

# 粗粒土の締固め密度推定式の比較

増井久<sup>1</sup>・福本武明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

粗粒子を多量に含む土質材料を扱う機会の多い今日、こうした粗粒土の密度管理が実施工において重要な問題になってきている。粗粒土の締固め密度を推定する方法には、これまでに種々の方法が提案されている。本論文では、それらのうちで特に密度補正式を用いて推定する方法を取り上げ、諸家の実測データを基に詳細な比較検討を行っている。その結果、主要な各提案式の得失を明確にして示すとともに、福本の提案式がどの土質材料に対しても概ね精度良く適合し、実務的に最も利用しやすい式として推奨できることを明らかにしている。

**Key Words :** coarse-grained soil, compaction test, density, oversize corrections

## 1. はじめに

空港、フィルダム、宅地造成工事等の特に大規模な工事においては、岩砕や礫などの粗粒子、ときには最大粒径が 75mm を超えるような粗粒子を多量に含む粒状材料を盛土材料として用いる場合が増えてきている<sup>1),2)</sup>。その際、設計や密度管理に必要な締固め特性を、直接室内試験で求めることが望ましいが、室内試験では粒径の大きい原材料をそのまま用いて試験することが極めて困難である。したがって、現行規定<sup>2)</sup>では、許容最大粒径より粗い粒子を除去した試料を用いて締固め試験を行い、得られた最大乾燥密度の値を許容最大粒径を超える粗粒子の混入率  $P$  に応じて補正する、いわゆる Walker & Holtz 法が用いられている。しかし、Walker & Holtz の密度補正式は、多くの人々が指摘のように、 $P \leq 30 \sim 40\%$  の範囲でしか成り立たないから、最近もっと広い範囲にまで適用できるような密度補正式の開発が行われている<sup>3)</sup>。また、こうした密度推定式を用いる方法の他に重回帰分析による方法、あるいは許容最大粒径以下のいわゆるせん頭粒度の材料(許容最大粒径以上の材料を原粒度から除去した材料)で室内試験を行い、それらの実測値との相関関係から原粒度の締固め特性値を外挿して求める方法なども提案されている<sup>3)</sup>。これらの推定方法の中でどれが最も利用価値の高い方法かといった点が実務上の関心事と思われるが、この点に関し今のところ有益な見解も公表されておらず不鮮明のままである。

そこで本論文では、上記の推定方法の中で今回、

特に密度補正式を用いる推定法に研究の対象を絞り、過去に提案された Walker & Holtz 式をはじめ主要な推定式を幾つか取り上げ、諸家の室内締固め試験で得られた実測データを当てはめて式の妥当性の検証を行うとともに、実務上どの推定式が最適かについてかなり詳細な比較検討を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 既存の密度補正式

### (1) Walker & Holtz の式 (1951)<sup>4)</sup>

この方法は、土と礫の混合物を締固めた場合、礫の間隙が土で満たされ、間隙中の土がその締固め仕事量で土のみを締固めた場合の密度になっているという仮定から出発している。いま、土のみの乾燥密度を  $\rho_{d1}$ 、礫のみの場合のゼロ空気間隙状態の乾燥密度を  $\rho_{d2}$ 、礫混入率を  $P$  とすると、混礫土の乾燥密度  $\rho_d$  は式 (1) で表される。この式の誘導過程の詳細と用語の定義については、わが国の「土質試験の方法と解説 (2000 年版)」<sup>2)</sup> の通りであるので参照されたい。

$$\rho_d = \frac{P\rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} \quad (1)$$

### (2) Ostermayer の式 (1979)<sup>5)</sup>

これは、Walker & Holtz 式をより実測値に近づけるために式中の  $\rho_{d2}$  を  $0.9\rho_{d2}$  と置き換えたもので

ある。

$$\rho_d = \frac{0.9\rho_{d1}\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + 0.9(1-P)\rho_{d2}} \quad (2)$$

(3) DIN の式 (1990) <sup>9)</sup>

ドイツの DIN では、次式が用いられている。

$$\rho_d = (1-P)\rho_{d1} + 0.9P\rho_{d2} \quad (3)$$

(4) 福本の式 (1984) <sup>8)~9)</sup>

これは、Walker&Holtz 式に含まれる不合理な点を改善し、より実情に即した仮定から出発して誘導されたものである。混礫土の乾燥密度は式 (4a) の形で表せる。式中の  $\alpha$  と  $\beta$  は係数であり、 $\alpha$  は式 (4b) で与えられる。式 (4b) 中の  $\rho_{dg}$  は、礫のみの場合の実測乾燥密度である。

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1}\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} (1 - \alpha P^\beta) \quad (4a)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_{dg}}{\rho_{d2}} \quad (4b)$$

(5) 柴田の式 (1986) <sup>10)~12)</sup>

これは、礫混じり土の構造 (2 種の基本構造 I, II の混合比率) を考慮して誘導されたものである。混礫土の乾燥密度は式 (5) で表される。ここで、 $G_g$  は礫の比重であり、 $\rho_{dvc}$ 、 $\lambda$  は礫混入率  $P$  によって決まる係数である。

$$\rho_d = \frac{G_g\rho_{d1} - (G_g - \rho_{dg})(\rho_{d1} - \rho_{dvc})\lambda}{G_g(1-P) + \rho_{d1}P} \quad (5)$$

(6) Hsu&Saxena の式 (1991) <sup>13)</sup>

これは、間隙比  $e$  を用いて表したもので、土の比重を  $G_s$ 、礫の比重を  $G_g$ 、水の密度を  $\rho_w$  とすると、混礫土の乾燥密度は式 (6a) で表される。なお、式中の  $e$  は式 (6b) で与えられる。ここで、 $e_0$  は土のみの間隙比であり、 $A, B, C, D$  は、大型締固め試験の結果より決定される係数である。

$$\rho_d = \frac{1}{(1+e)[P/(G_g\rho_w) + (1-P)/(G_s\rho_w)]} \quad (6a)$$

$$e = e_0 + AP + BP^2 + CP^3 + DP^4 \quad (6b)$$

### 3. 締固め試験データと諸式への当てはめ

粗粒土の締固め密度推定式を比較するために、表 - 1 に示すような諸家 <sup>9), 9), 10), 12)~21)</sup> の締固め試験データを用いることにする。対象とした土質は、道路路盤材として用いられた火山礫やフィルダムのコア用土など様々である。また、締固め条件として締固め仕事量やモールド径もそれぞれ 550~2500kJ/m<sup>3</sup>、15~76.2cm と広範囲に及んでいる。

諸式への当てはめに際しては、表 - 1 中に示した物理量を用いた。これらの諸量は、各文献中の表や図から拾ったり読み取って特定した数値である。また、式 (4)~(6) 中の諸係数の求め方については、今回、式 (4a) 中の  $\beta$  に対して実測データに最小二乗法を適用して算定する方法で行い、式 (5) 中の  $\rho_{dvc}$  と  $\lambda$  に対して柴田 <sup>10)</sup> が提示した図から読み取る方法で行い、式 (6b) 中の  $A \sim D$  に対して実測データを当てはめて 4 元連立方程式を解く方法で行ったことを明記しておきたい。

### 4. 結果と考察

諸式への当てはめ結果を試料毎に整理して図 - 1 に示す。これらを見ながら、各密度推定式の適合性について、以下に考察する。

(1) 式 (1) とその微調整型の式の場合：

式 (1) の工学的な価値は、粗粒土の材料特性値 ( $\rho_{d1}$ 、 $\rho_{d2}$ ) さえ既知であれば、礫混入率  $P$  に対応する乾燥密度  $\rho_d$  が即座に求められることである。ところが、式 (1) の場合、礫混入率  $P$  が小さい間は確かに妥当であるが、 $P$  が大きくなるほど、間隙を満たす土の密度が減少するので仮定に合わなくなってくる。その結果、多くの人々の指摘の通り  $P$  が 40% 程度以上になると実測値との隔たりがどんどん大きくなる。式 (2) 及び式 (3) も、その成り立ちから式 (1) の微調整型の式と考えることができ、式 (1) に比べれば若干適合性が良くなるものの、 $P$  の増大とともに実測値からかけ離れてしまう。

(2) 式 (4) の場合：

式 (1) を改善した式 (4) は、試料番号 7, 13 のように、 $P$  が 80% 前後で実測値から少し外れるケースがあるものの、概ね  $P$  の全範囲にわたり実用上十分な精度でよく適合することが図 - 1 からわかる。式中の  $\alpha$  と  $\beta$  については、 $\alpha$  を式 (4b) から一義的に決め、 $\beta$  を前述のように最小二乗法を適用して算定してい

表-1 諸家の締固め試験データ及び当てはめに必要な諸量

| 試料番号 | 対象土質                  | 主な試験条件    |                                   |            | 当てはめに必要な諸量                      |                                 |                                 |       |       |       | 引用文献番号     |
|------|-----------------------|-----------|-----------------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|------------|
|      |                       | 礫の粒径 (mm) | 締固め仕事量 $E_c$ (kJ/m <sup>3</sup> ) | モールド径 (cm) | $\rho_{d1}$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\rho_{d2}$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\rho_{dg}$ (t/m <sup>3</sup> ) | $G_s$ | $G_g$ | $e_0$ |            |
| 1    | 礫混じり土                 | 4.76~19.1 | 550                               | 10         | 1.778                           | 2.677                           | 1.733                           | 2.665 | 2.677 | 0.499 | 14)<br>15) |
| 2    |                       |           |                                   |            | 1.778                           | 2.677                           | 1.791                           | 2.665 | 2.677 | 0.499 |            |
| 3    |                       |           |                                   |            | 1.778                           | 2.677                           | 1.742                           | 2.665 | 2.677 | 0.499 |            |
| 4    |                       |           |                                   |            | 1.778                           | 2.677                           | 1.854                           | 2.665 | 2.677 | 0.499 |            |
| 5    | 道路路盤材<br>火山礫          | 4.76~12.7 | 550                               | 15         | 1.560                           | 2.670                           | 1.740                           | 2.670 | 2.670 | 0.712 | 16)<br>17) |
| 6    |                       |           |                                   |            | 1.560                           | 2.450                           | 1.540                           | 2.670 | 2.450 | 0.712 |            |
| 7    |                       |           |                                   |            | 1.560                           | 2.200                           | 1.330                           | 2.670 | 2.200 | 0.712 |            |
| 8    | 名神高速道路盛土材<br>山科小山土    | 2~4.75    | 550                               | 15         | 1.890                           | 2.664                           | 1.670                           | 2.700 | 2.700 | 0.429 | 18)        |
| 9    | 名神高速道路盛土材<br>八日市黒丸台地土 |           |                                   |            | 1.600                           | 2.635                           | 1.710                           | 2.670 | 2.670 | 0.669 |            |
| 10   | 名神高速道路盛土材<br>大津三池土    |           |                                   |            | 1.580                           | 2.684                           | 1.740                           | 2.720 | 2.720 | 0.722 |            |
| 11   | フィルダム材<br>アースダムコア用土   | 2~4.75    | 550                               | 20         | 1.722                           | 2.560                           | 1.863                           | 2.780 | 2.698 | 0.614 | 19)        |
| 12   | フィルダム材<br>牧尾ダムコア用土    | 2~50      | 2300                              | 20         | 1.767                           | 2.630                           | 1.878                           | 2.730 | 2.630 | 0.545 | 20)        |
| 13   |                       |           |                                   |            | 1.490                           | 2.770                           | 1.900                           | 2.770 | 2.770 | 0.859 |            |
| 14   | 礫混じり土                 | 2~20      | -                                 | 15         | 1.832                           | 2.700                           | 1.648                           | 2.640 | 2.700 | 0.441 | 10)        |
| 15   |                       | 2~40      |                                   |            | 1.672                           | 2.735                           | 1.762                           | 2.641 | 2.735 | 0.580 | 12)        |
| 16   | Sandy gravel          | 4.75~76.2 | 2500                              | 76.2       | 1.929                           | 2.620                           | 2.071                           | 2.620 | 2.620 | 0.358 | 13)        |
| 17   |                       |           | 550                               |            | 1.730                           | 2.620                           | 1.954                           | 2.620 | 2.620 | 0.514 |            |
| 18   | Medium gravel         | 2~75      | -                                 | -          | 1.820                           | 2.470                           | 1.690                           | 2.740 | 2.740 | 0.505 | 5)         |
| 19   | Uniform coarse gravel | 2~31.5    |                                   |            | 1.820                           | 2.470                           | 1.800                           | 2.740 | 2.740 | 0.505 |            |
| 20   | Well graded gravel    | 31.5~75   |                                   |            | 1.820                           | 2.740                           | 2.140                           | 2.740 | 2.740 | 0.505 |            |
| 21   | 京都高速鉄道<br>建設用土        | 37.5~75   | 550                               | 30         | 1.749                           | 2.711                           | 1.848                           | 2.748 | 2.748 | 0.571 | 9)         |
| 22   | 岐阜県土地造成<br>工事現場盛土材料   | 4.76~63.5 | 550                               | 30         | 1.815                           | 2.560                           | 1.800                           | 2.635 | 2.635 | 0.452 | 21)        |

る。図-2は、このようにして求めた  $\alpha$ ,  $\beta$  をプロットしたもので、今回の場合、 $\alpha$  が 0.21~0.39 の範囲、 $\beta$  が 1.8~5.1 の範囲の値を示すことがわかる。 $\beta$  と試験条件との相関性については、礫部分の平均粒径  $D_n$  と細粒部分の平均粒径  $d_n$  の比 ( $D_n/d_n$ ) との間に両対数紙上で点 (1, 1) を通る直線関係が認められ、式 (7) で表せること、及び式中の  $\xi$  が式 (8) で表せることが極最近の要因分析結果から判明している<sup>22)</sup>。

$$\beta = \left( \frac{D_n}{d_n} \right)^\xi \quad (7)$$

$$\xi = \left( \frac{\rho_{d1}}{\rho_{dg}} \right) \left( 1 - \frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}} \right) \quad (8)$$

いま、 $\beta$  を式 (7), (8) から計算するとともに、式 (4) に実測値を入れて求めた  $\beta$  との関係プロットすれば図-3が得られる。この図より、点群が 45° の線上にほぼ集中することから、粒径比  $D_n/d_n$  と材料特

性値 ( $\rho_{d1}$ ,  $\rho_{d2}$ ,  $\rho_{dg}$ ) さえ事前に求めておけば式 (4) 中の  $\beta$  が実用上十分な精度で容易に推定でき、有用性の高いものであることがわかる。

(3) 式 (5) の場合:

式 (5) は、図-1 からわかるように、式 (4) と似通った曲線傾向を示し、 $P$  が 60% の範囲まではほぼ実測値に適合しているが、 $P$  が 60% 付近より大きくなると、例えば試料番号 8, 10, 13 のように、概して適合性が悪くなる。この原因として、係数  $\rho_{dvc}$ ,  $\lambda$  の求め方に難点があることが挙げられる。つまり、 $\rho_{dvc}$  と  $\lambda$  は係数というものの、いずれも一定値でなく  $P$  の関数として図より決定する方式となっており (文中では  $\rho_{dvc}$  に対し図-4,  $\lambda$  に対し図-5 を使用)、使用土に合わせた図の作成を必要とし、作成の仕方が判りにくく複雑である。

式 (5) の適合性を式 (4) のそれと具体的に比較して示すために、ここでは当てはめ精度として次のよう

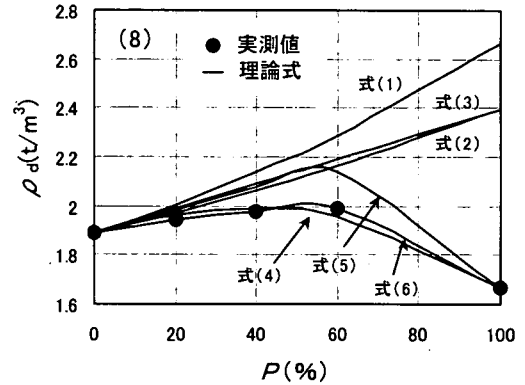
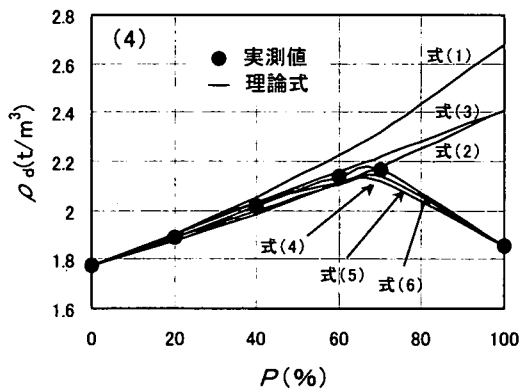
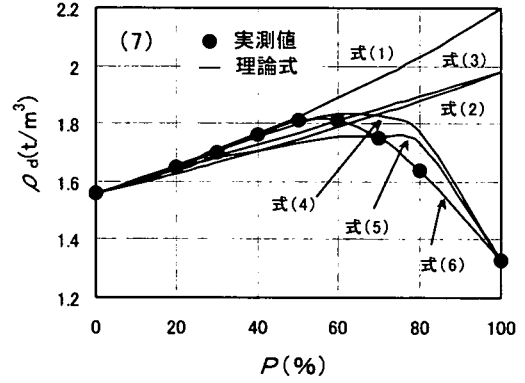
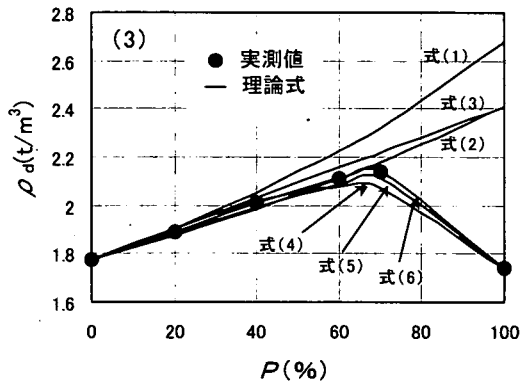
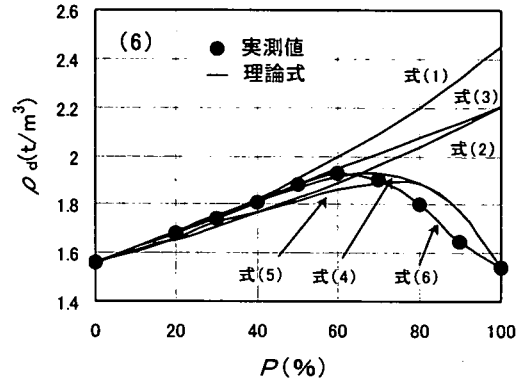
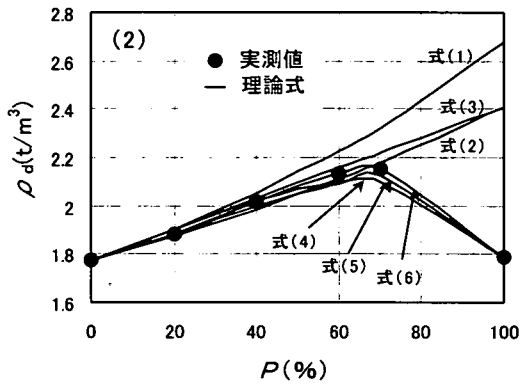
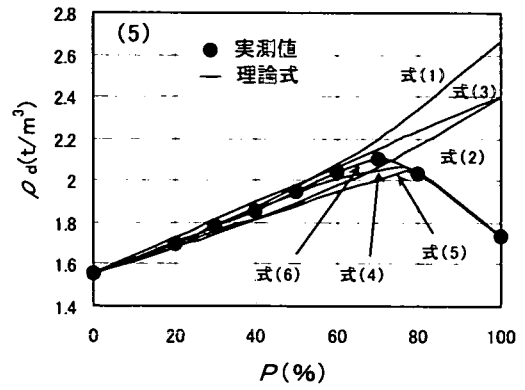
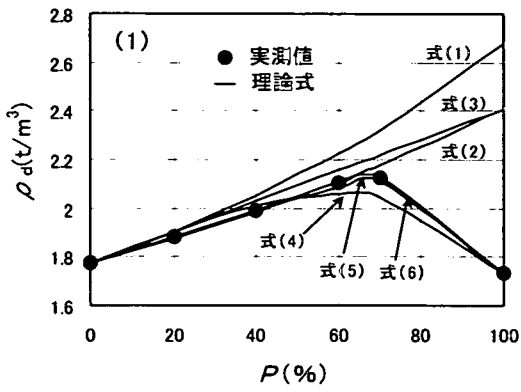


図-1 乾燥密度  $\rho_d$  と礫混入率  $P$  の関係

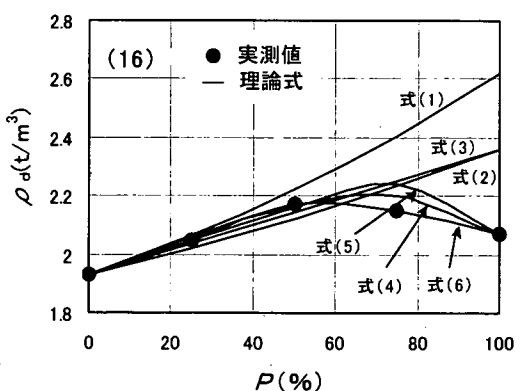
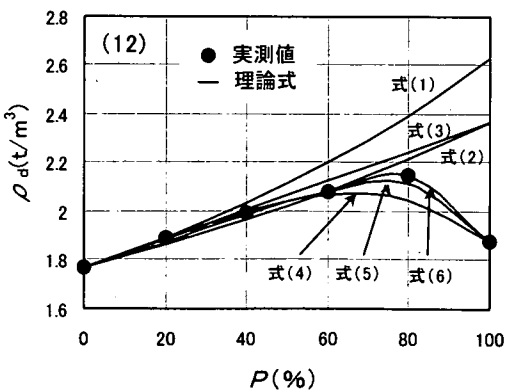
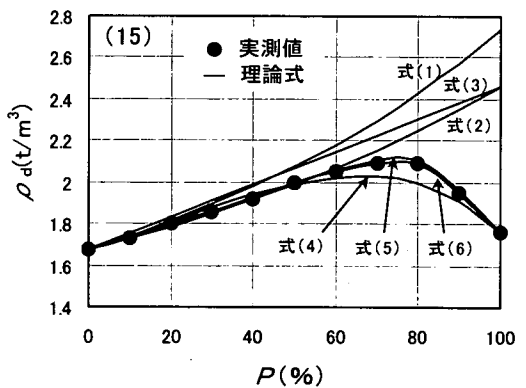
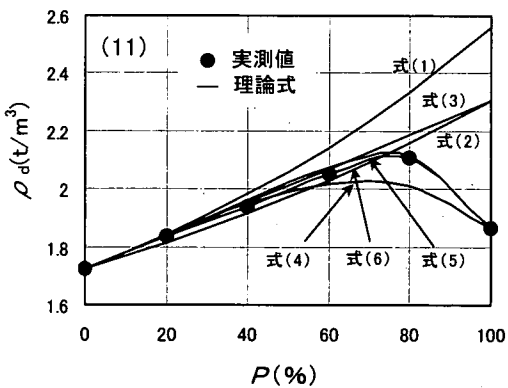
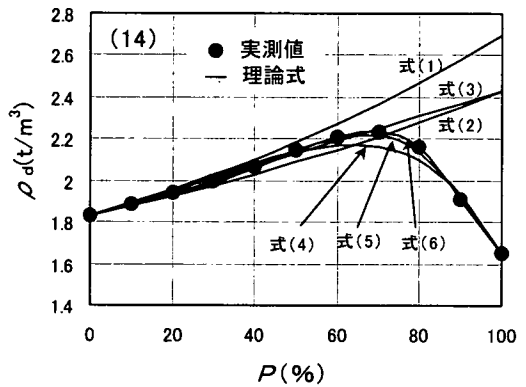
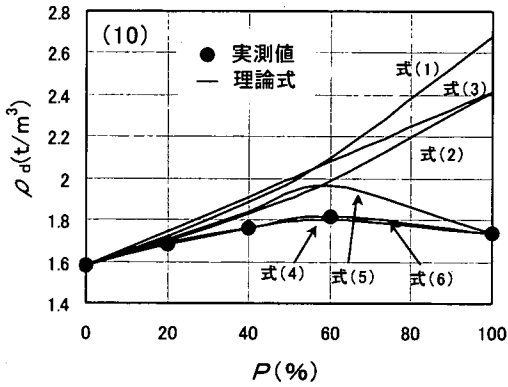
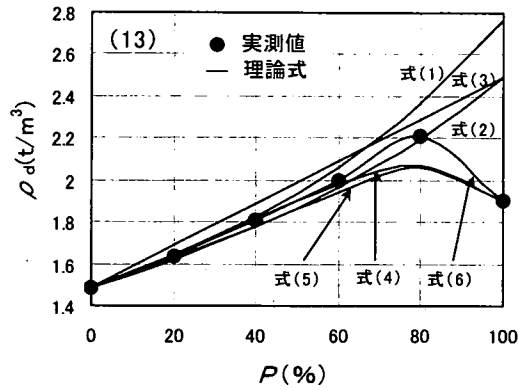
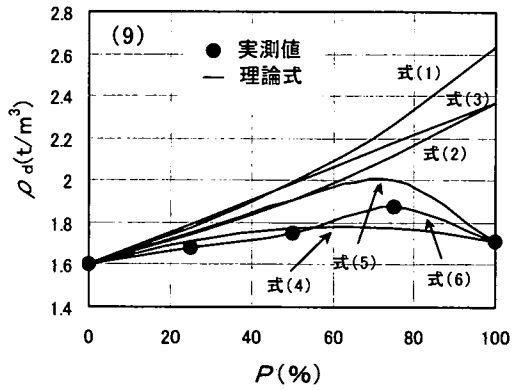


図-1 乾燥密度  $\rho_d$  と礫混入率  $P$  の関係 (続き)

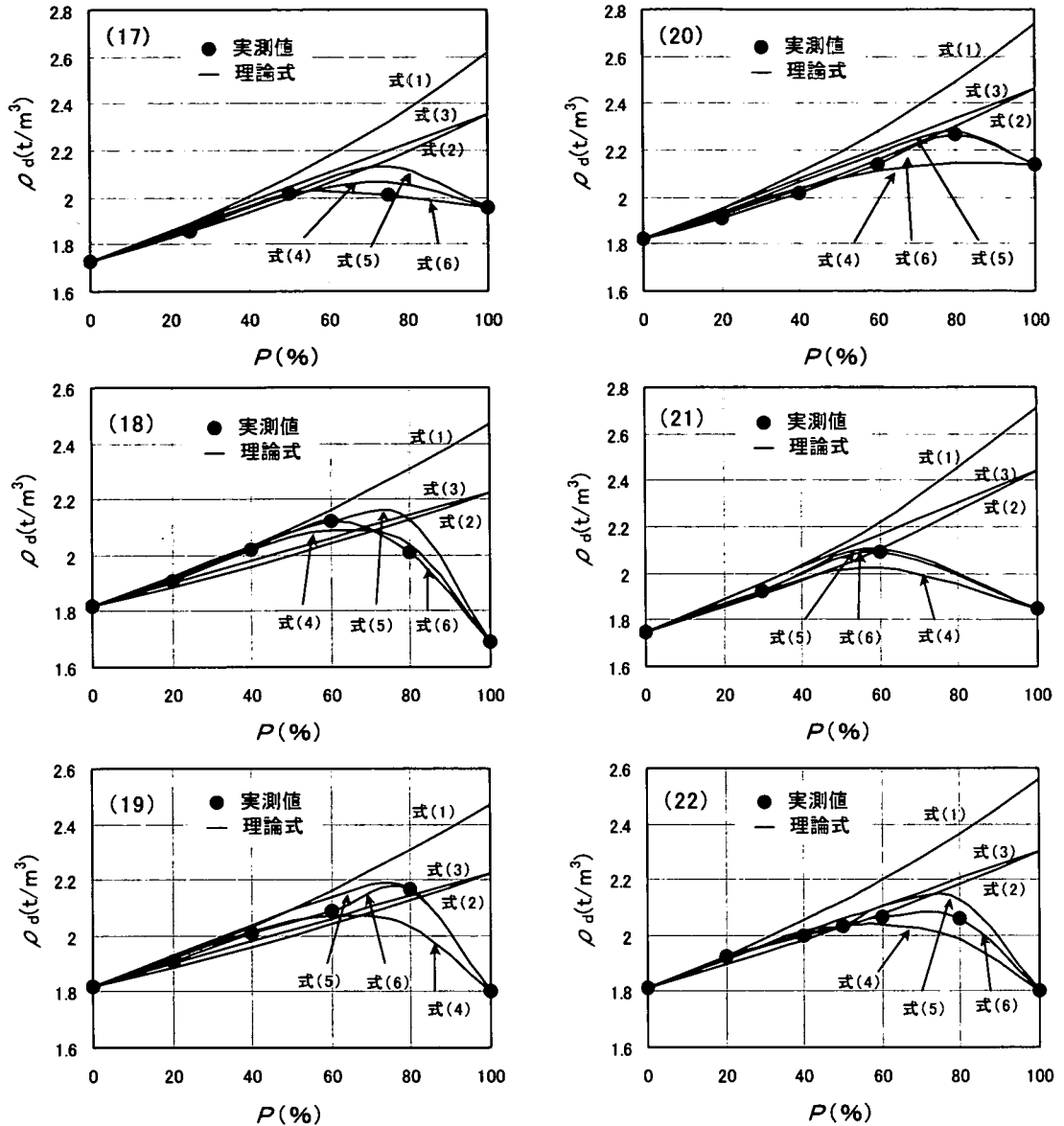


図-1 乾燥密度  $\rho_d$  と礫混入率  $P$  の関係 (続き)

な  $v^2$  なる量を定義し、その大小で示すこととした。

$$v^2 = \sum_{i=1}^n [(\rho_d \text{の实测値}) - (\rho_d \text{の推定値})]^2 \quad (9)$$

式中、 $n$  は測定数である。その結果が表-2 である。表中の両式の比較から、式(5)は式(4)よりも精度的に良くない場合が多いことがわかる。

(4) (6) の場合：

式(6)において、混雑土全体の比重を  $G_1$  と記号すれば、 $G_1$  が式(10)のように書けることから、結局、

$$G_1 = \frac{G_s \cdot G_g}{PG_s + (1-P)G_g} \quad (10)$$

混雑土の乾燥密度の算定式として、この場合、常用の式(11)を考えていることになる。

$$\rho_d = \frac{G_1 \cdot \rho_w}{1+e} \quad (11)$$

そして、式中の間隙比  $e$  を混雑率  $P$  の関数と見なし、単に式(6)に示すような4次式で表現しているに過ぎない。つまり、式(6)の背景に物理的意味が認め

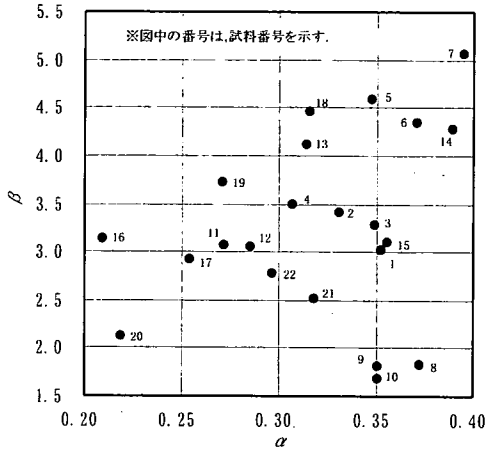
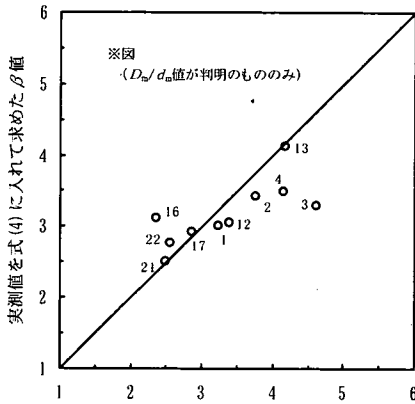


図-2 式(4)中の係数 $\alpha$ と $\beta$ の関係



式(7)、(8)で計算した $\beta$ 値

図-3  $\beta$ の実測値と計算値の関係

表-2 当てはめ精度の比較

| 試料番号 | 当てはめ精度 $v^2$ |          |
|------|--------------|----------|
|      | 式(5)         | 式(4)     |
| 1    | 0.0005       | 0.0090   |
| 2    | 0.0026       | 0.0046   |
| 3    | 0.0018       | 0.0058   |
| 4    | 0.0026       | 0.0033   |
| 5    | ▲ 0.0251     | 0.0038   |
| 6    | ▲ 0.0201     | 0.0091   |
| 7    | ▲ 0.0211     | ▲ 0.0249 |
| 8    | ▲ 0.0335     | 0.0019   |
| 9    | ▲ 0.0438     | 0.0123   |
| 10   | ▲ 0.0288     | 0.0003   |
| 11   | 0.0008       | 0.0105   |
| 12   | 0.0016       | 0.0098   |
| 13   | ▲ 0.0283     | ▲ 0.0207 |
| 14   | 0.0006       | 0.0061   |
| 15   | 0.0007       | 0.0103   |
| 16   | 0.0080       | 0.0023   |
| 17   | 0.0147       | 0.0040   |
| 18   | 0.0148       | 0.0016   |
| 19   | 0.0036       | 0.0191   |
| 20   | 0.0051       | 0.0166   |
| 21   | 0.0002       | 0.0046   |
| 22   | 0.0066       | 0.0059   |

注) 精度の良い方に を付けてある。  
▲印-良くない精度範囲( $v^2 \geq 0.02$ )

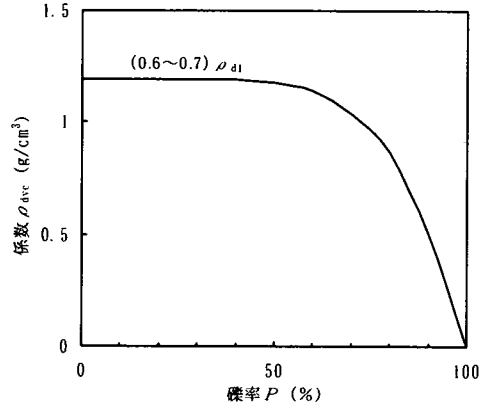


図-4  $\rho_{dvc}$ - $P$ 関係の一例<sup>10)</sup>

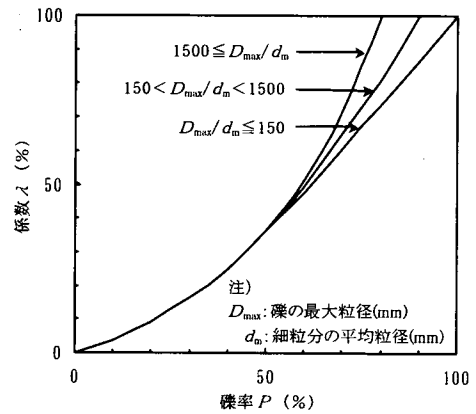


図-5  $\lambda$ - $P$ 関係の一例<sup>10)</sup>

表-3 式(6)における係数A, B, C, Dの値

| 試料番号 | A        | B        | C        | D        |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 1    | -0.30441 | -0.43464 | 0.51064  | 0.27425  |
| 2    | -0.37099 | -0.35505 | 0.48879  | 0.23307  |
| 3    | -0.41231 | -0.14830 | 0.30230  | 0.29617  |
| 4    | -0.38701 | -0.33651 | 0.48112  | 0.18743  |
| 5    | -0.13060 | -2.24960 | 2.24814  | -0.04500 |
| 6    | -0.17300 | -2.45751 | 2.73215  | -0.22227 |
| 7    | -0.49953 | -1.56166 | 2.12114  | -0.11736 |
| 8    | -0.23935 | 0.18113  | 0.02842  | 0.21799  |
| 9    | -0.44289 | 0.68700  | -0.74750 | 0.39605  |
| 10   | -0.59540 | 0.44235  | -0.13566 | 0.13041  |
| 11   | -0.48689 | -0.12291 | 0.24724  | 0.19643  |
| 12   | -0.66402 | 0.55784  | -0.30263 | 0.26424  |
| 13   | -0.97826 | 0.55216  | -0.40190 | 0.42683  |
| 14   | -0.03155 | -1.47839 | 1.48300  | 0.22424  |
| 15   | -0.35186 | -0.52991 | 0.63556  | 0.21888  |
| 16   | -0.23726 | -0.55184 | 0.83291  | -0.13693 |
| 17   | -0.20939 | -1.18857 | 1.47581  | -0.25147 |
| 18   | 0.08411  | -1.96241 | 2.05132  | -0.05721 |
| 19   | -0.54646 | 0.69396  | -0.54323 | 0.41245  |
| 20   | -0.39633 | 0.10942  | -0.12554 | 0.18734  |
| 21   | -        | -        | -        | -        |
| 22   | -0.35378 | -0.06560 | 0.27678  | 0.15470  |

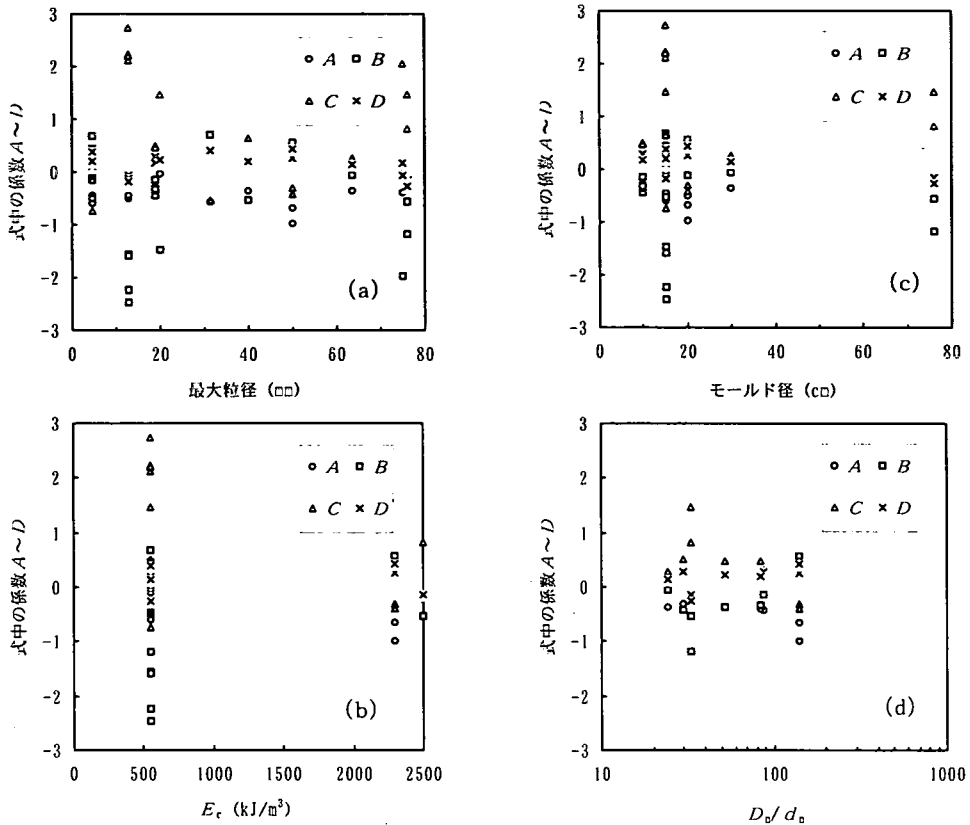


図-6 式(6)中の係数A~Dと諸要素の関係

られない。それゆえ、式(6)そのものが混礫土の構造の考察結果を反映して導き出された式とは言い難い。式(6)に実測値を当てはめて係数A, B, C, Dを4元連立方程式より求めた結果が表-3である。それらの係数値を使えば、式(6)の適合性は図-1から良いといえる。係数A~Dと試験条件との相関性については図-6に示すように、ここに取り上げた各要素に対し無相関である。

## 5. 結論

いずれの締固め密度補正式も境界条件、すなわち粗粒土を構成するもののうち、土のみと礫のみの比重と乾燥密度を実測し、それらの値を代入して求めることを前提としている。各密度推定式の比較検討結果を簡潔に整理して示せば、以下の通りである。

- (1) 式(1)は、多くの人々の指摘のように、概ね礫混入率  $P \leq 30 \sim 40\%$  の範囲でしか成り立たない。式(1)の微調整型である式(2), (3)についても、ほぼ同様の傾向である。
- (2) 式(4)は、式(1)の誘導過程に含まれる不合理な

点を改善した式であり、Pの全範囲にわたって実用上十分な精度でよく適合する。式中の係数  $\alpha, \beta$  は、材料特性値 ( $\rho_{d1}, \rho_{d2}, \rho_{dg}$ ) と粒径比  $D_0/d_g$  (礫部分の平均粒径  $D_0$  と細粒部分の平均粒径  $d_g$  の比) さえ既知であれば容易に求められることから、実務上便利で有用性の高いものである。

- (3) 式(5)は、式(1)と異なる発想から出発して誘導されたもので、式中の係数  $\rho_{dec}, \lambda$  を決めなければならない。それらの値をPの関数と考え、かつ礫部分の最大粒径  $D_{max}$  と細粒部分の平均粒径  $d_g$  の比と関連づけて求める方式を採っているが、かなり複雑で使用土毎の具体的な求め方が判りにくく、精度の面でも式(4)より劣る場合が多い。
- (4) 式(6)は、混礫土の構造の考察から誘導されたものでなく、単に空隙比  $e$  を4次式で表現しているに過ぎない。式の適合性は良いが、式中の係数A, B, C, Dを決めるために大型締固め試験を行って4点を求める必要がある。係数A~Dの値と各種試験条件との間に、相関性は認められない。



## 参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック，1999。
- 2) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第1回改訂版)，pp. 260-261, 2000。
- 3) 福本武明, 増井久：粗粒土の締固め密度推定法，土と基礎，Vol. 49, No. 8, pp. 26-28, 2001。
- 4) Walker, F.C. and Holtz, W.G. : Control of Embankment Material by Laboratory Testing, *Proc. ASCE*, Vol. 77, No. 108, pp. 1-25, 1951。
- 5) Schwab, H.H. : A contribution to the examination of hydraulic stability of earth and rock, *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, pp. 307-308, 1993。
- 6) 福本武明：新しい密度補正式の提案，立命館大学地盤研究室発表会資料，pp. 1-5, 1984。
- 7) 増井久, 福本武明：粒状土の密度に及ぼす粗粒子の影響，土木学会第 50 回年次学術講演会概要集，pp. 772-773, 1995。
- 8) 松田裕光, 福本武明, 増井久：粗粒材の密度補正に関する研究，平成 8 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，pp. III-51-1-2, 1996。
- 9) 福本武明, 増井久, 松田裕光：締固められた粗粒土の新密度補正式，第 33 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 403-404, 1998。
- 10) 柴田英明：土に粗粒分を混入した場合の締固め密度の算定式に関する一提案(第2報)，第21回土質工学研究発表会講演集，pp. 1759-1760, 1986。
- 11) 柴田英明：締固めたレキ混じり土の密度補正に関する提案，第22回土質工学研究発表会講演集，pp. 1681-1682, 1987。
- 12) 柴田英明：締固めたレキ混じり土の密度補正に関する提案(第2報)，第23回土質工学研究発表会講演集，pp. 1999-2000, 1988。
- 13) Hsu, T.S. and Saxena, S.K. : A GENERAL FORMULA FOR DETERMINING DENSITY OF COMPACTED SOILS WITH OVERSIZE PARTICLES, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol. 31, No. 3, pp. 91-96, 1991。
- 14) 森満雄：レキを含んだ土の締固め度について，道路建設，No. 162, pp. 28-34, 1961。
- 15) 森満雄：レキ込み土の締固め特性と2, 3の補正法の適用性について，道路建設，No. 166, pp. 11-20, 1961。
- 16) 森満雄：火山レキの締固め特性と支持力(その1)，土と基礎，Vol. 13, No. 6, pp. 19-26, 1965。
- 17) 森満雄：火山レキの締固め特性と支持力(その2)，土と基礎，Vol. 13, No. 7, pp. 3-9, 1965。
- 18) 試験所報告(名神高速道路編)，pp. 302-307, 1965。
- 19) 建設工事における土質工学の実用例(土質工学会編)，pp. 299-300, 1969。
- 20) 山口柏樹, 大根義男：フィルダムの設計および施工，技報堂，pp. 57-60, 1973。
- 21) 李弘揆, 中村吉男：礫質土の室内締固め試験と現場での密度管理のあり方に関する一考察，土木学会第54回年次学術講演会概要集，pp. 662-663, 1999。
- 22) 福本武明, 増井久：二要素混合問題における粒径比の影響，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp. 549-550, 2001。

(2000. 12. 22 受付)

## COMPARISON OF EQUATIONS FOR ESTIMATING THE COMPACTED DENSITY OF COARSE-GRAINED SOILS

Hisashi MASUI and Takeaki FUKUMOTO

This study highly focused on the methods using equation for estimating the compacted density of granular soils with oversize particles, and several equations indicated in past studies were explained. They were compared and examined in detail based on the data measured in the past, and the practical effectiveness and fitness were evaluated. Consequently, the equation proposed by Fukumoto was proved to be adaptable in good accuracy for any granular soils and most practical.