

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)

中 根 淳 一 瀬 賢 一 芳 賀 孝 成
十 河 茂 幸 新 開 千 弘 扇 啓 祐
佐 藤 哲 司 (本社 技術開発本部)
(本社 技術開発本部)
(土木技術第一部)

Study on Cooling of Concrete with Liquid Nitrogen (Part 3)

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

Abstract

The first apparatus for dispensing liquid nitrogen was developed by the authors for practical application of the method of cooling concrete with the fluid. This was a charging apparatus for direct cooling of concrete hauled by a ready-mix truck. This report describes two early examples of construction in Japan cooling concrete with liquid nitrogen, and shows the cooling performances and working efficiencies in construction. As a result, the following were disclosed. (1) Concrete in a ready-mix truck is cooled 10 degrees within 3 minutes. In the case of continuous placement, concrete of about 50 m³ in 10 ready-mix trucks is cooled within an hour. (2) The cooling efficiency with a ready-mix truck is 40 to 50 percent. (3) It is necessary to consider the increase of air content due to agitation in the ready-mix truck.

概 要

液体窒素によるコンクリートのクーリング工法の実用において、第1号の液体窒素投入装置を開発した。この装置は、生コン車で運ばれるコンクリートを直接冷却するためのものである。この報告では、本装置で行なった我が国初の液体窒素によるコンクリートクーリングの施工例を二つ紹介し、施工における冷却性能、作業能率などを示す。

この結果、以下のことが分かった。(1) 5 m³ 積載の生コン車を3分で約10°C冷却できる。連続打設する場合、1時間で10台の生コン車のコンクリート(約50m³)を冷却できる。(2) 生コン車内での冷却の場合、冷却効率は、40~50%の範囲にある。(3) コンクリートの調合に際し、冷却中の生コン車のアジテートによる空気量の増加を考慮する必要がある。

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ことは周知のとおりである。筆者らは、これまでに液体窒素の冷熱を利用するプレクーリングの方法を研究しており、それにより冷却されたコンクリートの基礎的性質については、ほぼ把握している^{1),2),3)}。冷却の方法としては、ミキサやアジテータ内での冷却も考えられるが、生コン車による冷却が現在のところ簡易でしかも廉価であることから、最も有効と思われる。

著者らは、これまでの実験に基づき、実用化装置の開

発を進め、この度半自動式の液体窒素投入装置第1号機を完成した。この報告では、本装置を用いて実施した我が国初の液体窒素によるコンクリートクーリングの施工例2題を紹介する。また、この実施工を通じ本装置の冷却性能および作業能率などを検討した。同時に、施工に伴い実施したフレッシュコンクリートの性質、および硬化したコンクリートの性質など各測定結果についても、今までの研究結果と比較しながら考察・検討を加える。

2. 液体窒素投入装置

液体窒素投入装置を写真一1に示す。この投入装置は、ノズルと駆動部と架台から成り立っており、半自動式で

その投入ノズルを上下、前後および角度調整の遠隔操作できるもので、生コン車で運搬したコンクリートを直接冷却する。コンクリートの冷却方法は、この投入装置のノズルとタンクローリー車の液体窒素吹き出し口をフレキシブルホースで連結し、投入ノズルを生コン車のホッパー口に挿入して行なう。液体窒素の投入状態を図-1に示す。

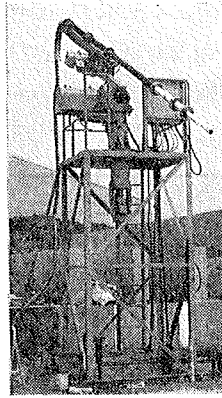


写真-1 液体窒素投入装置

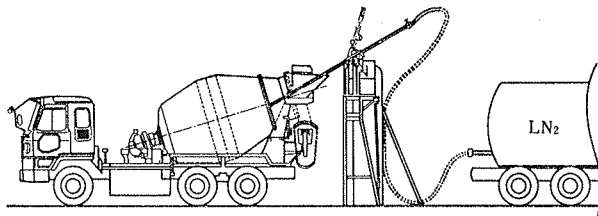


図-1 液体窒素の投入状態

3. 施工例（その1）——実験施工——

3.1. 工事概要

施工場所：(株)大林組技術研究所内
 対象部材：壁体（65 cm×150 cm×1,500 cm）
 冷却量：約 15 m³
 日程：昭和61年6月4日

3.2. 施工条件

3.2.1. 使用材料および調合 使用した骨材の種類と性質を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、混和剤は、AE減水剤を使用した。実験に用いたコンクリートの調合を表-2に示す。

項目	産地	種類	混合比 (%)	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率
細骨材	熊谷・荒川	川砂	75	5	2.61	1.92	64.0	2.80
	千葉・佐原	陸砂	25	5				
粗骨材	熊谷・荒川	川砂利	50	25	2.67	1.00	61.5	6.80
	名栗	石灰石・砕石	50	20				

表-1 骨材の種類と性質

目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
12	4	51.8	44.9	167	322	829	1,017	0.760

表-2 コンクリートの調合

3.2.2. 部材の形状および寸法 壁体の形状および寸法を図-2に示す。壁体は2体あり、内1体を液体窒素

による冷却用（C壁体）とし、他の1体を冷却無し（N壁体）として打設した。1体あたりのコンクリート量は、約 14.6 m³ 必要とするため、各生コン車3台（5 m³ 積載）で打設した。

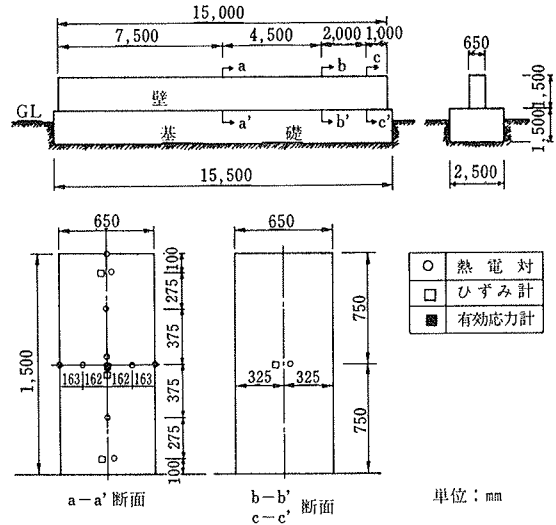


図-2 壁体の形状および寸法

3.2.3. 冷却条件 冷却条件を表-3に示す。冷却は、前述の冷却装置を用いて行なった。冷却後は、生コン車内のコンクリート温度を一様とするため、約2分間アジテートした。

項目	条件
冷却温度	約 8℃
投入圧力	7.5 kg/cm ²
投入時間	2.5～3分
ノズルの口径	2インチ

表-3 冷却条件

3.2.4. 測定項目とその測定方法 施工に際し、コンクリート試験および冷却効果の確認を行なった。コンクリート試験としては、フレッシュコンクリートの性質（スランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積重量）と硬化したコンクリートの性質（圧縮強度、弾性係数、温度応力履歴、ひびわれ性状）について測定した。また、冷却効果の確認としては、生コン車内の温度分布測定、目視調査、液体窒素の使用量など測定した。各測定方法

項目	方法	備考
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101 冷却前後測定
	空気量	JIS A 1128 冷却前後測定
	コンクリート温度	採取したコンクリートを温度計により測定 冷却前後測定
	単位容積重量	JIS A 1116 冷却前後測定
硬化コンクリート試験	圧縮強度	JIS A 1132 JIS A 1108 冷却前後測定 標準水中、コア(4週、13週、26週)
	温度応力履歴	C-C型熱電対により水和反応時のコンクリート温度を測定 壁体内に埋め込み
	ひびわれ性状	ひずみ計、有効応力計により測定 壁体内に埋め込み
冷却効果の確認	温度分布	C-C型熱電対により生コン車内の温度を測定 5点測定用の計測棒をミキサ内に挿入して測定
	目視調査	壁体のひびわれ状態を観察 実験後適宜実施
	液体窒素使用量	液体窒素ローリー車の液面計 1冷却ごとに測定

表-4 測定項目および測定方法

は、表-4に示す。

3.3. 施工結果および考察

3.3.1. フレッシュコンクリートの性質
フレッシュコンクリートの性質を表-5に示す。No. 6を除いてスランプは、2.5 cm 増加し、空気量は、0.6~1.8% 増加した。これは、文献1)の結果と同様、生コン車のアジテートによる影響と低い温度に対するコンクリートの軟化の影響によるものと考えられる。この結果からコンクリートを液体窒素により生コン車内で冷却する場合、コンクリートの調合設計の際、空気量の増加を若干考慮する必要があるものと考えられる。

サンプリングしたコンクリート温度は、生コン車内の平均温度とほぼ一致した。冷却後の生コン車内のコンクリートの温度差は、約2℃であり、冷却前の温度差とほぼ等しい。これは、コンクリートが局部的に冷却されたのではなく、一様に冷却されたことを示す。

種類	生コン車 No.	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	コンクリート過度 (°C)	生コン車内のコンクリート温度 (°C)
N壁体	1	11.0	4.4	2277	27.8	.....
	2	9.5	4.1	2289	28.0	.....
	3	12.5	4.0	2297	27.8	.....
C壁体	4	11.5	4.3	2282	28.4	28.8
		14.0	4.9	2266	21.3	21.4
	5	14.5	4.8	2260	27.8	27.4
		17.0	5.8	2245	19.0	18.2
	6	16.5	3.7	2297	27.0	27.7
		12.0	5.5	2265	19.6	20.0

*No. 4、5、6は、上段：冷却前、下段：冷却後

表-5 フレッシュコンクリートの性質

3.3.2. 硬化したコンクリートの性質
標準水中養生およびコア供試体の圧縮強度、弾性係数の測定結果を表-6に示す。標準水中養生の場合、冷却を行なったものは、若干強度の低下がみられる。これは、冷却の影響というよりも前述したようにアジテートによって増加した空気量の影響によるものと考えられる。コア供試体の強度は、文献3)でも示すように、液体窒素により冷却した場合、冷却しないものに比べ増加するはずである。しかし、今回の場合、冷却による強度の増加は、認められなかった。この原因としては、N壁体内の温度がそれほど高く上がらなかったためと考えられる。弾性係数は、圧縮強度に比例して大きくなり、冷却の有無による相違はなかった。両壁体の中心温度履歴曲線を図-3に示す。C壁体は、打設後28時間で最高温度49.4℃に達し、N壁体は、打設後18時間で最高温度58.4℃に達した。プレクーリングにより最高温度が約9℃下がり、最高温度に達する時間も10時間長くなり、壁体内の温度上昇が緩和された。

両壁体の中心部に埋め込んだ有効応力計の測定結果を

図-4に示す。C壁体の引張強度は、N壁体に比べ約4 kg/cm² 低く、応力緩和された。また、N壁体は、引張強度が13.2 kg/cm² に達したA地点で貫通ひびわれの入ったことを示している。

No.	標準水中 *1)				コア *2)						
	4週		13週		4週		13週		26週		
	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	
1	367	3.06	405	3.22	302	2.59	333	2.49	379	2.79	
2	369	3.15	408	3.11	301	2.55	338	2.60	355	2.71	
3	347	3.05	391	3.02	301	2.57	324	2.67	357	2.81	
4	前	349	2.91	393	2.94	—	—	—	—	—	—
	後	348	2.92	383	2.82	295	2.40	330	2.51	364	2.54
5	前	344	2.91	377	2.88	—	—	—	—	—	—
	後	317	2.92	353	2.80	298	2.45	330	2.49	348	2.64
6	前	364	3.02	390	2.96	—	—	—	—	—	—
	後	338	2.92	378	2.92	308	2.55	309	2.37	*3)	*3)

Fc：圧縮強度、Ec：弾性係数 *1)3本の平均 *2)6~7本の平均 *3)採取不良

表-6 圧縮強度試験結果 (標準水中、コア)

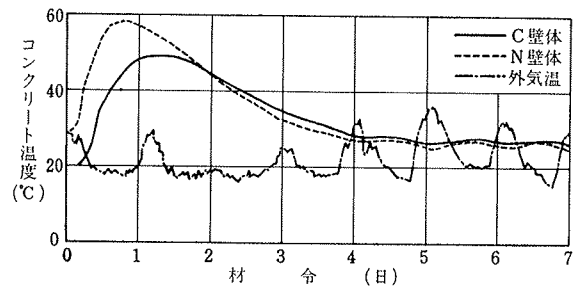


図-3 壁体の中心温度履歴曲線

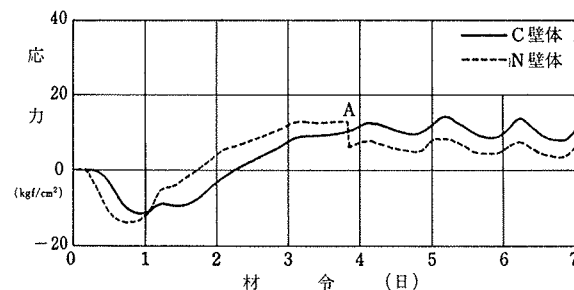


図-4 壁体の有効応力測定結果

3.3.3. 冷却効果の確認
液体窒素の使用量および冷却効率 (液体窒素の全冷熱量に対するコンクリートの冷却に使用した熱量の割合) を表-7に示す。液体窒素は、1分間に約170~180 kg 生コン車に投入されており、投入圧力が一定 (この実験では、7.5 kg/cm²) の場合、投入量は、投入時間にほぼ比例した。冷却効率は、40.7~47.1%となり文献1)で示す結果とほぼ一致した。

No.	冷却条件		液体窒素 使用量 (kg)	冷却 必要量 (kg/cm ²)	冷却効率 (%)
	投入圧力 (kg/cm ²)	投入時間 (分)			
4	7.5	2.5	440	11.9	47.1
5	7.5	3.0	560	12.2	45.9
6	7.5	3.0	530	13.8	40.7

表-7 液体窒素の使用量および冷却効率

ひびわれの目視調査は、型枠の脱型後3回

実施した。N壁体は、図-4でも示したように、材令4日目にひびわれが壁中央部と中央部から3m離れたところに入った。これは、温度ひびわれであり、その大きさは0.1~0.5mmであった。一方C壁体には、貫通ひびわれは1本も入らなかった。以後、2回の測定では、乾燥ひびわれがN壁体では7本、C壁体では4本壁体上面に発生した。その大きさは、0.1mm~0.4mmであった。

4. 施工例 (その2) — 実施工 —

4.1. 工事概要

施工場所: 某ガス製造所内
 対象部材: LNGタンクポンプ基礎
 冷却量: 100 m³ (予備冷却 20 m³, 本冷却 80 m³)
 日程: 昭和61年9月22日, 10月1日

4.2. 施工条件

4.2.1. 使用材料および調査 使用した骨材の種類と性質を表-8に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、混和剤は、AE剤を使用した。コンクリートの調査を表-9に示す。

項目	産地	種類	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	岡山	山比陸砂	20	2.56	1.86	2.70
粗骨材	御津	砕石	5	2.62	0.85	6.60

表-8 骨材の種類と性質

目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
12	4	59.0	44.9	180	305	796	1001	0.023

表-9 コンクリートの調査

4.2.2. 部材の形状および寸法 工事対象となった部材の形状および寸法を図-5に示す。冷却したコンクリートは、サブブラック基礎の一部20m³を予備冷却とし、移送ポンプ基礎80m³を本冷却として打設した。

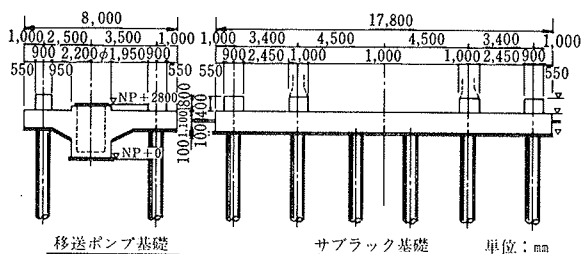


図-5 部材の形状および寸法

4.2.3. 冷却条件 冷却条件は、予備冷却の結果を元に表-10のように決定した。冷却は、前述の冷却装置を用いて5m³積載の生コン車16台について行なった。16

台の生コン車の内、前半8台を口径1インチ、後半8台を口径2インチのノズルを用いて冷却した。施工の関係から生コン車は、15分間隔で冷却した。冷却状態を写真-2に示す。

項目	条件
冷却温度	10℃
投入圧力	7.0kg/cm ²
投入時間	3分
ノズルの口径	1インチ 2インチ

表-10 冷却条件

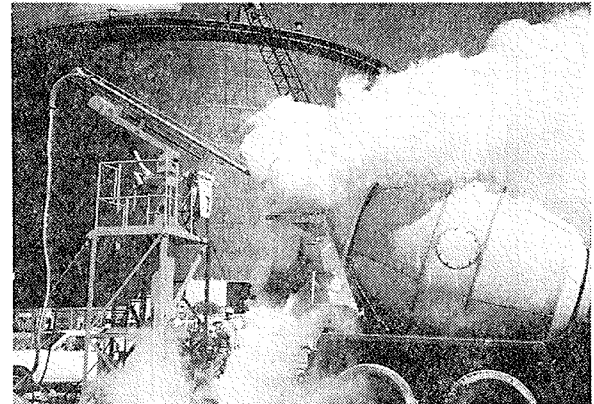


写真-2 冷却状態

4.2.4. 測定項目とその測定方法 コンクリート試験としてフレッシュコンクリートの性質(スランプ, 空気量, コンクリート温度)と硬化したコンクリートの性質(圧縮強度)について測定した。各測定方法は、前述の表-4に示したとおりである。また、実施工を通じて、直接冷却における冷却性能, 作業能率について調べた。液体窒素の使用量は、液面計と施工前後におけるタンクローリー車の重量差によった。

4.3. 施工結果および考察

4.3.1. フレッシュコンクリートの性質 本冷却による測定結果を表-11に示す。フレッシュコンクリートの性質のうち、スランプ、コンクリート温度については、冷却前後すべて測定した。空気量は、冷却前のみ全台数を測定した。スランプは、0~2.5cm大きくなった。冷却温度は、7.0~11.5℃の範囲となった。コンクリートの冷却温度の変化を図-6に示す。口径1インチのノズルを用いた場合、平均約8.6℃(標準偏差1.4℃)、口径2インチのノズルを用いた場合、9.9℃(標準偏差0.9℃)冷却された。同一条件において冷却温度が変動する主な原因としては、タンクローリー車の投入圧力の変動によるものと考えられる。冷却効率については、口径1インチの場合、39.2%口径2インチの場合、40.9%とほぼ等しかった。

生コン車1台の冷却に要する時間は、生コン車の誘導から投入装置のセット、冷却および搬出時間を含め約6分必要であった。この結果から、現状では1時間あたり

No.	スランプ (cm) 前/後	空気量 (%) 前/後	コンクリート温度 (°C) 前/後	冷却温度 (°C)	*1 液体窒素 投入量 (kg)	*1 冷却 必要性 (kg/m ³ °C)	*1 冷却 効率 (%)
*2 本-1	13.5	4.2	25.5	10.5	4800	14.3	39.2
	14.5	4.9	15.0				
本-2	12.5	4.4	25.0	8.0			
	14.0	4.5	17.0				
本-3	12.5	4.4	25.5	9.7			
	14.5	.....	15.8			
本-4	12.0	4.5	25.0	10.5			
	14.5	.....	14.5			
本-5	12.0	4.6	24.0	7.0			
	13.5	.....	17.0			
本-6	12.5	4.5	25.0	7.0			
	14.0	.....	18.0			
本-7	13.5	4.4	24.2	7.7			
	14.5	.....	16.5			
本-8	12.5	4.3	24.5	8.7			
	13.0	.....	15.8			
本-9	11.5	4.5	25.0	11.0			
	13.0	.....	14.0			
本-10	12.0	4.5	24.5	9.0			
	13.0	.....	15.5			
本-11	11.5	4.6	24.5	9.5			
	11.5	.....	15.0			
本-12	12.0	4.5	25.0	9.5			
	13.0	.....	15.5			
本-13	11.5	4.3	25.0	9.0			
	12.0	.....	16.0			
本-14	13.5	4.5	25.0	11.5			
	13.5	.....	13.5			
本-15	11.5	4.1	24.0	10.0			
	14.5	4.5	14.0				
本-16	11.0	4.4	25.0	9.5			
	13.5	.....	15.5			

*1 上段：液面計、下段：台貫計量による *2 約4m³冷却

表-11 フレッシュコンクリートの性質（本冷却）

約10台の生コン車のコンクリート（約50m³）を約10°C冷却可能であると推察できる。

4.3.2. 硬化したコンクリートの性質 コンクリートの圧縮強度は、材令4週において冷却しない場合が、平均273kg/cm²、冷却した場合が、平均260kg/cm²となり、施工実験と同様に若干低くなった。しかし、設計基準強度210kg/cm²は、すべて満足した。

5. まとめ

壁体の施工実験および実際の現場における基礎工事において、液体窒素によるコンクリートのクーリングを実施した。この結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 5m³積載の生コン車を3分で約10°C冷却できる。連続出荷の場合、生コン車の誘導から冷却、搬出まで約6分必要であり、1時間で10台の生コン車のコンクリート（約50m³）を冷却できる。

(2) 冷却効率は、生コン車内冷却の場合、40~50%である。

(3) 冷却に伴う生コン車のアジテータにより空気量が

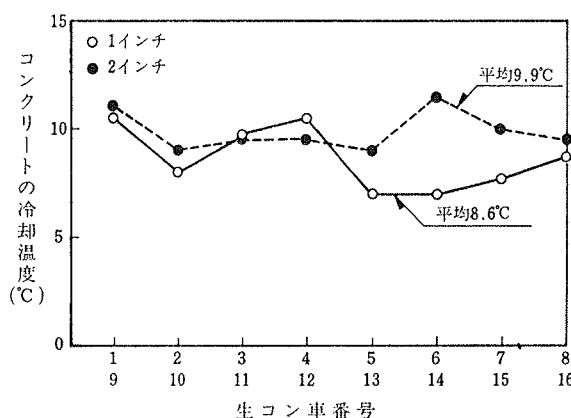


図-6 コンクリートの冷却温度変化

若干大きくなり、スランプも大きくなる傾向がある。液体窒素による冷却を実施する場合、生コン車のアジテータによる空気量の増加を考慮して調合設計を行なう必要がある。

(4) コンクリートの温度履歴および温度応力は、冷却によりかなり緩和される。

付 記

この研究は、大阪ガス(株)と当社の共同研究の成果をまとめたものであることを付記します。また、この研究は、社内研究開発グループ「液体窒素によるコンクリートクーリング」(扇 啓祐リーダー)、中川武志(阿木川ダム工事事務所 所長代理)、三浦昭爾(本店 土木部設計課長)、竹村次男(本社 技術開発本部 土木技術部技術課長)、他の皆様の御協力により実施することができました。厚くお礼申し上げます。

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) 十河, 中根, 他: 液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次講演会論文集, 第8回, (1986), pp. 329~332