

論文

[1028] 液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの製造に関する研究

正会員 ○木村克彦 (清水建設技術本部)
 正会員 小野 定 (清水建設土木本部)
 正会員 後藤貞雄 (東京ガス工務部)
 峯岸孝二 (東京ガス工務部)

1. まえがき

近年、長大橋の下部工、LNG地下式貯槽の底版、側壁、原子力発電所のベースマットなど、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構造物の品質を確保するうえで重要な検討課題となっている。このような温度ひびわれ制御対策の一方法として、プレケーリング工法があり、冷水や氷によるプレケーリングが古くから実施されている。また国内において、コンクリート練りませ中または練りませ後に、液体窒素を用いたプレケーリングも実施されるようになってきた〔1〕。しかし、コンクリート練りませ前にその構成材料である砂を液体窒素により極低温(0~-100℃)に冷却し、コンクリートをプレケーリングする方法については、研究されていないのが現状である。本報告では、コンクリート製造プラントに冷却砂製造装置を組込んで行なった冷却砂および冷却砂を用いたコンクリートの製造実験結果について、冷却効率および冷却コンクリートの特性について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料の一覧を表-1に示した。粗骨材は、碎石2010と碎石1005を7:3で混合して使用した。また混和剤としてAE剤を用いたのは、コンクリート温度の違いによる混和剤の減水効果の差などの影響をさけるためである。たとえば、空気量が一定となるようにAE減水剤を添加して冷却砂を用いたコンクリートを練りませた場合、常温コンクリートと冷却コンクリートのスランプの差が、混和剤の添加量の差によるものか、冷却砂を用いたことによるものであるか分離できなくなる恐れがあるためである。コンクリートの配合を表-2に示した。冷却コンクリートの場合にはAE剤の添加量を若干減じて空気量が常温コンクリートの場合と同じ $4 \pm 1\%$ となるように調整した。

2.2 冷却砂および冷却コンクリート

製造方法および装置

冷却砂は、写真-1に示すように周囲を断熱材で被覆された冷却砂製造装置(容量0.5m³)に所定量の砂を投入し攪拌しているところへLN₂を噴入することにより製造する。すなわち、砂の表面水は凍結し、さらに、砂粒子の温度をマイナス数十度に冷却することができる。

冷却コンクリートは、写真-1のように設置したグラス

表-1 使用材料

材料	種類	品質	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16	
骨材	細骨材(海砂)	比重 2.49、 FM 2.56~2.85	広島県瀬戸田町 高根島産
	粗骨材(碎石2010)	比重 2.72、FM 6.90	広島県府中市
	粗骨材(碎石1005)	比重 2.71、FM 6.73	荒谷町産
混和剤	AE剤	7-11系	

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 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/m ³)				
					W	C	S	G	Ad.
20	8±2.5	4±1	58	47.3	198	340	770	934	0.02

ウールで保冷した水平2軸強制練りミキサー（容量1 m³）を用いて約60秒練りまぜて製造した。冷却砂は、冷却砂製造装置で製造し、直接コンクリートミキサーに投入した。コンクリートの練りまぜ量は捨バッチ以外は、1バッチ1 m³とした。

2.3 試験・測定項目

(1) 冷却砂の試験測定項目

砂の冷却前後において、砂温度、表面水率、粒度について試験・測定を行った。

(2) コンクリートの試験・測定項目

a. フレッシュコンクリート：スランプ、空気量、単位容積重量、コンクリート温度等をそれぞれのJISの方法などに準じて試験した。

b. 硬化コンクリートの試験：圧縮強度は、 $\phi 10 \times 20$ cmの供試体を作製し、所定材令（7、28、91日）まで水中養生しJISの方法により試験した。

2.4 計測項目および方法

(1) 温度

各材料温度は、貯蔵槽に設置したC-C熱電対で計量直前に測定した。冷却砂は、試料を発泡スチロールの箱にとりPt抵抗体温度計およびC-C熱電対で温度が安定するまで約3～5分間測定した。コンクリート温度は、コンクリートホッパー内でC-C熱電対により測定した。

(2) 冷却砂製造装置およびコンクリートミキサーの温度

冷却砂製造装置および窒素ガス温度は、冷却砂製造中は断熱材の内外面およびダクトに設置したC-C熱電対を用いて10秒間隔で測定した。コンクリートミキサー温度は、コンクリート練りまぜ前後に保冷材の内外面に設置したC-C熱電対により測定した。

(3) LN₂ 噴入量

LN₂ 噴入量は配管の途中に設置した差圧流量計により測定した。流量計の測定範囲はLN₂ で0～600 kg/分である。LN₂ は、温度によって比重が異なるので、流量計設計時のLN₂ 温度に対して供給したLN₂ 温度でのLN₂ 密度補正を行った。

2.5 冷却砂および冷却砂を用いたコンクリートに関する実験要因および水準

冷却砂の製造実験では、要因としてLN₂ 噴入量、LN₂ 噴入時間、1バッチ当りの砂量を取り上げ、その水準数を3～4とした。

冷却砂を用いたコンクリートに関する実験要因および水準は表-3、実験の組合せは表-4のとおりとした。なお砂の表面水率は、実験期間を通じて、極力一定となるようにできる範囲で調整したが途中で表面水率の大きい砂が供給されたため4～8%となった。



写真-1 冷却砂製造装置

表-3 実験要因および水準

要因	水準数	水準
砂表面水率	1	自然状態での表面水率
砂温度*	4	常温、-10℃、-20℃、-50℃
配合	1	W/C=58%
材料投入順序	1	砂利、砂→セメント→水

* 目標温度である

表-4 実験の組合せ

試験シリーズNo	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	L ₃ M
砂目標温度(℃)	常温	-10	-20	-50	-50
冷却砂の割合(%)*	0	100	100	100	50

* 練りまぜに用いた砂重量に対する冷却砂重量の割合

2.6 データ整理方法

(1) 用いる定数

冷却砂製造効率およびコンクリート練り上り温度などの計算に用いた定数は表-5のとおりである。

(2) 冷却砂製造効率

冷却砂製造効率 η_s を式(1)で定義した。

$$\eta_s = Q_s / Q_{LN_2} \quad (1)$$

$$Q_s = (\text{表乾砂が持っている熱量}) + (\text{表乾砂が吸水している水の潜熱}) + (\text{表面水の持っている熱量}) + (\text{表面水の潜熱})$$

$$= C_s(T_{S0} - T_{S1})W_s + q_i \gamma_s W_s / (1 + \gamma_s) + (C_w T_{S0} - C_i T_{S1})S_r W_s + q_i S_r W_s \quad (2)$$

$$Q_{LN_2} = Q_{LN_2} W_{LN_2} \quad (3)$$

ここに η_s : 冷却砂製造効率 Q_s : 砂の受取った熱量 (kcal)

Q_{LN_2} : 噴入したLN₂の持っている熱量 (kcal) T_{S0}, T_{S1} : 冷却前後の砂温度 (°C) ($T_{S1} < 0^\circ\text{C}$) C_s : 表乾砂の比熱 (kcal/kg°C) C_w, C_i : 水および氷の比熱 (kcal/kg°C) γ_s, S_r : 砂の吸水率および表面水率

W_s : 冷却した表乾砂重量 (kg) W_{LN_2} : 噴入したLN₂量 (kg)

Q_{LN_2} : 1kgのLN₂が持っている熱量 (kcal/kg)

q_i : 氷の融解熱 (kcal/kg)

(3) コンクリート練り上り温度

コンクリート練り上り温度の計算値は、式(4)で与える。

$$T_{PC} = (Q_{mat} + H) / (C_{CON} W_{CON}) \quad (4)$$

$$C_{CON} = (C_g W_g + C_s W_s + C_c W_c + C_w W_w) / W_{CON} \quad (5)$$

$T_s \geq 0^\circ\text{C}$ の場合

$$Q_{mat} = C_g W_g T_g + C_s W_s T_s + C_c W_c T_c + C_w (W_w - S_r W_s) T_w + C_w S_r W_s T_s \quad (6)$$

$T_s < 0^\circ\text{C}$ の場合

$$Q_{mat} = C_g W_g T_g + C_s W_s T_s + C_c W_c T_c + C_w (W_w - S_r W_s) T_w + C_i S_r W_s T_s - q_i W_s \{S_r + \gamma_s / (1 + \gamma_s)\} \quad (7)$$

ここに T_{PC} : コンクリート練り上り温度の計算値 (°C) Q_{mat} : コンクリート1m³当りの材料が持っている熱量 (kcal/m³) C_{CON} : コンクリートの比熱 (kcal/kg°C) W_{CON} : コンクリートの単位容積重量 (kg/m³) H : コンクリートの練りませ時のミキサー摩擦熱など (=550 kcal/m³) C_g, C_c : 砂利およびセメントの比熱 (kcal/kg°C) T_g, T_s, T_c, T_w : 砂利、砂、セメント、および水の温度 (°C) W_g, W_s, W_c, W_w : 砂利、砂、セメント、および水の単位重量 (kg/m³)

コンクリートの単位容積重量は、実測値がある場合には実測値を用い、実測値がない場合には示方配合から求めた値とする。なお、コンクリートの比熱は、示方配合などから求めた値を用いた。

(4) コンクリート1m³を1°C冷却するのに必要なLN₂量

表-5 計算に用いた定数

材料名	項目	単位	数値	備考
LN ₂	比熱	kcal/kg°C	0.248	気体
	気化熱	kcal/kg	48.8	
	LN ₂ の持っている熱量 Q_{LN_2}	kcal/kg	100 *	(-196~10°C)
水	比熱 C_w	kcal/kg°C	1.0	水
	比熱 C_i	kcal/kg°C	0.48	氷
	融解熱 q_i	kcal/kg	80	
セメント	比熱 C_c	kcal/kg°C	0.2	
砂	比熱 C_s	kcal/kg°C	0.2	表乾砂
	吸水率 γ_s	%	3.2	
砂利	比熱 C_g	kcal/kg°C	0.2	
コンクリート	比熱 C_{CON}	kcal/kg°C	0.27	

* $Q_{LN_2} = 0.248 \times (196 + 10) + 48.8 = 99.9 \text{ kcal/kg} \approx 100 \text{ kcal/kg}$

$$W_{LN2req} = W_{LN2} / (T_{PC}' - T_{PM}) \quad (8)$$

ここに W_{LN2req} : コンクリート 1 m^3 を 1°C 冷却するのに必要な LN_2 量 (kg)

W_{LN2} : コンクリート 1 m^3 当りの砂冷却に用いた LN_2 量 (kg) T_{PC}' : 冷却コンクリートにおいて砂温度を冷却前の砂温度に置換えた場合の常温コンクリートの練上り温度の推定値 ($^\circ\text{C}$) (式(4)で与える) T_{PM} : 冷却砂を用いたコンクリートの練上り温度の実測値 ($^\circ\text{C}$)

3. 実験結果およびその考察

3.1 冷却砂製造実験

(1) 冷却砂の物理的性質

砂を LN_2 により冷却した場合の冷却前後における砂の粗粒率の平均値はそれぞれ 2.69 および 2.77 ($n=6$) であり、また、冷却前後における含水率の差の平均値は 0.6% ($n=152$) であった。なお冷却砂の含水率は 7.6~11.3% であった。このことから、砂を極低温に冷却しても砂が熱衝撃によるわれなどで粒度変化せず、含水率も冷却によりほとんど変わらないと考えられる。

(2) 冷却砂製造効率

冷却砂製造効率 η_s を式(1)から算定した結果 η_s の平均値は 88.5% であり、その標準偏差は 7.6% であった。なお、冷却砂の温度は $-1 \sim -131^\circ\text{C}$ の範囲であった。このように冷却砂製造効率がよいのは、砂粒子が小さいため熱交換率がよいためであると推定できる。

3.2 冷却コンクリートの性質

(1) フレッシュコンクリート

スランブの試験結果を表-6に示した。表-6からコンクリートの冷却温度が大きいほどスランブが大きくなる傾向が認められる。同一配合とした場合、コンクリート温度が低い方が高い場合よりスランブが大きくなる傾向があるが、冷却砂の表面に存在する小さな氷のまわりにセメント粒子が附着することによって、セメントの分散性がよくなることもスランブが大きくなる理由の一つと考えられる。このことは、ブレーキングに氷を用いた場合の試験結果などからも推定できる〔2〕。常温および冷却コンクリートの空気量の試験結果は平均値でそれぞれ 4.6% ($n=6$) および 4.8% ($n=26$)、その標準偏差はともに 0.39% と同じであった。このことから、常温および冷却コンクリート間で空気量の差はないと考えられる。

(2) 硬化コンクリート

常温および冷却コンクリートの圧縮強度の試験結果を図-1に示した。この結果から冷却コンクリートの圧縮強度は常温コンクリートに比較してやや大きいようである。

3.3 コンクリート温度の実測値と計算値の比較

コンクリートの練上り温度の実測値 T_{PM} と計算値 T_{PC} の関係を示したのが図-2である。コンクリート練上り温度の実測値と計算値の関係を回帰した結果は図中に示したとおりであり、相関係数は

表-6 スランブ測定結果

コンクリート種類	n	\bar{x} (cm)	\sqrt{v} (cm)	備考
常温コンクリート	6	8.2	2.5	
冷却コンクリート	22	13.2	1.9	冷却砂100%
	4	7.7	0.6	冷却砂50%

n : データ数 \bar{x} : 平均値 \sqrt{v} : 標準偏差

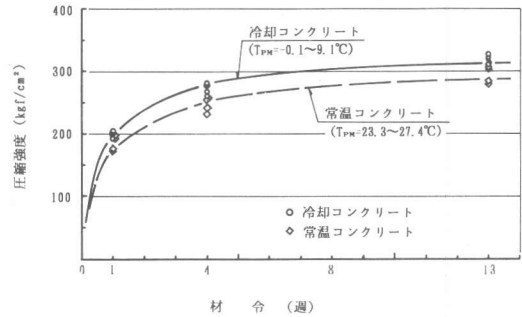


図-1 圧縮強度の経時変化

0.997 と高い。図示のように常温においては、コンクリート温度の計算値は実測値とよく一致しているが、コンクリート温度が低くなるにつれて、計算値は実測値より低くなっている。この原因の一つは、コンクリート温度が低くなるほど外気との温度が大きくなり、練りませ中の熱ロスが大きくなることが考えられる。図-2をコンクリート練り温度の実測値と計算値の比 T_{PM}/T_{PC} に着目して再整理した結果を図-3に示した。常温では、 T_{PM}/T_{PC} の値は1.03とほぼ1に近く、計算値と実測値はほぼ等しい。計算値 T_{PC} が約15℃では T_{PM}/T_{PC} の値は約1.13であり、約10%実測値の方が計算値より高い。計算値 T_{PC} が0℃~6℃では、 T_{PM}/T_{PC} の値は1.3~3.9と大きな幅をもっている。このように、コンクリート温度が低くなるほど T_{PM}/T_{PC} の値が大きくなるのは、熱ロスなどの影響で計算値と実測値の差が大きくなり、また分母である計算値そのものが小さくなるためであると考えられる。以上のことから、冷却コンクリートの練り温度を計算値から推定するには、計算値が10~20℃では、計算値に1.1、計算値が0~10℃では計算値に1.7を乗じることによって算定しても実用的には大きな差はないと考えられる。

3.4 コンクリート1m³を1℃冷却するのに必要なLN₂量

図-4にコンクリート1m³を1℃冷却するのに必要なLN₂量 W_{LN2req} とコンクリート温度低減量 ΔT_p との関係を示した。なお、連続練りした最初の2バッチのデータは後述する理由により除いている。1バッチ当りの冷却砂量の少ない混合砂使用時を除いた、冷却砂のみを用いた場合の W_{LN2req} の平均値は8.4kg/m³℃、その標準偏差は0.64kg/m³℃である。 W_{LN2req} は、コンクリート温度低減量が大きいほど少なくなる傾向があるが、相関係数の値が0.63と比較的小さいことなどから、現在のデータだけでは W_{LN2req} が ΔT_p

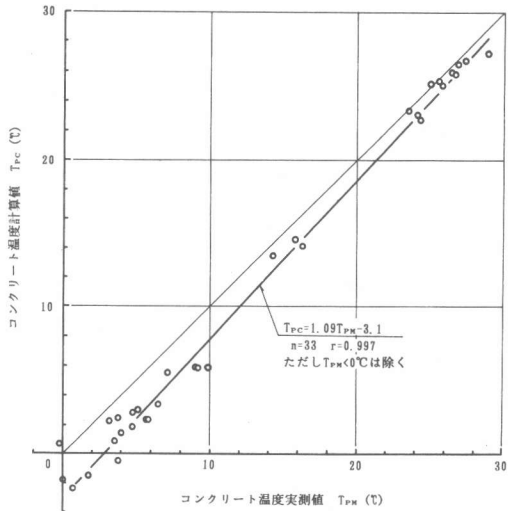


図-2 T_{PC} と T_{PM} との関係

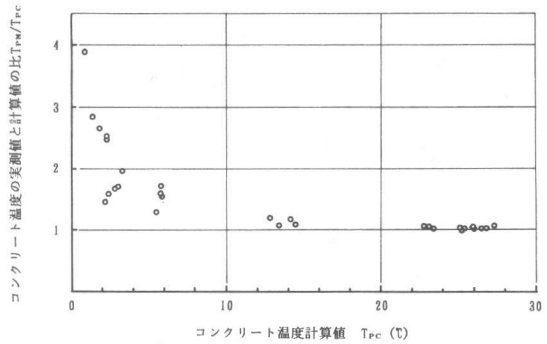


図-3 T_{PM}/T_{PC} と T_{PC} との関係

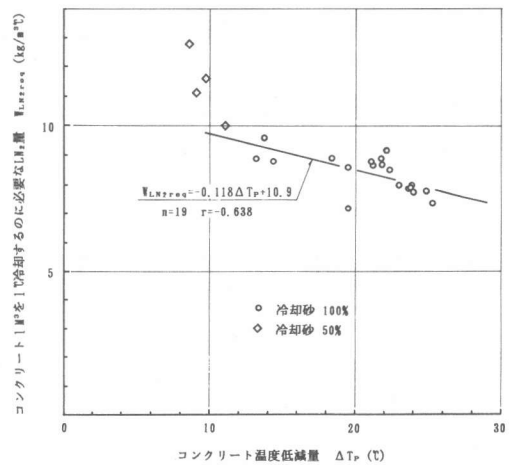


図-4 W_{LN2req} と ΔT_p との関係

の関数となるかどうかについては断言できない。コンクリートを10℃冷却する場合の W_{LN2req} は図から推定すると9.5kg/m³℃であり、筆者らが実施したアジテータへのLN₂の直接噴入によりコンクリートを約10℃の冷却した時の W_{LN2req} は約15kg/m³℃で、これと比較して約35%少ないLN₂の使用量であり、アジテータへのLN₂の直接噴入に比べて効率がよいことがわかる。次に図-5に冷却コンクリートを連続練りした場合の W_{LN2req} の変化を示した。この図に示したように W_{LN2req} は3~4バッチ目では安定しているようである。しかし、3~4バッチでは、冷却砂製造装置およびコンクリートミキサー温度は幾分ではあるが、低下する傾向にあった。

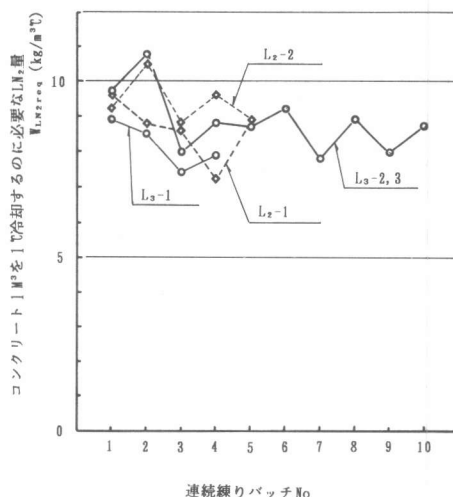


図-5 連続練りによる W_{LN2req} の変化

4. まとめ

本研究は、コンクリート製造プラントを用いて液体窒素により冷却した砂および冷却砂を用いて練り混ぜたコンクリートについて、冷却コンクリートの特性およびその冷却効率について検討したものである。本研究で得られた主な成果を列挙すれば次のとおりである。

- (1) 液体窒素により冷却した砂の粗粒率、含水率、表面水率などは冷却しない砂に比べてほとんど変わらない。
- (2) 冷却砂を用いたコンクリートのスランプおよび圧縮強度は常温砂を用いたコンクリートに比べて増加する傾向が認められた。
- (3) 冷却砂を用いたコンクリートの練り温度は、温度範囲で異なる係数をコンクリート練り温度の計算値に乗じることによって推定できることがわかった。
- (4) 液体窒素により冷却した砂を用いてコンクリート1 m³を1℃冷却するのに必要なLN₂量は約8.4 kg/m³℃であり、他の液体窒素を用いる方法に比べて少ない液体窒素でコンクリートを冷却できる。
- (5) 液体窒素で冷却砂を製造しこれを用いたコンクリートの練り混ぜを実機プラントを用いて行った結果、実用上問題なくコンクリート温度を最大約30℃低減できることが確認された。

本研究は東京冷熱産業㈱との共同研究で行った。

最後に、本研究の実施に当って東工大長瀧重義教授のご指導を戴いたことを記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 大澤 賢修, 福田 信幸, 森 敏昭, 小野 定, 江渡 正清 : 液体窒素を用いたダムコンクリートのプレクーリング, コンクリート工学投稿中
- (2) 加島 聰, 藤田 時男 : 吊橋下部工マスコンクリートのクーリングによる温度制御, コンクリート工学, Vol.24, No6, June 1986