

地盤応答解析における変形特性のパラメータ設定に関する一考察

(その2：砂質土の内部摩擦角の設定方法に関する検討)

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○小野寺 智哉 正会員 月岡 桂吾 正会員 山本 昌徳
正会員 石井 貴大 正会員 井澤 淳

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁾ (以下、耐震標準) では、GHE-S モデル²⁾を用いた逐次非線形動的解析による地盤の地震時挙動評価を推奨しているが、その解析精度は $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ に代表される変形特性のパラメータ設定に大きく依存する。著者らは実務設計で一般的に用いられる全応力解析を主な対象として、変形特性のパラメータ設定のための地盤材料試験 (以降、変形特性試験) に関する検討を実施している。その中で、L2 レベルの地震動を対象とした場合、通常は内部摩擦角および粘着力を把握するために実施される単調載荷試験から得られるせん断応力～せん断ひずみ関係から変形特性を算定することで、精度良く地震時の地盤変位を把握できることを確認している³⁾。一方で、サイクリックモビリティの影響を考慮出来ない全応力解析では、有効応力の回復に伴う加速度応答の大きな増加までは再現出来ていない。本稿では、このような加速度の再現性向上に向けた内部摩擦角の設定方法について検討する。

2. 単調載荷試験結果に基づく内部摩擦角の設定方法

本稿では、図1に示すように中空ねじり試験装置を用いた非排水単調載荷試験 (以降、単調載荷試験) から得られるせん断応力～せん断ひずみ関係を用いて3通りの内部摩擦角の設定方法を検討する。1つ目 (設定方法①) は、水平面でのせん断挙動を想定し、最大せん断応力時における有効応力と最大せん断応力から内部摩擦角を設定する。2つ目 (設定方法②) は、破壊時のモール円に対して、粘着力0として原点から引いた接線の角度から内部摩擦角を設定する方法であり、主応力に基づく内部摩擦角を設定する。3つ目 (設定方法③) は、全応力解析において有効応力の回復によるせん断応力の増加を擬似的に考慮するため、初期有効応力と最大せん断応力から内部摩擦角を設定する。上記の内部摩擦角の設定方法の動的解析への影響について以降で検討する。

3. 内部摩擦角の影響を把握するための解析条件

検討に用いる対象地盤を図2に示す (対象層の土質材料は相対密度 $D_r=60\%$ の豊浦砂とする)。地盤は1次元多質点系により表現し、構成則にはGHE-Sモデルを用いる。本検討では、以下で述べる2通りの解析手法により地盤の地震時挙動を評価する。

1つ目は、地盤応答解析により対象層への作用を算定し、その作用を土質試験機内の供試体 (本検討では対象層) に直接入力して応答を算定するとともに、地盤応答解析へフィードバックするという処理を繰り返すハイブリッド地盤応答試験⁴⁾ (以下、ハイブリッド試験と呼ぶ) である。ハイブリッド試験によりハイブリッド対象層については精緻な地盤挙動評価が可能であり、2章で述べた各方法の妥当性を検証するための正解値を得る位置づけで実施する。2つ目は、対象層の内部摩擦角を2章で述べた3通りの方法で設定した地盤応答解析である。対象層における内部摩擦角の設定は図1に示す通りだが、前述の設定方法に従って $\phi_1=35.7^\circ$, $\phi_2=46.0^\circ$, $\phi_3=67.2^\circ$ を設定する。変形特性については図3に示す通り、せん断剛性比～基準化ひずみの関係を筆者らの提案している変形特性試験⁴⁾ (以降、RTRI式変形特性試験) と上記の単調載荷試験により表現し、履歴減衰～基準化ひずみの関係はRTRI式変形特性試験のみから設定する。本検討では、内部摩擦角によらず図3を使用し、基準ひずみを使い分けることで、内部摩擦角に応じた変形特性を設定する。なお、いずれの手法においても、対象層以外の変形特性には耐震標準記載の標準パラメータ¹⁾を設定する。また、レーリー減衰は福島・翠川の方法⁵⁾を参考に地盤の固有周期から設定した ($\alpha=1.019$ および $\beta=0.002$)。また、解析モデル下端には半無限地盤の影響を模擬した粘性境界を設けた。設計

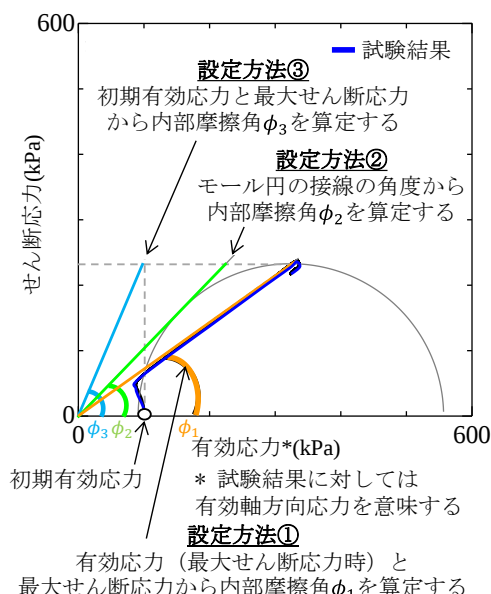


図1 内部摩擦角の設定方法

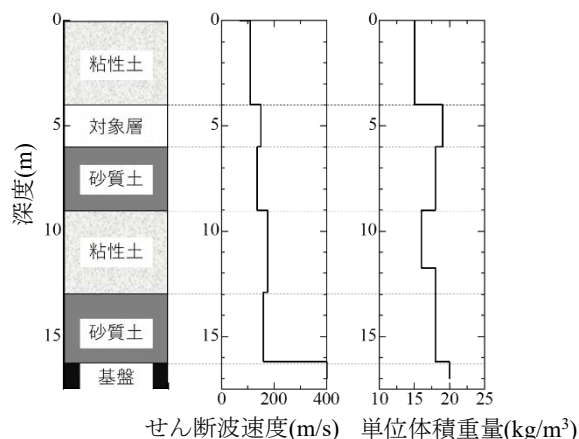


図2 検討対象とする地盤

キーワード 地盤応答解析, 変形特性, 内部摩擦角

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

地震動には、鉄道構造物の耐震設計において標準的に用いられているスペクトルⅡ（G1地盤）を用いた。

4. 解析結果

対象層における応力～ひずみ関係を図4に示す。いずれもハイブリッド試験の結果よりも最大せん断応力が過小評価される。既往検討⁴⁾によれば、ハイブリッド試験の結果ではサイクリックモビリティによりせん断応力が上昇しているが、全応力解析ではこれを表現できないことが上記の原因である。出来るだけこれを評価するために設定した設定方法③では、比較的ハイブリッド試験に近い値が得られているが、せん断ひずみは半分程度に抑えられている。鉄道構造物の設計においては、地盤の慣性力と地盤変位の両者を適切に考慮することが重要であることから、本手法の採用は適切でないと考えられる。

各層の最大応答値分布（絶対加速度および相対変位）を図5に示す。応答加速度と応答変位に対する剛性の影響は相反することから、対象層における加速度分布に着目すると、内部摩擦角が小さいほどハイブリッド試験との整合性が低下し、変位に着目すると内部摩擦角が小さいほどハイブリッド試験との整合性が向上することが分かる。今回対象としたような過剰間隙水圧の変動が大きく、サイクリックモビリティが卓越するような砂質土に対する全応力解析の適用には限界があると考えられる。設定方法①または②を用いた場合は、最大地盤変位量はハイブリッド試験と概ね同等になるが、地表面付近における最大加速度は設定方法②を用いることで、加速度、地盤変位とも精度の向上が若干見れる結果となった。

図6に地表面地震動波形による弾性加速度応答スペクトルを示す。固有周期が0.5秒以下の短周期側ではハイブリッド試験に比べて応答が過小評価される傾向にある。しかしながら、一般的な鉄道構造物の周期帯である0.5秒～1.5秒の範囲では、概ね同等の応答となっている。

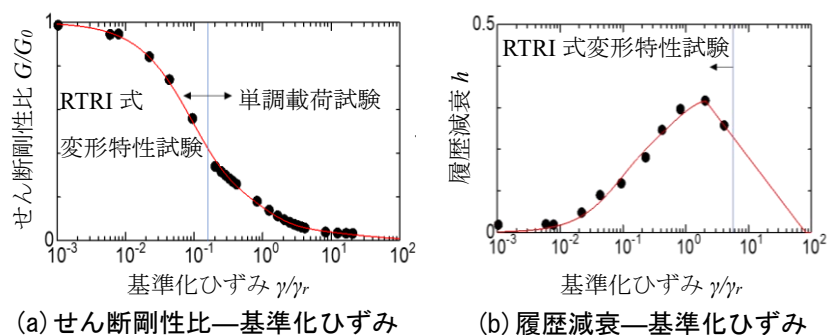
以上から、サイクリックモビリティが発生するような砂質土に対して全応力解析の適用には限界があるが、設定方法②を用いることで地盤変位は精度よく再現でき、慣性力についても鉄構造物の一般的な周期帯については十分な精度を有していると考えられる。一方、短周期の構造物を設計する際には有効応力解析により、短周期の応答を評価する必要がある。

5. まとめ

全応力解析における砂質土の内部摩擦角の設定方法が、地盤の地震時挙動や構造物の地震応答に与える影響を確認し、内部摩擦角の適切な設定方法を検討した。結論を以下に示す。

- ・固有周期が0.5秒以下の構造物では、サイクリックモビリティを考慮できないことで構造物の地震応答を過小評価する可能性があるため、有効応力解析の使用が望ましい。
- ・固有周期が0.5～1.5秒の一般的な鉄道構造物では、全応力解析により地盤の地震時挙動を評価しても問題はないと考えられる。ただし、加速度および変位の推定精度の両立が難しい場合もあることを考慮し、双方の推定精度が偏らないような内部摩擦角の設定が望ましい。例えば、本検討の場合では設定方法②が望ましいといえる。

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) 野上ら：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. 3) 小野寺ら：地盤応答解析における変形特性のパラメータ設定に関する一考察（その1：変形特性試験・パラメータ設定方法の検討）, 第58回地盤工学研究発表会論文集, 2023. 4) 鈴木ら：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. 5) 福島・翠川：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, 1994.



(a) せん断剛性比—基準化ひずみ

(b) 履歴減衰—基準化ひずみ

図3 変形特性（黒点：試験結果，赤線：解析に用いる変形特性）

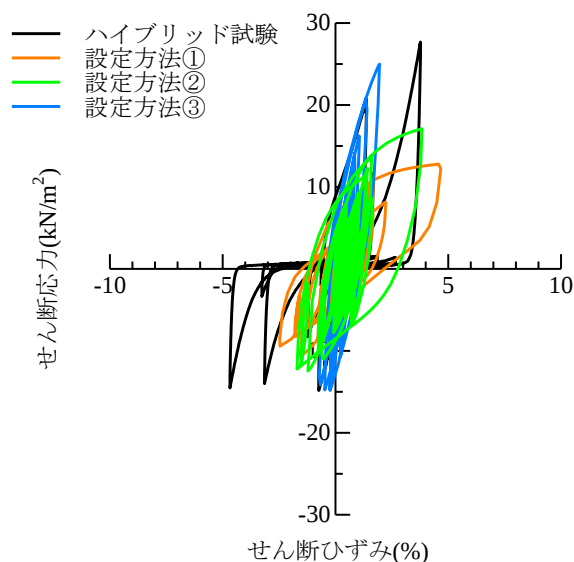


図4 対象層における応力—ひずみ関係

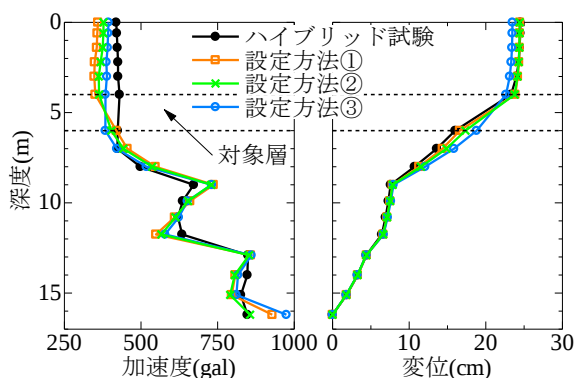


図5 最大応答値分布

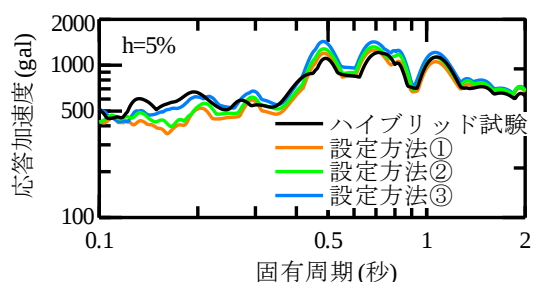


図6 加速度応答スペクトル