第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

地盤の定常化を考慮した拡張おわんモデルによる有効応力解析手法の提案と妥当性評価

小野寺智哉[1]・井澤淳[1]・伊吹竜一[1]・山本昌徳[1]
福武毅芳[2]・桐山貴俊[2]・児玉剛[3]・馬渕倉一[3]

[1]（公財）鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター
[2]清水建設（株）　技術研究所
[3]伊藤忠テクノソリューションズ（株）　科学システム本部

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計における L2 地震動は，建設地点で起こりうる最大級の地震動を設定することとされており，強震動予測手法により算定することが推奨されている[1)]．近年では，M9 クラスの巨大地震の発生が危惧されており，特に震源域の近傍では極めて大きな地震動が算定される可能性がある．このような巨大地震に対する構造物の性能を評価するためには，表層地盤の挙動評価が必要であり，当然，地盤の液状化に対する配慮も必要となる．

鉄道構造物の設計には，地盤の非線形全応力解析モデルとして GHE-S モデルが標準的に用いられており，これに加えて間隙水圧の発生をおわんモデル[2)]により評価する有効応力解析手法がこれまで提案されてきた[3)]．しかしながら，従来のおわんモデルでは後述する地盤の大変形時に生じる定常化を考慮できないため，巨大地震時の地盤挙動を精緻に評価できない可能性がある[4)]．

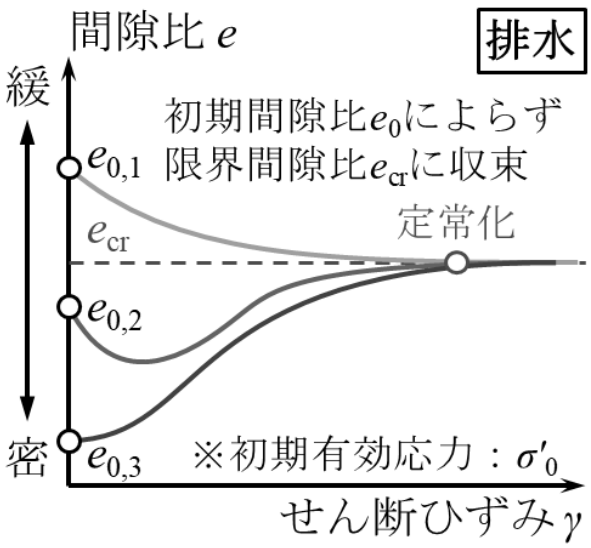
そこで，地盤の定常化を考慮できるようにおわんモデルを拡張するとともに，パラメータ設定手法を提案し，各種試験の再現解析によりその妥当性を確認したので報告する．

2. 地盤の定常化とそのモデル化

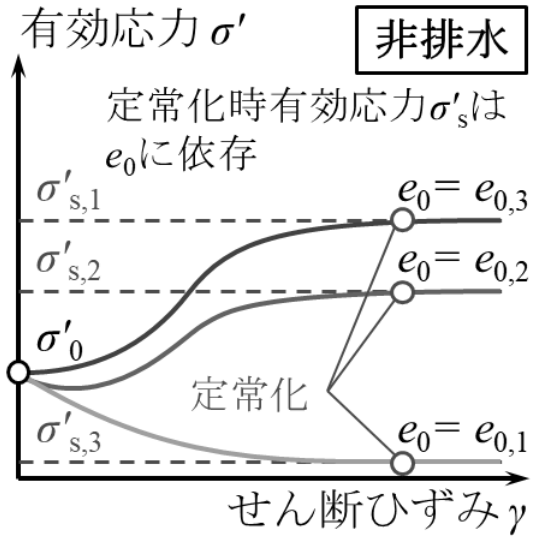
(1) 地盤の定常化[5)6)]

図 1 に，単調せん断載荷時の土の変形挙動の概念図を示す．本稿では，非排水条件においては有効応力が，排水条件においては間隙比が一定のままでせん断変形が進行する現象を，同一の破壊現象と考え，これらを定常化と呼ぶこととする．

砂を排水条件で単調せん断した場合，緩い（初期間隙比が大きい）砂は体積圧縮して定常化に至るのに対し，密な（初期間隙比が小さい）砂では体積膨張して定常化に至る．地盤材料が同一であれば，定常化時における間隙比は初期間隙比によらず同一であり，この時の間隙比を限界間隙比e_{cr}とする（**図 1(a)**）．一方，非排水条件では，緩い砂はせん断に伴って有効応力が減少し，初期より低い有効応力で定常化に至るのに対し，密な砂はせん断に伴って有効応力が回復し，初期より高い有効応力で定常化に至る．このように初期有効応力が同一の条件において，非排水条件で砂をせん断した際に定常化に至る有効応力は，初期間隙比によって決まる（**図 1(b)**）．本稿では、このような地盤の定常化を再現可能な有効応力解析モデルを提案する．



(a) 排水条件



(b) 非排水条件

図 1 単調せん断時の土の変形挙動の概念図

(2) 拡張おわんモデルの概要

本研究では，地盤の有効応力解析のモデルとして，GHE モデルと拡張おわんモデルを組み合わせて使用した．**図 2** に拡張おわんモデルの概要を示す．

従来のおわんモデルは，せん断に伴う体積変化（$\varepsilon_v - \gamma$関係）をモデル化したものだが，定常化の発生による体積（間隙比）の頭打ちを考慮できず，大ひずみ領域において間隙比が単調に増加する．したがって，非排水条件での載荷において，有効応力が単調に増大し，結果としてせん断応力や加速度の増加を過大評価することが考えられる．

そこで，拡張おわんモデルでは，限界間隙比に達した場合におわんが平行移動し，間隙比増分を 0 とすることで，定常化を考慮できるようにしている．これにより，大ひずみ領域でのせん断応力などを適切に計算できるようになり，巨大地震時に対する応答を精緻に評価できると考えられる．

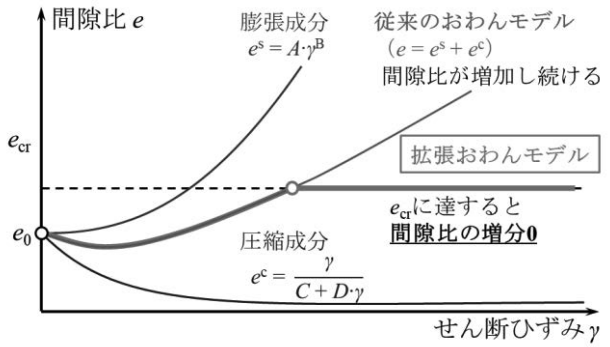


図 2 限界間隙比を考慮した拡張おわんモデルの概要

(3) パラメータ設定

本研究では，豊浦砂（Dr=60%）の層を対象に有効応力解析を実施した．この土質に対するパラメータ設定を以下の手順で行った．

まず，**図 3** に示す非排水単調せん断試験を実施し，内部摩擦角ϕ'と定常化時有効応力σ'_sを求める．次に，繰返しせん断試験による変形特性試験から得られる$G \sim \gamma$関係および$h \sim \gamma$関係をもとに，GHE モデルパラメータを設定する [7]（**図 4**）．ただし，変形特性試験から得られる$G \sim \gamma$関係は水圧上昇の影響を含むため，これを補正した剛性G_{mod}（式(1)）を用いて設定を行い，水圧の上昇については拡張おわんモデルで考慮する．その後，液状化試験から得られた動的せん断強度比 R と繰返し回数N_cの関係（液状化強度曲線）などから，おわんパラメータを設定する（**図 5**）．

$$G_{mod} = G_{test}\left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_{m0}}\right)^{0.5} \quad (1)$$

ここで，定常化を考慮するためのパラメータ設定を以下の考え方に基づいて行う．**図 6** に，初期有効応力σ'_0，初期間隙比e_0の土を，排水，非排水条件で単調せん断した場合の$e - \log\sigma'$関係を示す．排水条件では有効応力σ'が一定であるから経路は上下に，非排水条件では間隙比eが一定であるから経路は左

右にのみ移動し，いずれの場合も限界状態線上で定常化に至る．限界状態線の傾きが，緩い地盤では圧密曲線，密な地盤では膨張曲線上の傾きと同等であると仮定すると，限界間隙比e_{cr}および定常化時有効応力σ_s'は式(2)(3)により算出できる．係数 C は初期状態に応じて，式(4)により膨潤係数C_sと圧縮係数C_cを使い分ける．なお，拡張おわんモデルを用いた有効応力解析の際に用いる膨潤係数C_sおよび圧縮係数C_cは，圧密試験から求まるものではなく，解析時に設定するものであることに注意が必要である．今回対象としたのは，有効応力が回復する（間隙比が増大する）密な砂であることから，C_c，σ_s'を式(2)に代入して限界間隙比e_{cr}を算出した．

表 1 に，豊浦砂 Dr=60%の各種試験結果に対してフィッティングしたパラメータを示す．なお，G_{0i}およびγ_{ri}はそれぞれ，有効拘束圧が 1kPa のときの初期せん断弾性係数および基準ひずみである．この条件において，初期間隙比は$e_0 = 0.723$，定常化時有効応力は$\sigma_s' = 320$ kPaである．

$$e_{cr} = e_0 + C \cdot \log\frac{\sigma_s'}{\sigma_0'} \tag{2}$$

$$\sigma_s' = \sigma_0' \cdot 10^{(e_{cr}-e_0)/C} \tag{3}$$

$$C = \begin{cases} C_c (e_0 \le e_{cr} \ or \ \sigma_0' \le \sigma_s') \\ C_s (e_0 > e_{cr} \ or \ \sigma_0' > \sigma_s') \end{cases} \tag{4}$$

表 1 豊浦砂（Dr=60%）について設定したパラメータ

（a）土の力学的特性

G_{0i}(kPa)	γ_{ri}(%)	ϕ'(°)	c (kPa)
9820.3	7.32×10^{-3}	35.7	0.0

（b）GHE モデルパラメータ

$C_1(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(0)$	$C_2(\infty)$	α	β	h_{max}	κ
1.00	0.265	0.424	1.00	1.32	0.97	0.36	1.1

（c）拡張おわんモデルパラメータ

A	B	C	D	Cs	Cc	X_l	e_{cr}
-0.5	1.4	10	30	0.01	0.0102	0.15	0.743

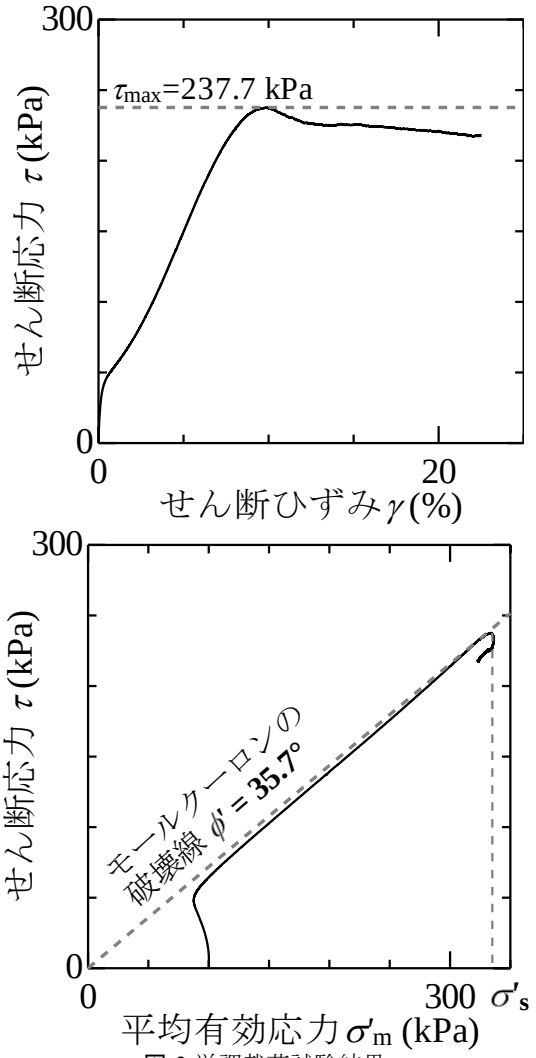


図 3 単調載荷試験結果

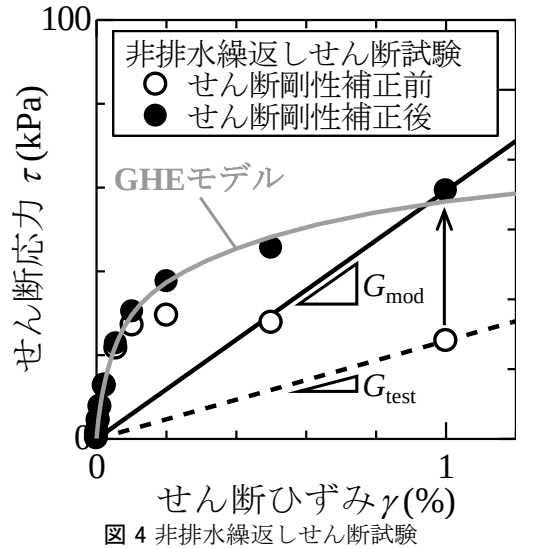


図 4 非排水繰返しせん断試験

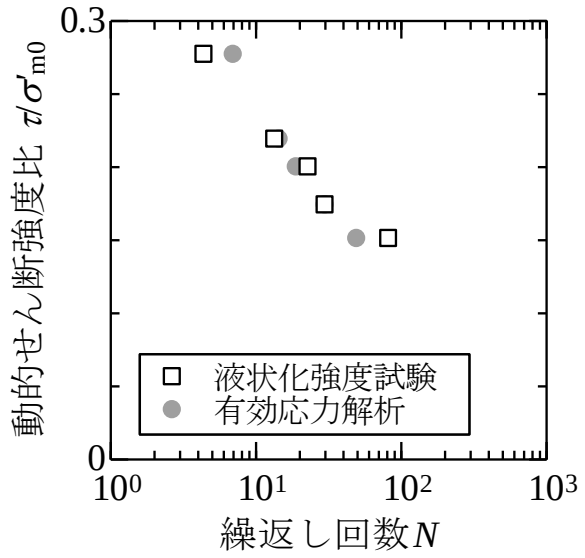
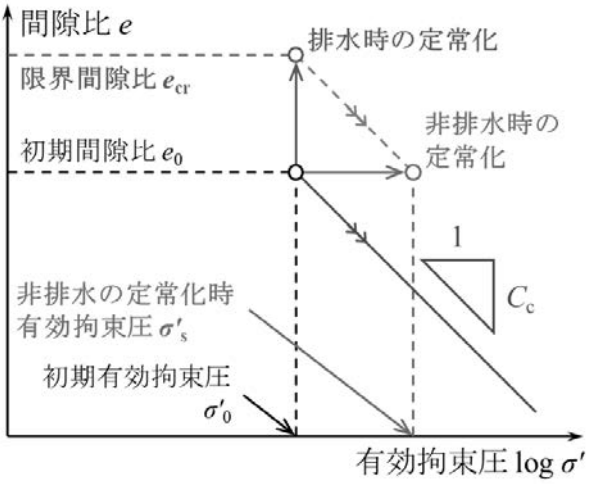
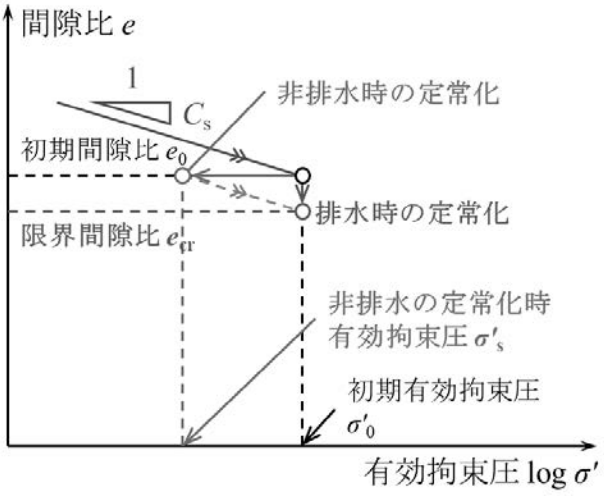


図 5 液状化強度曲線



(a) 密な砂



(b) 緩い砂

図 6 単調せん断時の$e - \log\sigma'$関係の概念図

3. 再現解析による妥当性の確認

拡張おわんモデルの妥当性を確認するため，非排水繰返しせん断試験とハイブリッド地盤応答試験 [8] を実施し，その再現解析を行った．なお，ハイブリッド地盤応答試験装置（**図 7**）は，対象層のせん断試験装置として，拘束圧載荷可能な単純せん断試験装置を採用しており，非排水繰返しせん断試験においてもこの装置を使用した．

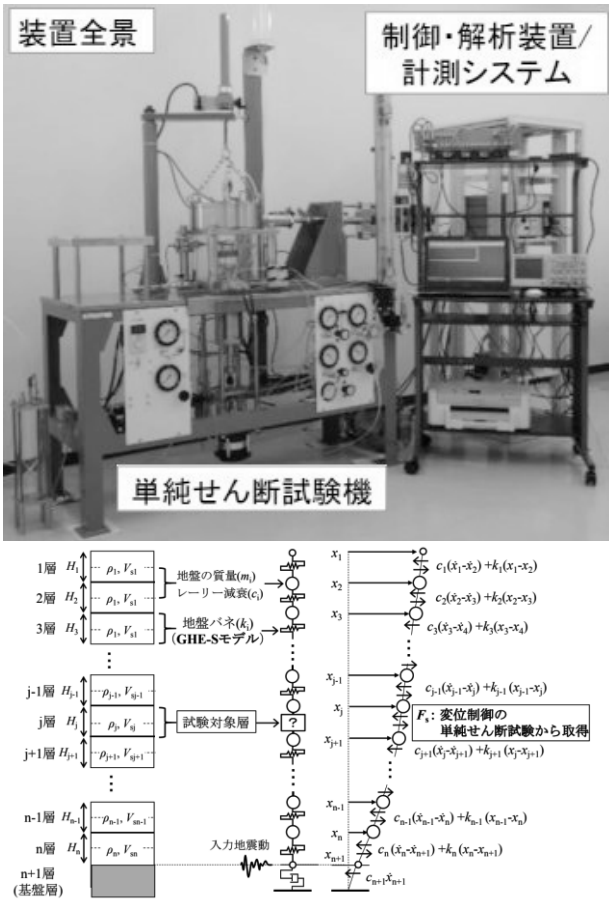


図 7 ハイブリッド地盤応答試験装置の装置全景と試験の概念図 [7]

(1) 非排水繰返しせん断試験

単純せん断試験装置を用いて，大ひずみ領域での非排水繰返しせん断試験を実施した．試料として，豊浦砂（Dr=60%）を用いた．載荷はひずみ制御（ひずみ速度$\dot{\gamma} = 0.1\%/min$）で，ひずみ振幅 20%として 3 回繰り返した．また，上述のモデルとパラメータを用いた有効応力解析を同様の条件で実施した．

図 8 に，試験および有効応力解析から得られたせん断応力-せん断ひずみ（τ~γ）関係と平均有効応力-せん断ひずみ（σ'_m~γ）関係を示す．試験結果では，平均有効応力が約 320kPa で頭打ちとなり，それに伴ってせん断応力も一定のままでせん断ひずみが増大する挙動が見られる．有効応力解析でも平均有効応力が 320kPa に達するとそれ以上は増加せず，せん断応力についても極端な増加がないままひずみが増大する挙動が見られる．このことから，当該モデル，パラメータを用いた有効応力解析は大ひずみ領域での繰返しせん断挙動を再現できていると考えられる．なお，小ひずみ領域において試験と解析の結果は必ずしも一致していないため，この領域の挙動に着目した解析を実施する際の当該パラメータの適用については注意が必要である．

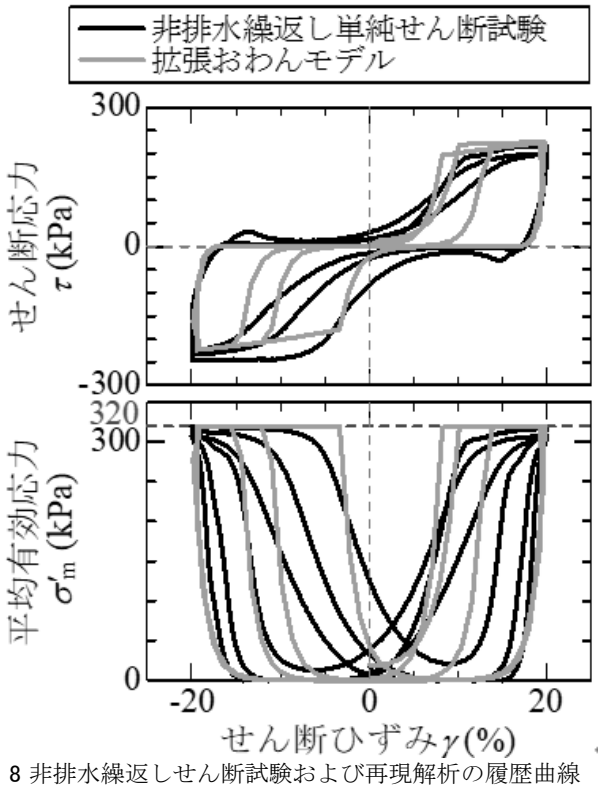


図 8 非排水繰返しせん断試験および再現解析の履歴曲線

(2) ハイブリッド地盤応答試験

図 9 に示す仮想地盤を対象としたハイブリッド地盤応答試験を実施した．鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計 [1]に示す L2 スペクトル II 地震動（G1）を 3000, 5000, 7000gal に振幅調整して基盤（Vs=400m/sec，$\rho = 2.0\mathrm{g/cm^3}$）に入力した．なお、本検討では定常化に至る挙動を確認するため、非現実的ではあるが、極端に大きな入力加速度を使用した．減衰について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（$\alpha = 3.78, \beta = 4.53 \times 10^{-4}$）．

図 10 にハイブリッド試験および再現解析で得られるせん断応力，変位，加速度の応答値深度分布を示す．定常化を考慮しないおわんモデル（従来のおわんモデル）と拡張おわんモデルの結果を比較すると，入力 3000gal では大きな応答の違いは見られず、ハイブリッド試験結果を概ね再現出来ている．一方で，入力 5000gal, 7000gal における試験対象層の挙動に差異が見られ，従来のおわんモデルでは対象層で大きなせん断応力が発生し，それに伴って対象層以浅での加速度応答が大きく，変位応答がやや小さくなっているのに対して，拡張おわんモデルを用いた解析では，7000gal まで入力を増大させると若干の乖離はあるものの，概ねハイブリッド試験の結果を再現できているといえる．なお，この傾向は入力加速度が大きいほど顕著である．

図 11 にそれぞれの入力振幅における，試験対象層のτ~γ関係およびσ'_m~γ関係を示す．入力 3000gal では，試験結果が定常化まで至っておらず，定常化が発生するような応力レベルに達していないと考えられる．このことから，いずれのモデルを用いた有効応力解析でもほぼ同様の結果が得られている．入力 5000gal，7000gal の場合，従来のおわんモデルでは大ひずみ発生時にせん断応力および平均有効応力が上限無く増加することにより，試験結果との乖離が生じている．一方，拡張おわんモデルでは，ハイブリッド試験結果において応力が頭打ちしている状況を再現できていることが分かる．

図 12 に，各入力加速度と，応答 として得られた対象層のせん断応力，平均有効応力，せん断ひずみの時刻歴波形を示す．入力 3000gal では，従来のおわんモデルと拡張おわんモデルでほぼ同じ応答を示していることが分かる．一方，入力 5000gal，7000gal のケースでは，入力加速度が大きくなる時刻 4 秒・6 秒付近において，せん断応力・平均有効応力に着目すると，従来のおわんモデルでは非常に

大きい応答を示しているのに対し，拡張おわんモデルでは頭打ち挙動を示しており，ハイブリッド試験で見られた定常化を再現できているといえる．また，特に入力 7000gal においては，せん断ひずみにも明確な違いが生じているが，定常化を再現できている拡張おわんモデルの方が，ハイブリッド試験に比較的近い挙動を示していることが分かる．

⑶ 拡張おわんモデルの適用性と課題について

上記の再現解析結果より，L2 地震動やそれを大きく上回るような巨大な地震動に対して，地盤の応力状態や加速度の最大値を算出するにあたり，定常化を考慮した拡張おわんモデルにおける解析が有用であることが分かった．

一方，入力 3000gal のハイブリッド試験再現解析のτ~γ関係およびσ'_m~γ関係に顕著であるが，小ひずみ領域における履歴曲線の形状やひずみの発生状況の精緻化については検討の余地があり，パラメータ設定は今後の課題となる．

4. まとめ

本研究では，巨大地震に対する地盤の応答を評価することを目的として，地盤の定常化を考慮した拡張おわんモデルについて検討した．非排水条件で定常化時の有効応力σ'_sが初期間隙比e_0によって決まること，排水条件でe_0によらず限界間隙比e_{cr}が一定値に収束することを利用し，地盤の有効応力解析モデルである拡張おわんモデルに限界間隙比の概念を取り入れた．

また，提案した拡張おわんモデルを用い，豊浦砂 Dr=60%の地盤を対象として，パラメータ設定および室内試験の再現解析（有効応力解析）を実施した．その結果，拡張おわんモデルを用いた解析では，各試験において確認された地盤の定常化挙動を概ね再現可能であることが確認できた．また，ハイブリッド試験の再現解析において，拡張おわんモデルでは，定常化を考慮しない従来のおわんモデルと比較して，対象層の有効応力・せん断応力レベルや，耐震設計で重要となる対象層以浅（特に地表面）の加速度・変位の最大値を精度よく評価できていることが分かった．

本研究では，現象の把握およびモデル，パラメータの妥当性確認のため，7000gal に至るまでの極端に大きな地震動を入力したが，極めて強い揺れが想定される地域の L2，あるいは危機耐性の範疇にあると考えられる地震動に対しても，拡張おわんモデルを用いることで，定常化を含む地盤の地震時挙動を精緻に評価できることが確認できた．

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) 福武毅芳：三次元有効応力解析プログラム HiPER（おわんモデル）と液状化シミュレーション，清水建設技術報告，Vol.96，pp. 5-18，2018.

3) 山本昌徳，井澤淳：地盤～構造物一体型モデルに適用する有効応力解析モデルのパラメータ設定手法，日本鉄道施設協会誌，Vol. 60，No.8，pp.49-52，2022.

4) 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，馬渕倉一：ステディーステートを考慮したおわんモデルの拡張　その 1，第 57 回地盤工学研究発表会，2022.

5) R.Verdugo and K. Ishihara: The steady state of sandy soils, Soils and Foundations, Vol.36, No.2, pp.81-91, 1996.

6) M. Yoshimine and K. Ishihara: Flow potential of sand during liquefaction, Soils and Foundations, Vol.38, No.3, pp.189-198, 1998.

7) 西村昭彦，室野剛隆：GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証，第 25 回地震工学研究発表会，1999.

8) 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.

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.

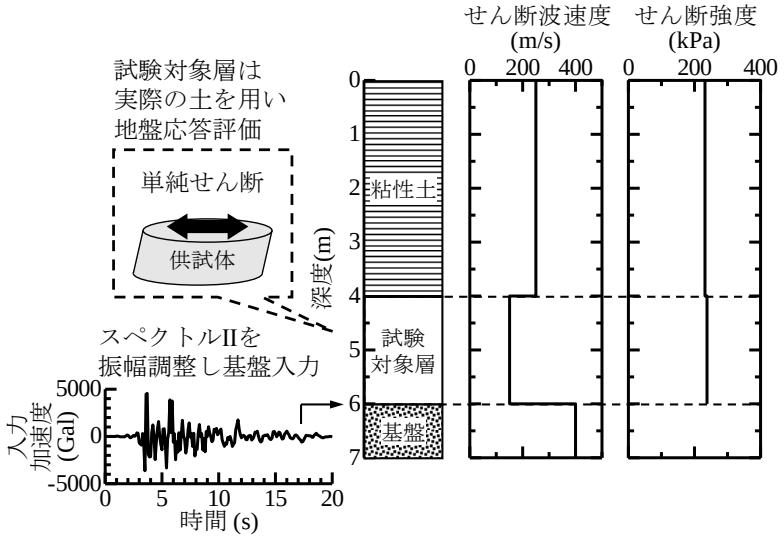
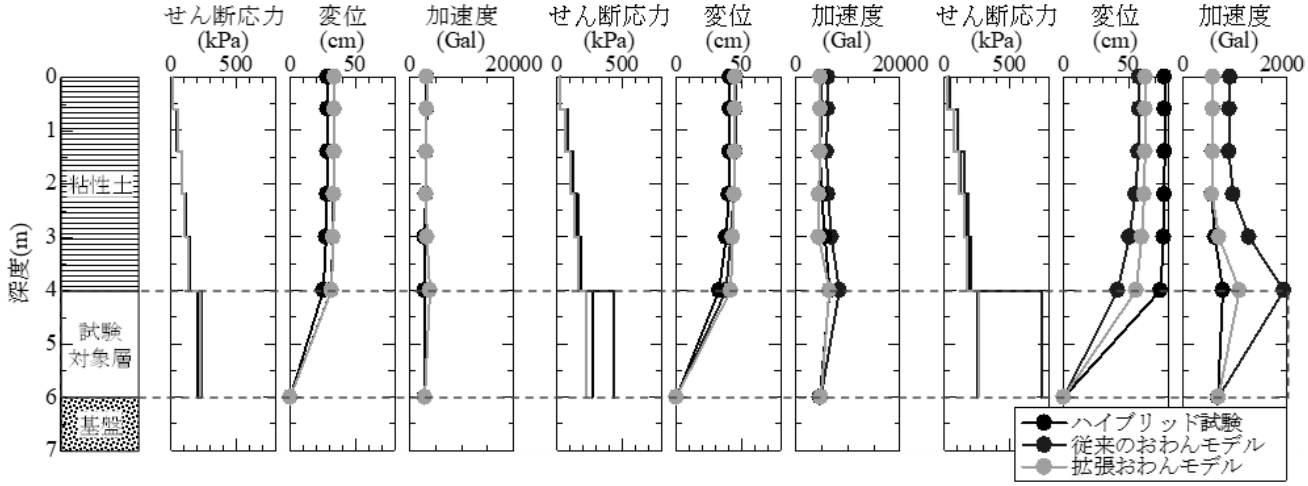
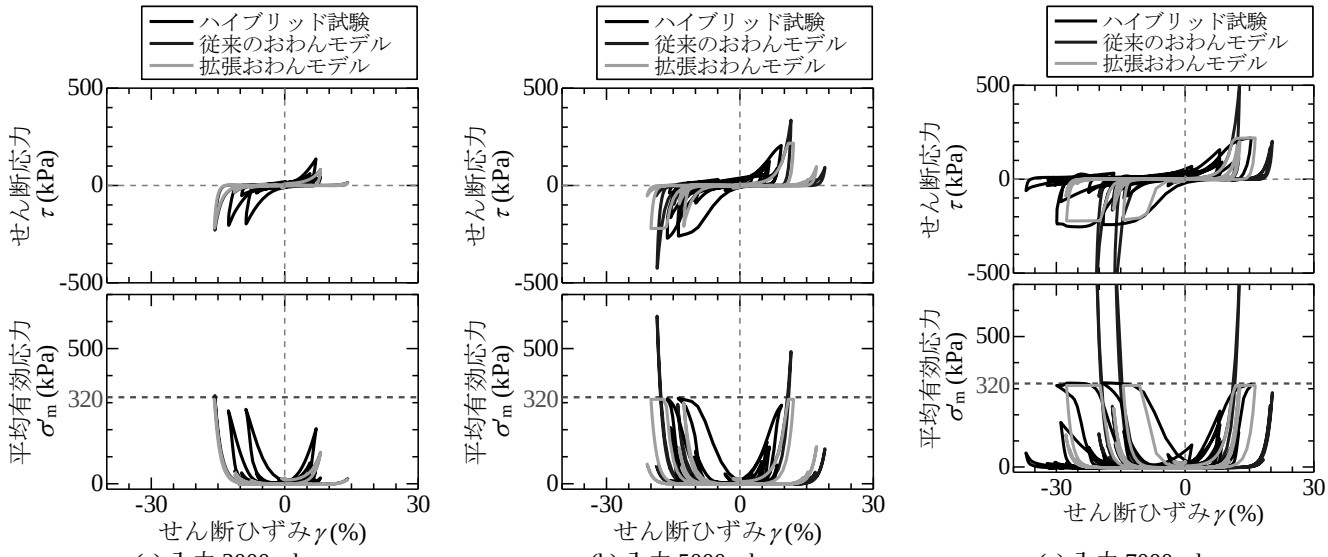


図 9 検討に用いる仮想地盤とハイブリッド試験概要



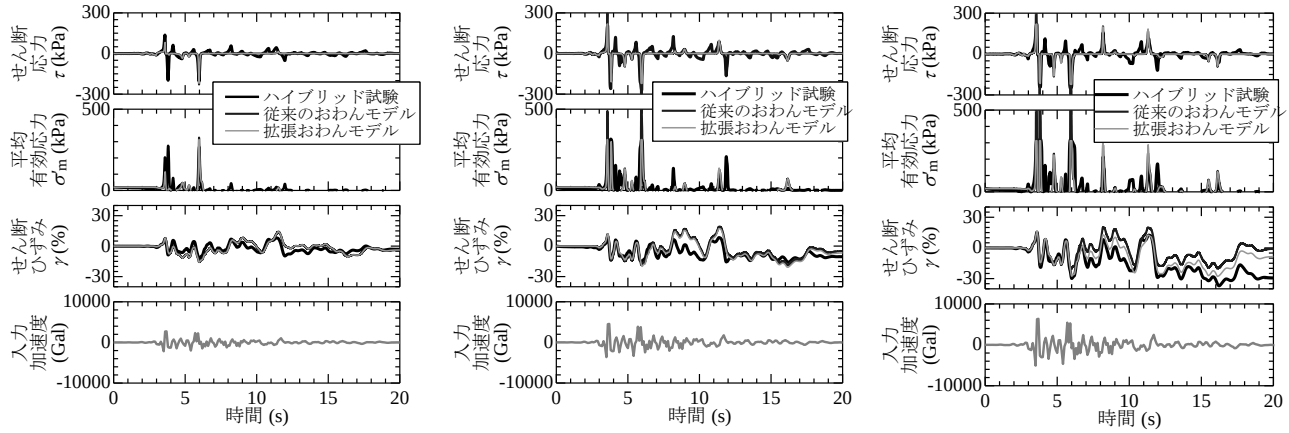
(a) 地層構成　(b) 入力 3000gal　(b) 入力 5000gal　(c) 入力 7000gal

図 10 ハイブリッド試験および有効応力解析結果における最大応答深度分布



(a) 入力 3000gal　(b) 入力 5000gal　(c) 入力 7000gal

図 11 ハイブリッド試験および有効応力解析における試験対象層の応答履歴



(a) 入力 3000gal　　(b) 入力 5000gal　　(c) 入力 7000gal

図 12 ハイブリッド試験および有効応力解析における応答時刻歴波形