

5連セル型プレッシャメータによる砂質土の動的性質の推定方法

Evaluation of dynamic properties of sandy soils from 5-cell pressuremeter tests

益田和夫¹, 中村正博², 塚本良道³, 石原研而³Kazuo MASUDA¹, Masahiro NAKAMURA², Yoshimichi TSUKAMOTO³ and Kenji ISHIHARA³¹ マスダ技建, Masuda Giken Co., Ltd.² (株) エヌアイティーエルオー, NITLO Co., Ltd.³ 東京理科大学理工学部土木工学科, Department of Civil Engineering, Tokyo University of Science

SUMMARY: The field testing method is proposed for the evaluation of dynamic properties of sandy soils using 5-cell pressuremeter tests, and the interpretation of data is discussed in detail. The field tests are conducted at two sites located in Chiba city of Chiba and Omaezaki of Shizuoka. In order to estimate the liquefaction strength of soils, the cyclic loading tests are conducted using two cells, which are alternately cyclically excited. Using the same data thus obtained from the cyclic tests, the data for the strain-dependent shear modulus are obtained. However, this testing method and interpretation of data are still short of deriving the strain-dependent damping ratio.

1 はじめに

近年、土木構造物へのレベル2地震動の導入の検討とあわせて、地盤構造物への性能設計法の導入の機運が高まりつつある。性能設計法の導入には、精度を有する地盤構造物の変形照査が欠かせない。これにより、従来の標準貫入試験を主体とした地盤調査法の枠組みにとらわれない変形量の推定に資する地盤調査法の枠組みへの刷新と、地盤の非線形変形解析の高度化が必要とされている[1]。本研究では、土の応力-ひずみ関係を観測可能な原位置プレッシャメータ試験法により、小ひずみから大ひずみに至る砂質土の動的性質を推定する試験方法の検討を行なった。

2 試験機の概要

Fig.1 に示す、5連セルを有する直径10cm・長さ90cmのプレッシャメータを使用する。最上端と最下端の長さ10cmのセルとセルは、ガードセルとしての機能を果たす。それらの内側に位置する長さ30cmのセルとセルが、载荷セルとしての機能を果たし、単調载荷や繰返し载荷などを周辺地盤に及ぼす。これらの中に位置する長さ10cmのセルに隣接する土要素は、セルとセルにより引き起こされる载荷の影響を受けることが予想されるが、セルには間隙水圧計が設けられており、間隙水圧計測も同時計測可能な観測セルとしての機能を果たす。これら各セルには、空圧方式によるポンプから圧力水が供給され、各セルの圧力と送水量の自動制御が可能となっている。

試験手順について、概要を説明する。まず、全てのセルを地盤の静止土圧状態に相当する応力状態まで一様に側方载荷を行なう。各セル圧は、別々に制御可能であるが、便宜上同一の圧力を付加している。ここで静止土圧

状態とは、セル圧 半径方向変位の関係が急激に立ち上がり、ゴムソルダが孔壁に密着したことが確認できる時点とし、有効土被り圧の0.5~0.6に相当する。その後、载荷セルであるセルとセルを用いた载荷試験を行なう。セルあるいはセルを単独に用いた単調载荷試験、セルとセルを同時に用いた単調载荷試験、セルとセルを交互に繰返し载荷する交互繰返し载荷試験などが可能である。载荷試験中には、セルとセルの圧力・半径変化量ばかりでなく、セルの圧力・半径変化量と間隙水圧の計測を行なう。

3 試験方法の概要

砂質土の動的性質として取り扱う物性は、地盤の地震時応答解析(等価線形解析法・非線形解析法)で用いられる、小中ひずみレベルを対象にしたせん断弾性係数 G

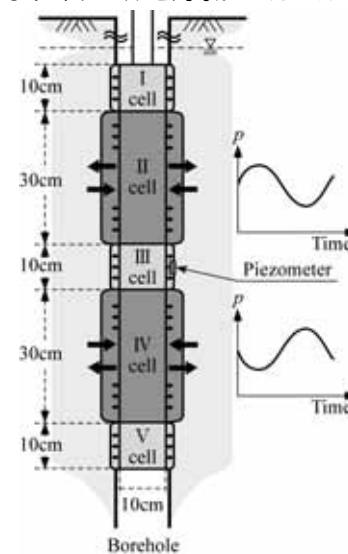


Fig.1 Test apparatus

と減衰率 η のひずみ依存性と、液状化発生の判定に用いられる、大ひずみを対象にした液状化強度である。それぞれにおいて、異なる試験方法の実施を検討した。

液状化強度の推定を目的とした試験方法には、0.1Hzの周期で圧力振幅を漸増させながらセルとセルを交互に繰返し載荷する交互繰返し載荷試験の適用を検討した。Fig.2に示すように、載荷セルであるセルとセルを交互に繰返し載荷することにより、観測セルであるセルに隣接するドーナツ状の土要素の上下端面にはせん断応力が作用し、過剰間隙水圧の上昇と繰返し軟化現象に引き続き、液状化が生じると仮定する。

一方、せん断弾性係数 G と減衰率 η のひずみ依存性の推定を目的とした試験方法には、セルあるいはセルを単独に、または双方を用いた繰返し載荷試験の適用が考えられるが、ここでは、上記の液状化強度の推定に適用したのと同じ交互繰返し載荷試験により推定が可能かを検討することとした。得られる試験結果の解析方法の概略を示す。各セルの圧力 p ・半径ひずみ ϵ_r の関係を、Fig.3に示す。ここで、半径ひずみは、 $\epsilon_r = (r - r_0) / r_0$ であり、 r は現在のセルの半径を表し、 r_0 は静止土圧状態(图中、セル圧 p_0 に相当)に相当するときの半径と定義される。今、セル圧最大値 p_{max} を経験する1st cycleに着目すると、ループ上下の点を結ぶ傾きが $2G$ に相当し、半径ひずみの幅を $\Delta\epsilon_r$ と定義することとする。次に、減衰率 η については、Fig.3に示す1st cycleの拡大図により概略を示す。孔内載荷試験では、つねにゴムソンドを孔壁に密着させた状態を保持しながら載荷を進行させる必要があり、一般に室内要素試験で得られるような「正方向載荷、徐荷、逆方向載荷、徐荷」という過程を再現することができず、「正方向載荷、徐荷、正方向再載荷、徐荷」という

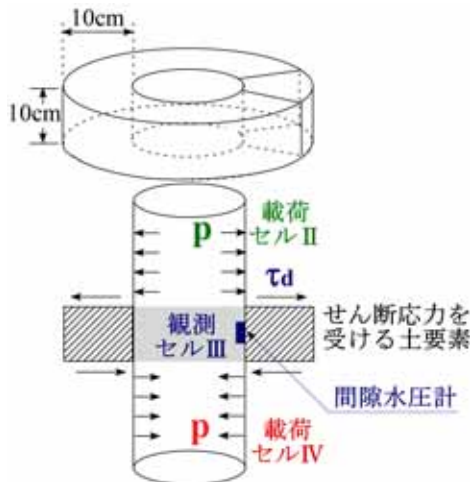


Fig.2 Soil element under cyclic loading tests

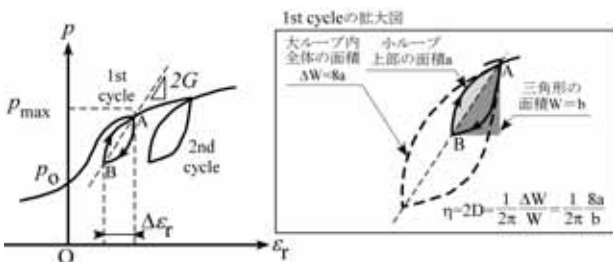


Fig.3 Estimation of shear modulus and damping ratio

過程をたどることとなる。これにより、Fig.3に示すような仮定を設けて、減衰率 η の推定を行なう方法の適用を考えることとした。ここで、小ループが実際のセルが経験する圧力・半径ひずみ関係で、大ループは仮想である。小ループの上部の半月状の面積 a とおくと、大ループの上部の半月状の面積は a の4倍となり、その2倍が大ループ全体の面積となるので a の8倍が大ループの面積に相当すると仮定される。これより、減衰率は $\eta=2D=8a/(2\pi b)$ で求められると考える。

4 試験地点の概要

原位置試験を行なった地点は、千葉県千葉市と静岡県御前崎の2箇所である。Fig.4とFig.5にそれぞれ、千葉市と御前崎における土質柱状図を示す。千葉市における主な試験土層は細砂層で、御前崎における主な試験土層は埋土の礫混じり土丹層である。

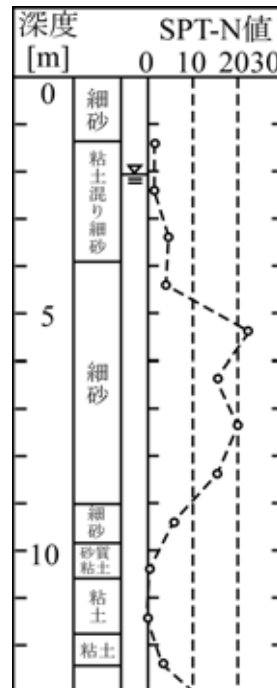


Fig.4 Depth-wise soil profile (Chiba)

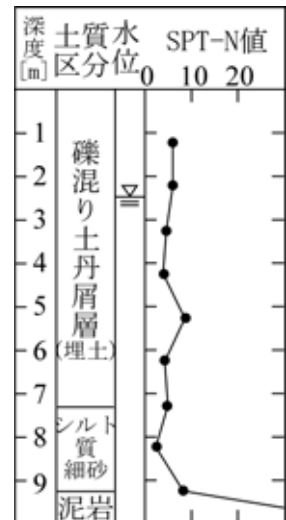


Fig.5 Depth-wise soil profile (Omaezaki)

5 液状化強度の推定

交互繰返し載荷試験の試験結果の一例を、載荷セルのセル圧・間隙水圧・半径方向変位の時刻歴として、Fig.6に示す。データの解釈の詳細については既往の研究[2]に譲るが、室内液状化要素試験と異なり、原位置においては過剰間隙水圧の上昇と相まって、周辺地盤への過剰間隙水圧の消散も同時に生じることから、繰返し載荷の比較的早期の挙動から、液状化強度の推定を行なわなければならない。実際、0.1Hz周期で5回の繰返し載荷で過剰間隙水圧は100%に達し、セルの近傍の土要素に破壊の現象が確認される。これより、5回の繰返し載荷の間は、透水性の良いきれいな砂礫以外は少なくとも、ほぼ非排水条件に近い状態が保持されているのではないかと

と推測される。本研究では、セルで計測している間隙水圧が最大値を示す時点(図中の最初の点線)と、セルの押し戻し変位が生じる時点(図中の最後の点線)との、ほぼ中間における時点(図中の中間の実線)でのセルの繰返し振幅圧を読み取り、その値から土要素に発生しているせん断応力を計算して、液状化強度とした。セル圧の繰返し振幅圧から土要素に作用するせん断応力への換算方法の詳細については、既往の研究[2]に譲る。このようにして得られたデータを、換算 N 値と比較して Fig.7 に示す。図中の曲線は、換算 N 値と液状化強度比の関係を示す。チューブ試料のデータは、 N 値が小さく密度の小さい場合液状化強度を過大評価し、 N 値が大きく密度の高い場合液状化強度を過小評価する傾向にあるが、今回原位置プレッシャメータ試験から得られたデータは、上記曲線より上側に位置する。また、埋立て土である御前崎のデータは、自然地盤の千葉市のデータより、年代効果の影響が小さい値を示す。これより、室内三軸

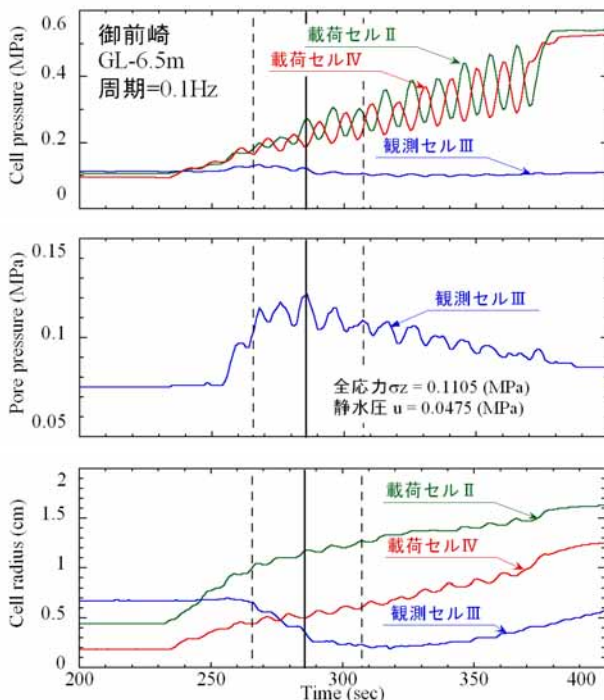


Fig.6 Time history data during cyclic loading tests (Omaezaki, Depth : 6.5m)

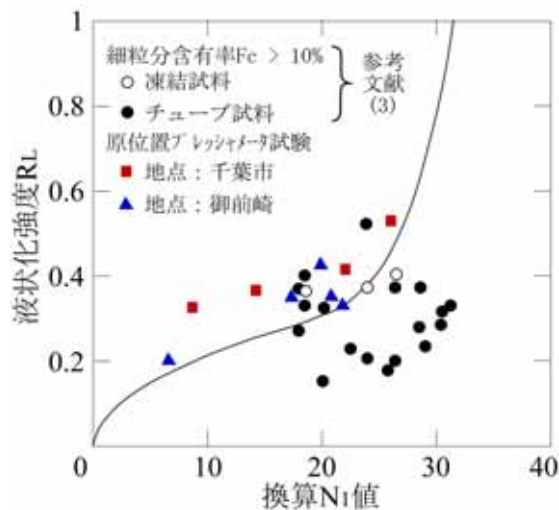


Fig.7 Liquefaction strength - N_T -value

試験に基づく液状化強度比の評価[3]と、本原位置試験から得られる液状化強度比について、さらに検討を加えていく必要があると考える。

6 せん断弾性係数 G のひずみ依存性の推定

Fig.8 に、千葉市における深度 7.5m における試験結果の一例を示す。Fig.8(a)と(b)はそれぞれ、セルとセルのセル圧 - 半径ひずみの関係を示す。各ループの平均的な傾きを用いて、せん断弾性係数の推定を行なった。ここで、各繰返し载荷ループにおける側方圧力レベルの相違についての補正が必要となる。つまり、同深度で有効上載圧が同じ試験であっても、側方圧力のレベルに相違が生じる。せん断弾性係数 G は、拘束圧に大きく依存することから、以下の式を用いて補正せん断弾性係数 G_c を求めることとした。

$$G_c = G(p'_o/\sigma'_{av})^n \quad (1)$$

ここで、 $n = 0.4$ とし、 σ'_{av} は繰返し载荷中の圧力レベルを表し、 $\sigma'_{av} = p'_o + 0.2(p'_{max} - p'_o)$ と求めている[4]。ここ

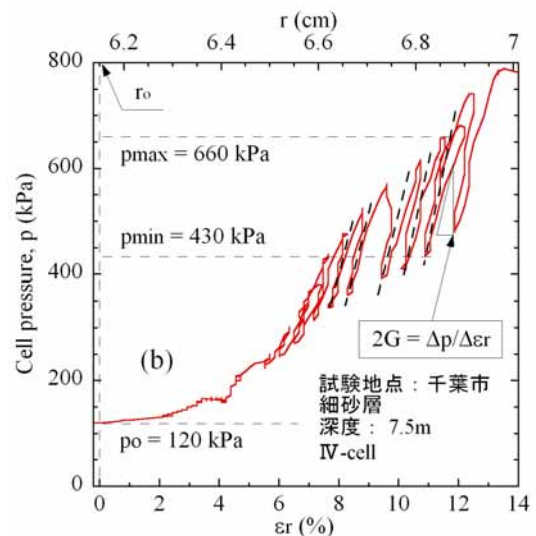
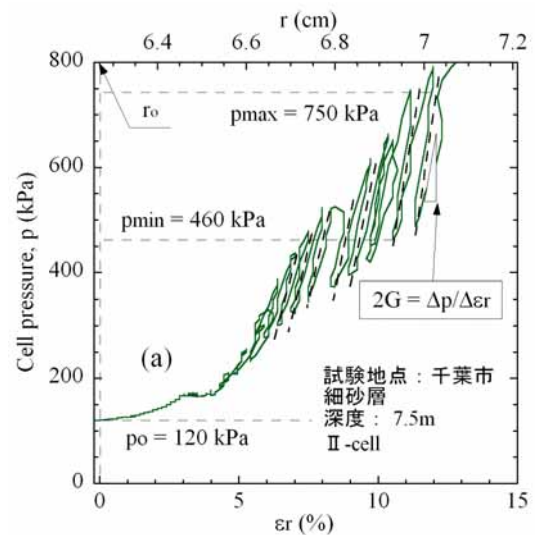


Fig.8 Cell pressure p - Radial strain ϵ_r (Chiba, Depth : 7.5m)

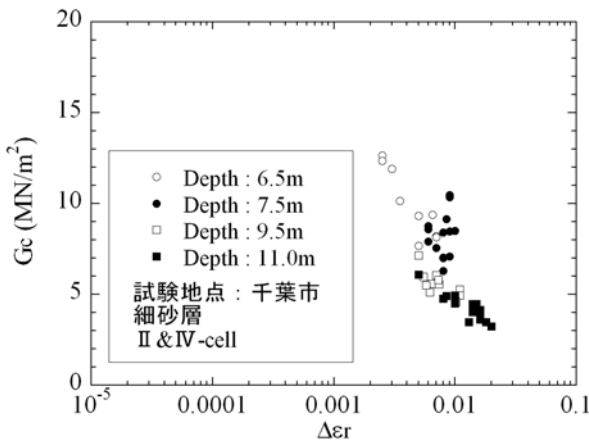


Fig.9 Shear modulus G_c - Radial strain increment $\Delta\epsilon_r$ (Chiba)

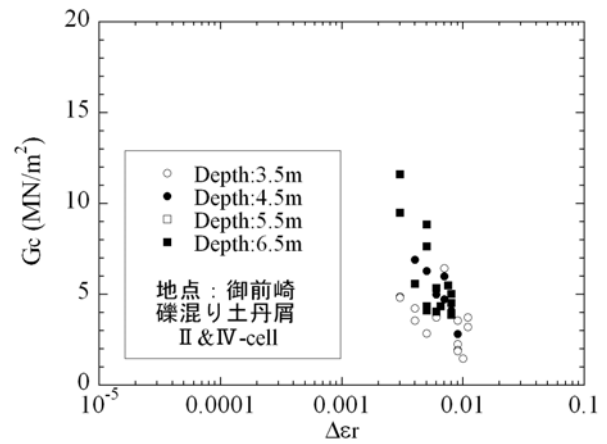


Fig.11 Shear modulus G_c - Radial strain increment $\Delta\epsilon_r$ (Chiba)

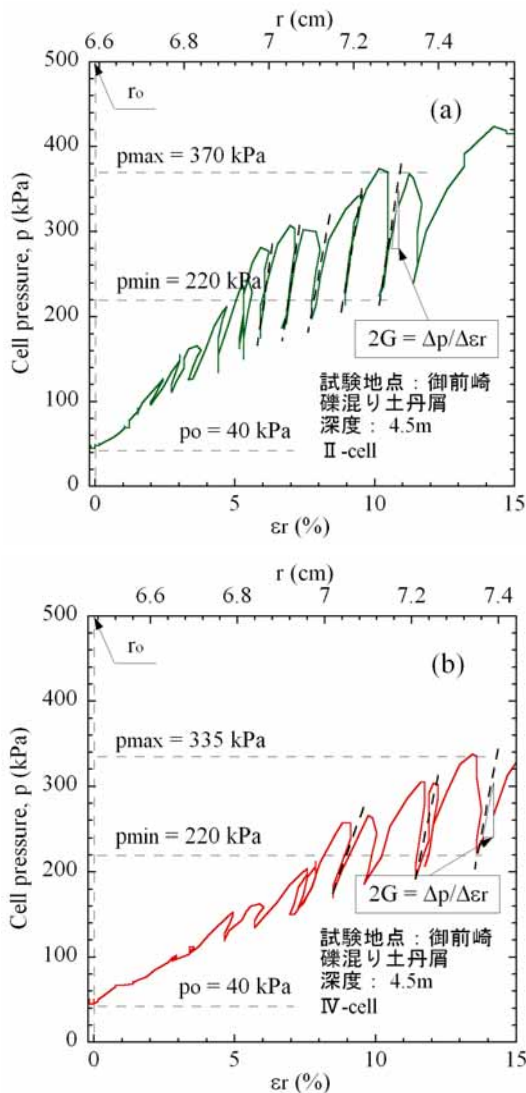


Fig.10 Cell pressure p - ϵ_r (Omaezaki, Depth : 4.5m)

で、0.2 という係数は、砂に対して適用可能な値として推奨されている。Fig.9 に、補正 G_c 値を半径ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_r$ に対してプロットした結果を示す。本関係図において、初期せん断弾性係数 G_0 のレベルを示すと有意義であるため、今後において速度検層試験の併用も重要と考えている。Fig.10 には、御前崎における深度 8.0m にお

る試験結果の一例を示す。同様に、Fig.11 には補正 G_c 値を半径ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_r$ に対してプロットした結果を示す。Fig.9 に示す千葉市の場合と同様なひずみレベル $\Delta\epsilon_r$ において、データが取得されていることが伺える。今回試験を実施した 2 地点における補正 G_c 値と半径ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_r$ の関係には、大きな差は見られないが、土質の違い・年代効果により差異が生じると考えられるので、今後の検討課題としたい。また、今回の試験結果からは、減衰率のひずみ依存性の推定に資するより良い試験結果の取得には至らなかった。今後、データサンプリングの強化と原位置試験方法の改善を行いたいと考えている。

7 まとめ

千葉県千葉市と静岡県御前崎において実施した孔内繰返し水平載荷試験の結果をもとに、液状化強度及びせん断弾性係数 G のひずみ依存性の推定などの検討を行ない、概ね実用的と思われる砂質土地盤の動的特性を得ることができた。今後、原位置における孔壁の乱れの影響や室内試験結果との相関性に関する考察を進めるとともに、減衰率のひずみ依存性の推定に資する試験方法とデータサンプリング法の改善に努めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 地盤工学学会関東支部：首都圏を直下地震から守るために 地盤工学からの提言，2005。
- [2] Masuda, K., Nagatoh, R., Tsukamoto, Y. and Ishihara, K. : Use of cyclic pressuremeter with multiple cells for evaluation of liquefaction resistance of soils. ISP5 - Pressio 2005, Vol. 1, pp.91 - 99, 50 years of pressuremeters, M.Gambin, J.-P.Magnan & P. Mestat (eds.), Marne-la-Vallee, 22 - 24/August/2005。
- [3] 土木研究所耐震技術研究センター：地盤の液状化抵抗の評価に関するサンディング・サンプルング手法の実証実験報告書，1998。
- [4] Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P.K. and Peterson, R.W. : Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sand. Geotechnique, 39(2), 269 - 292, 1989。