

(32) 堆積軟岩の室内・原位置試験による変形係数とその解析への応用

東急建設㈱ 技術研究所 越智健三
東急建設㈱ 技術研究所 壺内達也
東京大学 大学院 金 有性
東京大学生産技術研究所 龍岡文夫

Deformation Properties of Mudstones from Laboratory Tests and Field Measurements and It's Application to Numerical Analysis

Kenzou OCHI, Tokyu Construction Co., Ltd.
Tatsuya TSUBOUCHI, Tokyu Construction Co., Ltd.
You-seong KIM, Graduate Student, Tokyo University
Fumio TATSUOKA, Institute of Industrial Science, Tokyo University

ABSTRACT

Of a sedimentary soft rock, Sagami-hara mudstones, the stiffness was measured by the triaxial compression tests (TC) by using LDT, and they were compared, taking into account its strain-level dependency, with those from the seismic survey and the pressuremeter tests performed in the bore hole from which the TC samples were taken. Then, from the deformation of ground by excavation at the same site. The modulus of deformation was back-calculated by three dimensional and plane strain FEM analysis and was compared with the values obtained as above.

1. はじめに

圧縮強度が $10\sim 100\text{kgf/cm}^2$ の堆積泥岩は、剛性率が大きい。しかも、地盤として比較的一様に堆積しており、亀裂の影響をそれほど受けないと考えられる。このような地盤に構造物を構築する場合、構造物の応力～変形状態を合理的に解析するためには、広範囲なひずみ状態(0.0001%～1%)レベルでの正確な変形係数が必要となる。また、微小ひずみレベルにおける初期変形係数 $E_{0.001}$ と圧縮強度との関係が明らかになれば、非常に実用的である。さらに、原位置弾性波速度・孔内水平載荷試験などの原位置測定値と室内三軸試験結果との関係が明らかになれば、より正確に原位置の変形特性を推定できる。

そこで本報告では、神奈川県相模原市郊外の段丘地における地下掘削実験工事に関連して、中津層堆積泥岩を対象に以下のことを調べた。まず、三軸圧縮試験において軸ひずみを供試体側面で正確に測定した変形係数 ϵ と、試料採取した同じ孔内で測定した弾性波速度による変形係数および孔内水平載荷試験で得られた変形係数を比較した。次に、掘削工事による実測変形量を説明できる変形係数を3次元および平面ひずみFEMにより評価し、室内・原位置試験で測定された変形係数との関係を考察した。

2. 地盤概要および試験方法

対象とした地盤は、神奈川県相模原市郊外の段丘地における掘削工事に関するもので、当地は、相模川より約500m離れた地点である。掘削は、泥岩部を素掘り工法で実施した。代表的柱状図を図1に示す。GL-7m付近までは、立川ロームが堆積しており、その下GL-12.5m付近までは、田名原層と呼ばれる最大粒径が1m以上にも及ぶ礫層が堆積していた。GL-21.5m付近までは、座間丘陵礫層と呼ばれる粘土化した風化礫を主とする礫層が堆積し、その下が中津層泥岩となる。この泥岩は、約500万年前に堆積したシルトからな

ると言われており、シーム状に挟んでいる砂層は、砂岩にはなっていないものの、密に締まった状態であった。掘削面の観察結果から浅部の泥岩には縦亀裂が走っていたが、GL-30m付近を過ぎると目視では、かなり一様と見える状態になった。シュミットハンマーによる定性的な母岩の評価としては、深度方向にしたがって強くなるような結果となった。泥岩の平均圧縮強度 q_{max} は50kgf/cm²である。平均単位体積重量は $\gamma = 2.0 \text{ tf/m}^3$ である。本報告では、GL-39mまでについて結果を述べる。

原位置弾性波速度は、サスペンション法によるPS検層より求めた。変形係数 E_r は、(1)式により求めた。

$$E_r = 2(1 + \nu) \gamma \cdot V_s^2 / g \cdots (1)$$

ここで、密度 ρ は、密度検層の値ではなく室内試験の結果を用いた。

孔内水平載荷試験は、体積変化を測定する等分布載荷法で行った。換算半径を次式で求めた。

$$r = \{ (1/\pi L) (V_0 + \Delta V - V_0) \}^{1/2} \cdots (2)$$

ひずみ量は、次の関係が与えられている²⁾。

$$\Delta \varepsilon_1 = -\Delta \varepsilon_\theta = -\Delta r / r \cdots (3)$$

変形係数 E_{BHLT} は、圧力変化 ΔP より、次式で求めた。

$$E_{BHLT} = (1 + \nu) \Delta P / \Delta \varepsilon_1 \cdots (4)$$

ここで、ポアソン比 ν は、0.33とした³⁾。

同時に、原位置試験を実施したボーリング孔からコアバック（直径約70mm）で採取した試料について、三軸試験を行った¹⁾。なお、載荷軸とキャップは固定している。

3. 室内および原位置測定による変形係数

図2は、室内三軸試験から得られた初期の最大変形係数 E_{max} (LDT)と、原位置弾性波速度で測定した変形係数 $E_r = 2(1 + \nu) \gamma \cdot V_s^2 / g$ および孔内水平載荷試験で得られた変形係数 E_{BHLT} を比較したものである。この図より、原位置弾性波速度で得られる変形係数 E_r と室内三軸試験で微小ひずみ測定装置(LDT)により測定した変形係数 E_{max} は、20000~40000kgf/cm²の範囲で非常に良く一致していることが分かる。弾性波速度が原位置の亀裂等の影響を含んだ微小ひずみでの変形係数を与えることからすれば、この泥岩では原位置の亀裂等の影響は小さく、室内三軸試験で正確な、しかも原位置を代表する応力~ひずみ関係を求めることが可能であることを示していると言える。一方、孔内水平載荷試験から得られた変形係数 E_{BHLT} は、弾性波速度および三軸試験から得られた変形係数より非常に小さい値である。これは、孔内水平載荷試験で求めている変形係数は、弾性係数ではなく、ひずみが相当大きいレベルで求めた値であるためと思われる。

図3は、孔内水平載荷試験の降伏強度(Limit Pressure)と三軸試験のピーク強度($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}を比較したものである。三軸試験は非排水条件であるが、孔内水平載荷試験は、排水条件と考えられる。今、この泥岩のピーク強度($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}がピーク強度時の σ_2 、 σ_3 に左右されないと仮定して両者の強度の比較をすると、三軸試験による非排水強度の方が低い値を示している。しかし、排水条件のピーク値は、孔内水平載荷試験の降伏強度ライン上に載る。ことからすると孔内水平載荷試験の変形係数は、三軸試験に対して、ピーク強度またはそれ以降のひずみレベルで求めていることが推測される。

図4は、原位置測定弾性波速度および孔内水平載荷試験から得られた変形係数と室内三軸試験から得られた変形係数を、ひずみレベルを一致させて表示したものである。同図の三軸試験の結果の内、LDTは直接供試体側面で測定した結果であり、Externalは通常の三軸セル外部での変位測定による結果である。なお、弾性波速度の変形係数は、その深度の三軸圧縮強度で除し、孔内水平載荷試験の変形係数は、そのピーク強度で除し、三軸試験の(変形係数/圧縮強度)と同様に正規化表示してある。また、同図の線FFは $q = q_{max}$ の状態を表していて、孔内水平載荷試験の降伏圧と三軸試験のピーク強度のデータがこの上にくる。この図より、原位置測定値とLDTによる三軸試験結果は、ひずみレベルに応じてほぼ同一の曲線として表示できることが分かる。一方、孔内水平載荷試験結果は、コアサンプルの非排水ピーク強度を超えたひずみレベルで変形

係数を測定していたことが分かる。従来測定方法であるExternalの曲線は、この孔内水平載荷試験結果に連なる曲線となる。この図より、変形係数を線型で近似する時、その値 E_{max} は、圧縮強度 q_{max} の400~800倍程度の値となることが分かる。 10^{-2} のひずみ以前にピーク強度に至っており、慣用的に言われていた圧縮強度の50~100倍の変形係数は、ピーク強度を過ぎたひずみレベルに相当する変形係数であることが分かる。

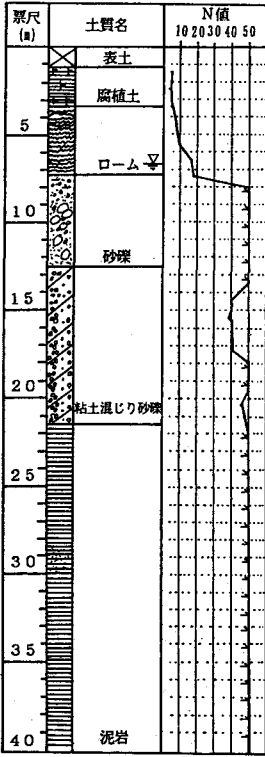


図1. 柱状図

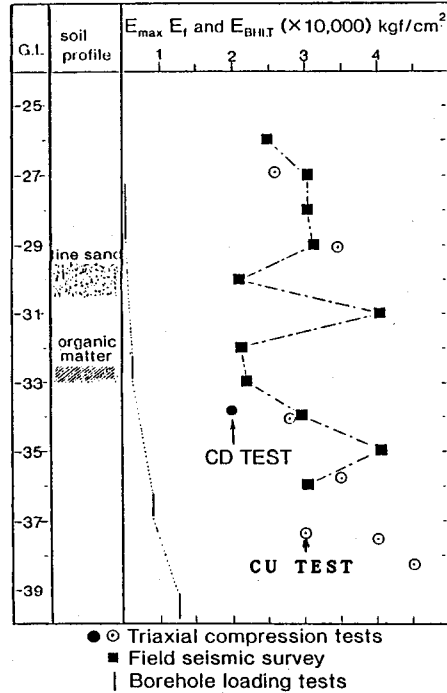


図2. 室内および原位置試験による変形係数

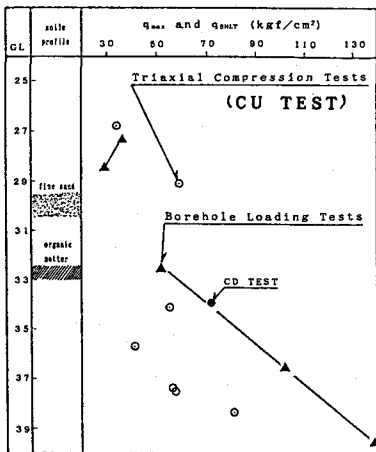


図3. 三軸試験と孔内載荷試験の強度

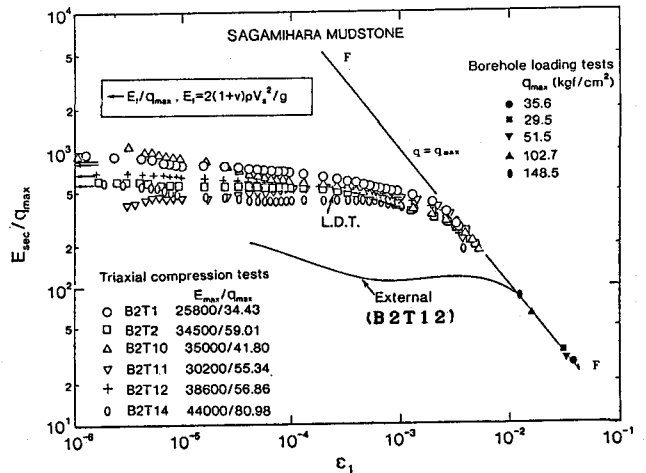


図4. 変形係数の圧縮強度比とひずみレベル

4. FEMによる変形係数

室内・原位置測定で得られた変形係数を実際の設計・施工に合理的に反映させるためには、これらが実測

値をシミュレートするための変形係数とどのような関係にあるのかを検討しておくことが重要である。現在、現場をシミュレートする解析手法としてはFEMがかなり一般に用いられている。そこで、現場実測値を基にFEMの入力定数としての変形係数と室内・原位置測定による変形係数を比較した。

図5図6に、FEMモデルを示す。図5は、3次元モデルで図中のA方向断面が図6の平面ひずみモデルと同じになるようにした。境界条件を簡便にするため、解析要素は泥岩層(G.L.-20m以深)のみとし、ローム・砂礫は上載荷重として与えた。解析モデルの大きさは、掘削による水平変位がほぼ一定値に収束する水平・鉛直長で定めた。解析は弾性解析とし、水平方向の応力をK値(σ_h/σ_v)により考慮した自重解析の後、9m×5mの立坑部の要素を除荷した。

図7に実測値と解析値の比較の一例を示す。変形係数を均一に30000kgf/cm²と3000kgf/cm²に設定した結果であり、このときの変形係数は、それぞれ、平均圧縮強度の600倍および60倍に相当する。初期応力比K値は0.5、ポアソン比は0.33とした。実測値は、掘削面から50cm奥に地表から埋め込まれた多段式傾斜計により測定したものである。結果は、深度方向(縦軸)に対する水平変位(横軸)で示してある。この図より、3次元解析と平面ひずみ解析では結果にかなりの差があることが分かる。平面ひずみ解析による変位量は、3次元解析より3倍近く大きい。また、平面ひずみ解析ではE=30000kgf/cm²の値がかなり実測値と近いが、3次元解析では実測変位量は、E=30000kgf/cm²とE=3000kgf/cm²の中間程度であることが分かる。

図8は、解析上で節点の水平変位が実測値と概略一致するときの変形係数を深度方向に表示したものである。横軸上部は、平均圧縮強度を $q_{max}=50\text{kgf/cm}^2$ としてE/ q_{max} の値を示している。同図には、3次元解析および平面ひずみ解析共それぞれ、K=0.5とK=1.0の場合を示している。また、図2で示した室内三軸試験結果と原位置弾性波速度試験結果および孔内水平載荷試験結果も示した。この図より、室内三軸試験結果および原位置弾性波速度試験結果は、平面ひずみ解析によるK=0.5~1.0の変形係数とたまたま非常によく一致していることが分かる。すなわち、平面ひずみ解析では、圧縮強度の400~800倍程度の変形係数が実測値から評価されることになる。一方、3次元解析で実測値から評価される変形係数は、これらの値より低く圧縮強度の150~400倍程度の変形係数となる。この値は変形係数のひずみレベル依存性を考えても少し小さすぎるようである。しかし、今回の解析は弾性解析なので、ひずみが集中するコーナー部分の変形係数を過大にみて図5点Bでの計算上の変位を過小に見積もる可能性(すなわち、実測に合うための変形係数を過小に見積もる可能性)がある。また、Kの値も不確定要素としてある。しかし、少なくとも孔内水平載荷試験結果は、3次元および平面ひずみ解析より非常に小さい変形係数を与えていることが分かる。

5. まとめ

相模原市郊外における中津層堆積泥岩の原位置測定試験および正確に変位を測定した室内三軸試験、さらに実測値を基にしたFEMより、変形係数について以下のことが分かった。

- (1) 原位置弾性波速度から得られた変形係数 E_r とコアサンプルの室内三軸試験による最大変形係数 E_{max} は一致する。すなわち、原位置の地盤の評価に亀裂等の影響があまりないと見なされ、室内三軸試験により正確に求めた応力~ひずみ関係を原位置に当てはめることができる。
- (2) 線型で近似できる変形係数(弾性係数) E_{max} の値は、圧縮強度 q_{max} の400~800倍である。圧縮強度の50~100倍の変形係数は、ピーク強度を過ぎたひずみレベルに対するものである。また、試験のひずみレベルを一致させると、原位置測定値と室内三軸試験から、広範囲なひずみレベルに対しての統一的な応力~ひずみ関係が得られる。
- (3) 平面ひずみFEMで実測値から評価される変形係数は、たまたま室内三軸および原位置弾性波から測定される変形係数 $E_{max}=E_r$ と等しい。一方、3次元FEMでは、圧縮強度の150~400倍の変形係数が評価された。また、孔内水平載荷試験による変形係数は著しく小さすぎる。したがって、実際のEは $E_{max} \cdot E_f$ がひずみ依存性により低下した値であると思われる。

<参考文献>

- 1) 金・越智・龍岡：三軸圧縮試験による軟岩の変形係数及び圧縮強度との関係。第8回岩の力学国内シンポジウム，1990
- 2) F.Baguélin, J.F.Jezequel and D.N.Shields :The Pressuremeter and Foundation Engineering, Series on Rock and Soil Mechanics, TRANS TECH PUBLICATIONS, p.348-381, 1978
- 3) 土質工学会編：土質調査法 一第2回改訂版一，p.405-420, 昭和58年

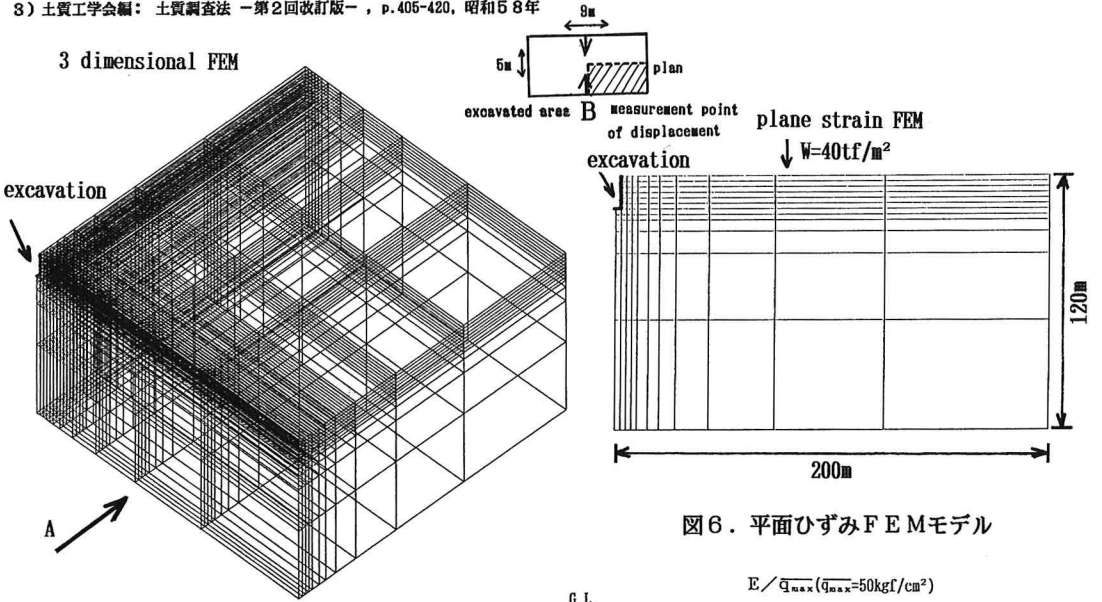


図6. 平面ひずみFEMモデル

図5. 3次元FEMモデル

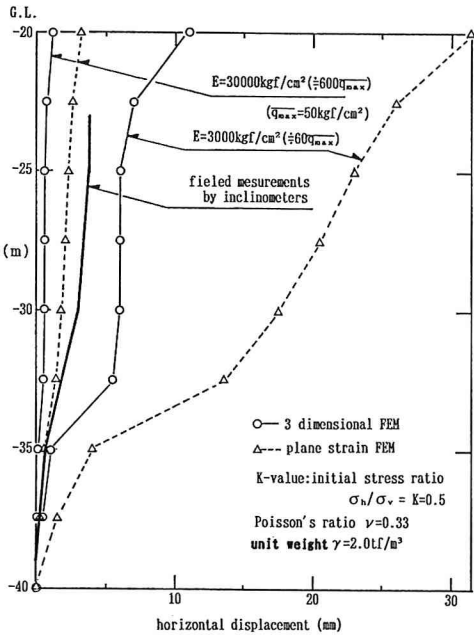


図7. FEM変形解析結果

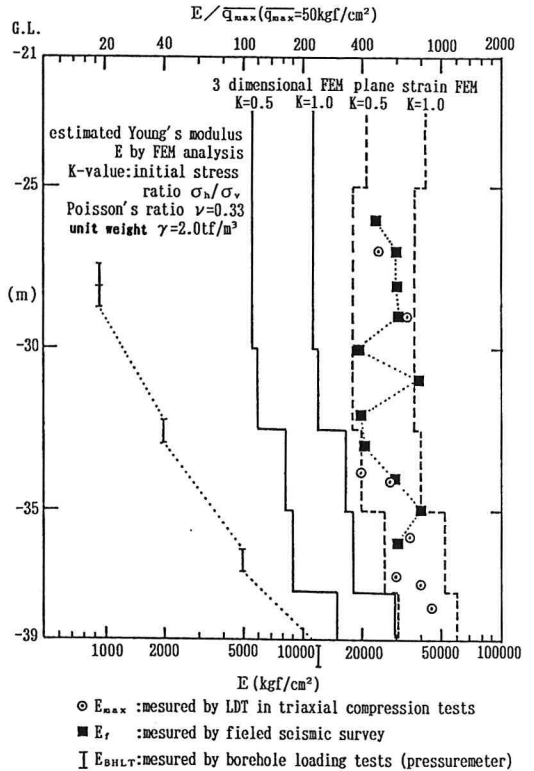


図8. 評価される変形係数