

平面ひずみ状態でのせん断試験

大原 資生*

The Plane Strain Shear Test

Sukeo ŌHARA

Abstract

The shear failure of foundations and earth structures with the long length is the plane strain shear failure.

The paper describes briefly the plane strain shear test carried out in our laboratory.

Generally, the techniques of the plane strain shear test are torelably difficult and the apparatus is complex.

We have made the simple apparatus of the plane strain shear test in the light of the apparatus developed by Dr. Duncan J. M. at University of California.

The test specimen is the rectangular solid with 3.5cm in width, 7.5cm in length and 8.0cm in height.

The end clamp is set in order to arrest the displacement of the direction of length. The shear strengths of three kinds of dry sand in plane strain shear test are compared with strengths measured in triaxial test at the same initial density and the pore water pressure produced during the test of saturated sand in plane strain shear test is measured.

These experimental results were satisfactory.

1. 緒 言

堤体や連続基礎のように、一様な断面の長い構造物の付近の土塊は平面ひずみ状態にあり、そのせん断破壊は構造物の長さ方向の変位は生じない状態での破壊である。しかし、現在、これらの設計に用いられている土の力学定数は必ずしも平面ひずみ条件での試験から求められているわけではない。

この平面ひずみ条件でのせん断試験や試験機の試作等は1965年前後から数か所の実験室で行なわれ、それらの結果と現在実用化されている三軸試験の結果との比較などが発表されているが、その実験操作が非常にむつかしく、また試験機自体もかなり複雑な機構もっていて、まだ一般的に試験とはいいがたい状態である。

著者の実験室では昨年より、米国のカリフォルニア大学 (Berkeley) の Duncan, J. M. 氏が行なっている平面ひずみ状態でのせん断試験¹⁾を参考にし、従来の三軸試験を利用して比較的簡単に平面ひずみ三軸試験を行なうことをこころみた。

その結果、まだ改良すべき点はあるが、一応期待どおりの実験を行なうことができたので、その方法および結果等について述べる。

2. 実験装置

前述のように、この実験では三軸試験機をほぼそのままの形で利用した。平面ひずみ状態でのせん断試験（これを以後平面ひずみ試験という）を行なうために変替した部分や特に使用した器具について述べる。

平面ひずみ試験の供試体は水平断面が 7.5×3.5 cmの矩形で高さが約8.0cmの直方体としたので、三軸室内の上に、下加圧板は水平断面が 7.5×3.5 cmのものにとりかえて使用した。なお、供試体の各寸法を上記のように定めるには三軸試験で供試体の直径が75mmの場合に使用されるゴムスリーブをこの場合にも使用するという原則とし、幅に対して長さおよび高さが2倍以上ということ考慮した。

Fig. 1に示す拘束板はせん断中に供試体の長さ方向の変位を拘束するためのもので、厚さ1cm、縦9cm

* 土木工学教室

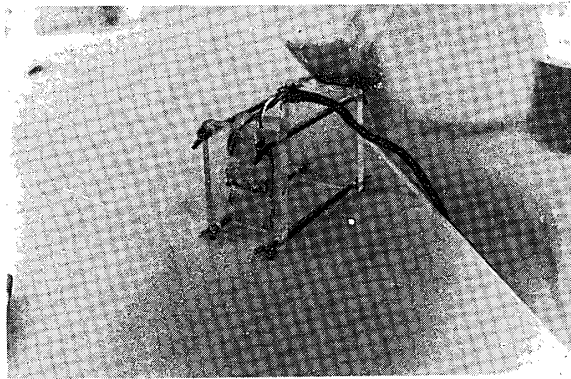


Fig. 1 End clamp

横6 cmの2枚の亚克力板で供試体を左右からはさみ、互いに四隅をボルト、ナットで緊結して使用するものである。なお、拘束方向の中間主応力 σ_2 を測定する場合には Fig. 1に示すように、片方の拘束板の内側に σ_2 を測定するための亚克力板と板バネをとりつけて使用する。供試体内に生じた中間主応力が内側の亚克力板に作用し、その合力によって板バネに生じる曲げひずみを板バネに接着したひずみゲージで測定する。

この板バネのたわみ量は合力が10kgで0.02mmであった。

Fig. 2は供試体成形用のモールドで内側にはポリスチロールが張ってあって乾燥砂等の試料の場合にはモ

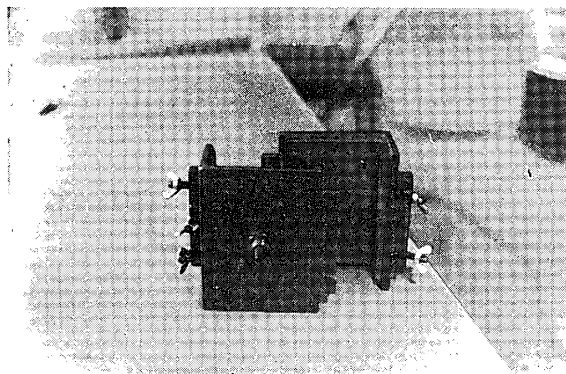


Fig. 2 Mould

ールドの内面にゴムスリーブを張って枝管を負圧に連結し、ゴムスリーブをモールド内壁に密着させて試料砂を入れて供試体を作製するのに用いる。

また、本試験では飽和砂に対して、せん断時の間げき水圧の変化を測定したが、間げき水圧計としては受圧面径6 mmの共和電業製ps型圧力計を用いた。

3. 試 料

本実験に使用した試料は Table 1 にかかげる三種で、いずれも均等係数が1.0に近いものである。

供試体の製作には前述の成形用モールドを用い、初期単位重量が同一砂においてはほぼ一定となるように努めた。その値および初期間げき比は Table 1 のとおりである。なお、飽和砂として間げき水圧の測定を行なったのは豊浦標準砂のみで、そのときの初期間げき比も Table 1に示すそれと差はなかった。

4. 実 験 方 法

実験方法を順を追って述べる。

乾燥砂においては試料内部を負圧にすることが可能であり、側圧を負荷するのに液圧を用いなくてよいこととなるので、中間主応力を測定するための実験には乾燥砂を使用した。

まず、成形用モールドを下部加圧板の上に立て、内側にゴムスリーブを入れ、モールドの枝管を負圧につなぎ、ゴムスリーブを成形器の内面に吸いつける。

この際、隅の部分やスリーブがしわにならないように気をつける。そしてスリーブの中に試料砂を入れ、モールドに軽く振動を与えながらできるだけ均一になるようにつめる。

所定の高さまで砂をつめた後、砂表面に濾紙を置いて上部加圧板をとりつけ、輪ゴムでスリーブを加圧板に緊結し、供試体内部を所定の負圧にして供試体を自立させた後にモールドをはずす。供試体の寸法を測定する。

Table 1 Physical properties of materials

Materials	Specific gravity	Mean (m.m) particle size	Uniformity coefficient	Unit volume weight(g/cm ³)	Void ratio
TOYOURA standard sand	2.63	0.21	1.50	1.45	0.82
TOYOURA coarse sand	2.58	0.85	1.92	1.55	0.67
SOMA sand	2.61	0.72	1.63	1.65	0.58

つぎに Fig. 1 に示した中間主応力方向のひずみ拘束板をとりつける。これは供試体を左右からはさむようにしてアクリル板をあてて4本のボルトで締めつけるのであるが、アクリル板と供試体すなわちゴムスリーブとの接触面にはシリコングリスを十分に塗布して拘束板面に平行な方向の供試体の変形が拘束板とゴムスリーブとの間のマサツによって拘束されないようにした。拘束板の締めつけは4本のボルトの蝶ナットによって加減されるが、各ボルトはできるだけ均等な力をうけるように配慮し、締めつけ後に指先で拘束板を上下に動かすとき、拘束板が供試体の表面を軽くすべる状態であることを確かめながら締めつけた。

前述のように乾燥砂の場合には中間主応力の値を測定する板バネにはひずみゲージが貼ってあるので、これを液体中におくことができないので、そのため供試体内部を負圧にすることによって側圧を負荷するようにした。それで Fig. 3, Fig. 4 に示すように三軸室はアクリル円筒のかわりに特殊な円筒を用いて供試体は試験中も大気圧中に開放のままとした。

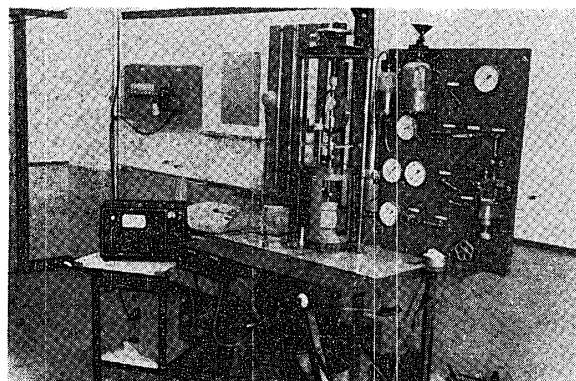


Fig. 3 Plane strain test

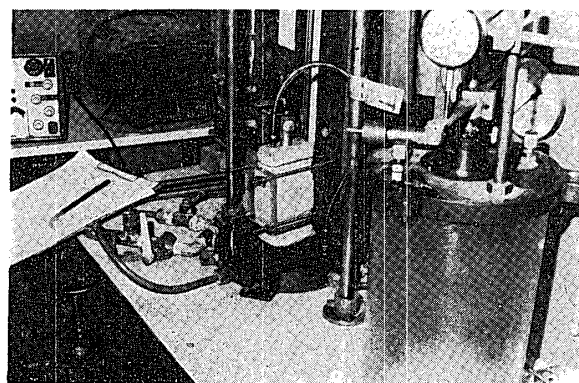


Fig. 4 Test specimen

なお、この実験では実験結果を従来の三軸試験と比較しながら行なったので、各種の砂についての三軸試験も平面ひずみ試験と平行して行なった。そのときの側圧負荷も供試体内部を負圧とすることによって行な

った。

乾燥砂の実験を行なった後に、豊浦標準砂について飽和度を100%にして圧密非排水試験を行なってせん断中の間げき水圧変化を測定した。すなわち、乾燥砂の場合とはほぼ同じような操作によって飽和砂の供試体を作り、所定の側圧によって圧密を行なった後に非排水状態で軸差圧を加えた。この場合の側圧の負荷は液圧によって行なったので、中間主応力の測定はできなかった。

本実験では軸方向の圧縮速度は1 mm/minとした。

供試体の単位重量や含水比等はせん断後、供試体の全重量、試料の含水比を測定して求めた。

5. 実験結果

Fig. 5 は本実験で得られた応力-ひずみ曲線の一例である。縦軸に主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、横軸に軸方向圧縮ひずみ ϵ をとって整理したものである。

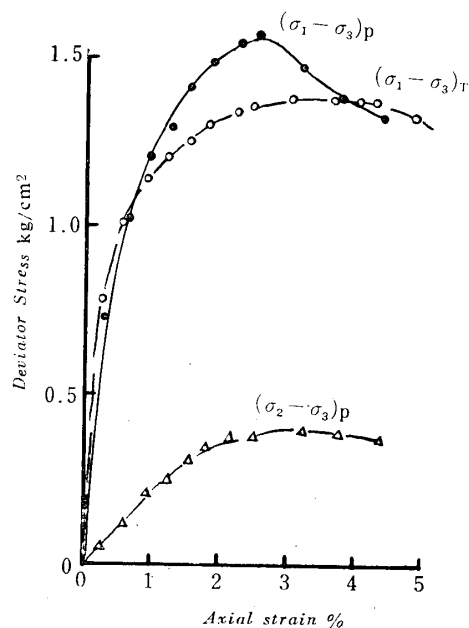


Fig. 5 Stress-strain curve

実線が平面ひずみ試験の結果で、破線は三軸試験の結果である。この図よりわかることは、平面ひずみ試験においては三軸試験より破壊ひずみ量は小さく、破壊点における主応力差のピーク値のあらわれ方が顕著であることである。

平面ひずみ試験と三軸試験とのそれぞれの破壊点の軸ひずみ ϵ_f の大きさを比較したのが Fig. 6 である。これよりわかるように平面ひずみ試験での破壊ひずみ ϵ_{fP} が三軸試験での破壊ひずみ ϵ_{fT} より大きくなる例は一つもなく、実験値の平均として求めた直線の勾配

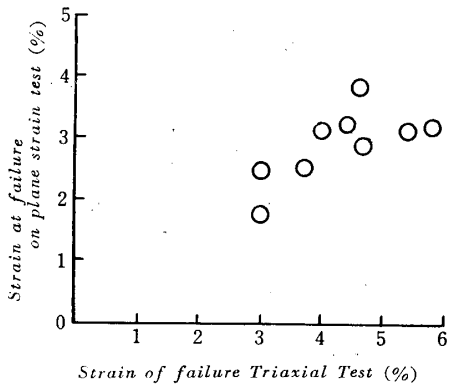


Fig. 6 Comparison of strain at failure

から平面ひずみ試験の場合には、三軸試験の破壊ひずみの約30%の軸ひずみで破壊に達していることがわかる。

Fig. 7は平面ひずみ試験において最大主応力 σ_1 と中間主応力 σ_2 とがそれぞれの最大値を示すときの軸

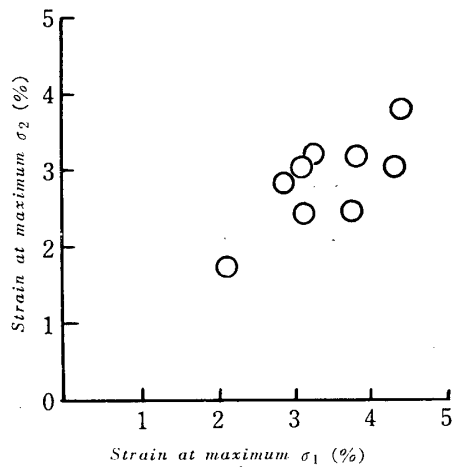


Fig. 7 Comparison of axial strain

ひずみ ϵ を比較したものであるが、これより両者が最大値をとるきの軸ひずみにはほとんど差のないことがわかる。

Table 2 Comparison of test results

Materials	Internal friction angle		Difference of int. fric. angle
	Triaxial test	Plane strain test	
TOYOURA standard Sand	40° 10'	41° 30'	1° 20'
TOYOURA coarse Sand	42° 20'	42° 40'	2° 20'
SŌMA Sand	38° 20'	40° 50'	2° 30'

Table 2 は各種の砂の平面ひずみ試験、三軸試験それぞれから得られた内部マサツ角を示したものである。同一種目の砂について初期間げき比を変化してのせん断試験は行なわなかったが、Table 2 と Table 1 とを対応させると、両試験より得られた内部マサツ角の差は間げき比の大きい砂の方が小さいことがわかる。これは他の実験結果とも一致する。なお、これらの実験結果についての供試体の寸法の影響をしらべるために、水平断面が2.5×5.5cmで高さが約6.0cmの供試体による平面ひずみ試験も行なった。そして豊浦標準砂について内部マサツ角が42°という結果が得られ、Table 2の結果との差は僅少で、水平断面が3.5×7.5cmの供試体と水平断面が2.5cm×5.5cmの供試体の間に寸法によるちがいは認められなかった。

つぎにせん断中の間げき水圧の測定結果であるが、その一例を Fig. 8 に示す。平面ひずみ試験を実線、三軸試験を破線で示してある。

Fig. 8 (a)の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ϵ との関係は Fig. 1 とはほぼ同じである。Fig. 8 (b)がその際

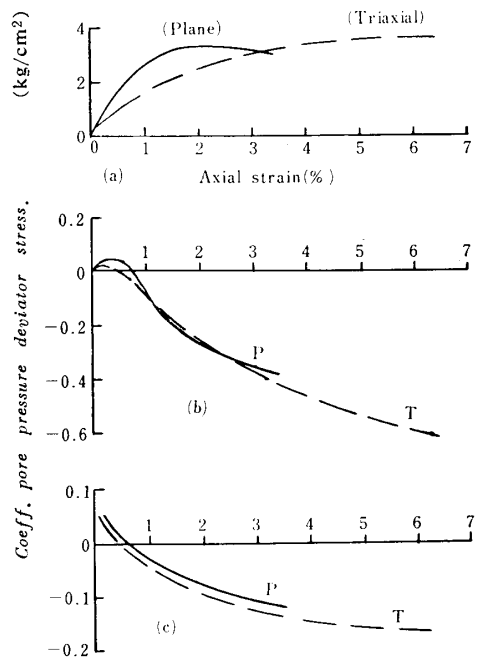


Fig. 8 Deviator stress, pore pressure and coeff. of pore pressure (Toyouura sand. $\sigma_3 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$)

に生じた間げき水圧の変化である。この供試体の初期間げき比が限界間げき比以下にあるためか、軸ひずみが小さい間は正の間げき水圧が発生しているが、軸ひずみが大きくなると負の間げき水圧が発生するようになる。このことは平面ひずみ試験でも三軸試験でも同じようであるが、平面ひずみ試験の場合の方が三軸試験の場合に比して大きい間げき水圧が発生する傾向が見られる。

側圧 σ_3 によって圧密された試料の圧密非排水試験であるので、

$$A = \Delta u / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

の関係から間げき水圧係数 A を求めたのが Fig. 8 (c) である。 Δu はせん断中の間げき水圧増加量である。

供試体破壊時の間げき水圧係数を A_f とし、それと側圧 σ_3 との関係をも求めたのが Fig. 9 である。実線が平面ひずみ試験、破線が三軸試験の結果である。

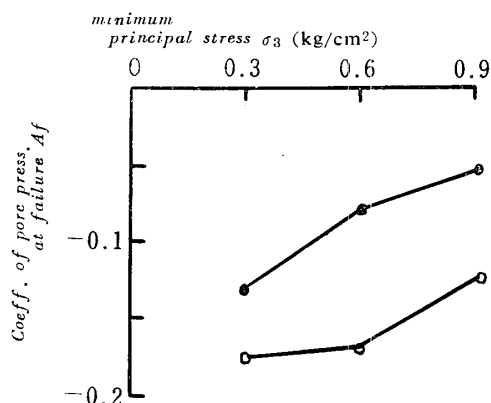


Fig. 9 Relation $\sigma_3 - A_f$

前述のように A_f の値はいずれも負となるが、その絶対値は平面ひずみ試験の場合が小さい、すなわち平面ひずみ試験の場合の方が発生する間げき水圧値が大きいということがわかる。このことについては理論的に証明されている²⁾。

6. 結 言

以上述べたように著者は米国カリフォルニア大学の Duncan 氏が行なっている平面ひずみ試験を参照して、現在使用されている三軸試験機を利用しての平面ひずみ試験を行なってみた。その結果、上、下の加圧板をかえることや拘束板やモールド等を用意することだけで比較的簡易に平面ひずみ試験を行なうことができた。

そして、実験結果も他所で現在までに行なわれた平面ひずみ試験の結果³⁾とよく一致する結果が得られた。

すなわち本実験結果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 平面ひずみ試験より得られる乾燥砂の内部マサツ角は三軸試験より得られるそれより数度大きく、両者の差は初期間げき比の小さい試料ほど大きい。
- 2) 破壊点における最大主応力値のピークは、平面ひずみ試験の方が大きく、そのあらわれ方が顕著である。
- 3) 平面ひずみ試験の破壊時の軸ひずみ量は三軸試験のそれより小さく約30%位となる。
- 4) 圧密非排水試験における間げき水圧は平面ひずみ試験の場合の方が大きい。
- 5) 平面ひずみ試験で供試体寸法を水平断面が 2.5×5.5 cm で高さが約5.0 cm の場合と水平断面が 3.5×7.5 cm で、高さが約3.0 cm の二種類について実験を行なったが、内部マサツ角等にはほとんど差はなかった。

終りに本実験は本学々生中野章君の助力を得て行なわれたことを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) J. M. Duncan & H. B. Seed: Strength Variation Along Failure Surfaces in Clay, Proc. ASCE, SM 6, (1966)
- 2) 土質工学ハンドブック, 土質工学会, p. 176
- 3) D. P. Cornforth: Some Experiments on the Influence of Strain Conditions on the Strength of Sand. Geotechnique 14, No. 2 (1964.)

(昭和45年4月15日受理)