

タイトル	グルーピング系凍結抑制舗装の凍結抑制効果に関する研究
著者	田中，俊輔；武市，靖
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要，8：19-32
発行日	2008-09-28

グルーピング系凍結抑制舗装の凍結抑制効果に関する研究

田 中 俊 輔* ・ 武 市 靖**

Research on Anti-Freezing Effect of
Grooving Type-Freezing Prevention Pavements.

Shunsuke TANAKA* and Kiyoshi TAKEICHI**

1. まえがき^{1),2),3)}

冬期路面管理対策として平成4年のスパイクタイヤ使用禁止以降、積極的に導入されたロードヒーティングは、ランニングコストの高さから、新設・更新が抑制されている。現在、冬期路面管理は除雪水準の見直しや凍結防止剤散布の効率化、及び凍結抑制舗装の性能向上等の方向で進められているが、管理水準と管理費用とのバランスをどのようにとるかが課題となっている。冬期路面管理手法としては、舗装の面からこれを補助するものとして従来から凍結抑制舗装が開発されてきた。凍結抑制舗装は路面の初期凍結を遅延し、雪氷の付着を弱めるなどの効果を持ち、凍結抑制舗装の性能向上は冬期路面管理の複合的な手段の1つとして今後重要になると考えられる。

2. 研究の概要

2.1 研究の流れ

本研究はグルーピング系凍結抑制舗装の工学的性質を明らかにし、その後、凍結抑制効果を実験及び理論解析から明らかにしたものである。研究の流れを図2.1に示した。

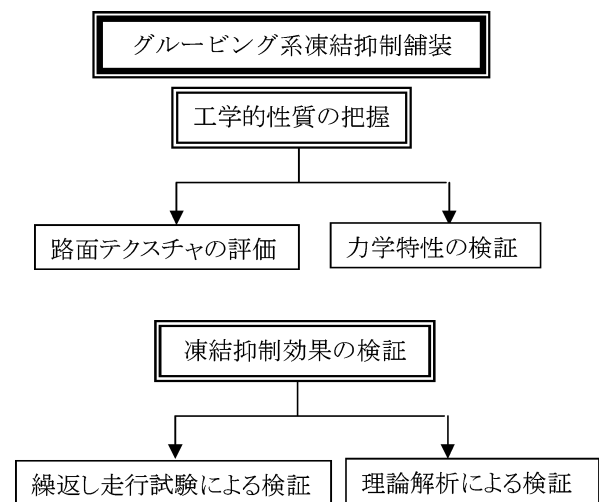


図2.1 研究の流れ

2.2 試験舗装の概要

2.2.1 グルーピング系凍結抑制舗装

試験舗装として用いた4タイプのグルーピング系凍結抑制舗装は本来、たわみ効果による物理的作用と融氷効果による化学的作用の複合作用をもった舗装⁴⁾として開発されたものである。

本研究では、まず物理的作用によるたわみ効果を評価するために凍結防止剤を添加せず、物理効果の発現についてのみ実験を行った。また、密粒度舗装13F（密粒度と略称）と排水性舗装（排水性と略称）を比較舗装とし、試験舗装の概要を表2.1、試験室内部と各舗装の表面状況を写真

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻 修士課程（土木系）

Graduate School of Engineering (Civil Eng.), Master's Hokkai-Gakuen University

** 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（土木系）

Graduate School of Engineering (Civil Eng.), Hokkai-Gakuen University

2.1～2.5 に示した。

3. 試験舗装の工学的性質²⁾

凍結抑制舗装としての性能に影響を与えると考えられる路面テクスチャと力学特性 2 つの工学的性質について、室内試験により定量的に評価した。

表 2.1 試験舗装の概要

タイプ	P	G-P	G-9	G-12
母体舗装	ポーラス	ポーラス	密粒度	密粒度
凍結抑制材	ゴムチップをウレタン樹脂で結合させたもの (凍結防止剤の添加なし)			
グルーピング 幅(深さ)	上部空隙 に 50 mm 幅で充填	9 mm (10 mm)	9 mm (10 mm)	12 mm (10 mm)

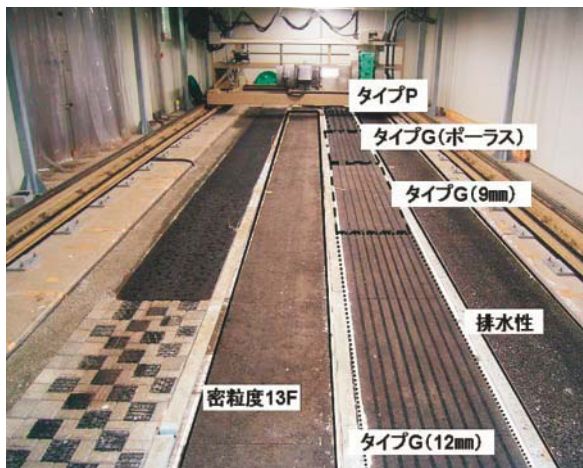


写真 2.1 走行試験装置と試験路面



写真 2.2 タイプ P



写真 2.3 タイプ G-P



写真 2.4 タイプ G-9



写真 2.5 タイプ G-12

3.1 路面テクスチャ解析⁵⁾

道路を走行する自動車のタイヤは路面と直接、接触するので、路面テクスチャはタイヤとの摩擦に密接な関係がある。また、凹凸の大きい（きめが粗い）粗面の舗装は、雪氷の付着力が小さいため繰返し走行荷重による雪氷の剝離・消耗効果が期待できるとされている。

ここでは、繰返し走行荷重によるグルーピング部分に充填した凍結抑制材や溝の変形・破損などの性状変化を調べ、路面テクスチャによる凍結抑制効果の検証を行うために、繰返し走行試験後の路面テクスチャを測定し、MPD(平均きめ深さ)を算出した。

3.1.1 ST メータの概要

ST メータの大きな特徴としては、路面に対して縦断方向に 300 mm、横断方向に 100 mm の範囲内で 34 本の側線で測定することができ、路面を面的に評価することが可能なので、精度の良い測定ができる。

写真 3.1 に ST メータの写真、表 3.1 に設定条件、表 3.2 にレーザ変位計の仕様を示した。

3.1.2 測定原理

舗装のきめ深さを正確に測定するために重要なレーザ変位計は、半導体レーザを照射する光源と投光レンズ、そして受光レンズとレーザ光を感知する CCD (Charged Coupled Device: 電荷転送素子) で構成される。CCD レーザ変位センサの測定は図 3.1 に示すように、三角測量の原理を応用した三角測距方式によるレーザ式変位センサを使用した。光源から発射されたレーザを投光レンズで束ね、測定対象に照射する。対象物に照射された光は反射し、受光レンズにより収束する。収束した光は受光用 CCD にスポットを結像する。



写真 3.1 ST メータ

ここで対象物が変位した場合、スポットも変位して像の変位に比例した電圧が出力される。出力された電圧をロガーで読み取り対象の変位を測定する。

光位置検出素子に CCD を受光部に用いた変位計は、PSD（Position Sensitive Detector）を用いた汎用のものに比べ測定対象の表面状態（反射率、粗面度）によって生じる誤差が小さく、精度が高いという特徴がある。この特性は表面状態が一定ではない対象の測定に有効である。

表 3.1 ST メータの設定条件

項目	数値
(X, Y) 方向延長	(300 mm, 100 mm)
(X, Y) インターバル	(0.1 mm, 3 mm)
基長	100 mm
X 方向スピード	60 mm/sec
測定ピッチ	0.1 mm

表 3.2 レーザ変位計の仕様

型 式	LK-080
波 長	670 nm
パルス幅	3.2~992 μ s
周 期	1024 μ s
基 準 距 離	80 mm
測 定 範 囲	± 15 mm
光 源	赤色半導体レーザー（クラス 2）
スポット径	$\phi 70 \mu$ m

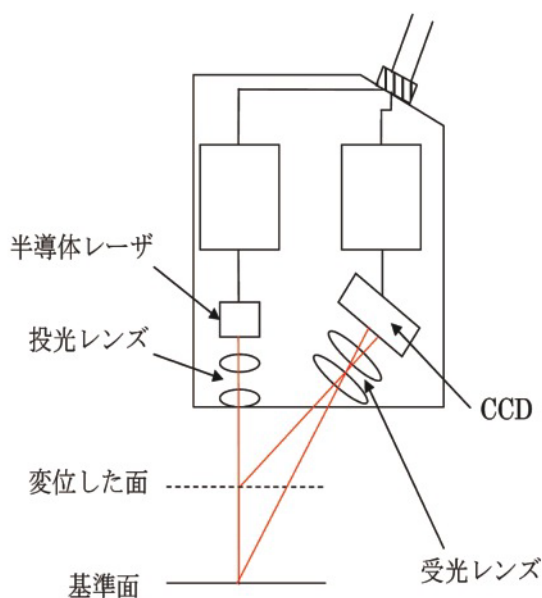


図 3.1 レーザ変位計概略図

3.1.3 試験手順

低温室内に設置された 4 種類のグルーピング系凍結抑制舗装について、施工直後と 0 回, 100 回, 500 回, 1000 回, 3000 回の繰返し走行試験後の路面テクスチャの測定を行った。密粒度、排水性については、これまでの研究で使用され、劣化していると考えられる。このことから、繰返し走行試験後の路面テクスチャの測定を行っても大きな変化は見られないと考えられるので、本研究では既存の状態での路面テクスチャの測定を行った。

路面テクスチャは、各舗装について走行回数毎に ST メータが毎回同じ場所になるように設置し、測定を行った。また、各舗装で 3 回測定し、それぞれ算出された MPD の平均値を試験結果の値とした。図 3.2 に路面テクスチャ測定の試験手順を示した。また、図 3.3 に MPD を算出するための計算式と算出方法の概略図を示した。

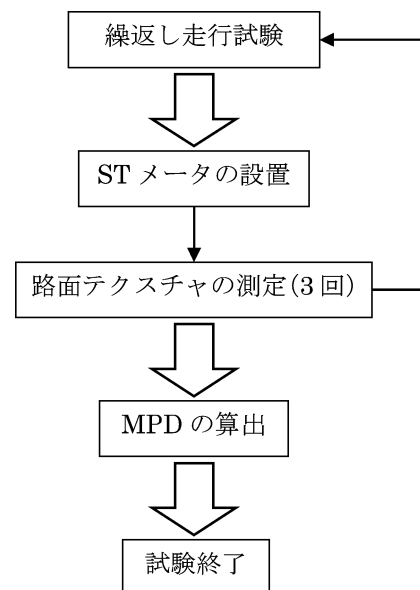


図 3.2 路面テクスチャ測定試験手順

$$MPD = \frac{\text{最大レベル(1番目)} + \text{最大レベル(2番目)}}{2} - \text{平均レベル}$$

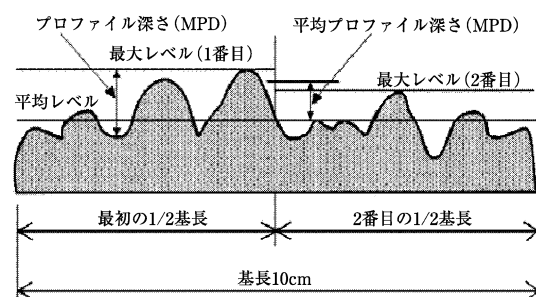


図 3.3 MPD の算出方法概略図

グルーピング系凍結抑制舗装についての測定では、測定範囲内にアスコン部分と凍結抑制材部分の異なる性状のものが混合している。アスコン部分と凍結抑制材部分のそれぞれの路面テクスチャを調べるために、測定したMPDのデータから各側線（34本）のグラフを作成し、そのグラフに基づきアスコン部分のみのMPDのデータと凍結抑制材部分のみのMPDのデータを分け、アスコン部分のみのMPDと凍結抑制材部分のみのMPDをそれぞれ算出した。

3.1.4 試験条件

表3.3に試験条件を示した。本来、路面温度を高くし、舗装に対して過酷な条件の下で試験を行うべきであるが、今後、継続して実施する実験において影響が出ないよう考慮した結果、本研究で

表 3.3 試験条件

試験舗装	タイプP, G-P, G-9, G-12
路面状態	乾燥
路面温度	10°C
走行回数	0, 100, 500, 1000, 3000
走行速度	5 km/h
走行輪荷重	5 kN

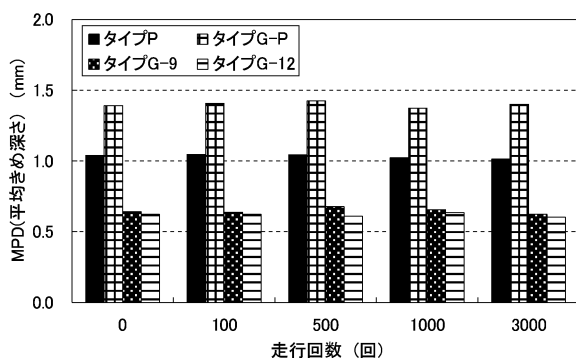


図 3.4 試験舗装全体の測定結果

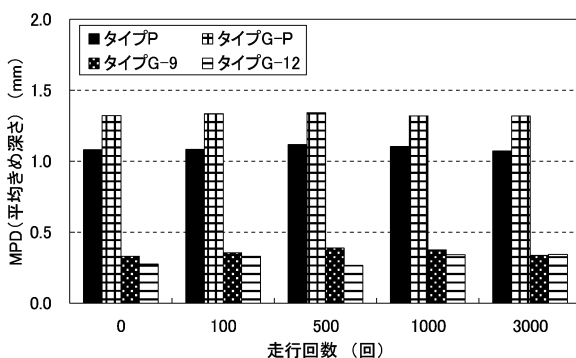


図 3.5 試験舗装（アスコン部分）の測定結果

は路面温度を 10°C に設定した。

3.1.5 試験結果

図3.4～図3.7に試験舗装全体、アスコン部分、凍結抑制材部分のMPDの測定結果をそれぞれ示した。これらの測定結果を見ると、走行回数による変化が無く、今回の試験条件では性状変化は見られなかった。

母体舗装にポーラス舗装を用いているタイプ（P, G-P）は、密粒度舗装に比べて、大きな値となっており、粗面系舗装としての雪氷消耗効果が期待できる。凍結抑制材部分に注目すると、排水性よりMPDは小さくなっているが、たわみ特性を持っているので、雪氷消耗効果だけでなく雪氷剝離効果も期待できる。

3.2 乗用車用タイヤによる接地面積測定試験

圧縮試験を行う際に、室内走行試験機で使用したスタッドレスタイヤの接地面積と同等の円盤型の載荷板を用いるために、それぞれの舗装における乗用車用タイヤの接地面積を測定した。

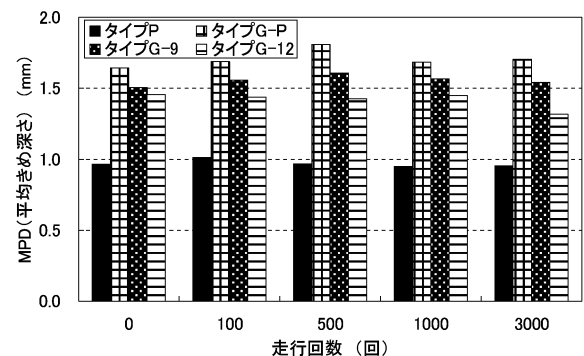


図 3.6 試験舗装（凍結抑制材部分）の測定結果

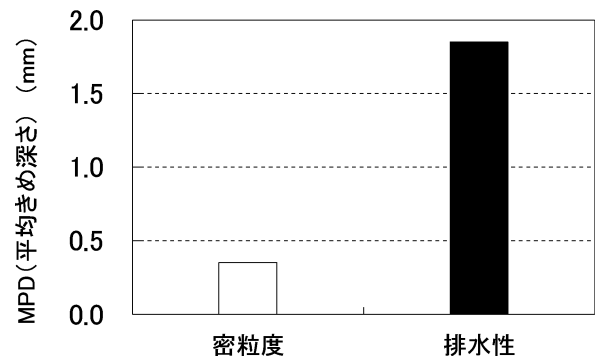


図 3.7 比較舗装の測定結果

3.2.1 試験条件

各舗装の試験箇所まで走行試験機を移動させ、スタッドレスタイヤにインクを塗り、タイヤが接地する路面上に白紙を設置した。その後、タイヤ痕の面積を算出し、その面積を円の直径に換算した。表 3.4 に接地面積測定試験条件を示した。

3.2.2 試験結果

表 3.5 に縦方向と横方向の長さの測定値とタイヤの接地面積を、表 3.6 に円の直径に換算した値をそれぞれ示した。

試験結果より、本研究では室内走行試験機で使用了スタッドレスタイヤの接地面積と同等の 18.0 cm の載荷板を用いて圧縮試験を行った。

3.3 圧縮試験

低温時における凍結抑制材のたわみ特性を調べるために、 -5°C で養生した供試体に荷重を作用させ、変位量で評価した。本研究では、厚さ 50 mm

の供試体上部に 1 mm の氷板があると仮定したとき、1 mm 変位すると約 2 % のひずみ、2 mm 変位すると約 4 % のひずみが作用すると考えられるので、1 mm 変位したときと 2 mm 変位したときの荷重を測定した。

3.3.1 試験手順

直径 18 cm の載荷板を使用し、載荷板が各舗装の供試体の表面（グルーピング、凍結抑制材がある面）に作用するように供試体を設置した。

供試体が 2 mm 変位を超えた時点で載荷を止め、1 mm 変位したときと 2 mm 変位したときの荷重をそれぞれ記録した。試験は舗装毎に 2 回行い、その平均をとった。写真 3.2 に載荷試験の状況を示した。

3.3.2 試験条件

表 3.7 に圧縮試験の試験条件を示した。供試体温度は -5°C とし、供試体全体が一定温度になるよう十分に養生した。

3.3.3 試験結果

図 3.8 に 1 mm 変位時と 2 mm 変位時の荷重を示した。試験舗装は、比較舗装と比べて荷重が非

表 3.4 接地面積測定試験条件

試験舗装	タイプ P, G-P, G-9, G-12
路面状態	乾燥
使用タイヤ	普通自動車用スタッドレスタイヤ
路面温度	-5°C
載荷重	5 kN

表 3.5 測定値とタイヤ接地面積

路面	接地長さ (cm)		面積 (cm ²)
	縦	横	
P	20.5	12.8	262.4
G-P	20.0	12.9	258.0
G-9	20.2	13.1	264.6
G-12	21.0	13.1	275.1
密粒度	19.1	12.7	242.6
排水性	19.5	12.7	247.7

表 3.6 測定値とタイヤ接地面積

路面	円の直径 (cm)	平均値 (cm)
P	18.3	18.1
G-P	18.1	
G-9	18.4	
G-12	18.7	
密粒度	17.6	
排水性	17.8	



写真 3.2 載荷試験の状況

表 3.7 試験条件

試験舗装	タイプ P, G-P, G-9, G-12
供試体寸法 (mm)	300×300×50
載荷板の直径	18 cm
載荷方法	単調増加載荷
荷重増加速度	40 kg/sec
サンプリング周期	10 Hz

常に小さいことから、凍結抑制材がたわみによって変位を起こしたことが考えられる。このことから、 -5°C の環境下では、凍結抑制材のたわみ効果は期待できると考えられる。

3.4 ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験は、主に耐流動対策が必要とされる重交通道路に使用するアスファルト混合物、または重交通道路に施工されているアスファルト混合物に対し、配合設計および品質管理を目的として行われる試験である。動的安定度 (Dynamic Stability : DS) は、高温時における加熱アスファルト混合物の耐流動性を評価する指標であるが、本研究では特にグルーピングが施されたグルーピング系凍結抑制舗装の耐流動性を評価し、舗装の流動性に対する強度について検討した。

3.4.1 試験条件

本試験は、写真 3.3 に示したホイールトラッキング試験機を用いて、規定された試験条件に準拠して行った。

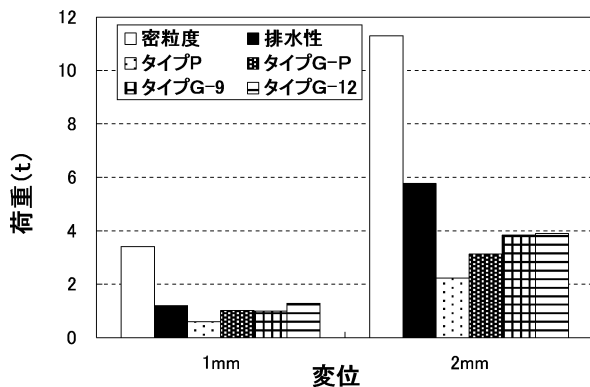


図 3.8 1 mm 変位時と 2 mm 変位時の荷重



写真 3.3 ホイールトラッキング試験機

図 3.9 に動的安定度の算出式と、ホイールトラッキング試験の様子を示した。

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C_1 \times C_2$$

ここに、DS：動的安定度 (回/mm)

d_1 : t_1 における変形量 (mm)

d_2 : t_2 における変形量 (mm)

C_1 : クランクによる変速駆動型の試験機を使用した場合の補正係数=1.0

C_2 : 室内および現場で作製した供試体 (幅 300 mm) を使用した場合の補正係数=1.0

表 3.8 にホイールトラッキング試験の試験条件を示した。

ただし、供試体の養生温度及び試験温度の規定は 60°C となっているが、本試験で使用した恒温室の性能の限界により 50°C で実施した。そのため、得られた試験結果に温度補正を行った。補正係数は、土木研究所で実施されたホイールトラッキング試験の結果と文献より得られた値を適用した⁶⁾。表 3.9 に温度区分を 5°C ごととした各温度範囲を代表する補正係数をそれぞれ示した。

本試験では、補正係数として 0.394 を用いた。



図 3.9 DS の算出式と試験の様子

表 3.8 試験条件

試験舗装	タイプ P, G-P, G-9, G-12
供試体寸法 (mm)	300×300×50
養生時間	5 時間以上 24 時間未満
養生温度	50°C
試験輪形状寸法	直径 200 mm, 幅 50 mm ゴム厚 15 mm
試験輪荷重	$686 \pm 10 \text{ N}$ ($70 \pm 1 \text{ kgf}$)
接地圧	0.63 MPa
試験温度	50°C
試験輪の走行速度及び走行距離	毎分 42 ± 1 回 $230 \pm 10 \text{ mm}$

3.4.2 試験結果

表 3.10 に試験温度 50°C のときの動的安定度 (DS_{50})、表 3.11 に温度補正を行ったときの動的安定度 (DS) をそれぞれ示した。

試験結果より、全ての試験舗装は約 5000 回/mm 以上の動的安定度が得られた。重交通道路において動的安定度は 3000 回/mm 以上を基準値としており、舗装の流動性に対して十分な強度を示していると考えられる。

4. 繰返し走行試験による凍結抑制効果^{2),3)}

グルーピング系凍結抑制舗装には、凍結抑制材が充填されているため、他の舗装にはないたわみ特性が特徴となっているが、実際に車両の走行による凍結抑制効果が発揮されるかは必ずしも定量的に明確にされていない。それを解明するため、ここでは氷板路面、硬圧雪路面、軟圧雪路面、積雪路面で繰返し走行を行い、試験舗装の試験結果を比較舗装と比較し、氷板路面では路面露出率、雪路面では雪氷剝離率から評価した。

4.1 室内凍結路面走行試験装置

雪氷路面状態に対して交通荷重を与えるため、室内凍結路面走行試験装置（以下、走行試験装置）を用いた。この走行試験装置の主要部分は、路面を走行するタイヤ、タイヤ駆動モーター、そしてフレーム駆動モーターで構成される。走行試験装

表 3.9 温度に関する補正係数⁶⁾

温度範囲 (°C)	45～ 50	50～ 55	55～ 60	60～
補正係数	0.228	0.394	0.704	1.480

表 3.10 動的安定度 (DS_{50})

舗装	P	G-P	G-9	G-12
d_1 (mm)	0.75	0.92	1.17	0.86
d_2 (mm)	0.79	0.97	1.21	0.89
DS_{50} (回/mm)	15750	12600	15750	21000

表 3.11 温度補正後の動的安定度 (DS)

舗装	P	G-P	G-9	G-12
DS (回/mm)	6206	4964	6206	8274

置は雰囲気温度について -20°C から +50°C までの設定が可能な恒温室内に設置されている。タイヤは排水溝を有する幅 0.5 m、長さ 10 m の 3 レーンと幅 0.76 m、長さ 10 m の 1 レーンの計 4 レーン上に施工された舗装を走行する。

走行試験装置の機能として、制動試験、スリップ率設定制動試験、繰返し走行試験が可能である。本研究では、繰返し走行試験を用いた。最大走行速度 10 km/h、最大輪荷重 5.0 kN まで設定が可能で、写真 4.1 に走行試験装置を示した。

4.2 路面露出率・雪氷剝離率の算定

路面露出率は、通常はデジタルカメラなどで撮影した路面状況の電子データを画像解析により 2 値化し、観測対象区間の画像全面のピクセル数に対する黒に判別したピクセル数の百分率で表すことができる。しかし、氷板路面の舗装路面露出率を求める場合、氷板は 1 mm と薄く透明であるため、2 値化することが困難である。そこで、図 4.1 に示したように、走行回数毎に路面に透明なラミネートシートを敷き、氷が剝離した箇所を油性のホワイトマーカーで塗りつぶし撮影した。

雪路面の場合、路面露出率では付着破壊が起きて雪氷が剝離している部分でも、タイヤが剝離した雪片を引きずってしまうことから（引きずり効果）、路面に粒雪が残存し剝離効果を正確に判別することができない図 4.2(左)。そこで、図 4.2(右)に示したように、軟らかいハケで剝離部分を掃いて路面を目視で確認した後、画像の雪が剝離した部分を黒く塗りつぶし、雪氷を背景画像（白）として、本研究では雪氷剝離率と定義し算定した。これらの画像を 2 値化処理するための閾値設定は、氷板路面では判別分析法を用いたが、雪路面では、明らかに雪氷が剝離していない部分でも対



写真 4.1 室内凍結路面走行試験装置

象領域に判断されてしまうことがあるため、走行回数0回時の露出率が0%となるように閾値指定法により設定を行い、閾値を109に設定した。路面露出率と雪氷剝離率は式(4.1) (4.2)により求めた。

$$\text{路面露出率} = \frac{\text{路面露出面積}}{\text{解析画像全体の面積}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{雪氷剝離率} = \frac{\text{雪氷剝離面積}}{\text{解析画像全体の面積}} \times 100 \quad (4.2)$$

4.3 試験条件

氷板路面における試験条件を表4.1に示した。路面温度は、凍結抑制舗装の一般的に性能評価温度としている -5°C と、 -10°C の極低温下における凍結抑制効果も併せて検証した。輪荷重は乗用車を仮定して5kN、走行速度は繰返し走行試験時の走行試験機の最大設定である5km/hで行った。

作製した雪路面の状況の詳細を表4.2に示した。路面温度は -5°C とした。試験舗装、比較舗装、輪荷重、走行速度、走行回数、使用タイヤは氷板路面時と同様である。

4.4 試験結果

4.4.1 氷板路面

路面温度 -5°C と -10°C の時の氷板路面の試験

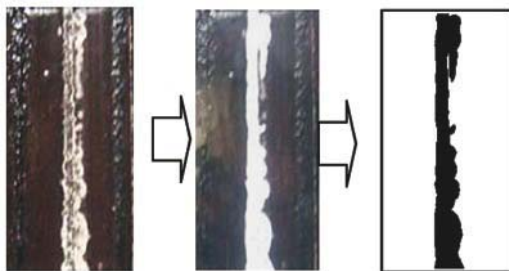


図4.1 氷板の路面露出率の算出例

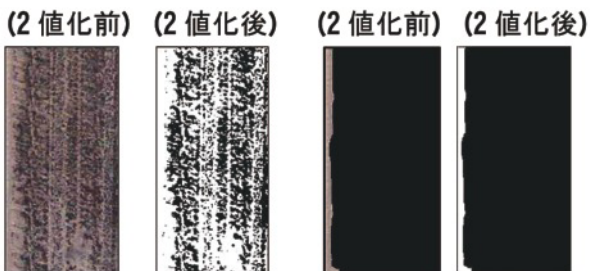


図4.2 雪路面の路面露出率(左)と雪氷剝離率(右)の例

結果を図4.3と図4.4にそれぞれ示した。

路面温度 -5°C の時は、全ての舗装で、走行回数が増加するにつれて路面露出率が大きくなっている。タイプGの3種は全て比較舗装よりも大きい値となっている。特にタイプG-Pは、凍結抑制

表4.1 氷板路面時の試験条件

路面温度	-5°C -10°C
試験舗装	タイプP, G-P, G-9, G-12
比較舗装	密粒度, 排水性
路面状態	密粒度に対して氷板厚さ1mmの状態
輪荷重	5kN
走行速度	5km/h
走行回数	0回, 50回, 100回, 500回, 1000回
使用タイヤ	普通自動車スタッドレスタイヤ 規格165/80 R13 83Q
氷板厚さ	1mm

表4.2 雪路面の状況

路面状況	厚さ	密度
硬圧雪	10mm (締固め後)	約0.70 t/m ³
軟圧雪	10mm (締固め後)	約0.55 t/m ³
積雪	15mm	約0.40 t/m ³

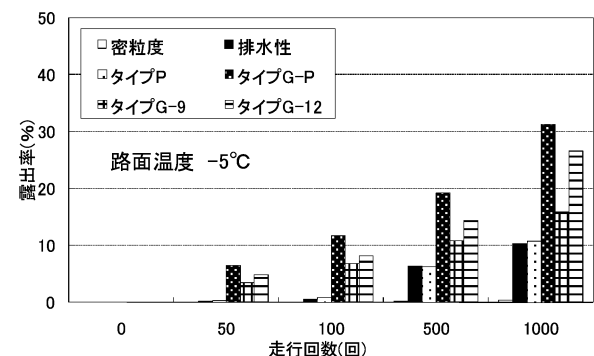


図4.3 路面露出率 (氷板・ -5°C)

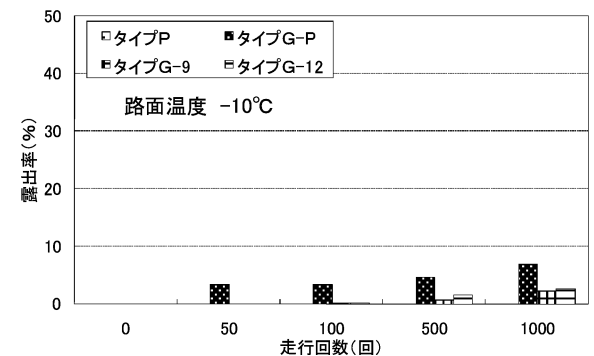


図4.4 路面露出率 (氷板・ -10°C)

材部分だけでなく、舗装面まで氷板の剥離が見られた。これは、路面テクスチャの作用によるものと考えられる。タイプ P は、排水性とほぼ同じ値となった。

路面温度 -10°C の時は、全ての試験舗装の路面露出がわずかであり、比較舗装においては、露出することはなかった。よって、路面温度 -5°C の時は、試験舗装は高い凍結抑制効果が期待できるが、路面温度 -10°C の時は、ほとんど期待できないと考えられる。

4.4.2 圧雪及び積雪路面

図 4.5、図 4.6、及び図 4.7 は硬圧雪路面、軟圧雪路面、積雪路面の雪氷剥離率をそれぞれ示したものである。

硬圧雪路面では、500 回走行時で密粒度以外の舗装で雪氷剥離が確認された。タイプ G の 3 種は、比較舗装よりも大きく剥離をしているため高

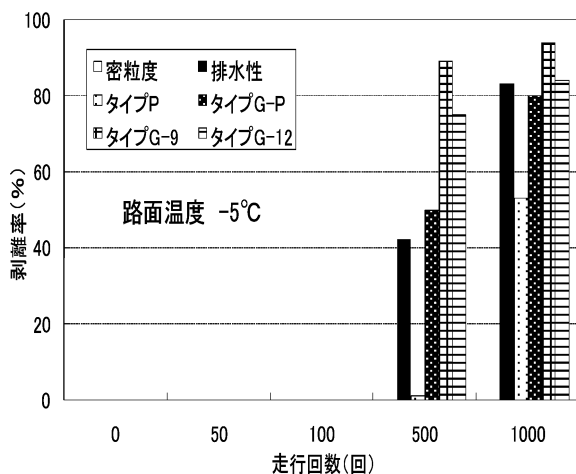


図 4.5 硬圧雪路面の雪氷剥離率

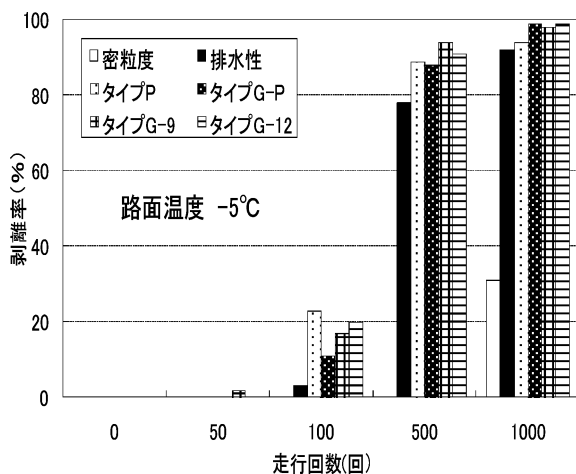


図 4.6 軟圧雪路面の雪氷剥離率

い凍結抑制効果が期待できるが、タイプ P は、排水性舗装よりも小さい値となった。

軟圧雪路面では、100 回走行時で全ての試験舗装に雪氷の剥離が見られたが、比較舗装には見られなかった。すべての走行回数において、試験舗装は比較舗装よりも多くの雪氷剥離が見られるため、高い凍結抑制効果が期待できる。

積雪路面では、走行回数が増加するにつれて、全ての舗装が大きな値を示した。しかし、密粒度は雪氷剥離が見られるのが他の舗装より明らかに遅かった。走行回数 1000 回では、全舗装が 80%以上の値を示した。

5. 理論解析による凍結抑制効果の検討⁷⁾

たわみ特性を有する凍結抑制舗装に付着した氷板が交通荷重によって破壊される氷板の路面剥離効果の有無について多層弾性理論と有限要素解析を用いて理論的に検証した。

すなわち、輪荷重によって氷板に発生するひずみが氷板の破壊限界ひずみ以上であるか否かを理論的に明らかにすることにある。

理論解析では多層弾性理論と、従来の H 法有限要素解析より、高次の多項式に基づく P 法有限要素解析の 2 つの解析手法を用いた。また、実際に室内走行試験室で実験を行ない、解析値と実験結果の両面から氷板剥離効果の比較検証をした。解析対象舗装は、タイプ G-9、タイプ G-12、密粒度の 3 種とした。

図 5.1 に解析の流れを示した。

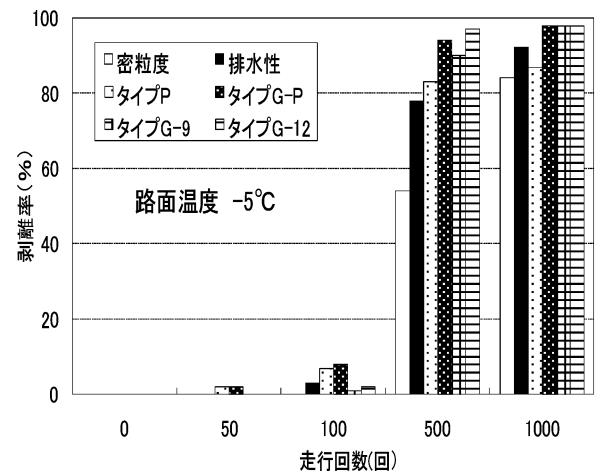


図 4.7 積雪路面の雪氷剥離率

5.1 設定条件

5.1.1 材料条件

弾性係数とポアソン比の、力学定数については、文献や既往研究の成果などから一般的数値を採用し、表5.1に示した。氷板の弾性係数はN.P. Lascaら⁸⁾の実験値を用いた。

5.1.2 荷重条件

荷重は乗用車および大型車の輪荷重であるが、表5.2のように設定した。なお、実際の路面には車の繰返し走行荷重がかかるが、今回の解析では1回載荷での検証となる。乗用車のタイヤの荷重半径は、接地圧試験結果を利用した。接地面積が約300 mm²であったので、これから荷重半径は90 mmとなる。これに乗用車の輪荷重5 kNがか

かることにより接地圧0.196 MPaとなった。

大型車の荷重半径は、竹下春美による理論式⁹⁾ $r=P+12$ に基づいている。ここで r が荷重半径であり P が荷重(t)である。ここで求めた荷重半径より接地0.55 kNとなった。

5.1.3 氷板の破壊条件

氷板の破壊の有無は、解析によって得られる氷板のひずみによって評価した。試験舗装が有するたわみ特性を利用した舗装面に交通荷重が作用することで発生するひずみが、氷板の破壊ひずみより大きくなると氷板の破壊ないし剥離が起こると仮定した。

Malcolm Mellor 及び David M Cole が発表した文献¹⁰⁾によると、図5.2に示すように、氷板のひずみが0.05～0.5%に達したときに初期破壊が発生し、これが、0.7～1.2%に達した時に完全破壊が発生するとされている。初期破壊が発生する時氷板にクラックが入り、完全破壊が発生する時氷板が剥離したと考える。

以上より、初期破壊が終了するひずみ0.05%をクラックが入る1次破壊の基準値とし、完全破壊が終了するひずみ0.7%を氷板が剥離する基準値とした。ひずみがこの基準値以上の場合は氷板にクラックまたは剥離し、以下の場合はそれがないと判断する。

氷板の破壊条件を表5.3に示した。

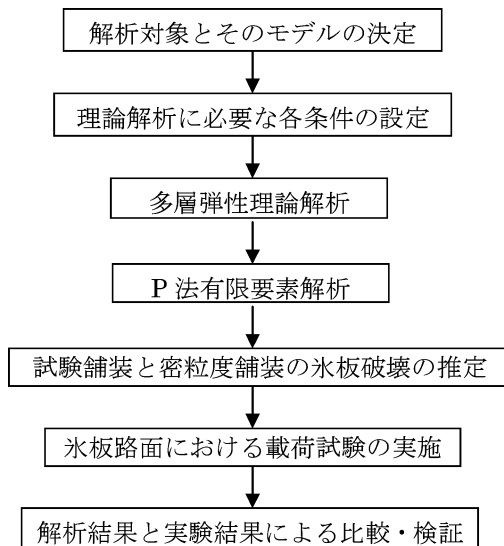


図5.1 解析の流れ

表5.1 材料条件

材料	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
氷板 ⁸⁾	7900	0.33
ゴムチップ 結合材	5	0.44
アスコン	13000	0.35
コンクリート	30000	0.2

表5.2 荷重条件

	輪荷重	荷重半径	接地圧
乗用車	5 kN	90 mm	0.196 MPa
大型車	50 kN	170 mm	0.551 MPa

5.2 多層弾性理論解析

— GAMES による解析

5.2.1 解析モデル

多層弾性理論に基づいた GAMES¹¹⁾ は、舗装構造を層の数と厚さのみで定義する理論であり、層毎に材料を定義し解析を行うプログラムである。

図5.3は、本室内実験室の舗装構造を近似したものである。

5.2.2 解析結果と推定

試験舗装の乗用車輪荷重載荷時の解析結果を図5.4に示し、破壊の推定結果を表5.4に示した。

試験舗装は、凍結抑制材のたわみ効果が大きく氷板は完全破壊したが、密粒度は初期破壊にすら達しなかった。

次に、試験舗装の大型車輪荷重載荷時の解析結果を図5.5に示し、破壊の推定結果を表5.5に示

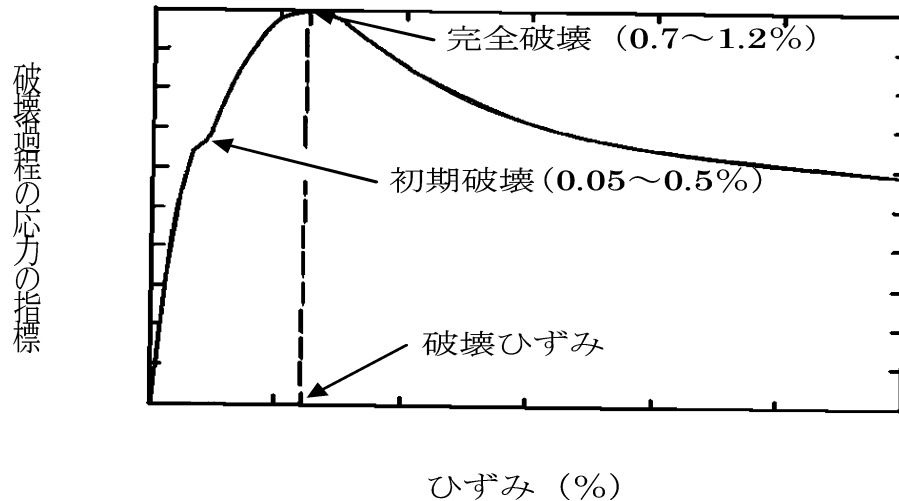

 図 5.2 氷板の破壊過程¹⁰⁾

表 5.3 氷板の破壊条件

	ひずみ (%)
1 次破壊（クラックが入る）	0.05 以上
2 次破壊（完全に剝離する）	0.7 以上

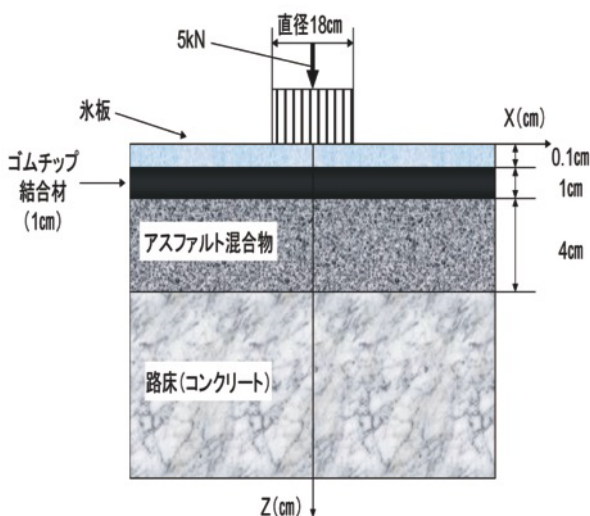


図 5.3 GAMES の解析モデル

した。試験舗装のひずみは、乗用車荷重載荷時と比べても大きくなったが、密粒度はほぼ変わらず、初期破壊にも達しなかった。

5.3 有限要素解析（P 法）

— Stress Check による解析

P 法とは、従来の H 法と同じ要素密度を持つが、要素に新しい中間接点を付加することにより、使用する近似多項式 (Polynomial) の次数 (P) を上げることによって少ない要素数でも解の精度を

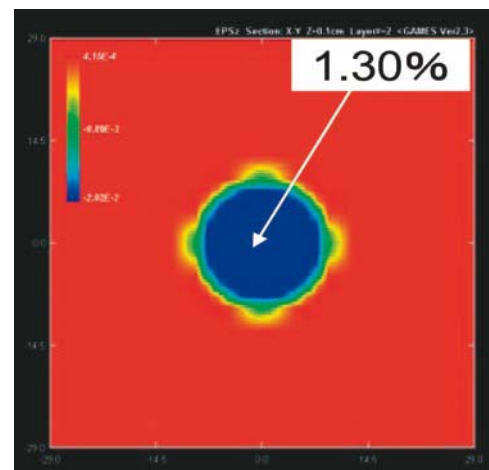


図 5.4 試験舗装（G-9、G-12）のひずみ

表 5.4 乗用車輪荷重載荷時の解析結果

舗装	ひずみ (%)	推定結果
タイプ G-9、G-12	1.30	完全破壊
密粒度	0.00083	破壊なし

得る解析方法である。また、中間接点の次数 (P) は最大 8 つまで増やすことができる。有限要素解析プログラム (Stress Check) は、上記の P 法有限要素解析に基づいているので、他の FEM より信頼性の高い解析結果を得ることが出来る。

5.3.1 解析モデル

本研究では、断面を 1 つの平面として 2 次元解析を行った。図 5.6 に Stress Check における解析モデルを示した。

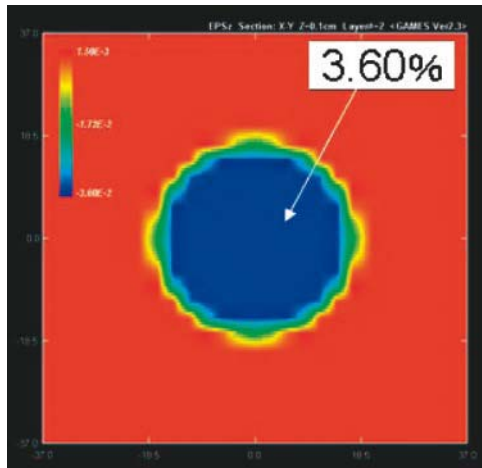


図 5.5 試験舗装（G-9, G-12）のひずみ

表 5.5 大型車輪荷重載荷時の解析結果

舗装	ひずみ (%)	推定結果
タイプ G-9, G-12	3.60	完全破壊
密粒度	0.00083	破壊なし

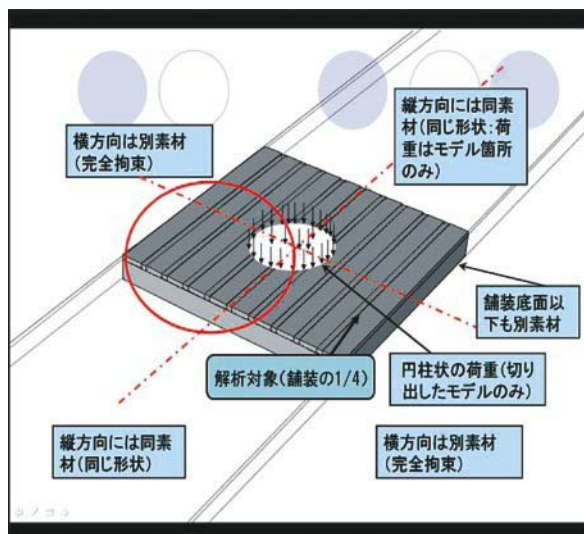


図 5.6 Stress Check の解析モデル

5.3.2 解析結果と推定

試験舗装（タイプ G-9, G-12）の乗用車荷重載荷時の解析結果を図 5.7, 図 5.8 にそれぞれ示し、破壊の推定結果を表 5.6 に示した。

試験舗装は、凍結抑制材の充填されている面積に対してアスコン部分の面積が表層の大部分を占めているため、GAMES の推定結果と比較してひずみの値は小さくなっている。密粒度は初期破壊に達しなかった。

次に試験舗装の大型車荷重載荷時の解析結果を図 5.9, 図 5.10 にそれぞれ示し、破壊の推定結果

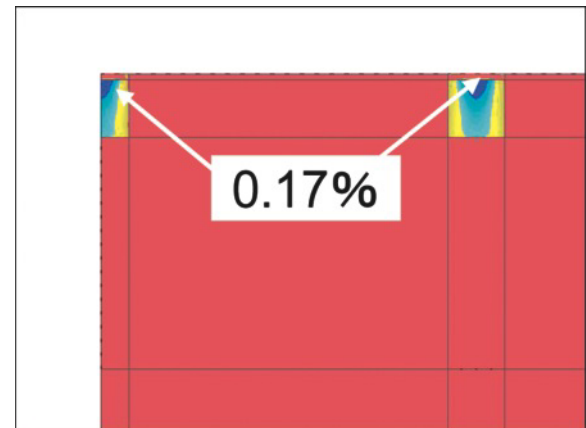


図 5.7 タイプ G-9 のひずみ



図 5.8 タイプ G-12 のひずみ

表 5.6 乗用車輪荷重載荷時の解析結果

舗装	ひずみ (%)	推定結果
タイプ G-9, G-12	0.17 0.24	初期破壊
密粒度	0.00075~0.00092	破壊なし

を表 5.7 に示した。

試験舗装は、乗用車荷重載荷時に比べて大きくなり、溝幅の違いによっても結果に差が見られた。密粒度は初期破壊に達しなかった。

5.4 室内試験による検証

5.4.1 試験概要

図 5.11 に載荷試験モデルを示した。舗装に対し水平になるよう直径 18 cm の載荷板を接地し、その上に荷重 5 kN を載荷した。表 5.8 に試験条件を示した。



図 5.9 タイプ G-9 のひずみ

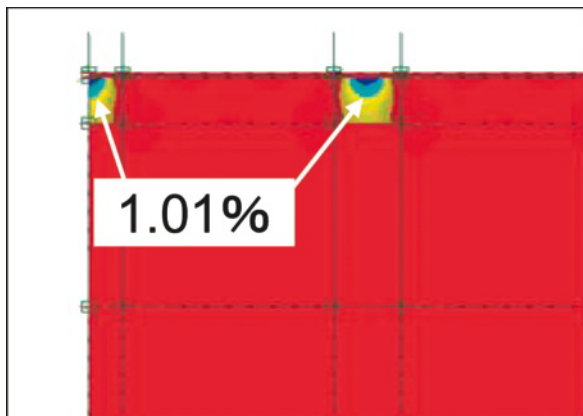


図 5.10 タイプ G-12 のひずみ

表 5.7 大型車輪荷重載荷時の解析結果

舗装	ひずみ (%)	推定結果
タイプ G-9, G-12	0.47 1.01	初期完全破壊
密粒度	0.0021~0.0026	破壊なし

5.4.2 試験結果

写真 5.1, 写真 5.2 に示すように試験舗装では部分破壊を起こしたが、密粒度では変化が見られなかった。従って、理論解析とほぼ同等の結果を得ることができた。

6. まとめ

- 路面テクスチャ解析で、繰返し荷重によるグルーピング部分の凍結抑制材を含め舗装表面の性状変化は見られなかった。
- 圧縮試験では、 -5°C の環境下では凍結抑制効果が期待できることが分かった。

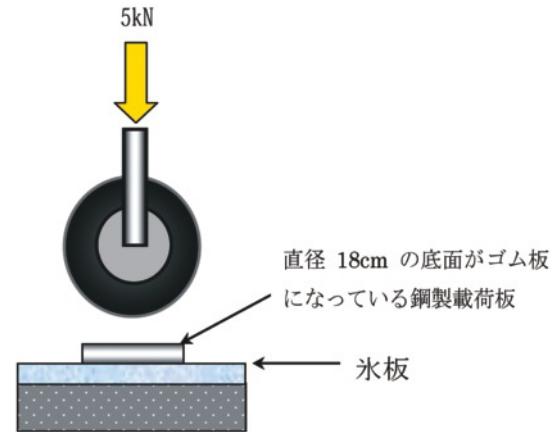


図 5.11 載荷試験モデル

表 5.8 試験条件

試験舗装	タイプ G-9, G-12, 密粒度
路面状態	密粒度に対して, 氷板厚さ 1 mm の状態
路面温度	-5°C
載荷方法	理論解析と同じ静的載荷
輪 荷 重	5 kN
載荷半径	9 cm

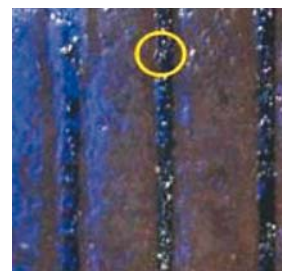


写真 5.1 G-9



写真 5.2 G-12

- ホイールトラッキング試験では、流動性に対して十分な強度を持つことがわかった。
- 氷板路面の繰返し走行試験では、路温 -5°C では高い凍結抑制効果が期待できるが、路温 -10°C では期待できないことがわかった。また圧積雪路面では、排水性舗装と差がない結果も見られた。
- Stress Check は GAMES よりもきめ細かい要素モデルの設定ができるので、載荷試験に近い解析ができることがわかった。
- 理論解析結果では、載荷試験と近い結果が得られた。

7. 今後の課題

今回使用した試験舗装は、本来化学特性も有しているのですが、今後、化学特性も付加した試験舗装について凍結抑制効果を調べる。また、Stress Check による理論解析では、3次元解析により、詳細な比較検証を行う。

謝辞

増山幸衛様、吉野敏弘様をはじめとする世紀東急工業（株）の皆様には多大なご協力を頂いたことに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 武市靖・松田謙治・溝渕優：物理系凍結抑制舗装の改良に関する検討，土木学会舗装工学論文集，第11巻，pp.75，2006.
- 2) 芳賀雄哉，渋谷拓司，田中俊輔，武市靖，増山幸衛，グルーピング系凍結抑制舗装の凍結抑制効果に関する実験的研究，土木学会北海道支部論文報告集，第64号，2008.
- 3) 高橋朋也 武市靖 化学特性を改良した凍結抑制舗装に関する検討 土木学会北海道支部論文報告集，第63号，2007.
- 4) 早坂保則，岳本秀人：積雪寒冷地におけるグルーピング工法の効果について，土木学会舗装工学論文集，pp.261-269，2008.
- 5) 増山幸衛，片山潤之介，草刈憲嗣，岩井茂雄，寺田剛 解析方法の違いを考慮したテクスチャの評価に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第9巻，pp.231-239，2004.
- 6) 土木学会：舗装工学ライブラリー4，環境負荷軽減の評価技術，pp.120-122，2007.
- 7) 菊地陽介，武市靖 理論解析によるグルーピング系舗装とゴムロード舗装の氷板剥離効果に関する検討，土木学会北海道支部論文報告集，第64号，2008.
- 8) N. P. Lasca., et al: A Data Acquisition System for Testing the Mechanical Properties of Ice, Geotechnical Testing Journal, Vol.3, No.1, pp.3-7, 1980.
- 9) 竹下春見：竹下春見博士遺稿集，pp.258，1967.
- 10) Malcolm Mellor, David M. Cole: DEFORMATION AND FAILURE OF ICE UNDER CONSTANT STRESS OR CONSTANT STRAIN-RATE, Cold Regions Science and Technology, pp.201-204, 1981.
- 11) 土木学会：舗装工学ライブラリー3，多層弾性理論による舗装構造解析入門，pp.69-104，2005.