

## 土の最大乾燥密度と最適含水比について

森 満 雄\*

## 1. まえがき

締固め機械を用いて土の締固め施工を実施する場合に土の締固め程度判定の規準として“締固め度”があり、これは土の締固め試験より得られた最大乾燥密度に対し締固め施工によって得られた土の乾燥密度の比として示される。したがって、土の締固め試験は土構造物の安定性を知る上から重要な要素の一つとして知られている。いま、現在の段階で土の締固め試験に於ける最大乾燥密度と最適含水比について一般的傾向として概念的に知られていることを挙げれば次のように言えよう。すなわち

- (1) 最大乾燥密度の高い土ほど最適含水比が低く、この逆も言える。
- (2) 粒度配合の良い砂質土ほど最大乾燥密度が高く、細粒土ほど最大乾燥密度が低い。
- (3) 最大乾燥密度を与える点の飽和度は普通80%～90%程度と考えられる。

次に土の締固め試験から得られる最大乾燥密度と最適含水比の値を短時間に求めるため、又他の物理的性質と関係ずけて間接に推定する方法として次のような事が考えられている。

- (4) 締固めの仕事量が同一の場合、上に述べた(1)の性質を利用して、種々の土の最大乾燥密度を与える点はほぼ一つの曲線上にあると仮定し、この曲線によって締固め試験における最大湿潤密度から最大乾燥密度、最適含水比の値を推定する<sup>1)</sup>。
- (5) 土のアッターベルグ限界と土の最大乾燥密度、最適含水比を定性的に結びつけた実験式から推定する<sup>2)</sup>。

本報文は以上述べた(1)～(5)に対しわが国の土質について次のような目的から検討を加えたものである。

- (1) (4)に対して最大乾燥密度と最適含水比の相関関係はどうか。
- (2) 土質を三角座標分類に従って粘土から砂まで分類すると各土質は最大乾燥密度、最適含水比がどの程度の範囲にあるか。
- (3) 飽和度と最大乾燥密度、最適含水比の関係。
- (4) 物理試験結果を用いた実験式による推定値は実際に得られた土の最大乾燥密度、最適含水比に対してどの程度の誤差を生ずるか。

## 2. 資 料

\* 東京都立大学工学部土木工学科助手

標準締固め試験 (JIS A 1210) を行なったものについて最大乾燥密度、最適含水比、三角座標分類による土質のわかっているものを中心に調査した結果、約 380 ケの資料を集めることが出来た。これらの資料は最大乾燥密度  $0.672 \text{ g/cm}^3 \sim 2.070 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 8.0%～99.8%、土質は粘土から 4.76 mm 以下のレキを含む砂質土まで広範囲にわたっている。又、この報文では一応三角座標分類にしたがったが、土質は粒度のみによって分類され得る性質のものではなく細粒度、粘土質土では塑性、液性限界、塑性指数等の物理的性質による分類(統一分類法)も考えられるのは当然である。各試料の物理的性質の判明しているものは後に述べる(5)の実験式の適用性の項で 99 ケの試料について、このアッターベルグ限界を使用する。

すでに述べたように資料調査の目的ができる限り多くの試料と多種の土について最大乾燥密度、最適含水比、土質の関係を調べようとするのであるから、この三つの要素の値又は土質の分類がわかっている物理試験の結果が判明しない資料がある。勿論、これは調査した論文の内容、目的がそれぞれ異なるから試料の物理的性質が示されずに単に三角座標分類“砂質ローム”のように表わされていた場合である。又、最大乾燥密度  $r_{dmax}$ 、最適含水比  $w_{opt}$ 、比重  $G_s$  から飽和度  $S_r$  は計算されるが、実際に資料の値にもとづいて計算すると  $S_r > 100\%$  となるものが約 30 ケ、全試料の 7.9%見出された。これは理論的にもあり得ないことで、この原因は土の比重試験から得られた実験値が小さく出たためと考えるであろう。これは当然のことではあるが締固め試験では単に乾燥密度—含水比曲線から最大乾燥密度、最適含水比を求めるのみでなくゼロ空積曲線を描き、その土の比重との関係の妥当性を確認すべきことを意味している。

## 3. 最大乾燥密度と最適含水比の関係

まえがきで述べたように、一般に最大乾燥密度の高い土ほど最適含水比が低くその逆もいえると考えられるから、各種の土について最大乾燥密度と最適含水比の間に或る一つの曲線を想定することができる。

図-1 は縦軸に最大乾燥密度  $r_{dmax}$  の逆数を取り横軸に最適含水比  $w_{opt}$  を取り、全試料をプロットしたものである。いま  $1/r_{dmax}$  と  $w_{opt}$  の間に直線的な関係が成立すると考えると、次式のようなになる。

$$1/r_{dmax} = Aw_{opt} + B \dots\dots\dots(1)$$

これを、 $Y$ の $X$ に対する回帰直線として計算すると  $Y = 0.0107 X + 0.400$  となり、最大乾燥密度  $r_{dmax}$  と最適含水比  $w_{opt}$  の間には次式の関係が示される。

$$r_{dmax} = 1 / (A w_{opt} + B) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $A = 0.0107$   $B = 0.400$

又、 $1/r_{dmax}$  と  $w_{opt}$  の相関係数を求めると 0.96 となった。したがって最大乾燥密度と最適含水比の相関性はかなり高いといえる。

今(2)式の $A, B$ について、その内容を検討するために、飽和度一定曲線と比較してみる。飽和度一定曲線

は次式で示される。

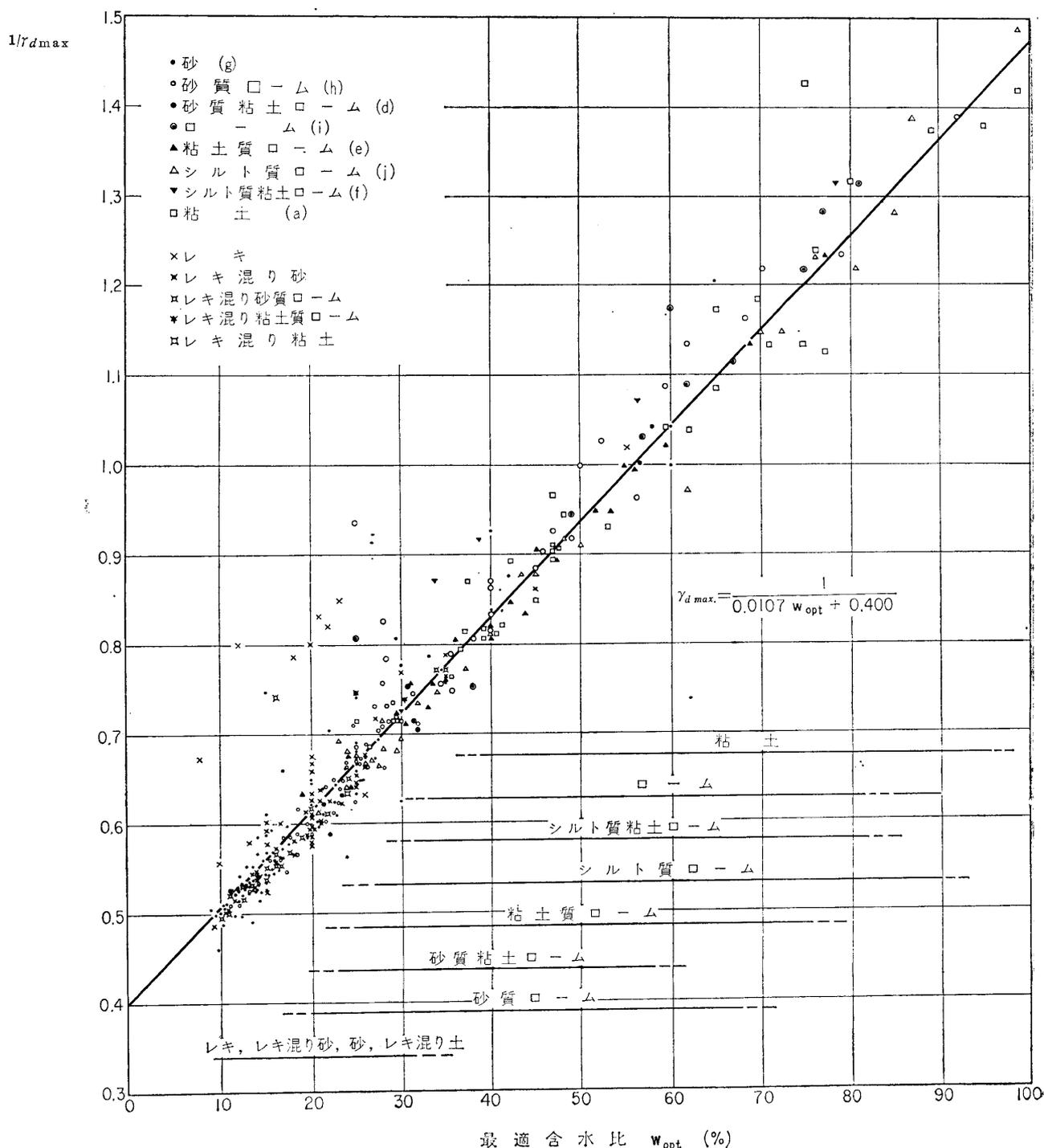
$$r_d = r_w \left/ \left( \frac{w}{S_r} + \frac{1}{G_s} \right) \right. \dots\dots\dots (3)$$

$r_w$ : 水の単位体積重量 (g/cm<sup>3</sup>)

$G_s$ : 土の比重  $r_d$ : 土の乾燥密度(g/cm<sup>3</sup>)

$w$ : 含水比 (%)  $S_r$ : 飽和度 (%)

(2),(3)式を比較すると式の型が類似しているので同型の曲線と考えると、両式より飽和度  $S_r$  および土粒子の比重  $G_s$  はそれぞれ  $1/A, 1/B$  とおいて求めることができる。すなわち、計算の結果は  $S_r = 93.5\%$ ,  $G_s =$



図一1 最適含水比と最大乾燥密度の関係

報 文

2.50 となる。図-2 は全資料（ただし、資料の項で述べた約 30 ケは除く）の比重  $G_s$  の頻度を示したものであるが、これからみると (2), (3) 式によって求めた比重  $G_s$  の値は土の一般的な比重の範囲内にはあるが資料の平均的な値とは言えない。しかし、図-2 のモード 2.675 に相当する (2) 式の  $B$  は 0.374 であり、メジアン 2.630 に相当する  $B$  は 0.380 であるから、図-1 の試料の“ばらつき”からみて (2) 式の  $B=0.400$  と大差はないといえる。次に (2) 式の  $A$  と (3) 式の飽和度  $S_r$  との関係を見るために飽和度の分布状態を 図-3 に示した。(2), (3) 式を同型の曲線と考えた場合  $S_r=93.5\%$  となったが、図-3 では最適含水比  $w_{opt}$  に対する飽和度  $S_r$  の“ばらつき”が大きく 60%~100% の範囲に分布している。したがって (2), (3) 式から直ちに  $A=1/S_r$  と結びつけることはできない。しかし、以上述べたところから (2), (3) 式は同型の曲線であると考えれば (2) 式の  $A, B$  はほぼ近似的に (3) 式の  $1/S_r, 1/G_s$  として表わされると考えてよいであろう (この (2), (3) 式の関係については試料の“ばらつき”によるものか、又は別の factor が影響してくるものか他の機会に検討する予定である)。

4. 最大乾燥密度、最適含水比と土質の関係

最大乾燥密度と最適含水比の間にはほぼ一定の関係が成立し、図-1 から求めた (2) 式によって最大乾燥密度の高いものは最適含水比が低く、最大乾燥密度の低いものは最適含水比が高い傾向のある事を示した。したがって或る土質の最適含水比はどの程度の範囲に分布しているか検討することが、併せて最大乾燥密度がどの程度の範囲内にあるか検討することになる。

図-1 によって土質と最適含水比  $w_{opt}$  の関係からみると、“まえがき”で述べた土の一般的傾向である砂質土ほど最大乾燥密度が高く、細粒土ほどそれが低いということがわかる。即ち、図-1 は最適含水比の高い方から低い方に粘性土から砂質土へと変化している。しかし、各土質の最適含水比に対する分布範囲は資料 380 ケについてのものであり、図-1 に示した範囲内に全ての土質はその最大乾燥密度、最適含水比の値を示すことを意味しているわけではなく、ここに示した範囲は近似的なものと考えられる。

いま、図-1 によって土の締固めにおいては締固め特性が最も異なると考えられる粘土、ロームとレキ混り砂、砂と比較してみると、両者はほとんど最適含水比が他方の分野に入っていない。したがって砂より粘土、ロームは最大乾燥密度が低く、最適含水比は高いといえ

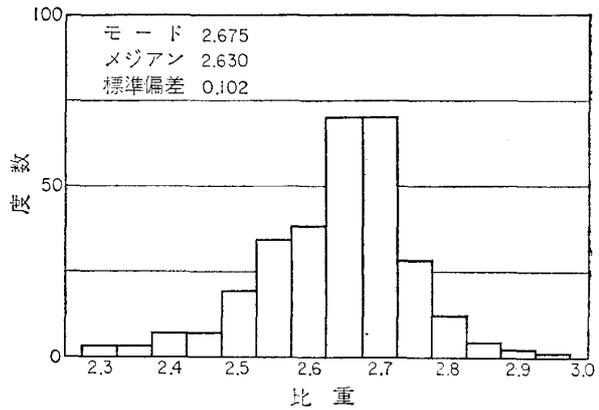


図-2 比重の分布

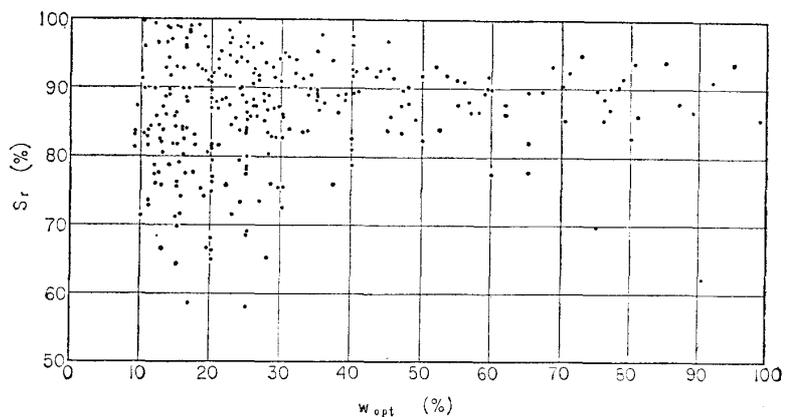


図-3 最適含水比における飽和度の分布

る。しかし、この中間の土質と考えられる他の土質はほとんど砂、粘土の最適含水比の分布範囲に及んでいる。又、これらの土質の分布範囲は図に示すようになりに広く相互に最適含水比の分布範囲を共有している。したがって粘性土より砂質土の方が最大乾燥密度が高く最適含水比が低いという事は極めて概念的な事柄と言えよう。

5. 最大乾燥密度、最適含水比における飽和度

一般に締固め試験を行ない乾燥密度-含水比曲線を求めると飽和度一定曲線、空ゲキ率一定曲線を図に記入す

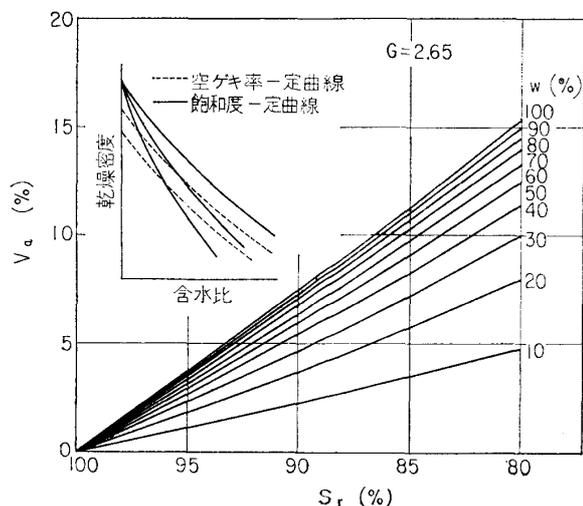


図-4 含水比に対する空ゲキ率飽和度の関係

る。飽和度 100%, 空ゲキ率 0% であるゼロ空積曲線は, 含水比が 0% に近づくにしたがい乾燥密度の値が土の比重  $G_s$  と同じ値に限りなく近づく。即ち (3) 式

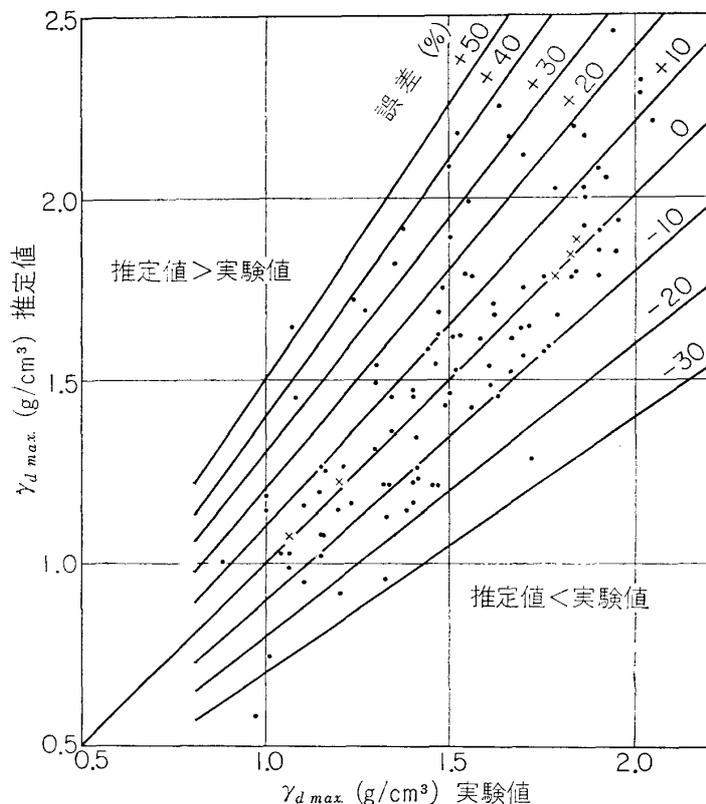


図-5 物理試験結果を用いた実験式による最大乾燥密度の推定値と実験値の関係 (×印は最大湿潤密度による推定値)

の  $S_r=100\%$  の場合である。同様に飽和度  $S_r$  が 100% でなくても飽和度一定曲線は上と同じ事がいえる。一方, 空ゲキ率一定曲線は常にゼロ空積曲線に平行である。図-4 ではこの飽和度と空ゲキ率と含水比の関係を比重  $G_s=2.65$  の場合について示してある。縦軸に空ゲキ率  $v_a\%$ , 横軸に飽和度  $S_r\%$  をとり含水比  $w$  を 10% から 100% に変化させた時の両者の関係を表わしている。いま, 図-4 を用いて, 図-3 に示した飽和度の分布状態が, 最適含水比の低い場合にその変動が大きい原因を考えてみる。図に示されている曲線は含水比 10% のとき空ゲキ率 1% の変化に対して飽和度は約 5% 変化し, 含水比 20% でそのときは約 3% 変化している。したがって, 含水比が低いほど空ゲキ率の少しの変化が飽和度に大きく影響してくる。すなわち, 図-4 中に画いた乾燥密度-含水比の関係からわかるように各飽和度一定曲線は含水比の減少と共に相互に接近する。したがって, 図-3 の最適含水比が低い場合に生じた飽和度 60%~100% の広い範囲におよぶ変動は以上のことから, 最大乾燥密度を与える点の少しのずれが大きく影響してくるためと考えるとよいであろう。勿論, この場合比重の測定値 誤差も影響してくる事は当然である。しかし, 土の比重値の 2.70 のものが 2.80 と測定されても,

たとえば最大乾燥密度  $1.70 \text{ g/cm}^3$ , 最適含水比 20% で飽和度に対しては約 5% の変動を与えるのみである。

6. 土の最大乾燥密度, 最適含水比を推定する物理試験結果を用いた実験式の適用性

土の工学的性質と物理的性質を定性的に結びつけ, 土の粒度, アッターベルグ限界から締固めにおける最大乾燥密度  $\gamma_{dmax}$  と最適含水比  $w_{opt}$  (JIS A 1210 の締固め方法によるもの) を推定するものに, つぎのような実験式がある。<sup>2)</sup>

$$\gamma_{dmax} = \frac{\tau_w \cdot K_1}{w_s(B/A-1) + 100/R} \dots\dots\dots(4)$$

$$w_{opt} = w_s(B/A) + K_2 \dots\dots\dots(5)$$

ここに,  $\tau_w$ : 水の単位体積重量 ( $\text{g/cm}^3$ )

$A$ :  $4760 \mu$  フルイ通過土の重量百分率 (%)

$B$ :  $420 \mu$  フルイ通過土の重量百分率 (%)

$K_1$ :  $104.00 - 6.7 I_p$      $K_2$ :  $0.33 I_p - 4.0$

$I_p$ : 塑性指数     $w_s$ : 収縮限界 (%)

$R$ : 収縮比

全試料について (4), (5) 式から最大乾燥密度, 最適含水比を求めるに必要な粒度, その他物理試験結果の判明しているものを調査した結果 99 ケの試料を得た。

図-5, 図-6 は (4), (5) 式にもとづいた計算値と実際に得られた実験値との関係を示している。

図-5 の最大乾燥密度の場合には実験値に対して推定値は, その誤差が  $\pm 20\%$  程度の範囲にほぼ含まれているが, 図-6 の最適含水比の場合には  $+50\% \sim -70\%$  と大きく, 誤差 0% の付近に集中している傾向はない。したがってこの場合, 資料 99 ケの物理試験結果から, この実験式の適用性について論ずることはできないが, この実験式は個人差の生じ易いといわれる<sup>3)</sup> 粒度, 液性限界, 収縮常数試験の実験値にかなりの厳密さを要求しているものと考えられる。しかし, これらの実験値に誤差が介入したとしても, 図-5, 図-6 のように, 実際の値に対する推定値の誤差が大きく現われたことは, この実験式の適用に当たって留意すべき点である。

以上より, この資料による計算結果の範囲内では, 最大乾燥密度の値は極めて大略の値ではあるが推定できる。しかし最適含水比の値は, ほとんど推定できないといえよう。

7. 土の最大湿潤密度より最大乾燥密度, 最適含水比を推定する方法

この方法<sup>1)</sup>は, 土の締固め試験において乾燥密度を得るために必要とする含水比の測定を省略し最大湿潤密度のみで最大乾燥密度と最適含水比を短時間に決定しようとするものである。実験にあたって加水量を締固め各回とも等量ずつ試料に与えながら実験を進め, 各回の湿潤

## 報 文

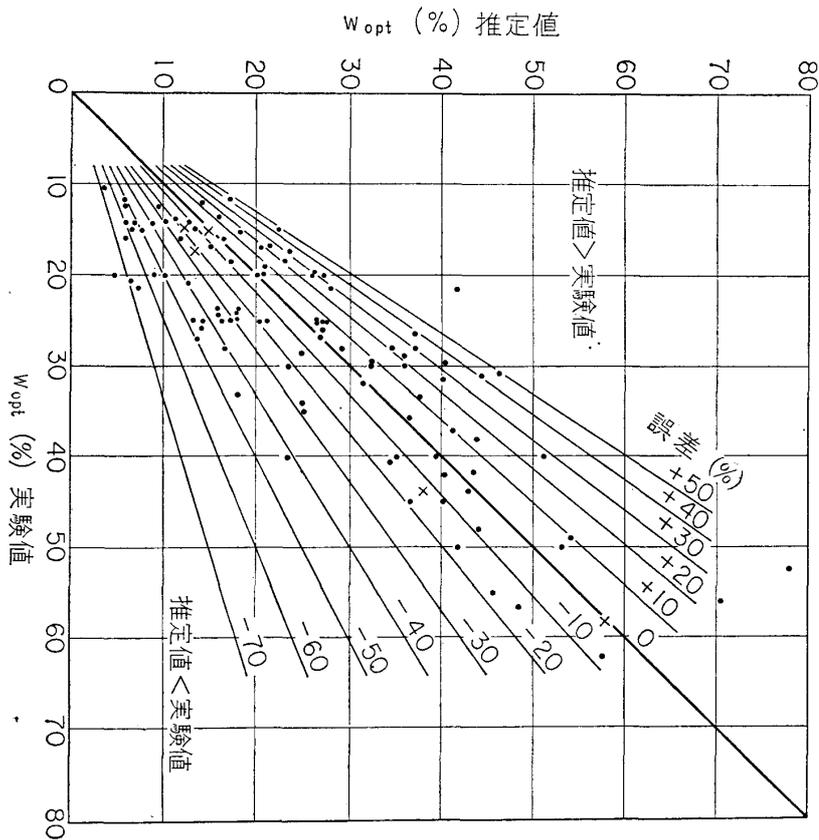


図-6 物理試験結果を用いた実験式による最適含水比の推定値と実験値との関係 (×印は最大湿潤密度による推定値)

密度を求める。したがって縦軸に湿潤密度、横軸に含水比のかわりに試験番号を等間隔目盛にとれば締固め曲線が求まり、最大湿潤密度が得られる。以下に、この推定法の大略を示す。

種々の土の最大乾燥密度を与える点は 図-1, (2) 式に示したようにだいたい一つの曲線上にある。すなわち、 $r_{dmax} = 1/(Aw_{opt} + B)$  である。

次に含水比-湿潤密度の曲線上で最適含水比  $w_{opt}$  に相当する点を近似的に最大湿潤密度  $r_{tmax}$  とすると、

$$r_{tmax} = (1 + w_{opt})r_{dmax} \dots\dots\dots (6)$$

(2), (6) 式より

$$r_{tmax} = (1 + w_{opt})/(Aw_{opt} + B) \dots\dots\dots (7)$$

(2), (7) 式より  $w_{opt}$  を消去して  $r_{dmax}$  を求めると、

$$r_{dmax} = \frac{A}{A-B} r_{tmax} - \frac{1}{A-B} \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式を (2) 式に代入すれば

$$w_{opt} = \frac{1 - B \cdot r_{tmax}}{A \cdot r_{tmax} - 1} \dots\dots\dots (9)$$

したがって土の締固め試験を行なって最大湿潤密度さえ求めれば (8), (9) 式より直ちに最大乾燥密度、最適含水比を求めることができる。しかし、この推定法は定数  $A, B$  のいかにかかっている。したがって各種の土に普遍的な定数  $A, B$  の値を決定することについては問題が残されている。いま各種の土についてかなり多くの試料を集めたといえる本報告の (2) 式の  $A, B$  の値

を、いくつかの試料に適用してみる。

図-5, 図-6 の × 印は 5 ケの試料をプロットしたものである。最大湿潤密度の値が判明しているのは、5 ケの試料に限られているため、この推定法の適用性については全くその可否を判断し得ないが、物理試験結果からの実験式と比べて誤差が少ない。これは、更に多くの試料について検討せねばならないのは当然であるが、締固め試験における最大乾燥密度に直接関係のある最大湿潤密度を用いた推定法に対して、物理試験結果から最大乾燥密度、最適含水比を推定する方法の“むずかしさ”を意味しているといえよう。

## 8. むすび

以上、土の最大乾燥密度と最適含水比の関係について 2, 3 の調査を試みたがこれらの結果を本報文中で検討した範囲内でまとめると大要次のようになる。

(1) 最大乾燥密度と最適含水比の間には、かなり相関関係の高い一つの曲線を

考えることができる。

(2) 粘土、ロームより砂の方が最大乾燥密度は高いといえるが、これらの中間の土質、いわゆる粘性土、シルト質土、砂質土等については、砂質土の方が最大乾燥密度が高いと言うようなはっきりした傾向はみられない。当然、これはその生成過程、母岩等の相異による影響といえよう。

(3) 最大乾燥密度を与える点の飽和度は最適含水比の低い試料では、かなり広い範囲に分布する。

(4) 物理試験結果を用いた実験式による最大乾燥密度、最適含水比の推定法は、実測値に対する誤差が大きく、この実験式からはほとんど推定できなかった。

(5) 土の最大湿潤密度から最大乾燥密度、最適含水比を推定する方法は、資料数が少ないとはいえ、特に最大乾燥密度に対して良く一致する傾向を示した。最適含水比については多少の“ばらつき”があったが、この推定法の適用性については今後多くの資料による検討にまたねばならないと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 酒井, 佐藤: “土の最大乾燥密度 および 最適含水比の簡略決定法に関する一試み” 土と基礎 Vol. 5, No. 2, 1957
- 2) 土質工学会: 土質試験法解説 第1集 昭和35年8月改訂版, pp. 87~88.
- 3) 松本鍊三: “土の物理的試験値の個人差について(続報)” 土と基礎 Vol. 10, No. 3, 1962.

(原稿受理 1962.8.14)