

林道の路体構造に関する研究 (II)

林道路体内での水平方向の応力分布について

瀧 本 義 彦・佐々木 功

Studies on the Structure of the Forest Road (II)

The Horizontal Stress Distribution in the Inside of the Forest Road

Yoshihiko TAKIMOTO and Isao SASAKI

目 次

要 旨	264	(3) 水平分布実験	
I はじめに	264	(4) 路体改良への応用	
II 林道路体内での応力分布	265	III ま と め	275
(1) 実験方法と装置		参考文献	275
(2) 垂直分布実験		Résumé	275

要 旨

軟弱地における林道の路体構造を決定するために、林道の路体内での応力の分布状態を検討するための実験を行ない、その結果を考察した。

今回は第 I 報で疑問となった理論式の不正確さを、路体材料の違いを集中係数 n で表わすとともに理論式自身も修正することによってかなり少なくした。そして路体内での応力の垂直分布に加えて、水平分布も実験・考察して、ある程度信頼のできる計算式を作った。また実験に使った路体材料での応力の分布状態を考察して、応力の分布から見た望ましい路体構造として、表面より粘性土混合物層・砂利層・粘性土層という構造を得た。なおこの構造を実際に使用する場合を考えて、京都大学芦生演習林内の林道の悪路部分の改良方法について C.B.R. 試験結果を資料として考察してみた。

今後の研究項目として、集中係数を使った応力の水平分布を表わす計算式の作成・深さと C.B.R. 値の関係・路面のセン断抵抗や透水性などが残された。

I. は じ め に

林道の開発は近年めざましいものがある。この開発には量的なものと質的なものとの両面が考えられるが、今までは単に林道を運材路としてのみ考えて来たために質的な面での考慮が足りず、しばしば悪路となって車両の通行に支障をきたしている。しかし最近では林道を林業機械の導入路、森林労働者の輸送路、山間部の公道、観光道路などとしても考えるようになり、質的にも向上する傾向にある。質的な向上は必ずしも全線、全区間に必要なのではなくて、いわゆる悪路部分（常に車両の通行に支障をきたす部分）において必要である。この悪路部分で、林道として必要な最低条件にかなった構造を決定するために第 I 報¹⁾では悪路部分を中心として路体材料の粒度組成・支持力を調査し路体

内での車輪による荷重の垂直的な分布を実験して考察を行なった。その結果、さらにその他種々の事象も調べる必要を生じ、今回はその一つである林道路体内での輪荷重による応力の水平方向の分布を中心に実験・考察したので第Ⅱ報として発表する。

Ⅱ. 林道路体内での応力分布

(1) 実験方法と装置

方法としては前回と同様に木箱に試験土を入れ、試験土中に土圧計を埋めておき、試験土の表面に加えられた荷重がおのおのの深さの土圧計ではどの程度の荷重になるかを測定した。今回は土圧計の配置を2種類（載荷面の直下に深さ10cmごとと90cmまでと、ある一定の深さで載荷面を中心に半径20cmごとと60cmまで）で行なって、前者では荷重の垂直的な分布を、後者では水平的な分布を調べた。

試験土としては、京都大学芦生演習林近辺で得られる、砂利・砂・粘性土と火山灰土（浅間山麓の

Table 1 Classification of test soil based on grain size (%)

Grain size (mm)	~0.005	~0.074	~0.25	~2	~25	~50	~
Name	Clay	Silt	Sand		Gravel		
Test soil			Fine	Coarse	Small	Middle	Large
Trass	2.8	10.2	17.9	45.4	23.7	0.0	0.0
Sand	2.8	1.9	9.8	71.8	13.7	0.0	0.0
Ballast	0.2	0.4	0.4	5.4	89.2	4.4	0.0
Clayey soil	19.0	14.7	7.3	19.0	31.0	9.0	0.0
Mixture	7.8	3.2	7.4	33.0	48.1	0.5	0.0

林道で採取したもの）と混合物（砂利・砂・粘性土を1:2:2で混合したもの）の5種類を使用した。なおこの試験土の粒度組成はTable 1のとおりである。なお粘性土と火山灰土とは第Ⅰ報における調査地点の土でもあり、粘性土は悪路を、火山灰土は良好な路面を構成していた。また混合物は路体材料としての土の

理想的な粒度分布（Fullerの式による）に近くなるように混合したものである。砂と砂利とは第Ⅰ報で述べたように林道の路体材料としてしばしば使用されており、砂と砂利が多く使用されている路体は排水の良さや路面の硬さなどにより丈夫であると知られている。

装置はPlate 1に見られるように内法が、縦・横・高さともに1mの木箱①（写真中の番号）に試験土を入れ、横渠にフレーム④とジャッキ台③を使って固定したスクリュウジャッキ②の荷重を継足棒⑥と荷重変換器⑦とを通して載荷ピストン⑤（接地面積78.6cm²）によって試験土の表面に荷重を加えるようになっている。そして試験土中に埋められた土圧計によって、この表面に加えられた荷重のおのおのの地点での分布荷重が測定された。この他に、全載荷荷重は荷重変換器、表面載荷単位荷重（載荷ピストンの接地面積でのcm²当たりの荷重）は載荷ピストンの載荷面の中央部に張り付けられた小型圧力変換器によって測定した。これらの各種の測定器は多点式スイッチボックスを経て自動平衡指示計につながれており、スイッチの切り換えにより読取られた。なお載荷に当たっては載荷ピストンの貫入量を一定に（分速1mm）する

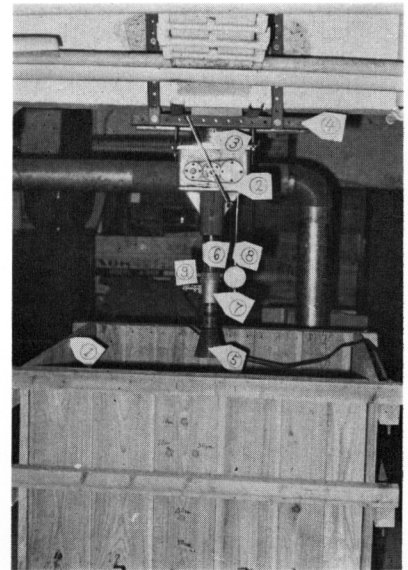


Plate 1. Equipment of stress distribution test.

ためダイヤルゲージ⑧とストップウォッチによって制御した。

(2) 垂直分布実験

第Ⅰ報の実験でも行なったが、今回は特に前回使わなかった粘性土とそれらの混合物とを使用して、前回の結果を Boussinesq の理論に基づく理論式で考察した時に実験値と理論式による計算値とが一致しなかった点を中心に実験した。

実験は火山灰土・砂・砂利・粘性土およびそれらの混合物について深さ 90cm まで (粘性土のみ 60 cm まで) 10cm ごとに表面荷重 0~940kg まで 40kg ごとに、表面単位荷重で 0~12kg/cm² まで 0.5 kg/cm² ごとに载荷ピストン直下の応力分布を測定した。Fig. 1~5 はその代表的な結果をグラフに

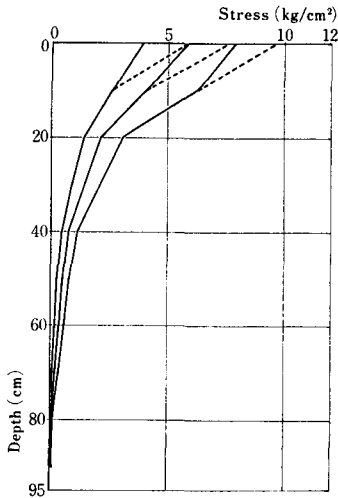


Fig. 1. Stress distribution graph by test (Trass).

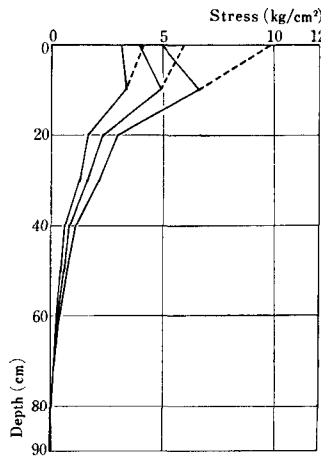


Fig. 2. Stress distribution graph by test (Sand).

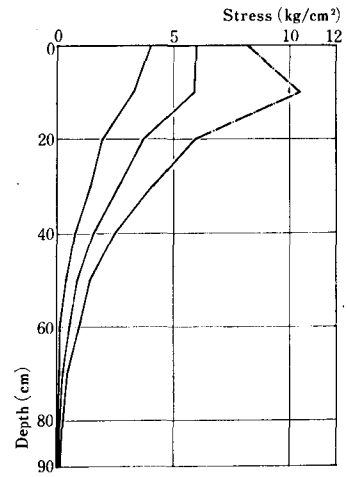


Fig. 3. Stress distribution graph by test (Ballast).

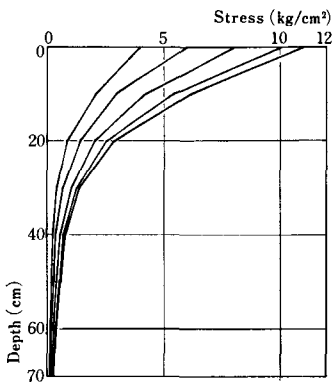


Fig. 4. Stress distribution graph by test (Clayey soil).

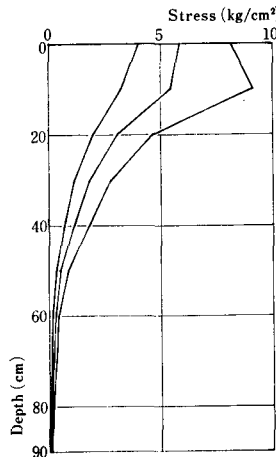


Fig. 5. Stress distribution graph by test (Mixture).

したものである。これらのグラフで実線は表面単位荷重として表面全荷重を载荷ピストンの接地面積で割った値を使用しており、点線は载荷ピストンの接地面に張り付けた圧力変換器の測定値を使用している。なおこの点線は火山灰土と砂とにしか使用されていないが、これは砂利の測定中に圧力変換器が破損して修理不能となりそれ以後は測定できなかったためである。この点線と実線との違いは今回の実験で得られた重要な結果の一つである。すなわち第Ⅰ報における

実験では表面単位荷重として全荷重を载荷面積で割った値を使用してグラフを描いた。ところがこのグラフにおいて、表面単位荷重がある限界 (3~4kg/cm²) を越えると深さ 10cm の所の圧力が 0cm の所の圧力より大きくなって、表面単位荷重が大きくなればなるほどますますその傾向がひどくなっている。これについては前回の考察において応力集中が起こるためと考えたが、今回の実験の結果必

ずしもそうではないことが明らかになった。つまり、実線のグラフでは確かに同じ傾向が現われているが、点線のグラフでは違っている。これは実線のグラフでは 0cm の荷重として、全荷重が載荷ピストンの接地面で等分布すると仮定して全荷重を接地面積で割った値を使用しているが、点線のグラフは 0cm の荷重として載荷ピストンの接地面の中央に張り付けた圧力変換器による実測値を使用しており、この 2 種の 0cm における値が一致しないで圧力変換器による値の方が大きいのである。つまり載荷ピストンの接地面での反力が一様でないためである。この現象については、「基礎の底面の反力の分布」について行なわれた Koegler, Scheidig, Ostor Faber の実験²⁾により証明ができると思う。その実験結果とは、砂においては基礎のまわりに上載荷重がない場合は（この実験でも載荷ピストンの回りには上載荷重がない）、基礎の圧力が基礎の外周の地表面に水平分力を生じ、砂のように粘着性のない土はそれに抵抗することができない。従って基礎の周辺の砂はたやすく降伏し、反力が十分にとれない。そこで鉛直力の平衡から考えて、基礎の中央部では反力が平均荷重圧（全載荷荷重を接地面積で割ったもので以後平均荷重と呼ぶ）より大きくなければならないということである。

次にこのことが実験に及ぼした影響を考えてみよう。火山灰土の場合、全荷重より計算した平均荷重が 1.78kg/cm^2 の時、圧力変換器の実測値は 3.00kg/cm^2 (168%), 3.95kg/cm^2 の時 5.75kg/cm^2 (146%), 6.18kg/cm^2 の時 7.90kg/cm^2 (128%), 8.11kg/cm^2 の時 9.85kg/cm^2 (121%) であった。このように平均荷重の増加にともなって、圧力変換器の実測値の平均荷重に対する比率は小さくなるので、表面の平均荷重が大きい時の値はそれほど影響を受けていないと考えられる。砂の場合、全荷重より計算した平均荷重が 1.27kg/cm^2 の時、圧力変換器の実測値は 1.30kg/cm^2 (102%), 3.12kg/cm^2 の時 4.15kg/cm^2 (133%), 4.97kg/cm^2 の時 9.85kg/cm^2 (198%) であった。これによれば平均荷重の増加にともない、圧力変換器の実測値の平均荷重に対する比率は大きくなっており、かなり影響を受けていると思われる。しかし圧力変換器の値の平均荷重に対する比率が 100~110% の範囲の表面荷重の時はそれほど影響を受けていないと思われる。

砂利の場合、圧力変換器による測定が行なわれていないので判断しにくいが表面荷重と深さ 10cm での測定値とを比較してみると、表面荷重が 1.81kg/cm^2 の時 1.19kg/cm^2 (65.7%), 4.01kg/cm^2 の時 3.32kg/cm^2 (82.8%), 5.96kg/cm^2 の時 5.92kg/cm^2 (99.3%), 7.58kg/cm^2 の時 9.34kg/cm^2 (123.2%) である。これから考えて砂利の場合も載荷面の中央部では表面荷重より大きい値を示し、砂と同じように表面荷重が大きくなるほどますます大きい値を示すように思われる。砂において圧力変換器の値が平均荷重の 100~110% になった時の深さ 10cm での荷重の平均荷重に対する比率は 90~96% であったから、砂利の場合も 90~96% の範囲の値はピストン接地面における表面荷重の非均一性による影響を受けないと思われる。粘性土の場合は、先に述べた「基礎の底面の反力の分布」の実験結果では次のように述べられている。堅い粘土地盤においては砂と異なり上載荷重の有無にかかわらずせん断力が伝達される。したがって基礎のまわりの粘土も荷重の一部を負担して支持することができる。よって基礎の周辺には反力の集中が起こり、中央部よりも大きな反力を示す。このことから考えて粘性土の場合はピストンの接地面では周辺部で応力が大きくなるものと思われるが、この場合は中央部と違って一部分に集中せずに周辺部全体で大きくなるのでその大きさは砂における中央部の大きさよりも絶対量が小さいと思われる。また実際に表面荷重と深さ 10cm での測定値とを比較してみると、表面荷重が 1.76kg/cm^2 の時 0.79kg/cm^2 (45%), 4.07kg/cm^2 の時 2.11kg/cm^2 (52%), 5.98kg/cm^2 の時 2.99kg/cm^2 (50%), 8.15kg/cm^2 の時 4.28kg/cm^2 (53%), 9.52kg/cm^2 の時 5.11kg/cm^2 (54%), 11.06kg/cm^2 の時 6.17kg/cm^2 (56%) で、あまり変化はみられない。ゆえに粘性土ではピストン接地面における表面荷重の非均一性による影響をほとんど受けないと思われる。最後に混合物の場合はその粒度組成から考えて粘性土よりもむしろ砂に近いと考えられる。また表面荷重と深さ 10cm での荷重の値とを比較してみると、表面荷重が 1.81kg/cm^2 の時 1.19kg/cm^2 (65.7%), 4.01kg/cm^2 の時 3.32kg/cm^2 (82.8%), 5.96kg/cm^2 の時 5.92kg/cm^2 (99.3%), 7.58kg/cm^2 の時 9.34kg/cm^2 (123.2%) である。

cm^2 の時 $3.32\text{kg}/\text{cm}^2$ (82.8%), $5.96\text{kg}/\text{cm}^2$ の時 $5.92\text{kg}/\text{cm}^2$ (99.3%), $7.58\text{kg}/\text{cm}^2$ の時 $9.34\text{kg}/\text{cm}^2$ (123.2%) である。このことから考えて砂利の場合と同様に表面荷重に対する深さ 10cm での荷重の比率が 90~96% の範囲ならば、ピストンの接地面での表面荷重の非均一性による影響を受けないと思われる。

次に Fig. 1~5 から判るもう一つの重要なことから、同じ表面荷重の場合でも試験土が違くとグラ

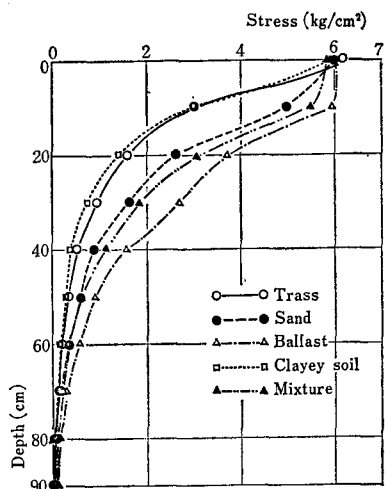


Fig. 6. Stress distribution curve by test ($q=6\text{kg}/\text{cm}^2$).

完全弾性体ではなく、土の種類によって弾性も違うためである。そこで実際の土に良く適合するように補正する方法が考えられている。その方法は半無限固体の表面に集中荷重が作用したとき作用点の下に応力集中が生じるという考え方にに基づき、①式を集中係数 n を使って次のように変形するものである³⁾。

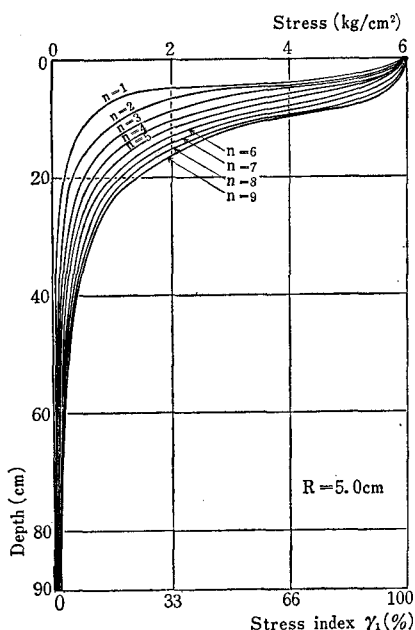


Fig. 7. Stress distribution curve by theoretical formula ②.

フの形が違ってくることである。特にこの傾向をくわしく調べるために表面荷重が $6\text{kg}/\text{cm}^2$ の時のグラフを 1 枚の図に書いたのが Fig. 6 である。これによれば火山灰土と粘性土とは比較的似ているが、他の 3 つは少しずつ違っている。またこのグラフを第 I 報で使用した理論式

$$P_v = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + (R/Z)^2} \right\}^{3/2} \right] \quad \dots\dots\dots ①$$

(ただし P_v は半径 R 等荷重 Q の円載荷の中心より Z の深さの点に生ずる鉛直応力であり、 $q=Q/A$ で A は載荷面積を表わす

において $q=6.0\text{kg}/\text{cm}^2$ のグラフ (Fig. 7 の $n=3$ のグラフと同じ) と比較してみると形は似ているが、同じ深さでの荷重は理論式のグラフの方が小さいことも判った。

この 2 つの事柄は次の説明で理解できよう。つまり①式は土を完全弾性体と仮定して求めたものであるが、実際には土は完全弾性体ではなく、土の種類によって弾性も違うためである。そこで実際の土に良く適合するように補正する方法が考えられている。その方法は半無限固体の表面に集中荷重が作用したとき作用点の下に応力集中が生じるという考え方にに基づき、①式を集中係数 n を使って次のように変形するものである³⁾。

$$P_{v1} = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + (R/Z)^2} \right\}^{n/2} \right] \quad \dots\dots\dots ②$$

n の値は実験的に決定しなければならないが、 n の値が大きくなるほど②式の $\{ \}$ の内の値が小となり従って P_{v1} が大となって応力が集中することがわかる。一般に粘土では $n=3$ 、砂では $n=5$ か 6 が比較的实验結果に良く合うとされている。また $n=3$ の時は①式と同じである。すなわち、土の種類によってグラフの形が違うのは n が違うからであり、理論式のグラフと実測値のグラフが違うのも n が考慮されていないためと思われる。②式で $R=5\text{cm}$ 、 $q=6\text{kg}/\text{cm}^2$ を $n=1\sim 9$ まで計算して書いたグラフが Fig. 7 である。Fig. 7 と 6 とを比較してみると、依然として任意の深さでの荷重が n 値に関係なく実測値の方が大きく、その上 n 値の判別もできない。そこで②式はこのままでは実測値とかなり違った値を示すので、何んらかの方法で修正する必要がある。

まず 5 種の試験土の実測値を表面荷重に関係なく表わすために荷重係数 (荷重の実測値をそれぞれの表面荷重で割ったもので % で表わす) に換算し、先に述べたピストンの接地

面での非均一性の影響を受けないように考えて Table 2 のような各種の試験土の代表値を得た。Table 2 をグラフに書いたのが Fig. 8 である。また②式を荷重係数で表わすと次のようになる。

$$\frac{P_{v_2}}{q} = \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + (R/Z)^2} \right\}^{n/2} \right] = r' \quad \text{②'}$$

$$R_1 = r' \times 100 (\%) \quad \text{.....②'}$$

(ただし R_1 は荷重係数である)

②' 式で $R=5\text{cm}$, $n=1\sim9$ の時のグラフは Fig. 7 の下の横軸で表わされる。Fig. 7 と 8 を比較すると、やはり深さと n 値について違いが大きく、修正の方法を見出すことは困難である。そこで集中係数のところで述べた「一般に粘土では $n=3$, 砂の場合には $n=5$ か 6 が比較の実験結果と良く合うとされている」にしたがって、 n 値を仮定して深さについての関係を調べてみよう。粘性土については Fig. 7 と 8 より $n=3$ なら実験値の 10cm が理論式の 5cm の値に、20cm の値が 10cm の値に、30cm の値が 15cm の値に、40cm の値が 20cm の値に近いといえる。また火山灰土についても $n=5$ なら同様のことが言える。

ゆえにこの 2 種の試験土については実験値と計算値との間の深さによる関係から考えて、実験値の 2 倍の深さの値に近いと考えられる。この推定は粘性土と火山灰土とは 3 角座標による土の分類 (JIS) (Table 3) によれば、それぞれ粘土と砂とに分類されることによって裏付けられる。そこでこれによって ②式, ②' 式を修正した。

$$P_{v_2} = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + (2R/Z)^2} \right\}^{n/2} \right] \quad \text{.....③}$$

$$\frac{P_{v_2}}{q} = 1 - \left\{ \frac{1}{1 + (2R/Z)^2} \right\}^{n/2} = r''$$

$$R_2 = r'' \times 100 \quad \text{.....③'}$$

③' 式を $R=5\text{cm}$, $n=1\sim9$ について計算し、それをグラフに書いたのが Fig. 9 である。

Fig. 9 と 8 とを比較して n 値を判別してみると、火山灰土は $n=5$ か 6, 砂 $n=6\sim8$, 粘性土は $n=2$ か 3, 混合物は $n=7$ と判るが、砂利は何んとも判読し難い。

(3) 水平分布実験

第 I 報ではごく簡単な実験を行ない、さらにくわしい実験を行なう必要があると判った。そこで今

Table 2 Relation between load index and depth

Test soil Depth (cm)	Trass	Sand	Ballast	Clayey soil	Mixture
0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	82.61	96.92	96.66	55.79	96.63
20	41.31	51.10	62.28	26.40	53.21
30	27.74	34.80	45.19	12.88	32.05
40	14.80	19.38	26.52	7.05	20.35
50	10.73	13.22	14.71	5.34	10.10
60	7.64	8.37	9.68	3.39	5.15
70	4.07	4.02	3.95	2.62	3.53
80	1.72	3.15	2.55	—	2.06
90	1.23	1.32	2.24	—	1.52

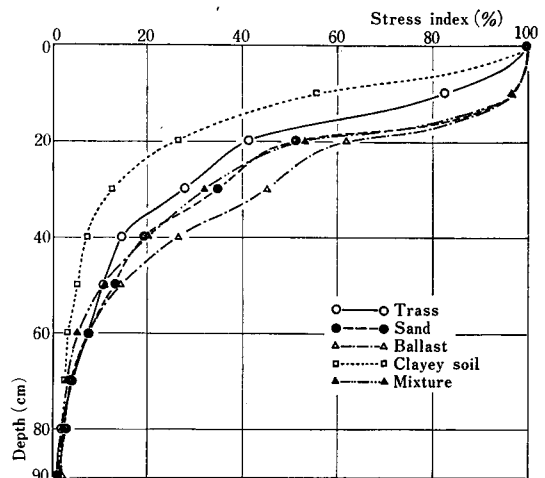


Fig. 8. Stress distribution curve by test.

Table 3 Classification of test soil based on JIS

Test soil	Grain size (mm)			Classification
	Name	~ 0.005 ~	0.074 ~	
Trass		3.7	13.4	Sand
Sand		3.2	2.2	Sand
Ballast		3.1	6.3	Sand
Clayey soil		31.7	24.5	Clay
Mixture		15.2	6.2	Sandy loam

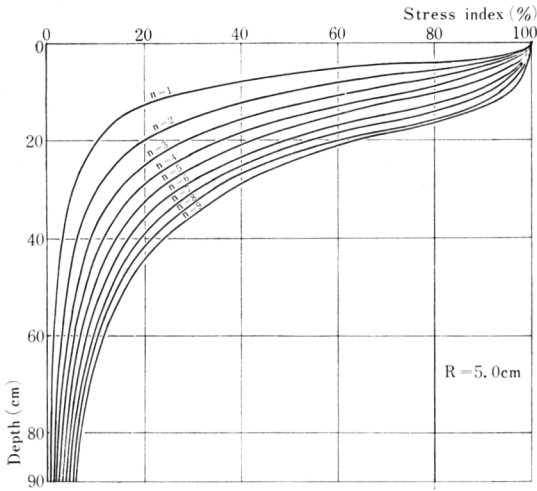


Fig. 9. Stress distribution curve by theoretical formula (3).

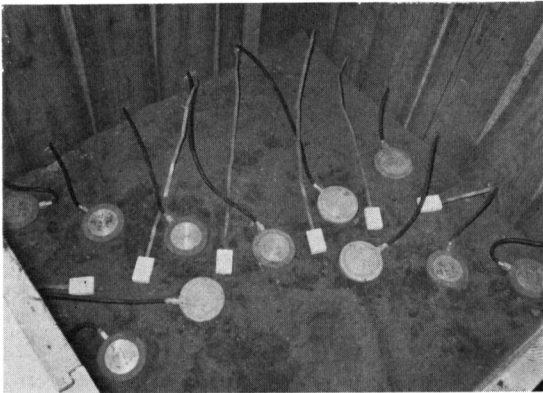


Plate 2. Arrangement of soil pressure gauge.

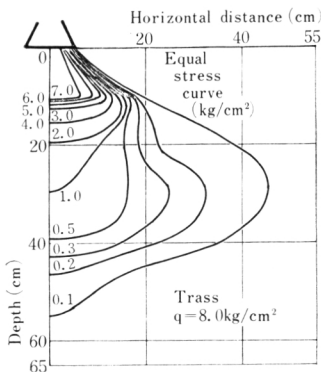


Fig. 10. Stress distribution by test.

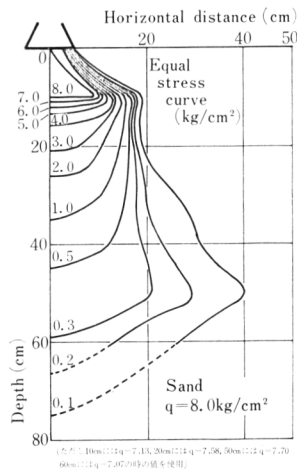


Fig. 11. Stress distribution curve by test.

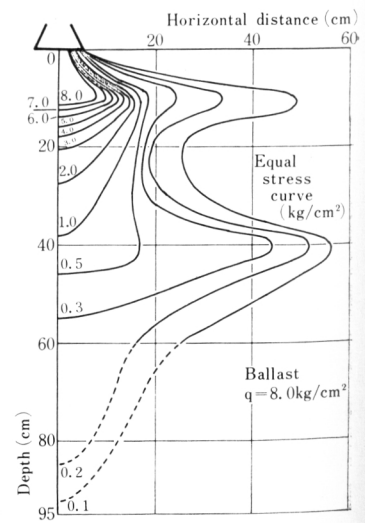


Fig. 12. Stress distribution curve by test.

回は水平分布実験をくわしく行ない、その結果を理論式で考察した。

水平分布を調べる場合に载荷ピストンを中心に水平方向に一定間隔で土圧計を設置すると同時に、垂直方向にも一定間隔で土圧計を設置すればよい。しかしこうすると試験土中に多数の土圧計が含まれて荷重の分散に影響を与える恐れがある。そこでこの実験では試験土中のある水平面に Plate 2 のごとく载荷ピストン直下、20cm はなれた所、40cm はなれた所、60cm はなれた所に土圧計を配置した面を作り、その土圧計配置面と载荷ピストンの接地面との間の距離を 10~60cm の範囲で 10cm ごとに変えて測定した。表面全荷重は垂直分布実験と同じく 0~940kg まで 40kg ごとに、表面平均荷重では 0~12kg/cm² まで 0.5kg/cm² ごとに土圧計の読みを記録した。試験土は同じく火山灰土・砂・砂利・粘性土・混合物について深さ 60cm まで (粘性土のみ 40cm まで) 行なった。Fig. 10~14 はその代表的な結果を 3 次元のグラフに描いたものでおのおのの深さで荷重の等しい点を結んで書いた等応力線図である。これによれば 0.1kg/cm² の等応力線を土圧の影響のおよぶ限界線とすれば、土圧の影響は水平方向に 40~50 cm 付近まで及ぶことが判る。この場合は表面荷重が 8kg/cm² であるが、Fig. 15~17 は表面

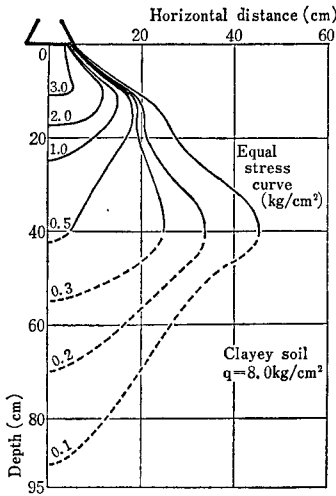


Fig. 13. Stress distribution curve by test.

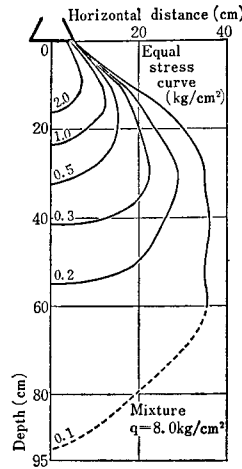


Fig. 14. Stress distribution curve by test.

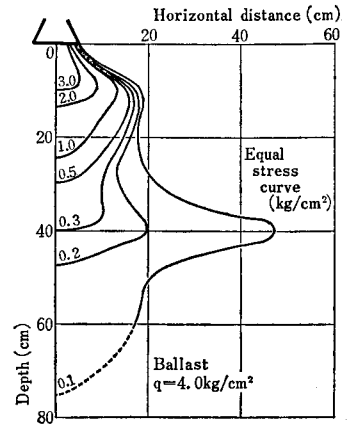


Fig. 15. Stress distribution curve by test.

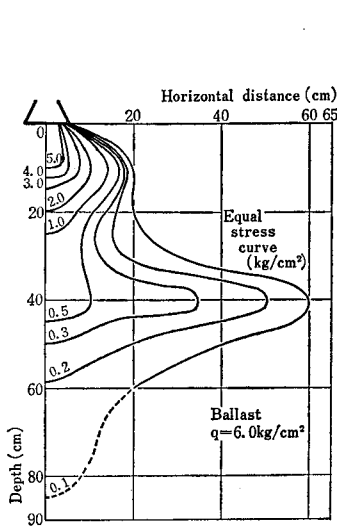


Fig. 16. Stress distribution curve by test.

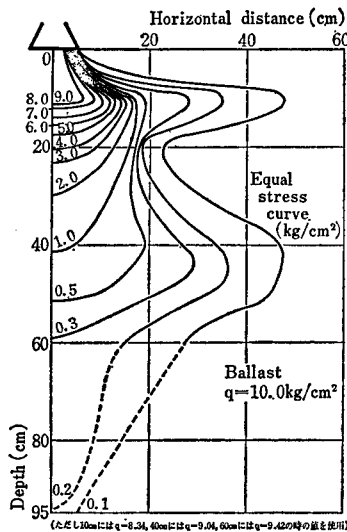


Fig. 17. Stress distribution curve by test.

荷重が 4, 6, 10 kg/cm² の時の砂利の等応力線図であるが、これでもせいぜい 60 cm までしか及ばないのが判る。またここには載せていないが、他の 4 種の試験土の場合もやはり水平方向には 60 cm 以上は及んでいない。次に試験土による違いであるが、火山灰土は深さ 10 cm 付近まで等応力線が密で、水平方向には深さ 30 cm 付近で最大約 50 cm まで影響が及んでいる。この傾向は Fig. 10 だけでなく、同じ火山灰土の等応力線図で表面荷重が異なる場合にも当てはまる。この火山灰土は良好な路面を構成

成していた路体材料であるから、このような応力の分布をすることが望ましいと思われる。砂は深さ 10 cm 付近まで等応力線が密であり、水平方向には深さ 50 cm 付近で最大約 40 cm まで影響が及んでおり、水平方向に最大の影響が及んでいる深さが火山灰土にくらべて深い。同じ砂の等応力線図で表面荷重が異なる場合にもこの傾向はみられる。これは砂では表面の荷重を垂直方向によく伝えて、水平方向にはあまり伝えないことを示していると思われる。砂利は深さ 10 cm 付近までは等応力線は密であるが、同時に水平方向にも遠くまで影響を及ぼしている。そして水平方向に最も遠くまで影響が及んでいるのは深さ 40 cm で 50 cm までである。砂利において水平方向に最も遠くまで影響が及ぶ深さが 2 種類あることは非常に注目値することなので、さらにくわしく Fig. 15~17 で調べてみよう。表面荷重が 4 と 6 kg/cm² では水平方向に最も遠くまで影響が及ぶ深さは 40 cm だけであるが、8 と 10 kg/cm² では深さ 10 cm にも出ている。この理由として筆者は次のように考えてみた。つまり、砂利は砂などにくらべて各粒子の粒径がかなり大きくてある程度粒径がそろっているの、直接

に荷重を受ける粒子からそれに接している粒子に荷重が伝達される時にかなり大きな角度に分散されるため、載荷面から放射状に応力の大きい線状のものがある間隔を持って発生するのではないか、またこの放射状のものは砂などの粒径の小さいものでも発生するがその間隔がせまいのではないか、粒径のそろっていないものでは放射状のものが互いに交差してはっきりと判らないのではないかということである。しかしこの説明もこの程度の実験では正しいとはいいがたいので、この点についてもっとくわしい実験が望まれる。

粘性土は今までの3種の試験土と違って深さ10cmまでの等応力線はそれほど密でもなく値も小さい。そして水平方向に最も遠くまで影響の及んでいる深さは40cmであるが、同じ粘性土で表面荷重の違う場合を調べてみると表面荷重が増加するにつれて水平方向に最も遠くまで影響の及ぶ深さが浅くなっている。これは恐らく他の試験土よりも深さ10cmまでの等応力線が密でなく値も小さいことと関連があるのではないだろうか。つまり表面に加えられた荷重は垂直方向と水平方向とに伝わって行くうちにだんだん値が小さくなり、荷重を支える面積が広がるだけでなく土粒子自身が荷重を吸収するためと思われる。そしてこの土粒子自身による荷重の吸収は火山灰土・砂・砂利でもある程度は行なわれるが、粘性土の場合に特に激しくて同じ10cmの深さまででも等応力線の値が小さくなっており、表面の荷重を垂直方向にあまり伝えずに粘性土自身で吸収する。それで水平方向に最も遠くまで影響の及ぶ深さが浅くなるものと思われる。この粘性土自身による吸収は完全弾性体としての荷重の吸収ならば望ましいのであるが、残念なことに粘性土は完全弾性体ではなく、その上、水が存在すると（ほとんどの場合存在しているが）粘性土が泥ねい化するとと思われる。混合物は粘性土と同じように深さ10cmまでの等応力線はそれほど密でなく値も小さいが、表面の単位荷重が増加しても水平方向に最も遠くまで影響が及ぶ深さは約50cmと深い。これは混合物中の粘性土が荷重を吸収し、砂と砂利とは垂直方向に良く伝えるので両方の傾向が出ているためであろう。この混合物中の粘性土が荷重の吸収によって泥ねい化しなければ非常に望ましい路体材料と思われる。

以上をわかりやすくまとめると、火山灰土は荷重を水平方向に分散させるが吸収はしない、砂は荷重を水平方向にはあまり分散させないし吸収もしない、砂利はかなり浅い所で荷重を水平方向に良く分散させるが吸収はしない、粘性土は荷重を水平方向に分散させて吸収もするが、水が存在すると泥ねい化する恐れがあり、混合物は荷重を水平方向に分散させて吸収も行ない混合比がよければ泥ねい化は起さない。ゆえに悪路の部分改良の路体材料としてこれらの5種のものを使用する場合には、表層に適当な混合比の混合物を用いて荷重を分散・吸収させて、その下に砂利の層を作ってさらに荷重を分散させ、最後に粘性土などの現存の路床で吸収させるのが望ましい。なお特に排水を必要とするところでは砂利の層の下に砂の層を入れて路体内の排水を良くすればよい。

この実験では直径10cmの載荷ピストンを使用した。実際に林道を通るトラックの接地面積は直径24cmの円と同じであるといわれている¹⁾。載荷面積が異なれば当然等応力線の大きさなども違ってくる。そこで円載荷の場合の土中の応力の分布を示す理論式を直径10cmの円の実験結果と照し合わせて信頼性を調べ、直径24cmの円の場合を計算して実際の林道でのトラックの輪荷重による応力の路体内での分布状態を推測することにした。この理論式として使うのに適したものがないので、一般に用いられている点荷重に関する Boussinesq の式¹⁾

$$P_{0'} = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \left\{ \frac{1}{1 + (r/Z)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots ④$$

より導くことにした。第I報で述べたように Terzaghi は④式を積分して②式を得た。しかし②式は先に垂直分布実験の考察で述べた理由により③式に修正された。それと同じ理由により④式も⑤式に修正される。

$$P_{v'} = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \left\{ \frac{1}{1 + (2r/Z)^2} \right\}^{5/2} \dots\dots\dots (5)$$

いま Fig. 18 のごとく Z 軸より r だけ離れた点を中心に半径 R の円形載荷が行なわれている。Fig.18(A)において小部分 ΔS に Q' の荷重が加わっている場合について考えてみると、 N_3 に加わる垂直荷重 ΔP_{v_1} は⑤式より

$$\Delta P_{v_1} = \frac{3Q'}{2\pi \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{2r'}{Z}\right)^2} \right\}^{5/2} \dots\dots\dots (6)$$

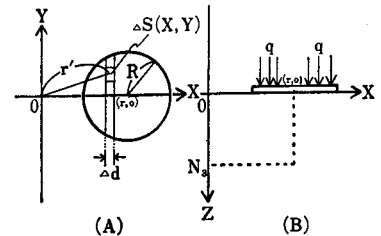


Fig. 18. Diagram about formula ⑥~⑧.

で表わされる。この⑥式を半径 R の円について積分すると、 N_3 に加わる垂直荷重が得られる。そこでまず半径 R の円を Fig. 18 (A) における幅 Δd のたんざく型で分割する。幅 Δd のたんざく型 1 個に垂直等分布荷重 q が加わった場合の点 N_3 に加わる垂直荷重 ΔP_{v_2} は⑥式を幅 Δd のたんざく型について積分すれば、

$$\Delta P_{v_2} = \int_{- \sqrt{R^2 - (X-r)^2}}^{+ \sqrt{R^2 - (X-r)^2}} \frac{3q}{2\pi \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{2r'}{Z}\right)^2} \right\}^{5/2} dY \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。⑦式の Y の範囲は原点における円の公式 $R^2 = y^2 + x^2$ において $y = Y$, $x = X - r$ であるから $R_2 = Y^2 + (X - r)^2$ であり、これを变形して $Y = \pm \sqrt{R^2 - (X - r)^2}$ の関係が得られ、 $+\sqrt{R^2 - (X - r)^2}$ から $-\sqrt{R^2 - (X - r)^2}$ までと定められる。また r' は $r' = \sqrt{X^2 + Y^2}$ の関係があるから⑦式は

$$\Delta P_{v_2} = \int_{- \sqrt{R^2 - (X-r)^2}}^{+ \sqrt{R^2 - (X-r)^2}} \frac{3q}{2\pi \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{2\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z}\right)^2} \right\}^{5/2} dY \dots\dots\dots (7')$$

と書き換えられる。幅 Δd のたんざく型を $r+R$ から $r-R$ の範囲で積分すれば、半径 R の円について⑥式を積分したことになる。⑧式はその式である。

$$P_{v_3} = \int_{r-R}^{r+R} \left[\int_{- \sqrt{R^2 - (X-r)^2}}^{+ \sqrt{R^2 - (X-r)^2}} \frac{3q}{2\pi \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{2\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z}\right)^2} \right\}^{5/2} dY \right] dX$$

$$= \int_{r-R}^{r+R} \left[\int_{- \sqrt{R^2 - (X-r)^2}}^{+ \sqrt{R^2 - (X-r)^2}} \frac{3q}{2\pi \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \left\{ \frac{\left(\frac{Z}{2}\right)^2}{X^2 + Y^2 + \left(\frac{Z}{2}\right)^2} \right\}^{5/2} dY \right] dX \dots\dots\dots (8)$$

Fig. 20. Stress distribution curve by theoretical formula.

⑧式によれば半径 R の円載荷の場合に円の中心より深さ Z で水平距離 r の点に加えられる垂直荷重が計算できる。⑧式の計算結果より等応力線図を描いたのが Fig. 19, 20 である。Fig. 19 を実験結果の Fig. 10~14 と比較してみると等応力線の形は混合物が相似的によく似ている。深さ 10cm までについては火山灰土・砂・砂利ともに等応力線の密度や値は実測値より小さめを示

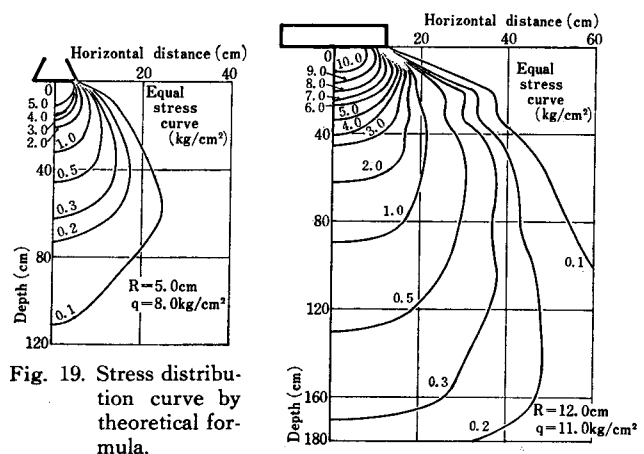


Fig. 19. Stress distribution curve by theoretical formula.

し、粘性土や混合物では大きめを示している。水平方向に最も遠くまで影響の及ぶ距離は5種の試験土の実測値の方が大きな値を示しており、垂直方向では計算値の方が大きな値を示している。

このように⑧式による計算結果と実験結果とは少しいち違ってはいる点もあるが、今回はいおうこの程度の信頼性ということで林道の路体内での応力分布を推測してみることにする。なおより信頼できる理論式は今後の問題として残しておく。

(4) 路体改良への応用

最後に林道におけるトラックによる荷重の分布を考察してみよう。第I報にも述べたように、現在林業に使われているトラックの車輪が林道路面に加える最大垂直荷重は、実測により 11kg/cm^2 と判

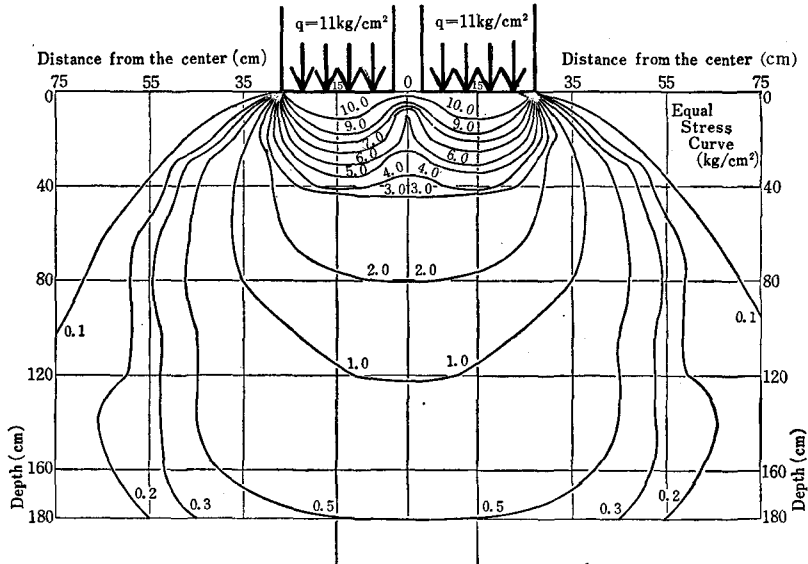


Fig. 21. Stress distribution under the road surface by the dual tires.

Table 4 The effect of C.B.R. test about the forest road materials in Ashiu Forest

Depth (cm)	Value of field C.B.R. test (%)	M.C. in field C.B.R. test (%)	Bearing power (kg/cm^2)
0	11	38	1.4
10	10	40	1.4
20	6	42	0.9
30	18	30	2.0
40	23	25	2.3
50	11	28	1.4
60	20	35	2.1
Compaction times in indoor C.B.R. test	Value of indoor C.B.R. test (%)	M.C. in indoor C.B.R. test (%)	Bearing power (kg/cm^2)
55	40.1	34.8	3.1
40	33.1	34.2	2.8
25	25.6	34.1	2.4
10	8.9	34.5	1.2

っている。この 11kg/cm^2 という荷重が車輪の接地面積に相当する直径 24 cm の円に等分布した複輪の場合の林道の路体内での等応力線図が Fig. 21 である。これによれば実際の林道の路体内でのトラックの荷重による応力の分布状態が推測できるので、これを利用して実際の林道の悪路部分を改良する方法を考えてみよう。ここで対称となる改良区間は京都大学農学部附属芦生演習林内の林道

でケヤキ坂付近の1967年に新設された部分である。この部分は路体材料の粒度組成が適当でないために悪路となっており、林道開設中に工事用の車両の通行にも支障をきたしていた。この路体材料の粒度組成は先の応力分布実験で使用した粘性土と同じであり、またこの地点で深さと支持力との関係を調べた結果は Table 4 のとおりである。

Table 4 によれば路体の支持力は深さ 40cm でいちばん大きくて 2.3kg/cm^2 で、Fig. 21 によれば深さ 70cm 以下の路体としてはこのままで良いことが判る。またこの地点の土について行なった室内 C.B.R. 試験の結果 (Table 4) によれば締固め度 95% 以上 (室内 C.B.R. 試験の 25 回突固め相当) の締固めを行なえば 2.4kg/cm^2 以上の支持力が得られることが判ったので、この場合には深さ 60 cm 以下の部分はそのまま路体として使用できる。そこで現在の路面から深さ 40cm までの路体をけず

り取ってその表面を締固め度95%以上に締固め、その上に1層15cmの十分に締固めた碎石層を作り、その上にこの現場のけずり取った土と粒径2.5mm以下の砂と粒径2.5~5mmの砂利を適当な比で（たとえば2:2:1か2:1:1）よく混合し、1層10cm締固め度95%以上の層を2層作って改良を終る。この路体は先の応力の分布実験結果より考えて、路面に加わった輪荷重はまず混合物の層で分散・吸収され、次に砂利の層でさらに分散され、最後に粘性土の層で吸収されるという働きをする。

III. ま と め

以上の実験結果より次のことが判った。

- (1) 路体内の応力の垂直分布を表わす式として、

$$P_{v1} = q \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{2R}{Z} \right)^2} \right\}^{n/2} \right]$$

を得た。この式より5種の試験土のうち、火山灰土・砂・粘性土・混合物の集中係数 n が求められた。

- (2) 路体内の応力の水平・垂直分布を表わす式として

$$P_{v3} = \int_{r-R}^{r+R} \left[\int_{-V\sqrt{R^2-(X-r)^2}}^{+V\sqrt{R^2-(X-r)^2}} \cdot \frac{3q}{2\pi \left(\frac{Z}{2} \right)^2} \left\{ \frac{\left(\frac{Z}{2} \right)^2}{X^2 + Y^2 + \left(\frac{Z}{2} \right)^2} \right\}^{5/2} dY \right] dX$$

を得た。しかしこの式は集中係数 n を含んでいないために、少し不正確であるから、今後 n を含んだ式を作る必要がある。

- (3) 路体内の応力の分散分布を考慮した望ましい路体構造は、表層に粘性土を含んだ砂と砂利の混合物を置いて輪荷重をある程度吸収・分散させて、基層の砂利でさらに荷重を分散させ、最後に路床の粘性土で荷重を吸収させる構造である。

参 考 文 献

- 1) 佐々木功ら：京大演報，39，(1967)
- 2) チェボタリオフ：チェボタリオフの土質工学，技報堂，(1964)
- 3) 竹下春見：道路工学，金原出版，(1961)

Résumé

We made a study of the horizontal stress distribution under the road surface in the case of the forest road. The formula that had come into the question in the Report (I) was incorrect. The invalidity of the formula was corrected by using the concentration index that depended upon the nature of the road materials and changing Z to $Z/2$. This time we investigated not only the vertical stress distribution but also the horizontal stress distribution under the road surface of the forest road and we made another formula that can be applied to both the vertical and the horizontal stress distribution.

The result says that the following structure is better from the viewpoint of the stress distribution: the course of the clay mixture, the ballast course and the clay course from the surface to the earth. Then, supposing that we used practically this road structure, we investigated the way of improving the bad road in Kyoto University Forest at Ashiu with reference to the C.B.R. of this road.

After this, it is desirable to make the formula of the stress distribution that includes the concentration index and to investigate the forest road about the relation of C.B.R. variation with depth and shearing resistance and permeability of the road surface.