

フェーシングを設置した等応力平板載荷試験地盤変位式の修正誘導とその適用

Revised Displacement Equations for Rock Mass Under Flexible Plate Loading Test Using Concrete Facing and their Applicability .

高島康夫

Yasuo TAKASHIMA

正会員 技術士 サン測量設計株式会社 (〒093 網走市桂町 5-4-1)

連絡先 自宅 (〒235-0021 横浜市磯子区岡村 7-28-3)

Equations of vertical and horizontal displacements in a half space rock foundation caused by a flexible plate loading test using concrete facing which restricts free horizontal displacements of the underlying rock surface, are developed. An optimal point of measurements for displacements in order to obtain Young's modulus and Poisson's ratio of the intact rock foundation is also discussed.

Key Words: Flexible plate loading test, Horizontal displacement restriction, Effect of concrete facing .

1. はじめに

現行の平板載荷試験には、定変位載荷試験と等応力載荷試験の2種がある。たとえば ASTM では標準試験法として前者については Designation:D4394¹⁾を、後者については Designation:D4395²⁾を定めている。しかして両 Designation とも、載荷面平滑化のために載荷板と地盤面との間に、コンクリート等を現地で打設して設置したフェーシングを標準セットアップとして図示している。一方この国の例としては JIGS1521³⁾があるが、主として定変位載荷試験について規定し等応力載荷試験については単に“ダイヤフラム加圧板を用いてもよい。”との条項があるのみである。これはこの国における平板載荷試験の現状が、定変位載荷試験を主流としていることによるものと考えられる。載荷板の設置に関しては“載荷板は整形した試験地盤面に、水平で一様に密着するように設置する。”と規定しているが、とくに硬岩の場合は載荷板が一様に密着するように岩盤表面を仕上げる現地作業は容易でない。こ

のため現実にはある程度仕上げた岩盤表面にフェーシングを打設することになる。従ってこの国における平板載荷試験も、コンクリート、モルタル、または特殊剤混合の石膏等を用いたフェーシングを設置するケースが殆どである。しかしながら、これらのフェーシングの設置は本来の試験目的に必ずしも沿っていない。その理由は下記のとおりである：

その第一は、試験対象岩盤と同一の力学的性状をもつフェーシングの設置は不可能であるところにある。この結果載荷試験はフェーシングと岩盤との2層構造の試験体に載荷していることになる。即ちもし等応力載荷試験において設置したフェーシングの剛性が試験対象軟岩の剛性より高ければ（軟岩の場合はこのケースが殆どであろう）、岩盤に対する試験としては等応力試験から定変位試験に片寄ったものとなる。これに対して定変位載荷試験におけるフェーシングの剛性が試験対象硬岩のそれより低ければ（硬岩の場合このケースは十分起こり得る）、岩盤に対する試験は当初意図した定変位試験より等応力試験に近づいてくる。

次に平板載荷試験の目的の一つとして試験対象岩盤の力学的物性値の特定がある。このため平板載荷試験によって得られた岩盤の垂直および水平変位測定値と、岩盤の力学的物性値を結ぶ理論式が必要であり、定変位載荷および等応力載荷のそれぞれについて下記条件下において成立する変位式が存在する。(ただし本節のはじめに記した諸規定は垂直変位式のみで水平変位式については規定していない) 即ち岩盤は垂直荷重のみを受けてもそのもつヤング率およびポアソン比の値に応じて、垂直下方に変位すると同時に水平方向にも変位する。これは上記変位式が水平変位の同時発生を当然の成立条件としていること、換言すれば水平変位の発生は拘束されていないとの条件下で誘導された式であることを意味する(なお2節末部の理由説明参照)しかるに前記フェーシングは摩擦抵抗や岩盤面の小凹凸に食い込んで固化しているためと、フェーシング自体の剛性のために岩盤面の水平変位の発生は拘束される。このため水平変位のみならず垂直変位もフェーシングがない場合とは異なった値となる。したがってフェーシングが設置された平板載荷試験において得られる岩盤の変位測定値は変位式が想定していない状態についての変位値であり、この変位値を上記変位式に用いて得られる岩盤の力学的物性値は必然的に誤差を含んだ値となる。これが第二の理由である。

以上はフェーシングの設置を疑問とする一般論である。しかしながらもフェーシングの設置による影響が軽微で(具体的にはフェーシングの設置の有無による岩盤変位の差、またはこれらの測定値から求められる岩盤の物性値の差が僅少で)、実際上無視できる程度のものであるならば、フェーシングの設置を否定するには当たらない。

本研究は等応力平板載荷試験を例にとり、フェーシングの設置、非設置の各場合について生ずる岩盤変位を解析し、フェーシング設置によってもたらされる変位の差、とくに岩盤物性値の推定誤差が具体的にどの呈度のものであるかをみ、併せてフェーシングが設置

されている場合の最適変位測定点位置の選択、岩盤物性値の特定その他事項について検討したものである。

以下岩盤面の水平変位の発生が自由である(smooth contact) 載荷状態を柔載荷、水平変位の発生が拘束されている(rough contact) 載荷状態を剛載荷と呼ぶこととする。また全文を通じて岩盤のヤング率 E 、ポアソン比 ν 、荷重合計 P 、荷重円の半径 a 、水平変位 u 、垂直変位 w で表わす。座標系としては垂直下向きを z の正方向とする右手系の円筒座標 r, θ, z を用いるが、深さ及び半径方向の長さはそれぞれの実長を荷重円半径で除して基準化した値を z および r とする。また変位は座標軸の正方向に向かうものを正とする。即ち垂直変位は下方に向かう変位、水平変位は原点から遠ざかる方向に向かう変位をそれぞれ正とする。

2. 等応力柔載荷による岩盤内部の変位

この場合の変位は円形等分布柔載荷による岩盤変位式として、Poulos and Davis⁴⁾、Gerrard and Harrison⁵⁾ および 高島⁶⁾によって与えられている。これらの内 Poulos ら、および Gerrard らの式を構成する多重特殊関数の数値表には一部(少なくとも3箇所)誤りが認められるので、以下本研究においては高島の式を使用する。(ただし上記数値表の誤りを修正後の数値例計算結果は上記3式すべて一致することを別途確認済みである)。

従って本論において使用する変位式に若干のコメントを付して列挙すれば次記のとおりとなる。なおこれらの式の誘導根拠については文献⁶⁾を参照されたい。

2.1 岩盤内部の変位 ($r>0, z>0$)

円形等分布荷重によって岩盤内部の点 (r, z) に生ずる水平変位を u_v 、垂直変位を w_v とすれば u_v, w_v は次式で与えられる。(添え字 v は垂直荷重による変位であることを示す。) 図-1 参照。

(1) 荷重円内 ($r \leq 1, z > 0$)

$$u_v = \frac{-(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[(s_m - s_n) + \frac{z}{1-2\nu} \cdot \left(\frac{s_m}{R_m} - \frac{s_n}{R_n} \right) + \frac{2 \cdot (1-\nu) \cdot z}{1-2\nu} \cdot \ln \left(\frac{s_n + R_n}{s_m + R_m} \right) \right] \cdot \cos(\psi) d\psi \quad (1)$$

$$w_v = \frac{(1+\nu) \cdot P}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[2 \cdot (1-\nu) \cdot (R_m + R_n) - z^2 \cdot \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_n} \right) - (2-4\nu) \cdot z \right] d\psi \quad (2)$$

$$s_m = r \cdot \cos(\psi) + \sqrt{1 - r^2 \cdot \sin(\psi)^2} \quad s_n = -r \cdot \cos(\psi) + \sqrt{1 - r^2 \cdot \sin(\psi)^2} \quad (3)$$

$$(R_m)^2 = (s_m)^2 + z^2 \quad (R_n)^2 = (s_n)^2 + z^2 \quad (4)$$

(2) 荷重円外 ($r > 1, z > 0$)

$$u_v = \frac{-(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot \int_0^{\arcsin\left(\frac{1}{r}\right)} \left[s_m - s_n + \frac{z}{1-2\nu} \cdot \left(\frac{s_m}{R_m} - \frac{s_n}{R_n} \right) - \frac{2 \cdot (1-\nu)}{1-2\nu} \cdot \ln \left(\frac{s_m + R_m}{s_n + R_n} \right) \right] \cdot \cos(\psi) d\psi \quad (5)$$

$$w_v = \frac{(1+\nu) \cdot P}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot \int_0^{\arcsin\left(\frac{1}{r}\right)} \left[2 \cdot (1-\nu) \cdot (R_m - R_n) - z^2 \cdot \left(\frac{1}{R_m} - \frac{1}{R_n} \right) \right] d\psi \quad (6)$$

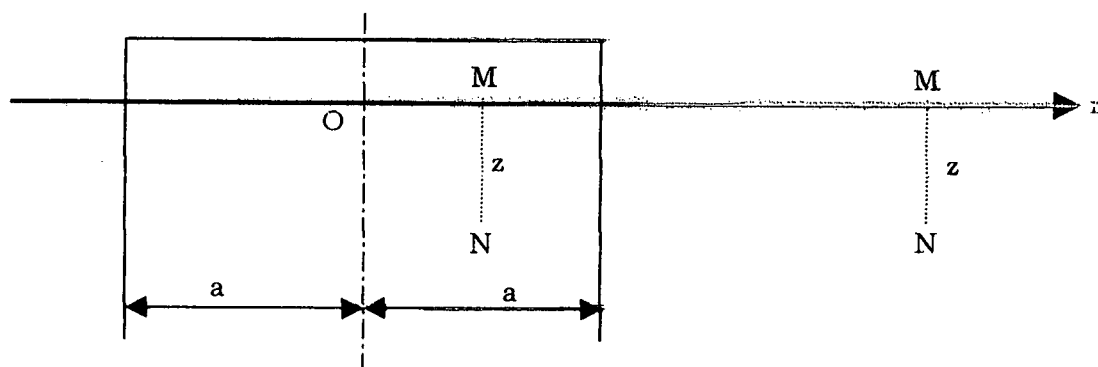
$$s_m = r \cdot \cos(\psi) + \sqrt{1 - r^2 \cdot \sin(\psi)^2} \quad s_n = r \cdot \cos(\psi) - \sqrt{1 - r^2 \cdot \sin(\psi)^2} \quad (7)$$

$$(R_m)^2 = (s_m)^2 + z^2 \quad (R_n)^2 = (s_n)^2 + z^2 \quad (8)$$

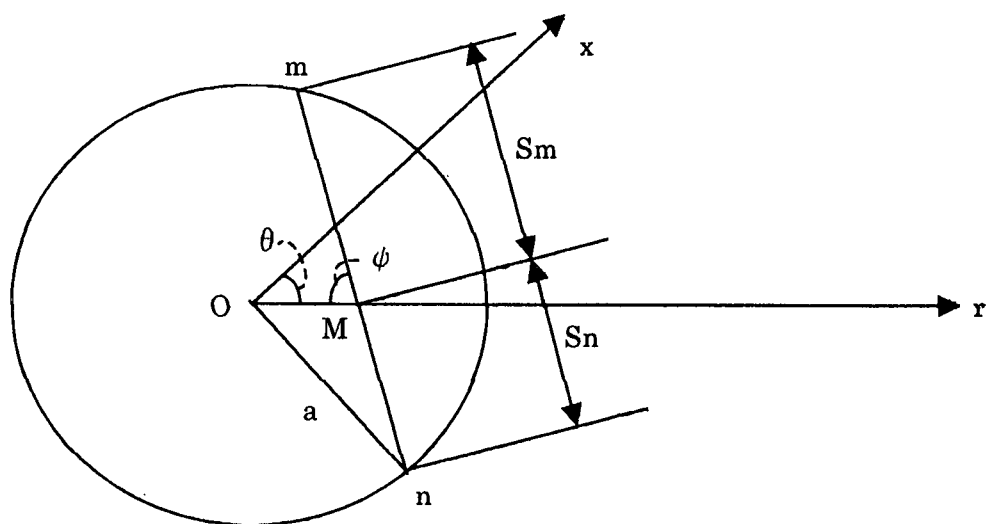
2.2 荷重中心軸上の変位 ($r=0, z \geq 0$)

$$u_v = 0 \quad w_v = \frac{(1+\nu) \cdot P}{\pi \cdot E \cdot a} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1+z^2}} + (1-2\nu) \cdot (\sqrt{1+z^2} - z) \right] \quad (9)$$

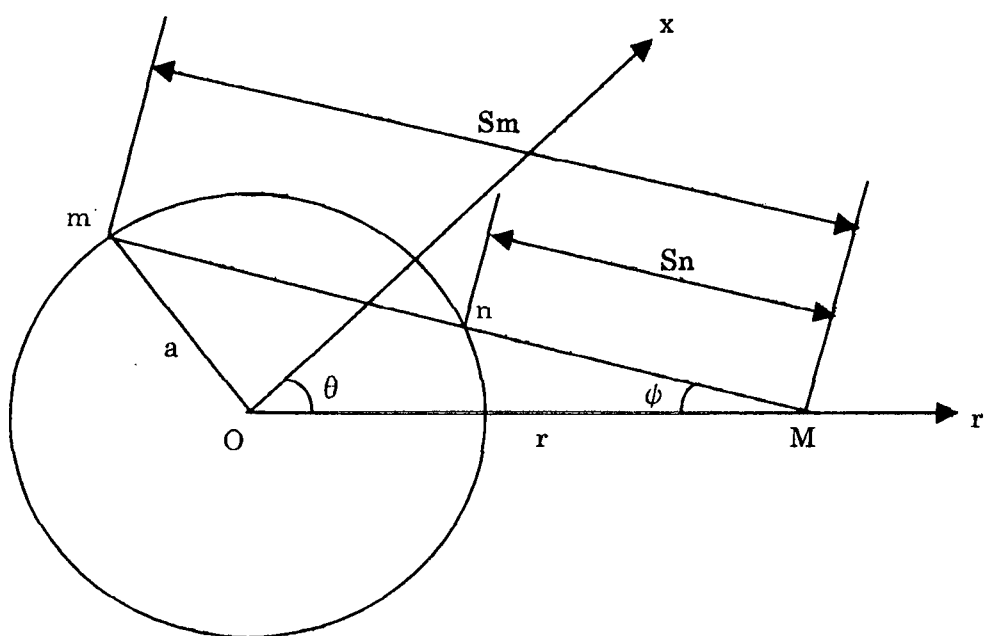
式(9)の第2式は Wittke が与えている式⁷⁾および D4395 の式⁸⁾とも一致している。なお第1式にみられるようにz軸上の水平変位 u_v は生じない。これは岩盤のヤング率とポアソン比を同時特定するための変位測定点として荷重中心線上に下したボーリング孔内の点を選ぶことは無意味であることを示している。



(a) 断面



(b) M点は荷重円内の点



(c) M点は荷重円外の点

図-1 円形等分布荷重の荷重円

2.3 岩盤面の変位 ($z=0$)

(1) 荷重円内 ($r \leq 1, z=0$)

$$u_v = \frac{-(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{2\pi \cdot E \cdot a} \cdot r$$

$$w_v = \frac{4 \cdot (1-\nu^2) \cdot P}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot E(m) \quad m=r^2 \quad (10)$$

ここに $E(m)$ は第2種完全楕円積分である。この式の第1式より u_v の値は原点からの距離 r に比例し、その方向は原点に向かうことがわかる。また第2式において $r=0$ とおけば $E(0) = \pi/2$ であるから、岩盤面荷重円の中心における垂直変位 w_0 は:

$$w_0 = \frac{2 \cdot (1-\nu^2) \cdot P}{\pi \cdot E \cdot a} \quad (11)$$

で与えられる。式(10)の第2式はテイモシェンコの式⁹⁾に、また(11)は D4395 の式¹⁰⁾に一致している。

(2) 荷重円外 ($r > 1, z=0$)

$$u_v = \frac{-(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{2\pi \cdot E \cdot a \cdot r}$$

$$w_v = \frac{4 \cdot (1-\nu^2) \cdot P \cdot r}{\pi^2 \cdot E \cdot a} \cdot (E(m) - (1-m) \cdot K(m))$$

$$m = \frac{1}{r^2} \quad (12)$$

ここに $K(m)$ は第1種完全楕円積分である。式(12)はテイモシェンコの式¹¹⁾に一致している。

さて上記 u_v, w_v の各式は、垂直集中荷重が半無限弾性体の表面に加えられたとき、弾性体内部の任意の点に起こる垂直、水平変位(ブーシネスク¹²⁾ の式)のそれぞれを合成して全分布荷重によるその点の両変位を求めた式

である。しかしてブーシネスクの式は垂直荷重による変位式であるから、合成された前記 u_v, w_v の各変位式も垂直分布荷重のみが作用し、岩盤面の水平方向変位を拘束する何らの水平荷重も作用していないときの変位式である。

なお既述のように、現行の等応力載荷試験の変位式は垂直変位のみを対象とし水平変位については規定していない。従って岩盤の力学的物性値としては別途推定されたポアソン比に基き、垂直変位のみ測定値を用いてヤング率を求めるに留まっている。再考の余地ありと思料する。

3. 水平遠心放射型柔載荷による岩盤変位

前節において円形等分布垂直荷重が柔載荷された場合、荷重円内の岩盤面には、垂直変位と同時に荷重円中心(原点)に向かう水平変位(収縮、図-2(a)参照)が生じ、その大きさは、原点から荷重円周までの間は原点からの距離に直線比例することをみた。(式(10)の第1式参照)

これに対して本節においては垂直分布荷重とは別に、水平方向遠心放射型せん断荷重のみが、荷重円内岩盤面に柔載荷されたとき岩盤内各部に生ずる水平垂直両変位を求める。この内、荷重円内岩盤面に生ずる水平変位は前節の水平変位(式(10)の第1式)と同じく原点からの距離に比例し荷重円周上で式(10)で $r=1$ とおいたときの u_v の最大値に等しい最大値 $|\delta_r|$ をとり、原点で0となるものとするが、その方向は反対に原点から放射状に遠心方向を向くものとする。(拡張、図-2(b)参照)

よって、このような条件を満たす変位が求められたならば、それらの変位を第2節の対応する変位と合成することにより、荷重円内岩盤面の水平変位は0となる。その結果岩盤面の水平変位の発生が拘束されている場合の岩盤内各点の変位が求められる。

水平遠心放射型せん断荷重が荷重円内岩盤面に加えられたときの変位式は Gerrard and Harrison によって与えられている¹³⁾。ただし下記の変位式はこの原式に欠けている連続条件を追加修正した式である。これらの追加点

および修正理由についてはこの後3. 4項において詳記する。以下水平変位を u_h , 垂直変位を w_h で表わす。(添え

字 h は水平放射荷重による変位であることを示す。)

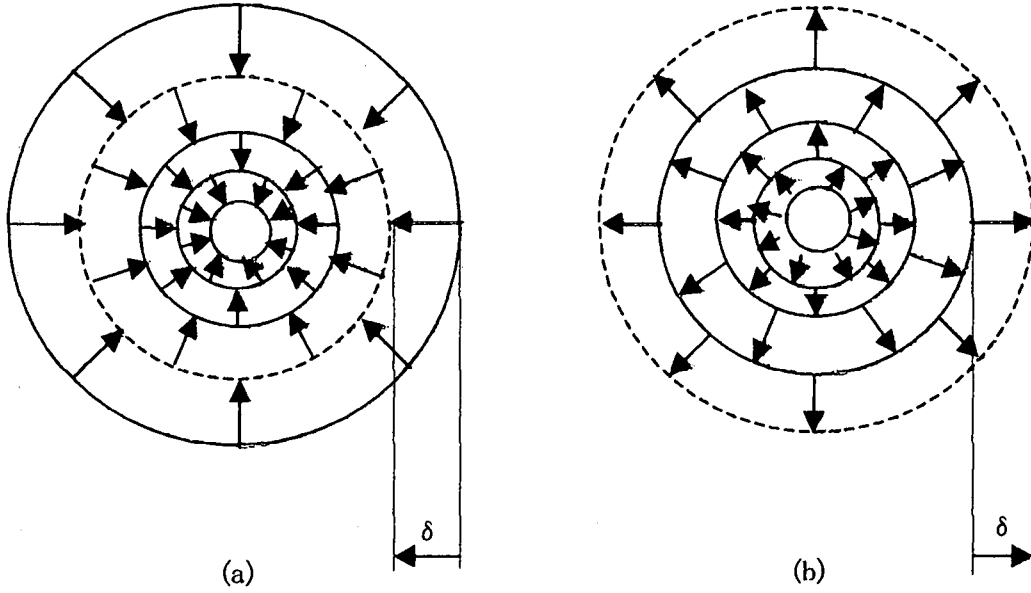


図- 2 荷重円内地盤面の求心収縮(a)および遠心膨張(b)

3. 1 岩盤内部の変位 ($r > 0, z > 0$)

$$u_h = \frac{-2\delta_1}{\pi \cdot (1-\nu) \cdot r} \left[-(1-\nu) \cdot \left(r^2 \cdot \sigma_0 + z \cdot N_0 \cdot \sin \frac{\lambda_0}{2} - N_0 \cdot \cos \frac{\lambda_0}{2} \right) + \frac{z}{N_0} \cdot \left[z \cdot \cos \frac{\lambda_0}{2} + \left[1 - (N_0)^2 \right] \cdot \sin \frac{\lambda_0}{2} \right] \right] \quad (13)$$

$$w_h = \frac{-2\delta_1}{\pi \cdot (1-\nu)} \left[(1-2\nu) \cdot N_0 \cdot \sin \frac{\lambda_0}{2} + z \cdot \left(2\nu \cdot \sigma_0 - \frac{1}{N_0} \cdot \cos \frac{\lambda_0}{2} \right) \right] \quad (14)$$

$$\sigma_0 = \arcsin \left[\frac{2}{\sqrt{z^2 + (1+r)^2} + \sqrt{z^2 + (1-r)^2}} \right], \quad N_0 = \left[(z^2 + r^2 - 1)^2 + 4z^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

$$\lambda_0 = \arctan \left(\frac{2z}{z^2 + r^2 - 1} \right) \quad \text{for} \quad z^2 + r^2 - 1 > 0 \quad (16a)$$

$$\lambda_0 = \frac{\pi}{2} \quad \text{for} \quad z^2 + r^2 - 1 = 0 \quad (16b)$$

$$\lambda_0 = \pi + \arctan \left(\frac{2z}{z^2 + r^2 - 1} \right) \quad \text{for} \quad z^2 + r^2 - 1 < 0 \quad (16c)$$

3.2 荷重中心軸上の変位 ($r=0, z \geq 0$)

$$u_h=0 \quad w_h = \frac{-2\delta_1}{\pi \cdot (1-\nu)} \cdot \left(1 - 2\nu + 2\nu \cdot z \cdot \arctan\left(\frac{1}{z}\right) - \frac{z^2}{z^2+1} \right) \quad (17)$$

3.3 岩盤面の変位 ($z=0$)

(1) 荷重円内 ($r \leq 1, z=0$)

$$u_h = \delta_1 \cdot r \quad w_h = \frac{-2\delta_1 \cdot (1-2\nu)}{\pi \cdot (1-\nu)} \cdot \sqrt{1-r^2} \quad (18)$$

この第1式は荷重円内岩盤面の水平変位の大きさは原点からの距離に比例しその方向は遠心であることを示している。

(2) 荷重円外 ($r > 1, z=0$)

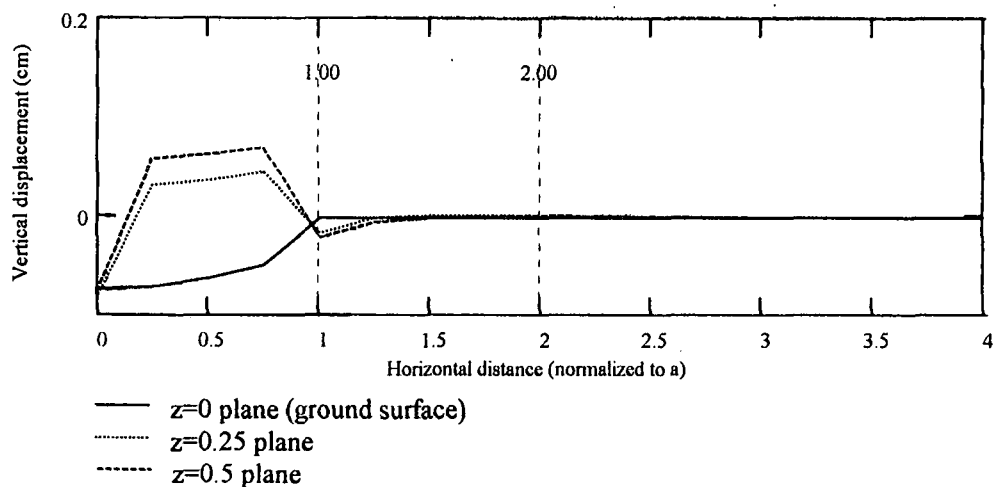
$$u_h = \frac{2\delta_1}{\pi} \cdot \left(r \cdot \arcsin\left(\frac{1}{r}\right) - \sqrt{1-\frac{1}{r^2}} \right) \quad w_h = 0 \quad (19)$$

3.4 変位式の成立条件を追加する理由

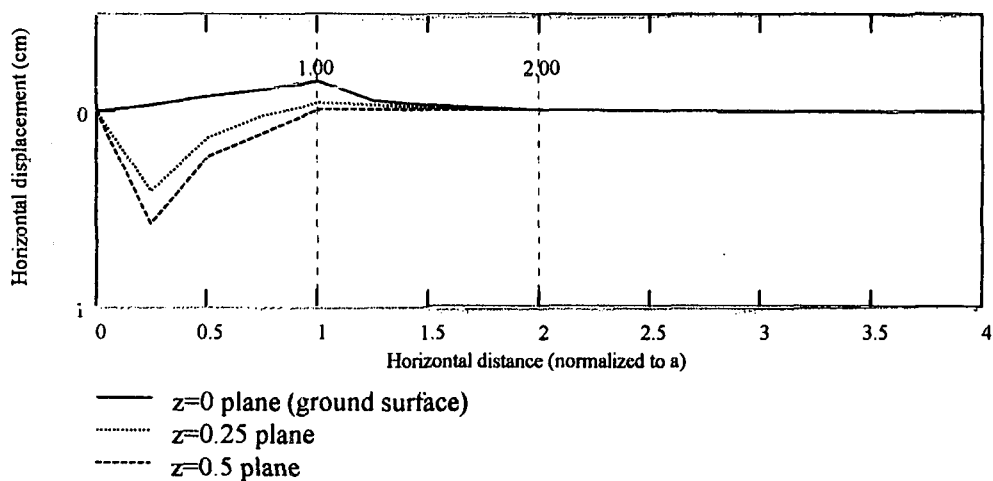
Gerrard らは λ_0 の式として (16a) のみを与えている。この式の () 内の分母 $z^2 + r^2 - 1$ が 0 のときは $\arctan$ の引数は無限大となる。この場合分母が $0 + \varepsilon$ から 0 に近づくと z は正であるから、引数の値は $+\infty$ に近づき、従って λ_0 の値は $\pi/2$ に近づき、これに対して分母が $0 - \varepsilon$ から 0 に近づくと引数の値は $-\infty$ に近づき、従って λ_0 の値は $-\pi/2$ に近づき、この結果 λ_0 の値は $z^2 + r^2 - 1 = 0$ 点において $\pi/2$ から $-\pi/2$ にジャンプする不連続点を生ずる。この不連続は従って λ_0 を用いて求められる変位値 u_h , および w_h にも不連続点を生むこととなる。しかしながら実際の変位にはこのような不連続はあり得ない。上記 λ_0 に不連続点を生じた原因は λ_0 の式として (16a) のみを用いたことにある。しかし $\arctan x$ の一般式は周知の公式により $\arctan x = n \cdot \pi + \text{Arctan } x$ で与え

られる。ここに n は任意の整数、 $\text{Arctan } x$ は主値である。この式において $0 \leq x \leq +\infty$ のときは $n=0$ において主値 $\arctan x = \text{Arctan } x$ をとり、 $-\infty \leq x < 0$ のときは $n=1$ において $\arctan x = \pi + \text{Arctan } x$ をとることにすれば $x = +\infty$ および $-\infty$ いずれの場合も $\arctan x = \pi/2$ となる。この結果 $x = \pm\infty$ 点の $\arctan$ の値が連続となり境界条件が満たされる。この x を $2z/z^2 + r^2 - 1$ で置き換えて式 (16) の3式が得られる。

図-3は λ_0 の式として (16a) のみを用いて式 (13), (14) を計算した例を示す。 $z^2 + r^2 - 1 < 0$ なる範囲内にある点の水平、垂直変位とも起こり得ない変形状態を呈している。式 (16) の追加条件を必要とする所以である。なお本問題に限らず λ_0 を含む Gerrard らの全変位式にこの不連続が生ずるので一般に同式適用に際しては注意を要する。



(a) Erroneous Vertical displacements



(b) Erroneous horizontal displacements

図-3

4. 等応力剛载荷による岩盤内部の変位

前記2節と3節で求めた変位を重合して得られる水平変位を u , 垂直変位を w とおけば u , w はそれぞれ下式で与えられる:

$$u = u_v + u_h \quad w = w_v + w_h \quad (20)$$

ここに u_v , w_v は式(1)~(12), u_h , w_h は式(13)~(19)により与えられる。ただし, 式(13)~(19)に含まれる δ_1 の値は式(10)の第1式で $r=1$ とおいた値の

符号を変えた次式を用いる;

$$\delta_1 = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{2\pi \cdot E \cdot a} \quad (21)$$

5. 数値計算例と考察

計算例の対象岩盤として, 第三紀風化頁岩層を選び, そのヤング率 1000 kgf/cm^2 (98 MPa), ポアソン比 0.2 とする。また荷重円の半径 $a=15 \text{ cm}$, 荷重合計 $P=20000 \text{ kgf}$ とする。なおこれらの入力値は比較に便なるよう文献⁹⁾と

同値とし、数値積分における区間幅も同じく 1000 分割とした。以下 2, 3, および 4 節の順に各節に示されている変位式を用いて計算する:

5.1 岩盤変位の数値計算例

(1) 等応力柔載荷による岩盤変位

式(1)～(12)による変位計算結果を表-1に示す。岩盤面の水平変位は原点 $r=0$ において 0 であるが、原点から遠ざかると共に r に比例して増加し、荷重円周上 $r=1$ において最大値 0.1528cm となっている。これ以遠の岩盤面の水平変位は r に逆比例し、無限遠点で 0 となる。岩盤面の水平変位の方向は原点を向いている。

(2) 水平遠心放射型柔載荷による岩盤変位

式(13)～(19)による変位計算結果を表-2に示す。ただしこれらの式中の δ_1 の値は式(21)により、前項の $z=0$, $r=1$ 点の u_r の符号を変えた $\delta_1=0.152788745\text{cm}$ を用いた。表-2より原点から荷重円周 $r=1$ までの岩盤面の水平変位値は、予期のとおおり表-1の相当欄の変位値と大きさは等しく方向反対となっている。また水平遠心放射型荷重のみによって生ずる垂直変位は小さく、とくに荷重円外の岩盤面の垂直変位は 0 である。

(3) 等応力剛載荷による岩盤変位

式(20), (21)による変位計算結果を表-3, 図-4に示す。これらを表-1, 表-2 と対比するとフェーシング設置の影響が具体的にみえてくる:

荷重円内岩盤面の水平変位は 0 となり剛載荷の条件を満たしている。これに対して他の部分の剛載荷の水平変位を柔載荷のそれと比べると、とくに r, z が 2 より小さい領域においては変位の違いが甚だしい。たとえば $r=1.5, z=0.5$ 点の水平変位は表-1 の -0.0134cm に対し表-3 では 0.005cm となり方向は反転し変化率は約 140% と大きい。この違いは、両表の計算式(5),(13)とも変位を岩盤物性値の関数として求めているから、変位測定位置の選定如何によって、フェーシング有りの変位測定値をフェーシングを無しの変位式に用いて岩盤の物性値を求めると大きな誤差を招くことがあることを暗示している。一方垂直変

位の最大値は岩盤面の荷重中心点において起こりその大きさは 0.7419cm である。これはフェーシング 無しの場合の同点における変位 0.8149cm に対して約 9% 小さい。以上総括してフェーシング設置による影響は垂直変位より水平変位の変化において著しい。

5.2 変位測定位置の選定

フェーシングを設置した等応力載荷試験によって得られた変位測定値を、4 節で求められた変位式に用いれば、現地不撓乱岩盤のヤング率とポアソン比を得ることができる。ただしその際変位測定位置の選定が重要となる。図-4(c)にみるように岩盤面およびその直下領域では深さの増加に伴う水平変位の変動が激しく、かつ水平変位の方向が反転する点を含んでいる。このような領域は変位測定には適しない。一方 $z=2$ 以深は $r=2, 4$ 両断面共変位の変動が比較的少なく、かつ変位の絶対値もあまり減衰しないので測定に適した領域である。よって変位測定最適位置は $z=2, r=2$ 付近となる。この点はまたフェーシングを設置した等応力載荷試験の変位測定値をフェーシング無しの場合の変位理論式に用いても大きな誤差を生じない点でもあることは容易に確かめることができる。

しかしながら現実には、荷重円外の測定孔の削孔は実施できない事態が多いであろう。この場合の例として上記最適点ではなく $r=1.5, z=0$ 点を測定点に選んで試算する: フェーシングを設置した等応力載荷試験の水平変位 -0.0679cm , 垂直変位 0.2900cm が得られたものとする。この測定値を式(20)に用いれば当然ながら正解値 $E=1000$, $\nu=0.2$ が得られる(表-3参照)。しかしながらもしこの測定値をフェーシング無しの式(12)に用いれば $E=930$, $\nu=0.33$ となる。この結果は E の誤差は 10% 以下であるが、 ν のそれは 65% と大きい。従って変位測定点が岩盤面上に限定される事情下においては、高精度測定値を用いた 4 節の変位式の適用が必須となる。

表-1 円形等分布柔载荷による岩盤変位 (変位式(1)～(12)適用)

u_v = 半径方向水平変位 cm(負号は中心軸に向かう変位), w_v = 垂直変位 cm

深さ z	変位 記号	原点からの水平距離 r							
		0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	4.0
0	u_v	0	-.0382	-.0764	-.1146	-.1528	-.1019	-.0764	-.0382
	w_v	.8149	.8020	.7613	.6840	.5188	.2900	.2108	.1027
0.25	u_v	0	-.0140	-.0252	-.0301	-.0317	-.0498	-.0489	-.0317
	w_v	.7327	.7203	.6791	.6019	.4795	.2914	.2114	.1028
0.50	u_v	0	.0019	.0050	.0086	.0073	-.0134	-.0252	-.0254
	w_v	.6444	.6324	.5936	.5273	.4399	.2910	.2122	.1029
1.0	u_v	0	.0111	.0206	.0269	.0283	.0185	.0050	-.0140
	w_v	.4867	.4785	.4533	.4145	.3674	.2759	.2104	.1033
2.0	u_v	0	.0072	.0137	.0189	.0223	.0240	.0206	.0019
	w_v	.2999	.2974	.2892	.2765	.2605	.2240	.1888	.1032

表-2 水平遠心放射型柔载荷による岩盤変位 (変位式(13)～(19)適用)

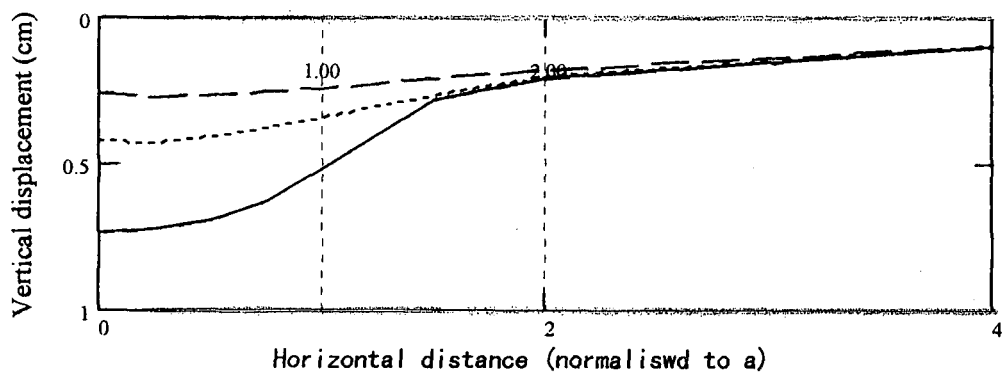
u_h = 半径方向水平変位 cm(負号は中心軸に向かう変位), w_h = 垂直変位 cm (負号は上方に向かう変位)

深さ z	変位 記号	原点からの水平距離 r							
		0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	4.0
0	u_h	0	.0382	.0764	.1146	.1528	.0340	.0176	.0041
	w_h	-.0730	-.0706	-.0632	-.0483	0	0	0	0
0.25	u_h	0	.0193	.0356	.0439	.0428	.0284	.0164	.0041
	w_h	-.0819	-.0790	-.0695	-.0494	-.0153	.0010	.0005	.0001
0.50	u_h	0	.0071	.0124	.0150	.0172	.0183	.0133	.0039
	w_h	-.0756	-.0721	-.0612	-.0424	-.0202	-.0011	.0004	.0001
1.0	u_h	0	-.0006	-.0009	-.0003	.0012	.0051	.0065	.0033
	w_h	-.0504	-.0479	-.0410	-.0311	-.0206	-.0064	-.0015	.0001
2.0	u_h	0	-.0009	-.0015	-.0019	-.0018	-.0010	.0002	.0018
	w_h	-.0208	-.0202	-.0186	-.0162	-.0135	-.0082	-.0044	-.0002

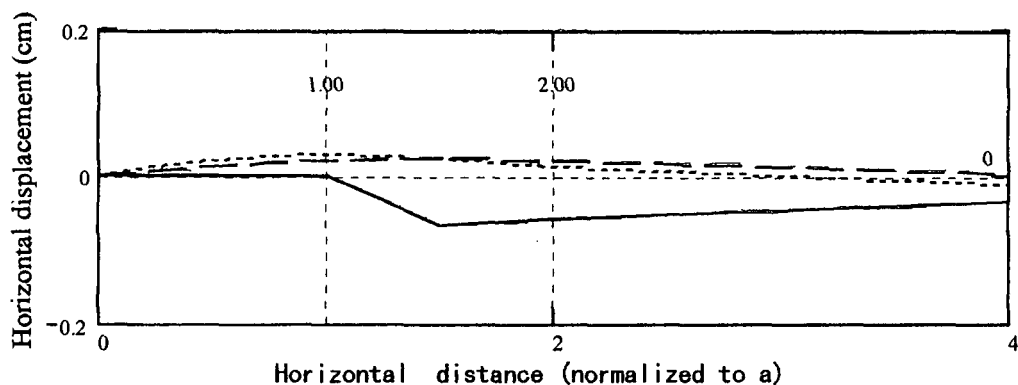
表-3 円形等分布剛载荷による岩盤変位 (変位式(20), (21)適用)

u = 半径方向水平変位 cm(負号は中心軸に向かう変位), w = 垂直変位 cm

深さ z	変位 記号	原点からの水平距離 r							
		0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	4.0
0	u	0	0	0	0	0	-.0679	-.0588	-.0341
	w	.7419	.7314	.6981	.6357	.5188	.2900	.2108	.1027
0.25	u	0	.0053	.0104	.0139	.0111	-.0214	-.0325	-.0277
	w	.6508	.6413	.6096	.5526	.4642	.2924	.2119	.1029
0.50	u	0	.0090	.0174	.0237	.0245	.0050	-.0119	-.0215
	w	.5688	.5603	.5324	.4849	.4197	.2898	.2126	.1031
1.0	u	0	.0105	.0198	.0265	.0295	.0237	.0115	-.0107
	w	.4363	.4306	.4123	.3834	.3468	.2696	.2089	.1035
2.0	u	0	.0064	.0122	.0170	.0205	.0230	.0209	.0037
	w	.2791	.2772	.2706	.2603	.2470	.2158	.1844	.1030

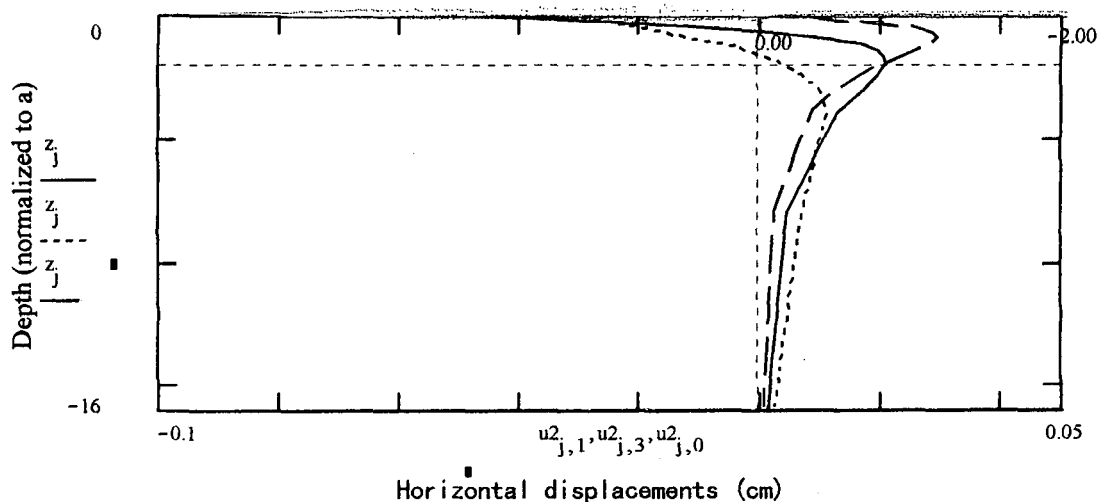


(a) Vertical displacements of planes



- $z=0$ plane (ground surface)
 --- $z=1.0$ (15cm) horizontal plane
 ... $z=2.0$ (30cm) horizontal plane

(b) Horizontal displacements of planes



- $r=2.0$ section (negative displacement towards origin)
 --- $r=4.0$ section
 ... $r=1.0$ section (perimeter)

(c) Horizontal displacements by sections

図-4 式(20)および(21)による変位計算結果

6. むすび

殆どの平板載荷試験は載荷板と岩盤面との間にフェーシングを設置する。しかるにその試験結果から岩盤物性値を求める現行規定の変位式はフェーシングの存在を無視している。本研究は等応力平板載荷試験についてフェーシングによる岩盤面の水平方向変位拘束効果を考慮した変位式を、既往式の一部修正を行い誘導したものである。更改変位式が示す測定最適点における水平垂直両変位を測定することにより原位置不攪乱岩盤の力学的基本物性値を従来より高精度で同時特定することができる。

しかして実際にはフェーシング自体も弾性をもつ。このためフェーシングによる岩盤面の水平変位拘束効果は完全ではない。この弾性を考慮した厳密な地盤変位の算定に対しては完全拘束の前提に立って誘導した4節の変位式では誤差を生ずるので、有限要素法等の数値解法によらざるを得ない。しかしながらその場合においても解法固有の計算誤差最小化のため、要素分割の範囲および細分のサイズ決定等において上記理論解が必要となる。

逆に、完全な等応力載荷状態実現のためにフェーシングをたとえばゴム膜等の超軟性のものに取り替えるか、さらに進めてフェーシングを設置せずダイヤフラムを直接岩盤面に据える等の措置も考えられる。前者については岡田ら¹⁴⁾による軟岩上の載荷試験における開発例もあり、今後の進展が待たれる。なおこれらの場合に対しては2節の変位式が直接適用できる。

参考文献

1) ASTM: Designation D4394-84 (Reapproved 1994): Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation Rock Mass Using the Rigid Plate Loading Method.

2) ASTM: Designation D4395-84 (Reapproved 1994): Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation Rock Mass Using the Flexible Plate Loading Method.

3) 地盤工学会: 地盤調査法, 地盤工学基準 (JICS1521-1995), 地盤の平板載荷試験方法, p. 345~353, 1995.

4) H.G.Poulos and E. H. Davis: Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons, 1974.

5) C.M.Gerrard and W.Jill Harrison: Circular loads applied to a Cross anisotropic half space, Technical Paper No.8 of the Division of Applied Geomechanics, C.S.I.R.O., Australia.

6) 高島康夫: 円形等分布柔載荷による不攪乱地盤のヤング率とポアソン比の特定, 土木学会, 応用力学論文集, Vol 1, 1998年9月.

7) Walter Wittke: Rock Mechanics(20.45), p.796, Springer-Verlag, 1990.

8) ASTM: Designation D4395-84, (3), p.567.

9) S.P.Timoshenko, J.N.Goodier: Theory of Elasticity, 3rded., (218), p.404, McGraw-Hill, 1970.

10) ASTM: Designation D4395-84, (1), p.567.

11) S.P.Timoshenko, J.N.Goodier: Theory of Elasticity, 3rded., (216), p.404, McGraw-Hill, 1970.

12) S.P.Timoshenko, J.N.Goodier: Theory of Elasticity, 3rded., foot note, p.399, McGraw-Hill, 1970.

13) C.M.Gerrard and W.Jill Harrison: Items D., P22, C., P.20, & eq.8a, p.10.

14) 岡田哲美, 谷和夫, 田中幸久, 百瀬和夫: 堆積軟岩上の平板載荷試験におけるポアソン比の検討, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1999年1月.

(1999年4月23日受付)