ＰＳ検層法を用いた砕石路盤の剛性評価に関する研究

皆木孝英[1]・上浦正樹[2]・関根悦夫[3]・木幡行宏[4]

[1]学生会員　北海学園大学工学部（〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1）
[2]正会員　工博　北海学園大学工学部（〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1）
[3]正会員　工博　(財)鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
[4]正会員　工博　室蘭工業大学工学部（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）

本研究は載荷エネルギーや路盤内のひずみが非常に小さい弾性波に着目し,地盤内の弾性係数を求めようとするものである. 対象を一般的に用いられている砕石とし，事前に室内試験で弾性波の発生方法や検知方法を土槽により試験をし，求めた弾性係数の妥当性を小型 FWD の載荷・たわみの結果から判定した．これらに基づき現場試験を行ない，得られた弾性係数は室内試験と同様の結果が見られた．以上から，本研究の有用性が確認できた.

Key Word ： *elastic wave, elastic modulus, ballast, strain, acceleration*

１．はじめに

バラストなどの粒状体は安価で容易に入手できることから一般的によく利用される材料である．しかし，突固めの方法など現場施工の状態や粒径，粒子の形状等によって一様な材質を確保するのは事実上かなり難しい．しかし土木構造物の維持管理の観点からは，この種材料の材質を評価する方法として剛性のうち支持力など力学的性状を知ることは重要なことである.

地盤の支持力には地盤支持力係数Ｋ値や弾性係数Ｅなどの剛性を示す指標が用いられている．これらは地盤を弾性体と仮定し，地盤表面に小型 FWD 装置などにより載荷をしてそのたわみから算定する方法であり，道路舗装ではすでに用いられている．しかし砕石を用いた鉄道路盤では砕石が路盤として敷設されているが，道路舗装のように平板状にほぼ均一な剛性を示していないで，レールを支持しているまくらぎ下の砕石を重点的につき固めているために，まくらぎ下に対する路盤の剛性評価を行う必要がある。この剛性評価は小型 FWD を用いる方法がある[1)]が，これは，まくらぎ上に載荷してまくらぎのたわみを測定し, 砕石表面のたわみとしている. そこで，本研究ではまくらぎ下の砕石の剛性を直接評価する方法の検討を行うこととした.

２．ＰＳ検層法

検層とは坑井内に測定器を下ろし，坑井のまわりの地層の物性，例えば比抵抗，密度，弾性波速度，孔隙率（分野によって空隙率や間隙率）等を深度に対して連続的に計測する技術で，正確には物理検層と呼ばれる。その物理検層の手法の中で本研究ではＰＳ検層法を使用して砕石の剛性を評価する方法の検討を行うこととした.

ＰＳ検層法[2)]とは土木建設，耐震調査分野で最も重視されていて，またそれと同時に多用されている手法で，地盤を伝播する弾性波速度を測定することにより地盤の力学的性質を評価するものである．求める弾性波速度には，Ｐ波及びＳ波速度があり，この両方を求める場合をＰＳ検層法と呼んでいる．地盤に圧縮力を加えることによりＰ波を，またせん断力を加えることによりＳ波を発生させ，それらが地盤中を直接的に伝播してきた波動を任意の地点に設置した受振器で受振し，波動検出間の距離を位相時間差で割ることで，その間のＰ波及びＳ波伝播速度を求める．この求めたＰ波及びＳ波速度から，地盤の重要なパラメーターである微小ひずみレベル（Hokke の法則が成り立つ範囲）でのポアソン比，剛性率（せん断弾性係数），ヤング率を求めることが出来る[3)].

写真-1　測定機器

３．本研究の試験方法

３．１　ＰＳ検層法による方法

本研究で使用する弾性波は砕石の微小な圧縮，せん断を生じさせて起こる現象で，進行方向に位相が変化するP波と直角方向に変化するS波がある．P波とP波をそれぞれ起振して発生させ，加速度計によりこの微小な弾性波を検知する．ここで使用する機器等として，**写真-1**に全ての試験に用いた測定機器を示す．これらは受振器（3軸加速度計・1軸加速度計），A/D変換機（動ひずみ測定器），収録部（ノートパソコン）から構成される，

P 波の起振方法としては，砕石上に密着させた板をハンマーで上から打撃することによって P 波を発生させる．S 波の起振方法としては，板たたき法を用いて行う．板たたき法とは地盤上に木の板を置き，その上に荷重をかけて砕石と圧着させた状態で板の左右を水平打撃し，S 波を発生させる．その際に板は受振器の測定方向に対して直交し，地面に水平になるように設置する．

波の受振方法について，起振側の初動を記録する受振器には 1 軸加速度計を用いて，P 波測定の際には測定方向を下部受振器の測定方向と直線上になるように設置し，S 波測定の際には下部受振器の測定方向に対して直交し地面に水平になるように設置し波形を記録する．位相時間差を測るための受振器には 3 軸加速度計を用いて，P 波は上下動成分の波形記録に，S 波は水平動（2 成分）の波形記録に現れる．S 波については水平 2 成分の波形記録を震源での振動方向に合成し，表示する．また記録波形にノイズが混入している場合はローカットフィルタ，ハイカットフィルタ等の適切なフィルタ処理を行う．

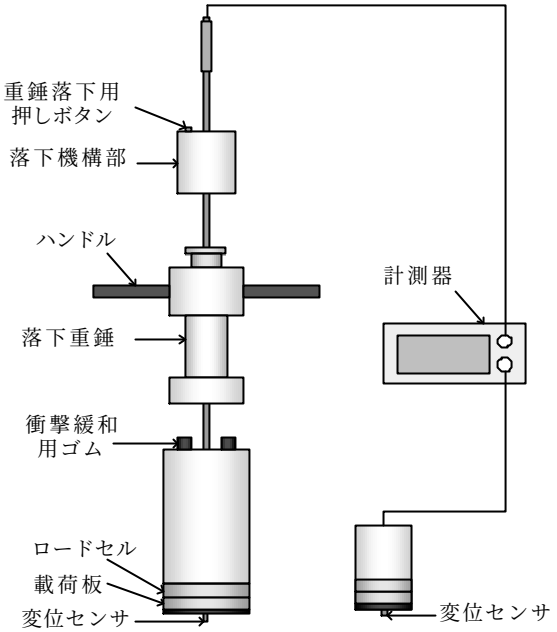

図-1　小型ＦＷＤ概要図

３．２　小型ＦＷＤによる方法

本研究では ＰＳ 検層法でバラスト路盤の剛性を推定するが，その妥当性について検証するため，小型 FWD を使用して弾性係数を推測し，この結果と比較する．

ここで小型 FWD 装置の概要を示す．小型 FWD とは，FWD を小型・簡略化し持ち運びを可能にしたもので速度計とロードセルにより測定した変位量と荷重より弾性係数 E や地盤反力係数 K を推定する機器である．鉄道において小型 FWD は，狭隘で道路の平板載荷試験や FWD による測定が困難な箇所や施工延長が短く測定数の少ない盛土工事などの品質管理に用いることを基本としている．小型 FWD 概要図を**図-1** に示す．

４．室内試験

本研究ではPS検層法で推定される弾性係数と比較するために小型FWDを用いて推定される弾性係数を求め、その適用範囲を明確にする必要がある．そこで実際のバラスト路盤に適用する準備として土槽を用いた室内試験を行った．

試験試料は，実際の鉄道の道床部分に用いられているものである．**図-2**に粒径加積曲線を示す．最大粒径D_{max}＝57.3mm，平均粒径D_{50}＝38.4mm，均等係数U_c＝1.60である．単位体積重量は15.4kN/m^{3}であった．**写真-2**に試験試料埋設中の土槽を示す．

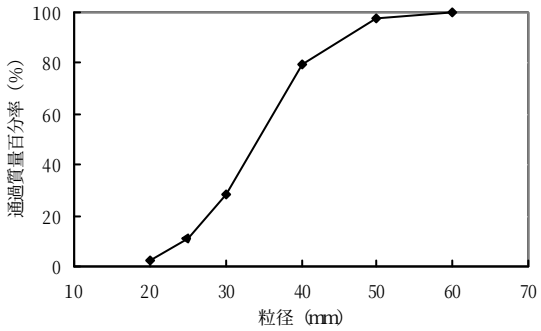

図-2　試験試料の粒形加積曲線

写真-2　試験試料敷設中の土槽

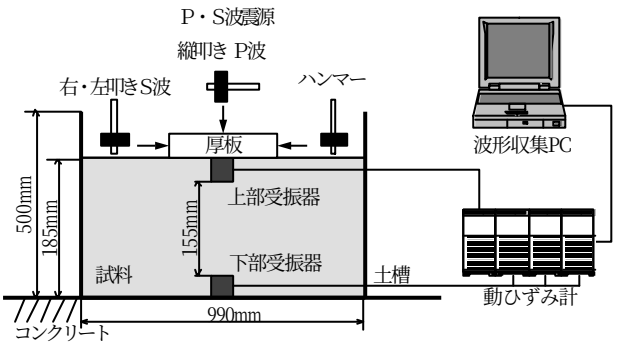

図-3　室内試験概要図

4．1　ＰＳ検層法による方法と結果

震源より発せられた道床バラストを伝播する弾性波（P波・S波）を震源側（上部受振器），受振側（下部受振器）の2個の加速度計で検知し，加速度計検出間の距離を位相時間差で割ることで弾性波速度を得る．そしてその弾性波速度を利用して弾性係数を求める．**図-3**に室内試験概要図を示す．

試験結果の波形図を**図-3** と**図-4** に示す．P 波と S 波の検出確認方法として，P 波は初動の立ち上がりの良し悪しを，S 波も初動の立ち上がりとさらに右叩きと叩きでは波形が反転していることを確認する．

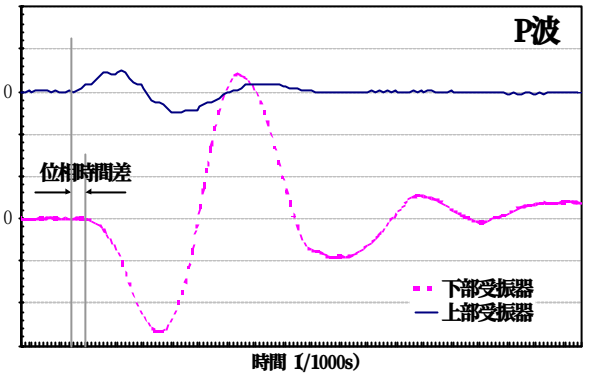

図-3　Ｐ波形記録図

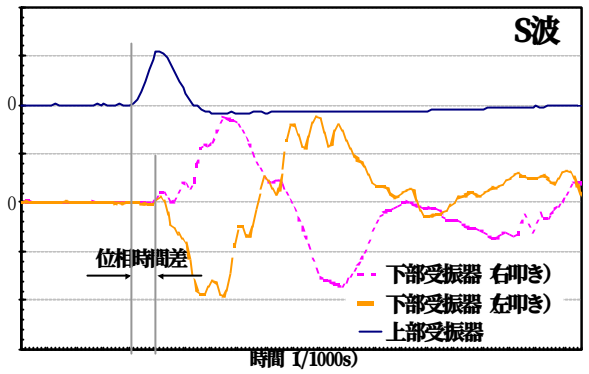

図-4　Ｓ波形記録図

図-4 は P 波形測定記録の一部である。初動の立ち上がりも良く，P 波は検出できたと考えられる．**図-5** は S 波形測定記録の一部である．初動の立ち上がりも良く，右叩きと左叩きの波形の位相が反対であり S 波を検出することができたと考えられる．

そこで測定して得られた P 波速度 V_P 及び S 波速度 V_S から，(1)式よりポアソン比 ν を(2)式より剛性率 G，(3)式より弾性係数 E を求める．この結果を**表-1** に示す．

$$n=\frac{1}{2}\cdot\frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2-2}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2-1} \qquad (1)$$

$$G=rV_S^{\,2} \qquad (2)$$

$$E=2\cdot(1+n)\cdot G \qquad (3)$$

ρ：単位体積質量

表-1　PS検層法による弾性係数推定結果(室内試験)

DATA	V_P (m/s)	V_S (m/s)	μ	G (MPa)	E (MPa)
1回目	387.5	193.8	0.33	57.8	154.2
2回目	310.0	172.2	0.28	45.8	116.9
3回目	387.5	193.8	0.33	57.8	154.2

表-2　測定DATA(小型FWD：土槽上)

DATA	荷重(N)	たわみ(mm)
1回目	5020	0.215
2回目	5020	0.214
3回目	5030	0.216

4．2 小型FWDによる方法と結果

弾性係数の比較のために土槽に埋設した砕石上に小型FWDをセットし、載荷荷重と載荷点直下のたわみを測定した．**表-2**に測定DATAを示す．この結果を次の2つの方法を使用し弾性係数を推定した．

1つの方法は多層弾性理論に基づく逆解析から求められる方法である．逆解析プログラムはLMBSを使用し,逆解析の条件として2層解析の上層185mmの道床バラスト，下層をコンクリート路盤と設定して小型FWDから得られた荷重とたわみの測定DATAから弾性係数を推定した．その結果を**表-3**に示す．

$$E = \frac{S \cdot \left(1 - n^2\right) \cdot F}{p \cdot a \cdot d} \qquad (4)$$

F：最大衝撃荷重
d：たわみ
ν：ポアソン比
S：応力分散係数
a：載荷板半径

2つ目の方法は，Gurpらの提案式から弾性係数を求める方法である[4]．これは円形載荷板を用いて、載荷しそのたわみを測定することで、経験に基づき式（4）が提案されている[3]．

ここでSは応力分散係数として載荷板の条件により2ケースの場合を想定している．第一番目は載荷板が剛なケースで，この場合Sはπ/2を用いる．第二番目は均一に載荷できるケースでSは2を用いる．本研究では使用した載荷板は剛であるので第一番目を適用した．この結果を**表-4**に示す．

表-3　弾性係数推定結果(逆解析LMBS)

DATA	E (MPa)
1回目	83.4
2回目	83.7
3回目	82.9

表-4　弾性係数推定結果(Gurpらの提案式)

DATA	E (MPa)
1回目	102.7
2回目	102.9
3回目	102.1

写真-3　現場試験実施場所

5．現場試験

室内試験で得られた結果より，PS検層法による弾性係数の推定は可能であると考えられるため，実際の線路のバラスト路盤にてPS検層法の適用性を検討する．

試験場所は函館本線，苗穂駅構内の着発2番線（50Nレール，PCまくらぎ，砕石道床で厚さ200mm）の線路において2001年7月3日に現場試験を行った．現場試験試験実施場所を**写真-3**に示す．

5．1　PS検層法による方法と結果

試験方法は**図-7**より，まくらぎ端で砕石部分を深さ200mmまでほぼ垂直に掘削し，その掘削面の震源側とする掘削面に1軸加速度計，受振側とする反対側に3軸加速度計を設置する．震源側とする掘削面に厚板をセットし室内試験と同様にハンマーでP波測定のために縦打ち，S波測定のために左右打ちを行った．そして道床バラストを伝播する弾性波を2個の加速度計で検知し，加速度計検出間の距離を位相時間差で割ることで弾性波速度を得た．

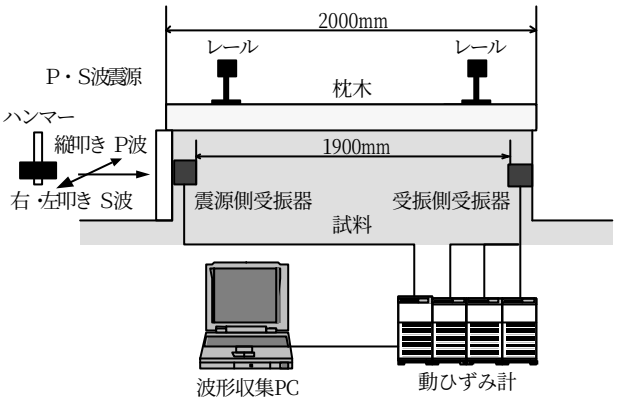

図-6　現場試験概要図

表-6　測定DATA(小型FWD：まくらぎ上)

DATA	荷重(N)	たわみ(mm)
1回目	5350	0.129
2回目	5190	0.121
3回目	5080	0.120

表-5　PS検層法による弾性係数推定結果(現場試

DATA	V_P (m/s)	V_S (m/s)	μ	G(MPa)	E(MPa)
1回目	513	241	0.34	74.4	199.1
2回目	488	235	0.35	85.3	230.3
3回目	444	220	0.36	89.4	243.0

表-7　弾性係数推定結果(Steinbrenner式)

DATA	E(MPa)
1回目	92.6
2回目	95.8
3回目	94.7

以上の方法により，得られたP波速度及びS波速度を用いて室内試験と同様に式(1)，(2)，(3)により弾性係数を推定した.この結果を**表-5**に示す.

5．2　小型FWDによる方法と結果

現場で得られた弾性係数の妥当性を検討するため左右のレール締結装置を外し、載荷時にレールの影響を除いた状態によりまくらぎと砕石の載荷・たわみ測定を行った．載荷位置はまくらぎ中央で，まくらぎのたわみを砕石表面のたわみと仮定した．この測定DATAを**表-6**に示す.

この結果から砕石の弾性係数を推定するため，Steinbrenner式[5]を導入することとした.まくらぎ中央部の上面に載荷し，その直下のたわみを用いて式(5)から弾性係数を推定することとした.

$$E=\frac{4bP_0(1-n^2)}{pw_0}\left\{\log_e\left(\sqrt{m^2+1}+m\right)+m\log_e\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{m}\right\} \quad (5)$$

P_0：荷重強度
w_0：地表面中心点のたわみ
ν：ポアソン比
2a,2b：まくらぎの一辺の長さ
m：a/b

この結果を**表-7** に示す。

6．考察

6．1　室内試験

ＰＳ検層法から求めた弾性係数推定結果の**表-1**と逆解析から求めた弾性係数推定結果の**表-3**及びGurpらの提案式から求めた弾性係数推定結果の**表-4**については，2倍程度の結果が得られた．これはPS検層法が弾性波から求めるのに対し，逆解析やGurpらの提案式が砕石のたわみから求めることに起因しているものと考えられる.阿部ら[6]は砕石路盤でひずみレベルが10^{-4}では弾性係数が400MPaのものがひずみレベルが10^{-3}では弾性係数が100MPaとなったと報告している．ここで載荷板の半径r（=200mm）におけるたわみ量(δ)のひずみをδ/rで計算すると1～2×10^{-3}程度となっている．以上から弾性波によるＰＳ検層法ではかなりの微小ひずみレベルに対する弾性係数を示すが，小型FWDによって推定される弾性係数ではひずみレベルが相対的に大きいことから，その結果がより小さいことが推定される.

6．2　現場試験

ＰＳ検層法から求めた弾性係数推定結果の**表-5** とSteinbrenner式により求めた弾性係数推定結果の**表-7** では2倍程度の差が生じている．この原因としては室内試験で考察されたひずみレベルの違いが弾性係数に影響したものと考えられる.

７．結論

本研究は，砕石路盤を対象に載荷エネルギーや路盤内のひずみが非常に小さい弾性波に着目して,地盤内の弾性係数を求めようとするものであるが，そこで以下の結論を得た.

(1)PS検層法から求めた弾性係数推定結果は，逆解析から求めた弾性係数推定結果及びGurpらの提案式から求めた弾性係数推定結果に対して，2倍程度の結果が得られた.

(2)PS検層法から求めた弾性係数推定結果は，Steinbrenner式により求めた弾性係数推定結果に対して2倍程度の結果が得られた.

(3)PS検層法と小型FWDにより各種方法で推定した弾性係数の違いは測定時のひずみレベルの差によるものと考える.

最後に本研究にあたり御協力を頂いた日本貨物鉄道(株)北海道支社の猪口雅之保全室長, 日野将規様に感謝の意を表します.

なお本研究の一部は文部科学技術省の科学研究（基礎研究(B)(1)（1255130)の一環で行った.

参考文献）

1) 上浦正樹，高橋顕：弾性解析における木まくらぎの良・不良判定法，鉄道施設協会，pp37-40,1994.6
2) 物理探査学会：物理探査適用への手引き（とくに土木分野への利用），物理探査学会，pp172-184,2000
3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，物理探査学会，pp.635-641,1998
4) Van Gurp & J.Groenendijk: Experience with various types of foudation tests,Pro.of 5th Int. Symposium on Unbound Aggregaites in Roads pp239-246,2000.6
5) 日本国有鉄道編：建造物設計標準解説　土構造物，日本鉄道施設協会，pp326-327,1978.12
6) Nagato Abe, Etuo Sekine, Masaki Kamiura, Teruhiko Maruyama Yasuo Miura: Stability processing evaluation method for the subgrade using the HFWD Pro.Int.Confe Bearing Capacity of roads and airfields,pp301-310 1998.6

(2001．7.23 受付)

A STUDY ON ESTIMATION OF STIFFNESS FOR BALLAST ROADBED USING P-S LAYER INSPECTION METHOD

Takahide MINAKI, Masaki KAMIURA, Etsuo SEKINE and Yukihiro KOHATA

This paper is according to estimation of the elastic coefficient using a very small elastic wave in which the distortion in the roadbed is very small in the loading condition. The ballast generally used is set as a target. In advance, a roadbed test pit was used for the generating method and the detection method of an elastic wave by indoor examination. The validity of the elastic coefficient for which it asked was judged from the result of loading and bending using a portable FWD.The elastic coefficient obtained by in-site examination based on these was almost as the same tendency as the in-door test results. As mentioned above, the usefulness of this research has been checked.