

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-668 改1
提出年月日	平成30年8月23日

V-5-10 計算機プログラム（解析コード）の概要・F L I P

目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. 解析理論	6
3.1 支配方程式	6
3.2 構成則	12
4. 解析フローチャート	15
5. 杭-地盤相互作用ばね	17
6. 有効応力解析に用いる解析コードの検証及び妥当性確認	22
6.1 概要	22
6.2 杭と周辺地盤の相互作用	22

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）FLIPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-25	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-27	代替淡水貯槽の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2

V-2-2-28	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-29	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答解析	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-31	計算書 S A用海水ピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-32	S A用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-33	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-35	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-36	書 防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性につい	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-37	ての計算書 防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-38-2	震応答計算書 防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-39-1	算書 防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-39-2	震性についての計算書 防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-2-1	防潮扉の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-2-2	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-4	S A用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-2	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-3	貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-4-1	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-4-2	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-5	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-11-2-14	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-2-2	度計算書 防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-3	防潮扉の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-4	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-3	貯留堰の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-9		

2. 解析コードの概要

項目	コード名 FLIP
使用目的	地震応答解析（時刻歴解析）
開発機関	FLIPコンソーシアム
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 7.3.0_2
コードの概要	<p>FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) は、1988年に運輸省港湾技術研究所（現：（独）港湾航空技術研究所）において開発された平面ひずみ状態を対象とする有効応力解析法に基づく、2次元地震応答解析プログラムである。</p> <p>FLIPの主な特徴として、以下の項目を挙げることができる。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①有限要素法に基づくプログラムである。 ②平面ひずみ状態を解析対象とする。 ③地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析を行い、部材の断面力や変形量を計算する。 ④土の応力-ひずみモデルとしてマルチスプリング・モデルを採用している。 ⑤有効応力の変化は有効応力法により考慮する。そのために必要な過剰間隙水圧算定モデルとして井合モデルを用いている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が提示解と一致することを確認した。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは港湾施設の設計に用いられる「港湾施設の技術上の基準・同解説（2007）（社団法人日本港湾協会）」において、港湾施設に対して適用性が確認されている解析コードとして扱われており、今回の解析に使用することは妥当である。 ・関西電力株式会社の「高浜原子力発電所第4号機」において、防潮堤、防潮扉、屋外排水路逆流防止設備、放水ピット止水板の地震応答解析に本コード（Ver. 7.2.3.4）が使用された実績がある。

	<ul style="list-style-type: none">・本工事計画において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において、今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。・本工事計画における構造に対し使用する地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

3. 解析理論

3.1 支配方程式

3.1.1 運動方程式及び水流の収支バランス式

Zienkiewiczらに従い、間隙水で満たされた多孔質体の運動方程式および水流の収支バランスを表す式を次のようにおく (u-p formulation)。

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i \quad (3-1-1)$$

$$(k_{ij} p_{,j})_{,i} - \dot{\varepsilon}_{ii} - (k_{ij} \rho_f g_j)_{,i} = -(k_{ij} \rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + n \dot{p} / K_f \quad (3-1-2)$$

ここで、

σ_{ij}	全応力 (対称テンソル)
ρ	密度 (土と水の複合物としての密度)
g_i	重力加速度ベクトル
u_i	土骨格の変位ベクトル
k_{ij}	透水係数 (対称テンソル)
p	間隙水圧
ε_{ij}	土骨格のひずみ (対称テンソル)
ρ_f	間隙水の密度
n	間隙率
K_f	間隙水の体積弾性係数

である。

また、以下に示す関係がある。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} p \quad (\text{有効応力原理}) \quad (3-1-3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{微小ひずみテンソル}) \quad (3-1-4)$$

ここで、 σ'_{ij} は有効応力、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

なお、本定式化では、ひずみと応力に関しては、収縮・圧縮を負、伸張・引張を正とする。ただし、間隙水圧に関しては、圧縮を正とする。

3.1.2 境界条件と初期条件

式(3-1-1) (3-1-2)に対し、次に示す4種の境界条件を考える。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-5)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \quad (3-1-6)$$

$$p = \bar{p} \quad \text{on } \partial\Omega_p \quad (3-1-7)$$

$$q = -\dot{w}_j n_j = k_{ij} (p_{,i} - \rho_f g_i + \rho_f \ddot{u}_i) n_j = \bar{q} \quad \text{on } \partial\Omega_q \quad (3-1-8)$$

ここで、

\bar{u}_i	$\partial\Omega_u$ 境界上で規定される変位
\bar{t}_i	$\partial\Omega_\sigma$ 境界上で規定される表面力
\bar{p}	$\partial\Omega_p$ 境界上で規定される間隙水圧
\bar{q}	$\partial\Omega_q$ 境界上で規定される間隙水流入量
\dot{w}_i	間隙水の骨格に対する相対速度 (断面平均)

なお、 $\partial\Omega_u$ 境界と $\partial\Omega_\sigma$ 境界を合わせたものが、対象領域 Ω の全表面 $\partial\Omega$ に等しい。また、 $\partial\Omega_u$ 境界と

$\partial\Omega_\sigma$ 境界の共通部分はない。 $\partial\Omega_p$ 境界と $\partial\Omega_q$ 境界についても同様である。

一方、初期条件は領域 Ω の各点において、次のように与えられるものとする。

$$u_i = \dot{u}_i = \ddot{u}_i = 0 \quad (3-1-9)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{st} = \sigma'_{ij}{}^{st} - \delta_{ij}p^{st} \quad (3-1-10)$$

$$p = p^{st} \quad (3-1-11)$$

$$\dot{p} = 0 \quad (3-1-12)$$

特に、境界上では以下のように与えられるものとする。

$$u_i = \bar{u}_i^{st} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-13)$$

$$t_i^{st} = \sigma_{ij}^{st}n_j = \bar{t}_i^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \quad (3-1-14)$$

$$p = \bar{p}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_p \quad (3-1-15)$$

$$q = k_{ij}(p_i^{st} - \rho_f g_i)n_j = \bar{q}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_q \quad (3-1-16)$$

これ以降、初期条件により示される系の状態を基準状態と呼ぶことにする。基準状態では、式(3-1-1)は、

$$\sigma_{ij,j}^{st} + \rho g_i = 0 \quad (3-1-17)$$

となる。式(3-1-17)を用い、式(3-1-1)から ρg_i の項を消去すると、次式を得る。

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (3-1-18)$$

また、基準状態では、式(3-1-2)は、

$$(k_{ij}p_{,j}^{st})_{,i} - (k_{ij}\rho_f g_j)_{,i} = 0 \quad (3-1-19)$$

となる。式(3-1-19)を用い、式(3-1-2)から重力加速度 g_i を含む項を消去すると、次式を得る。

$$(k_{ij}(p_{,j} - p_{,j}^{st}))_{,i} - \dot{\epsilon}_{ii} = -(k_{ij}\rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + n\dot{p}/K_f \quad (3-1-20)$$

以後、式(3-1-18)及び式(3-1-20)を用いて、有限要素法に基づく定式化を行う。

3.1.3 運動方程式の離散化

式(3-1-18)に示す運動方程式は、任意の試行関数（重み関数） ϕ_i を用いて、以下のとおり書くことができる。

$$\int_{\Omega} \phi_i \left((\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} - \rho \ddot{u}_i \right) dv + \int_{\partial\Omega_u} \phi_i (\bar{u}_i - u_i) ds + \int_{\partial\Omega_\sigma} \phi_i (\bar{t}_i - \sigma_{ij}n_j) ds = 0 \quad (3-1-21)$$

ここで、

$$\phi_i = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-22)$$

とすると、式(3-1-21)は、

$$\int_{\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} dv - \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv + \int_{\partial\Omega} \phi_i (\bar{t}_i - \sigma_{ij}n_j) ds = 0 \quad (3-1-23)$$

となる。式(3-1-23)の左辺第1項は、Gaussの定理を用いると、

$$\int_{\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} dv = \int_{\partial\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) n_j ds - \int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv \quad (3-1-24)$$

と表され、これを式(3-1-23)に代入すると次式を得る。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i (\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) ds = 0 \quad (3-1-25)$$

式(3-1-25)によれば、表面力としては、基準状態における表面力からの増力のみを考慮すればよいことがわかる。この増加分を \bar{t}_i^* で表すことにする。すなわち、

$$\bar{t}_i^* = (\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) \quad (3-1-26)$$

より、式(3-1-25)は以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \quad (3-1-27)$$

ここで、応力の対称性を用いると、

$$\int_{\Omega} \frac{1}{2} (\phi_{i,j} + \phi_{j,i}) (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \quad (3-1-28)$$

となり、さらに、次式のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L}\boldsymbol{\phi})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \boldsymbol{\phi}^T \ddot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\phi}^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-29)$$

ここで、

$$\mathbf{L}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3-1-30)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}) \quad (3-1-31)$$

$$(\boldsymbol{\sigma}_{st})^T = (\sigma_{xx}^{st} \quad \sigma_{yy}^{st} \quad \sigma_{zz}^{st} \quad \sigma_{xy}^{st} \quad \sigma_{yz}^{st} \quad \sigma_{zx}^{st}) \quad (3-1-32)$$

$$\mathbf{u}^T = (u_x \quad u_y \quad u_z) \quad (3-1-33)$$

$$\boldsymbol{\phi}^T = (\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z) \quad (3-1-34)$$

$$(\bar{\mathbf{t}}^*)^T = (\bar{t}_x^* \quad \bar{t}_y^* \quad \bar{t}_z^*) \quad (3-1-35)$$

である。

ここで、試行関数 $\boldsymbol{\phi}$ は任意であるので、試行関数として仮想変位 $\delta\mathbf{u}$ を採用すると、式(3-1-29)より以下のような仮想仕事の原理が導かれる。

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L}\delta\mathbf{u})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (\delta\mathbf{u})^T \ddot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial\Omega} (\delta\mathbf{u})^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-36)$$

さらに、以下のとおり書ける。

$$\int_{\Omega} (\delta \underline{\boldsymbol{\varepsilon}})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (\delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} dv - \int_{\partial \Omega} (\delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-37)$$

ここで、

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}) \quad (3-1-38)$$

とする。なお、 $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ ($i \neq j$)は工学ひずみである。

続いて、式(3-1-36)に示す運動方程式の離散化を行う。すなわち、変位などを補間関数 \mathbf{H} 、節点変位ベクトル $\underline{\boldsymbol{u}}$ などを用いて、以下のように表す。

$$\underline{\boldsymbol{u}} = \mathbf{H} \underline{\boldsymbol{u}} \quad (3-1-39)$$

$$\ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} = \mathbf{H} \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} \quad (3-1-40)$$

ここで、2次元の場合、

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & 0 & \cdots & h_N & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & \cdots & 0 & h_N \end{bmatrix} \quad (3-1-41)$$

$$\underline{\boldsymbol{u}}^T = [u_x^1 \quad u_y^1 \quad u_x^2 \quad u_y^2 \quad u_x^3 \quad u_y^3 \quad \cdots \quad u_x^N \quad u_y^N] \quad (3-1-42)$$

となる。なお、 N は1要素あたりの節点数である。

さらに、ひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ は次のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \underline{\boldsymbol{u}} = \mathbf{L} \mathbf{H} \underline{\boldsymbol{u}} = \mathbf{B} \underline{\boldsymbol{u}} \quad (3-1-43)$$

ここで、 \mathbf{B} は節点変位-ひずみ変換マトリクスであり、次の関係がある。

$$\mathbf{B} = \mathbf{L} \mathbf{H} \quad (3-1-44)$$

これより、式(3-1-36)に示す運動方程式が、以下のように離散化される。

$$\int_{\Omega} (\mathbf{B} \delta \underline{\boldsymbol{u}})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (\mathbf{H} \delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \mathbf{H} \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} dv - \int_{\partial \Omega} (\mathbf{H} \delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds \quad (3-1-45)$$

$$= (\delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \int_{\Omega} \mathbf{B}^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + (\delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \int_{\Omega} \rho \mathbf{H}^T \mathbf{H} dv \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} - (\delta \underline{\boldsymbol{u}})^T \int_{\partial \Omega} \mathbf{H}^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds = 0$$

式(3-1-45)は、任意の仮想変位に対して成立するので、

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \mathbf{M} \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}} = \mathbf{t}^* \quad (3-1-46)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega} \rho \mathbf{H}^T \mathbf{H} dv \quad (3-1-47)$$

$$\mathbf{t}^* = \int_{\partial \Omega} \mathbf{H}^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds \quad (3-1-48)$$

であり、2次元の場合、

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial h_N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial h_N}{\partial y} \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \frac{\partial h_3}{\partial x} & \dots & \frac{\partial h_N}{\partial y} & \frac{\partial h_N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3-1-49)$$

となる。

なお、式(3-1-46)からは、 $\partial\Omega_u$ 境界上の自由度に対する式は落ちているものとする。

3.1.4 有効応力・相対変位を用いた運動方程式

式(3-1-3)に示す有効応力原理より、式(3-1-46)は有効応力を用いて以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{m}}(p - p^{st}) dv + \mathbf{t}^* \quad (3-1-50)$$

ここで、

$$\hat{\mathbf{m}}^T = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad (3-1-51)$$

$$\boldsymbol{\sigma}'^T = (\sigma'_{xx} \quad \sigma'_{yy} \quad \sigma'_{zz} \quad \sigma'_{xy} \quad \sigma'_{yz} \quad \sigma'_{zx}) \quad (3-1-52)$$

$$(\boldsymbol{\sigma}'_{st})^T = (\sigma'_{xx}{}^{st} \quad \sigma'_{yy}{}^{st} \quad \sigma'_{zz}{}^{st} \quad \sigma'_{xy}{}^{st} \quad \sigma'_{yz}{}^{st} \quad \sigma'_{zx}{}^{st}) \quad (3-1-53)$$

ここで、間隙水圧を、節点における間隙水圧の値を用いて、以下のように離散化する。

$$p = \hat{\mathbf{H}} \mathbf{p} \quad (3-1-54)$$

ここで、補間関数 $\hat{\mathbf{H}}$ は以下のとおり。

$$\hat{\mathbf{H}} = [\hat{h}_1 \quad \hat{h}_2 \quad \hat{h}_3 \quad \dots \quad \hat{h}_N] \quad (3-1-55)$$

式(3-1-54)を式(3-1-50)に適用すると、運動方程式は、減衰項も考慮して次のようになる。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{Q} \mathbf{p}^* + \mathbf{t}^* \quad (3-1-56)$$

ここで、 \mathbf{C} は減衰マトリクス、また、

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p} - \mathbf{p}_{st} \quad (3-1-57)$$

$$\mathbf{Q} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{m}} \hat{\mathbf{H}} dv \quad (3-1-58)$$

である。

さらに、基盤に一様に入射する地震動加速度 \ddot{u}_g に対する応答を求めるために、節点変位を基盤の変位とそれに対する相対変位に分離する。すなわち、

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_r + u_g \mathbf{I} \quad (3-1-59)$$

ここで、

- \mathbf{u}_r 相対変位ベクトル
- u_g 基盤の変位 (いずれかの座標軸の方向の変位)
- \mathbf{I} 加振方向の自由度成分に1, その他に0を割り当てたベクトル

式(3-1-59)を式(3-1-56)に代入すると、次式を得る。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_r = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^* \quad (3-1-60)$$

なお、 \mathbf{I} は平行移動を表すベクトルであるから、次式が成り立つ。

$$\mathbf{B} \mathbf{I} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{C} \mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (3-1-61)$$

ひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ は、式(3-1-43) (3-1-59) (3-1-61)より、 \mathbf{u} でも \mathbf{u}_r でも同様に、以下のようにして求められる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u} = \mathbf{B} \mathbf{u}_r \quad (3-1-62)$$

有効応力ではなく全応力で取り扱うべき要素が他にあれば、式(3-1-60)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_r \\ & = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^* \end{aligned} \quad (3-1-63)$$

上式では、全領域 Ω を、有効応力により定式化される要素の存在する領域 Ω_1 と、全応力に基づく要素の存在する領域 Ω_2 に分離した。

さらに、相対変位ベクトル \mathbf{u}_r を、非拘束自由度 \mathbf{u}_r^f と拘束自由度 \mathbf{u}_r^c ($\partial\Omega_u$ 境界上の自由度)に分け、また、行列 \mathbf{C}, \mathbf{M} もこれに応じて区分する。すなわち、

$$\mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_r^f \\ \mathbf{u}_r^c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}^f \quad \mathbf{C}^c], \quad \mathbf{M} = [\mathbf{M}^f \quad \mathbf{M}^c] \quad (3-1-64)$$

すると、離散化された運動方程式(3-1-63)は、以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \mathbf{C}^f \dot{\mathbf{u}}_r^f + \mathbf{M}^f \ddot{\mathbf{u}}_r^f \\ & = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} - \mathbf{C}^c \dot{\mathbf{u}}_r^c - \mathbf{M}^c \ddot{\mathbf{u}}_r^c + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^* \end{aligned} \quad (3-1-65)$$

3.1.5 非排水の場合の運動方程式

間隙水が非排水条件にあると仮定した場合、式(3-1-2)において $k_{ii} = 0$ とおくことにより、次式を得る。

$$\dot{p} = -\frac{K_f}{n} \dot{\varepsilon}_{ii} \quad (3-1-66)$$

これを時間 t に関して積分し、式(3-1-9) (3-1-11)に示す初期条件を考慮すると、

$$p^* \equiv p - p^{st} = -\frac{K_f}{n} \varepsilon_{ii} \quad (3-1-67)$$

となる。上式を式(3-1-50)に代入すると、式(3-1-60)に代えて次式を得る。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \widehat{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{u}}_r + \mathbf{C} \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r + \mathbf{M} \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{t}^* \quad (3-1-68)$$

ここで,

$$\widehat{\mathbf{A}} = \int_{\Omega} \frac{K_f}{n} \mathbf{B}^T \widehat{\mathbf{m}} \widehat{\mathbf{m}}^T \mathbf{B} dv \quad (3-1-69)$$

あるいは、式(3-1-65)に対応して次式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \widehat{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{u}}_r + \mathbf{C}^f \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r^f + \mathbf{M}^f \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r^f \\ & = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} - \mathbf{C}^c \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r^c - \mathbf{M}^c \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r^c + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{t}^* \end{aligned} \quad (3-1-65)$$

3.2 構成則

FLIPでは、前述のとおり、せん断応力-せん断歪関係には、主応力軸の回転が自然に考慮される、東畑・石原(1985)によるマルチスプリング・モデルを採用し、過剰間隙水圧の発生モデルとしては、井合のモデルを採用している。

このマルチスプリング・モデルは、図 3-1 に示すように任意方向のせん断面に対して仮想的な単純せん断が発生するものとし、これらのせん断面に対して双曲線モデルを適用するものである。FLIPでは、双曲線モデルにおけるMasing則を修正し、履歴ループの大きさを任意に調節可能なように拡張したモデルを使用している。このモデルの特徴は以下のとおりである。

- (1) 排水条件におけるせん断応力-せん断歪の履歴ループ特性（いわゆる歪依存カーブ）は、既往の試験データとよく適合する。
- (2) 主応力の回転が自然に（つまり新たなパラメータを導入しなくても）考慮される。
- (3) 材料としての異方性が導入しやすい形となっている。

他方、過剰間隙水圧発生モデルでは、累積塑性せん断仕事に基づいて、液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇、有効応力の減少及びせん断剛性の低下等を、以下に示す手順で評価する。

- ① 地震力の作用により土の各部分はせん断変形するが、その際の塑性せん断仕事を累積したものが液状化の進展の程度を表す指標になりうると考えられる。井合モデルでは、この累積塑性せん断仕事から、図 3-2 に示す液状化の進展の程度を表す「液状化フロントパラメータ S_0 」を求める、 S_0 が定まれば、図中の液状化フロント(Liquefaction Front)が所定の式により与えられる。なお、図 3-2 は等方圧密後に全拘束圧力一定の条件下で準静的に繰り返しせん断を行う液状化試験において得られる有効応力経路を模式的に描いたものであり、液状化フロントは液状化の進行のある局面における可能な応力経路を示す。
- ② 図 3-2 に示すように、液状化フロントとせん断応力比 $r(= q/(-\sigma_{m0}'))$ から、前述の液状化試験の条件下においては $\sigma_{m'}/\sigma_{m0}'$ に一致する状態変数 S (図 3-2 の横軸の値)を求める。なお、せん断応力比 r は、進行中の地震応答解析の現時刻における最大せん断応力 q と地震応答解析開始時点の平均有効応力 σ_{m0}' から算定する。液状化試験では σ_{m0}' は等方圧密後の平均有効応力、 $\sigma_{m'}$ は試験中の任意の時点における平均有効応力を表す。
- ③ 前述の液状化試験の条件下で考えると、 $(1 - S)\sigma_{m0}'$ は過剰間隙水圧 u に等しく、また、全体積の変化により定まる。一方、平均有効応力と体積弾性歪に関する構成則を導入すれば、平均有効応力 $\sigma_{m'}(= S\sigma_{m0}')$ に基づき体積弾性歪を算定することができる。従って、過剰間隙水圧から算定される全体積歪から体積弾性歪を引くと体積塑性歪 ϵ_{mp} が得られる。この体積塑性歪は、上記液状化試験の条件下で得られるもので、2次元地震応答解析ではこの条件は成立しないが、その場合でも、この方法で見積もった体積塑性歪が生じるものとする。
- ④ 前述の平均有効応力と体積弾性歪の関係に対して、③で求めた体積塑性歪 ϵ_{mp} を考慮すれば、全

体積歪と平均有効応力との間の関係を得る。2次元の地震応答解析の際には、全体積歪は地盤要素の節点変位から直ちに計算することが可能で、これにより平均有効応力 $\sigma_{m'}$ を評価することができる。また、過剰間隙水圧比は $(1 - \sigma_{m'}/\sigma_{m0'})$ により算定する。なお、 $\sigma_{m0'}$ は地震応答解析開始時点の平均有効応力である。

- ⑤ 上記④で求めた有効応力 $\sigma_{m'}$ に応じてせん断強度及び初期せん断剛性を算定し直すのが普通であるが、FLIP では②で求めた状態変数 S に応じてマルチスプリング・モデルのせん断強度等を直接低減させる。これによりマルチスプリング・モデルの各スプリングが従う双曲線モデルの骨格曲線は図 3-3 に示すように変化する。

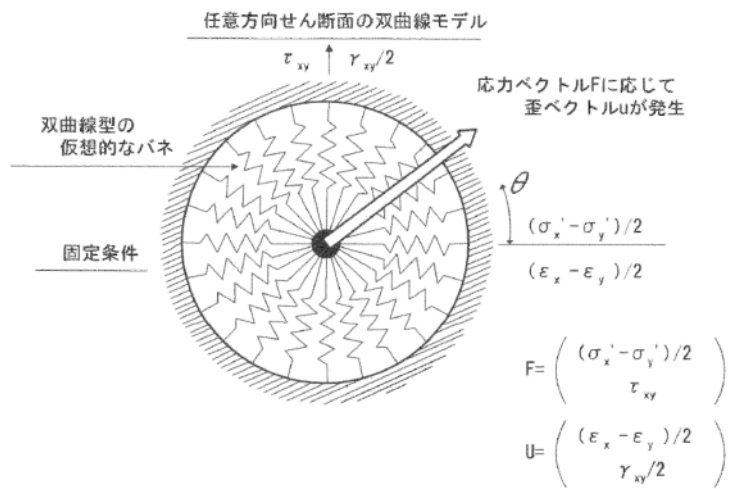


図 3-1 マルチスプリング・モデル

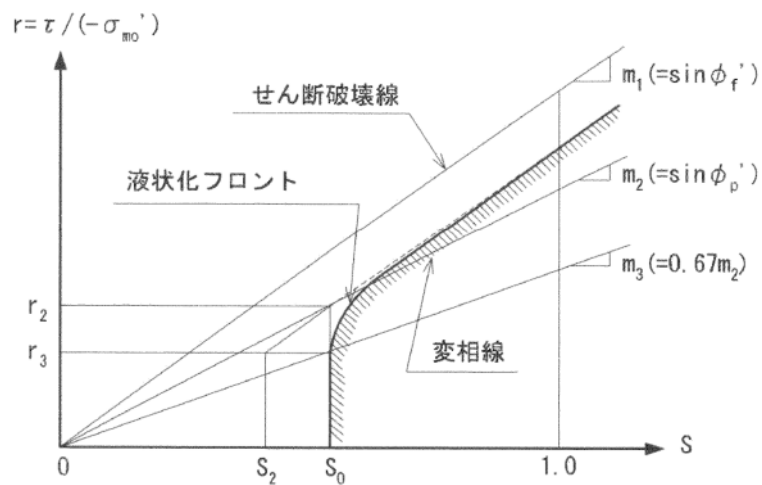


図 3-2 過剰間隙水圧モデルの概念図

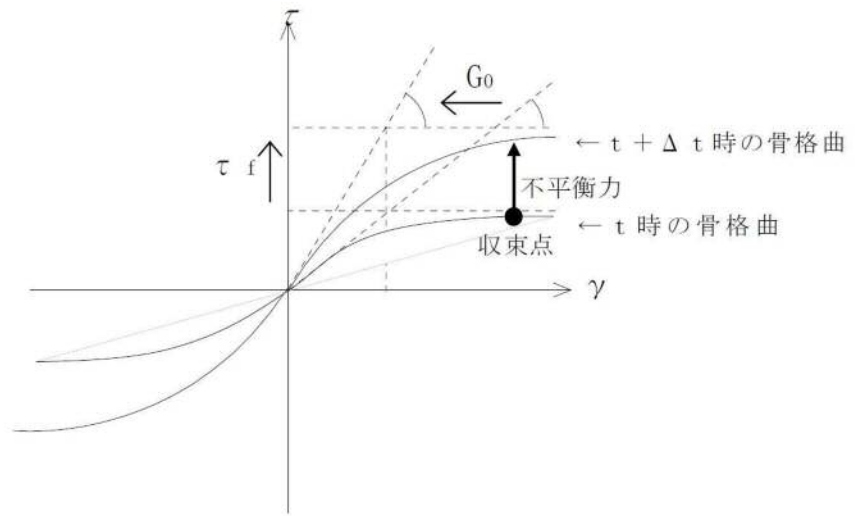


図 3-3 双曲線モデルの骨格曲線の液状化による変化 (模式図)

4. 解析フローチャート

解析フローチャートを図 4-1 に示す。

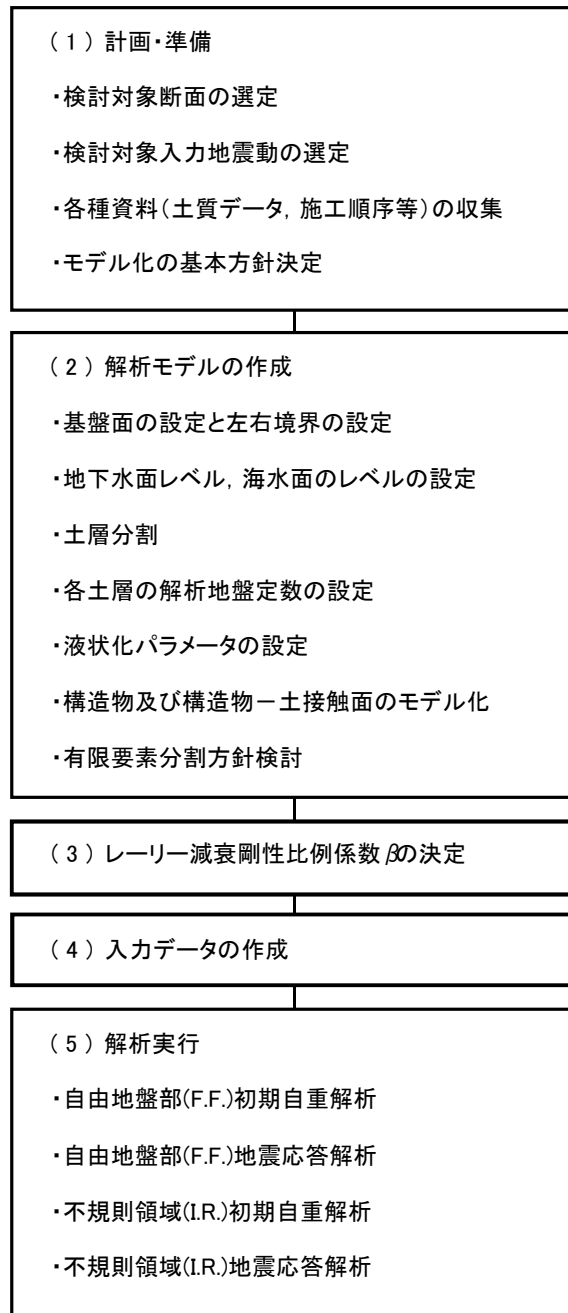


図 4-1 解析フローチャート

5. 杭－地盤相互作用ばね

杭基礎構造物－地盤系の耐震解析を2次元一体解析として行うには、既往検討¹⁾⁻⁶⁾で評価した、杭－地盤相互作用ばねの特性を持つばね要素（以下、杭－地盤相互作用ばね要素）により、杭モデルと2次元地盤モデルを接続する。まず、奥行き方向幅が杭間隔に等しい2次元地盤モデルと奥行き方向に等間隔に配置された杭群中の杭径Dの杭1本分のモデルを用意する。地盤要素にはマルチスプリング要素を適用し、杭は線形または非線形のはり要素でモデル化する。杭節点と対応する2次元地盤モデルの地盤節点の水平方向並進自由度を、図 5-3に示すように、杭－地盤相互作用ばね要素により接続する。

このような2次元一体解析のモデルにおいて、杭－地盤相互作用ばね要素は以下に示すように動作する。

① 杭の循環境界に対する相対変位 u を算定する。なお、循環境界変位として、一体解析モデルを構成する地盤モデルの対応する節点変位を参照する。

② 相対変位 u から、次式を用いて、対応するせん断ひずみ γ を評価する。

$$\gamma = u / (D \times \beta_p)$$

なお、 β_p は、土質、不飽和・飽和などの土の状態、杭間隔、荷重レベル（荷重片振幅／破綻荷重＝せん断応力片振幅／初期せん断強度）及び液状化フロントパラメータ S_0 に応じて、図 5-1から定める。

③ 杭近傍の土要素を参照して、その変形特性を決めるパラメータと土の状態（主に、有効拘束圧と液状化フロントパラメータ S_0 ）に基づいて、砂の構成則と同様のせん断応力－せん断ひずみ関係を設定し、せん断ひずみ γ を与えてせん断応力 τ を算定する。

④ せん断応力 τ から、次式を用いて、ばね力 F を評価する。

$$F = (L \times D \times \alpha_p) \times \tau$$

なお、 α_p は応力－荷重変換係数で、杭間隔と単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度 τ_{m0} ）の分布（図 5-2）より定まる11.5～12.6の範囲の値である。

上記②において、液状化を考慮する場合に、ひずみ－変位変換係数 β_p の値を決めるには、近傍土要素の液状化フロントパラメータ S_0 の値を参照する必要がある。ある S_0 の値に対しては、 β_p は概ね一定値を取るので、定数とするか、過去に経験した最大の荷重レベルを適用することが考えられる。図 5-4は、杭間隔5Dの場合の飽和砂 ($N_{65}=10$, $\sigma_{m0}=98\text{kPa}$, $S_0=1.0, 0.5, 0.05, 0.005$) を対象とした水平断面モデルによる繰り返し載荷解析で得られた荷重片振幅－最大相対変位関係と過剰間隙水圧モデルに基づいて設定したせん断応力 τ －せん断ひずみ γ 関係から設定した荷重－変位関係を比較したものである。過剰間隙水圧モデルに基づき設定した関係では、荷重＝12.6× τ 、変位＝1.5× γ ($S_0=1.0, 0.5$)、または、変位＝1.63× γ ($S_0=0.05, 0.005$) とした。ひずみ－変位変換係数 β_p は荷重レベルに依存して変化する量だが、このように、荷重レベルによらない定数と置いても、全体系の解析結果をよく説明するので、このような取扱いでもよい。

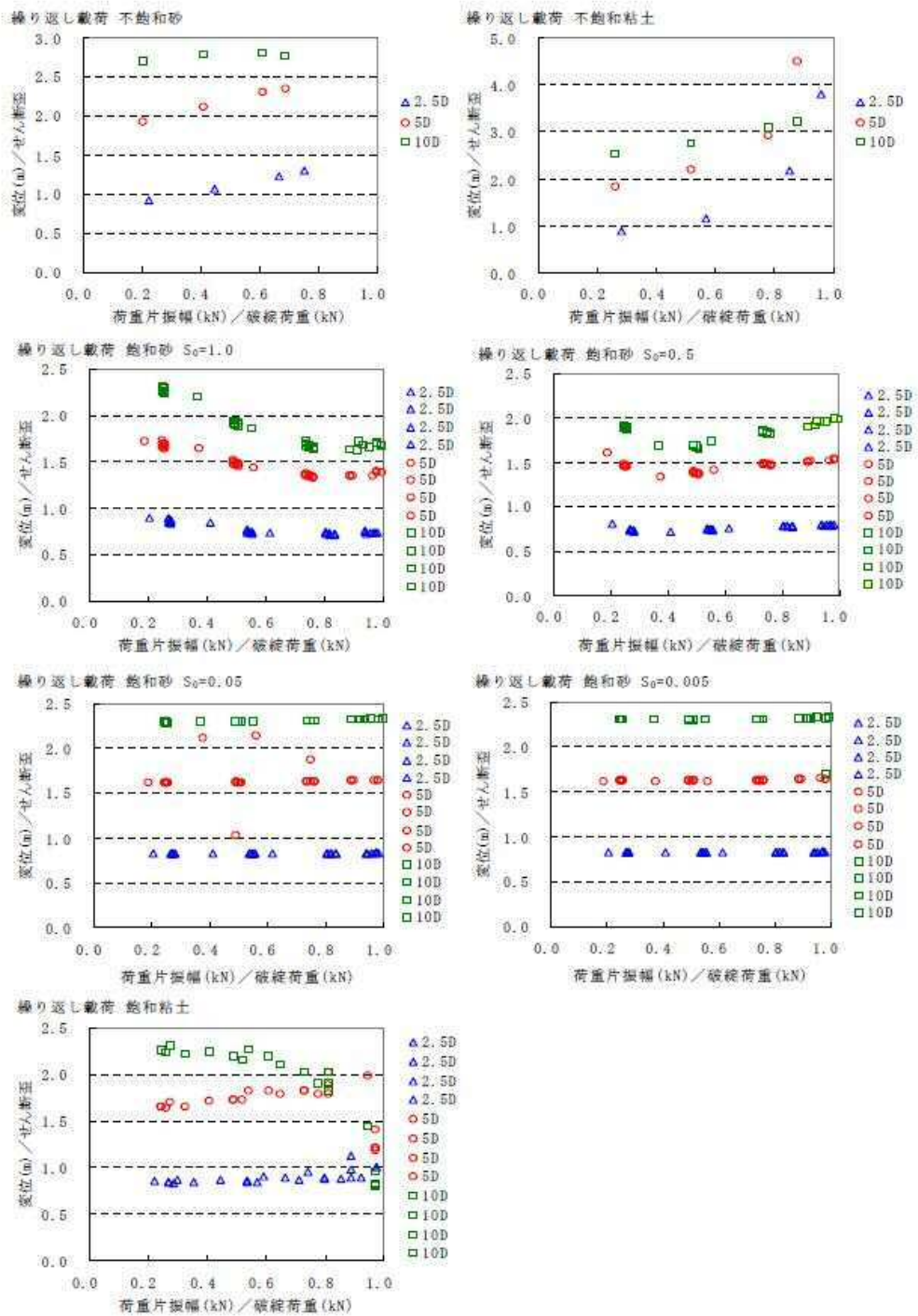


図 5-1 循環境界基準の相対変位振幅と要素シミュレーションのせん断ひずみ振幅の比を
求めるためのチャート

※ 破綻荷重で正規化した荷重片振幅と杭間隔の関数として表示。

なお、破綻荷重=12.6 (2.5Dの場合は11.5) $\times \tau_{m0}$

単調載荷 全17ケース×杭間隔3ケース 破綻荷重／初期せん断強度 τ_{m0}

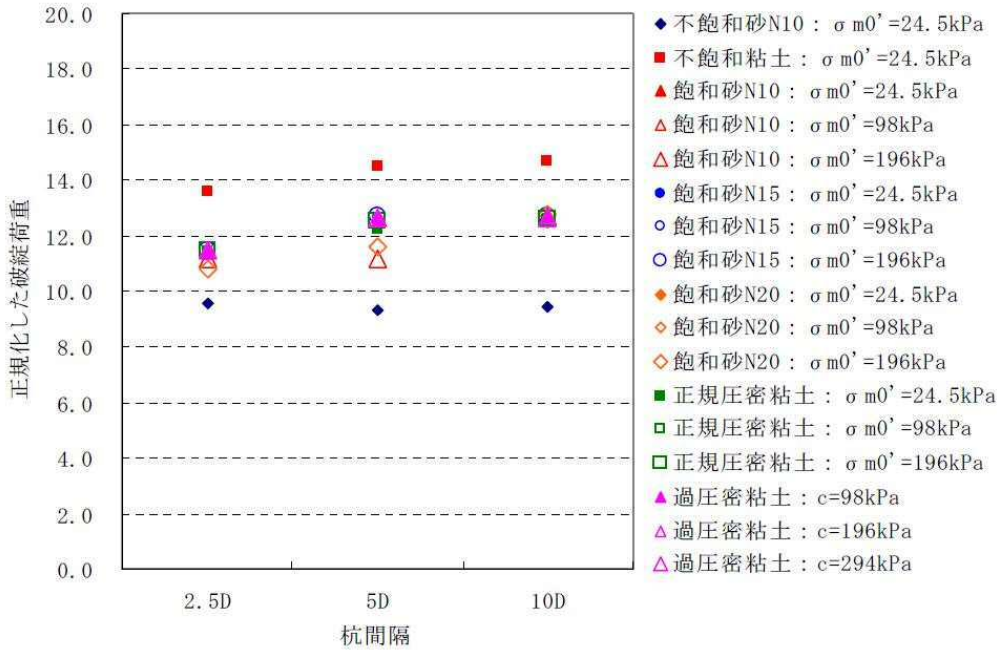


図 5-2 単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度 τ_{m0} ）の分布

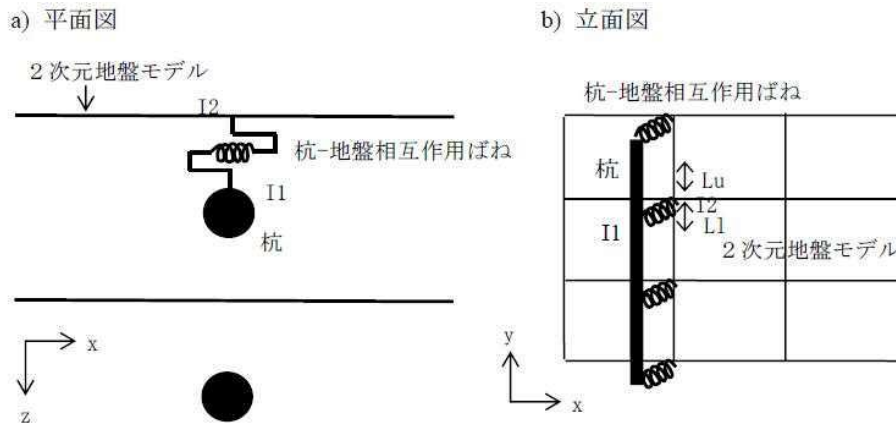


図 5-3 杭-地盤相互作用ばねによる2次元一体解析の杭モデルと地盤モデルの連結方法 (模式図)

※I1は杭-地盤相互作用ばね要素の杭側節点，I2は地盤側節点，Luはばねの上側配長（隣接する上側のばねまでの半分の長さ），L1はばねの下側支配長を表す。

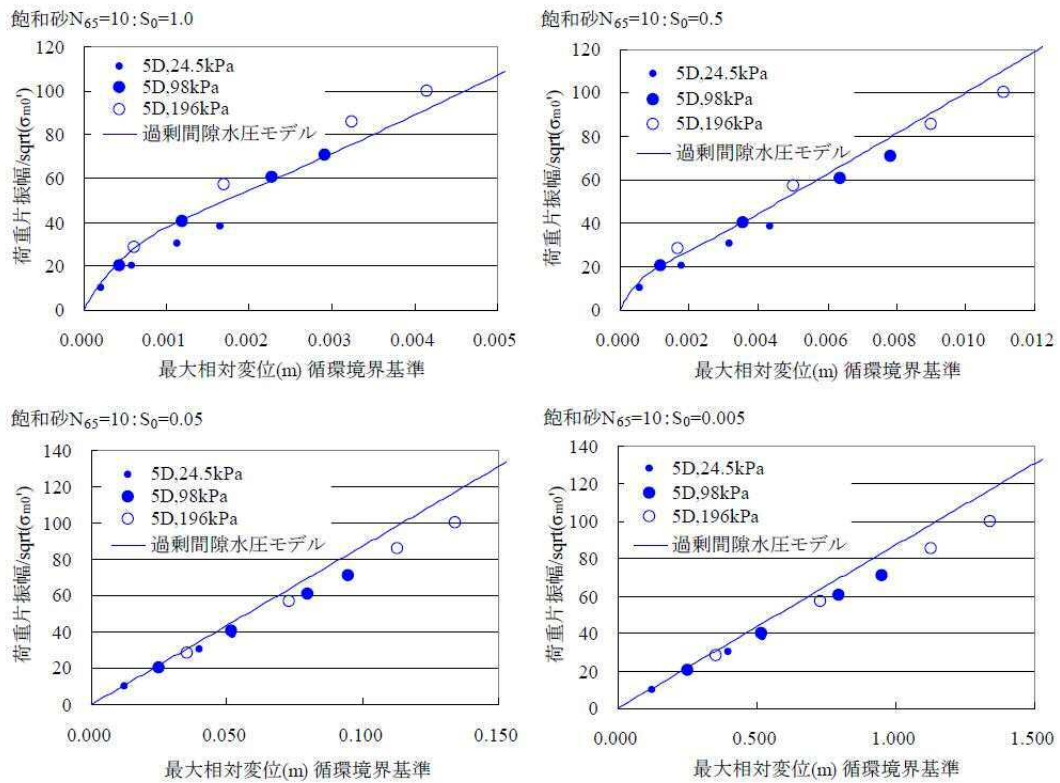


図 5-4 飽和砂 (5D, $N_{65}=10$, $\sigma_{m0}'=98\text{kPa}$, $S_0=1.0, 0.5, 0.05, 0.005$) :
荷重片振幅－最大相対変位の関係と過剰間隙水圧モデル他に基づいて求めた関係の比較

※1 過剰間隙水圧モデルによる曲線は、 τ と S_0 からせん断強度 τ_f と初期せん断剛性 G_0 を求めて、双曲線関係に基づくせん断応力 τ －せん断ひずみ γ 関係を設定し、それを荷重－変位関係に置き換えたもの。

置き換えは、荷重= $12.6 \times \tau$ 、変位= 1.5 (または 1.63) $\times \gamma$ とした。

※2 全体系で解いた解が、大きな荷重では、過剰間隙水圧モデルによる曲線の下側に来るのは、荷重ステップ間隔の増大による精度低下によるものと思われる。また、変位－ひずみ変換係数は、荷重片振幅に依存する量だが、このように定数と置いても、全体系の解析結果をよく説明する。

<5. 杭-地盤相互作用バネの参考文献>

- 1) 三輪滋, 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 田河祥一: 2次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭-地盤系の相互作用の検討, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 2) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 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簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997.
- 3) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 523-530, 1985.
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990.
- 5) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 6) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の動的相互作用のモデル化, 第58回土木学会年次学術講演会, 2003.

6. 有効応力解析に用いる解析コードの検証及び妥当性確認

6.1 概要

東海第二発電所の有効応力解析にはFLIP Ver. 7.3.0_2を用いる。他プラントの既工事計画で使用されたバージョン (Ver. 7.2.3_4) との主な変更点は、杭-地盤相互作用ばね要素の導入である。そこで、FLIP Ver. 7.3.0_2とVer. 7.2.3_4を用いて、杭-地盤相互作用ばね要素の検証及び妥当性確認を行った。

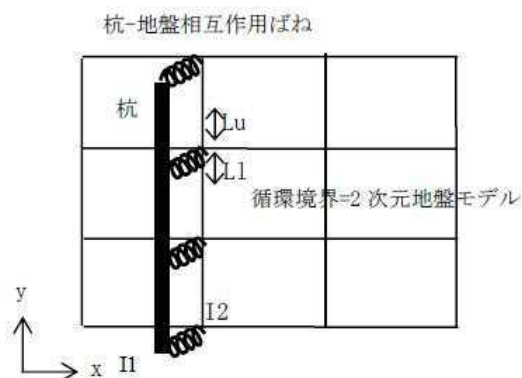
6.2 杭と周辺地盤との相互作用

杭と周辺地盤との相互作用として、Ver. 7.3.0_2では杭-地盤相互作用ばね要素を用いる。また、Ver. 7.2.3_4ではジョイント要素を用いるものとする。両者の設定方法を以下に述べる。

a) 杭-地盤相互作用ばね要素の支配長

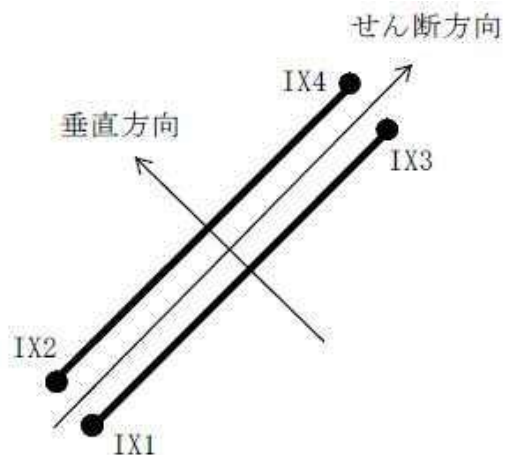
杭-地盤相互作用ばね要素は、その上側支配長 L_u と下側支配長 L_1 を自動的に決定する。I1節点 (杭側節点) に接続するはり要素を上方に辿り、次の杭-地盤相互作用ばね要素が接続する節点までの距離の半分を上側支配長 L_u とする。そのような節点がない場合は $L_u=0$ とする。同様に、下側支配長 L_1 も算定する。

鉛直断面



b) ジョイント要素の配置

ジョイント要素は、土 (マルチスプリング要素等またはマルチスプリング要素等+間隙水要素) と矢板 (線形はり要素) やケーソン (線形平面要素) 等の構造物の接触面上 (節点間) に置いて、その間の滑り・剥離を表現するのに用いる。



解析結果

比較対象：鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤

Ver. 7.3.0_2とVer. 7.2.3_4との加速度の解析結果の比較を行い、解析結果が等しいことを確認した。Ver. 7.2.3_4では杭-地盤相互作用ばね要素を用いて杭軸方向非線形バネを設定できないため、杭軸方向非線形バネを無視した場合と考慮した場合の2ケースの比較を行った。ただしVer. 7.2.3_4では杭-地盤相互作用ばねの代わりにジョイント要素を用いた。

表 1 杭軸方向非線形バネに用いた要素

	Ver. 7.3.0_2	Ver. 7.2.3_4
杭軸方向非線形バネを無視	—	—
杭軸方向非線形バネを考慮	杭-地盤相互作用ばね	ジョイント

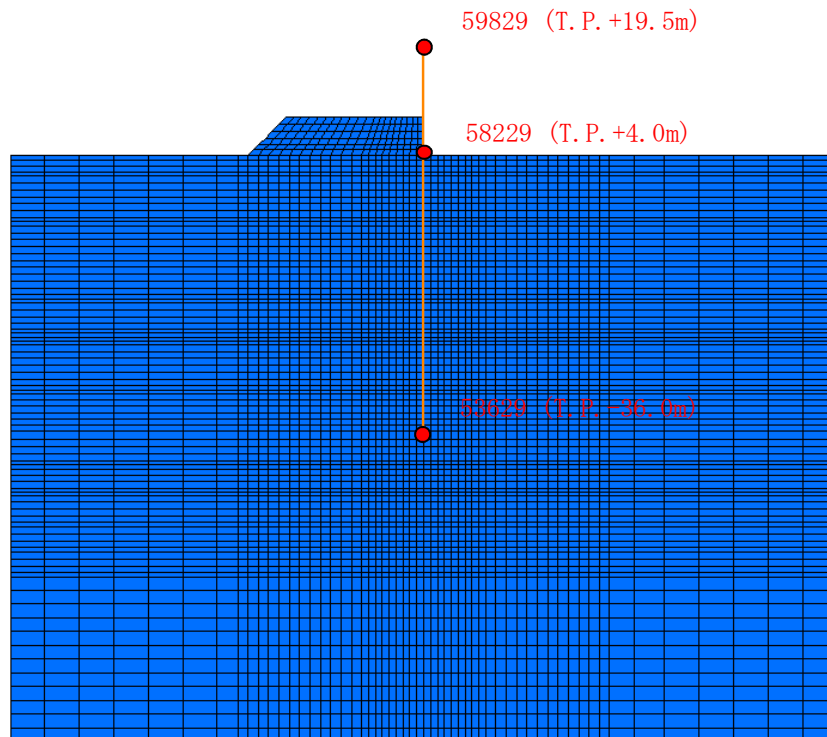


図 6-1 出力節点の位置図

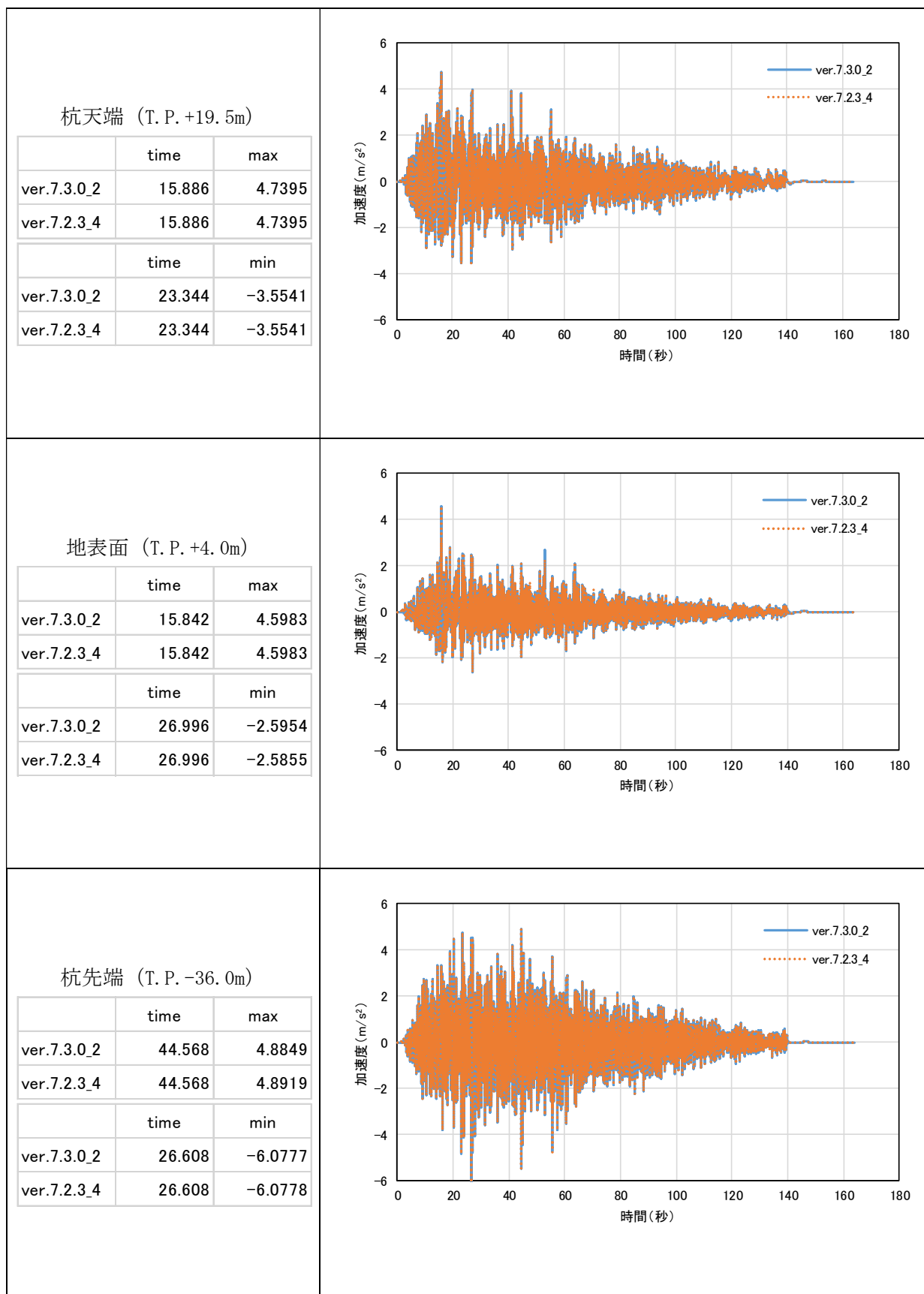


図 6-1 水平方向加速度 (m/s²) (杭軸方向非線形バネを無視した場合)

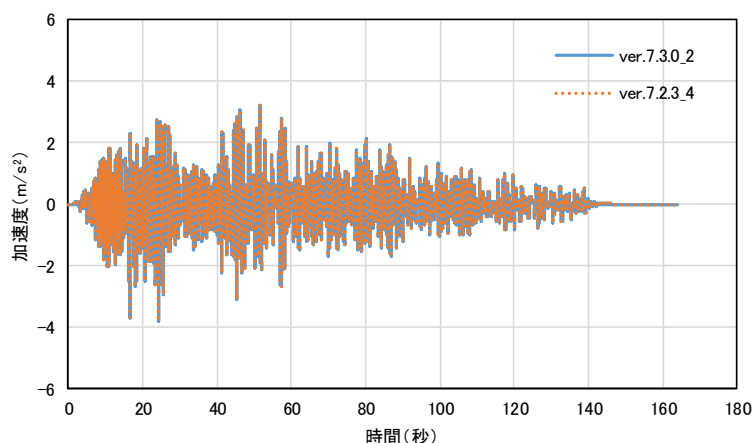
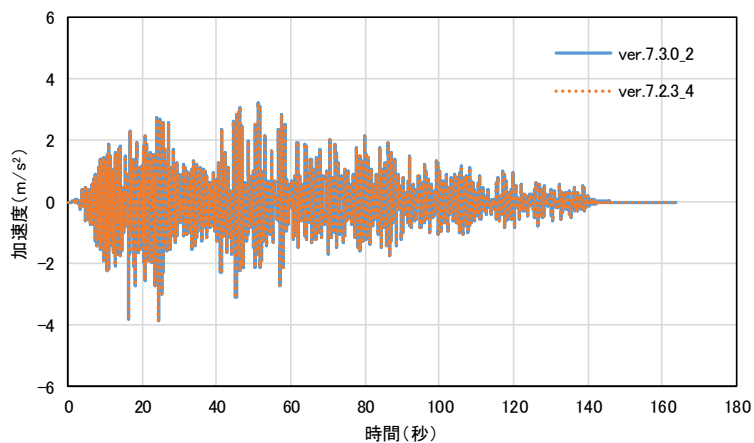
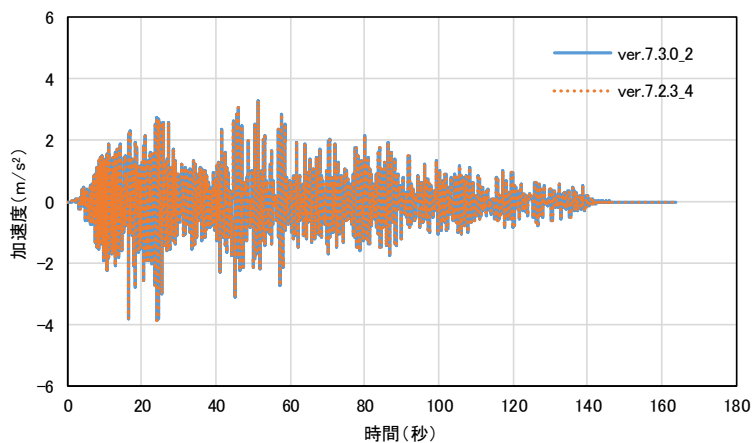
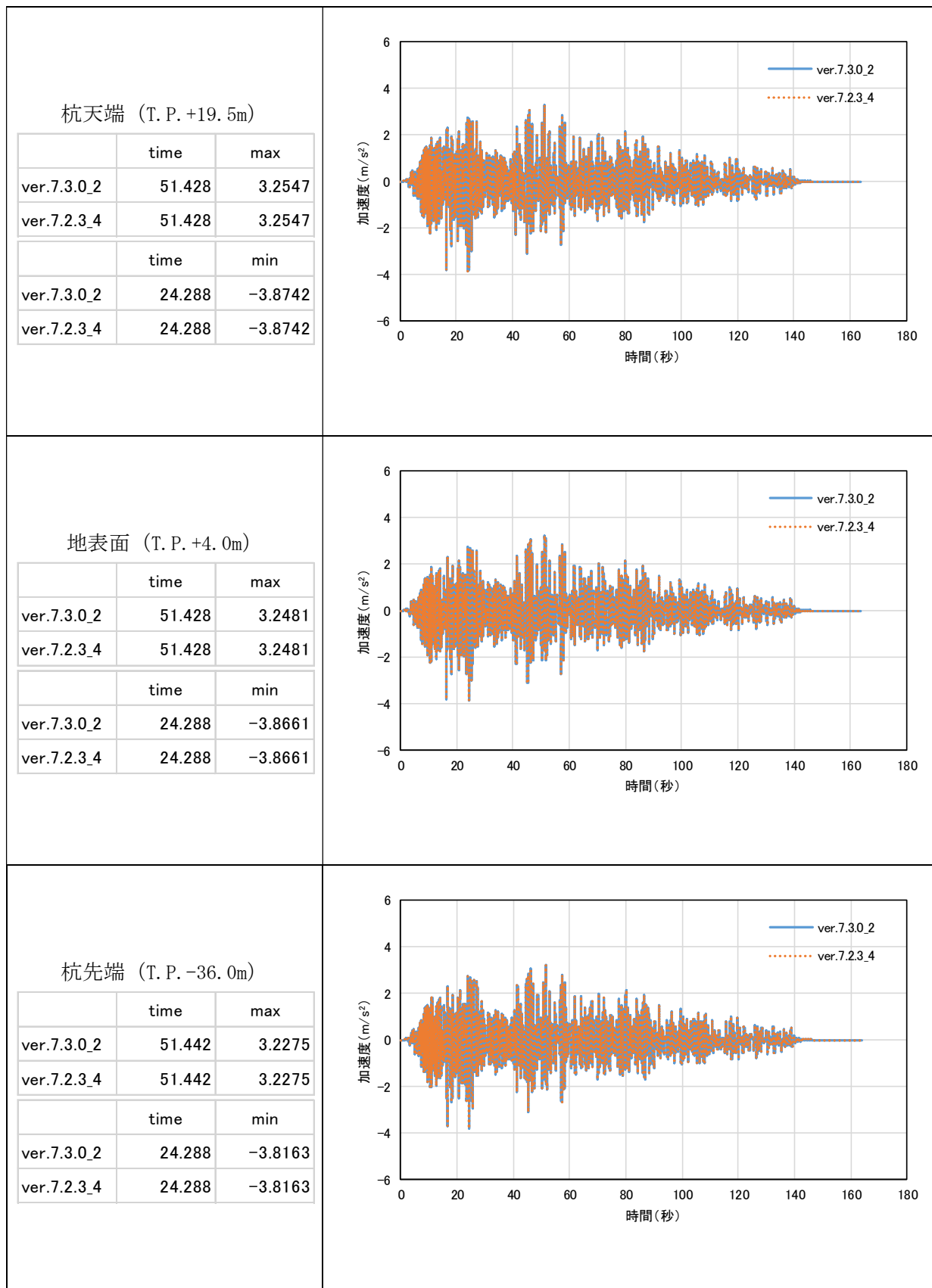


図 6-2 鉛直方向加速度 (m/s²) (杭軸方向非線形バネを無視した場合)

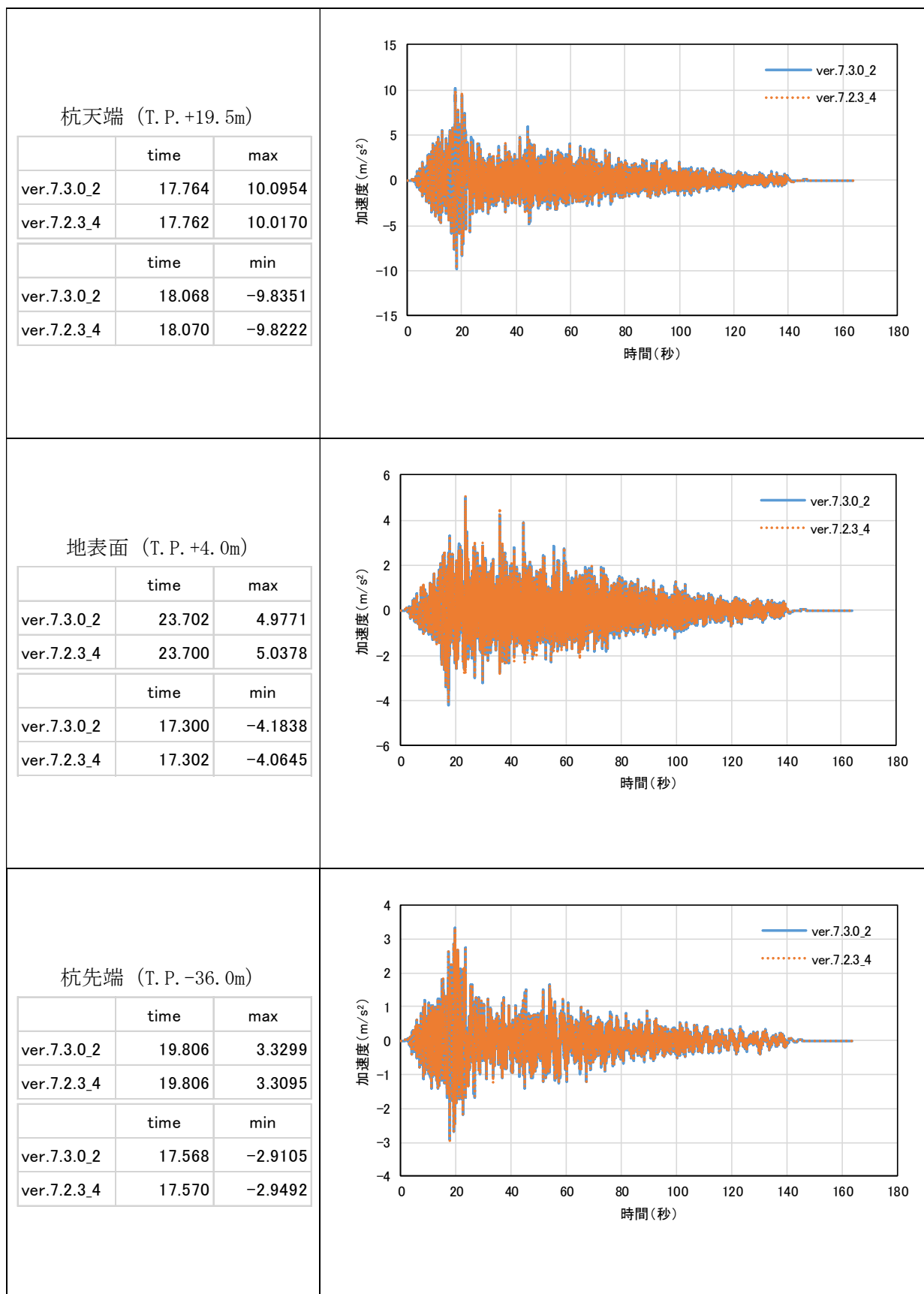


図 6-3 水平方向加速度 (m/s^2) (杭軸方向非線形バネを考慮した場合)

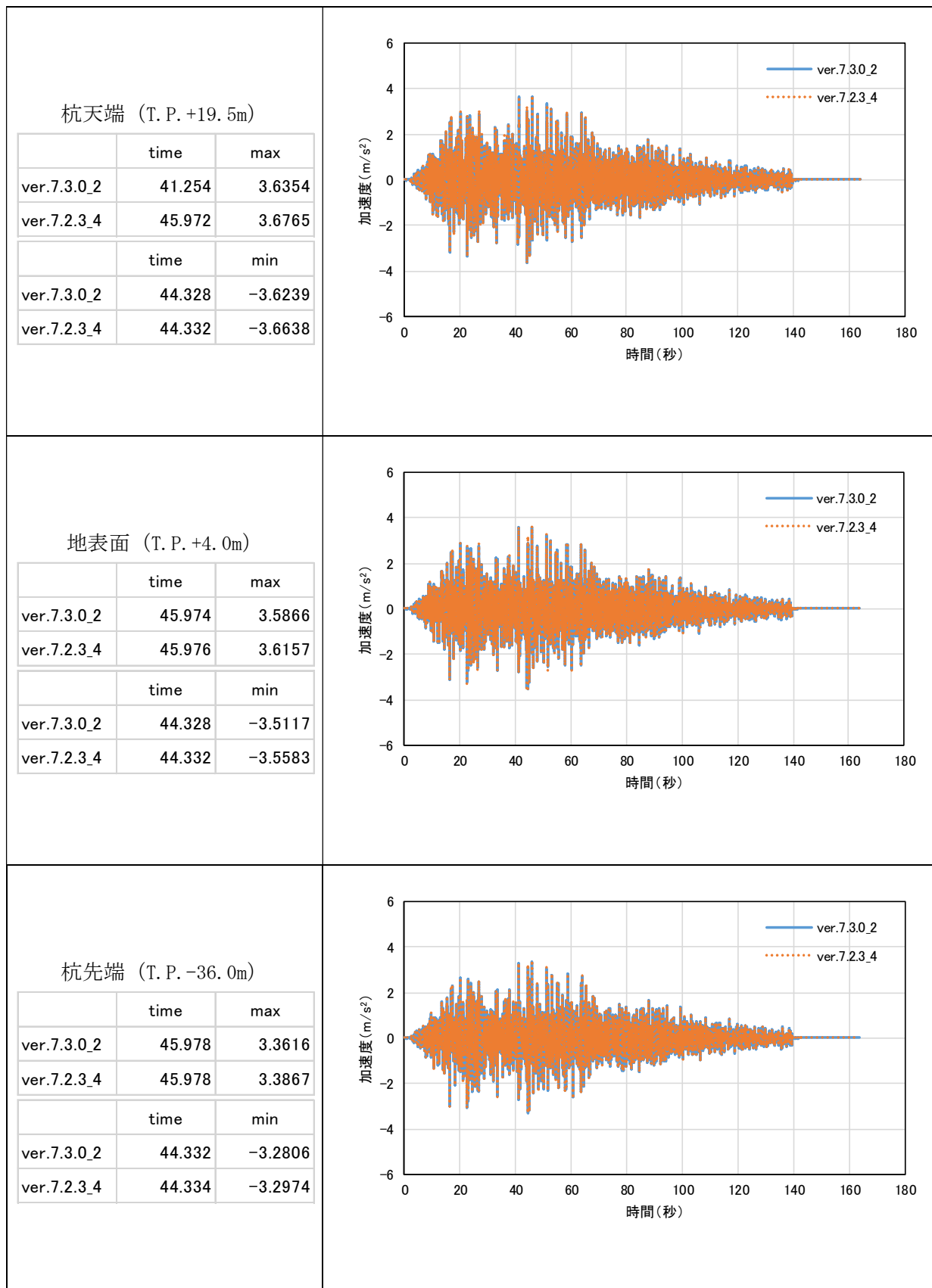


図 6-4 鉛直方向加速度 (m/s²) (杭軸方向非線形バネを考慮した場合)