HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	地盤剛性評価に対する載荷時間の影響
著者	上浦，正樹
引用	北海学園大学学園論集，139：89-95
発行日	2009-03-25

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

地盤剛性評価に対する載荷時間の影響

上　浦　正　樹*

1　はじめに

土の変形特性のなかで土の剛性は土構造物がその機能を維持する上で重要な要素である。したがって道路や鉄道の建設にあたり，路盤を構成する土構造物の剛性を評価し，この剛性が所定の範囲内となるように適切に施工することは構造物全体の維持管理に関して重要とポイントとなる。しかし，現段階で一般的に行われている主な方法は土構造物の締固め管理方法[1]であり，例えば90%以上と設定した締固め度を最低値としてこれ以上を確保するように締固めを行うものである。だが，土の変形強度特性は締固め度に加え，乾燥密度，粒度，粒径，粒子形状に依存している[2]ことを考慮すると，締固め管理方法は土構造物の剛性を直接管理するものではない。その意味で土構造物を建設する際で適切な剛性情報をには，施工現場で載荷し変形を測定して剛性を評価する原位置載荷試験が重要な方法である。

路盤などの地盤剛性を推定する原位置載荷試験には平板載荷試験が一般的である。この方法は載荷用ジャッキの反力を受けるフレームにトラックなどの重量車両などを用い，ジャッキで載荷しながら変位を測定して土構造物の変形特性を求めるものである。このようなプロセスを経る必要があることから，測定時に多くの手間と長い時間を要することになる。これを改善する方法として小型FWDが開発された。この装置は重錘を自由落下させ，そのときの地盤の変位を測定することで効率よく地盤の変形特性を推定できるものである。しかし，小型FWDの載荷時間が6 msec～10 msec程度の極めて急速な載荷試験であり，一方平板載荷試験は2分～5分程度と擬似静的な載荷試験である。この結果，載荷板の平均的接地圧を変位で除したK値を平板載荷試験でK_{30}値，小型FWDのK値をK_{PFWD}値とすると，粘土ではK_{30}値とK_{PFWD}値がほぼ同じであり，砂ではK_{PFWD}値がK_{30}値の1.5倍，礫ではK_{PFWD}値がK_{30}値の2倍との換算係数（γ）が提案されている[3]。しかし，小型FWDと平板載荷試験での違いの解明についてはほとんどされていないのが現状である。また，土の種類ごとに換算係数が限られた試験データを統計的に定めたものであることから土全体で統一して精度の高い地盤剛性を評価する方法の確立が必要である。

＊）北海学園大学工学部社会環境工学科
Department of Civil Environment Engineering, Hokkai Gakuen Unversity

よって本稿では，土の種類ごとに示されている K_{PFWD} 値の K_{30} 値への換算係数(γ)に対する検討するうえで必要になる地盤剛性評価に対する載荷時間の影響について考察することとした。

2　最近の研究

小型FWDが開発されてほぼ15年を経て，この間に現場の利用が拡大されつつある。日本においても土木学会から小型FWDの運用マニュアル[3]が作成されてから5年を経ている。このように利用が定着し現場データが蓄積されると剛性評価の精度について種々の問題点が明らかになってきた。これを集約すると次のようになる。

その1つは，載荷時の応力とひずみ状態の不均一性に関するものである。一般に地盤の載荷試験では載荷時に地盤内の応力とひずみ状態が不均一に変化し，やがて局所的に降伏が生ずる。特に砂，礫などの非粘性地盤で小型FWDや平板載荷により載荷する場合には載荷板に接する地盤表面では，境界の不連続性によって応力とひずみが不均一になることや局所的に降伏する傾向が大きい。また，載荷応力は載荷板を介して地盤表面に伝達され，さらに地盤内へ伝播していくが，地盤表面での応力の不均一性や降伏の程度によって地盤内の応力や伝播範囲で影響を受けることになる。よって，載荷板に接する地盤表面の応力状態の分布が K_{PFWD} 値と K_{30} 値との換算係数(γ)に影響を与え，結果として精度低下の原因となるものと考えられる。

2つ目は，応力・ひずみ関係における載荷速度依存性に関するものである。小型FWDの載荷波形と変位波形とではピークの時間が異なることが多くみられ，これらの波形に対して周期が変化しない前提で0－P時間（開始からピークまでの時間）を指標としている。

最近になって，これらの現象について部分的ではあるが研究成果が報告されている。その1つは非粘性体である砂に応力・ひずみ特性に関するもの[4]である。この論文では砂地盤内に深さ1200 mmの土槽を用いて加速度計を10 cm～50 cmまで10 cmごとに設置し，小型FWDと平板載荷装置を用いて砂地盤のひずみ・応力関係を論じている。そのなかで砂について材料粘性を想定している点に特徴がある。その根拠として，砂の三軸圧縮せん断試験において「軸ひずみ速度の急激な増加に伴って応力が弾性挙動にように増大し，その後軸ひずみの増加に伴って減衰する」現象をTESRA（Temporary Effects of Strain Rate and strain Acceleration）粘性[5]に相当するものとしている。このように小型FWDは平板載荷に比べ $1/10^4$ 倍に載荷時間しか要しない急激な載荷であることから，TESRA粘性を仮定することで K_{PFWD} 値と K_{30} 値との換算係数(γ)の意味について説明することができる。この現象は杭の静的な載荷と動的な打ち込み載荷でも報告されている[6]。この論文では α を加速度，ν を速度，杭頭での載荷荷重 F_{stn} を杭の慣性力 $M\alpha(t)$ と地盤の抵抗力 F_{siol} の和で表し，地盤の抵抗力を静的抵抗力（$F_w(t)$）と動的抵抗力（$F_\nu(t)$）に分け，減衰係数 C を用いて次式で示している。

$$F_{soil}(t)=F_w(t)+F_\nu(t)=F_w(t)+C\cdot\nu(t) \tag{1}$$

この式からも動的載荷状態では載荷荷重が大きいことが分かる。

またこの論文[4]では(1)式の動的抵抗力の影響を小さくするために，「a）載荷速度の影響と，b）地盤の動的挙動の影響を」できるだけ小さくする載荷荷重を接地面積で除した平板平均圧力と平板沈下量に着目して時刻歴データに基づき検討している。その方法は小型 FWD の重錘落下荷重を緩衝するバッファの硬度を通常の 1/3 に柔らかくすることで平板平均圧力と平板沈下量に近づけようとするものである。その結果，平板載荷の結果を予測できるとしている。だが，この論文でも述べられているようにこの手法が種々の土の適応するためには，バッファの硬度を調節する必要がありそのためにデータの蓄積が望まれるとしている。だが，小型 FWD と平板載荷の剛性評価方法に着目し，式(1)の動的抵抗力を粘性抵抗力のうち TESRA 粘性として結びつけて論じた点は評価できる。ただ，載荷板に平均圧力を用いた点で改善が必要と思われる。

小型 FWD の載荷板の接地圧の分布に着目した論文が 2009 年 2 月米国土木学会論文集（ASCE）に発表された[7]。米国では小型 FWD による地盤の剛性評価する方法として変形係数 E をもちいている。この算出には載荷荷重と変位に接地圧分布の形状からもとまる係数Aを用いている。この論文では 5 種類の小型 FWD を用いて載荷板の直径が 200 mm，変位 1.25 mm での試験結果を示している。また，モデル地盤を用いており，その深さは 1.4 m の砕石上に粘土（層厚 75 cm），上部が砂（25 cm と 47 cm），下部が粘土（25 cm）の複合層からなる各上部層を構築している。この上部層には土圧計と変位計が接地されている。接地圧についてはテルツアギが 1943 年に発表した弾性地盤上の剛性板とたわみ性板による載荷による分布と砂地盤上の剛性基礎の接地圧を実験的に求めた結果から推定された放物線形状の分布を採用している。以上の接地圧分布に基づき弾性理論によって地盤内応力の理論解を導いている。これらの結果から深さ 30 cm 以下では載荷条件によらず同じ鉛直応力であるが，それよりも浅い地点では剛性載荷板による接地圧分布による地盤内応力が最も小さく，放物線の接地圧分布による地盤内応力が最も大きいことが示されている。また実際の現場試験の結果では，粘土層の地盤内応力は変位が 1.25 mm の 5 割程度で剛性載荷板の接地圧分布による理論曲線上に位置しているが，さらに大きい変位になるに従いとたわみ性載荷板の各接地圧分布の中間に位置していることが述べられている。砂層 25 cm ではたわみ性載荷板，砂層 47 cm では放物線による各接地分布上に位置していることを提案している。以上から，土の種類と変位のレベルで接地圧分布の形状に変化することに着目した点は評価できる。しかし，実際の接地圧分布を求めていない点でまだ研究段階であると思われる。

そのほかの研究事例として次のようなものがある。載荷板の接地圧に関する研究の例にオランダの研究がある[8]。ここでは直径 300 mm の載荷板上の速度計を設置し，その積分で変位を求めていることに関して，地盤の剛性の不均一や重錘の落下ガイドの傾きなどを考慮すると中心から半径の 80％離れた位置で測定することが最も適切であるとしている。

3　本研究の着眼点

以上の研究結果からもわかるように，小型 FWD を種々の土地盤の剛性評価に用いる場合に

K_{PFWD} 値と K_{30} 値の換算係数（γ）を用いることで実用上有効であることが分かる。しかし，建設現場の土を利用する場合に粘土，砂，礫という典型的な地盤材料とは限らず，この換算係数（γ）を決めることが困難であることが多い。そこで小型FWDを用いて簡便な方法で精度よく地盤剛性を決定する方法として急速な載荷試験である小型FWDと擬似静的な載荷試験である平板載荷試験から求まる剛性値の違いの原因を応力・ひずみ関係で載荷速度依存性にあるとして研究を進める。これは文献5で示したように，砂，礫などの非粘性材料であってもみかけの粘性が存在している仮説を採用する。これは粒径の分布が偏っていて角ばった粒子で顕著に認められTESRA粘性として知られているものである。この粘性の影響で載荷速度が早いほどひずみ速度が速くなり，みかけの粘性の影響で現れることになる。

以上に基づき，ひずみレベルを一定にするために載荷板の変位が同じ状態において載荷板の接地圧を測定し，地盤表面の応力状態を検討することとした。具体的には，小型FWDと平板載荷試験によって発生する地盤内の鉛直応力を測定し，地盤内の応力分布の違いを検討し，みかけの剛性が大きくなる場合の地盤内の鉛直応力を求めることとした。ここで，今までの研究実績を考え合わせると土とは粒径が異なり粒子のテクシュチャーに差がある粒状体であることが，載荷時間によって剛性に大きな影響を与えることに行き着く。一方，地盤の剛性で評価すべきは載荷時間が長いことがより現実であることがわかる。つまり，短時間での測定は効率性が高く数多くの測点数を確保する上で有効であるので精度を増す一方，剛性評価では現実性から遠のくことで精度と剛性評価はトレイドオフの関係にあることが分かる。そこで，工学の面からそれぞれの長所を多少犠牲にしながら両者の成り立たせる方策を検討することとした。

4　粘性を考慮する動的載荷・変位現象のモデル化

道路・鉄道では路盤・路床では砕石などの粒状体が主体であるので，礫についてモデルを作成した。また小型FWDと平板載荷を比較する上で着目する箇所は接地圧と地盤内応力の2項目ある。最初に接地圧を比較すると縁端部で応力が集中している。これは剛性載荷板により弾性体に載荷する場合によく見られる現象である。そのことから類推すると，粘土地盤では載荷により弾性的な挙動を示している。次ぎに平板載荷と小型FWDにおける接地圧の違いである。載荷によって1.25 mmの変位を発生させるために動的載荷である小型FWDと擬似静的載荷である平板載荷を用いている。

1）接地圧の分布

直径30 cmの載荷板を用いて圧力センサーを載荷板の中心から0 cm，6 cm，12 cm，3.5 cmの位置に設置し接地圧を測定した。この結果，平板載荷では載荷時間45 sec，変位量0.22 cmでは粘土の接地圧を示す端部の接地圧が高い傾向を示した。さらに載荷時間75 sec，変位量0.55 cmではさらに端部が大きい原点を載荷点中心とする放物線に似た接地圧の形状を示した。しかし，

載荷時間 120 sec，変位量 1.25 mm では全体のほぼ均等に等分布荷重に近い分布形状で端部が減少し中央部が増加する傾向を示した。これは載荷板端部から徐々に降伏した影響が表れているものと思われる。このような傾向は，粘土では端部が大きい放物線の傾向を維持していくものの，砂，礫と粒子の形状が大きくなるにつれて端部の降伏の傾向が大きくなる傾向を示していた。一方，小型 FWD による急速載荷では，載荷時間 5 msec，変位量 0.23 mm では変位量は小さいものの平板載荷に近い形状を示した。次ぎに載荷時間 6 msec，変位量 0.61 mm では接地圧分布では端部で降伏する傾向が強まり載荷中心が頂点となる放物線の傾向が現れ，載荷時間 7 msec，変位量 1.25 mm では載荷中心が頂点となる放物線状の接地圧分布となった。このように載荷時間の違いによって接地圧分布に大きな違いが認められた。これは非粘性体である礫が載荷時間の違いによって異なる挙動を示すことから TESTA 粘性の現象を示すものと思われる。

このような粘性について　粒状体として剛性評価を見出すために，実験結果を反映したモデルを使用することとした。そこで粘性を考慮する動的載荷・変位現象を扱う FEM[9] を導入することとした。ここで，2 次元のバネマス系の運動方程式において粘性を考慮すると運動の減衰現象を表す必要がある。このような現象を数式化する場合に，一般的には速度に比例する粘性減衰として取り扱われている[10]。この減衰比には質量 m，粘性減衰係数 c，バネ係数 k を用いて次の 2 方法がある[11]。

$$D=\frac{c}{2\sqrt{mk}} \qquad D'=\frac{c'}{2k}$$

後者は前者と異なり質量が減衰比に影響を与えることがないので系全体の変形特性を表現する方法である。この考え方を対象の FEM[9] では用いており，応用して減衰マトリクス C は剛性マトリクス E の 0.5%を採用し，この論文で取り扱っている実際の事例では礫の弾性係数 196 MPa に対する減衰係数は 0.98 MNs/m であった。

2）地盤内応力

本研究室では深さ 50 cm で粘土，砂，礫の 3 種類の地盤を構築し土圧計を用いて小型 FWD と平板載荷試験における載荷時の地盤内の圧力分布を測定し各種土のコンター図を求めている。これらの結果と動的 FEM を用いて小型 FWD と平板載荷試験のそれぞれの載荷時間に対応する載荷条件を模擬し，接地圧の分布で発生する地盤内応力のコンター図と実験値でのコンター図と比較した。

この結果から次のことが明らかになった。

a）粘土地盤

粘土地盤においては小型 FWD と平板載荷とは接地圧の分布を反映して載荷板端部の影響が深さ 10 cm 以下に見られた。しかし，深さ 10 cm を超えると同一深さで載荷点中心付近に最大値が

現れる傾向にあった。一方，FEM解析でも同様の傾向が認められ，載荷板端部の影響が深さ10 cm以下に現れた。しかし，深さ10 cmを超えると同一深さで載荷点中心付近に最大値が現れる傾向にあった。

b）礫地盤

小型FWDの接地圧分布では接地圧分布では端部で降伏する傾向が強まり載荷中心が頂点となる放物線の傾向が現れ，全体の荷重は平板載荷の2.3倍であった。その結果，地盤内圧力は小型FWDが平板載荷よりも卓越する傾向がみられた。これは，動的な載荷によって端部よりも載荷点中心に集まる傾向が強いため結果として深さ方向により集中して荷重が伝播するものと思われる。

5　おわりに

以上の結果から次の結論を導きだした。

1）平板載荷試験でK_{30}値，小型FWDのK値をK_{PFWD}値とすると土の種類によってこれらのK値に差が発生するのは接地圧の分布に関係している。

2）本研究で用いた動的FEMはよく小型FWDと平板載荷試験の変形強度特性を求めるのに有効であることが明らかになった。

今後は，平板載荷試験に実用上近似できる皿ばねバッファのばね係数を定め，静的と動的の差があまりなく，かつ短時間で簡易に測定できる小型FWDとしていきたいと考えている。

引用文献

1）地盤工学会：地盤工学ハンドブック，地盤工学会，pp 582-584，1999.11

2）平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集C，Vol 64　No 2，pp 253-266，2008

3）土木学会舗装委員会編：FWDおよび小型FWD運用の手引き，土木学会，pp 73-74，2002.12

4）平川大貴，増田直哉，龍岡文夫，川崎廣貴：地盤剛性評価法としてのFWD試験と平板載荷試験の関係の検討，地盤工学ジャーナル，Vol 3，No 4，2008.12，pp 307-320

5）Tatsuoka, F., Ishihara, M., Benedetto, H., and Kuwano, R.,: Time-dependent deformation characteristics of geomaterials and their simulation, *Soils and Foundations*, Vol 42, No 2, pp106-132, 2002

6）加藤一志，堀越研一，松本樹典，日下部治：杭のスタナミック試験結果の解釈法，土木学会論文集Ⅲ－47，No 624　2，pp 267-282，1999

7）Mooney, M.A. and Miller, P.K.: Analysis of Light Deflectometer Test Based on In Situ Stress and Strain Response ASCE 2009. Feb. pp199-208

8）Christ van Gurp & Jacob Groenedijk: Experience with various types of foundation tests, Unbound Aggregates in road construction, 2000.6, pp239-246

9）董勤喜，八谷好高，坪川将丈，松崎和博：三次元有限要素法による空港舗装構造の数値解析，国土交通省技術政策総合研究所資料，No 101，2003.6

10）土木学会編：土木工学ハンドブック，土木学会，p 990，1989.11
11）石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp 47-48，1981.3