

報 告
[1079] 沈埋函体コンクリートの施工時の温度応力についての検討

正会員○ 溝淵 利明 (鹿島建設技術研究所)
渡辺 幸之 (パシフィックコンサルタンツ)
松岡 彰 (多摩川トンネル共同企業体)
清水 徹 (川崎航路トンネル共同企業体)

1. はじめに

首都高速道路公団が建設を進めている東京湾岸道路・多摩川及び川崎航路トンネルは、沈埋工法で施工されることから、函体コンクリートには水密性が要求され、施工時などに発生するひびわれを極力抑える必要がある。しかしながら、本構造物はマッシブなコンクリート構造物であり、セメントの水和熱に起因する温度応力によってひびわれの発生する可能性があった。そこで、ひびわれ発生の可能性が高いと思われた函体側壁を対象として、温度ひびわれ抑制のための材料・配合の選定及び施工法に関する事前検討を行った。¹⁾

検討の結果、コンクリートの材料・配合については、高炉B種セメント（スラグ混入率50%）を使用し、施工法では、夏期（7～9月）に液体窒素を用いてプレクーリングを実施することにより、温度ひびわれを抑制する対策を実施することとした。

この温度ひびわれ抑制対策のうち、液体窒素を用いたプレクーリングの実際の施工での効果を確認するために、函体側壁の施工時の温度応力に関する検討及び函体のひびわれ調査を行った。

本報文では、函体側壁の施工時の温度応力についての検討結果及びその結果を用いて行った温度応力解析結果から、函体側壁の温度ひびわれ抑制効果について検討した結果を報告するものである。

2. 施工条件及び計測概要

計測の対象である函体は、図-1に示すように幅39.7m、高さ10mで、長さ128.6m、外壁は厚さ1.25mのマッシブなコンクリート構造物である。これを長手方向8ブロック（1ブロック長；約16m）に分割して施工した。²⁾

函体作製に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは高炉B種セメント（スラグ混入率50%），粗骨材は最大寸法が25mmの碎石，細骨材は山砂を使用した。

コンクリートの打設は、昭和62年11月～平成元年2月の間に実施したが、温度応力が厳しくなると考えられる7～9月に施工する側壁においては、液体窒素を利用したプレクーリングを実施した。温度応力に関する検討は、プレク

表-1 コンクリートの配合

設計基準 強度 (kg/cm ²)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
350	51.5	45.3	155	301	834	1034	0.753

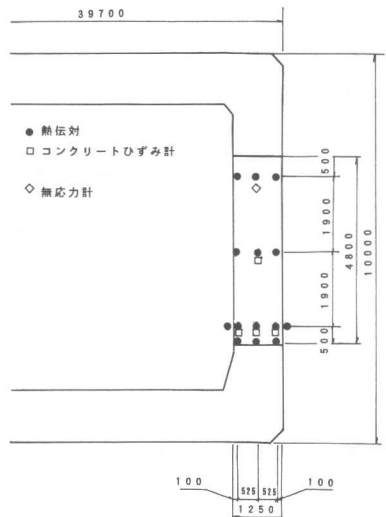


図-1 函体の断面図

ーリングしない6, 10月について、各月ごとに1ブロックを選定して行った。計測した項目は以下のとおりである。

- (1). コンクリート温度 (1ブロック ; 18箇所)
- (2). コンクリートひずみ (1ブロック ; 6箇所)
- 無応力計 ((6月のみ) : 1箇所)

函体側壁の計器の設置位置は、16mのブロックの中央断面であり、各計器は図-1に示すように、底版の打継ぎ面から0.5m, 2.3m及び4.3mの位置(順に側壁下段、側壁中央部及び側壁上段と称す。)に設置した。

3. 材料特性

函体作製に使用したコンクリートの材料特性を把握するために、計測対象ブロックのコンクリート打設時に試料を採取し、その後20℃の水中養生した供試体の圧縮強度、引張強度及び弾性係数試験を実施した。その結果を図-2に示す。それらの試験結果を用いて、圧縮強度については材令との関係、引張強度及び弾性係数については圧縮強度との関係を最小自乗法を用いて算定した。

算定した関係式を以下に示す。

圧縮強度 ; $f_c(t) = 285 \cdot \log(t) - 30.5$ (kgf/cm²)
 引張強度 ; $f_t = 0.313 f_c^{0.738}$ (kgf/cm²) (1)
 弾性係数 ; $E_c = 0.18 \sqrt{f_c} \cdot 10^5$ (kgf/cm²)

4. 計測結果

4.1 コンクリート温度

各月の側壁中央部のコンクリート温度の経時変化を図-3に示す。

側壁中央部の温度はプレクーリングを行った7~9月では約20℃で、またプレクーリングを行わない6, 10月は約27℃で打ち込まれた後、材令3日で最高温度45~52℃に達し、その後徐々に下がり、経過時間14日程度で外気温とほぼ同様な温度となった。各月の側壁中央部の温度上昇量及び温度降下量を図-4に示す。

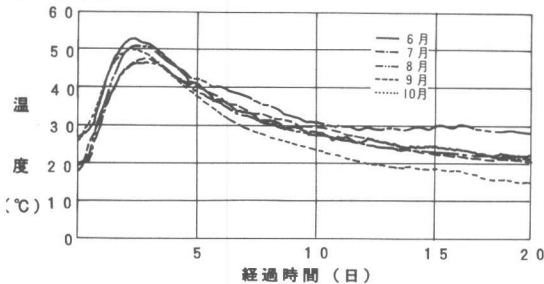


図-3 温度履歴計測結果

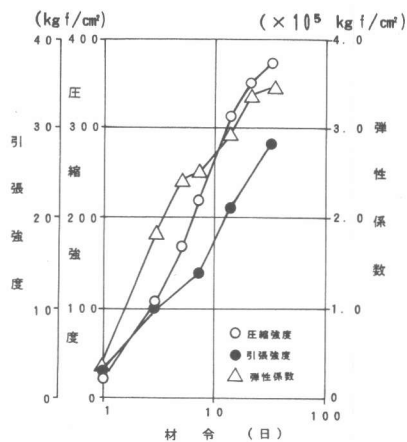


図-2 材料特性実験結果

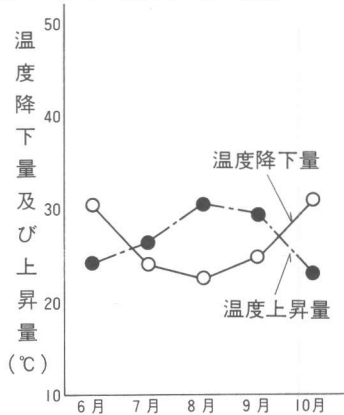


図-4 各月の温度上昇量及び降下量

ここで、温度上昇量は、打込み温度から最高温度に達するまでの上昇量であり、温度降下量は、最高温度から側壁中央部の温度が外気温とほぼ同じとなる経過時間20日の温度との差とした。

温度上昇量は、プレクーリングを実施した7月～9月では27～31℃であり、プレクーリングを実施していない6、10月の23～24℃に比べ平均で約5℃高い結果であった。

これは、プレクーリングの実施により、打込み温度を10～15℃程度下げているものの、外気温の影響を受けて最高温度が46～50℃に達し、プレクーリングを実施しなかった場合の50～52℃との差が平均で3℃程度しかなかったためと思われる。

温度応力に大きな影響を与える温度降下量は、温度上昇量とは逆にプレクーリングを実施していない6、10月が30～31℃であるのに対し、プレクーリングを実施した7～9月では23～25℃と約7℃低い結果であった。これは、7～9月はプレクーリングを行うことによりコンクリートの最高温度を抑えていることの他に、7～9月では降下後のコンクリート温度が高いことによるためと思われる。

4. 2 温度応力の検討

コンクリートひずみの測定結果及び材料特性試験で求めた弾性係数の試験結果を用いて、函体側壁中央部におけるコンクリートの温度応力を各月について算定した。各月の温度応力履歴を図-5に示す。ただし、算定した温度応力はクリープを考慮していない弾性解である。

また、コンクリートひずみの測定では一般に打設後硬化が始まる6～8時間までは測定値が安定しないことから、今回の測定においては、コンクリート打設後8時間を初期値として算定を行った。

各月における温度応力発現は、側壁中央部の温度が最高となる経過時間3日で最大圧縮応力に達し、その後コンクリート温度が低下するに従い、圧縮応力は減少に転じて、経過時間4～5日で引張応力に移行し、経過時間10日前後で最大引張応力を示している。

9月の計測ブロック及び10月の月計測ブロックにおいて、経過時間7日で応力がそれぞれ14、15 kgf/cm²に達した時点で急激な変動を示した。経過時間7日での引張強度が材料特性試験結果から14 kgf/cm²であると推定されること、この時期がちょうど型枠脱型時期にあたり、側壁の内外温度差が増大したこと等から判断して、この

時点でひずみ計の埋設している部位でひびわれが生じたものと思われる。また、

7月及び8月において、経過時間9日及び13日にそれぞれ応力が低下しており、この時点で計器を埋設した部位の近くでひびわれが生じた可能性が強いと推察された。

次に、各月の応力の計測結果からプレクーリングの効果を検討するために、材令7日での応力値を比較した。その結果

を表-2に示す。ここで、経過時間7日での応力を比較した理由としては、前述したように9、10月において、経過時間7日で急激な応力変動があり、この時点でひびわれが生じたものと思われることから、ひびわれが生じる前の値で比較するためである。

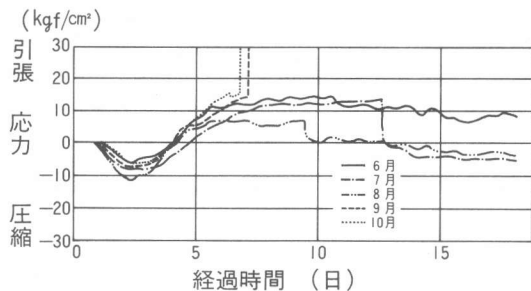


図-5 応力履歴算定結果

表-2 応力算定結果

	6月	7月	8月	9月	10月
引張応力 (kgf/cm ²)	12	10	7	14	15
引張強度 (kgf/cm ²)	13	14	13.5	14	14
ひびわれ指数	1.1	1.4	1.0	1.0	0.9

表-2から、プレクーリングを実施していない6月の計測ブロックは経過時間7日で引張応力が12kgf/cm²生じており、10月の計測ブロックは15kgf/cm²に達している。一方、プレクーリングを実施した7月の計測ブロックでは、経過時間7日で引張応力が10kgf/cm²であり、8月の計測ブロックは7kgf/cm²であり、9月の計測ブロックは14kgf/cm²であった。

以上の結果から、プレクーリングを実施した7~9月のうち、7、8月については、実施しなかった6、10月に比べて経過時間7日で約60%程度に応力が低減され、ひびわれ指数で0.5~0.9大きい結果となり、プレクーリングによる効果があったものと思われる。

4.3 コンクリートの線膨張係数

側壁の温度による自由膨張ひずみを無応力計により測定を行い、コンクリートの線膨張係数を算定した。図-6に温度変化と自由膨張ひずみの関係を示す。

図-6から、温度変化に伴う自由膨張ひずみはほぼ線形関係にあった。最小自乗法を用いて算定した結果、線膨張係数は 10.4×10^{-6} であり、一般のコンクリートの線膨張係数とほぼ同様であった。

4.4 拘束度の算定³⁾

各月の側壁下段及び中央部でのコンクリートの実測ひずみの平均値と温度変化の関係から、側壁に生じた拘束度の算定を行った。図-7に一例として、6月及び7月の温度変化量とコンクリートひずみの関係を示す。

拘束度は、拘束ひずみを自由変形ひずみで除した値で表され、一般に以下の式を用いて算定される。

$$K = (\alpha_0 - \alpha_1) / \alpha_0$$

ここで、K；拘束度， α_0 ；線膨張係数， α_1 ；温度変化に伴うひずみの変化率

ただし、本検討では α_1 は温度降下域での温度変化に伴うひずみの変化率を用いた。

計測結果から算定した結果を表-3に示す。

表-3から、拘束度は各月によって多少異なるものの、側壁下段で0.52、側壁中央部で0.47であり、壁高方向に対して高い位置程減少する傾向であった。

5. プレクーリングの効果について

前項までに6~10月の計測結果から、プレクーリングの有無による温度及び温度応力について比較検討を行い、プレクーリングの効果があったという検討結果を得た。しかしながら、比較したブロックでは外気温の条件等が異なるために、実際にどの程度効果があったのかは明らかでない。そこで、プレクーリングを実施した7~9月を対象にして、温度応力解析を行ってプレクーリングの効果について検討した。

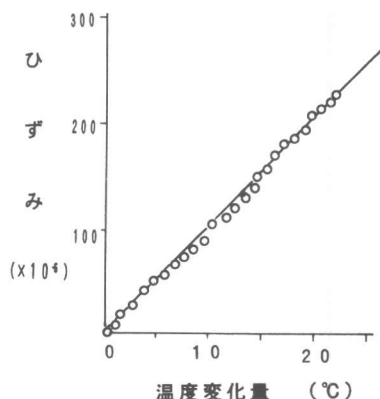


図-6 コンクリートの線膨張係数

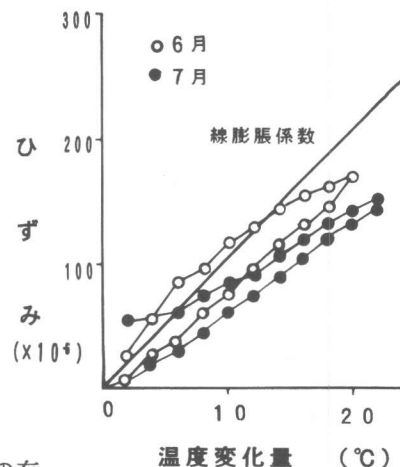


図-7 拘束度の算定

表-3 拘束度の算定結果

	6月	7月	8月	9月	10月	平均
側壁下段	0.52	0.51	0.55	0.48	0.54	0.52
側壁中央部	0.49	0.48	0.44	0.45	0.52	0.47

5. 1 解析条件及び解析方法

解析方法としては、プレクーリングを実施した場合については温度計測結果を用いて、Compensation Line 法による温度応力解析を行った。また、プレクーリングを実施しなかった場合については計測結果がないことから、事前検討で実施した断熱温度上昇試験結果を、また、打込み温度としてはプレクーリングを実施していない部分の打設記録を用いて熱伝導解析を行った。解析条件を表-4に示す。応力解析には、プレクーリングを実施した場合と同様に Compensation Line 法を用いて行ったが圧縮強度については、プレクーリングを行わなかったコンクリートの品質試験結果を用い、それから(1)式を用いて引張及び弾性係数を算定した。

5. 2 解析結果

7~9月の温度解析結果及び応力解析結果を、表-5及び図-8, 9に示す。

これらから、温度上昇量はプレクーリングを実施した方が、実施しない場合に比べて、1~2℃大きくなる解析結果となった。計測結果による温度上昇量の比較では約5℃であったことから、解析結果のほうが3~4℃小さい結果となった。

温度降下量については、各月ともプレクーリングの実施により7~10℃程度低減する解析結果となり、計測結果による比較結果が7℃であることから、それよりも若干大きい結果となった。

応力解析結果については、図-9及び図-10に示すように、プレクーリングを実施して打込み温度を10~15℃下げた場合、引張応力は経過時間20日で11~14kgf/cm²であるのに対して、実施しなかった場合には、23~24kgf/cm²であり、プレクーリング実施により10~12kgf/cm²程度の応力低減効果があるという解析結果を得た。ひびわれ指数でみるとプレクーリングを実施した場合には1.4~1.9であるのに対してプレクーリングを実施しなかった場合には0.9であり、プレクーリングの実施によりひびわれ指数が0.5~1.0大きくなることという解析結果を得た。

以上の解析結果から、プレクーリングにより打込み温度を

表-4 解析条件

	6月	7月	8月	9月	10月	
打込み温度(°C)	28.0	29.5	32.0	27.0	29.0	
比熱(kcal/kg)	0.23					
熱伝導率(kcal/mh)	2.3					
熱容量(kcal/m ³)	660					
表面熱伝達率(kcal/m ² h)	15					
断熱温度	k	44.6	44.3	43.8	44.8	44.4
上昇式	α	0.78	0.82	0.90	0.78	0.81
線膨張係数(x10 ⁻⁶ /°C)	10.4					

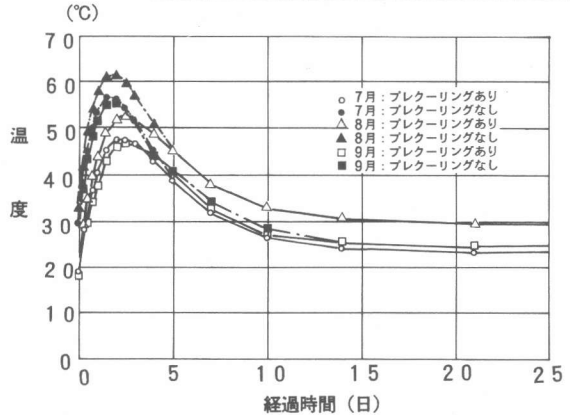


図-8 温度履歴解析結果

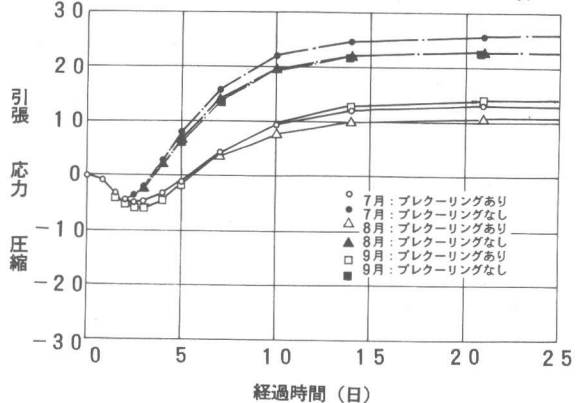


図-9 応力履歴解析結果

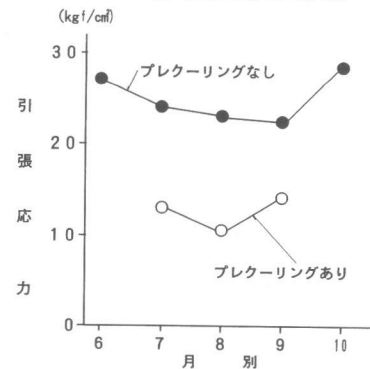


図-10 プレクーリングの効果

10～15℃下げることにより、応力を約60％に低減し、ひびわれ指数が0.5～1.0 大きくなることが分かった。

表－5 解析結果

作製月	プレクーリングの有無	打込み温度 (℃)	外気温 (℃)	最高温度 (℃)	温度上昇量 (℃)	温度降下量 (℃)	引張応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ひびわれ指数
7	有	19.0	23.1	47.4	28.4	24.3	13.1	22.0	1.7
	無	29.5	23.1	56.2	26.7	33.1	24.0	21.5	0.9
8	有	19.0	29.7	51.4	32.4	21.7	10.6	21.0	1.9
	無	32.0	29.7	60.7	28.7	31.0	23.0	21.5	0.9
9	有	16.5	24.0	46.3	29.8	22.3	14.2	20.5	1.4
	無	27.0	24.0	55.5	28.5	31.5	23.2	21.5	0.9

6. まとめ

沈埋函体側壁の温度ひびわれ抑制対策の効果を確認することを目的として、函体施工時の温度応力についての検討を行った。その結果を基に温度応力解析を実施し、プレクーリングの効果についての検討を行った。

以下に計測結果及び検討結果を示す。

- (1). 函体側壁の温度計測結果から、7～9月にプレクーリングをおこなって施工した場合と、6、10月にプレクーリングしないで施工した場合とを比較すると、側壁中央部における経過時間20日までの温度降下量はプレクーリングの実施した場合で24℃、実施しなかった月で31℃であり、約7℃の低減であった。また、コンクリートひずみの計測結果を用いて応力を算定した結果から、10～15℃打込み温度を低減することにより、側壁中央部に発生する引張応力は最大15 kgf/cm²から7 kgf/cm²に低減された。
- (2). 計測結果を基にした温度応力解析から、同じ環境条件におけるプレクーリングの有無による温度応力低減効果を比較すると、プレクーリングにより打込み温度を10～15℃下げた場合には、温度応力を約10～12 kgf/cm²低減することができ、ひびわれ指数で約0.5～1.0程度大きくすることが可能であるという結果を得た。

以上、函体施工時の温度及びひずみの測定結果と、その結果を用いた温度応力解析結果について報告したが、今回の施工時における温度応力に関する検討調査では、函体側壁のひびわれ調査も行っている。この検討結果については別稿で報告する予定である。

<参考文献>

- 1) 寺山 徹, 高津 和義, 山田 淳 : 沈埋函コンクリートのひびわれ制御検討, 土木学会第42回年次学術講演会, 1987.9
- 2) 神戸 明雄, 手塚 茂樹, 松森 秀美 : 高速湾岸線の沈埋函製作工事施工概要, 建設の機械化, 1988.11
- 3) 竹下 浩之, 浅沼 潔, 横田 季彦 : マスコンクリート中の計器特性について, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム
- 4) 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