

## 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（V）

- 成果報告書 -

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
Σ	J1458 97-003	97.10.16
<p>この資料は技術管理室保存資料です            閲覧には技術資料閲覧票が必要です            動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</p>		

1997年2月

コンピュータソフト開発株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

## 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発 (V)

森 康二\*<sup>1</sup> 根山敦史\*<sup>1</sup>

田中由美子\*<sup>1</sup> 西村和哉\*<sup>1</sup>

### 要 旨

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムに於ける人工バリアの耐震安定性の評価を目的として、以下の研究を実施したものである。

- (1) 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価を念頭に、地下深部に於ける地震観測事例を調査した。
- (2) 前年度に引き続き、3次元地震応答解析コードの機能追加を行った。本年度は実処分環境に於ける周辺岩盤のモデル化に伴い、地盤の半無限性を考慮する粘性境界要素の追加を行った。
- (3) 改良コードの妥当性を確認するため、簡易モデルによる定性的な検証解析、ならびに動燃事業団殿所有の総合地盤解析システム SIGNAS によるベンチマーク解析を行った。
- (4) 防災科学研究所で実施された1/5スケール人工バリアの振動実験への情報提供(固有値、緩衝材の乾燥密度の影響など)を目的として、予備解析を行った。
- (5) 実処分場を想定したニアフィールドのパラメータ解析を行い、耐震安定性の評価検討を行った。

---

本報告書は、コンピュータソフト開発株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容である。

契約番号 : 080D0247

事業団担当部課室及び担当者 : 環境技術開発部推進本部処分研究グループ  
秋好賢治

\* 1 科学技術部

## Development of Seismic Response Analysis Models and Codes for Engineered Barrier System(V)

Koji Mori\*<sup>1</sup> Atsushi Neyama \*<sup>1</sup>  
Yumiko Tanaka\*<sup>1</sup> Kazuya Nishimura \*<sup>1</sup>

### Abstract

In this study, the following tasks have been performed in order to evaluate the stability of earthquake resistant for the engineered barrier of geological isolation system for High Level Waste.

- (1) We have investigated the past seismic wave data observed in the deep underground environment.
- (2) An additional function was introduced to the three dimensional seismic analysis code. This year, the viscous boundary finite elements which makes it possible to take account for the semi-infinity in underground was introduced.
- (3) In order to verify the improved code, the verification analysis using simple model and the benchmark analysis using SIGNAS ( System for Integrated Geotechnical Numerical Analyses ) were conducted.
- (4) We have analyzed preliminary the case problem in order to offer the information, which is related with the eigenvalue and the dependency of dry density of buffer materials to the dynamic property of the 1/5 scale engineered barrier, to the National Research Institute of STA.
- (5) The parameter survey taking account for the realistic isolation system was conducted, and the stability of the earthquake resistance was evaluated.

---

Work performed by Computer Software Development Co.,Ltd.under contract with  
Power Reactor and Nuclear Fuel Development corporation.  
PNC Liaison : Isolation system Research Program Radioactive waste Management  
Project, Kenji Akiyashi

\*1 Scientific Engineering Department

## 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（V）

	項
1. まえがき	1-1
1.1 実施内容	1-1
1.1.1 地中の地震波に関する調査検討	1-1
1.1.2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	1-2
1.1.3 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討	1-2
1.1.4 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性の評価検討	1-3
2. 文献調査	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 文献調査の方法	2-1
2.3 文献調査結果の概要	2-1
2.4 地中の地震波に関する調査検討	2-1
2.4.1 地下深部における地震波観測事例	2-1
2.4.2 地下深部の地震波特性の推定法	2-2
2.5 地震応答解析コード改良に関する調査検討	2-11
2.5.1 地盤の半無限性を考慮する代表的手法	2-11
(1) エネルギー伝達境界	2-11
(2) 粘性境界	2-13
(3) 混合境界	2-14
(4) 境界要素法とのハイブリッド法	2-14
2.5.2 各手法の比較・検討	2-15
3. 無限粘性境界の導入と検証解析	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 粘性境界要素の導入	3-1
3.2.1 地震応答解析コードの改良	3-1
3.2.2 粘性境界要素を用いた動的応答解析のやり方	3-2
3.3 検証解析	3-3
3.3.1 検証方針の検討	3-3
3.3.2 解析条件	3-5
3.3.3 解析結果および考察	3-6
4. 振動実験に基づくモデル／コードの妥当性評価	4-1
4.1 はじめに	4-1
4.2 予備解析	4-1

4.2.1 1 / 5スケール人工バリアの実固有値解析 .....	4-1
4.2.2 1 / 5スケール人工バリアの動的応答解析 .....	4-2
4.3 H7 実験データ解析結果の考察 .....	4-3
5. 実処分場を想定したニアフィールドパラメータ解析 .....	5-1
5.1 はじめに .....	5-1
5.2 解析ケースの選定 .....	5-1
5.3 モデル化の考え方 .....	5-2
5.4 解析条件 .....	5-4
5.5 解析結果と考察 .....	5-6
6. 今後の課題 .....	6-1
7. あとがき .....	7-1
8. 参考文献 .....	8-1
付録 A. 粘性境界に関する理論的事項 .....	A-1
付録 B. 3次元動的有効応力解析コードユーザズマニュアル .....	B-1

## 表目次

表 2.2-1 文献検索情報 (その 1) .....	2-12
表 2.2-2 文献検索情報 (その 2) .....	2-12
表 2.3-1(1/7) 文献概要 .....	2-13
表 2.3-1(2/7) 文献概要 .....	2-14
表 2.3-1(3/7) 文献概要 .....	2-15
表 2.3-1(4/7) 文献概要 .....	2-16
表 2.3-1(5/7) 文献概要 .....	2-17
表 2.3-1(6/7) 文献概要 .....	2-18
表 2.3-1(7/7) 文献概要 .....	2-19
表 2.5.2-1 各手法の特徴の比較 .....	2-20
表 3.2-1 入力カードの内容一覧 .....	3-8
表 3.3.1-1 検証解析ケース .....	3-9
表 4.2.1-1 固有値解析で用いた諸条件と解析結果 .....	4-5
表 4.2.2-1 解析条件 .....	4-6
表 4.2.2-2 実固有値解析結果 .....	4-6
表 5.2-1 ニアフィールドパラメータ解析ケース .....	5-9
表 5.4-1 解析条件 .....	5-10
表 5.4-2 実スケール人工バリアの実固有値解析結果 .....	5-11
表 5.5-1 ニアフィールドパラメータ解析結果 .....	5-11

## 図目次

図 2.4.2-1 水平多層地盤	2-21
図 2.4.1-1 深層井戸の国内分布状況	2-21
図 2.4.2-2 均質弾性媒体中を伝搬する入射波と反射波	2-22
図 2.4.2-3 表層観測波を用いた深部地盤挙動の推定例	2-23
図 2.5-1 エネルギー伝達境界	2-24
図 3.2-1 地震応答解析コード主プログラム構成と改良箇所	3-10
図 3.2-2 サブルーチン「CARDIN」のプログラム構成と改良箇所	3-11
図 3.2-3 サブルーチン「EMATGN」のプログラム構成と改良箇所	3-12
図 3.2-4 サブルーチン「DLOADN」のプログラム構成と改良箇所	3-13
図 3.2-5(1/2) サブルーチン「DYNMI4」のプログラム構成と改良箇所	3-14
図 3.2-5(2/2) サブルーチン「DYNMI4」のプログラム構成と改良箇所	3-15
図 3.2-6 粘性境界要素の定義方法	3-16
図 3.2-7 フリーフィールドとの連成を考慮した動的応答解析体系	3-17
図 3.2-8 解析領域とフリーフィールド単体モデルとの比較	3-18
図 3.3.2-1 1次元波動伝搬モデル(カラム形状モデル)	3-19
図 3.3.2-2 3次元検証解析モデル	3-20
図 3.3.2-3 1次元波動伝搬モデルによる検証で用いた正弦入力荷重	3-21
図 3.3.2-4 検証用入力波	3-22
図 3.3.3-1 P波入力に対する波動伝搬モード(解析ケース 1)	3-23
図 3.3.3-2 S波入力に対する波動伝搬モード(解析ケース 2)	3-23
図 3.3.3-3 S波入力に対する波動伝搬モード (底部固定境界と底部粘性境界の比較)	3-24
図 3.3.3-4 P波入力に対する波動伝搬モード(解析ケース 7)	3-24
図 3.3.3-5 S波入力に対する波動伝搬モード(解析ケース 8)	3-25
図 3.3.3-6 基盤入射に対する自由表面の加速度応答 P波入力 (解析ケース 3,4)	3-25
図 3.3.3-7 基盤入射に対する自由表面の応答 S波入力 (解析ケース 5,6)	3-26
図 3.3.3-8 基盤入射に対する自由表面の加速度応答 (解析ケース 9,10)	3-26
図 3.3.3-9 基盤入射に対する自由表面の加速度応答 (解析ケース 11,12)	3-27
図 3.3.3-10 基盤入力に他する自由表面の加速度応答 (解析ケース 14 解析領域：水平成分)	3-27
図 3.3.3-11 基盤入力に他する自由表面の加速度応答	

	(解析ケース 14 フリーフィールド：水平成分) .....	3-28
図 3.3.3-12	基盤入力に他する自由表面の加速度応答 (解析ケース 14 解析領域：鉛直成分) .....	3-28
図 3.3.3-13	節点荷重に対する変位応答 (解析ケース 13) .....	3-29
図 3.3.3-14	節点荷重に対する着力点の速度応答 (解析ケース 13) .....	3-29
図 3.3.3-15	節点荷重に対する着力点の加速度応答 (解析ケース 13) .....	3-29
図 4.2.1-1	固有値解析モデル .....	4-7
図 4.2.1-2	ベントナイトの動的試験データ 1/2 .....	4-8
図 4.2.1-2	ベントナイトの動的試験データ 2/2 .....	4-9
図 4.2.2-1	動的応答解析モデル .....	4-10
図 4.2.2-2	動的応答解析に用いた入力地震動 (El-Centro NS) .....	4-10
図 4.2.2-3	加速度時刻暦 (エルセントロ波) .....	4-11
図 4.2.2.4	変位時刻暦 (エルセントロ波) .....	4-12
図 4.3.1	1/5 スケール振動実験データ解析 (動的応答解析結果) .....	4-13
図 5.4-1	岩手県沿岸南部地震 .....	5-12
図 5.4-2	概念モデル .....	5-13
図 5.4-3	実スケール固有値解析モデル .....	5-13
図 5.4-4	1/2 対称モデル (動的応答解析用) .....	5-14
図 5.4-5	多点拘束条件 .....	5-15
図 5.5-1(1/2)	周辺粘性境界条件と固定境界条件の比較 (処分坑道横置き、絶対加速度) .....	5-16
図 5.5-1(2/2)	周辺粘性境界条件と固定境界条件の比較 (処分孔縦置き、絶対加速度) .....	5-17
図 5.5-2(1/3)	動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度) .....	5-18
図 5.5-2(2/3)	動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度) .....	5-19
図 5.5-2(3/3)	動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度) .....	5-20
図 5.5-2(1/4)	底部モデル化範囲 $H_B$ の相違による比較 (処分坑道横置き、せん断応力 $\tau_{yz}$ 、単位：kgf/cm <sup>2</sup> ) .....	5-21
図 5.5-2(2/4)	底部モデル化範囲 $H_B$ の相違による比較 (処分坑道横置き、せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、単位：-) .....	5-22
図 5.5-2(3/4)	上部モデル化範囲 $H_T$ の相違による比較	

	(処分坑道横置き、せん断応力 $\tau_{yz}$ 、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-23
図 5.5-2(4/4)	上部モデル化範囲 H <sub>T</sub> の相違による比較	
	(処分坑道横置き、せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、単位：—)	5-24
図 5.5-3(1/4)	底部モデル化範囲 H <sub>B</sub> の相違による比較	
	(処分孔縦置き、せん断応力 $\tau_{yz}$ 、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-25
図 5.5-3(2/4)	底部モデル化範囲 H <sub>B</sub> の相違による比較	
	(処分孔縦置き、せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、単位：—)	5-26
図 5.5-3(3/4)	上部モデル化範囲 H <sub>T</sub> の相違による比較	
	(処分孔縦置き、せん断応力 $\tau_{yz}$ 、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-27
図 5.5-3(4/4)	上部モデル化範囲 H <sub>T</sub> の相違による比較	
	(処分孔縦置き、せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、単位：—)	5-28
図 5.5-4(1/2)	廃棄体の定置方式による比較(せん断応力 $\tau_{yz}$ 、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-29
図 5.5-4(2/2)	廃棄体の定置方式による比較(せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、単位：—)	5-30
図 5.5-5(1/2)	時間変化に伴う緩衝材の挙動	
	(処分坑道横置き、解析ケース 2A、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-31
図 5.5-5(2/2)	時間変化に伴う緩衝材の挙動	
	(処分孔縦置き、解析ケース 2A、単位：kgf/cm <sup>2</sup> )	5-32
図 5.5-6(1/2)	緩衝材中の加速度応答 (処分坑道横置き)	5-33
図 5.5-6(2/2)	緩衝材中の加速度応答 (処分孔縦置き)	5-33
図 A.1-1	対象とする系 (概念図)	A-1
図 A.1-2	3次元体系と境界面の取り方	A-4
図 A.2-2	境界上での3次元応力成分	A-12
図 A.2-3	3次元境界応力と等価節点力の与え方	A-12
図 A.2-4	底部無限領域を有する1次元せん断モデル	A-14
図 A.2-5	フリーフィールド単体モデル概念	A-17

## 1. まえがき

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成される人工バリアシステムは、長期的にわたる核種の封じ込め、核種移行の抑制、地下水浸入の抑制など様々な物理的・化学的バリア性能が要求される。これらのバリア性能を評価する上では、人工バリアシステムが健全な状態で存続することが前提とされる。すなわち、地層処分を行う際の操業・閉鎖の期間中に、地震に起因する様々なシナリオを想定した解析・評価を行い、人工バリアの設計ならびに人工バリアの性能評価に対し適切な情報提供を行う必要がある。我が国のように地震の多い地質環境条件下における地層処分では、上記人工バリアの健全性を確認するとともに、設計・性能評価側への情報提供を目的とした耐震性評価が重要かつ必要になる。

本研究では、実処分場体系の解析・評価を行うことを目的とし、これまで開発してきた3次元地震応答解析コードの機能拡張（粘性境界要素の導入）、ならびに関連する諸情報（地下深部の地震観測事例など）の調査検討を行い、実処分場を想定した際の解析条件の検討および耐震安定性の概略的な評価検討を行った。

### 1.1 実施内容

#### 1.1.1 地中の地震波に関する調査検討

実処分場体系での有意な地震応答解析を行うには、人工バリアの立地環境に合わせた入力地震動の選定が必要となる。通常の原子炉施設では、設計用地震動として模擬地震波等が用いられており、これらはサイト周辺の過去の地震活動情報ならびに活断層情報等から選定される。地震動を設定する位置は解放基盤表面であり、多くの場合岩盤表面である。また、対象とする構造物の応答性状を共通の地震波に対して比較するなどの観点から、過去の著名地震波が用いられることもある。しかしながら、地層処分システムの場合、立地環境が数百メートル以上の地下深部を想定している為、解放基盤表面で設定された地震動や地表付近の浅層で観測された過去の地震動をそのまま適用することは現実的でない。サイト周辺の各種情報と地下深部という立地環境を合わせて地震動を設定することが重要である。従って、従来までの工学システムに対して収集されてきたサイト周辺の地震活動情報のみならず、地下深部での地震波特性に関する情報収集を行う必要がある。

本調査は、処分施設の立地地域を限定して行う過去の地震活動や活断層に関する情報収集に焦点を置いたものではなく、従来の工学施設とは立地深度がまったく異なること

を念頭に、地下深部の地震波特性に関する情報収集に焦点を置いたものである。すなわち、これまでに観測された地中地震波を、地域を限定することなく、幅広く調査したものである。ただし、昨年度までの調査結果から、数百メートル以上の地下深部に於ける地震観測事例やそこでの観測波を用いた地震応答解析事例の情報入手は極めて困難なことが予想されるため、地下深部の地震波形と地表・浅層の地震波形との因果関係に着目し、地表・浅層付近の観測波から地下深部の地震波形を予測することが可能か否かを含めて検討することとした。

尚、人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発に関する調査検討に関して、本年度は実処分場体系における解析、評価を念頭に、周辺岩盤のモデル化に伴う機能を一部追加した。すなわち、事実上無限長の広がりを持つ解析対象を有限な系で切断することの効果、周辺岩盤の境界を人為的に制御することで取り込むことである。通常、この種の対応としては、

- ① 無限粘性境界
- ② エネルギー伝達境界
- ③ 混合境界
- ④ 境界要素法とのハイブリッド法

など、幾つかの対応策が提案されている。従って、これらの適用事例等を公開文献より調査し、本プログラムへの機能追加を考慮しつつ、各手法の特徴、利用可能性の整理・検討を行った。

#### 1.1.2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

前項の文献調査結果を踏まえ、本年度のプログラム改良方針ならびに改良箇所を検討し、プログラムの機能拡張を行った。改良プログラムの検証は、

- ① 簡易モデルによる定性的な機能確認
- ② 動燃事業団殿所有の SIGNAS とのベンチマーク解析

を通じて行った。

#### 1.1.3 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討

防災科学技術研究所殿および動燃事業団殿との共同研究で行われる人工バリアの振

動実験に対し、これまでに開発した解析コードを用いて、予備解析を実施した。

本年度はベントナイトの乾燥重量密度を、振動実験との対応を考慮しつつ、より実機に近い値に変更し解析を行った。

#### 1.1.4 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性の評価検討

実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性を検討するにあたり、これまでに考案されてきた各種設計案および場を特徴付ける各種入力パラメータに対する地震応答特性を把握する必要がある。即ち、如何なる因子が地震応答性状にどの程度の影響を及ぼすのかを、定量的に把握することである。これにより、

- ① 処分施設の基本設計仕様に対する影響度
- ② 応答を支配する各種データセットの不確実性への対応

に係わる情報提供が可能となる。①については、現状の各種設計案(例えば、廃棄体の定置方式、オーバーパック肉厚および緩衝材厚さ等)に対し、構造上の健全性を見通すことが可能となり、②については地震発生時の場の状態(すなわち、地震応答解析における初期条件の設定)、入力する地震波形および人工バリアの製作・据付け誤差など、想定する場・事象の不確実性に対し、評価上の保守性を見通すことが可能となる。

地震応答性状に影響を及ぼすと考えられる諸因子は多数考えられるため、それらの全てに対して、人工バリアの地震応答性状を詳細に追求することは FEM モデルの規模、計算時間の観点から現実的でないし、各種パラメータの変動範囲を完全に把握することも容易ではない。さらに、解析結果を保証する FEM モデルについての情報も不足している。そこで、本年度は以下に示す 2 つの因子に着目し、詳細な感度解析を実施するための解析モデルの構築を主目的とした評価検討を実施した。

- ① FEM モデルの相違による地震応答性状への影響
- ② 廃棄体定置方式の相違による地震応答性状への影響

①の FEM モデルの相違については、ニアフィールドのモデル化領域の相違に着目し、これによる解析結果への影響を評価検討した。②の廃棄体定置方式の相違については、処分坑道横置ならびに処分孔縦置に伴うニアフィールドの形状の相違を考慮したモデル化を行い、地震応答性状への影響を評価検討した。

## 2. 文献調査

### 2.1 はじめに

人工バリアの処分環境で想定される入力地震動を設定するため、地下深部における地震波観測事例について調査した。また、解析コードの改良に係わる調査として、粘性境界、伝達境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド法について調査し、各手法の特徴ならびに本解析コードへの導入可能性について整理・検討した。

本文献調査により、国内の地下深部に於ける地震観測状況ならびに解析コードの改良に関する先行事例を明らかにすることができた。

### 2.2 文献調査の方法

文献検索データベース JICST、DIALOG を用い、関連する公開文献を入手し、地下深部における地震観測事例および解析コードの改良に関する先行事例の調査検討を行った。検索にあたり、キーワードを表 2.2-1 および表 2.2-2 に示す通り設定した。

### 2.3 文献調査結果の概要

検索の結果、300 件余りの文献がリストアップされた。これらを、本研究との関連性に着目し絞込みを行った結果、40 件となった。表 2.3-1 に各文献の概要を示す。

前記のとおり、本検索では地下深部における地震観測事例の入手ならびに解析コードの改良（周辺岩盤のモデル化に伴う境界処理機能の追加）に伴う情報の入手を目的とした 2 項目について行っており、それぞれの内訳は以下の様になった。

① 地下深部における地震観測情報に関する文献 ……	13 件
② 解析コードの改良に伴う情報 ……………	27 件

これらの文献より得られた知見を、以下に整理した。

### 2.4 地中の地震波に関する調査検討

#### 2.4.1 地下深部における地震波の観測事例

入手した文献の調査を行った結果、地下数百メートル級の地震波の観測事例は極めて少ないことが明らかになった。このことは、TRU 廃棄物処分場への人間侵入の観点か

ら、深層井戸の国内分布状況について調査した統計結果（坂本、妹尾、他 1996）から見ても裏付けることができる（図 2.4.1-1）。同文献の深度別地下利用状況によると、累積頻度が深度 30m 以浅で全体の約 40%、100 m 以浅では約 60%、300 m 以浅では約 90%、600 m 以浅ともなると約 99.9% になることが報告されている。数少ない観測事例として、先第三紀基盤上の厚さ数 km にも及ぶ堆積層の地震応答特性を把握することを目的に、深層に於ける地震波を直接観測した事例がある（木下、1986）。同文献では、岩槻（3510m）、下総（2300m）および府中（2750m）に於ける各深層井で観測された地震波に関する情報が記載されている。

本来、人工バリアの耐震安定性については、選定されたサイトの地質環境条件を考慮しつつ、過去の地震観測結果などの包括的な情報に基づいた入力地震動の下で議論されるべきものである。しかしながら、現段階ではサイトを特定しない幅広い範囲で研究を推進していること、また、地下深部に於ける地震波情報が不足していること等の現状を加味すると、これらサイト固有の情報に固執するには限界がある。現時点では、例えば上記の深層井観測波を El-Centro や宮城沖などの過去の著名地震波と同等の意味づけで解析を行うことが有効と考える。

一方、これまでに観測されている表層の地震波など、既存の情報から地下深部における地震波を推定することができれば、少なからず実際の処分環境を考慮した解析が可能となる。通常、水平多層地盤における一次元的な波動伝搬に対しては、重複反射理論などの一般的な手法が適用される。また、波動伝搬媒体の伝達関数を用いた簡易的な推定手法も考案されている（G.N.Owen 等、1981）。以下に、これら 2 つの手法の概要を整理するとともに、各手法を適用する上で必要となる諸情報についてまとめた。

## 2.4.2 地下深部の地震波特性の推定法

### (1) 重複反射理論に基づく地中地震波の推定

図 2.4.2-1 に示す水平多層地盤に SH 波が入射する場合を例にとり、地表付近の地震観測波から地下深部の地震波の推定を試みる。

第  $m$  層に於ける地盤の運動方程式は、次式で表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = c_m^2 \left( \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial z_m^2} \right) \quad (2.4.2-1)$$

ここに、 $u_m$  は紙面に垂直な方向の変位振幅であり、 $c_m$  は媒体のせん断波速度である。上式の一般解は次式で表すことができる。

$$u_m(x, z_m, t) = A_m \exp\{i(v_m z_m + \omega t - kx)\} + B_m \exp\{-i(v_m z_m - \omega t + kx)\} \quad (2.4.2-2)$$

$$v_m = k_m^2 - k^2 \quad (2.4.2-3)$$

$A_m$ 、 $B_m$ は、それぞれ上昇波および下降波の振幅である。これより、任意の点 $(x, z_m)$ におけるせん断応力 $\tau_m$ が以下のように算定できる。

$$\begin{aligned} \tau_m(x, z_m, t) &= \frac{\partial u_m(x, z_m, t)}{\partial z_m} \\ &= iG_m v_m \left[ A_m \exp\{i(v_m z_m + \omega t - kx)\} - B_m \exp\{-i(v_m z_m - \omega t + kx)\} \right] \end{aligned} \quad (2.4.2-4)$$

(2.4.2-2)式および(2.4.2-4)式で表した第 $m$ 層における変位、せん断応力を行列表記でまとめると以下の様になる。

$$\begin{Bmatrix} u_m \\ \tau_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp i(v_m z_m + \omega t - kx) & \exp(-i)(v_m z_m - \omega t + kx) \\ iG_m v_m \exp i(v_m z_m + \omega t - kx) & -iG_m v_m \exp(-i)(v_m z_m - \omega t + kx) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-5)$$

第 $m$ 層の上面( $z_m = 0$ )では、さらに次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} u_m \\ \tau_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp i(\omega t - kx) & \exp(-i)(-\omega t + kx) \\ iG_m v_m \exp i(\omega t - kx) & -iG_m v_m \exp(-i)(-\omega t + kx) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-6)$$

(2.4.2.5)式および(2.4.2.6)式より、 $A_m$ 、 $B_m$ を消去すると

$$\begin{Bmatrix} u_m(z_m) \\ \tau_m(z_m) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos v_m z_m & \sin v_m z_m / G_m z_m \\ -G_m z_m \sin v_m z_m & \cos v_m z_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-7)$$

今、注目している第 $m$ 層の地盤の厚さを $H_m$ と考え、上式を適用すると、

$$\begin{Bmatrix} u_m(H_m) \\ \tau_m(H_m) \end{Bmatrix} = [T_m] \begin{Bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-8)$$

$$[T_m] = \begin{bmatrix} \cos v_m H_m & \sin v_m z_m / G_m H_m \\ -G_m z_m \sin v_m H_m & \cos v_m H_m \end{bmatrix} \quad (2.4.2-9)$$

第 $m$ 層と第 $(m-1)$ 層間の境界における連続性より、

$$\begin{Bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_m(H_{m-1}) \\ \tau_m(H_{m-1}) \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-10)$$

これを用いて、(2.4.2.8)式を地表面レベルまで順次繰り下げて適用すると、

$$\begin{Bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{Bmatrix} = [R_{m-1}] \begin{Bmatrix} u_1(0) \\ \tau_1(0) \end{Bmatrix} \quad (2.4.2-11)$$

$$[R_{m-1}] = [T_{m-1}][T_{m-2}] \cdots [T_2][T_1] \quad (2.4.2-12)$$

となる。地表面での応力条件  $\tau = 0$  と合せることにより、地表面での変位  $u_1(0)$  のみから第  $m$  層での変位と応力が推定できることがわかる。

## (2) 伝達関数による地中地震波の推定

### (a) 数学モデル

均質等方性の半無限媒体中を伝搬する SH 波の入射による地中地震動の深度依存性を考える。図 2.4.2-2 に、ここで対象とする系の概念を示す。S 波速度  $\beta$  の等方半無限地盤とその自由表面下に深さ  $x_2$  の点を考える。均質な弾性媒体中の変位に関する支配方程式は以下のようなになる。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.4.1-1)$$

ここで、 $\rho$  は媒体の密度、 $\mathbf{u}$  は変位ベクトル、 $\lambda$  および  $\mu$  は媒体のラーメの定数である。今、SH 波のみについて考えているため、上式は以下のように簡単に表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = \beta^2 \nabla^2 u_3 \quad (2.4.1-2)$$

ここで、 $\beta = \mu / \rho$  である。

変位成分  $u_3$  は、図 2.4.2-2 に示す  $x_1$  および  $x_2$  の面内で定義される運動の面外成分を表す。今、自由表面( $x_2=0$ )に角度  $\theta$  で SH 波が入射する場合を考える。この時、地震動の震源はこの領域より十分遠くにあると仮定され、波頭(wave front)の屈曲は無視して

考えるものとする。次式で定義するフーリエ変換を用い、変位成分  $u_3$  を周波数領域に変換する。

$$U_3(x_1, x_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u_3(x_1, x_2, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.4.1-3)$$

点  $(x_1, x_2)$  における変位は次式で表される。

$$U_3 = \left[ A_1 e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_1 \sin \theta + i\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos \theta} + A_2 e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_1 \sin \theta - i\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos \theta} \right] e^{i\omega t} \quad (2.4.1-4)$$

ここで、

$\omega$  : 角周波数

$\beta$  : せん断波速度

$i$  : 複素数

$\theta$  : 入射角

(自由表面にたてた垂線と入射波に対する垂線の成す角を時計周りに正とする)

$A_1$  : 入射波の振幅

$A_2$  : 自由表面からの反射波の振幅

自由表面における応力条件より  $A_1 = A_2$  となり、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{U_3(x_1, x_2, \omega)}{U_3(0, 0, \omega)} &= \frac{1}{2} \left[ e^{i\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos \theta} + e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos \theta} \right] e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_1 \sin \theta} \\ &= \cos\left(\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos \theta\right) e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_1 \sin \theta} \end{aligned} \quad (2.4.1-5)$$

これは、 $U_3^i(\omega)$  に対する  $U_3(x_1, x_2, \omega)$  の比として表すこともできる。 $U_3^i(\omega)$  は空間に依存しない入射変位であり、次式で表わされる。

$$U_3^i(\omega) = A_1 e^{-i\omega t} \quad (2.4.1-6)$$

また、 $U_3(0,0,\omega) = 2U_3^i(\omega)$  であるため、(2.4.1-5)式は以下ようになる。

$$\frac{U_3(x_1, x_2, \omega)}{U_3^i(\omega)} = 2 \cos\left(\frac{\omega}{\beta} x_2 \cos\theta\right) e^{-i\frac{\omega}{\beta} x_1 \sin\theta} \quad (2.4.1-7)$$

上式は、SH 波の成分の変位を、周波数、深度、波の伝搬速度および入射角の関数として与えるものである。この比は、入射波が有限時間の調和波で構成される場合に適用することができ、周波数領域における伝達関数を表している。すなわち、周波数  $\omega$  の入射波領域の運動に対する、ある深度における運動を表すものである。(2.4.1-7)式で  $x_2 = 0$  とすると、SH 波の自由表面での反射のため、入射波が 2 倍になるという一般的な結果が得られる。

今、任意の変位時刻暦から成る波動を用いて一般的な問題を考える。一般に、この波動はすべての周波数帯域から構成され、それぞれの周波数では適当な振幅と位相をもつものである。 $u_3^0(0,0,t)$  を自由表面での波動列(wave train)の変位時刻暦と考え、任意の点  $(x_1, x_2)$  における変位  $u_3(x_1, x_2, t)$  を求めるには、以下の手順が取られる。

- ① (2.4.1.3)式により、 $u_3^0$  のフーリエ変換を行う ( $U_3(0,0,\omega)$  を計算する)。
- ② ① で得られた  $U_3(0,0,\omega)$  に (2.4.1.5) 式で与えられる伝達関数を乗じ、 $U_3(x_1, x_2, \omega)$  を求める。
- ③ 次式により、 $U_3(x_1, x_2, \omega)$  のフーリエ逆変換を行い、 $u_3(x_1, x_2, t)$  を計算する。

$$u_3(x_1, x_2, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_3(x_1, x_2, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.4.1-8)$$

同様の手順により、地振動の  $x_1$  成分および  $x_2$  成分(P 波、SV 波)を求めることができるが、その場合は、自由表面からの反射と深く関連するため、若干複雑になる可能性がある。

#### (b) 処理プログラム

上述の手順は、プログラムとして用意されている (G.N.Owen 等, 1981)。これは、地表面で観測された時刻暦波を入力情報として与え、任意の深さにおける変位ならびにひずみを計算するものである。同プログラムは均質等方性の半無限媒体中の SH 波のみを対象とするものであり、座標系の原点は地表における地震波の観測点に取られ、水平方向  $x_1$  および深さ方向  $x_2$  の 2 次元平面内で取り扱われる。また、入射する波の入射角は任意の角度で取り扱うことが可能である。本プログラムで必要となる、主な入力パラ

メータは以下のとおりである。

- ① 媒体中のせん断波速度
- ② 深度
- ③  $x_2$  軸からの距離
- ④ 入射角
- ⑤ 地表観測波の時刻暦データ

図 2.4.2-3 に、本プログラムを用いた解析結果（深部地盤挙動の推定結果）の一例を示す。

## 2.5 地震応答解析コードの改良に関する調査検討

次に、地震応答解析コードの改良に係わる文献としてエネルギー伝達境界、粘性境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド境界に関する評価事例を入手した。検索の結果、粘性境界およびエネルギー伝達境界に関する事例が多く、次いで混合境界、境界要素法とのハイブリッド法の順であった。本節では、これらの手法の取り扱いに関する概要を述べ、各手法の長所・短所を比較の上、本研究で開発中の地震応答解析コードへの導入可能性について検討した。

### 2.5.1 地盤の半無限性を考慮する代表的手法

#### (1) エネルギー伝達境界

本手法は、Lysmer, Wass 等により提案されたものであり、FLUSH 等の著名な汎用コードで多く採用されている手法である。ここで対象とする系は、図 2.5-1 に示す様に、解析領域外部を一様な成層地盤と仮定したものである。領域内部の構造物等で反射された散逸波は、側方境界を表面波と仮定して伝搬するものとする。また、解析領域の底部境界は、通常、剛基盤として処理される。エネルギー伝達境界は、解析領域側方の境界節点に、節点変位に基づく境界力を作用させることで、解析領域内部からの散逸波を吸収するものである。この境界力と節点変位を関係付けるマトリクスを境界マトリクスという。以下に、エネルギー伝達境界を用いた解析手順の概略を示す。

#### ① 境界力の算定

図 2.5-1 の右側方領域上を右方向に伝搬する散逸波を考える。境界上における節点力ベクトル $\{P\}$ は境界マトリクス $[R]$ を用いて、次のように表される。

$$\{P\} = [R]\{u\} \quad (2.5-1)$$

$$[R] = i[A][V][K][V]^{-1} + [D] \quad (2.5-2)$$

ここで、[A]、[D]は地盤の剛性に関するマトリクスであり、[K]は波の固有波数に関するマトリクスである。また、[V]は[K]に対応するモーダルマトリクスである。上式からわかるように、境界マトリクスを算定するには、散逸波（ここでは、表面波を仮定）の波数kに関する固有値解析を行い、(a)固有波数ならびに(b)固有ベクトルから構成される固有マトリクスを求める必要がある。この際の表面波の取り扱いとしては、波の進行方向およびこれに対して面外運動となるレイリー波と面内運動となるラブ波の各々に対しての考慮が必要となる。また、右側方境界と左側方境界の区別も必要である。図2.5-1における右側方境界上を、+X方向に伝搬する散逸波の場合、境界上に作用させるべく境界力 $\{F\}^R$ は、境界マトリクス[R]を用いて次の様に表すことができる。

$$\{F\}^R = [R](\{u\}^R - \{u\}_f^R) \quad (2.5-3)$$

ここに、 $\{u\}^R$ 、 $\{u\}_f^R$ は右側のモデル境界および右側の成層地盤に対する変位ベクトルである。左側方境界に関する節点力も、同様に境界マトリクス[L]を用いて算定することができる。

## ② 全体系の解析

上記の節点力を解析領域全体の運動方程式に取り込む必要がある。通常、エネルギー伝達境界を用いた解析では、運動方程式は周波数領域で取り扱われるため次式で表すことができる。

$$([K] + i\omega[C] - \omega^2[M])\{u\}_I = \{p\}_I - \{p\}_L - \{p\}_R \quad (2.5-4)$$

[K]、[C]および[M]は、それぞれ系の剛性マトリクス、減衰マトリクスおよび質量マトリクスである。 $\omega$ は系の受ける外力の角振動数である。 $\{u\}$ 、 $\{p\}$ は変位ベクトルおよび荷重ベクトルであり、添え字の I,L,R は解析領域内部、左側方境界および右側方境界に於ける諸量であることを意味している。上式の右辺第2項および第3項は、散逸波の進行方向を考慮に入れて、次式のように展開することができる。

$$\begin{aligned} \{p\}_L &= \{p\}_L^L - \{p\}_L^R = [L]_L \{u\}_L^L - [R]_L \{u\}_L^R \\ \{p\}_R &= \{p\}_R^R - \{p\}_R^L = [R]_R \{u\}_R^R - [L]_R \{u\}_R^L \end{aligned} \quad (2.5-5)$$

上添え字が散逸波の進行方向を表している。(2.5-4)式、(2.4-5)式および $\{u\}_I = \{u\}_R + \{u\}_L$ の関係を考慮すると、最終的な全体系の運動方程式は次式の様になる。

$$\begin{aligned} ([K] + i\omega[C] - \omega^2[M] + [L]_L + [R]_R)\{u\}_I \\ = \{p\}_I + ([L]_L + [R]_L)\{u\}_L^R + ([L]_R + [R]_R)\{u\}_R^L \end{aligned} \quad (2.5-6)$$

なお、エネルギー伝達境界を用いた解析では、原則として解析領域底部は剛基盤とされるため、FEMモデル下方地盤の半無限性を考慮することができない。そこで、解析領域底部に次項に示す粘性境界と併用させた解析手法（たとえば後藤、白砂 他, 1983）等も考案されている。また、散逸波の波数に関する固有値解析の結果を前提とすることから、運動方程式の取り扱いには周波数領域に限定される。従って、土質材料の材料非線形等を考慮した解析は、等価線形解析などの近似的手法に依らざるを得ない。

## (2) 粘性境界

本手法は、解析領域境界にダッシュポットを設けることにより散逸波を吸収し、地盤の半無限性を考慮するものである。境界に付与すべき条件は、2次元問題の場合（鉛直方向：n、水平方向：s）、以下の減衰力として表される。

$$F_s = \rho V_s A \dot{u}_s \quad (2.5-7)$$

$$F_n = \rho V_n A \dot{u}_n \quad (2.5-8)$$

ここに、Aは断面積を、 $\rho$ は媒体の密度を表している。また、 $V_s$ および $V_n$ は、水平方向ならびに鉛直方向の波動伝搬速度を表している。上式を応力に換算し、仮想仕事の原理を用いて平衡方程式に組み込み、さらに適当な形状関数の下で離散化すると、時間領域における運動方程式に直接組み込むことができ、境界に付与すべき減衰力ベクトルが節点速度ベクトルとの関係で以下のように得られる。

$$\{F\}_{vi} = [C]_{vi} \dot{\{u\}} \quad (2.5-9)$$

ここに、 $[C]_{vi}$ は粘性境界マトリクスであり、変位の離散化に用いた形状関数の形によ

り異なるものである。この最も基本的なものは対角マトリクスとして表わすことができるが、エネルギー伝達境界や後述の他の手法に比較して境界におけるエネルギー吸収能がやや劣るといわれている。そこで粘性境界マトリクスを非対角マトリクスで表したものが幾つか提案されており、境界におけるエネルギー吸収能を改善する試みが行われてきた。

一方、下方から上昇伝搬してくる地振動に対して地盤—構造物の相互作用を考慮した動的応答解析を行う場合、モデル底面の境界条件としては粘性境界による散逸波の吸収ばかりでなく、入力地振動の規定方法についての配慮が重要となる（奥村,多田,宇高 1982 他）。

モデル底面を固定基盤とした通常地震応答解析では、表層での観測波などが、FEM領域の底面レベルまで引き戻されたトータルモーション（上昇波+下降波）を入力して解析を行う。しかしながら、ここで言う下降波とFEM領域で生じる下降波とは本来同一のものではない。なぜなら、FEM領域での下降波は内部に評価の対象とする構造物等があり、これにより反射された散逸波等を含むからである。一方、実際の観測波はそのような散逸波を含んでいない自由地盤中で観測されたものであったりする。従って、下方から上昇伝搬してくる地振動に対して、地盤—構造物の相互作用を考慮した動的応答解析を行う場合、FEM領域の下方部に本来ある地盤中の波動伝搬状況を考慮に入れた入力波を用いて解析しなければならない。以上の問題を解決するため、FEM領域の底部境界に付与すべき条件を、波動方程式の変位解より定めたものがある（奥村,多田,宇高 他 1982）。それによれば、モデル下部にある地盤の半無限性を考慮し、かつ下降波成分を規定しない解析を行うためには、底部境界で上昇波の2倍を粘性境界を介して入力するとともに、散逸波を粘性境界で吸収してやれば良い。

### (3) 混合境界

解析領域内部の構造物等で反射された波（散逸波）が境界に到達したとき、この境界が自由境界の場合は散逸波と同じ位相で反射され、固定境界の場合は逆位相で反射される。従って、2つの反射波を重ね合わせることで、これを消去することができ、無限遠方領域への波の散逸を表現することができる（W.D.Smith 他 1974）。しかしながら、この手法では消去したい境界の数を  $n$  とすると  $2^n$  個の解を重ね合わせる必要があり、すべての反射波を消去するためには、注目している領域の全体を何度も解析する必要がある。これを改善するため、注目する解析領域の外側に新たに境界領域を付加し、解析領域の計算は1度だけで、境界領域は重ね合わせるべく解の数だけ解析する手法が提案されている（P.A.Cundall 他 1978）。この境界領域の大きさは、反射波が解析領域内部に進入しない範囲で設定されるものである。なお、Cundall らの手法をさらに3次元系に拡張した手法も提案されている（T.Suzuki, M.Hakuno 1985）。

#### (4) 境界要素法とのハイブリッド法

有限要素法は複雑な系のモデル化や非線形問題の取り扱いにおいて有効な手段であるが、無限領域を対象とした解析でさえ、これを有限な系として切断する必要がある。一方、境界要素法は半無限領域のモデル化において有効な手段であるが、複雑な系や非線形問題の取り扱いが困難である。従って、両者の利点を併せ持った手法として、有限要素法と境界要素法のハイブリッド法が種々考案されている。本手法の詳細については、例えば文献 26,27 (文献集に収録) を参照されたい。

#### 2.5.2 各手法の比較検討

各手法の特徴および概念を表 2.5.2-1 にまとめた。これらの手法は目的に応じて使い分けが成されるものであり、一概に比較し、それぞれの優劣を判断することは困難である。しかしながら、

- ① 昨年度、機能追加した Ramberg—Osgood モデルに依る非線形解析機能の利用を前提に時間領域での解法を可能にしたいこと。
- ② 人工バリアが地下深部に設置されることから、表面波の吸収はあまり考えなくてよいこと。
- ③ 3次元体系での解析が可能であること。
- ④ 解析ケースあるいは自由度が増大することは避けたい。
- ⑤ 解析コードへの機能追加が比較的容易であること。

等を考慮すると、エネルギー伝達境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド境界では対処困難である。粘性境界はエネルギー吸収能力がやや劣るといわれているものの、上記項目の全てに対し見通しが得られている。

以上を踏まえ、本作業では現在開発中の地震応答解析コードに、2次元および3次元の粘性境界要素を導入することとした。

表 2.2-1 文献検索情報 (その 1)

検索目的	地下深部での地震観測情報の入手
検索キーワード	① 地震応答 ② 地下構造物 ③ 地中地震波 ④ 深層地震観測
検索方法	① and {② or ③ or ④}
対象年代	1981.1 ~ 1996.8
利用するデータベース	JICST、DIALOG

表 2.2-2 文献検索情報(その 2)

検索目的	プログラム機能追加に伴う情報の入手
検索キーワード	① 地震応答 ② 地震 ③ エネルギー伝達境界 ④ 粘性境界 ⑤ 混合境界 ⑥ 境界要素法とのハイブリッド法
検索方法	{① or ②} and {③ or ④ or ⑤ or ⑥}
対象年代	1981.1 ~ 1996.8
利用するデータベース	JICST、DIALOG

表 2.3-1 (1/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
1	Experimental and Analytical Studies of a Deeply Embedded Reactor Building Model Considering Soil -Building Interaction (Part II)	H.Tanaka T.Ohta .etc.	半埋設式原子力建屋の動特性を、実験的・解析的手法を通じ検討した事例である。「Backfill」の有無が土-構造物相互作用系の動特性に及ぼす影響を評価している。解析モデルは3次元集中質量で離散化され、モデル側方、底面の双方に粘性境界が設けられている。
2	地盤-構造物系の相互作用解析における底面粘性境界の有効性について	奥村光男 多田和美、他	有限要素法を用いたパラメトリックな地盤-構造物系の動的相互作用解析を実施した例である。解の精度の観点から、建屋の底面からモデル底面までの必要な深さについての定量的な考察を行っている。地盤-構造物系の側方にはエネルギー伝達境界を、底面には粘性境界を設けている。本パラメータ解析を通じ、解の精度を確保するために必要な建屋底面からモデル底面までの深さは、注目すべき振動成分の波長との関係で論じられるべきことと、剛体基盤の場合は1/2波長以上、粘性境界の場合は1/10波長程度取るべきとの知見が得られている。
3	根入れ鋼板セル護岸の動的応答特性	河野建二 古川浩平、他	根入れ鋼板セル護岸が一般に海岸線等に沿った長大な構造物であることから、地盤を平面ひずみ問題として扱いとともに、鋼板セルを対称な円筒シェルの曲げ理論から得られた弾性床上の梁としてモデル化し、動的応答解析を行った事例である。解析モデル底面は固定境界であるが、側方には粘性境界を設けている。
4	表層を人工硬質地盤で被覆した軟弱地盤の動的応答特性	有賀 義明	表層を人工硬質地盤で被覆した軟弱地盤-基礎地盤系を対象に2次元地震応答解析を実施した例である。モデル側面および底面に粘性境界が設けられている。
5	有限要素法を用いた建家-地盤連成系の動的解析	中川 恭次 武田寿一 他	建屋-地盤系の相互作用を考慮した地震応答解析手法の開発に関するものである。建屋は質点系、地盤は3次元有限要素でモデル化している。地盤モデルの側面境界には粘性境界を設けている。解析方法の妥当性は、自然地盤上に制作された模型試験体のシミュレーション解析より確認されている。

表 2.3-1 (2/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
6	建屋—地盤連成格子型モデルの下部粘性境界に関する解析法について	武藤 潔 小林俊夫 他	著者らが提案した「格子型モデル」に関する続報である。格子型モデルの地盤下部に粘性境界を設けた場合の時間領域における解析方法(固有モード法)が新たに提案されている。
7	地盤—構造物系の相互作用解析における一手法	奥村 光男 多田和美、他	地盤—構造物系の相互作用解析プログラム FLUSH に関して、地盤の半無限性を考慮した動的応答解析手法の改善策を提案するものである。現行の FLUSH では、モデル側面にエネルギー伝達境界を設定することができるが、底面の境界条件を剛体基盤として扱わなければならないため、底部地盤の半無限性を考慮することができない。その改善策として、モデル底部に粘性境界を導入し、エネルギー伝達境界と組み合わせた新しい手法を提案している。
8	地下式原子力発電所空洞の耐震性の検討 —その 1. 3次元震動応答解析法による地下および半地下空洞の地震時挙動比較	駒田広也	地下式原子力発電所の耐震設計に係わる検討の一環として、建屋に入力される地震波の最大加速度や周波数特性などに着目し、地上式と地下式の包括的な比較を行った事例である。本検討では、モデル側面に粘性境界が定義可能な 3次元応答解析プログラムを開発しており、プログラムの検証は城山水力地下発電所における実測データとの比較を通じて行われている。
9	粘性境界の 3次元地震応答解析法への適用	三浦 房紀 沖中宏志 他	著者らの提案するジョイント要素を導入した 3次元非線形振動解析に関する続報である。モデル側面および底面に粘性境界を設けることができる。
10	仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法	三浦 房紀 沖中 宏志	地盤—構造物系の動的相互作用解析に関し、仮想仕事の原理に基づく運動方程式の導出と有限要素法による離散化を行った例である。対象とする系は側面および底面に粘性境界を考慮するものである。手法の妥当性は、①波動エネルギーがモデル境界において反射されることなく、うまく吸収されているか。②周辺地盤からの加振がうまく行われているか。を確認することで示されている。

表 2.3-1 (3/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
11	液体-構造物-地盤連成系の地震応答解析手法について	後藤洋三 白砂 健 他	有限要素法による液体-構造物-地盤系の線形地震応答解析プログラムの開発に関するものである。解析モデルは軸対称構造物としてモデル化され、モデル側方にエネルギー伝達境界を、モデル底面に粘性境界を設けることが可能である。
12	MULAP4:A Multi-Linear Analysis Program for Ground Motion Studies of Horizontally Layered Systems	Albert T.F..Chen	水平多層地盤における非線形地震応答解析プログラム MILAP(Multi Linear Analysis Program)の開発に関するものである。本プログラムは、均質な線形弾性半無限媒体上にある層状地盤を対象とするもので、地盤の各層は集中質量でモデル化されている。モデル底面は簡易波動理論より求められる境界応力により拘束され、この境界応力を Lysmer ら(1969)のダッシュポットによりモデル化している。なお、本文献には、MULAP コードのソースプログラムなども記載されている。
13	NATM トンネルの新動特性について(1)	阿部 秀典 相川 明 他	砂質地盤における NATM トンネルの振動特性が断面形状の相違によりどのように変化するかを検討した事例である。解析モデルは底面固定境界、側方粘性境界を考慮した対称モデルを用いており、モデル下部については剛体基盤を仮定しているため、トンネル端点からモデル境界までの距離が幾分大きく取られている。
14	Seismic Response of Choeseive Marine Soil	C.H.Tsai I.Lam etc.	代表的な沖合い粘性土を対象とし、DETRAN コードを用いた地震応答解析の事例である。同コードは有限差分法による 1 次元非線形解析プログラムであり、NONLIS コードを母体として改良されたものである。地盤の半無限性については、モデル底部に伝達境界を設けることで対処可能である。なお、地盤の非線形モデルには、Iwan のモデルを採用するとともに、Idress 等により提案された剛性低下モデルを備えている。

表 2.3-1 (4/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
15	Analytical Method for Determining Seismic Response of Cooling Tower on Footing Foundations	P.L.Gould B.J.Lee ,etc.	浅層における環状基盤上における、軸対称薄肉回転シェルの動的応答解析モデルの開発に関するものである。本モデルは、下部境界を固定境界とし、側方部境界を伝達境界とするものである。
16	Dynamic Analysis of Footings on Layered Media	E.Kaousel J.M.Roesset	水平方向に無限の広がりを持つ粘弾性層状地盤中の円形基礎を対象に、効率的な動的解析手法を提案するものである。形状モデルは有限の不規則領域と、これに接続する半無限領域とから構成される。半無限領域については、準解析的な薄層要素法で離散化されている。
17	3次元薄層要素法による相互作用の解析 (part1,2)	清水 信行 山本 鎮男 他	文献 16 とほぼ同様の手法を用いた 3 次元動的相互作用解析に関するものである。Part1 では、主に半無限領域の定式化について薄層要素法を基に詳細が記載されており、Part2 では不規則領域およびエネルギー伝達境界についての定式化が記載されている。
18	地盤－基礎構造物系の動的相互作用特性の解析	河野 健二 末広 励行	地盤－構造物系の動的相互作用解析において問題となるインピーダンス関数や入力地震動について、有限要素法を適用し検討を加えたものである。地盤はリング要素によって 3 次元的に表し、地盤の離散化に伴い問題となる有限境界の取り扱いとして、粘性境界、伝達境界を導入している。
19	有限要素法による地盤－構造物連成系の相互作用解析における境界条件及び入力地震動の評価	多田 和美 宇高竹和 他	地盤－構造物系の動的相互作用解析コード「Super FLUSH」を用い、エネルギー伝達境界、粘性境界の有効性について検討した例である。本検討により、両境界の有効性が示されたとともに、進行波による解析に検討の余地があることが示唆された（鉛直入射による応答解析が必ずしも安全側の評価ではないことが読み取れる）。
20	Soil-Structure Interaction Using Substructures	K.Singh T.Hsu etc.	地盤－構造物の相互作用解析としてサブストラクチャ法を用いた事例である。構造物は、モード形状、モード周波数、刺激係数などのモード特性で表され、地盤は粘性境界、伝達境界を併用した平面ひずみ要素で表している。系全体の解析は、周波数応答解析法を使用している。

表 2.3-1 (5/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
21	半無限境界の有効性に関する検討	松原 勝己 平澤賢治 他	構造物-地盤系の動的相互作用解析において、地盤の半無限性を考慮する側方伝達境界、底面粘性境界の有効性を、2次元複素解析プログラム「Super FLUSH」を用いて示した例である。結果の妥当性は弾性波動論による解析解との比較を通じて確認されている。
22	Non-Reflection Boundary for Finite Element Method	M.Irobe Y.Shimomura	波動方程式の一般解に基づき、FEM で用いる非反射境界を解析的に検討したものである。波動方程式の一般解を操作することで、変位の空間微分を時間微分に変換でき、非反射境界の数学的取り扱いが論理的かつ正確になることが示されている。
23	3D Dynamic Analysis of Ground Motion by FEM	T.Suzuki M.Hakuno	弾性媒体中の波動伝搬問題を時間領域で取り扱うものである。Cundall 等の混合境界（文献 24,25 参照）を3次元問題に拡張し、その有効性を検討している。
24	A Nonreflecting Plane Boundary for Wave Propagation Problems	W.D.Smith	ノイマン条件およびディリクレ条件の下で波動方程式の解が逆位相になることに注目し、境界における反射波を完全に消去する、いわゆる混合境界に関するものである。本手法は周波数、入射角のいずれにも依存しない解析的なアプローチによるものである。
25	Solution of Infinite Dynamic Problem by Finite Modeling in the Time Domain	P.A.Cundall R.P.Kunar,etc	Smith の混合境界(1973)の改良に関するものである。注目する領域の外側に境界領域を設け、この領域内で反射波を消去するものである。なお、Smith の混合境界で用いられた固定境界および自由境界は、速度一定境界および応力一定境界として用いられている。
26	BIEM-FEM ハイブリッド法による弱層周辺の動的解析	木嶋 健 小林 昭一 他	等方均一な 2 次元線形弾性地盤を対象に、境界積分方程式法(BIEM)および有限要素法を用いて地震時の挙動解析を行った事例である。
27	Earthquake-Resistance Analysis by Finite Element Boundary Element Hybrid Method	K.Goto M.Matsumoto	文献 26 と同様に、FEM-BEM のハイブリッド法に関するものであり、傾斜地盤中の空洞を対象に耐震性の検討が行われている。

表 2.3-1 (6/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
28	Reproduction of Behavior on Underground Structure Subjected to Phase Difference Motion Using Multiple Excitation Aperture	K.Ohtomo T.Iwatate	原子力プラントにおける屋外構造物として、海水ダクトを例に位相差入力に対する地震時挙動を検討した事例である。本検討では、多点加振装置を用いた実験と応答変位法を用いた解析の双方が実施されており、実験結果と解析結果の一致により、解析手法の妥当性が示されている。
29	地下構造物の波動問題の解析法について	北原 道弘 丹羽 義次 他	フーリエ変換法に基づき、半無限媒体中に①空洞、②周辺と性質の異なる弾性体、③流体が存在するモデルを考え、非定常応答解析を実施した事例である。
30	地盤の動特性および地下構造物の動的挙動に関する研究	久保慶三郎	地下構造物の振動解析に入力とすべき地振動の研究、地下構造物を支持すべき地盤の強度の研究、ならびに地震時挙動解析用計算モデルの開発に焦点をあて、地下構造物の耐震設計を包括的に検討した研究論文である。
31	不整形多層地盤の地震動解析	丹羽 義次	地形や地盤構造の不整形性に着目し、波数領域における積分方程式を解くことにより地震応答解析を実施した事例である。解析モデルは、2次元2層地盤を想定しており、定常的な平面波が入射した際の自由表面上の応答を解析している。
32	積分方程式法による不整形多層地盤の地震動解析	丹羽 義次 広瀬 壮一 他	文献 31 に同じ
33	深層地下構造物の地震動観測と解析 (その2)地下壁面に作用する地震時変動側圧に関する一考察 (その3)シミュレーション解析と構造物への地震入力評価に関する一考察	前田 安治 多賀 章 他	東京の比較的軟弱な表層地盤に建設された大型地下構造物で得られた地震観測記録を対象として、地震時変動側圧について考察した事例(その2)、ならびにシミュレーション解析を行った事例(その3)である。また、構造物への地震入力機構の定性的な評価も実施している。
34	The State-Of-The-Art of Earthquake Engineering of Civil Engineering Structures in Japan	K.Kubo	日本における地震工学の現状に関して、とくに土木工学の観点から、土木構造物に対する耐震設計基準、地震工学の観測的、実験的研究等について報告したものである。

表 2.3-1 (7/7) 文献概要

NO	文献名	著者	概要
35	層混合処理工法による改良地盤の耐震設計について	稲富 隆昌	改良地盤の振動特性に関して行った地震観測、模型振動実験に基づき、改良地盤のより合理的な耐震設計法を検討したものである。地中構造物の耐震設計に関しては、構造物自身がほとんど地中にあるものに対して提案されている耐震設計の基本方針がまとめられている。
36	深層井観測により推定された厚い堆積層の地震応答特性	木下 繁夫	先第三紀基盤上の厚さ数 km に及ぶ堆積層の地震応答特性を、深層井観測を中心とする地震観測により推定し、実用可能な形にすること目的とした研究論文である。深層井観測については、下総、府中、岩槻の観測例が報告されており、堆積層の地震応答について検討がなされている。
37	Earthquake Engineering of Large Underground Structures	G.N.Owen R.E.Scholl	地下構造物の耐震設計の現状と、今後何を行うべきかを幅広く議論した研究論文である。この中で、地震動の深度依存性について触れられており、均一等方性地盤を対象とした深部地震波の推定法が紹介されている。
38	多変数 AR モデルを用いた観測記録を含む時空間地震波形のシミュレーション	川上 英二 小野 牧夫	地下構造物の耐震設計に資する現実的な入力地振動の設定を目的として、時空間に依存した地震波形のシミュレーションを行った事例である。
39	Underground Response During Earthquake	S.Sharma	過去の地震による地下構造物の被害データをまとめたものである。収録データは 192 件あり、78 の地震に関するものが収められている。
40	積分方程式を用いた半無限領域問題の解析	板川 康一 川上 哲太郎他	解析領域の境界形状が複雑な場合に有効である積分方程式法を用いて、半無限地盤中に存在する地下構造物の動的応答解析を実施した事例である。

表 2.5.2-1 各手法の特徴の比較

	粘性境界	エネルギー伝達境界	混合境界	境界要素法とのハイブリッド法
特徴	解析領域内部からの散逸波を境界におけるダッシュポットで吸収。この減衰力は、散逸波より境界面で成される仕事から定式化することができる。モデル底部に粘性境界を設定する事により、上昇波のみによる解析を実施することができる。	解析領域の境界変位とフリーフィールドの境界変位の差に等価な力で表面波(レーリー波、ラブ波)を吸収する。表面波の波数に関する固有値解析を実施する必要がある。モデル底部を剛体基盤で仮定する為、底部の半無限性を考慮することが困難。	弾性波理論に基づく。2つの境界条件(ノイマン条件、ディリクレ条件)に対する解が逆位相となることに着目し、これらの平均をとることで反射波を消去する。問題の次数をnとすると、 $2^n$ 個の解を重ねあわせる必要がある。	解析領域をFEMで、半無限領域を境界要素法で定式化。FEM領域と境界要素領域の境界における変位が等しいことにより、両手法を結合させる。
概念	<p>粘性境界</p> <p>FEM領域</p> <p>地震波</p>	<p>伝達境界</p> <p>FEM領域</p> <p>表面波</p> <p>地震波</p>	<p>FEM領域</p> <p>ノイマン条件</p> <p>ディリクレ条件</p> <p>地震波</p>	<p>FEM領域</p> <p>BEM領域</p> <p>地震波</p>
解析領域	時間領域	周波数領域	時間領域	周波数領域
解析ケース数	少ない	少ない	多い	少ない
機能追加に伴う作業量	中	大	中	大

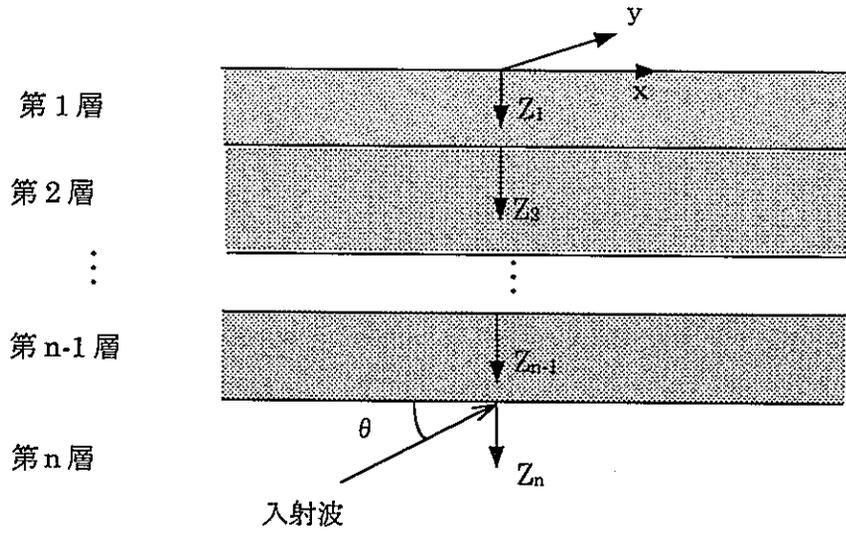


図 2.4.2-1 水平多層地盤

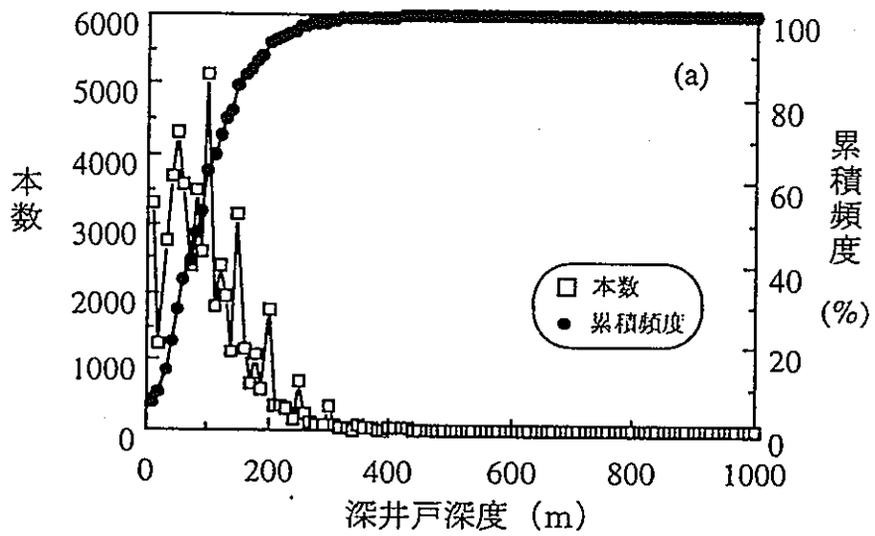


図 2.4.1-1 深層井戸の国内分布状況  
(坂本、妹尾ら、1996 より引用)

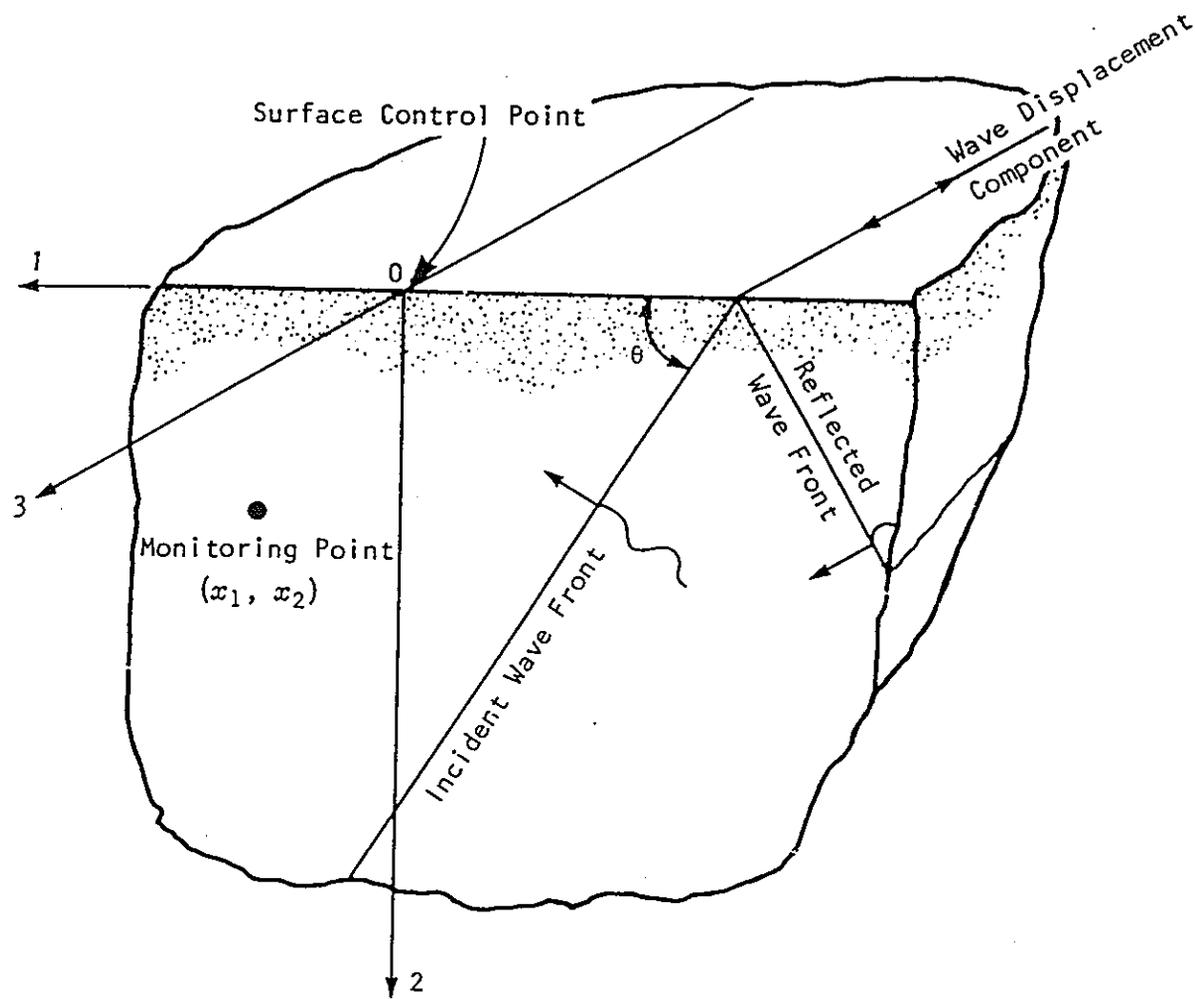


図 2.4.2-2 均質弾性媒体中を伝搬する入射波と反射波  
(G.N.Owen 等、1981 より引用)

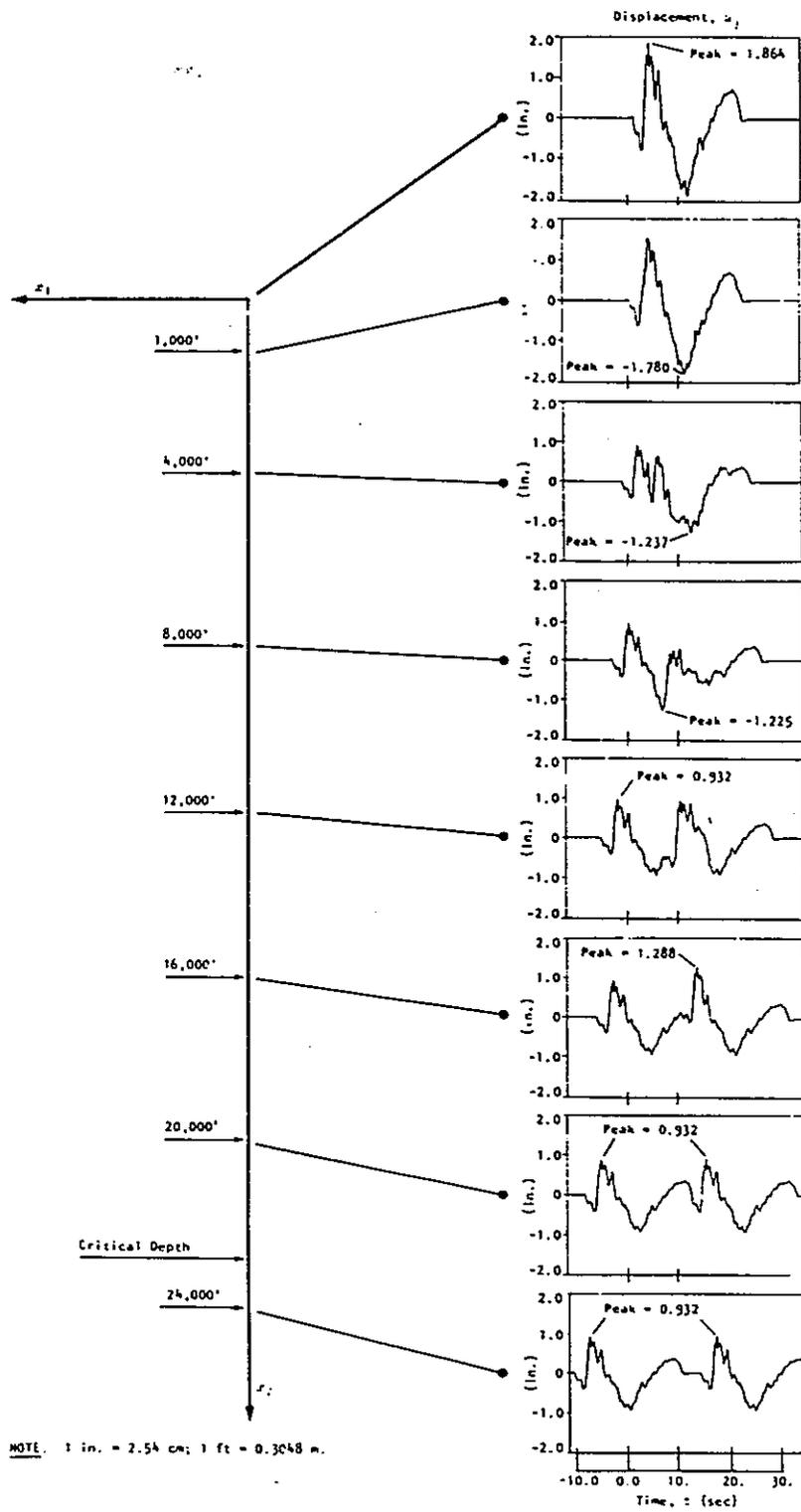


図 2.4.2-3 表層観測波を用いた深部地盤挙動の推定例  
(G.N.Owen 等、1981 より引用)

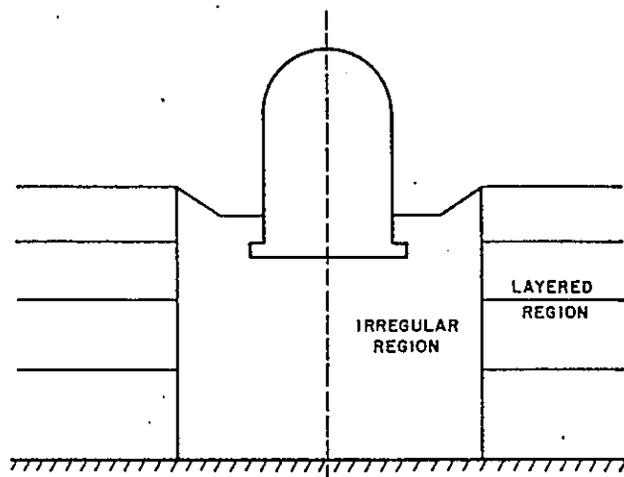


図 2.5-1 エネルギー伝達境界  
(E.Kaousel,J.M.Roesset,1975 より引用)

### 3. 無限粘性境界の導入と検証解析

#### 3.1 はじめに

前章の文献調査結果に基づき、人工バリアの地震応答解析モデル／コードの改良を行った。前記のとおり、ニアフィールド周辺岩盤のモデル化に伴う境界処理機能として、地盤の半無限性を考慮する粘性境界の導入と関連する諸解析機能の導入を行った。本章では、解析コードの改良に伴う機能概要と、解析コードの検証解析について記載する。

#### 3.2 粘性境界要素の導入

前章の文献調査で得られた成果に基づき、3次元地震応答解析コードへの粘性境界要素の導入と、これを用いた諸解析機能の導入を行った。解析コードの改良に関する理論的事項および粘性境界の定式化については、付録Aに記載した。本作業により、以下の解析が可能となった。

- ① 散逸波の吸収を考慮した動的応答解析
- ② 上昇波入力による動的応答解析
- ③ 入射波の直進性を保証した動的応答解析

①の散逸波の吸収は、解析領域境界に粘性境界要素を設けることで考慮することができる。②の上昇波入力による解析は、これまで全節点に慣性荷重として与えていた地震力を、解析領域の底面のみに与えることで考慮することができる。これらを考慮することで、地盤の半無限性を表現しつつ、鉛直下面から伝搬してくる上昇波のみによる解析(入射波解析)を行うことができる。一方、③の入射波の直進性については、解析領域の側面に設けた粘性境界とともに、フリーフィールド単体モデルの事前解析結果を用い、側方境界に人為的な境界力を与えることで考慮することができる。

以下に、本改良で実施した具体的な作業内容について記載する。

##### 3.2.1 地震応答解析コードの改良

本解析コードの主プログラムの構成を図 3.2-1 に示す。このうち粘性境界の導入に伴い改良したサブルーチンは、時刻暦応答解析のメインルーチン「DYNMI4」、ならびに入力データの読み込みルーチン「CARDIN」である。具体的には、

- ① 入力カードの読み込み

- ② 粘性境界要素の要素ライブラリーへの登録
- ③ 入射波解析に伴う荷重ベクトルの作成
- ④ 粘性境界要素の運動方程式への組み込み

に係わる改良作業を行った。以下に各作業の概要について記載する。

#### ① 入力カードの読み込み

ここでは、粘性境界要素の導入に伴い必要となる各種入力情報の読み込み機能を追加した。該当するサブルーチンは「CARDIN」である。図 3.2-2 に、本サブルーチンのプログラム構成と改良箇所を示す。表 3.2-1 に、本作業により追加変更した入力カードの内容についてまとめる。入力データの作成方法に関する詳細については、プログラムユーザズマニュアル（付録 B）を参考にされたい。

#### ② 要素ライブラリの登録

ここでは、粘性境界要素マトリクスの作成ルーチンを登録した。該当するサブルーチンは「EMATGN」である。図 3.2-3 に本サブルーチンのプログラム構成と改良箇所を示す。

#### ③ 入射波解析に伴う荷重ベクトルの作成

ここでは、フリーフィールド単体モデルの動的応答解析結果から全体系モデルに作用させる境界力ベクトルの組立てルーチンを作成した。該当するサブルーチンは「DLOADN」である。図 3.2-4 に本サブルーチンのプログラム構成と改良箇所を示す。

#### ④ 粘性境界要素の運動方程式への組み込み

ここでは、粘性境界要素マトリクスの全体系への組み込み、ならびにフリーフィールド単体モデルの動的応答解析結果の I/O に関連する動的応答解析メインルーチンの改良を行った。該当するサブルーチンは「DYNMI4」である。図 3.2-5 に本サブルーチンのプログラム構成と改良箇所を示す。

### 3.2.2 粘性境界要素を用いた動的応答解析のやり方

#### (1) 入射波解析

図 3.2-6 に、本解析コードにおける粘性境界要素（2次元、3次元）の定義方法について示す。それぞれ、2次元4節点要素、3次元8節点要素の表面に貼り付ける形で定義する。従って、解析領域内部からの散逸波の吸収を考える場合は、その面を構成している全ての要素に対して粘性境界を定義しなければならない。モデル底面からの上昇波

のみによる解析を行う場合は、底面粘性境界を設けるとともに、入力カード「SEIS」による指定が必要である。

## (2) 入射波の直進性を保証した動的応答解析

本解析コードで入射波の直進性を保証した動的応答解析を行う場合、図 3.2-7 の手順に示す様にフリーフィールド単体モデルとの連成を考慮する必要がある。すなわち、第一にフリーフィールド単体モデルを用いた動的応答解析を行い、その結果(速度、応力)を用いて対象とする全体系の動的応答解析を実施する。したがって、最終的な解析結果を得る為には、計算を 2 回実行させる必要がある。なお、フリーフィールド単体モデルと解析領域の鉛直方向の要素分割は同一でなければならない(図 3.2-8)。

## 3.3 検証解析

### 3.3.1 検証方針の検討

本解析コードに新規に導入した 2 次元および 3 次元の無限粘性境界要素について、機能検証を行った。昨年度までは、文献調査等により過去の解析事例を収集し、これと同等の解析を行い文献記載値との一致を確認することで、コード機能の妥当性を示してきた。しかしながら、検証の対象となる機能が複雑多岐になるにつれ、比較しようとする解析で用いられた実験パラメータ、荷重条件および物性値などの諸条件が全て文献に明記されているとは限らない。そこで、本年度は、解析結果を定量的に解釈することのできる簡易モデルによる検証を行うとともに、類似機能を有する他のコードとのベンチマーク解析を行い、改良コードの妥当性を多角的に検討することとした。

以下に簡易モデルによる検証およびベンチマーク解析による検証の方針を述べ、ここで扱う具体的な解析ケースについて記載する。

### (1) 簡易モデルによる検証

#### (a) 粘性境界マトリクスの検証

本検証は、一次元波動伝搬を模擬するカラム形状のモデルを、2 次元平面ひずみ要素あるいは 3 次元ソリッド要素で構成したものをを用いるものである。2 次元粘性境界要素および 3 次元粘性境界要素は、それぞれの要素表面に貼り付ける形で定義される。両モデルとも、底面のみに粘性境界要素を付加したもので、自由表面からの加振に対するモデル底面からの波の散逸を表現するものである(図 3.3.2-1 参照)。解析結果の解釈を容易にするため、一次元の波動伝搬モードのみが現れるよう拘束条件を与えた。この拘束条件は入力波の振幅成分により異なり、本検証では P 波および S 波の 1 次元波動

伝搬を与える拘束条件を考慮する。せん断剛性および密度などの物性値は、対象とする弾性波の伝搬速度および入力振動数などとの関係を考慮し、100mのカラム長で2～3波長のモードを表現でき、かつ、計算時間内で波動伝搬の定常状態が観測できるよう設定する。

本年度、機能追加した粘性境界が正しく機能していれば、モデル底面に於ける波の散逸が確認でき、理論的に算定する波長および伝搬速度とも一致するはずである。本検証では、モデル底面を通常の固定境界とした場合との比較、ならびに理論値との比較を合わせ、解析コードに導入した粘性境界マトリクスの妥当性を確認することとする。

#### (b) 入射波解析機能の検証

本検証は(a)項で記載したモデルを用い、底部基盤からの入射波解析機能の検証を行うものである。従って、解析モデルへの入力条件が異なる以外は、前記(a)項と全て同等のものを用いる。

底部粘性境界を併用した入射波解析機能が正しく機能していれば、自由表面に於ける応答は入射波の2倍となるはずである。すなわち、(本コードでは)基盤入射波が加速度で定義されるため、この最大入力加速度の2倍が自由表面の最大応答値として得られることになる。さらに、この関係は、基盤面—自由表面間の距離(カラム長)に依存せず成り立たなければならない為、カラム長を変化させた場合も最大入力加速度の2倍が自由表面の最大応答値として得られるはずである。したがって、本検証ではカラム長をパラメータとした基盤入射波解析を行うことにより、入射波解析機能の妥当性を確認することとする。

#### (c) フリーフィールドの影響を考慮した解析機能の検証

本検証は、側方自由地盤(フリーフィールド)の振動に伴う、解析領域への影響が正しく取りこまれているか。すなわち、フリーフィールドとの連成を考慮した解析が正しく行われているかを確認するものである。これは、均質媒体を対象とした基盤入射の地震応答解析を行い、フリーフィールド単体モデルおよび解析領域の運動モード(振幅、位相等)を見ることで判断することができる。フリーフィールドとの連成を考慮した解析が正しく行われていれば、両者の運動モードは完全に一致することになる。仮に、これが正しく機能していなければ、水平加振の地震応答解析を行った場合に解析領域で鉛直方向の振幅成分が生じたり、同一レベルでの位相が異なったりしてくる。

#### (2) ベンチマーク解析による検証

本検証では、解析領域内部からの散逸波が、遠方半無限領域に散逸していく現象を正しく模擬しているか。すなわち、本作業で導入した粘性境界が、散逸波を反射すること

なく、精度良く吸収しているか否かをベンチマーク解析を通じ確認する。これは、解析領域内部の一節点に、インパルス的な外力を作用させ、解析領域内での自由応答(変位、速度、加速度)波形を見ることで判断することができる。粘性境界が正しく機能していれば、境界の反射波による自由応答の攪乱は生じない。

本ベンチマーク解析では図 3.2.2-2 に示した 3 次元簡易地盤モデルを用い、動燃事業団殿所有の有限要素法による総合地盤解析コード「SIGNAS」とのベンチマーク解析を行った。

### (3) 解析ケース

前項までに記載した内容に基づき、本検証で実施すべき解析ケース(全 14 ケース)を設定した。これは、プログラムの処理経路が異なるケースに着目し設定したものである。表 3.3.1-1 にこれを示す。解析ケース 1~12,14 は粘性境界要素を用いた簡易モデルによる検証であり、解析ケース 13 は 3 次元モデルを用いたベンチマーク解析による検証である。同表には、荷重条件、粘性境界要素の次数、波動伝搬成分および当該ケースで機能確認する項目を記載している。

## 3.3.2 解析条件

### (1) 解析モデル

上述の簡易モデルとして用いる 3 次元および 2 次元解析モデルを図 3.3.2-1 に示す。両モデルとも、重量密度  $9.8\text{kg/m}^3$ 、ポアソン比 0.4、せん断波速度(および縦波速度)  $40\text{m/sec}$  の地盤を想定し、内部減衰は境界面による散逸波の吸収を明らかにするため考慮しないこととする。

一方、ベンチマーク解析ならびに解析ケース 14 では図 3.3.2-2 に示す 3 次元モデルを用いた。粘性境界は自由表面を除く全ての側面およびモデル底面で定義している。重量密度、ポアソン比等の地盤物性は前モデルの場合と同様である。

### (2) 入力波

簡易モデルによる検証では、図 3.3.2-3 に示す正弦荷重を用いた。正弦波の周期については、P 波あるいは S 波がカラム長  $100\text{m}$  を 2~3 波通過することを目安に設定した。また、解析 ケース 13 では、境界面での散逸波の吸収能を単純に確認するため、図 3.3.2-4 に示すインパルス的な荷重を用いた。解析ケース 14 では、より実際的な入力波を用いた際の機能確認を行うため、同図(b)に示す Elcentro 観測波(Max :  $1010\text{gal}$ )

を用いた。

### 3.3.3 解析結果および考察

#### (1) 1次元波動伝搬モデルによる検証結果

##### (a) 粘性境界マトリクスの検証結果

図 3.3.3-1 に解析ケース 1 の結果を示す。これは振幅成分が鉛直方向となる P 波入力(図 3.3.2-3)を自由表面に与えた場合であり、カラムの各レベルに於ける鉛直方向の変位を基盤面からの距離に対してプロットしたものである。同様に、S 波入力(図 3.3.2-3)を与えた結果を図 3.3.3-2 に示す。伝搬する波動の波長を材料物性、入力条件より概算すると約 40m となり、本解析結果から得られる波長との一致が確認できる。なお、図中の実線、破線はそれぞれ時刻 2.6sec および 3.0sec に於ける波動伝搬モードである。これより P 波の伝搬速度を概算すると、102.5 [m/sec] となり、理論値 98[m/sec] と良い一致を示す。同様に、図 3.3.3-2 から S 波の伝搬速度を概算すると 41.8[m/sec] となり、理論値 40[m/sec] と良い一致を示す。また、図 3.3.3-1 および図 3.3.3-2 の基盤位置での応答に着目すると、入射した波が反射することなく粘性境界で吸収されていることが確認できる。固定境界であれば、基盤面を拘束したことによる影響が解析領域内部に現れるはずである。参考までに、解析ケース 2 で基盤面を固定境界とした場合と粘性境界とした場合の比較を図 3.3.3-3 示す。粘性境界では基盤面に入射する波の反射はなく、半無限領域への波の散逸が模擬されているのに対し、固定境界では反射波の影響が約 60m 付近まで生じていることが確認できる。

以上は、2次元粘性境界要素を用いた検証結果(解析ケース 1、2)についてであるが、3次元粘性境界要素を用いた検証(解析ケース 7、8)についても、上記と同等の結果を確認することができた。図 3.3.3-4 および図 3.3.3-5 にこれを示しておく。

##### (b) 入射波解析機能の検証結果

図 3.3.3-6 に解析ケース 3 および 4 の結果を示す。これは基盤面に P 波(図 3.3.2-3)を入射した場合の、自由表面に於ける鉛直方向の応答加速度を、時間軸に対してプロットしたものである。実線がカラム長 100m の結果を示し、破線が 50m の結果である。前記のとおり、自由表面での応答は、カラム長に依存せず入射波の 2 倍の振幅とならなければならない。ここで用いた入射波の最大加速度は 1000gal である為、図 3.3.3-6 より、ほぼ 2000gal の応答加速度が得られていることが確認できる。また、入射した波が自由表面に到達する時刻を概算すると、カラム長 100m の場合が約 1.0sec、50m の場合が約 0.5sec となり、理論値とほぼ完全に一致している。なお、基盤面に S 波を

入射した場合(解析ケース 5、6)の結果を図 3.3.3-7 に示す。これより、P 波入射の場合と同様のことが確認できる。

3次元粘性境界要素を用いた検証(解析ケース 9~12)についても、上記と同等の結果を得ることができた。図 3.3.3-8 および図 3.3.3-9 にこれを示しておく。

#### (c) フリーフィールドの影響を考慮した解析機能の検証

解析ケース 14 の結果を図 3.3.3-10~図 3.3.3-11 に示す。本ケースはフリーフィールドの影響を考慮した基盤入射波による解析である。図 3.3.3-10 は、解析領域の自由表面に於ける応答加速度であり、図 3.3.3-11 はフリーフィールドの同一レベルに於ける応答加速度である。両応答波形がほぼ完全に一致しているとともに、同位置に於ける鉛直方向の応答加速度もゼロとなっており(図 3.3.3-12)、フリーフィールドの影響を考慮した解析が正しく行われていることが確認できる。

#### (2) ベンチマーク解析による検証結果

解析ケース 13 の結果を図 3.3.3-13~図 3.3.3-15 に示す。荷重は図 3.3.2-4(a)に示したインパルスのな外力として自由表面上の点 A に作用しており、この点に於ける変位、速度、加速度の系時変化を周辺固定境界および周辺粘性境界の場合で比較した。入力波は 0.5sec をピークとし、1.0sec でゼロとなるインパルスのな荷重であるため、これ以降の波形の攪乱は境界に於ける散逸波の反射によるものと考えてよい。1.0sec 以降の波形を見ると、周辺固定条件に比較し粘性境界の場合は、反射波による波の攪乱が低減されることが確認できる。また、SIGNAS コードの解析結果とも良好な一致を示している。しかしながら、周辺粘性境界の変位波形を見ると、若干の残留変位を確認することができる。これは、周辺境界を全てダッシュポットで支持したことによる影響と考えられる。この影響を回避するためには、モデル化領域をある程度大きくとる等の対応策が報告されている(三浦、沖中 1989)。

表 3.2-1 入力カードの内容一覧

 : 変更箇所

カードグループ	入力カード	内 容
CONT	TITL	タイトルデータ
	RUN	ランタイプの指定 (インチャート or リスタート)
	PARM	Newmark の $\beta$ 法で用いるパラメータの指定
	PROB	解析タイプ(平面ひずみ、平面応力、3 D)
	PHAS	1 相系・2 相系の選択
	GRAV	重力加速度の入力
	FILE	リスタートファイルの作成指示
SCON	STTL	サブタイトル
	EXEC	解析種別(静解析,動解析,周波数応答解析)の選択
	SOLV	解法の選択
	OPTI	スカイライン全体行列形状の最適化
	MODL	非線形モデルの選択
	SEIS	入射波解析の指定
GEOM	FRFD	連成解析用中間ファイルの I/O の指定
	NODE	節点データの設定
	AUTO	節点データの補完生成
	MODF	節点データの変更
	CORD	節点座標系の指定
MATR	MTRL	要素材料データの設定
FEM	ELEM	要素構成データの設定
	AUTO	要素構成データの自動作成
	MODF	要素材料番号の変更
	MASS	質量行列の作成方法の指定
	FRFD	ブリーフィールドとの連成節点の指定
	FRFL	ブリーフィールドとの連成要素の指定
	NODB	節点単位の拘束条件の設定
	CODB	座標値による拘束条件の設定
	UNDR	節点単位の非排水境界条件の設定
	UND2	座標値による非排水境界条件の設定
MPCS	多点拘束条件の設定	
UNDP	要素単位の非排水条件の設定	
NODL	節点集中外力の設定	
PRES	要素面分布荷重の設定	
TFNC	時間関数の指定	
TABL	FTAB	テーブル入力の時間関数 (書式 1)
	FTA2	テーブル入力の時間関数 (書式 2)
	FTA3	テーブル入力の時間関数 (書式 3)
STEP	TIME	解析継続時間の指定
INIT	TPNT	計算時間点の配置を設定
	SETS	初期応力の定義方法の選択
	ELEM	初期値を与える要素番号の指定
	STRS	初期応力の設定
PHST	PORE	初期間隙水圧の設定
	DISP	節点データ(変位、速度、加速度)の時刻層出力
	STRS	要素応力の時刻層出力
	STRN	要素ひずみの時刻層出力
EHST	PORE	要素間隙水圧の時刻層出力
	MODU	せん断弾性係数の時刻層出力
	DISP	指定した時間点での節点データの分布の出力
GHST	STRS	指定した時間点での応力分布の出力
	STRN	指定した時間点でのひずみ分布の出力
	PORE	指定した時間点での間隙水圧分布の出力
PDIS	MODU	指定した時間点でのせん断剛性分布の出力
	END	入力カードの終わり

表 3.3.1-1 検証解析ケース

解析ケース	荷重条件	要素次数	波動伝播成分	機能確認項目	備考
1	自由表面での圧力荷重	2次元	P波	1相系2次元粘性境界要素マトリクス	
2			S波		
3	基盤入射波		P波	入射波解析機能	
4					
5					
6			S波		
7	自由表面での圧力荷重	3次元	P波	1相系3次元粘性境界要素マトリクス	
8			S波		
9	基盤入射波		P波	入射波解析機能	
10					
11					
12			S波		
13	節点荷重	3次元		1相系3次元粘性境界マトリクス	ベンチマーク解析用検証問題
14	基盤入射波		S波	入射波解析機能およびフイーカとの連成機能	

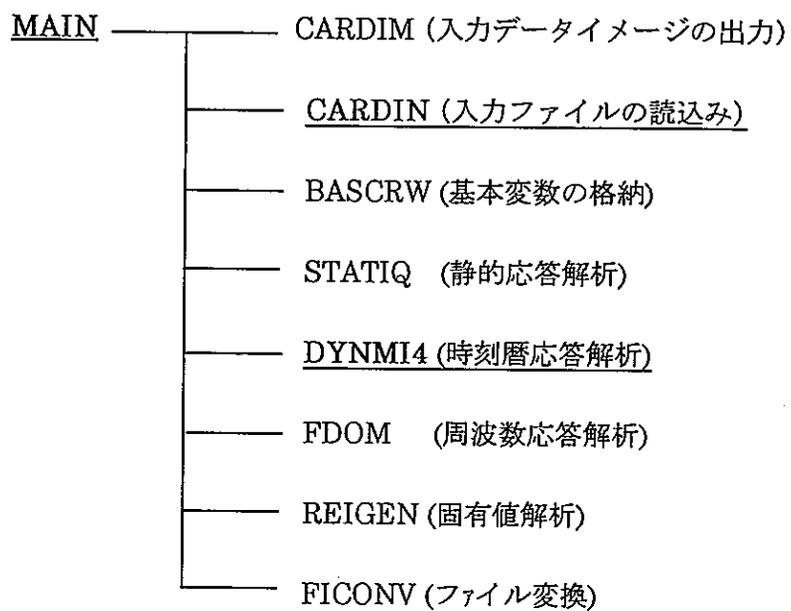


図 3.2-1 地震応答解析コード主プログラム構成と改良箇所

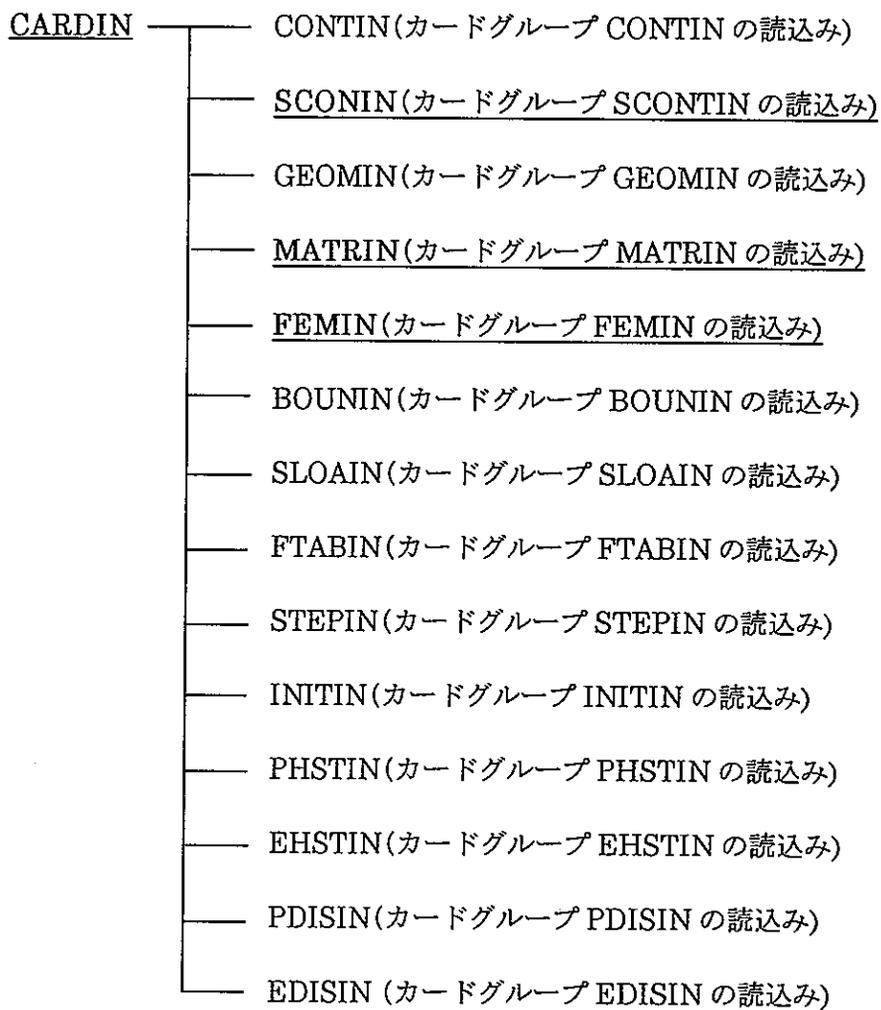


図 3.2-2 サブルーチン「CARDIN」のプログラム構成と改良箇所

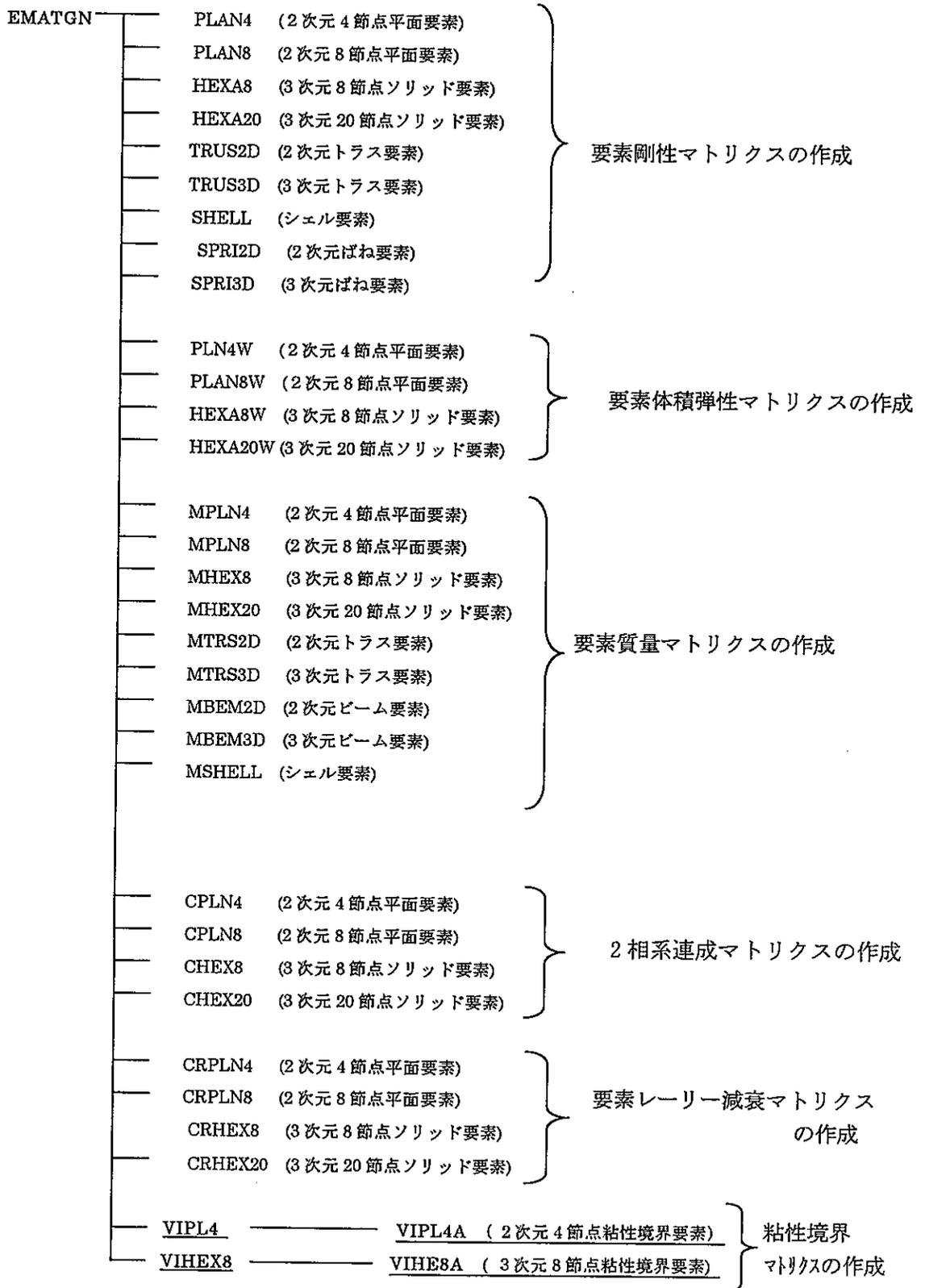


図 3.2-3 サブルーチン「EMATGN」のプログラム構成と改良箇所

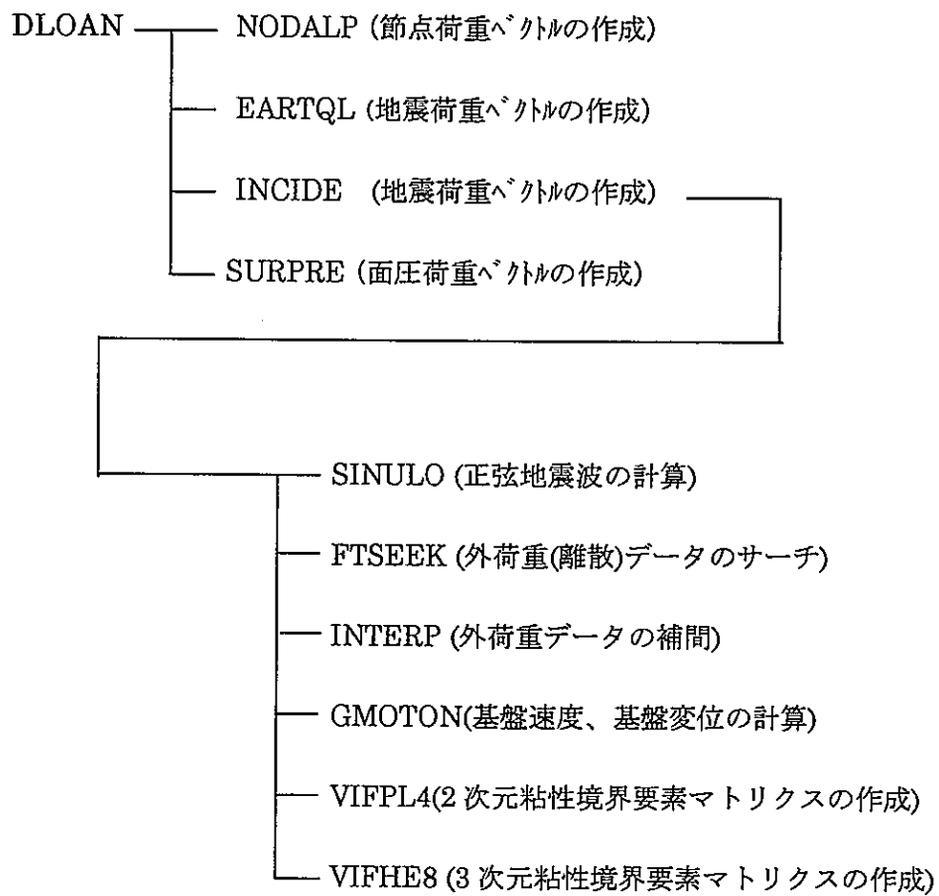


図 3.2-4 サブルーチン「DLOADN」のプログラム構成と改良箇所

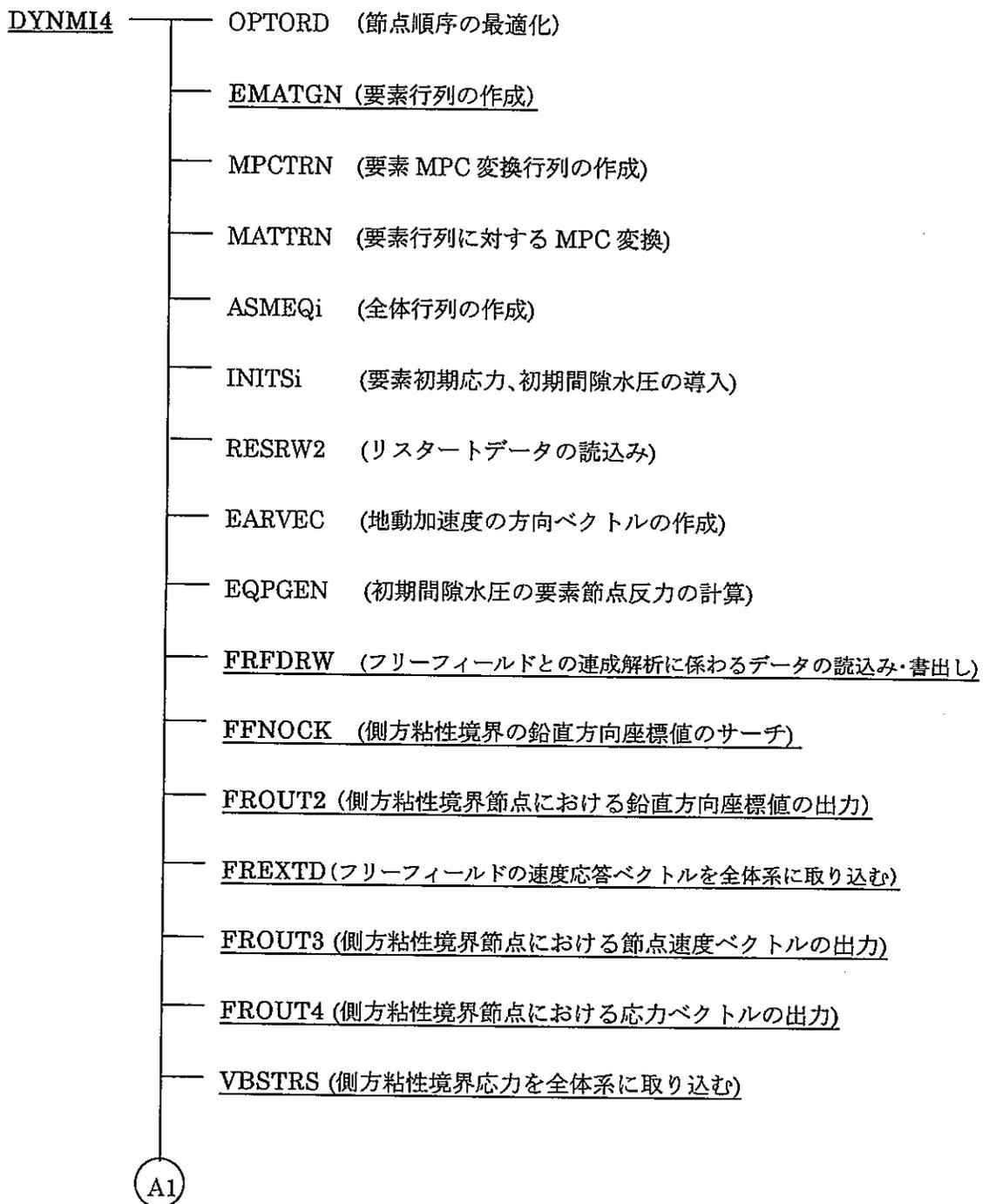


図 3.2-5(1/2) サブルーチン「DYNMI4」のプログラム構成と改良箇所

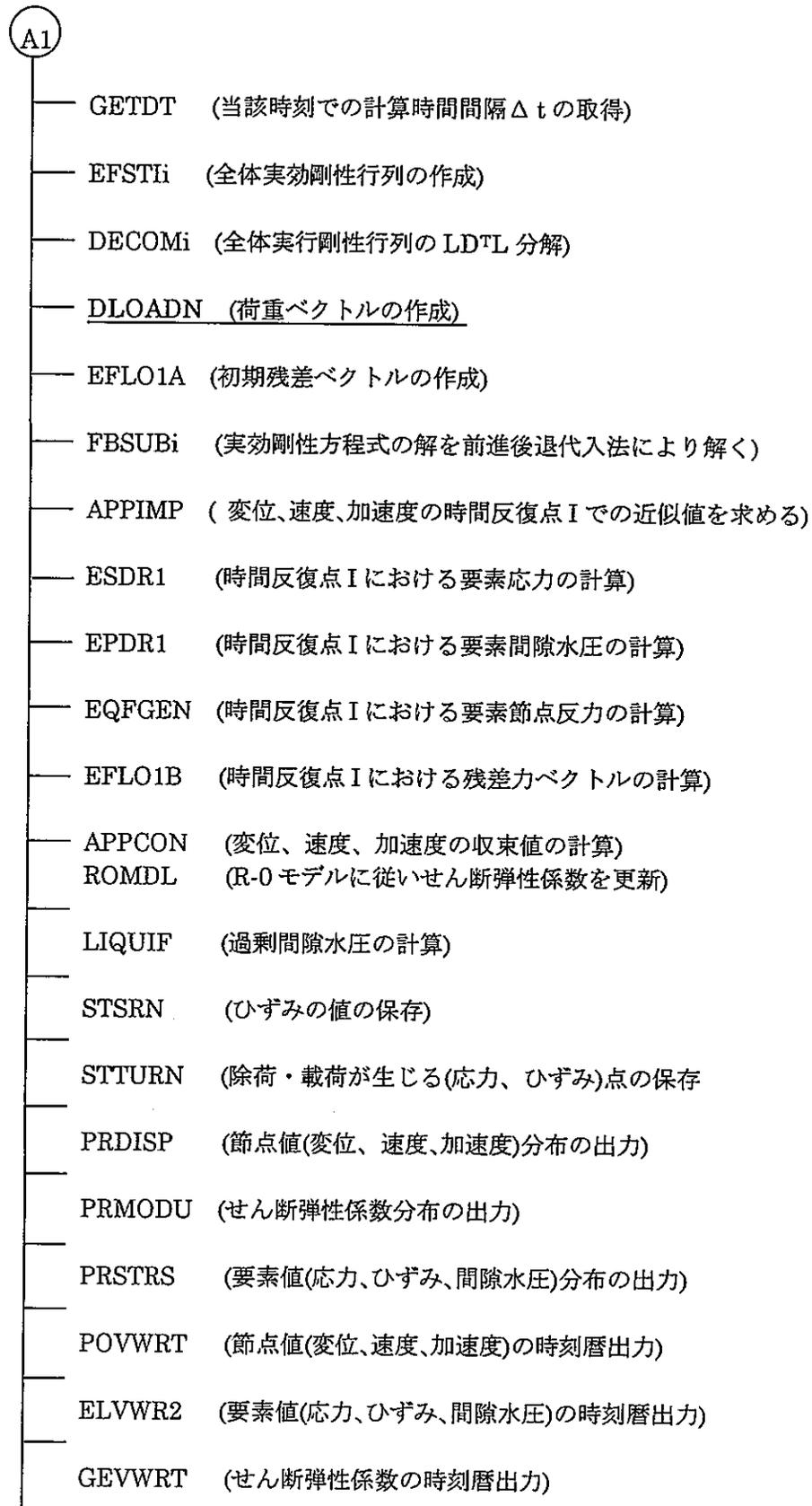
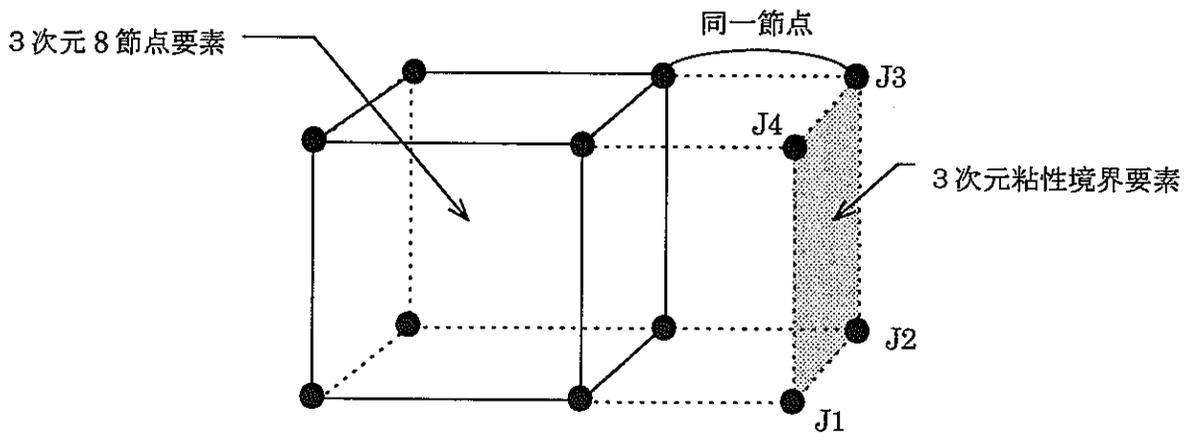
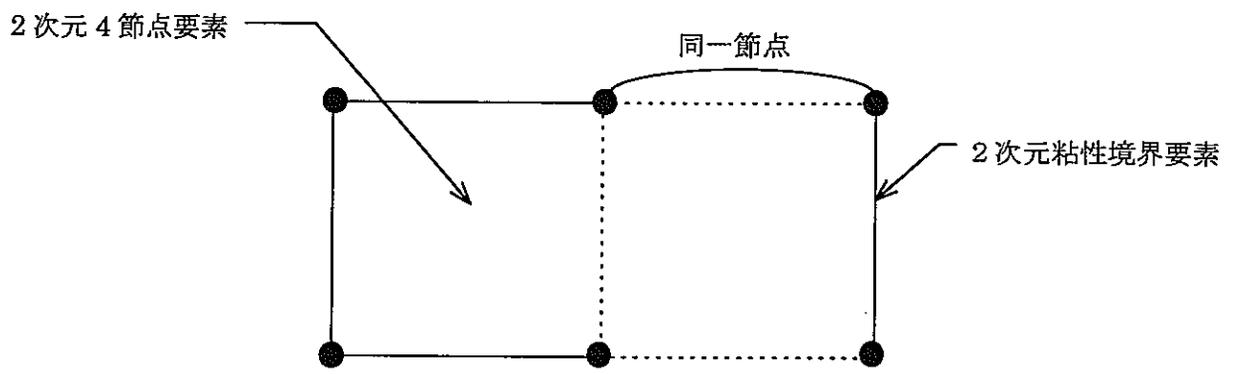


図 3.2-5(2/2) サブルーチン「DYNMI4」のプログラム構成と改良箇所



(a) 3次元粘性境界要素の場合(VIHE8)



(b) 2次元粘性境界要素の場合(VIPL4)

図 3.2-6 粘性境界要素の定義方法

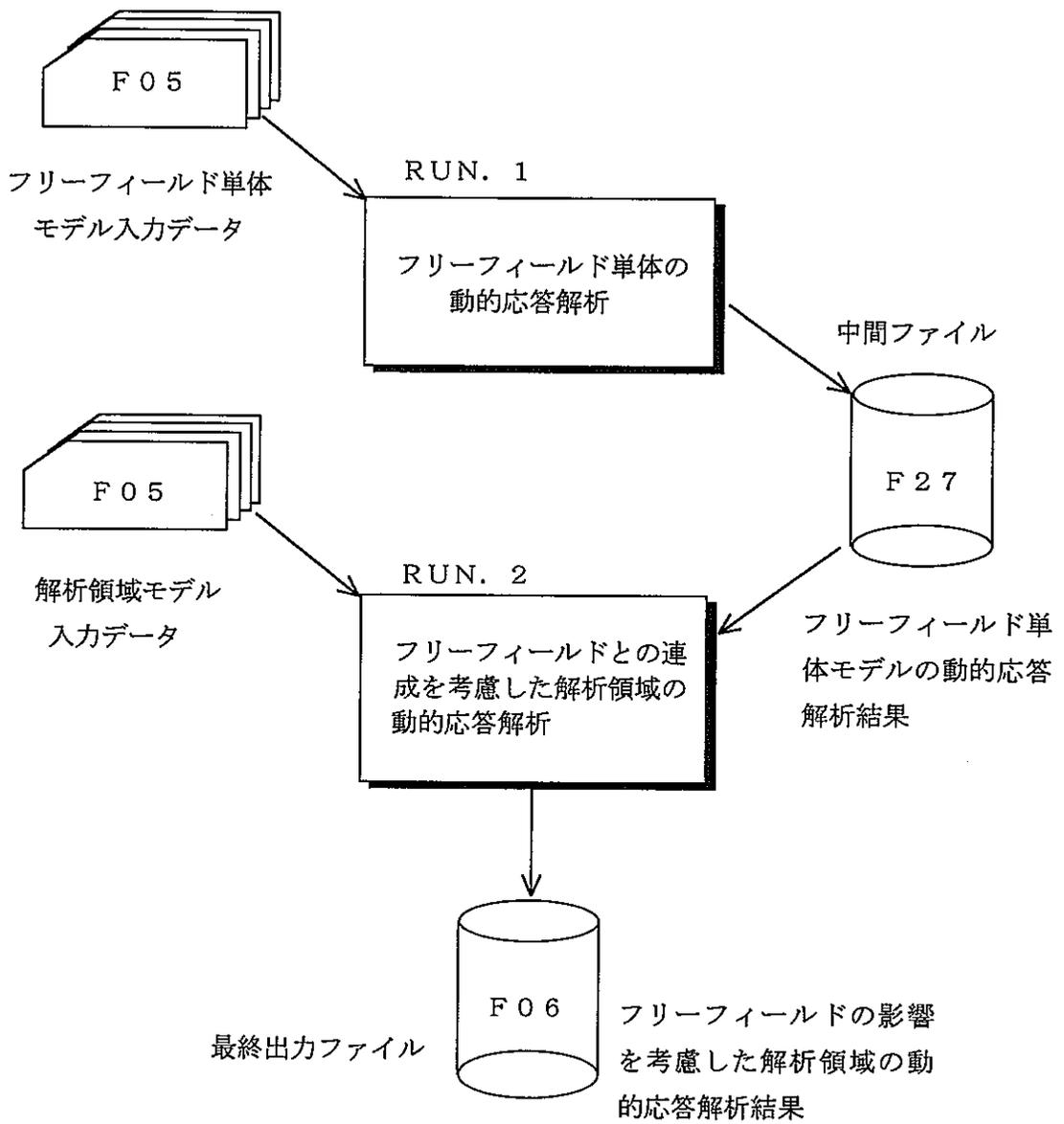
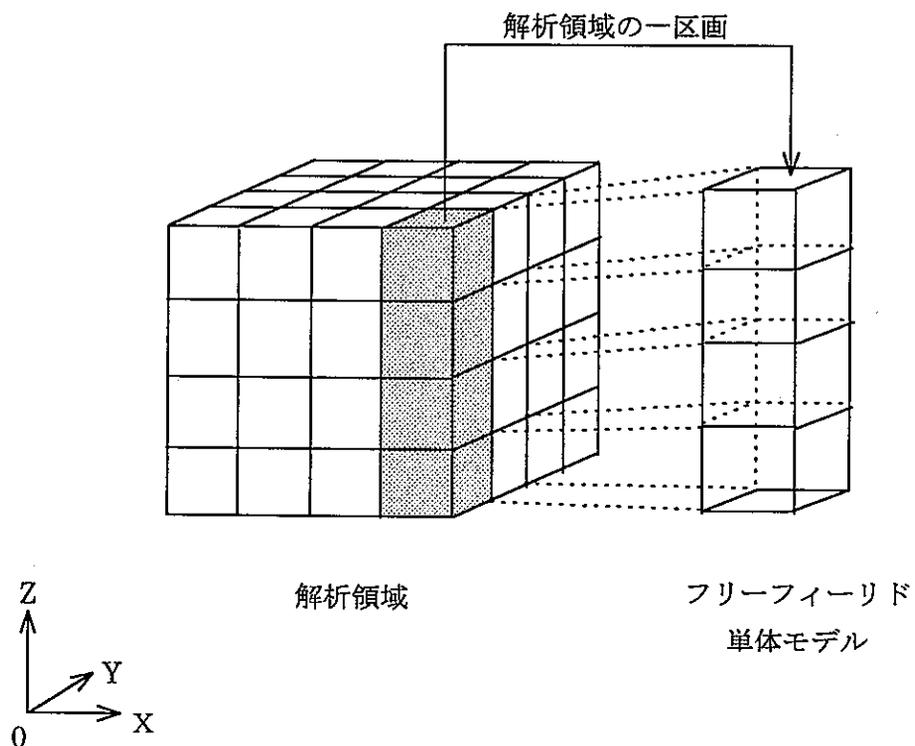
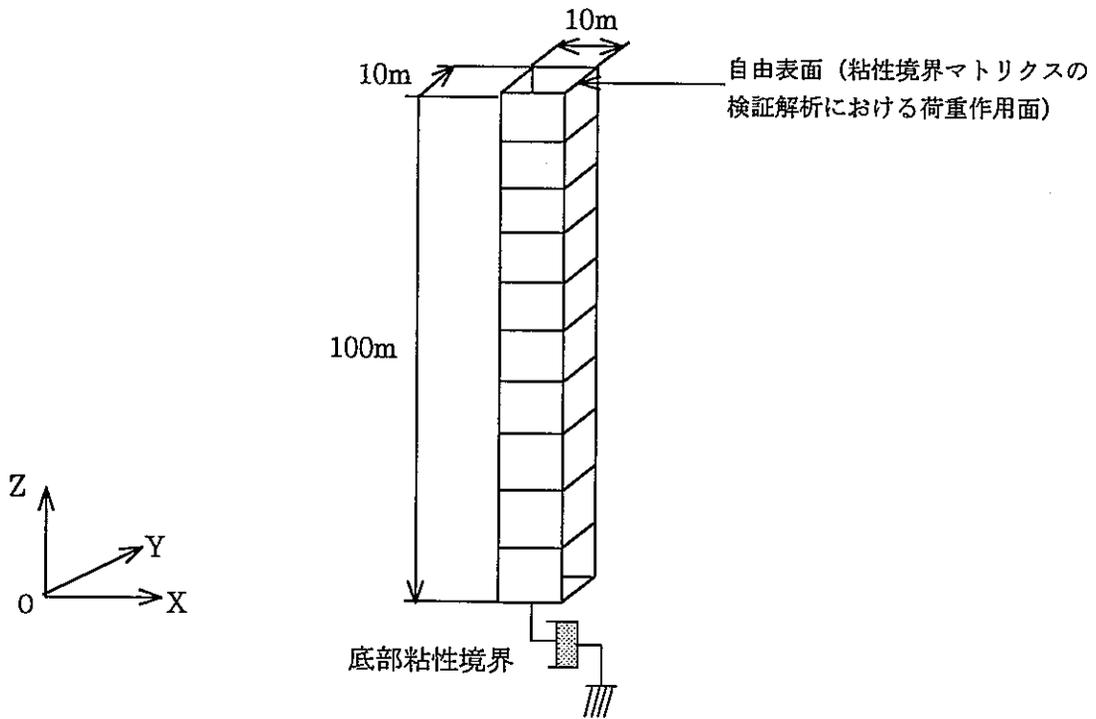


図 3.2-7 フリーフィールドとの連成を考慮した動的応答解析体系

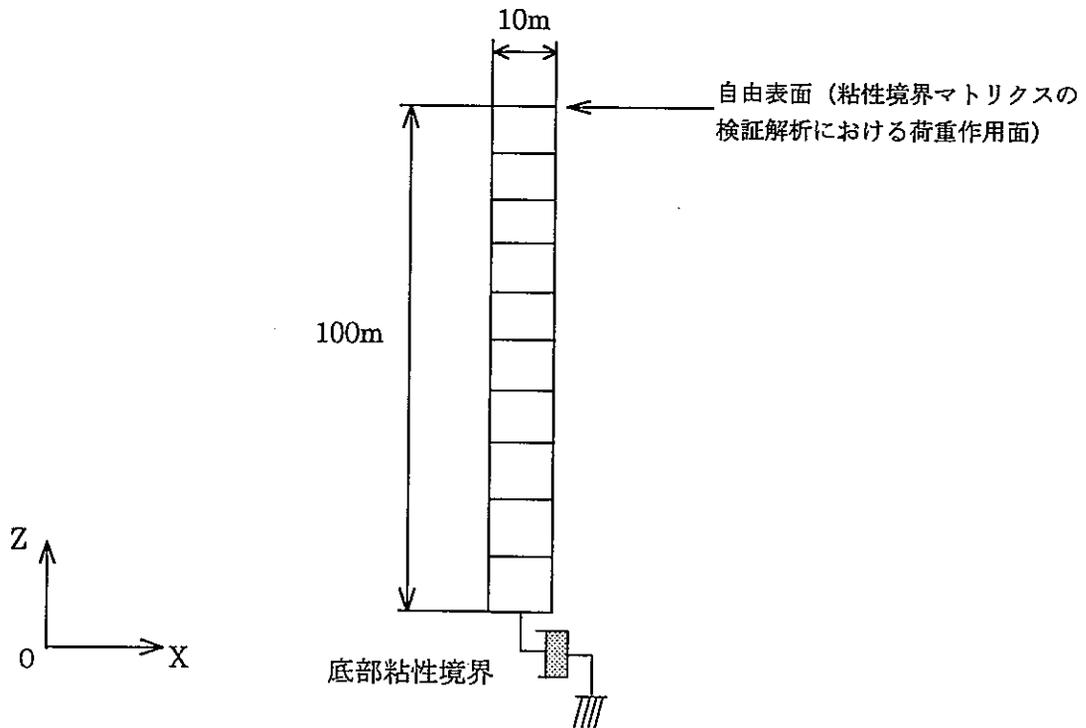


- フリーフィールド単体モデルは、解析領域全体のうち一区画のみを取り出したカラム形状のものでよい。
- 解析領域とフリーフィールド単体モデルは、要素分割方法が同一でなければ成らない。

図 3.2-8 解析領域とフリーフィールド単体モデルとの関係



(a) 3次元粘性境界要素の検証モデル



(b) 2次元粘性境界の検証モデル

図 3.3.2-1 1次元波動伝搬モデル(カラム形状モデル)

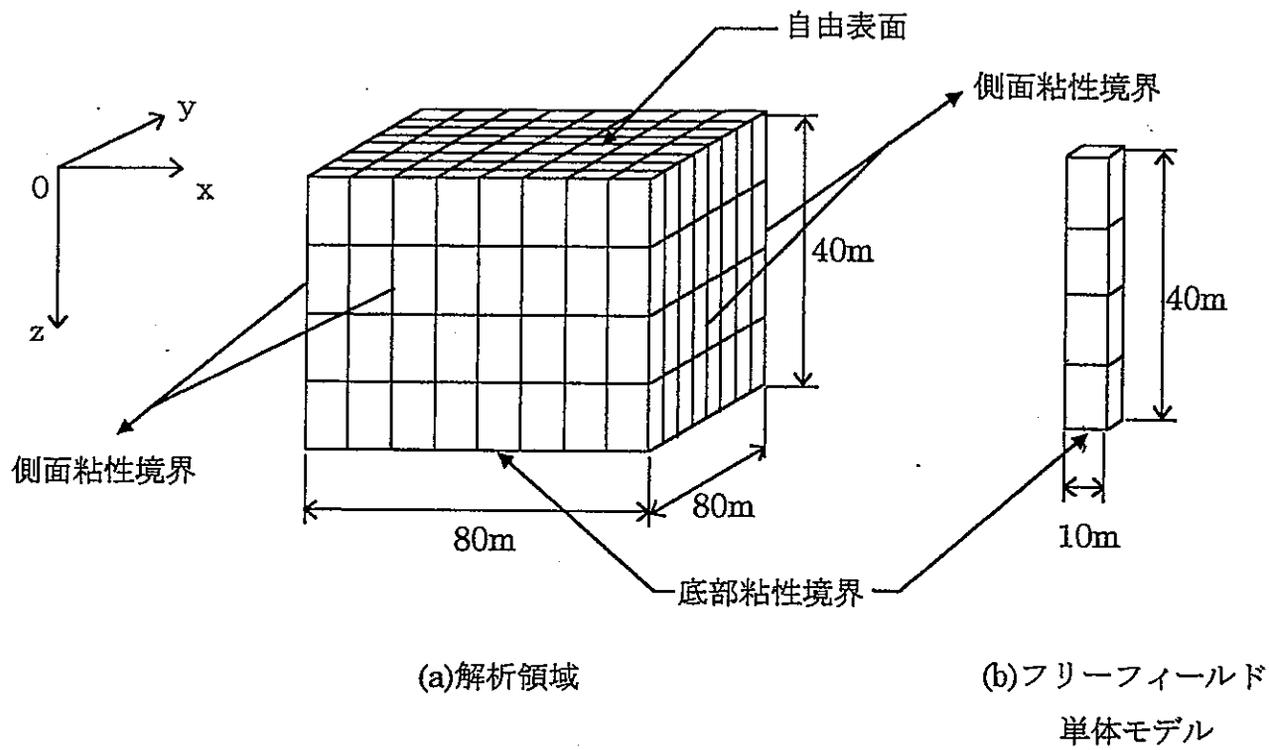


図 3.2.2-2 3次元検証解析モデル

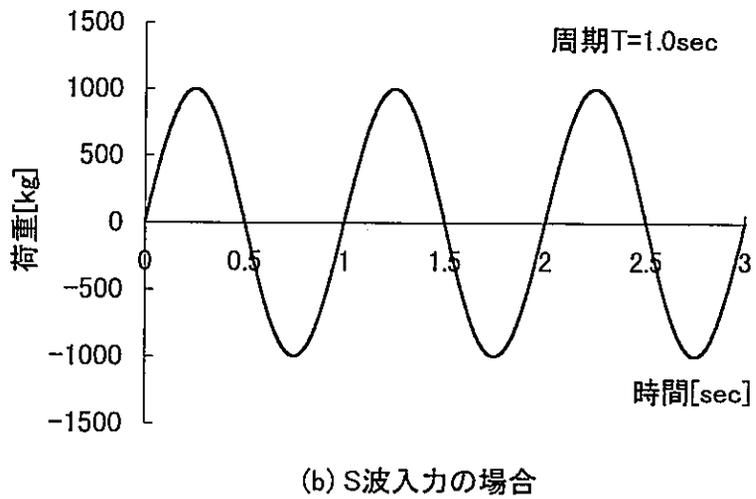
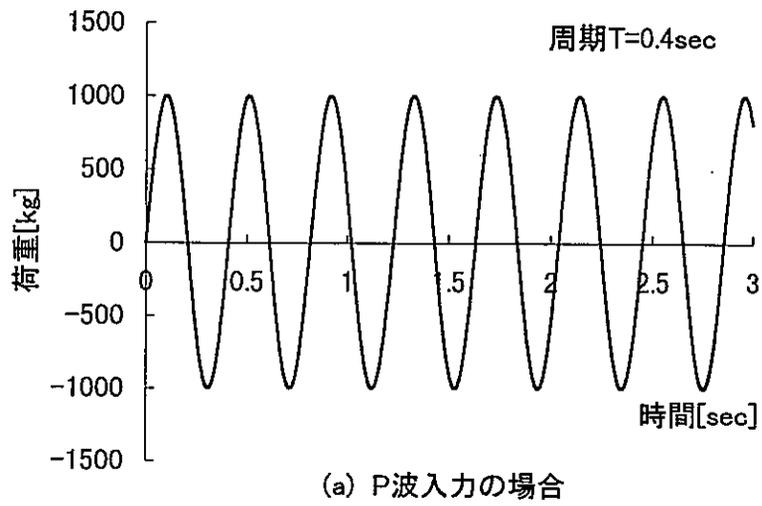
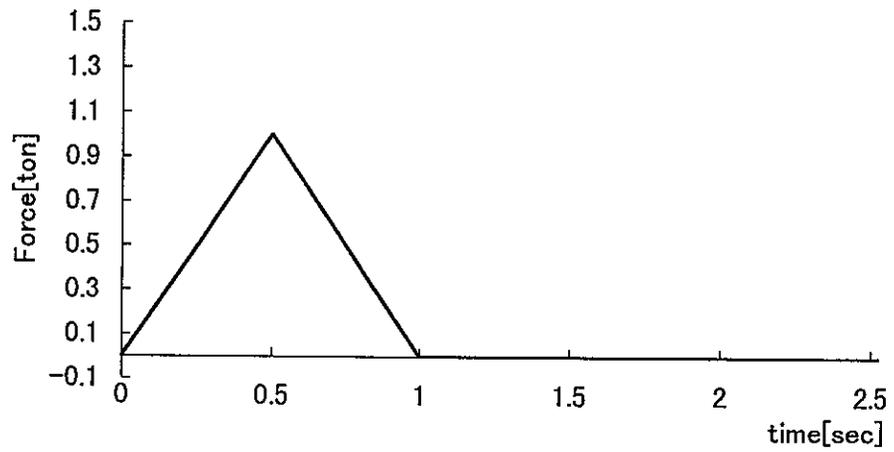
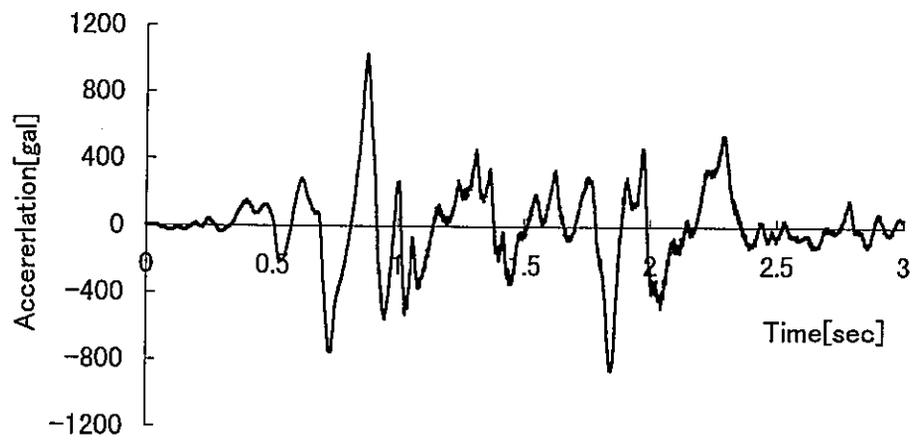


図 3.3.2-3 1次元波動伝搬モデルによる検証で用いた正弦入力荷重



(a) インパルス荷重



(b) 地震荷重(Elcentro:1010gal)

図 3.3.2-4 検証用入力波

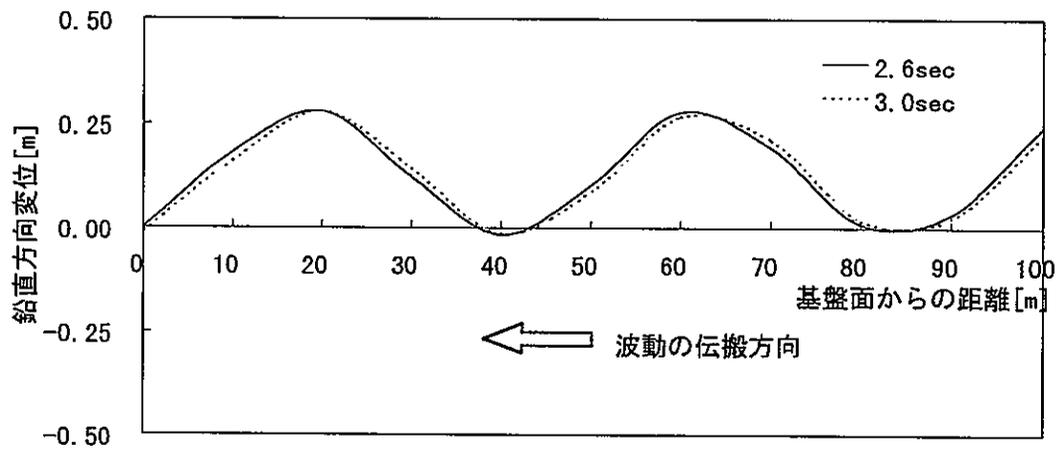


図 3.3.3-1 P 波入力に対する波動伝搬モード (解析ケース 1)

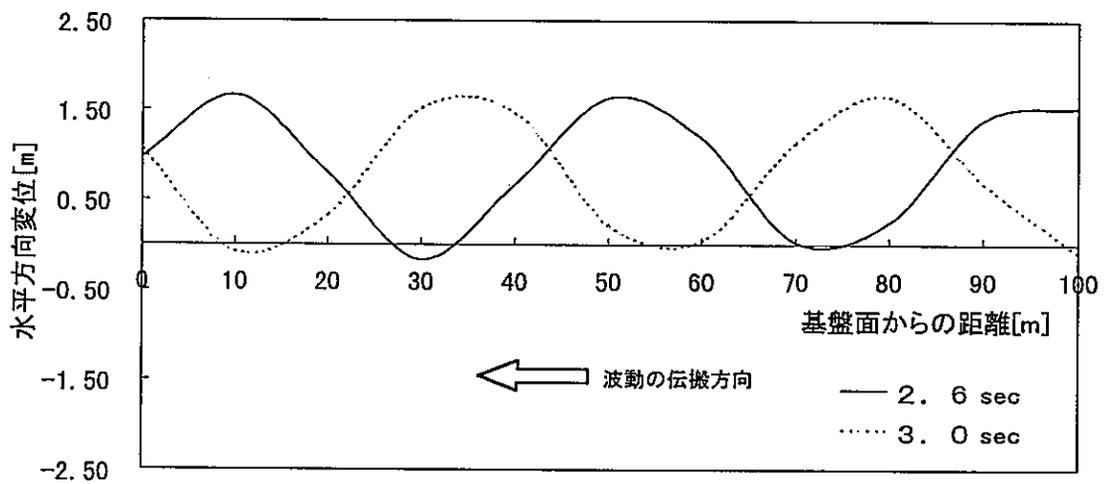


図 3.3.3-2 S 波入力に対する波動伝搬モード (解析ケース 2)

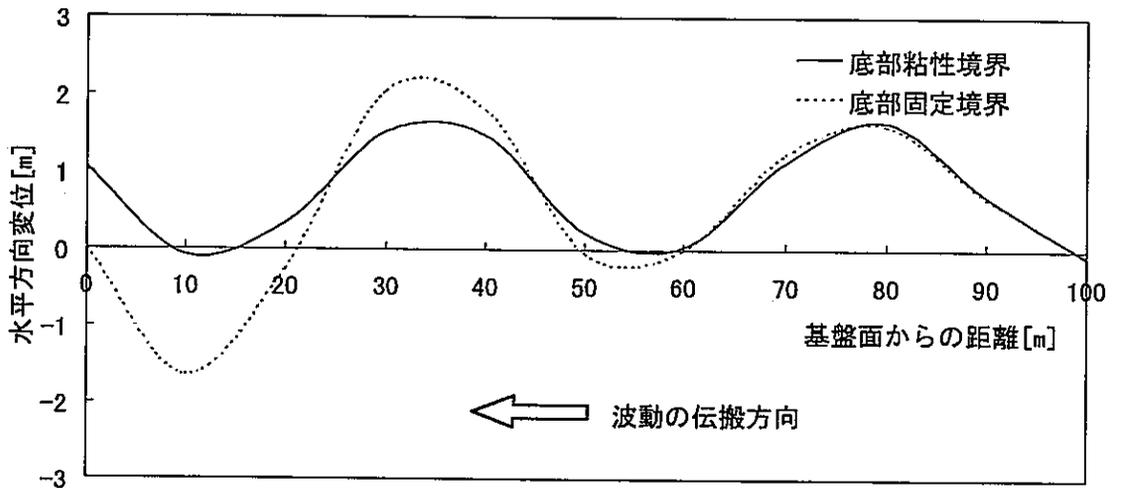


図 3.3.3-3 S 波入力に対する波動伝搬モード  
(底部固定境界と底部粘性境界の比較)

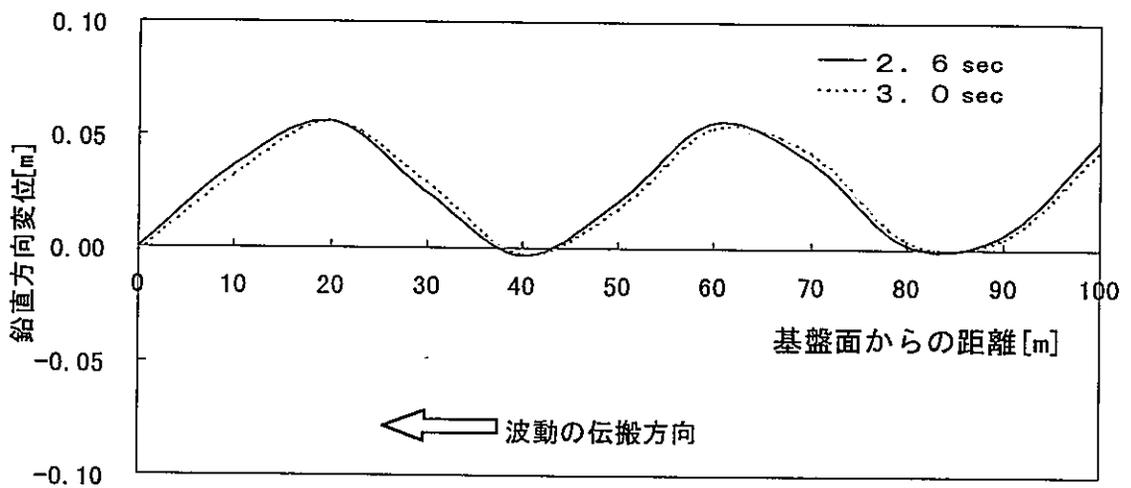


図 3.3.3-4 p 波入力に対する波動伝搬モード (解析ケース 7)

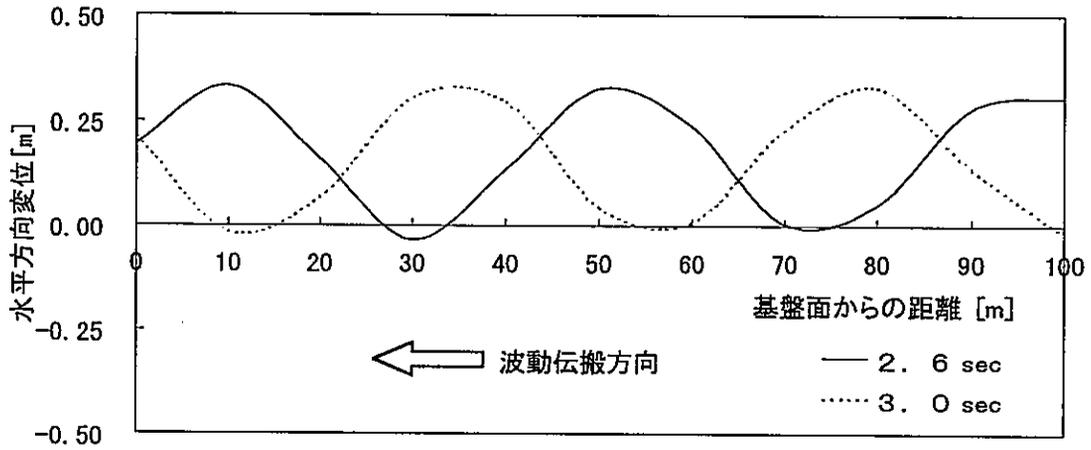


図 3.3.3-5 S波入力に対する波動伝搬モード(解析ケース 8)

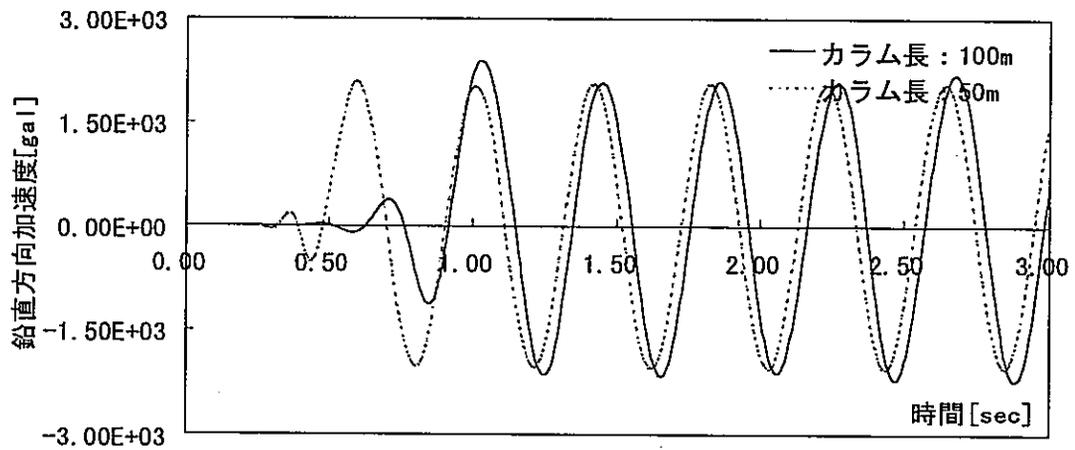


図 3.3.3-6 基盤入射に対する自由表面の加速度応答 P 波入力  
(解析ケース 3.4)

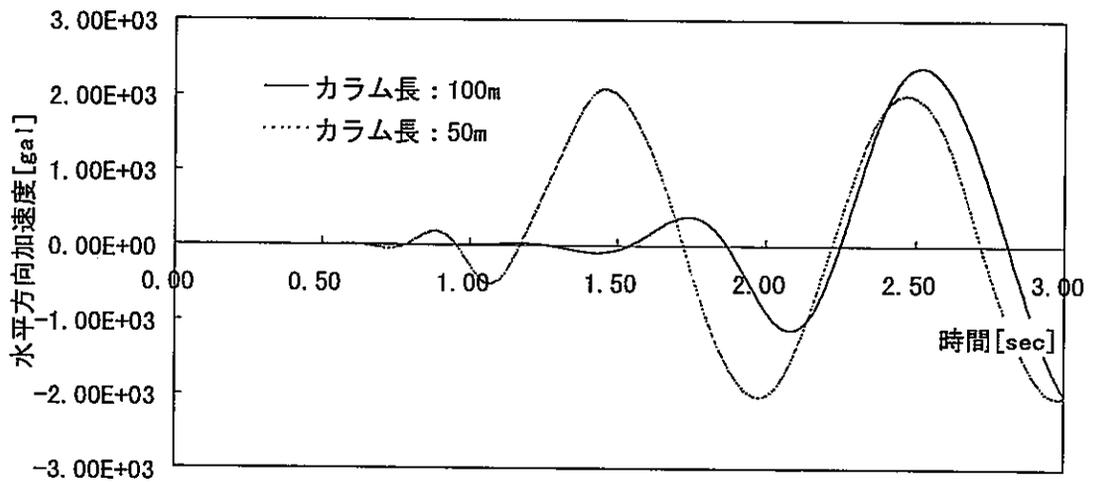


図 3.3.3-7 基盤入射に対する自由表面の応答 S 波入力  
(解析ケース 5, 6)

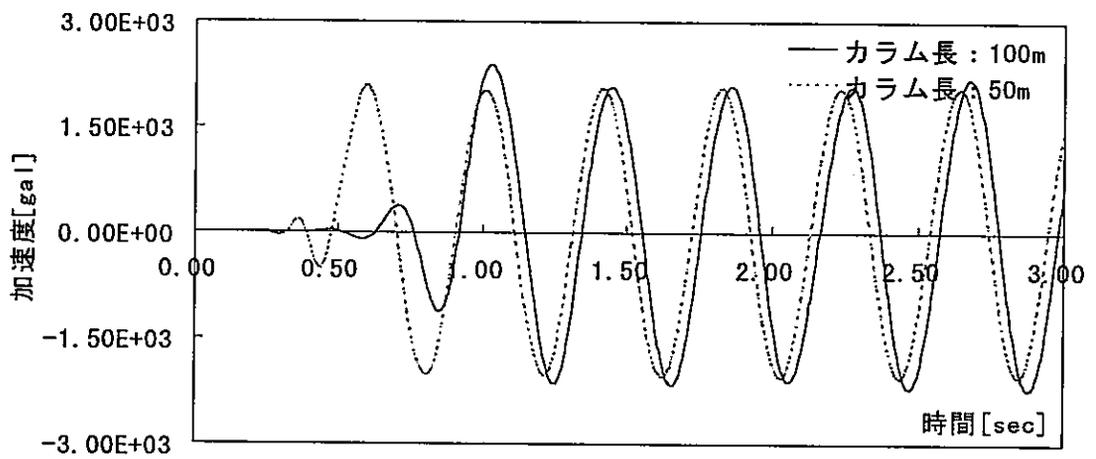


図 3.3.3-8 基盤入射に対する自由表面の加速度応答  
(解析ケース 9,10)

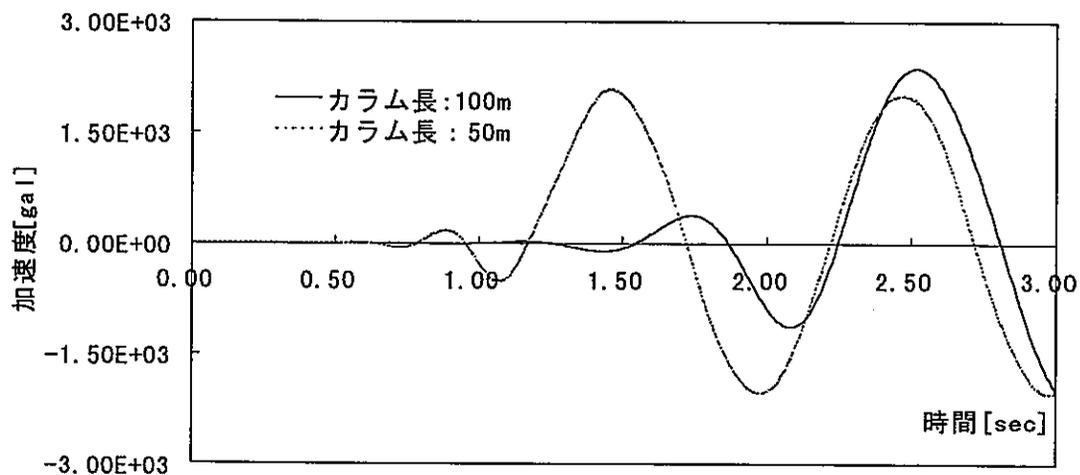


図 3.3.3-9 基盤入射に対する自由表面の加速度応答  
(解析ケース 11.12)

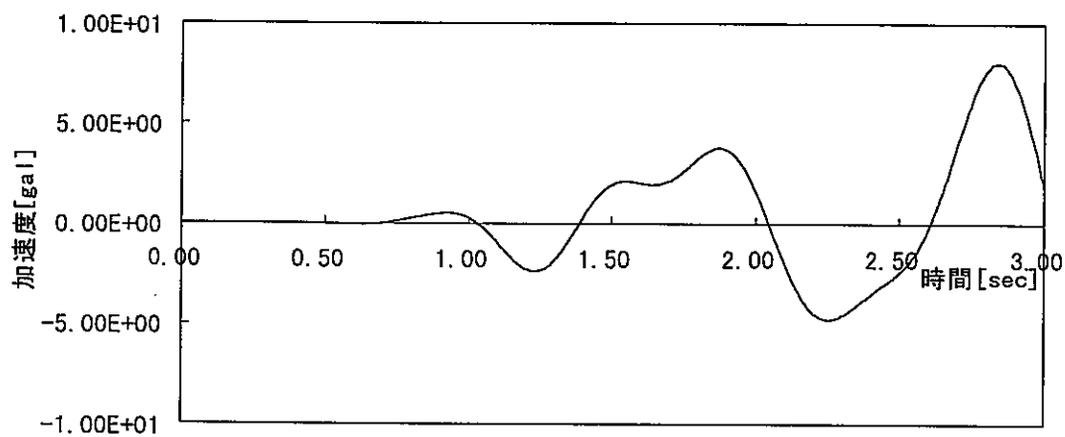


図 3.3.3-10 基盤入力に対する自由表面の加速度応答  
(解析ケース 14 解析領域: 水平成分)

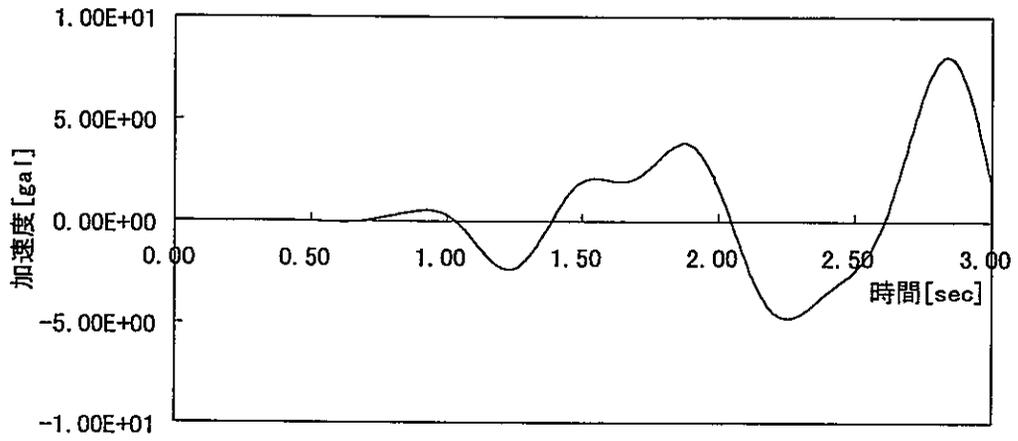


図 3.3.3-11 基盤入力に対する自由表面の加速度応答  
(解析ケース 14 フリーフィールド：水平成分)

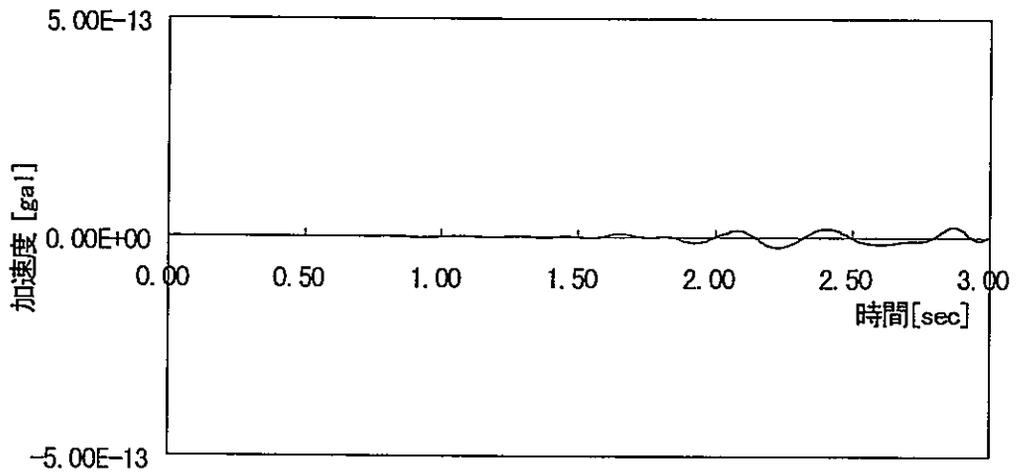


図 3.3.3-12 基盤入力に対する自由表面の加速度応答  
(解析ケース 14 解析領域：鉛直成分)

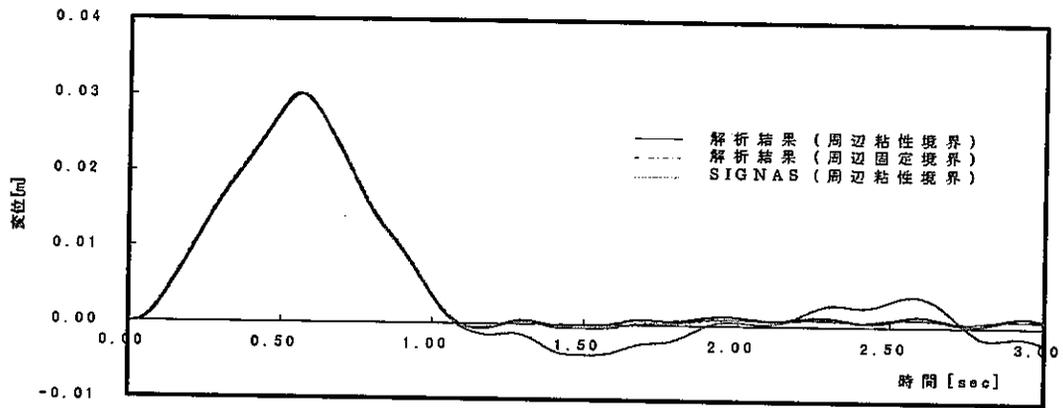


図 3.3.3-13 節点荷重に対する応答変位 (解析ケース 13)

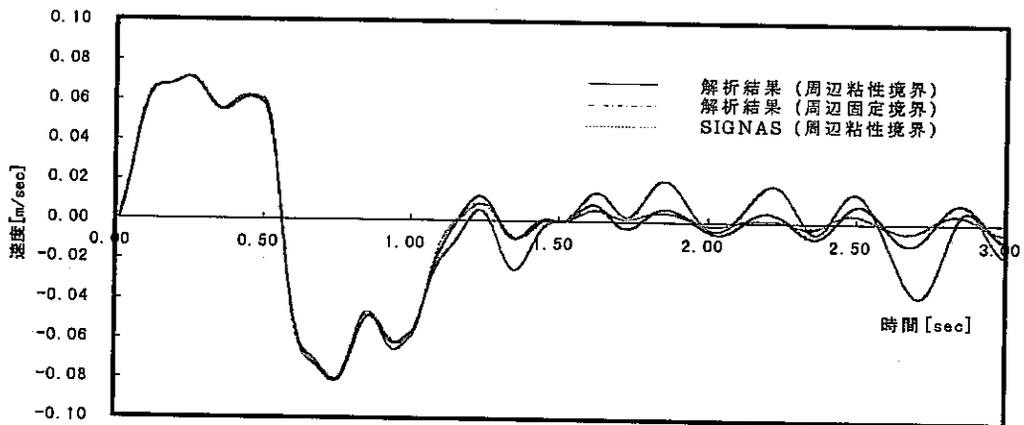


図 3.3.3-14 節点荷重に対する応答速度 (解析ケース 13)

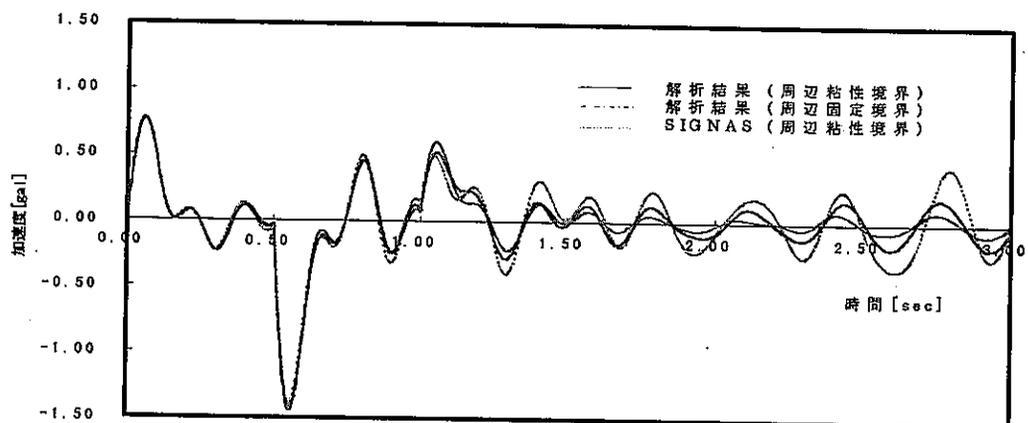


図 3.3.3-15 節点荷重に対する応答加速度 (解析ケース 13)

## 4. 振動実験に基づくモデル／コードの妥当性評価

### 4.1 はじめに

H7年度に引き続き、防災科学技術研究所殿（以下、防災研殿）に於いて大型振動試験装置による人工バリアの振動実験（1／5スケール供試体）が行われた。本研究では同振動実験に対する事前の情報提供を目的に予備解析を実施した。

また、昨年度に実施した実験解析の諸条件を再検討した結果、防災研殿で実施した振動実験結果と解析結果の間に差異があることがわかった。ここでは、その原因を考察し、実験結果を再現する方策について具体的に検討した。

### 4.2 予備解析

#### 4.2.1 1／5スケール人工バリアの実固有値解析

##### (1) 目的

本年度は、乾燥密度を実際の処分環境に近づけたベントナイトを用いて人工バリアの振動実験を行う。本試験装置では、固有周期が50Hzを超える可能性がある供試体に対して、スweep試験等からこれを計測することは困難とのことである。ここでは、解析により事前に固有周期を推定し、ベントナイトの乾燥密度をどの程度まで大きくすることができるかを把握することを目的とする。

##### (2) 前提条件

現解析コードの機能制約等より、人工バリア緩衝材部は1相系材料と仮定し、質量マトリクス[M]、剛性マトリクス[K]で表されたMK型の固有値方程式を解くものとする。

##### (3) 解析手法

系の質量マトリクス、剛性マトリクスの正則、対称性を考慮し、大次元の固有値問題を部分空間の固有値問題に帰着させるサブスペース法（部分空間反復法）を採用した。

##### (4) 解析モデルと諸条件

図4.2.1-1に、本解析で用いたFEMモデルを示す。また、要素分割方法は前年度モデルと同様であり、要素数、節点数はそれぞれ891、890である。境界条件としては、供試体の容器にあたるモデル側面および端面を拘束した。

ベントナイトの物性は動燃事業団殿所有の動的試験データより、拘束圧の異なる3種類のサンプル(DT-24~DT-26; 図4.2.1-2参照)から定めており、全9ケースの物性値を設定した。乾燥密度はいずれも $1.0\text{g/cm}^3$ のものである。せん断剛性および減衰定数は、図4.2.1-2より $10^{-3}\sim 10^{-5}$ の範囲のひずみレベルに対応する値を幾つか用い設定した。

#### (5) 解析結果と考察

表4.2.1-1に各解析ケースに対する解析結果を示す。ベントナイトの乾燥密度が $1.0\text{g/cm}^3$ の場合、いずれの解析ケースも固有周期が $50\text{Hz}$ を超過している。H7年度(乾燥密度 $0.7\text{g/cm}^3$ )の固有値解析結果が約 $36\text{Hz}$ であることを考慮すると、供試体の密度の増加に伴い固有周期が増大したものと解釈することができる。これより、本供試体の固有周期を、大型振動実験装置を用いたスイープ試験から測定することは困難であることがわかる。

### 4.2.2 1/5スケール人工バリアの動的応答解析

#### (1) 目的

上記の解析結果より、大型振動試験装置を用いた1/5スケール人工バリアの振動実験を行うには、ベントナイトの乾燥密度を $1.0\text{g/cm}^3$ より小さくしなければならないことが示唆された。ここでは、ベントナイトの乾燥密度を $0.7\text{g/cm}^3$ とした昨年度の解析結果と、仮にこれを $1.0\text{g/cm}^3$ とした場合の比較を行い、ベントナイトの乾燥密度の相違による応答解析結果に及ぼす影響について把握することを目的とする。

#### (2) 前提条件

本検討の主目的は、ベントナイトの乾燥密度の相違による動的応答解析結果への影響を把握することであり、解析結果の解釈を容易にする観点から、モデルを無意味に複雑にしないことが望ましい。したがって、ベントナイトは1相系材としてモデル化するとともに、構成則は線形として取り扱う。

#### (3) 解析手法

本解析コードでは、有限要素法により離散化された運動方程式をNewmarkの $\beta$ 法による直接積分法により解いている。本手法は、数値安定性に優れているが、解の精度を支配するパラメータ $\beta$ 、 $\gamma$ を解析者の主観に依り設定しなければならない部分がある。本解析では、これまでに本研究で実施した解析実績を参考にし、同パラメータ $\beta$ 、 $\gamma$ を各々 $0.5$ 、 $0.25$ と定めた。

#### (4) 解析モデルと諸条件

図 4.2.2-1 に本解析で用いた FEM モデルを示す。本モデルは、幾何形状ならびに荷重条件の対称性を考慮し、固有値解析で用いた全周モデルを 1/8 に縮約したものである。また、表 4.2.2-1 に、本応答解析で用いた物性値を示す。せん断剛性、減衰定数については、動燃事業団殿所有の動的試験データ DT-22 (図 4.2.1-2(a)) および DT-25 (図 4.2.1-2(c)) より設定したものである。ただし、ベントナイトの減衰定数は、表 4.2.2-2 に示す固有値解析結果に基づき、次式のレーリー減衰係数に換算したものを採用した。

$$h_i = \alpha \frac{1}{2\omega_i} + \beta \frac{\omega_i}{2} \quad (4.2.2-1)$$

ここに、

- $h_i$  : 減衰定数 [-]
- $\omega_i$  : 固有円振動数 [rad/sec]
- $i$  : モード次数
- $\alpha, \beta$  : レーリー減衰係数 [-]

図 4.2.2-2 に、本解析で用いた入力波 (El-Centro, NS) を示す。応答解析では最大値近傍の 2 秒間 (データ数  $N=2000$ ) を用いた。なお、解析に用いた時間ステップ  $\Delta t$  は、入力ステップと同様に 0.001[sec]とした。

#### (5) 解析結果と考察

図 4.2.2-3、図 4.2.2-4 に加速度および変位の応答解析結果を示す。評価点は、オーバーパック上の点 (節点 3)、オーバーパックと容器の径方向の中間点 (節点 5)、オーバーパックと容器の長手方向の中間点 (節点 57) の計 3 点である。各節点に関して、ベントナイトの乾燥密度が  $1.0\text{g/cm}^3$  の場合と  $0.7\text{g/cm}^3$  の場合で結果を示した。これより、双方の応答性状は大きく異なっており、ベントナイトの乾燥密度の相違に伴う応答解析結果への影響は大きいと考えることができる。しかしながら、両ケースではベントナイトの乾燥密度の相違に伴い、せん断弾性係数も大きく異なっている (表 4.2.2-1 参照)。解析結果の相違は、むしろこれらの因子に起因しているものと考えられる。

### 4.3 H7 実験データ解析結果の考察

図 4.3-1 に H7 年度に得られた実験データ解析結果の一例を示す。これは、エルセン

トロ波を用いた際の動的応答解析結果（節点番号3）を、(a)絶対加速度、(b)相対加速度ならびに(c)相対加速度のフーリエスペクトルで整理したものであり、ベントナイトの減衰を2.5%、20%とした場合を併記したものである。これより、ベントナイトの動的試験で得られた減衰2.5%を利用した場合は、実験結果と解析結果が大きく異なっていることが確認できる。(c)図のフーリエスペクトルからは、30数Hz近辺でのフーリエ振幅が、実験結果に比較して突出していることが確認できる。卓越周波数は比較的一致しているにもかかわらず、フーリエ振幅のみが大きく異なるということは、解析で用いた減衰定数の相違を意味している。実際、振動実験で用いた供試体の観察記録を通じ、ベントナイトの浸潤状態にはムラがあり、不均一であることを確認している。すなわち、飽和度の相違によりベントナイトの減衰定数が異なっていることが考えられる。そこで、この減衰定数をパラメータに数ケースの感度解析を行い、その影響を分析した。その結果、ベントナイトの減衰を20%程度とすれば過大な振幅を抑制することができ、実験結果と比較的一致することがわかった。しかしながら、ベントナイトの減衰を独立に変更することに物理的な意味はなく、本来であれば、減衰と連動するパラメータ（例えば、せん断剛性）も変更しなければならない。したがって、振動実験が行われた系で、何らかの減衰効果が作用している可能性が予測できる。

表 4.2.1-1 固有値解析で用いた諸条件と解析結果

No	供試体	せん断ひずみ [-]	せん断剛性 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	固有周波数 [Hz]	固有周期 [sec]
1	DT-24	1.42E-03	33	92.4	56.711	1.76E-02
2		1.71E-04	42	117.6	63.979	1.56E-02
3		1.34E-05	47	131.6	67.680	1.48E-02
4	DT-25	1.73E-03	27	75.6	51.297	1.95E-02
5		1.95E-04	36	100.8	59.233	1.69E-02
6		1.64E-05	45	126.0	66.224	1.51E-02
7	DT-26	1.32E-03	30	84.0	54.072	1.85E-02
8		1.74E-04	38	106.4	60.856	1.64E-02
9		4.94E-05	43	120.4	64.736	1.54E-02

表 4.2.2-1 解析条件

	ベントナイト		ホパ-ハツカ	備考
せん断弾性係数 G [kgf/cm <sup>2</sup> ]	13	35	2.1×10 <sup>6</sup>	PNC 試験データ DT-22,DT-25 よりせん断ひずみ 3.33×10 <sup>-4</sup> および 3.60×10 <sup>-4</sup> での値を参照
ポアソン比 $\nu$ [/]	0.4	0.4	0.3	
減衰比 h [] (レーリー減衰係数 $\alpha$ 、 $\beta$ )	0.032 (13.52、0)	0.036 (24.13、0)	—	PNC 試験データ DT-22,DT-25 よりせん断ひずみ 3.33×10 <sup>-4</sup> および 3.60×10 <sup>-4</sup> での値を参照
乾燥密度 $\rho_d$ [gf/cm <sup>3</sup> ]	0.7	1.0	7.77	PNC 試験データ DT-22,DT-25 参照
湿潤密度 $\rho_t$ [gf/cm <sup>3</sup> ]	1.4266	1.681	—	$\rho_t = \rho_d [1 + (\omega/100)]$ より算出 $\omega$ : 含水比(103.8%,68.1%)

表 4.2.2-2 実固有値解析結果

No	供試体	せん断ひずみ [-]	せん断剛性 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	固有周波数 [Hz]	固有周期 [sec]
1	DT-22	3.33E-04	13	36.4	33.62	2.97E-2
2	DT-25	3.60E-04	35	98.0	53.34	1.87E-2

- ・解析モデルは前年度と同様 1 / 5 スケール全周モデルを使用。
- ・本固有値解析の結果および次式により、動的応答解析に要するレーリー減衰係数  $\alpha$ 、 $\beta$  を算定した。

$$h_i = \alpha / 2 \omega_i + \beta \omega_i / 2$$

下添の i はモード次数を示し、 $h_i$  および  $\omega_i$  は i 次モードの減衰比、固有円振動数である。

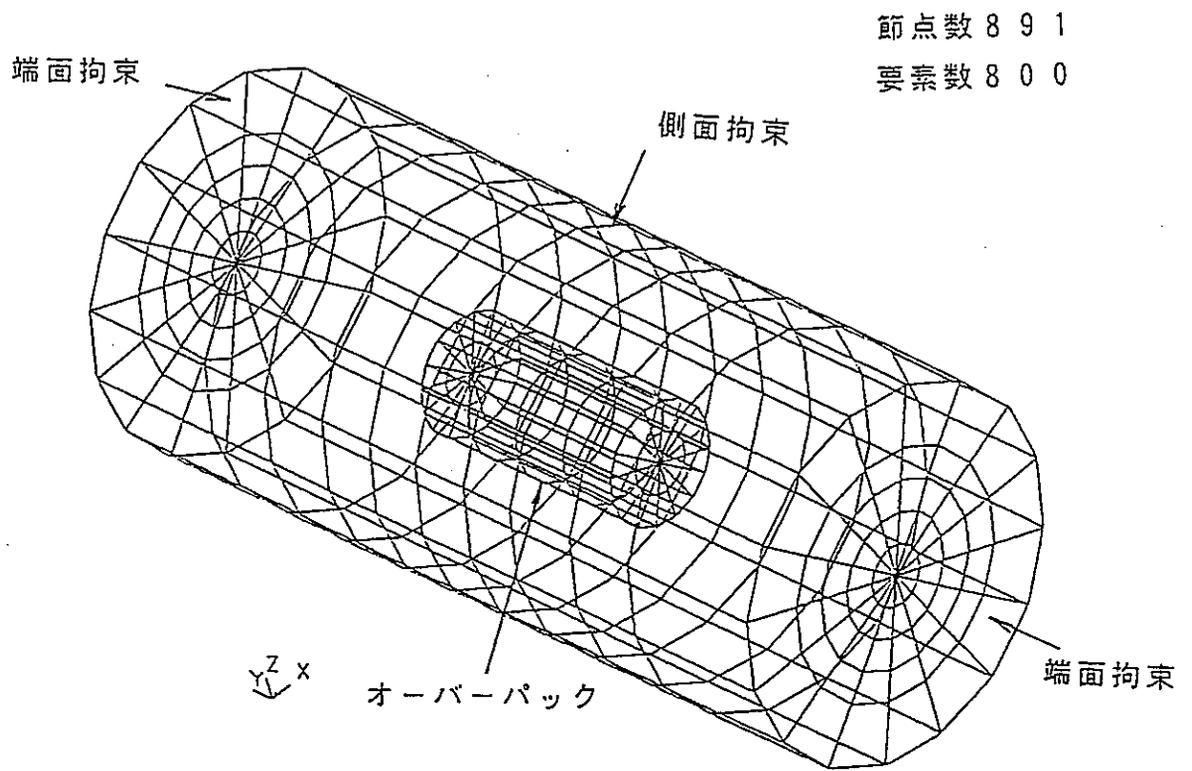
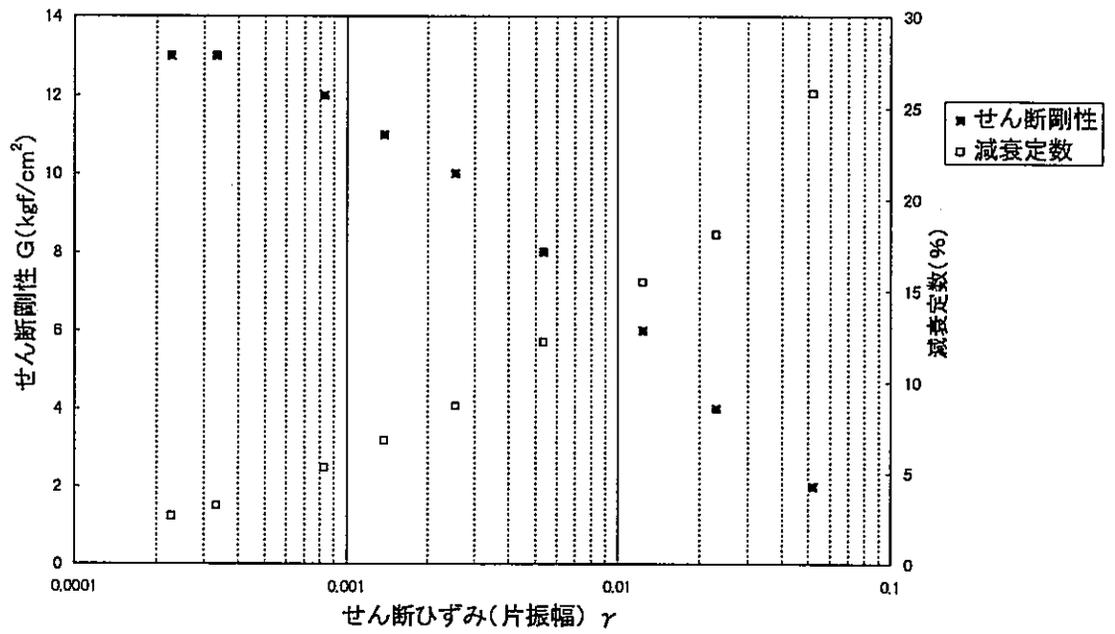
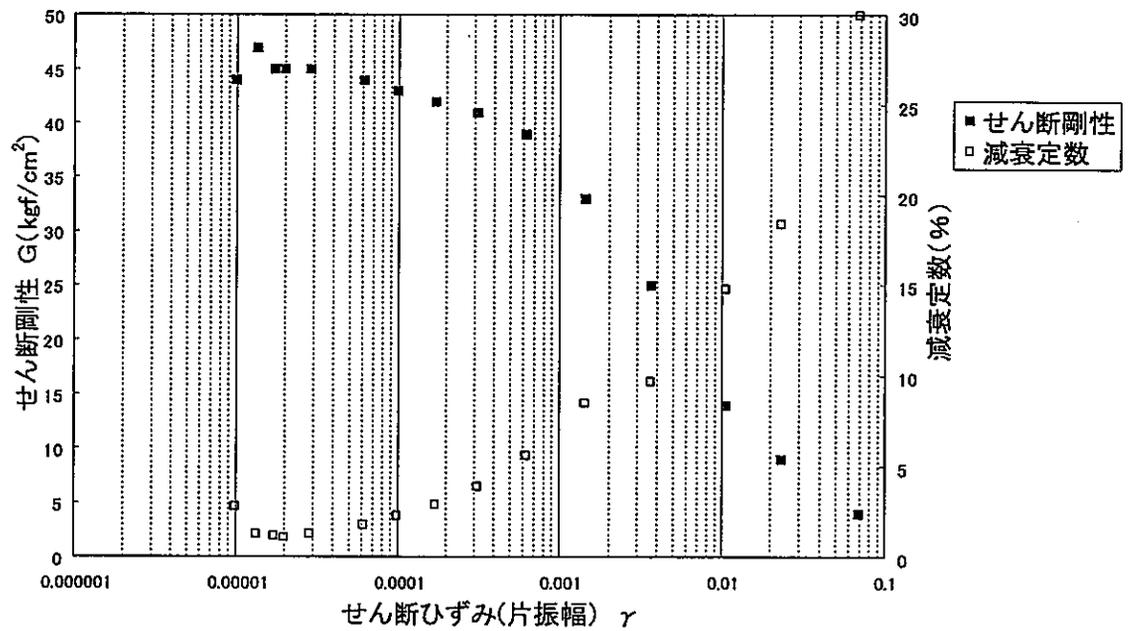


図 4.2.1-1 固有値解析モデル

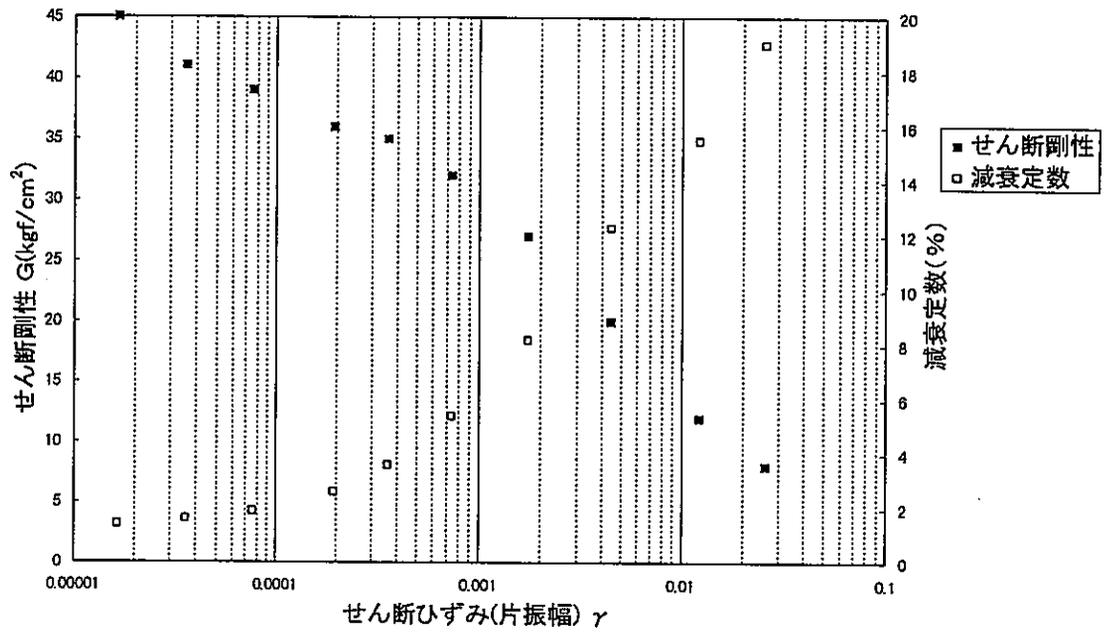


(a) DT-22

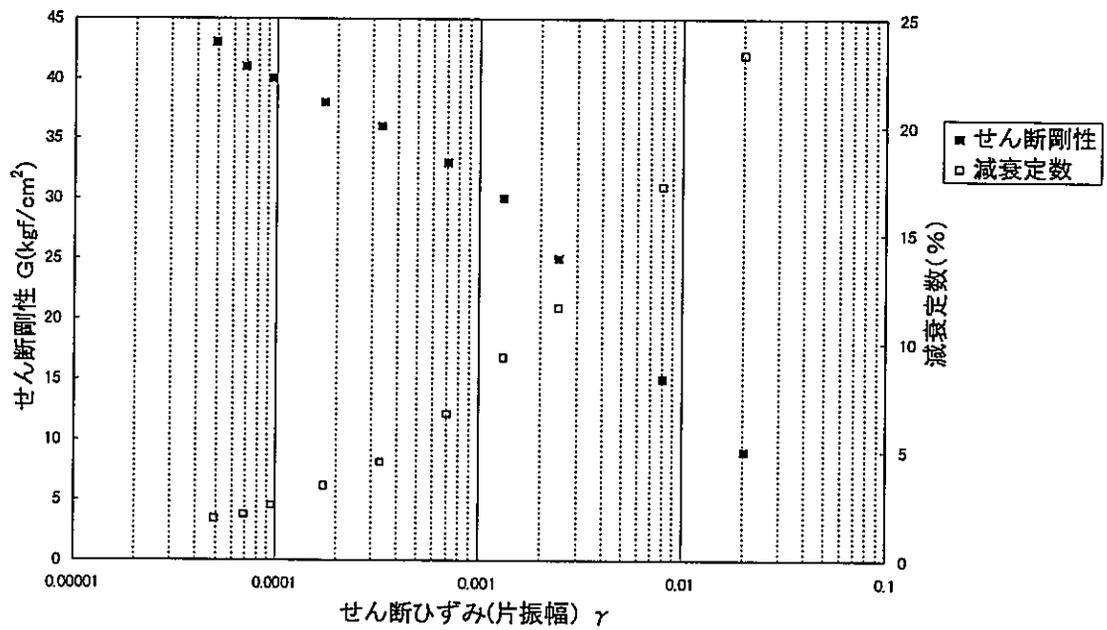


(b) DT-24

図 4.2.1-2 ベントナイトの動的試験データ 1 / 2



(c) DT-25



(d) DT-26

図 4.2.1-2 ベントナイトの動的試験データ 2 / 2

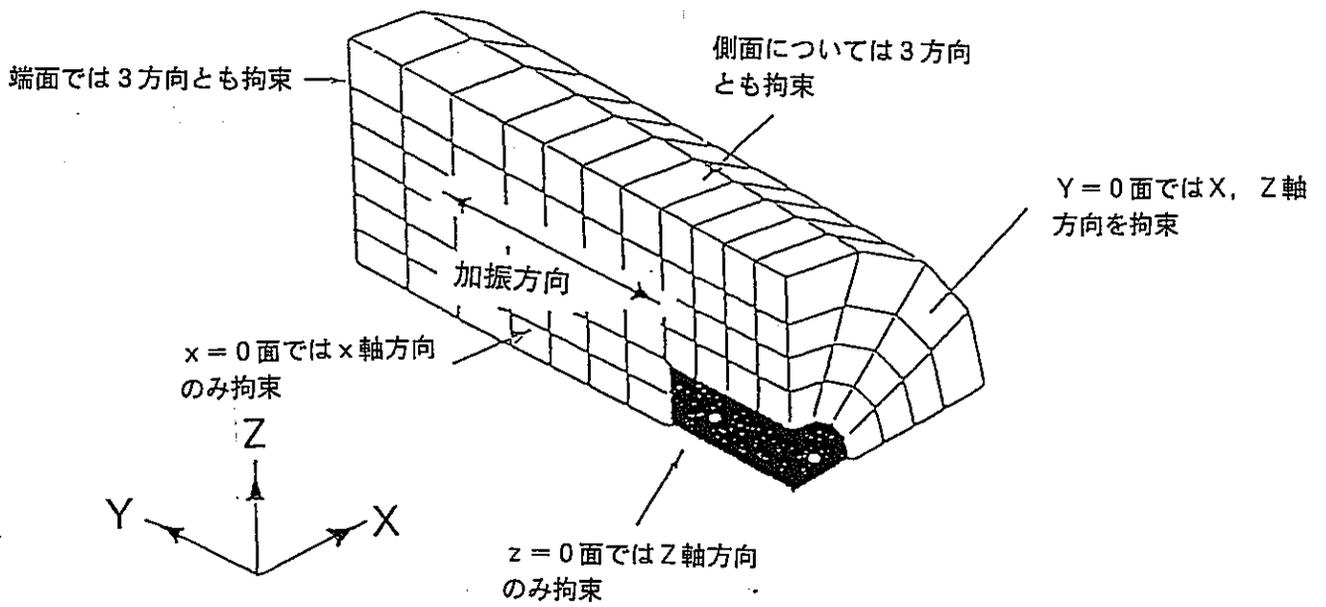


図 4.2.2-1 動的応答解析モデル

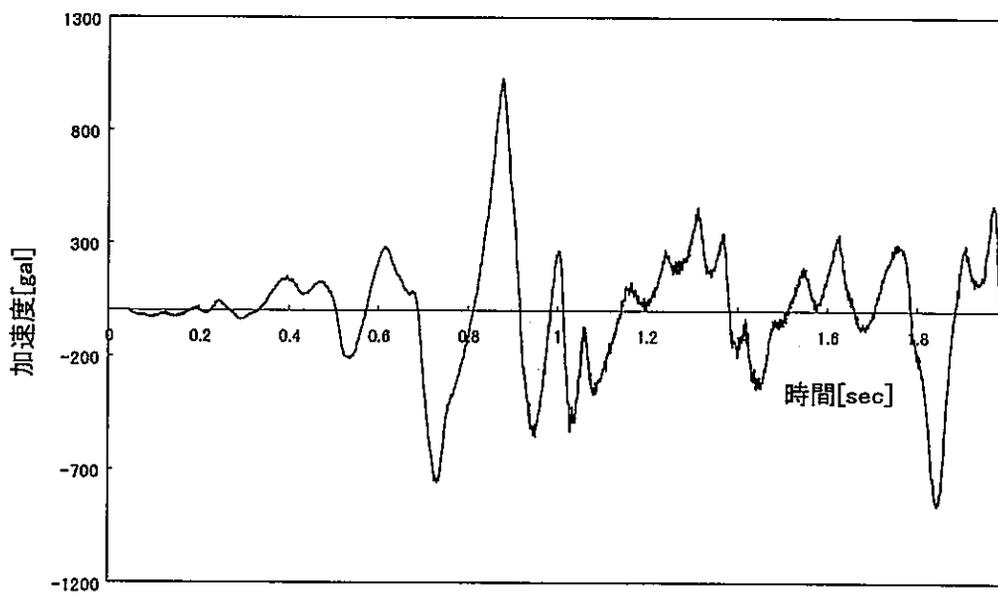
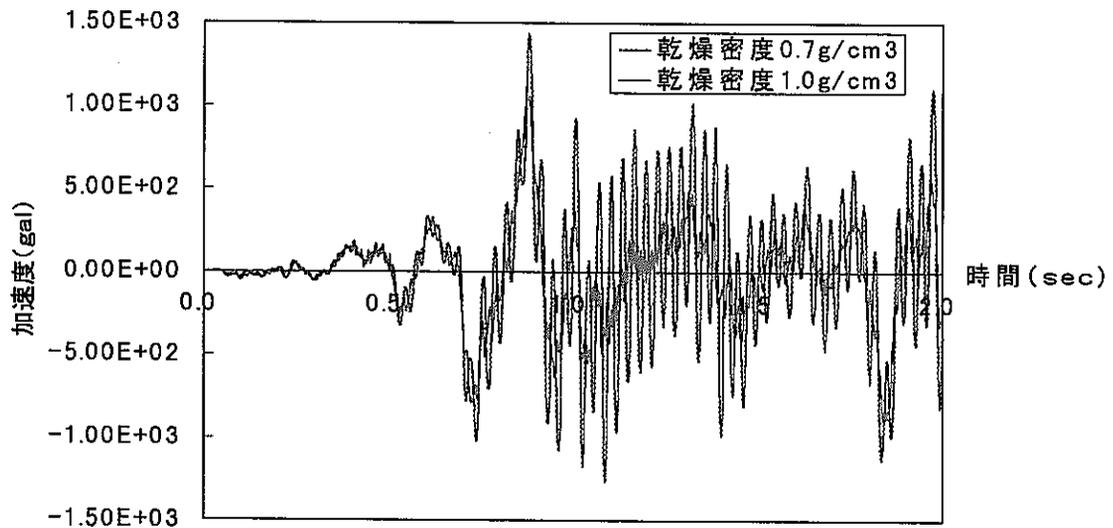
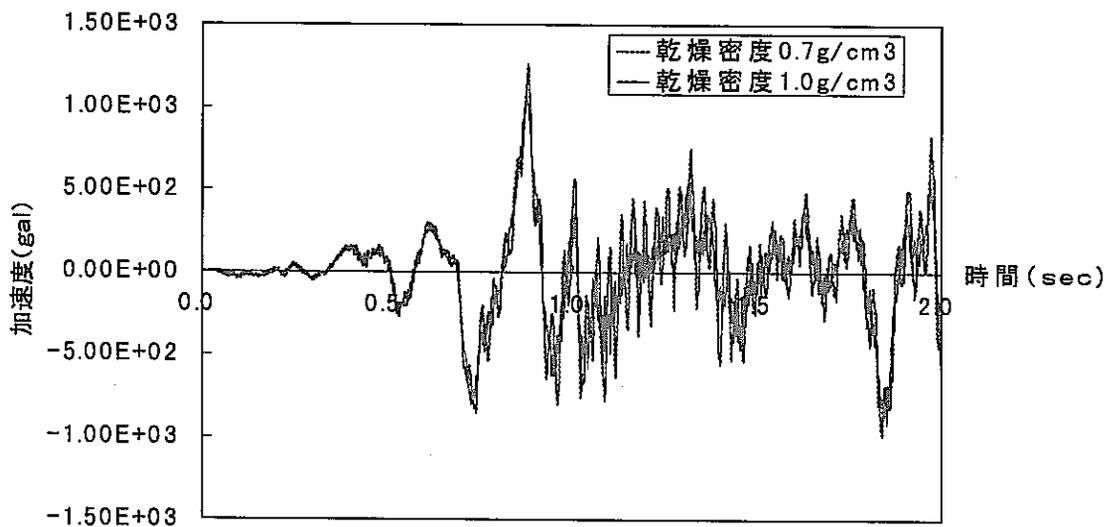


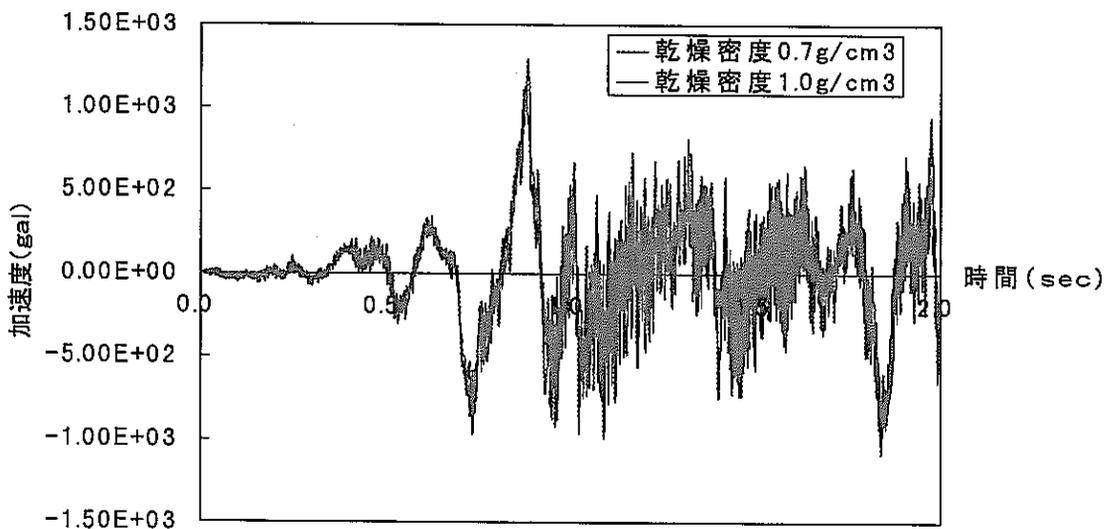
図 4.2.2-2 動的応答解析に用いた入力地震動 (El-Centro NS)



(a) 節点 3

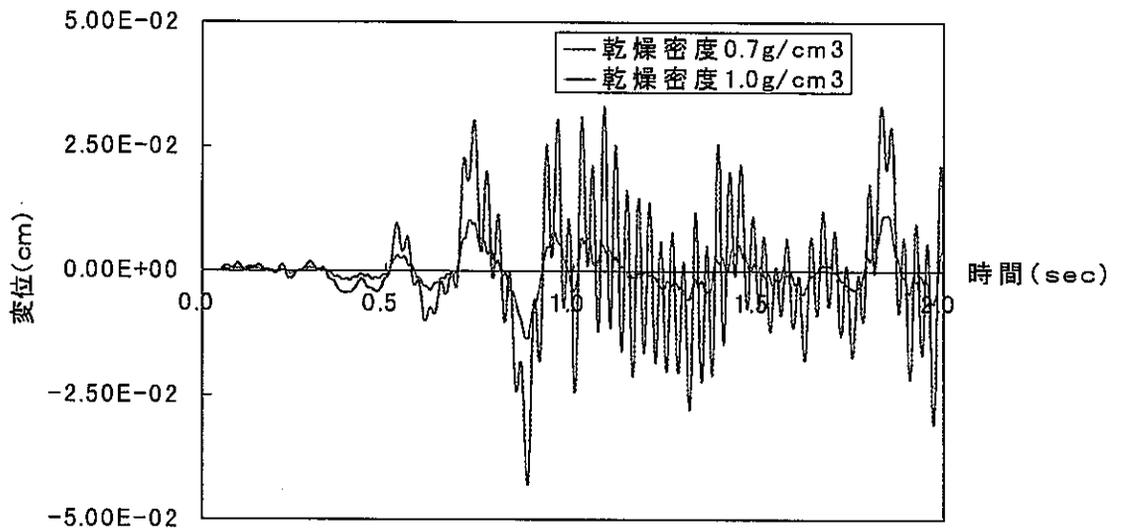


(b) 節点 5

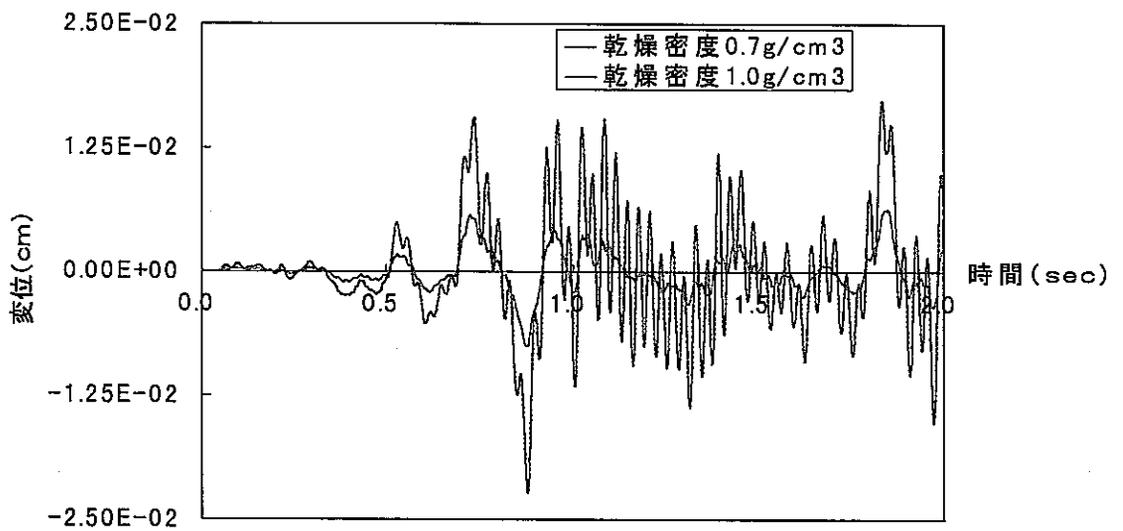


(c) 節点 57

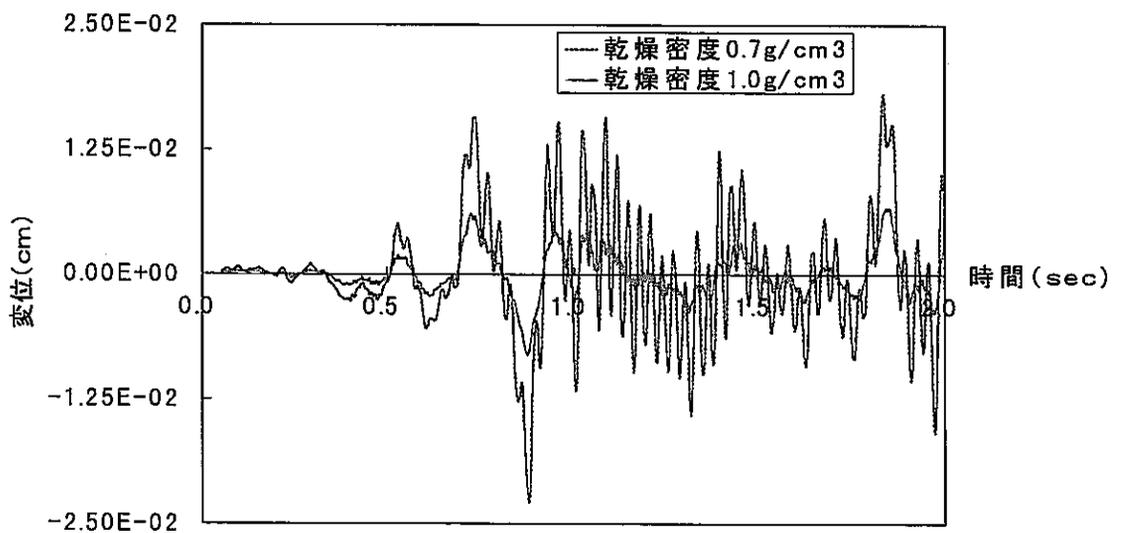
図 4.2.2-3 加速度時刻歴 (エルセントロ波)



(a) 節点 3

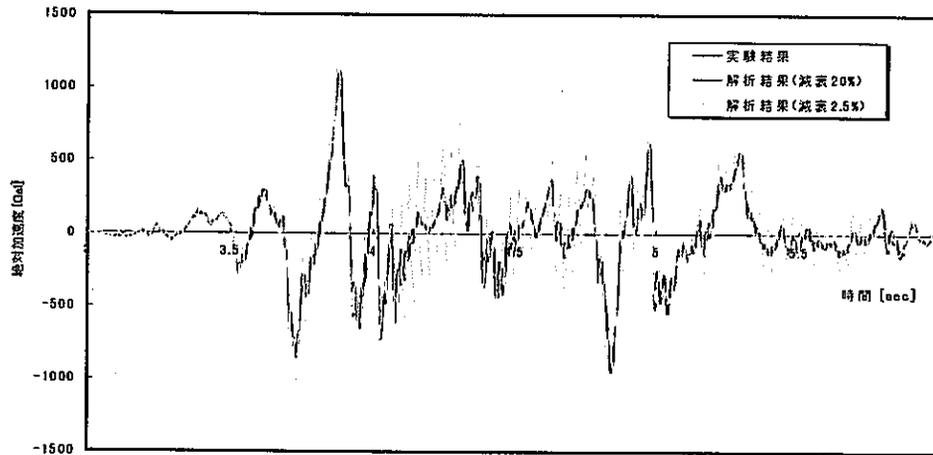


(b) 節点 5

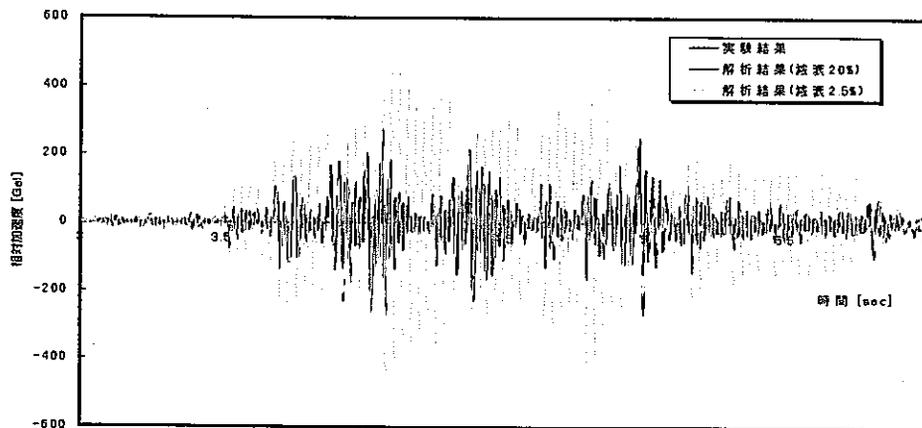


(c) 節点 57

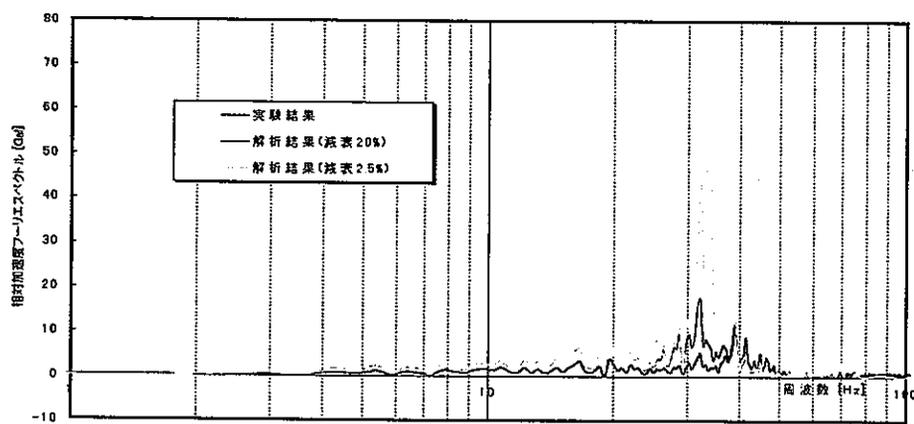
図 4.2.2-4 変位時刻歴 (エルセントロ波)



(a) 絶対加速度応答



(b) 相対加速度応答



(c) 相対加速度フーリエスペクトル

図 4.3-1 1/5 スケール振動実験データ解析 (動的応答解析結果)

## 5. 実処分場を想定したニアフィールド耐震安定性評価検討

### 5.1 はじめに

実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価を目的とし、処分環境下に於ける FEM モデルの構築ならびに廃棄体の定置方式の相違に着目したパラメータ解析を行った。

### 5.2 解析ケースの選定

波動伝搬問題に於いて、モデル化領域を決定するには入力する波の波長成分との関係を十分配慮の上設定することが重要となる。通常、モデル化すべき範囲としては、注目している評価範囲よりできるだけ遠くに設定し、境界の影響を受けないようにすることが望ましいが、計算自由度の増大等に伴い作業効率の低下が大きな負担になる。一般的には、対象とする地盤が適切な広がりを持っているか否かを判断するためには、そのモデルの 1 次固有周期をモード解析等で求め、固有周期の理論解

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (5.2-1)$$

との比較により判断されている(たとえば、川本,林, 1978)。これは、モデルを単層地盤と仮定した際のせん断波の波動伝搬理論より算定されるものである。ここで、H は注目しているモデル全体の高さに相当する。しかしながら、これは単層地盤を仮定した指標であり、本パラメータ解析で対象とするような廃棄体、緩衝材、岩盤から成る不均一地盤に対して直接適用できるかは即断できない。

これに対し、地盤—構造物の相互作用解析に於いて、構造物底面からモデル底面までの距離  $H_B$  に関するパラメトリックなケーススタディを実施し、 $H_B$  と解の精度との定量的な解釈を行った事例も報告されている(奥村,多田,他 1982)。それによると、モデル底面を固定境界とした場合と粘性境界とした場合で以下のような目安を与えている。

- ・ 固定境界の場合 ;  $H_B \geq 1 / 2 \lambda_{\max}$
- ・ 粘性境界の場合 ;  $H_B \geq 1 / 10 \lambda_{\max}$

ここで、 $\lambda_{\max}$  は注目している振動成分の最大周期  $T_{\max}$  に対応する波長である。

この様な、モデル化範囲に関する既往の研究成果は、対象とする地盤や地盤上あるいは地盤中の構造物等の状況に応じて適時設定すべきものであるが、1つの目安として利用可能と考える。従って、本パラメータ解析では、上記のモデル化範囲を基準ケースとしてのみ採用し、これらの変動に対するパラメトリックな地震応答解析を実施することとした。ただし、ここで言うモデル化範囲とは、ベントナイト上部の岩盤距離  $H_T$  ならびにベントナイト下部の岩盤距離  $H_B$  を示すものとする。なお、ニアフィールドをモデル化するに当たりここで与えられていない諸条件の設定に関しては、動燃事業団殿の概括的性能評価レポート(PNC TN 1410 92-081、以下「H3 レポート」と称する)記載の処分場条件より設定した。

以上の内容を基に、本作業で実施する実処分場を想定したニアフィールドパラメータ解析の解析ケースを表 5.2-1 に示すとおり設定した。解析ケースは全 12 ケースであり、処分坑道横置きの場合(ケース 1A~5A)と処分孔縦置きの場合(ケース 6A~10A)、ならびに比較参照用の固定境界の場合(ケース 2B,7B)から構成されている。いずれの解析ケースも、注目している振動成分の波長の最大値  $\lambda_{max}$  を尺度に各データセットを表した。解析ケース 1A~3A はベントナイト上部の岩盤距離を固定し、ベントナイト下部の岩盤距離  $H_B$  を変化させた場合のパラメータ解析であり、解析ケース 4A~5A がベントナイト上部の岩盤距離を固定し、ベントナイト下部の岩盤距離  $H_B$  を変化させた場合のパラメータ解析である。処分坑道横置きでは、解析ケース 2A を基準ケースとしている。処分孔縦置きに関しても、処分坑道横置きの場合と同様に設定した。基準ケースとしては、解析ケース 7B を考える。

次節に実処分場のモデル化に係わるその他の具体的な諸条件について記載する。

### 5.3 モデル化の考え方

地層処分場と言うニアフィールドとは、ガラス固化体、オーバーパック、ベントナイトおよび処分場の建設に伴い影響を受けた周辺岩盤とから構成されるものである。従って、厳密にニアフィールドのモデル化を考えれば、ガラス固化体の形状・材質あるいは周辺岩盤のゆるみ領域の範囲など、詳細な情報をもとに行う必要がある。実処分場をモデル化するに際し、考慮すべき主な条件としては以下のものが挙げられる。

- ① ガラス固化体のモデル化
- ② オーバーパックの肉厚
- ③ ベントナイトの膨潤圧
- ④ ゆるみ領域の範囲と初期応力

しかしながら、①のガラス固化体のモデル化に関しては、オーバーパック内の領域(本来、キャニスター内にガラス固化体が収納されている。)に比較し、モデル化するニアフィールドの領域が非常に広域であること。あるいは、④の周辺岩盤のゆるみ領域の範囲に関しては、詳細な情報を把握していない等の実情がある。すなわち、ニアフィールドの耐震安定性の評価を行う為に、必要以上に厳密なモデルを構築する必要もないし、また情報不足に伴うモデルの簡略化も余儀なくされる訳である。以上の観点から、本パラメータ解析では上記の各項目に対し、以下に示す考え方によりニアフィールド全域のモデル化を行うこととした。

#### ① ガラス固化体のモデル化

前記のとおり、モデル化する領域に比較しガラス固化体の占める領域が小さいこと、ならびにガラス固化体を評価の対象としていないこと等を考慮し、本パラメータ解析ではガラス固化体の詳細なモデル化は行わない。ただし、オーバーパックとの形状不連続ならびに材料不連続等を考慮すると、この領域に発生する負荷が大きくなる可能性がある。したがって、ここではオーバーパック内にガラス固化体が均一に存在する場合を仮定し、その物性値を均一に割り当てた簡易モデルを採用することとする。

#### ② オーバーパックの肉厚

上記①のモデル化を行う為にはオーバーパックの肉厚を考慮する必要がある。本パラメータ解析では、H3 レポートに記載の 300 mmの肉厚を用いることとする。

#### ③ ベントナイトの膨潤圧

実処分場のモデル化にあたり、オーバーパックと岩盤の間のベントナイトの膨潤圧の影響を考慮する必要がある。H3 レポートによると、ベントナイトの乾燥密度と膨潤圧の対数には線形関係があること、またモンモリロナイト含有量と膨潤圧の対数は線形関係にあること等が記載されている。たとえば、乾燥密度  $1.8\text{kg/cm}^3$  のクニゲル V1 の膨潤圧は約 3.7Mpa となることが報告されている。本パラメータ解析では、ベントナイトの全領域にわたり膨潤圧が均一に作用すると仮定し、これを初期応力として取込んだ評価を行う。

#### ④ ゆるみ領域の範囲と初期応力

周辺岩盤のゆるみ領域をモデル化するためには、この領域の存在する範囲あるいは剛性や密度などの具体的な情報を把握する必要がある。前記のとおり、これらの情報は現時点では把握できておらず、厳密にモデル化することは不可能である。また、岩盤の剛性や密度等の諸物性は地震波の伝搬速度を規定するため、解析で用いる入力地震波と整合性の取れたものでなければならない。すなわち、実現象を忠実に模擬す

るためには、入力として用いる実地震波が観測された媒体中での物性をモデル化する必要がある。したがって、本解析では入力地震波（後述）が観測された地点での物性を取込むこととし、現時点では、実処分環境で想定されるゆるみ領域の物性は考慮しないこととした。

岩盤中の初期応力については、遠方地盤から作用する地圧の影響を勘案のうえ設定しなければならない。このためには、モデル境界に作用する地圧を荷重条件とした静解析を行い、場の平衡状態を求める必要がある。しかしながら、本解析コードでは、機能上の制約により自重による静解析以外は対応不可能である。現時点では岩盤の初期応力は全てゼロとして扱い、今後コードの改良あるいは他のコードを利用するなどして対応することとする。

本来は、上記項目の他に構成則（オーバーパック、緩衝材および岩盤の応力-ひずみ関係）として何を採用するべきか、あるいは緩衝材や岩盤などの土質材料を2相系材として扱うべきかなどを慎重に議論しなければならない。しかしながら、本年度のパラメータ解析の主目的が、解析結果を保証するFEMモデルの構築であることを考慮すると、ニアフィールドの構成材料が塑性化に至るような大きな入力地振動を敢えて用いる必要はなく、またベントナイトあるいは周辺岩盤を2相系材として厳密にモデル化する必要もない。これらの事項は、今後の諸研究の進展に伴い厳密な解析結果が要求された段階で、それまでの研究成果を取り込みつつ行うべきものとする。したがって、本パラメータ解析では、構成則としては最も単純な線形モデルに限定し、かつ緩衝材、岩盤は1相系材としてのモデル化にとどめることとする。

#### 5.4 解析条件

以上の考え方にに基づき、本パラメータ解析における諸条件を下記のとおり設定した。

##### (a) 材料物性値

ニアフィールドの場を規定するガラス固化体、オーバーパック、ベントナイトおよび岩盤の諸物性値を表5.4-1のとおり設定した。これらの物性値は、原則としてH3レポートを基に定めたものである。ただし、ガラス固化体のヤング率、ポアソン比については同レポートに記載がないため、機械工学便覧よりガラスの値で代用した。また、岩盤の物性は、地震波の伝搬特性（S波速度、P波速度など）を規定するため、本解析で用いる入力地震波と媒体の物性値の間に矛盾が生じないように、実際の観測地点付近で測定された値を採用した。なお、ベントナイトおよび岩盤の物性値は、処分後にある程度時間が経過し、地下水の浸潤により飽和状態に達した値として設定したものである。

## (b) 入力条件

実際の処分環境で想定される地下深部の地震波の1つとして、動燃事業団殿の釜石サイトで観測された地震波を採用する。同サイトでは、三陸はるか沖地震、福島県沖地震、岩手県沿岸南部地震および宮城県沖地震の4つの地震記録があるが、解析・評価における保守性ならびに現実性を配慮し、最大加速度が最も大きく、かつ観測地点での岩盤物性が入手できているものに着目した。これは、岩手県沿岸南部地震の地下300m付近における観測波（NS成分）に該当し、このうちの最大値近傍3.0秒間の加速度波形を採用することとした（図5.4-1参照）。ただし、注目している系の応答特性を明瞭にするため、同地震波の最大値（-14.6Gal）を1000Galに規格化したものを採用する。表5.4-1に示した岩盤の物性値は、ここで採取された岩石試料（ザクロ石スカルン）に関するものである。

なお、加振方向は処分坑道横置きと処分孔縦置きの場合で、ニアフィールドの応答性状の相違を共通に議論するため、処分坑道の軸方向で同一とし、解析モデル底部の岩盤境界から水平に加振するものとした。

## (c) モデル化範囲

上記の入力条件に基づき、本パラメータ解析でモデル化すべき範囲、すなわち人工バリアの上下方向に広がる岩盤領域の距離の基準値（ $H_B, H_T$ ）を設定した。人工バリアの側方領域（前後左右）のモデル化範囲については、隣接するオーバーパック間のピッチを目安に設定した（図5.4-2参照）。

5.2節で述べた様に、モデル化すべき岩盤領域の距離は、注目している振動成分の最大周期  $T_{max}$  に対応する波長  $\lambda_{max}$  に基づき定める必要がある。最大周期  $T_{max}$  は、人工バリア（ガラス固化体+オーバーパック+ベントナイト）の主要な周波数帯域を含むよう設定しなければならないため、事前に人工バリアの固有値解析を実施し、卓越する低次モードの固有周波数を把握する必要がある。図5.4-3に示す実スケール全周モデルを用いて固有値解析を実施した結果、1次モードから5次モードまでの固有周波数は25Hz～50Hzの間に有ることが確認できた（表5.4-2参照）。したがって、本解析で用いる入力地震波のうち考慮すべき最も小さい周波数を25Hzと設定し、これに対応する最大波長を以下のように見積もった。

$$\lambda_{max} = T_{max} \cdot V_s = V_s / f_{min} = 3734 / 25 = 149.36 \text{ [m]}$$

ここで、 $V_s$ は岩盤中を伝搬するS波速度であり、上記のザクロ石スカルンの値である。5.2節に示した奥村らの推奨に基づく、地震波の入射面を粘性境界とした場合は、 $H_B \geq 1/10 \lambda_B$ であることが必要であるため（表5.2-1参照）、本ケースの場合は  $H_B = H_T \approx 15 \text{ [m]}$ として基準ケースのモデル化を行った。

なお、本解析ではモデル幾何形状ならびに荷重条件の対称性を仮定し、図 5.4-4 に示す 1/2 対称モデルを採用することとした。

#### (d) 境界条件

地盤の半無限性を考慮するため、周辺岩盤の外側境界に粘性境界を設ける。ただし、横方向の境界 ( $\pm y$  面) に関しては、オーバーパックが等間隔で周期的に配置されることを仮定し多点拘束条件とした。これにより、横方向境界では拘束したことによる反射波が存在することになるが、この反射波は隣接する領域からの透過波と解釈することが可能となる。このとき、処分坑道の軸方向の長さは無限長を仮定しており、坑道両端の影響を全く受けない中心近傍の一区画を想定している (図 5.4-5 参照)。また、前後方向の境界 ( $\pm x$  面) に関しては、 $x=0$  の面は対称条件 ( $x$  方向を拘束) とし、 $-x$  面には粘性境界を設けた。ただし、 $-x$  面ではフリーフィールドの影響を考慮することとした (第 3 章参照)。

#### (e) 初期条件

前記のとおり、ベントナイトの膨潤圧のみを初期応力として考慮する。ここでは、ベントナイトを構成する各要素に対し等方的に作用させることとした。

### 5.5 解析結果と考察

#### (a) 粘性境界要素を導入したことによる効果確認

図 5.5-1 に、処分坑道横置きおよび処分孔縦置きの各ケースについて、周辺境界条件を固定境界あるいは粘性境界とした場合の加速度モードの比較を示す。両ケースとも、応答加速度 (絶対加速度) が最大値を取るときの時間断面に於けるモードを表しており、モード形状の相違を明瞭にするため幾分誇張して表示している。これより、廃棄体の定置方式に係わらず固定境界とした場合は、地震荷重が同一時刻で全節点に作用するため、系全体が比較的剛な挙動となることが確認できる。一方、粘性境界を用い上昇波による解析を行った場合は、モデル下方から入射した地震波が上方から散逸していく様子が確認できる。したがって、本年度導入した粘性境界要素ならびに関連する諸解析機能は正しく機能していることが確認できる。

また、表 5.5-1 に全解析ケースに於ける加振方向の最大加速度、最大せん断応力および最大せん断ひずみを整理した。同表に示した解析ケース 2A と 2B、7A と 7B を各々比較すると、固定境界と粘性境界とでは最大加速度に大きな相違はない。しかしながら、最大応力、最大ひずみに関しては処分坑道横置きで約  $8\text{kgf/cm}^2$ 、処分孔縦置きで約  $20\text{kgf/cm}^2$  と相違があり、双方とも固定境界の方が小さくなっている事が確認できる。一般的には、解析モデルの境界を固定境界とした場合は、粘性境界を設けた場合に比較

し、境界に於ける反射波の影響より大きめ結果（すなわち、危険側の結果）となる傾向がある。しかしながら、本解析で対象とした系は、境界に於ける反射波の影響が極めて小さい（次項(b)参照）ため、この様な一般的傾向は確認できなかった。

#### (b) モデル化すべき範囲の概略的把握

図 5.5-2 に各解析ケースにつき、処分坑道下端の同一節点で得られた応答加速度（加速度時刻暦、フーリエスペクトル）を示す。また、図 5.5-3、図 5.5-4 に応答加速度が最大値をとるときの時間断面に於ける空間分布を、それぞれ加振方向のせん断応力  $\tau_{yz}$ 、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$  で比較したものを示す。これらの結果より、周辺岩盤を除く人工バリアに注目した場合は、廃棄体の定置方式に依らず  $H_B$  あるいは  $H_T$  の相違による応答性状への影響はほとんどないことが確認できる。このことは、周辺境界に粘性境界を設けたことにより岩盤の半無限性がうまく表現できていることを意味している。従って、本解析に類似した条件の範囲では、 $H_B=H_T=7.5\text{m}$  程度モデル化すれば十分であり、本パラメータ解析で設定した基準ケース ( $H_B=H_T=15\text{m}$ ) よりも効率的なモデルを用いることが可能である。

#### (c) 廃棄体の定置方式の相違による影響把握

図 5.5-5 に処分坑道横置きおよび処分孔縦置きについて、基準ケース 2A、7A の結果を比較したものを示す。両ケースともに、緩衝材部分で  $5\text{kgf/cm}^2$  程度のせん断応力  $\tau_{yz}$  が一様に発生しており、ほぼ同様の傾向が確認できる。処分孔縦置きの場合は、処分坑道近傍の岩盤領域(+x 面付近)で  $60\text{kgf/cm}^2$  程度のやや大きい応力値が確認できる。これは、馬蹄形状の坑道コーナー一部で散乱した波が境界面 (+x 面) で完全に吸収できなかったためと考えられる。処分坑道横置きの場合も  $30\text{kgf/cm}^2$  程度であるが同様の傾向が確認できる。これは、処分孔縦置きに比較して、坑道のコーナー部が存在しない分、波の散乱が低減されたものと考えられる。この様に、境界に於ける波の吸収能に依存した反射波の影響は、物理的な意味を有するものではなく、モデル化範囲を広げるなどにより除去しなければならない。しかしながら、隣接する処分坑道の対称性を考慮し、5.4(d)項と同様に多点拘束条件を併用すれば、上述の反射波は隣接する処分坑道からの透過波と解釈することができる。

一方、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$  に関しては、処分孔縦置きの方で幾分高いオーダー( $10^{-3}$ )が発生している。これは処分坑道と処分孔の幾何学的不連続が起因しているためと考えられる。

以上より、廃棄体の定置方式の相違による地震応答性状への影響は、処分孔縦置きの場合で、処分坑道と処分孔の幾何学的不連続による緩衝材中のせん断ひずみの増加がある以外は、概ね同様の傾向を示していることが確認できる。

(d) 実処分場を想定した耐震安定性の評価

前図 5.5-5 を基に、ニアフィールドの耐震安定性を概略的に考察する。ベントナイト、岩盤でせん断破壊が生じたか否かについては、現解析コードでは厳密に判定することはできない。しかしながら、モールクーロンの破壊基準に基づき、各材料の粘着力を概ねの目安と考えることにより定性的傾向は把握できるものと考えられる。岩盤で  $10^2$  オーダー、ベントナイトで  $10^1$  オーダー程度であれば、せん断破壊は生じていないものと予測される。また、図 5.5-6 より、ベントナイトで発生するせん断応力は波の伝搬に伴い変動せず、ほぼ一定値を保っていることがわかる。すなわち、ベントナイトの応力緩衝性が確認できる。なお、図 5.5-7 にベントナイト中の数箇所を得られた応答加速度を示す（解析ケース 2A,7A）。これより、これまでの振動実験で示唆されてきた人工バリアの剛体挙動が改めて確認することができる。

表 5.2-1 ニアフィールドパラメータ解析ケース

解析 ケ-ス	廃棄体定置方式	モデル化範囲 <sup>(1)</sup>		境界条件	備 考
		H <sub>B</sub>	H <sub>T</sub>		
1A	処分坑道横置き	1/20 λ <sub>max</sub>	1/10 λ <sub>max</sub>	粘性境界	(1) オーバパック側方のその他の距離(前 H <sub>F</sub> 、後 H <sub>BA</sub> 、左 H <sub>L</sub> 、右 H <sub>R</sub> )については、原則として隣接するオーバパック間の中間点とし、均一に 3.5m と定めた。  (2) 解析ケース(1)～(3)ないし、(7)～(9)をもとに定めるものとする。
2A		1/10 λ <sub>max</sub>		〃	
3A		1/5 λ <sub>max</sub>		〃	
4A		(2)	1/20 λ <sub>max</sub>	〃	
5A			1/5 λ <sub>max</sub>	〃	
6A	処分孔縦置き	1/20 λ <sub>max</sub>	1/10 λ <sub>max</sub>	〃	
7A		1/10 λ <sub>max</sub>		〃	
8A		1/5 λ <sub>max</sub>		〃	
9A		(2)	1/20 λ <sub>max</sub>	〃	
10A			1/5 λ <sub>max</sub>	〃	
2B	処分坑道横置き	1/10 λ <sub>max</sub>	1/10 λ <sub>max</sub>	固定境界	
7B	処分孔縦置き	1/10 λ <sub>max</sub>	1/10 λ <sub>max</sub>	〃	

表 5.4-1 解析条件

	ヤング率 [kg/cm <sup>2</sup> ]	ポアソン比 [-]	比重量 [kg/cm <sup>3</sup> ]	減衰定数 [%]	膨潤圧 [kg/cm <sup>2</sup> ]	出典
ガラス固化体 <sup>1)</sup>	<sup>1)</sup> 8.20×10 <sup>5</sup>	<sup>2)</sup> 0.250	<sup>2)</sup> 2.2×10 <sup>-3</sup>	—	—	1) 地層処分研究情報交換会報告書 2) 機械工学便覧よりほう珪酸ガラスの値を引用 3) H3 レポート 4) 動燃殿動的試験データよりひずみレベル1.1E-02 の値を引用 5) 動燃殿釜石実測データ 6) ベントナイトの真密度を 2700g/cm <sup>3</sup> として換算。
オーバーパック <sup>3)</sup>	2.10×10 <sup>6</sup>	0.300	7.8×10 <sup>-3</sup>	—	—	
ベントナイト	<sup>4)</sup> 1.24×10 <sup>3</sup>	<sup>3)</sup> 0.400	<sup>6)</sup> 2.0×10 <sup>-3</sup> (湿潤状態)	<sup>3)</sup> 1.360	<sup>3)</sup> 37.73	
岩盤	<sup>5)</sup> 5.84×10 <sup>5</sup>	<sup>5)</sup> 0.173	<sup>5)</sup> 3.35×10 <sup>-3</sup>	—	—	

(1) ベントナイトのヤング率は、せん断剛性  $G=443\text{kg/cm}^2$  より、 $E=2(1+\nu)G$  を用いて換算

(2) 岩盤のポアソン比は、 $V_p^2=2V_s^2(1-\nu)/1-2\nu$  より換算。

表 5.4-2 実スケール人工バリアの実固有値解析結果

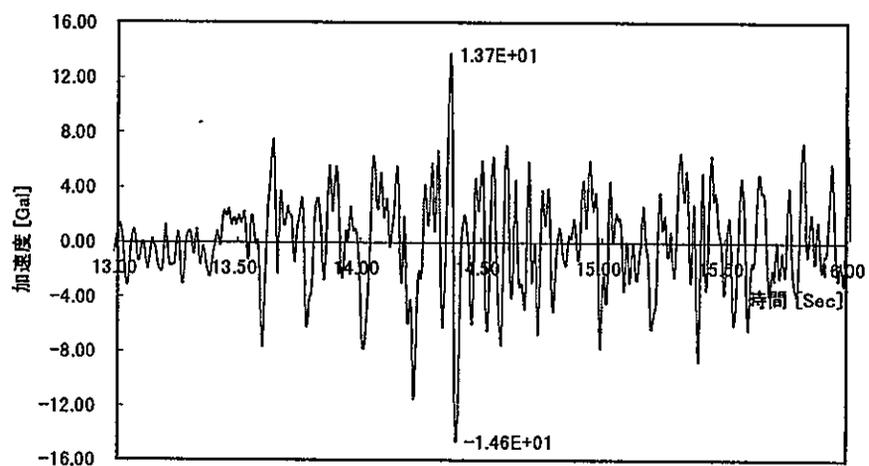
モード次数	固有周波数 [Hz]
1	2.7552e+1
2	3.8171e+1
3	3.8171e+1
4	4.0428e+1
5	4.0428e+1

(注 1) 固有値解析の前提条件、解析手法は 4 章を参照。

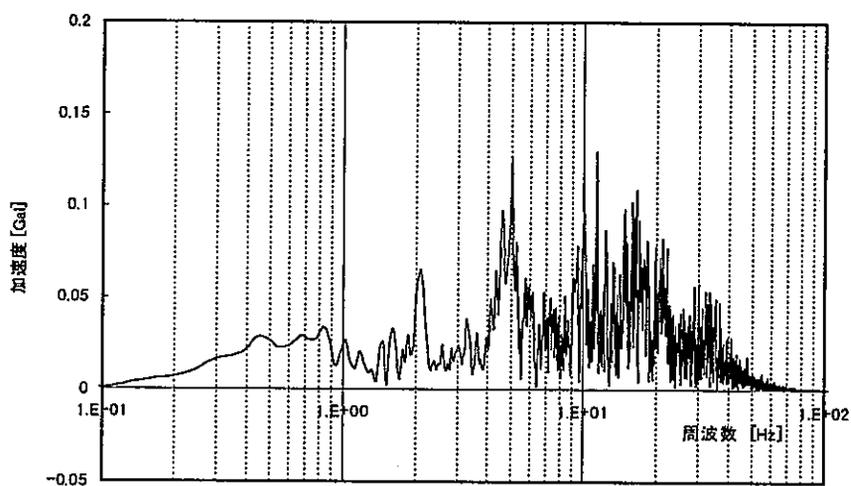
(注 2) 材料物性値は表 5.4-1 を参照。

表 5.5-1 ニアフィールドパラメータ解析結果 (最大値リスト)

解析ケース	最大加速度 [gal]	最大応力 $\tau_{yz}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	最大ひずみ $\gamma_{yz}$ [-]
1A	1051.4	48.016	5.9940e-4
2A	1059.1	48.232	6.0344e-4
3A	1066.7	48.002	6.0019e-4
4A	1048.1	48.382	6.0177e-4
5A	1051.4	47.887	5.9861e-4
6A	1137.5	90.229	1.1499e-3
7A	1110.9	89.104	1.1416e-3
8A	1127.2	88.039	1.1370e-3
9A	1140.7	91.529	1.1538e-3
10A	1134.9	88.685	1.1453e-3
2B	1059.0	40.381	1.2749e-4
7B	1099.1	68.991	2.4918e-4



(a) 時刻暦波形



(b) 加速度フーリエスペクトル

図 5.4-1 岩手県沿岸南部地震

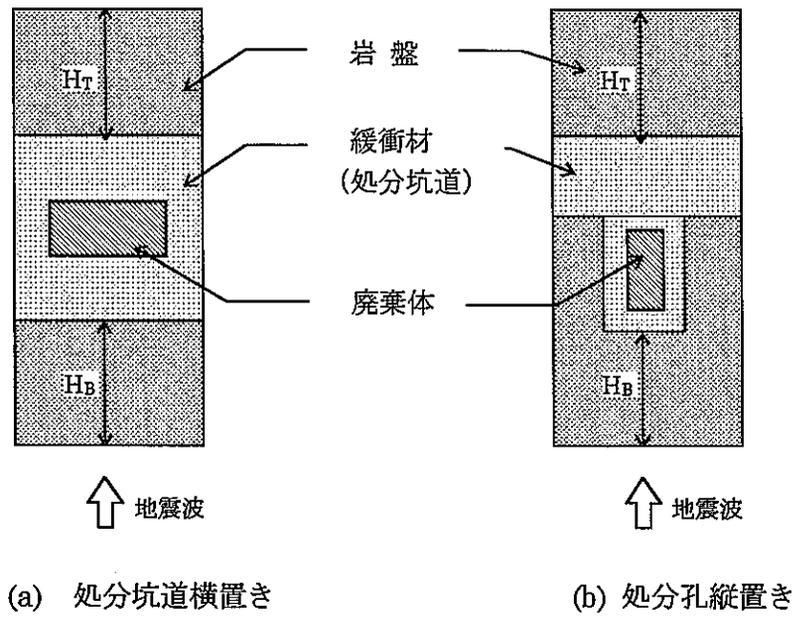


図 5.4-2 概念モデル

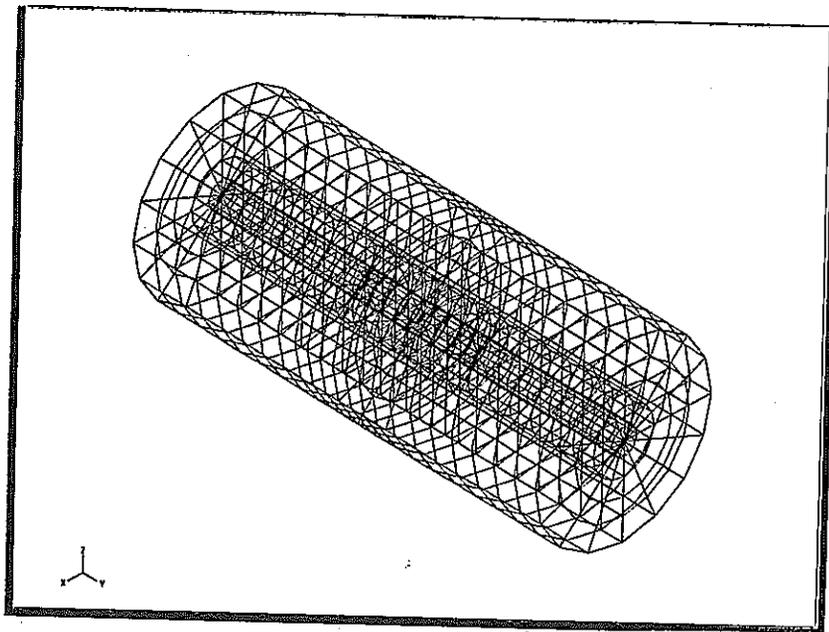


図 5.4-3 実スケール固有値解析モデル (固有値解析用)

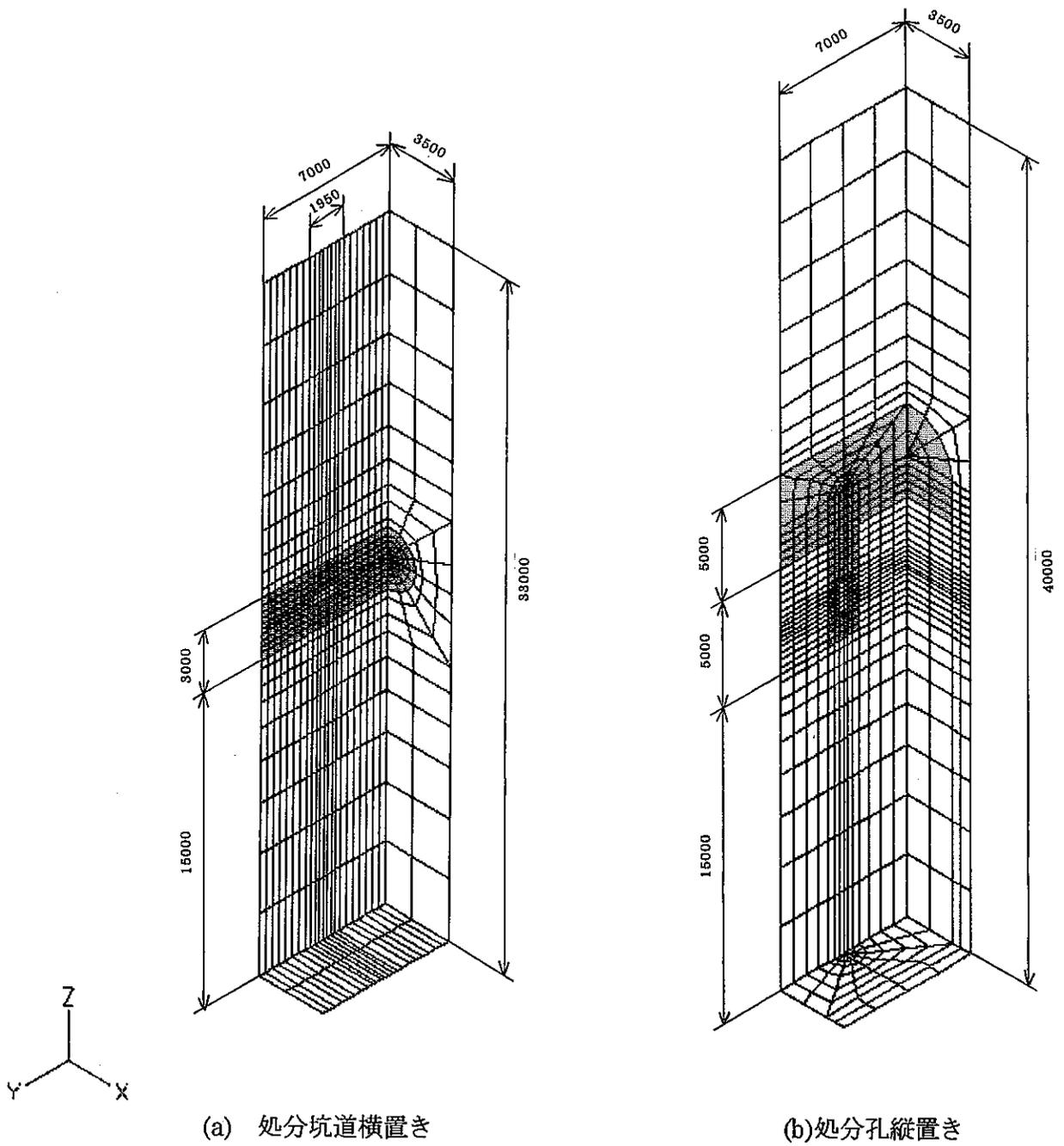


図 5.4-4 1/2 対称モデル (動的応答解析用)

単位 (mm)

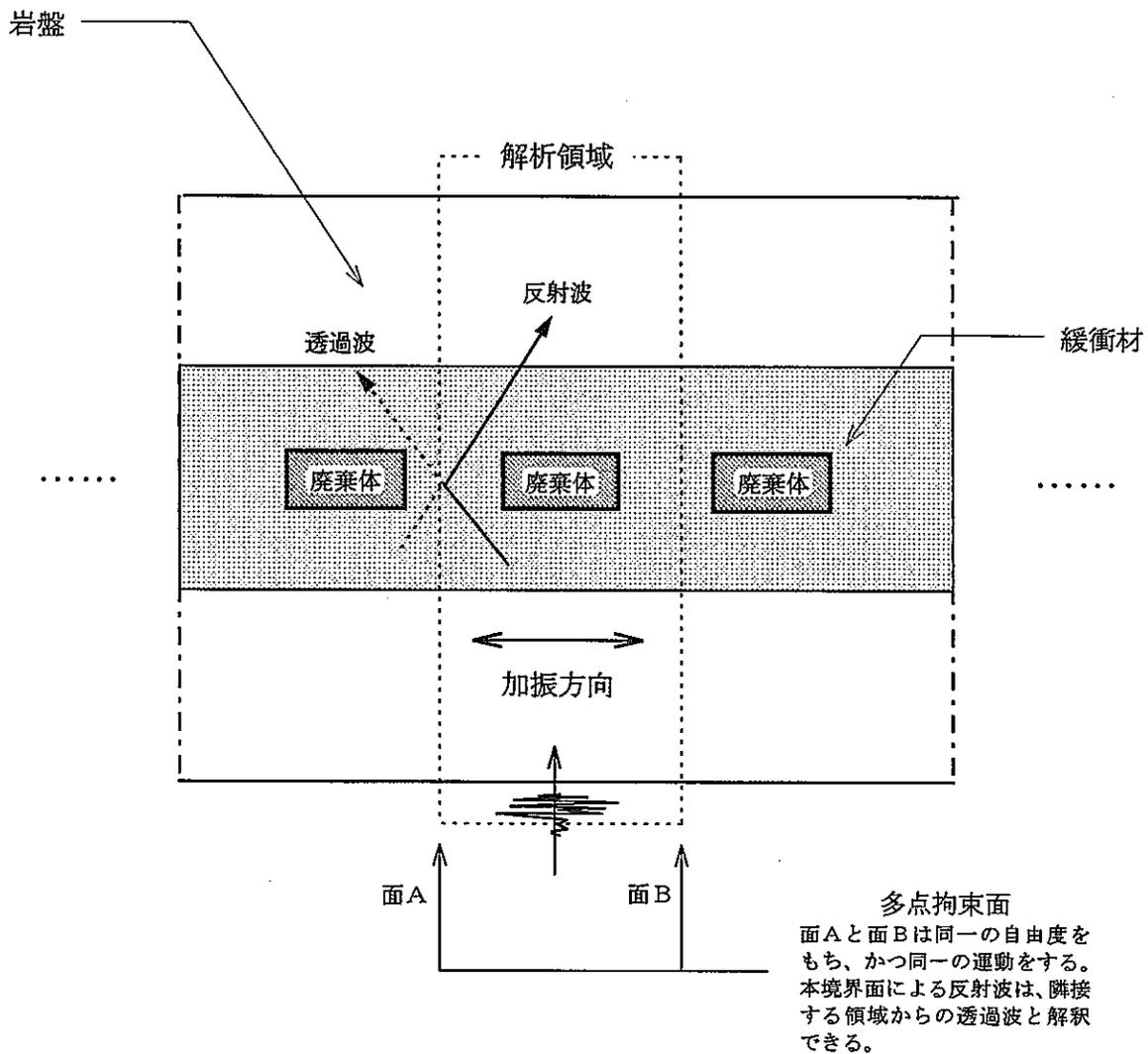


図 5.4-5 多点拘束条件

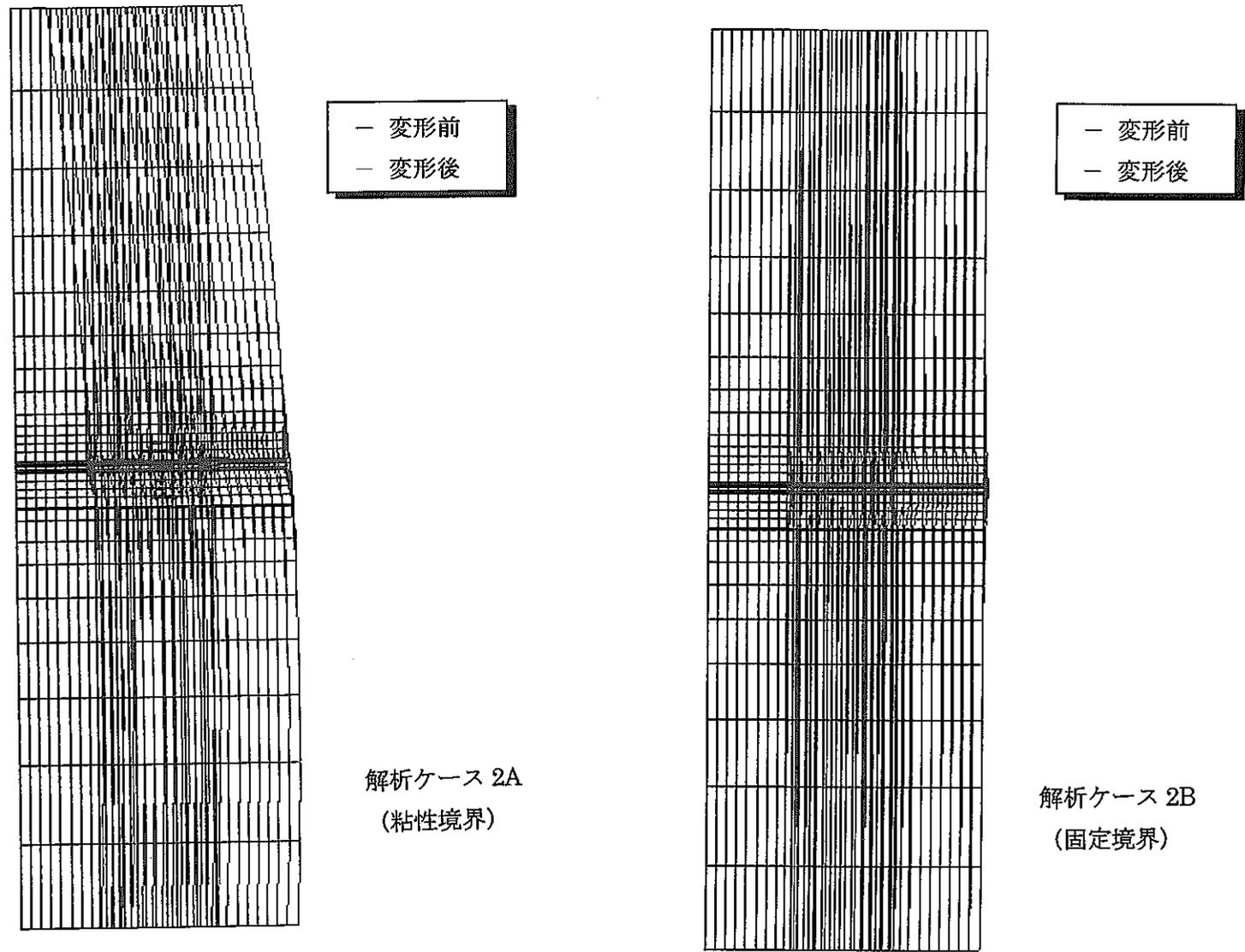


図 5.5-1(1/2) 周辺粘性境界条件と固定境界条件の比較 (処分坑道横置き、絶対加速度)

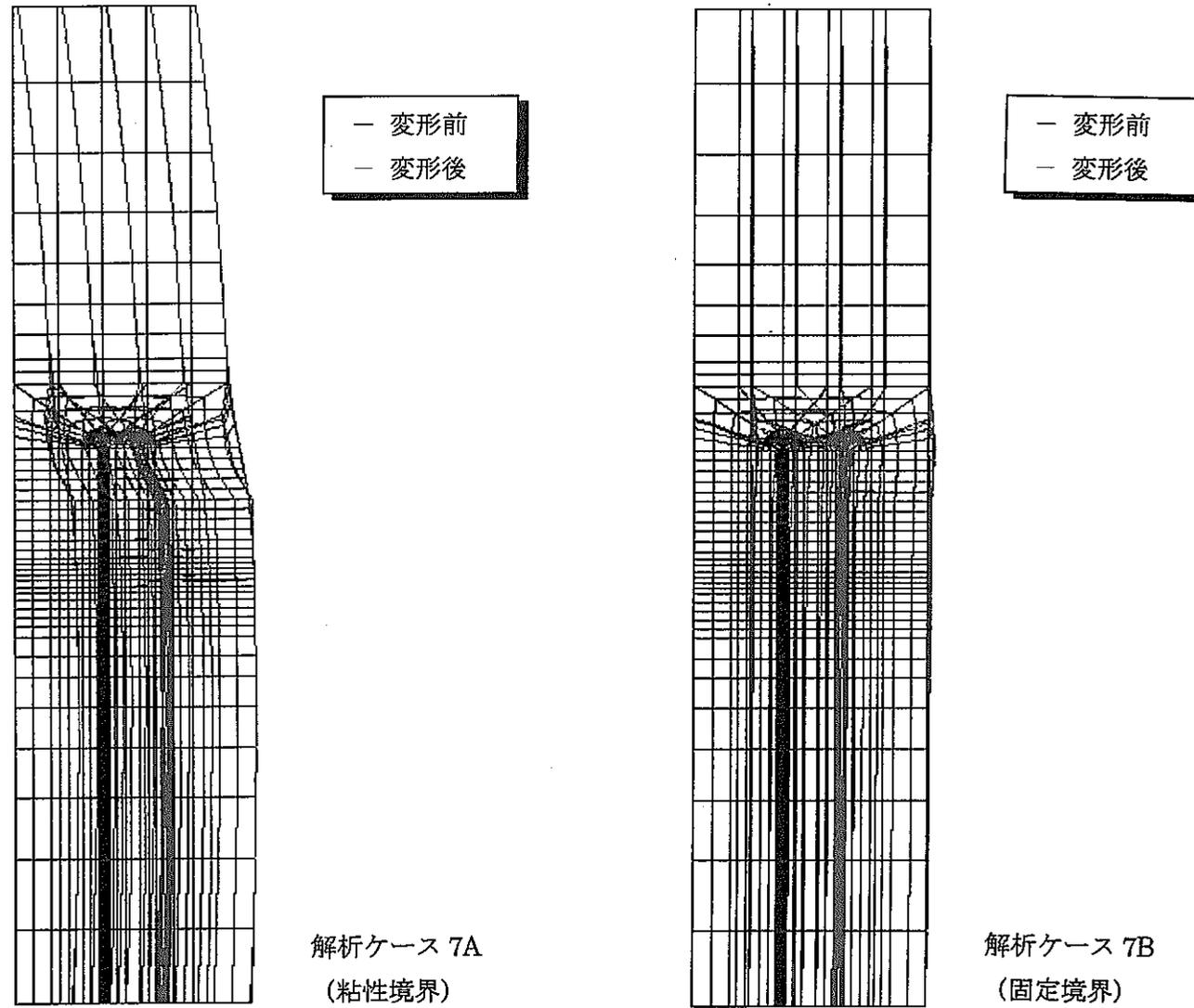
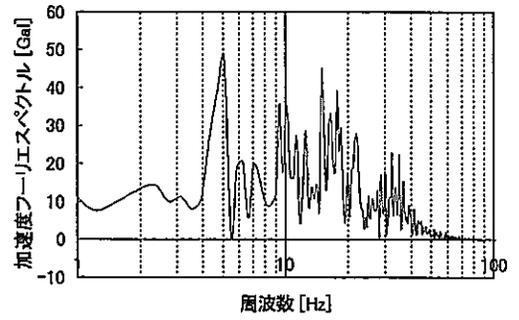
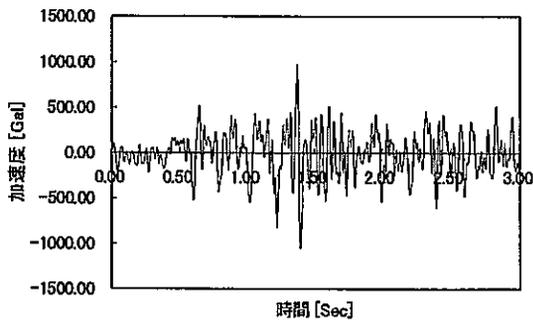
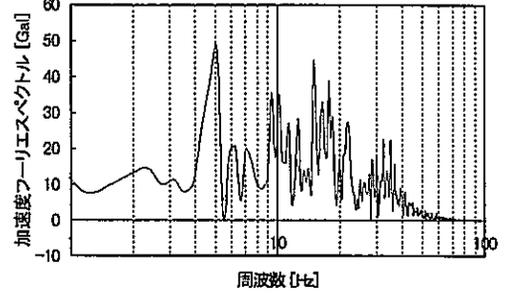
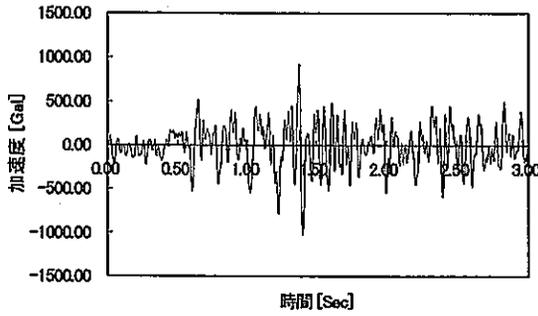


図 5.5-1(2/2) 周辺粘性境界条件と固定境界条件の比較 (処分孔縦置き、絶対加速度)

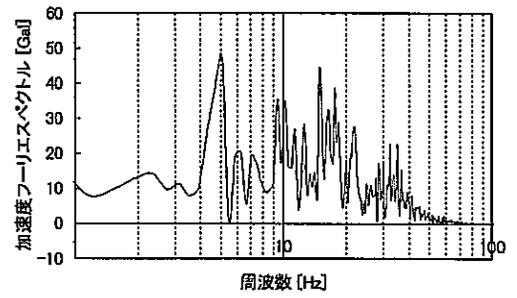
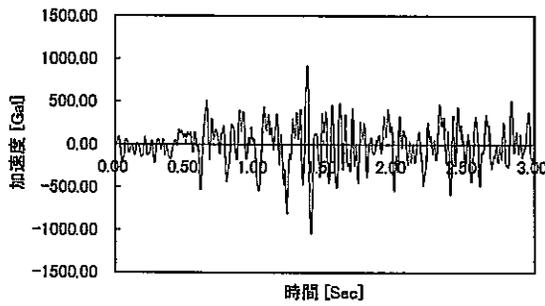
(a) 解析ケース 1A



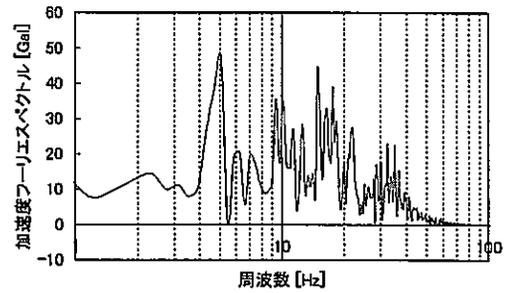
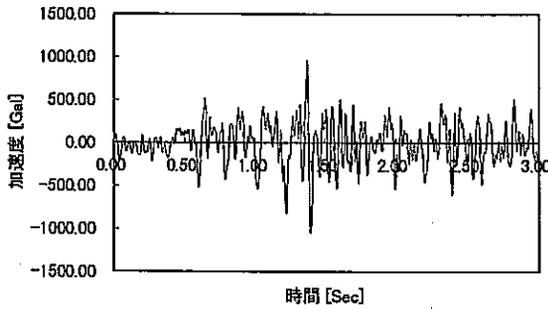
(b) 解析ケース 2A



(c) 解析ケース 3A



(d) 解析ケース 4A



(e) 解析ケース 5A

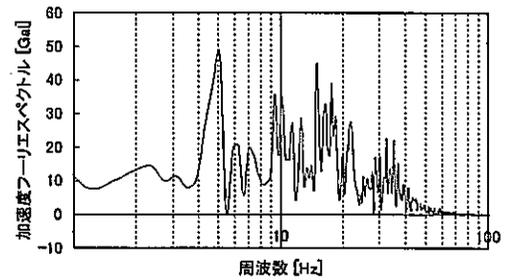
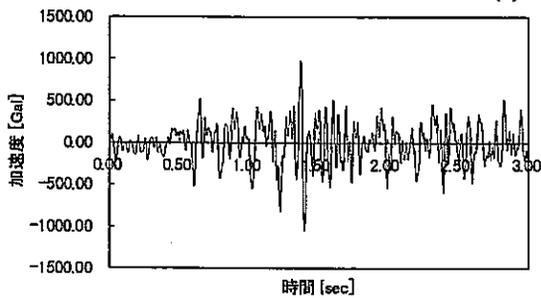
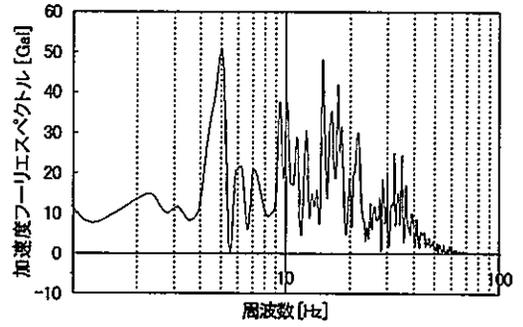
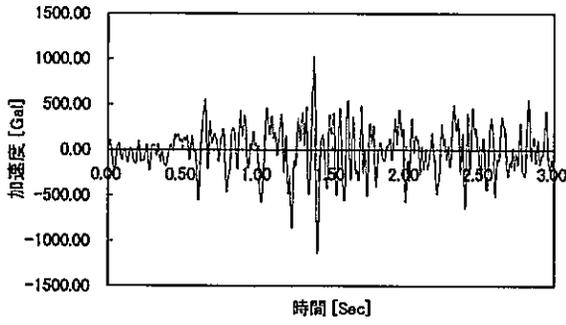
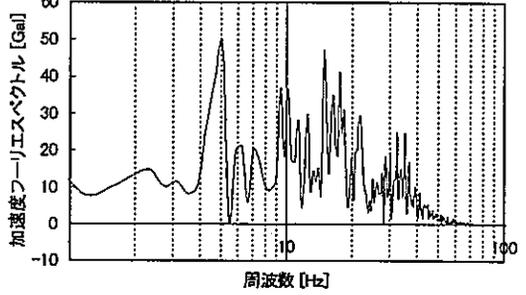
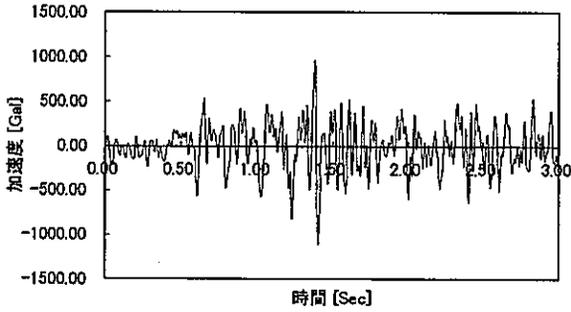


図 5.5-2 動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度: 1/3)

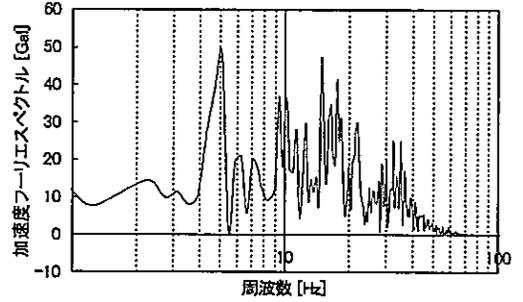
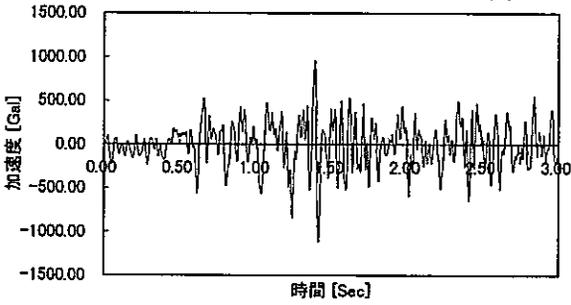
(f) 解析ケース 6A



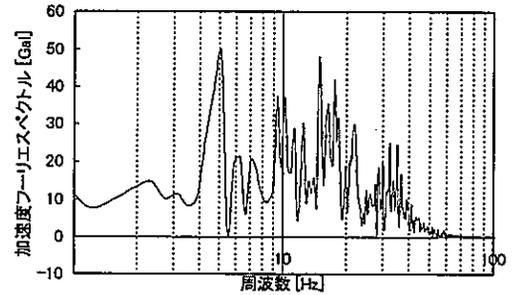
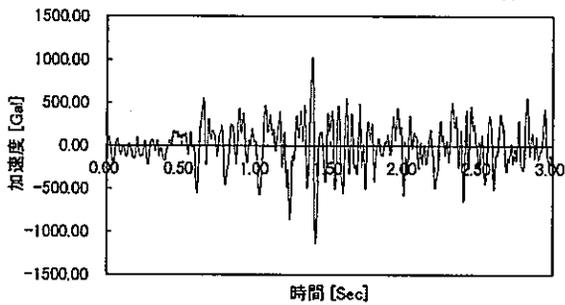
(g) 解析ケース 7A



(h) 解析ケース 8A



(i) 解析ケース 9A



(j) 解析ケース 10A

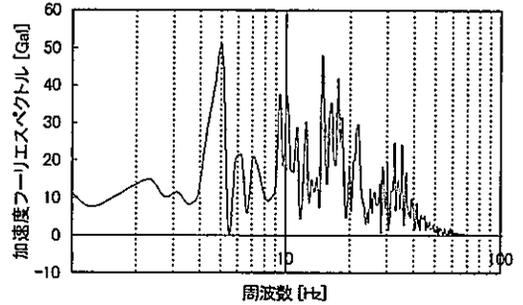
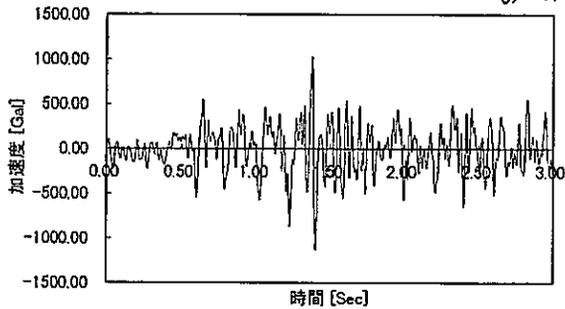
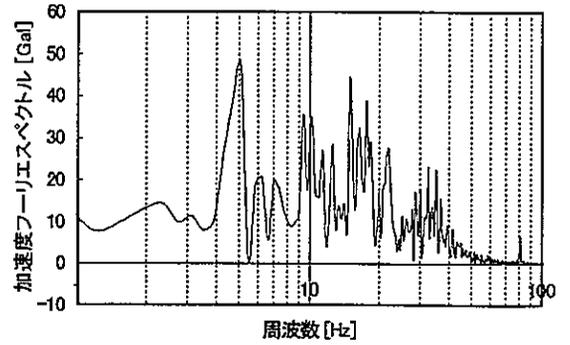
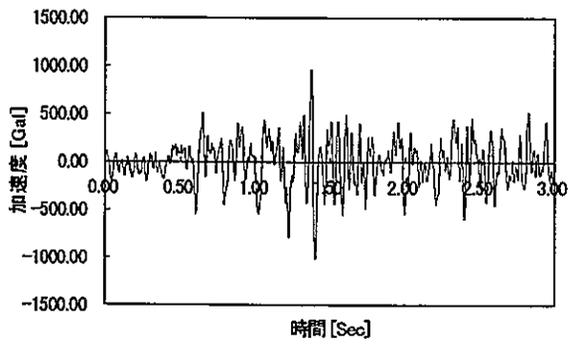


図 5.5-2 動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度: 2/3)

(k) 解析ケース 2B



(l) 解析ケース 7B

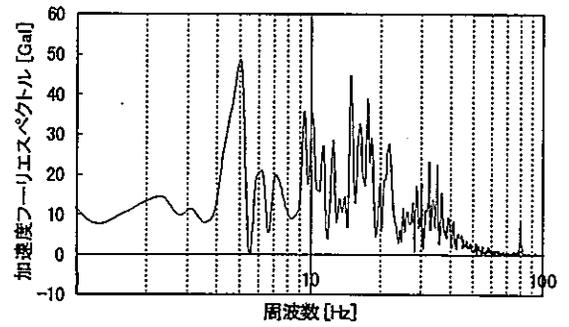
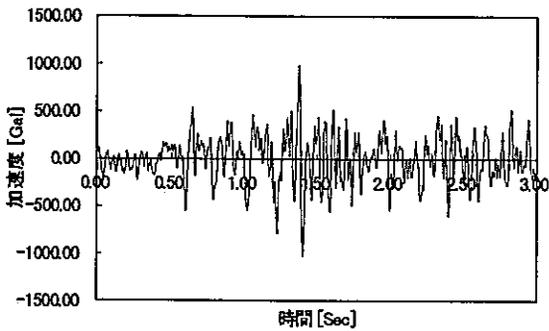


図 5.5-2 動的応答解析結果 (坑道端部における絶対加速度 : 3/3)

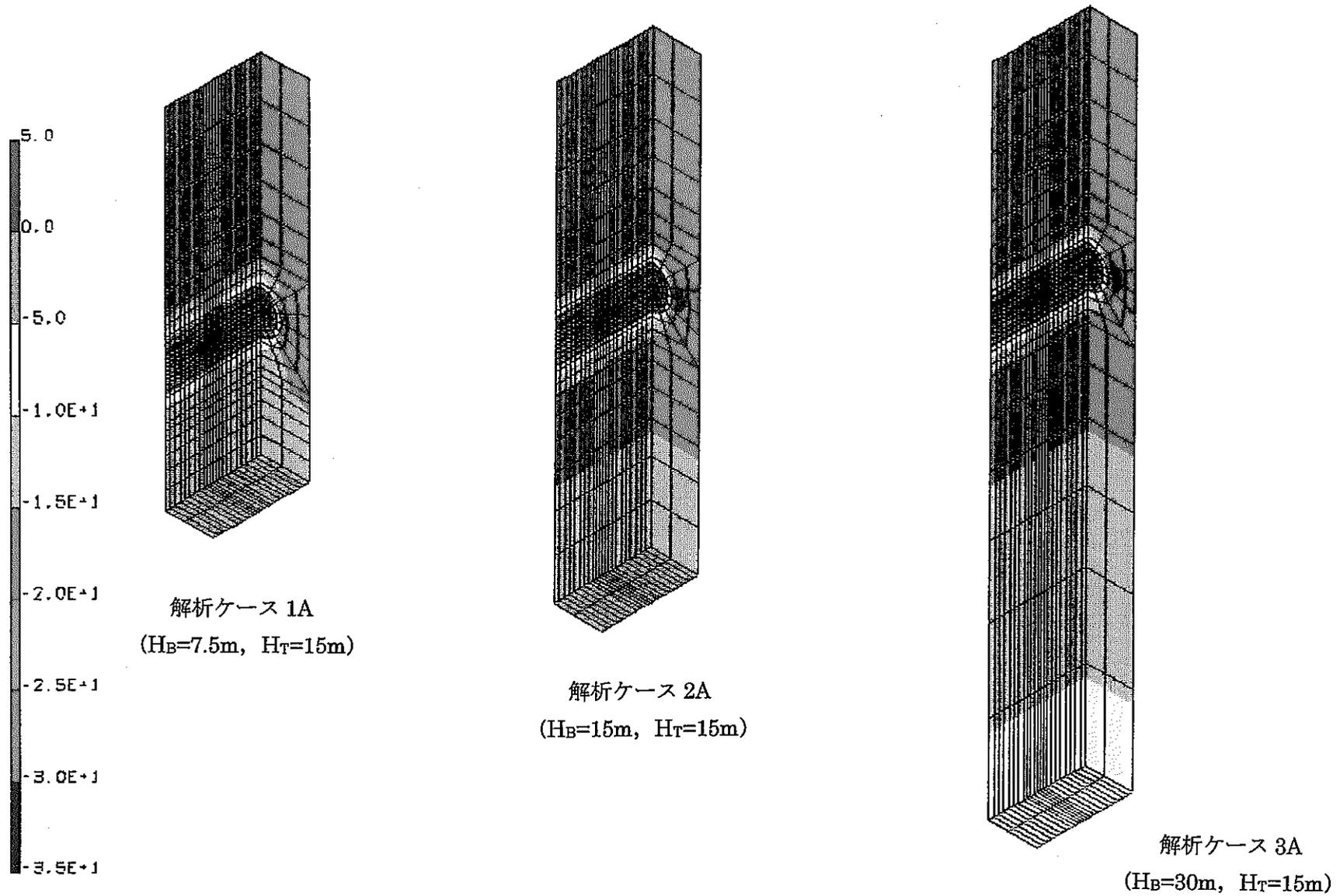


図 5.5-3(1/4) 底部モデル化範囲  $H_B$  の相違による比較  
(処分坑道横置き、せん断応力  $\tau_{yz}$ 、単位 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

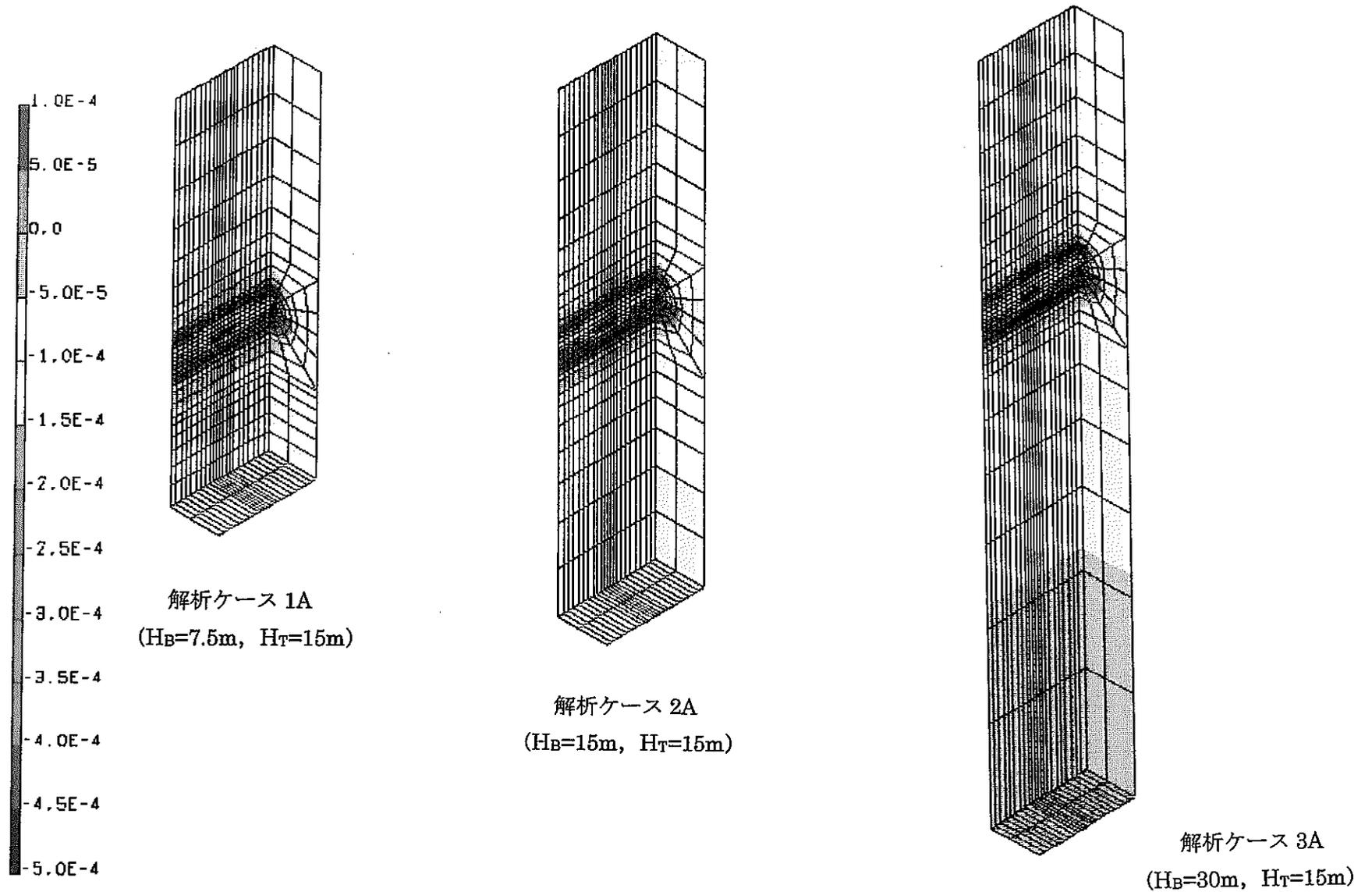


図 5.5-3(2/4) 底部モデル化範囲  $H_B$  の相違による比較  
(処分坑道横置き、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$ 、単位：-)

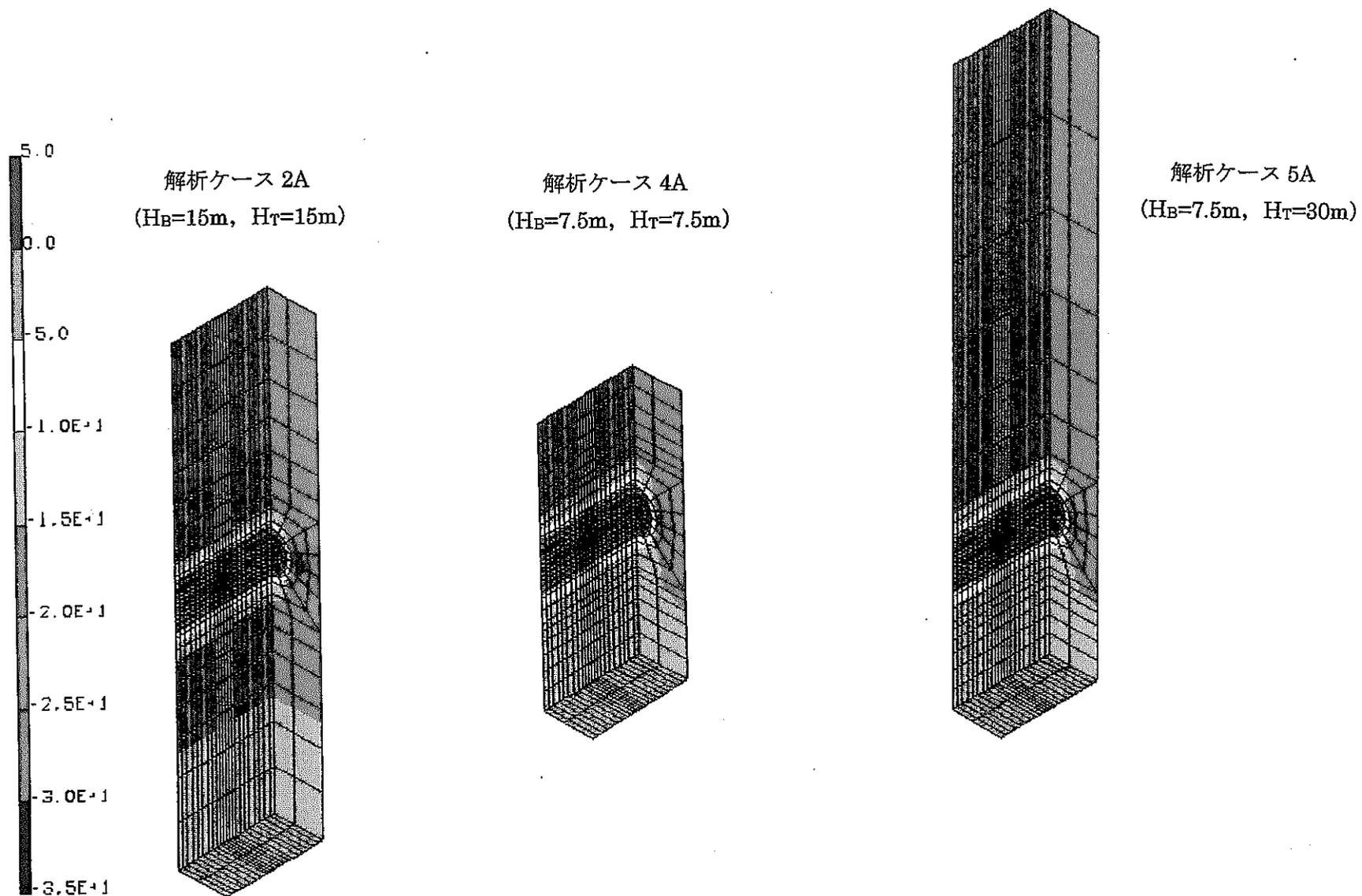


図 5.5-3(3/4) 上部モデル化範囲  $H_T$  の相違による比較  
(処分坑道横置き、せん断応力  $\tau_{yz}$ 、単位 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

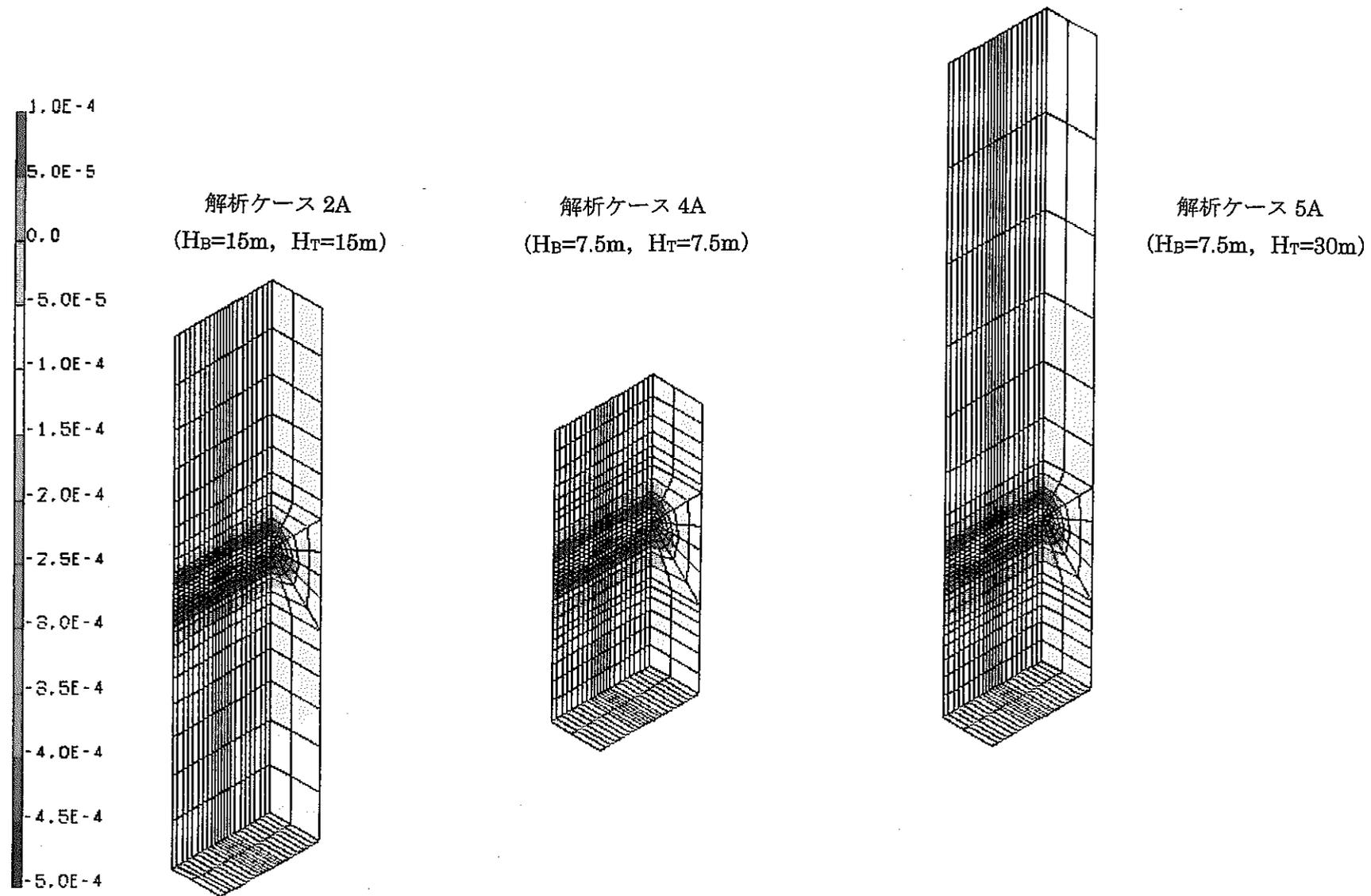


図 5.5-3(4/4) 上部モデル化範囲  $H_T$  の相違による比較  
(処分坑道横置き、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$ 、単位：-)

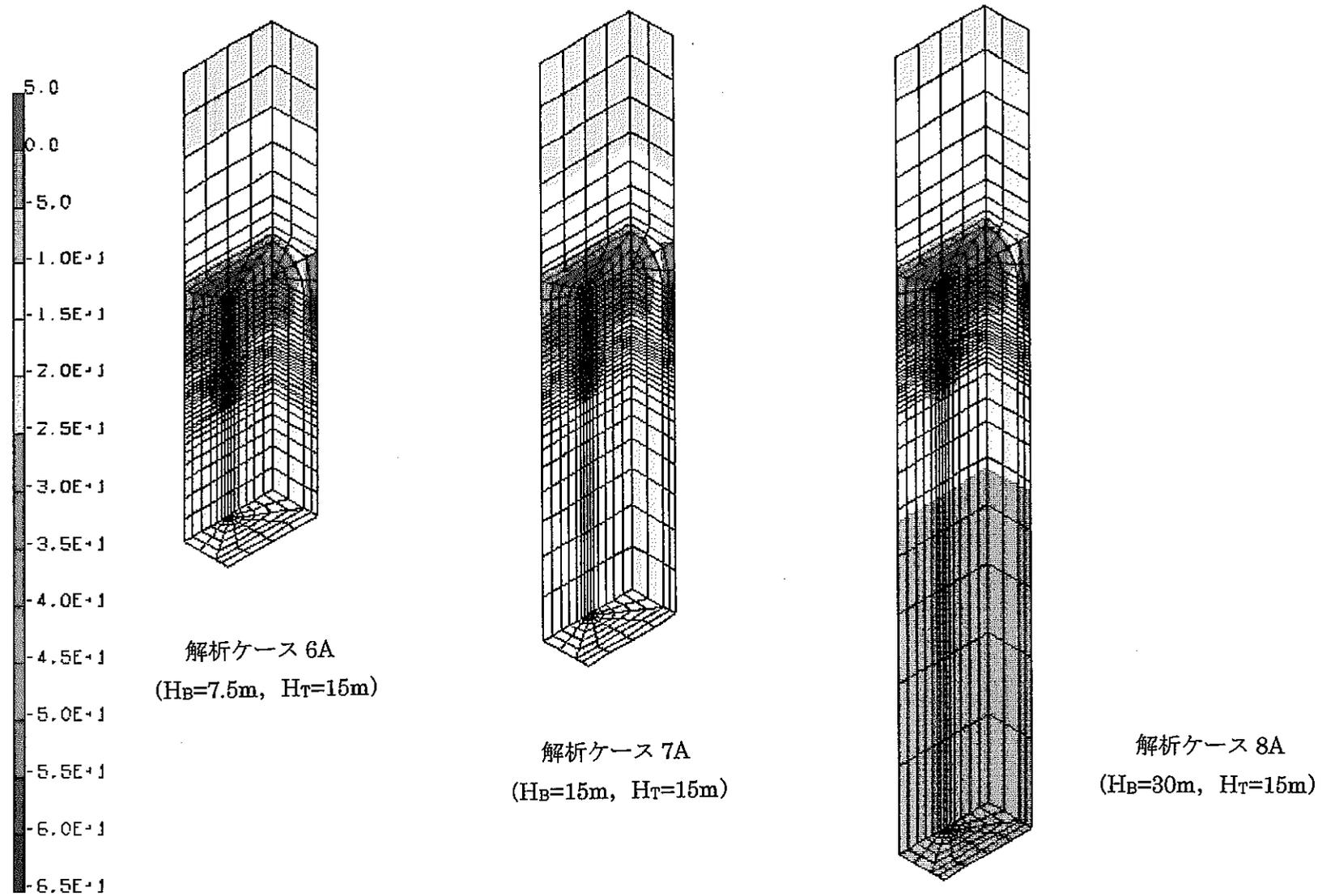


図 5.5-4(1/4) 底部モデル化範囲  $H_B$  の相違による比較  
(処分孔竖置き、せん断応力  $\tau_{yz}$ 、単位 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

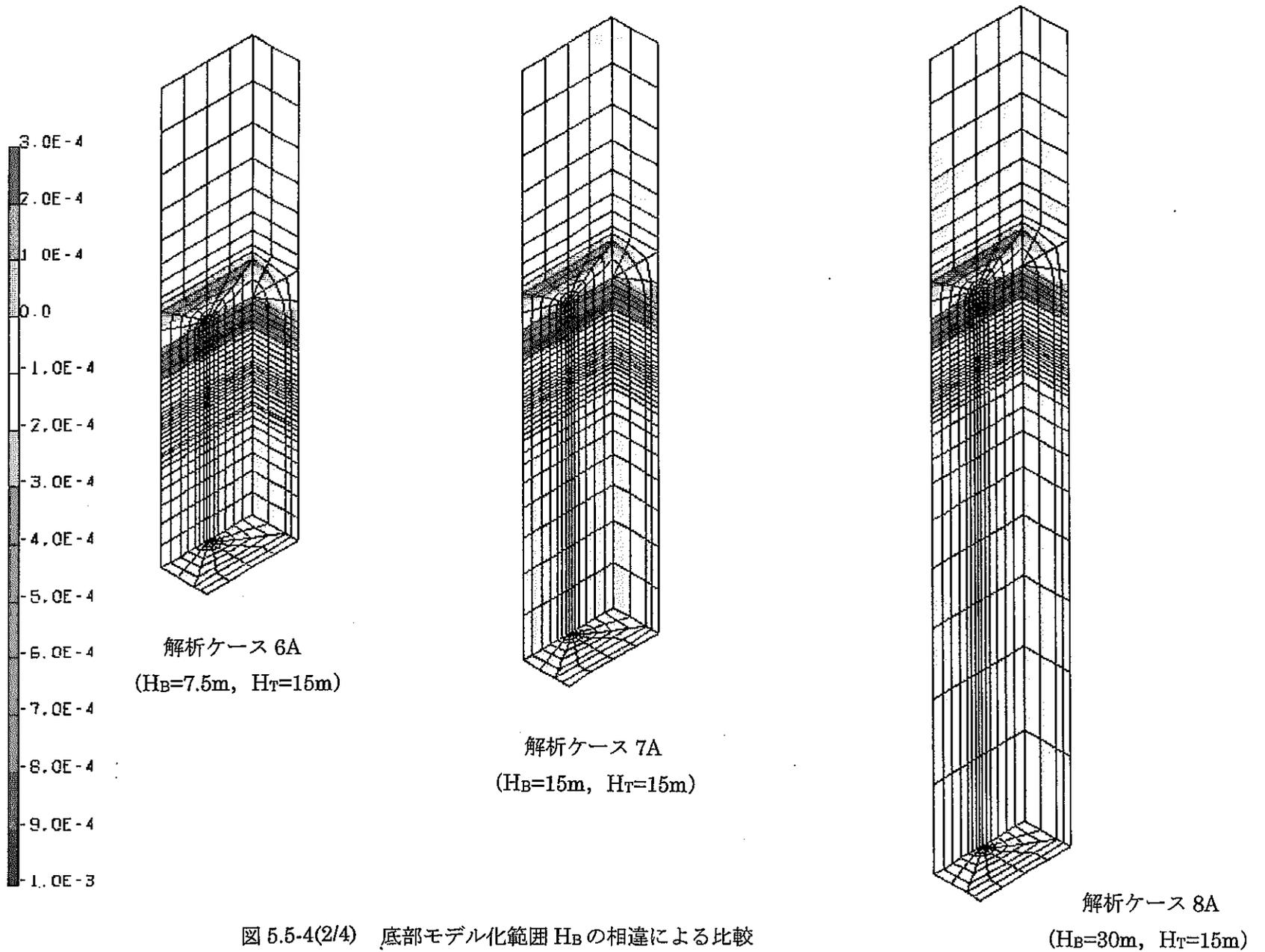


図 5.5-4(2/4) 底部モデル化範囲  $H_B$  の相違による比較  
(処分孔縦置き、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$ 、単位：-)

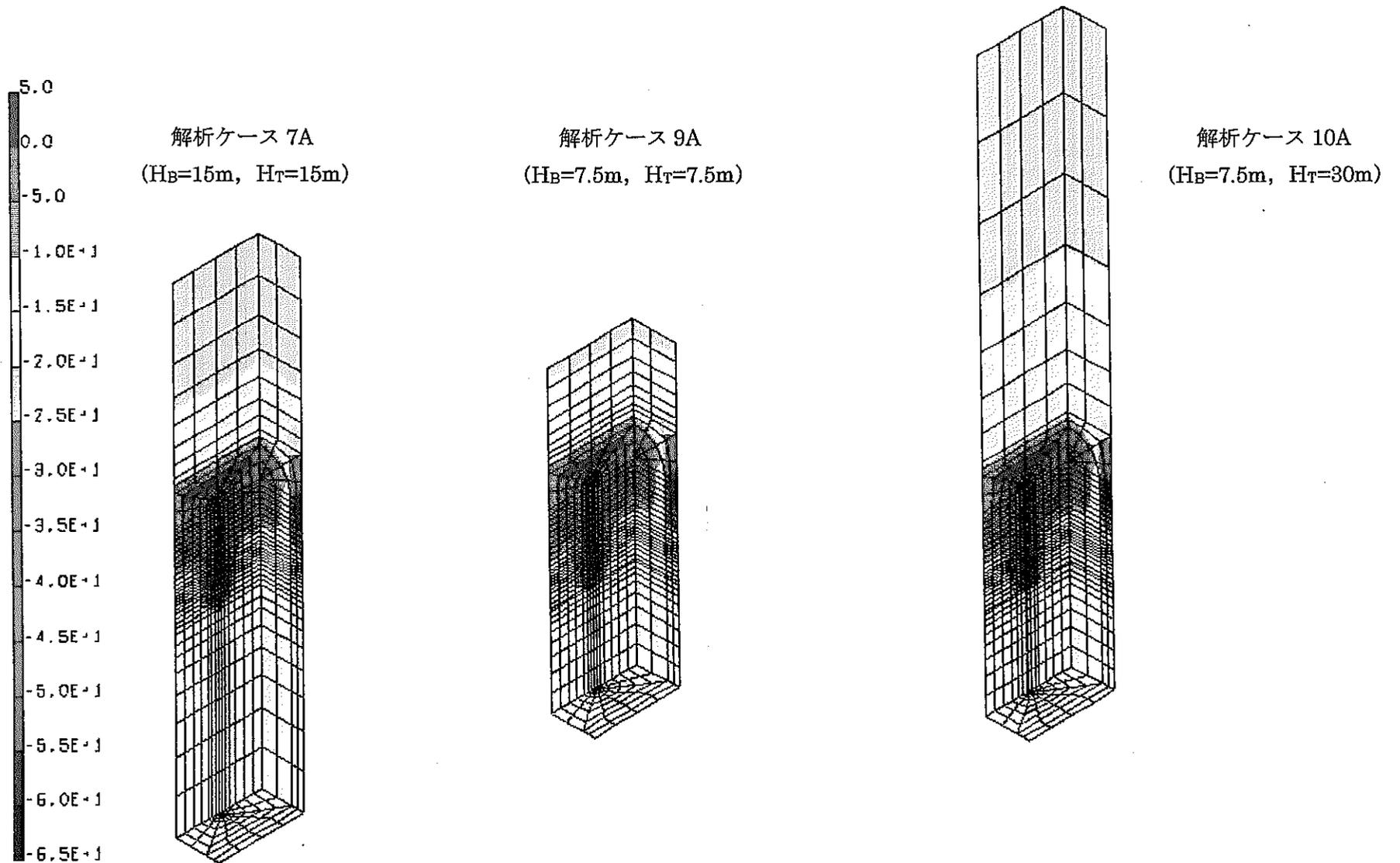


図 5.5-4(3/4) 上部モデル化範囲  $H_T$  の相違による比較  
(処分孔縦置き、せん断応力  $\tau_{yz}$ 、単位： $\text{kgf/cm}^2$ )

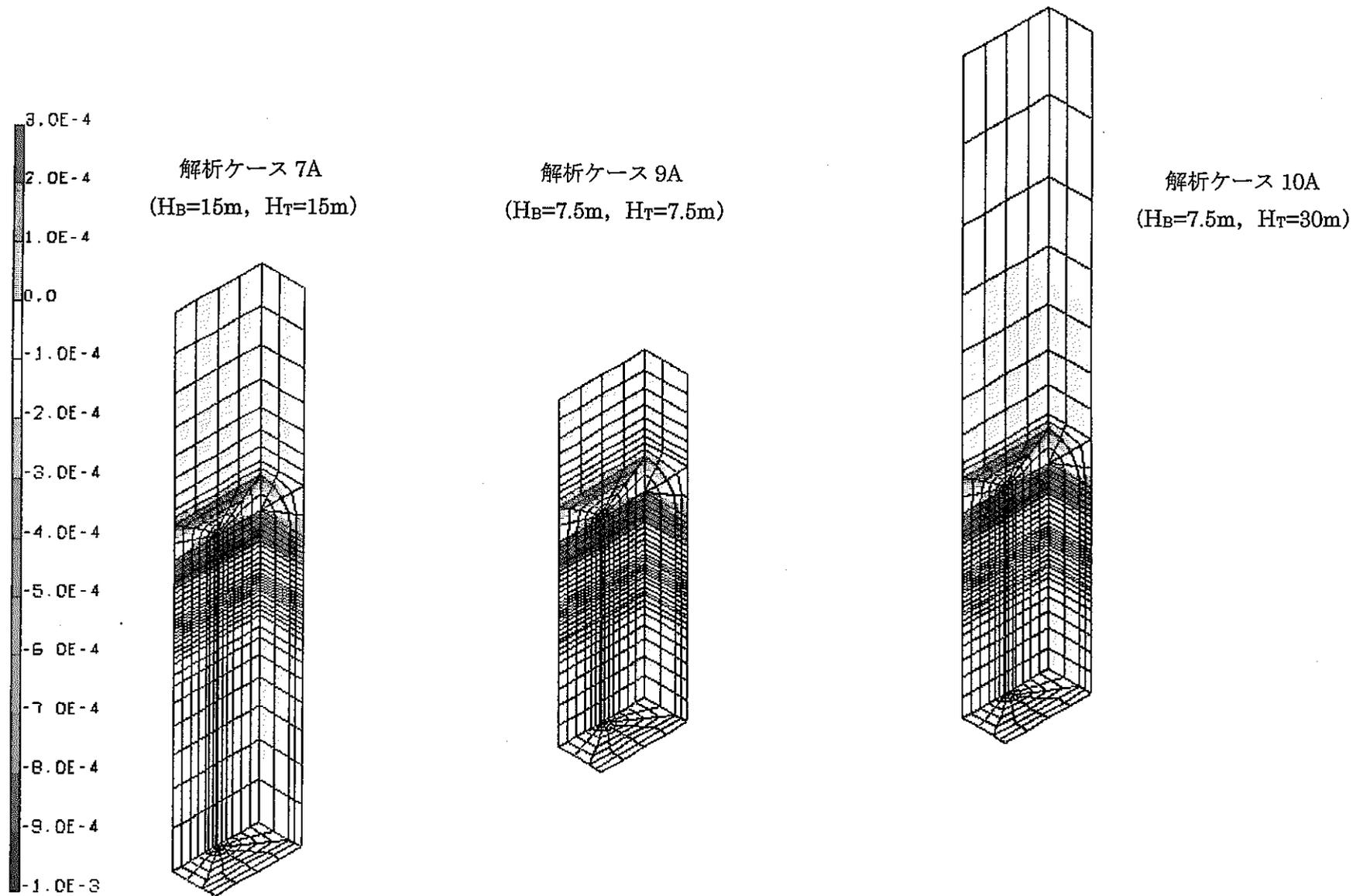


図 5.5-4(4/4) 上部モデル化範囲  $H_T$  の相違による比較  
(処分孔縦置き、せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$ 、単位：-)

解析ケース 2A  
(処分坑道横置き)

解析ケース 7A  
(処分孔縦置き)

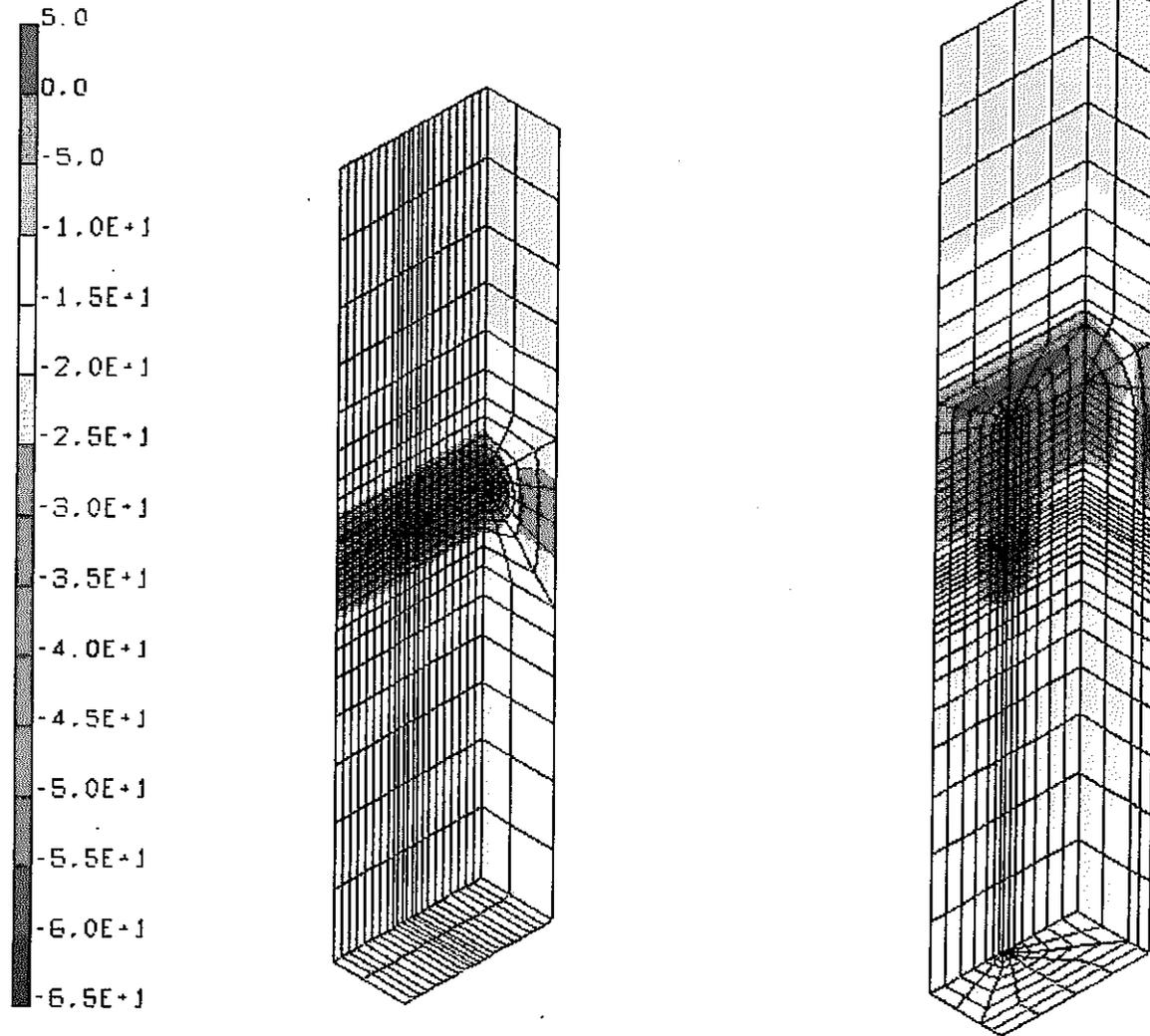
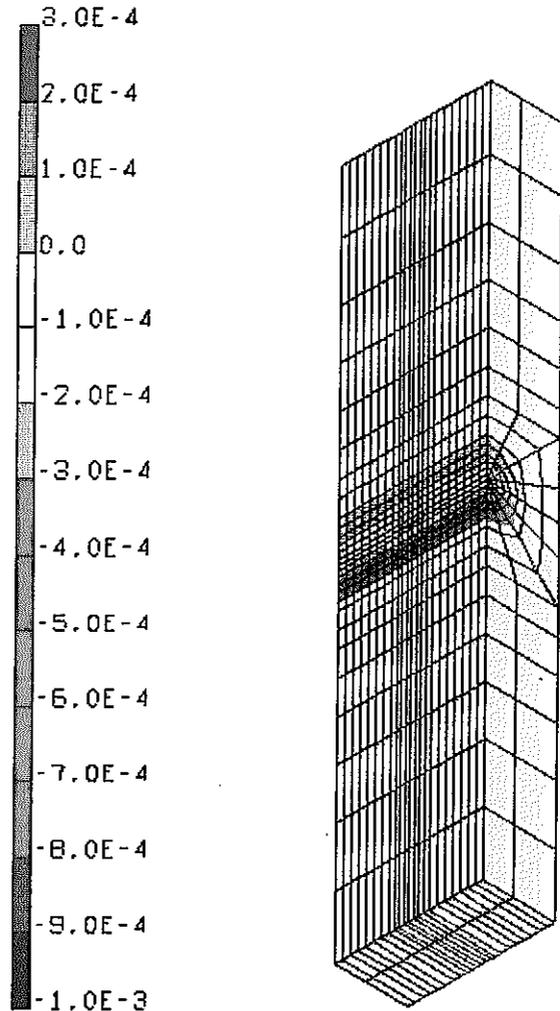


図 5.5-5(1/2) 廃棄体の定置方式による比較 (せん断応力  $\tau_{yz}$ 、単位 :  $\text{kgf/cm}^2$ )

解析ケース 2A  
(処分坑道横置き)



解析ケース 7A  
(処分孔竖置き)

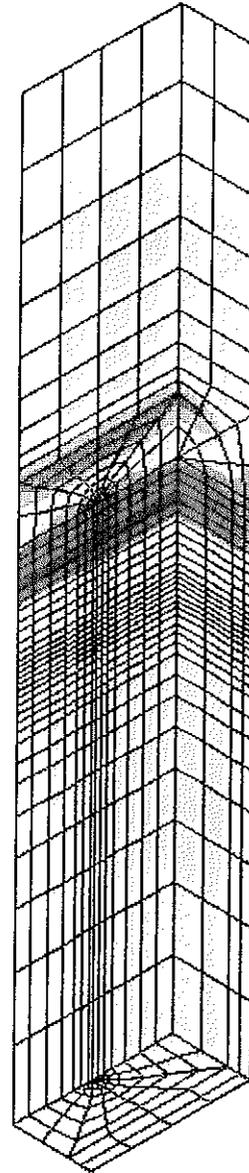


図 5.5-5(2/2) 廃棄体の定置方式による比較 (せん断ひずみ  $\gamma_{yz}$ 、単位：-)

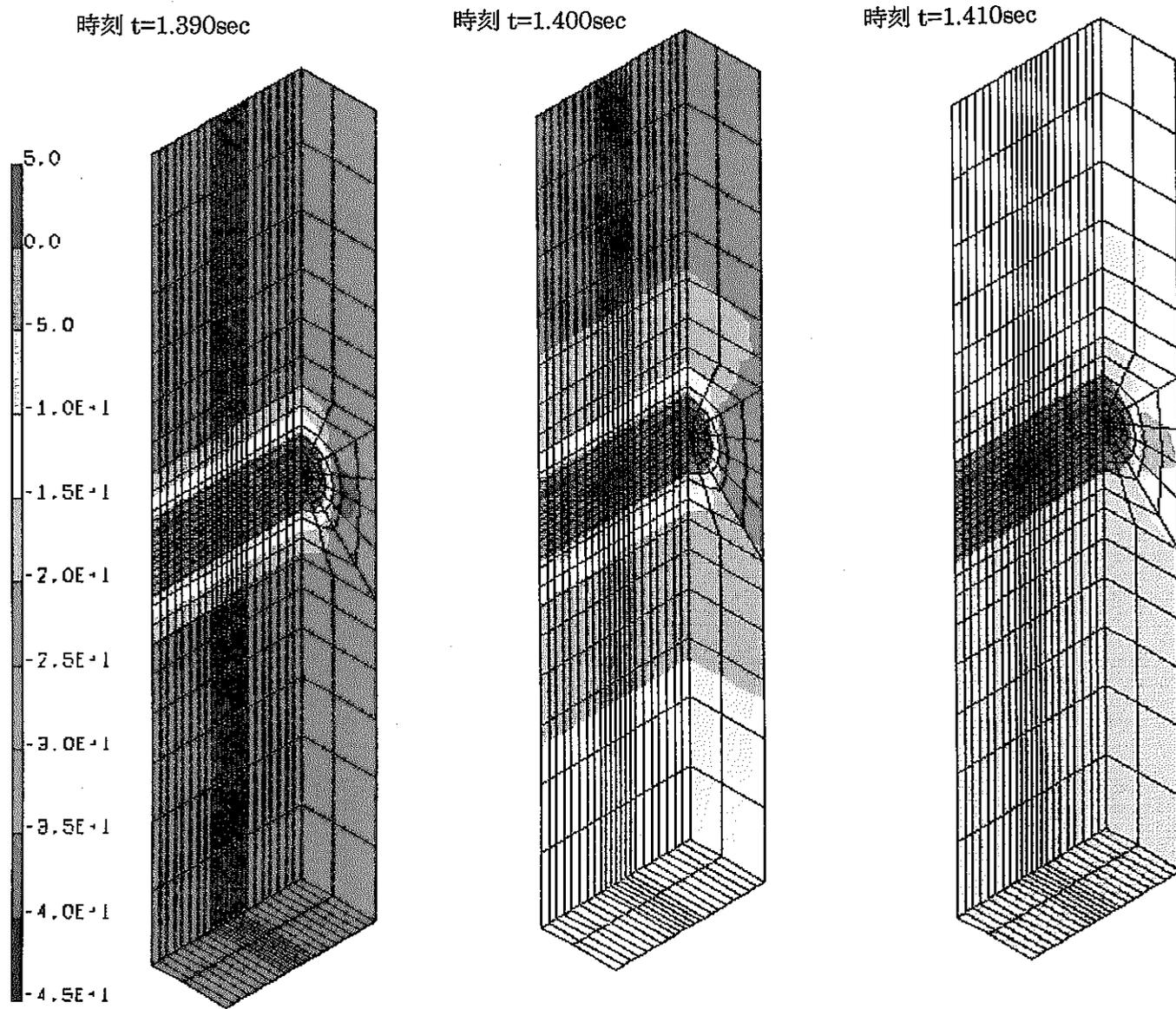


図 5.5-6(1/2) 時間変化に伴う緩衝材の挙動  
(処分坑道横置き、解析ケース 2A、単位 :  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

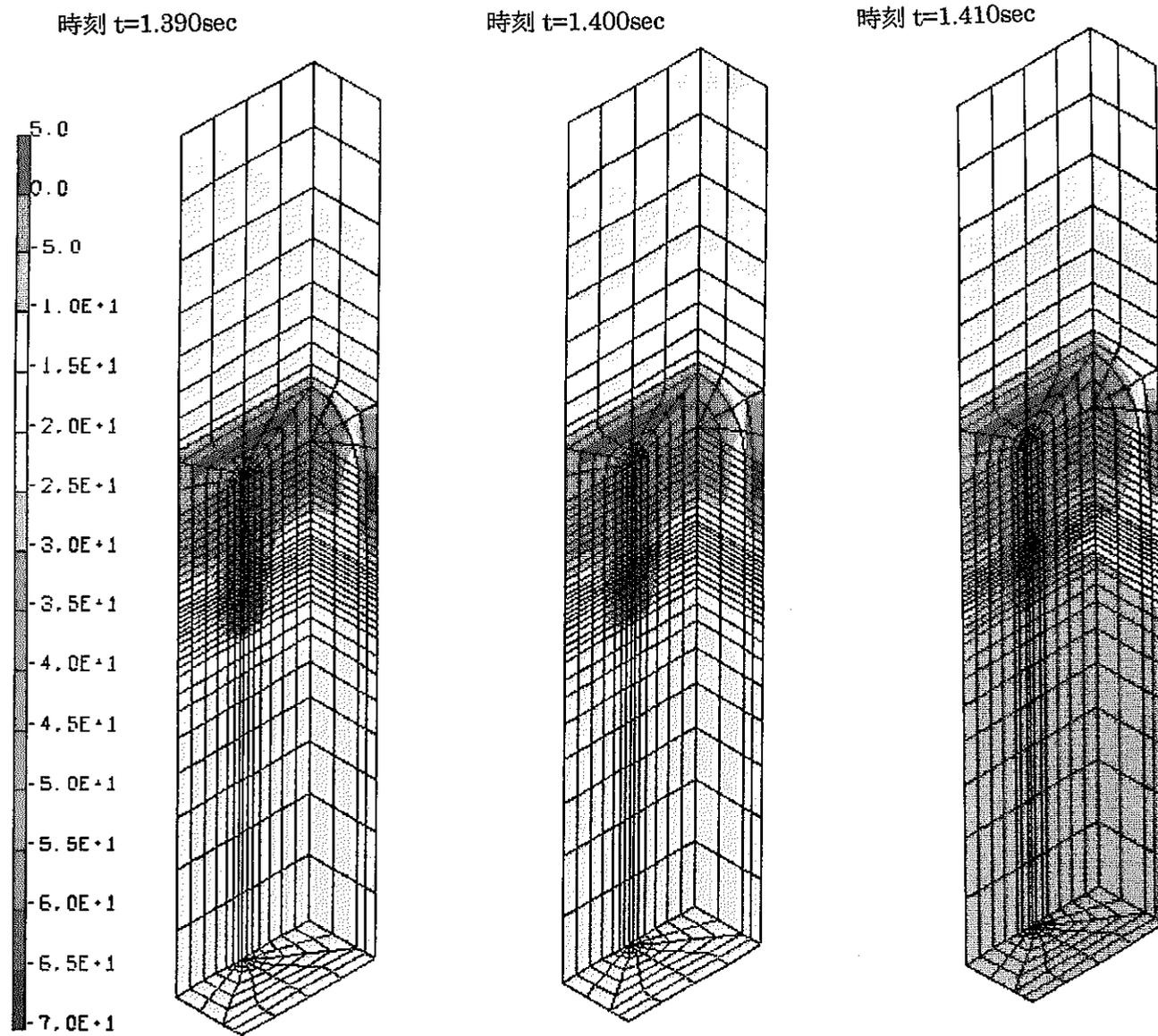


図 5.5-6(2/2) 時間変化に伴う緩衝材の挙動  
(処分孔縦置き：解析ケース 7A、単位：kgf/cm<sup>2</sup>)

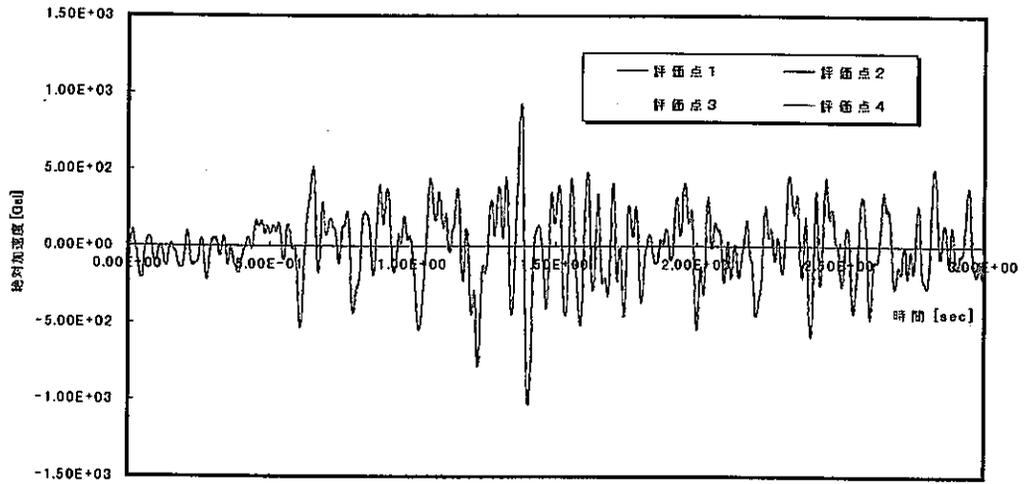


図 5.5-7(1/2) 緩衝材中の加速度応答 (処分坑道横置き)

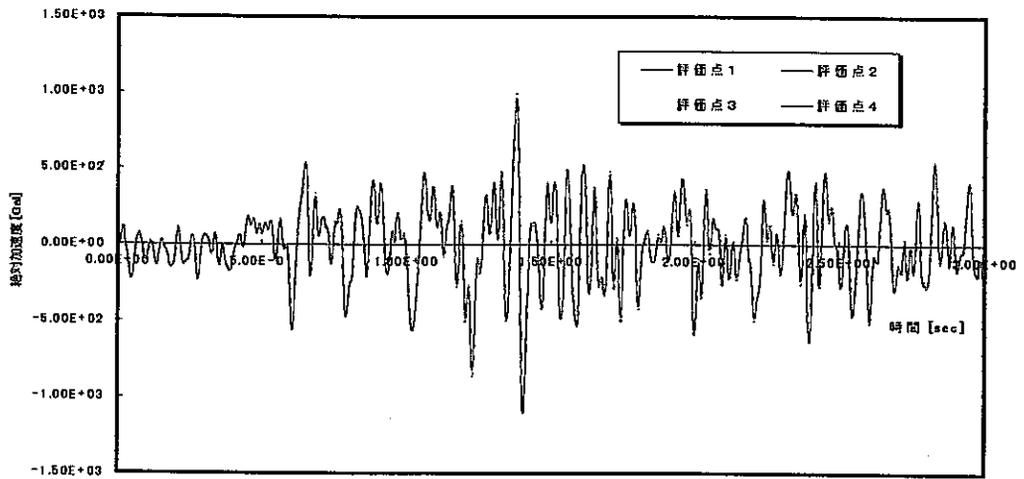


図 5.5-7(2/2) 緩衝材中の加速度応答 (処分孔縦置き)

## 6. 今後の課題

本年度の研究では、実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価に焦点を当て、処分環境における入力地震動の調査、解析コードの実用化への対応（無限粘性境界要素の導入）ならびにニアフィールドパラメータ解析を実施し、動燃殿の第二次取りまとめレポートの作成に向けた予察的な知見を得ることができた。以下に本研究を通じ得られた今後の課題について整理する。

### ① 地中の地震波に関する調査検討

人工バリアの地震応答解析に資する入力地震動の設定を念頭に、地下深部の地震観測事例に関する調査検討を行った。これにより、地下数百メートルに於ける観測事例は極めて少ないことが明らかになった。しかしながら、下総、府中および岩槻の深層井では、2000m～3000m級の観測事例があることが分かった。これらの観測波は、地下深部における地震波の何らかの特性を含んでいるものとして、El-Centroや宮城沖などの過去の著名地震波と同等の扱いで利用することが可能と考える。また、これまでに得られている表層の地震波から、地下深部の地震波を推定する手法に関して調査・整理した。これらの手法は、表層の観測点から注目している深度までの地盤特性（弾性波速度、密度など）を必要とするため、これらのデータが整備されていることが前提となる。また、地盤を均質弾性媒体と仮定している等の手法に関する前提条件を加味すると、現実的かつ保守的な推定結果と成り得るかの十分な検討が必要であろう。

### ② 地震応答解析モデル／コードの開発

地盤の半無限性を考慮することを念頭に、本研究で開発中の解析コードに無限粘性境界を導入した。これにより、解析領域内部から遠方地盤への散逸波を考慮した地震応答解析が可能になり、実際の処分環境をより現実的に取り扱えるように成った。今後は、ベントナイト中のオーバーパックスの移動、沈下あるいはベントナイトーオーバーパックス間あるいはベントナイトー岩盤間などのすべり・剥離を考慮した解析など、実処分場をモデル化する上での高度化が必要となろう。しかしながら、解析コードの機能拡張は、処分環境で想定され得る様々なシナリオとそれらの優先順位を考慮しつつ、検討していくことが重要である。

### ③ 振動実験に基づくモデル/コードの妥当性検討

解析結果と 1/5 スケール人工バリアの振動実験結果との間に見られた相違は、感度解析を通じベントナイトの減衰の影響であることが確認できた。しかしながら、減衰比のみを独立なパラメータとして感度解析を行うことに物理的な意味はなく、本来であれば、減衰の増大に伴う剛性低下も同時に考慮すべきである。したがって、実験系で何らかの減衰効果が作用した可能性が実質的な原因として考えられる。ベントナイトの動的試験データを取得した供試体と振動実験で用いているベントナイトが同一条件下のものか、あるいは人工バリアの据付けで不備な箇所はないか等の観点から、現コードで採用しているモデルの確証を前提とした基礎データ取得実験が必要である。

### ④ 実処分場を想定したニアフィールド耐震安定性の評価検討

これまでに得られている既存の諸情報に基づき、実処分場を想定したニアフィールドの地震応答解析を実施し、モデルならびに解析・評価に関する知見の収集を行った。これらは、人工バリアの耐震安定性評価に資する希少な情報として蓄積していくとともに、第 2 次取りまとめのレファレンスケースの解析に着実に反映させていくことが重要である。以下に、本評価検討を通じて得られた課題についてまとめる。

#### (a) 地震応答解析コードの実用化への対応

本年度のコード改良により、地盤の半無限性を考慮した現実的な解析が可能になった。しかしながら、地震荷重による破壊（たとえば、剥離、すべり等）の有無など構造上の健全性評価、あるいはニアフィールドの岩盤中に想定する不連続領域には対応することはできない等の実用化への対応には課題が残った。したがって、岩盤中のき裂をモデル化すると同時に、土質材料の破壊挙動が表現可能なジョイント要素の導入が候補として考えられる。今後は、ジョイント要素の制約条件等を考慮の上、本地震応答解析コードへの導入を検討すべきである。

#### (b) 隣接する処分坑道の影響

本年度の解析では、処分坑道の軸方向の周期対称性は考慮（すなわち、同一坑道中の隣接するオーバーパックを考慮）しているが、平行に隣接する他の処分坑道を含めた周期対称性については考慮できていない。これは、軸方向の周期対称性と同等の扱いで考慮可能ではあるが、解析モデルを全周モデルとして扱わなければならないため、モデルの規模が相当に大きくなることが予測される。これらの周期対称性を考慮するためには、効率的かつ現実的な解析モデルの検討が必要となる。

(c) 初期条件の設定

初期条件は、想定する処分環境の状態（操業時、処分時、閉鎖後など）に依存するものであり、それぞれの状態に於ける様々な現象を勘案して設定しなければならない。本年度は、解析コードの制約などから周辺岩盤の初期応力は設定していない。今後、他のコードにより周辺岩盤の初期応力を求めるなどの対応が必要である。また、本年度は検討の対象としなかった 2 相系解析の必要性を考慮するとともに、初期間隙水圧の設定等も検討する必要がある。

(d) 入力地震動の設定

本年度の解析では、動燃殿の釜石サイトで観測された比較的深部の実地震波を利用した。今後、様々なサイト特性を想定した解析を行うにあたっては、すべての場合に深部地震波が観測されているとは限らない。本年度の文献調査で整理した、表層地震波から深部地震波を推定する手法（第 2 章参照）を利用するなどして対処すべきである。

## 7. あとがき

動燃事業団殿の第二次取りまとめレポートの作成に向け、限られた時間的制約の下で最大限の知見を得る必要がある。したがって、本年度より開始した実規模想定耐震安定性評価に於いても、基本事象に対する理解を深めるとともに、耐震安定性に関与する重要事象を早期に見極めることが重要である。このことは、やみくもに詳細かつ高精度のモデル化を行うことではなく、実際の物理現象の再現性を損なわない範囲で、より簡易なモデルあるいは手法を用いた合理的な評価を行うことにつながる。

本研究では、今年度の成果により実処分場を想定した耐震安定性の解析・評価を行える見通しを得た。今後は、上述の重要事象の絞り込みを図りつつ、解析コード／モデルの開発ならびに人工バリアの耐震安定性評価を展開することが肝要である。

## 8. 参考文献

- － 坂本義昭、妹尾宗明、他(1996)「TRU 廃棄物処理場への人間侵入の観点から見た地下構造物深度分布調査」
- － 木下 繁夫(1986)「深層井観測により推定された厚い堆積層の地震応答特性」
- － G.N.Owen、R.E.Scholl(1981)「Earthquake Engineering of Large Underground Structures」
- － 奥村光男、多田 和美、他(1982)「地盤－構造物系の相互作用解析における底面粘性境界の有効性について」
- － 奥村 光男、多田 和美 他(1982)「地盤－構造物系の相互作用解析における一手法」
- － W.D.Smith(1974)「A Nonreflecting Plane Boundary for Wave Propagation Problems」
- － P.A.Cundall、R.P.Kunar 他(1978)「Solution of Infinite Dynamic Problem by Finite Modeling in the Time Domain」
- － T.Suzuki、M.Hakuno(1985)「Dynamic Analysis of Ground Motion by FEM with Non-Reflecting Boundary」
- － K.Goto、M.Matsumoto(1985)「Earthquake-Resistance Analysis by Finite Element-Boundary Element Hybrid Method」
- － 三浦 房紀、沖中 宏志(1989)「仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物－地盤系の動的解析手法」
- － 川本、林 正夫(1978)「地盤工学における有限要素解析－地質力学と岩盤力学へのアプローチ－」
- － 動力炉・核燃料開発事業団(1992)「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 -PNC TN 1410 92-081-」

# 付 録 A

粘性境界に関する理論的事項

## 目次

	項
A.1 対象とする系 .....	A-3
A.2 粘性境界要素の基本的定式化 .....	A-4
A.2.1 仮想仕事の原理に基づく平衡方程式 .....	A-4
A.2.2 内部加振問題 .....	A-5
A.2.3 外部加振問題 .....	A-10
A.2.4 入力地震動の規定方法 .....	A-15

## 付録 A. 粘性境界に関する理論的事項

### A.1 対象とする系

地層処分施設に於けるニアフィールドの概念を図 A.1-1 に示す。ニアフィールドはガラス固化体、オーバーパック、ベントナイトおよび周辺岩盤から構成される。無限媒体中に於ける有限な領域に注目した地震応答解析を行う場合、通常の見取りでは解析領域境界を注目している評価範囲からできるだけ遠くに設定し、この境界の影響が解析結果に影響を及ぼさないように定める。すなわち、領域を有限な系で切断することの悪影響を回避することである。ここで言う悪影響とは、例えば、系内の構造物で反射した散逸波が再びその境界で反射し解析領域内に影響を及ぼすことなどがある。しかしながら、この種の対策では、解析領域の大規模化は避けられない問題となり、計算コストが増大し、特に3次元体系では現実的な解析が困難となることが予測される。そこで、解析領域を比較的小さく設定しつつ、境界を人為的に制御することでこれに対処しようとする試みが幾つか用いられている。ここでは、その1つとして Lysmer (1969) 等の提案した粘性境界について解説するとともに、これまでに開発した3次元動的有効応力解析コードへの導入可能性について記載する。

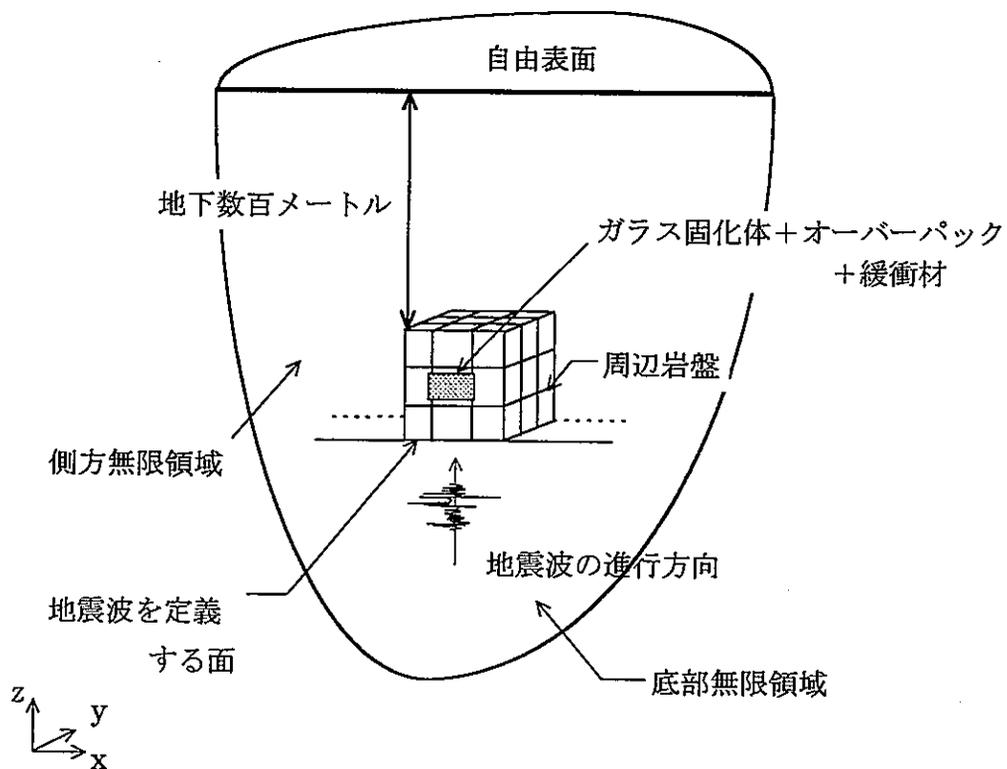


図 A.1-1 対象とする系(概念図)

## A. 2 粘性境界要素の基本的定式化

### A.2.1 仮想仕事の原理に基づく平衡方程式

仮想仕事の原理に基づく、動的な運動方程式(平衡方程式)は以下のように表される。

$$\int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \int_V \{\delta u\}^T (\{F\} - \eta \{\dot{u}\} - \rho \{\ddot{u}\}) dV - \int_S \{\delta u\}^T \{T\} dS = 0 \quad (\text{A.2-1})$$

ここで、

- $\{\delta \varepsilon\}$  : 仮想ひずみベクトル
- $\{\delta u\}$  : 仮想変位ベクトル
- $\{\sigma\}$  : 応力ベクトル
- $\{F\}$  : 物体力ベクトル
- $\{u\}$  : 変位ベクトル
- $\{T\}$  : トラクションベクトル

係数  $\eta$  および  $\rho$  はそれぞれ粘性係数および密度である。また、 $V$ 、 $S$  は解析領域の全体積および全表面積を表している。上式の左辺第 3 項の面積積分が、人為的に設けた(解析領域)境界でのエネルギーの授受を表す。今、物体力  $\{F\}$  として地震荷重および外力が作用するものとし、有限要素法により上式の空間的な離散化を考えると、

$$\{\delta u\}^T ([K]\{u\} + [C]\{\dot{u}\} + [M]\{\ddot{u}\}) - \int_S \{\delta u\}^T \{T\} dS = \{\delta u\}^T (-[M]\{\ddot{z}\} + \{f\}) \quad (\text{A.2-2})$$

ここで  $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$  はそれぞれ剛性マトリクス、減衰マトリクスおよび質量マトリクスを表し  $\{u\}$ 、 $\{f\}$  は節点変位ベクトル、節点力ベクトルを表す。地震荷重は図 A.1-1 に示す解析領域底面に鉛直下面から作用すると仮定する。この仮定は、比較的深い震源に対する表層構造物の地震応答解析等に於いて、解析上便宜的に想定されるものであり、実際上は地震波を定義する面からの斜め入射を考慮する必要がある。本研究では、斜め入射に対する検討は当面の課題とし、鉛直入射を前提とした最も基本的な定式化を行う。

今、問題としているのは 上式の面積積分の項であり、これは入射面からの加振に対して以下の 2 種類の境界面で成される仕事により表される。

- ① 解析領域内部から底部基盤領域、側方自由領域(フリーフィールド)および上部領域への散逸波により境界で成される仕事
- ② フリーフィールドの地盤の振動により成される仕事

目的は、これらの仕事を精度良く定式化し運動方程式に組み込むことである。なお、上記①の散逸波は、解析領域内の人工バリアで反射した散逸波に伴うものであり、対象とする境界面は6面体のすべての面(前(FR)、後(BA)、左(L)、右(R)、上(TOP)、底(BOT))となる。一方、②のフリーフィールドの振動は解析領域内の影響を受けない遠方のものであり、対象とする境界面は側面(前(FR)、後(BA)、左(L)、右(R))のみである。以下、上記の仕事を有限要素法に従い離散化する。ここでは、①を内部加振問題と称し、②を外部加振問題と称することとする。

#### A.2.2 内部加振問題

解析領域内部からの散逸波によって境界で成される仮想仕事を考慮し、境界に人為的に付与すべき条件を求める。具体的には、境界上の節点速度と節点力を関係づけるマトリクスを求めることである。すなわち、

$$\{f\} = [C]\{u\} \quad (\text{A.2-3})$$

ここでは、マトリクス[C]を粘性境界マトリクスと称することとする。今、(A.2-2)式の左辺第3項で表される仮想仕事を以下の様に表す。

$$\delta W = \int_S T_j \delta u_j dS \quad (\text{A.2-4})$$

ここに、jはx,y,z軸方向のいずれかを表す添字であり、 $T_j$ および $\delta u_j$ はj方向のトラクションと仮想変位である。通常、トラクションは媒体の密度および弾性波速度Vを用いて次式で表される。

$$T_j = a\rho V u_j \quad (\text{A.2-5})$$

弾性波速度Vは注目している運動の方向に従い、せん断波速度 $V_s$ およびたて波速度 $V_p$ が用いられる。また、係数aは境界に於けるエネルギー吸収を左右するものであり、 $a=1$ のとき最もエネルギーを吸収する事が知られている。

3次元問題として扱う場合、境界面は側方に4面(前(FR)、後(BA)、左(L)、右(R))と上面(TOP)および底面(BOT)の合計6面がある。ここでは、図 A.2-1 に示す右側面(R)に関する粘性境界マトリクスの誘導を示す。他の境界面についても対象とするトラクション、変位、速度の成分が異なるのみで考え方は全く同じである。

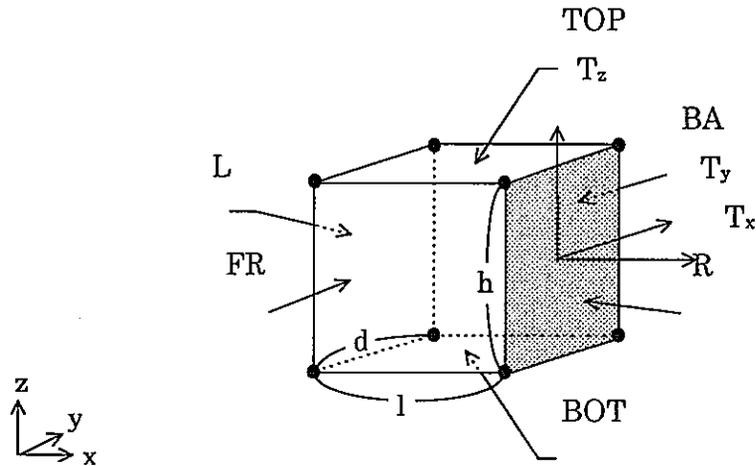


図 A.2-1 3次元体系と境界面の取り方

(a) x方向の運動に伴う粘性境界マトリクス

x方向の運動のみを考えると、対象とする弾性波は解析領域内の構造物による散逸波であり、変位成分がR面と垂直になる縦波(p波)である。今、境界面でのx方向の速度をuとすると、トラクションTxは(A.2-5)式より次式で与えられる。

$$T_x = \rho V_p \dot{u} \tag{A.2-6}$$

また、境界Rに於けるx方向の仮想変位 $\delta u$ が成す仮想仕事は、

$$\delta W_x = \int_0^h \int_0^d \rho V_p \dot{u} \delta u dy dz \tag{A.2-7}$$

変位uについては形状関数{N}および節点変位{u}<sup>e</sup>を用いて以下のように表す。

$$u = \frac{1}{dh} \{N\} \{u\}^e \tag{A.2-8}$$

ここで、上付きの  $e$  は 1 つの有限要素に着目した場合の節点変位であることをあらわす。ここでは、以下の形状関数を仮定することとする。

$$\{N\} = \{(h-z)(d-y) \quad (h-z)y \quad yz \quad z(d-y)\} \quad (\text{A.2-9})$$

$$\{u\}^T = \{u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4\} \quad (\text{A.2-10})$$

(A.2-8)式より、節点速度および仮想変位は以下の様になる。

$$\dot{u} = \frac{1}{dh} \{N\} \{\dot{u}\}^e \quad (\text{A.2-11})$$

$$\delta u = \frac{1}{dh} \{N\} \{\delta u\}^e \quad (\text{A.2-12})$$

ここで、

$$\{u\}^T = \{u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4\} \quad (\text{A.2-13})$$

$$\{\delta u\}^T = \{\delta u_1 \quad \delta u_2 \quad \delta u_3 \quad \delta u_4\} \quad (\text{A.2-14})$$

以上より、(A.2-7)式で表される仮想仕事は以下の様になる。

$$\begin{aligned} \delta W_{zx} &= \int_0^h \int_0^d \rho V_p \frac{1}{dh} \{N\} \{\dot{u}\}^e \frac{1}{dh} \{N\} \{\delta u\}^e dydz \\ &= \delta u^e \frac{\rho V_p dh}{36} [R] \{\dot{u}\}^e \end{aligned} \quad (\text{A.2-15})$$

ここで、

$$[R] = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-16})$$

上式の仮想仕事は、境界面 R の等価節点力ベクトル  $\{f_x\}^e$  を用いて、以下の様に表すことができる。

$$\delta W_x = \{\delta u\}^e \{f_x\}^e \quad (\text{A.2-17})$$

ここに、

$$\{f_x\}^e = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{x2} \\ f_{x3} \\ f_{x4} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2-18})$$

従って、(A.2-15)式と(A.2-17)式より、以下の等価節点力ベクトルが得られる。

$$\{f_x\}^e = \frac{\rho V_p dh}{36} [R] \{u\}^e \quad (\text{A.2-19})$$

(b) y, z 方向の運動に伴う粘性境界マトリクス of 導出

図 2.2 より、境界面 R の y 方向の運動および z 方向の運動は面に平衡であるため対象とする弾性波は双方せん断波 (S 波) である。各々のトラクションは以下で与えられる。

$$T_y = \rho V_s \dot{v} \quad (\text{A.2-20})$$

$$T_z = \rho V_s \dot{w} \quad (\text{A.2-21})$$

x 方向の運動の場合と同様の操作を行うと、それぞれの仮想変位が成す仮想仕事は次式で与えられる。

$$\delta W_y = \delta v^e \frac{\rho V_s dh}{36} [R] \{v\}^e \quad (\text{A.2-22})$$

$$\delta W_z = \delta w^e \frac{\rho V_s dh}{36} [R] \{w\}^e \quad (\text{A.2-23})$$

従って、y 方向ならびに z 方向の等価節点力ベクトルは以下の様になる。

$$\{f_y\}^e = \frac{\rho V_S dh}{36} [R] \{v\}^e \quad (\text{A.2-24})$$

$$\{f_z\}^e = \frac{\rho V_S dh}{36} [R] \{w\}^e \quad (\text{A.2-25})$$

(c) 境界面 R の粘性境界マトリクス

(A.2-19)式、(A.2-24)式および(A.2-25)式より、節点速度と節点変位を関連付ける境界面 R に関するマトリクスを導出することができる。今、これを  $[C]_R$  とすると、

$$\{f\} = [C]_R \{\delta\} \quad (\text{A.2-26})$$

ここに、

$$\{f\}^T = \{f_{x1} \quad f_{y1} \quad f_{z1} \quad \cdots \quad f_{x4} \quad f_{y4} \quad f_{z4}\} \quad (\text{A.2-27})$$

$$\{\delta\}^T = \{u_1 \quad u_1 \quad u_1 \quad \cdots \quad w_4 \quad w_4 \quad w_4\} \quad (\text{A.2-28})$$

$$[C]_R = \frac{\rho dh}{36} \begin{bmatrix} 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 \\ 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_p \\ V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s \end{bmatrix}$$

(A.2-29)

他の境界面についても、運動の方向と弾性波の振幅方向に注意を払えば、同様の操作でこれを求めることができる。従って、境界面 FR および BS の粘性境界マトリクスは以下の様になる。

$$[C]_{FR} = \frac{\rho h}{36} \begin{bmatrix} 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 \\ 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 \\ 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S \\ 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 \\ 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P & 0 \\ 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S \\ V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 \\ 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 \\ 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S \\ 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 \\ 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P & 0 \\ 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S \end{bmatrix}$$

(A.2-30)

$$[C]_{RS} = \frac{\rho l d}{36} \begin{bmatrix} 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 \\ 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 \\ 0 & 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P \\ 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 \\ 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 \\ 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P \\ V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 \\ 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 \\ 0 & 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P & 0 & 0 & 2V_P \\ 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 & 0 \\ 0 & 2V_S & 0 & 0 & V_S & 0 & 0 & 2V_S & 0 & 0 & 4V_S & 0 \\ 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & V_P & 0 & 0 & 2V_P & 0 & 0 & 4V_P \end{bmatrix}$$

(A.2-31)

なお、境界面 R と L ならびに FR と BA は、対称性より、次式が成り立つものとする。

$$[C]_L = [C]_R \quad (A.2-32)$$

$$[C]_{FR} = [C]_{BA} \quad (A.2-33)$$

### A.2.3 外部加振問題

内部加振問題と同様の手順で、フリーフィールドの振動により境界面で成される仕事を考慮し、境界に人為的に付与すべき条件を求める。ここでは、フリーフィールド上の節点変位および節点速度に関係する等価節点力がある。前者を関係づけるマトリクスを

側方境界剛性マトリクス、後者を関係づけるマトリクスを側方境界減衰マトリクスと称することとする。

(a) 側方境界剛性マトリクスの導出

簡単の為、フリーフィールドの振動が x 方向のみの場合について考える。すなわち、仕事に関与する境界は R 面と L 面のみの場合である。今、フリーフィールドの変位振幅を  $u^f$  とすると、

$$u^f = u^f(z) \quad (\text{A.2-34})$$

つまり、x 方向のせん断 1 自由度系の応答変位を考える。従って、 $u^f$  によって生じるひずみも  $\gamma_{zx}$  のみであり、応力も  $\tau_{zx}$  のみである。

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u^f(z)}{\partial z} \quad (\text{A.2-35})$$

$$\tau_{zx} = \mu \gamma_{zx} = \mu \frac{\partial u^f(z)}{\partial z} \quad (\text{A.2-36})$$

ここに、 $\mu$  はフリーフィールド地盤のせん断剛性である。x 方向の仮想変位  $\delta u^f$  の成す仮想仕事は次式で与えられる。

$$\delta W_{zx} = \int_0^h \int_0^d \tau_{zx} \delta u^f dy dz \quad (\text{A.2-37})$$

仮想変位  $\delta u^f$  は、形状関数  $[N]$  および節点変位により次式で与えられる。

$$\delta u^f = \frac{1}{2h} [N] \{\delta u\}^f \quad (\text{A.2-38})$$

ここに、

$$[N]^T = \{h-z \quad z \quad h-z \quad z\} \quad (\text{A.2-39})$$

$$\{\delta u\}^{fT} = \{\delta u^f_i \quad \delta u^f_{i+1} \quad \delta u^f_i \quad \delta u^f_{i+1}\} \quad (\text{A.2-40})$$

従って、フリーフィールドの振動による境界面 R での仮想仕事は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\delta W_{zx} &= \frac{\mu}{4h^2} \int_0^h \int_0^d \frac{\partial([N]\{u\}^f)}{\partial z} [N]\{\delta u\}^f dydz \\ &= \{\delta u\}^f \frac{\mu d}{8} [S]\{u\}^{fT}\end{aligned}\tag{A.2-41}$$

ここに、

$$[S] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}\tag{A.2-42}$$

これより、R 面での節点力ベクトル $\{f\}^f$ は

$$\{f\}^f = \frac{\mu d}{8} [S]\{u\}^{fT}\tag{A.2-43}$$

従って、側方剛性マトリクス $[G]_R$ が次式で与えられる。

$$[G]_R = \frac{\mu d}{8} [S]\tag{A.2-44}$$

L 面の境界剛性マトリクス $[G]_L$ は、境界面に対するフリーフィールドの振動方向が R 面と逆向きであることを加味すると次式で与えられる。

$$[G]_R = -[G]_L\tag{A.2-45}$$

フリーフィールドの運動方向が y 方向の場合についても、同様の操作で求めることができる。結果のみ示すと BA 面の側方境界剛性マトリクス $[G]_{BA}$ は次式となる。

$$[G]_{BA} = \frac{\mu l}{8} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-46})$$

FR面の側方境界剛性マトリクスとの関係は次式で与えられる。

$$[G]_{BA} = -[G]_{FR} \quad (\text{A.2-47})$$

本プログラムでは、この節点変位と節点力を関係づける側方境界剛性マトリクスをプログラム内に組み込むことなく、フリーフィールド単体モデルの動的応力解析の結果から直接的に境界節点に付与すべき条件を与える。即ち、(A.2-37)式のフリーフィールド上での仮想変位  $\delta u^f$  を形状関数を導入し、離散化表示することなく、直接フリーフィールド上での応力値  $\tau_{zx}^f$  を用いて節点力を与えるわけである。

$$f_{zx} = \int_0^h \int_0^d \tau_{zx}^f dx dy \quad (\text{A.2-48})$$

この表記は、x方向に振幅成分を有するS波入力に対するものである。y方向に振幅成分を有するS波あるいはz軸方向に振幅成分を有するP波についても同様に以下の様になる。

$$f_x = \int_0^h \int_0^d \sigma_x^f dx dy \quad (\text{A.2-49})$$

$$f_{yx} = \int_0^h \int_0^d \tau_{yx}^f dx dy$$

この応力成分  $\tau_{zx}^f$ 、 $\sigma_x^f$  及び  $\tau_{yx}^f$  が、境界面Rが成す仕事に関係する、3次元応力成分である(図A.2-2参照)。実際の解析では、境界面Rを図A.2-3に示すような有限要素分割にした小区画として考える。この各区画面全体の反力を、区画の各節点に均等に分配することにより、境界面応力の等価節点力が決定される。

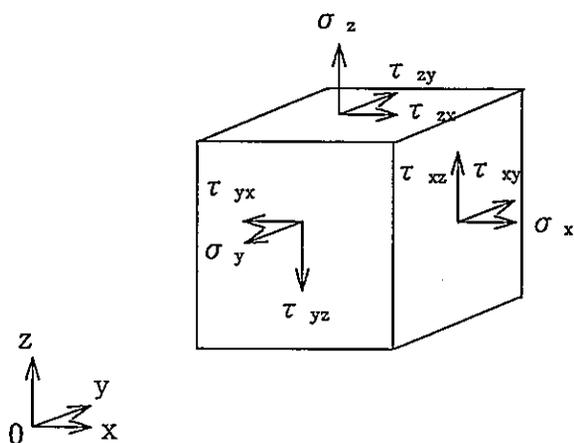
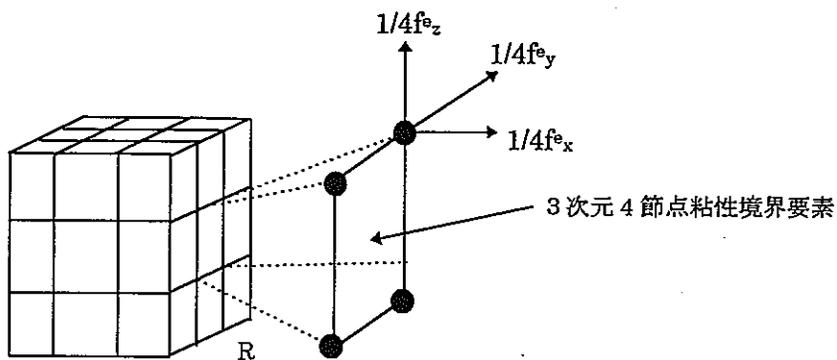


図 A.2-2 境界上での 3 次元応力成分

図 A.2-3 は面全体の反力を各節点に  $1/4$  毎分配した時の例であり、境界面 R の全体としての節点力は区画同士の重複する等価節点力を足し合わせることで算定する。



(注) 上付きの e は一つの要素に対する等価節点力であることを示している。

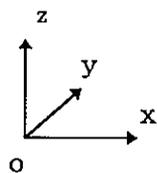


図 A.2-3 次元境界応力と等価節点力の与え方

なお、2次元2節点粘性境界要素は、面全体の反力を各節点に  $1/2$  毎分配する。

(b) 側方境界減衰マトリクスの誘導

フリーフィールド上の節点速度と境界上の等価節点力とを関係づける側方境界減衰マトリクスを導出する。ここでは、この減衰マトリクスをレーリー減衰の一種である剛性比例型として仮定する。すなわち、

$$[G]_{ci} = \beta [G]_i \quad (\text{A.2-50})$$

ここに、

$i$  : FR, BA, L, R のいずれか

$\beta$  : レーリー減衰係数

$$\beta = \frac{2h}{\omega} = \frac{h}{\pi f}$$

$\omega$  : 角振動数[rad/s]

$h$  : 減衰定数[-]

$f$  : 振動数[Hz]

#### A.2.4 入力地震動の規定方法

下方から上昇に伝搬してくる地震動を想定して、地盤—構造物系の相互作用解析を行う場合、境界に於ける散逸波の吸収およびフリーフィールドの振動に伴う側方境界応力の成す仕事ばかりでなく、入力地震動の規定方法も再考しなければならない。即ち、地震波が伝搬する底部領域の半無限性を考慮し、入力地震動として上昇波のみを規定する必要がある。

今、図 A.2-4 に示す系を想定し、せん断波による一次元波動伝搬を考える。

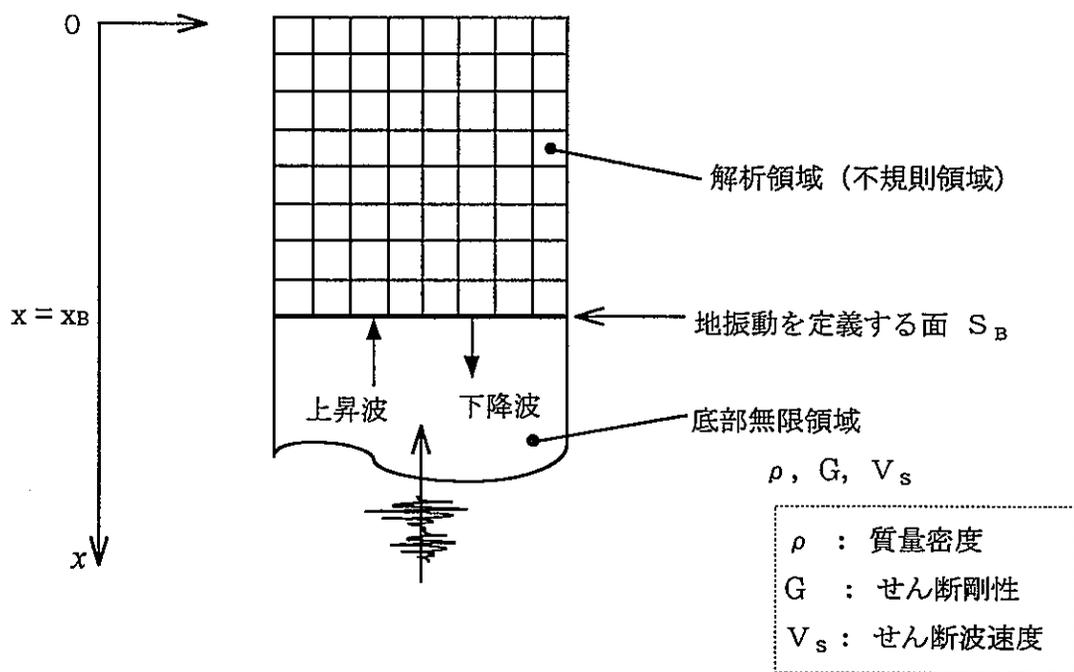


図 A.2-4 底部無限領域を有する 1次元せん断モデル

境界面  $S_B$  での地震波動を内部距離減衰を考慮した上昇波成分ならびに下降波成分に分けて表すと、

$$U_B(x_B, t) = E_o e^{j\omega(t - \frac{x_B}{V_s})} + F_o e^{j\omega(t + \frac{x_B}{V_s} + \delta)} \quad (\text{A.2-51})$$

ここに、

$E_o$  : 上昇波の振幅

$F_o$  : 下降波の振幅

$\omega$  : 角周波数

$\kappa$  : 波数

$j$  :  $\sqrt{-1}$  (虚数単位)

$\delta$  : 上昇波と下降波の位相違差  $2\frac{x_B}{V_s} + \delta$  を表す為、形式的に導入したもの。

となり、これにより境界面  $x_B$  で生じるせん断応力  $\tau_B$  は、次式で算定される。

$$\tau_B = G \frac{\sigma u_B(x_B, t)}{\sigma x} \quad (\text{A.2-52})$$

(A.2-51)式の微分を行い、(A.2-52)式で整理すると、以下の式が得られる。

$$\tau_B = G \cdot j \frac{\omega}{V_S} \left\{ -2E_o e^{j\omega(t - \frac{x_B}{V_S})} + u_B(x_B, t) \right\} \quad (\text{A.2-53})$$

境界面  $S_B$  に於いて解析領域が底部無限領域から受ける反力は、以下の境界応力  $\tau_B$  により成される仮想仕事  $\delta W_B$  を評価することにより決定される。

$$\delta W_B = - \int_{S_B} \delta u \tau_B ds \quad (\text{A.2-54})$$

これより、境界面  $S_B$  での全反力  $F_B$  として次式が得られる。

$$F_B(x_B, t) = -j\omega C_B^{(S)} \left\{ 2E_o e^{j\omega(t - \frac{x_B}{V_S})} + u_B(x_B, t) \right\} \quad (\text{A.2-55})$$

ここで、 $C_B^{(S)}$  は定数係数であり、

$$C_B^{(S)} = \rho V_S S_B \quad (\text{A.2-56})$$

で表される。これは、せん断波についての無限粘性境界を表すものである。

尚、周波数空間で表示した境界反力  $F_B$  は、逆フーリエ変換を施すことで物理空間に於ける以下の形式で表すことができる。

$$F_B(t) = -C_B^{(S)} \left\{ -2\dot{u}_g(t) + \dot{u}_B(t) \right\} \quad (\text{A.2-57})$$

ここに、

$\dot{u}_g(t)$  :  $x = x_B$  での上昇波 E の速度振幅

$\dot{u}_B(t)$  : 未知の境界変位

以上より、図 A.2-4 に示した半無限領域を有する系の底部境界では、入力として上昇波 E の 2 倍を与えるとともに、粘性係数  $C_B^{(S)}$  なる減衰力で下降波を吸収してやる必要がある。上式の右辺第 2 項は底面粘性境界による散逸波の吸収に相当するものである。

### A. 3 運動方程式

以上で導出した粘性境界マトリクス、側方境界剛性マトリクスおよび側方境界減衰マトリクスを用い、全体系の運動方程式を構築する。この際、境界の節点自由度に注意して全体系のマトリクスを組み立てると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + [C]_{BS}\{\dot{u}\} + [C]_{TOP}\{\dot{u}\} \\
& \quad + [C]_{FR}(\{\dot{u}\} - \{\dot{u}\}_{FR}^f) + [C]_{BA}(\{\dot{u}\} - \{\dot{u}\}_{BA}^f) \\
& \quad + [C]_R(\{\dot{u}\} - \{\dot{u}\}_R^f) + [C]_L(\{\dot{u}\} - \{\dot{u}\}_L^f) \\
= & -[M]\{\ddot{z}\} + \{f\} + [G]_{FR}\{u\}_{FR}^f + [G]_{BA}\{u\}_{BA}^f \\
& \quad + [G]_L\{u\}_L^f + [G]_R\{u\}_R^f + [G_C]_{FR}\{\dot{u}\}_{FR}^f + [G_C]_{BA}\{\dot{u}\}_{BA}^f \quad (A.3-1) \\
& \quad + [G_C]_L\{\dot{u}\}_L^f + [G_C]_R\{\dot{u}\}_R^f
\end{aligned}$$

未知量と既知量を分けて整理すると、最終的な運動方程式が次式で得られる。

$$\begin{aligned}
& [M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [C]_{BS} + [C]_{TOP} + [C]_{FR} + [C]_{BA} + [C]_L + [C]_R)\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \\
= & -[M]\{\ddot{z}\} + \{f\} + [G]_{FR}\{u\}_{FR}^f + [G]_{BA}\{u\}_{BA}^f + [G]_R\{u\}_R^f + [G]_L\{u\}_L^f \\
& \quad + ([G_C]_{FR} + [C]_{FR})\{\dot{u}\}_{FR}^f + ([G_C]_{BA} + [C]_{BA})\{\dot{u}\}_{BA}^f \quad (A.3-2) \\
& \quad + ([G_C]_L + [C]_L)\{\dot{u}\}_L^f + ([G_C]_R + [C]_R)\{\dot{u}\}_R^f
\end{aligned}$$

ここに、

$[C]_i$  : 粘性境界マトリクス

$[C]_{BS}$  : 底面粘性境界マトリクス

$[G]_i$  : 側方境界剛性マトリクス

$[G_C]_i$  : 側方境界減衰マトリクス

$\{u\}_i^f$  : 自由地盤の変位ベクトル

$\{u\}_i^f$  : 自由地盤の速度ベクトル

自由地盤の変位ベクトルならびに速度ベクトルは図 A.3-1 に示すフリーフィールド単体モデルの応答解析より別途求めておく必要がある。本プログラムでは、解析領域の外周全域に渡り、このフリーフィールドが同一に存在することを仮定する。

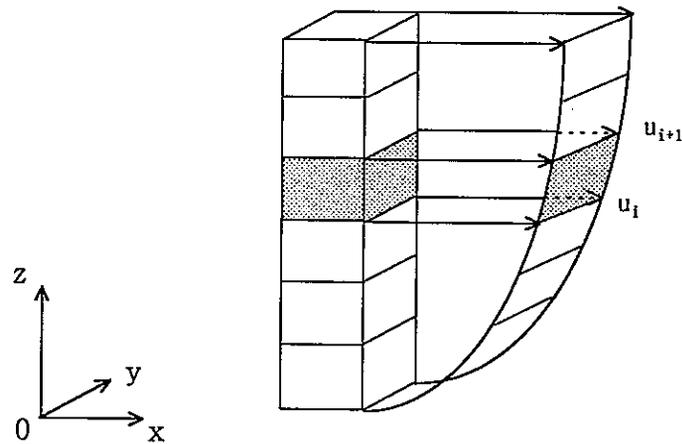


図 A.3-1 フリーフィールド単体モデル概念

## 付 録 B

### 3 次元地震応答解析コード

—ユーザーズマニュアル—

# 目次

項

1. コードの概要.....
2. 実行形式.....
3. 座標系と単位系.....
4. 要素ライブラリ.....
5. 入力形式.....

## 1. コード概要

本解析コードは、人工バリアの耐震安定性評価を目的として開発された有限要素法による3次元2相系地震応答解析コードである。本解析コードの有する特徴を以下に列挙する。

- (a) 土・水2相系地盤を対称とした3次元動的有効応力解析を実施することができる。
- (b) 土質材料の他、一般構造物の解析も可能である。
- (c) 自重環境下における初期応力解析（静的応答解析）が可能である。
- (d) 動的応答解析では、周波数応答解析ならびに時刻歴応答解析が可能である。
- (e) 土質材料の非線形性は、等価線形解析および直接積分により対応可能である。
- (f) 過剰間隙水圧の上昇過程を追跡し、液状化評価を行うことができる。
- (g) 地盤の半無限性を考慮することができ、鉛直下方からの入射波を定義することにより地震荷重を設定できる。また、遠方地盤への波の散逸を考慮することができる。
- (h) CPU時間の制約等により解析が異常終了した場合、リスタート機能を用いることにより、計算が打ち切られた時点からの再計算が可能である。
- (i) 本解析コードとは独立したプレポスト処理システムを併用することにより、モデル化ならびにポスト処理を支援することができ、解析・評価作業を効率的に行うことができる。

## 2. 実行形式

本コードの実行形式ならびに代表的な処理フローを図 2.1, 図 2.2 に示す。

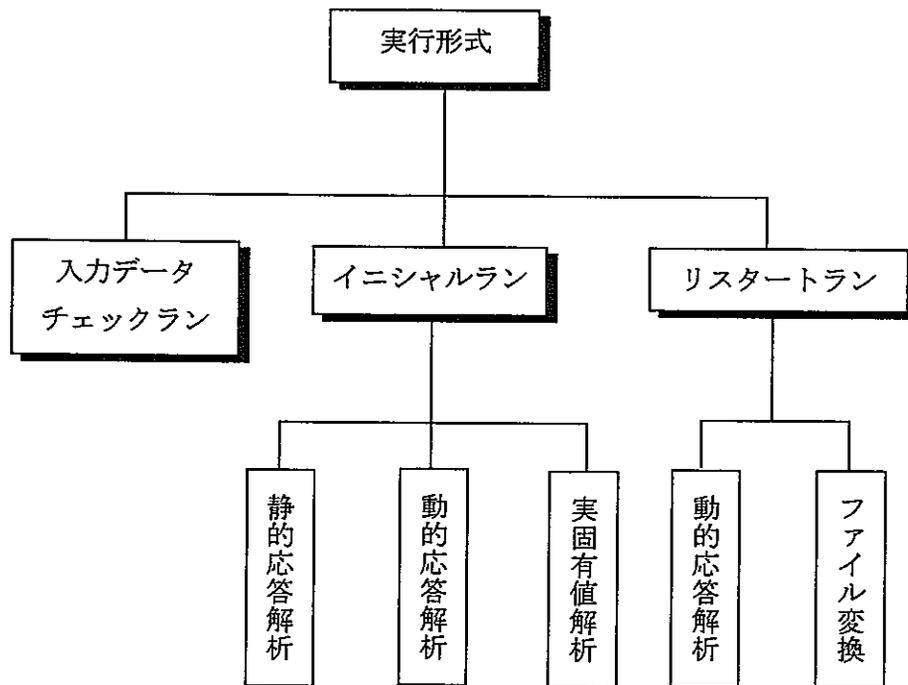


図 2.1 地震応答解析コードの実行形式

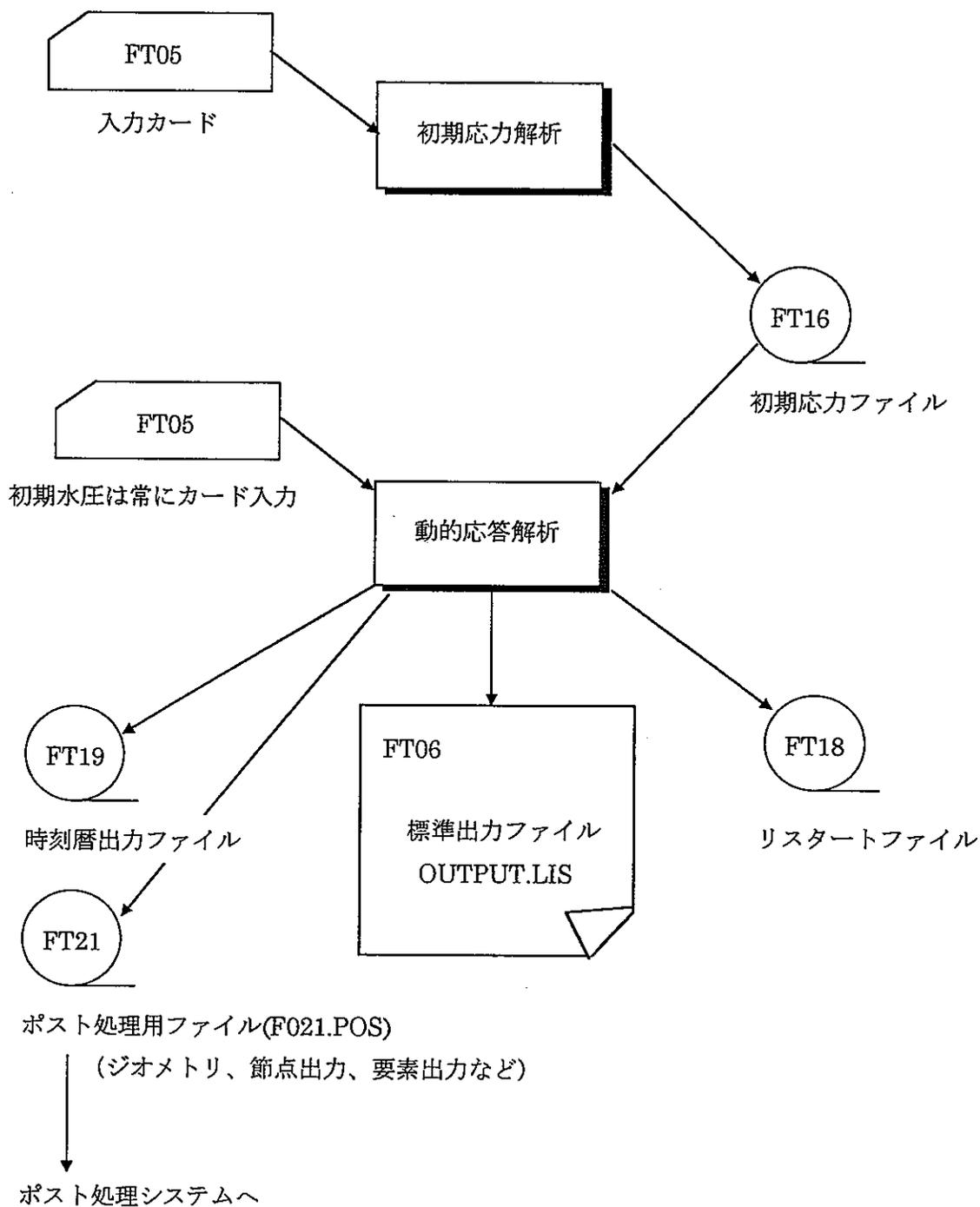


図 2.2(1/2) 地震応答解析処理フロー (静的・動的応答解析)

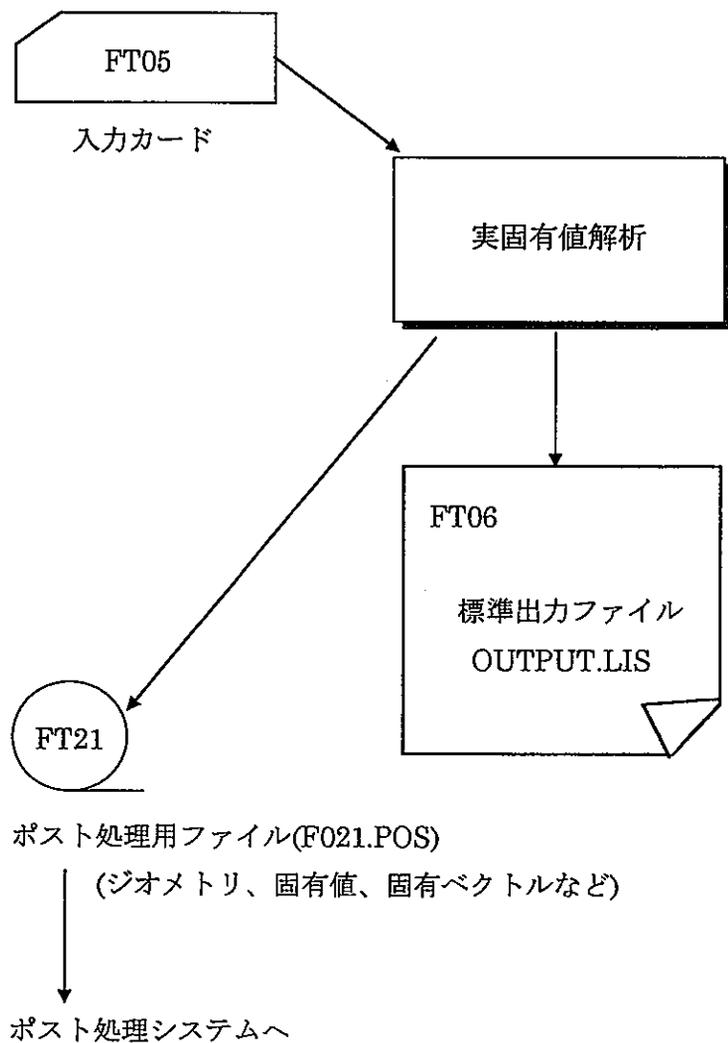


図 2.2(2/2) 地震応答解析処理フロー（実固有値解析）

### 3. 座標系と単位系

#### 3.1 座標系

本解析コードで用いる座標系は、図 3.1-1 に示す①入力座標系、②全体座標系、③節点座標系の 3 種類である。

##### ① 入力座標系

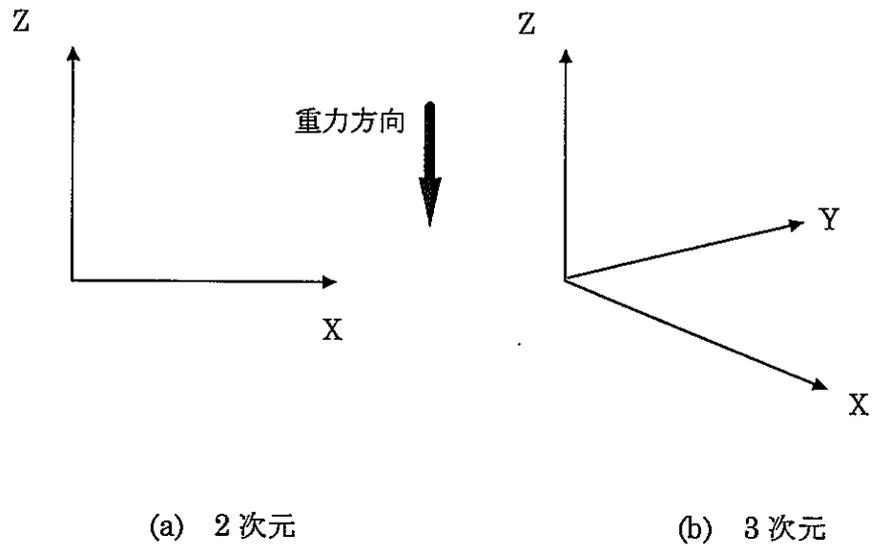
節点の入力時のみに用いられる座標系であり、直行座標系、円筒座標系ならびに球座標系が利用できる。入力の後、直ちに全体座標系（直交座標系）に変換し記憶される。

##### ② 全体座標系

要素形状の定義に用いられる座標系である。要素行列、要素荷重ベクトルの作成時に用いられる。なお、全体座標系は、 $z$  軸下向きを重力作用方向とする直行座標系が使用される。2 次元の場合の解析モデルは、紙面に垂直な方向の厚みを 1 とする。

##### ③ 節点座標系

節点拘束、節点外力の入力、あるいは節点変位、節点速度などの出力の際に用いられる座標系であり、節点ごとに異なる座標系が定義可能である。なお、全体方程式は、この座標系で作成される。



- (注1) 直交座標系では、入力座標系と全体座標系は同じである。
- (注2) 入力データで、節点座標系を特に指定しない限り、節点座標系は全体座標系と同じである。

図 3.1-1 全体座標系

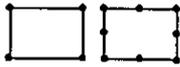
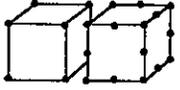
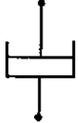
### 3.2 単位系

本コードでは、原則として単位系は固定していない。ただし、円筒座標系あるいは球座標系を用いて角度を入力する場合は、全て度[deg]で入力しなければならない。

#### 4. 要素ライブラリ

本コードでは、表 4-1 に示す有限要素を備えている。

表 4-1 要素ライブラリ

	要素種別	形状概念	節点自由度	特徴	入力名称
1	4,8 節点 4 辺形要素		UU,WW UL,WL	2 次元、等方性、ア イソパラメトリッ ク系定式化	PLANE4 PLANE8
2	8,20 節点 6 面体要素		UU,VV,WW UL,VL,WL	3 次元、等方性、ア イソパラメトリッ ク系定式化	HEXA8 HEXA20
3	トラス要素(注 1)		UU,VV,WW	軸方向剛性のみ	TRUSS
4	梁要素(注 1)		UU,VV,WW TU,TV,TW	伸縮、ねじり、曲げ 剛性を考慮	BEAM
5	シェル要素(注 2)		UU,VV,WW TU,TV,TW	等方性、アイソパラ メトリック系定式 化	SHELL
6	ばね要素(注 1)		UU,VV,WW TU,TV,TW	3 次元空間における 任意方向剛性	SPRING
7	無限粘性境界要素		—	2 次元、3 次元	VIPL4 VIHES
8					

(注1) 2次元、3次元の両解析で利用可能

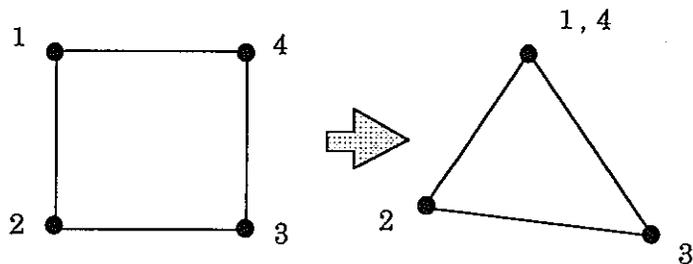
(注2) 3次元解析のみ利用可能

(注3) 節点自由度の定義については表 4.2  
を参照のこと。

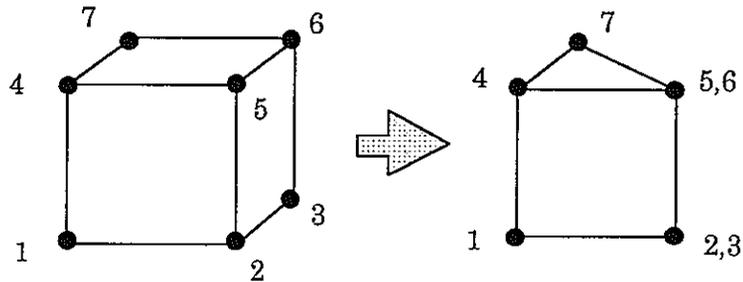
表 4-2 節点自由度の定義 (1 節点当たりの自由度成分)

自由度識別記号	意 味
UU	土骨格の X 方向並進変位
VV	土骨格の Y 方向並進変位
WW	土骨格の Z 方向並進変位
TU	土骨格の X 方向回転変位
TV	土骨格の Y 方向回転変位
TW	土骨格の Z 方向回転変位
UL	水の X 方向並進変位
VL	水の Y 方向並進変位
WL	水の Z 方向並進変位

また、2次元平面要素、3次元立体要素はアイソパラメトリック系の定式化を採用しており、3角形要素(2次元)や4面体要素(3次元)は節点の縮合により作成することが可能である(図4-1参照)。



(a) 節点 1,4 の縮合



(b) 節点 2,3 および 5,6 の縮合

図 4-1 節点の縮合による要素形状の変更

## 5. 入力形式

本解析コードの入力形式は、フォーマット付きファイル入力方式を採用しており、1つの解析に対する入力ファイルは、複数のカードグループの集まりで構成されている。表 5-1 に入力カードの内容一覧を示す。また、各解析種別で必要となる入力カードの構成例を表 5-2 に示す。

表 5-1(1/2)入力データカード内容一覧表

カードグループ	入力カード	内 容
CONT	TITL	タイトルデータ
	RUN	ランタイプの指定 (イニシャル or リスタート)
	PARM	Newmark の $\beta$ 法で用いるパラメータの指定
	PROB	解析タイプ(平面ひずみ、平面応力、3 D)
	PHAS	1 相系・2 相系の選択
	GRAV	重力加速度の入力
	FILE	リスタートファイルの作成指示
	SCON	STTL
EXEC		解析種別(静解析,動解析,周波数応答解析)の選択
SOLV		解法の選択
DYNA		応答解析方法の指定
OPTI		スカイライン全体行列形状の最適化
MODL		非線型モデルの選択
PRNT		初期応力解析結果の印字指示
SEIS		入射波解析の指定
FRFD		連成解析用中間ファイルの I/O の指定
GEOM	NODE	節点データの設定
	AUTO	節点データの補完生成
	DYNA	応答解析方法の指定
	PRNT	初期応力解析結果の印字指定
	MODF	節点データの変更
	CORD	節点座標系の指定
MATR	MTRL	要素材料データの設定
FEM	ELEM	要素構成データの設定
	AUTO	要素構成データの自動作成
	MODF	要素材料番号の変更
	MASS	質量行列の作成方法の指定
	FRFD	フリーフィールドとの連成節点の指定
	FREL	フリーフィールドとの連成要素の指定
	INTG	積分点数の指定
BOUN	NODB	節点単位の拘束条件の設定
	CODB	座標値による拘束条件の設定
	UNDR	節点単位の非排水境界条件の設定
	UND2	座標値による非排水境界条件の設定
	MPCS	多点拘束条件の設定
	UNDP	要素単位の非排水条件の設定

表 5-1(2/2)入力データカード内容一覧表

カードグループ	入力カード	内 容
SLOA	NODL	節点集中外力の設定
	PRES	要素面分布荷重の設定
	EART	地震荷重の設定
	TFNC	時間関数の指定
TABL	FTAB	テーブル入力の時間関数 (書式 1)
	FTA2	テーブル入力の時間関数 (書式 2)
	FTA3	テーブル入力の時間関数 (書式 3)
STEP	TIME	解析継続時間の指定
	TPNT	計算時間点の配置を設定
INIT	SETS	初期応力の定義方法の選択
	ELEM	初期値を与える要素番号の指定
	STRS	初期応力の設定
	PORE	初期間隙水圧の設定
PHST	DISP	節点データ(変位、速度、加速度)の時刻暦出力
EHST	STRS	要素応力の時刻暦出力
	STRN	要素ひずみの時刻暦出力
	PORE	要素間隙水圧の時刻暦出力
GHST	MODU	せん断弾性係数の時刻暦出力
PDIS	DISP	指定した時間点での節点データの分布の出力
EDIS	STRS	指定した時間点での応力分布の出力
	STRN	指定した時間点でのひずみ分布の出力
	PORE	指定した時間点での間隙水圧分布の出力
GDIS	MODU	指定した時間点でのせん断剛性分布の出力
END		入力カードの終わり

表 5-2 解析種別ごとの入力カード構成例

○ : 必須  
 △ : 任意  
 - : 無関係

カードグループ	静的解析	動的解析	実固有値解析	ファイル変換
CONT	-	-	-	-
SCON	○	○	○	○
GEOM	○	○	○	
MATR	○	○	○	
FEM	○	○	○	
BOUN	○	○	○	
SLOA		○		
TABL		△		
STEP		○		
INIT		○		
PHST		△		
EHST		△		
PDIS	△	△		
EDIS	△	△		

本解析コードの入力フォーマットを次項以降に記載する。









































節点データ定義

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
N:O:D:E				C:I:D		N:O:					R:1					R:2					R:3					I:C:O:D					W:W:																																											

NOTE

- ・節点の入力座標系は、直交座標系（デフォルト）、円筒座標系（ID='CY'）および球座標系（ID='SP'）の中から選択することができる。
- ・直交座標系は全体座標系に一致する。
- ・角度 $\theta$ や $\phi$ の単位はすべて【度】である。
- ・節点集中重量は本データにより入力されるWWを重力加速度Gで割りWW/Gとして評価している。

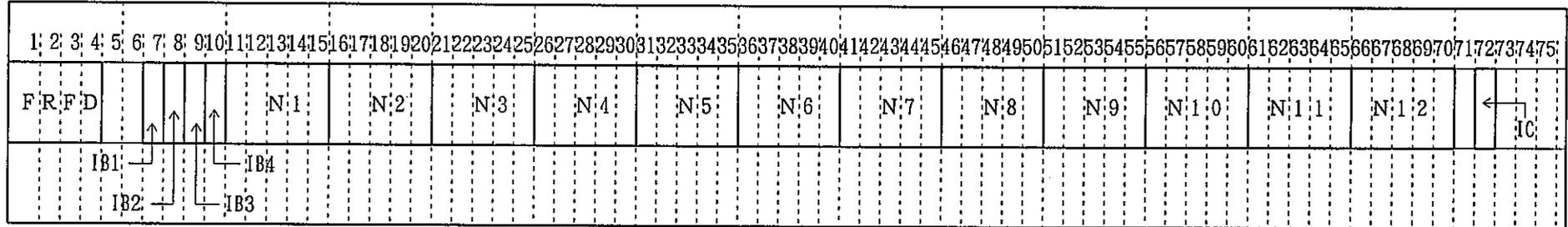
	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	'NODE'	1~4	カードヘッダ名 'NODE' と記入		A 4
	CID	5~6	入力座標系選択オプション		A 2
			ID=ブランクのとき直交座標系		
			" 'CY' のとき円筒座標系		
			" 'SP' のとき球座標系		
	NO	11~15	節点番号（1~99999までの任意の数）		I 5
	R1	21~30	} 節点座標値 (X Y Z), (R, $\theta$ , Z) または (R, $\theta$ , $\phi$ )		F 10.0
	R2	31~40			F 10.0
	R3	41~50			F 10.0
	ICOD	51~55	参照する節点座標系番号		I 5
	WW	61~70	節点集中重量		F 10.0







フリーフィールドの節点定義



NOTE

- ・本データはフリーフィールドだけの動的応答解析で使用される。
- ・本データにより指定された節点についての動的応答解析結果論理機番27のファイルに出力される。これらの応答値はフリーフィールドの影響を考慮した動的応答解析で使用される。
- ・節点番号N1, N2, ... は鉛直下方から上方に向かう順に指定する。
- ・2次元解析では'R'と'L'の境界、3次元では'R'、'L'、'B'および'F'の境界として、任意の節点集合を別々に定義することができる。

	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	'FRFD'	1~4	カードヘッダ名'FRFD'と記入		A4
	IB1	7	=Rのとき+X側の境界		A1
	IB2	8	=Lのとき-X側の境界		A1
	IB3	9	=Bのとき+Y側の境界		A1
	IB4	10	=Fのとき-Y側の境界		A1
	N1	11~15	フリーフィールド1番目節点番号		I5
	N2	16~17	フリーフィールド2番目節点番号		I5
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	N12	66~70	フリーフィールド12番目節点番号		I5
	IC	72	本カードの継続を指示する。		
			= 'C' のとき継続		A1



要素材料データ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
MTRL				NAME				MNO				↑		↑		R:1					R:2					R:3					R:4					R:5					← IC																																	
IPHS																ITYP/ISIDE																																																										

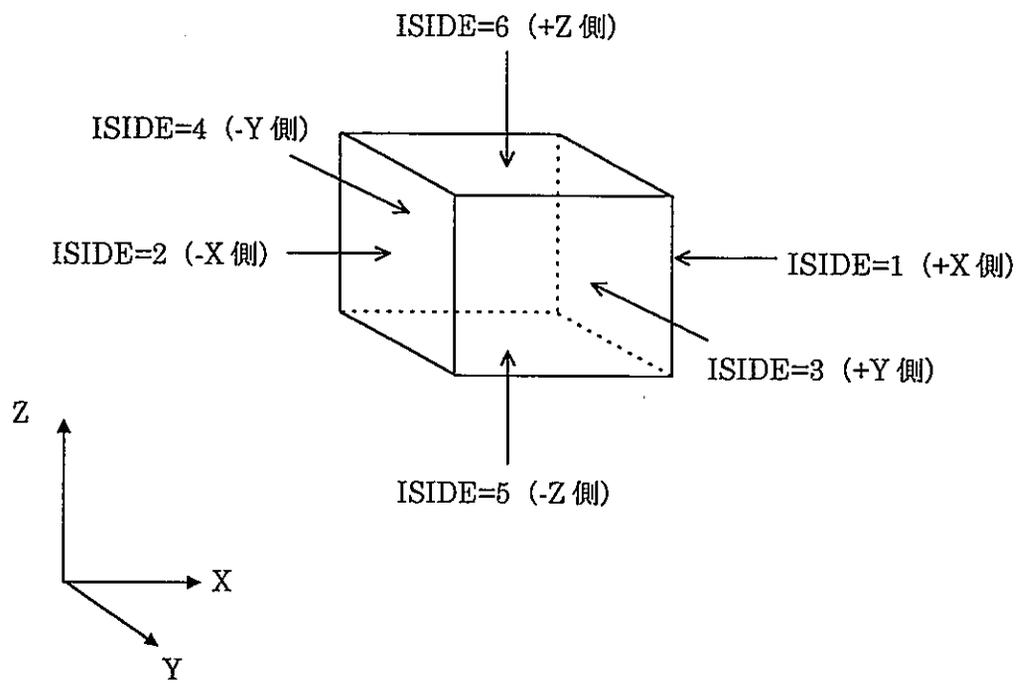
NOTE

- ・要素種別名 (NAME) は次の英数字 6 文字で与える。  
 PLANE 4 , PLANE 8  
 HEXA 8 , HEXA 2 0  
 TRUSS , BEAM  
 SHELL , SPRING  
 VIPL 4 , VIHE 8
- ・R 6 以上のデータを必要とする場合は、IC = 'C' と記入し、2 枚目のカードを作成する。2 枚目のカードは 1 ~ 2 0 カラムをブランクとする。
- ・要素モデル化番号 ITYP は PLANE 4, PLANE 8, HEXA 8 および HEXA 2 0 要素に対し適用される (表 5. 3 参照)。
- ・粘性境界面番号 ISIDE は VIPL 4 および VIHE 8 要素に適用される (図 5 - 1 参照)。

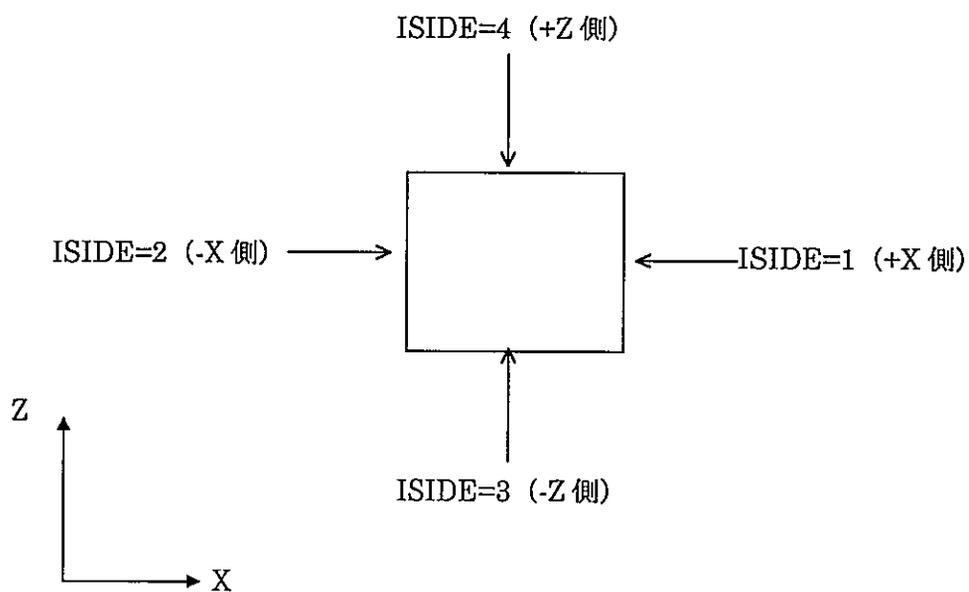
	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	MTRL	1 ~ 4	カードヘッダ名 'MTRL' と記入		A 4
	NAME	5 ~ 1 0	要素種別名		A 8
	MNO	1 3 ~ 1 5	材料番号		I 3
	IPHS	1 6 ~ 1 7	1 相 / 2 相の区分 = 1 のとき 1 相系 = 2 のとき 2 相系		I 2
	ITYP/ISIDE	1 8 ~ 2 0	要素モデル化番号 / 粘性境界番号		I 3
	R 1	2 1 ~ 3 0	各要素により内容が異なる (表 5.3 参照)		F 10.0
	R 2	3 1 ~ 4 0	" "		F 10.0
	R 3	4 1 ~ 5 0	" "		F 10.0
	R 4	5 1 ~ 6 0	" "		F 10.0
	R 5	6 1 ~ 7 0	" "		F 10.0
	IC	7 2	本カードの継続指示		A 1

表 5.3 要素材料データ一覧

要素種別	PLANE, HEXA			TRUSS	BEAM	SHELL	SPRING	VIPL4/VIHE8
ITYP	0	1	0	0				
構成則	線形弾性	非線形弾性	等価線形	線形弾性				
R1	土骨格ヤング率	同 左	土骨格ヤング率(実数部)	ヤング率	ヤング率	ヤング率	x 方向バネ剛性	土骨格ヤング率
R2	土骨格ポアソン比	"	" (虚数部)	断面積	断面積	ポアソン比	y 方向バネ剛性	土骨格ポアソン比
R3	土骨格体積弾性係数	"	土骨格ポアソン比	重量密度	重量密度	板厚	z 方向バネ剛性	土骨格体積弾性係数
R4	土骨格せん断剛性	"	土骨格体積弾性係数(実数部)		せん断剛性	せん断板厚	x 回転バネ剛性	土骨格せん断剛性
R5	土粒子体積弾性係数	"	" (虚数部)		y 方向断面 2次モーメント	重量密度	y 回転バネ剛性	土粒子体積弾性係数
R6	水粒子体積弾性係数	"	土骨格せん断剛性(実数部)		z 方向断面 2次モーメント		z 回転バネ剛性	水粒子体積弾性係数
R7	土重量密度	"	" (虚数部)		断面極 2次 モーメント			土重量密度
R8	水重量密度	"	土粒子体積弾性係数(実数部)		y 方向 せん断断面積			水重量密度
R9	間隙率	"	" (虚数部)		z 方向 せん断断面積			間隙率
R10	透水係数	"	水粒子体積弾性係数(実数部)					透水係数
R11	土骨格レーリー減衰 $\alpha_s$	"	" (虚数部)					土骨格レーリー減衰 $\alpha_s$
R12	土骨格レーリー減衰 $\beta_s$	"	土重量密度					土骨格レーリー減衰 $\beta_s$
R13	水レーリー減衰 $\alpha_w$	"	水重量密度					水レーリー減衰 $\alpha_w$
R14	水レーリー減衰 $\beta_w$	"	間隙率					水レーリー減衰 $\beta_w$
R15	未使用	規準ひずみ $\gamma_f$	透水係数					境界減衰パラメータ $\beta$
R16	"	R-0の減衰パラメータ $\alpha$	土骨格レーリー減衰 $\alpha_s$					
R17	"	R-0の減衰パラメータ $\beta$	土骨格レーリー減衰 $\beta_s$					
R18	内部摩擦角	同 左	水レーリー減衰 $\alpha_w$					
R19	実験定数 $\xi$	"	水レーリー減衰 $\beta_w$					
R20	実験定数 $\eta$	"	履歴減衰係数					
R21	液状化応力比 $R_{20}$	"						



(a) 3次元粘性境界要素 (VIHE8)



(b) 2次元粘性境界要素 (VIPL4)

図 5.1 粘性境界の面番号規約

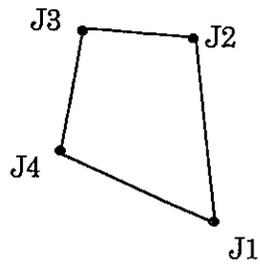




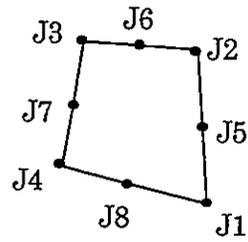
表 5.4 要素ごとの構成節点番号

	要素種別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 <sup>注1</sup>	PLANE4	J1	J2	J3	J4																
2 <sup>注1</sup>	PLANE8	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8												
3 <sup>注1</sup>	HEXA8	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8												
4 <sup>注1</sup>	HEXA20	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15	J16	J17	J18	J19	J20
5	TRUSS	J1	J2																		
6	BEAM	J1	J2	K1																	
7	SHELL	J1	J2	J3	J4																
8	SPRING	J1	J2	K1	K2																
9	VIPL4	J1	J2																		
10	VIHE8	J1	J2	J3	J4																

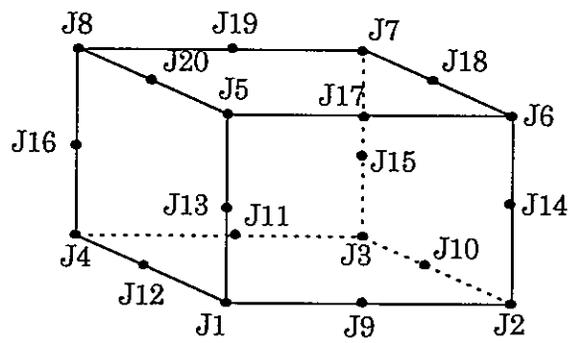
(注1) 図 5.2 参照



(a) 4 節点 4 辺形要素  
(PLANE4)



(a) 8 節点 4 辺形要素  
(PLANE8)



(a) 20 節点立体要素  
(HEXA20)

図 5.2 要素構成節点の順序付け













節点単位の拘束条件

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
N O D B				N O D S												N O D E																																																										

IUU, IVV, IWW, ITU, ITV, ITW, IUL, IVL, IWL

NOTE

- ・ NODSからNODEまでの定義されているすべての節点に適用される。
- ・ NODE = 0 またはブランクのとき NODS = NODE とされる。
- ・ 節点座標系の変位成分が適用される。

	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	'NODB'	1~4	カードヘッダ名 'NODB' と記入		A 4
	NODS	11~15	境界条件の定義を開始する節点番号		I 5
	NODE	16~20	" 終了 "		I 5
	IUU	21	土骨格のX方向境界条件 固定のとき=1 フリーのとき = 0 またはブランク		I 1
	IVV	22	土骨格のY方向境界条件 I UUと同様、以下同じ		I 1
	IWW	23	土骨格のZ方向境界条件		I 1
	ITU	24	土骨格のX軸周り境界条件		I 1
	ITV	25	" Y軸周り "		"
	ITW	26	" Z軸周り "		"
	IUL	27	水側のX方向境界条件		I 1
	IVL	28	" Y方向 "		"
	IWL	29	" Z方向 "		"









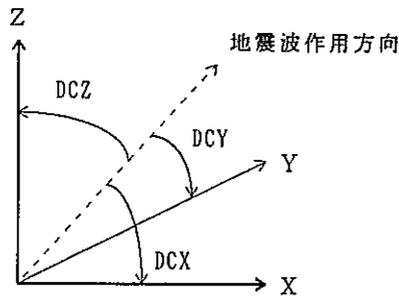


地震波の定義

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
E A R T				I F N C				D C X				D C Y				D C Z				S C A L E																																																						

NOTE

- ・ひとつの地震波について、その地動加速度時刻歴パターンと振幅および作用方向を指定する。
- ・本データを任意の数だけ定義して、地震波をそれらのベクトル的な重ね合わせとして表すことができる。
- ・時間関数  $f(t)$  にスケールファクター  $SCALE$  を乗じた  $SCALE * f(t)$  が実際の入力地震波の地動加速度を表す。
- ・プログラムでは方向係数ベクトル (DCX, DCY, DCZ) の長さを1とする規格化を実施している。入力時に正確な方向余弦係数値を与える必要はない。



- ・2次元解析ではDCYは意味を持たない。

	VARIABLE	COLUMNS	E N T R Y	単位	FORM
	'EART'	1~4	カードヘッダ名 'EART' と記入		A 4
	IFNC	6~10	参照する時間関数番号		I 5
	DCX	11~20	全体座標系 X 方向 方向係数		F 10.0
	DCY	21~30	" Y 方向 "		F 10.0
	DCZ	31~40	" Z 方向 "		F 10.0
	SCALE	41~50	スケールファクター		F 10.0





時間関数

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
T'F'N'C				I'F'U'N'C				I'T'A'B				A'0					B'0					T					P'H'A'S																																															

NOTE

・テーブル入力の離散点とする場合は、他にテーブル関数データ（カードグループ"TABL"）が必要。

	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	T'F'N'C	1 ~ 4	カードヘッダ名 'TFNC' と記入		A 4
	I'F'U'N'C	6 ~ 10	本カードにより定義する時間関数番号		I 5
	I'T'A'B	16 ~ 20	テーブル入力の時間関数に対するテーブル番号 ただし、= 0 またはブランクの時、正弦波とする。		I 5
	A 0	21 ~ 30	} I T A B = 0 の時、意味を持つ。		F 10.0
	B 0	31 ~ 40			F 10.0
	T	41 ~ 50	} 正弦波の直流成分 A 0 振 幅 B 0 周 期 T		F 10.0
	P'H'A'S	51 ~ 60		位相差 $\delta$	



時間関数テーブル（書式1）

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
F,TAB				I,TAB						T,1						F,1						T,2						F,2						T,3						F,3						IC																												

NOTE

- 関数テーブル番号 I T A B は本データと次の ' F T A 2 ' , ' F T A 3 ' データで唯一でなければならない。  
(重複してはならない)
- 任意数組の離散データ ( T<sub>1</sub> , F<sub>1</sub> ) を定義することができる。
- データは時間点値 T<sub>1</sub> の昇順、 T<sub>1</sub> < T<sub>2</sub> < T<sub>3</sub> < ... に記入しなければならない。
- ( T<sub>4</sub> , F<sub>4</sub> ) 以上が必要な場合は、 I C = ' C ' と記入し、2枚目のカードを作成する。2枚目のカードは1～10カラムをblankとする。

VARIABLE	COLUMNS	E N T R Y	単位	FORM
'FTAB'	1～4	カードヘッダ名 'FTAB' と記入		A 4
ITAB	6～10	本データにより定義される関数テーブルの 識別番号		I 5
T 1	1 1～2 0	1番目の時間点値		F 10.0
F 1	2 1～3 0	T 1における関数値		F 10.0
T 2	3 1～4 0	2番目の時間点値		F 10.0
F 2	4 1～5 0	T 2における関数値		F 10.0
T 3	5 1～6 0	3番目の時間点値		F 10.0
F 3	6 1～7 0	T 3における関数値		F 10.0
IC	7 2	本カードの継続指示		A 1

時間関数テーブル (書式 2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
F T A 2				I T A B				D T				F 1				F 2				F 3				F 4				F 5				I C																																										

NOTE

- ・関数テーブル番号 I T A B は本データと前の ' F T A B ' 次の ' F T A 3 ' データで唯一でなければならない。(重複してはならない)
- ・任意の N 組の離散データ  
( $\Delta t$ , F1), ( $2\Delta t$ , F2), ( $2\Delta t$ , F3), ...  
( $N\Delta t$ , FN) を定義することができる。
- ・ F 6 以上が必要な場合は、 I C = ' C ' と記入し 2 枚目のカード作成する。2 枚目のカードは 1 ~ 2 0 カラムをブランクとする。
- ・最終データの次には、データの終了を示す 4 文字データ ' E N D T ' を記入する。' E N D T ' は 1 0 カラムフィールドに左詰めで記入する。

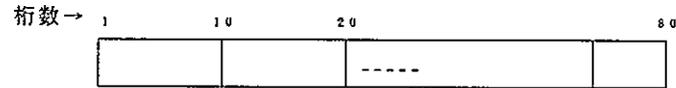
	VARIABLE	COLUMNS	E N T R Y	単位	FORM
	' F T A 2 '	1 ~ 4	カードヘッダ名 ' F T A 2 ' と記入		A 4
	I T A B	6 ~ 1 0	本データにより定義される関数テーブルの 識別番号		I 5
	D T	1 1 ~ 2 0	関数値の定義される時間間隔 $\Delta t$		F 10.0
	F 1	2 1 ~ 3 0	1 番目の関数値		F 10.0
	F 2	3 1 ~ 4 0	2 番目の関数値		F 10.0
	F 3	4 1 ~ 5 0	3 番目の関数値		F 10.0
	F 4	5 1 ~ 6 0	4 番目の関数値		F 10.0
	F 5	6 1 ~ 7 0	5 番目の関数値		F 10.0
	I C	7 2	本カードの継続指示		A 1

時間関数テーブル (書式3)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
FTA3				ITAB												NPOIN												IUNIT												DT												FORM																						

NOTE

- 関数テーブル番号ITABは本データと前の'FTA B'次の'FTA 2'データで唯一でなければならない。(重複してはならない)
- 点列(Δt, F1), (2\*Δt, F2) . . . . . NPOIN\*Δt, f<sub>NPOIN</sub>)とされる。
- F 6以上が必要な場合は、IC='C'と記入し2枚目のカード作成する。2枚目のカードは1~20カラムをブランクとする。
- テーブルデータフォーマットを与える文字列の例  
FORM=" (/// (8F10.0) " のとき、ファイル先頭の3レコードをスキップして、f<sub>i</sub>, i=1~NPOINの10カラム/フィールド、8フィールド/レコードのフォーマットで読む。



	VARIABLE	COLUMNS	ENTRY	単位	FORM
	'FTA3'	1~4	カードヘッダ名'FTA3'と記入		A4
	ITAB	6~10	本データにより定義される関数テーブルの 識別番号		I5
	NPOIN	11~15	データ点数		I5
	IUNIT	16~20	テーブルデータを読み込むファイルユニッ ト番号		I5
	DT	21~30	データ点間隔 Δt > 0		F10.0
	FORM	31~50	テーブルデータフォーマットを表す文字		A20

























表 5.5 要素応力・部材力成分対応表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
PLANE4 PLANE8	$\sigma_x$	$\sigma_z$	$\tau_{xz}$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_z$	$\tau_{xz}$	$\sigma_y$	以降、各積分点について同様に割り当てる。														
HEXA8 HEXA20	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$	以降、各積分点について同様に割り当てる。										
TRUSS	$F_{xi}$	$F_{yj}$																					
BEAM	$F_{xi}$	$F_{yi}$	$F_{zi}$	$M_{xi}$	$M_{yi}$	$M_{zi}$	$F_{xj}$	$F_{yj}$	$F_{zj}$	$M_{xj}$	$M_{yj}$	$M_{zj}$											
SHELL (注1)	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$	$N_x$	$N_y$	$N_{xy}$	$M_x$	$M_y$	$M_{xy}$	$Q_x$	$Q_y$
SPRING	$F_{xi}$	$F_{yi}$	$F_{zi}$	$M_{xi}$	$M_{yi}$	$M_{zi}$	$F_{xj}$	$F_{yj}$	$F_{zj}$	$M_{xj}$	$M_{yj}$	$M_{zj}$											

(注1) シェル要素の断面力  $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$  は部材単位幅当たりのものである。























