

不飽和土の取扱いの現状と問題点

The present situation and some problems on unsaturated soils

かわ 川 上

ひろし 浩*

1. ま え が き

ひとくちに不飽和土の問題というと、我が国のように多雨多湿で地盤の地下水位の高い所では、それは特殊な問題と考えられ、身近な問題としてはとらえられていないようである。

飽和度が低い土の問題は、我が国では築堤盛土などにみられる程度で、これも施工後降雨によって飽和状態に近づく傾向にある。したがって、外国の半乾燥地域あるいは乾燥地域でみられるような土の吸水による急激な沈下とか吸湿による粘土の膨張といった土質工学上の大きな問題は我が国では少ないといえる。しかしながら、飽和度が100%よりわずかに低下したり、土中の間隙に気泡が生じて間隙水圧が負となっている状態まで考えると不飽和土の範囲は拡大され、多くの問題が不飽和土の問題となる。例えば、飽和粘土の非排水強度試験として広く行われている一軸圧縮試験にしても、その試料中には、サンプリングによる応力解放に伴い負の間隙水圧が発生しており、発生しているサクシジョンの大きさに一軸圧縮強さも大きく影響されている。あるいは、我々は、乾燥した砂地盤および地下水面下の砂地盤では垂直に掘削することは不可能であるが、砂が湿潤した状態ではある程度の高さの垂直切取りが可能であることを経験的に知っている。このことは、湿潤状態の砂では、砂粒子間の間隙水に生ずるサクシジョンによって、砂粒子間に圧縮応力が与えられ、結果的に見掛けの粘着力が生ずるためと説明できる。

日ごろわれわれが手にする土質試料は、完全な飽和状態で存在することの方が珍しく、むしろ三軸試験時に還元圧をかけたりして、飽和粘土を完全飽和状態で試験するために苦労しているのが実状である。このように、われわれの周囲には、飽和状態からわずかに不飽和化した土の問題が多いといえよう。

飽和土という2相系の材料から、空気が混入して3相系の物質に変化した不飽和土は、気相が存在するだけその力学的性質が複雑なものとなるが、不飽和土を飽和土とは異なる全く別の材料とみるのではなく、飽和土の中に空気が混入してきた飽和土の延長上の問題としてとらえてゆくことは大切であろう。

2. 飽和と不飽和

完全飽和の状態から、飽和度が低下したいわゆる不飽和状態にいたる間には、当然不完全な飽和状態が存在する。Aitchison¹⁾ (アイチソン) の区分によれば表-1のとおりで、完全飽和と不飽和の間には、部分飽和、疑似飽和と呼ぶべき過渡的状态がある。これらはそれぞれ Skempton (スケンプトン) の間隙水圧係数 B が1以下の状態および試料中にサクシジョンが発生している状態を示す。これらは通常飽和土として扱われているが、不飽和土としてみていくことも、飽和土と不飽和土の挙動の差を明らかにしていくうえに必要なことである。

3. 不飽和土の有効応力

Rendulic (レンドリック)²⁾ および Henkel (ヘンケル)³⁾ の実験により、飽和粘土における有効応力の原理が認められ、飽和粘土の変形と強度は全応力ではなく、有効応力によって支配されることが明らかになると、それでは不飽和土においてはどうかということが問題になる。飽和粘土の有効応力の原理と言っても、土粒子間の塑性流動による二次圧密⁴⁾ や溶脱による二次圧密⁵⁾ など間隙水圧が消散した後の有効応力一定下での変形もあるので、有効応力と変形・強度間に対応関係があると理解すればよいであろう。

不飽和土に関する有効応力式は、Aitchison⁶⁾ および Jennings (ジェニングス)⁷⁾ によっても提案されているが、次の Bishop (ビショップ) 式が気相の項を含んでいる点で包括的な表現式であるとして用いられてきている。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 u_a = 間隙空気圧、 u_w = 間隙水圧、 χ は土の飽和度・乾湿の繰返し・粘土鉱物などに関連する実験定数で、飽和時1となる。現在この実験定数 χ は不飽和土の強度あるいは体積変化挙動を飽和土のそれに一致させるように決

表-1 飽和と不飽和の区分 (Aitchison, 1957)

	飽 和 度	間隙水圧係数 B	サクシジョン
飽 和	100	1	0
部 分 飽 和	<100	<1	0
疑 似 飽 和	100	1	あり
不 飽 和	<100	<1	あり

*信州大学教授 工学部土木工学科

総 説

めているが、不飽和土のみの試験から決定できるものではない。 χ に乗すべき $u_a - u_w$ は、土中のサクシオンを意味し、定数 χ はいわばサクシオンが不飽和土の強度・変形にどれほど寄与するかその寄与率を表している。

1960年代は(1)式の妥当性をめぐって活発な論議が展開されてきたが、1970年代に入って目新しい研究の進展がみられないのは、この χ の存在がじゃましていると言っても過言ではあるまい。サクシオンの測定法も含めて χ の決定の難しさ、また不飽和土のみの試験では χ の値を決定できないという問題が研究の進展を阻害している。

その後、不飽和土の有効応力式としては、サクシオンをマトリックスサクシオンと溶質サクシオンに分けることが提案⁹⁾されたが、これまでの流れの中に位置づけうる。別の形のものとしては、Sridharan (スリッドハラン)¹⁰⁾により、反発力・吸引力という Lambe (ラム) の考え方⁹⁾を導入して、次式が示されている。

$$\sigma' = \sigma - u_a - u_w - R + A \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ただし、 R ：反発力、 A ：吸引力である。

反発力、吸引力の定量的把握が問題であるが、考え方としては、今後の進展の可能性があろう。

4. 不飽和土におけるコラプス

Jennings¹¹⁾らによって、不飽和土の圧密試験中に、透水を行うことによりサクシオンを解放した場合、急激な圧縮変形を生ずる場合があることが示された。有効応力の原理に従えば、サクシオンの解放による有効応力の減少は、膨張変形を生ぜしめるはずであるが、ある条件のもとでは圧縮変形が生じる。そのため、Jennings らは(1)式を適用できるのは、粘性土では飽和度90%以上、砂質土では50%以上という限界があることを示した。かかる圧縮変形は、①土がもともと不安定な間隙の多い構造をもつこと、②構造を崩壊させる外的応力が作用すること、③高いサクシオンあるいは粒子間のセメンテーションによって土の構造が一時的剛性をもつことが必要であるとされている¹²⁾。また、コラプスの現象は浸水により有効応力が減少し、構造の強さが減少した結果生じるせん断変形であるとの見方もある。等方圧下でコラプスが生じても粒子間応力が減じた結果、粒子が滑動しやすくなって変形が生ずるのであって、一概に有効応力の原理を否定する根拠にはならないという見方もある⁴⁾。

ともあれ、このような圧縮変形が、不飽和土の変形に大きな影響をもつことは当然であり、不飽和土の三軸試験中の体積変化には、コラプスによる変形が含まれている¹³⁾。

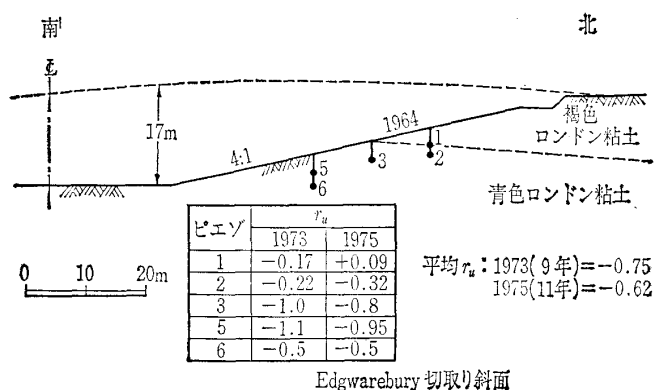
このような現象による実際の沈下は、北アメリカ、アフリカの乾燥地域、半乾燥地域のレス土あるいは扇状地堆積土においてみられ、かんがい事業のため建設した水路がわずかな水漏れによる不同沈下で破壊されている。カリフォルニア州サン・オークインバレーなどはその代表例である

うが(口絵写真—1～3参照)、対策としてはあらかじめ地盤に水をまいて締め固めるハイドロ・コンパクションが採用されている。そして対策工法から転じて現象そのものが、ハイドロコンパクションと呼ばれている¹⁴⁾ようである。

5. サクシオンの現場計測

実験室で不飽和土の強度定数が決定でき、(1)式の χ が決定できたとしても、それで現場の問題が直ちに解決されるものではない。次の段階として現場におけるサクシオンまたは間隙水圧が計測されなければならない。軟弱地盤上の盛土施工において、飽和土のせん断時の間隙水圧挙動が、実験室内で調査され、現場で間隙水圧の計測を行って初めて、盛土の制御が可能になるのと同じである。

このような現場での問題として最も印象に残るのは、東京の国際土質基礎工学会議での Skempton のスペシャル・レクチャーである。ロンドンクレイの切取り斜面は、完成後、10年後、20年後場合によっては50年後に突然滑動することがあった。それまでは安定逆算によれば、年々 c' が減少する結果になると報ぜられてきた。1972年以来斜面内の間隙水圧計測が試みられ、造成後多年月を経た斜面内に、負の間隙水圧が存在することが確認されるに至った。図—1にその調査結果の一例を引用したが、この切取り斜面は1964年に造成されたが、1972年ピエゾメーターを埋設したところ、造成後9年を経た斜面内になお負の間隙水圧が残留している。図中の間隙水圧は間隙水圧係数 r_u で表されているが、 r_u は間隙水圧をピエゾメーター埋設点の土かぶり荷重で除したものである。このような負圧の存在は、その後褐色ロンドンクレイ中でも確認され、斜面完成後50年かかって徐々に解放され、一定値 $r_u = 0.30$ に近づくことが確認されている。フィッシャーの多い粘土の中での間隙水圧の消散に50年もの年月を要するという事は簡単に想像できないことである。また、土中のサクシオンの存在は、見掛け上、粘着項 c' が増加したと同様な効果をもつことも銘記すべきである。と同時に、現場で拾い上げた問題を実験室でも検討し、困難な現場の計測で問題解決を立証していくという工学本来のあるべき姿に改めて感銘を受けたものである。



図—1 掘削斜面中の負の間隙水圧 (Skempton, 1977)

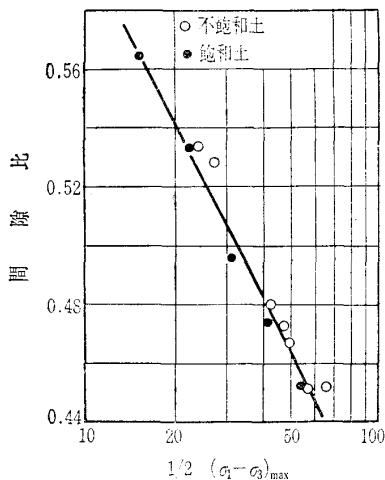
6. サクシオンと強度

前述の有効応力式の論議から、現状、不飽和土の有効応力をどのように考えているかについては、それぞれにかなりの差があらうかと推察している。しかし、不飽和土の有効応力について、一つのけじめをつけたのは、図—2に示す関係である。この図はBlight (ブライト) がマングラ頁岩の締固め土について行った実験結果より、Burland (バーランド)¹⁵⁾ が整理して示したものである。図によれば飽和土および不飽和土ともに、非排水せん断強さと破壊時間隙比の間にはユニークな関係が認められる。この事実は限られた飽和度、含水比等の制限はあったとしても、有効応力の原理が存在することを意味している。そして破壊にいたる道程での変形については(1)式の考え方が妥当であることを示している。この関係が厳密に存在すれば、サンプリングによる強度の低下とか、水浸による強度低下も生じないという見方が生じてくる。したがって、図の関係は基本的な関係として認められるが、土によっては、多少のばらつきが生じ、ある幅が生じるのではないとも考える。その一例として、同じ間隙比をもつ不飽和土と飽和土の一軸圧縮試験の結果を示したい。図—3はシルト質粘土を圧密成形して得た試料であるが、圧密荷重の除荷によって飽和

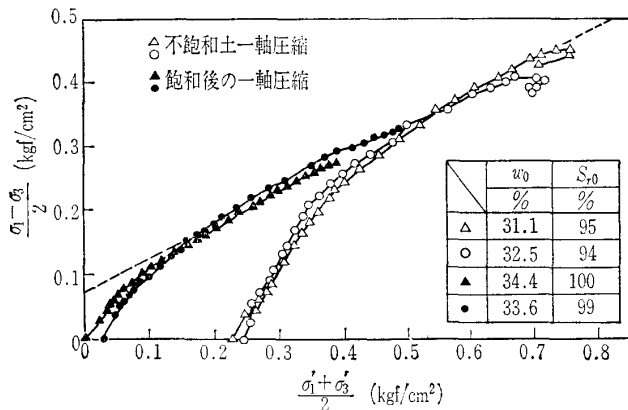
度は95%に低下している。不飽和土は、そのまま土中のサクシオンを測定して一軸圧縮を行っている。一方飽和土は吸水によって体積膨張が生じないように拘束等方圧を加えて飽和させ、その後非排水せん断を行ったものである。膨張拘束のため、ほんのわずかの拘束圧が作用しているとはいえ、事実上の一軸圧縮試験を行った結果と考えてよい。なお、不飽和土の有効応力は $\chi=1$ と仮定して計算している。図示のように、わずかながら吸水による強度低下を生じている。細かにみると判別される強度低下も図—2の関係図の中ではばらつきの範囲内に属し、大局的には図—2の関係が認められる。

さて、図—3における不飽和土の一軸圧縮試験結果は試料土の飽和度が94%以上と高いため、飽和土の破壊包絡線と一致している。しかし、試料土の飽和度が低下すると不飽和土の強度線は徐々に飽和土のそれからはずれてくる。図—4はサクシオン一定の一軸圧縮試験を行い、 $\chi=1$ として有効応力を算定したものであるが、サクシオンが小さい間は飽和土の強度線に一致している。しかし、サクシオンが大きくなると、一致しなくなっている。この飽和土と不飽和土の強度が一致するよう操作して得られるのが、パラメーター χ であり、図においても簡単に χ を決めることはできる。しかし、実験室で単に χ を求めてみても、現場での間隙水圧が算定もしくは測定されなければ、単に求めただけにとどまることになる。しかし、図にみられるように、ある程度の範囲において、不飽和土においても、 $\chi=1$ として飽和土と全く同様の取扱いができる範囲がある。この範囲は、単に飽和度だけでなく土質によっても変わってくるので、今後簡単な試験で $\chi=1$ として扱える範囲を決めておくことが必要と考える。前述のように、我が国では不飽和土といっても、飽和度が高いものが多い実情を考えると、大切であろう。さすれば、現場の負の間隙水圧測定を生かす可能性も増し、測定する機会も増えるように思われる。

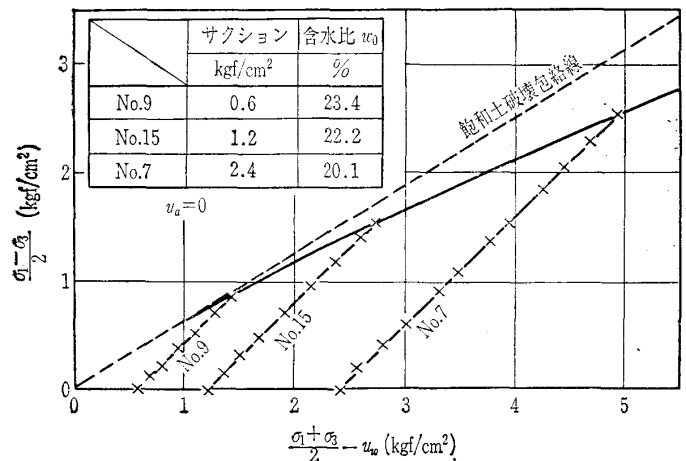
土が更に不飽和化した場合、その強度は一般に増大してゆく。既往の不飽和土の一軸圧縮試験結果をサクシオンと



図—2 マングラ頁岩の試験結果 (Burland, 1964)

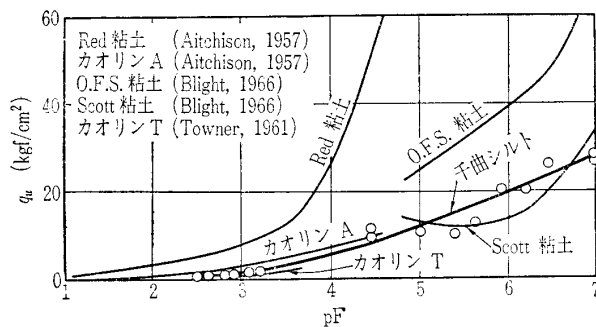


図—3 飽和土と不飽和土の一軸圧縮試験



図—4 サクシオン一定の一軸圧縮試験

総 説

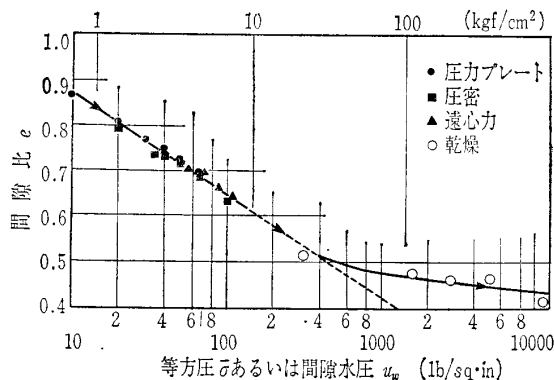


図—5 サクシオンと一軸圧縮強さ

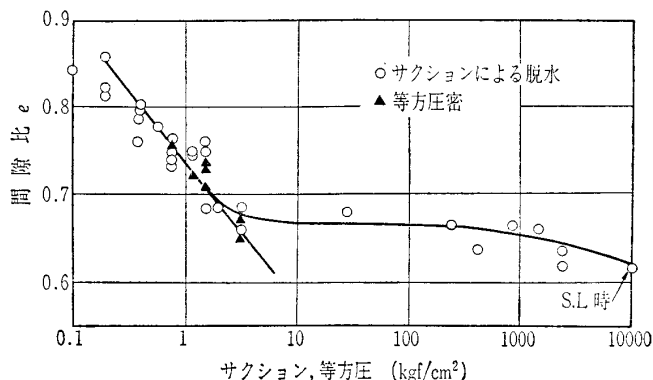
対比すると、図—5のごとくである。不飽和土の強度は、おおざっぱにみて、サクシオンの対数に比例して増大する傾向にある。飽和土では拘束圧に比例して増大することを考えると、大約サクシオンの対数が拘束圧に対応したものとみることができる。この場合にも、不飽和土の強度を飽和土のそれと対比することによって、パラメーター χ を決定できる。一例として、スコット粘土について求められた結果は図—8に示す値となる。

7. サクシオンと変形

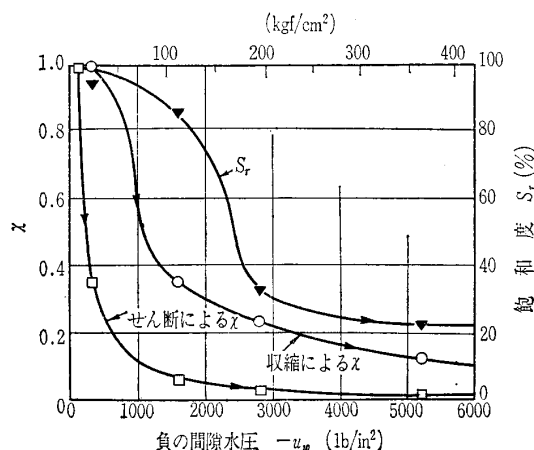
パラメーター χ は、不飽和土と飽和土の変形後の間隙比を一致させるという方法でも決定される。さきに引用したスコット粘土について、等方圧とサクシオンによる変化を対比した結果を図—6に示している。また、千曲シルトについて同様な実験を行った結果でも、同じ傾向を示し、ある圧力範囲まではサクシオンと等方圧による圧縮とが一致する。すなわち、この範囲では $\chi=1$ ということになる。スコット粘土について圧縮変形の面から決めた χ の値は図—8に示される。図では破壊強度から求めた χ の値と対比されているが、それにはかなりの差が認められる。この例にみるように、せん断強度から求めた χ と変形から求めた χ は一致しないのが通常である。だからといって有効応力式が成立しないということではなく、これは χ のもつばらつき、 χ 決定の不確かさと見るべきである。サクシオンを独立した変数としてとらえ、 χ 値にとらわれる必要はないという考え方は、軽部ら¹⁷⁾の研究にも示されている。得られ



図—6 スコット粘土の等方圧およびサクシオンによる圧縮 (Blight, 1966)



図—7 千曲シルトの等方圧およびサクシオンによる圧縮



図—8 スコット粘土で得られた χ (Blight, 1966)

る χ の絶対値にこだわることなく、不飽和土有効応力式の示す考え方で、現実に対処すべきであろうと考える。

サクシオンによる変形で、一つ指摘しておきたい点は、その変形に限度があることである。土をスラリー状から乾燥させてゆくと、収縮限界以下では体積はほぼ一定となる。図—6, 7でサクシオン増大時にも、間隙比がほぼ一定となっているのはこのためである。圧密試験のような荷重による圧縮では、容易にこの収縮限界時の間隙比以下まで圧縮される。サクシオンによる圧縮を論ずる場合、この収縮限界を土の物性を示す一つの尺度として使ってゆくべきであろう。

8. 不飽和土の実用的試験

不飽和土の実用的試験はどうすればよいのかとは常日ごろ問われるところだが、ひとくちにせん断中のサクシオンを測るといっても、時間と手数を要し、とても実用に供しうるものではない。サクシオンを測定した一軸圧縮試験でさえ、1本つぶすのに60時間を要している。当面は不飽和状態での非排水せん断強さを求めて、全応力解析を行うことであろう。そして今一つは、飽和土としてのせん断試験を行い、飽和土の延長上の問題として有効応力解析を行うことである。

道路の拡張による切り取り斜面が、掘削直後は安定してい

でも、降雨後にはサクシヨンの解放によって崩壊する現象は飽和土の延長上の問題といえるであろう。労働災害が多いこの種の問題では、斜面に間隙水圧計を埋めて斜面の健全度を確かめながら工事を進めることも必要であろう。また、そのための現場測定技術の進展も待たれるところである。

9. おわりに

不飽和土の問題としては、なお不飽和土の圧密・浸透・膨張など多くの問題はありますが、一般的に難しい課題であり、パラメーター χ を中心に述べてきた。パラメーター χ にこだわる必要はないと述べながら、本文自体が χ にこだわっているともいえよう。しかし、それが不飽和土の問題に関心をいだく者の正直な姿でもあらうかと考える。

参 考 文 献

- 1) Aitchison G.D.: The Strength of Quasisaturated and Unsaturated Soils in Relation to the Pressure Deficiency in the Pore Water, Proc. 4th ICSMFE, Vol. 1, pp. 135-139, 1957.
- 2) Rendulic, L.: Ein Grundgesetz der Tonmechanik und Sein Experimenteller Beweis. Bauingenieur, pp. 459-460, 1937.
- 3) Henkel, D.J.: The Relationship between the Effective Stresses and Water Content in Saturated Clays, Geotechnique, Vol. 10, No. 2, pp. 41-54, 1960.
- 4) Leonards, G.A.: Correspondence, Geotechnique, Vol. 12, No. 4, pp. 354-355, 1962.
- 5) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, Geotechnique, Vol. 17, pp. 83-118, 1967.
- 6) Aitchison, G.D.: Relationships of Moisture Stress and Effective Stress Functions in Unsaturated Soils, Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 47-52, 1960.
- 7) Jennings, J.E.B.: A Revised Effective Stress Law for Use in the Prediction of the Behaviour of Unsaturated Soils, Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 26-30, 1960.
- 8) Aitchison, G.D.: Structurally Unstable Soils, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 3, pp. 161-190, 1973.
- 9) Lambe, T.W.: A Mechanical Picture of Shear Strength in Clay, Proc. Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, pp. 555-580, 1960.
- 10) Sridharan, A., Rao, G.V. and Pandian, R.S.: Volume Change Behaviour of Partly Saturated Clays during Soaking and the Role of Effective Stress Concept, Soils and Foundations, Vol. 13, No. 3, pp. 1-15, 1973.
- 11) Jennings, J.E.B. and Burland, J.B.: Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. Geotechnique, Vol. 12, pp. 125-144, 1962.
- 12) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R.: Volume Change Characteristics of Unsaturated Clays, Proc. ASCE, Vol. 95, SM 1, pp. 33-51, 1969.
- 13) Kawakami, H. and Abe, H.: Volume Change Characteristics and Collapse in Unsaturated Soils during Triaxial Test, Proc. 5th Asian Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 111-116, 1975.
- 14) 桑原 徹：自然災害と水一地盤沈下と水, pp. 75-109, 災害科学研究班, 1980.
- 15) Burland, J.B.: Correspondence, Geotechnique, Vol. 14, pp. 64-68, 1964.
- 16) Blight, G.E.: Strength Characteristics of Desiccated Clays, Proc. ASCE, SM 6, pp. 19-37, 1966.
- 17) 軽部大蔵他：不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 269, pp. 105-120, 1978.

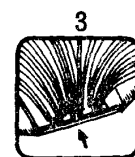
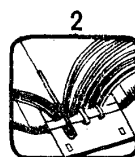
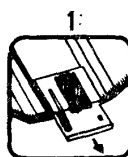
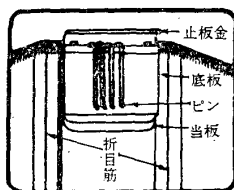
(原稿受理 1981. 2. 24)

学会誌「土と基礎」合本 ファイル

製本のいらない表紙

1冊500円(送料別)

- ① 1図に示す様に上下の止板金を引出しますと一定のところで止ります。(尚強く引きますと取り外しもできます) 必要のPINを抜きとり
- ② 2図に示す様に合本される本の中心折目を開き底板を同時に挟み込み止金板を差込みます。
- ③ 1図, 2図を繰返すことにより3図のように製本されます。



ピンはヘアーピンでも代用できます

お申込みは 土質工学会販売係まで