

体積圧縮係数 (m_v) を用いるときの 圧密沈下量算定に関する 2・3 の考察

松 並 仁 茂

A few Studies about Calculation for Consolidation Settlement of Soft Clay Layers which take the Coefficient of Volume Compressibility (m_v)

Hitoshige MATSUNAMI

We have three calculated methods for consolidation settlement of soft clay layers. These are e -log p method, C_c method and m_v method. On Practical use, the m_v method which takes the coefficient of volume compressibility is frequently solved to excessive result at $p < 1.0 \text{ kgf/cm}^2$.

We must pay attention to this excessive result when using this m_v method. So several problems in the cause of this m_v method are cleared out and an improved method at the calculated method for consolidation settlement is proposed on this paper.

1. まえがき

わが国における軟弱地盤の圧密沈下量の算定は JIS A 1217-1980 に規定されている圧密試験¹⁾の結果を用いて計算することになっている。その算定式は以下に示すように 3 通りある。

$$s = (e_0 - e) / (1 + e_0) \cdot H \quad (1)$$

$$s = C_c / (1 + e_0) \cdot H \cdot \log_{10}((p_0 + \Delta p) / p_0) \quad (2)$$

$$s = m_v \cdot \Delta p \cdot H \quad (3)$$

ここに, s : 圧密による最終沈下量 (cm)

H : 載荷前の土層厚 (cm)

C_c : 圧縮係数

e_0, e : それぞれ土層中央深さにおける載荷前および載荷後の間隙比

p_0 : 土層中央深さにおける載荷前の有効土かぶり圧 (kgf/cm^2)

Δp : 増加鉛直応力 (kgf/cm^2)

m_v : 体積圧縮係数 (cm^2/kgf)

なお, ここでは便宜上, 式(1)による沈下量算定法を e -log p 法といい, 式(2)による場合は C_c 法, そして式(3)による場合を m_v 法ということにする。この 3 式は理論的に同一の結果を与える

ものであることは多くの著書²⁾によっても明らかである。

ところで、圧密沈下量の算定法は、道路、河川、港湾および建築などの国内の各分野において、一つの方法が用いられているわけではない。一般には、C法が採用されているようであるが、港湾とか漁港の分野ではm_v法が多く用いられているようである。ただ、e-log p法を主に用いているところは少ないようである。

これらの三方式による圧密沈下量の算定法は、同一の算定条件のもとでは同一の結果をもたらすことになっているのであるが、しかし、実際の施工方法に合わせて算定してみると、e-log p法とC法は、同じ結果を与えるが、m_v法は他の2法と比較して、過大な結果を示すことが多いようである。

その原因としては、つぎのような二つの問題点をあげることができる。その一つは、m_vの値は載荷前後の平均有効土かぶり圧だけによって決められるのではなく、載荷前の有効土かぶり圧と増加鉛直応力の両方によって決定されるものであること。他の一つは、JISの圧密試験法において、土層厚を載荷前後の土層厚の平均値を用いているのにたいし、式(3)の土層厚は載荷前のものを用いている点で、両者の間に根本的な相違が認められること。この二点である。

ここでは、実際的な場合について具体的な考察を行ない、圧密沈下量の算定法の改善すべき諸点を明らかにするとともに、算定法の一部改訂を提案することにした。

2. 載荷圧密工法の現状

軟弱地盤を改良する工法として最も基本的な載荷圧密工法は、よく知られ、よく用いられている。実際には載荷は、一回だけで済ませるよりは、地盤崩壊の安全性を確認しながら多数回にわけて施工するほうが多い。この場合、計算条件が同一ならば算出される圧密沈下量の総合計は、常に、載荷回数に関係なく一定でなければならない。e-log p法やC法の場合は、常に、同一の結果をもたらすが、現行のm_vは、一般に、他の二法の圧密沈下量とは異なる結果を示すうえ、載荷回数によっても異なる値を示す。特に、地盤が軟弱でm_v値が大きい範囲においては、圧密沈下量がきわめて過大な値を示すので、その結果として、全圧密沈下量の予測をいたずらに過大に見積らせるにいたらしめている。

3. e-log p法とC法による圧密沈下量

本論文のように、実際的な問題を取り扱う場合には、具体的、かつ、実際的な状況において比較検討する方が、問題点をより明確に表しうるものと考ええる。

そこで、ここでは、国内に広く分布していると思われる神奈川県横須賀市久里浜産の粘土(図-1)を用いることにした。図中の黒丸が圧密試験の結果をプロットしたものであり、それらを結ぶ線がいわゆるe-log p曲線である。本図の場合、0.1~0.8kgf/cm²は過圧密の範囲であり、有効応力の増加が相当量あるにもかかわらず、間隙比の値は僅かに減少するのみである。これに対し、p>1.6kgf/cm²範囲では、間隙比の値は有効応力の増加に伴いその減少の状況が直線的で大きく

示されていることが分かる。この処女曲線が $e - \log p$ 紙上で直線とみなされるとき、その勾配を圧密係数 C_c として式(2)のように表すことができるのであり、図-1の場合の圧密係数は式(4)のように表すことができる。

$$e = 1.900 - 1.020 \log p, \quad C_c = 1.020 \quad (4)$$

$e - \log p$ 法と C_c 法は上述のような関係にある範囲では、両者の算定式から得られる圧密沈下量は常に、同一の結果を与えるものと考えてさしつかえない。

ここで、沈下量算定の比較検討を容易にするため、次のような計算条件を設けることにした。

- ① 粘土層内はすべて均質である
- ② 初期の粘土層厚は300cmとする
- ③ 全載荷圧力は 2.0 kgf/cm^2 とする

圧密沈下量計算を行なうにあたって、初期間隙比 e_0 の値を適切に決定することはきわめて重要なことであるが、それは非常に難しいこととされている。ここでは、まず、粘土の自沈のみによって生成されたとする仮想の粘土を取り扱うことから、既に求められていた粘土の土粒子の比重 $G = 2.67$ を用いて、式(4)などから初期間隙比を求めた。その結果、 $e_0 = 2.570$ を得たが、これに対応する土かぶり圧は $p_0 = 0.220 \text{ kgf/cm}^2$ 、単位体積重量は $\gamma_0 = 1.468 \text{ tf/cm}^3$ と算出された。

これらの結果は図-1の処女曲線の直線延長上の最も上に \oplus 印で示されている。ただ、この粘土は超軟弱な仮想の土であると思われるので、この他に、実在する粘土として先行圧密を受けた過圧密粘土として、当初の単位体積重量 $\gamma_0 = 1.50 \text{ tf/cm}^3$ と $\gamma_0 = 1.55 \text{ tf/cm}^3$ および $\gamma_0 = 1.60 \text{ tf/cm}^3$ の3種類についても検討を加えることにした。これらの粘土の初期間隙比 e_0 を上述の方法でもとめると、それぞれ2.340, 2.036, および1.783と算出され、また、初期土かぶり圧 p_0 は、それぞれ 0.370 kgf/cm^2 , 0.736 kgf/cm^2 , および 1.302 kgf/cm^2 と算出された。これらを前同様に、図-1に上からそれぞれ、2番目、3番目および4番目の \oplus 印で示した。

これまで述べてきた計算条件を用いて、まず、仮想粘土の圧密沈下量

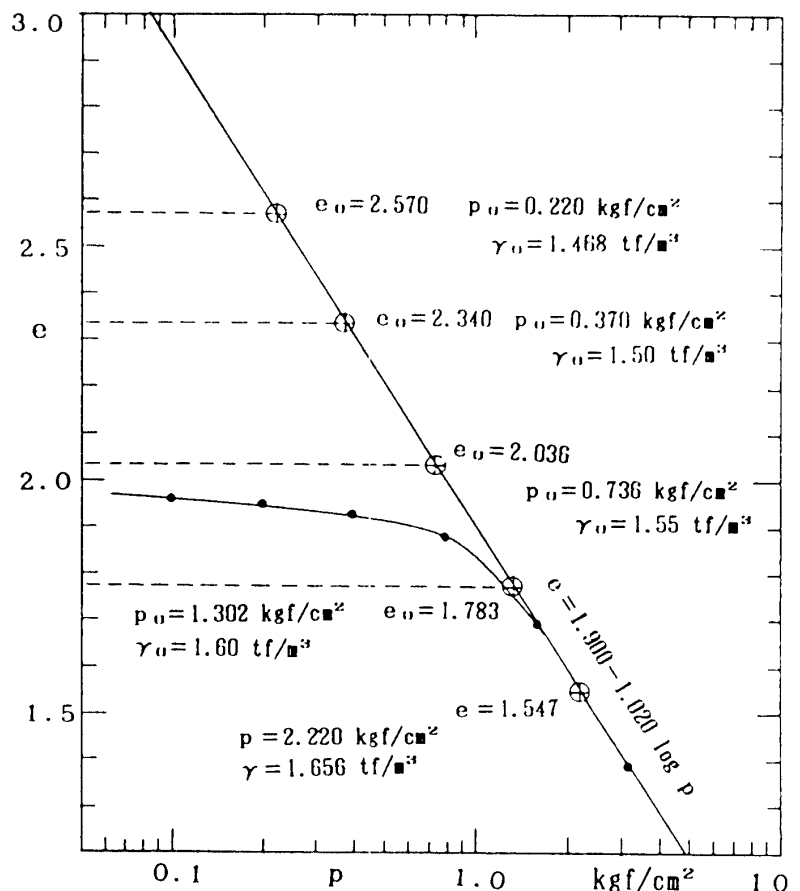


図-1 $e - \log p$ (久里浜粘土)

を算定する。載荷前の有効土かぶり圧 $p_0 = 0.22 \text{ kgf/cm}^2$ に載荷圧力 $\Delta p = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えた時の圧密沈下量は $s = 85.99 \text{ cm}$ となった。これは載荷圧力を分割することなく、一回載荷の場合の沈下量であるが、載荷圧力を2回、3回…などと均等多段回に分割圧密する場合については、逐次沈下量を算定し、これを累計し、 Σs として求めると図-2の最も下方の圧密沈下量曲線のようになる。この場合の累計沈下量の合計は1回載荷の沈下量と同一の85.99cmの値を示す。

同様にして、 $\gamma_0 = 1.50 \text{ tf/m}^3$ ($e_0 = 2.340$, $p_0 = 0.370 \text{ kgf/cm}^2$) の粘土、 $\gamma_0 = 1.55 \text{ tf/m}^3$ ($e_0 = 2.036$, $p_0 = 0.736 \text{ kgf/cm}^2$) の粘土および $\gamma_0 = 1.60 \text{ tf/m}^3$ ($e_0 = 1.783$, $p_0 = 1.302 \text{ kgf/cm}^2$) の粘土について、多段回分割載荷の圧密沈下量を求めると、おのこの全圧密沈下量 Σs は図-2に示すように、71.25cm、48.35cmおよび25.47cmとなり、1回載荷の場合の圧密沈下量と同一の値を示すことが分かった。以上のことは、 $e - \log p$ 法とC法によって算定される圧密沈下量は、計算条件が同一であれば、あらゆる場合の圧密沈下量の総合計は同一の値を与えるということを示すものである。

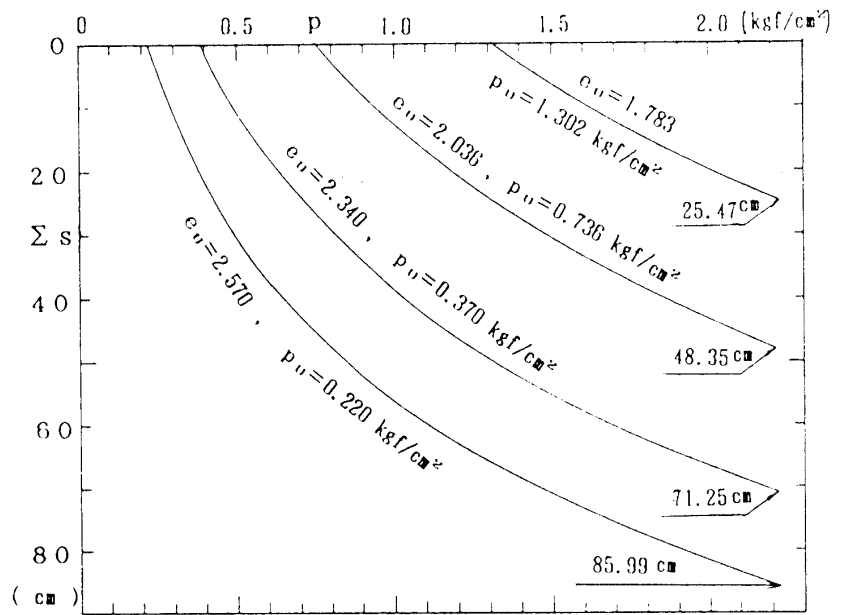


図-2 $e - \log p$ 法による圧密沈下量

4. m_v 法による圧密沈下量

4-1 体積圧縮係数 m_v の値

圧密沈下量の計算に必要な久里浜粘土の体積圧縮係数 m_v の試験結果は図-3に黒丸で示した。図-1の $e - \log p$ 曲線の処女圧縮の範囲における m_v の値は、平均圧密圧力 \bar{p} に関してこれを両対数紙に示すとき直線的関係になることが一般に知られているところである。久里浜粘土においても、図-3の一部に見られるように、処女圧縮の部分に直線的関係を認めることができるが、これらの関係を図から求めると式(5)のようになる。

$$m_v = 0.216 \bar{p}^{-1.170} \quad (5)$$

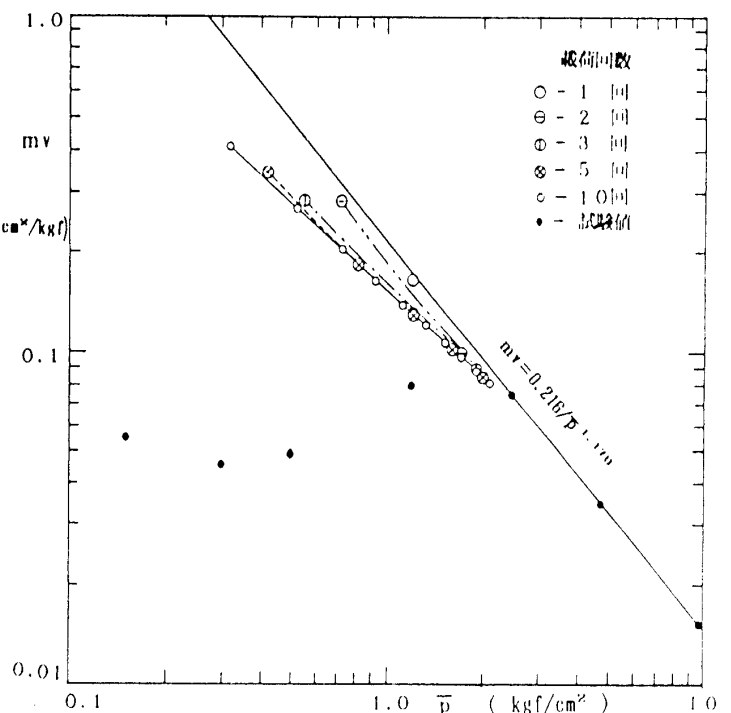


図-3 体積圧縮係数 $m_v \sim \bar{p}$

ここに、 \bar{p} ：圧密試験における各載荷圧力前後の平均圧密圧力 (kgf/cm^2)

これらの関係を方眼紙に表したのが図-4である。 $\bar{p} < 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の範囲では反比例的に m_v 値は大きく変化しているが、これに対し、 $\bar{p} > 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の範囲では m_v 値はその量とともに変動量も小さくなり、遂には一定の値に漸近するようになる。実際に施工する場合は、 $\bar{p} < 5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ であり、 $2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 以下の場合が多いことから、 m_v 値の採用にあたっては十分な配慮のうえに慎重に行なう必要があるといえる。

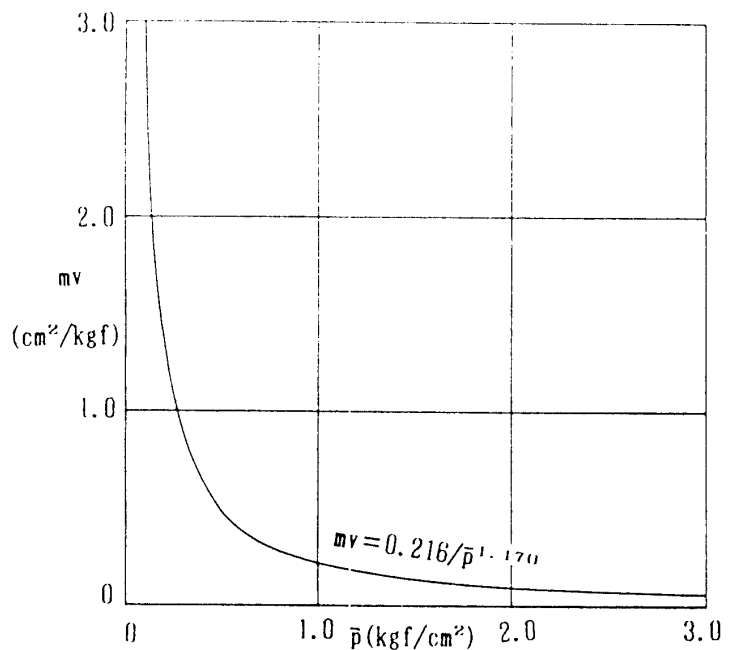


図-4 体積圧縮係数 $m_v \sim \bar{p}$

4-2 m_v 法による圧密沈下量

m_v 法による圧密沈下量の算定は式(5)の関係式を用いることによって、前述の未載荷粘土の各載荷段階の m_v の推測値を求めることができるので、あらゆる場合について容易におこなえる。ここでは、上述の4種の粘土について、各載荷段階ごとに圧密前後の有効土かぶり圧を平均した平均圧密圧力を図-3の \bar{p} に相当するものとして、これに対応する m_v 値を式(5)から求め、各載荷段階の圧密沈下量を算出することにした。このように、平均圧密圧力に対応する m_v 値を求めてゆく算定法は一般的に用いられている方法である。

この方法によって載荷重を均等に N 回に分割して施工するときの圧密沈下量の総合計は一括して図-5と表-1に示したが、当初の粘土の軟弱の程度によって1回載荷の場合と多段階の場合との間でかなりな相違があることが分かる。すなわち、 $\gamma_0 = 1.60 \text{ tf}/\text{m}^3$ の場合の1回載荷の沈下量と例えば10回載荷の全沈下量は、おのおの、 30.68 cm と 30.27 cm で殆んど等しい結果を示すのに対し、 $\gamma_0 = 1.55 \text{ tf}/\text{m}^3$ の場合は 60.88 cm と 62.15 cm で両者の比は $1:1.021$ となり、 $\gamma_0 = 1.50 \text{ tf}/\text{m}^3$ のときは 88.59 cm と 99.52 cm で両者の比は $1:1.123$ 、さらに、 $\gamma_0 = 1.468 \text{ tf}/\text{m}^3$ の場合は 102.70 cm と 126.82 cm で両者の比は $1:1.235$ と地盤が軟弱なほど大きくなっていることが分かる。これまで述べてきたように、全圧密沈下量は1回載荷の場合も多段階載荷の場合も同一の値を示すべきものであるので、 m_v 法によるこれらの値は異常な結果であり、算定法に重大な欠陥があることを示す証といえる。

さらに、 m_v 法による全沈下量の算定結果について、正しい結果を与える $e - \log p$ 法と比較するため表-1に一括表示した。これによると、 m_v 法による全圧密沈下量は $e - \log p$ 法のそれに対して、1回載荷では、いずれの粘土の場合もほぼ1.2倍の値を示しているうえ、多段階載荷で

は、それが1.2~1.5倍になっていて、両者の差ははなはだ大きく無視できないものとなっていることが分かる。

4-3 m_v法の算定法改善のための検討

一般に用いられている m_v法は式(3)によって定義されているが、JISの圧密試験法によれば式(6)のようになっており、粘土層厚を載荷前の厚さHを採るか、載荷前後の平均厚さ \bar{h} を採るかで、両者の間で重大な違いを見ることができる。

$$s = m_v \cdot \Delta p \cdot \bar{h} \quad (6)$$

そこで、 \bar{h} の代りに載荷前の土層厚Hを用いて表すと、次式(7)のようになる。

$$s = m_v \cdot \Delta p \cdot H / (1 + m_v \cdot \Delta p / 2) \quad (7)$$

この式に従って圧密沈下量を求めると、その結果は図-6の黒丸のようになる。図中の白丸は前述した従来_の m_v法の結果であるので、両者の間にはかなりな違いがあることが分かる。また、地盤が軟弱なほど、さらに、載荷回数が少ないほど沈下量の差は大きい。

正当な結果を示す e-log p 法と比較するため表-1 にその結果を数値で示した。すなわち、e-log p 法に対する m_v法の値は、1回載荷では軟弱な粘土のほうから、それぞれ、1.02倍、1.08倍、1.14倍および1.15倍となって若干の改善が認められるが、載荷回数の増加に伴って従来の m_v法の値に漸近し、結局のところ、両者の差は依然として大きいことが分かる。

このように、m_v値は正しくは載荷前の有効土かぶり圧 p₀ と増加鉛直応力 Δp の両方によって決定されるものであって、平均圧密圧力 \bar{p} だけで決定される従来の方法には大きな問題があることが明らかになった。そこで新たに、図-1に示した e-log p 曲線の処女曲線から、上述の沈下量算定のための諸条件にあわせて、載荷回数1回、2回、3回、5回、および10回について JIS

表-1 m_v法による全圧密沈下量と

e-log p による全圧密沈下量

全沈下量(cm) (H₀=300cm, p₁=p₀+ΣΔp
=2.220kgf/cm²)

e ₀	2.573	2.340	2.036	1.783
p ₀ (kgf/cm ²)	0.220	0.370	0.736	1.302
γ ₀ (tf/m ³)	1.468	1.50	1.55	1.60
載荷回数(3) 式	102.70	88.59	60.88	30.68
1 回 (4) 式	87.69	77.19	55.27	29.19
(3) 式	118.63	98.14	62.86	30.68
2 回 (4) 式	105.74	89.85	59.74	29.19
(3) 式	123.69	100.03	62.73	30.56
3 回 (4) 式	112.98	93.93	60.29	29.72
(3) 式	125.68	100.32	62.80	30.55
4 回 (4) 式	116.67	95.63	60.47	29.79
(3) 式	126.52	100.22	62.62	30.44
5 回 (4) 式	118.81	96.43	60.94	29.87
(3) 式	126.87	100.04	62.45	30.41
6 回 (4) 式	120.10	96.85	61.09	29.90
(3) 式	126.98	99.86	62.38	30.36
7 回 (4) 式	121.06	97.09	61.13	29.92
(3) 式	126.97	99.72	62.36	30.33
8 回 (4) 式	121.69	97.24	61.17	29.94
(3) 式	126.91	99.60	62.23	30.31
9 回 (4) 式	122.15	97.33	61.25	29.95
(3) 式	126.82	99.52	62.15	30.27
10 回 (4) 式	122.49	97.40	61.28	29.96
(3) 式	124.57	98.14	61.51	30.03
100 回 (4) 式	124.12	97.64	61.41	30.00
e-log p 法	85.99	71.25	48.35	25.47

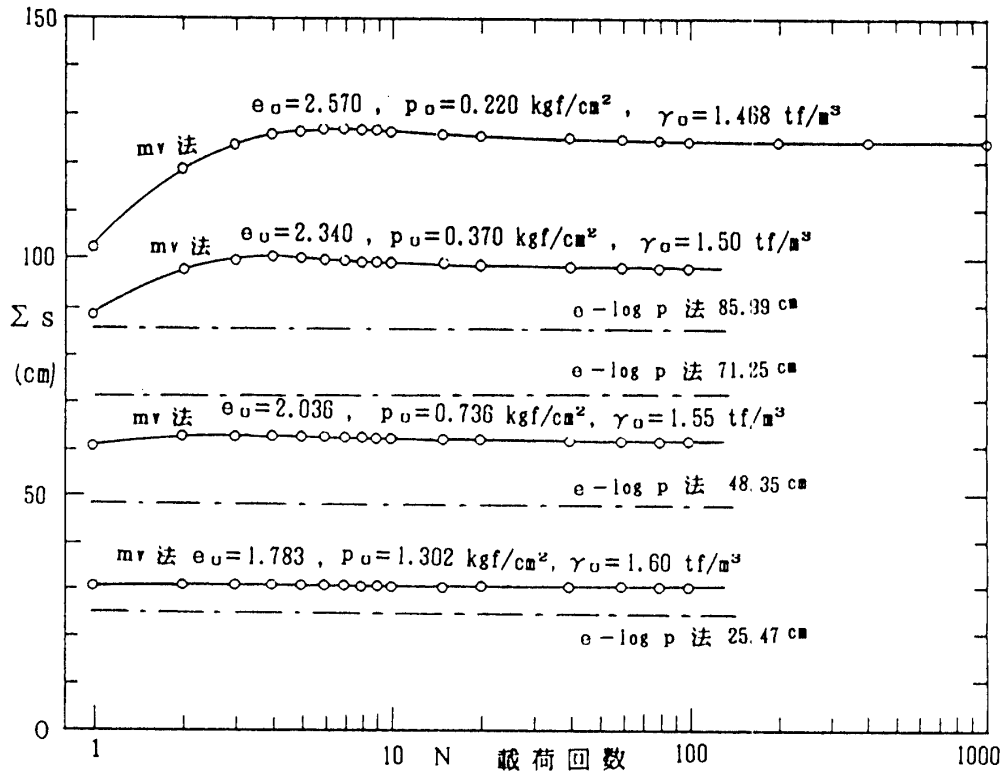


図-5 m_v 法による載荷回数と全圧密沈下量

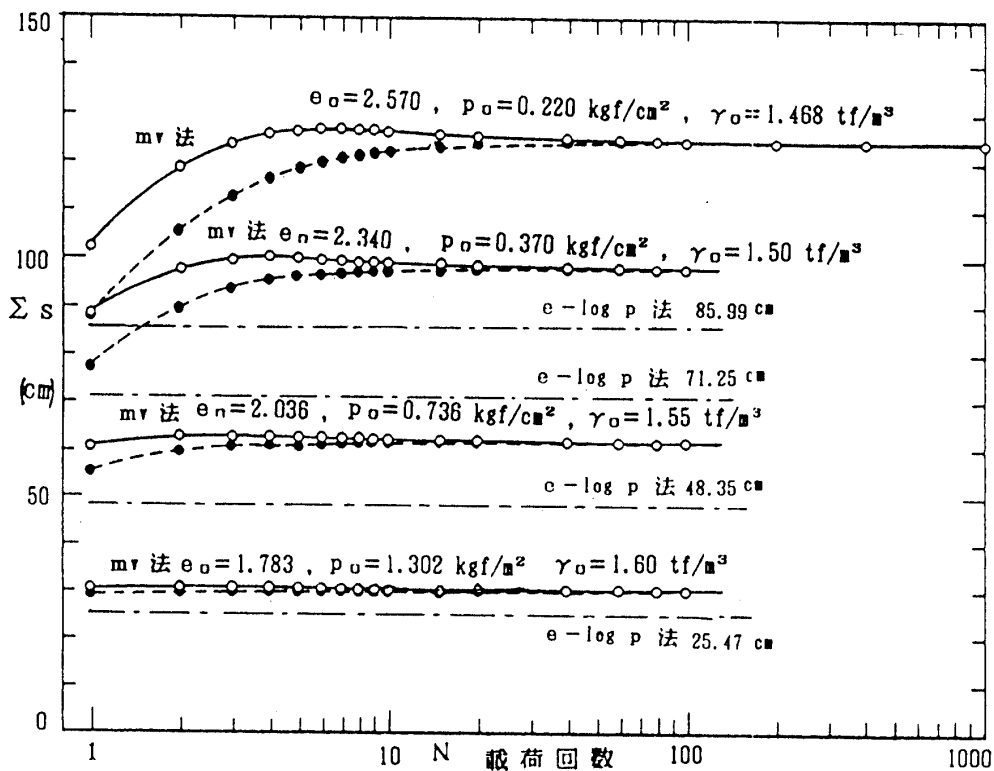


図-6 m_v 法による載荷回数と全圧密沈下量

(従来の方法と式(7)を用いたときの圧密沈下量の比較)

の試験法に従って m_v 値を求めるとその結果は図-3のようになったが、いずれも、現行の m_v 値より小さい値となっていることが分かる。施工現場においては、各載荷段階ごとに適切な m_v 値を求めて、かなりな調整を行なっている状況にあるが、その理由の一つとして、上述の事情をあげることができる。ここでは更に、これらの新しい m_v 値を用いて、上述の4種類の粘土について、圧密沈下量を式(7)によって算定したが、いずれも図-2の各沈下量曲線の上のり、 $e-\log p$ 法と等しい結果をもたらすことが確かめられた。

以上の検討結果により次ぎのようにいうことができる。

- (1) m_v 法はJISの試験法による値を用いる限り正しい結果を与えるものではない。
- (2) $e-\log p$ 曲線から載荷前の有効土かぶり圧 p_0 と増加鉛直応力 Δp に対応する新 m_v 値を求め、式(7)によって圧密沈下量を算定すると、 $e-\log p$ 法や C_c 法と等しい圧密沈下量を得ることができる。しかし、この算定法は合理的な方法とはいえない。

5. 結 論

軟弱地盤の圧密沈下量の現行算定法について、実際的かつ具体的に検討したところ、 m_v 法はJISの試験法と現行の算定式に重大な矛盾点が認められてので、 $e-\log p$ 法か C_c 法を用い、 m_v 法は用いないほうがよいことが確かめられた。

新たな m_v 法としては、 $e-\log p$ 曲線から載荷前の有効土かぶり圧と増加鉛直応力に対応する m_v 値を得て、式(7)によって圧密沈下量を算定する方法が見いだされたが、この算定法は直接的でない点で、合理的な方法とはいえない。

本論文は、さきに、昭和63年度土木学会関西支部年次学術講演会³⁾において発表したものに若干の考察を加えてとりまとめたものである。

【参考文献】

- 1) 土質工学会：土の試験実習書，1984，pp.111～124.
- 2) たとえば，箭内寛治・浅川美利：わかり易い土木講座6 新訂版・土質工学，土木学会編，1985，pp.100～101.
- 3) 松並仁茂：多段階載荷における沈下量計算について，昭和63年度 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，Ⅲ-6.