

平板載荷を受ける路床土の変形に関する諸特性

土の種類と載荷法を異にしたことによる異同

渡辺正平*

(昭和63年5月31日受付)

Deformation Properties of Subgrade Soils Subjected to Plate Loading

Differences Arising from Soil Character
and Loading Method

Shouhei W_{ATANABE}*

In order to investigate deformation properties of subgrade soils, plate loading tests were performed in test pits using six circular disks of 5 to 30 cm in diameter. The tests were carried out on three kinds of subgrade soils, and loading was applied by three methods. The results obtained indicated that the displacement of the plate caused by non-repeated loading had both elastic and plastic one, hence the modulus of deformation calculated from it was not proper. Comparing the results of two repeated loading methods, the creep during a half minute in each cycle affected weakly the modulus of deformation for the unloading process. Once the subgrade was subjected to a greater intensity of load, the subgrade behaved almost as an elastic body. The moduli of deformation of two subgrades varied with the magnitude of load intensity or with the plate size, but little variation was seen in one subgrade. The ratio of the modulus of deformation in the CGS unit to the in-situ CBR value of subgrades was about 15-55. These are fairly small in comparison with the generally used value of 100-110.

緒 言

道路舗装の合理的な設計・補修法においては、各層の舗装構成材の変形係数を知る必要がある。現場試験においてこれを求めるために、平板載荷試験のほかに Benkelman Beam, Road Rator, Falling Weight

Deflectiometerなどによる試験が行われている^{2,3,9,11,12,13,16,17,22,25)}。これらはいずれも、表面に加えられた鉛直方向荷重に伴う表面変位を測定しようとするものである。その載荷面が必ずしも円形面でなくても、これを円形面に換算し、それに対する理論式から変形係数なり

* 鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

* *Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University*

を算定されている。その理由は、円形載荷面ならば軸対称構造に対する理論式が求められていて、その計算プログラムも開発され、計算図表も公表されているからである。実験装置に要する費用は別であるが、現場試験が非効率であることから最近では平板載荷試験が行われる例は多くはない。しかしながら、理論式との対応性においては、平板載荷試験が最も優れていると考えられる。ところが、同じ平板載荷試験であっても、その載荷方法を異にすれば生じる変位も異なり、従って、同じ対象物に対する変形係数も異なる。そこでここでは、屋外の土槽に締固めた3種類の土を対象とした平板載荷試験を行い、その載荷方法を異にすることによる路床の表面変位や変形係数の相違を測定し算定した。また、路床土が応力あるいはひずみ非線形性を示すことが知られている^{5,6,9,10,23,24)}。そこで、変形係数が荷重強度や円板の大きさによってどのように変化するかを調べてみた。なお、CBR値から変形係数を求める関係式がしばしば用いられているが、これについてもその妥当性について検討した。

試料と実験方法

この実験は、深さ1mで、2×20mの2個の土槽で行った。この土槽に3種類の土を別の場所に締固め、そのまま1年以上放置した後、その上で平板載荷試験を行った。この試験を行う直前に、測定場所の表面をコンクリートブロックで一樣に突固めた。ただし、その測定場所を順次移動させた。使用した土は、クロボク、粘性土、まさ土の3種類である。これらの物理的性質を第1表に示す。試験時の含水比はこれをことさら調節をせずに、この土槽の自然状態で行った。その含水比は、まさ土では最適含水比より4～6%下回っていたが、クロボクでは15～24%、粘性土では3～10%それぞれ上回っていた。

まず、直径30cmの円板を用いて3種類の載荷方法で平板載荷試験を行った。その載荷方法とは、JIS法、日

本道路公団の方法(公団法)、それに3回法である。JIS法とは、所定の荷重強度ごとに載荷面の変位が微小となるまで荷重を持続させ、順次その荷重強度を増加させるものである。そして、この変位が微小とは、1分間の変位がその荷重強度における変位の1%になったときとされている¹⁴⁾。しかしその判定は、実験者の主観に多少左右される。この方法は地盤係数を求めることを目的とされているようであるが、それによって変形係数を求められた例もある。公団法とは、路床土を対象とする場合には0.4kgf/cm²での30秒間の事前載荷を行い、その後所定の荷重強度ごとに5回ずつの載荷と除荷を繰り返すものである。ただし、荷重強度を零から増加させ、所定の荷重強度に達した後これを30秒間持続させるように定められている。除荷後も荷重が零の状態を30秒間持続するように定められている¹⁴⁾。3回法とは、所定の荷重強度ごとに3回ずつの載荷と除荷を絶えず繰り返すものである。ここでは、その荷重強度を順次増加させる方法で試験を行った。そして3回法では、特に直径5～30cmまで、5cmごとに直径を異にする6個の円板を使用し、同じ円板に対する実験を3回ずつ行った。

なお、荷重は手動のスクリージャッキによって与え、力計を見ながら荷重の大きさを調節した。変位の測定は円板の中心に対称に設置した2個のダイヤルゲージを読み取る方式で行い、両者の平均値を円板の変位とみなすことにした。

結果と考察

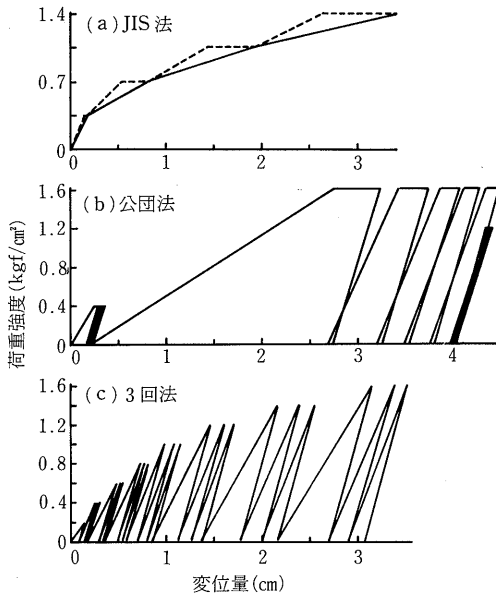
(1) 載荷方法による変位挙動の相違

まず3種類の載荷方法によって試験を行った場合の荷重強度と鉛直変位の関係の相違を第1図に示す。これは、直径30cmの円板を使用した場合のものであり、ここでは粘性土路床のもののみを代表して示している。他の路床土も、定性的には同様の傾向を示す。

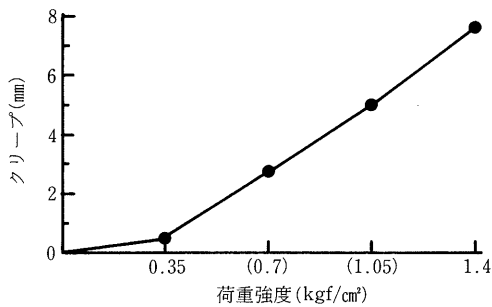
第1(a)図はJISによる結果である。この方法では、各荷重強度におけるクリープの進行がほぼ停止するまでその荷重強度での載荷を維持させている。そのために、この方法による変位には弾性変位と塑性変位が含まれている。このクリープ変位は荷重強度と共に大きくなっている。その様子を第2図に示す。ここでは上の凹の曲線となっている。これは単位荷重強度当りのクリープ量が荷重強度と共に次第に大きくなっていることを意味している。第3図は、JIS法の場合の載荷時間を表したものである。ここに示すように、この方法による載荷試験は長時間を要し、しかも荷重強度が大きくなるに従い変

第1表 使用土の物理的性質

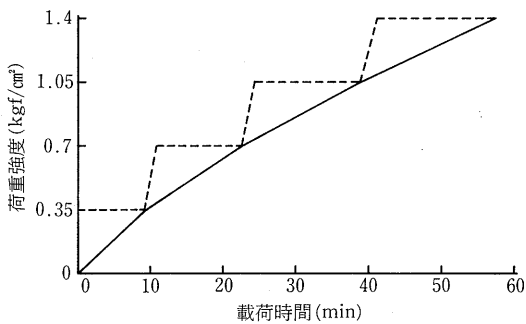
	粒徑分布(%)			コンシステンシー(%)			G _s	W _{opt} (%)	γ _{amax} (g/cm ³)
	砂	シルト	粘土	W _L	W _P	I _p			
まさ土	85.5	5.5	9.0	NP	NP	—	2.58	16.7	1.73
粘性土	37.0	45.5	18.0	51.0	37.9	13.1	2.55	27.8	1.43
クロボク	58.5	18.5	23.0	91.0	80.3	10.7	2.35	63.6	0.89



第1図 載荷方法を異にした場合の変位挙動の相違



第2図 JIS法におけるクリープ量

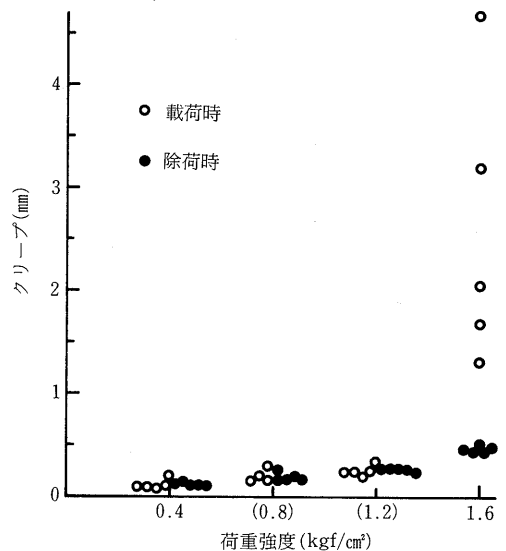


第3図 JIS法における荷重強度と時間の関係

位が安定するまでの時間が長くなっている。このことは、繰り返し載荷試験よりもこの方法の方が実験が困難であることを意味している。

次に、第1(b)図の公団法での荷重強度と変位の関係を見ると、特に、荷重強度1.6kgf/cm²における載荷時のクリープが大きく現れている。公団法の規定によると、路床土に対する試験では、最初に0.4kgf/cm²の事前載荷を行った後、荷重強度を0.4、1.6、5.6kgf/cm²と変えて各荷重強度で5回ずつの載荷・30秒間の荷重維持・除荷・30秒間の休止を繰り返すようになっている。ところが、ここで行った実験では、荷重強度が5.6kgf/cm²に対する載荷が行えなかった。その理由は、そこまで荷重強度を増加させようとするれば、その途中で路床が降伏した状態となり、この荷重強度が得られなかったからである。また、実際の路床においても、設計輪荷重によって路床に5.6kgf/cm²の鉛直応力が生じるようなことはあり得ないものと考えられる。このように、5.6kgf/cm²に対する載荷が不可能であったことと、路床に関してはこの荷重強度は実用的な意味を持たないものと考え、これに対する載荷を行わなかった。また、路床土は一旦大きな荷重を受けると、その後それよりも小さな荷重を受けた場合、塑性変位は微小なものとなる。そのために、第1(b)では、荷重強度0.8、1.2kgf/cm²に対する変位-荷重強度関係はほぼ同一の直線上を往復するような結果となっている。

なお、公団法における30秒間のクリープを第4図に示



第4図 公団法における30秒間のクリープ

す。この場合の載荷時（白丸）とは、30秒間その荷重強度を維持している間の変位の増加量を示し、除荷時（黒丸）とは、30秒間荷重強度を零とした場合の変位の減少量を示す。つまり、両者のクリープ量は反対方向である。第1(b)図と第4図に示されるように、事前に大きな荷重を受けると、その後それよりも小さな荷重を受けた場合の路床土はほぼ弾性的な挙動をするようになっている。これは、施工時の路床土の締固めが十分であれば、路床は初めから弾性体として取り扱っても実際との誤差は小さいことを示唆している。

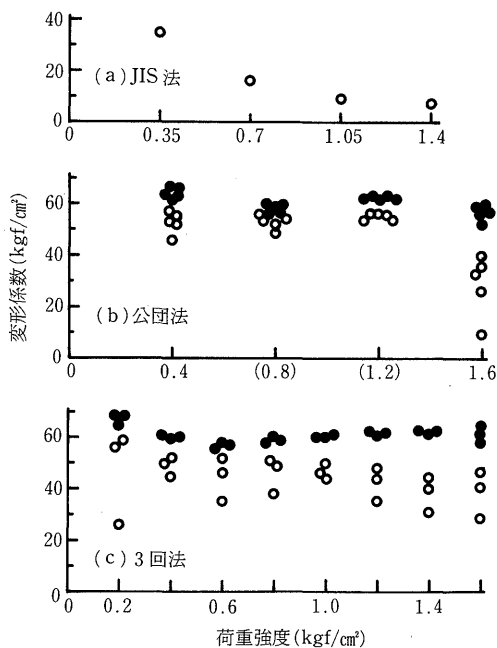
第1(c)図は、3回法における荷重強度と変位量の関係である。このように載荷と除荷を繰り返すと、全変位量が次第に大きくなってきている。しかしながら、除荷時の変位量だけをみると、各荷重強度における3回のこの値はお互いにほぼ等しくなっている。このことは、第1(c)図の除荷過程の3つの勾配は、どれもほぼ等しいことを意味している。この場合の3回法では、荷重強度を次第に増加する方法で載荷している。同じ3回法でも、先の公団法と同じように、一旦大きな荷重を載荷し、その後の繰り返し載荷の荷重強度を減少させる方法でも載荷できる。そのような場合には、最初が一番大きな荷重強度以外は、路床土はほぼ弾性的な挙動を示す傾向がみられる²⁷⁾。

(2) 変形係数の相違

この実験に使用した円板の直径は最大30cmであり、土槽の深さは1mでその底面はコンクリートである。同じ弾性体で半無限体のものと有限の深さのものに円板による鉛直荷重を加えると、理論的には前者の変位は後者のそれよりは大きくなる。しかし、その底面の深さと円板の半径の比を大きくすれば、両者の変位の差は次第に小さくなる²⁷⁾。また、半無限体に円形鉛直荷重を加えた場合の荷重強度と変位の関係は、理論的に示されている。いわゆるBoussinesqの式である。その際、弾性係数とポアソン比の値が必要となる。或は、荷重強度と変位が与えられているならば、弾性係数とポアソン比のどちらかを与えることによって、理論式から他方を求めることができる。そこで、ここでの実験の条件を半無限体とみなし、また、ポアソン比をとりあえず0.5と与えることによって、実験で得た荷重強度と変位の関係から弾性係数を求めることにする。このようにして求めた弾性係数は、必ずしも正確なものとは言えないが、その近似値としては有用であると考えられる。また、この方法による測定例は多い。なお、路床土は弾性的な性質ばかりではなく、塑性的・粘性的な性質も有している。そのためにこの種の問

題では弾性係数の代りに変形係数と呼ばれることが多い。以下でもこの「変形係数」なる用語を使用する。

第1図のように、3種類の方法で測定した荷重強度と変位量の関係を、上述の理論式にあてはめて算定した変形係数を第5図に示す。ここで、JIS法における変形係数は、規定に従い、各荷重強度におけるクリープ変位がほぼ停止した時点の全変位から算定したものである。ところが、公団法や3回法のような繰り返し法では、変形係数を算定するための変位として、変位差を用いた。この変位差とは、荷重強度が零における全変位と所定の荷重強度における全変位との差である。この際、公団法においては、30秒間のクリープ変位を除外している。この両方法において、この変位差は2種類定義できる。その一つは載荷過程の変位差である。これは荷重強度が零における全変位を、その後荷重強度を上昇させて、所定の荷重強度に達したときの全変位から差し引いたものである。もう一つは除荷過程の変位差である。これは、所定の荷重強度における全変位から、その後除荷し、荷重強度が零となった時点の全変位を差し引いた値である。このような理由から、第5(a)図のJIS法から求めた変形係数は、それを計算するための変位量にクリープ量が



第5図 3種類の載荷方法による荷重強度と変形係数の関係

含まれている点で他の二つの方法から求めたものとは異質である。また、この場合は、弾性変位と塑性変位との和を用いて変形係数を算定しているために、これを弾性係数に対応したものとして取り扱うことは適当ではないと考えられる。

次に、2種類の繰り返し載荷試験から得られた変形係数をみる。第5(b)図は、公団法によって得られた荷重強度と変形係数の関係である。この場合の荷重強度は、前述のように、 $0.4 \rightarrow 1.6 \rightarrow 0.8 \rightarrow 1.2 \text{ kgf/cm}^2$ の順序で変えている。そうすると、荷重強度が 0.4 と 1.6 kgf/cm^2 に対する載荷過程の変形係数は、除荷過程のそれより小さくなっている。この二つの荷重強度で載荷するときは、その路床は以前にそれよりも大きな荷重を受けていない。このような場合には、繰り返し荷重を受けることによって締固めが進行していると考えられる。なお、荷重強度 0.4 kgf/cm^2 に対しては、この載荷試験の以前にこれと同じ荷重強度による事前載荷を受けている。そのために、この荷重強度で載荷過程の変形係数のばらつきの程度は、 1.6 kgf/cm^2 のものよりは小さくなっている。

この実験では、公団法で荷重強度 0.8 と 1.2 kgf/cm^2 での載荷を行う場合には、それよりも大きな荷重強度による繰り返し載荷を既に経験している。そのために、これらの荷重強度に対する締固めは十分行われており、載荷過程の変形係数のばらつきの程度は小さく、しかもこれらは除荷過程の変形係数に近いものとなっている。このように載荷過程と除荷過程の変形係数の値が近いことは、路床土が弾性的な挙動をしていることを示している。

第5(c)図に示された3回法による荷重強度と変形係数の関係を見ると、載荷過程の変形係数はどの荷重強度においてもばらついているが、除荷過程のものはいずれの荷重強度においてもお互い3個が接近した値を示している。そしてこの方法による除荷過程の変形係数は、公団法によって得られたそれと近い値を示している。公団法では30秒間のクリープを進行させているが、3回法ではそれを行っていない。それでいて両者の方法による変形係数がほぼ等しいのは、クリープが除荷過程の変形係数にほとんど影響していないことを示している。なお、ここでの3回法では、繰り返し載荷の荷重強度を順次増加させる荷重増加法で載荷している。ところが、これとは逆の順序で繰り返し載荷を行う荷重減少法によると、最初の最大荷重を除き、載荷過程の変形係数と除荷過程のそれとがほぼ一致する傾向を示す²⁷⁾。これは、さきの公団法における場合と同様に、その荷重強度に対する締固めが十分であれば、路床土はほぼ弾性的な性質を示すこと

を意味している。

第5(b)、(c)図をみると、いずれの繰り返し載荷試験によっても、除荷時の変形係数は各荷重強度においてまとまりを示しており、また両方法によって得られたこれらの値は近似したものとなっている。このことから、以下では除荷時の変形係数のみに注目し、しかも、3回法による値について述べることにする。なお、公団法の本来の規定では、載荷過程の変位差から変形係数を算定するようになっている。ところがこの変位差には、上記のように塑性変位も含まれているから適当ではないと考えられる。

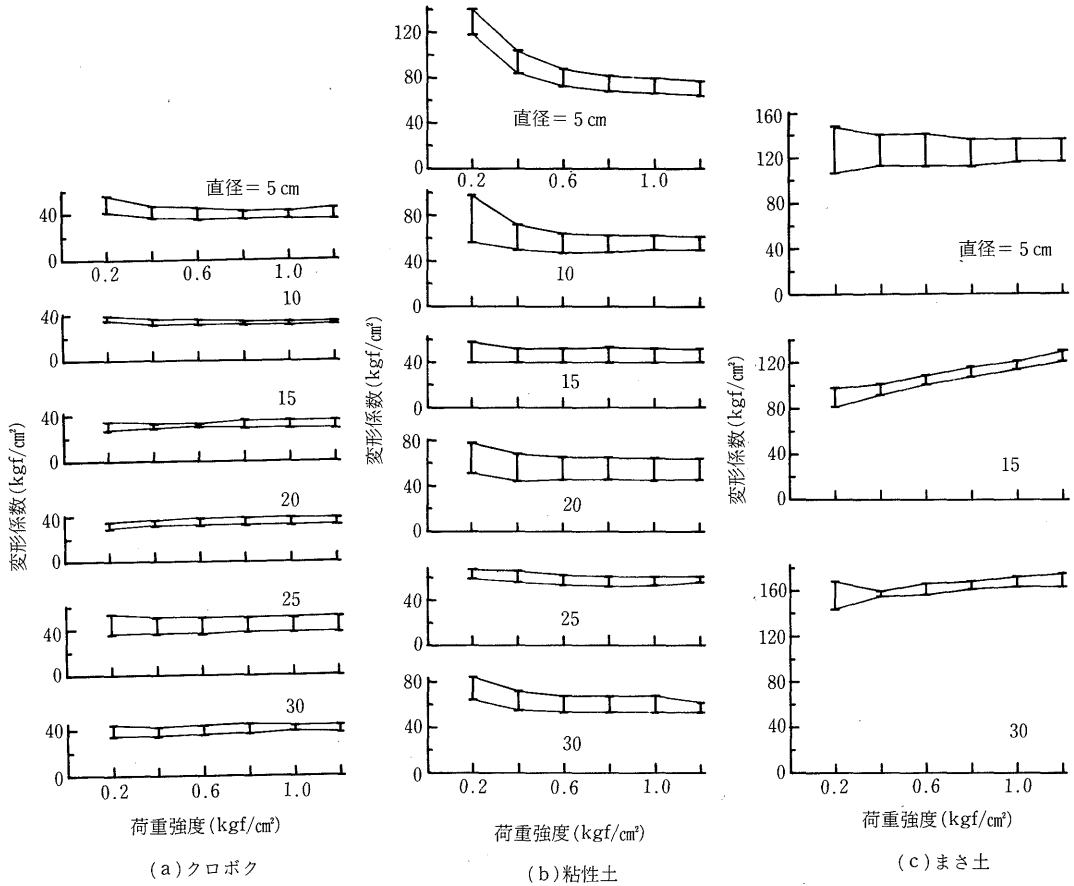
(3) 変形係数の非線形性

第5(c)図をみると、除荷時の変形係数は一定ではなく、荷重強度の変化に伴ってわずかに変化している。これは、路床土の非線形性が現れていると言える。この非線形性をさらに詳しく調べてみる。

(a) 荷重強度による変化

平板載荷試験を行うと、同じ条件の実験を行ったにも拘らず、同様の試験を別に行えばそれによって得られた変形係数は一般にお互いに離れたものとなる²⁷⁾。前述のように、3回法による載荷試験は6種類の直径の円板を使用し、同一の条件に対する載荷試験を3回ずつ行った。そのようにして得られた3種類の路床土に対する変形係数と荷重強度の関係を、それぞれの円板の場合について第6図に示す。ここでは、1回の試験による各荷重強度における変形係数の中央値を選び、3回の試験によって求められたそれらの最大値と最小値から作図をしている。なお、第6(c)図、つまりまさ土の場合には、直径10、20、25cmに対して得られた結果を、図面の大きさを考慮して省略している。

第6図によると、変形係数の非線形性の程度およびその傾向は路床土の種類によって異なっている。まず、第6(a)図、つまりクロボクの場合は、円板の直径が5cmに対するものを除けば、変形係数はほぼ一定であり、非線形性はほとんど無視できる程度のものである。ところが、第6(b)図、つまり粘性土の場合は、円板の直径が15~25cmのものを除き、変形係数は荷重強度の増加に伴って減少する傾向が認められる。そのうちで、円板の直径が5cmに対するものはその傾向が強い。また、変形係数の値は、円板の大きさによって異なっている。これらのことは、変形係数の非線形性を表しているものと言えよう。第6(c)図はまさ土に対するものであるが、この場合は前の二つの路床土とは異なって、直径15cmの円板に対して得られた変形係数の荷重強度に伴う変化が一番大きくな



第6図 3種類の路床土の荷重強度と変形係数の関係

っている。なお、粘性土の変形係数は荷重強度の増加に伴って減少する傾向を持っているが、まさ土ではその逆の性状を示している。これは、まさ土は粘性を有しておらず、その物理的性質が粘性土とは異なることに原因しているかと考えられる。

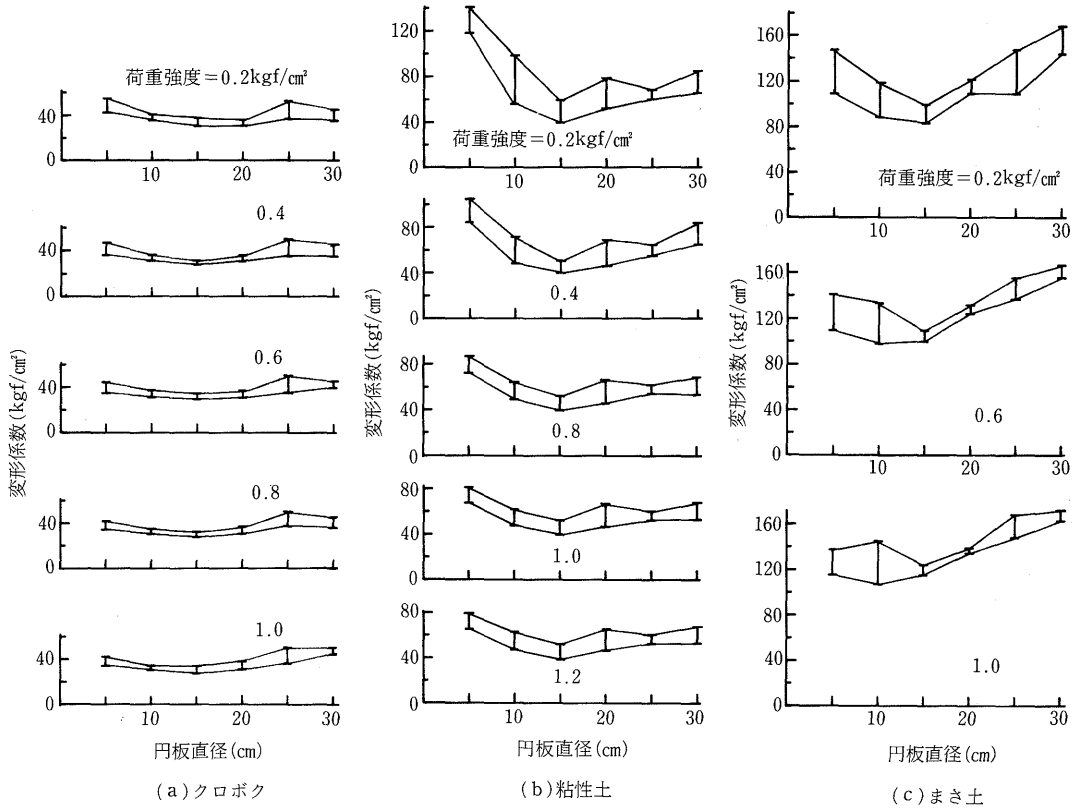
なお、ここに示した実験結果は、いずれも路床土のみを対象にして行ったものである。実際の道路ではその上に路盤と表層が敷設されている。そうなると、路床に対して円板による荷重以外の重量が上載されていることになり、この実験の条件とは異なっている。上層の表層と路盤の一部を破壊し、その下の路床面に対して平板載荷試験を行った場合の路床土の変形係数は、同じ路床土であっても、もともと表層と路盤が全然ない場合のものとは異なる。またそのような報告がみられ、表層と路盤が拘束された場合の路床土の変形係数は、それらが無い場

合のものよりは大きくなっている^{1,3)}。

(b) 円板の大きさによる変化

屋外での平板載荷試験は、一般に直径30cmあるいはそれよりも大きい円板を使用して行われることが多い。屋内の土槽での実験ではそれとは逆に小型の円板を使用されることが多い。路床土が線形性を示すならば、その変形係数は円板の大きさとは無関係のものとなる。ところが、第6図に示されたように、路床土の変形係数に非線形性の傾向がうかがえる。そこで、円板の直径と変形係数の関係を調べてみることにした。

第7図は、各荷重強度において変形係数と円板の直径の関係を表したものである。ここでも、第6図と同様に、3つの除荷変位から算定された変形係数の中央値をとり出し、3回の同一条件に対する測定値の最大値と最小値を各荷重強度で表したものである。3種類の路床土それ



第7図 3種類の路床土の円板直径と変形係数の関係

それぞれについて示しているが、まさ土では、図面の大きさを考慮し、荷重強度が0.6, 0.8kgf/cm²に関するものを省略している。

まず、第7(a)図、つまりクロボクの場合をみると、どの荷重強度においても、円板の直径が10~20cmに対して変形係数が最小となっている。しかし、この変形係数の変化の程度は他の二つの路床土に比較して小さい。そしてその変化の程度は、荷重強度が小さいときの方が大きくなっている。第7(b)図粘性土の荷重強度が0.2kgf/cm²場合には、直径15cmでの変形係数は直径5cmのものの5割以下となっている。第7(c)図、つまりまさ土の場合には、やはり円板直径が10~15cmに対して変形係数が最小となっている。まさ土は粘性土とは異なり、むしろ円板直径が30cmに対して変形係数が最も大きくなっている。このように、非線形性の程度や傾向が路床土の種類によって異なるのは、その物理的性質の違いに原因すると考えられるが、その詳細な説明は課題である。

このように同じ方法で載荷試験を行っても、変形係数が荷重強度や使用する円板の直径によって異なることは注意すべきである。多層系弾性論に基づいた舗装の合理的設計法においては、舗装構成材各層の弾性係数やポアソン比が一樣であるとの仮定のもとに解析が進められている。この場合どのような条件のもとに得られた変形係数をその路床土の変形係数として与えるかが一つの課題である。

(4) 変形係数とC B R 値の関係

従来の道路舗装の設計法では、路床土のC B R 値が舗装厚設計の基礎とされている。そのために、C B R 値の測定はしばしば行われている。合理的設計法においては、舗装各層の変形係数を知る必要がある。ところが、変形係数を測定することはC B R 値の測定に比べて多くの労力あるいは多額の費用を要する。手元に変形係数の測定値がなくてその値が必要な場合には、 E (kgf/cm²)/C B R = 100~110の関係を使用された例が多い^{4,7,11,15,18,19,20,26,28}。

この関係は、Heukelonら⁸⁾が弾性波試験によって得た弾性係数の値を基礎にして導いたものであり、その妥当性を疑問とする議論もある^{21,29)}。そこで、ここではこの実験で得た変形係数とC B R値を用いて両者の関係を求めてみた。

ところで、変形係数の値は、上記のように円板の大きさによって変化している。しかし、一般に屋外の実験では直径30cmの円板を使用されるから、ここではそれに対して得られた変形係数と比較することにする。そうすると、クロボク、粘性土、まさ土の変形係数はそれぞれ、35~45, 60~80, 140~170kgf/cm²である。この実験では、路床土の条件を平板載荷試験と同じにし、現場C B R試験を行った。その結果、平均C B R値は、クロボク、粘性土、まさ土それぞれに対し2.2, 2.8, 3.2%であった。これらから算定すると、E (kgf/cm²)/C B R値はクロボク、粘性土、まさ土に対してそれぞれ16~20, 21~29, 44~53となる。これらの値は、広く使用されている100~110とはかなり異なっている。したがって、C B R値から変形係数を推算しようとするような場合にはそれなりの注意が必要と言えよう。

総 括

平板載荷試験によって路床の変形係数を求める試みを、屋外の大型土槽で6種類の円板を使用して行った。ここで対象とした路床土は3種類である。まず、最初に載荷方法を変えて試験を行い、それによる変位挙動と変形係数の異同を調べた。その後、3回法による結果から変形係数の非線形性および変形係数とC B R値との関係などを調べた。ここで得られた結果の主なものを要約すると次の通りである。

1. 載荷試験をJ I S法と道路公団の方法および3回繰り返し法で行った。このうち、J I S法は所定の荷重強度でのクリープがほぼ停止するまで一定の荷重強度を維持し、順次その荷重強度を増加させるものである。後の二つは、所定の荷重強度ごとに繰り返し載荷を行うものであるが、公団法は30秒間のクリープの進行を認めるものである。この三つの方法のうちJ I S法は変位に塑性変位が大きく含まれているので、これから変形係数を求めるのは適当ではない。
2. 2種類の繰り返し載荷試験の結果によると、30秒間のクリープを認めても、除荷時の変位差から算定された変形係数は、それを認めない場合のものとの差異がない。また、載荷時の変位には弾性変位以外に塑性変位が含まれているから、これから変形係数を算定するのは好まし

くない。その上、載荷時の変位は載荷・除荷の繰り返しに伴って大きく変動する。しかしながら、路床土が一旦それよりも大きな荷重を受けると、載荷時の変位も除荷時のそれとほぼ等しく路床はほぼ弾性的な挙動を示すようになる。つまり、事前の締固めが十分であれば、路床土は初めからほぼ弾性体として取り扱えると言える。

3. 除荷時の変位から求めた変形係数は、非線形性を持っており、そのためこの値は、荷重強度あるいは使用する円板の大きさによって異なる。しかし、その非線形性の程度は路床土の種類によって異なり、クロボクではこれが小さい。粘性土やまさ土では、使用する円板の大きさを異にすることによって、変形係数の値が大きく異なることがある。また、粘性土の変形係数は荷重強度と共に減少する傾向を示したが、まさ土はその逆であった。この違いは、路床土の物理的性質に原因しているとも考えられる。

4. 直径30cmの円板を使用した除荷時の変形係数(kgf/cm²)とC B R値との比を求めると、3種類の路床土いずれにおいても一般に使用されている100~110よりもかなり小さい。したがって、C B R値から変形係数を推算しようとする場合には注意が必要となる。

文 献

- 1) Barros de, S. T. : Transportation Research Record, No. 145 60-82 (1966)
- 2) Benkelman, A. C. : Highway Research Board, Bull. 210 39-48 (1958)
- 3) Brown, P. P. : Proc. Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements, 680-685 (1963)
- 4) Chou, Y. T. : Transportation Research Record, 537 44-48 (1975)
- 5) Chou, Y. T. : Technical Report S-76-3, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Miss. (1976)
- 6) Chou, Y. T. : Final Report DOT-FA 73 WAD-377, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory, Vicksburg, Miss. (1976)
- 7) Dormon, G. M. and Metcalf, C. T. : Highway Research Record, No. 71 69-84 (1965)
- 8) Heukelon, W. and Foster, C. R. : Proc. ASCE 86 (SM1) 1-28 (1960)
- 9) Hoffman, M. S. and Thompson, M. R. : Transportation Research Record 852 32-41

- (1982)
- 10) Irwin, L. H. : *Proc. Fourth Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, No. 1 831-840 (1977)
 - 11) 笠原篤, 他 : 土木論集 254 107-110 (1976)
 - 12) Kilareski, W. P. and Anani, B. A. : *Proc. Fifth Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. 1 349-366 (1982)
 - 13) Liddle, W. J. and Peterson, D. E. : *Highway Research Record*, No. 330 10-15 (1969)
 - 14) 松野三朗, 他 : アスファルト舗装に関する試験. 建設図書, 東京 (1973) pp. 340-345
 - 15) 佐藤勝久, 福手勤 : 土木論集 303 109-118 (1980)
 - 16) Sharp, G. W. *et al.* : *Proc. ASCE* 107 (TE2) 167-181 (1981)
 - 17) Scrivner, F. H. *et al.* : *Highway Research Record*, 129 1-16 (1966)
 - 18) Singh, G. and Akoto, B. K. A. : *Proc. ASCE* 107 (TE6) 653-665 (1981)
 - 19) Smith, B. E. and Witczak, M. W. : *Proc. ASCE* 107 (TE6) 635-652 (1981)
 - 20) Taille de la, B. *et al.* : *Proc. Fifth Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. 1 682-694 (1982)
 - 21) 竹下春見 : 舗装. 土木学会関東支部編, 土木学会関東支部, 東京 (1966) pp. 51-52
 - 22) 達下文一, 他 : 昭和53年東京都土木技術研究所年報, 23-32 (1976)
 - 23) Thompson, M. R. and Robnett, Q. L. : *Civil Engineering Studies*, Transportation Engineering Series No. 14, University of Illinois (1976)
 - 24) Thompson, M. R. : *Civil Engineering Studies*, Transportation Engineering Series No. 46, University of Illinois (1976)
 - 25) Ullitz, P. : *Proc. Fourth Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. 1 722-735 (1977)
 - 26) Ullitz, P. and Peattie, K. P. : *Proc. ASCE* 106 (TE5) 581-597 (1980)
 - 27) 渡辺正平 : 鳥大農研報 39 92-100 (1986)
 - 28) Wiffin, A. C. and Lister, N. W. : *Proc. Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, 499-521 (1963)
 - 29) ヤン, N. C. : 舗装新設計法. 井上静三, 山下弘美訳, 森北出版, 東京 (1973) pp. 15-46