

# 密度による砂地盤のせん断抵抗角 $\phi_d$ の推定システム

奥山一典<sup>1</sup>・与那城稔<sup>2</sup>・藤原身江子<sup>2</sup>・田平健二<sup>2</sup>・真田博司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

<sup>2</sup>正会員 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

本論文では、砂地盤の $\phi_d$ を経済的かつ高精度に推定できるシステムの提案を目的とした研究を行った。まず、最上の強度式中の定数 $k$ と砂や粒状体との物理的性質の関係を吟味した上で、実用的観点から、定数 $k$ と最大間隙比 $e_{max}$ の直線的関係を利用した $\phi_d$ の推定式を提案した。つぎに、提案推定式と二重管式標準貫入試験器による密度測定方法を組み合わせ、砂地盤の原位置における $\phi_d$ の推定システムを提案した。そして、土槽内に作製した実験用砂地盤に提案システムを適用して $\phi_d$ を推定した結果、従来の $N$ 値による $\phi_d$ の推定方法に比べ、極めて高い推定精度を得ることができた。

**Key Words :** sand, density, angle of shear resistance, maximum void ratio, split spoon sampler with built-in tube

## 1. はじめに

我が国では、設計時に砂地盤の強度定数であるせん断抵抗角 $\phi_d$ を求める際、測定 $N$ 値を各種の $N$ 値 $\sim\phi_d$ 関係<sup>1)</sup>に適用して $\phi_d$ を推定する方法がよく利用されている。しかし、この $N$ 値による $\phi_d$ の推定方法は、経済的ではあるが、 $N$ 値が拘束圧や粒度などに影響を受けるため、その推定精度は低く、あまりにも安全側に推定する場合がある<sup>2)</sup>。一方、設計の重要度によって高精度の $\phi_d$ が要求される場合には、凍結サンプリング等により不攪乱試料を採取し、室内試験から直接求めることになるが、その調査費は極めて高価である。

このように、高精度の $\phi_d$ を経済的に得ることはできないのが現状である。しかしながら、土木構造物の設計において原位置の $\phi_d$ の精度を上げることができれば、地盤に関する設計の信頼性が高まり、合理的な設計に繋がるため、精度の高い $\phi_d$ を経済的に得る方法の開発が望まれる。

そこで、本論文では、まず、最上<sup>3)</sup>の強度式中の定数 $k$ と砂や粒状体との物理的性質の関係を吟味した上で、実用的な砂の $\phi_d$ の推定式を誘導した。しかし、この推定式によって原位置の $\phi_d$ を推定するには、原位置の密度(間隙比 $e_f$ )と最大間隙比 $e_{max}$ が必要となり、

- ① 経済的な密度測定方法
- ② 最大粒径 $D_{max}$ が2mmを超える砂に適用できる

## 最小密度試験法

の選定が実用上の課題となる。本研究では、この課題を解決するため、筆者らが提案した二重管式標準貫入試験器による密度測定方法<sup>4)</sup>および砂礫の最小密度試験法<sup>5)</sup>を用いることにした。そして、これらの方法と $\phi_d$ の推定式を組み合わせ、砂の $\phi_d$ を高精度かつ経済的に推定できるシステムの提案を行った。

なお、本研究で主に対象とする砂は、流水中で磨耗を受けた川砂や海砂などの自然砂であり、地盤工学会基準「地盤材料の工学的分類方法」(JGS M 111-1996)の小分類<sup>6)</sup>における砂(S)、礫まじり砂(S-G)および礫質砂(SG)に分類されるものである。

## 2. 砂の定数 $k$ と物理的性質の関係

従来、最上の強度式中の定数 $k$ を各種物理定数と関連付けることにより、 $\phi_d$ を経済的に推定する方法の研究<sup>7), 8), 9), 10)</sup>が行われている。しかし、一般化された方法は未だに確立されていない。本章では、砂の定数 $k$ と物理的性質の関係を吟味し、実用的な $\phi_d$ の推定式を誘導する際の基底とする。

### (1) 最上の強度式と物理的性質

#### a) 最上の強度式

砂の強度式は、表-1<sup>11)</sup>に示すように、主に1960年代、数多くの研究者が提案している。本研究では、これらの強度式のうち、理論的根拠の明確な最上の強度式を基に実用的な $\phi_d$ の推定式を誘導する。

表-1 強度式<sup>1)</sup>

| 番号 | 提案者                              | 強度式   |
|----|----------------------------------|---|
| a  | Chen (1948)                      | $\phi = c_1 - c_2 \log e$   |
| b  | Caquot, Kerisel (1956, 1967)     | $\tan \phi = c_3 / e$   |
| c  | Brinch Hansen, Lundgren (1960)   | $\phi = c_4 \log e$   |
| d  | Idel                             | $\tan \phi = \frac{c_5 + c_6 e}{1 + e}$   |
| e  | Winterkorn (1960)                | $\tan \phi = \frac{c_7}{e - e_{min}}$   |
| f  | Feda, Kamenov (1963)             | $\phi = \frac{c_8 + c_9 e}{1 + e}$  |
| g  | Kezdi (1964)                     | $\tan \phi = c_{10} \frac{\sqrt{e - e_{min}}}{\exp\left(\frac{e - e_{min}}{c_{11}} - 1\right)}$ |
| h  | Mogami (1965)                    | $\sin \phi = \frac{c_{12}}{1 + e}$  |
| i  | Herbst, Winterkorn (1965)        | $\tan \phi = \frac{c_{13}(e_{cr} - e_{min})}{e - e_{min}}$                                      |
| j  | Helenelund (1966)                | $\phi = \frac{c_{14} G_s}{1 + e}$   |
| k  | Schultz (1966)                   | $\tan \phi = \frac{1}{c_{15} + c_{16} e}$   |
| l  | Brinch Hansen (1967)             | $\sin \phi = \frac{c_{17} + c_{18} e}{1 + e} + \frac{c_{19}}{c_{20} + e^2}$                     |
| m  | Nichiporovitch, rasskozov (1967) | $\phi = c_{12} + \left(\frac{1 + e_{min}}{1 + e}\right)^{c_{22}}$                               |
| n  | Moroto (unpublished)             | $\sin \phi = \frac{c_{24}}{c_{23} + e}$   |

$\phi$ : せん断抵抗角,  $e$ : 間隙比,  $e_{min}$ : 最小間隙比,  $c_i$ : 定数 ( $i=1 \sim 24$ ),  $G_s$ : 土粒子の比重,  $c_{cr}$ : 限界間隙比

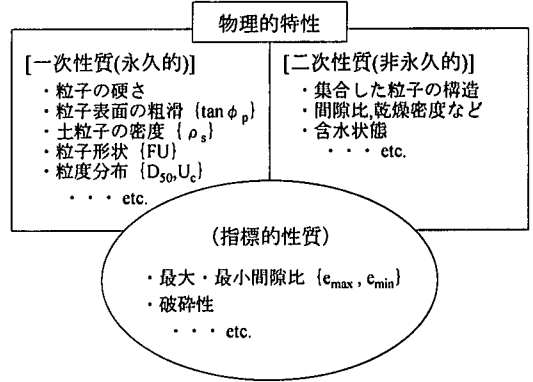


図-1 砂の物理的性質(文献<sup>12)</sup>より一部抜粋)

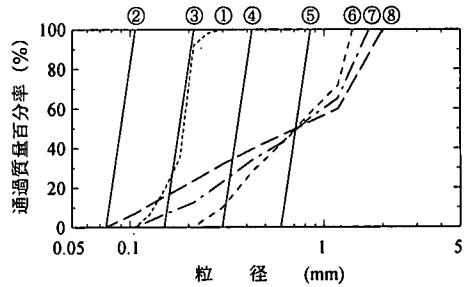


図-2 砂試料の粒度分布

最上は、粒状体の力学について理論的ならびに実験的に研究を進め、三軸圧縮試験の場合、つぎの強度式を得た。

$$\sin \phi_d = \frac{3k}{2(1 + e_0) + k} \quad (1)$$

ここに、 $\phi_d$ : 等方圧密排水せん断条件におけるせん断抵抗角,  $e_0$ : 初期間隙比,  $k$ : 強度特性を表す定数である。なお、表-1中の最上の強度式は、平面応力の場合である<sup>7)</sup>。

**b) 砂の物理的性質**

三浦ら<sup>12)</sup>は、砂の物理的性質を図-1のように分類し、最大間隙比  $e_{max}$  や最小間隙比  $e_{min}$  などを指標的性質として物理的性質に位置付けている。この指標的性質は、一次性質と二次性質に密接に関係し、砂の特徴を定量的に表すという意味で用いられる。

本研究では、一次性質と指標的性質のうち、①土粒子の密度  $\rho_s$ , ②平均粒径  $D_{50}$ , ③均等係数  $U_c$ , ④粒子形状, ⑤粒子表面の粗滑, ⑥  $e_{max}$ , ⑦  $e_{min}$  を選択し、これらの物理定数と定数  $k$  との関係について検討する。なお、粒子表面の粗滑は、その指標と考えられる平面摩擦角  $\phi_p^*$  によって評価する。また、粒子形状は、簡易に定量化できるという観点から、吉村ら<sup>13)</sup>が次式で定義した凹凸係数  $FU$  を用いて評

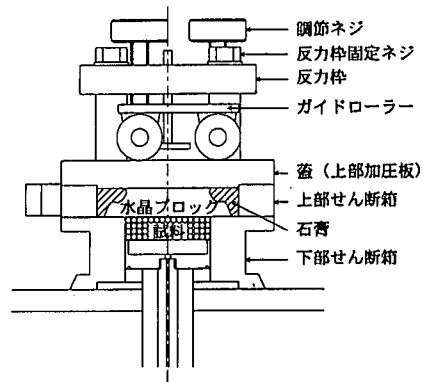


図-3 平面摩擦測定装置

価する。

$$FU = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (2)$$

ここに、 $A$ : 粒子投影断面積,  $L$ : 粒子投影断面の外周長である。

**(2) 砂の定数  $k$  と物理的性質の相関分析**

本節では、物理的性質が異なる砂試料を用いた一連の室内土質試験を行い、その結果を相関分析し、

表-2 砂試料の物理的性質

| 試料名 | 試料番号 | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $D_{max}$<br>(mm) | $D_{50}$<br>(mm) | $U_c$ | FU    | $e_0$ | $\phi_p^*$<br>(度) | $\tan \phi_p^*$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ |
|-----|------|----------------------------------|-------------------|------------------|-------|-------|-------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|
| 標準砂 | ①    | 2.638                            | 0.850             | 0.190            | 1.48  | 0.792 | 0.756 | 13.8              | 0.246           | 0.963     | 0.605     |
|     | ②    | 2.673                            | 0.106             | 0.090            | 1.19  | 0.810 | 1.052 | 19.0              | 0.343           | 1.330     | 0.799     |
|     | ③    | 2.660                            | 0.212             | 0.180            | 1.19  | 0.818 | 0.953 | 16.4              | 0.295           | 1.204     | 0.739     |
|     | ④    | 2.654                            | 0.425             | 0.360            | 1.19  | 0.830 | 0.906 | 15.9              | 0.286           | 1.098     | 0.713     |
|     | ⑤    | 2.656                            | 0.850             | 0.718            | 1.19  | 0.834 | 0.831 | 13.6              | 0.241           | 1.018     | 0.669     |
|     | ⑥    | 2.658                            | 1.40              | 0.718            | 3.00  | 0.828 | 0.743 | 13.7              | 0.243           | 0.941     | 0.544     |
|     | ⑦    | 2.659                            | 1.70              | 0.718            | 5.44  | 0.828 | 0.679 | 12.9              | 0.230           | 0.894     | 0.462     |
|     | ⑧    | 2.661                            | 2.00              | 0.718            | 9.83  | 0.817 | 0.642 | 12.8              | 0.227           | 0.858     | 0.425     |

表-3 砂試料の三軸圧縮試験結果

| 試料名  | 試料番号  | $D_{50}$<br>(mm) | $U_c$ | $e_0$ | $\phi_d$<br>(度) | $k$    | $\frac{k-\bar{k}}{\bar{k}}$ | $\bar{k}$ |
|------|-------|------------------|-------|-------|-----------------|--------|-----------------------------|-----------|
| 標準砂  | ①     | 0.190            | 1.48  | 0.669 | 40.0            | 0.910  | 0.010                       | 0.901     |
|      |       |                  |       | 0.756 | 37.8            | 0.902  | 0.001                       |           |
|      |       |                  |       | 0.831 | 36.0            | 0.892  | -0.010                      |           |
| 吉井川砂 | ②     | 0.090            | 1.19  | 1.052 | 37.8            | 1.053  | 0.025                       | 1.027     |
|      |       |                  |       | 0.891 | 38.9            | 1.000  | -0.026                      |           |
|      | ③     | 0.180            | 1.19  | 0.953 | 37.8            | 1.002  | 0.004                       | 0.998     |
|      |       |                  |       | 0.815 | 40.2            | 0.994  | -0.004                      |           |
|      | ④     | 0.360            | 1.19  | 0.790 | 41.4            | 1.012  | -0.002                      | 1.014     |
|      |       |                  |       | 0.906 | 39.1            | 1.015  | 0.001                       |           |
|      | ⑤     | 0.718            | 1.19  | 0.831 | 37.6            | 0.934  | -0.024                      | 0.957     |
|      |       |                  |       | 0.733 | 41.4            | 0.980  | 0.024                       |           |
| ⑥    | 0.718 | 3.00             | 0.743 | 37.7  | 0.892           | -0.008 | 0.899                       |           |
|      |       |                  | 0.624 | 40.9  | 0.906           | 0.008  |                             |           |
| ⑦    | 0.718 | 5.44             | 0.679 | 39.3  | 0.898           | 0.006  | 0.893                       |           |
|      |       |                  | 0.549 | 41.9  | 0.887           | -0.007 |                             |           |
| ⑧    | 0.718 | 9.83             | 0.642 | 40.1  | 0.897           | 0.007  | 0.891                       |           |
|      |       |                  | 0.512 | 42.8  | 0.885           | -0.007 |                             |           |

定数  $k$  と各種物理定数の相関度を明らかにする。

a) 砂試料の室内土質試験

吉井川砂を JIS の全標準ふるいで粒度調整したものと豊浦標準砂を砂試料として準備した。各試料の粒度分布を図-2 に、物理的性質を表-2 にそれぞれ示す。表中の FU は、試料毎に粒子の顕微鏡写真を撮り、距離・面積計で粒子の投影断面積と投影断面の外周長を計測し、式(2)を適用して算出した。なお、FU は各試料から任意に選んだ粒子 100 個の平均値である。

図-3 に示す装置で、水晶ブロック面とそれにポイントで接する多数の粒子との間での摩擦を測定し、乾燥状態の各試料のピークせん断応力時の平面摩擦角  $\phi_p^*$  を求めた。この装置は、一面せん断試験の機構を利用しており、Rowe<sup>14)</sup> が提案したものと同様である。 $\phi_p^*$  は密度や垂直応力  $\sigma_n$  の影響をほとんど受けないため<sup>15)</sup>、各試料の初期間隙比(表-2 中の  $e_0$ ) は初期相対密度 50% を目標に設定し、 $\sigma_n = 196\text{kPa}$  とした。また、平面摩擦測定装置の水晶ブロック面は 320 メッシュ仕上げ(磨りガラス程度)である。なお、Rowe は平面摩擦角を  $\phi_p$  と表記しているが、 $\phi_p$  は

水晶ブロック面の研磨度によって異なるため<sup>16)</sup>、本実験の水晶ブロック面の研磨度における  $\phi_p$  という意味で  $\phi_p^*$  と記している。

JGS T 524-1990<sup>16)</sup> に従い、棒突き法で室内再調整試料を作製し、圧密圧力  $\sigma_c$  を 49, 98, 196kPa とし、土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験(以後、三軸圧縮試験と略称する)を行った。試験結果は、粘着力がないものとし、次式で表される破壊規準で整理して  $\phi_d$  を求めた。

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_d \quad (3)$$

ここに、 $\tau$  : せん断抵抗,  $\sigma_n$  : 垂直応力である。

なお、次章以降の三軸圧縮試験も、上記と同じ方法・条件で行う。

表-3 に三軸圧縮試験から得られた  $\phi_d$ 、およびその  $\phi_d$  を式(1)に適用して求めた定数  $k$  および  $k$  の平均値  $\bar{k}$  を示す。また、同表には  $k$  の  $\bar{k}$  からのはずれを  $\bar{k}$  で除した値、つまり  $(k-\bar{k})/\bar{k}$  を合わせて示す。表-3 をみると  $e_0$  の違いによる  $k$  のバラツキは小さく、 $(k-\bar{k})/\bar{k}$  でいって高々3%の誤差であることがわかる。すなわち、定数  $k$  は  $e_0$  の影響をほとんど受

表-4 相関分析結果(数字は相関係数 r)

|                    |          |                    |                 |        |                 |           |           |           |
|--------------------|----------|--------------------|-----------------|--------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
|                    | $\rho_s$ | $\log_{10} D_{50}$ | $\log_{10} U_c$ | FU     | $\tan \phi_p^*$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $\bar{k}$ |
| $\rho_s$           | 1.000    |                    |                 |        |                 |           |           |           |
| $\log_{10} D_{50}$ | -0.141   | 1.000              |                 |        |                 |           |           |           |
| $\log_{10} U_c$    | 0.115    | 0.625              | 1.000           |        |                 |           |           |           |
| FU                 | 0.360    | 0.658              | 0.112           | 1.000  |                 |           |           |           |
| $\tan \phi_p^*$    | 0.517    | -0.853             | -0.648          | -0.200 | 1.000           |           |           |           |
| $e_{max}$          | 0.484    | -0.830             | -0.748          | -0.142 | 0.974           | 1.000     |           |           |
| $e_{min}$          | 0.221    | -0.756             | -0.927          | -0.099 | 0.871           | 0.936     | 1.000     |           |
| $\bar{k}$          | 0.432    | -0.649             | -0.755          | 0.098  | 0.895           | 0.923     | 0.924     | 1.000     |

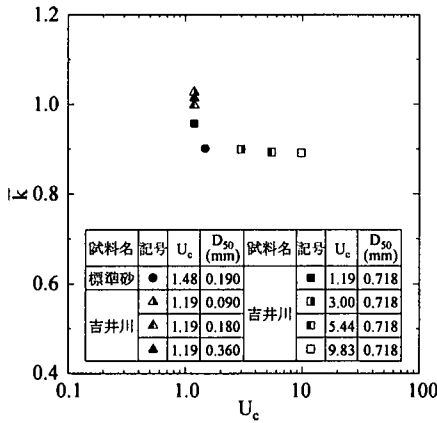


図-4 砂の  $U_c \sim \bar{k}$  関係

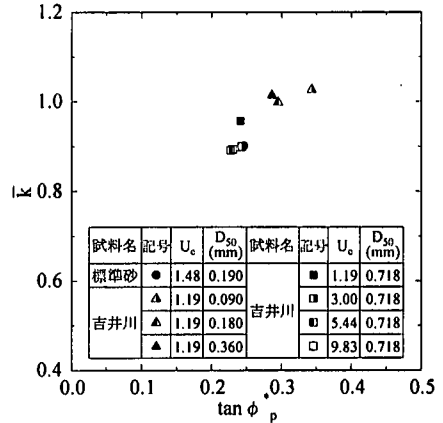


図-5 砂の  $\tan \phi_p^* \sim \bar{k}$  関係

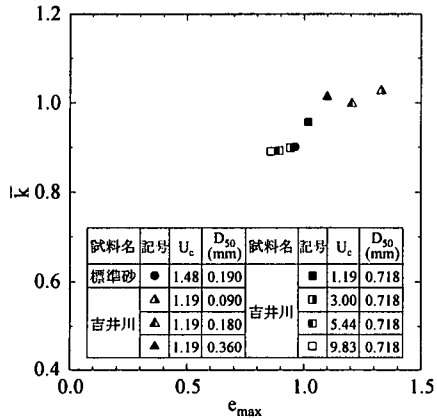


図-6 砂の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係

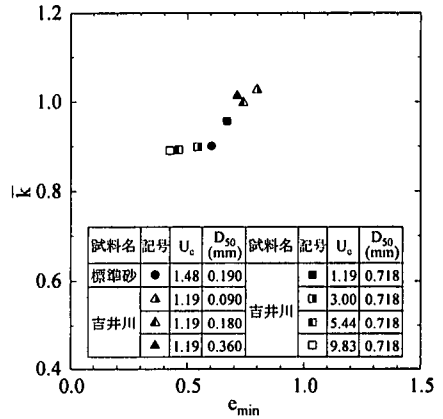


図-7 砂の  $e_{min} \sim \bar{k}$  関係

けないと言えよう。以後の相関分析においては、 $\bar{k}$  を確率変数として扱う。

b) 土質定数の相関分析と考察

$\rho_s, \log_{10} D_{50}, \log_{10} U_c, \tan \phi_p^*, FU, e_{max}, e_{min}$  および  $\bar{k}$  を確率変数として相関分析を行った。その結果を表-4 に示す。 $\bar{k}$  に関して相関係数の値が大きい  $\log_{10} U_c, \tan \phi_p^*, e_{max}$  および  $e_{min} \sim \bar{k}$  関係を図-4~図-7 に示す。以下に、それぞれの関係につい

て考察する。

①  $\log_{10} U_c \sim \bar{k}$  関係

図-4 に示す  $\log_{10} U_c \sim \bar{k}$  関係の相関係数  $r (= -0.755)$  は大きい、同じ  $U_c (= 1.19)$  でも  $\bar{k}$  の値は明らかに異なる。これは、最上<sup>7)</sup> が述べているように、粒子の形状や粒子表面の粗滑の違いによると思われる。したがって、粒子の形状や粒子表面の粗滑および  $\log_{10} U_c$  などを  $\bar{k}$  と関連づけた  $\phi_d$  の推定式の誘導

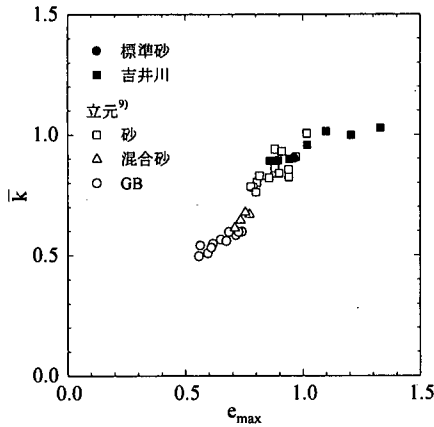


図-8 立元<sup>9)</sup>の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係との比較

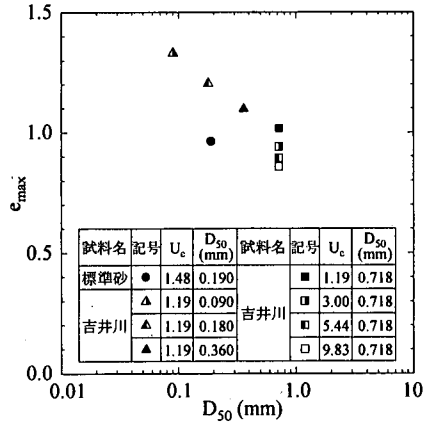


図-9 砂の  $D_{50} \sim e_{max}$  関係

が可能であろう。しかし、その推定式はかなり複雑になると思われる。

### ② $\tan \phi_p^* \sim \bar{k}$ 関係

図-5 に示す  $\tan \phi_p^* \sim \bar{k}$  関係の  $r (=0.895)$  はかなり大きく、この関係を利用して  $\phi_d$  を推定することが考えられる。しかし、 $\phi_p^*$  の試験法は基準化されていないため、この関係の利用は実用的ではない。

### ③ $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係

図-6 に示す  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係の  $r (=0.923)$  は非常に大きい。この直線関係を一次回帰分析により定式化し、式(1)と組み合わせれば、かなり精度良く  $\phi_d$  を推定できると思われる。

### ④ $e_{min} \sim \bar{k}$ 関係

$e_{max} \sim \bar{k}$  関係と同様に、図-7 に示す  $e_{min} \sim \bar{k}$  関係の  $r (=0.924)$  も非常に大きく、諸戸<sup>10)</sup> が発想したようにこの関係を利用した  $\phi_d$  の推定は可能であろう。しかし、この関係を用いる場合、つぎの問題点がある。砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大を図る一つの方法として、大容量モールドを用いることがある。この場合、 $e_{max}$  はモールドの大小にほとんど影響されない<sup>5)</sup> が、 $e_{min}$  はモールドが大きくなることにより生じる試料の土被り圧に影響される<sup>17)</sup>。したがって、現行の最大密度試験法に従う限り、 $e_{min} \sim \bar{k}$  関係を利用した  $\phi_d$  の推定方法の適用範囲は最大粒径が 2mm 未満の砂に限られることになる。

$\phi_d$  の推定式の誘導方法の一つに、 $\rho_s$ 、 $\log_{10} D_{50}$ 、 $\log_{10} U_c$ 、 $\tan \phi_p^*$ 、 $FU$ 、 $e_{max}$  および  $e_{min}$  などを  $\bar{k}$  の説明変数とする重回帰式と式(1)を組み合わせる方法が考えられる<sup>18)</sup>。しかし、推定式の簡便さや砂の最大密度試験法の問題点などを勘案すると、 $\phi_d$  の推定式の誘導には  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係の一次回帰式と式(1)を組み合わせるのが最も効果的であろう。

## 3. $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係に及ぼす一次性質の影響

$\phi_d$  の推定式の誘導に  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係を利用することについては、既に立元<sup>9)</sup> が示唆している。しかし、図-6 に立元のデータを重ねると図-8 のようになり、筆者らのデータ群と立元のそれは同じ直線で近似できないことがわかる<sup>19)</sup>。本章では、この原因を明らかにするため、粒状体の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係に及ぼす一次性質の影響について検討する。

### (1) 砂の $e_{max}$ と一次性質の関係

表-4 において  $e_{max}$  と相関の高い  $\log_{10} D_{50}$ 、 $\log_{10} U_c$  および  $\tan \phi_p^*$  との関係を図-9〜図-11 に示す。以下にそれぞれの関係について考察する。

#### ① $\log_{10} D_{50} \sim e_{max}$ 関係

この関係の相関係数  $r (= -0.830)$  はかなり大きく、図-9 の  $U_c = 1.19$  の吉井川砂をみると  $e_{max}$  の強い粒径依存性<sup>9), 20)</sup> が伺える。また、 $D_{50} = 0.718$  mm の吉井川砂では、 $U_c$  が大きくなると  $e_{max}$  は小さくなり、 $U_c$  は  $e_{max}$  に影響を及ぼしている。しかし、 $U_c$  と  $D_{50}$  の値が同程度の標準砂の  $e_{max}$  と吉井川砂のそれを比較すると、 $e_{max}$  の値が大きく異なり、 $\log_{10} D_{50}$  と  $U_c$  だけで  $e_{max}$  を説明できるとは言い難い。

#### ② $\log_{10} U_c \sim e_{max}$ 関係

図-10 に  $\log_{10} U_c \sim e_{max}$  関係を示す。この関係の  $r (= -0.748)$  は大きく、データ全体としては、 $U_c$  が大きくなると  $e_{max}$  は小さくなる傾向が伺える。しかし、 $U_c (= 1.19)$  が同じ値の吉井川砂では、 $D_{50}$  が大きいほど  $e_{max}$  は小さくなっており、先に述べた粒径依存性の影響すなわち  $D_{50}$  の影響がある。

#### ③ $\tan \phi_p^* \sim e_{max}$ 関係

図-11 に示す  $\tan \phi_p^* \sim e_{max}$  関係の  $r (= -0.974)$  は非常に大きい。とくに、 $U_c = 1.19$  の吉井川砂お

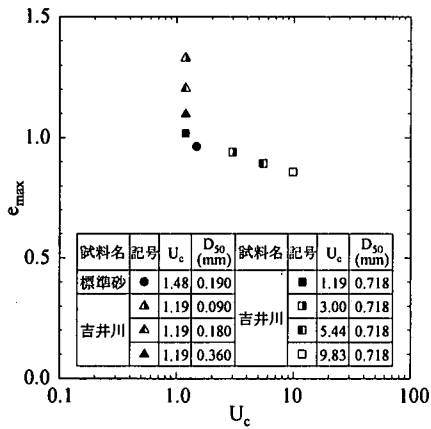


図-10 砂の  $U_c \sim e_{max}$  関係

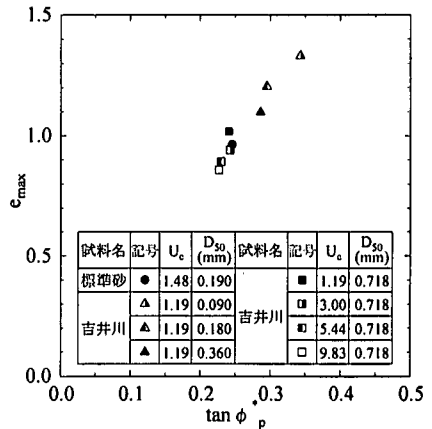


図-11 砂の  $\tan \phi_p \sim e_{max}$  関係

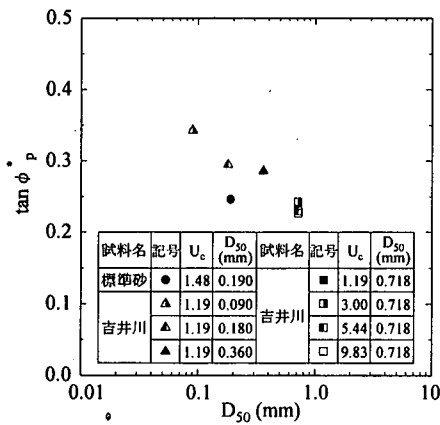


図-12 砂の  $D_{50} \sim \tan \phi_p$  関係

よび標準砂をみると、これらには非常に良い直線関係が認められ、 $\tan \phi_p$  は  $e_{max}$  に極めて大きな影響を及ぼしている。ところで、この  $\tan \phi_p$  と  $\log_{10} D_{50}$  の関係は図-12 のようになり、その相関 ( $r = -0.853$ ) はかなり高い。同図より、単一粒径に近い場合、相似粒度をなす砂の最大・最小間隙比に粒径依存性が生じるのは、 $\tan \phi_p$  が粒径ごとに異なることに起因すると考えられる<sup>21)</sup>。このことから、 $\log_{10} D_{50}$  が  $e_{max}$  に及ぼす影響は、 $\tan \phi_p$  のそれを反映したものと考えられる。つまり、 $e_{max}$  に直接的に影響するのは、 $\log_{10} D_{50}$  ではなく、 $\tan \phi_p$  であると言えよう。また、図-11 の  $D_{50} = 0.718$  mm の吉井川砂では、 $\tan \phi_p$  の値が同程度であり、 $U_c$  が大きくなると  $e_{max}$  は小さくなっており、 $U_c$  も  $e_{max}$  に影響を及ぼすことがわかる。

以上の考察から、砂試料の場合、 $e_{max}$  に直接的に顕著な影響を及ぼす一次性質は、 $\tan \phi_p$  と  $U_c$  の二つであると言えよう。

表-5 混合砂の物理的性質と三軸圧縮試験結果

| 混合率<br>$w$<br>(%) | FU    | $e_{max}$ | $e_0$ | $\phi_d$<br>(度) | $\bar{k}$ |
|-------------------|-------|-----------|-------|-----------------|-----------|
| 0                 | 0.857 | 1.031     | 0.863 | 40.4            | 1.024     |
| 25                | 0.883 | 0.940     | 0.799 | 36.9            | 0.901     |
| 50                | 0.910 | 0.850     | 0.736 | 33.4            | 0.779     |
| 75                | 0.936 | 0.760     | 0.673 | 30.0            | 0.669     |
| 100               | 0.962 | 0.668     | 0.609 | 27.7            | 0.590     |

## (2) 粒状体の $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係に及ぼす FU の影響

図-8 に示す立元<sup>9)</sup>の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係は、砂、ガラスビーズ GB および混合砂(砂と GB)を用いた実験から得られているが、筆者らの  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係は砂のみである。立元の砂のデータ群の一部は筆者らのデータ群に重なっているが、GB と混合砂のデータは筆者らのデータ群から明らかに外れている。このことから、粒状体の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係には、粒子形状が大きな影響を及ぼしていると想像される。そこで、本節では、砂とは著しく FU の異なる混合砂を用いた室内土質試験を行い、粒状体の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係に及ぼす FU の影響を明らかにする。

### a) 混合砂の室内土質試験

吉井川砂と GB を準備し、JIS の全標準ふるいでどちらも同じ粒径加積曲線 ( $D_{50} = 2.0$  mm,  $U_c = 1.19$ ) になるように粒度調整した。そして粒度調整した吉井川砂と GB を混合した試料(混合砂)の最小密度試験と三軸圧縮試験を行った。混合砂の物理的性質を表-5 に示す。表中の混合率  $w$  は、混合砂の全重量に占める GB の重量の割合を表す。なお、同表の吉井川砂と GB の FU は各試料から任意に選んだ粒子 100 個の平均値である。また、混合砂の FU は次式<sup>22)</sup>から求めた。

$$FU = \frac{(100-w)FU_s + wFU_g}{100} \quad (4)$$

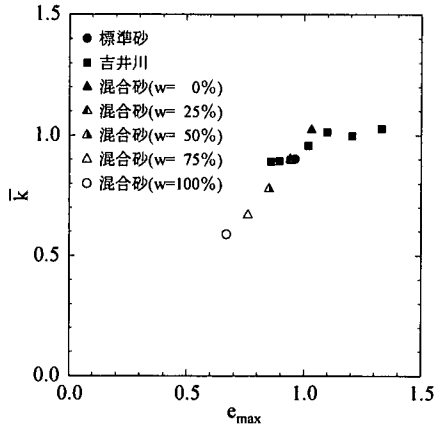


図-13 粒状体の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係

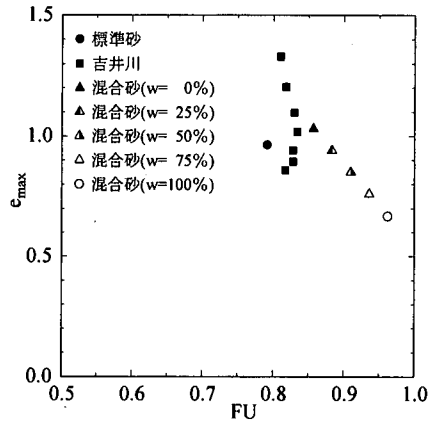


図-14 粒状体の  $FU \sim e_{max}$  関係

ここに、 $FU_s$  : 吉井川砂の  $FU$  ,  $FU_g$  : GB の  $FU$  ,  
 $w$  : GB の混合率 (%) である。

#### b) 試験結果と考察

三軸圧縮試験結果から得られた混合砂の  $\phi_d$  と  $\bar{k}$  の値を表-5 に示す。

表-5 の混合砂のデータと表-2、表-3 の砂のデータを合わせ、粒状体の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係として図-13 に示す。混合砂の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係は砂のそれとは全く異なり、図-8 の混合砂と同様の傾向を示している。

図-14 に粒状体の  $FU \sim e_{max}$  関係を示す。砂試料の場合、 $FU$  の変動は非常に小さく、 $FU$  が  $e_{max}$  に及ぼす影響はほとんどない。一方、砂とは著しく粒子形状の異なる混合砂の場合、明らかに  $FU$  が  $e_{max}$  に影響を及ぼしている。なお、図中の混合砂では、その  $U_c$ 、 $D_{50}$  は一定であるから、 $FU$  以外に  $\tan \phi_p^*$  も  $e_{max}$  に影響を及ぼしていると思われる。

図-15 に粒状体の  $FU \sim \bar{k}$  関係を示す。砂の  $FU \sim \bar{k}$  関係には相関性が認められないが、混合砂のそれには非常に強い相関がある。このことから、混合砂のように粒子形状が著しく異なる粒状体の場合、 $\bar{k}$  は  $FU$  の影響を大きく受けると言えよう。また、吉村ら<sup>23)</sup>は、粒径が 2mm 程度で単一粒度の金属製の球、正三角錐および六角ボルト(以後、金属砂と呼ぶ)を用いた三軸圧縮試験を行い、金属砂の  $\phi_d \sim FU$  関係に強い直線性を見出している。この吉村らのデータ(中密状態)から換算した金属砂の  $FU \sim \bar{k}$  関係を図-15 に合わせて示すが、この関係にも強い直線性が認められる。混合砂と金属砂の  $FU \sim \bar{k}$  関係が異なるのは、主に粒子表面の粗滑の違いによると推察される。

以上のように、表-2 に示す砂試料とは著しく粒子形状の異なる GB、混合砂および金属砂のような人工砂の場合、 $FU$  は  $e_{max}$  あるいは  $\bar{k}$  に大きな影響を

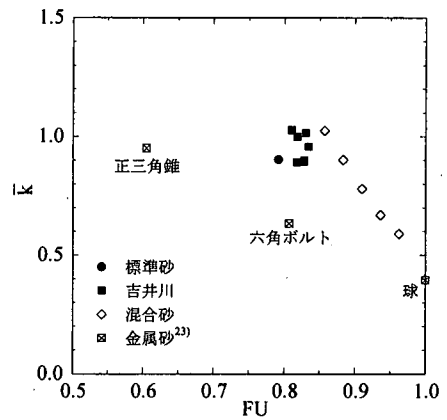


図-15 粒状体の  $FU \sim \bar{k}$  関係

及ぼすことがわかった。そのため、先に示した図-8、図-13において、混合砂の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係と砂のそれとは全く異なると考えられる。しかし、現時点では、このような人工砂を実際の建設工事に用いることは稀である。したがって、 $\phi_d$  の推定式の誘導には、自然砂の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係を利用することが実用的と言えよう。

#### 4. 砂の $\phi_d$ の推定式の提案

第2章および第3章の検討から、砂の  $\phi_d$  の推定式の提案にあたっては、自然砂の  $e_{max} \sim \bar{k}$  関係を式(1)と組み合わせる方法が実用的かつ効果的であると結論された。そこで本章では、まず、川砂や海砂といった一般的な自然砂の各種室内土質試験を行い、その試験結果である  $e_{max}$  および  $\bar{k}$  に表-2、表-3 の砂試料のそれらを合わせて  $\phi_d$  の推定式を提案する。そして提案推定式の妥当性を検証する。

表-6 追加砂試料の物理的性質と三軸圧縮試験結果

| 試料名  | 試料番号 | $\rho_{s3}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $D_{max}$<br>(mm) | $D_{50}$<br>(mm) | $U_c$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $e_0$          | $\phi_d$<br>(度) | k              | $\bar{k}$ |
|------|------|-------------------------------------|-------------------|------------------|-------|-----------|-----------|----------------|-----------------|----------------|-----------|
| 砂川   | ⑨    | 2.632                               | 4.75              | 0.940            | 2.04  | 1.079     | 0.717     | 0.898<br>0.789 | 36.8<br>38.9    | 0.947<br>0.947 | 0.947     |
| 鳥取砂丘 | ⑩    | 2.643                               | 0.850             | 0.320            | 1.88  | 0.911     | 0.582     | 0.748<br>0.649 | 39.9<br>41.1    | 0.949<br>0.924 | 0.937     |
| 桂浜   | ⑪    | 2.701                               | 4.75              | 1.40             | 2.14  | 0.718     | 0.450     | 0.548<br>0.504 | 37.4<br>39.5    | 0.803<br>0.809 | 0.806     |
| 砂川2  | ⑫    | 2.634                               | 9.5               | 0.830            | 3.23  | 1.071     | 0.683     | 0.761<br>0.877 | 39.7<br>37.8    | 0.953<br>0.964 | 0.959     |
| 末国川  | ⑬    | 2.646                               | 9.5               | 2.00             | 2.96  | 1.002     | 0.675     | 0.740<br>0.839 | 38.4<br>37.1    | 0.909<br>0.925 | 0.917     |
| 平石川  | ⑭    | 2.764                               | 9.5               | 0.830            | 1.98  | 1.110     | 0.688     | 0.772<br>0.899 | 38.6<br>37.4    | 0.931<br>0.963 | 0.947     |
| 渋川海岸 | ⑮    | 2.617                               | 2.00              | 0.390            | 1.71  | 0.975     | 0.630     | 0.699<br>0.803 | 42.3<br>40.0    | 0.983<br>0.983 | 0.983     |
| 吉井川2 | ⑯    | 2.683                               | 9.5               | 1.10             | 5.95  | 0.764     | 0.426     | 0.494<br>0.595 | 40.0<br>39.5    | 0.815<br>0.857 | 0.836     |
| 小田川  | ⑰    | 2.683                               | 9.5               | 0.660            | 3.08  | 0.971     | 0.629     | 0.697<br>0.800 | 39.2<br>38.5    | 0.906<br>0.944 | 0.925     |
| 旭川   | ⑱    | 2.703                               | 9.5               | 1.70             | 3.73  | 0.783     | 0.496     | 0.553<br>0.640 | 40.0<br>39.3    | 0.848<br>0.879 | 0.864     |
| 宇甘川  | ⑲    | 2.653                               | 9.5               | 0.540            | 3.05  | 1.032     | 0.693     | 0.761<br>0.863 | 37.5<br>36.2    | 0.897<br>0.912 | 0.905     |
| 桜川   | ⑳    | 2.634                               | 9.5               | 0.600            | 2.30  | 1.055     | 0.669     | 0.746<br>0.862 | 39.5<br>36.6    | 0.940<br>0.923 | 0.932     |
| 八塔寺川 | ㉑    | 2.654                               | 9.5               | 1.70             | 5.35  | 0.889     | 0.576     | 0.639<br>0.733 | 41.0<br>39.1    | 0.917<br>0.923 | 0.920     |

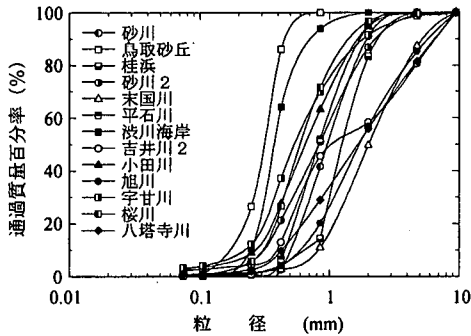


図-16 追加砂試料の粒度分布

(1) 砂の  $\phi_d$  の推定式

a) 砂試料の追加室内土質試験

図-16、表-6に示すような13種類の川砂や海砂を試料として準備し、各種物理試験および三軸圧縮試験を行った。なお、 $D_{max}$ が2mmを超える試料の $e_{max}$ 、 $e_{min}$ は、奥山ら<sup>5)</sup>が提案した砂礫の最大・最小密度試験法によって求めた。以下にこの試験法の概要を記す。

試験方法は原則的に現行試験法(JGS T 161-1990)に従うが、モールドは標準モールド(内径60mm、深さ40mm)あるいは突き固め試験用の1000ccモールド(内径100mm、深さ127.3mm)を使用する。なお、 $U_c$ が2以上の砂を試料として標準モールドを用いて最大

密度試験を行う場合に限り、試料に上載圧 $\sigma_v = 0.98kPa$ を作用させる。また、1000ccモールドによって最小密度試験を行う場合、試料の量に見合う大きさで口径が12, 20, 30, 40, 50, 60, 70mmのステンレス製の漏斗を準備し、最大粒径の3~4倍程度の口径を目安として用いる。

モールドの選択はつぎのように行う。まず、試料の粒度分布から次式で定義される平均粒径 $D_m$ を求める。

$$D_m = \sum p_i D_i \quad (5)$$

ここに、 $p_i$ :質量残留率( $\sum p_i = 1$ )、 $D_i$ :最小粒径から数えて*i*番目のふるい径を通過した粒径である。なお、 $p_i$ は最小粒径から数えて*i*番目のふるい径を通過し(*i*-1)番目のふるい径に留まる試料の質量を試料の全質量で除したものと定義する。

つぎに、次式を満足すれば、試験法の適用が可能であると判断する。

$$D^* \geq D_m \quad (6)$$

ここに、 $D^*$ は、単一粒径の粒状体を用いた最大・最小密度試験における最大粒径の制限値であり、相似粒度のガラスビーズ試料による実験から求められている<sup>5)</sup>。 $D^*$ の値は、標準モールドで1mm、1000ccモールドで8mmであるので、 $D_m$ の値によって使用するモールドを選択すればよい。



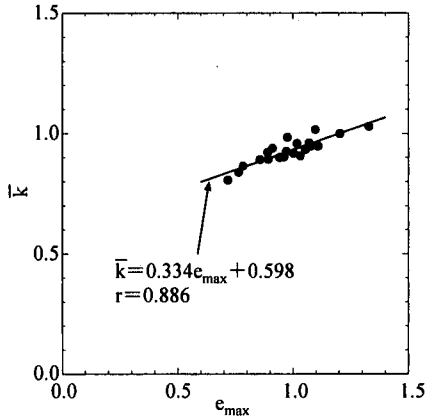


図-17 21種類の砂試料の $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係<sup>24)</sup>

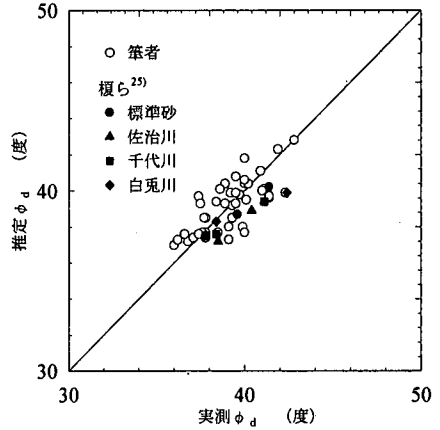


図-18 三軸圧縮試験の実測 $\phi_d \sim$ 推定 $\phi_d$ 関係

この試験法は、標準モールドを用いると $D_{max}$ が3～5mm程度、1000ccモールドを用いると $D_{max}$ が20～30mm程度までの砂礫に適用可能と想定されている。

b) 推定式の誘導

表-6に示す土質試験結果と表-2、表-3の砂試料のそれらを合わせた21種類の砂試料の $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係を図-17に示す。

図-17の $\bar{k}$ と $e_{max}$ の一次回帰直線は、

$$\bar{k} = 0.334e_{max} + 0.598 \quad (r = 0.886) \quad (7)$$

である。

上式は、統計手法から得られた実験式であるから、右辺が $\bar{k}$ の物理的意味を表しているわけではない。しかし、このように強い相関が得られた原因を以下に考察する。砂の $e_{max}$ に大きく影響する物理的性質は $\tan \phi_p^*$ と $U_c$ であることは先に述べた。図-11をみると、 $e_{max}$ に及ぼす影響は、 $U_c$ よりも $\tan \phi_p^*$ の方が卓越していると言えよう。一方、 $\bar{k}$ は、 $U_c$ と粒子形状および粒子表面の粗滑に影響されると言われている<sup>7),8)</sup>。ここで、粒子形状を $FU$ 、粒子表面の粗滑を $\tan \phi_p^*$ で評価すると、砂では $FU$ の変動が小さいため、 $\bar{k}$ に大きく影響する物理的性質は $\tan \phi_p^*$ と $U_c$ である。吉村ら<sup>20)</sup>は、砂の $\phi_d$ に $U_c$ が及ぼす影響度は小さいと述べている。これを勘案すると、結局、 $\bar{k}$ に及ぼす影響は、 $U_c$ よりも $\tan \phi_p^*$ の方が卓越すると言えよう。したがって、 $e_{max}$ と $\bar{k}$ のどちらにも卓越して影響するのは $\tan \phi_p^*$ であるから、 $e_{max}$ と $\bar{k}$ に強い相関が生じるのではないと思われる。

さて、 $\phi_d$ の推定式は、 $k \equiv \bar{k}$ とすれば、式(1)と式(7)より、次式で与えられる。

$$\sin \phi_d = \frac{3(0.334e_{max} + 0.598)}{2(1 + e_0) + (0.334e_{max} + 0.598)} \quad (8)$$

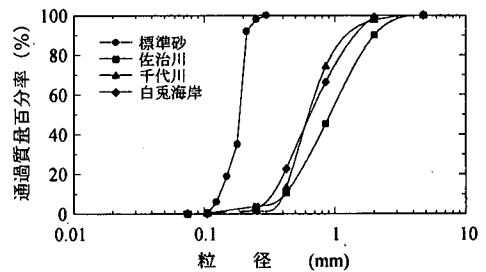


図-19 砂試料の粒度分布<sup>25)</sup>

表-7 砂試料の物理的性質と三軸圧縮試験結果<sup>25)</sup>

| 試料名  | $D_{50}$<br>(mm) | $U_c$ | $e_{max}$ | $e_0$ | $\phi_d$<br>(度) |
|------|------------------|-------|-----------|-------|-----------------|
| 標準砂  | 0.18             | 1.46  | 0.980     | 0.818 | 37.8            |
|      |                  |       |           | 0.756 | 39.6            |
|      |                  |       |           | 0.689 | 41.4            |
| 佐治川  | 0.93             | 2.62  | 1.008     | 0.850 | 38.5            |
|      |                  |       |           | 0.764 | 40.4            |
| 千代川  | 0.63             | 1.75  | 1.069     | 0.873 | 38.4            |
|      |                  |       |           | 0.780 | 41.1            |
| 白兔海岸 | 0.64             | 2.27  | 0.788     | 0.654 | 38.4            |
|      |                  |       |           | 0.584 | 42.4            |

(2) 提案推定式の検証

前節で提案した砂の $\phi_d$ の推定式の妥当性を検証するため、推定式の誘導に用いた21種類の砂の $e_{max}$ と三軸圧縮試験時の初期間隙比 $e_0$ を式(8)に適用し、推定 $\phi_d$ を求めた。この推定 $\phi_d$ と実測 $\phi_d$ の関係を図-18に示す。また、同図には、図-19、表-7の榎ら<sup>25)</sup>の試験結果より得られた推定 $\phi_d$ と実測 $\phi_d$ の関係を合わせて示している。

図-18をみると、推定 $\phi_d$ と実測 $\phi_d$ の差は $\pm 2^\circ$ 程度であり、提案推定式の推定精度は十分実用に供すると言えよう。ただし、本推定式は、 $D_{max}$ が9.5mm以下の砂試料を用いて得られた実験式であるから、 $D_{max}$ が9.5mmよりも大きい砂礫試料への適用には

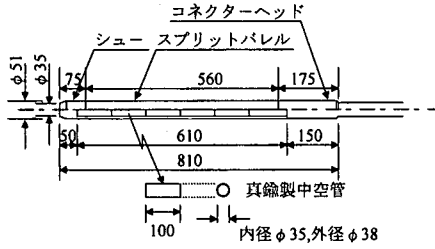


図-20 二重管式標準貫入試験器<sup>4)</sup> (単位: mm)

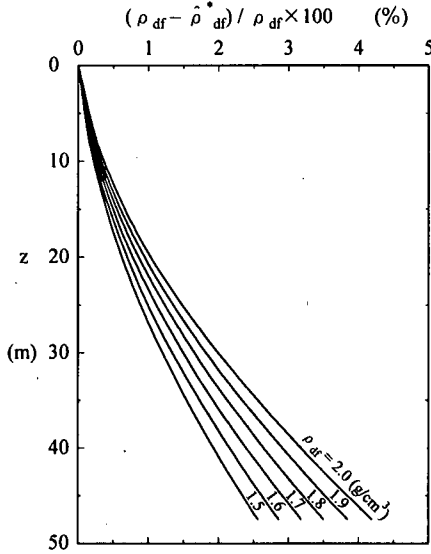


図-21  $(\rho_{df} - \hat{\rho}_{df}) / \rho_{df} \sim z$  関係

留意する必要がある。

## 5. 砂地盤における $\phi_d$ の推定システムの提案

### (1) 砂地盤における $\phi_d$ の推定システム

砂地盤の原位置における  $\phi_d$  の推定システムを以下のように提案する。

#### a) 推定システム

① 図-20 に示す二重管式標準貫入試験器<sup>4)</sup>は、標準貫入試験器の中に密度測定用の真鍮製の中空管を具備している。本試験器を用いて標準貫入試験を行い、先端から2番目の中空管に詰まった試料の湿潤密度  $\rho_{ds}^2$  を測定する。

② 試料を試験室に持ち帰り、各種物理試験(土粒子の密度, 含水比, 粒度, 最小密度など)を行い、 $\rho_{ds}^2$  から乾燥密度  $\rho_{ds}^2$  を算出し、次式<sup>4)</sup>より原位置の乾燥密度を推定する。

$$\hat{\rho}_{df} = \rho_{ds}^2 / (0.000371\sigma'_v + 1.013) \quad (9)$$

ここに、 $\hat{\rho}_{df}$  (g/cm<sup>3</sup>): 原位置の乾燥密度の推定値,  
 $\sigma'_v$  (kPa): 標準貫入試験開始深度における有効土被

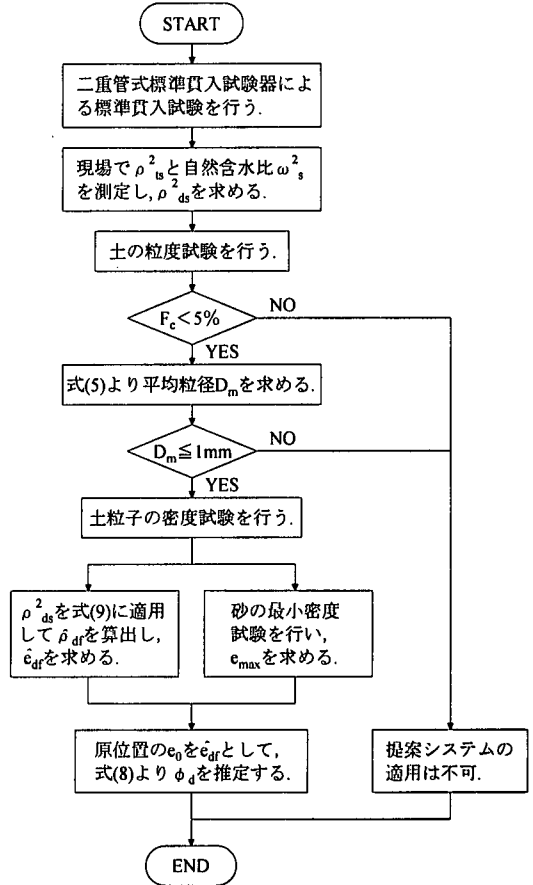


図-22 原位置の  $\phi_d$  の推定フロー

り圧である。

③  $\hat{\rho}_{df}$  を換算して原位置の推定間隙比  $\hat{e}_{df}$  を求め、原位置の  $e_0$  を  $\hat{e}_{df}$  として式(8)より  $\phi_d$  を推定する。

#### b) $\sigma'_v$ の算定方法

原位置の  $\rho_{df}$  の推定にあたり、ひとつの矛盾に気づく。それは、 $\hat{\rho}_{df}$  が先に得られなければ、式(9)における  $\sigma'_v$  は求められないという矛盾である。土槽実験では  $\sigma'_v$  を制御できるので問題はないが、実際の現場では問題となることが懸念される。そこで、解決方法の一つとして式(9)における  $\sigma'_v$  の算定に  $\rho_{ds}^2$  を用いることを提案する。この方法を適用した場合、 $\rho_{df}$  を若干小さく推定することになるが、どの程度の影響があるかを以下に検討する。

地表面から飽和した一様な砂地盤 ( $\rho_s = 2.65$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_w = 1.0$  g/cm<sup>3</sup>) を想定した場合、深度  $z$  (m) における  $\sigma'_v$  (kPa) は、

$$\sigma'_v = 9.8 \{ 1 - (1/\rho_s) \} \rho_{df} z \quad (10)$$

である。想定砂地盤の深度  $z$  で採取された試料の乾燥密度  $\rho_{ds}^2$  は、式(9)の関係から、

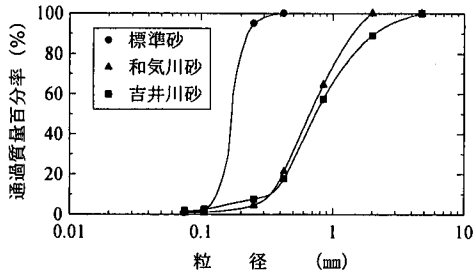


図-23 実験用試料の粒度分布

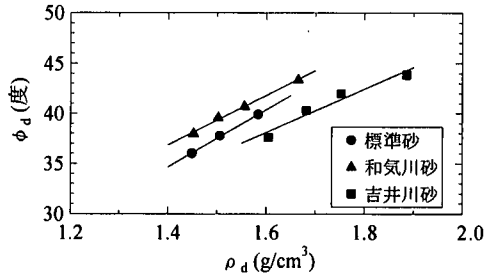


図-24 実験用試料の  $\rho_d \sim \phi_d$  関係

表-8 実験用試料の物理的性質

| 試料名  | $\rho_s$<br>( $g/cm^3$ ) | $D_{50}$<br>(mm) | $U_c$ | $e_{max}$ | $e_{min}$ |
|------|--------------------------|------------------|-------|-----------|-----------|
| 標準砂  | 2.644                    | 0.17             | 1.6   | 0.973     | 0.612     |
| 和気川砂 | 2.637                    | 0.68             | 2.5   | 1.036     | 0.609     |
| 吉井川砂 | 2.672                    | 0.76             | 3.0   | 0.844     | 0.494     |

$$\rho_{ds}^2 = \rho_{df} (0.000371\sigma'_v + 1.013) \quad (11)$$

となる。この  $\rho_{ds}^2$  を用いて算定される有効土被り圧  $\sigma'_v$  (kPa) は次式で与えられる。

$$\sigma'_v = 9.8 \{ 1 - (1/\rho_s) \} \rho_{ds}^2 z \quad (12)$$

式(9)の  $\sigma'_v$  に  $\sigma'_v$  を適用して推定される  $\hat{\rho}_{df}$  と  $\rho_{df}$  の差を  $\rho_{df}$  で除した値、つまり  $(\rho_{df} - \hat{\rho}_{df})/\rho_{df}$  と深度  $z$  の関係を図-21に示す。同図では、 $\rho_{df}$  をパラメータ (1.5~2.0  $g/cm^3$ ) にしているが、深度 30 m 程度までは、 $(\rho_{df} - \hat{\rho}_{df})/\rho_{df}$  で最大 12% の推定誤差である。したがって、実際の現場で  $\rho_{df}$  を推定する場合、 $\sigma'_v$  の算定に  $\rho_{ds}^2$  を用いることは実用上問題ないと言えよう。ただし、大深度の場合には留意する必要がある。

### c) 適用範囲

① 細粒含有率  $F_c$  が 5% 未満の飽和した川砂や海砂から成る砂地盤を対象とする。ここで、適用範囲を飽和状態に限定したのは、式(9)が飽和状態の砂地盤における密度補正式であるためである。

② 採取試料の粒度分布に式(5)を用いて平均粒径  $D_m$  を求め、式(6)で  $D^* (=1mm) \geq D_m$  となれば本システムの適用が可能と判定する。

式(6)は、最大・最小密度試験の最大粒径値を制限するものであるが、二重管式標準貫入試験器による密度測定方法の最大粒径値の制限にも準用できることが確認されている<sup>4)</sup>。そして本システムでは、二重管式標準貫入試験器の中空管の形状から  $D^* = 1mm$  と決まっており、 $D_{max}$  が 3~5mm 程度までの砂に適用可能と想定されている<sup>26)</sup>。

以上の推定フローを図-22に示すが、本システム

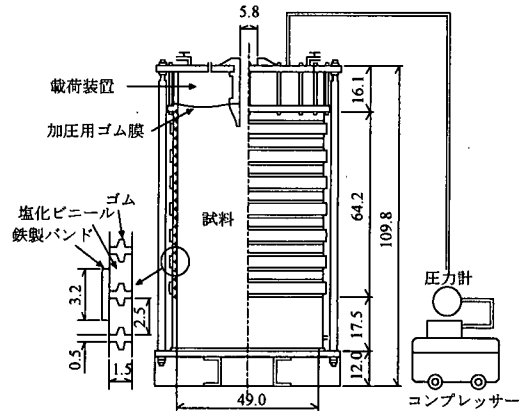


図-25 積輪型土槽 (cm)

から推定された原位置の  $\phi_d$  は、不攪乱採取試料を用いた三軸圧縮試験による  $\phi_d$  と概ね同等になると思われる。なぜならば、 $\phi_d$  は、密度によって大きく変わるが、粒子構造の乱れの影響を受けないからである<sup>27), 28)</sup>。ただし、原地盤における粒子の堆積状態と攪乱試料で作成した供試体内の粒子の堆積状態との違い、すなわち強度異方性の影響については今後の課題である。

## (2) 土槽実験による提案システムの検証

### a) 実験用試料と実験方法

豊浦標準砂、和気川砂 (愛媛県産) および吉井川砂 (岡山県産) を実験用試料とした。これらの試料の粒度分布を図-23に、物理的性質を表-8に示す。

まず、実験用試料の乾燥密度  $\rho_d$  を適当に変えて作製した供試体の三軸圧縮試験を行い、図-24に示す  $\rho_d \sim \phi_d$  関係を得た。つぎに、図-25に示す積輪型土槽内に、十分に水浸した試料を6層に分けて投入し、パイプレーターで試料を所定の密度に締固めて実験用地盤を作製した。実験用地盤の密度は1層当たりの試料の投入量と仕上がり厚さで規定した。なお、この土槽上部の天蓋に取り付けられた载荷装置で与えた上載圧  $p$  (=有効土被り圧  $\sigma'_v$ ) は、ほぼ一様に土槽内の試料に分布することが確認されている<sup>29)</sup>。

表-9 土槽実験結果

(a) 乾燥密度と  $\phi_d$  の推定

| 試料名  | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $e_{max}$ | 上載圧<br>$\sigma_v$<br>(kPa) | N値<br>(回) | $\rho_{df}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_{ds}^2$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\hat{\rho}_{df}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\hat{e}_{df}$ | 密度<br>による<br>推定 $\phi_d$<br>(度) | 土槽の<br>実測 $\phi_d$<br>(度) |
|------|----------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|----------------|---------------------------------|---------------------------|
| 標準砂  | 2.644                            | 0.973     | 0                          | 1.5       | 1.500                               | 1.524                                 | 1.504                                     | 0.757          | 38.6                            | 39.3                      |
|      |                                  |           | 49                         | 4.5       | 1.526                               | 1.569                                 | 1.522                                     | 0.738          | 39.0                            | 39.8                      |
|      |                                  |           | 98                         | 5.0       | 1.487                               | 1.554                                 | 1.481                                     | 0.785          | 38.0                            | 39.0                      |
|      |                                  |           | 98                         | 10.5      | 1.531                               | 1.592                                 | 1.517                                     | 0.743          | 38.9                            | 39.8                      |
|      |                                  |           | 98                         | 16.0      | 1.573                               | 1.668                                 | 1.590                                     | 0.663          | 40.7                            | 40.6                      |
|      |                                  |           | 147                        | 8.5       | 1.527                               | 1.644                                 | 1.540                                     | 0.717          | 39.5                            | 39.8                      |
| 和気川砂 | 2.637                            | 1.036     | 0                          | 3.0       | 1.597                               | 1.612                                 | 1.591                                     | 0.657          | 41.7                            | 41.7                      |
|      |                                  |           | 49                         | 7.5       | 1.605                               | 1.690                                 | 1.639                                     | 0.609          | 42.9                            | 41.9                      |
|      |                                  |           | 98                         | 5.0       | 1.520                               | 1.648                                 | 1.570                                     | 0.679          | 41.2                            | 39.8                      |
|      |                                  |           | 98                         | 9.0       | 1.589                               | 1.653                                 | 1.575                                     | 0.674          | 41.3                            | 41.5                      |
|      |                                  |           | 98                         | 15.0      | 1.647                               | 1.734                                 | 1.652                                     | 0.596          | 43.2                            | 43.0                      |
|      |                                  |           | 147                        | 11.5      | 1.599                               | 1.728                                 | 1.619                                     | 0.629          | 42.4                            | 41.8                      |
| 吉井川砂 | 2.672                            | 0.844     | 0                          | 3.0       | 1.770                               | 1.769                                 | 1.746                                     | 0.530          | 42.1                            | 41.8                      |
|      |                                  |           | 0                          | 9.5       | 1.803                               | 1.852                                 | 1.828                                     | 0.462          | 44.0                            | 42.5                      |
|      |                                  |           | 49                         | 5.5       | 1.762                               | 1.802                                 | 1.748                                     | 0.529          | 42.1                            | 41.6                      |
|      |                                  |           | 49                         | 17.0      | 1.849                               | 1.878                                 | 1.821                                     | 0.467          | 43.8                            | 43.5                      |
|      |                                  |           | 98                         | 3.0       | 1.623                               | 1.646                                 | 1.569                                     | 0.703          | 38.0                            | 38.6                      |
|      |                                  |           | 98                         | 4.0       | 1.674                               | 1.758                                 | 1.675                                     | 0.595          | 40.4                            | 39.7                      |
|      |                                  |           | 98                         | 15.5      | 1.747                               | 1.858                                 | 1.771                                     | 0.509          | 42.6                            | 41.3                      |
|      |                                  |           | 147                        | 15.0      | 1.748                               | 1.837                                 | 1.721                                     | 0.553          | 41.5                            | 41.3                      |
|      |                                  |           | 147                        | 23.5      | 1.853                               | 1.960                                 | 1.836                                     | 0.455          | 44.1                            | 43.6                      |

(b) 含水比と湿潤密度の推定

| 試料名  | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $e_{max}$ | 上載圧<br>$\sigma_v$<br>(kPa) | N値<br>(回) | $\rho_{ds}^2$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\omega_s^2$<br>(%) | $\hat{\omega}_f$<br>(%) | $\hat{\rho}_{df}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 土槽の<br>$\omega_f$<br>(%) | 土槽の<br>$\rho_{df}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|------|----------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|---|--------------------------|--|
| 標準砂  | 2.644                            | 0.973     | 0                          | 1.5       | 1.948                                 | 27.8                | 28.6                    | 1.935                                     | 28.8                     | 1.933                                      |
|      |                                  |           | 49                         | 4.5       | 1.975                                 | 25.9                | 27.9                    | 1.946                                     | 27.7                     | 1.949                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 5.0       | 1.946                                 | 25.2                | 29.7                    | 1.921                                     | 29.4                     | 1.925                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 10.5      | 1.971                                 | 23.8                | 28.1                    | 1.943                                     | 27.5                     | 1.952                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 16.0      | 2.023                                 | 21.3                | 25.1                    | 1.988                                     | 25.8                     | 1.978                                      |
|      |                                  |           | 147                        | 8.5       | 1.978                                 | 20.3                | 27.1                    | 1.958                                     | 27.7                     | 1.949                                      |
| 和気川砂 | 2.637                            | 1.036     | 0                          | 3.0       | 1.986                                 | 23.2                | 24.9                    | 1.988                                     | 24.7                     | 1.991                                      |
|      |                                  |           | 49                         | 7.5       | 2.048                                 | 21.2                | 23.1                    | 2.017                                     | 24.4                     | 1.996                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 5.0       | 2.011                                 | 22.0                | 25.8                    | 1.975                                     | 27.9                     | 1.944                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 9.0       | 2.008                                 | 21.5                | 25.6                    | 1.978                                     | 25.0                     | 1.986                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 15.0      | 2.072                                 | 19.5                | 22.6                    | 2.026                                     | 22.8                     | 2.022                                      |
|      |                                  |           | 147                        | 11.5      | 2.070                                 | 19.8                | 23.9                    | 2.005                                     | 24.6                     | 1.993                                      |
| 吉井川砂 | 2.672                            | 0.844     | 0                          | 3.0       | 2.087                                 | 18.0                | 19.8                    | 2.093                                     | 19.1                     | 2.108                                      |
|      |                                  |           | 0                          | 9.5       | 2.095                                 | 13.1                | 17.3                    | 2.144                                     | 18.0                     | 2.128                                      |
|      |                                  |           | 49                         | 5.5       | 2.126                                 | 18.0                | 19.8                    | 2.094                                     | 19.3                     | 2.103                                      |
|      |                                  |           | 49                         | 17.0      | 2.162                                 | 15.1                | 17.5                    | 2.140                                     | 16.7                     | 2.157                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 3.0       | 2.002                                 | 21.6                | 26.3                    | 1.982                                     | 24.2                     | 2.016                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 4.0       | 2.045                                 | 16.3                | 22.3                    | 2.048                                     | 22.3                     | 2.048                                      |
|      |                                  |           | 98                         | 15.5      | 2.109                                 | 13.5                | 19.1                    | 2.108                                     | 19.8                     | 2.093                                      |
|      |                                  |           | 147                        | 15.0      | 2.142                                 | 16.6                | 20.7                    | 2.077                                     | 19.8                     | 2.094                                      |
|      |                                  |           | 147                        | 23.5      | 2.223                                 | 13.4                | 17.0                    | 2.149                                     | 16.5                     | 2.160                                      |

最後に、二重管式標準貫入試験器をボーリングロッドに接続し、通常の標準貫入試験を行った。

**b) 実験結果と考察**

実験結果を表-9に示す。表-9 (a)の  $\hat{\rho}_{df}$  は、二重管式標準貫入試験器で採取した試料の乾燥密度  $\rho_{ds}^2$  を式(9)で密度補正し、地盤の乾燥密度を推定したものである。土槽の実測  $\phi_d$  は、図-24に示す実験用試料の  $\rho_d \sim \phi_d$  関係に実験用地盤の乾燥密度  $\rho_{df}$  を適用して求めている。また、表-9 (b)の土槽の含水比  $\omega_f$  と湿潤密度  $\rho_{df}$  は、飽和度を100%、水の密度  $\rho_w$  を1.0 g/cm<sup>3</sup> と仮定し、 $\rho_{df}$  および土粒子の密

度  $\rho_s$  から求めたものを実測値としている。

図-26に  $\hat{\rho}_{df} \sim \rho_{df}$  関係を示す。 $\hat{\rho}_{df}$  と  $\rho_{df}$  の比をとると、 $(\hat{\rho}_{df} / \rho_{df})$  の平均値は1.000で、変動係数は0.015である。したがって、二重管式標準貫入試験器による密度測定精度は、実用的には十分であると言えよう。また、同図には  $\rho_{ds}^2 \sim \rho_{df}$  関係を合わせて示すが、採取時に密度が増加していることがわかる。これは、主に上載圧の影響に起因している<sup>4)</sup>。

図-27に提案システムによって推定した  $\phi_d$  すなわち密度による推定  $\phi_d$  と実験用地盤の実測  $\phi_d$  との関係を示す。また、同図には、以下に示す各式から

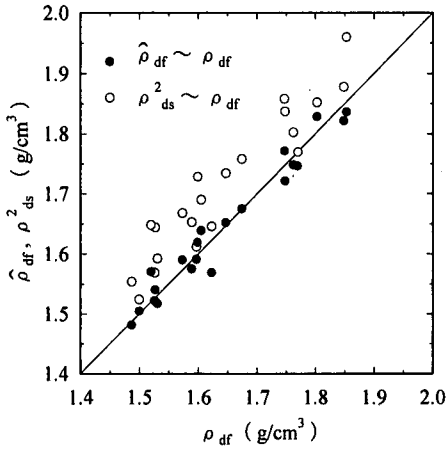


図-26  $\hat{\rho}_{df} \sim \rho_{df}$  関係

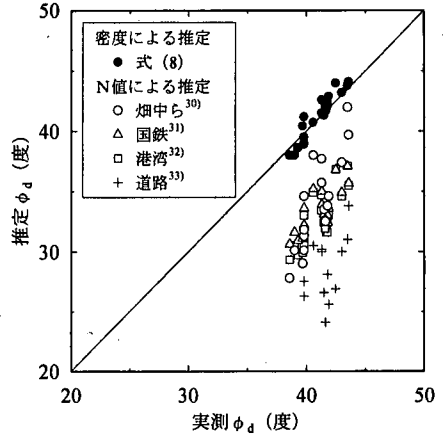


図-27 推定  $\phi_d \sim$  実測  $\phi_d$  関係

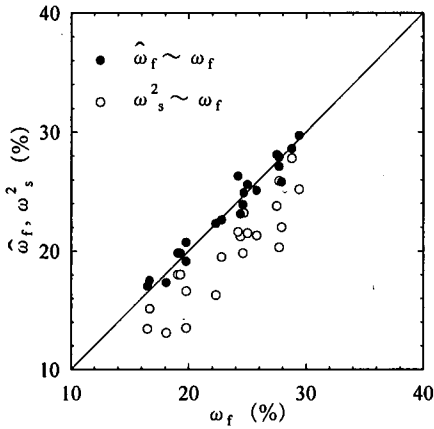


図-28  $\hat{\omega}_f \sim \omega_f$  関係

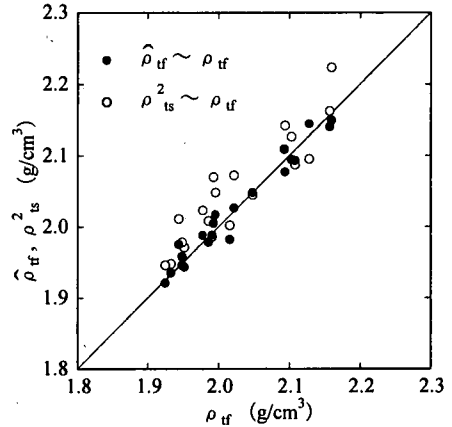


図-29  $\hat{\rho}_{df} \sim \rho_{df}$  関係

求めた  $N$  値による推定  $\phi_d$  と実測  $\phi_d$  の関係を合わせて示す。

煙中らの式<sup>30)</sup>

$$\phi_d = \{20N / (0.01\sigma'_v)^{0.5}\}^{0.5} + 20 \quad (\sigma'_v: \text{kPa}) \quad (13)$$

国鉄の式<sup>31)</sup>

$$\phi_d = 1.85(N / 0.01\sigma'_v + 0.7)^{0.6} + 28 \quad (\sigma'_v: \text{kPa}) \quad (14)$$

港湾の式<sup>32)</sup>

$$\phi_d = 3.2(N / 0.01\sigma'_v + 0.7)^{0.5} + 25 \quad (\sigma'_v: \text{kPa}) \quad (15)$$

道路標示方書の式<sup>33)</sup>

$$\phi_d = (15N)^{0.5} + 15 \leq 45^\circ, \quad N > 5 \quad (16)$$

図-27 をみると、密度による推定  $\phi_d$  は、実測  $\phi_d$  と最大  $\pm 2^\circ$  程度の違いである。この結果は、本推定システムを利用して原位置の  $\phi_d$  を精度良く推定できることを示唆している。

一方、 $N$  値による推定  $\phi_d$  は、非常にバラツキが大きく、実測  $\phi_d$  よりもかなり小さいことがわかる。 $N$  値による推定  $\phi_d$  が実測  $\phi_d$  より小さいのは安全側ではあるが、過大設計にもなりうる。したがって、今後は、森田<sup>2)</sup> が述べているように、地盤定数の真値を求めることに努める必要がある。

ところで、本実験では、二重管式標準貫入試験器の先端から 2 番目の中空管に詰まった試料の湿潤密度  $\rho_{ts}^2$  と含水比  $\omega_s^2$  (%) を測定し、これらを次式

$$\rho_{ds}^2 = \frac{\rho_{ts}^2}{1 + (\omega_s^2 / 100)} \quad (17)$$

に代入して  $\rho_{ds}^2$  を求めた後、 $\rho_{ds}^2$  を式(9)に適用して実験用地盤の乾燥密度の推定値  $\hat{\rho}_{df}$  を求めている。しかしここで、採取試料の測定値  $\rho_{ts}^2$ 、 $\omega_s^2$  は、それぞれ実験用地盤の湿潤密度  $\rho_{df}$ 、含水比  $\omega_f$  とは異なることに注意しなければならない。この差異は、①採取過程における試料からの脱水、②二重管式標準

貫入試験器の打撃貫入と $\sigma'_v$ などの影響による中空管内の試料の密度変化などによって生じる。

原位置の $\rho_{yf}$ および $\omega_f$ は重要な情報であり、設計値としても必要である。そこで、飽和砂地盤における $\rho_{yf}$ および $\omega_f$ の推定手順を以下に示す。

まず、次式から原位置の含水比 $\omega_f$ を推定する。

$$\hat{\omega}_f (\%) = \rho_w \left( \frac{1}{\hat{\rho}_{df}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (18)$$

ここに、 $\hat{\omega}_f$ ：原位置の含水比 $\omega_f$ の推定値、 $\rho_w$ ：水の密度(=1.0 g/cm<sup>3</sup>と仮定する)、 $\rho_s$ ：土粒子の密度(g/cm<sup>3</sup>)である。

つぎに、 $\hat{\rho}_{df}$ と $\hat{\omega}_f$ を次々に適用すれば、原位置の湿潤密度 $\rho_{yf}$ が推定できる。

$$\hat{\rho}_{yf} = \hat{\rho}_{df} \left\{ 1 + \left( \hat{\omega}_f / 100 \right) \right\} \quad (19)$$

ここに、 $\hat{\rho}_{yf}$ ：原位置の湿潤密度 $\rho_{yf}$ の推定値である。

図-28、図-29に上記の手順で推定した実験用地盤の $\hat{\omega}_f \sim \omega_f$ 関係および $\hat{\rho}_{yf} \sim \rho_{yf}$ 関係を示す。推定値と実測値は極めて良い相関があり、二重管式標準貫入試験器によって原位置の $\omega_f$ 、 $\rho_{yf}$ を十分な精度で把握できると言えよう。また、これらの図には、採取試料の測定値 $\rho_{ts}^2 \sim \rho_{yf}$ 関係および $\omega_s^2 \sim \omega_f$ 関係を合わせて示しているが、先に述べたように、かなりの差異があることがわかる。

## 6. まとめ

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下のようである。

- ① 砂の $\phi_d$ の推定式の提案にあたっては、実用的観点から、砂の $e_{max}$ と $\bar{k}$ との直線関係を最上の強度式と組み合わせる方法が効果的である。
- ② 自然砂とは著しく粒子形状の異なるGB、混合砂および金属砂のような人工砂の場合、 $FU$ が $e_{max}$ および $\bar{k}$ に大きな影響を及ぼす。そのため、砂の $e_{max} \sim \bar{k}$ 関係は、人工砂のそれらとは全く異なる。そこで、本研究では、川砂や海砂などの自然砂を対象とした $\phi_d$ の推定式を提案することにした。
- ③  $\phi_d$ の提案推定式は、十分実用に供することがわかった。また、本推定式は、砂礫の最小密度試験<sup>5)</sup>を適用することにより、 $D_{max}$ が20~30mm程度までの砂礫に適用を拡大できると思われ、盛土材の $\phi_d$ の設定などに利用できよう。ただし、本論文で示した推定式は、 $D_{max}$ が9.5mm以下の自然砂試料を用いて得られた実験式であるから、 $D_{max}$ が9.5mm以上の砂礫試料への適用には留意する必要がある。
- ④ 砂地盤の原位置における $\phi_d$ の推定システムは、

二重管式標準貫入試験器の中空管の形状による制約から、 $D_{max}$ が3~5mm程度までの砂に適用可能と想定される。

⑤ 土槽内に作製した実験用砂地盤に本推定システムを適用して $\phi_d$ を推定した結果、 $N$ 値による $\phi_d$ の推定方法に比べ、極めて高い推定精度を得ることができた。ただし、本システムでは、原位置の密度から等方圧密排水三軸圧縮条件下の $\phi_d$ の推定に限定しているため、原位置の $\phi_d$ に及ぼす異方性、年代効果、有効拘束圧等の影響については別途検討する必要がある。

⑥ 本推定システムでは、原位置の $\phi_d$ 以外に、原位置の含水比 $\omega_f$ 、湿潤密度 $\rho_{yf}$ および乾燥密度 $\rho_{df}$ といった重要な地盤情報を得ることができる。

今後は、本推定システムの実用化に向け、①人工砂である碎石、マサ土やシラスといった特殊土の $\phi_d$ の推定式の誘導、②現場実証実験などを行う予定である。

## 参考文献

- 1) 例えば、土質調査法改定編集委員会：地盤調査法地盤工学会，pp. 200~202, 1995. 7.
- 2) 森田悠紀雄：強度定数 $N$ 値による評価について，Q&Aコーナー，土と基礎，Vol. 45, No. 10, pp. 35~37, 1997.
- 3) 最上武雄編：土質力学，技報堂出版，pp. 1029, 1982.
- 4) 奥山一典，藤原身江子，大西智佳，八木則男：二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法，土木学会論文集，No. 652/III-51, pp. 141~153, 2000. 6.
- 5) 奥山一典，藤原身江子，越智洋秀，井上真理子：砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大に関する研究，土木学会論文集，No. 638/III-49, pp. 11~27, 1999. 12.
- 6) 地盤工学会：改正地盤工学会基準・同解説，地盤材料の工学的分類方法(日本統一分類法)(JGS M 111-1996)，1996. 8.
- 7) 最上武雄：レキの内部摩擦角と常数 $k$ について，土と基礎，Vol. 16, No. 11, pp. 29~37, 1968.
- 8) 最上武雄，吉越 洋：砂礫の内部摩擦角について，土木学会第23回年次学術講演会概要集，pp. 51~52, 1969.
- 9) 立元 勉：砂質土の粒度粒径などが最大・最小間隙比におよぼす影響について，砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 71~78, 1981.
- 10) 諸戸靖史：粒状体の変形と強度に関する基礎的研究，学位論文，東北大学，1976.
- 11) 諸戸靖史：砂や礫の内部摩擦角，土と基礎，Vol. 31, No. 8, pp. 5~10, 1983.
- 12) MIURA, K., MAEDA, K., FURUKAWA, M. and TOKI, S.: PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SANDS WITH DIFFERENT PRIMARY PROPERTIES, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol. 37, No. 3, pp. 53~64, 1997.
- 13) 吉村優治，小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の

- 簡易な定量化法, 土木学会論文集, No. 463/Ⅲ-22, pp. 95~103, 1993. 3.
- 14) Rowe, P.W. : The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, *Proc. Royal Society*, Vol. A269, pp. 500~527, 1962.
  - 15) 越智洋秀, 岡田歩, 奥山一典 : 平面摩擦角の粒径依存性について, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 507~508, 1997.
  - 16) 土質試験法(第 3 回改訂版)編集委員会編 : 土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp. 106~115, 1994.
  - 17) 井上真理子, 藤原身江子, 奥山一典 : 砂の最小間隙比に及ぼす上載圧の影響, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 507~508, 1996.
  - 18) 田平健二, 越智洋秀, 藤原身江子, 奥山一典 : 砂の密度と一次性質による  $\phi_d$  の推定について, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, 第 3 部(A), pp. 734~735, 1998.
  - 19) 奥山一典, 田平健二, 井上真理子, 越智洋秀 : 砂の定数  $k$  と粒子形状の関係について, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 513~514, 1998.
  - 20) 吉村優治, 小川正二 : 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No. 487/Ⅲ-22, pp. 95~103, 1993. 3.
  - 21) 越智洋秀, 藤原身江子, 奥山一典 : 相似粒度をなす砂の最大間隙比の粒径依存性について, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, 第 3 部(A), pp. 18~19, 1997.
  - 22) 北島智子, 越智洋秀, 田平健二, 奥山一典 : 砂の定数  $k$  と最大間隙比  $e_{max}$  の関係について, 地盤工学会四国支部平成 11 年度技術講演概要集, pp. 41~42, 1999.
  - 23) 吉村優治, 松岡 元 : 粒状体の内部摩擦角と粒子形状の関係, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 745~746, 1996.
  - 24) 真田博司, 田平健二, 藤原身江子, 奥山一典 : 密度による自然砂の  $\phi_d$  の推定方法, 地盤工学会四国支部平成 11 年度技術講演概要集, pp. 43~44, 1999.
  - 25) 榎 明深, 越智洋秀, 吉岡輝政 : 砂の内部摩擦角に関する研究, 鳥取大学共同研究報告書, 1999. 3.
  - 26) 伊豫屋紀子, 真田博司, 藤原身江子, 奥山一典 : 二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限について, 地盤工学会四国支部平成 11 年度技術講演概要集, pp. 39~40, 1999.
  - 27) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. : EFFECTS OF SAMPLE DISTURBANCE ON DYNAMIC PROPERTIES OF SAND, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol. 26, No. 1, pp. 53~64, Mar. 1986.
  - 28) 山崎 勉, 吉見吉昭 : 乱さない密な新潟砂の排水せん断特性, 第 19 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 263~264, 1984.
  - 29) 越智洋秀, 奥山一典, 田平健二 : 積輪型土槽内の土圧分布, 第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集 2 分冊の 1, pp. 415~416, 1996.
  - 30) Hatanaka, M. and Uchida, A. : EMPIRICAL CORRELATION BETWEEN PENETRATION RESISTANCE AND INTERNAL FRICTION ANGLE OF SANDY SOILS, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol. 36, No. 4, pp. 1~9, 1996.
  - 31) 土木学会 : 国鉄建造物設計標準解説, 抗土圧構造物, 基礎構造物, 1986. 3.
  - 32) 日本港湾協会 : 港湾施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp. 245, 1999. 4.
  - 33) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, 1990. 5.

(1999. 9. 9 受付)

## ESTIMATING SYSTEM OF ANGLES OF SHEAR RESISTANCE $\phi_d$ BASED ON DENSITY OF SANDY GROUNDS

Kazunori OKUYAMA, Minoru YONASHIRO, Mieko FUJIWARA,  
Kenji TABIRA and Hiroshi SANADA

The object of the present study is to propose a system for estimating the angles of shear resistance  $\phi_d$  of sandy grounds economically and accurately. After examining the relationship between the parameter  $k$  in Mogami's strength formula and the physical properties of sand, the authors developed an equation for estimating  $\phi_d$  which utilizes the linear relationship between the parameter  $k$  and the maximum void ratio  $e_{max}$  from a practical point of view. Then, the authors combined the estimating equation and the density-measuring technique with the "split spoon sampler with built-in tube" to build a system for estimating  $\phi_d$  of sandy grounds *in site*.