

論文 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

前田哲宏^{*1}・畠中重光^{*2}・三島直生^{*3}・犬飼利嗣^{*4}

要旨:本研究は、真空脱水処理をしたコンクリートの早期強度発現性に注目し、コンクリート打込み直後における初期凍害に対する抵抗性について調べることを目的とする。凍結の開始時期を要因とした一連の実験の結果、真空脱水処理を行ったコンクリートが、打設後の極めて初期の段階において凍結に有利であること、打設後12時間以上経過すれば、1回の凍結による強度の損失はほとんど生じないことが明らかになった。

キーワード:真空脱水処理、初期凍害、強度損失、圧縮強度

1. はじめに

コンクリートが初期凍害を受けると強度低下、強度増進不能、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⁾。また、日本建築学会建築工事標準仕様書JASS5に規定された寒中コンクリートの適用期間外や適用地域外でも、初期凍害を受ける危険性があることも報告されている²⁾。

一方で、所定の空気量を含んだコンクリートの圧縮強度が5MPaに達すると、施工中に考えられる数回の凍結融解に耐えられるようになり、初期凍害を受ける可能性がほとんどなくなる³⁾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できると有効であるといえる。

本研究で用いる真空脱水処理工法とは、コンクリート中の余剰水を強制的に脱水することにより、強度の発現も早く、強度および耐久性を飛躍的に向上させることができる工法である。主にスラブなどの水平部材に用いられており、凍害を受けやすいと思われるコンクリート表面の強度が特に大きくなることから凍害に対して有効であると考えられる。

そこで、本研究では、真空脱水処理をしたコンクリートの早期強度発現性に注目し、コンクリート打込み直後における初期凍害に対する抵抗性を検討する。すなわち、本報では、凍結を受ける材齡

を、凝結前から初期凍害を受ける可能性がある極めて早期に限定し、真空脱水処理を行ったコンクリートの初期凍害抵抗性を検討する。また、圧縮強度を測定した試験体の細孔構造を調べ、凍害および真空脱水処理が細孔構造におよぼす影響についても検討する。

2. 既往の研究

2. 1 初期凍害

ここでは、初期凍害のサイクルを1回～数回のレベルに限定し、凍結（凍害）の温度、継続時間、および開始時期がコンクリートの強度に及ぼす影響について既往の研究をまとめた。

(1) 凍結温度の影響

硬化コンクリートの場合、その空隙内に存在する水が凍結する温度は、その空隙径によって異なり、それらの関係は明確ではないものの、いずれの研究報告においても空隙径が小さいほど低くなる傾向は一致している⁴⁾。従って、凍結温度が低下するほど、より小さな細孔内の水まで凍結するため、強度の損失は大きくなる。

一方、フレッシュの段階では、フレッシュコンクリートの凍結温度は-0.5～-2.0°C⁴⁾であるが、硬化体組織の形成されていない段階では、凍結温度は強度損失の大きさには影響しないと考えることができる。

* 1 旭コンクリート工業(株) 製造部設計課 修士(工学) (正会員)

* 2 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

* 3 三重大学助手 工学部建築学科 博士(工学) (正会員)

* 4 東海コンクリート工業(株) 生産技術グループ係長 修士(工学) (正会員)

(2) 凍結継続時間の影響

凍結継続時間は、コンクリート断面に対して凍結温度が到達している深さに影響する。試験体の中心部にまで凍結が及んだ場合、それ以降の凍結継続時間の影響はほとんどなく、無視できる範囲であるという報告⁵⁾もある。

(3) 凍結開始時期の影響

コンクリートがまだフレッシュな段階において凍結を受けるとコンクリートの損傷は極めて著しい⁶⁾が、硬化したコンクリートの凍害は連行空気によって防止することができると考えられている。気泡の効果は3～5MPa以上の強度を発現した時点で現れるとされており、フレッシュの段階のコンクリートにはこの効果を期待することはできない⁴⁾。

1回の凍結を受けた場合の強度損失が5%以下となるのは、コンクリートの打込み後6～12時間で、その時の圧縮強度は0.5～1MPa程度であるという報告⁷⁾がある。

凍害による強度損失はコンクリートの材齢が長いほど小さくなる。しかし、初期凍害を受けたコンクリートは、強度損失以上に耐久性の低下など、長期にわたって受ける作用に対する抵抗性を低下

させると考えられている。

2. 2 真空脱水処理⁸⁾

本研究の真空脱水処理には、筆者らの提案している工法、すなわち軟練りコンクリートを使用する建築分野においても適用可能な方法⁸⁾を採用している。

ここでは、初期凍害に大きく関係すると思われる初期強度発現性と内部強度分布について、筆者らがこれまで行ってきた実験結果をまとめる。

(1) 初期強度発現性

本実験で対象とするような、打込み後の極めて初期の段階での強度発現性は明らかではないが、図-1(a)に示すように、真空脱水処理を施したコンクリート表面の早期強度発現性は非常に高く、無処理の場合の28日強度を材齢3日において既に発現している。

(2) 内部強度分布

図-1(b)に真空脱水処理を施したコンクリートの内部強度分布を示す。無処理のコンクリートでは、ブリーディングなどの影響により、表面(上面)に近づくほど強度が低下する傾向にある。一方、真空脱水処理をしたコンクリートでは、表面に近いほど圧縮強度が高くなる。特に表面近くでは、無処理のコンクリートと比べて15～20MPaも強度が高くなる場合がある。また、真空脱水処理による強度増進の効果は表面から深さ15cm程度までである。

表-1 実験要因

| 要因 | 水準 |
|-----------|----------------------------|
| 真空脱水処理 | 有、無 |
| 凍結開始材齢(h) | 4(脱水直後), 6, 12, 18, 24, 36 |

表-2 真空脱水処理および凍結の条件

| 真空脱水 | | 凍害 | |
|-------|------|------|------|
| 処理時期 | 吸引時間 | 凍結温度 | 継続時間 |
| 打設後4h | 5分 | -5°C | 12h |

表-3 コンクリートの調合表

| W/C (%) | s/a (%) | 単位質量 (kg/m ³) | | | | AE/C (%) | SL (cm) | Air (%) | T (°C) | ブリーディング量 (cm ³ /cm ²) |
|------------|------------|---------------------------|-----|-----|-----|-------------|------------|------------|-----------|---|
| | | W | C | S | G | | | | | |
| 55 | 50 | 185 | 336 | 870 | 883 | 1.0 | 17.0 | 5.5 | 12.5 | 0.374 |

[註] C: 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³), S: 町屋川産川砂(密度2.62g/cm³, 粗粒率2.80), G: 北勢産碎石(密度2.66g/cm³, 粗粒率6.50), AE: AE減水剤(促進形), SL: 実測スランプ値, Air: 実測空気量, T: 練りあがり時の実測コンクリート温度

スラブの場合、打込み直後から外気にさらされるのは表面のみであり、最も凍害を受けやすい部分といえる。これに対して、真空脱水処理では、表面の強度が特に大きくなることから、凍害に対して非常に有利であると考えられる。

3. 実験概要

3. 1 実験要因

本実験の要因を表-1および2に示す。凍結開始材齢は、コンクリート打込み後から6, 12, 18, 24, 36時間および真空脱水処理直後の4時間を加えた全6水準とした。さらに無処理の試験体にも同様に凍結を与え、真空脱水処理の効果を検討する。

使用材料および調合を表3に示す。本実験で使用したコンクリートの練りあがり温度は12.5°Cであった。

3. 2 実験方法

本実験で使用する試験体は、図-2(a)に示すような $50 \times 50 \times 200\text{mm}$ の角柱体(試験体A)とし、型枠は同図に示すような3連型枠を用いた。また、凍結前の強度測定用として図-2(b)に示すように、試験体Aの上層部のみを想定した 50mm 立方試験体(試験体B)を作成した。コンクリートの打込みは突き棒およびテーブルバイブレータを行った。

真空脱水処理は図-3に示すようにして行い、真空脱水処理を行う試験体は、試験体A, Bと $\phi 10\text{cm}$ 円柱試験体の3種類である。円柱試験体は、試験体AおよびBの比較用として用いた。真空脱水処理は図に示すように行い、真空脱水処理開始時期は、最も効果の大きいとされるブリーディング終了時とし、本実験では打込みの4時間後とした。

養生はビニール袋で密閉した状態で、気温 5°C 相対湿度60%の恒温室内で材齢3日まで行った。凍結を与える試験体は、各凍結開始材齢において、凍結融解試験槽を用い、 -5°C の不凍液中に12時間沈めた。試験体はビニール袋で密閉し、直接不凍液が当たらないようにした。材齢3日で気温 20°C 相対湿度60%の恒温室内に全試験体を移し、材齢7日の脱型までは型枠内封かん養生とした。脱型後、28日圧縮強度試験を行うまでは、気温 20°C 相対湿度60%の雰囲気で気中養生を行った。

3. 3 測定項目

本実験の測定項目を表-4に示す。

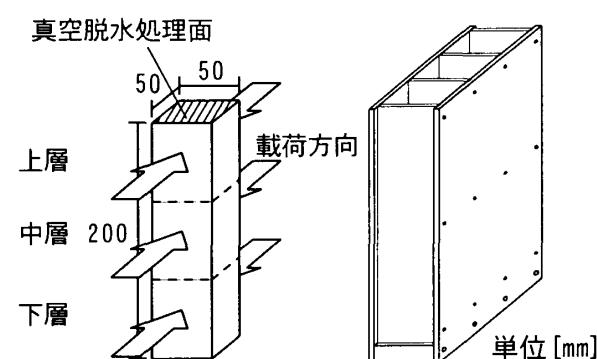
(1) 真空度および脱水率

真空脱水処理の際、試験体A, Bおよび円柱試験体の真空度および脱水率を測定した。

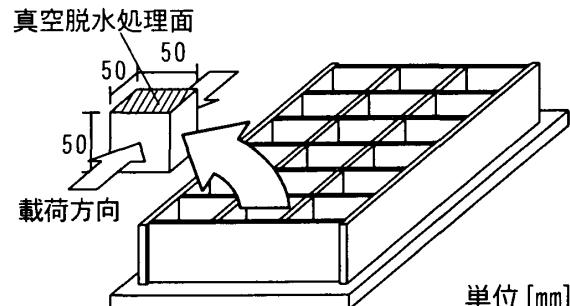
(2) 圧縮強度

材齢28日のほか、各凍結開始材齢において試験体Bの圧縮強度を測定した。ただし、脱型が不可能な試験体に関しては、圧縮強度の測定を行っていない。

図-2(a)に示すように、試験体Aを破線位置においてコンクリートカッターで3分割し、各層の



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図-2 試験体概要

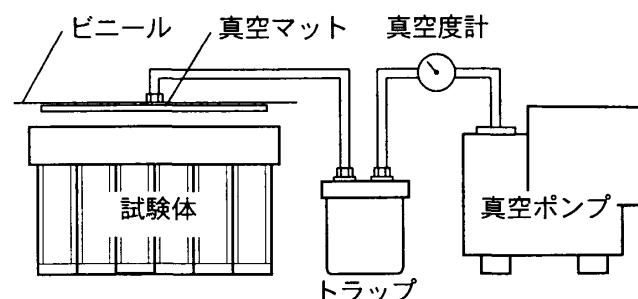


図-3 真空脱水処理の方法

表-4 測定項目

| 実験方法 | 測定項目 |
|----------|----------------|
| 真空脱水処理 | 真空度, 脱水率 |
| コンクリート強度 | 凍結前強度, 28日圧縮強度 |
| 細孔径分布 | 総細孔量, 細孔径分布 |

上面方向の端に 50mm 角の鋼製載荷板を用い、側面から圧縮して強度の測定を行った。全ての要因について 3 体ずつ測定を行った。

(3) 細孔径分布

水銀圧入法を用いてコンクリートの細孔径分布の測定を行った。測定箇所は、凍結開始材齢 18 時間までの試験体では、試験体上層部のみ、凍結を与えていない試験体では上、中、下層とした。以上の要因に関して、それぞれ 2 点ずつ測定を行った。

4. 実験結果および考察

4. 1 真空度と脱水率

表-5 に、真空脱水処理による脱水率 [= 脱水量 (g) / 使用水量 (g)] とその時の真空度 [= { [大気圧 - 到達圧力 (MPa)] } / 大気圧 (MPa)] および脱水面積あたりの脱水量 [= 排水量 (g) / 脱水面積 (cm²)] を示す。

脱水率は試験体 A と比較して B で大きくなつた。これは、真空脱水処理の効果がコンクリート深さの影響を大きく受けるためで、深さの異なる試験体の評価には適さない。そのため、単位脱水面積あたりの脱水量で比較すると、試験体 A および B はほぼ同様の値となり、このことは、本実験における真空脱水処理の影響深さが 5cm 程度であったことを示している。

類似の傾向は、後掲の図-5 における内部圧縮強度分布にも現れている。すなわち、表面から約 10cm 以上の深さ（中層および下層）では真空脱水処理による強度増進の傾向がほとんど見られない。

4. 2 圧縮強度

図-4 に、同一条件（真空脱水処理なし、凍害なし、材齢 28 日）とした円柱試験体（JIS A 1108）と 50mm 立方試験体の圧縮強度の比較を示す。同図によると、本実験で用いた 50mm 立方試験体では、円柱試験体よりも約 30% 大きい圧縮強度が得られている。ただし、以下の本文中で示す圧縮強度試験結果はこの試験体形状による補正を行っていない。

(1) 内部強度分布

図-5 に、凍結開始材齢ごとのコンクリート深さと圧縮強度の関係を示す。同図には、比較のために凍結を与えていない試験体の結果（●および○）を併示した。まず、凍結を与えていない試験体に

表-5 真空度、脱水率および脱水量

| 試験体名 | 真空度(%) | 脱水率(%) | 脱水量(g/cm ²) |
|---------------------|--------|--------|-------------------------|
| 試験体 A ^{*1} | 89.5 | 6.6 | 0.245 |
| 試験体 B ^{*2} | 92.1 | 24.5 | 0.227 |
| 円柱試験体 ^{*3} | 96.1 | 11.6 | 0.431 |

[註] *1 50 × 50 × 200mm 角柱試験体、*2 50 × 50 × 50mm 立方試験体、*3 φ 100 × 200mm 円柱試験体

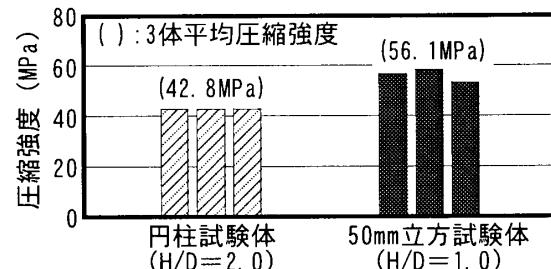


図-4 試験体寸法の影響

- 真空脱水処理を行った試験体
- 無処理試験体
- ▲ 真空脱水処理を行った試験体（凍結）
- △ 無処理試験体（凍結）

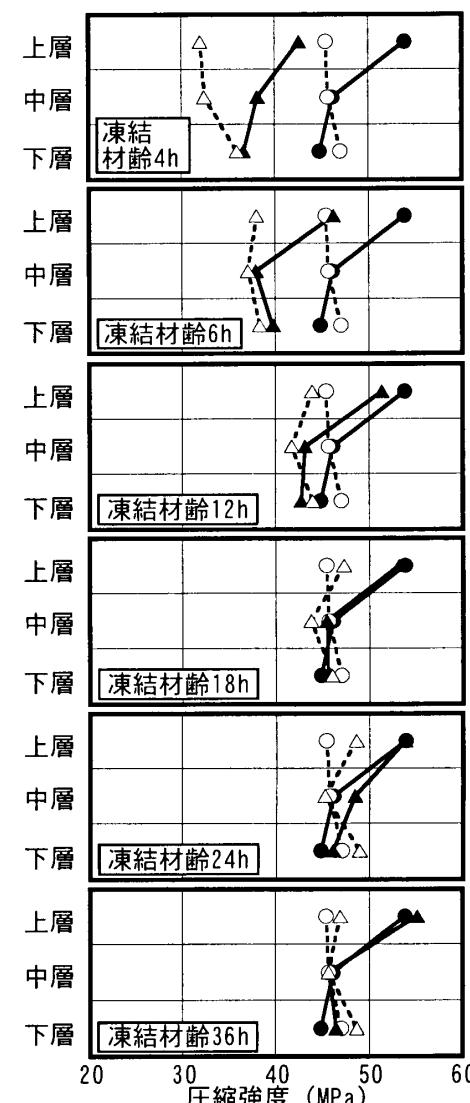


図-5 コンクリート中の深さ方向の圧縮強度分布
(材齢 4h で真空脱水、強度は材齢 28 日)

注目すると、真空脱水処理の効果は、上層のみに現れており、その圧縮強度の改善効果は10MPa弱となっている。また、凍結を与えた試験体(▲および△)にもほぼ同様の傾向が見られる。

凍結の影響に関しては、凍結開始材齢が若いほど圧縮強度の低下が著しく、凍結開始材齢4時間の場合、真空脱水処理の有無および深さに関わらず、10MPa程度の強度低下を受けている。

試験体上層部に注目すると、例えば、真空脱水処理を行い、凍結開始材齢6時間とした場合に、凍結を与えていない無処理の試験体とほぼ同等の圧縮強度が保たれている。

(2) 圧縮強度の残存率

図-6(a)に、凍結を受けた場合の圧縮強度の残存率(凍結を受けたコンクリートの圧縮強度/凍結を受けていないコンクリートの圧縮強度)を、図-6(b)に、凍結開始前に行った各材齢における圧縮強度を示す。

図-6(a)によれば、残存強度95%以下で凍結の影響がある⁶⁾と見なすと、コンクリート打込み後12時間以内においては真空脱水処理の有無に関わらず凍結の影響がある。また、凍結の開始材齢が早いほど、真空脱水処理を行ったコンクリート試験体の方が圧縮強度の低下が小さい。

真空脱水処理を行った試験体で、強度残存率が95%以上となるのは材齢12時間であるのに対して、無処理試験体では12~18時間である。図-6(b)によると、この時にコンクリートが発現している圧縮強度は共に約1MPa程度であり、文献7)による実験結果と一致する。真空脱水処理を行った試験体の上層部では、1MPaの圧縮強度を材齢12時間で発現することができるが、無処理の試験体では、この圧縮強度を発現するのに約18時間必要である。このことから、真空脱水処理を行い、コンクリート中の自由水を抜き取れば、打込み後の極めて初期の段階の凍結作用に対してある一定の効果を期待できる。この結果は、既往の研究結果³⁾より得られている強度5MPaとはかなり異なるが、本実験における凍結融解の繰返し回数が1度である点(一晩の凍害を想定)が主な理由の一つであると考えられる。すなわち、凍結融解の繰返し回数が多くなる場合には、初期凍害の防止に必要な圧

縮強度が、本実験結果より得られた1MPaより大きくなると考えられる。

4. 3 細孔構造

図-7に真空脱水処理および初期の凍結が細孔径分布に及ぼす影響を示す。同図には、初期凍害の影響が最も大きい凍結開始材齢4時間のデータを示す。図-7(a)によれば、凍結を与えていない試験体と比べて、凍結を与えた試験体では、3μm以

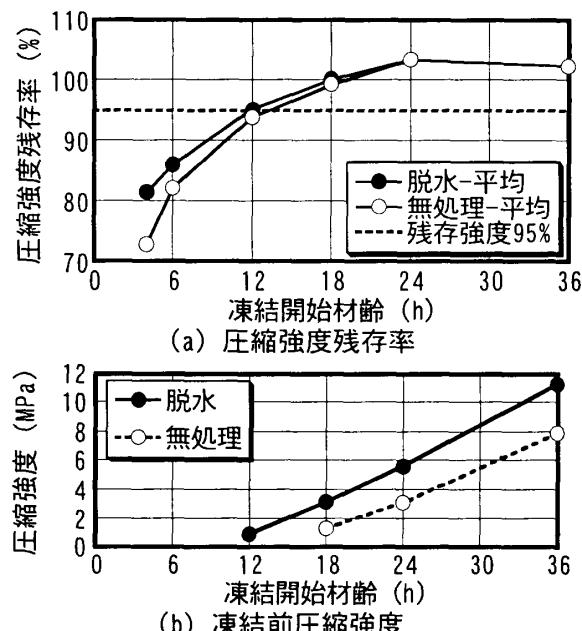


図-6 凍結開始材齢が圧縮強度におよぼす影響

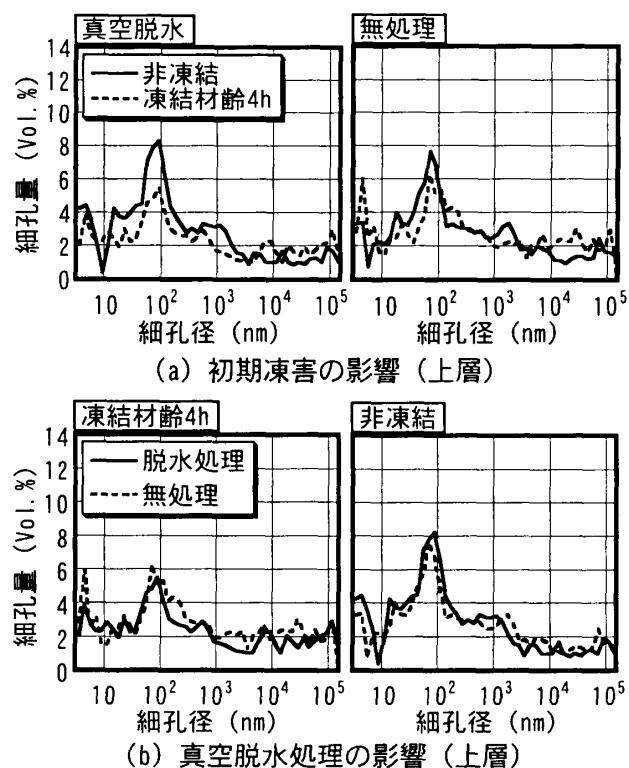


図-7 脱水および凍害が細孔径分布におよぼす影響

下の細孔量が少なく、それ以上の細孔量が多くなる傾向がある。一方、図-7 (b) によれば、今回の測定において、脱水の影響は顕著には認められなかつた。

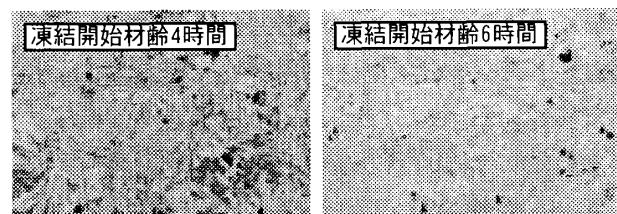
4. 4 表面性状

写真1に、凍害を受けたコンクリートの表面性状を示す。写真-1 (a) は無処理試験体、写真-1 (b) は、真空脱水処理を行った試験体の表面性状である。試験体の表面に現れている氷の結晶の痕跡は、凍結開始材齢6時間までの試験体表面に見られ、無処理試験体の方が痕跡が鮮明であった。特に凍結開始材齢6時間の試験体を比べるとその差は顕著である。

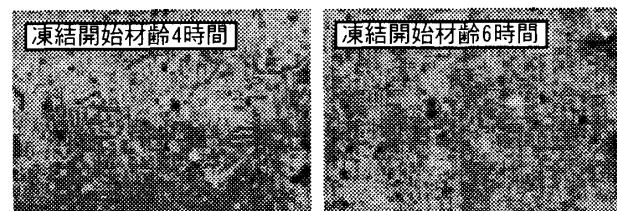
5.まとめ

本報では、凝結前後の材齢で、コンクリートを一度だけ凍結させた場合について、圧縮強度および細孔構造におよぼす真空脱水処理の影響を実験的に検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 本実験条件において、真空脱水処理の効果は表面より5cmまで、表層部では10MPa程度の圧縮強度の改善があった。
- 2) 本実験の範囲では、5°C環境下のコンクリートが12時間以内に凍結を受けた場合、真空脱水処理を行ったコンクリートは、無処理のものと比べて、圧縮強度の損失が小さい。
- 3) 5°Cの環境下において、凍結開始材齢がコンクリート練混ぜ後6時間以内ならば、真空脱水処理を行ったコンクリートは、無処理で凍害を受けていないものと比べて、同等以上の表層強度（コンクリートの打込み上面より5cm以内の深さにおける圧縮強度）を示す。
- 4) 本実験の範囲では、-5°Cの凍結を12時間受けても、コンクリートが1MPa程度の圧縮強度を発現していれば、材齢28日の圧縮強度残存率は95%以上となる。
- 5) 初期材齢で受けた凍結作用の影響は、総細孔量ではほとんど認められなかったものの、強度への影響が大きいと思われる3μm以上の空隙量が増加する傾向が見られた。
- 6) 初期凍害を受けたコンクリート表面で観察される凍結模様は、これが鮮明であるほど初期凍害による圧縮強度の低下が大きい。



(a) 無処理の試験体



(b) 真空脱水処理の試験体

写真-1 試験体の表面性状

【謝辞】

本研究に際し、村松昭夫氏（（株）建和）、山口武志氏（山口技研）および東海コンクリート工業（株）生産技術グループの皆様にご助力を得た。また、本研究の一部は、2002年度セメント協会研究奨励金（研究代表者：三島直生）によつた。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- 1) 金武漢、横山隆、田畠雅幸、洪悦郎、鎌田英治：コンクリートの初期凍害に及ぼす空気量に関する研究（第1報 普通コンクリートの場合），日本建築学会論文報告集，Vol.265, pp.1～9, 1978.3
- 2) 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
- 3) 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, 2000.6.15
- 4) 鎌田英治：コンクリートの凍害と細孔構造，コンクリート工学年次論文集，No.10-1, pp.51～60, 1988
- 5) 田畠雅幸、洪悦郎、鎌田英治：コンクリートの対凍害性におよぼす環境要因の影響－養生と凍結融解の条件－，セメント技術年報，Vol.37, pp.349～352, 1983
- 6) 笠井芳夫、横山清、柴田修身：各種混和材を用いたコンクリートの初期凍害性に関する研究，セメント技術年報，Vol.23, pp.265～268, 1969
- 7) 神田衛：まだ固まらないコンクリートの凍結被害と所要硬化時間に関する研究，セメント技術年報，pp.335～338, 1963
- 8) 畑中重光、和藤浩、三島直生、村松昭夫：真空脱水処理工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.558, pp.7～14, 2002.8