

報告 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

堀越 大助^{*1}・高橋 成幸^{*2}・宮薗 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での適用を目指し、強度管理手法の適用や耐寒促進剤を使用した場合の諸性状について実験的に検討、確認した。寒冷地の実施工において、養生打切り、交通開放のタイミングを把握するには、強度試験用供試体を恒温室もしくは現場封緘で養生することは適当でなく、実部材の温度履歴を反映させた強度管理が適当であることが分かった。また、極寒期における早期交通開放型コンクリート舗装の適用には耐寒促進剤の使用が有効であることを明らかにしたうえで、耐寒促進剤の使用によってスランプロスや収縮ひずみの増大といった留意点も明らかにした。

キーワード：早期交通開放型コンクリート舗装、曲げ強度、積算温度、耐寒促進剤、収縮ひずみ

1. はじめに

早期交通開放型コンクリート舗装（1DAY PAVE）は、外気温が20°C前後の標準期であれば、コンクリート舗装の施工から1日程度で交通開放が可能であるといった特徴を有する。更には、ポンプ施工も可能であるといった施工上のメリットも大きい。この1DAY PAVEは、早強ポルトランドセメントを使用し、低水セメント比の配合とすることで初期の強度発現性を高め、早期の交通開放を実現させており、早期交通開放が求められる交差点やバス停の打換え工事、長期の交通規制が厳しい重交通道路もしくは道幅が狭い道路の打換え工事が主たる用途となっている¹⁾。しかしながら、外気温が20°C前後から大きく逸脱する寒冷地の低温環境下での適用にあたっては、強度発現が不十分となり、早期交通開放の実現が困難になると懸念される。ただし、低水セメント比の条件で早強ポルトランドセメントを使用するといった1DAY PAVEの特性上、舗装版の寸法であってもコンクリート硬化時の発熱を有効に活用することで保温効果をもたらし、実部材の強度発現は促進されると予想される。

そこで、著者らは、室内試験練りで定められたコンクリート配合に基づき、実施工に即した模擬舗装版を作製し、その温度履歴を確認すると共に、模擬舗装版の温度履歴を再現させるような様々な養生を施した供試体の強度発現を確認した。また、初期の強度発現を促進させるため、耐寒促進剤を使用した場合についても上記と同様の実験を行った。耐寒促進剤を使用したケースについては、フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの性状を実験的に確認した。

また、今回の実験を通じて、実部材の温度履歴を考慮した上で強度発現を評価し、養生打切りや交通開放のタイミングを把握することが寒冷地における1DAY PAVEの施工には適当であることが分かった。そこで、実部材の温度履歴を積算温度として簡易的に評価した上で、積算温度と曲げ強度の関係から所要の曲げ強度の照査が可能な強度管理手法についても併せて検討した。

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。実験に使用した耐寒促進剤は、無機系窒素化合物を主成分としたものであり、減水作用を持たないタイプII型のものである。

表-1 使用材料

区分	記号	種類、銘柄、物性等
水	W	地下水
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

*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 修士(工学) (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) 東北支店

2.2 コンクリート配合

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室内試験練りを行い、材齢24時間の曲げ強度が、実施工で養生打切りの目安となる 3.5N/mm^2 以上を満足するように定められた。なお、表-2に示したコンクリート配合は、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を目標としたものである。

表-2 コンクリート配合

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	437
AC有								204	

※AE剤は適宜調整

2.3 コンクリート製造

コンクリートの製造には、公称容量 2.25m^3 の強制練り水平二軸型ミキサを使用した。練混ぜ方法は、細骨材と水と混和剤をまず投入し、次いでセメント、粗骨材の順序で投入し合計60秒間練り混ぜた。これは、寒冷地特有の温水使用時に、温水とセメントが直接触れないようするための練混ぜ方法である。

2.4 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、スランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)を測定した。

(2) 強度特性

強度特性として、圧縮強度(JIS A 1108)、曲げ強度(JIS A 1106)を測定した。養生方法は、供試体全体をブルーシートで覆うだけの簡易的な方法(ブルーシート養生、写真-1参照)と断熱材容器に $150 \times 150 \times 530\text{mm}$ の角柱供試体7個、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体6個を格納した方法(保温養生、写真-2参照)の2通りである。なお、これら強度試験は、外気温が異なる環境下で複数回、コンクリート供試体内部の温度測定も併せて実施した。

(3) 模擬舗装版の作製

模擬舗装版は、図-1に示す通り、 $L1800 \times B900 \times H300\text{mm}$ の寸法とした。この寸法は、温度解析を通じて確認した結果、実部材(幅員4000mm、奥行き5000mm、版厚300mm)と概ね同様の温度履歴を得ることができる最小のものである。この模擬舗装版の中央に熱電対を設置し、模擬舗装版にコンクリートを打込んだ直後からの温度履歴を計測した。なお、模擬舗装版にコンクリートを打込んだ後の養生方法は、厚さ5mmの合成繊維状の養生マットとブルーシートの2枚重ねとした。



写真-1 ブルーシート養生の状況



写真-2 断熱材容器を使用した保温養生の状況

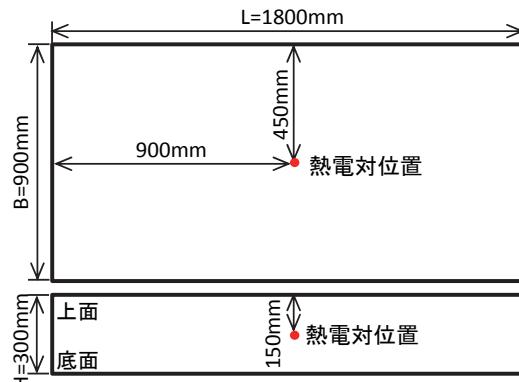


図-1 模擬舗装版の概要



写真-3 舗装版を模擬した収縮ひずみ測定用型枠

(4) 収縮特性

コンクリートの収縮特性として、JIS A 1129に従った乾燥収縮ひずみと実際の舗装版を模擬した状態での収縮ひずみを測定した。後者は、 $L650 \times B450 \times H300\text{mm}$ の木製型枠に鉄製のメッシュ(線径6.0mm、ピッチ150mm)

を2段配置し、中央に埋込み型ひずみ計を設置することによって測定した（写真-3参照）。この型枠にコンクリートを打込み、室温20°C、相対湿度60%の恒温室内で始発時間起点の収縮ひずみを計測器で連続的に測定した。

（5）凍結融解抵抗性

今回、1DAY PAVEの実用対象が寒冷地であることを考慮し、当該コンクリートの凍結融解抵抗性をJIS A 1148に従って測定した。

（6）断熱温度上昇特性の同定

後述する温度解析によって実部材である舗装版の温度履歴を予測するためには、表-2に示したコンクリート配合における断熱温度上昇特性を事前に求めておく必要がある。そこで、図-1に示した模擬舗装版の実測温度と同じ舗装版をモデル化した3次元FEM温度解析で再現できるように終局断熱温度上昇量と温度上昇速度に関する定数を変化させ、実測値と解析値が最も合致した際の値を当該コンクリートの断熱温度上昇特性とした。なお、コンクリートの熱伝導率、密度、比熱は2.7W/m°C、 2313kg/m^3 、 1.15kJ/kg°C 、模擬体側面、上面の熱伝達率は、側面は木製型枠存置のため $8\text{W/m}^2\text{°C}$ 、上面はシート養生のため $6\text{W/m}^2\text{°C}$ を用いた。コンクリートの初期温度や外気温データは後述の図-4に示す通りである。

（7）温度解析

実部材である舗装版の温度履歴を予測するため、FEM温度解析を実施した。解析条件として、外気温、コンクリートの打込み温度、幅員、版厚、奥行きを変化させたが、奥行きの長さに関わらず、舗装版断面の温度分布は一様であることが確認されたため、舗装版、路盤、地盤を含む2次元断面を対象にFEM温度解析を実施した。解析条件として、舗装版上面はシート養生を仮定した熱伝達率 $6\text{W/m}^2\text{°C}$ 、両側面は間詰めコンクリートであることを想定し断熱温度境界とした上で、外気温（日平均気温として一定値を入力）は $3\sim10\text{°C}$ 、コンクリートの打込み温度は $3\sim14\text{°C}$ 、幅員は $4000\sim6000\text{mm}$ 、版厚は $200\sim500\text{mm}$ の範囲で変化させた。

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、経時変化は表-3に示す通りである。なお、フレッシュ性状を確認した当日の外気温は 4°C であり、経時変化はアジテータ車による攪拌状態で測定した。

表-3より、耐寒促進剤を使用しないケース（AC無）については、スランプロスもなく、実用に際して特段注意することはないとと思われる。一方、耐寒促進剤を使用した場合（AC有）では60分以降のスランプ、空気量のロスが大きいため、練混ぜから打込み終了までの時間を

制御すること、耐寒促進剤の後添加等の配慮が必要となる。

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

種類	試験項目	経過時間			
		直後	30分	60分	90分
AC無	スランプ(cm)	19.5	20.5	19.5	19.5
	空気量(%)	2.7	3.9	3.9	4.0
	コンクリート温度(°C)	10	9	8	8
AC有	スランプ(cm)	19.5	18.5	11.0	5.0
	空気量(%)	4.3	4.0	2.9	2.3
	コンクリート温度(°C)	10	10	10	10

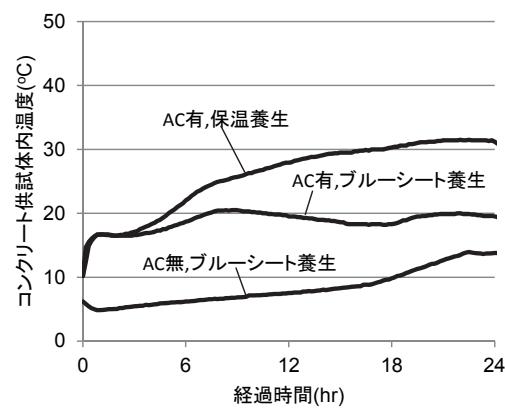


図-2 各養生におけるコンクリート供試体内温度

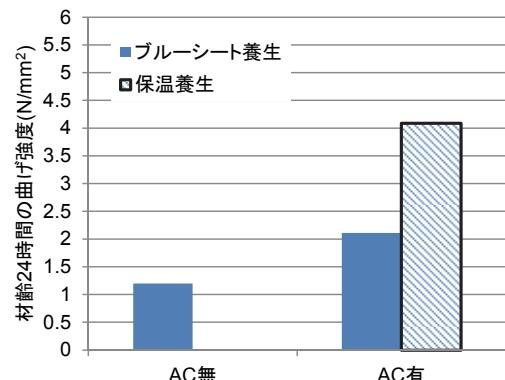


図-3 各養生条件における曲げ強度

3.2 強度特性

AC無、AC有のケースについてブルーシート養生、写真-2に示した断熱材容器による保温養生を施した場合のコンクリート供試体内温度を図-2、材齢24時間の曲げ強度試験結果を図-3に示す。AC無のケースでは、コンクリート温度が $5\sim13\text{°C}$ を推移し、材齢24時間の曲げ強度は養生打切りの目安となる 3.5N/mm^2 を下回る結果となった。AC有のケースは、AC無のケースに比べてコンクリート温度が全般的に高くなるが、曲げ強度は 3.5N/mm^2 に到達しなかった。一方、AC有、保温養生のケースでは、コンクリート温度は 30°C 近傍に達し、曲げ

強度が 4.09N/mm^2 となった。これらの結果より、コンクリート硬化時の発熱が保温効果として作用することで曲げ強度が大きくなることが分かる。

ここで、図-4 に示した模擬舗装版の温度計測結果を見ると、ブルーシート養生や保温養生より高い温度が記録されている。そこで、模擬舗装版の温度履歴を可変式恒温槽で再現させ、槽内で養生したコンクリート供試体の曲げ強度を確認した（図-5 参照）。図-5 より、ブルーシート養生や保温養生より高い温度が記録される模擬舗装版の温度履歴を再現させると、AC 無、AC 有とも材齢 24 時間の曲げ強度が交通開放の目安となる 4.5N/mm^2 以上となった。つまり、実部材に近い温度履歴が与えられれば、養生打切りや交通開放の所要強度を満足する可能性は高まる。しかしながら、今回のように対象部材中心の温度履歴を与条件にすると危険側の判断になることは注意すべきである。

図-2～図-5 から、AC 無に比べて AC 有のケースは、耐寒促進剤の影響で硬化過程の発熱が大きくなり、材齢 24 時間の曲げ強度が大きくなっていることが分かる。つまり、寒冷地・寒冷期で 1DAY PAVE を適用する上で、耐寒促進剤の使用は、スランプロス等への配慮を必要とするが、強度面では有効である。

3.3 断熱温度上昇特性

2.4 節(6)に記載した方法に従って得られた断熱温度上昇特性は式(1)、(2)に示す通りである。

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

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

ここで、 t は経過時間(日)、 $Q(t)$ は t 日における断熱温度上昇量を示す。

また、式(1)、(2)の断熱温度上昇特性を用いて得られた温度解析値と実測値は図-6 に示す通りであり、解析値と実測値が概ね合致していることから、これら断熱温度上昇特性の妥当性が確認された。

3.4 強度管理手法の検討

3.2 節より、寒冷地・寒冷期において 1DAY PAVE を適用するなかで、所要の曲げ強度を照査するには、実部材相当の温度履歴を把握し、その温度履歴を考慮した曲げ強度発現を評価することの妥当性が示された。したがって、强度管理手法として、実部材を模擬したモックアップ試験や温度解析によって温度履歴を事前に把握し、その温度履歴下での曲げ強度を確認すること、もしくは、積算温度と曲げ強度の関係を事前に求めておき、モックアップ試験や温度解析で得られた温度履歴から所定の材齢における積算温度を計算し、その積算温度に対応する曲げ強度を確認すること等が考えられる。今回の実験で

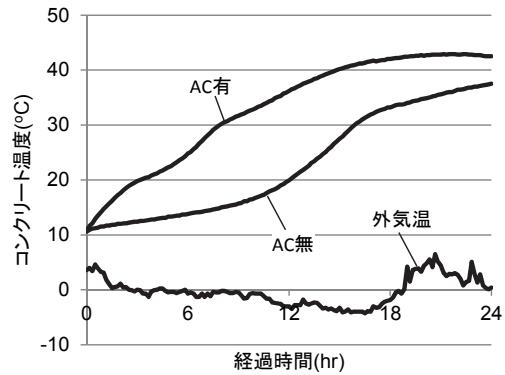


図-4 模擬舗装版中心部のコンクリート温度

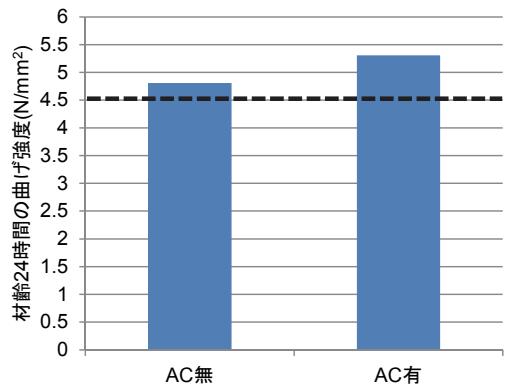


図-5 模擬舗装版の温度履歴を与えた場合の曲げ強度

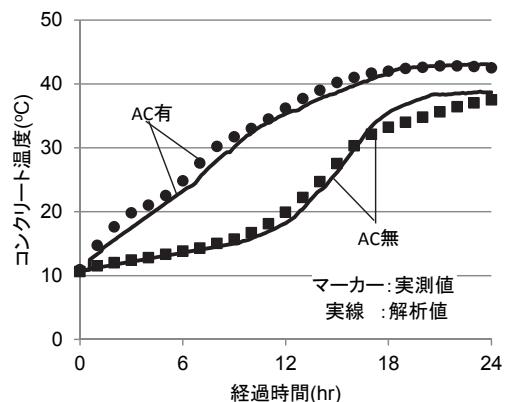


図-6 断熱温度上昇特性の妥当性検証

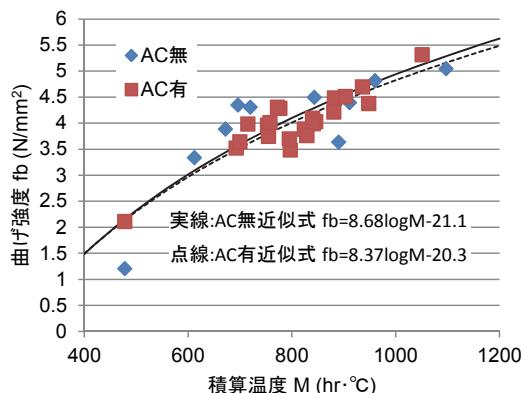


図-7 積算温度と曲げ強度の関係

は、環境温度、養生温度が異なる数ケースの曲げ強度試験結果が蓄積されたことにより、図-7に示すような積算温度と曲げ強度の関係が得られている。そこで、今回は、この積算温度と曲げ強度の関係を活用した強度管理手法を検討することとした。なお、ここでいう積算温度とは、コンクリート供試体内温度に10°Cを加算し、曲げ強度の試験材齢(hr)までの積分値を表している。

温度履歴に関する情報は、モックアップ試験や温度解析によって取得することがより実態に近づける意味で望ましいと思われる。しかしながら、外気温や打込み温度の温度条件や実部材の寸法条件が変わる毎にモックアップ試験や温度解析を実施することは効率的でない。そこで、マスコンクリートのひび割れ制御指針²⁾で示すように、モデルケースの温度解析に基づいた簡易温度評価式の構築可否について検討することとした。今回は、表-1、表-2に示した材料、配合、更には2.4節(7)に示した境界条件に限定した簡易温度評価式の構築を目指し、外気温、コンクリートの打込み温度、舗装版の幅員、版厚を変化させた計13ケースの温度解析によって簡易温度評価式を求ることとした。

解析によって得られた温度履歴を積算温度に換算した結果の一例は図-8、図-9に示す通りである。なお、図-8はAC無で部材内の最高温度を記録する断面中央箇所の積算温度、図-9はAC無で最低温度を記録する表面端部の積算温度を示している。これら図より、外気温や打込み温度が高いほど、版厚が厚いほど積算温度が大きくなる傾向が認められる。更に、72時間までは積算温度が経過時間に応じて直線的に増加する傾向が認められる。そこで、特定の経過時間における積算温度を簡易評価式で算出するのではなく、経過時間と積算温度の関係を示す傾きを簡易評価式で算出することとし、コンクリート打込みから72時間までの任意の時間における積算温度を算出できるような簡易温度評価式を構築することとした。経過時間と積算温度の関係を示す傾きを従属変数とし、外気温、コンクリートの打込み温度、幅員、版厚を独立変数として重回帰分析を行った結果、式(3)～(6)に示すような簡易温度評価式が得られた。

【最高温度記録箇所】

$$AC\text{無}) \quad Sl=12.5+0.57Tair+0.48Tcp+0.41t+0.0015w \quad (R^2=0.995) \quad (3)$$

$$AC\text{有}) \quad Sl=13.1+0.58Tair+0.47Tcp+0.50t+0.0017w \quad (R^2=0.995) \quad (4)$$

【最低温度記録箇所】

$$AC\text{無}) \quad Sl=11.8+0.54Tair+0.45Tcp+0.39t+0.0014w \quad (R^2=0.995) \quad (5)$$

$$AC\text{有}) \quad Sl=12.5+0.55Tair+0.44Tcp+0.47t+0.0015w$$

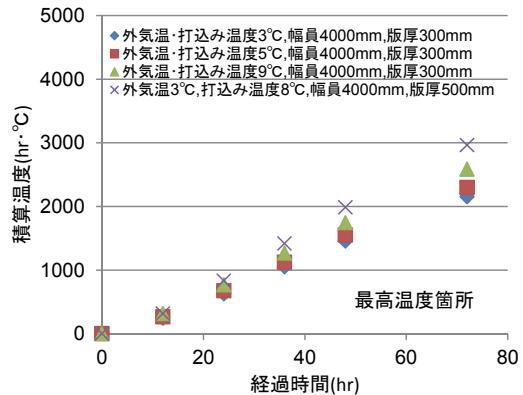


図-8 経過時間と積算温度の関係(AC無,最高温度箇所)

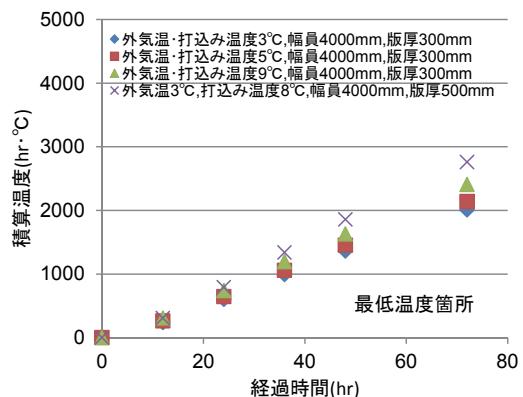


図-9 経過時間と積算温度の関係(AC無,最低温度箇所)

$$(R^2=0.995) \quad (6)$$

ここで、Slは経過時間と積算温度の関係を示す傾き、Tairは外気温(°C)、Tcpは打込み温度(°C)、tは版厚(cm)、wは幅員(cm)を示す。

これら簡易温度評価式と図-7の積算温度と曲げ強度の関係を用い、数ケースの条件において曲げ強度を算定した(表-4参照)。

表-4 曲げ強度算定結果例

箇所	AC 有無	外気 温 (°C)	打込 み 温 度 (°C)	版厚 (cm)	幅員 (cm)	傾 き	積算温度 (hr°C)		曲げ強度 (N/mm²)	
							24hr	36hr	24hr	36hr
最高	無	3	3	400	25	26.5	636	954	3.23	4.76
	有					29.4	706	1059	3.63	5.16
最低	無	7	12	400	30	25.1	602	903	3.03	4.55
	有					27.8	668	1002	3.42	4.95
最高	無	7	12	400	30	35.2	844	1265	4.30	5.83
	有					38.5	924	1385	4.64	6.17
最低	無	7	12	400	30	33.2	798	1197	4.09	5.62
	有					36.3	872	1308	4.42	5.95

表-4 より、今回構築した簡易温度評価式と積算温度と曲げ強度の関係を併用することで任意の材齢における曲げ強度が予測できる。また、交通開放に必要な曲げ強度 4.5N/mm^2 到達時期や材齢 24 時間で交通開放するための耐寒促進剤の有無について概ね判断することができる。ただし、曲げ強度を予測する段階での安全率の取り方、任意の材料、配合への拡張等、今後の検討課題は山積みである。

3.5 収縮特性

耐寒促進剤の有無による乾燥収縮ひずみの測定結果を図-10 に示す。同図より、AC 無と AC 有のケースとでは乾燥収縮ひずみは大差ないことが分かる。また、図-11 に示した舗装版を模擬した供試体での収縮ひずみでは、AC 有無に関わらず測定開始から 5~10 時間で収縮ひずみが急激に進展し、耐寒促進剤を使用することで若干収縮ひずみが大きくなっている。上述した測定開始直後の急激なひずみ進展は、早強ポルトランドセメントを低水セメント比で使用した際の自己収縮に起因していると考えられる。

3.6 凍結融解抵抗性

耐寒促進剤の有無による凍結融解試験結果を図-12 に示す。同図より、耐寒促進剤の有無によって相対動弾性係数は大差なく、両者とも十分な凍結融解抵抗性を有している。ただし、これらは空気量を 4~5% 確保した場合の結果であり、AC 有のように空気量の経時変化が大きく上記の空気量範囲を逸脱する場合にはこの範疇でない。よって、凍結融解抵抗性に必要な空気量を確保する観点からも練混ぜから打込み終了までの時間を制御する必要がある。

4. まとめ

- (1) 早強ポルトランドセメントを使用し、低水セメント比の配合となる早期交通開放型コンクリート舗装では、硬化発熱が生じ、この発熱を保温効果として利用することで、早期に曲げ強度を増加させることができる。
- (2) 早期交通開放型コンクリート舗装に耐寒促進剤を使用すると、硬化発熱の上昇によって保温効果が高まり、耐寒促進剤を使用しない場合に比べて早期に曲げ強度が増加する。
- (3) 実部材の温度履歴を考慮した強度管理手法として、積算温度と曲げ強度の関係を実験的に求めた上で、モデルケースの温度解析によって外気温、打込み温度、舗装版の寸法条件をパラメータとした簡易温度評価式を構築した。この両者を併用することによって実部材の積算温度を算定し、その積算温度に応じた曲げ強度の推定が可能となる。

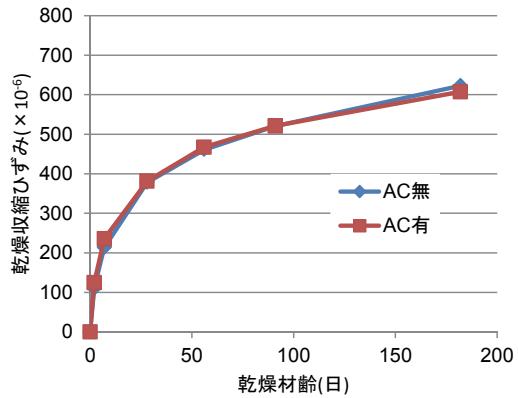


図-10 乾燥収縮ひずみの測定結果

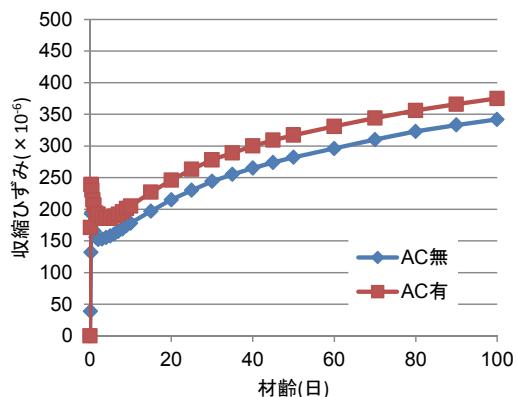


図-11 舗装版を模擬した収縮ひずみの測定結果

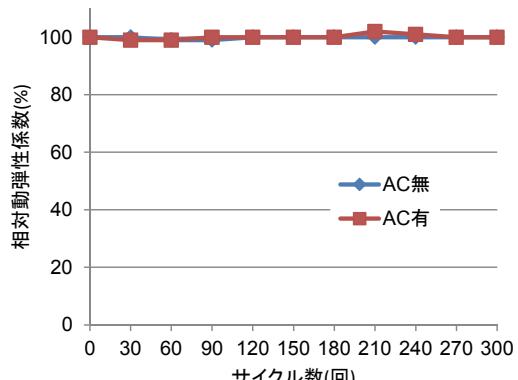


図-12 凍結融解試験結果

- (4) 早期交通開放型コンクリート舗装に耐寒促進剤を使用した場合、スランプロスの増大、収縮ひずみの増加に留意する必要がある。

参考文献

- 1) 早期交通開放型コンクリート舗装 1DAY PAVE 製造施工マニュアル, (一社)セメント協会, 2016
- 2) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, (公社)日本コンクリート工学会, p.70, 2016