

論文

[1193] 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

正会員○本郷 善彦 (三井建設 技術研究所)

正会員 竹内 光 (三井建設 技術研究所)

正会員 田村 富雄 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

昨今、コンクリート構造物の大型化・複雑化、更には過酷な環境下に曝される構造物が多く見られ、耐久性確保に関する要求も厳しさを増してきている。このような状況下において、マスコンクリート構造物の水和過程で発生するひびわれを制御することは重要な課題である。とりわけ、夏場の暑中コンクリート対策は重要であり、あらかじめ冷却したコンクリートを打設するプレクーリング工法はその効果が大きく、注目を集めつつあり、液体窒素を用いた工法等各種の工法の開発がなされている[1]。筆者らは、新たな冷却媒体として蒸発潜熱が 137kcal/kgと大きいドライアイスに着目し、プレクーリング工法の研究を行っており、冷却コンクリートの基礎的な性質については、ほぼ把握している[2]。そこで実用化へのステップとして、既設のバッチプラントに冷却設備を取付け、ドライアイスを用いたプレクーリング工法の実証試験を行い、約80m³の冷却コンクリートを打設した。本研究は、冷却システム、コンクリート温度管理結果、冷却効率、強度及び中性化に対するモニタリング結果について検討したものである。

2. 冷却システム

2.1 基本的な冷却システム

ドライアイスを用いた基本的なプレクーリングシステムは、既存のミキサーに骨材(砂、砂利)を投入し、その中に冷却媒体としてドライアイス(-78.5℃)を投入してドライミックスを行う。ドライアイスが昇華する際の吸熱作用によって骨材を冷却し、冷却骨材を生産する。ミキサー内の炭酸ガスを強制的に排気した後、骨材温度の計測を行い、骨材が所定の温度まで冷却されたことを確認する。最後に、残りの材料である水、セメント、混和剤を投入し、冷却コンクリートを製造するものである。

2.2 冷却設備

本システムの特徴の1つとして、冷却コンクリートの製造を既存のミキサー内で行うため、冷却のための大きな設備及びスペースを必要としないことが上げられる。図-1にプレクーリング用設備の概要を示す。タンクローリからミキサーの清掃用窓に取り付けた2台のドライアイス生成ホーン(写真-1)まで断熱配管し、液化炭酸(-20

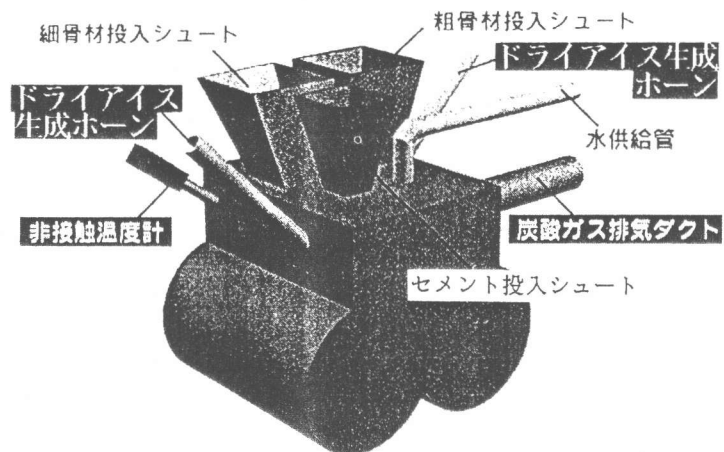


図-1 プレクーリング用設備

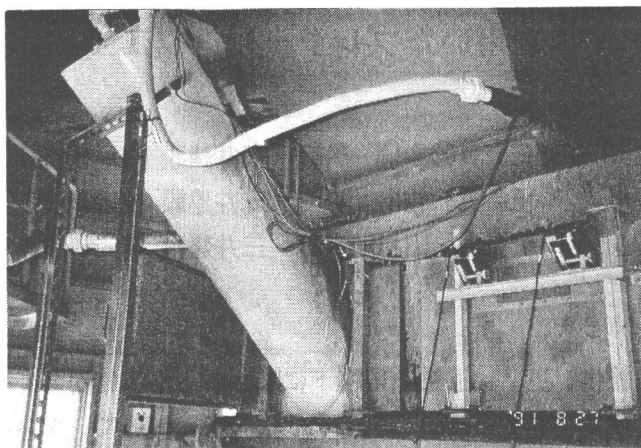


写真-1 ドライアイス生成ホーン

で、20気圧)を供給する。この液化炭酸をホーン先端の噴射ノズルから大気に吹き出すことによって断熱膨張させドライアイスを生成する。ドライアイスは粉雪状であり、表面積が大きいので、骨材からの吸熱及び昇華がすみやかに行われる。液化炭酸の投入制御は電磁弁で行い、投入量はオリフィス型流量計で管理した。また、ミキサー内及びミキサー室内に充滿した炭酸ガスを速やかに取り除くために2台の排気ファンを設置した。

2.3 温度管理

冷却システムのフローを図-2に、コンクリート材料及びドライアイスの熱量を表-1に示す。混練り前の材料温度は、砂、砂利、セメント、水各サイロに埋設した熱電対によって計測した。練り上がり温度 T_r は、打設時及び運搬時の温度上昇を考慮して、荷卸地点でのコンクリート温度よりも低い値を設定しておく必要がある。本試験では、目標温度に対して -3.5°C を入力した。骨材冷却温度目標値 T_a は、各材料の熱量より(1)式を用いて計算した。

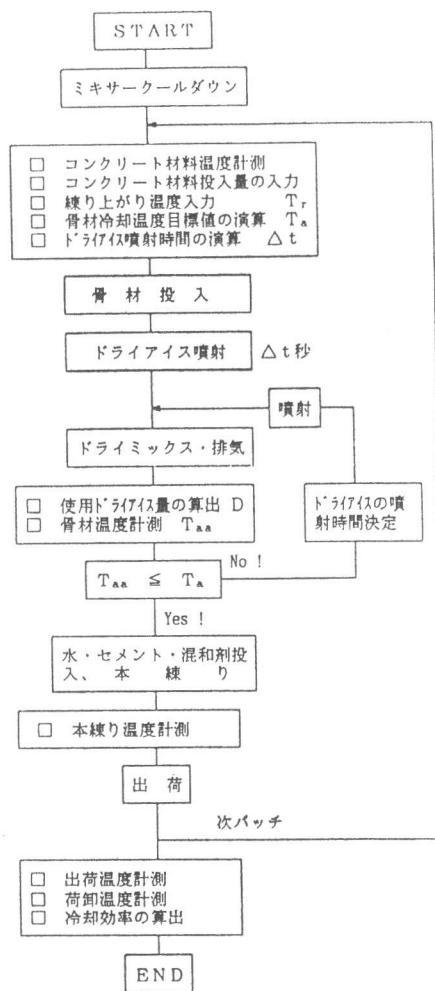


図-2 冷却システムのフロー

表-1 コンクリート材料及びドライアイスの熱量

| コンクリート材料 | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 骨材水分 | ドライアイス |
|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------|
| 1m ³ 当りの重量(kg) | W | C | S | G | Ws | — |
| 材料温度(°C) | Tw | Tc | Ts | Tg | Tws | — |
| 比熱(kcal/kg·°C) | 1.0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1.0 | — |
| 顕熱(kcal) | $W \cdot \theta$ | $0.2C \cdot \theta$ | $0.2S \cdot \theta$ | $0.2G \cdot \theta$ | $Ws \cdot \theta$ | — |
| 昇華熱(kcal/kg) | — | — | — | — | — | 137 |

註 θ : 冷却温度(°C)

$$T_a = \frac{(W + 0.2C + 0.2S + 0.2G) T_r - \{(W - W_s) T_w + 0.2C \cdot T_c\}}{0.2(S + G) + W_s} \quad (1)$$

ドライアイスの噴射時間は、骨材の冷却温度幅、ドライアイスの生成量(1.07kg/sec)及び骨材を1°C冷却するのに必要なドライアイス量(予備試験データより4.6kg/1m³·1°C)より求めた。冷却骨材の温度計測及び本練り温度の計測は、ミキサーの清掃用窓に取り付けた非接触温度計(写真-1参照)を用いて行った。また、冷却効率 η は(2)式より求めた。

$$\eta = \{ (W + 0.2C + 0.2S + 0.2G) \theta / 137 \} / D \quad (2)$$

上式の{ }内は、ドライアイスの昇華熱がすべてコンクリートの冷却に消費されたとした場合の理論値であり、Dは、実験でのドライアイス使用量である。計測した温度データは3秒単位でリアルタイムでパソコンに取り込み、CRT表示、計算、保管を行った。

3. 試験方法

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。基礎実験では、骨材と同時にセメントをも冷却するシステムで実験を行った。その際に、骨材の表面水中に昇華したドライアイスとセメント中のCaが溶解し、CaCO₃が生成し、ペースト中のCa濃度が低下し、空隙質や半水石膏の水和が促進され、こわばり現象が生じたため、超遅延剤を添加することによってこのこわばり現象を解消した[2]。今回の試験では、セメントはドライアイスの昇華を確認した後に投入するシステムに変更したが、砂の表面水率が8%程度と高かったため、炭酸ガスが表面水中に溶解込んだ場合を考慮して、冷却コンクリートには超遅延剤を添加した。試験水準は、表-3に示すように、荷卸し地点での目標温度

として20℃、15℃、10℃とし、温度基準を+0℃、-3℃とした。各バッチの混練りは、容量3m³の強制2軸練りミキサーを用いて、1バッチ1.75m³の混練りを行い、3バッチ

5.25m³で1車出荷した。レミコン車1台毎に出荷時点及び荷卸し地点でのコンクリート温度、スランプ、空気量を測定した。また、荷卸し地点で、各温度水準毎にテストピースを採取し、強度試験及び中性化促進試験に供した。

表-2 コンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法 (cm) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|---------------|-----------|---------|----------------|--------------|--------------------------|-----|-----|------|-----------|-------|
| | | | | | W | C | S | G | 混和剤 (C×%) | |
| | | | | | | | | | AE減水剤 | 超遅延剤 |
| 25 | 12±2.5 | 4±1 | 60.4 | 43.8 | 165 | 273 | 813 | 1080 | 1.5 | 0.075 |

表-3 試験水準

| 温度水準 | 未冷却 | 20℃ | 15℃ | 10℃ | 計 |
|-----------------------|-----|-----|-----|--------|--------|
| 打設量 (m ³) | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 1.5.75 | 7.8.75 |
| 出荷台数 | 4 | 4 | 4 | 3 | 15 |

4. 試験結果及び考察

4.1 コンクリートの温度管理結果

コンクリートの混練りは、未冷却、20℃、15℃、10℃の順に各温度2台ずつ行った。打設したコンクリートの温度測定結果を、図-3に示す。図には、1バッチ毎に本練り時に測定した温度の3バッチの平均値と各レミコン車毎の出荷時点での温度及び荷卸し地点での温度とを並列に示している。未冷却コンクリ

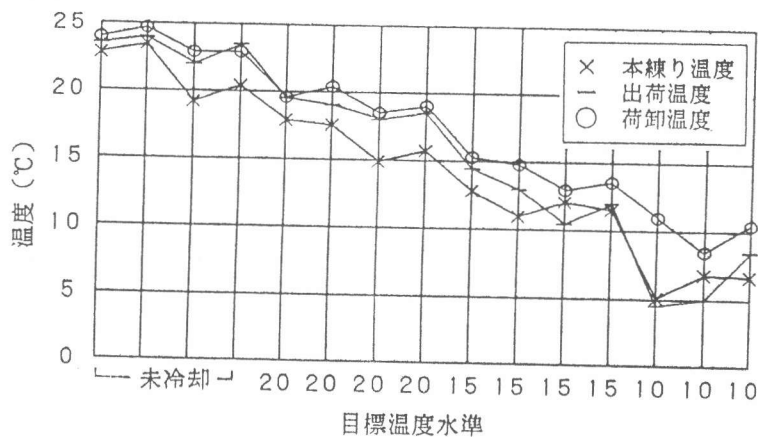


図-3 コンクリートの温度測定結果

一の荷卸温度は、23～25℃であった。温度水準20℃及び15℃の冷却コンクリートの温度は、荷卸地点で目標温度に対して-2℃～+0.5℃の範囲にあり、精度良く温度管理ができた。一方、温度水準10℃では、出荷時のコンクリート温度が低いために、他の水準に比べて運搬時の温度上昇が大きかったため、若干目標温度よりも高くなったが、-1.5～+1℃の範囲であった。

次に、本練り時と出荷時の温度を比較すると平均1.2℃の温度上昇があった。この理由としては、炭酸ガスがコンクリート中に巻き込まないよう、投入したドライアイスが完全に昇華し、排気を確認するまでに時間がかかり、1バッチ当たりの平均所要時間が約5分であったため、3バッチ練り上がるまでの間にコンクリートの温度がレミコン車内で上昇したものと考えられる。一方、打設現場までの平均運搬時間は36分であり、この間の温度上昇は平均1.5℃であった。

また、実験中骨材温度が目標値まで下がらず液化炭酸の再噴射を要したのが2バッチあった。実験時の液化炭酸の流量データからその原因を分析すると、1バッチは、噴射の途中より明らかに供給流量が減少していた。これは、傾斜したドライアイス生成ホーンを採用したため、ホーン先端のノズル部分でドライアイスが生成され、目詰まりを起こしたものと考えられる。もう1バッチの方は、流量に異常はなかった。従って、再噴射の原因は生成したドライアイスの1部分がホーン下部に堆積し、ミキサー内に落ちなかったためと考えられる。

4.2 冷却効率

図-4に、コンクリートの冷却温度幅と使用したドライアイス量の関係を示す。図には、1バッチ毎の本練り温度を対象としたものと、荷卸温度を対象とした結果を示している。1バッチ毎の本練り温度を対象とした場合はややばらつきが大きいが、図よりコンクリートの冷却温度幅とドライアイス使用量とは比例関係にあることが分かる。図中に示した直線回帰式より、1m³のコンクリートを1℃冷却するのに要するドライアイス量を求めると、本練り時で6.3kg（相関係数R=0.86）、荷卸時で6.9kg（R=0.95）であった。この本練り時と荷卸時との差は、未冷却コンクリートの方が冷却コンクリートよりも運搬時の温度上昇が大きかったためである。一方、使用した全ドライアイス量を全水準の総冷却量で除して得られる1m³、1℃冷却に要するドライアイス量は7.2kgであった。(2)式よりコンクリート1m³、1℃冷却に必要なドライアイスの理論値は4.4kgであり、これらの結果より61～70%の冷却効率を得られた。室内試験では80～85%の冷却効率を得られており、今回の実証試験では20%程度冷却効率が低下した。この理由として考えられるのは、ミキサー容量に比べて練り混ぜ

数量が小さく、かつ、ミキサーを断熱養生していないためにドライアイスの冷熱がミキサー外に流出したことと、打設待ち時間及び運搬時にレミコン車内で温度が上昇したためと考えられる。

4.3 コンクリートの製造能力

図-5に、コンクリートの冷却幅と製造能力の関係を示す。計算条件は、2.5m³練り2バッチで1車出荷とした。コンクリートの冷却幅が大きくなるほど製造量は減少し、現状のドライアイス製造能力64kg/min、排気時間100sec

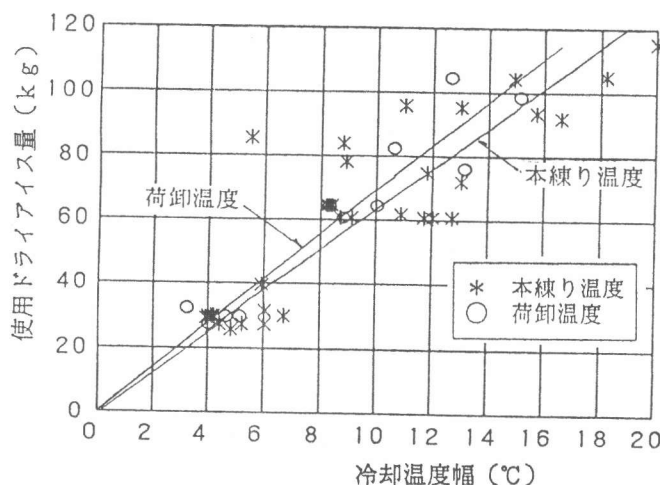


図-4 冷却温度幅と使用ドライアイスの関係

での製造能力は、冷却幅10℃で、約30 m³/hである。製造能力を向上させるためには、排気時間の短縮及びドライアイス製造能力の増大が必要となる。図に示すように、排気時間を現状の1/2に短縮し、ドライアイス製造能力を2倍にすると、冷却幅10℃のコンクリートを時間当たり約50m³製造することが可能となり、今後実用化に向けてこの点の改良を進めていく必要があると考えられる。

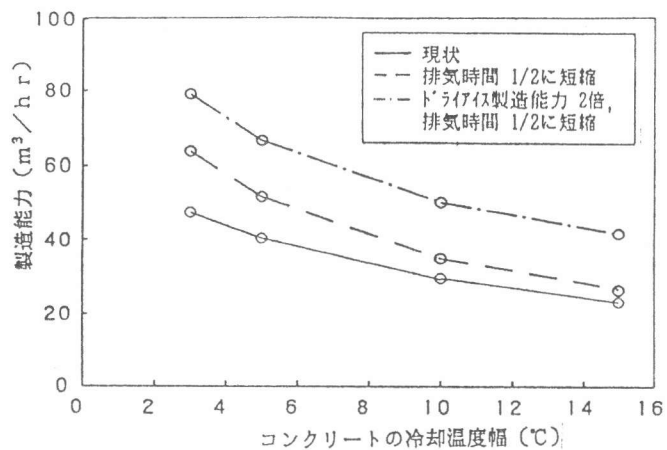


図-5 冷却コンクリートの製造能力

4.4 コンクリートのスランプ、空気量

各レミコン車毎のコンクリートのスランプ及び空気量の測定結果を表-4に示す。スランプは、出荷時13cm、荷卸で12cmを目標としが、冷却コンクリートのスランプは、未冷却コンクリートに比べ、出荷時で1.4cm、荷卸時で2.5cm大きかった。また、運搬によるスランプロスもほとんどなく、逆に、若干大きくなった。この理由は、コンクリートの温度が低いことにもよるが、超遅延剤による効果が大いと考えられる。この結果から、セメントを冷却しない本システムでは、超遅延剤添加の必要性及び添加量については、再考を要すると考えられる。一方、空気量の値は、未冷却と冷却でほとんど変わらず、冷却による影響がないことが分かった。

表-4 スランプ、空気量

| 項目 | | サンプル数 | 平均値 | 標準偏差 | |
|--------------------------|-----|-------|-----|------|-----|
| ス ラ ン プ (cm) | 未冷却 | 出荷時 | 4 | 13.4 | 1.0 |
| | | 荷卸時 | 4 | 12.7 | 2.5 |
| | 冷却 | 出荷時 | 11 | 14.8 | 1.5 |
| | | 荷卸時 | 11 | 15.2 | 1.9 |
| 空 気 (%) | 未冷却 | 出荷時 | 4 | 4.2 | 0.5 |
| | | 荷卸時 | 4 | 4.4 | 0.6 |
| | 冷却 | 出荷時 | 11 | 4.2 | 0.7 |
| | | 荷卸時 | 11 | 3.9 | 0.7 |

4.5 コンクリートの強度

試験時に採取したコンクリート供試体の圧縮強度試験結果を図-6に示す。一般的にコンクリートの打設温度が低いと長期材令で強度が増加することが知られているが、本試験結果も打設温度10℃以外の冷却コンクリートでは15~20%未冷却に比べて強度が増加している。

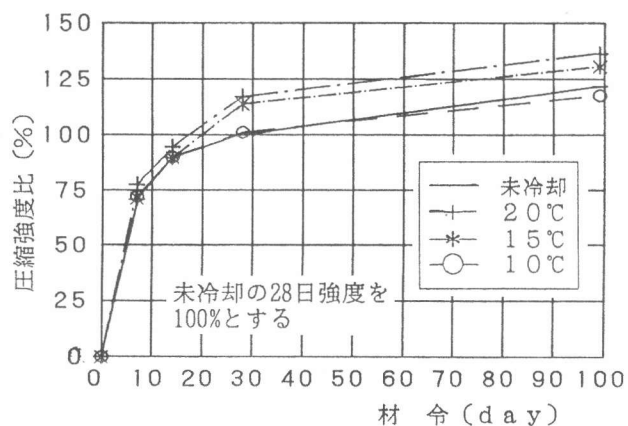


図-6 コンクリートの圧縮強度

4.6 中性化促進試験

冷却媒体としてドライアイスを用いているため、コンクリートの耐久性として中性化の問題が懸念される。試験では、水、セメントと炭酸ガスが接触して、炭酸カルシウムが生成されないように、完全にガスを排気してから水、セメントを投入している。ここでは、打設した冷却コンクリートの中性化に対する抵抗性を確認するために中性化の促進試験を行った。試験方法は、各温度水準の打設コンクリート供試体を14日水中養生後、温度20℃、湿度60%、炭酸ガス濃度

10%の促進試験槽に定置し、3、7、14、28日後にそれぞれ取り出し、割断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧し、未発色部分を12点測定し、中性化深さを求めた。横軸に経過時間の平方根をとった中性化深さの結果を図一7に示す。この図より中性化の進行が $X = k\sqrt{t}$ (X ; 中性化深さ(mm)、 k ; 中性化速度定数、 t ; 時間(day))で表されることが分かる。得られた中性化速度定数を比較すると、いづれの温度水準でも未冷却と同程度か、若干小さくなっており、ドライアイスで冷却媒体として用いても中性化が促進されることがないことを確認した。さらに、化学的な見地から、モルタル中の全カルシウムに対する水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの割合の相違について示差熱分析を用いた検討を現在進めている。

5. まとめ

本研究では、冷却媒体としてドライアイスを用いたコンクリートプレケーリング工法の実証試験結果について述べた。得られた成果をまとめると以下のようなになる。

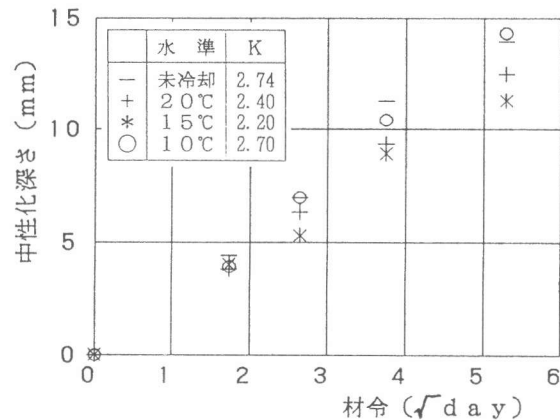
- (1) 既存の生コンクリートプラントの大幅な改良や広いスペースを必要とせずに、ミキサーに冷却設備としてドライアイス生成ホーン及び簡単な温度管理システムを設置することによって、冷却コンクリートが製造できることを確認した。
- (2) 20、15、10℃という荷卸地点でのコンクリート目標温度に対して、-2℃～+1℃の範囲で精度良く温度管理ができた。
- (3) ドライアイスによるコンクリートの冷却効率は、冷却温度幅に関係なく、61～70%であり、1 m³コンクリートを1℃冷却するのに必要なドライアイス量は約7kgであった。
- (4) 現状での冷却コンクリート製造能力は、時間当たり約30m³であり、排気時間の短縮及びドライアイス製造能力の増大が今後の課題である。
- (5) 冷却コンクリートの強度は、10℃冷却の場合を除いて、未冷却コンクリートに比べ約15%増加した。
- (6) ドライアイスで冷却媒体として用いても、中性化に対する悪影響はないことを確認した。

謝辞

最後に、本研究の実施にあたり、多大な御協力をいただいた横須賀小野田レミコン株式会社及び湘南国際村本工事事務所の関係者各位ならびに共同研究者の日本酸素株式会社関係者に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 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ケーリング工法の開発、セメント技術年報、Vol. 42, pp. 571-574、1988
- 2) 土師秀人・竹内光・田村富雄：ドライアイスを用いたプレケ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



図一7 中性化促進試験結果