

# 報 文

## 軟弱な支持層を有する粒体層の 振動性状について

正 員 工学博士 村 山 朔 郎\*  
正 員 谷 本 喜 一\*\*

### ON THE VIBRATION CHARACTERS OF GRANULAR LAYERS WITH SOFT UNDERLYING LAYERS

(JSCE March 1956)

*Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member, Kiichi Tanimoto, C.E. Member*

**Synopsis** In this paper, the authors describe some experimental researches on the mechanism of the flow settlement of a granular layer such as the railway ballast, which is caused by a repetitional load.

As the results, the followings are made clear.

- (1) The flow settlement of the granular layer is caused by the decrease in the intergranular friction of the dynamic state from that of the static state.
- (2) The decrease of the intergranular friction depends on the acceleration.
- (3) If the granular layer is laid on a soft ground, the thicker the depth of the layer is, the less the settlement becomes.

**要 旨** 本文は軌道砂利道床のような粒体層に、繰返し荷重が作用した場合に起る流動沈下の機構を究明するために行つた実験的研究について述べたものである。その結果、

- 1) 粒体層が流動沈下を起す原因は、動態時の粒間摩擦が静止時のそれより減少することにある。
  - 2) 粒間摩擦の減少は加速度値によつて決定される。
  - 3) もし粒体層が軟弱路盤上にあれば、粒体層厚が大きいほど沈下は少なくなる。
- などが明らかとなつた。

### 1. 緒 論

軌道道床のような一般に上方および側方に自由表面を有する粒体の層は動荷重に対して敏感で、多少の動的外力をうけると流動性を生じて沈下してゆく傾向がある。このような動荷重による粒状体の流動性状はある場合には好都合であるが、砂利道床のような場合では軌道の狂いを生じ望ましくない。前者の場合にはこの性状をいかに利用するか、また後者の場合にはいかにして防止軽減するかということは、はなはだ重要な問題となつてくるが、そのためにはまずその性状や本質を明確に把握しなければならない。

本文は以上のような目的で実施した若干の実験的研究について述べたもので、特に動態時の粒体の流動は、動態時の粒間摩擦が静止時のそれより小さくなることに基因するものであることを明らかにし、かつ摩擦減少度は振動加速度と密接な関係があることを見出した。

### 2. 実験装置および方法

粒体試料は篩川砂利(粒径 5~10 mm)でこれを底面 50×50 cm の方形に盛り、砂利層の 1つの対向二辺を木ワクで固定し、他の対向二辺は上幅 24 cm の自由法面としてこの面で流動がおきるようにした。この砂利層を加振するために砂利層表面中央部に起振機を置き種々の振動特性を測定したが、起振機は two-mass をもつ偏心質量型(自重: 4.4 kg, 最大振動力: 100 kg)で、偏心質量は位相可変式になつており、その駆動には 1/8 HP 可変速型モータを用い、動力の伝導にはフレキシブル・シャフトを使用した。本実験では振動力は振動数の変化にかかわらず 3 kg に一定するよう偏心質量の位相を調節し、振動数変化による性状変化を調べた。

起振機下部には鋼製枕木(重量: 0.9 kg, 下面寸法: 40×160 mm) 2本を中心間距離 10 cm で取りつけこれで起振機を支えたが、これは軌道道床への応用を考慮したからである。砂利層表面寸法は 50×24 cm で

\* 京都大学教授, 工学部土木工学教室

\*\* 京都大学講師, 同

短辺は枕木方向に平行である。

また砂利の層厚は原則として 5, 10, 15 cm の 3 種とし, その路盤としては力学的性状の異なる 3 種のスポンジ板をコンクリート床盤上において代用させたが, 砂利層を直接コンクリート床盤上においた場合も観測した。

それらの測定は沈下, 内部摩擦, 振幅および振動数の 4 種の項目, すなわち砂利層の流動性を表わす指標として起振機の沈下量およびその主因と思われる砂利層の内部摩擦, さらに内部摩擦変化と振動性状 (振動数, 振幅, 加速度など) との関連性を調べるために起振機の振動数および振幅について行つた。

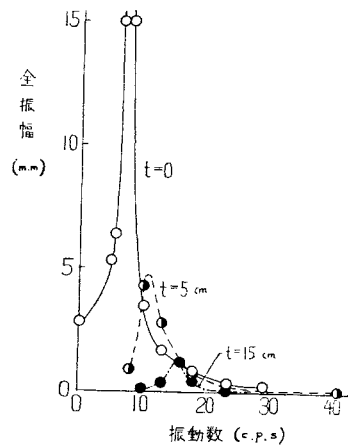
測定装置としては, 振幅および沈下測定にはダイヤルゲージを, 振動数 (起振機回転数) 測定にはタコメータを用い, 内部摩擦の測定はこれを直接測定する代わりに 0.1×13 mm の断面を有する鋼製薄板 (ストリップ) と砂利との間の摩擦を測ることで代用したが, その方法はつぎのとおりである。すなわちストリップをあらかじめ砂利層内部に約 20 cm 程度水平にそう入しておき, そのそう入長さに対する動態時および静止時の引き抜き抵抗力をスプリング・バランスで測定した。実測の結果, 動態時の内部摩擦は静止時のそれより小さくなることを認めたが, この比を比摩擦 (動摩擦/静摩擦) と名づけることにした。この種の測定においては, 測定値が相当ばらつくので一測定に 4~5 回の繰返し測定を行い, その平均値をとるようにしたが個々の測定値が比較的良好に一致する場合も少なくなかつた。なお摩擦測定は枕木下方で層厚 5 cm の場合には 1 箇所, 層厚 10, 15 cm の場合には深さ方向の 2 箇所それぞれ数回の測定を行つた。

3. 実験結果

路盤として用いた 3 種のスポンジ板の力学的性質を知るため, 静荷重試験および動荷重試験を行い次のような結果を得た。すなわち静荷重試験で前記の枕木つき起振機の枕木間隔と同一間隔に枕木を配置して, これに静荷重をかけて得た沈下-荷重曲線 (直線) より路盤係数 (スポンジ路盤 1 cm 沈下に必要な路盤圧力強度) を求めると, 3 種の路盤についてそれぞれ路盤 I : 0.10 kg/cm<sup>2</sup>, 路盤 II : 0.40 kg/cm<sup>2</sup>, 路盤 III : 0.92 kg/cm<sup>2</sup> であつた。また動荷重試験ではスポンジ路盤上に前記起振機をおき, あとの実験と同一振動力を载荷して共振曲線 (振動数-振幅曲線: たとえば図-1 の t=0 の曲線参照) を求めた結果, それらの共振振動数はつぎのとおりである。

路盤 I : 8 cps, 路盤 II : 12 cps, 路盤 III : 23 cps。

図-1 共振曲線 (路盤 I)



なおコンクリート路盤の荷重試験は省略した, つぎに各路盤上に 2. にのべたごとく砂利層を敷いて前記各項目について測定した結果を次にのべる。

(1) 路盤 I : 砂利層厚 5, 15 cm 路盤 I については, 砂利層厚は枕木下 5 cm および 15 cm の 2 種しか行わなかつた。その共振曲線は図-1 に示すとおりである。ここで振幅としては全振幅を用いた。また図中の t は層厚を表わし, t=0 は砂利層のない場合すなわち路盤のみの場合を示す。図-1 によると層厚が大きくなると振幅は小さくなり, 共振振動数は次第に高くなる。これはこのような軟かい路盤では層厚の増大とともに砂利層-路盤振動系のバネ常数が大きくなることを意味している。

図-2, 3 は加振時間と沈下量との関係を示すもので図中の f は振動数 (cps) である。すなわち図-2 は t=5 cm の場合の結果で, 加振後しばらくは過渡的非常状態にあつて沈下速度は大きい, 次第に定常沈下の状態に入つて沈下速度は遅くなり一定速度に落ちつくかのように見える。図-3 は t=15 cm に対するも

図-2 時間-沈下曲線 (路盤 I, 層厚 5 cm)

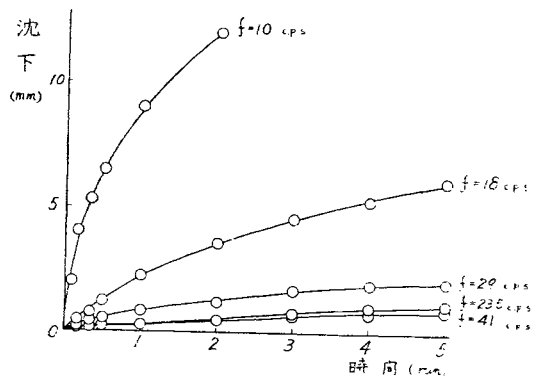


図-3 時間-沈下曲線 (路盤 I, 層厚 15 cm)

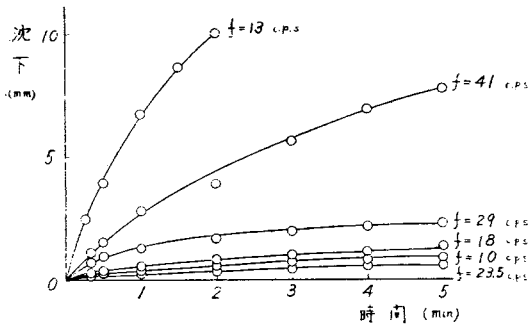


図-4 振動数-沈下曲線 (路盤 I)

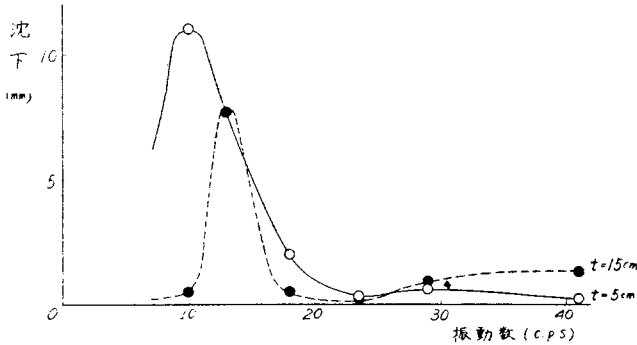


図-5 振動数-比摩擦曲線 (路盤 I)

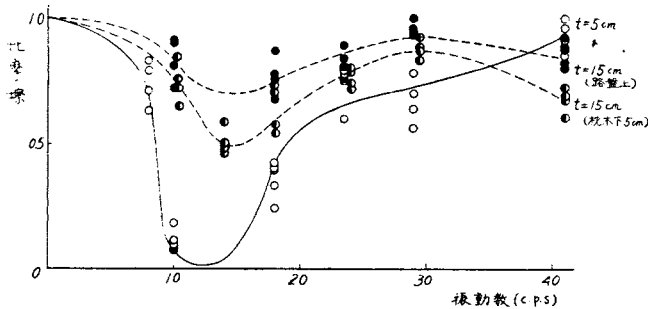
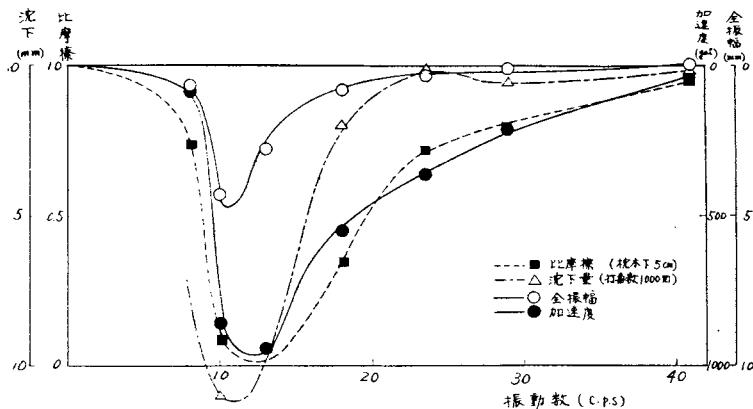


図-6 振動数と比摩擦, 沈下量, 全振幅, 加速度との関係 (路盤 I, 層厚 5 cm)



のほぼ同様の傾向がみられる。これら 図-2,3 いずれの場合においても振動数特性が顕著にあらわれているから、さらにこれらより沈下量振動数曲線を求めると 図-4 が得られる。ただし本図の沈下量としては一応 1000 回打撃による沈下をもつて図示した。

次に動態時および静止時の砂利とストリップとの摩擦を測定して、その比摩擦を振動数に対して図示すると 図-5 が得られるが、比摩擦は動態時においては 1 より小さくなっている。図-5 には路盤上約 0.5 cm 上方および枕木下約 4.5 cm 下方の位置における測定結果を示してある (以下の図には簡単のため、路盤上および枕木下 5 cm と記入する)。

図-1,4 および 5 を通覧すれば類似の振動数特性を有するようであるから、以上の諸結果をさらに比較しやすくするために 図-1,4 および 5 をまとめて 図-6,7 を作製した。なお図中の最大加速度値は計算によるものである。これは別に記録したオシロ・グラフ記録から振動がほぼ正弦波振動であることを認めたので、振幅 ( $a$  cm) および振動数 ( $f$  cps) の測定値を用い、最大加速度  $\alpha = 4\pi^2 f^2 a$  gal として計算したものである。図-6,7 をみれば 4 本の曲線は傾向として若干の差異があるとはいえ相当類似した振動数特性を有し、しかもそれらの極値がほぼ同一振動数 (5 cm 厚のときは約 11 cps, 15 cm 厚のときは約 14 cps) において現われていることは興味深く思われる。すなわちこの極値に近づくとき振動がはげしくなり内部摩擦は極端に小さくなり、それに応じて粒子は不安定状態におちいつて、はげしく流動することを示している。

(2) 路盤 II: 砂利層厚

5, 10, 15 cm 路盤 II についても上記とほぼ同様の試験を層厚 5, 10, 15 cm の 3 種に対して行つた。路盤 II は路盤 I よりもやや硬いので振動振幅は上記よりもやや小さい結果が得られた。しかし比摩擦, 沈下量などの測定の結果これら諸量相互間の関係は I とほぼ同一の傾向を有することを認めたので、全般の

図-7 振動数と比摩擦, 沈下量, 全振幅, 加速度との関係  
(路盤-I, 層厚 15 cm)

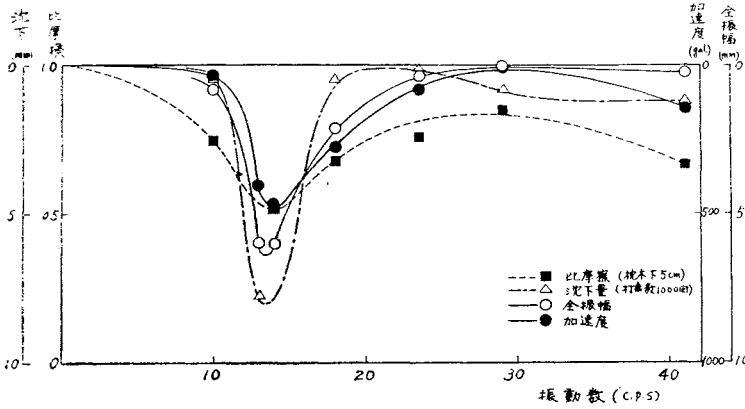


図-8 同 上 (路盤-II, 層厚 5 cm)

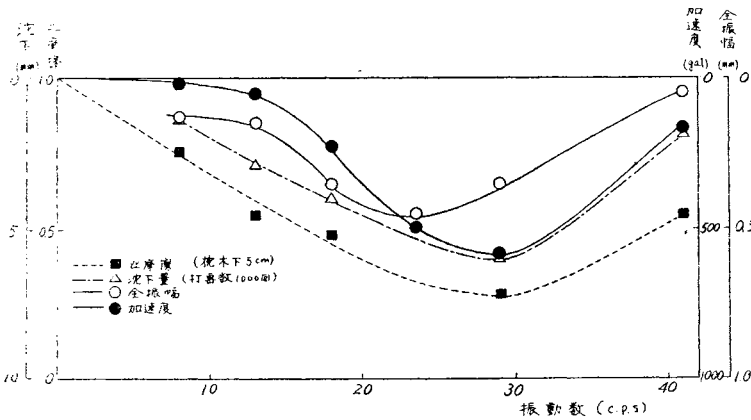
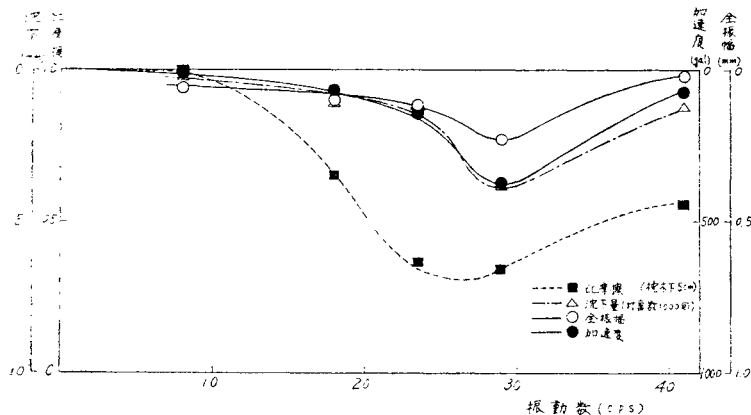


図-9 同 上 (路盤-II, 層厚 10 cm)



図は省略するがそのうち I の 図-6.7 に相当するもののみを 図-8,9,10 に示す。

(3) 路盤-III: 砂利層厚 5, 10, 15 cm 路盤-III についても層厚を三通りに変えて同様の測定を行った。それら諸測定結果をまとめて 図-11,12,13 に示

す。路盤-IIIは前二者よりさらに硬く振動振幅は小さくなつたが、この路盤の場合振動数特性も相当異なつてゐる。たとえば砂利層厚 5 cm の場合 22 cps 付近の共振点のほか振動数が 40 cps (41 cps 以上の振動数については求められなかつた) 付近で振幅, 沈下量がさらに増大し内部摩擦が減少している。これは砂利層と路盤との連成振動の結果として現われるものと考えられるが、砂利層厚が厚くなるとこの状態は次第に顕著でなくなり、曲線のピークは明白にみられなくなる。しかし諸量間には上記同様の相関性を認めることができる。

(4) コンクリート路盤

：砂利層厚 5 cm 路盤が固い場合としてコンクリート路盤上に 5 cm 厚さの砂利層を作り上記同様の試験を行った。加振振動数は 23, 29, 41 cps の 3 種であつたが振幅および沈下量はきわめて小さいことがわかつた。振動数をさらに低くすると振幅はさらに小さくなり高感度振動計を用いなければ測定は不可能である。

この結果から路盤が固くなると道床はほとんど振動しないといえるわけで、上記 (1), (2), (3) で測定された振幅はほとんど路盤振動であると考えられる。従つて砂利層振動の機構は一

応次のように考えられる。

すなわち軟弱路盤上の砂利層に動荷重が作用すると、砂利層は荷重を路盤に伝えそれによつて路盤が振動し、それにともなつて砂利層までも振動しようとする。しかし砂利層は粒状構造の性質上、振動力の伝達

図-10 振動数と比摩擦, 沈下量, 全振幅, 加速度との関係  
(路盤一Ⅱ, 層厚 15 cm)

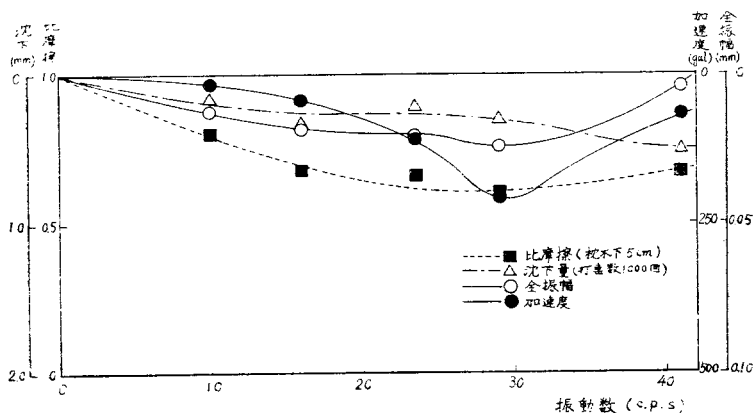


図-11 同 上 (路盤一Ⅲ, 層厚 5 cm)

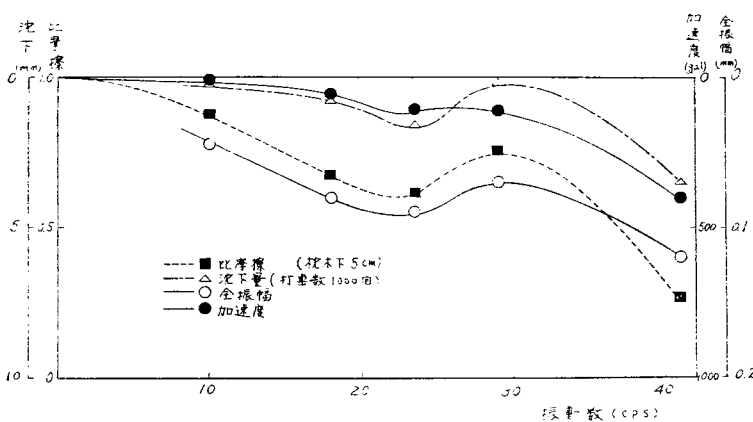
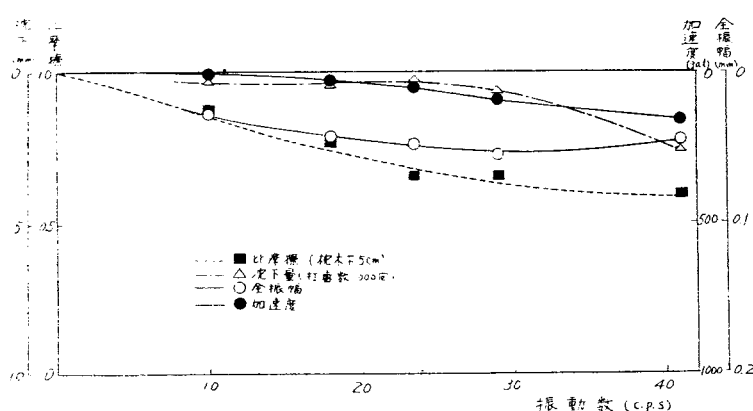


図-12 同 上 (路盤一Ⅲ, 層厚 10 cm)



性が不均一であるから粒子は回転, 並進運動を含む複雑な運動をする。その際粒子の占有空間は静止時のそれよりも拡大されて, 粒子間接触圧は減少し内部摩擦を低下する結果, 層構造は不安定状態を呈して流動す

るものと考えられる。

#### 4. 考察

砂利層の流動性状に関しては表面振動による内部摩擦変化, 沈下, 振幅(加速度)および振動数の測定結果を述べたが, すでに述べたようにこれら諸量の間には密接な関連性があるように思われる。

まずすべての測定値から比摩擦と加速度との関係を図示すると図-14をうる。砂利を扱うこの種の実験においてまぬかれがたい測定誤差を除外して考えれば, 図-14から比摩擦と加速度との間には一定の関係が存在するといつてよいであろう。すなわち比摩擦は加速度の減少函数で, 加速度が重力加速度に近づくにつれて比摩擦は次第に0に近づく。しかも図-14の結果は3種の路盤, 3種の層厚の結果を一つに示しており, 各場合の特性が特に目立たないことは, 比摩擦-加速度の関係が路盤性状, 層厚に無関係に一義的に決定されることを意味するものである。しかし材料の粒度, 粒形, 表面粗度などに影響されるかもしれないが, これについては今後調べてゆきたい。

つぎに比摩擦と振動振幅, 振動速度あるいは振動エネルギーとの関係を調べたがこれらは一義的関係のないことがわかった。

比摩擦と沈下量との関係は図-15に示すとおりで図-14と類似しているのは興味深い。図-15によると比摩擦が小さくなるにつれて沈下量が大きくなる。すなわち比摩擦の減少は砂利層構造を不安定化して砂利の流動性を増進すること

図-13 振動数と比摩擦, 沈下量, 全振幅, 加速度との関係  
(路盤一皿, 層厚 15 cm)

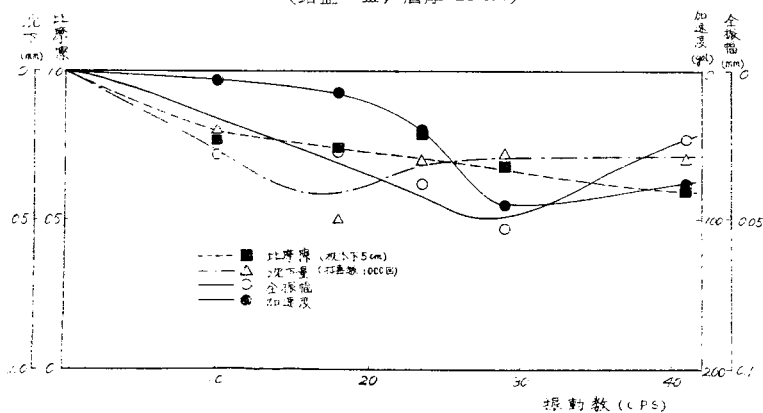
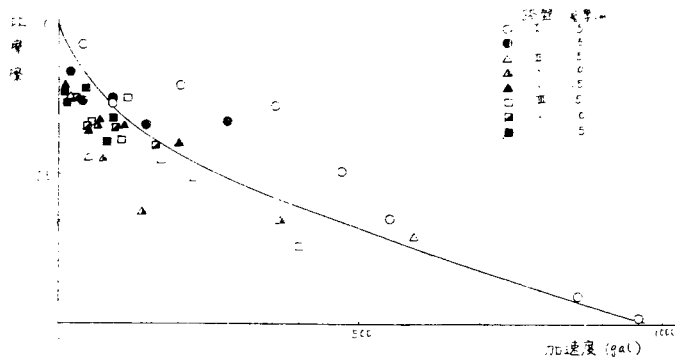


図-14 加速度—比摩擦曲線



になる。しかも相互の関係は各種路盤, 各種層厚のいかんにかかわらずないことは注目すべきである。

図-14, 15 の類似性から加速度と沈下との関係もまた興味深く思われる。その結果 図-16 を得た。図-16 は相当ばらついた点があるが, 測定点は大体原点を通る直線のまわりに分布するようである。すなわち両者はほとんど比例関係にあるようであるが, 資料が若干少ないので断言は不可能である。

図-15 沈下—比摩擦曲線

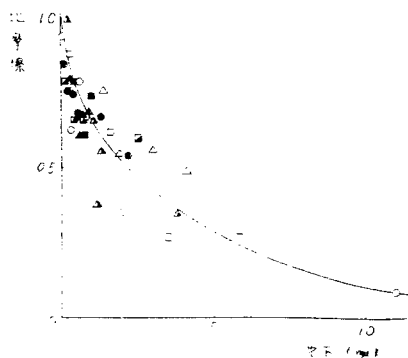
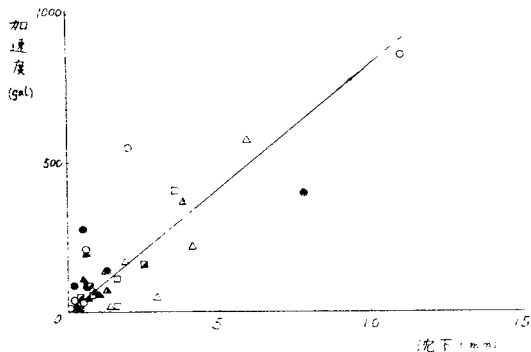


図-16 沈下—加速度曲線



これまで考察したのは砂利層内の一点のまわりの局所的な力学的性質に関してであつたが, つぎに砂利層, 路盤から成る振動系全体に対する路盤性状および層厚の影響について調べよう。

種々の見方があるが便宜上層厚をパラメータとし, 路盤係数に対する共振振動数, 最大加速度および最大沈下量を図示するとそれぞれ 図-17, 18 および 19 をうる。

図-17 によれば路盤係数および層厚が増大するにつれて, 系の共振振動数は高くなる。すなわちバネ定数を強める。しかし層厚が大きくなると路盤係数がある程度以上大きくなつても共振振動数はあまり増大しない傾向がある。

図-18, 19 によれば路盤が硬くなるほど, また層厚が大きくなるほど, 最大加速度および最大沈下量は小さくなる傾向がある。

5. 結論

まだ実験検照の不十分な点もあり今後の確認を要するところもあるが, 上記のごとき砂利層による実験結果を総合すると一応次のように結論される。

- 1) 砂利層は路盤と一体となつて振動しようとするから砂利層の振動は路盤の硬軟による影響が大で, 軟

図-17 路盤係数—共振振動数曲線

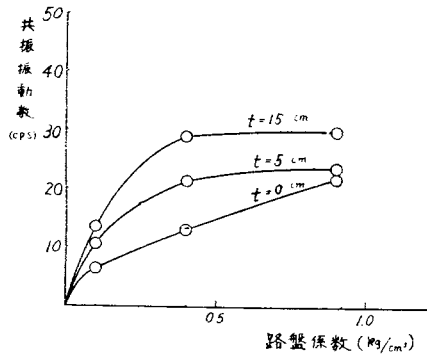


図-18 路盤係数—最大加速度曲線

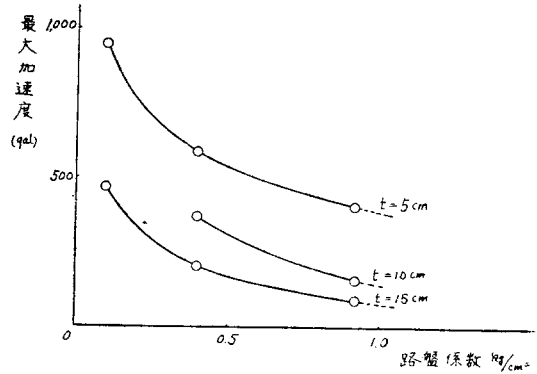
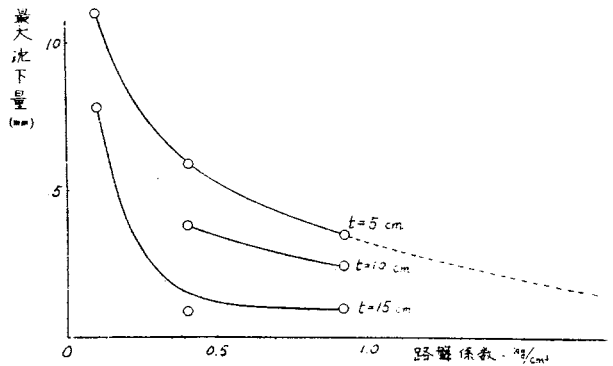


図-19 路盤係数—最大沈下量曲線



- 弱路盤ほど大きい振動を行う。また路盤としてコンクリートを用いた砂利層の振動はきわめて小さかった。
- 2) 砂利層厚さの増加にともなつて路盤への荷重ならびに振動の伝達が減少する。軌道において道床よりもバネ常数の低い土質を有する路盤の所では、道床厚さを増すとともに道床全体としてのバネ常数が増加する。
  - 3) 砂利層に動的強制力が作用するとき、砂利層は粒状構造の性質上振動の伝達性が不均一で、そのため各構成粒子は回転、並進移動を含む複雑な運動を行い、層全体としての運動と同一振幅、同一位相で動くものではない。ゆえに粒子間には位相のずれを生じ、各粒子の占有空間は静止時のそれよりも拡大されて粒間摩擦を減じ、次第に不安定な流動状態を呈して崩れてゆくものと思われる。なお本実験では粒間摩擦の減少を示す代りに、その指数として動態時の摩擦の静止時のそれに対する比を用い、これを比摩擦と称することにした。上記の関係は比摩擦の減少と流動との関係から明らかに認められた。
  - 4) 道床内の一点の比摩擦はその点の加速度値によつて決定される。すなわち比摩擦は加速度の減少函数

で、加速度が重力加速度に近づくにつれて0に近づく。しかもこの関係は路盤性状および砂利層厚には無関係である。

- 5) 従つて比摩擦の測定を行えば、路盤をも含めた道床の動的強度が求められる。なおその簡易測定法については目下研究中である。

終りに本研究は国鉄部外委託研究費によつて実施したものであることを付記して関係各位に深謝の意を表わすとともに、実験に協力された京大大学院学生 松野三郎君に感謝する次第である。

(昭.30.10.24)

正員 榎木寛之氏(享年64才、元本会理事、国土総合開発委員会委員)は2月17日、正員 佐藤慶次氏(享年54才、元札幌鉄道局長、鉄道保安工業KK社長)は2月29日、それぞれ逝去された旨連絡がありました。

本会はここに会員を代表して謹んで両氏の御冥福をお祈り申し上げます。