

種々の砂および地震動に対する 土の変形特性試験法の適用性に関する検討

山本 昌徳¹・山内 泰知¹・井澤 淳²

¹正会員 修士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計において、地盤の地震時挙動を適切に評価することは重要であり、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（以降、耐震標準）¹⁾では、地盤の地震時挙動を逐次非線形解析により評価することを推奨している。また、幅広いひずみレベルで精度よく土の非線形性を表現可能なGHE-Sモデルが提案されている²⁾。筆者らは、地盤の動的解析に使用する土の変形特性を適切に把握するため、繰返し载荷に伴う水圧上昇の影響を極力抑えた変形特性試験を提案し、適用性を確認している³⁾。しかし、同手法は変形特性のみを把握する場合、従来の試験法と比べ試験本数が増えるなど、実務的に適用する際に課題であった。

本稿では、変形特性試験の試験本数を削減した、より実務的な試験法を示すとともに、複数の砂および地震動に対する試験法の適用性を検討した。

2. 変形特性の評価法

(1) 検討する変形特性試験

従来の変形特性試験（以降、従来法）は、繰返し载荷に伴う水圧上昇の影響により、大ひずみ領域の剛性を過小評価する課題が指摘されている（例えば⁴⁾）。筆者らは繰返しによる水圧上昇を極力抑えた変形特性試験（以下、RTRI法）を提案している³⁾。

RTRI法は図-1 (a), (b)に示す「1回繰返し段階载荷試験（以降、段階载荷試験）」および「一定ひずみ振幅繰返し载荷試験（以降、定ひずみ試験）」の

試験であり、図-1 (c)に示すようなせん断剛性比とせん断ひずみの関係（ $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係）および各ステージ・各サイクルのせん断応力とせん断ひずみの関係（ $\tau \sim \gamma$ 関係）を得る。RTRI法は、定ひずみ試験結果の適用するサイクル数を変えることで、断層型地震のような繰返し回数の少ない地震動と海溝型地震のような繰返し回数の多い地震動のどちらにも適用可能な枠組みとしており、既往の検討により豊浦砂（相対密度 $D_r = 60, 80\%$ ）に対する断層型、海溝型地震動への適用性を確認している^{3), 5)}。また、エネルギー法を用いた液化判定が実施可能である³⁾。一方で、試験本数が4本必要であり、変形特性のみを把握したい場合は従来法よりコストが高く、実務的に適用する際に課題がある。図-1 (c)には段階载荷試験、定ひずみ試験とともに従来法の試験結果を併せて示しているが、従来法と定ひずみ試験結果の2サイクル目を適用したRTRI法（以降、RTRI法@2cycle）は、0.5%を超える大ひずみ領域の剛性が顕著に低下している。一方、段階载荷試験結果は定ひずみ試験結果の1サイクル目を適用したRTRI法（以降、RTRI法@1cycle）と同様、剛性低下が抑えられており、段階载荷試験結果はRTRI法@1cycleと概ね同程度の変形特性が得られている。

そこで本稿では、従来法およびRTRI法に加え、段階载荷試験1本のみから変形特性を算定する手法（以降、簡易RTRI法）に対しても適用性を検討した。

(2) 種々の砂で得られる変形特性

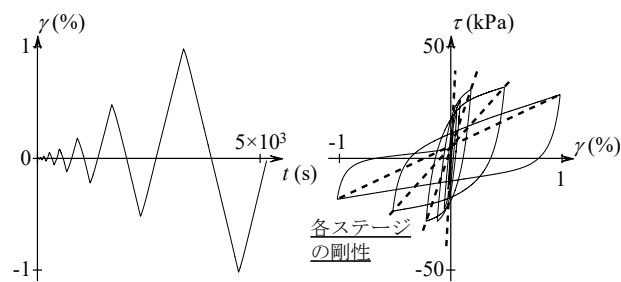
粘性土を対象とした場合、剛性低下に対する水圧上昇の影響は小さく、RTRI法と従来法は同等の変

形特性が得られると考えられる．本稿では，剛性低下に対する水圧上昇の影響が大きいと考えられる単粒度の砂に対して，平均粒径 D_{50} および相対密度 D_r の異なる砂供試体を対象に適用性を検討することとし，珪砂6号，豊浦砂，珪砂8号を用いた．図-2に各試料の粒度分布を示す．

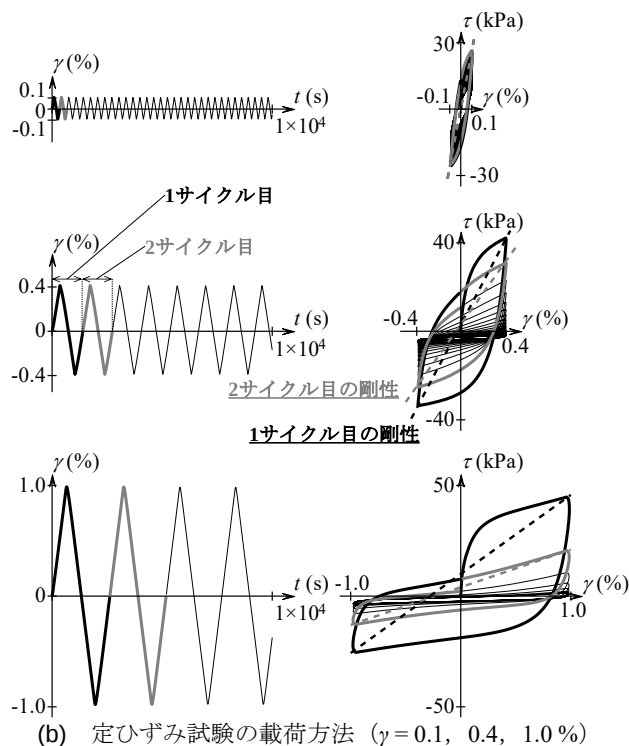
図-3に豊浦砂の $D_r = 60, 80\%$ および珪砂6号，珪砂8号の $D_r = 60\%$ で実施した従来法，RTRI法，簡易RTRI法の3種類の変形特性試験から得られた $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係および $\tau \sim \gamma$ 関係，変形特性把握時点の過剰間隙水圧比とせん断ひずみの関係（ $\Delta u/\sigma'_v \sim \gamma$ 関係）を示す．RTRI法は定ひずみ試験結果の1サイクル目，2サイクル目を適用した2ケースを示す．また，それぞれの $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係， $\tau \sim \gamma$ 関係等に対してGHE-Sモデル²⁾でフィッティングした結果を重ねて示す．GHE-Sモデルのパラメータは反復Shor'sアルゴリズム⁶⁾を用いた最適化手法により求めた．なお，最適化手法の詳細は山内ら⁷⁾を参照されたい．

図-3 (a), (b)に示す珪砂8号および豊浦砂の $D_r = 60\%$ の場合，従来法の大ひずみ領域における剛性低下が簡易RTRI法やRTRI法@1cycleより顕著であることが分かる．これらの試料は密度が低いため，各ステージで11サイクル繰返し，10サイクル目の結果から変形特性を算定する手法である従来法の場合，各ステージの繰返し载荷により発生する過剰間隙水圧が，簡易RTRI法やRTRI法@1cycleより大きいのである．また，RTRI法@2cycleの過剰間隙水圧も大きく発生し，剛性を過小評価している．そのため， $\tau \sim \gamma$ 関係を見ると，従来法やRTRI法@2cycleでは大ひずみ領域で τ が低下し続ける負勾配の傾向が顕著である．ただし，珪砂8号の $D_r = 60\%$ の場合，簡易RTRI法もやや負勾配の傾向を示している．

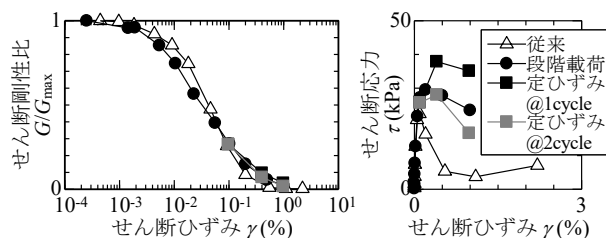
図-3 (c), (d)の豊浦砂 $D_r = 80\%$ および珪砂6号 $D_r = 60\%$ は，大ひずみ領域の剛性低下の程度が4つの変形特性試験結果ともに概ね同程度であり， $\tau \sim \gamma$ 関係はいずれも概ね正勾配を示している．密度が高い豊浦砂 $D_r = 80\%$ は，大ひずみ領域においても過剰間隙水圧に与える繰返し载荷の影響が小さかったと考えられる．一方，珪砂6号 $D_r = 60\%$ は大ひずみ領域では何らかの要因で過剰間隙水圧がすべての試験で同程度であり，剛性低下の程度に違いが生じなかったが，中ひずみ程度では従来法の過剰間隙水圧がRTRI法@1cycleや簡易RTRI法より大きいため，簡易RTRI法またはRTRI法@1cycleを用いるのが適切と考えられる．



(a) 段階载荷試験の载荷方法



(b) 定ひずみ試験の载荷方法 ($\gamma = 0.1, 0.4, 1.0\%$)



(c) 試験結果から得られる $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係， $\tau \sim \gamma$ 関係

図-1 段階载荷試験，定ひずみ試験の载荷方法および試験結果から得られる $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係， $\tau \sim \gamma$ 関係

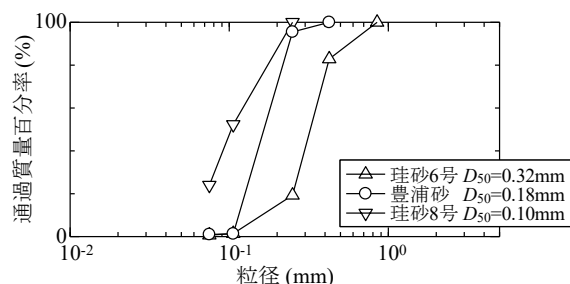


図-2 検討する土質材料の粒度分布

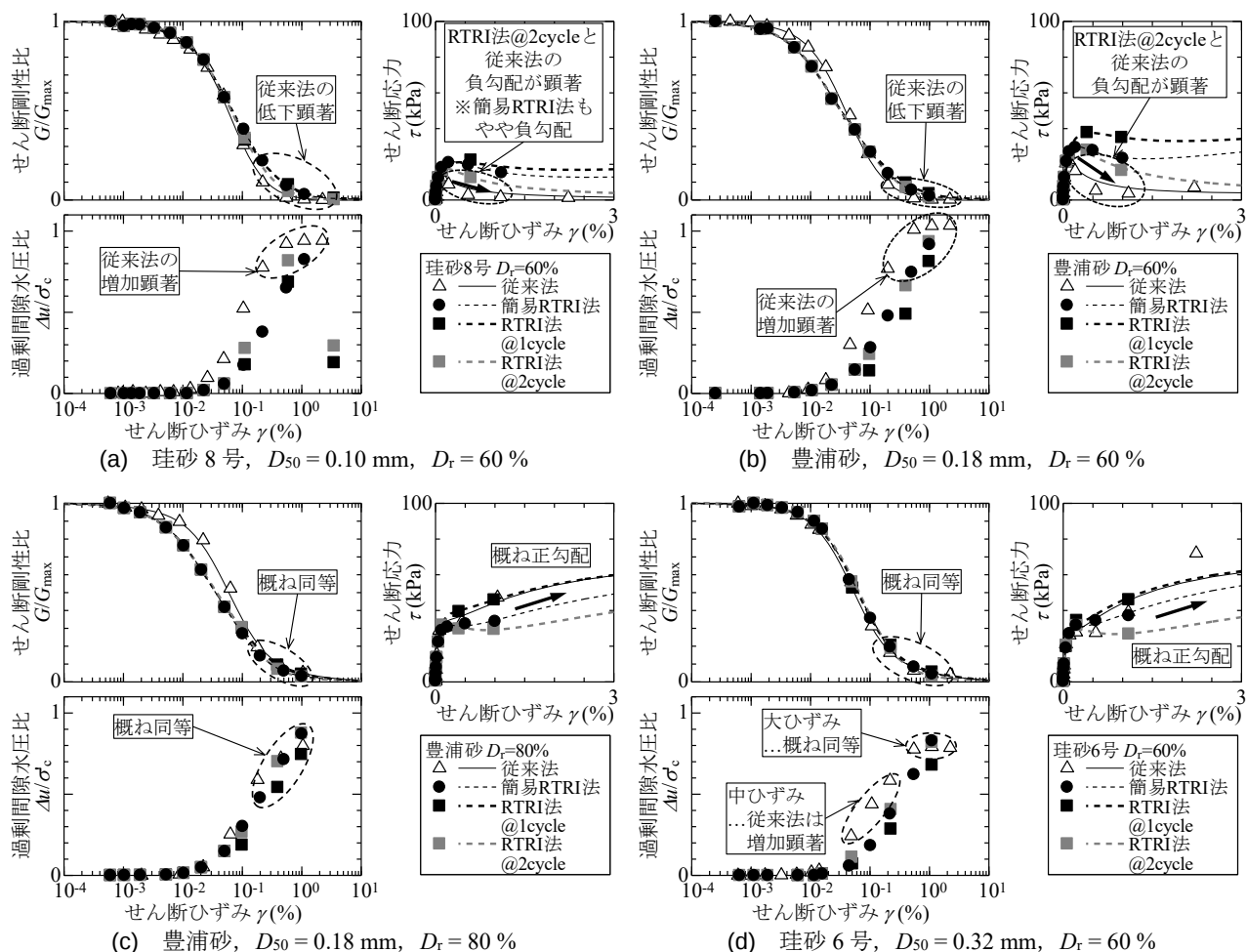


図-3 従来法，RTRI法，簡易 RTRI法で得られる変形特性および GHE-S モデルによるフィッティング結果

3. 簡易 RTRI 法の適用性

(1) 断層型地震動に対する適用性

図-4 (a)に示す地層構造を有する地盤に対して GHE-Sモデルを用いた1次元の地盤応答解析およびハイブリッド地盤応答試験³⁾を実施した。深度4～6 mの層について、動的解析では2(2)節で得られたパラメータを用いてモデル化を行い、ハイブリッド地盤応答試験ではせん断試験対象層とした。なお、断層型地震動は繰返し回数が少ないため、RTRI法はRTRI法@1cycleのみ検討した。その他の層はGHE-Sモデルでモデル化し、標準パラメータ⁸⁾を用いた。減衰にはレーリー減衰を用い、福島・翠川⁹⁾を参考に地盤の固有周期から設定した ($\alpha = 1.02$, $\beta = 2.00 \times 10^{-3}$)。基盤には $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$, $V_s = 400 \text{ m/s}$ 相当の粘性境界を設置し、耐震標準のスペクトルII地震動 (G1地盤)¹⁾を入力した。

図-4 (b)～(e)に豊浦砂の $D_r = 60, 80\%$ および珪砂6号、珪砂8号の $D_r = 60\%$ に対してスペクトルII地震動を入力した場合の従来法、簡易RTRI法、RTRI法@1cycleより得られる変形特性を用い地盤応答解析

結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の最大変位分布を示す。豊浦砂の $D_r = 60\%$ は、深度4～6 mの層で従来法の変位がRTRI法@1cycleと簡易RTRI法より大きくなっており、RTRI法@1cycleと簡易RTRI法の変位はハイブリッド地盤応答試験結果と概ね同程度となっている。一方、豊浦砂の $D_r = 80\%$ および珪砂6号の $D_r = 60\%$ は各種試験手法から得られる変形特性によらず、いずれの変位分布も一致し、ハイブリッド地盤応答試験結果と整合している。密度の低い砂では繰返し载荷により大ひずみ領域で剛性が低下しやすいため、従来法で得られる変形特性を用いた応答解析は変位が過大評価となり、繰返し载荷の少ないRTRI法@1cycleまたは簡易RTRI法はより適切な応答評価できたと考えられる。珪砂8号の $D_r = 60\%$ は、豊浦砂の $D_r = 60\%$ と同様に従来法の変位が最も大きい、簡易RTRI法とRTRI法@1cycleの変位分布も一致せず、RTRI法@1cycleが最もハイブリッド地盤応答試験結果と整合する結果となった。

図-3(a)で珪砂8号の $D_r = 60\%$ は、簡易RTRI法においても τ - γ 関係が大ひずみ領域でやや負勾配の傾向を示していた。一方、図-3(c), (d)の豊浦砂の $D_r =$

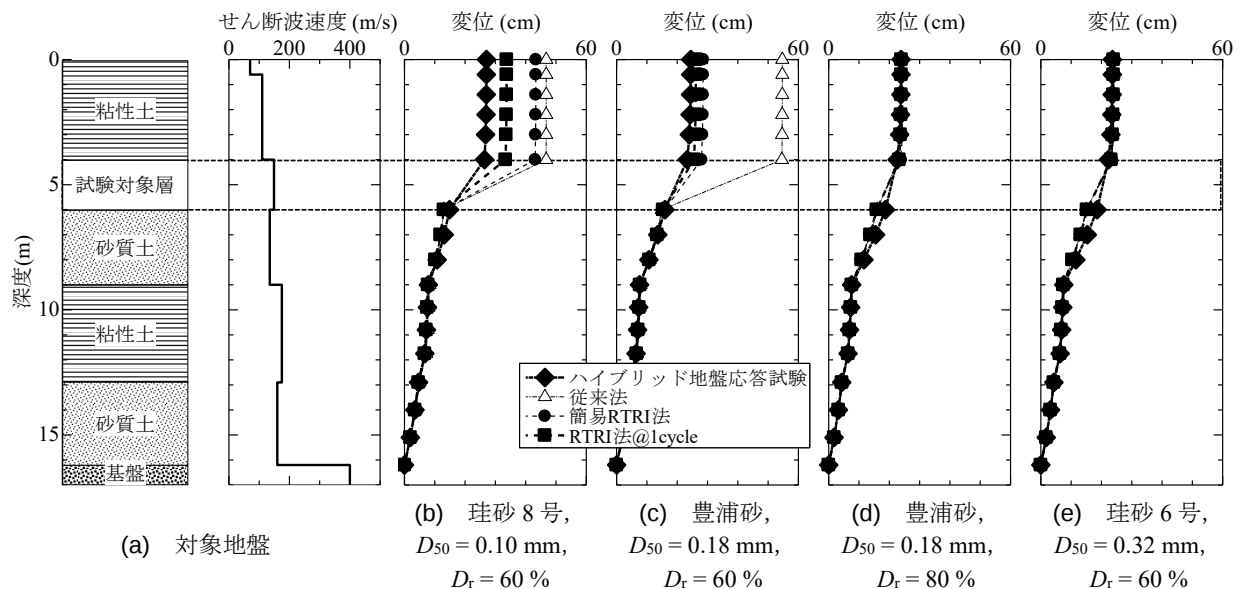


図-4 従来法，簡易 RTRI 法，RTRI 法@1cycle で得られる変形特性を用いた地盤応答解析結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の比較（スペクトルⅡ地震動）

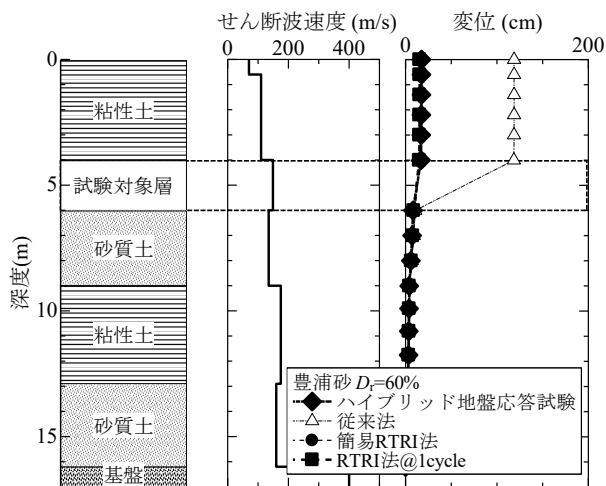


図-5 従来法，簡易 RTRI 法，RTRI 法@1cycle で得られる変形特性を用いた地盤応答解析結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の比較（豊浦砂， $D_r = 60\%$ ，スペクトルⅠ地震動）

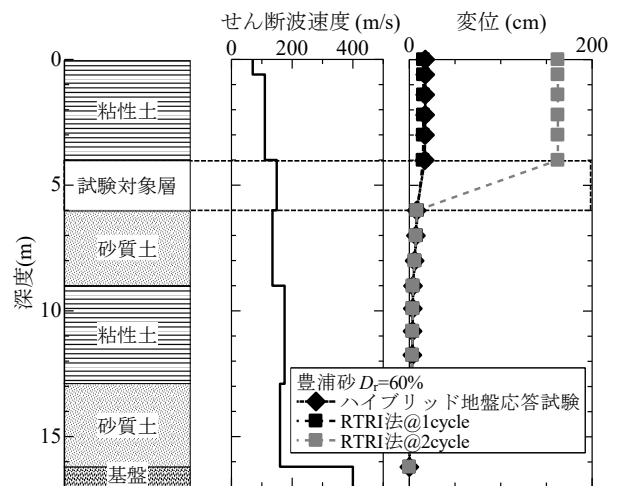


図-6 適用する定ひずみ試験のサイクル数の異なる RTRI 法で得られる変形特性を用いた地盤応答解析結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の比較（豊浦砂， $D_r = 60\%$ ，スペクトルⅠ地震動）

80%および珪砂6号の $D_r = 60\%$ は，いずれも $\tau-\gamma$ 関係が大ひずみ領域で正勾配となっている．負勾配を持つ場合は，RTRI法@1cycleの方がより適切だが，簡易RTRI法でも安全側に評価可能である．

(2) 海溝型地震動に対する適用性

本検討には3(1)節と同じ地盤を用い，海溝型地震動として耐震標準のスペクトルⅠ地震動（G1地盤）を入力した．なお，海溝型地震動は繰返し回数が多いため，繰返し载荷に伴う水圧上昇の影響による剛性低下を考慮する必要があると考えられるため，RTRI法@1cycleに加え，RTRI法@2cycleの変形特性を用いた地盤応答解析も実施した．

図-5に，豊浦砂の $D_r = 60\%$ に対してスペクトルⅠ

地震動を入力した場合の従来法，簡易RTRI法，RTRI法@1cycleより得られる変形特性を用いた地盤応答解析結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の最大変位分布を示す．スペクトルⅡ地震動を入力した場合と同様，深度4～6 mの層で従来法の変位が簡易RTRI法およびRTRI法@1cycleより大きくなっており，簡易RTRI法およびRTRI法@1cycleの変位はハイブリッド地盤応答試験結果と概ね同程度となっている．

図-6に，図-5と同じ試料，同じ地震動に対して定ひずみ試験の異なるサイクル数の変形特性を適用したRTRI法の変形特性を用いた地盤応答解析結果およびハイブリッド地盤応答試験結果の最大変位分布を示す．RTRI法@2cycleの変位は，RTRI法@1cycle

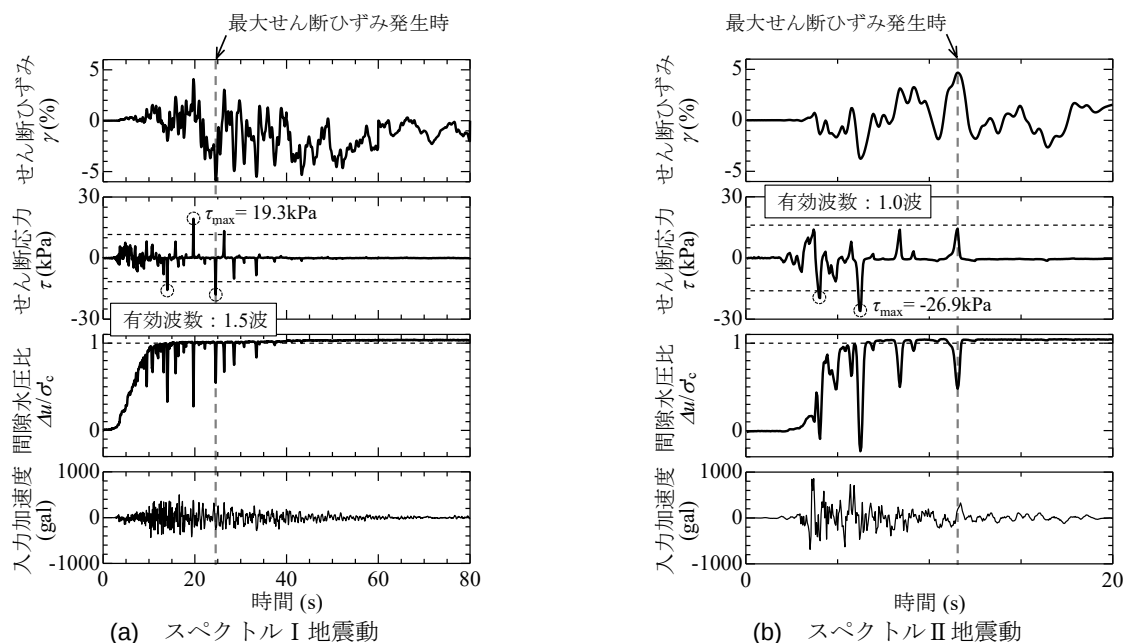


図-7 スペクトルⅠ，Ⅱ地震動に対するハイブリッド地盤応答試験の試験対象層における時刻歴応答と最大せん断ひずみ発生以前の有効波数（豊浦砂， $D_r = 60\%$ ）

より大きく、定ひずみ試験の2サイクル目を適用すると土の剛性低下を過大評価する結果となる。そのため、スペクトルⅠ地震動に関しては繰返し回数が多く、剛性低下は想定より小さいことが分かる。

この要因について山崎ら¹⁰⁾の提案する有効波数の概念を用いて考察する。有効波数は、せん断応力時刻歴波形の内、ピークが最大せん断応力の6割以上となる波の数の半分として定義され、液状化の発生に影響を与える波数とされている。したがって、水圧変動に影響を与える波数と考えられ、変形特性の水圧依存にも影響を与えると考えられる。

図-7に豊浦砂 $D_r = 60\%$ に対してスペクトルⅠ，Ⅱ地震動を入力した場合のハイブリッド地盤応答試験における試験対象層の時刻歴応答および最大せん断ひずみが発生するまでの有効波数を示す。振動初期に液状化に至っているため判断は難しいが、スペクトルⅠ地震動は1.5回であり、スペクトルⅡ地震動の1.0回と同程度の有効波数となっている。このことから、スペクトルⅠ地震動は土の変形特性に影響を与えるレベルの繰返し回数がスペクトルⅡと同程度であったと考えられ、繰返し载荷の少ない簡易RTRI法やRTRI法@1cycleより得られる変形特性を用いることで剛性低下を適切に評価することができ、これらを用いた地盤応答解析結果がハイブリッド地盤応答試験と整合する結果となったと考えられる。スペクトルⅠ地震動以外の海溝型地震動についても有効波数が同程度であれば、簡易RTRI法あるいはRTRI法@1cycleが適用可能であると考えられる。なお、有効波数が多い場合は別途繰返しの影響を考慮

する必要がある。

4. まとめ

本稿では、筆者らが提案している地盤の動的解析のための変形特性試験法（RTRI法）について、より実務的な手法（簡易RTRI法）を検討し、その適用性について検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 相対密度の低い砂の場合、繰返し载荷により過剰間隙水圧が蓄積しやすく、従来の変形特性試験法は、大ひずみ領域での剛性を過小評価し、地盤応答解析においては変位を過大評価する傾向にある。
- (2) 異なる試験法より得られる変形特性を用いた地盤応答解析を実施した結果、定ひずみ試験結果の1サイクル目を適用したRTRI法が最も高い精度で地盤変位を評価できた。また、簡易RTRI法は応力ひずみ関係で負勾配が生じる場合に地盤変位をやや過大評価する場合があるが、安全側の評価が可能である。
- (3) 密度の高い砂の場合、試験手法によらず変形特性は概ね一致し、いずれの試験法でも適切な応答結果が得られる。
- (4) 繰返し回数の多い海溝型地震動においても、有効波数が1程度である場合、簡易RTRI法および定ひずみ試験結果の1サイクル目を適用した

RTRI 法は適切な応答結果が得られる。

簡易RTRI法は、定ひずみ試験結果の1サイクル目を適用したRTRI法と比べ応答変位をやや過大評価する場合があるが、試験本数が1本であることを考慮すると、より実務的な試験法である。また、簡易RTRI法を用いた有効応力解析モデルのパラメータ設定法についても検討し、その適用性を確認しており¹¹⁾、1供試体から様々な情報を得ることが可能である。

参考文献

- 1) (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，2012.
- 2) 室野剛隆，野上雄太：S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，2006.
- 3) 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，総研報告，Vol. 32, No. 9, 2018.
- 4) 吉田望，三上武子：時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を，地盤工学会誌，2010.
- 5) 井澤淳，山本昌徳，神澤拓，小島謙一：海溝型地震を対象とした地盤応答解析に用いる土の変形特性に関する検討，第 54 回地盤工学研究発表会，2019.
- 6) Kappel, F. and Kuntsevich, A. V.: An implementation of Shor's r-algorithm, *Computational Optimization and Applications*, Vol. 15, No. 2, pp. 193-206, 2000.
- 7) 山内泰知，山本昌徳，井澤淳：地盤の動的解析における変形特性パラメータの設定手法に関する一考察，第 24 回橋梁等の耐震設計シンポジウム（投稿中），2021.
- 8) 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.
- 9) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q-1 値とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，第 460 号，pp. 37-46, 1994.
- 10) 佐々真志，山崎浩之，後藤佑介：地震動波形と継続時間の双方を考慮した新たな液状化予測判定法とその検証，土木学会論文集 B3, Vol. 69, No. 2, I_143-I_148, 2013.
- 11) 山本昌徳，山内泰知，神澤拓，井澤淳：液状化地盤中の杭基礎構造物の地盤一構造物一体海型モデルによる動的解析手法に関する検討，第 23 回橋梁等の耐震設計シンポジウム，2020.