

## 穴あけベンケルマンビーム試験による舗装構造の解析

### ANALYSIS OF PAVEMENT STRUCTURES MEASURED BY CORE BORING AND THE BENKELMAN BEAM TEST

植 下 協\*・吉 兼 亨\*\*・玉 野 富 雄\*\*\*

By Kano Ueshita, Tōru Yoshikane and Tomio Tamano

#### 1. 緒 言

アスファルトコンクリート舗装の力学的設計は、現在の日本道路協会アスファルト舗装要綱<sup>1)</sup>によれば、路床土の設計 CBR、交通条件、舗装材料のアスファルトコンクリート等値換算係数によって行なわれている。このような設計法に対し、舗装構造が交通荷重に十分耐えるものかどうかを能率的に調べる方法として、ベンケルマンビーム試験による設計法を採用している国も多い。

ベンケルマンビーム試験による舗装設計の原理は、交通荷重に対し、表面のたわみが、舗装の疲労破壊を生じない程度に小さいものであるような構造を作ることであり、その舗装構造の設計には、弾性理論が援用されることになる。

弾性理論により、設計段階で舗装表面のたわみ量を推定するためには、路床ならびに舗装各層の弾性係数を知ることがある。これらの弾性係数は、舗装各層材料のアスファルトコンクリート等値換算係数とも関連づけられている<sup>2)</sup>。

弾性係数を知るためには、個々の材料から供試体を作って室内試験的に調査するのも一つの方法であるが、現地で施工した舗装上で、平板載荷試験またはベンケルマンビーム試験で評価するのがより実際的であると考えられる。

舗装しながら、または舗装を解体しながら、各層ごとに平板載荷試験を行ない、その結果から舗装各層の弾性係数を求める方法については、筆者の一人がすでに報告している<sup>3)</sup>。

この報告では、穴あけベンケルマンビーム試験による舗装各層のたわみ計測法、その計測結果から弾性理論に

基づき舗装各層の弾性係数を求める解析法について述べた。

また、名四国道における試験舗装での穴あけベンケルマンビーム試験結果の解析例を示した。

#### 2. 穴あけベンケルマンビーム試験について

穴あけベンケルマンビーム試験は、1962年に、Walker<sup>4)</sup>が試みているが、当時の解析法は Boussinesq の理論を用いたものであった。

穴あけベンケルマンビーム試験は、舗装にタイヤ荷重が載ったときに、舗装内部の各深さで、どのような変位が生じているかを計測することにより、弾性論解析に役立つデータを得ようとするものである。舗装各深さの変位を読み取るためには、図-1に示すように、所定の深

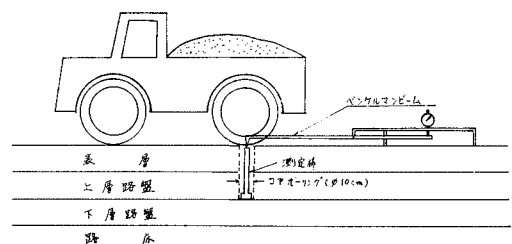


図-1 穴あけベンケルマンビーム試験概念図

さまで直径 10 cm のコアボーリングを行ない、その孔底から孔深にほぼ等しい測定棒を立て、その測定棒の上端をベンケルマンビームの測点とし、トラックによる載荷計測法は通常のベンケルマンビーム試験と同様に行なう。各深さにおける計測値を得るために、コアボーリングを順次深めながら、載荷計測を繰返し、解析を行なう層数に等しいデータを得るものである。

一方、舗装内部各層の弾性係数を求めるために、舗装を順次解体しながら、平板載荷試験を行なう方法がある。その方法によると、一般には 舗装を 1 m 角程度に掘

\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 大有道路建設(株)中央研究所所長代理  
\*\*\* 正会員 工修 大阪市下水道局建設部処理場課設計係

削しなければならず、測定作業にかなりの労力と時間を要し、その後の修復も大がかりとなる。それに対し、穴あけベンケルマンビーム試験は、コアカッターで直径 10 cm 程度の穴をあけるだけで、舗装厚の確認と供試体の採取をかねて行なうことができる。また実際に供用中の状態に最も近い形で舗装材料の弾性係数を計測しうるのが特徴である。

### 3. 穴あけベンケルマンビーム試験の解析法

#### (1) 穴あけベンケルマンビーム試験解析に利用する多層問題計算法

穴あけベンケルマンビーム試験は前節で述べたように、舗装構造の力学的調査法として優れたものであるが、その解析法が簡単でない難点があった。平板載荷試験結果から舗装各層の弾性係数を求める方法<sup>3)</sup>において便利に利用することができた Nascimento らの計算法<sup>5)</sup>は、舗装各層における圧縮量を数値として取り出して扱わない計算法であるため、穴あけベンケルマンビーム試験の解析には使用不能であることがわかった。

厳密弾性理論による多層問題の直接計算はあまりにも複雑であるため、数表またはグラフを作成しておいたうえで利用が考えられ、次節にその種の数表とグラフの一例を示す。しかし、この方法は、Burmister の図表など、二層問題ではよく利用されているが、三層系以上ではパラメーターが多すぎて、一般には利用しにくいものである。

そこで厳密計算によらないで、Odemark による近似計算法<sup>6)</sup> または上田らによる近似計算法<sup>7)</sup> によることが考えられる。これらの近似計算法がこの穴あけベンケルマンビーム試験の解析に利用しうるものであるか否かをあらかじめ知るために、三層系厳密弾性理論解と比較検討をしておく必要がある。

Odemark 法で、修正係数を  $n=0.9$  とした場合、二層系の表面の変位係数が Burmister の厳密解とよく合うことはすでに知られている<sup>9)</sup>。また三層系についても表面の変位係数が厳密弾性理論から計算したものとかなりの一致があることを筆者の一人がすでに報告している<sup>9)</sup>。しかし、これらの比較は多層系の表面に対するもので、多層系の内部については行なわれていない。そこで、三層系各接面の変位係数を厳密弾性理論、Odemark 法、上田法で計算し、Odemark 法と上田法の計算精度を調べてみた。

#### (2) 厳密弾性理論による三層系の表面ならびに各層接面の変位係数の計算

三層系の表面における変位係数の計算は、Kirk<sup>9)</sup> や植

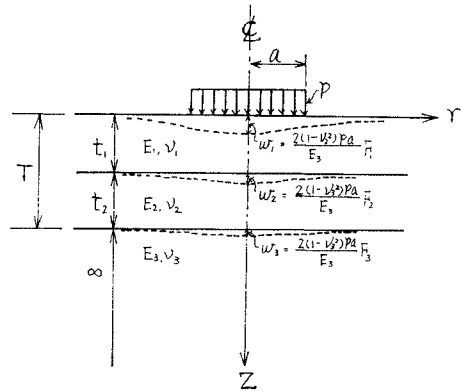


図-2 三層弾性体

下と Meyerhof<sup>9)</sup> らが行なっている。

図-2 に示すような三層系の表面ならびに各層接面の変位係数  $F_1, F_2, F_3$  は、次式で与えられる。

$$F_1 = w_1 \sqrt{\left[ \frac{2(1-\nu_3^2)}{E_3} p \cdot a \right]} \dots \dots \dots (1)$$

$$F_2 = w_2 \sqrt{\left[ \frac{2(1-\nu_3^2)}{E_3} p \cdot a \right]} \dots \dots \dots (2)$$

$$F_3 = w_3 \sqrt{\left[ \frac{2(1-\nu_3^2)}{E_3} p \cdot a \right]} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $F_1, F_2, F_3$ ：円形等分布載荷中心軸上の表面および各層境界面の変位係数

$E_1, E_2, E_3$ ：各層の弾性係数

$\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ：各層のポアソン比

$p$ ：円形等分布載荷重強度

$a$ ：円形載荷面半径

この厳密計算では、各層はポアソン比 0.5 の完全弾性体であるとし、各層境界面でせん断応力は完全に伝えられると仮定した。(この論文では、各層のポアソン比をすべて 0.5 として扱ったが、実際には、舗装材料によって、0~0.5 の間のある値をとると考えられる。しかし、いちいちポアソン比を材料によってかえて計算するのは、実用的には繁雑となるので、すべての場合のポアソン比を 0.5 と仮定して計算した弾性係数を求めておくこととした。したがって、次に表面たわみを推定するときには、ポアソン比を 0.5 と仮定して、この計測と計算に基づく弾性係数を利用すれば、ほぼ妥当に、表面たわみを推定できるであろうと考えた。)

計算条件としては、次のとおりである。

$$E_1/E_2=2, 10, 100 \quad E_2/E_3=2, 10, 100$$

$$T/a=0.5, 1, 2 \quad t_1/T=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$$

文末の 附表-1~3 は、これらのパラメーターの組合せに対する  $F_1, F_2, F_3$  の計算値を数表にまとめたものであり、図-3~5 は、その一部をグラフとして示したものである。なお、数値計算は、植下・Meyerhof<sup>9)</sup> と同じ方法で行なったので、詳細については、参考文献 9)

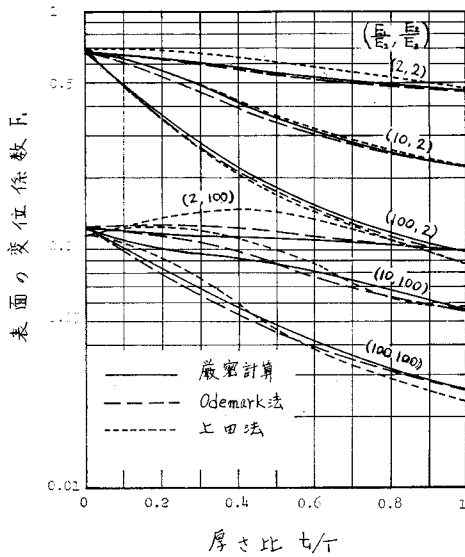


図-3 三層弾性体の表面変位係数  $F_1$  と厚さ比  $t_1/T$  との関係 ( $T/a=2$  の場合)

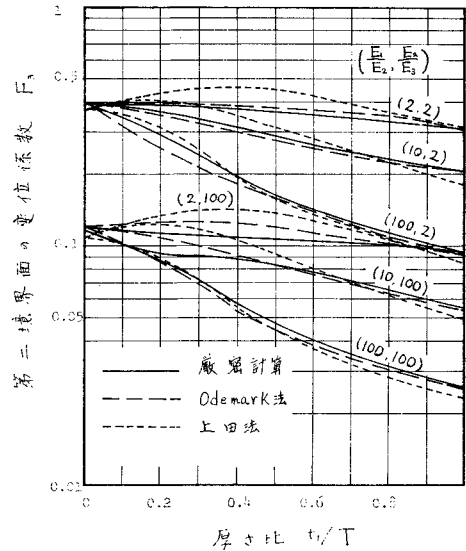


図-5 三層弾性体の第二境界面の変位係数  $F_3$  と厚さ比  $t_1/T$  との関係 ( $T/a=2$  の場合)

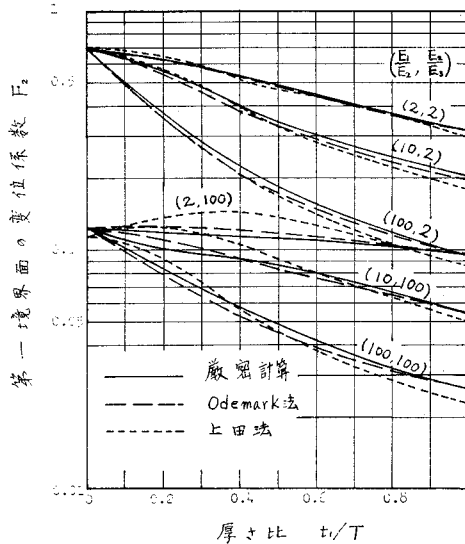


図-4 三層弾性体の第一境界面の変位係数  $F_2$  と厚さ比  $t_1/T$  との関係 ( $T/a=2$  の場合)

の Appendix を参照されたい。

(3) Odemark 法, 上田法による変位係数と厳密計算値との比較

Odemark 法による三層系の表面ならびに各層境界面の変位係数の計算法は次のとおりである。

三層系の表面の変位係数に占める各層ごとの圧縮係数を  $F_1', F_2', F_3'$  とし, 各層のポアソン比を 0.5 とする。

$$F_1 = F_1' + F_2' + F_3' \dots\dots\dots (4)$$

$$F_2 = F_2' + F_3' \dots\dots\dots (5)$$

$$F_3 = F_3' \dots\dots\dots (6)$$

$$F_1' = \frac{E_3}{E_1} \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + N_1^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$F_2' = \frac{E_3}{E_2} \left\{ \frac{1}{\left[ 1 + N_2^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{1}{\left[ 1 + N_2'^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$F_3' = \frac{1}{\left[ 1 + N_3^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (9)$$

ここで,

$$N_1 = n_1 \frac{t_1}{T} \dots\dots\dots (10)$$

$$N_2 = n_1 \frac{t_1}{T} \left( \frac{E_1}{E_3} \cdot \frac{E_3}{E_{12}} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (11)$$

$$N_2' = n_1 \frac{t_1}{T} \left( \frac{E_1}{E_3} \cdot \frac{E_3}{E_{12}} \right)^{1/3} + n_2 \frac{t_2}{T} \dots\dots\dots (12)$$

$$N_3 = n_1 \frac{t_1}{T} \left( \frac{E_1}{E_3} \cdot \frac{E_3}{E_{12}} \right)^{1/3} + n_2 \frac{t_2}{T} \left( \frac{E_2}{E_3} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{E_3}{E_{12}} = \left[ \frac{1 + N_2^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2}{1 + N_3^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2} \right]^{1/2} + \frac{E_3}{E_2} \left\{ 1 - \left[ \frac{1 + N_2^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2}{1 + N_2'^2 \left( \frac{T}{a} \right)^2} \right]^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$E_{12}$  は、第1層に対して、第2層、第3層が一つの下層であると考えるとききの下部複合層の等値弾性係数である。

Odemark の式には、 $n_1$  と  $n_2$  の修正係数が含まれており、Odemark は  $n_1=n_2=0.9$  とおいている。

計算としては、まず  $E_3/E_{12}$  を仮定し、式 (10)~(13) より  $N_1, N_2, N_2', N_3$  を計算し、これを式 (14) の右辺に代入して再び  $E_3/E_{12}$  を計算する。この操作を次の式を満足するまで繰返す。

$$\left| \frac{(E_3/E_{12})_m - (E_3/E_{12})_{m-1}}{(E_3/E_{12})_m} \right| < 0.01 \dots \dots (15)$$

ここに、添字  $m$  は繰返し計算回数を示す。

その結果求めた  $E_3/E_{12}$  を式 (10)~(13) に代入し、さらにその値を式 (7)~(9) に代入し、 $F_1', F_2', F_3', F_1, F_2, F_3$  を計算する。

修正係数  $n_1=n_2=0.9$  については、参考までに、0.8, 0.85, 0.9, 0.95 に変化させて、 $F_1, F_2, F_3$  の計算を行ない、その結果を先に計算した厳密解と比較してみた。修正係数のとり方によって、計算結果は少々異なるが、 $n_1=n_2=0.9$  とした場合が厳密解に最もよく合っている。厳密解と  $n_1=n_2=0.9$  の Odemark 法による値の差は、今回の計算範囲において 1割以内である。

また、上田法によって  $F_1, F_2, F_3$  の計算を行なった。厳密計算値、Odemark 法による近似計算値、上田法による近似計算値の比較例を 図-3~5 に示した。

図-3~5 によると、Odemark 法のほうが、上田法よりも全体的に厳密解に対する近似度がよい。

以上の結果から、穴あけベンケルマンビーム試験の解析に、Odemark 法を用いるのがよいと考えた。

#### 4. Odemark 法による穴あけベンケルマンビーム試験の解析

穴あけベンケルマンビーム試験の解析法として Odemark 法を用いることの妥当性が前節で示された。ここでは、その解析法を、図-6 に示すような三層系に対して例示する。

計測によって得られるデータは、 $p_1, a_1, t_1, t_2, w_1, w_2, w_3$  である。計算順序はまず、

$$E_{01} = 1.5 p_1 \cdot a_1 / w_1 \dots \dots \dots (16)$$

式(16)により  $E_{01}$  を求める。次に、以下式(17)~(21)の計算を  $n=1, n=2$  の場合に対して行なう。

$$E_n = \frac{1.5 p_n a_n}{w_n - w_{n+1}} \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + 0.9^2 \left( \frac{t_n}{a_n} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\} \dots (17)$$

$$E_{n,n+1} = \frac{1.5 p_n a_n}{w_{n+1}} \frac{1}{\left[ 1 + 0.9^2 \left( \frac{t_n}{a_n} \right)^2 \left( \frac{E_n}{E_{n,n+1}} \right)^{3/2} \right]^{1/2}} \dots \dots \dots (18)$$

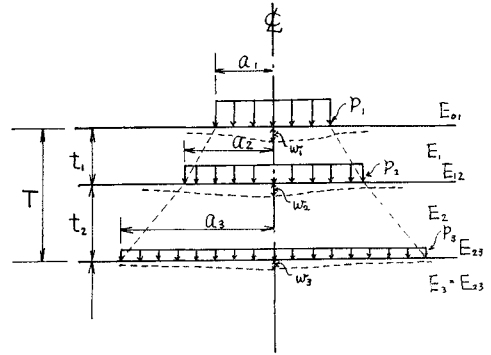


図-6 三層系における穴あけベンケルマンビーム試験の解析法

式 (18) を解くためには、最初、右辺の  $E_{n,n+1}$  に  $E_{n-1,n}$  の値を入れ、次式が満足されるまで繰返し計算を行なう。

$$\left| \frac{(E_{n,n+1})_m - (E_{n,n+1})_{m-1}}{(E_{n,n+1})_m} \right| < 0.01 \dots \dots (19)$$

ここに、添字  $m$  は繰返し計算回数を示す。

$E_{n,n+1}$  が求まれば、 $a_{n+1}, p_{n+1}$  が次式で求まる。

$$a_{n+1} = \frac{1.5 p_n \cdot a_n}{w_{n+1} \cdot E_{n,n+1}} \dots \dots \dots (20)$$

$$p_{n+1} = p_n \frac{a_n^2}{a_{n+1}^2} \dots \dots \dots (21)$$

$N$  層の問題に対しては、得られるデータ、 $p_1, a_1, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}, w_1, w_2, \dots, w_N$  を用いて式 (17)~(21) の計算を  $n=1$  から  $n=N-1$  まで繰返し計算すれば、 $E_{01}, E_{12}, \dots, E_{N-1,N}, E_1, E_2, \dots, E_N, p_1, p_2, \dots, p_N, a_1, a_2, \dots, a_N$  が求まる。

#### 5. 穴あけベンケルマンビーム試験による名四国道試験舗装の解析例

穴あけベンケルマンビーム試験による舗装構成材料の弾性論的解析例として、名四国道試験舗装における測定値を利用してみた。

##### (1) 名四国道試験舗装

名四国道における試験舗装<sup>10),11)</sup> は 図-7 に示すような断面に作られており、上層路盤の部分を試験層とし、15種類の上層路盤材料が用いられている。それらは、加熱アスファルト安定処理(骨材種類、配合をかえた6種類)、アスファルト乳剤安定処理、浸透式マカダム、セメント安定処理(セメント量、骨材をかえた3種類)、石灰安定処理、粒度調整スラグ(硬質スラグ、軟質スラグ)、粒度調整砕石などであり、それらの配合などについて付表-4<sup>10)</sup> に示す。

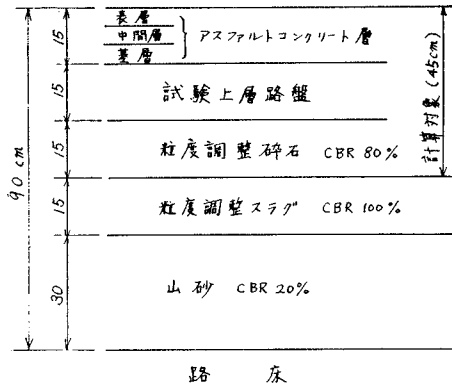


図-7 名四国道試験舗装の舗装構造

(2) 穴あけベンケルマンビーム試験の結果例とその考察

この試験舗装は昭和 44 年 10 月に施工されたものであるが、ベンケルマンビーム試験などによる調査は、施工直後、8 か月後、10 か月後、12 か月後、16 か月後、24 か月後などにおいて行なわれている。ここで用いる穴あけベンケルマンビーム試験の測定値は昭和 46 年 10 月（路面温度は 22~24°C）に測定した結果である。したがって、建設後 2 年目における状態の測定値ということになる。それらの結果のうち、試験舗装工種 No. 2 の例を示すと図-8 のようである。同一材料・構造の舗装であるのに、ばらつきがかなり大きい。これらの平均値によって工種間の比較をするために

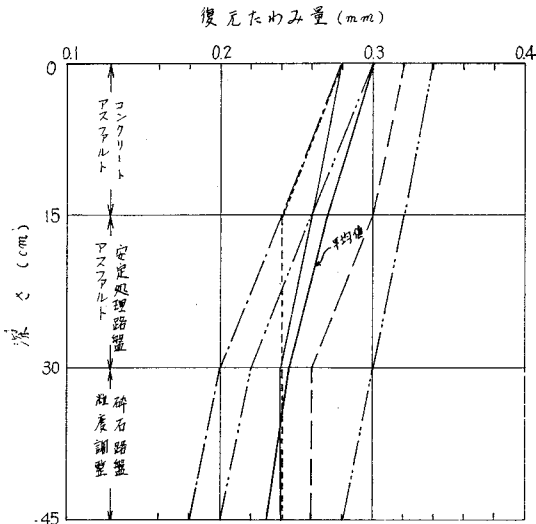


図-8 工種 No. 2 アスファルト安定処理路盤工区における穴あけベンケルマンビーム試験結果

プロットしたものが図-9 である。図-9 では、あまりに煩雑となることを避けるため、付表-4 の 15 工種のうちの 7 工種の場合だけをとり上げて示している。図-8 と図-9 を比較してみると、穴あけベンケルマンビーム試験の測定値は、平均値に対するばらつきがかなり大きいことがわかる。したがって、穴あけベンケルマンビーム試験に基づき、信頼性のある解析を行なうためには、かなりの回数計測値によって平均値の精度を高める必要がある。このばらつきの原因としては、舗装構成厚、構成材料、施工状態、環境条件のばらつきにあわせて、測定装置の性能の問題（測定対象がきわめて小さい量であることに対する機械的精度の問題）、安定性に原因す

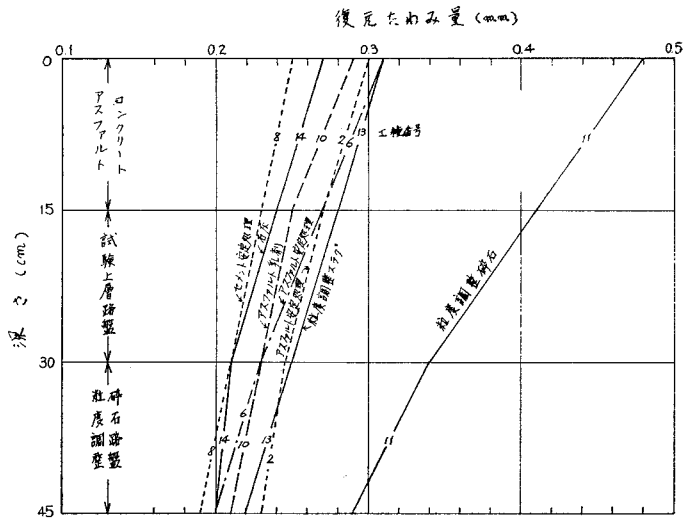


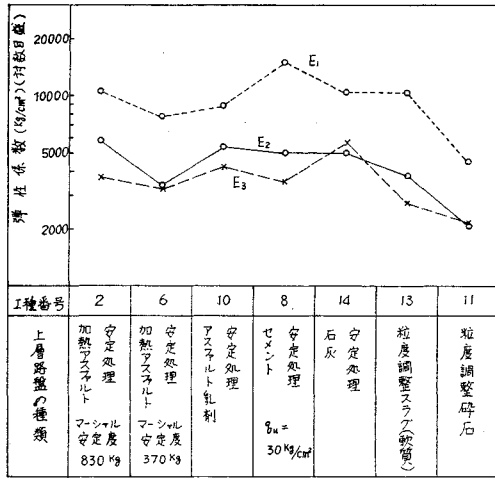
図-9 各工種の試験舗装における穴あけベンケルマンビーム試験の平均値の比較

るばらつき（微量の測定において、風などが影響しやすいことなど）もあると考えられる。

(3) 穴あけベンケルマンビーム試験から計算される弾性係数

図-9 に示した 7 工種の試験舗装における穴あけベンケルマンビーム試験の結果において、全体の調和を考えた補正（工種 No. 10 の深度 15 cm の復元たわみ量、工種 No. 2, No. 14 の深度 30 cm の復元たわみ量を 0.005 mm だけ大きい値とした）を行ない、4. に示した方法によって、第一層（アスファルトコンクリート）、第二層（試験上層路盤）、第三層（粒度調整碎石路盤）の弾性係数、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  を計算して図示したものが、図-10 である。

アスファルトコンクリート層の弾性係数  $E_1$  は、ほとんどの場合、8000~15000 kg/cm<sup>2</sup> と出ているが、粒度調整碎石工区のアスファルトコンクリートの場合には



図一〇 穴あけベンケルマンビーム試験から計算された弾性係数の例

4 500 kg/cm<sup>2</sup> と、他にくらべ低い値を示している。このことより、同一表層材料であっても、表層の弾性係数は、その下の路盤の支持能力の影響をうけることが考えられる。

なお、ベンケルマンビーム試験機では、0.01 mm より小さいたわみを測定することはできない。したがって、第一層の弾性係数を計算するにあたって、第一層の弾性係数がかかなり高い材料の場合、式 (17) の  $w_1-w_2$  は、0.00 mm か、0.01 mm か、0.02 mm かという値になる。この解析法によれば、式 (17) より、 $t_1=15 \text{ cm}$ 、

$p_1=5.74 \text{ kg/cm}^2$ 、 $a_1=17.5 \text{ cm}$  の場合、上記の値に対し、 $E_1 \approx \infty$ 、30 000 kg/cm<sup>2</sup>、15 000 kg/cm<sup>2</sup> が対応する。この点が穴あけベンケルマンビーム試験の一つの限界であることに気がつく。

試験上層路盤の弾性係数  $E_2$  については、粒度調整碎石が他にくらべて低い値を示している。アスファルト乳剤については、建設後かなりの期間を経た後では、加熱アスファルト安定処理路盤に対し遜色のないものであることがわかる。

2種類の加熱アスファルト安定処理路盤の比較から、それらの路盤の弾性係数は、マーシャル安定度の大小に対応する値となっていることがみられる。セメント安定処理、石灰安定処理、粒度調整スラグ(軟質)はいずれも水硬性路盤であり、これらは似たような値を示している。

第三層は、すべてに共通の粒度調整碎石であるが、 $E_3$  は、2 000~6 000 kg/cm<sup>2</sup> というかなり大きいばらつきを示している。粒度調整碎石工区の  $E_3$  は低い値となっているが、上層路盤の拘束力が他の上層路盤の工種にくらべて小さいためであると推測される。なお、4. の計算による荷重分散の状況を図示したものが 図一〇 である。

### 6. 結 語

この報告を要約すると、次のようになる。

(1) 穴あけベンケルマンビーム試験による舗装構造



図一〇 各工種の試験舗装における荷重分散の状況

の力学的調査法について述べた。

(2) 三層弾性体の舗装解析に役立つ各種の条件の場合に対して、表面、第一境界面、第二境界面の変位係数を厳密弾性理論で計算し、その結果を図・表で示した。

(3) 上記の条件に対し、Odemark 法による近似計算を行なったが、その結果は厳密解とよく一致し、Odemark 法が穴あけベンケルマンビーム試験解析法として精度のよいものであることを示した。

(4) 名四国道試験舗装における穴あけベンケルマンビーム試験結果を Odemark 法で解析した例を示した。その際に、穴あけベンケルマンビーム試験は、種々の要因により精度において難点のあることに気づいた。すなわち、弾性係数の高い材料(セメントコンクリートなど)による舗装に適用することはできない。また、計測値のばらつきが大きいので、信頼できる解析を行なうためには、かなりの回数の計測値に基づく必要があると考えられた。

なお、終りにあたり、名四国道における穴あけベンケルマンビーム試験測定結果の利用をお許し下さった建設省中部地方建設局の名四国道工事事務所ならびに中部技術事務所に対し、厚くお礼申し上げます。

本研究の計算には、名古屋大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を利用させていただいたことを記し、感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，昭和 42 年。
- 2) Takeshita, H. : Considerations on the Structural Number, Proc. 2nd Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, 1967, pp. 407-412.
- 3) 植下 協：平板載荷試験から舗装各層の変形係数を計算する方法，舗装，Vol. 6, No. 1 (昭和 46.1)，pp. 13-15.
- 4) Walker, D., Yoder, J., Spencer, T. and Lower, R. : Significance of Layer Deflection Measurements, Highway Research Board, Bulletin 321, 1962, pp. 63-81.
- 5) Nascimento, U., Seguro, J.M., da Costa, E. and Pinela, Sequeiro : A Method of Designing Pavements for Road and Airports, Proc. 5th Int. Conf. on S.M.F.E., Vol. 2, 1961, pp. 283-288.
- 6) Odemark, N. : Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity, Meddelande No. 77, Statens Vaginstitut, Stockholm, 1949.
- 7) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，技報堂，1965年，pp. 59-63.
- 8) Kirk, J.M. : Beregning af nedsyningen i lagdelte systemer, Dansk Vajtidsskrift, Vol. 38, No. 12, 1961, pp. 294-296.
- 9) Ueshita, K. and Meyerhof, G.G. : Deflection of Multilayer Soil Systems, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SM 5, Sept. 1967, pp. 257-282.
- 10) 佐藤 彰・小沢靖夫：名四国道，有松試験舗装について，土木研究所資料第 616 号，昭和 45 年 10 月，pp. 42-51.
- 11) 南雲貞夫・月成 稔：試験舗装に取上げた路盤工種とその効果，土と基礎，Vol. 20, No. 6 (昭和 47.6)，pp. 27-34.

付表-1 厳密計算による三層弾性体表面の変位係数  $F_1$

$T/a$	$E_1/E_2$	$E_2/E_3$	$E_1/E_3$	$t_i/T$					
				0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
0.5	2	2	4	0.926	0.924	0.920	0.906	0.882	0.852
		10	20	0.738	0.719	0.712	0.700	0.677	0.643
		100	100	0.429	0.402	0.397	0.391	0.377	0.351
	10	2	20	0.926	0.918	0.885	0.808	0.722	0.643
		10	100	0.738	0.677	0.643	0.574	0.498	0.429
		100	1000	0.429	0.351	0.338	0.301	0.255	0.214
	100	2	200	0.926	0.872	0.683	0.528	0.423	0.351
		10	1000	0.738	0.606	0.452	0.336	0.262	0.214
		100	10000	0.429	0.305	0.226	0.164	0.126	0.101
1	2	2	4	0.790	0.786	0.761	0.719	0.677	0.640
		10	20	0.487	0.472	0.460	0.443	0.420	0.393
		100	200	0.235	0.219	0.216	0.211	0.202	0.187
	10	2	20	0.790	0.767	0.656	0.544	0.458	0.393
		10	100	0.487	0.438	0.390	0.331	0.278	0.235
		100	1000	0.235	0.191	0.180	0.157	0.132	0.110
	100	2	200	0.790	0.629	0.412	0.296	0.230	0.187
		10	1000	0.487	0.363	0.247	0.177	0.136	0.110
		100	10000	0.235	0.161	0.116	0.083	0.063	0.051
2	2	2	4	0.662	0.639	0.575	0.525	0.490	0.463
		10	20	0.306	0.294	0.277	0.261	0.246	0.230
		100	200	0.125	0.117	0.114	0.111	0.106	0.098
	10	2	20	0.662	0.563	0.414	0.325	0.269	0.230
		10	100	0.306	0.262	0.216	0.179	0.149	0.125
		100	1000	0.125	0.100	0.093	0.080	0.067	0.056
	100	2	200	0.662	0.378	0.223	0.156	0.120	0.098
		10	1000	0.306	0.197	0.128	0.091	0.069	0.056
		100	10000	0.125	0.083	0.059	0.042	0.032	0.026

付表—2 厳密計算による三層弾性体第一境界面の変位係数  $F_2$ 

$T/a$	$E_1/E_2$	$E_2/E_3$	$E_1/E_3$	$t_1/T$					
				0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
0.5	2	2	4	0.926	0.924	0.920	0.902	0.866	0.821
		10	20	0.738	0.719	0.712	0.700	0.677	0.636
		100	200	0.429	0.402	0.397	0.391	0.377	0.350
	10	2	20	0.926	0.918	0.885	0.807	0.718	0.632
		10	100	0.739	0.677	0.643	0.574	0.497	0.427
		100	1000	0.429	0.351	0.338	0.301	0.255	0.214
	100	2	200	0.926	0.872	0.683	0.528	0.423	0.350
		10	1000	0.738	0.606	0.452	0.336	0.262	0.214
		100	10000	0.429	0.305	0.226	0.164	0.126	0.101
1	2	2	4	0.790	0.786	0.754	0.695	0.632	0.569
		10	20	0.487	0.472	0.460	0.443	0.416	0.380
		100	200	0.235	0.219	0.216	0.211	0.202	0.186
	10	2	20	0.790	0.767	0.654	0.538	0.448	0.380
		10	100	0.487	0.438	0.390	0.331	0.277	0.232
		100	1000	0.235	0.191	0.180	0.157	0.132	0.110
	100	2	200	0.790	0.629	0.411	0.296	0.229	0.186
		10	1000	0.486	0.363	0.247	0.177	0.136	0.110
		100	10000	0.235	0.161	0.116	0.083	0.063	0.051
2	2	2	4	0.662	0.626	0.530	0.447	0.362	0.316
		10	20	0.306	0.294	0.272	0.251	0.225	0.201
		100	200	0.125	0.117	0.114	0.110	0.104	0.095
	10	2	20	0.662	0.560	0.405	0.310	0.248	0.205
		10	100	0.306	0.262	0.215	0.176	0.145	0.120
		100	1000	0.125	0.100	0.093	0.080	0.067	0.055
	100	2	200	0.662	0.378	0.222	0.155	0.118	0.095
		10	1000	0.306	0.197	0.128	0.090	0.069	0.055
		100	10000	0.125	0.083	0.059	0.042	0.032	0.026

付表—3 厳密計算による三層弾性体第二境界面の変位係数  $F_3$ 

$T/a$	$E_1/E_2$	$E_2/E_3$	$E_1/E_3$	$t_1/T$					
				0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
0.5	2	2	4	0.868	0.862	0.860	0.852	0.839	0.821
		10	20	0.725	0.698	0.690	0.680	0.664	0.636
		100	200	0.427	0.398	0.397	0.387	0.374	0.350
	10	2	20	0.868	0.845	0.821	0.765	0.700	0.632
		10	100	0.725	0.612	0.612	0.556	0.490	0.427
		100	1000	0.427	0.343	0.331	0.297	0.253	0.214
	100	2	200	0.868	0.796	0.645	0.512	0.418	0.350
		10	1000	0.725	0.571	0.437	0.330	0.261	0.214
		100	10000	0.427	0.297	0.223	0.163	0.125	0.101
1	2	2	4	0.646	0.639	0.628	0.609	0.589	0.569
		10	20	0.459	0.438	0.428	0.415	0.400	0.380
		100	200	0.232	0.215	0.211	0.207	0.200	0.186
	10	2	20	0.646	0.616	0.556	0.486	0.428	0.380
		10	100	0.459	0.394	0.359	0.314	0.270	0.232
		100	1000	0.232	0.184	0.174	0.155	0.131	0.110
	100	2	200	0.646	0.525	0.375	0.282	0.225	0.186
		10	1000	0.459	0.330	0.235	0.173	0.135	0.110
		100	10000	0.232	0.156	0.114	0.082	0.063	0.051
2	2	2	4	0.392	0.388	0.375	0.359	0.329	0.316
		10	20	0.255	0.243	0.232	0.226	0.212	0.201
		100	200	0.120	0.111	0.109	0.106	0.102	0.095
	10	2	20	0.392	0.366	0.314	0.267	0.232	0.205
		10	100	0.255	0.216	0.191	0.164	0.140	0.120
		100	1000	0.120	0.094	0.089	0.078	0.066	0.055
	100	2	200	0.392	0.291	0.198	0.146	0.115	0.095
		10	1000	0.255	0.174	0.121	0.088	0.068	0.055
		100	10000	0.120	0.079	0.058	0.041	0.032	0.026



付表-4 名四国道試験舗装の上層路盤工種と材料

工 種 番 号	工 種	最 大 粒 径 (mm)	粗 骨 材	細 骨 材	結 合 材	備 考
1	浸透式マカダム	60	砕石 2~7号		アスファルト乳剤 857 l/100 m <sup>2</sup>	
2	アスファルト処理	40	切込砕石 40%	山砂 50% スクリーニングス 10%	アスファルト 5%	安定度 830 kg
3	"	"	"	"	" 3%	" 530 kg
4	"	"	山砂利 90%	山砂 10%	" 5%	" 670 kg
5	"	"	"	"	" 3%	" 520 kg
6	"	10		山砂 100%	" 3.5%	" 370 kg
7	セメント処理	40	切込砕石 70%	ダスト 30%	セメント 5.5%	7日圧縮強度 $q_u = 57 \text{ kg/cm}^2$
8	"	"	"	"	" 3%	$q_u = 30 \text{ kg/cm}^2$
9	"	"	切込砕石 30%	山ダスト 50% 砂 20%	" 4%	$q_u = 28 \text{ kg/cm}^2$
10	アスファルト乳剤	"	" 90%	スクリーニングス 10%	アスファルト乳剤 8%	
11	粒調砕石	"	砕石 60%	山ダスト 10% 砂 30%		
12	粒度調整スラグ(硬質)	25	粒調スラグ 100%			
13	" (軟質)	"	"			
14	石灰処理	40	山砂利 90%	山砂 10%	石灰 2.5%	
15	アスファルト処理	25	砕石 61.3%	細砂 20%	アスファルト 4%	安定度 740 kg

(1972.12.4・受付)