

[2013] 液体窒素を用いたプレクーリングのダムコンクリートへの適用性

正会員 中原 康 (鹿島建設技術研究所)  
 正会員 万木 正弘 (鹿島建設技術研究所)  
 二階堂 稔 (鹿島建設技術研究所)  
 正会員 ○白石 泰一 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

液体窒素(以下、LN<sub>2</sub>と記す)によるコンクリートのプレクーリングは、既にアメリカやオーストラリア等では多くの実績もあり<sup>[1]</sup>、我国でも研究<sup>[2]</sup>が進められている。また、本年改訂されるACI 305 委員会報告『暑中コンクリート』にもLN<sub>2</sub>によるプレクーリングは取り入れられる予定であり、今後の温度ひびわれ抑制対策の一つとして期待される技術である。しかし、Gmax=150 mmのダムコンクリートを対象としたものとしては、オーストラリアでの実績<sup>[3]</sup>はあるが、技術的資料は見当たらない。

本研究は、Gmax=150 mmのダムコンクリートを対象に、短い練りまぜ時間で所要の品質が得られる強制2軸ミキサを使用した場合のLN<sub>2</sub>によるプレクーリングの適用性について検討したものである。

2. 実験概要

ダムコンクリートを対象にLN<sub>2</sub>の冷却効率、冷却されたコンクリートの品質、冷却後のコンクリートの温度上昇に対する養生の影響等を把握することを目的とし、実工事現場に設置されている2軸強制練りミキサにLN<sub>2</sub>を直接投入してコンクリートをプレクーリングする方法で一連の実験を行った。

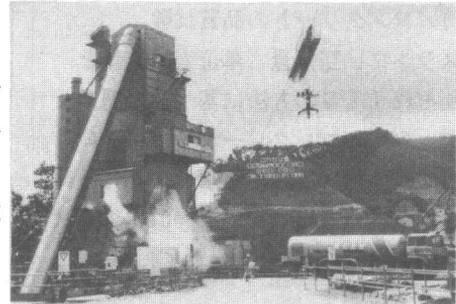


写真-1 現場実験の状況

2.1 実験ケース

表-1に示した計19ケースの実験を次の2ステップに分けて行った。

1). ステップ1: LN<sub>2</sub>の投入量とコンクリートの降下温度の関係を把握を目的とした実験

2). ステップ2: 次の3項目の把握を目的とした実験

a. LN<sub>2</sub>によるプレクーリングがダムコンクリートの品質に与える影響

b. 標準的なダムコンクリートと骨材寸法40~150 mmを40mm以下の骨材に置き換えたコンクリートおよびRCDコンクリートの冷却効率の違い

c. プレクーリングしたコンクリートの打設後の養生方法がコンクリートの内部温度に与える影響

2.2 LN<sub>2</sub>の投入方法

写真-1に示すようにLN<sub>2</sub>タンクローリーからミキサまで配管し、ミキサ内部に取り付けた4本のノズルからLN<sub>2</sub>を投入した。ミキサでのノズルの位置や方向お

表-1 実験ケース

ケース No	コンクリート配合	目標降下温度(℃)	LN <sub>2</sub> 投入量(kg/ml)	圧縮強度試験	コンクリートの養生方法	
ステップ1	1	I	0	0		
	2	I	3	30		
	3	I	6	60		
	4	I	9	90		
	5	I	12	120		
ステップ2	1	I	0	0	○	
	2	I	6	60	○	シート
	3	I	12	120	○	
	4	II	0	0	○	
	5	II	12	120	○	
	6	I	12	120		自然
	7	I	12	120		シート
	8	I	12	120		断熱
	9	I	0	0		自然
	10	I	0	0		シート
	11	I	0	0		断熱
	12	III	0	0		
	13	III	6	60		
	14	III	12	120		シート

よびLN<sub>2</sub>の流量や圧力は海外での経験や事前に行った室内実験結果から適切な方法を採用した。

### 2.3 使用ミキサ

容量1.5 m<sup>3</sup>の可変速式の水平2軸強制練りミキサを使用した。ミキサの羽根の回転数および練りませ時間は表-2に示すとおりであり、15秒間高速でモルタルを先練りし、その後に粗骨材を投入して中速でコンクリートを練りませた<sup>[4]</sup>。ただし、LN<sub>2</sub>の投入量が多く、所定の練りませ時間内ではLN<sub>2</sub>の投入ができなかったケースでは練りませ時間を100秒まで延ばした。

### 2.4 使用材料およびコンクリートの配合

実験で使用した材料は表-3に示すとおりで、コンクリートの配合は表-4に示すとおりである。配合Ⅰはダム用内部コンクリート、配合ⅡはRCDコンクリート、配合Ⅲは配合Ⅰの寸法40mm以上の骨材(G1, G2)をすべて寸法40mm以下(G3)に置き換えたものである。

### 2.5 測定項目およびその方法

#### (1). LN<sub>2</sub> 使用量の測定

LN<sub>2</sub>の使用量はオリフィス式の流量計を用いて測定した。なお、流量計の手前には気液分離器を設置した。

#### (2). コンクリートの品質試験

スランパ、空気量、単位容積重量をそれぞれJISの方法に基づいて測定した。RCDコンクリートでは、RCD工法技術指針(案)に示された方法によってVC試験を行なった。

圧縮強度試験はφ150×300mmの供試体を標準養生し、材令7, 28, 91日においてJISに基づいて試験した。

#### (3). 温度測定

コンクリートの温度は練上り直後、および練上りから約10分後のフレッシュコンクリートの品質試験時に測定した。

#### (4). 養生実験

図-1に示すような容器にコンクリートを打込み、ダム用バイブレータで締固めて養生実験用の試験体を作製し、それ以後のコンクリート温度を測定した。養生方法は次の3ケースとした。なお、練上り後試験体作製までに10~15分を要した。

- 断熱養生：厚さ30cmの発泡スチロールをコンクリートの上面に設置し、コンクリートと外気との熱移動を少なくする。
- シート養生：ブルーシートをコンクリートの上面から10cm程度の位置に張り、日射や風による影響を少なくする。
- 自然放置：コンクリートの上面を均した後、そのまま放置し、日射や風の影響を直接受けるようにする。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 コンクリートの品質への影響

練上り直後の温度とスランパ、空気量、圧縮強度の関係は

表-2 ミキサの羽根の回転数および練りませ時間

	回転数	練りませ時間
モルタル練り	36r.p.m.	15秒
コンクリート練り	27r.p.m.	65秒

表-3 使用材料

セメント	中庸熟ポルトランドセメント
細骨材	鬼怒川産川砂(比重2.58, F.M.2.70)
粗骨材	鬼怒川産川砂利(比重2.63, F.M.8.30)
混和材料	遅延形A/E減水剤 フライアッシュ(RCDコンクリート)

表-4 コンクリートの配合

配合No.	粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比(%)	骨材率(%)	骨材目標準ランパ(cm)	目標空気量(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
						水	セメント	骨材				混和剤	
								細骨材	G1	G2	G3		G4
I	150	64	26	4	4	102	160	543	476	397	286	428	0.400
II	150	71 <sup>1)</sup>	28	20 (Vc値)	1.5	79	110 <sup>1)</sup>	533	501	398	279	559	0.275
III	40	64	26	—	—	102	160	543	—	—	1159	428	0.400

注1)：配合Ⅱのセメントにはフライアッシュを含む。

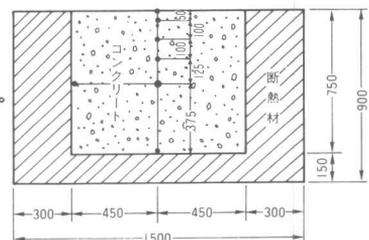


図-1 養生実験用の試験体

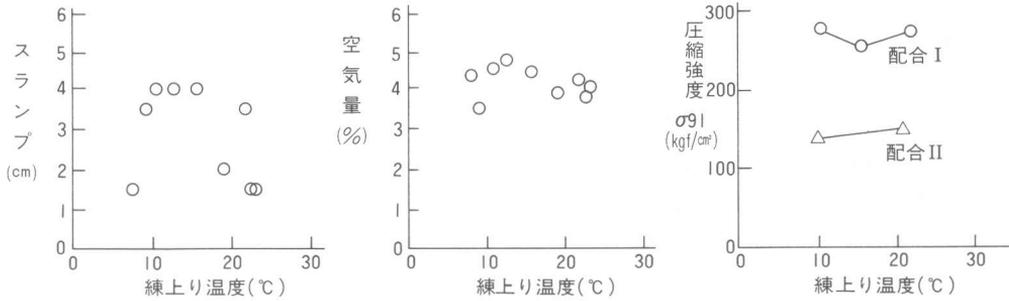


図-2 練上り温度とコンクリートの品質の関係

図-2に示すとおりであり、 $LN_2$ による冷却がコンクリートの品質へ及ぼす顕著な影響はなかった。一般に、練上り温度が低いと圧縮強度の増進などが見込まれるが、今回の実験ではそのような結果は得られなかった。 $LN_2$ による冷却が他の冷却方法と同様な影響をコンクリートの品質に対して与えるかどうかは、今後さらに検討していく必要がある。

### 3.2 $LN_2$ によるダムコンクリートの冷却効率

#### (1). 練上り直後のコンクリート温度による冷却効率（見掛け上の冷却効率）

コンクリート  $1 m^3$ を  $1^\circ C$ 下げるのに必要な $LN_2$ の量と練上り直後の温度降下量の関係を図-3に示す。この結果から、温度降下量が  $5 \sim 15^\circ C$ の範囲では降下量の大小にかかわらず、配合Iでは平均  $8.8 kg/m^3 \cdot ^\circ C$ の $LN_2$ 使用量となった。配合IIIでは  $10.4 kg/m^3 \cdot ^\circ C$ であり、配合Iと  $1.6 kg/m^3 \cdot ^\circ C$ の差がある。これは骨材粒径による骨材の表面積の違いによって熱交換の効率に差が生じたためと考えられる。また、配合IIでは $LN_2$ 使用量は  $11.8 kg/m^3 \cdot ^\circ C$ であり、他と比べて使用量が多い。これは配合II（RCDコンクリート）が超硬練りであるので練りませ時に $LN_2$ を取り込みにくいこと、熱交換の効率が低下したことによるものと考えられるが、今後のデータ収集によって確認する必要がある。

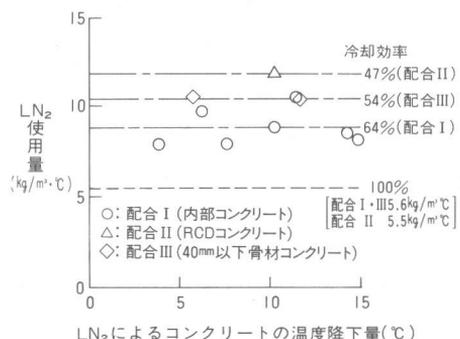


図-3 コンクリートの温度降下量と $LN_2$ 使用量の関係  
(見掛け上の冷却効率)

#### (2). 練上り直後からの時間の経過に伴う温度上昇

練上り後から約10分間にコンクリートがどの程度温度上昇するかを示したのが図-4である。外気温の違いや直射日光の影響など必ずしも同一条件で得られたデータでないため、ばらつきはあるが、練上り直後のコンクリート温度が低いほど温度上昇量は大きくなっている。この温度上昇の原因としては、

- a. 寸法の大きい骨材の未冷却
- b. 外気温・直射日光の影響
- c. セメントの水和熱

等が考えられるが、粗骨材寸法の大きいダムコンクリートの特徴として、aがあり、この影響を十分把握しないと真の冷却効率はわからないことになる。

#### (3). 真の冷却効率の検討

真の冷却効率は各種要因が絡んでいるので把握す

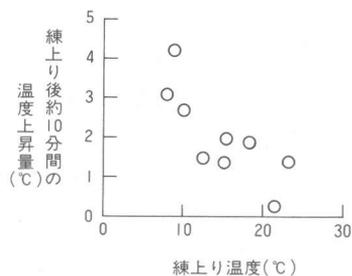


図-4 練上り約10分後までの温度上昇量

することは難しいが、次の二つの方法によって検討した。

1). 断熱養生試験体の温度上昇データからの推定

LN<sub>2</sub>によってコンクリートを急冷した場合、練上り直後において前述のa~cの影響のほか、セメントが加水された極初期において極低温にさらされるため、初期の水和反応速度にも影響を与える可能性がある。そこで材令2日までの断熱養生での温度測定結果を基に、冷却されたコンクリートの初期温度を熱伝導解析によって推定すると、図-5に示したように練上り直後の温度よりも約4℃コンクリートの初期温度を高くして計算した場合、実測値と解析値がほぼ一致する結果が得られた。すなわち、LN<sub>2</sub>の冷却による練上り直後から打込みまでの極初期における種々の影響は、練上り温度に対して約4℃の温度上昇に相当するものと考えられる。

2). 熱伝導解析による骨材温度の推定

練りませ中にLN<sub>2</sub>を投入してコンクリートを冷却する場合の冷却の機構は複雑であるが、ここではLN<sub>2</sub>によって直接的に冷却されるのはコンクリート中のモルタル分や粒径の小さい骨材分と考え、練りませ中にモルタル+粗骨材G4の温度が強制的に冷却されると仮定し、コンクリート中の骨材の温度分布を熱伝導問題として解析した。

すなわち、図-6に示す解析モデルでモルタル+粗骨材G4の温度がLN<sub>2</sub>投入開始から終了までの間に直線的に降下するものとし、練りませ中およびその後の各材料の温度分布を求めた。

入力条件は表-5に示すとおりであり、骨材等の熱的性質は一般的な値を用い、LN<sub>2</sub>投入開始時、および終了時の温度は実験各ケースで得られた値を用いた。

解析結果の一例として、配合Iを8.9℃まで冷却した場合の各材料の平均温度の経時変化を図-7に、さらに配合IIIを13.0℃まで冷却した場合も加えて、実験結果と解析結果の比較を表-6に示した。図-7によれば、モルタル+粗骨材G4の温度とコンクリート温度がほぼ同等（コンクリート温度とモルタル+粗骨材G4の温度の差が0.5℃以内）となるのは練上り15分後であり、その時の温度上昇は配合Iで3.2℃、配合IIIで1.9℃であった。

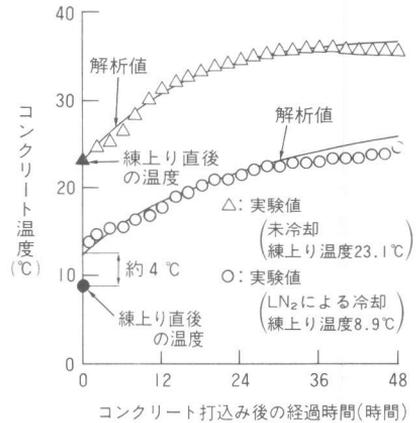


図-5 断熱養生試験体における初期のコンクリート温度展歴

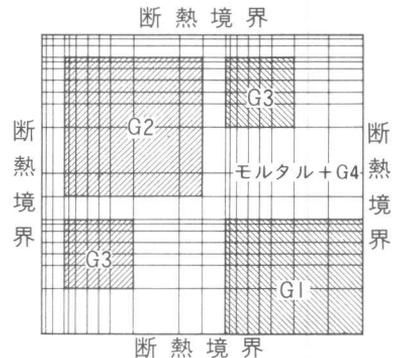


図-6 解析モデル(内部コンクリート)

表-5 解析条件

材料の初期温度(℃)		実験で得られた値を用いた
LN <sub>2</sub> 投入終了時のモルタル+G4の温度(℃)	LN <sub>2</sub> による冷却時間(秒)	
熱伝導率 (kcal/m・hr・℃)	モルタル+G4	1.6
	G3, G2, G1	2.6
熱拡散係数 (mf/hr)	モルタル+G4	0.0035
	G3, G2, G1	0.0050
G1(150~80mm), G2(80~40mm), G3(40~25mm), G4(25~5mm)		

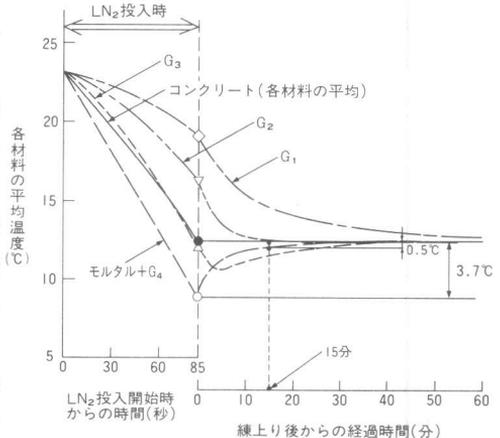


図-7 各材料の平均温度の経時変化

実験結果ではそれぞれ5℃（練上り15分後）、2.6℃（練上り10分後）であり、解析値と差があるが、これは主に外気からの熱流入の影響のためと考えられる。

### 3). 真の冷却効率の推定

このように、1), 2)の結果では、配合Ⅰを練上り直後で8.9℃まで冷却した場合、実際のコンクリート温度は練上り直後よりも約3～4℃高いものと推定された。真の冷却効率を把握するためには、今後さらに、実験研究が必要であるが、練上り直後の温度では真の冷却効率を把握できないことは明らかである。ここでは、2)の解析手法を用いて、各ケースの冷却効率を算出することにした。その結果は図-8に示すとおりである。

配合Ⅰおよび配合Ⅲの冷却効率はそれぞれ50、45%であり、練上り直後の温度を用いた場合（64、54%）より低下している。特に、G<sub>max</sub>=150 mmの配合Ⅰではその差は14%と、配合Ⅲでの差9%よりも大きい値となったが、このことは寸法40mm以上の骨材で未冷却部分が多いことを示すものと考えられる。

以上から、ダムコンクリートの冷却においては骨材からの熱流出を考慮して、練上り温度を目標打込み温度よりも予め低めに設定しておく必要がある。

### 3.3 打込み後の温度上昇の養生方法による違い

各養生条件下での試験体中央部におけるコンクリート温度の経時変化を図-9に、各条件での練上り温度、打込み温度、最高温度を図-10に示した。これらから次のことがわかる。

- プレクーリングしなかったコンクリートでは自然放置が最も温度上昇が小さいが、プレクーリングしたコンクリートではシート養生が最も温度上昇が小さい。
- 自然放置の最高温度はプレクーリングの有無にかかわらず同等であり、プレクーリングの効果が認められない。
- 未冷却で自然放置したものと、冷却してシート養生したものでは打込み時のコンクリート温度の差は10.0℃であったにもかかわらず、最高温度の差は4.0℃と小さくなっている。
- 最高温度に達した材令は、未冷却のコンクリートでは外気温の影響が大きかった自然放置を除くと、1～2日であるのに対し、冷却されたコンクリートでは5日程度と遅くなっている。これは、セメントの水和反応速度が遅く

表-6 実験結果と解析結果の比較

材料の初期温度(℃)	23.1	23.1
練上り直後のコンクリート温度(℃)	8.9	13.0
LN <sub>2</sub> による冷却時間(秒)	85	42
打込み直後のコンクリート温度(℃)	13.9	15.6
実験結果		
温度上昇量T <sub>e</sub> (℃)	5.0	2.6
練上りから打込み直後までの時間(分)	15	10
外気温(℃)	29	28
解析結果		
打込み直後のコンクリート温度(℃)	12.1	14.9
温度上昇量T <sub>a</sub> (℃)	3.2	1.9
実験結果と解析結果との差T <sub>e</sub> -T <sub>a</sub> (℃)	1.8	0.7

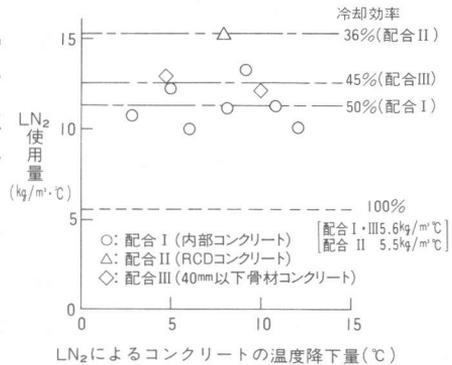


図-8 コンクリートの温度降下量とLN<sub>2</sub>使用量の関係 (真の冷却効率)

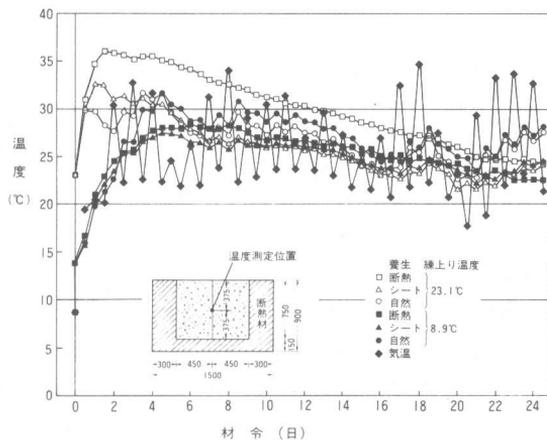


図-9 養生実験におけるコンクリート温度の経時変化

なったのと同時に、外気温よりもコンクリート温度が低いので外気への放熱がなかったためと考えられる。

以上の結果は、プレクーリングの効果をできるだけ大きくするためには、コンクリート温度が外気温に達するまでは外気からの熱流入の少ない養生を行い、外気温に達した後は、冷水湛水などによってできるだけ放熱を促進するような養生が望ましいことを示している。また、コンクリートダムでは次々と上層を打継ぐので、これらの温度上昇特性を考慮した適切な打継ぎ間隔および養生方法を選定する必要がある。

#### 4. まとめ

以上、液体窒素を用いたプレクーリングのダムコンクリートへの適用性について検討した結果をまとめると次のとおりである。

- L N<sub>2</sub> を可変速式2軸ミキサに直接投入することによって、練りませ時間100秒以内で、G max=150 mmのダムコンクリートを冷却でき、コンクリートの温度降下量はL N<sub>2</sub> の投入量にほぼ比例する。しかし、骨材寸法が大きいダムコンクリートでは短時間に骨材内部までは冷却されておらず、骨材からモルタルへの熱移動によって練上り終了後15分程度までコンクリート温度は上昇する。このため、冷却効率を考える場合練上り直後のコンクリート温度ではなく、モルタルと骨材の温度がほぼ同等となる練上り後15分程度での温度を考える必要がある。その場合の冷却効率は配合Ⅰ（内部コンクリート）で50%程度であった。また、超硬練りの配合Ⅱ（RCDコンクリート）では、配合Ⅰと比べて冷却効率が低下した。
- スランプ・空気量・圧縮強度にはL N<sub>2</sub> による冷却の影響はほとんど認められなかった。
- プレクーリングしたコンクリートの打設後の最高温度は、打込み時のコンクリート温度にもよるが、打設後の表面の養生方法によって大きく異なる。最高温度を低く押さえるためにはコンクリート温度が外気温に達するまでは外気からの熱流入をできるだけ少ない養生を行い、外気温に達した後はコンクリート表面からの放熱を促進するような養生を行うことが望ましい。また、コンクリートダムでは次々と上層を打継ぐので、これらの温度上昇特性を考慮した適切な打継ぎ間隔および養生方法を選定する必要がある。

#### 5. おわりに

現場実験結果を基に、L N<sub>2</sub> でダムコンクリートをプレクーリングした場合の効果について検討した。しかし、L N<sub>2</sub> の投入の影響に関して未だ説明されていない課題も多く、今後研究を進めていく予定である。

<謝辞> 本研究を行うにあたり、実験に関しては大阪酸素工業㈱と共同で実施したものであり、効率的なL N<sub>2</sub> の供給方法について助言と指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>[1] Cooling concrete mixes with liquid nitrogen, Concrete construction, May, 1977, p. p. 257~258

[2] 十河, 中根, 他: 液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, p. p. 329 ~332, 1986

[3] Liquid Nitrogen Cools Concrete for Tallowa Dam, CIG Gases in Research and Industry No. 12, 1975. 5

[4] 万木, 桜井 他: ダムコンクリート練りませへの二軸ミキサの適用性に関する研究, 鹿島建設技術研究所年報Vol. 35, 1987. 6 (予定)

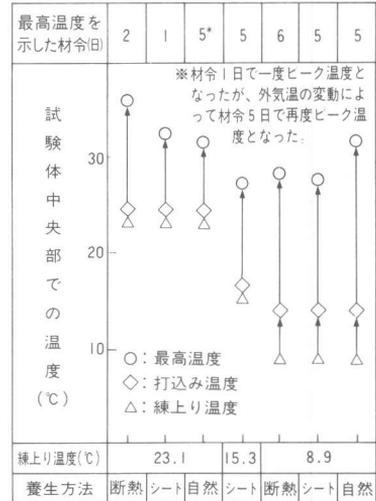


図-10 各条件での練上り・打込み・最高温度