

表録

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

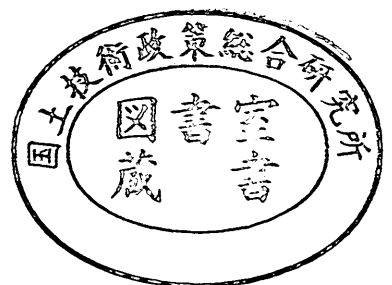
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 10

NO. 1

MAR. 1971

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第10巻 第1号 (Vol. 10, No. 1), 1971年3月 (Mar. 1971)

目 次 (CONTENTS)

1. An Experimental Study of the Turbulent Structure of Wind over Water WavesHajime KATO, Kikuo SANO..... 3
(水面波上の風の乱流構造に関する実験的研究.....加藤 始・佐野喜久雄)
2. 波浪データの集中処理方式について高橋智晴・鈴木禮実・佐々木 弘
副島 毅・菅原一晃・中井徹也..... 43
(On a Concentrative Handling and Analysis System for Wave Observation DataTomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI and Takeshi SOEJIMA, Kazuteru SUGAHARA, Tetsuya NAKAI)
3. 粘土試料のかく乱に関する研究 (第3報)
—単純せん断試験機による繰り返し破壊試験および圧密試験—
.....奥村樹郎・梅田裕史・成田 実..... 77
Studies on the Disturbance of Clay Samples (3rd Reports)
—Repeated Loading Tests and Consolidation Tests with a Simple Shear Apparatus—
.....Tatsuro OKUMURA, and Hirofumi UMEAD, Minoru NARITA)
4. 数値解による杭の横抵抗の基準曲線の作成山下生比古・稲富隆昌・小蔵紘一郎・奥山育英.....107
(New Standard Curves in the PHRI MethodIkuhiko YAMASHITA, Takamasa INATOMI, Koichiro OGURA and Yasuhide OKUYAMA)
5. 掘削時における砂の応力—ひずみ関係の一考察岩崎峯夫・麻山和正・石塚浩次・河野 茂.....169
(Study on the Stress-strain relationship of soils under excavationMineo IWASAKI, Kazumasa ASAYAMA, Kozi ISHIZUKA and Sigeru KONO)

5. 掘削時における砂の応力—ひずみ関係の一考察

岩崎峯夫*・麻山和正**・石塚浩次*・河野茂*

要 旨

近年、有限要素法が連続体の応力ひずみ解析に用いられるようになってきた。この方法を土の掘削問題に応用するためには、第一段階として、土、砂の応力—ひずみ関係の一般的表現（弾塑性非線形応力—ひずみマトリックス）を求める必要がある。本報告では非線形弾塑性論を粘性のない砂の3軸試験に適用し、等方性、2軸直交異方性（面内等方性）応力—ひずみ挙動を挙動とするとして、弾塑性非線形応力—ひずみマトリックスを求めた。これらを求めるために等方圧縮試験、平均応力一定試験を行なった。さらにこれらの応力の合成された応力状態の代表として側圧一定試験を行ない、この応力—ひずみマトリックスから計算した値と比較した。この結果比較的よい一致を示した。ここでは、砂はせん断力による塑性変形のために等方性限度があり、これを越えて破壊に近づくときせん断弾塑性変形係数が非線形となり、同時に異方性を示すと考えた。ダイレイタンスはこの異方性により説明、計算をした。

また、このマトリックスにより等方性限度内では無条件の、等方性限度外では $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ または $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ の条件で任意の応力—ひずみ入力を与えてその場合の応力—ひずみ挙動を計算で求めることができ、弾塑性論に必要な弾性定数をも求めることができるであろうと思われる。なお、このマトリックスの表現には体積弾塑性変形、せん断弾塑性変形係数を用いている。

* 検材部 作業船研究室

** 検材部 作業船研究室長

Study on the stress-strain relationship of a cohesionless soil under excavation

Mineo IWASAKI*

Kazumasa ASAYAMA**

Kozi ISHIZUKA*

Sigeru KONO*

Synopsis

In order to apply finite-element analysis to a soil, the stress-strain relationship of the soil element is required. The relationship is described by a matrix which is composed of elastic and plastic deformation moduli. The moduli are a function of the state of the soil element. The matrix shows a relationship between stress increment and strain increment and should be general to be applicable to any stress path. The paper describes the stress-strain behavior of a cohesionless soil element whose state is isotropic or anisotropic. In the paper the matrix shows the stress-strain behavior of a cohesionless soil element under axial and symmetric any stress path. The matrix is obtained from isotropic consolidation tests and constant mean normal stress triaxial compression tests. Therefore the matrix is composed of the bulk moduli and the shear moduli. To check the propriety of the matrix constant cell pressure tests are performed and the behaviors of the test are calculated by the matrix. The results of the tests agree with thoes of the calculations.

In the result there is a limit of isotropy on the soil element, because of the plastic deformation caused by the shear stress. The property of the soil element is isotropic within the limit and becomes anisotropic beyond the limit. Dilatancy of a soil element causing by shear stress is explained by the anisotropic property and is calculated by that. The matrix must be applicable to axial and symmetric any stress path and to any stress path specially within the limit of isotropy.

* Member of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

** Chief of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	169
1. ま え が き	173
2. 砂の応力—ひずみ関係の理論的考察	173
2.1 等方性非線形の応力—ひずみ関係	174
2.2 2軸直交異方性非線形の応力—ひずみ関係	175
3. 各種3軸試験での応力—ひずみ関係の数学的表現	176
3.1 等方圧縮試験	176
3.2 平均応力一定試験	176
3.3 側圧一定3軸試験	176
3.4 平面ひずみ3軸試験	177
4. 応力—ひずみマトリックスの求め方とその実験結果	177
4.1 体積弾塑性変形係数と等方圧縮試験	177
4.2 せん断弾塑性変形係数と平均応力一定試験	178
4.3 側圧一定3軸試験	179
5. 理論計算値と実験値の比較と考察	180
5.1 計算値と実験値の比較	180
5.2 弾塑性マトリックス $[AN]$ の非線形性と異方性の関係	180
6. 結 論	181
7. あとがき	181
参考文献	181

1. まえがき

近年、有限要素法が連続体の応力ひずみ解析に用いられるようになってきた。当研究室はこの方法を土の掘削問題に応用するために、土の応力-ひずみ関係の一般的表現を求める研究を行なっている。土、砂においての複雑な応力-ひずみ挙動の表現はある応力-ひずみ入力での挙動を示し、他の応力-ひずみ入力での挙動との関連、任意の応力-ひずみ入力に対する挙動はほとんど今まで述べられてはいなかった。破壊に近い土、砂の応力状態は本報告での考えによれば一般的には3軸直交異方性と見なされるが、本報告では等方性と2軸直交異方性(面内等方性)となる応力状態での非線形応力-ひずみマトリックスを実験で求めこのマトリックスによる計算と実験値を比較した。

2. 砂の応力-ひずみ関係の理論的考察

砂に応力を加えていくと、ひずみの変化は直線ではなく非線形に変化する。すなわち、各時点での弾塑性変形係数は一定でなく変化する。この係数は接線係数をとることになり、しかもその係数はその時の応力-ひずみ状態により決まる。

ひずみに関しては応力の増分に対し弾性ひずみと塑性ひずみ増分に分かれる¹²⁾。

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1^e \\ d\varepsilon_2^e \\ d\varepsilon_3^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1^p \\ d\varepsilon_2^p \\ d\varepsilon_3^p \end{Bmatrix} = [AN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

また、応力ひずみの関係は次式となる。

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1^e \\ d\varepsilon_2^e \\ d\varepsilon_3^e \end{Bmatrix} = [EN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1^p \\ d\varepsilon_2^p \\ d\varepsilon_3^p \end{Bmatrix} = [PN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

[EN]マトリックスは応力と弾性ひずみの関係を表わすマトリックスで、このマトリックスの対称性はMaxwellの相反定理により証明される。他方塑性ひずみと応力の関係を示す[PN]マトリックスの対称性は保証されない。一般に[PN]マトリックスはある荷重経路での応力-ひずみ関係を示すにすぎない。しかし、ここでは砂について次のように仮定する。すなわち、応力-ひずみの関係は $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はすべて圧縮方向に加える間は応力径路に無関係である。言いかえると $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が決まれば $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の値がただ一組決まり塑性によりなされた塑性

仕事が一意性を示すと仮定する。以上の仮定をおくと[AN]マトリックスの対称性が保証され同時に[PN]マトリックスの対称性も保証される。ただし[AN]マトリックスは弾塑性ひずみ増分と応力増分の関係を示すマトリックスで次式で示される。

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_3 \end{Bmatrix} = [AN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} = [EN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} + [PN] \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[AN] = [EN] + [PN] \quad (2.4)$$

[AN]は弾塑性変形係数である。

砂に偏差応力を加えていくとある条件に達するとその砂は異方性を示すと考えられる。なぜなら、もし砂が等方性を保つと仮定するとせん断力によって生じる体積増加(ダイレイタンス)は説明できない。5.2で示すようにせん断力によって粒子がすべり、塑性変形を生じ体積増加を生じると仮定すると[PN]マトリックスは異方性を示すことになる。このすべり(せん断塑性変形)は偏差応力成分がある値に達すると生じると考えられる。この値に達する点を等方性限度とする。また、これはダイレイタンスを生じる限界値でもある。軸対称応力での粘土のダイレイタンスの研究^{8,9)}によれば $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m = \frac{\sqrt{2}}{3} \tau_{oct} / \sigma_m$ がある限界値 σ_c / σ_m に達するとダイレイタンスが生ずると考えられている。本報告では τ_{oct} / σ_m がある一定の値に達すると異方性となりダイレイタンスを生ずるとした。すでに等方性限度をこえた状態にある砂は2軸直交異方性か3軸直交異方性となっていると考えられる。本報告では軸対称応力について実験、計算を行なったので、等方性限度外では2軸直交異方性となっていると考えられる。また、平面ひずみの場合は $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ の条件となり等方性限度外では3軸直交異方性となると考えられる。

応力は流体圧成分と偏差成分 S_d に分けられる。流体圧成分は水圧のように作用する成分で平均応力である。これは体積の膨張、収縮のみを生じさせる成分であり次式で示される。

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.5)$$

偏差成分とは物体に角度変化を生じさせる成分で物体はこの偏差成分により破壊を生じる。偏差成分は次の項で示される。

$$(\sigma_1 - \sigma_m), (\sigma_2 - \sigma_m), (\sigma_3 - \sigma_m) \quad (2.6)$$

2.1 等方性非線形の応力—ひずみ関係

砂は塑性変形などのために非線形挙動をするので、応力—ひずみ関係を示すマトリックスは応力の増分とひずみの増分（弾性ひずみ増分+塑性ひずみ増分）間の線形定数で、このマトリックスの各要素はその時の応力、ひずみ状態の関数となる。これを式で示すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \{d\boldsymbol{\varepsilon}\} &= \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu \\ -\nu & \frac{1}{E} & -\nu \\ -\nu & -\nu & \frac{1}{E} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} \\ &= [AN] \{d\boldsymbol{\sigma}\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ただし、

$$E = f_1(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}), \quad \nu = f_2(\boldsymbol{\sigma}, E) \quad (2.8)$$

E, ν は塑性変形をも含んだ、見かけのヤング率と見かけのポアソン比となる。

$$\{d\boldsymbol{\varepsilon}\} = [AN] \{d\boldsymbol{\sigma}_m\} + [AN] \{dS_a\} \quad (2.9)$$

ただし

$$\{d\boldsymbol{\sigma}_m\} = \begin{Bmatrix} d\sigma_m \\ d\sigma_m \\ d\sigma_m \end{Bmatrix}, \quad \{dS_a\} = \begin{Bmatrix} d\sigma_1 - d\sigma_m \\ d\sigma_2 - d\sigma_m \\ d\sigma_3 - d\sigma_m \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

またこれらには次の関係がある。

$$\frac{\nu}{E} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}_m\} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\nu}{E} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \{dS_a\} = 0 \quad (2.12)$$

(2.9) 式に (2.11), (2.12) 式を加えると次の式を得る。

$$\begin{aligned} \{d\boldsymbol{\varepsilon}\} &= \begin{Bmatrix} \frac{1-2\nu}{E} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-2\nu}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{E} \end{Bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}_m\} \\ &+ \begin{Bmatrix} \frac{1+\nu}{E} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-\nu}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} \end{Bmatrix} \{dS_a\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{Bmatrix} \frac{1}{3K} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3K} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3K} \end{Bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}_m\} \\ &+ \begin{Bmatrix} \frac{1}{2G} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2G} \end{Bmatrix} \{dS_a\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

K は体積弾塑性変形係数, G はせん断弾塑性変形係数

$$\{d\boldsymbol{\sigma}_m\} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}\} \quad (2.14)$$

(2.13) 式に (2.14) 式を代入すると次式となる。

$$\{d\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{9K} + \frac{2}{6G} & \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} & \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} \\ \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} & \frac{1}{9K} + \frac{2}{6G} & \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} \\ \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} & \frac{1}{9K} - \frac{1}{6G} & \frac{1}{9K} + \frac{2}{6G} \end{Bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}\} \quad (2.15)$$

(2.15) 式が $[AN]$ マトリックスを K と G で示したものである。

平均応力増分により生ずるひずみ増分 $\{d\boldsymbol{\varepsilon}_m\}$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \{d\boldsymbol{\varepsilon}_m\} &= \begin{Bmatrix} d\varepsilon_m \\ d\varepsilon_m \\ d\varepsilon_m \end{Bmatrix} = \frac{1}{9K} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}\} \\ &= \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}_m\} \end{aligned} \quad (2.16)$$

偏差応力増分により生ずるひずみ $\{d\boldsymbol{\varepsilon}_a\}$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \{d\boldsymbol{\varepsilon}_a\} &= \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{a1} \\ d\varepsilon_{a2} \\ d\varepsilon_{a3} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6G} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \{d\boldsymbol{\sigma}\} \\ &= \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \{dS_a\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

平均応力増分による体積変化 dV_m は次式となる。

$$dV_m = d\varepsilon_m + d\varepsilon_m + d\varepsilon_m = 3d\varepsilon_m \quad (2.18)$$

偏差応力増分による体積変化 dV_a は次式となる。

$$dV_a = d\varepsilon_{a1} + d\varepsilon_{a2} + d\varepsilon_{a3} = 0 \quad (2.19)$$

結局、等方性の場合には dV_m は生じるが dV_a は生じな

い。また K, G と E, ν の関係は (2.13) 式から次式となる。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.20)$$

2.2 2軸直交異方性非線形の応力-ひずみ関係

ホルベック¹²⁾はせん断力が増加していくと、砂は異方性になり、軸対称応力の場合2軸直交異方性(面内等方性)になることを示している。本報告では等方性限度をこえた応力状態で異方性となると考え、 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ (軸対称応力)の条件下の2軸直交異方性について述べる。

この応力-ひずみマトリックスは次のようになる^{12, 4)}。
 E_1 は σ_1 方向, E_2 は σ_2, σ_3 方向の見かけのヤング率, ν_1 は $\sigma_1 \rightarrow \epsilon_3, \epsilon_3, \nu_2$ は $\sigma_2, \sigma_3 \rightarrow \epsilon_1, \nu_3$ は $\sigma_2 \rightarrow \epsilon_3, \sigma_3 \rightarrow \epsilon_2$ に影響するポアソン比。ここで見かけのヤング率としたのは塑性成分を含むからである。

$$\{de\} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_2}{E_2} & \frac{-\nu_2}{E_2} \\ \frac{-\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_3}{E_2} \\ \frac{-\nu_1}{E_1} & \frac{-\nu_3}{E_2} & \frac{1}{E_2} \end{pmatrix} \{d\sigma\} = [AN] \begin{Bmatrix} \sigma \\ m \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

ただし、マトリックスの対称性から次の関係がある。

$$\frac{\nu_1}{E_1} = \frac{\nu_2}{E_2} \quad (2.22)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{-2\nu_1}{E_1} & \frac{\nu_1}{E_1} & \frac{\nu_1}{E_1} \\ \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{-\nu_2-\nu_3}{E_2} & \frac{\nu_3}{E_2} \\ \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{\nu_3}{E_2} & \frac{-\nu_2-\nu_3}{E_2} \end{pmatrix} \{d\sigma_m\} = 0 \quad (2.23)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{\nu_2}{E_2} \\ \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{2\nu_2-\nu_3}{E_2} & \frac{\nu_3}{E_2} \\ \frac{\nu_2}{E_2} & \frac{\nu_3}{E_2} & \frac{2\nu_2-\nu_3}{E_2} \end{pmatrix} \{dS_d\} = 0 \quad (2.24)$$

(2.21) 式を (2.9) 式のように分解し (2.23), (2.24) 式を加えると次式となる。

$$\{de\} = \begin{pmatrix} \frac{1-2\nu_1}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-\nu_2-\nu_3}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu_2-\nu_3}{E_2} \end{pmatrix} \{d\sigma_m\}$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{1+\nu_1}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1+2\nu_2-\nu_3}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+2\nu_2-\nu_3}{E_2} \end{pmatrix} \{dS_d\}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{3K_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3K_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3K_2} \end{pmatrix} \{d\sigma_m\}$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{1}{2G_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2G_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2G_2} \end{pmatrix} \{dS_d\}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{9K_1} + \frac{2}{6G_1} & \frac{1}{9K_1} - \frac{1}{6G_1} & \frac{1}{9K_1} - \frac{1}{6G_1} \\ \frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2} & \frac{1}{9K_2} + \frac{2}{6G_2} & \frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2} \\ \frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2} & \frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2} & \frac{1}{9K_2} + \frac{2}{6G_2} \end{pmatrix} \{d\sigma\} \quad (2.25)$$

(2.25) 式が2軸直交異方性マトリックスを体積弾塑性変形係数, せん断弾塑性変形係数により示した式である。平均応力増分により生ずるひずみ増分 $\{de_m\}$ は次式となる。

$$\{de_m\} = \begin{pmatrix} d\epsilon_{m1} \\ d\epsilon_{m2} \\ d\epsilon_{m3} \end{pmatrix} = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} \frac{1}{K_1} & \frac{1}{K_1} & \frac{1}{K_1} \\ \frac{1}{K_2} & \frac{1}{K_2} & \frac{1}{K_2} \\ \frac{1}{K_2} & \frac{1}{K_2} & \frac{1}{K_2} \end{pmatrix} \{d\sigma\}$$

$$= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \frac{1}{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{K_2} \end{pmatrix} \{d\sigma_m\} \quad (2.26)$$

偏差応力増分により生ずるひずみ増分 $\{de_d\}$ は次式となる。

$$\{d\epsilon_a\} = \begin{Bmatrix} d\epsilon_{a1} \\ d\epsilon_{a2} \\ d\epsilon_{a3} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{Bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ G_1 & G_1 & G_1 \\ -1 & 2 & -1 \\ G_2 & G_2 & G_2 \\ -1 & -1 & 2 \\ G_2 & G_2 & G_2 \end{Bmatrix} \{d\sigma\}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \frac{1}{G_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ m \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

異方性では等方性と異なり次の関係がある。

$$d\epsilon_{m1} \neq d\epsilon_{m2} = d\epsilon_{m3} \quad (2.28)$$

等方性では平均応力増分 $d\sigma_m$ により各方向に生ずるひずみ増分を (2.29) 式で表わしていたが異方性ではこの考え方がなり立たず $d\epsilon_m$ は平均応力増分 $d\sigma_m$ により生ずるひずみ増分の単なる平均値となる。

$$d\epsilon_m = (d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3) / 3 \quad (2.29)$$

異方性では $d\epsilon_m$ は次の式で示される。

$$d\epsilon_m = \frac{d\epsilon_{m1} + d\epsilon_{m2} + d\epsilon_{m3}}{3} = \frac{dV_m}{3} \neq \frac{d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3}{3} \quad (2.30)$$

平均応力増分による体積変化 dV_m は次式となる。

$$dV_m = d\epsilon_{m1} + d\epsilon_{m2} + d\epsilon_{m3} = 3 d\epsilon_m \quad (2.31)$$

偏差応力増分による体積変化 dV_a は次式となる。

$$dV_a = d\epsilon_{a1} + d\epsilon_{a2} + d\epsilon_{a3} = \frac{2}{6} \left(\frac{1}{G_1} - \frac{1}{G_2} \right) \times (d\sigma_1 - d\sigma_2) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_1} - \frac{1}{G_2} \right) (d\sigma_1 - d\sigma_m) \quad (2.32)$$

異方性の場合、平均応力増分による体積変化 dV_m と偏差応力増分による体積変化 dV_a が生じる。このように砂が異方性を示すと考えると、せん断力(偏差応力)により生ずるダイレイタンスは dV_a と考えることができ、うまく説明できる。

また K_1, K_2, G_1, G_2 と $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ の関係は次式で示される。

$$K_1 = \frac{E_1}{3(1-2\nu_1)} \quad K_2 = \frac{E_2}{3(1-\nu_2-\nu_3)}$$

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+2\nu_1)} \quad G_2 = \frac{E_2}{2(1+\nu_2-\nu_3)} \quad (2.33)$$

異方性の場合 K_1, K_2, G_1, G_2 はその本来の性質から言うと、それぞれ平均応力増分、偏差応力増分がひずみに及ぼす影響係数と考える方が妥当と思われるが本報告で

は等方性の場合の関連により体積弾塑性変形係数、せん断弾塑性変形係数と称することにする。

3. 各種3軸試験での応力-ひずみ関係の数学的表現

線形の応力-ひずみ関係では連立線形方程式で示されるが、非線形では連立非線形微分方程式となる。またこれらの関係をもつ要素の集合体として計算する有限要素法も同様である。

3.1 等方圧縮試験

等方圧縮試験では偏差応力が存在せず異方性になったり破壊することはない。(2.16), (2.18) 式から次の微分方程式が求まる。

$$dV_m = \frac{1}{K} d\sigma_m \quad (3.1)$$

$$\text{ただし} \quad d\epsilon_1 = d\epsilon_2 = d\epsilon_3 = dV_m \quad (3.2)$$

$$d\sigma_1 = d\sigma_2 = d\sigma_3 = d\sigma_m \quad (3.3)$$

3.2 平均応力一定試験

試験初期にある平均応力を与え試験中は平均応力を一定に保つ試験でひずみ、応力増分は偏差成分のみ存在する。本報告での条件は次のようになる。

$$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3, \quad (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = \text{一定} \quad (3.4)$$

(2.27) 式から応力ひずみの関係は次の連立微分方程式で示される。

$$\{d\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2G_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2G_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2G_2} \end{Bmatrix} \{dS_a\} \quad (3.5)$$

等方性限度内では $G_1 = G_2$ である。また $d\sigma_m = 0$ であるので体積変化は dV_a だけで (2.32) 式から次式となる。

$$dV_a = \left(\frac{1}{2G_1} - \frac{1}{2G_2} \right) d\sigma_1 \quad (3.6)$$

dV_a をダイレイタンスと考える。

3.3 側圧一定3軸試験

側圧一定試験では $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3, d\sigma_2 = d\sigma_3 = 0$ の条件となり (2.25) 式に代入すると次式となる。

$$\{d\epsilon\} = \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\epsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{2}{6G_1} + \frac{1}{9K_1}\right)d\sigma_1 \\ \left(\frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2}\right)d\sigma_2 \\ \left(\frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2}\right)d\sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Ad\sigma_1 \\ Bd\sigma_2 \\ Bd\sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

ただし,

$$A = \left(\frac{2}{6G_1} + \frac{1}{9K_1}\right), \quad B = \left(\frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2}\right) \quad (3.8)$$

(3.7) 式をひずみ ϵ_1 を入力した連立微分方程式で示すと次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1} &= \frac{1}{A} \\ \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} &= \frac{d\epsilon_2}{d\sigma_1} \times \frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1} = \frac{B}{A} \\ \frac{d\epsilon_3}{d\epsilon_1} &= \frac{d\epsilon_3}{d\sigma_1} \times \frac{d\sigma_1}{d\epsilon_3} = \frac{B}{A} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

ただし等方性限度内では $K_1=K_2$, $G_1=G_2$ である。

3.4 平面ひずみ三軸試験

本報告では3軸直交異方性については求めていないので等方性限度内について考える。条件は $\epsilon_2=0$, $d\epsilon_2=0$ であるので (2.25) 式により次式の連立微分方程式が求まる。

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon_1 &= \left(\frac{1}{9K} + \frac{2}{6G}\right)d\sigma_1 + \left(\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G}\right)d\sigma_2 \\ 0 &= \left(\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G}\right)d\sigma_1 + \left(\frac{1}{9K} + \frac{2}{6G}\right)d\sigma_2 \\ d\epsilon_3 &= \left(\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G}\right)d\sigma_1 + \left(\frac{1}{9K} + \frac{2}{6G}\right)d\sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

4. 応力-ひずみマトリックスの求め方とその実験結果

4.1 体積弾塑性変形係数と等方圧縮試験

体積弾塑性変形係数 K を求めるために等方圧縮試験を行なった。試料は豊浦標準砂 (比重 2.664) である。結果を Fig. 4-1 に示す。この曲線は次式で近似した。

$$\epsilon_V = \frac{dV}{V} = a \cdot \sigma_m^{\frac{3}{4}} \quad (4.1)$$

したがって体積弾塑性変形係数は次式で示される。

$$K = \frac{4}{a} \sigma_m^{\frac{3}{4}} \quad (4.2)$$

実験の結果 a の値は次の値となった。

$$e_i = 0.664 \quad \text{で} \quad a = 1/51.0$$

$$e_i = 0.72 \quad \text{で} \quad a = 1/47.6$$

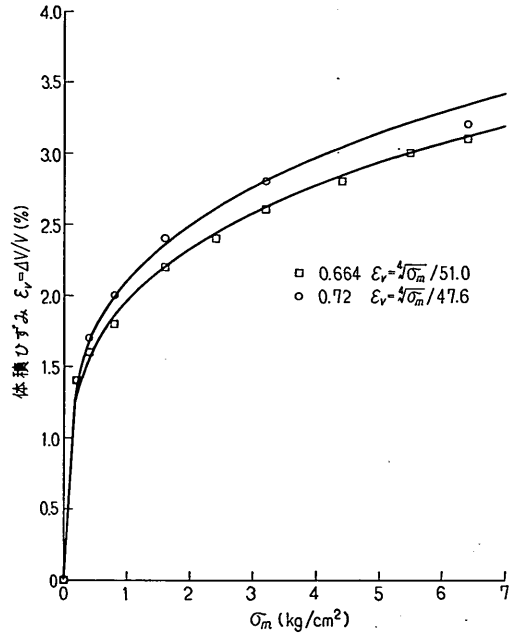


Fig. 4-1 等方圧縮試験結果

e_i は初期間隙比, K を各時点の間隙比 e と, その時の平均応力の関数と仮定し次式で示す。

$$K = f(e, \sigma_m) \quad (4.3)$$

また各時点の間隙比は初期間隙比と体積ひずみにより示され次式となる。

$$e = -(e_i + 1) \cdot \epsilon_V + e_i \quad (4.4)$$

(4.1) 式を代入すると次式となる。

$$e = -(e_i + 1) \cdot a \cdot \sigma_m^{\frac{3}{4}} + e_i \quad (4.5)$$

(4.2), (4.5) 式により e, σ_m と K の関係を上の2試験について求め, σ_m が同じ値の時 e が 0.6~0.7 の間では計算の便宜上 e と K との関係を線形とみなし, σ_m の等しい点を直線で結ぶと Fig. 4-2 となる。また次式で示される。

$$K = \frac{k_1 - k_2}{e_1 - e_2} (e - e_1) + k_1 \quad (4.6)$$

ただし,

$$k_1 = 47.6 \times 4.0 \times \sigma_m^{\frac{3}{4}}, \quad k_2 = 51.0 \times 4.0 \times \sigma_m^{\frac{3}{4}}$$

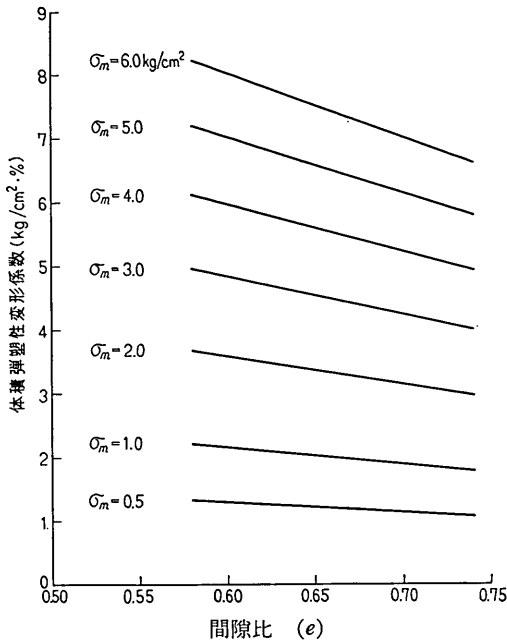


Fig. 4-2 体積弾塑性変形係数 K と σ_m , e の関係

$$e_1 = -1.72 \times \sigma_m^4 / 47.6 + 0.72,$$

$$e_2 = -1,664 \times \sigma_m^4 / 51.0 + 0.664$$

(4.6) 式に各時点の σ_m と e を与えると K が求められる。 K をこのように表わした利点は過去の状態に関係なく任意の時点の間隙比 e , σ_m を与えるとその時点の K が求まることである。このような表現により、等方圧縮試験は (2.16) 式の解として微分方程式で示される。

4.2 せん断弾塑性変形係数と平均応力一定試験

せん断弾塑性変形係数を求めるために、平均応力一定の試験を行なった。その結果を Fig. 4-3 に示す。実験装置は普通の 3 軸試験機を用い側圧を与える水銀容器の位置を垂直方向応力の変化に合わせて動かすために横に目盛りのついた定規を作った。この定規の目盛りは σ_1 測定用リングのダイヤルゲージと関連した目盛りで σ_m が一定となるダイヤルゲージの目盛りが打ってある。実験中ダイヤルゲージの読みにあわせてたえず水銀容器を定規上のこの読みの目盛りに合わせ操作を行なった。

Fig. 4-3 からわかるように $e_i = 0.6$ で $\tau_{oct}/\sigma_m = 0.7$ に達するまでは体積変化は生じない。すなわちこの間は等方性であり、せん断弾塑性変形係数は線形と見なせ、弾性変形をしていると考えられる。この点を越えた領域

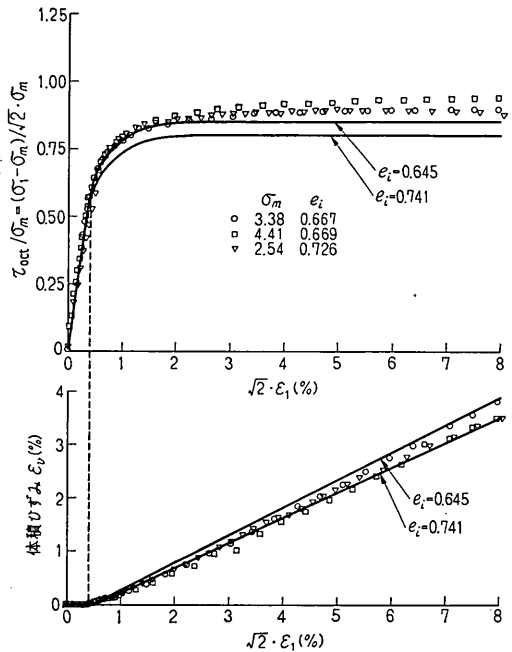


Fig. 4-3 平均応力一定試験結果

ではせん断力により粒子間のすべりが生じ異方性となり体積増加を伴うと考えられる。Fig. 4-3 の曲線の接線が G_1/σ_m となるように横軸に $\sqrt{2} \cdot e_1$ をとった。 G_2 は等方性限度内では G_1 と同じ値となり限度外では体積変化から求まる。

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = 2G_1 \quad (4.7)$$

Fig. 4-3 の下図から次式を得る。

$$dVd = -b \cdot \sqrt{2} \cdot d\varepsilon_1 \quad (4.8)$$

b は Fig. 4-3 の下図の直線の傾き。

(3.6), (4.7); (4.8) 式から G_2 は次のように示される。

$$G_2 = \frac{G_1}{1 + \sqrt{2}b} = \frac{G_1}{C} \quad (4.9)$$

Fig. 4-3 での実線は計算に用いた近似曲線である。ここで実験値と異なっているのは次の理由による。今回の平均応力一定試験では特別な装置でなく普通の 3 軸試験機を用いて行なったのでかなりの誤差が入っていると思われる。Fig. 4-4 は側圧一定試験から求めた破壊時の τ_{oct}/σ_m の値と初期間隙比の値との関係である。平均応力一定試験でも同じ条件 (τ_{oct}/σ_m) で破壊すると考えられるので文献^{1,2)}などを参考にして実線のように補正を加えた。この曲線は初期間隙比により異なる。本報告

では1本の近似曲線を常に原点をとおり、平行移動させることで近似し、破壊時の τ_{oct}/σ_m を側圧一定試験から求めた値と一致するように平行移動させた。

$$\begin{aligned}
 y_h &= 0.05 \cdot (e_i - 0.645) / (0.6 - 0.741) \\
 y_h: & \tau_{oct}/\sigma_m \text{ 軸の平行移動量} \\
 x_h &= y_h / 1.5 \\
 x_d &= \sqrt{2} \varepsilon_1 + x_h \\
 x_h: & \sqrt{2} \varepsilon_1 \text{ 軸の平行移動量} \\
 x_d: & \text{ひずみで表した等方性限度} \\
 x_d &< 0.4 \\
 \tau_{oct}/\sigma_m &= 1.5 x_d - y_h \\
 G_1 &= 1.5 \sigma_m \\
 x_d &> 0.4 \\
 \tau_{oct}/\sigma_m &= 0.25(\exp(1 - 0.4 - x_d) / 0.46) \\
 &+ 0.6 - y_h \\
 G_1 &= (0.25 \sigma_m - (\tau_{oct} - (0.6 - y_h) \sigma_m)) / 0.46
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

b も側圧一定試験から補正を加えて次のように表わした。

$e_i = 0.645$ で $b = 0.51$, $e_i = 0.741$ で 0.47 任意の e_i に対しては比例配分して次式で示した。

$$b = \frac{(0.51 - 0.47)}{(0.645 - 0.741)} (e_i - 0.645) + 0.51 \tag{4.11}$$

4.3 側圧一定3軸試験

求めた応力-ひずみマトリックスの妥当性を調べるために側圧一定3軸試験を行なった。その結果を Fig. 4-4, 一例を Fig. 4-5, 4-6 に示す。この試験は前述2試験の両成分を含んだ応力状態にあり前述の2試験から得た各弾塑性変形係数の合成から計算で求めたものとの一致を調べるためと、平均応力一定試験の補正のために行なった。

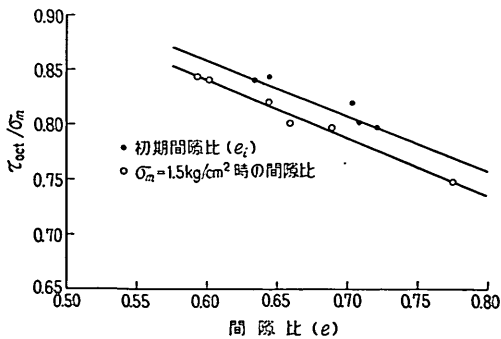


Fig. 4-4 初期間隙比と強度の関係

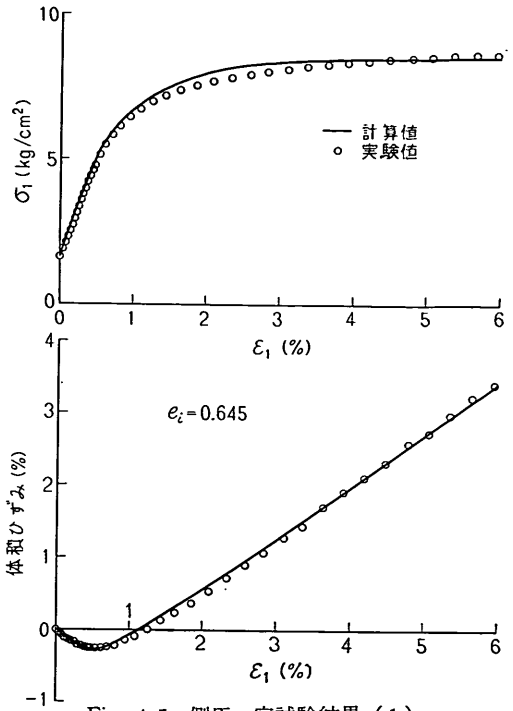


Fig. 4-5 側圧一定試験結果 (1)

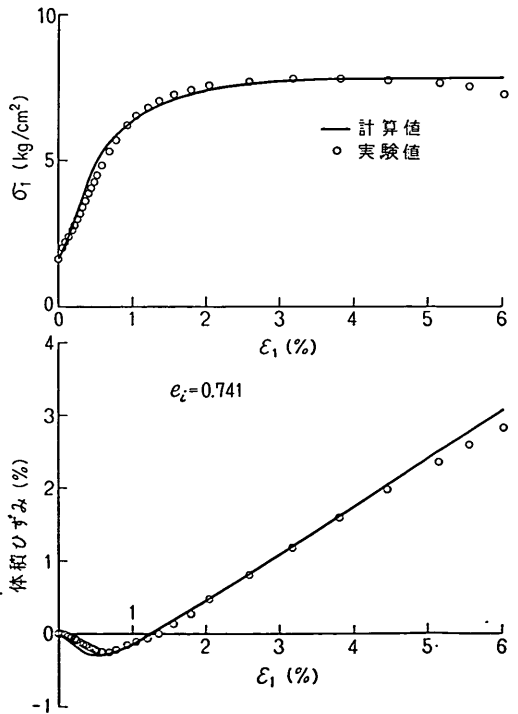


Fig. 4-6 側圧一定試験結果 (2)

5. 計算値と実験値の比較と考察

5.1 計算値と実験値の比較

4. で求めた弾塑性変形係数から (3.9) 式に体積増分、間隙比増分の式を加えて次の計算式で応力-ひずみ挙動を電子計算機で計算した。微分方程式の解法はルンゲ・クッタ・ギル法によった。

$$\left. \begin{aligned}
 A &= \frac{1}{3G_1} + \frac{1}{9K_1} \\
 B &= \frac{1}{9K_2} - \frac{1}{6G_2} \\
 \frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2} &= \frac{1}{A} \\
 \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} &= \frac{B}{A} \\
 \frac{d\epsilon_V}{d\epsilon_1} &= 1 + 2 \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} \\
 \frac{de}{d\epsilon_1} &= \frac{(e_i + 1)d\epsilon_V}{100 \cdot d\epsilon_1} \\
 G_1 &= f_1(\tau_{oct}/\sigma_m, e_i) \\
 G_2 &= f_2(\tau_{oct}/\sigma_m, e_i) \\
 K_1 = K_2 = K &= f_3(e, \sigma_m) \text{ (等方性)} \\
 K_1 \neq K_2 = K &= f_3(e, \sigma_m) \text{ (異方性)}
 \end{aligned} \right\} (5.1)$$

K_1, K_2 は異方性になった場合での体積弾塑性変形係数であるが、今回は K とほぼ等しいとして計算した。この計算結果を Fig. 4-5, 4-6 に実線で示した。この結果ほぼ実験と一致することがわかったので体積弾塑性変形係数、せん断弾塑性変形係数を別々に求め、一般の応力状態はこれらの合成の弾塑性変形係数を用い計算でき、任意の応力-ひずみ入力に対する応答を計算で求めることができると思われる。

5.2 弾塑性マトリックス [AN] の非線形性と異方性の関係

[AN] マトリックスを分解すると次の項に分けられる。

$$[AN] = [KEN] + [KPN] + [GEN] + [GPN] \quad (5.1)$$

ここで [KEN], [KPN] は σ_m により生ずる弾性成分と塑性成分を示すマトリックス。同様に [GEN], [GPN] は偏差応力により生ずる弾性成分と塑性成分を示すマトリックス。ここで [KEN], [GEN] はほぼ線形であると考えられる。また [KPN], [GPN] は塑性成分

でこの成分のために非線形になると考えられる。なぜなら弾性では粒子間のすべりがなく、ひずみによるエネルギーが蓄えられると考え、塑性では粒子間にすべりが生じそれに用いたエネルギーは消費されると考えられる。

異方性について考えると [KEN], [GEN] は弾性成分であるので等方性限度外でもほぼ等方性を示すと考えられる。[GPN] は常に異方性を示すと考えられる。これを2次元粒状体の破壊機構 Fig. 5-1 により示す。これは平均応力 σ_m でせん断力 σ_s をうけている図である。このようなせん断力をうけすべりが生じ角 β が $\beta + d\beta$ に変化したとすると各方向のひずみは次式で示される。

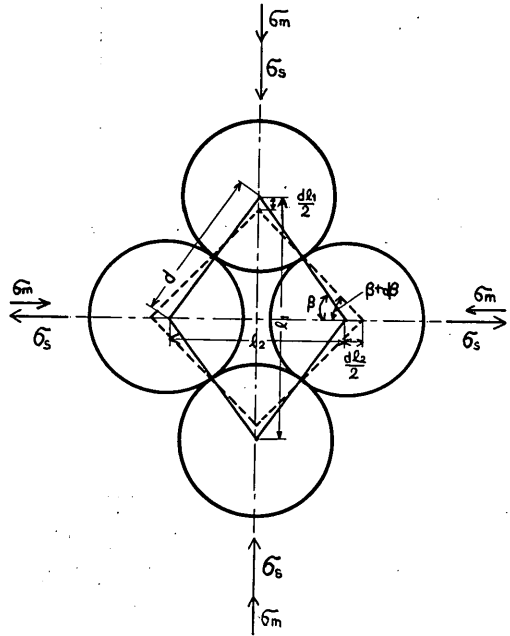


Fig. 5-1 2次元粒状体の破壊機構

$$\epsilon_1 = \frac{dl_1}{l_1} = \frac{\cos \beta \cdot d\beta}{d \cdot \sin \beta} = \frac{d\beta}{d \cdot \tan \beta} \quad (5.2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{dl_2}{l_2} = \frac{-\sin \beta \cdot d\beta}{d \cdot \cos \beta} = \frac{-\tan \beta \cdot d\beta}{d} \quad (5.3)$$

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{-1}{\tan^2 \beta} \quad (5.4)$$

これをマトリックスで示すと次式となる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2G_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2G_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_s \\ -\sigma_s \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

ここで G_1 と G_2 の比は (5.5) 式から次式を得る。

$$\frac{G_3}{G_1} = \frac{1}{\tan^2 \beta} \quad (5.6)$$

このことは [GPN] マトリックスが異方性を示すことを示している。また (2.27) 式からわかるように [GPN] マトリックスは非対称でもある。すなわちせん断力によりすべり (塑性変形) が生じて体積変化を伴う場合、非対称、異方性マトリックスで示される。(5.6) 式の $\tan^2 \beta$ は (4.9) 式の C に相当する。本報告での実験では塑性変形が生じてからはほぼこの値が一定であった。このことは平均応力一定試験においては初期間隙比によりほぼ C の値が決まり、各粒子間ではこの値はランダムであるが平均値がこの値になり、この平均の値を保つように変形が進んでいると考えられる。他方 [KPN] は等方性限度内では等方性を示す。しかし等方性限度外においても等方性を示すかについてはまだ研究の余地がある。本報告の 2. において応力径路に無関係にひずみの値が決まると仮定し、[AN] マトリックスの対称性を仮定した。このことは [KPN] + [GPN] が対称であるので、[KPN] は非対称で異方性を示すことになる。すなわち [GPN] の非対称性、異方性のために影響をうけることを意味する。しかし以上の仮定を考えず [KPN] はせん断による塑性変形すなわち [GPN] の影響をうけないと仮定すると、[KPN] は対称、等方性マトリックスとなる。したがって [AN] マトリックスは非対称、異方性マトリックスになる。本報告で等方性限度外で $K_1 \equiv K \equiv K_2$ として近似計算したのは実は後者のような取扱いをしていることになる。これはせん断力作用中の体積弾塑性変形係数を複雑なために測定しなかったためであるが、今後厳密さの点でこれらを研究する必要がある。平均応力、偏差応力を含む一般的応力を加えてゆくと等方性限度内では [AN] マトリックスは [KEN], [KPN], [GEN] より成り、[KPN] のために非線形挙動をすると考えられる。等方性限度に達すると [GPN] が加わり異方性といちじるしい非線形性となり破壊に達すると考えられる。

6. 結 論

以上の実験、理論計算により次の結論を得た。

(a) 砂の破壊過程では破壊近くで、せん断力により塑性変形が生じ異方性となる。すなわち等方性→異方性→破壊の過程をとおり、砂には等方性限度がある。

(b) ダイレイタンスーは異方性から説明、計算ができる。

(c) 等方圧縮試験より K を求め、平均応力一定試験から G_1, G_3 を求めることにより非線形 2 軸直交異方性応力-ひずみマトリックスが求まる。

(d) 弾性論等に必要の任意の応力状態にある点の弾性定数 (K, G, E, ν) は等方圧縮試験、平均応力一定試験により求まる。ただし異方性域では軸対称のみ。

(e) 等方性限度内ならば $\sigma_1 \equiv \sigma_2 \equiv \sigma_3$ または $\varepsilon_1 \equiv \varepsilon_2 \equiv \varepsilon_3$ (たとえば平面ひずみ条件) の条件の応力またはひずみ入力に、限度外では $\sigma_2 = \sigma_3$ または $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ の条件の応力はまたはひずみ入力に対する挙動が前述 2 試験から求まる。

(f) 等方性限度内ならば 3 次元有限要素に利用できる。誤差を認めるならば破壊まで拡張できる。

この結論は今回の実験、計算により得られたものであるが、このような理論的取扱いがなされた例がないので、以上の結論の厳密さの点ではまだ疑問の余地があると思われる。

7. あとがき

本報告で応力の制御の難かしさから、平均応力一定試験結果を正確に得ることができなかったが、今後より正確な平均応力一定試験法、装置の考案などにより正確な結果を得たいと思う。本報告で示した 2 軸異方性の応力-ひずみマトリックス表示は砂の応力-ひずみ関係の一部しか解決していないので今後 3 軸異方性、除荷、繰返し荷重、土に対しての理論などについても解決し、土、砂に有限要素法を応用しようと思っている。またさらにこれらの理論を解明し実験的に難しい平均応力一定試験を行なわず等方圧縮試験、側圧一定試験により各弾性係数を求める方法なども研究しようと思う。

最後に、多くの助言を頂いた当研究所土性研究室長中瀬明男氏、研究員小林正樹氏、勝野克氏に深く謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) Leonard. D and Neil. H.W "A study of bulk and shear moduli of a sand" proc. ASCE SM 2, March 1969
- 2) 落合英俊, 山内豊聡 "砂質土とダイレイタンスーについて" 九大工学集報第 43 巻第 2 号, p. 102-108
- 3) 山田嘉昭 "材料非線形問題解析法" 生研講習会テキスト第 8 回マトリックス法の応用, 生産技術研究奨励会, p. 1-15

- 4) O.C. ツィエンキーヴィッツ, Y.K. チューン原著
“マトリックス有限要素法” 邦訳培風館昭和45年
- 5) Y.C. Fung 著 “固体の力学/理論” 邦訳培風館昭和45年
- 6) 飯田隆一 “体積変化をともなう直交異方性弾塑性理論とその適用” 土木研究所報告 p. 1-26
- 7) D.J. Pickering “Anisotropic elastic parameters for soil” *Geotechnique* 20, No. 3, 271-276
- 8) 柴田徹 “粘土のダイラタンシーについて” 京大防災研究所年報第6号, 昭和38年7月
- 9) 島昭次郎, 大田秀樹 “粘土の非排水せん断時の間げき水圧に関する一考察” 土木学会論文集第155号昭和43年7月
- 10) 市原松平 “平面ひずみみにおける強度ならびにせん断特性に関する研究” 土木学会第24回年次学術講演概要 III-20, p. 59-60
- 11) 最上武雄編 “土質力学” 技報堂, p. 479-622, p. 980-987
- 12) Igor Holubec “Elastic behavior of cohesionless soil” *proc. ASCE SM* 6 November 1968

総 索 引 (第9巻第1号~第4号)

論 文 名 ・ 著 者

巻 号 頁

水 工 部

- 港湾埋没に関する移動床模型の再現性——鹿島港模型実験の場合——
 ……………佐藤昭二・田中則男・入江 功・平原淳次……9 1 71~123
- 水平全方向流速計の試作について (第1報)
 ……………柴山煒彦・須藤 茂……9 1 125~149
- 定置式波向計 (抵抗歪線型) の開発
 ……………高橋智晴・鈴木禧実・佐々木 弘……9 1 151~177
- 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第6報)
 ——港口損失係数の影響—— ……………伊藤喜行・木原 力……9 2 3~ 22
- 波浪の統計的性質に関する数値実験 (欧文) ……………合田良実……9 3 3~ 57
- 流れの中の風波についての実験的研究 (1) ……………加藤 始・佐野喜久雄……9 3 59~ 87
- 防波護岸の越波流量に関する研究 ……………合田良実……9 4 3~ 41

土 質 部

- 組グイの水平抵抗に関する実験的研究 ……………沢口正俊……9 1 3~ 69
- 偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力 ……中瀬明男・小林正樹……9 2 23~ 38
- 航空機タイヤの平均接地圧に関する一考察
 ……………須田 濶・佐藤勝久・阿部洋一……9 2 39~ 59
- 静的載荷試験による空港舗装の実験的研究
 ……………須田 濶・森口 拓・佐藤勝久
 吉田富雄・川本晴郎・阿部洋一……9 3 89~156
- 沖積粘土のボーリングおよびサンプリングに関する研究 (第5報)
 ……………松本一明・堀江宏保・奥村樹郎……9 4 43~ 63

構 造 部

- 鋼直杭棧橋の耐震性に関する研究
 ……………山本隆一・林 聡・土田 肇・山下生比古・小蔵紘一郎……9 1 179~228
- 海岸堤防の大型模型振動実験と円形すべり安定計算
 ……………土田 肇・野田節男・倉田栄一……9 2 61~121
- 矢板壁の耐震性に関する研究 (第2報)
 ——矢板壁模型の振動致特性—— ……………荒井秀夫・藤野芳明・坂井慧子……9 2 123~146

索 引

論 文 名 ・ 著 者

巻 号 頁

アルミナセメントを使用したプレパックドコンクリートの諸特性について
.....青木義典・関 博・小野寺幸夫.....9 5 157~179

設計基準部

ふ頭エプロンの荷役活動と面積に関する研究
.....工藤和男・高力健次郎・久保重美.....9 1 229~274

機 材 部

軟底質における超音波の反射透過特性
——フライアッシュ底質における室内実験——.....木原純孝.....9 1 275~306

捨石均し機の開発小岩 苔生・大平 勝・平山 勇・白鳥保夫.....9 1 307~328

水噴流による水中の岩盤の掘削特性について
——ノズル移動時のモルタル試料掘削について——藤井喜一郎・守口照明.....9 2 147~162

Accumulative index (Vol. 9 No. 1~No. 4)

Vol. No. p.

Hydraulics Division

Similitude of the model Test on Harbour-Shoaling in Movable Bed —The Case of the model Test of Kashima Port—Shoji SATO, Norio TANAKA, Isao IRIE, Junji HIRAHARA.....9	1	71~128
A New Current-Meters of All-Direction-Type (1st Report)Akihiko SHIBAYAMA, Shigeru SUDO.....9	1	125~149
On the Development of A New wave Direction meterTomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI.....9	1	151~177
Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long- period waves (6th Report) —On the Head-loss Coefficient at the Tsunami-Breakwater Opening—Yoshiyuki Ito and Tsutomu KIHARA.....9	2	3~ 22
Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral SimulationYoshimi GODA.....9	3	3~ 57
Experimental Study of Wind Waves on Water Currents (1st Report)Hajime KATO and Kikuo SANO.....9	3	59~ 87
Estimation of the Rate of Irregular Wave Overtopping of SeawallsYoshimi GODA.....9	4	3~ 41

Soil Division

Experimental Investigation on the Horizontal Resistance Coupled PilesMasatoshi SAWAGUCHI.....9	1	3~ 69
Bearing Capacity of Foundation on Cohesive Soil under Eccentric and Inclined Loads.....Akio NAKASE and Masaki KOBAYASHI.....9	2	23~ 38
A Study on the Average Contact pressure of Airplain TiresHiroshi SUDA, Katsuhisa SATO and Yoichi ABE.....9	2	39~ 59
Experimental Studies on Airport Pavements by Static Loading TestsHiroshi SUDA, Hiraku MORIGUCHI, Katsuhisa, SATO, Tomio YOSHIDA, Haruo KAWAMOTO and Yoichi ABE.....9	3	89~156
Studies on Boring and Sampling of Saturated Alluvial Clays (5th Report).....Kazuaki MATSUMOTO, Hiroyasu HORIE and Tatsuro OKUMURA.....9	4	43~ 63

Structures Division

Evaluation of Seismic Stability of Trestle Type Pier with Vertical Steel Piles	Ryuichi YAMAMOTO, Satoshi HAYASHI, Hajime TSUCHIDA, Ikuhiko, YAMASHITA, Koichiro OGURA.....9	1	179~228
Vibration Test and Circular Arc Analysis for Full-scale Models of Levee	Hajime TSUCHIDA, Setsuo NODA and Eiichi KURATA.....9	2	61~121
On the Earthquake Resistance of Anchored Sheet-Pile Walls (2nd Report) —Frequency Characteristics of Model Anchored Sheet-Pile Walls—	Hideo ARAI, Yoshiaki FUJINO and Keiko SAKAI.....9	2	123~146
Basic Properties of Prepacked Concrete Using Alumina Cement	Yoshinori AOKI, Hiroshi SEKI and Sachio ONODERA.....9	3	157~179

Design Standard Division

Studies on Area of Wharf [Apron and Related Cargo Handling Activities].....	Kazuo KUDO, Kenjiro KOHRIKI, Shigemi KUBO.....9	1	229~274
---	---	---	---------

Machinery Division

Reflection and Transmission Characteristics of Ultrasonic Wave in Soft Mud Layer —An Experiment on Fly-Ash mud Sediment—	Sumitaka KIHARA.....9	1	275~306
Development of a Leveling Equipment for Rubble Mounds	Taisei KOIWA, Katsu OHIRA, Isamu HIRAYAMA, Yasuo SHIRATORI.....9	1	307~328
On the Excavation Characteristic of Rocks in the Water by Water-jets.....	Kiichiro FUJII and Teruaki MORIGUCHI.....9	2	147~162