

論文

[1224] ポンプ圧送中におけるコンクリートのプレクーリング手法に関する検討

羽瀧 貴士*1・守分 敦郎*2・西川 正夫*1・秋葉 泰男*1

1. はじめに

コンクリートのプレクーリングはマスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として有効な方法であり、これまでも数種の手法が開発されている[1]。近年のコンクリート構造物の大型化の傾向とそれに伴う温度応力対策の観点から、今後ますますプレクーリングの重要性は高まるものと考えられる。

筆者らは、施工性や経済性の優れたプレクーリングを目指し、打設現場におけるポンプ圧送中に比較的簡易な冷却設備を用いてコンクリートから熱を奪い打設温度を低下させる手法を開発した。ここでは、本プレクーリング手法の実機レベルでの効果を確認するために行なった現場実験結果について報告するものである。

2. 実験概要

2. 1 プレクーリングの方法

プレクーリングは、コンクリート圧送管の周囲を二重管とし、ポンプ圧送時にその外周部に低温の冷却水を循環させることによってコンクリートから熱を奪うことにより行なうものである。

実験に用いたコンクリート圧送管（二重管）の形状を図-1に示す。圧送距離は30mとし、冷却長は1回の圧送につき25mとした。冷却水には塩化カルシウム水溶液（20%濃度）を用い、地盤凍結工法などにおいて一般に用いられている冷凍機（75kw型）により冷却した。また冷却水の循環にはギヤーポンプ（5.5kw型）を用い、二重管部においてコンクリートの圧送方向と逆になるように通水した。プレクーリングシステムの概要を図-2に示す。

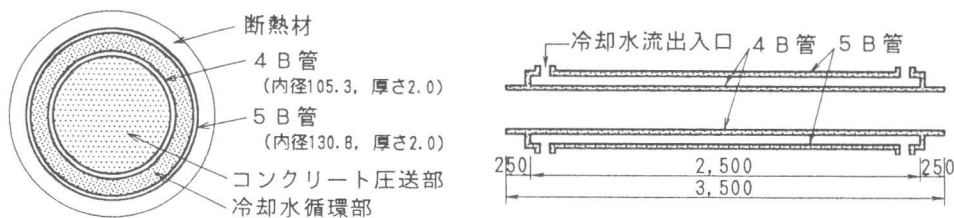


図-1 コンクリート圧送管（二重管）の形状

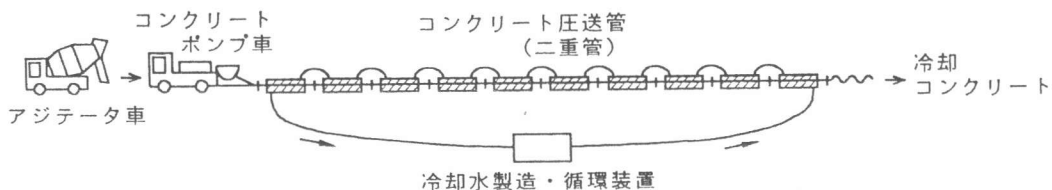


図-2 プレクーリングシステムの概要

*1 東亜建設工業(株)技術研究所 材料・構造研究室研究員（正会員）

*2 東亜建設工業(株)技術研究所 材料・構造研究室室長（正会員）

実験はコンクリートの圧送速度、冷却水の循環流量、冷却前のコンクリート温度等がプレクーリングの効果（冷却温度幅、コンクリートの品質等）に与える影響を把握することを目的とし、表-1 に示す範囲について各要因の影響を検討した。コンクリートの圧送速度および冷却水の循環流量は圧送ポンプおよびギャーポンプの回転数により制御した。また、冷却したコンクリートを繰返し圧送（冷却）することにより、冷却前のコンクリート温度を変化させた。繰返し圧送は、冷却後のコンクリートを空のアジテータ車に積み込み、そのコンクリートを再度圧送することにより行なった。なお、本実験は夏期に実施したものである。

表-1 実験要因

要因	水準
コンクリート圧送速度	20~45m ³ /hr程度
冷却水の循環流量	200、300 l/hr
冷却前のコンクリート温度	15~30℃程度
コンクリートの種類	プレーン、AE コンクリート

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	高炉セメントB種 (比重 3.04)
細骨材	君津産山砂 (比重 2.59、粗粒率 2.55)
粗骨材	G ₁ : 海老名産山砂利 (比重 2.67、粗粒率 6.84) G ₂ : 八戸産砕石 (比重 2.71、粗粒率 6.67)
混和剤	A _{d1} : 超遅延性減水剤、A _{d2} : 遅延形AE減水剤

表-3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	S	G ₁	G ₂	A _{d1}	A _{d2}
プレーン	25	18	2.0	55.0	47.0	162	295	884	510	520	3.54	—
AE	25	15	4.0	55.0	44.4	162	295	806	517	527	—	0.59

2. 2 使用材料およびコンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの材料および配合を表-2、3 に示す。セメントには高炉セメントB種を用い、コンクリートの水セメント比は55%とした。また、プレーンコンクリートは繰返し圧送によるスランブロスの抑制を目的として超遅延性減水剤を使用した。

2. 3 計測項目および方法

(1) フレッシュコンクリートの計測項目および方法

フレッシュコンクリートを冷却の直前および直後に圧送管の出入口部にて容器に採取し、冷却直前、直後および冷却後5分経過時のコンクリート温度をデジタル温度計により計測した。また、スランブと空気量を冷却前コンクリート受入れ時および冷却後5分経過時においてJISの方法に準じて計測した。コンクリートの圧送速度は、各アジテータ車の積載量と荷下ろし時間より平均圧送速度として求めた。またプレクーリングがマスコンクリートとしての温度上昇量に与える影響について検討するために、プレクーリング前後のAEコンクリートについて図-3 に示すブロック供試体（断熱型枠内）を打設し中央部の温度を熱電対により計測した。

(2) 冷却水の計測項目および方法

冷却水については、二重管部の入口・中央・出口において循環ホースに差込んだ熱電対により温度を計測した。

(3) 硬化コンクリートの計測項目および方法

スランブ・空気量の計測と同時に円柱供試体（φ10cm×20cm）を作成して標準水中養生を行ない、材齢7日、28日において、圧縮強度とヤング係数をそれぞれJISおよび土木学会規準の方法に準じて計測した。

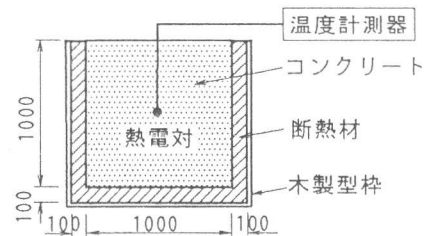


図-3 ブロック供試体の形状

3. 実験結果および考察

3. 1 冷却後におけるコンクリート温度の変化

冷却直後に計測されたコンクリート温度と冷却後5分経過した時点でのコンクリート温度の関

係を図-4に示す。これによると、冷却後5分経過した時点でのコンクリート温度は冷却直後の温度よりも高くなる傾向がみられる。この原因の一つには、圧送中の冷却では粗骨材が十分に冷却されず、冷却直後においてはモルタルと粗骨材に温度差がありコンクリートが均一の温度になるのに若干の時間が必要なためと考えられる。従って、温度管理は温度分布が均一となった時点で行なう必要がある。

3. 2 冷却効率

今回用いたプレクーリング手法の効果について1回の圧送（冷却長25m）毎に整理したものを表-4に示す。二重管部でのコンクリートから冷却水への熱通過率[2]、冷却効率は式(1)、(2)を用いて算定したものである。

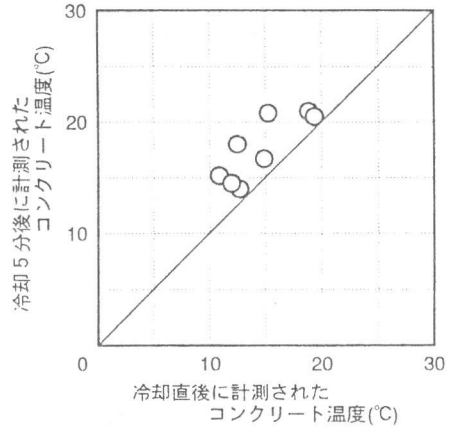


図-4 冷却後におけるコンクリート温度の変化

$$K = \frac{\Phi_c}{A \times (T_{c-m} - T_{w-m})} = \frac{Q_c \times \gamma_c \times \rho_c \times \Delta T_c}{(L \times \phi) \times (T_{c-m} - T_{w-m})} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Phi_c}{\Phi_w} \times 100 = \frac{Q_c \times \gamma_c \times \rho_c \times \Delta T_c}{Q_w \times \gamma_w \times \rho_w \times \Delta T_w} \times 100 \quad (2)$$

ここで、K；二重管部の熱通過率(kcal/m²・hr・°C)、η；冷却効率(%)

Φ_cおよびΦ_w；コンクリートおよび冷却水の熱交換量(kcal/hr)

Q_cおよびQ_w；コンクリートおよび冷却水の流量(m³/hr)

γ_cおよびγ_w；コンクリートおよび冷却水の単位体積重量(kg/m³)

ρ_cおよびρ_w；コンクリートおよび冷却水の比熱(ρ_c=0.25, ρ_w=0.80kcal/kg・°C)

ΔT_cおよびΔT_w；コンクリートおよび冷却水の温度変化量(°C)

T_{c-m}およびT_{w-m}；二重管部でのコンクリートおよび冷却水の平均温度(°C)

A；二重管部の伝熱面積(m²)、L；二重管部の長さ(L=25.0m)

φ；コンクリート圧

送部の周長(m)

表-4 プレクーリングによる冷却効果

コンクリート圧送速度と二重管部の熱通過率の関係を図-5に、冷却前のコンクリート温度と冷却効率の関係を図-6に示す。二重管部の熱通過率については、値がばらつく傾向にあり必ずしも明確ではないが、全体として圧送速度が大きくなるに従って増加

コンクリートの種類	コンクリート				冷却水				二重管部の熱通過率 (kcal/m ² hr°C)	冷却効率 (%)
	冷却前温度(°C)	冷却後温度* (°C)	温度差 (°C)	圧送速度 (m ³ /h)	冷却前温度 (°C)	冷却後温度 (°C)	温度差 (°C)	循環流量 (m ³ /h)		
プレーン	28.7	21.0	7.7	42.9	-9.0	3.0	12.0	18.0	849	94
	28.8	20.5	8.3	36.0	-7.8	2.8	10.6	18.0	786	97
	23.1	14.0	9.1	22.2	-8.5	-0.9	7.6	18.0	621	91
	22.9	18.0	4.9	30.0	-8.7	-1.5	7.2	18.0	412	70
	19.4	15.2	4.2	27.3	-10.8	-0.1	10.7	12.0	361	55
	18.9	14.5	4.4	37.5	-9.8	-2.0	7.8	18.0	524	73
AE	30.9	—	—	33.3	-18.8	-8.0	10.8	18.0	—	—
	26.8	20.8	6.0	33.3	-14.5	-5.3	9.2	18.0	414	73
	22.8	16.7	6.1	30.0	-13.5	-4.1	9.4	18.0	447	65

*；冷却後5分経過時における温度

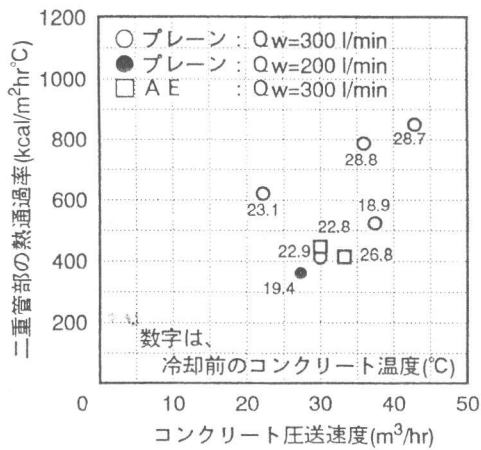


図-5 コンクリート圧送速度と二重管部の熱通過率の関係

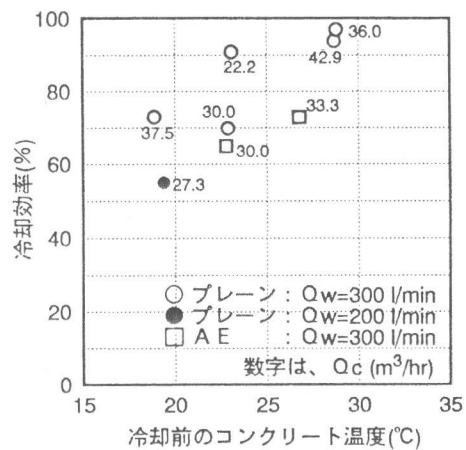


図-6 冷却前のコンクリート温度と冷却効率の関係

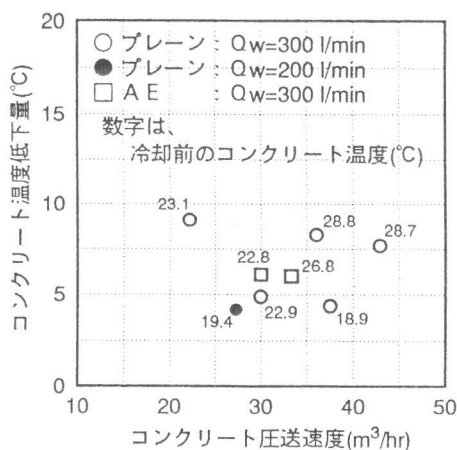


図-7 コンクリートの圧送速度と温度低下量の関係

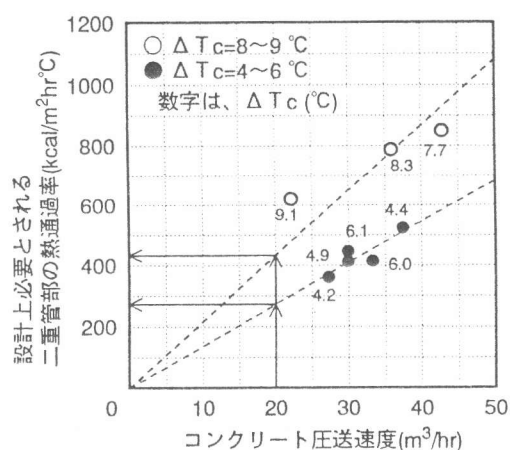


図-8 施工条件により決まる二重管部の必要熱通過率

するようである。またコンクリートの損失熱量と冷却水の取得熱量の比で表した冷却効率も、ばらつきはあるが全体としては70~90%程度の値と考えてよいようである。

次に、コンクリートの圧送速度と温度低下量を図-7に示す。この図から、夏期などに使用される練上がり温度の高いコンクリートに対しては、今回使用した程度の冷凍設備を用いることにより、コンクリート圧送速度40m³/hr程度以下の打設条件では十分に5~10°C程度のプレクーリングが実施できるものと推測された。

本プレクーリング手法の適用の際の冷却設備の設計は、以下のように行うことができる。図-8はコンクリート圧送速度と二重管部の熱通過率の関係をそのときのコンクリート温度低下量で整理したものであり、同じ圧送速度においてコンクリート温度低下量をより大きくするためには二重管部の熱通過率が大きくなる必要があることを示している。図中に矢印で示しているように、施工条件（コンクリート圧送速度）と目標とするコンクリート温度低下量によってそのときに設計上必要とされる二重管部の熱通過率が決まる。式(1)からもわかるように二重管の形状が決まっている場合には、変数は二重管部の長さ(L)とコンクリートと冷却水の平均温度の差($T_{c-m} - T_{w-m}$)のみとなる。従って、($T_{c-m} - T_{w-m}$)を一定に保つために必要な冷凍機能力と二重管部の長さ(L)との適切な組み合わせにより、最適な冷却設備を決定することができる。ただし今後さらにデータを蓄積し、基礎データの信頼性を高める必要がある。

3. 3 スランプ・空気量の変化

コンクリートの品質試験結果を表-5にまとめて示す。このうち、コンクリート温度の低下とスランプ、空気量の関係を図-9に示す。スランプは温度の低下により同程度かあるいは若干大きくなる傾向にある。A Eコンクリートを約15°C冷却した場合にはスランプが低下し、また空気量も温度の低下とともに若干小さくなっているが、これは温度を低下させるために行なった繰返し(2~3回)圧送と時間経過のためであり、プレクーリングによる品質の低下はないものと考えられる。

表-5 コンクリートの品質試験結果

コンクリートの種類	冷却の有無	温度(°C)	スランプ(cm)	空気量(%)	圧縮強度(kgf/cm ²)		ヤング係数(×10 ⁵ kgf/cm ²)	
					σ_7	σ_{28}	E_7	E_{28}
プレーン	無	30.0	19.5	1.3	200	332	2.39	3.07
		21.0	21.5	1.3	211	334	2.44	3.09
	有	20.5	20.0	1.6	182	300	2.40	2.92
		14.0	20.5	1.4	207	333	2.43	3.02
		18.0	18.5	1.6	192	311	2.33	2.93
		15.2	20.0	1.4	186	318	2.31	3.01
		14.5	21.0	1.3	188	316	2.33	2.99
A E	無	30.9	15.0	4.6	207	282	2.06	2.89
		20.8	18.0	4.2	177	289	2.14	2.65
	有	16.7	13.5	4.0	197	319	2.19	2.73

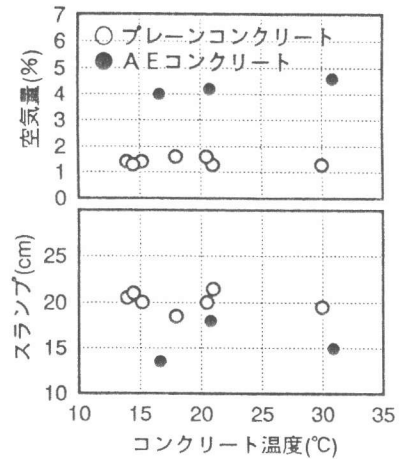


図-9 プレクーリングによるスランプ・空気量の変化

3. 4 強度特性

コンクリート温度と圧縮強度およびヤング係数の関係を図-10、11にそれぞれ示す。A Eコンクリートの材齢28日圧縮強度は温度の低下とともに大きくなる傾向を示しているが、全体としては圧縮強度、ヤング係数ともにプレクーリング前のコンクリートとの顕著な相違は見られなかった。また圧縮強度とヤング係数の関係を図-12に示すが、コンクリートの種類やプレクーリングによるコンクリート温度の変化によらずほぼ同様の強度特性を示すことが確認された。

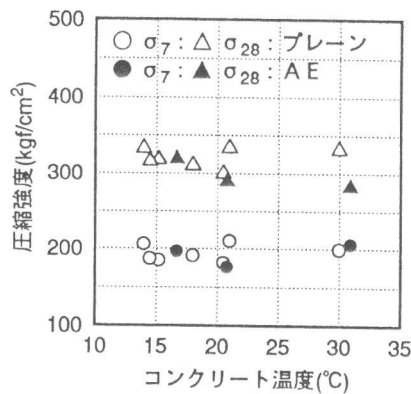


図-10 コンクリート温度と圧縮強度の関係

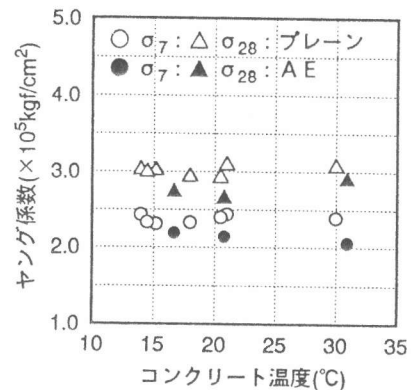


図-11 コンクリート温度とヤング係数の関係

3. 5 マスコンクリートとしての発熱特性

図-3に示すブロック供試体の中心部の温度変化の状況を図-13に示す。この図にはプレクーリングを実施する前のコンクリートと、プレクーリングにより打設温度を約10°C、約14°C低下させたものを比較して示した。これらの供試体は、ほぼ同時に打設され同一環境におかれたものである。本計測期間における外気温は、25~35°C

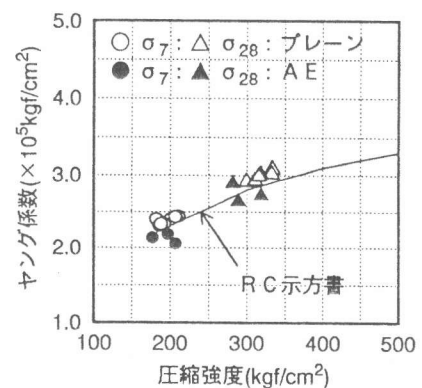


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

の範囲にあった。この図より明らかなように、プレクーリングを行なうことにより中心部の最高温度を低下させることができた。また温度上昇時の上昇速度が低減される傾向がみられ、最高温度に達するまでの時間も遅れる傾向にあった。なお、本手法を用いたプレクーリングにより部材の中心部が最高温度に達した時点における表面付近との温度差が小さくなることも確認されている[3]。

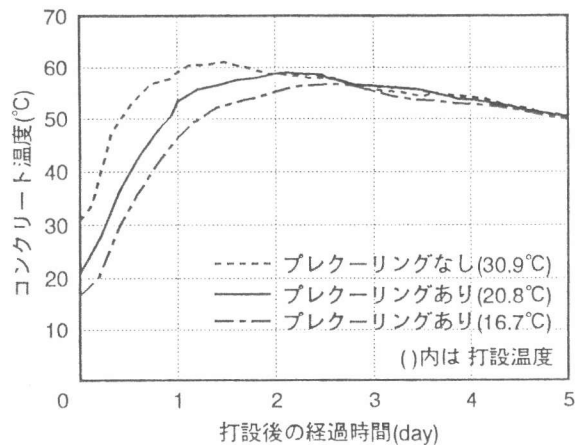


図-13 ブロック供試体中央部の温度履歴

4. まとめ

ポンプ圧送時にコンクリート圧送管の外周部に低温の冷却水を循環させることにより行うプレクーリング手法に関する検討の結果より、以下の結論を得た。

- (1) 打設現場において打設直前に比較的簡易な冷却設備を用いて、ポンプ圧送中のコンクリートに対してプレクーリングを行うことが可能である。
- (2) 75kw型の冷凍機を用い、圧送中の冷却区間長さが25mの場合、冷却前のコンクリート温度が20～30℃、ポンプ圧送速度が20～40m³/hrの範囲では、その条件により5～10℃程度のプレクーリングが実施できた。
- (3) 本プレクーリング手法の適用の際の冷凍設備等の設計の考え方を示した。
- (4) スランプ、空気量および強度特性などのコンクリートの品質は、今回用いた手法によるプレクーリングの実施により、プレクーリングを行わない場合とほぼ同様の傾向を示した。
- (5) 本手法を用いたプレクーリングの実施により、プレクーリングを行わない場合に比較してマスコンクリートの中心部の最高温度を低下させることができた。

現在実用化されているプレクーリング手法が経済性等の面から大規模構造物を中心に実施されているのに対し、本プレクーリング手法は冷却設備の打設現場単位での移動が可能であり、設備費も既存の設備を利用することにより低く抑えることができることなどから、プレクーリングを一般のコンクリート打設工事に適用することを容易にするものと考えられる。今後は冷却効果およびその信頼性の向上、設計手法の確立に努める予定である。

参考文献

- 1) 長滝重義・小野 定：コンクリートのプレクーリングの現状、コンクリート工学、Vol. 29、No. 29、pp. 5-19、1991. 12
- 2) 瀬下 裕・藤井雅雄：コンパクト熱交換器、日刊工業新聞社、1992
- 3) 秋葉泰男・福手 勤・竹村英樹・守分敦郎：温度応力対策を施したマスコンクリートの力学的特性と耐久性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16