

# 空港アスファルト舗装における路床置換厚の低減の可能性に関する検討

秋元恵一<sup>1</sup>・金澤 寛<sup>2</sup>・稲田雅裕<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 運輸省第二港湾建設局 東京空港工事事務所長 (〒144 東京都大田区羽田空港三丁目3-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長 (〒231 横浜市中区北仲通5-57)

<sup>3</sup>正会員 工修 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所第二設計室長 (〒231 横浜市中区北仲通5-57)

舗装原地盤の土質性状のばらつきが大きい場合、一様な支持力を期待することができないことから、そのまま原地盤を路床とするには不適當である。このため、路床は表層地盤を掘削し、山砂で置換して築造する。この際、路床厚の低減を図ることができれば、掘削および置換にかかる施工の効率化が可能となり、さらに掘削残土の処分に関する問題もなくなり、ひいては施工期間の大幅な短縮にもつながる。このため、ジオテキスタイルを路床に挿入することによる補強効果に期待して路床置換厚を低減することの可能性について検討する目的で、室内試験、現場試験および解析を実施した。これら一連の検討の結果、路床置換厚の低減は構造上困難であるとの結論を得た。

**Key Words :** *airport, design of asphalt pavement, field test, finite element method, geo-textiles, laboratory test, pavement for airport facilities*

## 1. はじめに

東京国際空港（羽田空港）の沖合展開計画用地の地表面は東京都内から発生した建設残土の処分によって形成された層（Bs層）である。当該地盤上に滑走路等の舗装を施す場合、本層はその地盤形成過程からも明らかなように土質性状が大変ばらついてきたため、一様な支持力を期待することができず、そのまま空港アスファルト舗装の路床とするには不適當であった。このため、路床は、表層の建設残土層Bs層を掘削し、山砂で置換して築造することとした。<sup>1)</sup>

路床厚の低減を図ることができれば、掘削および置換にかかる施工の効率化が可能となり、さらに掘削残土の処分に関する問題もなくなる。これら施工性の向上を図ることができれば、航空輸送能力の早期向上のために1日も早い工事完成が要請された当空港など、急速大量施工を強いられるプロジェクトにおいて大きな意義を持つことになる。

このため、ジオテキスタイルを路床に挿入し、その補強効果に期待して、路床置換厚を低減することの可能性について検討する目的で、室内試験、現場試験および解析を実施した。

## 2. 空港アスファルト舗装設計の概要

滑走路など空港アスファルト舗装の設計は「空港アスファルト舗装構造設計要領」<sup>2)</sup>に基づいて実施される。本要領における構造設計法としては、CBR法であるCE（米国陸軍工兵隊）法が採用されている<sup>3)</sup>。これは、比較的良好な地盤条件下での経験に基づき設定された舗装厚設計曲線を用い、支持力（CBR）と設計荷重により基準舗装厚を決定するという手順を踏む方法である。通常、設計年数は10年とされる。

重要な設計条件の一つである路床支持力（設計CBR）は、現地に適用される予定であったシルト分を約10%含む山砂により30m×10m規模の試験路床を築造し、現場CBR試験を実施して定めた。この結果、設計CBRは9%を採用した。

設計荷重は、当空港のような基幹空港の場合、設計対象機種をボーイング747-400（設計荷重区分：LA-1）とする<sup>4)</sup>。この荷重条件の場合、「空港アスファルト舗装構造設計要領」によると路床厚は2000mmとするよう定められている。

なお、当空港の第三期地区に建設される「新C滑走路」<sup>5)</sup>は、平成9年3月に供用を開始する予定で現在工事中であるが、本滑走路の場合、供用開始後

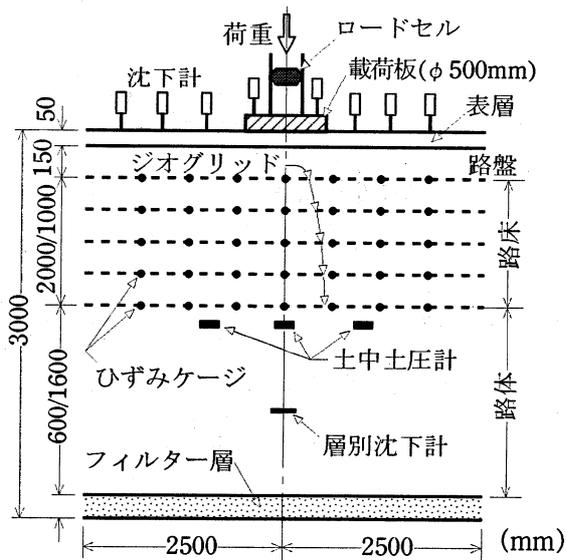
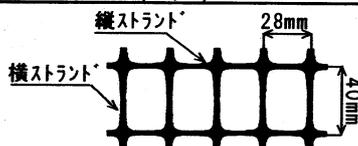


図-1 試験舗装の室内実験土層

表-1 ジオテキスタイルの特性

規格	
原料	ポリプロピレン
製法	二方向延伸
製品幅 (m)	4.0
製品長さ (m)	50
目合寸法 (m)	0.028×0.040
品質管理強度(kN/m)	タテ:19.8 ヨコ:35.0
製品基準強度(kN/m)	タテ:17.0 ヨコ:30.0



の空港の運用条件を勘案すると、設計反復作用回数は40,000回となる。「空港アスファルト舗装構造設計要領」では、基準舗装の層構成を、表層・基層がアスファルトコンクリート、上層路盤が粒度調整砕石、下層路盤が粒状材から成り立つものと定義しており、以上の設計条件によると、基準舗装厚は1320mmとなる。このうち、上層路盤は粒度調整砕石を用いた場合の標準厚であれば300mmとなるが、マーシャル安定度5kN（突固め回数75回）以上のアスファルト安定処理に置換すると等価値2.0と評価できることから、厚さ150mmに低減できる。

### 3. 室内試験による検討<sup>6)</sup>

ジオテキスタイルによる路床補強効果の程度を明らかにする目的で、まず図-1に示すように実物大の試験舗装を室内土槽に製作し、載荷試験を実施した。使用したジオテキスタイルは表-1に示すとおり

表-2 試験ケース

試験ケース	ケース1	ケース2	ケース3
路床厚 (mm)	2000	1000	1000
路体厚 (mm)	600	1600	1600
補強材総数	0	0	5

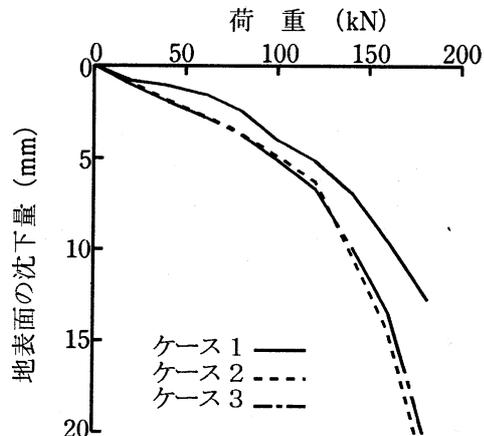


図-2 荷重～地表面沈下量の関係（静的載荷試験）

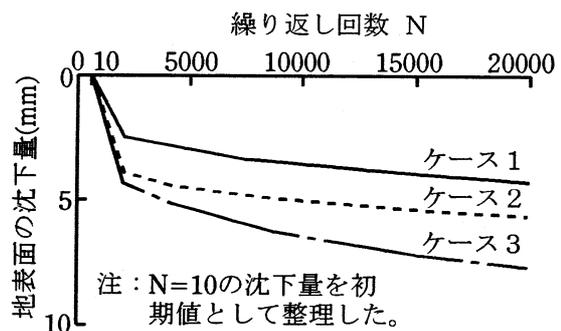


図-3 繰返し回数～地表面沈下量の関係（繰返し載荷試験）

りである。試験は運輸省港湾技術研究所内の原型載荷実験槽を利用して、静的段階載荷試験および繰返し載荷試験を行った。静的段階載荷試験は直径500mmの載荷板を用いて20kN（102kN/m<sup>2</sup>）づつ荷重を段階的に増加させ、最大180kNまで載荷した。また、繰返し載荷試験では100kN（510kN/m<sup>2</sup>）の荷重を1 Hzで20,000回まで連続載荷した。各々の試験に対し、地表面沈下量やジオテキスタイルのひずみ量などを計測した。

試験ケースとしては表-2に示すとおり、路床厚2000mmの標準舗装断面（ケース1）のほか、路床厚を1000mmに低減した断面（ケース2）および路床厚1000mmに引張強度17kN/mのジオテキスタイルを250mm間隔で5層敷設して補強した断面（ケース3）を設定した。これらの試験ケースに対する試験結果を図-2および図-3に示す。図-2は静的段階載荷試験による荷重と地表面沈下量の関係で

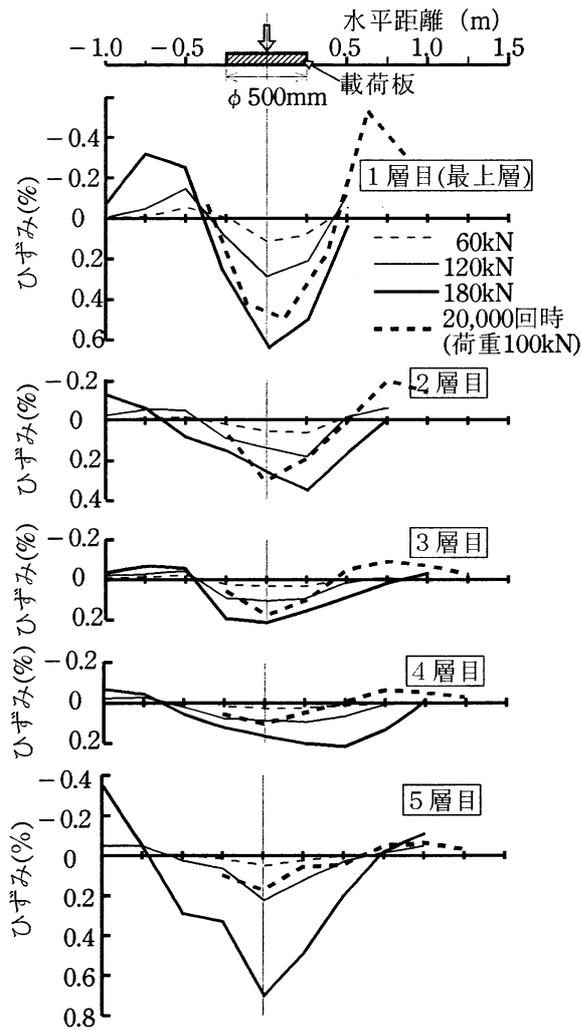
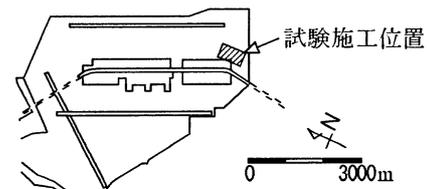


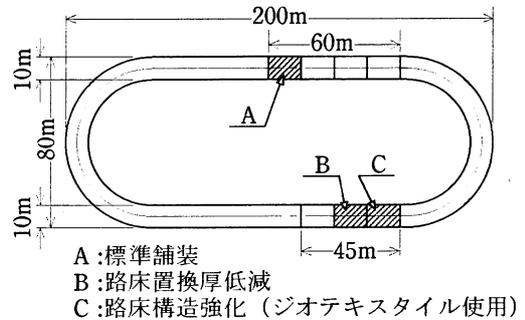
図-4 ジオテキスタイルのひずみ分布に関する実測値

あり、図-3は繰返し載荷試験による繰返し回数と地表面沈下量の関係である。路床厚 2000mm を確保したケース 1 の標準舗装断面が地表面沈下量が最も少ないが、静的載荷試験ではケース 3 のジオテキスタイル補強断面の沈下量がケース 2 の無補強断面よりわずかながら小さく、繰返し載荷試験ではこの関係が逆転している。この関係からは、ジオテキスタイルの補強効果ははっきりしない。

ジオテキスタイルのひずみ量の計測結果を図-4に示す。ひずみ分布は載荷点直下で引張りひずみを示し、横方向に減衰して圧縮ひずみに変化する。また、路床上下端の敷設層が大きなひずみ量を示している。各層の最大引張りひずみ量で整理すると、静的載荷試験 180kN 載荷時では 0.2 ~ 0.7% 程度、繰返し載荷試験 20,000 回時では 0.1% ~ 0.5% 程度であり、ひずみレベルとしては小さい。路床内で発揮されている拘束応力もかなり低いものと推察できる。



(a) 試験位置図



(b) 試験走行路平面図

図-5 試験舗装ヤード

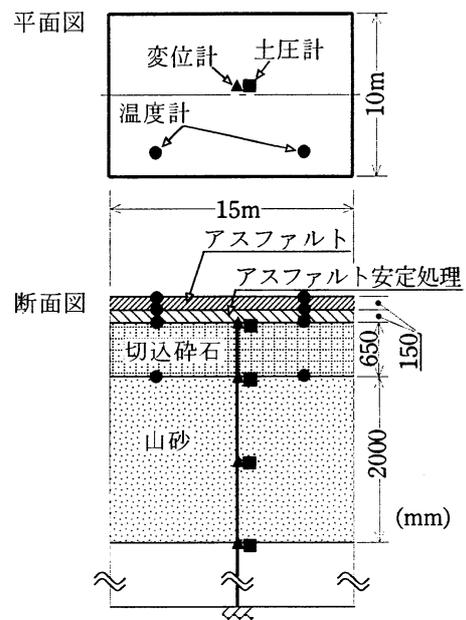


図-6 試験舗装の標準舗装断面(A)および計器設置状況

#### 4. 現場試験舗装による検討<sup>7)</sup>

##### (1) 試験舗装の概要

図-5に示すとおり、羽田空港沖合展開地区内に 200m × 800m 規模の試験ヤードを確保し、12種類の試験断面を有する一周約 460m のトラック状の試験舗装を施工した。この舗装上にボーイング 747-400 相当の脚荷重 928kN を載荷できる原型走行荷重車を走行させることによって繰返し載荷試験を実施した。走行回数 0, 1,000 回, 2,000 回, 5,000

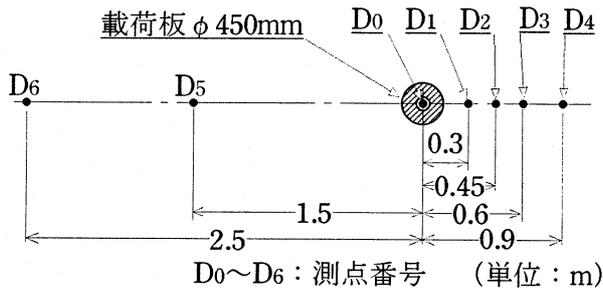


図-7 FWD試験のたわみ量測定位置

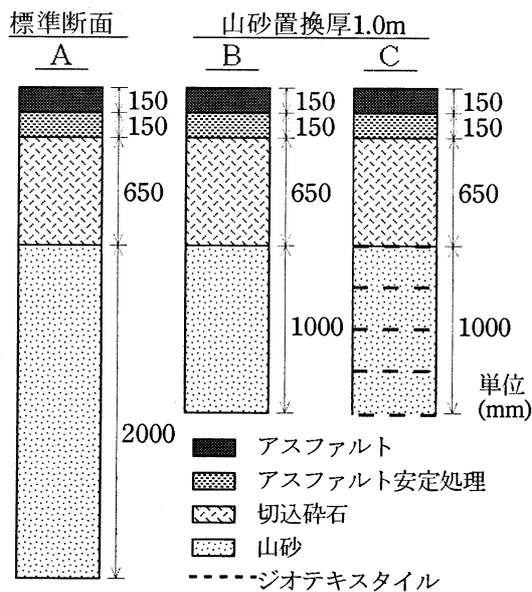


図-8 路床置換厚低減効果確認のための試験断面

回、7,000回および10,000回の所定走行回数毎に、静的載荷試験、FWD (Falling Weight Deflectometer) による試験などを実施し、各断面の土圧、変位、舗装表面の変形等を計測し、標準断面との相对比较によって各断面の構造安定性を検討するものである。標準舗装 (A断面) の層構成を図-6に示すが、表・基層はアスファルトコンクリート150mm厚、上層路盤はアスファルト安定処理150mm厚、下層路盤は切込碎石650mm厚および路床を2000mm厚の山砂としている。なお、静的載荷試験は設置計器上に原型走行荷重車を静止させた状態で各層の土圧、変位を計測するものであり、また、FWD試験は、一般的に空港舗装の評価に用いられる最大載荷荷重200kNで、載荷板中心から0、300mm、450mm、600mm、900mm、1500mmおよび2500mm離れた7点のたわみを計測する試験である (図-7)。

本試験舗装は様々な検討の観点から12断面を施工したものであるが、本論文においては今回の趣旨に合致するものに関する試験結果、すなわち路床置

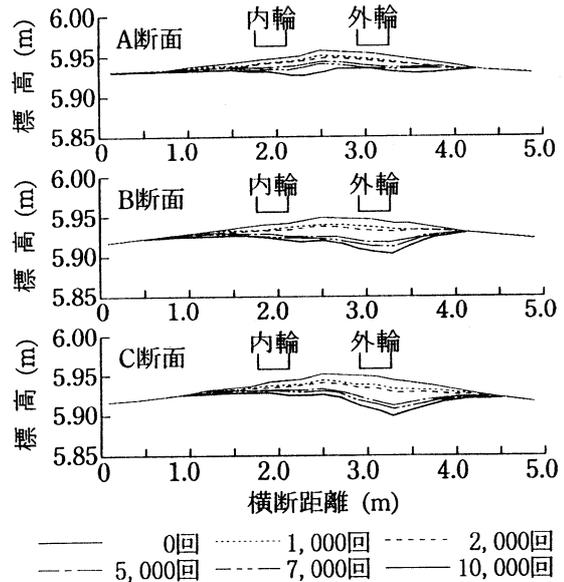
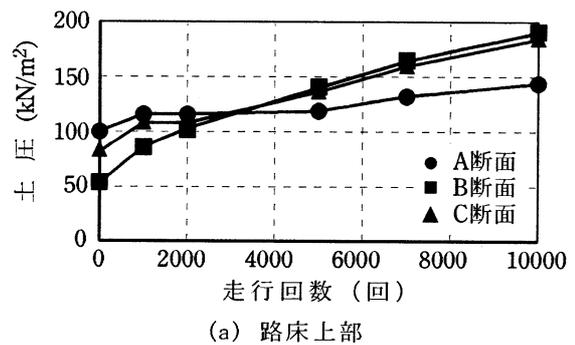
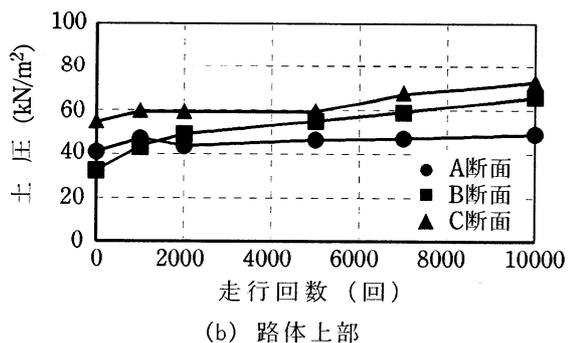


図-9 路面形状の経時変化



(a) 路床上部



(b) 路体上部

図-10 土圧の経時変化 (静的載荷試験)

換厚を低減した断面 (B、C断面) と標準舗装断面 (A断面) の比較について記述する。

## (2) 試験舗装走行試験結果

試験舗装において路床置換厚を低減した断面は、図-8に示すとおり、路床を標準の半分である1000mm厚に低減したB断面と1000mm厚の路床に引張強度17kN/mのジオテキスタイルを250mm間

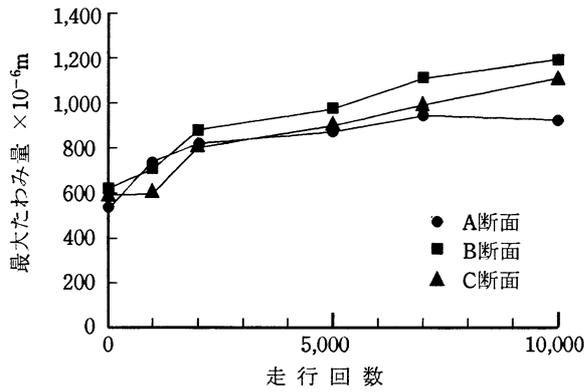


図-1 1 路面たわみの経時変化  
(FWD 試験: Do 地点)

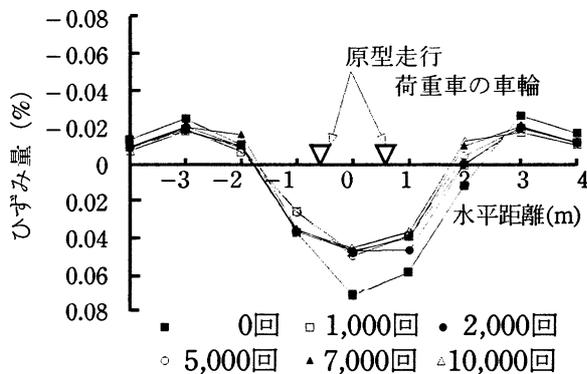


図-1 2 ジオテキスタイルのひずみ量の経時変化  
(静的載荷試験)

隔で5層敷設して補強したC断面の2つである。

図-9に路面形状の走行試験回数毎の経時変化、図-10に静的載荷試験より得られた路床上部および路体上部における土圧の走行試験回数毎の経時変化、図-11にFWD試験より得られた重錘落下点(D<sub>0</sub>)の路面たわみ量の走行回数毎の経時変化、図-12に静的載荷試験より得られたジオテキスタイル3段目のひずみ量の走行試験回数毎の経時変化を示す。標準舗装断面と比較して、路床置換厚を低減したBおよびC断面の方が路面の塑性変形量が2倍程度も大きく、これと関連して土圧や路面たわみも大きくなっている。さらに、ジオテキスタイルのひずみも繰り返し走行に伴う増加がほとんど見られず、路床のたわみを抑止する効果が見られなかった。路床置換厚を低減した2断面を比較しても各計測データには顕著な違いが見られず、ジオテキスタイルの補強効果は期待できないことが判った。すなわち、路床置換厚を低減することは困難であるとの結論を得た。

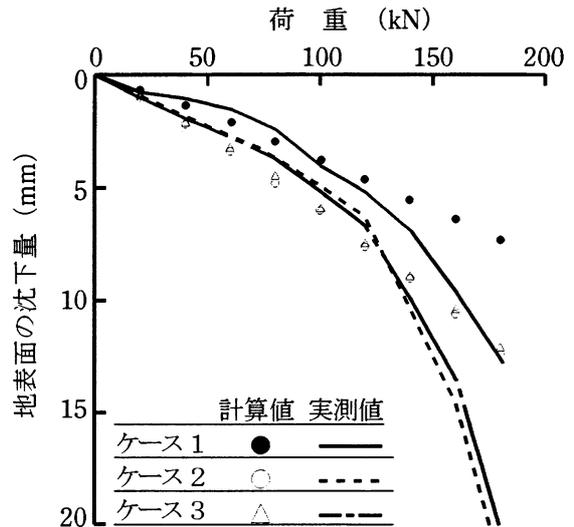


図-1 3 有限要素計算と実測の荷重～地表面沈下量の比較 (静的載荷試験)

表-3 材料物性の推定結果

	原位置試験結果		FEMによる推定値		
	$\rho_d$ 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>3</sup>	CBR %	$K_{30}$ MN/m <sup>3</sup>	E MN/m <sup>2</sup>	$\nu$
表層	-----	-----	244 ~283	2500	0.35
路盤	2.03 ~2.17	-----	127 ~213	300	0.30
路床	1.50 ~1.57	9.1 ~12.9	47 ~64	25	0.30
路体	1.46 ~1.49	1.7 ~3.0	17 ~36	5	0.20
補強材	バネ係数 500~900kN/m (タテ、ヨコ)		バネ係数 500kN/m		

$\rho_d$ : 乾燥密度、CBR: 現場CBR、 $K_{30}$ : 地盤反力係数、  
E: 弾性係数、 $\nu$ : ポアソン比  
路体: 建設残土、路床: 山砂、路盤: 粒調碎石、  
表層: アスファルト、補強材: ジョグリッド

## 5. 有限要素法による解析

前述の3.に記した室内試験のうち静的段階載荷試験の測定値を非線形弾性有限要素解析により再現し、材料物性に関するパラメータの推定を行った。次に、推定値を用いて数値計算によりジオテキスタイルの補強効果について検討した。

非線形弾性有限要素解析は、円形等分布荷重の鉛直載荷であることから軸対称モデルとし、舗装および地盤を弾性係数Eおよびポアソン比 $\nu$ により規定される連続体要素、ジオテキスタイルをバネ係数により規定されるトラス要素とし、さらに路床材とジオテキスタイルは完全に連結するものとして計算し

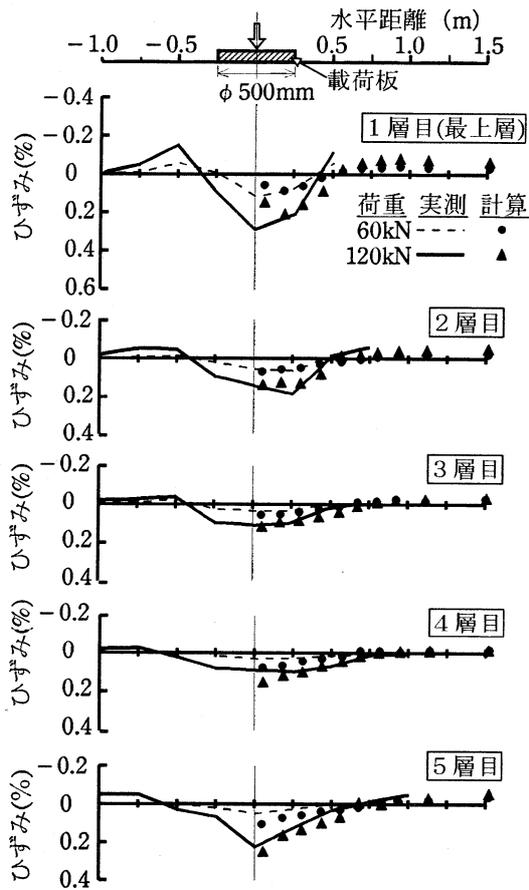
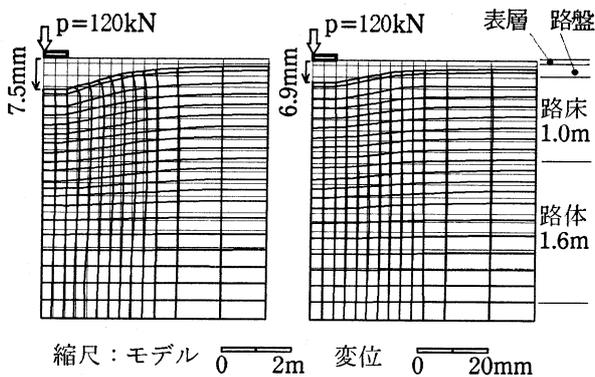


図-14 ジオテキスタイルのひずみ分布に関する解析値と実測値



(a) バネ係数 500 N/mm (b) バネ係数  $5 \times 10^6$  N/mm

図-15 ジオテキスタイルの弾性係数の変化の影響

ている。パラメータ推定の方法は、ポアソン比 $\nu$ として平均的な値を与え、図-13に示すとおり各層の弾性係数 $E$ を実測の地表面たわみ形状に比較的一致するように定めた。この結果推定されたパラメータ値を表-3に示す。

図-14に載荷重 60kN および 120kN のときの各層毎のジオテキスタイルのひずみ分布の実測値と計算値の比較を示す。載荷中心点直下の引張ひずみか

ら水平方向に向けて圧縮ひずみ領域に変化する様子やひずみ量などがよく一致しており、パラメータの推定値の妥当性が判断できる。

次に、ジオテキスタイルのバネ係数を  $10^4$  倍に増大させた数値実験の結果を図-15に示す。このバネ係数は鉄筋金網に相当するオーダーである。地表面の沈下量は約 1 割程度抑制され、水平方向の変位拘束効果の発生も見られるが、それでも路床厚 2000mm の標準舗装断面の地表面沈下量（実測値 5.2mm, 解析値 4.7mm）よりも 3~5 割大きくなる。この解析結果からも、ジオテキスタイルの補強効果に期待して路床置換厚を低減することは困難であることが結論できる。一般に、軟弱地盤上の道路などでは路床に敷設したジオテキスタイルの補強効果が確認されていることと対比するならば、今回のように沈下量が比較的小さなうちは路盤及び表層の剛性が支配的となるためと考えられる。

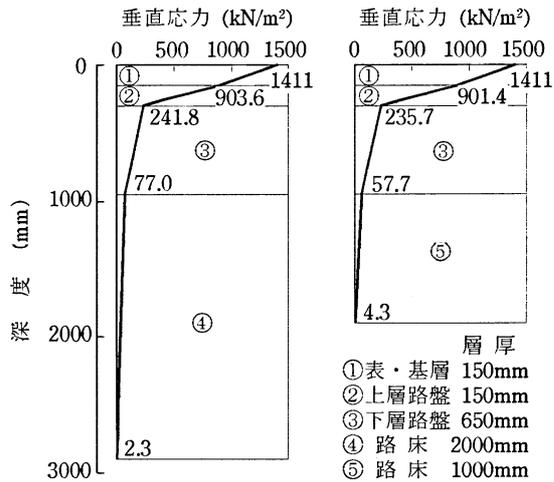
## 6. 多層弾性理論からの考察

前述 4. に記した現場試験舗装走行試験において実施した FWD 試験より得られた表面たわみ量を用いて各層の弾性係数 $E$ の推定を行った。解析には多層弾性理論による構造解析プログラム BISAR を使用した。標準舗装断面の走行回数 0 回時の表面たわみ実測値をよく再現できる各層の弾性係数 $E$ を推定した結果を表-4に示す。

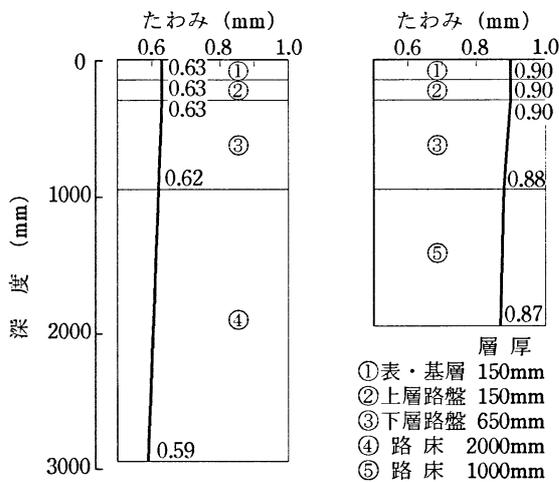
表-4 BISAR を用いて表面たわみ実測値より推定した弾性定数

	$E$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
表・基層 (アスファルト)	10,000	0.35
上層路盤 (アスファルト安定処理)	10,000	0.35
下層路盤 (切入碎石)	600	0.30
路床	500	0.30
路体	5	0.20

この推定値を使用して、標準断面 (A断面) および (B断面) にボーイング 747-400 の脚荷重が作用したときの車輪直下の垂直応力およびたわみを BISAR により計算した結果が図-16である。路床の役割として、交通荷重を分散し路体上面の垂直応力を荷重の大きさによらずほぼ一定にする<sup>8)</sup> ことがあることから、路体上面の垂直応力に着目すると、標準舗装断面では  $2.3\text{kN/m}^2$  (たわみ  $0.59\text{mm}$ ) であるのに対し、路床低減断面では  $4.3\text{kN/m}^2$  (たわみ  $0.87\text{mm}$ ) と 2 倍近くの応力が発生していること



(a) 発生垂直応力



(b) 発生たわみ

図-16 垂直応力と発生たわみのBISAR  
計算結果 (B-747-400 車輪荷重)

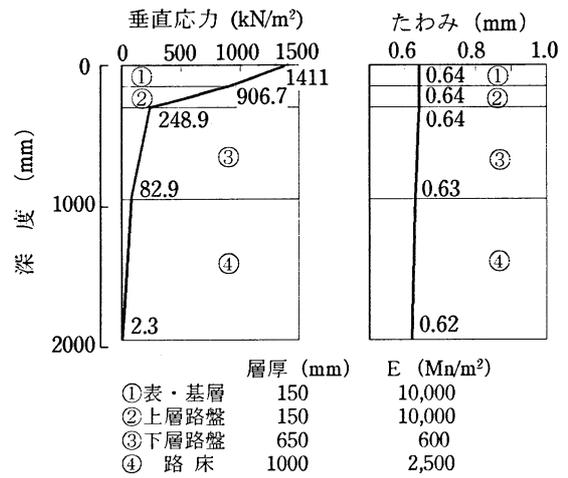


図-17 路床の弾性係数を5倍にした場合  
の路床低減断面の垂直土圧分布

## 7. おわりに

本論文で述べたことをまとめると次のとおりである。

- 路床内に敷設したジオテキスタイルのひずみは、路床上下端で大きな値を示す。また、ひずみ分布は、載荷点直下で引張ひずみを示し、横方向に減衰して圧縮ひずみに変化する。ひずみレベルは0.2～0.7%程度と小さく、路床内で発揮されている拘束応力もかなり小さい。
- 有限要素解析における解析定数については、地表面たわみの実測に合うように各層の弾性係数を設定した。その計算結果は、ジオテキスタイルのひずみ分布などをよく再現できた。
- 有限要素解析の結果、鉄筋金網に相当する程度までジオテキスタイルの剛性を高めると、沈下抑制効果は約1割程度高まるが、それよりも路床厚を大きくした方が効果的である。
- 以上より、施工性の向上策としてジオテキスタイルの路床補強効果に期待して路床置換厚を低減することは、構造上困難である。路床置換厚を低減するためには、ジオテキスタイル程度の補強ではなく、相当低強固な路床を築造する必要があるが、その場合、舗装構造全体から再検討する必要がある。

## 参考文献

- 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，(財)航空振興財団，1993.3
- 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，

がわかる。これは、図-10に示した傾向とも同様である。前述の路床の役割を考えると、路床低減を可能とするためには、路体上面の発生垂直応力を標準舗装のそれと同程度にできるような強さを持つ路床を築造する必要があると言える。

そこで、路床低減断面における路床の弾性係数Eを5倍に増大させた計算を行った。結果は図-17に示すように、路体上面の発生垂直応力を標準舗装断面と同程度とすることが可能となることわかった。しかし、路床の弾性係数EすなわちCBRを5倍程度に高めるということは、下層路盤と同等な粒状材に置換しても困難であることを意味する。このため、挿入するジオテキスタイルの剛性を高める程度では対応できず、安定処理を施すなど特別の工夫を要することになるが、これは相当なコスト増加要因となることから、舗装構造全体として再検討する必要があると言えよう。

- (財) 航空振興財団, 1990
- 3) (社) 土木学会: 舗装工学, (社) 土木学会, 1995.1
- 4) 運輸省航空局: 空港土木施設設計基準, (財) 航空振興財団, 1989
- 5) 伊藤和央, 稲田雅裕, 児玉道久: 東京国際空港新C滑走路の設計について, 第22回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, PP.506 ~ 507, 1995.3
- 6) 常陸壮介, 塩見雅樹, 池田直太, 梅野修一, 滝昌和, 福田直三: 路床をジオグリッドで補強した舗装の載荷実験と FEM 解析, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部, PP.200 ~ 201, 1994.9
- 7) 常陸壮介, 塩見雅樹, 西村大司, 畑山敏, 寺田俊朗, 橋本和明: 空港舗装における山砂置換厚の低減に関する現場実験, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部, PP.202 ~ 203, 1994.9
- 8) (社) 日本道路協会: アスファルト舗装要領, (社) 日本道路協会, P7, 1992.12

## STUDIES ON THE POSSIBILITY OF REDUCTION IN SUBGRADE SOIL REPLACEMENT THICKNESS FOR AIRPORT ASPHALT PAVEMENT

Keiichi AKIMOTO, Hiroshi KANAZAWA and Masahiro INADA

In case the pavement foundation soils is dispersed in characteristics, a uniform bearing capacity cannot be expected, and the foundation itself is not suited to be used as subgrade. Accordingly, the subgrade is made up by excavating and replacing the foundation soil with sand. In that, if the reduction of the subgrade thickness is made possible, the problem of removal of surplus soil will be possibly reduced. With this objective in mind, the geo-textile was inserted into the subgrade to gain the reinforcement effect and the subsequent reduction in replacement thickness. Such a possibility was examined by conducting in-situ tests, laboratory tests and analyses of the test results. The test results reveal that the reduction in thickness is structurally difficult.