ンネル本体を適当な長さに分割した函体（エレメント）をドライドック等の製作ヤードで築造し、両端をふさいで密閉状態にしたのち、水の浮力で浮かび上がらせる。これと並行してトンネル建設現場では、あらかじめ函体を沈設する溝（トレンチ）を掘っておき、ここに函体を曳航し、水荷重を加えて沈設する。函体と函体を水圧で接合したのち、仮の隔壁を撤去し、順次沈設を繰り返しながら埋戻しを行い、トンネルを完成させる。

多摩川トンネルは全長 2 090 m のトンネルで、このうち多摩川河口部 1 549.5 m が沈埋トンネルとなって

おり、1 函の長さ約 129 m の函体 12 函から構成される。川崎航路トンネルは全長 2 050 m のトンネルで、このうち川崎航路横断部 1 187.5 m が沈埋トンネルとなっており、1 函の長さ 132 m の函体 9 函から構成されている（図-2）。

この2つの沈埋トンネルの函体製作工事が大田区大井埠頭に建設されたドライドックで行われており、現在1期工事として、多摩川トンネルの7 函体、川崎航路トンネルの4 函体、計 11 函体が製作されている（写真-1）。

ここでは、函体製作工事についての品質管理、ひびわ

図-2 多摩川、川崎航路一般図

写真-1 沈埋管製作状況全景

Crack-Control of Elements for Submerged Tunnels

—Tama River and Kawasaki Fairway Tunnels in Expressway Bay-shore Route—

By S. Tezuka and S. Tomizawa

Concrete Journal, Vol. 27, No. 5, pp. 38~49, May 1989

Synopsis Tama River and Kawasaki Fairway tunnels in Expressway Bay-shore Route is constructed with submerged tunneling method. As for the elements of these tunnels, eleven of twenty-one elements are now being prefabricated in the dry-dock. This report presents the quality control and crack-control, such as mix proportion and pre-cooling of the concrete, in the prefabrication of the elements.

Keywords : submerged tunnel, element, crack control, precooling

れ制御対策等について報告する。

2. 函体製作工事の概要

2.1 沈埋函の構造概要

両トンネルは、道路規格第2種第1級往復6車線を有し、その両側に避難路を兼ねた管理用通路と管理施設のスペースをもち、海側には企業の洞道を併設する断面となっている。

沈埋函の断面は、上記内空断面に、浮上、曳航時の乾舷吃水や、トンネル完成時の浮き上り安全率を考慮した鉄筋コンクリートとしての部材断面から決定される。沈埋函の標準断面を 図-3 に示す。下床版厚は 1.35 m、上床版および側壁厚は 1.25 m であり、全幅約 40 m、高さ 10 m の函体となる。これは、沈埋トンネルとして世界最大規模の断面であり、沈埋トンネルの延長としても、多摩川トンネルが 7 番目、川崎航路トンネルが 11 番目にそれぞれランクされる。

沈埋函 1 函当りの長さは、経済性、工程、作業性、沈設バージの規模、航路条件、既往の沈埋トンネルの施工例等を総合的に検討した結果、約 130 m とした。

沈埋トンネルは、水底に建設されることから高い水密性が要求され、このため、函体の底面および側面には 8 mm の防水鋼板（型わく兼用）を、頂面には防水シート（ $t=2.5$ mm プチルゴム）を設けて止水をはかるほか、函体軸方向に 112 本の P C ケーブルを配置して約 10 kgf/cm² のプレストレスを導入し、ひびわれ幅の減少をはかることとしている。

沈埋函の構造概念図を 図-4 に、概算数量表を 表-1 に示す。

表-1 函体製作工事概算数量

名 称	仕 様	数 量
コンクリート	$\sigma_{ck91}=350$ kgf/cm ² (BB 352 B)	19 000 m ³
鉄 筋	SD 35 D 51~D 16	5 370 t
防 水 鋼 板	SS 41 $t=8$ mm	500 t
防 水 シート	プチル系 $t=2.5$ mm	5 000 m ²
縦締ケーブル	12-T 12.7	112 本
連結ケーブル	タイプル F 270 T	200 本
端 部 鋼 殻		300 t
バルクヘッド		170 t

(注) 函体概算総重量 約 5 万 2 000 t/函

図-3 沈埋函標準横断面

図-4 沈埋函概念図

図-5 函体製作順序

2.2 製作工事概要

本工事では、沈埋函 1 函当りのコンクリート量は約 1 万 9 000 m³ であり、1 期工事全体では約 20 万 m³ となることから、効率的な施工が必要となる。

コンクリートプラントはドライドックの近くに既存の市中プラントが 3 社あり、この内の 1 社を本工事専用プラントとして使用することとした。これは、沈埋函として均一で高品質のコンクリートを安定的に供給する必要があること、約 1 年半の間に約 20 万 m³ のコンクリートを打設することから、ほぼ連日のコンクリート打設となること等によるものである。

函体の製作は、函体を軸方向に 8 ブロックに分割し、下床版、側壁、上床版の順で施工した（写真-2~6）。函体製作のフローを 図-5 に示す。1 ブロックの長さは約 16 m とした。これは、下床版、上床版の 1 日当りの

コンクリート打設量が最大約 1 000 m³ となること、移動型わく支保工の転用、作業性等を総合的に判断して決定した。

型わく支保工には、函体の出来形精度の向上と、作業の省力化、効率性を考慮して、移動型わく支保工（トラベラー）を採用した。移動型わく支保工の配置図を 図-6 に示す。移動型わく支保工は、1 函体につき、下床版用（下床版外枠 2 セット）、側壁用（車道隔

写真-2 防水鋼板，鉄筋組立て

写真-5 壁コンクリート打設

写真-3 端部鋼殻組立て

写真-6 上床版コンクリート打設

写真-4 底版コンクリート打設

壁部1セット，ダクト部2セット)，上床版用（上床版外枠，車道部，ダクト部各2セット）から構成され，全体では5パーティー分を製作し，2回，転用をはかることとした。

また，上床版の鉄筋組立てを前スパンのコンクリート養生中に施工できるよう，鉄筋吊り架台を使用して工程の短縮をはかった。

コンクリートの打設は，ロングビームコンクリートポンプ車（吐出量 100 m³/h）を使用し，下床版，上床版は

図-6 コンクリート打設時の移動型わく支保工

3台により，1ブロックをいずれも1日で打設した。

コンクリートの養生は，使用セメントが低発熱型の高炉セメントであることから，初期養生を入念に行う必要があり，コンクリート露出面を養生マットで覆い，散水

養生を行った。沈埋函は、底面および側面が防水鋼板で覆われ、型わくも支保工と一体構造となっていることから止水性が高く、湛水状態で養生を保つことができた。

函体の下床版、側壁、および上床版の1ブロック当りのサイクルタイムは約3週間であった。

2.3 コンクリートの品質管理

コンクリートの品質管理計画表を表-2に示す。沈埋トンネルでは、一般に行われているスランプ、空気量、圧縮強度の管理に加え、比重管理が重要な要素となる。これは、沈埋函が浮上した際の乾舷を約10cmに設定しており、使用する骨材およびコンクリートの比重を正確に把握する必要があるためである。

コンクリートの比重は生コンクリートの出荷時に午

前・午後おのおの1回測定するほか、硬化コンクリートについてMT供試体(φ360×H360mm)とLT供試体(800×800×800mm)を作製し、MT供試体は各コンクリートの打設ブロックごとに3個採取、LT供試体は1函体につき下床版、側壁、および上床版からそれぞれ2個ずつ2回採取する。比重の測定は、7日、28日、91日、ドライドック注水前1か月の計4回行う。

3. コンクリートの配合

3.1 配合検討

函体は水密性が要求される構造物であることから、ひびわれを極力抑える必要がある。しかし、本構造物はマッシブなコンクリート構造物であるうえに、設計規準強度350kgf/cm²と比較的高強度であるため、セメントの

表-2 コンクリート品質管理計画表

試験項目		仕 様	場 所	方 法	頻 度	仕様を満足しない場合の処置	関連規格	記 録	備 考
ス ラ ン プ		8±2.5 cm	ミキサ早吐出口付近	JIS A 1101	毎日、最初の運搬車から5台目まで各運搬車ごとに1回、その後5台につき1回、性状が変わったと思われるごとに1回。床版コンクリートは運搬車ごとに1回。結果が良好であれば上記まで頻度の低減可。	返 品	JIS A 1115	生コンクリートの品質検査成績表(様式第40)	
空 気 量		4±1%	同 上	JIS A 1116 JIS A 1118 JIS A 1128	圧縮試験供試体採取のたび(1回/150 m³)	同 上	JIS A 1115	同 上	
塩化物含有量		Cl ⁻ として 0.30 kg/m³ 以下	同 上	公団が定める塩分含有量測定器による。	午前・午後の最初のスランプ試験のとき	同 上		同 上	試験器は使用開始前に1回。その後半年ごとに1回精度検定、結果を主任監督員に提出。
圧縮強度	材令7日	試し練りの強度発現状態を参考とする。	供試体作製は現場。養生および試験は工場。	JIS A 1108	1回/150 m³ (1日最低1回)	試験の結果と試し練りの比較において疑義があると認められるときは、主任監督員に報告し指示を受ける。	JIS A 1115 JIS A 1132	様式第40	養生20°C+3°C水中供試体 φ100×200
	材令28日	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上
	材令91日	350 kgf/cm²	同 上	同 上	1回/150 m³ 同一構造物の同一コンクリートにつき最低3回 床版コンクリートは1径間につき最低1回	試験の結果疑義があると認められるときは、主任監督員に報告し、指示を受ける。	同 上	同 上	同 上
骨 材 比 重		砕石2.70±0.02 (表乾) 砂利2.61±0.02 (表乾) 砂 2.61±0.02 (表乾)	産地および工場	JIS A 1109 JIS A 1110	産地、工場ともに1回/月	返 品		骨材試験成績表	
単位体積重量	生コンクリート	2.33*+0.02 t/m³	工 場	JIS A 1116	午前・午後各1回	廃 棄	JIS A 1115	様式第40	* 試し練りにもとづく参考値であり、本打設にともない見直しを行う。
	硬化コンクリート		現 場	φ360× H360 mm 0.8×0.8×0.8 m の2種の供試体を作製。	3個/打設日(φ360) 1個/1 667 m³(0.8 m) (3個/5 000 m³) 材令28日、91日、完成時に重量測定。詳細は別途計画書による。				
アルカリ骨材反応		無害であること	公的機関またはこれに準ずる機関	化学法あるいはモルタルバー法	施工開始前および骨材産地が変わるたびに、必要に応じ事前に1回	主任監督員と協議を行う。			試験は公的機関またはこれに準ずる機関が行う。

水和熱に起因する温度応力によって温度ひびわれが発生するおそれがある。函体のうち、上下床版については、これまでの実績により、ひびわれの発生するおそれは少ないと考えられるが、側壁についてはそのおそれが大きく、十分なひびわれ抑制対策を施す必要がある。そこで、函体を使用するコンクリートについては、とくに側壁部を対象として、温度ひびわれの発生をできるだけ抑制するための適切な材料、配合、および施工法について検討する目的で、図-7に示す一連の試験および解析を実施した。

3.2 セメントに関する試験

温度ひびわれ抑制に関しては低発熱型セメントの使用が有効であるが、中庸熱ポルトランドセメント、中庸熱フライアッシュセメント、低発熱型高炉B種セメントの3種を対象として、おのおののセメントを使用した場合のコンクリートの強度特性および熱特性についての試験を行った。

図-8は材令ごとのコンクリート強度と水セメント比の関係を各セメントごとに示したものであるが、強度発現は、中庸熱ポルトランドセメントの場合がもっとも大きく、低発熱型高炉B種がこれに次ぎ、中庸熱フライアッシュセメントがもっとも低くなった。

熱特性については、簡易断熱温度上昇試験を行い、その結果から完全断熱状態における温度上昇式を解析的に

図-8 水セメント比と圧縮強度の関係

求めた。簡易断熱温度上昇試験は、練上り温度 20°C および 30°C のコンクリートを 50×50×50 cm のブロック供試体に詰め、周囲を 20 cm 厚の断熱材で囲み、それぞれ 20°C および 30°C の恒温室に入れて温度測定を行った。しかし、この試験は多少の放熱の影響が入っていることから、完全な断熱状態での温度上昇を推定するために、一次元差分法（シュミット法）を用いて解析を行った。温度推定はもっとも断熱状態に近い中心部で行い、計算値が試験値とほぼ同じになるように断熱温度上昇式を定めた。断熱温度上昇式としては次式を用いた。

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (^\circ\text{C})$$

ここに、 K, α ：定数（セメントの種類、単位セメント量、打設温度等で変化する）

T ：材令 t 日における断熱温度 ($^\circ\text{C}$)
 t ：材令 (日)

断熱温度上昇式の推定結果と各材令における温度上昇を図-9に示す。温度上昇量は低発熱型高炉B種がもっとも大きく、以下、中庸熱ポルトランド、中庸熱フライアッシュの順となっているが、材令初期における温度上昇速度は、中庸熱ポルトランド、低発熱型高炉B種、中庸熱フライアッシュの順となった。

3.3 温度応力解析

図-7 ひびわれ制御検討フロー

(a) 単位セメント量：270 kg/m³, 打設温度：20°C

(b) 単位セメント量：300 kg/m³, 打設温度：20°C

(c) 単位セメント量：270 kg/m³, 打設温度：30°C

図-9 断熱温度上昇式一覧

(1) 解析方法

断熱温度上昇式および圧縮強度試験結果をもとに、沈埋函側壁についてもっとも条件の厳しい夏場における温度応力解析を行い、セメントの種類について絞り込みを行い、さらに春・秋についても温度応力解析を行って、沈埋函用コンクリートに適したセメントの選定を行った。

温度ひびわれ発生の検討は土木学会「コンクリート標準示方書」の温度ひびわれ指数 f_t/σ_T (f_t : 水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値, σ_T : その材令におけるコンクリートの引張強度) を判断基準として行ったが、同示方書では温度ひびわれ指数を以下のように区分している。

ひびわれを防止したい場合	1.5 以上
ひびわれ発生を許すが、その幅および数を制限したい場合	1.2~1.4
上記以外の場合	0.7~1.1

沈埋函体のコンクリートは、ひびわれ発生の抑制およびひびわれ幅の制御が必要とされる構造物であること、函体周囲には防水鋼板が設けられることや、函体製作後プレストレスの導入を行うことなどを考慮して、ひびわれ指数 1.2 以上 (ひびわれ発生確率 20% 以下) を目安とすることにした。

温度応力解析は、沈埋函の側壁および上下床版を対象として、温度解析は一次元 FEM、温度応力解析は「コンクリート標準示方書」および日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートのひびわれ制御指針」に示す Compensation-Line 法を用いて行った。また、拘束度については、側壁で 0.6、上下床版で 0.1 とした。

(2) 解析結果

a. 夏場での解析結果 (側壁)

側壁に対する夏場における温度応力解析を行った結果を表-3に示す。

低発熱型セメントを用いても、プレクーリング等の打設温度を下げる対策を行わないと、ひびわれ指数 1.2 以

表-3 温度応力解析結果 (側壁, 夏場)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m³)	温度解析						温度応力解析			
		打設温度 (°C)	外気温 (°C)	最高温度 (°C)	材令28日 での温度 (°C)	温度 上昇量 (°C)	温度 降下量 (°C)	引張応力 (kgf/cm²)	引張強度 (kgf/cm²)	温度ひび われ指数	ひびわれ 発生確率 (%)
普通ポルトランド	270	30	27	65.7	27.5	35.7	38.8	34.6	23.7	0.69	85
低発熱型高炉B種				54.9	27.5	24.9	28.1	25.6	22.6	0.88	60
中熱ポルトランド				54.6	27.5	24.6	27.6	25.2	23.6	0.93	55
中熱フライアッシュ				49.1	27.5	19.1	21.3	17.9	19.5	1.09	35
低発熱型高炉B種	300	27	20	49.6	27.5	29.6	22.6	20.5	26.0	1.27	25
中熱ポルトランド				49.0	27.5	29.0	22.1	19.0	25.5	1.34	15
中熱フライアッシュ				42.7	27.5	22.7	15.7	11.0	22.5	2.05	5以下
普通ポルトランド				56.2	27.5	36.2	29.2	24.2	26.5	1.10	35
低発熱型高炉B種	270	20	17	46.3	27.5	26.3	19.3	15.9	25.0	1.62	5以下
中熱ポルトランド				44.8	27.5	24.8	17.9	14.1	24.3	1.72	5以下
中熱フライアッシュ				41.4	27.5	21.4	14.4	9.1	17.5	1.92	5以下

表-4 温度応力解析結果(側壁, 春・秋および冬)

コンクリート 打設時期	セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	温度解析						温度応力解析			
			打設温度 (°C)	外気温 (°C)	最高温度 (°C)	材令28日 での温度 (°C)	温 上 昇 量 (°C)	温 下 降 量 (°C)	引張応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	温度ひび われ指数	ひびわれ 発生確率 (%)
春・秋 (4~5月, 10~11月)	低発熱型高炉B種 中庸熱ポルトランド	300	20	17	45.3	17.1	25.3	28.2	26.2	25.0	0.95	50
					46.0	17.1	26.0	28.9	27.1	25.7	0.95	50
	低発熱型高炉B種 中庸熱ポルトランド	270			42.1	17.1	22.1	25.0	21.2	22.7	1.07	35
					41.9	17.1	21.9	24.8	21.0	23.3	1.11	30
冬 (1~2月)	低発熱型高炉B種 中庸熱ポルトランド	300	10	5	27.3	5.1	17.3	22.2	21.7	24.8	1.14	30
					29.3	5.1	19.3	24.2	22.1	23.7	1.07	35
	低発熱型高炉B種 中庸熱ポルトランド	270			24.7	5.1	14.7	19.6	17.3	22.0	1.28	15
					26.0	5.1	16.0	20.9	17.4	21.5	1.13	20

表-5 温度応力解析結果(上下床版)

対象構造物	打設時期	セメント の 種 類	温 度 解 析						温 度 応 力 解 析			
			打設温度 (℃)	外 気 温 (℃)	最高温度 (℃)	材令28日 での温度 (℃)	温 度 上 昇 量 (℃)	温 度 下 降 量 (℃)	引張応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	温度ひび われ指数	ひびわれ 発生確率 (%)
下 床 版	夏 春・秋 冬	低発熱型 高炉B種 セメント	32.0	27.0	61.8	30.5	29.8	31.3	16.7	27.5	1.64	5 以下
			20.0	17.0	48.3	20.0	28.3	28.3	15.7	27.2	1.73	5 以下
			10.0	5.0	31.1	9.0	21.1	22.1	12.3	25.7	2.10	5 以下
上 床 版	夏 春・秋 冬		32.0	27.0	59.8	29.5	29.8	30.3	16.5	27.5	1.67	5 以下
			20.0	17.0	43.4	19.0	28.3	24.4	9.4	23.5	2.50	5 以下
			10.0	5.0	29.7	8.0	21.1	21.7	11.7	25.7	2.20	5 以下

上を確保できない結果を得た。

ただし、低発熱型セメントのうち中庸熱フライアッシュについては、冬場での強度発現が遅くなることが予想され、型わく脱型等に影響を与えることや、材令91日で配合強度を満足しないおそれも考えられるため、選定の対象から外し、中庸熱ポルトランドおよび低発熱型高炉B種について春・秋および冬場の解析を行った。

b. 春・秋および冬場の解析結果(側壁)

春・秋および冬場での解析結果を表-4に示す。

春および秋については、中庸熱ポルトランドおよび低発熱型高炉B種のどちらも、単位セメント量 270 kg/m³ 以上ではひびわれ指数 1.2 以上を満足しなかった。

冬場においては、単位セメント量 300 kg/m³ ではひびわれ指数 1.2 を満足しないものの、単位セメント量 270 kg/m³ では、ひびわれ指数 1.2 以上であった。

また、中庸熱ポルトランドおよび低発熱型高炉B種は、前述のように断熱温度上昇特性には差異があったものの、ひびわれ指数は各ケースともほぼ同様な値を示した。

c. 上下床版の温度応力解析結果

沈埋函体の上下床版の温度応力解析結果を表-5に示す。夏、春・秋、および冬の打設時期とも、ひびわれ指数 1.5 以上となり、上下床版とも特別な養生等の対策をとらなくても、温度応力によるひびわれ発生のおそれは小さいと判断された。

3.4 配合決定

前節までの検討で、使用セメントについては中庸熱ポ

表-6 函体コンクリートの配合

設計基準 強度 (kgf/cm ²)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 Ad
350	51.5	45.3	155	301	834	1,034	0.753

(注) セメント: 低発熱型高炉B種セメント

細骨材: 木更津産山砂

粗骨材: 鳥形山三砕石 (5~20 mm)

富士川産玉砕石 (5~25 mm)

ただし、砕石: 玉砕=7:3

ルトランドと低発熱型高炉B種を最終的に選定の対象とした。温度ひびわれ特性については両者ほとんど同じ結果となったが、経済性等を考慮して低発熱型高炉B種を使用することにした。

これらの検討結果をふまえ、実際に使用する生コンプラントでの試し練りを行い、その結果、沈埋函体コンクリートは表-6に示す配合を用いることにした。

ただし、側壁についてはひびわれ指数 1.2 を確保するため、夏は打設温度を 10°C 程度、春・秋は打設温度を 5°C 程度下げるプレクーリングをコンクリート打設時に行うことが望ましいということになった。

4. プレクーリングの検討

4.1 プレストレス導入効果実験

前章までの検討で、側壁については、温度ひびわれ指数 1.2 以上を確保するには春・秋および夏においてプレクーリングを実施したほうが望ましいという結果になったが、沈埋函体については、軸方向に $\sigma_c=10$ kgf/cm² 程

度のプレストレスが導入されることから、漏水を防ぐにはどの程度のひびわれ幅まで許容できるかという観点でプレストレス導入効果実験を行った。

実験は、鉄筋コンクリートの供試体に 0.05～0.4 mm の初期ひびわれを発生させ、プレストレスを導入したのち水圧をかけ、プレストレスによるひびわれ幅の減少量と、ひびわれ幅と漏水量の関係を調べた。

表—7 は実験により確認された結果をまとめたものであるが、初期ひびわれ幅を 0.23 mm 以下に抑えれば、プレストレスによってひびわれ幅が 50% 程度に減少し、漏水についても無し、あるいは時間とともに自然に止まること（自癒効果）が期待できることが分かった。

4.2 施工時期の検討

最終的に決まった配合を用いて再度、温度応力解析、温度ひびわれ指数、最大ひびわれ幅等に関する検討を行い、実施レベルでのプレクーリングの施工時期を決定した。なお、最大ひびわれ幅の算定式には ACI の式を用いた。

表—8 はこれらの検討結果をまとめたものであるが、

表—7 プレストレス導入効果確認実験結果

初期ひびわれ幅 (mm)	プレストレス導入後のひびわれ幅 (mm)	漏水の程度 防水性からみた補修の要否*
0.35 以上	0.20 以上	漏水あり。 補修の必要がある。
0.35～0.23	0.20～0.12	漏水あり。 補修は技術者の判断による。
0.23～0.10	0.12～0.05	漏水は微少。 自癒効果が期待できる。
0.10 以下	0.05 以下	漏水なし。

(注) * 補修の要否は、日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひびわれ制御指針」による。

表—8 ひびわれ指数とひびわれ幅

月	プレクーリングの有無	平均気温 (°C)	養生温度 (°C)	打込みまたは冷却温度 (°C)	ひびわれ指数	最大ひびわれ幅 (mm)	平均ひびわれ間隔 (m)	1ブロック当りのひびわれ量 (mm)
4	無有	13.9	15.0	19.0 14.0	0.93 1.22	0.08 —	17.9 —	0.05 —
5	無有	18.4	19.2	23.5 17.0	0.87 1.17	0.16 —	8.5 —	0.20 —
6	無有	21.5	22.4	26.5 19.0	0.84 1.18	0.17 —	6.6 —	0.27 —
7	無有	25.2	25.6	30.5 21.0	0.81 1.18	0.18 —	5.2 —	0.37 —
8	無有	26.7	25.8	32.0 21.0	0.77 1.19	0.19 —	4.3 —	0.47 —
9	無有	22.7	21.5	28.0 18.5	0.79 1.18	0.19 —	4.8 —	0.42 —
10	無有	17.3	16.1	22.5 15.0	0.83 1.19	0.17 —	6.8 —	0.27 —
11	無有	12.3	11.6	17.5 11.6	0.91 1.28	0.08 —	17.9 —	0.05 —

(注) 1ブロック当りの平均ひびわれ量

$$= \frac{\text{最大ひびわれ幅} \times 1 \text{ブロック延長}}{\text{平均ひびわれ間隔} \times 1.5} \text{ (mm)}$$

これによって以下のことが言える。

1) ひびわれ指数については、厳密に 1.2 以上を確保しようとする、ほとんど通年のプレクーリングが必要となり、現実的な制御対策とは言い難い。

2) 最大ひびわれ幅は 5～10 月においても 0.16～0.19 mm と、漏水に対し自癒効果が期待できる範囲となっている。

しかし、ACI の算定式においては 40% 程度、首都高速道路公団における実験でも 20% 程度のばらつきがあるとされており、平均的に 30% のばらつきがあるとすれば、7～9 月において幅 0.23 mm 以上のひびわれが発生するおそれがある。

3) 平均ひびわれ間隔をもとに 1 ブロック当り（打設延長 16 m）のひびわれ量を算定すると、7～9 月が 0.37 mm 以上となり、他の月に対し卓越している。

以上の検討結果と、既往の構造物のひびわれ発生調査結果を参考とし、プレクーリングの施工時期は夏期の 7～9 月とし、コンクリートの温度降下量はひびわれ指数 1.2 を確保できる温度とした。

4.3 プレクーリングの手法

本工事における温度降下量（夏期で 10°C 程度）を考慮すると、氷による冷却あるいは液化ガスによる冷却が有効と考えられる。しかし、今回は側壁のみが対象となり、量的にも 8 000 m³ 程度（函体製作 1 期・2 期合計）とあまり多くないことから、氷による冷却は設備に対する初期投資が大きくなり経済的でないため、液化ガスを用いることにした。

冷媒としての液化ガスは種々あるが、今回は効率および施工性を考慮して、液体窒素（以下、LN₂）を用いることにした。

LN₂ を用いたプレクーリングについては国内ではほとんど実績がないが、現在実用化が進んでいる方法としては、トラックミキサに直接噴入する方法と、プラントで冷却砂を作る方法とがある。前者は、現場でトラックミキサにノズルから直接 LN₂ を噴入し、ミキサを高速回転しながら冷却コンクリートを製造する方法である。一方、後者は、プラントで冷却砂専用のミキサに LN₂ を噴入してまず冷却砂を作り、これを他の材料とコンクリートミキサ内で練り混ぜて冷却コンクリートを製造する方法である。

両工法の特性の比較は表—9 に示すとおりであるが、両工法について事前に実験を行ったところ、両工法とも本工事に対するクーリング効果を満足するものとなった。

しかし、現場での直接噴入方式では、現場内で極低温（-196°C）高圧ガスの取扱いと、噴入前後の温度・空気量等のコンクリート管理を近接して行う必要があり、

表—9 LN₂によるブレーキング工法の比較

項 目	トラックミキサへの 直接噴入工法	冷却砂を用いる工法
冷 却 能 力	15°C 前後	30°C
コンクリート 強 度	・冷却 ($\Delta T_p=10^\circ\text{C}$) した 場合の材令 91 の強度 比 -4%	・冷却 ($\Delta T_p=10^\circ\text{C}$) した 場合の材令 91 の強度 比 +4%
コンクリ ートの品 質管理	温度 管理	・搬入時の生コン温度を計 測して LN ₂ 噴入量を調 整する。
	空気 量管理	・B/P にて材料温度を自動 計測することにより、運 搬時の温度上昇量を加味 して LN ₂ 噴入量を調整 する。
施 工 性	・ $\Delta T_p=10^\circ\text{C}$ で 5~6 分 であるが、投入圧力の調 整により 2~3 分程度で 可能。 ・1 セット当り 60m ³ / h の製造可能。 ・トラックミキサの高速回 転を行う必要がある。 ・LN ₂ 投入場所が現場とな り、LN ₂ による白煙発生 範囲は立入禁止措置等の 安全対策面の考慮が必要。	・ $\Delta T_p=10\sim15^\circ\text{C}$ の場合、 1B/P 当り 100m ³ /h の 出荷が可能。 ・専用の冷却装置を用いる ため、トラックミキサを 高速攪拌する必要がない。 ・B/P にて生コン製造時に 同時投入となる。安全対 策は設備等で考慮できる。
そ の 他	・クーリング専用のトラッ クミキサを固定しておく 必要がある。	・一般のトラックミキサで 対応できる。 ・国内外とも大量に施工し た実績がない。

危険物取扱い上の十分な安全対策の確保に問題があること、また、ドラムを高速回転するため、トラックミキサに油温調整用のオイルクーラーを取り付ける等の対策を考慮する必要があること等の問題点があるため、本工事では冷却砂による方法を採用することとした。

5. 冷却コンクリートの施工概要

5.1 冷却コンクリートの製造

ひびわれ制御検討の結果から、夏場に施工する沈埋面の両側壁については、冷却コンクリートの打設が必要となった。打設断面を図—10 に示す。壁幅は 1.25m、打設高は 4.8m であり、1 ブロック当りの冷却コンクリート量は約 190m³、全体では 25 ブロック約 4800m³ となる (1 期工事分)。冷却コンクリートは、液化窒素ガス (LN₂) を砂に噴入して骨材温度を下げる方法によった (写真—7)。このため、既存のプラントを一部改造し、LN₂ を噴入して冷却砂を製造する装置を新たに取り付けた。プラントの概念図を図—11 に示す。

5.2 プラントの製造管理

冷却コンクリートの温度は、ひびわれ指数 1.2 を確保するため、ポンプ筒先で 7、8 月が 20°C、9 月が 17°C を管理目標とした。練上り温度は、これにミキサー車に

図—10 冷却コンクリート打設位置

写真—7 ブレーキング（液化窒素ガス供給）

図—11 冷却コンクリート製造概念図

よる運搬、ポンプ車による打設時の温度上昇を見込む必要があることから、実地に測定した結果、これを 4°C とし、7、8 月は 16°C、9 月は 13°C とした。

冷却コンクリートの製造は、各材料ホッパー内に熱電対を 2 か所取り付け、その平均温度から、常温での練上り予想温度、必要 LN₂ 噴入量をパソコンで算出し、噴入量プリセット、実噴入量の計量の順で行われる。

LN₂ の使用量管理表を表—10 に示す。また、実施工にあたっては、冷却コンクリートの打設ごとにプラントのクールダウン、配管内の残液、タンクローリー車の噴入待ち間の圧力調整によるブローおよび運搬時の蒸発等、冷却コンクリートの製造に直接寄与しないロスが見

表-10 LN₂ 使用量管理表

バッチ No.	水	材 料 温 度				粗骨材	コンクリート温度			LN ₂ 噴入量 (kg/バッチ)	LN ₂ 使用量 (kg/m ³ ・℃)
		セメント	細 骨 材				T ₀	T ₁	T ₀ -T ₁		
			常温	冷却前	冷却後						
1	22.5	44.0	20.7			21.3	24.8	25.0			
2	22.6	44.1	20.8	21.9	-12.7	21.5	25.1	16.7	8.4	248.0	10.7
3	22.8	43.0	20.9	22.0	-31.6	21.6	25.1	14.8	10.3	249.0	8.8
4	23.1	44.6	21.4	22.4	-30.5	22.0	25.6	15.3	10.3	250.0	8.8
5	23.0	46.2	21.6	22.4	-43.8	22.2	25.9	13.6	12.3	312.0	9.2
6	23.2	44.4	21.6	22.4	-35.7	22.3	25.7	15.0	10.7	252.0	8.6
			21.9	22.3	-43.8	22.3	25.9				

込まれる（今回の実績では1回当たり約 890 kg）。このため、タンクローリーの事前・事後の重量を計量してLN₂の全体消費量を確認する。

5.3 冷却コンクリートの品質管理

冷却コンクリートは、2.3 節に示した方法により管理するほか、コンクリートポンプ車の筒先温度、ミキサー車の吐出口温度を棒状温度計により測定する。プラント出荷時温度は、ホッパー内の熱電対により、各バッチごとに自動的に計測される。また、スランプ、空気量について、それぞれが安定した管理状態になるのを確認するため、冷却コンクリート工事の初期段階では、とくに入念に管理した。

6. 函体側壁の温度応力の計測

6.1 温度応力計測の概要

函体側壁は、ひびわれ制御対策として夏場に施工するコンクリートに、液化窒素ガスによるプレクーリングを実施している。この効果を確認するため、6月から10月の間に打設する5ブロックについて、函体側壁に温度計、ひずみ計を埋め込み、計測を行った。

計測および調査項目は以下のとおりである。

1) 函体側壁の温度および温度応力

計測期間は3週間とした。

2) 函体側壁のひびわれ調査

型わくの脱型後、側壁表面の外観調査を行い、ひびわれの幅、本数を記録した。調査は、脱型後1か月は週に1度、その後は月に1度実施した。

3) そ の 他

無応力計（6月の計測のみ）によるコンクリートの線膨張係数の測定。

コンクリートの圧縮、引張強度、および弾性係数。

計測器の配置図を図-12に示す。

6.2 温度計測結果の概要

1) 側壁の壁高方向の最高温度分布は、中央部に比べ、下床版、上床版側が5~10°C低かった。

2) 壁厚方向の最高温度分布は、中央部が表面部に比べて10月が約10°C、7月が約6°C、8、9月が約

7°C高い結果となり、プレクーリングの実施月のほうが3~4°C低い結果となっている。

3) 壁中央部における長手方向の最高温度の分布は、若干のばらつきはあるが、ほぼ一様である。

各月の最高温度は、6月がもっとも高く53°Cで、以下、7月46.5°C、8月51.3°C、9月47.6°C、10月49.9°Cであった。

4) 壁中央部における各月の温度上昇量は、8月がもっとも大きく30.8°Cであり、以下、9月29.7°C、7月26.6°C、6月24.3°C、10月23.3°Cの順であった。

これに対し、温度応力に大きく影響する温度下降量は、プレクーリングを実施しなかった10月と6月がそれぞれ31.2°C、30.5°Cと大きく、以下、9月26.1°C、7月24.3°C、8月22.7°Cの順であった。

6.3 コンクリート応力計測結果

ひずみにより計測されたコンクリートひずみを温度補正し、さらに、採取したコンクリートから求めた弾性係数を乗じて各側点の応力を算定した。ただし、コンクリートの硬化が始まる6~8時間はひずみ計が安定しないことから、打設後8時間の値を初期値とした。

1) 下床版との打継ぎ部付近では、材令3~5日までは圧縮側にあり、その後2日程で最大引張応力となり、材令10~14日まではほとんど変化しないが、次第に応力が低下する結果となった。

最大引張応力は、おのおの断面でばらつきはあるが、8~14 kgf/cm²程度であった。

2) 壁厚方向の応力分布は、表面部が2~10 kgf/cm²であるのに対し、中央部では8~25 kgf/cm²となっている。

また、壁長手方向の温度変化はほとんどなかったのに対し、応力も多少のばらつきはあるが、ほぼ一様であった。

3) 各月の壁中央部の引張応力を比較してみると、10月が最大で24 kgf/cm²であり、以下、9月12.8 kgf/cm²、6月12.2 kgf/cm²、7月11.8 kgf/cm²、8月8.7 kgf/cm²であった。

(計器配置と計器名称)

図—12 計測位置と計測番号

6.4 鉄筋応力計測結果

鉄筋応力は、コンクリートひずみと同様の手法で算出している。

鉄筋応力履歴をみると、各断面とも最高温度に達する材令(2~3日)で圧縮側の最大値を示し、その後、部材温度の降下に従い、鉄筋に生ずる応力度も徐々に引張り側に移行し、材令6~7日ではほぼ安定する傾向にある。しかし、鉄筋計に急激な応力の変動が見られるものもあり、この段階でひびわれが発生しているものと思われる。

鉄筋計の計測結果とひびわれ調査結果から、鉄筋の引張応力で300~500 kgf/cm²のとき0.1 mm程度のひびわれが発生しているものと思われる。

なお、本工事のひびわれ制御対策および温度応力解析の詳細については、本年度のコンクリート工学年次講演

会で報告の予定である。

7. あとがき

沈埋函の製作工事は、本年8月には1回目の11函が完成し、ドライドック内に浮上することになる。

沈埋トンネルとしては、この後、残り10函の函体製作工事を継続する一方、沈設工事の基地となる発進側の立坑完成後、護岸撤去、しゅんせつを行い、平成3年秋からの沈設開始を迎える予定である。

多摩川、川崎航路の2つの沈埋トンネルは現在まで順調に進捗しているが、まだまだ多くの課題をもっており、工程短縮を含め、今後もよりいっそうの研究・開発が必要である。関係各位のご支援をよろしくお願いする次第である。

《メ

モ》

ガンター橋 (Ganterbrücke) のひびわれ、その後

本誌2月号の“海外だより”「スイス・チューリヒから」の中で紹介しましたガンター橋のコンクリート斜壁のひびわれについては、その後、Prof. Menn ならびに筆者が再度調査を行った結果、構造的欠陥によるものよ

りは、むしろ施工に起因するものである可能性が濃厚であると判明しましたので、訂正かたがたお知らせさせていただきます。

(睦好宏史)