

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-757 改2
提出年月日	平成30年9月28日

V-5-23 計算機プログラム（解析コード）の概要・T L P I L E S 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.	TLPILESPの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	本解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	5
3.4	解析フローチャート	7
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	8

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）TLPILESP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-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	Ver. 2.3
V-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver. 2.3

2. 解析コードの概要

項目	コード名 TLPILESP
使用目的	群杭基礎の動的地盤ばねの算出
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1992年
使用したバージョン	Ver. 2.3
コードの概要	TLPILESP (以下「本解析コード」という。) は、鹿島建設が自社開発したもので、薄層要素法に基づく群杭基礎の動的地盤ばねを算出するプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、主排気筒の地震応答解析における群杭地盤ばねの算出に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証は以下のとおり実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較し、概ね一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の体系と今回の工事認可申請で使用する体系が同等であることから、本解析コードの解析結果と検証済解析コードの解析解の一致をもって、解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事認可申請で行う地震応答解析並びに基礎版の応力解析に用いる地盤ばねの用途及び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. TLPILESPの解析手法について

3.1 一般事項

本解析コードは、鹿島建設により開発されたプログラムである。本解析コードは、水平方向に半無限に広がりのある成層地盤上の群杭基礎の動的地盤ばねを算出することができる。

また、本解析コードは、主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構の動的地盤ばねの算定に使用している。

3.2 本解析コードの特徴

- ①半無限成層地盤の特性は、薄層要素法による加振解を用いており、成層地盤への適用が可能である。
- ②群杭効果を考慮した群杭基礎の動的地盤ばねが算定できる。また、2本杭間の杭頭柔性の重ね合わせを用いているため、大規模群杭への適用が可能である。
- ③本解析コードは、薄層要素法を用いているため、地盤のモデル化において次の仮定を設けている。
 - ・地盤各層は、弾性とし、水平方向に半無限に広がっているものとする。(水平成層地盤)
 - ・分割した地盤各層内の変位分布は、線形と仮定する。
 - ・地盤物性は、各層の単位体積重量、せん断波速度（又はせん断弾性係数）、ポアソン比及び減衰定数を入力することで定義する。
- ④モデル下部境界は、半無限要素あるいはダッシュポット要素でモデル化する。

また、今回の解析における本解析コードのバージョン、件名、使用要素及び評価内容を表3.2-1に示す。

表3.2-1 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 2.3	<ul style="list-style-type: none"> ・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構 	—	地震応答解析モデルによる基礎底面地盤ばねの算定

3.3 解析手法

a. 基本方針

杭各部での変位を $\{u^p\}$ ，作用力を $\{f^p\}$ として，杭-地盤連成系での力の釣り合いを (1) 式のとおりを表す。

$$[K_{ps}]\{u^p\} = \{f^p\} \quad \dots \dots (1)$$

ここで，剛性マトリクス $[K_{ps}]$ は，図3.3-1及び (2) 式に示すとおり，半無限成層地盤から得られる剛性マトリクス $[K_{ss}]$ から，杭を土柱に置換した置換土柱の剛性マトリクス $[K_s]$ を引く一方で，杭の剛性マトリクス $[K_p]$ を足し合わせて算定する。

$$[K_{ps}] = [K_{ss}] - [K_s] + [K_p] \quad \dots \dots (2)$$

杭の剛性マトリクス $[K_p]$ は，杭の曲げとせん断剛性をもとに定める。同様に，置換土柱の剛性マトリクス $[K_s]$ も，土の物性値をもとに評価する。一方， $[K_{ss}]$ は無限領域に対して評価する必要があり，以下のb. ~d. に示す方法にて評価する。

地盤ばね算定にあたっては，杭頭位置に単位加振，すなわち， $\{f^p\} = \{e^{i\omega t}, 0, \dots, 0\}^T$ を与えた時の杭頭変位 u^{sp} を求め，その逆数を地盤ばねとする。

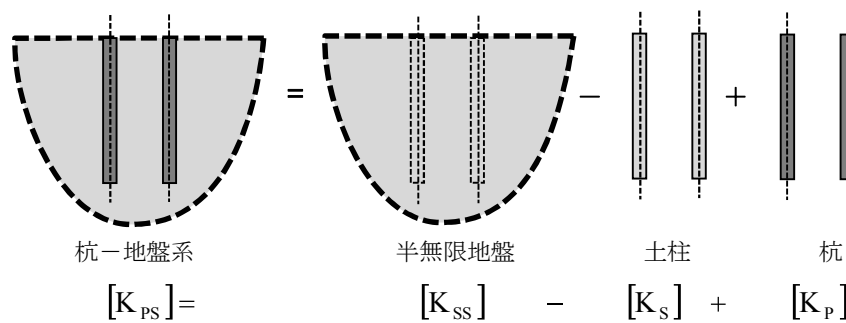


図 3.3-1 杭-地盤系の剛性マトリックス

b. 半無限成層地盤についての基礎方程式

上記の半無限成層地盤についての剛性 $[K_{ss}]$ を算定するにあたっては，まず，図3.3-2に示すように，半無限成層地盤の上層部は平行で複数の層からなると仮定する。また，各層においては，図3.3-3に示すとおり z 軸を鉛直下方に向けて円筒座標 (r, θ, z) を定め，円筒座標系での変位を (u_r, u_θ, u_z) と表わす。この時，水平方向に加振する場合，波数 α ，振動数 ω とした波動方程式は (3) 式となる。

$$\begin{aligned}
 \alpha^2(\lambda + 2G)u_r - G \frac{d^2 u_r}{dz^2} + \alpha(\lambda + G) \frac{du_z}{dz} - \omega^2 \rho u_r &= 0 \\
 -\alpha(\lambda + G) \frac{du_r}{dz} + \alpha^2 G u_z - (\lambda + 2G) \frac{d^2 u_z}{dz^2} - \omega^2 \rho u_z &= 0 \\
 \alpha^2 G u_\theta - G \frac{d^2 u_\theta}{dz^2} - \omega^2 \rho u_\theta &= 0 \quad \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 λ はヤング係数、 G はせん断弾性係数、 ρ は質量密度である。

なお、鉛直方向に加振する場合にも類似の方程式が誘導されるが、省略する。

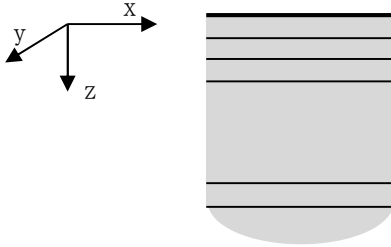


図 3.3-2 半無限成層地盤

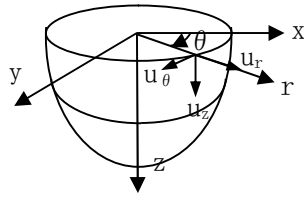


図 3.3-3 円筒座標系

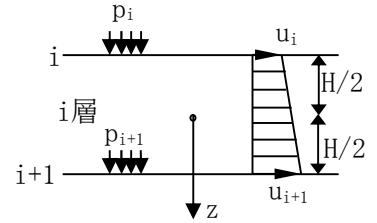


図 3.3-4 層要素

c. 半無限成層地盤の固有値解析

次に、ある層要素*i*については図3.3-4に示すように層内の深さ方向の変位は線形に変化すると仮定する。この時、(3)式の偏微分方程式を離散化し、*i*層の上面、下面の変位を要素に持つベクトル $\{u^i\} = \{u_i, u_{i+1}\}^T$ についての代数方程式 (4) を誘導することができる。

$$(\alpha^2 [A^i] + \alpha [B^i] + [G^i] - \omega^2 [M^i]) \{u^i\} = \{f^i\} \quad \dots \dots (4)$$

ここで、 $(\alpha^2 [A^i] + \alpha [B^i] + [G^i] - \omega^2 [M^i])$ は波数、振動数に依存した剛性マトリクス、 $\{f^i\} = \{f_i, f_{i+1}\}^T$ は*i*層の上面、下面での表面力を要素に持つベクトル。

上記で誘導した要素の代数方程式を複数の要素について組み合わせると、次のような層分割した半無限成層地盤についての変位ベクトル $\{u^s\}$ と表面力ベクトル $\{f^s\}$ の関係式を得る。

$$(\alpha^2 [A] + \alpha [B] + [G] - \omega^2 [M]) \{u^s\} = \{f^s\} \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 $(\alpha^2 [A] + \alpha [B] + [G] - \omega^2 [M])$ は波数、振動数に依存した、半無限地盤全体の剛性マトリクス。

$\{f^s\} = 0$ として振動数 ω ごとに、波数 α に対する複素固有値解析を実施し、固有値と固有ベクトルを計算する。地盤内の点を加振する解は、それらをもとに分解された固有モードの重ね合わせとして表す。

d. 杭位置を加振した時の半無限地盤の剛性マトリクスの評価

円柱形の杭部分は図3.3-5に示すとおりに離散化する。杭位置の各部を加振した変位は、点加振時の変位を半径 r_0 の杭外周リング形状に沿って積分して算定する。また、杭が複数本ある場合を想定し、各杭位置を加振した時の各部の変位を算定し (6) 式の通りに表す。また、それを (7) 式のように変形し、剛性マトリクス $[K_{ss}]$ を定める。

$$\{u^p\} = [D_{ss}] \{f^p\} \quad \dots \dots (6)$$

$$\{f^p\} = [D_{ss}]^{-1} \{u^p\} = [K_{ss}] \{u^p\} \quad \dots \dots (7)$$

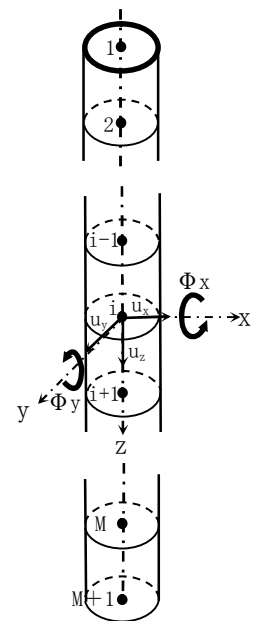


図 3.3-5 杭部分の離散化

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1に示す。

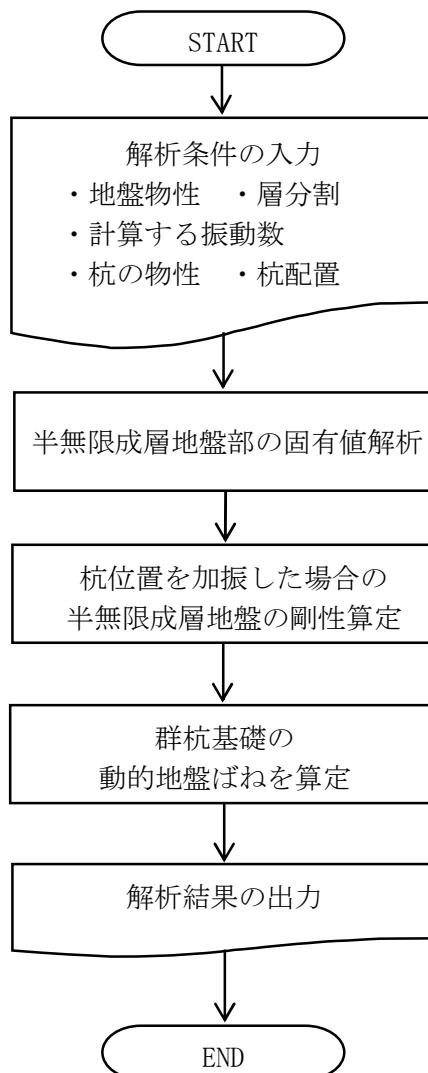


図3.4-1 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

a. 検証 (Verification)

本コードは、「3.3 解析手法」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。また、今回の工事計画認可申請で使用する解析機能は「3.3 解析手法」に示す一般性のあるモデルに基づき構築されている。

以上を踏まえ、今回使用する解析機能に特化する形で、本コードと日本建築学会の公開文献^{*1}の結果を比較することにより、本コードの当該解析機能の適切さを確認した。

検証は、均質地盤を対象として、本コードの解析解と公開文献^{*1}で示されている解析解の比較を行う。検証を行う解析モデル図及び解析諸元を図3.5-1に示す。

単杭及び群杭基礎の動的地盤ばねを算定し公開文献^{*1}の結果と合わせて図3.5-2に示す。図3.5-2より両者は概ね一致しており、本コードが杭基礎の動的地盤ばねを正しく評価していることが確認できる。

注記 *1：入門・建物と地盤との動的相互作用 174頁～175頁 (社)日本建築学会 1996年4月，第1版第1刷

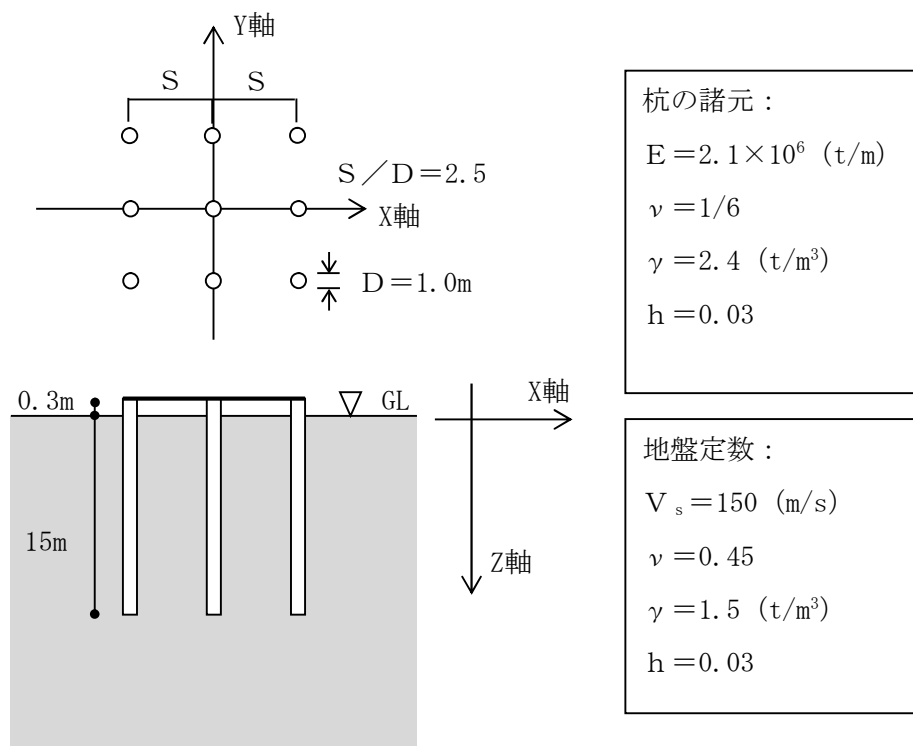


図3.5-1 解析モデル及び解析諸元

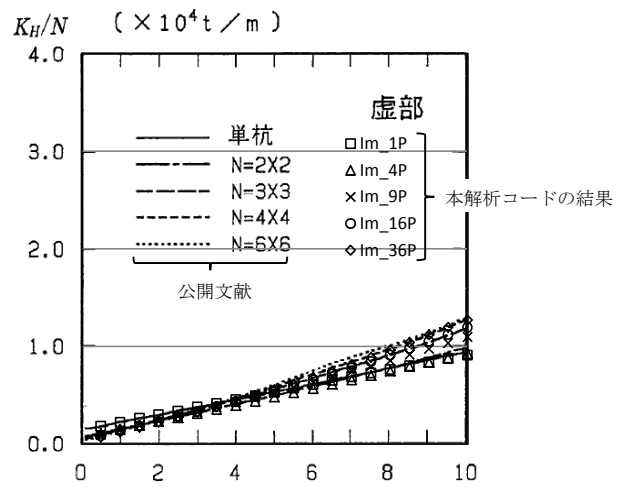
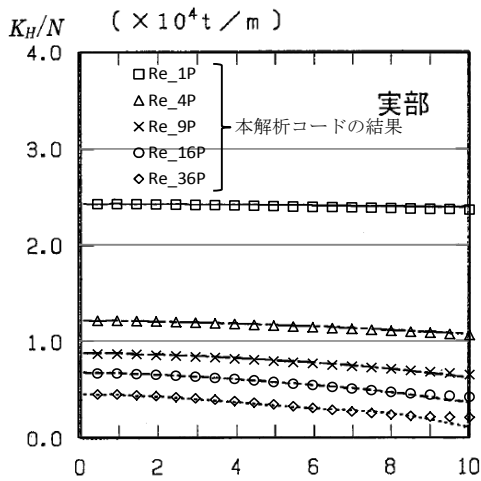


図3.5-2 公開文献*1の解析解とTLPPILESPによる動的地盤ばねの比較

b. 妥当性確認 (Validation)

本解析コードによる動的地盤ばね計算の機能について、弾性地盤の群杭基礎の動的地盤ばねの解析結果が公開文献による解析解と概ね一致していることを確認している。

また、上記に加えて、今回の工事認可申請で行う解析の用途及び適用範囲が、上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

c. 評価結果

本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較した結果、概ね一致していることが確認できたため、本解析に本解析コードを用いることは妥当である。