

液性限界と塑性限界を併せて測定する問題 → 感度が大きく影響する問題

フォールコーン試験による液性限界・塑性限界の同時測定に関する研究

岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 正会員 吉村優治
建設工学専攻 学生 田中大輔

1 はじめに

土はその含水状態によって変形特性が異なる。土の状態は固体・半固体・塑性体・液体に分けられ、それぞれの境界の含水比を収縮限界・塑性限界・液性限界といい、これらをコンシステンシー限界と呼んでいる。コンシステンシー限界の定義として、液性限界は多量の水分を含む土が塑性体として最小のせん断強さを示す状態の含水比、塑性限界は土の含水比がそれ以下になると脆くなり亀裂が生じ、自由に変形しにくくなる境界の含水比、収縮限界は土の含水量をある量以下に減じても、その体積が減少しない状態の含水比とされている。コンシステンシー限界を決定する現行の液性限界試験、塑性限界試験、および収縮限界試験は JSF に定められた試験方法¹⁾ (以下、現行法と呼ぶ) により実施されている。しかし、このうちの液性限界試験は、液性限界という本来、静的性質のものを動的に求めようとしていること、使用する試験器具によって結果が異なること、試験に熟練を要し結果に個人差が生じることなどの多くの問題点が指摘されてきた²⁾。諸外国では、コーンの自由落下による貫入量と含水比の関係より液性限界を求める方法 (以下、フォールコーン試験と呼ぶ) が広く用いられており、スウェーデン、イギリス、ノルウェーなどのヨーロッパ諸国を中心に規格・基準化されている。国内においても液性限界を求める試験方法の代替法として「フォールコーンを用いた土の液性限界試験方法」³⁾ が地盤工学会で基準化された。一方、塑性限界試験においても測定に個人誤差が入りやすいといった問題点が指摘²⁾ されており、フォールコーン試験による塑性限界の同時測定も期待されている³⁾。

本研究では、試料容器の体積が既知のフォールコーン試験装置を用いて、試験時の試料の密度を測定し、この密度と空気量の変化から塑性限界の推定を試みた。そして、フォールコーン試験による液性限界と塑性限界の同時測定の可能性を探った。

2. 実験概要

2.1 試料土

実験に用いた試料は、①骨材採取工場の骨材を洗い流した時の水に沈殿する粘性土 6 種類 (試料 No.1 ~ No.6)、②濃尾平野南部で採取されたボーリング試料 2 種類 (A,B)、③市販の陶土を含むその他 7 種類 (C,D,E,F,G,H,I) の計 15 種類の試料である。これらの土の基礎的性質を把握するために、土粒子の密度試験 (JSF T 111-1990)⁴⁾、土の粒度試験 (JSF T 131-1990)⁵⁾ (ただし試料 A,B については、レーザー粒度分析計を用いた⁶⁾)、土の液性・塑性限界試験 (JSF T 141-1990)¹⁾ を行った。

2.2 実験方法

1) 試料準備

試料を約 200g 用意する。蒸留水を試料がパテ状になるまで加え、へらにより 10 分間練り合わせる。練った試料はラップに包み、湿った布で覆い一昼夜保存する。

なお、コンシステンシー限界試験では本来 425 μm ふるいを通過した土を対象としているが、本実験では原粒度のまま試験を行っている。

Measurement of Liquid Limit and Plastic Limit of Cohesive Soils by Means of Fall Cone Method:

Yuji Yoshimura, Daisuke Tanaka (Gifu National College of Technology)

2) フォールコーン試験

- ① 試料を3分間練り返す。
- ② 試料の質量を測定する。
- ③ 試料を図-1に示す内径60mm、深さ25mmの試料容器に気泡が混入しないように詰め、試料の表面が容器の上端に沿って水平になるようにへらを使って仕上げる。
- ④ 貫入体のコーン（質量60g、先端角60°）の先端を試料の表面に合わせ、静的に貫入させる。5秒後の貫入量 h をダイヤルゲージで読む。
- ⑤ コーン本体の周辺の試料を取り、含水比 w を測定する。
- ⑥ 試料容器から試料を取り出し、ピペットで試料に蒸留水を加えて3分間練り合わせ、ラップに包んで5分間放置する。
- ⑦ 貫入量が7~11mmの範囲で2個以上、11~15mmの範囲で2個以上、計5個以上得られるように②~⑥を繰り返す。

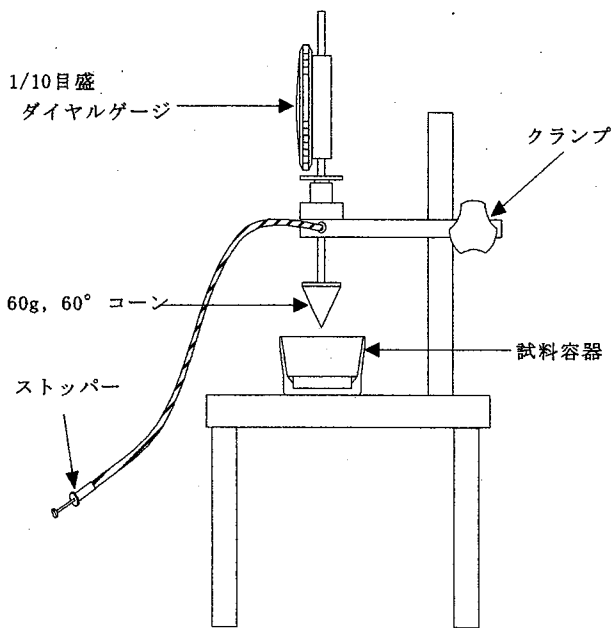


図-1 フォールコーン試験装置

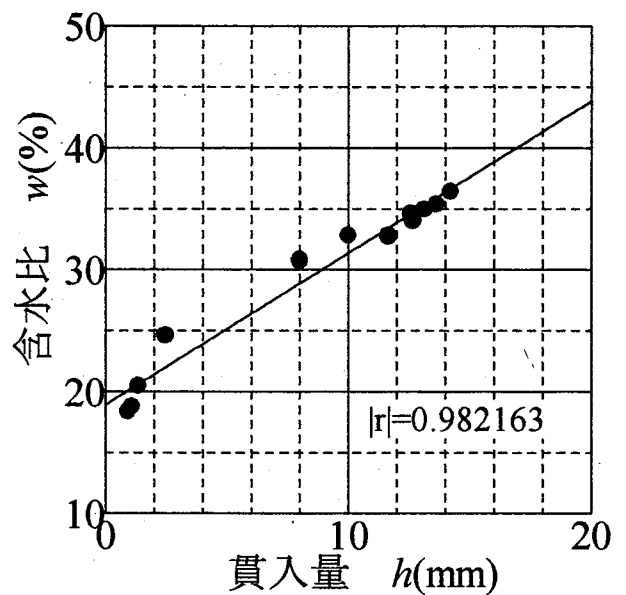


図-2 含水比と貫入量の関係 (試料No. 6)

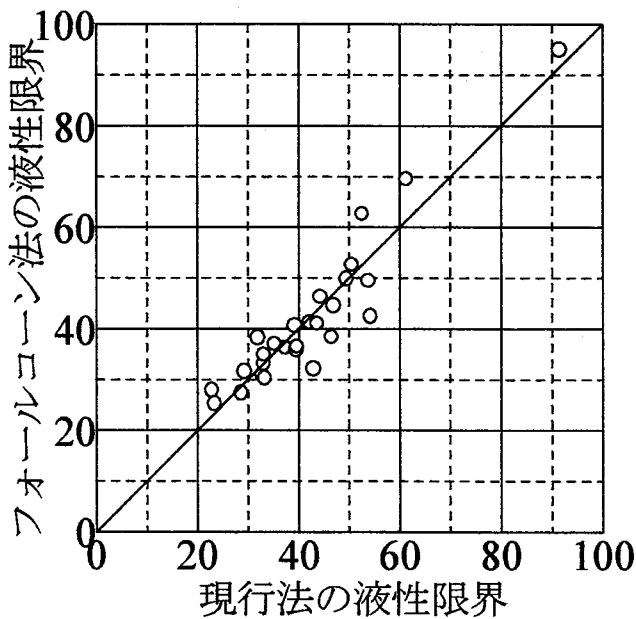


図-3 液性限界の比較

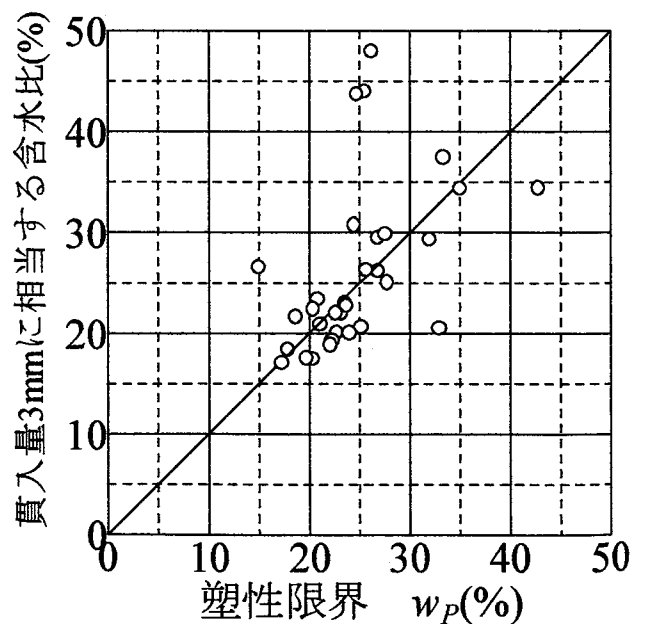
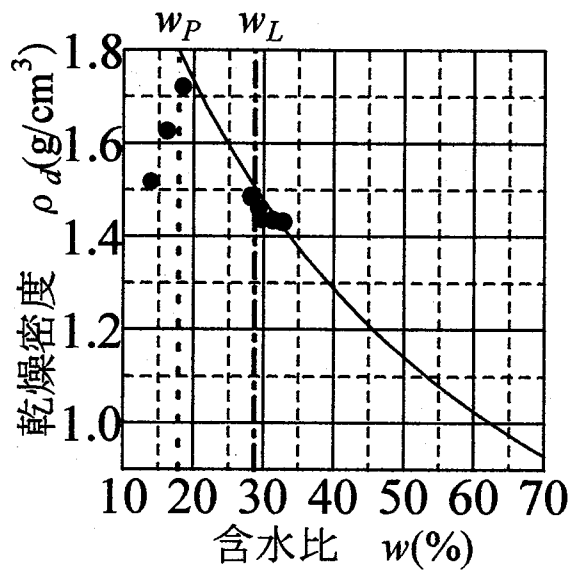
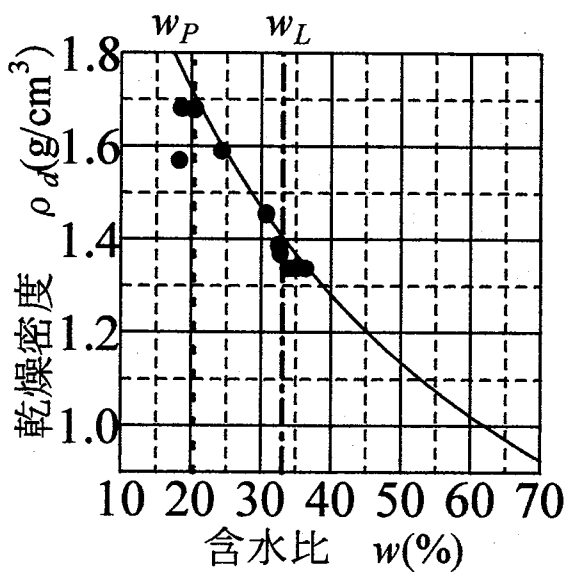


図-4 塑性限界の比較

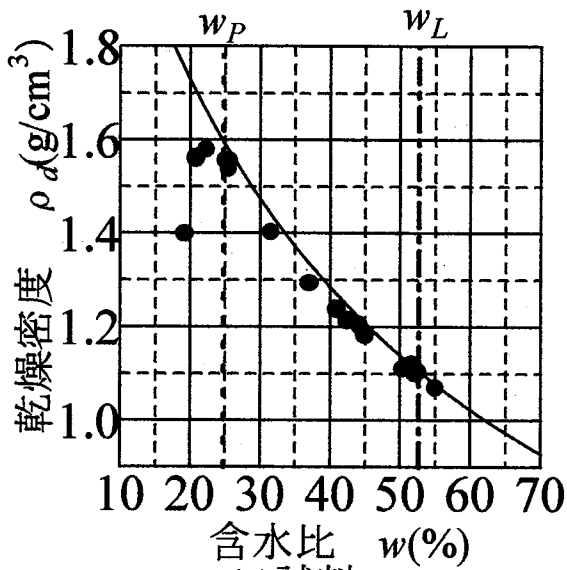
表
5
目
5



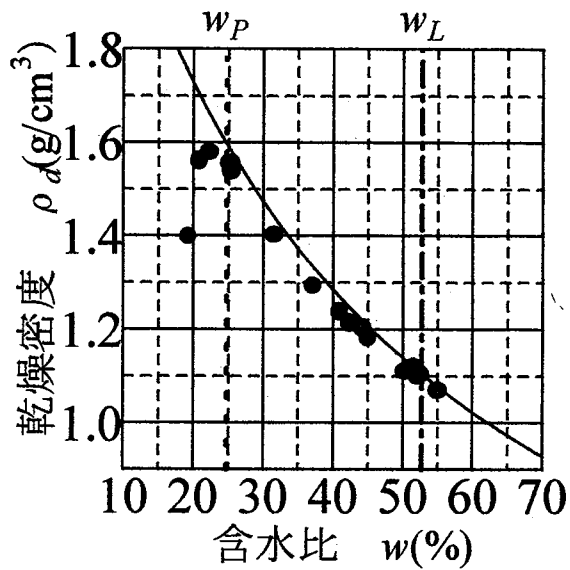
(a) 試料No.2



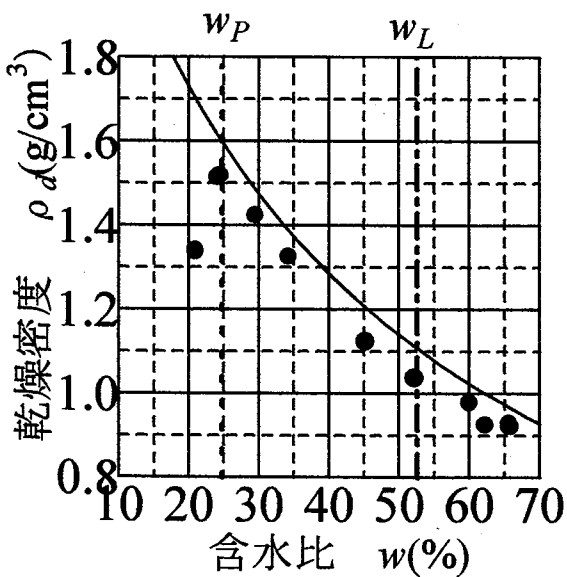
(b) 試料No.6



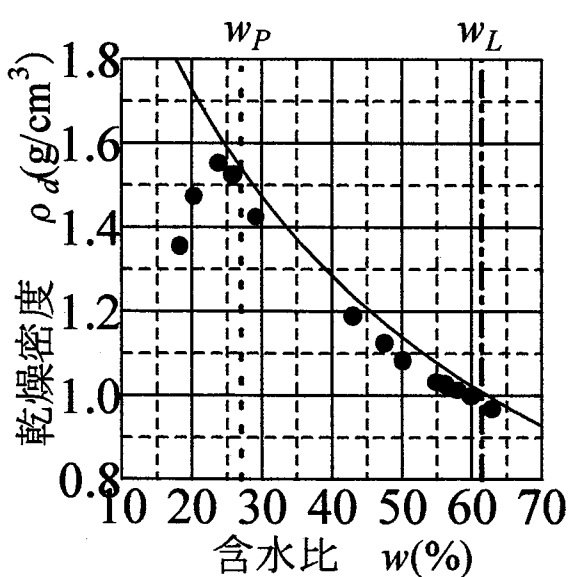
(c) 試料A



(d) 試料B



(e) 試料G



(f) 試料H

図-5 乾燥密度と含水比の関係

3) 結果の整理

- ① 普通目盛りのグラフ用紙を用い、横軸に貫入量 h ，縦軸に含水比 w をとり測定値をプロットする。
- ② 測定値に最も適合する回帰線を引く。
- ③ 回帰線において、貫入量 11.5mm に相当する含水比 を液性限界 $w_L(\%)$ とする。

3. 実験結果および考察

3.1 液性限界

含水比 w と貫入量 h の関係の一例（上述、試料①の No.6）を図-2 に示す。図中の $|r|$ は回帰線の相関係数を表している。この図で貫入量 11.5mm に相当する含水比が、フォールコーン試験で求まる液性限界となる。図-3 は、今回の実験と過去に本研究室で行われたフォールコーン試験から求めた液性限界と現行法により求めた液性限界とを比較したものであり、両試験法から求まる液性限界はほぼ一対一に対応している。

3.2 塑性限界

過去にもフォールコーンを用いて、貫入量から塑性限界を推定する試み^{7,8)}がされてきた。図-4 は本研究室で過去に得られた結果について、貫入量が文献 9 を参考に 3mm に相当する含水比と塑性限界とを比較したものである。図では貫入量が 3mm に相当する含水比が塑性限界に対応しているデータもあるが、対応がよいとは言い難い。最近も試料を粉体から液体までの貫入量を測定したとき、貫入量はある含水比でピーク値(最小値)を示し、このピーク値と塑性限界が対応しているという報告¹⁰⁾もある。しかし、塑性限界付近の貫入量は比較的ばらつきが大きいいため、貫入量から塑性限界を求めることは困難であると考えられる。

そこで、本研究ではフォールコーン試験時に密度を測定し、含水比による密度変化から塑性限界を推定することを試みた。

3.2.1 乾燥密度と含水比の関係

土の締固め曲線の乾燥密度と含水比の関係をみると、乾燥密度は初めは増加していくが、ある含水比を越えると減少し始める。これは、乾燥した試料に水を加えていくと、土粒子が結合しやすくなって締め固めエネルギーが伝わりやすくなり、かつ土粒子表面に付着した水分は土粒子が相互に位置を変える際に潤滑的作用をして、このため締め固めにより乾燥密度は増大する。さらに水を加えて、ある含水比を越えると、土粒子の間隙に存在する水分のために土粒子相互の距離が遠ざけられて、乾燥密度が減少する。このように乾燥密度と含水比の関係は上に凸の山形の曲線を示し、山の頂点を表す密度と含水比を、最大乾燥密度と最適含水比と呼んでいる。

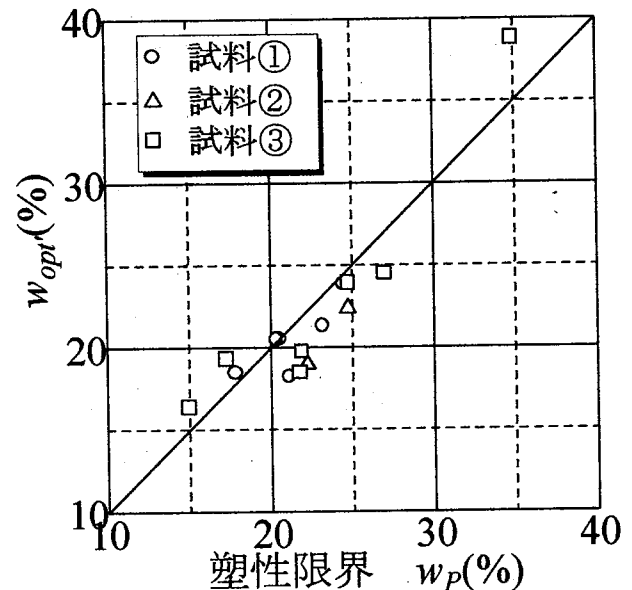


図-6 密度最大時の含水比と塑性限界の関係

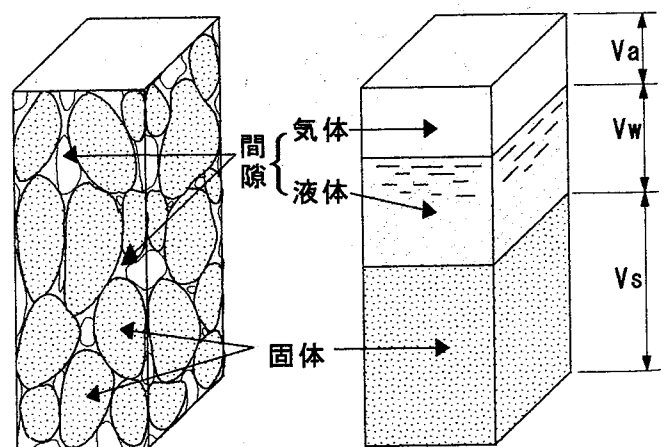


図-7 土の構造図

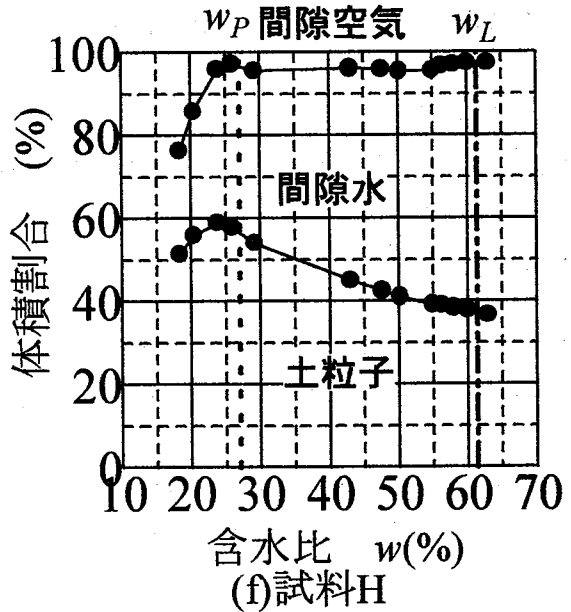
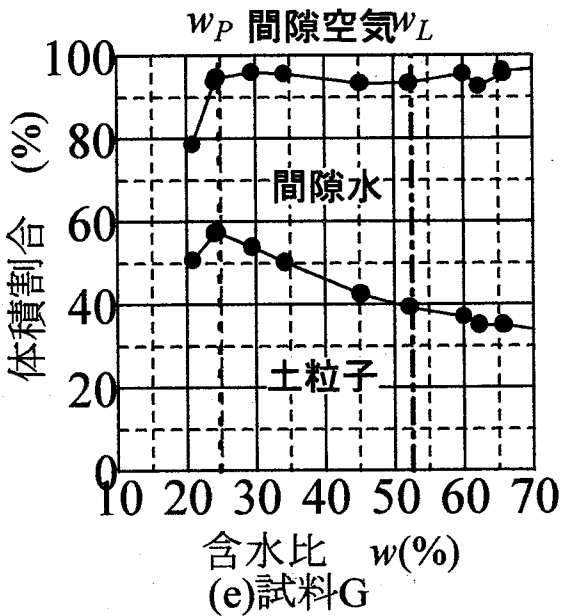
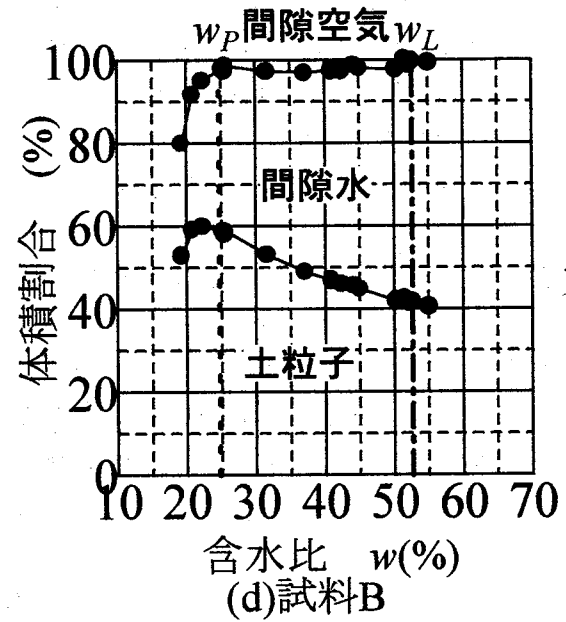
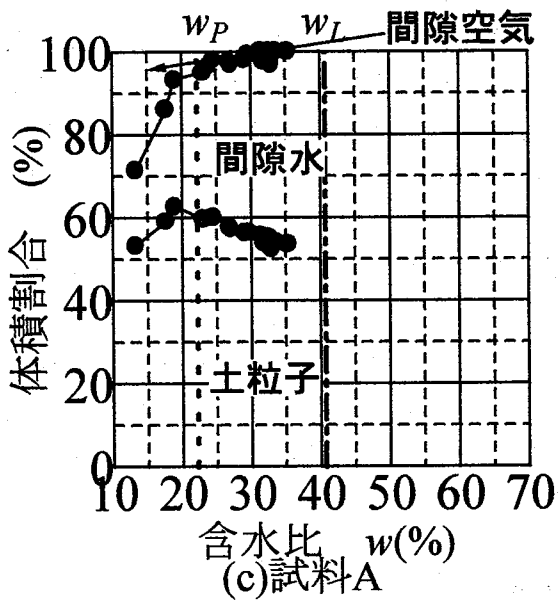
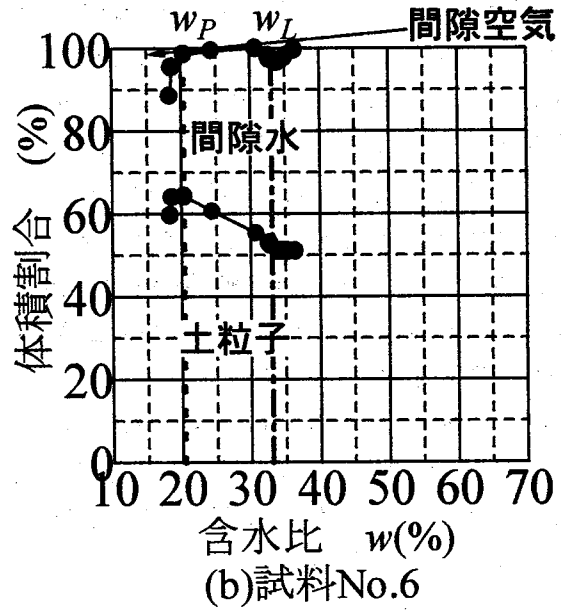
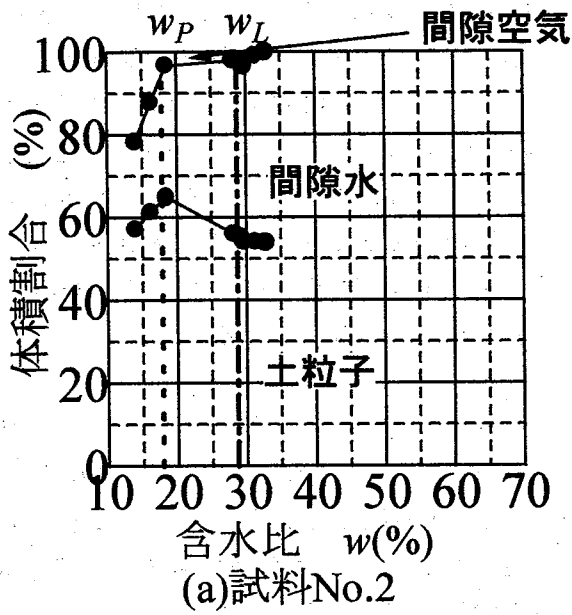


図-8 体積割合と含水比の関係

図-5はフォールコーン試験時の乾燥密度 ρ_d と含水比 w の関係の一例(上述, 試料①のNo.2, No.6, 試料②のA, B, 試料③のG, H)を示したものである。図には、ゼロ空気間隙曲線, 現行法により求めた液性限界(一点鎖線), 塑性限界(点線)を併記している。この乾燥密度と含水比の関係でも, 土の締固め曲線と同じような山形の曲線を示す。これらの山の頂点となる含水比, つまり乾燥密度が最大となる含水比は, それぞれの塑性限界の値に近いことがわかる。このことより, 密度が最大となる含水比が塑性限界に対応していると考えられる。そこで乾燥密度が最大となる含水比を w_{opt} で表すこととして, 現行法により求めた塑性限界と比較したものを, 図-6に示した。この結果をみると, 最大の乾燥密度に相当する含水比 w_{opt} が塑性限界 w_p に十分対応しているといえる。

3.2.2 体積割合と含水比の関係

試験時の試料容器内の試料は図-7に示すように, 土粒子, 間隙水, 間隙空気の三つで構成されており, これらの体積割合は密度より計算して求めることができる。図-5に示した試料を, 試験時の体積割合(土粒子 V_s , 間隙水 V_w , 間隙空気 V_a)と含水比 w の関係で表すと図-8になる。図は下から順に V_s , V_w , V_a の体積割合を示したものであり, 現行法により求めた液性限界(一点鎖線), 塑性限界(点線)を併記している。この図で間隙空気の体積割合 V_a (以下, 空気量と呼ぶ)に注目すると, 塑性限界以上の含水比では空気量は比較的小さいが, 塑性限界より低含水比になると急激に増加し始める。現行の塑性限界の試験方法においては, 土をすりガラス上でひも状に転がして直径が3mmで切れるときの含水比を塑性限界としている。この土が切れるのは, 含水比が減少していくことにより空気量が急増し, そのため土の構造のバランスが崩れ亀裂を生じ脆くなるためであると考えられる。

4. おわりに

本研究からも, フォールコーン法が現行の液性限界試験の代替法として, 十分な結果を得ることができた。また塑性限界は, 密度が最大となる含水比, 土中の空気量が急増するときの含水比であることが明らかになった。これまでの現行の塑性限界試験では, 太さ3mmで土が切れたときの含水比を測定するだけであったが, 今回の方法では密度や体積割合の変化から, 塑性限界の物理的な意味を知ることができた。以上のことから, 密度を測定するフォールコーン試験により, 液性限界と塑性限界を同時に測定することが十分に可能であるといえる。

参考文献

- 1) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, pp.71 ~ 88, 1990.3.
- 2) 土のコンシステンシーに関する研究委員会: 土のコンシステンシーに関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.36 ~ 37, 1995.1.
- 3) 地盤工学会編: 新規規定地盤工学会基準・同解説IV, pp.1 ~ 10, 1997.10.
- 4) 前掲1), pp.43 ~ 48.
- 5) 前掲1), pp.54 ~ 67.
- 6) 吉村優治・板橋一雄・長谷川英明・鍵谷朋子: 濃尾平野南部地盤の液性限界・塑性限界の変動に関する一考察, 理学・工学情報が臨海平野の地盤解釈に果たす役割に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.111 ~ 116, 1998.11.
- 7) 佐野信房・鈴木輝之・北郷繁: フォールコーン法による液性・塑性限界の測定, 土と基礎, Vol.23, No.11, pp.39 ~ 46, 1975.
- 8) 風間秀彦・上條良博・藤田龍之・古河幸雄: フォールコーン法による液性限界・塑性限界の測定, 土のコンシステンシーに関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.145 ~ 152, 1995.1.
- 9) 吉村優治・小川正二: コンシステンシー限界に関する二, 三の考察, 土木構造・材料論文集, 第9号, pp.63 ~ 71, 1993.11.
- 10) 鈴木介人・関延子・高野昭信: フォールコーン法・ベーン法による液性・塑性限界の測定法について, 第32回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.337 ~ 338, 1997.7.