



土木研究所資料
第664号

試験道路における試験調査
—自動ベンケルマンビームの比較試験—

昭和46年3月

建設省土木研究所

道路事業調査費による調査試験(試験調査) 道路土工及び舗装に関する試験調査

自動ペンケルマンビームの比較試験

機 械 研 究 室

磯 部 金 治
吉 田 六 三

目 次

ま え が き	1
1. 製 作 目 的	2
2. 路面たわみの理論的考察とその応用	2
3. 路面たわみ量測定車の仕様及び構造	5
3-1 概 要	5
3-2 仕 様	5
3-3 作 動 方 式	9
4. 性 能 試 験	11
4-1 試 験 方 法	11
4-2 試 験 結 果	12
5. ま と め	14
あ と が き	15
参 考 文 献	15

ま え が き

路面や路床のたわみを測定してそれ等の強度を推定し、舗装の構造設計や施工管理に利用している。この方法は Boussinesq の弾性理論並びに Burmister Barber 及び Nascimento 等の多層構造理論に基づき路盤のたわみから弾性係数（変形係数）等の力学的性質をつかむ方法と、たわみと $C \cdot B \cdot R$ 、 K 値等との相関をつかみ路床や路面の強度を推定して舗装の構造設計又はオーバーレイ等の施工管理に用いる方法である。路面のたわみの測定は $C \cdot B \cdot R$ 、 K 値等の測定法に比べ簡単であるので各所で利用されている。しかし従来のベンケルマンビームたわみ量試験方法ではビームの挿入や、測定値の読み取りが人力で行なわれるので交通開放された路面の管理には常に測定員の危険を伴っている。

ここに紹介する測定機はたわみ測定作業の安全と省力化を図る目的で開発されたものでビームの挿入、たわみの測定と読み取りが連続的かつ自動的に行なわれるようにしたものである。

測定作業は測定員と運転員を含めて3名で連続的なたわみ測定ができ約 6.9 sec 間で 5.2 m 間隔に1点のたわみの測定を行なっていく。たわみ量は復元たわみで荷重輪（後輪）が連続的に移動していく間に記録されるので、最大たわみ量ばかりでなくたわみの形が読み取れ、荷重の分散の仕方がたわみの形より推定でき路面の管理に有効である。

この報告は測定機の紹介と従来のベンケルマンビームとの比較試験結果を示したものである。

1. 製作目的

路面の設計、施工管理や舗装の診断に用いるベンケルマンビームたわみ量測定機の測定作業の安全と省力化を図り路面設計、管理の能率的な遂行に役立てる。

2. 路面たわみの理論的考察とその応用

C・B・R試験や支持力係数K値は路床や路盤の支持力を測定する試験法として各所で行なわれているが、これ等の試験方法は取り扱いが面倒で、かつ多量のデータを取る試験法には向かない。そこで近年路面のたわみ量を測定してC・B・R試験値や支持力係数値との相関々係を見つけ、路面のたわみよりこれ等の値を推定しようとする試験が各所で行なわれている。

路面のたわみ測定方法は簡単であり、特に多量のデータを必要とする路面管理には向いている。しかし実際の路面は構造が均質でなく、かつ性質を異にする多層構造となっており、理論式で導かれるようには測定されないが、たわみの性質をつかむ意味でも理論的な検討を試みる。今、路面構造が均質で弾性であると仮定する。Boussinesq及びTimoshenkoの弾性理論によると鉛直の集中荷重が、ある固体水平面に作用するとその固体中の各水平面には次式で示す鉛直応力が生ずる。その鉛直力の強さは荷重直下で最大で、その点でたわみは最大となる。

すなわち鉛直な集中荷重 Q が半無限に広がった固体の水平面上に作用すると固体内の任意の点には次の式で示される鉛直応力が生ずる⁽¹⁾⁽²⁾。

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \left[\frac{1}{1 + (r/Z)^2} \right]^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2U) \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{Z}{r^2} (r^2 + Z^2)^{-\frac{1}{2}} \right\} - 3r^2 Z (r^2 + Z^2)^{-\frac{5}{2}} \right\} \dots\dots\dots (2-2)$$

ここに、 Q ：点荷重の強さ

r ：点荷重の位置から半径方向の距離

Z ：点荷重の位置から垂直方向の距離

σ_z ：鉛直方向の主応力

σ_r ： Z 軸に平行な面の主応力

U ：ポアソン比

今半径 a なる円形をした等分布荷重 P が載荷された時中央部の Z なる点の応力は(2-1)(2-2)式を使って次式で示される。

$$\sigma_z = P \left[1 - \frac{\left(\frac{Z}{a}\right)^3}{\left\{1 + \left(\frac{Z}{a}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \right] \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2} \left[1 + 2U - \frac{2(1+U)\left(\frac{Z}{a}\right)}{\left\{1 + \left(\frac{Z}{a}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}} + \frac{\left(\frac{Z}{a}\right)^3}{\left\{1 + \left(\frac{Z}{a}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \right] \dots\dots\dots (2-4)$$

$U = 0.5$ とすると

$$\tau_z = \frac{3}{4} \frac{\left(\frac{Z}{a}\right)}{\left\{1 + \left(\frac{Z}{a}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots (2-5)$$

従って Z 点のたわみは $U = 0.5$ とすると

$$\tau_z = \int_z^\infty (\sigma_z - 2U\sigma_r) = \frac{1.5 P_a}{E} \dots\dots\dots (2-6)$$

となる。剛性円形載荷板で荷重をかける場合は応力分布が載荷板の周辺において大きくなっており、Timoshenkoによれば

$$\varepsilon_z = \frac{1.18 P_a}{E} \dots\dots\dots (2-7)$$

となる。支持力係数 K 値は我が国に於いては30 cm の剛性載荷板を利用して次式で示される。

$$K = \frac{P}{d} \dots\dots\dots (2-8)$$

ここに、 K ：支持力係数値 (Kg/cm³)

P ：載荷板上の荷重強度 (Kg/cm²)

d ：載荷板の沈下量 (cm)

従ってC・B・R試験値を直径5 cm の剛性載荷板による平板載荷試験と考えると貫入量0.25 cm (アスファルト舗装路盤の場合、標準荷重強度70 Kg/cm²)に於ける板の荷重強度 P 、支持力係数 K_5 及びC・B・Rと K 値の関係は(2-7)、(2-8)式より次式で示される⁽³⁾。

$$P = 0.7 C \cdot B \cdot R \dots\dots\dots (2-9)$$

$$K_5 = 2.8 C \cdot B \cdot R \dots\dots\dots (2-10)$$

$$C \cdot B \cdot R = 2.14 \cdot K_{30} \dots\dots\dots (2-11)$$

又ベンケルコンビーム沈下量と K_{30} の関係は次式で示される。

$$K_{30} \cdot d = \frac{a_2}{a_1} \cdot P \dots\dots\dots (2-12)$$

ここに、 K_{30} ：直径30 cm 円板の支持力係数値

d ：たわみ量 (cm)

a_1 ：剛性載荷板の半径 (cm)

a_2 ：タイヤの平均接地面の半径 (cm)

P ：後輪ダブルタイヤの平均接地圧 (Kg/cm^2)

実際にはベンケルマン沈下量はけん引車後部の荷重輪のダブルタイヤの中央の沈下であってタイヤの直下より小さい⁽⁴⁾。タイヤの接地面の直径45 cm，接地圧 $3.14 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ と仮定して計算すると右辺は4.7となる。我が国で全国的な調査に基づき，この関係が示されているが相関々係が強い⁽⁵⁾。先にも述べたように路面は不均一な多層構造体であり，たわみ量は単純には求められない。近年電子計算機の利用により，これ等の解法についても理論的な検討が進められている⁽⁷⁾。

3. 路面たわみ量測定車の仕様及び構造

3.1 概 要

この測定車は大型トラック後部に連結されたガイド車の下へ間けつ的に移動できる測定車を組み込み、トラックを2.7 Km/h のスピードで連続移動する時5.2 m間隔で1点のたわみが自動的に測定できるようになっている。測定人員は3人で充分であり、回送の時は測定車、ガイド車を備え付けのクレーン装置で積み上げて格納できる。なお詳細な仕様については文末の文献を参照されたい(5)。

3.2 仕 様

名 称 自動路面たわみ量測定車

型 式 被けん引式ベンケルマンビーム式

性 能

測定ビームの数	2 本
ビームレバー比	2 : 1 (ビーム先端側, 2 m)
測定できる最大たわみ	5 mm
測 定 精 度	5 % 以下
最 少 精 度	1/100 mm
測定許容最小回転半径	50 m
試 験 速 度	1.5 ~ 2.7 Km/h (変速機, 1 速) 副変速機低速
測定ピッチ	5.2 m / 1 サイクル
測定車全重量 (ガイド車及び測定車)	920 Kg

計 測 器

記 録 器	ペン書きオシログラフ (リニアコーダ)
紙送り方式	移動距離と連動
ピックアップ	差動トランス

けん引用トラック

型 式	日野 KB 320 改造型, ダブルキャブ
乗 車 定 員	6 名
最大積載量	6 ton
車 輛 重 量	7,700 Kg
全 長	8,420 mm

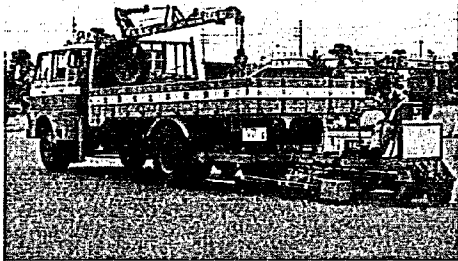


写真-1 自動ペンケルマンビーム測定車全体

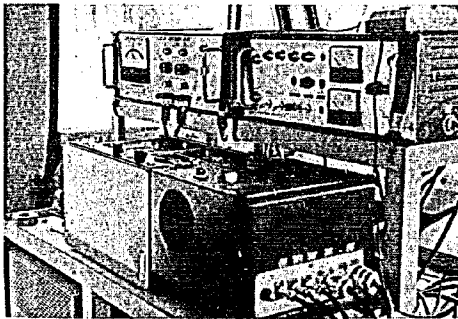


写真-3 測定記録装置

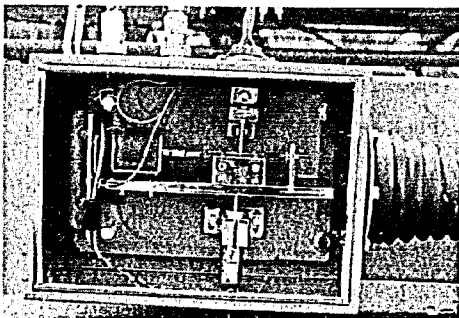


写真-4 測定検出装置

全 巾 2,490mm
 後 軸 荷 重 10ton
 クレーン装置
 型 式 共栄コニッククレ
 ーンU-300F(2.9t)
 附 属 装 置
 後部吊上げ装置 載荷々重

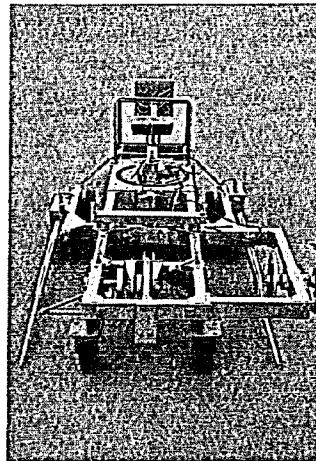


写真-2 自動ペンケルマン
ビーム測定機全体

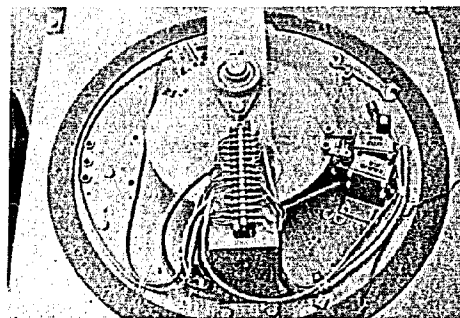


写真-5 側定制御装置

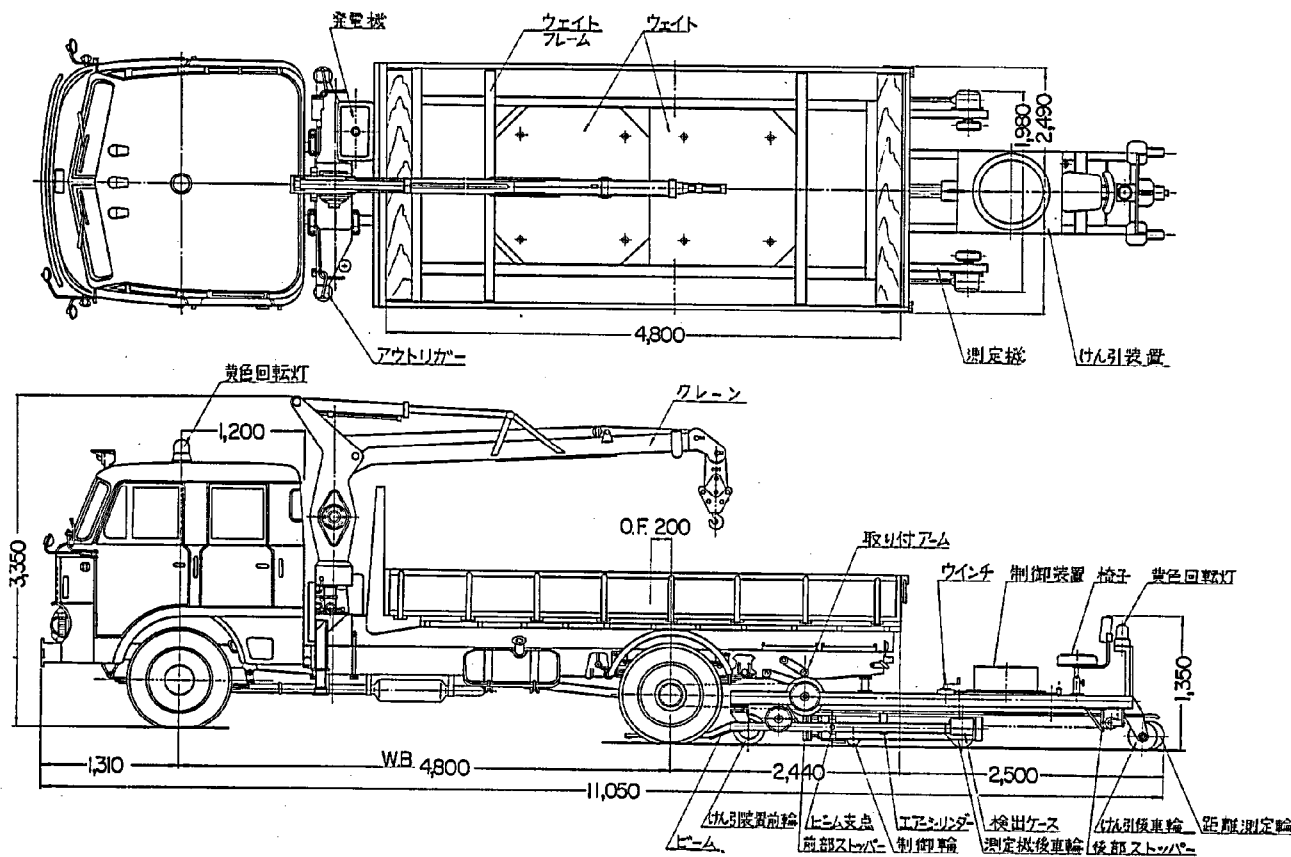


図-1 自動ベンケルマンビーム測定車全体図

図-2 自動ペンケルマンビーム測定機全体図

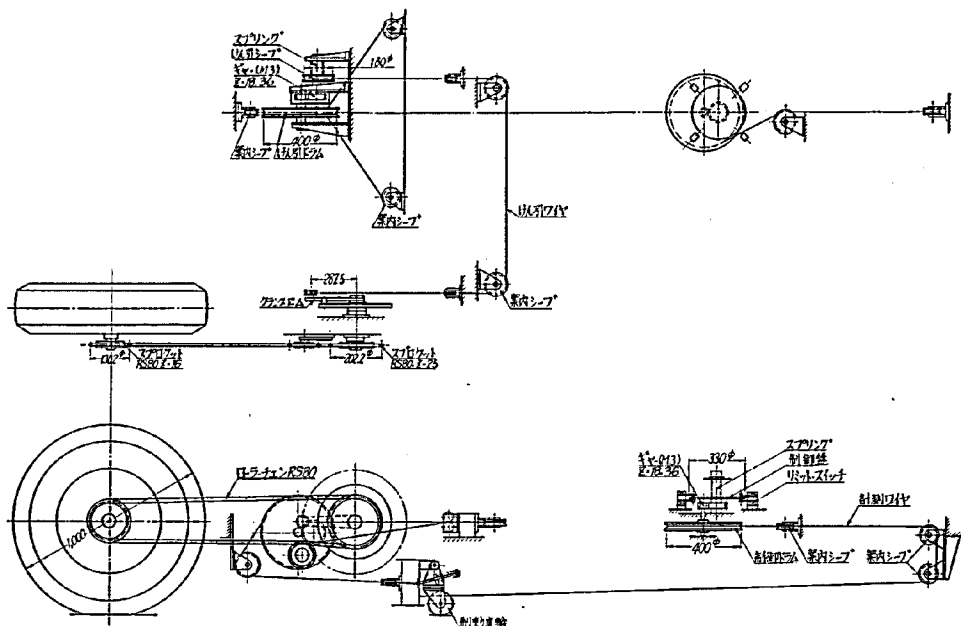


図-3 けん引動力取り出し方法

3.3 作動方式

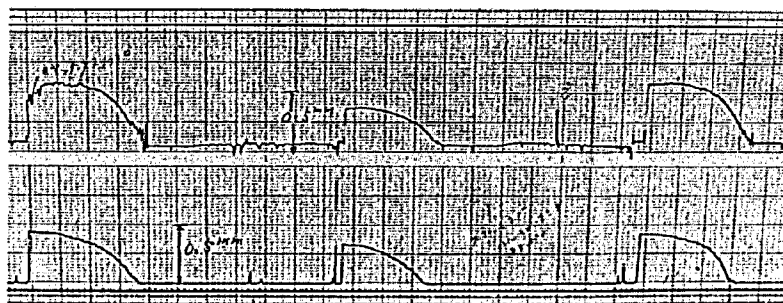
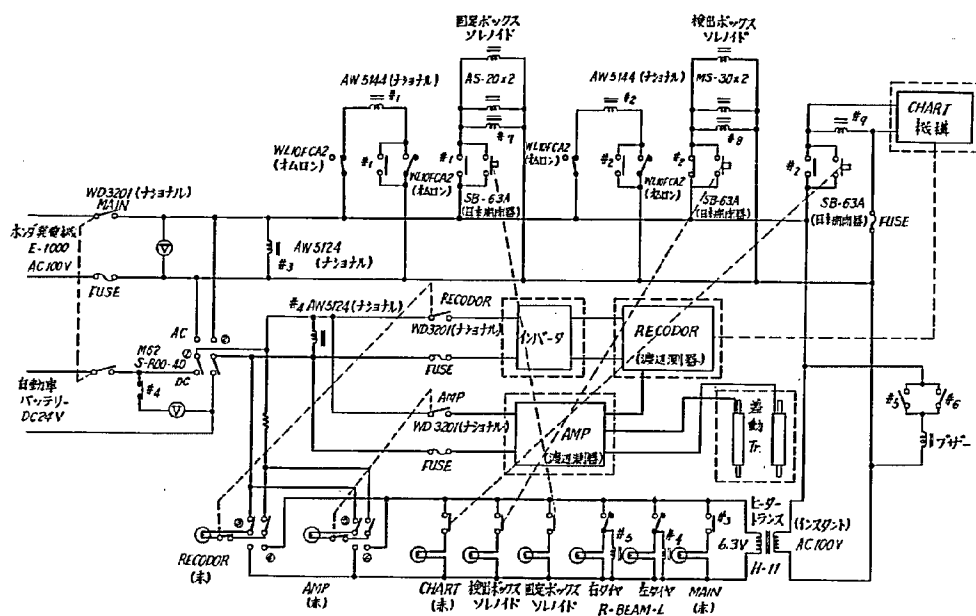
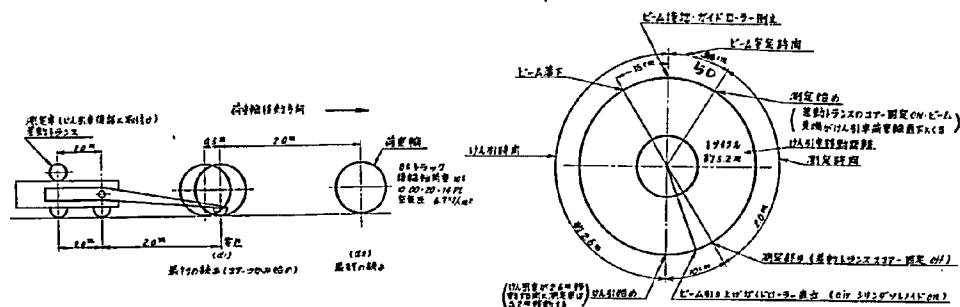
作動方式はトラックが5.2 m移動する間に左右のビームがそれぞれのトラックの後部複輪タイヤの間に引き込まれて、後輪軸より40 cm 手前へ設定される。

トラックが前方へ移動してビーム先端が後輪軸直下へくると測定作業が始まり、それよりトラックが2.0 m移動する間のたわみ量の変化が測定される。トラックが約20 cm 移動する間の安定時間の経過後、再び引き込まれ測定サイクルはくり返えされる。

図-4に測定サイクルの様子を図解してある。

図-5は作動ブロック線図を示したもので、計測装置の作動状態がわかるようになっている。

写真-6は測定結果の一例を示したものでオシログラム40mmで1mmのたわみ量が記録される。



4. 性能試験

4.1 試験方法

自動ペンケルマンビームと比較するために所内の試験舗装路に於いて従来のペンケルマンビーム測定機で同じトラックを用いて正確なたわみ量の測定を行なった。自動ペンケルマンビームの測定方式に合わせるため2m点でのたわみも読み取ってある。表-1, 図-6にそれ等の路面構造と測定値及び測定方法が示してある。

4.2 性能試験結果

自動ペンケルマンビームが試験機として完成するために正しいたわみ量が記録されているかどうかの検討が必要である。今回は所内の試験舗装路で従来のペンケルマンビームとの比較試験を行なったものである。図-6にその結果を示す。

45度の相関図直線より相当のずれがある。これは本機の構造よりビーム支持フレームの路面支持点の路面のたわみ量が図-6に示すように2m点においても影響を受けているもので、その量を補正すると図-7のようになる。測定値がばらついているのは差動トランスのコア一つかみ部分に約10/100mmの誤差があり、この部分の改良を実施中である。図-7の破線は改良されたと仮定して修正を行なった場合の相関直線である。

修正後も多少下方へずれているが、これは修正した相関図が図-7より従来のペンケルマンビーム測定値 d_2 と自動ペンケルマンビーム測定量 d_3 の関係であり、自動ペンケルマンビームの路面支持点の変化 d_4 の補正は行っていない。従って実際はもう少し上へずれ45度の直線上への上へと思われる。

46年度には試験車自身でペンケルマン式に測定できる方法に改良を行なうので、改良後は比較試験を実施して試験車として完成させ、舗装研究室で行なう路面の試験調査等のたわみ測定作業に実用化する予定である。

表-1 試験舗装路の構造とベンケルマンビームたわみ量

単位: 1/100mm

分類	舗装構造	測点番号	試験分類	ビームと荷重輪の中心位置				備考
				左側ビーム(たわみ量平均値)		右側ビーム(たわみ量平均値)		
				2m点たわみ量	安定点たわみ量	2m点たわみ量	安定点たわみ量	
A (16.0m)	表層: アスコン 基層: アスファルト バインダー	0	B	21.6	32.8	18.8	31.1	B: ベンケルマンビーム測定値 be: ベンケルマン式測定値 測定値: 自動路面たわみ量 (規定車測定値)
			測定値	—	—	1.3	(13.6)	
		1	B	23.6	35.2	18.6	32.8	
			測定値	—	—	0.8	(13.6)	
		2	B	27.0	39.8	25.0	38.6	
			測定値	—	—	5.2	(18.0)	
B (16.0m)	表層: アスコン 基層: アスマカ	3	B	35.4	48.8	43.2	57.0	
			測定値	—	—	14.0	(27.8)	
		4	B	25.4	37.4	30.2	42.0	
			測定値	—	—	6.5	(18.3)	
		5	B	26.8	37.6	32.1	44.8	
			測定値	—	—	11.4	(24.1)	
C (16.0m)	表層: アスコン 基層: ソイルセメント	6	B	49.8	59.8	50.4	60.0	
			be	—	—	38.6	—	
		7	測定値	—	—	22.2	(31.8)	
			B	55.0	67.6	71.2	81.2	
		8	測定値	—	—	41.8	(51.8)	
			B	52.4	61.6	55.2	65.3	
D (23.5m)	表層: アスコン 基層: クラッシュラン	9	測定値	—	—	31.2	(41.4)	
			B	56.6	69.0	66.1	76.3	
		10	測定値	—	—	46.3	(57.3)	
			B	65.2	76.8	75.4	85.2	
		11	測定値	—	—	45.7	(55.9)	
			B	65.0	75.0	67.0	77.0	
		12	be	—	—	69.5	—	
			測定値	—	—	39.7	(49.7)	
		13	B	61.0	69.6	70.6	78.6	
			測定値	—	—	45.2	(53.0)	
E (23.5m)	表層: オープン アスコン 基層: クラッシュラン	14	B	81.2	90.4	86.2	94.6	
			測定値	—	—	60.4	(68.2)	
		15	B	81.4	91.0	84.4	93.4	
			測定値	—	—	56.9	(65.9)	
		16	B	—	—	—	—	
			測定値	—	—	55.3	(64.3)	

所内試験舗装路区分

()内は 2m 点に於いて修正後の値である。

8.7m

100m90m83.0m80m70m60m51.0m50m40m30m27.5m20m10m0

(西側)表層 5cm
基層 15cm
路盤 40cm
砂 10cm
路床 20cm
ローム

A 区間 (160m)

B 区間 (160m)

C 区間 (160m)

D 区間 (235m)

E 区間 (235m)

簡易舗装 1m ビーム

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+</

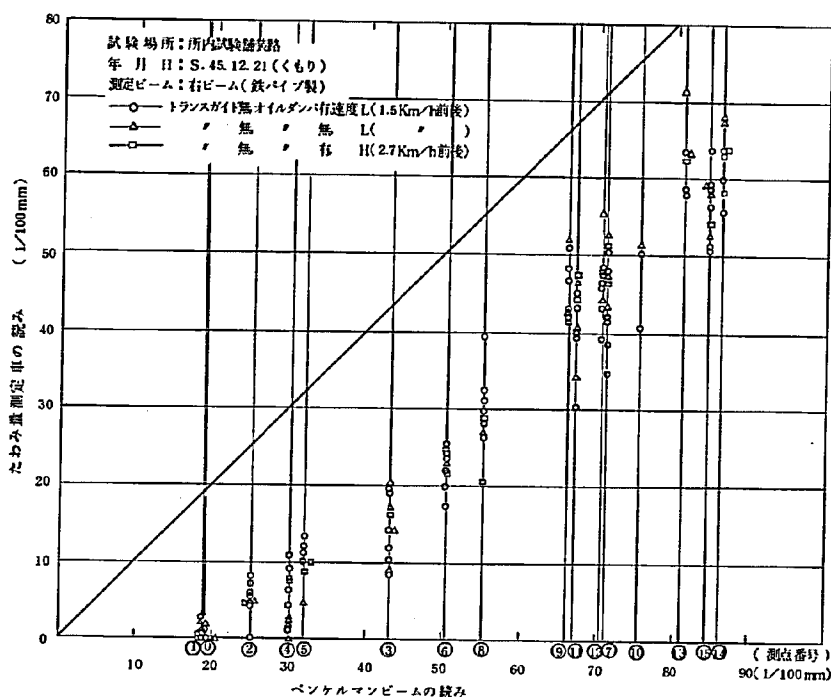


図-6 ペンケルマンビームとの比較試験(補正前)

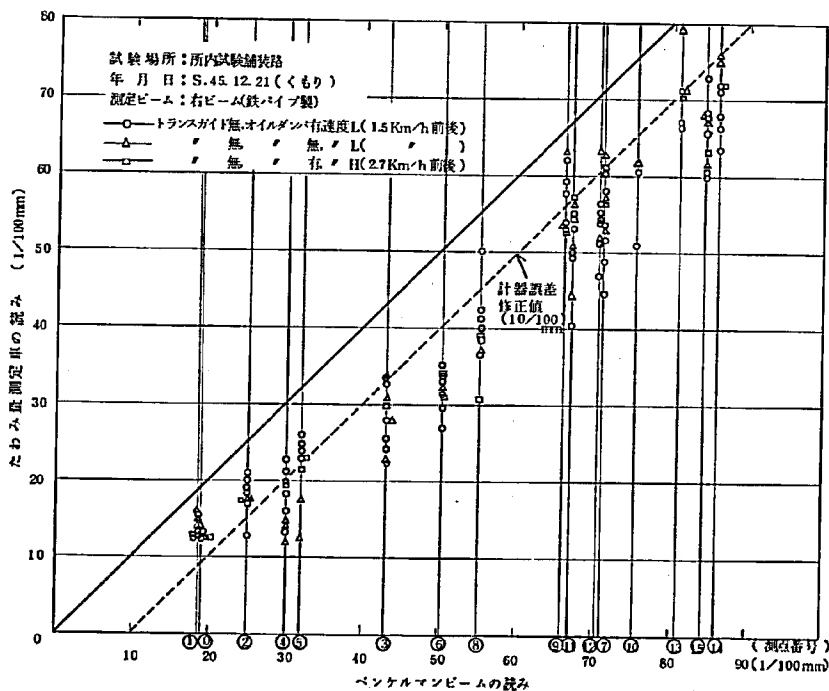


図-7 ペンケルマンビームとの比較試験(補正後)

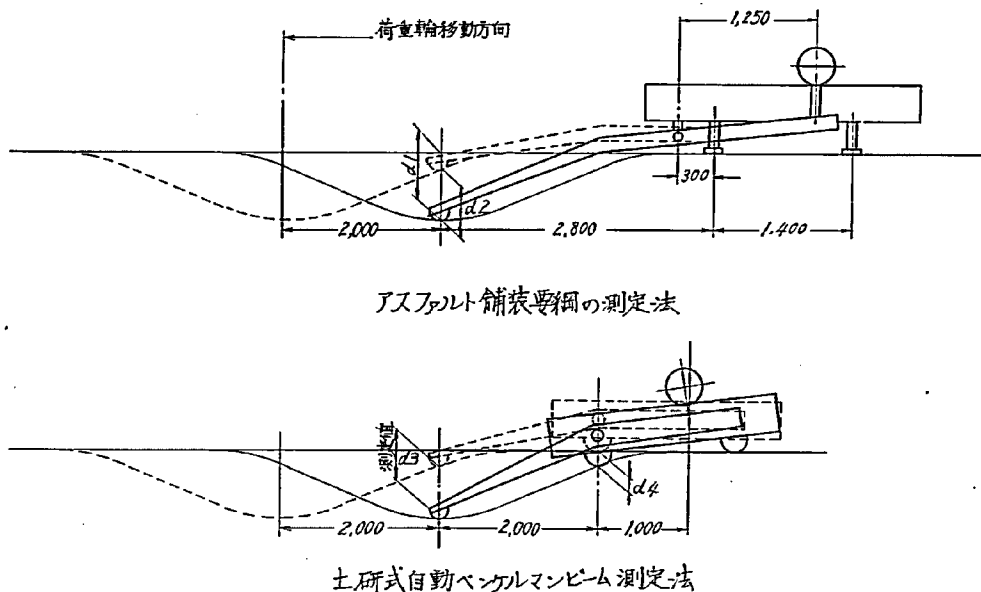


図-8 自動ベンケルマンビームたわみ量の修正する説明図

5. ま と め

今回は自動ベンケルマンビームの性能試験として従来のベンケルマンビームとの比較実験を行なったもので一部測定部の改良を行なう必要があるがベンケルマンと同じたわみ量が測定できる。

たわみの形がそのまま読み取れるので荷重の分散状況の判定ができ、路面管理に役立つ。

運転員を含めて3人で2.7Km/hの速度で5.2 mに1点のたわみが連続して測定できるので約520点/hのたわみ測定ができる。測定作業員は車に乗り込んで測定作業を行なえるので交通解放された路面でも危険性が少ない。

路面の連続測定ができ、かつ測定員及び監視員は機械や計器の監視のみであるので、測定中路面の状況等たわみ測定に関連する他の調査が並行してできる。

ビームの支持点が測定始めで荷重輪直下より2 mであるのでたわみ性舗装ではたわみの影響があるが支点の長いビームを製作すれば、その影響は取り除くことができる。

あ と が き

新しい路面たわみ測定車の開発を目的として自動ベンケルマンビーム試験車の試作を行ってきたが、各種のトラブルが起り思うようには進行しなかったが、やっと各部の構造上のトラブルも無くなり、試験車として安定してきたと思う。測定部の構造が一部不安定であり、46年には改良が終るので新しいたわみ車が出来上がると思われる。なおこの種の測定車は我が国では第一号車であり各種の不備はあろうが、今後のたわみ測定に活躍すると思われる。この機種は形が少し大き過ぎるので第二号機以後はもっと小型化の考えを持っており、その方面の検討を行なっている。外国では振動計を応用した簡易型のたわみ測定車が実用化されており、小型トラックでけん引でき、セメント、コンクリート舗装にも適用されているので、この種の試験機についても検討中である。

参 考 文 献

- (1) テルザギー・ベック 「土質力学基礎編」 丸善（小野他訳），1960
- (2) 富 山 「土質力学」 コロナ社，1959
- (3) 建設省土木研究所 「舗装の支持力についての調査研究“ベンケルマン沈下量による舗装各層の荷重分散効果の推定”」 44年11月 第23回 建設省技術研究発表会（道路部門指定課題）
- (4) 斎藤・木村 「ベンケルマンビーム試験方法の理論的問題について」，第8回，日本道路会議論文集，第2部会，150，P.467
- (5) 磯部，吉田 「自動ベンケルマンビーム試験報告」 土木研究所資料，第606号
- (6) 磯 部 「自動ベンケルマンビーム」 土木技術資料，1970年4月
- (7) 上田，西中村，増井 「撓み性舗装に対する層構造の考え方」 第7回 日本道路会議論文集 第2部会 137，P.432
- (8) 松 野 「アスファルト舗装の基層について」 日本道路協会・第7回，日本道路会議論文集，第2部会，98，P.332