

各層の圧密度を考慮した層厚換算法による

圧密沈下速度の予測法

いな 稲	だ 田	ます 倍	ほ 穂*	やま 山	だ 田	みち 道	お 男***
あか 赤	いし 石		まさる 勝**				

1. ま え が き

多層地盤における一次元圧密の沈下速度の予測は、標準圧密試験から得られる圧密係数を用いた層厚換算法によって行なわれることが多い。しかし、このようにして求められた沈下速度と実際の沈下速度とは一般に一致しない場合が多く、実際の沈下速度のほうが早いといわれている。もちろん標準圧密試験は一次元圧密条件で行なわれるから、その結果を帯状荷重や部分荷重などの二次元、三次元の圧密に適用しても十分な一致を示さないことは、明らかである。しかし、ほぼ一次元圧密の条件と考えられるような載荷の行なわれた地盤についても、計算沈下速度より実際の沈下速度のほうが早い傾向が認められている。その原因としては、① 標準圧密試験から求められる圧密係数には、側面摩擦、載荷速度、二次圧密などが影響する、② 圧密計算では、“有効土カブリ圧+載荷増分の $1/2$ ”に対応する圧密係数を圧密過程中一定としているが、実際は圧密過程中に圧密係数が変化する。特に泥炭質地盤では、小さい荷重でも圧密係数値の変化が大きい、③ チュウ積地盤には、サンドシームなどの介在が多いが、計算ではこれらの排水効果は無視される、などが考えられるほか、つぎのような計算手法の問題も大きく関与する。

すなわち、一般にチュウ積地盤は圧縮性の異なる層が成層している多層地盤である。このような地盤に從來から用いられてきた平均圧密度による層厚換算法を用いたのでは、各層の圧縮性の差が大きいほど、計算値と実際の沈下速度が一致しないのは当然といえよう。したがって、圧縮性の差が大きい多層地盤の沈下速度を計算する場合には、各層の圧密度を求め各層ごとの沈下量の算定を行なうことが少しでも計算沈下速度を実際の沈下速度に近づける重要なポイントとなる。

2. 従来の代表的な多層地盤圧密沈下速度計算法

多層地盤の圧密沈下速度計算の代表的な方法として、平均値単一法¹⁾、層厚換算後平均圧密度を用いる方法^{2),3)}、

および差分法^{4),5)}などがある。平均値単一法は、多層地盤各層の圧密係数の平均値を用いて沈下速度を計算する方法であり、層厚換算後平均圧密度を用いる方法は、ある一定の圧密係数で代表させるため各層の厚さを増減する方法である。平均値単一法および層厚換算後平均圧密度を用いる方法は、圧密沈下速度を圧密係数のみの関数と考え計算しているため、多層地盤各層の圧縮性の相違が考慮されておらず、各層の圧縮性が異なるとき実際と相違した結果が得られる。また、差分法により圧密沈下速度を求める方法は、電子計算機を利用することなどから複雑な境界条件の問題も比較的簡単に解くことができるが、計算に用いられる土の定数がそれに伴わないのが現状であろう。

3. 層厚換算法

層厚換算法は、多層地盤の圧密沈下速度の計算を簡便化するため各層を同一の圧密係数 c_v をもった単一層に変換する方法である。層厚および圧密係数の異なる数層からなる地盤を任意の圧密係数 c_v 、層厚 H の地盤に換算するには、(1)式が用いられる。

$$H = H_1 \times \sqrt{\frac{c_v}{c_{v1}}} + H_2 \times \sqrt{\frac{c_v}{c_{v2}}} + \dots + H_n \times \sqrt{\frac{c_v}{c_{vn}}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_1, H_2, \dots, H_n$ は各層の実際の層厚、 $c_{v1}, c_{v2}, \dots, c_{vn}$ は各層の圧密係数である。

荷重載荷後の経過時間 t における沈下量 S_t の算定には、一般的に平均圧密度 $\bar{U}$ による(2)式が用いられる。

$$S_t = \bar{U} \times \sum S_n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S_n は各層ごとの最終圧密沈下量である。

各層の圧縮性の差が大きい場合、あるいは各層の圧密係数の差が大きい場合には、各層ごとの沈下量および成層状態の影響が考慮されていないので実際と異なる沈下速度が得られるといわれている。つまり図-1のような地盤において、各層の順序がどのように変化しても同じ計算結果が得られることになる。しかし、圧密の進行状況は各圧密層の順序により大幅に変化するものである²⁾ から、多層地盤における沈下速度の算定に層厚換算法を適用する場合には、(2)式にかえて各層の圧密度 U_n を考慮している(3)式を用い

* 工博 東海大学教授 工学部土木工学科

** 東海大学講師

*** (株)オオバ 土木設計部

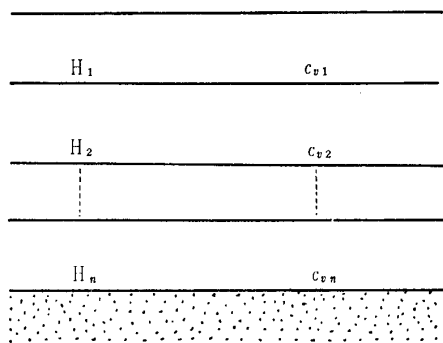


図-1 多層地盤

て圧密沈下量 S_t を求めねばならない。

$$S_t = \sum (S_n \times U_n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

4. 各層の圧密度の求め方

一次元圧密理論解より間ゲキ水压の等時線を描き、間ゲキ水压が消散したときの有効応力面積から図-3を作成し、この図を利用して(3)式における任意の層の圧密度 U_n を求める方法を述べる。

図-2(a)に示すような層厚 H で片面排水の均質地盤における等分布荷重載荷後の経過時間 t における過剰間ゲキ水压の等時線を図-2(b)に示す。

排水面からの深さを z とすれば、 z_1 から z_2 までの任意の層に関する圧密度 U_n は、過剰間ゲキ水压の消散した面積から(4)式で表わされる。

$$U_n = \frac{\int_{z_1}^{z_2} (1-u) dz}{\int_{z_1}^{z_2} u_0 dz} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u は過剰間ゲキ水压、 u_0 は初期過剰間ゲキ水压である。

(4)式を変形すると(5)式となる。

$$U_n = \frac{\int_{z_1}^{z_2} (1-u) dz - \int_{z_1}^{z_2} (1-u) dz}{\int_{z_1}^{z_2} u_0 dz} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 u_0 = 一定とした場合の深さ z における u は、一次元圧密理論より(6)式で示される⁴⁾。

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H} \right) \exp(-M^2 T_v) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $M = (2m+1)\pi/2$ 、 m は正の整数、 T_v は時間係数である。

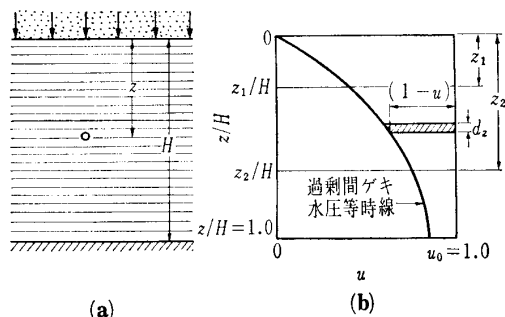
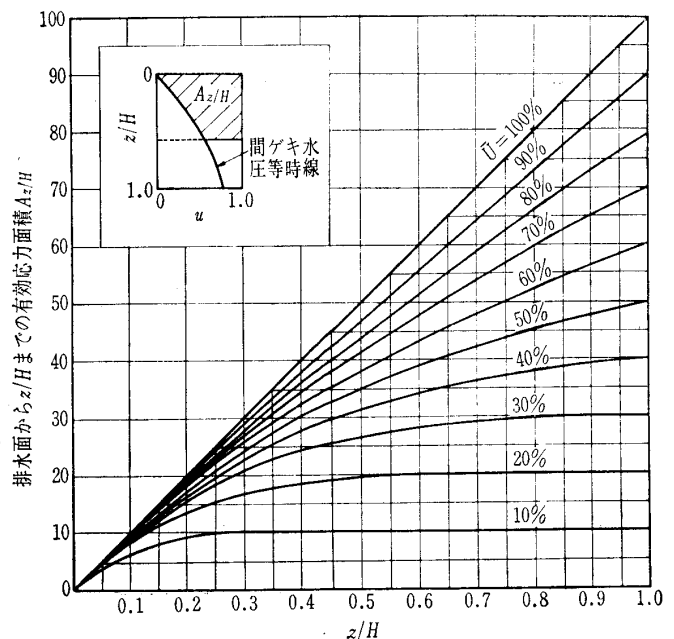


図-2 圧密層に関する任意の層と過剰間ゲキ水压の等時線の関係

表-1 平均圧密度 $\bar{U}$ に対する z/H と A_z/H の値 (片面排水)

$\bar{U}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
z/H									
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	4.2	4.6	4.7	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0
0.1	7.0	8.4	8.9	9.2	9.3	9.5	9.6	9.8	9.9
0.15	8.6	11.5	12.6	13.2	13.6	13.9	14.2	14.5	14.7
0.2	9.4	13.9	15.9	16.9	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5
0.25	9.8	15.8	18.6	20.1	21.1	21.9	22.7	23.5	24.2
0.3	10.0	17.1	20.9	23.0	24.4	25.6	26.7	27.8	28.9
0.35	"	18.1	22.9	25.6	27.5	29.1	30.6	32.0	33.5
0.4	"	18.8	24.5	27.9	30.3	32.3	34.3	36.2	38.1
0.45	"	19.3	25.8	29.9	32.9	35.4	37.8	40.2	42.6
0.5	"	19.5	26.8	31.6	35.2	38.3	41.2	44.1	47.1
0.55	"	19.7	27.6	33.1	37.3	40.9	44.5	48.0	51.5
0.6	"	19.8	28.3	34.4	39.2	43.5	47.6	51.8	55.9
0.65	"	19.9	28.8	35.5	40.9	45.9	50.7	55.5	60.2
0.7	"	19.9	29.1	36.4	42.5	48.1	53.6	59.1	64.5
0.75	"	20.0	29.4	37.2	43.9	50.3	56.5	62.7	68.8
0.8	"	"	29.6	37.9	45.3	52.3	59.3	66.2	73.1
0.85	"	"	29.8	38.5	46.6	54.3	62.0	69.7	77.3
0.9	"	"	29.9	39.1	47.8	56.2	64.7	73.1	81.6
0.95	"	"	30.0	39.6	49.0	58.1	67.4	76.6	85.8
1.0	"	"	"	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0

図-3 z/H と A_z/H の関係(片面排水)

$u_0 = 1.0$ (一定)として、(6)式を用い z/H ごとの u を算出し、排水面から z までの過剰間ゲキ水压が消散した面積 $\int_0^z (1-u) dz$ (有効応力面積を A_z/H と表わす) を z/H および平均圧密度10%ごとに計算した結果が表-1である。さらに表-1を図で表わしたものが図-3である。

(5)式を $u_0 = 1.0$ (一定)として、 z を層厚 H との比 z/H で表わせば(7)式になる。

表—2 計算例に用いた地盤の性状

土質柱状図	土質名	土質と沈下量				
380 cm	盛土	沈下量 (cm)	圧密係数 (cm ² /min)	自然含水比 w_n (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)
300 cm	有機質土	133	0.072	710	670	10
500 cm	粘土	68	0.0277	150	130	35
260 cm	砂質シルト	15	0.402	80	70	35
		沈下量合計 216cm				

$$U_n = \frac{Az_{2/H} - Az_{1/H}}{z_2/H - z_1/H} \dots\dots\dots(7)$$

したがって、(1)式により層厚換算を行なった後、各層の z_1/H および z_2/H がわかれば、図—3 を用いて $Az_{1/H}$ および $Az_{2/H}$ が得られ、さらに(7)式を用いて U_n を求めることができる。

5. 各層の圧密度を考慮した層厚換算法による計算例

計算例に用いた地盤の代表的な性状を表—2に示す。この地盤は、チュウ積層谷部のほぼ全面に盛土を行なった宅地造成地なので、一次元圧密条件を満たしていると考えられる。

各層の圧密試験結果より得られた最終圧密沈下量は、有機質土層 133 cm、粘土層 68 cm、および砂質シルト層 15 cm、合計 216 cm である。

(1) 式より、圧密係数 c_v が 0.072 cm²/min の単一層に換算すれば、(8)式になる。

$$H = 300 + 500 \times \sqrt{\frac{0.072}{0.0277}} + 260 \times \sqrt{\frac{0.072}{0.402}} \\ = 300 + 810 + 110 = 1220(\text{cm}) \dots\dots\dots(8)$$

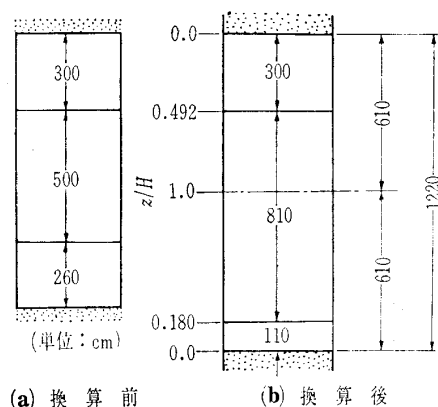
各層の層厚を図—4(a)に、また層厚換算後の各層の層厚および両面排水としたときの各層の z/H の値を図—4(b)に示してある。

時間～圧密度の関係は、時間係数 T_v を用いて両面排水条件を考慮し(9)式で表わされる。

$$t = \frac{(H/2)^2}{c_v} \cdot T_v \\ = \frac{(1220/2)^2}{0.072} \times \frac{1}{1440} \times T_v \\ = 3590 \cdot T_v(\text{day}) \dots\dots\dots(9)$$

計算の一例として、平均圧密度60%の場合を行なえば、 $T_v = 0.287$ であるから荷重が瞬間に載荷された場合の平均圧密度60%までに達する経過時間は、(9)式より $t = 3590 \times 0.287 = 1030\text{day}$ となる。

一方、図—4(b)の各層の z/H より、図—3を利用して各層の Az/H

図—4 計算例に用いた地盤の層厚と層厚換算後の各層の層厚および層厚に対する z/H の値

が求まるので、各層の時間 t における圧密沈下量 S_t および層全体の沈下量 $\sum S_t$ は、(7)式および(3)式を用いて表—3のように求められる。

6. 各層の圧密度を考慮した層厚換算法と実測値および平均圧密度を用いた方法の比較

各層の圧密度を考慮した層厚換算法を用い平均圧密度10%ごとに時間と沈下量を求め、漸増荷重による補正を行なって得られた時間～沈下量曲線①と実測沈下曲線②と比較したのが図—5である。なお、図—5には平均圧密度による計算沈下曲線③を併記するとともに、有機質土層の圧密係数を $5 \cdot c_v$ 、粘土層の圧密係数を $2 \cdot c_v$ としたときの各層の圧密度を考慮した層厚換算法による計算沈下曲線④も併記した。なお、有機質土層について $5 \cdot c_v$ 、粘土層について $2 \cdot c_v$ を用いたのは、大きな圧密係数をもつ土に対しては、標準圧密試験の供試体の大きさでは最大排水長さが小さすぎるため、圧密係数の値を過小評価する傾向があることが指摘されている⁶⁾ことを考慮したものである。

図—5によれば、一次元圧密が行なわれている地盤であっても標準圧密試験結果の c_v をそのまま用いた計算沈下曲線は、平均圧密度による方法および各層の圧密度を考慮

表—3 各層の圧密度を考慮した層厚換算法の計算例

層名	各層の z_1/H ①	各層の z_2/H ②	各層の $Az_{1/H}$ ③	各層の $Az_{2/H}$ ④	各層の z/H ②-①	各層の Az/H ④-③	各層の圧密度 U_n (%) ④-③/②-①	各層の沈下量 S_t (cm)
有機質土層	0	0.492	0	37.8	0.492	37.8	76.8	$133 \times 0.768 = 102$
粘土層	0.492	1.0	37.8	60.0	1.328	65.8	49.5	$68 \times 0.495 = 34$
	0.180	1.0	16.4	60.0				
砂質シルト層	0	0.180	0	16.4	0.180	16.4	91.1	$15 \times 0.911 = 14$

合計沈下量 $\sum S_t = 150 \text{ cm}$

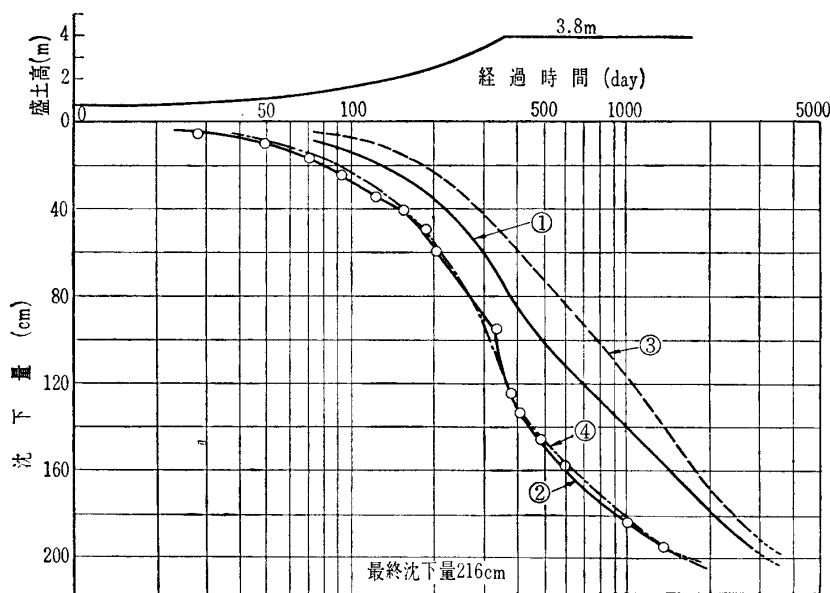


図-5 計算沈下曲線と実測沈下曲線

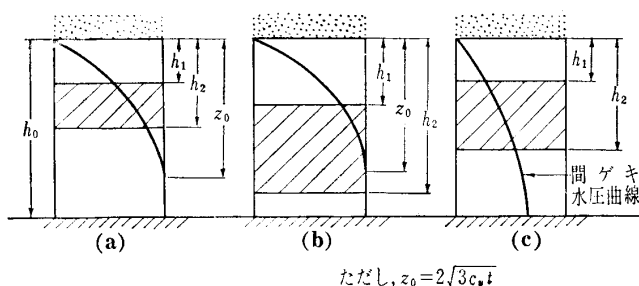


図-6 過剰間ゲキ水圧の等時線を放物線と仮定した場合の任意の層と等時線の関係

した方法のいずれの方法も実際の沈下速度よりも遅いことを示している。しかし、平均圧密度による方法と各層の圧密度を考慮した方法を比較した場合、明らかに各層の圧密度を考慮した方法が実際の沈下速度に近い値を得ている。また、有機質土層 $5 \cdot c_v$ 、粘土層 $2 \cdot c_v$ として各層の圧密度を考慮した方法による計算沈下曲線は、ほぼ実測沈下曲線に一致しており、前述の c_v 値の大きい土の c_v 値を過小評価しているということが正しいことになる。

ここであげた一次元圧密理論より作成した図を利用して各層の圧密度 U_n を求める方法のほか、各層の圧密度 U_n を求める方法としては、層厚換算後の単一層の間ゲキ水圧曲線が放物線をなすと仮定して放物線近似解によって行なう方法がある。この方法は仮定した間ゲキ水圧曲線の放物線の先端 z_0 と任意の層 (h_1 から h_2) の位置により図-6 に示した(a), (b), (c)の場合が考えられ(a), (b), (c) おおのに相当している各層の圧密度 U_n の算定式が(10), (11), (12)式である。

$$(a) \quad 0 \leq t \leq h_0^2/12c_v, \quad 0 \leq h_1 \leq h_2 \leq 2\sqrt{3c_v t}$$

$$U_n = 1 - \frac{1}{12c_v t} \left\{ 2\sqrt{3c_v t} (h_2 + h_1) - \frac{1}{3} (h_2^2 + h_2 \times h_1 + h_1^2) \right\} \dots (10)$$

$$(b) \quad 0 \leq t \leq h_0^2/12c_v, \quad 0 \leq h_1 \leq 2\sqrt{3c_v t}, \quad 2\sqrt{3c_v t} \leq h_2 \leq h_0$$

$$U_n = \frac{z_0 - h_1}{h_2 - h_1} \left[1 - \frac{1}{12c_v t} \left\{ 2\sqrt{3c_v t} (z_0 + h_1) - \frac{1}{3} (z_0^2 + z_0 \times h_1 + h_1^2) \right\} \right] \dots (11)$$

$$(c) \quad h_0^2/12c_v \leq t \leq \infty, \quad 0 \leq h_1 \leq h_2 \leq h_0$$

$$U_n = 1 - \left(\frac{h_2 + h_1}{h_0} - \frac{h_2^2 + h_2 \times h_1 + h_1^2}{3h_0^2} \right) \exp \left\{ - \left(\frac{3c_v t}{h_0^2} - \frac{1}{4} \right) \right\} \dots (12)$$

図-3 を用いる方法に対し放物線近似解による方法では、平均圧密度算出にあたり差が生じるが、圧密沈下速度を決定する他の要因も考慮すればこの差は、許容されると考えてもさしつかえない。

7. あとがき

各層の圧密度を考慮した層厚換算法による圧密沈下速度の予測法を計算例を用いて述べたが要約するとつぎのようになる。

- (1) 圧縮性の異なる層が成層している多層地盤の沈下速度の予測に層厚換算法を用いるときは、各層の圧密度を考慮して解析を行なえば、平均圧密度を用いる方法に比較してより実際に近い圧密沈下速度が得られる。
- (2) 層厚換算後、各層の圧密度を求めるには、一次元圧密理論より作成した図-3 を用いれば簡単に求まる。
- (3) 標準圧密試験から求めた圧密係数に対し現場の圧密係数を有機質土層では5倍、粘土層では2倍として、各層の圧密度を考慮した解析を行なったところ実際に近い圧密沈下曲線が得られた。
- (4) 過剰間ゲキ水圧の等時線を放物線で近似したときは、圧密度で最大4.5%程度の差がでる。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質工学ハンドブック、技報堂
- 2) 土質工学会編：土と基礎の設計計算演習
- 3) L.A.Palmer, Settlement Analyses for Areas of Continuing Subsidence, Proc, 4th. ICSMFE Vol.1, 1957
- 4) 最上武雄：土質力学、技報堂
- 5) 赤井浩一、大草重康訳：フローリンの土質力学(II)、森北出版
- 6) 小林・松本・奥村：広島空港における圧密沈下現象の解析、第19回土質工学シンポジウム
- 7) 稲田・赤石・山田：多層地盤の圧密沈下速度の計算法、第3回土木学会関東支部講演概要集

(原稿受理 1976.11.1)