

# 小型FWDを用いた地盤の評価に関する解析的検討

久保寺貴彦<sup>1</sup>・姫野賢治<sup>2</sup>・関根悦夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 工修 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>2</sup> フェロー会員 工博 中央大学理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>3</sup> 正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

FWD 試験において、同一の最大荷重であっても載荷時間・時間積が異なることは、最大変位の差異を生じ地盤の弾性係数と K 値の推定に影響を与えると指摘されている。小型 FWD を対象として、弾性モデルを用いた衝撃解析ではこれらの把握ができないことが検証された。本研究では、地盤と衝撃緩和材について粘弾性モデルを用いた衝撃解析により、同一の最大荷重に着目し載荷時間の変化が最大変位に与える影響、また、地盤の剛性、重錘の質量と落下高さの変化が載荷時間に与える影響を解析的に把握することができた。

**Key Words:** portable FWD, FEM, visco elasticity, impact analysis

## 1. はじめに

小型FWD(Falling Weight Deflectometer)は、重錘の落下により載荷板に衝撃荷重を発生させ、荷重と変位の時系列を測定する装置である。このときの最大荷重と最大変位から弾性係数Eと地盤反力係数K値を推定する。小型FWD試験は、車載タイプのFWDによる測定が困難な狭隘な箇所において地盤の剛性を測定することに用いられ、従来の地盤の支持力評価に用いる平板載荷試験に比べると、大掛かりな反力装置を必要としない、1点の測定時間が数分と短い、1~2人で測定が可能である。

小型FWD試験において、対象土の剛性に応じて、重錘の質量と落下高さを変化させることが可能である。このため、道路の平板載荷試験にてK値を算出するときに基準とされている沈下量に相当する変位とそのときの荷重を発生させることが可能である<sup>1)</sup>。

小型FWD試験は平板載荷試験と同等の評価が得られることが望ましいが、平板載荷試験が静的荷重によるものであるのに対し、小型FWD試験が衝撃荷重によるものであるため、最大荷重が同じであっても、地盤の剛性に依り、最大変位は小型FWD試験の方が小さく、地盤のK値は小型FWD試験の方が大きく評価されることがある。特にこれは地盤の剛性が高い場合、より顕著であることが指摘されている<sup>2)</sup>。

一般的に、FWDの測定において、重錘の質量と落下高さの変化や衝撃緩和材の剛性の変化などにより、同一の最大荷重であっても図-1に示す載荷時間(荷重が0から最大に至るまでの時間)と載荷時間積(荷重の載荷時間での時間積分値)が異なり、最大変位に差異が生じて、

弾性係数とK値の推定に影響を与えることが指摘されている<sup>3)</sup>。

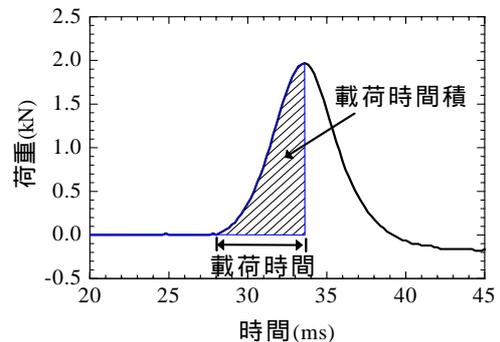


図-1 載荷時間と載荷時間積

そこで、筆者らは、小型FWD試験を対象とし、衝撃緩和材の剛性の変化が荷重と変位の時系列波形に与える影響を把握するため、弾性モデルを用いた衝撃解析を行った<sup>4)</sup>。しかしながら、影響を受ける荷重と変位波形は、ほぼ同じ割合でしか増減しておらず、K値に整理した場合、変化はあまり見られなかった。また、同一の最大荷重に着目した場合、載荷時間が変化しても最大変位の差異が見られなかった。これより、弾性解析においては、衝撃解析でありながら静的解析と変わらない結果であった<sup>5)</sup>。

そこで、本研究の目的は、地盤と衝撃緩和材について粘弾性モデルを用いた衝撃解析により、同一の最大荷重に着目し載荷時間の変化が最大変位に与える影響、また、地盤の剛性、重錘の質量と落下高さの変化が載荷時間に与える影響を解析的に把握することである。

## 2. 解析概要

### (1) 解析モデル

今回、対象とした小型FWDを図-2に示す。小型FWD試験において、EとK値の実用的に用いられている算出式の一例を式(1),(2)に示す。センサは載荷板中心にあるため、Burmister理論で $r=0$ とすると式(1)となる<sup>6)</sup>。

$$E = \frac{2(1-\nu^2)P}{\pi \cdot a \cdot D} \quad (1)$$

$$K = \frac{P}{A \cdot D} \times \frac{2a}{300} \times 10^3 \quad (2)$$

ここに、 $E$ :弾性係数(MPa)、 $K$ :地盤反力係数(GN/m<sup>3</sup>)、 $P$ :最大荷重(N)、 $D$ :最大変位(mm)、 $a$ :載荷板半径(mm)、 $A$ :載荷板面積(mm<sup>2</sup>)、 $\nu$ :ポアソン比

式(1),(2)から、対象土の弾性係数とK値を推定する際、同一の最大荷重であっても最大変位が異なると、推定値に差異が見られることが確認される。

解析は、LS-DYNAによる衝撃解析を行った。LS-DYNAは陽解法による動的なFEM解析プログラムであり、衝撃荷重が作用する現象の解析に優れており、自動車の衝突解析などに広く使用される。

小型FWDを対象とした有限要素分割を図-3に示す。解析モデルは軸対称とし、拘束条件は、回転軸：鉛直方向以外は拘束、底面：完全拘束、地盤の側面：半径方向拘束とした。重錘の初期条件については、解析時間の短縮のため、衝撃緩和材から高さ5mmの位置で、所定の高さからの自由落下に相当する初速度を与えて落下させた。解析結果については、荷重は載荷板下の接触面に着目し、変位は載荷板下中心の地盤に着目した。重錘と躯体および載荷板は、弾性体とし、衝撃緩和材と地盤は、粘弾性体とした。

粘弾性の構成式は、未知パラメータを少なくするため、3要素のKelvinモデル<sup>7)</sup>で表現した。解析に用いた3要素のKelvinモデルを図-4に示し、応力とひずみの関係を図-5に示す。図-4中の $E_1$ は弾性係数、 $\eta$ は粘性係数、図-5中の $E_0$ は初期弾性係数、 $E$ は後期弾性係数である。

$E$ を $E_0$ と $E_2$ の関係式で表すと式(3)となる<sup>4)</sup>。

$$E_\infty = \frac{E_0 \cdot E_2}{E_0 + E_2} \quad (3)$$

Kelvinモデルの構成式を式(4)に示す。

$$E(t) = E_\infty + (E_0 - E_\infty)e^{-\beta \cdot t} \quad (4)$$

ここに、 $\beta$ ：粘性項を含む定数

は、式(5)で表される。

$$\beta = \frac{1}{\tau \cdot E_\infty / E_0} \quad (5)$$

ここに、 $\tau$ ：緩和時間

$\tau$ は、式(6)で表される。

$$\tau = \frac{\eta}{E_2} \quad (6)$$

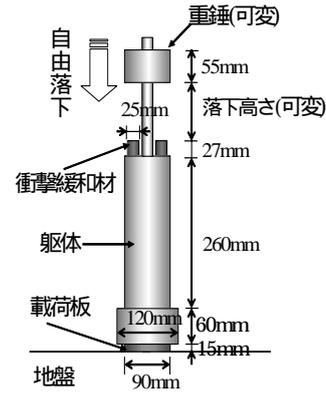


図-2 小型FWD

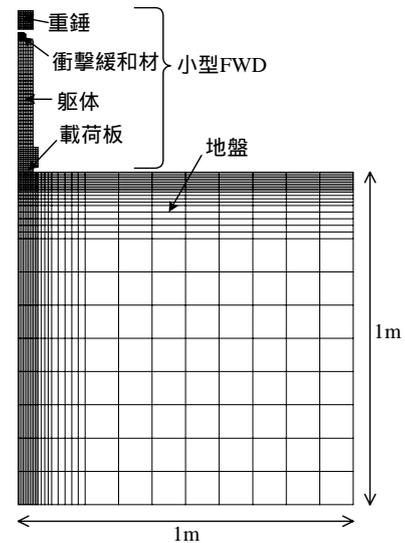


図-3 有限要素分割

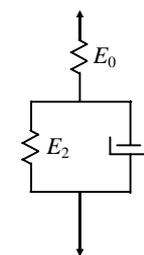


図-4 3要素のKelvinモデル

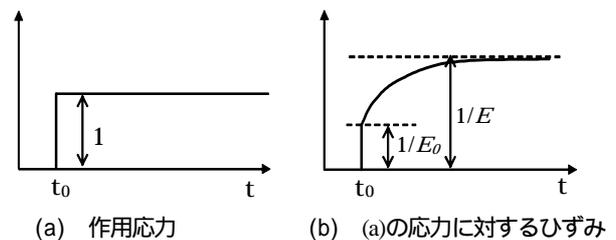


図-5 応力とひずみの関係

表-1 弾性体の物性値

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比	$E$ (MPa)
載荷板	7.85	0.3	$2.1 \times 10^5$
躯体	5.05	0.3	$2.1 \times 10^5$
重錘	可変	0.3	$2.1 \times 10^5$

表-2 粘弾性体の物性値

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比	$E_0$ (MPa)	$E$ (MPa)	(1/ms)
地盤	2.03	0.3	200	23.4	3.8
衝撃緩和材	0.96	0.49	10.3	6.43	0.0965

図-5(a),(b), 式(4)から, 用いた粘弾性の構成式には, 弾性係数が載荷時間に依存する. 式(4)~(6)から, 粘性係数は, 載荷時間の係数に含まれ, 粘性係数が大きくなると, 載荷時間にかかる係数が小さくなり,  $E(t)$ が $E$ まで収束するに要する載荷時間が長くなる.

## (2) 物性値の設定

解析に用いた弾性体の物性値を表-1に示す. 載荷板の物性値は, 鉄をもとに設定した. 解析モデルの小型FWDは, ロッド部分や躯体内部を表現していないので, 解析上の総質量を実際の小型FWD総質量に相当させる補正を躯体の密度で行った. 重錘の質量変化は, 解析上, 密度を変化させた.

解析に用いた粘弾性体の物性値を表-2に示す. 表-2に示す地盤の $E_0$ と $E$ は実験値から求めた. 地盤の $E_0$ は三軸圧縮試験,  $E$ は平板載荷試験を行った結果を参考にして設定した. 地盤の三軸試験の結果を図-6に示す<sup>8)</sup>.

地盤の $E_0$ は, 図-6の軸ひずみが $1 \times 10^{-5}$ レベルの弾性係数200MPaを用いた.  $E$ を設定するため, 平板載荷試験の最大荷重と変位を用い, 地盤の弾性係数の静的逆解析を行った. この結果から $E = 23.4\text{MPa}$ とした.

表-2に示す地盤の  $E$  は, 載荷板上に実測の荷重波形を入力し,  $E$  を変化させたとき, 実測の変位波形と近似する値を用いた.

表-2に示す衝撃緩和材の $E$ は一軸試験を行った結果を参考にして設定した. 衝撃緩和材の一軸試験の結果をバネ値と変位について整理したものを図-7に示す<sup>9)</sup>. なお, 衝撃緩和材はブチルゴム, 高さ26.5mm, 半径22.0mmである.

弾性係数とバネ値の関係式を式(7)に示す<sup>10)</sup>.

$$E = k \times h / A \quad (7)$$

ここで,  $k$ : バネ値,  $h$ : 衝撃緩和材の高さ,  $A$ : 面積

衝撃緩和材のバネ値は, 図-7において, 収束した値の123N/mmとした. 実際の小型FWDの衝撃緩和材は3個であるが, 解析上では, 衝撃緩和材1個のバネ値が3個分に相当するようにした. このため, 衝撃緩和材の $E$ は, 式

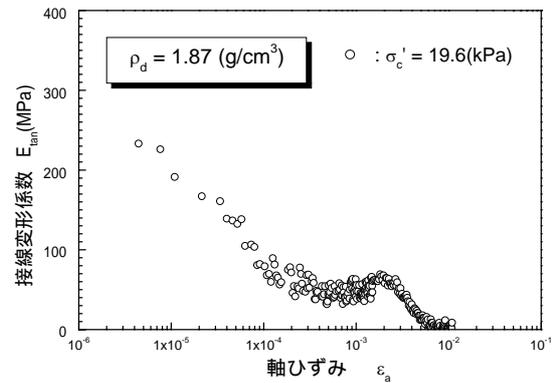


図-6 地盤のひずみと弾性係数

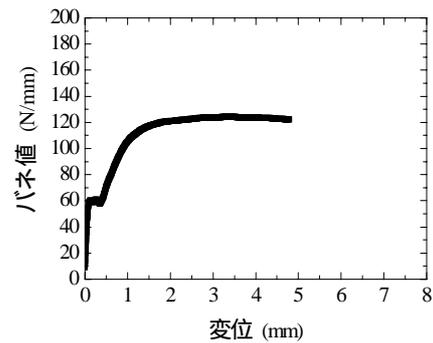


図-7 衝撃緩和材の変位とバネ値

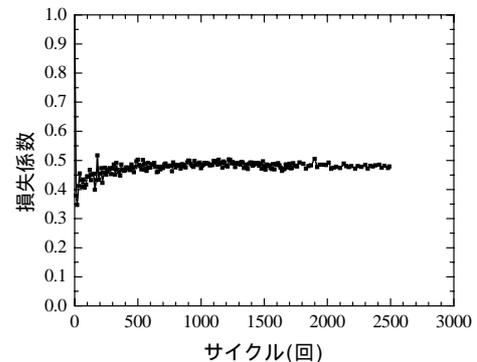


図-8 衝撃緩和材のサイクルと損失係数

(7)において,  $k = 369\text{N/mm}$ ,  $h = 26.5\text{mm}$ ,  $A = 22^2 \text{ mm}^2$ を用いて,  $E = 6.43\text{MPa}$ とした.

衝撃緩和材の $E_0$ は, ゴム硬度65のときの $E_0/E$ の比率1.6から求めた<sup>10)</sup>.

表-2に示す衝撃緩和材の  $E$  を得るために, 動特性試験を行った. 荷重 0.7kN, 周波数 20Hz 時の動特性試験から得られた損失係数  $\tan \delta$  を図-8に示す.

図-8より, 損失係数  $\tan \delta = 0.479$  とした. 損失係数と周波数および緩和時間との関係式を式(8)に示す.

$$\tan \delta = \frac{1}{(2\pi f) \cdot \tau} \quad (8)$$

衝撃緩和材の $E_0$ と $E$ を定めたので,  $E_2$ が定まり, 周波数20Hz時の損失係数が0.479であるので, 衝撃緩和材の  $E$  は, 式(6)と(8)から定めることができる.

### 3. 実測と解析結果の比較

重錘の質量3kg, 落下高さ100mmにおいて, 表-1と2の物性値を用い, 荷重~変位曲線が実測値に一致するように構造減衰 0.001 とした. また, 弾性解析では, 最大荷重と最大変位が実測値に一致するような弾性係数, 減衰定数等を設定した. 実測と解析の荷重~変位曲線を図-9に示す.

図-9より, 弾性解析では, 最大荷重と最大変位が実測値に一致したが, 荷重~変位曲線が一致するまでには至らない. 粘弾性解析を行ったことで, 最大荷重と最大変位に至る経路が近似できたことから, 荷重を作用させた時の地盤の挙動を, 実測値に近いものとしてシミュレートが可能となった.

図-9で, 解析値の実測値で荷重が除荷された時点の変位量が約3倍となる理由としては, 実際の対象土は転圧されており, 除荷時には弾性特性が強いと考えられる.

### 4. 地盤剛性, 重錘の質量, 落下高さが測定値に与える影響

小型FWDにおいて, 載荷時間が変化する要因は, 重錘の質量と落下高さの関係, 地盤の剛性, 衝撃緩和材の剛性などが指摘されている. 衝撃緩和材の剛性については, 実験や解析が行われており, ここでは, 重錘の質量と落下高さ, 地盤の剛性が載荷時間に与える影響について検討を行った.

解析に用いた3種類の地盤の剛性を表-3に示す. Case B は表-2で定めた地盤の物性値を用い, Case A はCase B の剛性を2倍とし, Case C はCase B の剛性を0.5倍とした. なお, 粘性係数は一定とした. このとき, 剛性を2倍すると, 式(3),(5),(6)から,  $t$  は2倍となる.

表-3に示す3種類の地盤それぞれにおいて, 重錘の質量を4種(3, 5, 10, 15kg), 落下高さを4~7種(25, 50, 100, 200, 300, 500, 700mm)変化させて解析を行った.

それぞれの解析結果として得られた荷重と変位の時系列波形から, 最大値, 載荷時間, 載荷時間積について整理を行った. 重錘の質量をパラメータとして, 落下高さとの関係を図-10に示し, 落下高さとの関係を図-11に, 落下高さとの関係を図-12に, 載荷時間積と最大変位との関係を図-13に, 地盤剛性と載荷時間との関係を図-14に示す.

最大荷重と載荷時間・時間積を既往の事例<sup>(11),(12)</sup>と比較した場合, 地盤を対象とした実測値では最大荷重2~8kNに対し, 載荷時間が4~12ms, 載荷時間積が10~30N・sであり, 解析値はこれらの範囲内にあることから信憑性は低いと考えられる.

最大荷重が一定で, 重錘の質量と落下高さが変化した場合, 最大変位・載荷時間などの測定結果に与える影響を検討するため, 図-10から, 同一の最大荷重に着目できる重錘の質量と落下高さの関係を破線で示す.

着目した同一の最大荷重は, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0kNである. 図-10から得た着目する同一の最大荷重での重錘と落下高さの関係を図-11~13についても破線で同様に示した.

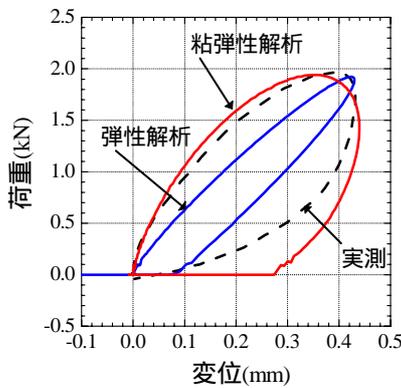


図-9 荷重~変位曲線

表-3 地盤の剛性

地盤	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン 比	E <sub>0</sub> (MPa)	E (MPa)	(1/ms)
Case A	2.03	0.3	400	46.8	7.6
Case B	2.03	0.3	200	23.4	3.8
Case C	2.03	0.3	100	11.7	1.9

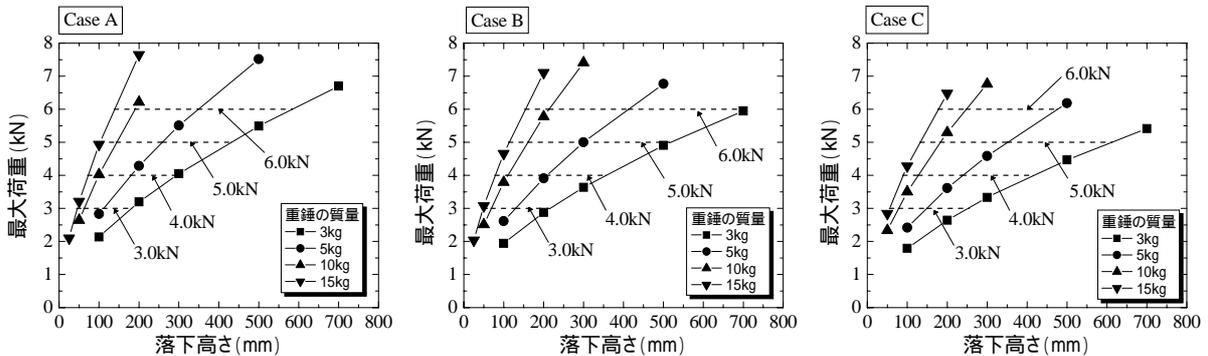


図-10 落下高さと最大荷重 (地盤: Case A, B, C)

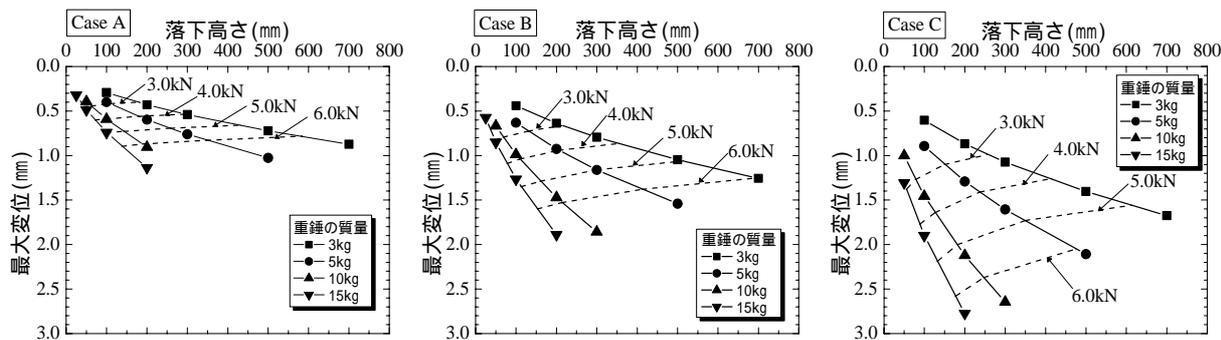


図-11 落下高さと最大変位 (地盤：Case A, B, C)

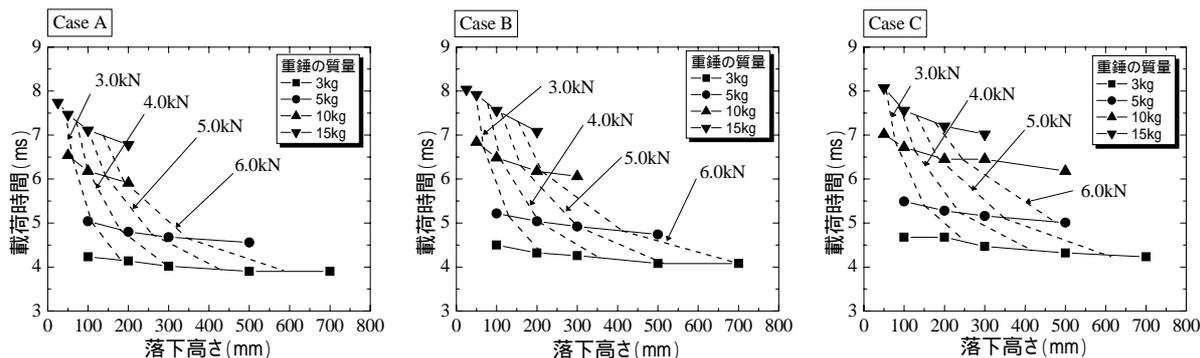


図-12 落下高さと載荷時間 (地盤：Case A, B, C)

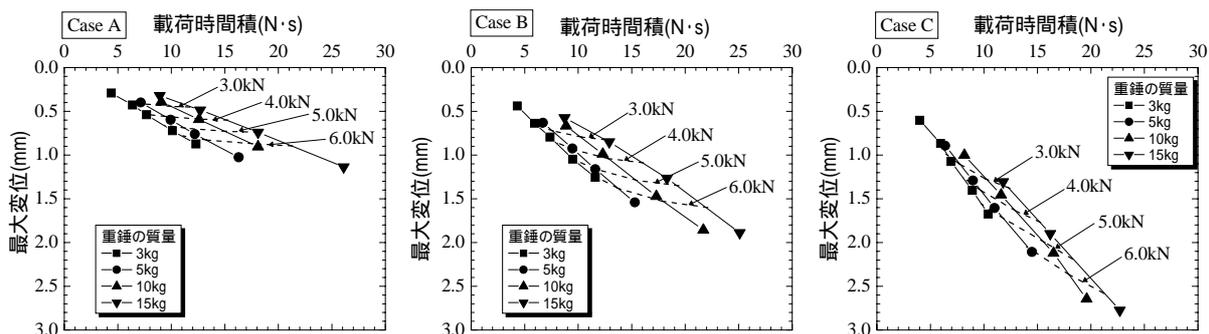


図-13 載荷時間積と最大変位 (地盤：Case A, B, C)

図-11から、同一の最大荷重に着目した場合、最大変位は重錘の質量が大きく落下高さが低いほうが大きく、この傾向は地盤の剛性が低いCase Cで顕著である。同一の最大荷重に着目した場合、重錘の質量と落下高さが異なると最大変位は異なるので、式(1),(2)から弾性係数とK値を算出すると、同一の地盤であってもPが一定でDが変化し、推定値の差異が生じることがわかる。この傾向は地盤の剛性が低いCase Cで顕著であることがわかる。

実測において落下高さが高くなると、載荷時間はわずかに減少する傾向にある<sup>13)</sup>が、図-12から、解析においてもその減少傾向が認められた。さらに、図-12から、重錘の質量が大きくなると載荷時間が増加する傾向にある。載荷時間に与える影響は、重錘の質量の変化のほうが落下高さの変化より大きいことがわかる。地盤の剛性によらず、同一の最大荷重に着目した場合、重錘の質量と落

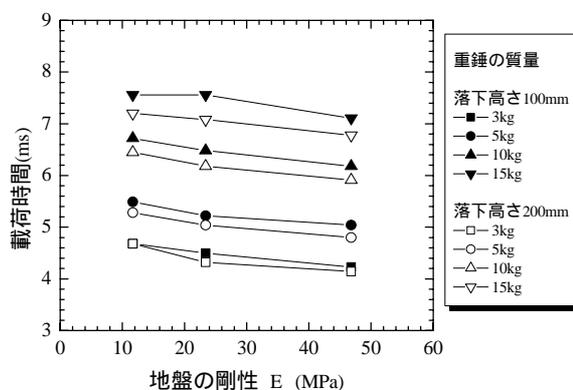


図-14 地盤の剛性と載荷時間

下高さが異なると載荷時間は異なり、重錘の質量が大きく落下高さが低いほうが、載荷時間は長いことがわかった。

図-13から、重錘の質量が大きくなると載荷時間積は大きくなる傾向がわかる。地盤剛性によらず、同一の最大荷重に着目した場合、重錘の質量と落下高さが異なると載荷時間積は異なり、載荷時間積の増加とともに最大変位は大きく、この傾向は地盤の剛性が低いCase Cで顕著であることがわかる。このため、地盤剛性が低いと、推定値に差異が生じやすいと考えられる。

図-14から、地盤剛性が高くなると、重錘の質量と落下高さによらず、全体的に載荷時間は短くなることわかる。

## 5. 結論

本研究では、小型FWD試験時において、粘弾性モデルを用いた衝撃解析により、以下の結論が得られた。

- 3要素のKelvin モデルを用いた粘弾性解析を行うことで、最大荷重が同一であっても、載荷時間が異なり、最大変位が異なることが確認された。
- 重錘の質量・落下高さ・地盤の剛性の変化が、最大変位・載荷時間・時間積に与える影響の把握が可能となった。
- 所定の最大変位を得るために、地盤の剛性に応じた載荷荷重設定の際、重錘の質量の変化は、落下高さの変化より載荷時間・時間積が大きく変化するので、重錘の質量より落下高さを変化させたほうがよい。このため、測定条件の変化による測定値の補正方法の検討を進めていく上で、用いる重錘の質量を限定したほうがよい。

## 6. おわりに

地盤の弾性係数とK値の推定において、荷重と変位の時系列波形の動的データから最大値を取り出し静的データに置き換えて算出している。このため、同一の最大荷重に着目した場合、載荷時間が異なることで、最大変位が異なり、弾性係数とK値の算出に差異が生じる。今後、重錘の質量、落下高さ、地盤の剛性などの測定条件の変化によらず、推定値の差異減少を目的とし、測定された時系列データから動的逆解析を進めていきたい。

## 参考文献

- 舗装工学委員会編：FWDおよび小型FWD運用の手引き，土木学会，pp.69-71，2002.
- 鉄道総合技術研究所編：鉄道建造物等設計標準・同解説 省力化軌道用土構造物，丸善，pp.220-236，1999.
- 姫野賢治，上島壯，雑賀義夫：FWDの荷重波形が舗装各層の推定弾性係数に及ぼす影響，日加科学技術協力協定寒冷地舗装会議発表論文集，第6回，pp.109-118，1996.
- 久保寺貴彦，関根悦夫，桃谷尚嗣，姫野賢治：小型FWDに関する衝撃解析 - 衝撃緩和材の剛性の影響 - ，土木学会年次学術講演会講演概要集，第56回，第部門，pp.114-115，2001.
- 久保寺貴彦：小型FWDに関する衝撃解析，中央大学卒業論文，pp.39-42.2001.
- Zdenek P.Bazant, Luigi Cedolin：STABILITY OF STRUCTURES Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories, oxford, pp.586-589，1991.
- 東京測器研究所：FWD-Lightによる小型FWD試験法(地盤編)，p.17
- 桃谷尚嗣，関根悦夫，鴨智彦，村本勝己：静的載荷および動的載荷による地盤変形特性の解析的検討，地盤工学研究発表会，第35回，地盤工学会，pp.1619-1620，2000.
- FWD研究会：2001年度報告書 FWDに関する研究，p.9-34，2002.
- 宇佐美民雄，大石不二夫：ゴム材の選び方・使い方，pp.25-29，オーム社，1978.
- 島津義輝，阿部長門，関根悦夫，桃谷尚嗣，小林宗弘，岡野晴樹：衝撃緩和材の剛性が小型FWDの測定値に及ぼす影響の実験的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，第56回，第部門，pp.116-117，2001.
- 丸子晃弘，阿部長門，島津義輝，関根悦夫，大塚勝：小型FWDの測定波形による機種間の比較，土木学会年次学術講演会講演概要集，第57回，第部門，pp.889-890，2002.
- FWD研究会：2001年度報告書 FWDに関する研究，p.9-9，2002.

# ANALYTICAL STUDY ON EVALUATION OF SUBGRADE MODULUS USING PORTABLE FWD

Takahiko KUBODERA, Kenji HIMENO and Etsuo SEKINE

It has been indicated, during FWD test, that variations of loading time and time integration of load have influences on the estimated elastic modulus and K-value of subgrade even if the peak load is same. The above indication could not be found from the impact numerical FE analysis of elastic model for the portable FWD. In this study, analytical study has been carried out to investigate the influences of various parameters, such as the rigidity of subgrade, the mass and drop height of falling weight, on the loading time and time integration of load from the numerical analysis of visco-elastic subgrade model.