

## 等価換算厚理論による多層地盤の沈下・応力・破壊・許容応力度に関する算定法

A METHOD TO CALCULATE SETTLEMENT, STRESS, FAILURE AND  
ALLOWABLE STRESS OF MULTI-LAYERED GROUND  
BY EQUIVALENT THICKNESS THEORY

平井弘義\*, 亀井健史\*\*

Hiroyoshi HIRAI and Takeshi KAMEI

The investigation was made to estimate the settlement, the stress, the failure and the allowable stress of the multi-layered ground. For the settlement and the vertical stress of the foundation, the generalization of Barber's method was proposed in order to incorporate the stiffness of soils into the behavior of the ground. The formulation presented was carried out by employing the equivalent thickness. It was found that the proposed model describes properly the characteristics of the distribution for the vertical stress in the multi-layered ground. An analytical method to represent the failure mode was propounded for the multi-layered ground in taking account of the equivalent thickness. The allowable stress of the multi-layered ground was presented in taking both failure mode and the equivalent thickness into consideration.

**Keywords:** Foundation, Multi-layered ground, Equivalent thickness, Settlement, Vertical stress, Failure, Allowable stress  
基礎, 多層地盤, 等価換算厚, 沈下, 鉛直応力, 破壊, 許容応力度

## 1. はじめに

国土交通省告示第1113号<sup>1)</sup>及び「建築物の構造関係技術基準解説書」等<sup>2)~4)</sup>によれば、建築物基礎の構造計算は、許容応力度法を採用しており、地盤の許容応力度の算定においては、まず許容応力度を求め、それによって生じる沈下量を計算し、許容沈下量以下であれば、その許容応力度が地盤の許容応力度として採用されることになる。このような考え方に沿って、サウンディング試験を用いた多層地盤の許容応力度の算定法に関する研究<sup>5)~7)</sup>が行われてきており、地盤の許容応力度と沈下量を算定するために、原地盤を砂質土と粘性土に分類し、また原地盤を多層地盤としてモデル化して検討された。そこでは、地盤の許容応力度に関して地下水面の影響および基礎底面の下部土質層の影響を考慮し、国土交通省告示第1113号で示された許容応力度の算定式を多層地盤へ一般的に拡張した形が提案された<sup>6), 7)</sup>。

多層地盤の即時沈下量に関して、著者ら<sup>8)</sup>は地盤の各層ごとの剛性の影響を適切に沈下量計算に組み込めるように、等価換算厚を二層地盤に適用したBarber<sup>9)</sup>の方法を多層地盤に一般化し、即時沈下量に関する近似計算式を提案した。そこでは、厳密計算値と比較し、従来用いられている指針式<sup>10)</sup>の問題点と提案式の有用性が明らかにされたが、鉛直方向の沈下分布については未解明であったので、今回、多層地盤の沈下分布特性に関して考察するものとする。

粘性土に関しては、過圧密、正規圧密、圧密未了として分類され

る地盤の圧密状態を考慮した圧密降伏応力の推定法<sup>9)</sup>が提案され、その各式を用いた圧密沈下量の算定法<sup>9)</sup>が提示されている。圧密沈下量の計算においては、まず載荷重による地盤内の鉛直応力を正確に算定することが必要である。従来の計算法<sup>9), 10)</sup>では、地盤を等方等質弾性体としてモデル化しており、この場合の鉛直応力分布を採用し、圧密計算式に代入することが多く行われてきているが、従来の計算法では多層地盤の鉛直応力分布に関する厳密解を適切に表現できないことが最近明らかになっている<sup>8)</sup>。

一方、地盤を多層地盤としてモデル化する場合は等方異質弾性体として仮定することが多く、層数が2~3の地盤においては鉛直応力の厳密解<sup>11)~14)</sup>が提示されている。しかしながら、二層以上になると、境界条件を満足させるためには解析が非常に複雑となり、厳密解は極めて少ないのが現状である。そこで、先に提示した変位算定法<sup>8)</sup>における等価換算厚による考え方を、多層地盤の鉛直応力解析に発展させた方法をここでは検討する。この手法は等価換算厚を用いた応力分散幅による近似解法であるが、多層弾性体における鉛直応力の厳密解を適切に表現しうる手法であるか否かを明らかにする。

次に、地盤の支持力を決定するためには、可能な破壊モードについて支持力値を調べ、その最小値を求めなければならない。例えば一層あるいは二層地盤に関する破壊モードと支持力の関係<sup>15)~20)</sup>は、既に研究されてきている。また、支持力問題における極限解析法<sup>21), 22)</sup>に関しては、上・下界法が適用され、Meyerhof解<sup>23), 24)</sup>は下界法、

\* 応地研 代表取締役・工博

\*\* 島根大学総合理工学部 助教授・工博

President, Applied Geotechnical Institute, Inc., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Department of Geoscience, Shimane University, Dr. Eng.

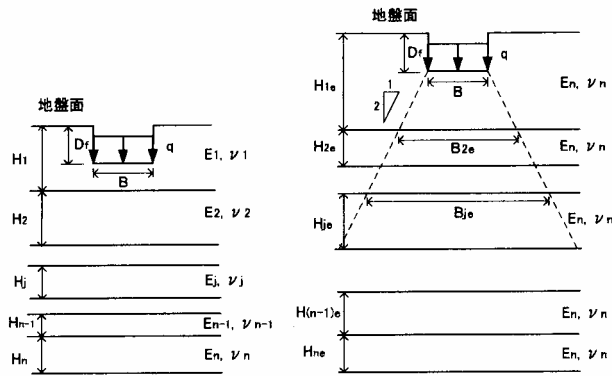


図-1 多層弾性体

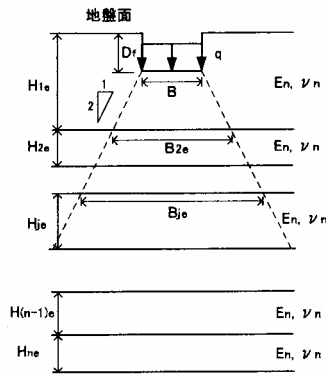


図-2 等価弾性体

円弧すべり法<sup>25)</sup>は上界法に相当する。また、粘性土地盤については上層と下層で強度が異なる場合について、円弧すべり法によって支持力が求められた<sup>26)</sup>。二層地盤に関してはせん断・分散破壊<sup>25)</sup>及び絞り出し破壊<sup>15), 27)</sup>の判別方法<sup>28)</sup>が提示されているが、多層地盤については詳細な検討はほとんどなされていない。そこで、等価換算厚<sup>8)</sup>を用いた応力分散幅による解析手法を用いて、多層地盤におけるせん断・分散破壊及び絞り出し破壊について、破壊モードと支持力係数の関係を明らかにする。また、多層地盤の許容応力度を計算するために、原地盤を砂質土と粘性土に分類し、地盤面から基礎底面までの深さ、地下水面、基礎底面の下部土質層及び応力分散幅に関するそれぞれの影響を考慮した許容応力度についても検討する。

## 2. 鉛直応力解析

### 2.1. 等価換算厚と沈下分布

Barber<sup>9)</sup>は二層地盤の表面変位を求めるための近似計算法を提案し、彼は二層弾性体の第一層を第二層と同じ弾性係数を持つ層で置き換えるのに、層の曲げ剛性を等しく保てばよいと考えた。

先に、著者ら<sup>8)</sup>はBarberによって提案された二層地盤に関する近似計算法を多層地盤に一般化した近似解析法を提案した。いま図-1の多層弾性体における第j層の弾性係数を $E_j$ 、ポアソン比を $\nu_j$ と書くことにすれば、層厚 $H_j$ を有する第j層の曲げ剛性 $D_j$ は次式のように定義される。

$$D_j = \frac{E_j H_j^3}{12(1-\nu_j^2)} \quad (1)$$

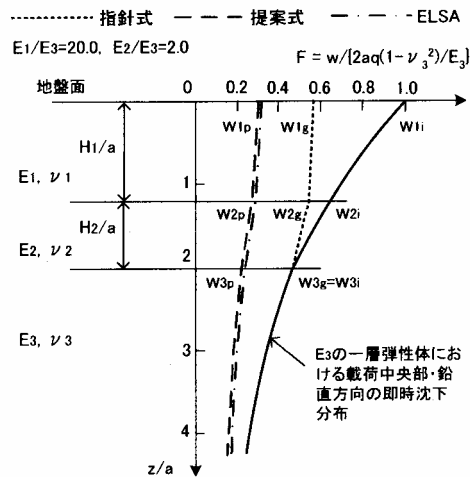
この場合、図-2に示すように第n層と同じ弾性係数を持つ層で第m層を置き換えるのに、層の曲げ剛性を等しく保つようにすれば、層厚は次式のように置き換えられる。

$$H_{1e} - D_f = \left\{ \frac{E_1(1-\nu_n^2)}{E_n(1-\nu_1^2)} \right\}^{1/3} (H_1 - D_f) \quad (2)$$

$$H_{me} = \left\{ \frac{E_m(1-\nu_n^2)}{E_n(1-\nu_m^2)} \right\}^{1/3} H_m \quad (m = 2 \sim n)$$

ここに、 $H_{me}$ ：等価換算厚、 $D_f$ ：地盤面から基礎底面までの深さ（以下、根入れ深さとよぶ）である。

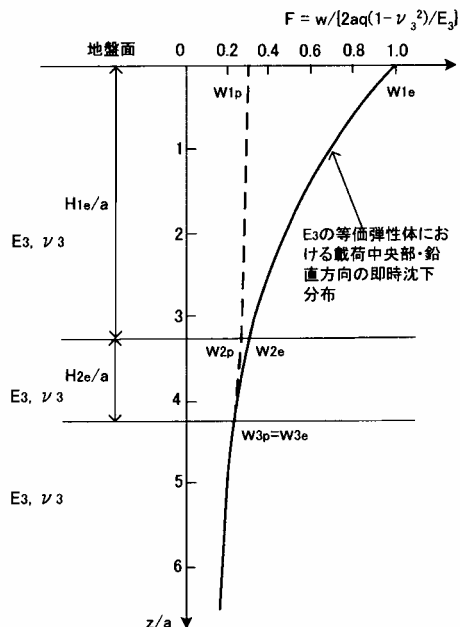
多層弾性体の即時沈下に関する近似式が著者ら<sup>8)</sup>によって提案され、三層弾性体の地盤面における即時沈下量について厳密解と提案



$$W1e = E3/E1(W1i - W2i) + E3/E2(W2i - W3i) + W3i$$

$$W2e = E3/E2(W2i - W3i) + W3i$$

図-3 地盤面において円形等分布鉛直荷重を受ける三層弾性体に関する載荷中央部・鉛直軸上の即時沈下



$$W1e = E3/E1(W1e - W2e) + E3/E2(W2e - W3e) + W3e$$

$$W2e = E3/E2(W2e - W3e) + W3e$$

図-4 等価弾性体における載荷中央部・鉛直軸上の即時沈下及び三層弾性体における即時沈下算定

式が比較され、提案式の有用性が明らかとなった。そこで本論文では、その提案式を用いて、三層弾性体について鉛直軸上の即時沈下を検討する。地盤面において半径aの円形基礎が円形等分布鉛直荷重qを受ける場合、図-3は三層弾性体に関する載荷中央部・鉛直軸上の即時沈下を示し、図-4は等価弾性体における載荷中央部・鉛直軸上の即時沈下及び三層弾性体における即時沈下算定に関する方法を表している。ここに、 $H_i = H_1 + H_2$ 、 $H_i/a = 2.0$ 、 $H_1/H_i = 0.6$ 、 $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 0.5$ 、 $E_1/E_3 = 20.0$ 、 $E_2/E_3 = 2.0$ である。図-3の中の指針式<sup>10)</sup>においては、 $E_3$ の一層弾性体における載荷中央部・鉛直軸上の沈下分布

を基準として、各層の弾性係数比を考慮して沈下分布が計算されている。一方、図—4 中の提案式においては、 $E_3$  の等価弾性体における荷重中央部・鉛直軸上の沈下分布を基準として、各層の弾性係数比を考慮して沈下分布が算定され、この結果を図—3 における三層地盤における沈下分布に関連付けている。図—3 に示される地盤面の変位係数  $F$  に関して、提案式及び多層弾性解析 (以下、ELSA と称する)<sup>29)</sup> による解は厳密解<sup>30), 31)</sup> をよく表現していることがわかる。

## 2.2. 鉛直応力

弾性係数  $E_n$ 、ポアソン比  $\nu_n$  の半無限弾性体では、荷重  $q$  を受ける長辺  $L$ 、短辺  $B$  の長方形基礎において中央部の直下で鉛直距離  $z$  における増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$ <sup>32), 33)</sup> は以下のように表される。

$$\Delta\sigma_v' = \Delta\sigma_v'(z) = \frac{2q}{\pi} \left[ \frac{mn}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \frac{1+m^2+2n^2}{(m^2+n^2)(1+n^2)} + \sin^{-1} \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{1+n^2}} \right] \quad (3)$$

ここに、 $m=L/B$ 、 $n=2z/B$  である。

また、荷重  $q$  を受ける半径  $a$  の円形基礎において中央部の直下で鉛直距離  $z$  における増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$ <sup>34), 35)</sup> は、次式のように表現できる。

$$\Delta\sigma_v' = \Delta\sigma_v'(z) = q \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{a^2}{z^2}\right)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

等価換算厚式(2)を式(3)あるいは(4)に代入すれば、図—2 の各層における増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$  は求められ、この値は図—1 における各層の増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$  となる。

図—2 に示す多層地盤に対する等価弾性体について、荷重が 1/2 の勾配<sup>16), 25)</sup> で伝播するものと仮定する。基礎底面下部の第  $j$  層上部での短辺及び長辺の応力分散幅  $B_{je}$  及び  $L_{je}$  について考えると、荷重  $q$  を受ける根入れ深さ  $D_j$ 、長辺  $L$ 、短辺  $B$  の長方形基礎においては、次式のように与えられる。

$$B_{1e} = B, \quad B_{je} = B - D_j + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke} \quad (j \neq 1) \quad (5)$$

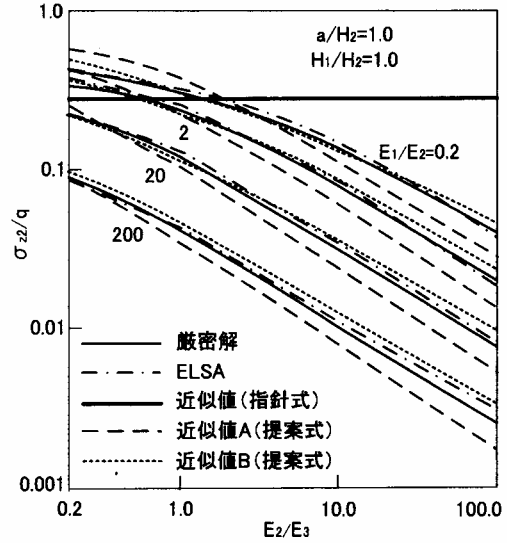
$$L_{1e} = L, \quad L_{je} = L - D_j + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke} \quad (j \neq 1)$$

それゆえ、力の釣り合い条件式より、基礎底面下部の第  $j$  層上部での増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$  は次式ようになる。

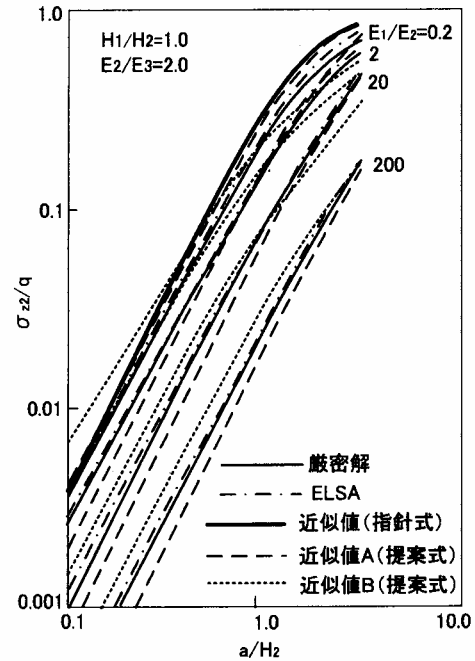
$$\Delta\sigma_v' = \left( \frac{B \cdot L}{B_{je} \cdot L_{je}} \right) q \quad (6)$$

等価換算厚の式(2)を用いた応力分散幅の式(5)を式(6)に代入すれば、図—2 の第  $j$  層上部における増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$  は求められ、この値は図—1 の第  $j$  層上部における増加鉛直応力  $\Delta\sigma_v'$  となる。

図—5 と図—6 は地盤表面で円形荷重を受ける三層地盤において、それぞれ弾性係数比  $E_2/E_3$  と鉛直応力比  $\sigma_{z2}/q$  との関係及び長さ比  $a/H_2$  と鉛直応力比  $\sigma_{z2}/q$  との関係について、厳密計算<sup>11)</sup>、指針式<sup>10)</sup>、ELSA による解<sup>29)</sup> 及び本提案式による近似計算のそれぞれの値

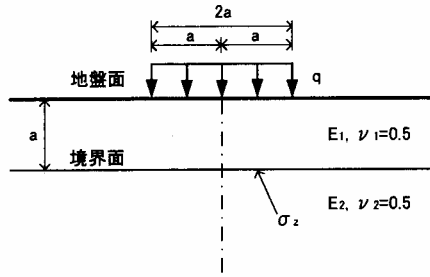


図—5 鉛直応力比  $\sigma_{z2}/q$  と  $E_2/E_3$ ,  $E_1/E_2$  の関係

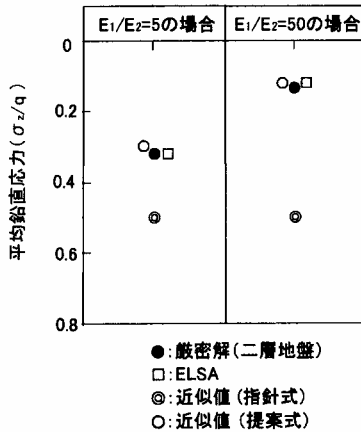


図—6 鉛直応力比  $\sigma_{z2}/q$  と  $E_1/E_2$ ,  $a/H_2$  の関係

を示している。ここに、 $\sigma_{z2}$  は第 2 層と第 3 層の境界における鉛直応力であり、 $a/H_2=1.0$ 、 $H_1/H_2=1.0$ 、 $\nu_1=\nu_2=\nu_3=0.5$  の場合について図—5 に示し、 $H_1/H_2=1.0$ 、 $E_2/E_3=2.0$ 、 $\nu_1=\nu_2=\nu_3=0.5$  の場合について図—6 に示している。指針式は、等方等質弾性体における厳密解<sup>36), 37)</sup> を近似値として用いているため、三層地盤の厳密解<sup>11)</sup> を表現しえない。近似値 A と B はそれぞれ式(4)と式(6)を用いた数値結果である。ELSA による解<sup>29)</sup> 及び本提案式による近似値 A と B は、各層の弾性係数比が異なるいずれの場合でも、全般的に厳密解を適切に表していることがわかる。また、図—7 は二層地盤において地盤面に作用する円形等分布鉛直荷重を示しており、図—8 は二層地盤の弾性係数比が異なる場合について、二層地盤の境界面において荷重中央部及び隅角部直下での平均鉛直応力の値を示している。図—8 の中の指針式<sup>10)</sup> は、等方等質



図一七 地盤面に作用する円形等分布鉛直荷重



図一八 荷重中央部及び隅角部直下の境界面における平均鉛直応力

弾性体における厳密解<sup>36), 37)</sup>を用いている。また厳密解(二層地盤)<sup>12) -14), 38)</sup>は等方異質弾性体における厳密解であり、 $E_1$ と $E_2$ が異なる場合の解である。指針式<sup>10)</sup>は等方等質弾性体における厳密解を近似値として用いているため、二層地盤の厳密解を表しえない。一方、ELSAによる解<sup>29)</sup>及び提案式(6)による近似値に関しては、 $E_1$ と $E_2$ の比が大きくなるに従い、鉛直応力比は小さくなり、二層地盤の厳密解を適切に表現していることがわかる。

### 3. せん断・分散破壊、絞り出し破壊及び支持力係数

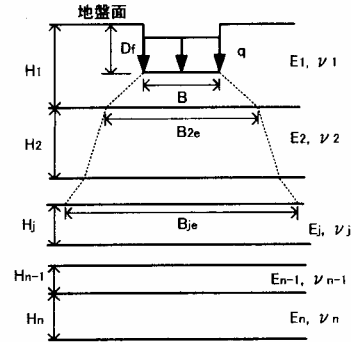
図一十は多層地盤の第j層における非排水せん断強さ $\zeta_j$ と支持力係数 $N_{cj}$ (以後、 $N_{cj}$ と記す)との関係を示している。ここにおいて、パラメーター $\lambda_j$ は図一九に示されるように、第j層における応力分散幅 $B_{je}$ と層厚 $H_j$ の比によって与えられ、また、パラメーター $\zeta_j$ は、第j+1層の $c_{j+1}^*$ と第j層が粘性土の場合の非排水せん断強さ $c_j$ との比を表している。ここに、 $c_{j+1}^*$ の表示式については、後述の表一において示されるが、第j+1層が粘性土の場合には非排水せん断強さ $c_{j+1}$ を表し、また、砂質土の場合では等価非排水せん断強さ $c_{j+1}^*$ を表している。本論文において、二層地盤に対するせん断・分散破壊<sup>25)</sup>の表示式を多層地盤へ一般的に拡張した提案式は以下のようなになる。

1)  $\zeta_j \leq 1.0$  に対して

$$N_{cj} = N_{cc}(1 + 1/\lambda_j)\zeta_j \quad (7)$$

ただし $N_{cj} \leq N_{cc}$ である。ここに、 $\zeta_j = c_{j+1}^*/c_j$ 、 $\lambda_j = B_{je}/H_j$ 、 $N_{cc} = \pi + 2 = 5.14$ であり、 $H'_1 = H_1 - D_f$ 、 $H'_j = H_j$  ( $j \neq 1$ )である。

また、二層地盤に対する絞り出し破壊において提案された Vesic<sup>28)</sup>



図一九 多層弾性体における等価換算厚を用いた応力分散幅

の解を多層地盤へ一般的に拡張した提案式は以下のようなになる。

2)  $\zeta_j > 1.0$  に対して

$$N_{cj} = (1 - \lambda_j/2)/\zeta_j + \lambda_j/2 + N_{cc} - 1 \quad (8)$$

ただし $\lambda_j \leq 2.0$ において $N_{cj} = N_{cc}$ である。

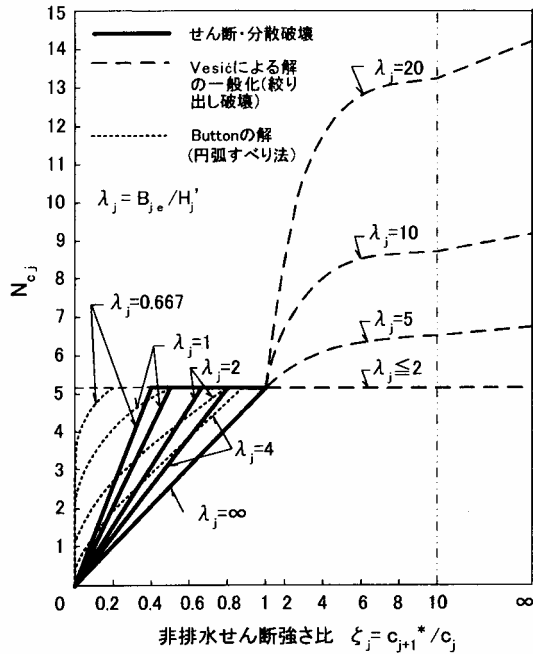
図一十では、パラメーター $\zeta_j \leq 1.0$ において、円弧すべり法によって得られた Button<sup>26)</sup>の解と本論文で提案されたせん断・分散破壊の解である式(7)が示されている。ここで、Buttonの解とせん断・分散破壊の解とを比較すると、 $\lambda_j \leq 1.0$ ではせん断・分散破壊の解は Buttonの解より小さな支持力係数 $N_{cj}$ を呈している。また、 $\lambda_j > 1.0$ かつ $0.5 \leq \zeta_j \leq 1.0$ の領域では、せん断・分散破壊の支持力係数 $N_{cj}$ は Buttonの解よりやや大きめの値をとる傾向が見られるが、パラメーター $\lambda_j$ に関して全般的にはせん断・分散破壊の支持力係数 $N_{cj}$ は Buttonの解より小さな値を有する傾向があることがわかる。よって、 $\zeta_j \leq 1.0$ の場合にはせん断・分散破壊として式(7)を採用する。

また、パラメーター $\zeta_j > 1.0$ においては破壊モードとして絞り出し破壊の発生が可能となり、Vesic<sup>28)</sup>によって支持力係数の解が提案された。円弧すべり法による Button<sup>26)</sup>の解と絞り出し破壊における Vesicの解を比較すると、Buttonの解は Vesicの解よりパラメーター $\lambda_j$ の全ての値に対して常に大きいので、Vesicの解が採用されることになり、図一十においては、Vesicによる解を一般化した提案式(8)が示されている。よって、 $\zeta_j > 1.0$ の場合には、絞り出し破壊として式(8)を採用する。

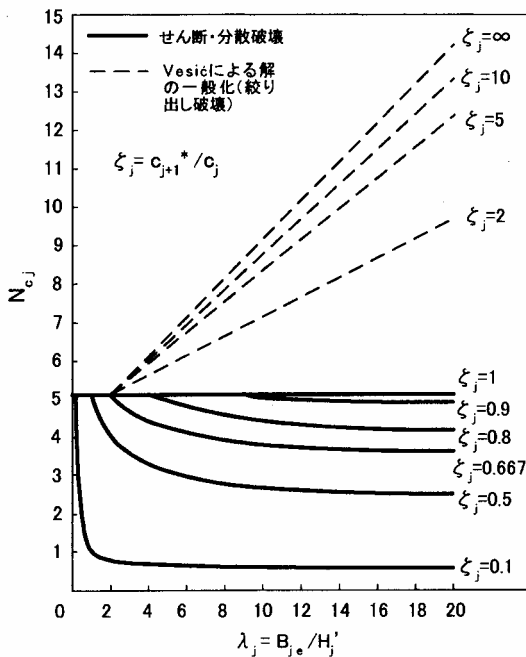
図一十一はパラメーター $\zeta_j$ に対するパラメーター $\lambda_j$ と支持力係数 $N_{cj}$ の関係を示している。 $\zeta_j \leq 1.0$ においてせん断・分散破壊の解は本論文で提案された式(7)であり、 $\zeta_j > 1.0$ においては絞り出し破壊における Vesicの解を一般化した提案式(8)が示されている。いま、多層地盤の第j層が粘性土である場合、非排水せん断強さ $c_j$ 、層厚 $H_j$ 及び等価換算厚を用いた応力分散幅 $B_{je}$ は求まり、それゆえ $\lambda_j$ は確定する。また、直下の第j+1層が粘性土であれば非排水せん断強さが判り、砂質土では等価非排水せん断強さが与えられるので $\zeta_j$ も確定する。それゆえ、図一十一を利用すれば、第j層の破壊モードとして、せん断・分散破壊或いは絞り出し破壊かを判別でき、そのときの支持力係数 $N_{cj}$ が求められることになる。

### 4. 多層地盤の許容応力度

地盤の支持力を推定するためには、境界条件を考慮した可能な破壊モードについて支持力を調べ、最小のものを探さなければならな



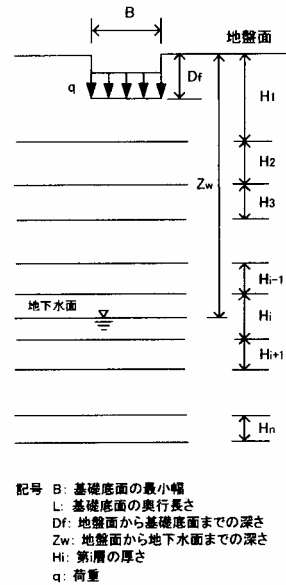
図一10 非排水せん断強さ比  $\xi_j$  と支持力係数  $N_{o,j}$  の関係



図一11 長さ比  $\lambda_j$  と支持力係数  $N_{o,j}$  の関係

い<sup>25)</sup>。また多層地盤の支持力を求めるための方法には、分割法<sup>39)</sup>と層別支持力法<sup>25), 40)</sup>がある。このうち層別支持力法は二次元的な連続基礎に対してだけでなく、正方形あるいは長方形基礎スラブなど有限な長さの基礎スラブに対しても利用できる。参考文献40)では、二層地盤に関する層別支持力法が示されており、本論文においては層別支持力法の多層地盤への適用性に関して検討する。

旧指針である1988年版建築基礎構造設計指針<sup>9)</sup>では許容応力度設計法に基づき、地盤の許容支持力度が示されていたが、2001年版新指針<sup>10)</sup>では限界状態設計法を採用し、極限鉛直支持力を定義している。また、建築基準法における地盤の許容応力度について告示<sup>1)</sup>が改正された。このような背景を踏まえ、本論文においては告示に沿



図一12 多層地盤における直接基礎

った方針で、地盤の許容応力度の算定法を提案する。

まず、根入れ深さ  $D_f$  を考慮する場合に関して検討する。多層地盤の支持力については、二層地盤<sup>16), 25)</sup>の場合と同様な仮定を用いることとすれば、図一12に示すように根入れ深さ  $D_f$  における基礎底面の荷重  $q$  が、図一9に示すような基礎底面下部の第  $j$  層上部における応力分散幅  $B_{j0}$  を有して下方に向かって広がるものとする。この分散した基礎底面の荷重、下部土質層の重量および下部土質層境界における極限支持力との力のつり合い式をつくると、下部土質層の影響を受けた場合における多層地盤の極限支持力度が求められる。長期許容応力度は、極限支持力度を安全率3で割ることによって与えられる。以後、本論文においては、長期許容応力度を簡略に許容応力度と称する。

そこで、許容応力度の算定における仮定として、根入れ深さ  $D_f$  は第1層の厚さ  $H_1$  以下であるものとする。また、図一12において示されるように地盤は  $n$  個の土質層から構成され、地下水面は第  $i$  層内にあるものとする。表一1においては多層地盤における許容応力度の算定式が示されており、地盤の許容応力度に用いられている材料パラメータに関しては文献1)を参照しており、算定式は、地盤面から地下水面までの深さ  $Z_w$  (以下、地下水面深さとよぶ) と根入れ深さ  $D_f$  との位置関係により区分され、砂質土では粘着力  $c = 0$ 、粘性土では内部摩擦角  $\phi = 0$  を仮定している。

よって、 $Z_w > D_f$  の場合においては表一1に示される (a), (b), (c), (d) のうち、いずれか最小の値が多層地盤の許容応力度となる。

次に、図一12において地下水面深さ  $Z_w$  が根入れ深さ  $D_f$  以下である場合、許容応力度は表一1に示されている。よって、 $Z_w \leq D_f$  の場合における (a), (b) のうち、いずれか最小の値が多層地盤の許容応力度となる。

以上示された許容応力度は、根入れ深さ  $D_f$  を考慮したものであるが、一方、 $D_f$  の効果を考慮しない場合の許容応力度についても、上記と類似な許容応力度の算定式が得られる。 $D_f$  を考慮しない多層地盤の許容応力度については、図一12に示す根入れ深さ  $D_f$  に相当する土被り部分が除荷された状態において考察することになる。図一9

表—1 多層地盤の許容応力度

D <sub>f</sub> を考慮する場合				
区分	分類	内容	砂質土	粘性土
Z <sub>w</sub> >D <sub>f</sub>	(a)	下部土質層の影響がない場合	$q_{as1} = \frac{1}{3}(\beta\gamma_1 BN_{\gamma 1} + \gamma_1 D_f N_{q1})$	$q_{ac1} = \frac{1}{3}\{\alpha c_1 N_{c1} + \gamma_1 D_f N_{qc}\}$
	(b)	下部第 j 層(2 ≤ j ≤ i)の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta\gamma_j B_{je} N_{\gamma j} + \{\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k\} (N_{qj} - 1) + \gamma_1 D_f]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \{\alpha c_j N_{cj} + \gamma_1 D_f\}$
	(c)	第 i 層にある地下水面の影響を受けた場合	$q_{asw} = \frac{1}{3} \frac{B_{we}}{B} \frac{L_{we}}{L} [\beta\gamma_i B_{we} N_{\gamma i} + \{\sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k + \gamma_i (Z_w - \sum_{k=1}^{i-1} H_k)\} (N_{qi} - 1) + \gamma_1 D_f]$	$q_{acw} = \frac{1}{3} \frac{B_{we}}{B} \frac{L_{we}}{L} \{\alpha c_i N_{ci} + \gamma_1 D_f\}$
	(d)	地下水面の下部第 j 層(i < j ≤ n)の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta\gamma_j B_{je} N_{\gamma j} + \{\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k - \gamma_w (\sum_{k=1}^{j-1} H_k - Z_w)\} (N_{qj} - 1) + \gamma_1 D_f]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \{\alpha c_j N_{cj} + \gamma_1 D_f\}$
Z <sub>w</sub> ≤ D <sub>f</sub>	(a)	下部土質層の影響がない場合	$q_{as1} = \frac{1}{3} [\beta\gamma_1 BN_{\gamma 1} + \{\gamma_1 D_f - \gamma_w (D_f - Z_w)\} (N_{q1} - 1) + \gamma_1 D_f]$	$q_{ac1} = \frac{1}{3} \{\alpha c_1 N_{c1} + \gamma_1 D_f\}$
	(b)	地下水面の下部第 j 層(2 ≤ j ≤ n)の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta\gamma_j B_{je} N_{\gamma j} + \{\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k - \gamma_w (\sum_{k=1}^{j-1} H_k - Z_w)\} (N_{qj} - 1) + \gamma_1 D_f]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \{\alpha c_j N_{cj} + \gamma_1 D_f\}$
D <sub>f</sub> を考慮しない場合				
区分	分類	内容	砂質土	粘性土
Z <sub>w</sub> >D <sub>f</sub>	(a)	下部土質層の影響がない場合	$q_{as1} = \frac{1}{3} \beta\gamma_1 BN_{\gamma 1}$	$q_{ac1} = \frac{1}{3} \alpha c_1 N_{c1}$
	(b)	下部第 j 層(2 ≤ j ≤ i)の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta\gamma_j B_{je} N_{\gamma j} + \{\sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f\} (N_{qj} - 1)]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \alpha c_j N_{cj}$
	(c)	第 i 層にある地下水面の影響を受けた場合	$q_{asw} = \frac{1}{3} \frac{B_{we}}{B} \frac{L_{we}}{L} [\beta\gamma_i B_{we} N_{\gamma i} + \{\sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f + \gamma_i (Z_w - \sum_{k=1}^{i-1} H_k)\} (N_{qi} - 1)]$	$q_{acw} = \frac{1}{3} \frac{B_{we}}{B} \frac{L_{we}}{L} \alpha c_i N_{ci}$

	(d)	地下水面の下部第j層( $i < j \leq n$ )の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta \gamma_j' B_{je} N_y + \{ \sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f - \gamma_w (\sum_{k=1}^{j-1} H_k - Z_w) \} (N_{qj} - 1)]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \alpha c_j N_{cj}$
$Z_w \leq D_f$	(a)	下部土質層の影響がない場合	$q_{as1} = \frac{1}{3} \beta \gamma_1' B N_{\gamma 1}$	$q_{ac1} = \frac{1}{3} \alpha c_1 N_{c1}$
	(b)	地下水面の下部第j層( $2 \leq j \leq n$ )の影響を受けた場合	$q_{asj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} [\beta \gamma_j' B_{je} N_y + \{ \sum_{k=1}^{j-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f - \gamma_w (\sum_{k=1}^{j-1} H_k - D_f) \} (N_{qj} - 1)]$	$q_{acj} = \frac{1}{3} \frac{B_{je}}{B} \frac{L_{je}}{L} \alpha c_j N_{cj}$

上式において、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：形状係数、 $\gamma_j$ 、 $\gamma_j'$ ：それぞれ第j層の単位体積重量及び水中単位体積重量、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、 $N_{qj}$ 、 $N_{\gamma j}$ 、 $N_{cj}$ ：第j層の支持力係数、 $N_{qc} = 1.0$ 、 $c_j$ ：第j層が粘性土の場合の非排水せん断強さ、 $c_{j+1}^*$ ：第j+1層が粘性土の場合、非排水せん断強さ $c_{j+1}$ を示し、砂質土の場合は下記で定義される等価非排水せん断強さを表し、砂質土を強度に関して非排水せん断強さ $c_{j+1}^*$ を有する粘性土として仮定する。

$$B_{je} = B - D_f + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke}, \quad L_{je} = L - D_f + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke}, \quad B_{we} = B - D_f + Z_{we}, \quad L_{we} = L - D_f + Z_{we}$$

$$Z_{we} = \sum_{k=1}^{i-1} H_{ke} + (Z_w - \sum_{k=1}^{i-1} H_k) \left\{ \frac{E_i(1-\nu_i^2)}{E_n(1-\nu_n^2)} \right\}^{1/3}$$

#### I. $D_f$ を考慮する場合

(a)  $j+1 \leq i-1$  の場合 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_{j+1}' B_{(j+1)e} N_{\gamma(j+1)} + \{ \sum_{k=1}^j \gamma_k H_k \} (N_{q(j+1)} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

(b)  $j+1 = i$  の場合 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_i' B_{ie} N_{\gamma i} + \{ \sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k \} (N_{qi} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

あるいは 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_i' B_{we} N_{\gamma i} + \{ \sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k + \gamma_i (Z_w - \sum_{k=1}^{i-1} H_k) \} (N_{qi} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

の内、小さい値の方を用いる。

(c)  $j+1 \geq i+1$  の場合 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_{j+1}' B_{(j+1)e} N_{\gamma(j+1)} + \{ \sum_{k=1}^j \gamma_k H_k - \gamma_w (\sum_{k=1}^j H_k - Z_w) \} (N_{q(j+1)} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

#### II. $D_f$ を考慮しない場合

(a)  $j+1 \leq i-1$  の場合 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_{j+1}' B_{(j+1)e} N_{\gamma(j+1)} + \{ \sum_{k=1}^j \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f \} (N_{q(j+1)} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

(b)  $j+1 = i$  の場合 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_i' B_{ie} N_{\gamma i} + \{ \sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f \} (N_{qi} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

あるいは 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_i' B_{we} N_{\gamma i} + \{ \sum_{k=1}^{i-1} \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f + \gamma_i (Z_w - \sum_{k=1}^{i-1} H_k) \} (N_{qi} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

の内、小さい値の方を用いる。

#### (c) $j+1 \geq i+1$ の場合

$Z_w > D_f$  のとき 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_{j+1}' B_{(j+1)e} N_{\gamma(j+1)} + \{ \sum_{k=1}^j \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f - \gamma_w (\sum_{k=1}^j H_k - Z_w) \} (N_{q(j+1)} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

$Z_w \leq D_f$  のとき 
$$c_{j+1}^* = [\beta \gamma_{j+1}' B_{(j+1)e} N_{\gamma(j+1)} + \{ \sum_{k=1}^j \gamma_k H_k - \gamma_1 D_f - \gamma_w (\sum_{k=1}^j H_k - D_f) \} (N_{q(j+1)} - 1)] / (\alpha N_{cc})$$

に示すように基礎底面の荷重  $q$  が、基礎底面下部の第  $j$  層上部における応力分散幅  $B_e$  を有して下方に向かって広がるものとする。この分散した基礎底面の荷重、下部土質層の重量および下部土質層境界における極限支持力との力のつり合い式をつくると、 $D_f$  を考慮しない場合における下部土質層の影響を受けた場合の多層地盤の許容応力度が求められる。ゆえに、表—1において  $D_f$  を考慮しない場合で  $Z_w > D_f$  の場合における (a), (b), (c), (d) のうち、いずれか最小の値が多層地盤の許容応力度となる。次に、図—12において地下水面深さ  $Z_w$  が根入れ深さ  $D_f$  以下である場合は、表—1において  $D_f$  を考慮しない場合で  $Z_w \leq D_f$  の場合における (a), (b) のうち、いずれか最小の値が多層地盤の許容応力度となる。

## 5. ま と め

地盤の沈下分布、応力、破壊モード及び許容応力度を算定するために、原地盤を砂質土と粘性土に分類し、また原地盤を多層地盤としてモデル化を行い、次のような成果が得られた。

- 1) 等価換算厚を用いた算定法により、多層地盤における即時沈下分布を明らかにし、また応力分散幅による解析手法を多層地盤に適用することにより、弾性鉛直応力の計算法とせん断・分散破壊に関する支持力係数  $N_c$  の形式を提案した。
- 2) 等価換算厚を用いた応力分散幅による解析手法を用いて、Vesicによって提示された二層地盤における粘性土の絞り出し破壊の支持力係数式を多層地盤において一般化し、多層地盤における粘性土の絞り出し破壊に関する支持力係数  $N_c$  の形式を提示した。
- 3) 粘性土の破壊モードに対する砂質土の強度特性の影響を考慮するため、砂質土の等価非排水せん断強さを用いて、多層地盤における砂質土の影響を受けた粘性土のせん断・分散破壊と絞り出し破壊に関するそれぞれの支持力係数  $N_c$  の算定式を提案した。
- 4) 等価換算厚を用いた応力分散幅による解析手法を用いて、せん断・分散破壊及び絞り出し破壊を判別する方法とそれぞれに関する多層地盤の第  $j$  層の支持力係数  $N_c$  を算定する方法を提案した。
- 5) 多層地盤の許容応力度を計算するために、原地盤を砂質土と粘性土に分類し、また根入れ深さ、地下水面、基礎底面の下部土質層及び応力分散幅の影響を考慮し、せん断・分散破壊及び絞り出し破壊のそれぞれから求める許容応力度の内、最小のものを多層地盤の許容応力度として算定する方法を提示した。

## 参 考 文 献

- 1) 国土交通省告示第1113号：官報，号外第136号，pp.4-5, 2001.
- 2) 2001年版建築物の構造関係技術基準解説書：国土交通省住宅局建築指導課他，工学図書（株），pp.53-63, 2001.
- 3) 日本建築センター：改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法，2002.
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針(第1版)，pp.117-358, 1988.
- 5) 平井弘義・亀井健史：粘性土の圧密降伏応力の推定法に関する一提案，土と基礎，地盤工学会，Vol.50, No.5, Ser.No.532, pp.11-13, 2002.
- 6) 平井弘義・亀井健史：サウンディング試験を用いた地盤の許容応力度の算定法に関する一提案，日本建築学会構造系論文集，第557号，pp.113-120, 2002年7月.
- 7) 平井弘義・亀井健史：多層地盤の許容応力度と沈下量の算定法に関する一提案，第47回地盤工学シンポジウム，平成14年度論文集，地盤工学会，pp.61-68, 2002.
- 8) 平井弘義・亀井健史：多層地盤の沈下・応力・許容応力度に関する算定法，

- 日本建築学会構造系論文集，第573号，pp.81-88, 2003年11月.
- 9) Palmer, L. A. and Barber, E. S.: Soil Displacement under a Circular Loaded Area, Proc. Highway Res. Board, Vol.20, pp.279-286, 1940.
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針(第2版)，pp.105-456, 2001.
- 11) Jones, A.: Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems, Highway Res. Board Bulletin 342, pp.176-214, 1962.
- 12) Burmister, D.M.: The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways, Proc. HRB, Vol.23, pp.126-148, 1943.
- 13) Burmister, D.M.: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems, J. Appl. Physics, Vol.16, No.2,3,5, 1945.
- 14) Burmister, D.M.: Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods, Highway Res. Board Bulletin 177, pp.26-54, 1958.
- 15) Meyerhof, G.G. and Chaplin, T.K.: The Compressions and Bearing Capacity of Cohesive Layers, British Jour. of App. Physics, Vol.4, No.1, pp.20-26, 1953.
- 16) Yamaguchi, H.: Practical Formula of the Bearing Value for Two Layered Ground, Proc. 2nd Asian Regional Conf. SMFE, Vol. 1, pp.176-180, 1963.
- 17) Nadai, A.: Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol.2, McGraw-Hill, 1963.
- 18) Schofield, A. and Wroth, P.: Critical State Soil Mechanics, Mc-Graw Hill, pp.247-268, 1968.
- 19) Meyerhof, G.G.: Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Sand Overlying Soft Clay, Canadian Geotech. Jour., No.2, 1980.
- 20) 加倉井正昭：浅い基礎の支持力と変形に関する理論とその適用，3. 浅い基礎の支持力と変形解析の手法，土と基礎，Vol.30, No.9, pp.63-69, 1982.
- 21) Meyerhof, G.G.: Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay, Canadian Geotech. Jour., Vol.11, No.2, pp.223-229, 1974.
- 22) 柴田徹・関口秀雄：地盤の支持力，鹿島出版会，pp.59-66, 1995.
- 23) Meyerhof, G.G.: The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Zurich, Vol.1, pp.440-445, 1953.
- 24) 関口秀雄・小林俊一：粘土地盤上の沿岸構造物の支持特性に関する塑性解析，第39回土質工学シンポジウム論文集，土質工学会，pp.195-202, 1994.
- 25) 山口柏樹：土質力学（第3版），技報堂出版，pp.94-276, 1984.
- 26) Button, S.J.: The Bearing Capacity of Footing on a Two-Layer Cohesive Subsoil, Proc. 3rd ICSMFE, Vol.1, pp.332-335, 1953.
- 27) 山口柏樹：浅い基礎の支持力と変形に関する理論とその適用，1. はじめに，土と基礎，Vol.30, No.7, pp.85-91, 1982.
- 28) Vesic, A.S.: Bearing Capacity of Shallow Foundations, Foundation Engineering Handbook, pp.139-140, 1975.
- 29) 姫野賢治：多層弾性解析プログラム，Elastic Layer System Analysis, 1998.
- 30) 植下協・G.G. マイヤホフ：多層地盤における弾性変位について，土木学会論文集，No.144, pp.20-26, 1967.
- 31) Ueshita, K. and Meyerhof, G. G.: Deflection of Multilayer Soil Systems, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, No.SM5, pp.257-282, 1967.
- 32) Steinbrenner, W.: Tafeln zur Setzungsberechnung, Die Straße, Vol.1, 1934.
- 33) Steinbrenner, W.: Bodenmechanik und nezeitlicher Straßenbau, Symposium by 24 authors, Volk und Reich Verlag, Berlin, 1936.
- 34) Love, A. E. H.: The Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on part of Boundary, Phil. Trans. Roy. Soc., London, Series A., Vol.228, 1929.
- 35) Harr, M. E.: Foundations of Theoretical Soil Mechanics, McGraw-Hill, 1966.
- 36) Newmark, N.M.: Chart for Computing Vertical Pressures Beneath a Surface Loading, Univ. of Illinois, June, 1937.
- 37) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, p.510, 1943.
- 38) Fox, L.: Computation of Traffic Stresses in a Simple Road Structure, Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.236-246, 1948.
- 39) 今泉繁良・山口柏樹：分割法による地盤の支持力計算法，土質工学会論文報告集，Vol.26, No.2, pp.143-150, 1986.
- 40) 大崎順彦：建築基礎構造，技報堂出版，pp.324-327, 1991.

(2003年10月3日原稿受理，2004年4月5日採用決定)