

## 側方拘束された路床土の変形状

締固め仕事量と含水比の影響

渡辺正平\*

平成2年5月31日受付

## Deformation Properties of Subgrade Soils Restrained to Side Displacement

Influences of Compaction Energy and Water Content

Shouhei WATANABE\*

Influences of compaction energy and water content on the deformation properties of subgrade soils were investigated by the repeated compression tests. The soil samples were compacted dynamically in a cylinder of 10 cm in diameter and 12.7 cm in depth, and 100 times of loadings and unloadings were applied through a disc of 10 cm in diameter. Obtained results indicated that the dry density of the soils were increased with the increase of compaction energy and has asymptotic lines, but the modulus of deformation was once increased and then decreased after reaching its peak. When the soils were compacted by great compaction energy, over compaction phenomenon appeared and the plastic property became evident. The modulus of deformation of the soils with optimum water content were about half of it with about 90% of optimum water content, which means that the influence of the water content on the deformation is great.

### 緒 言

舗装を力学計算に基づいて設計しようとするれば、舗装構成材各層の弾性係数を知ることが必要である。しかしながら、各舗装構成材の応力-ひずみ関係は非線形性

を有すると共に塑性的、粘性的な性質も保有していることから弾性係数の代わりに変形係数と称されることが多い。この変形係数を現地で測定するには多くの労力を必要とするに加えて、たとえ同一の土であっても含水比や締固めの程度さらには拘束条件・荷重条件などに応じて

\* 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

力学的挙動が異なるので多くの問題点を抱えている<sup>8)</sup>。そこで室内実験で得た基礎的な実験も重要であることから各種の実験も行われている。小規模の実験であれば、含水比や締固め仕事量などの制御が容易であることから多様な条件での測定が可能となる。ここでは小型の円筒を利用し、側方拘束した条件での路床土に対する一軸繰返し圧縮試験を行って、締固め仕事量と含水比が土の変形状や表面硬度に定性的にどのような影響を与えるかを2種類の試料土を用いて調べた。

実験方法と試料

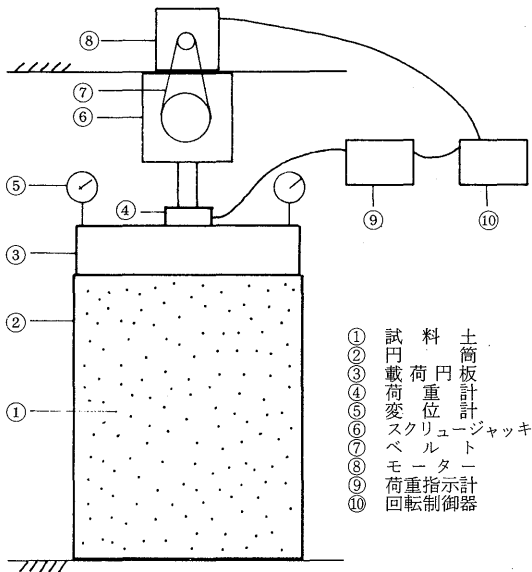
含水比を調整した試料土を、JIS A 1210 の締固め試験に使用される内径10cm、高さ12.7cmの鋼製円筒モールドに重量2.5kg、落下高さ30cmのランマーで3層に分けて動的に突固め、平面に整形された上表面に直径10cm、厚さ3cmの鋼製円板を載せてその上から鉛直荷重の載荷・除荷を繰返した。これは側方の変位を拘束した一軸圧縮試験である。繰返し載荷装置は載荷板上に接した荷重計にスクリージャッキを接続し、これを自動反転可能なモーターに連結した。所定の最大・最小荷重となるとモーターの回転方向が逆転するような制御装置を設計し、1.0~0.1kgf/cm<sup>2</sup>の荷重強度が変化するように設定して100回までの載荷・除荷を繰返した。載荷周期は試料の締固めの程度に応じて異なるが、14~20sec程度である。1周期間の極大・極小変位を円板の上に対称に設置した2

個の変位計から読取り測定した。最初の10周期目までは変位の変化が大きいことから毎周期の測定を行ったが、その後は変位も安定的となるので10周期目毎の測定を行った。載荷試験装置の模式を第1図に示す。

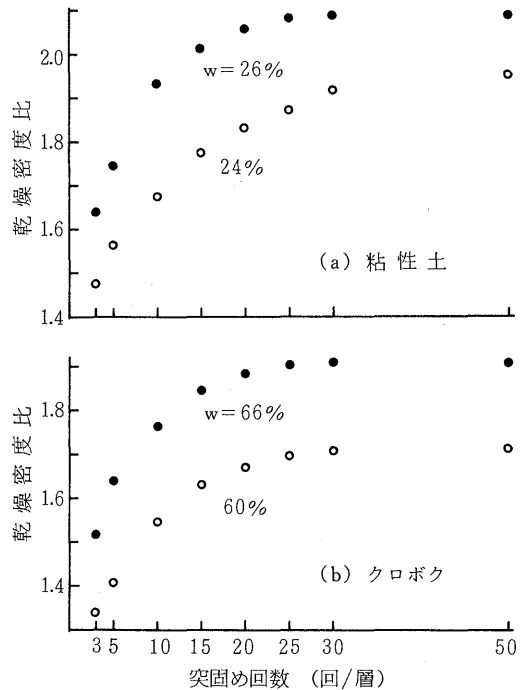
実験に使用した試料土は粘性土とクロボクの2種類でありこれら両者の工学的性質を第1表に示す。この中でふるい分け試験とは粒度試験とは異なるもので、試料の準備段階にみられる団粒構造を壊さないように風乾させ、その粒度を分析したものである。試験時の含水比は両試料とも最適含水比とそれの約90%となるように調整した。つまり、粘性土の含水比は26%と24%、クロボクのそれは66%と60%となるように調整した。この4種類の試料に対し、あらかじめ締固め仕事量と乾燥密度の関係を探

第1表 試料の工学的性質

試料名	$\gamma_{d,max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	$W_L$ (%)	$I_p$ (%)	ふるい分け試験 $D_{60}$	$U_c$
粘性土	1.52	26.0	47.7	20.4	3.5	4.3
クロボク	0.90	65.8	84.3	25.9	2.8	6.4



第1図 載荷試験装置



第2図 突固め回数と乾燥密度比の関係

定し、その結果から締固め時の1層当りの突固め回数を3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50回の8種類とすることにした。締固め・上面整形の後、密度を測定してから上記の繰返し載荷試験を行った。載荷試験終了後モールドの底板をとりはずし、上面と下面でそれぞれ3か所以上の所で山中式硬度計による表面硬度の測定を行った。

### 実験結果と考察

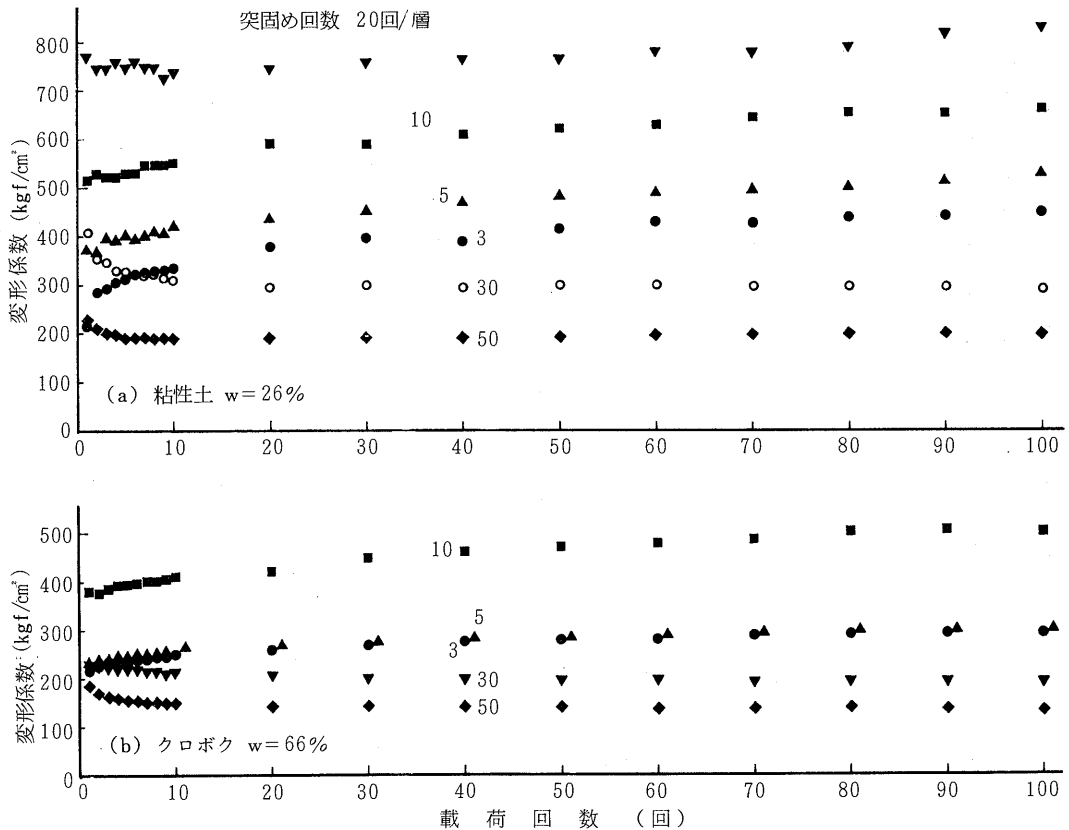
まず締め固め仕事量と乾燥密度の関係について述べ、次に載荷試験と表面硬度試験の結果を示す。

#### a) 乾燥密度

円筒モールドに含水比を調整した試料土を投入しそれを締め固めれば試料の密度が増加するが、その密度増加量には限界が存在する。いま、締め固め時の1層当りの突固め回数を変えて乾燥密度を測定した結果を第2図に示す。ここでの乾燥密度比とは、締め固め後の乾燥密度を試料を投入したままで締め固めを行わない状態の試料の乾燥密度

つまり突固め0回の乾燥密度で除した値である。したがって、この乾燥密度比とは締め固めに伴う乾燥密度の増加の程度を表すものである。突固めによる締め固めの効果は最大乾燥密度の場合の方がその約90%の含水比の場合よりも大きくなっている。この突固め0回の試料の乾燥密度と最大乾燥密度との比 ( $\gamma_{d0}/\gamma_{dmax}$ ) の値は、粘性土の含水比が24%, 26%の試料ではそれぞれ53%, 48%, クロボクの含水比が60%, 66%の試料ではそれぞれ57%, 52%であり、両方の試料土いずれも最適含水比よりも最適含水比の約90%の方が載荷0回の乾燥密度が大きくなっている。

いずれの試料も1層当りの突固め回数が20回以下の場合には締め固め仕事量の増加に伴う乾燥密度の増加も大きいですが、1層当り25回以上の突固めでは突固め回数の増加に伴う乾燥密度の増加量は微小となっている。このことからJISの締め固め試験に示された1層当り25回の突固め回数はこの試料に対しほぼ妥当であると言える。ともかくこの結果から後述の繰返し載荷試験のための締め固め仕



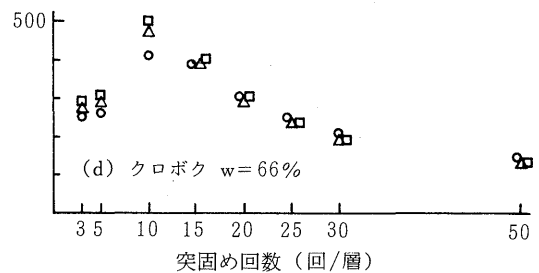
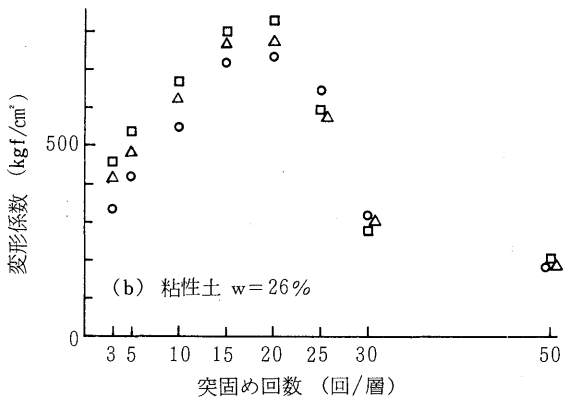
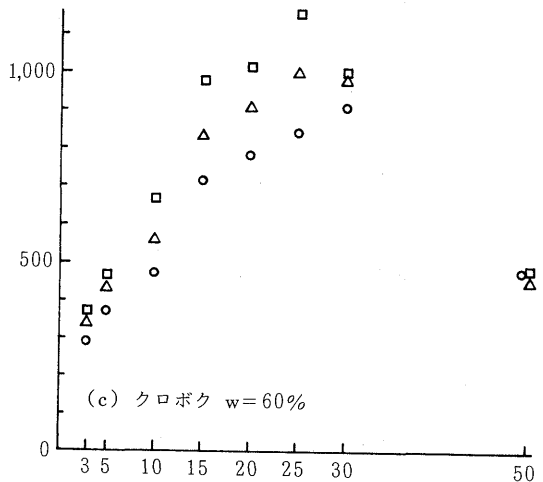
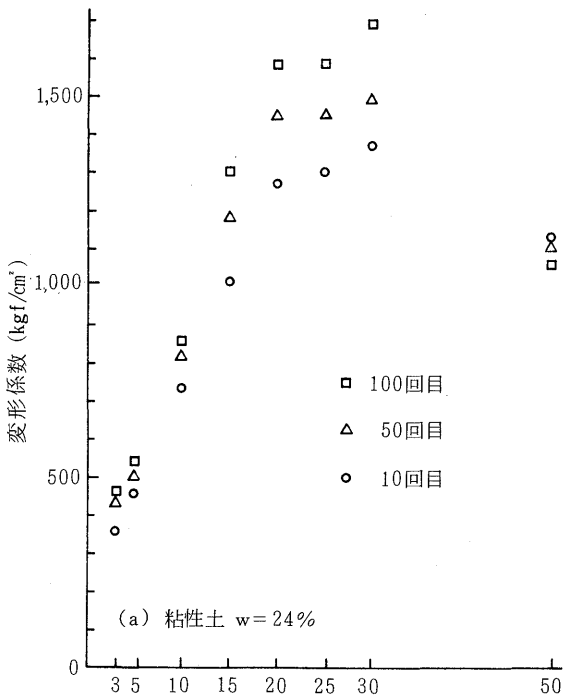
第3図 変形係数の推移

事量を決定した。つまり、1層当り50回までの突固めの試料を対象にすることとし、30回と50回の間の力学的特性の変化も小さいのではないかと予想した。

b) 変形係数

土は弾塑性的な材料であり、載荷の後に除荷をすれば残留変位が残るから荷重強度差と変位量差の関係から算定された変形係数は、載荷過程のものと同除荷過程のもの

で一般的に値が異なる。繰返し載荷試験を行うと載荷回数が少ない段階では残留変位が大きいことから両者の違いが大きい、載荷回数が増す毎に次第に両者は接近してくる。また、載荷回数が少ない段階では載荷過程の変形係数の変化が大きく不安定であるが、除荷過程のそれは比較的安定的であることから除荷過程の変形係数を舗装解析の対象にされることが多い<sup>7, 8, 10)</sup>。



第4図 突固め回数と変形係数の関係

いま、1層当りの締固め仕事量を変えて100回までの繰返し載荷試験を行った場合の載荷回数と除荷過程の変形係数の関係を、2種類の試料の最適含水比のもののみについて第3図に示す。これらの図には図面上の重複を避ける意味で特定の突固め回数のもののみを表示している。いずれの場合も載荷回数20回程度までは載荷回数の増加に伴う変形係数の変化がみられるが、それ以降は変化が微小となって安定的になっている。他の含水比の場合も同様な傾向を示す。

第2図に示された乾燥密度は締固め仕事量の増加に伴って増加しやがて収束しているが、第3図に示された変形係数の挙動はこれと異なっており、締固め仕事量の増加に伴って一旦増加するがその後減少している。そこで締固め仕事量と変形係数の関係をより明確にする目的で、載荷回数10, 50, 100回目のものを取り出して突固め回数と変形係数の関係として第4図のようにまとめた。第4図に示されるように、いずれの場合も締固め仕事量が増加すれば変形係数が増加するとは限らず、ある程度まで締固めるとそれ以上締固めることによってかえって変形係数が減少し、変形係数に対する過剰締固めの現象が現れている。この過剰締固めは粘性土、クロボクいずれの試料も最適含水比の場合の方がその約90%の含水比の場合よりも小さい締固め仕事量で現れている。特にクロボクの最適含水比のものでは1層当りわずか10回の突固めで最大変形係数となって、それ以上締固めれば過剰締固めになっている。最も変形係数が大きい粘性土の含水比24%の試料では、1層当り30回の突固めまでは過剰締固め現象は現れていない。つまり、変形係数が大きい試料は小さいものに比べて過剰締固めとなりにくいと言える。なお、過剰締固めの現象は、一軸圧縮強さにもみられるとの報告もある<sup>2), 6)</sup>。

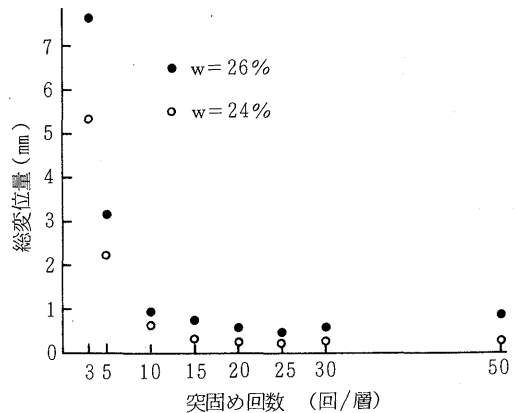
ところで、第3図に示された載荷回数と変形係数の関係を見ると、粘性土、クロボク両方とも過剰締固めとなった1層当り30, 50回の締固めの場合には繰返し載荷の初期段階に変形係数の低下がみられる。つまり、載荷1回目から10回の間では載荷回数の増加に伴って変形係数がむしろ減少している。1層当りの突固めが3, 5, 10回の場合にはそれに反してこの間の変形係数が増加する傾向となっている。このことは、過剰締固めとなっているかどうかは繰返し載荷の初期段階の変形係数の挙動にも現れているとも言える。なお、最適含水比で過剰締固めをした試料に繰返し載荷を続けると、試験中にモールドの上面から泥土が、下面から水がしみ出すことが多い。

粘性土、クロボクの両試料とも最適含水比の約90%の含水比の場合の方が最適含水比の場合よりも変形係数が大きくなっている。特に最大の変形係数を比較すると、2種類の試料とも2倍程度の差が現れている。このことから変形係数に与える含水比の影響は非常に大きいものと判断される。最適含水比の試料よりはそれよりもやや低い含水比のものの方が一軸圧縮強さや貫入抵抗、CBR値などが大きくなるとの報告がみられるが<sup>1), 3)-6)</sup>、これらは変形係数に現れた現象と対応している。なお、図にみられる変形係数はこの値が大きいほどばらつきも大きくなっているが、これは変位が微小な場合には読取誤差が変形係数に相対的に大きな影響を及ぼすためである。

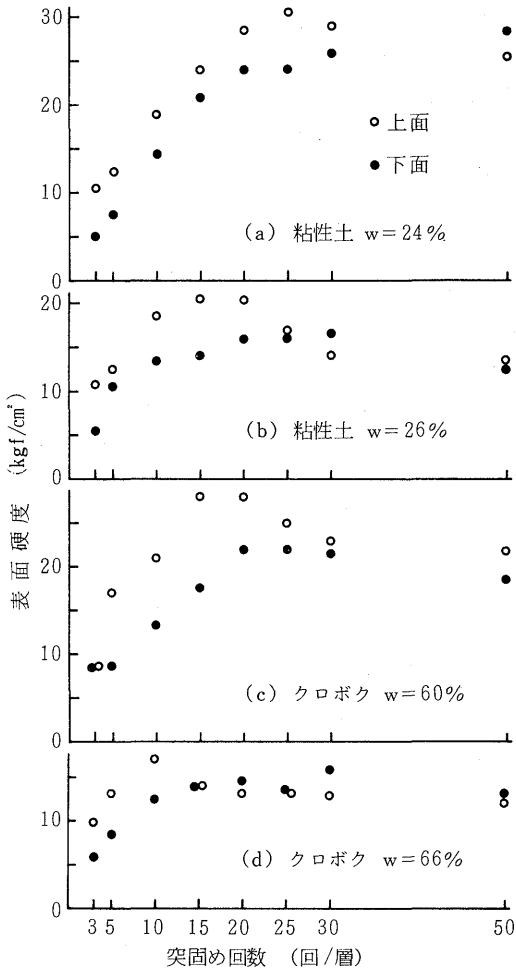
ここでの変形係数は繰返し載荷における1周期での荷重強度差を変位差から算定されるひずみで除した値として単純に算定したものである。そしてこの実験は側方の変位を拘束したものであり、一軸圧縮試験とは条件が異なるので算定された変形係数も条件が変われば別の値となることが予想される。同様の試料を使用している繰返し平板載荷試験から筆者が得た変形係数は上記のものより1桁小さい値となっており、その差が大きい<sup>8), 9)</sup>。拘束条件が土の変形性に与える影響を調べることは、今後の課題の1つである。

#### c) 総変位量

繰返し載荷試験を行えば残留変位が残るがその値は載荷試験前の締固め仕事量に応じて異なる。そこで、繰返し載荷試験終了時の総変位量と1層当りの突固め回数の関係を、2種類の含水比の粘性土についてのみ表せば第5図のようになる。クロボクでも定性的に同様の傾向を示す。予想されるように1層当りの突固め回数が3回と少ないものであれば、総変位量も5mmを越えひずみは3



第5図 突固め回数と総変位位置の関係



第6図 突固め回数と表面硬度の関係

%以上にも達するが、1層当りの突固め回数を5、15回と増加させると総変位量は急激に減少する傾向を示す。ところが、これ以上の締固めを行った場合には締固め仕事量を増加させても総変位量が減少する傾向はみられない。最適含水比の試料を1層当り25回以上突固めた場合には、締固め仕事量の増加に伴って総変位量もわずかではあるが増大している。つまり、過剰締固めの影響は顕著ではないものの載荷試験終了時の総変位量にも現れている。この総変位量は塑性変位を示すものであり、第5図によると最適含水比の試料はそれの約90%の含水比のものよりは、より塑性的である。

#### d) 表面硬度

締固め・繰返し載荷試験を行った後に上面と下面で測

定した表面硬度を第6図に示す。表面硬度は変形係数ほど顕著ではないが、過剰締固めとなった場合には表面硬度も低下する傾向がみられる。そして、一般に締固め仕事量が小さい試料では、上面の表面硬度の方が下面のそれよりは大きいのが、1層当り50回の突固めの場合にはこれが逆転しているものもみられる。表面硬度は締固め仕事量に対して鈍感であるとは言え、過剰締固めの後に繰返し載荷を受けると締固めの効果が上方に片寄るためとも考えられる。突固めによる締固めの場合にも、締固めの効果が深さに応じて異なることも予想されるが深さと締固めの程度との関係を調べることも課題である。

また、変形係数と同様に、最適含水比で締固められた場合よりもその約90%の含水比で締固められた場合の方が表面硬度も大きくなっている。つまり、表面硬度と含水比の関係は、変形係数や一軸圧縮強さ、貫入抵抗、CBR値などと同様な傾向を示している。

## 総括

小型の円筒モールドに締固めた試料土の側方変位を拘束して100回までの繰返し載荷試験を行った。そのために粘性土とクロボクの2種類の試料土を使用し、締固め仕事量と含水比が変形性状や乾燥密度、表面硬度などに与える影響の差異を調べた。得られた結果の主なものは次の通りである。

1. 使用した2種類の試料土はいずれも締固め仕事量の増加に伴って乾燥密度は増加するが、その増加勾配は次第に減少し乾燥密度はやがて一定値に収束する。また突固めによる締固めの効果は、最適含水比の試料の方がその約90%の含水比のものより大きかった。
2. 一定の最大・最小荷重強度の間で100回までの載荷・除荷を繰返すと、載荷回数が少ない段階での除荷時の変形係数は載荷回数と共にわずかずつ変動するが、その変動勾配は次第に減少した。
3. 締固め仕事量を増加させると変形係数も増加し続けるとは限らず、ある一定の締固め仕事量を越えるとかえって変形係数が減少して、変形係数に対して過剰締固めの現象が現れた。最適含水比の試料はそれの約90%の試料に比べて過剰締固めとなり易い上に、変形係数もより小さい値となった。過剰締固めされた試料が繰返し載荷を受けると、繰返し載荷の初期段階での変形係数が載荷回数の増加に伴って減少する傾向を持っていたが、そうでない試料は逆の傾向を示した。
4. 試料の含水比が変形係数に与える影響は大きく、最適含水比の試料よりは最適含水比の約90%の含水比のもの

の方が変形係数が約2倍も大きかった。また側方拘束が変形係数に与える影響も大きく、同様の試料を用いた側方拘束の載荷試験から得られた変形係数と平板載荷試験から得られたそれとは1桁異なっていた。

5. 載荷試験後の総変位量は締固め仕事量が小さい間は締固め仕事量の増加に伴って減少するが、過剰締固めとなった場合にはわずかではあるが逆に総変位量が増加する傾向を持っていた。また、最適含水比の試料はそれの約90%のものよりは総変位量が大きく、より塑性的であった。繰返し載荷試験後の表面硬度に締固め仕事量や含水比が与える影響は変形係数と同様であるが、変形係数ほど顕著には現れなかった。

#### 文 献

- 1) 赤井浩一：土質力学。朝倉書店，東京（1966） pp. 120-122
- 2) 河上房義，柳澤栄司：土の締固め。鹿島出版，東京（1975） pp. 41-46
- 3) 河上房義：土質力学。森北出版，東京（1983） pp. 233-236
- 4) 久野悟郎：土の締固め。技報堂，東京（1967） pp. 63-69
- 5) 久野悟郎：土と基礎，22(4) 5-10（1974）
- 6) 竹下春見，他：路床・路盤施工法。山海堂，東京（1961） pp. 63-69
- 7) Thompson, M.R. and Robbnet, Q.L. : *Proc. ASCE*, 105 (TE 1) 71-89 (1979)
- 8) 渡辺正平：鳥大農研報，39 92-100（1986）
- 9) 渡辺正平：鳥大農研報，42 69-77（1989）
- 10) Yoder, E.J. and Witczak, M.W. : *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1975) pp. 244-249