

# 礫の微小ひずみレベルでの変形特性 II

## ——単調載荷試験での測定——

Deformation Characteristics of Gravels at Small Strain Levels II  
——monotonic loading tests——

孔 憲 京\*・龍 岡 文 夫\*\*・澁 谷 啓\*\*

佐 藤 剛 司\*\*・田 村 重 四 郎\*\*\*

Xian Jing KONG, Fumio TATSUOKA, Satoru SHIBUYA

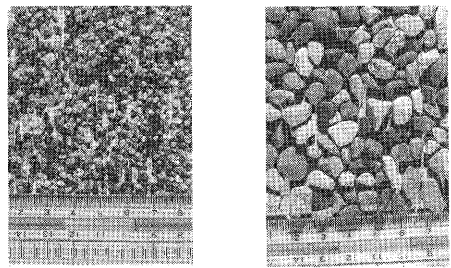
Takeshi SATO and Choshiro TAMURA

### 1. は じ め に

前報（龍岡ら，1989）で紹介した微小ひずみレベルでの変形特性と強度値を測定できる三軸圧縮試験機を用いて、礫の単調載荷試験による広範囲のひずみ範囲での変形特性と強度特性を測定した。

### 2. 試験材料・供試体作製法・試験条件

粒径が丸く貧配合であり、粒径が約3.6倍異なる二種類の礫の空気乾燥試料を用いた（図1，表1，写真1参照）。姫礫では小型供試体と大型供試体を作製し、磯美礫では大型供試体だけを作製した。姫礫の供試体の一様性と再現性が良い多重ふるいを用いた空中落下法で作製した（図2，写真2，後藤，1986）。磯美礫の場合は手から



(a) 姫礫

(b) 磯美礫

写真1

表1 礫の物理常数

試料	比重 G <sub>s</sub>	平均粒径 D <sub>50</sub> (mm)	均等係数 U <sub>o</sub>	最大/最小間隙比 e <sub>max</sub> /e <sub>min</sub>
姫 礫	2.65	1.85	1.33	0.633/0.514
磯美礫	2.67	6.65	1.21	0.676/0.490

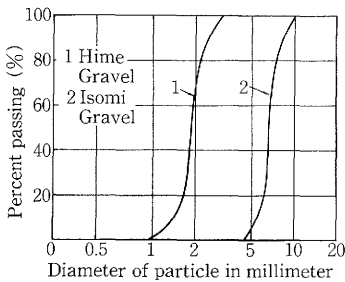


図1 礫の粒径加積曲線

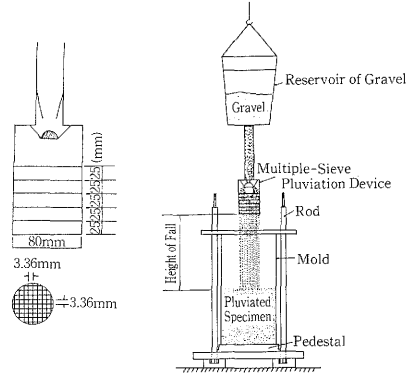
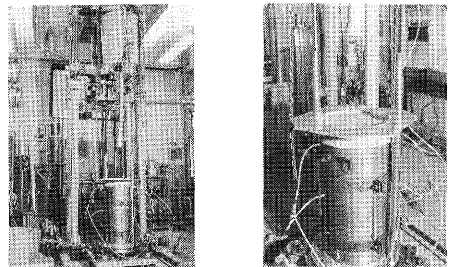


図2 大型供試体用の多重ふるい



(a)

(b)

写真2 大型供試体の作製

\*中華人民共和国大連理工大学 (元博士研究員)

\*\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*\*東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報

表2 実験条件

試料	供試体寸法 <sup>1)</sup> D/H (cm)	供試体	間隙比 <sup>2)</sup> $e_{0.1}$	有効拘束圧 kgf/cm <sup>2</sup>	載荷方法
姫礫	7.5/15	S3-29A	0.579	0.3	単調
	7.5/15	S3-27	0.516	0.3	単調
	7.5/15	S3-28B	0.579	0.5	単調
	7.5/15	S4-15	0.519	0.5	単調
	7.5/15	S3-29B	0.577	0.8	単調
	7.5/15	S3-23	0.518	0.8	単調
	7.5/15	G4-2	0.511	0.3	繰り返し
	7.5/15	G4-3	0.587	0.3	繰り返し
	7.5/15	G3-30	0.577	0.5	繰り返し
	7.5/15	G4-1	0.509	0.5	繰り返し
	7.5/15	G4-6	0.574	0.8	繰り返し
	7.5/15	G4-5	0.509	0.8	繰り返し
磯美礫	30/60	S4-14	0.548	0.5	単調
	30/60	S4-28	0.545	0.5	単調
姫美礫	30/60	S5-2	0.540	0.5	単調
	30/60	G5-6	0.548	0.5	繰り返し
姫礫	30/60	G5-8	0.549	0.5	繰り返し

☆備考

- 1) D: 供試体直径 H: 供試体高さ
- 2) 有効拘束圧0.1kgf/cm<sup>2</sup>の時に測定した供試体の初期間隙比

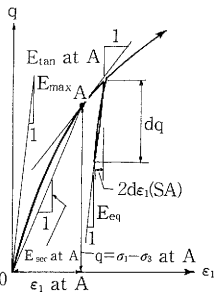


図3 E<sub>sec</sub>, E<sub>tan</sub>, E<sub>eq</sub>の定義

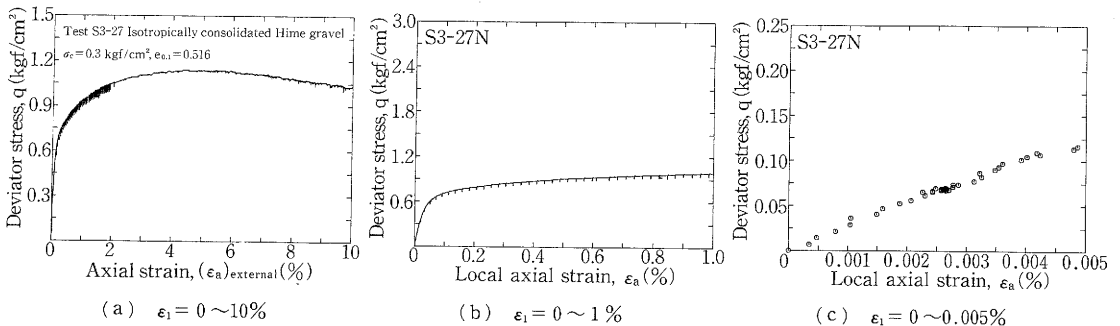


図4 典型的 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \epsilon_1$ 関係 (小型供試体)

落下させた。

表2に示すように、姫礫の単調載荷試験は小型供試体では①二種類の密度(間隙比 $e=0.52$ 程度,  $0.58$ 程度)と②三種類の拘束圧( $\sigma_3=0.3, 0.5, 0.8$ kgf/cm<sup>2</sup>)で、大型供試体では①一種類の密度(間隙比 $e=0.52$ 程度)と②一種類の拘束圧( $\sigma_3=0.5$ kgf/cm<sup>2</sup>)で行った。

等方圧密した供試体を側圧一定で軸荷重を単調増加した。ただし、微小ひずみ振幅に対する変形係数に対する応力比 $\sigma_1/\sigma_3$ の影響を調べるために、図4、5に例示するように載荷の途中で微小繰返し載荷を何回も繰返した。なお、載荷中の負圧は常に測定し、その値を結果の解析に用いた。

3. ひずみと変形係数の定義 (図3)

- (1) 単調載荷試験での割線変形係数 (Secant modulus):

$$E_{sec} = q/\epsilon_1 \quad (1)$$

ここで、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 、 $\epsilon_1$ は載荷開始から所定の時点(図3で点A)での偏差応力と軸ひずみである。なお、微小ひずみでの $E_{sec}$ の測定精度は $\epsilon_1 = 0$ を定義する載荷原点での $q$ の値の測定精度に大きく支配される。したがって、原点での実際の必ずしもゼロではない値 $q_0$ を用いて次式で $E_{sec}$ の値を厳密に求めた。

$$E_{sec} = (q - q_0)/\epsilon_1 \quad (2)$$

- (2) 単調載荷試験での接線変形係数 (Tangent modulus):

$$E_{tan} = dq/d\epsilon_1 \quad (3)$$

ここで、 $dq$ と $d\epsilon_1$ は各載荷時点での微小増分を表す。

- (3) 繰り返し履歴曲線に対する等価変形係数 (Equivalent modulus):

$$E_{eq} = dq/\{2d\epsilon_1(SA)\} \quad (4)$$

ここで、 $dq$ はピーク間の偏差応力の全振幅、 $d\epsilon_1(SA)$ は軸ひずみ片振幅である。

なお今回の研究でのひずみレベルは小さいので、メン

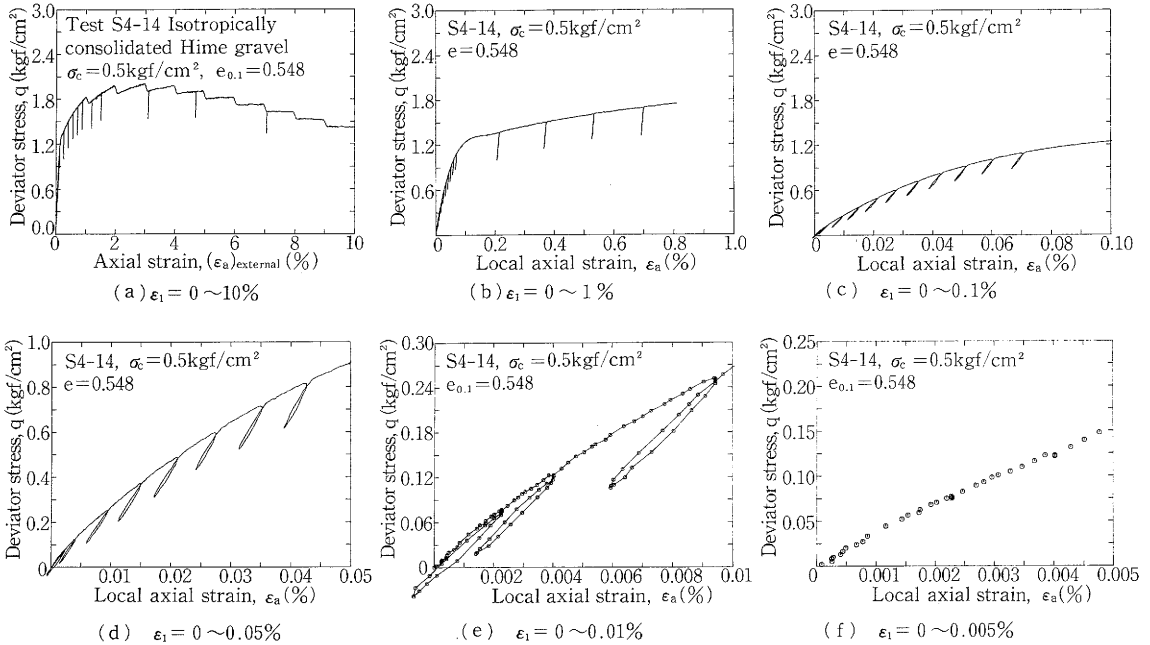


図5 典型的 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \epsilon_1$ 関係 (大型供試体)

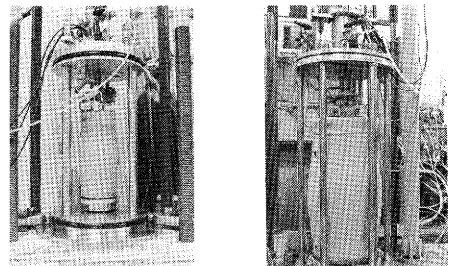
ブレン力に対する応力補正は不必要であることがわかった。また、今回の試験では載荷中の供試体の体積変化は測定していないが、断面積変化と応力計算の精度を確保するためにかなり高い推定精度が必要である。そこで、Rowe (1962) のStress-dilatancy関係：

$$\sigma_1 / \sigma_3 = -K \cdot d\epsilon_3 / d\epsilon_1 \quad (5)$$

を用いて、せん断中に各段階での $\sigma_1 / \sigma_3$ と $\epsilon_1$ の微小変化 $d\epsilon_1$ の測定値から $d\epsilon_3$ を推定した。これを何回も繰り返して $\sigma_1 / \sigma_3 \sim \epsilon_1$ 関係を求めた。ここで、Kの値として後藤(1988)による実測値2.5を用いた。

#### 4. 単調載荷試験の典型的実験結果

図4, 5に典型的結果を異なったひずみレベルごとに示す。大型供試体では、ピークに近づくといわゆるStick slip的現象があらわれる。このような現象は、大粒径の供試体の低い拘束圧の試験で現れることが知られている。これは、供試体内の大きなすべり面の発生と消滅に関連しているのであろう。なぜ小型供試体ではこの現象が現れずに大型供試体だけに現れたのかその理由ははっきりしない。おそらく、小型供試体では供試体上下端面の摩擦による供試体の変形に対する拘束が大きく、そのためすべり層が自由に発生しにくい。大型供試体では供試体が大きいので、供試体中央部でのすべり層の発生に対する端面摩擦の拘束の程度が小さいためすべり面がより自由に発生するためである可能性がある (写真3)。



(a) 小型供試体 (b) 大型供試体  
写真3 破壊後の供試体

これらの図から次のことがわかる。

- (1) 約 $2 \times 10^{-5}$ 以下の軸ひずみでは応力・ひずみ関係はかなり線形であり、ほぼ $E_{sec} = E_{tan}$ と言える (図4 c, 図5 e, f)。また、図5 (e)に示す載荷開始直後の繰り返し載荷での応力・ひずみ関係からわかるように、載荷開始直後では繰り返し載荷時の $E_{eq}$ はほぼ $E_{sec} = E_{tan}$ と一致する。したがって、単調載荷試験の載荷開始直後では礫はかなり線形弾性体的であり繰り返し載荷の影響がなく、 $E_{sec} = E_{tan} = E_{eq} = E_{max}$ である。このことは、すでにHardin (1978), Jardine and Hight (1987)によって示唆されているが、このような明確なデータは示されていない。また、この $E_{max}$ は弾性波探査で求まる弾性変形係数Eと一致すると考えて良い。

なお、この弾性限界のひずみレベル $2 \times 10^{-5}$ はやや便

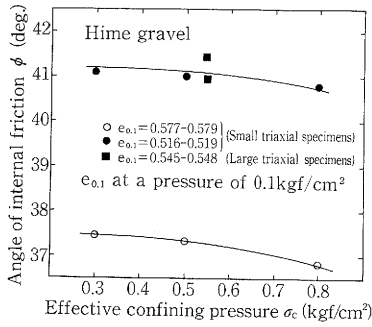


図6 姫礫の内部摩擦角 $\phi$ ~拘束圧 $\sigma_c$ 関係

表3 実験結果のまとめ

供試体	有効拘束圧 kgf/cm <sup>2</sup>	間隙比 <sup>1)</sup> e <sub>0.1</sub>	( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) <sup>2)</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	$\phi$ deg.	E <sub>max</sub> <sup>3)</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_r$ <sup>4)</sup> ×10 <sup>-4</sup>
S3-23	0.8	0.518	3.02	40.8	4560	6.62
S3-29B	0.8	0.577	2.39	36.8	4300	5.56
S3-29A	0.3	0.579	0.93	37.4	2350	3.96
S3-27	0.3	0.516	1.15	41.1	2900	3.97
S3-28B	0.5	0.579	1.54	37.3	3000	4.67
S4-15	0.5	0.519	1.90	41.0	3600	5.27
S4-14	0.5	0.548	1.96	41.5	3540	5.54
S4-28	0.5	0.545	1.90	40.9	3600	5.28
S5-2	0.5	0.540	2.28	44.1	3700	6.16

☆ 備考

- 1) 有効拘束圧0.1kgf/cm<sup>2</sup>の時に測定した供試体の初期間隙比
- 2) ピーク時の偏差応力
- 3) 初期 (=最大) ヤング係数
- 4) 偏差応力と軸ひずみ関係の双曲線近似に用いた基準軸ひずみ  
{=( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>i</sub>/E<sub>max</sub>}

宜的な値であり、これ以下のひずみレベルでの測定精度を向上させることにより、この値をより正確に求めることができると思われる。

(2) ひずみが弾性限界を越えると明確に非線形な応力・ひずみ関係になる。したがって、10<sup>-4</sup> (0.01%) の測定精度では弾性域から非線形領域に移る過程をとらえることはできない。

図6に内部摩擦角 $\phi = \arcsin\{(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)\}_{\max}$ と拘束圧の関係を示す(表3参照)。今回の実験結果では、同一の間隙比に対して大型供試体の $\phi$ のほうが小型供試体よりやや大きいことがわかる。Hardin (1989)は、「通常測定された間隙比は、供試体周辺の余分な空隙を含んでいて過大評価されており、この誤差は供試体が小さいほど大きい」と指摘している。この誤差を考慮すると供試体が大きいほど $\phi$ が大きくなる傾向はさらに大きくなる。この傾向は豊浦砂でも認められている(後藤, 1986)。しかし、この理由ははっきりしない。なお、同一間隙比に対しての $\phi$ は磯美礫のほうが姫礫より大きい。

### 5. あとがき

単調載荷三軸圧縮試験で得られる貧配合の礫の典型的応力・ひずみ関係の詳細を示した。その結果、 $2 \times 10^{-5}$ 以下の軸ひずみでは応力・ひずみ関係は線形弾性体的であり繰り返し載荷の影響がないと言える。すなわち、 $10^{-5}$ 以下のひずみレベルでの応力・ひずみ関係を正確に測定できれば、単調載荷試験によって弾性係数が測定できると言える。

次回では、 $\alpha$ 各種変形係数のひずみ依存性の解析結果を紹介する。  
(1989年8月9日受理)

### 参考文献

- 1) 後藤 聡 (1986) : Strength and deformation characteristics of granular materials in triaxial tests, Dr. Engrg. Thesis, Univ. of Tokyo.
- 2) Hardin, B.O. (1978): The nature of stress strain behavior for soils, Proc. of ASCE Geotechnical Engrng, Div., Specialty Conference, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, pp. 3-90.
- 3) Jardine, R.J. and Hight, D.W. (1987): Chapter 4, Laboratory and field techniques for obtaining design parameters, pp. 264-265, EMBANKMENTS ON SOFT CLAYS, Eptalofos S.A., Athens-Greece.
- 4) Rowe, P.W. (1962): The stress-dilatancy relations for static equilibrium of an assembly of particles in contact, Proc. Royal Society, Vol. 269, Series, A, London, pp. 500-527.
- 5) 龍岡文夫・後藤 聡・澁谷 啓・佐藤剛司・孔 憲京 (1989) : 礫の微小ひずみレベルでの変形特性 I - 実験システムの開発一, 生産研究, Vol. 41, No. 10, pp. 792~795.
- 6) Hardin, B.O. (1989): Effect of rigid boundaries on Measurement of particle concentration, Geotechnical Testing Journal, 12-2, June, pp. 143-149.