

## 土の非線形モデルの違いが構造物の地震時応答に及ぼす影響

ジェイアール東日本コンサルタンツ  
鉄道総合技術研究所  
東京工業大学

正会員 ○野上 雄太  
正会員 室野 剛隆  
正会員 盛川 仁

## 1. はじめに

杭基礎を有する構造物は上部構造物の慣性力と地盤変位の影響を受けることはよく知られており、鉄道構造物の耐震設計でも両者の影響を考慮している<sup>1)</sup>。この時の構造物への地震作用（慣性力と地盤変位）を地盤の動的解析によって評価する場合、加速度と変位の両者を適切に評価できる土の非線形モデルを使う必要がある。実務的には双曲線モデルやROモデルが多く使われているようであるが、これらのモデルは大小の幅広いひずみで土の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係を完全には満足できない。一方、著者らはGHE-Sモデルを提案しており<sup>2)</sup>、幅広いひずみレベルに対して土の $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を完全に満足できるだけでなく、大ひずみ時に現れることのあるS字型履歴曲線を表現できる特長を有する。そこで本研究では、土の非線形モデルの違いが構造物の地震時応答に及ぼす影響を把握することを目的とした検討を実施する。

## 2. 検討条件

## (1) 対象構造物と対象地盤

検討対象構造物は、一般的な鉄道構造物のうち、壁式橋脚の線路直角方向断面とした（図1）。杭頭をGL面としたときの地盤条件は図2に示すとおりであり、固有周期が0.48sのG3地盤<sup>1)</sup>に相当する。

## (2) 設計地震動

検討対象とした地震動は、鉄道構造物等設計標準（耐震設計）<sup>1)</sup>におけるL2地震動スペクトルII適合波とした。

## (3) 土の非線形モデル

用いた土の構成則はGHE-Sモデル<sup>2)</sup>と双曲線モデルとした。各モデルのパラメータの設定方法を表1に、用いた規準ひずみを図2に示す。

## (4) 検討手順

- 手順1) 自然地盤の非線形時刻歴動的解析を実施し、地表面加速度波形から所要降伏震度スペクトルを、各層の変位波形から深さ方向地盤変位分布 $\delta(z)$ を算定  
 手順2) 構造物の各部材を非線形梁要素で、杭と地盤の相互作用を非線形バネとした2次元にモデル化し、プッシュオーバー解析を実施  
 手順3) プッシュオーバー解析の結果と所要降伏震度スペクトルより、慣性力による応答変位と応答震度（慣性力）を決定（非線形応答スペクトル法<sup>1)</sup>）  
 手順4) 手順3)で求めた慣性力と手順1)で求めた地盤変位 $\delta(z)$ を作用として応答変位法により応答値を算出

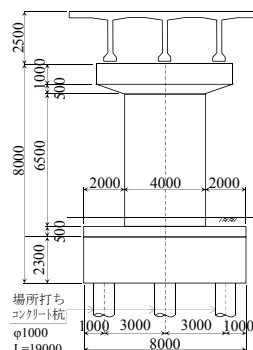
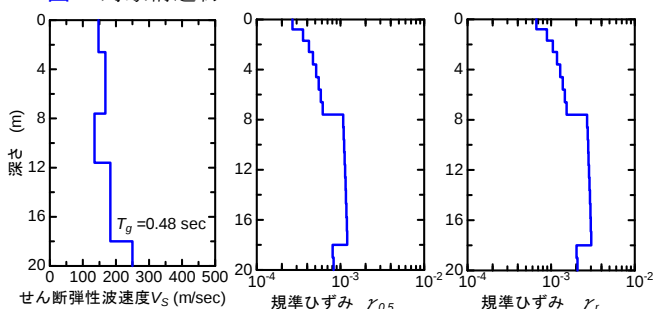
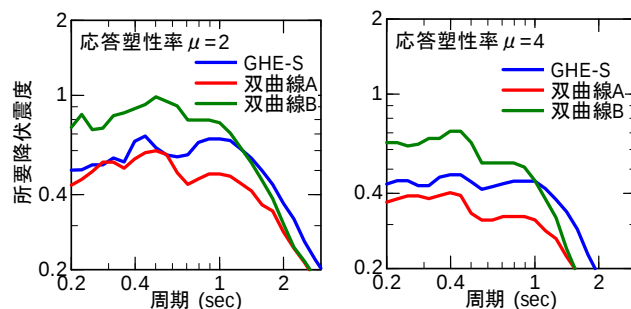


図1 対象構造物

表1 モデルのパラメータ設定方法

| モデル      | 規準ひずみ                                                    | パラメータ | $V_s$<br>[m/s] |
|----------|----------------------------------------------------------|-------|----------------|
| GHE-S    | $\tau_f = G_0 \cdot \gamma_f$<br>から定まる<br>ひずみ $\gamma_f$ | 実測    | 実測             |
| 双曲線<br>A | $G/G_0 = 0.5$ のときの<br>ひずみ $\gamma_{0.5}$                 |       |                |
| 双曲線<br>B | $\tau_f = G_0 \cdot \gamma_f$ から定まる<br>ひずみ $\gamma_f$    |       |                |

図2 検討に用いた  $V_s$  及び規準ひずみ  $\gamma_{0.5}$ 、 $\gamma_f$  分布図3 所要降伏震度スペクトルの算定結果例  
(a) 応答塑性率  $\mu=2$  (b) 応答塑性率  $\mu=4$ 

## 3. 検討結果と考察

## (1) 自然地盤の非線形時刻歴動的解析結果

自然地盤の非線形時刻歴動的解析結果として、地表面加速度波形から計算した所要降伏震度スペクトルの例を図3に示す。一般的な鉄道構造物の周期帯の1.5s以下では応答塑性率 $\mu=2, 4$ ともに、双曲線B、GHE-S、双曲線Aの順に所要降伏震度は小さくなっている。GHE-Sを基準にすると、周期1秒以下の領域で双曲線BはGHE-Sよりも最大1.5倍、双曲線Aは0.8倍の差がある。

次に深さ方向地盤変位分布を図4に示す。どのケースも杭頭から8mと12m付近で地盤変位が急変する分布形状となった。8m付近の変位の変化は、規準ひずみが急変する位置で、塑性化しやすい土層である（図2）。12m付近の変位の変化は、S波速度のインピーダンス比が大

キーワード：GHE-Sモデル、双曲線モデル、非線形スペクトル法、応答変位法

連絡先：〒170-0021 豊島区西池袋 1-11-1 メトロポリタンプラザ ジェイアール東日本コンサルタンツ TEL03-5394-7245

きくなる土層に相当する(図2)。地盤変位の大きさは、GHE-S、双曲線A、双曲線Bの順に小さくなっている。

これらは、図5の土の応力ひずみ関係のイメージ図のように、L2地震時のような大きなひずみレベルで、双曲線Bは土の要素試験結果よりも応力を大きく、双曲線Aは小さく、GHE-Sは実測値と同等に評価する傾向にあるため、上記の違いがあるものと考えられる。

## (2) 構造物の応答値の算定結果

構造物全体系の荷重変位曲線と非線形スペクトル法による応答値の算定結果を図6に示す。土の非線形モデルの違いによる構造物の応答変位の差は、GHE-Sを基準に±3割程度である。GHE-Sは土の特性( $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係, S字型履歴曲線)を完全に満足できることを勘案すると、双曲線モデルは変形性能として3割程度過大または過小評価する可能性があることが分かる。

次に、杭の曲げモーメント分布図を図7に示す。この図は押し込み側杭の1本あたりの断面力であり、(a)は慣性力のみを、(b)は慣性力と地盤変位を考慮したケースである。なお、慣性力と地盤変位は同位相で作用させている。図7(a)より、土の非線形モデルの違いが慣性力による杭の応答値に及ぼす影響は小さい。これは図6を見て分かるとおり、構造物全体系の応答値は、荷重変位曲線が水平の領域にあるためである。検討ケース以外に、基礎が先行降伏する構造物のように、荷重変位曲線に明確な折れ曲がり点が存在せず、変位の増加とともに荷重を負担する構造物もある。このような場合には、杭に作用する慣性力についても、土の非線形モデルの違いによる差が大きくなるものと推測される。

図7(b)の慣性力と地盤変位を考慮したケースを見ると、双曲線BのGL-5m付近の負の曲げモーメントが他のモデルよりも5割大きく評価されている。これは、双曲線Bは地盤変位が最も小さいことから、地盤変位による曲げモーメントが慣性力によって発生した負の曲げモーメントを打ち消し切らなかったためである。

双曲線モデルは、加速度と変位の両者を同時に評価することができず、トレードオフの関係にある。L2地震動のような大きな地震動では、双曲線Bは、双曲線AやGHE-Sに比べて加速度を大きく評価し、地盤変位を小さく評価する傾向にある。双曲線Aは、双曲線BやGHE-Sに比べて逆の傾向で評価される。耐震設計は未知の地震応答を推定することから、双曲線モデルを適用した場合、双曲線Aと双曲線Bのどちらの結果を採用すべきか高度な工学的判断が必要となる。設計として安全側の配慮をするならば、双曲線Aと双曲線Bによる応答値を比較し、大きい応答値を採用することは可能であるが、GHE-Sに比べると断面を過大評価する可能性がある。また、双曲線モデルは要素試験結果に完全にフィッティングできるパラメータがないことから何ケースか検討する。そのため、時間や労力の点でもGHE-Sを用いた

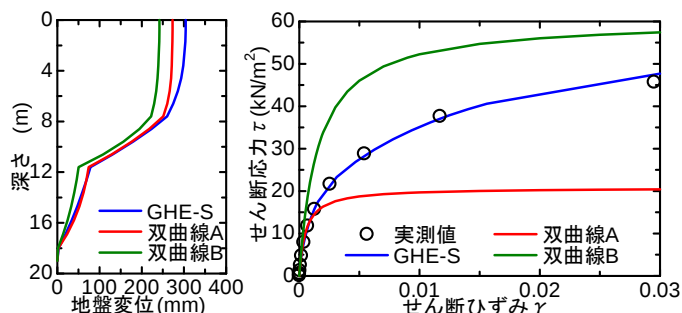


図4 地盤変位分布



図5 応力ひずみ関係のイメージ

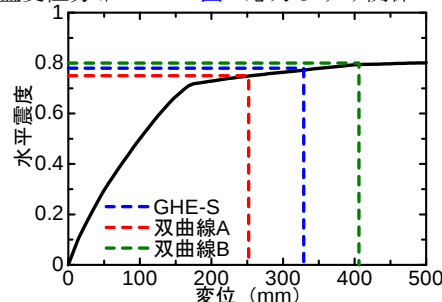


図6 構造物全体系の荷重変位曲線

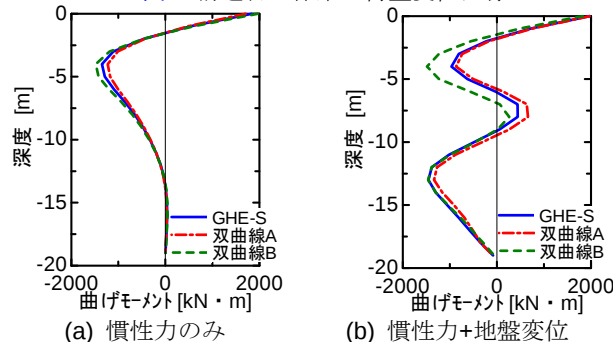


図7 杭の曲げモーメントの比較  
(a) 慣性力のみ (b) 慣性力+地盤変位

ほうがよいと考えられる。

## 4. おわりに

壁式橋脚を例にとり、土の非線形モデルの違いが構造物の地震時応答に及ぼす影響を把握した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 構造物全体系の荷重変位曲線が水平の領域では、杭に作用する慣性力(応答震度)は土の非線形モデルの影響を受けないが、橋脚躯体の応答変位は大きく異なり、変形性能に影響を与えることが分かった。
- (2) 地盤変位による杭の応答値は、土の非線形モデルの影響を直接的に受け、本検討ではGHE-Sに比べて双曲線の断面力が最大1.5倍程度大きく評価された。
- (3) GHE-Sモデルは、これまでに幅広いひずみで加速度と変位の両者を同時に評価できることが検証されているため、GHE-Sモデルを用いることで、双曲線モデルに比べて少ない時間と労力で、慣性力と地盤変位による応答値を適切に評価し、より合理的な設計につながるものと考えられる。

なお、線路方向の壁式橋脚、直角方向のラーメン高架橋も検討し、同様の傾向があることを確認している。

参考文献 1) 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、2006。