

V-32 断熱工法におけるアスファルト舗装の構造評価

北海道工業大学土木工学科 正員 笠原 篤
 ダウ化工 技術開発本部 正員 佐野 修

1. はじめに

積雪寒冷地の舗装において、最も重要な事項は凍上問題である。凍上問題を具体的に検討してみるならば、次のようになるであろう。すなわち、凍結が路盤・路床までおよび、路盤・路床中の水分が氷結する過程で、より下の層から水分の補給をうけ、アイスレンズを形成する。このとき体積が増すことから凍上現象が生ずる。また、春期をむかえ路盤・路床中の水が融解することにより含水比が増加し、路盤・路床の支持力が低下する。支持力が低下するとアスファルト下面に生ずる引張りひずみが大きくなり、少ない載荷回数で疲労にもとづくクラックが発生する。これが亀甲状クラックとしての破壊形態を示すこととなる。

凍上対策として従来から、理論最大凍結深の70%を非凍上性材料で置き換える、いわゆる置換工法が一般的に用いられている。しかし、路床強度および交通荷重から必要とされる構造としての舗装厚より凍結深から求められる置換厚が大きくなると、資源保護および経済性の立場から、断熱材の利用が考えられている。

北海道においては、約18年前から舗装体に断熱材を入れた断熱工法が経験的に用いられてきているが、その合理的な設計法は確立していない。現在のアスファルト舗装の設計法は、CBR法にもとづきアスファルト舗装要綱に示されているが、等値換算係数が得られていない材料については設計が困難である。そのため、断熱材を用いる舗装の構造設計においては、断熱材を路床の一部¹⁾とみなし、路床の合成CBRを求めることにより可能となっている。しかしながら、経済的な舗装構造設計の立場からは断熱材をいかに浅い所に敷設できるかが問題となる。この点に関しては、田口²⁾らの美々試験道路での調査をもとに、凍結深・表面たわみなどなどからの研究がある。

ここでは、フォーリング・ウェイト・デフレクト

メータ（以下FWDという）を用いて、舗装の3点の表面たわみを実測し、層構造の弾性理論解法を介して、断熱工法を用いたアスファルト舗装の構造評価を行ない、より合理的な断熱材を用いた舗装の構造設計法の確立を目指している。

2. フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ

舗装の支持力を評価するため、各国において多くのたわみ測定機が開発されている。その中で、古くから普及しているものとしてベンケルマンビームがあるが、載荷時間の不明確さおよび測定精度上の問題から舗装の構造評価に利用しにくい欠点を持っている。そこで、舗装構造解析への適応性、荷重の大きさ、操作性、価格、我が国特有の車検制度などに鑑み、FWD³⁾⁴⁾がベンケルマンビームにかわる最適なたわみ測定機であると判断し、昭和58年12月に北海道工業大学に導入された。FWDの主な特徴を列記すれば以下ようになる。

- a. 載荷面は円形で、その中心のたわみを測定できる。
- b. 載荷時間が明確(30msec)である。
- c. 重りを落下させることにより最大5トンの荷重が得られる。
- d. たわみ形状を得るために他に任意の2点のたわみも測定できる。
- e. ピックアップ自体が速度計であるため、不動点や基準ビームなどは不用である。
- f. 荷重の大きさ、3点のたわみ量のデータをデジタルでとりだし、ハンドヘルドコンピュータにストアーできる。
- g. 測定地点へはトレーラで移動し、測定に要する時間は1分以内であり、1～2名の人員でオートマチックに測定できる。

図1にFWDによるたわみ測定システムを、写真1にFWD本体を示す。

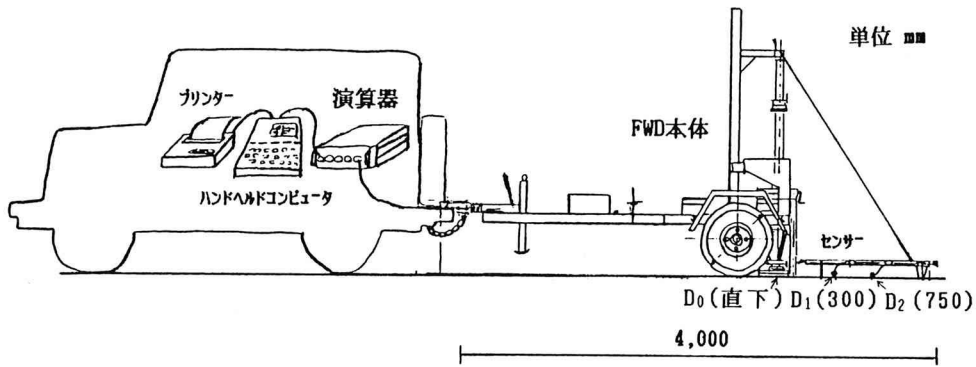


図1 FWDによるたわみ測定システム

3. たわみ測定

砂利道であった農道の改修工事において、従来からの置換工法と断熱工法が採用された舗装体が築構されたので、両舗装の支持力を評価するためにFWDを用いてたわみ測定を実施した。

在来の砂利層の一部を残し、その上に舗装体が作られたことから、それらの断面は若干複雑になっている。図2に示すような舗装構造の上に、直径30cmの載荷板により約2トンの衝撃荷重をかけ、載荷板中央のたわみ (D_0)、載荷中心から30cmのところのたわみ (D_1)、75cmのところのたわみ (D_2)を測定した。その結果を表1に示す。

アスファルト層の温度によってたわみ量は異なるので、アスファルト層の代表的温度を測定することが必要となる。アスファルト層の表面温度は日射、ふく射、風速などにより刻々と変化するため代表的温度とはいえない。そのため、ドリルで40mmの深さの穴をあけ、熱電対方式の温度計を用いて層内温度を測定しこれを代表的な温度とした⁵⁾。

重りの落下高を一定としても、表1にみられるように、同一舗装断面においても荷重の大きさは異なっている。その理由は、落下高が一定であっても舗装体の支持力が大きければ荷重は大きく、測定されるたわみは小さい。支持力が小さければその逆となる。すなわち、荷重及びたわみは舗装体の応答として示されるものであることがわかる。



写真1 FWD

各断面において、載荷中心でのたわみ (D_0)の平均値は、断熱断面で1.48mm、置換断面で0.86mmと、荷重はほぼ同一であるにもかかわらず断熱断面でのたわみは約1.7倍となっている。それは、置換断面に比し舗装厚が薄いことと、弾性係数の小さい(約120kgf/cm²)断熱材が舗装体に含まれていることによると考えられる。

4. 荷重分散性能

断熱工法及び置換工法による舗装体を、表層・路盤・路床とからなる3層構造とみなし、層構造の弾性理論解法プログラム(BISAR⁶⁾)とFWDによるたわみデータを用い、路床・路盤の弾性係数を推定することを試みた。

断熱断面は図2に示したような層構成になっているが、断熱材及び砂層をも含んだものを路盤として取り扱った。アスファルトの弾性係数は、アスファルト層の温度と荷荷時間(30msec)から図3に示されているアスファルト混合物の弾性係数のノモグラム⁷⁾を用いて決定されるので、未知量は路床・路盤の弾性係数となる。路盤の弾性係数(E_2)をパラメータとして、路床の弾性係数と荷重中心から0cm(D_0)、30cm(D_1)、75cm(D_2)における表面たわみ量との関係を、BISARを用いて算出した結果を図4に示す。同図から、実測された各たわみ量(D_0 、 D_1 、 D_2)に対応する路床・路盤の弾性係数を求めることができる。

この方法を適用した結果、断熱断面での路床の弾性係数は350kgf/cm²、路盤の見かけの弾性係数は650kgf/cm²、置換断面での路床の弾性係数は500kgf/cm²、碎石路盤の弾性係数は1,500kgf/cm²となる値が得られた。すなわち、断熱材を路盤の一部としたときの路盤の見かけの弾性係数は、通常の碎石路盤の弾性係数の1/2程度であることが明らかとなった。

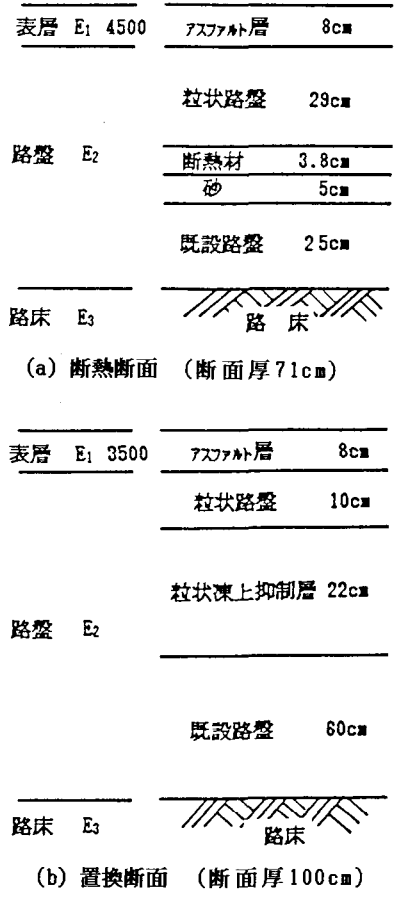


図2 舗装構造

表1 たわみ測定結果

(a) 断熱断面						(b) 置換断面					
POST (Km)	D0 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	LOAD (Kgf)	AST (°C)	POST (Km)	D0 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	LOAD (Kgf)	AST (°C)
1.0	1.787	0.967	0.404	4009	35.0	1.0	0.967	0.576	0.294	3978	37.0
2.0	1.600	0.842	0.334	3967	35.0	2.0	0.854	0.481	0.261	4009	37.0
3.0	1.929	1.004	0.382	3935	35.0	3.0	0.864	0.485	0.244	3988	37.0
4.0	1.915	1.054	0.412	3946	35.0	4.0	0.829	0.474	0.229	3978	37.0
5.0	1.726	0.949	0.432	3883	35.0	5.0	0.852	0.442	0.199	3956	37.0
6.0	1.526	0.906	0.414	3819	35.0	6.0	0.742	0.406	0.183	3978	37.0
7.0	1.537	0.939	0.475	3788	35.0	7.0	0.761	0.429	0.194	3946	37.0
8.0	1.391	0.785	0.387	3851	35.0	8.0	0.824	0.453	0.215	4004	37.0
9.0	1.327	0.795	0.329	3861	35.0	9.0	0.881	0.520	0.243	3988	37.0
10.0	1.320	0.738	0.317	3840	37.0	10.0	0.867	0.524	0.269	4025	37.0
11.0	1.329	0.811	0.380	3819	37.0	11.0	0.861	0.493	0.268	3999	37.0
12.0	1.443	0.861	0.399	3893	37.0	12.0	0.870	0.506	0.274	4025	37.0
13.0	1.323	0.766	0.364	3830	37.0	13.0	0.899	0.507	0.251	3999	37.0
14.0	1.551	0.763	0.384	3904	37.0	14.0	0.873	0.486	0.230	4007	39.0
15.0	1.228	0.608	0.276	3877	37.0	15.0	0.915	0.507	0.268	3978	39.0
16.0	1.198	0.654	0.303	3851	37.0	16.0	0.875	0.489	0.243	3988	39.0
17.0	1.214	0.639	0.282	3851	37.0	17.0	0.876	0.480	0.235	3999	39.0
18.0	1.426	0.704	0.289	3893	37.0	18.0	0.841	0.466	0.254	4030	39.0
19.0	1.663	0.783	0.288	3919	37.0	19.0	0.831	0.490	0.267	4051	39.0
20.0	1.232	0.680	0.282	3830	37.0	20.0	0.876	0.511	0.287	4030	39.0
平均値	1.483	0.812	0.356	3878		平均値	0.857	0.486	0.245	3997	

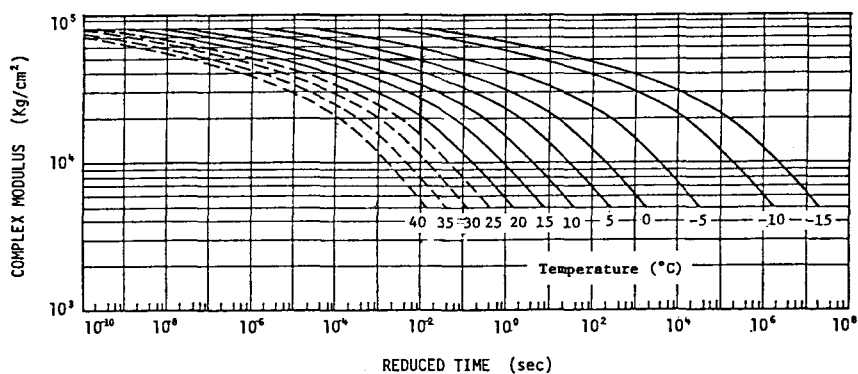
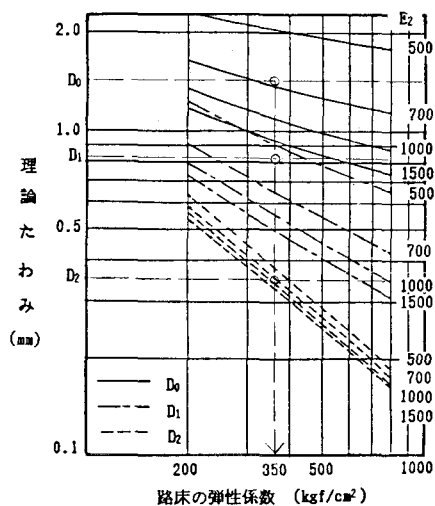
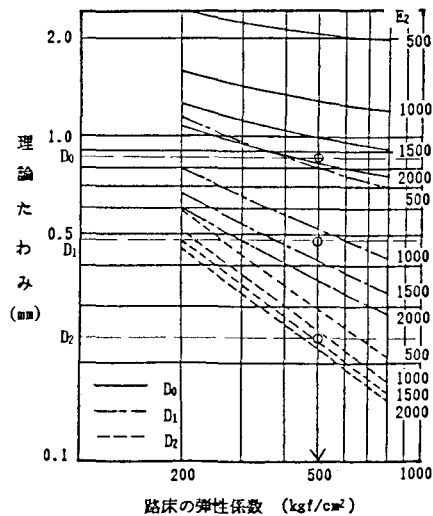


図3 アスファルト混合物の弾性係数 (笠原ら⁷⁾)

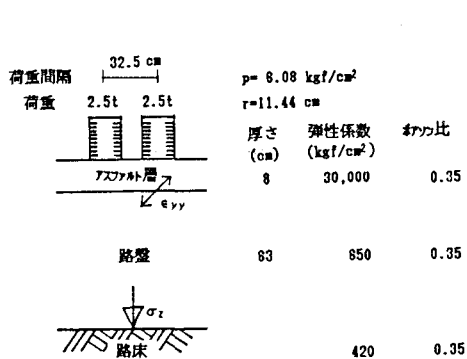


(a) 断熱断面

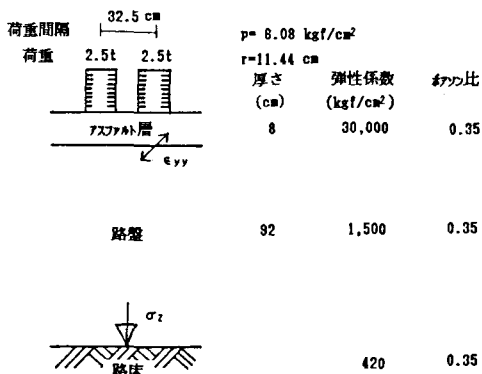


(b) 置換断面

図4 理論たわみ曲線群



(a) 断熱断面 (断面厚71cm)



(b) 置換断面 (断面厚100cm)

図5 解析対象の舗装構造

5. 層構造解析

断熱断面および置換断面から求められた路床の弾性係数は若干異なるが、ここではその平均値を用い図5に示すような条件下で、アスファルト層下面に生ずる引張りひずみと路床上面に作用する垂直応力をBISARによって算出した。

アスファルト層の温度を10℃、車両走行速度を60 km/h程度としたとき、アスファルト層の弾性係数は30,000 kgf/cm²である。また荷重については、軸重10トンの大型車を仮定して輪荷重2.5トンの複輪荷重とした。

アスファルト層下面に生ずる引張りひずみは、タイヤ直下で最大となり、また、路床上面に生ずる垂直応力は荷重中心で最大となる。算出されたアスファルト層下面に生ずる引張りひずみと路床上面に生ずる垂直応力の値を表2に示した。

表2 層構造解析結果

断 面	アスファルト層下面 ひずみ ϵ_{yy} (タイヤ直下)	応力 σ_z (kgf/cm ² ; 荷重中心)	
		断熱材上面	路床上面
置換断面(3層)	401×10^{-6}		0.11
断熱断面(3層)	607×10^{-6}		0.27
断熱断面(6層)	430×10^{-6}	0.55	0.23

置換断面と断熱断面を比較すると、路床に作用する垂直応力は約2.5倍、アスファルト下面に生ずる引張りひずみは約1.5倍となっていることがわかる。

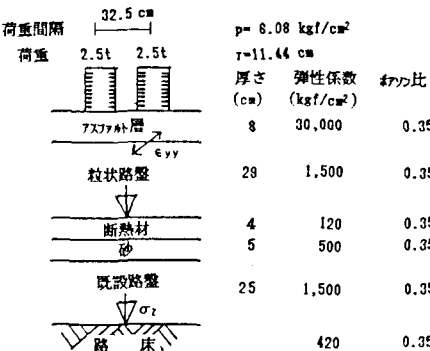


図6 断熱断面の層構成

断熱断面についてより詳細な検討をするため、実際の断面を用いて図6に示すような6層構造の理論解法を行なった。各材料の物性値は図中に示されている。

アスファルト層下面に生ずる引張りひずみの最大値はタイヤ直下で $\epsilon_{yy} = 430 \times 10^{-6}$ 、断熱材上面に作用する垂直応力は0.55 kgf/cm²、路床上面での垂直応力は0.23 kgf/cm²であった。このことは、断熱工法を用いた舗装の構造解析において、断熱材層を含んだ路盤の見かけの弾性係数を用いた3層構造として取扱うことはできないことを意味している。すなわち、各層の物性値を合理的に推定し、6層構造で解析することが重要である。断熱断面でのアスファルト層下面に生ずる引張りひずみは、置換断面に比し、10%程度の差である。路床上面に作用する垂直応力は置換断面に比し2倍程度であることと、3層構造および6層構造として取扱っても路床上面に作用する垂直応力の大きさはほとんど変わらないことがわかる。これらのことは、アスファルト下面に生ずる引張りひずみを論ずるときには多層構造で解析しなければならないこと、また路床に作用する垂直応力を論ずるときには3層構造で解析してもよいことを示している。

断熱材強度については、本工事で使用されている断熱材の許容圧縮強度は3.5 kgf/cm²であることから、断熱材に作用する垂直応力は問題ないといえる。

さらに、断面の耐久性について断熱断面と置換断面を比較すると、アスファルト混合物に生ずる引張

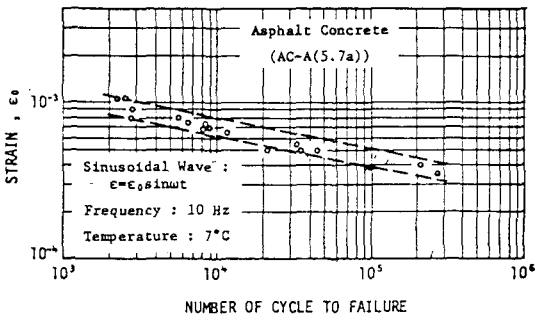


図7 アスファルト混合物の疲労曲線 (笠原ら⁸⁾)

りひずみと疲労破壊の関係⁸⁾(図7)から、それぞれ疲労破壊回数は 1×10^5 回、 1.6×10^5 回となる。このことは、舗装の寿命を交通量でとらえると、車両の走行位置分布⁹⁾をも考慮し、軸重10トンの車両に対して 5×10^5 台および 8×10^5 台程度となることを意味している。すなわち、断熱工法によるアスファルト舗装においては、断熱材という弾性係数の小さい材料が舗装構造体に挿入されていることから、置換工法に比し、路床に作用する垂直応力ならびにアスファルト下面に生ずる引張りひずみは大きくなるが、設計交通量に対する断熱工法断面の強度および耐久性は、疲労破壊曲線によって推定可能であるといえる。

6. 結論

本研究において明らかとなった事項を要約すれば次の通りとなろう。

- ① FWDによるたわみ測定データと層構造の弾性理論解法を組合わせることにより、路床及び路盤の弾性係数を合理的に推定することが可能となる。
- ② 断熱工法の舗装の力学解析において、アスファルト層の下面に生ずる引張りひずみを論ずるときには多層構造として取扱わなければならないこと、路床に作用する垂直応力を論ずるときには、3層構造として取扱ってもよいことが明らかにされた。
- ③ 断熱工法と置換工法を比較すると、断熱工法の方が路床面に作用する垂直応力及びアスファルト下面に生ずる引張りひずみは大となる傾向があるが、設定された軸重10トン荷重の繰返し回数に対して弾性理論解法を用いることにより、合理的舗装厚の設計が可能となるであろう。

むすび

交通荷重から要求される舗装厚に比し、凍結深から要求される置換厚が大となればなるほど、薄い断面で凍上防止効果の大きい断熱工法が有利となる。その効果については既に多くの実績や研究によって広く認められているところであり、断熱材を利用した断熱工法は今後さらに普及すると考えられる。そ

のためには、特殊材料・工法に適したCBR法にかわる合理的な設計方法が必要であるが、本研究によりその方向づけができたと考える。さらに研究を進め、断熱工法の合理的設計法の確立を目指したい。

終りに、FWD測定にご協力いただいた北海道農地開発部、十勝支庁北部耕地出張所の小林氏および上川支庁中部耕地出張所の曾我部氏に感謝の意を表します。また、実験および解析を担当した北海道工業大学の山田、小谷内、吉田の三君に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 有田政博・熊谷茂樹：断熱材工法による舗装の設計について、北海道開発局技術研究発表会資料，昭和59年2月
- 2) 田口史雄・久保宏・熊谷茂樹・有田政博：断熱工法による道路舗装の設計法，土木学会北海道支部論文報告集，第38号，昭和57年2月
- 3) T.M.Thomsen:Phoenix Falling Weight Deflectometer and Registration Equipment,International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfield, Proceedings of Vol.1,Trondheim,Norway,June,1982
- 4) 笠原篤・岳木秀人：舗装構造解析へのフォリング・ウェイト・デフレクトメータの利用，土木学会第39会年次学術講演会講演概要集第5部，昭和59年10月
- 5) C.K.Kennedy:Pavement Deflection,Operating Procedures for Use in the United Kingdom, Transport and Road Research Laboratory ,LR835,1978
- 6) D.L.de Jong,M.G.F.Puetz and A.R.Korswagen:Computer Program BISAR,Layered Systems under Normal and Tangential Surface Loads,Koninklijke/Shell Laboratorium,Amsterdam,1979
- 7) 笠原篤・岡川秀幸・菅原照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集，第254号，1976年10月
- 8) 笠原篤・菅原照雄：繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について，土木学会論文報告集，第235号，1975年3月
- 9) A.Kasahara:Wheel Path and Distribution of Vehicles on Highway,International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields,Proceedings Vol.1,June,1982,Trondheim,Norway