粘性土の圧縮性に関する統計的研究

その1 大阪平野沖積粘土の間隙比・有効応力の関係式

A STATISTICAL STUDY ON THE COMPRESSIBILITY OF CLAYEY SOIL

Part 1 On the formulas between void-ratio and effective pressure
of the alluvial clay in the Osaka plain

中田 啓一*, 辻本 勝彦**

Keiichi NAKATA and Katsuhiko TSUJIMOTO

The relation between void-ratio and effective pressure of clay is important for predications of building-settlements. This relation is gotten by consolidation tests of individual undisturbed soil samples. This method is require much labor and expense. By expressing void-ratio as function of soil characteristic constants and effective pressure, it is possible to express the compressibility of clay in large district by less labor and expense.

By statistical analysis, four relational formulas are gained, as variable soil characteristic constants. In the former two relational formulas, it is liquid limit alone, in the third relational formula, it is natural water content alone, in the last relational formula, it is clay content alone.

Keywords : compressibility, void-ratio, soil characteristic constants, consolidation test
liquid limit, natural water content

圧縮性、間隙比、土質定数、圧密試験、液性限界、自然含水比

1. はしがき

一般に、構造物の構築などの増加圧による粘性土層の沈下予測において最も基本となるものは、圧密試験結果から得られる圧密処女曲線の間隙比 e と圧密圧力 p の関係式である。現在、この関係式は地中の乱さない試料の採取、圧密試験、そして、その結果の算出により求めている。しかし、この方法では多くの労力を伴うため、比較的良好な地盤上の小規模建物では、圧密試験が行われなことが多。また、同一地層の採取試料の数が特に少ない場合も見られる。

統計学の手法を用いて、間隙比 e を圧密圧力 p と簡単な土質試験から推測できる土質定数の関数とした式から得られれば、圧密試験を行わない構造物の簡易な沈下予測、また、試料数の特に少ない場合、圧密試験結果の信頼性のチェックに有効である。本論文では、大阪平野沖積粘土の間隙比と有効応力の関係式を過去に行われた圧密試験結果を用いて統計的推論により求める。ただし、粘土は飽和粘土（以下飽和の文字は省略）とする。

個別試料の間隙比 e と有効応力 p （有効応力と圧密試験に用いる圧密圧力は同じとする。）は、

$$e = -a_c \log p + b_c \quad \text{----- (1)}$$

a_c 、 b_c : 試料ごとに異なる定数

の回帰式において相関性が高いと初期の研究^{1) 2)} から示されて

いる。そして、係数 a_c を圧縮指数 C_c としている³⁾。また、現在、圧縮指数は C_c で表され、間隙比 e と圧密圧力 p の関係を示す片対数グラフ上において、試験値を結んだ曲線の直線部の傾斜から求められている⁴⁾。

(1) 式は、片対数グラフ上では直線で表されるが、圧密試験の結果の中にはグラフ上で左下方に凸の曲線になるとの報告もある⁵⁾。この考えに沿って、筆者らは両対数グラフ上で直線、すなわち、

$$\log e = -a_n \log p + b_n \quad \text{----- (2)}$$

a_n 、 b_n : 試料ごとに異なる定数

の回帰式を示している⁶⁾。(1) 式および(2) 式の2 係数を土質定数の関数で表せば、各々

$$e = -a_c (x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{ci}, \dots) \log p + b_c (x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{ci}, \dots) \quad \text{-- (3)}$$

$$\log e = -a_n (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{ni}, \dots) \log p + b_n (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{ni}, \dots) \quad \text{-- (4)}$$

x_{ci} 、 x_{ni} : 土質定数 i : 正の整数

となる。そして、これらの式の係数を特定する。

このうち係数 a_c に相当する圧縮指数 C_c に関しては、多くの統計的研究⁷⁾ などがある。しかし、これらの論文は標本そのものを対象とした統計的記述か、母集団を対象とした統計的推論かの記述は

本論文は、文献17)~20)を改良および加筆したものである。

* 近畿大学理工学部建築学科 教授・工博

** ㈱東京ソイルリサーチ技術調査部 課長

Prof., Dept. of Archi., Faculty of Science and Eng., Kinki Univ., Dr. Eng.
Chief Engineer, Geotech. Eng. and Inve. Part, Tokyo Soil Research Co. Ltd.

なく、どちらか判断できない。さらに、後者とすれば、推論のため標本抽出に関する説明がなく、また、求められた重回帰式^{文8)} ^{文9)}では、説明変数の1つが工学的には順相関であるものが逆相関になっている式も含まれており、説明変数間の相関性の大きさから生じる多重共線性の弊害が現れている^{文10)}と考えられ、母集団に関する関係式の信頼度を判断できない。

本論文では、大阪平野の沖積粘土を母集団と考える。そして、標本として大阪平野沖積粘土の過去の土質試験値を用い、最適な単数、または、複数の土質定数を変数とする(3)式および(4)式の係数を求め、大阪平野沖積粘土の普遍的な間隙比と有効応力の関係式を統計的推論より求める。この関係式を求めるには、次の2つの方法が考えられる。第1の方法は、各試料の圧密試験における各荷重段階圧密終了時ごとの間隙比を基本として求める。第2の方法は、各試料の圧密試験により得られた(1)式および(2)式の4係数を基本として求める。各々の方法によって(3)式型の式と(4)式型の式を求め、合計4つの関係式を提唱する。

2. 標本およびその統計量

標本は、乱さない状態で採取した大阪平野沖積粘土の試料の土質試験値である。大阪平野沖積粘土は無限にあるため、試料の抽出に当たっては多段抽出法を用いる^{文11)}。ただし、試料は、新たに採取するのではなく、蓄積のある過去の工事現場で採取し圧密試験を行った結果を用いる。第一次抽出単位を図-1に示す7つの地域、すなわち、新大阪駅周辺、大阪駅周辺、東大阪、六甲アイランド(Is)、堺北臨海埋立地、大阪南港埋立地および尼崎港とし、第二次抽出により各地域の数箇所の工事現場を選び、平面上の分布を考える。そして、第三次抽出により各工事現場について、深さ方向の分布を考慮にいたれた数箇の試料を抽出する。

図-1 調査位置図

各地域の試料数を表-1に示す。その採取深さは、最浅1.38m、最深39.40m、そして、平均8.89mである。

全試料の土質試験結果から、その圧密降伏応力 p_c 、圧縮指数 C_c 、自然含水比 w_n 、塑性限界 w_p 、液性限界 w_L 、塑性指数 I_p 、粘土分含有量 f_c （以後、粘土分含有量の略記号に f_c を用いる）、土粒子の密度 ρ_s 、初期間隙比 e_0 、原位置における自然間隙比 e_n 、

そして、圧密降伏応力 p_c に対応する間隙比 e_c の平均値、標準偏差、最小値および最大値を表-2に示す。なお、自然間隙比 e_n は、含水比 w_n と土粒子の密度 ρ_s の試験値を用いて次の理論式で求める。

$$e_n = w_n \rho_s / (\rho_w \times 100) \quad \text{----- (5)}$$

ただし、 ρ_w は水の密度とし、1とする。

表-1 土質試料数

場所	新大阪駅	大阪駅	東大阪	六甲Is	堺北	南港	尼崎	合計
土質試験の試料数	22	37	25	69	31	53	15	252

表-2 土質定数の統計量

項目	平均値	標準偏差	最小値	最大値
圧密降伏応力 p_c (kgf/cm ²)	1.76	1.23	0.11	7.20
圧縮指数 C_c	0.85	0.27	0.21	1.59
自然含水比 w_n (%)	67.3	17.6	26.5	106.6
塑性限界 w_p (%)	28.3	5.8	14.7	45.4
液性限界 w_L (%)	87.6	23.9	32.1	129.9
塑性指数 I_p (%)	59.3	20.0	12.7	93.5
粘土分含有量 f_c (%)	58.8	14.4	13.5	84.5
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68	0.03	2.54	2.74
初期間隙比 e_0	1.85	0.48	0.75	2.89
自然間隙比 e_n	1.80	0.47	0.70	2.89
p_c に対応する間隙比 e_c	1.70	0.47	0.64	2.76

上記252個の試料について、個別に(1)式、および(2)式の関数近似を行った。その結果、自由度修正済み決定係数の平均値は、(1)式では0.995、(2)式では0.996と2式とも高い値を得る。以上の2つの相関性を示す値より、個別試料の間隙比 e と圧密圧力 p との関係を(1)式または(2)式で表すことは、妥当と判断される。

3. 変数候補の土質定数

(3)式および(4)式の4つの係数の変数を特定するため、その変数を、圧縮関係の土質定数から選ぶ。ここでは、その候補となる複数の土質定数を選ぶ。

第1ステップとして、圧縮指数 C_c を求める既往の統計的な研究に変数としてよく用いられた液性限界 w_L 、自然含水比 w_n 、初期間隙比 e_0 、自然間隙比 e_n 、そして、圧密降伏応力 p_c に対応する間隙比 e_c を取り上げる^{文12)}。これらのうち、自然含水比 w_n と自然間隙比 e_n は、(5)式における土粒子の密度 ρ_s がほぼ一定である(表-2を参照)ことから相関性が特に強く、相関係数は0.999である。また、これらの5土質定数間の相互の相関関係を示す相関マトリックスを表-3に示す。土質定数間の相関係数は大きく、液性限界 w_L を除いた4土質定数間では特に大きい。また、初期間隙比 e_0 、自然間隙比 e_n 、 p_c に対応する間隙比 e_c は、ほとんど同じ平均値と標準偏差である(表-2を参照)。このため、液性限界 w_L を除く4土質定数は互いに独立しているとは考え難く、これらのうち、最も算出誤差の少ないと考えられる自然含水比 w_n を代表とし、他は変数の候補としないことにする。

圧縮性に関係が深いと考えられる要件として、応力履歴、コンシステンシーおよび粒度分布がある。第2ステップとして、この要件

に従って、前述の自然含水比 w_n と液性限界 w_L に塑性指数 I_p 、粘土分含有量 f_c 、コロイド分含有量、圧密降伏応力 p_c を加えた6土質定数を変数の候補として考える。前5者は乱した試料によって求められる値であるが、圧密降伏応力 p_c は乱さない試料の圧密試験によらねば求められない。この p_c 値が採用されれば実用面で問題があるものの、応力履歴の影響を考える上で必要なので加える。

表-3 土質定数の相関マトリックス

	e_0	e_c	e_n	w_n	w_L
初期間隙比 e_0	1.000	0.988	0.989	0.988	0.785
p_c に対応する間隙比 e_c	0.988	1.000	0.979	0.978	0.778
自然間隙比 e_n	0.989	0.979	1.000	0.999	0.803
自然含水比 w_n	0.988	0.978	0.999	1.000	0.813
液性限界 w_L	0.785	0.778	0.803	0.813	1.000

4. 統計解析用の間隙比 e_j の値

統計解析のために使用する間隙比 e_j (j は圧密試験の荷重段階の段階数を示す)の値は、処女圧密曲線上の値である。そのため、圧密降伏応力 p_c 発生時の荷重段階以前の間隙比は、先行荷重の影響を受けた値と考え除外する。

また、間隙比と圧密圧力の関係式を求める第1の方法では、各荷重段階圧密終了時ごとの間隙比 e_j の資料数が必要である。 $p=0.8\text{kgf/cm}^2$ から 25.6kgf/cm^2 の6つの荷重段階圧密終了時ごとに読み取った間隙比の個数を、地域別に分けて表-4に示す。7つの地域のうち、新大阪駅周辺、大阪駅周辺および東大阪の内陸部で、 $p=0.8\text{kgf/cm}^2$ の試料がその他の臨海地帯に比べて少ないのは、浅い地点の試料が無いからである。また、 $p=0.4\text{kgf/cm}^2$ 以前と 51.2kgf/cm^2 以後の試験値は、その数が少ないので検討対象外とする。荷重段階 j と圧密圧力 p との対応は、 $j=1$ が $p=0.8\text{kgf/cm}^2$ 、 $j=2$ が $p=1.6\text{kgf/cm}^2$ 、以下、 $j=6$ が $p=25.6\text{kgf/cm}^2$ まで続く。

表-4 各圧密圧力段階の間隙比の数

圧密圧力 (kgf/cm ²) 地域	$p=0.8$	$p=1.6$	$p=3.2$	$p=6.4$	$p=12.8$	$p=25.6$
新大阪駅	0	3	16	21	22	10
大阪駅	0	13	29	37	37	12
東大阪	2	17	22	25	20	5
六甲	17	33	50	67	63	35
堺北	15	23	30	29	22	3
南港	9	28	45	53	53	18
尼崎	11	14	15	15	5	0
合計	54	131	207	247	222	83

5. 第1の方法による間隙比と圧密圧力の関係式

5.1 第1の方法による(3)式の特定

5.1.1 間隙比と土質定数の回帰式中の土質定数の特定

まず各荷重段階圧密終了時ごとの6つの間隙比 e_j と土質定数の回帰式が必要であり、この6つの回帰式に変数として用いる共通の土質定数を、既に3.で求めた変数候補の6土質定数から、その数を含めて選ぶ。この手順を以下に示す。

① 6荷重段階圧密終了時ごとの間隙比 e_j と6土質定数の単回帰分析を行う。

同分析から得られた相関係数、標準偏差および変動係数を、相関性の指標として、各々を表-5の上段、中段および下段に示す。相関係数が大きく、かつ、標準偏差および変動係数が小さければ、相関性が高いと考え、この表から6荷重段階を通じて最も相関性の高い土質定数は、液性限界 w_L である。

② 重回帰式の変数となる土質定数を選ぶ。

これには、まず、変数の数を、変数間の多重共線性の問題を考慮して求める。このため、6土質定数の変数のクラスター分析をウォード法、最短距離法、最長距離法、群平均法、重心法の5つの方法で行い、樹形図を求める。得られた樹形図は全て同じであり、これを図-2に示す。樹形図は、コンシステンシー関係の第1クラスター、粒度分布関係の第2クラスター、そして、応力履歴関係の第3クラスターに分かれており、変数の数は各クラスターごとに1の合計3とする。

図-2 樹形図

表-5 土質定数の相関係数、標準偏差と変動係数

圧密圧力 e_0 の平均	試験数	w_L	I_p	w_n	f_c	コロイド	p_c	$w_L \cdot f_c$ p_c
0.8kgf/cm ²	54	0.842	0.824	0.741	0.422	0.008	0.410	0.896
2.031		0.145	0.125	0.180	0.243	0.268	0.245	0.121
		0.071	0.075	0.089	0.120	0.132	0.121	0.060
1.6kgf/cm ²	131	0.822	0.806	0.811	0.706	0.446	0.221	0.865
1.667		0.150	0.156	0.154	0.187	0.236	0.257	0.133
		0.090	0.094	0.092	0.112	0.142	0.154	0.080
3.2kgf/cm ²	207	0.817	0.793	0.773	0.762	0.512	0.155	0.862
1.377		0.129	0.136	0.141	0.144	0.191	0.220	0.113
		0.093	0.098	0.103	0.105	0.139	0.160	0.082
6.4kgf/cm ²	247	0.825	0.791	0.759	0.744	0.523	0.211	0.845
1.133		0.103	0.112	0.120	0.123	0.156	0.180	0.099
		0.091	0.099	0.106	0.108	0.138	0.158	0.087
12.8kgf/cm ²	222	0.806	0.767	0.758	0.730	0.533	0.205	0.822
0.933		0.088	0.095	0.096	0.101	0.125	0.145	0.084
		0.094	0.102	0.103	0.108	0.134	0.155	0.090
25.6kgf/cm ²	83	0.748	0.702	0.813	0.631	0.409	0.208	0.751
0.759		0.089	0.095	0.078	0.104	0.123	0.131	0.090
		0.117	0.126	0.103	0.137	0.161	0.173	0.118

上段：相関係数 中段：標準偏差 下段：変動係数

3つのクラスターから、1つずつの土質定数を選ぶ。表-5を用いて、複数の2つの各クラスターの中で各々最も相関性の高い土質定数を選ぶと、第1クラスターでは液性限界 w_L 、第2クラスターでは粘土分含有量 f_c である。これらに圧密降伏応力 p_c を加えた3変数を用いて重回帰解析を行う。そして、解析結果による相関性の指標を表-5の右側に示す。

③ 重回帰による重相関係数を単回帰における液性限界 w_L の単相関係数と比べる。

変数の数が増加しているのに拘らず、その上昇は比較的小さい。以上より、回帰式の変数は、液性限界 w_L 1つとする。

5.1.2 間隙比 e_j と液性限界 w_L の組合せ

変数となる土質定数が液性限界 w_L に決まったので、間隙比 e_j と液性限界 w_L の回帰式を求める。間隙比 e_j と液性限界 w_L の関係は、その常用対数を含めると、(3)式の形式にするためには、次の2組の式

$$e_{1j} = a_{1j} w_L + b_{1j} \quad \text{----- (6)}$$

$$e_{2j} = a_{2j} \log w_L + b_{2j} \quad \text{----- (7)}$$

j : 圧密応力の荷重段階(1, 2, 3, 4, 5, 6)

が考えられる。ただし、 j の数から、両式は各々6個の式がある。これらの式番号を、(6.1)～(6.6)と(7.1)～(7.6)とする。そして、2組12個の回帰分析により得られた相関性に関する指標を表-6の第1列と第2列に示す。同表から、(6.1)～(6.6)の6式と(7.1)～(7.6)の6式の相関性の差はほとんど見られない。同じ回帰分析により得られた2組12式の係数 a_{1j} 、 b_{1j} および a_{2j} 、 b_{2j} の値を、表-7の第1列と第2列に示す。

表-6 回帰分析による相関係数、標準偏差と変動係数

圧密圧力 kgf/cm ²	$e-w_L$	$e-\log w_L$	$\log e-w_L$	$\log e-\log w_L$
0.8 (j=1)	0.842	0.846	0.835	0.843
	0.145	0.143	0.148	0.144
	0.071	0.071	0.073	0.071
1.6 (j=2)	0.822	0.822	0.814	0.824
	0.150	0.150	0.153	0.150
	0.090	0.090	0.092	0.090
3.2 (j=3)	0.817	0.820	0.809	0.819
	0.129	0.128	0.131	0.128
	0.093	0.093	0.091	0.093
6.4 (j=4)	0.825	0.816	0.821	0.823
	0.103	0.106	0.105	0.104
	0.091	0.094	0.092	0.092
12.8 (j=5)	0.806	0.792	0.804	0.800
	0.088	0.090	0.088	0.089
	0.094	0.097	0.094	0.095
25.6 (j=6)	0.748	0.721	0.750	0.733
	0.089	0.093	0.089	0.091
	0.117	0.122	0.117	0.120

上段：相関係数 中段：標準偏差 下段：変動係数

表-7 回帰分析による係数 a_{ij} と定数 b_{ij}

圧密圧力 kgf/cm ²	$e-w_L$	$e-\log w_L$	$\log e-w_L$	$\log e-\log w_L$
0.8 (j=1)	0.0142	3.159	-0.0032	0.725
	0.559	-4.322	-0.032	-1.154
1.6 (j=2)	0.0103	2.068	0.0029	0.583
	0.681	-2.403	-0.060	-0.931
3.2 (j=3)	0.0080	1.534	0.0027	0.519
	0.653	-1.599	-0.110	-0.874
6.4 (j=4)	0.0063	1.132	0.0025	0.459
	0.580	-1.047	-0.174	-0.835
12.8 (j=5)	0.0049	0.873	0.0024	0.421
	0.510	-0.737	-0.239	-0.842
25.6 (j=6)	0.0039	0.645	0.0023	0.380
	0.434	-0.464	-0.317	-0.847

上段：係数値 a_{ij} 下段：常数項 b_{ij}

5.1.3 係数 a_{1j} 、 b_{1j} と圧密圧力 p の回帰式

(6.1)～(6.6)の6式の a_{1j} 、 b_{1j} を圧密圧力 p について連続させることにより、すなわち、 a_{1j} 、 b_{1j} が圧密圧力 p の関数となることにより、6つの関数 e_{1j} は次に示すように液性限界 w_L と圧密圧力 p の1つの関数 e_1 となる。

$$e_1 = a_1(p) w_L + b_1(p) \quad \text{----- (8)}$$

(7)式についても同じ様に、6つの e_{2j} は次に示す液性限界 w_L と圧密圧力 p の1つの関数 e_2 となる。

$$e_2 = a_2(p) \log w_L + b_2(p) \quad \text{----- (9)}$$

(8)式の $a_1(p)$ 、 $b_1(p)$ を求めるとき、(9)式の $a_2(p)$ 、 $b_2(p)$ を求めるときの適合性の高低から、どちらかの式を選ぶ。これには、(6.1)～(6.6)の6式の a_{1j} 、 b_{1j} の95%の信頼区間を求め、 a_{1j} (●印)とその上限(×印)と下限(×印)を図-3の片対数グラフ上に、 b_{1j} については図-4の片対数グラフ上に同様に示す。両図共に、×印の中に直線が入る。しかし、同じように、片対数グラフ上の a_{2j} 、 b_{2j} の95%の信頼区間の上下限を示した×印の中には直線はいらない^{※13)}。この結果、 $a_1(p)$ と $b_1(p)$ 、すなわち、(8)式を採用する。

図-3 (6)式から求まる係数 a_1 と圧密圧力 p との関係

図-4 (6)式から求まる係数 b_1 と圧密圧力 p との関係

a_1 については、図-3で見られるように同一圧密圧力の×印の間が狭く、図からこの間を通る直線式を求める。また、 a_1 と b_1 はともに圧密圧力 p が、0.8kgf/cm²の段階では他の段階と比べて、その直線性からやや外れている。これは $p=0.8$ kgf/cm²に用いた試料の液性限界 w_L が他の荷重段階の圧密終了時に比べると、試験値の数が少ないこと(表-4を参照)とその分布が全試料の分布に比べて液性限界 w_L 値の大きい方に片よっている^{※13)}ことによるものと考えられる。以上のことから b_1 については、圧密圧力 $p=0.8$ kgf/cm²を除き $p=1.6$ kgf/cm²以上の5点($j=2\sim6$)で直線近似を行う。得られた2つの式を以下に示し、さらに、図上に示す。

$$a_1(p) = -0.0058 \log p + 0.0114 \quad \text{----- (10)}$$

$$b_1(p) = -0.21 \log p + 0.74 \quad \text{----- (11)}$$

これらを (8) 式に代入すると、間隙比 e と圧密圧力 p の次の式が得られる。

$$e = -(0.0058w_L + 0.21) \log p + 0.0114w_L + 0.74 \quad \text{----- (12)}$$

5.2 第1の方法による (4) 式の特定

(4) 式の特定は、(3) 式の特定と手順が同じであり、そのうち、間隙比 e_j と土質定数の回帰式に用いる土質定数の特定は 5.1.1 と全く同じであり、この土質定数を液性限界 w_L とする。

間隙比 e_j と液性限界 w_L の関係は、その常用対数を含めると、(4) 式を特定する場合は、次の2つの組合せの回帰式

$$\log e_{3j} = a_{3j}w_L + b_{3j} \quad \text{----- (13)}$$

$$\log e_{4j} = a_{4j} \log w_L + b_{4j} \quad \text{----- (14)}$$

が考えられる。両式は各々6個の式があり、これらの式番号を、(13.1)～(13.6)と(14.1)～(14.6)とする。2組12個の回帰分析により得られた相関性に関する指標を表-6の第3列と第4列に示す。同表から、(13.1)～(13.6)の6式と(14.1)～(14.6)の6式の相関性の差はほとんど見られない。同じ回帰分析により得られた2組12式の係数 a_{3j} 、 b_{3j} および a_{4j} 、 b_{4j} の値を、表-7の第3列と第4列に示す。(13.1)～(13.6)の a_{3j} 、 b_{3j} と(14.1)～(14.6)の a_{4j} 、 b_{4j} を圧密圧力 p について連続させると、(13)、(14)式は各々次の2式となる。

$$\log e_3 = a_3(p)w_L + b_3(p) \quad \text{----- (15)}$$

$$\log e_4 = a_4(p) \log w_L + b_4(p) \quad \text{----- (16)}$$

$a_3(p)$ 、 $b_3(p)$ を求めるために、(13.1)～(13.6)の6つの式の a_{3j} 、 b_{3j} とその95%の信頼区間の上下限を、 $a_3(p)$ については図-5の片対数グラフ上に、 $b_3(p)$ については図-6の片対数グラフ上に示す。両図共に、95%の信頼区間の上下限を示す×印の間に直線は引ける。同じように、 $a_4(p)$ 、 $b_4(p)$ に関する図では95%信頼区間の上下限の間の直線は、 $b_3(p)$ では得られるが、 $a_4(p)$ では得られない^{文13)}。この結果、 $a_3(p)$ 、 $b_3(p)$ 、すなわち、(15)式を採用する。

そして、5.1.3 と同じ様に、圧密応力 $p = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ から $p = 25.6 \text{ kgf/cm}^2$ の a_{3j} 、 b_{3j} の各々の5点 ($j = 2 \sim 6$) で直線近似

図-5 (13) 式から求まる係数 a_3 と圧密圧力 p との関係

を行い、得られた2式を以下に示す。

$$a_3(p) = -0.00050 \log p + 0.0030 \quad \text{----- (17)}$$

$$b_3(p) = -0.21 \log p - 0.0078 \quad \text{----- (18)}$$

これらを(15)式に代入すると、間隙比 e と圧密圧力 p の次の式が得られる。

$$\log e = -(0.00050w_L + 0.21) \log p + 0.0030w_L - 0.0078 \quad \text{----- (19)}$$

この(19)式と第1の方法で得られた(12)式の液性限界 w_L が50%、100%における間隙比・圧密圧力曲線を図-7に示す。

図-6 (13) 式から求まる係数 b_3 と圧密圧力 p との関係

図-7 液性限界と間隙比及び圧密圧力の関係

6. 第2の方法による間隙比と圧密圧力の関係式

6.1 第2の方法による (3) 式の特定

各試料の圧密試験による処女曲線上の試験値を、(1) 式の直線近似することにより得られた係数 a_c 、 b_c と土質定数の2つの回帰式を求める。第1の方法と同じ様に、この回帰式に用いる変数となる土質定数を、既に3. で求めた候補の6土質定数から、その数を含めて選ぶ。

まず係数 a_c 、 b_c と6土質定数の直線近似による単回帰分析を行う。相関性を示す指標として同分析で得られた相関係数、標準偏差、そして、変動係数を、表-8の上段、中段および下段に示す。

係数 a_c 、 b_c を通じて総合的に相関性の最も高い土質定数は、自然含水比 w_n である。次いで重回帰分析を行うが、変数とする土質定数の数は、第1の方法と同条件であるので、同じく3とする。そして、樹形図(図-2を参照)の3つの各クラスターでそれぞれ相関性の最も高い自然含水比 w_n 、粘土分含有量 f_c 、そして、圧密降伏応力 p_c を重回帰分析の際の説明変数とする。そして、係数 a_c 、 b_c とこれらの3土質定数との2つの重回帰分析を行い、その相関性に関する指標を表-8の右側に示す。自然含水比の単回帰の指標に比べて、重回帰による相関性の向上は、比較的小さく単回帰によるのが妥当と判断する。

表-8 (1)式の係数の回帰分析結果

係数	w_L	I_p	w_n	f_c	コロイド	p_c	$w_n \cdot f_c / p_c$
a_c	0.770	0.780	0.883	0.672	0.552	0.487	0.898
	0.130	0.128	0.095	0.151	0.170	0.178	0.090
	0.178	0.175	0.130	0.207	0.233	0.244	0.123
b_c	0.839	0.825	0.849	0.742	0.555	0.351	0.909
	0.182	0.188	0.177	0.224	0.278	0.312	0.140
	0.105	0.109	0.102	0.129	0.161	0.181	0.081

上段：相関係数 中段：標準偏差 下段：変動係数

係数 a_c 、 b_c は、自然含水比 w_n の関数として次の2式で表す。

$$a_c = 0.010 w_n + 0.042 \quad \text{----- (20)}$$

$$b_c = 0.016 w_n + 0.65 \quad \text{----- (21)}$$

係数 a_c 、 b_c と自然含水比 w_n の関係図を図-8および図-9に示す。

(20)および(21)式を(3)式に代入すると次式が得られる。

$$e = -(0.010 w_n + 0.042) \log p + 0.016 w_n + 0.65 \quad \text{----- (22)}$$

図-8 自然含水比 w_n と係数 a_c との関係 図-9 自然含水比 w_n と係数 b_c との関係

6.2 第2の方法による(4)式の特定

手順はすべて 6.1 と同じである。まず各試料の圧密試験による処女曲線上の試験値を、(2)式の直線近似することにより得られた係数 a_n 、 b_n を求める。そして、係数 a_n 、 b_n と6土質定数の直線近似による単回帰分析を行う。得られた相関性に関する指標を、表-9に示す。総合的に相関性の最も高い土質定数は、粘土分含有量 f_c と判断する。次いで、樹形図(図-2を参照)の3つの各クラスターでそれぞれ最も相関性の高い液性限界 w_L 、粘土分含有量 f_c 、そして、圧密降伏応力 p_c を重回帰の際の説明変数とする。そして、係数 a_n 、 b_n とこれらの3土質定数との重回帰分析を行い、その相関性に関する指標を表-9の右側に示す。粘土分含有量の単回帰の指標に比べて、重回帰による相関性の向上は、比較的小さく単回帰によるのが妥当と判断する。

表-9 (2)式の係数の回帰分析結果

係数	w_L	I_p	w_n	f_c	コロイド	p_c	$w_L \cdot f_c / p_c$
a_n	0.292	0.301	0.207	0.402	0.252	0.173	0.474
	0.036	0.036	0.037	0.035	0.036	0.037	0.034
	0.138	0.138	0.143	0.132	0.138	0.143	0.128
b_n	0.757	0.735	0.685	0.740	0.520	0.106	0.808
	0.061	0.063	0.068	0.063	0.079	0.093	0.055
	0.237	0.246	0.264	0.243	0.309	0.361	0.215

上段：相関係数 中段：標準偏差 下段：変動係数

係数 a_n 、 b_n は、粘土分含有量 f_c の関数として次の2式で表す。

$$a_n = 0.0010 f_c + 0.20 \quad \text{----- (23)}$$

$$b_n = 0.0048 f_c - 0.022 \quad \text{----- (24)}$$

そして、係数 a_n 、 b_n と粘土分含有量 f_c の関係図を図-10および図-11に示す。

図-10 粘土分含有量 f_c と係数 a_n との関係 図-11 粘土分含有量 f_c と係数 b_n との関係

(23) および(24)の各式を(4)式に代入すると次式が得られる。

$$\log e = -(0.0010 f_c + 0.20) \log p + 0.0048 f_c - 0.022 \quad \text{----- (25)}$$

(22) 式の自然含水比 w_n が $w_n=40\%$ 、 80% と、(25) 式の粘土分含有量 f_c が $f_c=30\%$ 、 70% における間隙比・圧密圧力曲線を図-12に示す。

図-12 自然含水比・粘土分含有量・間隙比及び圧密圧力の関係

7. 変数に用いられた土質定数の相互関係

変数として用いた土質定数は、(12)と(19)式では液性限界のみが、(22)式では自然含水比のみ、(25)式では粘土分含有量のみである。液性限界については、工学的意義や試験誤差について、その信頼性に異論もある^{文14)}が、既往の多くの論文は、圧縮性に対して相関性が強いことを示しており、また、新たに片桐が提案した土粒子構造や攪乱に依存している粘土の圧縮性を統一的に表せるパラメーターも液性限界と一義的に関係がある^{文15)}ことから、指標の一つとなりうると考えられる。これら3つの土質定数を粘性土の圧縮性に関する要因から見ると、粒度分布の代表としての粘土分含有量、コンシステンシーの代表としての液性限界、そして、応力履歴とコンシステンシーの双方の影響を受けている自然含水比である。粒度分布とコンシステンシーの相関性は高いと考えられることから3土質定数の相関マトリックス表を求め、表-10に示す。互いの相関性が高いことから、今後、同じ様な分析を行っても、標本が異なれば、係数の値が異なることは勿論、変数であるこの3土質定数間の変更もあり得ると考えられる。

表-10 粘土分含有量・液性限界・自然含水比の相関マトリックス

	f_c	w_n	w_L
粘土分含有量 f_c	1.000	0.648	0.770
自然含水比 w_n	0.648	1.000	0.813
液性限界 w_L	0.770	0.813	1.000

8. $e-\log p$ 直線近似と $\log e-\log p$ 直線近似

個別試料の間隙比と圧密圧力に関する(1)式($e-\log p$ の直線近似)と(2)式($\log e-\log p$ の直線近似)の適合性の比較を、相関係数と標準偏差の値を用いて行う。その結果、 $e-\log p$ 直線の方が適合性が高いものが101、 $\log e-\log p$ 直線の方が高いもの

のが147、同じが2である。さらに、その区別したものを、各試料について圧密試験の荷重段階数と圧密降伏応力以後の最初の圧密圧力の組み合わせに分類して、表-11に示す。この表から最初の圧密圧力が 0.8 kgf/cm^2 以下では2方法の適合性はほぼ同じであるが、 1.6 kgf/cm^2 以上では $\log e-\log p$ 直線近似の方が適合性が高いといえる。これは、圧密降伏応力が大きい場合を示しており、応力履歴が圧縮性に影響を与えていることが考えられる。

表-11 (1)式と(2)式の適合性比較表

最初の圧密圧力 段階 (kgf/cm^2)	圧密荷重段階数			
	3	4	5	6
0.4	0 0	1 1	5 5	2 4
0.8	0 0	7 8	14 16	1 0
1.6	1 2	28 39 (1)	2 6	0 0
3.2	9 29	14 17	0 0	0 0
6.4	17 20 (1)	0 0	0 0	0 0
12.8	0 0	0 0	0 0	0 0
25.6	0 0	0 0	0 0	0 0

上段： $e-\log p$ の方が適合性が高い試料数

下段： $\log e-\log p$ の方が適合性が高い試料数

()：適合性が同じ試料数

9. 圧縮指数と液性限界

現在のわが国では、圧縮指数 C_c に関しては、Terzaghi・Peckの式^{文14)}が広く用いられていることから液性限界 w_L の関数として取り扱われることが多い。このため、各試料から求めた圧縮指数 C_c と液性限界 w_L の関係を直線近似すると、次式が得られる。

$$C_c = 0.0073 w_L + 0.20 \quad \text{----- (26)}$$

そして、(26)式の圧縮指数 C_c と液性限界 w_L 、(12)式の係数 a_c と液性限界 w_L との関係を図-13に示す。同図には、Terzaghi・Peckのアメリカ・ヨーロッパから集めた粘土の式^{文16)註1)}、村山らの大阪北港における沖積粘土の式^{文7)}をも示す。今回の研究で得られた関係は、他の2つの関係に比べて、図中では直線の傾斜が小さく、液性限界 w_L に対する依存度が小さい。また、(26)式で示す圧縮指数 C_c の相関係数は0.647であり、係数 a_c の相関係数0.770(表-8を参照)より小さい。

図-13 各地域の圧縮指数 C_c と液性限界 w_L の関係

10. むすび

間隙比と圧密圧力の関係は、既往の研究から、片対数グラフで直線（(1)式を参照）、または、両対数グラフで直線（(2)式を参照）とすることが相関性が高く、かつ、使用上の利便性も高い。そして、両式の各係数は単数または複数の圧密関係の土質定数の関係で表すことにより、広い地域の圧縮性に関する普遍的な式が得られる。本論文では、大阪平野沖積飽和粘土の普遍的な間隙比と圧密圧力の関係式を、多段抽出法により得た大阪平野の試料の試験値を用いて統計的推論で求めた。これには次の2つの方法を用いた。圧密試験各荷重段階における間隙比の集団を基本として求める方法と、個別試料の関数近似式の各係数の集団を基本として求める方法である。2つの方法で求めた(1)式型の式を(12)式と(22)式に、(2)式型の式を(19)式と(25)式に示す。また、これらの式に変数として用いられた液性限界、自然含水比、粘土分含有量の互いの相関性は高い。

さらに大阪平野の沖積粘土の圧縮性について次のことが判った。

1. 各試料の $e-\log p$ の直線近似と $\log e-\log p$ の直線近似を行い、相関係数の大きさからその適合性を検討した。約3対2の比率で後者の相関係数が大きい。また、圧密降伏応力以後の最初の圧密圧力が大きい試料では後者の相関係数が大きく、応力履歴の影響が考えられる。
2. 液性限界と圧縮指数の相関係数より、液性限界と係数 a_c の相関係数の方が大きいことから、係数 a_c の信頼性が高いと考えられる。
3. 今回の研究による圧縮指数は、既往の研究による圧縮指数を比べると、単純に比較は出来ないものの、液性限界に対する依存度が小さいと考えられる。

謝辞

統計に関する有効適切な助言を頂いた近畿大学理工学部経営工学科岩崎日出男助教授に謝意を表します。

註1) この式は、文献3)のこね返し粘土の圧縮指数 C'_c を用いて、変換式 $C_c = 1.3 C'_c$ より求めている。しかし、 C'_c の値は、その作成年代より直線回帰式の係数 a_c と考えられる。また、文献14)の変換式の係数1.3は圧密試験より求めた $e-\log p$ 曲線の傾度に対するものではなく、原位置の現場圧密線(The field consolidation line)の傾度に対するものである。ゆえに文献14)の圧縮指数 C_c は、 $e-\log p$ 曲線の圧縮指数 C_c よりも、一般に少し大きい。

参考文献

- 1) K. Terzaghi : *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Vienna, 1925
- 2) L. Cooling & Skempton : Some Experiments on the Consolidation of Clay, J. Inst. C. E. 16, 1941
- 3) A. Skempton : Notes on the compressibility of clays, Quart. J. Geol. Soc. London, 1944
- 4) 土質試験法(第3回改訂版)編集委員会編 : 土質試験の方法と解説、土質工学会、1990
- 5) 網干寿夫・石井敬一・国弘真信他 : 圧密過程における C_c 、 m_v の変化、第1回土質工学研究発表会、第17回土質工学研究発表会2の1、pp. 197~200
- 6) 中田啓一・辻本勝彦 : 圧密試験結果の $e-\log p$ 表示と $\log e-\log p$ 表示、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1429~1430. 1992. 8
- 7) S. Murayama, K. Akai, T. Sibata : The effect of the moisture content on the strength of an Alluvial Clay, Disaster Prevention Research Inst. Kyoto

Univ. Bulletins, No. 12, 1955. 12

- 8) A. Azzouz, J. Krizek, B. Corotis : Regression analysis of soil compressibility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 16 No. 2, 1976
- 9) 八尾真太郎・西田一彦・平田茂良 : 軟弱な沖積粘土の変形特性と物理・力学的性質間の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第437号 pp. 83~90. 1992
- 10) 菅 民郎 : EXCEL多変量解析で行う統計分析の本、エスミ、1996. 7
- 11) 宮城重二 : やさしい実践統計学、光生館、1994
- 12) E. Brand, R. Brenner : Soft clay engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, 1981
- 13) 四ッ谷次郎・西沢悟他 : 大阪平野の沖積粘土の圧縮特性に関する研究、近畿大学理工学部建築学科卒業論文、1995. 3
- 14) 片桐雅明 : 粘土の液性限界と圧縮性の関係に関する一考察、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. 187~190. 1995. 1
- 15) Terzaghi, Peck : Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, 1948
- 16) 土のコンシステンシーに関する研究委員会 : 委員会報告、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、1995. 1
- 17) 辻本勝彦・中田啓一・斉藤長太郎 : 大阪平野沖積粘土の圧密特性に関する統計的研究、第30回土質工学研究発表会、pp. 467~468. 1995. 7
- 18) 中田啓一・辻本勝彦 : 大阪平野の沖積粘土の圧縮性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 887~888. 1995. 8
- 19) 辻本勝彦・中田啓一・西沢悟他 : 沖積粘性土層の圧縮性と土質常数の関係、第31回地盤工学研究発表会、pp. 575~576. 1996. 7
- 20) 西沢悟・中田啓一・辻本勝彦他 : 圧縮指数の変数とされている土質常数について、第31回地盤工学研究発表会、pp. 579~580. 1996. 7

(1998年3月10日原稿受理、1998年7月31日採用決定)