

(117) 平板載荷試験における載荷板変位と 地中ひずみによる弾性係数の比較

応用地質株式会社 正会員 ○船戸 明雄
応用地質株式会社 小倉 均

Comparison of Deformation Moduli from Plate Displacements and from Rock strains
under in-situ Plate Loading Tests

Akio FUNATO, OYO Corporation
Hitoshi OGURA, OYO Corporation

Abstract

A plate loading test is one of the most popular tests for determining the in-situ modulus of deformation of rock mass. Usually, in this test, rigid plates are loaded against excavated surfaces and displacements of the plates are measured, so the influence of a damaged zone by excavations is inevitable.

For evaluating deformation characteristics of sedimentary soft rocks, the authors measured not only displacements of the plates but also strains within rock mass during plate loading tests. Therefore strain distributions under plates were obtained and the strain level dependency of deformation modulus could be clarified. And it appears that if desirable conditions and suitable procedures are chosen, then obtained deformation moduli from displacements of plates are practically equal to those determined from strains within rock mass.

1. まえがき

岩盤の平板載荷試験は、ダム、橋梁、原子力発電所などの土木工事において、基礎岩盤の変形特性を把握する目的で広く用いられている。この試験では、調査横坑などの岩盤表面を剛性載荷板で載荷し、その時得られた載荷板の変位から岩盤の変形特性を評価している。しかし岩盤の表面は、掘削による乱れや応力解放の影響により多少なりともゆるんでいること、また載荷板と試験面の間のなじみによるエラーのため、載荷板の変位によって岩盤の変形特性を正しく評価することは困難であるとの指摘もある。

ここでは平板載荷試験の際に計測された載荷板変位と載荷面下の地中ひずみによる弾性係数について比較・検討し、原位置における弾性係数の評価方法について得られた知見を述べる。

2. 地質概要

試験地点は、大深度地下構造物の設計・施工に係わる基礎資料

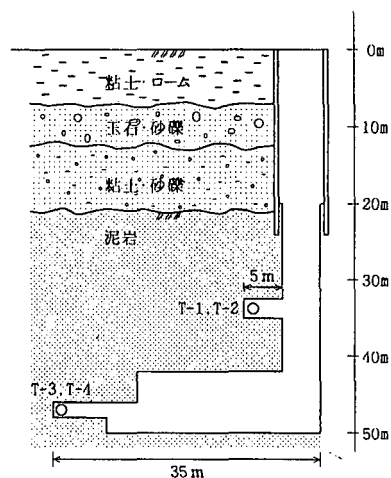


図-1 実験空洞の形状と試験位置

を得る目的で、東急建設（株）が神奈川県相模原市郊外に掘削している実験空洞（STUD）内の試験横坑である（図-1）。試験対象の地層は第三紀上総層群の泥岩である。この泥岩は所々に細～中粒砂の薄層を挟んでいるが、概ね塊状である。層理面は北東に約10度傾斜する単斜構造である。割れ目は30～40cm間隔で連続性に欠け、しっかり密着して充填物はほとんど認められない。試験面は顕著な割れ目や砂層を避けて選定したが、割れ目状況は試験面毎にいくらか差がみられた。T-1、T-3は試験面に開口気味の割れ目が存在し、T-3ではひずみ計埋設孔の深度50cm付近から湧水が認められた。

3. 試験方法

平板載荷試験は地表からの深度35mおよび50mの試験横坑において、側壁の両面に試験面を設け、水平方向に同時に載荷する方法で行った（図-2）。

試験横坑は手堀りで掘削されているので乱れは少なかったが、さらに30cm程度掘り込んで試験面を入念に整形した。載荷面下の地中ひずみを計測するため、試験面整形後中心に掘削したボーリング孔内に埋込型ひずみ計を設置した。ひずみ計の設置方向は、T-1、T-2ではボーリング孔軸（載荷軸）方向およびそれに直交する半径方向（水平と鉛直）の3方向、T-3、T-4ではボーリング孔軸方向のみとした（表-1）。所定の載荷パターンにしたがって載荷し、一定の時間間隔で地中ひずみ、載荷板変位および載荷荷重のデータを収録した。

4. 試験結果と考察

載荷面に加わる平均応力（ジャッキの実荷重を載荷板の面積で除したもの、以下「応力」と呼ぶ）と載荷板変位の関係、および応力と軸ひずみの関係から次式で各係数を求めた。

$$Et, Es = (1 - \nu^2) \cdot \frac{\pi a}{2} \cdot \frac{P}{\delta} \quad \text{----- (1)式}$$

$$Ee = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \varepsilon z} \cdot \frac{(1 - 2\nu) + (3 - 2\nu) \cdot \zeta^2}{(1 + \zeta^2)^2} \quad \text{----- (2)式}$$

Et：載荷板の変位による接線弾性係数(kgf/cm²)

Es：載荷板の変位による割線弾性係数(kgf/cm²)

Ee：地中の軸ひずみによる弾性係数(kgf/cm²)

ν：ポアソン比(0.33)

a：載荷板の半径(cm)

P：応力(kgf/cm²)

δ：載荷板の変位(cm)

ε z：地中の軸ひずみ

ζ：z/a

z：深度(cm)

表-1 ひずみ計の設置深度

試験No.	載荷板径	ひずみ設置方法	ひずみ径設置深度
T-1	φ60cm	直交3方向	25, 50, 100, 200, 300cm
T-2	φ60cm	直交3方向	25, 50, 100, 200, 300cm
T-3	φ30cm	軸方向のみ	10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160, 200cm
T-4	φ60cm	軸方向のみ	10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160, 200cm

また両式の右辺が等しいとおくと次式が得られる。

$$\frac{\varepsilon z}{\delta} = \frac{1}{(1 - \nu) \cdot \pi a} \cdot \frac{(1 - 2\nu) + (3 - 2\nu) \cdot \zeta^2}{(1 + \zeta^2)^2} \quad \text{----- (3)式}$$

4-1 応力と変位、応力と軸ひずみの関係の比較

試験結果の一例としてT-2とT-4の応力と変位、応力と軸ひずみの関係を図-3～図-7に示す。図-3、図-4に示したT-2の結果では、応力と変位、応力と軸ひずみの関係はいずれも線形でヒステリシスも少なく、ほとんど同じような形状を示している。このことはゆるみの影響や載荷板と試験面のなじみの影響がほとんどなかったことを表わしている。一方、図-5に示したT-4の応力と変位の関係は、低応力レベルで下に凸でありT-2に比べヒステリシスが大きい。ところが図-6、図-7の応力と軸ひずみの関係は、T-2と同様に線形でヒステリシスも少ない。T-2とT-4の試験に用いた装置、方法は全く同じであり、岩石物性にもほとんど差はない¹⁾ことから、これらの違いは試験面の割れ目や表面のゆるみの違いを反映したものと考えられる。

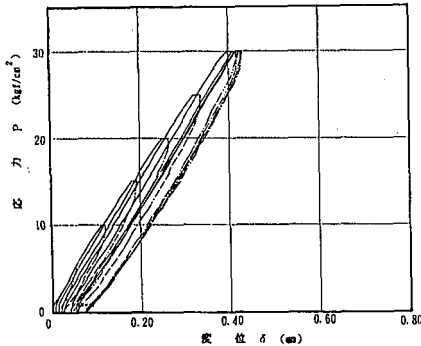


図-3 応力と変位の関係(T-2)

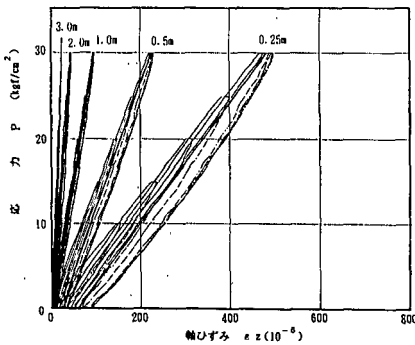


図-4 応力と軸ひずみの関係(T-2)

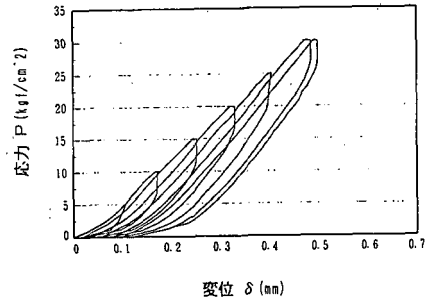


図-5 応力と変位の関係(T-4)

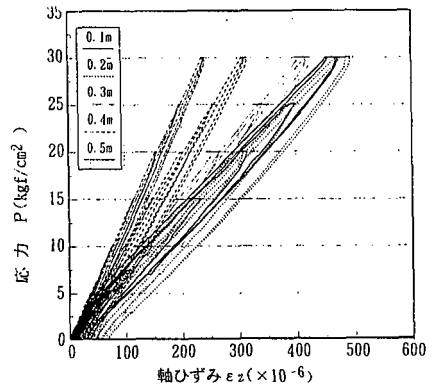


図-6 応力と軸ひずみの関係(T-4)

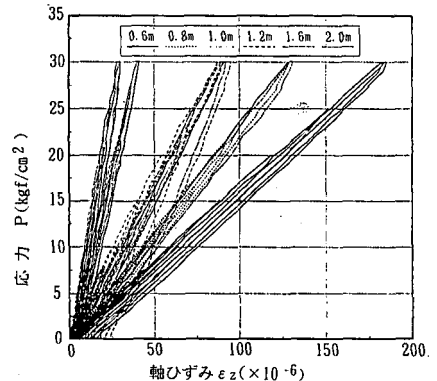


図-7 応力と軸ひずみの関係(T-4)

4-2 軸ひずみの深度分布

(3)式による弾性解とT-2, T-4の実測値をプロットして図-8、図-9に示す。T-2の実測値は応力レベルによる差はほとんどなく、弾性解に近い結果となっている。T-4の実測値は、特に浅い深度で応力レベルによる差が大きく、弾性解と分布形態は似ているが全般に値が小さめであった。これは(3)式の載荷板変位 δ には、地盤表面のゆるみや割れ目による載荷初期の非線形な変位が含まれていることによる。

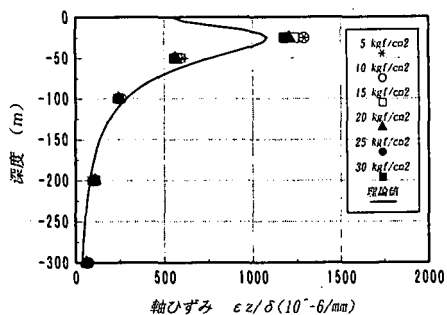


図-8 軸ひずみの深度分布(T-2)

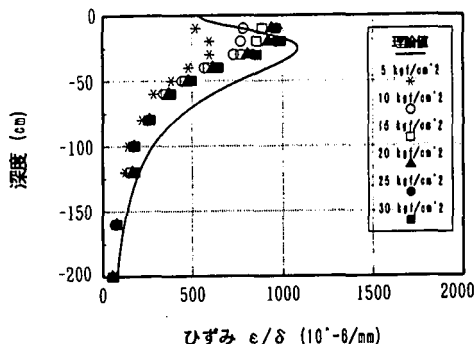


図-9 軸ひずみの深度分布(T-4)

4-3 軸ひずみの深度分布から回帰したEeとEt, Esの比較

T-2, T-4で得られた軸ひずみの深度分布を(2)式に回帰して求めたEeと変位によるEt, Esを同じ応力レベルで比較して図-10に示す。図中の□, ■印はT-4の全深度11点のデータを用いて回帰した場合、○, ●印は浅部10cmと20cmのデータを除いた9点で回帰したものである。载荷初期の変位の非線形な挙動にかかわらずEeとEtはほぼ一致している。特にT-4の浅部の2点を除いた場合には極めて良い一致を示している。これを軸ひずみの深度分布に示せば図-11のようになる。図中の曲線は、各応力レベルにおいて9点の軸ひずみの値から得られたEeを、(2)式に代入して求めたεzの弾性解である。

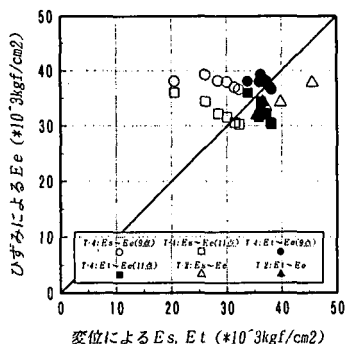


図-10 ひずみと変位による弾性係数(T-2, T-4)

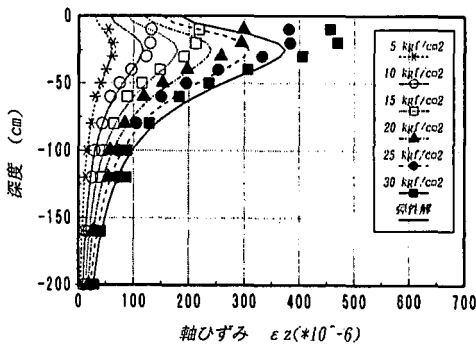


図-11 軸ひずみの深度分布(T-4)

4-4 Eeのひずみレベル依存性

T-1~T-4の各深度の軸ひずみから求めたEeとひずみレベルの関係をすべてプロットして図-12に示す。全体にばらつきはあるもののひずみレベルが大きくなるにしたがってEeが小さくなる傾向が認められる。特に同一のひずみ計でみればより明瞭にその傾向が認められる。当サイトの泥岩については各種の原位置試験や室内試験が実施されており、変形特性のひずみレベル依存性が明らかにされている¹⁾。本試験で得られた結果は、既報のひずみレベル依存性の傾向と整合しているが、Eeの値そのものについてはばらつきが大きい。これ

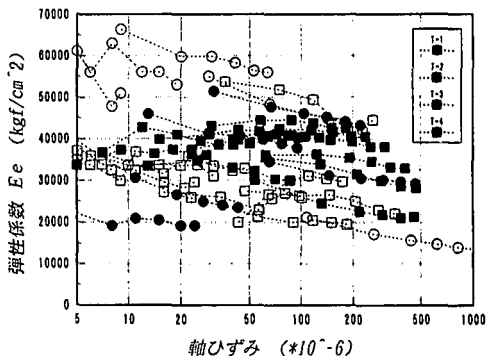


図-12 軸ひずみによるEeとひずみの関係

は計測されたひずみは局所的なものであり、岩盤の不均質性の影響をうけやすいこと特に開口性の割れ目のあったT-1やT-3ではその影響が大きかったためと推定される。またそのような場合には載荷面下の応力分布が連続体としての弾性解からはずれていることが予想される。

4-5 半径ひずみの深度分布

T-1, T-2では載荷軸に直交する半径方向（水平と鉛直）の地中のひずみを計測した。その結果を図-13に示す。図中の実線は軸対象FEMによる弾性解析結果である。実測値は全深度にわたってFEM解析値にほぼ等しいもの（T-2水平）もあるが、浅部で解析値よりかなり小さくなっているものもある。これは表面付近のゆるみの影響や計測されたひずみの変化が小さい（ほとんどが $100\mu s$ 以下）ことによるノイズの影響のほか、載荷軸に直交する方向なのでポアソン比に敏感なこと（FEMでは $\nu=0.33$ として計算）によるものと考えられる。

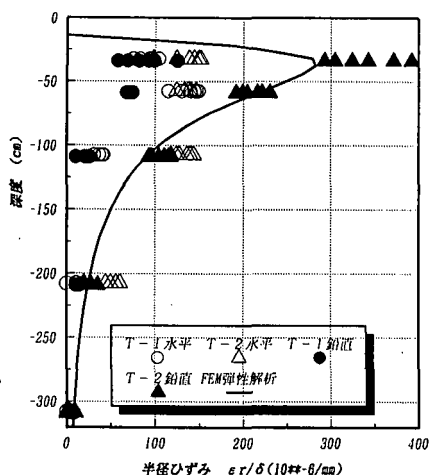


図-13 半径ひずみの深度分布(T-1, T-2)

5. まとめ

第三紀の泥岩を対象とした平板載荷試験の際、載荷面下の地中ひずみを計測した。その結果から以下のことが明らかになった。

- ①地盤条件が良く細心の注意を払って試験を行えば、応力と変位の関係は応力とひずみの関係にほぼ等しく、載荷板変位から岩盤の変形特性を正しく評価できる。
- ②測定された載荷面下の地中ひずみは、弾性解と同じような深度分布を示している。
- ③ゆるみや割れ目の影響により応力と変位の関係が非線形の場合でも、応力とひずみの関係は線形弾性的である。
- ④そのような場合でも、載荷板変位による接線弾性係数はひずみによる弾性係数にほぼ一致する。
- ⑤ひずみを計測することで弾性係数のひずみレベル依存性を評価することができる。

但し以上の検討では、岩盤は等方均質な弾性体であること、載荷板は剛性であること、ひずみ計によるひずみは周辺岩盤のひずみに等しいことなどを暗黙に仮定している。これらは厳密に言えば完全に成り立っている保証はなく、今後の検討課題として残されている。

最後に、本試験は東急建設(株)のSTUDプロジェクトのなかで実施されたものであり、試験にあたっては東急建設(株)越智健三氏、壺内達也氏らのご協力を頂いた。末筆ながら感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1)越智健三・金 有性・龍岡文夫：ひずみ依存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討，土木学会論文集，No. 463/Ⅲ-22, PP133～142, 1993. 3