

堆積軟岩上の平板載荷試験におけるポアソン比の検討 Research on Poisson's Ratio of Plate Loading Test on Sedimentary Soft Rock

岡田哲実*・谷 和夫**・田中幸久***・百瀬和夫****

Tetsuji OKADA, Kazuo TANI, Yukihiisa TANAKA and Kazuo MOMOSE

The purpose of this research is to further investigate the stiffness values of soft rocks evaluated by plate loading tests (PLT) and laboratory tests. Four plate loading tests were performed on sedimentary soft rock of siltstone and were simulated by FEM analyses. In FEM analyses, non-linear elastic models were used based on the results of triaxial compression tests which were conducted under consolidated and undrained (CU), and consolidated and drained (CD) condition. As a consequence, PLTs were successfully simulated by FEM analyses under CD condition. In this paper, the validity of the simulation under CD condition will be examined based on the measured strain distributions within the ground, displacement distributions on the ground surface outside the plate and pore water pressure within the ground.

1. はじめに

国内では、岩盤(マス)の変形特性を調査する場合、不連続面を有する硬岩のみならず軟岩においても、原位置試験である平板載荷試験が重視されている。一方、比較的均質な軟岩に関しては、一般的に節理・クラック等の不連続面の影響が無視できるほど小さいことが多く、サンプリングされた不攪乱試料(コア)を用いた室内要素試験によって岩盤(マス)の力学特性を評価できることが最近の研究で明らかになってきた¹⁾。室内要素試験と境界値問題である平板載荷試験の相互関係を明らかにするためには、要素特性をモデル化した数値解析の結果と平板載荷試験の結果を比較・検証する必要がある。実際、砂岩および泥岩地盤において、この比較から数値解析の結果と試験結果がほぼ整合したという報告も見られる²⁾。

以上を背景として、本研究では、堆積軟岩地盤でのコアによる変形特性評価手法の信頼性向上を目的としている。これまでに著者らは、シルト岩地盤にて、CU三軸圧縮試験および弾性波速度計測の結果からモデル化した数値解析の結果と原位置で実施した平板載荷試験の結果の比較を試みた³⁾。それによると、解析結果は試験結果と比較しておよそ半分程度の載荷板変位を示す結果となった。この理由について、載荷板端部の応力集中に伴う局所破壊、掘削に伴う載荷面近傍の剛性低下(ゆるみ)、ポアソン比の仮定、これら3つの視点から各種計測結果を基に考察した結果、ポアソン比の仮定に問題があったことが明らかとなった⁴⁾。そこで、本論文では、新たにCD三軸圧縮試験の結果を用いた数値解析と試験結果を比較するとともに、原位置のポアソン比について、地表面変位および地盤内ひずみの計測結果を用いた逆解析、および間隙水圧の計測から考察を試みた。

* 正会員 (財)電力中央研究所
** 正会員 Ph.D (財)電力中央研究所
*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所
**** 正会員 東京電力(株)

2. 試験の概要

試験実施位置は、地表から約30m下の試験坑内であり、新第三紀鮮新統のシルト岩からなる。試験面近傍に節理は認められず、おおむね均質である。地下水面は地表面とはほぼ一致している。平板載荷試験に先立って、弾性波速度の計測及びブロックサンプリングを行った。

試験坑内約11mの区間において、計4回の平板載荷試験を行った(表-1)。Case1は直径60cmの円形剛板による平板載荷試験であり、Case2は直径60cmのダイヤフラムによる平板載荷試験である。Case1とCase2では、載荷重、載荷板変位、載荷板周辺の垂直・水平2方向の地表面変位の計測以外に、地盤内のひずみの計測を行った(図-1)。また、Case1では載荷板下の応力分布、Case2では載荷板下の変位分布も計測している³⁾。Case3は、国内で最もよく実施されている直径30cmの円形剛板による平板載荷試験である。Case4は、30×90cmの長方形剛板による平板載荷試験である。Case4では、間隙水圧を測定するため、載荷板中心の深さ15cmの位置に水圧計を埋め込んだ。

Case1～4の載荷速度は、0.19MPa/minである。載荷パターンは、Case1、Case2では0.49MPaピッチで0MPaまで除荷しながら、最大2.94MPaまで載荷した(図-2(a))。ただし、0.98、1.96、2.94MPaでは、2時間荷重保持した。Case3、Case4では0.98MPaピッチで0MPaまで除荷しながら変形試験を行い、そのまま引き続き地盤が破壊するまで載荷した(図-2(b))。ただし、1.96、3.92MPaでは、2時間荷重保持した。

3. 平板載荷試験の数値解析の概要

平板載荷試験の数値解析では、変形試験のみを対象とし、非線形弾性モデルを用いた。堆積軟岩には、主に圧力(拘束圧)とせん断に伴う応力-ひずみ関係の非線形性が存在する⁵⁾。本地点のシルト岩については、圧力レベルに伴う非線形性は顕著でないため³⁾、せん断レベルに伴う非線形性のみ考慮して、接線せん断弾性係数 G_{tan} を次式のように定式化した。

$$G_{tan} = G_{max} \cdot f(q/q_{max}) \tag{1}$$

G_{max} は初期弾性係数、 q は軸差応力、 q_{max} は最大軸差応力である。式(1)中の関数 $f(q/q_{max})$ を原位置からブロック

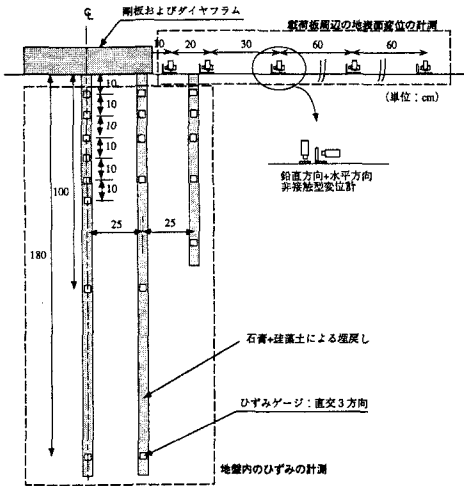
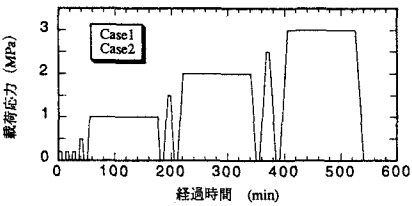


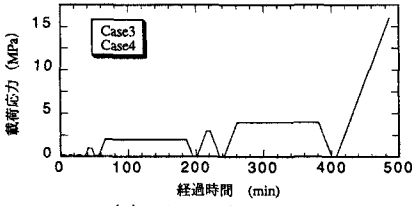
図-1 ひずみゲージと変位計の配置 (Case1,2)

表-1 平板載荷試験一覧

Case	載荷板	寸法 (cm)	試験内容	その他
1	円形剛板	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
2	円形ダイヤフラム	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
3	円形剛板	直径30	変形+支持力試験	
4	長方形剛板	30×90	変形+支持力試験	間隙水圧計測

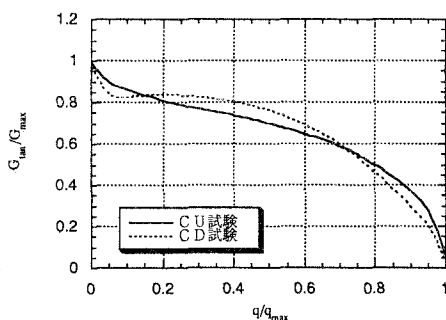


(a) Case1とCase2

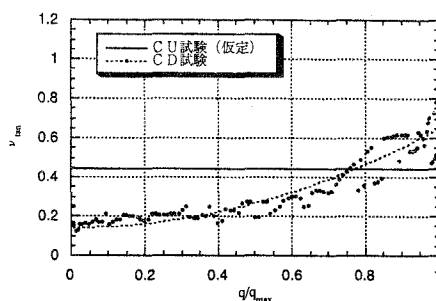


(b) Case3とCase4

図-2 載荷パターン



図－3 G_{tan}/G_{max} のせん断レベル依存性



図－4 ポアソン比のせん断レベル依存性

サンプリングした試料による圧密非排水（CU）および圧密排水（CD）三軸圧縮試験から求めた（図－3）。三軸圧縮試験では、ベッディングエラーを排除するために供試体の側面でひずみを計測した。また、図中の縦軸を正規化するための G_{max} は個々の三軸圧縮試験における、 2×10^{-5} のひずみレベルの初期せん断弾性係数を用いた。図－3 の関係を次式で近似した。

$$G_{tan}/G_{max} = f(q/q_{max}) = 1 + a \cdot (q/q_{max}) + b \cdot (q/q_{max})^2 + c \cdot (q/q_{max})^3 \quad (2)$$

これより、CU 三軸圧縮試験は、 $a = -1.49$, $b = 2.99$, $c = -2.38$ 、CD 三軸圧縮試験は、 $a = -1.26$, $b = 2.70$, $c = -2.41$ となった。

ポアソン比（ ν ）については、CU 三軸圧縮試験では計測していないため、弾性波速度計測の結果から算定されたポアソン比（ $\nu = 0.44$ ）一定の仮定を用い、せん断に伴う非線形性は考慮しなかった。CD 三軸圧縮試験では、供試体側面に貼り付けたひずみゲージによりポアソン比を計測し、せん断に伴う接線ポアソン比（ ν_{tan} ）の非線形性を次式で近似した。

$$\nu_{tan} = \nu_0 + d \cdot (q/q_{max})^2 \quad (3)$$

ν_0 は 2×10^{-5} のひずみレベルの初期ポアソン比である。これより、 $\nu_0 = 0.14$, $d = 0.5$ となった（図－4）。ただし、弾性解析の都合上、 ν が 0.5 を超えた場合は 0.499 で一定とした。

平板載荷試験の数値解析に用いる式（1）の G_{max} については、同一試験坑内にて行った弾性波速度計測（サスペンション PS）の結果から計算されるせん断弾性係数（ $G_t = \rho V_s^2 \approx 480$ (MPa)）を用いた。また、最大軸差応力 q_{max} は、CU および CD それぞれの三軸圧縮試験の結果から得た強度定数（ c , ϕ ）より求めた。以降では、CU および CD 三軸圧縮試験の結果からモデル化した以上の構成関係をそれぞれ CU および CD モデルと呼ぶ。

平板載荷試験の解析モデルは軸対称とし、モデル化領域は深さ方向 30m、水平方向 14.4m とした。境界は底面、側面ともにローラーとした。荷重 1 ステップの増分は 0.0981MPa、 q_{max} を超えた要素については、 G_{tan} を G_{max} の 1/1000 とした。

4. 試験結果と解析結果の比較

Case1～3 の平板載荷試験を対象に、CU および CD モデルを用いた FEM による数値解析の結果と試験結果を比較した（図－5）。解析結果の図中凡例「 V_s 低下考慮」とは、小区間弾性波速度計測から得られた載荷面の V_s の低下域の影響を補正した結果である。具体的には、載荷面約 10cm の深さで V_s が 1 割低下していた計測結果に関して、地盤を 2 層の線形弾性体と仮定した計算結果を基に、初期剛性の低下として補正したものである⁴⁾。ただし、剛性に対するこの影響は高々 10% 弱であった。試験結果と数値解析の結果から、Case1～3 の全てのケースを通じて次のこと言える。

・試験結果、解析結果ともに、荷重-変位関係の非線形性は顕著でない。

・CUモデルの解析結果とCDモデルの解析結果は、大きく異なる。

・CUモデルの解析結果は試験結果と比較して、かなり剛性を高く評価するが、CDモデルの解析結果は試験結果に近い。特にCase2については、試験結果とはほぼ一致し、Case1, 3についても、荷重レベルが小さい範囲では、かなり一致している。

以上のように、CUモデルの解析結果と異なり、CDモデルの解析結果は試験結果とかなり整合している。これは応力-ひずみ関係の非線形性ではなく、ポアソン比の違いによるものである。では、原位置のポアソン比（排水条件）は完全排水に近かったのだろうか。この点について、以下では、逆解析および間隙水圧の計測結果から考察を試みた。

5. ポアソン比の検討

5.1 ポアソン比の逆解析

図-5より応力-ひずみ関係の非線形性の影響は顕著でないため、本逆解析では、線形弾性を仮定した。荷重応力0.981MPaの計測データを用いて、せん断弾性係数(G)とポアソン比(ν)を同定した。逆解析手法として、修正マルカート法を用い、計測データと解析結果の誤差を最小化するように、くり返し計算を行った。用いた計測データは、①載荷板周辺の地表面変位（鉛直、水平2方向×5点）、②地盤内のひずみ（鉛直、水平2方向×19点）の2ケースであり（図-1）、地盤内のひずみを計測しているCase1とCase2のデータを用いた。逆解析により同定されたGと ν を表-2に示す。これより地表面変位から逆解析した結果は、Case1, 2ともに、 $\nu \approx 0.2$ となった。またGについても、弾性波速度計測から算出される $G_f (\approx 480 \text{ (MPa)})$ にかなり近い。一方、地盤内ひずみから逆解析した結果は、Case1, 2ともに、 $\nu \approx 0.27$ となった。地表面変位の逆解析結果より若干ポアソン比が大きいものの、それでも排水条件のポアソン比に近いと言える。これらの結果から、原位置の平板載荷試験は、かなり排水条件に近かったと推測される。

5.2 間隙水圧の計測結果

次に、Case4にて、長方形載荷板中心下15cmの位置に埋め込んだ水圧計により計測した間隙水圧の結

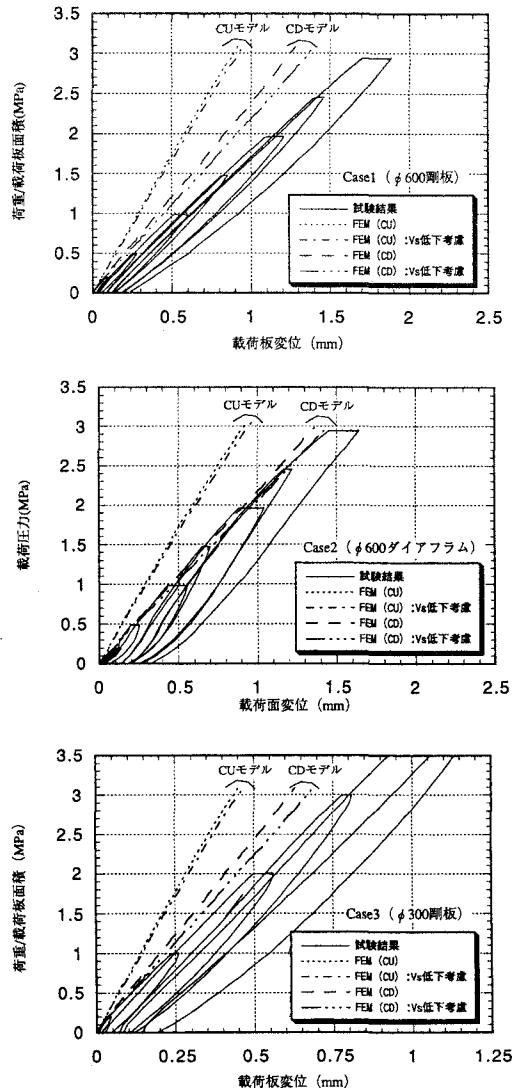


図-5 試験結果と解析結果の比較
(上: Case1, 中: Case2, 下: Case3)

表-2 逆解析より同定されたGと ν

試験 ケース	同定に用いた 計測値	逆解析	
		G (MPa)	ν
Case1	①地表面変位	487	0.21
	②地盤内ひずみ	496	0.27
Case2	①地表面変位	454	0.20
	②地盤内ひずみ	594	0.27

果から原位置の排水条件を考察する(図-6)。図より、約6MPaの荷重レベルまでは、ほぼ線形に水圧が発生し、それ以上の荷重レベルでは、急激に水圧が上昇している。完全な排水条件であれば、水圧は発生しないはずである。一方、完全な非排水条件で発生する水圧については次のように推定した。

荷重の載荷にともない地盤は圧縮とせん断の両方をうけるため、スケンプトンの間隙圧係数($\Delta u=B\{\Delta\sigma_3+A(\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_3)\}$)を用いて、圧縮とせん断に伴う水圧を分離して求める。地盤は飽和していると考え、 $B=1$ とし、 A については、土かぶり圧相当の圧密圧力を負加したCU三軸圧縮試験における破壊荷重での A 値の平均($A_p=0.062$)を用いた。また、 $\Delta\sigma_3$ 、 $\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_3$ の値については、2次元平面ひずみの半無限弾性体に帯荷重が載荷された場合の理論解より算出した。これらの仮定を用いて計算される水圧と実験値との比較から(図-6)、両者には大きな差があることがわかる。すなわち、地盤の排水条件は完全排水条件と完全非排水条件の間にあるが、排水条件に近かったものと考えられる。ただし、荷重レベルが1MPa以下の時には実験計測値と非排水条件を想定した計算値がほぼ一致しているが、詳細な評価については、 A 値の非線形性および計測精度の点等を含め今後の検討課題と言える。

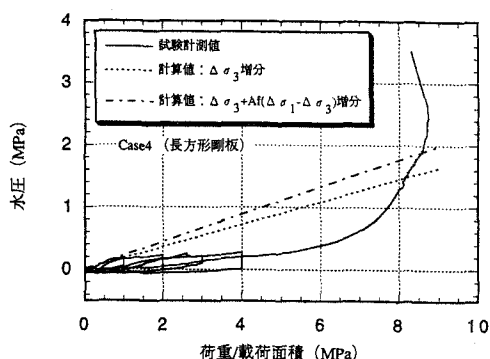


図-6 間隙水圧の計測結果

以上、5.1ポアソン比の逆解析と5.2間隙水圧の計測結果から、地盤は排水条件に近かったと考えられる。従って、実験結果とCDモデルを用いた数値解析の結果がほぼ整合したことに矛盾はない。すなわち、平板載荷試験を境界値問題として数値解析した結果と試験結果は、ほぼ一致したと考えられる。

6. まとめ

以上のように、原位置弾性波速度計測およびベッディングエラーを含まない軸ひずみの計測を行った三軸試験の結果から応力-ひずみ関係をモデル化し、平板載荷試験を境界値問題としてFEMにより数値解析した結果と原位置での試験結果はほぼ一致した。本地点においては、特に、解析結果と試験結果の比較に際し、応力-ひずみ関係の非線形性や載荷面近傍の剛性低下の影響はそれほど顕著でなく、排水条件(ポアソン比)の評価の影響が重要な要因であった。

謝辞

本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施しました。また、平板載荷試験を実施するにあたって(株)ダイヤコンサルタントのご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F. and Kohata, Y.: Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, Proc. Int. Sym. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2, pp.227 ~ 336, 1995.
- 2) Siddiquee, M.S.A., Tatsuoka, F., Hoque, E., Tsubouchi, T., Yoshida, O., Yamamoto, Y. and Tanaka, T.: FEM simulation of footing settlement for stiff materials, Proc. Int. Sym. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials (IS Hokkaido'94), Balkema, Vol.1, pp.531-537, 1994.
- 3) 岡田哲実, 谷和夫, 田中幸久: 堆積軟岩上の平板載荷試験における各種計測と分析, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.629-634, 1998.
- 4) Okada, T., Tani, K., Tanaka, Y. and Momose, K.: Interpretation of plate loading test on siltstone, Proc. The 2nd Int. Sym. on Hard Soils - Soft Rocks, Balkema, Vol.2, pp.745-750, 1998.
- 5) 龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一: 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集 No.561, pp.1-17, 1997.