

静荷重をうけた砂利層の諸性質について

—沈下の場合—

正員 最上 幸夫*

ON THE PROPERTIES OF GRAVEL LAYERS UNDER THE STATIC LOADS

—ESPECIALLY ON THE DEPRESSIONS—

Sachio Mogami, C.E. Member

Synopsis :

It is already known that the properties of gravel layers, which are so called granular materials, under various loads are very complicated. In this paper the auther made some experiments on the depressions of gravel layers under the static loads and tried to study the fundamental properties about them.

1. ま え が き

最近における軌道構造に関する動力学的研究の進展に伴い、道床が軌道の最弱点とみなされ、その動力学的強度が重要視されるにいたつた。そこで著者は道床(砂利層)の基本的性質を再検討するの必要を認め、室内のモデル実験を行つた。その結果砂利層は従来のごとく半無限弾性体もしくは連続体とみなすことは必ずしも妥当ではなく、その基本的性質は著しく複雑であり、一応これを粒状体と名づけ、他の材料と区別して取扱うのが妥当であるとの結論に達した。とくに荷重強度に比し、基礎の突き固めが不十分な場合においてとくにしかりである。振動荷重を主として研究の対象としたが、これと比較のため、静荷重の実験も行い、順序としてまず静荷重に対する基本的性質(主として沈下ならびに圧力分布に対する性質)を明らかにしようとした。本文では沈下に関する実験結果を述べ、これについて若干の考察を行つた。

2. 実験の概要

砂利層としては粒径 10~20 mm の砕石を用い、コンクリート路盤上に表-1に示す寸法に構築し、実験荷重強度が比較的小さいので、砂利層はなんら突き固めを行わないことにした。荷重としては、5 cm×8.5 cm, 7.5 cm×12.75 cm, 10 cm×17 cm の3種の載荷板を用い、載荷後 20 秒までは5秒ごと、それ以後は 10 秒ごとに光テコを用いて沈下を測定した。この場合載荷板は剛性板とみなしうるので沈下は一樣とみなし、載荷板底面重心部の値を測定した。同一形状の基礎に対しては 10 回の測定を行い、一応その平均値で沈下を表わすことにした。ただし載荷板重心鉛直軸上各深度の沈下は手数を省くため5回測定の平均値を用いた。なお積荷方法としては一定荷重、部分載荷ならびに繰り返し載荷の3種とした。

3. 実験結果とその考察

(1) 一定荷重による沈下について

ある一定荷重を初期の砂利層(作用荷重に対し突き固めが不十分な砂利基礎を意味する)上に載荷させたときの沈下は図-1~2のごときものである。このときの沈下曲線を検討すると、きわめて複雑であつて、これを理論的に解明することは困難のようである。すなわち沈下の時間的変化が不規則で、円滑な連続曲線とはいえないような特性が認められる。曲線の一般的な傾向としては、載荷直後の数秒間(5秒程度)に永久沈下の80~90%が生じ、それ以後5秒~30秒間では沈下速度(dy/dt)は初期のものよりはるかに小さくなり、約30秒以後一定沈下に落ち着くまでの沈下速度はさらに微小となり、初期のものにくらべると、ほとんど無視しうる程度である。したがつてこのような沈下過程は三つの異なつた段階に区分される。ここではこれらを一応初期沈下、過渡沈下、流動沈下過程と名づけておく。しかし砂利層のような材料では、静荷重をうける

表-1 実験用砂利基礎の種別

表面寸法 (cm)	厚さ (cm)	周辺条件
10×17	15	自然コウ配
"	10	"
"	5	"
10×17	15	周辺固定
"	10	
"	5	
15×25.5	15	自然コウ配
20×34	15	"

* 山口大学助教授, 工学部土木教室

図-1 定荷重による沈下曲線
砂利層 10×17×5 cm, 載荷板 10×17 cm

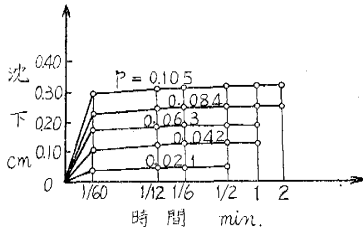
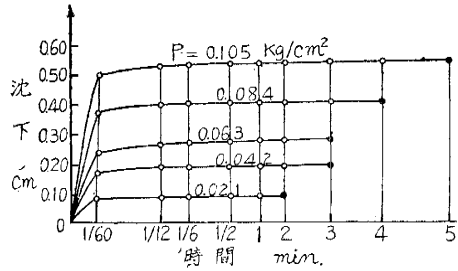


図-2 定荷重による沈下曲線
砂利層 10×17×15 cm, 載荷板 10×17 cm



ときは、流動沈下はごく微小であり、しかも比較的短時間内に一定沈下に落ち着くから、ここでは一応無視し、初期沈下と過渡沈下のみについて考察しよう。初期の砂利層では十分突き固めが行われていないから、その粒子間ゲキが大きく、粒間摩擦力は小さいので一定荷重をうけた瞬間、粒子は移動（回転、並進）を起し、その結果急激にある沈下を生じ、そのため粒子間ゲキは密となり、粒間摩擦力もある程度増大して外力に抗するが、まだ完全に外力と釣り合うまでにいたらず、そのため徐々に沈下をひきおこして過渡沈下の状態に入り、この段階の終りでは、ほとんど外力と釣り合うまでの抵抗力を發揮しようようになるが、まだいくぶん外力より小さいため、徐々に小さな流動をおこし、ついに完全に外力と釣り合いを保ちうる状態に達するものと考えられる。載荷直後の大きい初期沈下は、いわば瞬間的に生ずる沈下と考えられるから、この場合の沈下過程を説明するためには、図-3 のようなモデルを考えればよい。ただしこのモデルは単に圧縮（加荷）過程の場合についてのみ成り立つものと考ええる。しからば、沈下 y は、

$$y = y_1 + y_2 = P/K_1(P) + P/K_2(P)[1 - e^{-K_2(P)/\eta_2(P) \cdot t}] \dots\dots\dots (1)$$

で示される。ここにバネ常数 K_1, K_2 , 粘性係数 η_2 などは荷重強度 P の連続函数で表わしうるものと仮定する。本実験の沈下曲線について、このような沈下特性を示す $K_1(P), K_2(P), \eta_2(P)$ を求める方法を述べよう。種々の P に対する沈下-時間曲線を検討し、本実験では 0~5 秒間に生ずる大きい沈下量を y_1 とし、5 秒~30 秒間の沈下曲線を過渡沈下曲線とみなして取扱った。このとき過渡沈下 y_2 は次式で近似される。

$$y_2 = a(P)[1 - e^{-\theta(P)t}] \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $a(P), \theta(P)$ は P の連続函数と仮定する。この函数をきめるには、次のごとくすればよい。すなわち特定の P に対応する沈下曲線の形を

$$y_2 = a(1 - e^{-\theta t}) \dots\dots\dots (2)'$$

とおけば、これをかきかえて、

$$y_2 = a - v/\theta \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし、} \quad v = dy_2/dt \dots\dots\dots (4)$$

したがって沈下曲線の座標 y_2 および v を求め、式 (3) の関係から最小自乗法で a, θ がきまるから、各種の P に対する値を求め、これらを図示すれば、 $a(P), \theta(P)$ なる連続近似曲線がえられる。式 (1), (2) を対比して、

$$K_2(P) = P/a(P), \quad \eta_2(P) = P/a(P) \cdot \theta(P) \dots\dots\dots (5)$$

なる関係から $K_2(P), \eta_2(P)$ が容易に求められる。 $K_1(P)$ は P と y_1 の関係から近似曲線として最小自乗法によつて決められる。 $K_1(P), K_2(P), \eta_2(P)$ を求めた一例を 図-4~6 に示す。基礎の強度は一般に地盤係数で表わされるが、これは荷重強度と一定沈下に到着したときの沈下量との関係から求められるから、本実験の場合は、式 (1) において $\exp\{-K_2(P)/\eta_2(P) \cdot t_0\} \approx 0$ とおき

$$y_0 = P[1/K_1(P) + 1/K_2(P)] \dots\dots\dots (6)$$

の関係から $K(P) = dP/dy_0$ を計算すればよい。以上初期の砂利層が荷重によつて生ずる時間的沈下過程の特性を評価する方法について私見を述べた。しかしながらこのような沈下過程に

図-3 沈下説明用モデル

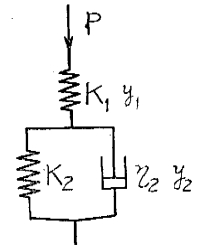


図-4 $K_1(P)$ を求めた一例

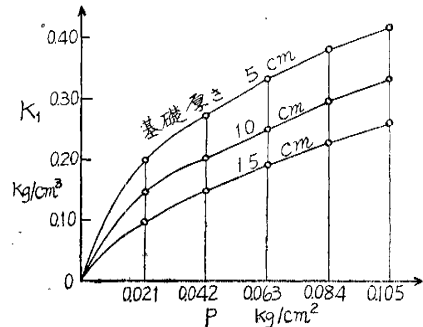


図-5 $K_2(P)$ を求めた一例

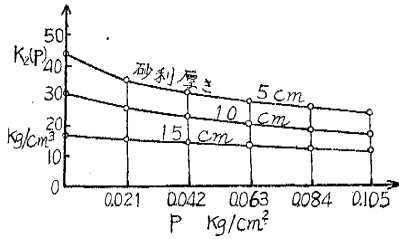
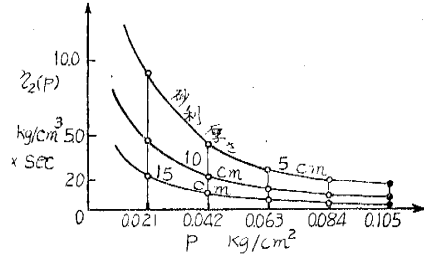


図-6 $\eta_2(P)$ を求めた一例

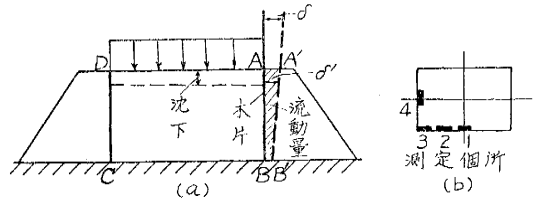


おける沈下と圧力分布との関係はきわめて複雑で、図-3のモデルのような単純なものではないようである。圧力測定(詳しくは次回にゆずる)の際、初期沈下の状態では、一般にヒズミ計の指針は不安定で、沈下が落ち着いてはじめて圧力も一定値を指示した。このような実測から判断すると、圧力と沈下は必ずしも一義的な関係にはないものと考えられる。このときの沈下について一応筆者はつぎのような解釈をくだしてみた。すなわち初期の砂利層では、間ゲキ率や粒間摩擦力にかなりの不同があり、かつ基礎の表面にも著しい凹凸があるから、これに載荷すると、その接触面も著しく不均一となり、このため基礎は局部的荷重をうけ、集中荷重をうけた部分は、これに抗しきれず、その粒子は移動を生じ、その結果沈下が促進される。かくしてつぎつぎに局部的荷重をうけた部分の粒子は移動を生じ、このため次第に粒子間隙は密となり、粒間摩擦力は増大し、基礎が荷重をうけもつ作用は沈下の進行とともに次第に均一化されてゆくものと推定される。したがって初期沈下の状態では、荷重の伝達は著しく不均一で部分的に変動するから、この間の荷重と沈下の関係を理論的に見出すことは困難となる。しかし実測では、一般に荷重強度が大きい程、初期沈下 y_1 の値も大きい傾向が認められるので、(もちろん正比例とはいえない) 初期沈下に対する砂利基礎の強度を判定するには、一応図-3のモデルの K_1 を用いるのが便利と思われる。また過渡沈下状態に対してはモデルの $K_2(P)$ 、 $\eta_2(P)$ で特性を評価するのが好都合と思われる。

(2) 純圧縮沈下と流動沈下との関係

本実験の場合、載荷板は剛性板とみなされるので沈下は一様とみなし、砂利基礎周辺が自然コウ配の状態にある場合は、周辺非拘束状態であるから、砂利粒子は自由に側方へも移動しうる。このときの沈下は、図-7(a)の関係から、沈下量は純圧縮量と流動量との和であると

図-7 流動沈下の測定



$$y = y' + y'' \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 y = 載荷板底面の一様沈下量、 y' = 図-7で ABCD 領域内の砂利の間ゲキが縮少したために生じた沈下量(純圧縮沈下とよぶ) y'' = ABCD 内の砂利の一部が境界線 AB, CD から外方へ抜けだしたために生ずる沈下量(流動沈下とよぶ)砂利層の沈下に対する基本的性質を明らかにするためには、このような y' 、 y'' が、いかなる割合に生ずるかをしらべておくことも必要であると考えられる。正確な測定は困難であるから、次のような方法によつて概測を行つた。すなわち図-7(a)に示すごとく幅 3 cm の木片を境界線にそつて鉛直に埋込み、これに積荷すれば、変形後木片は $A'B'$ のごとくなるから、 $ABB'A'$ なる面積に相当する粒子が外方へ押しだされたことになる。この木片の移動量を 2 個のダイヤルゲージで測定した。測定箇所は (b) 図のごとく、4

図-8 表面沈下と流動量との関係

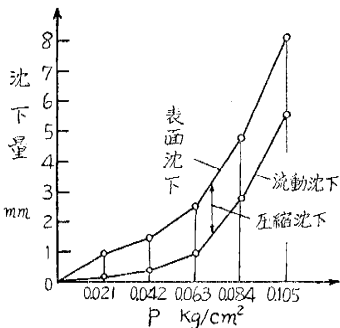
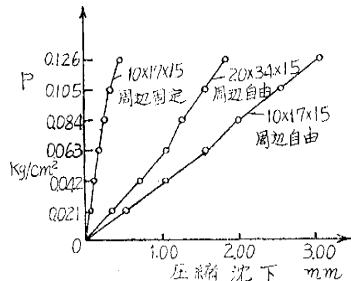


図-9 荷重-圧縮沈下曲線

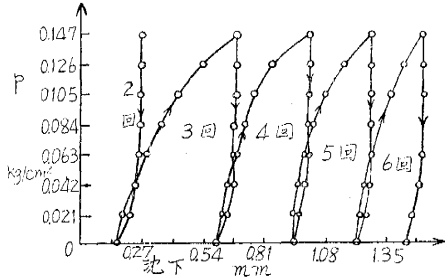


箇所で行い、これらの平均値から流動量を求めて概算し、一方載荷板底面の沈下量 y は光テコで測定した。測定結果の一例を示せば、図-8 となり、これより荷重強度と純圧縮量との関係を探ると図-9 となる。

(3) 繰り返し荷重による沈下

初期の砂利層が荷重をうけたときの沈下(第1回目の載荷過程による沈下)は(1)の項で述べたが、それ以後同一範囲の荷重が繰り返される場合の沈下について実験を行った。沈下の測定例を図-10に示す。この場合は部分載荷によつて一定荷重を加え、一定沈下に落ち着いた後、つぎの荷重を加えた。また念のため一度に全荷重を加えたときの終局沈下量と比較してみたが、両者はほぼ一致した値となることが推定された。繰り返し荷重による沈下曲線では、第1回目の載荷過程による沈下がきわめて大きく、第2回以後は第1回に比し、はるかに小さくなり、回を重ねるごとに漸減する。

図-10 繰り返し荷重沈下曲線測定例第1回、第2回載荷は、沈下がきわめて大きいため省略した

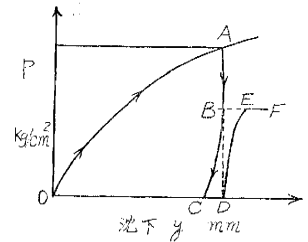


一方減荷過程による回復量は第1回目が一番大きい、第2回目以後でも余り大きい変化は認められなかつた。かくして何回かの加荷、減荷の行程を繰り返すと、加荷、減荷の両曲線は次第に類似の曲線に近づいてゆく傾向が見られた。両曲線がもし完全に一致すれば、この荷重範囲では基礎は完全弾性体とみなしうが、本実験の範囲(10回の繰り返し)では、やはり微小の(永久)沈下が生じ、両曲線は多少相違した。また加荷過程では、第2回目位までは沈下の時間的変化が見られ、第3回目以後では終局荷重(部分載荷の最後に加えた荷重)のときのみ時間的変化が認められ、(10~30秒位で一定沈下に落ち着く)その他の載荷では、ほとんど初期沈下のみとなつた。つぎに減荷過程では全く時間的変化は認められず、最初2,3の減荷過程では、荷重を除去してもなら回復量は生じなかつた。以上の関係から加荷と減荷の行程では、一般に沈下(変形)の性質が異なるから、基礎としての特性も両者で区別して取扱うのが適当と考えられる。このような見地から、加荷過程に対する基礎としての強度は、一応時間要素を無視すると(時間要素を考慮する場合は(1)の項に述べたと同様の方法を用いばよい)。

$K = dP/dy$ (8)

として荷重強度-沈下曲線から求められる。つぎに減荷過程では、図-11のごとく、ある程度荷重をとり去ると、はじめて沈下の回復が見られる。このような場合は基礎としてのバネ力は比較的弱く、ABだけの荷重が除去されて始めてバネ力を発揮し、DB以上の荷重に対しては、ならバネ力がなく、いわば降伏状態にあるわけである。したがつて減荷過程に対する基礎の弾性力の程度を判定するには、図のごとくBC curveを逆に回転してDEのごとくかき、E点以上の荷重ではバネは降伏するものとし、荷重-沈下曲線はDEFをたどるものとする。このときのバネ力は、

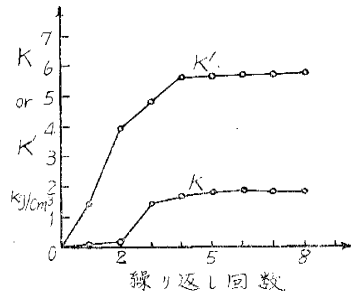
図-11 繰り返し荷重一沈下曲線説明図



$K' = dP/dy$ (9)

として求められる。したがつて K' の値は、減荷曲線の形から、ある大きい値から0まで変化するが、ある荷重範囲で減荷過程の K' の特性を表わすには、降伏直前すなわち図のE点における curve の切線コウ配から求めた値(これを限界バネ常数と呼ぶ)によつて表わすのが適当と思われる。また加荷曲線の K 値は、A点で curve OA に引いた接線コウ配から求めればよい。しかしこれらの K, K' 値は、繰り返し荷重の大きさ、載荷板の形状寸法、繰り返し回数などにより値を変化するから、これらの要素を明記しておく必要がある。要するに基礎の測定された沈下量あるいは K 値のみならず、その基礎が過去にうけた荷重履歴などをできるだけ詳しく究明することが、その基礎の特性を理解する上に重要な資料を与える点を注目する必要がある。各載荷過程につき、 K, K' 値を求め、繰り返し回数に対して図示した例を図-12に示す。

図-12 繰り返し荷重による K, K' 砂利層 $12 \times 25.5 \times 15$ cm, 載荷板 10×17 cm



(4) 載荷板重心鉛直軸上における沈下分布

測定例を図-13に示す。実測によつて見られた特性については、結論の項で述べる。以下(5),(6)についても同様。

(5) 表面沈下と砂利厚さとの関係

測定例を図-14に示す。

(6) 表面沈下と載荷板寸法との関係

測定例を図-15に示す。

4. む す び

静荷重による砂利層の沈下について行つた実験結果を要約すると、つぎのとおりである。

1) 砂利層の沈下は、きわめて複雑であるが、これは主として砂利粒子の粒間摩擦力、粒子間ゲキの大小などに依存するものと考えられる。しかもこれらの分布は基礎によつて異なつた値を示すから、同一荷重に対しても生ずる沈下量(あるいは圧力分布)も異なつてくる。したがつて与えられた荷重で生ずる沈下や圧力分布を推定することは困難で、十分信頼できる結果は実物試験によるほかはないと思われる。

2) 沈下に対して基礎の良否を判定する場合は、従来から地盤係数が用いられているが、もし時間的変動を評価する場合は3.(1)に述べた K_1, K_2, η_2 なる値を求めて検討する必要がある。

3) 一般に載荷板下面の沈下は3.(2)で述べたごとく、純圧縮量と流動量の和と考えられるが、沈下が大となる程、流動量の占める割合が大きく、本実験の場合、流動量が沈下の約75%程度に達すると、沈下はきわめて大となり、いわゆる破壊の現象と解さねばならないようである。すなわち砂利基礎の沈下や破壊などの現象には、前記の流動量の大小が重要な役割をばたすものと考えられ、この流動量は基礎の周辺固定条件によつて大きい影響をうけるものと思われる。

4) 繰り返し荷重による沈下では、第1回目の載荷過程(いわゆる Virgin Curve)の性質を明らかにすることは重要である。第2回以後の載荷では、沈下は第1回に比し、はるかに微小となり、しかも回数を重ねるごとに漸減する傾向が認められるが、 K 値は2回以後では、ほぼ一定値に近づく。また初期の砂利基礎では、一般に加荷曲線と減荷曲線では、その性質が異なり、したがつて K, K' 値は異なるが、繰り返し回数を増す程両者の沈下曲線は次第に類似する傾向が認められる。すなわち初期の砂利層は、非弾性的性質が著しいが、ある範囲の荷重の繰り返しに対しては反復回数を増す程、安全弾性体的性質が顕著となる。また加荷行程では沈下の時間的変化も認められるが、減荷過程では時間の影響はほとんど認められなかつた。

5) 砂利層の厚さおよび載荷板寸法などの沈下におよぼす影響については、一般に砂利厚さが大きい程、沈下も大きく、周辺自由(自然コウ配)の一定基礎では、載荷板寸法大なる程、沈下が大きいが、これらの間に必ずしも一義的な関係がなりたつとはいえないようである。また本実験では、荷重強度ならびに荷重の繰り返し回数を増す程、厚さや載荷板寸法の相違が沈下におよぼす影響は小さくなる傾向が認められた。また深さ方向の沈下分布は、本実験では、表面から5cm深さ程度までの沈下が大きく、この区間では、ほぼ二次曲線分布を示すが、それ以下の深さでは、ほぼ直線的に沈下が減少する傾向が見られた。

6) 今回の実験結果を総括すると、与えられた荷重に対し、砂利基礎の沈下を最小ならしめる方法としては、常識的ながら、路盤ならびに砂利基礎の周辺固定条件をできるだけ強固にし、少くも作用予定荷重以上の荷重強度で予め砂利層を十分突き固めておくことが望ましいが、地形上あるいは経済的に路盤がある程度軟弱化した場合は、周辺固定条件もほぼこれに相応したものとすればよいと思われる。いずれにしても将来に生ずる沈下や圧力分布を正確に推定するには、既述のごとく実物実験によるほかはないが、概略の予測をする場合には、基礎材料の性質とその基礎が過去にうけた荷重履歴を明らかにしておくことが望ましいと考えられる。砂利層内の圧力

図-13 載荷板重心鉛直軸上の沈下分布
砂利層 10×17×15 cm
載荷板 10×17 cm

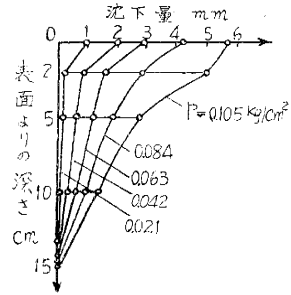


図-14 表面沈下と厚さの関係
砂利層表面積 10×17 cm

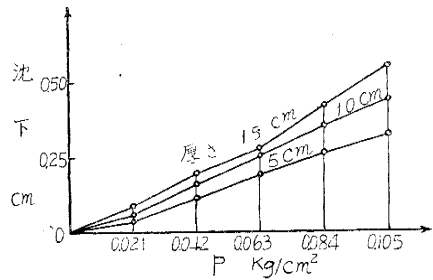
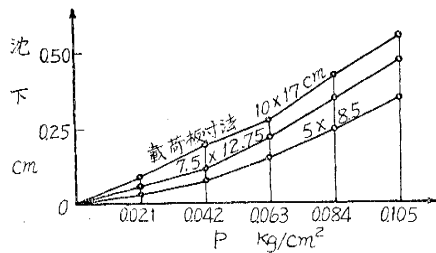


図-15 表面沈下と載荷板寸法との関係砂利層 10×17×15 cm



分布の測定については次回に述べたい。本研究は「道床及び路盤の動的強度の研究」¹⁾に関連して行つたもので、昭和 30 年度文部省科学研究費（個人研究）による研究成果の一部であり、御指導をいただいた京大教授村山朔郎博士に深謝するとともに、実験に協力された山口大学工学部学生阿部実、佐藤春美、西田憲史の 3 君に感謝する次第である。

参考文献その他

- 1) 日本国有鉄道部外委託研積報告書「道床及び路盤の動的強度の研究」日本保線協会編，昭和 30, 31 年 3 月
(昭.31.9.11)

昭和 32 年 6 月 25 日印刷
昭和 32 年 6 月 30 日発行

土木学会論文集第 46 号 定価 120 円 (〒 20 円)

編集兼発行者
印刷所

東京都新宿区四谷 1 丁目 中 川 一 美
東京都港区赤坂溜池 5 番地 株式会社 技 報 堂

発行所 社団法人 土 木 学 会

東京都新宿区四谷 1 丁目
電 話 (35) 5 1 3 8
振替東京 1 6 8 2 8