

報告

[1077] 温度ひびわれ制御技術に関する実験的研究

正会員○山下祐爾（大林組土木技術部）
 鈴木光雄（運輸省第二港湾建設局）
 梶原康之（運輸省第二港湾建設局）
 正会員 佐藤良一（宇都宮大学工学部）

1. まえがき

コンクリートの水和熱を主因とするひびわれの制御手法は種々実施されているものの、経済負担が大きく、より経済的な施工方法が求められている。温度ひびわれ制御対策として、①温度ひびわれ指数を基準とし、発熱の抑制、クーリング等により発生する温度応力を小さくしようとする方法や②ひびわれを計画的に発生させ、配筋によってひびわれ幅を抑制したり、誘発目地を配置して防水工を施すなどの方法が行なわれている。

このうち②の鉄筋を主体とするひびわれ制御は、経済性に優れており比較的採用しやすい方法であるが、その設計手法は明確となっていない点もある。特にひびわれ発生後、鉄筋には大きな引張応力が発生し、長期的にも残留することが知られている。このことはひびわれ誘発目地等の計画において検証すべき課題として残されている。

そこで、本報告は、東京国際空港沖合展開事業におけるアクセス道路の誘発目地によるひびわれ制御が計画された壁状構造物において、温度ひびわれの発生状況、コンクリート温度、応力および鉄筋応力などの測定を行ない、①ひびわれ誘発目地における鉄筋応力などの挙動の把握、②J C I の温度ひびわれ間隔、幅及び鉄筋応力算定方法の適用性について検証を行なった結果を述べるものである。

2. 構造物の概要および施工条件

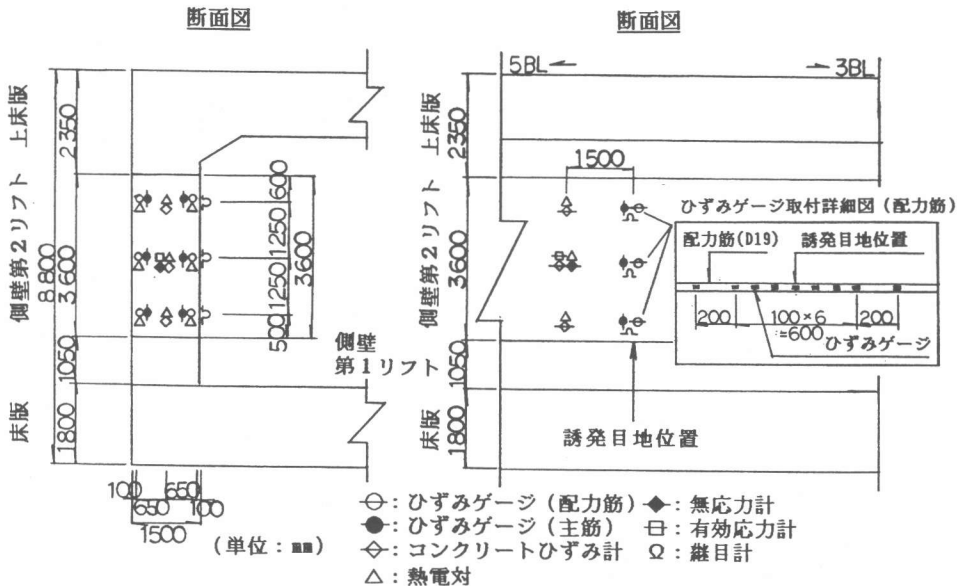


図-1. 構造断面図

対象構造物は、ボックスカルバートの側壁で、ブロック長が20m、ひびわれ誘発目地が5m間隔に配置されている。側壁の配筋筋はD19@125(SD30A)である。構造断面を図-1、ひびわれ誘発目地の構造を図-2、コンクリートの配合を表-1に示す。

コンクリートの打設は、底版が2月上旬、側壁第1リフトが2月中旬、側壁第2リフトが4月、頂版が5月であった。

表-1. コンクリートの配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	G _{max} (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE減水剤
240	20	8.0	4.0	57.8	46.2	151	261	877	1060	0.653

セメントの種類：普通ポルトランドセメント

3. 計測の概要

計測位置は側壁第2リフトで、断面内での拘束度の変化を把握するため断面上部、中央部、断面下部とした。各計測器の配置を図-1に示す。

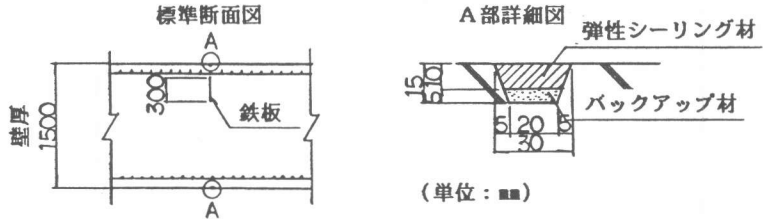


図-2. ひびわれ誘発目地の構造図

計測項目は、断面内温度、外気温、コンクリートのひずみと有効応力、鉄筋応力、ひびわれ幅であり、打設コンクリートについては圧縮強度、弾性係数、引張強度（それぞれ材令4日、7日、28日、91日）の試験を行った。強度試験結果を表-2に示す。

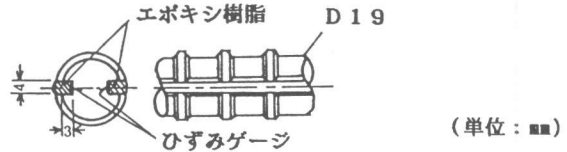


図-3. 計測用溝削り鉄筋（異形鉄筋を加工）とひずみゲージの貼付

表-2. 強度試験結果

材令	4日	7日	28日	91日
f'_c 圧縮強度 (kgf/cm ²)	147	198	298	338
E_c 弾性係数 (kgf/cm ²)	2.17×10^5	2.34×10^5	2.98×10^5	3.29×10^5
f_t 引張強度 (kgf/cm ²)	15.6	18.6	24.4	26.2

(注) 供試体は、標準養生を行った。

各計測器は、断面に直角方向に取り付けてあり、コンクリートひずみ計、有効応力計および熱電対はひびわれ発生後も測定が行なえるように、誘発目地断面より1.5m離れた断面に配置した。

また、鉄筋応力の測定は、ひずみゲージ貼り付けによるコンクリートの付着の乱れ等をなくすため、図-3に示すよう

に計測用鉄筋に溝を削り、その中に10~20cm間隔でひずみゲージを取り付けた。計測用溝削り鉄筋は、ひびわれ誘発目地を横断するように配置した。

4. 計測結果と考察

4.1 コンクリート温度

コンクリートの断面温度分布を図-4、温度経時変化を図-6に示す。

最高温度は、断面中央部において材令2日、51℃であり、打設温度20℃より31℃上昇している。温度経時変化について側壁下部の温度降下は、上部および中央部と比べて幾分早いですが、打設後約1月でコンクリート温度は外気温とほぼ同じとなった。

4.2 拘束度

拘束度は、拘束ひずみを自由変形ひずみ（温度変化量と熱膨張係数を乗じたもの）で除した値と定義される。本報告では、自由変形ひずみと実測ひずみの差から拘束ひずみを求めて、温度降下時の平均的な拘束度を算定し、その結果をACI 207委員会報告¹⁾の方法で算定した拘束度分布とあわせて図-5に示す。なお、無応力計から求めた、熱膨張係数は $7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

ひびわれ発生までは、実測の拘束度とACIの拘束度（ $L=20\text{m}$, $L/H=5.6$ ）は、ほぼ一致している。これは、実構造物の温度降下条件等がACIの実験条件と一致したものと思われる。ひびわれ発生後（ひびわれは材令7～9日において5m間隔で誘発目地に発生した。）の実測の拘束度は、ひびわれ前と比べると減少しているが、ACIの拘束度（ $L=5\text{m}$, $L/H=1.4$ ）と比べると大きく、側壁が床版やひびわれ部分の鉄筋により拘束されているため、みかけの拘束度（ $L/H=1.4$ ）より大きいと考えられる。

4.3 コンクリートの応力

有効応力計により測定した、コンクリートの応力を図-6に示す。コンクリートの水和熱による温度上昇にともない、圧縮応力が側壁の断面中央部に発生し、材令2日にお

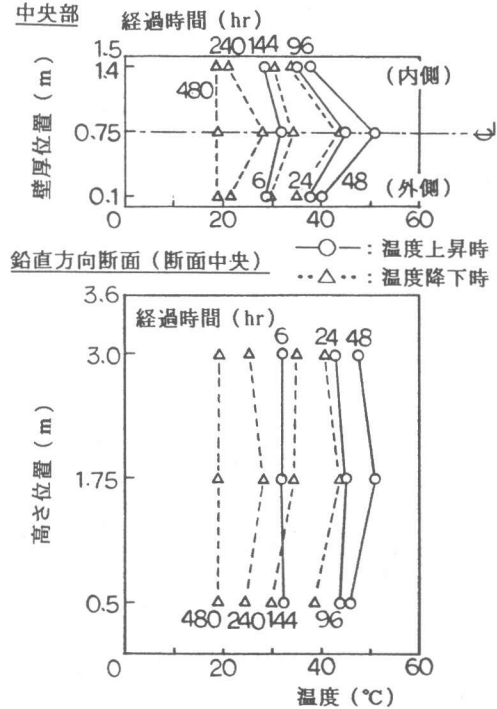


図-4. 断面温度分布
(側壁第2リフト)

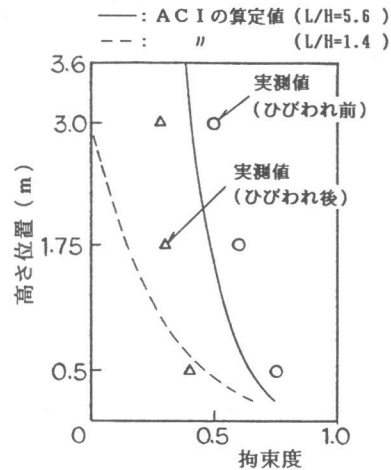


図-5. 拘束度分布
(側壁第2リフト)

いて最大圧縮応力(7.4kgf/cm²)となった。温度降下にともない圧縮応力は減少し材令4日を過ぎて引張応力となった。材令7日、側壁第2リフトの誘発目地に貫通ひびわれが発生した。

ひびわれ発生直前の引張応力は6.5kgf/cm²と小さいが、ひびわれ誘発目地に鉄板を設置して側壁断面を20%欠損させているため、ひびわれが発生したものと思われる。

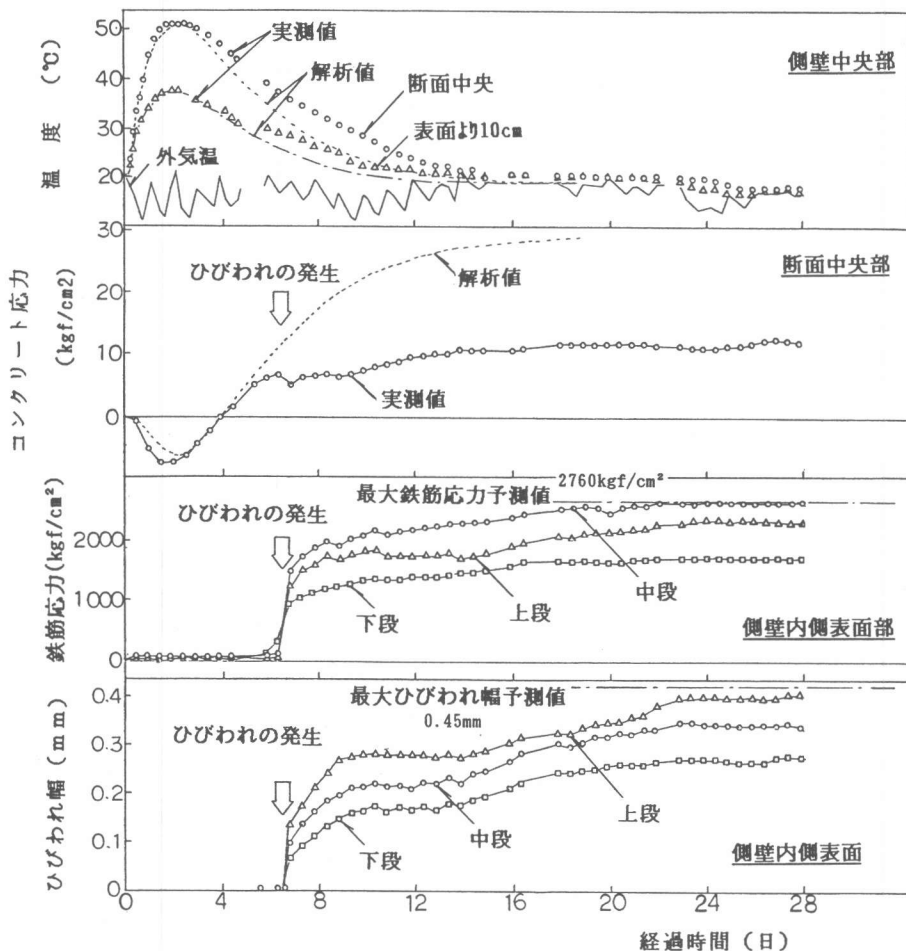


図-6. 各測定結果の経時変化

4. 4 鉄筋応力

配力筋応力の経時変化を図-6に示し、配力筋の応力分布を図-7に示す。

配力筋の応力は、ひびわれ発生直前まで、ほとんど発生していない。ひびわれ発生後、応力分布は、ひびわれ断面を中心として凸状の形となり、30~50cm離れたところでは、応力が小さく、ひびわれ発生前の応力と変わらなかった。したがって、ひびわれ断面を横断する鉄筋により、拘束力が相対すべりを伴って、コンクリートへ伝達される領域は、ひびわれ断面から30~50cmまでの範囲で、その他の領域は完全に鉄筋とコンクリートが定着していると考えられ、JCIの温度ひびわれ制御実験²⁾の結果が確認された。

ひびわれ断面での鉄筋応力は、コンクリート温度が外気温と同じ程度まで低下した材令25日で最大約2800kgf/cm²（側壁中段）となり、その後ほとんど変化しなかった。

4. 5 ひびわれ幅

縦目計を側壁内側表面に取付けて測定したひびわれ幅の結果を図-6に示す。材令7日において、貫通ひびわれが側壁第2リフトの

誘発目地に発生し、ひびわれ幅は発生後3日、上段において0.25mmとなり、コンクリート温度の降下にしたがい増大し材令25日、上段において最大0.4mmとなった。

ひびわれ幅の分布は、側壁第2リフトの上部から下部に向かい小さくなっており、鉄筋応力の分布もほぼ同様な結果となった。これは、ひびわれ後も側壁の下部が床版から拘束されているためと考えられる。なお、鉄筋応力が上段より中段のほうが大きくなっているのは、図-7に示されているように上段のひびわれ位置がひずみゲージの位置から若干ずれており、最大鉄筋応力が測定できなかったためと思われる。

4. 6 温度応力予測解析と実測値の比較

温度応力予測解析条件を表-3、温度応力予測解析結果²⁾と実測値を図-6に示す。

側壁の中央部において、解析の最高温度は、実測と良好に一致している。温度降下については、解析値のほうが、実測値より早くなっている。これは、解析で用いたコン

クリート表面の熱伝達率(10 kcal/m²・hr・°C)が、実際より幾分大きくなっているなどのためと考えられる。実測のコンクリート応力の発生状況は、ひびわれ発生前まで、解析値とほぼ

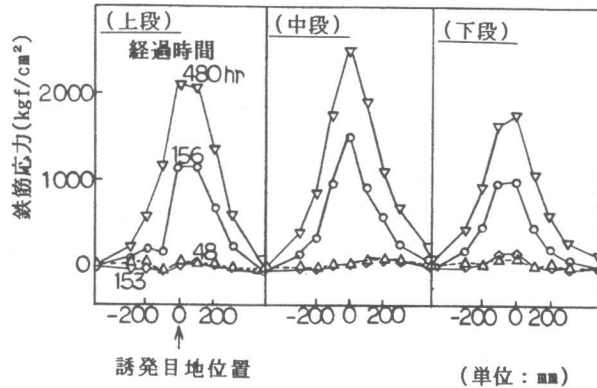


図-7. 側壁内側の鉄筋応力分布

表-3. 温度応力解析条件

項目	解析に使用した定数および式	
解析手法	温度解析: 1次元差分法(非定常熱伝導解析) 応力解析: 簡易拘束モデル法 ³⁾	
解析位置	側壁の中央部	
温度解析	外気温	17.0°C(一定)
	打設温度	20.0°C
	断熱温度上昇式	$Q(t)=44.4(1-e^{-0.000t})$
	コンクリート比熱	0.22 kcal/kg・°C
	コンクリート熱伝導率	2.0 kcal/m・kg・°C
	コンクリート熱膨張係数	$10 \times 10^{-6} \text{ 1/°C}$
応力解析	圧縮強度(kgf/cm ²)	$f'c(t) = 1771 \log M - 459 \text{ (M: 積算温度)}$
	弾性係数(kgf/cm ²)	$Ec(t) = 15300 \times f'c(t)^{0.5}$
	引張強度(kgf/cm ²)	$f't(t) = 1.4 \times f'c(t)^{0.5}$
	クリープ係数	CEB-FIP式
	拘束度	0.5

一致している。しかし、解析値はひびわれを考慮しておらず、ひびわれ発生後、温度降下に伴ない応力が増加するのに対し、実測値は微増にとどまっている。ひびわれ発生後の実測値と解析値の差は、ひびわれによる応力の再配分により生じたと考えられ、床版とひびわれ部分の鉄筋がその差分の応力を分担しているものと思われる。

4. 7 J C I の温度ひびわれ間隔、幅および鉄筋応力の解析値と実測値の比較

ひびわれ間隔、幅およびひびわれ断面に生じる鉄筋応力を、温度応力予測解析結果を用いて J C I の算定方法（長滝・佐藤らの方法）⁴⁾により求めた。算定結果と実測値を図-6および表-4に示す。解析値は、最大ひびわれ幅は0.45mm、鉄筋応力は2760kgf/cm²となった。これに対して、実測値は、最大ひびわれ幅は0.40mm、鉄筋応力は2780kgf/cm²であり、解析値は実測値と比較的良好に一致している。

表-4. J C I の最大ひびわれ間隔、幅および最大鉄筋応力の解析値と実測値

項目	断面中央部の有効拘束度 K _{rm}	温度降下量 ΔT(°C)	最大ひびわれ間隔 L _{max} (cm)	最大ひびわれ幅 W _{max} (mm)	最大鉄筋応力 f _s (kgf/cm ²)	備考
解析値	0.5	28.7	520	0.45	2760	材令30日
実測値	0.56	27.0	ひびわれ誘発 目地間隔 500	0.40	2780	材令25日

(注) 断面中央部の有効拘束度の解析値は、A C I の算定値 (L/H=5.6) である。

5. まとめ

- ①温度ひびわれは、すべて5 m間隔の誘発目地部分に集中的に発生し、計画のどおり、温度ひびわれを制御することができた。
- ②ひびわれ断面において鉄筋に生じる引張応力は、最大で約2800kgf/cm²と大きいことが確認され、その応力は、約1ヶ月間の計測において減少する傾向はなかった。
- ③J C I の温度ひびわれ間隔、幅および鉄筋応力の算定方法を実構造物に適用したが、その算定結果は実測値と良好に一致した。

今後、温度降下、乾燥収縮、クリープなどの影響もあり、長期的な計測を行ない、鉄筋応力などの挙動の把握や構造物の健全性について確認したい。

また、断面構造形状の異なる場合や時間に依存するコンクリートの諸物性などの影響、外力が同時に作用する場合についても、J C I の温度ひびわれ間隔、幅および鉄筋応力の算定方法について、検証していきたい。

<参考文献>

- 1) ACI Comitttee 207 : Effect of Restraint ,Volume Change ,and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Jour. of ACI, 1973
- 2) マスコンクリートのひびわれ制御指針：日本コンクリート工学協会
- 3) 吉岡、米沢、中島「マッシュピなコンクリート部材のひびわれ予測に関する研究」：第2回コンクリート工学年次講演会論文集，1980
- 4) 長滝、佐藤、小島「水和熱による温度ひびわれ幅の実用算定法」：第7回コンクリート工学年次講演会論文集，1985