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	小型FWDを用いた粒状材の変形特性に関する基礎的研 究
著者	 上浦, 正樹; KAMIURA, Masaki
引用	北海学園大学工学部研究報告(40): 27-39
発行日	2013-02-12

小型FWDを用いた粒状材の変形特性に関する基礎的研究

上 浦 正 樹*

A Basic Approach for the Deformation Charactereristic of Unbound Aggregates Using Portable FWD

Masaki KAMIURA*

要 旨

アスファルト舗装関係の示方書類では路盤・路床の力学特性が荷重支持特性と変形特性 に分類されているものの小型FWDで変形特性に必要なひずみレベルの規定が明確でな く、また変形特性のための繰り返し載荷試験の事例がほとんど見られない.そこで本研究 ではこれらの点に着目し基礎的検討を行った.その結果、1回載荷試験においては既往の 研究から変形特性の評価に必要なひずみレベルは荷重支持特性で用いられるひずみの1/2 程度であることを明らかにした.また繰り返し載荷試験ではシェイクダウンの概念に基づ きヒステリシスループの最大荷重と復元変位の比が変形特性を示す指標になりうることを 示した.

1. はじめに

(1)研究背景

アスファルト舗装では粒状材が主体である路床や地盤に対しCBR値と地盤反力係数が規定されている.これらの規定に関して我が国では1953年に現場CBR試験方法と道路の平板載荷試験 方法として日本工業規格に定められている¹⁾.その後,開発された小型FWDでは路盤・路床, 地盤に剛性評価に関して平板載荷試験方法で規定されている変位などに準じて規定値を使用し ている²⁾.一方,アスファルト舗装に理論的設計法が導入され,アスファルト舗装を多層弾性 体と見なして舗装各層のひずみを推定して破壊に至る許容輪数を予測するシステムが確立され たが,ここで必要となるアスファルト舗装を構成する各層の弾性係数などは室内試験で得られ たデータを活用するとしている³⁾.さらに舗装標準示方書(2007制定)では路盤・路床の力学

^{*} 北海学園大学工学部社会環境工学科

^{*} Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

特性について荷重支持特性と変形特性に分類し、それぞれ特性に関して要求性能を満たすこと を定めている⁴⁾.ここで示された荷重支持特性ではK₃₀値があり、そこで規定している変位は 1.25mmである.また、変形特性では変形係数、レジリエント・モジュラス(Mrとする)など があり、FWDあるいは小型FWDによる調査結果により求めた弾性係数を変形係数と等値とし て扱ってよいとしている.これは、含水比が同じで条件下で室内試験から推定されるMrの値 とFWDで推定した弾性係数はほぼ同じ値であるとした報告⁵⁰によっている.次に諸外国では変 形係数やMrの推定に小型FWDを用いる研究は最近多く見られる.そのうちGeorgeらは小型 FWD試験から得られる荷重と変位をテルツアギの弾性式に入れることで弾性係数Eを求めた. さらにこれからEとMrの関係を統計的な処理によって、関係式を提案している⁶⁰.しかし、小 型FWD試験で荷重支持特性と変形特性を分けて検討している例はみられないものと思われ る.

粒状材の変形係数は非弾性体であり、載荷による変形はひずみレベルに依存しているが、以 上のように、小型FWDを用いて粒状材の変形特性に推定する場合に適切なひずみレベルを規 定している例はほとんどないと考えられる.そこで本研究では、1回載荷と繰り返し載荷にお いて粒状材における変形特性の基本的な検討を行い、さらにシェイクダウンの概念に基づき変 形特性を整理することで、変形特性を求めるための基礎的な考察を行うこととする.

(2)繰り返し載荷に必要な用語の定義

小型FWD試験の変位測定は加速度センサーなどによって測定し演算処理を行うため,除荷 によって変位は0となる.よって,繰り返し載荷試験では累積した変位を求めることはできな い.よって本研究では外部の不動点に設置した変位計から変位を求める方法を採用した.ここ で使用する「変位」は載荷と除荷の1サイクルを対象として,不動点に対する鉛直移動距離を 示す.またその最大値を「最大変位」とする.「ひずみ」は,鉛直方向の圧縮ひずみを表す. また,ひずみ(ϵ)の定義は変位 δ と載荷板の半径 aにより $\epsilon = \delta/a$ とした.「最大ひずみ」は 最大変位から求めた.次に,繰り返し載荷では,変位が蓄積されるので「累積変位」とし,載 荷・除荷が終了後,荷重が0になった状態を「永久変位」とした.加えて,載荷開始から累積 した永久変位を「累積永久変位」とし,1サイクルで除荷後(載荷荷重が0)に測定される永 久変位の増加分を「永久変位増分」とした(**図**-1).同様に繰り返し載荷におけるひずみに ついても変位の定義に準じて「永久ひずみ」,「累積永久ひずみ」,「永久ひずみ増分」とした.

2. 変形特性に関する取組み方

ここでは小型FWDを用いた変形特性を調べる上で必要となる繰り返し試験の意義と1回載 荷試験と繰り返し試験におけるひずみの上限の設定の必要性について示す.



(1)繰り返し試験

Gurpらによると小型FWD試験では予備載荷5回程度にして載荷による締固め効果を最小限 に抑える必要があるとしている⁷.しかし舗装敷設後に交通荷重によって路盤や路床は繰り返 し載荷されることから,施工時に行われる変形特性を調べるうえで小型FWD試験において は,繰り返し載荷が必要であると考えた.

交通荷重のように移動して載荷される場合は鉛直方向だけでなく水平方向も考慮した検討が 必要となる. AASHTO T307 (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)によってMrの値を定めている⁸⁰. ここ では移動荷重によって主応力和や軸差応力が変わることを考慮している⁹⁰. また,シェイクダ ウン理論では,Sharpらが「載荷・除荷を繰返すことで発生する永久ひずみは発生しても増分 が増加しない状態」をplastic shakedown領域として扱うことを提唱している¹⁰⁰. 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条件として繰り返し載荷試験ではこのシェ イクダウン領域で行うべきであるとしている¹¹⁰. これからシェイクダウンを扱うときにはその 領域の上限のひずみ状態の予測が重要となる. Lekarpら (1998) は繰り返し三軸圧縮試験の結 果をもとに累積ひずみを予測するモデルを提案し、シェイクダウン領域のひずみの上限を明ら かにしようとしている¹²⁰.

以上のように小型FWD試験では鉛直方向の載荷であり,Mrを求める試験法で採用されてい る主応力和や軸差応力の変化に対する試験を行うことはできない.しかし,1回のみの載荷試 験によらず載荷・除荷の繰返し試験によることで,このMrを求める試験法の結果に近づける 可能性がある.よって本研究では小型FWDの繰り返し載荷試験によってこの変形特性を検討 することとする.

(2)1回載荷試験

我が国では荷重支持特性において平板載荷試験によるK₃₀値を用いている¹². この載荷条件で のひずみは8×10⁻³程度であり、小型FWD試験で荷重支持特性を調べた場合もこれに準じてい る¹³⁾.本研究では変形特性の上限を検討するために、既往の研究でアスファルト舗装の断面が 明らかなもの¹⁴⁾を用い、舗装体を多層弾性体として弾性係数などを仮定し、FEM解析¹⁵⁾により FWD試験によって発生する粒状材の路盤・路床のうち最もひずみの大きい上層路盤の上面で のひずみの推定を行った(図-2).ここでは、載荷荷重を49kN、載荷板の直径を30cm、弾性 係数とポアソン比はアスコン層(2000MPa:0.3)、粒調砕石層(150MPa:0.35)とした.ま た、供用後を想定して弾性係数を一律0.5倍したものを求め、その結果を0.5として併記した. この結果では、最大ひずみは2×10⁻³前後であり、荷重支持特性に関して平板載荷や小型FWD で扱っているひずみ(8×10⁻³程度)と比較するとはるかに小さいことがわかる.また、FWD を用いたMrの推定法の関する論文¹⁵⁾において、同様な手法を用いて粒状砕石(M-30)層の上 部のひずみはFEM解析を行ったが、その結果、路盤上部のひずみは0.8×10⁻³程度であった.

外国では接地圧を一定にして粒状材の剛性(stiffness)求める論文が多く見られる^{17),18)}が, ひずみについて言及する論文はほとんど見られない.これらの論文ではstrength and stiffness¹⁹⁾ と表記する例があるように強度strengthと区別し,テルツアギの弾性式を用いて弾性係数を剛 性としている.そこで,これらに関する論文の中で載荷荷重,載荷板の直径,弾性係数が示さ れているものを用いてひずみを推定した(**図**-3).よって外国の文献で剛性(stiffness)求め る場合のひずみは2×10⁻³程度であり,我が国の荷重支持特性で使用されているひずみレベル 8×10⁻³程度よりもはるかに小さい.

小型FWDをMrの推定に用いる例でGeorgeらの論文ではひずみレベルが1×10⁻³程度であった.また,Ebrahimiらは小型FWD試験での荷重・変位関係を用いてMrを逆解析で推定するソフト(MICHPAVE)よりMrを推定する方法を示しているが,ここで使用している小型のFWDの変位から推定したひずみは0.8×10⁻³程度であった²⁵⁾.



以上から、小型FWDを用いて1回載荷と繰り返し載荷における変形特性を検討するため

に、図-3から荷重支持特性のひずみの1/2である4×10⁻³とした.よって、荷重支持特性の ひずみレベルとこのひずみにより変形特性を検討することとした.

3. 力学試験

(1)本研究での検討プロセス

粒状材の変形特性を検討するための第一段階として、小型FWDと平板載荷試験装置を用い て粒状材層上面に接地圧計を設置した載荷板を用いて載荷板表面の接地圧分布状態を観察する こととした.また鉛直方向の断面で土粒子の移動を観察する可視化の手法により、載荷時の粒 状材層内の応力の分布状態を検討することとした.次に小型FWDと平板載荷装置により試験 土槽を用いて繰り返し載荷試験を行い、永久変位と載荷・除荷の1サイクル内における荷重・ 変位のヒステリシスループからその形状と粒状材の変形特性との関連を求めることとした.以 上から、小型FWD試験による変形特性を検討するための指標を考察することとした.

(2) 可視化試験用ボックスによる繰り返し載荷試験

a)試験方法

使用した礫材は、中礫(9.5~26.5mm)85.0%、細礫(2mm~9.5mm)14.9%、砂(2mm以下)0.1%であった.この材料を可視化試験用ボックス(図-4)に投入して突き固めたが、予備載荷に5回~7回を要し、最終的な湿潤密度は2.2g/cm³、含水比は10%となった.可視化用ボックス³⁰⁾の内寸法は横550mm×縦500mm×幅70mmで側壁には厚さ50mmのアクリル板を設置した.アクリル板と礫材との摩擦を軽減するためにアクリル板の内側に厚さ2mmのポリエステル製シートを貼ることとした.また、重錘の質量は5kgを用いた.載荷板の直径は地盤の深さの関係³⁷⁾から10cmとし、載荷板の中心から鉛直方向の断面を観察するため半月状の





図-4 可視化試験用ボックス



図-5 載荷板と接地圧計

載荷板を使用して長辺側に接地圧計(直径 7 mm,容量 2 MPa)を埋め込み(図-5),これを アクリル板側に設置した.変形特性を取り扱うためには荷重支持特性とは異なる最大変位を設 定すべきであるが,第一段階としては荷重支持特性で使用されている最大変位を用いることと した.よって重錘の落下高さを固定して,半月状の載荷板と同じ面積となる円板載荷板の直径 は 8 cmとなることから 1 回あたりの最大変位の目標を0.4 mm(ひずみ0.01)とし,載荷回数 を20回とした.

b)試験結果

繰り返し載荷における累積変位の推移(図-6)では繰り返し載荷では累積変位が増すごと に永久変位増分が減少し,後半に近づくに従い載荷・除荷のヒステリシスループは同じような 形状を示す傾向が得られた.また,永久変位増分と回数の関係では5回を過ぎるとほぼ一定に なることがわかる(図-7).よって本試験において永久変位増分がほぼ一定のケースでは, シェイクダウンの考え方によるとplastic shakedown領域での繰り返し載荷試験が行われている ことになる.ここで載荷点中心の接地圧分布では初期状態(1回目)では相対的に他よりも大 きい(図-8)が,10回目ではさらに中央部分の圧力が卓越している(図-9).しかし,そ れからは回数が増加してもこの傾向は大きく変化がないことが観察された(20回目:図-





10). これから,繰り返し載荷では締固めた状態が一定状態に達するまでは永久変位増分は減少し,接地圧は載荷板中心の集中する傾向があることが観察される. その後は永久変位増分の変化はあまりなく, plastic shakedown領域の挙動が考えられた. また,接地圧は載荷板中心の集中する傾向がより高くなることが観察された.

以上より小型FWD試験では鉛直方向の圧縮ひずみが生ずるので荷重支持特性でのひずみの より小さい変形特性の場合はこれらの値そのものは弱まるが、全体の傾向は変わらないものと 考えられる.

(3) 可視化処理

可視化用試験ボックスの側面に設置したアクリル板により載荷時の載荷板直下の土粒子の動きを撮影した.なお、ベクトル図は土粒子の移動量は非常に小さいので、メッシュの間隔は1 cm単位に対してベクトル表示はその1/20の0.5mmとしている.

前半のベクトル図(0回~10回)(図-11)では締固めが卓越していることで載荷によって鉛 直方向の移動が大きいが, plastic shakedown領域と考えられる後半のベクトル図(11-20回)

(図-12) では載荷中心で鉛直方向の移動が大きい.これは接地圧測定で示された載荷中心が 大きいことが原因と考えられる.以上から,この検討では荷重支持特性での各載荷の最大ひず みを対象としているが,それよりも小さなひずみであっても圧縮ひずみに直接関係する移動載



荷板の中心の鉛直方向の下向きへの移動が卓越し,一部で載荷板の外側での側方流動があるも のの上向きの移動は少ないことが観察された.

(4) 試験土槽による繰り返し載荷試験

a)試験方法

使用した礫材は粗礫89.5%, 中礫9.8%, 細礫0.6%, 砂0.1%であり, 湿潤密度は2.13g/ cm³, 含水比4%であった.小型FWDにおいて重錘質量は5kg, 10kg, 15kgの3種類, 載荷板 は直径10cm, 20cm, 30cmの3種類により, この組み合わせから合計で9通りの異なる載荷試 験を行った.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(最大変位5 mm, サンプリング間隔100msec)を2個により外部の不動点から設置して連続して測定し た.平板載荷試験ではロードセル(最大荷重50kN, サンプリング間隔100msec)をセットし, 直径10cm, 20cm, 30cmの各載荷板に2個の変位計を取り付けた.載荷速度は既往の研究²⁸に 準じて0.2kN/secを用いた.繰り返し回数は50回とした.

b)試験結果

1) ひずみの違いの影響

繰り返し載荷試験でえられた最大ひずみの平均値は載荷板と重錘の組み合わせにより0.003 ~0.015までの9段階であった.繰り返し試験での最大荷重の平均値をそれぞれの載荷板の面 積で除して路盤上面の接地応力とした.次に最大変位の平均値を求め,接地応力の比を接地応 力/変位とした(図-13).この比は粒状材の剛性に関係するものと考えられる.この結果か ら小型FWD試験による繰り返し載荷はひずみが大きくなるに従い,剛性を高く評価する傾向 にあることがわかる.これは小型FWD試験でのひずみは圧縮ひずみが主体であるためで,せ ん断ひずみを主体とする三軸繰り返し圧縮試験とは異なる傾向を示している. 小型FWDを用いた粒状材の変形特性に関する基礎的研究



2)小型FWD試験と平板載荷試験の比較

小型FWD試験で得られる最大接地応力と最大変位の比のうち載荷板の直径が30cmのとき小型FWDでは K_{PFWD} 値であり、平板載荷試験では K_{30} 値である.これらの比(K_{PFWD} 値/ K_{30} 値)は換算係数 γ で示されるが、この値は粒状材では1を超えて砂では1.5、礫材では2とされている²⁹⁾.これを拡大して小型FWD試験と平板載荷試験の全ての試験について最大応力と最大変位の比(K値とする)とし、小型FWD試験と平板載荷試験において同一の変位のときのK値の比を拡大換算係数 γ とした.以上により同一ひずみで平均値との関係を示す($\mathbf{2}$ -14).この結果では拡大換算係数 γ はひずみの増加ともに大きくなる傾向にある.よって、変形特性を対象とする場合では小型FWD試験と平板載荷試験のK値の差が小さくなる可能性が推定される.

3)累積変位と載荷荷重

繰り返し載荷試験結果のうち図ー15は平均最大変位0.4mmにおける結果で、この変位は欧米の小型FWD試験で行なわれているひずみに近い例(2.7×10⁻³)ものである.このように、 plastic shakedown領域でほぼ同じヒステリシスループの載荷試験が得られた.

4) 載荷・除荷のヒステリシスループ

ヒステリシスループの典型的な例(繰り返し小型FWD試験,50回目)を示す(図-16).こ の図で,ACは最大変位,BCは復元変位,ABは永久変位増分を示している.可視化試験用 ボックスと試験土槽とでは粒度分布と載荷板形状が異なるが,ともに小型FWDで用いている ことから永久ひずみ増分と最大ひずみの関係を検討することとした(図-17).これから,試 験用土槽の試験ではこれらの間で比例関係が認められることに加え,試験用土槽での試験と可





視化ボックスでの試験では共にこれらの間に比例関係があることが認められた.

次に図ー16のヒステリシスループで囲まれた面積(S)が変形によって蓄えられたエネルギ と仮定し、試験用土槽と可視化ボックスでのこの面積(S)と載荷荷重の関係を検討すること とした.ここで最大荷重Pmaxと最大変位Xmaxを用いて係数WE(等価仕事: Equivalent Work とする)をWE = $S/(Pmax \times Xmax)$ として定義した.また小型FWD試験の載荷荷重 (Fmax)は式(1)⁽³⁰⁾を用いた.

$$F \max = \sqrt{2MgHR} \tag{1}$$

M:重錘質量,H:落下高さ,R:緩衝用ゴムバッファのバネ定数,g:重力加速度

式(1) 試験用で土槽と可視化試験ボックスでは異なる重錘質量と落下高さであることから,(MgH) ^0.5を載荷

荷重の変数として選び,WEとの関係を求めた(図-18).この図で30cm,20cm,10cmは載荷板の直径を示す.この結果からWEは載荷荷重の大きさに相関が高く,WEと(MgH) ^0.5 とは反比例の関係にあることが明らかになった.このことは,載荷荷重が大きくなるとヒステ リシスループの囲まれた面積が小さくなる傾向を示す.これは載荷荷重が大きくなると復元変 位BCが大きくなるという変形特性を意味している.



図-18 ヒステリシスループで囲まれた面積と載荷荷重の関係



4. 小型FWD試験による変形特性のための指標

a) 変形係数

とになる.

小型FWD試験による予備載荷後の最初の試験で得られた最大荷重と最大変位に基づき,弾 性係数を求めた.これから荷重支持特性で使用されているひずみ0.008付近の変形係数値 (E)を基準として他のひずみにおける変形係数値(E')の比(変形係数比)を求めた(図-19).この結果,変形係数比とひずみは比例関係が認められた.これは図-13と同様に小型 FWD試験では圧縮ひずみが主体であるためと考えられる.よって変形特性に対する変形係数 は荷重支持特性での変形係数よりも小さい値を採用する必要がある.よって図-19のケースで は2.で述べたひずみの上限値0.004に対して荷重支持特性で使用される値の0.8倍を用いるこ

b) 復元変位に関する指標

小型FWDによる繰り返し載荷試験では復元変位XRを用い,最大荷重Pmaxとの比(KRとする)から KR= Pmax/XRを定義した.また,最大ひずみが永久ひずみ増分との関連が認められたことから,KR値と永久ひずみ増分の関係を求めた.ここでは繰り返しの最終段階の10回分についてKR値を求めた結果を示す(図-20).この図の凡例で30-15は載荷板の直径30 cm,重錘質量15kgを示す.ここで載荷板直径10cmのKR値は荷重支持特性のひずみよりも大きな値であるので,変形特性評価の対象から外すこととする.また変形特性評価の対象である載荷板直径20cmと30cmでは一定の範囲内に分布している.

以上から,KR値は粒状材の変形特性を示す指標となる可能性が認められた.

5 まとめ

以上から小型FWDに関して明らかになった点は以下の通りである.

(a) 1回載荷における路盤・路床の載荷試験で変形特性を求めるためのひずみは荷重支持特 性のためのひずみより小さいことが、外国の文献などから検討した結果から明らかになっ

37

た.

- (b)繰り返し載荷試験から、接地圧は載荷点中心に応力が集中する傾向が見られ、載荷板の下の土粒子でもこの影響と考えられる下向きへの移動が卓越していた.また、載荷試験で得られた変形係数とひずみの間には正比例の関係が得られた.これは載荷により圧縮ひずみが卓越することに関係しているものと考えられた.また、この現象はせん断ひずみが主体である三軸繰り返し圧縮試験で見られる傾向とは異なっていた.
- (c) 各試験のヒステリシスループはほぼ同じ形状をしていた. 各ヒステリシスループの最大 荷重と復元変位の比(KR)と永久ひずみ増分の関係から変位特性を求めるひずみの範囲 ではほぼ一定の範囲に分布していることが明らかになった.

今後はMRとKRの比較によりこの指標の妥当性について検討する予定である.

参考文献

- 1) JIS A1215: 道路の平板載荷方法,制定 1953.
- 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.69-70, 2002
- 3) 日本道路協会 舗装委員会 舗装設計施工委員会:舗装設計便覧, pp.136-139. 2006.
- 4) 土木学会 舗装工学委員会:舗装標準示方書, pp.38-40, 2007.
- 5) 阿部長門, 雑賀義夫, 丸山暉彦: 粒状路盤材・路床土のレジリエントモジュラス, 土木学会第48回学術年 次講演会, pp.878-879, 1993.
- 6) K. P. George : Portable FWD (PRIMA100) for in-situ subgrade evaluation, Final Report (U.S.DOT FHWA & MDOT), pp.23-24, 2006.
- 7) Gurp, C, Groenendijk, J.: Experience with various types of foundation tests. Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.241–242, 2000.
- 8) A. Boaterg : Evaluation of test methods for estimating resilient modulus of pavement geomaterials, Proceedings of the 28th Southern African Transport Conference, pp245–248. 2009
- 9) 日本道路協会 舗装試験小委員会:舗装試験方便覧別冊, pp.259-273, 1996.
- Sharp, R. W. and Booker, J. R.: Shakedown and Fatigue of pavements under movement surface loads, J. 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.
- 12) Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A.R.: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates, J. Trasp. Eng. ASCE, pp.76–83, 2000.
- 13) 2) と同じ, pp.69-73
- 14) 丸山記美雄, 熊谷政行: FWD散逸仕事量によるアスファルト舗装の疲労ダメージ評価, 土木学会論文集E
 1 (舗装工学), Vol.67, No.3, I_27-I_34. 2011.
- 15) 董勤喜, 姫野賢治, 八谷好高, 坪内将丈, 松井邦人: 動的荷重を受ける粘弾性多層構造の有限要素解析, 土木学会舗装工学論文集, vol. 8, pp54-61, 2003.
- 16) 雑賀義夫, 伊藤春彦, 阿部長門, 丸山暉彦: FWDによる試験区間の構造調査, 土木学会第48回学術年次講 演会, pp.848-849, 1993.

- 17) 例えばB. Rahimzadeh, M. Jones: performance testing of un bound materials within the pavement foundation, Proceedings of the 6th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.133–138, 2004.
- 18) 例えばA. Kavussi, K. Rafiei : A quality control method of pavement layers based on data obtained from PFWD, The 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and technological Control, pp.511 -519, 2009.
- 19) I. Hoff, A. Want : Expanded clay used for insulation in pavement–Strength and stiffness properties, Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.93–100, 2000.
- 20) K. P. George : Portable FWD (PRIMA100) for in-situ subgrade evaluation, Final Report (U.S.DOT FHWA & MDOT), pp.31-32, 2006.
- 21) J. P. Lambert : Novel assessment test for granular road foundation materials, CiCE Report RH4, pp83-84, 2007.
- 22) O.J–M. Hoffmann, B. B. Guzina : Stiffness estimates using portable deflecometers, TRB2004 Annual Meeting CD– ROM, Paper No,04–2304, 2003.
- M. A. Mooney, P. K. Miller : Analysis of lightweight deflectometer test based on in situ stress and strain response, ASCE, pp201–202, 2009.
- 24) White, D., Thompson, M. and Vennapusa, P. : Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbound Materials, Technical Report, MN/RC, pp.208–212., 2007.
- 25) A. Ebrahimi, T. B. Edil : Light-weight deflectometer for mechanistic quality control of base course materials, ICE -Geotech, pp.65–70. 2012.
- 26) 上浦正樹, 阿部長門: 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, 土木学会論 文集E1 (舗装工学), Vol.67, No.3, I_25-I_4.2. 2011.
- 27) 2) と同じ, p.74.
- 28) 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.
- 29) 2) と同じ, p.73
- 30) 2) と同じ, p.66