

小型FWDを用いた重錘と地盤の変位推定モデルに関する研究

上浦正樹¹・大石浩晶²・阿部長門³・関根悦夫⁴

¹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)

²学生会員 北海学園大学 工学研究科建設工学専攻(〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1)

³正会員 工博 東亜道路工業(株) 技術研究所(〒300-2622 茨城県つくば市要315-126)

⁴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)

小型FWD装置において重錘の運動エネルギーが衝撃力となって地盤のたわみとなると仮定して、このFWD装置と地盤の全体の系をバネマスモデルとした。このモデルにより重錘の落下直後を原点とする座標系から重錘の変位を推測する式と地盤を原点とする座標系から地盤のたわみを推測する式に関する連立微分方程式を作成し解を導いた。次に地盤として弾性係数が容易に求められるゴム板を使用してモデルによる重錘の変位と地盤のたわみを計算した。また、小型FWD装置の重錘に加速度計を取り付け、ゴム板上に載荷をした。測定された加速度を2回積分して求めた重錘の変位と測定結果と比較した。同様に地盤に砕石を用いて計算と実測の比較を行った。以上によりモデルから導かれた解の妥当性を確認できた。

Key Word : portable FWD , spring model , displacement , ballast , roadbed

1. はじめに

砕石などの地盤においては載荷時のたわみが小さい場合は弾性的な変形特性を示し、たわみが大きくなると塑性的な変形特性を示す。近年になってFWD(Falling Weight Deflectometer)装置や小型FWD装置を利用し地盤の剛性を予測する手法が確立されつつある¹⁾。この動向と相まって、各種の小型FWD装置が普及するにつれ、この装置のキャリブレーションの必要性や一斉試験などで装置間の違いのチェックなど装置に関する検討が必要となってきた。

そこで本研究ではキャリブレーションなどの装置の特性を検討するために、小型FWD装置のモデル化を試みることにした。モデル化にあたっては小型FWD装置と地盤全体をバネマスモデルとして扱うことにした²⁾。そして小型FWD装置で測定される地盤のたわみと重錘の変位を推測するために載荷板の変位は小型FWD装置から測定することとした。しかし重錘の変位は独自に求める必要があることから、重錘に加速度計を取り付け、得られた加速度を2重積分によって変位を算定し、重錘の変位の実測値とすることとした。以上のモデルによる計算値と実測

値と比較することで、モデルから導かれた解の妥当性を検討することとした。

2. 小型FWD装置の機構

小型FWD装置は、人力で重錘を持ち上げ落下させるために装置化されてない分の手間がかかるものの、構造は簡単で現場に持ち運びが容易であり、連続して測定できる特徴を有する。

小型FWD装置は動的載荷の発生機構、載荷と荷重・たわみ測定機構、制御機構の大きく3つの要素から成り立つ。

- 1) 動的載荷の発生機構は重錘とそれをガイドするガイドバーと落下した重錘を受けるゴムなどの衝撃装置から成り立つ。重錘を自然落下させると衝撃緩衝装置によって重錘の衝撃力が載荷板に伝わる。
- 2) 載荷と荷重・たわみ測定機構では重錘の衝撃力を地盤などの測定対象へ伝える役目とそのときの載荷荷重とたわみを測定する装置から成り立っている。
- 3) 制御機構には重錘の落下時に合わせて載荷荷重とたわみを測定することができるよう機構が組み込まれている。

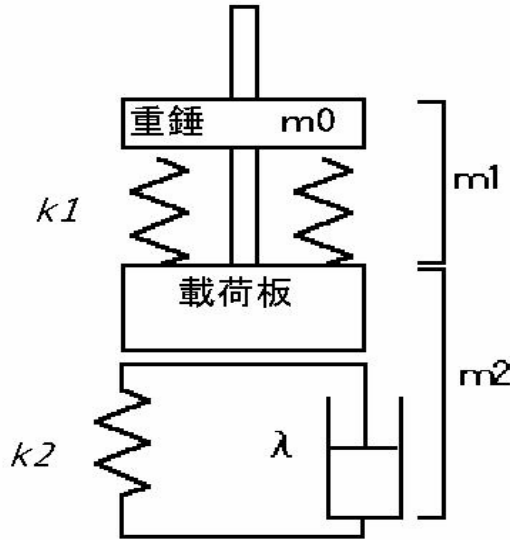


図-1 小型FWDのモデル

さらに載荷荷重とたわみの回数などを記録するシステムが組み込まれるのが一般的である。

3. 小型FWD装置のモデル化

小型FWD装置と地盤を一体化したモデルを図-1のように設定した。ここで重錘と地盤で2つの局部座標系を設定する。また地盤と載荷板の変位を同一とみなす。

(1)落下する重錘に関する力のつりあい

局部座標 x_1 系において、重錘が落下して(落下高： h)バネ(バネ定数： k_1)に接する点を原点とする。重錘の落下エネルギーが緩衝用バネの弾性エネルギーとして蓄えられると仮定する。ここで重錘の衝撃力 P_0 、重錘の質量を m_0 、重錘とバネを合算した質量を m_1 とする。またバネに到達したときの重錘の速度を v_0 とする。以上から次式が成り立つ。

$$P_0 = k_1 x_{\max} \quad (1) \quad v_0 = \frac{m_0}{m_1} \sqrt{2gh} \quad (2)$$

$$m_1 gh = \frac{1}{2} k_1 \left(\frac{P_0}{k_1} \right)^2 \quad (3)$$

以上から(4)式を導くことができる。

$$P_0 = \sqrt{2m_1 gh k_1} \quad (4)$$

ここで初期条件は

$$t=0: \quad x_1 = 0 \quad \frac{dx_1}{dt} = v_0 \quad (5)$$

となる。

ここでガイドバーが鉛直方向から角度 ϕ で傾いていた場合にガイドバーに重錘が滑りながら落下すると仮定し、発生する滑り摩擦力 f (滑り摩擦係数を μ とする)を(6)式で表す。

$$f = \mu \times m_0 g \cos \phi \quad (6)$$

以上から落下する重錘について次式が導かれる。なお載荷前の載荷板の位置を $x_2=0$ とする。

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 (x_1 - x_2) + \mu \times m_0 g \cos \phi = 0 \quad (7)$$

(2)載荷時における地盤上での力のつりあい

局部座標系 x_2 を用い、地盤のバネ係数を k_2 、減衰係数 λ とし、載荷の影響のある範囲での地盤のひずみを 10^{-4} 以上とする。この範囲内にある地盤の質量と載荷板の質量を合算し m_2 とする。

以上から載荷した時の地盤上での力のつりあいは(8)式ようになる。

$$m_2 \frac{dx_2}{dt} + \lambda \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2 - k_1 (x_1 - x_2) = 0 \quad (8)$$

ここで初期条件は次式を満足する必要がある。

$$t=0: x_2 = 0, \frac{dx_2}{dt} = 0 \quad (9)$$

(3)解析結果

以上の微分方程式を解くにあたり、地盤の減衰係数 λ の影響が小さいと判断して、これを省略することとした。初期条件(5)及び(9)を用いて、(7)式と(8)式の連立微分方程式を解いた³⁾結果をモデル式と呼ぶ。そのうち重錘落下後に緩衝用バネに接触してからの重錘の変位 x_1 を(10)式に示す。

$$x_1 = \frac{P_0}{k_1} (A \sin q_1 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} t + B \sin q_1 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} t) - F \quad (10)$$

ここで用いた係数は次の通りである。

$$\alpha = \frac{\frac{k_2}{k_1} + \frac{m_2}{m_1} + 1}{2\beta} \quad \beta = \sqrt{\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2}} \quad \text{として}$$

$q_1 = \alpha + \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}$ $q_2 = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}$ を用いる。

$$A = \frac{1 - q_2^2}{q_1 (q_2^2 - q_1^2)} \quad B = \frac{1 - q_1^2}{q_2 (q_1^2 - q_2^2)}$$



写真-1 ゴム板上の小型FWDと緩衝材

表-1 ゴム板材の緒元

大きさ	300×300×40 (mm)
質量	5.6kg
呼称	65°

$$F = \frac{\mu \times m_0 gh \cos \phi}{P_0}$$

同様に载荷直後からの地盤のたわみ x_2 を(11)式に示す。

$$x_2 = \frac{P_0}{k_1} (1 - q_1^2) \left(A \sin q_1 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} t - C \sin q_2 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} t \right) - F \quad (11)$$

この式の係数は(10)式で用いたものと次式である。

$$C = \frac{q_2^2 - 1}{q_2(q_1^2 - q_2^2)}$$

4. 実験方法と結果

(1) ゴム板

本研究で使用したモデル式の妥当性を検討するため、バネ係数を容易にかつ再現性が確認できる方法として、地盤にゴム板を使用した。また小型FWDは路盤上のたわみを測定する機構は有しているが、重錘の変位を測定する機構がないので、重錘の上部に加速度計(容量2000m/s²、最大応答周波数1300Hz)を取

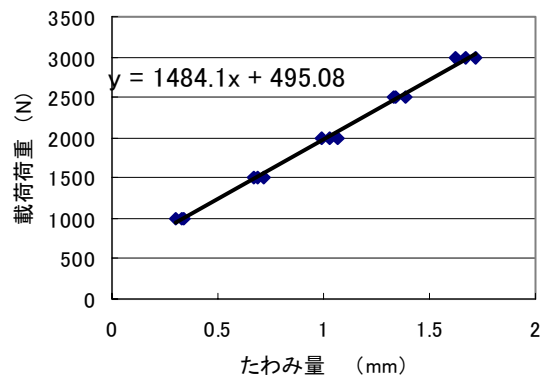


図-2 ゴム材の弾性特性

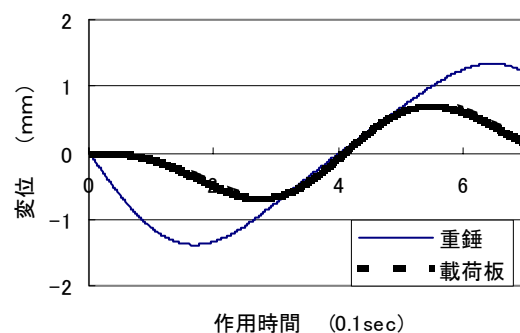


図-3 変位と作用時間(モデル)

り付け、重錘の変位および路盤上のたわみを求めることとした(写真-1)。

ここで使用したゴム板材の緒元を表-1に示す。落下する重錘の衝撃緩衝装置としてバネ(バネ定数:191N/mm)を3本用いた。またモデルでのバネ定数は3本並列でバネを使用することから3倍したものを採用した。また平板载荷装置を用いてゴム材のバネ係数を求めた。この方法は直径30cmの载荷板を使用して段階ごとに静的荷重を増やし、そのたわみ量を求めるものである。図-2にその例を示す。以上の結果から本研究で使用するゴム材は弾性的挙動を示しその平均は1500N/mmとなった。またこのモデルでは、 m_2 を载荷板の質量と地盤の質量の合計とした。ここでゴム板のポアソン比が約0.5であり、また厚さが4cmで载荷板の直径(30cm)と比べ約1割程度と小さいことから45°方向に分散して荷重が伝わりと仮定して、その範囲内のゴムの質量を地盤の質量とした。

重錘の落下高を3段階(75mm, 150mm, 225mm)とし、それぞれの落下高に応じて上記のモデルに基づき、重錘の変位 x_1 と地盤のたわみである载荷板の変位 x_2 を計算した。図-3はこの結果のうち重錘の落

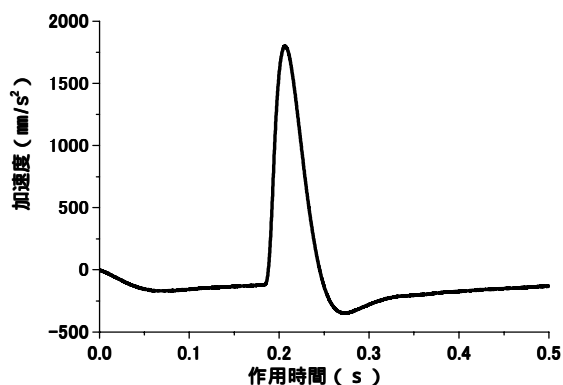


図-4 加速度と作用時間（実験）

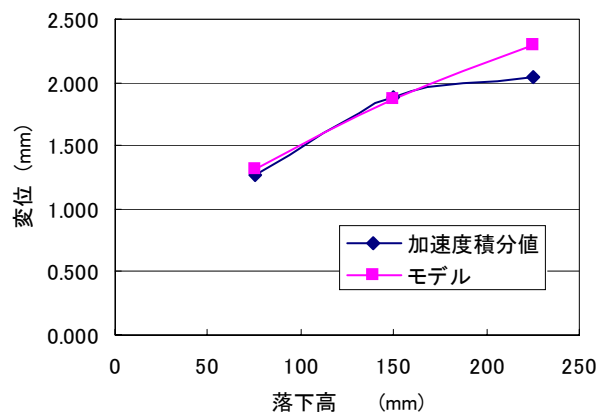


図-7 重錘の変位の比較

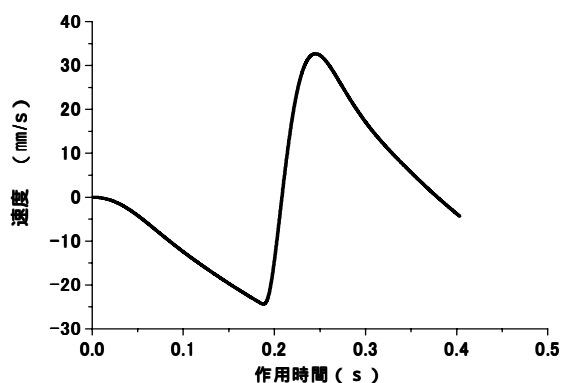


図-5 速度と作用時間（実験）

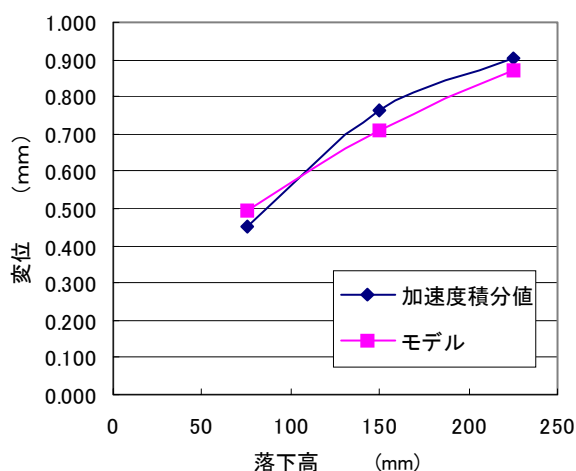


図-8 載荷板の変位の比較

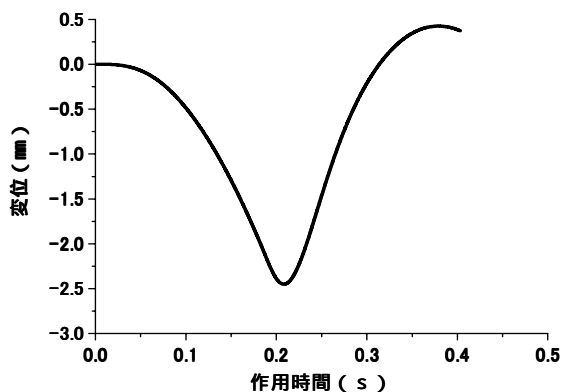


図-6 変位と作用時間（実験）

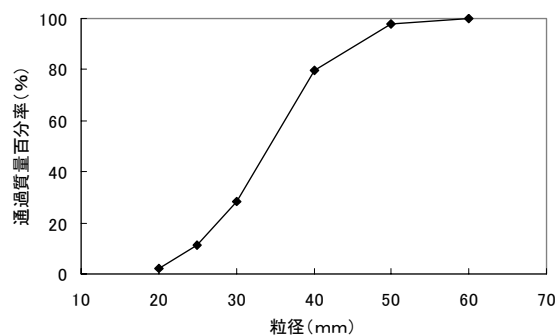


図-9 粒径加積曲線

下高225mmにおける各変位を重錘が緩衝用バネに落下直後の時間を作用時間として求めたものである。

次にゴム板上の実験を行なった。载荷は3回とし、3段階の落下高によりそれぞれ平均をとることとした。加速度の結果からフィルターはバンドパスのうちローパスフィルター（230Hz）のみを用いて積分した。図-4は重錘の落下高75mmの加速度データである。またこれを積分して速度（図-5）となり、さ

らに速度を積分して変位（図-6）となった。各図はそれぞれの時間に対する推移を示したものである。

落下高ごとに式(10)、(11)によって求められた理論値と比較するために重錘と載荷板の変位のなかでピーク値を採用した。図-7は重錘の変位と落下高の関係である。図-8は載荷板の変位と落下高の関係である。ここでモデルでは式(11)に示すようにsin関数を含んでいるがほぼ直線的に増加している。

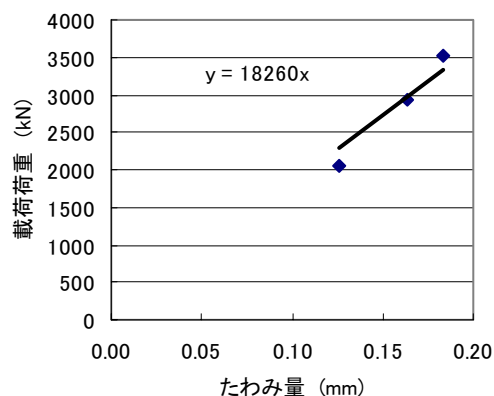


図-10 載荷荷重とたわみ（砕石）

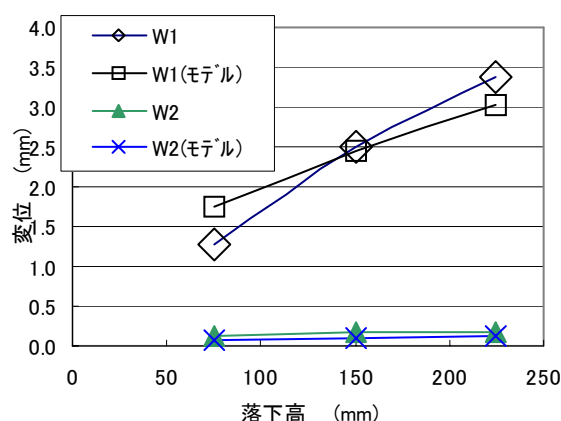


図-11 変位と落下高（砕石）

(2) バラスト地盤

実際の地盤により近い条件にするため繰り返し試験に比較的有效なバラストを採用した。室内試験用土槽（1×1×0.6m）を載荷時の変位がほとんど無視できるコンクリート板上に設置し、この土槽に鉄道で使用されている砕石を全面に敷き詰め、突き固めて厚さ20cmとした。この砕石の単位体積質量は15.4N/m³であり、鉄道で使用されているものとほぼ同じ値であった⁴⁾。この砕石層の粒度加積曲線を図-9に示す。

平板載荷試験によってバラストの荷重・たわみ関係を調べ、モデルに使用する路盤のバネ定数とした（図-10）。この結果から算定した地盤のバネ定数は18300N/mmであった。また、砕石の応力分散の程度を検討するため次の検討を行った。砕石の予想されるせん断摩擦角φは40°程度でポアソン比は0.35程度である。そこで砕石の弾性係数を3MN/mm²と仮定して層厚20cmの応力分布を順解析応力ソフト（ELSA）により求め、応力が最大値の0.1以下とな



写真-2 砕石上の載荷試験

る応力コンター図を求めた。以上から載荷板の影響を受ける範囲は載荷板縁端から35°方向に分散するものと仮定した。この結果から m_2 は載荷板の質量(13kg)とバラスト地盤との合計で42kgであった。緩衝用バネのバネはゴム板の実験で用いたのと同じバネ（バネ定数:191 N/mm）を3本用設置した。以上の値を用いて本研究で使用するモデルにより重錘と載荷板の変位を推定することとした。

(3) 小型FWD試験

土槽の砕石上の表面に小型FWDをセットし、たわみを測定した。ゴム板のケースと同様に重錘の落下高を3段階（75mm、150mm、225mm）とし、予備載荷として既往の研究³⁾に基づき、事前に2回載荷し、その後本載荷としてデータの収集は3回目から実施した。実験は落下高ごとに3回実施、その平均を求めた。以上の結果をまとめたものが図-11である。

5. 結果と考察

(1) ゴム板とモデルの関係

重錘の変位と載荷板の変位の両方とも図-7、図-8に示すように比較的良好に一致している。これは使用したバネマスモデルにおいてバネ定数を精度よく求められれば、それだけ実験値と理論値の乖離が少なくなることを示しているものと考えられる。

(2) バラスト地盤とモデルの関係

ゴム板と比較してバラストでは落下高により重錘と載荷板の変位では、加速度による計算値とモデルでの値に差が見られる（図-11）。しかし落下高150mmでは重錘と載荷板ともほぼ一致している。また落下高75mmや225mmにおいてもその差は最大で2割程度であった。これは路盤のバネ定数と路盤を含めた載荷の影響範囲に関する質量の算定にそれぞ

ればつく要素を含むと考えるが，実用上本研究におけるモデルの利用は可能であると考えられる．

6．結論

本研究はキャリブレーションや一斉試験などで装置内の各部品の質量，緩衝用バネやゴムの弾性係数の評価，地盤の剛性がたわみ測定に与える影響などを検討するために行った．ここではバネマスモデルを用いて推定される重錘の変位と載荷板の変位を小型FWDの重錘にセットした加速度計のデータから2回積分から求まる変位及び小型FWDの載荷板の変位測定結果を比較し次の結論を得た．

- (1) 路盤にゴム材を用いた場合は本研究で用いたモデルにより重錘の変位，載荷板の変位ともかなりよく一致した．
- (2) 鉄道で使用するバラストを用い鉄道線路と同程度に突き固めた路盤を用いた場合は本研究のモデルはほぼ一致するが最大で2割程度のばらつきが認められた．これは地盤

のバネ定数と地盤の載荷による影響範囲内の質量の評価に関係しているものと考えられるが，実用上問題がないものと考えられる．

以上から本研究に用いたモデルの妥当性は確認できたものと考えられるが，今後，一斉共通試験や各種地盤の載荷からモデルの精度を高めていきたいと考えている．

最後に本研究に技術的アドバイスを頂いた東京測器（株）の各位に謝意を表します．

参考文献）

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物設計標準・同解説省力化軌道用土構造物，丸善(株)，pp.224-227，1999.12
- 2) 日本機会学会編：振動のダンピング技術，(株)養賢堂，pp.49-56，1998.9
- 3) 清水信行：振動解析，共立出版社(株)，pp.103-109 1997.4
- 4) 須長誠 他：道床・路盤の動的特性の解明，研究開発テーマ報告，(財)鉄道総合技術研究所，pp.2-5 1996.4

(2001.7.23 受付)

A STUDY ON DISPLACEMENT ESTIMATION MODEL FOR FALLING MASS AND THE GROUND USING A PORTABLE FWD

Masaki KAMIURA , Hiroaki OOISHI , Nagato ABE , Etsuo SEKINE

The whole system of a portable FWD equipment and ground was made to be the spring mass mode as the kinetic energy of the falling weight became impulsive force and it was produced a deflection of the ground. Simultaneous differential equations were deduced .At the next stage , it was introduced the model of the ground using rubber board. And , the loading was made to be the rubber board by the portable FWD equipment which installed the accelerometer in and the prediction of the displacement of the falling weight by double integral and deflection of the ground were compared with the calculation result from the measurement in respect of the acceleration. The calculation using the ballast of roadbed was similarly compared with the observation in the ground. The validity of the solution deduced from this model was confirmed.