

低・高拘束圧下における繰返し載荷時の土の変形特性

篠田昌弘¹・室野剛隆²

¹ (株) 複合技術研究所 技術部 (前 (財) 鉄道総合技術研究所に出向)
(〒102-0072 東京都千代田区飯田橋4-6-9-6F)

E-mail: shinoda@igi.co.jp

² 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: murono@rttri.or.jp

現行の耐震設計法によれば、レベル2地震を想定した設計入力地震動に対して、構造物が十分な耐震性能を発揮できることを応答解析等を行って照査する必要がある。その際に、地盤の変形特性を考慮する必要があるが、レベル2地震動を採用するにあたり、地中深くの地盤材料の変形特性も考慮する必要がでてきた。本研究では、低・高拘束圧下での代表的な地盤材料の変形特性（せん断剛性—せん断ひずみの関係、減衰率—せん断ひずみの関係）を明確にすることを目的として、非排水三軸圧縮繰返し試験を行った。また、上記検討で得られた結果を実務で容易に利用できるように、簡便な算定式を示した。

Key Words : Deformation characteristics, Shear modulus, Damping ratio, Confining pressure

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、鋼・RC構造物に対する設計地震動（レベル2地震動）として非常に高い設計地震動が採用された。新たに設定された設計入力地震動に対して構造物が十分な耐震性能を発揮できるかどうかは、応答解析を行って各種の応答値を求め、これに対して構造物が安全に耐えうるかどうかを確かめることによって検討される。その際に、地盤の変形特性を考慮する必要があるが、レベル2地震動を採用するにあたり、地中深くの地盤材料の変形特性も考慮する必要がでてきた。しかしながら、高拘束圧下での地盤材料の変形特性は十分に把握できていないのが現状である。本研究では、低・高拘束圧下での典型的な地盤材料（豊浦標準砂、礫混じり細粒分質砂、相模原堆積泥岩、人工砂岩）の変形特性（せん断剛性—せん断ひずみの関係、減衰率—せん断ひずみの関係）を明確にすることを目的とする。

2. 三軸圧縮繰返し試験装置

図-1に三軸圧縮繰返し試験装置を示す。図-2に高拘束圧供給ユニットの構成を示す。本実験の特徴は、

非常に高い拘束圧下での実験を行うところにある。通常は1次圧を供給するコンプレッサーの最大圧力が7 kgf/cm²と所定の拘束圧が得られないため、このコンプレッサーと高圧空気圧のタンクとの間に増幅装置を設置することにより、高拘束圧下での載荷を可能にした。載荷装置には、高拘束圧下においても十分な載荷能力のある載荷装置と耐圧30 kgf/cm²の亚克力製のセルを使用した。所定の拘束圧を加えるために、セル内を一旦水で満たした後に中圧水タンクに接続し、このタンクに高圧圧力制御弁により高い空気圧を加えた。



図-1 三軸圧縮繰返し試験装置全体写真

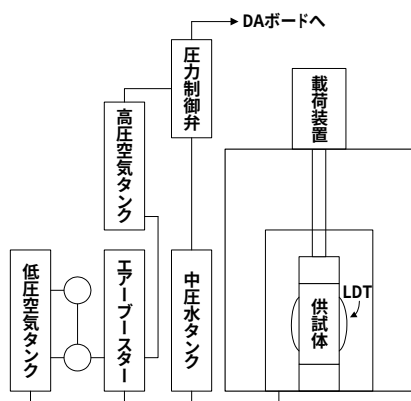


図-2 高拘束圧供給ユニットの構成

3. 試験条件

表-1に試験条件を示す。高拘束圧下での地盤材料の変形特性を求めるために、非排水条件の下で繰返し載荷試験を行った。試験結果としては、繰返し時の変形特性（せん断剛性—せん断ひずみの関係、減衰率—せん断ひずみの関係）が得られる。拘束圧は、基本的に各試料で100, 500, 1000, 1500, 2000 kPaとした。礫混じり細粒分質砂の場合では、十分な試料が得られなかったことから比較的高い拘束圧のみで実験を行った。非排水三軸圧縮繰返し試験での除荷時に引張り状態になると試料とキャップが離れる可能性があったため、相模原堆積泥岩と人工砂岩においては、静止土圧係数を0.5として載荷を行った。

表-1 非排水三軸圧縮繰返し試験における試験条件

No.	試料	静止土圧係数	拘束圧 (kPa)
1	豊浦標準砂	1.0	100
2	豊浦標準砂	1.0	500
3	豊浦標準砂	1.0	1000
4	豊浦標準砂	1.0	1500
5	豊浦標準砂	1.0	2000
6	礫混じり細粒分質砂	1.0	1000
7	礫混じり細粒分質砂	1.0	1500
8	礫混じり細粒分質砂	1.0	2000
9	相模原堆積泥岩	0.5	100
10	相模原堆積泥岩	0.5	500
11	相模原堆積泥岩	0.5	1000
12	相模原堆積泥岩	0.5	1500
13	相模原堆積泥岩	0.5	2000
14	人工砂岩	0.5	100
15	人工砂岩	0.5	500
16	人工砂岩	0.5	1000
17	人工砂岩	0.5	1500
18	人工砂岩	0.5	2000

4. 試験方法

供試体作成方法は、試料によって異なる。以下、それぞれの試料ごとの供試体作成方法について述べる。豊浦砂の場合、事前に測定した乾燥密度（1.645 g/cm³）と含水比（0.176%）から締め固め度が90%になるように一層あたりの重量（198 g）を算定して、5層に分けて突き固め法により供試体を作成した。礫混じり細粒分質砂の場合、事前に測定した乾燥密度（1.549 g/cm³）と含水比（24.32%）から締め固め度が90%になるように一層あたりの重量（230 g）を算定して、5層に分けて突き固め法により供試体を作成した。相模原堆積泥岩の場合、φ68mmのコアサンプリングされた試料を切断機で高さ150mmに成形した後に、試料切断面の凹凸をなくすため、端面を石膏でキャッピングした。砂岩の場合、コアサンプリングされたものがなかったため、既往の研究結果¹⁾を参考にして、相対密度60%で一軸圧縮強20 kg/cm²程度の強度発現を目的とした配合（表-2）を行い、セメント改良砂による人工砂岩を作成した。人工砂岩の養生については、期間を7日間として、水槽中で水中密封養生をおこなった。供試体設置後、豊浦標準砂、礫混じり細粒分質砂では二酸化炭素供給、相模原堆積泥岩と人工砂岩では二重負圧法を実施した。二酸化炭素供給は30分、二重負圧法は約15時間行った。供試体を飽和させるために、豊浦標準砂と礫混じり細粒分質砂では60分の通水を行い、相模原堆積泥岩とセメント改良砂は、負圧状態60分、正圧状態60分、計120分通水した。次に背圧を200kPaに加圧した後に、相模原堆積泥岩と人工砂岩においては、加圧後、均一に圧力がかかるまで60分間放置した。供試体の飽和度については、B値が0.95以上であることを確認した。飽和度の確認後、高拘束圧下での圧密を約15時間行った。豊浦標準砂と礫混じり細粒分質砂はK = 1.0、相模原堆積泥岩と人工砂岩はK = 0.5で圧密を行った。載荷速度は、0.05 %/minとした。

5. 試験結果

図-3から図-6に各試料の繰返し時の変形特性を示す。豊浦標準砂は低拘束圧下では拘束圧依存性が見られるが、高拘束圧になると拘束圧に依存していな

表-2 人工砂岩の配合

豊浦標準砂 （気乾状態）	66.3%
普通ポルトランドセメント （気乾状態）	10.0%
ベントナイト （気乾状態）	5.0%
蒸留水	18.7%

いのが分かる。これは、高拘束圧下では粒子破碎の影響により変形特性に変化がないと考えられる。礫混じり細粒分質砂でも同様な傾向が見られ、1000 kPaから1500 kPaでは拘束圧依存性が確認できるが、1500 kPaから2000 kPaでは拘束圧の影響は少ないようである。相模原堆積泥岩においては、低拘束圧から高拘束圧にわたって拘束圧依存性が確認でき、拘束圧が高いほど変形性能が高くなる。特に、2000 kPaでの高拘束圧下ではせん断剛性の低下がほとんど見られず、繰返し载荷時の変形性能はひずみレベル依存性がなく、弾性的であると言える。一方、人工砂岩においては、低拘束圧から高拘束圧にわたって若干ではあるが拘束圧依存性が確認できる。相模原堆積泥岩と比較すると、人工砂岩のほうが繰返し载荷時の非線形性が強く、高拘束圧下であってもひずみレベル依存性が確認できる。上記の実験結果から、低拘束圧下においては、いずれの試料も拘束圧依存性、ひずみレベル依存性があることが確認できた。高拘束圧下においては、相模原堆積泥岩を除き、拘束圧依存性はほとんどなく、ひずみレベル依存性がある。相模原堆積泥岩は、拘束圧依存性はあるが、ひずみレベル依存性がないことが確認できた。

6. 変形特性算定式

安田・山口²⁾は、約100供試体での試験結果をまとめて、平均有効主応力 p' 、平均粒径 D_{50} 、から $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を推定する式(1)と式(2)を提案した。式中の係数は表-3に示す通りである。ここでは、上記の算定式に基づいて、試算値で平均粒径

$$\frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} = (A_1 + A_2 \log D_{50}) \times p'^{(B_1 + B_2 \log D_{50})} \quad (1)$$

$$h = (C_1 + C_2 \log D_{50}) \times p'^{(D_1 + D_2 \log D_{50})} \quad (2)$$

表-3a 安田・山口の式における係数

γ	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	-0.044	0.056	0.026
3×10^{-4}	0.670	-0.068	0.184	0.086
10^{-3}	0.387	-0.099	0.277	0.130
3×10^{-3}	0.189	-0.089	0.315	0.147
10^{-2}	0.061	-0.054	0.365	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.019	0.403	0.183

表-3b 安田・山口の式における係数

γ	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	0.005	-0.559	-0.258
10^{-3}	0.136	0.036	-0.375	-0.173
10^{-2}	0.234	0.037	0	0

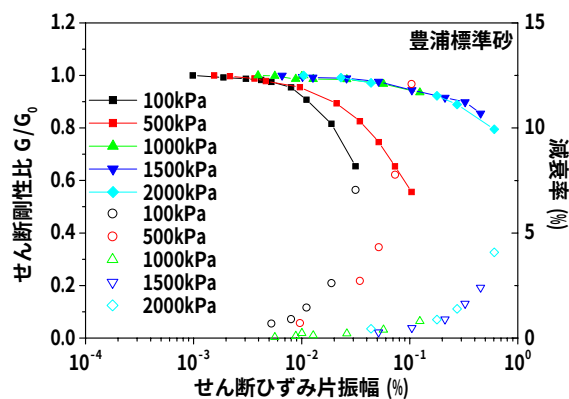


図-3 豊浦標準砂の変形特性

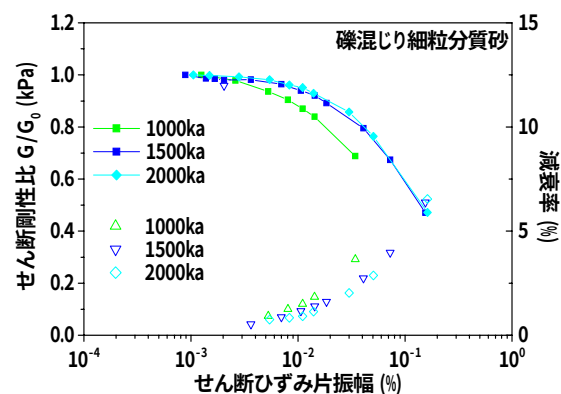


図-4 礫混じり細粒分質砂の変形特性

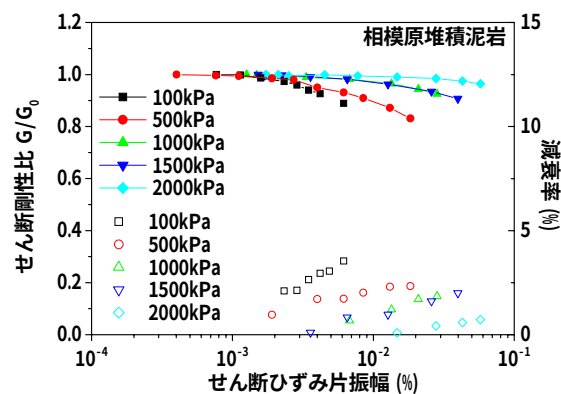


図-5 相模原堆積泥岩の変形特性

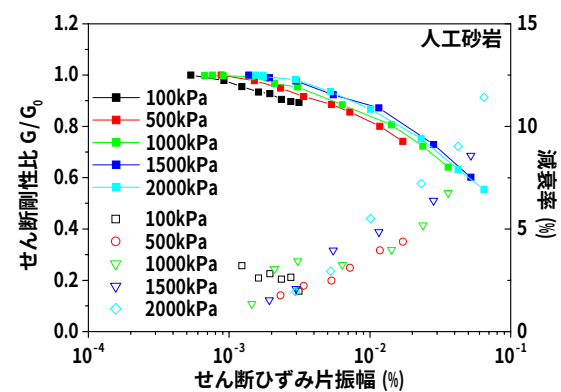


図-6 人工砂岩の変形特性

D_{50} を別途求め、この値に対して式(1)および式(2)の係数を実験結果と整合するように定めた。

実験結果に整合するように、各試料の平均粒径 D_{50} を表-4に示すように求めた。さらに、式(1)および式(2)の係数を試料ごとに表-5から表-9に示すように決定した。豊浦標準砂の場合は、低拘束圧と高拘束圧で変形性能が大きく異なるため、低拘束圧の場合と高拘束圧の場合で分けて係数を決定した。計算結果を図-7から図-10に示す。同図には比較のた

表-4 平均粒径の平均粒径の同定結果

	平均粒径 D_{50} (mm)
豊浦標準砂	0.21
礫混じり細粒分質砂	0.3
相模原体積泥岩	0.03
人工砂岩	0.06

表-5a 豊浦標準砂でのパラメーター（拘束圧100～500kPa）

	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	-0.14	0.04	0.026
3×10^{-4}	0.67	-0.01	0.19	0.086
10^{-3}	0.387	-0.03	0.29	0.13
3×10^{-3}	0.189	-0.089	0.315	0.147
10^{-2}	0.061	-0.054	0.365	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.019	0.403	0.183

表-5b 豊浦標準砂でのパラメーター（拘束圧100～500kPa）

	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	0.03	-0.5	-0.258
10^{-3}	0.136	-0.05	-0.375	-0.173
10^{-2}	0.234	0.037	0	0

表-6a 豊浦標準砂でのパラメーター（拘束圧1000～2000kPa）

	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	-0.15	0.04	0.026
3×10^{-4}	0.67	-0.38	0.08	0.086
10^{-3}	0.387	-0.7	0.12	0.13
3×10^{-3}	0.189	-0.85	0.15	0.147
10^{-2}	0.061	-0.75	0.16	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.05	0.4	0.183

表-6b 豊浦標準砂でのパラメーター（拘束圧1000～2000kPa）

	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	0.035	-0.559	-0.258
10^{-3}	0.136	0.18	-0.375	-0.173
10^{-2}	0.234	0.26	0	0

め実験結果も併せてプロットした。計算結果から、設定した D_{50} と係数を用いることにより高い精度で実験結果を再現できることが分かる。

表-7a 礫混じり細粒分質砂でのパラメーター

	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	0.25	0.12	0.026
3×10^{-4}	0.67	0.56	0.32	0.086
10^{-3}	0.387	0.42	0.5	0.13
3×10^{-3}	0.189	0.18	0.5	0.147
10^{-2}	0.061	-0.01	0.45	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.019	0.403	0.183

表-7b 礫混じり細粒分質砂でのパラメーター

	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	0.005	-0.559	-0.258
10^{-3}	0.136	0.036	-0.375	-0.173
10^{-2}	0.234	0.037	0	0

表-8a 相模原堆積泥岩でのパラメーター

	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	0.028	0.11	0.026
3×10^{-4}	0.67	0.075	0.3	0.086
10^{-3}	0.387	0.085	0.58	0.13
3×10^{-3}	0.189	0.04	0.7	0.147
10^{-2}	0.061	-0.02	0.6	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.019	0.403	0.183

表-8b 相模原堆積泥岩でのパラメーター

	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	-0.04	-1.15	-0.258
10^{-3}	0.136	-0.1	-1.2	-0.173
10^{-2}	0.234	0.06	-0.01	0

表-9a 人工砂岩でのパラメーター

	A_1	A_2	B_1	B_2
10^{-4}	0.827	0.05	0.07	0.026
3×10^{-4}	0.67	0.1	0.184	0.086
10^{-3}	0.387	0.06	0.277	0.13
3×10^{-3}	0.189	-0.001	0.32	0.147
10^{-2}	0.061	-0.03	0.365	0.167
3×10^{-2}	0.041	-0.019	0.403	0.183

表-9b 人工砂岩でのパラメーター

	C_1	C_2	D_1	D_2
10^{-4}	0.035	0.0001	-0.25	-0.258
10^{-3}	0.136	0.01	-0.18	-0.173
10^{-2}	0.234	-0.05	0.02	0

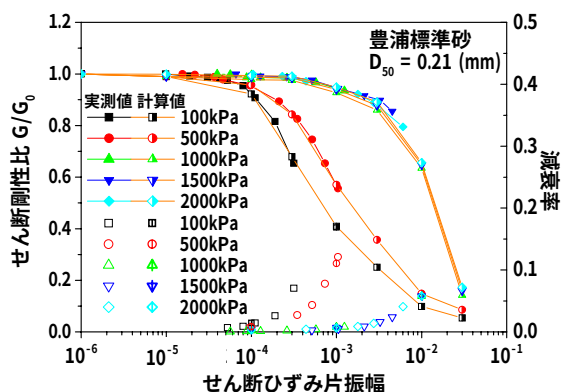


図-7 豊浦標準砂の変形特性

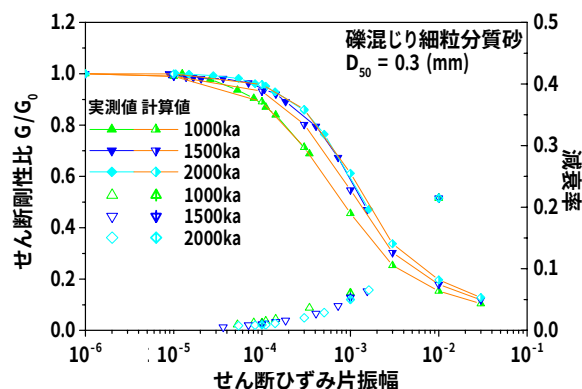


図-8 礫混じり細粒分質砂の変形特性

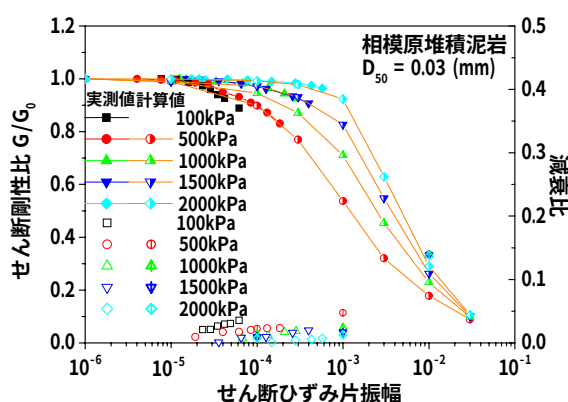


図-9 相模原堆積泥岩の変形特性

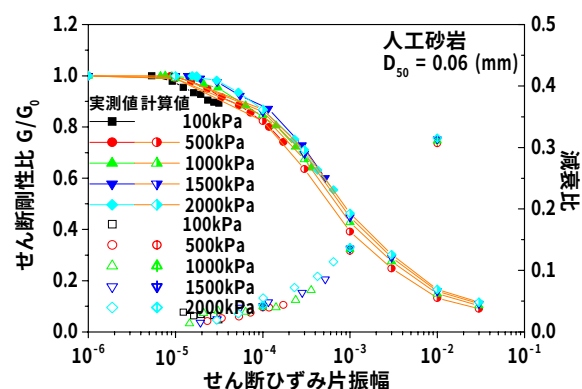


図-10 人工砂岩の変形特性

7. まとめ

豊浦標準砂，礫混じり細粒分質砂，相模原堆積泥岩，人工砂岩を用いて低・高拘束圧下での繰返し载荷時の変形特性を三軸圧縮試験装置を用いて精度良く調べた。実験結果から以下のような知見が得られた。

- ① 豊浦標準砂の変形特性に対する低拘束圧が与える影響は大きい。
- ② 豊浦標準砂の変形特性に対する高拘束圧が与える影響は小さい。
- ③ 礫混じり細粒分質砂の変形特性に対する低拘束圧が与える影響は大きい。
- ④ 礫混じり細粒分質砂の変形特性に対する高拘束圧が与える影響は小さい。
- ⑤ 相模原堆積泥岩の変形特性に対する拘束圧の影響は大きい。
- ⑥ 人工砂岩の変形特性に対する拘束圧の影響は小さい。

今後の検討としては，上記の実験結果を用いて，深

い地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行い，地盤材料の非線形性が与える影響について検討を行う予定である。

謝辞：本研究は国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である。また，本研究における実験は，東京大学生産技術研究所の古関研究室の実験装置を使わせていただき，試料の提供もしていただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 三平・古関・佐藤・並河・吉澤：セメント改良砂の変形・強度特性に関する三軸圧縮・引張試験，第38回地盤工学研究発表会講演概要集，2003
- 2) 安田・山口：種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，1985