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	地盤剛性測定装置の研究
著者	上浦，正樹；KAMIURA，Masaki
引用	北海学園大学学園論集(146)：45-51
発行日	2010-12-25

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

地盤剛性測定装置の研究

上　浦　正　樹

1．概　　要

道路や鉄道などの構造物に対して建設時における土構造物の剛性を適切に評価し，剛性値を所定の範囲内に施工することはメンテナンスコストを軽減するうえで重要な点である。土の剛性は締固め度，乾燥密度，粒度，粒径，粒子形状などに依存している[1]ので，剛性に関する情報を得る場合には，現場で載荷し地盤の変形を直接求める原位置載荷試験が望ましいとされている。このような条件を満たす原位置載荷試験として従来から平板載荷試験（以下平板載荷とする）がある。この装置は反力フレームが必要であり，測定時に載荷を手動で行い，計測時にも人の手で行うことから多くの手間と時間を要している。これに代わるものとして反力フレームを用いずに重錘を自由落下させ，載荷荷重と地盤の変位を自動計測することで効率よく地盤などの剛性を推定できる小型 FWD（以下では PFWD とする）が導入され，日本をはじめ欧米においても拡大されつつある[2]。

1.1　地盤の支持力方法

地盤の支持力評価を推定するには，一般的に Terzaghi の支持力式による方法と平板載荷験による方法がある[3]。この Terzaghi の支持力式では地盤が理想的な剛塑性的な性質をもつことが前提である。この剛塑性の仮定は一般的な基礎構造で接地面が傾かずに沈下する地盤の全般破壊に相当する[4]。ここで解析の上で基本となるパラメータの一つはせん断抵抗角 ϕ で，これを求める方法には室内試験による三軸圧縮試験がある[5]。山口は深基礎の支持力評価を載荷時に発生するくさびを半球状と仮定して地盤の支持力の扱いを弾塑性の押拡げ問題として取り扱い，粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ を用いて支持力を推定する方法を示している[6]。浅い基礎では帯基礎と円形基礎では破壊時の破壊面の断面形状は異なっている。帯基礎では載荷の初期の段階で垂直断面において基礎底面下に三角形のくさびが形成される[7]。さらに沈下が進むと，このくさびからせん断による体積膨張を起こす領域であるせん断帯が発生してすべり面を構成し，さらに発達して破壊に至る[8]。一方，円形基礎では体積膨張を起こす明確な不連続な面は存在せず連続的なせん断変形による破壊が発生する。このすべり線のＸ線写真から載荷によって円形基礎底面から発達するくさび

の形状は三角錐と楕円錐のほぼ間にあることが推定されている[9]。さらに円形載荷板により粒状路盤上で載荷されると大きく 2 要素によって変位が引き起こされる。その一つは粒状路盤内の圧縮によるものであり，二つ目にはせん断滑りによる側方流動によって粒状体の各要素が移動することが考えられる[10]。

1.2　円形載荷の特徴

礫地盤において円形の直接基礎の縁部近くでは載荷によって側方流動が発生し土粒子が載荷板外側へ移動して盛り上がり現象が推定されている。平板載荷試験と小型 FWD の載荷時に載荷板の端部付近でも同様に接地圧が急激に減少することから同様な現象が見られことが予想され，その結果として砕石などの非粘性体に載荷する場合に載荷板端部においてその外側では応力が解放されることが報告[11] されている。しかし実際の路盤や地盤の上部にはアスファルト層などが敷設され，舗装表面の載荷による路盤の側方流動が抑制されていることから現場の即した試験方法を考慮する必要がある。そこで上浦ら[12] は載荷板の外側にドーナツ状の内径部分をくり抜いた抑え鉄板を設置し，側方流動が発生する範囲を載荷中心から遠くすることで載荷板縁端部での側方流動を抑え，接地圧を確保できることを報告している。

2．地盤剛性の評価方法

地盤の剛性評価は，その上部に構築される構造物の保全に重要な影響を与える。一般的な考え方として塑性ひずみは保全への影響は少ないと考えられる。そこで地盤が弾性的挙動をしている応力範囲以内では塑性ひずみは蓄積されず，構造物の保全のコストを抑えることができる。地盤は完全弾性体ではないため実用上弾性的挙動範囲を定めているが，このパラメータとして地盤剛性値が用いられる。

2.1　応力条件と弾性挙動

粘性土地盤と砂質土地盤について弾性的な性状を示す事例と示さない事例が報告されている[13]。一方，粘性土地盤で一辺の長さが 10～150 cm の正方形載荷板を用いて平板載荷を行い，沈下量Ｓを載荷版の一辺の長さＢで除した値Ｓ／Ｂと荷重度ｐの関係は載荷版の面積に関係なく，ほぼ１本の曲線で示されるを報告している。このことはｐの増加に伴ってＳ／Ｂが増大するという地盤の非線形性を示しつつも，各段階においてＳはＢに比例するという弾性的な関係が満足されていることがわかる。また，沈下量と載荷版の面積で弾性的な関係が認められる事例や動的地盤反力係数が載荷版の直径の 3/4 乗の逆比例の例が報告されている[14]。さらに，砂地盤においては弾性的な挙動は $S=\alpha\frac{qB}{Nm}$ であり，Nm は地盤を代表する N 値で与えている[15]。Parry は N 値を弾性係数と置き換えることで弾性理論式の形になると説明している[16]。これらにいずれの説明の粘性土地盤と砂地盤において弾性的な性質を示すことも塑性的な性質を示すことがあることを示し

ている。

2.2 ひずみ条件

地盤の変形問題としてひずみレベルに着目して平板載荷試験で平板変位／平板直径をひずみとし，平板載荷で求めた弾性係数との関係が他の試験条件で求めた弾性係数とひずみの関係によく一致することが確認されている[17]。この知見は堆積軟岩に限定するものではないと考えられるが，小型 FWD の載荷に応用できるかは検討の余地がある。小型 FWD と平板載荷の比較の上で重要な要素に載荷速度がある。岩盤試験においては動弾性係数と静弾性係数の比は砂岩で 6 ～12 ある[18]。一方手引きでは FWD と平板載荷試験の結果から粘性土地盤，砂質地盤，礫地盤を対象としそれぞれ動弾性係数と静弾性係数の関係を示している。

2.3 推定方法

⑴ 海外での例

欧州では地盤や路盤の剛性を変形係数（E）で評価するのが一般的であり，Gurp ら[19] は Boussinesq の弾性解に基づき PFWD の載荷荷重と最大変位から変形係数を推定する方法を提案している。さらに，PFWD で推定した粒状路盤の変形係数は多くの場合で理論と一致しないが，その原因としては，接地圧の変化よりもむしろ層厚やその下層の変形係数によるものが考えられるとしている。一方，米国では路盤剛性の評価値として室内試験で求めるレジリエントモジュラス（Mr）を用いて例がある。この場合に K. P. George が提出した最終報告書[20] では PFWD によって欧州の方法と同様に Boussinesq による弾性解に基づく変形係数（E）と求め，次に Mr と E との相関を導いている。理論解析では弾性地盤上の載荷板における接地圧分布に対して Boussinesq の弾性解では係数に載荷板が剛体の場合には $\pi/2$ を採用し，載荷板が地盤表面の均一に分布する場合には 2 を用いているが，この報告書ではこれらの 2 ケースの平均をとって 1.8 を使用することとしている。

⑵ 我が国の例

わが国では載荷による荷重圧力を変位で除した K 値が通常使用されている。この K 値を求める方法として平板載荷と PFWD がある。平板載荷で求まる K 値を K_{30} 値，PFWD で求まる K 値を K_{PFWD} 値とすると，K_{PFWD} 値から K_{30} 値を推定しようとする試みがなされている[21),22)]。これから土全体を粘土，砂，礫に分類し，経験的な実績に基づいて粘性土系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の 1 倍とし，砂系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の 1.5 倍，礫系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の 2 倍とする換算係数 γ を用いる方法が提案されている[23]。これから，PFWD を用いる砂や礫などの粒状路盤の剛性に対し Boussinesq の理論解を直接適用することは十分な評価が得られないことに加え，K_{30} 値の推定では換算係数 γ の理論的な考察が不十分であることが考えられる。さらに，礫混じり砂などの

ように種々の土が交じり合っている場合に換算係数 γ を適用するケースでは土の区分を細分化して PFWD による剛性評価を行うことになるが，この精度向上のためには実証面や理論面からの取り組みが必要である。

3．本研究の取り組み

PFWD では 5 〜10 msec という短時間で載荷することから，載荷によって地盤内では急激なひずみが載荷板直下から地盤内部に向かって放射状に発生する[23]。粒状路盤ではこの極端に短い時間内に発生するひずみ増加が応力の増加に追い付けず，見掛け上で地盤の剛性が増加したようのみえる現象が発生する。この現象をひずみ速度に着目して，ひずみ速度が増大すると粘性が増す。そこでひずみ速度を抑制する方法の開発が必要となる。

3.1　緩衝用バッファの材質と形状の検討

緩衝用バッファのばね定数が関係しているが，緩衝用バッファには一般的な天然ゴムが用いられている。この材料の一軸方向の繰り返し載荷試験では Voigt モデルを用いた結果から弾性率がフックの法則に従う仮定で周波数に依存して複素弾性率の実部と虚部の比は 0.1（200 cps）〜0.5（1300 cps）程度[24] であり，天然ゴムの粘性が載荷の周波数に依存することが確認されている。そこで天然ゴムの温度依存性を確認し天然ゴムによる載荷時間の使用範囲を確定する検討を進めている。さらに円錐形状，薄板形状などを組みわせて，天然ゴムと複合材を組み合わせて載荷時間を拡張する試みがなされている。複合材としては弾性率を異なる合成ゴム材や他のゲル材の利用を進めている。これらに検討により静的載荷に比べ動的載荷では粘性の影響で載荷速度により変形係数が大きくなる可能性を確認している[25]。

3.2　載荷時の応力伝達機構の解明

粒状地盤で同じ変位量を確保する際に動的載荷が静的載荷よりも載荷荷重が大きくなるとする見かけの粘性に関する現象は，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[26]。剛体載荷板の接地圧に関して動的載荷と静的載荷とは異なった現象が見られる。載荷による地盤が沈下する場合に剛体載荷板とは載荷板の剛性が高く載荷板のどの位置でも変位は同じとなる。このため地盤を弾性と仮定して地盤に設置している載荷板の接地分布を理論的に求めると，円形の載荷板の中心から載荷板の端部に近づくほど接地圧力が大きくなり載荷板の縁部では無限大へ近づく[27] ことが知られている。しかし，礫材のような非粘性の粒状路盤材料では，弾性状態で応力・ひずみのピークである降伏点に到達した後にさらにひずみ増加する場合，応力の低下が粘土のような粘性材料に比べて著しく大きい。そのため載荷荷重を支える載荷板直下の接地圧に着目すると，接地圧分布は理論とは逆に載荷板の縁部では 0 で中心部に向かって増加する傾向が推論される。Mooney ら[28] は砂層と砕石層からなるモデル地盤内に土圧計を設置して得られる PFWD の

載荷板（直径 300 mm）の変位 1.25 mm における地盤内の応力分布が，載荷板中心を頂点とし端部を 0 とした放物線近似の仮定によって求めた接地圧分布から計算される地盤内の鉛直応力分布とよく一致しているとしている。

3.3　地盤内での応力分散の推定

本研究では K_{30} 値の換算係数 γ で最も大きな礫材を対象として室内試験と現場試験を行った。

室内試験ではゴム材による均一で一様と見なされる模擬地盤と礫材による模擬地盤で接地圧装置から直径 30 cm の載荷板における接地圧分布を求めることとした。ここでゴム材を用いたのは，Saint-Venain の原理[29] の基礎となったゴム材の梁における曲げ試験の結果で付加的な変形はごく近傍にしか起こらないとしたことから，円形載荷板を使用した載荷による変形も同様な結果が得られることが確認された[30]。この結果は一軸方向であって面的な載荷試験である平板載荷と PFWD に直接結びつくものではないが，静的載荷に比べ動的載荷では粘性の影響で載荷速度により変形係数が大きくなることを示唆している。以上のように粒状地盤内の動的載荷において見かけの粘性が発生することが既往の研究で示されていることから，ゴム材において動的載荷と静的載荷により粘性の影響を求め，粒状材と比較することとした。次に載荷板が地盤表面に作用するときには載荷面が粗いと仮定し載荷によって載荷板が変位すると載荷点中心付近でくさび状の主働域が発達し，一方端部付近では受働域が発生して載荷板外側の地盤表面を盛り上げることが推測[31] される。粒状体路盤では載荷板外側付近での路盤表面が開放されているため，載荷板端部の応力増加がより小さい段階で降伏した状態となり支持力が低下する。そのため載荷板の支持できる範囲が狭まり，載荷板内方へ応力が集中する傾向が生まれるものと推測される。一方，載荷板の外周近くに円形鉄板を設置することで抑え力を働かせて端部付近の応力状態を変化させると，その抑え効果で応力集中度合いの緩和状態されることが予想される。以上の推論について実験により確認することとした。現場試験では，地盤を掘削して礫材と入れ替えて内部に土圧計を設置した実際の路盤を構築し，PFWD と平板載荷の各載荷試験によって接地圧測定とともに地盤内の鉛直応力の分散状態を求めることとした。この試験結果と粘性を考慮した動的 FEM 解析[17] より地盤内の見かけの粘性を推定することを確認した[32]。

4．ま　と　め

道路や鉄道などの土構造物についてその剛性を適切に評価し，所定の範囲内に施工することはメンテナンスコストを軽減するうえで重要な点である。この過程で礫地盤を用い，必要な地盤を構成する載荷時の土粒子の動きを検討する方法の流れを示した。また，地盤の剛性評価をする上で活用されている小型 FWD について緩衝用バッファの材質と形状の検討，載荷時の応力伝達機構の解明，地盤内での応力分散の推定，この試験結果と粘性を考慮した動的 FEM 解析などの検討の内容を示し剛性評価の精度向上の方法を明らかにした。

(参考文献)

1) 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，pp. 253-266，土木学会論文集C，Vol.64，No.2，2008.
2) 土木学会舗装委員会編：FWD および PFWD 運用の手引き，土木学会，pp.73-74，2002.
3) A. S. Osman, M. D. Bolton: Simple Plasticity-based prediction of the settlement of shallow circular foundation, *Geotechnique* 55, No. 6, pp.435-447, 2005.
4) S. P. チィモシェンコ，J. N. グーディア：弾性論，コロナ社，pp.469-473，1999.
5) 河上房義：土質力学，森北出版，pp.187-191，2001.
6) 山口柏樹：無限土中における空洞押拡げの弾塑性解析と応用，東工大・土木工学科研究報告，No.15，pp.1-11，1973.
7) 小田匡寛，古戸幸博：浅い基礎の支持力問題における進行性破壊の意味，土木学会論文集，vol.321，pp.113-122，1982.
8) S. P.ティモシェンコ：材料力学史，鹿島出版会，pp.126-127，1982.
9) 岡村未対，竹村次朗，木村孟：砂地盤における円形及び帯基礎の支持力に関する研究，土木学会論文集，vol.463，pp.85-94，1993.
10) 福島和彰，松島亘志，山田恭央：イメージベース DEM による砕石の一面せん断試験シミュレーション，第 6 回地盤工学会関東支部発表会講演集，pp.126-128.
11) Einav. I and Classidy. M. J: A framework for modeling rigid footing behaviour based on energy principles, Computer and Geotechnics 32, pp.491-504, 2005.
12) 上浦正樹，桑野基史，董勤喜：小型 FWD と平板載荷の剛性評価に関する一考察，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009.9.
13) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.47-49．1981.
14) 河上房義：土質力学，森北出版，pp.120-122，2001.
15) 最上武雄編：土質力学，技報堂，pp.211-215，1969.
16) *N* 値の話編集委員会：改訂 *N* 値に話，理工図書，p.184，2004.
17) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.136-138，1981.
18) 地盤工学ハンドブック編集委員会：地盤工学ハンドブック，地盤工学会，p.875，1999.
19) C. v. Gurp, Groenen, J. and Beuving, E., Experience with various types of foundation tests. Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.239-246, 2000.
20) K. P. George: Portable FWD (PRIMA100) for in-situ subgrade evaluation, Final Report (U. S. DOT FHWA & MDOT), pp.36-37, 2006.
21) 田附伸一，島峰徹夫，関根悦夫，阿部長門：FWD を用いた鉄道盛土の急速施工管理について，第 33 回地盤工学研究発表会概要集，pp.2093-2094，1998.
22) 土木学会舗装委員会編：FWD および PFWD 運用の手引き，土木学会，pp.73-74，2002.
23) 最上武雄編：土質力学，技報堂，pp224-225，1969.
24) 神原周編：合成ゴムハンドブック，朝倉書店，pp.41-43．1967.
25) kamiura M, Nakayama. S: Application of acceleration measurement method for estimating the stiffness of unbound aggregates in roadbed,Proceedings of 6th International Symposium on Pavements Unbound, pp.125-126, 2004.
26) 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Ⅴ－47，No.624　2，pp.267-282，1999.
27) 最上武雄編著：土質力学，技報堂，pp.977-987，1969.

28）Mooney, M. A. and Miller, P. K.: Analysis of Light Deflectometer Test Based on In Situ Stress and Strain Response, ASCE, pp.199-208, 2009.
29）河上房義：土質力学，森北出版，pp.193-196，2001.
30）Kamiura, M., Sekine, E., Abe, N and Maruyama, T.: Stiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the portable FWD, Unbound Aggregates in Road Construction, pp.217-237, 2000.
31）松岡元：地盤工学の新しいアプローチ，京都大学学術出版会，pp.219-223，2003.
32）上浦正樹，桑野基史：小型 FWD を用いた粒状路盤の剛性評価に関する研究，舗装工学論文集，Vol. 14，pp.122-124，2009.