

# 巨大地震時の表層地盤の液状化挙動に関する ハイブリッド地盤応答試験

山本 昌徳<sup>1</sup>・伊吹 竜一<sup>2</sup>・山内 泰知<sup>3</sup>・井澤 淳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: yamamoto.masanori.21@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: ibuki.ryuichi.85@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 ダイヤコンサルタント (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町 2-272-3)  
E-mail: y.yamauchi@diaconsult.co.jp

<sup>4</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: izawa.jun.06@rtri.or.jp

南海トラフ地震など M9 レベルの巨大地震時の液状化地盤の挙動を評価するため、ハイブリッド地盤応答試験を実施した。特に顕著な挙動を確認するため、最大加速度を 3000~7000gal に調整した極端に大きな地震動を使用した。その結果、水平成層地盤であっても、極めて大きな地震動が作用する場合、液状化層は有効応力の回復が頭打ちするステディーステイトに至る可能性があること、これに伴って加速度が低下する様子などを確認した。また、既往の研究と同様に、相対密度と初期有効応力が同じであれば、同じ応力状態でステディーステイトに至ること、繰返し載荷においても同様の挙動を示すことを確認した。

**Key Words:** steady state, effective stress, cyclic loading, ground response analysis

## 1. はじめに

密な砂が液状化に至った場合、サイクリックモビリティにより有効応力が回復する現象が見られるが、更にせん断が進むと有効応力の回復が頭打ちとなるステディーステイト<sup>(例えば 1, 2)</sup>に至ることが知られている(図-1)。このような現象は、地表面が傾斜している場合の側方流動時や護岸の側方移動時などに発生すると考えられる。一方で、近年、発生が危惧されている南海トラフ地震など M9 レベルの巨大地震時では 1500 Gal を超えるような地震動の発生も危惧されており、水平成層地盤においても液状化層がステディーステイトに至ることで、表層地盤の挙動を支配し、構造物の応答に影響する可能性がある。

地盤の液状化を考慮した鉄道構造物の耐震設計においては、鉄道構造物等設計標準 耐震設計<sup>3)</sup>(以降、耐震標準)において有効応力解析による動的解析を用いて地盤の挙動を評価することが推奨されているが、実務的には PL 法による液状化判定に基づいて設定される地盤の諸数値の低減係数  $D_E$  を用いて評価する機会が多い。こ

の場合、構造物の構造体としての安全性および復旧性の照査には非線形スペクトル法を、車両の走行安全性の照査にはスペクトル強度  $SI$  を用いている<sup>3)</sup>。これらの手法は、それぞれ耐震標準に示されている標準的な設計地震動に対して用意されたスペクトルやスペクトル強度であるため、上記のような巨大地震の影響を考慮する場合は有効応力解析を行う必要がある。一方で、ステディーステイトを考慮可能な有効応力解析モデルを用いて評価することは可能ではあるが<sup>(例えば 4, 5)</sup>、巨大地震時の水平成層地盤の液状化挙動については未解明な点が多い。本稿では、有効応力解析による巨大地震時の液状化地盤の挙動評価を行うための基礎的な検討として、ハイブリッド地盤応答解析<sup>6)</sup>により水平成層地盤の巨大地震時の挙動を確認した。

## 2. 一定ひずみ振幅繰返し載荷試験

本稿においては、主に相対密度 65% 程度の豊浦砂を液

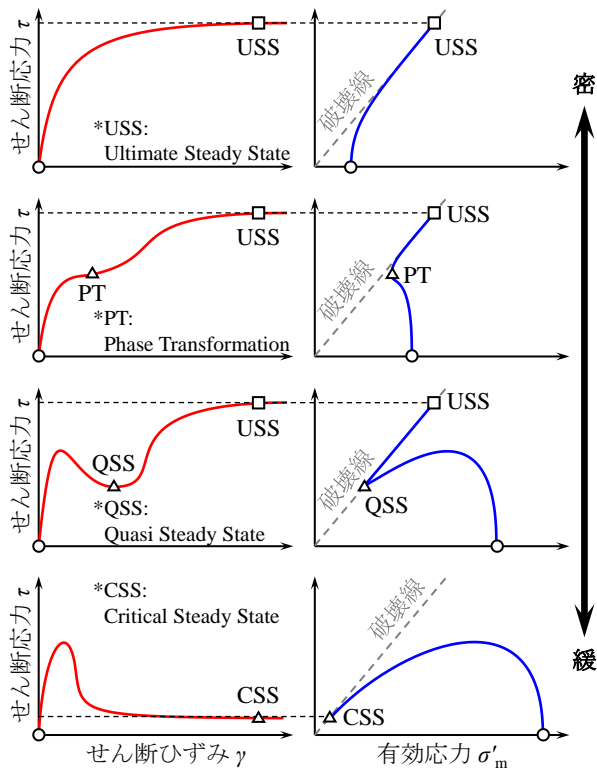


図-1 大変形時の砂の非排水変形挙動の概念図

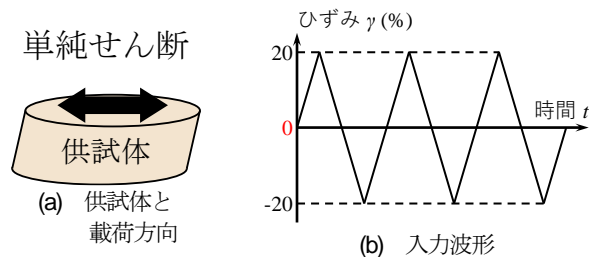


図-2 一定ひずみ振幅繰返し載荷試験の概要

状化地盤として検討を行った。まず、大ひずみ領域での基本的な繰返しせん断挙動を確認するため、一定ひずみ振幅繰返しせん断試験を実施した。

### (1) 試験概要

一定ひずみ振幅繰返し載荷試験は RTRI ハイブリッド地盤応答試験装置<sup>9)</sup>において使用している拘束圧載荷型単純せん断試験装置を用いた。図-2 に載荷試験の概要を示すが、供試体を強制的にせん断変形させ、せん断ひずみ  $\gamma = \pm 20\%$  の振幅で 3 回繰返した。なお、ひずみ速度は一定 ( $\dot{\gamma} = 0.6\%/min$ ) とし、三角波を入力した。目標  $D_r = 65\%$  として空中落下法で作成した豊浦砂供試体を、後述するハイブリッド地盤応答試験の試験対象層と同様の初期平均有効応力  $\sigma'_{m0} = 20\text{kPa}$  で圧密後 (圧密終了時  $D_r = 67.0\%$ )、載荷試験を実施した。

### (2) 試験結果

図-3 に  $\tau \sim \gamma$  関係、 $\sigma'_m \sim \gamma$  関係、 $\tau \sim \sigma'_m$  関係の応答履歴

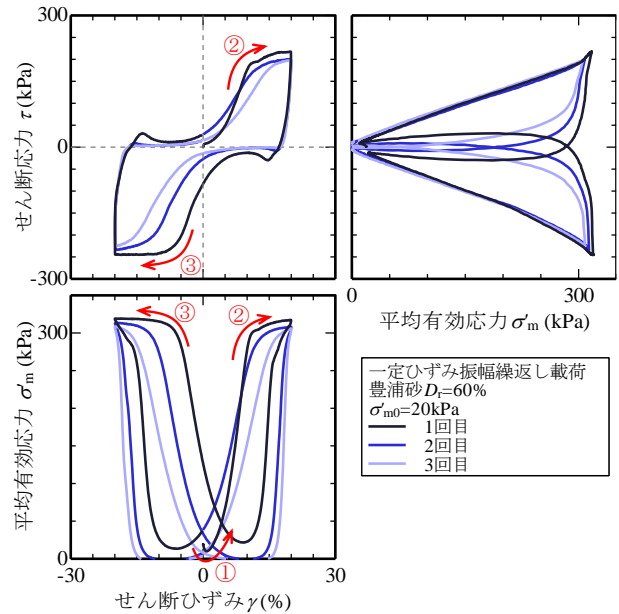


図-3 一定ひずみ振幅繰返し載荷試験の応答履歴

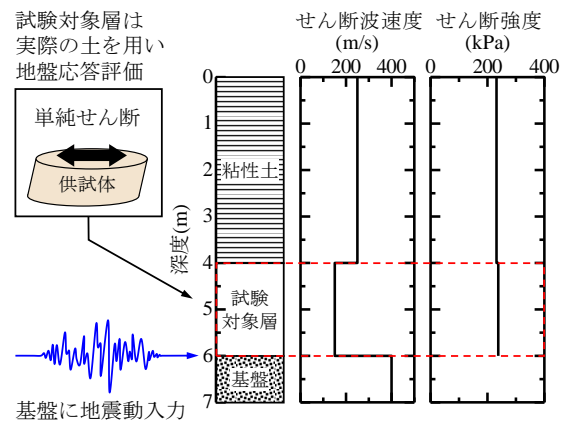


図-4 ハイブリッド地盤応答試験の試験条件

を示す。せん断により一旦有効応力が  $10\text{kPa}$  程度まで低下した後 (図-3 の①)、サイクリックモビリティにより有効応力が回復し、平均有効応力  $320\text{kPa}$  程度で頭打ちに至っており、ステディースタイトに達していることが分かる (図-3 の②)。その後の応力経路は多少異なるものの、ほぼ同等の  $320\text{kPa}$  程度でステディースタイトに至っている (図-3 の③)。また、それに伴いせん断応力も繰返し頭打ちしていることが確認できる。

## 3. ハイブリッド地盤応答試験

### (1) 試験条件

図-4 にハイブリッド地盤応答試験<sup>9)</sup>で模擬した対象地盤を示す。深度  $4 \sim 6\text{m}$  を単純せん断試験装置によるせん断試験対象 (以降、試験対象層) とし、試料には豊浦砂を用いた。その他の層は粘性土 (密度  $\rho = 1.5\text{g/cm}^3$ 、せん断波速度  $V_s = 250\text{m/s}$ ) とし、全応力解析モデルの

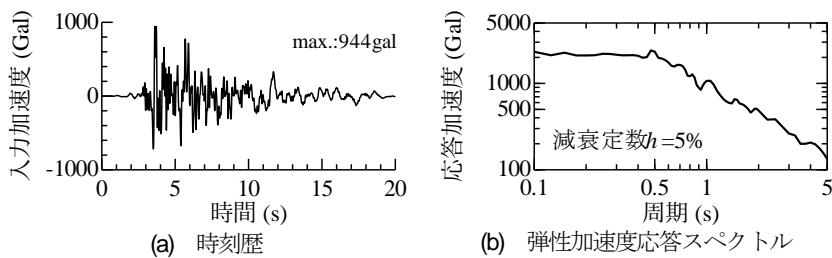


図-5 L2スペクトルⅡ地震動 (G1 地盤)

表-1 ハイブリッド地盤応答試験の試験条件

ケース	相対密度 $D_r$ (%)	入力最大振幅 (Gal)
1	65.4	3000
2	66.1	5000
3	79.2	7000

GHE-S モデル<sup>7)</sup>を適用し、標準パラメータ<sup>7)</sup>を用いた。本稿では地盤がステディーステイトに至った場合の影響を把握するため、耐震標準に示される L2 スペクトルⅡ地震動 (G1 地盤) の最大入力振幅を調整して、粘性境界 ( $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ ,  $V_s=400\text{m/s}$ ) を介して入力した。図-5 に L2 スペクトルⅡ地震動の時刻歴および減衰定数  $h=5\%$  として算定した弾性加速度応答スペクトルを示すが、20 秒程度の地震動であり、4 秒付近で加速度最大となる。本検討では、相対密度および入力最大振幅を変え計 3 ケース実施した。表-1 に各ケースの相対密度および入力最大振幅を示す。

## (2) 試験結果

### a) ケース 1 ( $D_r=65.4\%$ , 入力最大振幅 3000 Gal)

図-6 にハイブリッド地盤応答試験で得られる地表面および試験対象層上端の応答加速度、試験対象層の平均有効応力、せん断応力、せん断ひずみの時刻歴および  $\tau \sim \gamma$  関係、 $\sigma'_m \sim \gamma$  関係、 $\tau \sim \sigma'_m$  関係の応答履歴、地表面加速度応答スペクトルを示す。なお、(a)の応答時刻歴は全時刻歴と併せて入力加速度が最大となる 3.6 秒付近の 0.5 秒間を示す。(a)からせん断ひずみのピーク時に平均有効応力は 290 kPa 程度、せん断応力は -260 kPa 程度でピークに達しているものの、頭打ちは確認できない。また、応答加速度のピークは地表面・試験対象層上端共に 2900 Gal 程度となった。(b)においてもせん断応力および平均有効応力の頭打ちは見られず、ステディーステイトに至っていないことが分かる。また、(c)から周期 0.1 ~ 0.7 秒程度で応答加速度が 5000 Gal 程度であることが分かる。

### b) ケース 2 ( $D_r=66.1\%$ , 入力最大振幅 5000 Gal)

図-7 に応答時刻歴および応答履歴、地表面加速度応答スペクトルを示す。(a)からせん断ひずみのピーク時 (3.8 秒) に平均有効応力は 320 kPa 程度、せん断応力は -280 kPa 程度で頭打ちしていることが分かる。(b)から  $\gamma = -10 \sim -15\%$  程度でせん断ひずみの増加に伴うせん断応力および平均有効応力の頭打ちが見られ、ステディーステイトに至っていることが分かる。なお、加速度のピークは地表面で 5100 Gal、試験対象層上端で 6400 Gal 程度と増幅する結果となっているが、有効応力が頭打ちとなる 3.75 秒付近で加速度が低下に転じていることが分かる。

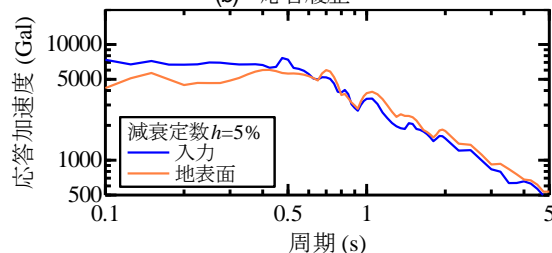
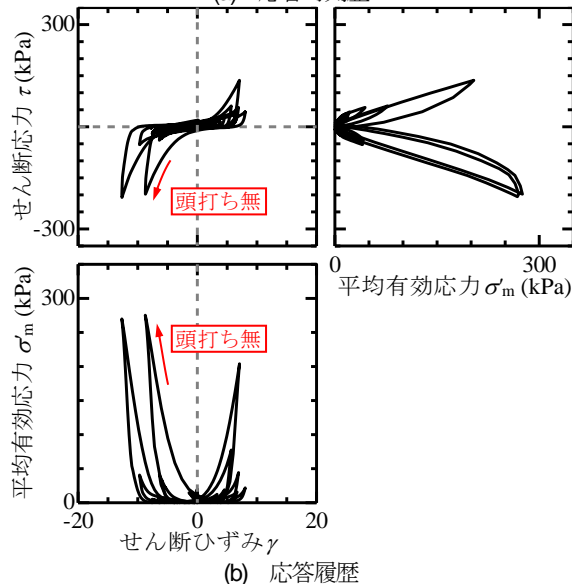
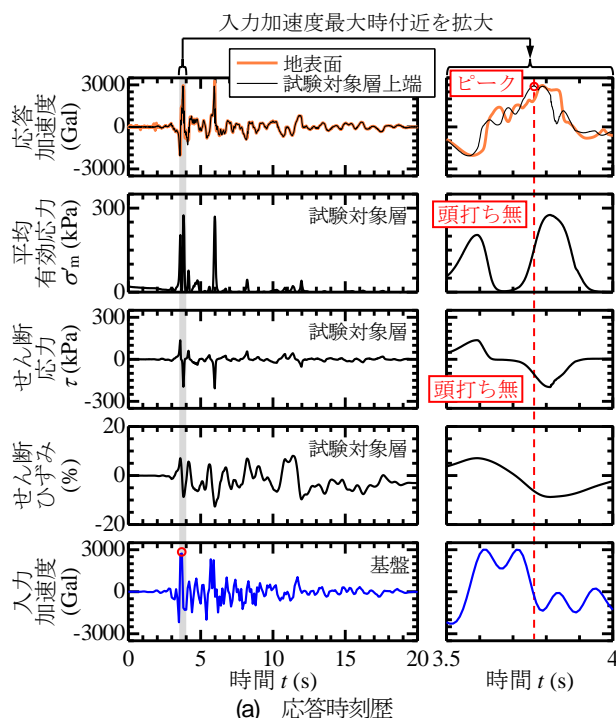
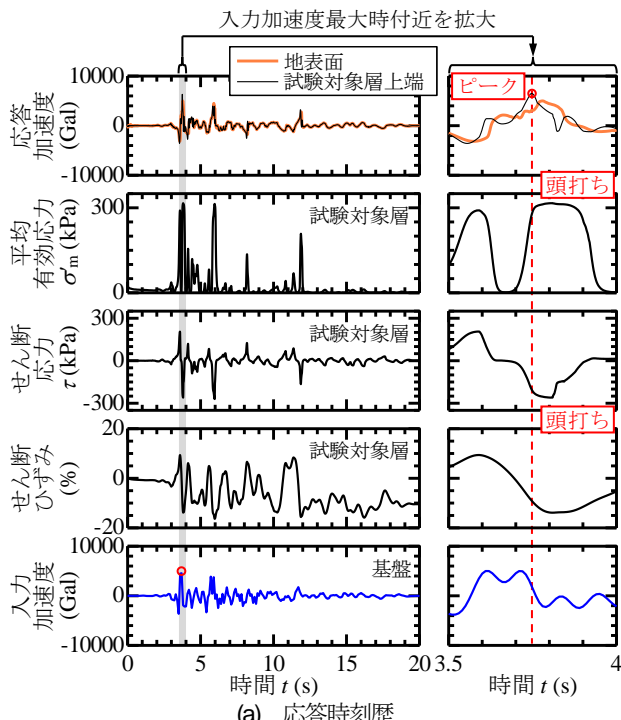
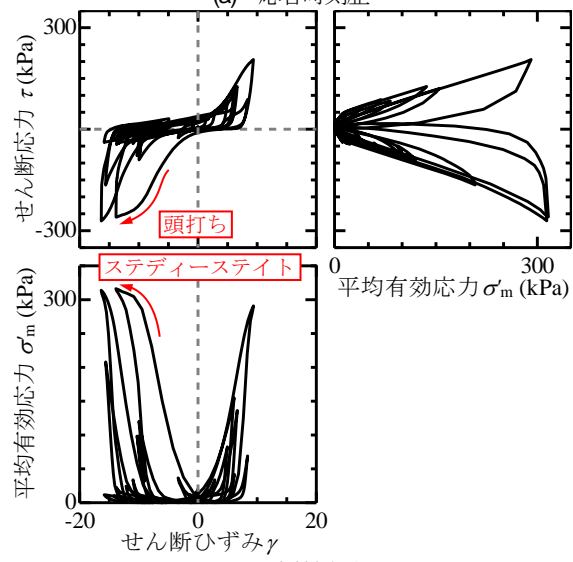


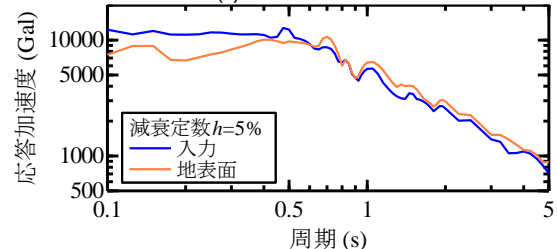
図-6 時刻歴応答および応答履歴 (ケース 1)



(a) 応答時刻歴

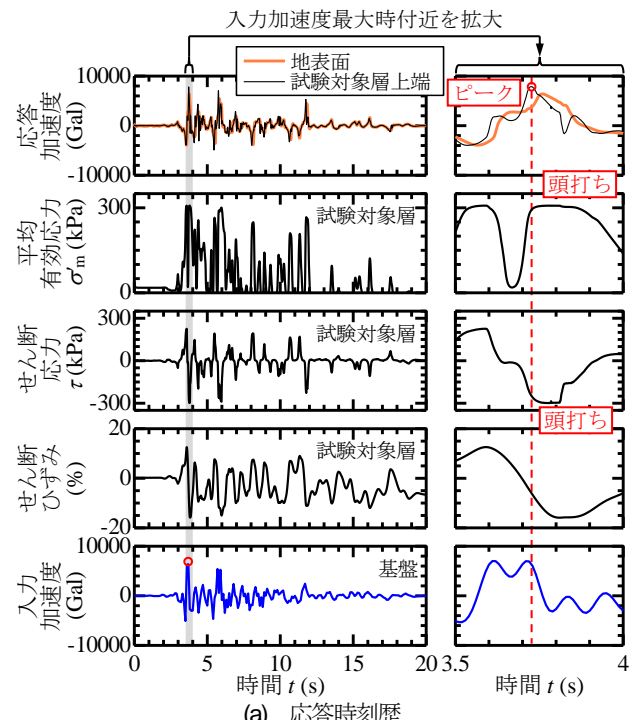


(b) 応答履歴

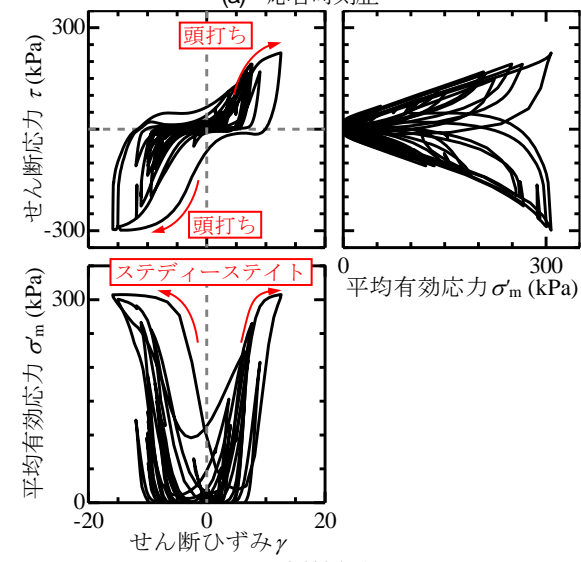


(c) 地表面加速度応答スペクトル

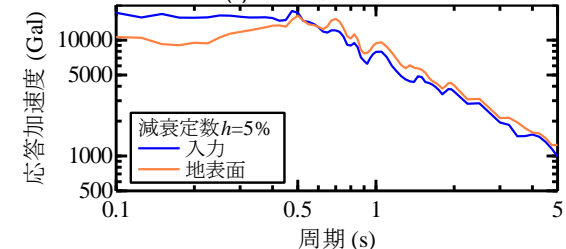
図-7 時刻歴応答および応答履歴 (ケース2)



(a) 応答時刻歴



(b) 応答履歴



(c) 地表面加速度応答スペクトル

図-8 時刻歴応答および応答履歴 (ケース3)

る。また、2章で示した一定ひずみ振幅繰返し載荷試験と同様、ステディーステイトに至ったのち除荷に転じると、せん断ひずみの減少に伴いせん断応力および平均有効応力は減少するが、再びせん断応力で $-280\text{ kPa}$ 程度、平均有効応力で $320\text{ kPa}$ 程度に達すると頭打ちの傾向を示すことが分かる。(c)の地表面加速度応答スペクトルは

入力加速度やケース1の地表面加速度の応答スペクトルの形状と大きな違いは無かった。

c) ケース3 ( $D_r=79.2\%$ , 入力最大振幅  $7000\text{ Gal}$ )

図-8に時刻歴応答および応答履歴、地表面加速度応答スペクトルを示す。ケース2と同じ3.8秒付近のせん断ひずみのピーク時に加え、3.6秒付近のピーク時に

いても、平均有効応力およびせん断応力の頭打ちしており、ステディーステイトに至っていることが分かる。加速度のピークは地表面で 6400 Gal、試験対象層上端で 7800 Gal と増幅する結果となっているが、有効応力が頭打ちとなる 3.75 秒付近で加速度が低下に転じていることが分かる。また、平均有効応力が頭打ちするときの値は 310 kPa 程度とケース 2 の結果よりやや小さい。一方、ステディーステイトに至るせん断は 300 kPa 程度とケース 2 に比べてやや大きい。これは、ケース 3 の相対密度が 80% 程度とケース 2 の 66% より密なで内部摩擦角  $\phi$  が大きいため、せん断強度  $\tau (= \sigma'_m \tan \phi)$  が大きくなったことが要因と考えられる。

ハイブリッド地盤応答試験で得られる有効応力経路と比較するため、図-9 にケース 2, 3 の結果を一定ひずみ振幅繰返し試験の結果に重ねて示した。ケース 2 と一定ひずみ振幅繰返し試験から得られる有効応力経路は、入力波が異なっているが、ステディーステイトに至る際の平均有効応力は概ね一致している。これは、既往の実験結果(例えば 1), 2)に見られるステディーステイトに至る有効応力状態およびせん断応力は、地盤条件(相対密度や細粒分含有率)に依存し、初期有効拘束圧には依存しない特徴と一致する。なお、密な地盤を想定したケース 3 はステディーステイトに至る時の有効応力が 310 kPa とやや小さい。この傾向は、密な地盤ほど高い有効応力状態でステディーステイトに至る傾向を示す文献 1), 2) と異なる結果となったケース 3 は、ケース 2 の終了後、圧密排水させて密度増加させて実施しており、せん断履歴、液状化履歴等が影響していることが考えられる。この点については今後さらに検討していきたい。

#### 4. まとめ

巨大地震に対する液状化挙動を把握するため、基盤直上に液状化層がある場合を想定したハイブリッド地盤応答試験を実施した結果、ハイブリッド地盤応答試験を実施した。なお、本稿では地盤がステディーステイトに至った場合の影響を把握するため、極端に大きな地震動を入力した。その結果以下の知見を得た。

- 1) 相対密度 65% の豊浦砂に対してせん断ひずみ振幅 20% の一定ひずみ振幅繰返し試験を実施し、除荷・再載荷時においても、初期のステディーステイトとほぼ同じ応力状態でステディーステイトに至ることを確認した。
- 2) 相対密度 65% の豊浦砂層を試験対象層としたハイブリッド地盤応答試験の結果、耐震標準に示す L2 スペクトル地震動の最大加速度を 3000 Gal に調整した基盤地震動を入力した場合でも、液状化層は

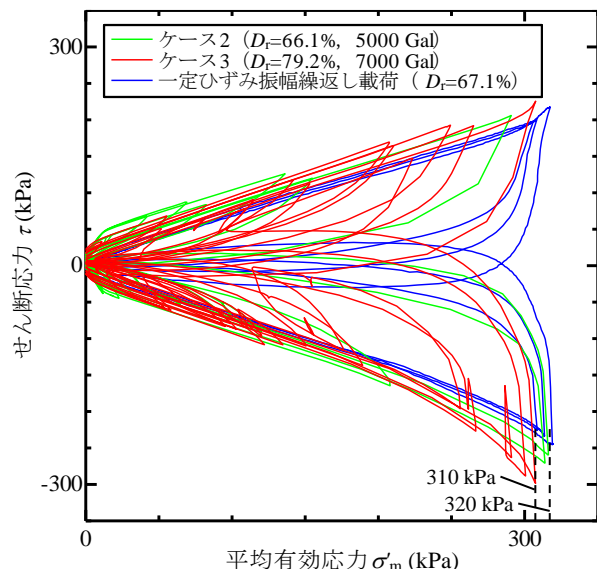


図-9 異なる試験条件で得られる有効応力経路の比較

- ステディーステイトに至らなかった。一方、5000 Gal に調整した場合、ステディーステイトに至った。
- 3) 相対密度 80% の密な豊浦砂層を試験対象層とした同様の試験を実施した結果、最大 7000 Gal に調整した場合、ステディーステイトに至った。
  - 4) 異なる入力波で実施した試験結果を比較し、既往の研究と同様に、相対密度と初期有効応力が同じであれば、同じ応力状態でステディーステイトに至ることを確認した。

なお、筆者らは、おわんモデルがステディーステイトを考慮可能となるよう拡張し、GHE モデルと組み合わせた有効応力解析モデルの検討を行っており、有効応力解析結果が有効応力の頭打ちおよびそれに伴うせん断応力の頭打ちを再現可能であることを確認している<sup>8)10)</sup>。

#### REFERENCES

- 1) Verdugo, R. and Ishihara, K.: The steady state of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 2, pp. 81-91, 1996.
- 2) Yoshimine, M. and Ishihara, K.: Flow potential of sand during liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, pp. 189-198, 1998.
- 3) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012。[Railway Technical Research Institute: *Design Standards for Railway Structures and Commentary (Seismic Design)*, Maruzen, 2012.]
- 4) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 35, Issue 3, pp. 360-392, 2011.
- 5) 上田恭平, 井合進, 飛田哲男, 小堤治：有限変形理論に基づくひずみ空間多重せん断モデルを用いた大変形液状化解析プログラムの開発，第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1589-1590, 2012。[Ueda, K.,

- Iai, S., Tobita, T. and Ozutsumi, O.: Development of large deformation analysis program considering liquefaction incorporating multiple shear mechanism model based on finite strain theory, *47<sup>th</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 2012.]
- 6) 鈴木聡, 井澤淳, 豊岡亮洋, 小島謙一: 耐震設計における適切な表層地盤応答評価法の構築, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 9, 2018. [Suzuki, A., Izawa, J., Toyooka, A. and Kojima, K.: Construction of an appropriate response evaluation method for the surface ground in seismic design, *RIRI Report*, Vol. 32, No.9, 2018.]
  - 7) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009. [Nogami, Y. and Murono, Y.: Nonlinear hysteresis model taking into account S-shape hysteresis loop and its standard parameters, *Proceedings of 30<sup>th</sup> Earthquake Engineering Symposium*, JSCE, 2009.]
  - 8) 山本昌徳, 伊吹竜一, 山内泰知, 井澤淳, 福武毅芳, 桐山貴俊, 児玉剛, 馬淵倉一: ステディーステイトを考慮したおわんモデルの拡張 その1, 第57回地盤工学会研究発表会, 2022. [Yamamoto, M., Ibuki, R., Yamauchi, Y., Izawa, J., Fukutake, K., Kiriyama, T., Kodama, T. and Mabuchi, S.: Expansion of the Bowl model considering steady state [Part 1], *57<sup>th</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 2022.]
  - 9) 福武毅芳, 桐山貴俊, 井澤淳, 山本昌徳, 伊吹竜一, 山内泰知, 児玉剛, 馬淵倉一: ステディーステイトを考慮したおわんモデルの拡張 その2, 第57回地盤工学会研究発表会, 2022. [Fukutake, K., Kiriyama, T., Izawa, J., Yamamoto, M., Ibuki, R., Yamauchi, Y., Kodama, T. and Mabuchi, S.: Expansion of the Bowl model considering steady state [Part 2], *57<sup>th</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 2022.]
  - 10) 伊吹竜一, 山本昌徳, 山内泰知, 井澤淳, 福武毅芳, 桐山貴俊, 児玉剛, 馬淵倉一: ステディーステイトを考慮したおわんモデルの拡張 その3, 第57回地盤工学会研究発表会, 2022. [Ibuki, R., Yamamoto, M., Yamauchi, Y., Izawa, J., Fukutake, K., Kiriyama, T., Kodama, T. and Mabuchi, S.: Expansion of the Bowl model considering steady state [Part 3], *57<sup>th</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 2022.]

## HYBRID GROUND RESPONSE ANALYSES FOR LIQUEFACTION BEHAVIOR OF SURFACE GROUND DURING EXTREMELY LARGE EARTHQUAKE

Masanori YAMAMOTO, Ryuichi IBUKI, Yasutomo YAMAUCHI and Jun IZAWA

In order to observe the liquefaction behavior of horizontally stratified ground during extremely large earthquakes, a series of Hybrid Ground Response Analysis were conducted using *Toyoura* sand as the test layer, with extremely large earthquake ground motions as input. As a result, it was confirmed that the liquefied layer reached steady state even in horizontally stratified ground. Furthermore, it was also confirmed that if the relative density and initial effective stress are the same, soils reached steady state under the same effective stress condition, and the same behavior is observed in a cyclic loading test.