

## 荷重持続方式による平板載荷試験でみられた 路床土の変位挙動

渡辺正平\*

平成3年5月31日受付

### Deformation Properties of Subgrade Soils Induced by Continuous Plate Loading

Shouhei W<sub>ATANABE</sub>\*

Deformation properties of subgrade soil were investigated by a plate loading test. Changing the compaction energy in two values, the soil sample was compacted by using a falling weight in a circular cylinder of 35 cm in diameter and 29 cm in depth. Continuous loading of 0.35 kgf/cm<sup>2</sup> in the intensity of load was applied through a circular disc of 10 cm in diameter until displacement velocity became fairly little, and the load intensity was increased in regular sequence subsequently. Obtained results indicated that the relationship between load intensity and displacement was not linear, hence the continuous loading method was not appropriate to evaluate the modulus of elasticity of the soil. Velocity of creep displacement increased rapidly at the moment of the load intensity was increased, and then the velocity gradually decreased during the constant load was kept. There appeared an inflection point in the relationship between the creep displacement and the load intensity, and the displacement velocity per unit load intensity was increased when the load intensity became greater than the inflection point.

#### 諸 言

道路舗装の力学的設計のために行われる平板載荷試験では、いくつかの載荷方式が採用されている。これを大別すると、所定の荷重強度ごとの載荷を持続する方式と、載荷と除荷を繰り返す方式に分けられる<sup>2-4,9)</sup>。前者の載荷法によると変位を弾性変位と塑性変位に分離すること

が困難であるが、変位の進行過程を詳細に測定できる。後者の載荷法による変位にも弾性変位と塑性変位が含まれるが、1周期における載荷過程と除荷過程の変位を求めれば両変位を比較的良好に分離できる<sup>9)</sup>。

ここでは、円筒内に締固められた土試料に対して荷重持続方式による平板載荷試験を行って、変位の時間的な経過を詳細に測定・解析した。それによって、荷重強度

\* 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*

と変位の関係から変形係数を求めることの妥当性を検討するばかりでなく、クリープ変位や変位速度の時間的な変化を測定して変位の収束状況や、土の塑性的性質の解明の可能性を調べた。なお、実験に用いた土試料は1種類であるが、締固め仕事量を2種類に変えて締固めた試料に対して平板載荷試験を行った。

### 試料と実験方法

内径35cm、深さ29cmの鋼製円筒土槽に試料土を締固め、整形された上表面で直径10cm、厚さ2cmの鋼製載荷円板を使用して平板載荷試験を行った。試料土は鳥取市古海地区の水田から採取されたもので、その真比重は2.65、最適含水比は31.2%、最大乾燥密度は1.33g/cm<sup>3</sup>である。含水比を調整した試料土を、カラーをつけた土槽にランマーの落下によって3層に分けて締固めた。このランマーは重量4.5kg、落下高さ45.7cmで、下部に直径20cmの鋼製円板をつけたものである。締固めるときはこの円板の位置を円筒内で順次均等に移動させた。

まず、締固め仕事量を変えたことによって試料土の力学的性質がどのように変化するかを調べた。そのために、含水比を25.5%に調整した試料土を用いて1層当りの突固め回数を5～160回に変えて締固め、乾燥密度とCBR値を測定した。その結果を第1図に示す。これによると、1層当りの突固め回数が5～80回程度までは突固め回数の増加に伴っていずれの値も増加しているが、それ以上の締固め仕事量を与えられても2つの値に顕著な変化を認められず、試料土は安定していることがわかる。なお、このとき与えた締固め仕事量は $0.11 \times 10^4 \sim 3.54 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kg}/\text{m}^2$ であり、これはJIS A 1210 Tに定められた突固めによる締固め試験法第1法の締固め仕事量<sup>1)</sup>の2～63%に相当する。

第1図に示された結果から、安定した締固め状態に相当する1層当り150回と、そうでない状態の1層当り20回の突固めを行った試料土に対して平板載荷試験を行った。これらの突固め回数による締固め仕事量( $E_c$ )は、それぞ

れ $0.44 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kg}/\text{m}^2$ と $3.32 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kg}/\text{m}^2$ である。平板載荷試験はJIS A 1215<sup>2,4)</sup>に準拠した荷重持続方式で行った。つまり、まず $0.35 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の予備荷重をして除荷をした位置を変化の原点とする。そして、荷重強度 $0.35 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ での載荷をし、この荷重を持続する。この段階で、30秒毎のクリープ変位を読み取り、1分間の変位がこの荷重強度における変位の1%以下となった時点で変位が収束したもののみにしてこの荷重強度での載荷を終了する。その後は載荷強度を $0.35 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ずつ増加させて同様の測定を行い、荷重強度が $1.40 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ となるまでの測定を目標とした。ところが、それ以下の荷重強度であっても荷重を増加させる段階において土が破壊された状態になると変位が急激に増加し続けて載荷が不可能となる。そのようになれば試験を終了することにした。

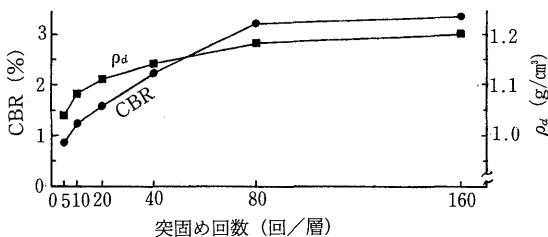
荷重は手動のスクリージャッキによって与え、力計を監視しながら荷重の大きさを調節した。変位は円板の中心に対称に設置した2個のダイヤルゲージの値を読み取り、その平均値を採用した。なお、この方式による試験では変位速度の時間的勾配が小さくなると変位の収束判定が微妙となりその判定に多少の主観を伴う。

### 結果と考察

含水比を最適含水比の95%となるように調整した試料土を土槽に締固めて平板載荷試験を行った。この含水比の選定は、最適含水比のときよりも含水比が小さ目のときの方が土の強度や変形係数が大きくなること<sup>10)</sup>、実験時の試料の取扱いが容易なことによるものである。2種類の締固め仕事量の試料に対してそれぞれ複数回の試験を行ったが、以下では各1回の試験の結果を代表して示す。締固め後の試料の乾燥密度は第1表に示す通りである。1層当りの突固め回数が20回の際の乾燥密度は最大乾燥密度の82%であるが、1層当り150回突固めると、最大乾燥密度に非常に近くなっている。

#### (1) 荷重強度と変位の関係

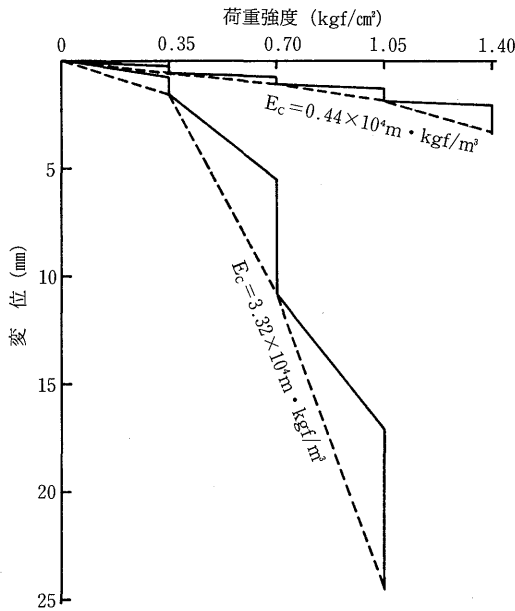
平板載荷試験で得た荷重強度( $q$ )と載荷円板の変位( $w$ )の関係を第2図に示す。1層当り20回突固めた場合は、荷重強度を $1.40 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ に増加させようとした段階で



第1図 乾燥密度およびCBR値の突固め回数に伴う変化

第1表 締固め仕事と乾燥密度比

突固め回数 (回/層)	$E_c$ ( $\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^2$ )	$\rho_d / \rho_{d\text{max}}$ (%)
20	$0.44 \times 10^4$	81
150	$3.32 \times 10^4$	98



第2図 荷重強度と変位の関係

変位が進行し続けて土が破壊状態となったために、この荷重強度での測定が出来なかったものである。第2図に示された荷重強度と変位の関係を理論式に当てはめれば、土を弾性体とみなした場合の弾性係数(E)を算定できる。いま、半無限体に円形剛性板による荷重が与えられた場合のEの値は次のBoussinesqの式によって計算できる<sup>7)</sup>。

$$E = \frac{\pi(1-\nu^2)aq}{2w} \quad (1)$$

ここに、aは載荷円板の半径、 $\nu$ は土のPoisson比である。この式は簡潔であるが、誘導は複雑である。対象を半無限体とみなし得ない場合の解析解も得られているがこれは複雑であり、しかも解析解の数値計算も面倒である。一般には式(1)が利用されており、ここでも便宜的にこの式を利用した場合のことを考える。なお、道路舗装の解析においては舗装構成材が必ずしも弾性体でないことから、Eを変形係数と称されることが多い。

JIS法に示された載荷法による変位とは、第2図における実線と破線の交点における変位である。第2図のこの交点を結んだ線は、原点を通る1本の直線の上に分布しておらず、上に凸の曲線となっている。このことは、第1図の荷重強度と変位の関係を式(1)に代入した場合にはEの値は一定にはならず、荷重強度が大きくなるのに伴ってEの値が減少することを示している。また、荷重持続方式の場合には変位の中に塑性的なクリープ変位が含まれ

ているから、この方式によって得たEの値を変形係数とみなすことは問題である。このようなことから、Eの値を求めることを目的とするならば、荷重持続方式ではなく繰返し載荷方式によって平板載荷試験を行うのが適当であると言える。

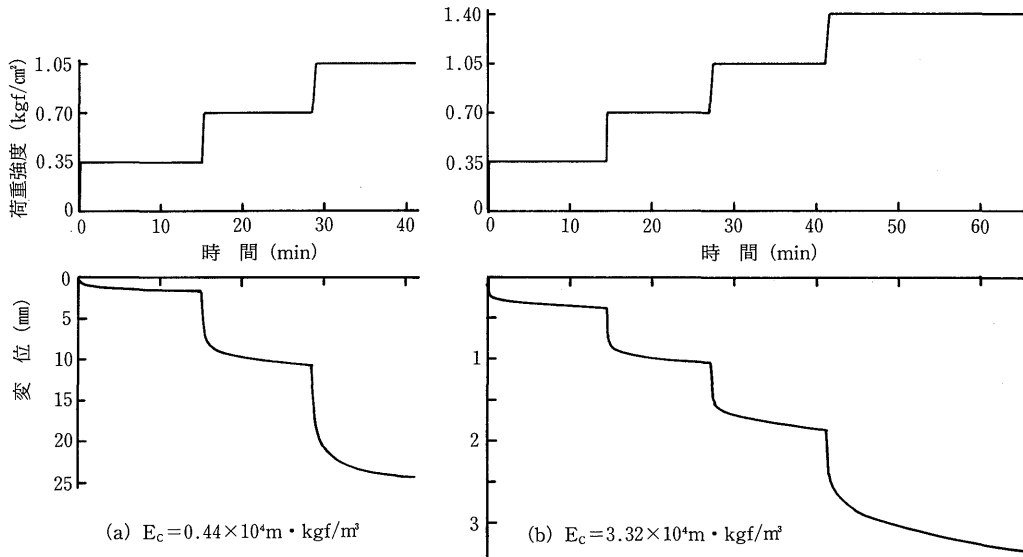
## (2) 変位の時間的变化

元来、JISに示された試験法では、各荷重強度において変位の時間的变化が微小となった段階での変位のみを求めることを目的とされている。しかしここでは、変位の時間的な変化を詳しく追ってみることにする。平板載荷試験において荷重強度を所定の値に増加させるための時間は、締固め仕事量と荷重強度によって異なるが、この実験では10数秒以下であった。その後、荷重を与えた当初は激しく変位が進行するが、次第に変位速度が低下して1分間の変位がその荷重強度における変位の1%となるまでには10数分、場合によっては20分以上の一定荷重の持続をすることが必要であった。このような挙動を示す変位の時間的な変化の様子を、与えた荷重強度も含めて、第3図に示す。荷重強度を増加させるとその当初は変位が激しく変化するが、変位の増加勾配は次第に小さくなる傾向がこの図からうかがえる。

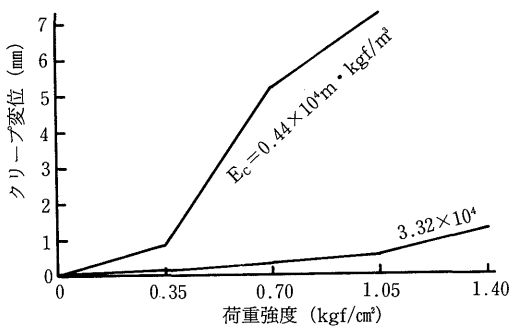
ところで、この平板載荷試験は圧密試験ではないが、第3図は荷重増加によって生じる圧密の進行現象と似たものとなっている<sup>5,6)</sup>。圧密の場合には、最大荷重を受けたときの圧密変位の時間的な経過が知られているならば、それより小さな荷重を受けたときの所定の時間の変位を近似的に計算する方法が示されている。そのことを考慮すれば、この実験でもいきなり最大荷重を与えることも有用と考えられる。

## (3) クリープ変位と変位速度

一般に、クリープとは一定の応力が持続した場合の増加ひずみと定義されている。この実験では円筒土槽と載荷円板の直径が異なるためにひずみは場所によって異なる。したがって、厳密な意味でのクリープはこの実験では求まらないが、ここでは一定の荷重強度を持続したときの変位をクリープ変位と名付ける。このようなクリープ変位は与える荷重強度の大きさによって異なるものであり、両者の関係を示すと第4図の通りである。締固め仕事量 $E_c$ が小さいときの方が $E_c$ が大きいきよりも同じ荷重強度におけるクリープ変位は大きくなる。そして、両者の関係の変曲点が、 $E_c = 0.44 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf/m}^2$ の場合には荷重強度が $0.35 \text{ kgf/cm}^2$ のところに現れており、 $E_c = 3.32 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf/m}^2$ の場合には荷重強度が $1.05 \text{ kgf/cm}^2$ のところに現れている。このことは、締固め仕事量が小さ



第3図 荷重強度と変位の時間的経過



第4図 荷重強度とクリープ変位の関係

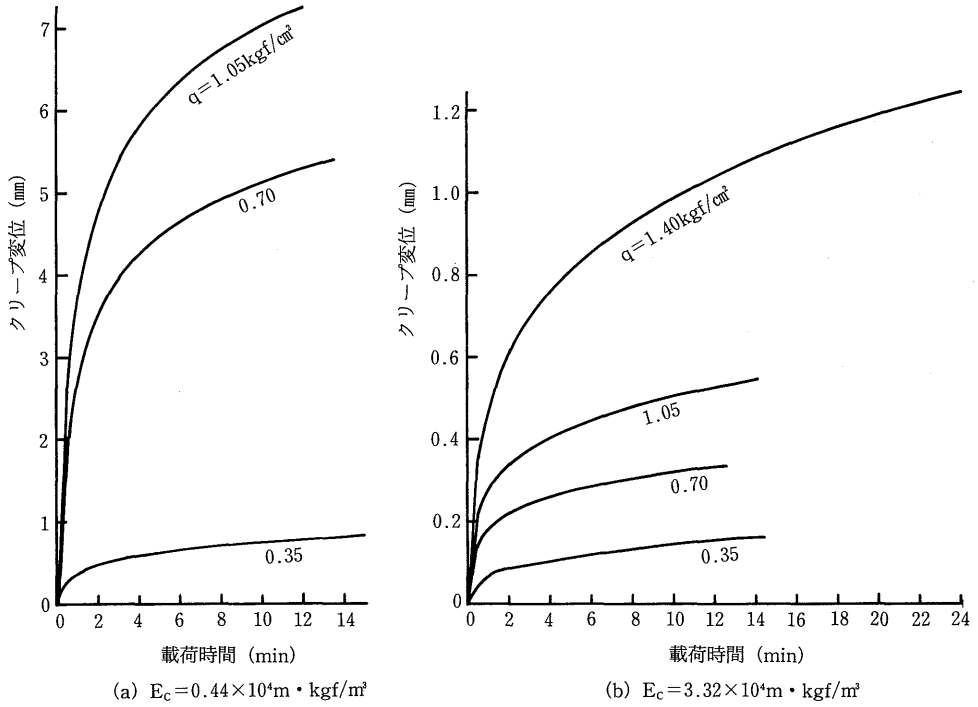
いときの方が、締固め仕事量大きいときよりも小さい荷重強度においてクリープ変位の変曲点が現れることを示している。なお、 $E_c = 3.32 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kg/m}^2$  の場合には、荷重強度  $1.05 \text{ kgf/cm}^2$  以下でのクリープ変位は荷重強度にほぼ比例している。

つぎに、クリープ変位の時間的経過をみると、第5図に示す通りとなる。一般にクリープと時間の関係は指数関数で表され、時間の経過に伴ってクリープは一定値に近付くとされている。第5図から判断してクリープの収束性をみることを目標とするならばJIS法に準拠した1分間の変位がその荷重強度での変位の1%となった時点まで載荷するという規定が不十分であると考えられる。ともかく、クリープ変位と時間とが指数関数で表されるか

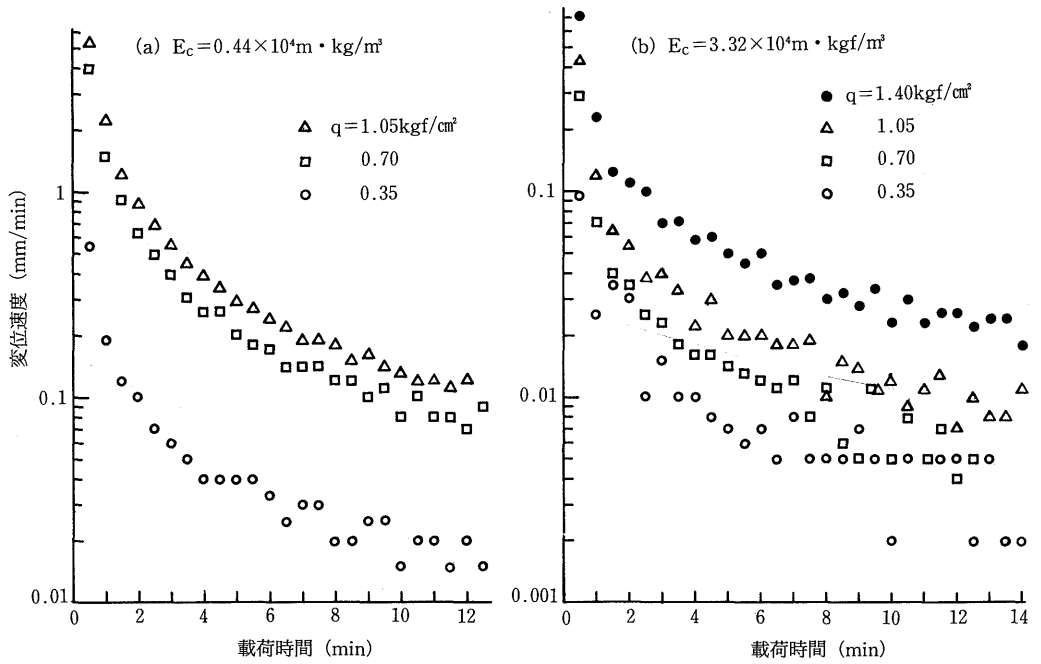
どうかをみるために、変位速度の時間的変化を調べることにした。各荷重強度における変位速度と時間の関係を片対数紙上に表したのが第6図である。ただし、第6(b)図では15分以降の値を削除している。第6図に示された時間と変位の関係は、どちらの締固め仕事量においても直線関係であることは認められない。このことは、第5図に示された時間とクリープ変位の関係が指数関数に近似できないことを意味している。もともと、ひずみで表されるクリープと、ここで定義したクリープ変位とは同じものではないことから、両者は別の挙動を示したものと考えられる。平板載荷試験からひずみを求めようとするならば、円筒土槽と載荷円板の直径を同じにして実験を行う必要がある。

なお、第6(b)図は、第6(a)図よりもプロット点がばらついているように見える。これは、変位の測定に使用したダイヤルゲージの読取り精度が  $1/100 \text{ mm}$  であることから、その端数を読取ったとしても変位が微小であれば僅かの読取り誤差が相対的に大きく現れてくることによる。したがって、片対数紙上に表すと、荷重強度  $0.35 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には変位も小さいからプロットが特に大きくばらついているように見えている。

荷重が大きい場合には荷重が小さい場合よりはクリープ変位の速度が大きくなる。そこで、変位速度と荷重強度との関係を調べるために、単位荷重強度当りのクリープ変位の速度を算定し、これと時間との関係をやはり片



第5図 クリープ変位の変化



第6図 変位速度と載荷時間の関係

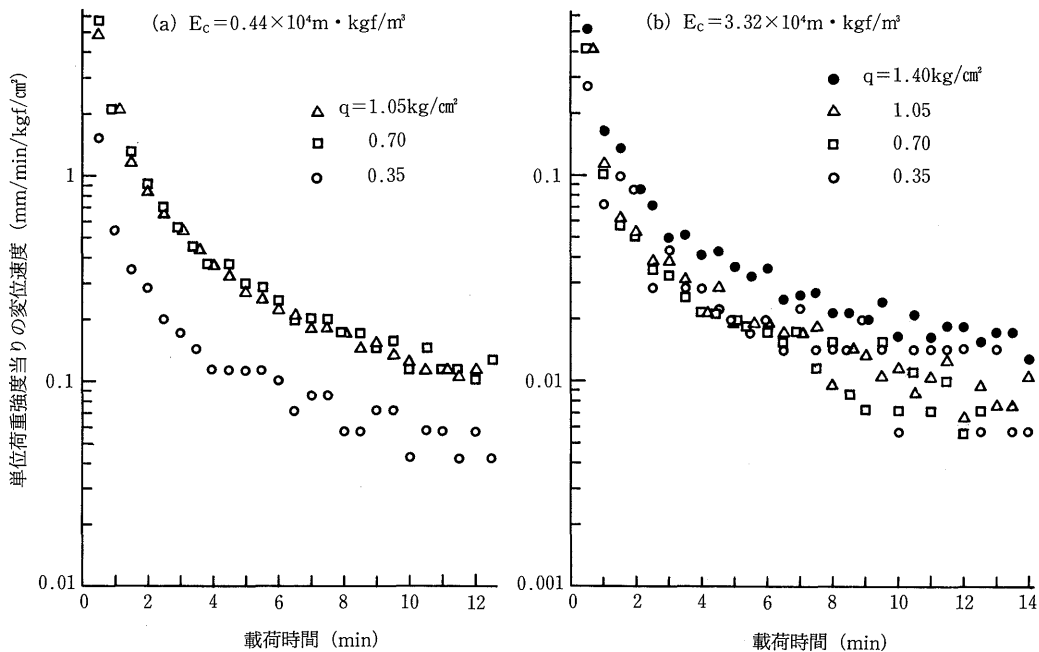
対数紙上にプロットした。その結果を第7図に示す。クリープ変位の速度がもし荷重強度に比例するものであるならば、第7図のプロット点は1つの曲線上に近似されることになるが、第7図は必ずしもそうっていない。つまり、 $E_c=0.44 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ においては3つの荷重強度のうちで $0.35 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ のものは $0.70 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ および $1.05 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ のものと離れている。また $E_c=3.32 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ においては荷重強度が $1.40 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ のものが他の3つの荷重強度のものから離れている。このグループ分けは、第4図に示された変曲点の前後と対応している。つまり、第4図のような荷重強度とクリープ変位の関係における変曲点よりも大きな荷重を受けると、変曲点よりも小さな荷重を受けた場合よりも単位荷重強度当りの変位速度が大きくなっている。

### 総 括

直径35cm、内径29cmの円筒土槽に締固めた土試料の表面で、直径10cmの円板を用い、JIS法に準拠した荷重持続方式による平板載荷試験を行って荷重強度と変位の関係を求めると共に、変位の時間的な経過を追跡測定した。使用した土試料は1種類であり、これを最適含水比の95

%の含水比に調整し、2種類の締固め仕事量でランマーの落下によって締固めた。この研究で得られた結果の要点は以下の通りである。

1. 荷重強度と変位は直線関係とならないために、両者を便宜的にBoussinesqの式に当てはめて変形係数を求めてもそれは荷重強度に応じて変化する、一定値とならない。したがって、変形係数を求めるための平板載荷試験では荷重持続方式で載荷することは好ましくない。
2. 一定荷重強度ごとの持続荷重は1分間の変位がその荷重強度における変位の1%となるまで載荷したが、クリープ変位が収束する状況を見るためには載荷の持続時間をもっと長くする必要がある。
3. クリープ変位と時間の関係を調べるために、変位速度と時間の関係をプロットしてみると、片対数紙上で直線上に分布しているとは認められない。したがって、クリープ変位と時間の関係は指数関数で表されない。この実験におけるクリープ変位はクリープひずみとは異なっており、クリープひずみを求めるためには、載荷円板の直径と円筒土槽のそれとを一致させる必要がある。
4. 荷重強度とクリープ変位の関係には変曲点がみられ、締固め仕事量が大きくなれば、この変曲点が現れる荷重



第7図 単位荷重強度当りの変位速度

強度も大きくなる。そして、この変曲点よりも小さな荷重強度であれば単位荷重強度当りの変位速度はほぼ同じであるが、それより大きな荷重を受けると単位荷重強度当りの変位速度が大きくなる。

#### 文 献

- 1) 土質工学会：土質試験法。土質工学会，東京(1980) pp.285-286
- 2) 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
- 3) 松野三朗・他：舗装道路の設計。山海堂，東京(1974) pp.44-48
- 4) 南雲貞夫・他：道路舗装に関する試験。山海堂，東京(1975) pp.380-387
- 5) 大崎順彦・他：土質工学ハンドブック。土質工学会編，技報堂，東京(1965) pp.397-400
- 6) Taylor, D. W.: *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1961) pp.288-290
- 7) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokyo (1970) pp.403-409
- 8) 内田一郎：道路舗装の設計法。森北出版，東京(1976) pp.112-123
- 9) 渡辺正平：鳥大農研報，41 47-55 (1988)
- 10) 渡辺正平：鳥大農研報，43 97-103 (1990)