

[83] 液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質

正会員 ○十河茂幸 (大林組技術研究所)

正会員 中根 淳 (大林組技術研究所)

浅井邦茂 (大阪ガス技術部)

直井彰秀 (大阪ガス技術部)

1. まえがき

マスコンクリート構造物や暑中に施工される構造物に発生する温度ひびわれの低減および強度発現の低下防止に、コンクリートのブレーキングが効果的であることは周知のとおりである。しかしながら、ブレーキングを実施することは、大規模な設備と高い費用を要するため、大規模な工事においてもその実施例が少ないのが現状である。これに対して、液体窒素によるコンクリートのブレーキング工法によると、液体窒素の供給と簡易な液体窒素の投入設備があるだけで、コンクリートのブレーキングが可能となり、比較的小規模な工事においても実施でき、経済的メリットも大きい。

そこで、本研究では、練上ったコンクリートを液体窒素で直接冷却することを試み、冷却されたフレッシュコンクリートの性質、および硬化後のコンクリートの性質について実験的に調査し、この工法の有意性について検討を加えた。

2. 冷媒としての液体窒素

主要な天然ガス成分と冷媒として保有する冷熱量を図-1に示す。メタンは潜熱、顕熱とも大きい安全面の問題があり、炭酸ガスは安全面で問題があるだけでなく、コンクリートの中性化を早めることが予想される。液体窒素は支燃性、可燃性でないで火災などの危険性もないなど、種々の冷媒のなかで最も優れていると考えられる。液体窒素の冷媒としての能力は、潜熱が47.7 kcal/kgで、常温20℃までの顕熱は53.5 kcal/kgである(表-1参照)。すなわち、100%の熱効率で使用できたとして、1m³のコンクリートの温度を1℃低下させるのに、約5.5kgの液体窒素が必要となる計算となる。

表-1 各種天然ガスの熱的性質

冷媒・成分	液 密 度 (kg/l) at b.p	沸 点 (℃)	蒸 発 潜 熱 (kcal/kg)	ガス比熱 kcal/kg℃ (常温)
メタン CH ₄	0.426	-162	122	0.528
プロパン C ₃ H ₈	0.582	-42	102	0.473
窒 素 N ₂	0.808	-196	48	0.248
酸 素 O ₂	1.141	-183	51	0.212
アルゴン Ar	1.402	-186	40	0.125
炭酸ガス CO ₂	1.030	-79	137	0.199

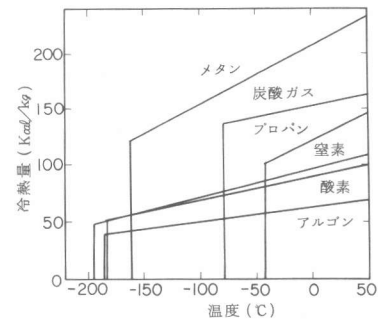


図-1 各種冷媒の保有冷熱量

3. 液体窒素により冷却されたコンクリートの性質

3.1 実験概要

(1) 目的………液体窒素による冷却がフレッシュコンクリートの性質および硬化後のコンクリートの性質に及ぼす影響を把握し、あわせてコンクリートを冷却する場合の液体窒素の冷却効率を調べる。

(2) 実験組合せ………実験の組合せを表-2に示す。主な比較要因としては、配合の違い、流動化剤の添加の有無とし、冷却前後のコンクリートの性質の違い、冷却効率、冷却後マス養生したコンクリートの温度と強度比較などを評価項目とした。

表-2 実験の組合せ

No.	液体窒素投入方法		コンクリート量 (m ³)	配合	備 考
	圧 力 (kg/cm ²)	時 間 (分)			
1	5.0	3.0 +1.5	4.0 3.0	A	普 通
2	5.0	3.0 +1.5	4.0 3.0	B	流動化→冷却
3	5.0	4.0	3.9	C	普 通
4	5.0	4.0	3.9	D	冷却→流動化
5	5.0	3.0	2.8	D	流動化→冷却
6	---	---	5.0	D	流動化(冷却せず)

(3) 使用材料および配合 …… 実験に用いた骨材の性質を表-3に示す。使用セメントは普通ポルトランドセメント(比重3.16, 比表面積3220 cm^2/gr), 使用混和剤は, AE減水剤, 流動化剤2銘柄とした。コンクリートの配合は, 表-4に示すとおりである。

表-3 骨材の性質

	産地	種類	混合比(%)	最大寸法(mm)	比重	吸水率(%)	粗粒率
細骨材	熊谷・荒川	川砂	75	5	2.60	1.90	2.86
	千葉・佐原	陸砂	25				
粗骨材	熊谷・荒川	川砂利	50	25	2.67	0.90	6.86
	名栗	石灰石・砕石	50				

(4) 冷却方法

液体窒素の投入は, 図-2 表-4 コンクリート配合

に示すように, 投入装置にタンクローリー車を直結し, 生コン車のホッパー口からノズルを挿入して行った。投入ノズル(径28mm, 長さ2.0m)の先端は, コンクリート表面

上約50cmに設置し, 投入時には, 生コン車のドラムを高速回転した。

液体窒素投入圧力は, $5\text{ kg}/\text{cm}^2$ とした。

(5) 測定内容および方法

1) フレッシュコンクリートの性質 …… スランブ, 空気量, 単位容積重量, コンクリート温度, ブリージング量をそれぞれJISの方法に基づいて測定した。

2) 硬化コンクリートの性質 …… 圧縮強度を標準養生供試体について材令3, 7, 28, 56, 91日で, マス養生コアについて材令28, 56, 91日で, それぞれJISに基づいて試験した。

3) マスブロックの温度履歴 …… 周辺を全て100mmの発泡スチロールでおおった1m角のマスブロックのコンクリートの温度履歴を測定した。温度測定は熱電対を用いて自動計測した。

4) 液体窒素の冷却効率の測定 …… 生コン車に投入した液体窒素量は, タンクローリーの液面計と使用全重量(ローリー車の実験前後の重量差)から算定した。液体窒素の冷却効率は, 液体窒素の投入量とコンクリート温度の低下量から, 1 m^3 のコンクリートを1℃下げるのに要する液体窒素量として算出し比較した。

3.2 実験結果および考察

(1) 液体窒素による冷却がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響 …… フレッシュコンクリートの試験結果を表-5にまとめ

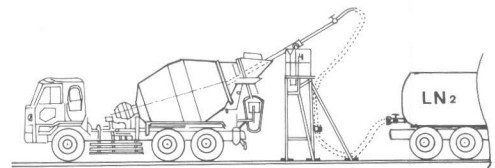


図-2 液体窒素によるコンクリートの直接冷却法

表-5 フレッシュコンクリートの性質

NO.	配合	測定時期	スランブ(cm)	空気量(%)	温度(℃)	単位重量(t/m^3)	最終ブリージング率(%)
1	A	生コン車到着時	10.0	2.9	15.1	2.35	2.68
		1次冷却後	11.5	4.7	7.5	2.31	2.64
		2次冷却後	11.5	4.5	3.8	2.31	2.17
2	B	生コン車到着時	7.0	4.2	14.5	2.33	1.96
		流動化後	20.6	2.7	14.5	2.37	2.90
		1次冷却後	14.0	2.0	7.5	2.38	1.92
		2次冷却後	12.0	2.1	1.5	2.38	1.53
3	C	生コン車到着時	8.0	3.1	31.5	2.32	1.56
		冷却後	9.5	4.1	16.5	2.30	1.83
4	D	生コン車到着時	6.0	3.2	32.5	2.34	0.40
		冷却後	7.0	4.6	15.0	2.32	0.90
		流動化後	15.5	4.9	23.0	2.29	0.45
5	D	生コン車到着時	7.5	3.2	32.5	2.33	0.66
		流動化後	18.5	3.9	32.5	2.32	0.96
		冷却後	15.0	5.6	19.8	2.28	0.90
6	D	生コン車到着時	6.5	3.3	33.1	2.34	----
		冷却仮想攪はん	8.5	3.9	33.5	2.32	----
		流動化後	20.5	3.7	33.3	2.32	----
		冷却仮想攪はん	14.5	4.0	33.0	2.32	----

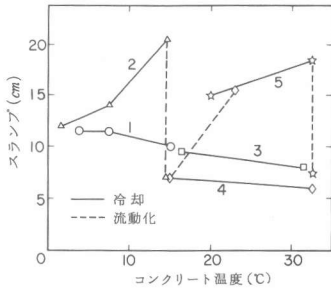


図-3 コンクリート温度とスランプ

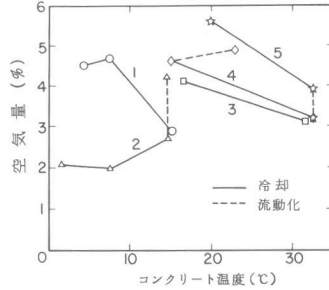


図-4 空気量とコンクリート温度

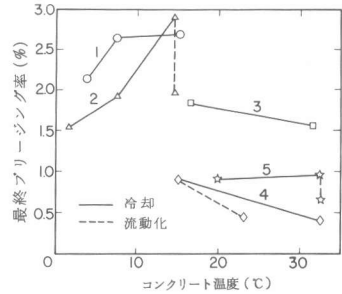


図-5 最終ブリージング率とコンクリート温度

た。液体窒素により冷却する前後のコンクリートのスランプ、空気量と温度の関係を図-3、図-4に示す。この結果、普通コンクリートでは液体窒素で冷却するとスランプは約1.5cm増大し、空気量も1~2%程度増加した。この現象は、No.6の結果より明かなように、生コン車の高速回転に主として起因するものと考えられる。

一方、流動化コンクリートの冷却の場合においては、逆にスランプは低下した。これは、冷却により流動化剤の界面活性作用が低下したためと考えられる。したがって、冷却しない場合と同等の流動化効果を得るためには、流動化剤を増量する必要が認められる。

各配合における最終ブリージング率と冷却温度の関係を図-5に示す。流動化コンクリートにおいては、流動化後に最終ブリージング率が増加する傾向にあるが、冷却後においては、コンクリート温度が低下しているにもかかわらず、最終ブリージング率はあまり変化しなかった。

(2) 液体窒素による冷却が硬化コンクリートの性質に及ぼす影響……標準養生供試体およびマスブロックコアの圧縮強度試験結果を表-6にまとめた。冷却

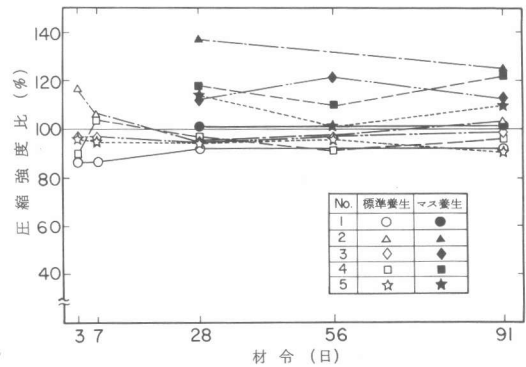


図-6 冷却前に対する冷却後のコンクリートの圧縮強度比

表-6 硬化コンクリートの性質

No.		圧 縮 強 度 (kg/cm ²)								マスブロック中心温度			
		標準養生				マス養生(コア)				打設温度	最高温度	温度上昇量	最高温度までの時間
		3日	7日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	T ₀ (°C)	T _{max} (°C)	T _{max} -T ₀ (°C)	(hr)
1	a	212	322	401	---	450	347	---	383	15.1	57.5	42.4	50
	b	186	289	350	---	414	321	---	361	7.5	48.0	40.5	72
	c	184	280	370	---	413	352	---	392	3.8	43.0	39.2	91
2	a	226	344	415	---	462	---	---	---	---	---	---	---
	b	223	348	410	---	486	346	---	390	14.5	57.5	43.0	51
	c	253	367	433	---	470	418	---	478	7.5	49.5	42.0	70
	d	261	368	433	---	503	474	---	487	1.5	45.0	43.5	92
3	a	144	234	318	345	356	234	233	246	31.5	70.9	39.4	36
	b	139	226	302	336	351	261	281	279	16.5	60.0	43.5	48
4	a	233	310	418	471	475	317	341	350	32.5	85.7	53.2	25
	b	210	323	404	427	457	375	376	426	15.0	69.5	54.5	50
	c	222	305	385	423	438	322	364	355	23.0	72.3	49.3	36
5	a	236	326	436	459	486	326	321	342	32.5	85.1	52.6	30
	b	232	326	406	458	483	297	314	322	32.5	84.9	52.4	30
	c	225	311	386	441	441	340	316	353	19.8	71.6	51.8	42

前のコンクリートの強度に対する、冷却後の標準養生供試体およびマスブロックコアの強度比を図-6に示す。これらの結果より、極端な条件ではあるが、マス養生を行った場合、若材令で高温履歴を受けるため、強度の発現がかなり低下することが明かである。しかし、図-6に示すように、冷却を行った場合は、冷却前の同一条

件のマス養生コアと比較して、約20%以上も強度が増大する場合もあり、強度低下の少ないことが認められた。

(3) 冷却コンクリートの温度上昇 …… 液体窒素により冷却されたコンクリートの、マスブロック打設後の温度上昇曲線の1例を図-7に示す。打込み温度が高いほど最高温度が高くなり、最高温度に達する時間は早くなる。図-8は、練上り温度ごとの引張強度と温度応力の関係を試算したものであるが、例えば、コンクリートの練上り温度を35、25、15、5℃と仮定した場合、練上り温度が小さい程、温度ひびわれ発生の危険性が低減できることが明らかである。

(4) 液体窒素の冷却効率 …… 液体窒素の使用量とそれによるコンクリート温度の低下量の関係を、図-9に示す。液体窒素の液面計の精度、生コン車内のコンクリート量の推定誤差、温度の測定位置による誤差などにより若干バラツキが認められるが、温度低下量と液体窒素の使用量はほぼ直線関係となり、冷却能率は約13.2 kg/m³・℃（液体窒素の消費量）であった。これは、液体窒素の冷熱量の約42%が有効利用できたことになる。

4. まとめ

液体窒素によるコンクリートのブレーキングを生コン車を用いて実験した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 液体窒素を用いて、5 m³のコンクリートの温度を10～15℃低下させるのに要する時間は、約5分間である。

(2) 冷却効率は約13 kg/m³・℃で、この値は液体窒素の冷熱量の約42%である。

(3) 冷却されたフレッシュコンクリートの性質は、スランプ、空気量、ブリージング量とも大きな変化はないが、流動化剤を使用した場合にスランプの低下が認められた。

(4) マス養生したコンクリートの強度は、冷却することによって冷却しない場合より約10～20%増加する。

温度ひびわれの低減にコンクリートのブレーキングは有効であり、液体窒素で冷却する工法はコンクリートの品質に影響を与えないで、短期間で、簡易な設備で、小規模な場合でも大規模工事の場合と同等のコストで実施できる効果的な方法であることが明らかになった。今後はさらに熱効率を向上させることを検討したい。

—謝辞— 本研究を実施するにあたり、貴重な御助言、御指導を賜りました東京理科大学 樋口芳朗教授ならびに、東京大学 岸谷孝一教授に心から感謝致します。

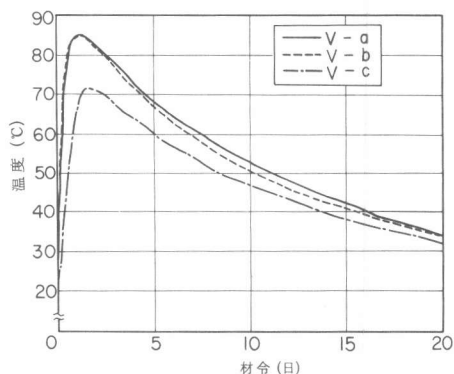


図-7 マスブロックコンクリート中心温度

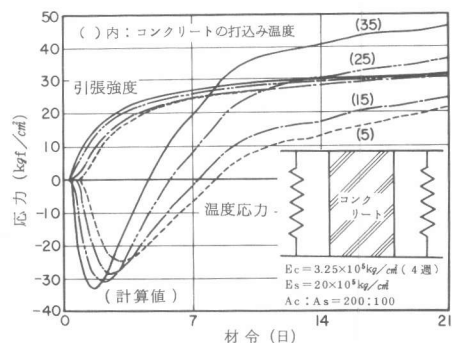


図-8 温度ひびわれに及ぼすブレーキング効果

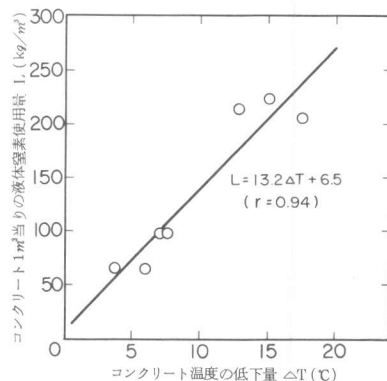


図-9 液体窒素使用量とコンクリート温度低下量