室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

砂の三軸強度特性の供試体寸法と構造依存症に関する実験的・解析的研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-03-04
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 磯崎, 真一, 新田, 登
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/739

砂の三軸強度特性の供試体寸法と構造依存性に関する実験的・解析的研究

磯 崎 真 一・新 田 登

Study on the dependency of triaxial shear behavior of sand on the sample dimension and fadric.

Shinichi ISOZAKI, Noboru NITTA

Abstract

Static triaxial compression tests on the specimens prepared by MSP were performed to compare the larger diameter specimens (φ150×360mm) with the standard specimens (φ70×170mm, φ50×120mm, φ35×85mm). Tests results showed that the angle of shearing resistance of specimens with large diameter (φ150mm) have a larger degree values (about 1 degree) than those of the standard specimens (φ≦70mm) in spite of relative densities.

For the specimens with diameter of 150mm, a series of static triaxial compression and extension tests on the specimens prepared by different methods (to obtain the specimens having a different fabric) were also performed. The variation in the angle of shearing resistance due to the effect of difference in sample preparation methods can be observed more clearly for the specimens with diameter of 150mm than for the specimens with diameter of 50mm.

Furthermore, elasto-plastic stress-strain relations proposed by Miura et al. were adopted to the medium triaxial test(φ150mm) results. Comparisons of the predicted and measured stress-strain relationships showed that the proposed theory is almost capable of simulating the specimen with diameter 150mm deformability.

1. まえがき

粗粒材の強度・変形特性は土構造物の設計のために必要であるとともに，補強土や路盤材などの舗装構造材料の支持力・変形挙動を推定する上での基礎資料となるものである。ところが，実際には粗粒材の強度・変形特性を精度よく推定することは容易ではない。その最大の理由は，粗粒材の試験用供試体が，要素として供試体内部で一様な応力一ひずみ分布を持つように試験することが困難なことである。この問題を解決する方法の一つは試験供試体を大型化することである。

ところで，三軸試験が要素試験として成立するのであれば，試験結果は供試体寸法の影響を受けないはずである。しかし，実際には寸法効果が存在することが示されている[1),2),3)]。また，大型，中型三軸試験機による三軸せん断挙動の構造依存性について実験的に検証されている例も少ない。

今回，中型三軸試験機（供試体寸法：φ150×360mm）を試作し，これを用いるにあたって供試体寸法が砂の強度・変形特性にどの様な影響を与えるかについて実験的に検討した。また，供試体作製法を変え粒子の堆積構造の異なる供試体を準備し，それによる影響について検討した。

また，三浦ら[4]が提案している弾塑性論に基づいた一般応力条件下にあたる粒状体の排水応力－ひずみ関係式を用いて，これが軸対称条件下の中型三軸試験結果をどの程度説明できるかについて検討している。

2．試料，供試体寸法および作製法

実験に用いた試料は豊浦標準砂である。この砂の物理的性質は $Gs=2.64$，$e_{max}=0.988$，$e_{min}=0.618$，$U_c=1.47$，$D_{50}=0.25$mmであり，土質工学会基準による。試料は供試体作製法によらず，あらかじめ水洗いしたものを炉乾燥して用いた。

供試体寸法は $H/D=2.4$ と一定にし，中型三軸試験機用供試体としてφ150×360mm，小型三軸試験機用供試体としてφ70×170，φ50×120，φ35×85mmの全4種である。

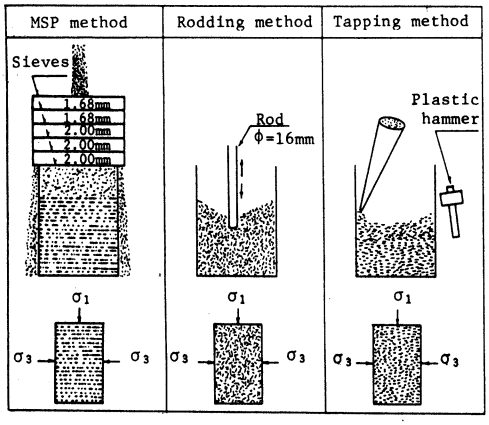
本研究では，砂の三軸特性の構造依存性を調べるために，以下の3種類の方法で中型三軸試験機用供試体を作製し，供試体の初期堆積構造を変化させている。

(1) MSP法：乾燥状態にある砂試料をメンブレンを装着したモールド上端に載せた4～7層のふるいを通して大気中で空中落下させモールド内に堆積させる方法。

(2) Rodding法：幹燥状態にある砂試料を各層均等厚に敷均し，直径φ16mmの突き棒で所定の密度が得られるように突き固める方法。

(3) Tapping法：モールド内に乾燥状態にある砂試料を紙筒を用いて落下高をあたえないように静かに注ぎ込みながら，モールド側壁をハンマーで万遍なく打撃して締固める方法。

なお，小型三軸試験機用供試体は従来のMSP法[5]を用いて作製した。MSP法によって得られる供試体は，砂粒子の見掛けの長軸が鉛直断面においてランダムな粒子配列を有し，Rodding法，Tapping法によって得られる供試体は比較的等方的な構造となっているものの幾分か重力の影響を受けたものであること[6]が知られている。図－1に今回の実験で採用した供試体作製方法の模式図を示す。



図－1　各供試体作製法の模式図

3．試験方法

供試体作製後CO_2，脱気水を通して飽和させ，その後196 kPaのバックプレッシャーを供給している。この方法によりB値は0.97以上の値を得ている。引続き，有効拘束圧Pc'＝98 kPaのもとで1時間程度等方圧密した後に排水三軸圧縮・伸張試験を側圧一定，ひずみ制御（小型三軸試験機：$\dot{\varepsilon}_a$＝0.25％／min，中型三軸試験機：$\dot{\varepsilon}_a$＝0.30％／min）の条件で行った。

試験結果は，次の応力－ひずみパラメータを用いて整理されている。

$q=|\sigma_a'-\sigma_r'|$　(1)　：偏差応力

$p'=(\sigma_a'+2\sigma_r')/3$　(2)　：平均有効主応力

$\eta=q/p'$　(3)　：有効応力比

$\varepsilon_v=\varepsilon_a+2\varepsilon_r$　(4)　：体積ひずみ

$\gamma=2|\varepsilon_a-\varepsilon_r|/3$　(5)　：せん断ひずみ

ただし，σ_a'，σ_r'はそれぞれ軸方向，半径方向主応力，ε_a，ε_rはそれぞれ軸方向，半径方向主ひずみで，圧縮を正としている。

今回，中型三軸試験機に用いたメンブレンは厚さt_mが1㎜（弾性係数Em＝16.8 kgf／㎠）あるためメンブレン力を無視できないと考え圧縮試験においてメンブレン力をフープテンションと考え側方応力を補正した((6)式)。また，伸張試験においては小型（t_m＝0.2㎜，E_m＝18.5 kgf／㎠），中型三軸試験ともメンブレンの軸方向の張力に対して補正した（(7)式）[7]。

$$\triangle\sigma_{rm}=-E_m\cdot A_m/2A \tag{6}$$

$$\triangle\sigma_{am}=-E_m\cdot\varepsilon_a\cdot A_m/A \tag{7}$$

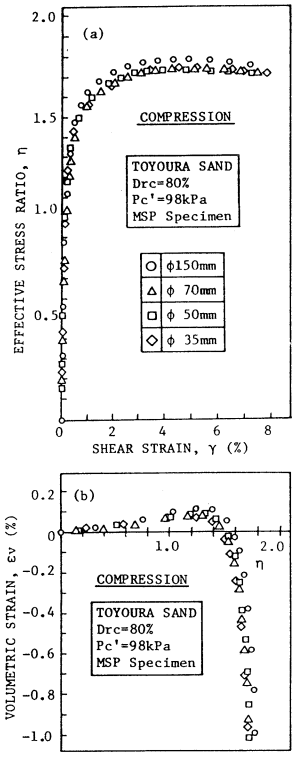
ここで，Am，Aはそれぞれメンブレン，供試体断面積。

なお，今回用いた三軸試験装置は軸力載荷装置を除き小型，中型ともほぼ同様の構造を持ち，ロードル（容量5 tf（中型三軸試験機））は三軸セル室内にあって正確な軸力の測定が可能となっている。

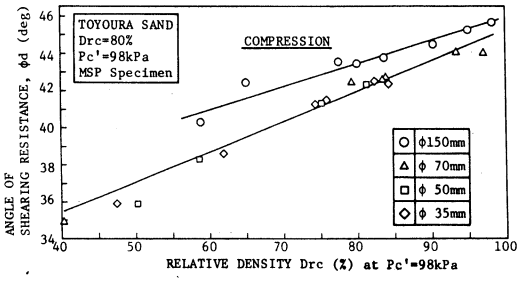
4．試験結果および考察

4―1　MSP供試体の三軸せん断挙動に及ぼす供試体径の影響

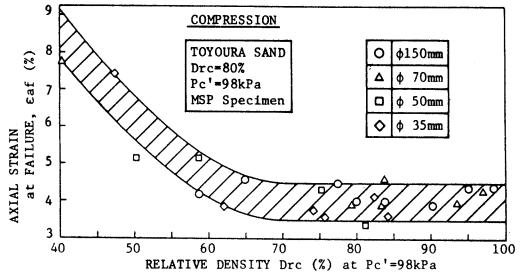
図―2(a)，(b)は，三軸圧縮応力条件における相対密度Drc＝80±3％の時の応力―ひずみ―ダイレイタンシー関係を各供試体径で比較したものである。供試体径により砂の応力－ひずみ挙動には若干の相違が認められ，φ150㎜供試体は破壊時の応力比が他の小径の供試体に比べて大きくなっている。これを除き，φ70㎜以下の供試体はほぼ同一の挙動を示している。一方，ダイレ



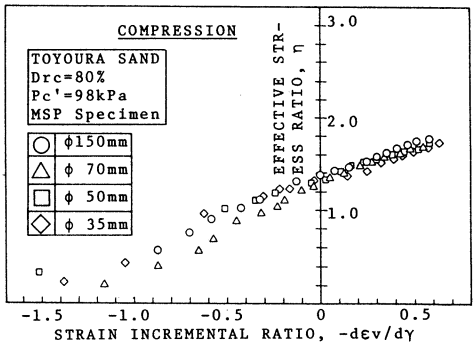
図－2　応力―ひずみ―ダイレイタンシー関係（その1）



図－3　せん断抵抗角と相対密度の関係



図－4　破壊時軸ひずみと相対密度の関係



図－5　応力比とひずみ増分比の関係（その1）

イタンシー挙動についてもϕ150mm供試体においてせん断初期の体積収縮傾向がϕ70mm以下の供試体に比べて幾分顕著であるのを除き，他は等しい傾向にある。

図―3は，せん断抵抗角と相対密度の関係を各供試体径で比較したものである。図から，三軸圧縮応力条件ではϕ150mm供試体とϕ70，50，35mm供試体とで各々直線関係が満足されている。三軸圧縮応力条件でせん断抵抗角は，ϕ70～35mmの間では相対密度が変化しても，全く供試体径に影響されないと言えそうである。ϕ150mm供試体のせん断抵抗角は相対密度にかかわらず他の小径の供試体に比べ大きくなり，その差は供試体が密なる場合で約1度であり，相対密度が低くなるとその差が広がる傾向にある。

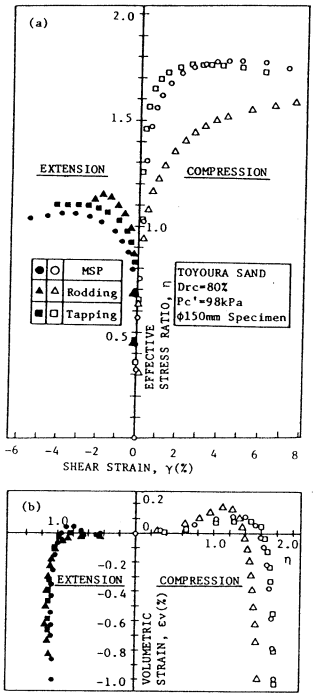
図―4は，破壊時の変形状態を知るために，破壊時の軸ひずみと相対密度の関係を各供試体径で比較したものである。破壊時の軸ひずみは多少のバラツキはあるものの，供試体径による顕著

な影響はみられず，密度の低いところでは軸ひずみが大きくなるが，相対密度70％以上では破壊時の軸ひずみは4 ±0.5％の範囲内で一定している。

図―5は，三軸圧縮応力条件における応力比－ひずみ増分比関係を各供試体径で比較したものである。両者の関係は供試体径にかかわらず直線関係で近似できるようである。この結果は粒状体試料特有の関係であり，応力比－ひずみ増分比関係には供試体径の影響は見られない。

4―2　三軸せん断挙動に及ぼす供試体作製法の影響

図―6(a)，(b)はϕ150mm供試体をMSP法，Rodding法，Tapping法により作製した時の応力－ひずみ－ダイレイタンシー関係を三軸圧縮・伸張応力条件について示したものである。各供試体作製法で応力－ひずみ挙動には明らかな差異が認められる。すなわち，最大主応力σ_1'が三軸供試体の軸方向となる三軸圧縮応力条件で，Rodding供試体が他の二方法で作製した供試体に比べ著しく変形し易い挙動を示している。これに対し，σ_1'が供試体の半径方向となる三軸伸張応力条件ではMSP，Tapping，Rodding供試体の順で変形し易くなっている。ダイレイタンシー挙動については，三軸圧縮応力条件でせん断初期の体積収縮傾向が，Rodding供試体で顕著であるのに対し，三軸伸張応力条件ではRodding，Tapping供試体の体積収縮傾向は認められない。Rodding供試体とMSP供試体における応力－ひずみ－ダイレイタンシー特性の差異が最も顕著であることが認められる。これは先に述べた三軸供試体の構造特性の相違に起因しているものと考えられ，MSP供試体は砂粒子の水平方向への卓越配列特性のため，その挙動は鉛直方向では圧縮しずらく膨張しやすい，逆に水平方向に圧縮しやすく膨張しずらいという異方的な力学特性を示している。



図―6　応力―ひずみ―ダイレイタンシー関係（その2）

表―1は，各供試体作製法におけるせん断抵抗角とせん断中の最大体積収縮ひずみの値を示している。せん断抵抗角においても三軸圧縮・伸張応力条件で明らかに供試体作製法の影響がみられる。三軸圧縮応力条件においてせん断抵抗角はMSP供試体，Tapping供試体，Rodding供試体の順で大きくなっているが，三軸伸張応力条件ではその逆の傾向を示している。三軸圧縮応力条件ではその応力－ひずみ関係，せん断抵抗角，最大体積収縮ひずみからMSP供試体および

表－1　最大体積収縮ひずみとせん断抵抗角

Method of Preparation	Compression		Extension	
	ε_{vmax}(%)	ϕ_d(deg.)	ε_{vmax}(%)	ϕ_d(deg.)
MSP	0.12	43.4	0.05	40.2
Rodding	0.17	39.4	——	45.4
Tapping	0.09	43.0	——	43.2

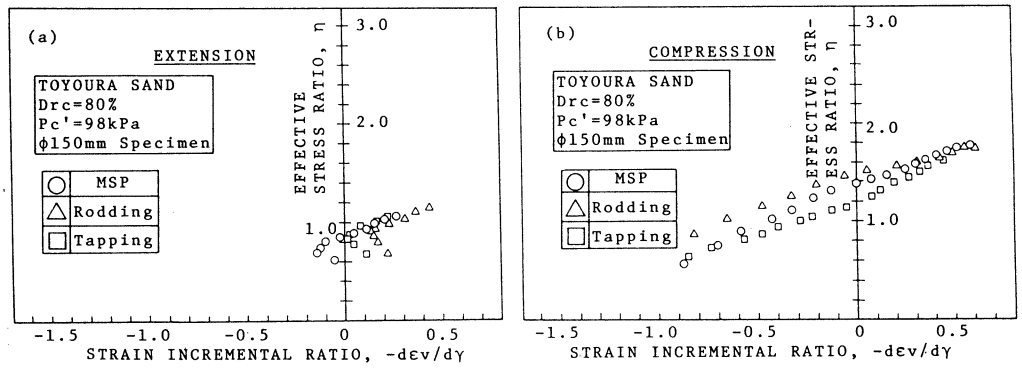
表－2　φ50，150mm 供試体におけるせん断抵抗角

	$\frac{\phi d(Rodding)}{\phi d(MSP)}$		$\frac{\phi d(Tapping)}{\phi d(MSP)}$	
	φ50mm	φ150mm	φ50mm	φ150mm
Compression	0.950	0.908	0.975	0.991
Extension	1.108	1.129	1.027	1.075

Tapping 供試体が安定した構造を有していると考えられる。三軸伸張応力条件では Rodding 供試体，Tapping 供試体，MSP 供試体の順に安定した構造を有していると思われる。

表－2は，Rodding 供試体，Tapping 供試体のせん断抵抗角を MSP 供試体のせん断抵抗角で除して正規化した値を供試体径φ150mmとφ50mm[4]で比較したものである。相対密度はφ150mm供試体で80%，φ50mm供試体で55%である。相対密度に差はあるが供試体径によらず Rodding，Tapping 供試体のせん断抵抗角は，三軸圧縮応力条件で MSP 供試体より小さく，三軸伸張応力条件で大きくなる傾向にあり，この傾向は Rodding供試体においてより顕著である。また，供試体径が大きくなる程その差は顕著であり，φ150mm供試体ではφ50mm供試体に比べ2～5%程度影響大となっている。

図－7(a)，(b)は三軸圧縮・伸張応力条件における各々の応力比－ひずみ増分比関係を各供試体作製法で比較したものである。三軸圧縮応力条件でその関係は直線で近似できそうであるが，せん断初期にバラツキが大きい。しかしながら，破壊に近い状態ではひずみ増分比はほぼ等しい値となっている。三軸伸張応力条件においてもせん断初期の関係は Rodding 供試体，Tapping 供試体，MSP 供試体の順に右に移動しているが，ある程度の応力比に至ると線形関係を満足している。



図－7　応力比とひずみ増分比の関係（その2）

5．中型三軸試験における弾塑性応力－ひずみ関係

三浦ら[4)]は自然砂地盤が二軸直交異方性体としてモデル化が可能であることを示した。また，砂粒子を落下させて再構成するMSP法を適用することによって，自然堆積砂地盤の粒子配列構造とその異方的な力学挙動を再現できる可能性を示した後，三主応力条件下にある二軸直交異方性砂の変形挙動を考察し，弾塑性応力－ひずみ関係式を誘導している。今回，MSP供試体による供試体径の影響を検討した結果，砂の応力－ひずみ－ダイレイタンシー関係についてその差が顕著でないことから，今まで軸対称条件においては小型供試体の試験結果に対して検証されてきた提案式をφ150㎜供試体の試験結果に対して検証した。また，提案されている弾塑性応力－ひずみ関係は，軸対称条件下では適切な硬化関数を選択することにより，供試体構造によらないものであるとの判断から，他の供試体作製法（Rodding法）についても検討した。

弾塑性応力－ひずみ関係式においてその基本式は

$$d\varepsilon_{ij} = h\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}df \quad (i,\ j=1,\ 2,\ 3) \tag{8}$$

ここで，f，g，hはそれぞれ降伏関数，塑性ポテンシャル関数，硬化関数である。

降伏関数fは三軸平面において原点を通る直線で近似できるとして次式によって規定されている。

$$f = \eta\,(=q/p') \tag{9}$$

塑性ポテンシャル関数gはせん断初期に生ずる負のダイレンタンシー特性を表現するために次のように求められている。

$$g = \eta + \frac{Cd\cdot m}{1-Cd}\left(1-p'^{Cd-1}\right) \quad (Cd \neq 1) \tag{10}$$

$$g = \eta + m\ln p' \quad (Cd=1) \tag{11}$$

ここで，Cd，mはそれぞれ応力比η－ひずみ増分比$d\varepsilon_v/d\gamma$関係（図―5，図―7参照）を表す直線の勾配の逆数，切片値であり構造に依存しないとされている。

硬化関係hは式(9)，(10)（または(11)）を式(8)に代入して得られるひずみ増分をせん断ひずみ増分の定義式

$$d\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2}\left\{(d\varepsilon_x - d\varepsilon_y)^2 + (d\varepsilon_y - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_x)^2\right\}^{1/2} \tag{12}$$

に代入して次の関係が与えられている。

$$h=p'\cdot(d\gamma/d\eta) \tag{13}$$

この硬化関数 h は塑性ひずみ仕事の関数で定式化され次式の関係で与えられている。

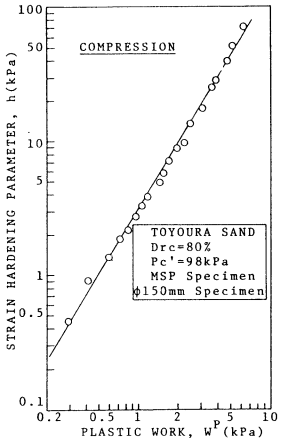
$$h=A\ (W^p)^B \tag{14}$$

ここで W^p は塑性変形中になされる仕事量であり次式で計算されている。

$$W^p=W_I^p+\int Cd\cdot m\cdot p'\cdot d\gamma \tag{15}$$

ただし，

$$W_I^p=\frac{l-n}{l+1}k\left(\frac{p_c'}{p_k'}\right)^l\cdot p_c' \tag{16}$$



図－8　硬化関数と塑性仕事の関係

表－3　MSP，Rodding 供試体の土質パラメータ

	Cd·m	m	A(kPa)	B	W_I^P(kPa)
MSP	1.52	1.38	3.00	1.60	0.700
Rodding			3.00	1.50	

W_I^P は等方圧密過程でなされる塑性ひずみ仕事量であって，k，l，n の値はすべて等方圧密膨張試験による $\log\varepsilon_v$～$\log p'$ の直線関係から決定され，l，n はそれぞれ載荷，除荷曲線の勾配，k は圧密圧力 $p'=p_x'$ における体積ひずみである。W_I^P の値は構造に依存しないことが示されており，今回 $W_I^P=0.07$ kPa として用いている。また，A，B はそれぞれ硬化関係 h を塑性ひずみ仕事 W^p の巾関数として定式化する時の定数であり，図―8 に一例として MSP 供試体における $\log h$～$\log W^p$ 関係を示す。

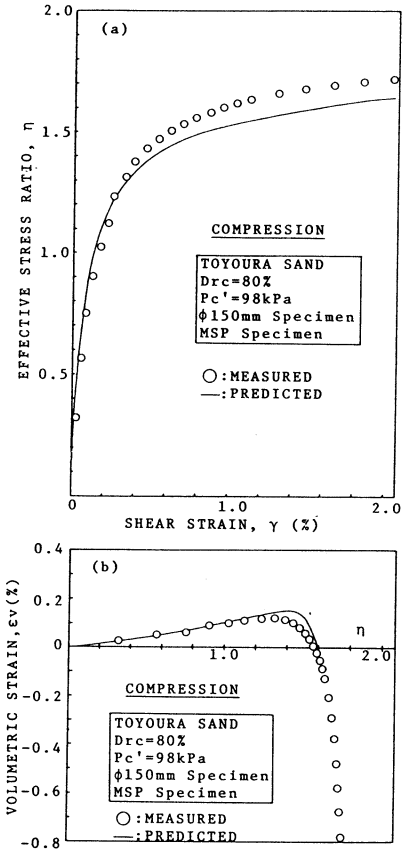
このように決定した定数を MSP 供試体と Rodding 供試体の場合について表―3 に示す。

以上から求められる軸対称条件下の応力－ひずみ関係式を以下に示す。

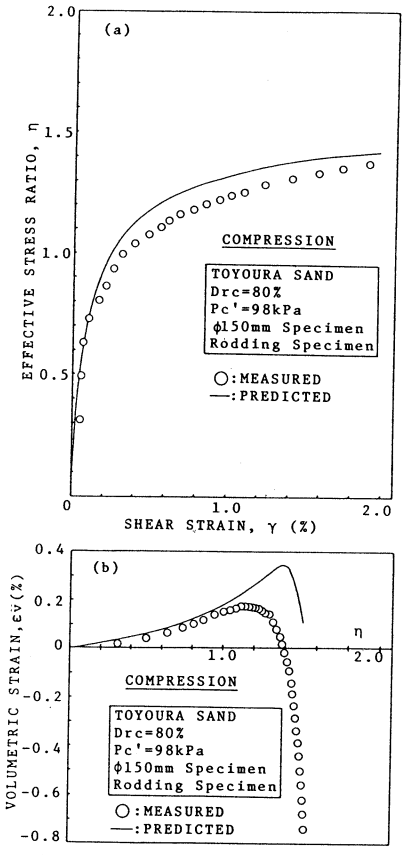
$$d\varepsilon_a=A(W^P)^B\cdot\frac{1}{3p'}\left\{3+(Cd\cdot m)\cdot\left(1-\frac{\eta}{m_c}\right)\right\}d\eta \tag{17}$$

$$d\varepsilon_v=A(W^P)^B\cdot\frac{1}{p'}(Cd\cdot m)\left(1-\frac{\eta}{m_c}\right)d\eta \tag{18}$$

図―9(a)，(b)と図―10(a)，(b)にそれぞれ MSD 供試体と Rodding 供試体の応力－ひずみ－ダイレイタンシー関係を実測値と予測値で比較したものを示す。MSP 供試体において，その予測値は実測値の変形特性を良く説明しているようである。Rodding 供試体においてはそのダイレイタンシー特性において，初期の体積収縮傾向（負のダイレイタンシー）を予測値において過剰に評価する傾向にあるが，定性的には Rodding 供試体が MSP 供試体よりも負のダイレイタンシーが著



図－9　予測値と測定値の比較（MSP）



図－10　予測値と測定値の比較（Rodding）

しくなる事実を説明できるようである。

6．あとがき

φ150mm供試体の中型三軸試験装置により供試体の直径および構造が強度・変形特性に与える影響について基礎的実験を行った。それとともに，中型三軸試験の弾塑性応力—ひずみ関係について調べた。得られた結果を以下に要約する。

(1)　供試体径がφ35～70mmの間ではそのせん断挙動に差はない。しかしながら，φ150mm供試体では他の小径の供試体に比べ応力－ひずみ－ダイレイタンシー関係に若干の差異が認められ，せん断抵抗角においては相対密度にかかわらず確実に1度の差がある。

(2)　せん断挙動に及ぼす構造の影響は大きく，その影響は供試体径が大きくなるほど顕著とな

ると推察される。

(3) すでに誘導されている弾塑性応力－ひずみ関係式[4]で，軸対称条件下のφ150mm供試体の三軸試験結果をほぼ説明できそうである。

最後に本研究の実施に際し日頃からご指導いただいている本学三浦清一助教授，実験およびデータ整理に協力を得た長内隆彦（現大林道路），須田伸次（現大成道路）各君に記して謝意を表します。

参考文献

1）後藤・龍岡・本山：砂の三軸圧縮強度の寸法効果について，第20回土質工学研究発表会講演集，pp. 355-358，1985

2）後藤・龍岡・井口：三軸供試体の寸法および境界条件が粗粒材の静的変形強度特性に与える影響，粗粒材の強度変形特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 1-8，1986

3）後藤，龍岡，井口：砂の三軸圧縮強度の寸法効果，第41回土木学会年次講習会，pp. 267-268，1986

4）S. Miura ： Study on the stress-strain-strength anisotropy of saturated sand, Dr. thesis, Hokkaido University, 1984.

5）S. Miura and S. Toki ： A sample preparation methed and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand, Soils and Foundations, vol. 22, No. 1, pp. 61–77, 1982

6）S. Miura and S. Toki ： Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits, Soils and Faundations, vol. 24, No. 3, pp. 69–84, 1984.

7）山下，土岐，三浦：低圧力下における飽和砂の変形特性，第40回土木学会年次講演習，pp. 445-446，1985