

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

実験とシミュレーションを組み合わせる 特殊な地盤の揺れを求める

鉄道構造物の耐震設計では、構造物の揺れに直接影響する地盤の揺れ方をシミュレーションにより計算する必要があります。しかしながら、日本には火山灰などの特殊な土が広く分布しているためシミュレーションモデルの作成が難しい場合があります。ここでは、特殊土層のモデル化を必要としない精緻な地盤応答解析が可能な、せん断試験とシミュレーションを組み合わせたハイブリッド地盤応答試験装置について紹介します。



井澤 淳
Jun Izawa
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
主任研究員
[専門分野] 地盤工学



豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
室長
[専門分野] 耐震設計、
免震・制震構造

はじめに

鉄道構造物の耐震設計における地盤の役割は大きく二つに分けられます。一つは構造物を支えるという役割であり、地盤が安定を失うと構造物が大きな被害を受けます。もう一つは、断層から発生した地震動を地表面まで伝える役割であり、これによって構造物の揺れ方が決まります。そのため、耐震設計においては、シミュレーションにより地盤の揺れ方を適切に評価し、構造物の設計を行う必要があります。ここでは、実験とシミュレーションを組み合わせた精緻な評価方法について紹介します。

土の変形特性

地盤の地震時シミュレーションを行うためには、地盤を構成している土が

地震力を受けてどの程度変形するかを計算できる数値モデルを用意する必要があります。土は細かい土粒子の集合体であるため、地震時に非常に複雑な変形をします。

図1は、地震荷重を模擬した横方向の力(せん断応力 τ)を土に与えた場合の土の変形(せん断ひずみ γ)の状態を模式的に示しています。土は地震時に左右に揺られることで、せん断応力とせん断ひずみの関係が紡錘形のループを描きます。このとき図2に示すように、ループの二つの頂点を結んだ直線の傾きは土が抵抗する力の大きさを表し、せん断剛性 G といいます。一方、ループの面積は地震力を吸収し、揺れを小さくさせる(減衰させる)量を表しており、減衰定数 h で表されます。図3(a)にはせん断ひずみが増加した場合の変

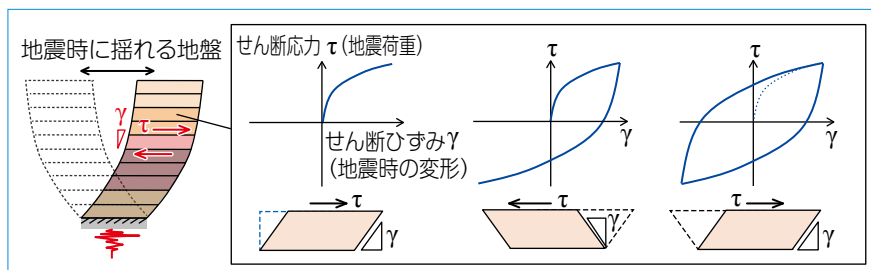


図1 地震時の地盤挙動と土の変形

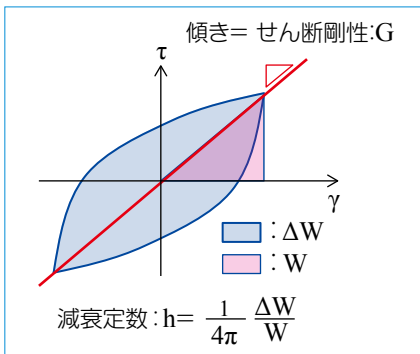


図2 土の変形特性を表す二つの指標

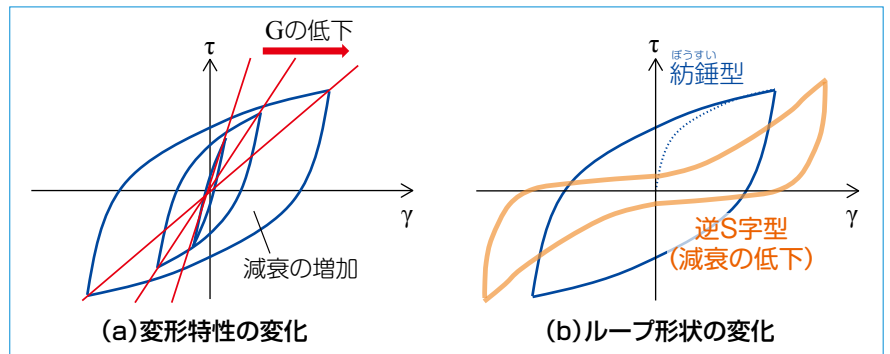


図3 ひずみ増加による変形特性の変化

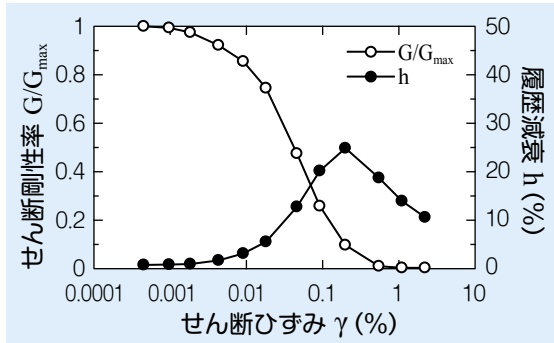


図4 代表的な土の変形特性

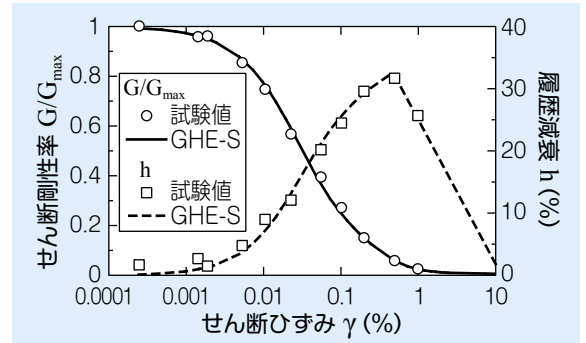


図6 試験から得られた変形特性のGHE-Sモデルでの再現例

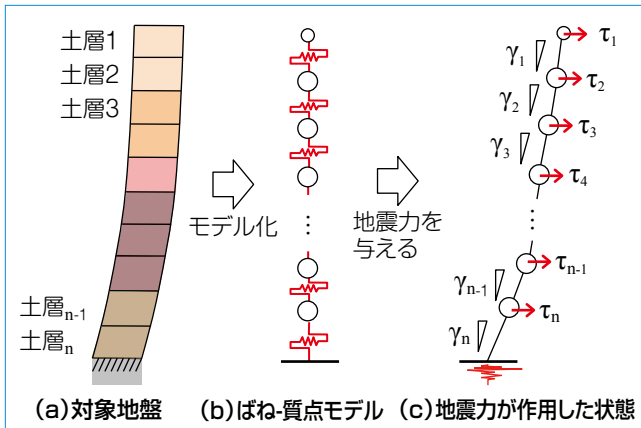


図5 地盤のシミュレーションモデル

形特性の変化を示しますが、土は非常に小さなひずみからせん断剛性Gが低下し、減衰定数hが増加する傾向にあります。また、図3(b)に示すようにひずみが非常に大きくなると、紡錘型のループ形状が逆S字型になり、減衰が低下する傾向も示します。このような土の変形特性は、図4に示すようにせん断剛性率 G/G_{max} (非常に小さいひずみレベルのせん断剛性 G_{max} と各ひずみレベルでのせん断剛性Gとの比)

と履歴減衰hをせん断ひずみに対してプロットした図で代表的に表されます。一般的にこの関係を G/G_{max} - γ 、 h - γ 関係とよんでいます。地盤の地震時シミュレーションでは、このような土の変形特性をモデル化する必要があります。

土の変形特性のモデル化

地盤の地震時シミュレーションを行う際は、図5に示すように地盤を1~2m程度厚さの層に分割したばね-質

点系のシミュレーションモデルを作成し、各層の土の変形特性をばねで、重さを質点で表現します。つまり、このばねに前述のG- γ 、h- γ 関係を適切に表現できる変形特性モデルを用いる必要があります。鉄道総研ではGHE-S¹⁾モデル (S-Shaped General Hyperbolic Equation) という変形特性モデルを開発しています。図6に変形試験から得られた土の変形特性をGHE-Sモデルを用いて再現した例を示します。G- γ 、h- γ 関係だけでなく、 τ - γ 関係までを非常に精度よく再現できていることがわかります。平成24年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(以

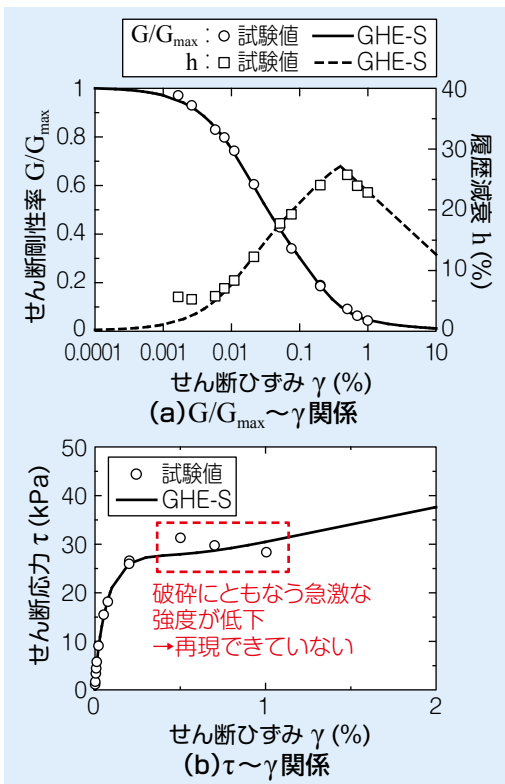


図7 破砕性土の変形特性のGHE-Sモデルでのフィッティング結果

降、耐震標準²⁾では、地盤のシミュレーションを実施する場合にGHE-Sモデルを用いることが推奨されています。

特殊土のモデル化

日本には、火山噴火によって堆積した土、岩の風化によって堆積した土など、標準的な土とは異なる特徴を持った特殊土(☞参照)とよばれる土があります。また、埋立土や浚渫土などの人工的に堆積された地盤についても、一般的な土の地盤工学的特性とは異なる場合があります。このような土の変形特性は、GHE-Sモデルを用いても適切に表現できない場合があります。たとえば、小さな地震力で土粒子が破砕してしまうような破砕性土の

☞ 特殊土

地盤工学的特性が一般的な土とは明らかに異なる土で、一般的に高有機質土(腐植土など)、火山灰質細粒土(関東ロームなど)、火山灰質粗粒土(シラスなど)、風化残積土(まさ土など)の4種類に分類されます。これらの特殊土は、災害の影響を受けやすい土、扱いにくく施工性の悪い土として知られています。また、地域性が強く、その特性については個々に直接調査する必要があります。

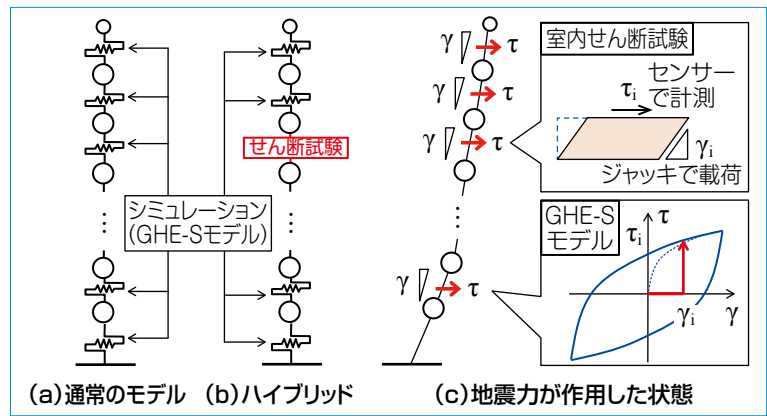


図8 ハイブリッド地盤応答試験の概念図

場合、破砕にともなう急激に強度が低下するためモデル化が難しくなります。図7はその一例です。G/G_{max}- γ 関係は一見合っているようにみえますが、大きなひずみレベルでの τ - γ 関係は大きく外れています。このような土ほど設計上注意を要するため、より精緻な挙動評価が要求されます。そこで、土の変形特性のモデル化が不要なハイブリッド地盤応答試験装置開発の着想に至りました。

ハイブリッド地盤応答試験

土の適切なモデル化が困難で、シミュレーションの実施が難しい場合、模型試験から挙動を評価する手法が考えられます。しかしながら、試験には多くの労力や予算がかかること、実物規模で実施することが困難であることなど、さまざまな制約があります。そこで、モデル化が困難な層のみを試験に置き換え、実験とシミュレーションを組み合わせ特殊な地盤の揺れを求められるのがハイブリッド地盤応答試験

装置です。

ハイブリッド地盤応答試験では、図5に示したばね-質点系のシミュレーションモデルの一つの層を実際の土を使った試験に置き換えます。その概念図を図8に示します。通常のシミュレーションでは、図8(c)に示すように、ある瞬間に地盤に作用する地震動の力によって生じる各層のせん断ひずみ γ_i を算出し、そのひずみに対応するせん断応力 τ_i をGHE-Sモデルより求めます。一方、ハイブリッド地盤応答試験では、試験に置き換えた対象層に作用するせん断ひずみ γ_i を試験装置内の土に直接作用させ、せん断応力 τ_i をセンサーで計測します。この手法ではGHE-Sモデルによって土の変形特性をモデル化する必要がないため、特殊土であっても、適切なせん断応力を求めることができます。また、変形特性をGHE-Sモデルを用いてモデル化する場合、変形特性を試験から求める際の誤差などが含まれますが、ハイブリッド地盤応答試験では、それらの誤差が含まれないため、非常に精緻な結果を得ることもメリットです。

なお、このハイブリッド地盤応答試験装置は実務設計レベルの地盤応答評価で適用することを念頭に開発を行いました。取り扱いが困難と想定される特殊土を扱うこと、迅速かつ容易に供試体を作成することが求められるなどの要求を勘案し、簡易に試験の実施が

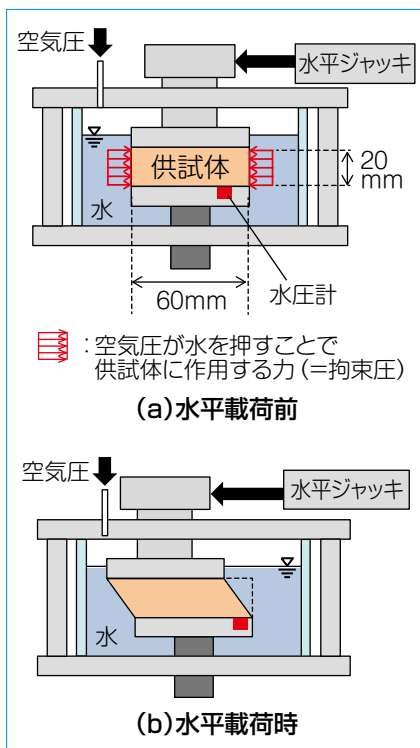


図9 拘束圧載荷型単純せん断試験装置

可能な拘束圧載荷型単純せん断試験装置を採用することとしました。図9に概念図を示しますが、水平ジャッキ1本の制御のみで地震中の土のせん断変形挙動を再現できます。また、円筒形の供試体を用いているため試料の作成が容易で、試験誤差も軽減できます。この拘束圧載荷型単純せん断試験装置を用いたハイブリッド地盤応答試験の外観を図10に示します。

ハイブリッド地盤応答試験装置の適用例

図11(a)に示す地盤を対象としたハイブリッド地盤応答試験の適用例を紹介します。本来は特殊土を対象としますが、ここでは試験システムの基本的な動作を確認することを目的とし、一般的な緩い砂を用いています。対象層以外はGHE-Sモデルを適用しました。鉄道の耐震設計で用いられる直下型地震を想定した地震動を入力した場合の最大応答値分布および試験対象層の応答値の時刻歴をそれぞれ図11(b),(c)に示します。このように対象層を数値

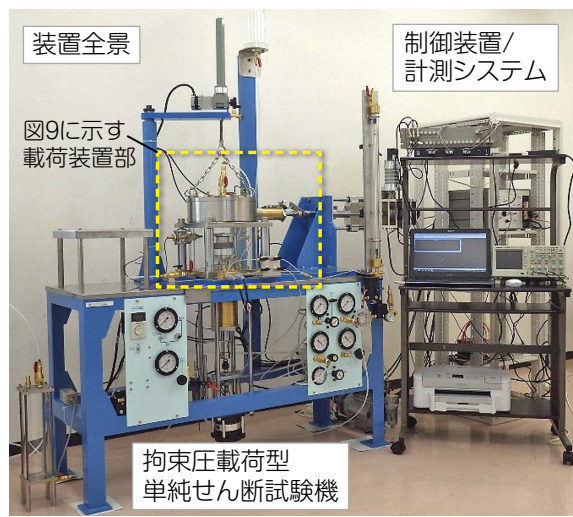


図10 ハイブリッド地盤応答試験装置

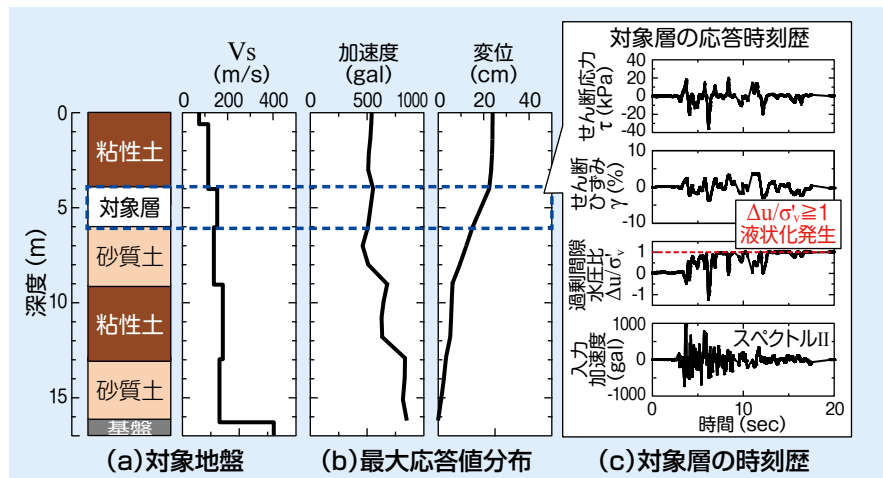


図11 ハイブリッド地盤応答試験結果の例

モデル化することなく地盤の変位や加速度などの応答評価が可能です。また、土供試体内の水圧を水圧計で計測しているため、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_v$ とよばれる値が1に達した場合、液状化が発生すると直接的に判断できます。

まとめ

1995年兵庫県南部地震以降、耐震設計は大幅に改定され、最近の大地震においても壊滅的な構造物被害を免れています。一方で、近年多発している震度5強から6弱レベルの地震では、構造物の損傷などによって長時間にわたって公共交通機関が麻痺するなど新たな問題が発生しており、これらの影響も考慮に入れたきめ細かい耐震設計の枠組み構築も検討されはじめていま

す。これを実現するためには、構造物に必要な性能を細かく設定した設計が必要になり、当然、地盤や構造物のシミュレーションもさらに細かい精度が要求されます。紹介したハイブリッド地盤応答試験装置は、そのような設計においても有効に活用できます。今後、対象層の多層化などの改良を加え、適用範囲を広げながら、実務展開を進めていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 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
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012