

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 Characteristic 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 K_{30} 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 (M_r 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 M_r 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⁵⁾によっている。次に諸外国では変形係数や M_r 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ァ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 M_r の関係を統計的な処理によって、関係式を提案している⁶⁾。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。

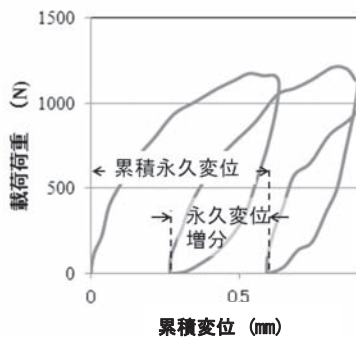
粒状材の変形係数は非弾性体であり、载荷による変形はひずみレベルに依存しているが、以上のように、小型FWDを用いて粒状材の変形特性に推定する場合に適切なひずみレベルを規定している例はほとんどないと考えられる。そこで本研究では、1回载荷と繰り返し载荷において粒状材における変形特性の基本的な検討を行い、さらにシェイクダウンの概念に基づき変形特性を整理することで、変形特性を求めるための基礎的な考察を行うこととする。

(2) 繰り返し载荷に必要な用語の定義

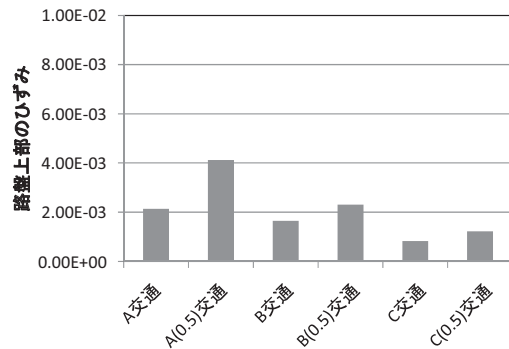
小型FWD試験の変位測定は加速度センサーなどによって測定し演算処理を行うため、除荷によって変位は0となる。よって、繰り返し载荷試験では累積した変位を求めることはできない。よって本研究では外部の不動点に設置した変位計から変位を求める方法を採用した。ここで使用する「変位」は载荷と除荷の1サイクルを対象として、不動点に対する鉛直移動距離を示す。またその最大値を「最大変位」とする。「ひずみ」は、鉛直方向の圧縮ひずみを表す。また、ひずみ (ϵ) の定義は変位 δ と载荷板の半径 a により $\epsilon = \delta/a$ とした。「最大ひずみ」は最大変位から求めた。次に、繰り返し载荷では、変位が蓄積されるので「累積変位」とし、载荷・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、载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(载荷荷重が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)。同様に繰り返し载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回载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。



図－１ 累積永久変位と永久変位増分



図－２ FWD载荷による路盤上部のひずみの推定

(1) 繰り返し試験

Gurpらによると小型FWD試験では予備载荷 5 回程度にして载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载荷されることから、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、繰り返し载荷が必要であると考えた。

交通荷重のように移動して载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秒の载荷後0.9秒無载荷状態の保持を 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 M_r の値を定めている⁸⁾。ここでは移動荷重によって主応力や軸差応力が変わること considering⁹⁾。また、シェイクダウン理論では、Sharpらが「载荷・除荷を繰り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¹⁰⁾。Werkmeisterらは交通荷重を繰り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载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¹¹⁾。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¹²⁾。

以上のように小型FWD試験では鉛直方向の载荷であり、 M_r を求める試験法で採用されている主応力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 回のみの载荷試験によらず载荷・除荷の繰り返し試験によることで、この M_r 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の繰り返し载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 K_{30} 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)、粒調碎石層(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 M_r の推定法に関する論文¹⁵⁾において、同様な手法を用いて粒状碎石(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)を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 M_r 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 M_r を逆解析で推定するソフト(MICHPAVE)より M_r 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

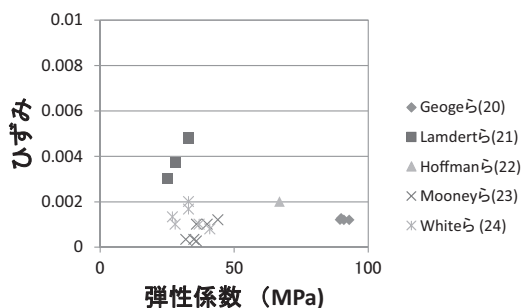


図-3 外国の文献によるひずみの推定

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と平板载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载荷板を用いて载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、载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と平板载荷装置により試験土槽を用いて繰り返し载荷試験を行い、永久変位と载荷・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载荷試験

a) 試験方法

使用した礫材は、中礫 (9.5~26.5mm) 85.0%，細礫 (2 mm~9.5mm) 14.9%，砂 (2 mm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、予備载荷に5回~7回を要し、最終的な湿潤密度は 2.2 g/cm^3 ，含水比は10%となった。可視化用ボックス²⁶⁾の内寸法は横550mm×縦500mm×幅70mmで側壁には厚さ50mmの亚克力板を設置した。亚克力板と礫材との摩擦を軽減するために亚克力板の内側に厚さ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。载荷板の直径は地盤の深さの関係²⁷⁾から10cmとし、载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

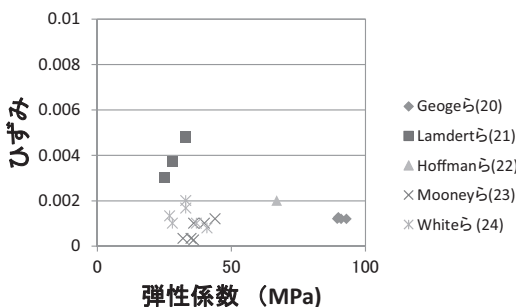


図-3 外国の文献によるひずみの推定

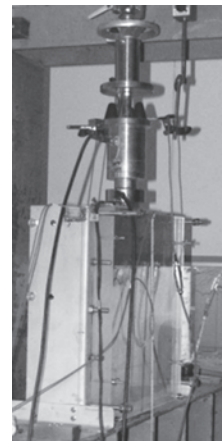
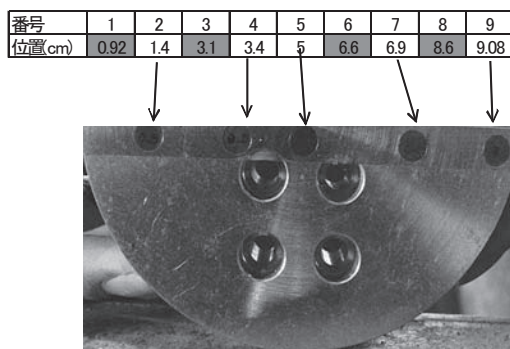


図-4 可視化試験用ボックス

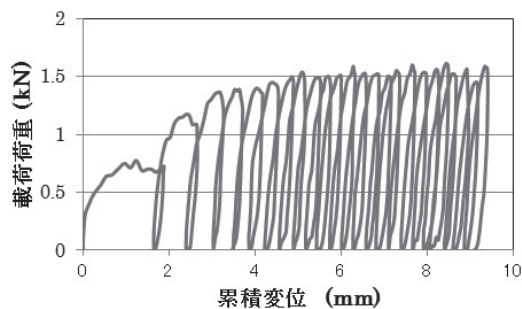


図－5 載荷板と接地圧計

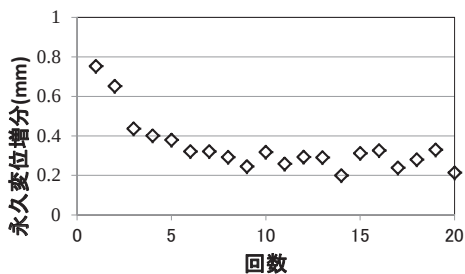
載荷板を使用して長辺側に接地圧計（直径 7 mm，容量 2 MPa）を埋め込み（図－5），これをアクリル板側に設置した．変形特性を取り扱うためには荷重支持特性とは異なる最大変位を設定すべきであるが，第一段階としては荷重支持特性で使用されている最大変位を用いることとした．よって重錘の落下高さを固定して，半月状の載荷板と同じ面積となる円板載荷板の直径は 8 cm となることから 1 回あたりの最大変位の目標を 0.4 mm（ひずみ 0.01）とし，載荷回数を 20 回とした．

b) 試験結果

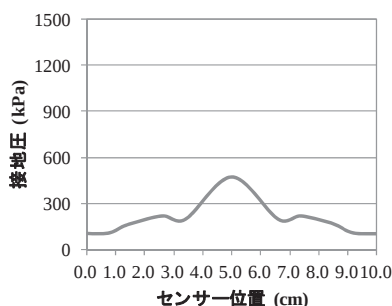
繰り返し載荷における累積変位の推移（図－6）では繰り返し載荷では累積変位が増すごとに永久変位増分が減少し，後半に近づくに従い載荷・除荷のヒステリシスループは同じような形状を示す傾向が得られた．また，永久変位増分と回数の関係では 5 回を過ぎるとほぼ一定になることがわかる（図－7）．よって本試験において永久変位増分がほぼ一定のケースでは，シェイクダウンの考え方によると plastic shakedown 領域での繰り返し載荷試験が行われていることになる．ここで載荷点中心の接地圧分布では初期状態（1 回目）では相対的に他よりも大きい（図－8）が，10 回目ではさらに中央部分の圧力が卓越している（図－9）．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



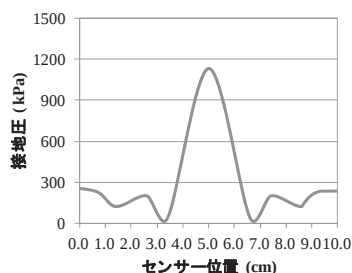
図－6 累積変位の推移



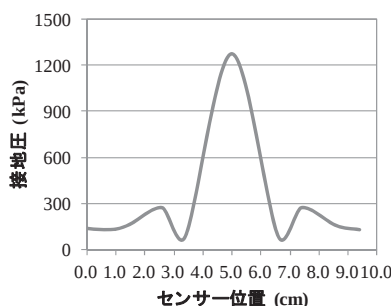
図－7 永久変位増分の推移



図－8 接地圧分布（1回目）



図－9 接地圧分布（10回目）



図－10 接地圧分布（20回目）

10). これから、繰り返し载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、接地圧は载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、接地圧は载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载荷時の载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载荷によって鉛直方向の移動が大きい、plastic shakedown領域と考えられる後半のベクトル図（11～20回）

（図－12）では载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载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载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

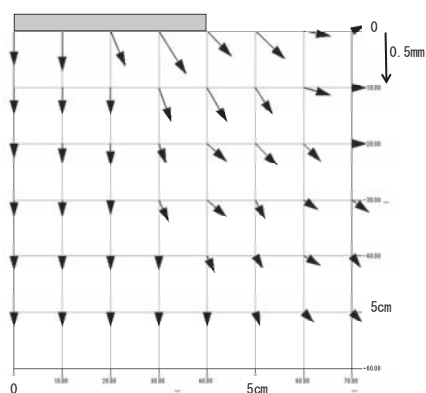


図-11 ベクトル図 (0回~10回)

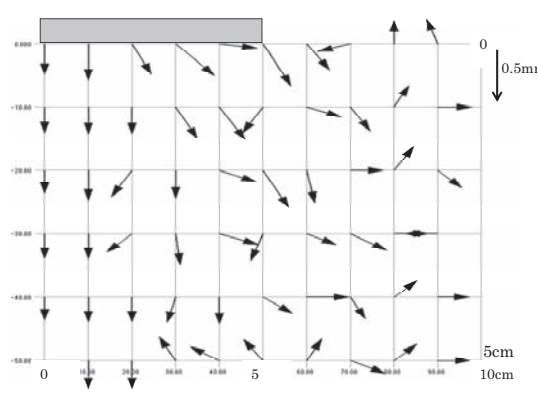


図-12 ベクトル図 (11回~20回)

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

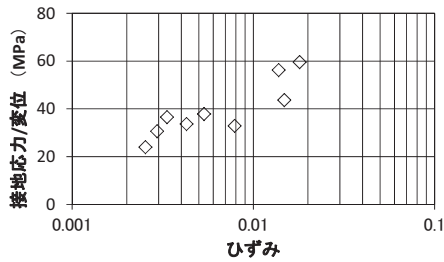
a) 試験方法

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 $2.13\text{g}/\text{cm}^3$ ，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5mm，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 $0.2\text{kN}/\text{sec}$ を用いた．繰り返し回数は50回とした．

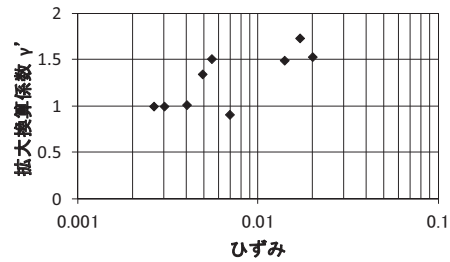
b) 試験結果

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．



図一13 接地応力／変位とひずみの関係



図一14 拡大換算係数 γ とひずみの関係

2) 小型FWD試験と平板載荷試験の比較

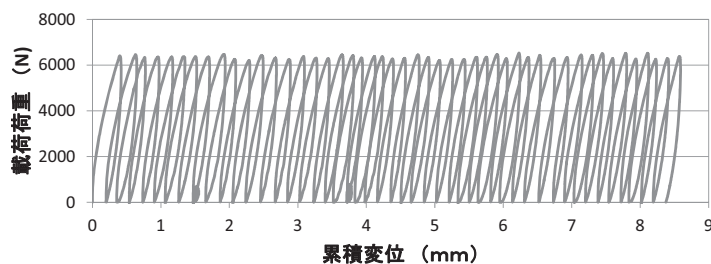
小型FWD試験で得られる最大接地応力と最大変位の比のうち載荷板の直径が30cmのとき小型FWDでは K_{FWD} 値であり，平板載荷試験では K_{30} 値である．これらの比（ K_{FWD} 値/ K_{30} 値）は換算係数 γ で示されるが，この値は粒状材では1を超えて砂では1.5，礫材では2とされている²⁹⁾．これを拡大して小型FWD試験と平板載荷試験の全ての試験について最大応力と最大変位の比（ K 値とする）とし，小型FWD試験と平板載荷試験において同一の変位のときの K 値の比を拡大換算係数 γ とした．以上により同一ひずみで平均値との関係を示す（図一14）．この結果では拡大換算係数 γ はひずみの増加と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一15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} ）のものである．このように，plastic shakedown領域では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（図一16）．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（図一17）．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



図一15 載荷荷重と累積変位の関係（載荷板直径30cm，重錘質量10kg）

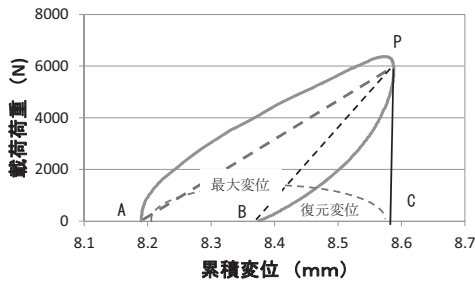


図-16 ヒステリシスループの例
(載荷板半径30cm, 重錘質量10kg)

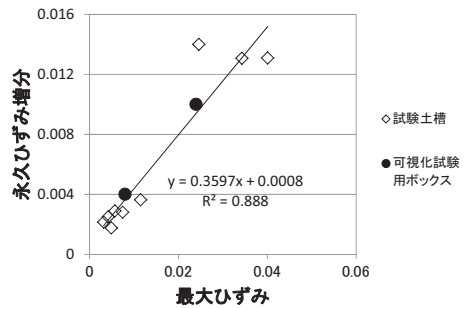


図-17 永久ひずみ増分と最大ひずみの関係

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-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ーと仮定し、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P maxと最大変位X maxを用いて係数WE (等価仕事: Equivalent Work とする) を $WE = S / (P \max \times X \max)$ として定義した。また小型FWD試験の載荷荷重 (F max) は式 (1)⁽³⁰⁾を用いた。

$$F \max = \sqrt{2MgHR} \quad (1)$$

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。

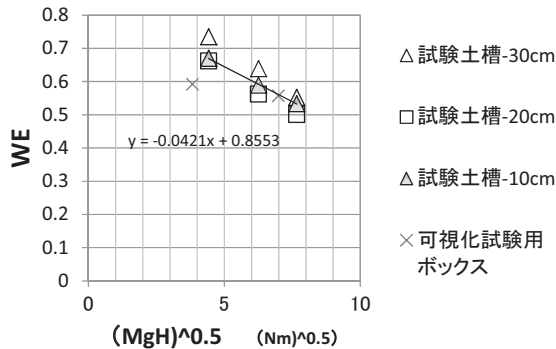


図-18 ヒステリシスループで囲まれた面積と載荷荷重の関係

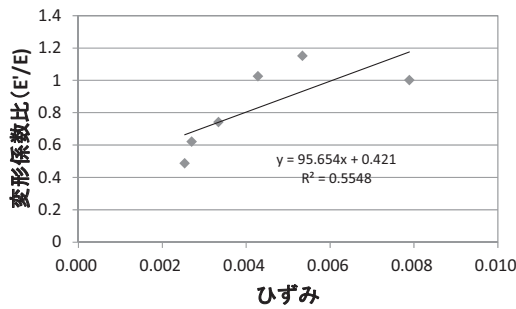


図-19 変形係数比とひずみの関係

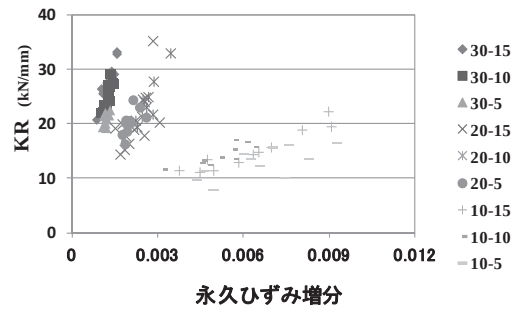


図-20 KRと永久ひずみ増分の関係

4. 小型FWD試験による変形特性のための指標

a) 変形係数

小型FWD試験による予備荷重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倍を用いることになる。

b) 復元変位に関する指標

小型FWDによる繰り返し荷重試験では復元変位XRを用い、最大荷重Pmaxとの比(KRとする)から $KR = P_{max}/XR$ 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30cm、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回荷重における路盤・路床の荷重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

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) Gulp, 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, pp.245-248. 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.
- 10) Sharp, R. W. and Booker, J. R. : Shakedown and Fatigue of pavements under movement surface loads, J. Trasp. Eng. ASCE,, pp.1-14, 1984.
- 11) 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, pp.54－61，2003.
- 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.
- 23) 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E 1 (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