

[2012] 液体窒素によるコンクリートクーリングの冷却効率に関する研究

正会員 中根 淳 (大林組技術研究所)
 正会員 ○一瀬 賢一 (大林組技術研究所)
 芳賀 孝成 (大林組技術研究所)
 直井 彰秀 (大阪ガス技術部)

1. まえがき

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]} 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。本研究は、生コン車のコンクリートをより効率よく、より速くしかも実用的に冷却する方法を確立するために、冷却効率に影響を及ぼす各種要因について実験的検討を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験は、投入装置先端の違い(形状、口径、断熱材の有無)、生コン車のドラムの回転速度、液体窒素の投入量(投入圧力と投入時間)などの影響について比較した。実験条件の一覧を表-1に示す。実験は、5m³積載の生コン車13台について実施した。実験の組合せを表-2に示す。

2.2 使用材料および調査

使用した骨材の種類とその性質を表-3に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、混和剤は、一般的な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-4に示す。これは、レデーミクストコンク

表-1 実験条件一覧

項目		摘要
投入装置 先端 (ノズル)	形状	ストレート、右上向き(15°)
	口径	φ38、φ50 mm
	断熱材	有、無
ドラムの回転状態		中速(12rpm)、低速(5rpm)
液体窒素 の投入量	投入圧力	2.5、5.0、7.5 kg/cm ²
	投入時間	1分~5分

表-2 実験の組合せ

No.	投入装置(ノズル)			ドラムの 回転	液体窒素の投入量	
	形状	口径	断熱		投入圧力 (kg/cm ²)	投入時間 (分)
*1	—	—	—	中速	—	(300)
2	ストレート	φ50	有	中速	5	150
3	"	"	"	低速	5	180
4	右上向	"	"	中速	5	180
5	ストレート	"	無	"	2.5	300
6	"	"	"	"	5	120
7	"	φ38	有	"	5	180
8	"	"	無	"	5	180
9	"	"	"	"	"	240
10	"	"	"	"	"	300
11	"	φ50	"	"	7.5	60
12	"	"	"	"	"	180
13	"	"	"	"	"	240

* No.1は、冷却を行わず、アジテートのみ、()内は、アジテート時間を示す。

表-3 骨材の種類と性質

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

リート工場から、呼び強度300kg/cm²、スランプ12cm、粗骨材の最大寸法25mmの標準品として製造、出荷された。

2.3 冷却方法

液体窒素によるコンクリートの冷却方法は、液体窒素をタンクローリー車のタンクからフレキシブルホースを通じ、投入ノズルにより生コン車のホッパー口から行なった。液体窒素の投入状態を図-1、写真-1に示す。この液体窒素投入装置は、半自動で、遠隔操作によりその投入ノズルを上下、前後および角度調整をして作動できるものである。実験の手順は、図-2に示す通りである。液体窒素の投入量は、タンクローリー車に備え付けの液面計および実験前後（生コン車5～6台の冷却後）のタンクローリー車の重量差をもとに算定した。

2.4 測定項目および測定方法

主な測定項目は、冷却前後における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）、硬化したコンクリートの性質（圧縮強度）、生コン車のドラム表面の温度分布測定、生コン車内のコンクリートの温度分布測定、液体窒素の使用量に関する要因（投入圧力、投入時間）などである。各測定方法は、表-5に示す。生コン車のドラム表面の温度分布については、赤外線カメラで観察した。

表-4 コンクリートの調合

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	43.4	180	309	796	1060	0.729

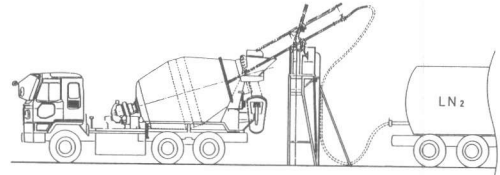


図-1 液体窒素の投入状態

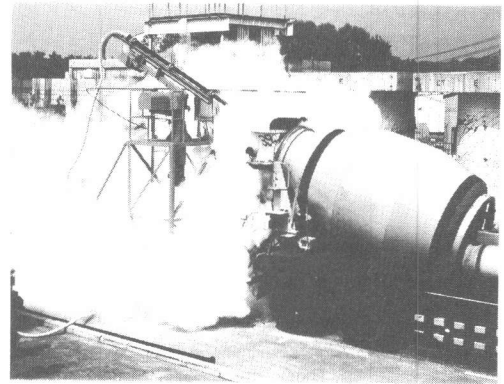


写真-1 液体窒素の投入状態

表-5 測定項目および測定方法

項目		方法	備考
コンクリート試験	フレッシュコンクリート	スランプ JIS A 1101	冷却前後
	フレッシュコンクリート	空気量 JIS A 1128	〃
	フレッシュコンクリート	コンクリート温度 採取コンクリートを温度計にて測定	〃
	フレッシュコンクリート	単位容積重量 JIS A 1116	〃
コンクリート試験	硬化コンクリート	圧縮強度 JIS A 1132 JIS A 1108	冷却前後 σ28, σ91 各 3本/回
	冷却の確認	温度分布 C-C熱電対にて生コン車内のコンクリート温度を測定	冷却前後
冷却の確認	液体窒素使用量*	液体窒素タンクローリーの液面計	各ケース完了毎
冷却の確認	ドラムの温度	赤外線カメラ	液体窒素投入時

* 当日の使用量はタンクローリーの計量差より算出

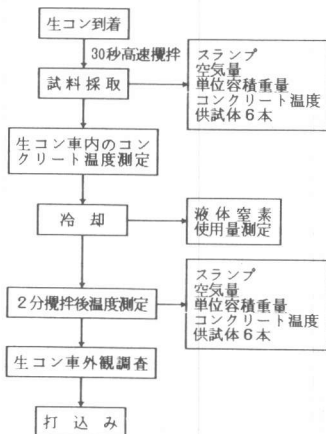


図-2 実験の手順

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

液体窒素による冷却前後のスランプ、空気量の変化を図-3、4に示す。生コン車のドラムを低速回転したNo. 3のスランプ低下が最大で8 cmとなった。他の中速回転の場合には、No. 12の6 cmの低下を除けば、冷却前後におけるスランプの変化は、±2.5 cmであった。この結果から冷却によるスランプの変化は、小さいものと考えられる。空気量については、-0.1~+1.4%変化し、全体的に約1%増加した。しかし、冷却しないものの空気量も増加したことから、これは、液体窒素による冷却の影響ではなく、生コン車の回転による影響と考えられる。

3.2 硬化したコンクリートの性質

冷却したものと冷却しないものの標準水中養生供試体の圧縮強度試験結果を表-6に示す。これによると材令28日の場合、圧縮強度の各平均が、冷却前331kg/cm²、冷却後323kg/cm²となり、材令91日の場合、冷却前390kg/cm²、冷却後374kg/cm²となり若干冷却後の強度が低下した。これは、3.1で示したようにアジテータによる空気量の増加の影響を受けたものと考えられる。

3.3 外観調査

赤外線カメラで冷却開始から連続して観察すると3分以上冷却した生コン車では、ドラム表面、特に投入口付近が約-20℃に達し、局部的に塗装の剝離が認められるものもあった。これは、液体窒素の潜熱のみがコンクリートの冷却に使われ、顕熱の大部分がコンクリートの冷却にほとんど使われていない冷たい窒素ガスとなり、放散経路のドラム表面の温度を下げたものと推察される。このため、本冷却方法を実施するに際し、生コン車の塗装として耐冷熱性の塗料を開発することも必要である。

冷却後、投入装置のノズル先端には、コンクリート塊が付着した。これは、ノズル先端が液体窒素で冷却され、コンクリートが、ドラムの

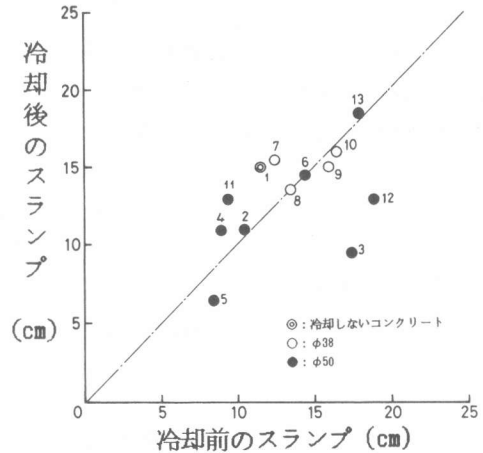


図-3 冷却前後のスランプの比較

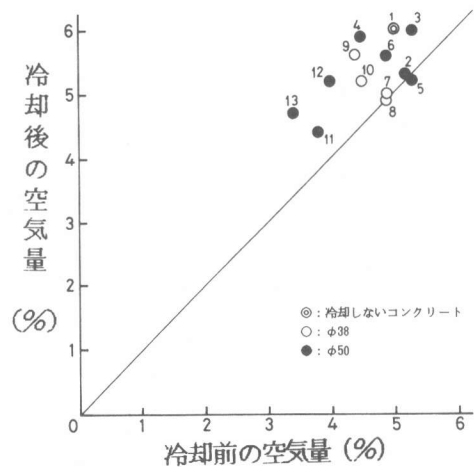


図-4 冷却前後の空気量の比較

表-6 圧縮強度試験結果

No.	圧縮強度 (Kg/cm ²)			
	28日		91日	
	冷却前	冷却後	冷却前	冷却後
1	336	*(308)	409	*(372)
2	309	332	387	374
3	337	330	376	385
4	372	327	392	378
5	354	363	404	392
6	346	329	388	381
7	354	334	408	367
8	321	317	400	394
9	311	286	382	365
10	292	288	374	339
11	354	337	419	380
12	301	323	364	362
13	315	304	384	375

* 5分間のアジテート後採取

回転またははね返りにより付着し、凍ったためと考えられる。しかし、No. 2～4およびNo. 7のようにノズルに断熱材を巻いた場合は、断熱しないものに比べコンクリートの付着が少なかった。このことから、実際の工事において連続的にコンクリートを冷却する場合、ノズルの先端を断熱することは、有意義なことと考えられる。

3.4 コンクリートの温度分布状態

冷却前後における採取したコンクリート温度および生コン車内の温度分布測定結果を表-7に示す。冷却後の生コン車内の温度分布は、約2℃前後のバラツキはあるものの冷却前のコンクリートの温度分布のバラツキと同程度である。このことからコンクリートがほぼ一様に混ぜられており、生コン車内の一部のみが冷却されたのではないことがわかる。

表-7 コンクリートの温度分布状態の測定結果

No.	口径	冷却方法			採取した コンクリート 温度 (℃)	*2 生コン車内コンクリート温度				*3 * 冷却効率 (%)
		LN ₂ 使用量 (kg)	投入圧力 (kg/cm ²)	冷却時間 (秒)		内 部 ← → ホッパー口			平 均	
1	*1 (300)	21.5 21.8	—	—	—	—
2	φ50	324	4.4	152	21.8 17.5	22.5 17.5	23.0 17.3	25.1 18.9	23.5 17.9	42.7
3	φ50	427	4.9	180	22.0 11.0	22.0 13.5	21.8 14.3	23.6 15.1	22.5 14.3	52.8
4	φ50	458	5.2	182	22.3 14.0	20.3 13.7	19.7 15.0	21.4 15.6	20.5 14.8	36.1
5	φ50	378	2.6	300	24.0 16.0	22.9 16.6	23.2 15.7	20.6 17.4	22.2 16.6	41.5
6	φ50	434	6.5	138	23.5 15.5	22.3 15.2	21.5 14.2	22.8 16.4	22.2 15.3	44.4
7	φ38	444	4.8	191	24.0 14.5	22.2 15.8	21.8 14.8	24.6 17.3	22.9 16.0	43.4
8	φ38	444	5.2	120	23.0 16.5	25.1 16.9	24.5 16.6	24.1 16.9	24.6 16.8	49.1
9	φ38	572	5.4	241	23.0 13.5	23.2 15.4	22.6 14.3	22.6 14.5	22.7 14.3	41.2
10	φ38	712	5.4	300	23.0 7.5	23.3 7.6	22.6 11.6	22.5 10.3	22.8 9.8	50.9
11	φ50	191	7.0	62	23.5 20.5	24.0 21.1	23.6 20.5	23.2 19.7	23.6 20.3	48.3
12	φ50	565	7.1	181	23.5 14.0	24.2 13.3	23.8 14.8	23.9 13.5	24.0 13.9	50.0
13	φ50	770	7.3	240	24.0 12.5	23.4 13.2	23.2 11.2	23.0 11.9	23.2 12.1	40.3

*1 アジテート時間 *2 上:冷却前 下:冷却後

*3 生コン車内コンクリートの冷却温度により算出

注) コンクリートの比熱: 0.24 Kcal/kg・℃として算出

*この冷却効率とは、液体窒素の有する全冷熱量(潜熱+顕熱)に対するコンクリートの冷却に使われた熱量の割合である。

3.5 冷却効率

当初、各生コン車における液体窒素の使用量は、タンクローリー車についている液面計により測定することとしていたが、1回の使用量が少ないため、これだけでは正確な計量が期しがたいことが分かったので、投入圧力と時間との積による使用量を別途計算して使用量とした。^(*) 液体窒素の使用量を表-7に示す。液体窒素の使用量と冷却温度との関係を図-5に示す。時間と投入圧力との関係から求めた液体窒素の使用量とコンクリートの冷却温度との関係はほぼ比例関係にあり、コンクリートの冷却温度の推定ができることを示している。

No. 4のノズルは、先端を投入方向に対して15度右上向きとした。これは、アジテート中のコンクリートに液体窒素を巻き込ませようとしたためである。しかし、実際には、液体窒素の投入圧力が高いためコンクリートが液体窒素を巻き込むのではなく、液体窒素がコンクリートを吹き飛ばす結果となった。このため、冷却効率は、36.1%となりストレートのものに比べ低い値（ストレートの場合の平均は、約45%）となった。

生コン車のドラムの回転の速さについては、No. 2とNo. 3との比較から若干、低速回転の方が冷却効率の高くなることが分る。これは、低速回転の場合、液体窒素とコンクリートとが接触している時間が長くなるためと考えられる。しかし、低速回転では、先に述べたようにスランプの低下が若干みられる。

ノズルの口径の大きさについては、No. 2, 6とNo. 9, 10との比較からほとんど差はなく、冷却効率への影響を特に与えなかった。

(*)

$$V_i = P_i \cdot T_i \cdot \frac{K}{\sum_{k=2}^{13} P_k \cdot T_k}$$

Vi : i台目のLN₂ 量
Pi : i台目の投入圧力
Ti : i台目の投入時間
k : 全実験前後のタンクローリー車の重量差

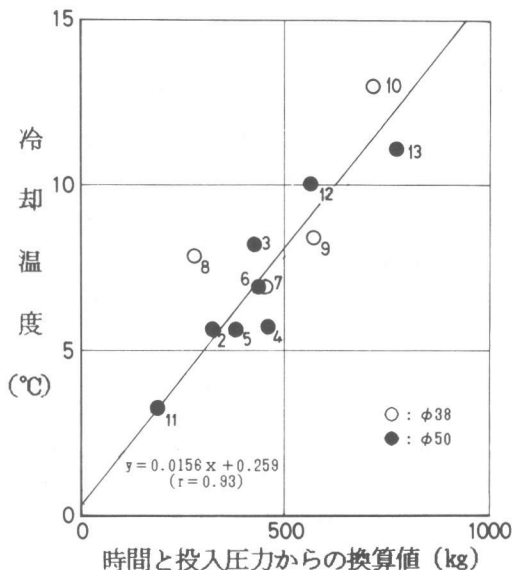


図-5 液体窒素の使用量と冷却温度

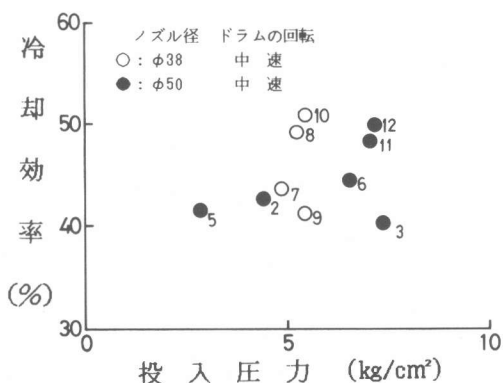


図-6 投入圧力と冷却効率

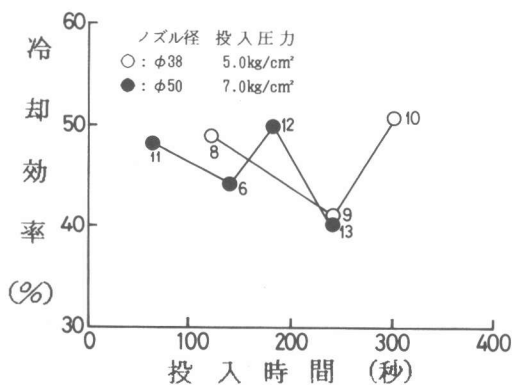


図-7 投入時間と冷却効率

投入圧力と冷却効率との関係を図-6に示す。これによると、 $\Phi 50\text{mm}$ の場合、圧力が高くなるに伴い冷却効率もやや高くなる傾向を示した。これは、文献[2]のアジテータ、ミキサにおける冷却実験の結果と一致している。

投入時間と冷却効率との関係を図-7に示す。投入時間を60秒から240秒まで変化させても冷却効率は、40%~50%の範囲にあることが分った。

4. まとめ

生コン車において、液体窒素によるコンクリートのプレクーリングを行ない、その冷却効果に影響を与える各種要因について実験した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 冷却前後におけるフレッシュコンクリートの性質について、スランプの変化は小さいけれども、空気量については約1%増加した。これは、冷却に伴うアジテータの影響によると考えられるが、実際の適用に際しては、空気量の増加を考慮する必要がある。

(2) 冷却後の生コン車内のコンクリート温度分布状態は、アジテートにより一様とすることができる。

(3) コンクリートの冷却効率は、40~50%の範囲にある。

(4) 実際の適用に際し、ノズルの断熱を行なうことは有意義である。

この液体窒素によるプレクーリング方法は、我が国においてまだ普及されていないが、今日コンクリート構造物の耐久性が重視されているなか、マスコンクリートおよび暑中コンクリートの打込みには、ぜひ積極的に採り入れていく必要があるものと考えている。今後は、この方法に改善、改良を加え、より使いやすいものの開発に努め、コンクリートの耐久性の向上に貢献したい。

〈謝辞〉本研究を進めるにあたり、貴重な御助言、御指導を賜りました日本大学 岸谷孝一教授ならびに東京理科大学 樋口芳朗教授に心から感謝致します。

〈参考文献〉

[1] 十河茂幸、中根 淳他：液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.329-332、1986

[2] 一瀬賢一、直井彰秀他：液体窒素によるコンクリートのプレクーリング（その1）（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.293-296、1986