

# 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究（その4）

芳賀孝成	十河茂幸	新開千弘
中根淳	一瀬賢一	
扇啓祐	佐藤哲司	若松嶽
(本社技術開発本部) (土木技術第一部)	(同左)	(同左)

## Study on Cooling of Concrete with Liquid Nitrogen (Part 4)

Takashige Haga	Shigeyuki Sogo	Chihiro Shinkai
Sunao Nakane	Ken-ichi Ichise	
Keisuke Ohgi	Tetsuji Sato	Gaku Wakamatsu

### Abstract

This report is on the results of constructing a high dike around an LNG tank with concrete cooled by liquid nitrogen for the purpose of preventing thermal cracks. The cooling method was direct jetting of liquid nitrogen into a truck agitator at the job site. This construction was completed without thermal cracks, and a number of hints were obtained for future management of cooling work with liquid nitrogen.

### 概要

この報告は、LNG 地上タンク防液堤の施工に際して、温度応力ひびわれを防止するために、液体窒素によるコンクリートのプレクーリング工法を実施した結果について、施工計画を含め示したものである。

プレクーリングは、生コン車内に液体窒素を直接投入する方法で行なった。施工は支障なく行なうことができ、目的とした温度ひびわれを防止するとともに、今後、同工法を適用していく上での、いくつかの知見が得られた。

## 1. はじめに

マスコンクリートの温度応力低減や暑中コンクリートの長期強度発現の改善に、コンクリートのプレクーリングが有効である。筆者らは、このプレクーリングを簡易に行なえる工法として、液体窒素の冷熱を利用して冷却したコンクリートの基礎的性質の把握および、本格的な実用化に向けての試験施工を行ってきた<sup>1),2),3)</sup>。

今回、これらの成果を基に、液化天然ガス(以下 LNG と呼ぶ) 地上タンクのプレストレストコンクリート製防液堤(以下防液堤と呼ぶ)の施工に際し、コンクリートの温度ひびわれ制御対策として、生コン車を用いた液体窒素によるプレクーリング工法を適用した。本報告は、その施工計画及び施工結果についてまとめたものである。

## 2. 工事概要

施工した防液堤は、80,000 k/LNG 地上タンク外周に

建設される内径 91 m、設計最大液深 14 m の国内最大級の円筒形 PC 構造物である。図-1 に PC 防液堤の構造概要を示す。この構造物は機能上、高耐久性と液密性が要求されるため、設計上の数多くの配慮のほか、施工時においても、躯体コンクリートのひびわれを防止するための対策が必要とされる。

防液堤の施工は、構造及び施工性の検討から全高を 6 ロットに分割して行なった。この内、第 1 ロットから第 4 ロットまでは温度ひびわれ制御対策として、PC テンドン配置用のシース管(φ80 mm)を利用したパイプクーリングと型枠面散水のポストクーリングを採用した。上部の第 5、6 ロットは、酷暑期の施工であること、構造上 PC テンドンの配置が疎となること、6 ロットの壁厚が厚いことなどから従来のポストクーリングに換えて、プレクーリング工法を採用することとし、簡易で冷却能力の大きい生コン車を用いた液体窒素によるプレクーリング(NICE クリート工法)を採用した。

なお、使用したコンクリートには、中庸熱ポルトランドセメント（強度管理材令91日）の使用、骨材最大寸法の変更、流動化剤の利用を行ない、コンクリートの温度上昇抑制を図った。コンクリートの配合を表-1に示す。

### 3. 施工計画

#### 3.1. 冷却量の検討

第5, 6ロットの施工に先立ち、打設温度の設定のためにFEMによる温度応力解析を行なった。

(1) 解析条件 温度および応力の解析は2次元軸対称モデルを使用し、第2ロット打設以降について行なった。解析に用いた諸条件を表-2に示す。なお、熱伝達率などの数値については、既施工部における計測結果をシミュレーション解析することによって定めた。

解析ケースは第5, 6ロットの打設温度が15, 20, 25°Cの場合を想定した3ケースについて行なった。また、温度ひびわれを防止するための目標としては、ひびわれ発生確率がほぼ

0%となる温度ひびわれ指数2.0以上を設定した。なお、第5, 6ロットの施工には、プレクーリングに加えて型枠面散水を併用する計画とした。

(2) 解析結果 表-3に解析結果のまとめを、図-2に応力度の経時変化をコンクリート打設温度20°Cの場合について示す。

引張応力度は、図-2に示すよう

に一つのロットについて2回ピークがある。1回目のピークは計測ロットの温度降下が下部のロットにより拘束されて生じるもの（応力Aと呼ぶ）で、2回目のピークは上部ロットを打継いだ際の温度上昇による膨張により、計測ロットが引張られて生ずるもの（応力Bと呼ぶ）である。上部ロットを打継ぐ第5ロットでは、応力Bの方が大きな引張応力度を示し、温度ひびわれ指数もこの時に最小値となる。

項目	解析値	
杭拘束(φ711, t=16)	1.6×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> ・本	
熱伝達率	鋼製型枠	7.5 kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C
	木製型枠	6.5 kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C
	コンクリート表面	7.5 kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C
コンクリート定数	単位体積重量	2320 kg/m <sup>3</sup>
	比熱	0.22 kcal/kg
	熱伝導率	2.0 kcal/m・hr・°C
	圧縮強度(f <sub>c</sub> )	f <sub>c</sub> =116・ln M-709kgf/cm <sup>2</sup>
	引張強度(ft)	ft=1.4f <sub>c</sub> <sup>1/2</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
	弾性係数(E)	E=4.37×10 <sup>4</sup> f <sub>c</sub> <sup>0.33</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
	熱膨張係数	10×10 <sup>-6</sup> 1/°C
ポアソン比	0.167	
クリープ係数	CEB-FIP Code	
発熱関数(打込み温度20°C)	T=43.5[1-e <sup>-1.6(t-0.084)</sup> ]	

f<sub>c</sub>, Eは、実測値より回帰計算によって算出。  
Mは、積算温度(°C・hr)

表-2 解析条件

ケース	ロット	打設温度(°C)	最大温度(°C)	最大引張応力(kgf/cm <sup>2</sup> )				最小温度ひびわれ指数	
				上部7打設前	上部7打設後	上部7打設前	上部7打設後	指数	材令hr
1	5	15	40	6	378	10	432	2.8	432
	6		47	8	378	—	—	3.4	378
2	5	20	42	8	138	12	414	2.3	414
	6		50	12	378	—	—	2.3	378
3	5	25	47	12	138	16	408	1.7	408
	6		57	18	378	—	—	1.5	—

表-3 温度応力解析結果

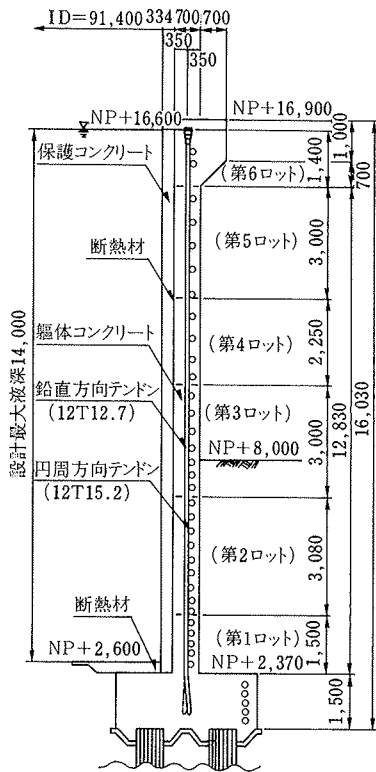


図-1 防液堤断面

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	Adm.	Pl.
40	6.5 ↓ 12.0	4.5	42	36	157	374	638	1151	0.94	3.0

Adm.: AE減水剤 Pl.: 流動化剤

表-1 コンクリートの配合

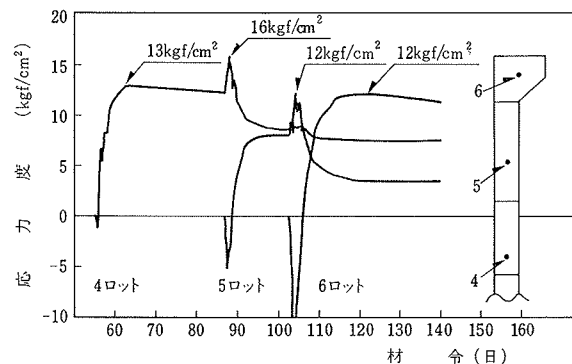


図-2 応力度解析結果 (ケース2)

解析結果による、温度ひびわれ指数の最小値とコンクリート打設温度の関係を図-3に示す。図-3から温度ひびわれ指数2.0を満足するコンクリート打込み温度は、第5、6ロットともに約22°Cとなり、この値を施工時の目標値とした。

### 3.2. コンクリート打設計画

コンクリートの供給は、二つの生コン工場から受けており、冷却および流動化は、現場到着後に生コン車ドラム内に液体窒素および流動化剤を投入しながら攪拌する方法によって行なった。

冷却設備は、液体窒素投入装置（ノズル口径2インチ）、液体窒素供給制御装置、白煙除去装置により構成されており、この他に液体窒素供給のためのローリー車2台が加わる。白煙除去装置は、冷却によって生ずる水蒸気が作業時の視界を妨げないように吸引し、影響範囲外に放出するものである。冷却設備を写真-1に示す。なお、施工に際しては、二組の冷却設備を使用することとした。

### 3.3. 品質管理計画

施工時におけるコンクリート品質管理フローを図-4に示す。コンクリート温度の管理は、打込み時の温度とし、解析結果をもとに管理温度を $21 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。冷却後のコンクリート温度は、流動化、ポンプ圧送などの間に上昇する。従って、コンクリートの冷却はそれを見越して行なわなければならない。この温度上昇量を予備冷却実験により確認し、冷却作業時のコンクリート温度目標値は $18^\circ\text{C}$ とした。なお、施工開始時には、不確定な要因もあり管理値を確実に保障するため、冷却量を $2^\circ\text{C}$ 程度低く設定し、コンクリート打込み温度を確認しながら

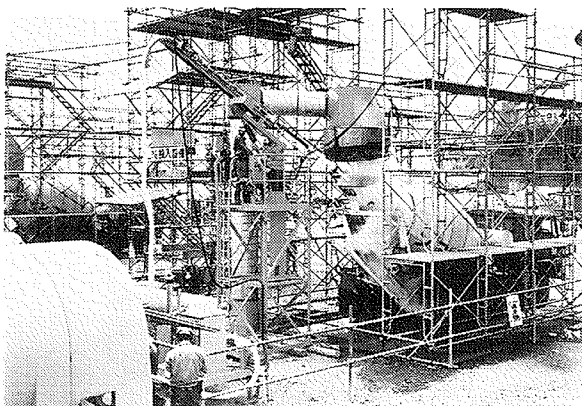


写真-1 液体窒素投入装置

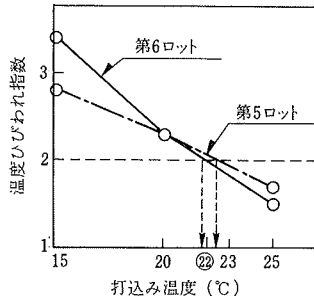


図-3 温度ひびわれ指数と打込み温度の関係

冷却量を調整することとした。

コンクリートの品質管理は、現場到着時、冷却後、流動化後について $50 \text{ m}^3$ に1回行なうこととした。なお、温度管理については、ポンプ圧送時および打込み時においても行なうこととし、施工状況を見ながら随時実施することとした。

## 4. 施工状況

### 4.1. コンクリート打設結果

施工時の天候は第5ロット打設時は曇り、第6ロット打設時は晴れて、入荷時のコンクリート温度平均値はそれぞれ $29^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ であった。また、最高温度は第6ロット施工時の $32^\circ\text{C}$ であった。

コンクリートの打設量は第5ロット $670 \text{ m}^3$ 、第6ロット $480 \text{ m}^3$ で、ポンプ車2台により打設した。平均打設速度は第5ロットで $56 \text{ m}^3/\text{h}$ 、第6ロットで $53 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。時間最大打設量は、両ロットとも $75 \text{ m}^3/\text{h}$ で、冷却に関しては十分な余裕があった。生コン車1台あたりの平均冷却時間は、平均冷却量 $12^\circ\text{C}$ （第5ロット）、 $15^\circ\text{C}$ （第6ロット）に対して3.5分、4.5分で、1台の生コン車が到着から荷卸しまでに要する時間は平均25分であった。施工状況を写真-2に示す。なお、冷却に要した液体窒素量は平均 $13 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ であった。

### 4.2. 品質管理結果

フレッシュコンクリートの品質管理結果を表-4に示す。コンクリート温度は、冷却直後にバラツキが大きいが、これは打込み温度に応じて冷却量を逐時変化させているため、打込み温度の標準偏差は $1.4^\circ\text{C}$ （第5ロット）、 $1.3^\circ\text{C}$ （第6ロット）と小さい。第6ロットの入荷時および打込み時のコンクリート温度日変化を図-5に示す。打設開始時には冷却が過剰であるが、打設の進行に伴う調整によって管理値に近い値となっている。午後になって冷却温度にバラツキが大きくなるのは、入荷時

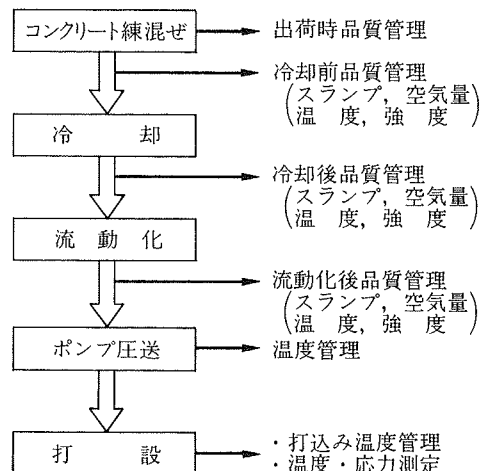


図-4 品質管理フロー

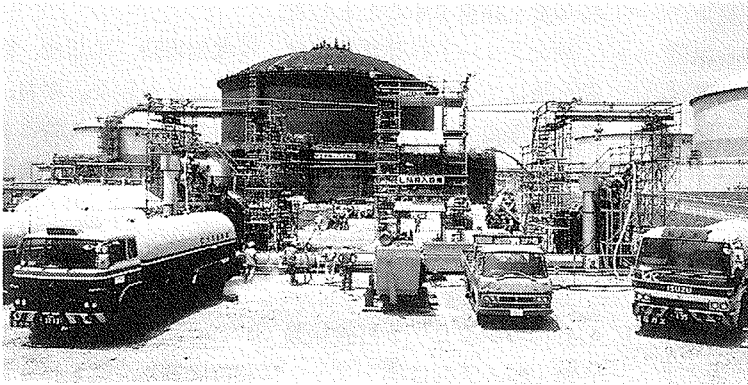


写真-2 施工状況

のコンクリート温度が生コン工場ごとに差が生じ、高い温度に対して液体窒素投入量を設定したためである。今後、より経済的な冷却を行なうためには、冷却しようとする生コン車内のコンクリート温度を即時に知り液体窒素投入量を調整する装置を用いる必要がある。

冷却直後から打込みまでの温度上昇量は、第5ロットで約3°C、第6ロットで約5°Cで、天候が良く気温の高い第6ロットの方が大きい。このように冷却量の損失が

		コンクリート温度 (°C)		スランプ (cm)		空気量 (%)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
5 ロット	入荷時	28.9	0.6	6.5	0.5	4.2	0.2
	冷却直後	16.7	3.1	6.5	0.9	4.3	0.3
	流動化後	18.3	1.7	12.4	1.3	4.1	0.2
	打込み時	19.3	1.4				
6 ロット	入荷時	29.9	1.1	6.7	0.7	4.5	0.3
	冷却直後	15.3	3.0	6.2	0.7	4.5	0.3
	流動化後	17.5	1.7	13.0	0.8	4.9	0.3
	打込み時	21.0	1.3				

表-4 フレッシュコンクリートの品質管理結果

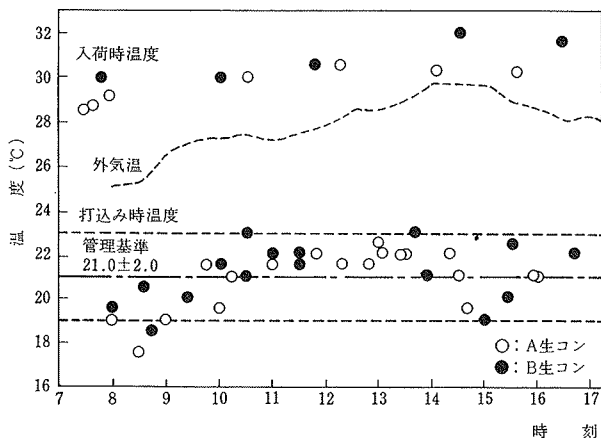


図-5 コンクリート打込み温度管理結果 (第6ロット)

施工条件に左右され、これによって打込み温度に対する冷却効率が影響を受けることから、施工時の効率向上のためには、冷却後打込みまでの間の外気温による温度上昇を極力小さくする対策が必要である。

スランプおよび空気量の冷却前後における比較を図-6, 7に示す。冷却によるスランプ、空気量への影響は特に認められず、表-4に示したように打設時のコンクリートの品質も安定している。入荷時と冷却後、流動化後における各試験材令の圧縮強度の比較を図-8に示す。

圧縮強度はいずれの段階においても差は少ない。

#### 4.3. 温度・応力計測結果

施工管理のため、防液堤の4断面に温度計、有効応力計を設置して計測を行なった。さらに、無対策で施工し

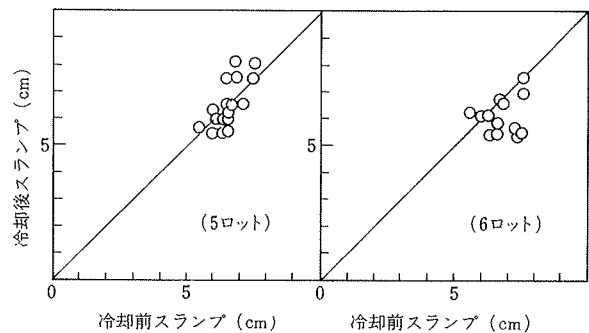


図-6 冷却前後におけるスランプの比較

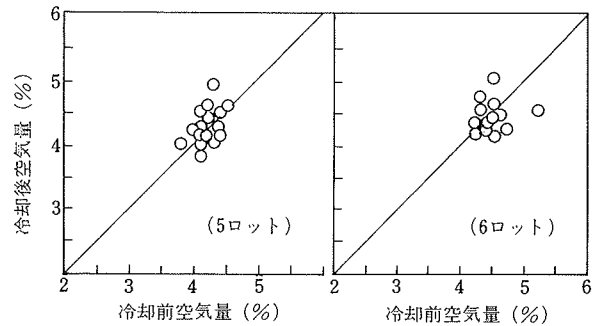


図-7 冷却前後における空気量の比較

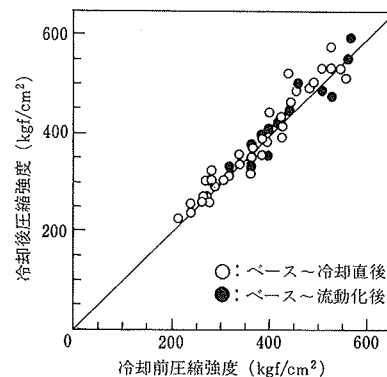


図-8 圧縮強度の比較

	第5ロット			第6ロット			
	打込み温度(°C)	最高温度(°C)	温度上昇量(°C)	打込み温度(°C)	最高温度(°C)	温度上昇量(°C)	
軀体断面	L	19.0	37.9	18.9	18.1	46.0	27.9
	K	19.6	38.0	18.4	21.2	48.4	27.2
	M	20.8	39.4	18.6	21.4	47.7	26.3
	J	20.6	38.5	17.9	19.5	47.2	27.7
平均	20.0	38.5	18.5	20.1	47.3	27.3	
ダミー*	28.1	45.1	17.0	28.6	56.6	28.0	
差**	-8.1	-6.6	+1.5	-8.5	-9.3	-0.7	

\*無対策ダミー供試体温度 \*\*\*(平均温度)-(ダミー温度)

表一5 コンクリート温度計測結果

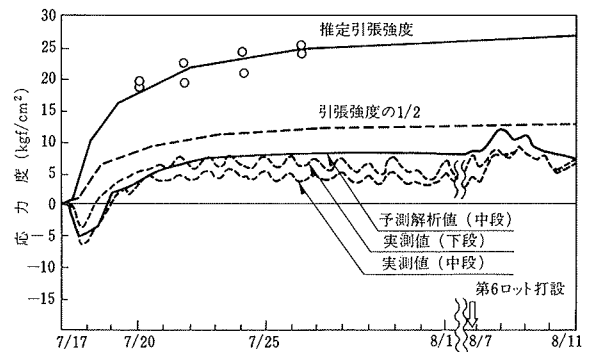
た場合の状況を知るため、第5、6ロットと同一断面で両端を断熱した長さ1.5mのダミー供試体をプレクーリングを行わないコンクリートで作製し、その温度の計測も行なった。

温度計測結果を表一5に示す。コンクリート打込み温度の平均は第5、6ロットとも約20°Cであるのに対して、最高温度はそれぞれ38.5°C、47.3°Cであり、予測解析値に比べいずれも約3°C低い結果となった。軀体平均温度を無対策時を想定したダミー供試体の温度と比較すると、打込み温度が第5ロット-8.1°C、第6ロット-8.5°Cとほぼ等しいのに対して、最高温度はそれぞれ-6.6°C、-9.3°Cとなり、第6ロットでは打込み時の冷却がそのまま最高温度の低下に反映しているのに対して、第5ロットでは冷却量に比べて最高温度低下量が小さくなった。これは、壁厚の薄い第5ロットは第6ロットに比べて外気温の影響を受けやすいため、コンクリート温度が外気温に比べて低い時期に、コンクリートが外部から温められるためと思われる。従って、部材厚の薄い構造物にプレクーリング工法を効率良く適用するには、コンクリート打込み直後において外気温の影響を防止する工夫をすることが必要である。

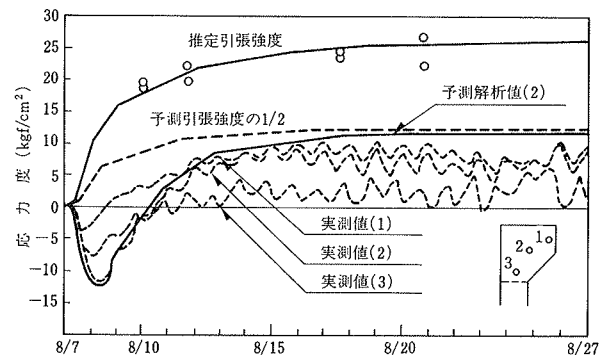
応力度実測値と予測解析値の経時変化を図一9、10に示す。引張応力度の実測値は、温度上昇量が予測値に比べて小さかったことを受けて、予測値を若干下回った。従って、温度ひびわれ指数が2.0となる境界の推定引張強度の1/2に対して常時発生引張応力度は小さく、温度ひびわれに対する所定の安全性を確保できたと判断できる。なお、施工後の目視調査の結果、ひびわれは認められなかった。

### 5. あとがき

液体窒素を用いたコンクリートのプレクーリング工法



図一9 応力度の経時変化（第5ロット）



図一10 応力度の経時変化（第6ロット）

の本格的な実用化の第一段階として、計画、施工管理から、効果の確認までを行ない、その有用性を確認することができた。さらに、同工法を幅広く適用していく上で必要となる施工管理のための多くの資料を得ることができた。今後は、この結果を踏まえて、同工法のより一層の充実を図るつもりである。

最後に、本工事を実施するに当たり、貴重な御助言、御指導を賜りました、樋口芳郎(東京理科大学)、岸谷孝一(日本大学)両教授ならびに、御協力いただいた大阪ガス姫路工事事務所の皆様に深く感謝致します。なお、この研究は、大阪ガス(株)と当社の共同研究による成果をまとめたものであることを付記します。

### 参考文献

- 1) 中根, 一瀬, 他: 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp.37~41
- 2) 芳賀, 十河, 他: 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp.62~66
- 3) 中根, 一瀬, 他: 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究(その3), 大林組技術研究所報, No. 35, (1987), pp.76~80