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	SHAKEDOWNを考慮した小型FWDによる粒状材の剛性評価に関する研究
著者	上浦，正樹; Kamiura，Masaki
引用	工学研究 ： 北海学園大学大学院工学研究科紀要(12): 3-11
発行日	2012-09-28

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究論文

Shakedown を考慮した小型 FWD による粒状材の剛性評価に関する研究

上　浦　正　樹*

AN APPROACH FOR THE STIFFNESS EVALUATION OF UNBOUND AGGREGATES USING PORTABLE FWD BY SHAKEDOWN THOERY

Masaki Kamiura*

1．はじめに

道路・鉄道の路盤材で主に用いられているものは礫などの粒状材である．粒状材で構成される路盤・路床などは上部の層から繰返し発生する輪荷重などの応力を地盤へ分散して伝える機能を有するため剛性の確保が重要である．この粒状材の剛性は締固め度，乾燥密度，粒度，粒径，粒子形状などの因子に依存している[1]．そのため路盤などの敷設にあっては粒状材の特性に合わせた施工が重要となる．一方で現場で施工される路盤などの粒状材の剛性を推定するためには，簡易で所定の精度を確保できる方法が望ましい．よって従来から平板載荷試験では載荷時の最大荷重と最大変位による剛性値を用いている．小型 FWD は平板載荷試験などと同じ測定項目を採用しているが，従来の評価方法よりも簡便で所定の精度が得られることから普及が進んでいる．日本における小型 FWD は 1990 年代の初めの頃に開発[2] されたが，欧米などの諸外国でも同じ時期に導入が始まっている．これらの国で用いられている機種には Zorn（ドイツ），Keros（デンマーク），Loadman（フィンランド）などがあり，それぞれ約 20 年以上の使用実績がみられる[3]．小型 FWD による路盤などの剛性評価の方法では，日本においては平板載荷試験の評価方法を導入して直径 30 cm の載荷板が変位 1.25 mm に達したときの平均載荷応力を変位で除した K 値を基本にしている．また土構造物の塑性変形を考慮して載荷板直径が異なってもひずみレベルを同じにすることで直径 30 cm の載荷板での評価と同じ値が得られるとしている[4]．一方，欧米諸国の剛性評価の方法は地盤を弾性と仮定して導かれる弾性論の理論式が主体である．欧州諸国のうち英国，デンマークを含む 16 カ国で構成される粒状体に関するプロジェクト（COST-337）では，コンクリート塊などの産業廃棄物を路盤材に活用することを含め，粒状材を応力面から考えて応力依存材料として粒状路盤の力学特性を検討している[5]．しかし，小型 FWD 試験の重錘質量 10 kg で平均接地圧を 100 kPa と標準とするなどの例[6] があるものの，日本のようにひずみを一定にするような荷重に関する明確な基準は，あまり明らかになっていない．

このように小型 FWD の載荷で得られる載荷荷重と変位から剛性評価を行う場合に日本と欧米の差がみられるが，ともに 1 回の載荷ごとに載荷試験で最大荷重と最大変位を測定する点は共通している．しかし路盤・路床が交通荷重によって繰返し荷重を受けることを考慮すると，簡易に繰返し載荷による剛性を評価する方法の確立や繰返し載荷試験と 1 回載荷試験の結果の関連性の検討が必要となると考えられる．

2．既往の研究と本研究の取り組み

(1)　繰返し載荷と Shakedown

繰り返される輪荷重によって路盤などでは弾・塑性変形が発生する．この論文では載荷によって生ずる変位とひずみは鉛直方向に生ずることを前

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）教授・博士（工学）
Graduate School of Engineering (Civil & Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

提とする．載荷によって発生するひずみ（載荷ひずみ：ε），除荷によって戻るひずみ（復元ひずみ：ε_r），除荷しても元に戻らないひずみ（永久ひずみ：ε_p）とすると $\varepsilon=\varepsilon_r+\varepsilon_p$ の関係がある．Sharp らは載荷・除荷を繰返すことで発生する永久ひずみが増加しない状態を Shakedown として扱うことを提唱した[7]．一般的に Shakedown に関する研究では概ね繰返し三軸圧縮試験を用いており，粒状体における繰返し載荷回数と永久ひずみの関係について Shakedown 領域（Range A），クリープ領域（Range B），内部崩壊領域（Range C）の 3 領域に分けてそれぞれの特性を求めている[8),9)]．図-1 はこれらの研究成果により作成したものである．Werkmeister らは交通荷重を繰返し受ける場合を想定して安定した試験条件として載荷試験では Shakedown 領域で行うべきであるとしている[10)]．また Wolff は礫と砕石の繰返し三軸圧縮試験により Shakedown 領域を示す軸差応力は，最大せん断応力の 0.58～0.98 程度であることを述べている[11)]．一方，繰返し載荷試験結果を小型 FWD 試験結果と関連づけるために AASHTO T 307（0.1 秒の載荷後 0.9 秒無載荷状態の保持を 1 サイクルとして最小で 500 サイクルのうちの 100 サイクルでの剛性の評価法）の結果と小型 FWD によって推定した弾性係数を統計的に処理をする方法が提案されている[12)]．また，Gurp らは，小型 FWD による路盤など剛性評価では載荷によって締め固め過剰となるとの仮定で載荷回数を 3 回と 8 回とで得られる弾性係数をもとに剛性評価を提案している[13)]．桑野らは，粗礫 52%，有効粒径 D_{50}＝19.3 mm，平均現場密度：1.57 g/cm³ の礫地盤において 3 種類の載荷板（直径：10，20，30 cm）を用いて小型 FWD より落下高さを低い段階から漸増しながら繰返し載荷を行った．このうち載荷板直径 30 cm の結果では，荷重と変位の関係が線形の傾向で Shakedown の領域内の挙動と判断できるが，載荷板直径 20 cm の結果では平板載荷試験で用いられているひずみレベルと同等の変位である 0.83 mm 付近では荷重がほぼ一定で変位が増加する傾向が見られたとしている（図-2）[14)]．この図から荷重がほぼ同じで変位が増加することは永久変位が増していることと判断されるので，この荷重条件では Shakedown 領域から外れている可能性があると考えられる．

以上のように小型 FWD による剛性評価において，Gurp らは載荷における応力レベルやひずみレベルの制限ではなく載荷回数によって規定する立場をとっている．一方，桑野らはひずみレベルを規定し土粒子が破壊されない前提で載荷回数が剛性評価に与える影響は少ないとの立場をとっている．いずれにしても適正な剛性評価のためには Shakedown 領域に着目した検討が必要である．

⑵　接地圧分布と剛性評価方法の比較

K 値を直径 30 cm の平板載荷試験では K_{30} 値，小型 FWD（PFWD と称する）では K_{PFWD} 値とすると，わが国では K_{PFWD} 値から K_{30} 値を推定しようとする試みがなされた[15)]．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[16)]．このように砂などの粒状体に対して換算係数 γ が必要となる要因としては，みかけの粘性，載荷板端部の接地圧低下とこれに伴う地盤内応力の変化が考えられている[17)]．

一方，欧米における剛性評価の方法は式(1)に示すように Terzaghi が示した弾性理論に基づいて

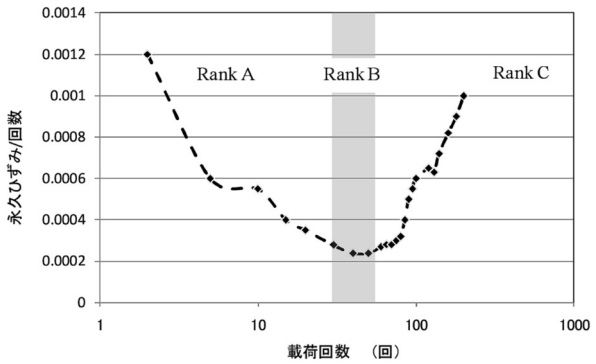

図-1　載荷回数と永久ひずみ[8),9)]

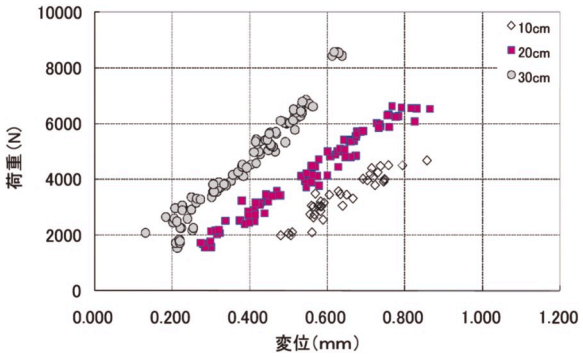

図-2　荷重と変位（礫地盤）[14)]

いる[18]．ここで砂のような粒状体に対して図-3 の接地圧分布に対応した shape factor を用いている（表-1）．なお (c) の破線は shape factor が $2/\pi$ に対応している．

$$E=\frac{(1-v^2)\cdot\sigma\cdot a}{d}\times f \qquad (1)$$

ここで

E：ヤング係数(MPa)，v：ポアソン比，σ：載荷応力（MPa），a：半径（mm），d：変位（mm），f：shape factor

小型 FWD 試験で砂や礫などの粒状材地盤上の載荷板の接地圧分布は端部付近ではほぼ 0 で中央部で最大となる放物線の形状となることが報告されている[19]．White は砂地盤において Shape factor を用いた接地圧から推定される地盤内の応力分散の解析結果と土圧計を用いた実験結果が一致したとしている[20]．

そこで，換算係数 γ と shape factor の関係を以下のように検討した．ここで厳密にいえば粒状体のひずみレベルや応力レベルを同一にするなどの条件が必要であるが，概ね同一条件を満たしていると仮定して次の式を導いた．

直径 750 mm の載荷板を用いた場合端部の影響は無視できるものとし，この載荷板で得られる K 値 (K_{75}) は直径 300 mm の載荷板で得られる K 値 (K_{30}) とは $K_{75}=1/2.2\times K_{30}$ の関係が報告されている[21]．よって式(2)が導かれる．

$$K_{30}=\frac{2.2\cdot E}{f\cdot a\cdot(1-v^2)} \qquad (2)$$

この式から砂地盤における Shape factor を用いて γ を推定すると 1.67 となり，K_{30} 値推定での砂の換算係数 γ が 1.5 であることから，ほぼ妥当な値が得られたと判断できる．よって砂地盤のような粒状体の路盤などにおいて載荷板の端部付近の接地圧が 0 となることが剛性評価に影響を与えていることを理論式から確認できたと考えられる．

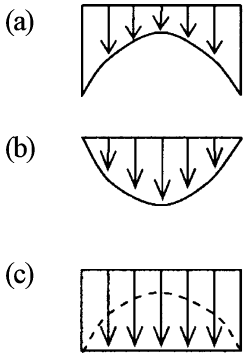

図-3　接地圧の分類[20]

(3)　本研究の目的

以上から粒状材の路盤などで小型 FWD 試験と平板載荷試験においてひずみレベルを規定しておけば載荷回数は剛性評価に与える影響は少ないとの前提で，繰返し載荷試験を行い，測定された荷重・変位関係に対する Shakedown 領域の存在を検討する．加えて，載荷時の地盤内の土粒子の移動を撮影しその軌跡を可視化の手法を用いて観察し，接地圧分布の違いが粒状材の路盤などに与える力学挙動の影響を検討することとした．そのための基礎的試験として砂を用いることとした．

3．力学試験の方法

小型 FWD 試験，平板載荷試験，三軸圧縮試験の 3 種類の力学試験を行った．

(1)　試験材料

小型 FWD と平板載荷による載荷試験のために 1 m×1 m×1 m の試験用土槽の中に粒度分布が礫 2 %，粗砂 8 %，中砂 58%，細砂 32%，の材料で模擬地盤を作製した．この模擬地盤では含水比 18%で締固め，湿潤密度 1.9 g/cm³，乾燥密度 1.6 g/cm³，飽和度 80%となった．三軸圧縮試験では直径 5 cm×高さ 10 cm の供試体を用いた．圧密

表-1　Shape factor[20]

載荷条件	土の種類	接地圧分散状態		Shape factor
剛性	粘土	鞍状	(a)	$\pi/2$
剛性	砂	放物線状	(b)	8/3
剛性	砂まじり粘土	一定	(c)	$\pi/2$～2

圧力の選定では模擬地盤の乾燥密度に近い値を得るため 100 kPa とした．これにより 90%圧密が完了するのが 30 秒程度であったが圧密度を向上するために 75 分間圧密した．この結果，供試体の乾燥密度は 1.7 g/cm³，圧密前後の体積変化は 1.0～1.5%であった．

⑵　試験方法

小型 FWD 試験では重錘質量を 10 kg，載荷板直径 20 cm を用いた．荷重の測定は内蔵されているロードセルを用い，変位は変位計(図-4)（最大変位 5 mm，サンプリング間隔 100 msec）を 2 個により外部の不動点から連続して測定した．ここで変位計で求まる変位（変位とする）として小型 FWD で測定する変位(装置変位とする)とは区別することとした．平板載荷試験ではロードセル(最大荷重 50 kN，サンプリング間隔 100 msec）をセットし，直径 20 cm の載荷板に 2 個の変位計を載荷板中心に対してそれぞれ反対側に取り付けた．載荷速度は既往の研究[22] に準じて 0.2 kN/sec を用いた．

三軸圧縮試験では，試験用土槽で用いた粒状材を使用しほぼ同じ乾燥密度 (1.68 g/cm³) とした．供試体の形状は直径 5 cm，高さ 10 cm としバックプレッシャー200 kN/m² を用いて飽和状態（含水比 20%）とした．等方非排水圧縮せん断試験を採用し，載荷制御の方法は変位制御で，載荷速度は載荷と除荷重とも 0.001 mm/秒とした．小型 FWD の載荷板半径 10 cm での最大装置変位 0.83 mm を載荷板半径で除した比を最大ひずみ (8.1×10^{-3}) に相当するものとして最大ひずみ 0.01（1 %）を採用し，その他の試験の最大ひずみとして，この 1/10 の 0.001 とその中間値 0.005 と用いた．

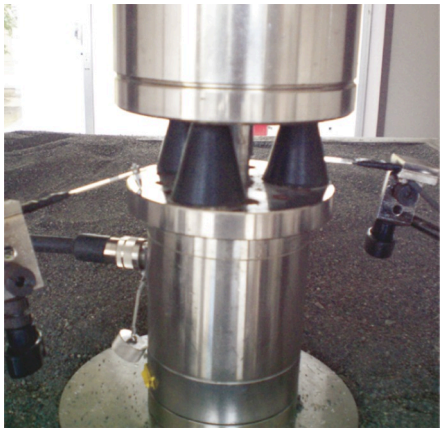

図-4　小型 FWD と変位計

4．力学試験の結果

⑴　載荷荷重増加試験（小型 FWD）

重錘の落下高さを最初は 10 cm にセットし載荷した後に除荷し，これを 2 回行った後に落下高さを 5 cm 増加させて最大ひずみまで落下高さを増加する方法を用いた(図-5)．これから載荷荷重と装置変位には比例関係が認められる．また，小型 FWD の載荷時の変位を半径で除したものをひずみとし扱っている[4] が，これを応用して永久変形量を載荷板半径で除して永久ひずみとした．この最大装置変位が大きくなると，この永久ひずみも大きくなる傾向を示している（図-6)．

⑵　同一変位における繰返し載荷試験（小型 FWD）

小型 FWD を用いて 3 種類の最大装置変位 (0.8 mm，0.6 mm，0.4 mm）に対して，これを確保するため落下高をそれぞれ固定した．落下回

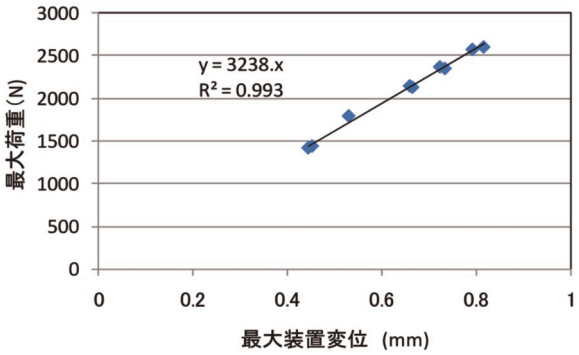

図-5　最大装置変位と最大荷重（小型 FWD）

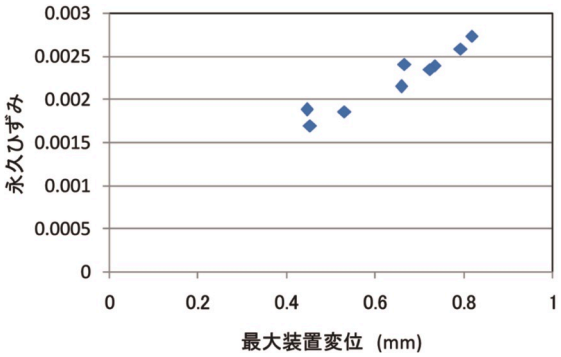

図-6　最大変位と永久ひずみ（小型 FWD）

数は 3 回の予備載荷の後，載荷と除荷を 10 回まで繰り返すこととした．変位量は最初の載荷から最終の除荷まで連続して計測することとした．その結果，途中段階の変位はそれまでの永久変位を累積したものとなる．そのうち最大装置変位 0.8 mm の結果を図-7 に示す．この図から各載荷での最大荷重と永久変位の増分はあまり変化しないように見える．そこで 3 種類の最大装置変位ごとに各載荷段階の最大変位と最大荷重の関係を図-8 に示す．この図から最大装置変位 0.8 mm，0.6 mm で微減の傾向がみれるもののほぼ同じ値とみなすことができることから K 値などの剛性値は一定であると考えられる．また，永久ひずみの推移（図-9）では，最大装置変位 0.8 mm，0.6 mm で減少する傾向がみられた．

なお，最大装置変位 0.8 mm での最大載荷荷重から推定する模擬地盤の K_{PFWD} 値は 136 MN/m³ であり，締固めが良好になされていると考えられる．

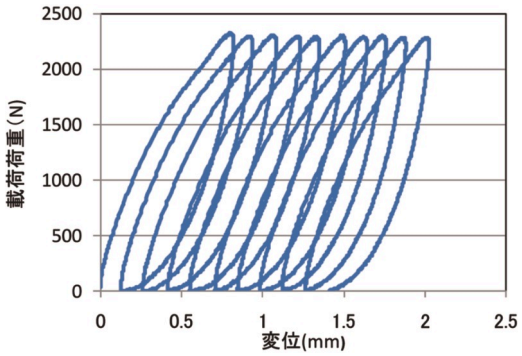

図-7　繰り返し載荷・除荷の推移（小型 FWD）

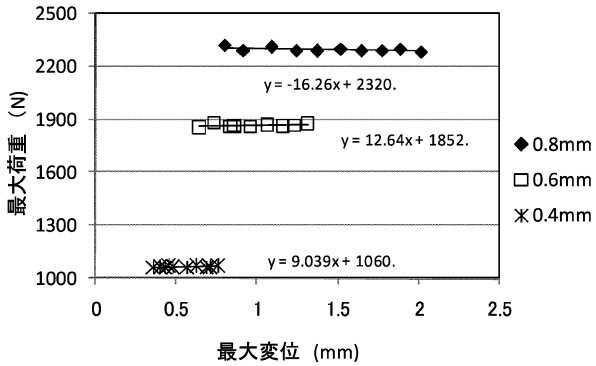

図-8　最大荷重と最大変位（小型 FWD）

(3)　同一変位における繰返し載荷試験（平板載荷装置）

小型 FWD との比較のため，3 種類の最大変位（0.8 mm，0.6 mm，0.4 mm）を対象とした．予備載荷と載荷回数は小型 FWD と同じとした．以上の条件で 3 種類の最大変位ごとに各載荷段階の最大変位と最大荷重の関係を図-10 に示す．この結果から永久変位の増分が各段階で非常に小さく，各点の重なりが多いことが分かる．永久ひずみの推移（図-11）では全体として値は小型 FWD と比べてかなり小さいが，載荷回数の増加によって最大変位 0.8 mm と 0.6 mm は減少する傾向が

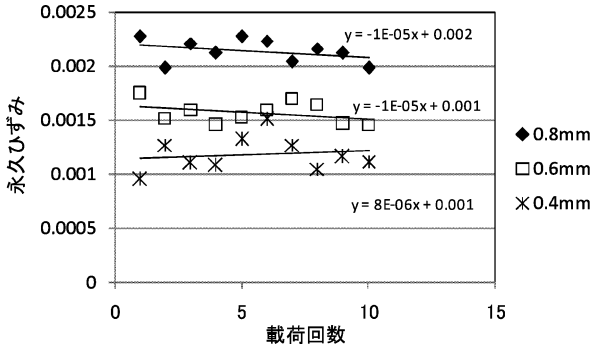

図-9　永久ひずみの推移（小型 FWD）

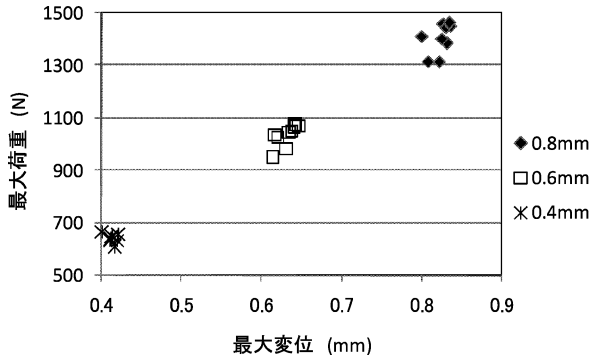

図-10　最大荷重と最大変位（平板載荷）

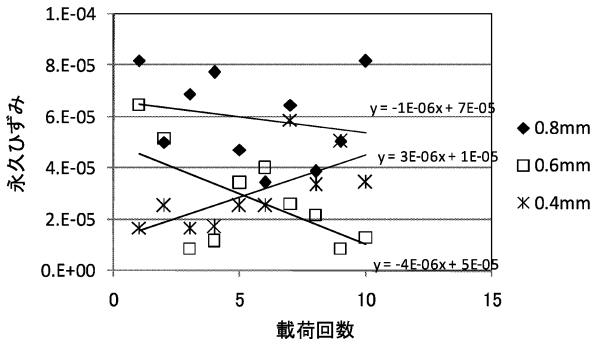

図-11　永久ひずみの推移（平板載荷）

見られる．これは繰返し載荷により試験材料の密度が増加したものと考察される．また，小型 FWD と平板載荷は同じ形状の載荷板で地盤表面に載荷するものの，図-9 と図-11 の比較により平板載荷の永久変位が非常に小さいことがわかる．

⑷　三軸圧縮試験

圧密非排水試験における最大ひずみ 1％のせん断後の供試体の状況（図-12）からこの段階でもせん断によるすべり線の確認はできなかった．繰返し載荷・除荷試験結果を軸ひずみと主応力差で整理したものを図-13 に示す．この結果から最大主応力差は 330 kN/m² であった．この最大主応力差に対して推定される最大せん断応力は 530 kN/m²（せん断抵抗角 ϕ を 40°とする）との比が 0.62 となった．既往の研究で示したように礫と砕石の繰返し三軸圧縮試験では Shakedown 領域での主応力差は最大せん断応力の 0.58～0.98 程度であったが，本研究の砂の繰返し試験結果はこの範囲内にあることから Shakedown 領域内での繰返し三軸圧縮試験が行われたと考えられる．

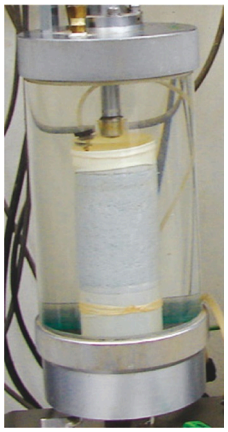

図-12　圧密非排水三軸圧縮試験

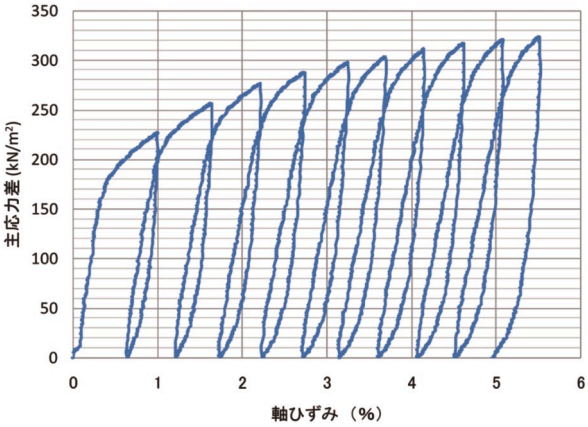

図-13　繰り返し載荷・除荷の推移（三軸圧縮試験）

最大主応力差と最大ひずみの関係（図-14）から最大ひずみが 1％と 0.5％では増加から微増の傾向が見られた．一方，永久ひずみ（図-15）の推移ではひずみが全てにおいて微減または減少の傾向が得られた．これらから今回の三軸圧縮試験は Shakedown の領域における試験であることが確認された．

以上を総合すると Shakedown 研究の基本となる繰返し三軸圧縮試験によって小型 FWD 試験と平板載荷試験と同じ試料でほぼ同じ乾燥密度とひずみレベルで繰り返し載荷試験を行った結果，粒状体の最大主応力差と最大せん断応力比が Shakedown 研究の結果で示された範囲内となることが明らかになった．また繰返し載荷による最大荷重と最大変位の関係と永久ひずみの推移では，繰返し三軸圧縮試験と小型 FWD の結果が類似してともに減少する傾向を示しており，Shakedown の領域内で小型 FWD の繰返し載荷試験が行われ，永久ひずみが蓄積していると考えられる．

本研究では小型 FWD における粒状体での Shakedown の存在を確認できたが，今後は小型 FWD による Shakedown の限界値と既往の研究で示されている繰返し三軸圧縮試験による

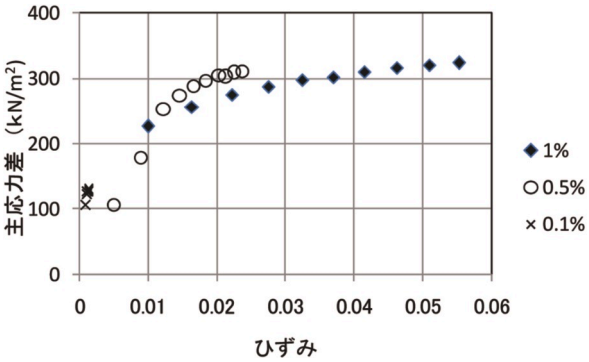

図-14　最大主応力差と最大ひずみ（三軸圧縮試験）

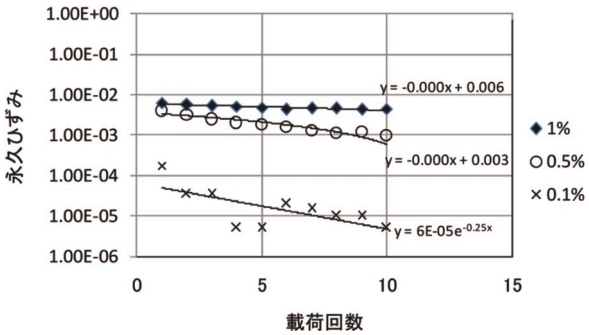

図-15　永久ひずみの推移（三軸圧縮試験）

Shakedown の限界値との関係を力学試験の条件などを考慮して検討する予定である．

5．画像処理（可視化）

⑴　方法

既往の研究で小型 FWD の接地圧分布は放物線の形状であり，載荷板端部では 0 と仮定できることに加え小型 FWD による繰返し載荷試験で Shakedown の領域内で地盤内に永久ひずみが蓄積されていくことが示された．これは載荷板に接する土粒子が移動した結果，除荷した後でももとに戻らず，永久ひずみになることが推定される．そこで繰返し載荷の前後の地盤内の断面を撮影し土粒子の移動を求めて全体として繰返し載荷による地盤内の動きを推定することとした．

土槽の内寸法は横 550 mm×縦 500 mm×幅 70 mm で側壁には厚さ 50 mm のアクリル板を設置した．アクリル板と砂との摩擦を軽減するためにアクリル板の内側に厚さ 2 mm のポリエステル製シートを用いた．

試料は小型 FWD などで使用した同一の砂を用いて締固めた（乾燥密度 1.5 g/cm^3）．載荷板の直径は地盤の深さの関係[23] から 10 cm とし，半月状の載荷板を使用して長辺側をアクリル板側に設置した．重錘の質量は 5 kg を用いた．半月状の載荷板と同じ面積となる円板載荷板の直径は 7 cm となることから 1 回あたりの装置変位を 0.3 mm とした．また，この高さを固定して載荷回数を 10 回載荷とした．使用したデジタルカメラの画素は 600 万画素であり，載荷前と繰返し載荷後でそれぞれ撮影した（図-16）．この図の作成にあたり，12.5 mm 間隔のメッシュを画像内に記入し，このメッシュの交差した点にある載荷前の土粒子に着目して位置を確定し，次に載荷後にこの着目した土粒子の位置を求め，土粒子における載荷前後の移動方向と移動量を推定した．

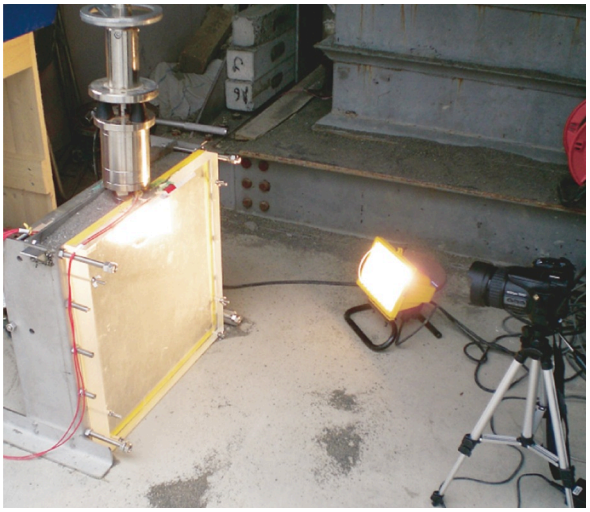

図-16　土粒子の移動量を撮影

⑵　画像処理の結果

小型 FWD と平板載荷における繰返し載荷による試験地盤内の土粒子の移動の方向と移動量を矢印で示す（図-17，図-18）．これらの画像処理の結果から次の傾向が観察された．第一に，表面では載荷板端部から外側で小型 FWD によって土粒子が上方へ移動する傾向が見られるが，平板載荷ではあまり確認できなかった．第二として，載荷板直下の土粒子の動きは小型 FWD によって鉛直方向の動きの傾向が強いの対して平板載荷では横方向に分散する傾向がみられた．

以上から，小型 FWD による繰返し載荷試験が平板載荷試験に比べ，Shakedown の範囲内で永久ひずみがの蓄積が大きいことの理由として載荷板端部付近の表面での上方向への土粒子の移動が考えられる．また，既往の研究によると小型 FWD 試験における砂や礫などの粒状材地盤上の載荷板の接地圧分布は端部付近ではほぼ 0 となることが報告されている（図-13(b)）が，これは上方向へ

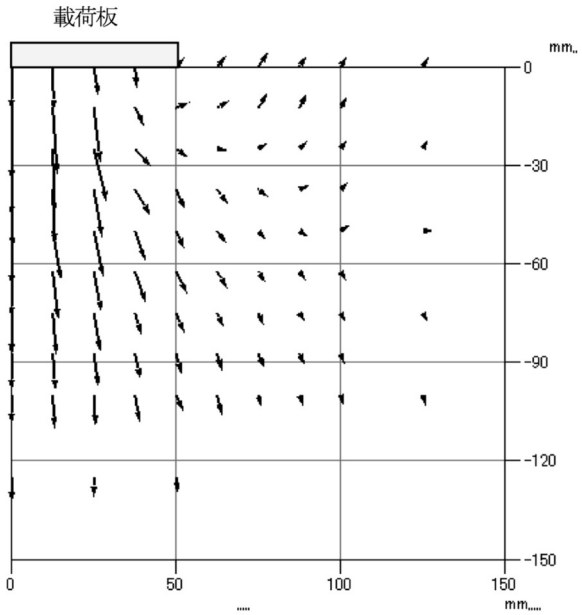

図-17　地盤内の土粒子の動き（小型 FWD）

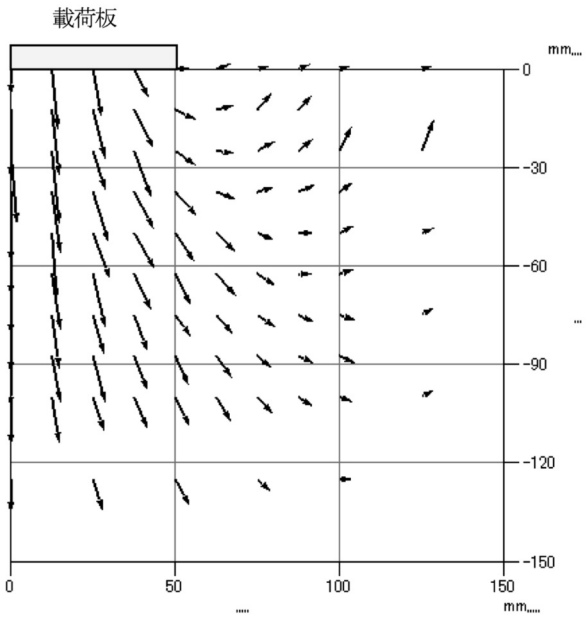

図-18　地盤内の土粒子の動き（平板載荷）

の土粒子の移動によって載荷板端部付近の接地圧分布がほぼ 0 となることに関係していると推定される．

6．まとめ

本研究で得られた重要な知見を以下に示す．

(1)　Shakedown の概念を整理し，Shakedown を考慮して粒状材の路盤などの載荷試験を行い剛性評価をすべき理由を示した．

(2)　砂地盤などの剛性評価に用いられる K_{30} 値での換算係数 γ と弾性係数 E における shape factor の関係を導き，換算係数 γ における既往の成果とほぼ同等となることを示した．

(3)　粒状体の剛性評価の基礎的研究として砂を用いることとし，試験用土槽の模擬地盤で小型 FWD による繰返し載荷試験を行い，最大荷重と最大変位の関係及び最大変位と永久ひずみの関係を求めた．平板載荷による繰返し載荷試験おいて同じ形状の載荷板で地盤表面に載荷して同様の関係を求めた．これらから，小型 FWD に比べ平板載荷の永久変位が非常に小さいことが明らかになった．

(4)　小型 FWD の繰返し載荷試験と同等のひずみレベルで繰返し三軸圧縮試験を行った結果，Shakedown 領域での最大主応力差であることが確認された．また，小型 FWD の繰返し載荷試験で得られた最大荷重と最大変位の関係と最大変位と永久ひずみの関係では繰返し三軸圧縮試験の試験結果と同じ傾向が確認された．従って小型 FWD の繰返し載荷試験が Shakedown 領域で実施されているものと推定した．

(5)　側壁をアクリル板とした土槽を用いて小型 FWD と平板載荷試験を行い，繰返し載荷によって模擬地盤内の土粒子の移動を撮影した．

(6)　小型 FWD による繰返し載荷試験が平板載荷試験に比べ，Shakedown の範囲内で永久ひずみがの蓄積が大きい理由として画像処理の結果から載荷板端部付近の表面での土粒子の上方向の移動が考えられた．また，既往の研究によると小型 FWD 試験における砂や礫などの粒状材地盤上の載荷板の接地圧分布は端部付近ではほぼ 0 となることが報告されているが，これは上方向への土粒子の移動によって載荷板端部付近の接地圧分布がほぼ 0 となることに関係していると推定された．

【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）笠原　篤，伊藤保彦，古川真男：ハンディーなフォーリング・ウエイト・デフレクトメータの開発，道路建設，No.544，日本道路建設協会，1993-05．

3）Steinert, B. C., Hurphrey, K. and Kestler. M. A: Portable Falling Weight Deflectometer study, NETCR 52, pp.5-17, 2005.

4）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.69-70，2002．

5）Huhtalav, M., Dawson, A. R. and Mundy, M. J.: Unbound Granular Materials for Road Pavements, COST-337 and COURAGE, Workshop on Modelling and Advanced Testing for Unbound Granular Materials, pp.15-26, 2002.

6）Gurp, C., Cillessen, R., Blom, S. and Groenen, J.: The use of LWD on granular bases and asphalt structures, 6th European FWD Users Group Meeting, pp.1-2, 2010.

7）Sharp, R. W. and Booker, J. R.: Shakedown and Fatigue of pavements under movement surface loads, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.1-14, 1984.

8）Werkmeister, S.: Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement constructions. Final report in Dresden University of Technology, pp.4-1/5-8, 2003.

9）Werkmeister, S., Numrich, R. and Wellner, F.: Resilient and permanent deformation behaviour of unbound granular, Unbound Aggregates in Road Construction, pp.171-180, 2000.
10）Werkmeister, S., Dawson, A. R. and Wellner, F.: Pavement Desing Model for Unbound Granular Materials, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.665-674, 2004.
11）Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A. R.: Permanet Strain Response of Unbound Aggregates, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.76-83, 2000.
12）Boateng, J. and Mgangira, M.: Evaluation of Test Methods for Estimating Resient Modulus of Pavement Geomaterials, Proceedings of the 28th South African Transport Conference, pp.245-254, 2009.
13） 6）と同じ pp.3-4.
14）桑野基史，上浦正樹，竹澤晋一：小型 FWD 載荷板の径が荷重・変位関係に与える影響に関する研究，土木学会第 65 回学術年次講演会，V-041，pp.81-82，2010.
15）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.
16） 4）と同じ，p.73.
17）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，土木学会舗装工学論文集，第 14 巻，pp.123-130，2009.
18）Gurp, C. and Groenendijk, J.: Experience with various types of foundation tests. Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.239-246, 2000.
19）桑野基史，上浦正樹，董勤喜：小型 FWD 載荷板と平板載荷の剛性評価に関する研究，土木学会第 64 回学術年次講演会，V-041，pp.79-80，2009.
20）White, D., Thompson, M. and Vennapusa, P.: Field Validation of Intelligent Compaction Monitering Technology for Unbound Materials, Techical Report, MN/RC, pp.208-212., 2007.
21）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，丸善，pp.173-174．1992.
22）上浦正樹，桑野基史：平板載荷試験と小型 FWD によるせん断抵抗角の評価法の提案，土木学会舗装工学論文集，第 15 巻，pp.169-176，2010.
23） 4）と同じ，p.74.