

V—18 SAS-BISAR システムを用いたアスファルト舗装の 構造評価法に関する一考察

北海道大学工学部 学生員 横山俊和
北海道大学工学部 正会員 小笠幸雄
北海道大学工学部 正会員 上島 壮
北海道大学工学部 正会員 菅原照雄

1. まえがき

道路交通網の整備が進むにともない道路舗装のストック量は増大し、道路舗装は建設の時代から維持管理の時代へ転換しようとしている。このため、道路技術者にとって道路舗装を適切かつ効率的に維持管理していくための手法を確立することが重要な課題となっている。¹⁾こうした状況のもとで PMS (Pavement Management System) の重要性が認識され各研究機関において研究開発が進められている。²⁾

ここでは当システムのうちアスファルト舗装の構造評価に注目し、構造解析において有力な武器となっているFWD(Falling Weight Deflectometer) とSAS-BISAR システムを使用し、それらについて若干の考察を試みた。

2. SAS-BISAR システム

層構造解析プログラムBISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads)を大型計算機用データ解析ソフトウェアSAS(Super Application System) に組込むことにより、層構造解析を広範囲に利用できるようにしたシステムである。³⁾本システムではBISAR において大量入力、大量出力が可能であるためBISAR の従来の解析の他、舗装体の応答をVisualに把握したり、また舗装体の理論的応答と実際の応答とから舗装体の力学的特性を求めたりすることが短時間でできる。

3. FWD ⁴⁾

舗装の支持力評価のためのたわみ測定機であり、北海道工業大学が所有している。当試験機は最大5,000 kgf の衝撃荷重が発生した時の載荷面中心下のたわみ量及び載荷面中心から任意の距離の数箇所のたわみ量を精度良く測定することができる。

その諸元と概要を表一1及び図一1に示す。表一1に示すように、FWD は計測単位0.001 mmの高精度でたわみを計測することができる。これは後述するように各舗装構成材料の層としての弾性係数が敏感に舗装表面のたわみ量に影響している事実を利用して、そのたわみ量から逆に各舗装構成材料の層としての弾性係数を推定することを試みる場合、基本的に重要なこととなる。

図一2にはSAS-BISAR システムによる、ある高級な舗装 (構造条件: アスファルトコンクリート層 [以下アスコン層という] $E_1=80,000 \text{ kgf/cm}^2$, $H_1=30\text{cm}$, 路盤 $E_2=2,000 \text{ kgf/cm}^2$, $H_2=40\text{cm}$, 路床 $E_3=1,000 \text{ kgf/cm}^2$ — $2,000 \text{ kgf/cm}^2$) での載荷面中心より75cm, 90cm, 120cm, 150cm, 200cm及び250cm の 6点のたわみ量と路床の弾性係数の関係を示す。

表一1 FWD の諸元

衝撃荷重発生装置	
1) 衝撃荷重:	最大5,000kgf
2) 落下高さ:	最大0.4m
3) 重錘質量:	最大150kg (30kg*5)
4) 載荷板 :	直径0.3m及び0.45m
5) 駆動方式:	電動油圧シリンダ
計測装置	
1) 衝撃荷重計測:	ロードセル (5, 000kgf)
2) たわみ計測 :	速度計 (ジオフォン)
計測範囲: 0.001-2.000mm	
計測単位: 0.001mm	
3) 計測条件 :	衝撃荷重制限式 (20-30ms)
4) 計測時間 :	約60s (3ストローク)
5) 計測面 :	路面及び深さ650mm までの 穴の底面

図より表面のたわみ量 0.01mm の変化は、弾性係数にして、ほぼ 100 kgf/cm^2 から 200 kgf/cm^2 に相当していることが分るとともに、FWD のたわみ計測精度であるなら今後解析手法が確立した時、路床の弾性係数を推定する場合もこれを精度良く行なえることが推測できる。

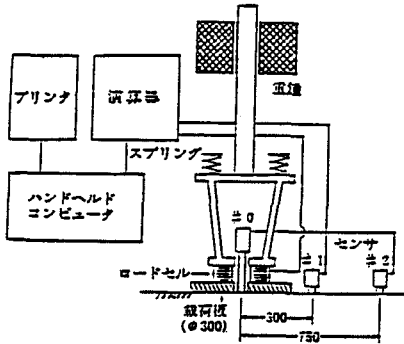


図-1 FWD の構造 (単位 mm)

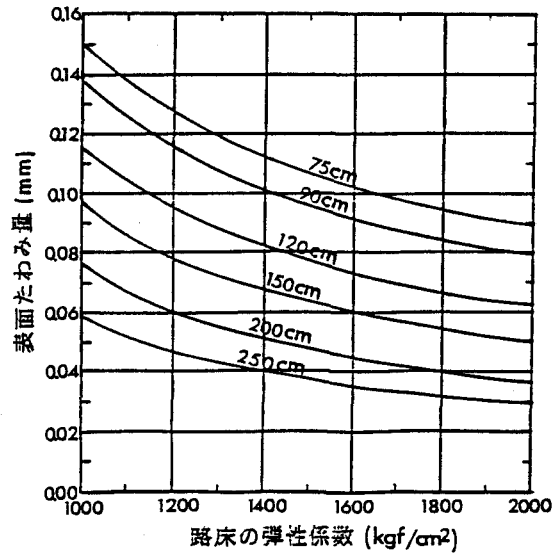


図-2 表面たわみ量と路床の弾性係数の関係

4. アスファルト舗装の構造解析

4-1 理論たわみと実測たわみ

国道36号線美々試験道路及び札幌市道下手稲通りにおいてFWD によって測定された舗装表面たわみの実測値とSAS-BISAR システムによって推定された理論たわみ曲線を図-3 に示す。

ここで、図-3 に示される理論たわみ曲線は、FWD によるたわみ測定が載荷面中心下、載荷面中心から 30 cm の地点及び載荷面中心から 75 cm の地点の3 点にて行なわれた時に推定された曲線である。

図-3 より、FWD によって測定されるたわみ量を利用してSAS-BISAR システムから推定される理論たわみ量は、FWD による実測たわみ量を良く再現していることがわかる。⁵⁾

4-2 舗装表面たわみ形状

図-4 はFWD の荷重が載荷された時、アスコン層の弾性係数のちがいによって、舗装表面のたわみ形状がどのくらい変動しているかをSAS-BISAR システムにより計算したものである。（舗装厚さは一定とする）

同様に、図-5 はアスコン層の厚さ別に舗装表面のたわみ形状を計算したものである。（アスコン層の弾性係数は一定とする）

路床並びに路盤の層としての弾性係数及びその厚さについても同様な結果が得られ、ある荷重が載荷されたときの舗装表面のたわみ形状は、舗装を構成している各材料の層としての弾性係数及びその厚さによって大きく影響されていることがわかる。

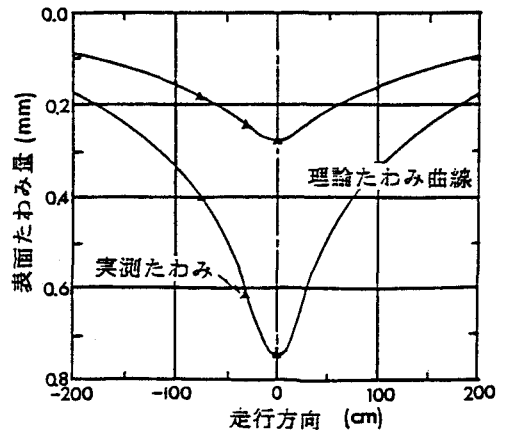


図-3 理論たわみと実測たわみ

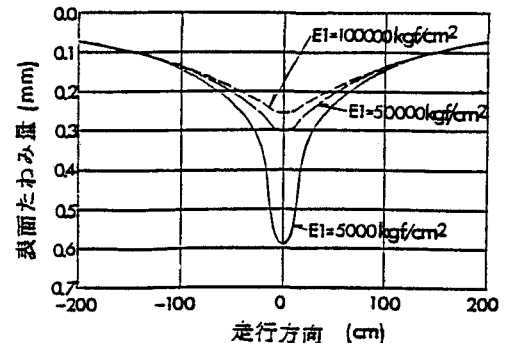


図-4 アスコン層の弾性係数のちがいによる舗装表面のたわみ形状の変動

4-3 各舗装構成層の構造評価法に関する考察

前節に示したように舗装表面のたわみ形状は、各層の弾性係数及びその厚さによって大きく影響される。そこで、逆にたわみ曲線から各層の弾性係数(E_1, E_2, E_3)を推定することを試みるわけであるが、本文ではその第一ステップとして各層の弾性係数を推定するために最も最適なたわみ測定位置を検討した。なお、舗装構造は3層(アスコン層、路盤、路床)とした。

(1) 理論たわみ曲線

まずFWDの荷重が載荷された時、SAS-BISARシステムによって計算される理論たわみ曲線について、その特性点について検討した。

曲線の特性点として図-6に示すように、4つの点(最大点、変曲点及び傾き変化率極大点)を考えた。

舗装を構成している各材料の層としての弾性係数及びその厚さ別に、上記特性点の位置を求めると表-2のようになる。表-2より特性点は、舗装を構成している各材料の層としての弾性係数及びその厚さによらず、載荷面中心からほぼ一定の位置にあることがわかる。このため、上記特性点によって各舗装構成層の構造評価を行なうことは、あまり有効ではないと考えられる。

(2) 各舗装構成層の構造評価に最適なたわみ測定位置の検討

FWDによってたわみ量が測定される位置は、載荷面中心から約2m以内の任意の距離の3ないし5点である。そこで3点及び5点の測定数のとき、それぞれのたわみ量がアスコン層、路盤及び路床の各弾性係数にどの程度影響しているかをSAS-BISARシステムを用いた計算実験で多重回帰分析によりアプローチすることを試みた。

多重回帰分析においては、推定したい各層の弾性係数を独立変数とし、たわみ量の組み合わせを従属変数とした。

BISARの入力条件及び出力位置は図-7に示す通りである。アスコン層の温度が 10°C 以上の条件の時、その弾性係数を $3,000\text{ kgf/cm}^2$ から $80,000\text{ kgf/cm}^2$ としまた、アスコン層の温度が 10°C 以下の条件の時、その弾性係数を $80,000\text{ kgf/cm}^2$ から $250,000\text{ kgf/cm}^2$ とした。⁶⁾路盤の弾性係数は、粒状路盤については $1,000\text{ kgf/cm}^2$ から $5,000\text{ kgf/cm}^2$ 、セメント安定処理路盤については $10,000\text{ kgf/cm}^2$ から $100,000\text{ kgf/cm}^2$ の範囲とした。⁷⁾路床の弾性係数は 100 kgf/cm^2 から $2,000\text{ kgf/cm}^2$ ($E=50\text{CBR}$ と仮定した場合CBR値が2

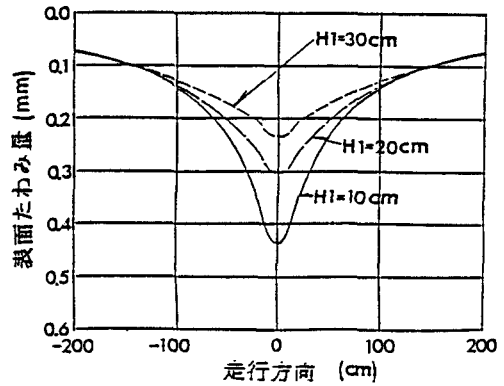


図-5 アスコン層の厚さのちがいによる舗装表面のたわみ形状

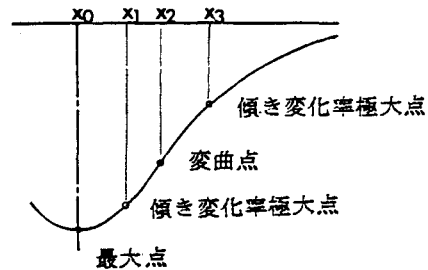


図-6 理論たわみ曲線の特性点

表-2 理論たわみ曲線の特性点の位置

E_1 kgf/cm^2	H_1 cm	x_0 cm	x_1 cm	x_2 cm	x_3 cm
5000	20	0	15.0-15.5	16.0-17.0	17.0-17.5
50000	20	0	15.0-15.5	16.5-18.0	18.0-20.0
150000	20	0	14.0-15.0	15.0-15.5	16.0-17.0
30000	10	0	15.0-15.5	16.0-17.0	17.5-18.0
30000	20	0	15.0-15.5	15.5-17.5	17.5-18.0
30000	30	0	15.0-15.5	17.0-19.0	19.0-20.0

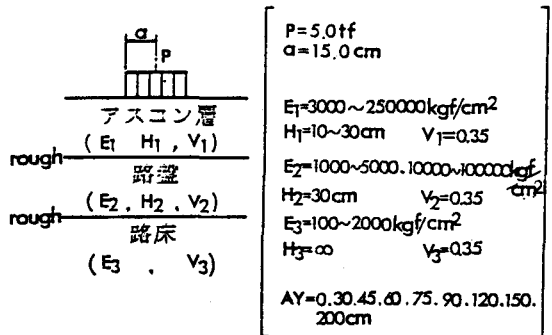


図-7 BISARの入力条件及び出力位置

％ から40％) としている。出力する表面たわみは載荷面中心及び載荷面中心からそれぞれ 30,45,60,75, 90,120,150,200cm離れた地点の値である。

表－3, 4, 5 及び6に解析結果を示す。表には舗装構造別に各層の弾性係数に対する寄与率の最も高いたわみの組み合わせとその寄与率が示されている。ここでは、各層の弾性係数とたわみ量の関係を1次式で回帰しているため、表に示されているような寄与率の大きいたわみ量の組み合わせが必ず各層の弾性係数を推定する時の有効なパラメータになるかどうかの判定は今後の研究を待たねばならない。しかしここに示された結果は、各層の弾性係数の推定作業の第一ステップとして十分役割を果たすものと考えられる。表－3, 4の解析結果及び他の一連の解析結果より測定数が3点の場合、次のようなことが言える。

1) アスコン層の想定温度が10℃以上の条件の時

- a アスコン層の厚さや路盤の種類にかかわらずd0はE1に対する高い寄与率を示す。アスコン層の厚さが大きくなったり、路盤がセメント安定処理路盤になると、載荷面中心からの距離が離れたほうがE1に対する寄与率が高くなる傾向になる。
- b E2に対する高い寄与率を示す組み合わせは、アスコン層の厚さや路盤の種類にかかわらず、載荷面中心からの距離が中間距離（30cmから100cm）付近の組み合わせである。
- c E3に対する高い寄与率を示す組み合わせは、粒状路盤の場合、載荷面中心からの距離が離れている地点の組み合わせである。この傾向はアスコン層の厚さや路盤の種類によって若干の差があるようである。

表－3 アスコン層の想定温度が10℃以上の条件の時の最適たわみ測定位置（3測点の場合）

アスコン層 厚(cm)	粒状路盤			セメント安定処理路盤		
	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与
10	d0,d30,d45 (0.524)	d45,d75,d90 (0.739)	d120,d150, d200 (0.685)	d0,d30,d45 (0.459)	d30,d45,d60 (0.749)	d0,d30,d45 (0.618)
20	d0,d90,d150 (0.529)	d0,d30,d45 (0.442)	d120,d150, d200 (0.641)	d0,d30,d200 (0.466)	d45,d75,d90 (0.714)	d30,d45,d60 (0.630)
30	d0,d45,d60 (0.539)	d0,d30,d45 (0.337)	d45,d60,d75 (0.624)	d0,d75,d200 (0.472)	d60,d90,d120 (0.632)	d30,d75,d90 (0.620)

表－4 アスコン層の想定温度が10℃以下の条件の時の最適たわみ測定位置（3測点の場合）

アスコン層 厚(cm)	粒状路盤			セメント安定処理路盤		
	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与
10	d0,d30,d45 (0.899)	d0,d30,d45 (0.688)	d120,d150 d200 (0.697)	d0,d30,d45 (0.582)	d30,d45,d150 (0.764)	d30,d45,d60 (0.645)
20	d0,d30,d60 (0.914)	d0,d30,d45 (0.466)	d60,d75,d120 (0.717)	d0,d30,d45 (0.901)	d0,d30,d45 (0.771)	d45,d60,d75 (0.653)
30	d0,d30,d45 (0.920)	d0,d30,d45 (0.332)	d75,d90,d120 (0.722)	d0,d30,d45 (0.915)	d0,d30,d45 (0.781)	d45,d75,d90 (0.670)

2) アスコン層の想定温度が10°C以下の条件の時

- a E1に対する高い寄与率を示す組み合わせは、アスコン層の想定温度が10°C以上の場合に比べて、より載荷面中心付近に近づいてくる。
- b E2に対する高い寄与率を示す組み合わせは、アスコン層の厚さや路盤の種類にかかわらず、ほぼ載荷面中心からの距離が45cm以内の組み合わせである。
- c E3に対する高い寄与率を示す組み合わせは、アスコン層の想定温度が10°C以上の場合とほぼ同じ傾向になる。

また表一5、6の解析結果及び他の一連の解析結果より測定数が5点の場合次のようなことが言える。

- 1) 5点を測定した場合も3点を測定した場合とほぼ同じような傾向を示す。
- 2) 5点を測定した場合は3点を測定した場合より、すべてのケースについて高い寄与率が得られる。
- 3) 載荷面中心から200cm離れた地点まで5点を測定すれば、E1,E2,及びE3のどの弾性係数についても、高い寄与率を示す組み合わせを得ることが可能である。

表一5 アスコン層の想定温度が10°C以上の条件の時の最適たわみ測定位置（5測点の場合）

アスコン層 厚(cm)	粒状路盤			セメント安定処理路盤		
	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与
10	d0,d45,d60, d75,d90 (0.562)	d30,d60,d120 d150,d200 (0.774)	d0,d60,d75, d150,d200 (0.709)	d0,d45,d60, d90,d150 (0.504)	d30,d45,d60, d75,d90 (0.766)	d60,d90,d120 d150,d200 (0.675)
20	d0,d90,d120, d150,d200 (0.564)	d30,d45,d60, d150,d200 (0.485)	d45,d60,d90, d150,d200 (0.685)	d30,d45,d90, d150,d200 (0.534)	d0,d75,d90, d120,d150 (0.743)	d45,d60,d120 d150,d200 (0.680)
30	d0,d30,d45, d60,d120 (0.580)	d0,d30,d45, d60,d120 (0.370)	d60,d90,d120 d150,d200 (0.680)	d45,d60,d90, d120,d200 (0.530)	d30,d75,d90, d150,d200 (0.690)	d0,d60,d120, d150,d200 (0.645)

表一6 アスコン層の想定温度が10°C以下の条件の時の最適たわみ測定位置（5測点の場合）

アスコン層 厚(cm)	粒状路盤			セメント安定処理路盤		
	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与	E1への寄与	E2への寄与	E3への寄与
10	d0,d30,d45, d120,d150 (0.919)	d0,d45,d120, d150,d200 (0.790)	d0,d45,d120, d150,d200 (0.772)	d0,d30,d45, d75,d120 (0.804)	d30,d45,d60, d75,d90 (0.766)	d45,d60,d120 d150,d200 (0.686)
20	d0,d60,d120, d150,d200 (0.917)	d0,d45,d120, d150,d200 (0.672)	d45,d60,d120 d150,d200 (0.812)	d0,d30,d75, d120,d150 (0.914)	d0,d45,d60, d75,d200 (0.789)	d30,d45,d120 d150,d200 (0.678)
30	d0,d30,d60, d90,d120 (0.923)	d0,d45,d90, d150,d200 (0.647)	d0,d30,d90, d150,d200 (0.778)	d0,d30,d90, d120,d150 (0.917)	d0,d30,d60, d150,d200 (0.793)	d0,d30,d45, d75,d90 (0.680)

なお、各層の弾性係数を推定する作業において、表中のたわみ量を関数とした 2 組の 1 次式が、その表面のたわみ形状をよく表す場合、その 2 組の 1 次式は、各層の弾性係数を推定するために都合のよいパラメータになっているようである。

5. あとがき

FWD は現在、北海道工業大学にて休みなく稼働中であり北海道内のいろいろな道路において表面たわみ量が測定されている。本報告でも明らかにされたように、FWD の実測データは SAS-BISAR システムによって推定される理論たわみ曲線とよく一致しており、今後さらに精度良く舗装の構造評価が行なえるよう、本解析結果が FWD のたわみ測定的位置を決める際の参考になれば幸いである。

また、本解析の当面の目的は、舗装を構成する各層の弾性係数を精度良く合理的に推定することにあり今後の研究においてその手法の確立を計りたい。

最後に本報告の執筆にあたり、FWD のデータの提供並びに幾多の御助言をいただきました北海道工業大学 笠原教授、北海道開発局舗装研究室の方々に対し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 榎本：土木構造物の寿命とは何か、土木学会誌、1985.8
- 2) 菊川：日本の道路網への舗装管理システム (PMS) の適用について、道路、1985.12
- 3) 小笠、上島、菅原：層構造解析プログラム BISAR の SAS への組込みとその応用、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 第 5 部、1985.9
- 4) 笠原、岳本、伊藤、古川：フォーリング・ウエイト・デフレクトメータについて、舗装、1985.6
- 5) 岳本、笠原：フォーリング・ウエイト・デフレクトメータによるアスファルト舗装の構造評価のペイメントマネジメントシステムへの利用 (第 2 報)、北海道開発局土木試験所月報 NO.387 1985.8
- 6) 菅原、山田、上島：圧裂試験法によるアスファルト混合物の力学性状、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 第 5 部、1985.9
- 7) 住友、川島：セメント安定処理路盤の荷重分散効果 (アスファルト舗装) について、土木学会論文集 第355 号/vi-2、1985.3