

報 告

[1156] 液体窒素によるプレクーリング工法（粗骨材冷却方法）
について

正会員○布谷 一夫（㈱竹中土木技術開発本部）

三木 自行（兵庫県企業庁）

正会員 吉岡 保彦（㈱竹中工務店技術研究所）

正会員 安藤慎一郎（㈱竹中土木東京本店）

1. はじめに

近年の社会基盤整備事業等においては大規模プロジェクトが多く、コンクリート構造物の大量急速施工法が要求されるとともに、重要構造物の大型化に伴う耐久性・機能性の確保および向上等の点からセメントの水和熱による温度ひびわれの制御が重要な問題となっている。ひびわれ制御方法としては、セメント量の低減や低発熱性セメントの使用、あるいはパイプクーリングなど種々の方法があるが、最近では温度低下効果が大きいことや、温度低下量制御の容易性、設備コストが低いなどの冷却設備の簡易性から、液体窒素によるプレクーリング工法が注目されている^{1), 2)}。

本報告で述べるプレクーリング工法は、液体窒素を粗骨材に直接供給し、潜熱および顕熱を有効に利用して粗骨材を冷却することによりコンクリートの練り上がり温度を制御して温度ひびわれを防止する工法であり、粗骨材の寸法や含水状態の相違が液体窒素の熱交換効率に及ぼす影響、冷却した粗骨材を使用したコンクリートの品質の確認、およびプロジェクトへの適用性等について検討した。

2. 粗骨材冷却実験

2-1 実験の目的および方法 粗骨材冷却実験では、液体窒素の蒸発潜熱および気化ガスの顕熱が最も効率良く熱交換される骨材の形状・状態を把握するために、粗骨材寸法の相違、含水状態の相違が熱交換効率に及ぼす影響について検討した。また急冷された粗骨材の品質を確認するために、BS 812に準じて粗骨材破砕試験を行った。

実験は図-1および写真-1に示す、粗骨材冷却筒に液体窒素供給ノズルを設置した装置により行った。使用した粗骨材の寸法は、5~20mm（大井川産）、20~40mm（葛生産）、60~80mm（葛生産）の3種類であり、含水状態としては気乾、表乾、湿潤状態とした。実験の組み合わせを表-1に示す。実験方法は、冷却筒内に投入した粗骨材に所定の液体窒素を供給して冷却した後、粗骨材を40℃の水中に移し、水温の変

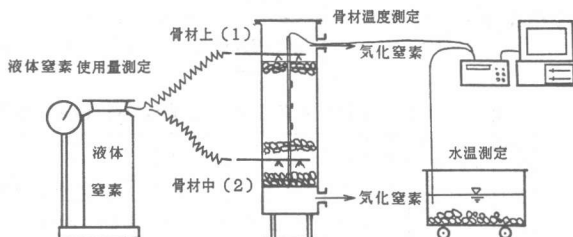


図-1 粗骨材冷却実験概要

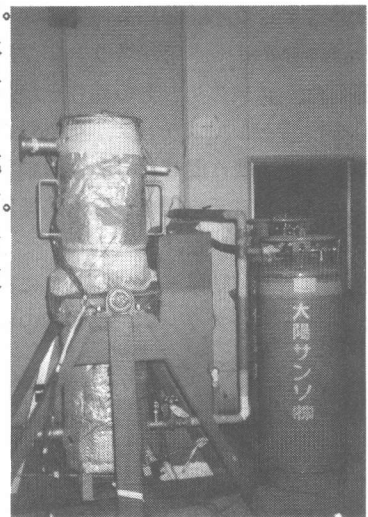


写真-1 粗骨材冷却実験装置

化から熱量を算定し熱交換効率を求めた。熱交換効率の算定式を(1)式に示す。

2-2 実験結果

図-2に粗骨材の粒径および含水状態の相違による熱交換効率を示す。常温の粗骨材と接触してガス化した冷室素ガスを粗骨材空隙中を通過させて、潜熱と顕熱を有効に利用することにより何れの場合も熱交換効率としては概ね70%以上の高い効率が得られた。また粗骨材寸法が小さい程、若干効率が高くなる傾向がある。これは大粒径の粗骨材に比べ、表面積が大きくなるため、冷却エネルギーが効率良く交換された結果と思われる。粗骨材の含水状態による熱交換効率の相違はあまり明瞭ではない。しかし湿潤状態の5~20mm、20~40mmの粗骨材では冷却筒内で凍結現象を呈した。この時の5~20mmの表面水率は約1.7%であり、粗骨材寸法が小さく表面水が多い時は凍結する場合がある。

粗骨材の破碎試験結果を表-2に示す。冷却した粗骨材も冷却しない粗骨材も40t破碎値は同程度であり、液体窒素による冷却が粗骨材の品質に与える影響はほとんどないと考えられる。

3. 冷却した粗骨材を用いたコンクリートの性質および品質

3-1 実験の目的および方法

冷却した粗骨材を使用したコンクリートの性質および品質を確認するために、表-3に示すダム用コンクリートの配合例を参考として、20mmふるいでスクリーニングした配合に修正したコンクリートで、スランプ、空気量、圧縮強度試験を実施した。コンクリートの練り上がり温度は、30℃、15℃、5℃を目標とし、スランプ、空気量の経時変化を30℃の室内で測定した。練り混ぜは100ℓ傾胴型ミキサーを使用した。更に、図-3に示す様な簡易断熱温度上昇試験を実施し冷却効果の確認を行った。

3-2 実験結果

図-4に冷却した粗骨材を用いたコンクリートのスランプ、空気量の経時変化を示す。冷却した

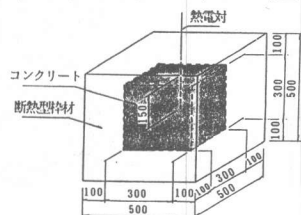


図-3 簡易断熱温度上昇試験概要

表-1 実験の組み合わせ

骨材	粒径	5-20			20-40			60-80			位置
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
含水状態	10kg	○			○			○			(1)
液体窒素投入位置	180秒	○	○	○	○	○	○	○	○	○	(2)

骨材の含水状態 A: 気乾 B: 表乾 C: 湿潤
液体窒素投入位置 (1): 骨材上 (2): 骨材中
○: 実験実施

表面水率
60-80mm 0.2%
20-40mm 0.7%
5-20mm 1.7%

$$\eta = \frac{(\rho \times W_G + W_W) \cdot (X - T_{Wf})}{E \times W_N} \times 100 \quad \dots (1)$$

$$X = \frac{\rho \times T_{Gi} \times W_G + T_{Wi} \times W_W}{\rho \times W_G + W_W}$$

- η : 熱交換効率 (%)
ρ : 粗骨材比熱 (kcal/kg℃)
E : 液体窒素の冷熱量 (100kcal/kg)
W_G : 粗骨材重量 (kg)
W_W : 温水重量 (kg)
W_N : 液体窒素使用重量 (kg)
T_{Wi} : 温水初温 (40℃)
T_{Wf} : 温水終温 (℃)
T_{Gi} : 粗骨材初温 (30℃)

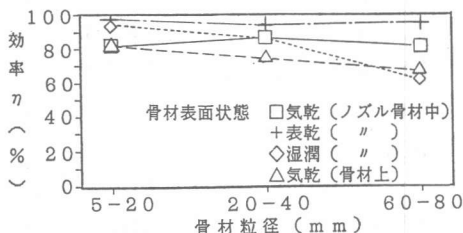


図-2 粗骨材粒径・含水状態と熱交換効率の関係

表-2 粗骨材破碎試験結果 (40t 破碎値 単位%)

粗骨材の状態 骨材種類、寸法	冷 却	無冷却
赤穂市有年地内産砕石 4020	20.4	21.1
青梅産硬質砂岩砕石 2005	20.9	21.2
大井川産川砂利 2505	13.2	13.3

表-3 ダム用コンクリートの配合例 (kg/m³)

粗骨材 最大寸法 mm	スラ ンプ cm	空気 量 %	W/C %	S/a %	水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G		
								5-20	20-40	60-80
80	3~5	2.5 4.5	50	28	105	210	569	520	445	520

※セメントは高炉B種、混和剤は標準添加量使用

粗骨材を使用したコンクリートのスランプは、冷却しない粗骨材を用いたコンクリートのスランプより約5cm大きくなった。これは練り上がったコンクリートに液体窒素を供給して冷却する方法では見られなかった現象であり、同等のコンシステンシー、W/Cのコンクリートを得ようとする場合であれば、単位水量、単位セメント量の低減が可能となるものと考えられる。スランプの経時変化は、何れの温度のコンクリートも同様の傾向を示しており、1時間後のスランプロスが4～6cm程度であった。また、練り上がり温度の相違による空気量への影響はほとんどないと考えられる。

図-5に冷却した粗骨材を使用したコンクリートと冷却しない粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。φ10×20cmの標準養生供試体の圧縮強度は、材令7日ではほとんど変わらない。しかし、材令28日では練り上がり温度の低いコンクリートの方が大きく、簡易断熱温度上昇試験に使用したブロックから切り出したコア供試体による圧縮強度では、その傾向が更に拡大され、練り上がり温度の低下によるコンクリートの強度増加が認められた。

4. 現場施工実験

4-1 実験の目的と方法 粗骨材冷却システムの連続運転稼働状態の試行、確認と液体窒素使用量の確認を行うために、建設中のダムサイトにおいて、バッチャープラントを使用した粗骨材の冷却およびコンクリートの製造実験を実施した。粗骨材冷却システムとコンクリート製造設備の一例を図-6に示す。冷却する対象としては、表-4に示す配合のうちの外部配合、20～40mmの粗骨材（赤穂市有年地内産）とした。液体窒素の供給はプラント操作室内に設置した供給制御盤により行った。コンクリートの練り上がり温度の測定は、バッチャープラントのグラントホッパー内にコンクリートが投下された直後に熱電対を挿入して行った。練り上がり温度の目標低下量を10℃とした。

4-2 実験結果 プラント内のグラントホッパーにおけるコンクリートの練り上がり温度を連続68バッチ測定した結果を図-7に示す。実験開始後、数バッチは冷却しない

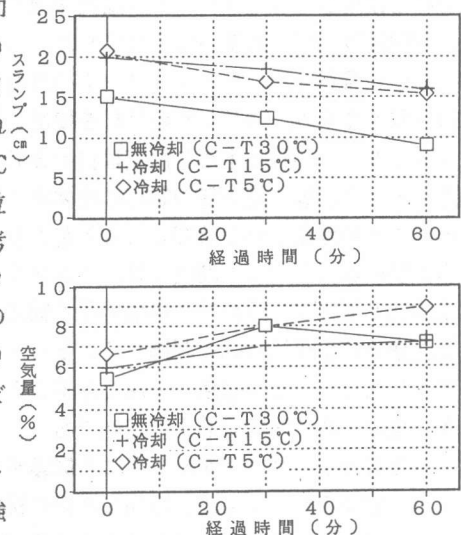


図-4 スランプおよび空気量の経時変化

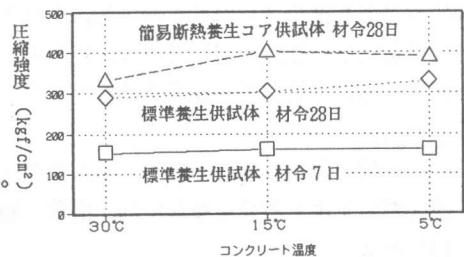


図-5 圧縮強度試験結果

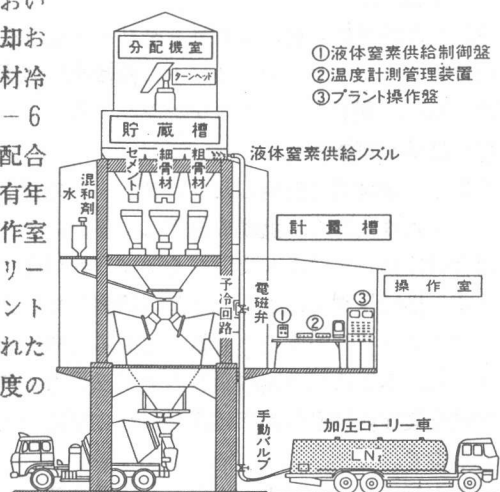


図-6 粗骨材冷却システムとコンクリート製造設備の一例

粗骨材を使用したコンクリートの温度を測定し、目標練り上がり温度の設定に供した。冷却しない粗骨材を用いたコンクリートの温度は21～24℃であり、冷却した粗骨材を使用したコンクリートの練り上がり温度は14±3℃程度であった。温度低下量の制御は液体窒素供給バルブの開度と供給時間によって定まり

表-4 ダムコンクリートの配合

配合 種別	骨材 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	2005
									8040	4020
A内部	80	3～5	3.5±1	80	26	120	150	534	616	459
B外部	80	3～5	3.5±1	60	26	120	200	528	449	599
C鉄筋	40	6～10	4±1	54.8	37	159	290	679	—	577
セメント				60	100	298	496	1309	—	—

、本実験におけるバルブ開度では、コンクリート温度を約10℃低下させるための供給時間は約60秒であった。液体窒素供給時間を制御することによって、目標とした練り上がり温度が確保できることが確認でき、更に、所要時間は数十秒程度であり、コンクリートを製造するサイクルタイムにも影響を及ぼさないことが明らかとなった。冷却した粗骨材を用いたコンクリート温度は測定時の熱電対位置が、冷却した粗骨材の近傍であるか否かによって、各バッチ

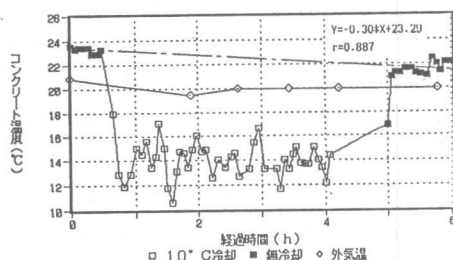


図-7 コンクリートの練り上がり温度

間で±3℃程度のばらつきがあった。また1m³のコンクリートを1℃低下させるための液体窒素使用量は7～9kg/m³℃であり、練り上がったコンクリートに直接供給する方法(12～14kg/m³℃)等に比較して、極めて効率が良いことが明らかとなった。

5. まとめ

以上の検討結果をまとめると、概ね次のようである。

- ①液体窒素による粗骨材冷却では、潜熱・顕熱を有効に利用することにより、高い熱交換効率が得られる。
- ②粗骨材寸法が小さいと、熱交換効率は若干高くなる傾向を示すが、表面水が多い場合には凍結する場合がある。
- ③冷却した粗骨材を使用してコンクリート温度を低下させたことによりスランプが増大した。これは練り上がったコンクリートに直接液体窒素を供給して冷却した場合には見られなかった現象であり、同等のコンシステンシー、W/Cのコンクリートであれば単位水量、単位セメント量の低減が可能となる。
- ④冷却した粗骨材を使用したコンクリートの材令28日強度は、冷却しない粗骨材を用いたコンクリートより大きく、温度の低下によるコンクリートの品質改善効果が認められた。
- ⑤粗骨材冷却システムが支障なく連続運転可能であることが明らかとなり、10℃冷却の場合は液体窒素供給量制御により±3℃の範囲でコンクリート温度を低下できることが確認できた。
- ⑥1m³のコンクリートを1℃低下させるための液体窒素使用量は7～9kg/m³℃であった。

最後に、本工法は大陽酸素㈱および三菱重工業㈱との共同開発であり、実験に御協力頂いた兵庫県企業庁西播磨新都市建設局殿ならびに下筋原ダム特別共同企業体の関係各位に深謝の意を表します。

<参考文献>1) 十河茂幸, 中根淳, 浅井邦茂, 直井彰秀: 液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986, pp329～332
2) 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, 第42回セメント技術大会(昭和63年), 1988, pp571～574