

1. はじめに

積雪寒冷地のみならず全国各地の空港においては、冬期間、滑走路、誘導路、エプロンの航空機走行区域に5cmを超える程度の積雪があると航空機の安全運航に支障となることから、除雪作業が行われるよう規定されている。除雪作業を円滑に実施するための規定はすでに整備されているところである。

空港除雪は、舗装表面を完全に露出（ブラックトップ化）させることが原則であったり、除雪作業時間が短い、除雪の必要面積が広いこと等、道路の除雪とは大きく異なっている。除雪作業は除雪（排雪）作業と除氷作業に分けられる。除雪（排雪）作業は、スノースィーパー、スノーブラウ、ロータリ除雪車等の除雪機械を使用して行われる。また、除氷作業としては、路面が凍結もしくはその恐れがある場合に凍結防止剤を散布するものがある。

施設面での対応としても、グルーピングが防雪に役立つことが認められたことから、滑走路のみならず、誘導路にも施工するといったものがある¹⁾。しかし、このような工夫によっても舗装上の積雪を完全には排除できず、除雪作業が必須のものとなっている。

このほかの施設面からの対応策としては凍結抑制舗装と融雪装置がその候補と考えられる。このうち、前者については、空港における航空機等の交通量が道路における車両の交通量と比べて著しく少ないことから、その効果については大きいものとは考えにくい。そこで、本研究においては、融雪装置を取り上げて、その効果について基本的な検討を加えることにした。

2. 空港での融雪対策

2.1 道路舗装における融雪・除雪対策

道路においても、積雪による交通障害が発生する。道路交通の安全性を確保するために、図-1に示すような種々の方策が試みられている^{2), 3)}。これをハード、すなわち施設という面からみると、スノーシェッド、消雪施設等の防雪施設と、路床・路盤改良、凍結抑制舗装等の凍雪害防止施設の二つがある。また、ソフト面、すなわち役務という面から見ると、除雪、凍結防止、スリップ防止作業等がある。実際には、両者が適切に組み合わせられて冬季の道路交通の安全確保が図られている。

これらの方策のうち、空港に適用可能なものとしては、ハード面では消雪装置や凍結抑制舗装の導入、路床・路盤改良の実施、ソフト面では、除雪、凍結防止、スリップ防止作業の実施といった方策がある。

ハード面での対策である消雪装置には、舗装を暖めるロードヒーティングと舗装面に散水する消雪パイプがある。前者は融雪装置と一般的には称され、電熱線に通電するもの、パイプ内に温水を通すものがある。また、凍結抑制舗装は、凍結抑制材、塩化物、粒状ゴム等をアスファルト混合物に混入するといったことにより、舗装自体に凍結抑制機能を付与したものである。これにより凍結防止剤や摩擦材散布量の削減、除雪作業の効率化等が期待できるものの、その効果は消雪施設や凍結防止剤の散布には及ばない。なお、路床・路盤改良は凍上を防止するために路盤や路床土を凍上しにくい材料で置換える方法であり、空港においても凍上の危険性の高い場合を対象としてすでに基準化されている。

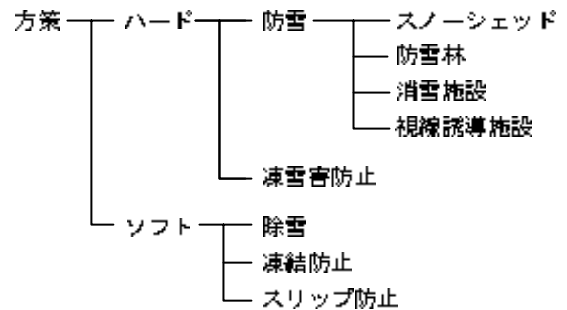


図-1 冬季の道路交通安全確保方策

ソフト面での対応である除雪は機械的除雪、すなわちグレーダやロータリ車等による方法が一般的であり、空港においても通常使用されている。また、凍結防止は、薬剤を道路に散布することにより凍結温度を下げて道路表面での水分の凍結を防ぐという方法である。薬剤としては塩化カルシウム、塩化ナトリウムといったものが用いられている。そして、車両走行時のスリップを防止するための方法としては、砂を道路上に散布することにより、タイヤの道路表面上でのすべり抵抗を高めるものが用いられている。

2.2 空港舗装の融雪対策

空港においては、ソフト面での対応は以前から行われているものの、積雪・降雪時の交通障害の発生が避けられないことから、さらなるハード面での対応も一部では必要と考えられている。道路で採られている上記の対策のうち、凍結抑制舗装は、空港における航空機等の交通量が道路における車両の交通量と比べて著しく少ないことから、空港への適用性は小さいと考えられる。これに対して、消雪装置は、そのような問題もなく、空港への適用性は大きいと考えられる。

消雪装置は、上記のように、自然エネルギーや化石エネルギーを熱源として利用して舗装を暖めることで融雪する無散水方式と、地下水などを舗装面に散水することにより融雪する散水方式に大別される。後者は、散水した水が凍結を起こす可能性があることから、気温が低すぎる地域への適応は難しく、今回の対象からははずれる。前者には温水を循環する循環パイプ方式、パイプ内で熱を伝達するヒートパイプ方式、電力を利用する発熱体方式、遠赤外線を照射する熱照射方式といったものがある。このうち、ヒートパイプ方式はパイプにある程度の勾配が必要であること、熱照射方式は地上構造物（ポール）の設置が必要になることから対象から除外される。したがって、今回の検討の対象となるのは循環パイプ方式と発熱体方式になる。

循環パイプ方式（温水パイプ方式）は舗装内に埋設したパイプ内に温水を循環するものである。パイプには鋼管と樹脂管があり、鋼管には炭素鋼鋼管やステンレス鋼管などが、樹脂管にはポリブデン管や特殊ナイロン管などが用いられる。ボイラーやヒートポンプにより水温が高くできる場合には鋼管または樹脂管のいずれか、地下水など水温が低い場合には熱伝達の良い鋼管が選定されることが多い。

発熱体方式（電熱線方式）は舗装内に埋設した発熱体に通電するものである。発熱体には、通常の電熱ロードヒーティングに利用される発熱線や鋼管発熱式ヒータ等がある。一般的に使用される発熱線は、鋼ニッケル合金を導体とし、絶縁体とシースにより被覆されている。発熱線は一般的に5～10cm間隔で設置され、単位面積あたりの定格出力は200～300W/m²となっている。これらは気象条件や融雪面積に合わせて選定される。

本研究においては、上記の検討結果に基づき、無散水方式による融雪装置を導入することが、空港基本施設の積雪による交通障害を防ぐための方策として有効であると考えた。具体的な融雪装置は、温水パイプ方式ならびに電熱線方式の二つである。前者は、外径17mm、内径13mmの特殊耐熱用ナイロン樹脂管を表・基層内に埋設し、ヒータにより温度を調節した不凍液を通水・循環させるものである。また、後者は、導体抵抗が0.522Ωである発熱線を表層もしくは基層内に埋設して、通電させるものである。

これらの融雪装置の空港舗装への適用性を考える場合には、これらが道路舗装において十分な耐久性を有していることがわかっているため、道路上を走行する車両に比べてはるかに重い航空機荷重に対する耐荷性・耐久性に関して検討する必要があると考えた。そこでまず、

小型供試体を用いた室内試験を行って、アスファルトコンクリートの熱的性質を把握するとともに、二種類の融雪装置を埋設したアスファルトコンクリートの力学的性状について検討した。次に、融雪装置を埋設した実大規模のアスファルト舗装を製作し、これに対して、実物大の繰り返し荷重を加えることによってその挙動を調べ、この種の舗装が妥当なものであるかを検討した。

3. 室内試験の方法

融雪装置の種類と設置深さを変えた場合の必要温度ならびに融雪装置の導入に起因するアスファルトコンクリートの力学的挙動の変化について明らかにするために、室内試験を実施した。

3.1 室内試験の種類

小型供試体を使用した試験は舗装内部温度変化試験と走行載荷試験の二種類である。

(1) 舗装内部温度変化試験

融雪装置を埋設したアスファルトコンクリート供試体を用い、融雪装置を稼働させたときに供試体の温度が変化する状況を調べた。

供試体寸法は、縦・横・厚さとも300mmであり、融雪装置の埋設位置はその底面位置が表面から50mm、100mm、160mmである（温水パイプ、電熱線とも）。これは、それぞれ、基層（上層）、基層（下層）、路盤施工後に融雪装置を据え付けることを想定したものである。供試体の側面図（温水パイプ・電熱線共通）を図-2に、平面図を図-3に示す。

融雪装置の通水、通電方法は、供試体ならびに雰囲気温度を-10℃とし、表面温度が1℃となるように設定した。融雪装置の稼働後における供試体の温度変化の状況を把握するために、熱電対を設置した。熱電対の設置位置として、融雪装置が温水パイプで、その埋設深さが160mmの場合を例にとって図-4に示した。試験条件については表-1にまとめた。

(2) 走行載荷試験

(1)の舗装内部温度変化試験と同様に、融雪装置を埋設したアスファルトコンクリート供試体を用いて、舗装上を航空機が繰り返し走行する場合を想定した走行載荷試験を実施した。

供試体寸法ならびに融雪装置とその埋設位置は(1)と同じである。この供試体に対して、空港舗装対応型ホイー

ルトラッキング試験を実施した。载荷車輪の接地圧は1.38MPa, 走行速度は20cm/sとし, 最大5,040回まで繰返し走行载荷を与えた。車輪の走行位置は供試体中心線上であり, 走行方向は供試体の転圧方向と同一である。

試験は, 供試体ならびに雰囲気温度を表-2に示すよう

に設定して実施した。なお, 温度が-10 の場合には融雪装置を稼働させ, 供試体中央の表面温度がほぼ1 に到達した時点で繰返し走行を実施した。また, 高温時の試験においては試験装置の制約上最大走行回数到達前に走行を打ち切らざるを得ない場合もあった。

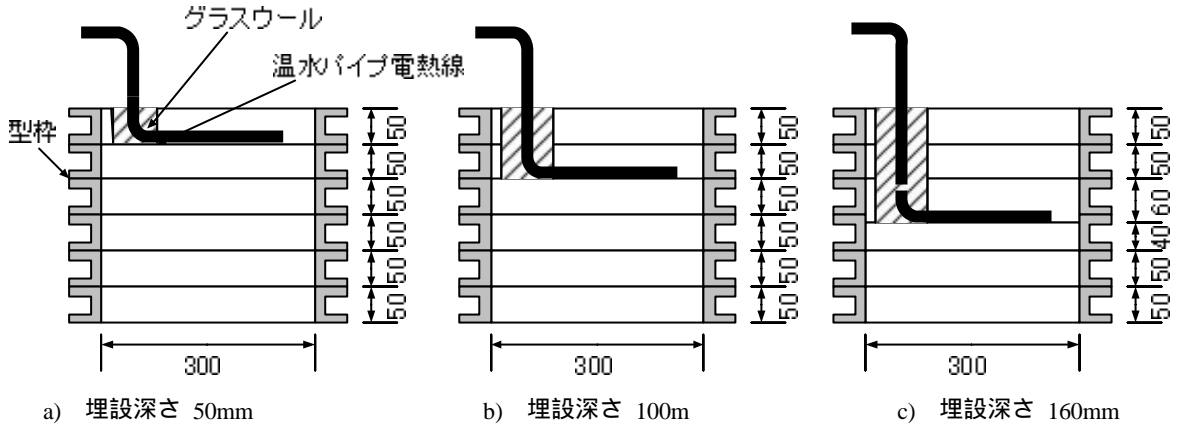
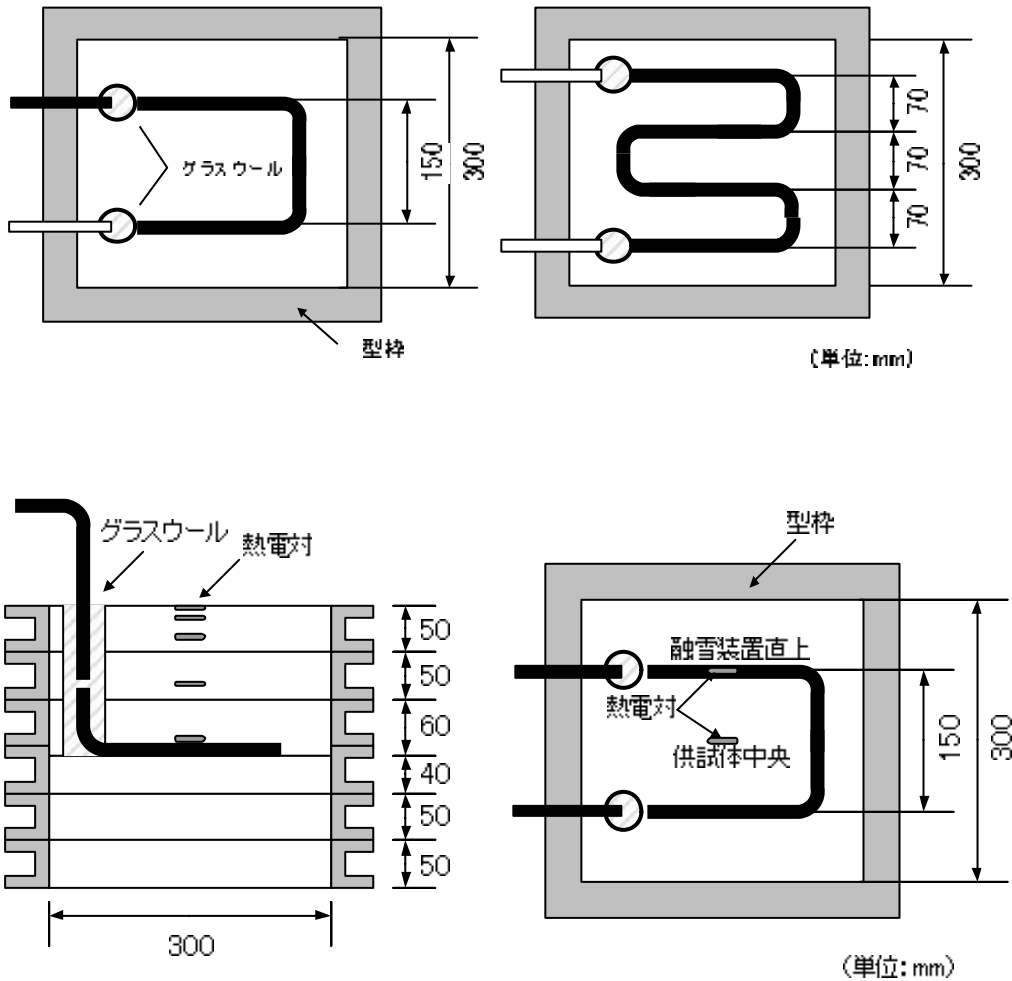


図-2 室内試験用供試体(側面図)



a) 側面図

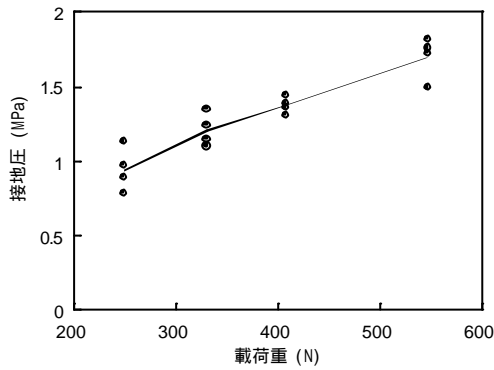
b) 平面図

図-4 熱電対設置位置(温水パイプ方式, 埋設深さ160mm)

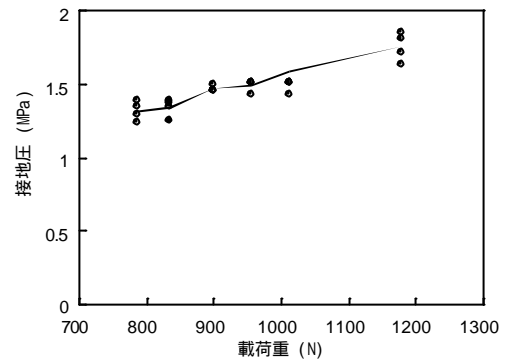
表-1 舗装内部温度変化試験の条件

融雪方式	埋設深さ (mm)	熱電対埋設深さ (mm)					
		供試体中央		融雪装置直上			
温水パイプ	50	0	0	10	33*		
	100	0	0	10	30	60	83*
	160	0	0	10	30	85	143*
電熱線	50	0	0	10	30	41*	
	100	0	0	10	30	60	91*
	160	0	0	10	30	85	151*

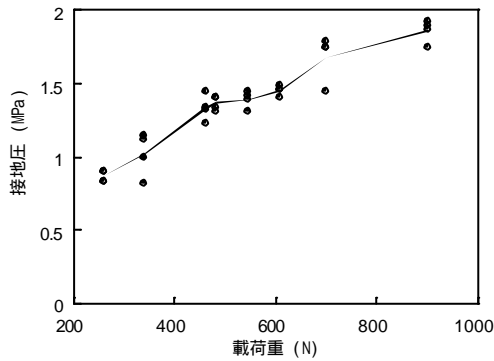
*融雪装置の上面位置



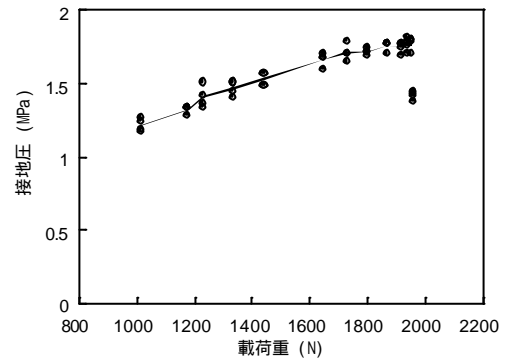
a) 供試体温度-10



c) 供試体温度20



b) 供試体温度1



d) 供試体温度40

図-5 車輪載荷重と接地圧

表-2 走行載荷試験の条件

融雪方式	埋設深さ (mm)	試験温度 ()
なし	-	-10, 1, 20, 40
温水パイプ	50	-10, 1, 20, 40
電熱線	100, 160	-10, 40

表-3 温度別の車輪載荷重

温度 ()	-10	1	20	40
載荷重 (N)	410	550	850	1200

試験中に供試体の温度が変化することを防止するため、供試体を入れた型枠の周囲には断熱材（厚さ12mm）を巻きつけた。各設定温度において車輪に加える荷重と車輪の接地面積を測定することにより、所定の車輪の接地圧を確保した。具体的には、図-5に示した供試体温度を-10、1、20、40としたときの車輪載荷重と接地圧の関係に基づいて、車輪載荷重は表-3に示すようになった。

試験開始から終了までの間、供試体の縦断方向の変形状況を調べた。また、試験開始前ならびに所定の走行回

表-4 試験に用いた骨材

項目		6号碎石		7号碎石		スクリーニングス		細砂		石粉	
		硬質砂岩		硬質砂岩		硬質砂岩		洗砂		石灰岩	
		測定値	規格	測定値	規格	測定値	規格	測定値	規格	測定値	規格
通過質量百分率	粒径(mm)										
	19.0	100	100								
	13.2	94.6	85~100	100	100						
	4.75	5.9	0~15	90.3	85~100	100	100	100			
	2.36	0.8		6.4	0~25	92.6	85~100	99.6			
	1.18			1.8	0~5	68.4		96.0			
	0.60			0.8		41.8	25~55	84.4		100	100
	0.30					33.4	15~40	50.2			
	0.15					24.4	7~28	9.1		99.3	90~100
	0.075					17.2	0~20	3.4		77.7	70~100
表乾比重		2.647	2.45以上	2.667	2.45以上	2.664		2.558			
かさ比重		2.631		2.649		2.641		2.488			
見掛比重		2.674		2.697		2.704		2.677		2.720	2.60以上
吸水率(%)		0.62	3.0以下	0.68	3.0以下	0.88		2.84			
ロサンゼルスすり減り減量(%)		14.1	35以下								
安定性(%)		2.8	12以下	3.3	12以下	2.6	12以下	2.2	12以下		
水分(%)										0.04	1.0以下

表-5 使用したアスファルトの性状

項目	測定値	規格	
針入度 (25 , 1/10mm)	68	60~80	
軟化点 ()	47	44~52	
伸度 (15 , cm)	+150	100以上	
トルエン可溶分 (%)	99.8	99以上	
引火点 ()	330	260以上	
薄膜加熱	質量変化率 (%)	0.1	0.6以下
	針入度残留率 (%)	58.8	55以上
蒸発後の針入度比 (%)		100	110以下
密度 (15 , g/cm ³)		1.031	1.000以上
動粘度 (mm ² /s)	120	727	
	150	183	
	180	65.4	

表-6 骨材の配合割合

骨材の種類	6号	7号	SC	細砂	石粉
配合割合 (%)	35	22	27	14	2

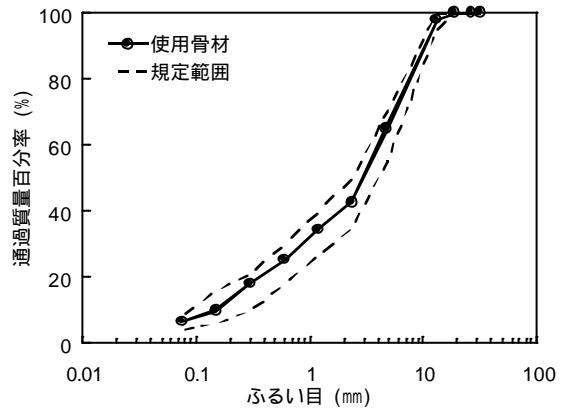


図-6 骨材の合成粒度

数時には、横断形状を3測線で計測するとともにひび割れの有無について観察した。

3.2 供試体の作成

(1) 使用材料

試験に用いた骨材は、表-4に示すとおりであり、空港土木工事共通仕様書⁴⁾(以下、共通仕様書と称す)の規

格を満たすものであった。

アスファルトは、ストレートアスファルト60/80を使用した。その試験成績を表-5に示す。

(2) アスファルトコンクリートの配合設計

骨材の粒度については、共通仕様書のアスファルトコンクリートの基本施設表層の粒度範囲のほぼ中央とな

るように調整した。その結果、骨材の配合割合は表-6のようになった。そのときの合成粒度は図-6である。

アスファルト量を5点変化させて材料を練り混ぜ、突固め回数75回（両面）の条件で供試体を作製して、マーシャル安定度試験を実施した。そして表-7に示す項目の規格を満足する共通範囲の中央値を最適アスファルト量（OAC）とした。マーシャル安定度試験の結果を示した図-7から、OACは5.8%となった。

(3) 融雪装置

融雪装置としては、2.で述べたように、道路等で一般的に使用されている温水パイプ方式ならびに電熱線方式の2つを用いた。

今回用いた温水パイプ方式では、外径17mm、内径13mmの特殊耐熱用ナイロン樹脂管を表層もしくは基層内に埋設し、ヒータにより温度を調節した不凍液を通水・循環させている。

また、電熱線方式では、導体抵抗が0.522 である発熱線を表層もしくは基層内に埋設し、通電させている。

4. 室内試験の結果

4.1 融雪装置による舗装内温度の変化

表層、基層ならびに上層路盤にアスファルト混合物を用いた舗装に融雪装置を深さを変えて設置した場合に必要な融雪装置の温度について検討した。また、融雪装置を設置したことによる供試体の力学的挙動の変化についても調べた。

(1) 供試体温度の変化状況

供試体ならびに雰囲気温度が-10 の場合で、融雪装置を稼働させたときの供試体内部の温度変化の状況を図-8（温水パイプ方式）、図-9（電熱線方式）に示した。これらの融雪装置の作動条件は、上記のように供試体中央の表面温度が1 となるように、従来の経験に基づいて定めたものである。

表-7 マーシャル安定度試験における規格

項目	規格値
安定度 (kN)	8.80以上
フロー値 (1/100cm)	20 ~ 40
空隙率 (%)	2 ~ 5
飽和度 (%)	75 ~ 85
残留安定度 (%)	75以上

注) 供試体突固め回数75回（両面）

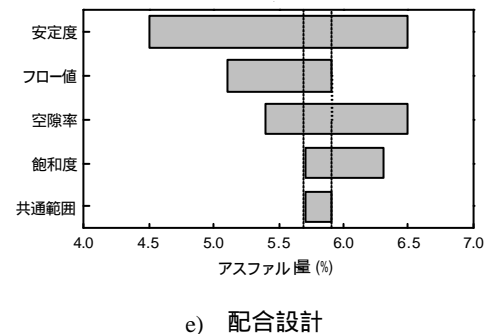
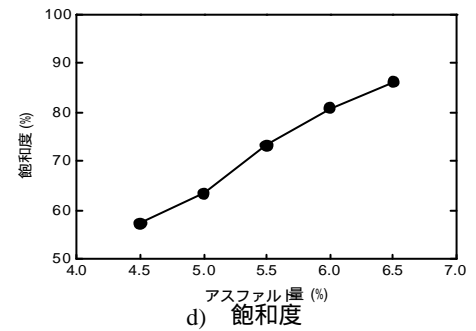
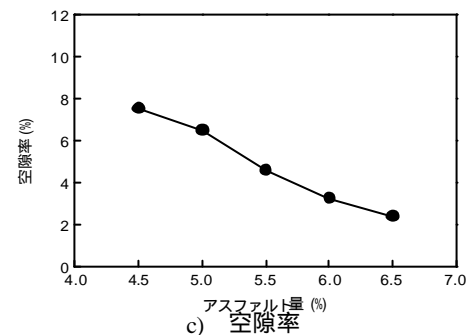
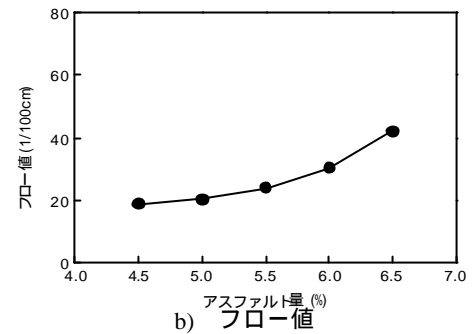
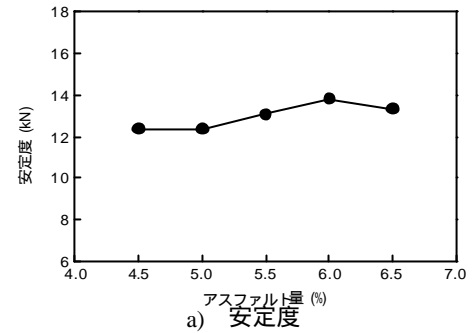
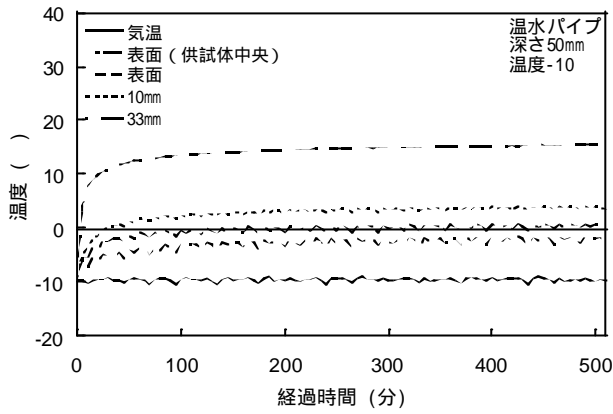
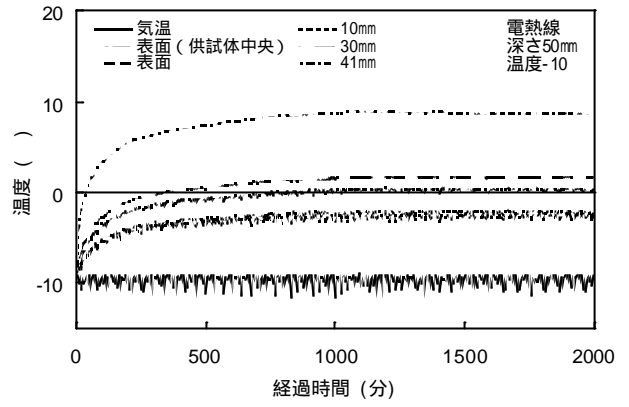


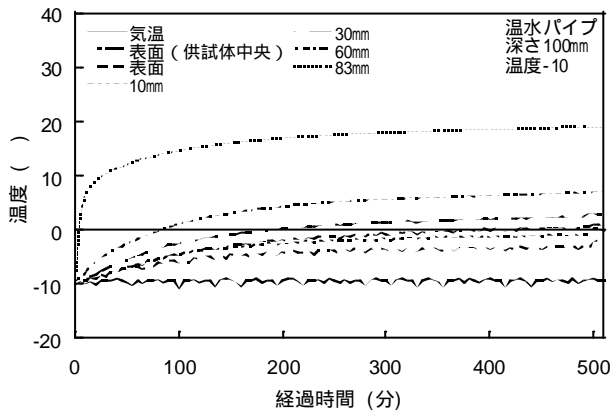
図-7 マーシャル安定度試験の結果



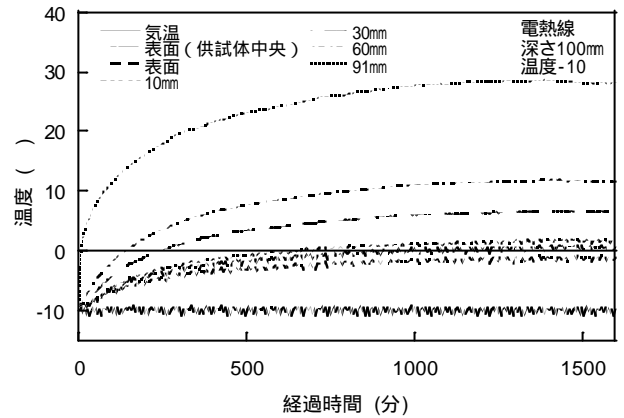
a) 埋設深さ50mm



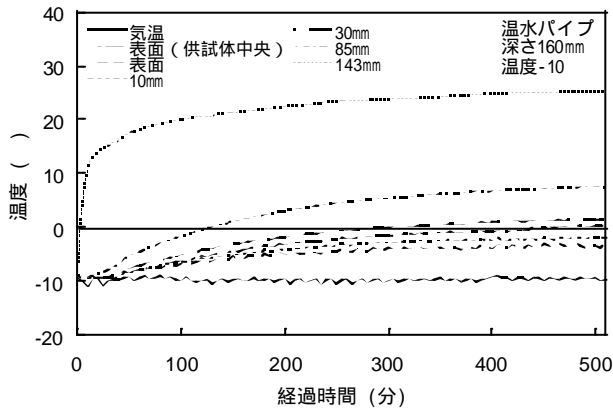
a) 埋設深さ50mm



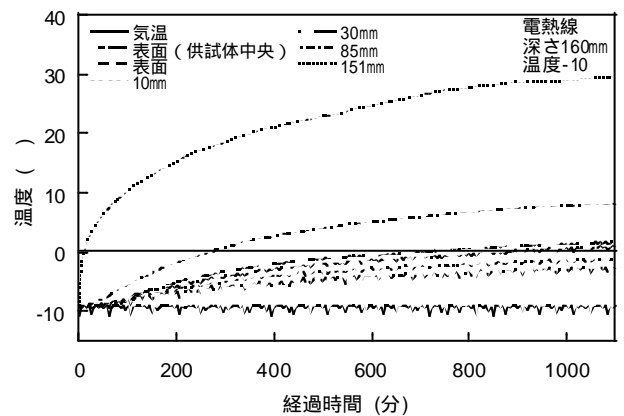
b) 埋設深さ100mm



b) 埋設深さ100mm



c) 埋設深さ160mm



c) 埋設深さ160mm

図-8 温水パイプ方式による供試体内部の温度変化

図-9 電熱線方式による供試体内部の温度変化

当然ではあるが、融雪装置の埋設位置が深いほど融雪装置自体の温度を高くしなければならないことがわかる。舗装表面温度は必ずしも当初設定したとおりにはならなかったが、今回の試験結果からみると、電熱線方式のほうがそれ自体の温度を高くする必要があるとの傾向が

ある。また、舗装内の温度が定常状態に到達するまでに必要となる時間に差がみられ、電熱線方式のほうが時間を要するとの傾向が明らかである。これには、融雪装置の形状や配置方法といった点が影響しているものと考えられる。

(2) 室内試験結果の数値解析

a) 解析方法

融雪装置を動作させた場合の熱伝導解析を行った(三次元有限要素法による定常電熱解析)。これは、(1)に示した室内試験で得られたデータからアスファルトコンクリートの熱伝導率を逆算して求めることを目的としている。この解析を融雪装置が50mm, 100mm, 160mmの深さに埋設した場合について行い、舗装表面が融雪に必要な温度(1)になるために必要な融雪装置の温度を求めた。

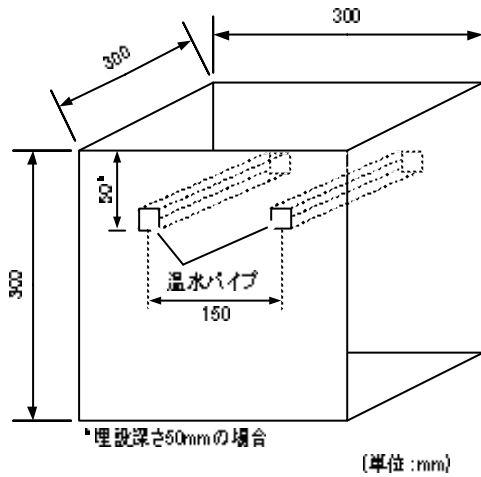


図-10 有限要素解析に用いたモデルの例

温水パイプを対象とした有限要素解析に用いたモデルは図-10(温水パイプ埋設深さ50mmの場合)のとおりである。舗装周囲の外気温度としては室内試験と同じ-10とし、表面を除く5面では熱の出入りがないものとした。解析を行う際に必要となる舗装表面の熱伝達係数については、様々な計算方法があるが、ここではユルゲスによる(1)式を用いた。室内試験のため平均風速は0m/sとなることから、舗装表面の熱伝達係数は $6.2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ となる。なお、舗装表面温度としては、融雪装置の中間地点の直上、すなわち供試体表面の中央地点のものをを用いた。

$$c = 4.2v + 6.2 \quad (1)$$

ここに、 c : 熱伝達係数($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$),

v : 平均風速(m/s) .

表-8 解析に用いた温度データ(温水パイプ方式)

a) 温水パイプ

経過時間(分)	埋設深さ(mm)		
	50	100	160
490	15.5	18.9	25.3
495	15.6	18.8	25.2
500	15.5	18.8	25.3
505	15.5	18.8	25.3
510	15.5	18.8	25.2
平均	15.5	18.8	25.3

(単位:)

b) 舗装表面

経過時間(分)	埋設深さ(mm)		
	50	100	160
490	0.8	0.5	0.2
495	0.3	0.6	0.2
500	0.7	1.0	0.3
505	0.6	0.9	0.3
510	0.2	0.7	0.5
平均	0.5	0.7	0.3

(単位:)

表-9 解析に用いた温度データ(電熱線方式)

a) 電熱線

経過時間(分)	埋設深さ(mm)		
	50	100	160
1090	9.0	27.9	29.4
1095	8.9	27.9	29.5
1100	9.0	27.9	29.6
1105	8.9	27.9	29.6
1110	8.9	28.0	29.6
平均	8.9	27.9	29.5

(単位:)

b) 舗装表面

経過時間(分)	埋設深さ(mm)		
	50	100	160
1090	0.3	0.2	0.7
1095	0.5	0.4	0.9
1100	0.0	-0.1	0.8
1105	0.4	0.5	1.0
1110	0.3	-0.1	0.7
平均	0.3	0.2	0.8

(単位:)

b) 解析結果

入力となる温度データについては、融雪装置ならびに表面温度がほぼ一定となったときのものを用いた。具体的には、温水パイプ方式の場合で通水後490～510分の平均値を、電熱線方式の場合で通電後1,090～1,110分の平均値を用いた。具体的な値は表-8、表-9に示した。解析では、まずこの表に示した融雪装置の温度をその位置に相当する節点に温度として入力し、熱伝導率を種々に仮定して、計算を繰り返し、舗装表面温度がこの表に示した温度になるときのものを熱伝導率として同定した。得られた熱伝導率を表-10に示した。

表-10 埋設深さが異なる場合の熱伝導率

a) 温水パイプ	
埋設深さ(mm)	熱伝導率 (W/m・K)
50	0.33
100	0.41
160	0.43

b) 電熱線	
埋設深さ(mm)	熱伝導率 (W/m・K)
50	0.38
100	0.23
160	0.38

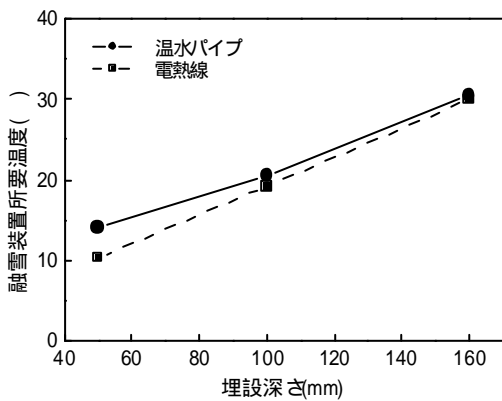


図-11 融雪装置の所要温度

表-10で得られた熱伝導率の平均値を使用して、舗装表面温度を1にするために必要となる融雪装置の温度を求めた。その結果を図-11に示す。これにより、融雪装置の埋設深さを任意の位置とした場合に必要となる温度が求められる。

4.2 融雪装置が表・基層の挙動に及ぼす影響

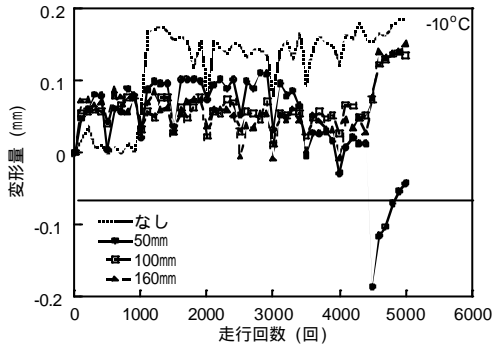
融雪装置を設置した供試体に繰返し走行載荷を実施した場合の力学的挙動について、それを設置しない場合と比較することにより検討した。

図-12、図-13は走行載荷試験中に変形量（供試体表面の最大累積変位）が変化する状況を示している（それぞれ温水パイプ方式、電熱線方式）。雰囲気温度が40で電熱線を160mmの深さに設置した場合は融雪装置のないものと比較すると変形量は大きいですが、これを除けば融雪装置を導入することによって変形が促進されるような傾向は認められない。なお、これらの試験では、所定の回数時に載荷を中断して横断形状を計測したので、図には一時的に変形量が回復するような状況がみられている。

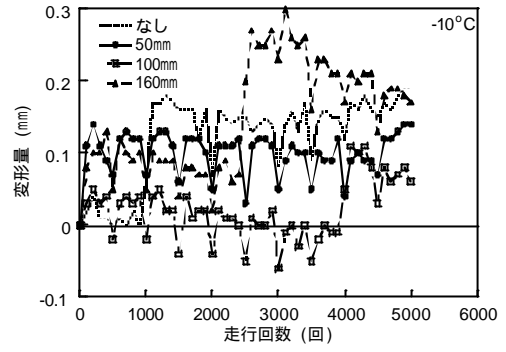
走行載荷試験終了時の車輪走行位置における最大変形量を図-14にまとめた。いずれの温度条件においても、融雪装置を導入した場合の最大変形量は、導入しない場合に比較すると同等かもしくは若干小さくなっていることがわかる。

図-15には動的安定度を示した。この場合も、最大変形量と同様に、融雪装置を設置することによる影響はほとんど認められない。温水パイプ方式、電熱線方式とも、融雪装置の埋設位置が深いほど動的安定度が小さくなる傾向がみられる。また、電熱線方式の場合には、これを設けない場合に比べて動的安定度が1～2割小さいこともわかる。

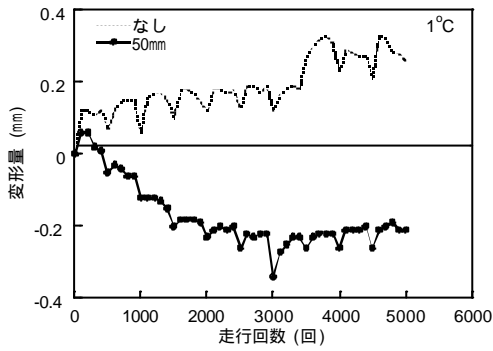
なお、ひび割れに関してはいずれの場合も発生が認められていない。



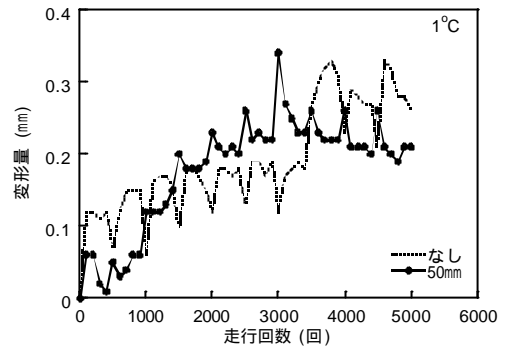
a) 雰囲気温度-10



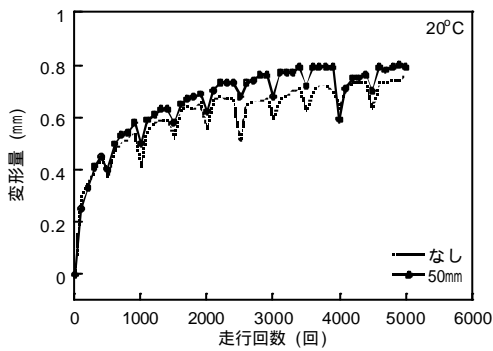
a) 雰囲気温度-10



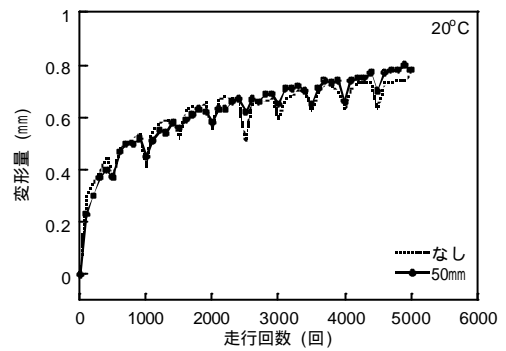
b) 雰囲気温度1



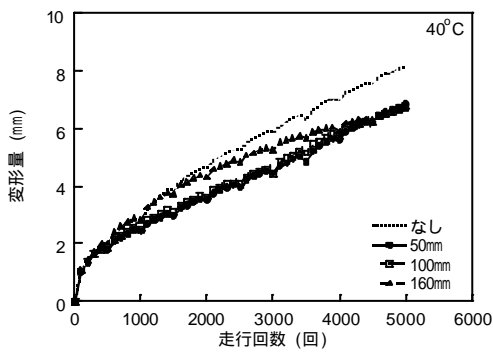
b) 雰囲気温度1



c) 雰囲気温度20

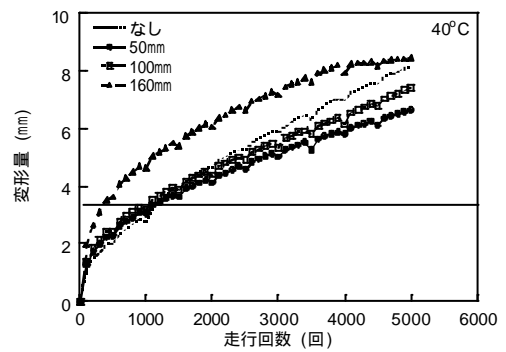


c) 雰囲気温度20



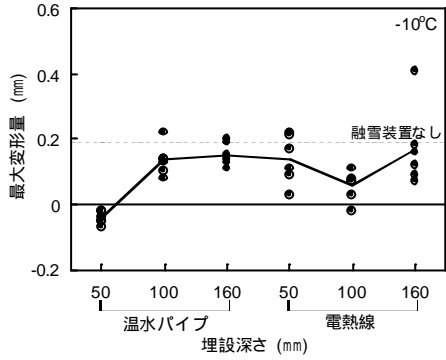
d) 雰囲気温度40

図-12 温水パイプ方式の変形量

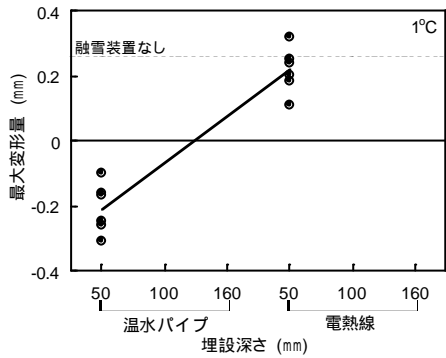


d) 雰囲気温度40

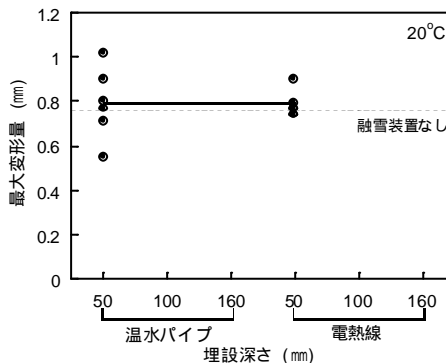
図-13 電熱線方式の変形量



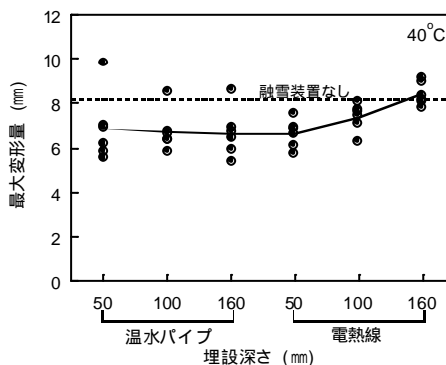
a) 雰囲気温度-10



b) 雰囲気温度1

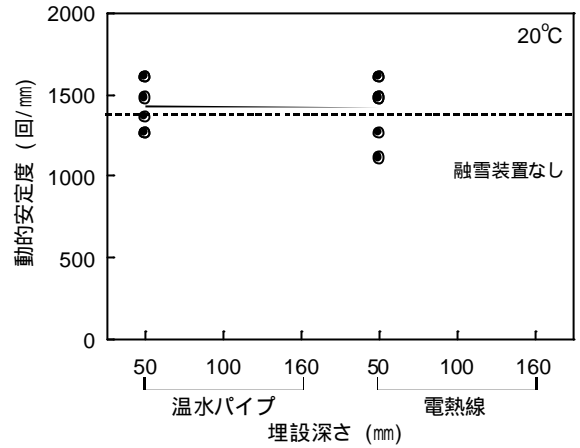


c) 雰囲気温度20

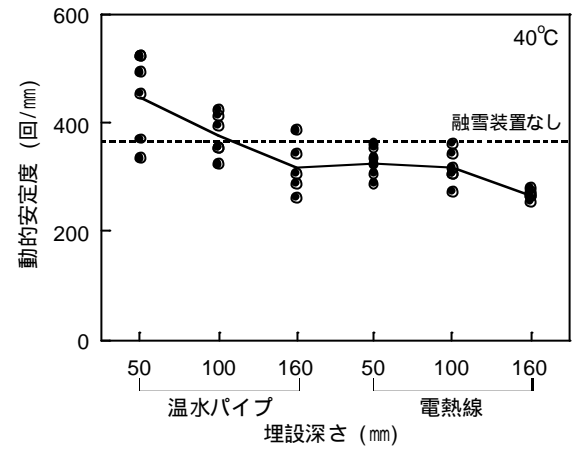


d) 雰囲気温度40

図-14 融雪装置を設置した供試体の最大変形量



a) 雰囲気温度20



b) 雰囲気温度40

図-15 融雪装置を設置した供試体の動的安定度

5. 実大規模試験の方法

融雪装置を設置した舗装に繰返し走行荷荷を行い、融雪装置を設置していない通常の舗装の場合との表面形状の違いを調べた。

5.1 試験舗装の構成

(1) 試験舗装の構造

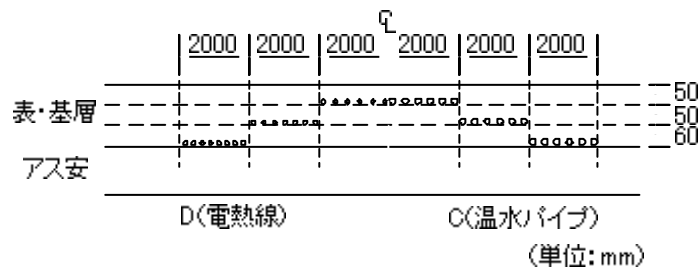
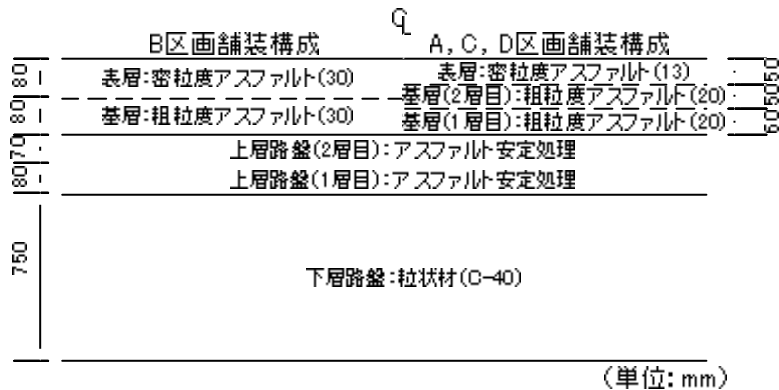
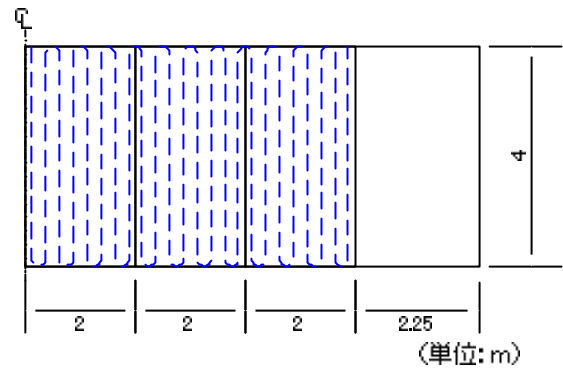
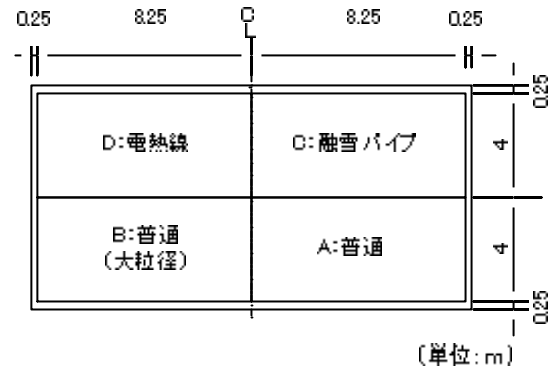
国土技術政策総合研究所の原型荷重実験槽に製作した試験舗装の構造は、その平面図を図-16に示すように、A～Dの4区画から構成されている（D区画はC区画と左右対称）。各区画とも幅4m、長さ8.25mの大きさである。このうち、C、D区画には融雪装置を設置した。具体的には、C区画には温水パイプを、D区画には電熱線を設置した。これらの比較対象となる、融雪装置を埋設してい

い通常のものはA区画である。

試験舗装の構造は図-17に示すとおりである。A~D区画とも、路盤は共通であり、上層路盤は15cm厚のアスファルト安定処理材、下層路盤は75cm厚の砕石である。表層と基層はA, C, D区画とB区画で異なる。A, C, D区画には、表層に密粒度アスファルトコンクリート（5cm厚）、基層に粗粒度アスファルトコンクリート（厚さは上層5cm, 下層6cm）を、B区画には表層、基層とも最大粒径30mmの骨材による密粒、粗粒アスファルトコンクリート（厚さはいずれも8cm）を用いた。なおB区画は、本研究の対象とはならないことから、以下では言及しない。

(2) 舗装材料

A, C, D区画の表層ならびに基層アスファルトコンクリートは、共通仕様書の規格を満たすものを使用した。表層の場合には、骨材として基本施設の表層タイプ（最大粒径13mm）を、アスファルトとしてストレートアスファルト60/80を使用した（マーシャル試験に対する規格値は共通示方書記載の基本施設 表層）。基層の場合には、骨材として基層、アスファルトとしてストレートアスファルト60/80を使用した（マーシャル試験に対する規格値は共通示方書記載の基本施設の 基層）。



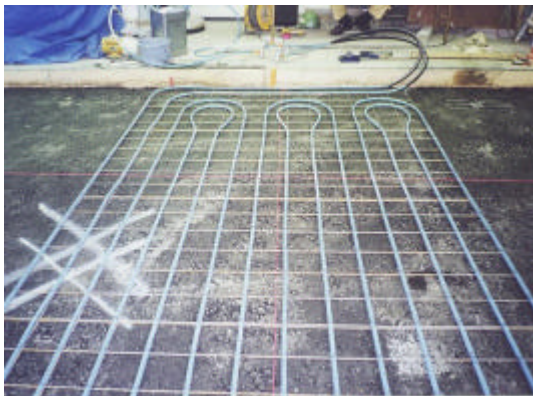
上層路盤のアスファルト安定処理材は、共通仕様書記載の規格である基本施設タイプAを満足するものである。アスファルトとしてはストレートアスファルト60/80を使用した。

下層路盤の砕石は、共通仕様書の規格を満たす、下層路盤材料のタイプAのものを使用した。

舗装に荷重を加えた場合に舗装内部に生ずる応力を計測するために、A区画の下層路盤に土圧計を設置した。平面的にはA区画の中心線上で、深さとしては下層路盤の上面ならびに中間面と路床上面である。また、アスファルトコンクリート層の温度を計測するために、表層、基層と上層路盤内に熱電対を設置した（舗装表面ならびに表面から50, 100, 160, 230, 310mmの深さ）。

(3) 融雪装置

融雪装置としては、上記のように、C区画には温水パイプ、D区画には電熱線を用いた。いずれも、上層路盤、基層下層、基層上層施工後に設置した。すなわち、舗装表面から融雪装置底面までの深さは50, 100, 160mmである。写真-1にはそれらの設置状況を示してある。



a) 温水パイプ



b) 電熱線

写真-1 融雪装置の設置状況

融雪装置として使用したものは、室内試験に用いたものと同様である。ただし、後述する載荷試験中には通水もしくは通電はしていない。

5.2 載荷試験

試験舗装に対して航空機荷重による繰返し走行載荷を行った。試験前ならびに所定の走行回数時には静的載荷試験とFWD載荷試験を実施した。

(1) 走行試験

2.3 試験方法

原型載荷実験槽に備え付けられてある自走式走行載荷試験装置を用いて、試験舗装に対して繰返し走行載荷試験を行った。自走式走行載荷装置は、B747型航空機の主脚と同等のもので、荷重は910kNである。なお、走行速度は5km/hである。

走行位置は図-18に示すように、A-B区画上の走行線Aと、C-D区画上の走行線Bの2箇所である。それぞれの走行線上で自走式走行載荷試験装置を10,000回まで走行させた。

この繰返し走行は、2つの走行線上で所定の回数を交互に実施することにより行った。具体的には、走行線Aにおいて所定回数まで走行させた後に、走行線Bにおいて同様に走行させ、静的載荷試験、FWD載荷試験ならびに表面形状測定を実施するというものである。所定の回数は、50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 3,000, 5,000, 7,000, 10,000回（それぞれ0, 25, 50, 100, 250, 500, 1,000, 1,500, 2,500, 3,500, 5,000往復）である。

b) 計測項目と計測方法

走行載荷試験中、所定の走行回数時に舗装表面の動的変位、表面形状（縦横断）ならびに舗装内の土圧を計測した。なお、舗装の温度も計測している。

動的変位の計測は、表面変位計3台を用いて、走行線の近傍において所定の走行回数の直前に1回行った。変位計の設置位置を図-19に示す。

表面形状については、デジタルプロフィールメータおよびコンベックスにより、縦断方向ならびに横断方向に計測した。測定間隔は、前者の場合で縦断、横断方向とも1cm、後者では縦断方向10cm、横断方向5cmである。これは試験前と所定の回数到達後に、1区画あたり縦断、横断方向とも3測線で行った。測定位置を図-19に示す。

土圧の測定は、走行載荷試験中の所定の走行回数時に行った。土圧計はA区画のみに埋設してある。

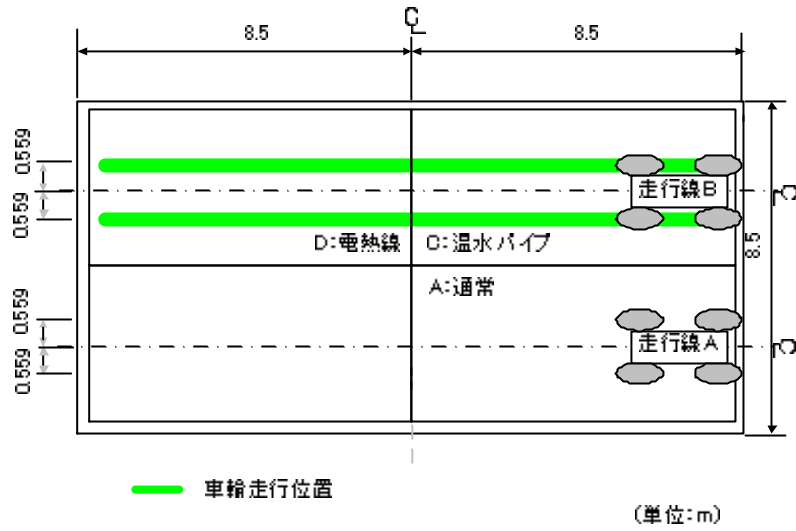
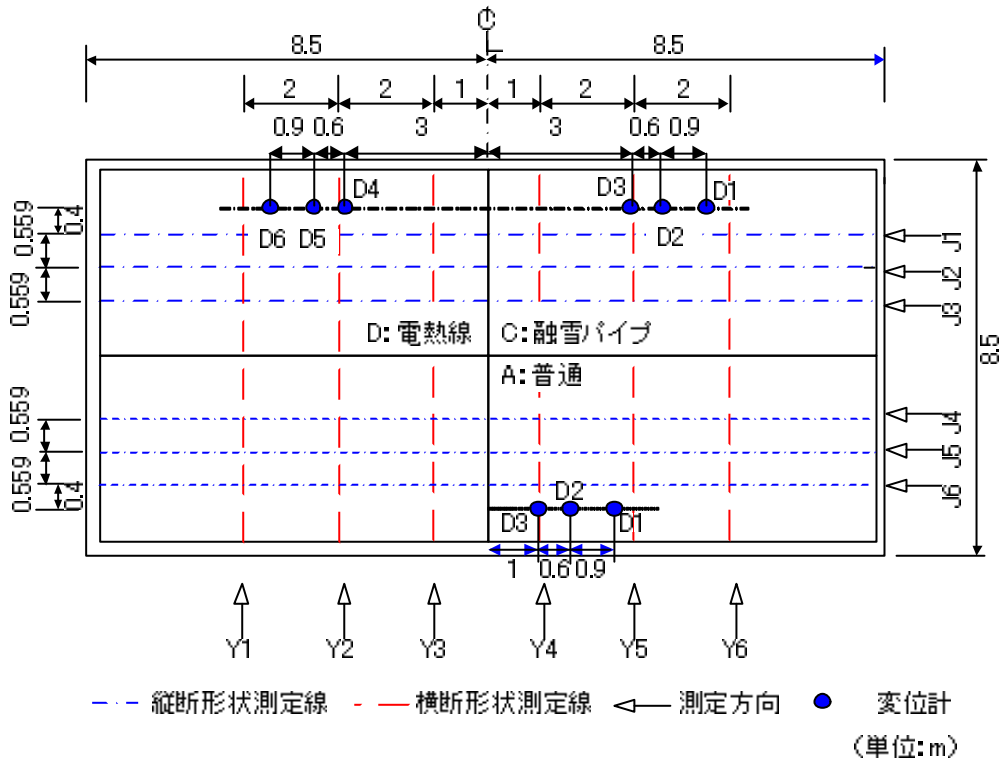


図-18 繰返し走行荷試験の位置



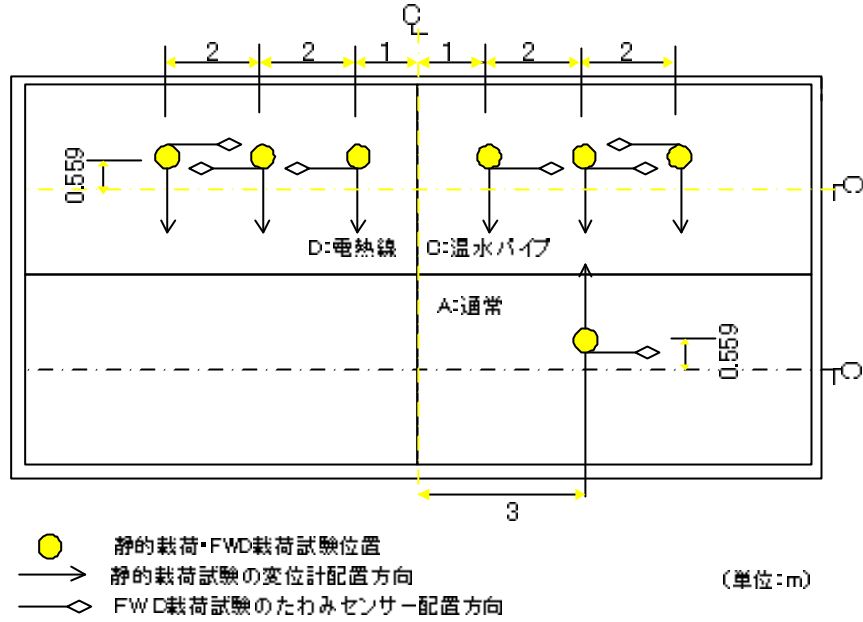


図-20 静的載荷・FWD載荷試験位置図

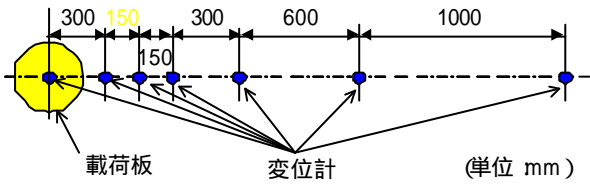


図-21 静的載荷試験とFWD載荷試験での変位測定位置

b) 計測項目と計測方法

静的載荷試験では、荷重が所定の値となったときに表面の変位形状を測定した。これには、変位計7台を用いて、載荷板中心より0, 30, 45, 60, 90, 150, 250cmの7点で計測をした。変位計の設置位置を図-21に示す。

(3) FWD載荷試験

a) 試験の方法

FWDを用いて衝撃載荷試験を行った。試験は、A～Dの各区画の指定位置において、FWDにより衝撃荷重を載荷して行った。この試験位置を図-20に示す。

b) 試験方法

FWD載荷試験における最大衝撃荷重は100, 150, 200, 250kNの4段階とし、試験実施時期は走行回数が、0, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 3,000, 5,000, 7,000, 10,000回の各時点である。

b) 計測項目

FWD載荷試験における荷重の計測は、FWDの操作用コンピュータにて行った。また、変位の計測は、FWDに内蔵されている変位計により0, 30, 45, 60, 90, 150,

250cmの7点で行った。変位計の設置位置を図-21に示す。

6. 実大規模試験の結果

融雪装置を埋設した試験舗装の繰返し走行載荷に対する挙動を検討するために実施した、静的載荷試験，FWD載荷試験，走行試験の結果についてまとめた。また，融雪装置の耐荷性について有限要素解析により検討した。

6.1 静的載荷試験

(1) 試験結果

静的載荷試験の結果として、荷重近傍のたわみ形状を図-22、図-23、図-24に示した(それぞれ、走行載荷前、走行回数3,000回ならびに10,000回)。

全体的にみると、融雪装置を設置することにより、たわみが大きくなる傾向にあることがわかる。たわみは温水パイプでは基層160mmに位置するものが最も大きくなっており、電熱線では基層100mmに位置するものが最大となっている。

繰返し走行載荷の進行につれて最大たわみが変化する状況を図-25に示した。融雪装置の設置位置による違いが若干みられ、温水パイプでは基層160mmの場合、電熱線では基層100mmの場合でたわみが大きくなるのがわかる。しかし、全体的にみれば、たわみの大きさと融雪装置の埋設深さとの間には明確な関連性があるとはいえない。

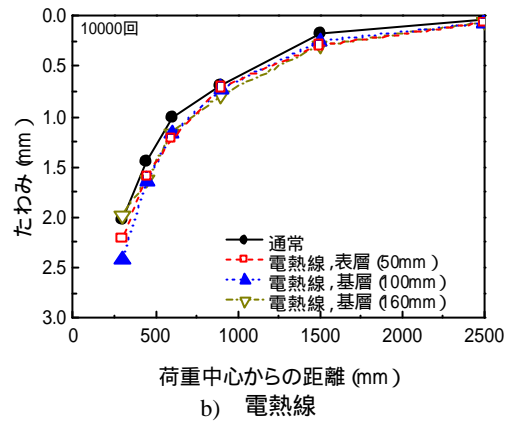
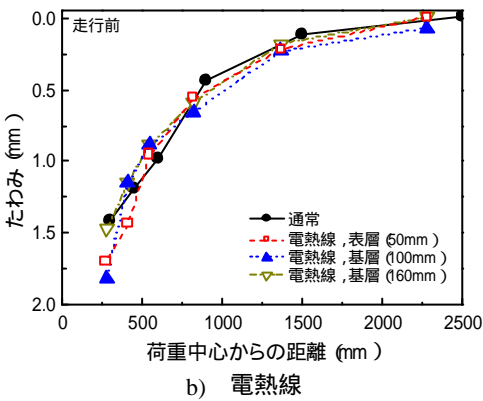
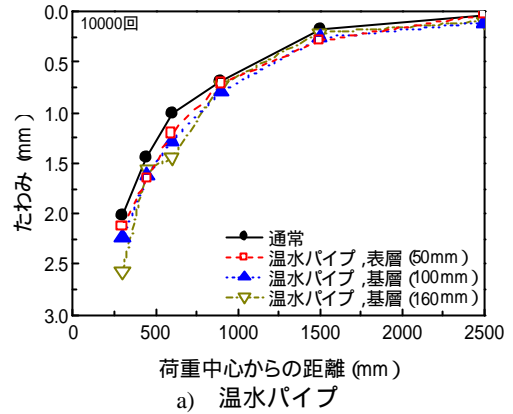
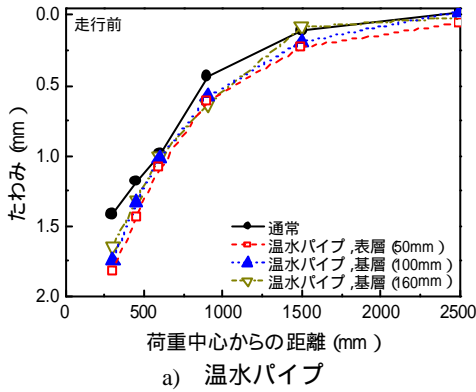


図-22 走行載荷前のたわみ形状

図-24 走行10,000回時のたわみ形状

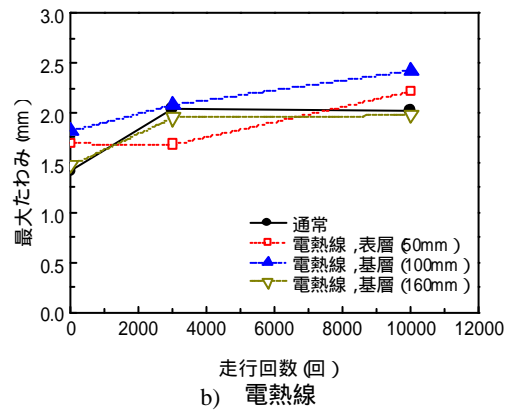
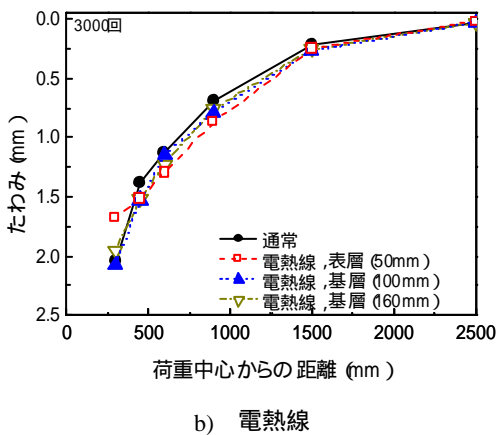
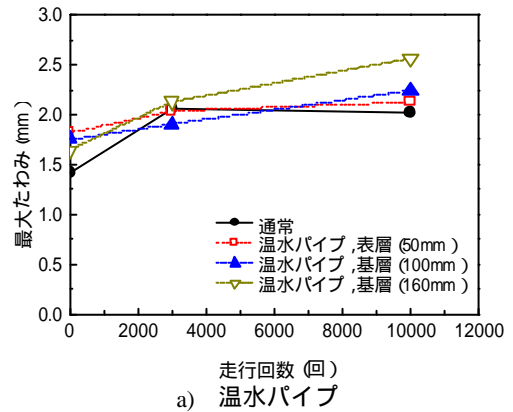
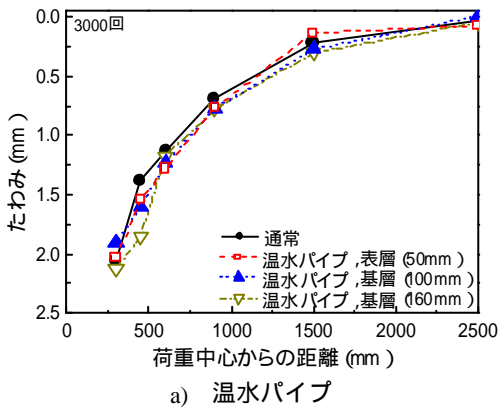


図-23 走行3,000回時のたわみ形状

図-25 最大たわみの比較

6.2 FWD載荷試験

FWD載荷試験により得られた載荷板中心のたわみ（最大たわみ）を図-26に示す（荷重200kN時）．全体的には、融雪装置を設置しているほうが通常舗装に比べて大きな値を示す傾向にあることが明らかである．また、埋設深さによる違いをみれば、静的載荷試験と同様に、温水パイプでは基層160mmの場合が、電熱線では基層100mmの場合が最も大きくなっていることがわかる．この最大たわみについて全体的にみれば、温水パイプ、電熱線といった、融雪装置による違いは明確ではなく、融雪装置の埋設深さとの間の関係も明らかではない．

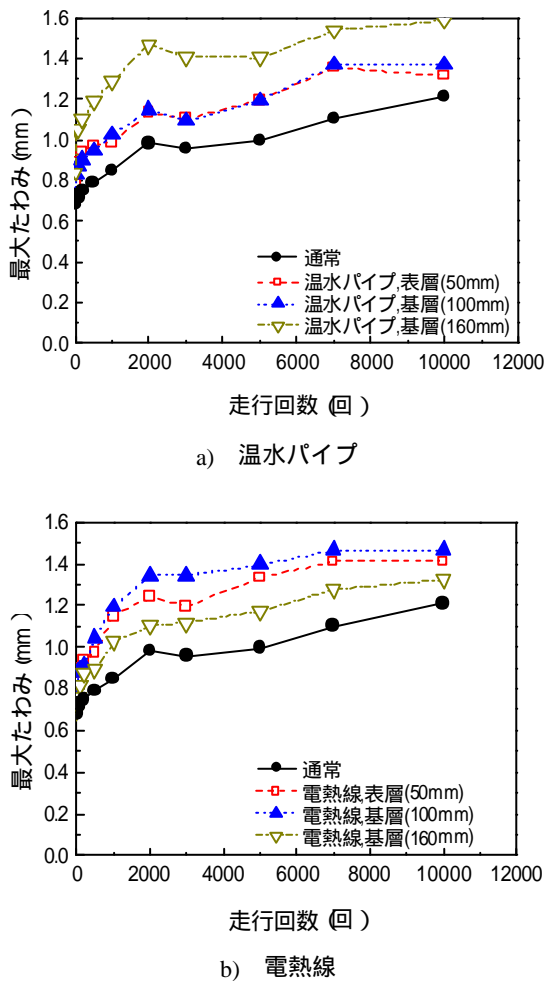


図-26 FWDによる最大たわみ

6.3 走行試験

(1) たわみ・土圧

走行試験の結果として、動的たわみの最大値を図-27に示す．これは、変位計3台で計測したものの平均値である．全体的にみると、他の載荷試験結果と同様に、融雪装置を埋設している区画のほうが、埋設していない区画よりもたわみが大きくなっていることがわかる．また、埋設

深さでは、温水パイプでは160mm、電熱線では100mmの場合がもっともたわみが大きくなっていることも同様である．

このほか、A区画に埋設されている土圧計による土圧の計測結果を図-28に示す（最大値）．下層路盤の上面で初期段階において土圧の変化がみられるものの、それ以外の深さでは走行回数が増加しても変化はみられないようである．

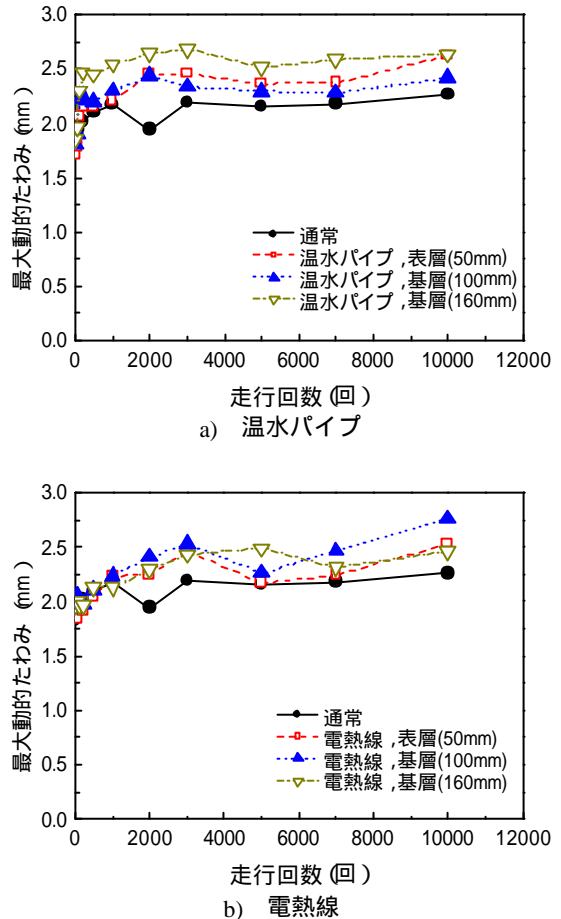


図-27 走行載荷における最大動的たわみ

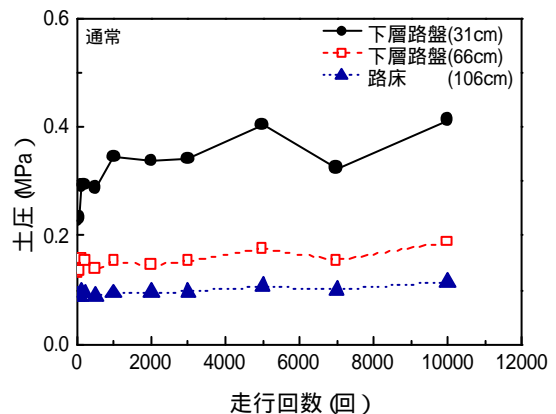
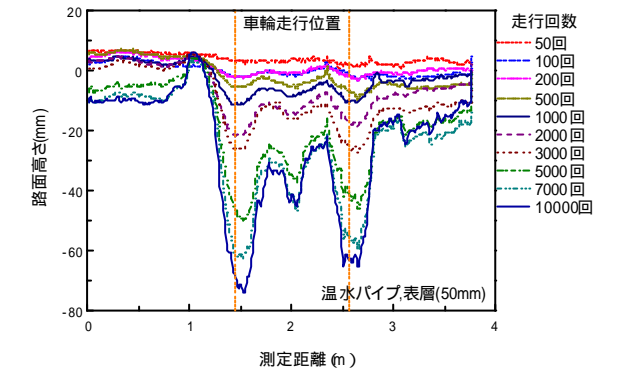


図-28 走行載荷による最大土圧の変化

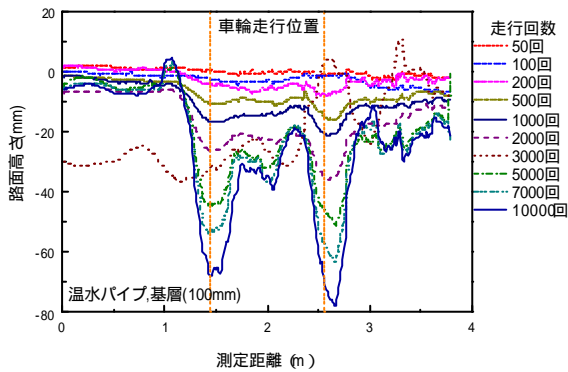
(2) 表面形状

デジタルプロファイルメータにより測定した横断方向の表面形状を図-29, 図-30, 図-31に示した(それぞれ, 温水パイプ, 電熱線, 通常)。

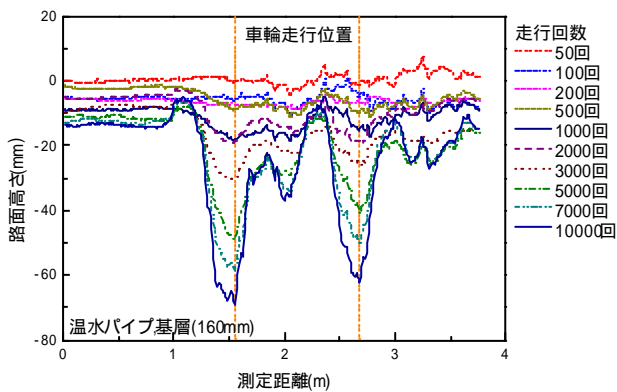
全体的には, 繰返し走行荷の進行につれて表面形状が徐々に変化していく傾向が明らかになっている。また, 普通舗装と融雪装置を埋設している場合を比較すると, 変形量にそれほど大きな差はないようである。



a) 表層50mm

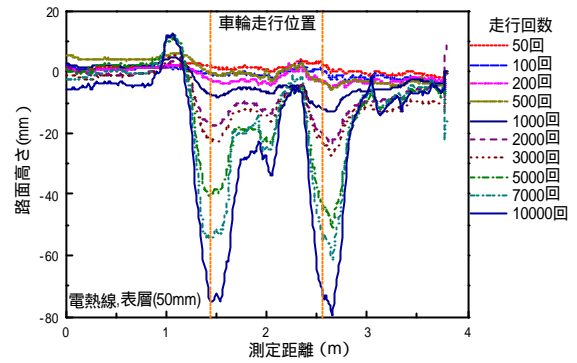


b) 基層100mm

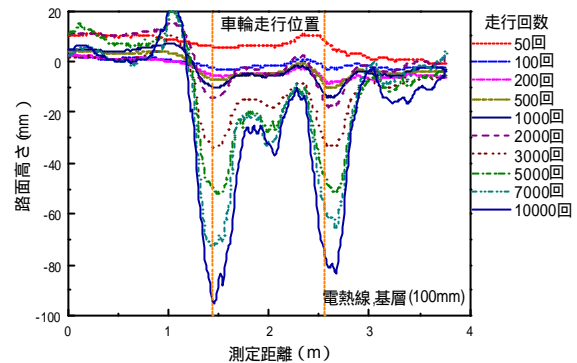


c) 基層160mm

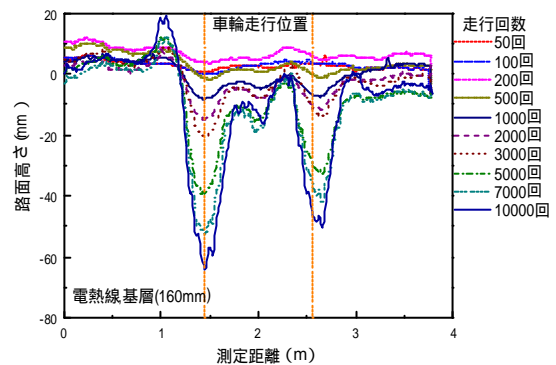
図-29 横断方向表面形状 (温水パイプ)



a) 表層50mm



b) 基層100mm



c) 基層160mm

図-30 横断方向表面形状 (電熱線)

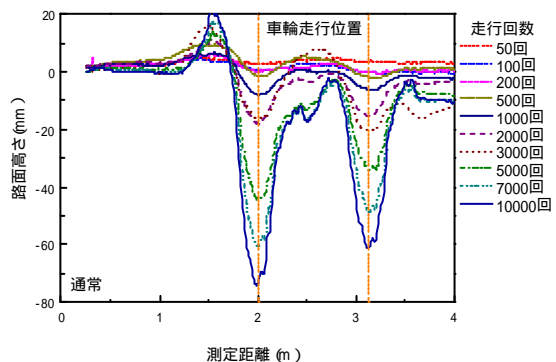
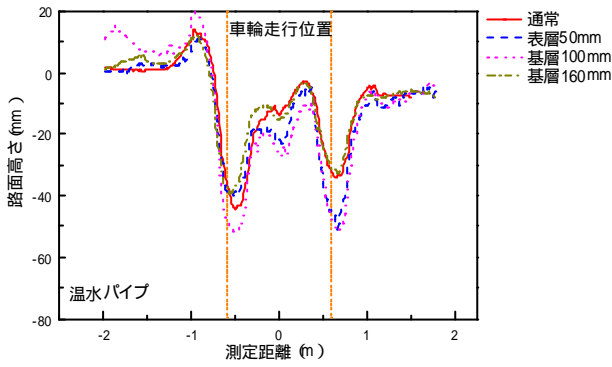
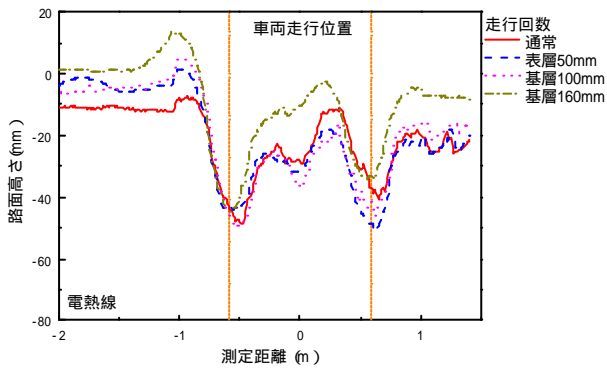


図-31 横断方向表面形状 (通常)

走行回数5,000回時の横断方向の表面形状について融雪装置の埋設深さによる違いをみたものが図-32である。左右の車輪位置におけるものを総合して考えると、融雪装置の有無や融雪装置の埋設深さの違いによる影響は明らかではない。

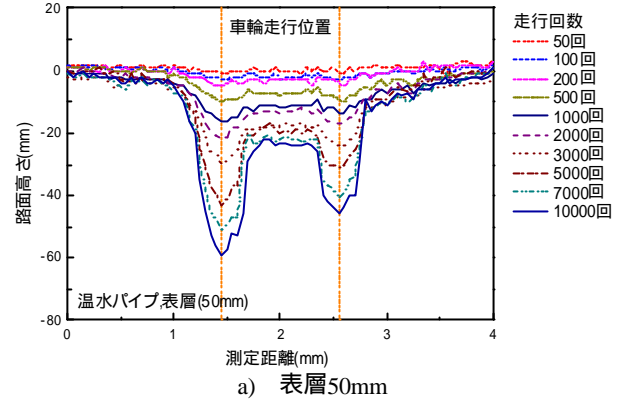


a) 温水パイプ

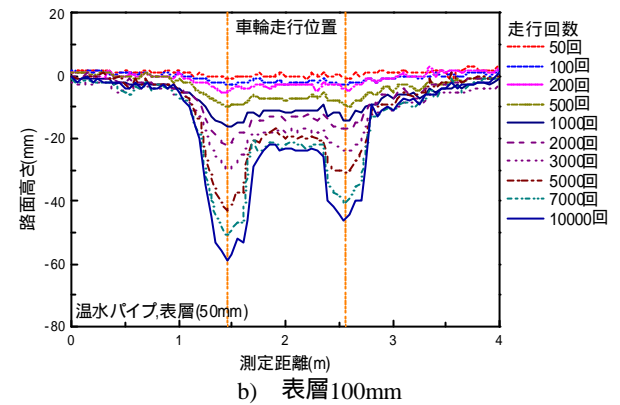


b) 電熱線

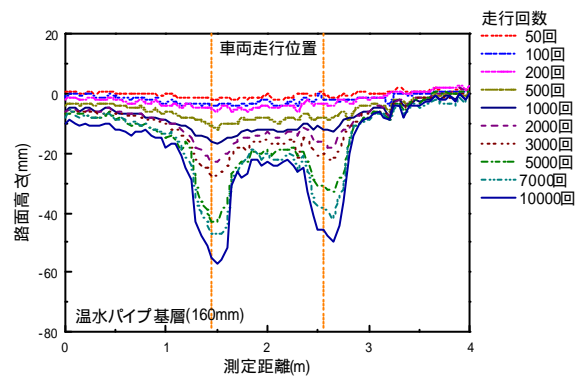
図-32 走行回数5,000回時の横断方向表面形状



a) 表層50mm



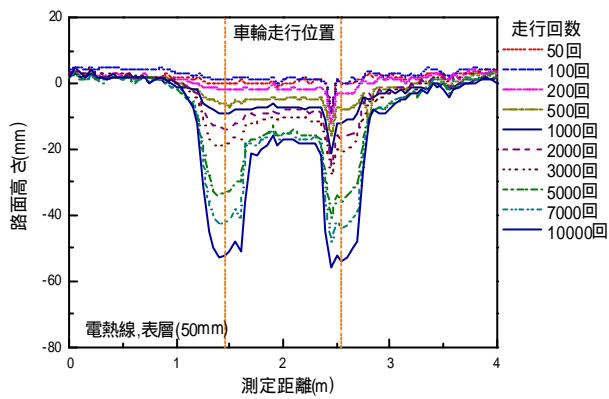
b) 表層100mm



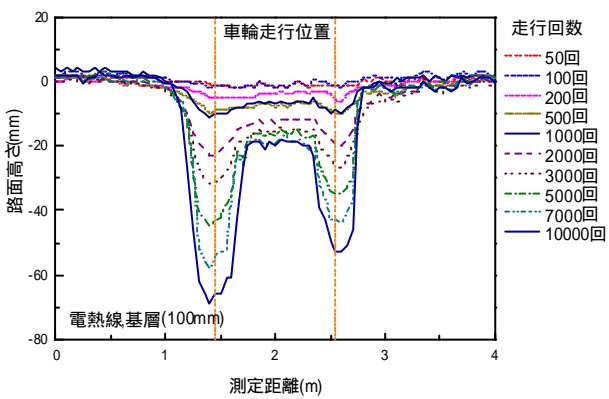
c) 基層160mm

図-33 横断方向表面形状(温水パイプ)

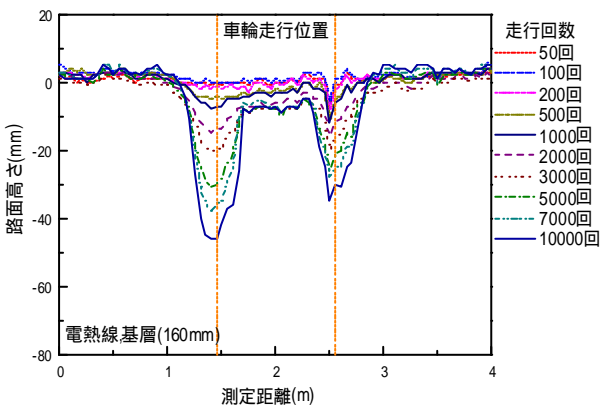
次に、コンベックスによる測定結果を、図-33、図-34、図-35(それぞれ、温水パイプ、電熱線、通常)に示す。また、走行回数5,000開示の各埋設深さによる表面形状の違いについて、図-36にまとめた。いずれもデジタルプロフィロメータによるものと同様の結果である。



a) 表層50mm



b) 基層100mm



c) 基層160mm

図-34 横断方向表面形状 (電熱線)

(3) 解体調査による厚さの確認

一連の走行試験終了後に舗装を解体して、各層の厚さを測定した。

図-37, 図-38, 図-39には融雪装置のないA区画, 温水パイプを設置したC区画, 電熱線を設置したD区画における断面をまとめてある。いずれの区画も走行荷重試験の実施中にわだち掘れが著しく進行したことから, レベリ

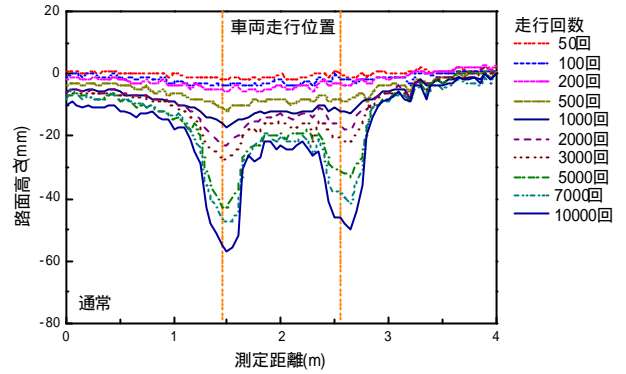
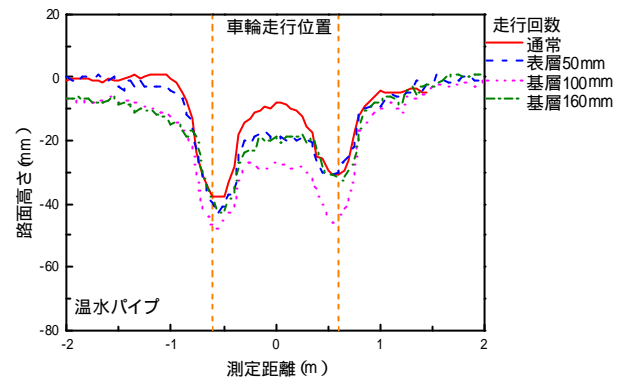
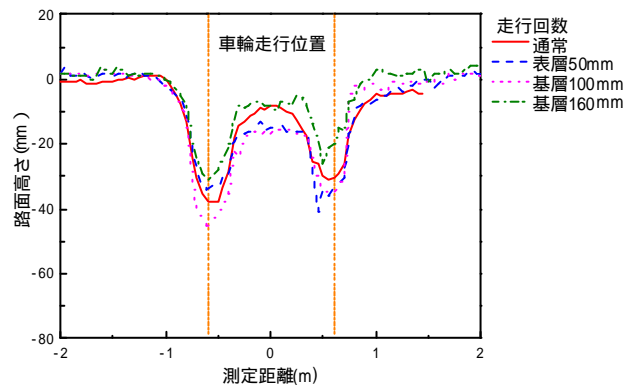


図-35 横断方向表面形状 (通常)



a) 温水パイプ



b) 電熱線

図-36 走行回数5,000回時の横断方向表面形状

ング層を施工した上で試験を継続した。走行荷重の影響は舗装表面に近いほど大きく、表層の変形が著しいことがわかる。このことから、航空機の繰返し走行に起因する融雪装置自体の変形を考えると、装置表面に近い深さに埋設することは不利となることわかる。

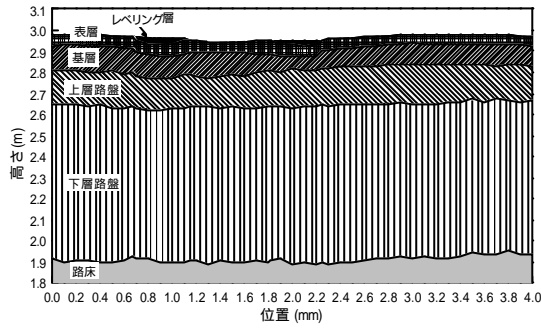
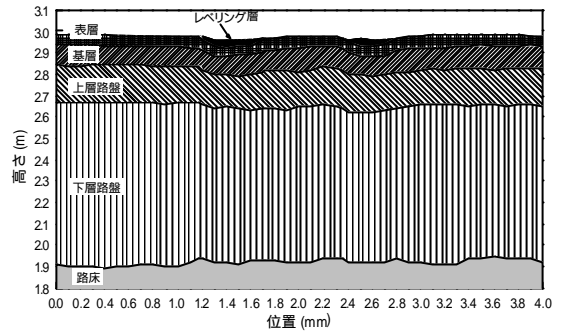
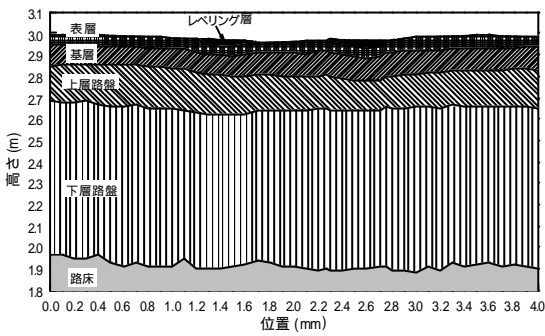


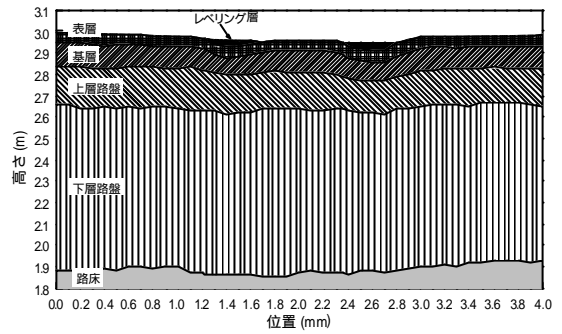
図-37 解体時の舗装断面 (通常)



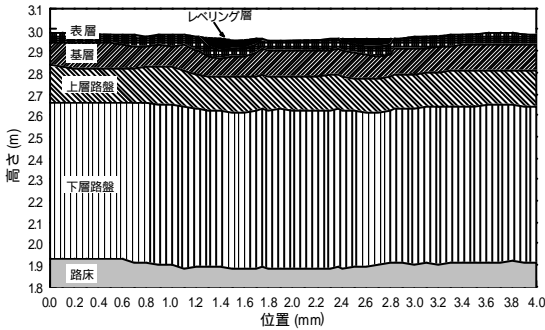
a) 埋設深さ 50mm



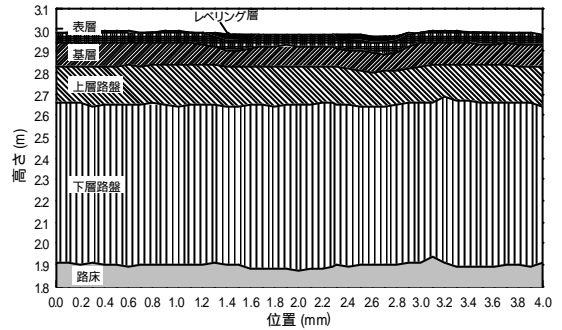
a) 埋設深さ 50mm



b) 埋設深さ 100mm

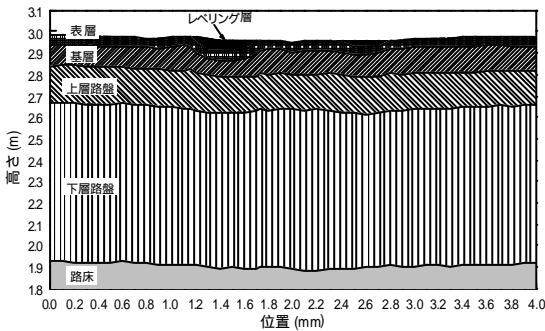


b) 埋設深さ 100mm



c) 埋設深さ 160mm

図-39 解体時の舗装断面 (电热線)



c) 埋設深さ 160mm

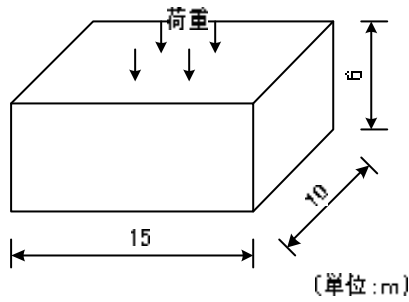
図-38 解体時の舗装断面 (温水パイプ)

6.4 融雪装置の耐荷性に関する有限要素解析

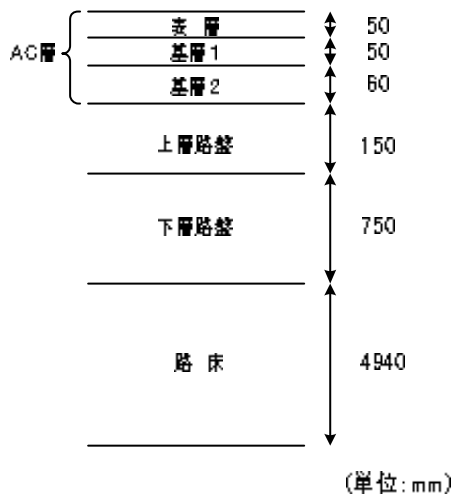
融雪装置を埋設した舗装に航空機荷重が載荷された場合に、融雪装置に生ずる応力について三次元有限要素法を用いて解析した。

(1) 解析方法

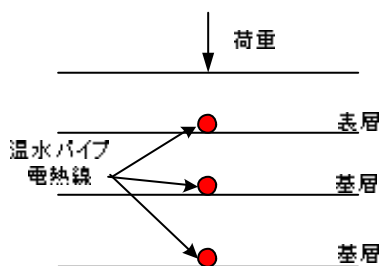
舗装構成としては、図-40に示すように、試験舗装と同様のものを用いた。融雪装置の埋設深さについても同様である。温水パイプと电热線については円形のものとし、直径はそれぞれ、17mm、9mmとした。



a) モデルの寸法



b) 舗装構造



c) 詳細断面図

図-40 解析に用いたモデル

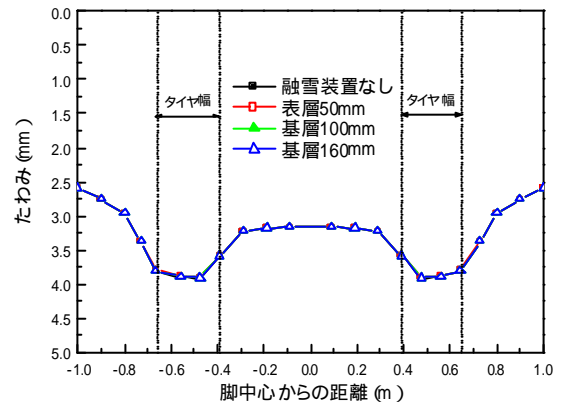
解析に用いた材料の力学特性は、表-11に示すとおりである。これは、融雪装置が埋設されていない通常舗装でのFWD 載荷試験の結果を逆解析することによって得られたものである。表・基層については夏季、冬季の温度を想定して設定した。また、温水パイプについてはメーカーのカタログを、電熱線はその材質をゴムとみなして理科年表を使用して算定した。

アスファルトコンクリートと融雪装置の要素は3方向の

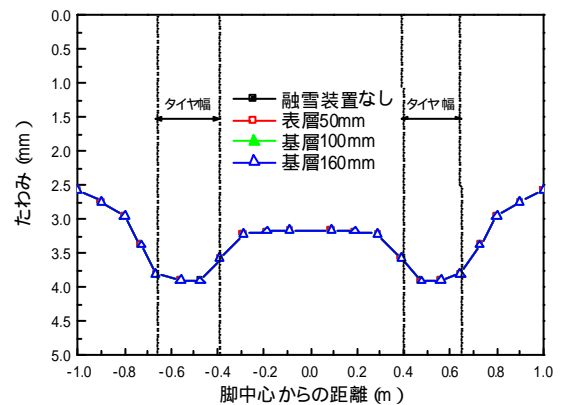
ばねにより結合した。鉛直方向については $1.0 \times 10^4 \text{GN/m}^3$ というばね定数を導入して、両者の位置は一致するものとした⁵。水平方向については、融雪装置とアスファルトコンクリートが完全に付着しているとは考えにくいことから、ばね定数として種々の値を想定して数値解析を行い、静的載荷試験における電熱線のひずみの実測値を参考として、ばね定数を同定した。その結果、 $1.0 \times 10^2 \text{kN/m}^3$ という値が得られた。

表-11 力学特性値

温度	弾性係数 (MPa)		ポアソン比
	冬季 (0)	夏季 (50)	
表・基層	7,400	300	0.3
下層路盤	1,500	1,500	0.3
下層路盤	300	300	0.3
路床	40	40	0.3
温水パイプ	785	785	0.3
電熱線	3.25	3.25	0.3

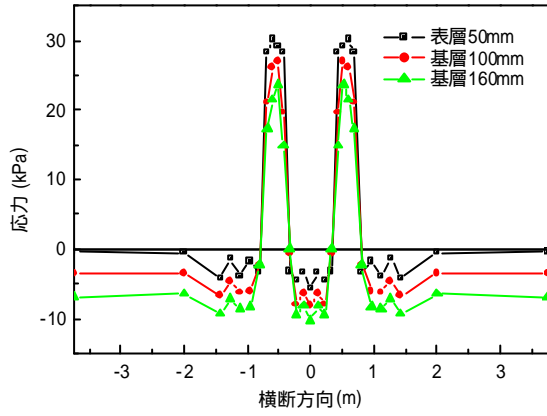


a) 温水パイプ

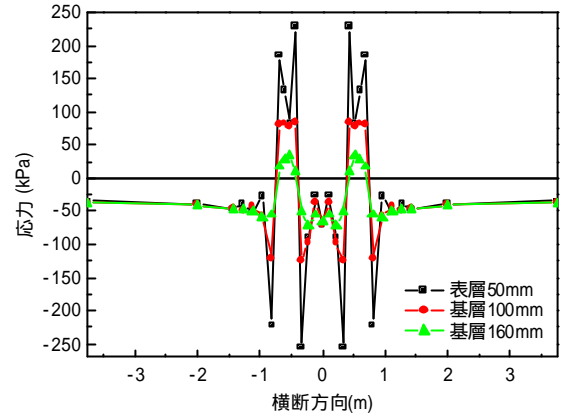


b) 電熱線

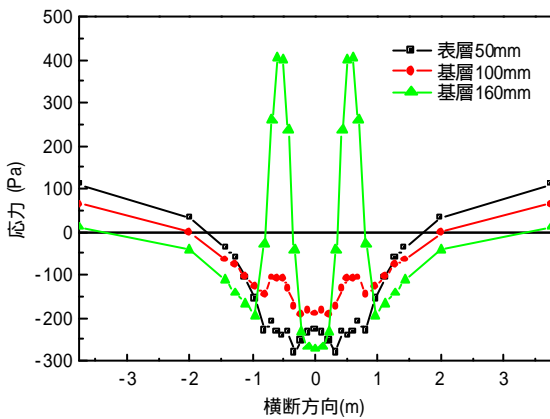
図-41 車輪中心位置における横断方向たわみ分布



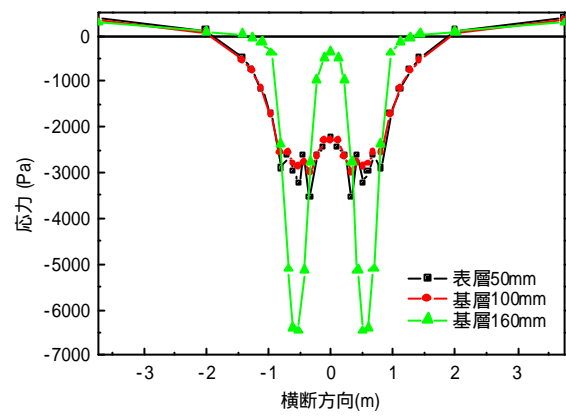
a) 温水パイプ



a) 温水パイプ



b) 電熱線



b) 電熱線

図-42 融雪装置応力(冬季)

図-43 融雪装置の応力(夏季)

このモデル上にB747-400(満載時)が載った場合の舗装ならびに融雪装置の挙動について解析した。荷重は接地圧1.38MPa, 接地面積1,632cm²(幅32cm, 長さ48cm)のものが4ヶである。

横断方向に埋設された融雪装置の真上に車輪が二つ載る場合を解析した。具体的には, 舗装表面のたわみ, 表層下面の応力, 融雪装置に生ずる応力を計算した。

(2) 解析結果と考察

a) 舗装表面のたわみ

融雪装置の埋設深さが異なる場合の車輪中心位置における横断方向のたわみ形状について図-41に示した(たわみが大きくなる夏季の場合)。融雪装置の埋設深さの違いのみならず, 装置の有無によってもたわみ形状はほとんど変化していないことがわかる。これには, 温水パイプ, 電熱線の違いはない。

b) 融雪装置の応力

融雪装置に発生する最大応力について, 冬季, 夏季の

場合をそれぞれ図-42, 図-43にまとめた。冬季の場合, 弾性係数の違いから電熱線より温水パイプのほうが大きな値を示している。温水パイプでは埋設深度が深くなるにつれて引張応力が小さくなっているのに対して, 電熱線の場合には埋設深度が浅ければ引張応力は生じないことがわかる。

夏季の場合, 温水パイプの荷重中心付近では, どの埋設深度であっても引張応力が発生するが, 埋設位置が深くなるにつれてその値は小さくなっている。一方, 電熱線の場合には, 全体的に圧縮応力が発生していることがわかる。

夏季, 冬季によらず, ここで得られた応力は温水パイプならびに電熱線の破断応力よりも小さいことが確認された。このことから, 航空機荷重が加わっても融雪装置が破壊する危険性はほとんどないとわかる。

c) 上層路盤下面の水平応力

上層路盤下面に発生する最大水平応力について図-44にまとめた。この場合も, たわみと同様に, 融雪装置の有無による違いはほとんど見られない。

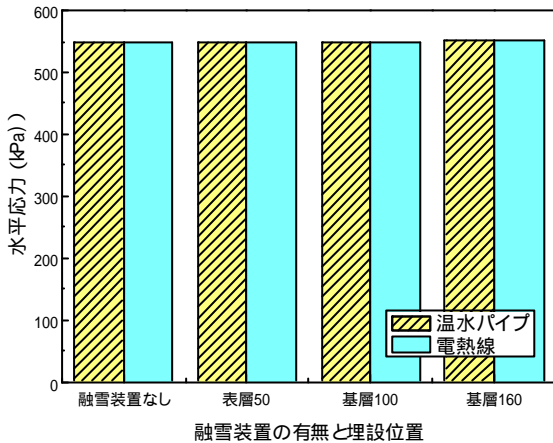


図-44 表層下面の水平応力

d) まとめ

舗装表面のたわみは、融雪装置を埋設しても融雪装置なしの場合とほとんど変わらない。表層下面の応力についても舗装表面のたわみと同様である。融雪装置に生ずる応力についてみれば、夏季のほうが冬季より表・基層の弾性係数が小さいため、絶対値でみると夏季のほうが大きい。埋設深度別にみると、浅い場合が圧縮応力であったのが、深くなるにつれて引張に転ずる。しかし、これらの応力は強度に比較すると十分小さい値となっている。

7. まとめ

融雪装置を導入したアスファルト舗装の空港基本施設への適用性に関する一連の試験研究結果は、以下のよう

(1) 室内試験

融雪装置を導入した表・基層の供試体に対するホイールトラッキング試験の結果からは、融雪装置を導入することによっても変形や動的安定度に及ぼす影響はほとんどみられない。

(2) 試験舗装

a) 荷重に対する弾性応答であるたわみは、融雪装置を導入することにより若干大きなものとなる。これには温水パイプ、電熱線といった融雪装置による違いは明確では

なく、また融雪装置の埋設深さによる違いも明確ではない。

b) 航空機荷重の繰返し走行によって生ずる舗装表面形状の変化は、走行回数の増加に伴って著しくなるものの、融雪装置を導入することによりその状況が異なるような傾向はみられない。

c) 10,000回の繰返し走行荷重後に実施した舗装の解体調査の結果からは、表面に近い層ほど累積変形が著しいことがわかった。

d) 航空機荷重が加わった場合に融雪装置に生ずる応力について3次元有限要素解析を実施した結果からは、それらの応力は破壊応力に対して十分安全であるとわかった。

以上のことから、融雪装置の変位アスファルト舗装への導入については十分可能であるとまとめられる。

8. おわりに

以上示したように、一連の試験研究の結果からは融雪装置を空港アスファルト舗装へ導入することは十分可能であるとわかった。これらの試験は、特に試験舗装に対する荷重試験は、気温が比較的高い状況下で実施されたことから、実際の使用状況下の場合と比較すると累積変形の点では厳しい結果となったと懸念される。

今後は、実際の空港での実施検証といったものを経て、実用化を図って行くこととしたい。

(2005年5月25日受付)

参考文献

- 1) 国土交通省航空局(監): 空港土木施設設計基準, (財)港湾空港建設サービスセンター, 2001.
- 2) (社)雪センター: 凍結抑制舗装資料, 72p., 1997.
- 3) (社)雪センター: 冬期路面対策事例集, 318p., 1997.
- 4) 国土交通省航空局(監): 空港土木工事共通仕様書(平成16年度版), (財)港湾空港建設サービスセンター, 2004.
- 5) 西澤辰男, 村田芳樹, 中川達裕: 薄層ホワイトトッピング工法におけるコンクリート版のそり応力, 土木学会舗装工学論文集, 第6巻, pp.176-185, 2001.