

液体窒素を用いたプレクーリング技術がコンクリートに及ぼす影響

りんかい日産建設株式会社 正会員 ○中出 睦
 りんかい日産建設株式会社 山田浩司

1. はじめに

セメントの水和熱に起因する温度ひび割れは、耐久性や水密性の低下および美観の損傷の原因となることから、近年の構造物の大型化に伴い、その抑制あるいは制御対策は重要な課題となっている。温度ひび割れの制御対策としては、主に以下の3つに大別される。①コンクリート温度を低減する対策、②温度応力を低減する対策、③コンクリートに発生する引張応力に対する抵抗性を増大させる対策。これらの対策のうち、コンクリート温度を低減する対策の一つである「プレクーリング技術」は古くから実施されており、数多くの研究が行われている^{1)~3)}。



写真-1 液体窒素噴入状況

しかしながら、プレクーリングを実施するには大規模な設備と高額な費用を要するため、大規模な工事以外では使用することが難しかった。

一方、トラックミキサー車のドラム内にノズルで液体窒素を噴入し、打設直前のコンクリートを所定の温度まで冷却する方法である「液体窒素を用いたプレクーリング技術」（写真-1 および図-1）は、従来技術に比べ、施設や設備が簡略化できることから、比較的小規模な工事でも実施することができ、かつ経済的となる利点もある。本報は、冷却されたフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質への影響の確認等を目的として実施した「液体窒素を用いたプレクーリング技術」の実験結果の一部を報告するものである。

表-1 コンクリートの配合

セメント種類	呼び強度 (N/mm ²)	スラブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水量	セメント量	細骨材量	粗骨材量	混和剤量
BB	27	8	52.3	45.1	157	300	819	1037	3.9
		15	52.3	44.7	173	331	783	1004	4.3

表-2 使用骨材

材料	種類	物性値	産地
細骨材	砂	表乾密度2.60g/m ³ , 吸水率2.16%,粗粒率2.60	君津市九留里大谷
粗骨材	碎石	表乾密度2.70g/m ³ , 吸水率0.49%,実績率61.0%	高知県吾川郡仁淀川町大植

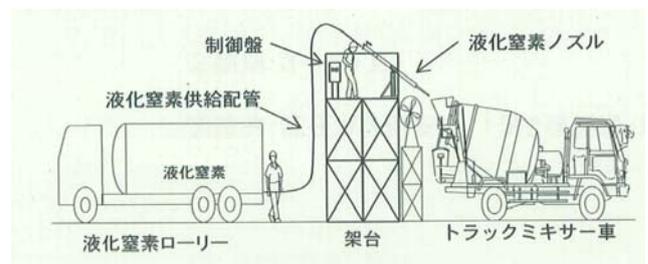


図-1 液体窒素による直接冷却工法

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験は、27-8-20BB、27-15-20BBの2種類のコンクリートを使用した。コンクリートの配合を表-1に、使用骨材を表-2に示す。

2.2 施工方法

冷却方法は、トラックミキサー車のドラム内にノズルを差込み、ドラムを150秒間高速攪拌しながら、ノズルの先端から液体窒素を噴入する方法で行った。

2.3 測定内容および実験方法

実験は、4m³のコンクリートを積載した4台のトラックミキサー車を使用し、トラックミキサー車ごとに1.8

キーワード 液体窒素, プレクーリング, 温度ひび割れ, 長さ変化, 凍結融解
 連絡先 〒105-0004 東京都港区芝2丁目3番8号 りんかい日産建設株式会社 TEL03-5476-1721

表-3 実験項目

試験項目	スランブ		8cm								15cm								
	液体窒素		無(4m ³)				有(4m ³)				無(4m ³)				有(4m ³)				
	目標低減温度		0°C				3°C				5°C				9°C				
コンクリート温度(°C)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
空気量(%)	○				○														
スランブ(cm)	○				○														
圧縮強度	σ 24h																	○	○
	σ 3									○									
	σ 7									○									
	σ 28									○									○
	σ 91									○									○
静弾性係数試験 (材齢28日)										○									○
試験体作成 (1.8m×1.8m×1.0m)																			
試験体コンクリート内外温度計測																			
長さ変化試験										○									○
凍結融解試験										○									○

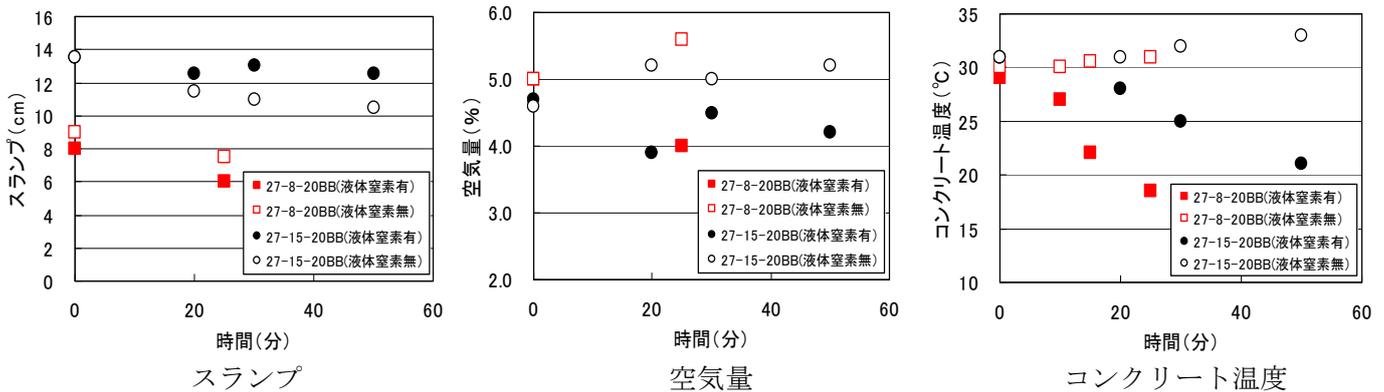


図-2 フレッシュコンクリートの試験結果

m×1.8m×1.0mの試験体を4体作製した。27-8-20BBで液体窒素により冷却したものと冷却しないもの（以下、液体窒素有と液体窒素無とする）および27-15-20BBで液体窒素有と液体窒素無のケースにおいて、試験体を作製した。

なお、液体窒素使用量とコンクリート降下温度の関係を求めるため、目標冷却温度となるまで液体窒素を噴入することとした。目標冷却温度は、現着温度に対して、1回目で3°C、2回目で6°C、3回目で9°Cを目標とした。

試験項目を表-3に示す。目標冷却温度ごとのスランブ、空気量、コンクリート温度、外気温（ただし、27-8-20BBでは、目標冷却温度3°C、6°Cのスランブ、空気量は計測していない）と材齢3日（27-15-20BBでは、材齢3日の代わりに材齢24時間とし、材齢7日の試験は実施していない）、7日、28日、91日の圧縮強度と材齢28日の弾性係数を求めた。

各試験体の天端と中心部には、熱電対を設置し、側面には、表面温度を計測できる温度センサーが設置している型枠を使用し、材齢28日まで存置し、表面温度の経時変化を求めた。

このほか、液体窒素の耐久性への影響も把握するため、各コンクリートの凍結融解試験と長さ変化試験を実施した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

スランブ(cm)・空気量(%)・コンクリート温度への影響を図-2に示す。

各コンクリート（27-8-20BB, 27-15-20BB）ごとに、液体窒素の有無によるスランブおよび空気量を把握するために同時に同種のコンクリートのトラックミキサー車を出荷させ、同作業工程ごとの液体窒素の有無によるフレッシュコンクリートの性状を計測した。したがって、液体窒素無でも150秒の高速攪拌を実施している。

その結果、液体窒素有は、液体窒素無よりもスランブロスと空気量の増加率が小さい傾向を示すことがわか

った。液体窒素を使用した場合、スランプロスが大きくなることや高速攪拌による空気量の増大が懸念されたが、実験結果は異なった。したがって、本工法は、暑中コンクリートへの適用が有効と考えられる。

3.2 液体窒素使用量とコンクリート温度低下量の関係

液体窒素量と低下温度の関係を図-3 に示す。コンクリート温度を1℃低下させるのに必要な液体窒素供給量を把握することが重要である。本実験では、液体窒素使用量とコンクリート降下温度の関係から、1m³のコンクリートを1℃降下するのに必要な液体窒素使用量は、約14.3kgであることを確認した。

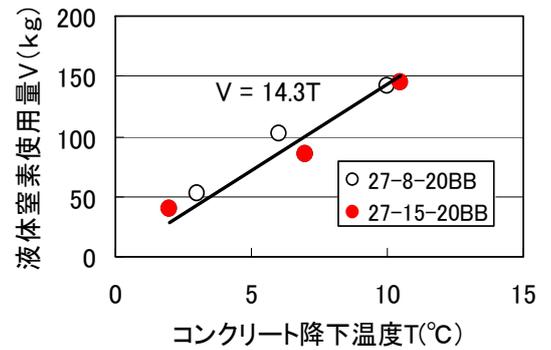


図-3 液体窒素使用量とコンクリート降下温度の関係

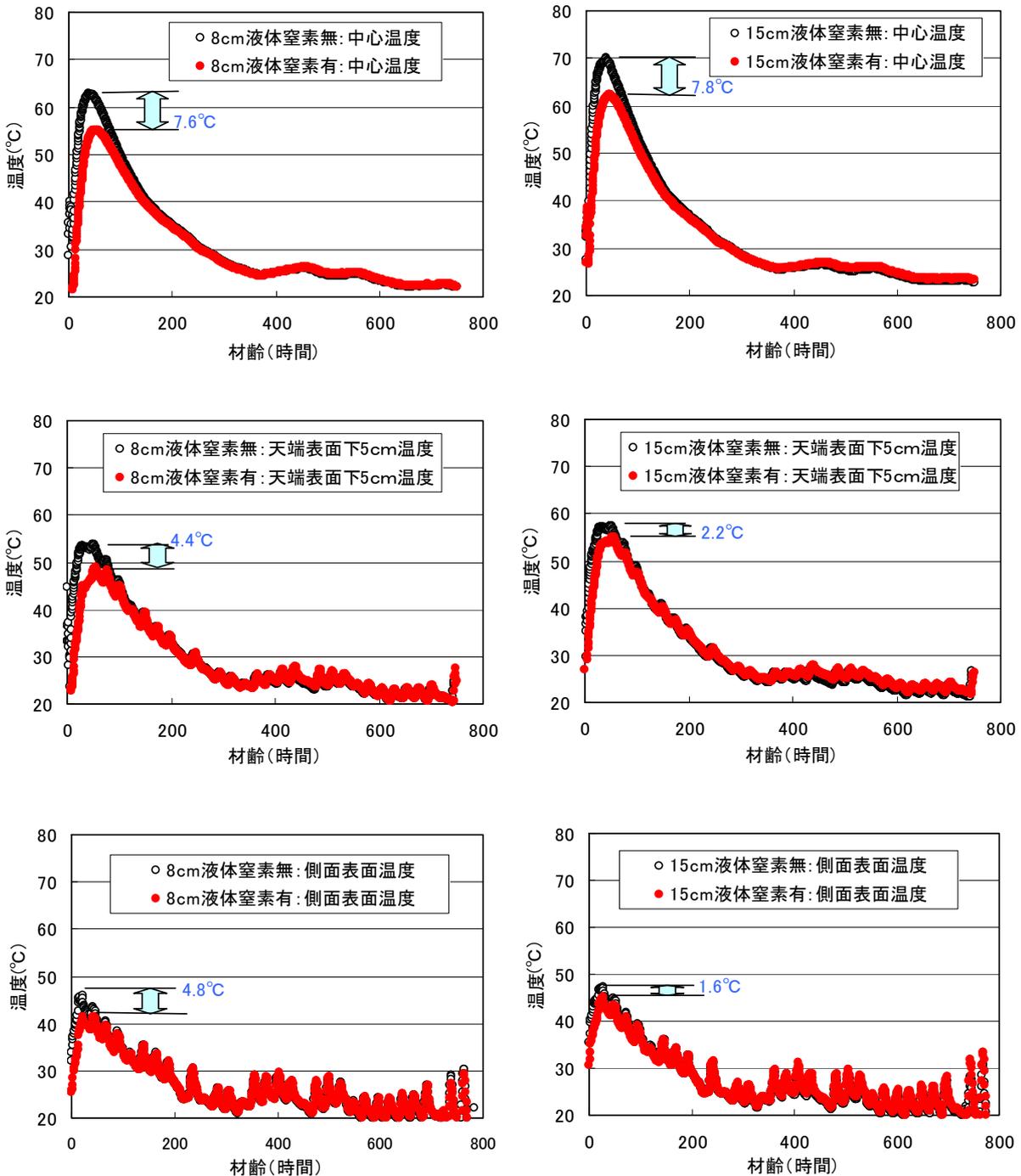


図-4 コンクリート温度の推移

3.3 コンクリート温度への効果

コンクリート温度の推移を図-4に示す。ここで、中心温度とは、1.8m×1.8m×1.0mの試験体の中心部の温度、天端温度とは、試験体の天端表面下5cmでの温度、側面温度とは、各側面の型枠ごとに2個ずつ設置した計8個の温度センサで測定した表面温度の平均値である。

液体窒素有無による温度の最大値は、27-8-20BBでは、中心温度で7.6℃、天端温度で

4.4℃、側面温度で3.0℃、27-15-20BBでは、中心温度で7.8℃、天端温度で2.2℃、側面温度で3.0℃低くなった。

液体窒素有が、外気の影響を受けにくい中心温度が表面温度より大きく低下することによる内外温度差の低減や温度低下時の温度変化が緩やかなことから、内外温度差に起因する内部拘束による温度ひび割れに顕著な効果があることが考えられる。

3.4 圧縮強度および弾性係数への効果

液体窒素有無による試験体の圧縮強度および弾性係数を表-5に示す。圧縮強度は、若材齢 σ_{24h} を除いては、液体窒素有のほうが材齢が長くなるほど、大きくなる傾向が見られる。同様に、弾性係数においても液体窒素有のほうが、やや大きな値を示していることがわかる。

3.5 長さ変化試験と凍結融解試験への影響

長さ変化率試験結果を図-5に、凍結融解試験結果の関係を図-6に示す。

本試験において、長さ変化については、冷却の有無による影響はみられなかった。一方、凍結融解試験結果において、相対動弾性係数は、27-8-20BBでは、増加する傾向が、27-15-20BBでは、やや低下する傾向が見られた。

表-5 圧縮強度および弾性係

材齢	*27-8-20BB		27-15-20BB	
	液体窒素有	液体窒素無	液体窒素有	液体窒素無
σ_1	-	-	6.98	6.49
σ_3	16.9	15.3	-	-
σ_7	26.1	23.7	-	-
σ_{28}	36.7	33.4	32.6	31.0
σ_{91}	38.0	36.7	41.8	38.3

(単位:N/mm²)

E28	34.8	33.6	34.8	33.6
-----	------	------	------	------

(単位:kN/mm²)

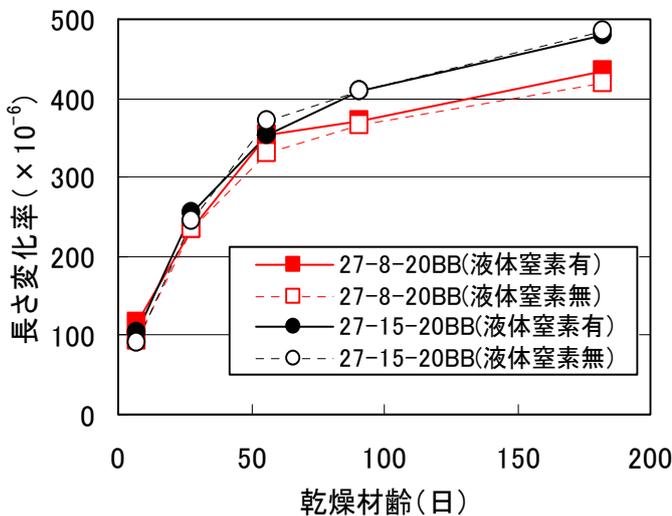


図-5 長さ変化率試験結果

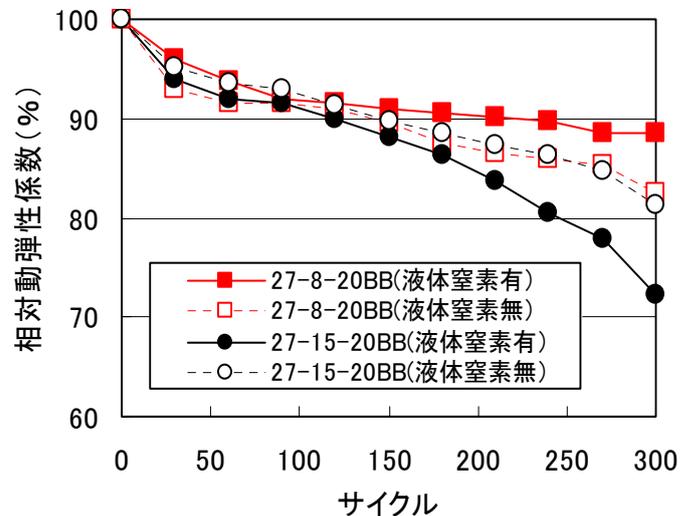


図-6 凍結融解試験結果

4. 検討概要

4.1 検討ケース

上記の液体窒素によるプレクーリングの効果を確認するため、壁厚が異なる壁状構造物を対象として、温度ひび割れの低減効果に及ぼす影響について、解析により検討した結果を以下に述べる。

4.2 解析条件

対象とした壁状構造物は、壁厚を0.4~1.6mの範囲で4水準(0.4, 0.8, 1.2, 1.6m)に変化させ、壁長は、10mとした。温度応力解析は1/4断面の解析モデルを用い、3次元FEMにより実施した。解析モデルを図-7に示す。

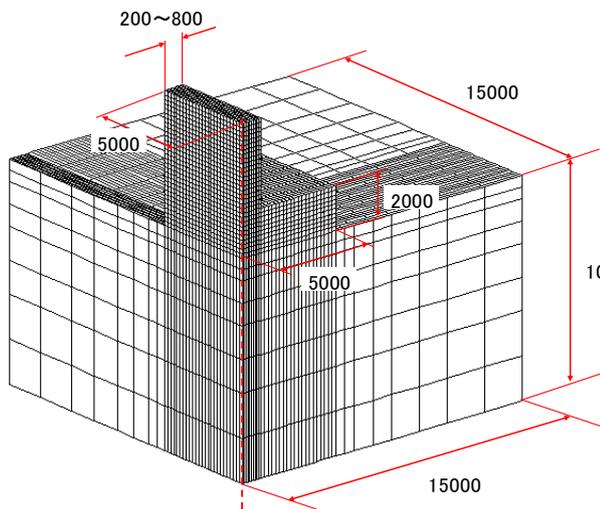


図-7 解析モデル

表-6 コンクリートの解析条件

項目	単位	条件
単位水量	kg/m ³	157
単位セメント量	kg/m ³	300
打ち込み温度	°C	25
熱伝導率	W/m°C	2.7
比熱	kJ/kg°C	1.15
単位容積重量	kg/m ³	2313
熱伝達率	W/m ² °C	14
ポアソン比	-	0.2
線膨張係数	μ/°C	12
断熱温度上昇量	°C	マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008による
圧縮強度	N/mm ²	
引張強度	N/mm ²	
有効ヤング係数	N/mm ²	
自己収縮	μ	

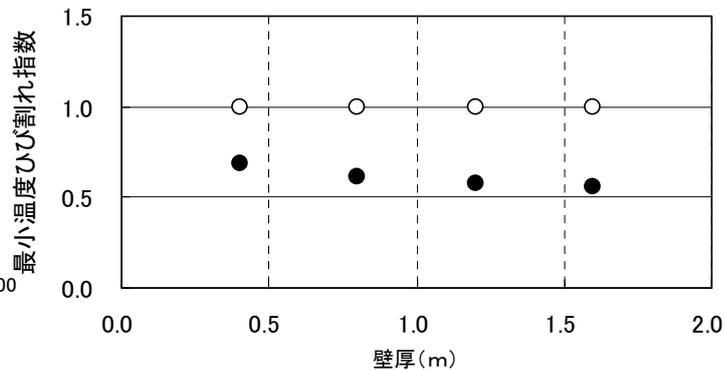


図-8 壁厚と最小温度ひび割れ指数の関係

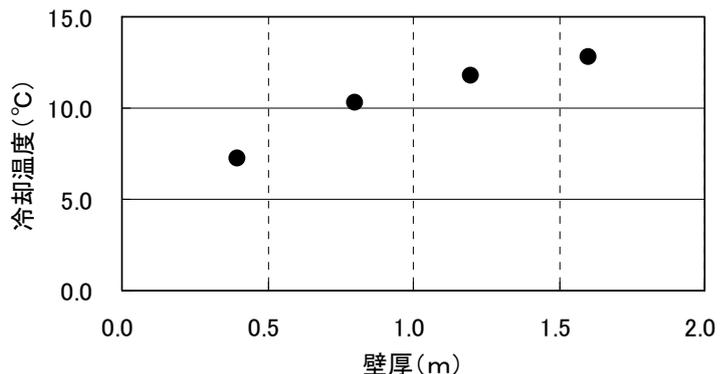


図-9 壁厚と最小温度ひび割れ指数 1.0 にするために必要な冷却温度の関係

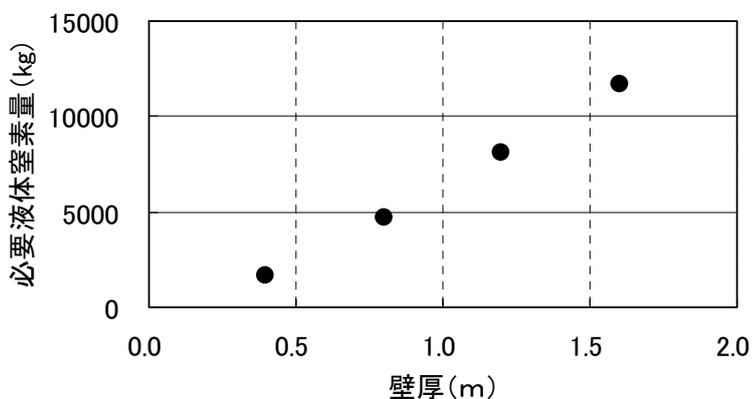


図-10 壁厚と最小温度ひび割れ指数 1.0 にするために必要な液体室素量の関係

コンクリートは、実験で使用した 27-8-20BB の配合とした。コンクリートの熱特性および力学特性などの解析条件については、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008（日本コンクリート工学会）⁴⁾ を参照とした。

4.3 検討結果

壁厚と最小温度ひび割れ指数の関係を図-8 に、壁厚と最小温度ひび割れ指数 1.0 にするために必要な液体室素量の関係を図-9 に、壁厚と最小温度ひび割れ指数 1.0 にするために必要な冷却温度の関係を図-10 に、温度応力解析結果（最小温度ひび割れ指数 I_{cr} のコンター図）を図-11 に示す。なお、最小温度ひび割れ指数の対象箇所は、壁のみに着目した値であり、液体室素量は、施工実験より求めた液体室素使用量 $14.3\text{kg/m}^3/\text{°C}$ を使用して計算している。

図-8 に示す液体室素無の場合、壁厚が増大するのに伴って、最小ひび割れ指数が低下することがわかる。

