

繰り返し曲げ試験による舗装用混合物の 材料定数推定に関する研究

栗谷川裕造¹・秋葉正一²・木田哲量³・能町純雄⁴

¹正会員 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275 習志野市泉町 1-2-1)

²正会員 工博 日本大学助手 生産工学部土木工学科

³正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科

⁴正会員 工博 日本大学講師 生産工学部土木工学科

本研究は、供試体形状や載荷位置の異なる繰り返し曲げ試験において、変位の実測値とはりの2次元弾性解析結果を用いて舗装用混合物の弾性的な材料定数を推定する手法を提案した。このため、まず、弾性材料を用いた曲げ試験を実施し、弾性解析による変位と実測変位との整合性を例証した。次にこの結果を踏まえ、材料定数の推定方法を呈示し、これをアスファルト混合物の回復弾性係数の推定に適用し、材料定数推定のための本推定手法の合理性を検証した。

Key Words : *repeated bending test, pavement mixture, two dimensional elastic analysis, mechanical properties, resilient modulus, surface displacement*

1. まえがき

舗装用混合物の材料特性を調べる曲げ試験は、曲げ強度を求める他に、ASTM¹⁾(American Society for Testing and Materials)に規定されている応力とひずみ式(以下ASTM公式と略する)を用いて材料定数を推定することや、この結果と繰り返し載荷によって得られる破壊回数等の相関性を求め破壊基準式を作成することに利用される^{2), 3)}。しかしながら、この試験により得られた材料定数については、供試体形状や載荷方法等の試験方法が未だ確立されておらず、既存の試験設備あるいは実路の舗装厚を考慮した供試体高さでの試験を実施するならば、前述したASTM公式を用いることには問題が生じる。また、供試体下面に生ずるひずみのひずみゲージによる測定は、接着などの問題もあり正確なひずみの測定を容易に行うことは難しいと考えられる。したがって、より合理的に材料定数を推定するためには、厳密な弾性解析を行う必要がある。

著者らはこの視点に基づき、初等曲げ理論による応力およびひずみ式の適用不可能な形状を有する曲げ試験用供試体の2次元弾性解析を有限Fourier変換による方法を用いて実施し、せん断効果⁴⁾を考慮したたわみが供試体形状や載荷位置などの違いによって初等曲げ理論によるたわみに対しどの程度影響

を及ぼすかを数値計算により明確にすることができた⁵⁾。そこで、本研究はこの成果をふまえ、任意の供試体形状や載荷位置の異なる繰り返し曲げ試験から材料定数を推定する方法を提案することを試みた。

現在、曲げ試験のみならず間接引張り試験や三軸圧縮試験を利用して、各研究機関で繰り返し載荷試験を実施して求めている舗装用混合物の弾性的性質を表す材料定数は、回復弾性係数や絶対複素弾性係数などがある。いずれの材料定数も一定の繰り返し波形および周波数により、応力あるいはひずみ制御で載荷試験を実施して求めるが、任意の載荷回数に対し、絶対複素弾性係数は、応力およびひずみの振幅を用い、また回復弾性係数は最大荷重による応力と、載荷時と除荷後のひずみの差すなわち復元ひずみを用いて求める。

本論文では測定された変位および荷重の結果と鉛直変位成分の弾性解析結果を利用し、材料定数を推定する方法を示す。このため、まず、等方等質な材料としてアクリルを用い、ASTM公式や実測ひずみを用いて弾性係数を求め、これらの弾性係数を用いて得られる弾性解析による鉛直変位(以下解析変位)と実測変位との比較を行って、弾性解析結果を用いることの妥当性を検証した。その上で鉛直変位成分の弾性解析結果と実測変位を用い、はり供試体の弾性的な材料定数を推定するための手法

表-1 供試体および荷重

記号	供試体形状 b×h×L' (cm)	密度 (t/m ³)	荷重 P(N)
B3	5×3×30	1.187	196
B5	5×5×30	1.187	686
B6	5×6×30	1.187	980

表-2 荷位置および荷条件

荷条件	CASE I	L	L ₁
荷位置	CASE II	24cm	8cm
荷波形	Sin 波		
周波数	1Hz		
サイクル	200		

表-3 中央断面の上面および下面の引張り応力

		B3	B5	B6
CASE I	上面	0.99906	0.98193	0.96235
	下面	1.00013	1.01490	1.02910
CASE II	上面	0.99955	0.98908	0.97108
	下面	0.99970	1.01010	1.02496

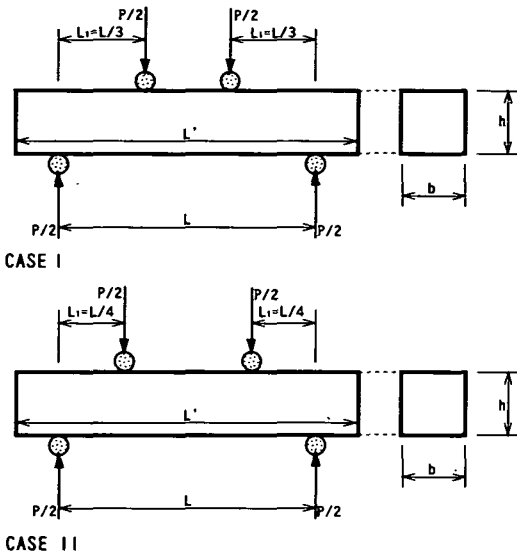


図-1 荷条件 (ASTM¹⁾)

を提案した。特にこの推定方法は、アスファルト混合物の回復弾性係数(以下 M_r)を求めることに適用し、曲げ試験における供試体形状や荷位置の違い、あるいは $-10\sim 20^\circ\text{C}$ までの供試体の温度の違いや自重を考慮した場合に推定される M_r に与える影響を検討した。

2. 弾性材料を用いた検討

(1) 概要

ここでは、弾性材料としてアクリルの棒状供試体を用いた片振りの繰り返し荷試験を実施して、供試体サイズや荷位置の違いがASTM公式を用いて算出される弾性係数の違いに与える影響を検討した。また、この公式を用いて推定した弾性係数は弾性解析による応力と実測ひずみを用いて得られた弾性係数と比較した。さらに、両弾性係数を用いた解析変位を求め、これと実測変位を比較した。供試体としてアクリルを用いたのは、ここでの検討事項が曲げ試験において弾性解析結果の適用の可否を調べることにあり、非等方等質な材料で感温性に敏感なアスファルト混合物ではひずみの測定結果にこれらの影響を受けると考えたためである。

(2) 実験概要

繰り返し荷試験装置はインストロン社製 (Model 8500)の動的荷試験装置である。試験に用いたアクリル供試体の寸法、密度、荷重は表-1に示す通りである。荷条件はASTM

に規定されている2点荷とし、図-1においてCASE IおよびCASE IIの形態で片振りによる荷を実施した。この場合の L および L_1 、荷波形、周波数およびサイクル数は、表-2に示す通りである。なお、変位 d は、設定した荷波形に対し、変位波形の振幅を測定した。また、荷試験は供試体温度が 10°C と一定となるように恒温室内で実施した。

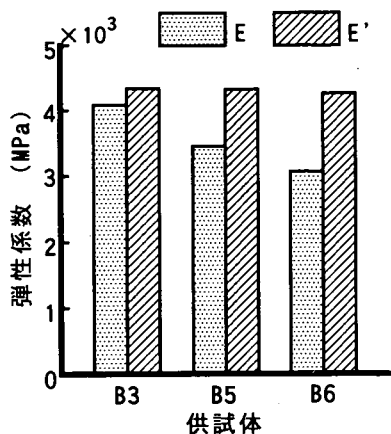
繰り返し荷に対する供試体内部の熱応力の影響について、試験時に供試体表面に設置した温度計により荷中の供試体温度の変化を測定したが、温度増加は認められなかった。

弾性係数 E は実測した荷重、測定変位あるいは測定ひずみを用い、以下に示す2種類の方法により応力 σ およびひずみ ϵ をそれぞれ求めて E を算出した。なお、自重による応力については、自重を荷重で除した比が供試体の中で最も大きいのはB3であり、この場合約0.027である。これより、荷重に対する自重の割合は微小であることから、以下の方法では自重による応力を無視した。

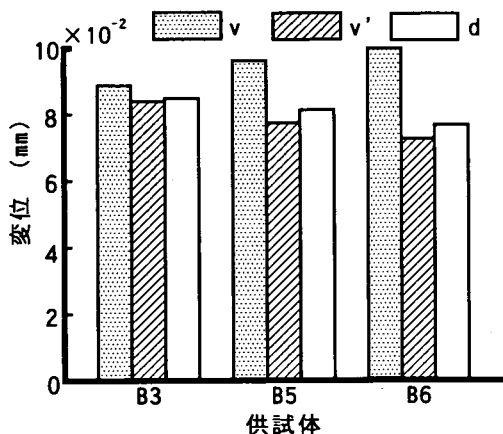
a) ASTM公式による方法(方法1)

ASTMによる応力およびひずみ式¹⁾を以下に示す。ただし、ひずみは測定する変位が荷点におけるものであり、この場合のひずみは式(2)の通りとなる。

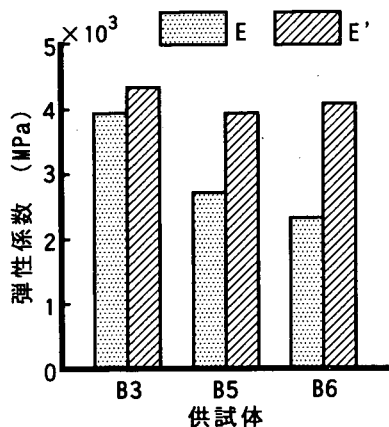
$$\sigma = \frac{3PL_1}{bh^2} \quad (1)$$



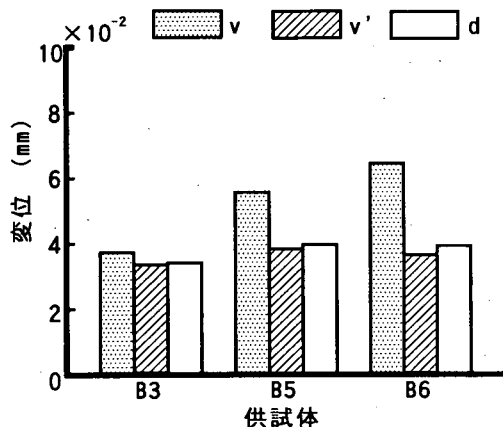
(a) CASE I



(a) CASE I



(b) CASE II



(b) CASE II

図-2 供試体形状と弾性係数の関係

図-3 供試体形状と変位の関係

$$\varepsilon = \frac{3hd}{3LL_1 - 4L_2^2} \quad (2)$$

なお、式(2)において d は測定変位である。

b) 弾性理論による応力と実測ひずみを用いる方法(方法2)

応力は、実測荷重と弾性解析した結果を用い、供試体下面の中央部における応力を計算した。また、ひずみは供試体下面の中央部にひずみゲージを接着し、得られたひずみ波形の振幅を用いた。

ここで、応力については著者らや渡辺らが弾性理論と初等曲げ理論による解析結果の比較を行っており、両解析値の応力の差ははり上面あるいは下面において、はり高さが長さ比べて大きくなるほど差が生じる結果を得ている^{5), 6)}。表-3は本実験で用いた供試体形状について、供試体の上面および下面の中央部において弾性計算した応力を式(1)

の初等曲げ理論による応力で除した比を求めたものである。これより、両者の比はひずみの測定値が真の値とすれば、この程度の差は得られる弾性係数の大きさにあまり影響を与えないと考えられる。しかし、アクリル供試体を完全弾性体と仮定していることから、方法1と方法2により得られた弾性係数に差が生じた場合には、応力よりもひずみ成分がせん断効果による影響を受けていると判断することが可能なことから、応力については厳密解による値を用いた。なお、この場合の弾性計算では、载荷試験において载荷点および支点は丸鋼が供試体と接していることから、この位置における表面の荷重強度分布は放物線荷重により解析した結果⁵⁾を用いた。また、後述する材料定数の推定方法でも、この荷重強度分布による弾性解析結果を用いた。

表-4 ポアソン比 ν と F_ν の関係

ν	CASE I		CASE II	
	荷重	自重	荷重	自重
0.25	1.1212	1.1583	1.1941	1.3583
0.30	1.1212	1.1584	1.1941	1.3584
0.35	1.1212	1.1586	1.1941	1.3586
0.40	1.1213	1.1587	1.1941	1.3587
0.45	1.1213	1.1588	1.1941	1.3588
0.49	1.1214	1.1589	1.1942	1.3589

(3) 結果および考察

a) 弾性係数

図-2はそれぞれの手法によって求めた弾性係数の結果である。なお図において、方法1より得られた弾性係数を E とし、方法2より得られた弾性係数を E' とした。まず、 E は供試体高さの増加に伴い減少しており、その割合はCASEIよりCASEIIの方が大きい。一方、 E' はCASEI、CASEIIともに約3950~4330MPaとその差は380MPaであり、供試体高さや載荷位置にあまり影響されていない。したがって、方法2により得られた E' は、最も確からしい弾性係数と判断して良いと考えられる。また、ASTM公式を用いて弾性係数を推定する場合には供試体高さや載荷位置に影響される結果となり、この傾向は前報⁵⁾で行ったたわみの数値計算結果による傾向と同様であることが確認できた。

b) 変位

図-3は、方法1および方法2の2種類の推定方法を用いて得られた弾性係数を用い、著者らが公表した弾性解析⁵⁾による載荷点での解析変位を計算したものである。同図では、方法1で得られた E を用いて計算した変位を v とし、方法2で得られた E' を用いて計算した解析変位を v' として、これらの解析変位を実測変位 d と比較した。その結果、まず、B3については弾性係数の推定方法の違い、あるいはCASEIおよびCASEIIの違いに関係なくほぼ等しい v と v' の値が得られ、これらは実測変位との差も少ない。一方、B3に比べ供試体高さの高いB5やB6の場合には、 v は実測変位との差が顕著であるのに対し、 v' は d との差異が少ない。したがって、方法2によって得られた最も確からしい弾性係数を用いて計算した解析変位は実測変位と近似していることから、逆に初等曲げ理論の適用不可能なはり形状を有する供試体でも実測変位 d と解析変位 v' が等しいと置いて弾性係数 E を推定することが可能ということが確認できた。

3. 材料定数の推定方法

(1) 概要

舗装用混合物を弾性材料と仮定すれば、曲げ試験を実施して求める材料定数は E と ν である。以下では、繰り返し載荷試験を実施して測定される荷重および測定変位と曲げ試験用供試体の2次元弾性解析による鉛直変位成分の解析結果を用いた材料定数の推定方法を示す。なお、この方法は鉛直変位成分の一般式に含まれている E と ν を逆解析することで求めようとするものであるから、事前にこれら E と ν の違いが解析変位に与える影響を調べておく必要がある。そこで、ここではこの影響について論じた上で、材料定数の推定方法について説明する。

(2) E, ν の違いが解析変位に与える影響

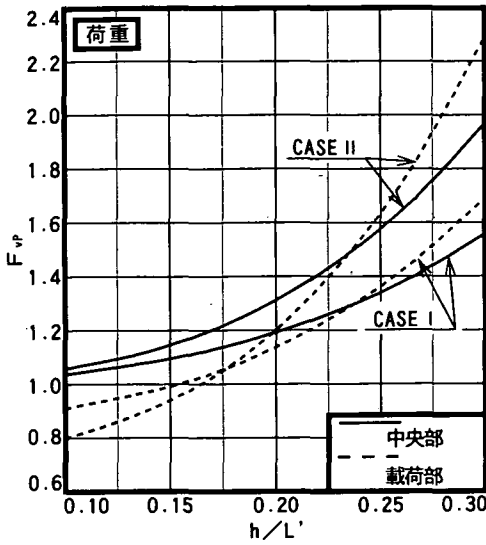
供試体形状、載荷位置および載荷荷重が同一であれば、基本的に解析変位 v は弾性係数 E およびポアソン比 ν の違いによって異なる。この場合、ポアソン比 ν が一定の場合、基本的に変位 v と E には反比例の関係がある。一方、 E が一定の場合、変位 v とポアソン比 ν はある一定の関係が存在するとは言えない。表-4は、2章で用いた弾性材料のうち、B5の形状を用い、はり上面側における中央部の解析変位 v を初等曲げ理論より得られるはり中央部の変位 d で除した比(以下 F_ν)を求め、ポアソン比 ν の違いによる F_ν の変化を調べたものである。これより F_ν は、荷重のみが支点に作用した場合あるいは自重のみが支点に作用した場合ともにポアソン比 ν に差があっても F_ν の差異は認められない。また、これは載荷位置が異なっても同様の結果となっている。文献⁴⁾によれば、張り出しのない場合について、自重を考慮した変位の解析結果を示しており、この場合のはり上面側における中央部の変位は次式で表される。

$$v = \frac{3}{8} \frac{p g}{E h^2} \left[\frac{5}{12} L^4 - \frac{1}{4} h^4 + \frac{4}{5} L^2 h^2 + \nu \frac{h^4}{30} \right] \quad (3)$$

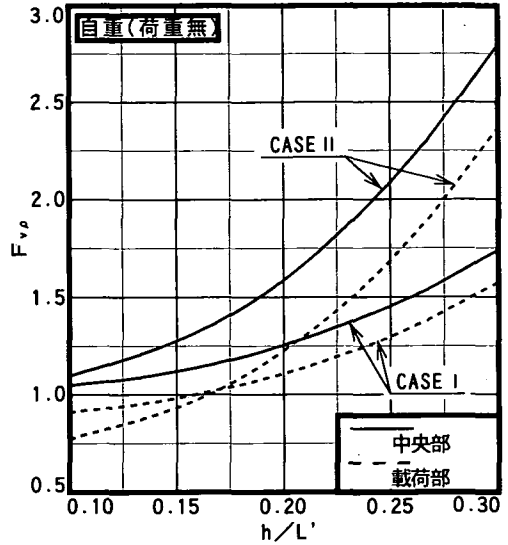
上式を用いて計算した F_ν は、 $L=3$ 、 $h=1$ とすればポアソン比 ν が0.25で1.2062、0.5で1.2064とその差は微小であり、この結果からもポアソン比による影響は無視できることがわかる。したがって、材料定数の推定は解析変位 v に最も影響を与える弾性係数 E のみで、ポアソン比 ν は通常舗装材料の ν として用いられている0.25から0.5の範囲で適当に仮定して良いと言える。

(3) E の推定方法

図-1に示した載荷方法について、供試体長さ



(a) 荷重



(b) 自重

図-4 h/L' と F_v の関係 (CASE I : $L/L'=0.8L$, $L'/L=4/15$, CASE II : $L/L'=2/3L$, $L'/L=1/6$)

L' を一定とし、また、 $\nu=0.3$ とした場合の供試体長さに対する高さの比 (h/L') と F_v との関係は、図-4の通りとなる。このうち(a)図は自重を無視した荷重のみによる F_v (以下 F_{vp}) の計算結果であり、(b)図は載荷重を無視した自重のみによる F_v (以下 F_{vo}) の計算結果をそれぞれ示している。なお、図に示す計算結果ははり上面側における載荷点および中央部の F_v をそれぞれ示した。また、(a)、(b)図における F_{vp} および F_{vo} は、解析変位 v_p 、 v_o とし、初等曲げ理論より計算される中央部の変位を d_p 、 d_o とすればそれぞれ式(4)、(5)の通りである。

$$F_{vp} = \frac{v_p}{d_p} = \frac{2Eh^3}{pL_1(3L^2 - 4L_1^2)} \cdot v_p \quad (4)$$

$$F_{vo} = \frac{v_o}{d_o} = \frac{32Eh^3L'}{RL^4\{5 - 6(L' - L)^2/L^2\}} \cdot v_o \quad (5)$$

ここで、

p : 単位幅当たりの荷重 ($p=P/b$)

P : 荷重

R : 単位幅当たりの自重 ($R = \rho ghL'$)

ρ : 供試体密度

g : 重力加速度

である。なお、支点反力の合計として測定された荷重 P' は、荷重に自重が加わったものである。したがって実測荷重 P' を単位幅当たりの荷重 p' にすれば、単位幅当たりの荷重 p は次式より得られる。

$$p = p' - R \quad (6)$$

表-5 本推定手法より得られた E'' と E' の比 (E''/E')

	B3	B5	B6
CASE I	1.053	1.069	1.080
CASE II	1.048	1.063	1.078

まず、供試体形状 (h/L') から図-4(a)、(b)を用いて F_{vp} 、 F_{vo} を求める。ここで、 $E \cdot v_p$ 、 $E \cdot v_o$ をそれぞれ V_p 、 V_o とすると、式(4)および(5)は次のように変形できる。

$$V_p = E v_p = \frac{pL_1(3L^2 - 4L_1^2)}{2h^3} \cdot F_{vp} \quad (7)$$

$$V_o = E v_o = \frac{RL^4\{5 - 6(L' - L)^2/L^2\}}{32h^3L'} \cdot F_{vo} \quad (8)$$

つぎに、実測荷重 P' から単位幅当たりの荷重 p および R を求め、式(7)および式(8)から V_p および V_o を算出する。

さらに、供試体を弾性体と仮定し、弾性領域の微小変位を測定すると想定することから、解析変位 v_p と v_o は重ね合わせが可能となる。これより、実測変位 d は次式で表されることから、

$$d = v_p + v_o \quad (9)$$

結局、求める E は式(7)と(8)を式(9)に代入し、式(10)により求められる。

$$E = \frac{V_p + V_o}{d} \quad (10)$$

表-6 使用材料

使用材料	名称	比重
粗骨材	6号	2.69
	7号	2.72
細骨材	粗砂	2.68
	細砂	2.67
	フィラー	2.62
アスファルト	ストレートアスファルト (60-80)	1.03

表-7 密粒度アスファルト混合物の性状

最適アスファルト量 O.A.C. (%)	5.3
密度 (t/m ³)	2.38
空隙率 (%)	3.7
マーシャル安定度 (kgf)	1050
フロー値 (1/100cm)	27.5

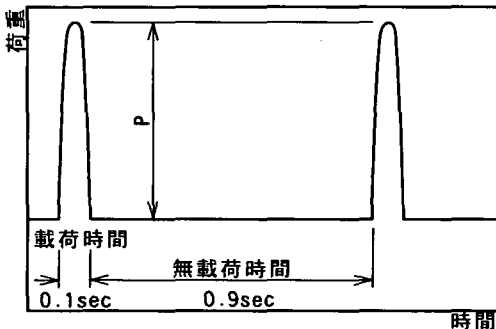


図-5 ハーバーサイン波荷重

表-5は2章で行った弾性材料を用いた曲げ試験において、上記の方法を用いて推定された弾性係数を E'' とし、これと前章の実験における方法2で得られた弾性係数 E' との比 E'/E'' を調べた結果である。これより両者の差は数%生じているが、この程度の差でも実用的には十分と考えられることから、本推定手法の整合性が確認できた。また E'' は、まず供試体寸法に対して図-4から F_{vp} および F_{vs} を求め、つぎに式(7)、(8)および式(10)を用いて推定することが可能なことから、本推定手法は煩雑な計算課程を踏まえずとも簡便に材料定数の推定が行える。

4. アスファルト混合物の M_r 推定への適用例

(1) 概要

アスファルト混合物について、間接引張り試験を

表-8 供試体および荷重

記号	供試体形状	密度 (t/m ³)	荷重 P(N)
	b×h×L' (cm)		
B3	5×3×30	2.38	137~1068
B5	5×5×30	2.38	529~2989
B6	5×6×30	2.38	676~4155

表-9 供試体形状に対する F_v

載荷形態	F_v	B3	B5	B6
CASE I	F_{vp}	0.91	1.03	1.13
	F_{vs}	0.91	1.02	1.11
CASE II	F_{vp}	0.80	1.01	1.20
	F_{vs}	0.78	1.01	1.22

利用した M_r の推定は、ASTMの方法⁷⁾を利用し、いくつかの研究機関で行われている^{8)~11)}。 M_r はハーバーサイン波荷重を用い、ある荷重回数における荷重時と除荷後のひずみの差、すなわち復元ひずみを測定し、これと応力の比によって決定されるものである¹²⁾。曲げ試験により求められる弾性的な材料定数は、絶対複素弾性係数と曲げステイフネス係数がある。いずれも両振りによる繰り返し荷重によって求めるものであるが、この内曲げステイフネス係数もハーバーサイン波荷重による荷重を行う。この係数が回復弾性係数と異なるのは、休止時間中には供試体を元の位置に戻すことから、測定変位はあくまでも振幅変位であり、復元変位でないことである。したがって、本研究では回復弾性係数の概念を繰り返し曲げ試験に導入し、繰り返し荷重における復元変位を測定し、前章で示した推定方法により M_r を求めた。以下ではストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物について、繰り返し曲げ試験を実施し、本推定手法により M_r を推定した場合に、供試体高さや荷重位置の違いが推定される M_r に与える影響について検討した。さらに試験温度の違いや荷重荷重に対する供試体自重の割合の違いが M_r に与える影響についても検討した。

(2) 実験概要

a) 使用材料および混合物

供試体作製に用いたアスファルト混合物の種類は、最大骨材粒径13mmの密粒度アスファルト混合物¹³⁾であり、骨材粒度は示方粒度範囲の中央値を用いた。供試体に使用した骨材およびその物性値は表-6に示す通りである。使用したバインダーは60-80のストレートアスファルトで、混合物作製時のアスファルト量は最適アスファルト量(O.A.C.)と

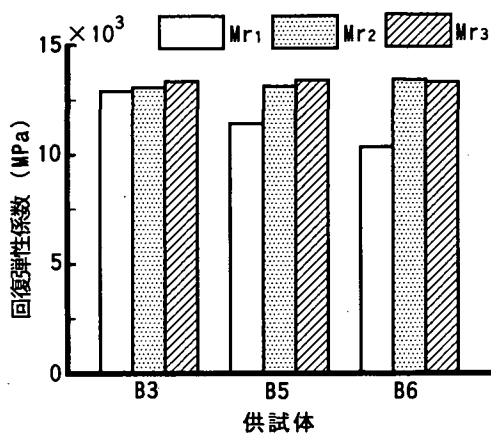


図-6 回復弾性係数の推定結果 (0°C, CASE I)

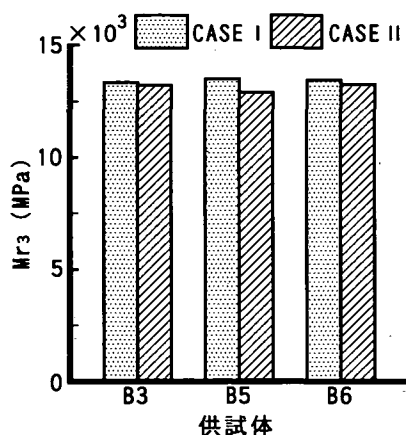


図-7 Mr_3 の推定結果 (載荷位置の違い, 0°C)

した。なお、マーシャル安定度試験¹³⁾を実施した際の密粒度アスファルト混合物の性状は表-7に示す通りである。

b) 供試体作製方法および供試体形状

供試体は、混合物をローラーコンパクタで締固めた40×30×10cmのブロックをダイヤモンドカッタで表-8に示す3つの異なる形状に6面カットしたものをを用いた。供試体の品質の均一性管理はマーシャル供試体のO.A.C.密度を基準密度とし、密度比が100±1%に収まるものを用いた。

c) 載荷方法

載荷位置は、図-1および表-2に示すものと同一である。繰り返し荷重波形は、アスファルト混合物の Mr に関する試験を行った文献^{8)~11)}およびASTMの試験法⁷⁾を参考に、図-5に示すように載荷時間が0.1secで1Hzのハーバースイン波で行った。このときの載荷荷重は供試体の下面ひずみが約200 μ となるような表-8に示す荷重とした。また、載荷試験は供試体温度が一定となるように恒温装置を用い、試験温度が-10, 0, 10, 20°Cの温度条件での片振りによる200回の繰り返し載荷を実施した。

試験は、載荷に対する復元変位を測定し、 Mr の推定に用いる復元変位は同一の試験条件で3回実施した結果の平均値を用いた。なお、繰り返し載荷に対する供試体内部の熱応力の影響について、試験時に供試体表面に設置した温度計により載荷中の供試体温度の変化を調べたが、温度増加は認められなかった。

d) 推定方法

Mr の推定は、載荷回数が200回時の荷重および復元変位を用い、3章で示した E の推定方法を用いて行った。この場合、本実験に用いた載荷位置

および供試体形状に関する Mr の推定時に必要な $F_{v,p}$ および $F_{v,s}$ は図-4より求め、これらは表-9に示す通りである。また、2章で示した2種類の方法による Mr の推定も実施した。なお、便宜上方法1および方法2で得られた Mr をそれぞれ Mr_1 および Mr_2 とし、本推定手法より得られた Mr を Mr_3 とした。

(3) 結果および考察

a) 供試体高さ

図-6は、供試体高さの違いが各推定方法を用いた場合に得られる Mr に与える影響を試験温度が0°Cの場合について調べた結果である。これより、ASTM公式を用いた方法1による Mr_1 は供試体高さの増加と共に減少し、他の推定手法により得られたものとの差が顕著となる。しかしながら、弾性解析による応力と実測ひずみを用いた方法2による Mr_2 と本推定方法による Mr_3 は、供試体高さの違いに関係なくほぼ一定である。また同一高さにおいて両推定手法により得られる Mr_2 および Mr_3 の差もあまり認められない結果となった。この結果は、2章で行ったアクリル供試体を用いた実験結果と同様の傾向で、本推定手法より得られた Mr は低温領域の場合に供試体の高さの違いにあまり影響されないと考えられる。

b) 載荷位置

図-7は、載荷位置の違いが本推定手法を用いて得られる Mr_3 に与える影響を試験温度が0°Cの場合について調べた結果である。これより、同一の供試体形状において載荷位置がCASE IおよびCASE IIのように異なっても Mr_3 には大きな差異が認められない結果となった。したがって、この結果は、2章で行ったアクリル供試体を用いた実験結果

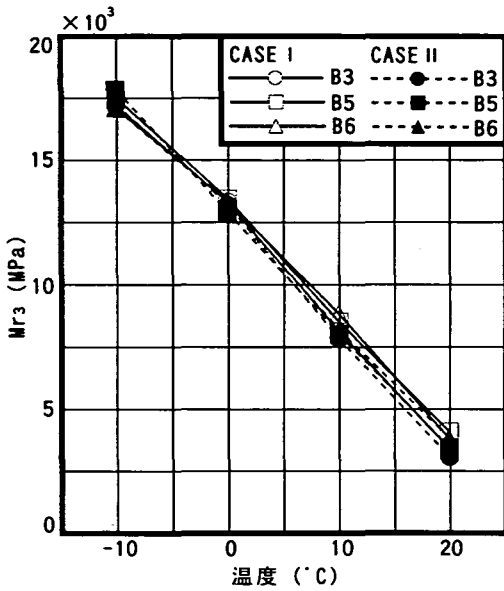


図-8 温度と Mr_3 の関係

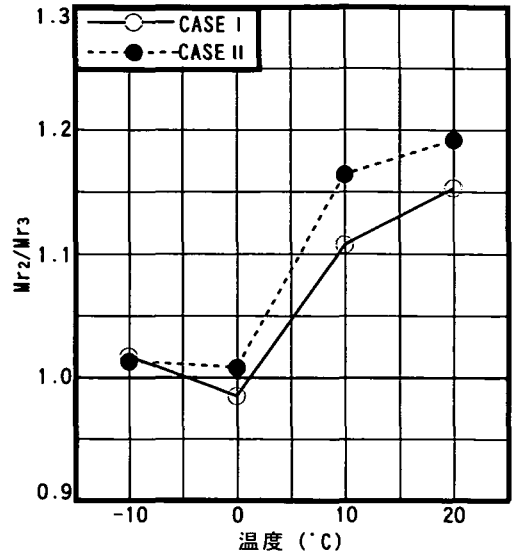


図-9 温度と Mr_2/Mr_3 の関係

と同様の傾向で、低温領域の場合に本推定手法による Mr は荷重位置の違いにあまり影響されないと考えられる。

c) 供試体温度

図-8は、供試体温度の違いが本推定手法を用いて得られる Mr_3 に与える影響について調べた結果である。これより、供試体温度が $0 \sim 20^\circ\text{C}$ までは、 Mr_3 はほぼ直線的に減少する傾向がある。この傾向は、一軸圧縮試験で弾性係数の推定を行った他の研究機関によるものと同様である。ただし、この文献⁸⁾に示されているように 20°C より高温側でもこのような直線関係が得られるか否かは不明である。また、各供試体形状の違いに着目すれば、供試体温度が -10° および 0°C と低温領域の場合には、供試体形状や荷重位置の違いによる Mr_3 の差異はあまり認められないが、高温領域になるにしたがってこれらの影響が現れる。図-8の推定値について、供試体高さや荷重位置の違いに関係なく、同一温度における Mr_3 の変動係数を調べた結果、 10°C 以下では約4%以下であるのに対し、 20°C では約9%と大きい。このような結果は、アスファルト混合物が複合材料であり、それ自体が完全弾性体ではないことから、温度が高くなるほど荷重位置や寸法の違いによって Mr_3 の大きさに違いが生じたと考えられ、これは供試体の大きさの違いによる骨材の配置および配向特性¹⁵⁾ や一種の寸法効果¹⁶⁾ の現れによる影響が大きいと思われる。したがって、混合物の物性が異なれば、供試体形状

の違いによりさらに Mr_3 は大きな変動が生じる可能性があると考えられる。

また、図-9は Mr_2 と Mr_3 の比 (Mr_2/Mr_3) と供試体温度の関係について、両推定手法より得られた Mr の違いを調べたものである。なお、この場合の回復弾性係数は Mr_2 、 Mr_3 ともに供試体サイズに関係なく平均値を用いた。これより、両推定手法より得られる Mr の比は、供試体温度が 10°C および 20°C と高温の場合に Mr_2 の方が Mr_3 よりも大きく、両者の差は顕著となる傾向を示す。ここで、著者らが行った計算⁵⁾によれば、はり供試体の高さが高くなると、荷重点において局部変形を起こすため、上面側と下面側の弾性変位の差が生じる。この場合は上面側の弾性変位が下面側よりも大きくなる。一方、実測ひずみは供試体下面に貼付しているひずみゲージにより測定されたものである。したがって、測定変位から得られた Mr_3 は供試体の上面側での弾性的な変形に対する値であり、実測ひずみから得られた Mr_2 は供試体下面側での弾性的な変形に対する値と考えられる。したがって、このような結果は、アスファルト混合物が高温領域において繰り返し荷重による供試体の上面側と下面側の変形動が弾性的な挙動を示さない、あるいはひずみゲージと供試体の接着等の影響を含んだ結果であると考えられる。

d) 供試体自重

曲げ試験において弾性係数を推定する場合、3章

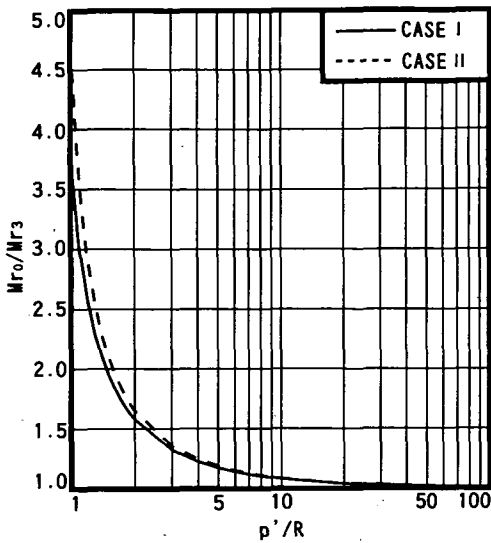


図-10 p'/R と Mr_0/Mr_3 の関係
(Mr_0 : 自重を考慮しない回復弾性係数)

の(3)で示した式(6)から(10)の関係からもわかるように、弾性係数は供試体密度が一定であれば、載荷荷重に対する自重の大きさに影響を受けると考えられる。図-10は本実験で用いたアスファルト混合物の供試体形状と密度を用いた場合、供試体自重を考慮しないものとして推定した Mr を Mr_0 とし、これと Mr_3 の比 Mr_0/Mr_3 を求め、これと自重 R に対する単位幅当たりの測定される荷重 p' の比 p'/R の関係を調べた結果である。これより、 Mr の比は p' が小さい場合に大きく、 p' の増加とともに減少し、自重の影響は無視できるようになる。なお、 Mr_0/Mr_3 は供試体形状の違いに対し図のような評価では差異が認められない結果となった。また、同一の供試体形状および載荷荷重の場合に載荷位置が異なると Mr の比は異なる。以上の結果より、試験温度が高く荷重が小さい場合に、自重によるたわみの影響を考慮せずに実測荷重を用いて Mr を推定すれば、実際よりも高い Mr を推定することになり、その影響の大きさは載荷位置の違いによっても異なると言える。例えば本実験で行った載荷試験において 20°C の場合を例にすれば、 p'/R が小さくなるのはB3の場合で、載荷荷重はCASEIの場合が 137N で、CASEIIの場合が 225N であり、自重は 10N であることから、 p'/R はそれぞれ 13.7 および 22.5 となる。したがって、図-10より自重を考慮した Mr_3 と自重を無視して推定した Mr_0 ではCASEIの場合が約6%で、CASEIIの場合が約4%であるが、この程度の差異は推定結果にあまり影響しないと考

えられる。しかしながら、さらに高温領域での試験や下面ひずみが小さい設定での載荷試験を実施すればこの差は大きくなることが予想できることから、このような場合には自重の影響は無視できないと思われる。

5. まとめ

本研究では舗装用混合物について、既存の試験設備を考慮し、はり高さがはり長さに比べて比較的大きい供試体を用いた場合、あるいは載荷位置が異なる場合の繰り返し曲げ試験を想定し、この試験より変位の測定結果とはりの2次元弾性結果から弾性的な材料定数を推定する手法を提案した。本論文の内容をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 材料定数の推定方法を提案するに当たり、はり高さの異なる3種類の弾性材料の供試体を用い、また載荷位置を変化させて載荷による変位の実測を行った結果、弾性解析結果との整合性が確認できた。
- (2) (1)で弾性解析を用いることの合理性が確認できたことから、供試体形状や載荷位置を考慮した弾性解析による変位の計算結果を用い、簡便に弾性係数を推定する手法を提案することができた。

また、本推定手法と片振りによる繰り返し曲げ試験結果により、アスファルト混合物の回復弾性係数を推定した結果、以下の結果を得た。

- 1) 供試体温度が 0°C 以下と低温領域の場合には供試体高さの違いが推定される回復弾性係数に与える影響は少ない。
- 2) 推定される回復弾性係数は、低温領域の場合載荷位置の違いにあまり影響されない。
- 3) 供試体温度が 20°C までの増加に対し、回復弾性係数はほぼ直線的に減少する。また、供試体温度が 0°C よりも高い高温領域の場合には、供試体高さや載荷位置の違いは推定される回復弾性係数に与える影響が大きくなる。

最後に、本論文では弾性解析結果を用いた弾性係数の推定手法を限られた供試体条件でアスファルト混合物の回復弾性係数推定に適用した例を示した。したがって、本推定手法を利用して得られた回復弾性係数が、混合物の物性や配合特性、さらに載荷方法の違いにどの程度影響するかは今後の研究課題としたい。また、本論文で示した実験では舗装用混合物の材料定数として、回復弾性係数に限って論じたが、本推定手法の疲労試験への適用については別の機会に公表する予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、当時日本大学大学院

生であった林信也氏(現 鹿島道路(株)), 野村博和氏(現 川崎市役所)には実験に際し多大の協力を得た。ここに記して感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) ASTM.D790-92: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, *Annual book ASTM Standard*, 1994.
- 2) 桐山孝晴, 中村俊行: アスファルト混合物の疲労破壊基準について, 土木学会第 48 回年次学術講演会, V-389, pp.804-805, 1993.
- 3) R. ハース・R. ハドソン(北海道土木技術会, 舗装研究委員会): 舗装マネジメントシステム, pp.247-259, 1989.
- 4) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.: *Theory of Elasticity* (Third Edition), McGraw-Hill, pp.46-50, 1970.
- 5) 栗谷川裕造, 秋葉正一, 能町純雄, 木田哲量: 曲げ試験に用いる舗装用混合物の 2 次元弾性解析, 土木学会論文集, No.550 / V-33, pp.63-72, 1996.
- 6) 渡辺正平, 岸武保: 脆性材料の梁の 3 等分載荷による曲げ試験での亀裂発生位置に関する弾性解析による考察, 農業土木学会論文集, 第 163 号, pp.19-27, 1993.
- 7) ASTM.D4123-82: Standard Test Methods for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, *Annual book ASTM Standard*, 1990.
- 8) 峰岸順一, 増山幸衛, 阿部忠行: アスファルト混合物の一軸圧縮試験による弾性係数の推定, 舗装, Vol.28, No.6, pp.22-26, 1993.
- 9) 阿部長門, 宇佐美圭一, 丸山暉彦, 姫野賢治: アスファルト混合物のレジリエントモジュラス, 土木学会第 47 回年次学術講演会, V-44, pp.118-119, 1992.
- 10) 宇佐美圭一, 阿部長門, 雑賀義夫, 丸山暉彦: アスファルト混合物のレジリエントモジュラス(その 2), 土木学会第 48 回年次学術講演会, V-386, pp.798-799, 1993.
- 11) 野田悦郎, 遠藤桂, 新井一仁: アスコンのレジリエントモジュラスに関する検討, 第 20 回日本道路会議論文集, 560, pp.478-479, 1993.
- 12) John A. Deacon: Materials Characterization on Experimental Behavior, Proc., Workshop on Structural Design of Asphalt Concrete Pavement Systems, *Highway Research Board*, Special Report 126, pp.150-179, 1971.
- 13) (社) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, pp.89-99, 1994.
- 14) (社) 日本道路協会: 舗装試験法便覧, pp.506-516, 1988.
- 15) 佐野正典: 粗骨材の形状特性がアスファルト混合物の変形現象に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第 408 号 / V-11, pp.41-50, 1989.
- 16) 例えば, 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.442 / V-16, pp.101-107, 1992.

(1996.6.4 受付)

A STUDY ON ESTIMATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF PAVEMENT MATERIALS BY THE REPEATED BENDING TEST

Yuzou KURIYAGAWA, Shyouichi AKIBA, Tetsukazu KIDA
and Sumio G. NOMACHI

This paper presents the way of finding out the mechanical properties of pavement materials by the results of two dimensional stress analysis of beam. The formulas are applied to compare results of repeated bending test for the various beam shapes and loading conditions.

We firstly carried out the repeated bending test on the elastic material, and made sure of good agreement between the measured and analyzed ones. The simplified method to estimate resilient modulus of asphalt mixture is proposed using the stress analysis.