

液体窒素で冷却した砂を用いて製造したコンクリートの 諸性質に関する研究

PROPERTIES OF CONCRETE MIXED WITH SAND FROZEN BY LIQUID NITROGEN

根上義昭*・後藤貞雄**・栗田守朗***・桑原隆司****

By Yoshiaki NEGAMI, Sadao GOTO, Morio KURITA and Takashi KUWAHARA

This paper presents a new precooling method which reduces the temperature of mixed concrete by mixing it with sand frozen by liquid nitrogen.

The authors tried to clarify the properties of both the frozen sand and the concrete mixed with the frozen sand. The results of a series of experimental studies indicate that the temperature of mixed concrete can be reduced about 25°C, which is a larger reduction quantity than that achieved by conventional precooling methods; and that this method contributes to improvement of the consistency and the compressive strength of the concrete. Furthermore, the advantageous effect of this precooling method is confirmed from the results of laboratory tests using massive concrete members.

Keywords : precooling, liquid nitrogen, frozen sand, concrete, mass concrete

1. はじめに

近年、本州四国連絡橋で代表される長大橋の下部工、LNG地下式貯槽の底版や側壁、原子力発電所のベースマットなどにみられるように、コンクリート構造物の大型化が著しい。このようなマスコンクリートでは、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度ひびわれの制御が、構造物の安全性、耐久性などの観点から重要な課題となっている。このような背景から、マスコンクリートにおける温度ひびわれの制御方法に関する総合的な検討がなされ、設計から管理までを含めて指針として提案されている¹⁾。さらに、マスコンクリート構造体の場合には、強度発現状況などにも一般のコンクリート構造体の場合とは異なる傾向を示すことも指摘されている²⁾。

マスコンクリートにおける水和熱に起因する温度ひびわれの制御方法には、設計から施工までの各段階におい

て各種の方法が提案されており、その一方法にコンクリートの構成材料の一部または全部をあらかじめ冷却し、コンクリートの練上り温度を低減させるプレクーリングがある。プレクーリングの方法には、冷水を用いる方法、練りませ水の一部に氷を用いる方法、冷風や冷水を用いて粗骨材などを冷やす方法、あるいは、それらを組み合わせて用いる方法などが一般的である。また、海外では、-196°Cの液体窒素を用いてプレクーリングを行う方法が10年以上前から実施されており^{3),4)}、最近、わが国においてもこの種の研究が積極的に進められている。

液体窒素を用いた既往のプレクーリング工法は大きく3つに分けて考えることができる。すなわち、コンクリートの構成材料を冷却する方法、コンクリートの練りませ中に液体窒素を噴入する方法⁵⁾として練りませ後のコンクリートに液体窒素を噴入する方法^{6),7)}である。国内、海外における実績の多くは2、3番目の方法である。

液体窒素を用いてコンクリートの構成材料を直接冷却する方法としては、冷水あるいは氷を製造する方法が主であり、骨材を対象とした例はほとんど見当たらない。

本研究は、液体窒素で直接冷却した細骨材を用いてコンクリートの練上り温度を低減させる方法でプレクーリングを行う場合の材料およびコンクリートの諸特性につ

* 正会員 清水建設(株)土木本部技術第一部長
(〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル)

** 正会員 東京ガス(株)生産技術部副部長
(〒104 港区海岸1-5-20)

*** 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所特別研究グループ
(〒135 江東区越中島3-4-17)

**** 工博 清水建設(株)技術研究所建設技術研究部主任研究員
(〒135 江東区越中島3-4-17)

いて、実験室規模の基礎実験および実大規模の実機実験により検討を行ったものである。

2. 本研究で検討したプレクーリング工法の概要

コンクリートの構成材料の温度が練上り温度に及ぼす影響は、その単位量が多い材料の方が大きいことから、細骨材を冷却する対象とすることは他の材料と比べると比較的大きな冷却能力を有すると考えられる。また、液体窒素はその温度が -196°C であり、保有する冷熱量が大きい。したがって、この両者を組み合わせることによって比較的大きな冷却能力を有するプレクーリングが得られるものと考えられる。すなわち、まず、コンクリートの主構成材料の1つである細骨材と液体窒素とを練りまぜることにより、細骨材粒子の表面に付着している水、すなわち表面水を凍らせ、かつ細骨材粒子そのものをマイナス数十度に冷却した細骨材（冷却砂）を製造する。次に、このようにして製造した冷却砂と他の材料とをミキサーで練りまぜることによって練上り温度を低減したコンクリートを製造することが可能となる。

上記の考えに基づくプレクーリング工法の基本的な考え方を図-1に示す。

3. 実験方法^{8),9)}

(1) 実験計画

冷却砂を用いたプレクーリング工法を開発するにあたり、表-1に示すような項目および実験の組合せに基づいて検討を進めた。

実験は大きく2つに分けて計画した。前者は項目①、

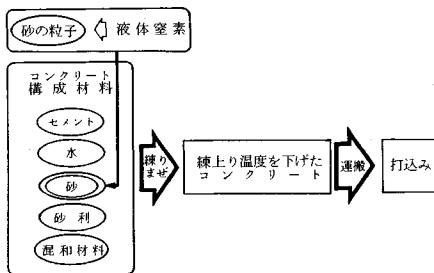


図-1 本研究で検討を行ったプレクーリング工法の基本的考え方

表-1 検討項目および実験の組合せ

項目	実験の種類		
	基礎実験	実機規模実験	実験室規模 シミュレーション/実験
① 液体窒素による冷却が細骨材に及ぼす影響	○	○	—
② 冷却砂を用いて製造したコンクリートの性質	○	○	—
③ 冷却砂を用いて製造したコンクリートのマスコンクリートとしての性質	—	—	○

②に関する検討であり、後者は項目③に関する検討である。項目①、②に関する検討では、試作したプロトタイプの冷却砂製造装置を用いる実験室規模の基礎実験そして冷却砂製造装置の実用機をコンクリートプラントに設置して行う実機規模の実験の2種類を計画した。実機規模の実験では、基礎実験結果の確認を行うとともに、実機規模における再現性を確認するために2種類の異なるコンクリートプラントを用い、異なる使用材料、配合条件における実験を計画した。項目③に関しては、実際のマスコンクリート構造部材の挙動をシミュレーションでできる実験室規模の装置を用いる計画とした。

(2) 液体窒素で冷却した細骨材（冷却砂）の製造方法

冷却砂は、あらかじめ表面水率を測定した細骨材を冷却砂製造装置に投入し、細骨材を攪拌しながら液体窒素を噴入して製造するものである。冷却砂製造装置は、タービン型強制練りミキサーに自公転攪拌羽根を有するボルテクス型ミキサーを基本にしており、装置全体を断熱材で保冷することにより熱損失が小さくなるようにした。また、冷却砂製造装置は密閉されているために、気化した液体窒素は設置した排気ダクトを通じて外部に排気される。このような方法で製造することにより塊（冷却砂が団子状になる状態）のほとんどない、マイナス数十度のさらさらした冷却砂が得られることになる。

4. 基礎実験

本実験は、液体窒素による冷却が細骨材の物性に及ぼす影響および冷却砂を用いて製造したコンクリートの性質を把握することを目的として、試作したプロトタイプの冷却砂製造装置を用いて実施したものである。本実験で使用した冷却砂製造装置は 0.1 m^3 の練りまぜ容量を有するミキサーであり、写真-1に示す。

(1) 実験概要

a) 要因と水準

液体窒素による冷却が細骨材の物性に及ぼす影響を把握する試験における要因と水準を表-2に示す。細骨材はある程度表面水を有する状態で使用されるのが一般的



写真-1 冷却砂製造装置（基礎実験）

表一 細骨材に関する実験の要因と水準

要因	水準
細骨材の種類	1 川砂
細骨材の状態 *	2 常温砂, 冷却砂
表面水率 (%) **	4 0(表乾), 4, 7, 10

*: 常温砂: 冷却しない細骨材, 冷却砂: 冷却した細骨材
 **: 目標とした値である

表三 コンクリートに関する実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	1 W/C=50
細骨材の状態 *	2 常温砂, 冷却砂
細骨材の表面水率 (%) **	4 0(表乾), 4, 7, 10

*: 常温砂: 冷却しない細骨材, 冷却砂: 冷却した細骨材
 **: 目標とした値である

であることから、細骨材の表面水率の水準を表面乾燥飽水状態(0%)から10%程度まで変化させた。また、細骨材の冷却温度は液体窒素の噴入量を調整することにより変化させた。冷却砂を用いて製造したコンクリート(冷却砂コンクリート)の性質把握試験における要因と水準を表一三に示す。なお、冷却砂はその表面水率をあらかじめ確認してコンクリートの製造に供した。

b) 使用材料および配合

本実験で使用した材料および配合をそれぞれ表一四、表一五に示す。コンクリートの練りまぜ量は0.1m³である。

c) 試験項目および試験方法

i) 細骨材に関する試験: ふるい分け, 比重, 吸水率および表面水率について JIS に準じて試験した。

ii) フレッシュコンクリート試験: スランプ, 空気量, コンクリート温度, 単位容積重量, プリージング, 凝結硬化速度などを JIS に準じて試験した。

iii) 硬化コンクリート試験: φ10×h20 cm の供試体を作製し, 所定の材令(3, 7, 28日)まで標準水中養生を行い, 圧縮強度試験および引張強度試験は JIS に準じて実施し, ヤング係数は ASTM に準じて試験した。

(2) 基礎実験結果および考察

a) 液体窒素による冷却が細骨材の物性に及ぼす影響

同じ細骨材において、液体窒素で冷却した場合と冷却しない場合において実施した各種試験結果を表一六に示す。細骨材の温度は冷却しない場合で17.0~23.9°Cである。また、冷却砂の性質を試験するに際してはできるだけ幅広い温度範囲の冷却砂を対象とすることを考慮し、0~140°C程度の冷却砂を製造した。

表一六から、冷却しない場合の細骨材の比重, 吸水率, 粗粒率はそれぞれ2.59, 2.27%, 2.90であるのに対して、冷却した場合はそれぞれ2.59, 2.26%, 2.90であ

表一四 使用材料

材料	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	比重: 3.16
細骨材	鬼怒川産川砂	比重: 2.59, 吸水率: 2.27% 粗粒率: 2.90
粗骨材	鬼怒川産川砂利	比重: 2.61, 吸水率: 6.89%
混和剤	AE剤	アニオン系界面活性剤

表一五 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	A.d.
25	12±2.5	4±1	50	40	150	300	738	1119	0.045

表一六 細骨材の試験結果

項目	温度(°C)		比重		吸水率(%)		粗粒率		表面水率の差* Δp (%)
	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有	
サンプル数	17.0	0	1	6	1	6	1	6	42
平均値	23.9	-136	2.59	2.59	2.27	2.26	2.90	2.90	0.35
標準偏差			-	0.01	-	0.02	-	0.05	0.85

*: Δp = (冷却無の場合の表面水率) - (冷却有の場合の表面水率)

表一七 コンクリートの試験結果

項目種類	エカート温度(°C)	スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積重量(kg/m ³)	圧縮強度(kgf/cm ²)*		
					材令3日	材令7日	材令28日
常温砂エカート	20.0~23.2	10.7(0.91)	4.3(0.51)	2262(15.6)	145(20.7)	231(19.4)	332(18.7)
冷却砂エカート	1.1~13.4	10.2(1.68)	4.2(0.77)	2265(22.1)	141(12.8)	238(7.9)	338(15.0)

()内は標準偏差を示す。
 *: 1 kgf/cm² = 0.098 MPa

り、液体窒素による冷却の有無による差異は認められない。一方、0~10%の表面水率を有する細骨材を冷却すると、ばらつきは大きいものの表面水率が平均で0.4%程度減少する傾向がみられた。

b) 冷却砂を用いて製造したコンクリートの性質

冷却砂を用いて製造したコンクリートのフレッシュおよび硬化後に行った試験結果を表一七に示す。

i) フレッシュコンクリートの特性

コンクリートの練上り温度は、冷却砂を用いない場合(常温砂コンクリート)は20~23°Cであるのに対して、冷却砂を用いた場合(冷却砂コンクリート)は1~13°C程度となり、最大で22°C程度低減していることがわかる。この低減量は、従来の氷等を用いたプレクーリング技術におけるコンクリート温度低減量が実用的な範囲で10~15°C¹⁰⁾であることを考慮すると比較的大きい温度低減量であると判断される。

スランプおよび空気量は、常温砂コンクリートの場合

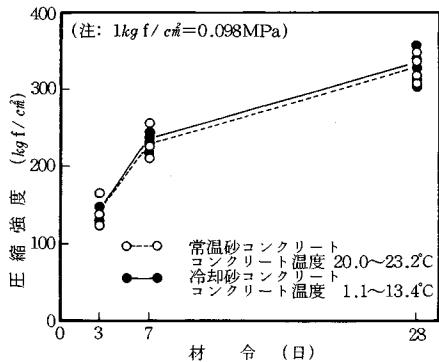


図-2 圧縮強度発現状況

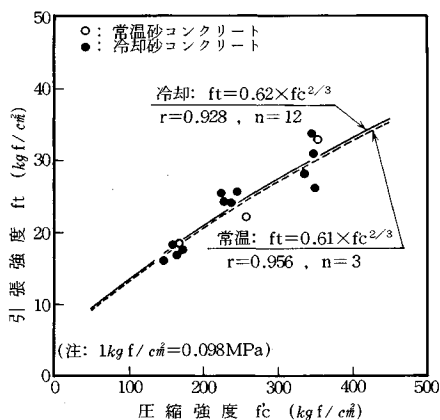


図-3 圧縮強度と引張強度の関係

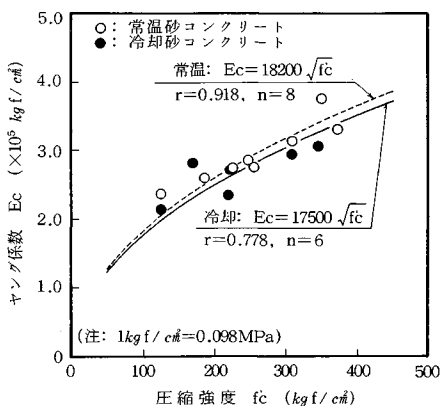


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

の平均値はそれぞれ 10.7 cm, 4.3% であり、目標とした値を満足していた。また、常温砂の代わりに冷却砂を用いた冷却砂コンクリートの場合のスランブ、空気量の平均値はそれぞれ 10.2 cm, 4.2% であり、冷却砂を用いることによる差異は認められない。また、単位容積重量についても冷却による影響はみられない。

ii) 硬化コンクリートの特性
冷却砂および常温砂コンクリートの圧縮強度試験結果を図-2 に示す。

冷却砂コンクリートの圧縮強度発現状況は、材令 3 日においては常温砂コンクリートの強度より若干小さい傾向が認められる。これは、供試体作製時のコンクリート温度が低いことによる影響であると考えられる。しかし、材令 7 日以降においては、冷却砂コンクリートは常温砂コンクリートと同等以上の強度が得られており、供試体作製時のコンクリート温度による影響がほとんどなくなったものと推察される。

常温砂コンクリートおよび冷却砂コンクリートにおける圧縮強度と引張強度およびヤング係数との関係をそれぞれ図-3, 図-4 に示す。

本実験の結果から冷却砂コンクリートの引張強度およびヤング係数と圧縮強度との関係は、冷却しない場合のコンクリートとほぼ同様の関係を示すものと考えられ、顕著な差異は認められない。なお、本実験結果は JIS に基づいて作製・養生した供試体の強度発現性状について述べたものであり、構造体コンクリートとしての強度発現性状に関しては、本文 6. で別途検討を行っている。

5. 実機規模の実験

本実験では、実際のプラントにおけるコンクリートの製造を想定して、冷却砂製造装置の実用機を用いた実機規模の実験を実施した。すなわち、通常のコンクリート製造工程に冷却砂製造工程を組み込み、実際のコンクリート製造工程に準じた条件下で 2 種類のコンクリートプラントにおいて行った。1 つは、K 鉄工所所有の実験用コンクリートプラントで行った場合（実機実験 [その 1]）であり、他方は Y 組所有のコンクリートプラント船で行った場合（実機実験 [その 2]）である。使用した冷却砂製造装置の実用機の原理は、基礎実験の場合と基本的には同様であるがその練りませ容量を実機規模を想定したために 0.5 m³ と大きくしたものである。本実験で使用した冷却砂製造装置を写真-2 に示す。

(1) 実験概要

a) 要因と水準



写真-2 冷却砂製造装置（実機規模実験）

表—8 細骨材に関する実験の要因と水準

要因	水準	
細骨材の種類	1	海砂
細骨材の状態	2	常温砂, 冷却砂**
表面水率 (%)	1	自然状態での表面水率
細骨材の初期温度	1	自然状態での温度

*: 実機実験 (その1) (その2) 共通である。
 **: 冷却砂の温度は液体窒素の噴入量などを変えることにより変化させた

表—9 コンクリートに関する実験の要因と水準

実験の種類	要因	水準	
実機実験 (その1)	水セメント比 (%)	1	W/C=58
	細骨材の状態	2	常温砂, 冷却砂
	細骨材の表面水率 (%)	1	自然状態での表面水率
	細骨材の温度 (°C) *	4	常温, -10, -20, -50
実機実験 (その2)	水セメント比 (%)	1	W/C=50
	細骨材の状態	2	常温砂, 冷却砂
	細骨材の表面水率 (%)	1	自然状態での表面水率
	細骨材の温度 (°C) *	2	常温, -80

*: 目標とした温度である

液体窒素による冷却が細骨材の物性に及ぼす影響把握に関する試験における要因と水準を表—8に示す。冷却砂コンクリートの性質把握に関する試験における要因と水準を表—9に示す。なお、コンクリートの温度低減量は実機実験〔その1〕では3水準とし、実機実験〔その2〕ではコンクリートの温度低減量を一定としている。また、両実験とも、冷却砂はその表面水率をあらかじめ確認してコンクリートの製造に供した。

b) 使用材料および配合

本実験で使用した材料および配合をそれぞれ表—10、表—11に示す。コンクリートミキサの容量は、実機実験〔その1〕,〔その2〕でそれぞれ1 m³, 3 m³である。

c) 試験項目および試験方法

i) 細骨材に関する試験：ふるい分け，比重，吸水率および表面水率について JIS に準じて試験した。

ii) フレッシュコンクリート試験：スランブ，空気量，コンクリート温度，単位容積重量などを JIS に準じて試験した。

iii) 硬化コンクリート試験：φ10×h20 cm の供試体を作製し，所定の材令（7，28，91日）まで標準水中養生を行い，JIS に準じて圧縮強度試験を実施した。

(2) 実機規模の実験結果および考察

a) 液体窒素による冷却が細骨材の物性に及ぼす影響 同一の細骨材において，液体窒素で冷却した場合と冷却しない場合の各種試験結果を表—12に示す。冷却しない場合の細骨材の温度はそれぞれ22.4~30.8°C，

表—10 使用材料

実験の種類	材料	種類	品質
実機実験 (その1)	セメント	普通種II型ポルト	比重: 3.16
	細骨材	高根島産海砂	比重: 2.49 吸水率: 3.07% 粗粒率: 2.56~2.85
	粗骨材 *	荒谷町産砕石(20) 荒谷町産砕石(1005)	比重: 2.72 粗粒率: 6.90 比重: 2.71 粗粒率: 6.73
	混和剤	A E剤	アニオン系界面活性剤
実機実験 (その2)	セメント	高炉セメントB種	比重: 3.05
	細骨材	海砂	比重: 2.55 吸水率: 1.58% 粗粒率: 2.85
	粗骨材	砕石	比重: 2.64 粗粒率: 6.73
	混和剤	標準型A B減水剤	メチルメタクリレート系複合剤

*: 粗骨材は砕石20と砕石1005を7:3で混合して使用

表—11 コンクリートの配合

実験の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	A d.
実機実験 (その1)	20	8±2.5	4±1	58	47.3	198	340	770	934	0.020
実機実験 (その2)	20	12±2.5	5±1	50	43	169	338	732	1008	0.845

表—12 細骨材の試験結果

項目	温度 (°C)		比重		吸水率 (%)		粗粒率		表面水率の差* Δp (%)	
	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有	冷却無	冷却有		
実機実験 (その1)	n		3	3	3	3	6	6	184	
	\bar{x}	22.4 30.8	-1 -133	2.49	2.50	3.07	2.90	2.69	2.77	0.63
	\sqrt{v}			0.01	0.01	0.06	0.11	0.10	0.09	0.40
実機実験 (その2)	n		15	15	15	15	15	15	30	
	\bar{x}	23.5 24.5	-18 -142	2.55	2.55	1.58	1.60	2.85	2.89	0.42
	\sqrt{v}			0.00	0.01	0.09	0.09	0.04	0.04	0.27

ただし、n: サンプル数、 \bar{x} : 平均値、 \sqrt{v} : 標準偏差
 *: Δp = (冷却無の場合の表面水率) - (冷却有の場合の表面水率)

23.5~24.5°Cである。また、冷却砂の性質を試験するに際してはできるだけ幅広い温度範囲の冷却砂を対象とすることを考慮し、それぞれ-1~-130°C，-20~-140°C程度の冷却砂を製造した。

両実験において，細骨材の比重，吸水率および粗粒率には冷却の有無による顕著な差異は認められない。一方，細骨材の表面水率は，冷却することにより平均でそれぞれ0.4%および0.6%程度減少しており，これらの結果は基礎実験と同様な傾向を示している。図—5に，冷却の有無における表面水率の試験結果を示す。表面水率の減少量は細骨材が有する表面水率が大きいほど多くなる傾向がみられ，たとえば，5%程度の表面水率を有する細骨材では冷却による減少分としては0.5%程度であると考えられる。これは，細骨材の表面水が液体窒素により瞬間的に凍結する際にわずかではあるが蒸発するためではないかと考えられる。

以上の結果から，液体窒素を用いて細骨材を0~

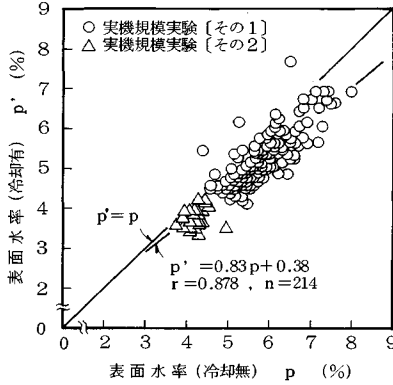


図-5 表面水率の比較

表-13 コンクリートの試験結果

種類	項目	ジャット温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m³)	圧縮強度 (kgf/cm²) *		
						材令7日	材令28日	材令91日
実機実験 (その1)	常温砂 コンクリート	21.6~ 27.4	8.2 (2.47)	4.6 (0.39)	2244 (15.6)	185 (11.8)	247 (14.5)	292 (14.1)
	冷却砂 コンクリート	0.1~ 14.0	13.2 (1.89)	4.8 (0.39)	2247 (13.0)	199 (4.9)	272 (7.3)	315 (9.5)
実機実験 (その2)	常温砂 コンクリート	23.5	12.2 (1.91)	4.9 (0.35)	2202 (9.19)	187 (16.3)	336 (36.8)	415 (21.9)
	冷却砂 コンクリート	11.0~ 11.7	14.9 (1.03)	5.3 (0.50)	2217 (7.78)	197 (9.5)	358 (15.0)	445 (20.1)

() 内は標準偏差を示す。
* : 1 kgf/cm² = 0.098 MPa

140°C 程度に冷却・凍結させたが、その比重、吸水率、粗粒率には差異は認められない。しかし、表面水率は冷却することにより若干量減少する傾向が認められる。

b) 冷却砂を用いて製造したコンクリートの性質

冷却砂を用いて製造したコンクリートの試験結果を表-13 に示す。

i) フレッシュコンクリートの特性

コンクリートの練上り温度は、冷却砂を用いない場合(常温砂コンクリート)はそれぞれ 22~27°C, 23.5°C であるのに対して、冷却砂コンクリートの場合はそれぞれ 0~14°C, 11°C 程度となり、冷却砂を用いることにより最大で 25°C 程度の温度低減量が得られている。この結果から、実機規模においても基礎実験と同程度の温度低減量が得られることを確認した。

スランプについては、常温砂コンクリートの場合は平均でそれぞれ 8.2, 12.2 cm であり、目標とした値を満たしていた。一方、同一の配合において冷却砂を用いた場合のスランプの平均はそれぞれ 13.2, 14.9 cm であり、冷却砂コンクリートの方が両実験とも大きくなる傾向が認められた。図-6 にコンクリートの練上り温度とスランプの関係を示す。実機規模の実験では、使用材料、配合、スランプなどが異なるものの、コンクリートの練上り温度が 10°C 変化すると 2 cm 程度スランプが変化すると考えられる。なお、基礎実験においてはコンクリー

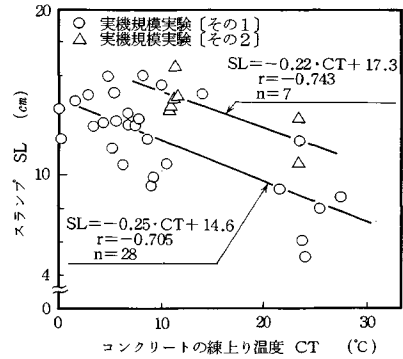


図-6 スランプとコンクリートの練上り温度との関係

トの練上り温度の低下に伴うスランプの増大傾向は認められなかったが、その原因については練り混ぜ容量の違いがその 1 つに考えられる。しかし、本研究の範囲では明らかにできなかった。

空気量および単位容積重量については、冷却砂を用いることによる差異は認められず、基礎実験と同様の結果であった。

ii) 硬化コンクリートの特性

冷却砂および常温砂コンクリートの圧縮強度試験結果を図-7, 図-8 に示す。両実験とも材令 7 日以降の結果であるが、冷却砂コンクリートの圧縮強度は常温砂コンクリートのそれと同等以上であり、この結果は基礎実験と同様の傾向を示している。基礎実験では材令 28 日

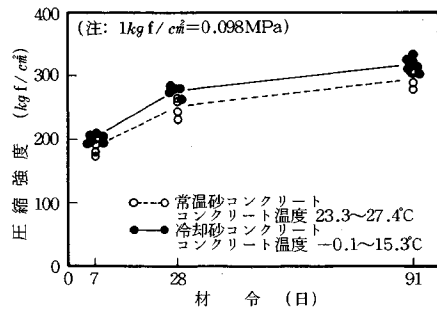


図-7 圧縮強度発現状況 (実機規模実験 {その1})

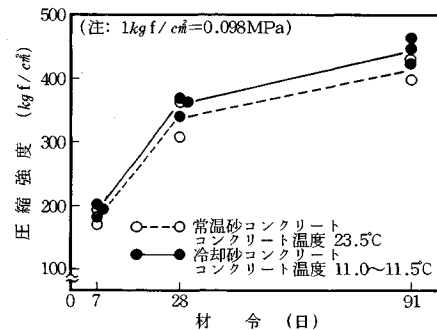


図-8 圧縮強度発現状況 (実機規模実験 {その2})

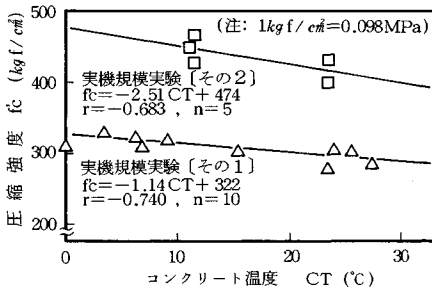


図-9 圧縮強度とコンクリート温度との関係

までの結果であったが、本実験のように長期材令の方がこの傾向は顕著に現われるようである。本実験における材令 91 日の結果では、冷却砂コンクリートの圧縮強度は常温砂コンクリートのそれよりも 8% 程度大きくなっている。また、コンクリートの練上り温度と材令 91 日の圧縮強度との関係を図-9 に示す。この図から、コンクリートの練上り温度が低くなるに従い強度は大きくなる傾向を示し、コンクリートの練上り温度が 10°C 下がると 10~25 kgf/cm² (0.98~2.45 MPa) 程度強度が増加することが認められる。

コンクリートの練上り温度が異なる条件においてその後標準養生を行った場合には、練上り温度の低いコンクリートは材令が進むに従い練上り温度の高いコンクリートよりも大きい圧縮強度を示すといわれており¹¹⁾、本実験においてもそうした影響を受けたものと推察される。

6. マスコンクリートに関する実験

本実験は、冷却砂を用いて製造したコンクリートをマスコンクリート構造体に適用した場合の性質を把握することを目的として実験室規模の試験装置を用いたシミュレーション実験を実施したものである。

(1) 実験概要

図-10 に示すマスコンクリートの熱的シミュレ-

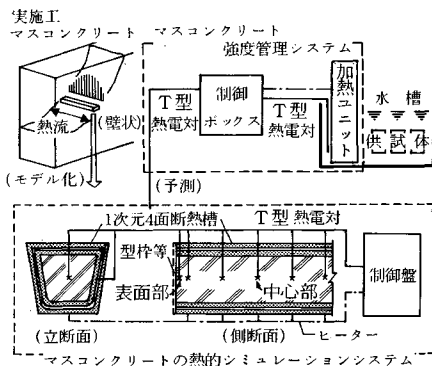


図-10 熱的シミュレーション・強度管理システム

ションシステムおよび強度管理システム¹²⁾を用いて実験を行った。熱的シミュレーションシステムではマスコンクリート部材の水和による発熱と最小部材寸法方向の熱伝導、熱伝達挙動をシミュレートすることにより、最小部材寸法方向の経時的な温度変化や温度分布状態の予測値が得られる。強度管理システムでは、熱的シミュレーションシステムで得られた部材温度と同一の温度履歴をリアルタイムでコンクリート供試体に入った水槽に与えることによって、マスコンクリート部材の強度発現の予測値が得られる。

実験では、部材最小寸法が 1 600 mm のマスコンクリートを想定し、コンクリートを常温 (約 20°C) で打ち込んだ場合と冷却砂を用いてコンクリート温度を約 10°C 下げた場合について計画した。

なお、使用材料、配合、コンクリート製造条件などは 4. 基礎実験と同じである。

(2) 試験方法

各条件におけるコンクリートを図-10 に示した装置に打ち込み、打込み直後から材令 12 日まで試験体中心部および表面部の温度履歴を測定した。なお、外気温は試験期間中 20°C 一定とし、材令 3 日で側面の合板製型枠を脱型した。同時に、得られた温度履歴を強度管理システムに取り込み、検知した温度と同一の温度条件を水槽内の供試体に与え、材令 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 日で圧縮強度を試験した。また、同一材令で標準水中養生の供試体の圧縮強度試験も行った。

(3) 実験結果および考察

常温砂を用いて製造したコンクリートと冷却砂を用いたプレクーリングを行ったコンクリートのマスコンクリートとしての温度特性、圧縮強度特性について試験した。

コンクリートの打込み温度は、常温砂コンクリートの場合は 22.8°C、冷却砂コンクリートの場合は 11.0°C であり、プレクーリングを行うことによってコンクリートの打込み温度を 11.8°C 低減している。

a) 温度特性

常温砂コンクリートと冷却砂コンクリートのマスコンクリートとしての温度履歴の比較を図-11 および表-14 に示す。常温で打ち込んだマスコンクリートの最高温度が 60.0°C であるのに対して、冷却砂を用いた場合のそれは 52.6°C となっており、プレクーリングにより最高温度が 7.4°C 低減されていることがわかる。これに伴い、部材中心部温度最高時における部材中心部と表面部の温度差も約 27°C から約 20°C と低減されている。さらに、プレクーリングを行ったマスコンクリートでは温度上昇期や温度下降期の温度変化速度が緩やかになっていることがわかる。このように、コンクリートの打込み温度を下げることは効果的な温度応力低減方法である

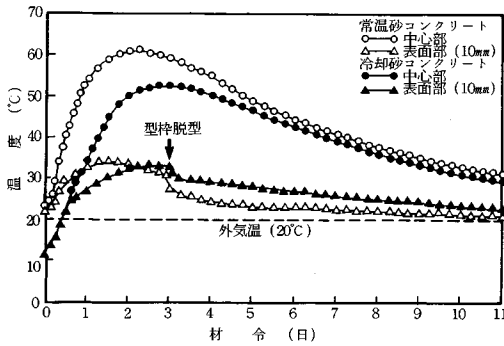


図-11 プレクーリングが温度履歴に与える影響

表-14 各マスコンクリートの中心部最高温度

項目	コンクリートの打込み温度 (°C)	中心部最高温度時の条件		
		中心部温度 (°C)	表面部温度 (°C)	材令 (日)
常温砂コンクリート	22.8	60.0	32.8	2.13
冷却砂コンクリート	11.0	52.6	32.8	2.92

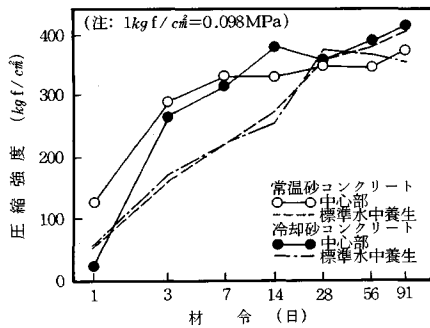


図-12 プレクーリングが強度発現に与える影響

ことから¹⁾、冷却砂を用いてプレクーリングを行うことは温度ひびわれの制御に有効であると考えられる。

b) 強度特性

常温砂コンクリートと冷却砂コンクリートのマスコンクリートとしての強度発現の比較を図-12に示す。

常温砂を用いたマスコンクリートの中心部の圧縮強度は、材令7日程度までは急激に増加するが、それ以降の材令における強度の伸びは小さくなる傾向を示す。一方、冷却砂を用いた場合の圧縮強度は、材令7日程度までは常温砂を用いた場合よりも小さい値を示しているが、材令14日以降長期材令に向かっては常温砂を用いた場合の圧縮強度よりも高い値を示している。このように、マスコンクリートのように断熱された状態においては、打込み時のコンクリート温度によって長期材令における強度が支配され、打込み時の温度が低い方が強度の伸びが大きいことは既往の報告^{12),13)}と同様な傾向を示している

と考えられる。したがって、冷却砂を用いてプレクーリングを行うことは、マスコンクリートの長期材令における強度の改善にも効果があると考えられる。

7. 結 論

本研究は、液体窒素で直接冷却した細骨材（冷却砂）を用いてコンクリートをプレクーリングする場合の、細骨材およびコンクリートの諸特性について、基礎実験ならびに実プラントを用いた実機規模の実験に基づいて検討したものである。本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に示す。

(1) 液体窒素を用いて -140°C 程度まで冷却した細骨材は、冷却をしない場合と比較するとその比重、吸水率および粗粒率に差異は認められない。なお、細骨材の表面水率は冷却することにより若干量減少する傾向がみられる。

(2) 冷却砂を用いてコンクリートを製造することにより、従来の氷等を用いたプレクーリング技術を上回る温度低減量を得ることが可能となった。その温度低減量は 25°C 以上である。

(3) 冷却砂を用いて製造したコンクリートは、空気量、単位容積重量に影響を及ぼすことはない。なお、スランプについては冷却することにより大きくなる傾向が認められ、その程度は練上り温度低減量 10°C に対して 2 cm 程度である。

(4) 冷却砂を用いて練上り温度を 10~25°C 程度下げて製造したコンクリートの標準水中養生条件における圧縮強度は、練上り温度を下げない常温砂コンクリートのそれと比較すると同等以上の強度が得られる。また、練上り温度が低いほど、長期材令における強度は大きくなる傾向を示す。

冷却砂を用いて製造したコンクリートの引張強度およびヤング係数と圧縮強度との関係は、常温砂コンクリートの場合と比較して差異は認められない。

(5) 冷却砂を用いてプレクーリングを行ったコンクリートのマスコンクリートとしての特性は、最高温度を低く抑えるとともに、部材中心部と表面部との温度差を小さくすることなどから温度ひびわれの制御に有効であると考えられる。さらに、長期材令における強度の改善にも効果があるものと推察される。

本研究は、東京冷熱産業(株)と共同で実施したものである。

最後に、本研究の実施にあたっては東京工業大学 長瀧重義教授のご指導を頂いたことを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針，昭和61年3月。
 - 2) たとえば，地濃茂雄・仕入豊和：コンクリートの強度発現におよぼす温度履歴条件（20～90℃）の影響，日本建築学会論文報告集，第337号，1984.3.
 - 3) Cooling concrete mixes with liquid nitrogen, Concrete Construction, pp.257～258, May, 1977.
 - 4) Liquid Nitrogen Cools Concrete for Tallowa Dam, CIG Gases in research and industry, No.12, May, 1975.
 - 5) 大澤賢修・福田信行・森 敏昭・小野 定・江渡正満：液体窒素を用いたダムコンクリートのプレケーリング施工，コンクリート工学，Vol.26, No.5, pp.21～29, May, 1988.
 - 6) 十河茂幸・中根 淳・浅井邦茂・直井影秀：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回コンクリート年次講演会論文集，pp.329～332, 1986.
 - 7) 浅井邦茂・直井影秀・中根 淳・芳賀孝成・佐藤哲司：液体窒素によるプレケーリング工法を用いたPC防波堤の施工，コンクリート工学，Vol.26, No.5, pp.20～38, May, 1988.
 - 8) 栗田守朗・桑原隆司・後藤貞雄・峯岸孝二：液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻，第2号，pp.299～304, 1988.
 - 9) 木村克彦・小野 定・後藤貞雄・峯岸孝二：液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの製造に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻，第2号，pp.157～162, 1988.
 - 10) 加島 聡：マスコンクリートにおけるプレケーリング工法，コンクリート工学，Vol.26, No.5, pp.13～20, May, 1988.
 - 11) 高野俊介・柳川晃夫：初期養生温度がモルタル及びコンクリートの強度に及ぼす影響，小野田研究彙報，No.15, pp.4～17, 1953.4.
 - 12) 桑原隆司・森永 繁：マスコンクリートの発熱，熱伝導シミュレーションシステムについて，セメント技術年報38, pp.190～193, 1984.
 - 13) 高野俊介：打込み温度がマスコンクリートの強度に及ぼす影響の研究，土木学会論文集，第26号，1955.5.
(1989.3.10・受付)
-