

論文 真空脱水処理を行ったモルタルの初期凍害抑制効果に関する実験的研究

HUI ZHEN*1・和藤 浩*2・畑中 重光*3・村松 功朗*4

要旨：コンクリートの強度を早期に発現させる方法の一つとして、真空脱水処理工法がある。真空脱水工法はコンクリートを大気圧で圧密し、余剰水をコンクリート内部より強制的に脱水することにより、コンクリート表層部の耐久性を飛躍的に向上させることができる。初期凍害の抑制効果があることも確認されているが、本報では、更なる検討を行うために、実際の施工現場を想定した気中環境下での測定、削孔試験による詳細な圧縮強度分布の測定、凍結時の内部温度分布の測定を目的として実験を行った。その結果、打込み後の適切な時期に真空脱水処理を行うことにより、初期凍害をほぼ抑制できることが再確認された。

キーワード：真空脱水処理、初期凍害、ブリーディング、圧縮強度分布、削孔試験、温度分布

1. はじめに

コンクリートが初期凍害を受けると、強度増進不能、強度低下、透水性の増大、耐水性の損失などの危険性が生じ、構造物として致命的な打撃を受けることになる¹⁾。

なお、所定の空気量を含んだコンクリートの圧縮強度がほぼ 5MPa に達すると、初期凍害を受ける可能性がほとんどなくなる²⁾とされている。このため、初期凍害に対しては、早期に強度を発現させることが非常に有効であるといえる。

コンクリートの強度を早期に発現させる方法の一つとして、筆者らがこれまで一連の実験を行ってきた真空脱水工法³⁾(図-1 参照)がある。真空脱水工法は、コンクリートを大気圧で圧密し、余剰水をコンクリートの内部より強制的に脱水することにより、コンクリート表層部の耐久性を飛躍的に向上させることができる。なお、真空脱水の処理開始時期として、最も効果の大きいとされるのは、ブリーディングがほぼ終了した時点である(真空脱水の処理開始時期の影響を検討した圧縮強度分布³⁾を図-2 に示す)。

以上のように、真空脱水工法はコンクリートの初期凍害に対して有効であると考えられ、前田ら⁴⁾は凍結融解装置を用いて真空脱水工法の初期凍害抑制効果を確認した⁵⁾。本研究では、前田らの研究をさらに深めることとし、以下の測定項目を新たに追加し、真空脱水工法の初期凍害に対する抑制効果を検討することを目的とした。

- ・実際の施工現場を想定した気中環境下での測定
- ・凍結時の内部温度分布の測定
- ・削孔試験⁵⁾による詳細な内部圧縮強度分布の測定

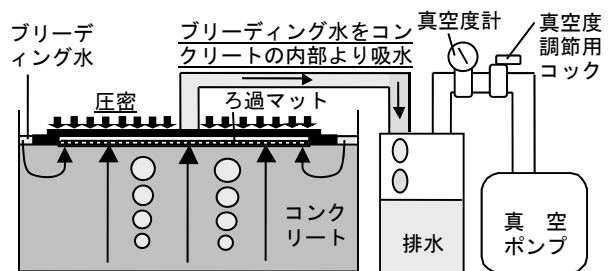


図-1 真空脱水工法の概略図³⁾

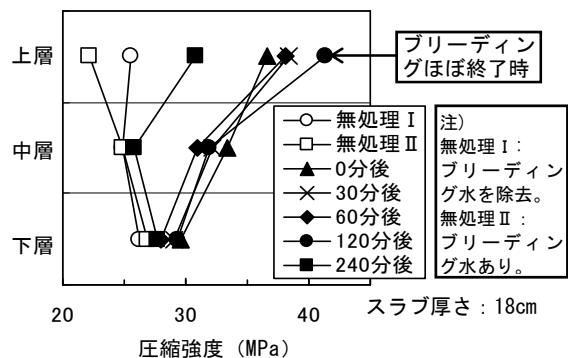


図-2 圧縮強度分布(真空処理開始時期の影響)¹⁾

2. 実験概要

2.1 実験要因

表-1 に、本実験の要因および条件を示す。なお、本実験は、上述したように削孔試験⁵⁾を行うため、モルタルを使用した。表-2 および表-3 に、本実験で使用したモルタルの使用材料および調合表を示す。

凍結は、-10℃の恒温槽で行った。凍結開始材齢は、真空脱水処理後から 0, 180, 360, 540 分の 4 水準とした。なお、凍結させない試験体も作製した。

*1 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 技術専門員 (正会員)

*3 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*4 (株) 建和 代表取締役 (正会員)

2.2 実験方法

(1) モルタルの打込み

本実験では、図-3に示すような278×165×165(高さ)mmの試験体を水セメント比、凍結の有無、真空脱水の有無、真空度の影響を検討するために、14体ずつ作製した。モルタルは型枠に2層に分けて打ち込んだ。締固めは突き棒による突き、および木づちによる型枠側面の叩きにより行った。表面はコテ仕上げとした。

試験体の作製時には、φ100×200mmのプラスチック容器を用いて、試験体に合わせて深さ165mmまでモルタルを打ち込み、ブリーディング試験を行った。これは型枠の材質(プラスチック製)と試験体の高さを整合させたうえで、試験体のブリーディング終了時点を求めるためである。

(2) 真空脱水処理

真空脱水処理開始時期は、調合水セメント比は異なるが、ここでは、上記の試験によってブリーディングがほぼ終了した打込み後120分の時点とした。また、真空脱水処理開始までは試験体をビニールで覆い、水分が蒸発しないようにした。

真空度(吸引圧/大気圧)は、50%、70%、90%の3段階として、そのうち実際の施工現場を想定した70%を基本水準とした。なお、施工現場では水封式の真空ポンプを

表-2 使用材料の性質

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
細骨材	川砂, 最大寸法 5mm, 表乾密度: 2.60g/cm ³

使用しており、真空マットの大きさと水封式ポンプの性能より真空度が70%程度となっている。

(3) 養生方法

養生は、実験室内気中養生(温度: 後述の図-6, 7 参

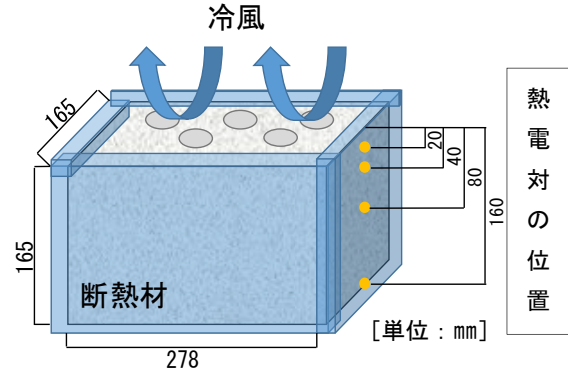


図-3 真空脱水処理の試験体

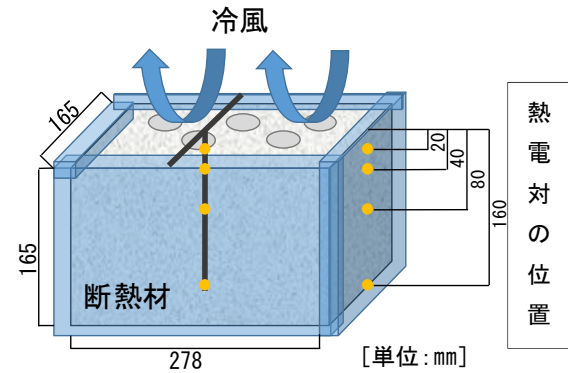


図-4 無処理の試験体

表-1 実験要因および条件

W/C (%)	凍結処理	真空脱水処理			凍害条件			熱電対温度計の位置	
		真空処理	開始材齢 (min)	真空度 (%)	吸引時間 (min)	冷凍庫の温度 (°C)	真空脱水処理後の凍結開始時 (min)	凍結継続時間 (min)	型枠内壁の上から距離 (mm)
45	有無	有無	ブリーディング終了時	90*	5	-10	0 (ブリーディング終了時)	720 (12h)	20
55			70	180 (3h)			40		
65			50*	360 (6h)			80		
									160

[註] *: 真空度 90%、50%の試験体の凍結開始時は、0(ブリーディングの終了時)のみとする。アンダーラインは、基本水準を示す。

表-3 モルタルの調査表

W/C (%)	s/m (%)	S/C	設計 FL (mm)	設計 Air (%)	単位量 (kg/cm ²)			混和剤 SP/C (%)	実測値	
					W	C	S		FL (mm)	Air (%)
45	50	2.16	220	4.0	270	599	1295	0.21	220	2.5
55	50	2.45	220	4.0	292	529	1295	0.07	211	4.0
65	50	2.72	220	4.0	309	476	1295	0	210	2.5

[註] W/C: 水セメント比, s/m: 細骨材の容積/モルタルの容積, S/C: 砂セメント比, FL: フロー値, Air: 空気量, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, SP: 高性能 AE 減水剤

照)とした。凍結させる試験体は、各凍結開始材齢において-10℃の恒温槽に720分(12時間)投入した。前田ら⁵⁾の研究よりさらに凍結の影響が大きくなると考えられる-10℃で行った。なお、型枠の側面および底面には、断熱材を貼付し、モルタル表面からのみ、凍害させるようにした。

凍結させた後は、凍結させない試験体と同様に、実験室内気中養生とした。

(4) 温度分布の測定

温度分布は、図-3に示すように型枠の内壁(表面から20, 40, 80, 160mm)に熱電対を設置し、打込み終了60分後から5分毎に1500分(25時間)測定を行った。なお、試験体中心部と型枠側面部の温度の違いを観察するため、無処理試験体の凍結させない試験体と真空脱水処理を行った直後に凍結させる試験体については、図-4に示すように試験体の中心部にも同じ高さの位置に熱電対を設置した。

(5) 圧縮強度分布

圧縮強度分布は、材齢25日に図-3, 4に示すように試験体からφ50mmのコアをコアドリルで5本切り出し、これらのコアのうちの3本をコンクリートカッターで高さ50mmに3分割し、材齢28日に圧縮強度試験を行った。なお、図-3, 4に示す残り2本のコアのうちの1本は削孔試験体(後述)、1本は予備試験体である。

(6) 削孔試験

削孔試験装置を図-5⁶⁾に示す。削孔試験は材齢30日に行った。前述したように、5本のコア試験体のうちの1本を削孔試験に供した(図-6参照)。モルタルを使って-17℃の条件で初期凍害の影響を調べた既往の実験⁷⁾で、初期凍害の影響は、上層の表面から50mm程度であったため、図-7に示すように、コア試験体を2分割した上層のみ削孔試験を行った。すなわち、上層の円柱試験体の両側をカットし、上表面から10mm間隔で50mmまで各3点ずつ測定を行った。削孔試験は削孔速度で評価した。削孔速度は削孔時間に対する削孔距離である。なお、削孔試験は、一定の回転数と一定の押しつけ力のもとでの試験のため、ある一定の削孔速度が得られる。

(7) 反発度

コア試験体を切り出した後の試験体に図-8に示すN型テストハンマーを用いて試験体表面を各10点ずつ打撃した。反発度の測定は材齢31日に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 温度分布の時刻歴

試験体の温度分布は、W/C=45%, 55%, 65%の3種類のモルタルおよび凍結開始時刻に関わらず、ほとんど同様であったため、ここではW/C=55%の真空脱水処理0分

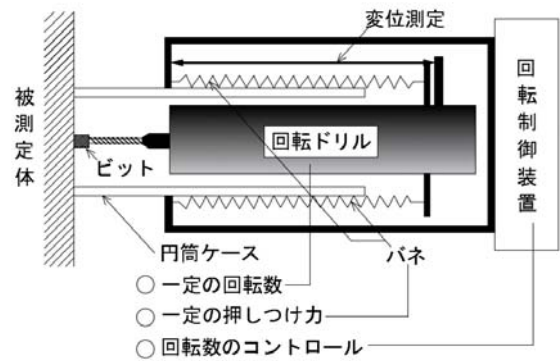


図-5 削孔試験機の概略図

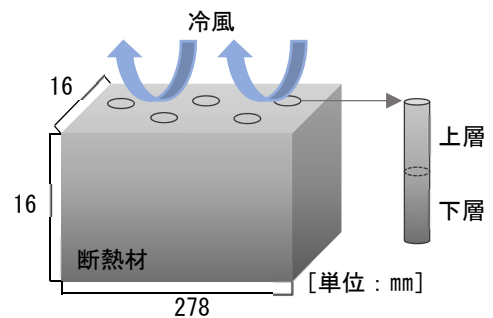


図-6 削孔試験用の試験体の概要

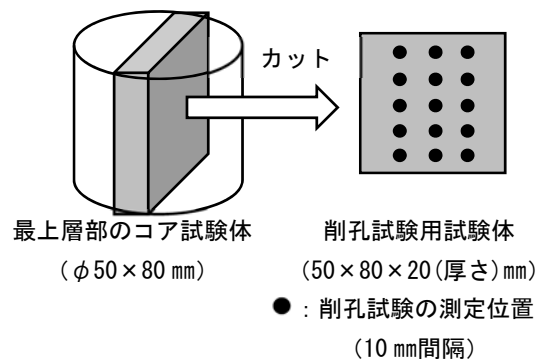


図-7 削孔試験用の試験体の概要

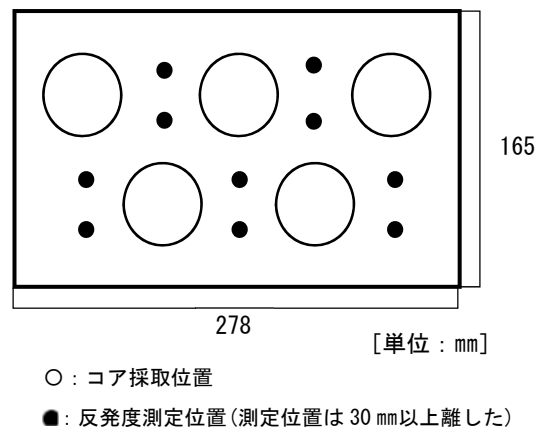
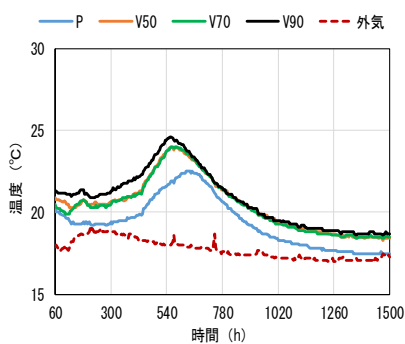
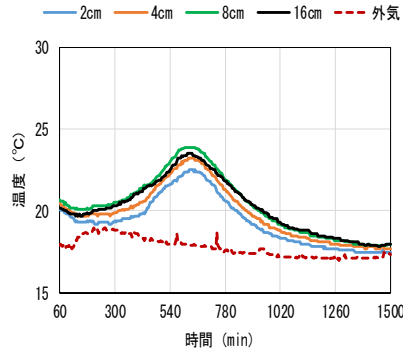


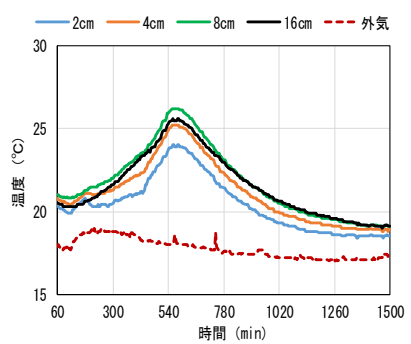
図-8 反発度の測定位置



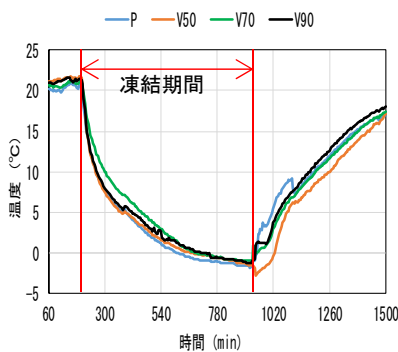
(a) 凍結無



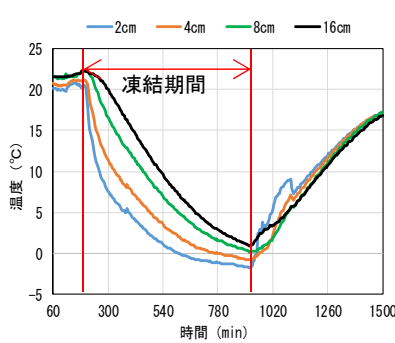
(a) 無処理・凍結無



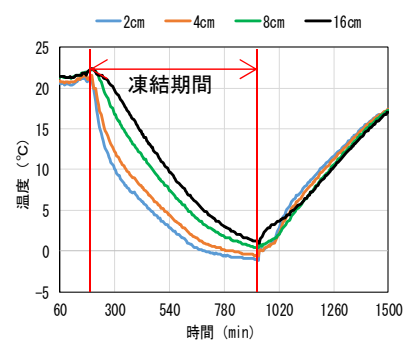
(c) 真空度 70%・凍結無



(b) 凍結有 (0分)



(b) 無処理・凍結有 (0分)



(d) 真空度 70%・凍結有 (0分)

図-9 W/C=55%試験体の2cm部分の温度分布

図-10 W/C=55%試験体の深さごとの温度分布

後に凍結を開始した試験体の試験結果について考察を行う。

図-9に試験体の表面から2cm部分の温度の時刻歴を示す。

図(a)によれば、凍結させなかった試験体については、真空脱水処理を行った試験体が無処理試験体より最高温度が高くなり、真空度が最も高い90%の試験体が最も高い値となった。最高温度に達した以降は、真空脱水処理を行った試験体は、ほぼ同様な速さで下降した。

図(b)によれば、凍結させた試験体については、真空脱水処理の有無に関わらず、最低温度がすべて0℃以下になった。

図-10に無処理試験体と真空度70%で真空脱水処理を行った試験体について、表層から深さごとの温度の時刻歴を示す。

図(a)および(c)は、凍結させなかった試験体の結果である。図によれば、深さ方向において、真空脱水処理を行った試験体は無処理試験体と比較して温度が高くなった。なお、真空脱水の有無に関わらず試験体中心部(上面から深さ8cm)が最も高い温度となった。

図(b)および(d)は、凍結させた試験体の結果である。凍結させた試験体は、真空脱水処理の有無に関わらずほぼ同様の時点で表面から2cmおよび4cmのところでも最低温度となった。なお、凍結させた場合は、最下層(深さ

16cm)の部分が最も高い温度となった。これは、型枠を断熱材で覆い表層部から凍結を与えた影響だと考えられる。

同図によれば、真空脱水処理の有無に関わらず、表層に近づくに従って温度が低くなり、表層部4cmまでが氷点以下になった。特に、無処理試験体の表層から2cmの部分が最も低い温度となり、初期凍害を最も受けやすい状態になっていると考えられる。

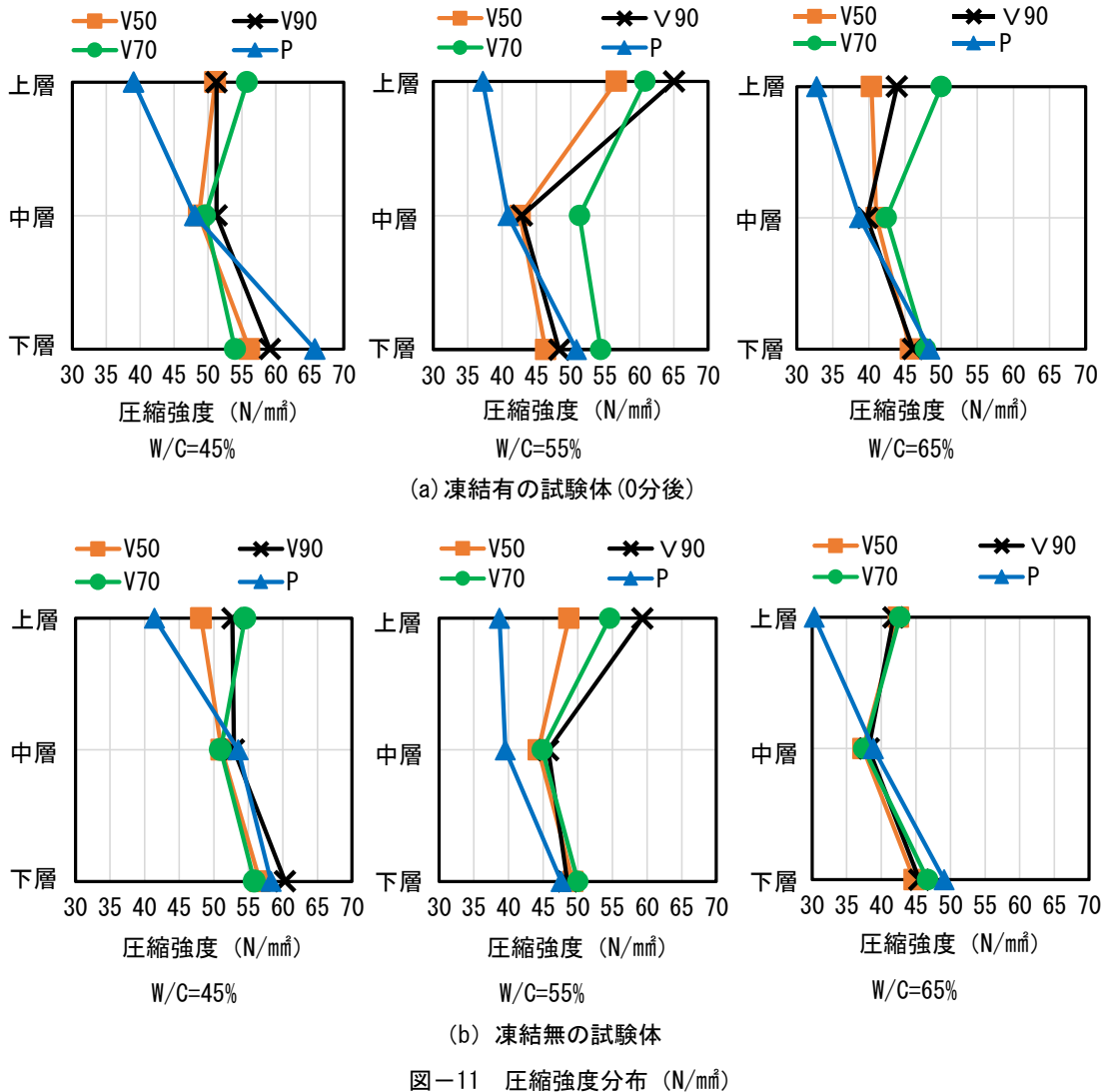
3.2 圧縮強度分布

凍結開始時期の違いによって圧縮強度分布に顕著な差はなかったため、以下、真空脱水直後に凍結を開始した試験体の水セメント比の異なる試験体について考察を行う。

図-11に、各水セメント比の真空脱水直後に凍結させた試験体の圧縮強度分布を示す。図によれば、真空脱水処理を行った試験体では、真空脱水直後に凍結させた試験体は、凍結させなかった試験体と比較しても、圧縮強度分布にはほとんど影響がなかった。しかし、無処理試験体の凍結させた試験体は、凍結させなかった試験体と比較して、上層の圧縮強度が小さくなる傾向を呈した。ただし、水セメント比65%の無処理については、凍結を行った試験体の圧縮強度が大きくなった。この理由については、現在のところ不明である。

3.3 削孔試験

ここでは、初期凍害についてとくに明確な傾向が得ら



れている水セメント比 55% の無処理試験体と真空度 70% で真空脱水を行った試験体を取りあげる。なお、表層から 2cm~5cm の部分では、初期凍害の明確な傾向がみられなかったため、表層より 1cm の部分について考察を行う。表層から 2cm~5cm の部分の評価については、今後の検討課題としたい。

削孔試験で得られた削孔速度の結果から、既往の研究⁶⁾で提示されている式(1)を用いて推定圧縮強度を求めた。

$$F_c = 4.0X^{1.3} \quad (1)$$

ここに、

F_c : 推定圧縮強度 (N/mm²)

X : 削孔速度 (mm/s)

図-12 によれば、無処理試験体の極く表層部では、凍結させなかった試験体と比較して無処理の 0 分後に凍結させた試験体を除いて推定強度が小さく、凍結の影響を受けたものと考えられる。なお、0 分後に凍結させた試験体の推定強度が凍結させなかった試験体と同様な値に

なった理由について現時点では不明である。一方、真空脱水処理を行った試験体では、凍結の影響はほとんどみられなかった。

3.4 反発度

試験体表層にリバウンドハンマを用いて反発度を測定した。その結果を図-13 に示す。

なお、反発度試験は、試験体が比較的小さかったため、既往の関係式から推定強度を求めることは難しいと判断し、そのまま反発度の値を表示した。

無処理の凍結させた試験体は、凍結させなかった試験体と比較して反発度が小さく、凍結の影響を受けたものと考えられる。一方、真空脱水処理を行った試験体では、凍結の影響はほとんどみられなかった。

上記の結果から判断すれば、コンクリートの打込み後の適切な時期に真空脱水処理を行えば、初期凍害はかなり精度で抑制できるといえる。

4. まとめ

本報では、水セメント比の異なるモルタルを 720 分(12 時間)凍結させた場合の初期凍害について、試験体内部

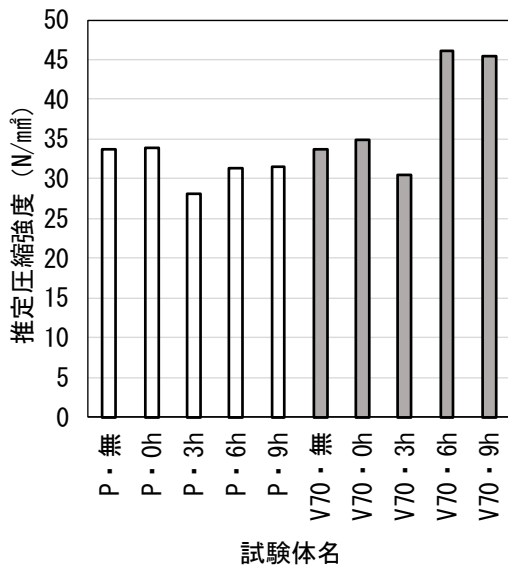


図-12 W/C=55%試験体の削孔試験による推定圧縮強度

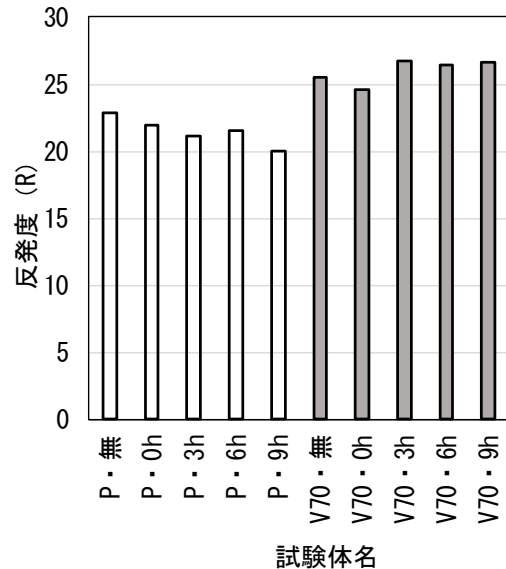


図-13 W/C=55%試験体の反発度

の温度分布、圧縮強度分布、表層の削孔速度、反発度などに及ぼす真空脱水処理の効果を実験的に検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 真空脱水処理を行うことで打込み後のモルタルの温度が高くなる。
- 2) その影響は、真空度が高い試験体、すなわち真空度90%の試験体が最も大きくなった。
- 3) 試験体内部の圧縮強度分布について調べたところ、真空脱水処理を行った試験体では、真空脱水処理直後に凍結を開始してもほとんど影響がなかった。
- 4) 極く表層部の圧縮強度分布について調べたところ、真空脱水処理を行った試験体では、真空脱水処理直後に凍結を開始してもほとんど影響がなかった。

謝辞

本実験でご協力を得た山口武志氏（榊明光建商）および伊藤俊哉君（三重大学工学部建築学科）に謝意を表す。

参考文献

- 1) 長谷川寿夫：寒中施工に関する全国区各地の気象資料，施工，No.125，pp.127-137，1976
- 2) 洪悦郎，鎌田英治，長島弘：寒中コンクリート，技術書院，pp.52-87，2000.
- 3) 畑中重光編著：新しい真空脱水コンクリート工法—理論と施工の実際，工文社，2016.
- 4) 前田哲宏，畑中重光，三島直生，犬飼利嗣：真空脱水処理を行ったコンクリートの初期凍害抑制効果について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.383-388，2003.
- 5) 藤森繁，長谷川哲也，畑中重光，青木孝義，朴相俊：小径ドリル型削孔試験機の改良とコンクリートへの適用のための検討，日本建築学会技術報告集，No.53，pp.25-30，2017.
- 6) 朴相俊，藤森繁，青木孝義，畑中重光，長谷川哲也：小径ドリル型削孔試験機を用いたコンクリートの圧縮強度と削孔速度の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.537-538，2017.