

# 原位置試験による変形係数についての一考察

武内俊昭

深田地質研究所

## Some Consideration on Deformation Coefficient by In-Situ Loading Test

Toshiaki TAKEUCHI

Fukada Geological Institute

要旨：同一の岩盤に対して異なる種類の原位置試験によって得られる変形係数が互いに異なることは現場においてしばしば経験する。かつて筆者らは平板載荷試験と孔内載荷試験による変形係数の関係について花崗岩における結果を報告したが、今回、堆積岩のデータを若干付け加えて検討した。その結果、地質の違いによってこれら変形係数の関係に違いは見られなかった。そこでこの結果を受けて、堆積岩を基礎岩盤とする実際の構造物について変形係数の分布を考察した。その結果、応力機構の違いと変形係数のひずみ依存性による関係を併せて検討することにより、実際の挙動をより合理的に説明できることを示した。また、この検討過程を通して残された課題に対する今後の視点についても述べる。

キーワード：原位置試験，孔内載荷試験，平板載荷試験，変形係数，ひずみ分布

Keywords: In-situstest, Borhole Loading Test, Plate Loading Test, Deformation Coefficient, Strain Distribution

### 1. はじめに

図-1(a)に示すように無限に広がった板中に、半径aの円孔をあけ、その内面に内圧pが一様に作用する場合、円孔の中心から距離bの点における岩盤内の応力は、厚肉円筒理論により(1)式で示さ

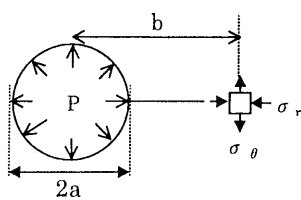
れる。

つまり任意の点においては、半径方向には圧縮応力が働くが、直交する円周方向にはそれと同じ大きさの引張り応力が作用する。この引張り応力が岩盤の引張り強度を超えると図-1(b)に模式的に示すような放射状方向に割れ目が発生する。そして、

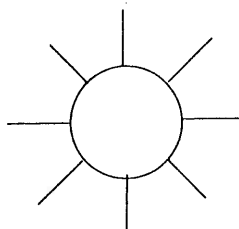
その後の岩盤の変形は割れ目に囲まれたくさび状の部分の変形となる。

M.Rochaら(1956)はこのようなモデルによるくさび状の部分の変形を求める式を導いている。

一方、平板載荷試験においては、岩盤内には圧縮応力しか発生せず、孔内載荷試験のように発生する割れ目を考慮する必要はない。平板載荷試験と孔内載荷試験それぞれによる変形係数の違いは、このような岩盤内部に発生する応力機構の違いによることが一因と考えられる。



(a)



(b)

図-1 内圧を受ける円孔外側の応力と挙動

$$\sigma_r = -\frac{a^2}{b^2} p \quad \sigma_\theta = \frac{a^2}{b^2} p \quad (1)$$

筆者らは、花崗岩の岩盤において、平板荷重試験と孔内荷重試験による変形係数の試験データを用いて、両者の関係をグラフで示し、その関係をM.Rochaらが提示した孔内荷重試験における岩盤変形のモデルを導入することによりある程度説明できることを述べた(武内他, 1976).

今回、花崗岩地域におけるデータの他に新たに堆積岩地域におけるデータが得られたのでそれを加えて考察を行ったのでその結果について以下に述べる。

## 2. 原位置試験結果の比較と考察

実際の原位置試験データから同一地点における平板荷重試験と孔内荷重試験の変形係数の関係について見たのが図-2である。

これらの試験による値は、平板荷重試験と孔内荷重試験の試験地点が5m以内の地点で得られた類似の地質および岩盤状況と見なせるものを1組のデータとして扱いプロットしている。

図-2に両者の関係を示す図を横軸に平板荷重試験、縦軸に孔内荷重試験をとって示した。

この図においてプロットされている花崗岩のデータは、武内他による論文(1976)に示されているものであり、堆積岩のデータは、今回新たに追加したものである。

なおここでは、原位置試験結果の応力～変位曲線から変形に関する係数を求める際、応力～変位曲線の初期曲線の勾配から求められるもの係数を“初期変形係数”と呼び、応力～変位曲線の繰り返しの曲線から求

める係数を“弾性係数”と呼び、それぞれ図中の凡例では、“花崗岩変形”，“堆積岩弾性”のように示している。また、それらを総称して変形係数と呼ぶ。

図-2から次のことがうかがえる

○平板荷重試験と孔内荷重試験による初期変形係数あるいは弾性係数の関係はおおよそ比例関係にあり、両者の関係が1：1の直線に沿ってばらついている。

○花崗岩と堆積岩それぞれにおけるデータともあるバラツキを示しており、それらが重なり合って地質の種類による変形係数の関係に違いはみられない。

○2つの荷重試験の関係は、初期変形係数と弾性係数に対してもほとんど差はみられない。

さて、孔内荷重試験の装置の原理から、この試験で対象とする岩盤材料は変形係数10,000MPa程度が上限と考えられる。このことから図-2の縦軸(孔内荷重試験)の値が10,000MPaを超える点を

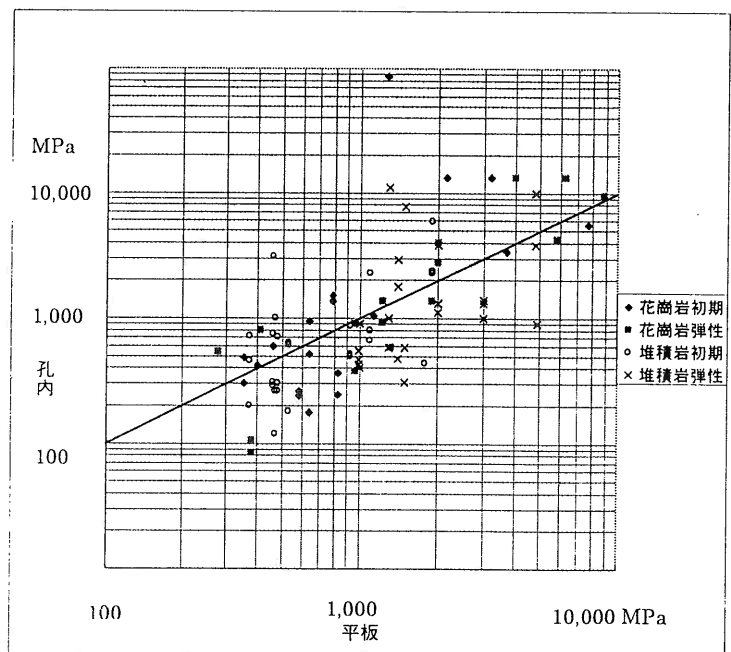


図-2 平板荷重試験と孔内荷重試験による変形に関する係数の関係

原位置試験による変形係数

除いてみると、値が1,000Mpaを超える領域では両試験の関係は1:1の直線に近く、一方値が1,000Mpaを下回る領域では点のバラツキは1:1を示す直線の下側に点が多く集まっている。つまり、この領域では、孔内载荷試験による係数の値が平板载荷試験による値より小さくなることを示している。

一般に、建設における構造物の基礎の設計において必要とされる初期変形係数あるいは弾性係数としては、応力機構が類似していることから平板载荷試験による結果が用いられることが多い。しかし反面、このような現場において原位置で行われる試験として、ボーリング孔を利用する孔内载荷試験が比較的容易に実施できる試験として多く用いられている。

図-3は、このような場合を考えて図-2のグラフの表現を変えたものであり、前述した論文（武内他1976）で示されている。

この論文では、プロットされた点を近似して結ぶ線が孔内载荷試験の値が1,000Mpaより大きい領域では、縦軸の比が1を下回るように引かれている。

この理由として、試験で対象とする岩盤の変形係数が大きつまり堅硬になるにしたがって、孔内载荷試験による岩盤内に引っ張り破壊が発生し

にくくなること、また、孔内载荷試験によるひずみは半径の自乗に反比例して小さくなり、孔壁のごく近傍の影響しか受けない。このことにより殆どインタクトロック部分の影響を反映する。一方平板载荷試験は通常60cm~100cm程度の加圧板を用いており、孔内载荷試験に比べてかなり広い範囲の岩盤の影響を反映する。そのためもともと存在している割れ目の影響を多少受けると考えられる。

しかし、1,000Mpa以上の岩盤に対しては孔内载荷試験の分解能は徐々に低下するため、その影響を含んで点がばらついており厳密な検討は現段階では妥当でない。図-2の傾向からみて、図-3における関係は今のところ縦軸の比が1に漸近すると考えるのが妥当と思われる。つまり対象とする岩盤がより堅硬になるにしたがい両試験法による変形係数は等しくなると考える。

3. ひずみ依存性に関する考察

図-4は、長大橋梁地点の主塔基礎建設時において基礎岩盤内に生ずるひずみの深度による分布を示したものである。

ひずみは基礎の中心位置に掘削したボーリング孔の中にスライディングマイクロメータと呼ばれる

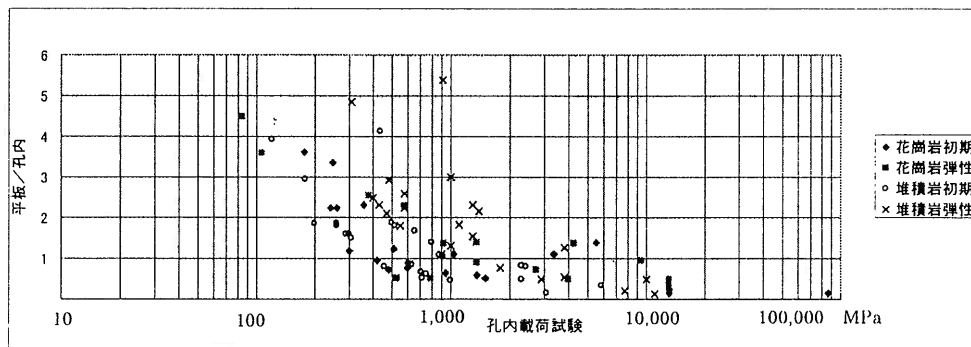


図-3 孔内载荷試験から平板载荷試験への係数に換算する関係図

装置を挿入し深度1m毎の区間変位を測定し、その間の値として求めている。

図-4に示されている各深度のひずみは、当該深度の岩盤の変形に関する係数(D)とそこに作用している応力( $\sigma$ )により次の式(2)で既定される。

$$\epsilon = \sigma / D \quad (2)$$

図からひずみは深度に対して次第に小さくなり基礎の幅に相当する深度約60m (TP-120m)では設地面付近の約1/10、基礎幅の約2倍に相当する深度 (TP-180m) では1/100程度に小さくなっていることがうかがえる。

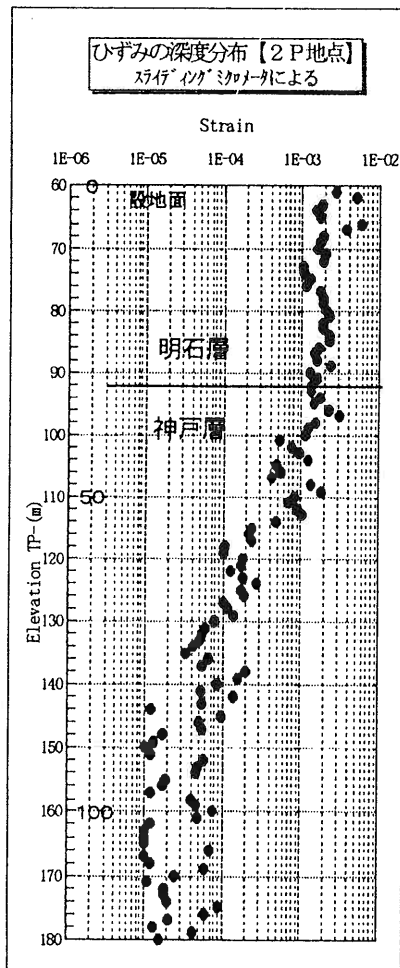


図-4 基礎地盤内ひずみ分布 (新田他 1998 から)

図-4に示される実測されたひずみの値に対し、ケーソン荷重から理論的に算定できる深度に応じた岩盤内の応力を与えると、その深度における岩盤の変形に関する係数を求めることができる。

このような考えから弾性問題FEMの逆解析を用いて算出した変形係数の分布を図-5に黒い太線で示す。ただし、図-5は岩盤を深度方向に幾つかに層区分し、同一区分内は同じ変形に関する係数を有していると扱っている。

さらに図-5では、ボーリング孔を用いて測定された速度検層によるP、S波の速度値および孔内載荷試験からそれぞれ求めた変形に関する係数の深度による分布を併記している。

図-5のこれらの傾向を概観すると、深度が深くなるにしたがって実測ひずみから逆解析で求めた変形係数と測定された係数との差が大きくなっているのがわかる。また、P S波から求めた係数の方が孔内載荷試験による係数より大きく、逆解析による係数に近くなっていることも伺える。これらの現象は岩盤の変形に関する係数は、岩盤に与えるひずみの大きさに依存するいわゆる“変形係数のひずみ依存性”である程度説明できるとしている(新田他, 1996)。

通常、P S速度検層に用いられるP波、S波のひずみは $10^{-6}$ 程度と云われているのに対して、孔内載荷試験において岩盤に与えるひずみの大きさは $10^{-3} \sim 10^{-2}$ である。

これに対して、図-4に示されている実測されたひずみの大きさをみると、深度TP-100m程度までは、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ であり、それより深い深度では次第に小さくなって $10^{-5}$ である。したがって、深度TP-100mまでは、孔内載荷試験が実際のひずみに近く、深度TP-140m以深ではP S速度検層による結果が近いひずみを示していることになる。

図-5をやや詳細にみると深度TP-50mまでの孔内載荷試験と逆解析結果の変形係数は、それより

原位置試験による変形係数

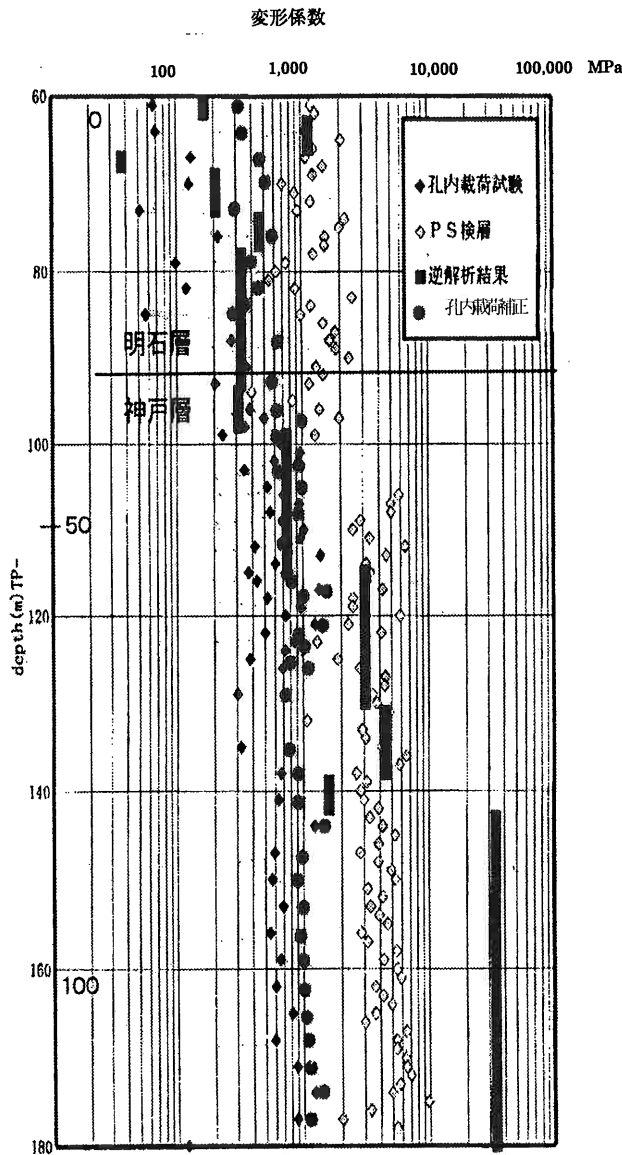


図-5 各種変形係数の深度分布  
(新田他 (1998) に一部加筆)

深い深度に比べると接近しているが、それでもまだ孔内載荷試験による値が逆解析結果をやや下回っている。

さて、橋梁ピア基礎の荷重により基礎岩盤内に働く応力は、2章で論じた平板載荷試験と同様な圧縮側のみと考えられる。そのため、孔内載荷試験で得られた変形係数もさらに平板載荷試験による変形係数に換算して後に、逆解析結果の変形係

数と対比する必要があると考えられる。

このような考えから、図-5に示されている孔内載荷試験による結果(◆印の点)に、図-3で示される関係をもとに平板載荷試験結果への換算を施して示したのが、同図中に●印で示した点の分布である。

この●印の分布を見ると、以前より逆解析の結果に近づいていることが伺える。つまり、このような応力機構の違いを考慮した変形係数の補正が、実測されたデータを基にした検討によりある程度正しいことが立証されたと云える。

4. 考察と今後の視点について

前節までの議論では、孔内載荷試験と平板載荷試験の関係について応力機構の違いによる観点とひずみ依存性つまりそれぞれの試験方法が対象としているひずみレベルの違いによる観点を結びつけ、それが実測されているひずみとの関係においてある程度説明することができた。

しかし、図-5の深度TP-120m以深にみられるように、実測されたひずみとほぼ同じひずみレベルであるPS速度検層による変形係数と逆解析による変形係数とは、まだ1オーダーの差異が見られる。そして、この説明はひずみ依存性や応力機構の違いでは説明はできていない。

この違いを説明する重要なキーワードの1つに応力伝搬の問題があると考えられる。

この違いを説明する重要なキーワードの1つに応力伝搬の問題があると考えられる。

逆解析による変形係数は、応力を Boussinesq による理論解によっている。しかし、図-5のケースのようなケーソン荷重の岩盤内への伝搬が弾性理論通りかどうかはここでは、立証されていない。例えば、 $10^6$ 程度のひずみであるPS速度検層に

よる変形係数が正しいとするならば、逆解析で使用した応力は大きすぎ、実際の応力はもっと小さいであろうと推定される。(武内等, 1976)による孔内載荷試験の模型実験の結果においても上のことが示唆されている。

この種の変形や岩盤物性について検討を深めて行く上で、真の応力分布を求める実験や測定手段の開発は不可欠なものと思われる。

#### 引用文献

- 新田篤志・山本茂樹・武内俊昭・中西昭友  
(1998)：地盤の変形性に影響を与える要因  
と橋梁基礎の合理的な沈下予測についての考  
察. 第10回 岩の力学国内シンポジウム講演論  
文集, pp.305～310
- 宮島圭司・越智啓登・武内俊昭・鈴木楯夫  
(1979)：孔内載荷試験による岩盤変形挙動  
のモデル実験. 第12回岩盤力学に関するシン  
ポジウム 講演概要集 pp.96～100
- 武内俊昭・鈴木楯夫・田中荘一(1976)：孔内載  
荷試験と岩盤の変形に関する特性の研究. 土  
と基礎Vol.24,No.1 pp.35～41
- M. Roca., et al, (1956) Determination of the  
Deformability of Rock Masses along Boreholes,  
Proceedings of the first Congress of the ISRM