

超大型一面せん断試験装置の開発とその適用性

福島 伸二¹・北島 明²

¹ フェロー会員 工博 (株) フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

² 正会員 工修 (株) フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1)

山岳空港や工業用地・宅地開発における高盛土等の土構造物は計画地内の切土により発生する岩塊を含む粒径の大きい盛土材、いわゆる粗粒土で造成されることが多い。本論文はこのような土構造物の安定性の評価に必要な粗粒土の強度特性を求めるために、新たに開発した供試体直径 $D=1,600\text{mm}$ 、高さ $H=800\text{mm}$ の超大型一面せん断試験装置の基本構造の概要と、供試体せん断面上の応力の算定法、砂と粗粒土(まさ土)を用いた本装置の適用性確認のための試験結果について報告するものである。この装置の製作にあたっては、装置自体の製作費用や試験費用のかからない実用的なものとするためにその基本構造や試験操作が簡単な装置にすること、また特に他の研究機関や大型土工事の現場試験室への貸出しの可能な装置とすることを目指した。

Key Words : large-scale test, direct shear test, coarse-grained soil, normal stress, shear stress, strength, angle of internal friction, cohesion, earth structure

1. はじめに

ロックフィルダム、山岳空港や工業用地・宅地開発における高盛土等の土構造物は工事計画地内での切土により発生する岩塊を含む粒径の大きい、いわゆる粗粒土を盛り立てて造成されることが多い。しかしながら、このような土構造物の安定性の評価に必要な粗粒土の強度・変形特性は粒子径が大きすぎ通常サイズの土質試験装置で調べることは不可能である。これまでこのような粗粒土の強度・変形特性は、ほぼ原粒度のままで試験できる、粒子径に比較して十分寸法の大きい供試体をもつ超大型三軸圧縮試験^{1), 2)}、あるいは原粒度を相似粒度あるいはカット粒度によるモデル化した試料の大型三軸圧縮試験³⁾により調べられてきている。しかし三軸圧縮試験装置は、供試体の応力状態が明確で排水条件も制御できるが、供試体の応力状態が軸対称状態に限定されるため原位置の応力状態の再現性は必ずしも良い訳ではない。またこの試験は供試体が大型化するほど装置製作費用や試験費用が飛躍的に増加することも問題である。

そこで著者らは三軸圧縮試験よりも経済的な試験装置として、粗粒土を対象にした超大型一面せん断試験装置を開発した。この試験装置の製作にあたっては実用的なものにするために、装置自体の製作費用や試験費用がかからないこと、装置の基本構造と試験操作が簡単であること、また特に他の研究機関や土工事現場での試験室への装置の貸出しのための移設が簡単にできるように分解・組立てが容易で軽量・コンパクトにすることを目指した。ここでは装置の基本構造の概要、供試体せん断面上の垂直応力・せん断応力の算定法、豊浦標準砂と粗粒

土(まさ土)を用いて実施した装置の適用性確認試験の結果や、これと三軸圧縮試験との比較検討結果について報告する。

2. 開発した超大型一面せん断試験装置の概要

盛土材料としての粗粒土は、ただ単に径の大きい粒子を含む土質材料であるという他に、地山を構成する母岩の種類や風化程度にもよるが、切土掘削→積込み・運搬→撒出し・敷均し→転圧の一連の盛土造成過程(試験手順では供試体作製→圧密→せん断の全過程に相当)で粒子破碎が生じやすく、細粒化により粒径や粒度分布が変化してしまうという特徴を有する。このため粗粒土の力学的特性は多様に変化し、強度に及ぼす各種要因を砂質土や粘性土のように体系的に整理しにくく、密度や最大粒径、粒度分布等から強度を推定することを難しくしている。したがって粗粒土の強度は大粒径分を含んだ原粒度の状態あるいはそれに近い粒度状態で試験をして直接求めることが望ましく、そのため大型供試体を使用する試験装置が必要となる。

そこでここでは人頭大程度($D_{\max}=200\sim 300\text{mm}$)までの粗粒土の試験ができるよう供試体の形状・寸法を以下のように決定した。一面せん断試験と同様に直接せん断型の単純せん断試験ではせん断方向のロッキングの影響を小さくするために直径・高さ比を $D/H \approx 3.0$ のような偏平形とすることが多い^{4), 5)}。また一面せん断試験の供試体の形状で重要なのはせん断箱あるいはせん断リングと供試体間の周面摩擦の問題であり、この影響を少なくするためにも偏平形の方が有利である。一方、三軸圧縮圧

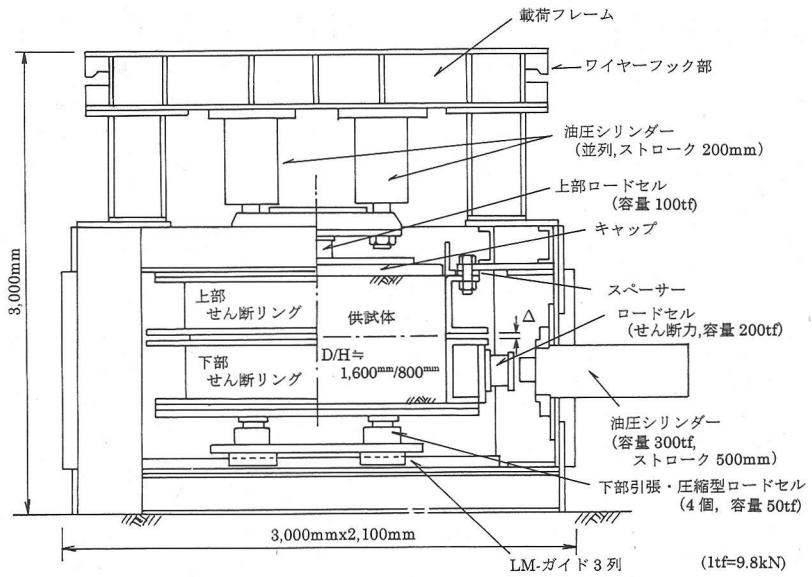


図-1 超大型一面せん断試験装置の基本構造

縮試験では粗粒土の適正な試験結果が得られる最大粒径と供試体直径比は $U_c \geq 10$ 程度の粒度分布が良いものであれば $D_{max}/D = 1/5$ 程度とされてゐる⁹⁾。これらの規定によれば、一面せん断試験の供試体は、 D_{max} に対する供試体寸法として三軸圧縮試験における D に代えて高さ H をとると $D_{max}/H = 1/5$ となり、最大粒径 $D_{max} = 200\text{mm}$ 程度までの粗粒土の試験を原粒度のままで行うには供試体高さは $1,000\text{mm}$ 程度を必要とする。しかし上述の直径・高さ比 $D/H = 3.0$ に合致した供試体寸法は、通常の人頭大レベルの最大粒径をもつ粗粒土の試験を対象にすると、 $D = 2,500 \sim 3,000\text{mm}$ 以上の直径となり現実的な装置の大きさを超えてしまう。このためこの装置の供試体は、ロッキング対策よりも実務目的を最優先させて直径・高さ比をやや偏平な寸法比 $D/H = 2.0$ とし、人頭大レベルの岩塊粒子までの試験が可能で現実的な供試体の直径/高さとして $D/H = 1,600\text{mm}/800\text{mm}$ (寸法比 $D/H = 2.0$, 体積 $V = 1.608\text{m}^3$)とした。

図-1 には試験装置の基本構造を、写真-1 には装置全景をそれぞれ示す。供試体のせん断は一定の垂直応力を加えた状態で、上部せん断リングを固定して、下部せん断リングを水平方向に油圧シリンダー（載荷容量 300tf (2,940kN), ストローク 500mm ）により一定速度で変位させて行う形式である（載荷速度は流量調整弁により油圧シリンダーに流入する油量を制御して行う）。下部せん断リングは底盤に設置された3列のLMガイド（直線方向案内機構）によりガイドされ、せん断方向の摩擦抵抗を最小限に抑えている。またせん断変位の最大可能量は $X_{max} = 400\text{mm}$ で供試体高さの $1/2$ までの大変形せん断が可能である。ただし、後述するようにせん断に伴う有

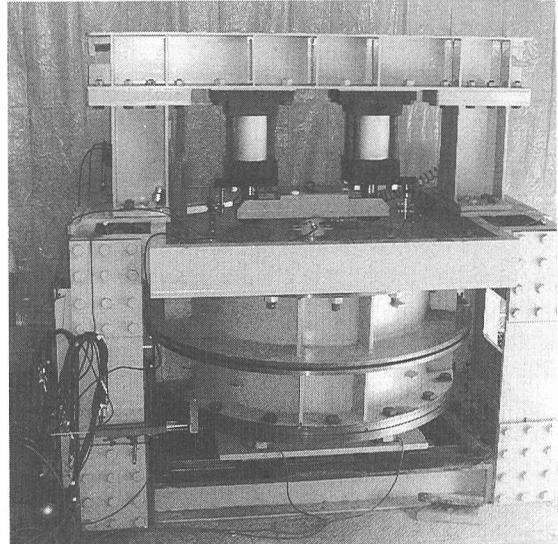


写真-1 超大型一面せん断試験装置の全景

効せん断面積の補正を行うため、この断面積補正 $\Delta A/A_0$ を $10 \sim 15\%$ を限度とすると $X = 126 \sim 188\text{mm}$ となるので、通常の試験におけるせん断変位の打切りは $X = 160\text{mm}$ とした。上・下せん断リングの隙間 (Δ) は隙間調整用スペーサーをリング固定板と上部せん断リングの間に入れることで $\Delta = 2, 10, 20, 40\text{mm}$ の4段階で調節可能である。この隙間の大きさは、供試体せん断面がせん断リングのフランジ面に接触して抵抗力が生じないように、試料の

最大粒径 D_{max} の大きさに応じて、つまり D_{max} が大きいほどせん断面の凹凸が大きいので隙間が大きくなるように調節する。なお、本研究での隙間間隔 Δ は豊浦砂を用いた試験では $\Delta=2mm$ 、まさ土を用いた試験では $\Delta=20mm$ とした。また供試体への垂直荷重の載荷は、2本並列させて互いに剛な鋼板で結合した油圧シリンダー（耐圧 $140\text{kgf/cm}^2(13.72\text{MN/m}^3)$ / 内径 250mm , 載荷容量約 65×2 本 = $130\text{tf}(1.27\text{MN})$, ストローク 200mm ）に高圧窒素ガスを精密レギュレータで制御しアキュムレータ内で油圧に変換して加える方式を採用し、荷重一定状態を保ちながら供試体の垂直変位に追従できる形式とした。また加圧板は、剛性の高い鋼円板とし、せん断中に傾斜しないようにシリンダーからの荷重を上部ロードセルにより平面で供試体に伝達するようにした。

供試体に加えられたせん断力 (S_x^{Total}) は下部せん断リングと油圧シリンダー間に設置したロードセルにより測定する。垂直荷重は供試体の上・下端面の2箇所でそれぞれ測定する。供試体上端面の垂直荷重 (P_2^{Top}) は図-1に示したように2本のシリンダーを剛結した載荷板からの荷重をキャップの上端面に設置した上部ロードセル（容量 $100\text{tf}(980\text{kN})$ ）により測定する。また供試体下端面に作用する垂直荷重 (P_2^{Bottom}) は下部せん断リング底板下面とLMガイドとの間に設置した4個の下部ロードセル（容量 $50\text{tf}(490\text{kN})$, 引張・圧縮型）によりそれぞれ測定する。これら4個のロードセルの設置位置は3列のLMガイドの外側2列がロードセル反力点が通るように、せん断方向に対して前後×左右の間隔を $800\text{mm} \times 1,200\text{mm}$ とした。

a) 装置開発で特に目指したこと

前述したように粗粒材の強度特性は多様であるために、粗粒土からなる土構造物の安定性評価に必要な強度パラメータは大粒径分を含んだ原粒度状態があるいはそれに近い粒度状態で試験をして直接求めることが重要である。そこで、本装置の開発にあたっては、粗粒土の試験を対象に実務に役立つものにするために、装置の基本構造や試験操作を可能な限り簡単にし、装置自体の製作費用や試験費用を安価にすること、また特にこの装置を他の研究機関や大型土工事の現場試験室へ貸出せるように装置自体の移設が容易にできることを目指した。このため、上部せん断リングの固定と下部せん断リングへのせん断力載荷のための油圧シリンダーの反力構造フレームはH形鋼と鋼板を組み合わせた箱形構造にすることで高剛性を確保し、そして装置全体を軽量（総重量は約 $13.5\text{tf}(132\text{kN})$ ）でコンパクト（底盤寸法 $3.0\text{m} \times 2.1\text{m}$, 全高さ 2.9m ）にした。装置移設のための運搬は、装置本体の構造部品の他に、試験に必要な油圧ユニット、アキュムレータ、窒素ボンベ類等の各部品も含めて、 $10\text{tf}(98\text{kN})$ トレーラー2台で可能である。このため移設先には装置の設置スペース（約 $5\text{m} \times 3\text{m}$ ）と、試料のストックや計量をするための作業スペース（ $5\text{m} \times 5\text{m}$ ）、クレーン設備、電

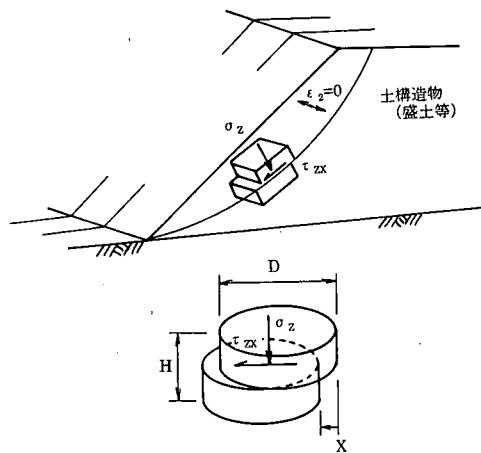


図-2 一面せん断試験により再現される原位置応力状態

源（ $100\text{V}, 200\text{V}$ ）があれば試験が可能である。例えば、装置を設置する建屋はトラッククレーンやホイールクレーン等を利用しやすい屋外に、鋼管を組み合わせた骨組み構造にブルーシートで覆って屋根を設けた程度でも十分である。この移設可能な試験装置の利点は、その土質が頻繁に変化するような粗粒土料を大量に扱う土工事現場では大きいと考えられる。例えば、盛土材の土質が大幅に変化して強度確認が必要になった時毎に、試験に必要な試料（3供試体分で約 $10\text{tf}(98\text{kN})$ ）を試験室まで運搬して試験をするとよりも、試験装置を現場へ移設して土質が変化する毎に試験を実施した方が経済的であり、そして試験結果を盛土材料の品質管理として施工に迅速に活用できる。

3. 一面せん断試験の意義

三軸圧縮試験装置は二つの主応力（軸応力、側方応力）を制御し、供試体内に生じるせん断面の位置を規定しないもので、供試体に再現される応力状態は軸対称状態（主応力方向一定）のみである。一方、一面せん断試験装置は供試体水平断面上の垂直応力、せん断応力を制御して、図-2に概念的に示すように、斜面内の土要素がすべり面を挟んで土塊が互いにすべり変位しているような状態を上・下せん断リング間の供試体水平面に強制的なせん断することで再現し、この面上で発揮される強度を求めるものである。この時の供試体は主応力方向の連続的回転下での平面ひずみ状態（せん断方向に直交する方向の変位が拘束されている）にある。しかしこの試験の利点はこのような原位置に近い土要素の破壊状態の再現性の良さよりも、装置の基本構造の単純さと試験操作の簡単さにより装置の製作費用と試験費用が三軸圧縮試験に比較して大幅に安くすることである。例えば、参考までに

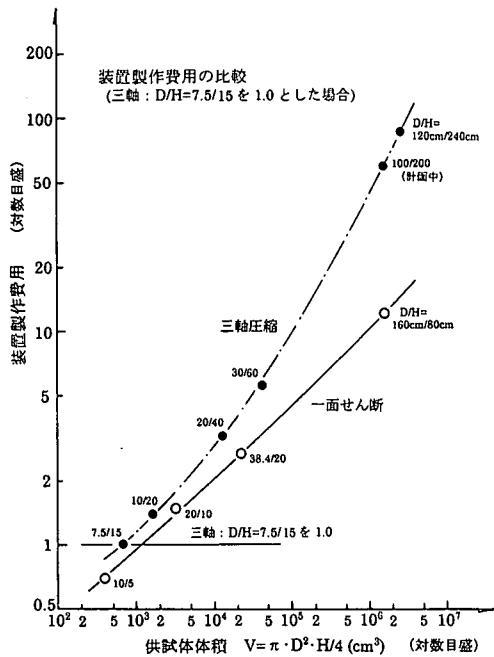


図-3 (a) 試験装置の製作費用の比較

一面せん断試験の装置製作や試験に要する費用を著者らの実績と経験を加味して評価した結果を示すと、それぞれ図-3 (a) (b) になる。図中で、供試体寸法 $D/H=1,200\text{mm}/2,400\text{mm}$ の超大型三軸圧縮試験（この装置は 25 年以上前に設置されたもので⁷⁾、すでに廃棄されている⁸⁾以外はすべて著者らが実際に設計したもので、また試験費用（但し経費は含まない）は著者らの実績によるものである。これらの図が示すように、同じ供試体寸法をもつ三軸圧縮試験に比較すると、供試体寸法が大型になるほど割安になり、ここで紹介する装置の供試体寸法では製作費用は 1/5～1/4 程度、試験費用は 1/3 程度である。これは、三軸圧縮試験が三軸セル内で供試体をゴムスリーブで被って圧力下で供試体をせん断させる二重構造になっているため、装置の構造や試験操作の複雑化により割高な試験になってしまふからである。このように一面せん断試験は装置自体が割安で、試験操作も簡単なことが大きな利点であり、この装置の構造的な問題点を捕つて余りあるといえる。特に民間工事における盛土造成工事では、斜面勾配は 5m 每に小段を設けるものの盛土材料の良否に関係なく宅造法で定められた最大角度 30° (1:約 1.73) で造成されるのが一般的である。このため非常に厳しい条件下での盛土造成となるが、一面せん断試験はこのような場合における経済的な盛土材の強度試験、施工中の品質管理試験として適用できる。

これに対して、この一面せん断試験の欠点として指摘されている点は供試体の排水条件が制御できない、供試

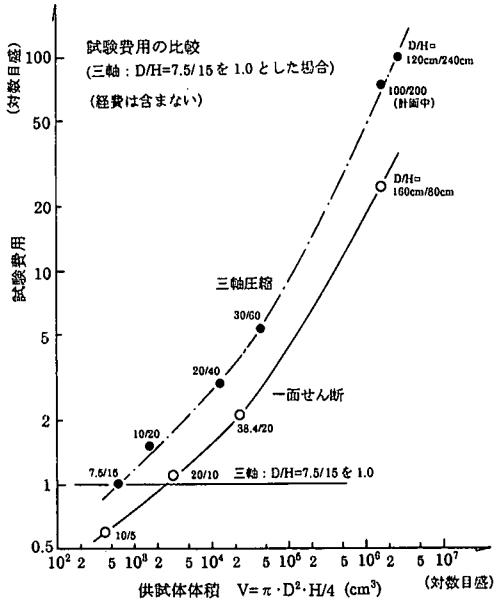


図-3 (b) 試験実施費用の比較

体のひずみが求められない（せん断応力～変位の関係が求まるだけ）、供試体のせん断面上の応力成分(σ_N, τ)しかわからず供試体の破壊条件の解釈が難しい⁴⁾⁵⁾などの装置の構造的な問題であろう。しかしこれらの問題は本当に欠点になるのだろうか。

a) 排水条件を制御できない問題

捨石マウンド材のように粒径の揃った粗粒土は高い透水性を有しており、排水条件せん断を受けるので、排水条件を制御できないことは必ずしも欠点とはならない。一方、透水性の低い細粒分を多く含む一般の粗粒土の場合にも排水条件はせん断速度により制御が可能である。例えば排水を許さない程度の急速せん断あるいは体積一定（高さ一定）条件でのせん断により非排水条件が実現でき、一方過剰間隙水圧が生じないようなゆっくりとしたせん断速度であれば排水条件を達成できる。しかしこのような排水条件の制御が本当に必要なのであろうか。原位置で土要素がせん断を受ける時の排水条件は排水あるいは非排水のように両極端な状態ではなくそれらの中間にあり、むしろせん断速度を原位置での荷重条件（これを限定するのは非常に難しい問題であるが）に合わせる方が重要ではないだろうか。このようなことから、三軸試験のように両極端の排水条件（排水 \leftrightarrow 非排水）で得られる強度パラメータは、原位置で発揮される強度を適正に評価できない場合もあり、常に万能という訳ではなく一面せん断試験からも有用な強度パラメータが得られるものと考えられる。特に実際の土構造物を構成する粗粒土はロックフィル材や捨石マウンド材等は例外として細粒分を含むことが多く、砂質土あるいは粘性土のように単純に分類できない場合には、原位置で想定さ

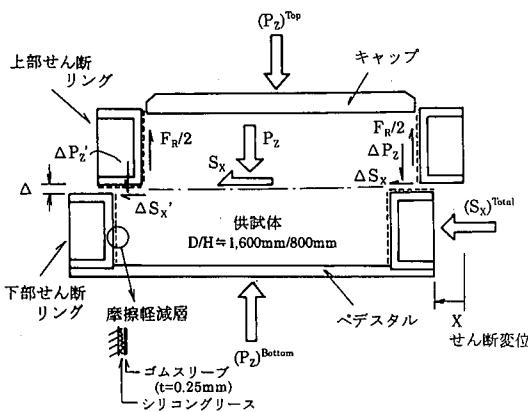


図-4 せん断中の供試体に作用する荷重（概念図）

れる載荷条件に合わせた試験をすることが重要となろう。

b) せん断応力～変位関係しかわからない問題

安定解析に必要な土の強度パラメータにみが要求されている場合にはせん断ひずみがわからないことは問題となる。しかし一面せん断試験で強度パラメータの他に変形解析等に必要な情報としてせん断ひずみも知りたい場合には、本装置のように供試体寸法が大きければ供試体内にひずみ測定が可能な計測器を埋設することが可能である。ここで後述するようにプレートひずみ計を埋設して、一面せん断でのひずみ測定を試みている。

4. 供試体の垂直応力・せん断応力の算定

せん断中の供試体に作用する垂直応力とせん断応力は、せん断変位の進行とともに供試体の有効なせん断面積が $\Delta A = X \cdot D$ だけ変化するので、初期断面積を A_0 、せん断中の有効断面積を $A (=A_0 - \Delta A)$ とし、以下のように算定できる。図-4にはせん断中(せん断変位 X)の供試体に作用する垂直荷重 P_z 、せん断変位に伴う垂直荷重の偏心により下部せん断リングフランジ面に作用する垂直荷重 P_z' (あるいは P_z)、せん断力 S_x 、周面摩擦力 F_R などを概念的に示している(図中の $F_R/2$ は上部せん断リングの周面に作用する全周面摩擦を対左右称で 1/2 に分けた図示している)。この図から鉛直方向の力のつり合いを考えると供試体の上・下端面で測定荷重はそれぞれ

$$(P_z)^{\text{Top}} = P_z + \Delta P_z + \Delta P_z' + F_R \quad (1)$$

$$(P_z)^{\text{Bottom}} = P_z + \Delta P_z + \Delta P_z' \quad (2)$$

となる。ここで $\Delta P_z'$ の作用面であるせん断変形後の供試体せん断面がフランジ面に接触せずに自由面になるように上・下せん断リング間の隙間間隔 Δ を設定すると $\Delta P_z' = 0$ になる。さらに供試体断面上の垂直応力を等分布である($P_z : \Delta P_z = A : A_0 - A$ より $\Delta P_z = P_z \cdot (A_0/A - 1)$)と仮定すると、上述の2式から次の関係が得られる。

$$P_z = [(P_z)^{\text{Top}} - F_R] \cdot (A/A_0) \quad (3a)$$

$$P_z = (P_z)^{\text{Bottom}} \cdot (A/A_0) \quad (3b)$$

一般に荷重は供試体上端面で測定する方が簡単であるが、供試体とせん断リング内面に作用する周面摩擦が含まれた荷重を測定してしまうことになる。このため供試体せん断面上に作用する平均的な垂直荷重を求めるには、上述の式(3a)～(3b)からわかるように周面摩擦の補正が必要になる(供試体下端面での荷重測定はせん断変形による断面積補正を行うのみ)。このため本装置では下端面で測定した荷重を応力算定に使用することを基本にしたが、上端面での測定荷重も垂直応力算定に使用できるように、摩擦力を軽減するためにせん断リング周面にはシリコングリース(信越化学製: KS-63G)を薄く塗ってゴムシート($t=0.25\text{mm}$)を貼り付けた摩擦軽減層を施している。この周面摩擦の除去は摩擦力がせん断による供試体の収縮・膨張変形を拘束するのを防止できる。したがって供試体せん断面上の垂直応力 σ_z は、垂直荷重 P_z と供試体自重を考慮して次式で算定する。

$$\sigma_z \cdot A = P_z + (1/2) \cdot \rho_t \cdot H \cdot A \quad (\rho_t : \text{試料密度})$$

$$\sigma_z = (\sigma_z)^{\text{Top}} - F_R/A_0 + (1/2) \cdot \rho_t \cdot H \quad (4a)$$

$$\sigma_z = (\sigma_z)^{\text{Bottom}} + (1/2) \cdot \rho_t \cdot H \quad (4b)$$

ここで $(\sigma_z)^{\text{Top}} = (P_z)^{\text{Top}}/A_0$ 、 $(\sigma_z)^{\text{Bottom}} = (P_z)^{\text{Bottom}}/A_0$ である。

次にせん断応力は供試体の水平方向の力のつり合いから求められる。

$$(S_x)^{\text{Total}} = S_x + \Delta S_x + \Delta S_x' \quad (5)$$

ここで ΔP_z が作用するせん断フランジ面も、この ΔP_z によりせん断力 ΔS_x が発揮されないようにリング周面と同じ方法で摩擦を除去している($\Delta S_x = \Delta S_x' = 0$)。したがって、供試体せん断面上に作用するせん断応力は

$$\tau_{zx} = S_x/A = (S_x)^{\text{Total}}/A \quad (6)$$

となる。

式(4)、式(6)からわかるように垂直応力の算定では垂直応力の一様分布の仮定により断面積補正の必要がないが、せん断応力では断面積補正が必要となることがわかる。この仮定は供試体が特に大きな収縮や膨張をする場合には成り立たない可能性があり、より信頼性の高い応力算定が要求される場合には、供試体境界での周面摩擦 F_R 、あるいはせん断面付近での ΔP_z による荷重の影響を避けるため供試体端面の中心部分における局部的荷重を測定するなどの対策が必要であろう。

5. 試験装置の適用性確認試験（強度パラメータ）

(1) 豊浦砂を用いた試験

空気乾燥状態にある豊浦砂のせん断中の垂直応力を $\sigma_z = 0.5, 1.0, 2.0 \text{kgf/cm}^2 (\times 98 \text{kN/m}^2)$ と一定にした超大型一面せん断試験により得られた典型的なせん断応力 τ_{zx} ～せん断変位 X の関係を図-5に示す。供試体は、上・下せん断リングの間隔を $\Delta = 2\text{mm}$ として、空気乾燥状態に

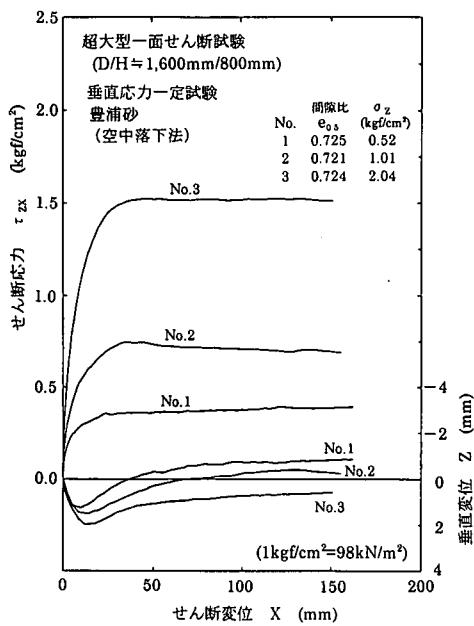


図-5 豊浦砂のせん断応力 τ_{zx} ～せん断変位 X 関係

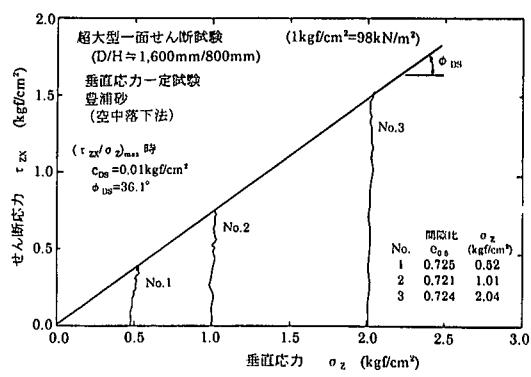


図-6 供試体水平面上の応力経路

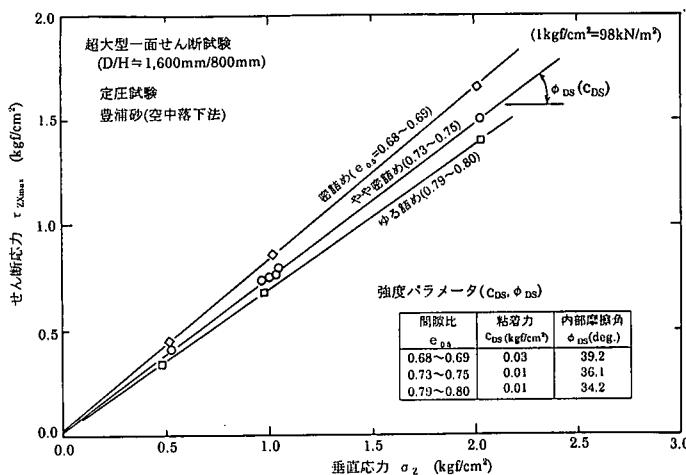


図-7 豊浦砂(τ_{zx}/σ_z)_{max} 点を直線近似した強度パラメータ(c_{Ds}, ϕ_{Ds})

ある砂を吐出し口寸法(2mm × 300mm)の砂撒きロートにより一定の高さから自由落下させて作製した(空中落下法)。なお、これらの試験における垂直応力一定条件は、摩擦力補正を必要としない、供試体下端面で4個の下部ロードセルにより測定した合計値(P_y)_{Bottom}が一定になるように制御したものである。また図-6にこれらの各供試体水平面における応力経路(σ_z, τ_{zx})をそれぞれ示すが、垂直応力を一定にして、せん断応力のみを増加させるという載荷条件をほぼ満足する状態にまで制御できていることがわかる。一面せん断試験では、供試体水平

面を強制的にせん断しているので、この面を破壊面、つまり最大せん断応力比(τ/σ_z)_{max}一面と仮定するのが一般的である。そこでこの図には(τ_{zx}/σ_z)_{max}を連ねた点を直線近似して求めた強度パラメータ(c_{Ds}, ϕ_{Ds})も示してある。また図-7に、これらの試験に加えて、供試体の密度を密詰め、やや密詰め、ゆる詰めの3種類に変えて実施した試験による(τ_{zx}/σ_z)_{max}点をプロットして、同一密度における各点を直線近似して求めた強度パラメータをそれぞれ示す(供試体密度は垂直応力 $\sigma_z=0.5$ kgf/cm²(49kN/m²)における間隙比 e_{0z} で表示した)。これらの

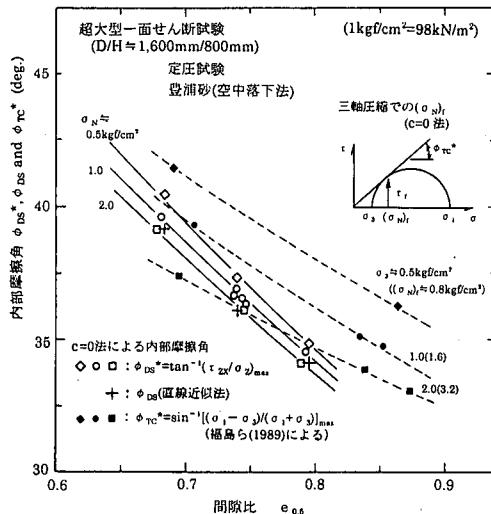


図-8 内部摩擦角 ϕ_{DS}^* (ϕ_{DS} , ϕ_{TC}^*) ~ 間隙比の関係

図から以下のことがわかる。密度をほぼ一定として垂直応力のみを変えた複数の試験から得られた(τ_{zx}/σ_z)_{max}点を近似した直線の切片は粘着力 c_{DS} であるが、これがどの密度においても小さく、ほぼ $c_{DS}=0$ になっている（粘着力が完全にゼロでないのは後述するように(τ_{zx}/σ_z)_{max}の大きさが垂直応力レベルが高くなるほど小さくなる傾向をもつ強度の拘束圧依存性のためである）。以上のこととは、本来粘着力成分のない空気乾燥状態の豊浦砂の特性と合致しており、この超大型一面せん断試験装置は低拘束圧領域においても精度の高い試験結果を示している。一般に三軸圧縮試験では寸法比 D/H=2.0 程度の背高の供試体を用いるため供試体の自重の影響が大きく、低拘束圧領域では供試体の破壊が一様に生じない問題が指摘されているが⁹⁾、一面せん断試験では偏平な供試体を使用するため、この自重の影響が三軸圧縮試験に比較して相対的に少ない。

次に強度に及ぼす密度（間隙比）の影響をみるために、粘着力を無視した($c=0$)内部摩擦角を

$$\phi_{DS}^* = \tan^{-1}[(\tau_{zx}/\sigma_z)_{max}] \quad (7)$$

から求め（いわゆる $c=0$ 法）、間隙比 $e_{0.5}$ に対して垂直応力レベル毎にプロットしたのが図-8 である。以下ここでは粘着力を無視した内部摩擦角は右上に * 印を付けて区別する（ここでこの $c=0$ 法による ϕ_{DS}^* は強度を表示するのは、この ϕ^* は内部摩擦角であっても正規化したせん断強度の大きさを表わしているからである）。図中には比較のために同じ豊浦砂について福島ら⁹⁾が実施した超大型三軸圧縮試験(D/H=1,200mm/2,400mm)から得られた内部摩擦角

$$\phi_{TC}^* = \sin^{-1}[(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)_{max}] \quad (8)$$

も最小主応力レベル毎にプロットし、さらに括弧内には三軸圧縮試験でのせん断面上の垂直応力 $(\sigma_N)_t$ として

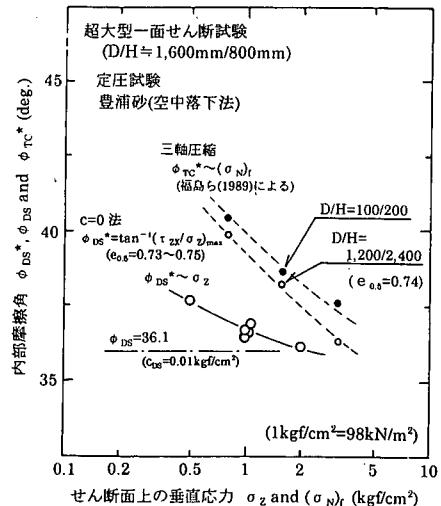


図-9 内部摩擦角 ϕ_{TC}^* (ϕ_{DS} , ϕ_{TC}^*) の拘束圧依存性

$$(\sigma_N) = \sigma_3 \cdot \cos^2 \phi_{TC}^* / (1 - \sin \phi_{TC}^*) \quad (9)$$

より求めた値を示した。また図-6 で 3 種類の密度について垂直応力レベル $\sigma_z=0.5 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kN/m}^2)$ の範囲における 3 本の供試体の(τ_{zx}/σ_z)_{max} 点の直線近似により求めた(c_{DS} , ϕ_{DS})の値を各供試体の平均密度に対して +印でプロットしてある。この図から一面せん断試験から求まる内部摩擦角は、三軸圧縮試験による値と比較すると、間隙比による影響はやや大きくかつ拘束圧による影響は小さいが、比較的近い値になっていることがわかる。そこでこの強度に及ぼす拘束圧の影響をみるために、一面せん断試験を実施した 3 種類の供試体密度のうちやや密な状態における間隙比 $e_{0.5}=0.73 \sim 0.74$ における内部摩擦角を図-8 から読み取って垂直応力 σ_z に対してプロットしたのが図-9 である。なお、図中には、比較のために、図-8 に示した超大型三軸圧縮試験による $\phi_{TC}^* \sim (\sigma_N)_t$ 関係と、さらに福島ら⁹⁾の小型三軸圧縮試験(D/H=100mm/200mm)による関係も示してある。この図から、 ϕ_{DS}^* の拘束圧依存性は三軸圧縮試験における ϕ_{TC}^* よりやや少ないとわかる。これは供試体全面を剛な面である一面せん断試験では自由なダイレイテンシーの発達が阻害されるためではないだろうか。また一面せん断試験により求まる内部摩擦角 ϕ_{DS}^* は三軸圧縮試験による ϕ_{TC}^* よりやや小さくその差は垂直応力レベルの低い $\sigma_z=(\sigma_N)=0.5 \text{ kgf/cm}^2 (49 \text{ kN/m}^2)$ 付近では $\phi_{TC}^* - \phi_{DS}^* = 3^\circ$ 程度であるが、垂直応力レベルが高くなるほど差が小さくなることがわかる。これら両者の差を大きいと見るか、あるいは小さいと見るかは試験目的や試験機の精度等により議論の別れる所であるが、割り切った実務的な観点からすると両試験の差がは少ないといえよう。

一面せん断試験における供試体は平面ひずみ状態にあるが、この試験から得られる内部摩擦角 ϕ_{DS}^* が三軸圧縮

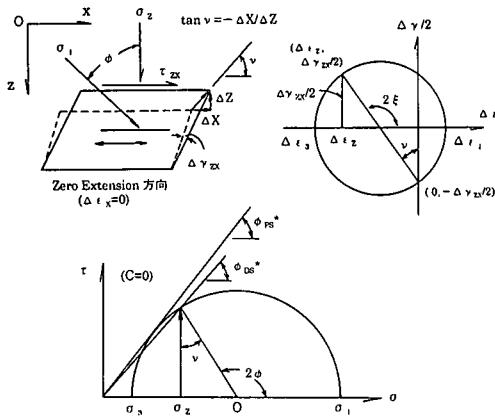


図-10 一面せん断試験におけるMohrの応力円表示の仮定

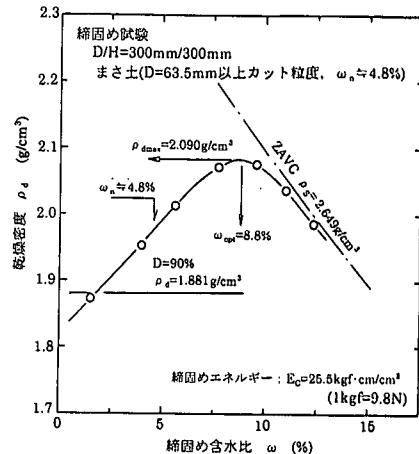


図-12 まさ土(粗粒土)の締固め特性

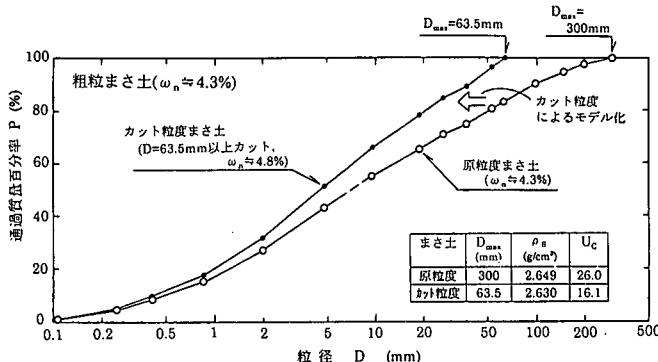


図-11 まさ土(粗粒土)の粒度曲線(原粒度とモデル化したカット粒度)

試験による ϕ_{rc}^* に近い値になっている理由について考えてみよう。Jewell,R.A. and Wroth,C.P.¹⁰⁾は一面せん断試験におけるMohrの応力円を求めるために、図-10に概念的に示すように、供試体の水平面内応力は最大応力比 $(\tau/\sigma)_{max}$ のせん断面ではなく伸び縮みのないZero Extension($\Delta\epsilon_x=0$)方向であること、主応力軸方向と主ひずみ増分軸方向が一致する(同軸性: $\psi=\xi$)として、Davis,E.H.¹¹⁾により導かれた理論式と同じ

$$\tan\phi_{DS}^* = \sin\phi_{PS}^* \cdot \cos\nu / (1 - \sin\phi_{PS}^* \cdot \sin\nu) \quad (10)$$

$$(\nu = \tan^{-1}(-\Delta Z/\Delta X) : ダイラタンシー角)$$

を得ている。これによると、一面せん断試験による内部摩擦角 ϕ_{DS}^* はせん断面上の応力ではないので、平面ひずみ状態(主応力軸の連続的な回転下での)での ϕ_{PS}^* のように主応力により求めたせん断面上で発揮される内部摩擦角より小さくなり、 ϕ_{PS}^* と ϕ_{rc}^* との間の値、もしくは ϕ_{rc}^* に近い値であっても不思議ではない。

(2) まさ土(粗粒土)を用いた試験

試験に使用したまさ土は広島市中心部の北西に位置す

る花崗岩地帯で施工した大規模造成工事における切土発生の盛土材であり¹²⁾、その粒度曲線を図-11に示す。このまさ土は主に風化程度の低い深い位置から発破掘削により発生した硬岩やリッピング掘削により発生した軟岩からなる最大粒径が $D_{max}=300mm$ 、均等係数が $U_c=26$ 前後と粒度分布が良い材料である。また締固め曲線を図-12に示すが、これは $D=63.5mm$ 以上の粒子を取り除いたカット粒度によるモデル化試料を用いて、内径寸法 $D/H=300mm/300mm$ の圧密リング(内面は周面摩擦軽減のためにハードクロムメッキ加工をしてあり、さらにシリコングリースを薄く塗布)を用いて、締固め試験法: JGS T711に準じて行った(締固めエネルギーは $4.5kgf(44.1N)$ ランマーを用いて締固め試験のD法あるいはE法と同じ $E_c=25.3kgf\cdot cm/cm^2(2.48MN\cdot m/m^3)$ になるように突き固めた)。

図-13には、このまさ土の垂直応力一定条件 $\sigma_z=0.25, 0.5, 1.0, 2.0kgf/cm^2(\times 98kN/m^2)$ で実施した超大型一面せん断試験によるせん断応力 τ_{zx} ～せん断変位 X の関係を示す。供試体は上・下せん断リング間隔を $\Delta=20mm$

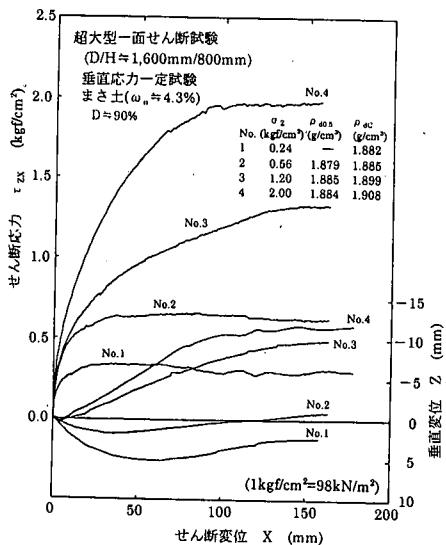


図-13 まさ土のせん断応力 τ_{zx} ～せん断変位 X 関係

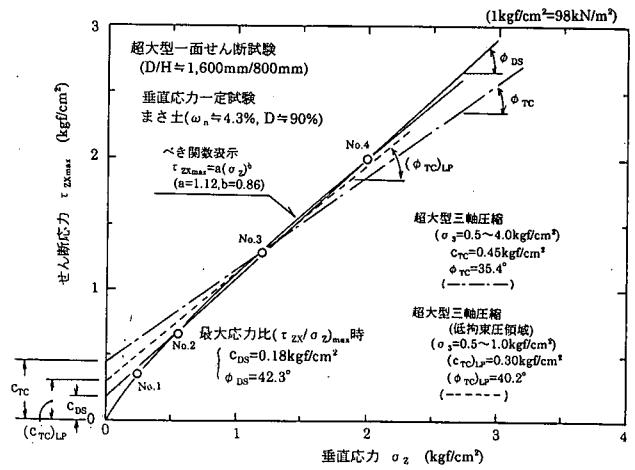


図-14 一面せん断試験・三軸圧縮試験による
まさ土の強度パラメータ

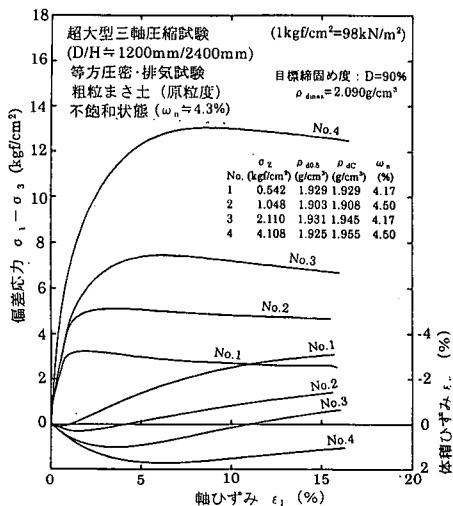


図-15 (a) 超大型三軸圧縮試験による応力～ひずみ関係

にして、自然含水比状態にあるまさ土を3層に分けて(撤出し層厚約30cm), 締固め度D=90%になるようにプレートコンパクターで転圧して作製した。この図から、豊浦砂の場合と同様に各垂直応力レベルにおける最大応力比(τ_{zx}/σ_z)_{max}を、あるいはせん断変位X=120mm(X/H=0.15)におけるせん断応力比を読み取り、この時の垂直応力とせん断応力の組合せをプロットした点と、これらの点を直線近似して求めた強度パラメータ(c_{DS} , ϕ_{DS})を図-14に示す。またこの超一面せん断試験とは別に、図-15(a) (b)には橋詰ら¹²が実施した同じまさ土の超大型三軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ関係と、これらの応力～ひずみ曲線からピーク応力である最大偏

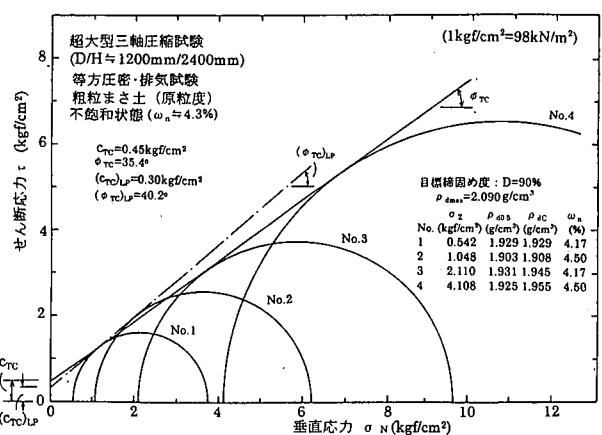


図-15 (b) 超大型三軸圧縮試験による強度パラメータ

差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}、あるいはピーク応力が現れない場合には軸ひずみ $\epsilon_1 = 15\%$ 時の偏差応力によるMohrの応力円の包絡線を直線近似して求めた強度パラメータ(c_{TC} , ϕ_{TC})をそれぞれ示す。これらの試験は、超大型一面せん断試験と同様に6層に分けて(撤出し層厚約40cm), 締固め度(D=90%)になるように加振機により締め固めて作製した供試体をそれぞれ圧密圧力 $\sigma_3 = 0.5, 1.0, 2.0, 4.0$ kgf/cm²(×98kN/m³)まで等方圧密後、排水状態でせん断したものある。図-14には比較のためにこの超大型三軸圧縮試験から求められた強度パラメータ(c_{TC} , ϕ_{TC})も示してある。この図からわかることは、粗粒土であるまさ土の特徴的な強度特性として大きな粘着力が現れることである(豊浦砂ではこのような大きな粘着力は現れなかった)。このような粗粒土が示す大きな粘着力は大・小

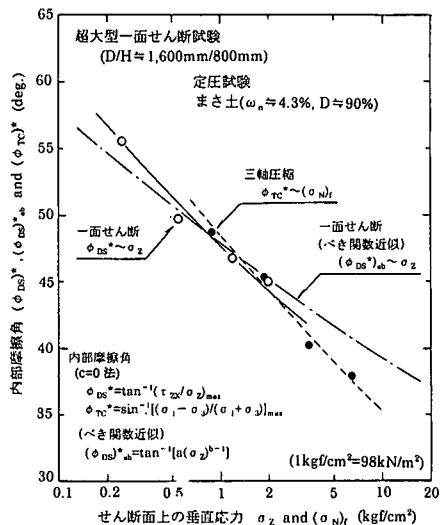


図-16 内部摩擦角 $\phi_{nc}^*(\phi_{ds}, \sigma_z)$ の拘束圧依存性

各粒子相互のかみ合わせによる強度成分や、不飽和状態における見掛けの粘着力成分によるものと考えられている。この他の要因として粗粒土に特有な砂質土や粘性土よりも強い強度の拘束圧依存性²⁾、つまり拘束圧の増加に対して強度が比例的に増加しない（破壊包絡線が上に凸な形状をしている）ことが考えられる。粗粒土におけるこのような強度の拘束圧依存性は主にせん断変形時の粒子破碎に起因しているとされている。つまり砂のように粒子破碎がない場合には拘束圧が高い状態でせん断変形を受けるとそれに比例して粒子間摩擦力が増加するが、粒子破碎が生じやすい粗粒土では高い拘束圧状態でのせん断変形において粒子破碎にせん断エネルギーが消費されるため粒子間に拘束圧に比例した摩擦力が発揮されないためと考えられている。このため粗粒土の拘束圧レベルを変えた試験から $(\tau_{zx}/\sigma_z)_{max}$ 点あるいは Mohr の応力円を直線近似して求めた強度パラメータは、粘着力を過大に、内部摩擦角を過小に評価しがちにあることを指摘できよう。

さらに図-14から、一面せん断試験による強度パラメータは三軸圧縮試験によるものより粘着力は小さく、内部摩擦角は大きい傾向にあることもわかる。これはせん断面上での拘束圧レベルが一面せん断試験の方が三軸圧縮試験の場合よりも低いためと考えられる。そこで図-15には三軸圧縮試験のせん断面上の垂直応力が一面せん断試験における値とほぼ同じ範囲にある $\sigma_z = 0.5 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kN/m}^2)$ の Mohr の応力円のみを直線近似して低拘束圧領域での強度パラメータ $(c_{TC})_{LP}$, $(\phi_{TC})_{LP}$ を求めてある。この強度パラメータも図-14に示してあるが、一面せん断試験より得られた値との差はかなり小さいことがわかる。このことからも、強度の拘束圧依存性を正に評価する必要性が理解できよう。

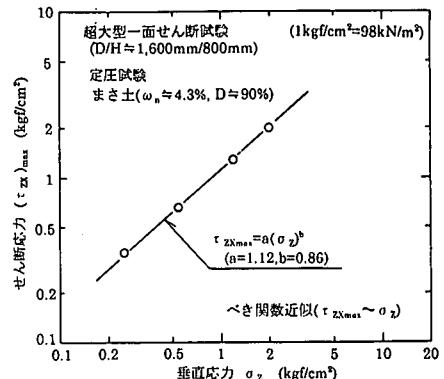


図-17 まさ土の $\tau_{zx} \sim \sigma_z$ 関係のべき関数表示

そこで同一拘束圧レベルにおける両試験による強度パラメータを比較してみよう。一面せん断試験による内部摩擦角を、便宜的にせん断面上の垂直応力により発揮されるせん断応力として評価するために、豊浦砂の場合と同様に $c=0$ 法により式(7) (ϕ_{ds}^*)により求め、せん断面上の垂直応力 σ_z に対してプロットしたのが図-16である。また三軸圧縮試験における内部摩擦角～せん断面上の垂直応力 (σ_N) の関係は、豊浦砂の場合と同様に式(8) (ϕ_{nc}^*) と式(9)により算定した（但し、粗粒土は豊浦砂に比較して強度の拘束圧依存性が強く破壊包絡線が上に凸な曲線形状であるため、式(9)による (σ_N)_f は実際のせん断面上の垂直応力よりやや低い値となる）。この図からまさ土的一面せん断試験と三軸圧縮試験での内部摩擦角の拘束圧依存性はほぼ同じ傾向にあり、また同一拘束圧レベルではかなり良い一致を見せていていることがわかる。

このような粗粒土の拘束圧レベルを変えた試験結果を上述のような直線近似法により求めた強度パラメータは強度の拘束圧依存性のためにどうしても見掛け分を含む過大な粘着力が現れてしまう。この強度の拘束圧依存性（破壊包絡線が上に凸な曲線形状になる特性）を、 $\sigma_N = 0$ 時には $c=0$ となるように表現する方法として Charles, J.A., and Watts, K.S.¹³⁾によるべき関数表示法があり、これは破壊包絡線をべき関数式

$$\tau = a(\sigma_z)^b \quad (11)$$

で近似するものである。上式により超大型一面せん断試験による $\tau_{zx_{max}} \sim \sigma_z$ 関係を近似するために図-17に示すように両対数グラフ上に $\tau_{zx_{max}} \sim \sigma_z$ をプロットして係数 a, b を決めた。このべき関数式による破壊包絡線は図-14にも示したが、試験結果を低拘束圧領域でうまく表現できていることがわかる。またべき関数で表示した超大型一面せん断試験による内部摩擦角

$$(\phi_{ds})_{ab} = \tan^{-1} [a(\sigma_z)^{b-1}] \quad (12)$$

も図-16に示してある。これよりべき関数近似は強度の拘束圧依存性を表現できるが、実際に試験した垂直応力領域内では近似度は良いものの、その領域外では良く

表-1 一面せん断試験と三軸圧縮試験の比較

項目	一面せん断試験(DS)	三軸圧縮試験(TC)
供試体の形状・寸法比	偏平円柱:D/H≈2.0	背高円柱:D/H≈0.5
制御可能な応力成分	せん断応力・垂直応力 (σ_z, τ_{zx})	主応力制御 ($\sigma_1, \sigma_3 = \sigma_s$)
応力沿程中の応力状態	一次元正密 $\sigma_z, \sigma_3 = \sigma_0, \sigma_v$	等方圧密: $\sigma_1 = \sigma_3$ 異方圧密: $\sigma_1 \neq \sigma_3$
せん断過程中の応力経路	定圧密: $\sigma_z=0, \tau_{zx}>0$ $\Delta \sigma_z > 0, \Delta \sigma_3 < 0$ ($\Delta p = 0, \Delta q > 0$) ($\sigma_1, \sigma_3, \sigma_v$ は未知)	$\Delta \sigma_z > 0, \Delta \sigma_3 = 0$ ($\Delta p > 0, \Delta q / \Delta p = 3$)
せん断形式	強制的にすべり面を規定	すべり面を規定しない
主応力方向 主ひずみ増分方向	変化(連続的回転)	一定
供試体の境界条件	平面ひずみ状態 (側面積一定) 全面か拘束面	軸対称応力・ひずみ状態 σ_1 方向: 固定面 σ_3 方向: わみ性面
供試体自重の影響	小	大
有効せん断面積	せん断変位により変化 (垂直荷重も考慮)	せん断変形により変化
試験結果に及ぼす装置に特有な要因	周面摩擦 有効断面積の補正 上・下せん断リングの隙間	ゴムスリーブによる拘束 (低拘束圧領域)

$$\text{平均主応力: } p = (\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma_v)/3, \text{ 偏差応力: } q = (\sigma_1 - \sigma_3)$$

ないことがわかる。これはべき関数で($\sigma_z, \tau_{zx\max}$)を近似する場合にも対象とする拘束圧レベルをカバーした試験が必要なことがわかる。

以上より、粗粒土の試験では問題とする地盤の対象となる拘束圧領域をきちんと設定した試験を実施し、拘束圧依存性の影響をうけない粘着力を求めることが非常に重要であることが理解できよう。粗粒土の三軸圧縮試験では、低拘束圧領域では大型供試体の自重の影響が大きく、正確な粘着力を求めるための試験が不可能である。このため拘束圧依存性の影響をうけない粘着力を正確に求めるには低拘束圧領域における信頼性の高い試験実施が望ましく、この場合には大型供試体でも自重の影響の小さい一面せん断試験の方が三軸圧縮試験より有利であろう。

(3) 一面せん断試験と三軸圧縮試験による強度の比較

一面せん断試験から得られる基本的な強度パラメータは供試体水平面がせん断破壊面(τ_{zx}/σ_z)であるという仮定による ϕ_{DS}^* である。この ϕ_{DS}^* が三軸圧縮試験により求められる ϕ_{TC}^* と一致する必然性はないが、上述したように供試体水平面が伸び縮みのない Zero Extension 方向であること、主応力方向と主ひずみ増分方向は一致する(同軸性)という Mohr の応力円を求めるための仮定から導かれる $\phi_{DS}^* < \phi_{PS}^*$ の関係を考慮するならば、両試験間で近い関係($\phi_{DS}^* \approx \phi_{TC}^*$)にある可能性も理解しやすい。もともと土の強度の基本的な強度成分に比較して各種の供試体の境界条件により変化する強度成分の割合は少ないということかもしれないが、表-1 に示すように両試験間には供試体形状、せん断形式、応力経路、供試体境界条件など各種の相違があるにもかかわらず得られる内部摩擦角 ϕ^* に差がないのは驚きでもある。

さらに、実務的な観点からみると、現行の土構造物の設計法が三軸試験による強度パラメータの使用を前提に確立されているので、両試験間での強度パラメータに差が少なく比較的近い強度を与えることは、一面せん断試験による強度パラメータをそのまま現行の設計体系の中へ適用しやすい利点がある。

6. 供試体の荷重・せん断ひずみ等の測定結果

これまで豊浦砂とまさ土を用いて実施した超大型一面せん断試験装置の適用性確認試験の結果を述べてきたが、ここでは、試験装置の特性を調べるためにせん断リング内面に作用する摩擦力特性や供試体内せん断変位の測定可能性を検討した結果を報告する。

(1) 供試体の上・下端面で計測した垂直荷重

図-18 (a) に豊浦砂の $\sigma_z=1.0 \text{ kgf/cm}^2 (98kN/m^2)$ の一面せん断試験におけるせん断中の供試体のせん断力 S_x 、上端面で測定した垂直荷重(P_z)^{Top}、下端面における4個のロードセルの各測定値 $BL_i (i=1 \sim 4)$ 、及びそれらの合計値(P_z)^{Bottom} ($= \sum (BL_i)_{i=1 \sim 4}$) をそれぞれ示す。この図で上・下垂直荷重の差が摩擦力であり、これは式(1)～(2)から

$$F_R = (P_z)^{\text{Top}} - (P_z)^{\text{Bottom}} \quad (13)$$

で与えられる。図-18 (b) には図-18 (a) のせん断中の供試体上・下端面で測定した垂直荷重を応力表示した結果を示すが、両垂直応力間の差が摩擦力による上・下応力差 $\Delta \sigma_{FR}$ となるが、これは式(4a)～(4b)から

$$\Delta \sigma_{FR} = F_R/A = [(\sigma_z)^{\text{Top}} - (\sigma_z)^{\text{Bottom}}] \cdot A_0/A \quad (14)$$

で与えられる。また図-19 (a) (b) にはまさ土を用いた一面せん断試験における測定結果をそれぞれ示す。これらの図から、下端面における各荷重値は供試体のせん断方向に前・後部で異なり、せん断方向後部(水平方向シリンダー側)の方が前部に比較して大きいこと、つまり供試体内部の応力・変形が非一様状態にあり非常に複雑であることがわかる。これは供試体に加えた水平方向せん断力に対して供試体端部の鉛直方向のせん断応力が作用しないため供試体に回転モーメントが作用するためであろう。また供試体の上・下端面の垂直荷重差である摩擦力 F_R は、豊浦砂で最大せん断応力付近において $F_R = -0.27t (-2.65kN)$ で、これは $\Delta \sigma_{FR} = -0.014 \text{ kgf/cm}^2 (-1.4 \text{ kN/m}^2)$ に相当する。そしてこの摩擦力はせん断変位 X につれて増加し、例えば $X=120mm (X/H=0.15)$ 付近では $F_R = -0.95t (-9.3kN)$ となり、これは $\Delta \sigma_{FR} = -0.047 \text{ kgf/cm}^2 (-4.6 \text{ kN/m}^2)$ に相当し、その方向は供試体が膨張しているため($\Delta Z < 0$)下向きである。一方まさ土における摩擦力は、豊浦砂の場合より大きく供試体が膨張するようになるようなせん断変形になると、 $X=120mm$ 付近で $F_R = -2.42t (-23.7kN)$ 、これは $\Delta \sigma_{FR} = -0.121$

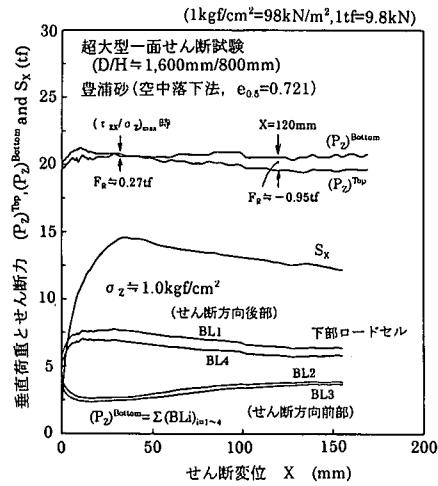


図-18 (a) 豊浦砂の供試体上・下端面の垂直荷重

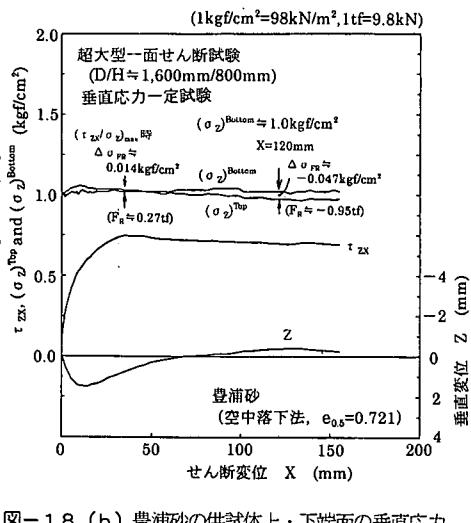
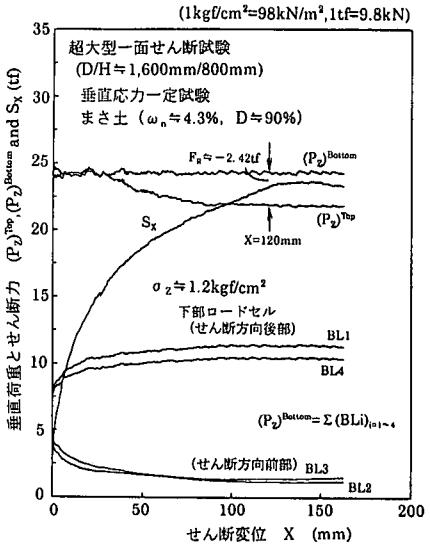


図-18 (b) 豊浦砂の供試体上・下端面の垂直応力

図-19 (a) まさ土の供試体上・下端面の垂直荷重

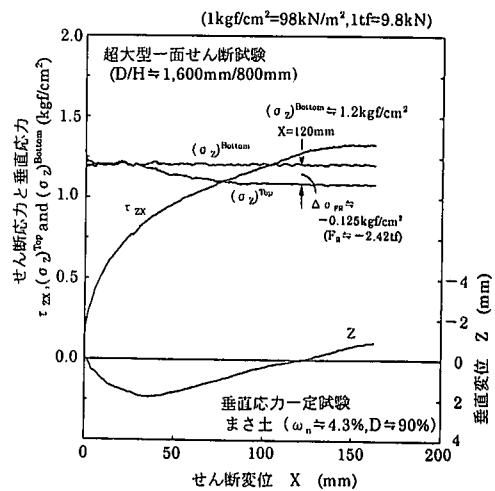


図-19 (b) まさ土の供試体上・下端面の垂直応力

kgf/cm^2 (-11.9kN/m^2)に相当する。ここで実施した試験はすべてせん断リング内面には図-4に示したようにシリコングリースを薄く塗りゴムシートを貼り付けて周面摩擦の除去対策を施しているが、それにもかかわらずかなり大きな摩擦力が作用している。特にまさ土のような粗粒土では大きな摩擦力が発生している。これはせん断リング内面に貼り付けたゴムシートの厚さに比較して粒径の大きな岩塊粒子の尖った部分がこのゴムシートを突くように堆積したものが、収縮・膨張する時に大きな摩擦力を生じるためと考えられる。供試体上端面のみの垂直荷重を測定した場合の垂直応力の算定のためには、摩擦力の補正が必要であるが、摩擦力は供試体の収縮・膨張によりその方向も逆転し値を推定することが難しい。のことや、また新たに基準化された土の圧密定圧一面せん断試験方法(JGS T561)¹⁴⁾において「定圧せん断での

せん断面上の垂直応力を測定するための荷重計は必ず反力板側に設置する」とあるように、供試体下端面で垂直荷重を測定することの重要性が理解されよう。

(2) 下部せん断リング下端面に土圧計を埋設した試験
供試体内の垂直応力の分布を調べるために下部リング下端面に5個の小型土圧計 E_i ($i=1 \sim 5$)をせん断方向の直徑線上にある一定間隔で設置した。土圧計はダイヤフラム間に圧力媒体を封入した二重ダイヤフラム型で、外径/厚さ= $D/h=50\text{mm}/9.3\text{mm}=0.186$ である。

図-20 (a) に垂直応力 $\sigma_z = 1.0\text{kgf/cm}^2$ (98kN/m^2)の豊浦砂を用いた試験におけるせん断中の垂直応力の測

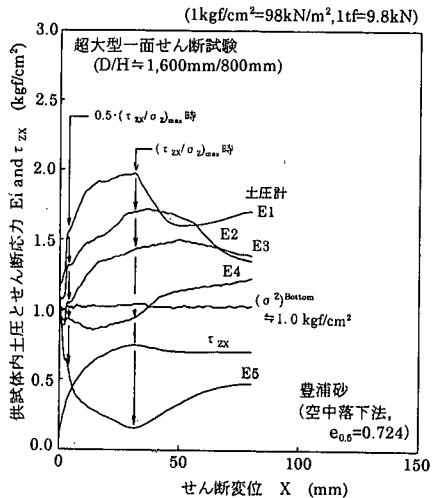


図-20 (a) 下部せん断リング下端面での土圧測定結果

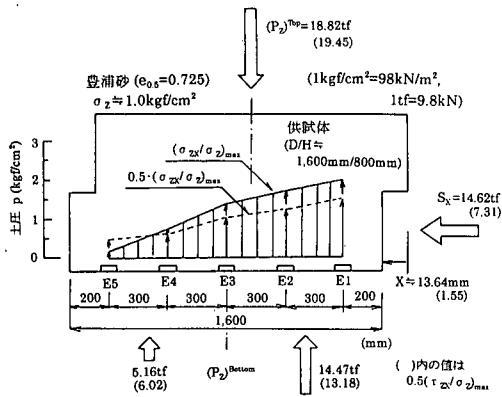


図-20 (b) $(\tau_{zx}/\sigma_z)_{\text{max}}$ と $1/2 \cdot (\tau_{zx}/\sigma_z)_{\text{max}}$ 時の土圧分布

定結果を示す。またこの図から最大応力比(τ_{zx}/σ_z)_{max}時と $1/2 \cdot (\tau_{zx}/\sigma_z)$ _{max}における値を読み取ってせん断方向の垂直応力の分布を図-20 (b) に示す(図中には各ロードセルによる(τ_{zx}/σ_z)_{max}時と $1/2 \cdot (\tau_{zx}/\sigma_z)$ _{max}時における測定値を示す)。これらの図から、下部せん断リング底面における垂直応力はせん断応力の増加とともに急激に変化しピーク応力以降はその変化は比較的少ないこと、また垂直応力の分布はせん断方向の後部(水平シリンダー側に近い位置)では増加し、前部では逆に低下する傾向があること、この傾向は供試体下端面での垂直荷重の計測結果と対応している。上部せん断リングでは力のつり合いからこのような応力状態と反転した関係にあるはずである。このように垂直応力がせん断方向に一様に分布しないのは供試体に作用するせん断力の共役性が満足されないことによる回転モーメントによるためと考えられるが、供試体の中央部 1/3 程度の部分はこれらの影響が小さく、比較的一様な垂直応力の分布をして

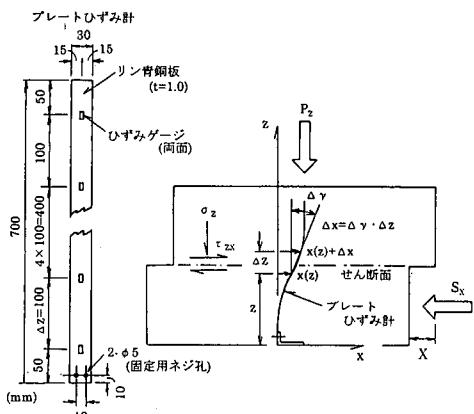


図-21 プレートひずみ計による供試体内せん断変位の測定法

いる部分と言えそうである。

(3) せん断ひずみの測定

一面せん断試験の供試体内のせん断ひずみ測定の可能性を検討するために、図-21に示すプレートひずみ計を、下部せん断リング底面から垂直に埋設してせん断変位測定を試みた。このプレートひずみ計は幅 b30mm × 厚さ t1mm × 長さ 700mm のリン青銅板に端部を 50mm あけて 100mm 間隔でひずみゲージを貼り付けたもので、これを下部せん断リング下端面に垂直に供試体せん断面を横断するように設置し、せん断中のプレートの曲げひずみ $\epsilon(z)$ を測定して供試体高さ方向(z 方向)のせん断変位分布 $x(z)$ を求めるものである。

図-22、図-23にそれぞれ豊浦砂とまさ土の垂直応力一定条件 $\sigma_z \approx 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ (98kN/m²)における超大型一面せん断試験から得られた、せん断変位 X=10, 30mm を与えた時の供試体内のせん断変位分布を示す。これらの図から、測定された供試体中のせん断変位はせん断面付近に集中するが、その変形集中度は土により相違し平均粒径の大きいまさ土の方がすくないことがわかる。またこの測定されたプレートひずみ計先端部付近のせん断変位量 $x(z) = \sum \gamma(z) \cdot \Delta z$ は供試体に与えたせん断変位量 X=10, 30mm と一致せず、これらの値より大きくなっている(特に豊浦砂の試験においてこの傾向にある)。これは、変位量が供試体下端面での変形をゼロとおいて積分して得られるため誤差が高さ方向に累積してしまうこと、供試体作製時にプレートひずみ計を埋設してから、圧密過程中に増加する垂直応力によりプレートひずみ計に加わる軸力の影響と思われる。

変形の集中程度を調べるために、プレートひずみ計によるせん断変位分布図からせん断面付近の最急勾配をせん断ひずみ $\gamma_m(\%)$ とし、これと供試体に与えたせん断変位 X から変形集中度の高い部分の層厚をせん断層の厚さ H_{SB} として

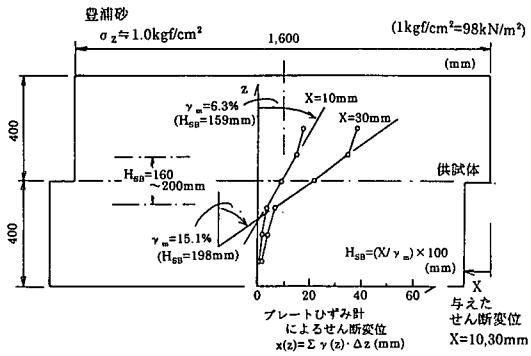


図-22 豊浦砂の供試体内せん断変位の測定結果

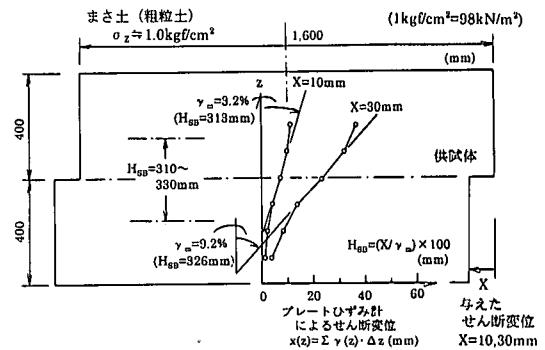


図-23 まさ土の供試体内せん断変位の測定結果

$$H_{sb} = (X/\gamma_m) \times 100$$

から求めた。この結果は図中の括弧内に示したが、せん断層の層厚は粒径の大きいまさ土の方が大きいことがわかる。実際に試験後に供試体内から掘り出したプレートひずみ計は豊浦砂の方がせん断面付近で急激に曲がった状態にあったが、粒径の大きいまさ土の場合には緩やかに曲がっておりせん断面付近の変形の集中度が低いことが確認された。

ここで採用したプレートひずみ計による測定法は供試体内のせん断変位をある程度測定可能と思われる。しかし、正確なひずみ算定のためには以下のような問題があるようと思われる。第1に適切なゲージ間隔の問題であり、供試体の高さ方向の変位分布がなめらかに変化せずにせん断面付近で急激なズレ変位が生じている場合には、ひずみゲージ間隔が大きすぎてこの変形集中度を正確に追跡できない可能性を考えられる。次にせん断変位が局部的に集中しはじめるとその箇所のゲージリード線が断線してしまうので大きなせん断変位まで測定できないことである。また前述のプレートひずみ計の軸力の影響もかなり大きいように思われる。今後は、さらに精度の高い供試体内的せん断変位測定法を検討する必要があろう。

7. おわりに

一面せん断試験は三軸圧縮試験に比較すると装置自体の製作費用・試験費用が安価で、試験操作・手順も簡単であり、このことは大型供試体になるほど効いてくる。粗粒土のような大型供試体の試験を必要とされる場合には、たとえ構造的に供試体内部の応力や変形の非一様性であるなど多少の問題点を抱えていたとしても、強度パラメータを経済的に求められることが特に重要であり、大型一面せん断試験の実務問題への適用性は非常に高いといえる。ここで開発した超大型一面せん断試験装置は安価で軽量・コンパクト、かつ現場試験室への移設も容易な形式なので、土質が頻繁に変化するような粗粒土を扱う

土工事現場での経済的な強度確認試験や施工中の品質管理試験として適用できるものと考えられる。一方、現行の土構造物の設計法が三軸圧縮試験による強度パラメータの使用を前提に確立されているので、これに一面せん断試験による結果を適用するには一面せん断試験と三軸圧縮試験による強度パラメータの比較が重要な検討項目になる。両試験の強度パラメータが一致する必然性はないが、本論文で示したように両試験で得られる強度パラメータに試験機の載荷形式、供試体形状、境界条件等の相違があるにもかかわらず比較的に差が少ないと興味深いことである。そして、このことは実務的な観点からすると、一面せん断試験を現行設計体系にそのまま適用しやすい環境を与えることになる。

現在までに、本装置によりいくつかの大型土工事における粗粒土材料の強度試験を実施してきたが、超大型三軸圧縮試験に比較すると、試験準備も簡単で、試料の必要土量や試験時間も少なくてすむなどの低労力かつ経済的である利点を感じている。

参考文献

- 粗粒土料の変形と強度編集委員会：ロックフィル材料の試験と設計強度，土質工学会，1986。
- 布施洋一、高橋昇、福島伸二、香川和夫：関西国際空港埋立材料の超大型三軸圧縮試験による強度・変形特性，土木学会論文集，No.448/III-19,pp.131～140,1992。
- 土質試験の方法と解説：第7編せん断試験，第9章「粗粒土料の圧密排水(CD)三軸試験」，土質工学会,pp.407～420,1990。
- Cole, E. R. : The Behaviour of Soils in the Simple Shear Apparatus, PhD Thesis, University of Cambridge, 1967.
- Stroud, M. A. : The Behaviour of Sand at Low Stress Levels in the Simple Shear Apparatus, PhD Thesis, University of Cambridge, 1971.
- 土質試験の方法と解説：第7編せん断試験，第8章「粗粒土料の三軸試験の供試体作製」，土質工学会,pp.397～406,1990。
- 鎌田正孝、岩橋俊郎、樋村博、宮地正光、本間一臣：大型三軸圧縮試験機の性能について、フジタ工業技術研究所報,第11号,pp.51

- ~56,1975.
- 8) 福島伸二,北島 明:超大型三軸圧縮試験装置の歩みとその果たした役割, 土と基礎, Vol.46 ,No.11,pp.29~32,1998.
 - 9) 福島伸二,香川和夫,望月美登志:砂の低拘束圧領域における超大型三軸圧縮試験, 土質工学会論文報告集,Vol.29,No.1,pp.187 ~194,1989.
 - 10) Jewell,R.A. and Wroth,C.P. : Direct Shear Tests on Reinforced Sand, *Geotechnique*, Vol.37, No.1, pp.53~68,1987.
 - 11) Davis,E.H. : Theories of Plasticity and Failure of Soil Masses, Selected Topics(ed. By Lee,I.K.),London,Butterworth,1968.
 - 12) 橋詰哲治,平野訓相,水谷敏彦,福島伸二,北島 明,望月美登志:超高盛土を含む大規模造成工事における粗・細粒まさ土の圧縮沈下と強度・変形特性, 第32回地盤工学研究発表会,1997.
 - 13) Charles,J.A. and Watts,K.S. : The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill, *Geotechnique*, Vol.30, No.4,pp.353~367,1980.
 - 14) 新規制定地盤工学会基準・同解説IV:土の圧密定圧一面せん断試験方法(JGS T561), pp.15~62,1997.

(1999. 3. 24 受付)

DEVELOPMENT AND APPLICABILITY OF SUPER LARGE SCALE DIRECT SHEAR TEST APPARATUS

Shinji FUKUSHIMA and Akira KITAJIMA

We had developed a super large scale direct shear test apparatus (SL-DS) with the specimen of 160cm in diameter and 80cm in height to investigate the characteristics of stress-deformation relations and strength on coarse-grained soils contained large size particles.

This paper introduces the mechanical structure of SL-DS as well as tests results on sand and masa-soil (a coarse-grained gravelly soil composed of weathered granite rock). The test results show the angle of internal friction obtained from the direct shear test is approximately equal to that obtained from triaxial compression test, which may prove the usefulness of this apparatus in practice.