

砂の最大密度・最小密度試験

大賀 雅則*

* OOGA Masanori、報国エンジニアリング株式会社 技術部 大阪府豊中市大黒町 3-5-26

1. はじめに

今回紹介する「砂の最大密度・最小密度試験」は、砂の最も緩い状態と最も密な状態の乾燥密度を求める試験である。本試験はJIS A 1224に規定されており、土の締まり度合いの判定に利用される物理試験である。本稿では、「砂の最大密度・最小密度試験」について、試験方法と結果の利用方法について述べる。

砂の力学特性は、一般的に間隙比と大きな関係があるが、間隙比が同じでも砂の種類によって力学特性は異なる。砂の圧縮性、変形特性および砂地盤の液状化の研究等において、異なる種類の砂の特性比較を行う場合、相対密度が用いられる。¹⁾ (図-1)

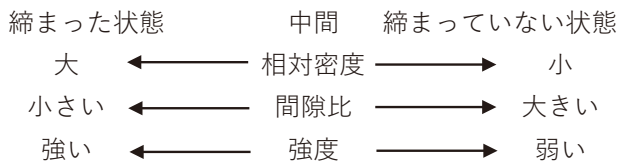


図-1 砂の締まり具合と性質の変化²⁾ 一部修正・加筆

砂の相対密度 D_r は、次式で定義され、砂の締まり具合(間隙比 e)が、その砂の最も密な状態(最小間隙比 $e_{\min}$)と最も緩い状態(最大間隙比 $e_{\max}$)の間のどの状態にあるかを示す指標である。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\rho_{d\max}(\rho_d - \rho_{d\min})}{\rho_d(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})}$$

$\rho_{d\min}$: 最小密度 $\rho_{d\max}$: 最大密度

ρ_d : 乾燥密度

自然状態での砂が最もゆるい場合には、 $e=e_{\max}$ であることから、 $D_r=0$ となり、また、最も密な状態にある場合は、 $e=e_{\min}$ であることから、 $D_r=1$ となる。

最小密度・最大密度試験はこの相対密度を求めるために実施する。最小密度 $\rho_{d\min}$ は最もゆるい状態の密度をいい、最大密度 $\rho_{d\max}$ は最も密な状態にしたときの密度をいう。

2. 試験概要

2.1 試験方法の概略

a) 最小密度試験

試験に使用する試料は、JIS Z 8801-1 に規定する金

属製網ふるいで、目開き 2 mm のふるいを通過し、75 μm ふるいに 95% 以上残留する砂を用い、ステンレス製のモールドの底面中央に決められた寸法の漏斗を立て、漏斗の中に試料を入れる。(写真-1) 漏斗を一定の速度で鉛直に上げていき、20~30秒でモールドの上端面全周から試料をあふれさせる。このとき、モールド内の砂の最頂部と漏斗の口先が離れないように、かつ試料がとぎれないように注意して入れる。モールドの上端面の縁に直ナイフをのせ、素早く滑らせて一気に試料の余盛り部分を取り除く。この時の試料の密度が最小密度 $\rho_{d\min}$ (Mg/m^3) で、次式で表される。

$$\rho_{d\min} = \frac{m_1 - m_d}{V}$$

m_1 : 最小密度試験の試料とモールドの質量(g)

m_d : モールドの質量(g) V : モールドの容積(mm^3)

なお、試験結果の代表値は、算術平均値とする。平均値は四捨五入によって、小数点以下 2 桁に丸める。



写真-1 最小密度試験

b) 最大密度試験

余盛り用カラーを装着したモールドに試料を10層に分けて入れ、モールドを回転させながらモールドの側面を木づちで各層100回打撃(計1000回打つ)して試料を締め固める。これは、カラーとモールドを片手で軽く押さえ、木づちをテーブルに沿って滑らしながら約1秒間で5連打し、モールドを45~90°回転させるような操作を繰り返せばよい。(写真-2) 締め固め後、カラーを取り外し、試料の余盛り部分を直ナイフで除去する。この時の試料の密度が最大密度 $\rho_{d\max}$ (Mg/m^3) で、次式で表される。

$$\rho_{dmax} = \frac{m_2 - m_d}{V}$$

m_2 : 最大密度試験の試料とモールドの質量(g)

なお、試験結果の代表値は、算術平均値とする。平均値は四捨五入によって、小数点以下2桁に丸める。



写真-2 最大密度試験

2.2 各種パラメーターとの相関

a) N値との相関

地質調査として、標準貫入試験(JIS A 1219)を実施し、 N 値を求めることで対象地質の硬軟や締まり具合を判断するが、この砂地盤の締まり具合を判断するために、 N 値、相対密度、内部摩擦角の関係として、Terzaghi-PeckとMeyerhofによるものが一般的に用いられるので、紹介する。

また、Gibbs-Holtzは、径0.9m、高さ1.2mの鉄製タンクで実験を行い、砂の相対密度のほかにも上載圧、粒度、水分などが N 値に影響を及ぼすことを明らかにしている。Schulze-Menzenbach(1961)、柳瀬(1963)、土研(1965)なども同様なことを行っている。これらのデータを藤田(1968)が取りまとめたのが、図-2である。なお、図中のTerzaghi-Peckの線④は、実験データに基づくものでなく、表-1の N 値と相対密度の用語を、Gibbs-Holtzが米国開拓局制定の相対密度の数値区分と結び付けたものを参考として記入してある。

図-3は、図-2の一部を取り出したものであるが、(a)は同一の砂でも相対密度と上載圧が N 値に影響を及ぼすこと、(b)は相対密度と上載圧が同一でも、砂の種類と水分が N 値に大きく影響すること、(c)は、上載圧が0であると、砂の種類や水分が N 値の大きさにそれほど影響を及ぼさず、かつ、最大でも20以下であること

表-1 N 値—相対密度—内部摩擦角³⁾ 一部修正

相対密度	N 値	内部摩擦角 ϕ°	
		Terzaghi・Peck	Meyerhof
非常に緩い(very loose)	0~4	28.5以下	30以下
緩い(loose)	4~10	28.5~30	30~35
中位の(medium)	10~30	30~36	35~40
密な(dense)	30~50	36~41	40~45
非常に密な(very dense)	50以上	41以上	45以上

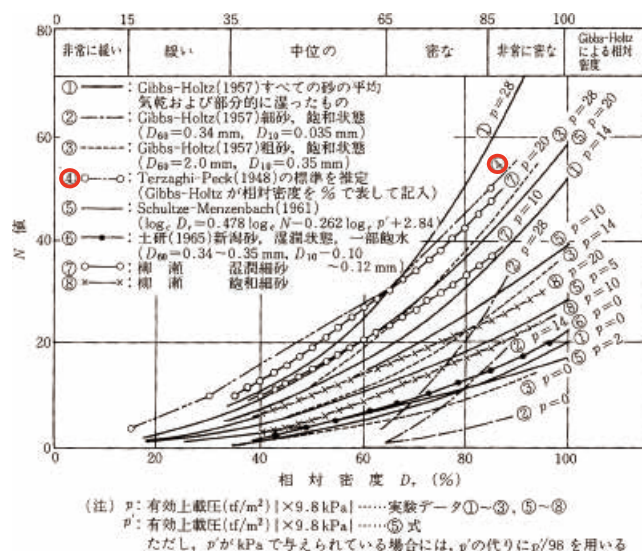


図-2 N 値と相対密度と有効上載圧の関係 (藤田-1968)

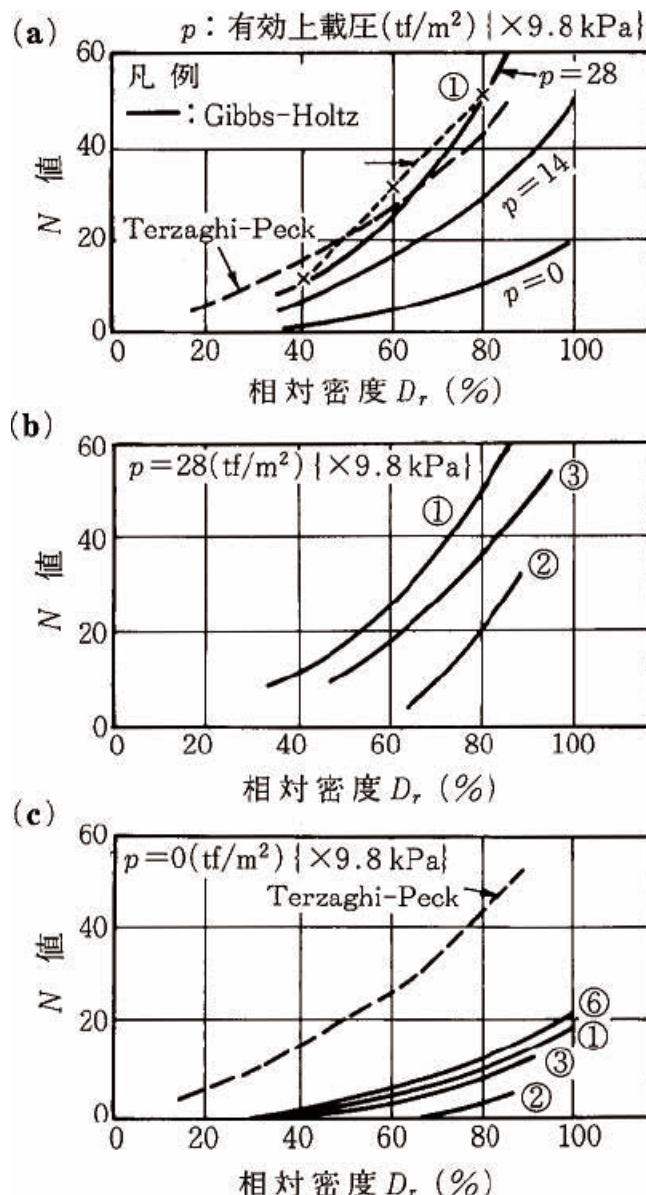


図-3 N 値, 砂の相対密度と有効上載圧の関係

を示している。このことから、 N 値と相対密度 D_r と上載圧 p の関係を議論する場合は、砂の粒径、粒度分布、粒子の形状、乾湿、飽和度などの条件が必要であることは明らかである。

b) 液状化抵抗との相関

液状化抵抗と相対密度の関係は、相対密度の値が最大・最小密度測定法に依存するほか、原位置密度の測定には高品質の乱さない試料が必要となるので、相対密度は N 値と比べて実用的価値が低く、信頼性に疑問があるが、再構成試料との比較を試みるために、液状化抵抗と相対密度の関係をプロットした図-4を示す。⁴⁾

図-4の+印は、炉乾燥し空气中で自由落下させて作製した再構成試料に対する試験結果（初期拘束圧＝98kPa）である。曲線の形は原位置凍結試料のものとよく似ているが、縦軸の値にはかなり差がある。したがって、原位置の相対密度が再現できたとしても、空中落下法による再構成試料に対する試験によっては、原位置における液状化抵抗は再現できないことになる。

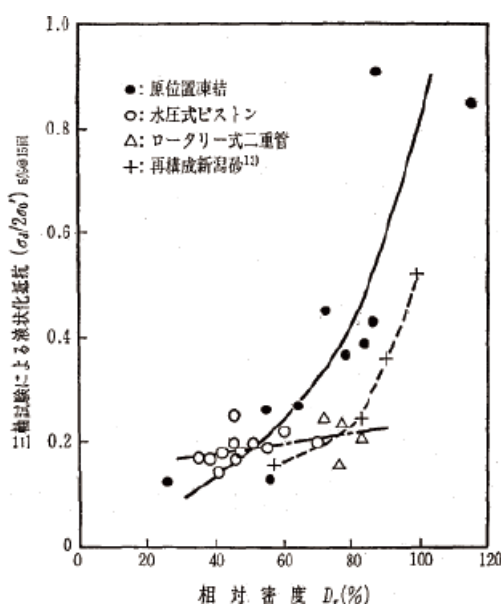


図-4 原位置凍結試料、チューブ試料および再構成試料の液状化抵抗～相対密度関係

3. 留意点

3.1 適用範囲の留意点⁵⁾

「砂の最大密度・最小密度試験」は、砂の相対密度決定のため、砂の最小密度および最大密度を測定する方法であるが、その砂の絶対的な最小密度あるいは最大密度を決定するものではなく、微視的構造は、原位置の砂の堆積構造を再現するものではないことに留意する必要がある。

自然状態の砂の乾燥密度は ρ_{dmax} と ρ_{dmin} の間にあり、 ρ_{dmin} に近ければゆるい状態であり、相対密度 D_r の値は小さくなり、 ρ_{dmax} に近ければ密な状態であり、相対密度 D_r の値は大きくなる。一般に砂の相対密度 D_r が0～30%程度はゆるい状態、30～70%程度は普通、70～100%程度は密であるといわれている。相対密度の計算式で、最大間隙比を液性限界に、最小間隙比を塑性限界にそれぞれ置き換えればコンシステンシー指数の式となる。両者は全く同じ形式であることから、砂の相対密度 D_r は、本シリーズ2019 Vol.17で紹介した粘性土の液性指数 I_L に相当するものであり、密度指数 I_D とも呼ばれる。

表-2に砂の最小密度・最大密度試験より得られた最小密度・最大密度の代表的な測定例を示す。自然に堆積した砂の相対密度は、時間（堆積年代）の対数と密接な関係が生じている。また、液状化した砂は、液状化後3年半経過しているが、依然としてきわめて緩い状態で堆積していることがわかる。ここで、砂の最小密度試験は原位置で最も緩い状態で求めたものではないため、液状化した砂は、相対密度が負になっている。同様に、更新世中期や前期に堆積した砂のような極めて密な砂では、相対密度は100%を超える場合もある。

3.2 試験器具の留意点⁶⁾

最小密度試験に用いる直ナイフは、刃の部分が湾曲していたり、刃先が丸みを帯びていたり、あるいは刃先がこぼれていたりして凹凸が生じていると、求められる砂の密度が高くなるので、このような直ナイフを用いてはならない。最大密度試験に用いる直ナイフは、刃の部分が直線で刃こぼれが生じていなければ、必ずしも刃先が鋭利である必要はない。

表-2 代表的な測定例⁵⁾

採取地点		山形県 遊佐町服部興野	秋田県 能代市逆川	青森県 車力村下牛潟
土質・地層名	豊浦砂	新砂丘DyⅡ層 (約600年前に堆積)	潟西層 阿蘇Ⅳ直上の風成砂層 (約7万年前に堆積)	1983年日本海中部 地震の際に生じた 液状化層、擾乱帯
採取深さ (cm)		20 (斜面)	8 (斜面)	100
原位置乾燥密度 (g/cm ³)		1.354	1.436	1.391
最小密度 (g/cm ³)	1.332	1.304	1.153	1.421
最大密度 (g/cm ³)	1.646	1.643	1.519	1.755
相対密度 (%)		18	82	-11

3.3 試料の留意点⁶⁾

毎回新しい試料を用いて試験を行うという主旨からすれば、試料は乾燥状態で1 kg程度用意することが望まれるが、試料の取り扱いの際には、以下の点に留意が必要である。

- ① 乾燥した試料が団粒化している場合は、よく解きほぐさないと、最小密度、最大密度とも小さめの値となるので注意する必要がある。同様に水分がわずかでも含まれていると、最小密度、最大密度とも信頼性が乏しくなる。
- ② 試験に供する試料は常温まで冷ました炉乾燥試料を用いなければならない。高温のまま試験を行うと、試験中に室内の水分を多く吸収し、含水比が高くなることおよびかりを用いた質量の測定値に誤差が生じることなどにより、試験そのものの信頼性が乏しくなる。
- ③ 最小密度・最大密度試験とも同じ試料で試験すると、試料の違いによる誤差が免れるため、最小密度試験を行った試料をそのまま最大密度試験に用いる。最大密度試験を先に行うと、場合によっては土粒子の破砕が生じ、最小密度試験に用いられなくなることがあるためである。

3.4 試験方法の留意点⁶⁾

最小密度試験は、必ず最大密度試験の前に行うものとする。試験は、同時に採取した試料5個について、毎回新しい試料で行うものとする。一方、最大密度試験は、最小密度試験に用いられた試料を用いて、原則として、試験は、同時に採取した試料3個について、毎回新しい試料で行うものとする。(最小密度試験及び最大密度試験ともに、 $0.003\text{g}/\text{cm}^3$ 程度のばらつきがみられた場合、試験回数を増やしてもよい。) これら試験を実施する際、以下の点に留意が必要である。

- ① 試験に用いる試料は、分級の影響を軽減し、かつ、後に行う最大密度試験用の試料の全量を多くするため、常に新しいものを用いるものとする。
- ② 余盛りの除去は、この試験の手順中で、結果に最も大きな影響を及ぼす。直ナイフは刃先が鋭利なほど、密度が低くなる傾向にある。また、直ナイフでモールドに衝撃を与え、余盛りの除去に時間をかけると密度が高くなるので、細心の注意のもとで試料に振動を与える時間が短くなるよう素早くナイフをすべらせる必要がある。
- ③ 図-5は、相対密度に関する知識は有しているが、試験を行った経験のない学生に口頭で試験方法を説明した後、連続して試験を行った結果である。この図によると、最小密度試験時の場合、余盛りの除去方法になれてきた8回目から試験操作の向上がみられる。しかしながら、15回目から疲れが見られるようになり、測定値が少し高くなってきている。このように、ある程度の熟練性を必要とする試験であり、このことは最大密度試験にもいえる。

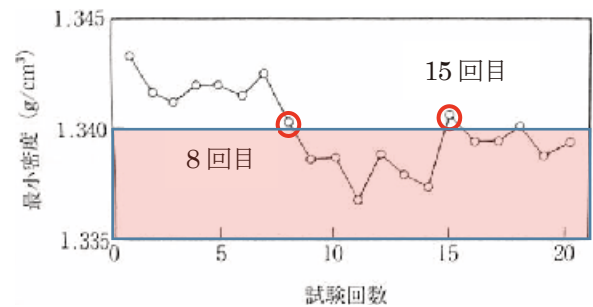


図-5⁷⁾ 最小密度の繰り返しによる測定値の変化(豊浦砂)
※目標値は平均 $1.335 \pm 0.005\text{g}/\text{cm}^3$ (赤塗り範囲)

4. おわりに

今回は、「砂の最大密度・最小密度試験」について紹介した。これら試験は、最大乾燥密度、最小乾燥密度、相対密度を求めることで、砂の圧縮性や変形特性および液状化の研究等に利用できる。ただし、その砂の絶対的な最小密度あるいは最大密度を決定するものではないことに留意する必要がある。

今回、紹介した試験は、住宅地盤では利用されることは少ないが、これからの住宅地盤技術者は、より幅広い知識を身に付けて、住宅地盤の解析をしていかなければならないと考える。

5. 参考文献

- 1) 日本建築総合試験所：わかりやすい試験シリーズ 土-17
- 2) (公社)地盤工学会：土質試験 基本と手引き pp.59-64、2010
- 3) (公社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説-二分冊の1- pp.305、2013
- 4) 吉見吉昭：砂の乱さない試料の液状化抵抗～ N 値～相対密度関係1994
- 5) 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 pp.41-42、1981
- 6) (公社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1- pp.195-222、2009
- 7) 砂の相対密度試験方法基準化委員会：砂の最大密度・最小密度に関する補足資料 土と基礎 Vol.27.No12 pp.35~40、1979