

3 方向入力に対応した 2 次元有限要素法による
地盤－構造物連成系の動的相互作用解析プログラム

SuperFLUSH/2D ver 6.2

概要書

第 1 版

2023 年 8 月

株式会社 地震工学研究所
株式会社 構造計画研究所

Contents

1. はじめに	1
2. 機能概要	5
2.1. 自由地盤解析	5
2.2. 複素応答解析	6
2.3. 振動数領域での補間	7
2.4. 等価線形解析	8
2.5. 振動数依存減衰	9
2.6. 境界条件	10
2.7. 外乱条件	14
2.8. 要素タイプ	17
2.9. インピーダンスの計算機能	18
2.10. リスタート機能	19
2.11. 計算結果の出力	19
3. 制限事項	20
4. 価格	20
5. お問い合わせ	20

1. はじめに

地震時における構造物の耐震安全性を検討する際に、地盤の影響をどのように考慮するかは極めて重要な問題であり、地盤と構造物との動的な相互作用を的確に表現できる解析コードが必要です。

有限要素法は連続体の数値解析手法として極めて有効な手法であり、この種の動的相互作用問題においてもよく用いられています。しかしながら、地盤－構造物の動的相互作用解析に有限要素法を適用する場合には、地盤の動的問題を扱うという点において、一般の構造物の有限要素法とは異なる問題があります。すなわち、以下の3点の取扱に充分留意する必要があります。

A) 解析の対象である地盤が半無限領域であり、有限要素モデルのモデル境界で波動の反射が生じます。

モデル境界での波動の反射は、有限要素モデルの領域を大きくとることにより、境界での波動の反射が構造物の応答に及ぼす影響を低減できるが、演算時間を多く要することから、最近では、波動を吸収するための特殊な境界条件を用いるのが一般的になっています。

B) 地盤中を伝播してくる地震動が複雑であり、有限要素モデルに対する入力地震動としてどのように評価するかが問題となります。

入力地震動の規定方法としては、従来、解析モデルの下方から鉛直上昇する実体波（鉛直方向伝播波動）を仮定して解析を行うのが一般的です。しかしながら、この鉛直伝播波動は、あくまでも地震動の第一近似にすぎません。この仮定を一步進めたものに、斜め下方から入射する波動（進行波）があり、また表面波等の影響も考慮する必要があります。

入力地震動の規定に関しては別の観点からの問題点があります。それは在来の解析で一般に用いられている、モデル底面でトータル・モーション（上昇波＋下降波）を規定する手法です。この規定法では上部構造による反射によって引き起こされる下降波をも規定することになりますが、下降波は上部構造によって変化するものであるため、本来は、上昇波のみが規定されるべきです。

C) 地盤の材料特性は一般の構造部材に比べて、強度の非線形特性を有しています。

地盤の非線形材料特性を考慮する手法としては、直接積分法を用いて非線形解析を行えば良いのですが、現時点においては演算時間あるいは、非線形特性の定数設定が難しいなどの問題があります。そこで線形解析を用いて非線形性を考慮する有効な手法として、等価線形解析法がよく用いられています。

以上のような地盤及び構造物の動的相互作用解析における種々の問題に対し、その有効性が認められ、現在良く用いられている解析プログラムにカリフォルニア大学バークレー校で開発された「FLUSH」があります。しかしながら、「FLUSH」では底面の境界条件は剛体としてのみ扱われ、入力動としては鉛直に上昇伝播する地震波のみを対象としています。

「SuperFLUSH/2D*」は、このような背景のもとで「FLUSH」の持つ解析機能を全て含んだ上、更に高度な解析を可能とする種々の機能を持つ汎用的な地盤－構造物連成系の相互作用解析プログラムとして開発したものです。

* SuperFLUSH/2D は、株式会社地震工学研究所と株式会社構造計画研究所の共同開発商品です。

<開発履歴>

	ver 3.5	
2006 年 4 月	ver 4.0	・ ジョイント要素の追加 ・ XY で別に質点質量を入力 ・ 体積弾性率一定 (K 一定) 機能追加 (オプション)
2006 年 7 月	ver 5.0	・ ジョイント要素の入力方法変更 ・ 波形の最大計算点数を 16384 に対応 ・ 等価線形解析の有効ひずみ算定用の係数 (0.65) を変更可に修正 ・ 節点重量の自由度別入力に対応 ・ 体積弾性係数一定 (K 一定) の等価線形解析機能の導入 (オプション)
2007 年 10 月	ver 5.1	・ 伝達関数の補間手法の強化 ・ K 一定解析時の K (体積弾性係数) の計算方法の変更 (オプション) ・ 伝達関数のテキスト出力 ・ MODE3 サポート終了
2008 年 12 月	ver 5.2	・ ジョイントの収束物性値出力を追加 ・ Windows 版の GUI 強化に伴うバージョンアップ
2009 年 10 月	ver5.2.3	・ ジョイント要素の収束物性値出力を追加 ・ リストファイルで、出力単位を修正 ・ リストファイルで、要素物性の収束計算結果タイトルを修正 ・ 並進バネ要素 (置換要素) の物性出力順番を修正
2010 年 4 月	ver5.2.4	・ マニュアルの誤植修正 ・ マニュアルの伝達関数の補間説明で、プログラム内で使用している関数説明等の追加 ・ 体積弾性率一定の計算時に、TP91 に出力される要素物性の MTYPE の値が 0 と出力される点を修正 ・ 側方境界条件の組み合わせについて改良
2011 年 1 月	ver5.3.0	・ MODE4 (振動数計算点の全点計算モード) の追加 ・ 内部変数を倍精度に修正
2012 年 3 月	Ver6.0	・ 入力データ書式の変更 ・ 出力結果書式の変更 ・ 面外方向加振オプションの追加 ・ 体積弾性率一定機能の標準化 ・ 振動数依存減衰の機能追加 ・ ダッシュポット要素、 ・ その他機能追加
2015 年 7 月	Ver6.1	・ 解析開始時刻の任意設定機能の追加 ・ 複素弾性係数を用いた応力の出力機能追加 ・ 2 次元引戻し解析オプションの追加 (有償オプション) ・ 歪依存曲線の補間オプションの追加 ・ 減衰力の出力追加 ・ 剛ビームの出力追加 ・ 単位重量および節点重量にファクターを乗じることができるように変更 ・ 初期応力の足し合せ出力機能を追加 ・ 旧バージョン(ver5.3 以前)の TP18,19 フォーマット出力機能の追加
2019 年 4 月	Ver6.2	・ 静的解析 (0Hz 解析) 機能の追加 ・ 底面条件の改良と追加 ・ エネルギー伝達境界の計算ルーチンの追加 ・ 新しいソルバー (PARDISO) の導入 ・ sfpr, TP92 等、テキスト形式の出力ファイルの応力等の数値の有効桁数を拡張

2022 年 2 月	Ver6.2.2	• MPC カードで従属節点として指定された節点の主節点として指定された場合エラー終了するよう、チェック機能を追加 • 自由地盤からの相対変位等を求める機能で、底面の半無限地盤を指定できるよう修正 • 相対変位等を求める際、伝達関数の補間前 or 補間後どちらで求めるか選択できるオプションを追加 • ピン支持のビーム・剛ビーム要素があるデータでスナップショットを出力する際、エラーで落ちることがある問題を修正
2022 年 11 月	Ver6.2.3	• エネルギー伝達境界の計算の際、Ver6.2.0 で追加された新ルーチンを使用するとごく稀にゼロ割が発生することがある問題を修正
2023 年 8 月	Ver6.2.4	• 節点変位の線形補間機能（[LINEINTP]カード）を追加

2. 機能概要

図 1 に示すように、二次元有限要素モデル部分（FEM 部）と、その側方に設けられた半無限地盤を表現するための成層の自由地盤モデル部分からなるモデルにより、地盤の動的問題や、地盤－構造物連成系の相互作用問題を以下に示す機能により適確に表現し解析することができます。

本バージョンより、面外方向の加振にも対応いたしました。

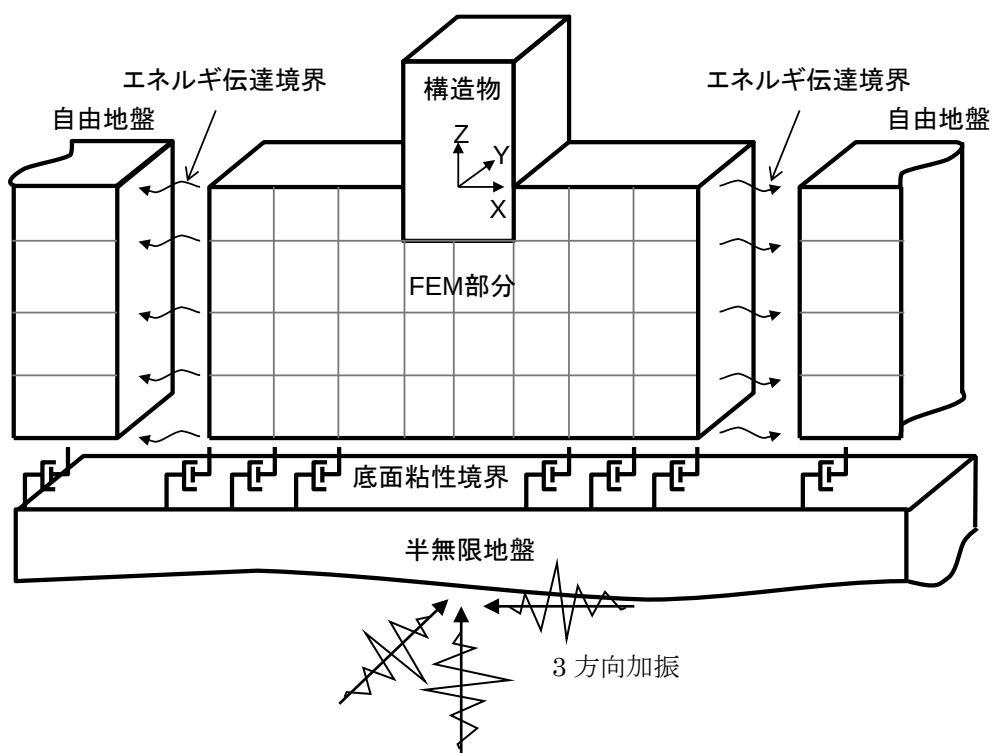


図 1 解析モデル概念図

2.1. 自由地盤解析

通常地震波は地表またはその付近で観測されます。観測された地震動をモデルに入力するためには、解析モデル底面レベルの地震動を計算する必要があります。自由地盤解析では、モデル底面への地震動の引き戻しを含め、自由地盤の応答解析を一次元有限要素法を用いて行います。

2.2. 複素応答解析

動的応答解析の手法としては直接積分法やモード合成法などがありますが、本プログラムでは複素応答解析法を用い減衰を複素剛性係数で評価し、応答解析を行います。

複素応答解析法では、応答解析を周波数領域で行います。すなわち、下図に示したように入力地震動は、複素フーリエ変換により周波数領域に変換され、それに対するモデルの周波数応答を求め、フーリエ逆変換により時系列の応答を求めます。

複素応答解析法の特徴は

- A) 解析が無条件安定となります。直接積分法では時間刻みの大きさにより解析が不安定になる場合があります。
- B) 減衰を複素剛性係数として評価しているため、要素ごとに減衰を定義することができます。モード合成法では要素ごとに減衰を定義することは不可能です。
- C) 解析振動数範囲の定義や振動数領域での補間手法により、演算時間の低減をはかることができます。
- D) 重ね合せの原理を用いているため、線形問題にしか適用できません。

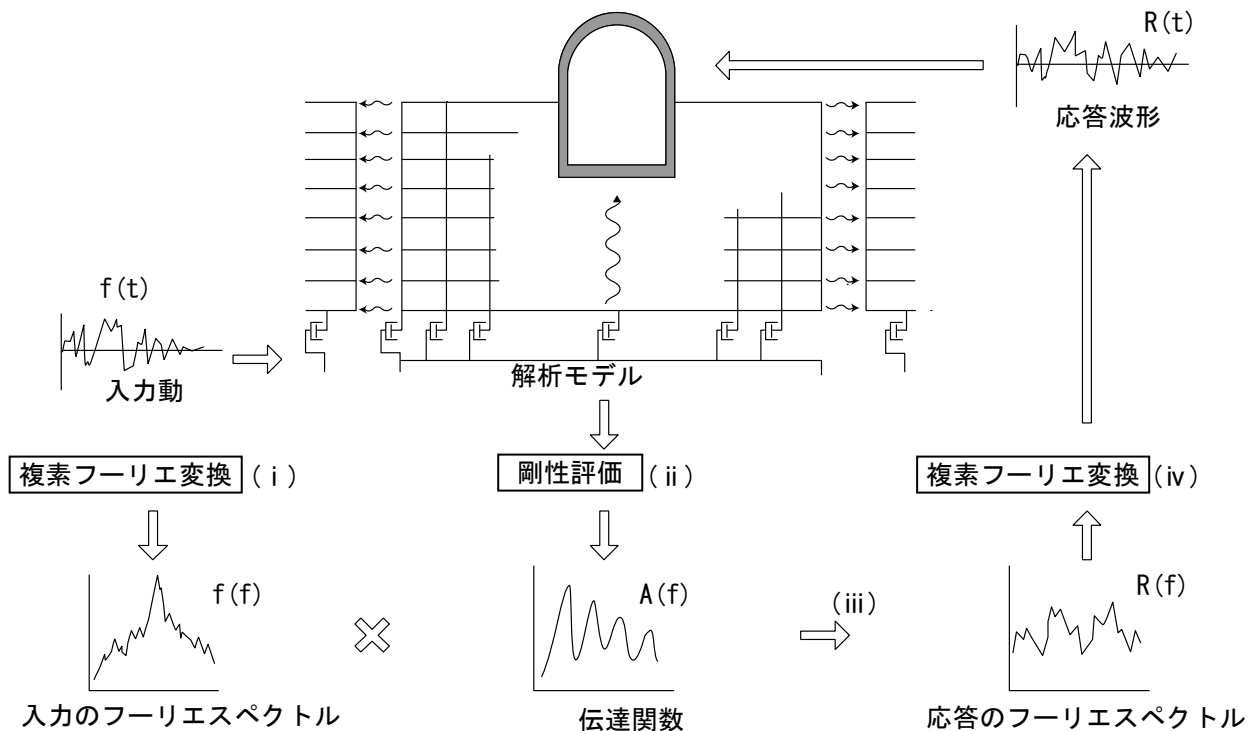


図 2 複素応答解析

2.3. 振動数領域での補間

前述のごとく複素応答解析法は振動数領域で応答解析を行います。計算する振動数の間隔や解析する上限の振動数は入力継続時間および時間刻みによって定まりますが、本プログラムでは解析振動数の上限を入力データで与えることにより、それ以上の振動数成分の応答解析は行いません。

また、計算振動数をスキップして伝達関数を求め、スキップした点の伝達関数を補間により計算することができます。補間を用いることにより、伝達関数の計算点数は少なくなり、演算時間の節約ができます。

例えば、時間刻み $\Delta t=0.01$ 秒、 $N=2048$ 点の入力動を与えた場合、そのフーリエスペクトルは、振動数間隔 $\Delta f=0.0488\text{Hz}$ 、スペクトル振幅値を与える点数 $M=1025$ 点、スペクトル振幅成分の上限振動数 $f_{\text{max}}=50\text{Hz}$ となり、伝達関数の計算点数は 1025 点になります。下記に示すように上限振動数を 20Hz とし、さらに補間を用いることにより計算点数は少なくて済みます。

表 1 $f_{\text{max}}=20\text{Hz}$ とした場合の計算点数

($\Delta t=0.01$ 秒, $N=2048$ 点)

	補間ピッチ	Δf (Hz)	計算点
補間を行わない	1	0.0488	410
補間を行う	4	0.1953	103
	8	0.3906	52

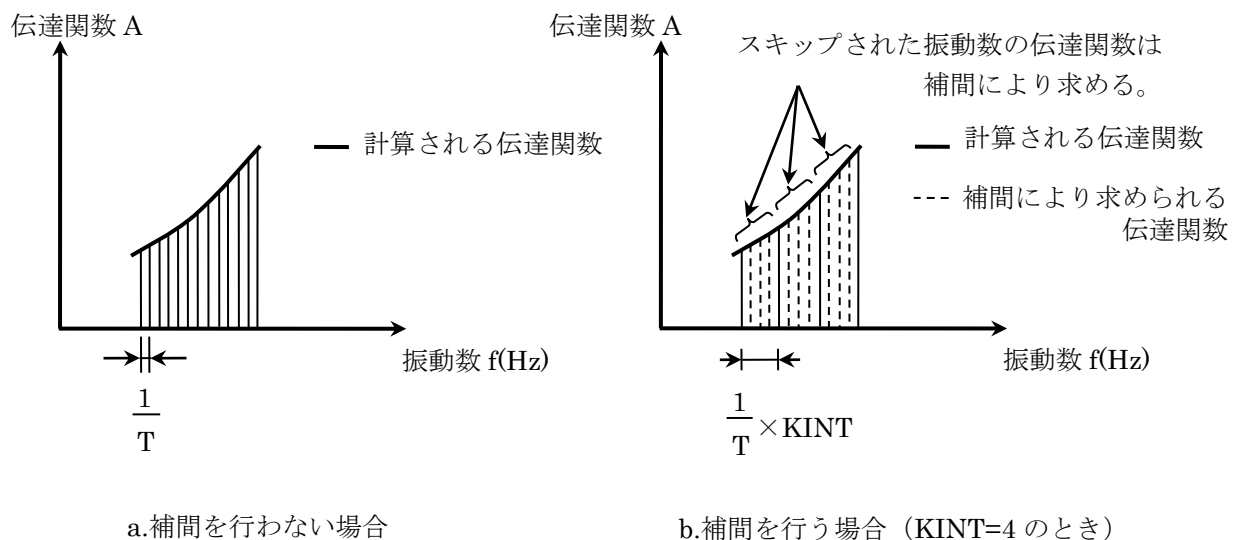


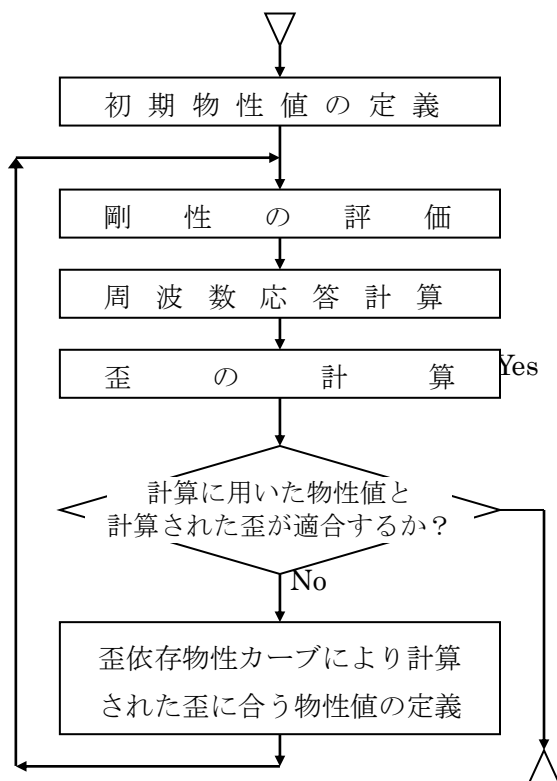
図 3 振動数領域の補間

2.4. 等価線形解析

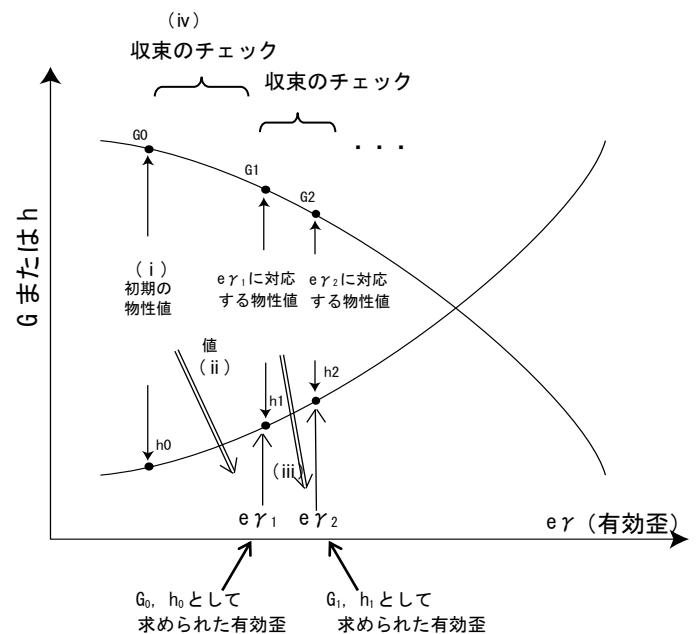
前述のごとく複素応答解析法は非線形問題には適用できません。しかしながら土の非線形材料特性は動的解析において無視することはできません。そのような観点から、本プログラムでは土の非線形特性を考慮するために等価線形解析を行います。

等価線形解析とは、歪に依存するせん断剛性係数および減衰定数を定義しておき、計算の結果として得られる歪と、計算に用いられた物性値が適合するまで繰返し計算を行う手法です。

等価線形解析は繰返し計算の1ステップごとに線形解析を行うので、重ね合わせの原理に基づく複素応答解析法はそのまま利用できます。



a. 解析のフロー



b. 物性値の歪依存曲線

図 4 等価線形解析

2.5. 振動数依存減衰

地盤中を伝播する地震波は極めて複雑であるため、材料減衰（または履歴減衰）の他に地盤形状、材料の不均一性、伝播経路等の様々な要因で減衰現象が見られます。この減衰は見かけの減衰（散乱減衰）と呼ばれ、振動数依存性を示すことが知られています。

地盤を 2 次元でモデル化することにより、地盤形状による散乱はある程度考慮されますが、その他の要因による見かけの減衰は別途考慮される必要があります。

振動数に依存した散乱減衰は以下の (2.1) 式で表されます。

$$h_f = h_0 f^{-n} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 h_f : 振動数依存減衰（散乱減衰）

h_0, n : 振動数依存減衰に関わる係数

各要素の減衰は、(2.2) 式で示すように、材料減衰と振動数依存減衰（散乱減衰）の和として評価されます。

$$h = h_r + h_f \dots\dots\dots (2.2)$$

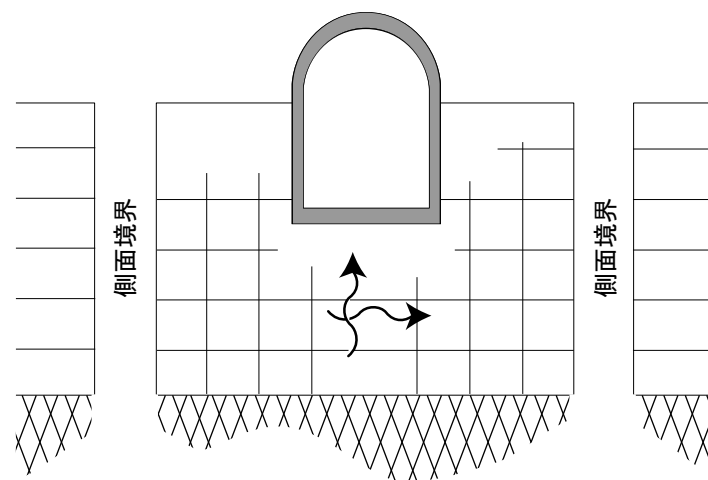
ここで、 h_r : 材料減衰

2.6. 境界条件

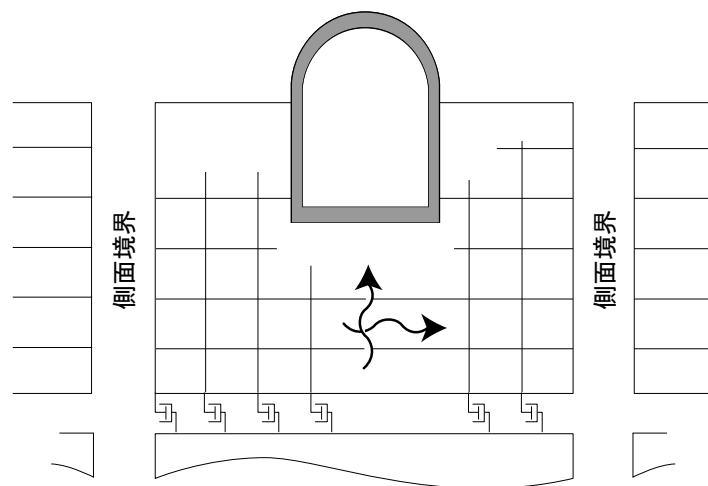
A) 底面境界

剛体基盤境界の他に、モデル底面における反射波の波動エネルギーの吸収と、入射波により地震動の定義を可能にする粘性境界が可能です。

この機能により下方地盤の半無限効果が適切に表現され、剛体基盤境界を用いた場合に比べモデル底面を構造物に近づけることができ、その結果としてモデル規模の縮小が可能となります。



a. 剛体基盤境界

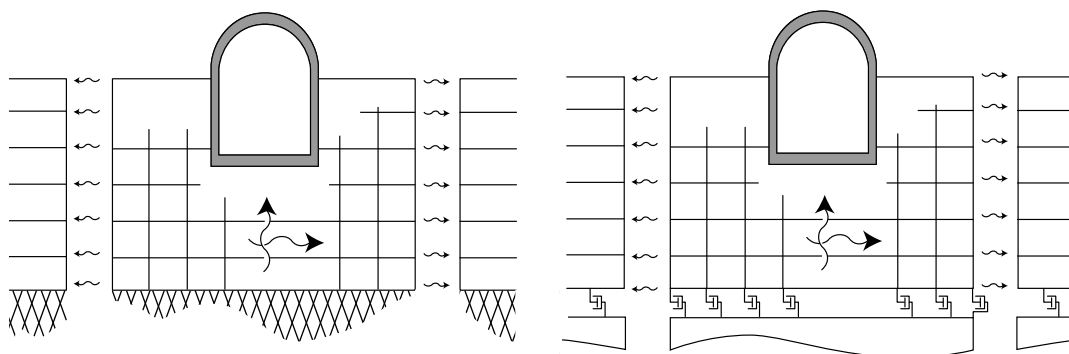


b. 粘性境界

図 5 底面境界

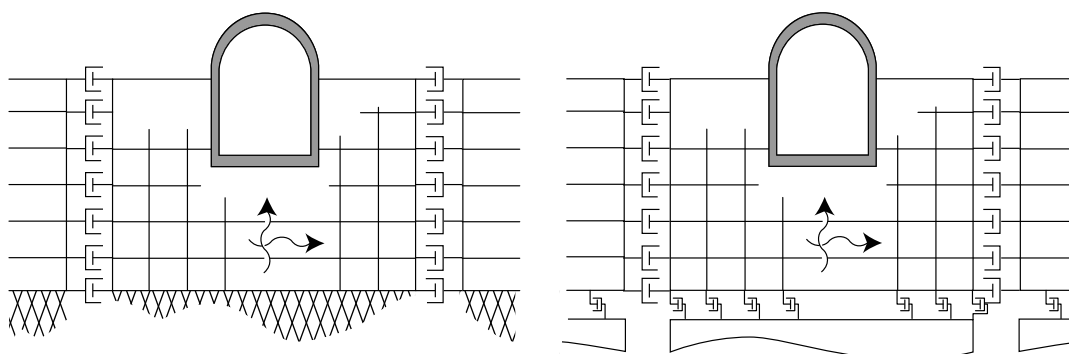
B) 側面境界

側面の境界条件としては、エネルギー伝達境界と、粘性境界を用いることができます。これらはいずれも、側方へ逸散する波動のエネルギーをモデル側面境界で吸収するためのものです。これらの境界条件は遠方の自由地盤との間に考慮され、側方地盤の半無限効果が表現されます。底面境界の条件との組合せにより図のような条件が可能となります。



a. 剛体基盤上のエネルギー伝達境界

b. 半無限基盤上のエネルギー伝達境界



c. 剛体基盤上の粘性境界

d. 半無限基盤上の粘性境界

図 6 側面境界

C) 自由地盤の形状

左右同一の層構造を持つ自由地盤の他に、傾斜地盤を適切に表現できるように、左右の層構造が異なる自由地盤が考慮できます。これは、側方の境界条件がエネルギー伝達境界および粘性境界のいずれの場合にも適用できます。

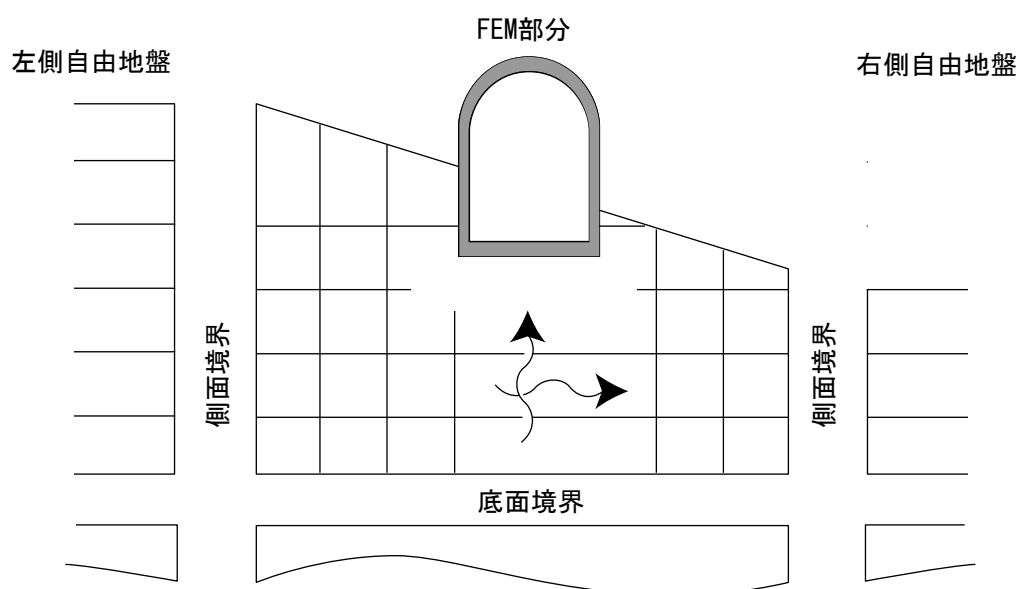
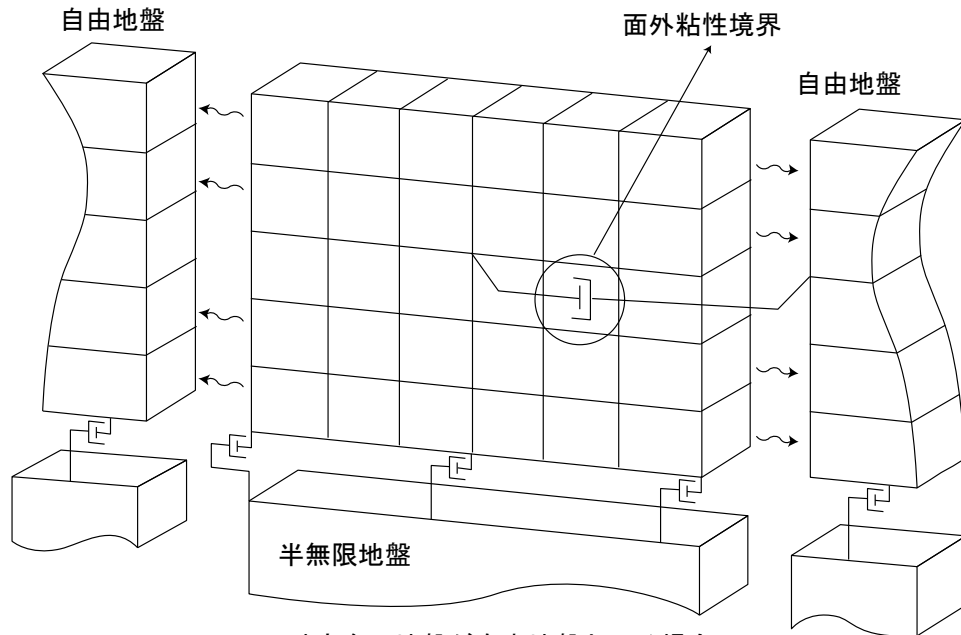


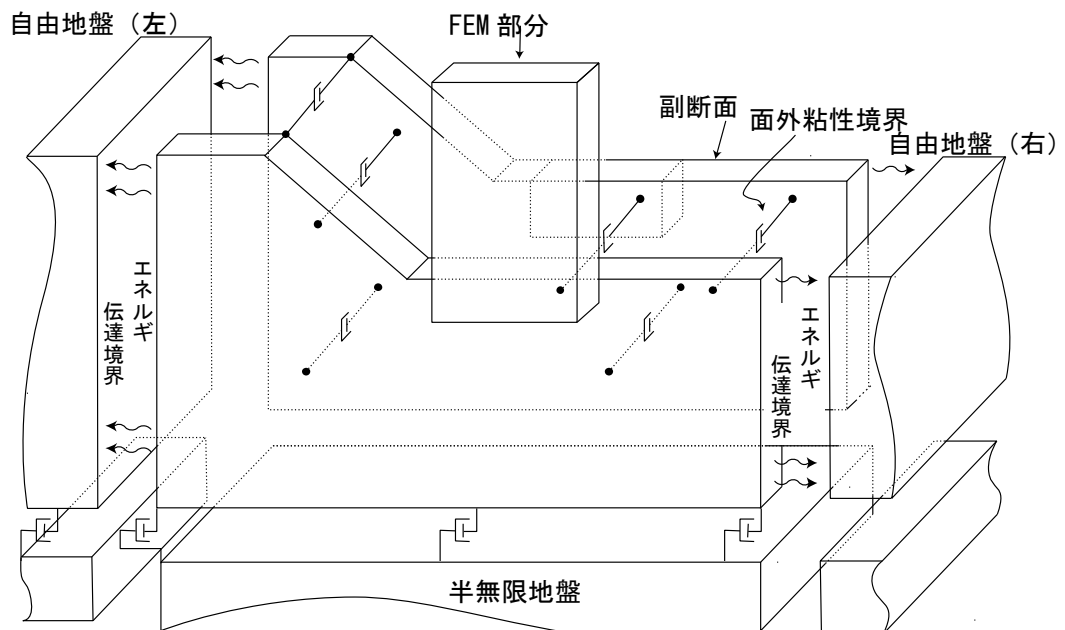
図 7 左右の層構造が異なる自由地盤

D) 面外粘性境界

解析モデルの三次元方向（厚さ方向）での FEM 部分と、自由地盤の結合を粘性境界により行い、波動の三次元方向へのエネルギーの逸散効果を考慮した疑似的な三次元の効果を表現することができます。これは、左右の異なる自由地盤を有するモデルに対しても適用できます。



a. 両外方向の地盤が自由地盤と同じ場合



b. 両外方向の地盤を副断面とする場合

図 8 面外粘性境界

E) その他

側面の境界条件として、一般の鉛直・水平ローラー、自由境界などを用い、対象条件、自由条件などを考慮することができます。

2.7. 外乱条件

A) 地震動入力

解析モデル基盤において同位相で振動するとの仮定に基づく鉛直伝播波動の入力と、任意の入射角を持つ平面波を与えることができます。この方法により、解析モデル基盤に沿って波の進行波速度に応じた位相のずれを与えることができます。(進行波解析)

これらの入力地震動（鉛直伝播波動，進行波）は水平 2 成分および鉛直 1 成分の計 3 成分を同時に入力して解析することができます。

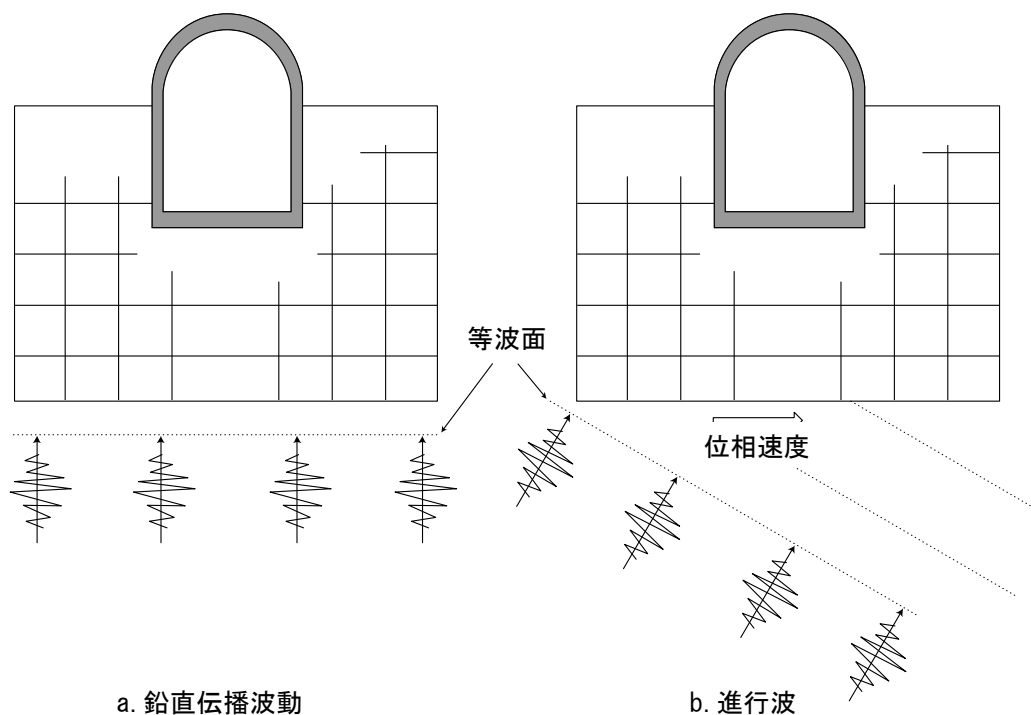


図 9 入力地震動

また、解析モデルへの入力地震動の規定方法としては、モデル底面の境界条件に応じて、剛体基盤の場合はトータルモーション（上昇波＋下降波）、底面粘性境界の場合は入射波（上昇波のみ）となります。

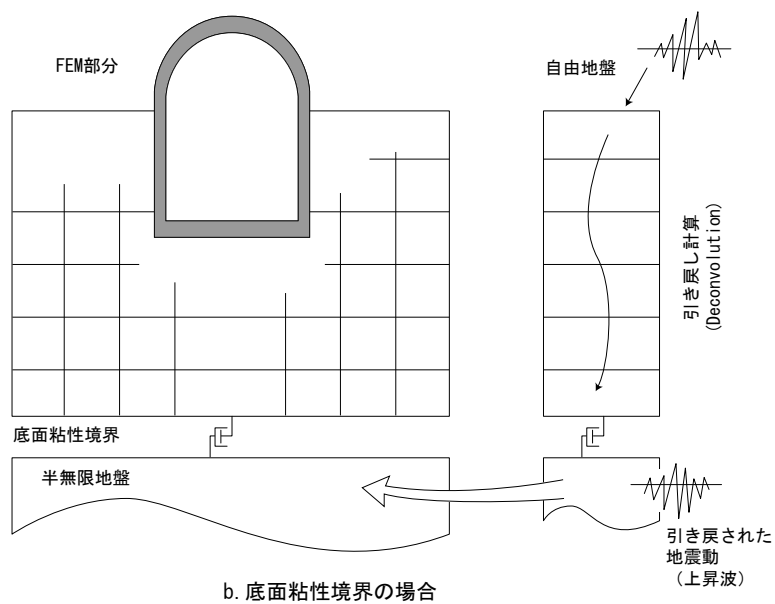
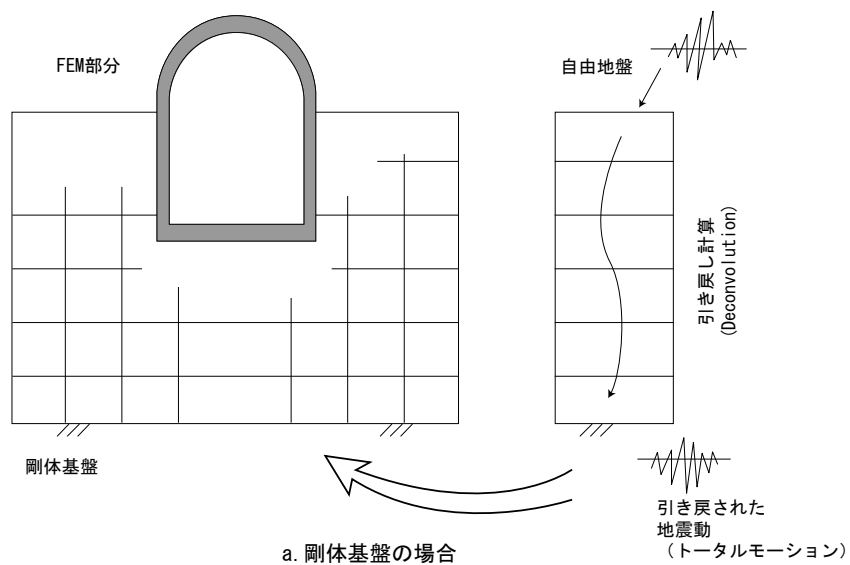


図 10 地震波成分の入力

B) 節点加振

起振実験のシミュレーションのように、節点に加振力を与えた場合の解析が可能です。
この場合、入力としては次の3種を考慮することができます。

- ・ 1 節点または多節点の加振力を規定
- ・ 1 節点または多節点の加速度を規定

これらの節点加振は水平方向および鉛直方向に同時に加振することができます。

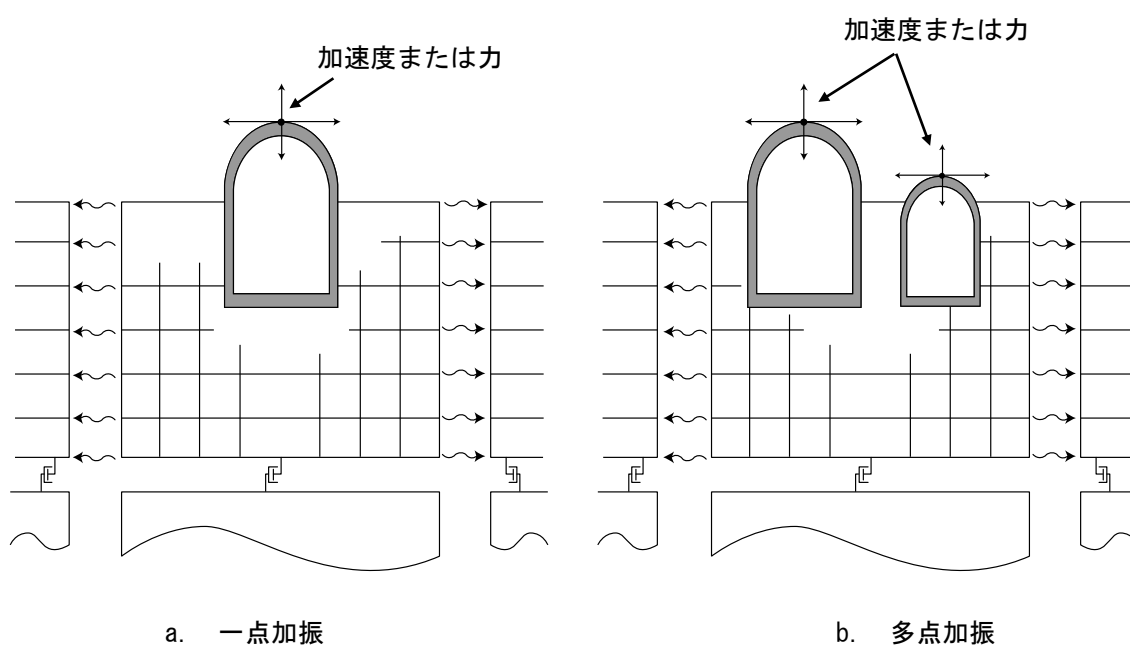


図 11 節点加振入力

2.8. 要素タイプ

本プログラムで利用できる要素タイプを表 2 に示します。

表 2 要素タイプ

要素タイプ	説明
平面歪要素	地盤や構造物の基礎等のモデル化に用います。 四角形および三角形要素があります。
ビーム要素	構造物の架構のモデル化で、曲げせん断棒として用います。
並進バネ要素	軸剛性およびせん断剛性のみを考慮する場合に用います。
回転バネ要素	構造物の架構等で曲げ特性のみを考慮する場合に用います。
液体要素	貯水等の液体のモデル化に用います。 非粘性流体を仮定しています。
液体固体境界要素	液体と構造物等の固体の相互作用を表わします。
平面応力要素	地表の構造物の壁等のモデル化に用います。 四角形要素および三角形要素があります。
剛体ビーム要素	2 節点間を剛体変形させる場合に用います。
ボイド要素	地盤中の空隙部分に面外粘性境界を考慮する場合に用います。
ジョイント要素	地盤中の弱層や亀裂のモデル化に用います。
マトリックス要素	2 節点の任意の剛性で接続する場合に用います。
ダッシュポット要素	速度依存の減衰機構のモデル化に用います。

2.9. インピーダンスの計算機能

本プログラムでは下図に示すように複数の節点を順次単位加振して、柔性マトリックスを作成し、これからインピーダンスマトリックスを求めることができます。また、各節点の幾何学的関係から結果をある節点に集約し、地盤バネ（インピーダンス）を求めることができます。

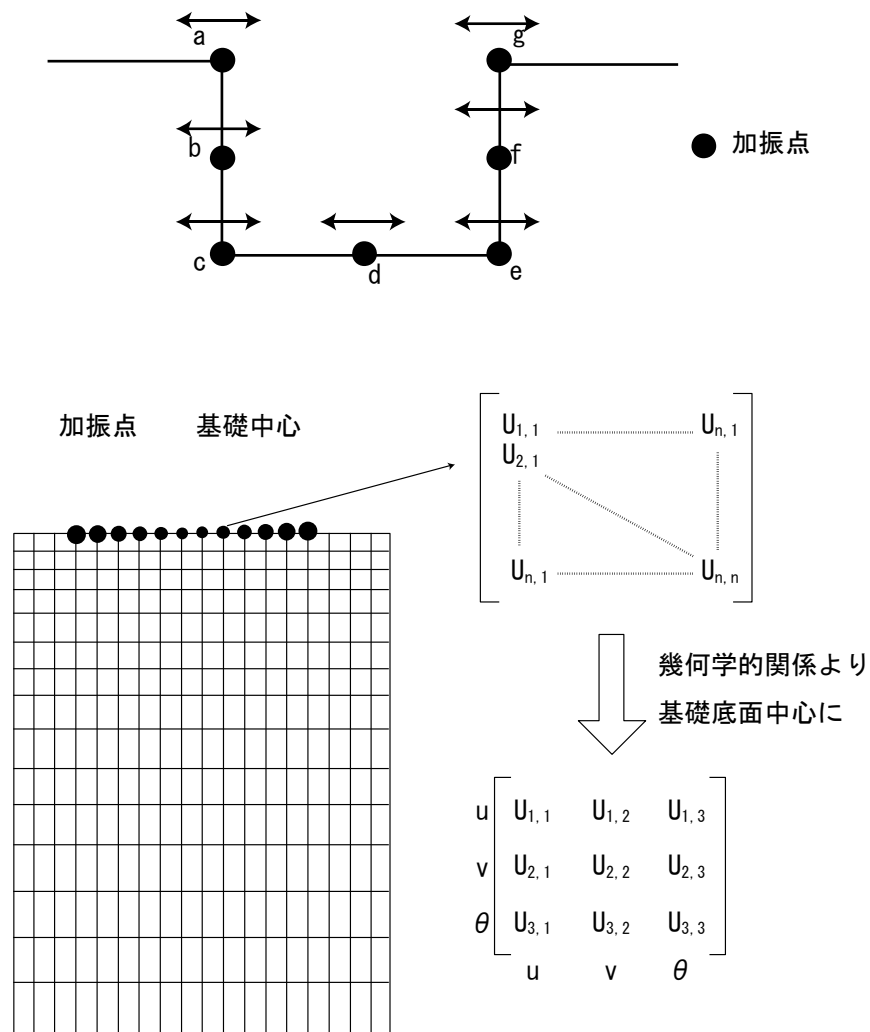


図 12 インピーダンスの計算機能

2.10. リスタート機能

伝達関数の計算後からの再計算を可能としましたので、出力点を追加しての再計算ができます。また、入力動を変更しての再計算も可能です。この機能を用いることにより、演算時間の節約が可能となります。

2.11. 計算結果の出力

本プログラムの計算結果の出力は、ファイルに行います。出力成分、位置は原則としてすべて入力データにより指定します。

3. 制限事項

- ・ 特に制限はなく、計算機のメモリに依存します。（ただし、100000 を超える節点・要素・材料番号は使用できません）
- ・ 対応 OS : Linux 系^{*1}、Windows 系^{*2}

^{*1} Linux-OS は、ディストリビューションによる使用できないものもありますので、事前に確認ください。

^{*2} プリポストを含む GUI 機能はありません。GUI 機能を持たせたバージョンは別途問い合わせください。

4. 価格

本 体 価 格 : 2,500,000 円（税抜）

年 間 保 守 料 : 250,000 円（税抜）

*面外加振機能を含まないバージョンは本体価格 2,000,000 円（税抜）になります。

*上記は Linux 版または Windows 版（GUI 機能なし）の価格です。

*EWS 版は別途問い合わせください。

*本価格表は平成 21 年 4 月のものです。記載された価格、内容は将来予告無しに変更される場合があります。

<保守サービス>

保 守 サ ー ビ ス : 本体価格の 10%（年間）

プログラム導入時に技術サービス（保守）契約を別途締結して頂き、1 年毎に更新して頂きます。

- ・ テレホンサービス（電話による使用上の質問などにお答えします。）
- ・ サービス（文書・メールによる質問にお答えします。）
- ・ アップデートサービス（機能の一部変更、障害の修正などアップデートがあった場合には、最新版を提供します。）

5. お問い合わせ

株式会社 地震工学研究所 技術部 SuperFLUSH/2D 担当

TEL : 03-3226-8733 FAX : 03-3226-8735

E-Mail : jkk@flush.co.jp