

# 部分空間法に基づくシステム同定を用いた 盛土構造物の地震中の固有周期変化の推定

石井 洋輔<sup>1</sup>・八木 悟<sup>2</sup>・山田 雅行<sup>3</sup>・坂口 剛<sup>4</sup>  
増田 仁<sup>5</sup>・片岡 正次郎<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1）  
E-mail: ishii-y92ta@mlit.go.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 株式会社ニュージェック DX 推進グループ（〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目 3-20）  
E-mail: yagist@newjec.co.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社ニュージェック 研究開発グループ（〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目 3-20）  
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

<sup>4</sup>正会員 株式会社アーク情報システム 計算技術開発部（〒102-0076 東京都千代田区五番町 4-2）  
E-mail: sakaguchi.go@ark-info-sys.co.jp

<sup>5</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1）  
E-mail: masuda-h92ta@mlit.go.jp

<sup>6</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 道路構造物管理システム研究官（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1）  
E-mail: kataoka-s92rc@mlit.go.jp

盛土構造物の実地震時の振動特性は必ずしも検証されておらず、個別の盛土構造物の振動特性を地震観測記録を用いて詳細に把握する必要があることが考えられる。本研究では、地震時挙動の観測記録から構造物の固有周期等の振動特性を推定する手法として、システム同定手法の一つである部分空間法を用いた。実地震時の観測記録より、盛土構造物の地震中の振動特性の変化を詳細に分析することを目的とし、2011年（平成23年）東北地方太平洋沖地震で震度6強程度の記録が観測された河川堤防を対象に部分空間法を用いて、地震中の盛土構造物の固有周期と減衰特性の経時的な変化を推定した。

**Key Words:** system identification, subspace method, natural period, during the earthquake,

## 1. はじめに

2011年（平成23年）東北地方太平洋沖地震では、地震により道路盛土、河川堤防などの多くの盛土構造物に被害が生じており<sup>1)</sup>、耐震対策技術をさらに向上させる必要性が再認識された。また、国土交通省では、近年の地震災害を踏まえ、道路盛土も含めた道路ネットワークとしての耐災害性向上が掲げられており<sup>2)</sup>、より一層の耐震対策技術の向上が必要であると考えられる。

盛土構造物の耐震対策の検討は、盛土崩壊発生可能性の評価<sup>3)</sup>や、近年では、道路ネットワークとしての耐災害性の評価<sup>2)</sup>がされている。一方、個別の盛土構造物の耐震対策の検討は、室内実験<sup>4)</sup>や数値解析<sup>4)</sup>が主に実施されており、実地震時の挙動を用いた盛土構造物の固有

周期や減衰特性等の振動特性の評価は十分に実施されていない。性能照査による設計合理化の観点からも、個別の盛土構造物の振動特性を地震観測記録を用いて詳細に把握する必要があることが考えられる。

盛土構造物の耐震照査には、FEMモデル等を用いた地震応答解析を用いることもあるが、盛土構造物の地震観測事例は少なく<sup>5)</sup>、実地震時の盛土構造物の振動特性は必ずしも検証されていない。

本研究では、地震時挙動の観測記録から構造物の固有周期等の振動特性を推定する手法として、システム同定手法の一つである部分空間法<sup>6)</sup>を用いた。部分空間法は、挙動観測記録から構造物の時々刻々の振動モードを算出することができる手法である。地震中も含め、時々刻々の固有周期等の振動特性の経時的な変化を評価できれば、

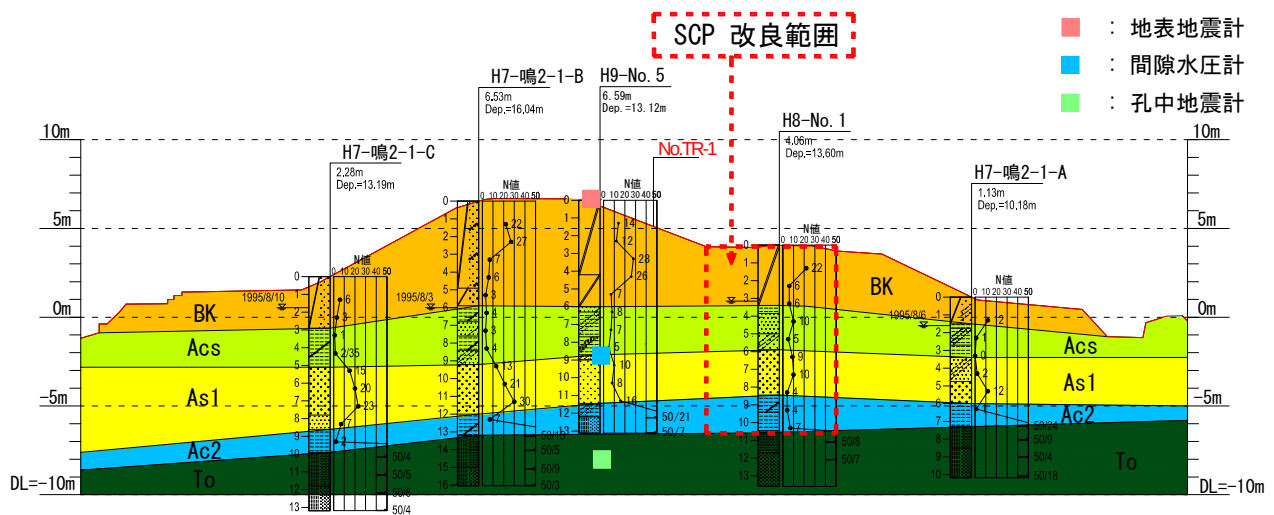


図-1 中下地区地質断面図 (H:V=1:1)

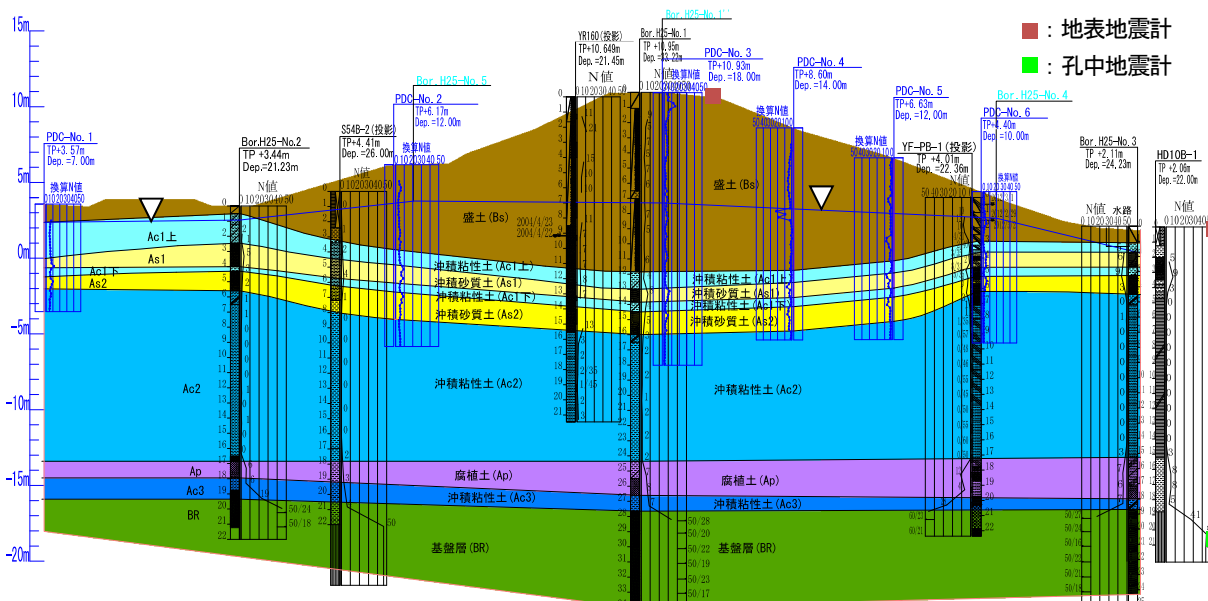


図-2 山崎地区地質断面図 (H:V=1:1)

地震被害検知やヘルスマモニタリングの分野にも活用が期待できる。

本研究では、実地震時の観測記録より、盛土構造物の地震中の振動特性の変化を詳細に分析することを目的とし、2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震で震度6強程度の記録が観測された河川堤防<sup>7)</sup>を対象に部分空間法を用いて、地震中の盛土構造物の固有周期と減衰特性の経時的な変化を推定した。

## 2. 対象構造物

国土交通省が管理する河川堤防に地震計が設置されており、2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震の地震記録が工学的基盤(せん断波速度  $V_s=300\text{m/s}$  以上の地

盤)と盛土天端で観測されている。本研究では、鳴瀬川0.8km付近(右岸)に位置する中下地区の河川堤防(以下、「中下地区」とする。)及び吉田川16.1km付近(右岸)に位置する山崎地区の河川堤防(以下、「山崎地区」とする。)の2地点を対象とした。

中下地区の地質断面と地震観測状況を図-1に示す。図-1は、既存調査結果と東北地方太平洋沖地震後に実施したボーリング調査結果より作成されたものである<sup>7)</sup>。中下地区の盛土は、東北地方太平洋沖地震以前に堤体法尻部に液状化対策としてのサンドコンパクションパイル(SCP)工法による地盤改良が施されている。ボーリング調査より、地下水位は概ね水平でありBK層下端付近にある。また、東北地方太平洋地震後に堤防天端中央に約47cmの沈下等の被災が確認されている<sup>7)</sup>。

山崎地区の地質断面と地震観測状況を図-2に示す。既

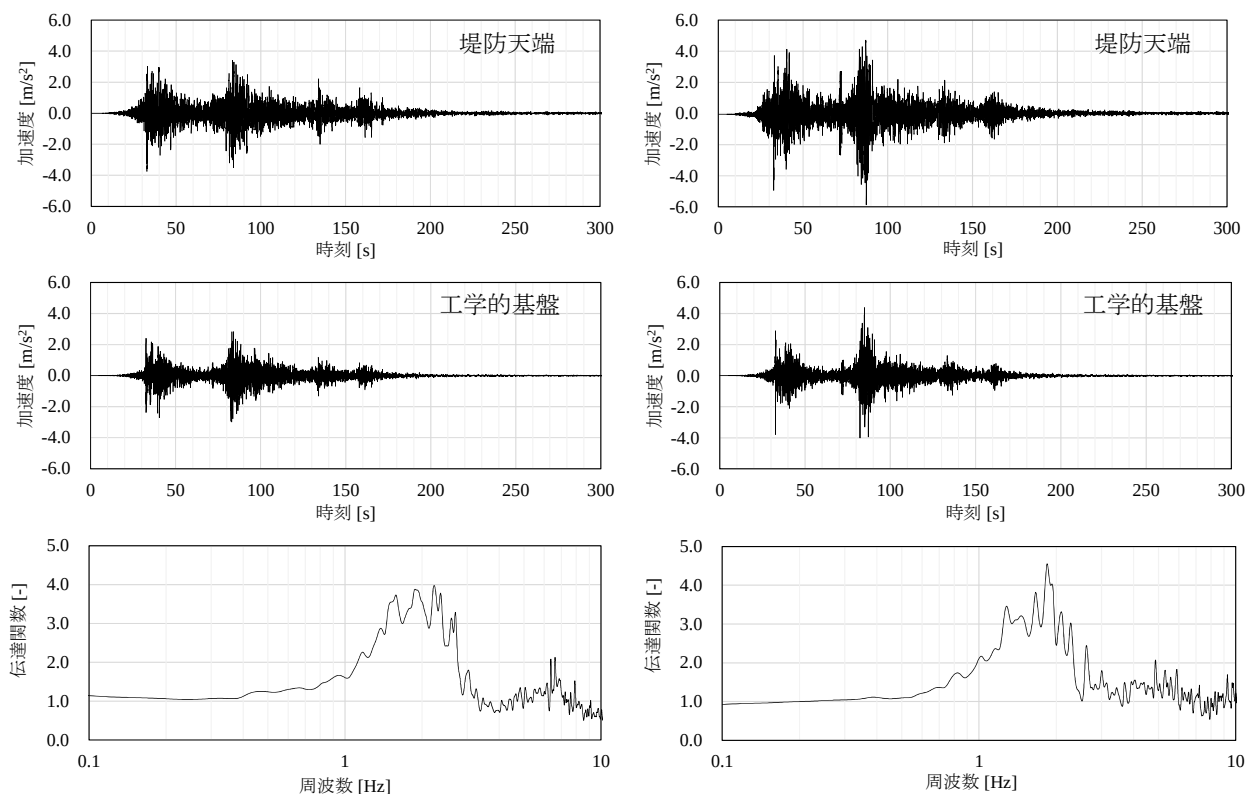


図-3 中下地区の波形と伝達関数（左側：NS成分，右側：EW成分）

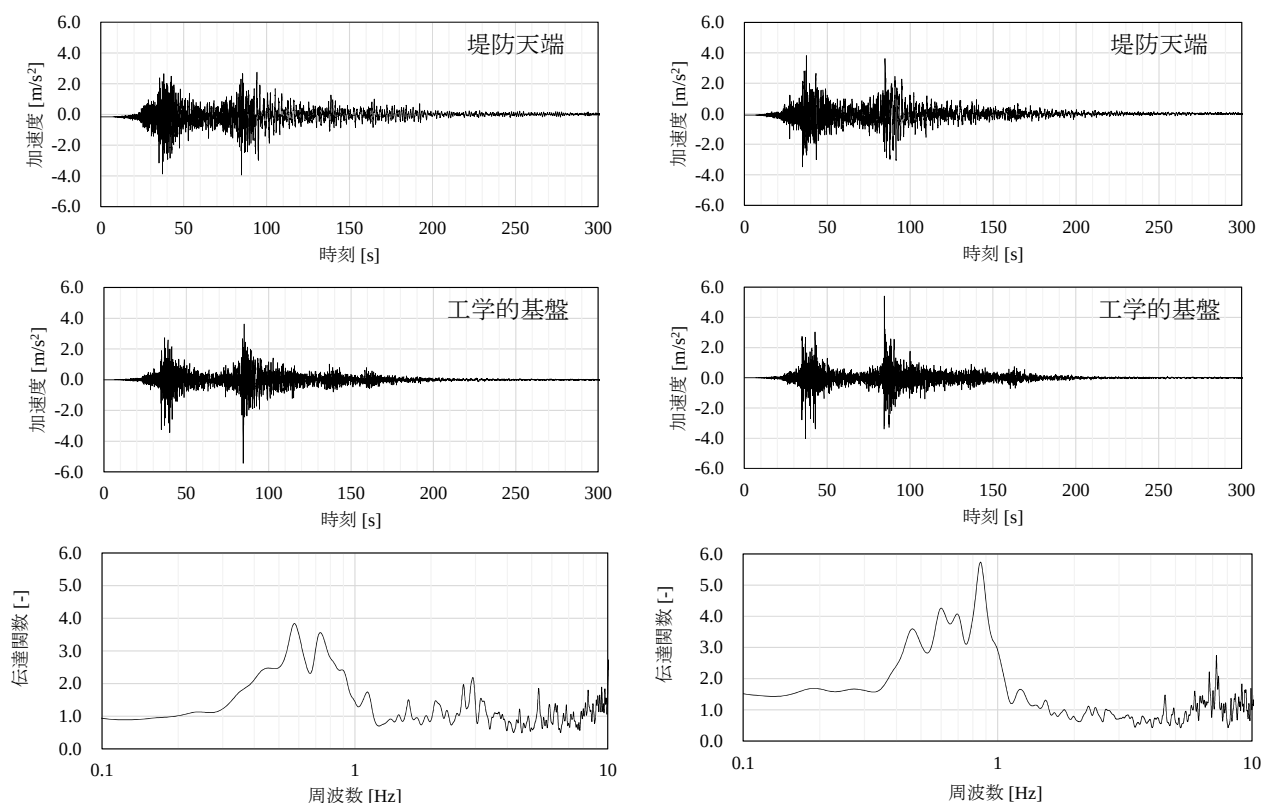


図-4 山崎地区の波形と伝達関数（左側：NS成分，右側：EW成分）

存ボーリング調査では堤体盛土の沈下形状や地下水位が不明であったため、堤防天端と川表側及び川裏側でボー

リング調査と地下水位観測を実施し、川表から川裏にかけて6本のピエゾドライブコーン（PDC）<sup>9</sup>を実施するこ

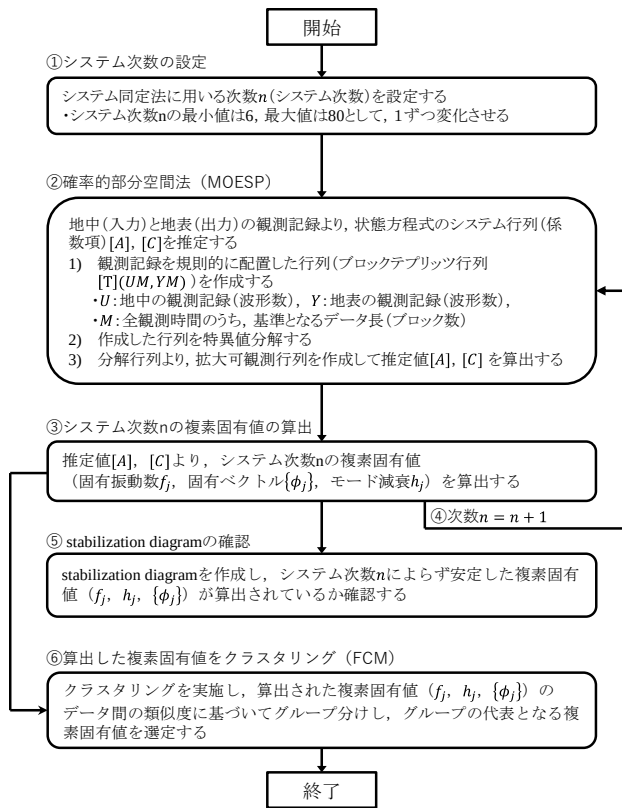


図-5 部分空間法による固有周期と減衰特性の算出フロー

とで連続的な地層の断面形状を詳細に把握がされている。  
7. 基礎地盤の表層部分は、薄い砂質土と粘性土の互層であり、地下水位は堤体内の高さ 1/3 の位置にある。また、東北地方太平洋地震後に堤防天端中央に 59cm の沈下が確認されている<sup>7)</sup>。

### 3. 観測記録

#### (1) 中下地区の観測記録

中下地区の盛土天端と工学的基盤で東北地方太平洋沖地震で観測された波形、および盛土天端－工学的基盤の伝達関数を図-3 に示す。

図-3 より、観測記録は 300 秒観測されており、20 秒付近より振動が開始され、33 秒付近より 1 回目の強振、87 秒付近より 2 回目の強振がみられる。また、工学的基盤－盛土天端の伝達関数より、概ね 0.6-0.8Hz にピーク値が確認できる。

#### (2) 山崎地区の観測記録

山崎下地区の盛土天端と工学的基盤で東北地方太平洋沖地震で観測された波形、および盛土天端－工学的基盤の伝達関数を図-4 に示す。

図-4 より、観測記録は 300 秒観測されており、20 秒付

近より振動が開始され、37 秒付近より 1 回目の強振、85 秒付近より 2 回目の強振がみられる。また、工学的基盤－盛土天端の伝達関数より、概ね 0.6-0.8Hz にピーク値が確認できる。

### 4. 部分空間法に基づくシステム同定を用いた盛土構造物の固有周期と減衰特性の算出

部分空間法はシステム同定手法の一つであり、インパルス応答や差分方程式といった入出力表現を介さずに、観測データの入力信号 $\{u_k\}$ と出力信号 $\{y_k\}$ から直接的に状態方程式と出力方程式のシステム行列を求める手法である。同定したシステム行列より、 $i$  次の複素固有値 $\lambda_i$  (固有振動数 $f_j$ , モード減衰 $h_i$ ) と固有ベクトル $\{\psi_i\}$ を求めることができるため、観測データから構造物の振動特性 (固有振動数 $f_j$ , モード減衰 $h_i$ ) を推定することが可能である。

本研究では、入力ベクトル $\{u_k\}$ と出力ベクトル $\{y_k\}$ を用いてシステム行列を推定する同定手法である Ordinary MOESP 法<sup>10)</sup>を用いての複素固有値である固有振動数 $f_j$ とモード減衰 $h_i$ を同定した。

また、本研究では図-1、-2 に示す工学的基盤の観測記録を入力値、盛土天端の観測記録を出力値として部分空間法に適用した。強制加振を受ける質点系の運動方程式 (1) 式は、状態方程式 (2) 式と出力方程式 (3) 式で表される。

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{u}_o(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = [A] \cdot \{x(t)\} + [B] \cdot \ddot{u}_o(t) + \{w(t)\} \quad (2)$$

$$\dot{y}(t) = [C] \cdot \{x(t)\} + [D] \cdot \ddot{u}_o(t) + \{v(t)\} \quad (3)$$

ここに、 $[A], [B], [C], [D]$  : システム行列

$\{x(t)\}$  : 状態ベクトル

$\ddot{u}_o(t)$  : 入力ベクトル

$\{y(t)\}$  : 出力ベクトル

$\{w(t)\}$  : プロセスノイズ

$\{v(t)\}$  : 観測ノイズ

式 (1) の運動方程式の未知量である変位 $z(t)$ や速度 $\dot{z}(t)$ は $\{x(t)\}$ に、また、入力値とする観測記録は入力ベクトルとして $\ddot{u}_o(t)$ に、出力値とする観測記録は出力ベクトルとして $\{y(t)\}$ で表現される。

本研究で用いる入出力を用いた同定法 (Ordinary MOESP 法) は、この式 (1)～(3) をもとに実施した。

さらに、地震中における盛土の振動特性 (固有振動数と減衰定数) の経時変化を確認するため、部分空間法による同定に用いる地震観測記録のサンプル数  $N$  は全時刻の 300 秒間に対し、10 秒間を 1 セグメントとして 0 秒か

表-1 部分空間法に基づくシステム同定のパラメータ

| 分類            | 項目                      | 設定                                              |
|---------------|-------------------------|-------------------------------------------------|
| システム同定<br>①～④ | 手法                      | MOESP法                                          |
|               | 時間間隔 $\Delta t$         | 0.01s                                           |
|               | 入力点数                    | 観測地点1カ所(NS, EW)                                 |
|               | 出力点数                    | 観測地点1カ所(NS, EW)                                 |
|               | 波形長さ                    | 2011/03/11 14:46:00:01～<br>14:51:00:00 (300 s間) |
|               | サンプル数 $N$               | 1000(10sec)                                     |
|               | ブロック数 $M$               | 80(0.8sec)                                      |
| 複素固有値評価<br>⑤  | システム次数<br>最大値 $n_{max}$ | 80                                              |
|               | システム次数<br>最小値 $n_{min}$ | 6                                               |
| クラスタリング<br>⑥  | 手法                      | Fuzzy C-Means                                   |

ら 300 秒まで 1 秒ずつシフトしながら同定計算を繰り返した。

本研究で実施した部分空間法を用いた固有周期と減衰特性の算出フローを図-5、部分空間法のパラメータを表-1に示す。部分空間法によりシステム次数  $n$  を変化させて得られた複素固有値には、ノイズ等の影響に起因した固有値が含まれる。この固有値を除去する方法として、本研究では、Magalhães ら<sup>10)</sup>が提案した stabilization diagram と Fuzzy C-Means<sup>12)</sup>を（以下、「FCM」という。）用いて、ノイズ等に起因した複素固有値の除去を実施した。

図-5 より、初めにシステム次数  $n$  を設定し、各観測点で観測された記録に対して部分空間法を用いて推定値を求め、推定値ごとの複素固有値 $\lambda_i$ を抽出した。次に、相関性の高い複素固有値の集合に対して、FCM により複素固有値間の類似度に基づいたグループ分けを実施し、グループの代表となる複素固有値 $\lambda_i$ （固有振動数 $f_i$ 、モード減衰 $h_i$ ）を選定した。なお、算出された複素固有値に対して stabilization diagram を作成し、システム次数  $n$  によらず相関性の高い固有値（安定極）を確認した。

部分空間法で同定された複素固有値の stabilization diagram の凡例は、システム次数  $n$  を  $n=6$  から 80 まで変化させた場合に、「固有振動数と固有ベクトルと減衰定数の相関がある場合は星（☆）」、「固有振動数と固有ベクトルの相関がある場合は星（○）」、「固有振動数のみ相関がある場合は（×）」、「両者に相関は存在しない

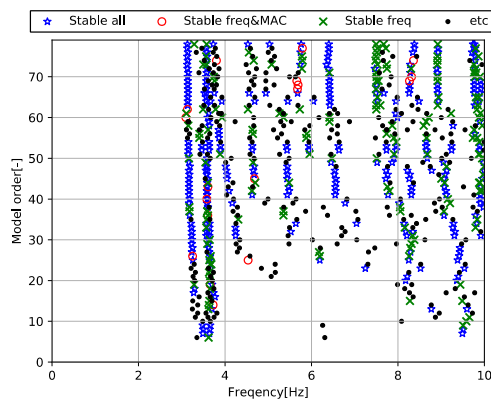
が計算結果で与えられた固有振動数を丸（●）」で示している。stabilization diagram では、明確に低いシステム次数から高いシステム次数  $n$  までの縦に伸びる星（☆）が確認できた場合、物理的に意味のある固有値と考えられている<sup>11)</sup>。これにより、信頼性の高い複素固有値を特定することが可能であると考えられる。

### (1) 中下地区の部分空間法による同定結果

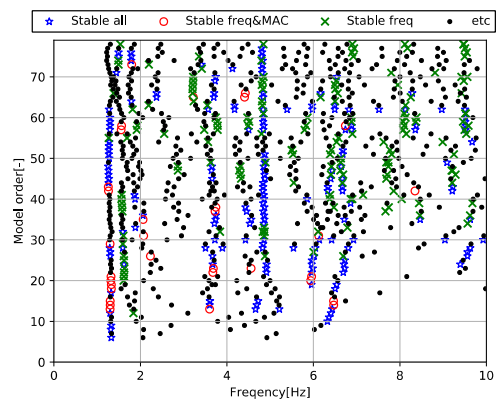
図-3 の波形から読み取った波形の形状が変化する時間の stabilization diagram を図-6 に示す。ここで、部分空間法で同定を行った各区間の代表時刻として、第 1 区間（初動部）を 20 秒、第 2 区間（1 回目の強振）を盛土の横断面で最大加速度が発生した 33 秒、第 3 区間（2 回目の強振）を 87 秒、第 4 区間（終端部）を 280 秒とした。図-6 より、各時刻ともに低振動数側で明確な固有値を確認することができる。クラスタリング（FCM）では、この縦線（固有値）を選定した。また、高振動数側には明確な縦線が存在しないことから、地震中の盛土の振動モードとしても 1 つの主要なモードで挙動していると同定されたことが分かる。

部分空間法より推定した固有周期と減衰の経時変化を図-7 に示す。時刻歴図は、システム同定を行った 10 秒間の中央の時刻を横軸、算出された振動特性を縦軸に表示している。図-7 より、地震中の盛土の振動特性は、システム同定に用いた入力地震動の波形と同様に複数のフェーズ（2 つのフェーズと 4 つの区間）が見られる。第 1 区間は、盛土に S 波初動が到達するまでの時間帯であり、盛土は線形物性（初期剛性）として振動すると考えられる 0 秒～30 秒、第 2 区間は、地震動の第 1 フェーズが到来した時間帯であり、非線形化による剛性低下が生じていると考えられる 30 秒～70 秒、第 3 区間は、地震動の第 2 フェーズが到来した時間帯であり、さらに非線形化が進展していると考えられる 70 秒～140 秒、そして、第 4 区間は第 2 フェーズから地震動の終端部までの時間帯となる 140 秒～300 秒である。第 4 区間では、第 2 フェーズの終了後に固有振動数と減衰定数が経時的に回復していることが認められるが、初期剛性までは回復していないことが分かる。

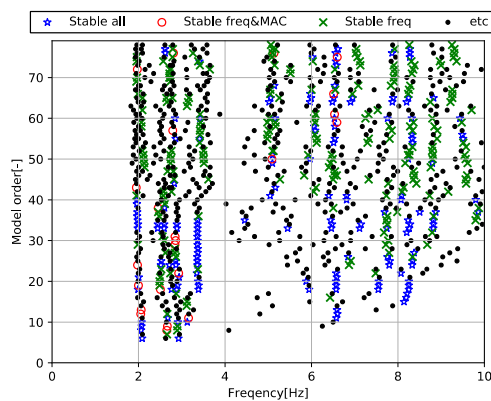
各区間の同定された振動特性は、波形の経時変化の時刻と対応しており、第 1 区間： $f_1=3.21\text{Hz}$  ( $h_1=0.06$ )、第 2 区間： $f_1=2.01\text{Hz}$  ( $h_1=0.14$ )、第 3 区間： $f_1=1.35\text{Hz}$  ( $h_1=0.17$ )、第 4 区間： $f_1=2.59\text{Hz}$  ( $h_1=0.06$ ) となり、地震中の盛土の振動特性は、地震中に経時変化していることが考えられる。



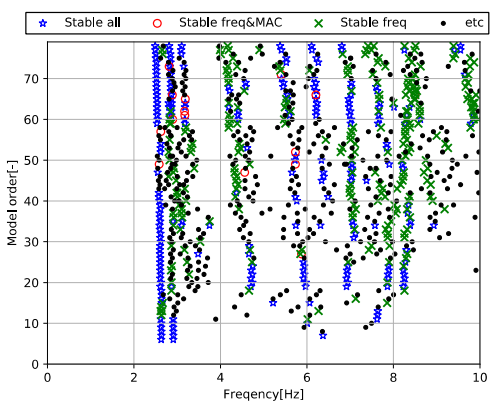
(1) 20秒付近



(3) 87秒付近



(2) 33秒付近



(4) 280秒付近

図-6 stabilization diagram (中下地区)

## (2) 山崎地区の部分空間法による同定結果

図-4の波形から読み取った波形の形状が変化する時間の stabilization diagram を図-8に示す。ここで、部分空間法で同定を行った各区間の代表時刻として、第1区間(初動部)を20秒、第2区間(1回目の強振)を盛土の横断面で最大加速度が発生した37秒、第3区間(2回目の強振)をも85秒、第4区間(終端部)を280秒とした。図-8より、各時刻ともに低振動数側で明確な固有値を確認することができる。クラスタリング(FCM)では、この縦線(固有値)を選定した。また、高振動数側には明確な縦線が存在しないことから、地震中の盛土の振動モードとしても1つの主要なモードで挙動していると同定されたことが考えられる。

部分空間法より推定した固有周期と減衰の経時変化を図-9に示す。時刻歴図は、システム同定を行った10秒間の中央の時刻を横軸、算出された振動特性を縦軸に表示している。図-9より、地震中の盛土の振動特性は、中下地区の盛土と同様に、複数のフェーズ(2つのフェーズと4つの区間)が見られる。第1区間は、盛土にS波初動が到達するまでの時間帯であり、盛土は線形物性(初期剛性)として振動すると考えられる0秒~30秒、第2区間は、地震動の第1フェーズが到来した時間帯で

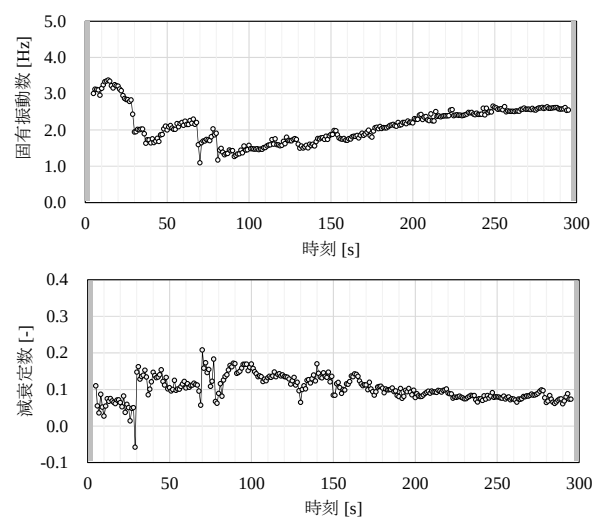
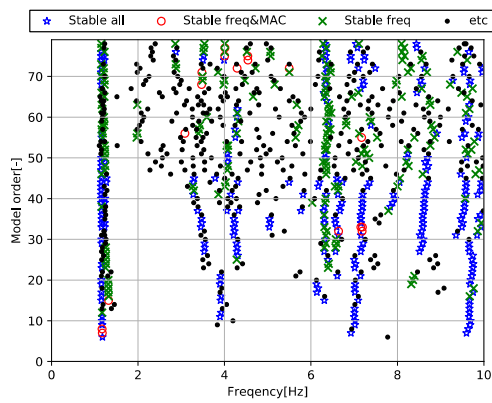


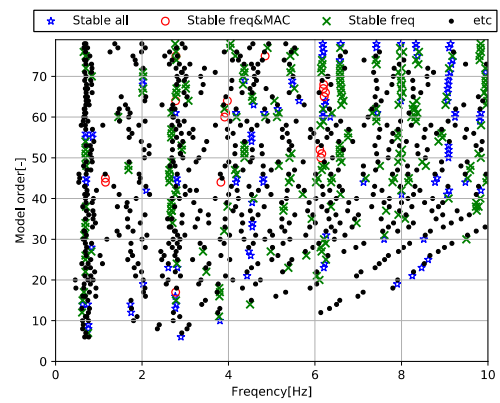
図-7 部分空間法による固有周期と減衰特性の地震中の経時変化 (中下地区)

あり、非線形化による剛性低下が生じていると考えられる30秒~70秒、第3区間は、地震動の第2フェーズが到来した時間帯であり、さらに非線形化が進展していると考えられる70秒~130秒、そして、第4区間は第2フェーズから地震動の終端部までの時間帯となる140秒~

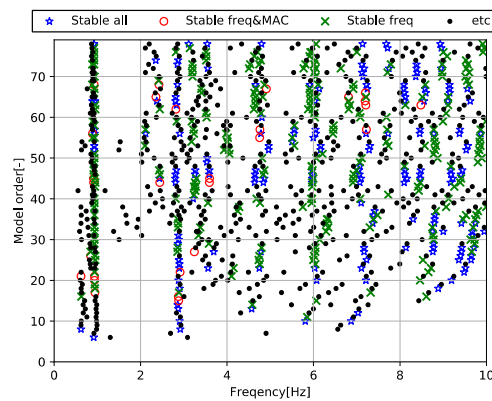




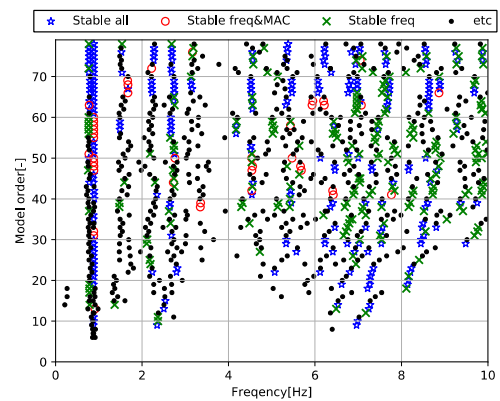
(1) 20秒付近



(3) 85秒付近



(2) 37秒付近



(4) 280秒付近

図-8 stabilization diagram (山崎地区)

300秒である。第4区間は、第2フェーズの終了後に固有振動数と減衰定数が経時的に回復しているが、中下地区の盛土ほど回復していないことが考えられる。

各区間の同定された振動特性は、第1区間： $f_1=1.20\text{Hz}$  ( $h_1=0.01$ )，第2区間： $f_1=0.88\text{Hz}$  ( $h_1=0.10$ )，第3区間： $f_1=0.73\text{Hz}$  ( $h_1=0.13$ )，第4区間： $f_1=0.83\text{Hz}$  ( $h_1=0.10$ )となり、地震中の盛土の振動特性は、地震中に経時変化していることが考えられる。

## 5. 算出した固有周期の検証

### (1) 地質調査より得られる固有周期との比較

対象盛土のPS検層の結果より、道路橋示方書<sup>13)</sup>の地盤の固有周期の算出式に基づき、部分空間法で得られた初期の固有周期と比較した。

#### a) 中下地区

図-1のNo.TR-1で地質調査した結果より算出した固有周期 $T_G$ を表-2に示す。表-2より、中下地区の基本の固有周期 $T_G$ は、 $T_G=0.313\text{秒}(3.191\text{Hz})$ である。PS検層は線形地盤の弾性波(実体波)を観測しているため、道路橋示

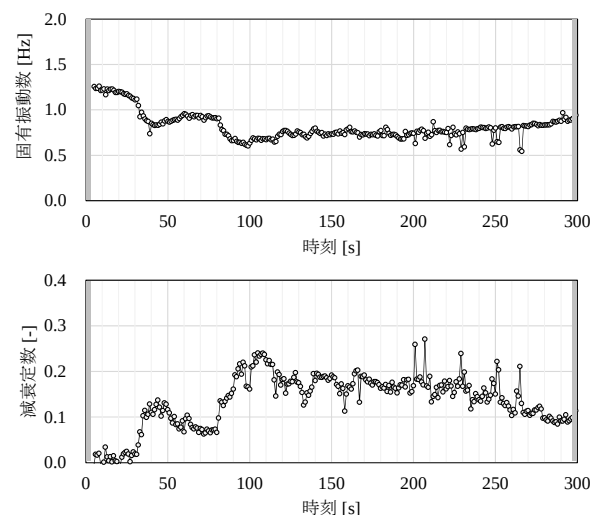


図-9 部分空間法による固有周期と減衰特性の地震中の経時変化(山崎地区)

方書による基本の固有周期 $T_G$ は、盛土の線形地盤の振動特性を算出している。中下地区の地震観測記録で部分空間で同定された結果のうち、線形地盤と考えられる振動特性は第1区間が該当する。第1区間の振動特性は、 $f_1=3.21\text{Hz}$  (0.312秒)であり、両者は良く一致している。

表-2 地質調査結果（中下地区）

| 区分                             | 深度    |   |       | 層厚    | 質量密度  | S波速度 | H <sub>i</sub> /V <sub>i</sub> |
|--------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|------|--------------------------------|
|                                | m     |   |       | m     | g/cm3 | m/s  | -                              |
| BK                             | -1.30 | ～ | 2.00  | 3.300 | 1.700 | 160  | 0.021                          |
| BK                             | 2.00  | ～ | 3.70  | 1.700 | 1.700 | 220  | 0.008                          |
| BK                             | 3.70  | ～ | 4.80  | 1.100 | 1.500 | 120  | 0.009                          |
| BK                             | 4.80  | ～ | 6.80  | 2.000 | 1.600 | 140  | 0.014                          |
| Acs                            | 6.80  | ～ | 7.35  | 0.550 | 1.620 | 140  | 0.004                          |
| Acs                            | 7.35  | ～ | 7.95  | 0.600 | 1.410 | 140  | 0.004                          |
| As1                            | 7.95  | ～ | 9.55  | 1.600 | 1.750 | 160  | 0.010                          |
| Ac2                            | 9.55  | ～ | 11.30 | 1.750 | 1.420 | 210  | 0.008                          |
| BR                             | 11.30 | ～ | -     | -     | 1.900 | 430  | -                              |
| ※T <sub>g</sub> :地盤の基本固有周期(s)= |       |   |       |       |       |      | 0.313 秒                        |
|                                |       |   |       |       |       |      | 3.191 Hz                       |

表-3 地質調査結果（山崎地区）

| 区分                             | 深度    |   |       | 層厚    | 質量密度  | S波速度 | H <sub>i</sub> /V <sub>i</sub> |
|--------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|------|--------------------------------|
|                                | m     |   |       | m     | t/m3  | m/s  | -                              |
| BK                             | 0.00  | ～ | 5.00  | 5.000 | 1.900 | 179  | 0.028                          |
| BK                             | 5.00  | ～ | 7.00  | 2.000 | 1.900 | 179  | 0.011                          |
| BK                             | 7.00  | ～ | 11.80 | 4.800 | 1.900 | 204  | 0.024                          |
| BK                             | 11.80 | ～ | 13.85 | 2.050 | 1.600 | 204  | 0.010                          |
| Ac1                            | 13.85 | ～ | 16.00 | 2.150 | 1.600 | 190  | 0.011                          |
| Ac2                            | 16.00 | ～ | 24.35 | 8.350 | 1.500 | 121  | 0.069                          |
| Ap                             | 24.35 | ～ | 27.65 | 3.300 | 1.500 | 135  | 0.024                          |
| BR                             | 27.65 | ～ | -     | -     | 2.000 | 409  | -                              |
| ※T <sub>g</sub> :地盤の基本固有周期(s)= |       |   |       |       |       |      | 0.710 秒                        |
|                                |       |   |       |       |       |      | 1.409 Hz                       |

## b) 山崎地区

図-2に示すH25-No.1で地質調査した結果より算出した地盤の固有周期を表-3に示す。表-3より、T<sub>g</sub>=0.710秒(T<sub>g</sub>=1.409Hz)である。中下地区と同様に、部分空間で同定された結果の第1区間の振動特性は、f<sub>1</sub>=1.20Hz(0.833秒)であり、部分空間法による同定結果は、道路橋示方書の固有周期の算出式で算出された固有周期と概ね一致した結果となった。

## (2) 2次元モデルの固有値解析より得られる固有周期との比較

システム同定によって得られた振動特性との比較を目的に、盛土構造物の横断面を対象とした2次元有限要素法モデルによる固有値解析を行った。盛土形状と土質分布は、盛土の地質調査結果に基づく地質断面図をもとに作成した。地盤要素は平面ひずみ要素として、要素サイズはアスペクト比1:1程度(概ね1m)とした。モデル化高さは、工学的基盤(せん断波速度V<sub>s</sub>=300m/s以上の地盤)から盛土天端までの距離H(m)を基準に、工学的基盤の高さをH(m)考慮した。固有値解析の境界条件は、解析モデル下端を固定境界、解析モデル側方を水平ローラーとした。なお、固有値を求める際の解析手法はサブスペース法とした。

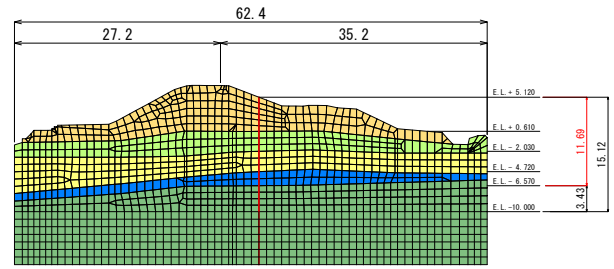


図-10 固有値解析モデル（中下地区）

表-4 固有値解析結果（中下地区）

| 次数 | 固有周期<br>(Hz) | 固有周期<br>(秒) | 累計有効質量比(%)     |                | 有効質量(tonf/G)   |                |
|----|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|    |              |             | T <sub>x</sub> | T <sub>y</sub> | T <sub>x</sub> | T <sub>y</sub> |
| 1  | 3.476        | 0.2877      | 47             | 0              | 101            | 0              |
| 2  | 5.043        | 0.1983      | 48             | 5              | 2              | 10             |
| 3  | 6.272        | 0.1594      | 55             | 5              | 15             | 0              |
| 4  | 7.163        | 0.1396      | 56             | 5              | 2              | 1              |
| 5  | 7.540        | 0.1326      | 64             | 5              | 18             | 0              |
| 6  | 8.351        | 0.1198      | 66             | 5              | 4              | 1              |
| 7  | 8.957        | 0.1117      | 70             | 7              | 8              | 4              |
| 8  | 9.364        | 0.1068      | 72             | 8              | 6              | 1              |
| 9  | 10.081       | 0.0992      | 73             | 8              | 1              | 1              |
| 10 | 10.388       | 0.0963      | 81             | 11             | 17             | 5              |

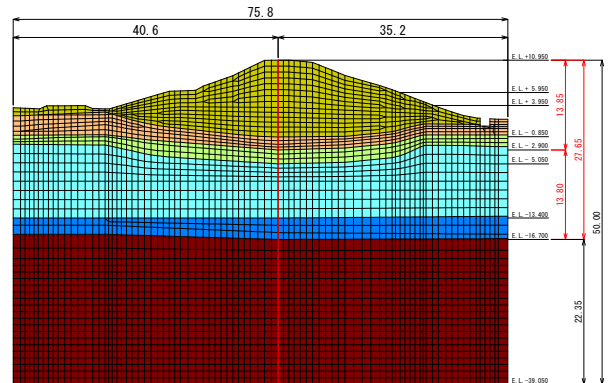


図-11 固有値解析モデル（山崎地区）

表-5 固有値解析結果（山崎地区）

| 次数 | 固有周期<br>(Hz) | 固有周期<br>(秒) | 累計有効質量比(%)     |                | 有効質量(tonf/G)   |                |
|----|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|    |              |             | T <sub>x</sub> | T <sub>y</sub> | T <sub>x</sub> | T <sub>y</sub> |
| 1  | 1.264        | 0.7913      | 48             | 0              | 295            | 0              |
| 2  | 2.453        | 0.4076      | 48             | 10             | 0              | 63             |
| 3  | 2.901        | 0.3447      | 48             | 10             | 0              | 0              |
| 4  | 3.454        | 0.2895      | 48             | 13             | 2              | 15             |
| 5  | 3.856        | 0.2593      | 78             | 13             | 186            | 1              |
| 6  | 4.257        | 0.2349      | 78             | 13             | 0              | 1              |
| 7  | 4.471        | 0.2237      | 79             | 24             | 4              | 63             |
| 8  | 5.200        | 0.1923      | 81             | 26             | 15             | 12             |
| 9  | 5.321        | 0.1879      | 86             | 26             | 29             | 0              |
| 10 | 5.876        | 0.1702      | 90             | 26             | 23             | 0              |

## a) 中下地区

中下地区の解析モデルを図-10に示し、固有値解析の結果を表-4に示す。表-4より、中下地区の支配的な固有周期(1次周期)は有効質量が最も多いf<sub>1</sub>=3.476Hz(0.288秒)である。また、その周期以外の有効質量は小さいため、中下地区は1次の卓越した振動モードで振動していることが考えられる。構築した2次元モデルの固有周期



は線形地盤であるため、システム同定結果の第 1 区間： $f_1=3.21\text{Hz}$  (0.312 秒)，および道路橋示方書  $T_G=0.313$  秒 (3.191Hz)と比較した場合、2 次元モデルは低周期であるが、概ね一致していると考えられる。なお、有効質量比が 50%を下回っている原因は、盛土と同じ深さの工学的基盤による解析的な影響と考えられる。

#### b) 山崎地区

山崎地区の解析モデルを図-11 に示し、固有値解析の結果を表-5 に示す。表-5 より、山崎地区の支配的な固有周期 (1 次周期) は有効質量が最も多い  $f_2=1.264\text{Hz}$ (0.791 秒)である。また、2 次の周期として、 $3.856\text{Hz}$ (0.259 秒)に有効質量の大きな振動モードが存在するため、山崎地区は 1 次の卓越した振動モードと 2 次の振動モードで振動していることが考えられる。算出した 2 次元モデルの固有周期は線形地盤であるため、システム同定結果の第 1 区間： $f_1=1.20\text{Hz}$  (0.833 秒)，および道路橋示方書  $T_G=0.710$  秒( $T_G=1.409\text{Hz}$ )と比較した場合、概ね一致していると考えられる。なお、有効質量比が 50%を下回っている原因は、盛土と同じ深さの工学的基盤による解析的な影響と考えられる。

### (3) 天端—基盤のウェーブレット変換より得られる固有周期の時刻歴の変化との比較

部分空間法より推定した固有周期の経時変化と比較することを目的に、観測記録の時間一周波数解析の連続 1 次元ウェーブレット変換<sup>19)</sup>を行い卓越振幅の経時変化を求めた。解析ウェーブレットは、時間の分散が広く周波数の分散が狭い Bump とした。また、入力信号は、天端と基盤上面の差を取った観測記録 (天端—工学的基盤)とした。

#### a) 中下地区

観測された記録の天端—工学的基盤のフーリエスペクトルとウェーブレット変換の結果を図-12 に示す。図-12 には、部分空間法で同定された第 1 区間から第 4 区間の固有振動数 (固有周期) を図示している。なお、図-1 の中下地区の盛土横断面は、EW 方向と対応する。図-12 の天端—工学的基盤の地震動波形より、EW 方向の振幅値が大きく、盛土縦断面の NS 方向よりも大きく振動している。

図-12 のウェーブレットより、第 1 区間(3.21Hz)は波形の振幅値が小さいため、ピーク振幅値が表れていないものと考えられる。第 2 区間(2.01Hz)は、システム同定された固有値を下限の周期として、10Hz までの長周期側にピーク振幅値を確認することができる。第 3 区間(1.35Hz)も同様であるが、第 2 区間よりも低周期側にピーク振幅値が分布しているため、盛土の非線形化を確認することができる。第 4 区間(2.59Hz)は、第 1 区間と同様に波形の振幅値が小さいため、明瞭なピーク振幅値は確認されな

いが、第 2 フェーズより、経時的に推移する薄いピーク振幅値を確認することができる。

ウェーブレット変換の結果より、地震中の固有周期の経時変化を確認することができた。また、その結果は、部分空間法で同定された固有周期の経時変化と概ね対応するものであった。

#### b) 山崎地区

観測された記録の天端—工学的基盤のフーリエスペクトルとウェーブレット変換の結果を図-13 に示す。図-13 には、部分空間法で同定された第 1 区間から第 4 区間の固有振動数 (固有周期) を図示している。なお、図-2 の山崎地区の盛土横断面は、NS 方向と対応する。図-13 の天端—工学的基盤の地震動波形より、NS 方向に比較的大きなスパイク状のパルス応答は確認できるが、盛土縦断面の EW 方向と同程度に振動しているものと考えられる。

図-13 のウェーブレットより、第 1 区間(1.20Hz)は波形の振幅値が小さいため、ピーク振幅値が表れていないものと考えられる。第 2 区間(0.88Hz)は、システム同定された固有値を下限の周期 (振動数) として、10Hz(0.1 秒)までの長周期側にピーク振幅値を確認することができる。第 3 区間(0.73Hz)も同様であるが、第 2 区間よりも低周期側にピーク振幅値が分布しているため、盛土の非線形化を確認することができる。第 4 区間(0.83Hz)は、第 1 区間と同様に波形の振幅値が小さいため、明瞭なピーク振幅値は確認されないが、第 2 フェーズより、経時的に推移する薄いピーク振幅値を確認することができる。

ウェーブレット変換の結果より、地震中の固有周期の経時変化を確認することができた。また、その結果は、部分空間法で同定された固有周期の経時変化と概ね対応するものであった。

## 6. まとめ

本研究では、2011 年 (平成 23 年) 東北地方太平洋沖地震で震度 6 強程度の記録が観測された盛土構造物を対象に、部分空間法を用いて地震中の盛土構造物の固有周期と減衰特性の経時的な変化を推定した。これにより、以下の知見が得られた。

- ・ 部分空間法に基づくシステム同定の Ordinary MOESP 法で評価された中下地区の固有周期の地震中の経時変化は、観測波形の形状の変化と一致しており、第 1 区間： $f_1=3.21\text{Hz}$  ( $h_1=0.06$ )，第 2 区間： $f_2=2.01\text{Hz}$  ( $h_2=0.14$ )，第 3 区間： $f_3=1.35\text{Hz}$  ( $h_3=0.17$ )，第 4 区間： $f_4=2.59\text{Hz}$  ( $h_4=0.06$ ) と評価された。
- ・ 部分空間法に基づくシステム同定の Ordinary MOESP 法で評価された山崎地区の固有周期の地震中の経時

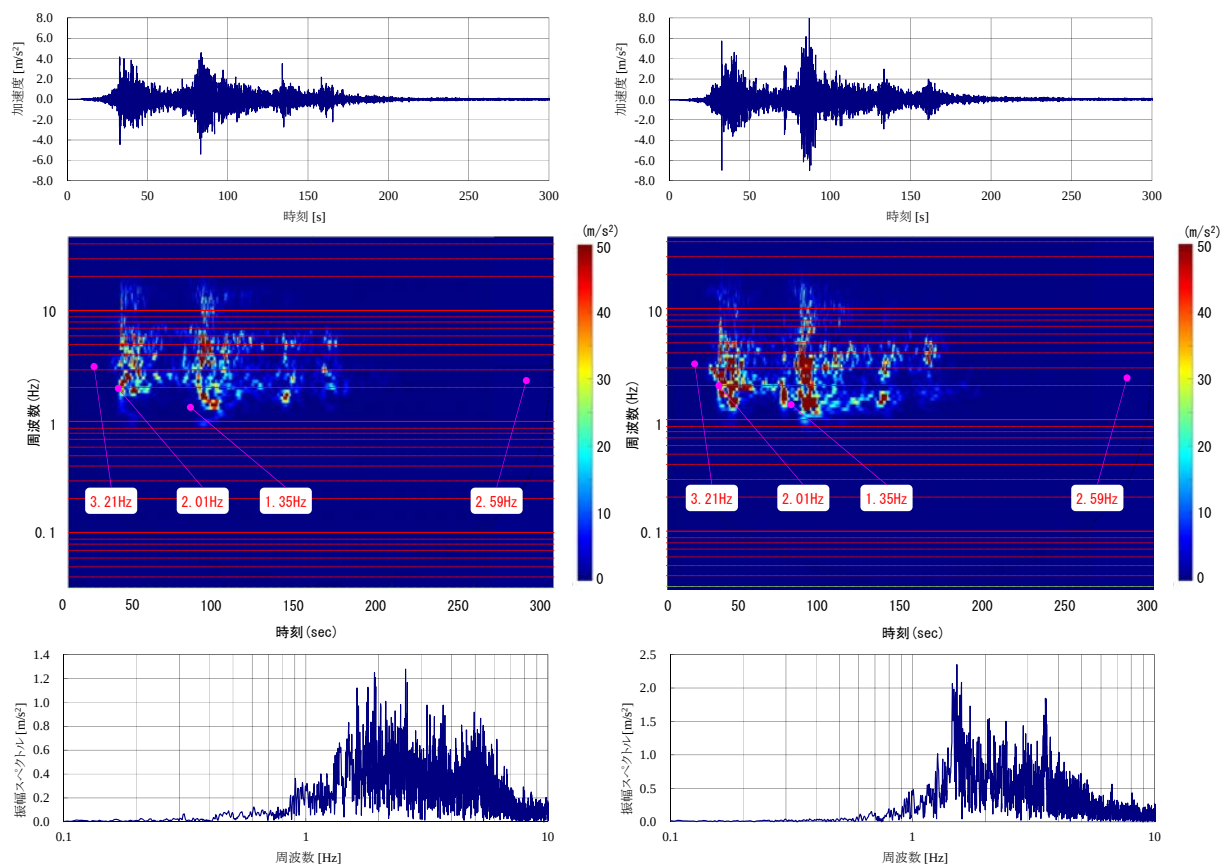


図-12 中下地区の天端—工学的基盤の波形とウェーブレット（左側：NS成分，右側：EW成分）

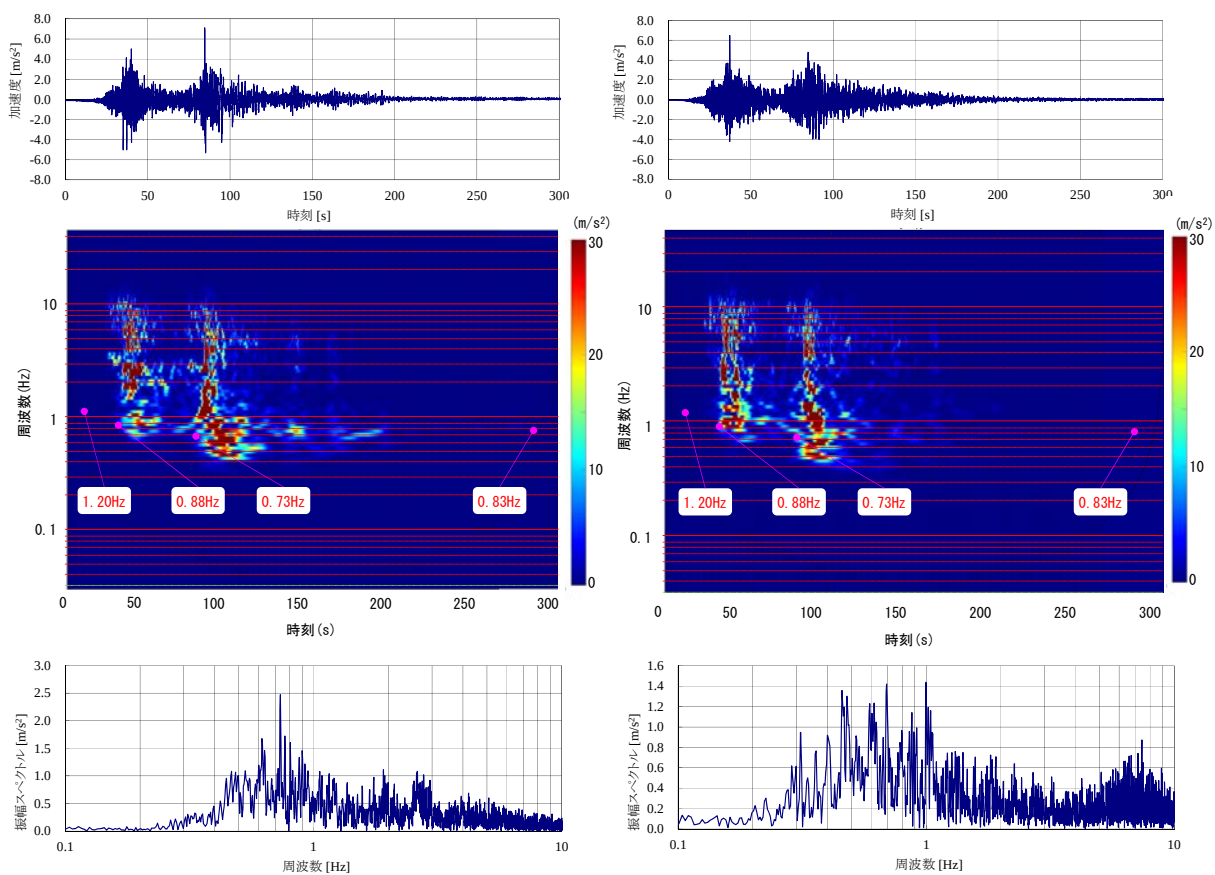


図-13 山崎地区の天端—工学的基盤の波形とウェーブレット（左側：NS成分，右側：EW成分）

変化は、波形の形状の変化と一致しており、第 1 区間： $f_1=1.20\text{Hz}$  ( $h_1=0.01$ )，第 2 区間： $f_1=0.88\text{Hz}$  ( $h_1=0.10$ )，第 3 区間： $f_1=0.73\text{Hz}$  ( $h_1=0.13$ )，第 4 区間： $f_1=0.83\text{Hz}$  ( $h_1=0.10$ ) と評価された。

- ・ 2 地点ともに盛土構造物が線形挙動と考えられる第 1 区間は、システム同定の固有値に対して、地質調査結果に基づく地盤の基本固有周期、及び土質断面形状を考慮した二次元有限要素法の固有値と概ね一致した。
- ・ 2 地点ともに非線形化が進展していると考えられる第 2 区間と第 3 区間は、天端－工学的基盤のウェーブレット解析におけるピーク振幅値と概ね一致した。

今後、盛土構造物の天端と工学的基盤の地震観測記録をもとに部分空間法を用いて盛土材料の動的変形特性を推定し、地質調査より得られる動的変形特性と検証することで、部分空間法によるシステム同定を用いた地盤の動的変形特性の推定可能性を検討する。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，（独）土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国土技術政策総合研究所資料 No.646, 2011.
- 2) 国土交通省：2040 年、道路の景色が変わる，<https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf>（2021 年 8 月 20 日閲覧）
- 3) 片岡正次郎，長屋和宏，松本幸司：新潟県中越地震時の道路盛土被害の分析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 4（地震工学論文集第 34 巻），pp. I\_568-I\_576, 2015.
- 4) 常田賢一，小田和広：道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察，土木学会論文集 C，Vol.65, No.4, pp.857-873, 2009.
- 5) 都間英俊，常田賢一，小田和広，江川祐輔：応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する解析的研究，土木学会地震工学論文集，Vol.29, pp.1205-1210, 2007.
- 6) 松岡一成，片岡正次郎，長屋和宏，金子正洋：東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた河川堤防の地震応答解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol.68, No.4, pp. I\_104-I\_110, 2012.
- 7) 梶尾辰史，谷本俊輔，片岡正次郎，佐々木哲也：2 次元動的有効応力解析による河川堤防の地震時沈下量の再現性向上策に関する考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 4, pp. I\_932-I\_948, 2017.
- 8) 肥田剛典，永野正行：部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 701 号，932-932, 2014.
- 9) PDC コンソーシアムオフィシャルサイト：液状化ポテンシャルサウンディング試験 PDC，<http://www.pdc-cons.jp/>（2021 年 8 月 20 日閲覧）
- 10) M. Verhaegen and P.Dewilde : Subspace model identification Part 1.The output-errorstate-space model identification class of algorithm,Int. J. Control, Vol.56, No.5, 1992, pp.1187-1210.
- 11) F. Magalhães, A. Cunha, E. Caetano : Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.23, pp.316-329, 2009.
- 12) M. Scinonti and J. P. Lanslots : Stabilisation diagrams : Pole identification usign fuzzy clustering techniques, Advances in Engineering Software, No. 36, pp. 768-779, 2005.
- 13) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 14) 服部匡洋，大石秀雄，加藤祥久，中村真貴，馬越一也，篠原聖二：長大トラス橋における 2018 年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75, No.4, I\_476-I\_484, 2019.

# ESTIMATION THE NATURAL PERIOD CHANGE OF THE EMBANKMENT DURING THE EARTHQUAKE BY SYSTEM IDENTIFICATION BASED ON THE SUBSPACE METHOD

Yosuke ISHII, Satoru Yagi, Masayuki YAMADA, Go SAKAGUCHI,  
Hitoshi MASUDA and Shojiro KATAOKA

The vibration characteristics of the embankment structure during an actual earthquake have not always been verified, and it is necessary to grasp the vibration characteristics of individual embankment structures in detail using seismic observation records. In this study, the subspace method, which is one of the system identification methods, was used as a method for estimating the vibration characteristics such as the natural period of the structure from the observation record of the behavior during an earthquake. For the purpose of analyzing in detail the changes in the vibration characteristics of the embankment structure during the earthquake from the observation records at the time of the actual earthquake, records of seismic intensity 6 upper were observed in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Using the subspatial method for the river embankment, the changes over time in the natural period and damping characteristics of the embankment structure during the earthquake were estimated.