

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1100

March 2020

特異値分解による線形次元削減と代替モデルに基づく耐震性能  
照査手法の高度化に向けた基礎的研究  
～重力式岸壁に対する地震応答解析への適用～

住岡直樹・宮田正史・福永勇介・大竹雄

Basic Study for Advanced Performance Verification of Earthquake Resistance Using Dimension Reduction by Singular Value Decomposition and Reduced Order Model  
-Application of Gravity-type Quaywalls to Seismic response analysis-

SUMIOKA Naoki, MIYATA Masafumi, FUKUNAGA Yusuke, OTAKE Yu

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1100

March 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは  
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕  
E-mail:ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

特異値分解による線形次元削減と代替モデルに基づく耐震性能照査手法の高度化に向けた基礎的研究  
（重力式岸壁に対する地震応答解析への適用）



# 特異値分解による線形次元削減と代替モデルに基づく 耐震性能照査手法の高度化に向けた基礎的研究 ～重力式岸壁に対する地震応答解析への適用～

住岡直樹\*・宮田正史\*\*・福永勇介\*\*\*・大竹 雄\*\*\*\*

## 要 旨

係留施設（岸壁や栈橋）における性能照査では、耐震性能が主要な照査項目となる。特に耐震強化施設に対しては、偶発状態（レベル2地震動作用時）における施設の損傷の程度を、二次元地震応答解析等を用いて照査することが求められる。本来、土質条件をはじめとする入力条件のばらつきが二次元地震応答解析の結果に及ぼす影響を把握することは重要である。しかし、計算コストの大きい二次元地震応答解析を、入力条件のばらつきに応じた多数のケースに対して実行することは容易ではない。そのため現状では、ある確定的な条件に対する解析結果のみで照査を行うことが一般的である。

そこで本研究では、まず、重力式岸壁を対象に、膨大な情報量を有する二次元地震応答解析の結果から、特徴的かつ重要な情報のみを、特異値分解を使うことで抽出した。さらに、ここで抽出した情報を基底とし、この基底に対する成分と入力条件を最小二乗法により関連付ける手法（代替モデルの構築）を検討し、港湾構造物への本手法の適用性を確認した。入力条件のばらつきが解析結果に及ぼす影響の評価は、従来の二次元地震応答解析では多数のケースに対する計算が必要であったが、この手法を用いることで、容易に、かつ、空間情報および時間情報を損なうことなく評価できる。また、本手法の今後の新たな活用方法や発展の方向性についても示した。

キーワード：二次元地震応答解析，特異値分解，次元削減，モード分解，最小二乗法，代替モデル

---

\*港湾研究部港湾研究室 交流研究員（株式会社エコー）  
\*\*港湾研究部港湾研究室 室長  
\*\*\*港湾研究部港湾研究室 主任研究官  
\*\*\*\*新潟大学准教授 自然科学系（工学部）建設学科  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所  
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail: ysk.nil-kukaku@ml.milt.go.jp

# Basic Study for Advanced Performance Verification of Earthquake Resistance Using Dimension Reduction by Singular Value Decomposition and Reduced-order Model - Application of Gravity-type Quay Walls to Seismic Response Analysis -

**SUMIOKA Naoki\***  
**MIYATA Masafumi\*\***  
**FUKUNAGA Yusuke\*\*\***  
**OTAKE Yu\*\*\*\***

## Synopsis

Seismic performance is a major factor in the overall performance of mooring facilities. Especially for facilities with high earthquake resistance, seismic response analysis is necessary to predict the degree of damage to facilities in the event of a level-2 earthquake. It is important to understand how the selection of one input condition from various types of soils will affect the seismic response analysis. However, it is not easy to analyze a large number of cases with this input condition due to the large calculation load associated with seismic response analysis. For this reason, today, performance verification of earthquake resistance is generally performed with reference to analysis results obtained from just one fixed input condition.

In this study, we used singular value decomposition to extract only significant information from seismic response analysis results based on a vast amount of information regarding gravity-type quays. In addition, we associated the extracted information with input conditions using the least squares method, an approach known as the “reduced-order model.” This model enables an understanding of the effects of varying the input conditions on the seismic response. Lastly, we provide examples of the potential use and further development of this method.

**Key Words:** Seismic Response Analysis, Singular Value Decomposition, Dimension Reduction, Mode Decomposition, Least Squares Method, Reduced-order Model

---

\* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM (ECOH CORPORATION)

\*\* Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

\*\*\* Senior Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

\*\*\*\* Associate Professor, Faculty of Engineering, Niigata University

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5019 Fax : +81-468-42-9265 e-mail:mitani-m92y2@ysk.nilim.go.jp

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的と本資料の構成	1
2. モード分解および代替モデル構築の基礎理論	2
2.1 全体構成の概要	2
2.2 モード分解の基礎理論	3
2.3 代替モデルの基礎理論	4
2.4 簡単な例題を用いた概説	7
3. モード分解に関わる各種検討	10
3.1 検討条件	10
3.2 各種条件の違いがモード分解へもたらす影響の検証	11
3.3 モード分解の適用性に関するまとめ	16
4. 代替モデル構築とその推定精度の検証	17
4.1 検討方針	17
4.2 検討に用いる入力変数	17
4.3 二次元地震応答解析結果	20
4.4 代替モデルの構築結果	21
4.5 代替モデルによる推定精度の検証	22
5. 今後の活用法の例示と適用上の課題	24
5.1 今後の活用法の例示	24
5.2 適用上の課題	25
6. おわりに	26
謝辞	26
参考文献	26
付録A 代替モデルにおける回帰係数の最小二乗推定値の導出	27
付録B 代替モデルによる推定値の分散の導出	29
付録C 各種入力条件におけるモード分解結果	31
付録D 土質調査結果資料収集データ	58



## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

係留施設（岸壁や栈橋）における性能照査では、耐震性能が主要な照査項目となる。特に耐震強化施設に対しては、レベル2地震動作用時（以後、偶発状態と呼称する。）における施設の損傷の程度が限界値以下であることを照査することが求められる<sup>1)</sup>。偶発状態における施設の応答を確認するツールとしては、二次元地震応答解析が一般的に用いられているが、現状は、ある確定的な条件に対する解析結果で照査を行うのみに留まっている。

このことによる問題点を、ここでは2つ挙げる。

#### 【問題点①】入力条件のばらつきに対する評価

二次元地震応答解析には、土質定数や土層構成等が入力条件として与えられるが、これらの入力条件は施設の断面方向および延長方向においても一定ではない。現状の性能照査では、安全側の検討として、最も厳しい条件下での二次元地震応答解析を実行し、それにより得られた解析結果（応答値）のみで照査している。しかし、土質条件が異なれば同じ地震動が作用したとしても施設の応答は異なる。図-1.1は、地震後の岸壁法線の出入りのイメージを示したものである。施設の暫定供用可否の判断や、被災後の復旧方法までを設計段階で考えるのであれば、本来、延長方向における応答値のばらつきまで確認することが望ましいが、二次元地震応答解析は計算コストが大きい<sup>2)</sup>ため、多数の解析ケース数を要するこのような検討はされてきていないのが現状である。

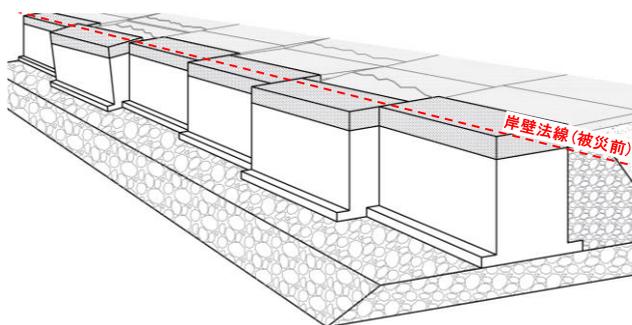


図-1.1 岸壁法線の出入りのイメージ

#### 【問題点②】破壊形態の把握とそれに着目した設計

作用外力が想定を超過する場合や、想定していた耐力が何らかの要因により得られない場合等、施設の破壊はどの施設においても起こり得る。図-1.2に示すように、係留施設の破壊形態は様々であり、破壊形態によっては連鎖的に大規模な破壊をもたらす場合も考えられる。そのような脆

性的な破壊（例えば重力式岸壁におけるコンクリート部材のせん断破壊や矢板式岸壁におけるタイ材の破断等）が生じると、当該施設の倒壊のみならず、土砂流出による航路への影響や背後建屋等の他施設の被害をも引き起こす要因になり得る。本来であれば、そのような脆性的な破壊は避けるべきであり、設計段階においては、少なくとも当該施設の破壊形態がどのようなものであるかを把握することが重要である。しかし、現状の耐震性能照査では、施設が破壊に至るまでのことは考えられていない。

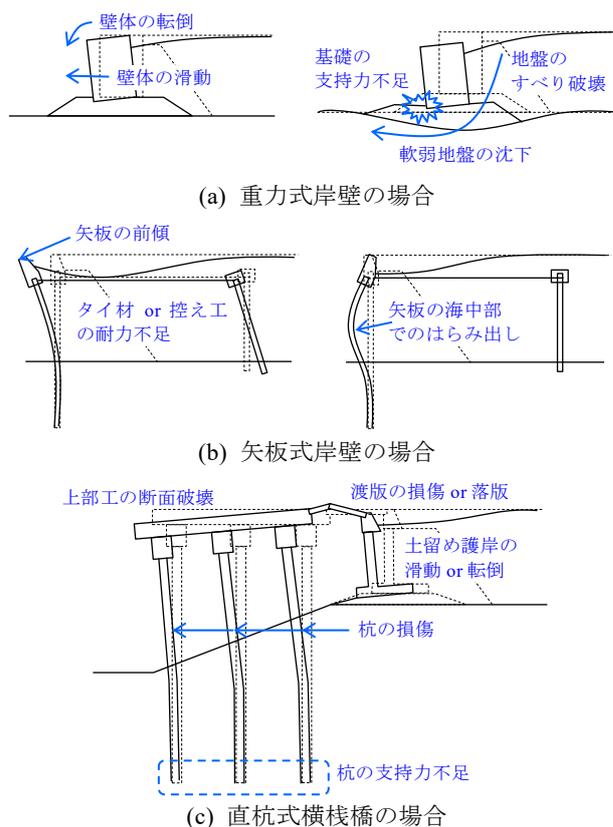


図-1.2 係留施設の破壊形態の例

### 1.2 研究の目的と本資料の構成

本研究が最終的に目指すのは、耐震性能照査手法の高度化である。手法の高度化に向けて、前述の問題点を解決する方法としては、膨大な量の二次元地震応答解析を実施することがまず考えられるが、これを実行するためには必ず計算コストという問題に直面することとなる。既往の研究として、簡易的に施設の耐震性を確認する手法<sup>2)3)</sup>も開発されており、これらの手法<sup>2)3)</sup>を用いれば効率的に計算が可能である。しかし、その反面で施設の耐震性能照査に用いる程の精度確立には至っていない。

そこで本研究では、耐震性能照査手法の高度化に向けた基礎的研究として、二次元地震応答解析と同等の精度を維

持しつつ、出来る限り効率的に照査が可能となる手法の検討を行う。具体的には、数値解析により得られる応答値と入力変数との関係を関連付けたモデル構築の手法のひとつである大竹ら<sup>4)</sup>の提案手法を港湾構造物に対して適用し、各種検証により港湾構造物への本手法<sup>4)</sup>の適用性を確認する。さらに、本手法<sup>4)</sup>の今後の様々な発展の方向性を示す。

本研究での中核を担う手法は、モード分解と代替モデルの2つであり、本資料では、これらの手法に関する各種検討内容を図-1.3に示す構成で整理している。

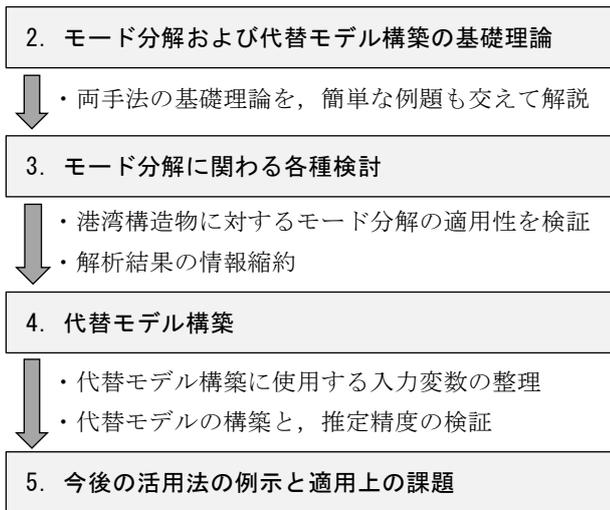


図-1.3 本資料の構成

## 2. モード分解および代替モデル構築の基礎理論

### 2.1 全体構成の概要

これまでにも、数値解析により得られる大規模な情報の中から、ある点—ある時刻の応答値と入力変数を関連付けたモデル（以後、代替モデルと呼称する。）構築の試みは多数報告されている（例えば5）。これに対して大竹ら<sup>4)</sup>は、土構造物を対象に、解析モデル全体（空間の拡張）の時刻歴応答（時間への拡張）を評価する手法を提案している。この手法<sup>4)</sup>では、数値解析で得られた情報のうち、空間的信息

および時間的情報をできるだけ損なわないような代替モデルを構築しているため、数値解析により得られる解析結果と同等の精度を維持されることが期待できる。

本研究では、大竹ら<sup>4)</sup>の提案手法を港湾構造物に対して適用する。代替モデルの構築は、以下の手順で行う。また、本研究で目指す手法構築の全体構造を図-2.1に示す。

#### Step1 解析結果（応答値）の情報縮約

二次元地震応答解析をはじめとするFEM解析では、解析領域内を小さな要素に分割し、各要素に作用する外力とそれにより発生する様々な応答を計算する。さらに、この計算を全時間ステップに対して行うため、FEM解析で得られる解析結果は膨大な情報量を有している。解析結果（応答値）と入力変数との関連付けを、この膨大な情報に対して実施してしまうと、計算コストの問題は依然として解決されないままである。

よってまずは、二次元地震応答解析により得られた解析結果（応答値）から、力学的解釈が可能であり、かつ、解析目的に応じて必要な情報のみを、モード分解を用いて抽出し、情報量を縮約することを考える。

#### Step2 入力変数の情報縮約

二次元地震応答解析では、多数の入力変数（地盤パラメータ等）が必要であり、これら全てを解析結果（応答値）と関連付けることは困難である。多数の入力変数を縮約する方法としては、主成分分析等が挙げられるが、本研究では、解析結果（応答値）に及ぼす影響が大きいと想定される入力変数のみに着目する。これにより、実質的に入力変数の情報を縮約することとする。

#### Step3 代替モデルの構築

Step1&2で縮約した情報同士を関連付けることを考える。本研究では、対象とする入力変数の平均値まわりにおけるいくつかの二次元地震応答解析を実施し、その解析結果（応答値）と入力変数を回帰分析により線形結合する。

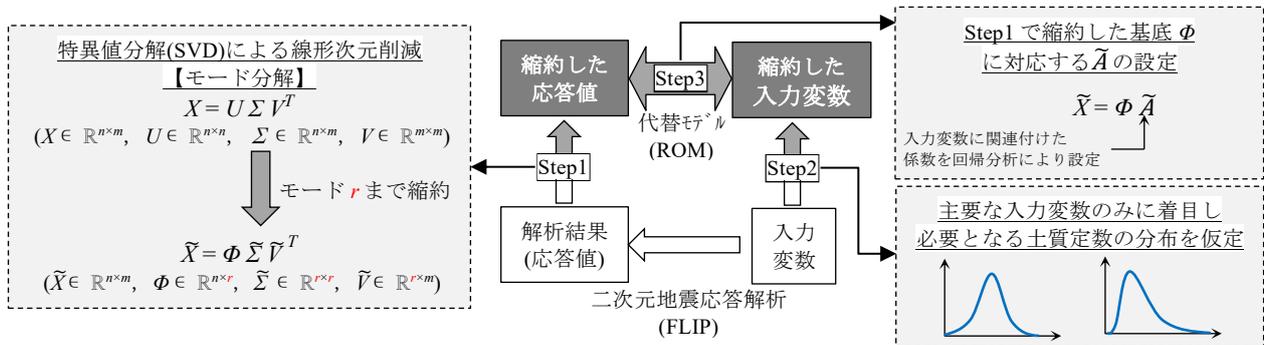


図-2.1 本研究で目指す代替モデル構築の全体構造

## 2.2 モード分解の基礎理論

特異値分解 (Singular Value Decomposition, SVD) は、線形代数における行列分解手法のひとつであり、数学的には主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) と等価とされている。特異値分解の特性を活用することで、大規模データから特徴的な情報のみを抽出することができ、この方法は画像処理や言語検索等の分野で盛んに利用されている。ここでは、特異値分解を用いて大規模データから特徴的な情報のみを抽出する行為を「モード分解」と呼称することとし、モード分解の概要を解説する。

### (1) 特異値分解の基礎理論

ある行列  $X (\in \mathbb{R}^{n \times m})$  の特異値分解は式 (2.1) のとおりとなる。

$$X = U \Sigma V^T \quad (2.1)$$

ここに

- $U$  : 直交行列で表される左特異ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{n \times n}$ )  
※  $U^T U = I$  ( $I$ : 単位行列)
- $\Sigma$  : 対角成分を特異値, それ以外の成分を0とした対角行列 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )
- $V$  : 直交行列で表される右特異ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{m \times m}$ )  
※  $V^T V = I$  ( $I$ : 単位行列)

特異値分解は、線形代数における固有値分解の応用的な手法とされている。固有値分解は正方行列 ( $n=m$ ) に対してのみ適用可能な手法であるため、非正方行列 ( $n \neq m$ ) である行列を固有値分解するために、まず、行列  $X (\in \mathbb{R}^{n \times m})$  を共分散行列 ( $X^T X (\in \mathbb{R}^{m \times m})$  あるいは  $XX^T (\in \mathbb{R}^{n \times n})$ ) に置き換える必要がある。この共分散行列を式 (2.1) の形に置き換えると、式 (2.2) および式 (2.3) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} XX^T &= U \Sigma V^T (U \Sigma V^T)^T \\ &= U \Sigma V^T V \Sigma^T U^T = U \Sigma^2 U^T \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} X^T X &= (U \Sigma V^T)^T U \Sigma V^T \\ &= V \Sigma^T U^T U \Sigma V^T = V \Sigma^2 V^T \end{aligned} \quad (2.3)$$

式 (2.2) および式 (2.3) に示すとおり、式 (2.1) の左特異ベクトル  $U (\in \mathbb{R}^{n \times n})$  は共分散行列  $XX^T (\in \mathbb{R}^{n \times n})$  の固有ベクトル、右特異ベクトル  $V (\in \mathbb{R}^{m \times m})$  は共分散行列  $X^T X (\in \mathbb{R}^{m \times m})$  の固有ベクトル、特異値  $\Sigma (\in \mathbb{R}^{n \times m})$  は共分散行列 ( $XX^T (\in \mathbb{R}^{n \times n})$  あるいは  $X^T X (\in \mathbb{R}^{m \times m})$ ) の固有値の平方根であることを意味している。また、式 (2.2) および式 (2.3) の固有値はいずれも  $\Sigma^2$  で一致していることから、例えば  $n \gg m$  の場合においても、 $X^T X (\in \mathbb{R}^{m \times m})$  の固有

値分解を行うことで、効率的に固有値を導き出すことが出来るという利点がある。

### (2) モード分解の基礎理論

まず、二次元地震応答解析結果を、行方向に全ての節点・要素における応答値、列方向に全時刻歴の応答値として、式 (2.4) のとおりに整理する。モード分解の対象とする物理量は任意に設定することができ、 $z$  個の物理量を対象として考えると、行列  $X$  は式 (2.5) のように表される。

$$x_1 = \begin{bmatrix} x_{(\text{FEM})11} & \cdots & x_{(\text{FEM})1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(\text{FEM})n1} & \cdots & x_{(\text{FEM})nm} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ここに

- $x_{(\text{FEM})n,m}$  : ある節点または要素  $n_z$ , ある時間ステップ  $m$  における物理量
- $x_z$  :  $z$  番目の物理量を全節点または全要素, 全時間ステップについて整理した行列 ( $\in \mathbb{R}^{n_z \times m}$ )
- $X$  : 対象とする全ての物理量を行方向に整理した行列 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )

ここでは、説明の簡略化のために式 (2.5) を式 (2.6) のように書き換える。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

続いて、行列  $X$  の各行における時間ステップ平均値 (1列目 ~  $m$  列目の平均値) を、式 (2.7) のとおり算出する。この時間ステップ平均値を行列形式にまとめた  $\bar{X}$  を、式 (2.8) のとおり作成する。

$$\bar{x}_n = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{nk} \quad (2.7)$$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \cdots & \bar{x}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_n & \cdots & \bar{x}_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ここに

- $\bar{x}_n$  : 行列  $X$  の第  $n$  行目における時間ステップ平均値
- $\bar{X}$  : 時間ステップ平均行列 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )

モード分解には、元の行列  $X$  から時間ステップ平均行列  $\bar{X}$  を差し引いて中心化した行列  $X'$  を使うこととする (式 (2.9)) .

$$X' = X - \bar{X} \quad (2.9)$$

ここに

$X'$ : 行列  $X$  から時間ステップ平均行列  $\bar{X}$  を差し引いた行列 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )

特異値分解により得られる特異値は式(2.10)で示すとおり、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n$  で順に並べられる。特異値が大きいということは、その特異値に対応する左右の特異ベクトルで構成される次元が、分解前の行列を表現する上で重要な情報を多く有していることを意味する。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \sigma_2 & \\ & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

この特性を活用することで、大規模データから特徴的かつ重要な情報のみを抽出し、少ない次元でのデータ再構成が可能となる。ここで、行列  $X (\in \mathbb{R}^{n \times m})$  を特異値分解し、特異値の大きいものから  $r$  番目までの次元（以降、モード  $r$  と記す）までを抽出・再構成することを考える。モード  $r$  まで線形次元削減した行列  $\tilde{X} (\in \mathbb{R}^{n \times m})$  は、式(2.11)で表される。また、モード分解を行うことによる線形次元削減のイメージを図-2.2に示す。

$$\tilde{X} = \Phi \tilde{\Sigma} \tilde{V}^T \quad (2.11)$$

ここに

$\Phi$  : モード1～ $r$  における左特異ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{n \times r}$ )

$\tilde{\Sigma}$  : 対角成分をモード1～ $r$  における特異値、それ以外の成分を0とした対角行列 ( $\in \mathbb{R}^{r \times r}$ )

$\tilde{V}$  : モード1～ $r$  における右特異ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{m \times r}$ )

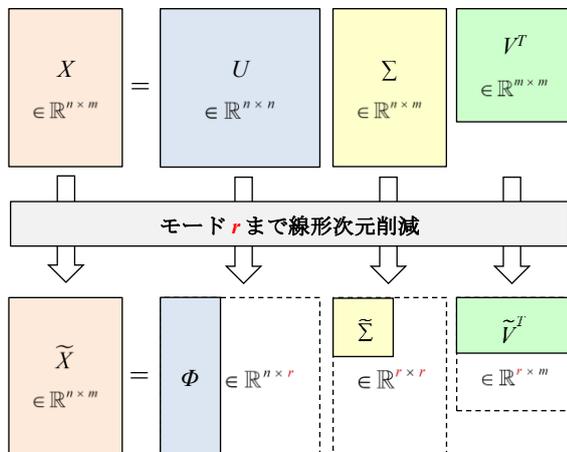


図-2.2 モード分解を行うことによる線形次元削減のイメージ

特異値分解により分解したそれぞれの次元が有している情報の多さは、寄与率 (Contribution) という指標で評価できる。モード  $r$  における寄与率は、式(2.12)により求めることができる。

$$\text{Cont}(r) = \frac{\sigma_r^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (2.12)$$

ここに

$\text{Cont}(r)$  : モード  $r$  における寄与率

$\sigma_r$  : モード  $r$  における特異値

### 2.3 代替モデルの基礎理論

代替モデル (Reduced Order Model, ROM) は、前述のモード分解により抽出した少数のモードで再構築することで、効率的に数値解析が可能となるモデルのことである。代替モデルの構築には、入力変数の異なるいくつかの二次元地震応答解析結果が必要となる。本研究では、まず、いくつかの解析結果のうち、ある代表的な1ケースの解析結果に対してモード分解を行い、線形次元削減した左特異ベクトル  $\Phi$  を基底として扱うこととする。さらに、この基底  $\Phi$  に対する成分を入力変数と関連付けた回帰係数を、いくつかの解析結果を用いた最小二乗法により設定する。これにより、必要最低限の数値解析結果から、入力変数のばらつきにより生じる解析結果への影響を評価できる。

ここでは、代替モデルに必要な回帰係数の導出過程等について説明する。

#### (1) 基底 $\Phi$ に対する $x_j$ の成分の導出

行列  $X$  の各列は、ある時間ステップ  $j$  における全節点・全要素の対象物理量を行方向に並べたベクトルとなっている。そのベクトルを、モード分解によりモード  $r$  までに縮約した左特異ベクトル  $\Phi$  を基底として示すと、式(2.13)のとおりとなる。

$$x_j = \Phi a_j = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r] a_j \quad (2.13)$$

ここに

$x_j$  : 時間ステップ  $j$  における全節点・全要素の対象物理量を行方向に並べたベクトル ( $\in \mathbb{R}^n$ )

$\Phi$  : モード  $r$  まで縮約した左特異ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{n \times r}$ )

$a_j$  :  $x_j$  の基底  $\Phi$  に対する成分 ( $\in \mathbb{R}^r$ )

式(2.13)を全時間ステップ(1~ $m$ まで)についてまとめると、式(2.14)のとおりとなる。ここで、 $A$ の第 $r$ 行はモード $r$ における基底ベクトル $\varphi_r$ に対する $X$ の成分の時間発展を表している。この観点から、 $A$ を行ベクトルに分解すると式(2.15)のとおりとなる。

$$\begin{aligned} [x_1, x_2, \dots, x_m] &= \Phi [a_1, a_2, \dots, a_m] \\ \Leftrightarrow X &= \Phi A \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{r,1} & a_{r,2} & \dots & a_{r,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1:m} \\ \vdots \\ a_{r,1:m} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ここに

$a_{r,1:m}$  : モード $r$ に対応する基底ベクトル $\varphi_r$ に対する $x_j$ の成分の時間発展 ( $\in \mathbb{R}^{1 \times m}$ )

$A$  : モード1~ $r$ までにおける基底ベクトルに対する $X$ の成分の時間発展で表される行ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )

### (2) $a_{r,1:m}$ の各種入力変数への回帰

ここでは、各モードの $a_{r,1:m}$ を、 $p$ 個の入力変数で構成したベクトル $\zeta$ に対して、時間ステップ毎に回帰することを考える。 $a_{r,1:m}$ の $\zeta$ への線形回帰は式(2.16)のとおりとなる。

$$\hat{a}_{r,1:m} = \zeta^T B_{\text{mode}(r)} \quad (2.16)$$

ここに

$\hat{a}_{r,1:m}$  :  $a_{r,1:m}$ に対応する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{1 \times m}$ )

$\zeta$  :  $p$ 個の入力変数と1からなるベクトル

$$:= \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\in \mathbb{R}^{p+1})$$

$B_{\text{mode}(r)}$  :  $a_{r,1:m}$ の $\zeta$ への線形回帰における回帰係数 ( $\in \mathbb{R}^{(p+1) \times m}$ )

式(2.16)を全てのモードに対してまとめると、式(2.17)のとおりとなる。

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_{1,1:m} \\ \vdots \\ \hat{a}_{r,1:m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta^T B_{\text{mode} 1} \\ \vdots \\ \zeta^T B_{\text{mode}(r)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \hat{A} = \begin{bmatrix} \zeta^T B_{\text{mode} 1} \\ \vdots \\ \zeta^T B_{\text{mode}(r)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ここに

$\hat{A}$  :  $A$ に対する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )

$\hat{A}$ に対する $X$ の推定値を $\hat{X}$ とすると、式(2.18)のとおりとなる。

$$\hat{X} = \Phi \hat{A} \quad (2.18)$$

ここに

$\hat{X}$  :  $X$ に対する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )

さらに、式(2.18)に式(2.17)を代入すると、式(2.19)のとおりとなる。式中の変数のうち、基底 $\Phi$ はモード分解により得られており、 $\zeta$ は入力変数によるベクトルであるため、未知パラメータは $B_{\text{mode}}$ のみとなる。この回帰係数 $B_{\text{mode}}$ は、必要最低限の数ケースの二次元地震応答解析結果を用いた最小二乗法により求められる。回帰係数 $B_{\text{mode}}$ の設定方法を次項で述べる。

$$\begin{aligned} \hat{X} &= [\varphi_1, \dots, \varphi_r] \begin{bmatrix} \zeta^T B_{\text{mode} 1} \\ \vdots \\ \zeta^T B_{\text{mode}(r)} \end{bmatrix} \\ &= [\varphi_1 \zeta^T, \dots, \varphi_r \zeta^T] \begin{bmatrix} B_{\text{mode} 1} \\ \vdots \\ B_{\text{mode}(r)} \end{bmatrix} \\ &= \Psi B_{\text{mode}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ここに

$\Psi$  : 既知パラメータである $[\varphi_1, \dots, \varphi_r]$ と $\zeta$ で構成される列ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{n \times [r \times (p+1)]}$ )

$B_{\text{mode}}$  : モード1~ $r$ までの回帰係数で表される行ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{[r \times (p+1)] \times m}$ )

### (3) 最小二乗法による回帰係数 $B_{\text{mode}}$ の算出

回帰係数 $B_{\text{mode}}$ の設定にあたり、まず、入力変数のばらつきに対応するいくつかの二次元地震応答解析を行う。ここで行う解析ケース数は多いほど精度の高い回帰分析が可能であるが、本研究では出来る限り少ない解析ケースのみで代替モデルを構築することを考える。例えば、ばらつきを考慮すべき入力変数が多数存在する場合は、施設の応答に大きな影響を及ぼし得る入力変数のみに着目するか、あるいは、多数の入力変数を主成分分析により集約する等の事前処理が必要となる。ここでは、既に解析ケース数は必要最低限に絞られていることを前提として、回帰係数 $B_{\text{mode}}$ の設定過程を説明する。

解析ケース数を $k$ とし、各解析ケースの解析結果から作成したそれぞれの行列 $X$ を、全解析ケースについてまとめると、式(2.20)のとおりとなる。

$$X^K = \begin{bmatrix} X^{(1)} \\ \vdots \\ X^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ここに

- $X^{(k)}$  : 解析ケース $k$ の解析結果による行列 $X$  ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )
- $X^K$  : 各解析ケースの $X$ を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times m}$ )

同様に, $X$ に対する推定値 $\hat{X}$ を全解析ケースについてまとめると,式(2.21)のとおりとなる.ここで,回帰係数 $B_{mode}$ は全解析ケースで共通すると仮定する.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{X}^{(1)} \\ \vdots \\ \hat{X}^{(k)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Psi^{(1)} B_{mode} \\ \vdots \\ \Psi^{(k)} B_{mode} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \Psi^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi^{(k)} \end{bmatrix} B_{mode} \\ \Leftrightarrow \hat{X}^K &= \Psi^K B_{mode} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ここに

- $\hat{X}^{(k)}$  :  $X^{(k)}$ に対する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )
- $\Psi^{(k)}$  :  $\Psi$ に $[\varphi_1, \dots, \varphi_r]$ と $\zeta^{(k)}$ を代入したもの ( $\in \mathbb{R}^{n \times [r \times (p+1)]}$ )
- $\zeta^{(k)}$  : 解析ケース $k$ における $p$ 個の入力変数と1からなるベクトル ( $\in \mathbb{R}^{p+1}$ )
- $\hat{X}^K$  : 各解析ケースの $\hat{X}$ を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times m}$ )
- $\Psi^K$  : 各解析ケースの $\Psi^{(k)}$ を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times [r \times (p+1)]}$ )

回帰係数 $B_{mode}$ は,解析により得られた $X^K$ と, $X^K$ の推定値である $\hat{X}^K$ との最小二乗法により求める.回帰係数 $B_{mode}$ の最小二乗推定値は式(2.22)で表される.

式(2.22)の導出根拠は付録Aに示す.

$$B_{mode}^{LSE} = \left[ (\Psi^K)^T \Psi^K \right]^{-1} (\Psi^K)^T X^K \quad (2.22)$$

ここに

- $B_{mode}^{LSE}$  :  $B_{mode}$ の最小二乗推定値 ( $\in \mathbb{R}^{[r \times (p+1)] \times m}$ )

よって, $X$ に対する推定値 $\hat{X}$ は式(2.23)により算出される.また,図-2.3にも示すとおり,回帰係数 $B_{mode}^{LSE}$ は,モード分解により抽出したモード $r$ における全節点・全要素での全物理量に対応する時間発展を表している.

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \Psi B_{mode}^{LSE} \\ &= \Psi \left[ (\Psi^K)^T \Psi^K \right]^{-1} (\Psi^K)^T X^K \end{aligned} \quad (2.23)$$

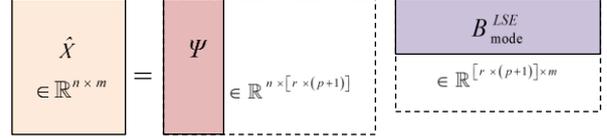


図-2.3 代替モデルの関係式概念図

(4) 代替モデルにより得られた推定値 $\hat{X}$ の分散の算出  
 本研究における代替モデルは,推定値 $\hat{X}$ と入力変数との関係を線形回帰により結び付けている.このため,期待値の性質から,推定値 $\hat{X}$ の分散を解析的に求めることができる.

式(2.22)で算出した回帰係数 $B_{mode}^{LSE}$ を,図-2.4のように各モードについて区分し,各モードにおけるベクトルの第 $p$ 行をそれぞれ抜き出して行方向へまとめた行列を $B_{PCA,p}^{LSE}$  ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )とすると,推定値 $\hat{X}$ の分散は,式(2.24)により求めることができる.

式(2.24)の導出根拠は付録Bに示す.

$$Var[\hat{X}] = \sum_{i=1}^{p+1} \lambda_i (\Phi B_{PCA,i}^{LSE})^2 \quad (2.24)$$

ここに

$Y^{*2}$  : 行列 $Y$  ( $\in \mathbb{R}^{i \times j}$ )の自身とのHadamard積

$$\left( := Y \circ Y := [Y_{ij}^2]_{\substack{1 \leq i \leq I \\ 1 \leq j \leq J}} \right) (\in \mathbb{R}^{I \times J})$$

$B_{PCA,p}^{LSE}$  :  $B_{mode}^{LSE}$ を各モードに区分したベクトルの第 $p$ 行を抜き出し,行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )

$\lambda_i$  :  $p$ 個の入力変数と1からなるベクトル $\zeta$ の共分散行列の固有値

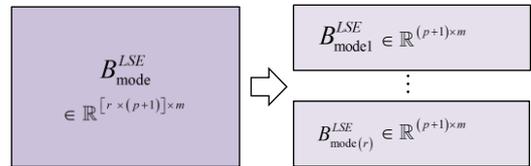


図-2.4 回帰係数のモード毎の区分

(5) 代替モデル構築のまとめ  
 ここまでの説明を踏まえ,代替モデル構築の手順とイメージを図-2.5に示す.

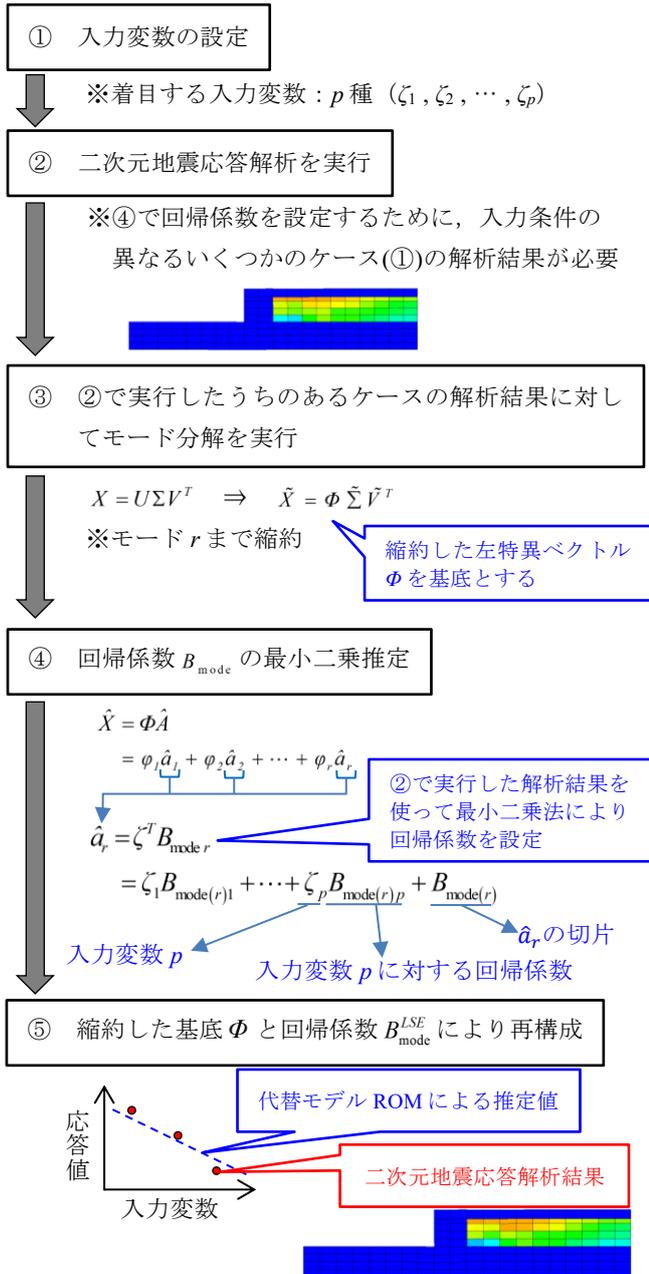


図-2.5 代替モデル構築のイメージ

$$X = \begin{bmatrix} Dx_{11} & \dots & Dx_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Dx_{n_p,1} & \dots & Dx_{n_p,m} \\ \hline Dy_{11} & \dots & Dy_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Dy_{n_p,1} & \dots & Dy_{n_p,m} \\ \hline Wp_{11} & \dots & Wp_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Wp_{n_p,1} & \dots & Wp_{n_p,m} \end{bmatrix} \quad (\in \mathbb{R}^{(2n_p+n_e) \times m}) \quad (2.25)$$

ここに

$Dx$  : 解析により得られた水平変位

$Dy$  : 解析により得られた鉛直変位

$Wp$  : 解析により得られた過剰間隙水圧比

ここでは, 例題として, 図-2.6に示す解析モデル図(節点数  $n_p=210$ , 要素数  $n_e=145$ ), 図-2.7に示す地震波形(時間ステップ数  $m=4000$ )での二次元地震応答解析結果を対象とする. つまり,  $565$ 行( $=2n_p \times n_e$ ) $\times 4000$ 列,  $565$ の次元を有する行列  $X$  を対象として, モード分解についての解説をする. なお, 二次元地震応答解析のツールとしては, 港湾施設の耐震性能照査として実績の多いFLIP<sup>67)</sup>を使用し, 以降の説明では, 二次元地震応答解析のことをFLIPと呼称する. また, 埋土の等価N値は10, 原地盤の等価N値は25として解析を実行する.

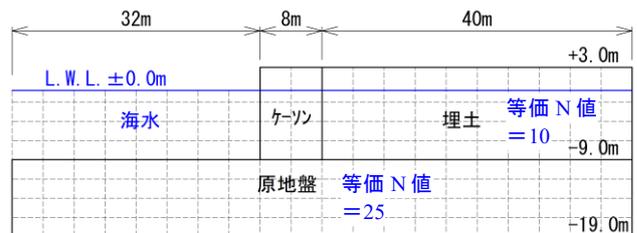


図-2.6 解析モデル(例題)

## 2.4 簡単な例題を用いた概説

### (1) モード分解

#### a) 検討条件

本研究では, 二次元地震応答解析により得られた応答値に対して, モード分解を行う. ここで示す例題では, モード分解に使用する物理量として, 水平変位・鉛直変位・過剰間隙水圧比を対象とする. これらの物理量の全節点・全要素, かつ, 全時間ステップにおける応答値を対象とする. 節点数  $n_p$ , 要素数  $n_e$ , 時間ステップ数  $m$  としたとき, モード分解に使用する行列  $X$  は式(2.25)のとおりとなる.

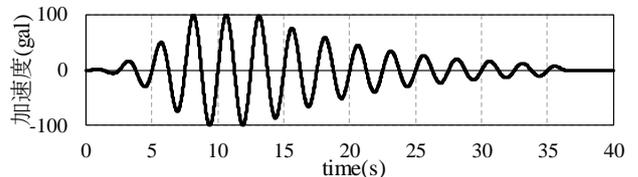


図-2.7 地震波形(例題)

#### b) 特異値分解および寄与率算出

行列  $X$  を前述の式(2.1)を使って特異値分解し, それにより得られた特異値から寄与率を算出する(式(2.12)). 算出した寄与率を表-2.1および図-2.8に示す. この結果が

ら、モード1のみで分解前の行列  $X$  の9割程度の情報を有していることがわかる。次に、算出した寄与率の高い順に、モード1～3までの応答値の空間分布の確認を行う。図-2.9は各モードで再構成した空間分布のスナップショット(残留値)を示したものである。図-2.9 (b), (c)のとおり、モード2およびモード3ではごく微小な過剰間隙水圧比の上昇のみが表現されている。このことから、モード2およびモード3が有している情報量は、モード1が有している情報量に比べてごくわずかであることが言える。

表-2.1 寄与率および累積寄与率

	mode1	mode2	mode3	mode4	mode5
寄与率	96.1%	2.0%	1.0%	0.3%	0.2%
累積寄与率	96.1%	98.1%	99.1%	99.4%	99.5%

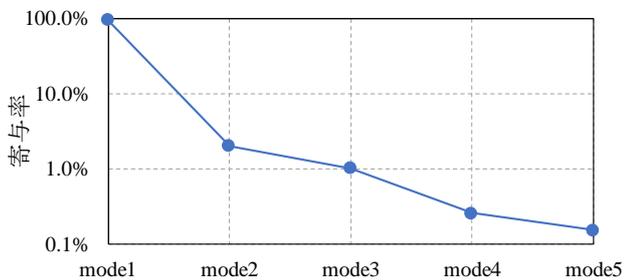


図-2.8 寄与率

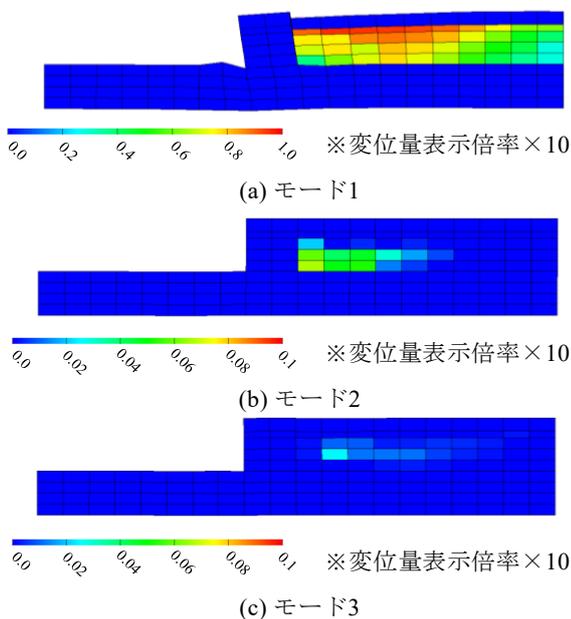


図-2.9 スナップショット(残留値)

続いて、各モードにおける応答値の時間発展に着目する。着目する物理量は水平変位・鉛直変位・過剰間隙水圧比の3つとし、それぞれの時刻歴応答値を図-2.10に示す位置で確認する。ここでは、モード1～3までの個別の応答値と、FLIPによる解析結果を比較する。図-2.11に各モードが示

す時刻歴応答値を示す。各物理量において、応答値の主要な時間発展は、モード1のみで表現できていることがわかる。一方で、最終時刻に至るまでの過程に着目すると、モード1での応答値はFLIPでの応答値に対して、振動の大小や位相にズレが見られる。これに対して、モード2およびモード3に着目すると、時間発展の過程において、モード1のみでは表現できていない振動成分を表現していることがわかる。

モード分解を行う際に、必要なモード数を判断する上では、寄与率やある時刻における空間分布を確認するのみではなく、応答値の時間発展も確認することが望ましいことが、この結果からわかる。

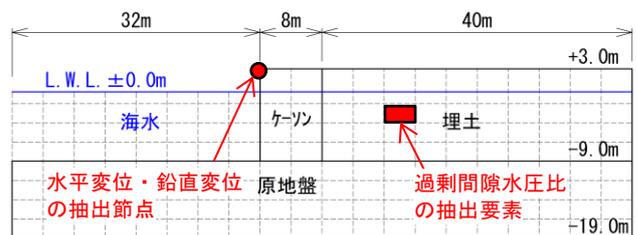


図-2.10 解析結果時刻歴抽出点

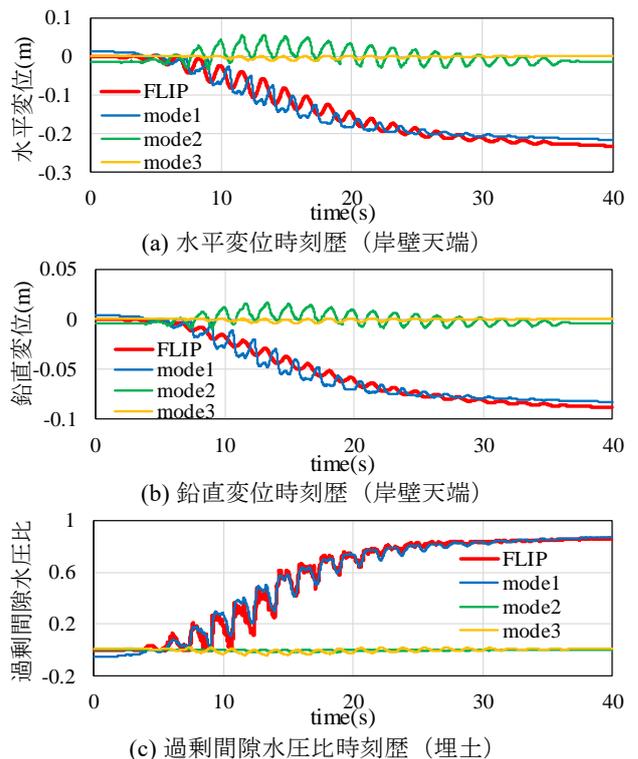


図-2.11 時刻歴応答値

c) 各モードの再構成

ここまでの検討結果を受け、ここではモード1～3までの左特異ベクトル・特異値・右特異ベクトルを使って、行列  $X$  を再構成することを考える。なお、式(2.9)で行列の中

心化を行っているため、再構成の際には時間ステップ平均行列  $\bar{X}$  を加算する必要がある。図-2.12はモード分解を行うことにより、次元数3まで線形次元削減を行ったイメージである。図-2.13はモード1~3までを再構成した結果の時刻歴応答値を示し、図-2.14は最終時刻におけるスナップショットを示す。これらの結果より、再構成した結果がFLIPでの時刻歴応答値ならびに、応答値の空間分布をよく表現できている。つまり、この例題では本来565の次元を有していた行列を、モード分解により、次元数3までに線形次元削減しても同等の精度で各応答を表現できるということがわかる。

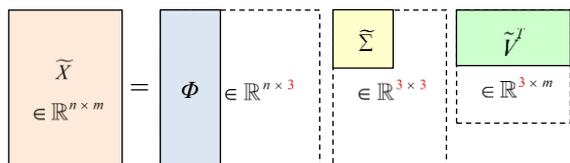


図-2.12 例題におけるモード分解のイメージ

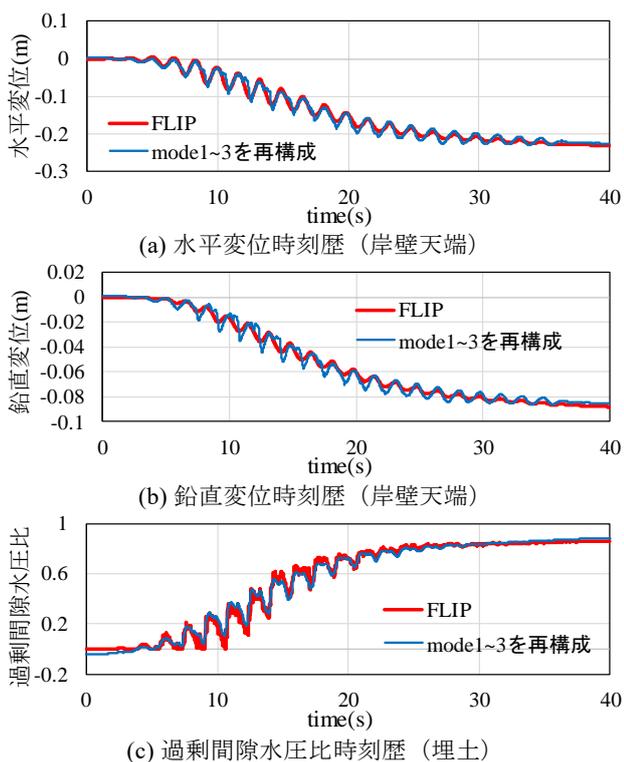


図-2.13 モード再構成

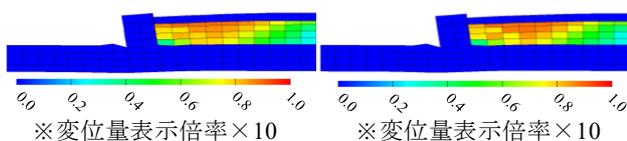


図-2.14 スナップショット (残留値)

(2) 代替モデルの構築

a) 検討条件

代替モデル (Reduced Order Model, ROM) の構築には、入力変数の異なるいくつかのFLIP解析結果が必要となる。本来、代替モデルを構築するにあたっては、どの入力変数に着目するか、その入力変数のばらつきをどう考えるか等が重要であるが、ここでは例題を簡易な問題にするために、着目する入力変数は等価N値のみとする。また、等価N値は平均  $\mu=15$ 、標準偏差  $\sigma=2.5$  とし、 $\mu-\sigma$ 、 $\mu$ 、 $\mu+\sigma$ の3ケースのFLIP解析結果を用いて、代替モデルを構築することを考える。

b) 二次元地震応答解析結果

等価N値を入力変数として、 $\mu-\sigma$ 、 $\mu$ 、 $\mu+\sigma$ の3ケースのFLIP解析を実行する。各ケースのFLIP解析による残留値を表-2.2に示す。

表-2.2 各ケースの解析結果 (残留値)

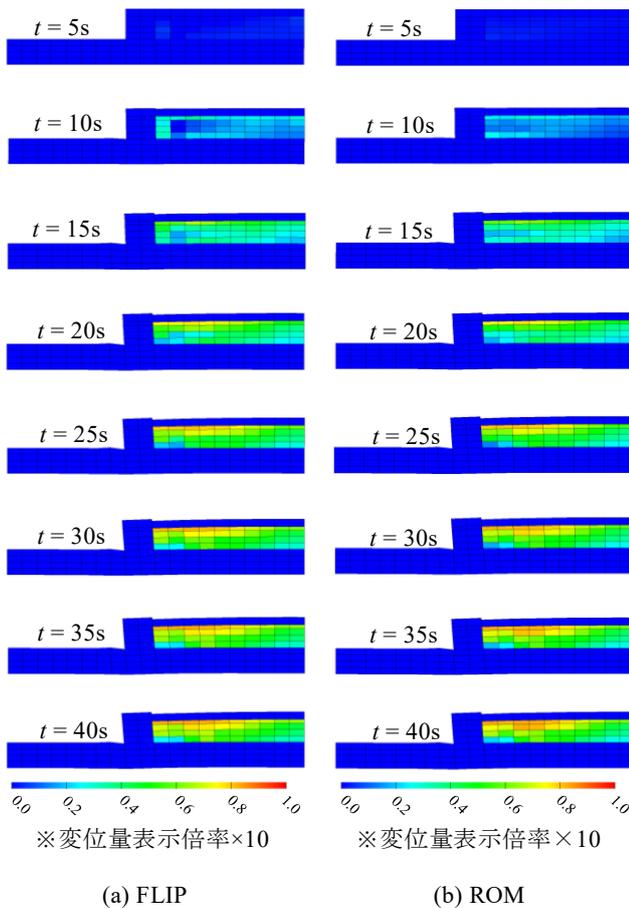
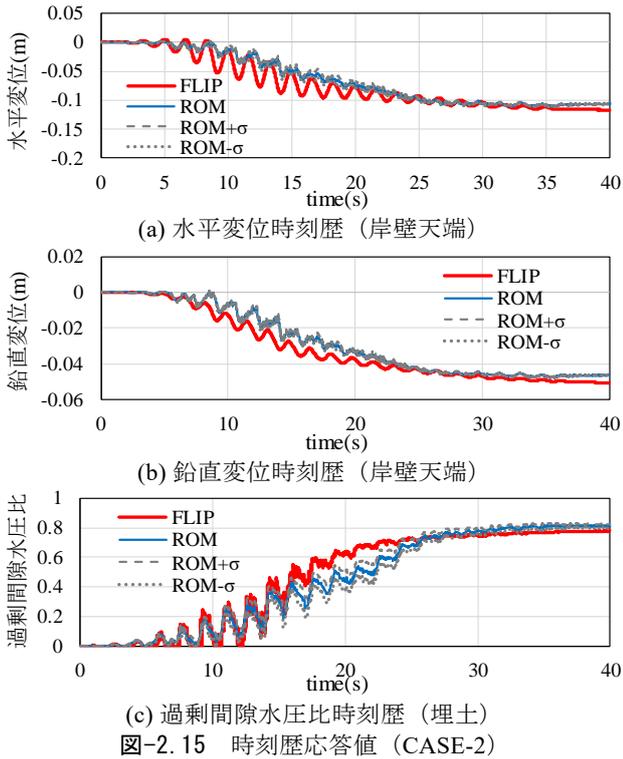
解析ケース	等価N値	残留水平変位(m)	残留鉛直変位(m)
CASE-1	$\mu-\sigma$	0.126	0.054
CASE-2	$\mu$	0.117	0.051
CASE-3	$\mu+\sigma$	0.096	0.043

c) 代替モデルの構築結果

FLIPによる解析結果を用いて構築した代替モデル (以後、ROMと呼称する。)による推定結果を以下より示す。なお、ここで示すROMでは、CASE-2に対するモード分解によりモード3までに縮約した左特異ベクトル  $\Phi$  を基底とし、回帰係数はCASE-1~3の解析結果から設定している。まず、表-2.3に各物理量の残留値を示す。FLIPとROMそれぞれにおける応答値を比較すると、変位量で0.01m程度、過剰間隙水圧比で0.03程度の違いしか生じておらず、ROMにより精度良く各応答値の推定が出来ていると言える。また、図-2.15および図-2.16に示すように、本手法の最大の利点は、空間的情報および時間的情報を損なうことなく、各種応答値の推定が可能である。対象とする解析モデルに対して一度ROMを構築してしまえば、入力変数 (本節で示す例題では等価N値) が異なる場合における応答値の空間分布ならびに時間発展を瞬時に推定することができる。

表-2.3 FLIPとROMの各物理量の残留値

	FLIP	ROM	差分 (ROM - FLIP)
水平変位(m)	0.117	0.106	-0.011
鉛直変位(m)	0.051	0.046	-0.005
過剰間隙水圧比	0.778	0.809	+0.031



### 3. モード分解に関わる各種検討

#### 3.1 検討条件

##### (1) 二次元地震応答解析手法

本研究では、港湾施設の耐震性能照査として実績の多い FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) <sup>6)</sup>を用いる。また、FLIPにおけるマルチスプリング要素が依拠する構成則は「従来法」を選択し、応力-ひずみ関係の非線形反復計算法も同様に「従来法」を選択する。

構成則として「従来法」を選択した理由は、既往の被災事例との再現性にある。FLIPはこれまでに、既往の被災事例との再現検証<sup>8)</sup>が行われてきており、構成則は「従来法」「tmp3法」「tmp7法」と改良されてきている。重力式岸壁の代表的な被災事例として挙げられる神戸港(1995年兵庫県南部地震)では、FLIPによる解析結果と被災事例との再現検証<sup>8)</sup>が行われ、「従来法」により再現性が確認されている。本研究では、神戸港で生じたような、液状化を伴う比較的大きな変位量が生じ得る解析を想定していることから、構成則および応力-ひずみ関係の非線形反復計算法は「従来法」を選択することとした。

##### (2) 解析モデル

本研究でFLIPを実施する構造形式は重力式岸壁(ケーソン式岸壁)を対象とし、解析モデルは図-3.1に示すとおりとする。一般に解析領域は、対象施設の幅の3~5倍が必要とされているが、1995年兵庫県南部地震において岸壁法線から背後100m程度の範囲まで側方流動の影響が見られたことから、岸壁法線から背後100mまでの範囲を解析領域とする。また、岸壁背後の埋土ならびに岸壁直下の原地盤①②はともに砂質土層として扱うものとする。

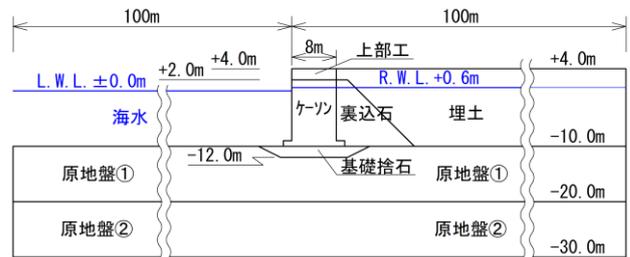


図-3.1 解析モデル図

##### (3) 解析パラメータ

FLIPに使用する解析パラメータは簡易設定法(初版)<sup>9)</sup>により設定する。簡易設定法(初版)<sup>9)</sup>は、N値・有効上載圧 $\sigma_v'$ ・細粒含有率Fcの3つの土質定数のみで、解析に必要な解析パラメータを設定する方法である。表-3.1に解析

パラメータを示す。なお、以降の検討で、地盤強度の強弱がモード分解に及ぼす影響を検証するために、ここでは等価N値（有効上載圧65kN/m<sup>2</sup>に相当するN値（N<sub>65</sub>））を5, 10, 15の3種類のパラメータセットを設定している。また、細粒分含有率Fcは10（%）で固定値とする。

表-3.1 解析パラメータ

(a) 動的変形特性

等価N値	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fc (%)	動的変形特性			
			$\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	G <sub>ma</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	K <sub>ma</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi_f$ (°)
5	65	10	98	55868	145695	38.49
10	65	10	98	84518	220411	39.67
15	65	10	98	109119	284565	40.59

(b) 液状化パラメータ

等価N値	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fc (%)	液状化パラメータ					
			$\phi_p$ (°)	S <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>
5	65	10	28	0.005	6.456	0.5	1.013	1.600
10	65	10	28	0.005	11.520	0.5	0.911	1.300
15	65	10	28	0.005	20.560	0.5	0.809	1.000

(4) モード分解に用いる物理量

FLIPによる解析結果として出力される数値には、加速度・速度・変位・応力・ひずみ・過剰間隙水圧比等、種々の種類がある。モード分解の対象とする物理量は任意に設定することができ、解析の目的に応じてどの物理量を選択するかを判断する必要がある。一般的に、FLIPでの解析結果を設計で用いる場合、変位量に着目して判断することが多いため、水平変位・鉛直変位はモード分解の対象とする。さらに、過剰間隙水圧比やせん断ひずみの応答値の空間分布を確認することも多い。ここでは、本研究においてモード分解の対象とする物理量を判断するために、(a) 水平変位および鉛直変位のみでモード分解した場合、(b) 過剰間隙水圧比を加えてモード分解した場合、(c) せん断ひずみを加えてモード分解した場合における、寄与率や各モードでの応答値への影響を試算する。

表-3.2に寄与率を示し、図-3.2に各モードでの時刻歴応答値を示す。なお、ここで着目する応答値は水平変位とした。ここで試算した解析結果のように応答値が微小なケースに対しては、(a)のように変位のみでモード分解を行うと比較的低い寄与率が算出される場合がある。これに対し、(b)のように過剰間隙水圧比を加えてモード分解を行うと寄与率が上昇し、さらに図-3.2に示すように、応答値もモード1に集約されている。一方で、(c)のようにせん断ひずみを加えてモード分解を行った結果、寄与率や時刻歴応答値は(a)のものほとんど変わらない結果が得られた。

以上より、本研究でのモード分解の対象とする物理量は水平変位、鉛直変位、過剰間隙水圧比の3つとする。なお、

ここで対象とした物理量は、あくまで本研究において必要と判断したものを選択したに過ぎず、今後の検討においてもせん断ひずみ等のその他の物理量が不要と断定しているわけではないことに留意されたい。

表-3.2 寄与率の比較

モード分解の対象物理量	寄与率		
	mode-1	mode-2	mode-3
(a) 変位のみ	69.5 %	18.7 %	6.5 %
(b) 変位&過剰間隙水圧比	90.9 %	3.2 %	2.8 %
(c) 変位&せん断ひずみ	69.7 %	18.7 %	6.5 %

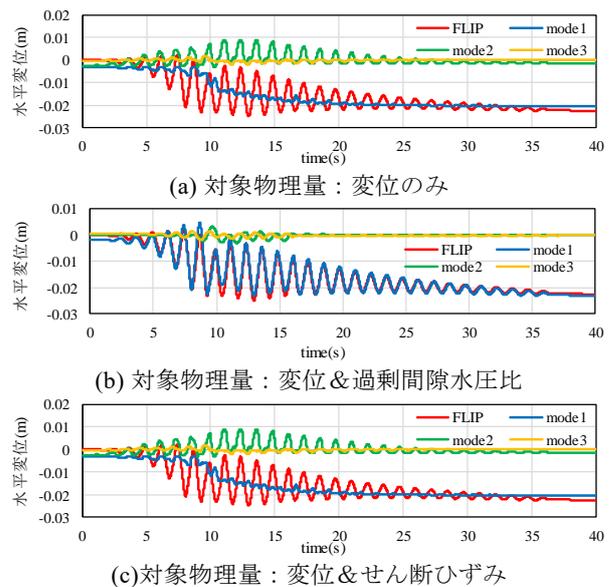


図-3.2 各モードにおける水平変位時刻歴

3.2 各種条件の違いがモード分解へもたらす影響の検証

本研究で対象としている解析モデル（重力式岸壁）において、各種条件の違いがモード分解へもたらす影響を検証する。ここでは、①地盤強度の強弱、②液状化発生の有無、③地震動の違い の3項目に着目する。

(1) 条件①（地盤強度の強弱）

地盤強度の強弱がモード分解にもたらす影響の検証として、等価N値（有効上載圧65kN/m<sup>2</sup>に相当するN値（N<sub>65</sub>））5, 10, 15の3種類を対象にモード分解を行う。解析パラメータは表-3.1に示すとおりである。なお、埋土および原地盤①②はいずれもケースごとに同一の地盤強度として与えている。

(2) 条件②（液状化発生の有無）

液状化発生の有無がモード分解にもたらす影響の検証として、図-3.3に示す液状化対象層の配置（3種類）を対象にモード分解を行う。ここで、非液状化層は解析パラメー

タのうち、動的変形特性は変えずに液状化パラメータのみ無効として解析を行う。

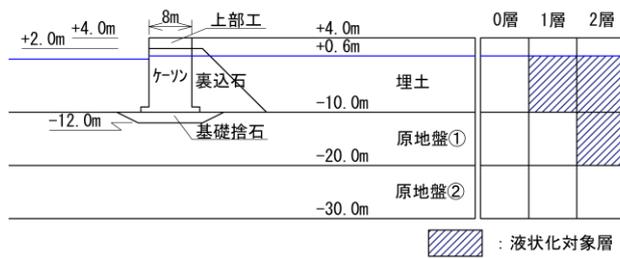


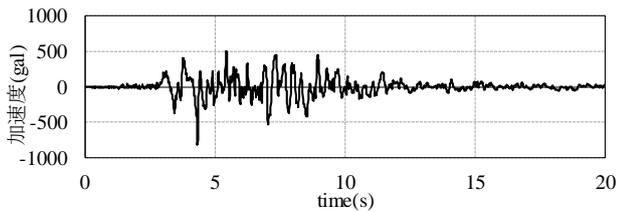
図-3.3 液状化対象層

(3) 条件③ (地震動の違い)

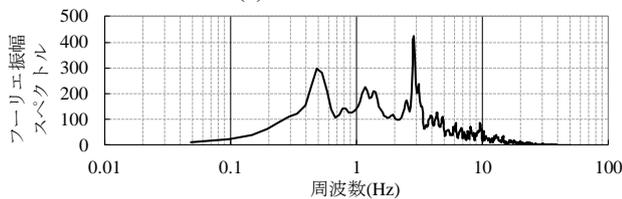
地震動の違いがモード分解にもたらす影響の検証として、最大加速度・卓越周波数・速度PSI値の異なる3波形を対象にモード分解を行う。対象とする波形は、既往研究<sup>10)</sup>で用いられている代表的な波形を選択することとし、内陸直下型地震として神戸波(図-3.4)、海溝型地震として八戸波(図-3.5)、大船渡波(図-3.6)を対象とする。対象地震動の最大加速度・卓越周波数・速度PSI値を表-3.3に示す。

表-3.3 対象地震動

波形名称	最大加速度 (gal)	卓越周波数 (Hz)	速度PSI値 (cm/s <sup>1/2</sup> )
神戸波	816.99	2.88	85.041
八戸波	209.89	0.39	30.185
大船渡波	275.13	2.34	12.802

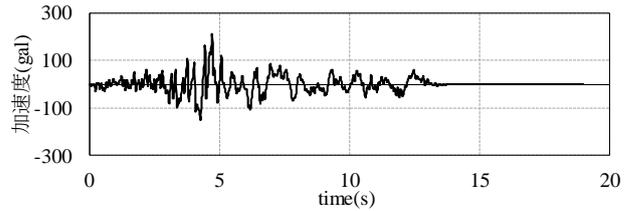


(a) 時刻歴波形

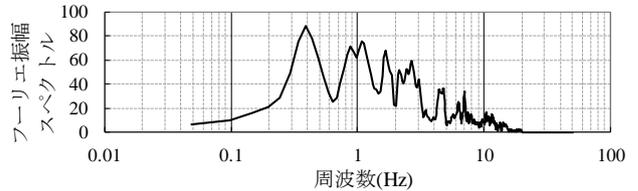


(b) フーリエスペクトル図

図-3.4 神戸波

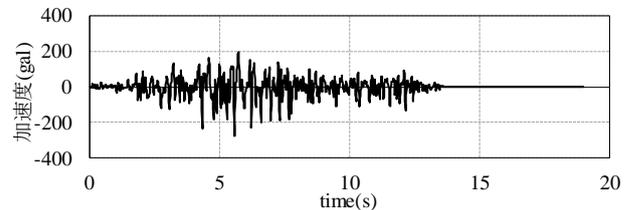


(a) 時刻歴波形

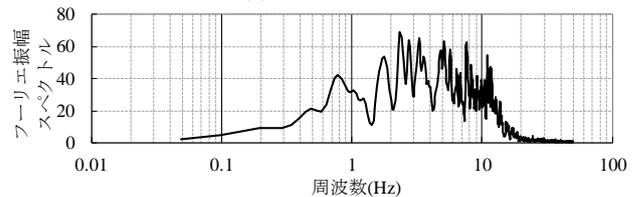


(b) フーリエスペクトル図

図-3.5 八戸波



(a) 時刻歴波形



(b) フーリエスペクトル図

図-3.6 大船渡波

(4) 検証結果 (寄与率)

各種条件の違いとして、①地盤強度の強弱(3種類)、②液状化発生の有無(3種類)、③地震動の違い(3種類)の計27ケースに対してモード分解を実施し算出した寄与率を表-3.4および図-3.7に示す。この結果から、条件の違いの影響を受けず、いずれの条件においてもモード1に多くの情報量(最小でも寄与率80.8%(CASE2-6))が集約されていることがわかる。同様に、モード2の寄与率に着目すると、いくつかのケースで寄与率10%を上回ることから、条件によってはモード2の有する情報が重要となる可能性がある。一方で、モード3以降の寄与率に着目すると、ほとんどのケースにおいて寄与率が1%未満であり、施設の挙動を把握する上では重要な情報を多く有してはいないと解釈することができる。

続いて、次項からは各モードが示す力学的意味について考察する。

表-3.4 各ケースの寄与率

ケース	等価N値	液状化対象層	地震動	寄与率				
				mode-1	mode-2	mode-3	mode-4	mode-5
CASE1-1	5	0層	神戸波	97.6%	1.8%	0.3%	0.1%	0.1%
CASE1-2	5	1層	神戸波	92.1%	4.2%	2.5%	0.5%	0.2%
CASE1-3	5	2層	神戸波	96.7%	2.2%	0.4%	0.2%	0.1%
CASE1-4	10	0層	神戸波	98.1%	1.4%	0.3%	0.1%	0.0%
CASE1-5	10	1層	神戸波	93.0%	3.5%	2.0%	0.5%	0.3%
CASE1-6	10	2層	神戸波	92.2%	4.7%	1.0%	0.6%	0.2%
CASE1-7	15	0層	神戸波	92.2%	1.3%	0.3%	0.1%	0.0%
CASE1-8	15	1層	神戸波	91.9%	4.6%	1.3%	0.6%	0.5%
CASE1-9	15	2層	神戸波	87.5%	6.5%	2.0%	1.1%	0.6%
CASE2-1	5	0層	八戸波	95.5%	3.7%	0.6%	0.1%	0.1%
CASE2-2	5	1層	八戸波	97.5%	0.9%	0.7%	0.3%	0.1%
CASE2-3	5	2層	八戸波	85.0%	11.4%	1.1%	0.5%	0.3%
CASE2-4	10	0層	八戸波	96.3%	3.1%	0.4%	0.1%	0.1%
CASE2-5	10	1層	八戸波	96.8%	1.4%	0.6%	0.4%	0.2%
CASE2-6	10	2層	八戸波	80.8%	11.9%	2.1%	1.4%	0.9%
CASE2-7	15	0層	八戸波	96.4%	2.9%	0.4%	0.2%	0.1%
CASE2-8	15	1層	八戸波	95.9%	1.6%	1.4%	0.3%	0.1%
CASE2-9	15	2層	八戸波	85.7%	8.1%	2.0%	1.6%	0.6%
CASE3-1	5	0層	大船渡波	94.2%	4.3%	0.9%	0.3%	0.1%
CASE3-2	5	1層	大船渡波	97.5%	1.2%	0.5%	0.3%	0.1%
CASE3-3	5	2層	大船渡波	85.7%	11.4%	0.8%	0.3%	0.2%
CASE3-4	10	0層	大船渡波	94.7%	4.0%	0.8%	0.3%	0.1%
CASE3-5	10	1層	大船渡波	97.3%	1.3%	0.6%	0.3%	0.2%
CASE3-6	10	2層	大船渡波	85.2%	9.5%	1.8%	0.7%	0.6%
CASE3-7	15	0層	大船渡波	94.9%	3.9%	0.7%	0.2%	0.1%
CASE3-8	15	1層	大船渡波	96.8%	1.4%	0.8%	0.3%	0.2%
CASE3-9	15	2層	大船渡波	89.8%	5.9%	1.5%	0.9%	0.3%

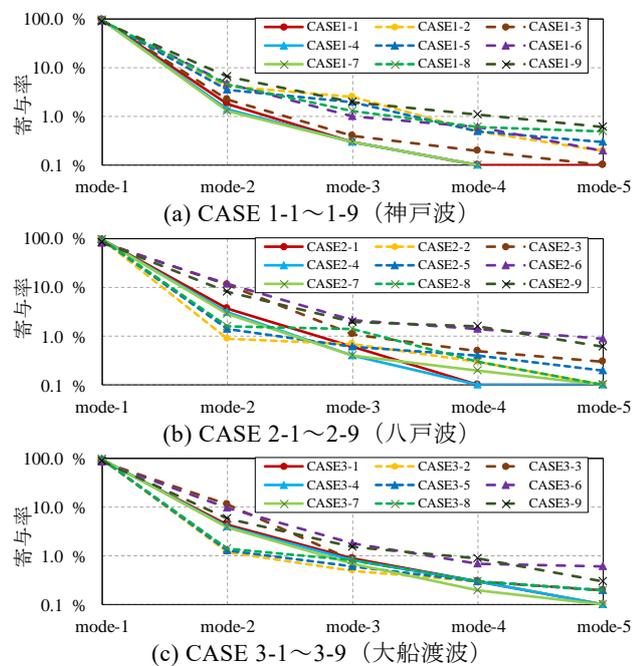


図-3.7 各ケースの寄与率

(5) 検証結果 (時刻歴応答値および応答値の空間分布)

ここからは、CASE1-2を代表ケースとして、代表ケースにおける時刻歴応答値および応答値の空間分布に着目した結果の考察を行う。CASE1-2以外のケースの結果は付録Cに示す。

a) 時刻歴応答値の比較

まず、FLIPでの時刻歴応答値と各モードが示す時刻歴応答値を比較する。それぞれの時刻歴応答値(岸壁天端における水平変位・鉛直変位、岸壁本体の傾斜角、埋土における過剰間隙水圧比)を図-3.9に示す。それぞれの時刻歴応

答値の抽出点は図-3.8に示す位置とした。寄与率の結果と同様の傾向で、モード1のみでFLIPでの解析結果の主要な応答は良く表現されていることがわかる。一方で、モード2では各物理量において  $t = 4 \sim 8s$  付近で発生している振動を表現しており、モード3では全時刻歴でほとんど応答の変化が見られない。

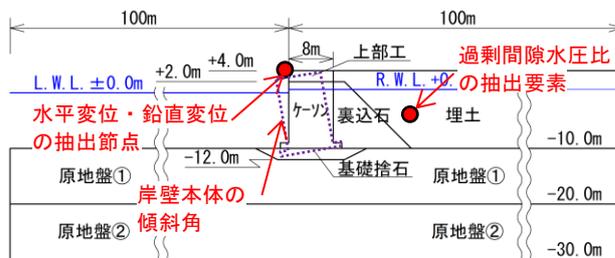


図-3.8 応答値確認項目

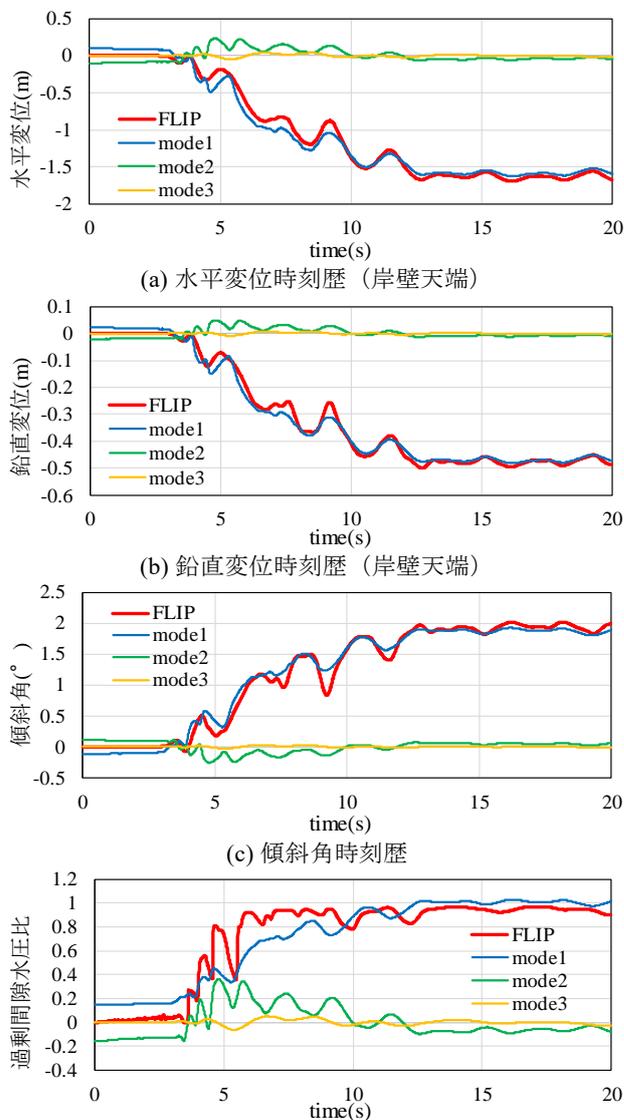


図-3.9 時刻歴応答値

b) 応答値の空間分布の比較

次に、解析領域内での応答値の空間分布の確認を行う。主要な時間ステップにおける、FLIPでの解析結果のスナップショットと、モード1～3をそれぞれ抽出して出力したスナップショットを図-3.10に示す。なお、カラーコンターは過剰間隙水圧比の大小を示している。

まず、FLIPでの解析結果では、 $t=4s$ 付近から過剰間隙水圧比が上昇し始め、その後 $t=6\sim 8s$ にかけて急激に過剰間隙水圧比が上昇し、最終時刻( $t=20s$ )に向けて埋土全域で過剰間隙水圧比が1.0に近い値を維持し続ける。

これに対し、モード1のみを抽出した結果に着目すると、 $t=4s$ 付近から過剰間隙水圧比が上昇し始める傾向はFLIPと同様であるが、 $t=6\sim 8s$ にかけて、FLIPの解析結果に比べて過剰間隙水圧比は小さい値を示す。この時間帯では、FLIPによる過剰間隙水圧比は大きく振動しているが、モード1ではその振動には完全に追随せずに緩やかに過剰間隙水圧比が上昇している。また、この緩やかな過剰間隙水圧比の上昇に合わせて、岸壁本体の変位も緩やかに増加している。しかし、 $t=12s$ 以降はFLIPの解析結果と同様に過剰

間隙水圧比は1.0に近い値で維持され続けることがわかる。つまり、モード分解により抽出したモード1の過剰間隙水圧比は、FLIPの解析結果に比べて上昇速度こそ遅いものの、最終的にはFLIPの解析結果と同等の値を埋土全域で表現できるということがわかる。また、岸壁本体の変位についても同様に、FLIPの解析結果と同等の応答を表現できていることがわかる。

続いて、モード2のみを抽出した結果に着目する。モード2では $t=4\sim 8s$ にかけて過剰間隙水圧比が一度0.3程度まで上昇するが、その後は過剰間隙水圧比の上昇は見られない。岸壁本体の変位についても同様の傾向であり、 $t=4\sim 8s$ にかけてわずかな変位が見られるが、その後は元の位置に留まる。ここで、 $t=4\sim 8s$ は図-3.4に示す対象地震動(神戸波)の主要動が発生する時刻に概ね一致する。このことから、モード2では地震動の主要動付近における岸壁本体の振動、ならびに、埋土の過剰間隙水圧比の一次的な上昇が表現されていることがわかる。

最後に、モード3のみを抽出した結果に着目する。モード3での過剰間隙水圧比は、モード2よりもさらに微小な上昇

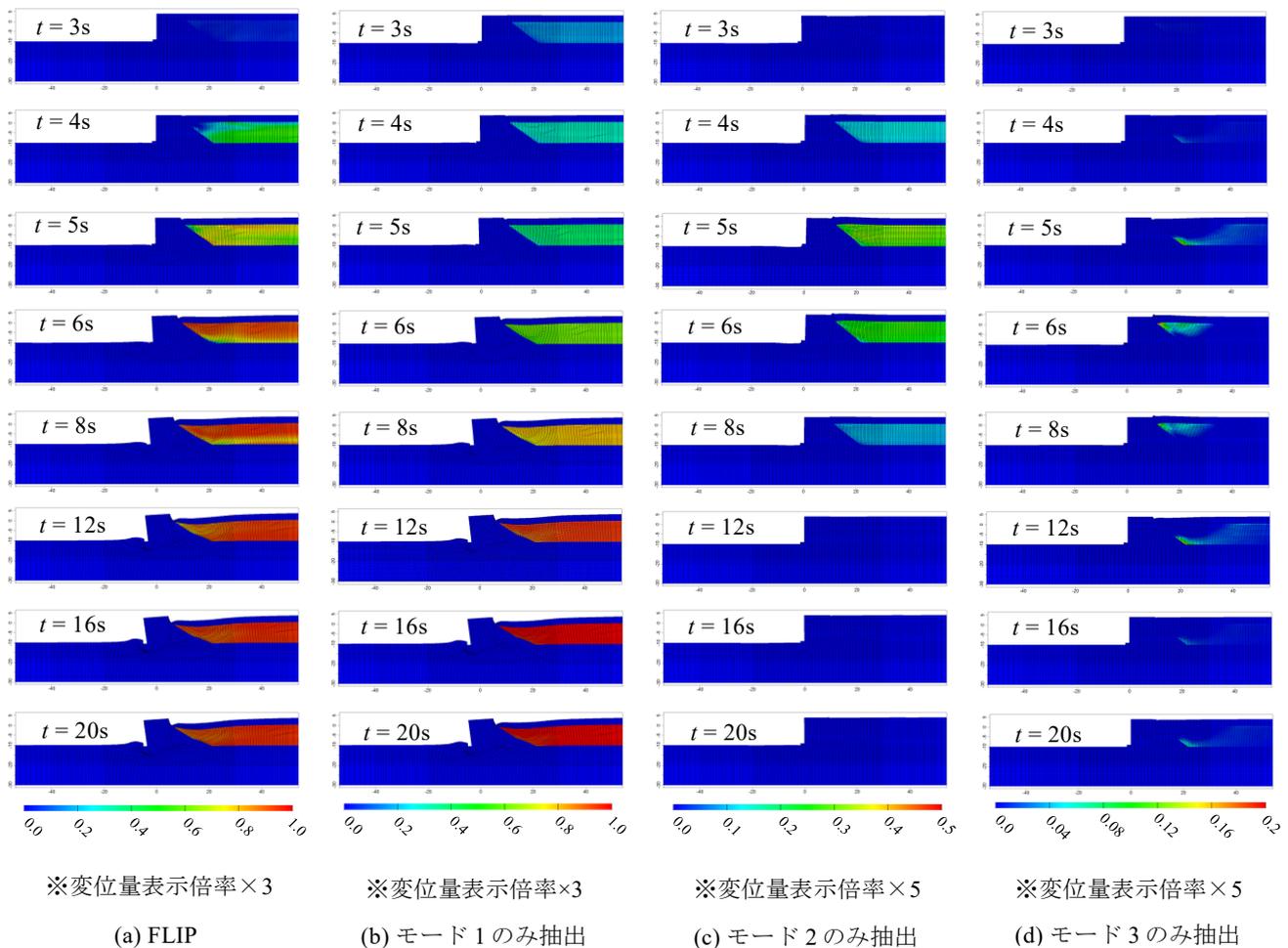


図-3.10 解析結果のスナップショット

を示しており、かつ、その上昇は埋土全域に発生するものではなく、局所的に発生している。このことから、モード3では、局所かつ微小な過剰間隙水圧比の上昇を表現されていることがわかる。

c) 各モードが示す応答の解釈のまとめ

各モードの応答値の時刻歴および空間分布から、各モードが示す応答の解釈をまとめる。

まず、モード1が表している応答をまとめる。図-3.11に示すとおり、過剰間隙水圧比の上昇に連動するように、岸壁本体も海側に移動している。また、過剰間隙水圧比の上昇は埋土全域で生じている。ここで、一般に埋土や原地盤の液化化が進行すると、地盤の流動等に伴い岸壁本体の変位が大きくなり、モード1では、そのような挙動が表れている。このことから、モード1は、継続する地震動の入力により背後埋土の過剰間隙水圧比が徐々に上昇し、地盤が液化化または軟化することに伴う岸壁本体の海側への変位の時間発展を、解析領域全域で表現していると解釈できる。

続いて、モード2が表している応答をまとめる。図-3.12に示すように、おおよそ $t=4\sim 8$ sにおいて変位および過剰間隙水圧比の変動が見られる。ここで、岸壁本体の変位が陸側に向けて生じたときに過剰間隙水圧比は上昇し、岸壁本体の変位が海側に向けて生じたときに過剰間隙水圧比の下降が見られる。また、過剰間隙水圧比の変動は、埋土全域で生じている。以上より、モード2では、岸壁本体の振動と、それと同位相で生じる過剰間隙水圧比の上昇・下降を、解析領域全域で表現されていると解釈できる。

最後に、モード3が表している応答をまとめる。図-3.13に示すように全時刻歴において微小な応答の変動が表れている。また、この応答の変動は埋土全域に発生するものではなく、局所的に発生している。過剰間隙水圧比の上昇は埋土全域において一律ではなく、局所的な応答は生じ得る。しかし、モード1およびモード2のように、明確に力学的な解釈をすることは難しい。

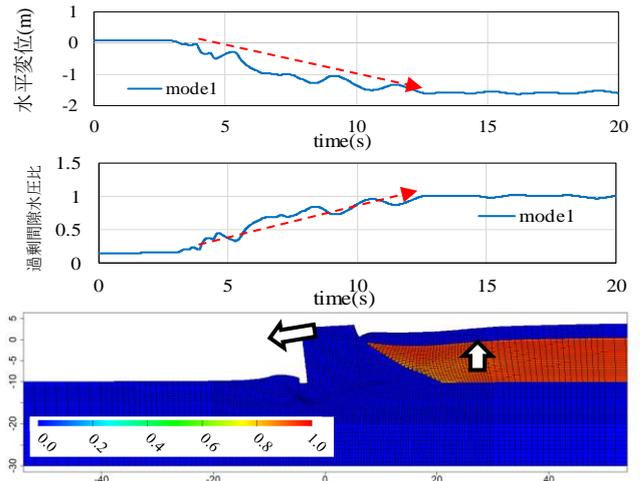


図-3.11 モード1が示す挙動

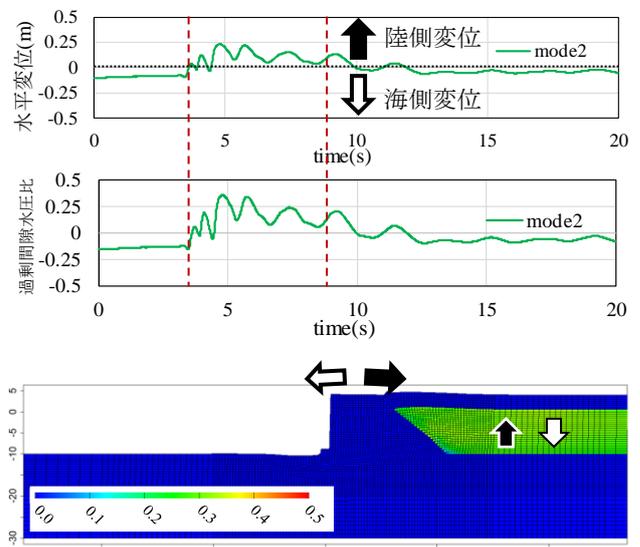


図-3.12 モード2が示す挙動

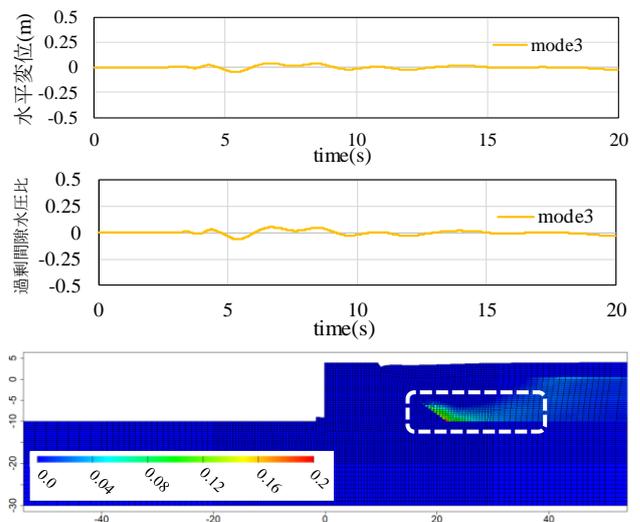


図-3.13 モード3が示す挙動

### (6) 線形次元削減とモード再構成

本章では、各モードが示す力学的意味や情報量の大小について検証した。検証の結果、モード1は過剰間隙水圧比の上昇に伴う岸壁本体の海側への変位の時間発展を、解析領域全域で表現していることがわかった。一方で、モード2は岸壁本体の振動と、それに伴い生じる過剰間隙水圧比の上昇・下降を、解析領域全域で表現しており、モード3は局所的かつ微小な過剰間隙水圧比の上昇を表現していることがわかった。代替モデルの構築に採用するモード数は、解析目的に応じて選択すべきである。本研究で対象としている重力式岸壁では、主に岸壁本体の挙動を把握することが重要であり、埋土部分における局所的な応答は不要であると考え、モード2までを用いることとした。図-3.14に、モード1とモード2で再構成した応答値の時刻歴を示す。

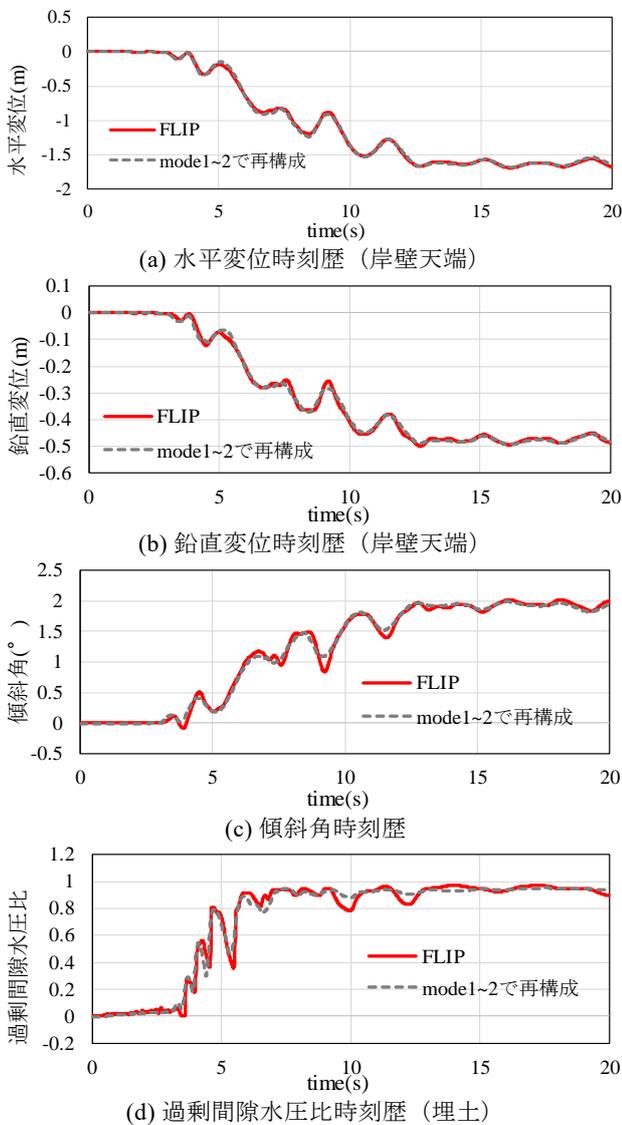


図-3.14 時刻歴応答値

### 3.3 モード分解の適用性に関するまとめ

本章では、重力式岸壁を対象としたFLIPでの解析結果を使ったモード分解を行うとともに、各種条件の違い（①地盤強度の強弱、②液状化発生の有無、③地震動の違い）がモード分解へもたらす影響について検証を行った。本章で得られた主な結果を以下に示す。

#### (1) 各種条件の違いによるモード分解への影響

本章では、各種条件の違いによるモード分解へもたらす影響の検証として、寄与率の比較を行った。その結果、いずれの条件においても、寄与率はモード1のみで80%以上を示しており、モード2までの寄与率の累積値（累積寄与率）も90%以上を示している。

#### (2) 各モードの解釈

モード分解により分解された各モードの応答値とFLIPでの応答値の比較として、応答値の時間発展および空間分布を確認した。

この結果、モード1では、過剰間隙水圧比の上昇に伴う岸壁本体の海側への変位の時間発展を、解析領域全域で表現されていると解釈できる。また、応答値の時間発展および空間分布ともに、モード分解前の応答値（FLIP）の主要な応答を表現していることがわかった。

次に、モード2では、岸壁本体の振動と、それに伴い生じる過剰間隙水圧比の上昇・下降を、解析領域全域で表現されていると解釈できる。

最後に、モード3はモード2よりもさらに微小な過剰間隙水圧比の上昇を示しており、変位量はほとんど見られない。さらに、過剰間隙水圧比の上昇は、埋土全域に及ぶものではなく、局所的な変化を示しているものであった。

#### (3) 線形次元削減

これらの検証結果より、本研究で対象としている重力式岸壁においては、各種条件の違いによらず、いずれの条件においてもモード分解を行うことによる線形次元削減は適用可能であるとわかった。

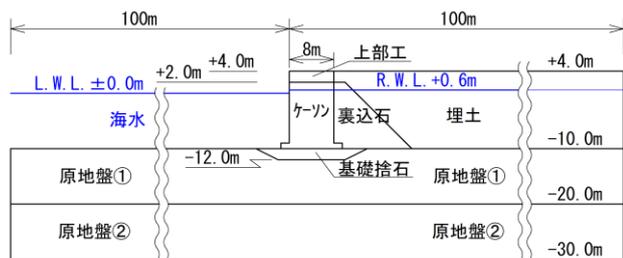
以降の検討（代替モデルの構築）においては、分解したモードのうち、主要な応答の大部分を示しているモード1と、地震動の主要動付近における岸壁本体の振動と過剰間隙水圧比の上昇を表現しているモード2を用いることとする。

## 4. 代替モデル構築とその推定精度の検証

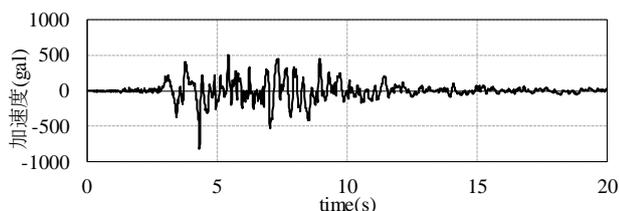
### 4.1 検討方針

#### (1) 解析モデルと地震波形

本章では、前章で用いた解析モデル（再掲図-3.1）によりいくつかのケースでのFLIPを実行し、それにより得られた解析結果により、代替モデルの構築を行う。また、対象とする地震波形は神戸波（再掲図-3.4）とする。



再掲図-3.1 解析モデル図



再掲図-3.4 神戸波

#### (2) 土質定数

代替モデルを構築するにあたっては、入力変数が異なるいくつかのケースでのFLIP解析結果が必要となる。ここでは、原地盤①②の入力変数は固定値とし、埋土の入力変数のみを変化させることを考える。また、液状化対象層は、埋土と原地盤①を対象とし、原地盤②は非液状化層として扱うこととする。

### 4.2 検討に用いる入力変数

#### (1) 代替モデルの構築に必要な入力変数

代替モデルの構築に用いる入力変数は、N値・細粒分含有率Fcの2つとし、本節では、この2変数の平均値 $\mu$ および標準偏差 $\sigma$ を設定することとする。なお、代替モデルの構築に用いる入力変数の選定理由を以下より述べる。

FLIPを実施するにあたって必要な解析パラメータは、初期せん断剛性や体積弾性係数、液状化パラメータ等、多岐にわたるが、本研究では、N値・有効上載圧 $\sigma_v'$ ・細粒分含有率Fcの3つの土質定数のみで解析に必要な解析パラメータを全て設定できる簡易設定法（初版）<sup>9)</sup>を採用している。このことから、代替モデルの構築にあたり着目すべき土質

定数はN値・有効上載圧 $\sigma_v'$ ・細粒分含有率Fcの3つのみと言える。さらに、本研究で使用している解析モデルは、砂質土層を対象としており、港湾施設に対する設計<sup>1)</sup>では一般的に砂質土の単位体積重量は湿潤重量 $18(\text{kN/m}^3)$ 、水中重量 $10(\text{kN/m}^3)$ として扱うことが多いため、有効上載圧 $\sigma_v'$ も土層毎に一定の値を使用することができる。以上の理由より、本研究における代替モデルの構築には、N値・細粒分含有率Fcの2つを入力変数とすることとしている。

#### (2) 埋土の土質定数の設定

##### a) 土質調査結果の収集

N値・細粒分含有率Fcの設定にあたり、図-4.2に示す港湾における土質調査資料を収集する。なお、図-4.2に示す港湾は、表-4.1に示すとおり、過去の大規模地震により被害を受けた港湾を選択している。土質調査資料は、国土地盤情報検索サイトKunijiban および過去の大規模地震による港湾施設の被害報告資料<sup>11)12)</sup>より収集した。なお、本検討で対象とする解析モデルでは、埋土層の下端標高を-10m、土層種別を砂質土としているため、収集した土質調査結果のうち、標高-10mよりも浅い位置で採取された砂質土のサンプルである60本の土質調査ならびに342つのサンプルを対象とする。ここで、収集したサンプルを厳密に埋土として判断することは困難であることから、本検討では上記の条件に当てはまるものを埋土であると仮定していることに留意されたい。収集した土質調査資料は付録Dに示す。

収集したN値・細粒分含有率Fcの度数分布を図-4.3に示す。また、図-4.4に示すように、N値と細粒分含有率Fcの間には明確な相関関係は見られないため、これらの変数は独立した変数であるとみなす。



図-4.2 土質調査資料収集箇所

表-4.1 過去の大規模地震により被害を受けた港湾

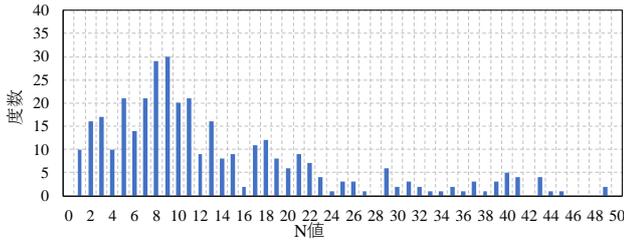
発生年	地震名称	被害を受けた港湾
1978	宮城県沖地震	仙台港, 石巻港
1983	日本海中部地震	秋田港
1993	釧路沖地震	釧路港, 根室港
1993	北海道南西沖地震	函館港
1995	兵庫県南部地震	神戸港, 尼崎西宮芦屋港
2000	鳥取県西部地震	境港
2005	福岡県西方沖地震	博多港
2007	能登半島地震	七尾港
2011	東北地方太平洋沖地震	八戸港, 小名浜港

$$\mu = \exp\left(\mu_m + \frac{1}{2}\sigma_m^2\right) \quad (4.1)$$

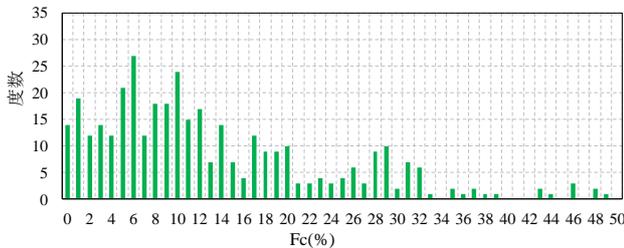
$$\sigma^2 = \exp(2\mu_m + \sigma_m^2)\left(\exp(\sigma_m^2) - 1\right) \quad (4.2)$$

ここに

- $\mu$  : 対数正規分布に従う確率変数 $X$ の平均
- $\sigma^2$  : 対数正規分布に従う確率変数 $X$ の分散
- $\mu_m$  : 確率変数 $X$ の対数値 $\ln(X)$ の平均
- $\sigma_m^2$  : 確率変数 $X$ の対数値 $\ln(X)$ の分散



(a) N値



(b) 細粒分含有率Fc

図-4.3 度数分布

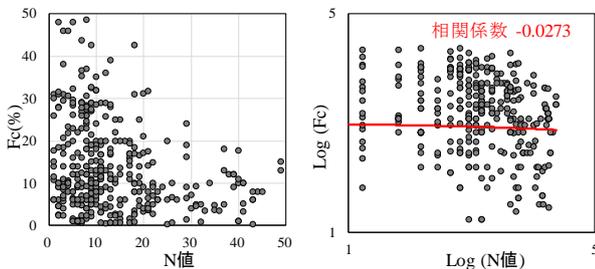


図-4.4 N値と細粒分含有率Fcの関係

#### b) 分布の仮定

図-4.3に示す収集結果より、N値と細粒分含有率Fcはどちらも値が5~10付近で最頻値をとる。ここで、正規分布の形状は左右対称な曲線となるが、図-4.3に示すデータが正規分布に従うと仮定した場合、負の値をとり得る。ここで対象としている入力変数(N値と細粒分含有率Fc)は負の値をとり得ないため、ここでは負の値をとることのない対数正規分布に従うことを仮定する。

対象とする確率変数 $X$ (ここではN値とFc)の対数値の平均を $\mu_m$ 、分散を $\sigma_m^2$ とし、この確率変数 $X$ が対数正規分布 $\Lambda(\mu_m, \sigma_m^2)$ に従うものとする。対数正規分布における平均 $\mu$ および分散 $\sigma^2$ は以下のとおり与えられる。

#### c) 自己相関性を考慮した分散の低減

土質調査によりサンプリングされた土試料の試験結果を統計的に整理する場合、試料の採取位置との関係性を与えることが望ましい。しかし、ある特定位置の統計的性質を知るためには、その点から多くのデータを得る必要があるが、それは現実的ではない。地盤の統計的性質を把握するためには、平均値と分散に加えて、自己相関性を調べる必要がある。例えば、標準貫入試験により得られたN値は地盤内の各位置でばらつくが、それぞれの位置でのN値は相互間にどのような関係があるかを特定する必要がある。本研究では、地盤がもつ不均質性を近似的に評価する方法として、Vanmarcke(1977)の提案<sup>13)</sup>に従い、自己相関性を取り入れた局所平均を用いる。

Vanmarckeは、地盤の空間的ばらつきを確率場の理論でモデル化することを提唱し、式(4.3)に示す分散関数を提案した。これは、定常確率場の局所平均は、局所平均を取る長さ、面積、体積と自己相関距離との相対的な大きさに応じて、その分散が元の確率場の分散よりも低減することを定量的に表現した関数である。

$$\sigma_{av}^2 = \sigma_c^2 \Gamma^2(V/\theta) \quad (4.3)$$

ここに

- $\sigma_{av}^2$  : 局所平均の分散
- $\sigma_c^2$  : ある位置での分散
- $\Gamma^2(V/\theta)$  : 分散関数

式(4.3)で示した分散関数は、仮定される自己相関関数の関数形に応じて解析的に求められる。自己相関関数は指数関数型(式(4.4))とガウス関数型が頻繁に用いられる<sup>13)</sup>が、ここでは既往の研究<sup>14)</sup>を参考に、指数関数型の自己相関関数を用いることとする。また、分散関数は式(4.5)により表される。

$$\rho(\Delta x) = \exp\left[-\frac{\Delta x}{\theta}\right] \quad (\text{指数関数型}) \quad (4.4)$$

$$\Gamma^2(V/\theta) = \left(\frac{\theta}{V}\right)^2 \left[2\left\{\frac{V}{\theta} - 1 + \exp\left(-\frac{V}{\theta}\right)\right\}\right] \quad (4.5)$$

ここに

- $\Delta x$  : 2点間の距離(m)
- $V$  : 層厚(m)
- $\theta$  : 自己相関距離(m)

式(4.4)が分散の低減を表現した関数であるため、標準偏差の低減関数は $[\Gamma^2(V/\theta)]^{0.5}$ で表される。図-4.5に標準偏差の低減関数を示す。

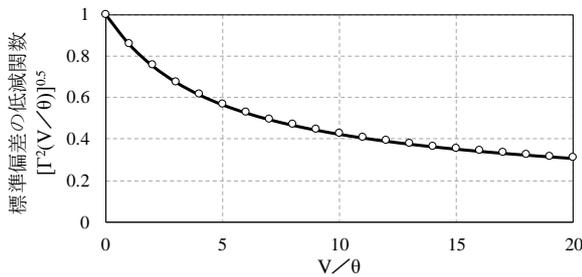


図-4.5 標準偏差の低減関数

ここで土質定数を設定したい埋土の層厚 $V$ は14mである。また、自己相関距離 $\theta$ は既往の研究<sup>14)</sup>を参考に1mとする。これらの値を標準偏差の低減関数に当てはめると、低減係数は0.364という値が得られる。

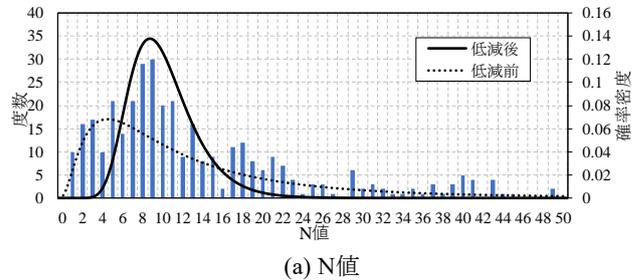
本研究では、この低減係数を、式(4.1)および式(4.2)の式中の $\sigma_{ln}$ (確率変数 $X$ の対数値の標準偏差)に乘じること、平均 $\mu$ および標準偏差 $\sigma$ を設定することとする。

表-4.2 土質定数 (N値と細粒分含有率Fc)

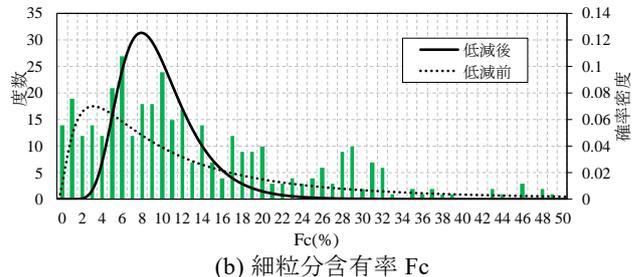
	N値	Fc(%)	備考
対数値の平均 $\mu_{ln}$	2.296	2.244	
対数値の分散 $\sigma_{ln}^2$	0.706	0.976	
対数値の標準偏差 $\sigma_{ln}$	0.840	0.988	低減前
低減係数	0.364	0.364	
対数値の標準偏差 $\sigma_{ln}'$	0.306	0.360	低減後
平均 $\mu$	<b>10.4</b>	<b>10.1</b>	式(4.1)
分散 $\sigma^2$	10.89	13.69	式(4.2)
標準偏差 $\sigma$	3.3	3.7	
$\mu + \sigma$	<b>13.7</b>	<b>13.8</b>	
$\mu - \sigma$	<b>7.1</b>	<b>6.4</b>	

d) 土質定数の設定

埋土層のN値および細粒分含有率Fcが対数正規分布に従うと仮定し、かつ、Vanmarcke(1977)の提案した分散関数<sup>13)</sup>により低減した土質定数(平均と標準偏差)を表-4.2に示す。また、対数正規分布の分布形状を図-4.6に示す。



(a) N値



(b) 細粒分含有率 Fc

図-4.6 対数正規分布

(3) 解析ケースと入力変数

本検討では、埋土層の土質定数を変えたいいくつかのケースでのFLIPを実行し、それにより得られた解析結果を用いて代替モデルの構築を行う。前述のとおり、変数とする土質定数はN値および細粒分含有率Fcの2つを対象とし、それぞれ設定した平均・標準偏差より、 $\mu \pm \sigma$ の範囲でのFLIPを実行する。実行する解析ケースを表-4.3に示す。なお、原地盤の土質定数は埋土と同様に、過去の大規模地震により被害を受けた港湾を対象に収集した土質調査結果の平均的な値を採用するものとし、原地盤の土質定数は、N値=30、細粒分含有率Fc=21(%)とした。

各ケースの解析パラメータを表-4.4に示す。

表-4.3 解析ケース

解析ケース	N値		細粒分含有率 Fc(%)	
	$\mu - \sigma$	$\mu$	$\mu - \sigma$	$\mu$
CASE-1	$\mu - \sigma$	7.1	$\mu - \sigma$	6.4
CASE-2	$\mu$	10.4	$\mu - \sigma$	6.4
CASE-3	$\mu + \sigma$	13.7	$\mu - \sigma$	6.4
CASE-4	$\mu - \sigma$	7.1	$\mu$	10.1
CASE-5	$\mu$	10.4	$\mu$	10.1
CASE-6	$\mu + \sigma$	13.7	$\mu$	10.1
CASE-7	$\mu - \sigma$	7.1	$\mu + \sigma$	13.8
CASE-8	$\mu$	10.4	$\mu + \sigma$	13.8
CASE-9	$\mu + \sigma$	13.7	$\mu + \sigma$	13.8

表-4.4 解析パラメータ

(a) 埋土

CASE	N値	等価 N値	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fc (%)	動的変形特性				液状化パラメータ					
					$\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi_f$ (°)	$\phi_p$ (°)	$S_1$	$w_1$	$p_1$	$p_2$	$c_1$
CASE-1	7.1	5.73	97.2	6.4	98	60539	157876	38.69	28	0.005	3.230	0.5	1.070	1.600
CASE-2	10.4	8.65	97.2	6.4	98	77380	201795	39.38	28	0.005	4.892	0.5	1.010	1.600
CASE-3	13.7	11.56	97.2	6.4	98	92638	241585	39.98	28	0.005	7.471	0.5	0.951	1.600
CASE-4	7.1	5.73	97.2	10.1	98	60539	157876	38.69	28	0.005	7.057	0.5	0.998	1.600
CASE-5	10.4	8.65	97.2	10.1	98	77380	201795	39.38	28	0.005	9.905	0.5	0.938	1.300
CASE-6	13.7	11.56	97.2	10.1	98	92638	241585	39.98	28	0.005	13.900	0.5	0.879	1.300
CASE-7	7.1	5.73	97.2	13.8	98	60539	157876	38.69	28	0.005	7.669	0.5	0.986	1.600
CASE-8	10.4	8.65	97.2	13.8	98	77380	201795	39.38	28	0.005	11.130	0.5	0.926	1.300
CASE-9	13.7	11.56	97.2	13.8	98	92638	241585	39.98	28	0.005	16.190	0.5	0.867	1.300

(b) 原地盤

土質 区分	N値	等価 N値	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fc (%)	動的変形特性				液状化パラメータ					
					$\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi_f$ (°)	$\phi_p$ (°)	$S_1$	$w_1$	$p_1$	$p_2$	$c_1$
原地盤①	30	16.69	217.2	21	98	117251	305773	40.88	28	0.005	43.600	0.5	0.738	1.000
原地盤②	30	12.39	317.2	21	98	97146	253342	40.15	—	—	—	—	—	—

### 4.3 二次元地震応答解析結果

表-4.3に示す解析ケースのうち、N値および細粒分含有率Fcの平均値を用いて解析を行っているCASE-5における残留値のスナップショットを図-4.7に示す。また、各ケースにおける残留水平変位および残留鉛直変位の一覧を表-4.5に示し、各物理量の時刻歴を図-4.8～図-4.11にそれぞれ示す。以降の検討では、このCASE-5に対するモード分解により得られた左特異ベクトルを基底として、代替モデルの構築を行う。

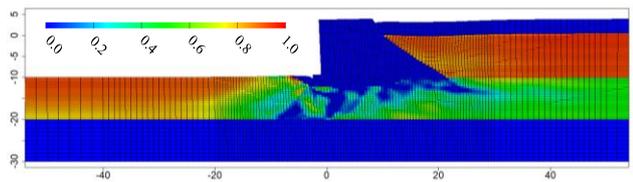
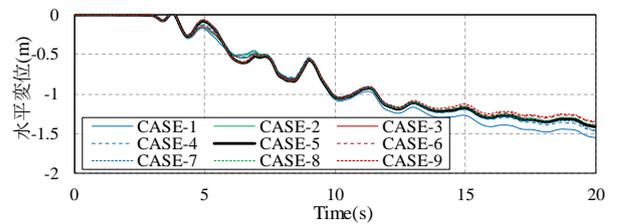


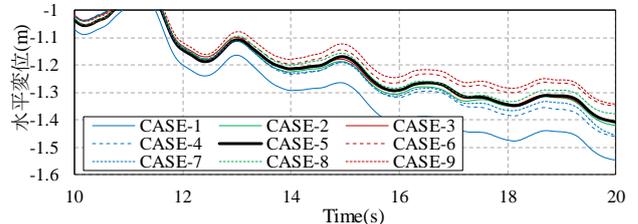
図-4.7 残留値スナップショット (CASE-5)

表-4.5 各ケースの解析結果 (残留値)

解析 ケース	N値	Fc(%)	残留水平 変位(m)	残留鉛直 変位(m)
CASE-1	$\mu - \sigma$	$\mu - \sigma$	1.547	0.367
CASE-2	$\mu$	$\mu - \sigma$	1.420	0.326
CASE-3	$\mu + \sigma$	$\mu - \sigma$	1.405	0.319
CASE-4	$\mu - \sigma$	$\mu$	1.462	0.348
CASE-5	$\mu$	$\mu$	1.409	0.312
CASE-6	$\mu + \sigma$	$\mu$	1.349	0.280
CASE-7	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	1.457	0.347
CASE-8	$\mu$	$\mu + \sigma$	1.379	0.298
CASE-9	$\mu + \sigma$	$\mu + \sigma$	1.343	0.285

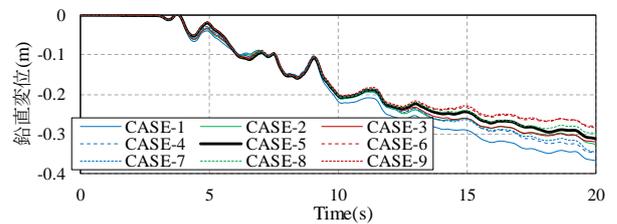


(a) 全体

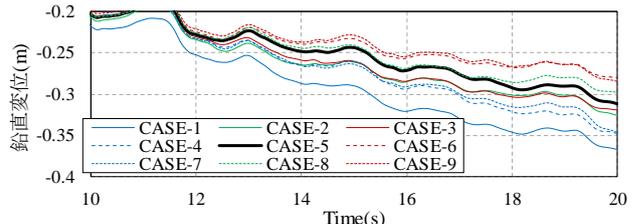


(b) 拡大

図-4.8 水平変位時刻歴

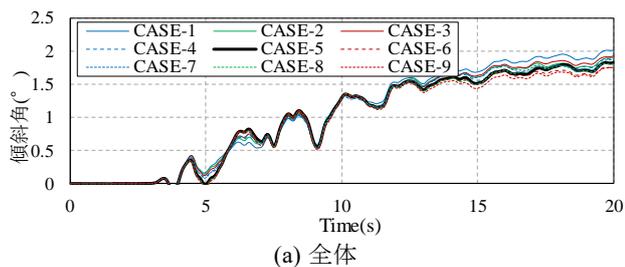


(a) 全体

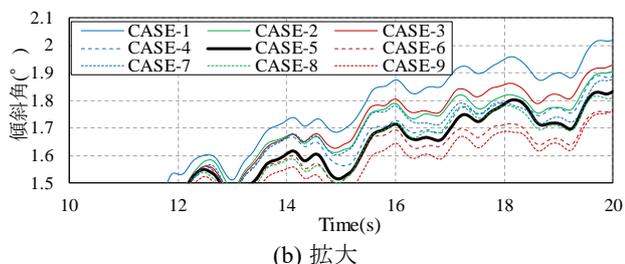


(b) 拡大

図-4.9 鉛直変位時刻歴



(a) 全体



(b) 拡大

図-4.10 傾斜角時刻歴

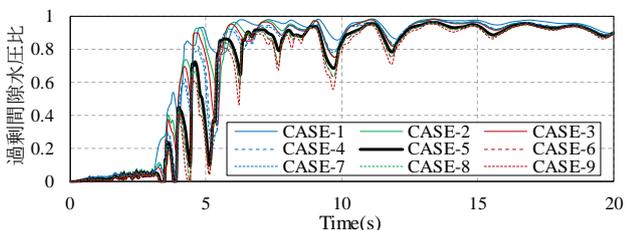


図-4.11 過剰間隙水圧比時刻歴

#### 4.4 代替モデルの構築結果

代替モデルの構築に必要な回帰係数は、前項で得られた9ケースのFLIPの結果を用いて設定した。また、代替モデルにおける基底は、CASE-5のFLIP解析結果のみに対するモード分解により得られた左特異ベクトルを用いている。本項では、この回帰係数と基底により構築した代替モデル（以後、ROMと呼称する。）による推定結果を示す。

##### a) 時刻歴応答値の比較

基底として用いているCASE-5を対象に、FLIPとROMによる時刻歴応答値の比較を行う。比較にあたり着目する物理量は、岸壁天端における水平変位・鉛直変位、岸壁本体の傾斜角、埋土における過剰間隙水圧比とする。

表-4.6に、FLIPとROMの各物理量の残留値を示す。いずれの物理量においても、ROMによる推定値はFLIPの応答値をよく推定できていることがわかる。また、推定誤差（ROM/FLIP）としては、最大でも5%程度に留まっており、応答値の推定誤差はほとんど生じずに推定できている。

続いて、各物理量の時刻歴（時間発展）を比較する。図-4.12に水平変位、図-4.13に鉛直変位、図-4.14に傾斜角、図-4.15に過剰間隙水圧比の時刻歴応答値をそれぞれ示す。まず、水平変位および鉛直変位については、応答値の時間発展の過程で数cm程度の誤差は生じているものの、全体と

しては精度良く推定できている。さらに、岸壁本体の傾斜角についても同様の傾向である。次に、過剰間隙水圧比に着目する。まず、FLIPでは時間発展の過程（主に $t=4\sim 10$ s付近）において、過剰間隙水圧比の急激な上昇および下降が現れている。これに対しROMでは、FLIPのような過剰間隙水圧比の急激な下降は表現できていない。これは、FLIPでの過剰間隙水圧比の時刻歴（図-4.11）が、各ケース（9ケース）において $t=4\sim 10$ s付近で大きくばらついていることが要因であると考えられる。

表-4.6 FLIPとROMの各物理量の残留値

	FLIP (CASE-5)	ROM* (CASE-5)	推定誤差 (ROM/FLIP)
水平変位 (m)	1.409	1.400 [-0.009]	99.36%
鉛直変位 (m)	0.312	0.295 [-0.017]	94.55%
傾斜角 (°)	1.837	1.854 [+0.017]	100.93%
過剰間隙水圧比	0.903	0.900 [-0.003]	99.67%

※[ ]内は、FLIPとの差分（ROM-FLIP）を示す。

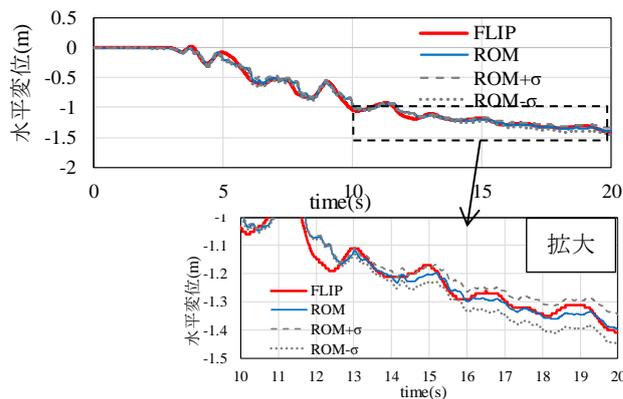


図-4.12 水平変位時刻歴（岸壁天端）

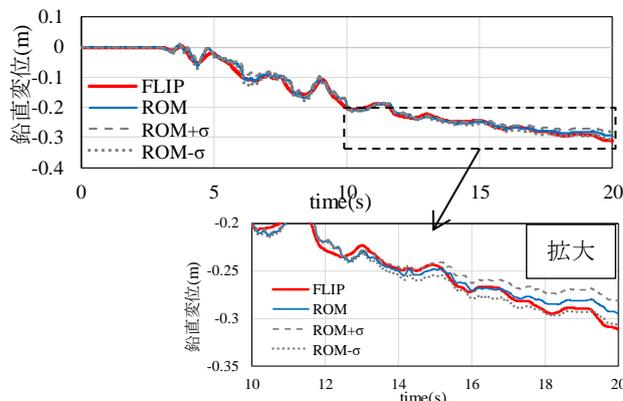


図-4.13 鉛直変位時刻歴（岸壁天端）

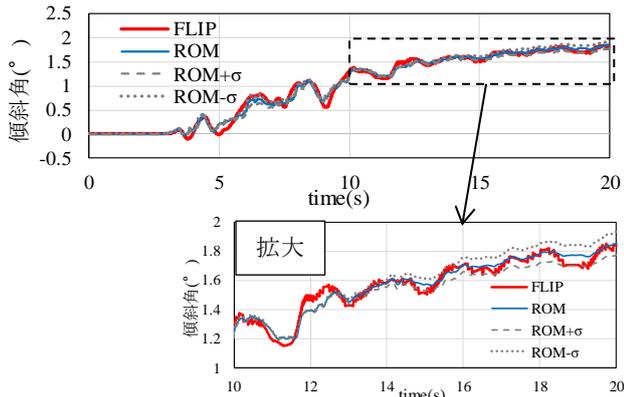


図-4.14 傾斜角時刻歴

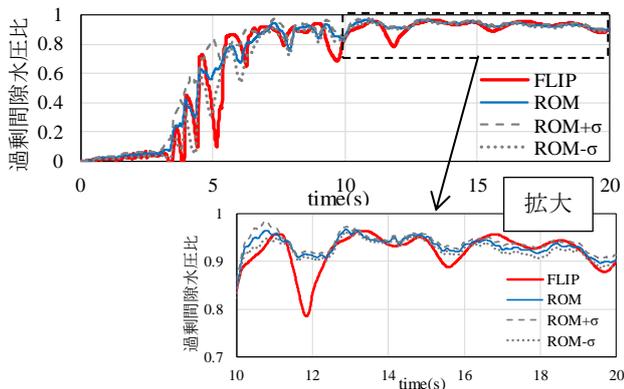


図-4.15 過剰間隙水圧比 (埋土)

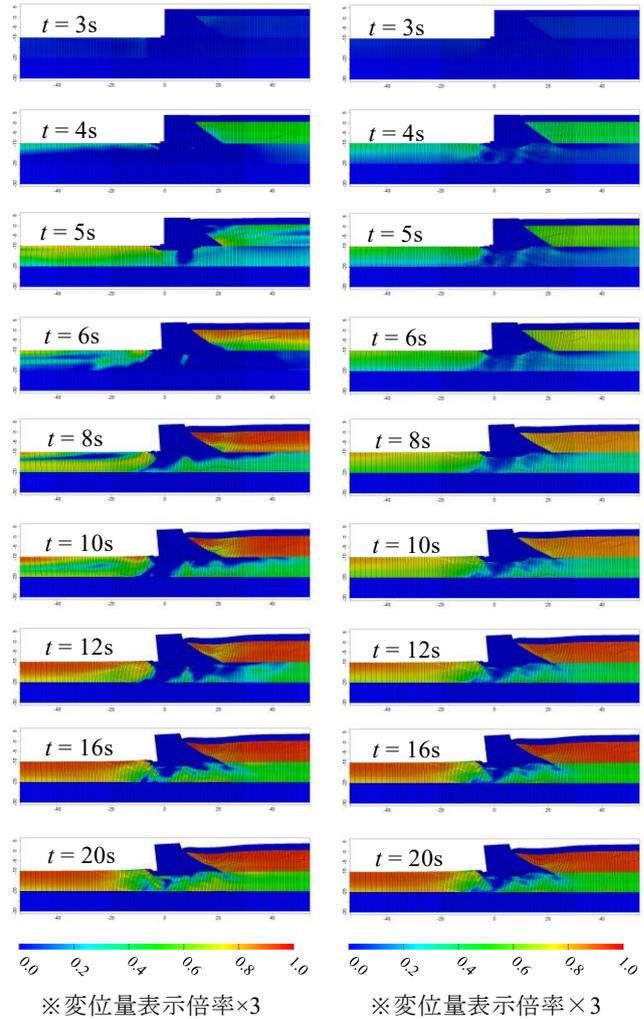
b) 応答値の空間分布の比較

FLIPとROMによる、応答値の空間分布の比較を行う。図-4.16にFLIPとROMでの主要な時間ステップにおけるスナップショットを示す。時刻歴応答値での傾向と同様に、過剰間隙水圧比の上昇は $t = 4 \sim 10$ s付近でやや差異が生じているが、全時間ステップにおける岸壁本体の挙動や、 $t = 12$ s以降での過剰間隙水圧比の空間分布は、ROMで精度良く推定できている。

4.5 代替モデルによる推定精度の検証

ROMの最大の利点は、対象とした入力変数の値を任意に変化させた際の応答を瞬時に推定できる点にある。ここでは、ROMの推定精度の検証として、N値および細粒分含有率 $F_c$ をそれぞれ5~20と変化させたFLIP解析結果とROMによる推定値との比較を行う。なお、比較の対象とする応答値は、岸壁天端における残留水平変位量とする。

まず、各条件下における応答値の全体の傾向を確認する。図-4.17に示すプロットはFLIPでの解析結果を示しており、そのうち、青色・緑色に着色しているプロットがROM構築に使用したFLIP解析結果を示している。また、図中の破線がROMによる推定値を示している。さらに、図-4.17の(a)における着色プロットは、 $F_c = \mu$ の条件でのケース(表-4.5



(a) FLIP (b) ROM

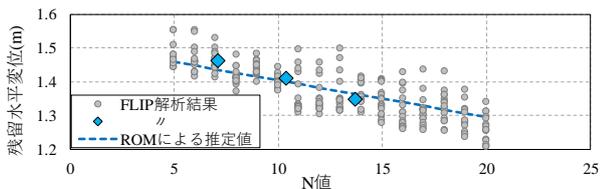
図-4.16 解析結果のスナップショット

のCASE4,5,6)の解析結果を、破線は $F_c = \mu$ でのROM推定値を示し、図-4.17の(b)における着色プロットは、N値= $\mu$ の条件でのケース(表-4.5のCASE2,5,8)の解析結果を、破線はN値= $\mu$ でのROM推定値を示している。図-4.17より、細粒分含有率よりもN値の方が、残留水平変位量に対する感度は高い傾向にあり、ROMによる推定においても同様の傾向を表現できている。

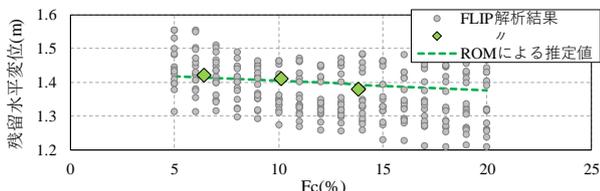
続いて、FLIPとROMの応答値の誤差を定量的に確認する。表-4.7は、FLIPとROMの解析結果の比(ROM/FLIP)を示したものである。全体の傾向としては、代替モデル構築に用いた対象範囲(9ケースのFLIP解析を行った範囲)の内側でも外側であっても推定誤差は小さく、最大でも±6%程度の精度で推定できている。ただし、各入力変数が小さい条件での応答(表中左上)は、ROMによる推定値はFLIPに比べて過小となり、各入力変数が大きい条件での応答(表中右下)は、ROMによる推定値はFLIPに比べて過大となる傾向である。この理由については後述する。

最後に、入力変数と応答値の関係をコンター図で表したものを図-4.18に示す。まず、FLIPのコンター図に着目すると、全体の傾向としては図-4.17のとおり、N値の方が残留水平変位量への感度が高い傾向がみられる。この傾向はROMのコンター図にも同様に表れている。一方で、部分的にFLIPで表れている極端な応答（例えばN値=5、Fc=5%付近での応答）がROMでは表現できていないが、これはFLIP解析における地盤の非線形特性が、解析結果（応答）として表れていることが要因である。本研究で対象とした解析モデルおよび入力条件では数%程度の誤差に留まっているが、解析モデルや入力条件によってはこのような非線形性を持つ応答がさらに顕著に発生することも考えられる。ROMによる推定精度や推定誤差を考える上では、非線形性が顕著な問題に対する課題が残されていると言える。

以上より、対象とした入力変数の値を任意に変化させた場合においても、ROMによりある一定の精度での推定が可能であることがわかった。ただし、非線形性が顕著な問題への対応には課題が残っているため、適用にあたっては注意が必要である。

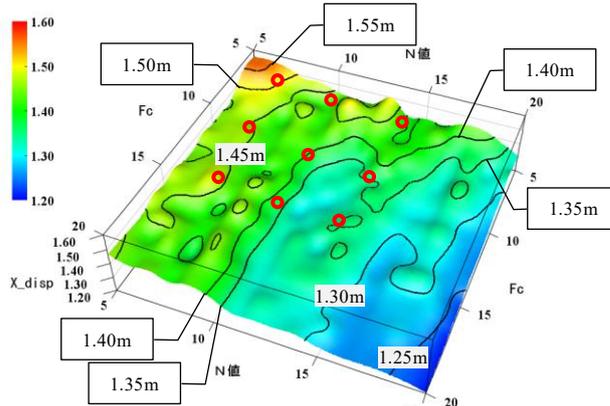


(a) N値と残留水平変位量の関係



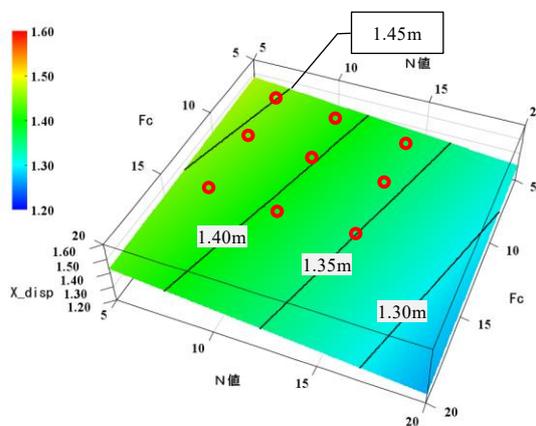
(b) 細粒分含有率Fcと残留水平変位量の関係

図-4.17 FLIPとROMの比較



● : ROM構築に用いた解析結果

(a) FLIP



● : ROM構築に用いた解析結果

(b) ROM

図-4.18 各条件下における残留水平変位のコンター図

表-4.7 FLIPとROMの比較 (ROM/FLIP)

		N値																		
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
Fc (%)	5	95%	94%	95%	97%	96%	98%	99%	98%	93%	99%	97%	97%	94%	93%	96%	100%			
	6	95%	94%	96%	99%	100%	100%	94%	96%	94%	98%	97%	95%	97%	97%	98%	100%			
	7	97%	97%	97%	99%	97%	100%	96%	97%	96%	98%	97%	97%	99%	97%	100%	97%			
	8	101%	98%	98%	102%	98%	100%	97%	100%	98%	97%	97%	98%	101%	98%	99%	101%			
	9	101%	99%	100%	101%	99%	99%	100%	103%	102%	97%	99%	99%	101%	97%	100%	101%			
	10	101%	99%	98%	101%	100%	100%	103%	104%	102%	101%	99%	101%	101%	98%	100%	102%			
	11	99%	99%	98%	101%	99%	100%	104%	103%	100%	100%	102%	102%	99%	102%	102%	102%			
	12	101%	99%	99%	101%	101%	99%	104%	104%	103%	101%	100%	102%	100%	98%	102%	103%			
	13	100%	99%	97%	100%	97%	100%	104%	104%	102%	100%	101%	103%	102%	99%	102%	103%			
	14	98%	99%	96%	99%	97%	101%	104%	104%	101%	101%	101%	104%	102%	100%	102%	102%			
	15	99%	98%	98%	101%	96%	100%	104%	102%	103%	99%	101%	104%	100%	98%	101%	104%			
	16	97%	100%	101%	100%	98%	101%	104%	102%	102%	100%	101%	103%	102%	101%	100%	104%			
	17	100%	97%	99%	100%	96%	101%	104%	102%	101%	100%	102%	104%	102%	101%	101%	105%			
	18	99%	101%	98%	102%	96%	99%	104%	103%	102%	102%	103%	104%	103%	101%	102%	105%			
	19	98%	100%	99%	99%	97%	99%	103%	102%	102%	102%	102%	104%	103%	103%	103%	105%			
	20	98%	99%	98%	100%	97%	99%	103%	103%	102%	101%	103%	104%	103%	103%	103%	105%			

□ : 回帰係数設定に用いた解析結果

凡例

Blue box	: 95%以下
Light blue box	: 95~97.5%
White box	: 97.5~102.5%
Light orange box	: 102.5~105%
Pink box	: 105%以上

## 5. 今後の活用法の例示と適用上の課題

### 5.1 今後の活用法の例示

前章で検討した代替モデルは、今後の耐震性能照査手法の高度化に向けた基礎的な枠組みとして発展されることを想定している。そこで本章では、代替モデルの活用法の例として、以下の2つを例示する。

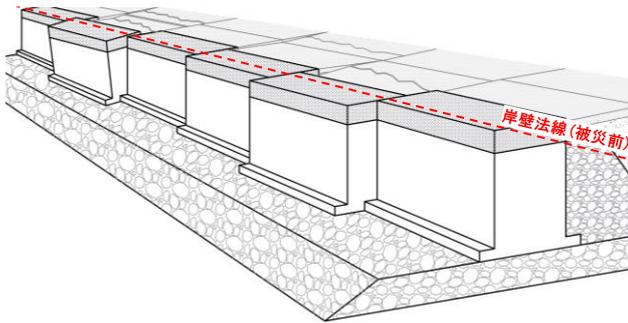
- ①岸壁の凹凸変位量の評価への活用
- ②破壊確率の算定および破壊形態の把握への活用

#### (1) 岸壁の凹凸変位量の評価

##### a) 現状の課題

岸壁に対して地震動が作用し、既存の法線からの変位が生じた場合、変位量は各ケーソンにおいて一定とは限らず、**再掲図-1.1**のように法線の出入り(凹凸変位)が生じ得る。岸壁の法線方向の凹凸変位量を評価することは、法線方向の解析結果のばらつきを評価することに等しく、現状の耐震性能照査ではほとんど検討されていない。

ここでは、代替モデルを用いて、岸壁の凹凸変位量を評価する方法を例示する。



再掲図-1.1 岸壁法線の出入りのイメージ

##### b) 代替モデル活用のイメージ

代替モデルを岸壁の凹凸変位量の評価へ活用する方法の例として、ある耐震強化施設における耐震性能照査を行うことを想定する。ここでは、以下より示す問題設定に対する活用法を例示する。

検討対象施設は、重力式岸壁(ケーソン式)であり、ケーソンが $K$ 函設置されている。また、岸壁背後における地盤調査が比較的密に実施されており、埋土層における土質定数が各ケーソンで把握できている。地盤調査の結果、埋土層における $N$ 値が岸壁延長方向において大きくばらついているため、 $N$ 値のばらつきが岸壁の変位量へもたらす影響の感度を把握するために、二次元地震応答解析を使って岸壁の凹凸変位量を評価することとなった。ここで、解析に用いる入力パラメータセットが $K$ セット存在するとした本活用法のイメージを図-5.1に示す。本来であれば、岸

壁の凹凸変位量の評価を行うためには、岸壁延長方向の土質条件のばらつきに応じて、多数の二次元地震応答解析が必要であるが、代替モデルを用いることで、解析ケース数を大幅に削減することが期待できる。

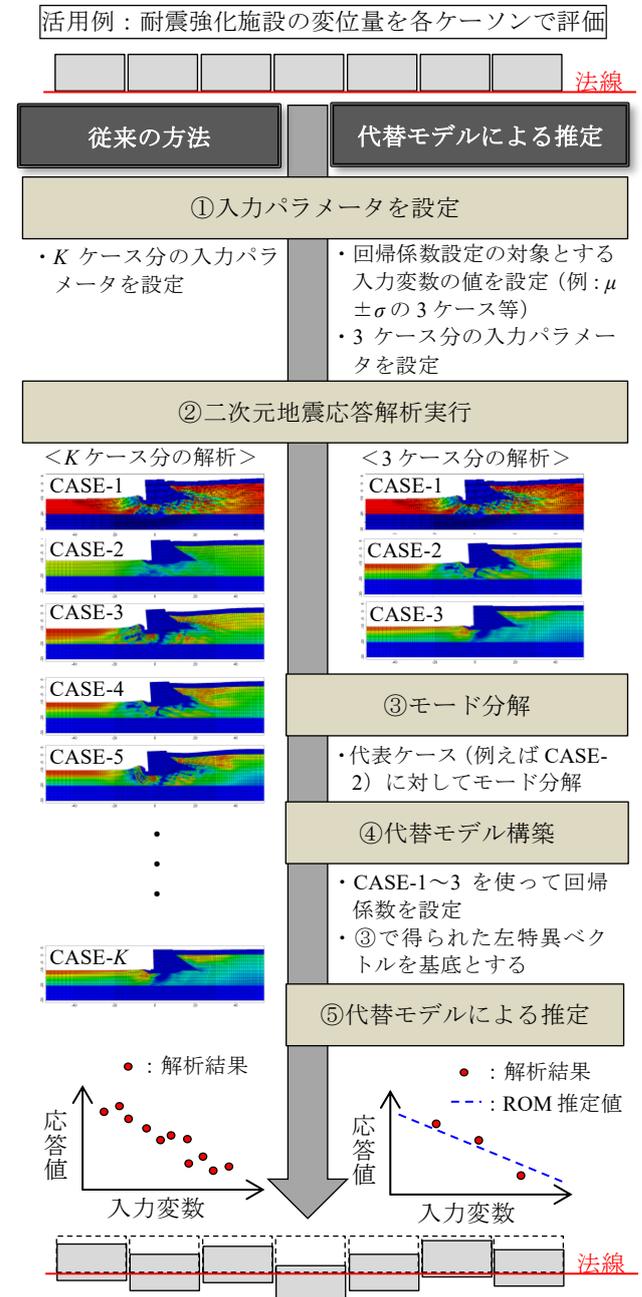


図-5.1 岸壁の凹凸変位量の評価への活用イメージ

(2) 破壊確率の算出および破壊形態の把握

a) 現状の課題

施設の破壊形態は様々であり、破壊形態によっては他施設の倒壊を連鎖的に引き起こす要因にもなり得る。そのため、施設が破壊に至るまでの状況の把握は重要であるが、現状の耐震性能照査ではほとんど考えられていない。

ここでは、施設の破壊に着目した活用方法を例示する。

b) 代替モデル活用のイメージ

代替モデルによる破壊確率の算定への活用イメージとして、ここでは、岸壁本体の水平変位量の許容値を1.5mとした場合の破壊確率評価の例を図-5.2に示す。図中上段は代替モデルにより得られた推定値（水平変位）とその分散 $\pm\sigma$ の範囲を表している。図中下段は破壊確率の時間推移を表している。破壊確率は、各時間ステップでの応答値と許容値を確率変数として捉え、その差を期待値の性質を用いて、解析的に算出することができる。

また、代替モデルでは、応答値の空間分布を損なうことなく推定が可能であるため、施設の破壊形態の把握にも活用できると考えられる。破壊形態の把握に関しては、比較的挙動の単純な重力式岸壁よりも、挙動が複雑な矢板式岸壁や栈橋に対する活用が有効であると考えられる。例えば矢板式岸壁においては、どの部材が破壊するかによって、破壊形態は全く異なる。一方で、矢板式岸壁における重要部材のほとんどは地中に埋まっており、発災後の緊急臨時点検の段階では、各部材が安全であるかの判断は困難であるため、代替モデルを活用することであらかじめ破壊形態を把握し、発災後の点検の効率化や暫定供用可否の判断に役立てられると考えられる。ただし、後述するように、他構造形式への適用性等、本手法を活用するにあたっては、まだ検証すべき課題が残されている。

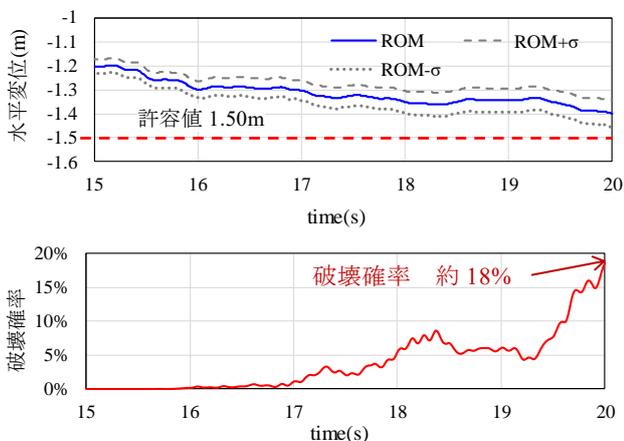


図-5.2 破壊確率算定への活用イメージ

5.2 適用上の課題

本研究で検討した手法における適用上の課題を以下に列挙する。

(1) 他構造形式への適用性

本研究で対象とした構造形式は重力式岸壁であるが、係留施設の構造形式は様々である。特に、矢板式岸壁や栈橋等の鋼材を用いた構造は、重力式岸壁とは構造特性が異なり、二次元地震応答解析を行う上でも、鋼材の強度等に対する照査が必要となる。

そのため、構造特性の異なる構造形式を対象とした二次元地震応答解析結果であっても、モード分解や代替モデルによる推定が適用可能か、今後検証する必要がある。また、本研究でモード分解や代替モデルの構築の対象とした物理量（水平変位・鉛直変位・過剰間隙水圧比）のほか、鋼材の曲率等の物理量を加えることとなるため、これらの物理量を加えた場合においても本手法が適用可能か、今後検証が必要である。

(2) 入力変数の情報縮約

本研究では、代替モデルの構築に用いる入力変数は、FLIPでの解析パラメータの簡易設定法に用いられる土質定数として、N値と細粒分含有率 $F_c$ の2つを対象としてきた。一方、解析パラメータの設定にあたっては、液状化強度試験（繰返しせん断試験）の結果に対して、液状化強度曲線や有効応力経路を良く再現できるパラメータを試行錯誤の上設定することが望ましいとされているため、入力変数は様々なものを対象とする必要があると考える。特に、液状化強度試験結果を良く再現できるパラメータを試行錯誤の上設定する場合、着目すべき入力変数はさらに多くなる（例えば液状化パラメータ5種類）ため、主成分分析や実験計画法等の考えに基づいた情報の縮約を考える必要がある。

(3) 代替モデルによる推定精度

本研究で検討した手法の中核を担っているモード分解は、線形基底に基づく固有値問題であり、非線形問題への適用については課題も残されている。特に、代替モデル構築に用いる解析結果（例えば入力変数 $\mu \pm \sigma$ ）の内挿範囲は精度良く推定できたとしても、外挿範囲では推定精度が低下することが懸念される。

## 6. おわりに

本研究では、耐震性能照査手法の高度化に向けた基礎的な検討として、二次元地震応答解析と同等の精度を維持しつつ、出来る限り効率的に照査が可能となる手法の検討を行った。既往研究<sup>4)</sup>では、土構造物を対象として、モード分解による解析結果（応答値）の情報縮約、および、縮約した応答値と入力変数を回帰分析により線形結合する代替モデルの構築を行っており、本研究はこれらの手法<sup>4)</sup>の港湾構造物への適用性を確認したものである。具体的には、各種入力条件の違いがモード分解へもたらす影響の検証や代替モデルの推定精度の検証等を実施し、その結果、港湾構造物のうち重力式岸壁への適用性が確認された。

モード分解や代替モデルを用いることによる最大の利点は、入力変数の値を任意に変化させたときの応答を、空間情報および時間情報を損なうことなく瞬時に推定できることである。本研究で示した検討内容はあくまで手法適用の一例であり、この手法を応用すれば様々な発展が期待される。本稿では、入力条件のばらつきが解析結果に及ぼす影響に着目し、岸壁の凹凸変位量の評価や、施設の破壊確率の算出、破壊形態の把握への活用法を例示した。

一方で、本研究の最終目標として位置付けている耐震性能照査手法の高度化に向けては、他構造形式への適用性や入力変数の情報縮約、代替モデルによる推定精度等、まだ解決すべき課題が残されている。したがって、今後は代替モデルの推定精度向上を目的とした、実被災事例との再現検証や、他構造形式への手法拡張等の各種検討が必要である。

(2020年2月12日受付)

### 謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、二次元地震応答解析について、港湾空港技術研究所の大矢陽介主任研究官よりご助言を頂きました。モード分解や代替モデルの具体的な解法について、新潟大学の茂野恭平氏よりご助言を頂きました。本稿の検討内容について、港湾施設研究室の交流研究員である錦織勇人氏、柴下達哉氏より貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 公益社団法人 日本港湾協会, 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018.
- 2) Ichii, K., Iai, S., Sato, Y. and Liu, H.: Seismic performance evaluation charts for gravity type quay walls, *Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE*, Vol.19, No.1, 21s-31s, 2002.
- 3) 團村肇, 宮田正史, 野津厚, 若井淳, 浅井茂樹: 液

状化を考慮した岸壁残留変形量の簡易評価法の高度化, 国土技術政策総合研究所資料 No.743, 2013.

- 4) 大竹雄, 茂野恭平, 渡邊慎也, 肥後陽介, 村松正吾: モード分解を用いた時空間の特徴抽出に基づくデータ駆動型・動的信頼性解析法: 有効応力動的解析への適用, 土木学会論文集, 2020.
- 5) 大竹雄, 本城勇介: 応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法: 液状化地盤上水路の耐震設計への適用, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.68, No.1, pp.68-83, 2012.
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Report of The Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter Identification for Cyclic Mobility Model, *Report of The Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.
- 8) 井合進, 一井康二, 森田年一: ケーソン式岸壁の有効応力解析, 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察 (その7), 港湾技研資料, No.813, pp.253-279, 1995.
- 9) 森田年一, 井合進, Liu Hanlong, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料 No.869, 1997.
- 10) 長尾毅, 岩田直樹, 藤村公宜, 森下倫明, 佐藤秀政, 尾崎竜三: レベル1地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料 No.310, 2006.
- 11) 土田肇, 野田節男, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 大根田秀明, 外山進一: 1983年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技研資料 No.511, 1985.
- 12) 上田茂, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 松永康男, 藤本健幸, 菊池喜照, 宮井真一郎, 関口信一郎, 藤本義則: 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料 No.766, 1993.
- 13) Vanmarcke, E.H.: Probabilistic modeling of soil profiles, *J, Geotechnical Engineering (ASCE)*, Vol.103, No.GT11, pp.1227-1246, 1977.
- 14) 松原弘晃, 竹信正寛, 宮田正史, 渡部要一: 控え矢板式係船岸の永続状態におけるレベル1信頼設計法に関する基礎的研究, 国土技術政策総合研究所資料 No.956, 2017.

付録 A 代替モデルにおける回帰係数の最小二乗推定値の導出

代替モデルの構築には、入力変数のバラつきに対応する幾つかの数值解析を行う。解析ケース数を  $k$  とし、各解析ケースの解析結果から作成したそれぞれの行列  $X$  を、全解析ケースについてまとめると、式 (A. 1) のとおりとなる。

$$X^K = \begin{bmatrix} X^{(1)} \\ \vdots \\ X^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 1})$$

ここに

- $X^{(k)}$  : 解析ケース  $k$  の解析結果による行列  $X$  ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )
- $X^K$  : 各解析ケースの  $X$  を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times m}$ )

同様に、 $X$  に対する推定値  $\hat{X}$  を全解析ケースについてまとめると、式 (2. 21) のとおりとなる。ここで、回帰係数  $B_{\text{mode}}$  は全解析ケースで共通すると仮定する。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{X}^{(1)} \\ \vdots \\ \hat{X}^{(k)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Psi^{(1)} B_{\text{mode}} \\ \vdots \\ \Psi^{(k)} B_{\text{mode}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \Psi^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi^{(k)} \end{bmatrix} B_{\text{mode}} \\ \Leftrightarrow \hat{X}^K &= \Psi^K B_{\text{mode}} \end{aligned} \quad (\text{A. 2})$$

ここに

- $\hat{X}^{(k)}$  :  $X^{(k)}$  に対する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{n \times m}$ )
- $\Psi^{(k)}$  :  $\Psi$  に  $[\varphi_1, \dots, \varphi_r]$  と  $\zeta^{(k)}$  を代入したもの ( $\in \mathbb{R}^{n \times [r \times (p+1)]}$ )
- $\zeta^{(k)}$  : 解析ケース  $k$  における  $p$  個の入力変数と 1 からなるベクトル ( $\in \mathbb{R}^{p+1}$ )
- $\hat{X}^K$  : 各解析ケースの  $\hat{X}$  を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times m}$ )
- $\Psi^K$  : 各解析ケースの  $\Psi^{(k)}$  を行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{(k \times n) \times [r \times (p+1)]}$ )

代替モデルに用いる回帰係数  $B_{\text{mode}}$  は、数值解析により得られた  $X^K$  と、 $X^K$  の推定値である  $\hat{X}^K$  との最小二乗法により求める。回帰係数  $B_{\text{mode}}$  の最小二乗推定値は式 (A. 3) で表される。

ここでは式 (A. 3) の導出過程を解説する。

$$B_{\text{mode}}^{LSE} = \left[ (\Psi^K)^T \Psi^K \right]^{-1} (\Psi^K)^T X^K \quad (\text{A. 3})$$

ここに

$$B_{\text{mode}}^{LSE} : B_{\text{mode}} \text{ の最小二乗推定値 } (\in \mathbb{R}^{[r \times (p+1)] \times m})$$

まず、ある解析ケースのみに着目し、その解析より得られた行列  $X$  と推定値の行列  $\hat{X}$  の残差は式 (A. 4) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} X - \hat{X} &= [x_1 - \hat{x}_1, \dots, x_m - \hat{x}_m] \\ &= \begin{bmatrix} x_{1:1:m} \\ \vdots \\ x_{n:1:m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{x}_{1:1:m} \\ \vdots \\ \hat{x}_{n:1:m} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_{1:1:m} - \hat{x}_{1:1:m} \\ \vdots \\ x_{n:1:m} - \hat{x}_{n:1:m} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A. 4})$$

ここに

$$x_{n:1:m} : \text{ある節点または要素のある物理量 } n \text{ の時間発展 } (\in \mathbb{R}^{1 \times m})$$

$$\hat{x}_{n:1:m} : x_{n:1:m} \text{ に対応する推定値 } (\in \mathbb{R}^{1 \times m})$$

$x_{n:1:m}$  の二乗和誤差は式 (A. 5) で表される。

$$(x_{n:1:m} - \hat{x}_{n:1:m})(x_{n:1:m} - \hat{x}_{n:1:m})^T \quad (\text{A. 5})$$

よって、全節点・全要素の全物理量の時間発展の二乗和誤差は式 (A. 6) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} &\sum_{N=1}^n (x_{N:1:m} - \hat{x}_{N:1:m})(x_{N:1:m} - \hat{x}_{N:1:m})^T \\ &= \text{tr} \left( \begin{bmatrix} x_{1:1:m} - \hat{x}_{1:1:m} \\ \vdots \\ x_{n:1:m} - \hat{x}_{n:1:m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1:1:m} - \hat{x}_{1:1:m} \\ \vdots \\ x_{n:1:m} - \hat{x}_{n:1:m} \end{bmatrix}^T \right) \\ &= \text{tr} \left( (X - \hat{X})(X - \hat{X})^T \right) \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

同様に、全解析ケースの数値解析により得られた  $X^K$  と推定値  $\hat{X}^K$  の二乗和誤差は、式 (A. 6) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} & \sum_{K=1}^k \sum_{N=1}^n \left( x_{N,1:m}^{(K)} - \hat{x}_{N,1:m}^{(K)} \right) \left( x_{N,1:m}^{(K)} - \hat{x}_{N,1:m}^{(K)} \right)^T \\ &= \text{tr} \left( \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right)^T \\ &= \text{tr} \left( \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(1)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(1)} \\ \vdots \\ x_{1,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{1,1:m}^{(k)} \\ \vdots \\ x_{n,1:m}^{(k)} - \hat{x}_{n,1:m}^{(k)} \end{bmatrix} \right)^T \\ &= \text{tr} \left( (X^K - \hat{X}^K) (X^K - \hat{X}^K)^T \right) \quad (\text{A. 6}) \end{aligned}$$

ここに

$x_{n,1:m}^{(k)}$  : 解析ケース  $k$  における, ある節点または要素のある物理量  $n$  の時間発展 ( $\in \mathbb{R}^{1 \times M}$ )

$\hat{x}_{n,1:m}^{(k)}$  :  $x_{n,1:m}^{(k)}$  に対応する推定値 ( $\in \mathbb{R}^{1 \times M}$ )

ここで、式 (A. 6) を式 (A. 7) のとおりの通り書き換える。

$$\begin{aligned} E_{\text{SS}}(B_{\text{mode}}) &:= \text{tr} \left( (X^K - \hat{X}^K) (X^K - \hat{X}^K)^T \right) \\ &= (X^K - \hat{X}^K) : (X^K - \hat{X}^K) \\ &= (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) : (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) \quad (\text{A. 7}) \end{aligned}$$

ここに

$E_{\text{SS}}(B_{\text{mode}})$  :  $X^K$  と  $\hat{X}^K$  の二乗和誤差

$$\left( := \text{tr} \left( (X^K - \hat{X}^K) (X^K - \hat{X}^K)^T \right) \right) (\in \mathbb{R})$$

式 (A. 7) の  $B_{\text{mode}}$  に関する導関数は、指標標記で表現すると、式 (A. 8) で表される。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{dE_{\text{SS}}(B_{\text{mode}})}{dB_{\text{mode}}} \right)_{pq} \\ &= \left( \frac{d \left( (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) : (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) \right)}{dB_{\text{mode}}} \right)_{pq} \\ &= \frac{d \left( (X_{st}^K - \Psi_{su}^K (B_{\text{mode}})_{ut}) (X_{st}^K - \Psi_{sv}^K (B_{\text{mode}})_{vt}) \right)}{d(B_{\text{mode}})_{pq}} \\ &= -\Psi_{su}^K \delta_{up} \delta_{lq} (X_{st}^K - \Psi_{sv}^K (B_{\text{mode}})_{vt}) \\ & \quad + (X_{st}^K - \Psi_{su}^K (B_{\text{mode}})_{ut}) (-\Psi_{sv}^K \delta_{vp} \delta_{lq}) \\ &= -\Psi_{sp}^K (X_{sq}^K - \Psi_{sv}^K (B_{\text{mode}})_{vq}) - (X_{sq}^K - \Psi_{su}^K (B_{\text{mode}})_{uq}) \Psi_{sp}^K \\ &= -2 \Psi_{sp}^K (X_{sq}^K - \Psi_{su}^K (B_{\text{mode}})_{uq}) \\ &= -2 \left( (\Psi^K)^T (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) \right)_{pq} \quad (\text{A. 8}) \end{aligned}$$

ここに

$(\cdot)_{pq}$  : 行列  $(\cdot)$  の第  $(p, q)$  成分 ( $\in \mathbb{R}$ )

$E_{\text{SS}}(B_{\text{mode}})$  を最小化するための1次の最適性の必要条件は、式 (A. 6) で表される。よって、回帰係数  $B_{\text{mode}}$  の最小二乗推定値が導出された。

$$\begin{aligned} & \frac{dE_{\text{SS}}(B_{\text{mode}})}{dB_{\text{mode}}} = 0 \\ & \Leftrightarrow -2 (\Psi^K)^T (X^K - \Psi^K B_{\text{mode}}) = 0 \\ & \therefore B_{\text{mode}}^{\text{LSE}} = \left[ (\Psi^K)^T \Psi^K \right]^{-1} (\Psi^K)^T X \quad (\text{A. 6}) \end{aligned}$$

付録 B 代替モデルによる推定値の分散の導出

本研究における代替モデルは、推定値  $\hat{X}$  と入力変数との関係を線形回帰により結び付けている。このため、期待値の性質から、推定値  $\hat{X}$  の分散を解析的に求めることができる。推定値  $\hat{X}$  の分散は式 (B. 1) で表される。ここでは式 (B. 1) の導出過程を解説する。

$$\text{Var}[\hat{X}] = \sum_{i=1}^{p+1} \lambda_i (\Phi B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}})^2 \quad (\text{B. 1})$$

ここに

$Y^{\circ 2}$  : 行列  $Y$  ( $\in \mathbb{R}^{i \times j}$ ) の自身とのHadamard積

$$(:= Y \circ Y := [Y_{ij}^2]_{\substack{1 \leq i \leq I \\ 1 \leq j \leq J}}) (\in \mathbb{R}^{I \times J})$$

$B_{\text{PCA}p}^{\text{LSE}}$  :  $B_{\text{mode}}^{\text{LSE}}$  を各モードに区分したベクトルの第  $p$  行を抜き出し、行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )

$\lambda_i$  :  $p$ 個の入力変数と1からなるベクトル  $\zeta$  の共分散行列の固有値

代替モデルによる回帰方程式を式 (B. 2) のとおりに書き換える。

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \Psi B_{\text{mode}}^{\text{LSE}} \\ &= [\varphi_1 \zeta^T, \dots, \varphi_r \zeta^T] \begin{bmatrix} B_{\text{mode}1}^{\text{LSE}} \\ \vdots \\ B_{\text{mode}r}^{\text{LSE}} \end{bmatrix} \\ &= [\varphi_1, \dots, \varphi_r] \begin{bmatrix} \zeta^T B_{\text{mode}1}^{\text{LSE}} \\ \vdots \\ \zeta^T B_{\text{mode}r}^{\text{LSE}} \end{bmatrix} \\ &= \Phi \begin{bmatrix} \zeta^T B_{\text{mode}1}^{\text{LSE}} \\ \vdots \\ \zeta^T B_{\text{mode}r}^{\text{LSE}} \end{bmatrix} \quad (\text{B. 2}) \end{aligned}$$

さらに、予測値  $\hat{X}$  の第  $n$  行目、第  $m$  列目に着目した上で、式 (B. 2) を指標表記で表すと、式 (B. 3) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \hat{X}_{nm} &= \sum_{i=1}^{p+1} \sum_{j=1}^r \Phi_{nj} \zeta_i (B_{\text{mode}j}^{\text{LSE}})_{im} \\ &= \sum_{i=1}^{p+1} [\Phi_{n1}, \dots, \Phi_{nr}] \begin{bmatrix} (B_{\text{mode}1}^{\text{LSE}})_{im} \\ \vdots \\ (B_{\text{mode}r}^{\text{LSE}})_{im} \end{bmatrix} \zeta_i \\ &= \sum_{i=1}^{p+1} \Phi_{n:,r} \begin{bmatrix} (B_{\text{mode}1}^{\text{LSE}})_{im} \\ \vdots \\ (B_{\text{mode}r}^{\text{LSE}})_{im} \end{bmatrix} \zeta_i \\ &= \sum_{i=1}^{p+1} \Phi_{n:,r} (B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}})_m \zeta_i \\ &= \Phi_{n:,r} [(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}})_m, \dots, (B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}})_m] \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_{p+1} \end{bmatrix} \\ &= \Phi_{n:,r} [(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}})_m, \dots, (B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}})_m] \zeta \quad (\text{B. 3}) \end{aligned}$$

ここに

$\hat{X}_{nm}$  : 予測値  $\hat{X}$  の第  $n$  行目、第  $m$  列目

$\Phi_{n:,r}$  :  $\Phi$  の第  $n$  行からなる行ベクトル ( $\in \mathbb{R}^{1 \times r}$ )

$B_{\text{PCA}p}^{\text{LSE}}$  :  $B_{\text{mode}}^{\text{LSE}}$  を各モードに区分したベクトルの第  $p$  行を抜き出し、行方向に並べた行列 ( $\in \mathbb{R}^{r \times m}$ )

$(B_{\text{PCA}p}^{\text{LSE}})_m$  :  $B_{\text{PCA}p}^{\text{LSE}}$  の第  $m$  列 ( $\in \mathbb{R}^r$ )

ここで、一般に、確率変数  $X$  の分散は式 (B. 4) により算出することができる。

$$\begin{aligned} \text{Var}[X] &= E[X^2] - E[X]^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right]^2 \quad (\text{B. 4}) \end{aligned}$$

この関係を、 $\hat{X}_{nm}$  について当てはめると、式 (B. 5) のとおりとなる。

$$\text{Var}[\hat{X}_{nm}] = E[\hat{X}_{nm}^2] - E[\hat{X}_{nm}]^2 \quad (\text{B. 5})$$

ここで、 $E[\hat{X}_{nm}] = 0$ であることから、式(B.5)は式(B.6)のとおり表される。

$$\text{Var}[\hat{X}_{nm}] = E[\hat{X}_{nm}^2] \quad (\text{B.6})$$

さらに、式(B.6)に式(B.3)を代入すると、式(B.7)のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{X}_{nm}] &= E\left[\left(\Phi_{n,l:r}\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right]\zeta\right)^2\right] \\ &= E\left[\Phi_{n,l:r}\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right]\zeta\zeta^T\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^T\left(\Phi_{n,l:r}\right)^T\right] \\ &= \Phi_{n,l:r}\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right]E\left[\zeta\zeta^T\right]\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^T\left(\Phi_{n,l:r}\right)^T \\ &= C_{nm}AC_{nm}^2 \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i(C_{nm})_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\sum_{i=1}^{p+1}\Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

ここに

$$A \quad : \quad \zeta \text{ の共分散行列 } ( := E[\zeta\zeta^T] = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_p, 1) )$$

$$C_{nm} \quad : \quad \Phi_{n,l:r}\left[\left(B_{\text{PCA}1}^{\text{LSE}}\right)_m, \dots, \left(B_{\text{PCA}p+1}^{\text{LSE}}\right)_m\right] \quad ( \in \mathbb{R}^{1 \times (p+1)} )$$

$$(C_{nm})_i \quad : \quad C_{nm} \text{ の第 } i \text{ 列 } ( \in \mathbb{R} )$$

よって、主成分の分散から導かれる予測値 $\hat{X}$ 全体の分散は、全行(1~n)、全列(1~m)に並べると、式(B.8)のとおりとなり代替モデルによる推定値 $\hat{X}$ の分散が導出された。

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{X}] &= \begin{bmatrix} \text{Var}[\hat{X}_{11}] & \dots & \text{Var}[\hat{X}_{1n}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Var}[\hat{X}_{n1}] & \dots & \text{Var}[\hat{X}_{nn}] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1\right]^2 & \dots & \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1\right]^2 & \dots & \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i \begin{bmatrix} \left[\Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1\right]^2 & \dots & \left[\Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1\right]^2 & \dots & \left[\Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i \begin{bmatrix} \Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1 & \dots & \Phi_{1,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1 & \dots & \Phi_{n,l:r}\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m \end{bmatrix}^2 \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left[\Phi\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_1, \dots, \Phi\left(B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)_m\right]^2 \\ &= \sum_{i=1}^{p+1}\lambda_i\left(\Phi B_{\text{PCA}i}^{\text{LSE}}\right)^2 \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

付録 C 各種入力条件におけるモード分解結果

表-C.1 モード分解結果 (CASE1-1)

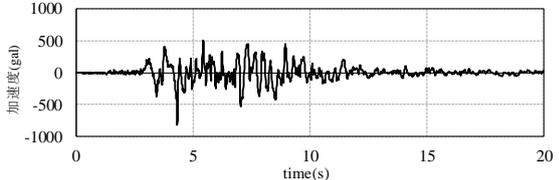
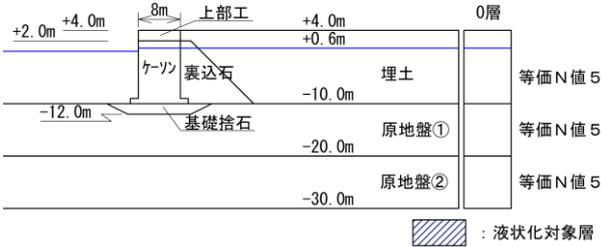
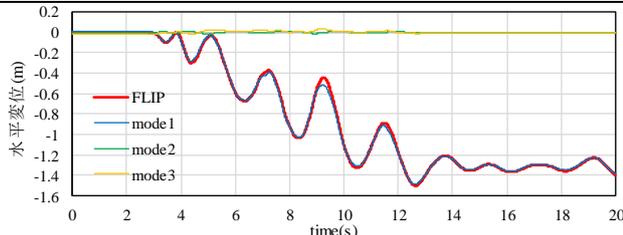
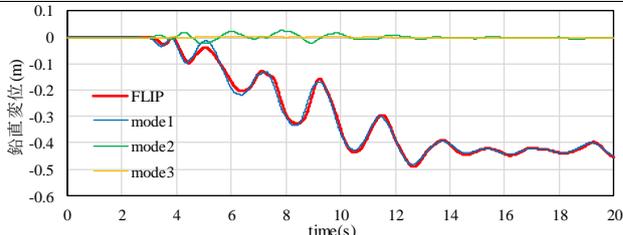
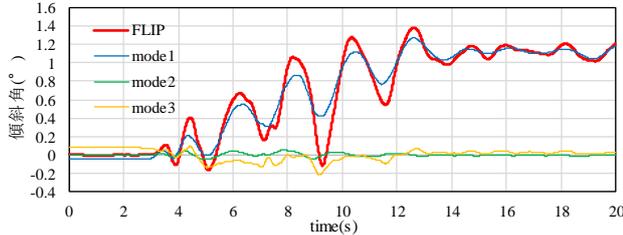
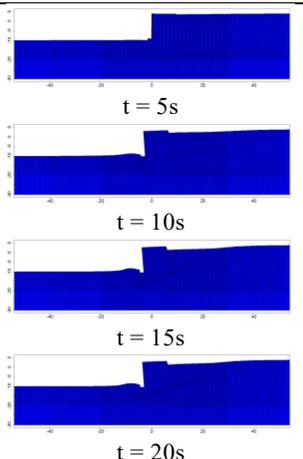
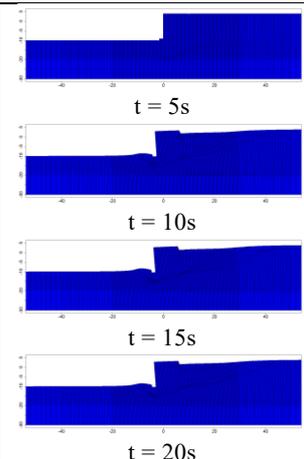
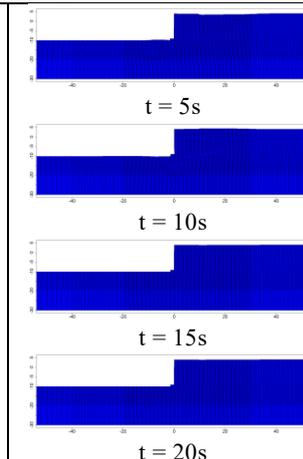
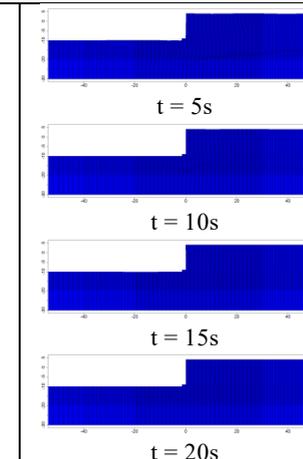
対象地震動					土質条件・液状化対象層		
<p>【神戸波】</p> <p>最大加速度：816.99(gal) 速度PSI値：85.041(cm/s<sup>1/2</sup>)</p> 							
寄与率					残留水平変位 (FLIP)	残留鉛直変位 (FLIP)	
mode-1	mode-2	mode-3	mode-4	mode-5	1.395m	0.453m	
97.6 %	1.8 %	0.3 %	0.1 %	0.1 %			
時刻歴応答値							
 <p>(a) 水平変位</p>			 <p>(b) 鉛直変位</p>				
 <p>(c) 傾斜角</p>			<p>(d) 過剰間隙水圧比</p> <p>非液状化条件により結果出力無し</p>				
スナップショット							
 <p>※変位量表示倍率×3</p> <p>(a) FLIP</p>		 <p>※変位量表示倍率×3</p> <p>(b) mode1</p>		 <p>※変位量表示倍率×5</p> <p>(c) mode2</p>		 <p>※変位量表示倍率×5</p> <p>(d) mode3</p>	

表-C.2 モード分解結果 (CASE1-2)

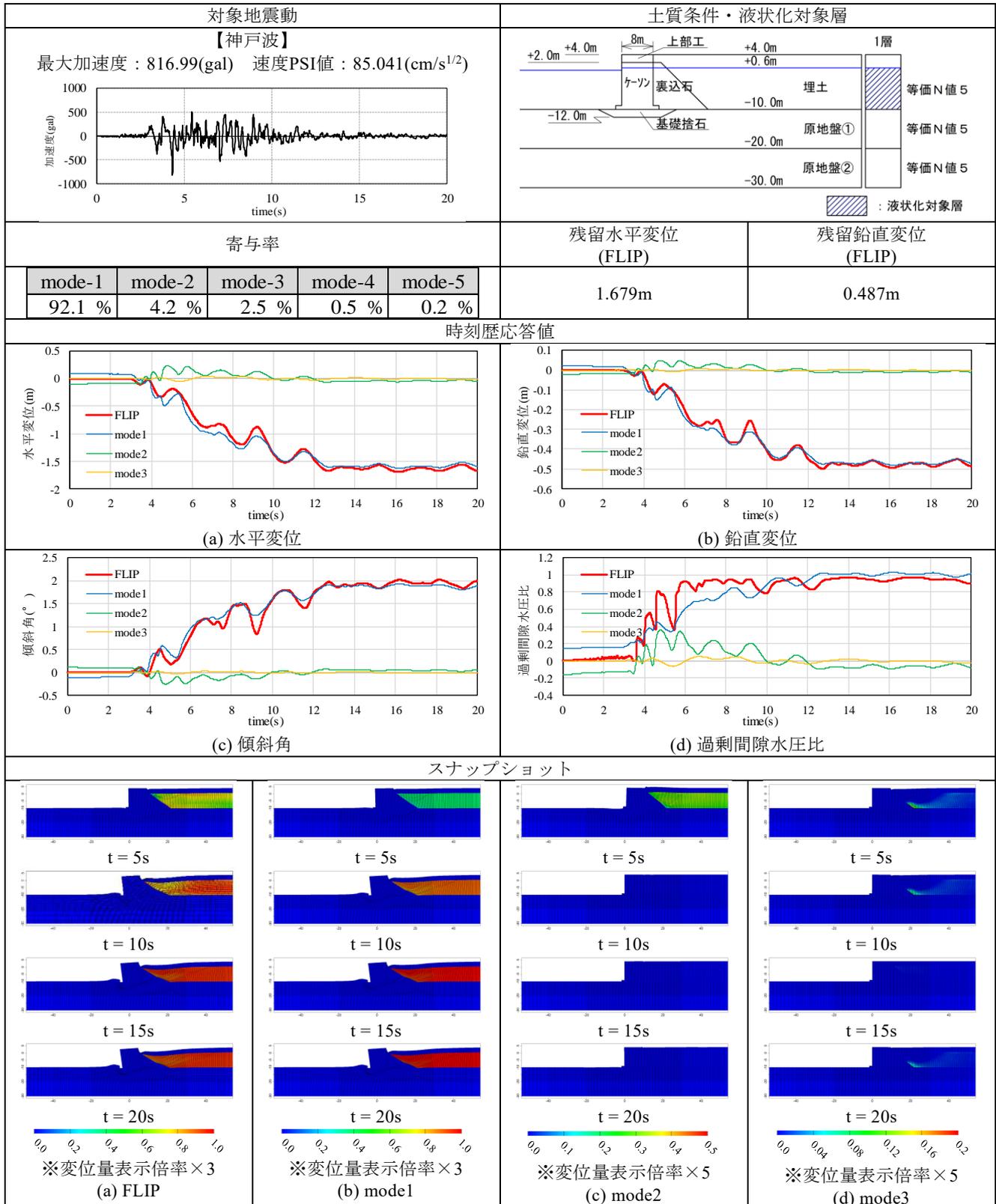


表-C.3 モード分解結果 (CASE1-3)

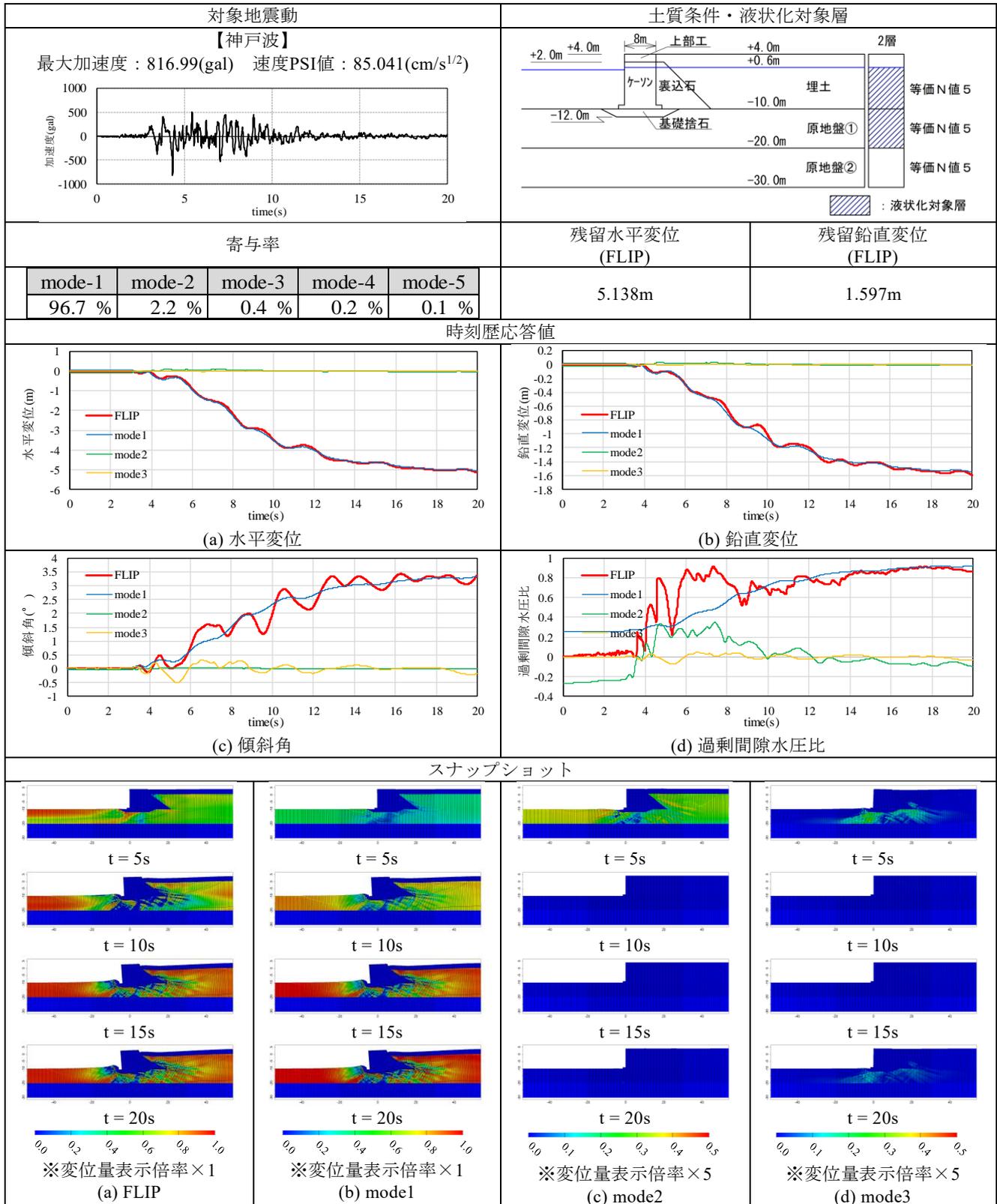


表-C.4 モード分解結果 (CASE1-4)

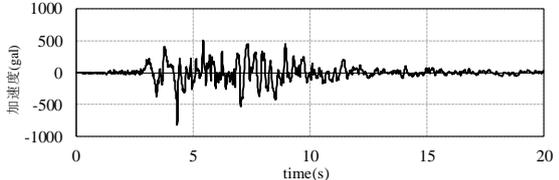
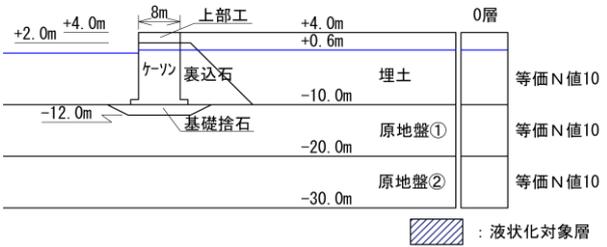
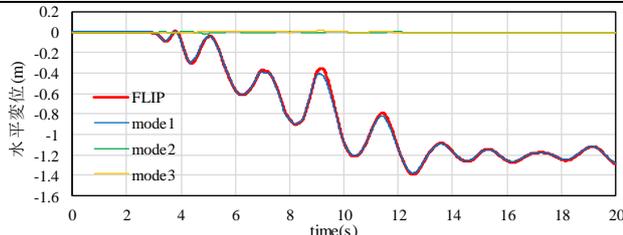
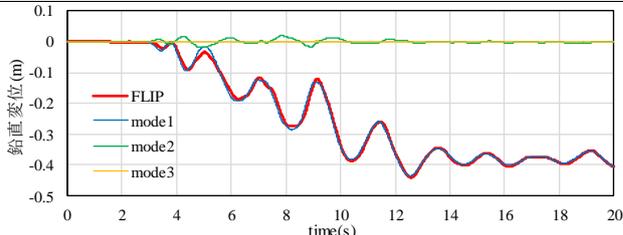
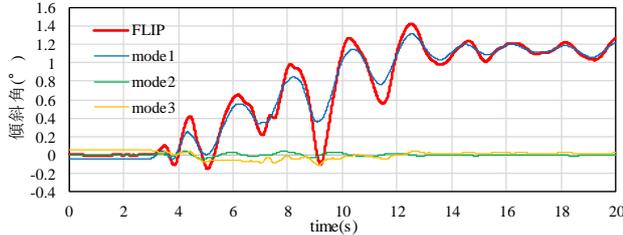
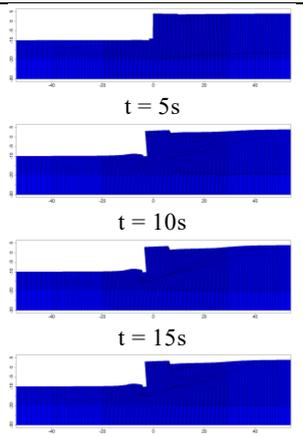
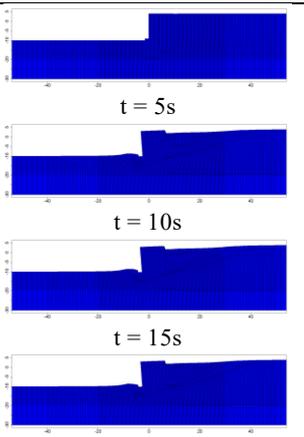
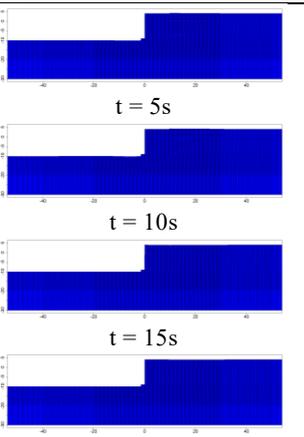
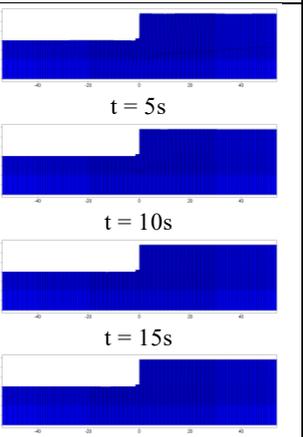
対象地震動					土質条件・液状化対象層		
【神戸波】 最大加速度：816.99(gal) 速度PSI値：85.041(cm/s <sup>1/2</sup> ) 							
寄与率					残留水平変位 (FLIP)	残留鉛直変位 (FLIP)	
mode-1	mode-2	mode-3	mode-4	mode-5	1.291m	0.407m	
98.1 %	1.4 %	0.3 %	0.1 %	0.0 %			
時刻歴応答値							
 <p>(a) 水平変位</p>			 <p>(b) 鉛直変位</p>				
 <p>(c) 傾斜角</p>			非液状化条件により結果出力無し (d) 過剰間隙水圧比				
スナップショット							
 <p>※変位量表示倍率×3 (a) FLIP</p>		 <p>※変位量表示倍率×3 (b) mode1</p>		 <p>※変位量表示倍率×5 (c) mode2</p>		 <p>※変位量表示倍率×5 (d) mode3</p>	

表-C.5 モード分解結果 (CASE1-5)

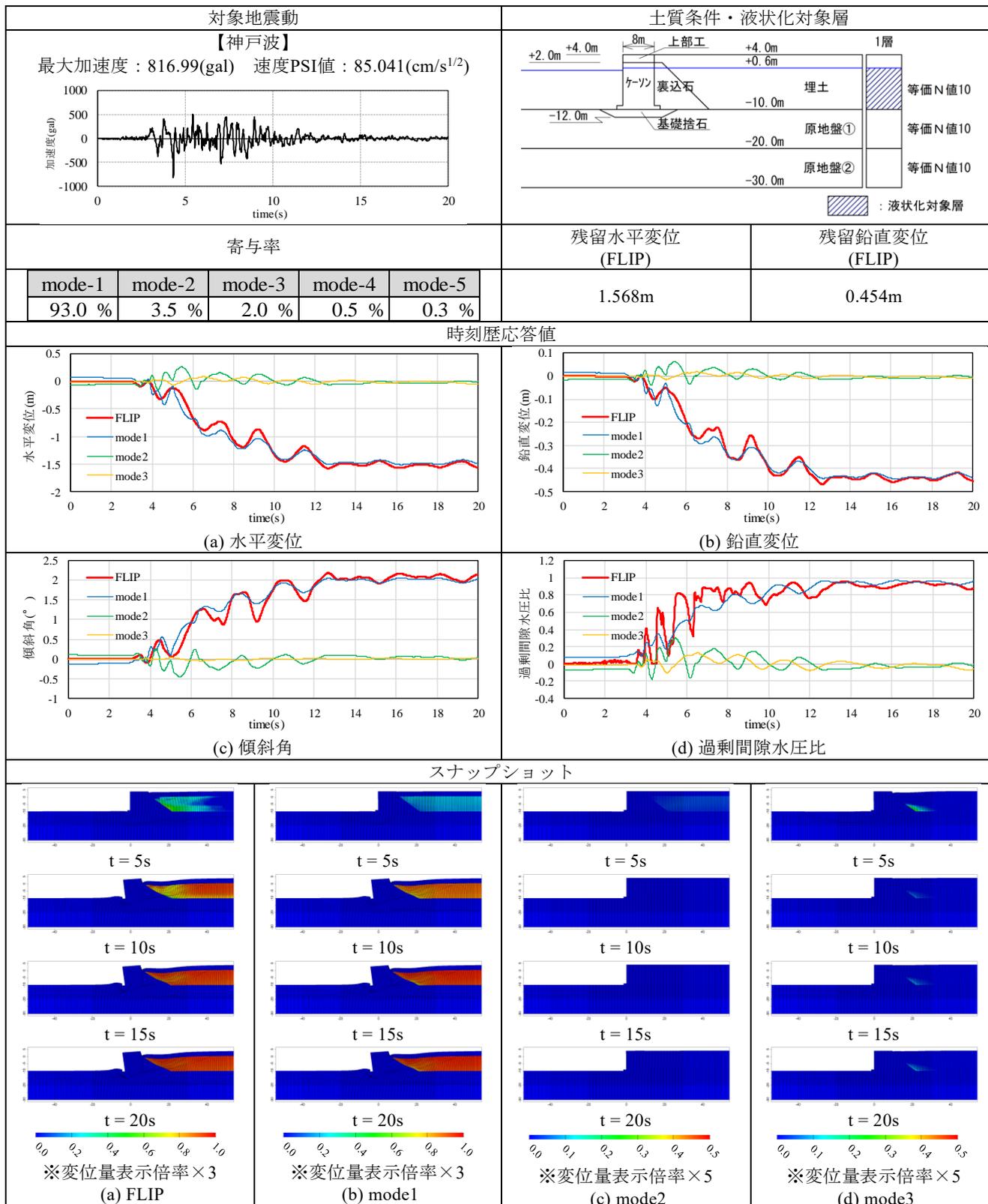


表-C.6 モード分解結果 (CASE1-6)

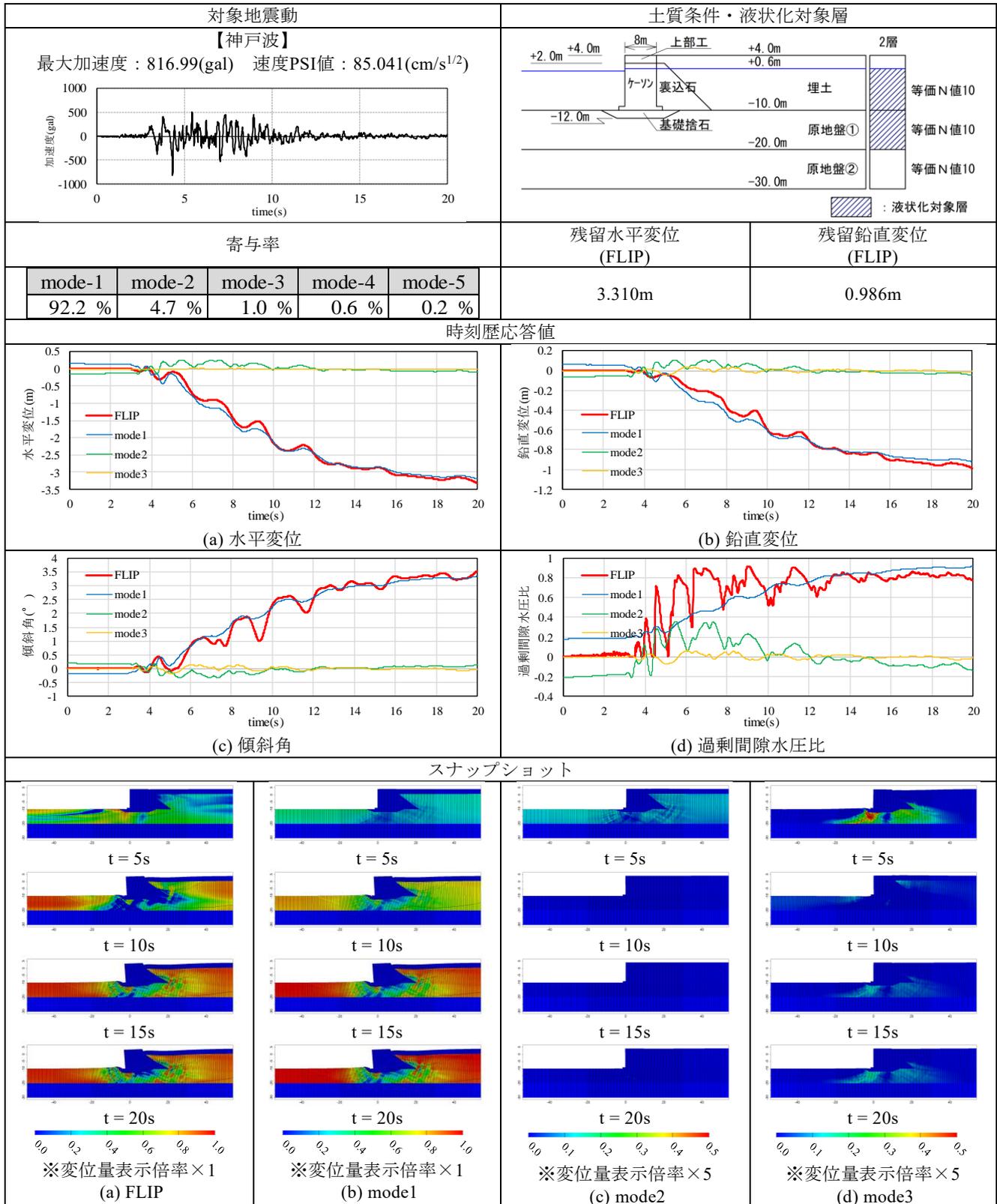


表-C.7 モード分解結果 (CASE1-7)

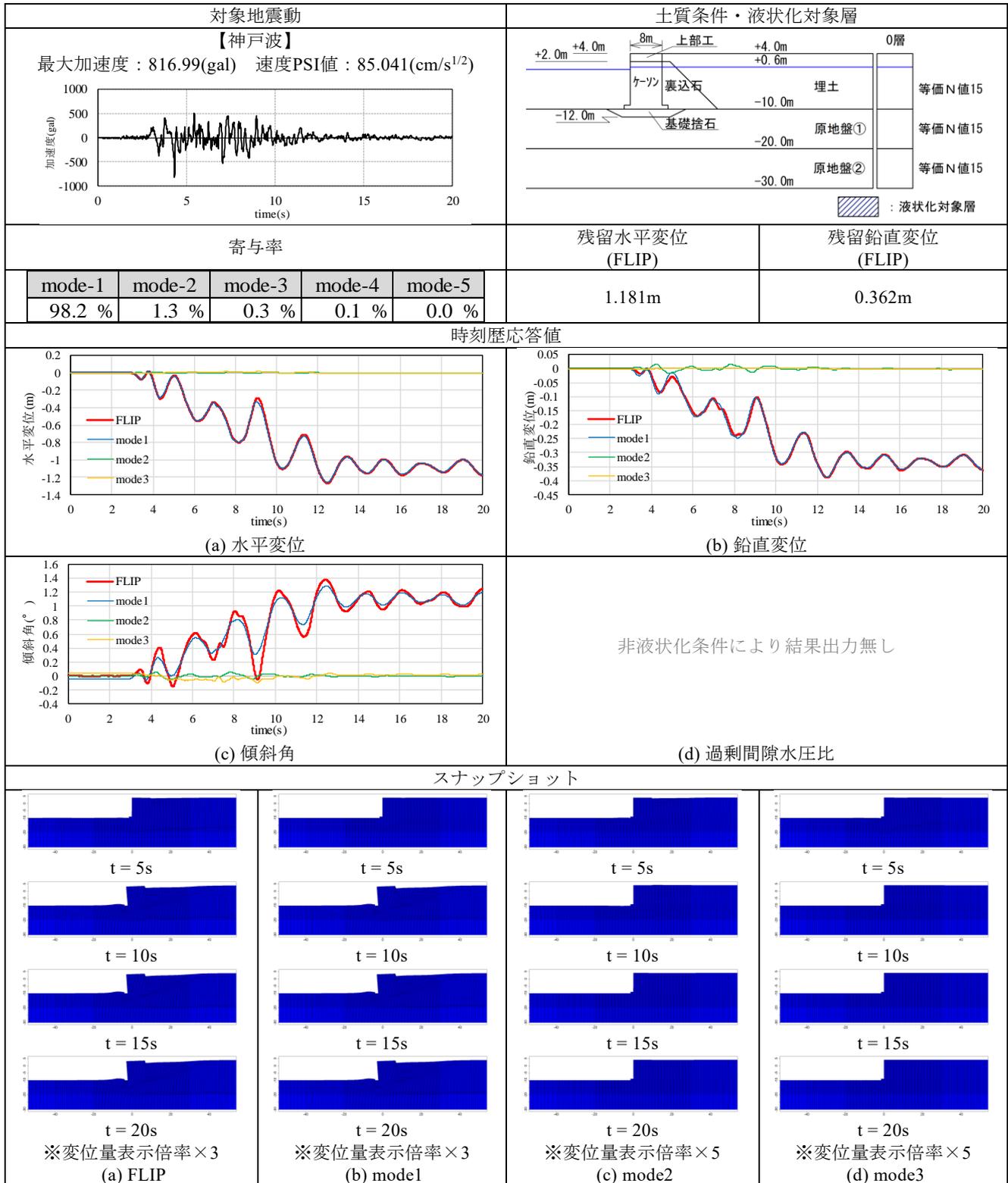


表-C.8 モード分解結果 (CASE1-8)

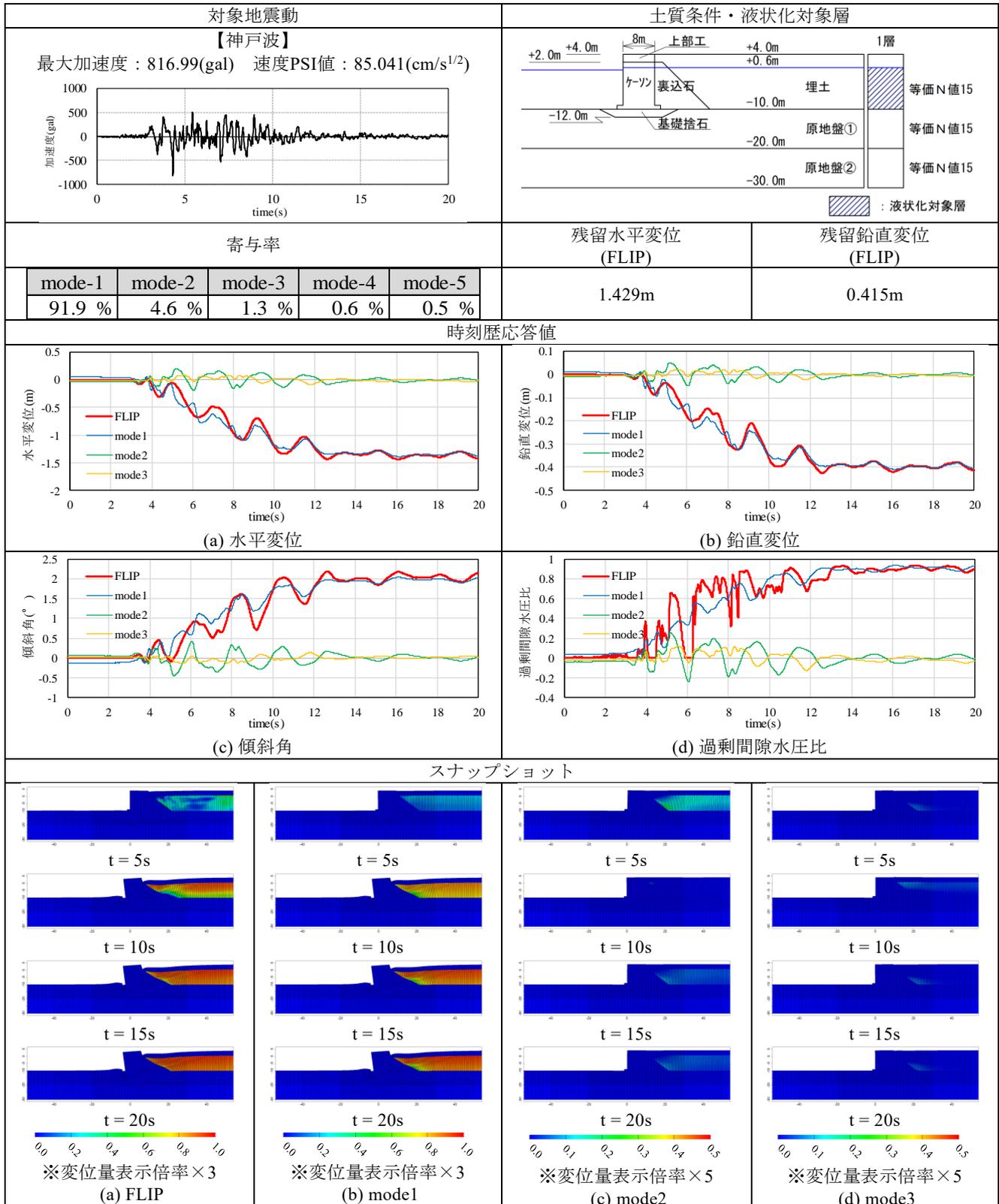


表-C.9 モード分解結果 (CASE1-9)

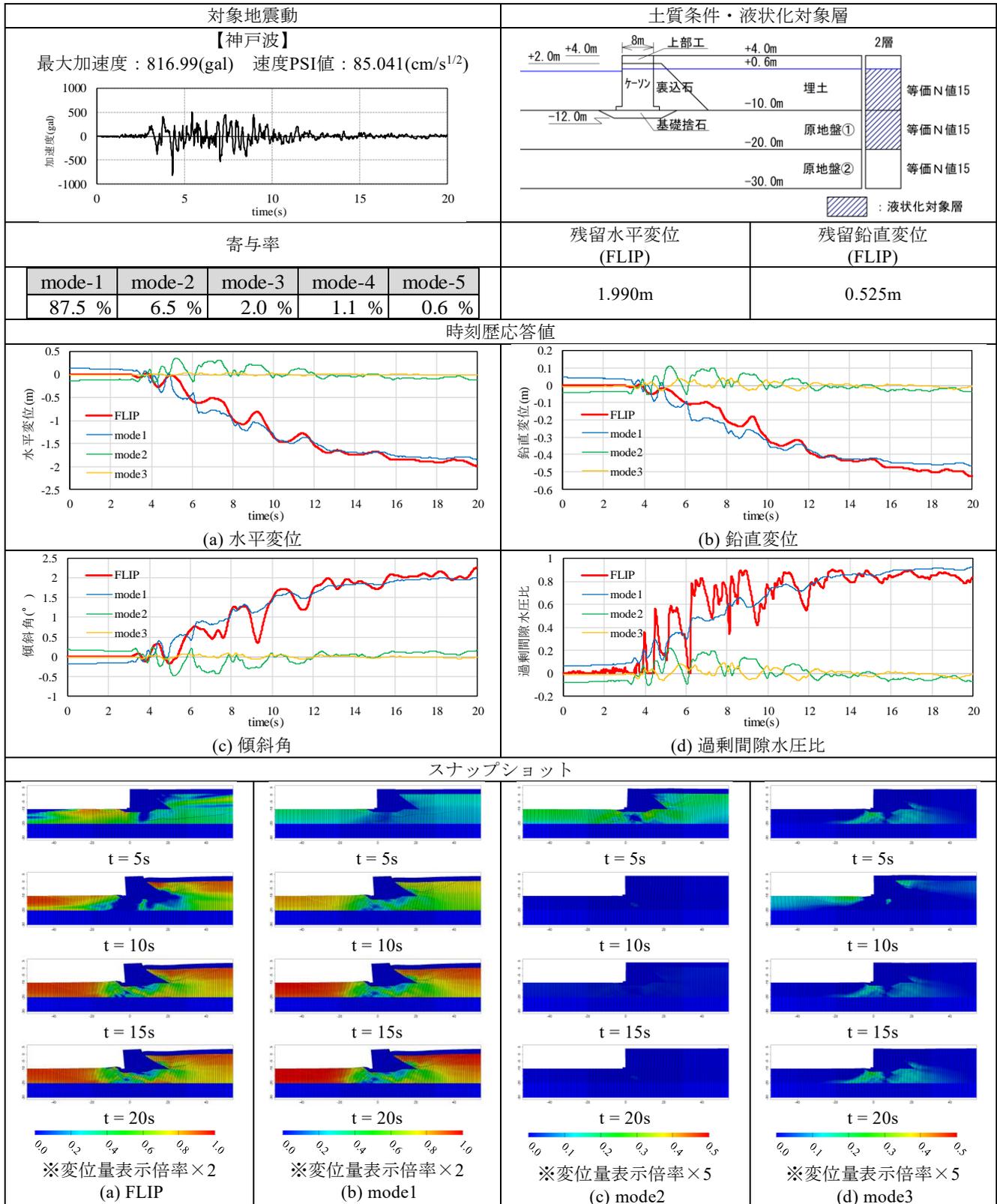


表-C.10 モード分解結果 (CASE2-1)

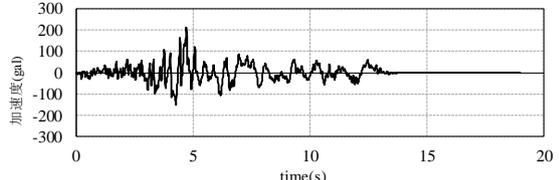
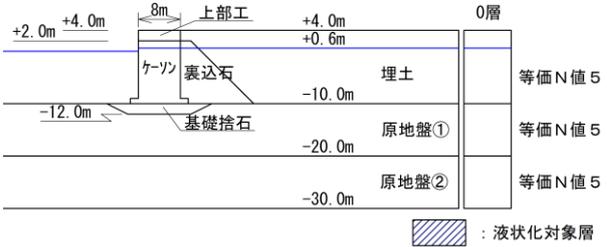
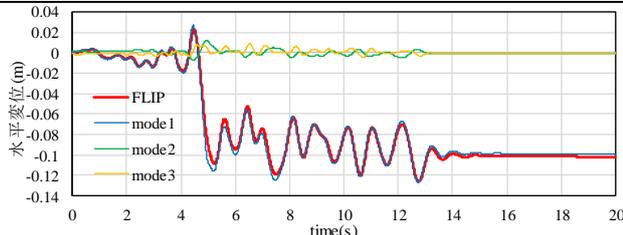
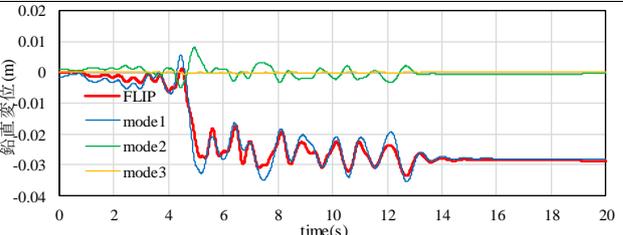
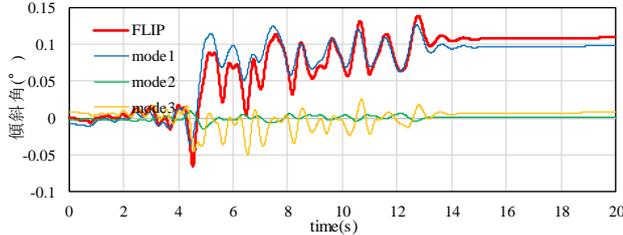
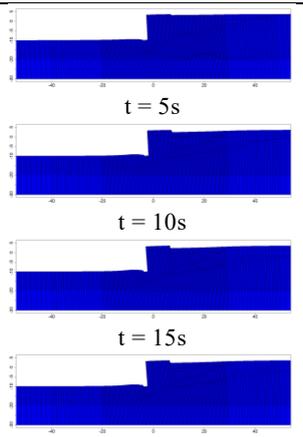
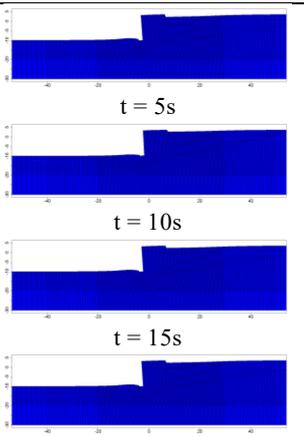
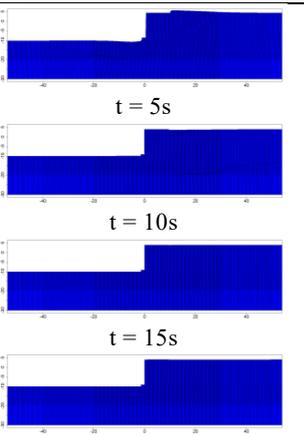
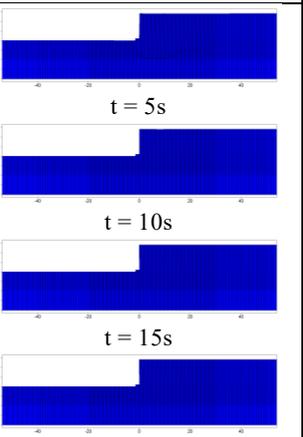
対象地震動					土質条件・液状化対象層		
【八戸波】 最大加速度：209.89(gal) 速度PSI値：30.185(cm/s <sup>1/2</sup> ) 							
寄与率					残留水平変位 (FLIP)	残留鉛直変位 (FLIP)	
mode-1	mode-2	mode-3	mode-4	mode-5	0.102m	0.029m	
95.5 %	3.7 %	0.6 %	0.1 %	0.1 %			
時刻歴応答値							
 <p>(a) 水平変位</p>			 <p>(b) 鉛直変位</p>				
 <p>(c) 傾斜角</p>			非液状化条件により結果出力無し (d) 過剰間隙水圧比				
スナップショット							
 <p>t = 5s t = 10s t = 15s t = 20s ※変位量表示倍率×30 (a) FLIP</p>		 <p>t = 5s t = 10s t = 15s t = 20s ※変位量表示倍率×30 (b) mode1</p>		 <p>t = 5s t = 10s t = 15s t = 20s ※変位量表示倍率×50 (c) mode2</p>		 <p>t = 5s t = 10s t = 15s t = 20s ※変位量表示倍率×50 (d) mode3</p>	

表-C.11 モード分解結果 (CASE2-2)

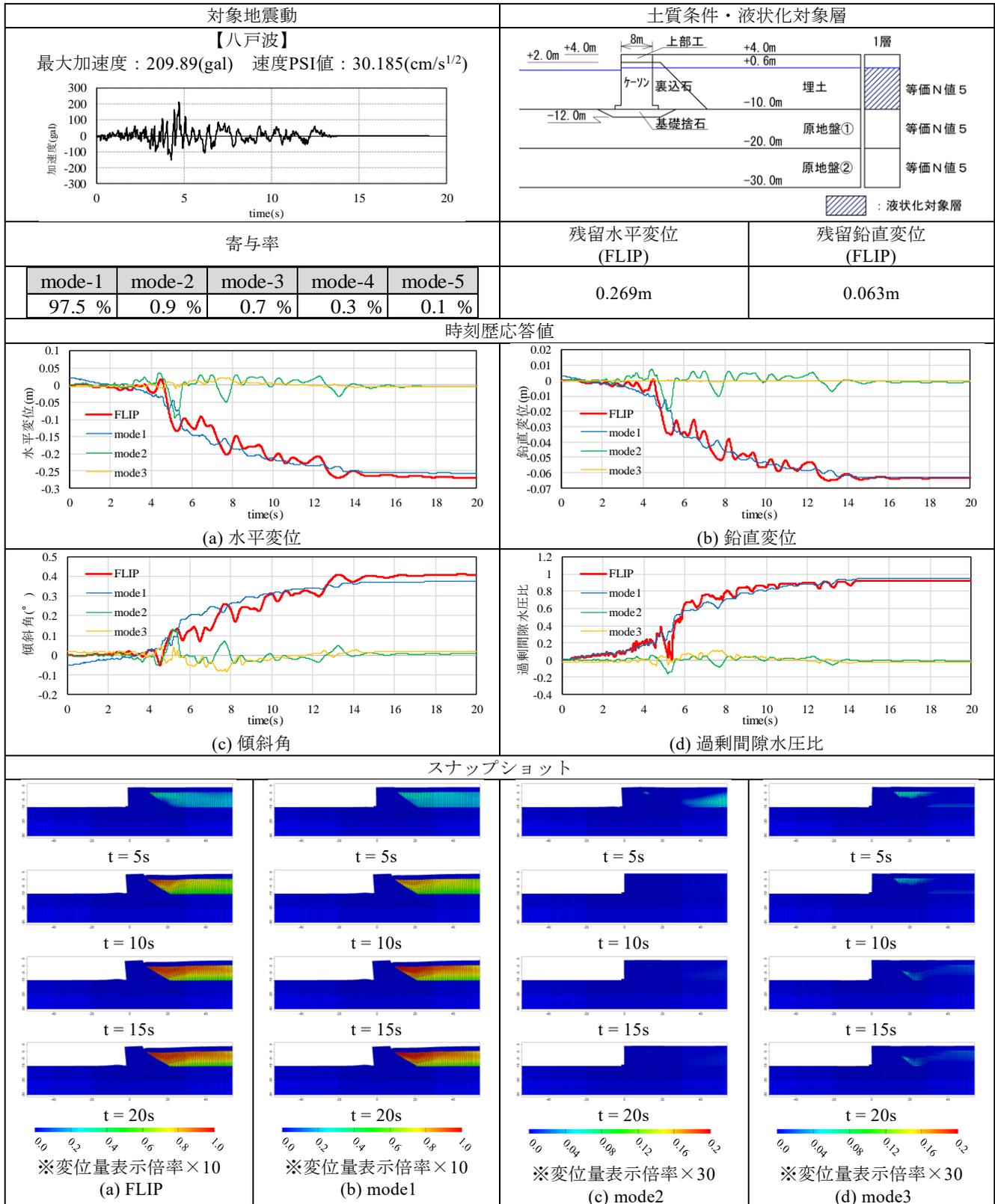


表-C.12 モード分解結果 (CASE2-3)

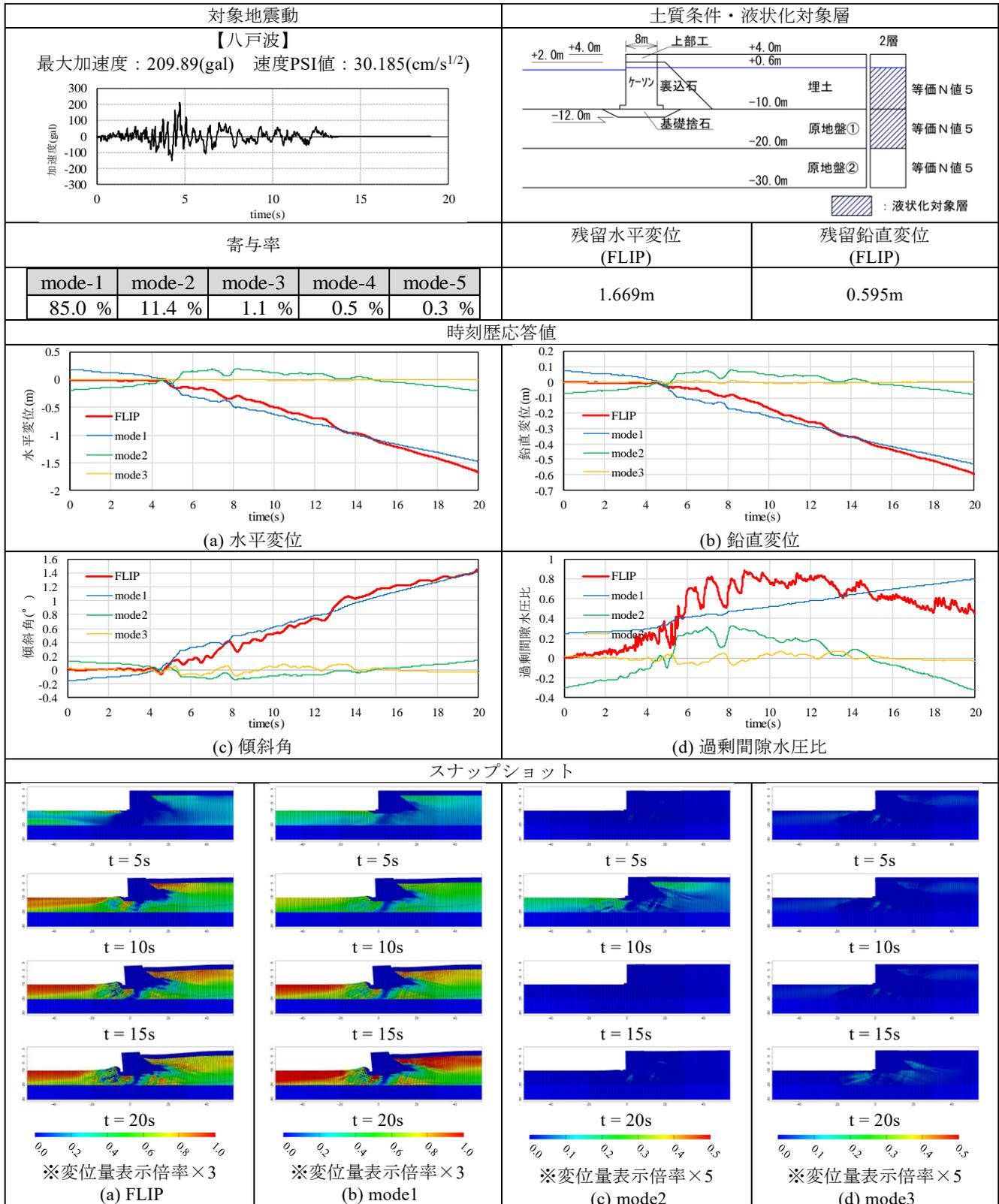


表-C.13 モード分解結果 (CASE2-4)

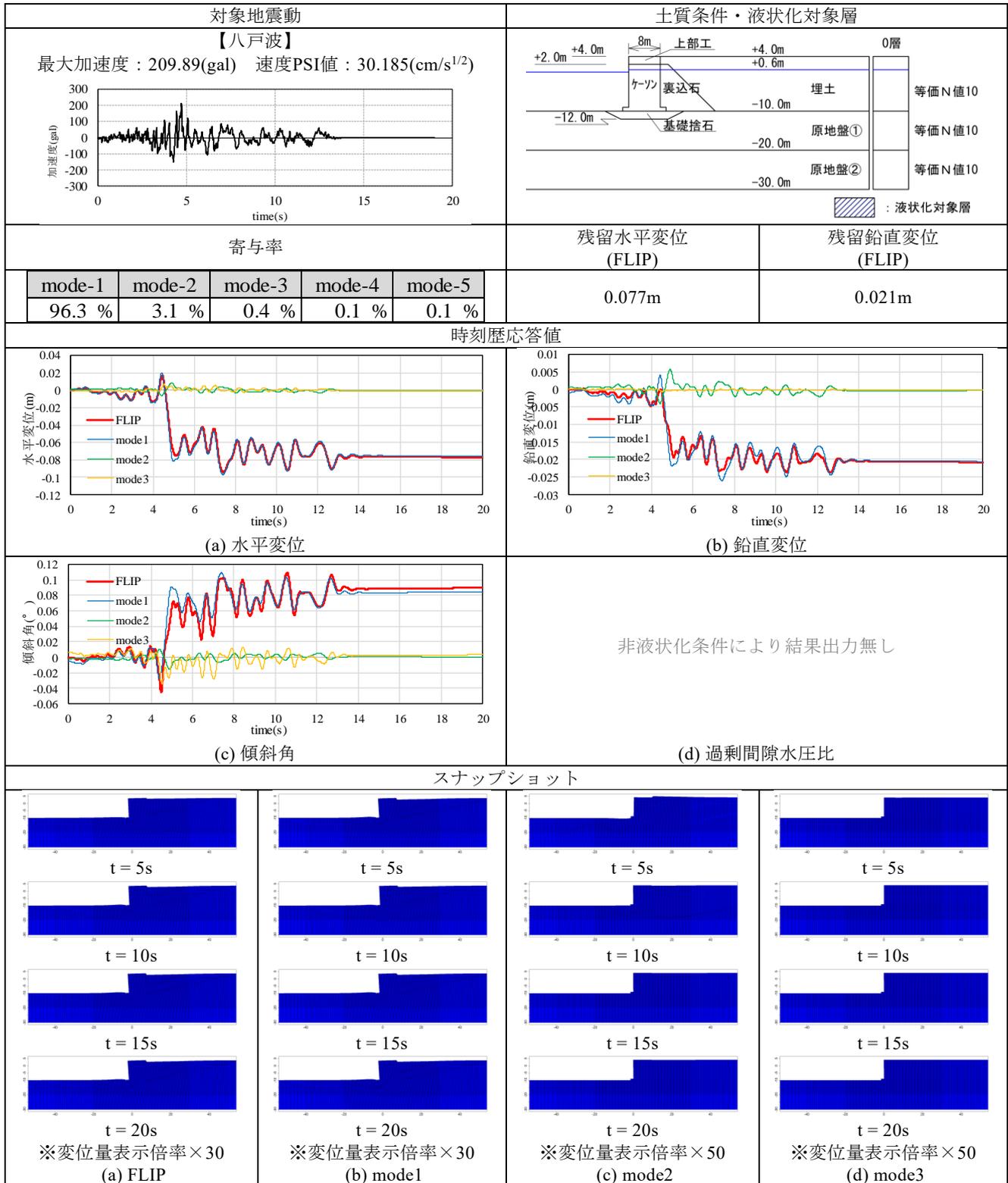


表-C.14 モード分解結果 (CASE2-5)

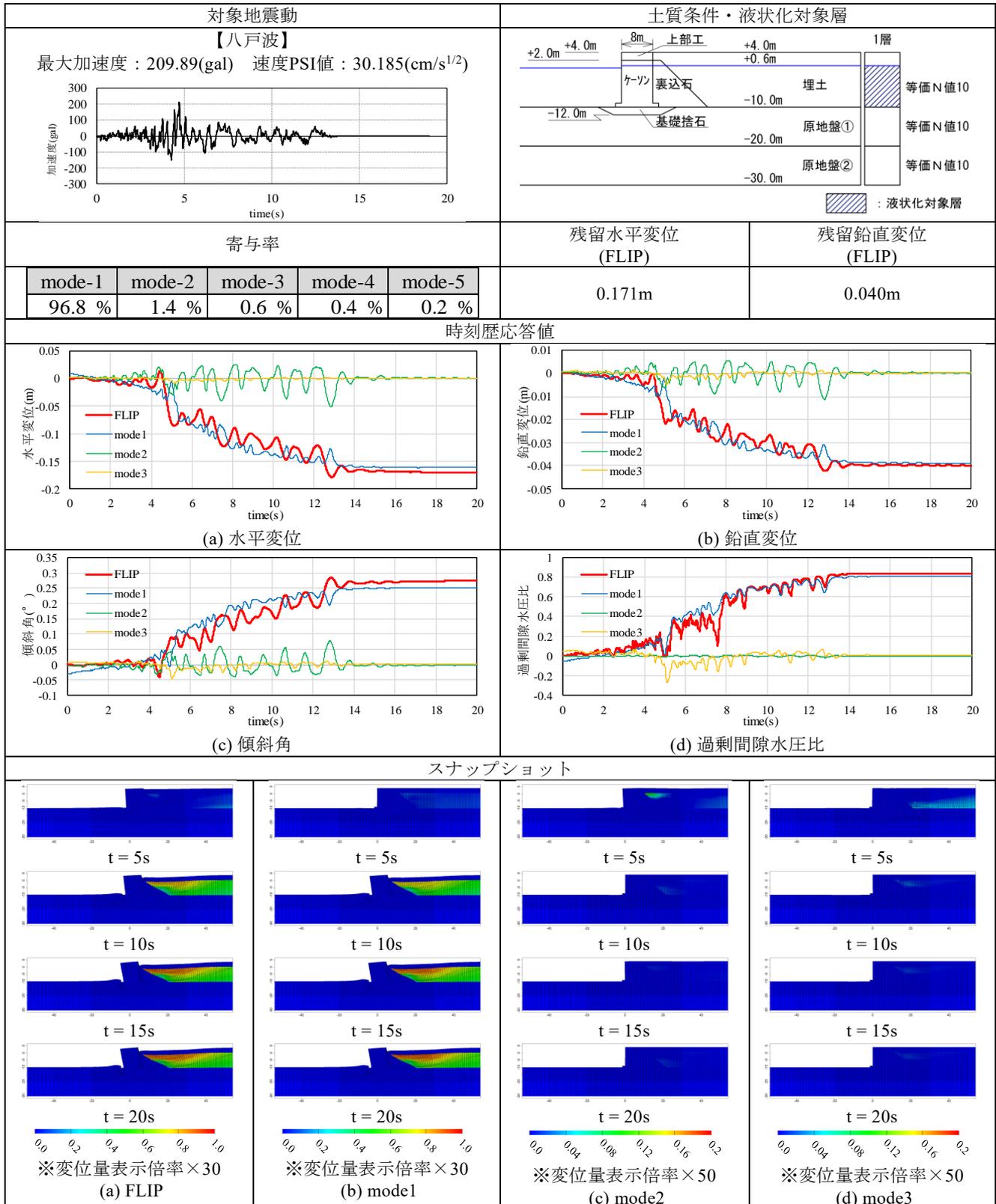


表-C.15 モード分解結果 (CASE2-6)

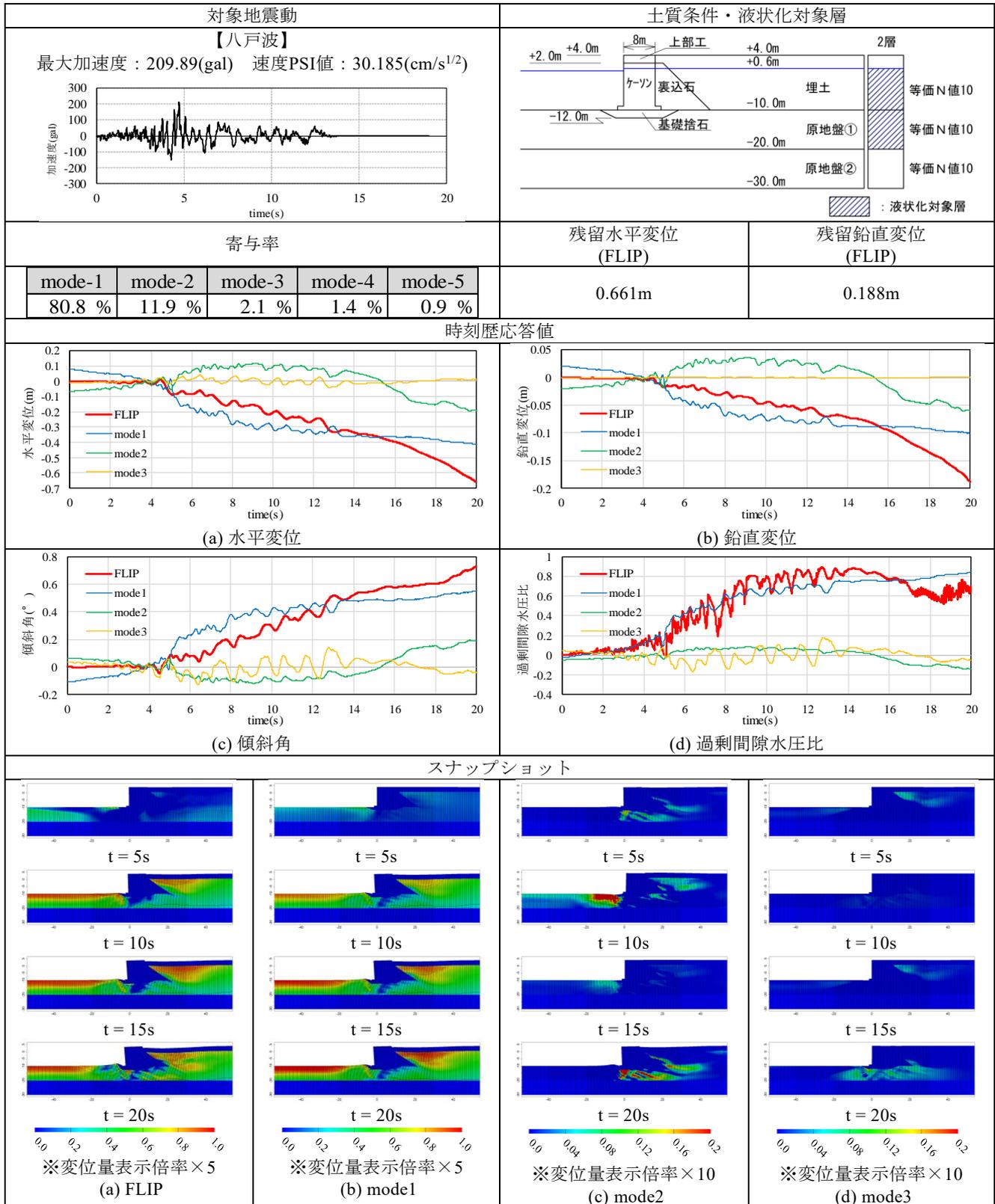


表-C.16 モード分解結果 (CASE2-7)

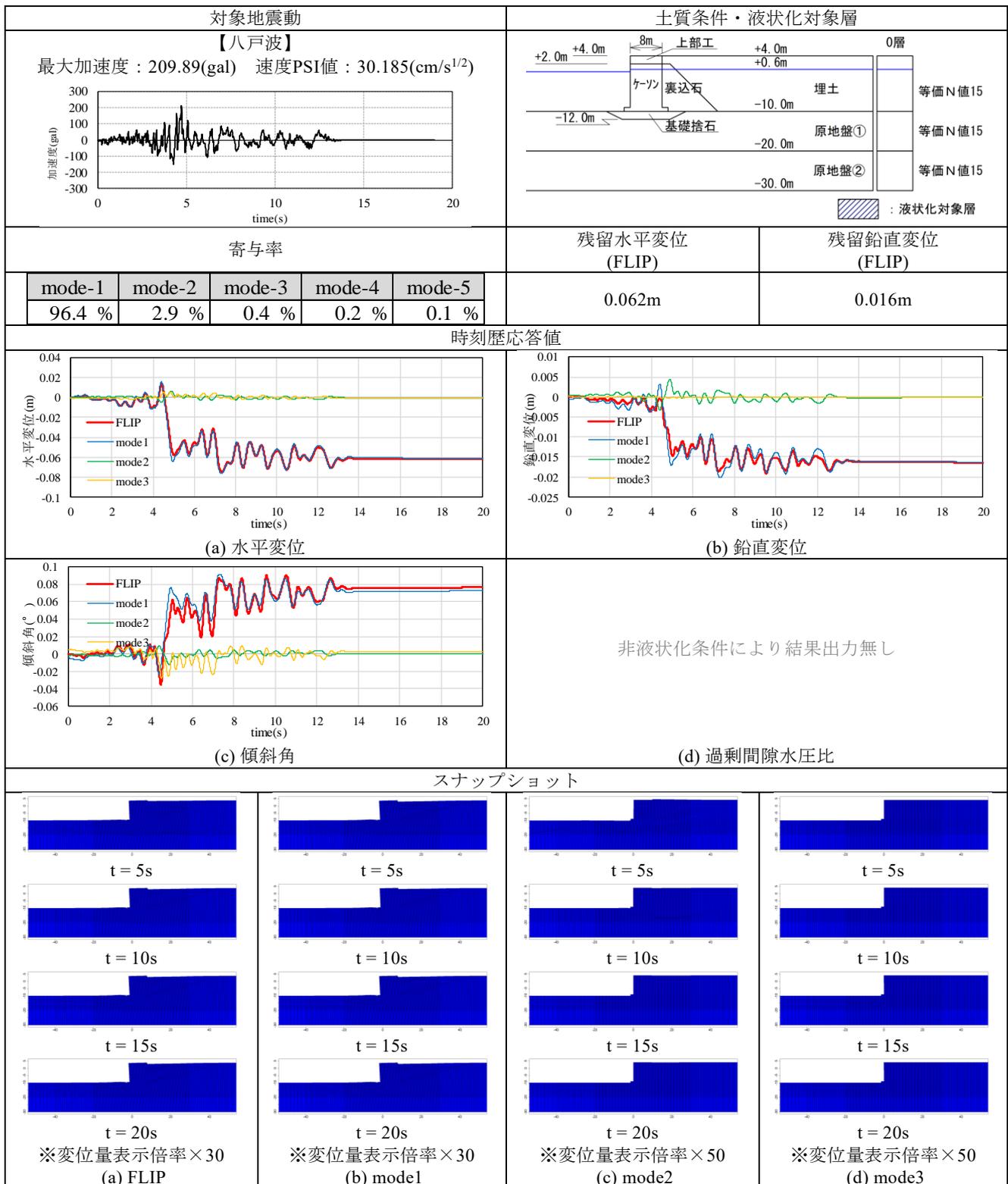


表-C.17 モード分解結果 (CASE2-8)

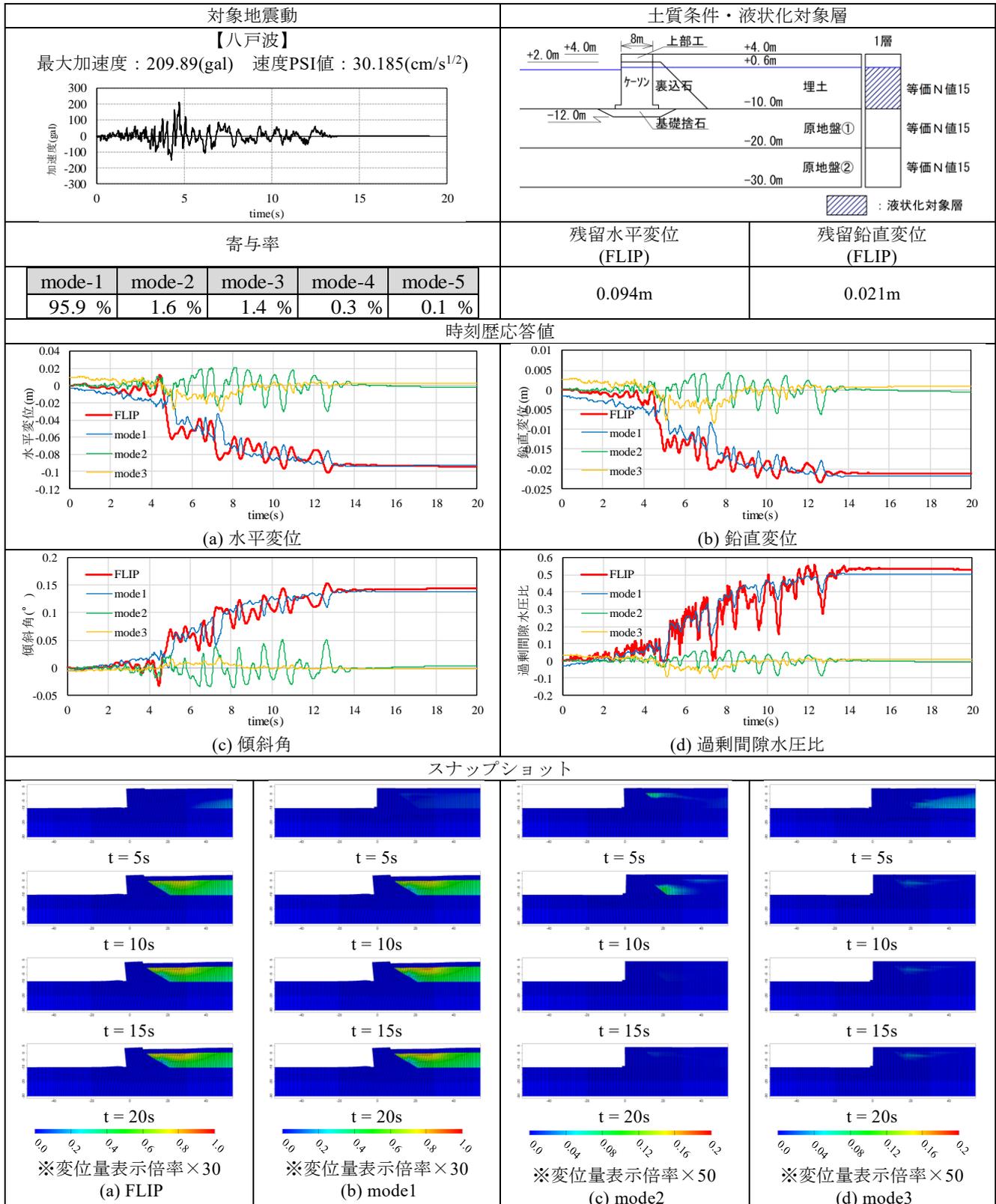


表-C.18 モード分解結果 (CASE2-9)

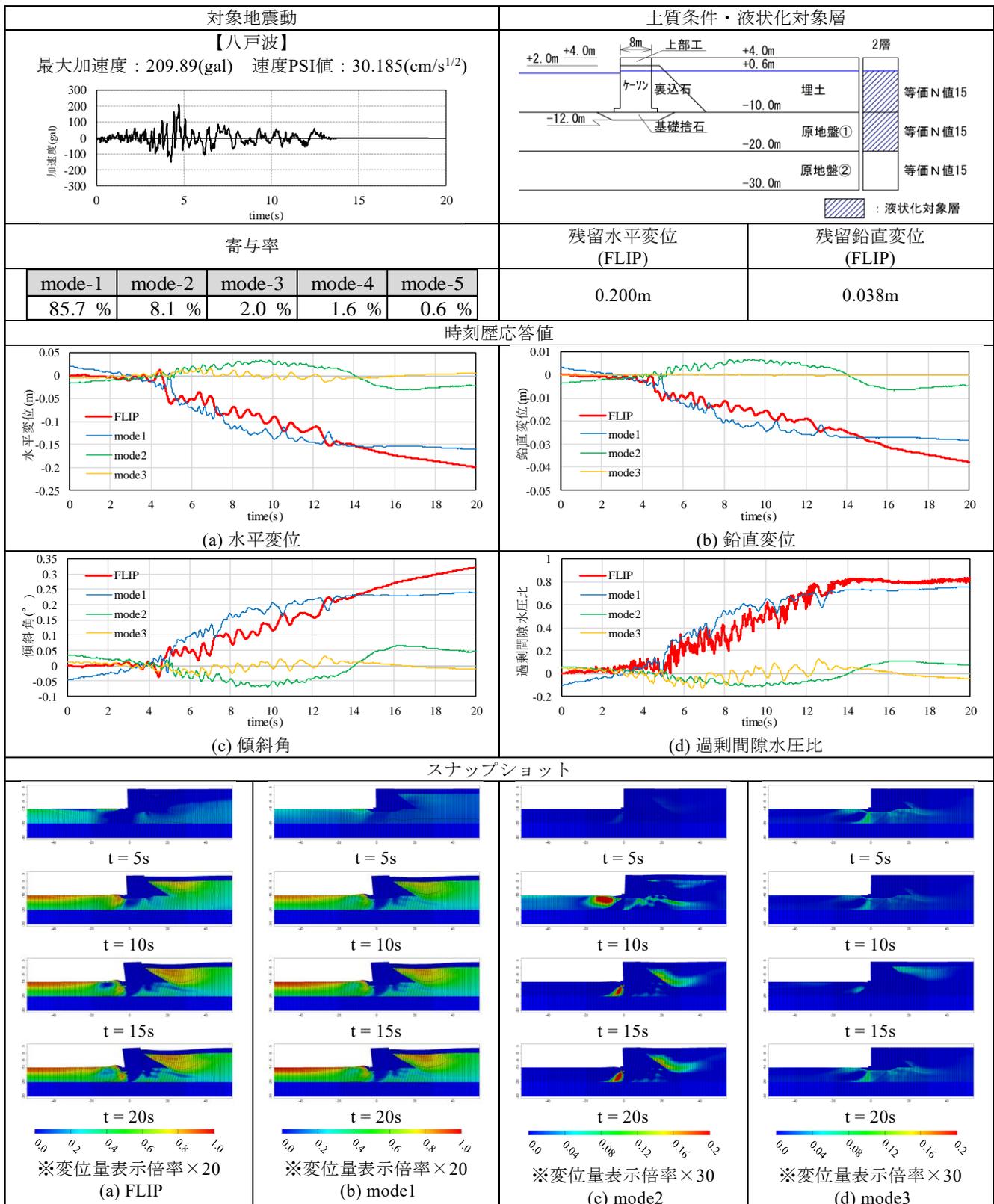


表-C.19 モード分解結果 (CASE3-1)

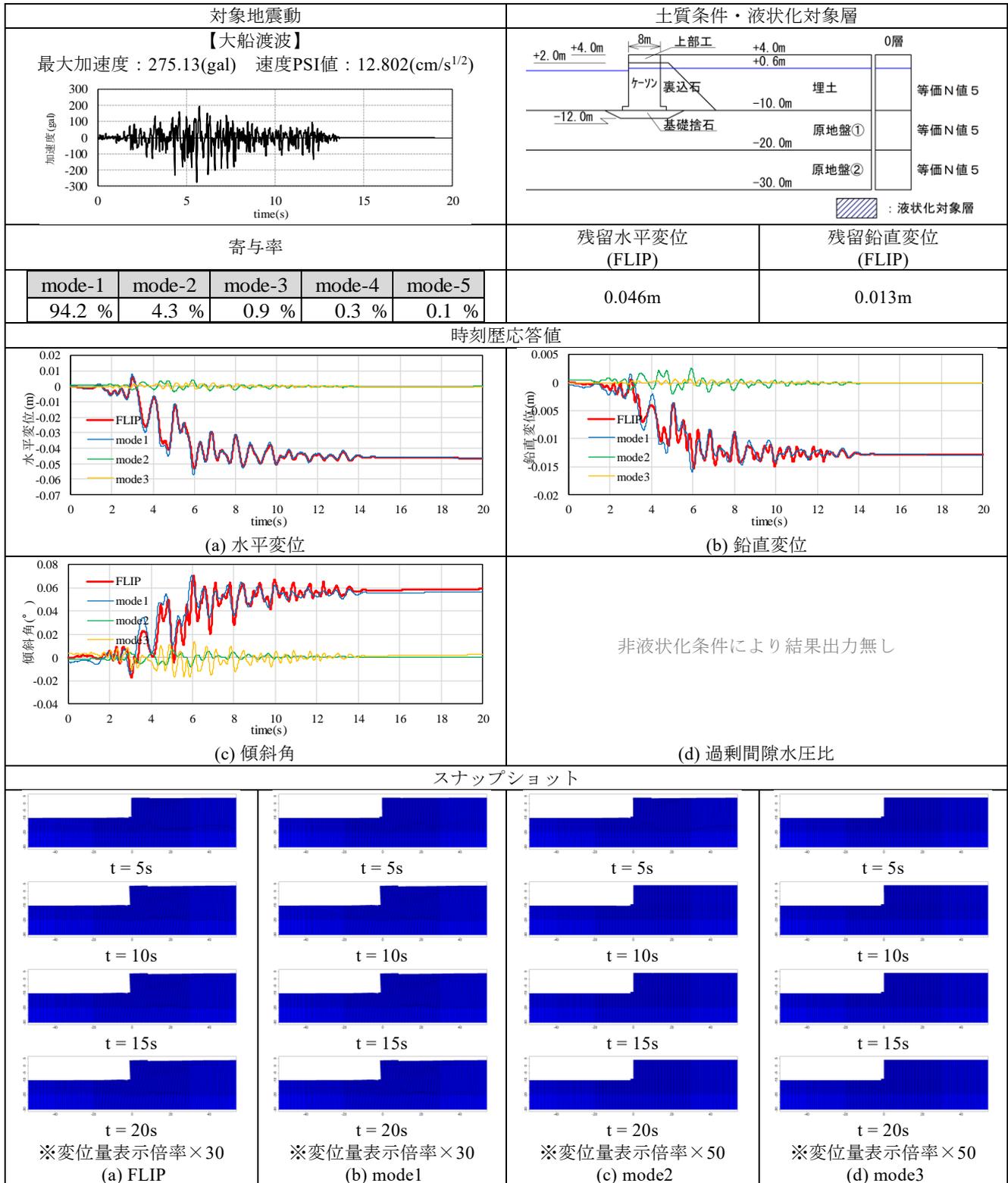


表-C.20 モード分解結果 (CASE3-2)

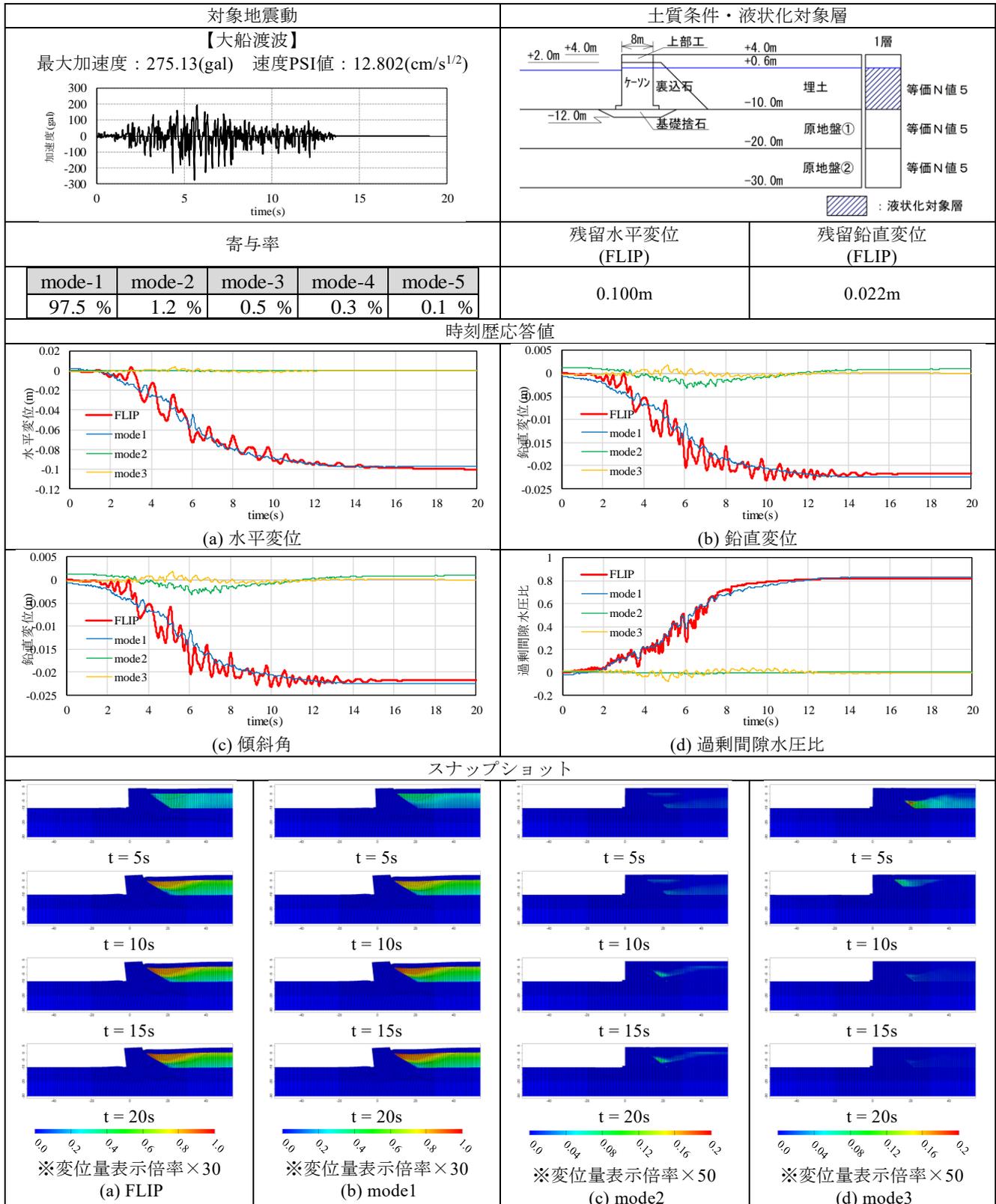


表-C.21 モード分解結果 (CASE3-3)

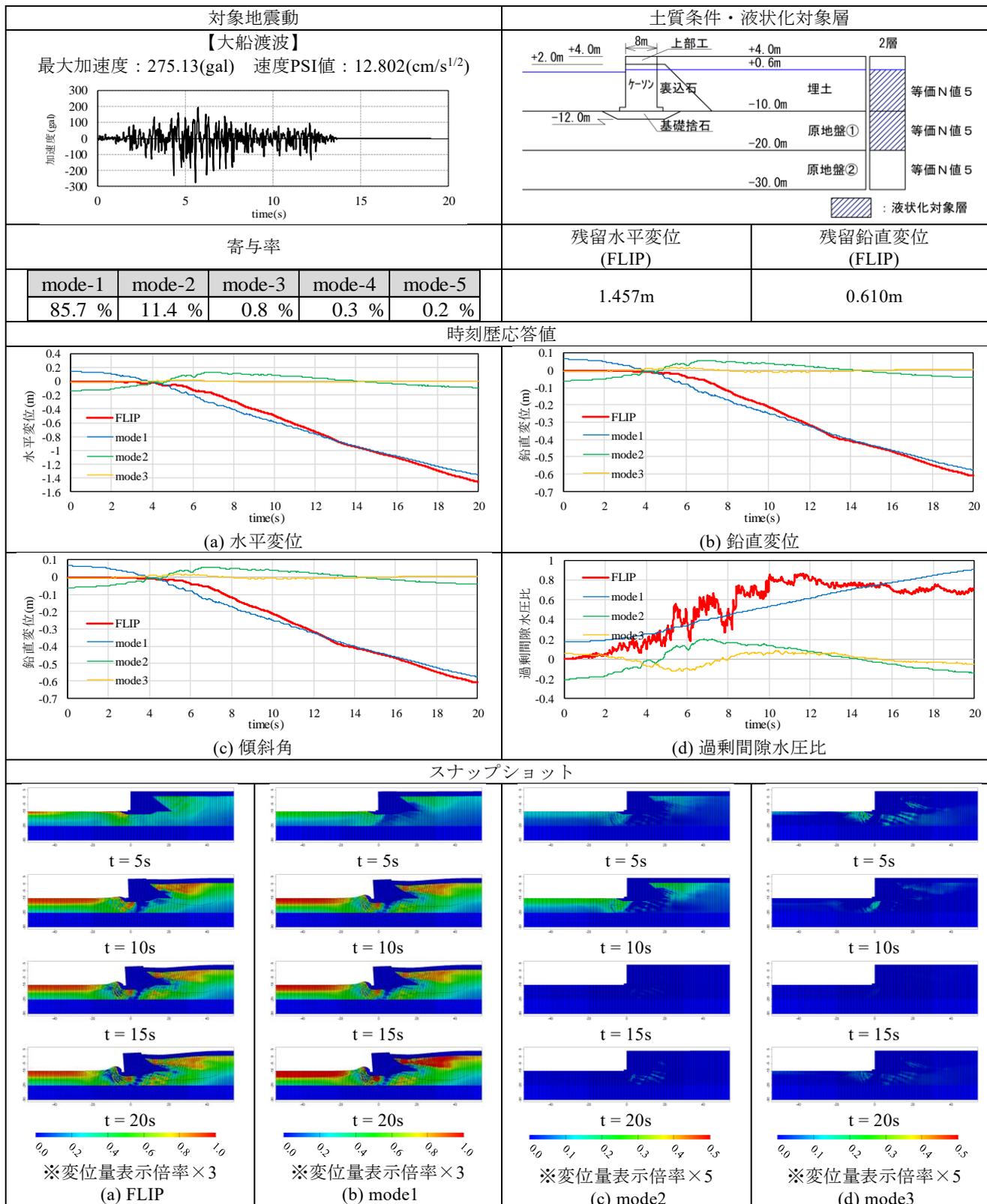


表-C.22 モード分解結果 (CASE3-4)

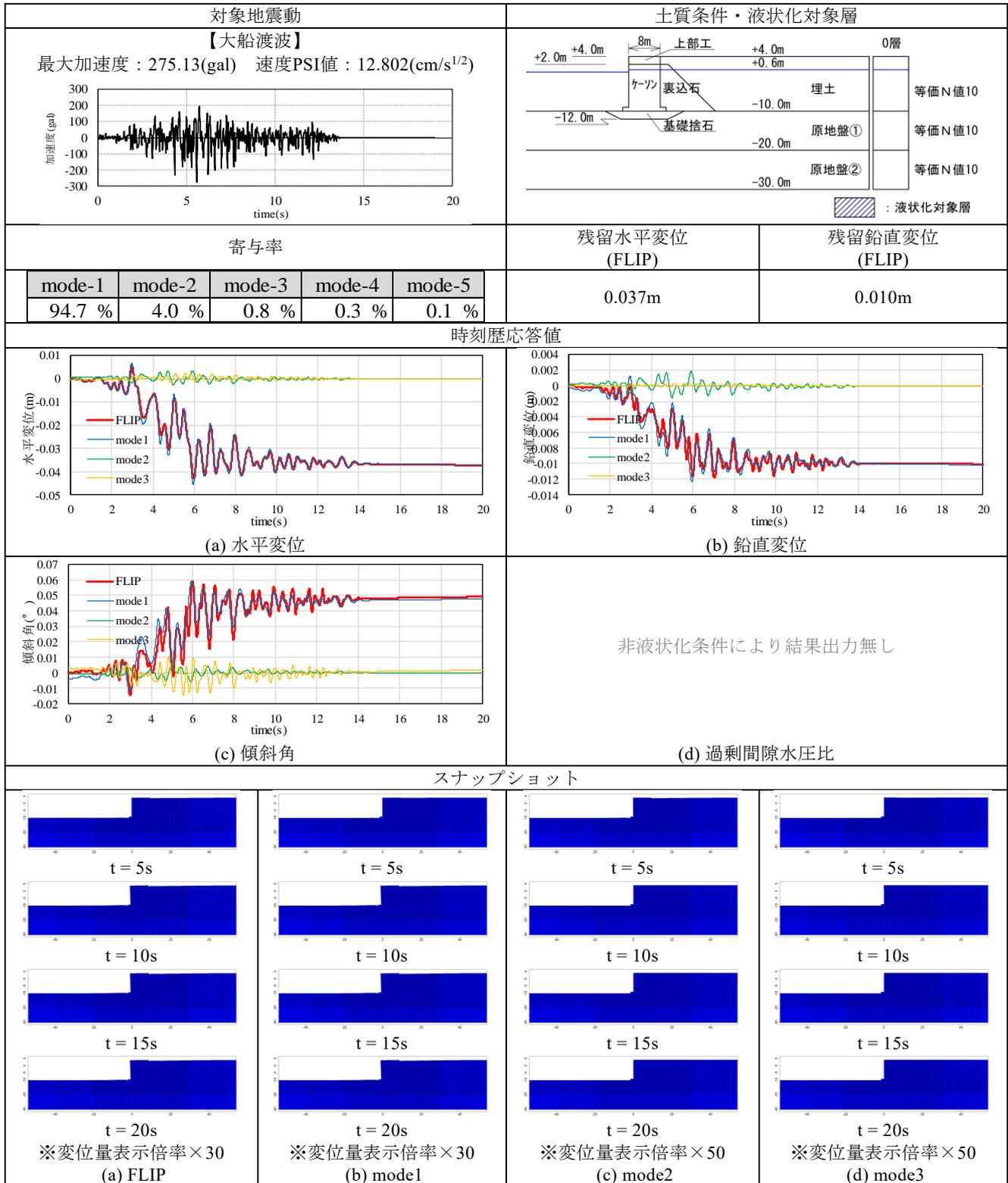


表-C.23 モード分解結果 (CASE3-5)

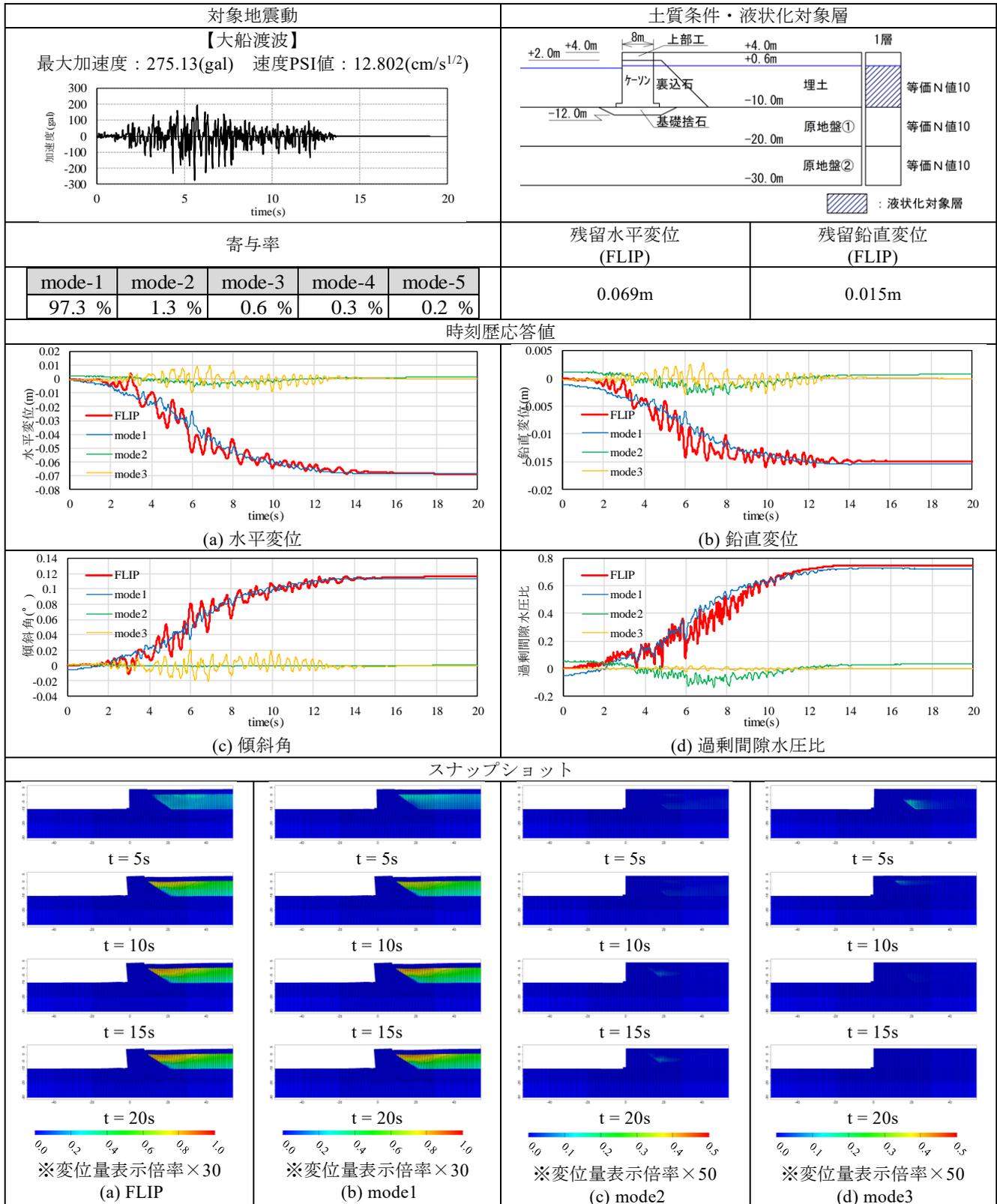


表-C.24 モード分解結果 (CASE3-6)

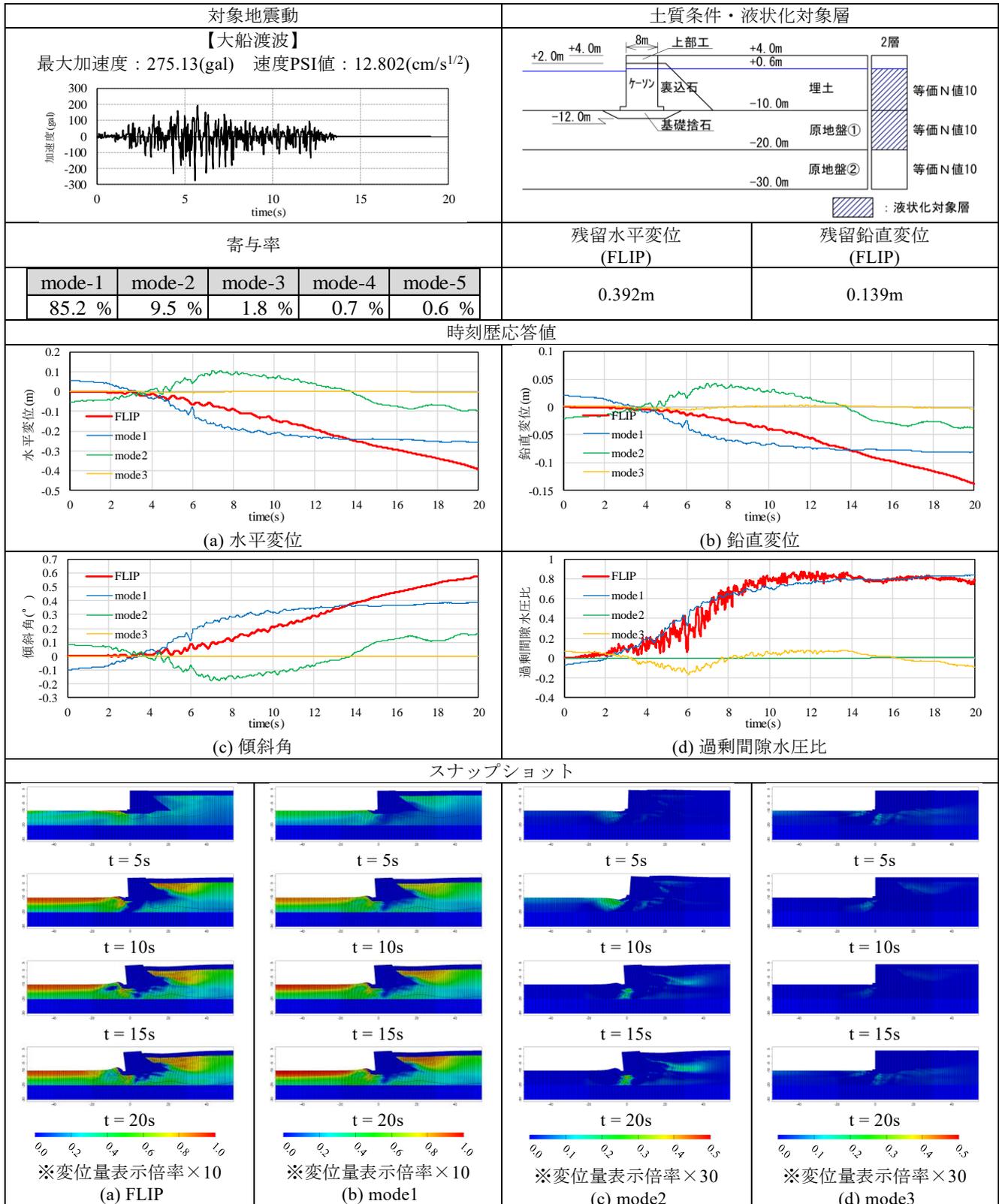


表-C.25 モード分解結果 (CASE3-7)

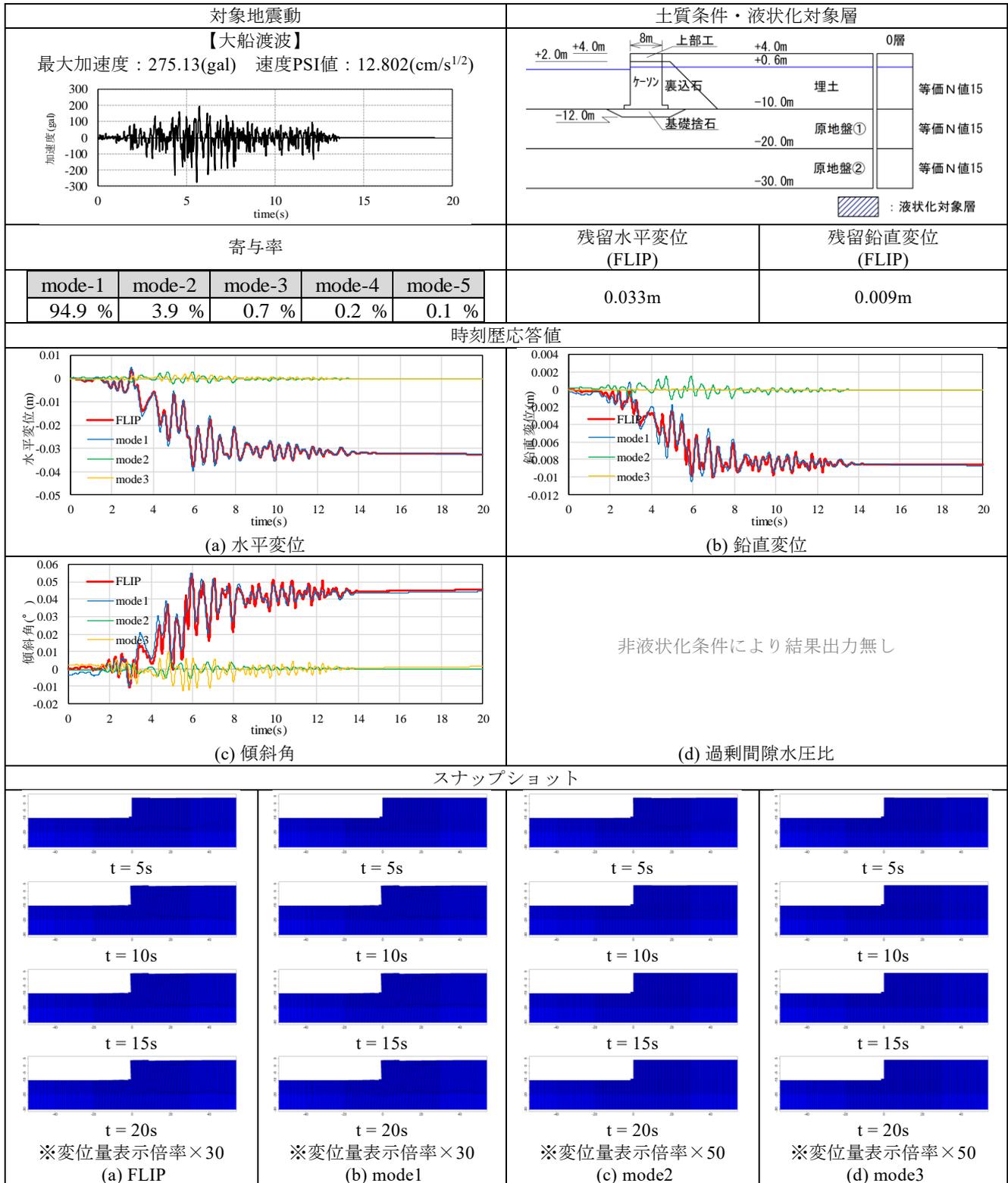


表-C.26 モード分解結果 (CASE3-8)

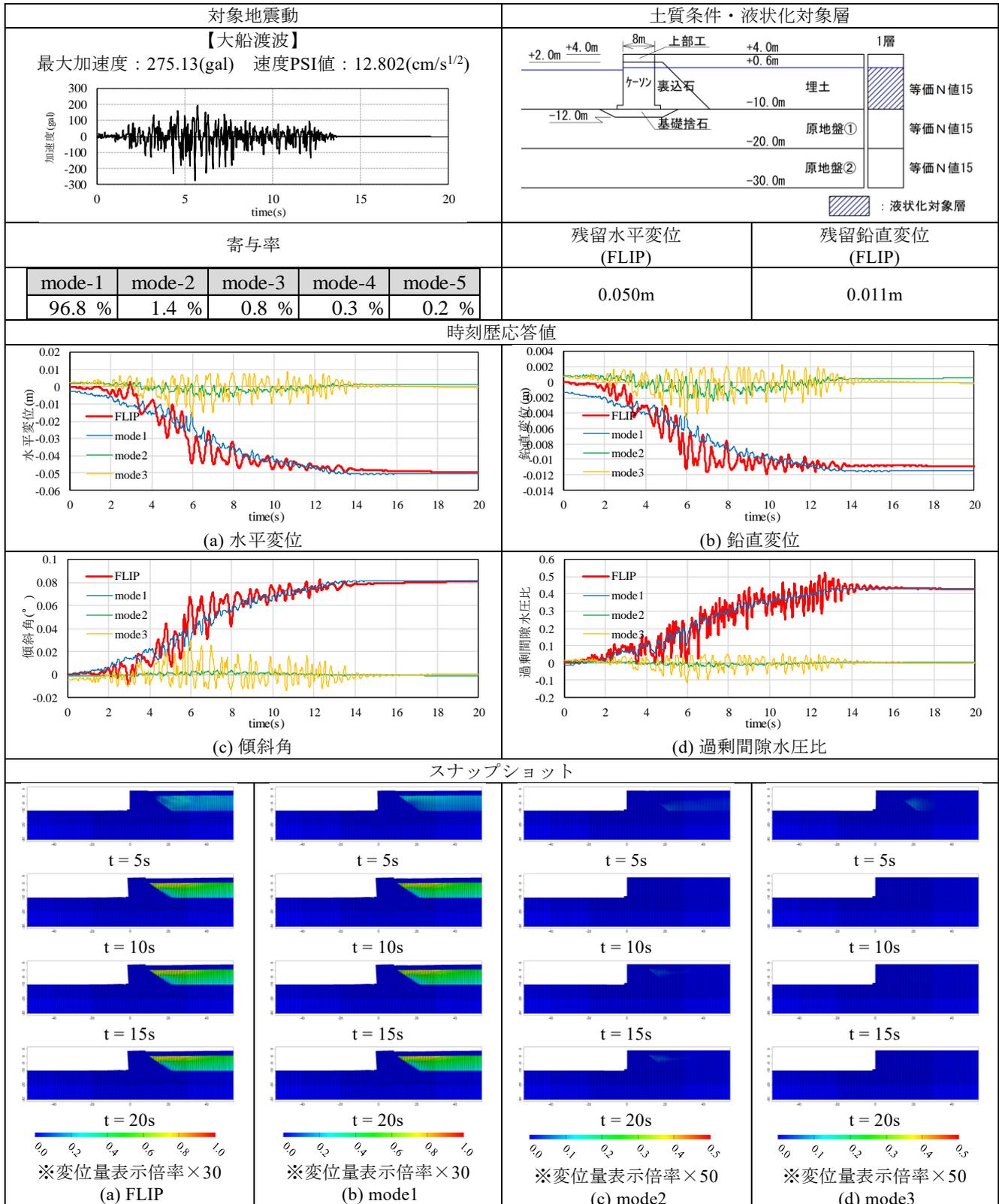
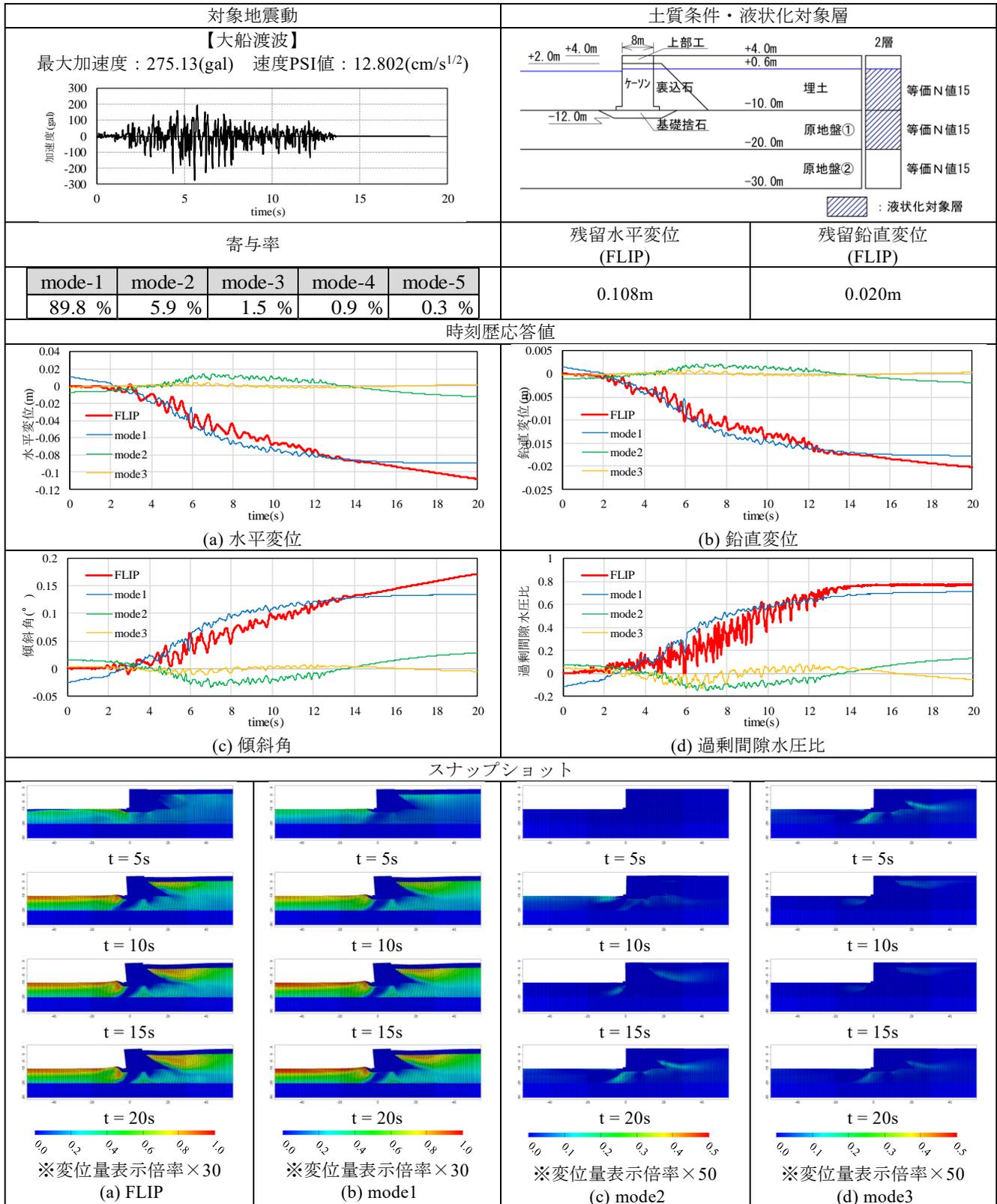


表-C.27 モード分解結果 (CASE3-9)



付録 D 土質調査結果資料収集データ

付表-D.1 土質調査資料一覧

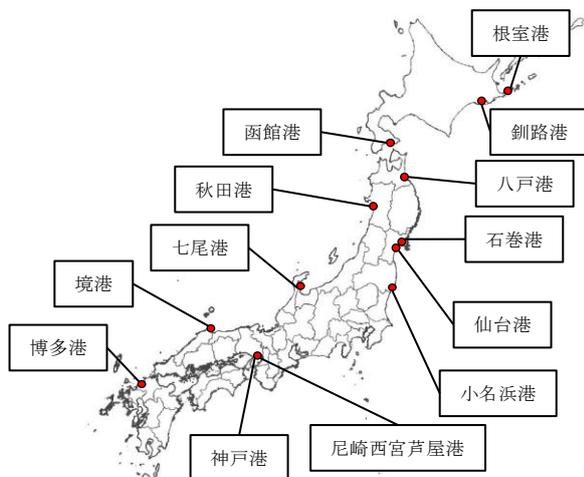
代替モデル構築に使用する入力変数 (N値と細粒分含有率Fc) の平均値  $\mu$  および標準偏差  $\sigma$  を設定するために、付図-D.1に示す港湾での土質調査資料を収集した。土質調査資料は、国土情報検索サイトKunijibanおよび過去の大規模地震による港湾施設の被害報告資料 (港湾技研資料No.511, No.766) より収集し、収集した資料の一覧を付表-D.1に示す。計87本の土質調査資料を収集し、このうち、下記の条件に該当する、60本の土質調査資料および342つのサンプルを埋土の土質定数設定に使用した。収集した各土質調査資料を付表-D.2~付表-D.88に示す。また、各表中のいずれかの欄で灰色に着色されているサンプルは、以下に示す条件に該当しないサンプル、つまり、埋土の土質定数設定には使用していないサンプルであることを示している。

【埋土のN値・Fc設定に使用するサンプル】

- ① 土質種別が砂質土系の地盤であるもの
- ② 標高-10mよりも浅い位置で採取されているもの
- ③ N値とFcの両方の値が得られているもの
- ④ N値が50以下のもの\*

\*土質調査資料において、N値が50と記されているものは、実際にはN値 $\geq$ 50の場合がある。また、土層種別も不明確な場合がある。本研究での解析モデルにおける埋土は、比較的軟弱な沖積砂質土を想定しており、N値 $\geq$ 50であるサンプルは土質定数設定には適さないと判断し、N値が50 (または50以上) と記載されているサンプルは除外することとした。

港名	Bor.ID	出典	標高(G.L. m)		備考
			上端	下端	
根室港	Bor.No.1	港湾技研資料No.766 p.46	-4.8	~ -9.8	付表D-2
	Bor.No.2	港湾技研資料No.766 p.46	-6.2	~ -7.7	付表D-3
	Bor.No.3	港湾技研資料No.766 p.46	-6.3	~ -7.8	付表D-4
	No.001006020201	国土情報検索サイトKunijiban	-4.6	~ -18.6	付表D-5
釧路港	No.001006020202	国土情報検索サイトKunijiban	-4.9	~ -14.6	付表D-6
	No.001006021824	国土情報検索サイトKunijiban	0.7	~ -13.3	付表D-7
	Bor.No.2	港湾技研資料No.766 p.102	-5.0	~ -14.0	付表D-8
	Bor.No.3	港湾技研資料No.766 p.102	-3.0	~ -10.0	付表D-9
函館港	Bor.No.4	港湾技研資料No.766 p.102	-4.0	~ -11.0	付表D-10
	No.001004010212	国土情報検索サイトKunijiban	-9.3	~ -21.3	付表D-11
	No.001004010211	国土情報検索サイトKunijiban	-9.3	~ -18.2	付表D-12
	No.001004010209	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -18.3	付表D-13
八戸港	No.001004010215	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -18.3	付表D-14
	No.001004010606	国土情報検索サイトKunijiban	0.6	~ -5.3	付表D-15
	No.001004010607	国土情報検索サイトKunijiban	-9.8	~ -31.8	付表D-16
	No.001004010204	国土情報検索サイトKunijiban	0.3	~ -24.7	付表D-17
秋田港	No.102002010190	国土情報検索サイトKunijiban	-4.1	~ -29.1	付表D-18
	No.102002010187	国土情報検索サイトKunijiban	-4.2	~ -24.1	付表D-19
	No.102002010265	国土情報検索サイトKunijiban	1.4	~ -5.6	付表D-20
	No.102002010075	国土情報検索サイトKunijiban	-1.4	~ -5.4	付表D-21
石巻港	No.102002010244	国土情報検索サイトKunijiban	-9.3	~ -24.3	付表D-22
	No.102002010242	国土情報検索サイトKunijiban	-7.3	~ -23.2	付表D-23
	No.102002010208	国土情報検索サイトKunijiban	-8.8	~ -43.8	付表D-24
	No.102002010243	国土情報検索サイトKunijiban	-13.3	~ -13.3	付表D-25
仙台港	No.102002010171	国土情報検索サイトKunijiban	-7.8	~ -7.8	付表D-26
	No.102002010172	国土情報検索サイトKunijiban	-7.4	~ -7.4	付表D-27
	No.104001010088	国土情報検索サイトKunijiban	0.3	~ -14.7	付表D-28
	No.104001010137	国土情報検索サイトKunijiban	0.6	~ -12.4	付表D-29
七尾港	No.104001010070	国土情報検索サイトKunijiban	-4.2	~ -30.2	付表D-30
	Bor.No.48-10	港湾技研資料No.511 p.196	0.7	~ -25.0	付表D-31
	No.104001010064	国土情報検索サイトKunijiban	-11.2	~ -25.2	付表D-32
	No.105001010155	国土情報検索サイトKunijiban	0.1	~ -32.9	付表D-33
小名浜港	No.105001010185	国土情報検索サイトKunijiban	0.3	~ -5.7	付表D-34
	No.105001010332	国土情報検索サイトKunijiban	-8.8	~ -26.0	付表D-35
	No.104001010132	国土情報検索サイトKunijiban	0.6	~ -12.4	付表D-36
	No.104001010165	国土情報検索サイトKunijiban	1.6	~ -11.3	付表D-37
神戶港	No.104001010194	国土情報検索サイトKunijiban	-2.3	~ -11.3	付表D-38
	No.104001010098	国土情報検索サイトKunijiban	-2.4	~ -9.4	付表D-39
	No.104001010143	国土情報検索サイトKunijiban	0.3	~ -33.7	付表D-40
	No.104002010020	国土情報検索サイトKunijiban	0.7	~ -51.3	付表D-41
境港	No.104002010023	国土情報検索サイトKunijiban	1.7	~ -15.3	付表D-42
	No.104002010019	国土情報検索サイトKunijiban	0.7	~ -38.3	付表D-43
	No.104002010022	国土情報検索サイトKunijiban	1.7	~ -15.3	付表D-44
	No.104001010296	国土情報検索サイトKunijiban	-3.2	~ -29.2	付表D-45
博多港	No.104001010246	国土情報検索サイトKunijiban	-0.7	~ -48.7	付表D-46
	No.104001010264	国土情報検索サイトKunijiban	0.2	~ -27.8	付表D-47
	No.104001010281	国土情報検索サイトKunijiban	2.4	~ -34.9	付表D-48
	No.104001010276	国土情報検索サイトKunijiban	2.6	~ -45.4	付表D-49
小名浜港	No.104001010348	国土情報検索サイトKunijiban	1.8	~ -44.2	付表D-50
	No.104001010346	国土情報検索サイトKunijiban	1.9	~ -42.0	付表D-51
	No.107001010500	国土情報検索サイトKunijiban	1.8	~ -5.3	付表D-52
	No.107001010528	国土情報検索サイトKunijiban	2.4	~ -10.6	付表D-53
七尾港	No.107001010525	国土情報検索サイトKunijiban	-12.0	~ -17.0	付表D-54
	No.107001010577	国土情報検索サイトKunijiban	-8.3	~ -12.3	付表D-55
	No.107001010542	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -18.3	付表D-56
	No.107001010543	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -18.3	付表D-57
小名浜港	No.107001010551	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -18.3	付表D-58
	No.107001010552	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -20.3	付表D-59
	No.107001010553	国土情報検索サイトKunijiban	-10.3	~ -17.3	付表D-60
	No.107001010554	国土情報検索サイトKunijiban	-9.3	~ -15.3	付表D-61
小名浜港	No.107001010234	国土情報検索サイトKunijiban	2.1	~ -8.9	付表D-62
	No.107001010181	国土情報検索サイトKunijiban	-9.5	~ -22.5	付表D-63
	No.107001010501	国土情報検索サイトKunijiban	-0.3	~ -7.4	付表D-64
	No.107001010470	国土情報検索サイトKunijiban	-11.4	~ -24.9	付表D-65
小名浜港	No.107001010473	国土情報検索サイトKunijiban	-12.4	~ -25.4	付表D-66
	No.107001010474	国土情報検索サイトKunijiban	-11.8	~ -22.3	付表D-67
	No.217001010159	国土情報検索サイトKunijiban	0.7	~ -15.3	付表D-68
	No.631999010052	国土情報検索サイトKunijiban	0.2	~ -10.8	付表D-69
境港	No.631999020003	国土情報検索サイトKunijiban	0.4	~ -3.6	付表D-70
	No.631999020004	国土情報検索サイトKunijiban	0.5	~ -3.5	付表D-71
	No.631999020005	国土情報検索サイトKunijiban	0.4	~ -3.6	付表D-72
	No.528003010108	国土情報検索サイトKunijiban	3.2	~ -21.8	付表D-73
神戶港	No.528001020233	国土情報検索サイトKunijiban	-6.8	~ -25.7	付表D-74
	No.528001020228	国土情報検索サイトKunijiban	-16.1	~ -40.1	付表D-75
	No.528001020146	国土情報検索サイトKunijiban	-13.0	~ -37.0	付表D-76
	No.528001020159	国土情報検索サイトKunijiban	1.1	~ -22.2	付表D-77
神戶港	No.528001020098	国土情報検索サイトKunijiban	-22.7	~ -28.6	付表D-78
	No.528001020025	国土情報検索サイトKunijiban	-13.4	~ -38.8	付表D-79
	No.528001020085	国土情報検索サイトKunijiban	2.8	~ -55.2	付表D-80
	No.528001020084	国土情報検索サイトKunijiban	2.8	~ -62.2	付表D-81
博多港	No.840002010020	国土情報検索サイトKunijiban	-5.9	~ -19.3	付表D-82
	No.840002010021	国土情報検索サイトKunijiban	-5.8	~ -19.2	付表D-83
	No.840002010022	国土情報検索サイトKunijiban	-5.7	~ -18.1	付表D-84
	No.840002010023	国土情報検索サイトKunijiban	-5.7	~ -18.1	付表D-85
博多港	No.840002010024	国土情報検索サイトKunijiban	-5.8	~ -18.2	付表D-86
	No.840002010025	国土情報検索サイトKunijiban	-5.7	~ -14.1	付表D-87
	No.840002010026	国土情報検索サイトKunijiban	-5.4	~ -16.8	付表D-88



付図-D.1 土質調査資料収集箇所

(1) 根室港

付表-D.2 港空技研資料No.766 Bor.No.1

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-4.8	砂質土	8	14.0							
-6.6	砂質土	7	16.0							
-7.3	砂質土	5	16.0							
-9.8	砂質土	17	12.0							

付表-D.3 港空技研資料No.766 Bor.No.2

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-6.2	砂質土	8	26.0							
-7.7	砂質土	5	20.0							

付表-D.4 港空技研資料No.766 Bor.No.3

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-6.3	砂質土	8	26.0							
-7.8	砂質土	8	20.0							

付表-D.5 No.001006020201

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-4.6	砂質土	9	3.0							
-5.6	砂質土	9	19.0							
-6.6	砂質土	8	4.0							
-7.6	砂質土	3	4.0							
-8.6	砂質土	2	9.0							
-9.6	砂質土	5	6.0							
-10.6	砂質土	10	3.0							
-11.6	砂質土	39	3.0							
-12.6	砂質土	30	3.0							
-13.6	砂質土	29	3.0							
-14.6	砂質土	50	3.0							
-15.6	砂質土	9	1.0							
-16.6	砂質土	38	3.0							
-17.6	砂質土	22	2.0							
-18.6	砂質土	16	3.0							

付表-D.6 No.001006020202

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-4.9	砂質土	21	4.0							
-5.9	砂質土	12	4.0							
-6.9	砂質土	2	6.0							
-8.4	砂質土	1	31.0							
-10.1	砂質土	1	33.0							
-11.1	砂質土	11	11.0							
-12.1	砂質土	21	2.0							
-13.1	砂質土	35	3.0							
-13.7	砂質土	15	3.0							
-14.6	砂質土	25	3.0							

(2) 釧路港

付表-D.7 No.001006021824

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.7	砂質土	5	7.9							
-0.3	砂質土	17	14.2							
-1.3	砂質土	11	11.7							
-2.3	砂質土	15	4.8							
-3.3	砂質土	19	5.8							
-4.3	砂質土	20	4.0							
-5.3	砂質土	21	5.0							
-6.3	砂質土	36	3.4							
-7.3	砂質土	22	2.6							
-8.3	砂質土	18	0.9							
-9.3	砂質土	21	3.6							
-10.3	砂質土	27	0.8							
-11.3	砂質土	20	2.0							
-13.3	砂質土	31	11.7							

付表-D.8 港空技研資料No.766 Bor.No.2

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-5.0	砂質土	19	10.0							
-6.0	砂質土	22	10.0							
-7.0	砂質土	34	10.0							
-8.0	砂質土	26	10.0							
-9.0	砂質土	14	20.0							
-10.0	砂質土	25	20.0							
-11.0	砂質土	28	20.0							
-12.0	砂質土	44	6.0							
-13.0	砂質土	31	6.0							
-14.0	砂質土	50	3.0							

付表-D.9 港空技研資料No.766 Bor.No.3

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-3.0	砂質土	3	31.0							
-4.0	砂質土	2	28.0							
-5.0	砂質土	2	31.0							
-6.0	砂質土	3	38.0							
-7.0	砂質土	7	23.0							
-8.0	砂質土	13	18.0							
-9.0	砂質土	37	18.0							
-10.0	砂質土	50	8.0							

付表-D.10 港空技研資料No.766 Bor.No.4

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-4.0	砂質土	2	48.0							
-5.0	砂質土	3	46.0							
-6.0	砂質土	4	46.0							
-7.0	砂質土	11	20.0							
-8.0	砂質土	14	25.0							
-9.0	砂質土	19	25.0							
-10.0	砂質土	40	11.0							
-11.0	砂質土	50	11.0							



付表-D.20 No.102002010265

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
1.4	砂質土	9	9.0							
0.4	砂質土	3	11.0							
-0.6	砂質土	10	6.0							
-1.6	砂質土	8	6.0							
-2.6	砂質土	12	5.0							
-3.6	砂質土	9	5.0							
-4.6	砂質土	10	35.0							
-5.6	砂質土	22	9.0							

付表-D.21 No.102002010075

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-1.4	砂質土	11	—							
-3.4	砂質土	29	24.0							
-5.4	砂質土	48	—							

付表-D.22 No.102002010244

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-9.3	砂質土	8	27.5							
-10.3	砂質土	11	21.2							
-11.3	砂質土	50	13.2							
-12.3	砂質土	50	13.8							
-13.3	砂質土	50	11.1							
-16.2	粘性土									
-17.3	粘性土									
-18.2	粘性土									
-20.2	粘性土									
-21.2	粘性土									
-22.3	砂質土	50	36.4							
-23.2	砂質土	50	47.9							
-24.3	砂質土	50	48.1							

付表-D.23 No.102002010242

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-7.3	砂質土	9	27.0							
-8.3	砂質土	11	16.8							
-9.3	砂質土	50	13.0							
-10.3	砂質土	50	21.9							
-11.2	砂質土	50	15.3							
-12.2	砂質土	50	17.1							
-13.3	砂質土	50	14.8							
-14.3	砂質土	23	19.6							
-15.3	粘性土									
-17.3	粘性土									
-19.3	粘性土									
-20.7	粘性土									
-21.2	粘性土									
-23.2	砂質土	50	45.0							

付表-D.24 No.102002010208

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-8.8	砂質土	23	8.0							
-10.8	砂質土	30	9.0							
-12.8	砂質土	41	15.0							
-14.8	砂質土	50	8.0							
-16.8	砂質土	32	9.0							
-17.8	砂質土	46	8.0							
-19.8	砂質土	28	18.0							
-20.8	砂質土	9	40.0							
-21.8	砂質土	22	19.0							
-22.8	砂質土	10	41.0							
-23.8	粘性土									
-24.9	粘性土									
-25.8	粘性土									
-26.9	粘性土									
-27.8	粘性土									
-28.8	粘性土									
-30.0	砂質土	9	42.0							
-30.8	砂質土	22	11.0							
-31.8	砂質土	22	26.0							
-32.8	砂質土	16	47.0							
-33.8	砂質土	3	31.0							
-34.8	粘性土									
-36.8	粘性土									
-37.8	粘性土									
-38.7	粘性土									
-39.3	粘性土									
-39.8	粘性土									
-40.8	粘性土									
-41.8	粘性土									
-43.8	粘性土									

付表-D.25 No.102002010243

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-13.3	砂質土	50	12.5							

付表-D.26 No.102002010171

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-7.8	砂質土	21	31.8							

付表-D.27 No.102002010172

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-7.4	砂質土	20	17.2							

(5) 秋田港

付表-D.28 No.104001010088

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.3	砂質土	10	13.0							
-0.7	砂質土	9	7.0							
-1.7	砂質土	2	4.6							
-2.7	砂質土	3	5.6							
-3.7	砂質土	2	4.5							
-4.7	砂質土	2	4.6							
-5.7	砂質土	7	4.7							
-6.7	砂質土	7	4.7							
-7.7	砂質土	6	5.8							
-8.7	砂質土	8	4.0							
-9.7	砂質土	9	8.3							
-10.7	砂質土	9	7.5							
-11.7	砂質土	6	6.5							
-12.7	砂質土	8	7.0							
-13.7	砂質土	7	13.6							
-14.7	砂質土	7	5.4							

付表-D.29 No.104001010137

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.6	砂質土	11	—							
-0.4	砂質土	7	9.0							
-1.4	砂質土	5	—							
-2.4	砂質土	7	1.6							
-4.4	砂質土	5	1.0							
-5.4	砂質土	8	—							
-6.4	砂質土	8	1.6							
-8.4	砂質土	6	1.2							
-10.4	砂質土	6	1.2							
-12.4	砂質土	10	2.3							

付表-D.30 No.104001010070

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-4.2	砂質土	15	6.1							
-6.2	砂質土	19	7.9							
-8.2	砂質土	35	4.8							
-10.2	砂質土	27	14.5							
-12.2	砂質土	29	16.9							
-14.2	砂質土	21	14.6							
-16.2	砂質土	50	28.2							
-18.2	砂質土	50	37.9							
-20.2	砂質土	50	14.2							
-22.2	砂質土	50	11.6							
-24.2	砂質土	28	32.2							
-26.2	粘性土									
-28.2	砂質土	43	23.7							
-30.2	砂質土	40	13.9							

付表-D. 31 港空技研資料No.511 Bor.48-10

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.7	砂質土	14	—							
-0.3	砂質土	15	—							
-1.3	砂質土	15	—							
-2.3	砂質土	20	—							
-3.3	砂質土	22	—							
-4.3	砂質土	24	—							
-5.3	砂質土	26	—							
-6.3	砂質土	21	—							
-7.3	砂質土	22	—							
-8.3	砂質土	23	—							
-9.2	砂質土	22	—							
-10.1	砂質土	20	4.8							
-11.1	砂質土	23	—							
-12.1	砂質土	34	8.1							
-13.1	砂質土	33	—							
-14.1	砂質土	50	9.3							
-15.1	砂質土	40	—							
-17.0	粘性土	—	—							
-18.0	粘性土	—	—							
-19.0	粘性土	—	—							
-21.0	砂質土	23	—							
-22.0	砂質土	48	—							
-23.0	砂質土	50	—							
-24.0	砂質土	50	—							
-25.0	砂質土	22	—							

付表-D. 32 No.104001010064

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-11.2	砂質土	3	1.8							
-12.2	砂質土	5	—							
-13.2	砂質土	12	1.4							
-14.2	砂質土	16	—							
-15.2	砂質土	26	0.8							
-16.2	砂質土	31	—							
-17.2	粘性土	—	—							
-18.2	粘性土	—	—							
-19.2	粘性土	—	—							
-20.2	粘性土	—	—							
-21.2	粘性土	—	—							
-22.1	砂質土	50	—							
-23.1	砂質土	50	5.2							
-24.1	砂質土	50	—							
-25.2	砂質土	50	8.1							

付表-D. 33 No.105001010155

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.1	砂質土	21	3.6							
-0.9	砂質土	9	5.8							
-1.9	砂質土	15	2.6							
-2.9	砂質土	12	0.4							
-3.9	砂質土	13	0.7							
-4.9	砂質土	17	0.7							
-5.9	砂質土	15	0.6							
-6.9	砂質土	14	0.7							
-7.9	砂質土	13	0.7							
-8.9	砂質土	19	13.9							
-9.9	砂質土	31	9.2							
-10.9	砂質土	32	12.8							
-11.9	砂質土	30	9.0							
-12.9	砂質土	31	12.2							
-13.9	砂質土	39	5.1							
-14.9	砂質土	40	6.4							
-15.9	砂質土	50	8.6							
-16.9	砂質土	41	6.1							
-18.2	粘性土	—	—							
-20.8	粘性土	—	—							
-22.9	砂質土	41	11.2							
-23.9	砂質土	40	10.6							
-24.9	砂質土	48	9.7							
-26.6	粘性土	—	—							
-27.0	粘性土	—	—							
-28.8	粘性土	—	—							
-30.7	粘性土	—	—							
-31.5	粘性土	—	—							
-31.9	砂質土	40	40.0							
-32.9	砂質土	42	5.2							

付表-D. 34 No.105001010185

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.3	砂質土	25	6.0							
-0.7	砂質土	27	6.0							
-1.7	砂質土	37	5.0							
-2.7	砂質土	30	4.0							
-3.7	砂質土	6	12.0							
-4.7	粘性土	—	—							
-5.7	粘性土	—	—							

付表-D. 35 No.105001010332

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-8.8	砂質土	17	—							
-10.8	砂質土	26	10.0							
-12.8	砂質土	36	10.0							
-14.8	砂質土	38	8.0							
-16.8	砂質土	24	48.0							
-17.8	砂質土	26	—							
-18.8	砂質土	31	12.0							
-20.3	粘性土	—	—							
-22.7	粘性土	—	—							
-24.8	砂質土	42	38.0							
-26.0	砂質土	27	—							

付表-D. 36 No.104001010132

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.6	砂質土	23	—							
-0.4	砂質土	11	0.7							
-1.4	砂質土	9	—							
-2.4	砂質土	8	24.1							
-4.4	砂質土	9	7.5							
-6.4	砂質土	31	—							
-8.4	砂質土	13	8.4							
-10.4	砂質土	16	11.9							
-12.4	砂質土	14	—							

付表-D. 37 No.104001010165

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
1.6	砂質土	7	7.0							
0.6	砂質土	22	9.5							
-1.4	砂質土	13	6.5							
-2.4	砂質土	19	16.5							
-3.4	砂質土	21	6.5							
-4.4	砂質土	29	6.5							
-5.4	砂質土	31	4.5							
-6.4	砂質土	19	4.5							
-7.4	砂質土	11	3.0							

付表-D. 38 No.104001010194

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-2.3	砂質土	5	—							
-3.3	砂質土	13	28.6							
-5.3	砂質土	50	2.5							
-6.2	砂質土	50	—							
-7.5	砂質土	41	3.3							
-8.3	砂質土	48	—							
-9.3	砂質土	35	3.7							
-10.3	砂質土	50	—							
-11.3	砂質土	39	3.0							

付表-D. 39 No.104001010098

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-2.4	砂質土	7	0.7							
-3.4	砂質土	18	2.7							
-6.3	砂質土	50	2.6							
-7.3	砂質土	50	—							
-8.4	砂質土	45	—							
-9.4	砂質土	40	—							

付表-D.40 No.104001010143

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
0.3	砂質土	7	2.4						
-0.7	砂質土	5	1.0						
-1.7	砂質土	6	0.9						
-2.7	砂質土	14	2.7						
-3.7	砂質土	18	2.5						
-4.7	砂質土	14	2.3						
-5.7	砂質土	8	48.6						
-6.7	砂質土	7	43.8						
-8.7	砂質土	16	—						
-9.7	砂質土	20	9.1						
-10.7	砂質土	25	9.7						
-11.7	砂質土	36	7.6						
-12.7	砂質土	26	9.7						
-13.7	砂質土	28	6.2						
-14.7	砂質土	29	21.2						
-15.7	砂質土	20	17.9						
-17.1	粘性土								
-18.2	粘性土								
-20.1	粘性土								
-21.6	粘性土								
-23.7	砂質土	30	9.8						
-24.7	砂質土	30	20.9						
-25.7	砂質土	25	5.7						
-26.7	砂質土	42	9.5						
-27.7	砂質土	36	9.3						
-28.7	砂質土	35	7.0						
-31.7	砂質土	50	9.0						
-32.7	砂質土	29	8.6						
-33.7	砂質土	28	49.5						

付表-D.43 No.104002010019

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
0.7	砂質土	13	14.0						
-1.3	砂質土	6	22.0						
-3.3	砂質土	6	14.0						
-7.3	砂質土	13	28.0						
-9.3	砂質土	15	25.0						
-11.3	粘性土								
-12.3	粘性土								
-13.3	粘性土								
-14.3	粘性土								
-15.3	粘性土								
-16.4	粘性土								
-17.5	粘性土								
-17.7	粘性土								
-18.3	粘性土								
-19.3	粘性土								
-20.3	粘性土								
-22.0	粘性土								
-22.3	粘性土								
-23.3	粘性土								
-24.3	粘性土								
-25.3	粘性土								
-26.3	粘性土								
-28.3	砂質土	6	44.0						
-30.3	砂質土	11	39.0						
-32.3	砂質土	10	42.0						
-34.3	砂質土	12	27.0						
-36.3	粘性土								
-38.3	粘性土								

付表-D.44 No.104002010022

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
1.7	砂質土	6	11.0						
0.7	砂質土	17	11.0						
-0.3	砂質土	11	14.0						
-1.3	砂質土	9	13.0						
-2.3	砂質土	10	20.0						
-3.3	砂質土	11	11.0						
-4.3	砂質土	8	18.0						
-5.3	砂質土	5	48.0						
-6.3	砂質土	9	42.5						
-7.3	砂質土	11	19.0						
-8.3	砂質土	10	12.0						
-9.3	砂質土	10	19.0						
-10.3	砂質土	13	16.0						
-11.3	粘性土								
-12.3	粘性土								
-13.3	粘性土								
-14.3	粘性土								
-15.3	粘性土								

(6) 石巻港

付表-D.41 No.104002010020

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
0.7	砂質土	11	11.0						
-1.3	砂質土	2	10.0						
-3.3	砂質土	9	19.0						
-5.3	砂質土	17	20.0						
-7.3	砂質土	11	29.0						
-9.3	砂質土	16	20.0						
-11.3	砂質土	12	33.0						
-13.3	粘性土								
-14.5	粘性土								
-15.3	粘性土								
-16.4	粘性土								
-17.3	粘性土								
-18.4	粘性土								
-19.3	粘性土								
-20.4	粘性土								
-21.3	粘性土								
-22.4	粘性土								
-23.3	粘性土								
-24.4	粘性土								
-25.3	粘性土								
-27.2	砂質土	50	9.0						
-29.2	砂質土	50	11.0						
-31.2	砂質土	50	13.0						
-33.3	砂質土	50	11.0						
-35.3	砂質土	23	22.0						
-37.3	砂質土	30	17.0						
-39.3	粘性土								
-41.3	粘性土								
-43.3	粘性土								
-45.3	粘性土								
-47.3	粘性土								
-49.3	粘性土								
-51.3	粘性土								

(7) 仙台港

付表-D.45 No.104001010296

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
-3.2	砂質土	10	5.0						
-4.2	砂質土	19	—						
-5.2	砂質土	15	—						
-6.2	砂質土	16	6.0						
-7.2	砂質土	14	—						
-8.2	砂質土	22	—						
-9.2	砂質土	35	—						
-10.2	砂質土	33	20.0						
-11.2	砂質土	22	—						
-12.2	砂質土	41	—						
-13.2	砂質土	21	—						
-14.2	砂質土	22	22.0						
-15.2	砂質土	11	—						
-17.2	粘性土								
-18.2	粘性土								
-22.2	粘性土								
-23.2	粘性土								
-24.2	砂質土	35	—						
-26.2	砂質土	45	—						
-27.2	砂質土	18	9.0						
-29.2	砂質土	29	—						

付表-D.42 No.104002010023

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値					
				1	10	20	30	40	
1.7	砂質土	20	21.0						
0.7	砂質土	10	32.0						
-0.3	砂質土	12	29.0						
-1.3	砂質土	10	24.0						
-2.3	砂質土	8	37.0						
-3.3	砂質土	14	22.0						
-4.3	砂質土	12	36.0						
-5.3	砂質土	13	39.0						
-6.3	砂質土	17	16.0						
-7.3	砂質土	14	10.0						
-8.3	砂質土	14	11.0						
-9.3	砂質土	12	9.0						
-10.3	砂質土	12	7.0						
-11.3	砂質土	13	10.0						
-12.3	砂質土	14	7.0						
-13.3	粘性土								
-14.3	粘性土								
-15.3	粘性土								

付表-D. 46 No.104001010246

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-0.7	砂質土	22	7.0							
-2.7	砂質土	21	8.0							
-4.7	砂質土	38	12.0							
-6.7	砂質土	39	9.0							
-8.7	砂質土	29	9.0							
-10.7	砂質土	28	8.0							
-12.7	砂質土	17	12.0							
-14.7	砂質土	19	16.0							
-16.7	粘性土									
-18.2	粘性土									
-19.2	砂質土	11	6.0							
-20.7	砂質土	30	14.0							
-22.7	砂質土	3	40.0							
-24.7	砂質土	50	12.0							
-26.7	砂質土	42	7.0							
-28.7	砂質土	40	4.0							
-30.7	粘性土									
-32.7	粘性土									
-38.7	粘性土									
-42.7	粘性土									
-46.7	粘性土									
-48.7	粘性土									

付表-D. 50 No.104001010348

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
1.8	砂質土	2	9.1							
0.9	砂質土	8	6.2							
-0.2	砂質土	3	10.3							
-1.2	砂質土	5	6.5							
-2.2	砂質土	5	5.0							
-3.2	砂質土	5	1.5							
-4.2	砂質土	9	2.1							
-5.2	砂質土	11	4.4							
-6.2	砂質土	10	6.2							
-7.2	砂質土	8	6.3							
-8.2	砂質土	26	6.7							
-9.2	砂質土	23	6.0							
-10.2	砂質土	19	9.2							
-11.2	砂質土	20	5.4							
-12.2	砂質土	20	2.3							
-13.2	砂質土	19	6.9							
-14.2	砂質土	6	20.0							
-15.2	砂質土	9	14.8							
-16.2	砂質土	10	21.2							
-17.2	粘性土									
-18.3	粘性土									
-19.8	粘性土									
-21.2	粘性土									
-24.3	粘性土									
-25.8	粘性土									
-27.0	粘性土									
-27.4	粘性土									
-28.2	砂質土	50	5.2							
-29.1	砂質土	50	7.7							
-30.1	砂質土	38	13.6							
-31.2	砂質土	17	12.6							
-32.2	砂質土	32	18.5							
-33.2	砂質土	32	4.7							
-34.2	砂質土	23	9.8							
-35.2	砂質土	17	19.9							
-36.2	砂質土	5	26.6							
-39.2	砂質土	18	18.8							
-40.2	砂質土	25	6.1							
-42.2	粘性土									
-43.2	粘性土									
-44.2	粘性土									

付表-D. 47 No.104001010264

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
0.2	砂質土	23	6.0							
-1.8	砂質土	31	5.0							
-3.8	砂質土	40	10.0							
-5.8	砂質土	40	1.0							
-7.8	砂質土	43	6.0							
-9.8	砂質土	44	8.0							
-11.8	砂質土	50	12.0							
-13.8	砂質土	30	18.0							
-15.8	粘性土									
-16.6	粘性土									
-17.8	砂質土	39	9.0							
-19.8	砂質土	50	8.0							
-21.8	砂質土	12	25.0							
-23.8	砂質土	15	24.0							
-27.8	砂質土	50	14.0							

付表-D. 51 No.104001010346

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
1.9	砂質土	3	8.4							
0.9	砂質土	3	18.5							
-0.1	砂質土	15	1.6							
-1.1	砂質土	18	3.4							
-2.1	砂質土	13	2.3							
-3.1	砂質土	17	1.5							
-4.1	砂質土	20	3.2							
-5.1	砂質土	19	11.4							
-6.1	砂質土	30	7.1							
-7.1	砂質土	33	3.4							
-8.1	砂質土	22	14.9							
-9.1	砂質土	21	14.1							
-10.1	砂質土	18	10.4							
-11.1	砂質土	27	13.0							
-12.1	砂質土	18	11.6							
-13.1	砂質土	13	6.8							
-14.1	砂質土	11	22.2							
-15.1	砂質土	10	28.4							
-16.1	砂質土	10	17.8							
-17.1	粘性土									
-18.2	粘性土									
-19.7	粘性土									
-21.2	粘性土									
-24.1	粘性土									
-25.2	粘性土									
-26.5	粘性土									
-28.1	粘性土									
-29.1	砂質土	19	9.2							
-30.1	砂質土	23	10.2							
-31.1	砂質土	42	5.8							
-32.1	砂質土	38	10.2							
-34.1	砂質土	32	8.7							
-35.1	砂質土	8	36.0							
-37.1	砂質土	18	34.0							
-38.1	粘性土									
-39.1	粘性土									
-40.1	粘性土									
-41.1	粘性土									
-42.0	粘性土									

付表-D. 48 No.104001010281

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
2.4	砂質土	4	-							
0.4	砂質土	29	1.3							
-1.6	砂質土	32	0.9							
-3.6	砂質土	25	0.2							
-5.6	砂質土	43	0.3							
-7.6	砂質土	26	0.6							
-9.6	砂質土	13	4.4							
-11.6	砂質土	42	0.8							
-13.6	砂質土	15	3.8							
-16.0	砂質土	3	0.4							
-17.6	砂質土	45	1.2							
-19.6	砂質土	49	2.7							
-21.6	砂質土	9	0.2							
-23.6	砂質土	10	4.5							
-25.6	砂質土	35	8.0							
-27.6	砂質土	41	1.2							
-29.6	砂質土	50	0.8							
-31.6	砂質土	20	1.5							
-33.6	砂質土	13	2.5							
-34.9	砂質土	12	2.5							

付表-D. 49 No.104001010276

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
2.6	砂質土	11	8.0							
0.6	砂質土	49	15.0							
-1.4	砂質土	41	10.0							
-3.4	砂質土	50	9.0							
-5.4	砂質土	49	13.0							
-7.4	砂質土	50	16.0							
-9.4	砂質土	43	8.0							
-11.4	砂質土	31	27.0							
-13.4	砂質土	22	15.0							
-15.1	粘性土									
-17.1	砂質土	50	4.0							
-19.1	砂質土	38	7.0							
-21.1	粘性土									
-23.1	粘性土									
-25.1	粘性土									
-27.3	砂質土	50	10.0							
-29.3	砂質土	50	8.0							
-31.3	砂質土	50	6.0							
-33.4	砂質土	50	-							
-35.4	砂質土	50	48.5							
-37.4	砂質土	40	17.0							
-39.4	砂質土	33	42.0							
-41.4	砂質土	31	47.0							
-43.4	粘性土									
-45.4	粘性土									

(8) 小名浜港

付表-D.52 No.107001010500

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
1.8	砂質土	21	17.5							
0.8	砂質土	11	8.5							
-0.6	砂質土	9	10.5							
-1.3	砂質土	5	12.0							
-2.3	砂質土	3	9.0							
-3.3	砂質土	4	10.0							
-4.3	砂質土	1	15.0							
-5.3	砂質土	1	11.5							

付表-D.53 No.107001010528

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
2.4	砂質土	15	12.0							
1.4	砂質土	11	13.0							
0.4	砂質土	11	8.0							
-0.6	砂質土	6	5.0							
-1.6	砂質土	6	6.0							
-2.6	砂質土	5	14.0							
-3.6	砂質土	5	14.0							
-4.6	砂質土	8	7.0							
-5.6	砂質土	5	23.0							
-6.6	砂質土	9	17.0							
-7.6	砂質土	13	12.0							
-8.6	砂質土	39	12.0							
-9.6	砂質土	29	19.0							
-10.6	砂質土	28	16.0							

付表-D.54 No.107001010525

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-12.0	砂質土	10	17.0							
-13.0	砂質土	20	13.0							
-15.0	砂質土	9	45.0							
-16.0	砂質土	9	14.0							
-17.0	砂質土	10	9.0							

付表-D.55 No.107001010577

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-8.3	砂質土	10	28.6							
-9.3	砂質土	18	42.5							
-10.3	砂質土	18	11.9							
-11.3	砂質土	20	10.6							
-12.3	砂質土	33	14.8							

付表-D.56 No.107001010542

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-10.3	砂質土	10	14.0							
-11.3	砂質土	18	16.7							
-12.3	砂質土	20	9.2							
-13.3	砂質土	21	8.6							
-14.3	砂質土	20	11.8							
-15.3	砂質土	30	13.3							
-16.3	砂質土	11	11.3							
-17.3	砂質土	15	6.1							
-18.3	砂質土	10	8.2							

付表-D.57 No.107001010543

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-10.3	砂質土	9	12.8							
-11.3	砂質土	18	9.6							
-12.3	砂質土	15	15.3							
-13.3	砂質土	18	12.6							
-14.3	砂質土	23	9.8							
-15.3	砂質土	29	11.7							
-16.3	砂質土	8	13.0							
-17.3	砂質土	12	17.3							
-18.3	砂質土	9	32.3							

付表-D.58 No.107001010551

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-10.3	砂質土	10	16.3							
-11.3	砂質土	11	20.6							
-12.3	砂質土	18	20.3							
-13.3	砂質土	19	27.2							
-14.3	砂質土	14	26.7							
-15.3	砂質土	26	23.3							
-16.3	砂質土	11	16.2							
-17.3	砂質土	10	19.0							
-18.3	砂質土	9	25.9							

付表-D.59 No.107001010552

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-10.3	砂質土	9	10.2							
-11.3	砂質土	22	9.7							
-12.3	砂質土	21	11.2							
-13.3	砂質土	22	12.9							
-14.3	砂質土	19	16.2							
-15.3	砂質土	22	16.6							
-16.3	砂質土	5	27.1							
-17.3	砂質土	6	22.2							
-18.3	砂質土	6	29.9							
-19.3	砂質土	10	19.6							
-20.3	砂質土	4	25.0							

付表-D.60 No.107001010553

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-10.3	砂質土	9	12.4							
-11.3	砂質土	18	6.0							
-12.3	砂質土	14	6.9							
-13.3	砂質土	19	8.3							
-14.3	砂質土	10	15.2							
-15.3	砂質土	21	9.5							
-17.3	砂質土	3	19.1							

付表-D.61 No.107001010554

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-9.3	砂質土	5	28.9							
-10.3	砂質土	12	9.4							
-11.3	砂質土	19	11.6							
-12.3	砂質土	19	13.2							
-13.3	砂質土	20	11.1							
-14.3	砂質土	20	13.2							
-15.3	砂質土	12	12.0							

付表-D.62 No.107001010234

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
2.1	砂質土	11	3.0							
1.1	砂質土	5	8.0							
-2.0	砂質土	1	30.0							
-3.0	砂質土	1	6.0							
-4.0	砂質土	1	6.0							
-5.9	砂質土	3	7.0							
-6.9	砂質土	10	9.0							
-7.9	砂質土	9	6.0							
-8.9	砂質土	10	32.0							

付表-D.63 No.107001010181

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値						
				1	10	20	30	40	50	
-9.5	砂質土	39	12.0							
-11.5	砂質土	8	7.0							
-13.5	砂質土	28	16.0							
-15.5	砂質土	5	7.0							
-17.5	砂質土	11	9.0							
-19.5	粘性土									
-20.5	粘性土									
-21.5	粘性土									
-22.5	砂質土	5	47.0							

付表-D. 64 No.107001010501

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
-0.3	砂質土	11	11.5													
-1.3	砂質土	9	10.0													
-2.3	砂質土	10	8.0													
-3.3	砂質土	10	10.0													
-4.3	砂質土	13	11.0													
-5.3	砂質土	7	12.5													
-6.3	砂質土	2	18.5													
-7.4	砂質土	1	26.0													

付表-D. 65 No.107001010470

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
-11.4	砂質土	1	23.0													
-12.4	砂質土	9	35.0													
-13.4	砂質土	7	24.0													
-14.4	砂質土	19	11.0													
-15.4	砂質土	19	6.0													
-17.0	粘性土															
-18.5	粘性土															
-20.0	粘性土															
-21.5	粘性土															
-23.0	砂質土	1	35.0													
-23.9	砂質土	3	30.0													
-24.9	砂質土	3	19.0													

付表-D. 66 No.107001010473

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
-12.4	砂質土	1	31.0													
-13.4	砂質土	7	10.0													
-14.4	砂質土	11	9.0													
-15.4	砂質土	5	4.0													
-17.0	粘性土															
-18.5	粘性土															
-20.0	粘性土															
-21.5	粘性土															
-23.0	粘性土															
-24.5	砂質土	2	18.0													
-25.4	砂質土	2	34.0													

付表-D. 67 No.107001010474

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
-11.8	砂質土	1	13.0													
-12.7	砂質土	11	12.0													
-13.7	砂質土	23	16.0													
-14.7	砂質土	7	4.0													
-16.3	粘性土															
-17.8	粘性土															
-19.3	粘性土															
-20.8	粘性土															
-22.3	粘性土															

(9) 七尾港

付表-D. 68 No.217001010159

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
0.7	砂質土	13	—													
-1.3	砂質土	2	2.5													
-3.3	砂質土	2	2.3													
-5.3	砂質土	1	14.0													
-7.3	砂質土	3	2.3													
-9.3	砂質土	6	1.0													
-11.3	砂質土	5	1.0													
-13.3	砂質土	6	2.0													
-15.3	砂質土	11	4.0													

(10) 境港

付表-D. 69 No.631999010052

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
0.2	砂質土	2	10.0													
-0.8	砂質土	7	10.0													
-1.8	砂質土	4	8.0													
-2.8	砂質土	9	10.0													
-3.8	砂質土	9	10.0													
-4.8	砂質土	3	17.0													
-5.8	砂質土	8	12.0													
-6.8	砂質土	9	15.0													
-7.8	砂質土	7	—													
-8.8	粘性土															
-9.8	粘性土															
-10.8	粘性土															

付表-D. 70 No.631999020003

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
0.4	砂質土	9	10.6													
-0.6	砂質土	4	10.5													
-1.6	砂質土	5	12.0													
-2.6	砂質土	6	9.5													
-3.6	砂質土	18	9.8													

付表-D. 71 No.631999020004

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
0.5	砂質土	8	2.3													
-0.6	砂質土	8	9.2													
-1.6	砂質土	4	10.2													
-2.6	砂質土	4	9.5													
-3.5	砂質土	17	15.2													

付表-D. 72 No.631999020005

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
0.4	砂質土	7	1.0													
-0.6	砂質土	3	6.4													
-1.6	砂質土	7	6.1													
-2.6	砂質土	11	12.4													
-3.6	砂質土	22	5.0													

(11) 尼崎西宮芦屋港

付表-D. 73 No.528003010108

標高 (G.L.m)	土質 種別	N値	Fc (%)	N値												
				1	10	20	30	40	50							
3.2	砂質土	12	—													
2.2	砂質土	8	—													
1.2	砂質土	9	—													
0.2	砂質土	17	—													
-0.8	砂質土	8	—													
-1.8	砂質土	2	—													
-2.8	砂質土	6	—													
-3.8	砂質土	17	—													
-6.8	砂質土	41	5.1													
-8.8	砂質土	18	18.4													
-9.8	砂質土	50	15.7													
-10.8	砂質土	50	43.3													
-11.8	砂質土	50	14.9													
-13.8	砂質土	42	21.5													
-16.8	砂質土	12	20.3													
-17.8	砂質土	29	14.5													
-20.8	砂質土	10	30.5													
-21.8	砂質土	5	42.5													



