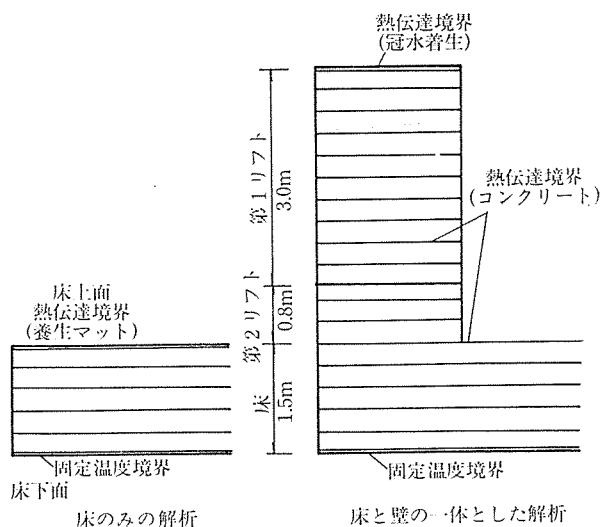
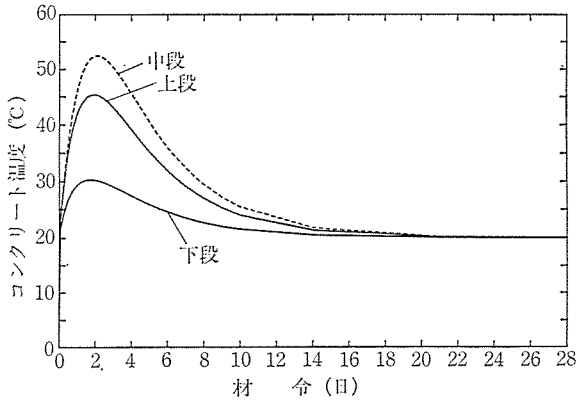


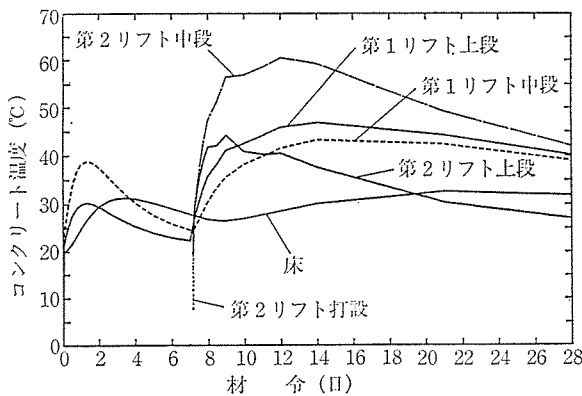
図-2 解析モデル

表—3 壁-床構造物の解析条件

高炉セメントB種	334 kgf/m ³ , Q=50.1°C, α=0.797
熱拡散率	0.004 m ² /h
熱伝導率	2.0 kcal/m·h·°C
比熱	0.22×10 ⁻³ kcal/kgf·°C
密度	2.3×10 ³ kgf/m ³
打設温度	20°C
外気温	20°C
熱伝達率	7.0 kcal/m ² ·h·°C (木製型枠)



図—3 Schmidt 法による温度予測 (床部材)



図—4 Schmidt 法による温度予測 (床, 壁)

いて断熱温度上昇試験を行い、この結果を使用した。また、モデルのブロック間隔は 30 cm とし、床の下端は固定温度境界、コンクリート面は熱伝達境界とした。

図—3 に床の温度の予測経時変化を示す。3 日目に最高温度となり、2 週程度で定常状態となった。予測最高温度は中央部において 53°C、最大温度降下量は 33°C となった。

図—4 に壁および床での温度経時変化予測を示す。図の 0 日が壁の第 1 リフト打設時で、7 日が壁の第 2 リフト打設時である。床での温度は 0 日するとき 20°C の定常状態であったが、第 1 リフト打設の影響を受け約 30°C まで上昇した。第 1 リフト (中段) では約 40°C まで上昇した後降下し、第 2 リフト打設により 42°C まで再上昇した。その後緩やかに下降した。第 2 リフト (中段) では最高温度が 60°C で、最大温度降下量は 40°C にも

達した。打継ぎを行った場合、温度降下勾配が緩やかになった。

上記の結果より、壁の第 1 リフトではひびわれの発生する可能性は低いが、壁の第 2 リフトおよび床では現状の施工計画ではひびわれの発生する可能性が高いことがわかった。

6. 温度ひびわれ制御の方法

温度ひびわれを制御する方法としては、コンクリート温度を低くする、温度応力を緩和する、および温度応力に対する抵抗力を増大させる方法がある³⁾。これらの方法のどれを採用するかは、施設の規模、工費、施設の重要度、ひびわれ発生の影響などを勘案して設定する。

今回はひびわれを許容しないこと、引張強度の増進が遅いことなどの理由により、温度の上昇を抑制する方法を採用した。打設温度の小さな方が内部温度上昇を低減させるので、温度ひびわれの発生を防止できる。打設温度を低下させる方法として、プレクーリングがある。プレクーリングには、練混ぜ水に冷水を使用する方法、骨材を冷やす方法がある。また、コンクリート練混ぜ後に液体窒素を注入し、冷却させる方法も最近提案されている。また、打設後の冷却効率を高めて、最高温度上昇の抑制をする方法として、パイプクーリングによる方法がある。パイプクーリングは部材内に配管を行い、冷水で温度を下げる方法である。今回パイプクーリング工法を採用した。

7. パイプクーリングによる対策

(1) パイプクーリングの実施計画

パイプクーリングの実施に当たっては、冷却する期間および温度が適切でなければならない。

パイプクーリングでは、ひびわれ限界温度と温度履歴 (t_1) との差が必要なクーリング熱量となる。必要熱量 (Q_p) は次式で求めた。

$$Q_p = C_c \cdot r_c \cdot A_{cd} \cdot L_p \cdot (T_{cr} - t_1) \dots \dots \dots (1)$$

C_c : 比熱 (kcal/kgf/°C)

r_c : コンクリートの単位体積重量 (kgf/m³)

T_{cr} : ひびわれが発生する温度上昇限界値 (°C)

A_{cd} : クーリングパイプの分担面積 (m²)

L_p : パイプ長さ (m)

クーリングパイプの分担面積の考えを 図—5 に示し、次式によりこの面積を求めた。

$$A_{cd} = 2\sqrt{(H_1 \cdot H_2)/\pi} \dots \dots \dots (2)$$

H_1 : 高さ方向のパイプ間隔 (m)

H_2 : 幅方向のパイプ間隔 (m)

必要水量は次式により求めた。

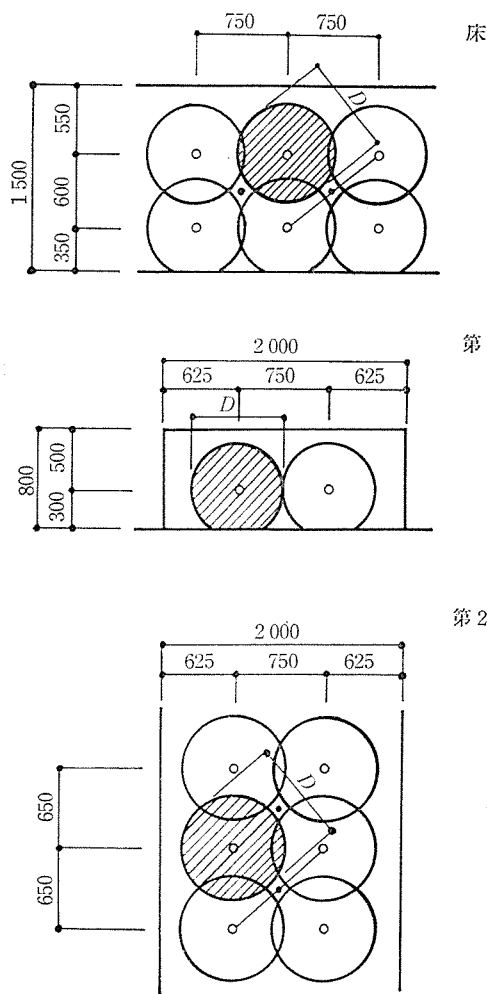


図-5 パイプクーリングの分担面積

$$V = \frac{Q_p}{T_s \cdot h} \dots\dots\dots (3)$$

T_s : 給水口と排水口との水温差 (°C)

h : クーリング時間 (h)

(2) 管理方法

パイプクーリングでは、コンクリート温度および冷却水の温度を管理した。同時にコンクリートのひずみを埋込み型ひずみ計により測定した。これは、コンクリートの温度変化に伴うひずみの変化を把握し、その値が許容引張ひずみ内に納まっているかどうかの確認に用いた。

パイプクーリングはコンクリート打設直前より開始し、内部のコンクリート温度が最高温度に達するまでとした。

最高温度に達したかどうかの判定は、事前に予測した温度履歴から得られた最高温度の計算値を目安として行った。予想最高温度に達する直前にパイプクーリングを中断して、その後の温度変化の状況を観察した。コンクリート温度の上昇が終わり、緩やかに温度の下降が始まって、降下量が 5°C に達した時点で冷却は終了とした。逆に、温度がさらに上昇した場合は再度パイプクーリングを行った。ここではパイプクーリングによる冷やしすぎが無いように注意して、温度管理を実施した。

8. 現場計測

(1) 温度測定

コンクリート温度、水温、外気温は熱電対により測定した。図-6 に熱電対の設置位置を示す。コンクリート温度および水温はコンクリート打設直前より測定を開始し、1時間ごとに測定した。外気温は打設1日前より測定を行った。水温の測定は、コンクリート温度が平衡になるまで継続的に測定した。

(2) ひずみ測定

コンクリートひずみの測定は、埋込み型ひずみ計を用いて行った。測定位置は、図-6 に示す温度の測定位置と同じ場所とした。上床版については直交する2方向(床版の辺方向)のひずみを測定した。写真-2 に測定計器の設置状況を示す。ひずみの測定は、温度測定と同時にを行った。

9. 計測結果

(1) コンクリートの強度特性

コンクリートの練上がり性状と圧縮強度の測定結果を表-4 に示す。材令 (t 日) と圧縮強度 (f_c') との回帰式を求めると、 $f_c' = t(0.0134 + 0.0019t)$ となった。

同じく表-4 に引張強度の測定結果を示す。材令と引張強度 (f_t) の回帰式を求めると、 $f_t = t(0.0964 +$

表-4 コンクリートの強度 (セメント量 334 kgf/m³)

材令 (日)	圧縮強度 (kgcm ² /f)						引張強度 (kgf/cm ²)						弾性係数×10 ⁵ (kgf/cm ²)					
	3	5	7	14	28	56	3	5	7	14	28	56	3	5	7	14	28	56
試験練り	—	—	259	342	412	478	—	—	—	—	—	—	—	—	2.70	2.92	3.21	3.52
”	169	209	244	315	372	445	12.4	15.8	17.0	21.3	23.8	—	2.31	2.49	2.72	2.96	3.15	3.55
”	—	—	232	306	379	438	—	—	—	—	—	—	—	—	2.31	2.85	3.24	3.49
反力床	—	241	274	328	401	—	—	24.8	28.0	32.1	34.7	—	—	2.79	3.02	3.11	3.5	—
試験拘束体	—	225	266	348	407	488	—	22.4	25.2	29.4	36.0	40.2	—	2.61	2.69	2.98	3.25	—
試験本体	163	245	292	378	444	489	18.0	26.0	27.4	32.7	40.8	41.9	—	—	—	—	—	—

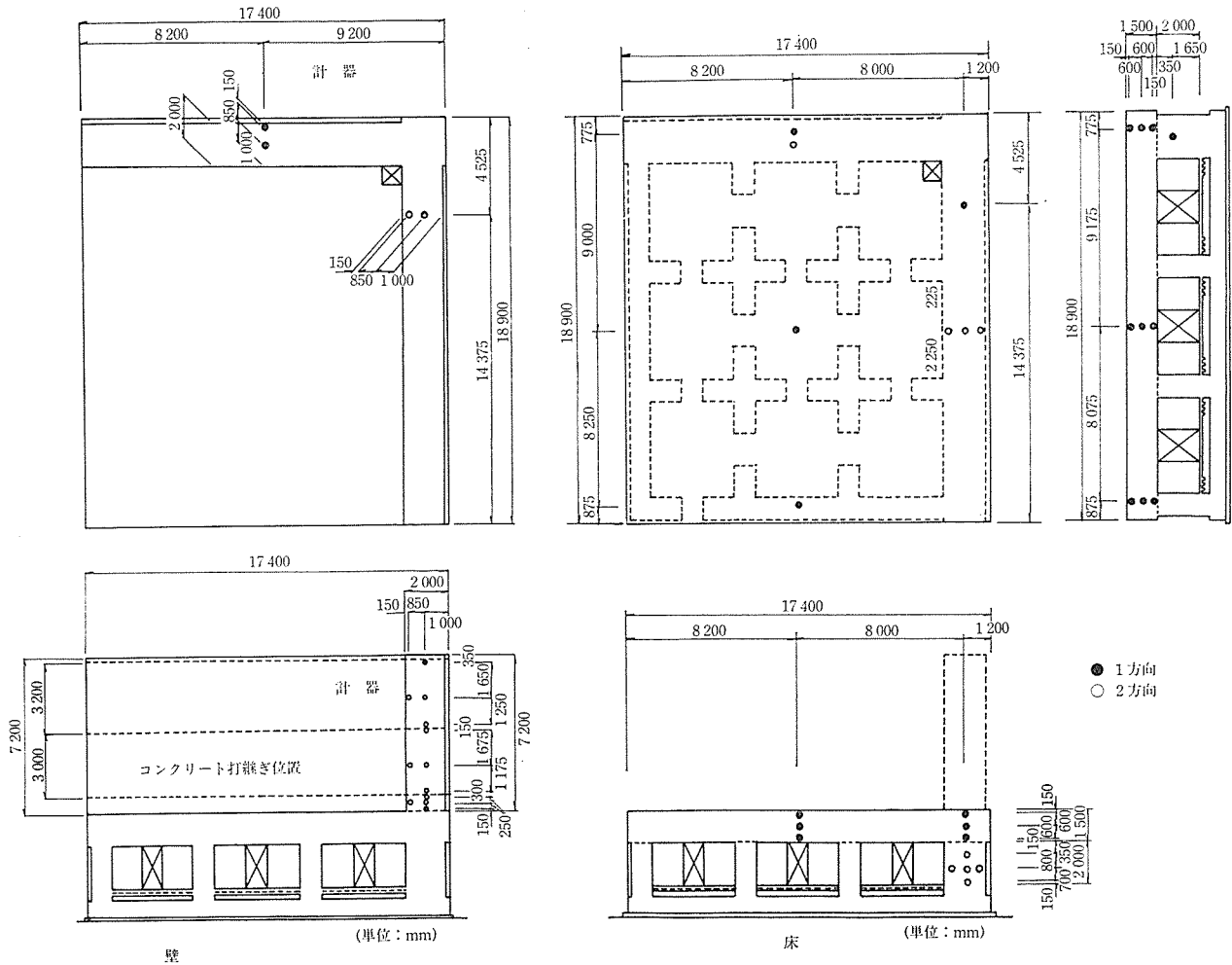


図-6 測定計器の設置位置

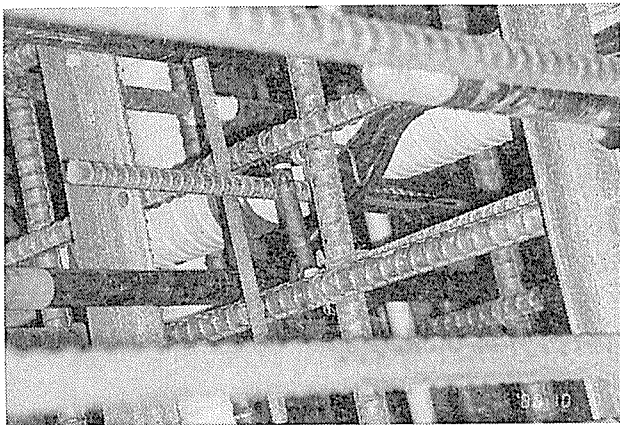


写真-2 ひずみ計の設置状況

0.022 t) となった。材令と弾性係数 (E_c) の回帰式を求めると $E_c = t / (0.073 + 0.0273 t)$ となり、7日目までで材令 91 日での値の 80% の値が得られた。

地下壁および反力床に設置した無応力計により、コンクリートの熱膨張係数を求めた。熱膨張係数の値は $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 程度であり、一般的な値と同じであった⁴⁾。

(2) 温度履歴

今回の工事における各リフトごとの温度履歴を以下の項目ごとに示す。

図-7 および 図-8 に床および壁の各リフトで測定した温度の経時変化図を示す。各図ともリフトの上段、中段および下段の 3 点について示した。

図-7 に示すように、床の最高温度は 5.41°C 、最大降

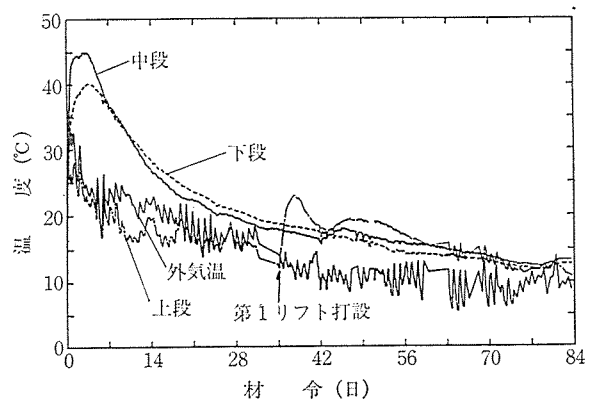


図-7 床中央部での温度履歴

下量 19.9°C であり、最高温度到達時間は、打設後4日後であった。床下段および下段では、上段が速く最高温度に達し、その後下段も同程度の温度まで上昇した。床の下面は合板を型枠とし、上面は冠水養生としたため、温度上昇の傾向に若干の差が出たものと思われる。

壁は第1リフトから第3リフトまで分けて打設した。図-8に示すように第3リフトの最高温度は41.9°C、最大降下量 26.0°C であった。床より壁の最大温度降下量

が大きいのは、打設後の外気温が下がったため、部材温度もその温度とともに低下したためである。

コンクリート打継ぎによる温度の変化について、図-9に壁の第2リフトでの経時変化を示す。図に上段、中段、下段の3点について示した。第2リフトでの温度履歴を見ると、打継ぎをした10日目から大きく温度が上昇し、第3リフトの下段で測定された温度と同程度まで温度が上昇した。材令が初期の内に打継ぎを行うと、新

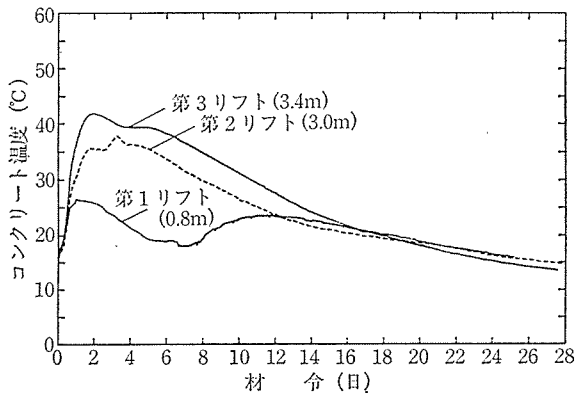


図-8 コンクリート温度履歴

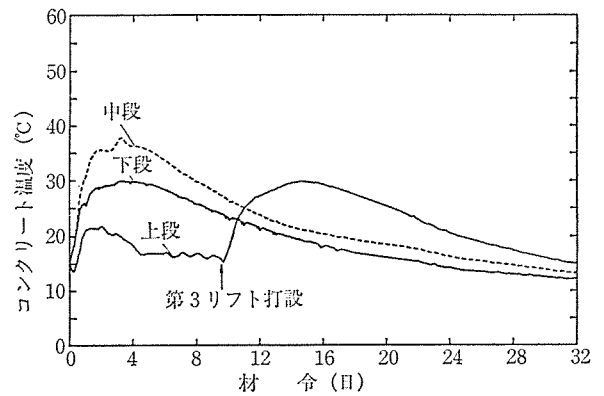


図-9 コンクリートの打継ぎによる温度変化

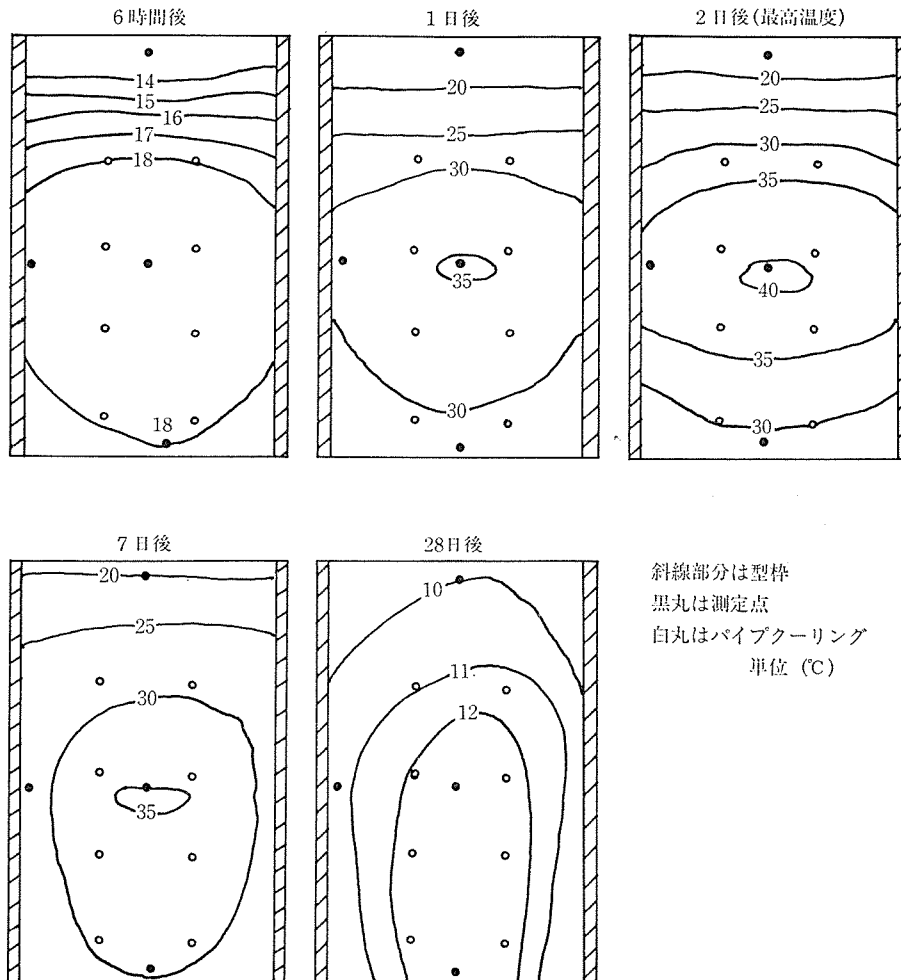


図-10 パイプクーリング実施中の断面内の温度分布

◇論文報告◇

たに打設されたコンクリートからの熱が既設のコンクリートに伝達され、再度既設のコンクリート温度が上昇することが確認できた。

図-10 にパイプクーリングを行った第3リフトの断面内の温度分布を示す。断面中心付近の温度は他に比べ高くなり、表面との温度差は 20°C にも達した。最高温度に達するまでは上下間での温度変化が大きく、横長の楕円形の分布を示していたが、温度が低下するときには型枠側（側方）からの熱の拡散が大きくなり、縦長の楕円形の分布を示した。

(3) コンクリートのひずみ

コンクリートを打設して凝結する間に、初期の塑性流動により、ひずみが残留する。今回使用した高炉セメントB種では、凝結終了時間が4時間程度であった(表-1)。しかし、今回は遅延剤を添加しているので、練混ぜ12時間後をひずみの原点とした。

壁の第3リフトの上段、中段、下段の3点における実測ひずみの経時変化を図-11に示す。温度上昇にはコンクリートが膨張し、コンクリート温度が最高温度を示す時点でひずみ量が最大となった。その後、温度の降下につれて収縮側に移行した。

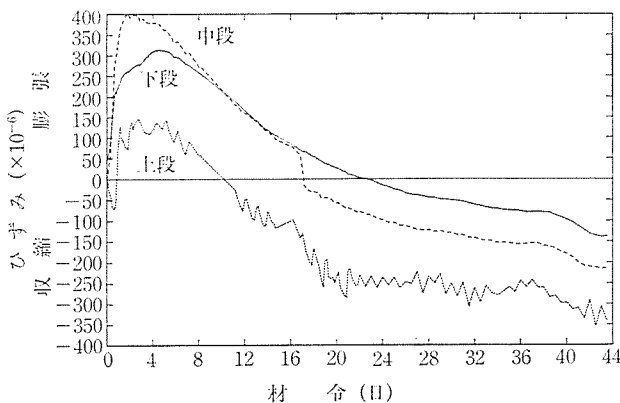


図-11 コンクリートの実測ひずみの変化 (壁第3リフト)

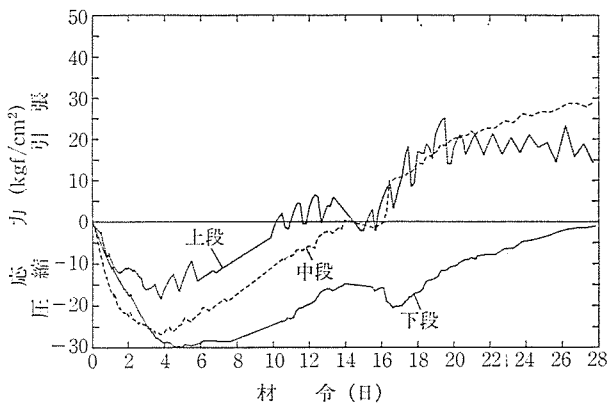


図-12 コンクリートの温度応力履歴 (壁第3リフト)

(4) 応力

コンクリート応力は、ひずみ値に有効弾性係数を乗じて算定した。この際、有効弾性係数はクリープ係数を用いて算出した。クリープ係数は CEB・FIP による方法⁵⁾により算出した。クリープ係数(ϕ_c)と材令(t)との回帰式は $\phi_c = t / (2.3812 + 1.0263 t)$ となった。また弾性係数は、実測の弾性係数値の回帰式から得られた値を使用した。

図-12 に壁の第3リフトでの応力の経時変化を示す。中段および下段では、温度上昇時には圧縮応力が増加し、コンクリート温度が最高温度を示す時点(材令5日程度)で最大となった。その後温度降下とともに引張域に移行し、外部拘束が働いた応力履歴を示した。上段では、材令初期から引張応力が発生した。

コンクリート打継ぎによる温度応力の変化について図-13に示す。打継ぎの影響が最も顕著に現れた壁の第1リフトについてそれぞれ示す。

第1リフトを打設して約6日後に第2リフトを打設した。第1リフト内の各点は打設の影響を受け、圧縮応力が発生した。特に上段では、応力が引張側から圧縮側に反転した。

コンクリート材令の初期に打継ぎを行うと、新たなコンクリートからの熱が既設のコンクリートに伝達され、既設コンクリートの温度が再度上昇する。それに伴い応力性状も変化し、二つのコンクリートが一体化するような応力分布を示した。また、新たなコンクリートの膨張の影響(外部拘束)も受けている。ひびわれ発生の検討を行う場合は、累積した応力を用いる必要がある。

今回の工事における温度応力の変化を述べる。なお、温度ひびわれの発生は見られなかった。

(5) ひびわれ指数

実測の温度から求めたコンクリートのひびわれ指数⁶⁾を図-14に示す。床が一番危険な結果となり、ひびわれ指数は1.0であった。予備検討によると、ひびわれ発

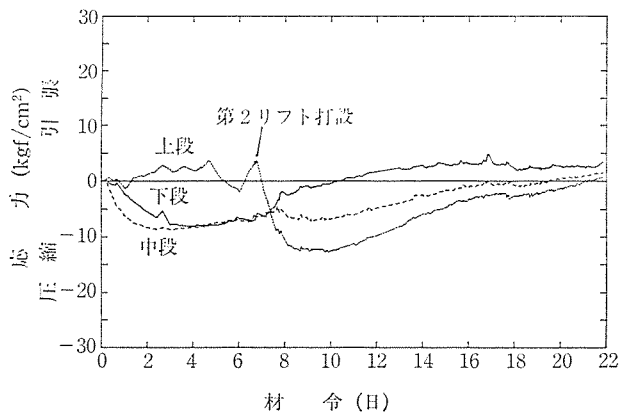


図-13 コンクリート応力 (打継ぎの影響)

表-5 コンクリートの温度履歴

	打込み時外気温 (°C)	打設温度 T_g (°C)	平均水温		パイプクーリング 時 (hr)	コンクリート最高温度 T_{max} (°C)	内部温度差 $\Delta T_{g,max}$ (°C)	最大降下温度量 ΔT_{md} (°C)	最大降下速度 (°C/日)
			給水	排水					
反力床 1	19.0	23.0	10.0	18.0	55	45.1	5.3	19.9	1.104
反力床 2	20.0	22.0	—	—	55	38.6	—	12.3	0.614
反力壁 1 リフト	9.5	17.0	12.0	12.5	30	26.4	4.9	9.2	1.673
反力壁 2 リフト	10.0	15.0	14.0	15.5	80	37.7	17.7	21.8	0.871
反力壁 3 リフト	15.0	15.0	12.5	14.0	70	41.9	21.5	26.0	1.301
拘束体	19.0	24.0	—	—	—	24.9	2.7	0.0	—
試験体	8.0	13.0	—	—	—	29.9	7.2	16.4	3.281

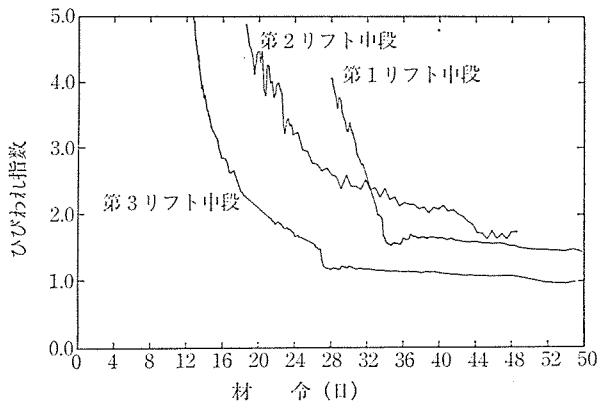


図-14 ひびわれ指数

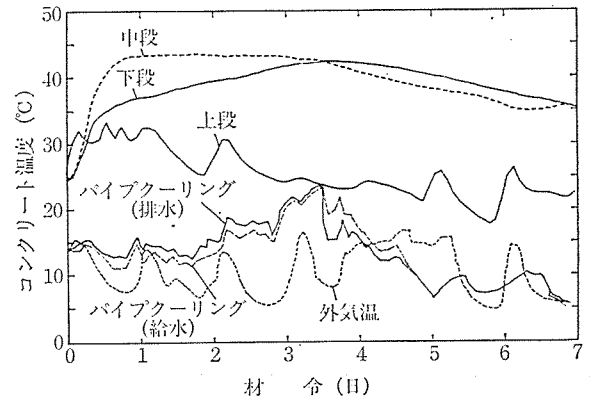


図-16 パイプクーリングでの冷却水の温度とコンクリート温度の関係

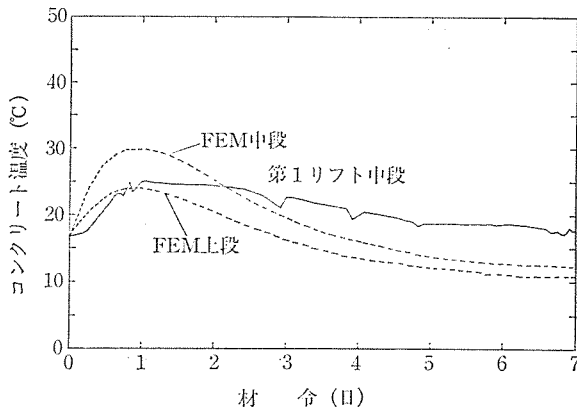


図-15 実測値と予測値の比較

生確率は 40% である。床では打設後 4 日程度でひびわれ指数が 2.0 を超えたが、壁では材令 2 週を過ぎてから短時間にひびわれ指数が上がり、その後緩やかな勾配で低下した。このことから、床は内部拘束による影響が強く、壁は外部拘束による影響が大きかったことがわかる。

10. 予測値と実測値の比較

壁の第 1 リフトにおける温度履歴について、図-15 に 2 次元の FEM による予測値と実測値の比較を示す。FEM での最高温度および温度勾配が大きいのは、コン

クリートの熱容量を大きく見積もったことと、一般的な熱拡散率より壁の第 1 リフトのほうが小さかったことによる。しかし、パイプクーリングを行う際の解析では、パイプ近傍の節点に固定温度境界を付与することで、クーリングの影響を表現することができることがわかった。

壁の第 3 リフトにおけるコンクリート温度と冷却水の温度の変化について 図-16 に示す。冷却水の温度は、クーリング中はほとんど一定であったが、クーリング停止後に 10°C 程度上昇した。コンクリート温度は、最高温度に達した後急激には低下せず、パイプクーリングによる徐冷の効果があったことが確認された。

表-5 に温度降下速度を示す。ここで、最大降下量を最高温度から打込み温度に達するまでの時間で除したものを温度降下速度と定義した。降下速度は、最高温度の低い壁の第 1 リフトでの値が最も遅く、Schmidt 法で予測した温度履歴と同様な形態を示した。床では温度降下速度が小さかった。これは木製型枠を使用したことや外気温が高かったため熱の拡散が少なかったことによる。

11. まとめ

マスコンクリートの温度ひびわれには、セメント量、打設温度、部材寸法など多数の要因が関係する。部材厚

◇論文報告◇

が厚く気温の高いときにコンクリートを打設する際には、温度ひびわれの検討が不可欠となる。今回の反力壁-床の建設では、パイプクーリングと現場計測を実施しつつ施工を行い、心配されたひびわれの発生を防止することができた。ただしこの際セメントの選定、養生方法など多岐にわたる検討を必要とした。また簡易予測手法では、コンクリートの打継ぎ、三次元の部材の拘束条件などうまく計算モデル化できず今後の検討課題となった。

今回の報告を纏めるにあたってピー・エス・コンクリート(株)の林三雄氏および清水建設(株)の小野定氏より貴重な提言や協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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，pp. 41～49
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，1985年11月
- 3) 小野 定，榎田泰仁：マスコンクリートの温度ひびわれの制御に関する一考察，セメント技術年報38，1984年，pp. 413～416
- 4) 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，pp. 61～67
- 5) CEB and FIP：Model Code for Concrete Structures，CES-FIP International Recommendation 3rd Edition，1978，pp. 445～470
- 6) 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

【1990年1月10日受付】

◀刊行物案内▶

最新 PC 橋 架 設 工 法

体 裁：B5判 147頁

頒布価格：3,000円

内 容：PC橋架設工法総論 <桁橋>張出し工法概論/ディビダーク工法/FCC—PC鋼より線を用いた片持ち張出し工法/P & Z工法/架設桁を用いた場所打ち張出し工法/フリー・ワイズ・ワーゲン工法/逆片持ち架設工法/幅員が大きく変化するPC橋の片持ち梁架設工法/プレキャストブロックキャンチレバー工法/押出し工法概論/TL 押出し工法/SSY 式押出し工法/RS 工法/移動支保工架設工法概論/グリュストワーゲン工法/OKK 式大型移動支保工/FPS 式移動支保工/ストラバーク方式可動支保工/プレキャスト桁架設工法概論/固定支保工式架設工法概論 <アーチ橋>アーチ橋架設工法概論/ピロン・メラン張出し工法/トラス張出し工法/トラス・メラン併用工法/ロアリング式架設工法/CLCA 工法(合成アーチ巻立て工法) <斜張橋>斜張橋架設工法概論/SLT 工法/ジャンピングステージ工法(主塔施工用移動足場工法) スウェーデン工法/埋込み桁を用いたキャンチレバー 架設工法/主塔用クライミングフォーム 工法/FRP 斜材外套管の架設工法/斜張ケーブルの被覆工法/複数集合斜材の架設・緊張工法/ π フレーム工法 <吊床版橋>吊床版橋架設工法概論/吊床版懸垂架設工法/吊床版架設工法/吊床版橋のスライド式架設工法/吊床版橋の架設工法 <その他の橋梁>バイプレ工法/プレビーム工法/PC トラスの架設工法/PC 方杖ラーメン橋片持ち架設工法