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 斎 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			

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⁵⁰.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⁶⁰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: er),除荷しても元に戻らないひずみ(永久ひ ずみ: $\epsilon_{\rm p}$)とすると $\epsilon = \epsilon_{\rm r} + \epsilon_{\rm p}$ 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 D₅₀=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.

(2) 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 倍とし,砂系で は K_{PFWD} 値が K_{30} 値の 1 6 とし,砂系で 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



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.

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

ここで

 $E: ヤング係数(MPa), v: ポアソン比, <math>\sigma:$ 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



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

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.

(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1m×1m×1m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1.9g/cm³,乾燥密度 1.6g/cm³,飽和度80%となった.三軸圧縮試験で は直径5cm×高さ10cmの供試体を用いた.圧密

載荷条件	土の種類	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)	$\pi/2\sim 2$

表-1 Shape factor²⁰⁾

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.

(2) 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



図-4 小型 FWD と変位計

みとして,この1/10の0.001 とその中間値0.005 と用いた。

4. 力学試験の結果

(1) 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⁴¹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).

(2) 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



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.





(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



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.

(4) 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



図-12 圧密非排水三軸圧縮試験



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.

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





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)

(1) 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/cm³).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



図-16 土粒子の移動量を撮影

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.

(2) 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





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。

- 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】

- 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.
- 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.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R. and Wellner, F.: Pavement Desing Model for Unbound Granular Materials, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.665–674, 2004.
- 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.