

大型ホットプレートを用いた土粒子の密度試験

The Method for Density of Soil Particles Using a Large-size Hot Plate

植 下 協 (うえした かろう)

名古屋大学名誉教授, 中部土質試験協同組合 技術顧問

坪 田 邦 治 (つばた くにはる)

中部土質試験協同組合 理事長

久 保 裕 一 (くぼ ゆういち)

中部土質試験協同組合 技術部 部長

加 藤 雅 也 (かとう まさや)

中部土質試験協同組合 技術部 次長

石 原 聖 子 (いしはら せいこ)

中部土質試験協同組合 技術部

1. はじめに

土の物理的性質を求める最も基本的な試験として、土粒子の密度、含水比、粒度、液性限界・塑性限界試験等がある。この中で、土粒子の密度試験は、土の固相部分を構成する無機物及び有機物の単位体積当たりの平均重量であり、間隙比・飽和度等の土の基本的な性質の値を求める際に必要となる。

しかし、土粒子の密度試験は、地盤材料試験の方法(以下、試験法)¹⁾では、試料中の温度が上がりにくく、土粒子に気泡が残る精度が悪くなる等、土質試験の中でも非常に難しいといえる。本報告では、湯せんを用いる従来の方法では、ピクノメーター中の試料温度が想定したほど上昇しないため、脱気が十分行われていない可能性があることに着目した。そこで、大型ホットプレートを使用して試料の温度を上げる試験法が、比較的高品質な結果が得られることが判明したので報告する。

2. 土粒子の密度試験

2.1 試験方法

試験方法は、「試験法」に準じ、地盤工学会が推奨する深型バットに水を溜めて煮沸する方法(湯せん法)と、筆者らが提案する大型ホットプレートで煮沸する方法と2種類で実施した。図-1の様に5領域(A~E)を選び、それぞれピクノメーター中の温度を測定するとともに、土粒子の密度試験結果のばらつきを測定した。なお、この試験では、比重瓶はゲーリュサック型ピクノメー

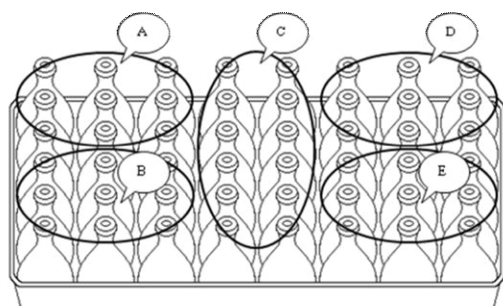


図-1 測定領域区分

ター(呼び容量50 ml)を採用した。

(1) 用いた煮沸試験器具

① 湯せんによる方法

・ガスコンロ(ガス消費量4,400 kcal)

・サイズ 550×350 mm

② ホットプレートによる方法

・大型ホットプレート, サイズ=750×550×156 mm

・可能設定温度範囲: 0~300℃

(2) 試験試料

試験に使用した試料は、濃尾平野地域における砂質土~粘性土を特定地域に集中することなく、採取地域を分散させて50試料を選択した。なお、湯せん法とホットプレート法と同じ計測位置に同一試料を入れて、領域毎に50試料の測定を行った。

(3) 煮沸時間と煮沸方法

煮沸時間は「試験法」に基づき、さらに、実務を考慮してそれぞれ2時間とし、ピクノメーターの温度を30分おきに4回測定した。なお、本報告後半の煮沸時間に伴う比較試験では、4時間まで煮沸した。

煮沸方法は、湯せんの場合(写真-1)は、試験法に準じて実施した。ホットプレート法では、ホーローバット内にピクノメーターを並べ、ホットプレートの温度を180℃に設定した。ただしホーローバット内には水は溜めずに三河珪砂を敷き詰めて、煮沸した(写真-2)。

2.2 試験結果

得られた試験結果から土粒子の密度を測定した。A~Eの領域毎に、50試料の温度の出現頻度ヒストグラムを、測定温度毎(2.5℃ピッチ)にプロットした(図-2)。

さらに、測定領域毎に、土粒子密度のばらつき(最大値-最小値)のヒストグラムを作成した(図-3)。

(1) ピクノメーター内の温度差

① 湯せんによる方法

A~E領域全体で温度が85℃付近に集中しているのが分かる。特にC領域ではさらに低い80~85℃程度を示している。これは、2連型ガスコンロを使用したため、



写真-1 湯せんによる煮沸の試験状況



写真-2 大型ホットプレートによる煮沸の試験状況

中央部付近の熱量が不足したのが原因と考えられる。A領域の中には一部95℃と高い温度を示している測点もみられた。

この測定結果から、湯せん法では沸点の100℃にほど遠く、85℃程度の温度しか確保できていないことから、ピクノメーター内の蒸留水が沸点に到達せず、試料内に気泡が残留する影響で低い値が出現する可能性があるといえる。

② ホットプレートによる方法

A～E 領域全体で温度が95～98℃付近に集中しており、湯せん法と比較して温度のばらつきが比較的少なく高い温度を確保できていることが分かる。

(2) 土粒子密度試験結果のばらつき

図-3は、土粒子密度の同一試験データのばらつきを(最大値-最小値)で示す。湯せん法では試験値全体に、最大が0.025近い大きな差が出ているが、ホットプレートによる方法では最大0.015以下が多く得られており、比較的小さなばらつきになっていることが分かる。なお、BS規格²⁾では同一試料に対して2回の測定結果の平均比重の値として少数点以下2位まで求め、二つの結果の相違0.03よりも大きい場合には、試験を繰り返すとしている。このことから、従来法でも、BS基準は満足し、実用上大きな問題となることはないが、ホットプレート法ではより精度の高い土粒子密度試験結果が得られる可能性を示唆している。

(3) 平均測定温度と試験結果の相関

図-4にそれぞれの方法での平均(最大値-最小値)と平均測定温度の相関を示す。この図から、温度が100℃に近ければ試験値の相違差は小さくなること分かる。また湯せん法に比較して、ホットプレート法による平均(最大値-最小値)が1/2程度となっていることが分

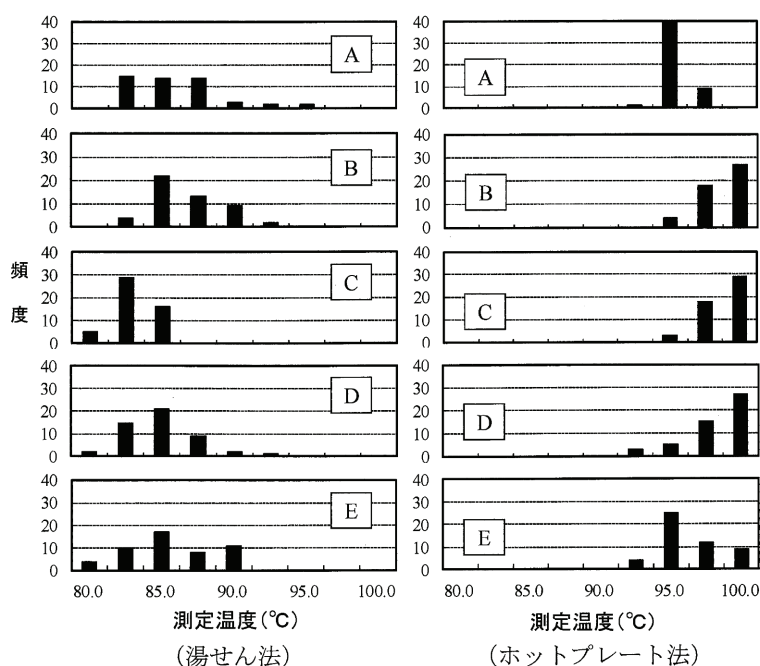


図-2 各測定箇所の試料瓶内の温度出現ヒストグラム

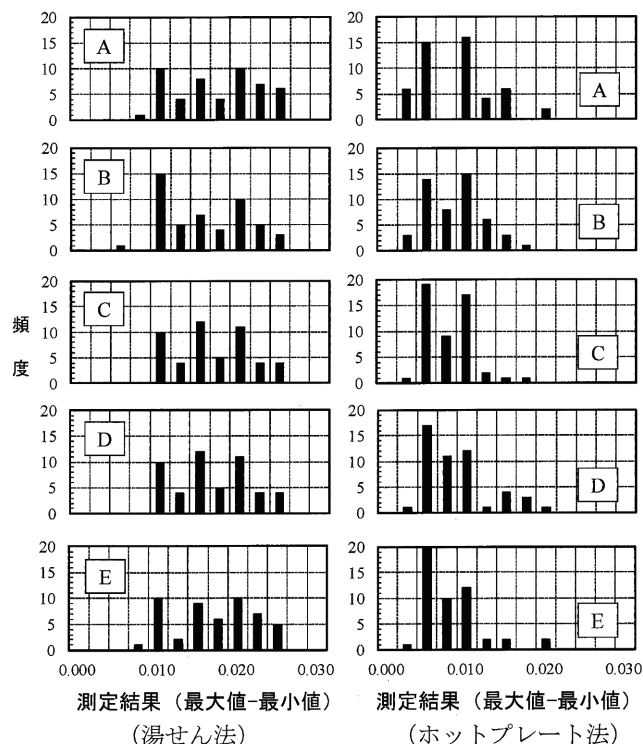


図-3 土粒子密度のばらつきヒストグラム

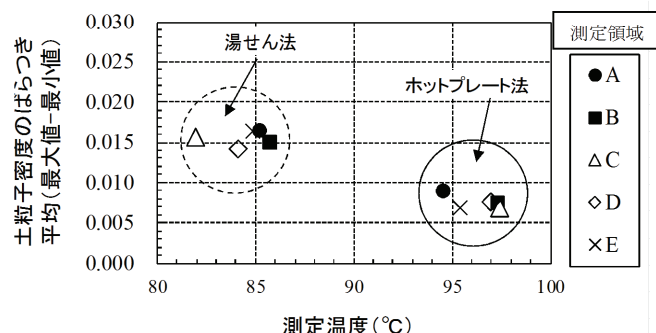


図-4 土粒子密度平均の(最大値-最小値)と測定平均温度の相関

った。本図からも、ホットプレート法が適切といえる。

2.3 煮沸時間に伴う土粒子密度試験結果の変化

(1) 試験に用いた試験材料と三角フラスコ型比重瓶

試験に用いた試料は、濃尾平野の代表的な試料から、砂質土、シルト、粘性土、有機質土の4種類で測定した。その粒度特性を、図-5、表-1に示す。なお、本試験では、ピクノメーターは、通常使うゲーリュサックタイプではなく、三角フラスコ型比重瓶（容量50 ml）を用いた（図-6）。これは、広口（開口径20 mm）でもあり、学会基準の最大礫径9.5 mmの試料も入れ易く、取り出し易いことから、比較的大きな粒径を含む材料の土粒子の密度試験結果の高品質化にも貢献すると考えたことによる。

なお、本試験では、できるだけ正確に値を算出するために、供試体数について、有機質土と粘性土は5供試体とし、砂質土、シルトは3供試体平均とした。

(2) 土粒子の密度試験の煮沸時間による変化

図-7に土粒子密度の煮沸時間による変化を示した。この図から、ホットプレート法による試験結果では、有機質土を除いて、煮沸開始から1~2時間までは、全体として値が高くなる傾向がある。3~4時間の継続測定では、漸減することが分かった。一方、湯せん法でも、砂質土において3時間煮沸が最も高い土粒子密度を計測しているが、その他では、1~2時間の煮沸ではほぼ最大値が得られている。

一方有機質土では、ホットプレート法、湯せん法ともに3時間計測値が最大を示していることが分かった。また得られた試験値は4供試体ともに、1時間以上の煮沸では、ホットプレート法≧湯せん法の結果となった。

一般的には、煮沸時間が長くなると試料瓶内の空気が抜け、土粒子の密度が高くなるとされている³⁾。本試験では、比較的短い間に、最大値が得られているが、この原因と評価については今後の課題と考えている。

(3) 煮沸時間による試料別のばらつきの変化

ここでは平均偏差（式(1)のMD）によりばらつきを評価した。平均偏差はあるデータの平均値からの差の絶対値の平均値であり、“平均値からの平均的な距離”を示すことから、ばらつきの評価には適していると考ええる。

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N} \quad (1)$$

図-8に平均偏差～煮沸時間の関係を示し、図-9に煮沸時間によるMD平均の変化を示す。これらの結果を見る限り、ホットプレート法では、3時間以上の煮沸は、測定誤差が大きくなる傾向があることが分かり、煮沸時間は、2時間を推奨することができる。

一方湯せん法は、ホットプレート法に比べ、MDが高めにプロットされることが分かり、その差は歴然である。

以下に、土質区分毎に、MD変化を記載した。

- ① 砂質土 ($F_c=0.7\%$) は、ホットプレート法では、0.0024以下の小さな値を示し、煮沸時間によるばらつきが小さい ($\Delta MD \leq 0.001$) といえる。湯せん法では、0.005~0.007とホットプレート法に比較して

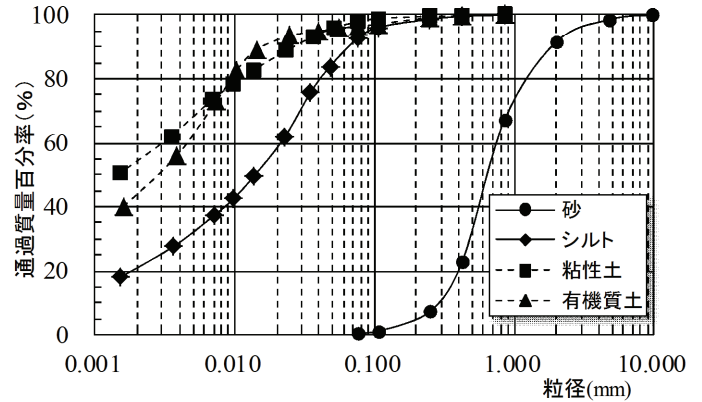


図-5 比較試験に使用した試料の粒度分布

表-1 使用した試料の粒度分布 (%)

粒度区分	砂質土	シルト	粘性土	有機質土
礫分	8.3	0.0	0.0	0.0
砂分	91.0	7.4	2.1	3.5
シルト分	0.7	60.5	29.6	34.1
粘土分	0.0	32.1	68.3	62.4

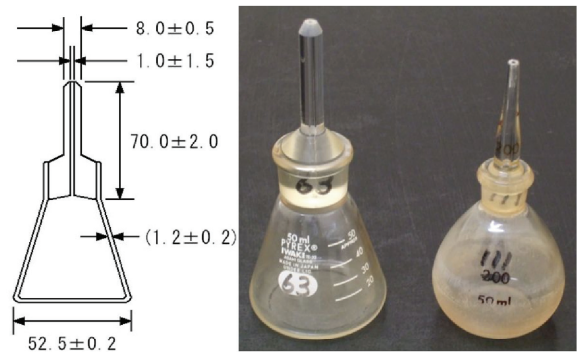


図-6 三角フラスコ型比重瓶と従来型比重瓶（単位：mm）

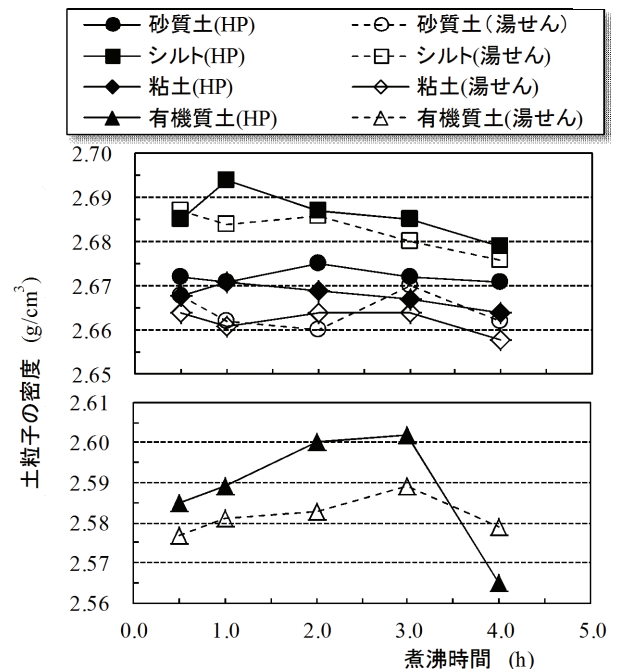
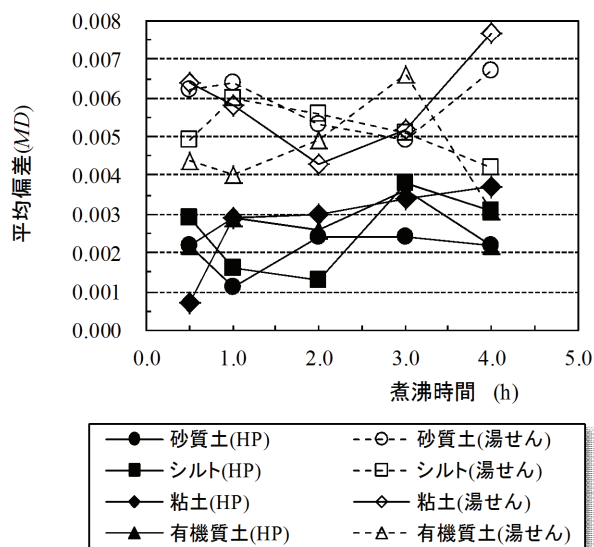


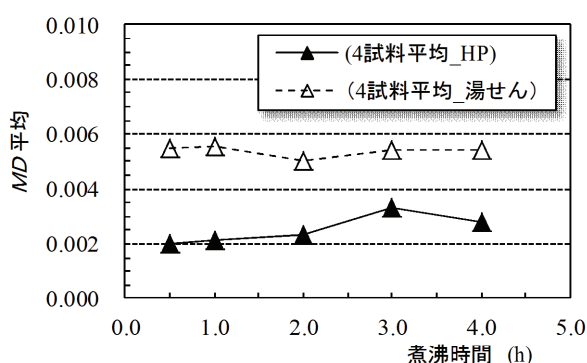
図-7 煮沸時間による土粒子密度の変化

大きい。

- ② シルト ($F_c=92.6\%$) は、ホットプレート法では、2時間が最小値を示し、2時間以降は少し大きくなり、0.0038~0.0031となる。湯せん法では0.0042~0.0060と①と同様の結果となっている。



図—8 煮沸時間による平均偏差 (MD) の変化

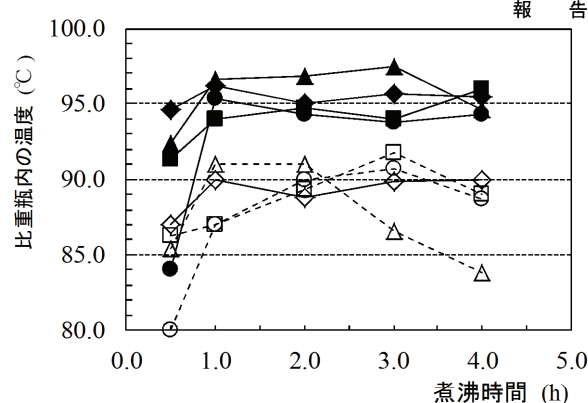


図—9 煮沸時間による MD 平均の変化

- ③ 粘性土 ($F_c=97.9\%$) は、ホットプレート法では、0.0007～0.0037となっているが、1時間以降では比較的值が落ち着いている。湯せん法では0.0043～0.0077と、①、②と同様の傾向がみられる。
- ④ 有機質土 ($F_c=96.5\%$) は、ホットプレート法では、0.0022～0.0036であるのに対して、湯せん法では、0.0031～0.0066となっている。
- ⑤ 4試料の平均偏差の平均値と煮沸時間との相関を図—9に示した。上記の①～④の結果を裏付けるように、湯せん法に比較すると、ホットプレート法のばらつきの小ささが顕著であるといえる。また、湯せんを用いる煮沸時間としては、0.5～4時間までは比較的安定しているといえる。一方、ホットプレート法の場合には、2時間までは安定しているものの、3時間を超えると MD 平均が1/1000程度大きくなることが分かる。
- ⑥ 湯せん法を用いる場合には、「試験法」が推奨する2～4時間が適切といえるが、ホットプレート法の場合には、煮沸時間を2時間として提案できる。

(4) 煮沸時間による比重瓶内の温度変化

図—10に煮沸時間に伴う比重瓶内の温度変化を示す。この結果も、図—2と同様に、ホットプレート法が湯せん法に比較して、95℃程度の安定的な温度を確保できているといえる。湯せん法の場合、1時間を超えた以後は、90℃程度を確保できている。ただ有機質土の場合には、85℃程度も記録し、ばらつきを示している。



図—10 比重瓶内の温度変化 (凡例は図—8と同一)

以上から、ホットプレート法を用いた比重瓶内の温度について、30分程度では少し低めの温度であるが、1時間を超えると高温に保持している。このことは、ホットプレート法は、湯せん法に対して、比重瓶内の温度を比較的高温に保持することが可能であり、その結果、比重瓶内の試験試料内の空気を極力取り出すことが可能といえ、より品質の高い土粒子の密度試験が可能と判断する。

3. ま と め

本報文では、土粒子の密度試験において、「試験法」が推奨する湯せん法と、ホットプレート法を同一条件で比較した。この結果、ホットプレート法は湯せん法に比較して、より精度の高い土粒子密度試験を実施できることが分かった。以下に、本比較試験の結果を整理する。

- 筆者らの試験室で実施した検証結果から湯せん法による煮沸ではピクノメーター内の平均温度が約85℃で、試験結果の相違は平均で0.015となった。これに対して、ホットプレート法の平均温度は、95℃程度で試験値の相違差は平均値で0.008程度となり、沸点温度の100℃により近い温度での煮沸を行える可能性が高いことが分かる。このことは試験値にばらつきが少なく、より精度の高い土粒子密度が得られるものと考えられる。
- 藤田・古河による湯せん法に基づく煮沸時間は、2～4時間とされている³⁾が、大型ホットプレート法では、1～2時間で一定値が得られることが分かった。このことから、筆者等が推奨する大型ホットプレートを用いた場合の煮沸は、2時間が適当であると考えられる。

引用・参考文献

- ① 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—, pp. 97～103, 2009.
- ② BS 1377-1975, 2.6 Test 6. Determination of the Specific Gravity of Soil Particles, 2.6.2 Test6 (B) Method for fine-grained Soils. 1975.
- ③ 藤田龍之・古河幸雄：電子レンジを利用した土の物理試験方法に関する2, 3の研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 28, No. 4, pp. 197～207, 1988.

(原稿受理 2013.6.19)