

論文 モルタルおよびコンクリートのフレッシュ時の特性に及ぼす冷却の影響

赤神優彦*¹・丸山久一*²・江渡正満*³

要旨：本研究は、マスコンクリートの温度応力低減のために用いられるブレーキング工法に関し、モルタルおよびコンクリートの練混ぜ時に行なう冷却が、流動性および圧縮強度に及ぼす影響を、冷却方法、細骨材の含水状態・冷却温度、練上り温度等をパラメータとして検討したものである。その結果、モルタルおよびコンクリートにおける冷却による流動性の向上を確認するとともに、流動性向上の要因が冷却により生成される細骨材表面の氷とセメントペーストの粘性の影響であることが分かった。

キーワード：冷却、流動性、圧縮強度、細骨材表面の氷、セメントペーストの粘性

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れを制御する場合、打込み温度を下げるブレーキング工法の一つとして、コンクリートを練混ぜる前にその構成材料である細骨材を直接、液体窒素（以下、LN₂と称する）によって冷却する工法が実施されその効果が認められている¹⁾。その際、この工法により冷却されたコンクリートは常温のコンクリートに比べ流動性の増大および圧縮強度が増進するという結果も得られたとの報告がなされている¹⁾。しかし、これらの現象については、そのメカニズムについて詳しい研究はなされていないのが現状である。このため、本研究では、これらの現象を解明することを目的とし、流動性の増大および圧縮強度の増進に寄与する要因として考えられる、細骨材の含水状態・冷却温度、練上り温度の違いなどの影響要因を様々に変化させ、冷却の有無におけるモルタルとコンクリートの流動性および圧縮強度に関して実験的に検討したものである。

本研究の検討要因と水準の一覧を表-1に示す。また、スランプおよび空気量の測定は練上り5分後、スランプフロー（以下、フローと称する）の測定は練上り10分後に行ない、空気量の測定は、JIS A 1128に準拠した。さらに、冷却前後の細骨材温度およびモルタルとコンクリートの練上り温度は、白金測温抵抗体デジタル温度計で温度が安定した後に、測定した。尚、セメントペーストのフロー試験のみ JIS A 1128に準拠しているが、落下運動（打撃）は与えずフローコーンを引き抜いた直後の値を用いた。

表-1 検討要因と水準

検 討 要 因		水 準
冷却の 評価指標	流動性	スランプ(JIS A 1101) スランプフロー(ASTM C124-39) スランプフロー(JIS R 5201): Δ° -スト
	圧縮強度	試験材齢: 28 日(JIS A 1108) 脱型: 材齢 2 日 養生: 水中
影響要因	冷却の有無	する, しない
	冷却の方法	細骨材直接冷却 モルタル・コンクリート直接冷却
	細骨材の 含水状態	気乾, 表乾, 湿潤 4・7 % (%は砂表面の表面水率)
	細骨材の 冷却温度	モルタル: -30, -20, -10, 5°C コンクリート: -40, -30, -20, -10, 5°C
	練上り温度	5, 10, 20°C

2. 実験概要

2. 1 検討要因と試験・測定方法

* 1 五洋建設(株) 工修 (正会員)

* 2 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 Ph.D. (正会員)

* 3 清水建設(株)土木技術第一部 工修 (正会員)

2. 2 使用材料と配合

本研究に使用した各種材料の一覧および骨材の物性値を表-2および表-3に示す。また、セメントペーストとモルタルおよびコンクリートの配合を表-4に示す。さらに、使用したミキサと1バッチ当りの練混ぜ量を表-5に示す。尚、本研究では冷却を行なう為、性状が温度に左右されるA E剤などを用いないプレーンモルタルおよびコンクリートを対象とした。

表-2 使用材料

分類	記号	種類	備考
セメント	C	中庸熟 ポルトランドセメント	フレン値 3420cm ² /g
細骨材	S 1	川砂	信濃川産
	S 2		
粗骨材	G	石灰碎石 2005	
液体窒素	LN ₂		

表-3 骨材の物性値

記号	比重	吸水率 (%)	粗粒率
S 1	2.64	1.74	2.74
S 2	2.64	1.95	2.78
G	2.68	0.76	6.60

表-4 配合

種類	W/C (%)	s/a* (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S	G
ペースト	50	—	1237	616	—	—
モルタル		3.33	531	265	1452	—
コンクリート		48	360	180	871	959

※モルタルは s/c

表-5 使用ミキサと練混ぜ量

種類	使用ミキサ※	公称容量 (l)	練混ぜ量 (l)
ペースト	ホート型	5	2
モルタル・コンクリート	ハン型	50	30

※冷却細骨材の製造にも用いる

2. 3 冷却細骨材製造方法

モルタルおよびコンクリートの練混ぜに使用する細骨材の冷却方法は、ミキサ内に所定量の細骨材を投入して蓋を閉め、ミキサを攪拌しながら所定温度になるまでLN₂を投入し製造した。

2. 4 練混ぜ方法

モルタルとコンクリートの練混ぜ方法は、冷却の方法によって以下の2種類とした。一つはLN₂により事前に冷却した細骨材を用い練混ぜる場合。もう一つは常温細骨材を用いて練混ぜ中にLN₂で冷却する場合である。

(1) セメントペースト

練り鉢内にセメントを投入し、次に練混ぜ水を投入し低速で30秒間練混ぜてからミキサを一旦停止して掻き落としを行い、次に再びミキサを始動させて低速により30秒間および高速により60秒間それぞれ練混ぜた。

(2) モルタルとコンクリート

LN₂により事前に冷却した細骨材を用い練混ぜる方法（以下、事前冷却と称する）における練混ぜは以下のようにした。ミキサ内に前節で冷却した冷却砂を投入し、コンクリートの場合には次に粗骨材を投入し5秒程空練りする。次にセメントをミキサ内に投入し30秒間空練りし、最後に練混ぜ水を投入し90秒間練混ぜる。

常温細骨材を用いて練混ぜ中にLN₂で冷却する方法（以下、事後冷却と称する）における練混ぜは以下のようにした。事前冷却と一部異なるだけであり、練混ぜ水投入開始10秒から練混ぜ終了までの80秒間LN₂を投入するものである。尚、事前冷却および事後冷却ともにモルタルの場合は、事前冷却と同様に練混ぜ水投入後の30秒後に一旦ミキサの回転およびLN₂の投入（事後冷却のみ）を停止し、ミキサの底面を掻き落とししてから再びミキサの回転およびLN₂の投入（事後冷却のみ）を開始し60秒間練混ぜた。また、冷却を行わない場合の練混ぜは、LN₂の投入手順を除いたものである。

3. 実験結果と考察

従来、スランプ試験はコンクリートに適用するものであるが、本実験では、基礎的研究という見地からモルタルにおいても適用した。尚、空気量は、全影響要因においてモルタルで約4%、コンクリートでは約2%であり、最大と

最小値の範囲も 0.5%未満であった。

3. 1 冷却の有無および冷却方法の違いによる影響

この節では、冷却の有無および方法の違いが各評価指標に及ぼす影響について検討する。

モルタルとコンクリートにおける冷却の有無と方法の違いがスランプとフローと圧縮強度に及ぼす影響を図-1に示す。スランプおよびフローはモルタルとコンクリートともに、既往の研究¹⁾同様、事前冷却（細骨材を練混ぜる前に直接冷却する方法）では流動性の向上が認められた。これは、冷却による砂表面の氷のベアリング効果とセメントペーストの粘性低下の影響により流動性が向上したものと考えられるが、各影響要因（冷却の有無および方法）毎に練上り温度が異なる為、はっきりとはいえない。また、事後冷却（練混ぜ中に試料そのものを直接冷却する方法）では冷却を行わないものと同等の流動性に留まり、既往の研究²⁾と異なった。既往の研究²⁾によると事後冷却することにより流動性は低下し、その理由として練混ぜ中の LN_2 投入による水分の減少（蒸発）とある。しかし、本研究では、 LN_2 投入による水分の減少（蒸発）によるセメントペーストの粘性の高上と冷却による練上り温度の低下によるセメントペーストの粘性低下の効果が相殺されている為、流動性に変化がなかったと考える。一方、圧縮強度は、モルタルとコンクリートともに、冷却による若干の強度向上の傾向が認められ、特に事後冷却では強度が増大した。この理由として、事前冷却では既往の研究¹⁾同様、試験材齢が 28 日程度では冷却の効果が発現しにくいこと、また、試験に用いた供試体の寸法が $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ と小さく、養生期間中における冷却効果の発現が小さい為と考えられる。また、事後冷却でも既往の研究²⁾同様、 LN_2 投入による水分の減少（蒸発）によるものと考えられる。

3. 2 細骨材の含水状態の違いによる影響

この節では、砂の各含水状態の場合を考え、事前冷却における砂表面の氷の有無が評価指標

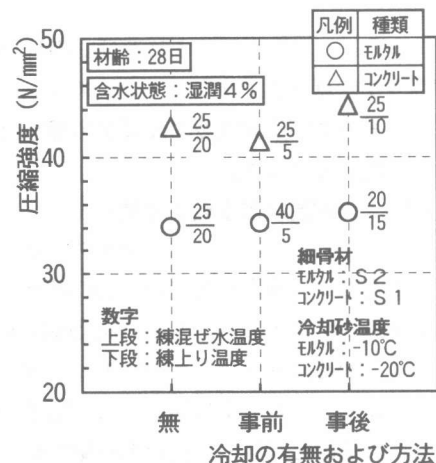
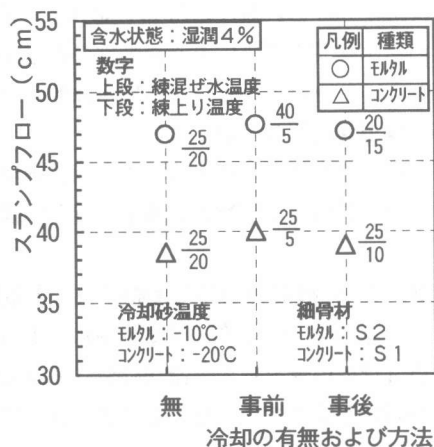
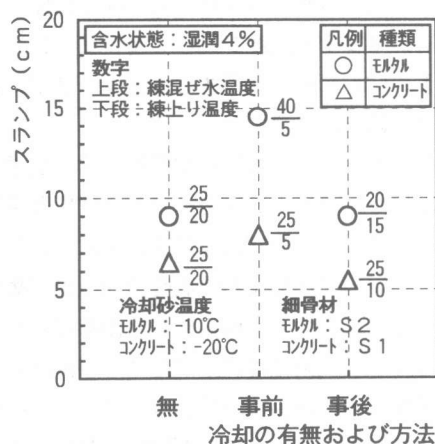


図-1 冷却の有無および方法の違い

に与える影響を検討する。尚、前節同様、冷却の有無で練上り温度が異なる為、セメントペーストの粘性影響を無視することはできず、このことを踏まえて論じる。

コンクリートにおける細骨材の含水状態の違いがスランプおよびフローに及ぼす影響を図-2に示す。スランプおよびフローは、各含水状態において冷却による流動性の向上が認められた。このことから、砂表面に氷が存在せずとも冷却により流動性は向上することが確認され、流動性向上に起因する要因は、セメントペーストの粘性低下であることが確認された。また、流動性は砂の水分が多くなるにともない大きくなった。しかし、既往の研究³⁾によると細骨材の含水状態の違いによる流動性の相違はほとんどないとされている。この理由は明確でないが、練混ぜ時間の不足によるコンクリートの不均一性などの影響が考えられる。尚、練混ぜ水は、細骨材の含水状態から補正を行ない練混ぜている。

3. 3 細骨材の冷却温度の違いによる影響

この節では、砂の冷却温度域が氷点下および氷点付近の場合を考え、冷却における砂表面の氷の有無が評価指標に与える影響を検討する。尚、練上り温度を一定にしている為、セメントペーストの粘性の影響をほぼ無視することができる。

モルタルとコンクリートにおける細骨材の冷却温度が氷点下および氷点付近のスランプおよびフローおよび圧縮強度に及ぼす影響を図-3および図-4に示す。

(1) 冷却温度が氷点下の場合

スランプおよびフローは、モルタルとコンクリートともに、練上り温度が一定の場合、砂の冷却温度が低下するにともない流動性は大きくなることが確認された(ケース1)。しかし、練上り温度を一定にする為、冷却温度が低くなればなるほど高温の練混ぜ水を使用せねばならない。このためセメントの水和などに悪影響を与えている可能性が考えられる為、練混ぜ水

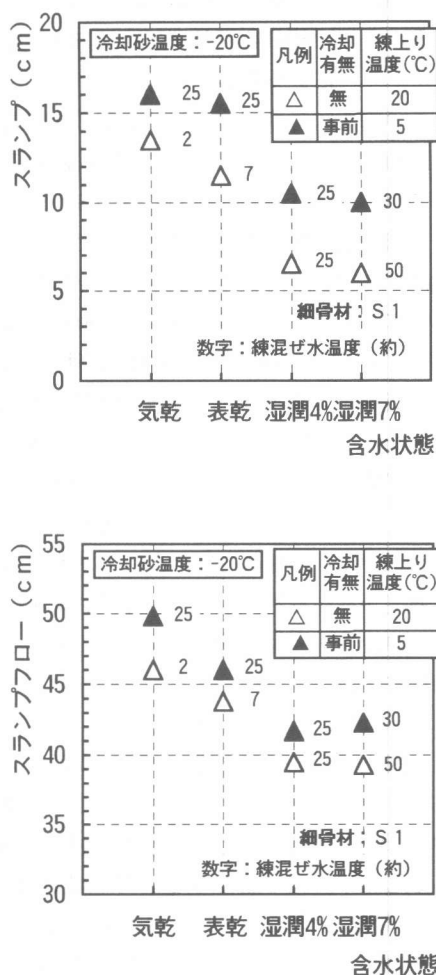


図-2 含水状態の違い

温度を一定にして練上り温度を任意にしたものも検討した(ケース2)。その結果、ケース1に比べ約5°C程練上り温度が低くなったが、ケース1と同様の傾向が認められた。これは、以下の圧縮強度にもいえるがことだが、約60°C以下の高温域における練混ぜ水によるフレッシュおよび硬化性状に及ぼす悪影響は無いと考えられる。このことから、流動性向上に起因する要因には、冷却による砂表面の氷の影響が考えられる。一方、圧縮強度は、モルタルとコンクリートともに、砂の冷却温度が低くなるにつれ若干の強度向上の傾向が認められた。また、ケース1と2の差は、練混ぜ日が異なることによ

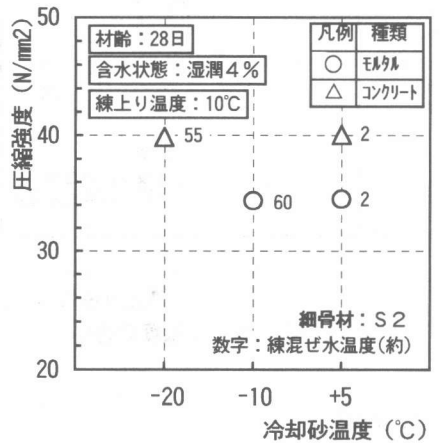
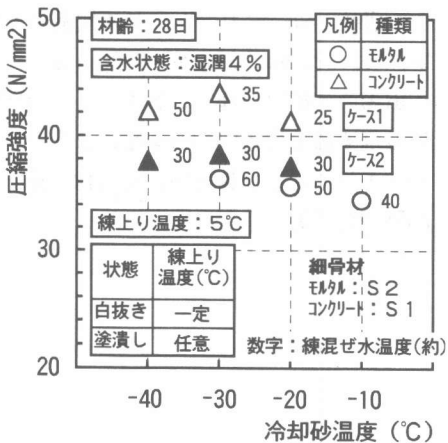
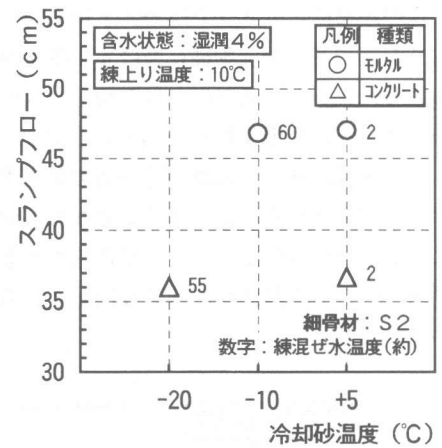
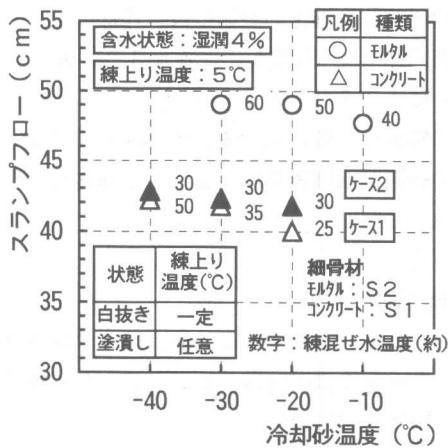
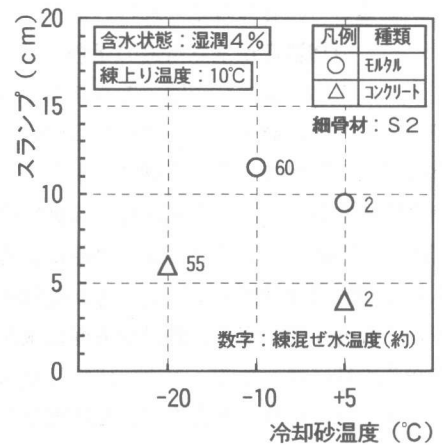
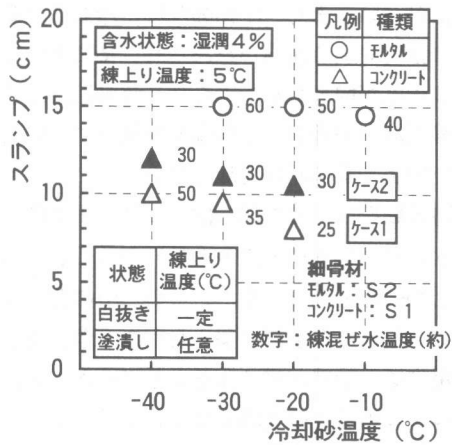


図-3 冷却砂温度の違い(氷点下)

図-4 冷却砂温度の違い(氷点付近)

る実験室の温度や湿度、養生水温度の履歴の違いが影響していると考えられる。

(2) 冷却温度が氷点付近の場合

スランプおよびフローは、モルタルとコンクリートともに、練上り温度が一定の場合、細骨材の表面に氷がある方が流動性は大きくなる傾向が認められた。このことから、流動性向上に起因する要因には、前項同様、冷却による砂表面の氷が影響を及ぼしていることが確認され、練上り温度が同じ場合、細骨材表面に氷がある方が流動性は高くなる。一方、圧縮強度は、モルタルとコンクリートともに、差は認められなかった。

3. 4 練上り温度の違いによる影響

この節では、セメントペーストにおいての練上り温度の違いが流動性に及ぼす影響を検討する。セメントペーストにおける練上り温度の違いがフローに及ぼす影響を図-5に示す。

フローは、練上り温度が低いものほど大きくなる傾向が認められた。このことから、他の節と同様、流動性向上には、温度に起因するセメントペーストの粘性が影響を及ぼしていることが分かった。

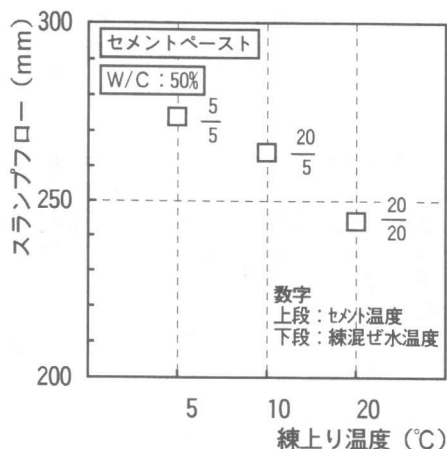


図-5 練上り温度の違い

4. 結論

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 流動性は、冷却を行なわないものに比べ、

事前冷却方法では向上されるが、事後冷却では変化がない。また、圧縮強度は、冷却による若干の強度向上の傾向が認められ、特に事後冷却では強度が増大した。さらに、流動性および圧縮強度は、細骨材の冷却温度が低下するにともない向上する傾向が認められた。

(2) 流動性向上の要因には、冷却による砂表面の氷とセメントペーストの粘性が関係していることが確認された。また、この二つの要因は単独でも流動性向上の効果をもたらすが、同時に作用すると効果が高くなることが分かった。さらに、この二つの要因のうち、セメントペーストの粘性の方が流動性向上に支配的であると考えられる。

(3) 圧縮強度向上の要因には、冷却効果の他、事後冷却では LN_2 投入による水分の減少（蒸発）によるものと考えられる。

(4) 練混ぜの際における、約 60°C 以下の高温域の練混ぜ水は流動性および圧縮強度に悪影響を及ぼさない。

参考文献

- 1) サンドプレクール工法協会編：サンドプレクール工法報告書，サンドプレクール工法協会，1996.3
- 2) 丸屋 剛・大友 健・松岡康訓：液体窒素によるコンクリートのプレクーリングに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp907-912，1990
- 3) 依田彰彦・横室 隆：コンクリートの性質に及ぼす砂の含水状態の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp51-56，1991