

報告

[1157] 冷却骨材ストック方式による吊橋アンカレイジコンクリートのプレクーリング

正会員○加藤和彦（サンドプレクール工法協会）

正会員 高橋三雅（首都高速道路公団 第三建設部）

山崎一衛（鉄建・東洋・大豊企業体）

森末 建（三井・五洋・白石企業体）

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起因する温度ひびわれの制御が重要な検討課題となっている。また、一方で大量急速施工のニーズがあるが、この場合には、温度ひびわれ制御はより大きな検討課題になると思われる。現在建設中の東京港連絡橋（仮称）吊橋アンカレイジ（図-1参照）の施工においては、耐久性の高いコンクリートが要求されている。しかし、夏期における施工では、急速施工の面から最大のリフト高さが3.5mであるために、温度ひびわれの発生が高い確率で予測された。このことから、温度ひびわれ制御対策として、超低発熱性セメントの使用など配合面の対策に加え、プレクーリング対策等が採用された[1]。

本工事での温度ひびわれ制御設計[2]より、プレクーリングによるコンクリート温度低減量は、最大で20°C以上になるため、従来多く使用されている冷水、氷等による方法では所要のプレクーリングによる温度低減量が確保できないことから、液体窒素（以下、LN₂）で骨材を冷却して、冷却コンクリートを製造するプレクーリング方法が検討された。冷却骨材を用いるプレクーリング方法として施工実績があるのは、コンクリート練りませ直前に細骨材を冷却する方法[3]であったが、本工事では、冷却コンクリート打設量が1回当たり約1,500 m³、2基のアンカレイジの総量で約41,000 m³と大量であったため、LN₂により冷却した骨材を貯蔵し、その貯蔵した骨材を用いて冷却コンクリートを製造する方法が採用された。

本報告は、冷却骨材ストック方式によるプレクーリング方法で製造したコンクリートの製造、管理方法および吊橋アンカレイジコンクリートでの施工結果をとりまとめたものである。

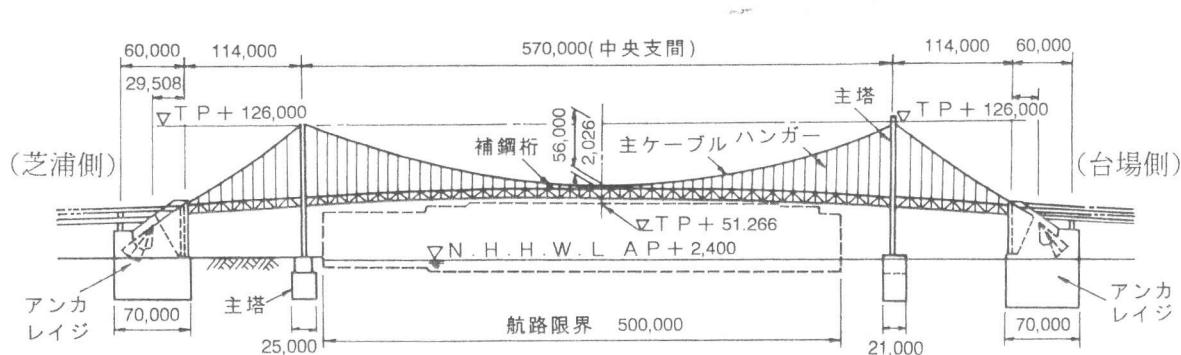


図-1 吊橋断面

2. 工事概要

首都高速12号線吊橋アンカレイジは、幅45m、長さ70mのケーソン上に設置され、頂版部とアンカレイジ軸体部から成っている。本工事では、芝浦側および台場側のアンカレイジコンクリートについてプレクーリングを行った。図-2に芝浦側のケーソン頂版およびアンカレイジ軸体を示

す。頂版は幅43m×長さ68m×高さ6.0m、アンカレイジ軸体は幅45m×長さ57.5m（最大部）×高さ34m（最大部）のマスコンクリート構造物であり、平面的に頂版は2ブロック、本体は5ブロックに分割して施工を行った。本施工では1ブロックのリフト高さが3.5m（最大で3.9m）であり、6～9月の夏期施工にあたるのは、頂版2リフトから軸体3リフトまでである。本工事では、これらのリフトに対しプレクーリングを実施した。

3. プレクーリングの実施方法

本工事では、LN₂を用いて冷却した骨材（以下、冷却骨材）を数日間骨材サイロに貯蔵し、後日その冷却骨材を用いて冷却コンクリートを製造するプレクーリング方法を用いた。冷却コンクリート製造の概要を図-3に示す。冷却コンクリート製造工程は、STEP1:冷却骨材の製造、STEP2:冷却骨材の貯蔵およびSTEP3:冷却コンクリート製造から構成されている。冷却骨材の製造は、既設生コンプラント敷地内に新たに設置した設備にて行い、冷却骨材の貯蔵および冷却コンクリートの製造は、既設生コンプラントにて行った。以下に各工程の概要を述べる。

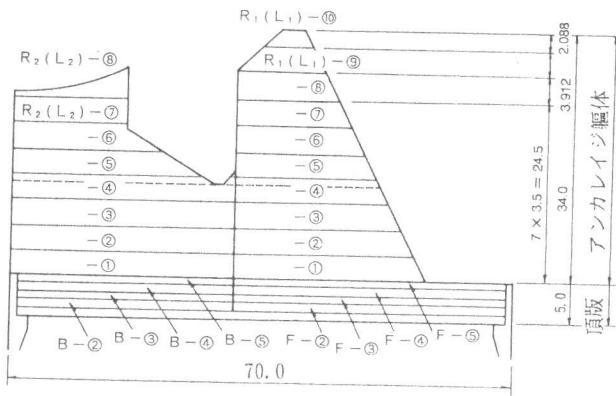


図-2 アンカレイジのリフト割

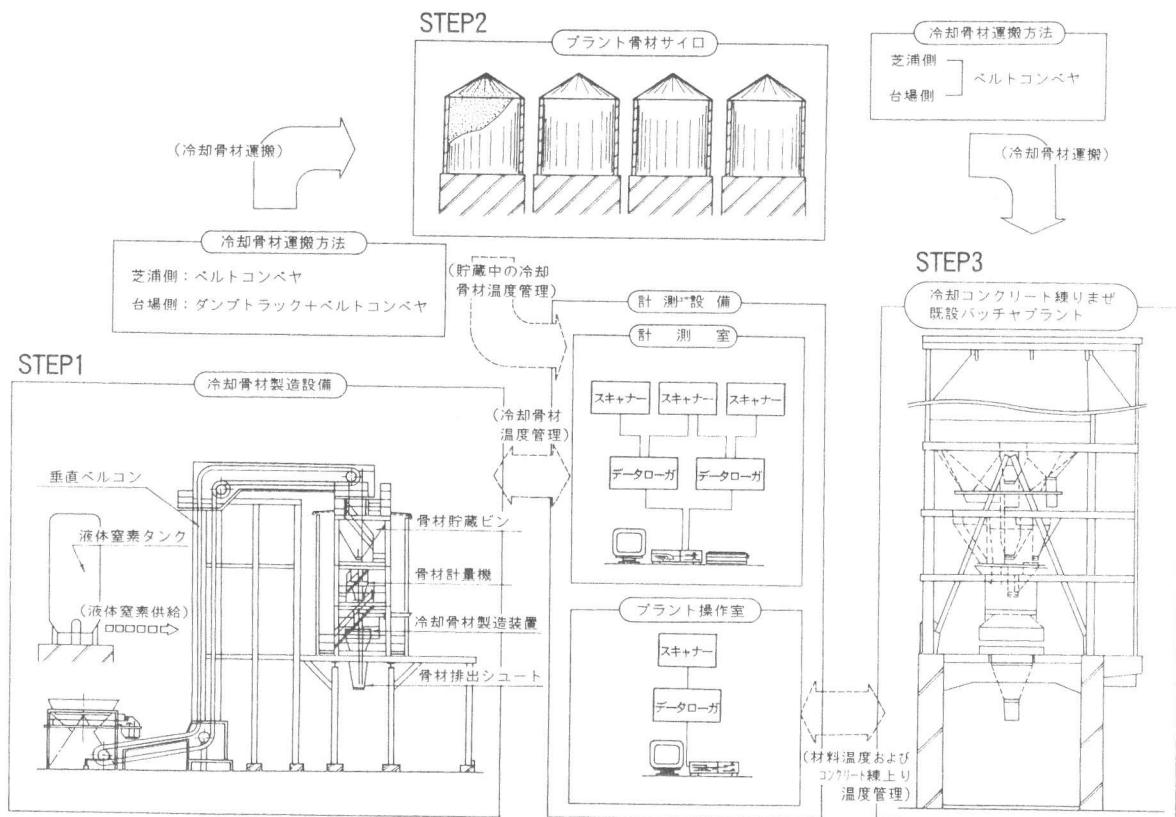


図-3 冷却コンクリート製造設備概要

(1) 冷却骨材製造

本設備の構成要素は、冷却骨材製造装置本体（以下、サンドクーラ）、垂直ベルコン、骨材貯蔵びん、骨材計量器、骨材排出シート、LN₂タンク、LN₂配管、サンドクーラ操作盤およびLN₂噴入管理操作盤からなる。冷却前骨材を垂直ベルコンで貯蔵びんへ運搬し、計量器で計量した後、サンドクーラに投入する。サンドクーラ内で骨材を攪拌しながらLN₂を噴入し、冷却骨材を製造する。1バッチ当たりの冷却骨材製造量は1,300kg～1,400kg、サイクルタイムは約60秒である。

(2) 冷却骨材貯蔵

冷却した骨材は、細、粗骨材の別にバッチャープラントの骨材サイロに貯蔵する。本工事での貯蔵日数は、最大で6日間である。貯蔵中の冷却骨材温度の上昇を防ぐために、サイロ側面を断熱材で保冷した。また、貯蔵した冷却骨材の回収率を向上させるため、さらに、冷却骨材の引出しを容易にするために、サイロの側面から圧縮空気を吹き込む設備、ホッパーに衝撃を与える設備を設置した。

(3) 冷却コンクリート製造

貯蔵した冷却骨材を用いて冷却コンクリートの製造を行った。冷却コンクリートの製造サイクルタイムは、通常のコンクリート製造と同様であり、最大出荷量は約200 m³/Hである。

4. 冷却骨材温度の設定および温度管理システム

4.1 冷却骨材温度の設定

従来の冷却骨材を用いたコンクリートのプレクーリングでは、コンクリート打設時の設定温度に対して、アジテータ車等での運搬時温度上昇量、およびポンプ車による圧送時の温度上昇量を推定して、コンクリートの練り上がり温度を設定[4]し、骨材の冷却温度を決めている。本工事では、冷却骨材製造温度を決定する際に、コンクリート運搬、圧送時の温度上昇量の推定に加え、冷却骨材貯蔵時の温度上昇量、冷却骨材運搬時の温度上昇量およびコンクリート練りませ時のセメント温度、練りませ水温度を推定する必要があった。図-4に冷却骨材温度の設定フローを示す。本工事では各打設毎の骨材温度の冷却幅、コンクリート温度の冷却幅、外気温等の条件が異なることから、これらの諸条件を考慮して各工程での冷却骨材および冷却コンクリートの温度上昇量を推定するために、施工データの蓄積が必要であった。そこで本工事では、各ブロックの打設終了毎にそれぞれの温度上昇量の推定値を見直し、次回の打設にフィードバックする方法を用いた。

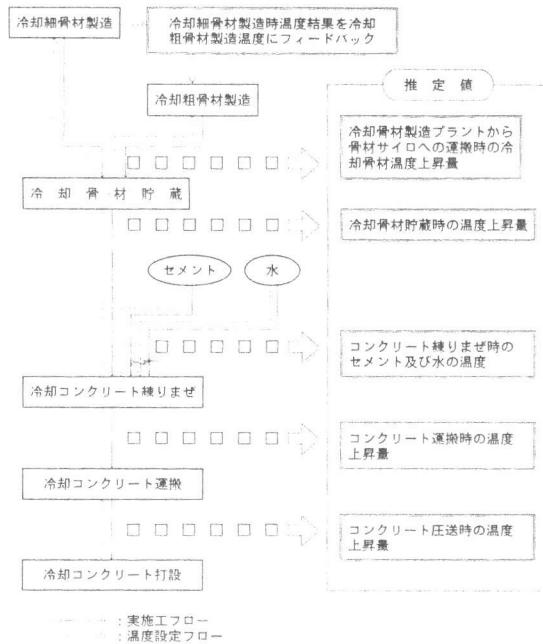


図-4 冷却骨材設定フロー

4.2 温度管理システム

本工事での温度管理システムフローを図-5に示す。骨材温度は、図-4に示すフローで、あらかじめ設定した冷却骨材温度を目標に管理した。冷却骨材製造時には冷却直後の骨材温度を接触型デジタル温度計、および放射温度計を用いて測定した。骨材貯蔵時には、サイロ内の骨材温度を測温ロープを用いて測定した。測温ロープは、線芯にT型熱電対を設置し、表面をフッ素樹脂シースで被覆したもので、骨材のサイロ投入時、貯蔵時、および引出し時に作用する引張力に耐えるものである。冷却コンクリートの練上り温度測定には即応性のよいシース型熱電対を用いた。他の材料温度等は、T型熱電対を用いて測定した。各温度の測定は10秒間隔で自動計測し、計測データを冷却骨材の温度管理に用いた。

5. 実施結果および考察

5.1 冷却骨材温度管理

冷却骨材の設定温度と実測値との比較を表-1に、冷却骨材製造時の骨材温度設定値と実測値との比較を図-6に示す。細骨材の冷却は製造温度の下限値を2°Cに設定して行った。これは細骨材を0°C以下で骨材サイロに貯蔵した場合、サイロ内で骨材が固結する場合があることが確認されたためである。表-1から、TS1(冷却直後の細骨材温度の実測値と設定値との差)の平均値が芝浦側0.4°C、台場側0.5°Cであり、粗骨材のTG1(冷却直後の粗骨材温度の実測値と設定値との差)の平均値は芝浦側0.5°C、台場側1.2°Cである。冷却直後の細骨材および粗骨材ともに骨材温度の設定値と実測値はほぼ一致していることが認められる。これは、冷却直後の骨材

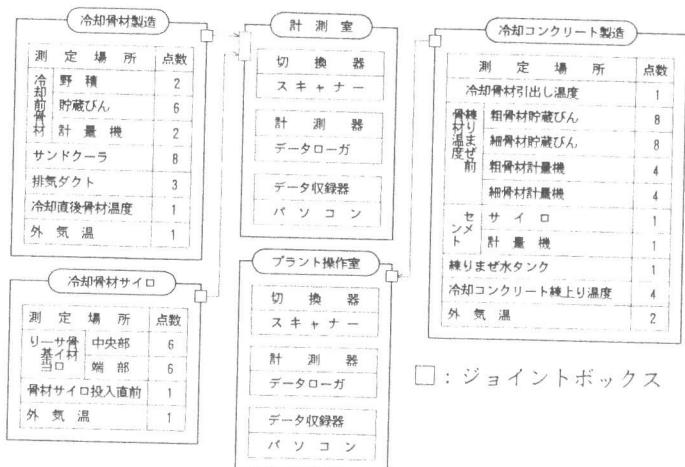


図-5 温度管理システムフロー

表-1 冷却骨材の設定値と実測値の比較

対象 リフト	冷却直後 (°C)				練りまぜ直前 (°C)			
	芝浦側		台場側		芝浦側		台場側	
	TS1	TG1	TS1	TG1	TS2	TG2	TS2	TG2
B-2	+0.6	-0.5	+0.6	+0.9	+1.7	-2.1	-0.1	-3.0
B-3	+1.0	+0.7	+0.1	+0.3	+1.3	+1.3	+0.1	-0.7
F-2	+0.6	-0.4	-0.6	-4.2	-0.4	-0.3	-0.7	+1.2
B-4	+0.4	-0.4	+1.1	+2.4	-0.1	-2.9	+0.1	-1.0
F-3	-0.1	-0.1	+0.4	-0.2	-0.3	+1.4	+0.2	+1.3
B-5	-0.3	±0.0	+0.3	-2.2	+0.2	+0.1	-0.7	-1.7
F-4	±0.0	-0.2	-0.3	+0.5	+0.5	+4.8	+1.1	+2.8
L2-1	-0.6	-1.3	+0.1	-0.4	-0.2	+0.2	+0.8	-2.1
R2-1	+1.0	+0.3	-0.5	-0.4	+1.8	-0.2	-0.4	-0.9
L2-2	+0.1	-0.5	+0.3	-0.7	+0.6	-3.1	+1.8	-0.4
F-5	+0.2	+2.2	-0.5	-1.3	-1.9	+0.5	+0.0	-0.4
R2-2	+0.4	-0.3	-1.3	+0.7	-0.6	+0.5	-2.6	+0.3
L2-3	-0.1	-0.2			-1.3	±0.0		
L1-1	±0.0	±0.0			-0.9	-0.7		
平均	0.4	0.5	0.5	1.2	0.8	1.3	0.7	1.3

TS1 : 冷却直後の細骨材温度の実測値と設定値の差
TG1 : 冷却直後の粗骨材温度の実測値と設定値の差
TS2 : 練りまぜ直前の細骨材温度の実測値と設定値の差
TG2 : 練りまぜ直前の粗骨材温度の実測値と設定値の差
平均はB-2からL1-1までの約40箇所の平均とした。
測定は接触型デジタル温度計を用いた。

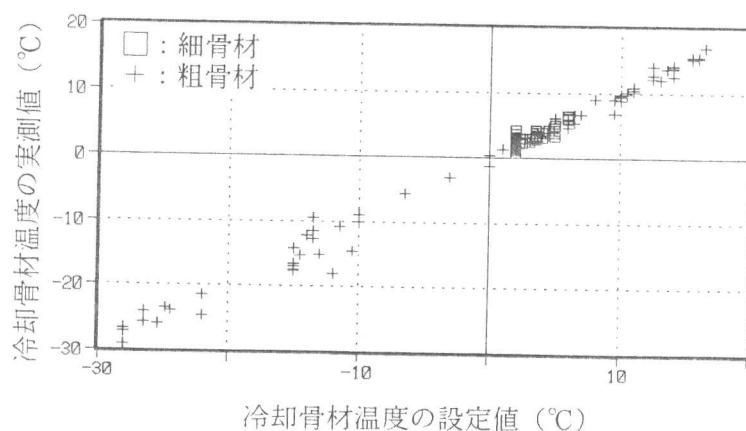


図-6 冷却骨材製造直後の実測値と設定値の比較

温度をリアルタイムに測定し、その結果を $L N_2$ 噴入管理にフィードバックすることにより、骨材温度の微調整を行ったことによると考えられる。芝浦側、台場側ともに粗骨材よりも細骨材の方が精度よく骨材が冷却できている。その理由として、図-6 に示すように細骨材の設定値は $2^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$ と比較的一定であったのに対して、粗骨材の設定値は $-27^{\circ}\text{C} \sim 16^{\circ}\text{C}$ と広範囲にわたっていたためである。

また表-1 から冷却細骨材は $T S_2$ (練りまぜ直前の細骨材温度の実測値と設定値との差) の平均値が芝浦側 0.8°C 、台場側 0.7°C であり、冷却粗骨材の $T G_2$ (練りまぜ直前の粗骨材温度の実測値と設定値との差) の平均値は芝浦側 1.3°C 、台場側 1.3°C である。コンクリート練りまぜ直前の細骨材および粗骨材ともに骨材温度の設定値と実測値はほぼ一致している。冷却細骨材は冷却直後の骨材温度が比較的一定であったため、搬送および貯蔵時の温度上昇量も比較的安定していた。これに対して冷却粗骨材は、冷却直後の骨材温度の分布範囲が大きいことから、各打設毎の温度上昇量の変動幅も大きかった。粗骨材の温度上昇量を推定する一つの方法として、粗骨材の温度上昇量 (ΔT_G) と外気温 (T_p) と冷却直後の骨材温度 (T_g) との差の関係を用いた。図-7 から粗骨材については ΔT_G と $(T_p - T_g)$ との間に直線関係が認められる。この結果から、各打設終了毎に ΔT_G と $(T_p - T_g)$ との関係について回帰式を求め、粗骨材温度の上昇量推定の参考として使用した。

5.2 冷却コンクリート温度管理

冷却コンクリート練上り温度の設定値と実測値との比較を図-8 に、打設温度の設定値と実測値との比較を図-9 に示す。

冷却コンクリートの管理目標は、芝浦側は設定値 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($B-2$ および $B-3$ ブロックは設定値 $\pm 3^{\circ}\text{C}$)、台場側は設定値 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ とした。芝浦側と台場側で管理目標範囲の幅が変わっているのは、冷却骨材運搬経路、コン

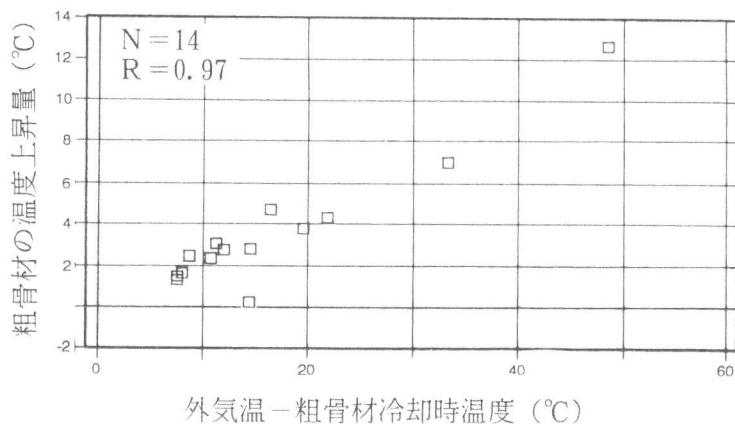


図-7 芝浦側 粗骨材の温度上昇量と外気温と冷却直後の骨材温度の差との関係

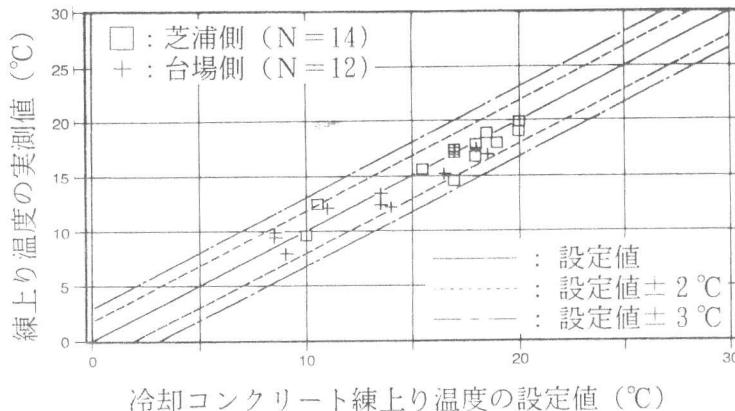


図-8 冷却コンクリート練上り温度の実測値と設定値の比較

クリート練りまぜ水温の日変化および冷却コンクリートの運搬時間が 2 つの工区で異なっていたためである。図-8 から、冷却コンクリートの練上り温度は芝浦側および台場側とともに、目標範囲を満足していることが分かる。これは、冷却骨材の温度上昇量を精度よく推定した結果、コンクリート練りまぜ時に冷却骨材温度がほぼ設定値通りであったためである。図-9 から冷却コンクリートの打設温度は、芝浦側および台場側ともに目標範囲を満足している。これは冷却コンク

リート練上り温度がほぼ設定値通りであったことおよび各打設毎に運搬、圧送時のコンクリート温度上昇量の結果を次回打設にフィードバックしたことによると考えられる。

5.3 LN₂ 使用量

コンクリート 1 m³を 1 °C冷却するための LN₂ 使用量は、芝浦側は冷却コンクリート打設量約 23,000 m³について 11.4 kg/m³、

台場側は冷却コンクリート打設量約 18,000 m³について 11.4 kg/m³ °C であった。ここで LN₂ 使用量とは、サンドクーラを用いて骨材を冷却するのに使用した LN₂ 量であり、冷却設備の予冷等に使用された LN₂ 量は含まれていない。従来の冷却骨材を用いてコンクリートをプレクーリングした実績の一例として、首都高速道路公団施工中の多摩川・川崎沈埋トンネルの 8.4 kg/m³ °C [5] がある。本工事で採用した冷却骨材を貯蔵する方法では、運搬および貯蔵中に冷却骨材温度が上昇するために、従来の方法に比べ 3 kg/m³ °C 程度 LN₂ 使用量が増加している。

6. まとめ

本報告は、吊橋アンカレイジコンクリートの温度ひびわれ制御対策の一つとして用いた LN₂ で冷却した骨材を貯蔵し、その貯蔵した冷却骨材を用いてコンクリートをプレクーリングする方法の施工結果に基づき、冷却骨材温度、冷却コンクリート温度、冷却効率等について検討した結果をとりまとめたものである。本工事で得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 冷却骨材は、各打設の結果を次回打設にフィードバックして製造時の温度管理を行った結果、所定温度の冷却骨材を製造することができた。(2) 冷却骨材をほぼ設定通りに製造した結果、所要温度の冷却コンクリートを製造、打設することができた。(3) コンクリート 1 m³を 1 °C冷却するのに必要な LN₂ 量は、11.4 kg/m³ °C 程度であった。(4) 貯蔵した冷却骨材を使用するプレクーリングの方法は、大量打設のプレクーリング方法として有効であると考えられる。

参考文献

- [1] 中込秀樹、西 洋司、田嶋仁志、高橋三雅：吊橋アンカレイジのマスコンクリート対策、コンクリート工学投稿中
- [2] 田嶋仁志、西 洋司、条原善隆、澤村秀治：吊橋下部工マスコンクリートの急速施工とひびわれ制御、第13回コンクリート工学年次講演会投稿中
- [3] 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 昭和63
- [4] 加藤和彦、手塚茂樹、松岡 彰：液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの運搬時の温度特性について、土木学会第44回年次学術講演会、1989.10
- [5] 加藤和彦、松森秀美、清水 徹、松岡 彰：液体窒素を用いた沈埋函体制壁コンクリートプレクーリングの施工、コンクリート工学年次論文報告集11-1.1989

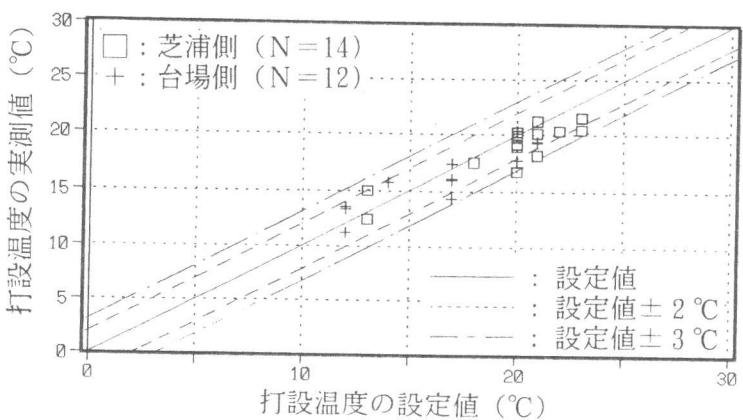


図-9 冷却コンクリート打設温度の実測値と設定値