

砂と礫の室内せん断試験における端面摩擦の軽減

Lubrication of Specimen ends for Sands and Gravels in Laboratory Shear Tests

朴 春植*・後藤 聡**・龍岡 文夫*

Choon-Sik PARK, Satoshi GOTO and Fumio TATSUOKA

1. はじめに

砂・礫の三軸圧縮試験や平面ひずみ圧縮試験で正確な変形・強度特性を得るためには、供試体が要素として挙動すること、すなわち供試体内の応力とひずみ分布が一樣である必要がある。このためには、供試体端面(上下面)と平面ひずみ圧縮試験の場合には σ_2 が作用する拘束面の摩擦が極小である必要がある。特に、供試体の高さが不十分であり供試体上下端面に摩擦がある場合や、平面ひずみ圧縮試験で拘束板面に摩擦がある場合は圧縮強度が過大に評価される。

端面摩擦を取り除く方法として、Rowe and Barden (1964)が提案したシリコングリースとラバーシートからなる端面摩擦軽減層(Lubrication layer)が用いられてきた(図1)。Tatsuoka et al. (1984)の研究によると、粒状体と剛な面の間にある上記摩擦軽減層のメカニズムは以下のようなものである。

- (1)メンブレンと剛な面が直接接触すると摩擦力は急増する。砂・礫の粒子の直下で(図1のAの箇所)、ラバーシートと剛な面との間にグリースが残っていることが、少ない摩擦力を得るためのポイントである。
- (2)粒径が大きいほど、メンブレンが薄く剛性が低いほど、圧力レベルが大きいほど図1のAの箇所での応力集中度は高まり、グリースが押し出されやすくなる。

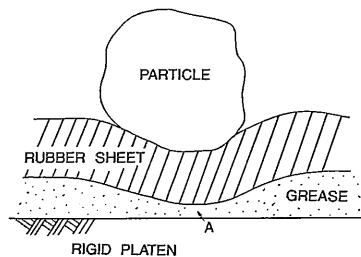


図1 端面摩擦軽減層の詳細の模式図

*東京大学生産技術研究所 第5部

**大成建設㈱

(3)したがって、加圧されても押し出され難く、かつせん断変形に対して抵抗力が小さい、と言う矛盾した性質を持つグリースが最適のグリースである。

(4)グリースは、ある粘性を持つオイルと微粒子のフィラーからなる。非常に粘性の高いオイルでも、長期的には押し出し抵抗が低い。したがって、粘性の高いシリコンオイルを用いるのは適切ではない。一方、フィラーは、押し出し抵抗を付与している。しかし、フィラーが増加するとグリース自体のせん断抵抗力が増加する。

(5)ラバーシートを厚くすると、ベッディングエラーによる軸変位の測定誤差が大きくなる。これは、供試体側面で局所的に変形を測定することで解決できる。しかし、ラテックスラバーのヤング率は低いので($E=15\text{kgf/cm}^2$)、軸圧縮力が加わることによりラバーシートに水平方向に伸びひずみ $\epsilon_3 = -\nu(\sigma_1 - \sigma_3)/E$ ($\sigma_2 = \sigma_3 = \text{一定の時}$)が生じる。これは砂の供試体自身の水平ひずみより大きくなるので、ラバーシートが供試体を水平に押し広げて供試体を弱化する(ポアソン効果)。逆に、ラバーの剛性が大きすぎるシートを用いると、シートが供試体に無視できない拘束力を与える可能性が出てくる。したがって、適当な剛性を持ち、厚すぎないシートを用いる必要がある。

以上のことを考慮して、豊浦砂のような比較的細かな砂の供試体の端面摩擦を有効に除去する方法の開発には成功した(Tatsuoka et al., 1984)。本研究は、粗砂・礫の供試体に有効な端面摩擦軽減層を開発しようとするものである。

2. 試料, 実験装置および実験方法

豊浦砂より粗な英国産Silver Leighton Buzzard sand(以下S.L.B.砂)と、さらに粗な姫礫を用いた(表1, 図2参照)。豊浦標準砂よりも、S.L.B.砂の平均粒径(D_{50})は約4倍、姫礫の平均粒径は約11倍大きい。

端面摩擦軽減層のせん断抵抗は、直接せん断試験装置(図3)を用いて測定した。これは、①軸載荷装置、⑥試料コンテナ、⑩~⑪水平方向せん断載荷装置、および載

研究速報

表 1 試料の物理的性質

試 料	S.L.B.砂*	豊浦標準砂	姫 礫
比 重(Gs)	2.66	2.64	2.65
最大間隙比 e_{max}	0.79	0.977	0.633
最小間隙比 e_{min}	0.49	0.605	0.514
平均粒径(mm) D_{50}	0.62	0.162	1.85
均等計数 U_c	1.107	1.46	1.33
細粒分(76 μ m以下)	0%	0%	0%

* : S.L.B.砂の結果はRobin F. Arthurによる。

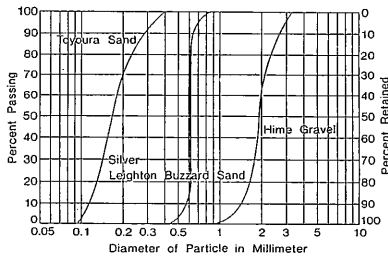


図 2 用いた砂・礫の粒径加積曲線

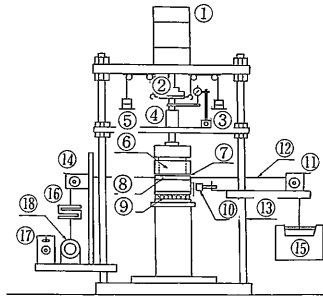


図 3 直接せん断試験機

荷枠等から成る。供試体は毎回同じ条件で作成し、また試験機も試験ごとに調整し、データのばらつきを極力防いだ。端面摩擦軽減層は、⑧非常になめらかな面を持つステンレスプレート(径10cm, 表面粗さ $\pm 0.035\mu$ m)上に「グリース塗り器」により50 μ m程度の厚さのグリースを塗り、その上的一端に径10cm, 厚さ0.3mmのラテックスメンブレンシートをメンブレンとグリース層の間に空気が入り込まないようにしてかぶせた。上下の環状プレート2枚の間に⑨ペアリングを置き、その上に横方向変位を測定する⑩非接触変位計のターゲットがついたプレートを置く。⑧スチールプレートの上に⑥試料コンテナ(内径8cm, 深さ5cmの亚克力円筒)を置く。内面には摩擦除去のためにグリース層とメンブレンから成る摩擦軽減層を作製した。この内部に、ノズルからの空中落下法で砂を投入し、その表面を整形した。次に、供試

体上加載圧を加える载荷ロッドを下ろし、スチールプレーに⑫ワイヤーをとりつける。ワイヤーの一方に⑮おもりを、もう一方には引張力を測定する⑬ロードセルをとりつけ、⑭モーターによりワイヤーを巻きとれるようにセットする。せん断試験は、上載圧0.05kgf/cm²で10分圧密の後1サイクル繰り返し载荷を行い、引き続き上載圧0.2kgf/cm²(圧密時間10分)、上載圧0.80kgf/cm²(20分)、上載圧3.0kgf/cm²(30分)でそれぞれ圧密してから1サイクル繰り返し载荷を行った。次に、上載圧を除荷する過程においても、上記の荷重段階で1サイクルの繰り返し载荷を行った。

3. 試験した端面摩擦軽減層の構成

図4に、豊浦砂に対して以下の構成の端面摩擦軽減層Type 1を用いた結果(Tatsuoka et al., 1984)を示す。初期グリース層厚50 μ m, ラテックスラバーシート(厚さ0.3mm, ヤング率15kgf/cm²), グリース(表2参照): Silicon grease KS63G(信越シリコン社, 以下KS63Gグリースと略記), およびHigh vacuum silicon grease(Dow Corning社, 以下Dowグリースと略記)。図4を見ると、最初の载荷時の低い圧力ではKS63Gグリースが,

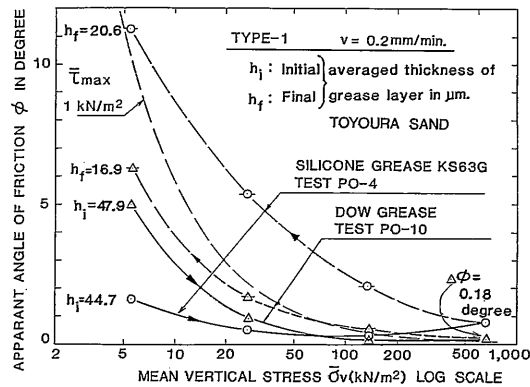


図 4 豊浦砂・端面摩擦軽減層Type 1, 二種のシリコングリースを用いた結果(Tatsuoka et al., 1984)

表 2 本研究に用いたグリース

Name	Type	Colour	Contents	Nominal Viscosity	Specific Density
Silicone Oil Compound, KS63G ¹⁾	Grease (Oil Compound)	Green	Silicone Grease, Silica Filler	Consistency (JIS) 200~260	1.06
High-Vacuum Grease ²⁾	Grease (Oil Compound)	Light-Gray, Translucent	Silicone Oil, Fine Filler	Consistency (Penetrometer unworked) 180~210	1.1

1) Provided by Shin-Etsu Company Limited.
2) Provided by Coring Corp.

研究速報

高い圧力ではDowグリースが非常に良い性能を発揮している。また除荷時にも、Dowグリースが良い性能を発揮している。これは、Dowグリースは粘性の高いオイルを用いているから、低圧部ではせん断抵抗が大きい、高圧部では図1での領域Aからの抜け出し抵抗が大きくなるからである。一方、KS63Gグリースは低い粘性のシリコンオイルと非常に小さなフィラーから成り立っているため、グリース抜け出しが少ない低圧時にはせん断抵抗が小さいが、高圧時には抜け出しが生じてせん断抵抗が増加するからである。

豊浦砂とKS63Gグリースを用いて引き出し速度に対する摩擦抵抗角 ϕ_μ の影響を調べた結果(Tatsuoka et al., 1984)によると、Type 1とType 2(後述)の端面摩擦軽減層で、引き出し速度0.55mm/min以下では摩擦抵抗角への影響はほとんどない。軸ひずみの速度0.25mm/min以下の三軸圧縮試験・平面ひずみ圧縮試験を想定して、今回の実験では引き出し速度0.25mm/minを採用した。

4. 姫礫を用いた実験結果

豊浦砂に適切な端面摩擦軽減層であっても、粒径の大きな姫礫の場合は性能が悪くなる。グリースの抜け出し抵抗を増加するためにはグリースにフィラーを混入すれば良いが、グリースに混入してもせん断抵抗が増加しないようなフィラーを探し出す必要がある。この目的には、粒子形状がなるべく丸いフィラーを適当な量で混入するのが良いであろう。

後藤(1987)は、姫礫の場合でDowグリースに6種類のフィラーを重量比で10%混ぜて実験を行った。その結果、低圧時ではBaby Powder, Slag(比重2.90, 比表面積3,750cm²/g, angular), Fly ash(比重2.08, 比表面積

積3,500cm²/g, 球形, 最大径60 μ m程度)の順で、高上載圧ではFly ash, Slag, P.T.F.E.の順で摩擦抵抗が小さかった。Fly ashは粒径が丸いので、摩擦抵抗が小さくなったものと思われる。この4種の中から、低圧時に十分低い摩擦抵抗値であったこと、全体的に平均して摩擦抵抗が低いことから、Fly ashを以降の検討で用いるフィラーとして選んだ。

図5は、姫礫に対してDowグリースに重量比で10%のFly ashをフィラーとして混入して、端面摩擦軽減層Type 1(上から、砂・礫の試料S, 厚さ0.3mmのラテックスシートM, グリース層G, プレートP)の他にグリース層とメンブレンの組み合わせを変えて試験した結果である。ここで、Type 2(上から、S, M, G, M, G, P), Type 3(上から、S, M, M, G, P), Type 4(上から、S, M, G, M, P)である。高圧時ではType 3が最も良い性能を示し、Type 2がそれについてよい性能を示している。これは、Type 3, Type 2はType 1でメンブレンを厚くした場合に相当し、グリース層内の応力集中度が最も小さくなるからであろう。しかし、前述のようにメンブレンが厚いことによるポアソン効果が大きくなる虞がある。また、Type 1の方が低圧時にはせん断抵抗が小さい。一方、Type 4は砂粒子の貫入によるひずみのbedding errorが大きくなる虞があるにもかかわらず性能は良くない。

5. Silver Leighton Buzzard砂を用いた実験結果

S.L.B.砂に対する端面摩擦軽減層としては、まず比較的低拘束圧での平面ひずみ圧縮試験を想定し、メンブレン力が大きくなりすぎないType 1を用いた端面摩擦軽減層の検討を行った。図6は、Dowグリースを用いた場合とフィラーとしてFly ashを2%, 5%, 10%, 20%

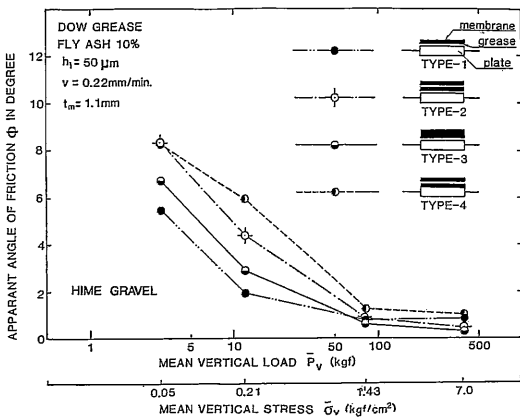


図5 姫礫, 各種端面摩擦軽減層, Dowグリース+Fly ash (10%)を用いた結果

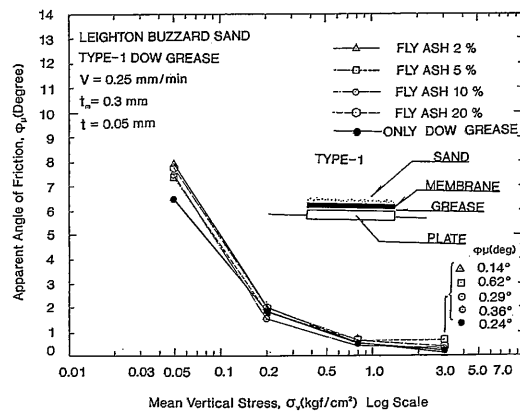


図6 S.L.B.砂, 端面摩擦軽減層Type 1, Dowグリース+Fly ashを用いた結果

研 究 速 報

の重量比で混ぜて実験した結果である。低圧時にはフィルターの混入により ϕ_μ が若干大きくなることわかる。これは、フィルターの混入によりグリース自体のせん断抵抗力が高くなったためと考えられる。また、 $\sigma_v=3.0\text{kgf/cm}^2$ 程度の上載圧ではフィルターが混入してなくてもグリースの抜け出しによる ϕ_μ の増加の程度はまだ小さい。これは、S.L.B.砂は珪礫よりも細かくて、グリース抜け出しの問題が相対的に小さいからであろう。しかし、Dowグリースにフィルターを2%混入した場合が最も摩擦抵抗が低い。これは、フィルター2%の混入によって抜け出し抵抗は減少したが、まだフィルターの量も少なくフィルター混入によるグリース自身のせん断抵抗の増加の程度が小さかったためであろう。一方、図7(a)を見ると、 σ_v を増加してゆく載荷過程の場合、図4に示す豊浦砂の場合と同様にS.L.B.砂でも低圧時ではKS63Gグリースを用いた方がDowグリース用いた場合に比べて ϕ_μ はるかに低い。これは、低圧時ではグリースの抜け出しがほとんどないため、 ϕ_μ がグリース自体のせん断抵抗力に左右されるためであろう。載荷過程の場合でKS63GグリースとDowグリースを用いた場合で摩擦抵抗が一致する σ_v の値は、 0.3kgf/cm^2 の時である。豊浦砂の場合(図4)は、この上載圧は約 0.7kgf/cm^2 である。これは、主にS.L.B.砂に対しての方がKS63Gグリースを用いた場合の上載圧の増加に伴う摩擦抵抗の増加の程度が大きいためである。また、KS63G, Dowグリースを用いた場合共に、S.L.B.砂の場合の摩擦抵抗は豊浦砂の場合よりも高い。この二つ現象は、S.L.B.砂が豊浦標準砂より粒径が大きいことで説明できるであろう。

また、Dowグリースでは載荷過程と除荷過程での摩擦角の差が小さいが、KS63Gグリースの場合はその差が大変大きい。これは、Dowグリースの方がKS63Gグリースよりも抜け出し抵抗が大きいためを意味している。また、豊浦砂の場合(図4)での載荷過程と除荷過程の場合との摩擦抵抗角 ϕ_μ の差は、いずれのグリースでもS.L.B.砂の場合(図7(a))よりも大きい。これは、S.L.B.砂の場合上載圧を 3.0kgf/cm^2 までしか加えなかったが、豊浦砂では 6.72kgf/cm^2 まで加えたため、グリースの抜け出しが多かったためであろう。

過圧密した供試体の三軸試験・平面ひずみ圧縮試験を行う場合、図4、図7(a)に示すような過圧密に伴うグリースの抜け出しによる端面摩擦性能の低下を考慮する必要がある。図7(b)は、そのために行った実験の結果である。この場合、加圧により抜け出しやすいKS63Gグリースを用いた。その結果、過圧密比は同じでも最大上載圧がより高い場合に除荷時の ϕ_μ がより大きくなることわかった。

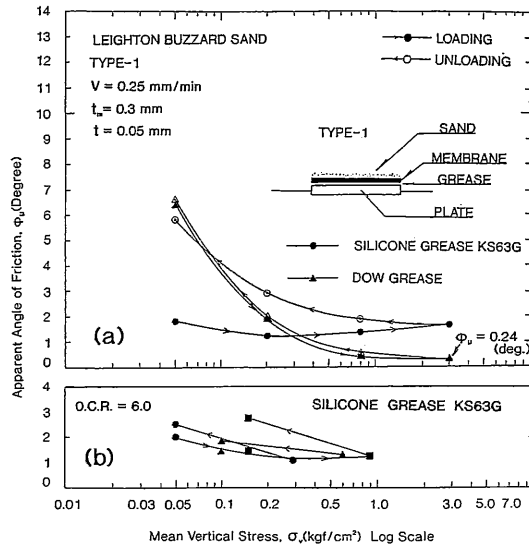


図7(a) S.L.B.砂, 端面摩擦軽減層Type 1, 二種のグリースを用いた結果

(b) S.L.B.砂, 端面摩擦軽減層Type 1, KS63Gグリースを用いて過圧密の影響を調べた結果

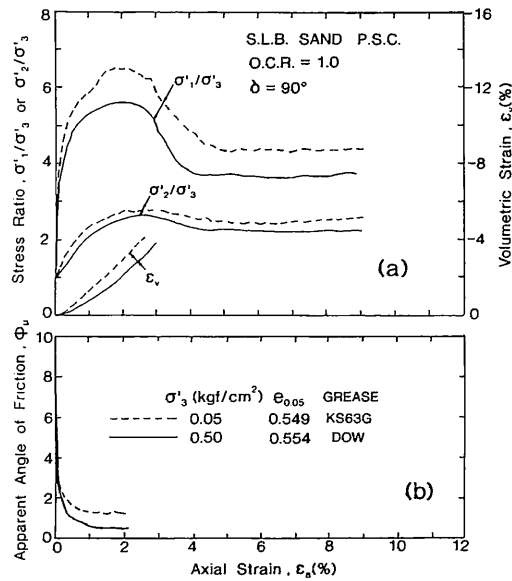


図8(a), (b) S.L.B.砂, 端面摩擦軽減層Type 1, 二種のグリースを用いた平面ひずみ圧縮試験の結果

研 究 速 報

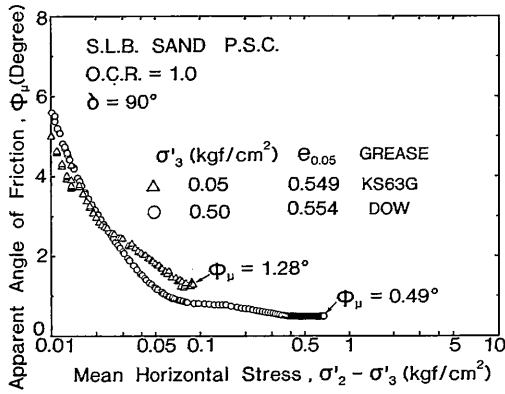


図9 平面ひずみ圧縮試験と直接せん断試験でのS.L.B. 砂, 端面摩擦軽減層Type 1, Dowグリースを用いた場合の摩擦抵抗角の比較

以上のことから, S.L.B.砂の要素試験で用いる供試体上下端面での摩擦軽減層は, 破壊時の $\sigma_1 : (\sigma_1)_r$ が0.3 kgf/cm²程度以下になる拘束圧 σ_3 が0.05kgf/cm²の時はKS63Gグリースを, それ以上の時はDowグリースを用いるのが適切であると判断される。以上の結果に基づいて, KS63GグリースとDowグリースをそれぞれ用いた端面摩擦軽減層Type 1を用いて拘束圧 $\sigma_3=0.05, 0.5$ kgf/cm²での平面ひずみ圧縮試験を行った(図8)。供試体寸法は, 高さ20cm, σ_2 方向長さ16cm, 幅8cmである。図9は, 2枚の拘束板の下部には供試体と拘束板との間の摩擦を測定するため設置したロードセルの測定値Fから拘束板と供試体との ϕ_μ を求めて, 拘束板に作用する平均垂直応力 $\sigma_v = (\sigma_2 - \sigma_3)$ に対してプロットしたものである。これを見ると, 結果のパラツキは非常に小さい。また, σ_v が小さい時は平面ひずみ圧縮試験の場合の方が直接せん断試験の場合(図6)よりはるかに小さいことがわかる。しかし, σ_v が大きくなるにつれてその差は次第になくなり, σ_v が約0.80kgf/cm²付近ではほとんど同じであることがわかる。低圧での差は, 次の理由であると思われる。平面ひずみ圧縮試験の場合, 供試体に拘束板を設置する時供試体と拘束板が完全に接触しておらず, このために平均圧を用いると接触している領域での接触圧を過小評価している可能性がある。すなわち, σ_2 方向の供試体の全面積を A_{total} , 実際に接触している面積を A_c , 拘束板に働く平均せん断応力を τ_{ave} , 接触面だけに作用するせん断応力を τ_{local} , 拘束板に作用する垂直力をL, 拘束板に作用する平均垂直応力を σ_{ave} , 接触面だけに作用する応力を σ_{local} としたら,

$$F = A_{total} \times \tau_{ave} = A_c \times \tau_{local}$$

$$L = A_{total} \times \sigma_{ave} = A_c \times \sigma_{local}$$

$$\tan \phi_\mu = (\tau_{ave} / \sigma_{ave}) = (\tau_{local} / \sigma_{local}) = F / L$$

を得る。したがって, ϕ_μ の測定値は接触の不完全さの影響を受けない。ここで, せん断直後は A_{total} がはるかに A_c より大きいとすると, $\tau_{local} > \tau_{ave}$, $\sigma_{local} > \sigma_{ave}$ である。すなわち, 図9の横軸の σ_v は σ_{ave} であるから, 平面ひずみ圧縮試験でせん断直後の σ_v が小さい時は真の接触面での σ_v を過小評価して, 同一の σ_v に対して平面ひずみ圧縮試験の方が直接せん断試験の場合よりも摩擦角が見かけ上小さいのであろう。また, せん断が進行すると共に A_c が徐々に大きくなり A_c が A_{total} に等しくなるため, 両方での摩擦角が一致してくるのであろう。

図8(b)を見ると, せん断開始後 $\epsilon_a=0.5\%$ になると ϕ_μ はほぼ一定の小さな値に収斂している。したがって, 全体としてはこの摩擦軽減法の性能は十分に高いと言える。

5. 結 論

- (1) 同一の端面摩擦軽減層に対して, 粒径が大きいほど, 圧力が高いほど摩擦軽減性能は劣化する。
- (2) 高圧時での端面摩擦軽減性能は, グリースに抜け出し抵抗が十分になるほど多く, またせん断抵抗が大きくなるほど多くはない。適切な量の適切なフィラーを混入して, グリースの抜け出しを防ぐことにより向上できる。
- (3) 低圧時では, フィラーを混入することによるグリース自身のせん断抵抗の増加により, かえって端面摩擦軽減性能は劣化する。
- (4) 要素試験での圧力レベル, 過圧密履歴等を考慮して, 適切なグリースの選択, 必要に応じて適切なフィラー混入を行えば, 粗砂や礫に対しても, 端面摩擦軽減を有効に行うことができる。その検査は, 事前に直接せん断試験によって行える。(1992年2月13日受理)

参 考 文 献

- 1) Goto, S. (1987): "Strength and deformation characteristics of granular materials in triaxial tests," Doctoral thesis, University of Tokyo
- 2) 朴春植 (1990): "平面ひずみ状態での砂の変形・強度特性の異方性," 東京大学大学院修士論文
- 3) 朴春植 (1990): "平面ひずみ圧縮試験によるSilver Leighton Buzzard砂の低拘束圧下での変形・強度特性," 第45回土木工学年次学術講演会
- 4) Rowe, P.W. and Barden, L. (1964): "Importance of free ends in triaxial testing," Jour. of SMF Div., Proc. ASCE Vol. 90, No. SM1, Jan., pp. 1~77 (5)
- 5) Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T., Hino, T. (1984): "Behaviour of lubrication layers of platens in element tests," Soils and Foundations, Vol. 24, No.1, pp. 113~128