

# 不飽和土の力学を用いた締固め土における圧密降伏応力の簡易予測手法

A simple method to predict the consolidation yield stress of compacted soils considering suction effects in unsaturated soil media

河井克之<sup>1</sup>, 金銀羅<sup>2</sup>, 流田寛之<sup>3</sup>, 飯塚敦<sup>4</sup>, 本田道識<sup>5</sup>

Katsuyuki KAWAI, Eunra KIM, Hiroyuki NAGARETA, Atsushi IIZUKA, Michinori HONDA

<sup>1</sup> 工博, 神戸大学助手, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>2</sup> 工修, 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>3</sup> 工修, 阪神高速道路公団 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

<sup>4</sup> 工博, 神戸大学助教授, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>5</sup> 工博, (株)日建設シビル, 東京事務所 (〒112-8565 東京都文京区後楽 2-2-23)

The objective of this study is to apply mechanics of unsaturated soils to prediction of compacted soils behavior. First, we performed static compaction tests with monitoring the change of applied stress and suction of specimen during compaction. Next, we carried out compression tests for the statically compacted soil specimen and measured consolidation yield stress of them. As a result, it was found that suction of compacted soil depends on the dry density as well as the water content. Moreover, compression lines of compacted soil retaining same suction converged into on unique compression line. Finally, we proposed the simple method to predict consolidation yield stress of compacted soil using simplified model of unsaturated soils.

*Key Words: Compacted Soil, Consolidation Yield Stress, Suction*

キーワード: 締固め土, 圧密降伏応力, サクション

## 1. はじめに

大半の陸上地盤構造物は, 締固め土を材料として施工される。締固め土はその間隙に空気相と液相を含む不飽和土であり, 飽和土よりも圧縮指数・透水係数とも小さく, より安全な材料として有用である。

しかしながら, 降雨や地下水の変動といった外水位の影響を大きく受け, ひずみの蓄積とともに本来の品質を保持し得るかどうかの検討が必要となる。その挙動は, 不飽和土特有の応力成分であるサクションの効果を考慮することで表現可能である。近年, 不飽和土の応力ひずみ関係, 浸透特性とともに研究が

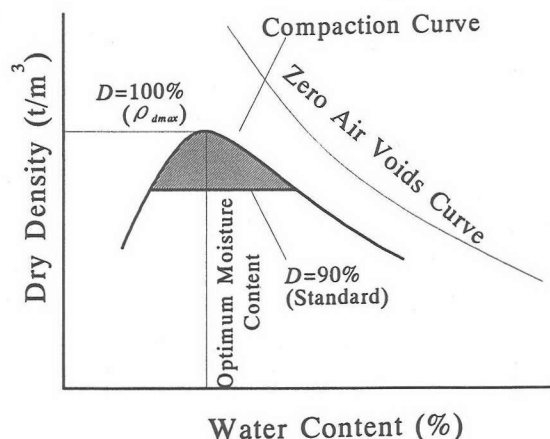


図-1 D 値管理の概念

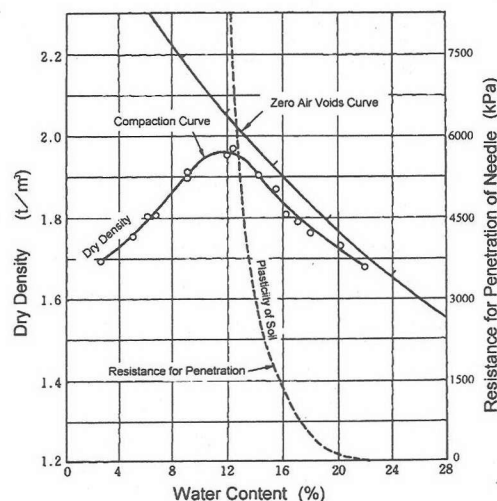


図-2 土の特性曲線

進み、不飽和土の力学として体系化されつつあるが、その挙動の複雑さから現場への適用には至っていない。本論文では、締固め土を不飽和土として扱い、既往の不飽和土の研究成果を簡略化し、締固め管理上、有意なものとするを目的としている。特に、締固め土の圧密降伏応力に着目し、不飽和土の力学挙動を支配するサクシオンを陽な形で組み込む方法を検討する。

## (1) Proctor の現場締固め管理手法と「D 値」管理手法

締固め土を材料とする土構造物の施工には、“施工含水比”、“締固め度”が重要な要素である。細粒分の比較的多い材料や細粒土における施工含水比は、盛土の安定・施工性などに関わる力学特性を間接的に規制している大切な要素である。盛土の品質の判定は、仕様書に規定されている締固め度によって行われる。締固め度は、広義には締固めの程度を示すが、狭義には次式で示される「D 値」を指す。

$$D = \frac{\text{盛土の乾燥密度}(\rho_d)}{\text{室内締固め試験による最大乾燥密度}(\rho_{d\max})} \quad (1)$$

締固め度の規定値は、JIS A 1210(突固めによる土の締固め試験方法)の最大乾燥密度の 90%以上の密度としているものが一般に多い。図-1 は、D 値管理の概念である。ここで、基準となっている室内締固め試験法については Proctor<sup>1)</sup>が提唱した現場締固め管理手法に根ざしている。Proctor は、Proctor Needle を用いて土の貫入抵抗値を求め、土の特性曲線を作成し(図-2)、現場締固め土の工学的性質を推定しようとした。Proctor は、室内締固め試験を仮想シミュレーションとして位置付け、それまでなかば経験的に行われていた現場締固めに対して、現代の締固めの基本原理(締固め曲線や最適含水比の概念)に基づく合理的な締固め管理手法を提案した。しかしながら、Proctor の手法は、多大な労力と費用を要する現場締固め試験を必要とすることから、室内試験方法だけが広く使われ、現在の「D 値」管理のような土の締固め度だけで構造物の健全度を判定するようになったが、土の工学的性質へのアプローチが希薄になっていることは否めない。

## (2) 締固め土の圧縮性状に関する既往の研究

Seed and Chan<sup>2)</sup>は、異なる 3 種類の方法で同じ乾燥密度・含水比の締固め供試体を作製し、せん断特性を比較した結果、締固め方法により強度特性が異なることを示した。しかしながら、室内試験結果をそのまま現場に適用するのではなく、室内および現場試験によって得られる土の工学的性質の直接的な相関を扱うことで、このような問題を回避できる。

締固め土の圧縮試験は数多く行われている。締固め状態より圧密降伏応力を算定する試みは、伊勢

田・水野<sup>3)</sup>にさかのぼるが、Ohta and Hata<sup>4)</sup>は、シルト質土で等体積一面せん断試験を行い、その圧密降伏応力と強度特性を詳細に調べ、体系化した。その結果、含水比毎に異なる圧縮特性として整理され、等体積せん断強度は、含水比・間隙比に関わりなく、先行圧密圧力によって決まるとした。さらに、太田ら<sup>5)</sup>は、乾燥密度で圧縮曲線を表し、締固め管理手法を提案している。これ以降、現場では含水比によって圧縮特性を比較することが多くなった。しかしながら、不飽和土である締固め土の圧縮特性を支配しているのはサクシオンであり、サクシオンを知ることによって理論的に強度を推定できる可能性がある。本論文では、まず締固め曲線上でのサクシオン分布を求め、それが圧縮特性に及ぼす影響を検討する。

## 2. 試験方法

締固め曲線とサクシオン分布の関係および圧縮特性を比較するために 2 種類の試験を行った。実験に用いた試料は、市販のシルト質粘土、カタルポクレーであり、その物理特性を表-1 に示す。

また、JIS A 1210 に沿って行った室内突固め試験結果(突固めモールド径 100mm、ランマー重量 2.5kg)を図-3 に示す。

### (1) サクシオンを測定した静的締固め試験

実験装置を図-4 に示す。所定の含水比に調整された粉末試料を圧密リング(直径 50mm)に投入し、静的に一次元締固めを供試体高さが 20mm になるまで行い、投入試料の量により目的の含水比・乾燥密度の供試体を作製する。このとき、Seed and Chan の試験結果を念頭におき、応力履歴が一定になるように、載荷台を用いてひずみ制御(1.06mm/min: 用いた載荷台で安定したデータを得ることのできる最も遅い速度)締固めを行う。ペDESTAL 部には細孔のセラミックディスクが設置されており、セラミックディスクを介して供試体内の間隙水圧が測定できるようになっている。低含水比の試料の場合、負の間隙水圧が発生し、その値が卓越してくると、間隙水圧経路内の水がキャピテーションを生じ、水圧が測定できない場合がある。そのため、セル内に空気圧を載荷し、載荷キャップに設けられた孔を介して供試体内の間隙空気圧を制御し、測定される水圧を正圧にする。載荷した空気圧と測定された水圧の差がサクシオンである。このとき、算出されるサクシオンは載荷する空気圧の大きさに依存しないことが確認されている<sup>6)</sup>。このように、セル内に空気圧を与える場合、ピストンが浮き上がるため供試体高さが正確に測定されない。これを避けるため軸受け部にはベロフラムシリンダーを設け、セル圧と相殺するように軸圧縮方向に圧力が加わるようになっている。実験装置

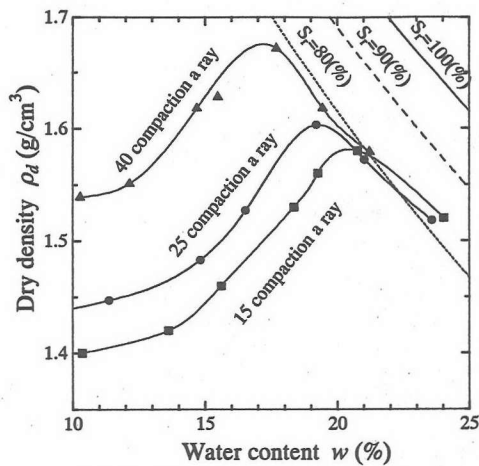


図-3 室内突固め試験結果

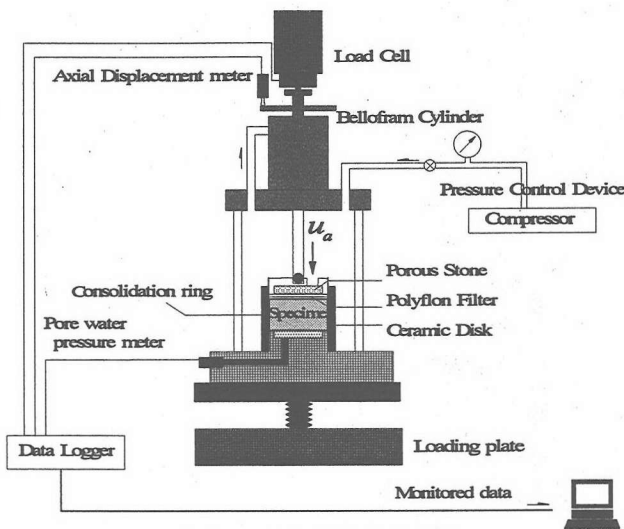


図-4 締固め試験装置

表-1 カタルボクレーの物理的性質

| 土粒子比重 | 塑性限界      | 液性限界      | 塑性指数  |
|-------|-----------|-----------|-------|
| $G_s$ | $w_P$ (%) | $w_L$ (%) | $I_P$ |
| 2.709 | 20.3      | 33.5      | 13.2  |

外部の荷重計により、締固め中の载荷重が測定できる。

## (2) 締固め土の圧縮試験

以上のようにして得られた締固め供試体の、圧密降伏応力を求めるために、直径 60mm の圧密リングで同様に高さ 20mm に締固められた供試体を水浸させずに、そのまま標準圧密した。そのときに得られた圧縮曲線から Casagrande の方法を用いて降伏応力を算定した。試験に用いた乾燥密度、含水比の範囲を表-2 にまとめて示す。

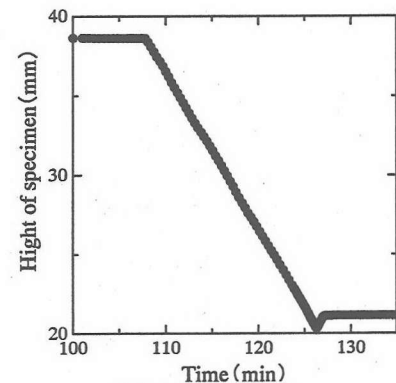
## 3. 試験結果

### (1) 締固め試験結果

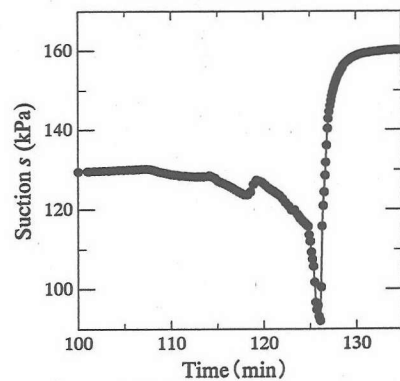
締固め試験中に、計測された間隙水圧計とロードセル値より得た代表的な結果を図-5 に示す。横軸の

表-2 供試体状態および試験数

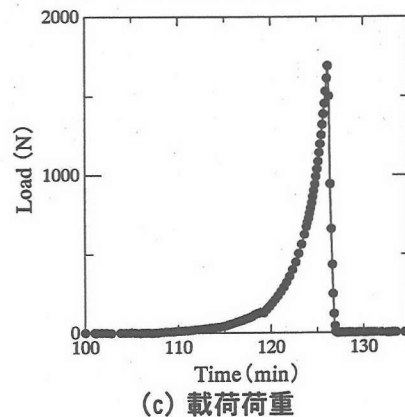
| 試験    | 試験数 | 乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 含水比 (%) |
|-------|-----|---------------------------------|---------|
| 締固め試験 | 7   | 1.40                            | 10~22   |
|       | 9   | 1.45                            | 10~19   |
|       | 15  | 1.50                            | 10~24   |
|       | 13  | 1.55                            | 11~25   |
|       | 8   | 1.60                            | 14~20   |
|       | 1   | 1.65                            | 22      |
| 圧縮試験  | 6   | 1.30                            | 11~23   |
|       | 4   | 1.35                            | 9~23    |
|       | 5   | 1.40                            | 7~21    |
|       | 7   | 1.45                            | 9~19    |
|       | 6   | 1.50                            | 7~20    |
|       | 3   | 1.55                            | 11~16   |
|       | 6   | 1.60                            | 11~20   |



(a) 供試体高さ



(b) サクション



(c) 载荷荷重

図-5  $\rho_d = 1.50 (\text{g}/\text{cm}^3)$ ,  $w = 13$  (%) を目標に締固められた供試体の締固め中の挙動

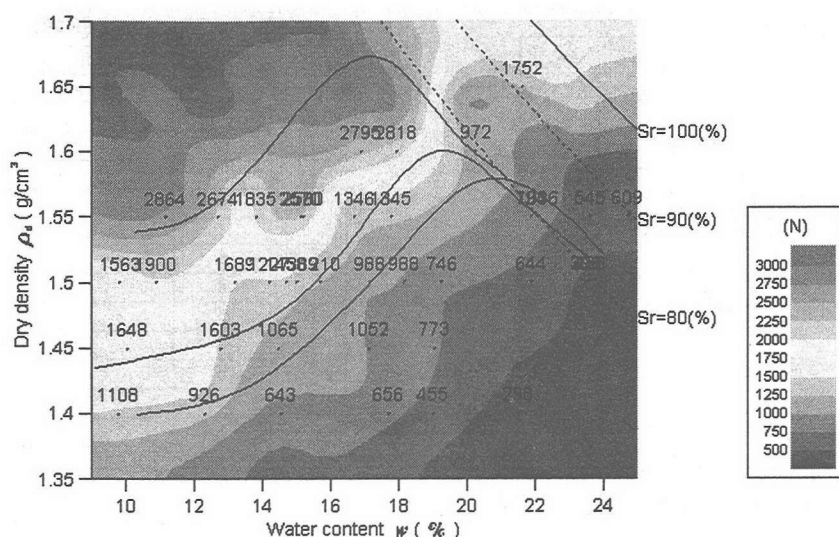


図-6 突固め試験結果と最大荷重分布の比較

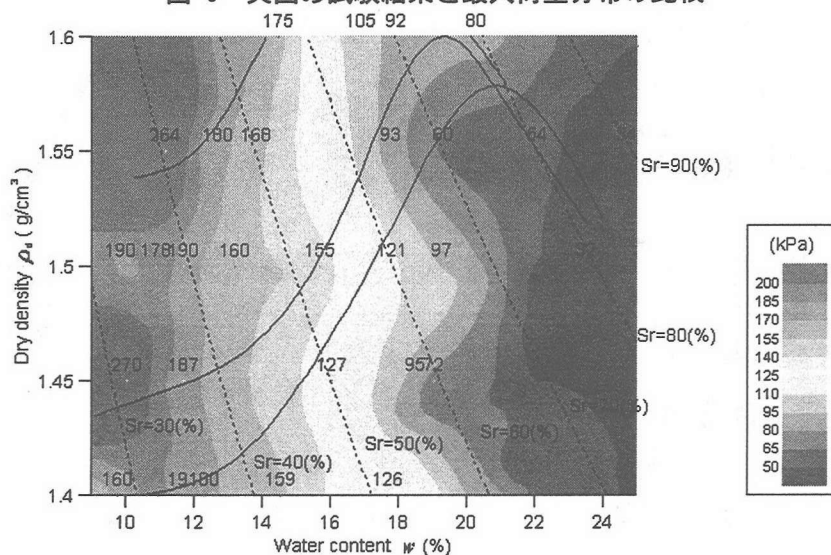


図-7 締固め曲線とサクション分布

時間は、圧密リングに試料を投入したときをゼロとしており、間隙空気圧载荷して間隙水圧が一定になるのを確認した後、締固めを行った。このとき経路内の水圧が $-98\text{kPa}$ 以下になると、キャビテーションを起こし、間隙水圧を測定できないので、セル圧として間隙空気圧 $98\text{kPa}$ 作用させた。図から、締固めによる圧縮に伴い、間隙水圧が大きく、つまりサクションが小さくなっていき、除荷時の供試体膨張とともに、間隙水圧が減少つまりサクションが増加しているのが分かる。また、供試体に作用する鉛直荷重は、締固めにより急激に増加していくのが分かる。このときの最大荷重を供試体断面積で割れば締固め応力が算出できる。

図-6は、表-2に示した条件で締固め試験中に供試体に加えられた最大荷重の分布である。試験から得られた離散データに対して補完計算を行い、2次元のメッシュデータを作成した後、2次方程式と距離の重み計算から演繹的にスムージングされたものが等値線として描かれている。比較的含水比の高い領

域では締固め中に排水が見られた。締固めを不飽和土の非排水圧縮挙動と位置付けると、このときの挙動は排水圧縮(圧密)となり、根本的に異なる現象である。そのため、試験データにバラツキが見られた。その結果、締固め曲線と等値線の形状が等しくはならないが、締固め曲線の乾燥側の形状は等値線と等しくなっている。つまり、動的締固めによって得られた締固め曲線は、静的締固め試験から得られた等値線に含まれ、等価な静的締固め応力を算出できることが分かる。

図-7は、締固め後に定常値として測定されたサクションの分布を示したものである。サクションと飽和度の関係を水分特性曲線として表し、一方の情報を得ることで他方の数値を推定するという方法がよく取られるが、図から読み取れるとおり、サクションと飽和度の間に相関関係は見られない。また、低含水比域では乾燥密度の増加とともにサクションも増加するが、高含水比域では大きな乾燥密度ほどサクションは小さくなっている。これは、次のように説明

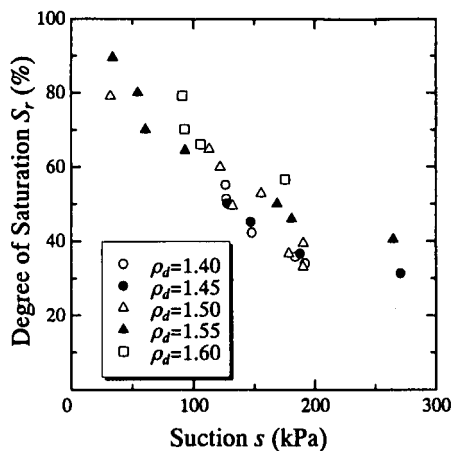


図-8 締固め土のサクシオン～飽和度関係

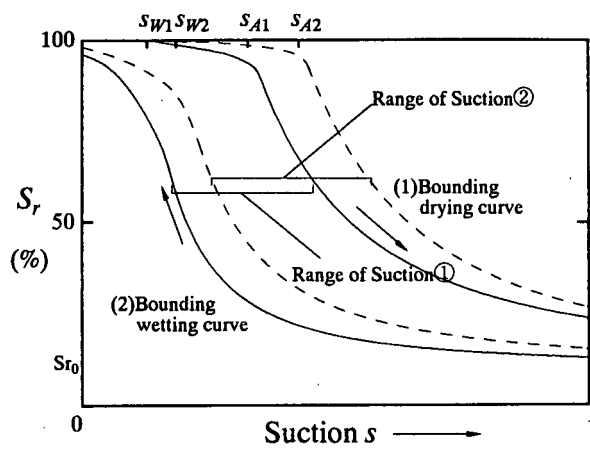
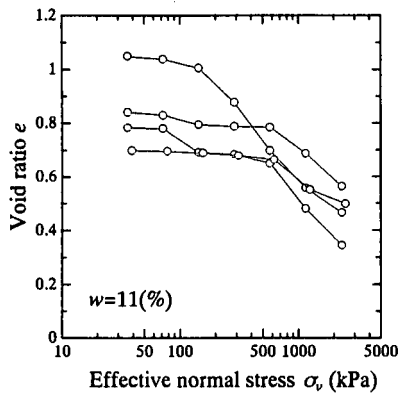
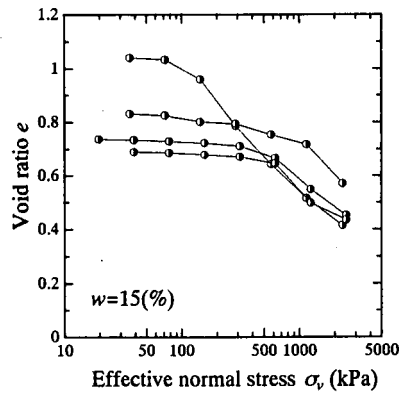


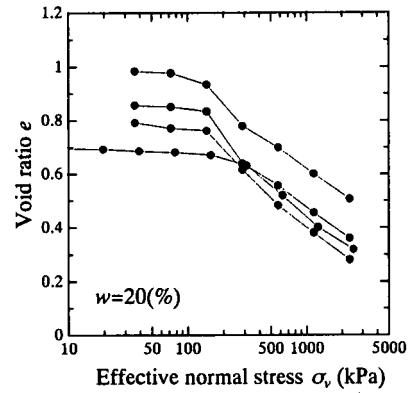
図-9 水分特性曲線概念図



(a) 低含水域の圧縮曲線群

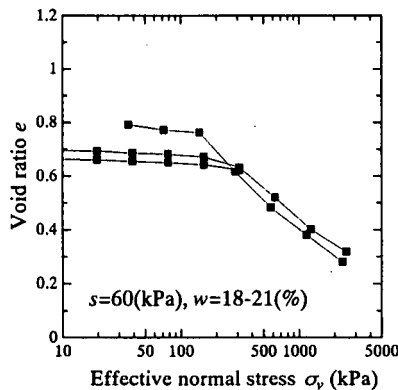


(b) 中含水比域の圧縮曲線群

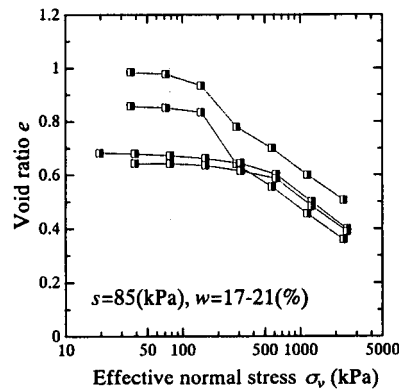


(c) 高含水比域の圧縮曲線群

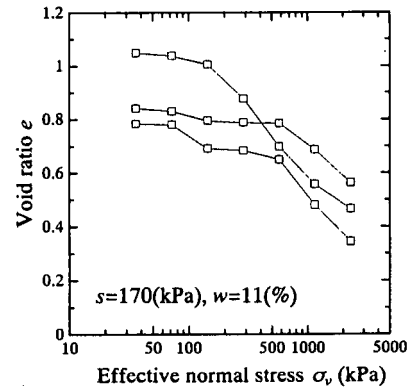
図-10 含水比で整理された圧縮曲線



(a) 低サクシオン域の圧縮曲線群



(b) 中サクシオン域の圧縮曲線群



(c) 高サクシオン域の圧縮曲線群

図-11 サクシオンで整理された圧縮曲線

される。図-8は、締固められた乾燥密度ごとに比較したサクシオンと飽和度の関係である。乾燥密度により得られるサクシオンの範囲が異なるため、同じ飽和度では乾燥密度が高いほどサクシオンも高くなっている。河井ら<sup>7)</sup>は、水分特性曲線は乾燥密度(論文では間隙比)に大きく依存し、その効果が主脱水曲線(飽和状態からサクシオンが増加するときに描く脱水曲線)の空気侵入値、主吸水曲線(吸着水しか存在しない絶乾状態から描く吸水曲線)の水侵入値に現れるとし、モデル化を行っている(図-9:破線はより乾燥密度の大きい主脱水・主吸水曲線)。乾燥密度が同じであればそれに応じた主脱水曲線・主吸水

曲線間を上限・下限として水分状態(サクシオン・飽和度関係)が決まるため、乾燥密度の高い供試体はより図-9のようにより高い範囲のサクシオンを持ち得る。特に締固めによって得られる供試体は主吸水曲線に近い水分状態であり、その影響が顕著に現れるため、図-7のようなサクシオン分布が得られると考えられる。

## (2) 締固め土圧縮試験結果

図-10は、従来どおり締固め土の圧縮曲線を含水比毎に比較したものである。多少のばらつきはあるものの含水比ごとにひとつの圧縮曲線に収束してい

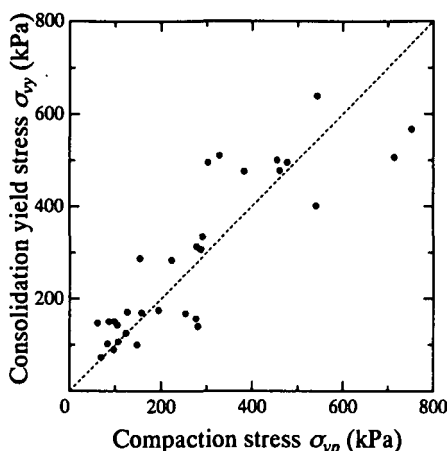


図-12 締固め応力～降伏応力関係

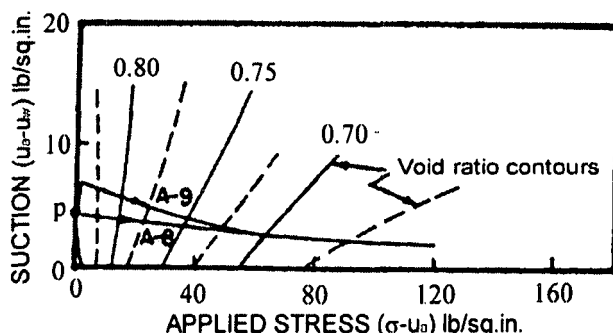


図-13 Matyas and Radhakrisna の研究

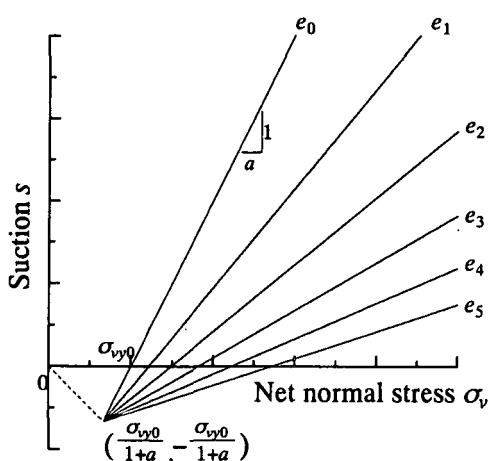


図-14 Matyas and Radhakrisna の試験結果の簡略化

るのが確認できる。この事実は多くの論文で確認されていることである(例えば 3))。しかしながら、締固め土を不飽和土として捕らえると、その応力成分サクシオンが圧縮曲線に大きく影響を及ぼし、含水比はその効果を間接的に表しているに過ぎない。また、図-7よりその影響は小さいが、サクシオン等値線が乾燥密度に依存していることを考慮すると、含水比での整理は妥当とはいえない。

図-11は、図-7より各供試体のサクシオン値を見積もり、初期サクシオンごとに圧縮曲線を比較したものである。図よりサクシオンごとに含水比の異なる供試体の圧縮曲線がひとつに収束しているのが分かる。この事実は、締固め土における正規圧密線がサクシオンごとに異なることを示している。

図-12は、締固め中に測定された最大締固め応力とCasagrandeの方法によって求めた圧密降伏応力の比較である。いくらかのバラツキが見られるが、締固め応力と圧密降伏応力は一致していることが分かる。

#### 4. 締固め土の圧密降伏応力の算定

前節の試験結果を踏まえて、締固め土に生じてい

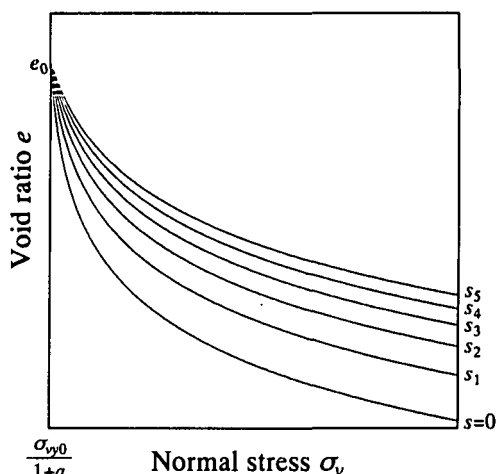


図-15 式(3)より得られる圧縮曲線群

るサクシオンから、圧密降伏応力を算定する手法を提案する。

##### (1) 圧縮曲線

不飽和土の構成モデルはいくつか提案されており、それぞれ圧密降伏応力に関するアプローチが異なる。しかしながら、それらの基本となる考え方は図-13に示すMatyas and Radhakrisna<sup>9)</sup>の試験結果に基づいている。Matyas and Radhakrisnaは、カオリンと蛍石の混合物でサクシオンを制御した不飽和三軸、 $K_0$ 圧縮試験を行い、基底応力(外力と間隙空気圧の差であり、通常大気圧下で間隙空気が外気と連続していると考え、外力がそのまま基底応力となる)・サクシオン面上に等間隙比線が描けることを示した。Alonsoら<sup>9)</sup>はMatyas and Radhakrisnaの試験結果を受け、同様に基底応力・サクシオンを応力成分としたが、Kohgoら<sup>10)</sup>、軽部ら<sup>11)</sup>はサクシオンの効果を2つに分類し、図-13面上の等間隙比線が内部の含水状態に依存しているとしている。しかしながら工学的に供する場合、特に圧密降伏応力を算定する場合に限定すると、圧縮中に内部含水状態が変化しないものとして簡略化できることを図-11, 12が示しているといえる。そこで、図-13の等間隙比線を図-14のように表し、 $s=0$ での間隙比変化を飽和土の圧縮曲線と

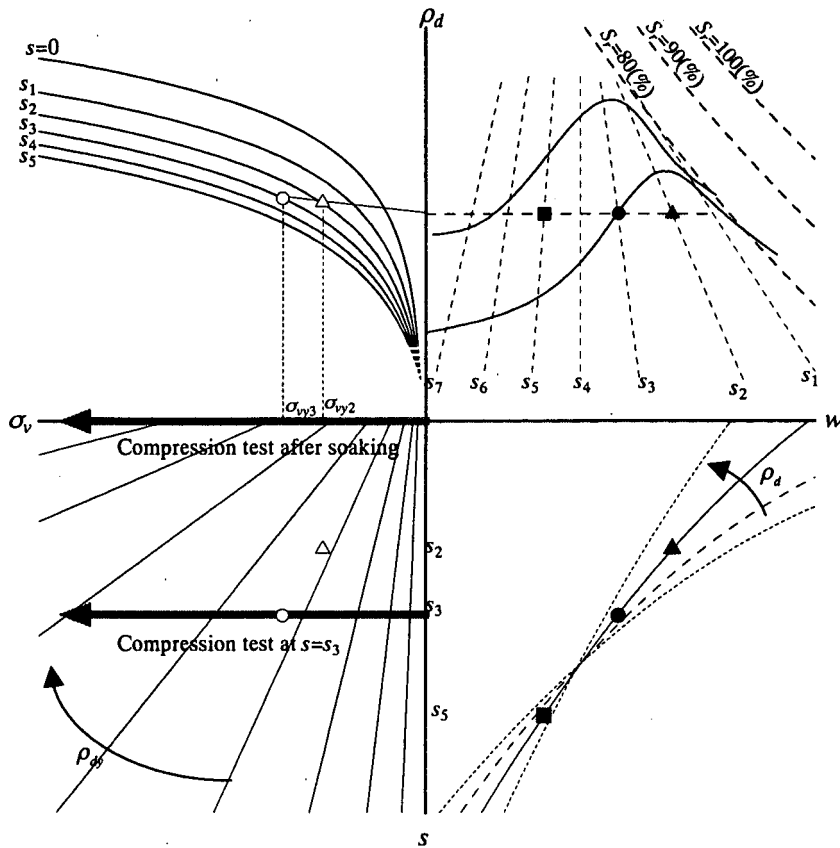


図-16 締固め土の圧密降伏応力算定法

して次式

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{\sigma_v}{\sigma_{vy0}} \quad (2)$$

を考えると、 $s = s$  の間隙比変化は次式のようなになる。

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{\sigma_v + s}{\sigma_{vy0} + (1+a)s} \quad (3)$$

ここで、 $e_0$  は鉛直応力  $\sigma_v = \sigma_{vy0}$  のとき降伏時の間隙比、 $\lambda$  は飽和土の圧縮指数、 $a$  は図-14 に示す初期降伏線の傾きである。図-15 は式(3)より得られるサクシオン一定の圧縮曲線群である。図中の圧縮曲線に対数座標上で描くと、サクシオン一定の圧縮線は鉛直応力が大きくなってくると互いに平行な直線群となる。

## (2) 圧密降伏応力算定チャート

前節で不飽和土の圧縮曲線を簡易的に表現したが、現場施工は乾燥密度・含水比で管理される場合が多いため、

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \quad (4)$$

を用いて、式(3)を次のように表す。

$$\rho_d = \frac{G_s \rho_{d0}}{G_s - \rho_{d0} \lambda \ln \left( \frac{\sigma_v + s}{\sigma_{vy0} + (1+a)s} \right)} \quad (5)$$

すると、図-16 に示すチャートの第二象限に示すようなサクシオンに依存する正規圧密曲線群が描ける。

つまり、締固め土が有するサクシオンが図-16 第一象限のように与えられれば、その供試体の降伏後の圧縮曲線は第2象限に示されるそれぞれのサクシオン毎の圧縮曲線に一致する。このとき、弾性圧縮係数を一定とすると、弾性域内での圧縮線と正規圧密線との交点が圧密降伏応力として算定できる。同じ乾燥密度で異なる含水比を持つ●▲で表す状態に締固められた供試体は、異なるサクシオンを保持しており第二象限で示す○△で降伏し、それぞれ  $\sigma_{vy2}$ 、 $\sigma_{vy3}$  の圧密降伏応力を持つことが分かる。以下に図-16 のチャートの作成法を記す。

① 図-8 より乾燥密度ごとの含水比～サクシオン関係を求め、第四象限(水分特性曲線)を作成すれば第一象限の締固め曲線上にサクシオン分布を描くことができる。

② 第二象限の圧縮曲線は第三象限に Matyas and Radhakrisna<sup>®</sup> の試験結果に基づいた乾燥密度線を描けば得られる。この乾燥密度線群を描くために、任意の状態に締固められた供試体を2つ用意し、一方はそのままの圧密試験、もう一方は水浸後( $s=0$ )圧密を行う。このとき、第三象限上では図-16 中に示す2つの応力経路が描ける。この経路上で、等乾燥密度線を描けばよい。

## (3) 締固め土の強度

不飽和土の破壊基準は排水条件に関わらず、次式で与えられることが確かめられている<sup>12)</sup>。



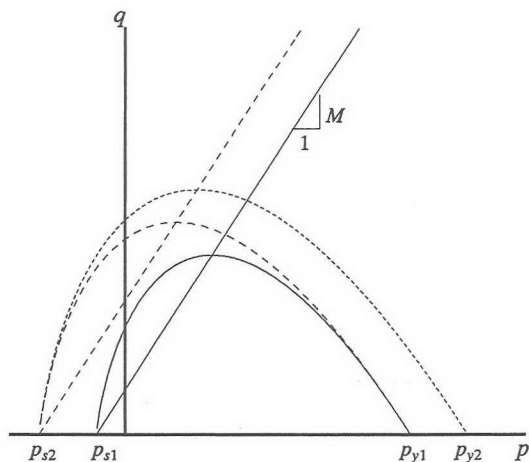


図-17  $p \sim q$  平面での降伏面

$$q = M(p + p_s) \quad (6)$$

このときの  $p \sim q$  平面での降伏面は次式で表され、図-17 のように与えられる。

$$q = -M(p + p_s) \ln \left( \frac{p + p_s}{p_y + p_s} \right) \quad (7)$$

ここで、 $q$  は主応力差、 $M$  は飽和土の限界状態線の傾き、 $p$  は平均基底応力、 $p_y$  は  $q = 0$  のときの圧密降伏応力である。 $p_s$  はサクシオン応力であり、次式で与えられるせん断抵抗力増分に寄与するサクシオンの効果を表す。

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} s \quad (8)$$

ここで、 $S_r$  は飽和度、 $S_{r0}$  は吸着水相が占める飽和度である。このサクシオン応力は締固め状態とサクシオンが分かれば算出可能である。 $p_y$  は次式に図-16 で得られる圧密降伏応力を代入すれば得ることができる。

$$p_y = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \sigma_{vy} \quad (9)$$

ここで、 $K_0$  は静止土圧係数である。

図-18 は、図-7 より算出されたサクシオン応力分布である。締固め土の強度は一般的に最適含水比よりも少し乾燥側でピークを迎えられているが、サクシオン応力も極大値となっていることが分かる。

## 5. まとめ

以上、締固め土に対して不飽和土の力学体系を簡略化して適用する手法について述べた。特に、これまで経験的に含水比で整理されていた締固め土の圧縮特性を、サクシオンで表現し、新たに圧密降伏応力を算定する手法を提案している。しかしながら、不飽和土の力学挙動がサクシオンだけでなく含水状態にも依存することも念頭に置く必要はあろう。ここでは、極力モデルを簡略化し現場に適用することを目的とした。

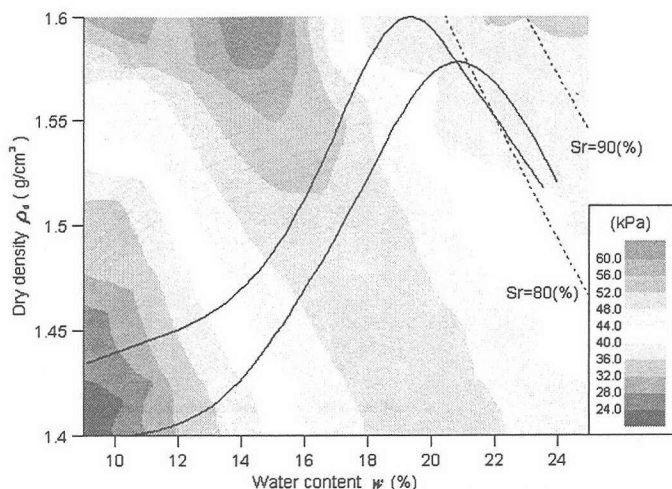


図-18 サクシオン応力分布

## 参考文献

- 1) Procter, R. R. : Four Articles on the design and construction of rolled-earth dams, *Eng. News Record*, Vol.111, pp.245-248, 286-289, 348-351, 372-376, 1933.
- 2) Seed, H. B. and Chan, C. K. : Structure and strength characteristics of compacted clays, *Journal of SMFD, Proc. ASCE, SM5*, pp.87-125, 1959.
- 3) 伊勢田哲也, 水野正憲 : 締固め土の圧縮性状に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 188 号, pp.45-52, 1971.
- 4) Ohta, H. and Hata, S. : Strength of dynamically compacted soils, *Proc. 9th ICSMFE*, Vol.1, pp.239-242, 1977.
- 5) 太田秀樹, 西田義親, 国安逸朗, 金子義信 : 土の締固め基準と品質検査, 土と基礎, Vol.34, No.5, pp.43-48, 1986.
- 6) Olson, R. E. and Langfelder, L. J. : Pumping test to determine permeability ratio, *Journal of SMFD, Proc. ASCE, SM4*, pp.127-150, 1965.
- 7) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤 : 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会論文集, No.666/III-53, pp.291-302, 2000.
- 8) Matyas, E. L. and Radhakrishna, H. S. : Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.
- 9) Alonso, E. E., Gens, A. and Hight, D. W. : Special problem soils. General Report., *Proc. 9th European RC-SMFE*, pp.1087-1146, 1987.
- 10) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T. : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 11) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識 : 不飽和土の間隙水状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.83-92, 1996.
- 12) 河井克之, 軽部大蔵, 嘉戸善胤, 加藤正司 : 不飽和土の非排水三軸圧縮試験における変形強度特性および水分特性, 土木学会論文集, 2002 (投稿中).

(2002 年 4 月 19 日 受付)