

論文

[1053] 液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの性質に関する研究

正会員 ○栗田 守朗 (清水建設技術研究所)
 正会員 桑原 隆司 (清水建設技術研究所)
 正会員 後藤 貞雄 (東京ガス工務部)
 峰岸 孝二 (東京ガス工務部)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化に伴いセメントの水和熱による温度ひびわれ制御が重要な問題になっている。この温度ひびわれを制御する方法として液体窒素を用いてコンクリートの練り上がり温度、打込み温度を下げるブレーキング工法に関する研究開発が日本でも進められている〔1〕。液体窒素を用いてコンクリートの温度を下げる方法としては、練りませ中に液体窒素を噴入しながらコンクリートを冷却する方法や練りませ後のコンクリートに液体窒素を噴入し冷却する方法が一般的である。しかし、コンクリートの構成材料である細骨材に着目し、液体窒素により極低温に冷却した細骨材を用いてコンクリートの練り上がり温度を下げる方法について検討した例は見当たらない。

本研究は、液体窒素によって冷却した細骨材（以下、冷却砂と記す）を用いて練りませたコンクリートの諸特性について実験的に検討したものである。

2. 冷却砂の製造方法

冷却砂は、コンクリートの主材料である細骨材と -196°C の液体窒素を練りませることによって製造する。まず、表面水を調整した細骨材をミキサに投入し、次に、細骨材を攪拌しながら液体窒素を所定の量噴入する。冷却砂の製造に使用したミキサはボルテクス型の強制練りミキサであり、ミキサ全面に断熱材を貼り付けることによって保冷した。また、液体窒素の排ガスはダクトをミキサに取り付けて排気した。冷却砂の製造装置を写真-1に示す。

この冷却砂製造装置を用いることによって、かたまり（冷却砂が団子状に成る状態）のほとんど無いさらさらした極低温の冷却砂を製造することが可能となった。また、冷却砂の温度は、液体窒素の噴入量を調整することによって任意に得ることが可能となった。

3. 実験概要

冷却砂を用いたコンクリートに関する実験では、冷却砂の性状に関する試験およびコンクリートに関する諸試験を実施した。

3. 1 冷却砂の性状に関する試験

液体窒素を用いて細骨材を冷却した場合の細骨材に及ぼす影響を調べるために、冷却前後の細骨材の粒度分布、比重、吸水率の試験を実施した。なお、細骨材の表面水率に及ぼす影響については3. 2において試験を行った。



写真-1 冷却砂製造装置

3. 2 冷却砂を用いたコンクリートに関する実験

(1) 要因と水準

実験では、水セメント比を一定とした配合において、細骨材を液体窒素で冷却した場合（冷却砂の状態）と冷却しない場合（約20℃、常温砂の状態）について比較検討した。また、細骨材は一般には表面水を含んでいる状態で使用されるために、細骨材の表面水を表面乾燥状態（0%）から10%程度まで変化させて試験に供した。なお、冷却砂の温度を変えた試験も併せて実施した。表-1に要因と水準を、表-2に実験の組合せを示す。

表-1 要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	50
細骨材の状態	常温, 冷却
細骨材の表面水率 (%)	0(表乾), 4, 7, 10

表-2 実験の組合せ

試験 №	1	2	3	4	5	6	7	8
細骨材の表面水率 (%)	0	0	4	7	10	4	4	7
細骨材の目標温度 (℃)	20	-30			-50	-70	-50	

(2) 使用材料および配合

実験で使用した材料を以下に示す。

セメント：普通ポルトランドセメント

(比重3.16)

細骨材：鬼怒川産川砂 (比重2.59, 粗粒率2.90)

粗骨材：鬼怒川産川砂利 (比重2.61, 粗粒率6.89)

混和剤：AE剤

また、コンクリートの配合は表-3に示すとおりである。

(3) 練りませ方法

コンクリートの練りませは、100ℓのパン型強制練りミキサを用い、練りませ時間は練りませ水投入後90秒とした。

(4) コンクリートの試験項目

フレッシュコンクリートの試験：スランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積重量、ブリージング量等をそれぞれJISの方法に準じて試験した。

硬化コンクリートの試験：作製した供試体（φ10cm×h20cm）の圧縮強度試験は標準水中養生を行い、所定の材令（3日、7日、28日）でそれぞれJISの方法に準じて行った。

マスコンクリートとしての温度履歴・圧縮強度特性試験：マスコンクリートの熱的シミュレーションシステムおよび強度管理システム〔2〕を用いて試験を行った。マスコンクリートの熱的シミュレーションシステムは制御盤と4面断熱槽から成っており、断熱槽内にコンクリートを打ち込むことによって最小部材寸法160cmのマッシュな構造体の温度変化を予測した。

強度管理システムは制御ボックスと加熱ユニットから成っており、上記マスコンクリート部材に生じた温度の測定値をそのまま自動的に供試体に与え、所定の材令で圧縮強度試験を実施した。本試験では、常温砂を用いたコンクリート（練り上がり温度約20℃）および冷却砂を用いたコンクリート（練り上がり温度

表-3 コンクリートの配合

約10℃)の2種類について実施し、圧縮強度試験は材令1, 3, 7, 14, 28, 56, 91日で実施した。

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	A.d.
25	50	40	12	4	150	300	738	1119	0.045

4. 実験結果および考察

4. 1 冷却砂の性状

細骨材を液体窒素を用いて冷却した場合の冷却前後の性質を試験した結果を図-1, 2および3に示す。冷却しない細骨材(約20℃, 常温砂と記す)については表乾状態(表面水率0%)の場合について試験を行い, 冷却した細骨材(冷却砂)については表乾状態(表面水率0%)から表面水率10%程度までの間で試験を行った。

冷却前後における細骨材の粒度曲線は, 図-1に示すように, 常温砂と冷却砂ではほとんど変化は見られず, また, 表面水率による影響も認められなかった。

冷却前後の細骨材の粗粒率を比較すると, 冷却前の常温砂では2.90であるのに対し冷却砂では2.85~2.96(平均値: 2.90)でありほぼ同じである。したがって, 液体窒素を用いて細骨材を冷却することにより, 細骨材が割れ細くなるなどの問題は認められなかった。

細骨材の冷却前後における比重の試験結果を比較すると, 図-2に示すように, 常温砂では2.59であるのに対し冷却砂では2.58~2.59(平均値: 2.59)であり両者には差は見られない。

細骨材の冷却前後における吸水率の試験結果を比較すると, 図-2に示すように, 常温砂では2.27%であるのに対し冷却砂では2.24~2.29%(平均値: 2.27%)であり両者には顕著な差は認められない。

細骨材の冷却前後における表面水率の試験結果を表-4および図-3に示す。同一の表面水を有する細骨材について冷却前後に試験しているが, 各表面水率において両者には差は見られず, 表面水を有する細骨材を液体窒素を用いて冷却することによっても表面水率に変化は見られない。

以上の結果から, 液体窒素を用いて細骨材を冷却した場合には, 細骨材の粒度分布, 比重, 吸水率および表面水率にはほとんど変化は認められない。

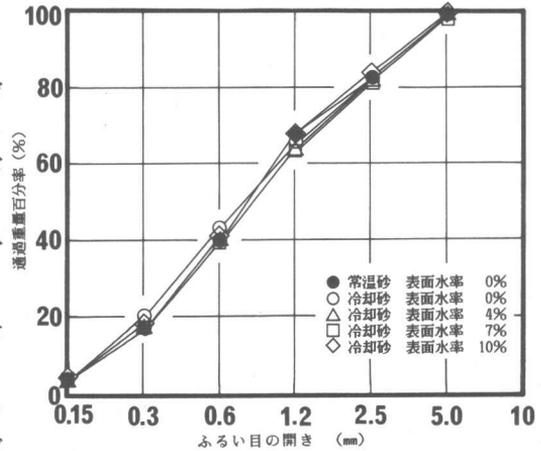


図-1 細骨材の粒度曲線

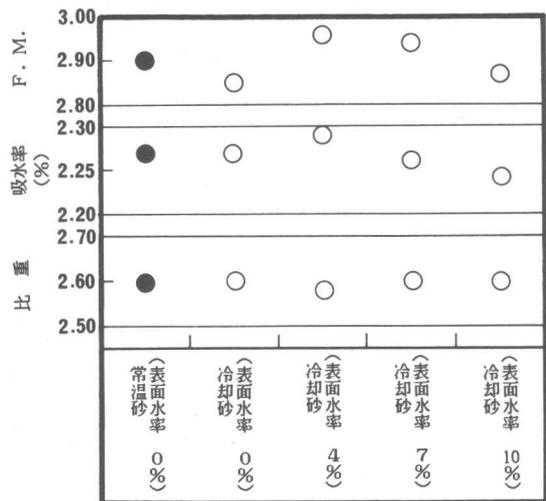


図-2 細骨材の試験結果

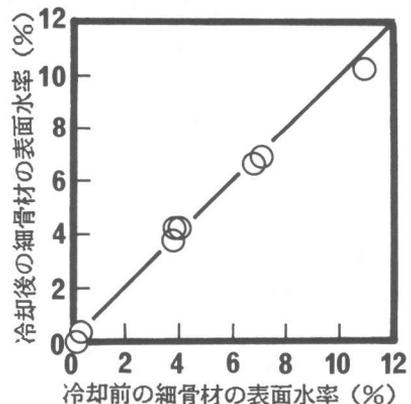


図-3 冷却前後の表面水率の比較

4. 2 フレッシュコンクリートの特性

冷却砂を用いて製造したコンクリートのフレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。

(1) コンクリートの温度

冷却砂を用いて製造したコンクリートの温度は、細骨材が有する表面水率および冷却砂の温度によって異なり、冷却砂の温度が同じであれば細骨材が有する表面水率が多いほどコンクリートの練上がり温度は低くなる。また、コンクリートの練上がり温度の低減量は試験No.7においては20℃程度となり、従来のプレケーリング工法よりも大幅に低減することが可能となった。

(2) スランプおよび空気量

常温砂および冷却砂を用いて練り混ぜたコンクリートの表面水率とスランプの関係を図-4に示す。常温砂を用いたコンクリートのスランプの平均値は10.8cmであり、冷却砂を用いたコンクリートのスランプはばらつきはあるものの表面水率に変化しても顕著な差は認められない。

常温砂および冷却砂を用いて練り混ぜたコンクリートの練り上がり温度とスランプの関係も図-4と同様であり、コンクリートの練り上がり温度が低下しても常温砂を用いた場合と比べて顕著な差は見られない。

空気量についてもスランプの場合と同様な関係が見られ、冷却砂を用いて練り混ぜたコンクリートの空気量は常温砂を用いたコンクリートのそれとほとんど変わらない。

(3) ブリージング特性

常温砂および冷却砂を用いて練り混ぜたコンクリートのブリージング試験結果を図-5に示す。冷却砂を使用したコンクリートのブリージング量は、常温砂を使用したコンクリートと比較すると全ての場合において少ない結果が得られている。また、そのブリージング特性は冷却砂の表面水率が大きいほど小さくなる傾向が認められる。その理由は現時点

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 No	細骨材の表面水率 (%) *	細骨材の温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
1	0	18.9	10.5	4.1	20.7
	0	19.9	10.0	5.0	22.7
	0	19.4	12.0	4.3	23.2
2	0.3/0.3	-35.2	12.1	3.1	11.6
	0.1/0.0	-35.2	10.7	4.7	13.4
3	3.9/4.1	-25.3	8.8	4.5	9.5
4	6.6/6.5	-36.0	11.0	5.6	7.1
5	10.6/10.0	-38.0	10.0	3.9	3.2
6	3.9/4.1	-51.5	7.0	4.2	7.6
7	3.8/4.1	-75.5	9.6	3.6	1.1
8	6.9/6.7	-47.2	11.9	3.7	4.0

* 冷却前の細骨材の表面水率/冷却後の細骨材の表面水率

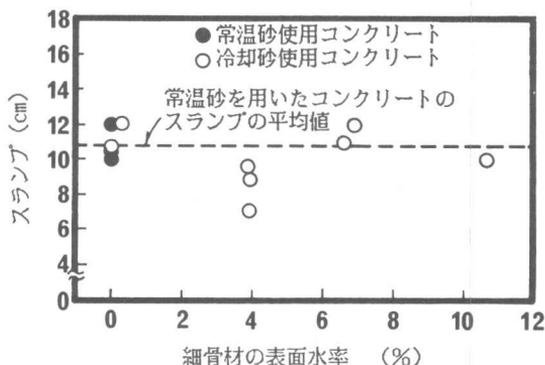


図-4 細骨材の表面水率とスランプの関係

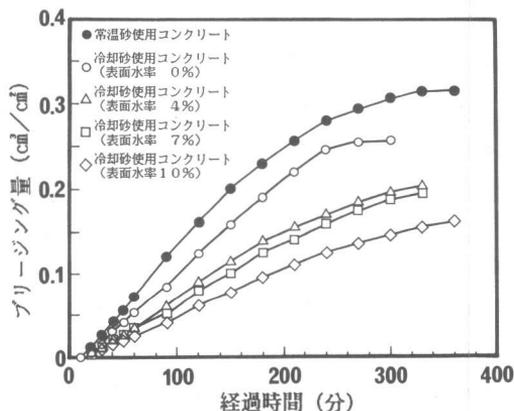


図-5 ブリージング試験結果

では明らかではなく、今後更に検討を加える必要があると考えられる。

以上の結果から、冷却砂を用いて製造したコンクリートのフレッシュな状態のスランプおよび空気量は常温砂を使用したコンクリートとほぼ同様であると考えられる。ただし、ブリージング特性に関しては冷却砂を用いたほうが常温砂を用いた場合よりも小さくなる傾向が認められる。

4. 3 硬化コンクリートの特性

冷却砂を使用して練り混ぜたコンクリートの硬化後の試験結果を図-6, 7および8に示す。図-6によると、常温砂を用いたコンクリートの圧縮強度の平均値は、材令3日, 7日, 28日でそれぞれ134, 222および324 kgf/cm²であり、冷却砂を用いたコンクリートの場合もほぼ同等の圧縮強度を有していることが認められる。また、冷却砂の温度が異なることによってコンクリートの練り上がり温度は変化するが、練り上がり温度が最も低い試験No.7 (1.1℃)においてもその圧縮強度は常温砂を用いたコンクリートとほぼ同等であることが分かる。

図-7によると、冷却砂を用いて製造したコンクリートの圧縮強度は冷却砂が有する表面水率が変化しても常温砂を用いたコンクリートとほぼ同等であると言える。

図-8は圧縮強度の発現状況を示したものであるが、冷却砂を用いたコンクリートの場合の圧縮強度の伸びは表面水率が異なっても常温砂を用いたコンクリートの圧縮強度の伸びとほぼ同様の傾向を示していることが認められる。

以上の結果から、冷却砂を用いて製造したコンクリートの硬化後の圧縮強度特性は、常温砂を用いて製造したコンクリートと同様な特性を有しているものと判断できる。

4. 4 マスコンクリートとしての特性

常温砂を用いて製造したコンクリートと冷却砂を用いてプレクーリングを行ったコンクリートのマスコンクリートとしての温度履歴の比較を図-9に示す。常温砂を用いたコンクリートの打込み温度は22.8℃であり、冷却砂を用いた場合は11.0℃であった。

常温で打込んだマスコンクリートの最高温度が60.0℃であるのに対して冷却砂を用いた場合は最高温度は52.6℃となっており、プレクーリングによって最高温度が大幅に低減されている。

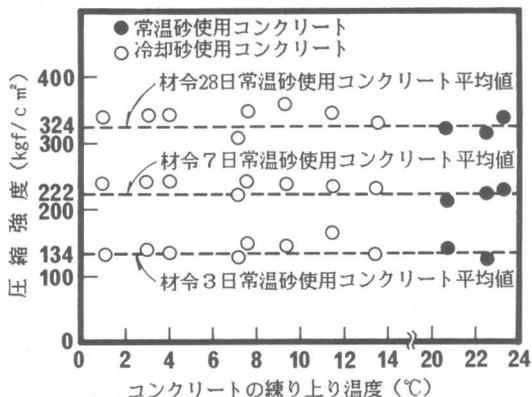


図-6 コンクリートの練り上がり温度と圧縮強度の関係

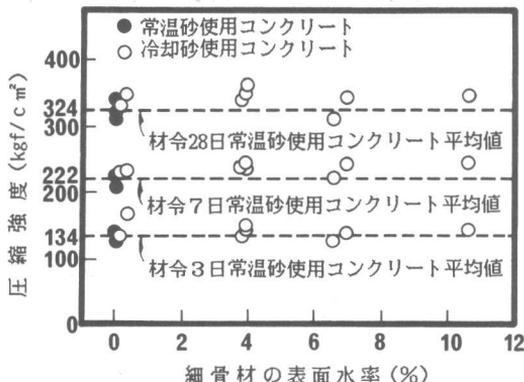


図-7 細骨材の表面水率と圧縮強度の関係

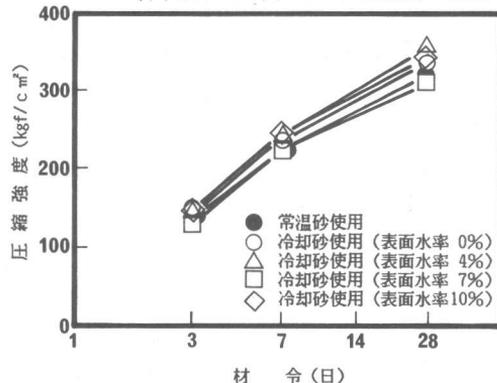


図-8 圧縮強度発現状況

冷却砂を用いたマスコンクリートでは温度上昇期や温度降下期の温度変化速度がゆるやかになるとともに部材中心部と表面部の温度差も小さくなっている。

常温砂を用いて製造したコンクリートと冷却砂を用いて製造したコンクリートの圧縮強度発現の比較を図-10に示す。冷却砂を用いたマスコンクリートの圧縮強度は材令7日程度までは常温砂を用いた場合よりも小さい値を示しているが、材令14日以降長期材令に向かっては常温砂を用いた場合の圧縮強度よりも高い値を示している。

以上の結果から、冷却砂を用いたプレクーリングは、温度ひびわれの制御に有効であるとともに、長期材令における圧縮強度の改善にも効果があるものと推察される。

5. まとめ

液体窒素により極低温に冷却した細骨材を用いて練り混ぜたコンクリートの諸特性について常温砂を用いて練り混ぜたコンクリートと比較検討を行った。本実験の範囲で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 液体窒素を用いて冷却した細骨材の粒度分布、比重等の諸性状は、冷却しない場合の細骨材のそれとほぼ同じである。
- (2) 冷却砂を用いて製造したフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの特性は常温砂を用いた場合と比較しても顕著な差は認められない。ただし、ブリージング特性に関しては冷却砂を用いた場合のほうが小さくなる傾向を示す。
- (3) 冷却砂を用いてプレクーリングを行ったコンクリートは、マスコンクリートの温度ひびわれの制御に有効であると共に、長期材令における強度発現の改善にも効果があるものと考えられる。

本研究は、東京冷熱産業㈱との共同研究で行った。

〔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性質, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986, pp.329-332
- (2) 桑原隆司, 安斉俊哉, 森永 繁: マスコンクリートの強度管理方法と管理装置の研究, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, 1987, pp.79-84

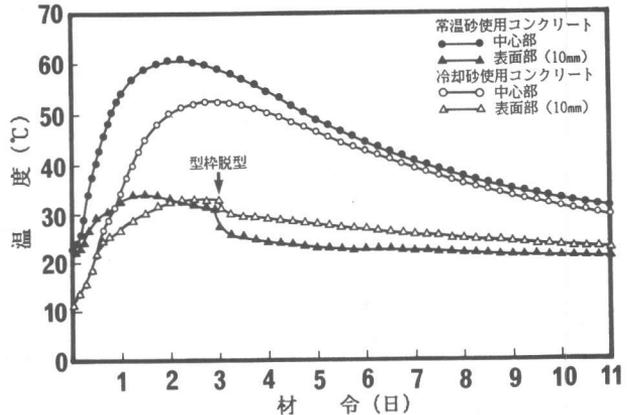


図-9 プレクーリングが温度履歴に与える効果

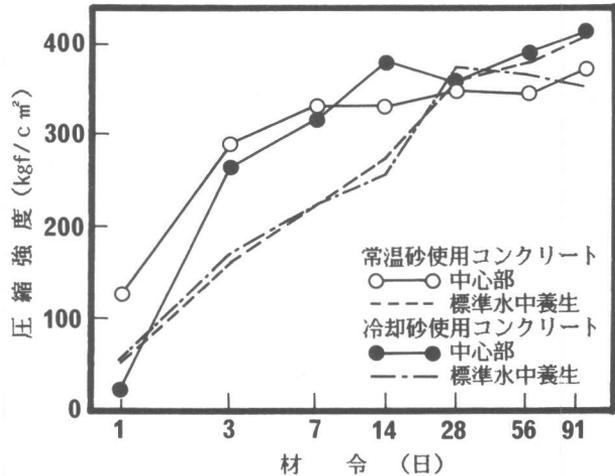


図-10 プレクーリングが強度発現に与える影響