

フォールコーン試験装置を用いた液性限界・塑性限界の決定に関する研究

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

土のコンシステンシー限界は、コンシステンシーの状態の変移点をいい、液体-塑性体-半固体-固体の変移点をそれぞれ液性限界、塑性限界、収縮限界という。またこのコンシステンシー限界は、Atterbergが提唱した方法に準じて求めるのでアッターベルグ限界ともいわれている。コンシステンシー限界を決定する現行の液性限界、塑性限界試験、および収縮限界試験は、JIS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、他の2つの試験方法と比べると多くの問題点が指摘されている。たとえば、静的性質である液性限界を試料土の衝撃落下による一種の動的せん断試験で推定しようとすることや、使用する試験器具の材料により結果に誤差が生じること、また個人差が入りやすい、試験者の熟練を要することなど²⁾である。

以上のような液性限界試験法の問題点の解決のため、フォールコーンを用いて液性限界を求める試みがなされており、地盤工学会でも規準化(JGS T 142-1996)³⁾の動きがある。そこで本研究ではフォールコーン試験装置を用いて液性限界を決定するために、貫入時間や結果の整理方法を検討し、さらに塑性限界の同時決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、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)と濃尾平野南部で採取されたボーリング試料(A,B,C)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(JGS T 131-1990)⁴⁾、土の粒度試験(JGS T 131-1990)⁵⁾(ただし試料A,B,Cについては、レーザー粒度分析計を用いた)、土の液性・塑性限界試験(JGS T 131-1990)⁶⁾を行った。表-1はその結果を整理したものである。

2.2 実験方法

1)試料準備

試料を約300g用意する。蒸留水を試料がパテ状になるまで加え、パテ状になった後、へらにより練り合わせ速度90回/分で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1昼夜保存する。ただし試料A,B,Cについては練り返し時間を変化させた実験も行っている。

なお、フォールコーン試験は本来425 μ m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。

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注意しながら外周の方から中心の方へ順次詰めてゆき、最後に容器の上縁に沿って試料を平に仕上げ、貫入体の先端角60°、質量60gのコーンを静的に試料の中に貫入させる。残った試料の質量を測定した後、含水比 w を測定する。

④コーン貫入後、ダイヤルゲージで5秒、1、3、5、10、15、20分のときの貫入量 h の値を読む。

On the Determination of Liquid Limit and Plastic Limit of Soils by means of Fall Cone Method:
Yuji Yoshimura, Daisuke Tanaka (Gifu National College of Technology)

表-1 試料の物理的性質

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	A	B	C
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.660	2.654	2.655	2.601	2.561	2.627	—	—	—
液性限界 W_L (%)	37.4	28.7	32.85	33.4	53.8	33.1	40.7	66.9	52.68
塑性限界 W_P (%)	20.84	17.85	21.11	23.18	24.5	20.38	33.4	25.54	24.73
塑性指数 I_P	16.56	10.85	11.74	10.22	29.3	12.74	7.3	41.36	27.95
砂分 (%)	9.3	20.3	5.1	5.7	7.2	9.1	13.5	0.5	0.0
シルト分 (%)	77.8	54.7	61.9	71.8	48.8	73.9	58.5	67.5	58.0
粘土分 (%)	12.5	25.0	33.0	22.5	44.0	17.0	28.0	28.0	42.0
最大粒径 (mm)	0.840	0.420	0.840	0.840	2.000	2.000	0.420	0.100	0.060
60%粒径 D_{60} (mm)	0.036	0.036	0.019	0.0325	0.012	0.054	0.0216	0.0136	0.009
50%粒径 D_{50} (mm)	0.0275	0.022	0.011	0.022	0.0076	0.044	0.0137	0.001	0.0066
30%粒径 D_{30} (mm)	0.011	0.007	0.007	0.0084	0.002	0.0216	0.0056	0.0054	0.0031
10%粒径 D_{10} (mm)	0.0045	0.0013	0.0011	0.0014	0.0007	0.001	0.0022	0.0035	0.0012
均等係数 U_c	8.0	27.7	17.3	24.1	16.7	54.0	9.818	8.0	7.5
曲率係数 U_c	0.75	0.63	2.34	1.61	0.46	8.56	0.66	1.261	0.89

⑤ 試料容器から試料を取り出し、これに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。

⑥ 貫入量が11.5mmをはさんで4個以上得られるように②～⑤を繰り返す。貫入量 h と含水比 w の関係をプロットし、貫入量11.5mmに相当する含水比をファイネスナンバー $F_{11.5}$ とする

3. 実験結果および考察

3.1 貫入時間の検討

図-2はコーンを落下させてからの経過時間 t に伴うコーン貫入量 h の関係の一例である。貫入量 h は時間の経過とともに若干増えるがその変化量は極めて小さく、結果に影響を及ぼさない。したがって、本研究では文献⁹⁾にならい5分後の値を貫入量とした。

3.2 結果の整理方法について

含水比 w と貫入量 h の関係について、横軸の貫入量 h を普通目盛および対数目盛でとり、ファイネスナンバーを地盤工学会基準案⁹⁾の貫入量11.5mmに相当する含水比として整理した。これらの条件で含水比 w と貫入量 h の関係を表す一例を図-3に示す。図-3(a),(b)は横軸を普通目盛、(a)',(b)'は横軸を対数目盛で整理したものであり、図中の $|r|$ は回帰線の相関係数である。これらの図より貫入量11.5mmに相当する含水比(ファイネスナンバー)を求め、普通目盛

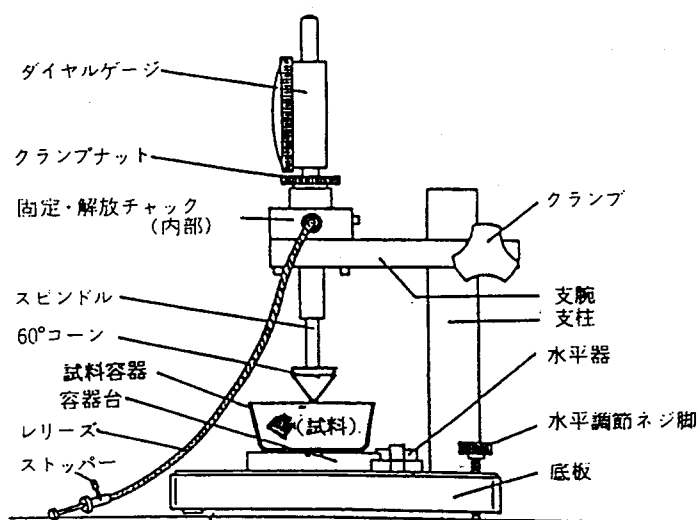


図-1 フォールコーン試験装置

の値を $F_{11.5}$, 対数目盛の値を $F'_{11.5}$ で表すこととした。表-2 に液性限界とこれらのファイネスナンバーとその相関係数をまとめた。表中, A'~A'', B', C' は試料の準備段階で繰り返し時間を変化させたものである。表中に示した相関係数がほとんどの試料で 0.96 ~ 0.99 と高いこと, 図-4 に示した $F_{11.5}$ と $F'_{11.5}$ がよく対応していること, ファイネスナンバーの決定は貫入量 11.5mm を挟んで内挿により求めていることから, 普通目盛, 対数目盛のいずれを使って結果の整理を行っても良いことがわかった。したがって本研究では地盤工学会基準案³⁾に従い, 試験結果は普通目盛で整理することにした。

3.3 液性限界 w_L とファイネスナンバー F の関係

図-5(a) はファイネスナンバー $F_{11.5}$ と液性限界 w_L の関係をプロットしたものであり, 両者の関係には良好な相関関係が見られる。また本研究室で過去に得られている市販の陶土 6 種類を含む 19 種類の結果^{6)~9)}を加えたのが図-5(b) であり, この図からも実用的にも $F_{11.5}$ は現行の液性限界 w_L に十分代わり得るといえる。

3.4 乾燥密度と含水比の関係

土の締め固め試験の乾燥密度と含水比の関係をみると乾燥密度は初め増加を示すが, ある含水比を越えると乾燥密度は減少し始める。これは, 含水比の低い土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が潤滑材として土粒子間の摩擦力を低減する。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る。このことにより乾燥密度が減少

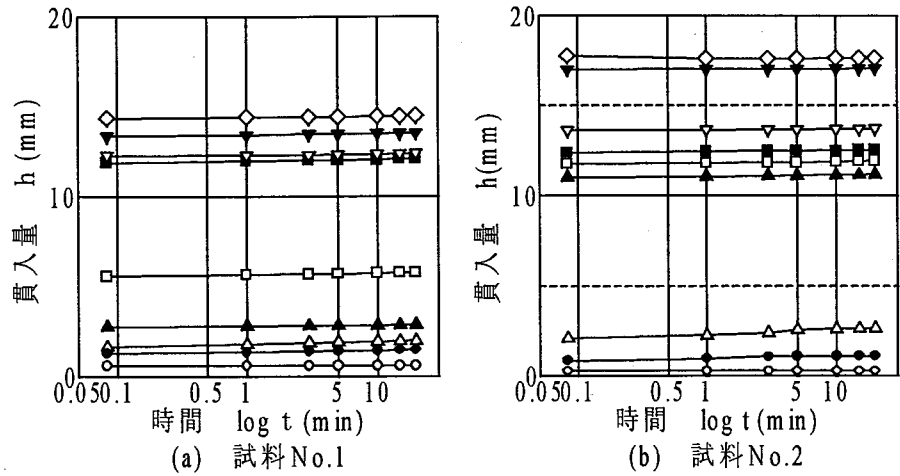


図-2 貫入量と時間の関係

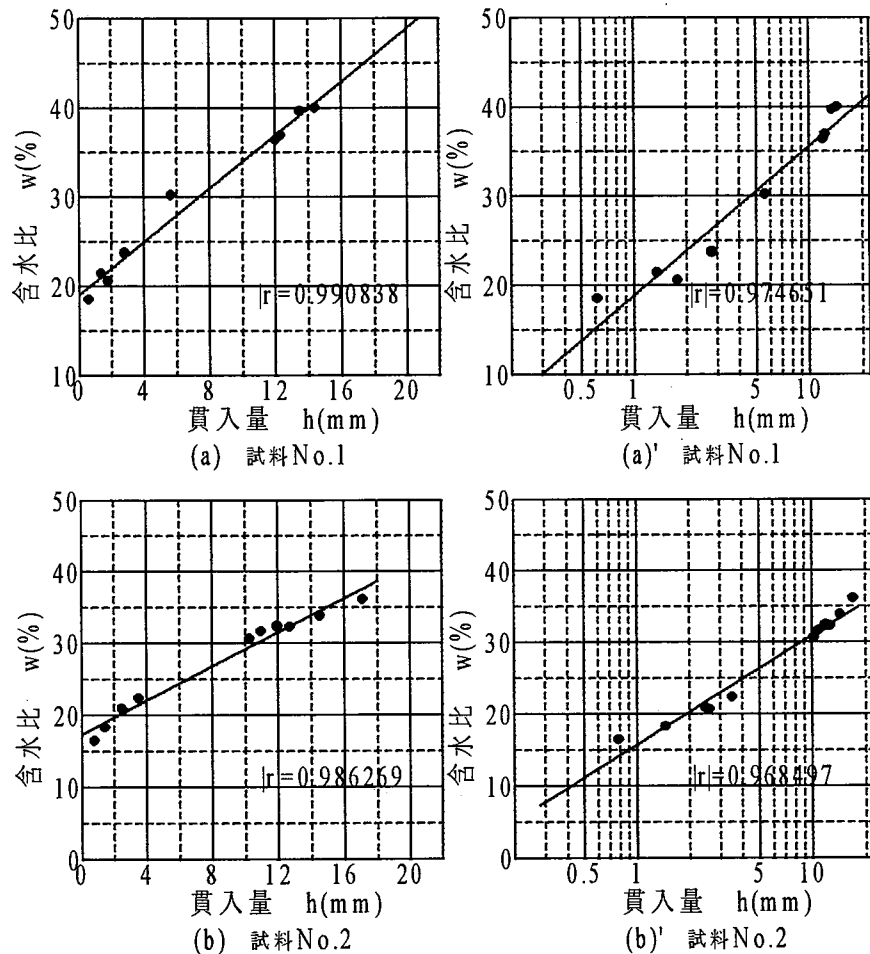


図-3 含水比と貫入量の関係

表-2 液性限界とファイネスナンバーの比較

試料名	液性限界 WL (%)	普通目盛		対数目盛	
		F _{11.5} (%)	相関係数	F' _{11.5} (%)	相関係数
No.1	37.4	36.1	0.991	36.5	0.975
No.2	28.7	27.3	0.986	28.8	0.969
No.3	32.9	30.9	0.988	31.8	0.987
No.4	33.4	30.2	0.955	31.8	0.961
No.5	53.8	49.3	0.994	54.1	0.993
No.6	33.1	33.1	0.983	33.7	0.994
A	40.7	41.3	0.958	41.3	0.955
A'	38.7	38.0	0.988	38.1	0.984
A''	32.8	34.1	0.918	34.1	0.923
A'''	31.9	32.8	0.963	32.7	0.988
B	67.0	60.2	0.999	59.2	0.999
B'	63.0	59.7	0.973	59.5	0.978
C	52.5	51.0	0.981	50.9	0.974
C'	49.0	47.7	0.997	47.7	0.994

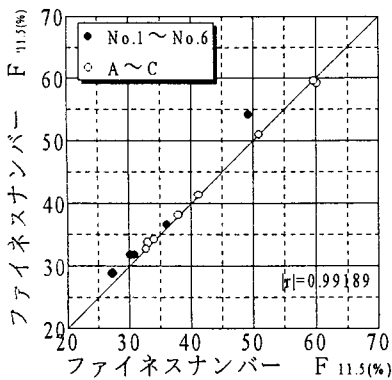
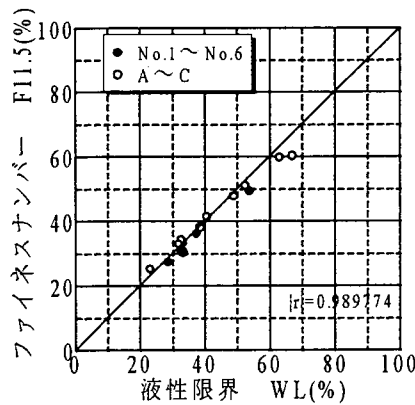
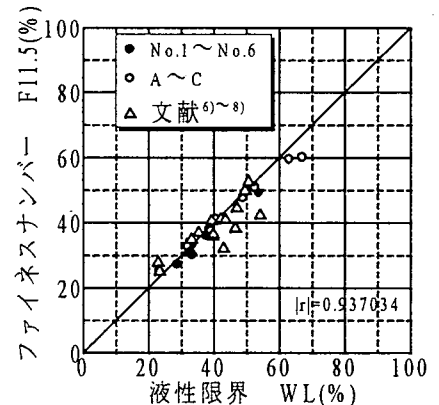


図-4 F_{11.5}とF'_{11.5}の関係



(a) 本実験データ



(b) 全データ

図-5 ファイネスナンバーと液性限界の関係

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、その頂点を表す密度と含水比をそれぞれ最大乾燥密度と最適含水比と呼んでいる。

本研究では、フォールコーン試験の試料容器の体積が分かっているために、試験時の密度を知ることができる。これより各含水比における乾燥密度を求め、試料 No.1 ~ No.6 の乾燥密度 ρ_d と含水比 w の関係を図-6 に示した。これらの図には、ゼロ空気間隙曲線、現行法より求めた液性限界 w_L (一点鎖線)、塑性限界 w_p (点線) を併記している。これらの図から、締め固め曲線と同じように乾燥密度は含水比と共に増加して、ある含水比に到達すると減少し始め、その後はゼロ空気間隙曲線に沿って減少していることがわかる。

また、液性限界付近では乾燥密度はゼロ空気間隙曲線に接する位置にあり、飽和度が 100% に近いことがわかる。一方、塑性限界付近では乾燥密度が山形を示す曲線の頂点付近にあることがわかる。

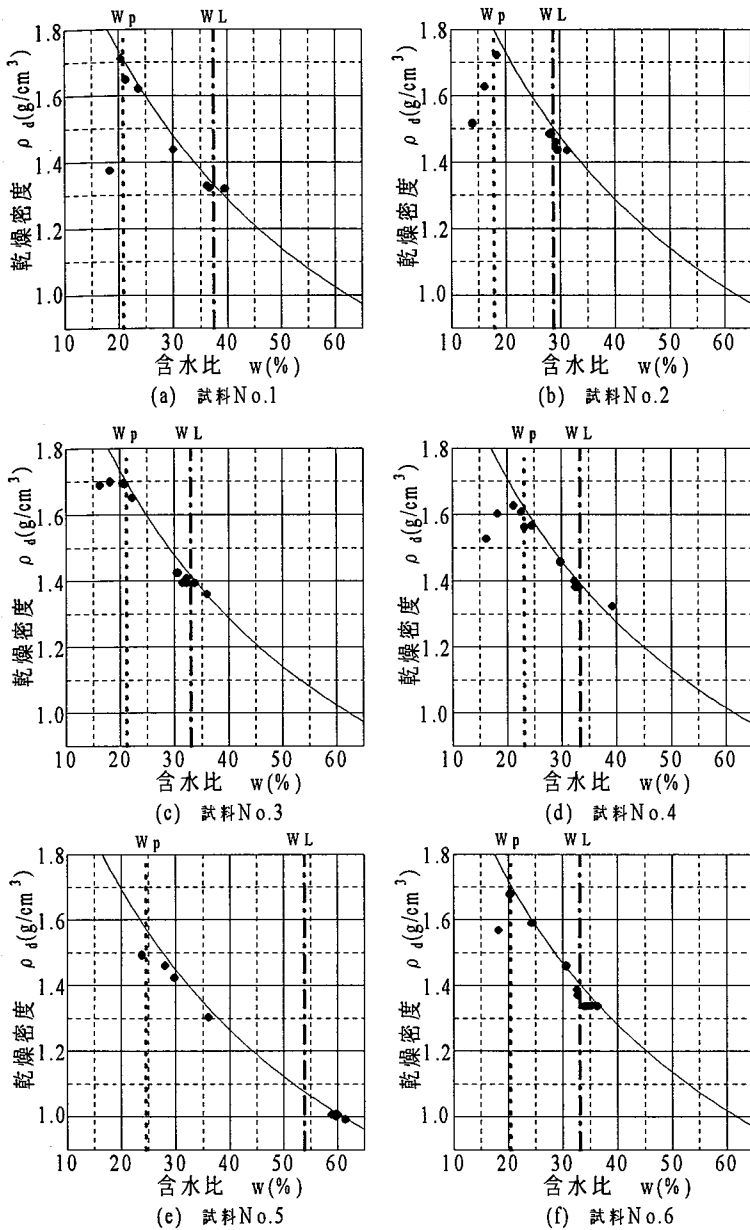


図-6 乾燥密度と貫入量の関係

3.5 塑性限界の推定

上述した図-6の結果より、曲線の頂点となる最大の乾燥密度に相当する含水比が、塑性限界 w_p に対応していると考えられる。そこで、これまでの結果から曲線の頂点に最も近い乾燥密度の含水比を $w_{opt}(\%)$ で表すこととして、塑性限界 w_p との関係を示したのが図-7である。この結果を見ると、最大の乾燥密度に相当する含水比 $w_{opt}(\%)$ が塑性限界 w_p にほぼ対応しているといえる。しかし、試料 A, B, C については低含水比のデータを測定しておらず、塑性限界付近のデータを得ていない。また、図-7には本研究室で過去に得られている結果^{7),8)}も併せてプロットしているが、これまでのフォールコーン試験で密度が測定された例はほとんどなく、今後のデータの累積が必要だと思われる。これまでもフォールコーン法により塑性限界を求める試みがなされてきている。たとえば貫入量 3mm に相当する含水比 $F_3(\%)$ がほぼ塑性限界 w_p に相当するという報告⁹⁾があるので、本研究のデータと本研究室の過去のデータ^{9)~10)}について $F_3(\%)$ を求め、塑性限界 w_p との関係を示したのが図-8である。図では F_3 と w_p が対応しているデータもあるが、かなりのばらつきが見られるので、特定の貫入量 h に相当する含水比が現行の塑性限界 w_p に対応している

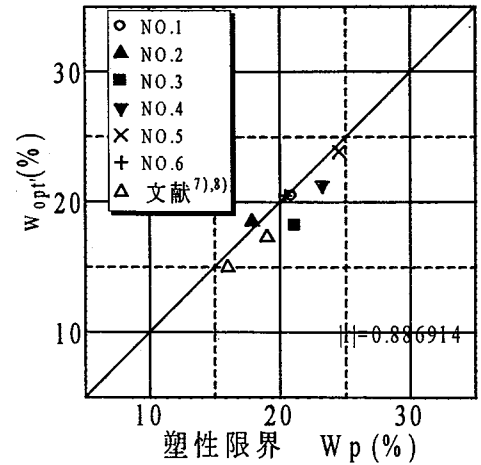


図-7 乾燥密度最大時の含水比と乾燥密度の関係

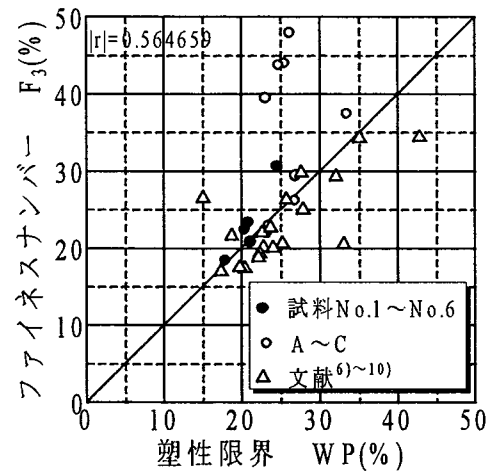


図-8 ファイネスナンバー F_3 と塑性限界の関係

とは言い難い。これは、 $F_{11.5}$ が実験値を内挿して求めているのに対し、 F_3 は外挿により求めていることも誤差を大きくする一因と考えられる。

4.おわりに

液性限界を求める試験法として、フォールコーン法がある。本研究では、フォールコーン試験装置を用いて試験を行い、貫入時間や結果の整理方法を検討し、さらに塑性限界の同時測定についても検討した。本研究から得られた結論は、以下の通りである。

- ①貫入量 h は時間の経過とともに若干増えるがその変化量は極めて小さく、貫入時間が5秒以上であれば結果に影響を及ぼさない。
- ②ファイネスナンバーの決定には貫入量 h を、普通目盛、対数目盛のいずれを使っても整理しても結果差がない。
- ③ファイネスナンバー $F_{11.5}$ は、現行の液性限界 w_L に十分代わり得る。
- ④試験時の密度は含水比に応じて変化をしており、締め固め曲線のような上に凸の山形の曲線を示す。そして、液性限界は飽和度が100%に近い含水比であり、塑性限界は乾燥密度が最大となる含水比付近にある。
- ⑤特定の貫入量 h （例えば3mm）に相当する含水比が塑性限界 w_p に対応しているとは言い難い。今後は、試験時の密度を測定したデータを累積し、密度が最大となる含水比 w_{opt} と塑性限界 w_p との関係を明らかにする予定である。また、試料準備の時の練り時間によって液性限界が変化するため、練り返し時間の基準化を考える必要がある。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，pp. 71～88, 1990.
- 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：フォールコーン試験による土の液性限界試験法(案)，土と基礎，Vol.44, No.12, pp.72～74, 1996.12.
- 4) 前掲 1)，pp.43～48.
- 5) 前掲 1)，pp.54～67.
- 6) 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.
- 7) 吉村優治・伏屋美香：フォールコーン試験に関する一考察，平成8年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.469～470, 1997.3.
- 8) 伏屋美香：サクションを測定するフォールコーン試験装置の開発とその試験方法，岐阜工業高等専門学校土木工学科平成8年度卒業論文，1997.2.
- 9) 佐野弘・服部浩至：液性限界・塑性限界測定法について，岐阜工業高等専門学校土木工学科昭和61年度卒業論文，1987.2.
- 10) 中川将己：土の物理的試験の見直し，岐阜工業高等専門学校土木工学科昭和62年度卒業論文，1988.2.