

供試体作成方法と飽和砂のせん断特性に与える影響

常 田 亮*

A SAMPLE PREPARATION METHOD AND ITS EFFECTS
ON SHEAR CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND

Makoto TOKIDA

A simple preparation method of sand specimen using pluviation apparatus (Conical Hopper Method) by which various desired specimen density can be provided by controlling the filter diameter is developed. It was found that various densities can be achieved by this method without applying vibration or impact. A series of static tri-axial compression tests on the specimens prepared by another method (Dry Tapping method) were also performed to compare in detail with the shear characteristics of specimens formed by Conical Hopper method. Tests results showed that shear characteristics due to the effects of difference in sample preparation method can be observed in the triaxial compression tests. It was also seen that Conical Hopper method can provided the uniform and reproducible specimens irrespective of the tester.

1. は じ め に

従来より行なわれてきた液状化現象に関する研究において、均質な供試体を作成することが、正確なデータを得るうえで必要不可欠であると考えられてきた。そのため砂の供試体の作成方法については多くの研究者によって提案されており、その主な方法を列記すると以下のように分類される¹⁾。

1) PW法 (Pluviated through Water method)

脱気した砂をスプーンで脱気水中に落下させて供試体を作成する方法。

2) PA法 (Pluviated through Air method)

フラスコ内の乾燥砂を空中落下させて供試体を作成する方法で、密度は落下高、フラスコの口径で調整する。

3) MT法 (Moist Tapping method)

含水比を8%に調整した砂を、直径3cmのタンパーで各層の密度が一定になるように6層に分けて突き固める方法。

4) HV法 (High Frequency Vibration method)

含水比を8%に調整した砂を、円柱形のおもりを乗せてバイブレーターで100cpsの振

* 土木工学科 助手
原稿受付 昭和62年9月29日

動を加えながら所定の密度に締め固める方法.

5) DT法 (Dry Tapping method)

秤量した乾燥砂をモールドに入れて、モールドの周囲に振動を加えて所定の密度に締め固める方法.

上記の供試体作成方法の他に、三浦、土岐²⁾が開発した MSP 法が提案され、現在でも用いられている.

このように、様々な方法によって砂の供試体は作成されているが、作成方法の違いが原因となって実験結果に誤差が生じるものと考えられる. そのため、実験結果に対する供試体作成方法の影響について検討する必要がある. 供試体の作成方法は、Oda³⁾ や Ladd⁴⁾ が述べているように、供試体の初期構造に大きな影響を及ぼすことが明らかにされている. また、Seed ら⁵⁾ は動的せん断特性について供試体作成方法の検討を行ない、作成方法によってかなりの違いのあることを確認している.

そこで本研究は、簡単に均質な供試体を作成することのできる CH法 (Conical Hopper method) を提案するとともに、DT法より得られた供試体を用いた三軸圧縮試験結果⁶⁾ との比較、検討を行なった.

2. CH 法と CH 法による供試体作成方法

2-1 CH 法 (Conical Hopper method)

CH 法は、図-1および図-2に示す落下装置とフィルターを用いて乾燥砂をモールド内に空中落下させることによって、供試体を作成する方法である.

この方法の特長は、フィルターの口径と数を変えることによって、供試体の相対密度を任意に変えることができることである. また、落下させる砂の量と落下高を一定にしておくことにより、実験者の個人誤差を最小限に低下させることが可能である.

落下装置は、円錐形の漏斗とプラスチックの円筒よりできており、フィルターホルダーによりフィルターと接続できるようになっている. また、フィルターはアクリル板を加工して作成し、フィルターの穴の数および配置は次の条件にしたがって決定した.

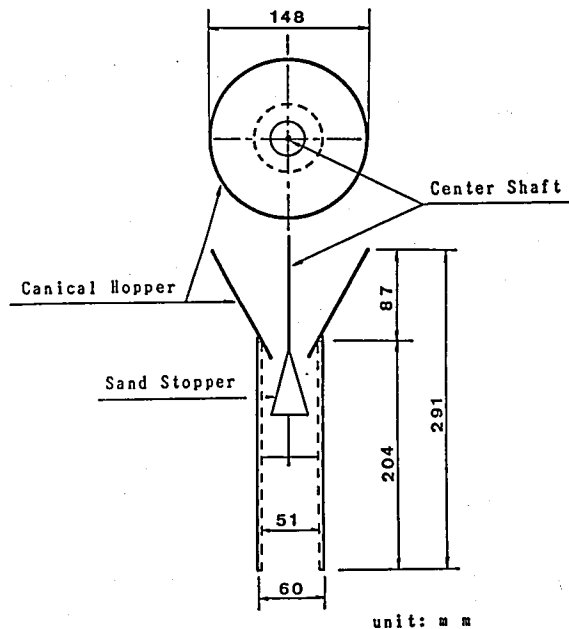


Fig. 1 Pluviation Apparatus (Conical Hopper)

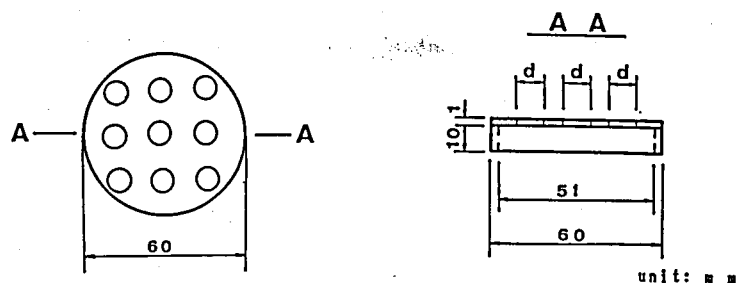


Fig. 2 Pluviation Apparatus (Filter)

- 1) 砂の通過断面積を一定にする。(Ar=30%~35%)

$$Ar = (A_1/A_2) \times 100(\%)$$

Ar : 面積比

A₁ : 通過断面積 (mm²)

A₂ : フィルター全断面積 (1963.5mm²)

- 2) 穴は軸対称に配置する.

2-2 CH 法の検定

CH 法の有効性を検討するために、フィルターの口径をパラメーターにしたときの相対密度と落下高の関係および相対密度とフィルターの口径の関係を調べた。

図-3は、落下高を50mmから150mmまで変化させたときの、相対密度と落下高の関係を示したものである。図に示すように、相対密度は落下高が増加するにしたがって、フィルターの口径に関係なくわずかに増加する傾向を示している。しかし、検定試験より得られた相対密度の差は、2%以下であったので実用上ほとんど無視することのできる誤差であると

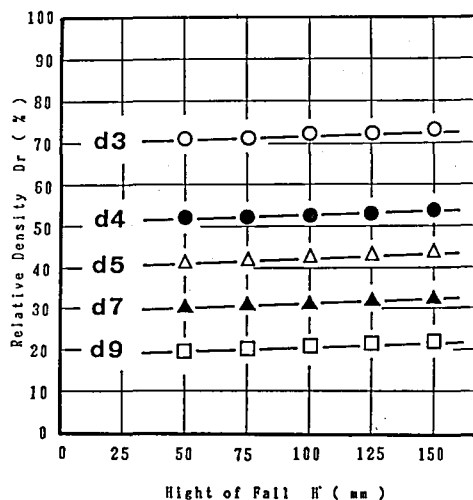


Fig. 3 Relative densities of prepared sand under various combinations of filter diameter and height of fall

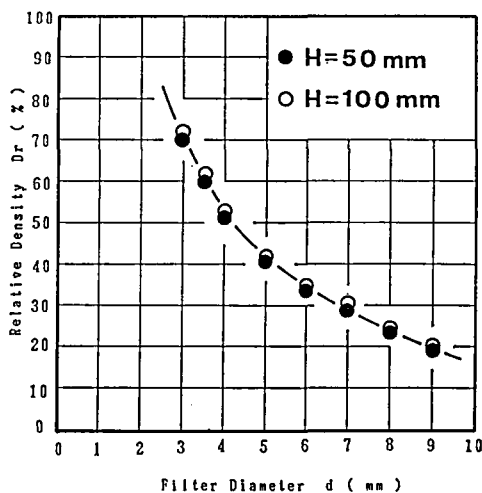


Fig. 4 Variation of relative density of prepared sand with filter diameter

Table 1 Relative Density achieved by CH method under filter diameters of 3mm to 9mm and height of fall of 50mm to 150mm

Filter Diameter (mm)	Relative Density (%)		
	H = 50mm	H = 100mm	H = 150mm
3	71.6	72.6	73.3
3.5	60.3	61.5	62.1
4	51.8	52.5	53.5
5	41.5	42.5	44.1
6	33.1	33.9	34.4
7	29.8	30.3	31.7
8	24.5	25.1	25.9
9	19.9	20.7	20.9

考えられる。表-1に今回行った検定試験結果を示す。

落下高 50mm と 100mm のときの相対密度とフィルターの関係を、図-4に示す。相対密度は、フィルターの口径の増加にともなって低下することが、図より明らかである。さらに、相対密度の低下の傾向は、次式によって近似することができる。

$$Dr = (2.1/d) \times 100 \quad (2)$$

Dr : 相対密度 (%)

d : フィルターの口径 (mm)

2-3 CH 法による供試体作成方法

今回の実験に用いた試料は、新潟県中蒲原郡黒崎町において採取された砂で、粒度分布及び物理的性質は、図-5および表-2に示すとおりである。

Table 2 Index Properties of Prepared sand

Gs	D50(mm)	D60(mm)	D30(mm)	Uc	Uc'	e max	e min
2.674	0.33	0.35	0.14	2.188	1.207	1.020	0.645

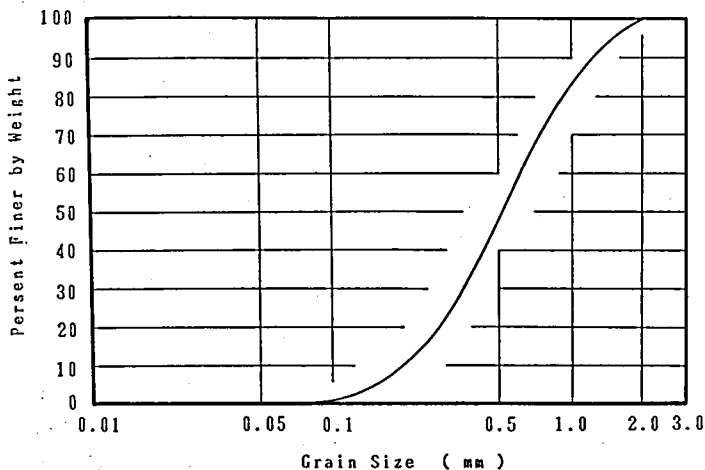


Fig. 5 Grain size distribution curve of soil sample

実験用の供試体は本研究で提案したCH法により作成した。以下、その手順を示す。

- 1) 落下装置およびフィルターを、図-6に示すように、供試体作成用モールドに接続する。
- 2) コニカルホッパーに所定の乾燥砂（質量300g）を入れる。
- 3) サンドストッパーを押下げてモールド内に試料を自由落下させる。
- 4) 試料が完全に落下したら落下装置とフィルターを取りはずし、受け皿に残っている試料の質量を測定し、供試体の質量を求める。
- 5) フィルター等を取り外した後、ストレーエッジを用いて供試体端面の整形を行なう。
- 6) 供試体に負圧を作用させて自立させ、モールドを取り外し寸法を測定する。

今回の実験に使用した供試体は、落下高Hを100mmとして作成したものである。

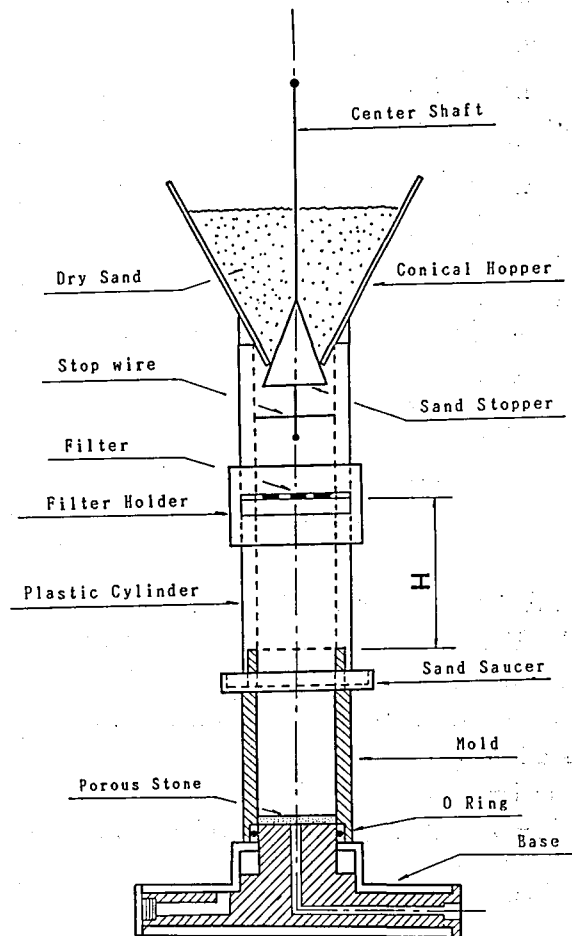


Fig. 6 Typical pluviation manner in triaxial specimen

3. 実験結果および考察

3-1 排水せん断試験

3-1-1 応力比-軸ひずみ関係

初期有効拘束圧 (σ'_c) が50kPa で相対密度 (D_r) を50%と70%に変化させたときの、CH法とDT法による応力比と軸ひずみの関係を図-7に示す。図より明らかであるように、軸ひずみの増加にともなう応力比 (η) は、CH法によって作成された供試体の方がDT法によって作成された供試体よりも、最大応力比 (η_{max}) および終局強度ともに大きくなっている。またこの傾向は、相対密度に依存していないが相対密度が低いほど著しくなっていることがわかる。さらに、応力比-軸ひずみ曲線の初期勾配は、CH法の方がDT法に比べて大きくなる傾向を示している。

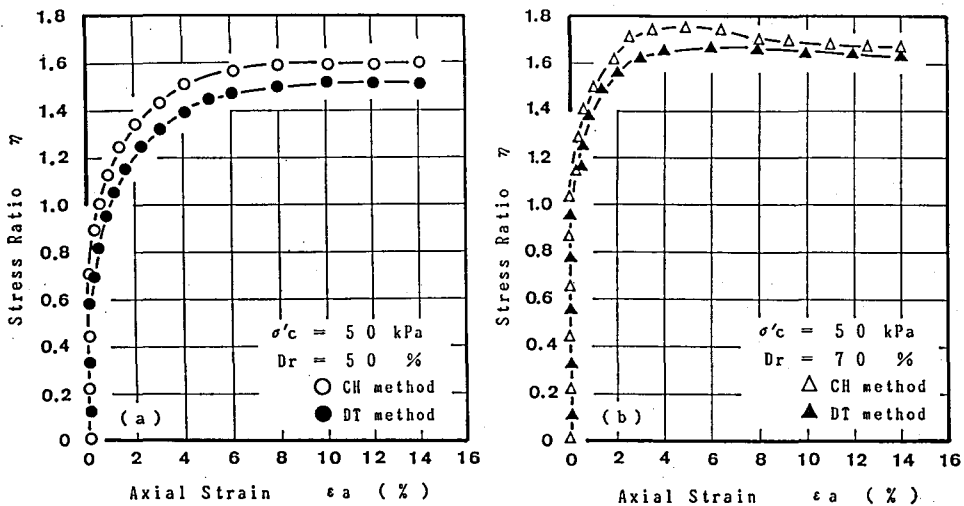


Fig. 7 Typical stress ratio-axial strain behaviour in CID tests

上述の傾向は、本研究で採用した他の初期有効拘束圧および相対密度においても認められ、相対密度が低いほど著しくなることが明らかとなった。以上のことから、CH 法によって作成された供試体の方が、DT 法によって作成された供試体に比べて均質であると考えられる。また、相対密度が低い場合ほど実験結果に与える供試体作成方法の影響が大きくなるものと考えられる。

3-1-2 体積ひずみ-軸ひずみ関係

図-8は、初期有効拘束圧が50kPaで相対密度が50%および70%における軸ひずみと体

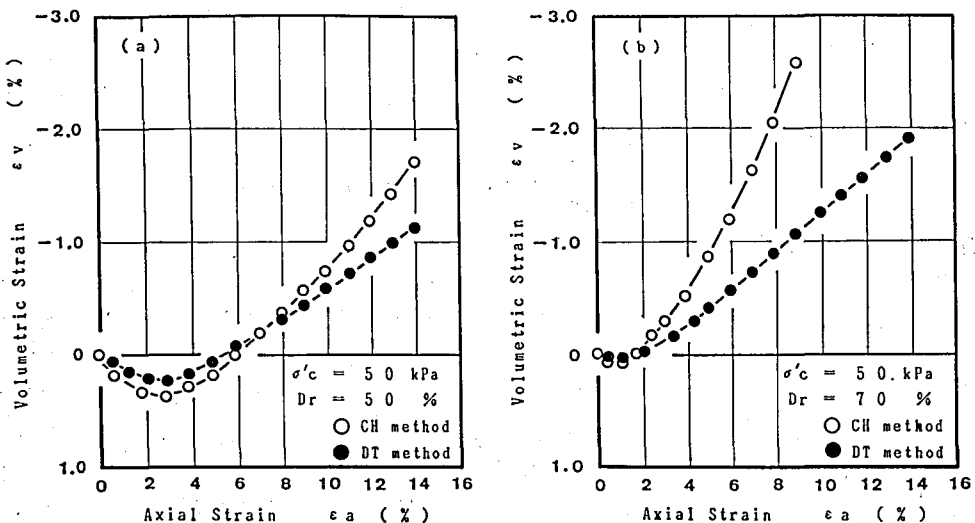


Fig. 8 Typical volumetric strain-axial strain behaviour in CID tests

積ひずみの関係を示したものである。図中、体積ひずみは圧縮側を正としている。せん断の進行に伴って発生する体積圧縮量は、CH 法の方が DT 法に比べて大きくなることが図より明らかである。また、体積ひずみが圧縮領域から膨張領域に移行するときの軸ひずみの値は、供試体の作成方法の違いに関係なくほとんど同じであり、膨張傾向は CH 法の方が著しいことがわかる。

上記の供試体作成方法の違いによる体積ひずみ特性の違いは、供試体の均質性の違いによって生じるものであると考えられる。したがって、CH 法によって作成された供試体の方が均質であるために、体積膨張特性が著しくなっているものと考えられる。

3-1-3 内部摩擦角 (ϕ_d)

$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ に対応する内部摩擦角と相対密度の関係を図-9 に示す。ここで内部摩擦角は、破壊包絡線が原点を通るものとして次式より求めたものである。

$$\sin \phi_d = 3 \times M / (6 + M) \quad (3)$$

ここで $M = \eta$, $\eta = q/p'$ とする

図に示すように、内部摩擦角 (ϕ_d) は相対密度の増加に伴って直線的に増加し、CH 法の方法が DT 法に比べて $3^\circ \sim 4^\circ$ 大きな値を示している。同様の実験結果が、三浦、土岐²⁾の研究によっても得られている。このことは、均質な供試体ほどせん断強度が大きくなることを示しているものと考えられる。

3-2 非排水せん断特性

3-2-1 有効応力経路

図-10は、初期有効拘束圧 50kPa、相対密度50%における非排水せん断時の有効応力経路を示したものである。ここで q は主応力差 ($q = \sigma'_1 - \sigma'_3$)、 p' は有効平均主応力 ($p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/3$) を示す。

有効応力経路は、せん断の初期において q/σ'_c の増加に伴って p'/σ'_c が低下し、変相点を境にして q/σ'_c および p'/σ'_c が増加して Critical State Line に到達する。また、ここでは初期有効拘束圧 50kPa の場合のみを扱ったが、有効応力経路は初期有効拘束圧の大きさに関係なくほぼ相似形をなし、相対密度の増加に伴って q/σ'_c の低下が小さくなることが明らかとなってい

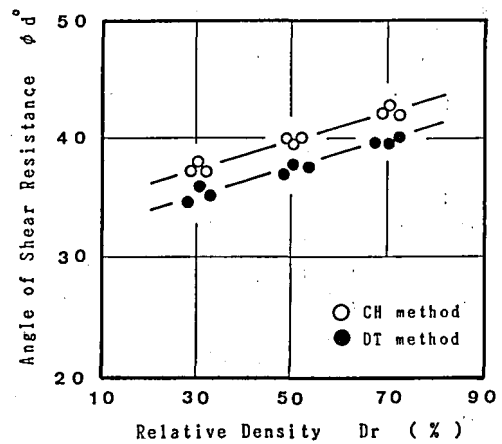


Fig. 9 Relationship between ϕ_d and Dr

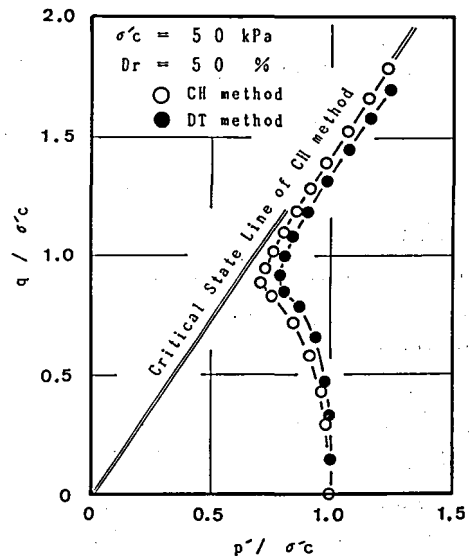


Fig. 10 Typical effective stress paths in CIU tests

る⁶⁾⁷⁾。

3-2-2 応力比—軸ひずみ関係

図-11は、非排水せん断試験における応力比と軸ひずみの関係 ($\sigma'_c=50\text{kPa}$, $Dr=50\%$, 70%) を示したものである。図に示すように、CH 法によって作成された供試体の方が DT 法によって作成された供試体に比べて、最大応力比 (η_{\max}) および終局強度ともに大きな値を示している。しかし、応力比—軸ひずみ曲線の初期勾配は、供試体作成方法による大きな相違は認められず、この傾向は相対密度を変えても同様であり、本研究で採用した他の拘束圧においても認められた。前述した排水せん断試験においては供試体作成方法の違いによる初期勾配の相異が明確に表われたのに対して、非排水せん断試験において相違が表われない原因としては、非排水せん断試験は等体積せん断であるのでせん断の初期においては、供試体の均質性の影響が小さいことが考えられる。

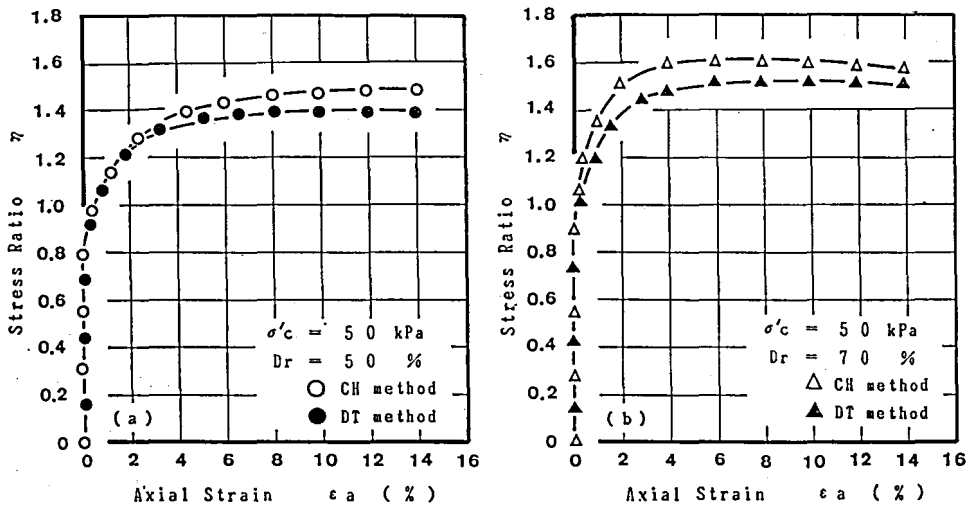


Fig. 11 Typical stress ratio-axial strain behaviour in CIU tests

3-2-3 間隙水圧比—軸ひずみ関係

間隙水圧比 (du/σ'_c) と軸ひずみの関係 ($\sigma'_c=50\text{ kPa}$, $Dr=50\%$, 70%) を図-12に示す。せん断に伴って発生する間隙水圧比は、相対密度の増加に伴って低下する傾向を示しており、この傾向は初期有効拘束圧および供試体作成方法の違いに無関係であることが、図より明らかである。しかし、最大間隙水圧比 ($(du/\sigma'_c)_{\max}$) は、CH 法の方が DT 法に比べて大きくなることが認められた。また、間隙水圧比が圧縮領域から膨張領域に移行するときの軸ひずみは、体積ひずみの場合と同様に、供試体の作成方法に無関係であることがわかった。

さらに非排水せん断時の膨張傾向は、相対密度 (Dr) が50%以下の場合、CH 法の方が著しい傾向を示すのに対して、70%程度になると供試体作成方法による相違はほとんど見られない。したがって非排水せん断時の間隙水圧比特性に与える供試体作成方法の影響は、相対密度が増加するほど小さくなり、特に膨張領域ではその影響がほとんどないものと考えられる。

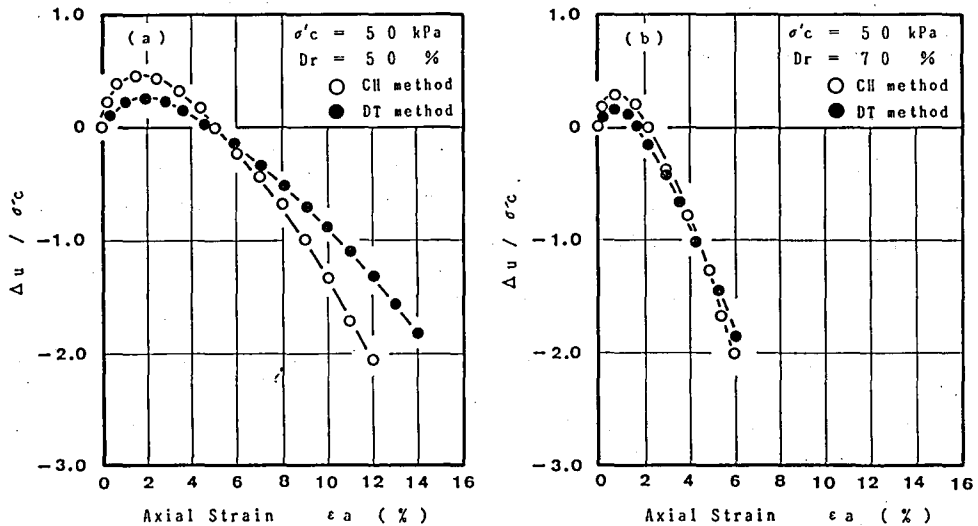
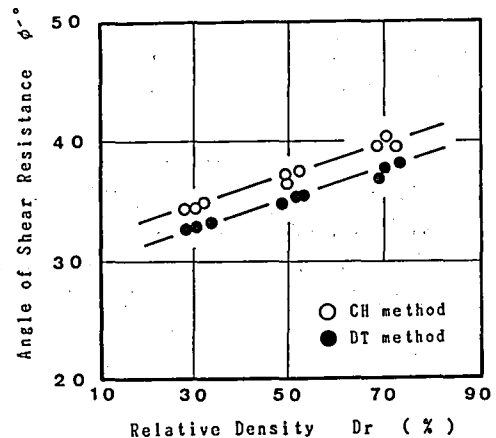


Fig. 12 Typical pore pressure-axial strain behaviour in CIU tests

3-2-4 内部摩擦角

排水せん断試験の場合と同様の方法で求めた内部摩擦角(ϕ')と相対密度の関係を、図-13に示す。内部摩擦角は、供試体の作成方法の違いに関係なく相対密度の増加に伴って直線的に増加する傾向を示している。また、CH法によって作成された供試体は、DT法によって作成された供試体に比べて $3^\circ \sim 4^\circ$ 大きな内部摩擦角を有している。さらに、 ϕ_d と ϕ' を比較した場合、 ϕ_d は相対密度の大きさに関係なく ϕ' よりも約 2° 大きな値を示している。しかし Bjerrum ら⁸⁾ が述べているように、実用上は ϕ_d と ϕ' は等しいとして問題ないものと考えられる。

Fig. 13 Relationship between ϕ' and Dr

4. 結 論

今回、砂を用いた供試体の簡易作成法として Conical Hopper 法を提案し、その実用性を検討するとともに、供試体の作成方法が実験結果に及ぼす影響について比較、検討を行った。その結果を以下に示す。

- 1) Conical Hopper 法を用いた場合、供試体の相対密度はフィルターの口径によって任意に決定することが可能であり、得られた結果は良好であった。
- 2) せん断特性を比較検討した結果 CH 法によって作成された供試体は、DT 法によって作成された供試体に比べて、均質であると考えられる。

- 3) 飽和砂のせん断特性に与える供試体作成方法の影響は、供試体の初期構造によるものが最も大きいと考えられる。

謝 辞

本研究を行なうにあたり長岡技術科学大学 小川 正二教授、亀井 健史助手の御助言、御指導を得たことをここに感謝致します。また、実験装置の製作および改良においては和田 技官の御協力を得たことを、ここに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 石脇 茂, 吉見吉昭, 時松孝次: 砂の液化抵抗と初期剛性の関係, 第14回土質工学研究発表会, 1969.
- 2) Miura, T. and Toki, S. : A Sample Preparation Method and Its Effects on Static and Cyclic Deformation Strength Properties of Sand, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77, 1982.
- 3) Oda, M. : Initial Fabrics and Their Relations to Mechanical Properties of Granular Material, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 1, pp. 17-36, 1972.
- 4) Ladd, R. S. : Preparing Test Specimens Using Undercompaction, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 1, pp. 16-23, 1978.
- 5) Muliris, J. P., Chan, C. K. and Seed, H. B. : The Effects of Method of Sample Preparation on Cyclic Stress-Strain Behaviour of Sand, Report No. EERC 75-18, Univ. of California.
- 6) 常田 亮: 伸張領域における飽和砂のせん断特性, 長岡技術科学大学修士論文, 1982.
- 7) 常田 亮, 小林正二, 亀井健史: 低拘束圧下における飽和砂のせん断特性, 長岡技術科学大学研究報告, Vol. 9, pp. 35-42, 1987.
- 8) Bjerrum, L., S. Kringstad and O. Kumeneje : The Shear Strength of Fine Sand, Proc 5th, ICSMFE, Vol. 1, pp. 29-37, 1961.