

報告

[1199] ドライアイスを用いたプレクーリング工法による貯水池側壁コンクリートの施工

本郷 善彦*1・竹内 光*2・久岡 雅見*3・石川 広志*4

1. はじめに

近年のコンクリート工事では施工技術の進歩により大量急速施工が一般化し、さらに、コンクリート構造物の複雑化に伴い、従来ではマスコンクリートとしての対応が必要とされなかった比較的小型の構造物においても、セメントの水和熱による有害なひびわれが生じる事例が多く見られる。このような状況下においては、特に夏場の暑中コンクリート対策が重要であり、温度ひびわれ制御対策として、低発熱型のセメントの使用、単位セメント量の減少、プレクーリング工法やポストクーリング工法の採用等、材料・施工面での対策が実施されている。筆者らは、種々の対策の中でも効果が大きいプレクーリング工法について、新たな冷却媒体として昇華潜熱が137kcal/kgと大きいドライアイスを用い、既設のバッチプラントに簡便な冷却設備を取付けることによって冷却コンクリートが製造できるプレクーリング工法について研究、開発を実施してきた[1, 2]。

本報告は、ドライアイスを用いたプレクーリング工法の実施工として、上水道用貯水池側壁コンクリートの施工を行い、コンクリートの温度管理、冷却効率、出荷効率、及び打込み後のコンクリートの温度・応力のモニタリング結果等について検討したものである。

2. ひびわれ制御対策の事前検討

対象とした貯水池の断面図を図-1に示す。本構造物は当初地形的制約から別々に計画されていた高区及び中区貯水池を一体化した階層式貯水池である。円筒形の半地下構造物（直径28.3m、高さ39.9m）であり、地下23mに設置される中区貯水池は、底版厚1.8m、側壁厚1mとマスコンクリートとなる。打設時期が9月～10月であることから、セメントの水和熱による温度応力をできるだけ小さくするひびわれ制御対策の事前検討を行った。

対象構造物は高い水密性が要求されるため、土木学会のコンクリート標準示方書より、ひびわれ制御対策の目標値を温度ひびわれ指数1.5以上と設定した。検討の第1段階として現状のまま無対策で施工した場合について、有限要素法を用いた2次元の軸対象モデルによる非定常伝熱解析、温度応力解析を行い、温度ひびわれ指数の把握を行った結果、中区貯水池の底版部及び側壁部の温度ひびわれ指数が最小で1.5以下

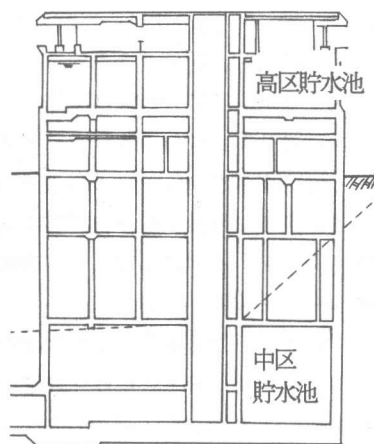


図-1 貯水池断面図

*1 三井建設（株）技術開発本部技術研究所、工修（正会員）
 *2 三井建設（株）技術開発本部技術研究所主任研究員、（正会員）
 *3 三井建設（株）湘南国際村葉山工事事務所所長
 *4 横須賀市水道局給水部建設課工事第一係主任

となり、ひびわれ制御対策が必要であることが判明した。そこで、目標を満足するようなひびわれ制御対策を検討した結果、セメントを超低発熱セメントに変更し、なおかつ、側壁の立ち上りの第1、第2リフトの3m部分についてはプレクーリングによって第1リフト18℃、第2リフト20℃まで打込み温度を低減させることによって、温度ひびわれ指数1.5以上を確保できることが分かった。図-2に側壁第1リフト(0~1.5m)中央部分の円周方向応力に対する温度ひびわれ指数の解析結果を示す。

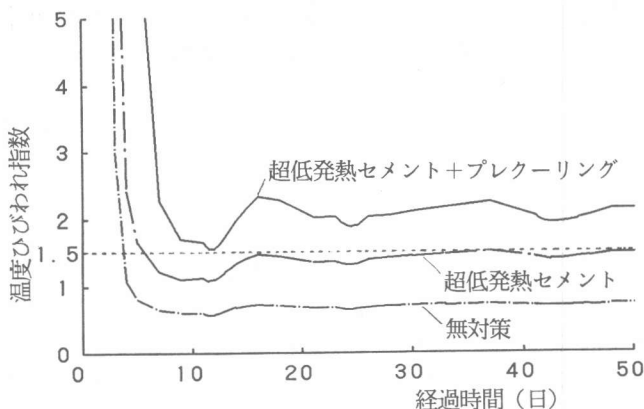


図-2 温度ひびわれ指数の解析結果

3. プレクーリング方法及び設備

3.1 基本的な冷却システム

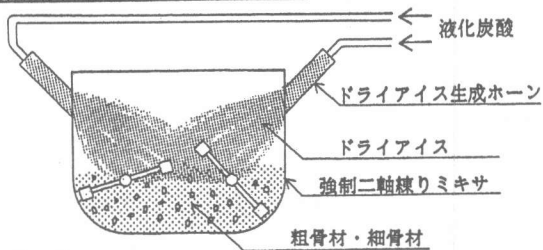
本工法の基本的な冷却システムを図-3に示す。まず、既存プラントのミキサ内に細骨材・粗骨材と粉雪状のドライアイス投入し、粉体混合させ、ドライアイスが昇華する際の吸熱作用により骨材を冷却させる。次にミキサ中に充満している炭酸ガスをファンにより速やかに強制排気する。最後に残りの材料である水、セメントをミキサ内に投入して冷却コンクリートを製造する。

骨材のみを冷却対象とした理由は、第1は、コンクリートの中性化に悪影響を与えないために、セメントとドライアイスの接触を避けたことであり、第2は、練混ぜ中及び練混ぜ後にドライアイス投入すると炭酸カルシウムが多量に生成され、コンクリートのスランプロスが著しくなるためである[1]。従ってミキサ内にドライアイスが残留していないことを確認するための排気作業が重要となる。このように、本システムでは冷却コンクリートの製造を既存のミキサ内で行うため、冷却のための大規模な設備及びスペースを特に必要とせず経済性に優れているが、その反面、冷却骨材の生産、排気作業が必要なため、出荷量に制約を受けるといった特徴を有している。

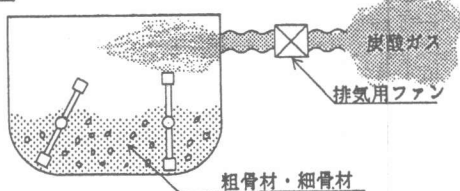
3.2 プレクーリング設備

プレクーリング設備の概要を図-4に示す。図に示すように本システムは既存のバッチャプラ

I. 冷却骨材の生産 (ドライミックス)



II. 排気



III. 本練り

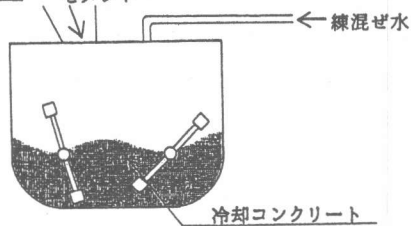


図-3 冷却システム

ントに冷却材供給設備、炭酸ガス排気設備、温度管理設備、安全設備等を組み込んだもので、これらの設備は、制御室に設置した冷却コンクリート制御システムによって管理されている。

断熱配管によりローリ車からミキサの清掃用窓に取り付けた16基のドライアイス生成ホーン（直径6cm、長さ15cm、写真-1）まで供給された液化炭酸ガスを、ホーン先端のノズル部分よりミキサ中に放出すると、断熱膨張してドライアイスが生成される。実証試験[2]では、ホーン内部でドライアイスの粒子を成長させるために直径40cm、長さ150cmの大型ホーンを2基搭載したシステムで実施し、ドライアイスの生成量は64kg/分であった。

これに対して今回のシステムでは、ミキサ自身を1つの大きなホーンとみなし、投入口を増やし流量を増加することとしたため、ドライアイスの生成量は1分間当たり144kgと約2倍の生成量になった。液化炭酸ガスの投入は空気作動弁で制御し、投入量はひずみゲージ型流量計で計測した。排気設備としては、ミキサに2台の排気ファンと1台の入気ファンを取り付けた。練混ぜ前のコンクリートの各材料温度は、貯蔵サイロ及び計量瓶に設置した熱電対によって計測した。また、冷却骨材温度及び冷却コンクリート温度は非接触温度計によって計測した。

4. 冷却コンクリートの施工

施工したコンクリートの配合を表-1に示す。セメントを3成分系の超低発熱セメントとしたため、設計基準強度240kgf/cm²を得る材令を56日とした。超遅延剤は、ドライミックスによるスランプロスを是正するために添加した。コンクリートの練混ぜは、容量3m³の強制2軸練りミキサを用いて、1バッチ2.5m³で行った。解析から得られた打込み温度は第1リフト18℃、第2リフト20℃であり、

運搬・圧送時の温度上昇量及びコンクリート温度のばらつきを考慮して、出荷時の温度管理値の初期値を解析温度-4℃と設定し、施工にともなって荷卸し及び筒先での計測温度をプラント側に直ちにフィードバックさせ、出荷目標温度を調整しながらコンクリートの出荷を行った。

打込んだ冷却コンクリートは、第1リフト135m³、第2リフト155m³であり、ポンプ車を用いてブームにより巡回しながら層状に打込みを行った。写真-2に打込み状況を示す。また、打込

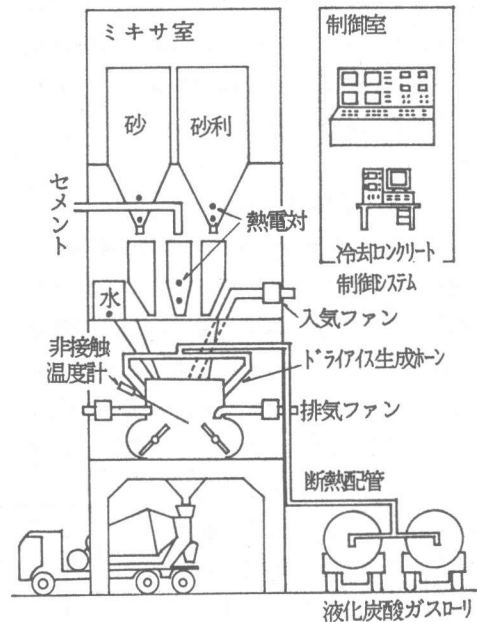


図-4 プレカリング設備の概要

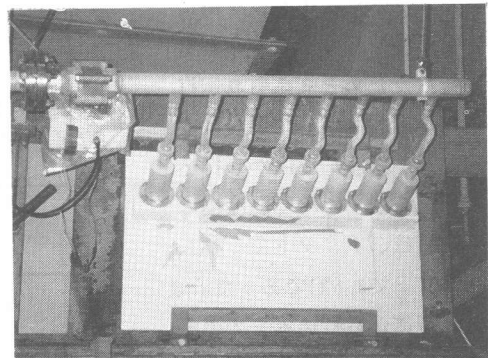


写真-1 ドライアイス生成ホーン

表-1 コンクリートの配合

| スランプ (cm) | Gmax (mm) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 混和剤 (C×%) | |
|--------------|--------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|-----------|------|
| | | | | W | C | S | G | AE減水剤 | 超遅延剤 |
| 15 | 20 | 51.7 | 43.5 | 155 | 300 | 782 | 1064 | 1.5 | 0.07 |

だコンクリートのモニターとして、熱電対、コンクリートひずみ計、有効応力計を各リフトに埋設し、打込み後のコンクリート温度及び応力の測定を行った。

5. 施工結果及び考察

5. 1 コンクリートの温度測定結果

打込んだコンクリートの筒先での温度測定結果を図-5に示す。図中の未冷却温度は、各材料の平均温度に運搬・圧送時の上昇温度を加えた温度である。打込み温度は全て目標温度以下であり、平均温度は、第1リフト16.7℃、第2リフト

18.4℃であった。打込み温度が波を打つような形でばらついた理由は、現場における打込み温度をプラントにフィードバックさせ、1バッチ毎に出荷温度を調整しながら製造を行ったためと考えられ、打込みが進むにつれて温度は安定した。未冷却温度から打込み温度を引いた冷却温度幅の平均値は、1リフトで3.4℃、2リフトで3.5℃であった。また、製造から打込みまでの平均所要時間は42分であり、コンクリートの練上りから筒先までの平均温度上昇量は2.1℃であり、その内訳は運搬時1.2℃、圧送時0.9℃であった。

5. 2 コンクリート1m³・1℃冷却に必要なドライアイスマ量

図-6に、各バッチに使用したドライアイスマ量と冷却温

度幅から算出した1m³・1℃冷却に必要なドライアイスマ量を示す。1m³・1℃冷却に必要なドライアイスマ量は全平均で7.9kgであった。冷却効率にばらつきが大きいのは、ミキサの保冷の影響と考えられる。施工の際にはミキサの外側を断熱材で養生して冷却コンクリートを製造したが、ミキサ本体が冷却されて一定温度になるまでに時間がかかり、製造開始から3～5台分までは、必要ドラ

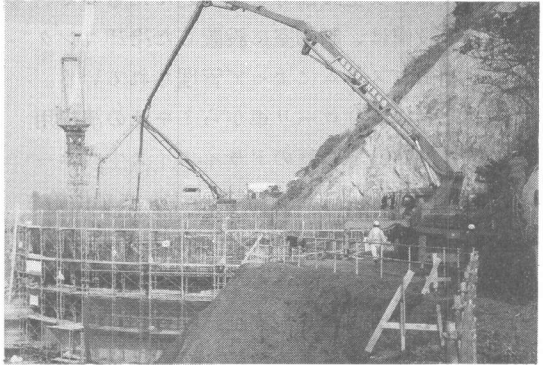


写真-2 打込み状況

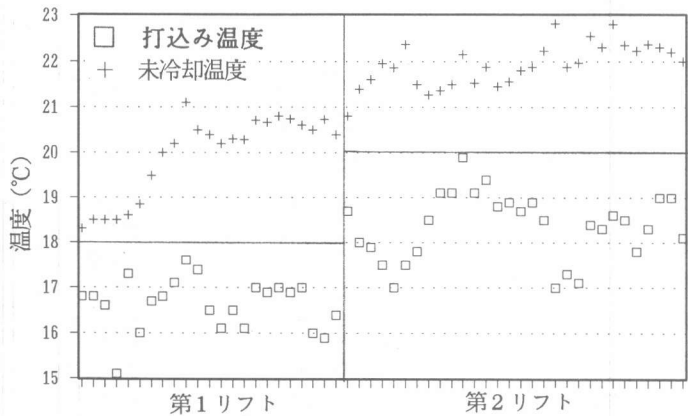


図-5 コンクリートの温度測定結果

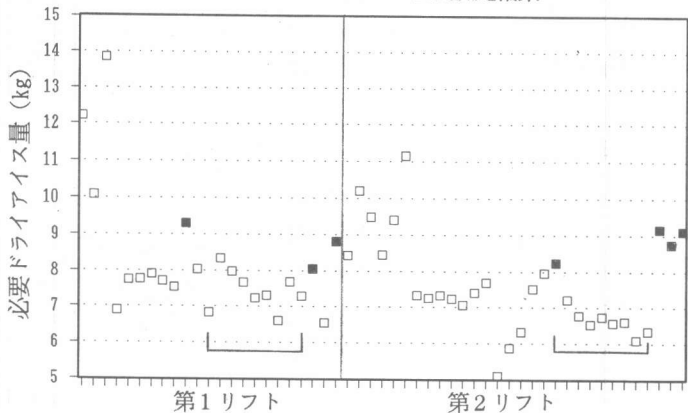


図-6 1m³・1℃冷却に必要なドライアイスマ量

イアイス量が増えたものと考えられる。図中の■のポイントは、アジテータトラックの連絡待ち等で出荷間隔が30分以上開いたケースであるが、この場合にも必要ドライアイス量が増加している。逆に括弧で示した連続出荷を行った9台の平均値は、1リフトで7.4kg、2リフトで6.8kgとなり、必要ドライアイス量が減少している。したがって、ミキサが冷却された後は、連続した出荷を行えば、必要ドライアイス量は減少し、ドライアイスの理論的保有熱量から計算した冷却効率率は、60～65%となることが分かった。

5.3 コンクリートのスランプ、空気量、強度

コンクリートのスランプ、空気量、圧縮強度、引張強度の試験結果を表-2に示す。表中の未冷却コンクリートは、プレクーリングを行わなかった底版部の測定結果を示す。冷却コンクリートのスランプは14～16.5cm、空気量3.3～3.7%であり、未冷却コンクリートとの差はなかった。また、圧縮強度は、材令7、28、56日でそれぞれ、177、289、323kgf/cm²であり、未冷却コンクリートと同等であった。

5.4 製造サイクルタイム

アジテータトラックの待ち時間等のロスタイムを含めて、今回の施工では時間当たり約40m³のコンクリートを打込んだ。1バッチ2.5m³の冷却コンクリートを製造する場合の標準的なサイクルタイムを図-7に示す。排気時間が全体の約半分を占めている。このように排気に時間がかかった理由として考えられるのは、ドライアイスの投入量が大きいために、上部に吹き上げられたドライアイスが、ミキサ内の壁面や材料投入口に付着し、そのドライアイスの昇華に時間がかかったためと考えられる。

今回の施工では外気温が低く冷却温度幅が小さかったが、真夏の施工では10℃程度の冷却が必要と考えられる。この場合のサイクルタイムを計算すると、ドライアイスの投入時間が80秒となり、その他は変更がないので1バッチ約4分となり、時間当たりの出荷量は37.5m³となる。

5.5 打込み後のコンクリー

表-2 コンクリートのスランプ、空気量、強度

| 項目 | 個数 | 平均値 | 標準偏差 | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-----|------|------|------|-----|------|------|
| 冷却コンクリート | スランプ (cm) | 10 | 15.4 | 0.74 | | | | |
| | 空気量 (%) | 6 | 3.5 | 0.13 | | | | |
| | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 6 | 7日 | 28日 | 56日 | 7日 | 28日 | 56日 |
| | | | 177 | 289 | 323 | 4.2 | 10.5 | 9.7 |
| | 引張強度 (kgf/cm ²) | 6 | 7日 | 28日 | 56日 | 7日 | 28日 | 56日 |
| | | | 15.4 | 24.7 | 26.3 | 0.8 | 1.1 | 1.3 |
| 未冷却コンクリート | スランプ (cm) | 10 | 15.3 | 0.34 | | | | |
| | 空気量 (%) | 6 | 3.4 | 0.10 | | | | |
| | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 6 | 7日 | 28日 | 56日 | 7日 | 28日 | 56日 |
| | | | 179 | 285 | 315 | 6.7 | 9.9 | 10.3 |
| | 引張強度 (kgf/cm ²) | 6 | 7日 | 28日 | 56日 | 7日 | 28日 | 56日 |
| | | | 14.4 | 23.6 | 26.2 | 1.3 | 1.9 | 1.2 |

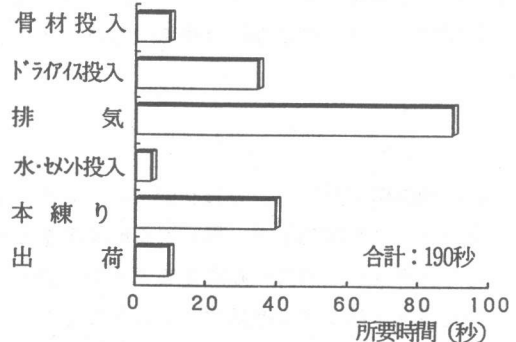


図-7 製造サイクルタイム (1バッチ当たり)

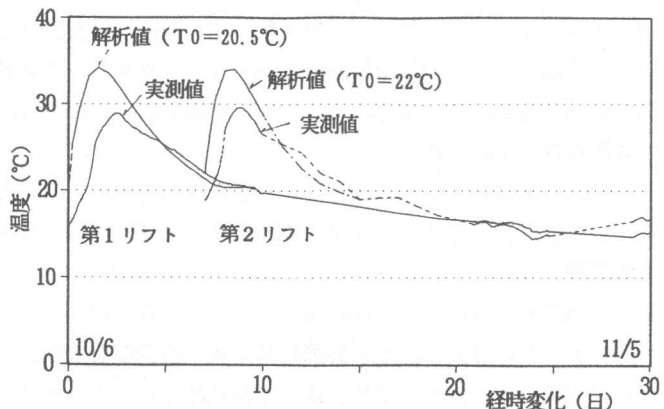


図-8 打込み後のコンクリート温度

ト温度、応力

熱電対による打込み後の各リフト中央部のコンクリート温度の測定結果を図-8に示す。図にはプレクーリングを行わなかった場合の事前解析結果もあわせて示した。プレクーリングによりコンクリートの最高温度は、1リフトで5℃、2リフトで4℃低減され、温度の上昇、低減勾配も緩やかになった。この結果、発生する温度応力も低減されたものと考えられる。

図-9には、最も温度応力が大きくなった1リフト断面中央部分の円周方向応力の計測結果を示す。図にはひずみから算定した温度応力と有効応力計での計測結果及び事前解析結果を示した。コンクリートの応力は温度降下とともに引張側となり、第2リフト打込み直後まで急激に増大する。その後第3リフト打込み直後にピークとなり、以降は日変化を伴いながら漸減している。ひずみから算出した応力と有効応力計の値に大きな差が見られたが、この点については、今後も計測を継続しデータを蓄積した段階で検討したいと考えている。いずれにしても温度応力の値は、コンクリートの引張強度に比べて十分小さく、また、表面の観測結果からも、現段階ではクラックの発生は皆無であり、満足できるひびわれ制御効果が得られたものと考えられる。

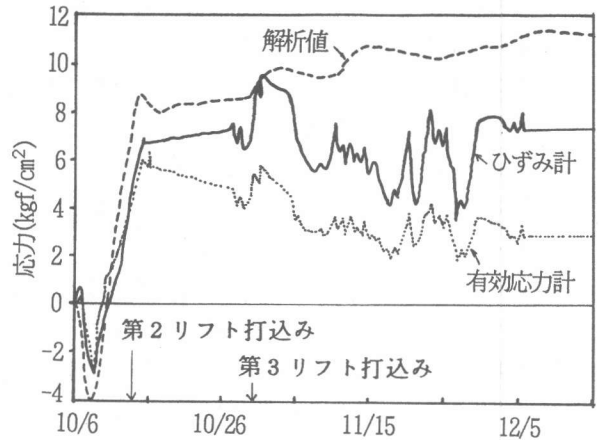


図-9 コンクリート応力の測定結果

図-9には、最も温度応力が大きくなった1リフト断面中央部分の円周方向応力の計測結果を示す。図にはひずみから算定した温度応力と有効応力計での計測結果及び事前解析結果を示した。コンクリートの応力は温度降下とともに引張側となり、第2リフト打込み直後まで急激に増大する。その後第3リフト打込み直後にピークとなり、以降は日変化を伴いながら漸減している。ひずみから算出した応力と有効応力計の値に大きな差が見られたが、この点については、今後も計測を継続しデータを蓄積した段階で検討したいと考えている。いずれにしても温度応力の値は、コンクリートの引張強度に比べて十分小さく、また、表面の観測結果からも、現段階ではクラックの発生は皆無であり、満足できるひびわれ制御効果が得られたものと考えられる。

6. まとめ

貯水池側壁部分のひびわれ制御対策として、超低発熱セメントを用い、ドライアイスによるプレクーリングを実施した。得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) コンクリートの打込み温度をプラント側にフィードバックさせて出荷温度を調整することで、筒先温度を精度よく制御することができた。
- (2) コンクリート $1\text{m}^3 \cdot 1^\circ\text{C}$ 冷却に必要なドライアイス量は全平均で7.9kgであり、連続した出荷を行えば必要ドライアイス量が減少することが分かった。
- (3) コンクリートのスランプ、空気量、圧縮強度等の品質はプレクーリングによって変化しない。
- (4) 現状のシステムで、冷却温度幅 10°C のコンクリートの時間打込み量は 37.5m^3 である。
- (5) 打込み後の温度・応力のモニタリング及び表面のひびわれ観測結果から、満足できるひびわれ制御効果が得られた。

最後に、本研究の実施にあたり、貴重な御助言をいただいた群馬大学辻幸和教授、御協力をいただいた横須賀小野田レミコン（株）及び日本酸素（株）関係者に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 土師秀人・竹内光・田村富雄：ドライアイスを用いたプレクーリング工法の基礎的研究（その1、その2）、土木学会第45回年次学術講演会、Vol. 5, pp. 402-405、1990. 9
- 2) 本郷善彦・竹内光・田村富雄：冷却媒体としてドライアイスを用いたプレクーリング工法の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp. 1115~1120、1992.