

報告

[1105] 液体窒素によるアイスシャーベットを用いた
コンクリート冷却工法

正会員○谷口裕史（間組技術研究所）

正会員 宮野一也（間組四国支店）

正会員 喜多達夫（間組技術研究所）

1. まえがき

近年、マスコンクリートの温度ひびわれ対策として、液体窒素を使用したコンクリートのブレードリング工法の研究開発が活発に行われており、実構造物への適用も行われている。液体窒素による冷却方法には、骨材などのコンクリート構成材料を冷却する工法¹⁾、コンクリートミキサ内で練りませ中のコンクリートを冷却する工法²⁾、生コン車内などで練りませ後のコンクリートを冷却する工法³⁾などがある。

本報告では、コンクリート構成材料のうち比熱の大きな水に注目し、液体窒素を水に噴入して製造するアイスシャーベットを練りませ水として用いた工法について、室内実験、1 m³のミキサを使用した実証実験および現場適用実験を実施したので、その結果について報告する。

2. 冷却システム

システムの概要を図-1に示す。本システムは製造部と計量部からなる。液体窒素は水槽底部のノズル(a)から噴入され、水槽内部で水と熱交換することにより細かい氷を生成しアイスシャーベット（水と氷の混合物）となる。これは比重が小さいため、水槽下部からの供給水(b)とともに底部からのバブリング作用により、水槽上部から水とともにオーバーフローし貯留槽(c)に溜まる。アイスシャーベットはチェーンコンベア上に取り付けられたL型金網(d)により計量槽(e)へ搬送される。アイスシャーベット中の水と氷の比率はチェーンコンベアの速度により調整される。

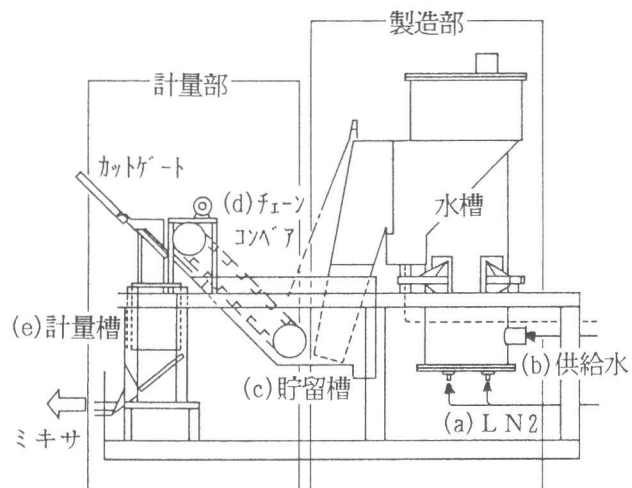


図-1 冷却システムの概要

3. 室内実験

室内実験は、アイスシャーベットを練りませ水として用いたときのコンクリートの基礎性状を把握することを目的として実施した。なお、本実験で使用したアイスシャーベット製造システムの水槽は、容量0.34 m³の円筒水槽である。また、アイスシャーベットの氷生成率（氷含有量）

表-1 実験ケース

実験ケース	実験要因	水準	氷生成率 (%)	練りませ時間(秒)
TEST1	アイスシャーベット氷生成率(%)	0(20℃), 17, 34, 50	—	120
TEST2	練りませ時間(秒)	90, 120, 150	45	—
TEST3	アイスシャーベット使用の有無	使用未使用	45	120

表-2 使用材料

		種類	備考
水		水道水	埼玉県与野市
セメント		普通 ポルトランド	比重3.16 比表面積3380cm ² /g
細骨材		大井川産 川砂	比重2.61 吸水率1.20% F.M. 2.70
粗骨材	40-20mm	秩父産 碎石	比重2.70 吸水率0.42% F.M. 7.92
	20-13mm	秩父産 碎石	比重2.70 吸水率0.50% F.M. 7.02
	13-5mm	秩父産 碎石	比重2.69 吸水率0.60% F.M. 6.44
混和剤	AE減水剤	標準型	リガニソルホン酸ホリオール 複合体
	AE剤	—	非イオン界面活性剤

表-4 試験項目および方法

		試験項目	試験方法
フレッシュ	練上り温度	棒状温度計で計測	
	スランプ	JIS A 1101	
	空気量	JIS A 1128	
	ブリージング	JIS A 1123	
	凝結硬化時間	JIS A 6204附属書1	
硬化	圧縮強度	JIS A 1108 (水中養生)	
	単位容積重量	圧縮強度試験時に測定	
	凍結融解抵抗性	ASTM C 666 A法	
	中性化	温度30℃相対湿度60% 炭酸ガス濃度10%促進	

は断熱容器内に所定量のアイスシャーベットを投入し、水温の変化による熱量計算から算出した。

3.1 実験概要

実験ケースを表-1に示す。TEST1では氷生成率がコンクリートの性状に及ぼす影響を、TEST2では練りませ時間の影響を、TEST3では硬化コンクリートの耐久性について検討した。

使用材料および配合を表-2および3に示す。練りませには容量35Lのパン型強制練りミキサーを使用した。また、練りませは15秒間空練り(1/2S+C+1/2S)した後、に所定時間本練りを行った。試験項目および方法は表-4に示すとおりである。

3.2 実験結果および考察

(1) アイスシャーベットの氷生成率がコンクリートの性状に及ぼす影響

試験結果を表-5に示す。アイスシャーベットの氷生成率が大きくなるに伴いコンクリートの練上り温度は低下し、氷生成率が50%の時には20℃水を使用した場合と比較して

10.7℃低減した。スランプは氷生成率が大きいものほど増大する傾向が認められている。これは、粗骨材を冷却した工法⁴⁾にも認められており、同一の強度およびコンシステンシーを得るための単位セメント量を低減できると考えられる。一方、圧縮強度は材令7日では同程度である

表-3 コンクリートの配合

No	TEST No	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	G	AE1	AE2
1	1	50	42	170	340	748	1068	0.85	0.085
2	2,3	50	42	165	330	757	1081	0.85	—

表-5 試験結果 (氷生成率の影響)

氷生成率 (%)	水温 (°C)	練上り温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	凝結時間 (時間-分)		圧縮強度 (kgf/cm ²)	
					始発	終結	7日	28日
0	20	21.9	17.1	3.9	8-25	11-10	345	433
17	0	16.4	15.6	3.4	8-30	10-45	345	449
34	0	14.0	18.3	3.4	8-45	11-00	337	458
50	0	11.2	20.2	3.6	8-20	11-00	345	490

表-6 試験結果 (練りませ時間の影響)

氷生成率 (%)	練りませ時間 (秒)	練上り温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリージング率 (%)	凝結時間 (時間-分)	
						始発	終結
45	90	9.5	18.5	2.5	3.53	7-25	9-50
45	120	9.0	18.5	2.5	2.80	7-20	9-50
45	150	9.1	17.5	2.5	2.68	7-20	9-50

が、材令28日において氷生成率の増大に伴う強度の増大傾向が認められた。

(2) 練りませ時間がコンクリート性状に及ぼす影響

試験結果を表-6および図-2に示す。スランプ、空気量および凝結時間は大きな差異は認められていないものの、練りませ時間が90秒のものは、ブリージングが増大する傾向が認められており、アイスシャーベット中の氷が残らないように十分な練りませを行う必要がある。

(3) アイスシャーベットの使用が耐久性に及ぼす影響

凍結融解抵抗性および中性化に及ぼす影響について、同一配合において、アイスシャーベット使用の有無による比較試験を実施した。試験結果を図-3および4に示す。いずれの試験においても同等あるいは同等以上の結果が得られており、アイスシャーベットの使用が上記耐久性に及ぼす影響はないと考えられる。

4. 実証実験

実証実験では、容量1m³のミキサおよび容量1.45m³のアイスシャーベット製造水槽を使用して自動計量されたアイスシャーベット(氷生成率45%)全量を使用した場合の冷却効率およびコンクリートの性状について検討した。

4.1 実験概要

使用材料は室内実験で使用した材料と同様である。配合は表-7に示すとおりであり最大粗骨材寸法20mmおよび40mmで検討した。練りませ量は0.5m³であり、空練りの後アイスシャーベットを投入して60秒練りませた後に排出した。なお、練りませ時間はミキサの能力を考慮し設定した。試験項目は室内試験で実施した項目に加え、アイスシャーベット製造時における液体窒素使用量および図-5に示す装置により簡易断熱温度上昇試験を実施した。

4.2 実験結果および考察

(1) 液体窒素使用量

本実験における1バッチの練りませ

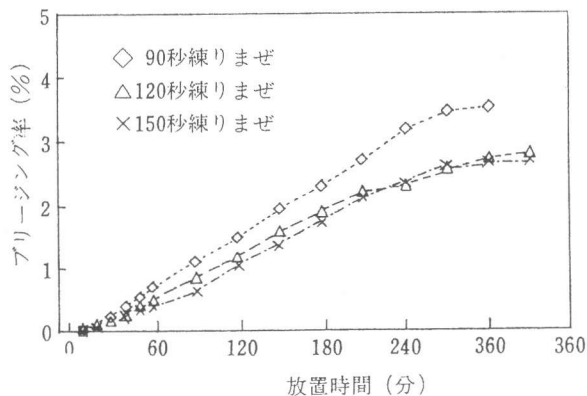


図-2 練りませ時間がブリージングに及ぼす影響 (TEST2)

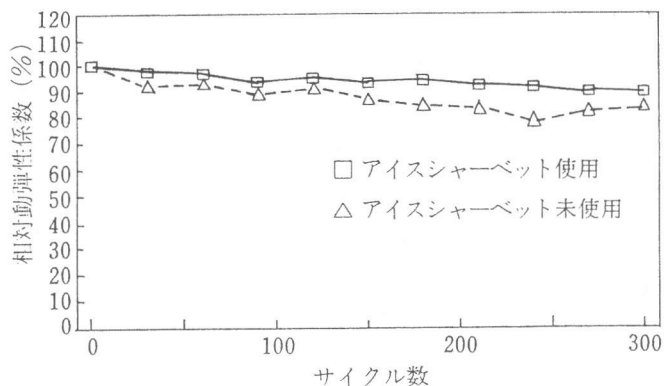


図-3 凍結融解抵抗性の比較 (TEST3)

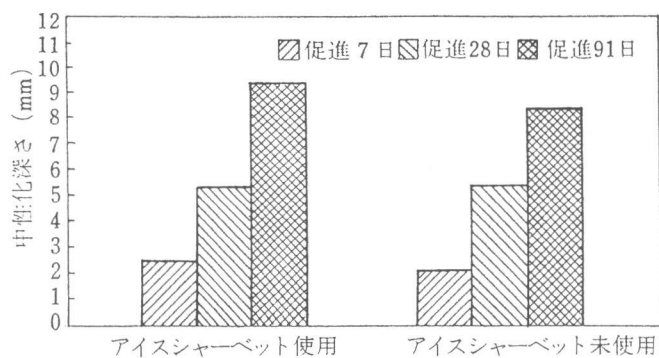


図-4 中性化深さの比較 (TEST3)

表-7 コンクリートの配合

No	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE1
1	20	50	42	165	330	757	1081	0.83
2	40	50	37	150	330	691	1216	0.75

水量は75kg、冷却前の供給水の水温は20℃であり、液体窒素理論消費量（熱効率100%の場合の液体窒素使用量）は以下のように計算できる。

①供給水を0℃まで冷却するのに必要な液体窒素消費量 W_{LN2} は水を0℃にするのに必要な熱量を液体窒素のもつ熱量で除してやればよいので(1)式で算定できる。

$$W_{LN2} = \{W_{ice} \times (T_w - 0) \times C_w\} / Q_{LN2} \quad (1)$$

②同様に、0℃の水の一部を氷にするための液体窒素消費量 W_{LN2}' は、0℃の水を氷にするために必要な熱量を液体窒素のもつ熱量で除してやればよいので(2)式で算定できる。

$$W_{LN2}' = \{W_{ice} \times I_{ratio} \times Q_{ice}\} / Q_{LN2} \quad (2)$$

- ここに W_{ice} ; アイスシャーベット製造量 (75kg / 1バッチ)
- I_{ratio} ; アイスシャーベット氷生成率 (45%、測定値)
- Q_{ice} ; 氷の融解熱 (80kcal/kg)
- Q_{LN2} ; 液体窒素が持っている熱量 (比熱0.248kcal/kg・℃、気化熱48kcal/kg)
- T_w ; 供給水温 (℃)
- C_w ; 水の比熱 (1kcal/kg・℃)

以上の①および②の和が液体窒素理論消費量となる。これにより計算すると本実験における液体窒素理論消費量は43kgとなる。本実験での実際の液体窒素使用量は44~50kgであり、アイスシャーベット製造時の熱効率は86~98%、コンクリート1m³を1℃低下させるのに必要な液体窒素量は8.8~10kg/m³・℃であり、従来の液体窒素を用いた工法と比較してもかなり効率のよいことが確認できた。また、貯留槽および計量槽の断熱設備を行うことによりさらに高い熱効率が得られるものと考えられる。

(2) 練りませ状況

練りませ状況を目視およびビデオ撮影により観察した結果、約15秒でアイスシャーベットは分散され、約30秒後にはほぼ完全に練りませられていた。

(3) フレッシュコンクリート

試験結果を表-8に示す。練上り温度は最大粗骨材寸法20mmの場合に9.5℃、40mmの場合に10℃低減した。また、スランプの増大は室内試験よりも大きく各々6.1cmおよび7.9cmであった。凝結時間はアイスシャーベットの使用により凝結始発時間が45~60分程度遅くなった。これらは、室内試験よりもミキサの練りませ性能が増大したことが影響しているものと考えられる。しかし、凝結時間の遅延も、始発から終結まで

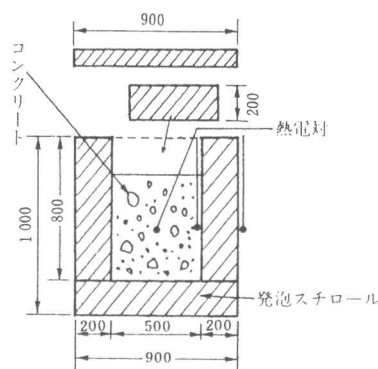


図-5 簡易断熱温度上昇試験装置

表-8 試験結果 (実証実験)

Gmax (mm)	アイス シャ- ベットの 使用	練上 り温 度 (℃)	スラ ンプ (mm)	空気 量 (%)	凝結時間 (時間-分)	
					始発	終結
20	無	17.0	11.4	2.7	5-25	7-15
20	有	7.5	17.5	2.2	6-25	7-55
40	無	21.5	7.0	1.3	5-45	7-30
40	有	11.5	14.9	1.3	6-30	8-00

の時間は同程度でありコンクリートの硬化に及ぼす影響はないと考えられる。

(4) 硬化コンクリート

圧縮強度試験結果を図-6に示す。アイスシャーベットを使用した場合には材令3日強度が若干小さいものの材令7日でほぼ同等の強度となり、それ以降は同等以上の強度を示しており室内試験と同様の結果が得られている。

(5) 簡易断熱温度上昇特性

試験結果を図-7に示す。アイスシャーベットの使用により、試験開始時の温度は9.7℃低減し、最大上昇温度は8.1℃低減した。また、最大上昇温度に達するまでの時間も遅延することから、温度上昇速度も小さくなり、温度ひびわれ対策として有効であることが確認された。

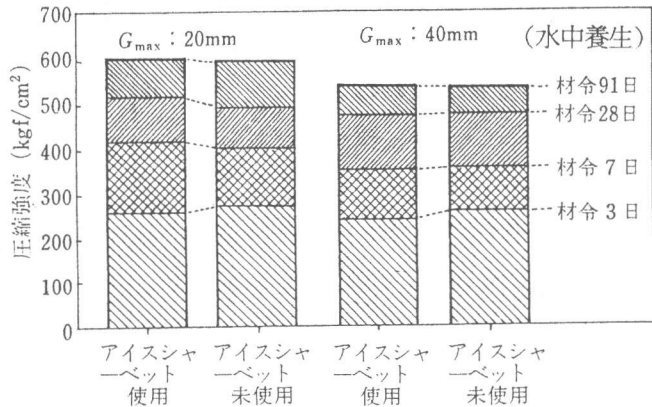


図-6 圧縮強度の比較 (実証実験)

5. 現場適用実験

実証実験で使用したアイスシャーベット製造システムを市中の生コンプラントに搬入し、実大規模での冷却効果について検討を行った。

5.1 実験概要

対象はひびわれの危惧されるスラブ部のコンクリートであり、打設数量は約20m³である。試験項目は室内実験での実施項目に加えて打設部のコンクリートの温度変化も測定した。なお、使用配合は表-9に示すとおりである。

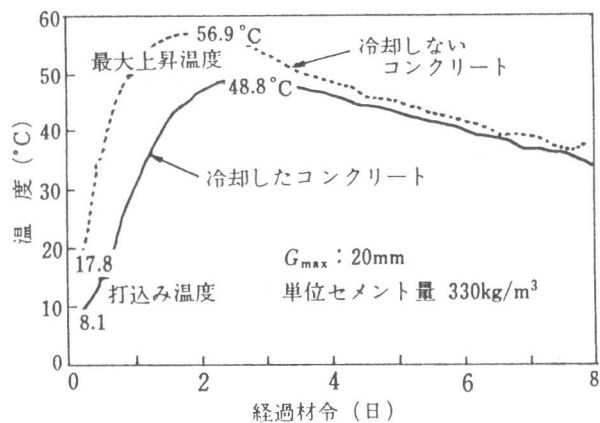


図-7 簡易断熱温度上昇試験結果

5.2 実験結果および考察

測定結果の一例を表-10に示す。練上り温度の低減量は平均7.0℃であり、室内実験結果よりも小さくなった。これは、骨材の表面水を補正した後の実際のアイスシャーベット使用量が108kg/m³であったこと、さらに、今回の実験ではアイスシャーベット製造装置を地上に設置し、計量されたアイスシャーベットをスカイポーターで運搬した後にミキサ内に投入したため、投入までの時間が10~20分程度かかり氷生成率が20%程度に低下したことが影響したと考えられる。しかし、実工事では計量されたアイスシャーベットを直接ミキサ内に投入するなどの方法を

表-9 コンクリートの配合

No	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE1
1	20	55	47.8	171	311	858	957	0.93

表-10 測定結果 (現場適用実験)

	コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)	スラブ (cm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
				7日	28日
未冷却	30.0	3.6	15.0	203	306
冷却	23.0 (22.5)	3.5 (3.8)	14.0 (16.5)	248 (253)	342 (355)

現場到着時の試験結果、()内はプラント試験結果

考えており、実証実験程度の熱効率が確保できるものと考えている。温度変化の一例を図-8に示す。最大温度上昇量は5℃程度の低減であった。これは、対象部材圧が薄いことにより、断熱状態の実証実験結果よりも小さい値となったと考えられる。一方、練りませは全材料投入後60秒行うことにより十分な練りませができることが確認された。

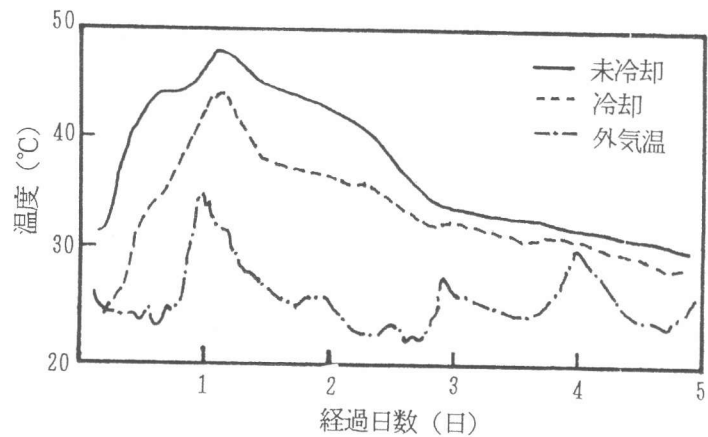


図-8 温度測定結果 (現場適用実験)

6. まとめ

液体窒素により製造したアイスシャーベットの練りませ水として用いるコンクリートのプレクーリング工法について検討した結果以下のことが明かとなった。

- (1) アイスシャーベットの製造する際の液体窒素の熱効率は86~98%であり、本実験で使用した配合のコンクリート1m³を1℃低下させるのに必要な液体窒素量は8.8~10kg/m³・℃と熱効率が優れた工法であることが確認された。
- (2) 氷生成率が45%のアイスシャーベットの練りませ水として使用することによりコンクリートの練上り温度を約10℃低減できる。
- (3) アイスシャーベットにより冷却したコンクリートの練上り時のスランプは増大する傾向がある。
- (4) アイスシャーベットの使用により凝結始発時間が1時間程度遅延することがあるが、材令7日で同等の強度が得られる。
- (5) アイスシャーベット使用による凍結融解抵抗性および中性化への影響は認められない。

7. あとがき

現在は、アイスシャーベット製造能力を大幅に改善した装置により検証しており、今夏より実用化の予定である。

本研究は、テイサン(株)および(株)渡商会との共同研究であり、研究開発を実施するにあたり多大なご支援とご協力を得たことをここに記して深く感謝する次第である。

(参考文献)

- 1) 小野 定 他：液体窒素で冷却した骨材を用いたクーリング工法の開発、セメント技術年報、No. 42、pp. 571~574、1988.
- 2) 中原 康 他：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、コンクリート工学年次学術講演会、No. 9-2、pp. 73~78、1987.
- 3) 芳賀孝成 他：液体窒素によるコンクリートのプレクーリング、土木技術、Vol. 44、No. 10、pp. 100~108、1989.
- 4) 布谷和生 他：液体窒素によるプレクーリング工法 (粗骨材冷却工法) について、コンクリート工学年次論文報告集、No. 12-1、pp. 903~906、1990.