

自然含水比をパラメーターにした軟弱土の e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線の予測方法

A METHOD FOR PREDICTING e - $\log p$ CURVE AND $\log c_v$ - $\log p$ CURVE OF A SOFT SOIL FROM ITS NATURAL WATER CONTENT

及川 洋*

By Hiroshi OIKAWA

A method is presented for predicting e - $\log p$ curve and $\log c_v$ - $\log p$ curve of a given soft soil from its natural water content, without making a consolidation test. The method, where an equation is used to predict e - $\log p$ curve and $\log c_v$ - $\log p$ curve, has been derived from the statistical analysis of the results of conventional oedometer tests on total 287 undisturbed samples containing various types of soils such as ordinary clays, silty soils, organic soils and peat soils. Natural water content of these samples ranged from about 25% to 1000%. Good agreements can be seen between measured curves in the laboratory and predicted ones obtained from the proposed method.

Keywords: consolidation, e - $\log p$ curve, $\log c_v$ - $\log p$ curve, soft soil

1. はじめに

軟弱地盤上に築造される盛土や各種構造物の沈下を予測するための圧密試験が、多大な労力と時間および多額の費用を要することは周知のとおりである。そのため、小規模な工事あるいは小規模な軟弱地盤の場合には、とくに試験が省略がちで、施工中あるいは施工後に支障を招くこともまれではない。また、たとえ工事の規模が大きくなっても、経費などの面で試験個数に制約を受ける場合が多く、満足できる試験数を実施することは一般的には困難である。このような事情の下では、より簡単な方法で対象土の圧密特性（実用的には e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線）が予測できれば、予測値が多少近似的なものであっても工学的には有用である。

このような観点から、渡辺ら¹⁾は、国内各地の軟弱土に対する圧密試験結果 32 例を統計的に処理することによって、自然間隙比 e_n をパラメーターにした沈下率 (μ)- $\log p$ 曲線群を作成し、 e_n のみの測定から対象地盤の沈下量を推定する手法を示している。この方法は、圧縮指数と液性限界あるいは他の物理量との関係から沈下量の概略を予測しようとするそれまでの簡易法²⁾とは異

なり、圧密降伏応力をまたぐ応力変化に対しても広く利用できる点において優れたものである。同様な研究として、最近、酒井ら³⁾は、軟弱土の e - $\log p$ 曲線はワイブル分布曲線で精度良く近似できることを示すとともに、自然含水比 w_n をパラメーターにした各種軟弱土の e - $\log p$ 曲線の予測式を発表している。この方法は関数付き電卓さえあれば対象土の e - $\log p$ 曲線が簡単に予測できるところに最大の利点がある。しかし、この方法は予測式中の係数が土質によって異なること、また、対象が腐植土の場合、それが正規圧密状態か過圧密状態かをあらかじめ知る必要があることなどに使用上の多少の不便さを感じる。ともあれ、これらの研究成果を利用すれば、 e_n あるいは w_n のみの測定で対象土の e - $\log p$ 曲線は概略予測できる。しかし、これらの研究成果を利用するうえでの最大の難点は、その成果の中に圧密試験のもう 1 つの目的である沈下速度（圧密係数 c_v ）を予測するための手法が示されていないことである。

これに対して、日本道路公団^{4),5)}では、同機関が所有する数多くの e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線を所定の自然含水比幅の曲線群に分類し、それぞれの平均的な曲線を視覚的な判断によって求めることによって、 w_n をパラメーターにした e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線の図表化を行っている。北海道開発局^{6),7)}で

* 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木工学科
(〒010 秋田市手形学園町 1-1)

も、道内各地の軟弱土に対する試験から得られた沈下曲線 13 968 本を、圧密圧力ごとに自然含水比 100 % 幅の曲線群に分類し、それぞれを 1 本の双曲線で代表させ、その代表曲線から算出される間隙比 e および圧密係数 c_v を用いて、やはり w_n をパラメーターにした e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線の図表化を行っている。また、その実用性の高さも確認している。これらの図表を用いれば、自然含水比 w_n のみの測定で対象土の e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線は概略予測できる。しかし、これらの図表における w_n のきざみ幅は比較的大きく、使用にあたっては予測精度の面で多少の不安が残る。たとえば、道路公団における図表では、 $w_n=700\% \sim 1000\%$ の土の e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線はわずか 1 本である。もちろん、 w_n のきざみ幅を小さくすれば予測精度の向上は望めるが、それに応じて図が複雑になり使用上の難度は増大する。

本文は、図表を用いることの以上のような難点を解消したもので、予測方法として 1 つの数式を用いる方法を提案したものである。すなわち、いくつかの圧密試験結果を統計的に処理することによって、自然含水比のみの値から対象土の e - $\log p$ 曲線および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線を予測するための近似式を導いている。式はさほど複雑でなく、関数付き電卓があれば容易に計算できるものである。提案式の検証結果は良好であり、本法は沈下予測を行う地盤の予備調査段階での圧密試験の割愛や本調査段階での試験個数の削減などに役立つ。

2. 提案式の誘導にあたって用いたデータ

秋田平野およびその周辺地域での各種建設工事に先だて行われた 287 個の圧密試験結果を収集し、解析に用いた。これらの試験結果は同一機関によるものではなく、複数の調査機関が行ったものであるが、試験はすべて JIS A 1217 「土の圧密試験方法」に従って行われて

いる。データの数はまだ十分ではないが、普通の無機質粘土、シルト質粘土、有機質粘土および黒泥、泥炭などのいわゆる軟弱地盤あるいは超軟弱地盤を構成する成分は一通り含んでいる。図-1 に、試験された試料の自然間隙比 e_n と自然含水比 w_n の関係を示した。これらの試料の w_n は最小のもので 28.4 %、最大のもので 985.6 % である。図には、わが国各地の軟弱土の間で見出されている e_n と w_n の関係式⁹⁾

$$e_n = \frac{w_n}{0.03 w_n + 0.37} \dots\dots\dots (1)$$

をも示している。図にみられるように、本地域軟弱土の e_n と w_n の関係も式 (1) で表わされる曲線の近傍に位置しており、かつ、曲線への適合度を示す相関指数 R^9 も 0.9845 と高い。このことは検討に用いたデータが特別なものではないことを示すとともに、以下に示す成果が他の地域の軟弱土に対しても適用できる可能性を示唆している。

3. 圧密による間隙比変化の統計的傾向

収集した圧密試験結果を用いて、各圧力段階での圧密後の間隙比 e と試料の自然含水比 w_n の関係の一例を示したのが図-2(a)~(f) で、両対数紙上に示した場合である。このうち、図 (a) は圧密圧力 $p=0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合で、普通グラフ上に示した図-1 と対応している。図に示したように、どの圧力段階をみても両者の間には比較的良好な相関関係が認められる。渡辺ら¹⁾は、 w_n の代わりに e_n を用いてほぼ同様な性質があることをすでに見出している。もちろん、 e_n と w_n とは式 (1) で表わされる関係にあるから、本データを e と e_n との関係で整理してもそれらの間には何らかの相関関係が見出せることは当然予想される。これらのことは、 e_n あるいは w_n さえ既知であれば各圧力段階での圧密後の間隙比 e は圧密試験を行わずとも概略推定できることを示している。しかし、 e_n の測定は w_n の測定に加え、密度や比重の測定を必要とする。そこでここでは、測定がより簡単な w_n を用いて各圧力段階での圧密後の間隙比 e との関係を定量化する。定量化にあたっては、各圧力段階での e と w_n の関係が図-1 に示したように双曲線的でもあり、また、図-2 に示したように指数曲線的でもあることを考慮して、次式 (2) の双曲線と式 (3) の指数曲線を用いて回帰分析を行った。

$$e = \frac{w_n}{a w_n + b} \dots\dots\dots (2)$$

$$e = m w_n^n \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 a 、 b および m 、 n は回帰係数である。

表-1 に、回帰曲線の適合度を示す相関指数 R^9 および回帰曲線からのデータの分散の程度を示す標準偏差

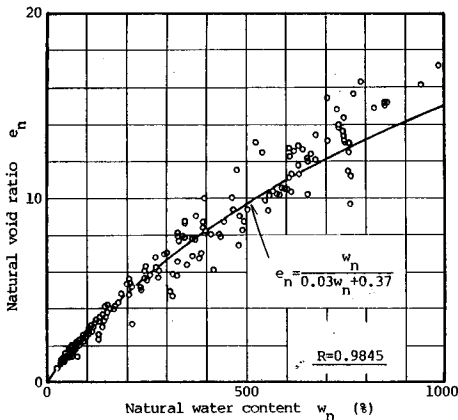
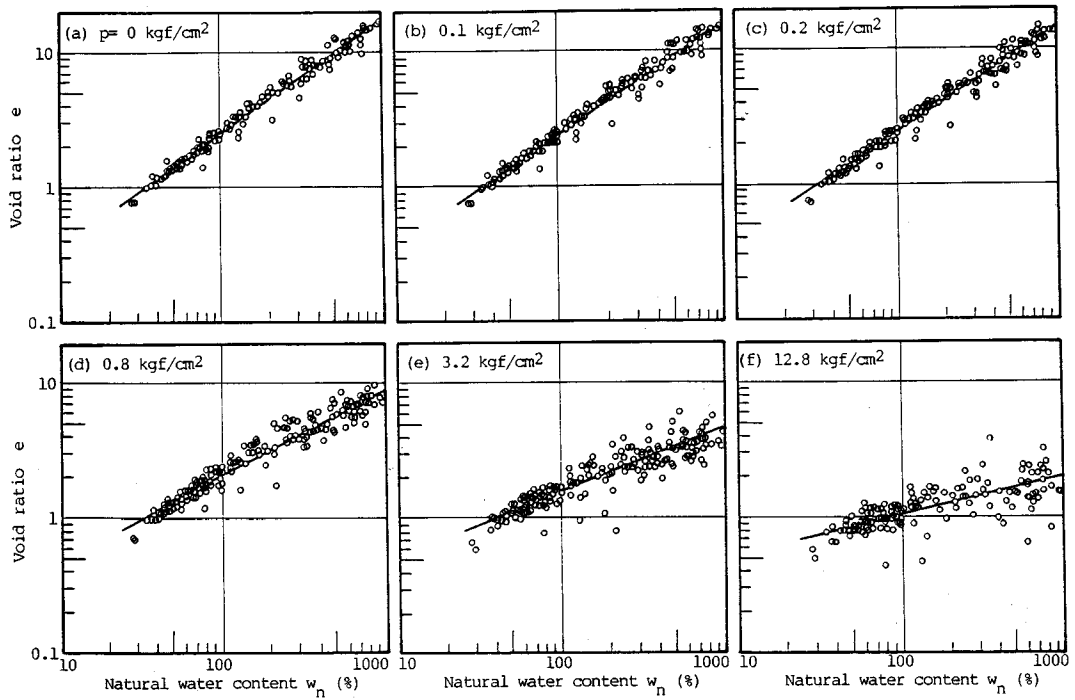


図-1 e_n と w_n の関係



図—2 圧密後の間隙比と w_n の関係

表—1 相関指数および標準偏差の値

圧密圧力 p (kgf/cm ²)		0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8
相関指数	R_h	0.9845	0.9732	0.9838	0.9809	0.9723	0.9558	0.9309	0.8933	0.8214	0.7497
	R_i	0.9858	0.9745	0.9848	0.9815	0.9698	0.9502	0.9260	0.8925	0.8338	0.7508
	R_h/R_i	0.9987	0.9987	0.9990	0.9994	1.0026	1.0059	1.0053	1.0009	0.9851	0.9985
標準偏差	S_h	0.7477	0.9454	0.7048	0.6915	0.6660	0.6228	0.5548	0.4834	0.4431	0.3087
	S_i	0.7165	0.9225	0.6839	0.6814	0.6956	0.6605	0.5734	0.4852	0.4290	0.3081
	S_h/S_i	1.0435	1.0248	1.0306	1.0148	0.9574	0.9429	0.9676	0.9963	1.0329	1.0019

表—2 係数 a, b および m, n の値

圧密圧力 p (kgf/cm ²)		0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8
双曲線	a	0.3661	0.3858	0.3684	0.3698	0.3669	0.3650	0.3722	0.3904	0.4265	0.3504
	b	0.0291	0.0291	0.0349	0.0434	0.0660	0.1040	0.1588	0.2355	0.3377	0.5603
指数曲線	m	2.4742	2.4282	2.4144	2.3452	2.2150	2.0265	1.7886	1.5301	1.2788	1.0414
	n	0.8466	0.8337	0.8244	0.7946	0.7275	0.6382	0.5452	0.4587	0.3844	0.2856

S を各圧密圧力ごとに示した (表中のサフィックス h は双曲線近似, i は指数曲線近似を示している). 表によれば, 両近似曲線の相関指数 R は圧密圧力 p の増大に伴って小さくなるものの, 0.75 以上と高く, 特に p が 1.6 kgf/cm² 以下の場合には 0.90 以上と極めて高い値を示している. このことは, 上記双曲線および指数曲線ともに各圧力段階での e と w_n の関係を近似する曲線として十分耐え得ることを示している.

ところで, 同表によれば, 圧密圧力 p が 0.4 kgf/cm²

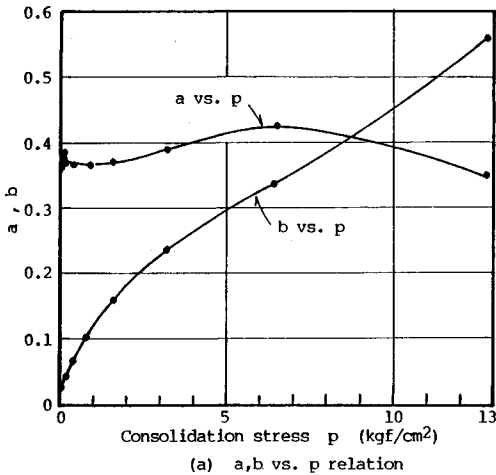
から 3.2 kgf/cm² の場合には R_h は R_i より大きく, S_h は S_i より小さい. このことは, p が 0.4~3.2 kgf/cm² の場合の e と w_n 関係は式 (2) の双曲線で, その他の圧力段階での e と w_n 関係は式 (3) の指数曲線で近似すべきことを示している. しかし, 同表にも示したように, 両近似曲線の相関指数の比 (R_h/R_i) および標準偏差の比 (S_h/S_i) は各圧力段階でほとんど 1 (相関指数比で 0.985~1.006, 標準偏差比で 0.943~1.044) であり, 圧力の大きさによって近似曲線の形を変える必要性はな

いと判断される。したがって、各圧力ごとの e と w_n の関係を式 (2), (3) のいずれの曲線で近似すべきかは別の角度から判断されるべきであり、このことに関しては次節に述べる。なお、表-2 に、各圧密圧力ごとの回帰係数 a, b および m, n の値を示しておいた。

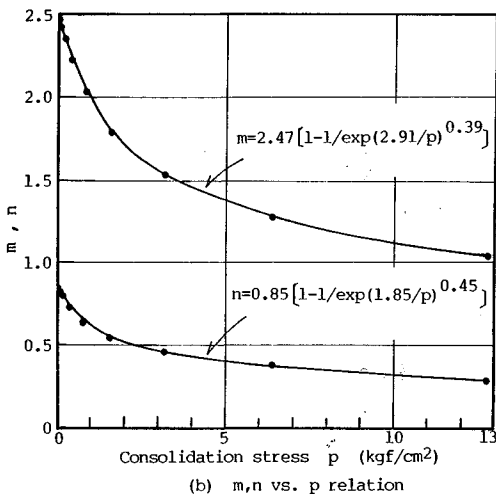
4. e - $\log p$ 曲線の数式化

図-3(a) に回帰係数 a, b と圧密圧力 p の関係を、また、図-3(b) には回帰係数 m, n と圧密圧力 p の関係を示した。図によれば、係数 a, b の圧力 p に対する変化は多少複雑で、現在のところ両者の関係を近似する式は見当たらない。これに対して、係数 m, n は圧力 p の増加に対して単調に減少する挙動を示しており、いくつかの近似曲線を想定して回帰分析を行った結果、両者はワイブル分布曲線を用いて次式のように近似できた。

$$m = 2.47 [1 - 1/\exp(2.91/p)^{0.39}] \dots\dots\dots (4)$$



(a) a, b vs. p relation



(b) m, n vs. p relation

図-3 a, b と p および m, n と p の関係

$$n = 0.85 [1 - 1/\exp(1.85/p)^{0.45}] \dots\dots\dots (5)$$

ただし、上式 (4), (5) において、 $p=0$ kgf/cm² の場合には $m=2.47, n=0.85$ と定義されている。

すなわち、各圧力段階での e と w_n の関係を式 (3) の指数曲線で近似すれば、式中の係数 m, n は圧力 p だけの関数で表わすことができる。したがって、以下では、各圧力ごとの e と w_n の関係を式 (3) の指数曲線で近似することにする。

式 (3) に式 (4), (5) を代入すれば

$$e = 2.47 [1 - 1/\exp(2.91/p)^{0.39}] \times w_n^{0.85 [1 - 1/\exp(1.85/p)^{0.45}]} \dots\dots\dots (6)$$

となる。この式を利用すれば、圧力 p のもとでの圧密後の間隙比 e は w_n のみの値から算出できる。もちろん、 p を種々変化させれば e - $\log p$ 曲線は簡単に求まる。これが提案式である。この式の妥当性については後節に示す。なお、式 (6) における自然含水比 w_n の単位は無次元である。

5. $\log c_v$ - $\log p$ 曲線の数式化

テルツァーギの圧密理論によれば、圧密係数 c_v は透水係数 k 、体積圧縮係数 m_v および水の単位体積質量 ρ_w の関数であり、次式によって表わされる。

$$c_v = \frac{k}{m_v \rho_w} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 m_v は間隙比 e と圧密圧力 p の関数であり

$$m_v = \frac{e_0 - e}{(1 + e_0)(p - p_0)} \dots\dots\dots (8)$$

として定義されるから、式 (7) は

$$c_v = \frac{k(1 + e_0)(p - p_0)}{(e_0 - e)\rho_w} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、 e_0, e は圧密圧力 p_0, p ($p_0 < p$) に対応する間隙比であり、自然含水比 w_n さえ既知であれば式 (6) を用いて求めることができる。したがって、式 (9) において、透水係数 k を間隙比 e の関数で表わせば、圧密圧力 $(p - p_0)$ に対応する圧密係数 c_v は w_n のみの値から求まることになる。

間隙比 e と透水係数 k の関係に関するこれまでの報告によれば、 $\log k$ - e 関係が直線で表示できるという報告と、 $\log k$ - $\log e$ 関係が直線で表示できるという2つの異なった報告がある¹⁰⁾⁻¹²⁾。そこで、いずれの表示法が妥当であるかを知るため、収集した圧密試験結果を用いて $\log k$ - \bar{e} 関係および $\log k$ - $\log \bar{e}$ 関係を調べた一例が図-4(a), (b) である。ここに、 \bar{e} は圧密中の平均間隙比 $(e_0 + e)/2$ で、透水係数 k (cm/day) は c_v 値と m_v 値から逆算して求めた計算値である。図によればいずれの関係も十分直線的であり、どちらの表示が良いかはこれらの図からは判断できない。そこで、それぞれの

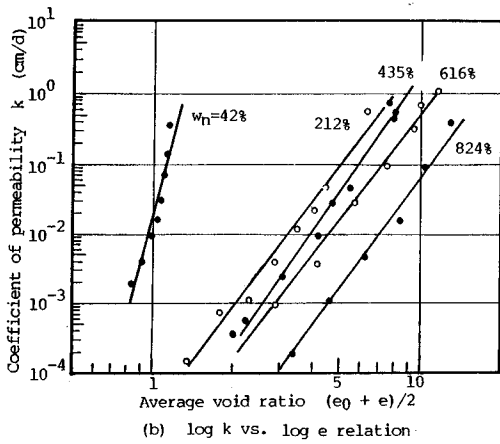
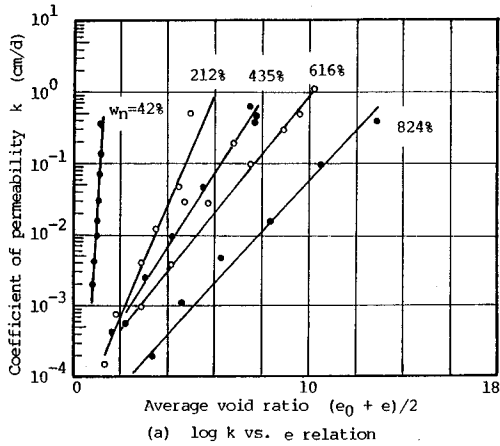


図-4 $\log k$ - e 関係および $\log k$ - $\log e$ 関係

回帰線からのデータの分散の程度を示す標準偏差 S ($\log k$ - e 関係からのそれを S_1 , $\log k$ - $\log e$ 関係からのそれを S_2 とする) を求めて、その比 (S_2/S_1) を試料の自然含水比 w_n に対して示したのが図-5である。図によれば、ほとんどの試料の S_1 は S_2 より小さい。すなわち、 k と e の関係は

$$\log k = A \frac{e_0 + e}{2} + B \dots\dots\dots (10)$$

として表わすのが妥当と判断される。ここに、 A , B は回帰係数である。

図-6(a), (b) に、係数 A と自然含水比 w_n の関係および係数 B と w_n の関係を示した。図にはかなりのばらつきがみられるが、いくつかの近似曲線を想定して回帰分析を行った結果、それぞれの関係は次式で近似できた。

$$A = \frac{1.51}{w_n^{1.14}} + 0.20 \dots\dots\dots (11)$$

$$B = \frac{-1.12}{(w_n - 0.12)^{0.68}} - 4.06 \dots\dots\dots (12)$$

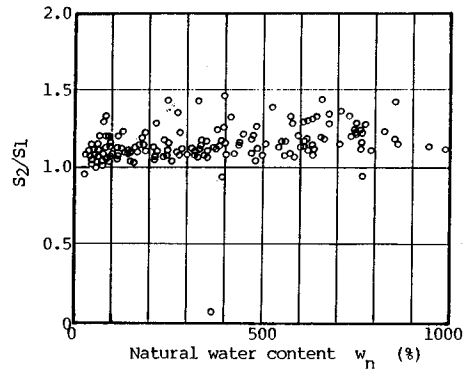


図-5 S_2/S_1 と w_n の関係

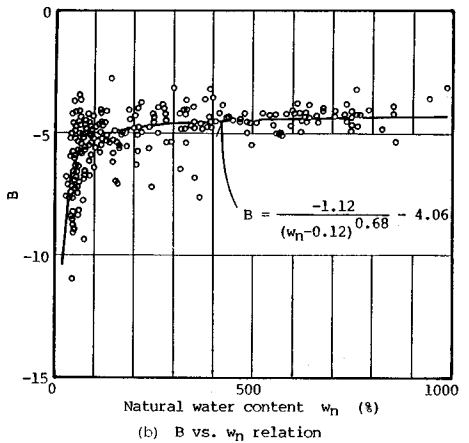
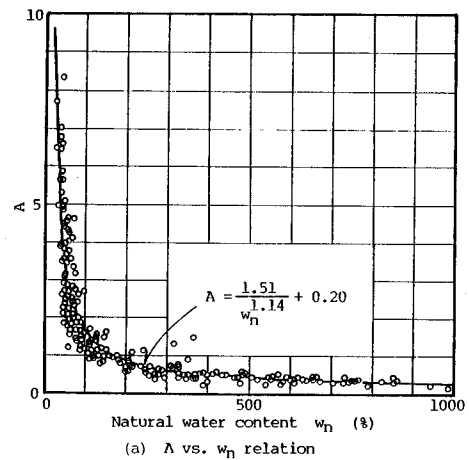


図-6 A と w_n および B と w_n の関係

したがって、式 (11), (12) を式 (10) に代入し、さらにそれを式 (9) に代入し整理すれば

$$\log c_v = \left[\frac{1.51}{w_n^{1.14}} + 0.20 \right] \left[\frac{e_0 + e}{2} \right]$$

$$\frac{1.12}{(w_n - 0.12)^{0.68}} + \log \frac{(1 + e_0)}{(e_0 - e)} + \log (p - p_0) - 1.06 \dots \dots \dots (13)$$

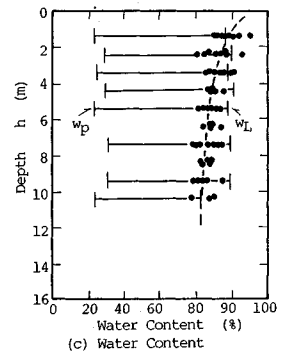
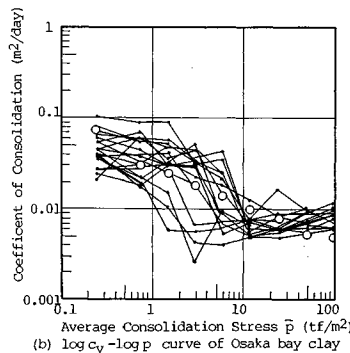
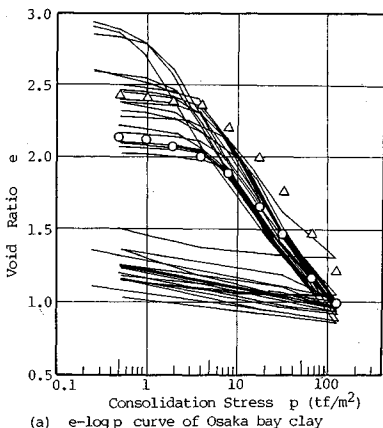
なる関係を得る。ここに、 c_v の単位は (cm²/day) である。

前述したように、間隙比 e_0 、 e は圧密圧力 p_0 、 p に応じて自然含水比 w_n の値から求まるから、結局、圧密圧力 $(p - p_0)$ に対応する圧密係数 c_v は式 (13) を用いて w_n のみの値から推定できることになる。

6. 提案式の検証

図一7は、大阪湾臨海部埋立て工事に先だって行われた同地区沖積粘土の圧密試験結果の一例で、図 (a) は $e - \log p$ 曲線、図 (b) は $\log c_v - \log p$ 曲線、図 (c) は自然含水比 w_n の深さ方向の変化を示している¹³⁾。図 (c) によれば、同地区軟弱粘土の w_n は深度方向に対し多少減少する傾向にあるが、その程度は小さく、約 80%~100% の範囲内にある。もちろん、通常の沖積粘土では w_n が 20% も違えば物性としての土質はかなり異なるから、沈下予測にあたってはこの粘土層を何層かに分けて解析することも、場合によっては必要と判断される。しかし、通常の沈下予測においては、 w_n がこの程度の幅であればこれを単一の圧密層として取り扱い、圧密試験等によって得られる設計定数もその平均値を用いるのが一般的と思われる。そこで、ここでも、この粘土層を単一の圧密層として取り扱い、その平均含水比を単純に $w_n = 90\%$ として式 (6)、(13) からこの粘土層の $e - \log p$ 曲線および $\log c_v - \log p$ 曲線を予測すると図中の白丸で示した曲線となる。図に示したように予測曲線と実測曲線のほど良い一致をみる事ができる。

東北横断自動車道秋田線が建設中の秋田県横手地区



図一7 沖積粘土の圧密試験結果 (田中ら¹³⁾による)

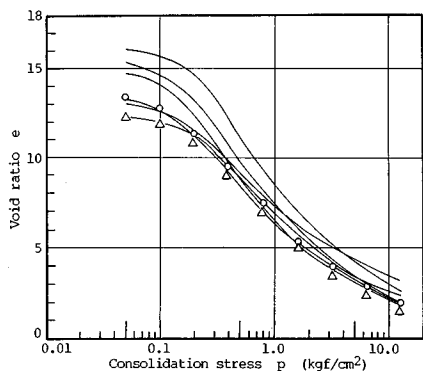
は、自然含水比が 500%~800% の未分解で高圧縮性の泥炭が表層から厚く堆積するわが国でも有数の泥炭地である。ここでも工事の実施に先立って多くの圧密試験が行われている¹⁴⁾。いま、図の繁雑さを避けるため、一例として、 $w_n = 700\% \sim 800\%$ の層の試験結果のみを取り出すと図一8のようになる。上記と同様、この層を単一の圧密層とみなし、その平均含水比を単純に $w_n = 750\%$ として式 (6)、(13) から $e - \log p$ 曲線および $\log c_v - \log p$ 曲線を予測すると図中の白丸で示した曲線を得る。やはり、予測曲線と実測曲線は良く一致している。

以上に示したように、本提案法による予測曲線は実測曲線とほど良く一致する。したがって、本法は沈下予測を行う地盤の予備調査段階での圧密試験の割愛などに役立つと判断される。しかし、本法は、その誘導過程や上記の検証事例からも明らかなように、個々の試料の $e - \log p$ 曲線および $\log c_v - \log p$ 曲線の予測法ではなく、似かよった自然含水比 w_n をもつ試料の平均的な $e - \log p$ 曲線および $\log c_v - \log p$ 曲線の予測法であるから、本法を適用するにあたっては、それがたとえ予備調査段階であっても、入力すべき w_n の値は十分検討されなければならないことはいうまでもない。また、たとえ入力値が適当であっても、本法はあくまでも概略曲線の予測法であるから、本調査段階においては要求される予測精度に応じた圧密試験の実施が必要であることもいうまでもない。しかし、本法はその際の試験個数の削減などにも十分役立つものと判断される。

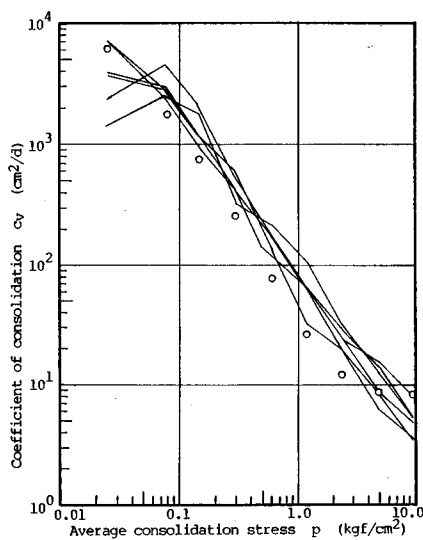
なお、図一7(a) および図一8(a) には酒井ら³⁾の方法によって予測される $e - \log p$ 曲線を△印で示している。視覚的な判断ではあるが本法による予測精度が多少良さそうである。

7. まとめ

287 個の圧密試験結果を統計的に処理することによって、自然含水比のみの測定から対象土の $e - \log p$ 曲線



(a) e - $\log p$ curve of Yokote peat



(b) $\log c_v$ - $\log p$ curve of Yokote peat

図—8 泥炭の圧密試験結果

および $\log c_v$ - $\log p$ 曲線を予測するための近似式を導いた。式の検証結果は良好であり、本予測法は沈下予測を行う地盤の予備調査段階での圧密試験の削減や本調査段階での試験個数の削減などに十分役立つと考える。提案式はさほど複雑でなく、関数付き電卓があれば容易に計算できるものである。もちろん、計算プログラムを作成しておけば、自然含水比の入力だけでこれらの曲線を即座に得ることもできる。また、対象地盤の自然含水比の深さ方向の分布が既知であれば、載荷応力の大きさに応じた圧密係数 c_v および圧密後の間隙比 e の深さ方向の分布を知ることによっても場合によっては可能である。したがって、本法は沈下予測を行う地盤の圧密特性を全体的

に把握する手段としても利用でき、沈下予測の精度の向上にも役立つものと考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり貴重なデータを提供して頂きました関係各機関に対し、また、データの解析に際し多大なご協力を頂いた(株)森本組、松本好正君(当時本学学生)に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 渡辺 進・井元美晴：初期間ゲキ比から圧密沈下量を求める方法，土と基礎，Vol. 10, No. 9, pp. 7~11, 1962.
- 2) Skempton, A.W. : Notes on the Compressibility of Clays, Quarterly Journal of the Geological Society of London, Vol. 100, pp. 119~135, 1944.
- 3) 酒井 孝・宇都一馬・冬木 衛・桜井 学：自然含水比をパラメーターにした e - $\log p$ 曲線の予測方法，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，第3部門，pp. 483~484, 1986.
- 4) 渡辺崇博：自然含水比をパラメーターにした圧密試験結果の適用，第9回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 121~124, 1974.
- 5) 日本道路公団：設計要領第1集，土工・舗装・排水・造園，p. 209, 1983.
- 6) 佐々木晴美・能登繁幸・東海林邦夫：泥炭の圧密常数の決定に伴う問題点と対策，有機質土の試験方法シンポジウム発表論文集，pp. 99~104, 1979.
- 7) 北海道開発局道路計画課：泥炭性軟弱地盤対策工指針，p. 53, 1988.
- 8) 渡辺 進：土質基礎工学ライブラリー1，軟弱地盤の調査・設計・施工法，第1編第3章，工学的な性質，土質工学会，p. 102, 1966.
- 9) 石川栄助編著：実務家のための新統計学，横書店，pp. 93~96, 1977.
- 10) Poskitt, T.J. : The Consolidation of Saturated Clay with Variable Permeability and Compressibility, Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp. 234~252, 1969.
- 11) Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S. : The Permeability of Natural Soft Clays, Part II : Permeability Characteristics, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, pp. 645~660, 1983.
- 12) 山口晴幸・松尾 啓・大平至徳・木暮敬二：泥炭および泥炭地盤の土質工学的性質，土木学会論文集，第370号/Ⅲ-5, pp. 271~280, 1986.
- 13) 田中泰雄・谷本喜一：臨海埋立地盤の沈下と大ひずみ圧密理論による予測，第31回土質工学シンポジウム，軟弱粘性土地盤における沈下予測と対策，昭和61年度発表論文集，pp. 53~58, 1986.
- 14) 日本道路公団仙台建設局：東北横断自動車道横手地区軟弱地盤の検討報告書，pp. 1~280, 1987.

(1988. 12. 16・受付)