

鉄道線路における噴泥発生機構の基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE PROCESS OF MUDPUMPING
IN THE RAILWAY TRACK

山田 幹 雄*・小野 一 良**

By Mikio YAMADA and Kazuyoshi ONO

1. ま え が き

軟弱な粘土層の上に敷設された鉄道線路は、列車通過による繰り返し荷重によって道床砂利がしだいに粘土層へ圧入され、粘土は道床砂利の間隙やまくらぎの周辺を通過して上昇する。地下水位の高いとき、または降雨によって多量の水が供給されたときには、列車通過時にまくらぎが沈下するとともに、まくらぎ下の粘土が泥水となって道床表面に噴き上がることがある。この現象を噴泥といっている。

噴泥を生じた場合には、それだけ道床砂利が路盤内に圧入されたことになり、たとえ見掛け上レール面における高低の変化はわずかでも、まくらぎ下面と道床面との間に空隙を生じ、列車の円滑な走行を妨げる。さらに、道床砂利を補充し、道床を突き固めるのに多大の労力と費用が費やされる。

以上に述べた噴泥を根本的に防止するには、路盤の表層土を噴泥を生じない土と置き換えればよいが、列車を運行しながら路盤土を置換することは容易ではない。したがって、線路を敷設する当初からよい土を路盤の表層土として使用すべきである。国鉄では、東海道新幹線の建設を契機として在来の線路の不良路盤の実態を調査し、噴泥を生じない土としては液性限界が 35% 以下であること、その他の条件を指示している^{1),2)}。また、すでに開業している区間で噴泥を生じている場合に対処すべき方法についても種々の工法が考案され^{3)~9)}、実施に移されている。

このように、噴泥の実態とその防止法に関しては従来多くの調査と研究がなされ、その効果もあがっているが、噴泥の端緒ともいうべき道床砂利が粘土層へ圧入される機構については、これまでにあまり解明されていない。

著者の 1 人は、かつてこの問題を解明する手掛かりとして、円筒容器の中に粘土を入れ、その上に砕石砂利の層を置き、繰り返し荷重を加えて砂利層の沈下の進行を測定したことがあった^{10),11)}。この報告においては、手動ジャッキによって圧力を加え、また最高、最低荷重において 30 秒ずつの保持時間をおいたため荷重変動の周期が長く、繰り返し回数の最高も 200 回に限られていたが、粘土の含水比が液性限界よりわずかに少ないある限界値を越えたときに沈下の進行が急に大きくなること、沈下の進行が繰り返し回数の平方根に比例すること、また沈下の進行が砕石の粒径に関連をもつことを述べた。しかし、この実験では荷重変動の周期があまりにも長く、実際の鉄道線路の路盤に加わる荷重状態とは異なり、また繰り返し回数も少なかったため、振動疲労試験機を用いて新たに実験を行い、その研究成果について数回の発表を行った^{12)~14)}。

以上の研究と並行して、鉄道技術研究所でも現場における噴泥の実態調査および実験室における模型実験が行われている。その一つとして直径 50 cm の円筒容器の中に厚さ 20 cm の路盤を置き、この上に直径 19 mm の鋼球を 4 段重ねに置いて、振動数 11 Hz の繰り返し荷重を加えたときの鋼球の沈下を測定した結果が報告されている¹⁵⁾。この研究においては、荷重の大きさおよび路盤の含水比を 3 段階に変えて実験がなされているが、比較的低い含水比において大きな沈下の進行が記録されている。

また、実際の鉄道線路に近い状態で路盤の上に道床砂利およびまくらぎを重ねて繰り返し荷重を加えたときに、道床砂利が路盤内に圧入される過程についての研究が行われている¹⁶⁾。この研究においては、路盤面は道床砂利より圧力を受けて下方および側方への流動を生じ、その後泥土が砂利層中を上昇してまくらぎ下面に達するようである。

以上に述べた研究と比べて本論文では、粘土層の含水

* 学生員 工修 金沢工業大学大学院博士課程 土木工学専攻

** 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科

比を広い範囲で変動し、道床面沈下の進行と含水比との関連を明らかにしたこと、また繰り返し荷重の振動数を各種の段階に変化して、振動数との関連について研究を進めたことに特徴がある。

2. 実験方法および試料の性質

(1) 実験方法

a) 試験装置

走行する列車から伝達される荷重を受けて、道床砂利が路盤内に圧入される過程を実験室内で再現するために、図-1 および写真-1 に示すような装置を用いた。図に示すように、直径 50 cm、高さ 40 cm の円筒容器の

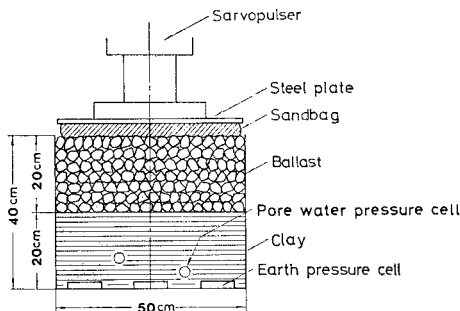


図-1 噴泥発生装置

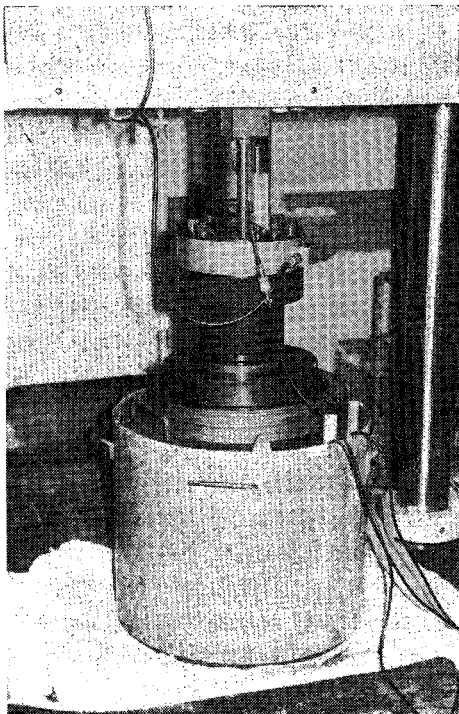


写真-1 試験装置

中に、所定の含水比となるように練り混ぜた粘土を 20 cm の高さに詰め、その上に碎石を 20 cm の厚さに置いた。この上から振動疲労試験機を用いて最初に静荷重を加え、続いて正弦波繰り返し荷重を加えた。荷重が道床面へ均一に分布するように、試験機の耐圧盤と道床面との間には厚さ 5 cm の砂袋を入れた。また、粘土層の表面で容器の壁面と接する部分には布を置き、道床砂利が圧入する際に粘土が壁面に沿って上昇するのを防いだ。容器の底部には土圧計を配置して、粘土層に伝達される圧力を測定した。特に、練り混ぜたときの飽和度がほぼ 100% の粘土層には、間隙水圧計を埋め込んだ。

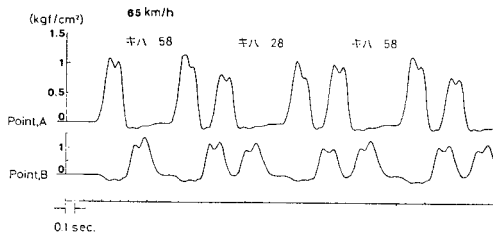
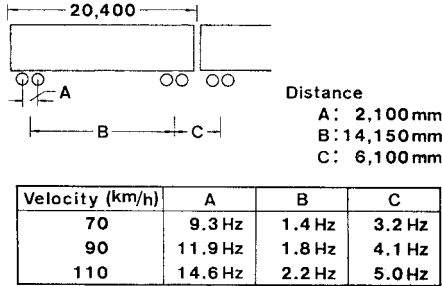
静荷重および繰り返し荷重を加えている間の道床面の沈下は、試験機のラムの上下位置が計器盤にデジタル表示されるので、これを読み取ると同時に変位計によって確認した。変位計、土圧計および間隙水圧計の指示値はオシログラフに記録した。

b) 荷重および振動数

道床面に加える荷重は、静的の場合にも繰り返しの場合にも 3 tf (29.4 kN) または 5 tf (49 kN) とした。この荷重が砂利層を通して粘土層へ一様に伝達されると仮定すれば、粘土層中の圧力は 1.53 kgf/cm² (150 kPa) または 2.55 kgf/cm² (250 kPa) となる。しかしながら土圧計の記録によれば、荷重 3 tf (29.4 kN) の場合には 0.8 ~ 1.1 kgf/cm² (78 ~ 108 kPa)、5 tf (49 kN) の場合には 1.4 ~ 1.7 kgf/cm² (137 ~ 167 kPa) の圧力となった。これは道床面に加えた荷重の 30 ~ 50% が、道床砂利と円筒容器の壁面との摩擦によって消費されたことになる。いま車両の軸重を 16 tf (156.8 kN) とするとき、50 kg レール敷設、25 m 当たりまくらぎ 41 本、道床厚さ 25 cm の軌道において、まくらぎ直下の路盤面の受ける圧力を Boussinesq の式を用いて計算すれば 0.75 kgf/cm² (74 kPa) となる。したがって、道床面に 3 tf (29.4 kN) の荷重を加えることは、レール中間部において路盤が受ける圧力にほぼ等しいとみることができる。5 tf (49 kN) の荷重は、車両がレールの継目部を通過するときに生じる衝撃を考慮したものであるが、継目落のある場合、または継目板がゆるんでいる場合には、さらに大きな衝撃の加わることが考えられる。正弦波繰り返し荷重の最小値は 0 としたかったのであるが、試験機の構造上不可能であったので 0.6 tf (5.9 kN) とした。

列車が 70 ~ 110 km/h で走行するときに、列車速度を車輪間隔 2.1 m で割れば 9.3 ~ 14.6 Hz の振動数に相当する (表-1)。この点に関し、国鉄七尾線の噴泥箇所において、列車が通過するときの路盤圧の変動を測定した。測定にあたっては、数個の土圧計をレール中間部におけるまくらぎ下 19 cm の位置に埋設した。そのときの一例を図-2 に示した。図によれば、路盤の受ける圧力

表一 列車速度と振動数との関係



図二 列車通過時における路盤圧の記録

の変動は1つの車輪を1個の荷重とみるより、1台車を1個の荷重とみた方が適切であることが示されている。これはレールおよび道床による荷重分散の効果と考えられる。したがって本実験では、0.25~8 Hz の各種の振動数で繰り返し荷重を加えることにした。

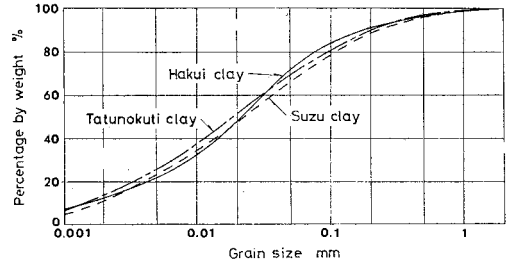
c) 載荷方法

繰り返し荷重を加える前に、3 tf (29.4 kN) または 5 tf (49 kN) の静荷重を 60 分間加えて、その間の沈下の進行を測定した。しかし、この静荷重試験もいきなり実施したのではなく、砂袋の圧縮、砂袋と道床砂利の間および砂利相互の接触を確実にするために 10 分間の予備載荷を行い、いったん荷重を 0 に戻してこれを出発点とした。このように、繰り返し載荷の前に静荷重試験を行った理由は、繰り返し載荷すること、すなわち、荷重の変動が道床砂利の圧入に対してどのような効果があるかを、静的な荷重を加えた場合と比較するためである。

静荷重試験が終了した後、続いて繰り返し載荷試験に移行するには、試験機の構造上ただちに 0.6~3 tf (5.9~29.4 kN)、または 0.6~5 tf (5.9~49 kN) の振幅とすることはできず、それぞれの中央の荷重より振幅を徐々に増加させた。この間に約 10 秒を要した。したがって、繰り返し載荷に移行してから 10 秒後を繰り返し載荷試験の出発点とした。

(2) 試料の性質

実験には石川県珠洲、羽咋および辰口地区より採取した試料を用いた。これらの試料を十分に空気乾燥させた



図三 粒径加積曲線

表二 試料の物理的性質

	Suzu clay	Haku clay	Tatumokuti clay
Specific gravity	2.22	2.66	2.68
Uniformity coefficient	20.6	19.6	20.0
Liquid limit	158%	75%	53%
Plastic limit	88%	42%	36%
Coefficient of permeability	2.46×10^{-8} cm/s	4.49×10^{-7} cm/s	4.76×10^{-7} cm/s
Unified soil classification	MH	CH	MH

表三 変水位透水試験における試料の状態 (試験前)

	Suzu clay	Haku clay	Tatumokuti clay
Moisture content (%)	160.9	60.4	50.4
Dry density (kg/m³)	480	1010	1131
Void ratio	3.63	1.64	1.37
Degree of saturation (%)	98.6	97.9	98.7

後、ロスアンゼルス摩耗試験機で破碎し、ふるいをを用いて粒径 2 mm 以下とした。各試料の粒径加積曲線を図三に、物理的性質を表二に示した。なお、各試料の透水係数は変水位透水試験 (JIS A 1218) を行って求めた。このときの各試料の状態を表三に示した。図三によれば、各試料の粒度分布はほぼ一致しており、いずれも粘土分を 20% 以上、シルト分を 50% 以上含んでいる。各試料の粒度分布、液性限界および塑性指数は鉄道技術研究所で示唆した噴泥を生じないための必要条件^{1),2)},

- (i) 0.42 mm ふるいの通過重量百分率が 70% 以下であること。
- (ii) 0.074 mm ふるいと 0.42 mm ふるいの通過重量百分率の比が 0.65 以下であること。
- (iii) 液性限界が 35% 以下であること。
- (iv) 塑性指数が 9 以下であること。

を一つも満足せず、きわめて噴泥しやすい土であることを示している。統一土質分類によれば珠洲産および辰口産粘土は MH、羽咋産粘土は CH となるが、珠洲産粘土の比重が小さく、液性限界や塑性限界が高いことに注目される。市川らの研究¹⁷⁾によれば、この粘土は珪藻土とよばれ、珪藻の遺骸を含み、きわめて多孔質の土とされている。

実験にあたっては、粉末状の試料の気乾状態における

表—4 試験開始時における粘土層の状態

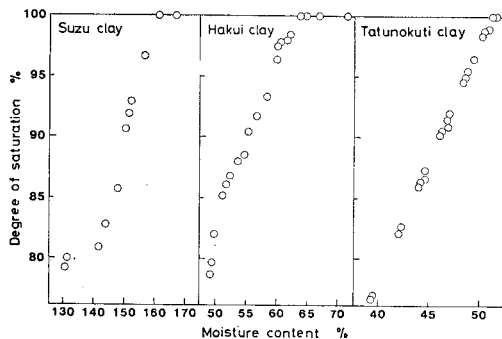
	Suzu clay	Hakui clay	Tatunokuti clay
Moisture content (%)	131.2~175.6	49.2~71.6	39.0~51.3
Liquidity index	0.62~1.25	0.22~0.90	0.18~0.90
Dry density (kg/m ³)	454~493	983~1028	1125~1132
Void ratio	3.90~3.56	1.70~1.59	1.38~1.37
Degree of saturation (%)	79.2~100	78.7~100	76.2~100

含水比を測定し、適量の水を加えてよく練り混ぜ、種々の含水比の粘土試料を作った。このようにして作製した粘土試料を、図—1 に示した円筒容器に突き棒を用いて大きな空隙を残さないように注意深く詰めた。このときの含水比、液性指数、乾燥密度、間隙比および飽和度の変動範囲を表—4 に示した。この表に示したように、羽咋産および辰口産粘土に対しては含水比を塑性限界から液性限界の間で種々変動し、珠洲産粘土に対しては液性限界を挟んでその上下に変動した。乾燥密度についてはその変動範囲が非常に小さく、羽咋産粘土では平均値の上下2.2%以内、辰口産粘土では0.3%以内となった。

同一の含水比に対して乾燥密度をこれより小さくするためには、円筒容器に粘土を詰めるときの突き固めの回数を減らすことになるが、その場合粘土層中に大きな空隙の点在するおそれを生じる。また突き棒では粘土が側方に流動するだけで、これ以上乾燥密度を大きくすることが望まれないので、この場合には粘土層の表面に蓋をして大きな圧力を加える必要がある。しかし、実際の噴泥現象においては、ほぼ等しい列車荷重が繰り返して加わるので、当初に大きな荷重を加えて乾燥密度を大きくしてから繰り返し載荷を行う意義も少ないと考えられる。含水比の低い場合には乾燥密度を変化させることも可能と思われるが、今回の実験においては含水比が比較的に高いため、乾燥密度の影響については実験項目として取り入れなかった。

図—4 に含水比と飽和度との関係を示したが、含水比と飽和度との関係は直線に近い1本の線上にのることが認められる。

道床砂利としては、石川県手取川産の粒径40~70mm



図—4 含水比と飽和度との関係

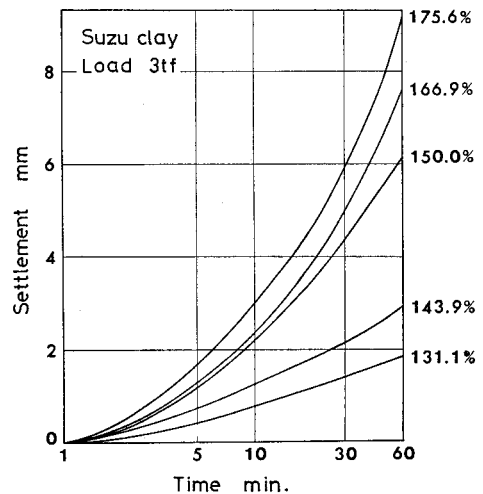
の砕石を用いた。実験では、この砕石を粘土層の上に入念に積み重ねたのであるが、そのときの砂利層の間隙率は43%になっていた。砂利の中には、静荷重または繰り返し荷重を加えている間に割れるものもまれにはあったが、大部分は無傷であった。

3. 試験結果

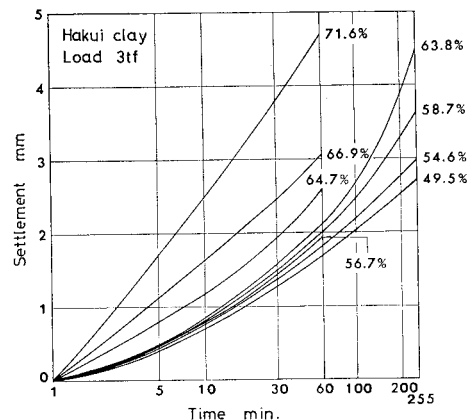
(1) 静荷重試験

図—5~7 は、種々の含水比に調整した粘土に、3tf (29.4 kN) の静荷重を加えたときの経過時間と道床面沈下の進行との関係を、片対数方眼紙により示したものである。これらの図より、沈下の進行は含水比の増加によって大きくなり、経過時間の対数に比例するというより、いくらか上向きの曲線となることが認められる。

図—8 は、荷重を5tf (49 kN) とした場合であるが、3



図—5 静荷重による道床面沈下 (珠洲産粘土)



図—6 静荷重による道床面沈下 (羽咋産粘土)

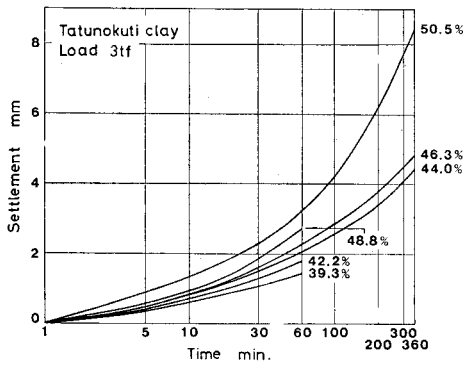


図-7 静荷重による道床面沈下 (辰口産粘土)

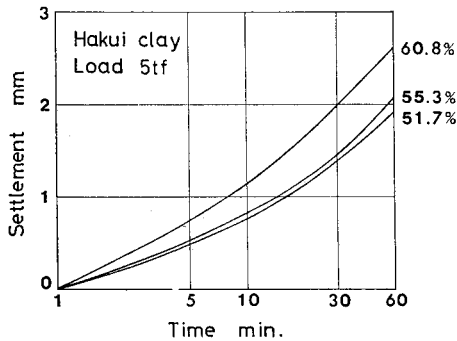


図-8 静荷重による道床面沈下 (羽作産粘土)

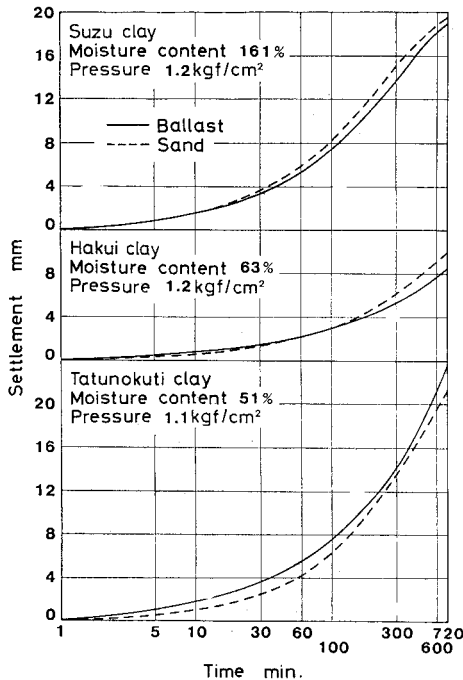


図-9 静荷重による道床面沈下

tf (29.4 kN) の場合 (図-6) と比較していくらか進行が大きい。しかし、荷重の大きさに比例するというほどでもない。

この沈下量は、主として粘土層の圧縮または圧密と道床砂利の圧入よりなると考えられるが、静荷重を6時間加えたあとの粘土層の状態としては、試験前粘土層の表面に置いた砂利がいくらか圧入されていた。しかし、この圧入が、予備荷重の開始の段階で生じたものか、静荷重を加えている間に継続して進行したものなのか明らかなでない。このことを検討するために、練り混ぜたときの飽和度がほぼ100%の粘土層の上に、砂を20cmの厚さに置いて静荷重を加えた。同様にして、砂利を詰めた場合にも等しい圧力を加えて沈下の進行を比較した。図-9に、静荷重を12時間加えたときの測定結果を示した。図-9より、道床面の沈下は、砂の場合と砂利の場合でほぼ同様に進行し、したがって静荷重においては、道床砂利はほとんど圧入されないことが判明した。

(2) 繰り返し荷重試験

a) 繰り返し回数と沈下量との関係

含水比のほぼ等しい珠洲産粘土に、3tf (29.4 kN) の静荷重を60分間加えた後、0.6~3tf (5.9~29.4 kN) の繰り返し荷重を一方には0.25 Hzで、他方へは1 Hzで加えたときの道床面沈下の進行を図-10に示した。この図においては、静荷重を加えている間の時間の経過、および繰り返し荷重50回までは普通目盛で示し、50回以上については対数目盛で示されている。図-10より、道床面の沈下は、静荷重から繰り返し荷重に移行することによって急速に進行し、繰り返し回数の対数に直線的というより、いくらか上向きの曲線となって進行することが認められる。また、同一の繰り返し回数に対しては、振動数の低いときに進行の大きいことが示される。

上に述べた振動数の影響を検討するために、珠洲産粘土に3tf (29.4 kN) の静荷重を60分間加えた後、0.6~3tf (5.9~29.4 kN) の繰り返し荷重を各種の振動数でそれぞれ同一の回数ずつ加えたときの道床面の沈下を測定した。その一例を図-11に示した。最初の1000回は4 Hzで加え、次の1000回は2 Hzとし、このように振動数を順次低くしたときの沈下の進行を普通目盛で

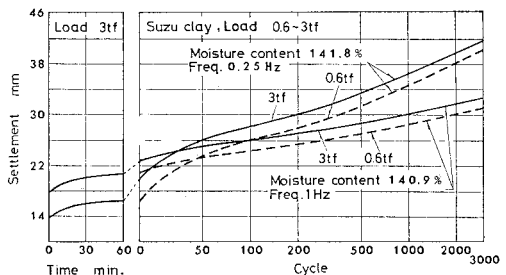


図-10 静荷重および繰り返し荷重による道床面沈下 (珠洲産粘土)

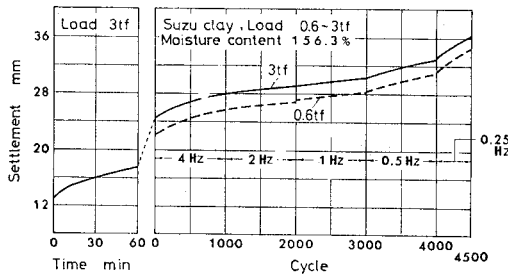


図-11 静荷重および繰り返し荷重による道床面沈下 (珠洲産粘土)

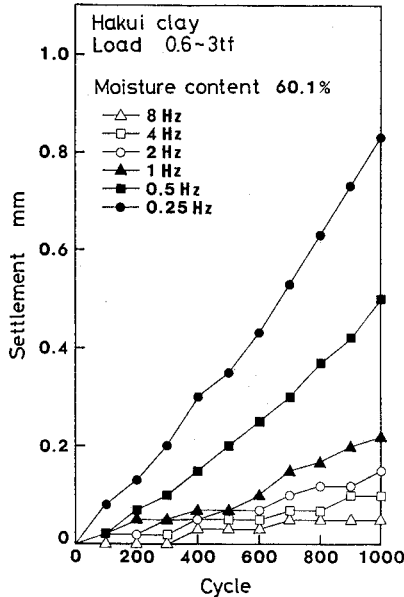


図-12 各種の振動数で1000回の繰り返し荷重を加えたときの道床面沈下 (羽咋産粘土)

示したものである。図より、2~0.25 Hz に対しては、振動数が減少することによって荷重の変動1回当たりの沈下の進行が大きくなることが示される。しかしながら、繰り返し荷重に移行した当初は、振動数の比較的高い場合でも急速な沈下の進行を生じ、振動数の影響が明らかでない。

羽咋産および辰口産粘土に対しては、3tf (29.4 kN) の静荷重を60分間、続いて0.6~3tf (5.9~29.4 kN) の繰り返し荷重を8 Hzで60分間加えた後に、8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 Hzの順にそれぞれ1000回ずつ荷重を加えた。その数例を図-12, 13に示した。また、図-14には5tf (49 kN) の静荷重、および0.6~5tf (5.9~49 kN) の繰り返し荷重を4 Hzで加えた後に、4, 2, 1, 0.5, 0.25 Hzの順に加えた場合を示した。これらの図より、同一の繰り返し回数における沈下の進行は、振動数の低いとき、すなわち繰り返し1回当たりの荷重時間の長いときに増大することが確認された。

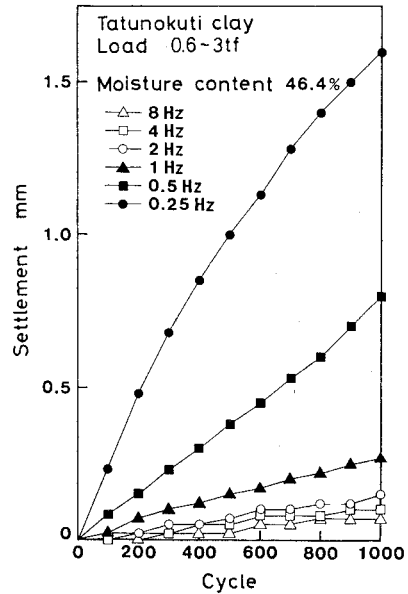


図-13 各種の振動数で1000回の繰り返し荷重を加えたときの道床面沈下 (辰口産粘土)

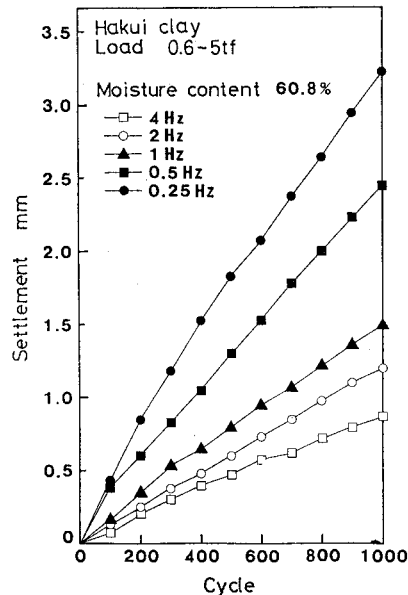


図-14 各種の振動数で1000回の繰り返し荷重を加えたときの道床面沈下 (羽咋産粘土)

このような実験を種々の含水比の粘土について実施したのであるが、羽咋産粘土に対して各種の振動数で1000回ずつ繰り返し荷重を加えたときの沈下量の累積を図-15, 16に示した。図-15は荷重の変動を0.6~3tf (5.9~29.4 kN)とした場合、図-16は0.6~5tf (5.9~49 kN)とした場合である。図-15によれば、道床面沈下の進行は、振動数のほかに粘土層の含水比が大きな関連をもち、特に含水比が62% (飽和度100%, 液性指数

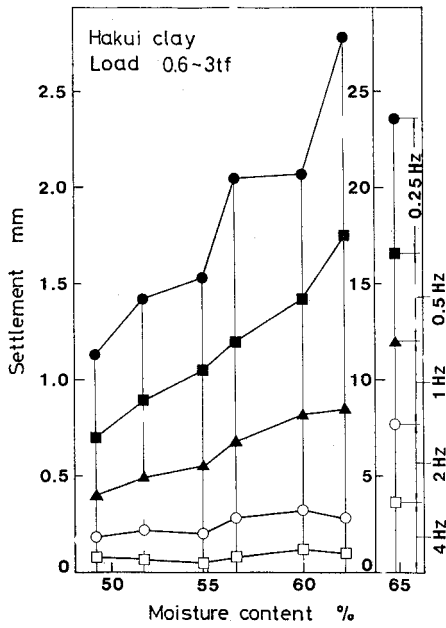


図-15 各種の振動数で1000回の繰り返し荷重を加えたときの道床面沈下の累積(羽咋産粘土)

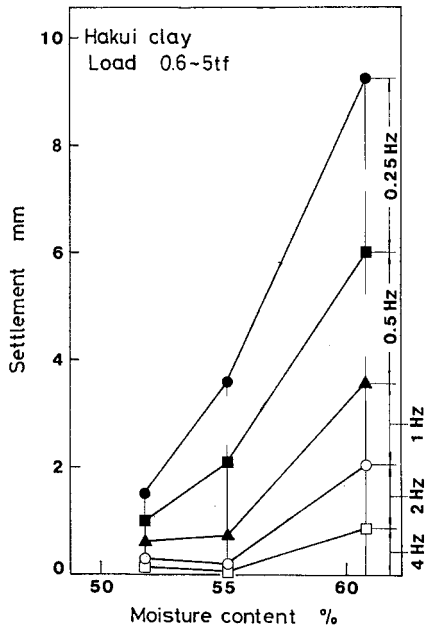


図-16 各種の振動数で1000回の繰り返し荷重を加えたときの道床面沈下の累積(羽咋産粘土)

0.61) を越えると、振動数の高い場合にも急速な沈下を生じている。図-15 と 16 を比較して、含水比が 52% 以下では沈下の進行に大きな差はないが、55% (飽和度 90%、液性指数 0.40) に達すると、荷重変動の大きさが沈下の進行に顕著な影響を与えることが認められる。

次に、繰り返し回数と道床面沈下の進行との関係を検討するために、種々の含水比の羽咋産および辰口産粘土

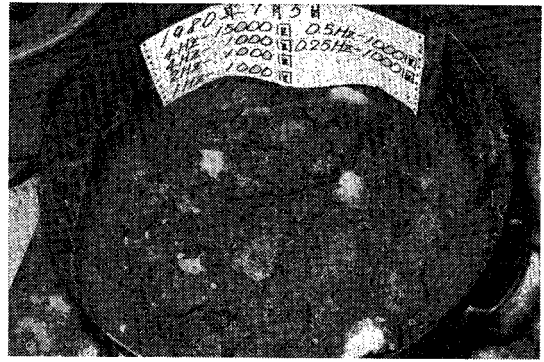


写真-2 試験終了後における碎石の圧入状態

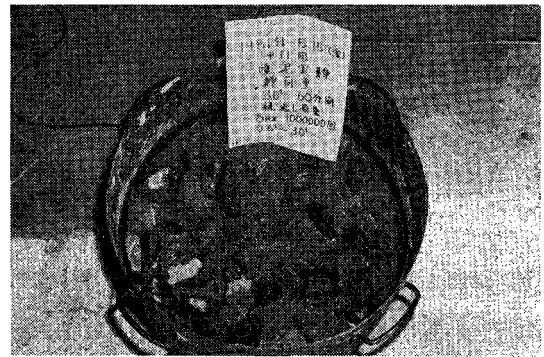


写真-3 試験終了後における碎石の圧入状態

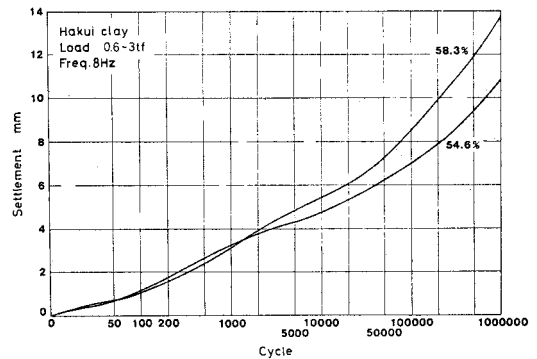


図-17 繰り返し荷重による道床面沈下(羽咋産粘土)

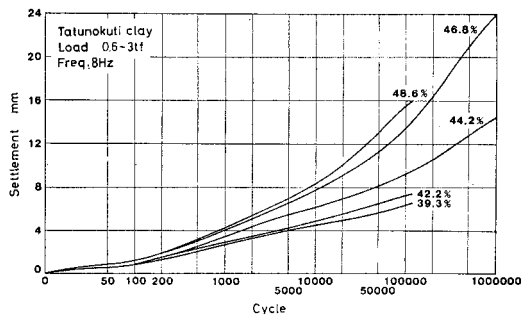


図-18 繰り返し荷重による道床面沈下(辰口産粘土)

に対して、3tf(29.4kN)の静荷重を60分間加えた後に、0.6~3tf(5.9~29.4kN)の繰り返し荷重を60000回から1000000回加えたときの沈下を測定した。実験終了後には、順次碎石を掘り出して碎石の圧入状態を調べた。写真-2, 3に実験終了後における粘土層表面の状態を示したが、このように碎石が深く圧入されることは、静荷重試験ではみられないことであった。8Hzで繰り返し荷重を加えた場合の沈下の進行を図-17, 18に、4Hzの場合を図-19に示した。これらの図において、繰り返し載荷50回までは普通目盛、50回以上は対数目盛で示してある。繰り返し回数が比較的に少ない間は、繰り返し回数の対数と沈下量との間にはほぼ直線的な関係が認められる。しかしながら、回数が増すにつれて、沈下の進行はしだいに上向きの曲線を示している。また、図-18と図-19において、ほぼ等しい含水比でそれぞれ50000回での沈下量を比較すれば、4Hzで繰り返し荷重を加えた場合は8Hzの場合より20~30%

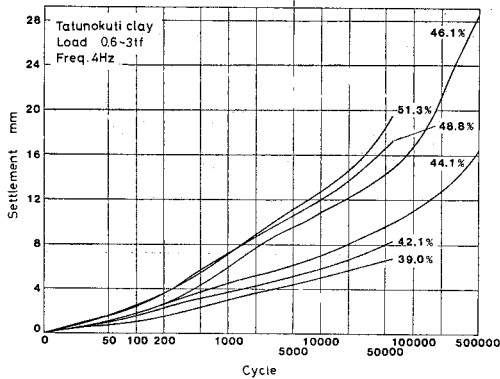


図-19 繰り返し荷重による道床面沈下(辰口産粘土)

大きい。このように、繰り返し回数を多くした場合にも振動数の低いときに沈下の進行が大きいことは、さきの図-10~16に示した測定結果と一致している。

b) 繰り返し載荷時間と沈下量との関係

静的載荷に比べて、繰り返し載荷が道床面の沈下にどのような効果をもつかを知るために、種々の含水比の粘土に、静荷重を60分間加えている間の沈下と、これに続いて繰り返し荷重を60分加えた間の沈下を比較した。図-20~22に、羽咋産粘土における測定結果を示した。図において、Transferと記入した部分は、静荷重から繰り返し荷重に移行するために、荷重変動の振幅をしだいに増加した過程を示す。図-20~22は、それぞれ8, 4, 2Hzの場合であるが、いずれも静荷重を加えたときの沈下量は少なく、含水比の影響もわずかである。それ

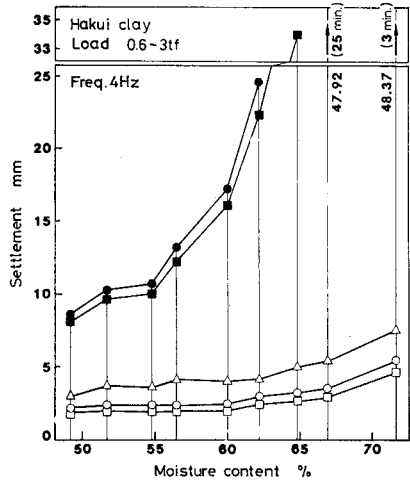


図-21 静荷重および繰り返し荷重による道床面沈下の累積(羽咋産粘土)

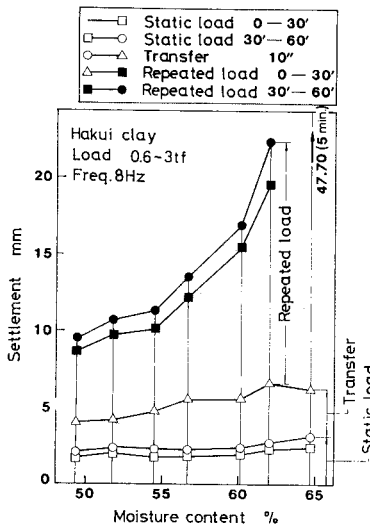


図-20 静荷重および繰り返し荷重による道床面沈下の累積(羽咋産粘土)

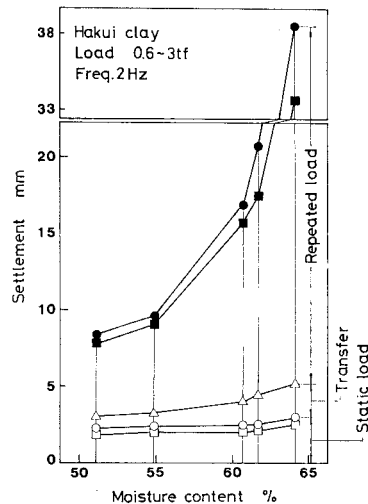


図-22 静荷重および繰り返し荷重による道床面沈下の累積(羽咋産粘土)

に対して、繰り返し荷重においては、含水比の増加による沈下量の増加が明らかに認められ、特に含水比が62%（飽和度 100%，液性指数 0.61）を越えると沈下の進行は急速となる。また、含水比の高い場合には、繰り返し荷重 60 分間の沈下量が、静的荷重 60 分間の沈下量の 10 倍以上となっている。

これらの測定結果に基づき、種々の含水比の粘土に各種の振動数で繰り返し荷重を 60 分間加えたときの沈下

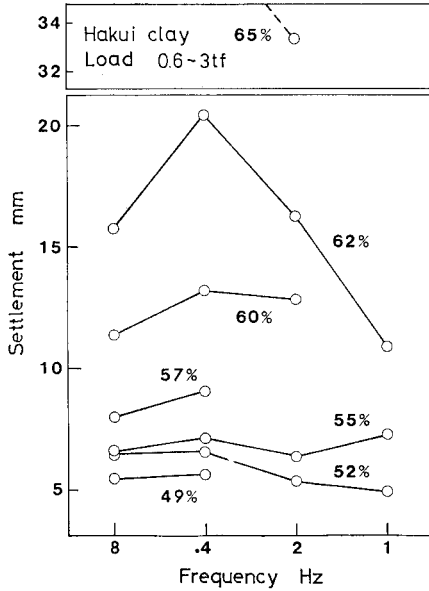


図-23 繰り返し荷重を 60 分間加えたときの道床面沈下 (振動数と沈下量との関係—羽咋産粘土)

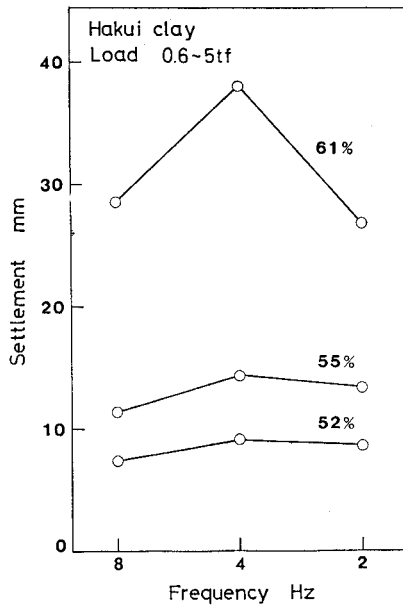


図-24 繰り返し荷重を 60 分間加えたときの道床面沈下 (振動数と沈下量との関係—羽咋産粘土)

量の比較を 図-23~25 に示した。図-23 は、羽咋産粘土に 0.6~3 tf (5.9~29.4 kN) の繰り返し荷重を加えた場合であるが、含水比の低い場合には、同一の載荷時間における沈下量は振動数によって大きな変化のないことが示されている。しかし、含水比が 55% (飽和度 90%，液性指数 0.40) を越えると、いずれの振動数においても沈下量は急に増加し、特に 4 Hz で著しい。図-24 には荷重変動の大きさを 0.6~5 tf (5.9~49 kN) とした場合を示した。図-23 と比較して、沈下量は含水比が 52% のときには 1.2~1.6 倍となり、荷重の大きさにほぼ比

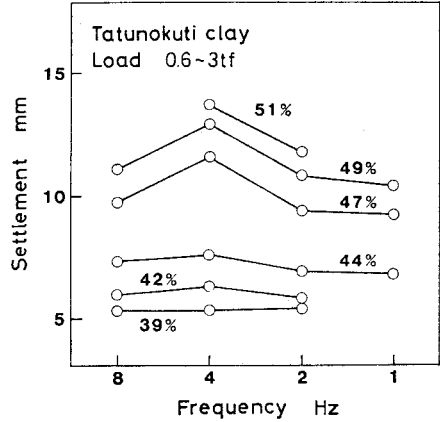


図-25 繰り返し荷重を 60 分間加えたときの道床面沈下 (振動数と沈下量との関係—辰口産粘土)

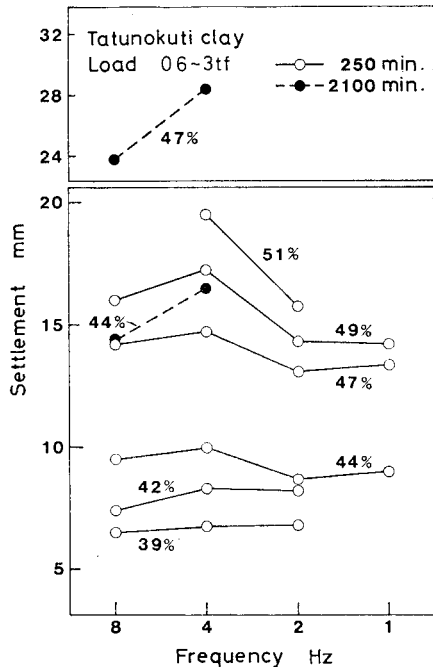


図-26 繰り返し荷重を 250 分または 2100 分間加えたときの道床面沈下 (振動数と沈下量との関係—辰口産粘土)

例して増加する。しかしながら、含水比が55%（飽和度90%、液性指数0.40）を越えると1.7~2.9倍となり、荷重の大きさに比例するというよりそれ以上に増加することが認められた。図-25は辰口産粘土の測定結果であるが、この粘土においても含水比が44%、すなわち、飽和度が90%（液性指数0.47）を越えると沈下量は急に増加し、4Hzのときに最大となることがわかる。図-26は、繰り返し荷重を250分間、または2100分間加えた場合であるが、この図からも道床砂利の圧入を生じやすい振動数、または含水比の存在することが明らかに認められる。

以上の内容を詳細に検討した結果、飽和度が90%、または液性指数が0.4~0.5を越えると、4Hzにおいては当初の10分間における沈下の進行が特に大きくなっていることが判明した。

4. 考 察

本研究においては、噴泥によって生じる道床面の沈下を検討するために、種々の条件のもとで多数の実験を行った。しかし、そこで測定された沈下量の中には、道床砂利が粘土層に圧入される量や粘土層の圧縮、または圧密量のほかに、砂利層の圧縮量が含まれるおそれがある。このことを検討するために、円筒容器の底部に5cmの砂層を置き、その上に10、20または30cmの砂利層を置いて荷重を加えた。まず、3tf(29.4kN)で10分間の予備荷重を行い、次に3tf(29.4kN)の静荷重を30分間、続いて0.6~3tf(5.9~29.4kN)の繰り返し荷重を4Hzで8000回加えた。このときの結果を図-27、28に示した。これらの図によれば、静荷重による道床面の沈下はきわめてわずかであるのに対し、繰り返し荷重を加えたときには約7mmの沈下を生じている。しかしながら、この沈下量は、主として道床砂利が下の砂層へ圧入された量であると推定される。その理由としては、図-27、28に示すように、沈下量は砂利層の厚さにほとんど関連をもたない。もし、道床内の空隙が圧縮されるのであれば、沈下量は砂利層の厚さに比例するはずである。以上の測定結果より、これまでの実験で得られた道床面の沈下量の中には、砂利層の圧縮量は含まれないとみなせる。

一般に繰り返し荷重によって生じる沈下量 S は、道床砂利の圧入量 y と粘土層の圧縮、または圧密量 C よりなるが、砂利層の間隙率を n とし、粘土が砂利層中を上昇した高さを r とすれば、次の関係が成り立つ。

$$y = n \cdot r \dots\dots\dots (1)$$

$$S = y + C \dots\dots\dots (2)$$

上式において r を正確に測定することは困難である

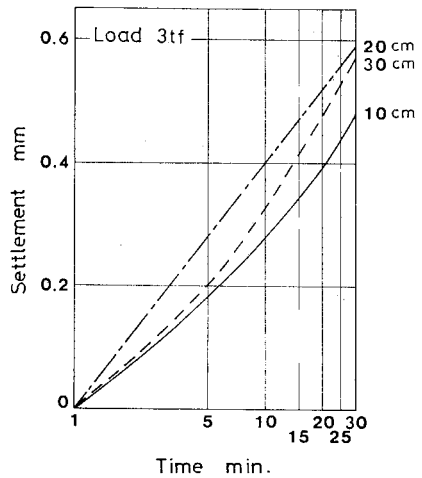


図-27 静荷重による砂利層の沈下

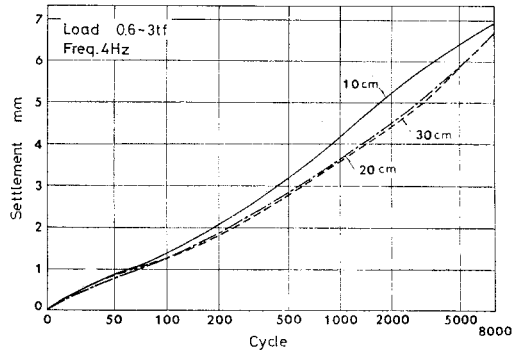


図-28 繰り返し荷重による砂利層の沈下

が、繰り返し荷重試験終了後、粘土層に圧入された碎石を掘り出して r の概略値を測り、 $n=0.43$ として y を求めた結果、 S とほぼ一致した。したがって、繰り返し荷重を加えたときに道床面が沈下する主要な要因としては、道床砂利の粘土層への圧入ということになる。特に、羽咋産粘土の実験においては、道床面の沈下が30mm以上となった場合もあったが、上式より、そのときの粘土の上昇高さは70mmとなる。実際の鉄道線路において、繰り返し回数がさらに増加すれば、粘土がまくらぎ下面にまで到達することが当然考えられる。

測定の結果、道床面の沈下は、繰り返しの振動数と関連し、繰り返し荷重1回当たりの沈下の進行は振動数の低いときほど大きい。一方、同一の荷重時間に対しては、4Hzの場合の沈下が最大となる。前述のように、1台車の通過によって路盤は1回の圧力変動を受けているので、実際の線路においては、4Hz付近の圧力変動を受ける可能性が大きい。また、道床砂利の圧入は、粘土層の含水比の影響を大きく受け、練り混ぜたときの飽和度が90%、または液性指数が0.4~0.5を越えると著しく進行する。しかし、本実験における繰り返し荷重は、

静荷重を 60 分間加えたあとに実施した関係上、繰り返し載荷に移行したときの飽和度は、繰り混ぜたときと比べていくらか高くなっていると考えられる。

図-1 に示したように、円筒容器の底部には土圧計を配置し、また、繰り混ぜたときの飽和度がほぼ 100% の粘土層には、間隙水圧計を埋め込んだ。繰り返し荷重を加えた場合には、これらの計器の追従性に疑問が残り、路盤中の圧力、または間隙水圧の変動に関しては、今後の研究において解明したい。

一般に繰り返し載荷に移行してから約 10 分間における道床面沈下の進行は著しく、この間の沈下の進行は、繰り返し回数対数の直線的な関係にある。著者の 1 人は、かつてこの間の沈下の進行を繰り返し回数の平方根に比例するとして発表したこともある^{10),11)}。その後の沈下の進行に関して今回の実験結果を整理したところ、以下に示すように繰り返し回数へのべき関数でほぼ近似できることが判明した。べき関数の指数と含水比との関連については、最小 2 乗法を用いて定めた。

羽咋産粘土

荷重変動の範囲：0.6~3 tf (5.9~29.4 kN)

$$S = 2.07 \left(\frac{N}{F} \right)^{1.0w-0.39} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $0.49 < w < 0.62$

荷重変動の範囲：0.6~5 tf (5.9~49 kN)

$$S = 2.87 \left(\frac{N}{F} \right)^{2.1w-0.97} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $0.52 < w < 0.62$

辰口産粘土

荷重変動の範囲：0.6~3 tf (5.9~29.4 kN)

$$S = 1.35 \left(\frac{N}{F} \right)^{1.0w-0.23} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $0.39 < w < 0.51$

上式において N は繰り返し回数、 F は振動数、 w は含水比を表わす。したがって、 N/F は経過時間となる。

上式 (3)、(4) によれば、羽咋産粘土において含水比が 53% のときの指数はいずれも 0.14 となるが、これより含水比が大きくなれば、式 (4) における指数は式 (3) の指数と比べてしだいに増加していく。式 (3)、(4)、(5) より、一般に沈下の進行は繰り返し回数の 0.1~0.3 乗に比例し、この指数は含水比とともに増加することを示している。また、上式においては、振動数の高いときに沈下の進行が少なくなること示し、これは列車速度の大きいときに相当する。しかし、列車速度が増加すれば、レール面の高低狂いによる荷重の変動が大きくなり、特に、レール継目部における衝撃は増大する。さらに、レール面や車輪踏面に傷のある場合には静荷重の数倍の衝撃を加えることがある。これらをあわせて考察すれば、列車速度の増加に伴って、道床砂利の圧入も促進

されると考えられる。

5. 砂利の圧入に関する理論的考察

道床砂利が粘土層中に圧入される過程、または流動性をもつ粘土が道床中の空隙を上昇する過程に関しては、粘性流体力学の関与する部分が多いと考えられるが、ここでは簡単な解法を試みる。

道床面に加える荷重を P_t とすれば、 P_t は円筒容器の壁面と砂利層との間の摩擦力 P_f 、最下面の碎石が粘土層へ圧入するときの抵抗力 P_c 、および道床砂利の間隙を粘土が上昇するときの抵抗力 P よりなる。

$$P_t = P_f + P_c + P \dots\dots\dots (6)$$

実験において、繰り返し荷重による碎石の破損はほとんどなかったことにより、試験中における碎石のかみ合い状態に変化はなく、したがって、 P_f の大きさは一定と考えられる。また、 P_c の大きさは粘土層の含水比の変動に関連をもつが、試験前後の含水比にはほとんど変化が認められなかったので、 P_c の大きさも一定とみなされる。したがって P_t の大きさが一定ならば、 P もほぼ一定に保たれると考えられる。

次に P と道床砂利の圧入量 y との関連について考察する。砂利層の間隙率を n とするとき、粘土は砂利層中を y/n だけ上昇することを前章に述べた。道床砂利と粘土との接触部の面積は、 y/n に比例して増加すると考えられるので、これを by/n とおく。この面がすべて垂直面ならば、単位面積に作用する摩擦力は $P/(by/n)$ となるが、実際には砂利層における間隙の形状は不規則であるから、単位面積に作用する平均摩擦力 τ は、上記の値にある係数 k を掛けた値とする。

$$\tau = kP/(by/n) \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) によれば、 τ は y に反比例することになる。この τ は碎石に作用する摩擦力であると同時に、碎石に接した粘土に作用するせん断力となる。

1 回の荷重変動において道床砂利が圧入される量を $4y$ とするとき、 $4y$ と τ との間には何らかの関係が成り立つと考えられる。(a) 粘土を流体力学で扱うニュートン流体と仮定すれば、 $4y$ は τ に比例すると考えられ、また、(b) 粘土と碎石との間のすべり摩擦を固体摩擦と仮定すれば、 τ がある一定の値を越えると $4y$ は急に増加する。これを図で表わせれば図-29 のようになる。これらは両極端の場合と考えられるので、(a) と (b) の中間をとって $4y$ と τ との関係を次式で表わす。

$$4y = a\tau^\lambda \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 λ は 1 より大きな定数とする。

式 (7) を式 (8) に代入すれば、

$$4y = a(kP)^\lambda (by/n)^{-\lambda} \dots\dots\dots (9)$$

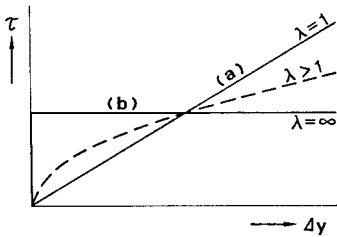


図-29 碎石と粘土との間に作用する摩擦力と移動量との関係

y は Δy の累計であり、また荷重の繰り返し回数を N とすれば、

$$\Delta y = \frac{dy}{dN} \dots\dots\dots (10)$$

とおくことができる。したがって、

$$\frac{dy}{dN} = a(kP)^\lambda (by/n)^{-\lambda} \dots\dots\dots (11)$$

$N=0$ のとき、 $y=0$ になるとして上式を解けば、

$$y = \left(\frac{knP}{b} \right)^{\lambda/(\lambda+1)} \{(\lambda+1)aN\}^{1/(\lambda+1)} \dots\dots\dots (12)$$

式 (5) によれば、 N の指数は 0.16~0.28 の間に変動するが、式 (12) の N の指数をこの値に一致させるためには $\lambda=3\sim 6$ とする必要がある。また、このときの P の指数は 0.75~0.86 となる。

以上に述べた式の誘導においては、繰り返し荷重の振動数が考慮されていないが、式 (8)、または式 (9) に相当する変形に到達するにはある時間の継続を必要とし、振動数の高いときには、この変形に到達する前に変形の進行が打ち切られてしまうと考えなくてはならない。

6. 結 論

本研究においては、噴泥による道床面の沈下を検討するために、物理的性質からみて噴泥の発生が予測された粘土を使用して、種々の条件のもとに荷重を加えたときの道床砂利の圧入過程を測定したのであるが、以下に本研究より得られた成果を要約する。

(1) 静的な荷重においては、道床砂利はほとんど圧入されない。

(2) 道床面の沈下は、同一の大きさの荷重を静的に継続して加えているときより、その荷重を繰り返して加えたときに著しく進行する。

(3) 道床面の沈下は、繰り返しの初期においては、繰り返し回数対数に比例するとみることができ、繰り返し回数が増加すれば、繰り返し回数の 0.1~0.3 乗に比例して進行する。

(4) 道床砂利の圧入には、粘土層の飽和度が大きく関連し、圧入は飽和度が 90% を越えると急に増加する。

これは液性指数が 0.4~0.5 のときに相当する。

(5) 同一の繰り返し回数における沈下、すなわち、繰り返し 1 回当たりの沈下の進行は、振動数の低いときほど大きい。しかし、同一の繰り返し載荷時間に対しては、4 Hz のときに最大となる。

以上に述べたように、粘土層に加わる荷重が変動するときに初めて道床砂利が圧入されるということは、粘土層のもつどのような性質と関連するの今後の研究において解明を続けたい。

謝 辞：現場調査にあたりご協力をいただいた金沢鉄道管理局の諸氏、および土質試験に関してご助言をいただいた金沢工業大学講師前川晴義氏に対し深謝の意を表します。また実験に協力してくれた金沢工業大学土木工学科卒業研究生諸君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 西亀達夫：鉄道の路盤に関する二、三の問題、土と基礎、Vol. 4, No. 6, 1956.
- 2) 西亀達夫：鉄道路盤表層土の材質判定法について、土と基礎、Vol. 9, No. 3, 1961.
- 3) 西亀達夫：鉄道線路の噴泥、土と基礎、Vol. 4, No. 1, 1956.
- 4) 西亀達夫・伊東孝之：鉄道の路盤について、土と基礎、Vol. 20, No. 6, 1972.
- 5) 伊東孝之：噴泥対策と新路盤工、鉄道技術研究資料、Vol. 34, No. 9, 1977.
- 6) 伊能忠敏：鉄道線路における路盤改良の新しい方向、土木学会誌、Vol. 63, No. 8, 1978.
- 7) 原 繁男：線路改良のポイント、鉄道線路、Vol. 28, No. 10, 1980.
- 8) 伊東孝之・岩崎高明・野口達雄：噴泥の実態とその対策(1)、鉄道技術研究報告、No. 1062 (施設編第 472 号)、1977.
- 9) 伊東孝之・岩崎高明・野口達雄・大脇康孝：噴泥の実態とその対策(2)、鉄道技術研究報告、No. 1077 (施設編第 479 号)、1978.
- 10) 小野一良・伊藤義男：軟弱路盤における砂利の圧入過程について、金沢大学工学部紀要、Vol. 6, No. 4, 1972.
- 11) 小野一良・伊藤義男：軟弱路盤における砂利の圧入過程、鉄道線路、Vol. 21, No. 2, 1973.
- 12) 小野一良・山田幹雄：鉄道線路の噴泥に関する研究、土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集、III-71, 1980.
- 13) 小野一良・山田幹雄：鉄道線路の噴泥に関する研究(第 2 報)、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、IV-1, 1981.
- 14) 山田幹雄・小野一良：鉄道線路の噴泥に関する研究(第 3 報)、土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集、III-36, 1981.
- 15) 伊能忠敏・伊東孝之・鬼頭 誠・狭田彰二：鉄道路盤の圧縮沈下実験、土質工学会第 16 回土質工学研究発表会発表講演集、402 (H-6), 1981.
- 16) 伊能忠敏・伊東孝之・渡辺英男：中型模型による噴泥再現実験、土質工学会第 16 回土質工学研究発表会発表講演集、405 (H-6), 1981.
- 17) 石川県珪藻土利用研究会基礎部会編：能登産珪藻土の基礎研究、石川県工業試験場、1966.

(1981.8.22・受付)