

林道の路体構造に関する研究 (I)

林道路体内での応力分布と支持力について

佐々木 功・滝本 義彦・上田 千秋

Studies on the structure of the forest road (I)

On the forest road, the stress distribution and bearing power

Isao SASAKI, Yoshihiko TAKIMOTO and Tiaki UEDA

目	次
要 旨.....	270
I はじめに.....	270
II 林道路体内での応力分布.....	271
(1) 理論式	
(2) 実験方法と装置	
(3) 結果と考察	
III 林道の支持力.....	275
	(1) 理論式
	(2) CBR試験
	(3) 結果と考察
	IV まとめ.....
	参考文献.....
	Résumé.....
	278
	278
	278

要 旨

軟弱地における林道の路体構造決定の為の予備実験として、林道の路体材料・応力分散分布状態・支持力について実験・考察を行なった。

林道路体内での鉛直方向の応力分散分布の状態を把握するための実験は、火山灰土・砂・砂利とそれらの2者の混合物について行った。その結果、同じ深さでは砂利の方が火山灰や砂より荷重の分散が少ないことが判った。また Boussinesq の式の変形式による路体内での垂直荷重の計算値は、実験値より小さかったが、これは土が弾性体でなく、その上に応力集中が起るためと考えられる。

林道の C.B.R. 実験は、京都大学芦生演習林と岩村田営林署管内の林道11ヶ所で行った。その結果、悪路と思われた地点は路盤材料の支持力不足よりむしろ締固め不足と排水不良に原因があるのが判った。

今後は、林道路体内での水平方向の応力分散分布実験、深さによる C.B.R. 値の変化、C.B.R. 値と支持力そのものとの関係、路面のセン断抵抗や透水性について調査するのが望ましい。

I は じ め に

近年林業地において林業機械化の前提条件として、あるいは観光開発等を目的として、林道網の計画・建設が盛んに行なわれている。しかしその際に経済的に大きな比重をしめる建設単価は林道の構造・路線の形状・地質条件等により非常に差があるので、目安になるような指標を得られるのが望ま

しい。そこで特に維持費の高いと思われる地盤の軟弱な地域を通る部分を中心に、林道として必要な最低条件になった構造の決定を目的として、種々の関係資料・文献による考察と、路体材料・支持力・応力分布についての実験、考察を行なったので、ここに第Ⅰ報として報告する。

Ⅱ 林道路体内での応力分布

(1) 理論式

普通、林道を通行する車輛として軽車輛・2輪車・3輪車・小型トラック・大型トラック・乗用車・特殊作業車・特別な場合には観光バスなどが考えられるが、林道の構造を考慮する場合に問題とされるのは重量の点から大型トラックと思われる。大型トラック（積載量5～10t）の接地面での最大垂直荷重は衝激荷重も含めて過去の研究より、約11kg/cm²と考えられる。タイヤの接地面は普通楕円形と見なすが、それを円と考えた場合の同面積の円の半径（等値半径）は10～12cmである。この半径10～12cmの円で、11kg/cm²の等分布荷重の土中での分散状態についてここで少し理論的に追究してみよう。

Boussinesq は、載荷される材料が弾性体であり均一であり、かつ等方であるという仮定の下に鉛直な集中荷重 Q が地表面に作用する場合、地中の任意の点 N に生ずる鉛直応力 P'_v を下記の式で表わした。

$$P'_v = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \left\{ \frac{1}{1+(r/Z)^2} \right\}^{5/2} \quad \text{.....①}$$

但し、 Z は N と地表面との間の鉛直距離を表わし、 r は N から荷重の作用線までの水平距離を表わす。

Terzaghi は①式を積分することによって、点 N が半径 R なる円形をした載荷面の中央 N' より Z なる深さの所にある時の鉛直圧力 P_v を下記の式で表わした。

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

但し $q=Q/A$ であり、 A は載荷面積を表わす。

土を弾性体と仮定したにもかかわらず、②式は粘土や砂に対してもかなり正確に適用できるが、一般に小さい値を与えるようである。

先に述べたように半径10～12cmの円に11kg/cm²の荷重が加わった場合の土中での垂直荷重は理論式②によれば、Fig. 1のグラフの通りである。これによれば深さ30cmで約2.2kg/cm²、60cmで約0.7kg/cm²の荷重が加わる事がわかる。

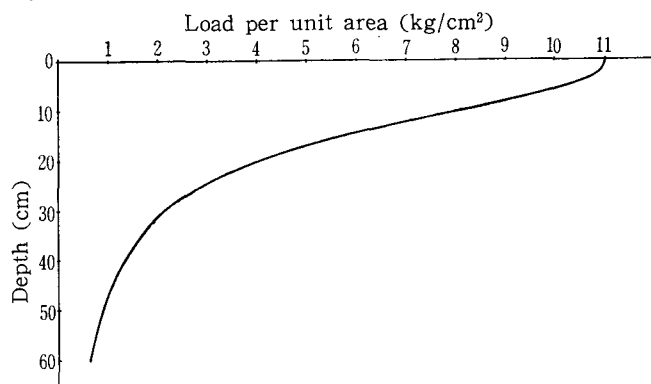


Fig. 1 Stress distribution curve by theoretical formula ($R=12\text{cm}$)

上記の垂直荷重の計算式はある仮定にもとづいたものであって、実際の林道において計算式による垂直荷重と実際の荷重との関係を調べる必要があるが、今回は実験室で実際の林道での荷重を推測できる方法で実験を行って見た。

(2) 実験方法と装置

方法としては、木箱に気乾状態の試験土を入れ、土中に土圧計を水平に数個埋めておき、土の表面に荷重を加えてその荷重が土圧計にどの程度の荷重

を加えるかを測定した。

試験土としては、火山灰土・砂・砂利の3種を選び、火山灰土は京都大学北海道演習林内の黄褐色土を、砂は釧路海岸の海砂を、砂利は釧路川岸の砂利を使用した。試験土3種と、それらを混合したもの2種、合計5種について試験を行なった。

装置は Fig. 2 のような、内寸法が縦・横・高さとも 1m の木箱からなり、この中に試験土を入れ、その試験土の中心直下に表面より 10・20・30・40・60cm の深さに土圧計を埋設し、これによって載荷重の土中での垂直方向の圧力変化を測定し、さらに水平方向の分散の概略を知るために深さ 30・60cm の所で、それぞれ中心より 20・40cm 離れた所に同じ土圧計を埋設した。これらの土圧計は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、スイッチの切換によって測定した。

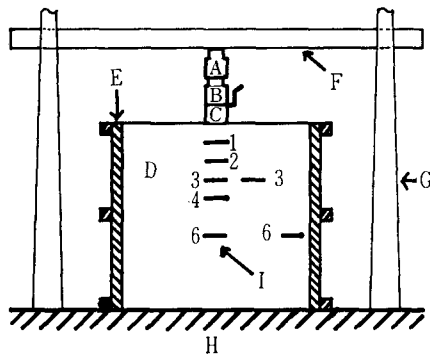


Fig. 2 Equipment of stress distribution test

A : Load cell
B : Oil jack
C : Wood cylinder
D : Test soil
E : Wood frame
F : Cross beam
G : Standing tree
H : Ground
I : Soil pressure gauge

試験土の表面に載荷する方法としては Fig. 2 に見られるように、直径 10cm・高さ 10cm の木製円柱 (C) の上に油圧ジャッキ (B) を置き、さらにその上に圧縮荷重変換器 (A) を載せてジャッキにより横渠と試験土表面の間に荷重を加えて、試験土に等分布荷重を加えるようにした。

測定計器としては下記のものを使用した。

○ 土圧計 (SPB—A 型土圧変換器,

共和電業製)

容量 数量

2kg/cm² 2 個

5kg/cm² 3 個

10kg/cm² 2 個

○ 圧縮荷重変換器 (LC—5TA 型,

共和電業製)

容量 5,000kg, 1 台

○ 油圧ジャッキ (自動車用)

容量 5,000kg, 1 台

○ 自動平衡指示計 (SLW 型, 共和電業製)

携帯用, 1 台

○ 多点切換用スイッチボックス (SS—J 型, 共和電業製)

12点用, 1 台

(3) 結果と考察

一般に林道は自然土の上に砂利または砂をひいたものが多い、火山灰土が見られる地方では、表層部に火山灰土があることも多い。筆者達の調査によれば、林道の路体材料の粒度組成は Table 1 の通りである。

このように砂・砂利が多く使用されている路体は何故丈夫かという理由として、雨水・湧水の排水の良さ、あるいは路面の硬さ増加のためなどがあげられるが、まず第 1 にこれらの材料について輪荷重の土中での分散分布が如何になるかを知るために、砂・砂利と火山灰土について実験を行った。Fig. 3・4・5 は実験の結果をグラフにしたものである。

Fig. 3 で判るように、表面載荷重が 5kg/cm² の場合は火山灰土と砂は深さ 30cm で約 2kg/cm² であり、砂利はそれらよりも大きく約 3kg/cm² である。また深さ 60cm では火山灰土と砂は 0.3kg/cm² 以下であり、砂利は 0.5kg/cm² である。このことから考えて砂・火山灰土は垂直力の分散が砂利に比較して非常に広く行なわれているか、あるいは砂・火山灰土はその粒子間にある空隙が載荷重

Table 1 Classification of subgrade materials based on grain size(%)

Place		Gravel	Coarse sand	Fine sand	Silt	Clay	a condition of road surface
Kamikawa Dist. Forest Office		50	28	14	1	7	comparatively good
Daisetsu	"	15	28	25	4	28	bad
Obihiro	"	12	24	28	3	33	bad
Kamishihoro	"	37	25	23	2	13	comparatively good
Muroran	"	46	38	3	1	12	comparatively good
Tomakomai	"	13	20	27	5	35	very bad
Iwamurata Dist. Forest Office	No. 1	22	49	20	6	3	good
	No. 2	11	11	13	52	13	comparatively bad
	No. 3	22	42	15	16	5	good
	No. 4	54	28	6	7	5	comparatively good
Kyoto University Forest at Ashiu	No. 1	49	5	12	18	16	comparatively bad
	No. 2	41	6	15	17	21	comparatively bad
	No. 3	41	14	8	15	17	comparatively bad
	No. 4	50	21	7	6	16	comparatively good
	No. 5	43	24	7	14	12	bad
	No. 6	43	6	6	36	9	comparatively bad
	No. 7	44	15	7	18	16	bad

Classification
of grain size (mm)

Gravel	to 2.0
Coarse sand	from 2.0 to 0.25
Fine sand	from 0.25 to 0.05
Silt	from 0.05 to 0.005
Clay	from 0.005

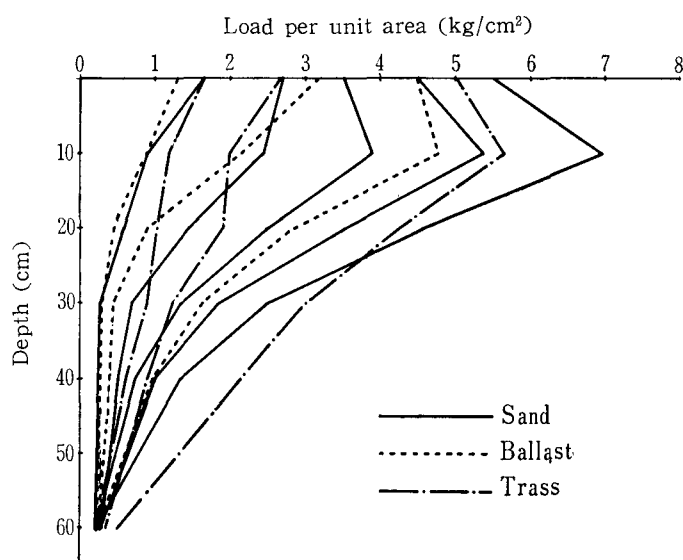


Fig. 3 Stress distribution graph by test

事にした。Fig. 4・5 から判るように、砂と砂利の混合比（容積比）が 1 : 5 の場合は砂利のみの場合とほとんど同じような圧力分布を示し、砂の混合率が大きくなれば当然砂のみの場合の圧力分布に近くなる。混合比が 1 : 1 の場合では 30cm の深さで表面載荷重 5kg/cm² では 2kg/cm²、60cm の深さで同じ場合に 0.5kg/cm² である。また火山灰土と砂利の混合の場合は、混合比が 1 : 1 の場合に非常に良い分散状態を示している。なお Fig. 3・4・5 を通じてみられるように載荷重がある限

により減少するために、分散が行なわれたのと同じ現象が生じるのか不明であるが、いずれにしても砂利よりも垂直圧は小さい。故に地盤の弱い林道で砂利のみをやたらに多く入れることはかえって不適當で不經濟でもある。しかし砂・火山灰土のみでは車輪の回転による掘削に対して非常に弱いと思われる。

Fig. 4 は砂と砂利、Fig. 5 は火山灰土と砂利の混合物について実験した結果である。混合の場合、火山灰土または砂と砂利の混合、あるいは粘質土との混合が考えられるが、今回は前者の火山灰土または砂と砂利の混合物について実験し、後者は次の機会に行う

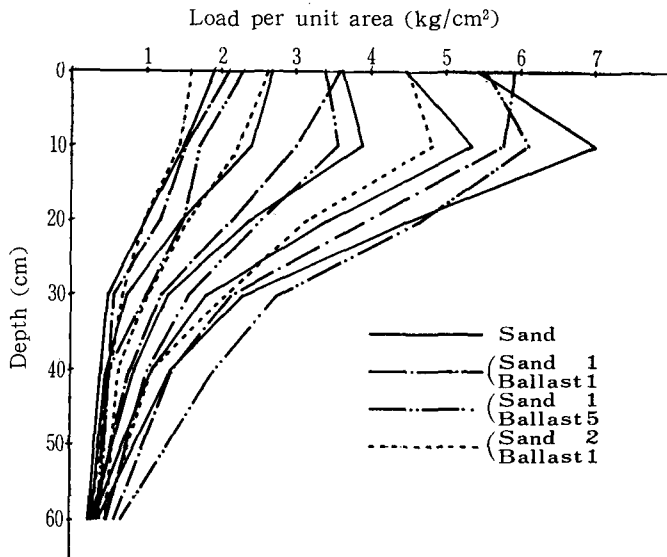


Fig. 4 Stress distribution graph by test

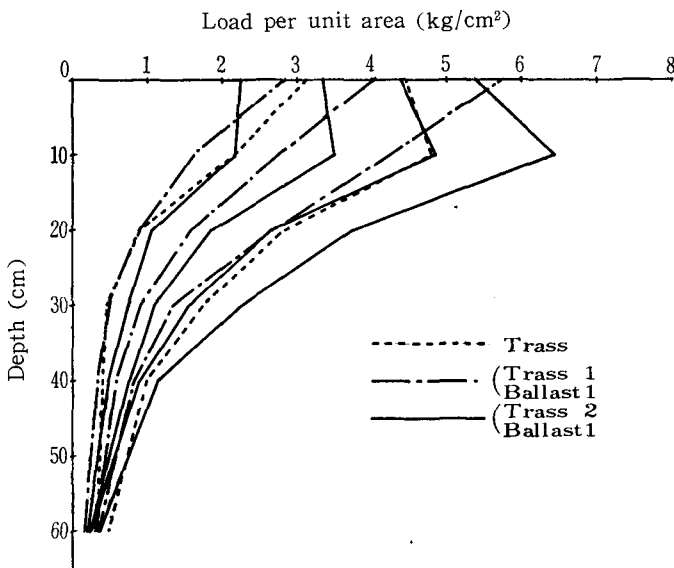


Fig. 5 Stress distribution by test

界 ($3\sim 4\text{kg/cm}^2$) を越えると深さ10cmの所の圧力が載荷重よりも大きくなっているのは、載荷面の直下で応力集中が生じる結果と考えられる。この点については Koegler, Scheidig 両氏の砂の中の応力分布実験においても同様の現象がみられ、同様な理由が述べられている。

Table 2 は土中の応力の水平分布の測定結果である。これによれば、各々の試験土で同じ様に載荷重が増すにつれて垂直荷重はわずかに増加している。なおこれについてのくわしい実験も次の機会に行ないたい。

次に上の結果と理論式②との関係について調べる事にする。Fig. 6 はこの実験の場合の理論式②

Table 2 Horizontal distribution of stress

Soil	Test load at surface (kg/cm ²)	Soil Pressure gauge No.			
		3	3'	6	6'
Trass	1.27	0.33	0.09	0.16	0.14
	4.46	1.65	0.15	0.20	0.15
Sand	1.59	0.29	0.15	0.19	0.17
	5.48	2.40	0.22	0.34	0.19
Ballast	1.59	0.80	0.10	0.26	0.19
	5.03	3.01	0.17	0.54	0.21
Trass Ballast 1)	2.86	0.55	0.21	0.25	0.16
	5.73	1.35	0.30	0.35	0.17
Sand Ballast 1)	2.26	0.63	0.14	0.29	0.17
	5.90	2.10	0.19	0.46	0.18

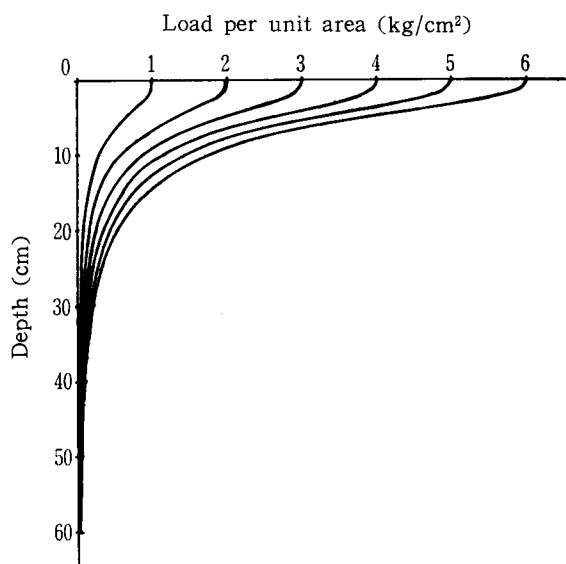


Fig. 6 Stress distribution curve by theoretical formula (R=5cm)

から得られた垂直圧 P_v の値と深さとのグラフである。Fig. 6と Fig. 3・4・5を比較してみると、グラフの形は似ているが理論式によるグラフの方が実験値によるグラフより、同じ深さでの垂直圧力が小さくなっている。これは恐らく理論式は土を弾性体・均質体と仮定して得られたものであるが、実際には土は弾性体でないために応力の分散が弾性体の場合よりも小さく、その上に応力集中が起るものと考えられる。この事は先に述べたように同じ深さで砂利の方が砂や火山灰土よりも大きな垂直圧力を示した事とも一致すると思われる。

Ⅲ 林道の支持力

(1) 理論式

林道の支持力とはすなわち、林道がまさに剪断破壊を起そうとするときの路面載荷物と路面との平均単位接触圧力の極限値の事である。林道での路面載荷物は車輪であるが、そのタイヤ面を深さが0のフーチングとみなして林道の支持力すなわちフーチングの支持力について考える事にする。

Terzaghi 'は円形フーチングの支持力について次のような実験に基いた半ば経験的な式を発表している。

。かなり密なまたは硬い土の場合

$$Q_{dr} = \pi \cdot r^2 (1.3c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.6\gamma \cdot r \cdot N_\gamma)$$

又は

$$q_{dr} = 1.3c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.6\gamma \cdot r \cdot N_\gamma$$

○ かなり弛いかまたは軟い土の場合

$$Q_{dr} = \pi \cdot r^2 (1.3c' \cdot N_{c'} + \gamma \cdot D_f \cdot N_{q'} + 0.6\gamma \cdot r \cdot N_{\gamma'})$$

又は

$$q_{dr} = 1.3c' \cdot N_{c'} + \gamma \cdot D_f \cdot N_{q'} + 0.6\gamma \cdot r \cdot N_{\gamma'}$$

但し

Q_{dr} : フーチングの支持力

q_{dr} : フーチングの単位面積当りの支持力 ($Q_{dr} = \pi \cdot r^2 \cdot q_{dr}$)

r : 円形フーチングの半径

c : 土粒子間の粘着力

$$c' = 2/3 \cdot c$$

γ : 土の単位体積重量

D_f : フーチングの深さ

$N_c, N_q, N_\gamma, N_{c'}, N_{q'}, N_{\gamma'}$ は土の内部摩擦角 ϕ によって定まる数

上式により支持力を求めるには c および ϕ の値をそれぞれ求める必要があるが複雑なので、今回は C. B. R. 貫入試験により林道の支持力を知ることにした。

(2) C. B. R. 試験

C. B. R. 試験とは直径 5cm のピストンを供試体に貫入させて、2.5mm の深さでの所要荷重の標準荷重に対する比を%で表わすもので、路盤あるいは路床の支持力を調べるのに使われる。この試験には室内試験と現場試験の2通りがあり、室内試験には乱した土を締固めて行う試験と乱さない土で行う試験とがあって、いずれも供試体を4日間水浸した後に貫入試験を行って含水量が多い最悪条件での支持力を推定しようとするものである。現場試験は路床土あるいは路盤材料の現在の強度特性を直接知ろうとするものであるが、含水量の変化による最悪状態の推測は出来ない。

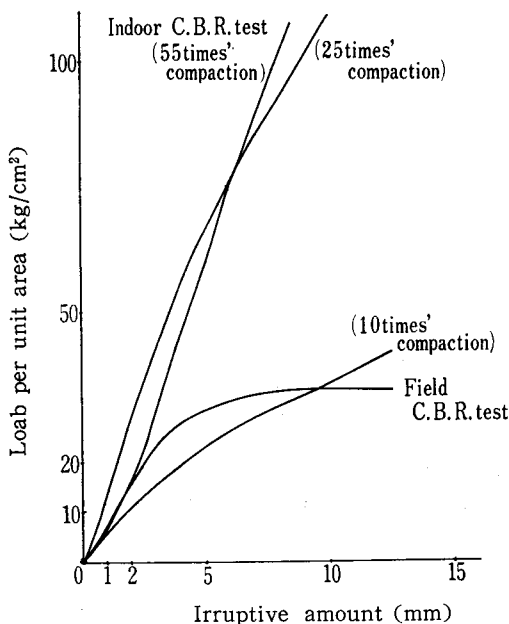


Fig. 7 Load-irruptive amount curve
(Ashiu No. 5)

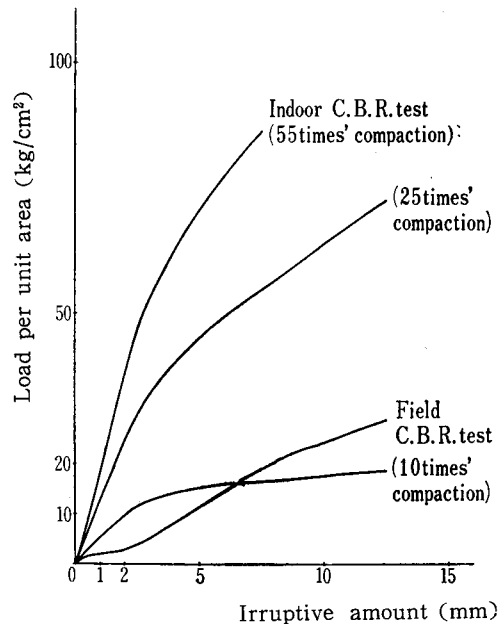


Fig. 8 Load-irruptive amount curve
(Iwamurata No. 3)

今回は現場試験と乱した試料で行う室内試験の両方を行って、その短所を補った。なおくわしい方法は JIS・A・1211 を参照されたい。

(3) 結果と考察

Table 3 に京都大学芦生演習林と岩村田営林署管内の林道について行った C. B. R. 試験の結果が示しており、Fig. 7・8 には代表的な 2 ケ所の荷重・貫入量曲線がかかされている。また同地点の粒度組成は Table 1 の通りである。この結果を Table 4 の C. B. R. 値による路盤の良否判定表を参考に考察してみる事にする。

Table 3 Value of C. B. R. test

Test place		Value of indoor C. B. R. test (%)			Value of field C. B. R. test (%)	Condition of road surface
		55times' compaction	25times' compaction	10times' compaction		
Iwamurata District Forest Office	No. 1	42.0	61.2	9.9	52.6	good
	No. 2	54.1	20.0	14.4	27.0	comparatively good
	No. 3	32.1	51.1	19.0	28.1	good
	No. 4	57.7	33.3	15.7	17.5	comparatively good
Kyoto University Forest at Ashiu	No. 1	32.1	8.7	2.9	11.7	comparatively bad
	No. 2	13.9	6.9	2.9	12.4	comparatively bad
	No. 3	55.7	25.7	8.6	19.7	comparatively bad
	No. 4	17.0	8.6	4.3	17.5	comparatively good
	No. 5	65.4	43.6	16.0	5.8	bad
	No. 6	46.8	19.6	8.6	24.1	comparatively bad
	No. 7	58.1	35.7	11.7	6.6	bad

Table 4 Judgement of subgrade with C. B. R. value

C. B. R. value (%)	Judgement
2 ~ 5	very bad subgrade
5 ~ 8	bad subgrade
8 ~ 20	pretty good subgrade
20 ~ 30	good subgrade
30 ~ 60	superior subgrade
60 ~ 80	good basement
80 ~ 100	the best basement

芦生演習林では外観から悪路と思われる部分を中心に実験したが、現場 C. B. R. 試験で十分な値を示さなかった路盤材料でも、室内 C. B. R. 試験ではそのほとんどが良い路盤に属するほどの C. B. R. 値を示している。このことから、外観によって悪路と判断した場所は路面がこね返しにより破壊を起していたにすぎず、路盤の支持力不足によるものではないと思われる。またこのような破壊の原因としては、路盤材料中の粒径の小さい成分（シルト分と粘土分）の含有率がかなり大きく、なおかつ道

路へ水が浸入したり停滞したりする事が考えられる。

岩村田営林署管内の林道は全般にかなり良い路面をしていた。ここでは良好な路面を中心に実験したが、いずれも芦生演習林の林道にくらべてずっと大きな C. B. R. 値を示した。これは岩村田地方の林道は粗粒な火山灰土から出来ていて排水性が良く、また路面では輪荷重により細砂などの粗粒な

路盤材料の一部が容易に破壊されて、主としてシルト分に変って、それが粗粒な路盤材料の間隙をうずめて良好な路面が得られるものと思われる。しかし室内 C. B. R. 試験の結果から判るように、この種の土は過度の突固めによりシルト分が非常に多くなって支持力が減少することがあるから注意を要する。

この調査より判ったように、現在の林道では悪路といわれている場所の大部分は排水施設の改良・新設によりほとんどの場所が良好な路面になるものと思われる。

Ⅳ ま と め

以上の2つの試験結果より次のことが判った。

- 1) 土中での垂直荷重についてはその傾向を知ることが出来たが、さらに他の路盤材料についての実験を行なって理論式②との関係を調べると同時に、土中での荷重の水平分布の実験を行い、その理論式を追究すべきである。
- 2) C. B. R. 試験は、今回は路面についてのみ行なったが、今後は同じ地点での深さによる C. B. R. 値の変化を調べる必要があると思われる。
- 3) C. B. R. 値と路盤支持力そのものとの関係を調べて、土中での垂直荷重に耐えられる C. B. R. 値を計算出来るようにすれば、林道の改良工事等で路体構造決定に C. B. R. 値が利用出来ると思われる。
- 4) 路盤材料の透水性・路面のセン断抵抗を調査して、排水施設のみでは改良出来ない地帯の林道（軟弱地盤地帯の林道など）に適した路体構造・表面処理の方法などを考えてみたい。

参 考 文 献

- 1) 杉原彦一等：77回日林講，1966
- 2) 佐々木功：76回日林講，1965
- 3) 小野薫等訳：テルッアギ・ベック 土質力学，丸善，1965
- 4) 佐々木功：日林北支講14，1965
- 5) 佐々木功等：78回日林講，1967
- 6) 石井靖丸訳：チェボタリオフの土質工学，技報堂，東京，1965
- 7) 谷藤正三：応用土質試験とその解説，理工図書，東京，1964
- 8) 土質試験法，土質工学会，東京，1965

Résumé

We studied on the road materials, stress distribution and bearing power to determine the structure of the forest road.

The distribution of vertical stress in trass, sand, ballast and mixture of two of them were investigated. The result said, the area of stress distribution in ballast was smaller than in trass or sand at the same depth. The value of vertical stress by a varied formula of Boussinesq's formula was smaller than the value from this investigation, because the soil was not elastic body and the stress concentration occurred in the soil.

C. B. R. (= California Bearing Ratio) of the forest road was investigated at 11 places in Kyoto University Forest at Ashiu and the province of Iwamura District Forest Office. As the result, a cause of bad road was not the lack of bearing power but the imperfect compaction or the poor drainage.

After this, it is desirable to investigate on the forest road about the horizontal distribution of stress, C. B. R. variation with depth, relation between C. B. R. and bearing power, and shearing resistance and permeability of the road surface.