

# N値を用いた砂地盤の静止土圧の一計算法

落 合 英 俊\*

## A Calculation Method of Earth Pressure at Rest of Sandy Soils Using N-value

by

Hidetoshi OCHIAI

(Department of Civil Engineering)

It is practical that the coefficient of earth pressure at rest,  $K_0$ , is expressed by the function of internal friction angle in effective stress,  $\phi'$ , although it has a fault in theoretical strictness. But  $\phi'$  at field of sandy soils is usually estimated from N-value by the standard penetration test, so that from a practical point of view it is desirable to obtain the relation between N-value and  $\phi'$ .

In this paper, firstly, a simple relation between N-value and  $\phi'$  introduced a term of effective overburden pressure which has not been considered in the past is newly presented. Secondly, combining the above N- $\phi'$  relation with the Jaky's or author's equation about  $K_0$ , a method employing N-value as a simple and practical calculation method of earth pressure at rest of sandy soils is presented, and its application to field problems is verified by comparison with the measured values of earth pressure for an underground retaining wall at field.

### 1. まえがき

地下壁や地中埋設物などの土圧の評価、深い基礎の支持力の算定などにおいては、静止土圧係数  $K_0$  の値が重要な要素となるものであり、また最近では、砂地盤の流動化の様子も  $K_0$  値によって異なるものともいわれており<sup>(1)</sup>、土質工学の分野では静止土圧に関連した問題は数多く、かつ重要である。

静止土圧係数  $K_0$  の算定式としては、Jaky<sup>(2)</sup>をはじめ、多数の研究者により種々提案されているが(表-1参照)、砂の場合、実用的でしかも実験結果をうまく説明できるのは、有効応力による内部摩擦角  $\phi'$  を用いた  $K_0=f(\phi')$  の形の式である。しかし、実際の現場においては、とくに砂地盤の場合、乱さない試料のサンプリングの困難さとも関連して、砂地盤の内部

摩擦角  $\phi'$  の値をセン断試験によって求めることは容易ではなく、そのためサウンディング結果からその値を換算することがしばしば行なわれている。したがって、サウンディング結果を用いて砂地盤の静止土圧係数を求め、土圧を算定する方法を確立することは、実用上、大きな意義をもっている。

著者<sup>(3),(4)</sup>はさきに標準貫入試験の N 値の特性を考慮し、N 値を用いた静止土圧の一計算法を提案したが、その際、砂地盤の N 値と有効上載圧力  $p$  および相対密度  $D_r$  の関係として、Schultz & Menzenbach<sup>(5)</sup> による実験式を利用していった。しかし、Schultz & Menzenbach の式は(18)式に示すように、式中对数計算を含むかなり複雑な実験式であるため、 $K_0$  値の算定に必要な内部摩擦角  $\phi'$  を N 値と有効上載圧力  $p$

昭和53年5月13日受理

\* 土木工学科

の関数として簡単に表示することができず、かなり面倒な計算を行なわねばならないという欠点があった。

本文では、さきに提案した計算法のより簡便な方法として、Schultz & Menzenbach の式の代りに、それとほぼ同じ結果を与える Meyerhof<sup>(6)</sup>による経験式を利用することにより、N 値と有効上載圧力 p の値から砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  を求める簡単な式を新たに提示し、さらにその式と静止土圧係数  $K_0$  に関する Jáky あるいは著者による式を組み合わせることによ

り、N 値を用いた簡便で実用的な静止土圧の計算法とその関係図を示した。

## 2. 静止土圧係数 $K_0$ の算定式

静止土圧係数  $K_0$  を算定する式は、次のように大別することができる。

- (i)  $K_0=f(\phi_\mu)$  あるいは  $K_0=f(\phi_{cv})$
- (ii)  $K_0=f(\phi')$
- (iii) その他

Table 1 Equations of the coefficient of earth pressure at rest,  $K_0$ .

Equations	Workers	No. of Eq.
(i) $K_0=f(\phi_\mu)$ or $K_0=f(\phi_{cv})$		
$K_0 = \frac{3-\eta_{k_0}}{2\eta_{k_0}+3}$ $\eta_{k_0}^2 + 3\{1-(\kappa/\lambda)\}\eta_{k_0} - M^2 = 0$ $\sin\phi_{cv} = 3M/(6+M)$	Roscoe et al <sup>(7)</sup>	(1)
$K_0 = \tan^2(\pi/4 - \phi_e/2)$	Rowe <sup>(8)</sup>	(2)
$K_0 = \frac{1 - (2/\pi)\tan\phi_\mu}{1 + (\pi/2)\tan\phi_\mu}$	Yamaguchi <sup>(9)</sup>	(3)
$K_0 = \frac{\sqrt{2} - \tan\phi_\mu}{\sqrt{2} + 2\tan\phi_\mu}$	Yamanouchi et al <sup>(10)</sup>	(4)
$K_0 = 1 - \sin\phi_{cv} = \tan^2(\pi/4 - \phi_\mu/2)$	Ochiai <sup>(11)</sup>	(5)
(ii) $K_0 = f(\phi')$		
$K_0 = \frac{1 + (2/3)\sin\phi'}{1 + \sin\phi'} (1 - \sin\phi')$ $= 0.9(1 - \sin\phi')$	Jáky <sup>(2)</sup>	(6)
$K_0 = 1 - \sin\phi'$		(7)
$K_0 = 0.95 - \sin\phi'$	Brooker et al <sup>(12)</sup>	(8)
$K_0 = \frac{1 - (2/\pi)^2 \tan\phi'}{1 + \tan\phi'}$	Yamaguchi <sup>(9)</sup>	(9)
$K_0 = \frac{\sqrt{2} - (2/\pi)\tan\phi'}{\sqrt{2} + (4/\pi)\tan\phi'}$	Yamanouchi et al <sup>(10)</sup>	(10)
$K_0 = \frac{\sqrt{(\pi/2)^2 + \tan^2\phi'} - \tan\phi'}{\sqrt{(\pi/2)^2 + \tan^2\phi'} + \tan\phi'}$	Ochiai <sup>(11)</sup>	(11)
(iii) The others		
$K_0 = 0.19 + 0.233\log I_p$	Alpan <sup>(13)</sup>	(12)
$K_0 = \mu/(1-\mu)$	Tschebotarioff <sup>(14)</sup>	(13)
$K_0 = 1/(\nu-2)$	Ohsaki <sup>(15)</sup>	(14)

以上の分類により、これまで提案されている式は Table 1 のとうりである。(i)の形式の諸式は、それぞれ理論的に誘導されており、その物理的意味も比較的明確であるが、粒子間摩擦角  $\phi_\mu$  あるいは限界間ゲキ比状態における摩擦角  $\phi_{cv}$  が材料定数であるため、

静止土圧係数  $K_0$  も材料定数となる。したがって、 $K_0$  値が初期間ゲキ比  $e_0$  によって変化するという実験的事実を説明することはできない。(ii)の形式の諸式は、内部摩擦角  $\phi'$  が初期間ゲキ比  $e_0$  によって変化するるので、実験結果をうまく説明することができ、実

用的ではあるが、破壊以前の非塑性状態における  $K_0$  値を塑性状態の  $\phi'$  と直接関係づけている点など物理的意味が不明確であり、またこれらの式は、あえて実験結果と合うように修正されているものが多く、一種の実験式とみなすべきであろう。(iii)のその他の式において、ポアソン比  $\mu$ 、応力集中係数  $\nu$  を用いた式は、それぞれ弾性論および Frölich の地盤内応力に関する考え方に基づくものであり、土の場合、その係数  $\mu$ 、 $\nu$  の定め方が問題である。なお、塑性指数  $I_p$  を用いた Alpan の式は粘性土に対して求められた実験式である。

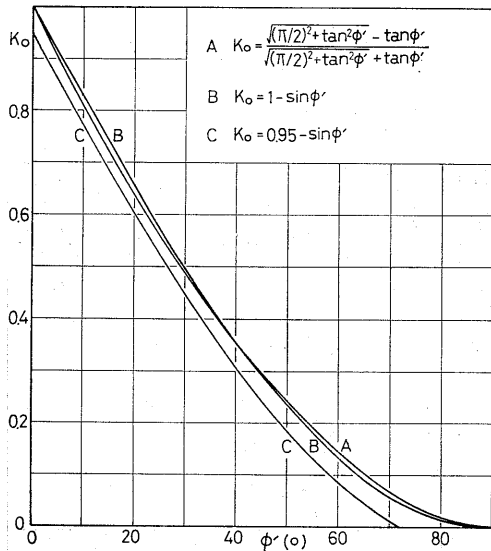


Fig. 1 Comparison of the equations of the coefficient of earth pressure at rest

Fig. 1 は、砂質土に対して実験結果とよく合うといわれている Jáký の(7)式、粘性土に対してよく合うといわれている Brooker らの(8)式、および著者の(11)式を示したものである。Jáký の式と著者の式は、内部摩擦角  $\phi'$  の全範囲 ( $0^\circ \leq \phi' \leq 90^\circ$ ) に対してほとんど一致することが知られる。なお、 $K_0 = f(\phi')$  の式のうち、Jáký および著者の式を除いた(8)、(9)、(10)式はいずれも  $\phi'$  がある値以上になると、 $K_0$  値が負になるという矛盾した結果を与える<sup>(6)</sup>

### 3. N 値と砂地盤の内部摩擦角 $\phi'$ の関係

土質調査の代表的方法として現場で広く用いられている標準貫入試験の N 値と砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の関係を調べた研究は数多くあるが、その関係を定量的に表示し、またわが国でよく用いられている式としては次のようなものがある。

$$\text{Dunham}^{(6)}; \phi' = \sqrt{12N} + \phi_0 \quad (15)$$

ただし、

$$\phi_0 = \begin{cases} 15^\circ : \text{粒度が一樣で丸い粒子} \\ 20^\circ : \text{粒度分布がよく丸い粒子} \\ \quad \text{粒度が一樣で角ばった粒子} \\ 25^\circ : \text{粒度分布のよい角ばった粒子} \end{cases}$$

$$\text{大崎}^{(4)}; \phi' = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad (16)$$

$$\text{日本道路協会}^{(8)}; \phi' = \sqrt{15N} + 15^\circ \quad (17)$$

これらの式はいずれも  $\phi' = f(N)$  の形で表示されており、N 値が決まれば、砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  は一義的に定まることになる。しかし、「N 値は深さによって異なった値を与える」<sup>(6)</sup>、すなわち、同一密度であっても深さが深くなるほど N 値は大きく表われてくるといわれており、このことは砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  を N 値のみの関数として表わせないことを示唆しているものと考えられる。本来、N 値とは地盤土の硬軟ないしは締まりぐあいの相対値を示す一つの指数であり、砂地盤の場合、この N 値から推定できるのは、そのせん断抵抗を表わす強度であって、強度定数の  $\phi'$  ではないと考えられる。したがって、砂の強度から強度定数の値を求めるためには、Coulomb の式からも知られるように考えている面上の有効垂直応力の値を指定する必要がある。それゆえ、N 値から砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の値を推定するためには、N 値を測定した深さ、したがって有効上載圧力  $p$  を考慮して、 $\phi' = f(N, p)$  の形で表示すべきであり、この形の方が N 値の特性をより適格に把握した考え方であり、また合理的である。

以上のような考え方にに基づき、N 値と砂地盤の相対密度  $D_r$  (%) および有効上載圧力  $p$  ( $\text{Kg/cm}^2$ ) との関係を表わす Schultz & Menzenbach<sup>(5)</sup> による(18)式と、砂の内部摩擦角  $\phi'$  (度) と相対密度  $D_r$  (%) の関係を表わす石堂<sup>(9)</sup>による(19)式を組み合わせることにより、N 値と有効上載圧力  $p$  の値から砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の値を算定する方法およびその関係図をさきに提案した<sup>(3),(4)</sup>。

$$\ln D_r = 0.478 \ln N - 0.262 \ln p + 2.84 \quad (18)$$

$$\phi' = 0.3D_r + 15^\circ \quad (19)$$

ところが、(18)式は式中に対数計算を含んでいるため、 $\phi' = f(N, p)$  の形の簡単な表示式にすることができず、また N と  $p$  の値から  $\phi'$  を求めるにしてもかなり面倒な計算を行わなくてはならず、実用的にはあまり好しくない。そこで、(18)式に代るものとして Meyerhof<sup>(6)</sup> による次の経験式を利用すれば、N 値と有効上載圧力  $p$  の値から砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  を求める簡単な式を得ることができる。

$$N = 1.7(D_r/100)^2(p+10), (p; \text{lb/in}^2) \quad (20. a)$$

$$= 2.4(D_r/100)^2(p+7), (p; \text{ton/m}^2) \quad (20. b)$$

なお、この(20)式は Schultz & Menzenbach による(18)式に比べて多少小さめな  $D_r$  値を与えるが、それほど大きな差はない。

(20. b) 式を(19)式に代入して整理すると、 $\phi'$ (度)、 $N$ ,  $p$ (ton/m<sup>2</sup>) の関係式として次式が得られる。

$$\phi' = 19.4 \sqrt{\frac{N}{p+7}} + 15^\circ \quad (21)$$

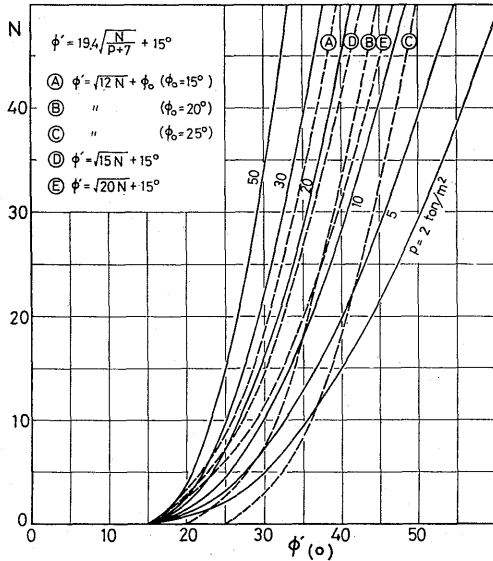


Fig. 2 Relation between N-value and internal friction angle,  $\phi'$ , of sandy soils

Fig. 2 は有効上載圧力  $p$  をパラメーターとした(21)式を示したものである。図中には、 $\phi' = f(N)$  に関する(15), (16), (17)式も示しているが、これらの式は(21)式において、 $p = 5 \sim 30 \text{ ton/m}^2$  の範囲内にほぼ含まれることが知られる。

ところで、 $N$  値と砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の関係式を実在のすべての砂地盤に適用するには問題がある<sup>(3)</sup>といわれており、それは事実であろうと考えられる。しかし、砂の内部摩擦角  $\phi'$  の値をセン断試験によって求めるにしても、乱さない試料のサンプリングは難しく、また乱した試料についても供試体の作成方法(供試体の初期構造の違いにより、砂のセン断強度は異なる<sup>(3)</sup>といわれている)などの問題があり、砂のセン断試験は必ずしも容易ではない。そこで、その測定が比較的容易な標準貫入試験の  $N$  値を利用して砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の値を推定するのは、実用的な一方法であると考えられる。(21)式は Fig. 2 に示すように、これまで提案されている  $N-\phi'$  関係式をほぼ包

含するような式であり、砂地盤の概略の内部摩擦角  $\phi'$  の値を推定するには有用であろう。

#### 4. N 値を用いた砂地盤の静止土圧の一計算法

2. で述べたように、砂の静止土圧係数  $K_0$  の算定式としては、有効応力による内部摩擦角  $\phi'$  を用いた  $K_0 = f(\phi')$  の形の式が実用的であり、Jáky の(7)式あるいは著者の(11)式が  $\phi'$  の全範囲にわたって矛盾のない結果を与える。一方、砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の値は  $N$  値および有効上載圧力  $p$  によって(21)式で求めることができる。それゆえ、これらの式を組み合わせると用いれば、 $N$  値と有効上載圧力  $p$ 、したがって、 $N$  値と単位体積重量  $\gamma_t$  の値のみによって砂地盤の静止土圧係数  $K_0$  の値を算定することができ、静止土圧も計算できる。

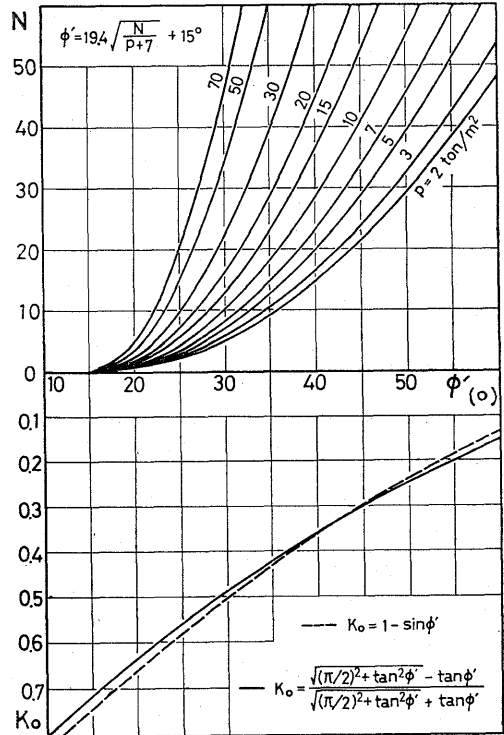


Fig. 3 Relation of N-value, internal friction angle,  $\phi'$ , and coefficient of earth pressure at rest,  $K_0$ , of sandy soils

Fig. 3 はその関係図を示すもので、この図を利用すれば、ある深さにおける  $N$  値から容易に  $K_0$  値を求めることができ、その利用価値は大である。

なお、静止土圧を計算する手順はさきの論文<sup>(3),(4)</sup>で述べたのと同じであるが、再録すれば次のとうりである。

(1)ある深さ  $z$  における有効上載圧力  $p$  を計算する。  
ただし、

$$p = \begin{cases} \gamma_t \cdot z & ; \text{地下水面より上の部分} \\ & (z < z_0) \\ \gamma_t \cdot z_0 + (\gamma_t - \gamma_w)(z - z_0) & ; \text{地下水面より下の部分} \\ & (z \geq z_0) \end{cases}$$

(2) $p$  と  $N$  値から内部摩擦角  $\phi'$  を求める (2)式あるいは Fig. 3)。

(3) $\phi'$  から静止土圧係数  $K_0$  を求める ((7)式あるいは

(1)式, あるいは Fig. 3)。

(4)静止土圧強度  $p_{0,z}$  を計算する。

ただし、

$$p_{0,z} = \begin{cases} K_0 \cdot p & ; \text{地下水面より上の部分} \\ & (z < z_0) \\ K_0 \cdot p + (z - z_0) \gamma_w & ; \text{地下水面より下の部分} \\ & (z \geq z_0) \end{cases}$$

ここに、 $\gamma_t$  = 土の単位体積重量、 $\gamma_w$  = 水の単位体積重量、 $z_0$  = 地下水面の深さである。

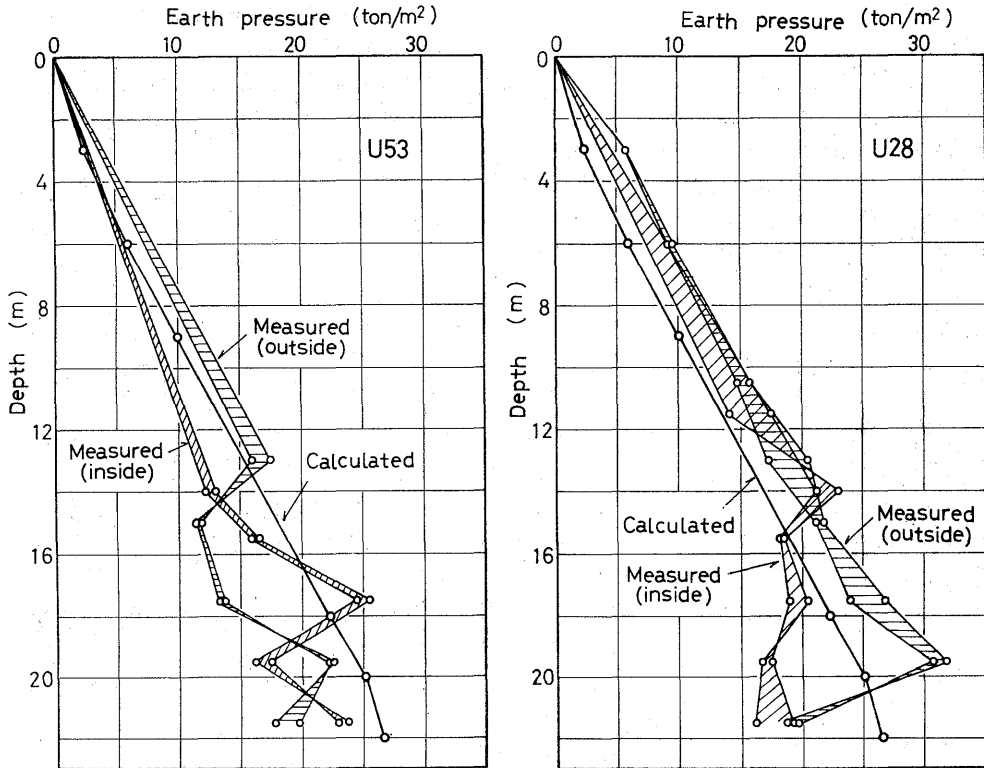


Fig. 4 Comparison of the calculated values with the measured values

Fig. 4 は、さきの論文<sup>(3),(4)</sup>で引用したのと同じ現場 (福岡市中央区, 西日本新聞会館新築工事, 鉄筋コンクリート製連続地下壁) における土圧測定値 (詳細については文献<sup>(3), (4)</sup>を参照のこと) と本文で提案している方法による計算値との比較である。計算値は測定値のはば平均的な値を示しており、本計算法は十分な精度で現場にも適用できることがわかる。

### 5. まとめ

標準貫入試験は、わが国でもっとも普及している原位置の地盤調査法であり、この試験によって得られる  $N$  値は基礎地盤関係の工事の設計・施工などに際し広

く利用されているが、必要以上に無批判に利用されすぎているという反省もある。また、この試験装置の機構、測定精度、適用土質の限界などいろいろの問題点も指摘されている。

本文では、 $N$  値に関していろいろの批判や問題点があることは認めたくうで、 $N$  値が十分な精度で測定されたものとして、これを用いた簡便な静止土圧の一計算法を提案し、現場の地下壁に対する土圧測定値との比較により、本提案法の現場への適用性を検証した。

主要な結論は次のとうりである。

(1) $N$  値と砂地盤の内部摩擦角  $\phi'$  の関係には、 $N$  値を測定した深さ、したがって有効上載圧力  $p$  を考慮

すべきであり、次式により  $\phi'$  の概略値を算定できる。

$$\phi' = 19.4 \sqrt{\frac{N}{p+7}} + 15^\circ \quad (2)$$

(2)  $N-\phi'$  関係の(2)式と、静止土圧係数  $K_0$  を内部摩擦角  $\phi'$  で表わした Jáky ((7)式) あるいは著者 ((11)式) の式を組み合わせることにより、N 値を用いた簡便な静止土圧の計算法とその関係図 (Fig. 3) を提示した。

最後に、日頃種々指導いただいている九州大学山内豊聡教授、ならびに本学伊勢田哲也教授に感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 石原研而, 李 相一 (1971) : 第16回土質工学シンポジウム発表論文集, p. 69-70.
- (2) Jáky, J. (1944) : Magyar Mérnök-és Építész-Egyet Közlönye, Budapest, No. 22, In Hungarian. (Kézdi, A. (1972) : Proc. 5th European Conf. SMFE, Vol. 2, p. 105-130. による)
- (3) 落合英俊 (1976) : 長崎大学工学部研究報告, 第7号, p. 63-71.
- (4) 落合英俊 (1977) : 土質工学会論文報告集, 第17巻, 第3号, p. 93-101.
- (5) Schultz, E. and Menzenbach, E. (1961) : Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, p. 527-532.
- (6) Meyerhof, G. G. (1957) : Proc. 4th Int. Conf. SMFE, Vol. 3, p. 110.
- (7) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968) : Engineering Plasticity, Cambridge University, p. 535-609.
- (8) Rowe, P. W. (1957) : Proc. 4th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, p. 189-192.
- (9) 山口柏樹 (1972) : 第27回土木学会年次講演会講演集, 第三部, p. 109-110.
- (10) 山内豊聡, 安原一哉 (1974) : 土質工学会論文報告集, 第14巻, 第2号, p. 113-118.
- (11) 落合英俊 (1976) : 土質工学会論文報告集, 第16巻, 第2号, p. 105-111.
- (12) Brooker, B. W. and Ireland, H. O. (1965) : Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, p. 1-15.
- (13) Alpan, I. (1967) : Soils and Foundations, Vol. 7, No. 1, p. 31-40.
- (14) Tschebotarioff, G. P. (1951) : Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, McGraw-Hill, p. 247-259.
- (15) 大崎順彦 (1971) : 基礎構造, コロナ社, p. 400-427.
- (16) Dunham, J. W. (1954) : Proc. ASCE, Vol. 80 No. SM1, p. 1-21.
- (17) 大崎順彦 (1959) : 東京地盤図, 技報堂.
- (18) 日本道路協会 (1977) : 道路土工一擁壁・カルバート・仮設構造物工指針, 日本道路協会.
- (19) 藤田圭一 (1968) : 土質調査試験結果の解釈と適用例, 土質工学会, p. 29-75.
- (20) 石堂稔 (1974) : 学位論文, 九州大学.
- (21) 竹中準之介 (1974) : 土と基礎, Vol. 22, No. 9, p. 85-90.
- (22) Oda, M. (1972) : Soils and Foundations, Vol. 12, No.1, p. 17-36.