

論文

[1157] 液体窒素によるコンクリートのプレクーリングに関する研究

正会員○丸屋 剛 (大成建設技術研究所)

正会員 大友 健 (大成建設技術研究所)

正会員 松岡康訓 (大成建設技術研究所)

1. はじめに

マスコンクリート構造物における温度ひびわれを制御する方法としては、コンクリートの打設温度を低下させるプレクーリングが有効であり、現在では練りませ水に冷水や氷を用いる方法、各構成材料を冷水などで冷却する方法等が一般に用いられている。

アメリカなどで既に実用化されている液体窒素によるコンクリートのプレクーリングに関しては、その大きな冷却効果から我が国でも研究開発が盛んに行われており<sup>1)~4)</sup>、実構造物への適用も始まっている<sup>5)</sup>。この液体窒素による冷却方法には、細骨材などの各構成材料を冷却する方法、コンクリートミキサ内で練りませ中のコンクリートを冷却する方法、生コン車内で練りませ後のコンクリートを冷却する方法等がある。

本研究では、液体窒素により練りませ中のコンクリートを直接冷却する方法について、液体窒素による冷却がフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質に及ぼす影響を室内実験で確認し、さらに、本方法をプレクーリングシステムとして確立するために1m<sup>3</sup> ミキサを供えた実機プラントにより実証実験を行った。

2. 室内実験

2. 1 実験目的

本研究では、以下の4項目を明らかにするために室内実験を行った。

- ①液体窒素投入量がコンクリートの品質、冷却効率に及ぼす影響 (シリーズ1)
- ②単位水量が液体窒素により冷却したコンクリートの品質、冷却効率に及ぼす影響 (シリーズ2)
- ③液体窒素による冷却がコンクリートの温度上昇特性に及ぼす影響 (シリーズ3)
- ④液体窒素による冷却がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響 (シリーズ4)

2. 2 実験条件

本実験に使用した材料、配合を普通コンクリートおよびダムコンクリートに対して、それぞれ表-1、2および表-3、4に示す。普通コンクリート、ダムコンクリートのいずれも水を加えてから90秒間練りませた。また、普通コンクリートでは50ℓパン型強制練りミキサを、

表-1 普通コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	鹿島産陸砂 (比重2.62, 吸水率1.02%)
	大井産川砂 (比重2.62, 吸水率1.16%)
粗骨材	青梅産碎石 (比重2.66, 吸水率0.67%)
	青梅産碎石 (比重2.66, 吸水率0.67%)
混和材料	遅延形A E減水剤

表-2 普通コンクリートの配合

配合区分	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
I	20	8±2.5	4 ± 1	55.0	45	154	280	846	1048	0.7
II	20	12±2.5	4 ± 1	57.1	45	160	280	838	1040	0.7
III	20	—	4 ± 1	53.6	45	150	280	849	1048	0.7

ダムコンクリートでは200ℓ水平2軸ミキサを使用し、

ミキサの外周は厚さ40mmのガラスウールで保冷対策を施した。また、液体窒素は断熱バケツにより重量計量を行い、水を加えて20秒後から30秒間でミキサ内に直接投入した。

表-3 ダムコンクリートの使用材料

セメント	中庸熟ポルトランドセメント
細骨材	定山溪砕砂 (比重2.62, F.M. 2.83)
粗骨材	定山溪砕石 (比重2.54)
混和材料	フライアッシュ 遅延形A E減水剤

表-4 ダムコンクリートの配合

配合区分	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (cm)	水材結合比 W/B (%)	フライアッシュ比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )								
							水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗 骨 材				混和剤
											G1	G2	G3	G4	
IV	150	3 ± 1	4 ± 1	64.4	25	25	103	128	32	507	379	379	364	394	2.89

2. 3 液体窒素投入量がコンクリートの品質、冷却効率に及ぼす影響

実験結果をまとめて表-5に示す。また、液体窒素投入量とスランブ、空気量および圧縮強度との関係を図-1に示す。液体窒素投入量が増加するにしたがいスランブは低下しているのに対し、圧縮強度は増加している。この原因としては、液体窒素の投入によるコンクリート中の水分の損失が考えられる。つまり、液体窒素投入量が多いほど失われる水分量も多くなり、そのためスランブは低下し、圧縮強度は増加したものと推察される。コンクリート1m<sup>3</sup>を1℃冷却するために必要である液体窒素量を表す冷却原単位は、液体窒素投入量が80kg/m<sup>3</sup>で10.3kg/m<sup>3</sup>℃、184kg/m<sup>3</sup>で9.9kg/m<sup>3</sup>℃であり、液体窒素の投入量にかかわらず約10kg/m<sup>3</sup>℃であることから、液体窒素の投入量により冷却温度を制御することが可能であることがわかる。なお、冷却前後の温度差は、液体窒素投入直前の温度と液体窒素投入後練りませ終了時の温度との差である。

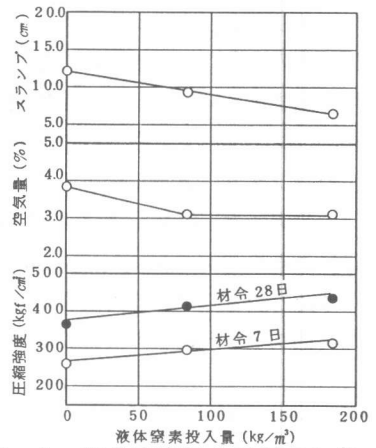


図-1 液体窒素投入量がコンクリートの品質に及ぼす影響

表-5 室内実験結果

実験シリーズ	配合区分	混練方法	液体窒素投入量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	冷却前後の温度差 (℃)		熱交換率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/d)	圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		含水率 (%)	
					冷却前	冷却後					σ <sub>7</sub>	σ <sub>28</sub>		
1	I	NPC	0	154	0	—	—	12.0	3.8	2.353	257	361	—	
		CDC	80	154	7.8	10.3	57.5	9.3	3.1	2.380	294	411		
		CDC	184	154	18.6	9.9	59.6	6.5	3.1	2.372	315	436		
2	II	NPC	0	154	0	—	—	6.0	3.1	2.384	259	384	7.10	
		NPC	0	160	0	—	—	11.9	4.2	2.345	220	341	7.42	
		NPC	0	166	0	—	—	—	17.3	3.5	2.355	220	315	7.88
		CDC	160	160	14.1	11.3	52.0	7.6	3.0	2.379	282	396	7.20	
		CDC	160	163	13.5	11.9	49.8	11.3	3.5	2.363	253	364	7.42	
		CDC	160	165	13.0	12.3	47.9	13.0	3.9	2.353	234	336	8.02	
3	III	NPC	0	150	0	—	—	—	—	—	—	—	—	
		CDC	176	150	17.0	10.3	57.0	—	—	—	—	—	—	
4	IV	NPC	0	103	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		CDC	—	103	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4	III	NPC	0	150	0	—	—	9.2	4.5	2.353	273	356	—	
		CDC	184	150	19.1	9.6	61.2	9.7	4.3	2.367	297	376	—	

\*NPCはクーリングなし、CDCはクーリングあり

2. 4 単位水量が液体窒素により冷却したコンクリートの品質、冷却効率に及ぼす影響

単位水量とスランブ、空気量および圧縮強度との関係を図-2に示す。これから、冷却コンクリートのスランブは、単位水量にかかわらず未冷却コンクリートのスランブを一定値低下させる方向に移動させて表せることがわかる。また、液体窒素投入量が160kg/m<sup>3</sup>のとき、スラン

プを維持するには単位水量で $+3.8\text{kg/m}^3$ の補正が必要であることがわかる。さらに、液体窒素により冷却したコンクリートにも単位水量と圧縮強度の間にはよい相関関係があり、単位水量で $170\text{kg/m}^3$ 以下の時冷却したコンクリートの方が圧縮強度が大きい。ここで、スランプを維持するために増加した水量が圧縮強度にどのような影響を及ぼすかをみると、材令7日、28日いずれでも未冷却のコンクリートの圧縮強度以上であることがわかる。従って、単位水量を補正することによりコンクリートの品質を維持することは可能であると考えられる。なお、単位水量の変化は冷却原単位に影響を及ぼさない。また、含水率の測定結果である表-6からも明らかなように、配合単位水量を $163\text{kg/m}^3$ で冷却したコンクリートの含水率と、配合単位水量 $160\text{kg/m}^3$ で未冷却のコンクリートの含水率は一致している。つまり、液体窒素による冷却で、単位水量は $3\text{kg/m}^3$ 減少している。これは、単位水量を $3.8\text{kg/m}^3$ 増加させてコンクリートの品質を維持することができる結果ともほぼ整合する。なお、含水率は、 $110^\circ\text{C}$ で恒量になるまで乾燥させ、重量変化を測定し求めた。

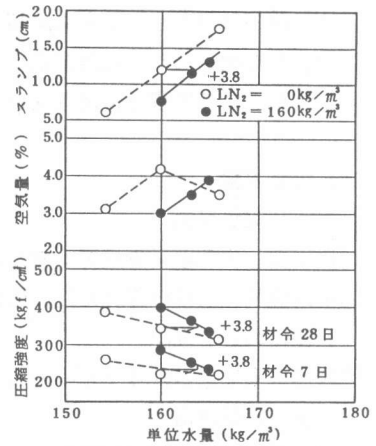


図-2 単位水量がコンクリートの品質に及ぼす影響

表-6 コンクリートの含水率測定結果

混練方法	配合単位水量 (kg/m³)	配合含水率 (%)	測定含水率 (%)	相対測定含水率 (%)	補正単位水量 (kg/m³)
NPC	154	6.64	7.10	-0.32	152.5
	160	6.90	7.42	±0	160
CDC	160	6.90	7.20	-0.22	154.8
	163	7.03	7.42	±0	160

## 2. 5 液体窒素による冷却がコンクリートの温度上昇特性に及ぼす影響

簡易断熱温度上昇試験装置（試料容量 $64\text{L}$ 、厚さ $20\text{cm}$ の発砲スチロールにより断熱）による普通コンクリート、ダムコンクリートの試験結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。普通、ダムコンクリートいずれも、最高温度上昇量は冷却した方が大きくなるが、最高上昇温度は確実に低下し、外気温との差も減少する。従って、部材内部の温度差が低減し、温度ひびわれの制御に有効であると考えられる。

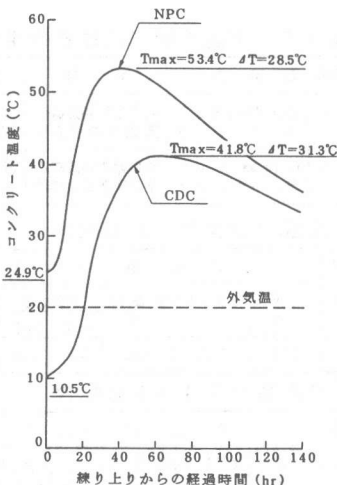


図-3 普通コンクリートにおける簡易断熱温度上昇試験結果

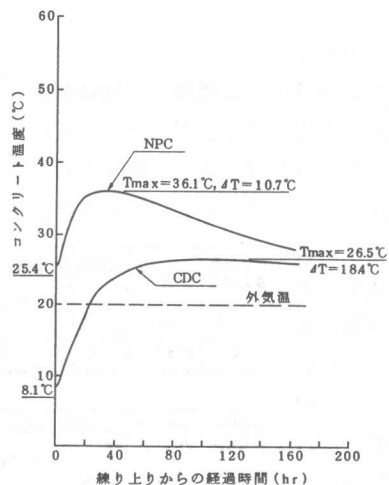


図-4 ダムコンクリートにおける簡易断熱温度上昇試験結果

## 2. 6 液体窒素による冷却がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響

図-5に凍結融解試験における動弾性係数の経時変化を示す。冷却コンクリートと未冷却コンクリートとの間にはほとんど変化がなく、液体窒素による冷却が凍結融解に対する耐久性には影響を及ぼさないことが明かとなった。

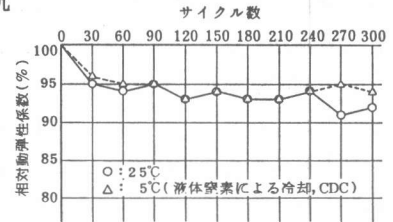


図-5 凍結融解における相対動弾性係数の経時変化

## 3. 実証実験

### 3. 1 実験目的

以下に示す2項目を検討するために、実機による実証実験を行った。

- ①室内実験により得られた液体窒素の冷却によるコンクリートの品質、冷却効率に及ぼす影響を実機において確認
- ②液体窒素による練りませ中のコンクリートの冷却をシステムとして確立

### 3. 2 実験設備

図-6に実験設備の概要を示した。液体窒素の高所、大量、間欠的な供給は、ポンプまたは自己加圧では困難であるため、窒素ガスでローリー内の液体窒素を外部加圧することにより行った。また、液体窒素の流量測定にはオリフィスをを用いた。液体窒素の流量制御は、液体窒素投入後ノズル内の熱電対が所定の温度に低下すると流量計が積算を開始し、設定投入量に達すると積算計の信号により遮断弁が自動停止するシステムによった。

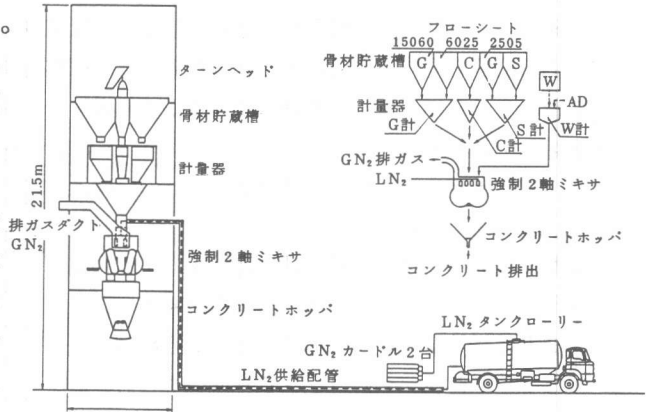


図-6 実験設備の概要

### 3. 3 実験条件

普通コンクリートに使用した材料を表-7に、配合を表-8に、ダムコンクリートに使用した材料を表-7に、配合を表-9に示す。普通コンクリート、ダムコンクリートともに、材料の投入開始から90秒間練りませを行い、液体窒素投入は材料放出開始後50秒から30秒間を標準とした。

表-7 実証実験における使用材料

コンクリート区分	セメント	骨材	混和材料
普通コンクリート	普通ポルトランドセメント	府中市荒谷産砕石 高根島沖産海砂	遅延形A E減水剤
ダムコンクリート	中庸熟ポルトランドセメント	奈良県布目産砕石 奈良県布目産砕砂	遅延形A E減水剤 フライアッシュ

表-8 普通コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G (5-10, 10-20)	遅延形A E減水剤	
20	12±2.5	4±1	58	42	174	300	729	329	766	1.05

表-9 ダムコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C+F (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)						
					水 W	セメント C+F	細骨材 S	粗骨材 G (5-25, 25-60, 60-150)			混和剤
150	3±1	3±1	95.3	24	123	129	511	455	483	705	0.45

### 3. 4 実験結果および考察

#### 3. 4. 1 液体窒素投入量がコンクリートの品質に及ぼす影響

普通コンクリートの、液体窒素投入量とスランプ、空気量および圧縮強度の関係を図-7に示す。液体窒素投入量の増加に伴いスランプは低下している。空気量も若干低下しているがこれは変動の範囲内であると考えられる。一方、圧縮強度は増加する傾向を示している。これらの結果は、室内実験における実験結果と一致する。また、冷却前後のコンクリート温度差と液体窒素投入量との関係を図-8に示す。本実験の冷却原単位の平均値は約9.4kg/m<sup>3</sup>℃であり室内実験と同等の結果が得られた。

ダムコンクリートの、液体窒素投入量とスランプ、空気量および圧縮強度の関係を図-7に示す。これらの関係は普通コンクリートの結果と若干異なるようであるが、空気量を除いて傾向的には一致している。すなわち、液体窒素の投入量の増加にともないスランプは低下するが、その傾向は普通コンクリートほど顕著ではない。また、圧縮強度についても同様である。空気量については液体窒素投入の影響を受けない。ダムコンクリートの冷却原単位の平均値は図-8に示すように7.2kg/m<sup>3</sup>℃となり、普通コンクリートに比較して小さかった。これは骨材の最大寸法が150mmと大きいため、骨材の中まで冷却されず、モルタル部分が良く冷却されたためと考えられる。

#### 3. 4. 2 単位水量補正がコンクリートの品質に及ぼす影響

普通コンクリートでは、液体窒素により練りませ中のコンクリートを冷却すると、スランプが低下することが実機においても確認された。従って、所定のスランプを維持するために単位水量の補正が必要となるため、コンクリートの品質変化に及ぼす単位水量の増加の影響について検討した。実験結果は図-9に示す通りであり、液体窒素により冷却したコンクリートではスランプは低下するが、単位水量を増加させることにより維持できることがわかる。空気量については、冷却の有無により変化はみられたものの、単位水量の変化の影響は見られない。

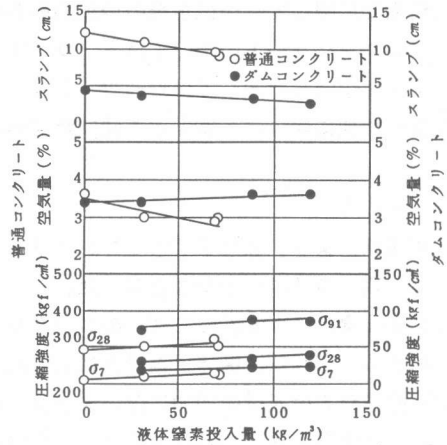


図-7 液体窒素投入量がコンクリートの品質に及ぼす影響

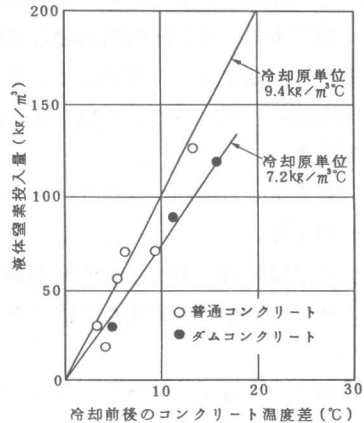


図-8 冷却温度と液体窒素量の関係

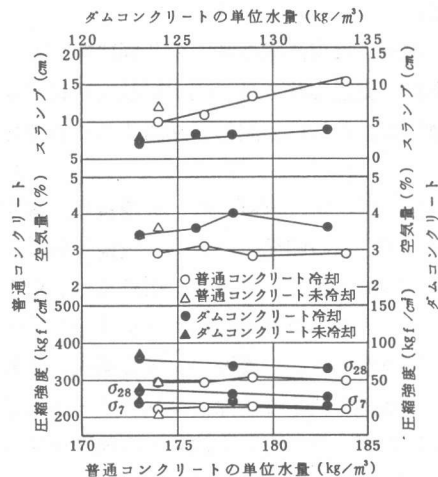


図-9 単位水量がコンクリートの品質に及ぼす影響

圧縮強度に関しても単位水量の増加の影響はほとんど見られず、同等以上の圧縮強度が得られた。

ダムコンクリートの単位水量とスランプ、空気量および圧縮強度との関係を図-9に示す。スランプ、空気量に関しては普通コンクリートと同様の結果を示したが、圧縮強度については単位水量の増加に伴い若干低下する傾向が認められた。

#### 4. まとめ

本研究により、練りませ中のコンクリートを液体窒素で直接冷却するプレクーリング方法に関して、以下の7項目が明かとなった。

- (1) 液体窒素による練りませ中のコンクリートの冷却により、スランプは低下し、圧縮強度は増加する。これは、液体窒素投入による水分の減少による。
- (2) 液体窒素投入量の増加に伴いスランプは低下し、圧縮強度は増加する。また、冷却原単位は液体窒素投入量に関わりなくほぼ一定であることから、液体窒素投入量により冷却温度を容易に制御できる。
- (3) 単位水量を補正することにより、液体窒素投入によるコンクリートの品質変化を抑制することが可能であり、品質維持に必要な単位水量の補正量は、コンクリートの含水率の測定とスランプ維持の確認により可能である。また、冷却原単位は単位水量の影響を受けない。
- (4) 液体窒素の冷却により、温度上昇試験における最高上昇温度が低下し、最高温度に達する時間も延長する。
- (5) 液体窒素による冷却コンクリートは未冷却のコンクリートと同等の凍結融解作用に対する抵抗性を有する。
- (6) 液体窒素投入量、単位水量の増加がコンクリートの品質および冷却効率に及ぼす影響について、 $1\text{ m}^3$  のミキサを備えた実機による実証実験においても室内実験とほぼ同等の結果が得られた。
- (7) 液体窒素によるプレクーリングシステムとしては、システムの冷却に消費される液体窒素量を最小限にすることが今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は東洋酸素(株)との共同研究であり、実験結果をまとめるにあたり多大な助力を戴いた。また、実証実験では、(株)北川鉄工所にバッチャープラントの提供、運転等において多大な協力を戴いた。ここに、記して感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 小野 定、木村克彦、後藤貞雄、峯岸孝二：液体窒素で冷却した骨材を用いたプレクーリング工法の開発：セメント技術年報42, pp. 571 ~574, 1988
- 2) 中原 康、万木正弘、二階堂稔、白石泰一：液体窒素を用いたプレクーリングのダムコンクリートへの適用性：コンクリート工学年次論文報告集9-2, pp. 73 ~78, 1987
- 3) 中根 淳、一瀬賢一、芳賀孝成、直井彰秀：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：コンクリート工学年次論文報告集9-2, pp. 67 ~72, 1987
- 4) 渡部 正、牧野英仙久：高強度マスコンクリートに関する研究(その1)：前田技術研究所報 Vol. 29, pp. 75~81, 1988
- 5) 手塚茂樹：世界最大の沈埋函を作る：セメント・コンクリートNo. 506, pp. 8 ~19, 1989. 4