

フェーシングを設置した定変位平板載荷試験岩盤面変位式の誘導とその適用

Displacement Equations of Rock Surface under Rigid Plate Loading Test using Concrete Facing and their Applicability .

高島康夫

Yasuo TAKASHIMA

正会員 技術士 サン技術コンサルタント株式会社 (〒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 on a half space rock mass caused by a rigid plate loading test using concrete facing which restricts free horizontal displacements of the rock surface under direct contact with it, are developed. Young's modulus and Poisson's ratio of the intact rock mass can be simultaneously obtained by applying the equations to the test results.

Key Words: Rigid loading test, Displacement equation, Concrete facing, Young's modulus, Poisson's ratio .

1. はじめに

現在この国で主として行われている定変位平板載荷試験は、載荷面平滑化の為に載荷板と岩盤面との間に現地打設のコンクリート等によるフェーシングを設置する。フェーシングは岩盤面の小凹凸に食込んで固化している。岩盤は垂直荷重のみを受けてもそのもつヤング率及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形するが、フェーシングはこの結果起るべきフェーシング直下岩盤面の水平変位の発生を拘束する。

しかしながら現行の平板載荷試験の諸規定、例えば ASTM の D4394¹⁾、この国の JIGS1521²⁾等が与えている変位式はこのような拘束力の存在を無視している。すなわちフェーシングがなく載荷板と岩盤面との接触がスムーズで摩擦力さえも存在しないと仮定したときの変位式である。従ってフェーシングを設置した平板載荷試験で得られた変位測定値をこれらの変位式に代入して求められる岩盤の力学的物性値は誤差を含む。

本研究は定変位載荷試験を対象としてフェーシングの設置、非設置の各場合に生ずる岩盤面の変位を解析し、フェーシングの設置によって齎される岩盤面変位の差、さらに岩盤物性値の推定誤差が具体的にどの程度かをみようとするものである。

本論文で多用する術語を次のように定義する：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。又変位式の誘導において必要となる境界条件として、岩盤面の変位値が与えられる場合と、岩盤面の応力値が与えられる場合とがあるが、前者を“変位示方載荷”(displacement-defined loading)、後者を“応力示方載荷”(stress-defined loading)と呼ぶ。

変位式の誘導は Gerrard and Harrison³⁾が与えている円形載荷のときの変位式を基礎式とする。変位の符号も Gerrard らの約束に従い、鉛直下向きの垂直変位を負、求心方向の水平変位を正とする。

以下全文を通じて岩盤のヤング率 E 、ポアソン比 ν 、

載荷円の半径 a_0 、水平変位 u 、垂直変位 w 、荷重合計 P (フェーシングの重量を含む) で表わす。

2. フェーシングを設置した垂直定変位示方 剛載荷による岩盤面変位式が満たすべき 基本条件

標記変位は、垂直定変位示方柔載荷による岩盤面変位 (3節参照) と、求心型非線形水平変位示方柔載荷による岩盤面変位 (5節参照) を合成して求める。求められた変位式は下記2条件を同時に満たすことが必要にして十分である。

- (a) 載荷円内岩盤面の垂直変位は一定であること、
- (b) 載荷円内岩盤面の水平変位は0となること。

3. 垂直定変位示方柔載荷による岩盤面変位

垂直定変位示方柔載荷による岩盤面の垂直変位 w_v と水平変位 u_v は Gerrard らによって次式⁴⁾ で与えられている：(添字 v は垂直荷重による変位を示す)

$$w_v = \frac{-(1-\nu^2) \cdot P}{2E \cdot a_0} \quad \text{if } r \leq 1 \quad (1a)$$

$$w_v = \frac{-(1-\nu^2) \cdot P}{\pi \cdot E \cdot a_0} \cdot \arcsin\left(\frac{1}{r}\right) \quad \text{if } r > 1 \quad (1b)$$

$$u_v = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{2\pi \cdot E \cdot a_0} \cdot \frac{1-\sqrt{1-r^2}}{r} \quad \text{if } r \leq 1 \quad (2a)$$

$$u_v = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot P}{2\pi \cdot E \cdot a_0} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{if } r > 1 \quad (2b)$$

ここに r は変位を求める点の円筒座標 $r \theta z$ (載荷円中心を原点とし鉛直上向きを z 軸とする右手系) 上の r 座標値を示し、載荷円半径 a_0 で除して基準化した値である。実距離 R を r で表わすと次式となる：

$$R = r \cdot a_0 \quad (3)$$

ここで具体的な数値例を用いて式(1)、(2)を計算してみよう。計算例の対象岩盤として、第三紀風化頁岩層を

選び、 $E = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ (98MPa)、 $\nu = 0.2$ 、 $a_0 = 15 \text{ cm}$ 、 $P = 20000 \text{ kgf}$ とする。なおこれらの入力値は比較に便なるよう文献^{5)・6)}と同値とし以下各節の計算例において共通使用する。

計算結果を後出の表-4のA行、E行及び図-2(点線)に示す。これらの図表にみられるように載荷円直下の岩盤面の垂直変位値は -0.64 cm で一定であるが、載荷円を離れた直後急激に上昇(変位絶対値は減少)している。一方、水平変位の変化は載荷円内の円周点近傍で強度に非線形である。なお、 w_v は負値であるから岩盤面は低下し、 u_v は正であるから岩盤面は中心に向かって収縮している。

4. 求心型線形水平変位示方柔載荷による 岩盤面変位

本節においては次節における非線形水平変位示方柔載荷による岩盤面変位式誘導の準備として、標記線形水平変位を与える既存式を列記しその特性をみる。

この場合の岩盤面の垂直変位 Lw_h 及び水平変位 Lu_h は Gerrard らによって次式⁷⁾ で与えられている：(添字 h は水平荷重による変位を示す)

$$Lw_h = \frac{-2 \cdot \delta_{\max} \cdot (1-2\nu)}{\pi \cdot (1-\nu)} \cdot \sqrt{1-r^2} \quad \text{if } r \leq 1 \quad (4a)$$

$$Lw_h = 0 \quad \text{if } r > 1 \quad (4b)$$

$$Lu_h = \delta_{\max} \cdot r \quad \text{if } r \leq 1 \quad (5a)$$

$$Lu_h = \frac{2\delta_{\max}}{\pi} \cdot \left(r \cdot \arcsin\left(\frac{1}{r}\right) - \frac{\sqrt{r^2-1}}{r} \right) \quad \text{if } r > 1 \quad (5b)$$

これらの式は、載荷円周上における求心方向の水平変位が最大値 $\delta_{\max}$ で、中心で0となるまで線形減少するような求心型水平変位が示方されたとき (そのような変位を生ずるように荷重円内全面に分布する水平せん断荷重が加えられたとき)、荷重円外の点も含めて岩盤面の変位を与える式である。これらの式の内、式(4b)で載荷円外の垂直変位が0であることに注意を

要する。(この重要性については後節6.2で触れる)。

5. 求心型非線形水平変位示方柔載荷による岩盤面変位

本節においては2節で求めた“強度の非線形水平変位”と大きさ、方向ともに等しい載荷円内水平変位が示方されたとき岩盤面に生ずる変位を求める。(このような非線形水平変位を示方して解いた変位式はGerrardらの文献には見当たらない。)

5.1 載荷円の分割

いま載荷円をM個の等幅のリングに分割して考える。(図-1)。リング i ($i=1, 2, \dots, M$)の外周円が横軸 R と交わる点の座標値 R_i は $i \cdot a_0/M$ となる。図-1の δ 曲線は示方された載荷円内岩盤面の非線形水平変位を表わす。すなわち δ は式(2a)の u_v に等しい。

ここで δ 曲線を折線 $OA_1A_2 \dots A_M$ によって近似することを試みる。分割数を大きくすればこの折線は限りなく δ 曲線に近づく。しかして R_i 点(リング外周円上の点)及び R_{i-1} 点(リング内周円上の点)の水平変位はそれぞれ δ_i 及び δ_{i-1} で与えられているから A_i 点及び A_{i-1} 点の縦距値はそれぞれ δ_i 及び δ_{i-1} となる。しかるに直線 A_iA_{i-1} の延長線は原点 O を通らないから(原点における水平変位は0とならないから)、この直線を対象として直接式(5)を適用することはできない。式(5)を適用できる直線としては例えば図-1の直線 A_iO 及び $A_{i-1}O$ がある。よって以下この2直線を対象として式(5)を適用することとする。

まずリング i によって岩盤面に生ずる変位すなわち A_iA_{i-1} を示方変位とする岩盤面変位を求めるために、
(直線 A_iO を示方変位とする(5)の解)
— (直線 $A_{i-1}O$ を示方変位とする(5)の解) (6)
を作ると、これによって得られる変位値は A_iA_{i-1} を

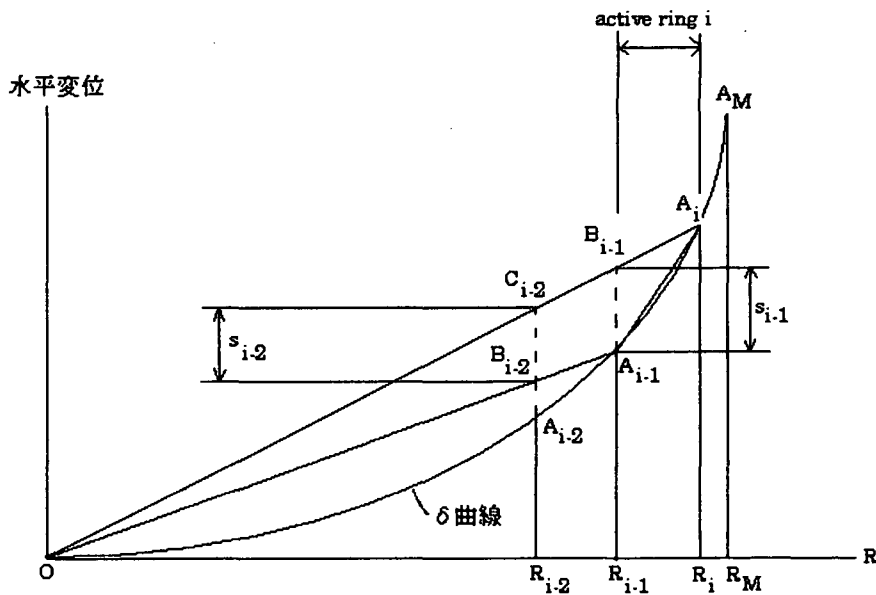


図-1 定変位柔柔載荷による岩盤面の水平変位 δ 曲線と偽変位 s_{i-n}

示方変位とする岩盤面変位とは一致せず、図-1にみられるような直線 A_iO と $A_{i-1}O$ の縦距の差を示方変位とする偽の(spurious)変位 $s_{i-1}, s_{i-2} \dots$ を含んで

いる。よって正解は

(式(6)の解) — (偽変位を示方変位とする解) (7)

でなければならない。図より明らかなように、偽変位

は R_i 点より内側にある全ての点, R_{i-1} 点, R_{i-2} 点, ..., R_1 点において生じる. この偽変位を求める為の準備として次項において式(6)の第1項及び第2項の解を求める.

なお図-1 は岩盤面の載荷円中心を原点とし横軸 R は原点からの半径方向距離を, 縦軸は各 R 点における岩盤面の水平変位の大きさを表している.

水平変位の変化が非線形の δ 曲線と, 線形変化すると例えば OA_i 直線との縦距値の差, $A_{i-1}B_{i-1}$ が偽変位を表す. よってこの偽変位を取り除いた折線 A_iA_{i-1} により δ 曲線を近似しようとするものである.

5.2 載荷円半径が R_i , 載荷円周上の水平示方変位が δ_i のとき岩盤面上 R 点に起る変位

本項においては前節まで対象とした半径 a_0 なる載荷円を取り除き, 新たに半径 R_i なる載荷円を考える. この載荷円内岩盤面の水平変位が載荷円周上で最大値 δ_i で載荷円内では中心で0となるまで線形減少するよう示方された載荷によって岩盤面上 R 点に生ずる垂直変位を $wout_i(R)$, 水平変位を $uout_i(R)$ とおけばこれらは式(4),(5)の δ_{max} を δ_i に, r を R/R_i に置き換えた次式で与えられる:

$$wout_i(R) = \frac{-2\delta_i(1-2\nu)}{\pi \cdot (1-\nu)} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_i}\right)^2} \quad \text{if } \frac{R}{R_i} \leq 1 \quad (8a)$$

$$wout_i(R) = 0 \quad \text{if } \frac{R}{R_i} > 1 \quad (8b)$$

$$uout_i(R) = \delta_i \cdot \frac{R}{R_i} \quad \text{if } \frac{R}{R_i} \leq 1 \quad (9a)$$

$$uout_i(R) = \frac{2\delta_i}{\pi} \left[\frac{R}{R_i} \cdot \arcsin\left(\frac{R_i}{R}\right) - \sqrt{1 - \left(\frac{R_i}{R}\right)^2} \right] \quad \text{if } \frac{R}{R_i} > 1 \quad (9b)$$

5.3 載荷円半径が R_{i-1} , 載荷円周上の水平示方変位が δ_{i-1} のとき岩盤面上 R 点に起る変位

本項においては再度新たに半径 R_{i-1} なる載荷円を考える. 載荷円周上の水平変位の最大値が δ_{i-1} で, 中心で0となるまで線形減少するものとする. 前項と同一点 R に起る変位 $win_i(R)$, 及び $uin_i(R)$ は式(4),(5)の δ_{max} を δ_{i-1} に, r を R/R_{i-1} に置き換えた次式で与えられる:

$$win_i(R) = \frac{-2\delta_{i-1}(1-2\nu)}{\pi \cdot (1-\nu)} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_{i-1}}\right)^2} \quad \text{if } \frac{R}{R_{i-1}} \leq 1 \quad (10a)$$

$$win_i(R) = 0 \quad \text{if } \frac{R}{R_{i-1}} > 1 \quad (10b)$$

$$uin_i(R) = \delta_{i-1} \cdot \frac{R}{R_{i-1}} \quad \text{if } \frac{R}{R_{i-1}} \leq 1 \quad (11a)$$

$$uin_i(R) = \frac{2\delta_{i-1}}{\pi} \cdot \left(\frac{R}{R_{i-1}} \cdot \arctan\left(\frac{R_{i-1}}{R}\right) - \alpha \right) \quad \text{if } \frac{R}{R_{i-1}} > 1 \quad (11b)$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{R_{i-1}}{R}\right)^2} \quad (11c)$$

ただし $i=1$ のときは式(10),(11)は次式となる:

$$win_i(R) = uin_i(R) = 0 \quad (12)$$

5.4 偽変位を含む解

5.2 では半径 R_i なる載荷円に独立した荷重が作用し又 5.3 では半径 R_{i-1} なる載荷円に独立して荷重が作用している状態を想定してそれぞれの解を求めた.

よって式(6)はこれらの差として

$$\text{wring}_i(R) = \text{wout}_i(R) - \text{win}_i(R) \quad (13)$$

$$\text{uring}_i(R) = \text{uout}_i(R) - \text{uin}_i(R) \quad (14)$$

となる。両式はリング i のみに荷重が作用していると
き R 点に起る変位を表わしている。よって半径 a_0 な
る全載荷円に加わる荷重により R 点に起る変位は M 個
のリングによる上式の解を合成することによって求め
ることができる。(ただし偽変位を含む解である)。

5.5 偽変位の除去と実変位式の誘導

5.1 項より引続いてリング i を取出し検討対象とし
リング i をアクティブリングとして選ぶ。これはリン
グ i を中心点 O に結びつける直線 $A_i O$ と $A_{i-1} O$ もア
クティブな直線であることを意味する。従って両直線間
の縦距値の差がアクティブリング i に伴う偽変位とな
る。これは図-1 でみるように R_{i-1} 点では s_{i-1} であり、
 R_{i-2} 点では s_{i-2} である。また R_{i-1} 点の偽変位の太
きさは図より

$$s_{i-1} = \delta B_{i-1} - \delta_{i-1} \quad (15)$$

である。ここに δB_{i-1} は B_{i-1} 点の縦距値で

$$\delta B_{i-1} = \delta_i \cdot \frac{R_{i-1}}{R_i} \quad (16)$$

で与えられる。この式の右辺は式(9a)において $R = R_{i-1}$ と
おいた式に等しいから

$$\delta B_{i-1} = \text{uout}_i(R_{i-1}) \quad (17)$$

となる。一方式(15)の δ_{i-1} は、式(11a)の右辺において
 $R = R_{i-1}$ とおけば式(11a)の右辺は δ_{i-1} となるから、
 $\text{uin}_i(R_{i-1})$ に等しくなる。よってこの結果と式(17)を
式(15)に代入すれば

$$s_{i-1} = \text{uout}_i(R_{i-1}) - \text{uin}_i(R_{i-1}) \quad (18)$$

となる。しかるにこの式の右辺は式(14)により

$\text{uring}_i(R_{i-1})$ に等しいから結局 R_{i-1} における偽変位は

$$s_{i-1} = \text{uring}_i(R_{i-1}) \quad (19)$$

で表わされる。以下同様にしてリング i による R_{i-n} 点

における偽変位は

$$s_{i-n} = \text{uring}_i(R_{i-n}) \quad n = 1, 2, \dots, i-1 \quad (20)$$

によって表わされる。

上記結果はリング i によって起る偽変位は i より小さ
な j を添字としてもつ R_j 点に起ることを示している。
これを裏返して云えばリング i によって起る実変位は、
 i に等しいか又は大きい j を添字とする R_j 点におい
てのみ起ることとなる。従って R_j 点に起る実変位は

$$\text{uring}_i(R_j) \quad \text{if } i \leq j \quad (21a)$$

によって求められる。

以上の所論は水平変位の偽変位及びそれを削除した水
平変位の実変位についてである。しかして式(4), (5)
にみるように $L w_h$, $L u_h$ とも $\delta_{\max}$ を含み相関した
変位であるから垂直変位にも当然 s_{i-n} に対応する偽
変位が含まれることが予想される。よって垂直変位に
ついて実変位を求める必要がある。ここで垂直変位
の実変位も式(21a)と同形の式で求めることができ
ると仮定し、次式:

$$\text{wring}_i(R_j) \quad \text{if } i \leq j \quad (21b)$$

を導入する。この仮定の妥当性は、この式を用いて求
められた垂直変位の最終式が2節の基本条件を満たす
ことによって証される。(6.2 参照)

5.6 リング荷重による変位の合成

前項のリング i による実変位(21)を全リングについ
て合成すれば本節の目標とする“求心型非線形水平変
位示方柔載荷による岩盤変位”が求められる。但し本
項と次項5.7においては R は離散値(discrete)変数で
ある場合を対象とする (R が連続変数である場合に
ついては5.8で論ずる)。よって R を R_j , $i=1, 2, \dots, \infty$
の内の任意の点 j にとり R_j で表わす。しかるときは
全荷重によって R_j 点に起こされる水平変位 $u_h(R_j)$
は式(21a)を用いて

$$u_h(R_j) = \sum_{i=1}^k u_{ring_i}(R_j) \quad (22)$$

によって求められる。同時並行して R_j 点に起こる垂直変位 $w_h(R_j)$ は

$$w_h(R_j) = \sum_{i=1}^k w_{ring_i}(R_j) \quad (23)$$

で与えられる。ここに、

$$k = \text{MIN}(j, M) \quad (24)$$

である。MIN は最小値関数で k は j と M の内小なる方の値をとる。

5.7 数値計算例

前記各項で誘導した変位式(22), (23)の数値例計算を行う。荷重円の分割数はまず $M=4$ (各区間幅 3.75cm) とし、変位計算点はこれら区間の境界点とする。

計算結果を表-1 に示す。これらの表中の括弧で括られている数値は、式(20)による偽変位の計算値を示すが条件式(21)の働きにより $u_h(R_j)$ 及び $w_h(R_j)$ には集計されない。求められた $u_h(R_j)$ の値を表-1 合計欄に示す。又 δ_j の値は2節式(2)の u_v の計算値である。この表より荷重円内 ($r \leq 1$) の $u_h(R_j)$ と δ_j の値は完全に一致し、 $u_h(R_j)$ の方向も δ_j と同じく求心方向の変位であることがわかる。この結果より R がリング境界点に一致する場合は推定誤差が0となり式(22)の正当性が検証された。

さらに表-2に示されている垂直変位 $w_h(R_j)$ の値は荷重円の内外を問わずすべて0となっている。これは前記偽変位の除去及び式(8b), (10b)によって齎された結果であるが2節の条件(a)が満たされていることを示唆するものである。(なお節6.2(c)項で続論する)

5.8 R が連続変数であるときの変位

前項においては式(22)検証の為、変位計算点 R_j を各リングの外周円上に選定した。しかしこれら点に

おいては変位推定値が示方変位値に一致するよう変位式が樹てられているので推定値と示方値が一致するのは当然である。しかしながら変位値が示方されていない R 点 (例えばリング中点等) に式(22)を適用すれば誤差を生ずる。すなわち 5.1 項で仮定したように式(22)は変位曲線 δ を折線 $OA_1A_2 \dots A_M$ で近似している。これが誤差の発生源である。しかしながらこれらの誤差は分割数 M を増加してゆけば漸減する。以下その状況を調べる。

まず表-1 の4分割の場合の各リング中点を変位計算点に選び式(22)により水平変位を計算し、同点における式(2a)の計算値と比較すれば表-2 のとおりとなる。この表より各リング端点における推定値の誤差は0であるにも拘わらず中点の誤差は0ではなく特に最外側リング中点における誤差は 48.4%と極めて大きい。次に $M=100, 1000, 10000, 100000$ としたときの各最外側リング中点 (略最大誤差を生ずる点) における水平変位の推定誤差を計算すると表-3 のとおりとなる。この表より荷重円外の点も含めて任意の R 点の変位推定誤差を例えば 1%未満とするには荷重円分割数を 10000 以上としなければならないことがわかる。

上記計算は式(22)の R_j を R に置き換えて行った。その際同式中の k の値を計算するのに必要な j の値は R 点が属するリング番号となる。具体的には j の値は次式で求められる：

$$j = \text{INT}\left(R \cdot \frac{M}{a_0}\right) \text{ if } \text{MOD}\left(R, \frac{a_0}{M}\right) = 0 \quad (25a)$$

$$j = \text{INT}\left(R \cdot \frac{M}{a_0}\right) + 1 \text{ if } \text{MOD}\left(R, \frac{a_0}{M}\right) \neq 0 \quad (25b)$$

ここに INT 及び MOD はそれぞれフオートラン言語等で用いられている整数値関数及び剰余関数を表わす。従って式(22)～(24)と(25a), (25b)を組み合わせることにより求心型非線形水平変位示方柔載荷による岩盤変位の解を一般的な連続関数 R の関数として求めることができる。

表-1 リング荷重による岩盤面変位の合成 (荷重円分割数 $M=4$)

水平変位

単位 cm

リング i	r R	荷重円内					荷重円外			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
		0	3.75	7.5	11.25	15.0	18.75	22.5	26.25	30.0
1	$u_{out_1}(R_j)$	0	.0194	.0022	.0009	.0005	.0003	.0002	.0002	.0001
	$u_{in_1}(R_j)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$u_{ring_1}(R_j)$	0	.0194	.0022	.0009	.0005	.0003	.0002	.0002	.0001
2	$u_{out_2}(R_j)$	0	(.0205)	.0409	.0091	.0047	.0029	.0020	.0015	.0011
	$u_{in_2}(R_j)$	0	(.0194)	.0022	.0009	.0005	.0003	.0002	.0002	.0001
	$u_{ring_2}(R_j)$	0	(.0011)	.0387	.0082	.0042	.0026	.0018	.0013	.0010
3	$u_{out_3}(R_j)$	0	(.0230)	(.0460)	.0690	.0206	.0120	.0080	.0057	.0043
	$u_{in_3}(R_j)$	0	(.0205)	(.0409)	.0091	.0047	.0029	.0020	.0015	.0011
	$u_{ring_3}(R_j)$	0	(.0025)	(.0050)	.0599	.0159	.0090	.0060	.0043	.0032
4	$u_{out_4}(R_j)$	0	(.0382)	(.0764)	(.1146)	.1528	.0544	.0340	.0237	.0176
	$u_{in_4}(R_j)$	0	(.0230)	(.0460)	(.0690)	.0206	.0120	.0080	.0057	.0043
	$u_{ring_4}(R_j)$	0	(.0152)	(.0304)	(.0456)	.1322	.0424	.0260	.0180	.0133
合計 $u_h(R_j)$		0	.0194	.0409	.0690	.1528	.0544	.0340	.0237	.0176
δ_j		0	.0194	.0409	.0690	.1528	.1222	.1019	.0873	.0764
$\Delta_j = u_h(R_j) - \delta_j$		0	0	0	0	0	-.0678	-.0679	-.0636	-.0588

垂直変位

単位 cm

1	$w_{out_1}(R_j)$	(-.009)	0	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{in_1}(R_j)$	(0)	0	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{ring_1}(R_j)$	(-.009)	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$w_{out_2}(R_j)$	(-.020)	(-.017)	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{in_2}(R_j)$	(-.009)	(0)	0	0	0	0	0	0	0
	$w_{ring_2}(R_j)$	(-.010)	(-.017)	0	0	0	0	0	0	0
3	$w_{out_3}(R_j)$	(-.033)	(-.031)	(-.025)	0	0	0	0	0	0
	$w_{in_3}(R_j)$	(-.020)	(-.017)	(0)	0	0	0	0	0	0
	$w_{ring_3}(R_j)$	(-.013)	(-.014)	(-.025)	0	0	0	0	0	0
4	$w_{out_4}(R_j)$	(-.073)	(-.071)	(-.063)	(-.048)	0	0	0	0	0
	$w_{in_4}(R_j)$	(-.033)	(-.031)	(-.025)	(0)	0	0	0	0	0
	$w_{ring_4}(R_j)$	(-.040)	(-.040)	(-.039)	(-.048)	0	0	0	0	0
合計 $w_h(R_j)$		0	0	0	0	0	0	0	0	0

註：表中の（ ）を付した数値は直線変化する変位示方の仮定に起因する偽変位であるので合計には加えない。

表-2 リング中点における変位推定値と誤差 (荷重円分割数 M=4)

リング i	1			2		3		4		
変位計算点 R	0	1.875	3.75	5.625	7.50	9.375	11.25	13.125	15.0	
	原点	中点	境界点	中点	境界点	中点	境界点	中点	円周点	
変位計算値 u_h	0	.0097	.0194	.0307	.0409	.0575	.0690	.1337	1.5279	
変位目標値 δ_p	0	.0096	.0194	.0297	.0409	.0536	.0690	.0901	1.5279	
誤差 %	0	1.2	0	3.3	0	7.2	0	48.4	0	

表-3 最外側リング中点における水平変位推定値と誤差

荷重円分割数 M		100	1000	10000	100000
最外側リング中点位置 R	cm	14.925	14.9925	14.99925	14.999925
水平変位計算値 u_h	cm	.152025	.152712	.152781	.152788
変位目標値 δ_p	cm	.138220	.148032	.151268	.152306
誤差	%	10.0	3.2	1.0	0.3

6. 垂直定変位示方剛载荷による岩盤面変位

6.1 基本式

2節で与えられている変位 w_v , u_v と 5節で求めた変位 w_h , u_h を合成すれば本研究の目標である標記垂直変位 w , 水平変位 u を求めることができる. すなわち岩盤面の合成変位を 0 とするため w_h , u_h の符号を変えて w_v , u_v に加え次式が得られる:

$$w = w_v - w_h \quad (26)$$

$$u = u_v - u_h \quad (27)$$

ここに w_v , u_v は式(1), (2)より w_h , u_h は式(22)~(25)により与えられる.

6.2 数値計算例と考察

荷重円分割数を $M=10000$ としたときの式(26),(27)の数値例計算結果を表-4 及び図-2 に示す. この表の C 行及び G 行が垂直定変位示方剛载荷による岩盤面の変位値, すなわちフェーシングの拘束効果を考慮に入れた場合

の定変位载荷試験における岩盤変位である. 図表より次のような事項が読み取れる:

- (a) 荷重円内岩盤面の u の値は 0 となり, 2 節(b)の条件を満たしている.
- (b) 荷重円外岩盤面の u の値は荷重円から離れた直後の $r=1.25$ 点では u_v と u の違いが 80.2%と大きい. これは荷重円近傍で岩盤面の水平変位を測定しその結果をフェーシングの拘束効果を考慮しない従来の変位式に代入して岩盤の力学的物性値を求めると大きな誤差を招くことを示している. なおこの表の“誤差”は計算値の正解値に対する誤差という意味での誤差ではなく, フェーシングを設置した試験の測定値を従来の変位式に代入することによって生ずる誤差の意である.
- (c) 鉛直変位 w_h の値は荷重円内外を問わず 0 である. この結果はフェーシングの水平方向変位拘束作用によって岩盤面の垂直変位は何の影響も受けないことを示している. 特に荷重円内岩盤面の垂直変位は -0.64cm の一定値を保ち 2 節の条件(a)を満たしている. 従って上記(a)項の結果と相俟って 2 節の全条件

を満たすこととなり変位式(26), (27)の正当性が検証された。同時に 5.5 項の仮定(21b)が妥当であることも確認された。

(d) 図-2 より w, u とも $r=1.0 \sim 1.25$ 間の変化は急激であるが, $r=1.50$ 点を過ぎると穏やかとなり, かつ $r=2.0$ 点付近までは変位の絶対値もあまり減少しない。

いま, フェーシングを設置した定変位载荷試験において $r=1.5$ 点の変位を測定し, $w=-.2973\text{cm}$, $u=.0679\text{cm}$ の測定値が得られたものとする。この測定値を式(26), (27)に代入すれば当然 $E=1000\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.2$ なる正解値が得られる。しかしながら, もしこの測定値をフェーシングの存在を無視した変位式(1b), (2b)に代入すると $E=930\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.33$ となる。E の推定誤差は 5%であるが, ν のそれは 65%と大きい。よってフェーシングを設置した定変位平板载荷試験において岩盤面の垂直, 水平両変位を測定して岩盤のヤング率とポアソン比を特定する場合には, 従来の変位式(1), (2)

ではなく, 前式(26), (27)を用いる必要がある。

6.3 変位測定位置および精度

岩盤内の変位を測定する為には測定孔の削孔が必要であるが岩盤面の変位測定ではこれを必要としない。载荷板直下の岩盤面の水平変位はフェーシングの拘束効果によって 0 であるので, 変位の測定は载荷板外の岩盤面で行う必要がある。その際前記計算例でみたように $r=2.0$ の円周上に数点を選んで垂直, 水平変位を測定しそれぞれの平均値をとることにより岩盤面の不陸に起因する誤差を除去することができる。又岩盤面の変位測定は孔内における測定より容易でかつ精度を上げることできる。ASTM の D4394 は垂直変位に対し測定精度 0.0025mm を推奨している。水平変位で同精度を保つには 0.001mm 以上が望まれる。 0.01mm 以下の精度では有意な結果は得られない。

表-4 フェーシング考慮, 非考慮の場合の定変位示方平板载荷試験変位式による岩盤面の変位

$E=1000\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.2$, $a_0=15.0\text{cm}$, $P=20000\text{kgf}$ R 及び変位の単位=cm

荷重円分割数 $M=10000$

r			原点からの距離									
			0	.25	.50	.75	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0	4.0
R			0	3.75	7.50	11.25	15.00	18.75	22.50	26.25	30.00	60.00
垂直 変位	w_v	A	-.6400	-.6400	-.6400	-.6400	-.6400	-.3778	-.2973	-.2478	-.2133	-.1030
	w_h	B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	w	C	-.6400	-.6400	-.6400	-.6400	-.6400	-.3778	-.2973	-.2478	-.2133	-.1030
	誤差	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水平 変位	u_v	E	0	.0194	.0409	.0690	.1528	.1222	.1019	.0873	.0764	.0382
	u_h	F	0	.0194	.0409	.0690	.1528	.0544	.0340	.0237	.0176	.0041
	u	G	0	0	0	0	0	.0678	.0679	.0636	.0588	.0341
	誤差	H	0	0	0	0	0	80.2	50.0	37.3	30.0	12.1

「註」

w_v : 垂直定変位示方柔载荷による岩盤面の垂直変位,

u_v : 垂直定変位示方柔载荷による岩盤面の水平変位,

w_h : 求心水平変位示方柔载荷による岩盤面の垂直変位,

u_h : 求心水平変位示方柔载荷による岩盤面の水平変位,

w: 垂直定変位示方剛载荷による岩盤面の垂直変位,

u: 垂直定変位示方剛载荷による岩盤面の水平変位,

D: $(w_v - w) / w * 100\%$

H: $(u_v - u) / u * 100\%$

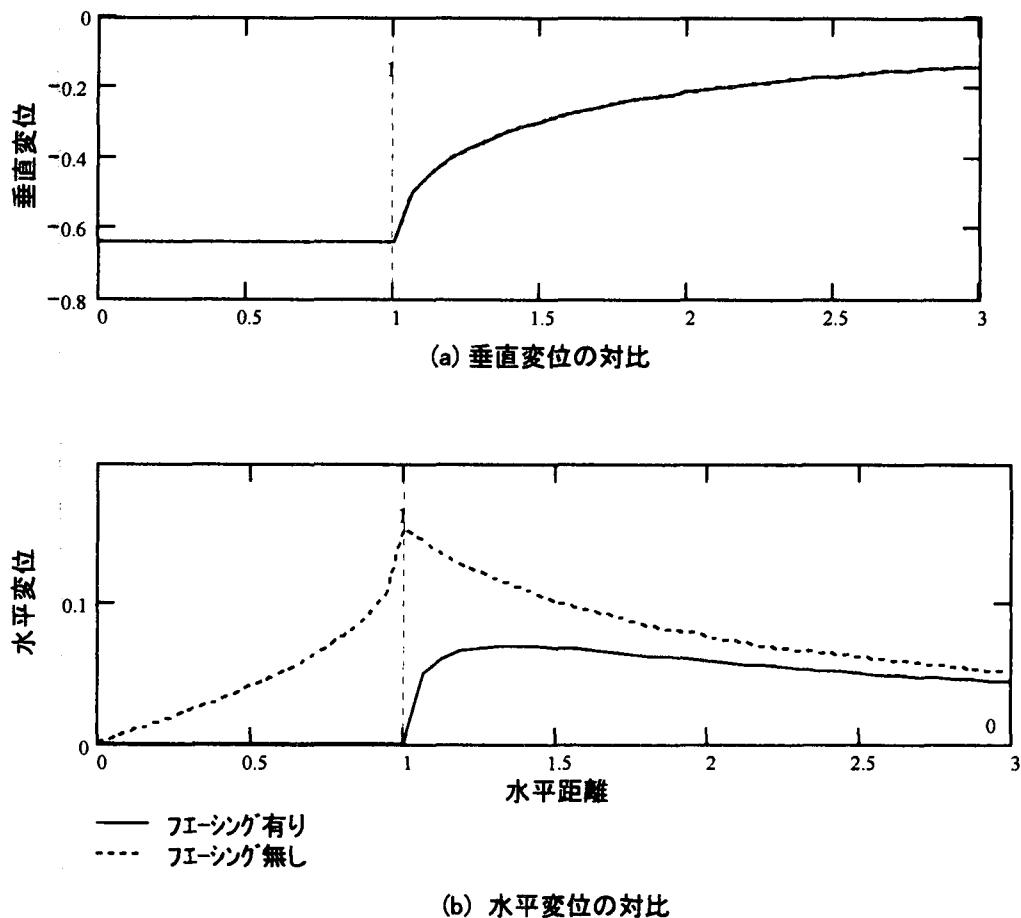


図-2 フェーシング考慮、非考慮の場合の平板載荷試験変位式による岩盤面の変位の対比

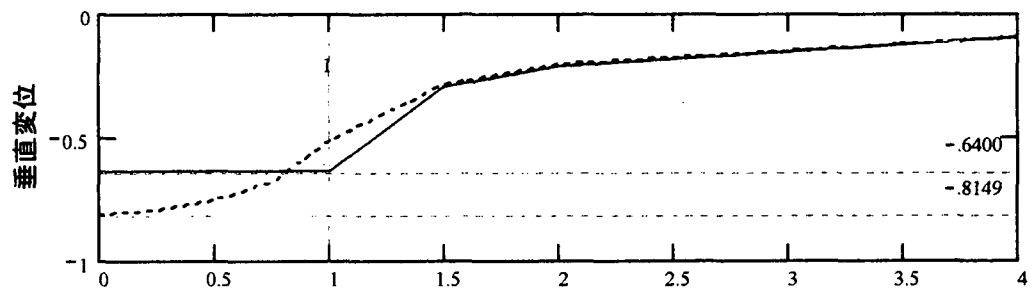
7. 等応力示方載荷と定変位示方載荷におけるフェーシング拘束効果の比較

前節までは定変位示方載荷試験を対象としてフェーシングの変位拘束効果を考慮したときの岩盤面変位式を誘導した。これに対して（2種ある平板載荷試験中の他種の試験である）等応力示方載荷試験のフェーシングの変位拘束効果については既に高島⁸⁾によって解が与えられている。よって本節においてはこれら2種の解を対比し、それぞれの試験におけるフェーシングの変位拘束効果の違いを見ることとする。

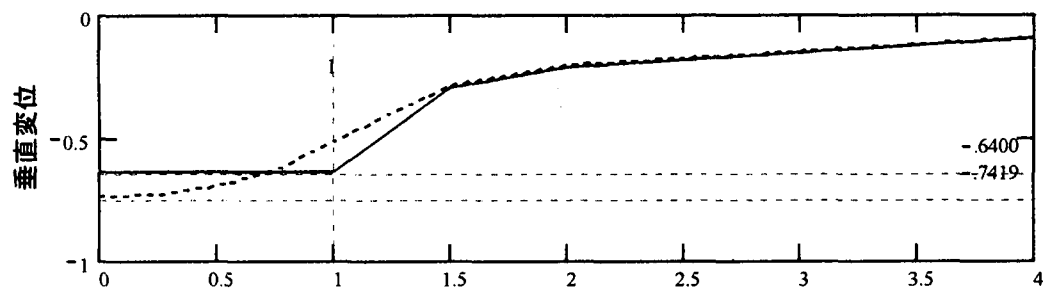
対比は同一の入力値に基づく変位計算値を比較するため、等応力示方載荷試験の変位値は高島⁸⁾の表-1、表-3より引用し、定変位示方載荷試験の変位値は前掲

表-4の値を用いた。図-3は、垂直変位と水平変位のそれぞれについて、かつフェーシングの拘束効果を考慮しないときと考慮したときのそれぞれについて、定変位示方載荷による変位（実線）と等応力示方載荷による変位（破線）を比較した図である。

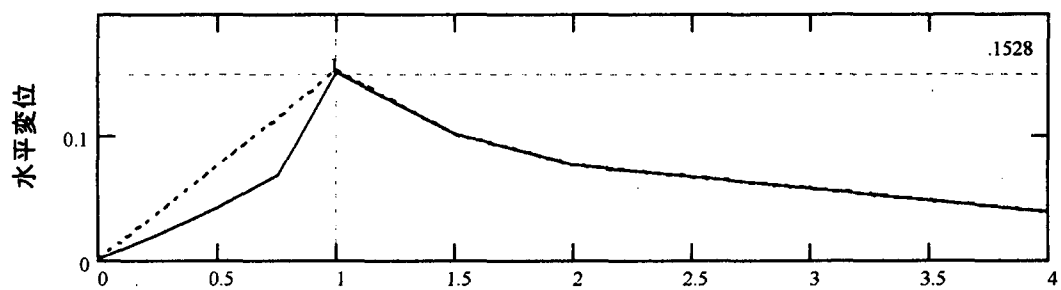
図(a),(b)を比べると、等応力示方載荷の変位最大値は-.8149cm から-.7419cm に約10%減少しているのに対し、定変位示方載荷の変位は-.6400cm の一定値を保っている。すなわち等応力示方の垂直変位はフェーシングの有無によって変化するのに対し、定変位示方載荷の垂直変位値は無関係である。換言すれば、定変位載荷の垂直変位値はフェーシングの水平変位拘束効果が存在しないときでも一定値を保つことを示す。これはこれまでの検討においてフェーシングは完全剛体



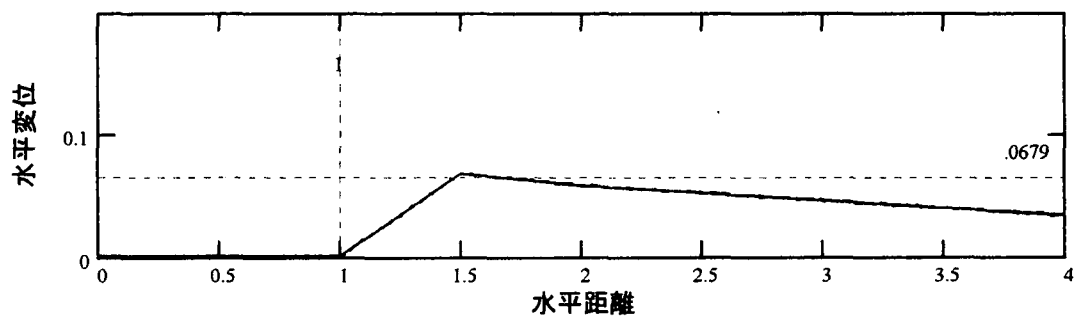
(a) フェーシング拘束効果を考慮しないとき



(b) フェーシング拘束効果を考慮したとき



(c) フェーシング拘束効果を考慮しないとき



— 定変位示方載荷
 ---- 等応力示方載荷

(d) フェーシング拘束効果を考慮したとき

図-3 フェーシング効果を考慮しないときと考慮したときの等応力示方載荷時の変位と定変位示方載荷時の変位の比較

とした暗黙裡の仮定が成立しなくても、一定の垂直変位値が得られることを意味する。しかしながら現実のフーシングは完全剛体ではないから水平方向変位拘束効果は完全ではない。にも拘わらず上記知見は、現実のフーシングに対しても垂直変位は一定であることを保証している。(勿論、載荷板自体は剛体でなければならない)

次に図(c), (d)を比べると、フーシングの効果を考慮しないときの水平変位の最大値は荷重円周上において起り、等応力示方載荷時及び定変位示方載荷時とも同一値. 1528cm である。これに対してフーシングの効果を考慮したときは、最大値を生ずる位置は $r=1.5$ 付近に移りはするが、両載荷とも. 0679cm の同一値をとる。さらに、(d)図で見るようにフーシングの効果を考慮したときは、等応力示方載荷時と定変位示方載荷時の水平変位は完全に一致している。この結果はさきの(a), (b)の比較によって得られた知見とは逆に、フーシングが完全剛体であれば載荷方式如何に拘わらず同一の水平変位値が得られることを示している。

以上総合すると、岩盤面の垂直、水平両変位測定目的に対しては完全剛体のフーシングを設置した定変位示方載荷試験方式が最適と云える。(現在主流となっている定変位載荷試験方式がこれに近い)

8. むすび

フーシングを設置する定変位平板載荷試験は現在最も普通に行われている平板載荷試験である。しかるにその試験は、載荷板の垂直変位を測定するに留まり、岩盤面の水平変位は測定されていない。もし載荷板から適当な距離を隔てた岩盤面の垂直、水平両変位を同時測定し、測定値を本論において誘導したフーシングの水平変位拘束効果を取り入れた変位式に代入すれば、従来得られなかった完全不撓乱自然岩盤の力学的基本2物性値、ヤング率とポアソン比を同時特定することができる。しかしてこの測定は、等応力平板載荷

試験の場合⁸⁾に提唱されているような、測定孔の削孔等の現地追加作業や小口径の孔内における水平変位の測定という困難な作業を必要とせず、直接岩盤面上で行えるので実用性も高い。さらに、岩盤面の垂直変位は、等応力示方載荷試験の場合設置されたフーシングの剛性に支配されるが、定変位示方載荷試験ではそれがなく安定している。構造物の基礎設計に必要な岩盤の物性値は実岩盤のそれであって試験室での測定によるものではない。本研究は層理や亀裂を含む実岩盤をマクロ的に等価な一様弾性体とみなして解析したものである。今後の定変位平板載荷試験において岩盤面の垂直、水平両変位を測定する利は大であろう。

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) 地盤工学会: 地盤調査法, 地盤工学基準(JIGS1521 1995), 地盤の平板載荷試験方法, p. 345~353.
- 3) 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, 1970.
- 4) C.M.Gerrard and W.Jill Harrison: op.cit., pp.14-15, 1970.
- 5) 高島康夫: 円形等分布柔載荷による不撓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, pp. 23-34.
- 6) 高島康夫: フーシングを設置した等応力平板載荷試験変位式の修正誘導とその応用, 土木学会, 応用力学論文集, Vol 2, 1999年9月 pp.3-14.
- 7) M.Gerrard and W.Jill Harrison: op.cit., pp.22-23, 1970.
- 8) 高島康夫: 上掲 6)と同じ.

(2000年4月21日受付)