

論文 早期交通開放型コンクリート舗装の寒冷地適用における耐久性評価

堀越 大助*1・高橋 成幸*2・宮菌 雅裕*3・村橋 大介*4

要旨：早期交通開放型コンクリート舗装の寒冷地かつ寒冷期での適用を目指して、耐寒促進剤の使用有無、試験開始時の曲げ強度レベルを試験水準として凍結融解試験やスケーリング試験を実施した。曲げ強度レベルが養生終了に必要な 3.5N/mm^2 を超えれば、凍結融解やスケーリングに対する抵抗性が十分確保されることが実験を通じて確認された。また、著者らが提案した、養生終了や交通開放のタイミングを簡易的に評価するための強度管理手法が今回得られた曲げ強度データにも適用できることが確認された。

キーワード：早期交通開放型コンクリート舗装, 耐寒促進剤, 凍結融解, スケーリング

1. はじめに

コンクリート構造物の施工において、湿潤養生期間は使用するセメントごとに日数で規定されているのが一般的であり^{1,2)}、養生の打ち切りを曲げ強度を基準に定めている早期交通開放型コンクリート舗装 (1DAY PAVE) は、特殊であると考えられる。また、1DAY PAVE は打設から僅か1日で交通開放するケースがほとんどであり、この点からも1DAY PAVE の特殊性が窺える。通常、コンクリートの強度発現は、セメント硬化体の組織形成に大きく依存するため、耐久性確保に十分な硬化体が形成されたかどうかは、強度を指標と考えれば良いことは想像できる。事実、建築コンクリートの場合、耐久性は耐久設計基準強度を満足すれば担保されるといった考え方があ。しかしながら、所要の曲げ強度に到達したからといって、打設から僅か1日で交通開放することは、寒冷地かつ寒冷期といった極端な条件においては、耐久性の面で若干の不安が残るところである。

著者らは、1DAY PAVE を寒冷地かつ寒冷期で適用することを目指し、耐寒促進剤による曲げ強度増進効果、養生終了や交通開放のタイミングを簡易的に評価するための強度管理手法について検討してきた³⁾。これに付随して、寒冷地かつ寒冷期に1DAY PAVE を適用することから、当該コンクリート供試体について JIS A 1148 の凍結融解試験を実施した。結果として、耐寒促進剤の使用有無に関わらず、耐久性指数 DF は概ね 100 となり、十分な凍結融解抵抗性を示した。しかしながら、これら結果は JIS A 1148 で定められた前養生 (水中養生 28 日) を施した条件であり、打設後1日で交通開放するといった厳しい条件での凍結融解抵抗性を保証するものではない。また、実用に即して、若材齢から耐久性試験を開始した

表-1 使用材料

区分	記号	種類, 銘柄, 物性等
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度 3.13g/cm^3
細骨材	S1	陸砂(粗目) 密度 2.58g/cm^3
	S2	陸砂(細目) 密度 2.56g/cm^3
粗骨材	G1	安山岩碎石 1505 密度 2.67g/cm^3
	G2	安山岩碎石 2010 密度 2.66g/cm^3
混和剤	AC	耐寒促進剤 無機系窒素化合物 密度 1.43g/cm^3
	SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE 剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

ような既往の研究は見当らなかった。

そこで、1DAY PAVE に適用するコンクリート配合を対象に、耐寒促進剤の使用有無、試験開始時の曲げ強度レベルを試験水準として、凍結融解試験、スケーリング試験を実施し、耐凍害性を中心とした耐久性を評価した。その前段として、既報³⁾に示した強度管理手法の適用可否を今回の実験データを対象に確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料は表-1 に示す通りである。表中の耐寒促進剤は、セメント鉱物、特にエーライト (C_3S)、アルミニネイト (C_3A) の水和を促進させる作用を持つ無機系窒素化合物を主成分としたものであり、低温下での強度増進

*1 鹿間生コンクリート(株) 管理課長 (正会員)

*2 鹿間生コンクリート(株) 取締役工場長 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 博士(工学) (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) 東北支店

を目的に使用した。また、これは耐寒促進剤成分のみで構成された非減水タイプ（タイプⅡ型）である。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。この配合は、耐寒促進剤を使用しない条件で、水セメント比 33, 35, 37%のコンクリートを対象に 20±3℃の室内で試験練りを行い、材齢 24 時間の曲げ強度が、実施工で養生終了の目安となる 3.5N/mm² 以上を満足するように定められた。なお、目標スランブおよび目標空気量は 18±2.5cm, 4.5±1.5%である。

2.3 実験項目および実験方法

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状として、スランブ、空気量、コンクリート温度を測定した。試験方法は、JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験」、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」、JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に準拠した。

(2) 強度特性

強度特性として、JIS A 1106 に準拠した曲げ強度を測定した。養生方法は、外気温 3℃、打込み温度 8℃、幅員 4000mm、奥行き 5000mm、版厚 300mm の条件で舗装版中央に生じる温度履歴を温度解析によって求めた上で、この温度履歴（図-1 参照）を温度可変槽で再現させた温度追従養生である。なお、温度解析で用いた断熱温度上昇特性は、既報³⁾で得られた式(1)、(2)であり、これらは舗装版模擬ブロックの温度計測データを基に逆解析によって得られたものである。

$$\text{AC 無) } Q(t)=71 \times \{1-\exp(-1.1 \times t^{1.5})\} \quad (1)$$

$$\text{AC 有) } Q(t)=76 \times \{1-\exp(-1.4 \times t^{1.0})\} \quad (2)$$

(3) 凍結融解試験

曲げ強度の目安が 3.5N/mm², 4.5N/mm², 6.0N/mm² に到達した時点を試験開始材齢として、JIS A 1148 に準拠した凍結融解試験を実施した。

(4) スケーリング試験

凍結融解試験と同様に、曲げ強度が 3.5N/mm², 4.5N/mm², 6.0N/mm² に到達した時点を試験開始材齢としてスケーリング試験を実施した。スケーリング試験は北欧規格 SS 13 72 44 (Concrete testing-Hardened concrete-Frost resistance Procedure 1, Method A)⁴⁾ に準拠しているが、供試体はφ150×50mm の円柱供試体とした。その他試験条件について概説すると、供試体上面の一面を暴露面として、その上を 3mm の水膜(3%NaCl 水溶液)で覆った。また、温度制御は、気相温度として図-2 に示すパターンを 1 サイクルとした。

表-2 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G1	G2	AC	SP
AC無	35.0	170	486	477	158	410	612	0.0	4.37
AC有								20.4	

※AE 剤量は適宜調整

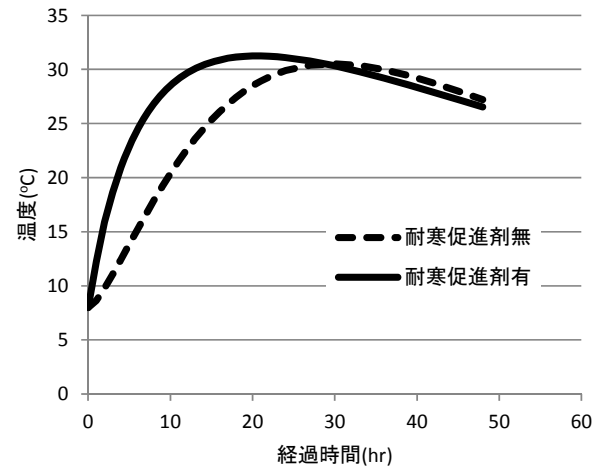


図-1 温度追従養生の温度履歴

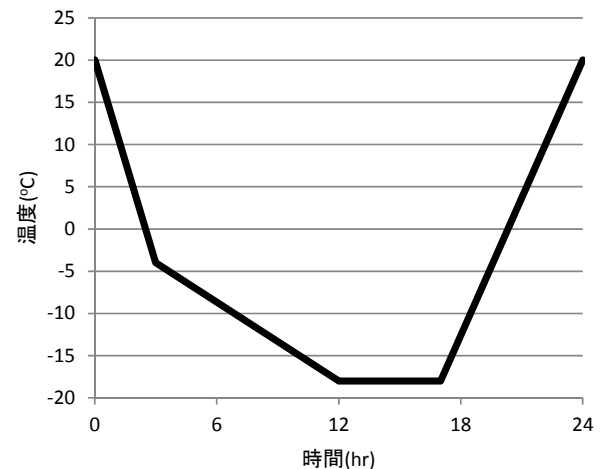


図-2 温度制御パターン

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
AC無	18.5	4.8	7.1
AC有	17.5	5.1	7.5

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状は表-3 に示す通りである。同表より、何れの配合においてもスランブ、空気

量の目標値を満足していることが分かる。また、温度追従養生は図-1に示す通り、8℃が基点となるため、コンクリート温度はこの値に近づくように調整した。

3.2 所定の曲げ強度に到達する時間の算定

既報³⁾において、積算温度 (M) と曲げ強度 (fb) の関係式を耐寒促進剤有無それぞれについて、式(3)、(4)の通り求めた。ただし、この関係式は、表-1、表-2に示した材料、配合に限定されたものである。

$$\text{AC 無) } fb=8.68 \times \log M - 21.1 \quad (3)$$

$$\text{AC 有) } fb=8.37 \times \log M - 20.3 \quad (4)$$

また、積算温度は、打設後 72 時間までは時間の経過に伴って直線的に増加すること、この直線の傾きは、外気温、打込み温度、舗装版の幅員、版厚で表すことが可能なことを既報³⁾で示した。舗装版で最高温度を記録するような部材中央での上記傾きを表す関係式は式(5)~(7)に示す通りである。

$$M = SI \times \text{time} \quad (5)$$

$$\text{AC 無) } SI = 12.5 + 0.57T_{air} + 0.48T_{cp} + 0.41t + 0.0015w \quad (R^2=0.995) \quad (6)$$

$$\text{AC 有) } SI = 13.1 + 0.58T_{air} + 0.47T_{cp} + 0.50t + 0.0017w \quad (R^2=0.995) \quad (7)$$

ここで、time は経過時間(hr)、SI は経過時間と積算温度の直線関係を示す傾き、Tair は外気温(℃)、Tcp は打込み温度(℃)、t は版厚(cm)、w は幅員(cm)を示す。

式(6)、(7)の相関係数 R² の数値を見ても分かるように、経過時間と積算温度の直線関係を示す傾き SI と、外気温 Tair、打込み温度 Tcp、舗装版の幅員 w、版厚 t は相関性が高いことが分かる。つまり、外気温、打込み温度、舗装版の幅員、版厚によって経過時間に応じた積算温度を推算することができる。

ここで、式(3)~(7)より、耐寒促進剤有無それぞれについて、曲げ強度が 3.5N/mm²、4.5N/mm²、6.0N/mm² に到達する時間を求めると表-4 に示す通りとなる。すなわち、今回の検討において、凍結融解試験、スケーリング試験では、図-1 の温度追従養生を与えた上で、表-4 に示した時間を試験開始材齢とした。なお、今回の温度追従養生は舗装版中央の温度履歴を対象としているが、表層の温度履歴も材齢 48 時間以内ではシート養生を施す都合上中央部と大差なく、表-4 に示した曲げ強度に到達する時間は表層部と中央部で最大 2 時間程度しか変わらないことを付け加えておく。

3.3 強度管理手法の適用性

図-1 に示した温度追従養生を与えた供試体 (100×

表-4 所定の曲げ強度に到達する時間

種類	所定の曲げ強度に到達する時間(hr)		
	3.5N/mm ²	4.5N/mm ²	6.0N/mm ²
AC 無	22	29	43
AC 有	20	27	41

表-5 曲げ強度試験結果

種類	想定曲げ強度 (N/mm ²)	時間 (hr)	積算温度 (hr・°C)	実測曲げ強度 (N/mm ²)
AC 無	3.5	22	682	3.65
	4.5	29	890	4.80
	6.0	43	1325	5.80
AC 有	3.5	20	697	4.10
	4.5	27	918	5.05
	6.0	41	1387	6.08

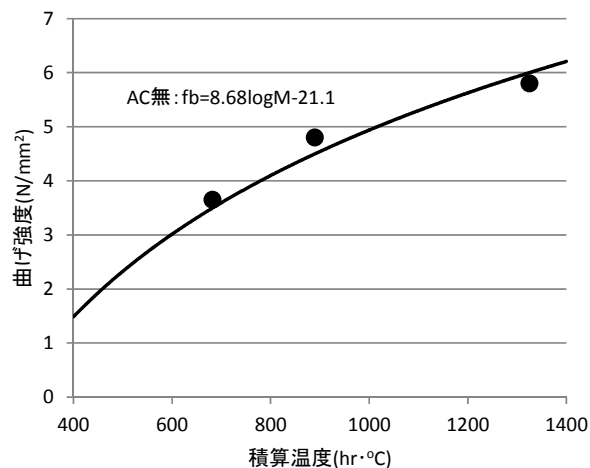


図-3 積算温度による曲げ強度予測の適用性 (耐寒促進剤無の場合)

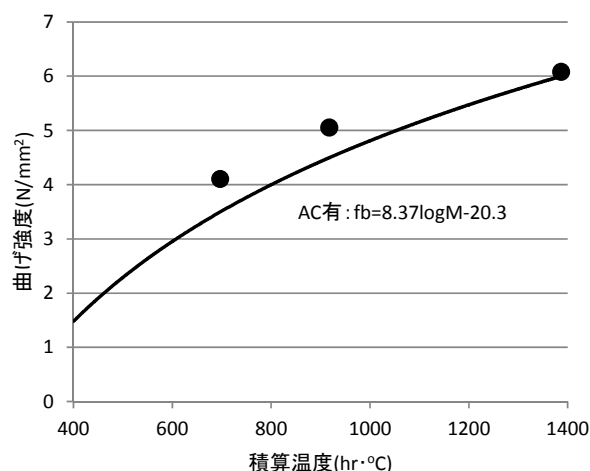


図-4 積算温度による曲げ強度予測の適用性 (耐寒促進剤有の場合)

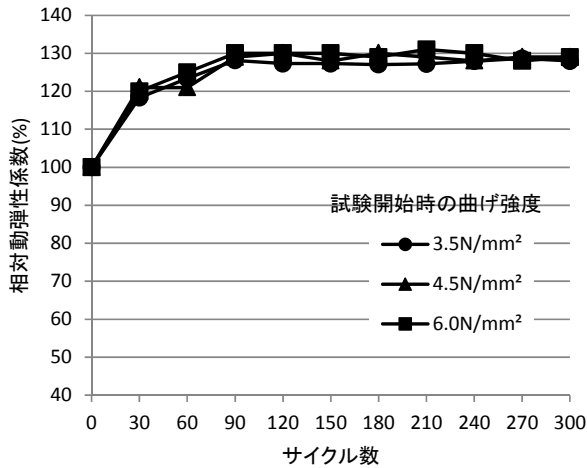


図-5 凍結融解試験結果（耐寒促進剤無の場合）

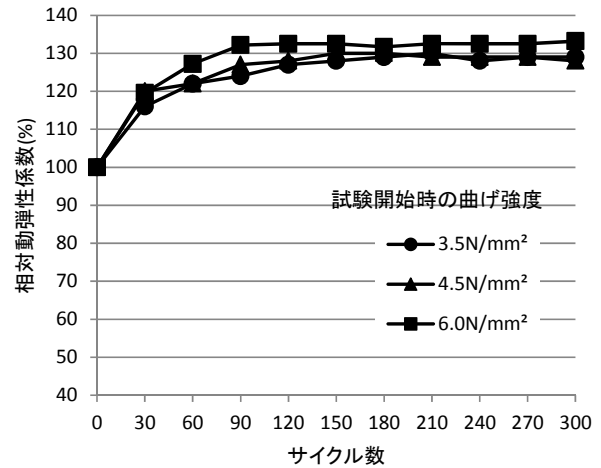


図-6 凍結融解試験結果（耐寒促進剤有の場合）

100×400mm) を表-4 に示した時間で温度可変槽から取り出し、直ちに曲げ強度試験を実施した結果を表-5 および図-3, 4 に示す。なお、同図中には、式(3), (4)の積算温度と曲げ強度の関係式も併記した。

表-5 より、実測曲げ強度は想定曲げ強度に概ね近い値となっていることが分かる。また、図-3, 4 より、実測曲げ強度は、式(3), (4)の積算温度と曲げ強度の関係式を示す曲線上にほぼプロットされているのが分かる。つまり、表-4 に示す時間で凍結融解試験、スケーリング試験を開始すれば、当初計画した通りの曲げ強度に到達した段階でそれぞれの試験を開始できることが判明した。それに加えて、既報³⁾において提案した強度管理手法が今回得られた曲げ強度データに対しても適用できることが分かった。

3.4 凍結融解抵抗性

曲げ強度試験を実施した条件と同様に、図-1 に示した温度追従養生を与えた供試体を表-4 に示した時間で温度可変槽から取り出し、直ちに凍結融解試験を開始した。凍結融解試験における相対動弾性係数の変化は図-5, 6 に示す通りである。

図-5, 6 より、凍結融解サイクルを与えた以降の相対動弾性係数は 100%を超える範囲で推移しており、その値は 130%程度に達しているのが分かる。つまり、1DAY PAVE 施工における養生終了の曲げ強度 3.5N/mm²、交通開放に必要な曲げ強度 4.5N/mm² に到達すれば、打設から 1 日程度の若材齢で凍結融解試験を開始しても十分な凍結融解抵抗性を示すことが分かる。

また、今回の試験結果において特徴的なことは、既報³⁾で前養生を水中養生 28 日とした場合では、相対動弾性係数が 100%前後を推移していたのに対し、今回は相対動弾性係数が 130%程度にも達している。既報³⁾における前回の試験と今回の試験における動弾性係数は図-7, 8

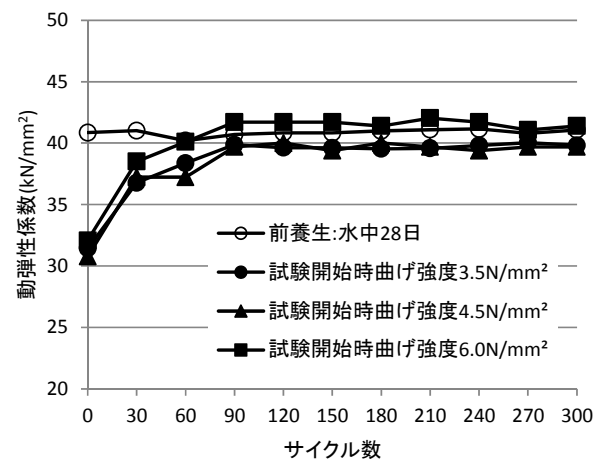


図-7 凍結融解試験時における動弾性係数の変化（耐寒促進剤無の場合）

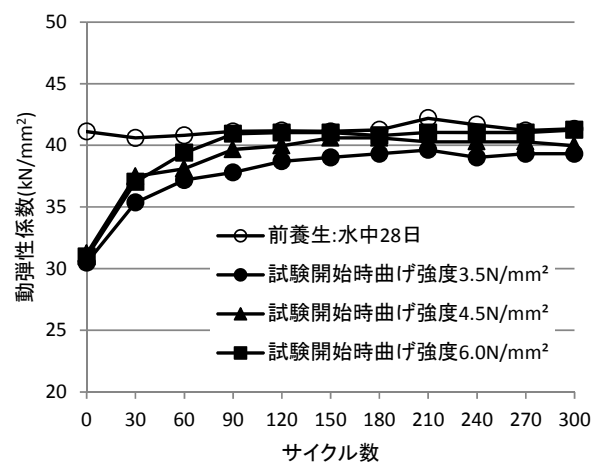


図-8 凍結融解試験時における動弾性係数の変化（耐寒促進剤有の場合）

に示す通りであり、試験開始時の動弾性係数は今回の方が明らかに小さいが、サイクル数を重ねていく毎に動弾性係数が上昇し、前回の動弾性係数の値と同等程度となっている。これは、今回の試験において、凍結融解試験の最中も水和が進行したことを現していると考えており、試験開始時の強度がある一定以上のレベルに達していれば、その後の水和の進行によって耐久性を確保するのに十分な硬化体組織を形成できるとも考えられる。

3.5 スケーリング抵抗性

ここでも曲げ強度試験や凍結融解試験と同様に、温度追従養生を与えながら所定の曲げ強度に到達した時点において、直ちにスケーリング試験を開始した。スケーリング試験におけるスケール量の変化は図-9, 10 に示す通りである。

ここで、北欧規格 SS 13 72 44 (Concrete testing-Hardened concrete-Frost resistance Procedure 1, Method A) ⁴⁾ の評価値について概説すると、表-6 に示す通りとなる。

図-9, 10 の試験結果と表-6 の評価値を照らし合せると、何れの試験結果とも評価レベル「良い」の評価値に合致する。つまり、スケーリング試験の開始が1日程度の若材齢であってもスケーリング抵抗性としては良好な結果が得られたと考えられる。

ただし、耐寒促進剤を使用しない場合では、スケール量が 0.1kg/m^2 以下に抑えられているのに対し、耐寒促進剤を使用した場合ではスケール量が 0.1kg/m^2 を超える結果となった。つまり、耐寒促進剤の有無によって評価レベルが「非常に良い」と「良い」に分かれる結果となった。耐寒促進剤の使用によってスケール量が多くなった原因については、現時点では不明確であるが、暴露面近傍の空隙構造に着目し、検討を深めていきたいと考えている。具体的には、当該箇所の空隙構造の水分移動性(連続性)とスケール量の大小を関連付けることを考えている⁵⁾。

今回、1DAY PAVE の寒冷地かつ寒冷期での適用を目指し、曲げ強度が $3.5, 4.5, 6.0\text{N/mm}^2$ に到達する若材齢での凍結融解抵抗性、スケーリング抵抗性を評価したところ、その両者とも良好な結果を示した。今回の検討を通じて、1DAY PAVE の施工において養生終了と交通開放のタイミングを曲げ強度を判断基準とすることは構造上の耐力ばかりでなく、耐久性を担保する観点からも妥当であることが確認できた。更に、1DAY PAVE 施工での使用材料、コンクリート配合の特徴上、凍結融解作用を受ける最中でも水和が進行し、耐久性を確保するための硬化体組織が形成される可能性を見出した。

4. まとめ

既報³⁾に続き、早期交通開放型コンクリート舗装の寒

表-6 SS 13 72 44 における評価値⁴⁾

評価レベル	評価値
非常に良い	最終スケール量 $< 0.1\text{kg/m}^2$
良い	56 日目スケール量/28 日目スケール量 < 2 の場合 56 日目スケール量 $< 0.5\text{kg/m}^2$
普通	56 日目スケール量/28 日目スケール量 < 2 の場合 56 日目スケール量 $< 1.0\text{kg/m}^2$
悪い	普通の条件を満足しない場合

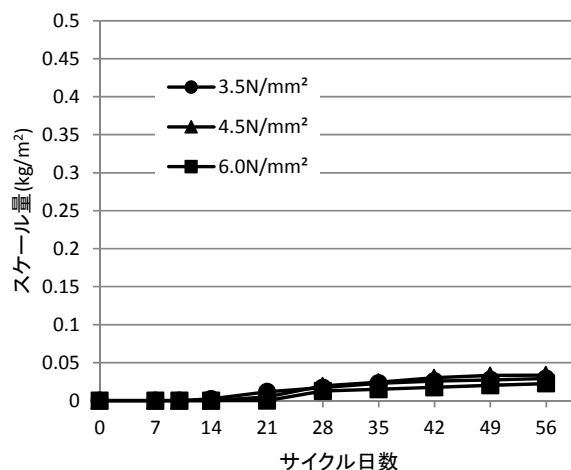


図-9 スケーリング試験におけるスケール量の変化 (耐寒促進剤無の場合)

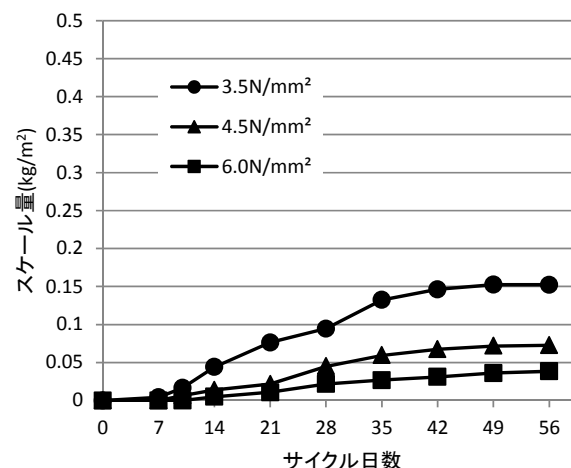


図-10 スケーリング試験におけるスケール量の変化 (耐寒促進剤有の場合)

冷地かつ寒冷期での適用を目指し、耐凍害性を中心とした耐久性について評価した。今回の検討を通じて得られた知見は以下に示す通りである。

- (1) 凍結融解試験やスケーリング試験を曲げ強度が所要値に達した時点で開始するため、既報において提案した強度管理手法によって想定した曲げ強度が

得られるかについて確認した。既報の強度管理手法に沿って推算された積算温度、その積算温度に達する時間における曲げ強度は想定値と概ね合致し、既報の強度管理手法の適用性が確認された。

- (2) 曲げ強度が 3.5, 4.5, 6.0N/mm²に到達する材齢 1～2 日を試験開始材齢として凍結融解試験を実施したところ、耐寒促進剤の有無に関わらず、高い凍結融解抵抗性を示した。
- (3) 早期交通開放型コンクリート舗装の材料、配合条件で若材齢から凍結融解試験を実施すると、凍結融解サイクルに応じて相対動弾性係数が増加した。
- (4) 凍結融解試験と同様に材齢 1～2 日を試験開始材齢としてスケーリング試験を実施したところ、良好なスケーリング抵抗性を示した。ただし、耐寒促進剤の使用によってスケール量は多くなる傾向を示した。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書(施工編), 土木学会, p.125, 2018.3
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5, 日本建築学会, p.283, 2015.7
- 3) 堀越大助, 高橋成幸, 宮菌雅裕, 村橋大介: 寒冷地における早期交通開放型コンクリート舗装の実用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1329-1334, 2018.7
- 4) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.180-181, 2008.8
- 5) 宮菌雅裕, 岸利治: 乾湿繰返しがコンクリートの細孔構造と凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.787-792, 2017.7