

## 人工バリアの地震応答解析モデル/コードの開発 (IV)

- 概要 -

(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
ㄗ	J1458 96-002	1996.6.6
<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</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</p>		

1996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下さい。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下さい。

本資料についての問い合わせ下記に願います。

〒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 (Ⅳ)

明石浩一\*<sup>1</sup>, 根山敦史\*<sup>1</sup>

西村和哉\*<sup>1</sup>, 田辺和夫\*<sup>1</sup>

### 要

### 旨

本研究は、緩衝材の粘弾塑性を考慮した人工バリアシステムの地震応答解析モデル/コードの開発を目的として以下の項目を実施した。

- (1) 平成6年度に引き続き、地震応答解析モデルを開発するうえで、重要な入力パラメータである土質材料の振動時の物性及び挙動に関する調査を行うとともに開発中のコードの機能検証を行うためのデータの調査検討を行った。
- (2) 平成6年度研究委託で得られた成果をもとに、非線形解析機能の追加等の改良・開発検討を行った。
- (3) 人工バリアの振動実験データをもとにモデル/コードの妥当性の評価及び課題の抽出を引き続き行った。

---

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：070D0237

事業団担当部課室および担当者：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 (IV)

Koichi Akashi \*<sup>1</sup>, Atsushi Neyama \*<sup>1</sup>  
Kazuya Nishimura \*<sup>1</sup>, Kazuo Tanabe \*<sup>1</sup>

## A b s t r a c t

In this study, the following tasks have been performed in order to develop seismic response analysis models and codes of engineered barrier system in consideration for viscous plastic of buffer material around overpack.

- (1) The public literatures for dynamic property and behavior of soil materials which is important parameters to develop seismic response analysis models of engineered barrier, and for experimental data for purpose of verification of developed program was researched .
- (2) As the results of reserch in last year, development of two-phases 3D non-linear seismic response analysis code was performed.
- (3) It has been analized on experimental scale by using developed model and compared with experimental data for code validity. And it has been discussed on future items for new version code.

---

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 Akiyoshi

\*1 : Scientific Engineering Department

## 目次

1. まえがき	1-1
1.1 土質材料の振動挙動に係わるデータの調査検討	1-2
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
1.3 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
2. 文献調査	2-1
2.1 文献の調査方法	2-2
2.2 文献概要	2-2
2.3 文献調査のまとめ方	2-2
2.4 文献調査のまとめ	2-3
3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	3-1
3.1 非線形解析機能および間隙水圧評価のためのモデルの導入	3-1
3.2 非線形解析	3-1
3.3 Ramberg-Osgoodモデル	3-2
3.3.1 Masing則と履歴曲線	3-2
3.4 液状化現象を評価するためのアルゴリズム	3-5
3.4.1 SEEDの過剰間隙水圧の評価式	3-5
3.4.2 不規則応力への適用	3-6
3.4.3 間隙水圧評価の手順	3-8
3.5 プログラムの構成	3-9
3.5.1 入力カードの変更	3-9
3.5.2 計算ルーチンの追加	3-9
3.6 非線形解析機能の検証	3-10
3.6.1 検証用モデルの形状と境界条件	3-10
3.6.2 物性値	3-10
3.6.3 入力波形	3-11
3.6.4 解析結果の比較	3-11
3.6.5 検証結果のまとめ	3-13
4. 振動実験にもとづくモデル／コードの妥当性の評価	4-1
4.1 実固有値解析	4-2
4.1.1 概要	4-2
4.1.2 解析時に用いた仮定	4-2
4.1.3 数式モデルと解法	4-2
4.1.4 物性値	4-3
4.1.5 モデルと境界条件	4-3
4.1.6 解析結果のまとめ	4-4

4.2 動的解析結果	4-5
4.2.1 概要	4-5
4.2.2 解析時に用いた仮定	4-5
4.2.3 物性値	4-5
4.2.4 加振方法	4-6
4.2.5 解析モデルと境界条件	4-6
4.2.6 解析結果のまとめ	4-7
5. 今後の課題	5-1
5.1 モデル／コードの開発とこれからの展望	5-1
6. あとがき	6-1

表目次

表2.2-1 文献リスト	2-4
表2.2-2 文献リスト	2-5
表2.2-3 文献リスト	2-6
表2.2-4 文献リスト	2-7
表2.2-5 文献リスト	2-8
表2.2-6 文献リスト	2-9
表2.2-7 文献リスト	2-10
表2.2-8 文献リスト	2-11
表3.6.2-1 検証用解析で用いた物性値	3-14
表4.1.4-1 物性データ	4-8
表4.2.3-1 物性値	4-9
表4.2.3-2 等価線形解析で用いた物性値	4-10
表5.1-1 人工バリアモデル／コードによる今後の解析方針	5-3

## 図目次

図3.3.1-1 骨格曲線と履歴ループ	3-15
図3.3.1-2 不規則荷重とMASINGの規則	3-15
図3.6.1-1 検証用文献で解析対象とした飽和砂地盤	3-16
図3.6.1-2 3次元解析用モデル	3-17
図3.6.2-1 検証用文献に記載されている深度～せん断弾性係数関係	3-18
図3.6.3-1 検証用文献に記載されている入力波および本検証で用いた入力波	3-19
図3.6.4-1 文献記載の地表付近の加速度データとの比較	3-20
図3.6.4-2 文献記載の地表付近の過剰間隙水圧データとの比較	3-20
図3.6.4-3 砂層の液状化現象についてのシミュレーションに記載の解析結果	3-21
図3.6.4-4 深度による応答加速度の比較 (レリ減衰係数 $\alpha=0.959$ 、 $\beta=0.002$ )	3-22
図3.6.4-5 線形解析結果と非線形解析結果との比較 (レリ減衰係数 $\alpha=0.959$ 、 $\beta=0.002$ )	3-23
図4.1.5-1 供試体と計測装置の配置	4-11
図4.1.5-2 スイープ試験結果	4-12
図4.1.5-3 スイープ試験結果	4-13
図4.1.5-4 固有値解析用3次元モデル	4-14
図4.2.3-1 DT22のせん断弾性係数～せん断ひずみ、減衰定数～せん断ひずみの関係	4-15
図4.2.5-1 動的解析用モデル	4-15
図4.2.6-1 線形解析結果と試験データとの比較 (EL-Centro)	4-16
図4.2.6-2 非線形解析結果と試験データとの比較 (EL-Centro)	4-17
図4.2.6-3 等価線形解析結果と試験データとの比較 (EL-Centro)	4-18
図4.2.6-4 線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)	4-19
図4.2.6-5 非線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)	4-20
図4.2.6-6 等価線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)	4-21
図4.2.6-7 線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)	4-22
図4.2.6-8 非線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)	4-23
図4.2.6-9 等価線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)	4-24



## 1. まえがき

高レベル放射性廃棄物については、地中数百メートルの深部に超長期間にわたって埋設される。我が国は世界有数の地震多発地帯であり、このような長期の埋設期間において人工バリアが幾度かの大規模な地震に遭遇することが考えられる。このような地震遭遇時のバリアの健全性についての評価は、高レベルの廃棄物から生活圏への放射性核種の移行シナリオを考えるうえで重要な課題である。

人工バリアの地震応答を実施する場合、①ベントナイトの振動時の物理的な挙動の数学的な表現方法、例えば応力～ひずみ関係の非線形性、大ひずみ領域における塑性挙動、間隙水の粒子間の移行に起因する剛性の減少と減衰の増大のモデル化、②解析時に利用する入力地震波の問題、例えば地中深部での地震波の波形、加速度、解析対象が広範囲に及ぶ時の地震波の位相の違いの問題など検討すべき問題が多く存在している。

このような問題点を考慮したうえで、平成4年度より順次2相系3次元地震応答解析コードの開発を継続してきた。本年度においては、モデル／コードの高度化を目的としてRamberg-Osgoodモデルを応力～ひずみ関係に用いた非線形弾性解析コードの開発を実施した。開発したコードについては文献調査、振動台を用いた振動実験により得られたデータにもとづいて検証作業および問題点の抽出を行った。

## 1. 1 土質材料の振動挙動に係わるデータの調査検討

平成6年度の研究においては、振動時の間隙流体の挙動を含めた粘土材の振動特性に関する調査検討を行ってきた。今年度は地震応答解析モデルを開発、検証するうえで、重要な土質材料の振動時の物性及び挙動について調査検討を引き続き行った。

- ①土質材料を対象とした動的解析において非線形モデル、粘弾塑性モデルを用いた解析事例
- ②解析時に入力パラメータとして必要となる物性値の取得方法
- ③非線形解析において間隙水圧の評価を行うためのモデル
- ④地中構造物、原子力発電所建屋に関する地震応答解析事例

## 1. 2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

モデル／コードの高度化を目的としてRamberg-Osgoodモデルを応力～ひずみ関係に用いた非線形弾性解析コードの開発を実施した。

## 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振動試験モデルを用いた人工バリアモデル解析

## 2. 文献調査

地震時の人工バリアの地震応答特性を評価するうえで、ベントナイトの挙動解析は重要な課題である。平成6年度の研究においては、振動時の土質材料の非線形挙動ならび粘弾塑性挙動、間隙水の挙動を解析時に再現することを目的として土質材料の動的特性、振動実験等の室内実験データおよび数学モデル、理論についての文献調査と内容の検討を行った。また、解析の対象となる人工バリアは地中深く埋設されるため、地震時に人工バリアシステムが受ける地震波は地上建屋等の耐震評価、数値解析にて利用される地上で観測された地震波とは異なることが考えられる。従って、解析時に入力加速度として用いる地中の地震波の特性、不連続岩盤内の振動特性、地中深部の地盤の物性データに関する参考資料として地中構造物、原子力発電所建屋に関する耐震設計、地震応答解析例についての公開文献調査も実施した。

調査した内容については以下に示す。

- ①土質材料を対象とした動的解析において非線形モデル、粘弾塑性モデルを用いた解析事例
- ②解析時に入力パラメータとして必要となる物性値の取得方法
- ③非線形解析において間隙水圧の評価を行うためのモデル
- ④地中構造物、原子力発電所建屋に関する地震応答解析事例

入手文献については概要をまとめた。

## 2. 1 文献の調査方法

昨年度、粘性土を対象にJ I C S Tを用いた検索を実施したが、必要にして十分な文献を得ること出来なかった。本年度は調査範囲の拡張を念頭にI N I S, D I A L O Gの土木関係のデータベースも利用した。

## 2. 2 文献概要

今回、前記の調査方法により関連文献として30件の文献を入手し検討を行った。入手した文献の内訳は次のように分類できる。

- |   |      |
|---|------|
| ① 土質材料を対象に動的解析において非線形モデル、<br>粘弾塑性モデルを用いた解析事例に関する文献<br>および地盤の物性値、境界条件、入力波形が記載<br>された文献 | 15文献 |
| ② 地中構造物、原子力発電所建屋に関する解析事例  | 8文献  |
| ③ 振動中の土質材料内の間隙水圧の挙動、液状化に<br>関する文献   | 7文献  |

各文献の概要については表2.2-1～2.2-8に示す。

## 2. 3 文献調査のまとめ方

各文献については、出典、著者、概要をまとめた。これらの成果は報告書文献集の原文の前に添付している。

## 2. 4 文献調査のまとめ

本年度の公開文献の調査を通して以下の様な知見が得られた。

### ① 非線形モデルおよび粘弾塑性モデルを用いた解析事例

- ・非線形モデルとして良く用いられるHardin-Drnevich モデルおよびRamberg-Osgoodモデルとも長所、短所を持ち合わせており解析対象、条件等を十分吟味のうえモデルの選択を行う必要がある。

本研究のコード開発では実材料の特性を柔軟に表現できるRamberg-Osgoodモデルを採用する。

- ・非線形モデルの選択は液状発生の有無、時刻にも影響する。

### ② 間隙水圧の評価

- ・液状化開始の複雑な力学挙動を非線形モデルと単純な間隙水圧評価モデルの組合せで表現することは難しい。しかしながら、液状化開始直前までは比較的うまく現象をシミュレートできる。

### ③ 地下構造物、トンネルの地震遭遇時の挙動

- ・地震波の卓越する震動数領域の違いによって、地下構造物の応答挙動は大きく違ってくる。このため、地下構造物、トンネルの地震性状を把握するためには少なくとも長周期の震動数が卓越する地震波、短周期の震動数が卓越する地震波の2種類の波をもって解析する必要がある。
- ・地震波の入射角、入射基盤の形状は地下構造物の応答に影響する。

次に文献調査から得られた知見を参考に人工バリアモデル/コードの開発を行った。

表2.2-1 文献リスト

No	文献名	著者	概要
1	不整形性、非線形性を考慮した沖積世地盤の地震応答性状 (土木学会論文集 No.477 P73-81, 1993)	竹宮宏和、石川基	本文献は不整形な基盤上の軟弱沖積世地盤の非線形地震応答を増幅効果と周期成分に注目して面内と面外振動を別々に検討を行ったものである。解析には非線形特性としてRamberg-Osgoodモデルを導入したFEMを用い、非線形直接積分法と等価線形化振動応答法を採用している。
2	土の非線形応力～ひずみモデルに関する研究 (鹿島建設技術研究所年報、Vol. 38, p 155-160, 1990)	林寛、菅原俊幸、本田満彦	本文献は地震時における地盤の応力～ひずみ関係の非線形性を精度よく表現できる新しい応力～ひずみモデルとしてよく用いられるH-Dモデルを拡張したものである。このモデルでは東京礫を対象とした室内試験結果を精度良く近似することができた。
3	液状化時における有効応力解析モデルの現状 (富士総研技報, Vol.1, p272-284, 1990)	宮崎浩徳	地震時の地盤液状化予測方法の中で、地震応答解析法の一つである有効応力解析モデルに関する比較を行い、その特徴を述べている。応力～ひずみ関係、間隙水圧モデル、透水方程式については、それぞれH-D型モデル、応力径路追跡モデル、Biotの多孔質物体の変形理論を採用すると有効であることが述べられている。
4	飽和砂礫き盤の振動台実験と非線形解析 (土質工学研究発表会講演集、Vol. 23, p1003-1004, 1988)	金谷守、西好一	大型土槽に模型砂礫き地盤を作成し、振動台実験を行うとともに、土槽内より採取した不攪乱試料による振動三軸試験を行った。これらの結果を履歴型H-DモデルおよびR-Oモデルを用いた地震応答解析結果と比較したところ、R-Oモデルのほうがより適切に現象を表現していた。

表2.2-2 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
5	繰り返し荷重を受ける砂の非排水時の応力～ひずみ曲線のモデル化 (土質工学研究発表会講演集、Vol. 20, p617-620, 1985)	三原正哉、西邦夫	有効応力法にも適用できる。II-Dモデルも適用できる。たちの有用性
6	粘性土の履歴型Hardion-Drnevichモデルについて (大林組技術研究報、No. 30, p101-104, 1985)	平間邦興、鳥井原誠	土の応力～ひずみ関係の非線形性を考慮した地震の応答解析法の中での非線形積分法を用いて、震とす地盤の情報をあげ、自然に履歴曲線のモデル化について
7	応力～ひずみモデルの履歴法則の改良に関する一提案 (土木学会年次学術講演会講演概要集第一部 Vol. 39 p735-736, 1984)	石原研而、辻野修一、吉田望	水平地盤のせん断力～せん断ひずみ関係の非線形モデルを提案している。この手法をR-0モデルにした結果得られた応力～ひずみ関係は実材料の良好な近似となっている。
8	地盤の非線形地震応答解析に関する研究その3 -有効応力解析- (佐藤工業中央技術研究所、技術研究報 NO. 10, p17-28, 1983)	吉田望、辻野修一	水平地盤の地震時有効応力解析における、せん断力～せん断ひずみ関係のモデル化が解析結果に与える影響を調べた。利用したモデルはII-DモデルとR-0モデルでこれらを用いて有効と応力解析手法を示した後、実際の地盤を対象としてモデル、係数をパラメータとすタディを实施了。その結果R-0モデルでは比較的よく実地盤の特性を近似できた。

表2.2-3 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
9	粘性土の動的変形特性に関する実験的研究 その4 非線形動力学モデルについて (日本大学理工学部学術講演会講演文集、 Vol. 27 p120-122, 1983)	榎並昭、安達俊夫	本論文ではせん断応力～せん断ひずみ関係に修正H-Dを用いる手法を示すとともに、それを利用した解析を実施している。この解析結果は著者等の行った実験結果とよく一致をしている。
10	地盤の非線形地震応答解析に関する研究 その2 - 応答解析結果の比較 - (佐藤工業中央技術研究所、技術研究報、 NO. 9, p19-28, 1982)	田中勉、有沢裕、清水全生、土田義三、 吉田望、辻野修一	H-D モデルとR-O モデルを用いて 1) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係が中ひずみ領域で一致するようにパラメータを定めた場合 2) 大ひずみ域で両モデルが一致するようにパラメータを定めた場合の2通りの解析を行いその比較を行っている。1)では両モデルとも中ひずみ域ではほぼ一致した。また、2)については最大応答ひずみの付近で $G/G_0$ が一致すれば、両者の最大応答値が一致した。
11	Ramberg-Osgoodモデルによる地盤の有効応力解析 (土木学会年次学術講演概要集、Vol. 38, p51-51, 1983)	吉田望、田中勉、有沢裕	本論文では液状化を考慮した地盤の地震応答解析で、せん断応力～せん断ひずみ関係にR-O モデルを用いる手法を示すとともに、H-D モデルを用いた解析との比較を実施している。
12	Modelling of Stress-Stain Relation of Soils in Cyclic Loading. (FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHOD OF GEOMECHANICS/ NAGOYA/1-5, APRIL, 1985)	K. ISHIHARA, N. YOSHIDA, S. TSUJINO	動的応答解析において最大応答ひずみ以上の応力～ひずみ関係は応答の結果に影響を及ぼさない。このことから予測される最大ひずみ以下の実験データに対して骨格曲線を決定すればよい。履歴を表現するためMASING則が適用されるが、これは、実際の土の特性とは異なる。本文献ではこのことから骨格曲線と履歴曲線を別々に定義している。



表2.2-4 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
13	過剰間隙水圧発生、消散過程を考慮した液状化地盤の地震時応答性状 (日本建築学会構造系論文報告集、第374号、昭和62年4月)	多賀直恒、栗本修、富樫豊	本論文では水平層状地盤を一次元せん断型にモデル化し、時間領域にて地震応答解析を行いその過程での過剰間隙水圧の蓄積、消散を考慮し有効応力の減少、せん断弾性係数の低減の評価を実施している。
14	二次元液状化解析法とその応用 (第25回土質工学研究発表会)	岡二三生、佐藤忠信、中島豊、大石博、加藤満	地盤に砕石ドレーン工法を施した場合の二次元液状化解析を行い、開発したモデル/コードの液状化対策工法に対する適用性の評価を行っている。地盤モデルの解析ではBiotの二相系混合体理論に立脚した釣り合い式をFEMにより解いている。また砂の構成式として足立、岡の弾塑性構成式を採用している。
15	不透水層を有する液状化地盤の地震応答解析 (土木学会第44回年次学術講演会)	孫建生、高田至郎、加藤恵三	本論文に用いられている二次元FEMによる地盤応答解析手法は、初期有効応力解析、動的液状化解析、過剰間隙水圧消散、沈下解析の3つの部分から構成される。応力～ひずみ関係としては履歴型H-Dモデルを載荷-除荷基準としては修正MASING則を用いている。
16	液状化解析の適用性に関する研究 その3 -地盤の実験と解析- (第25回土質工学研究発表会)	滝本幸夫、森伸一郎、戸早孝幸、池田隆明	振動台を用いた模型実験とそのシミュレーション解析により ①プログラムYUSAYUSAとDESRAは適切な入力パラメータさえ取得できれば、実験をよくシミュレートできる。 ②DIANA-Jは構成則としてMULTI-MECHANISMを用いているがこのため、サイクリックモビリティを再現できる。

表2.2-5 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
17	繰返しせん断による粘土層の沈下について —拘束圧の影響— (第24回土質工学研究発表会、 1988年6月)	松田博、山本茂広、大原資生	粘土地盤が繰返しせん断を受けたときに生じる沈下について検討を行っている。沈下量は圧縮指数と初期間隙比、拘束圧、間隙水圧によって表現される。この評価式を約0.3Gの地震力が作用する5mの粘土地盤に適用した場合、おおよそ10~100mmの沈下が生じることが判明した。
18	水平地盤の液状化解析 —履歴型関数モデルを用いた有限要素非線形振動解析法— (平成2年 都土木技研年報)	阿部博、草野郁	本文献は液状解析プログラムBFFCTDの信頼性について以下の検証結果を述べている。 ①ダイレイタンシー特性を直接評価することができなくても、液状化は表現できる。 ②TARA-3, DIANA-J, ALISS等を用いた解析結果に比べて修正R-Oモデルの液状化発生時刻がやや速くなる。
19	地盤の非線形地震応答解析に関する研究 (技術研究所報 No.9 佐藤工業(株)、 1982)	田中勉、吉田望、清水全生、有沢裕、 辻野修一、土田義三	H-DモデルとR-Oモデルについて比較を行い、次のような結果が得られた。 ①H-Dモデルはパラメータが一個であり、中ひずみ域に限れば材料特性を表現できる。R-Oモデルはパラメータが2個あり、H-Dモデルに比べ材料特性を柔軟に表現できる。 ②H-D, R-Oモデルとも数学モデルであり、実際の土の特性を完全に表現することは不可能である。
20	AMPLIFICATION STUDIES FOR A NONLINEAR HYSTERETIC SOIL MODEL (Department of Civil Engineering Research Report R73-46)	J. T. Christian , J. M. Roessert	土の強度、減衰に関する実験データからR-Oモデルによって土の性質が良く近似できることが判明した。また、一次元の粘弾性モデル化解析手法と厳密な形状モデル化手法を比較すると、前者のほうが変位については小さめ、加速度については大きめに見積もる傾向があった。

表2.2-6 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
2 1	地震の動的変形特性の簡易推定法 その1 (第24回土質工学研究発表会、平成元年 6月)	榎並昭、安達俊夫、鈴木伸彦、村松和仁	地盤材料の動的変形特性を実験的に把握する方法として、弾性波探査による原位置試験が採られた試料を用いた室内動的試験が行われるが、解析の対象となる全ての土層についての物性データを上記の方法で求めることは困難な場合が多い。このような点を考慮して室内の動的試験が実施できない場合にも適用できる簡易推定法がH-Dモデルに基づいて提案されている。
2 2	WAVE:A Efficient Microcomputer Program for Site Response Analysis	James D.Hart, Edward L.Wilson	土質材料特性について載荷、徐荷に関して別々の経路をとる履歴型のR-Dモデルにより表現された非線形次元解析プログラムWAVEについて記載されている。このプログラムを用いて1985年のメキシコシティの地震の解析を行っており、観測結果と解析結果は良い一致している。
2 3	石油地下備蓄施設における地震観測と解析 (第7回 日本地震工学シンポジウム)	竹協尚信、吉村隆、青木謙治、花村哲也、 田島孝也	観測記録の解析によって得られた貯油槽周辺岩盤の振動特性について検討を行っている。この結果次のような知見が得られた。 ①貯油槽の空洞は地震時周辺岩盤に影響を及ぼさない。 ②健岩部での地震の増幅は僅かである。
2 4	地震観測結果から得られた大深度鉛直立坑の地震応答特性及びシールドトンネルの影響 (鹿島技術研究所年報 第41号、 1993年10月31日)	大保直人、上野健治、鄭京哲	深さ99mまで地下連続壁で構築されたシールドトンネルの発進立坑と周辺地盤における地震観測の結果について検討を行った。その結果長周期が卓越する地震では立坑と地盤は一体となって挙動するが、短周期が卓越する場合は立坑と地盤の挙動は異なることが判明した。

表2.2-7 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
25	相対増幅率を用いた成層地盤の増幅特性の検討 (土木学会第43年次学術講演会)	鄭京哲、田村重四郎	地中構造物の地震応答特性の推定を目的として地盤中の増幅特性に関する研究が重複反射法を用い、相対増幅率という考え方の導入により行われている。この相対増幅率を利用すれば、地盤内部の動特性が容易に把握できる。
26	EL-Centro 変位波形を含む時空間関数のシミュレーション (土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月)	川上英二	トンネル、パイプラインの地震波動に伴う動的応答解析、耐震設計を行う場合、構造物への地震入力が必要になってくるが、構造物が大きなとき構造物に沿った各点で地震入力を与える必要がある。このことから、EL-Centro 地震波形を時空間関数として地中埋設物に対する入力波のシミュレートを行った。
27	地中構造物に対する斜め入射を考慮した地震応答解析 (土木学会第46回年次学術講演会、平成2年9月)	岸本章二、岩崎浩生、岩楯敏広	成層地盤ならびに基盤が傾斜した地盤（傾斜地盤）に埋設された地中長大構造物を対象に基盤での地震動の斜め入射を考慮した位相差入力地震応答解析を行った。構造物に発生する断面力について検討を行った。その結果地震動の位相を考慮した場合に構造物に発生する断面力は大きくなり、更に基盤の傾斜を考慮した場合入射角が小さくても発生断面力は大きくなることがわかった。
28	混合体理論による飽和岩盤の動的挙動に関する基礎的研究 (土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月)	松本守正、OMER AYDAN, 京谷孝史、市川康明	完全飽和状態の岩盤を対象に混合体理論の立場から、応力、浸透の連成場の支配方程式を導出し有限要素法による数値解析手法の定式化を行っている。これにより以下の知見が得られた。 ①地表面では振幅が増幅される。 ②間隙率の増加による減衰の効果の増大が解析結果に大きく影響する。

表2.2-8 文献リスト

No	文献名	著者	概要
29	大深度鉛直立坑とシールドトンネルの地震応答特性 (鹿島建設技術報告、1990)	大保直人、上野健治、鄭京哲、金子謙	地震波の伝播特性および振動特性の違いによる地盤、立坑およびシールドトンネルの応答の違いについて検討した結果以下の知見が得られた ①高振動数成分の卓越する直下型地震では地表面付近では地盤と立坑は異なった挙動を示す。 ②低振動数成分が卓越する遠方地震では、地盤と立坑は一体となって振動する。
30	比較的長周期の地震動観測によるLNG 地下式貯槽の地震時挙動 (第20回土質工学研究発表会 昭和60年6月)	小山和夫、渡辺修、久保田翼、草野直幹	日本海中部地震の際に、千葉県袖が浦にあるLNG 地下式貯槽で観測された周期10秒の長周期の地震動を取り上げ、そのときのLNG 地下式貯槽の挙動と短周期地震動による挙動との比較、検討を行った。長周期成分が卓越する地震では加速度に比べて変位が大きくなることが判った。
31			

### 3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

本章は、平成7年度の人工バリアの地震応答解析モデル／コードの機能追加内容についてまとめたものである。

#### 3. 1 非線形解析機能および間隙水圧評価のためのモデルの導入

地震時に時々刻々とひずみに応じて変化する土質材料の力学的特性を解析時に再現するため、土質材料の応力～ひずみ関係に関する非線形モデルの導入と非線形解析中に土質材料中の間隙水圧を追跡するための間隙水圧評価モデルの導入を実施する。

#### 3. 2 非線形解析

地盤を構成する材料はひずみが $10^{-5}$ オーダーか、それ以下のひずみのレベルでは弾性体と考えても問題はないが、ひずみレベルが大きくなるにつれ非弾性的性質が卓越し、線形弾性体として取り扱うことは難しくなる。前章で述べたように土質材料の載荷試験で得られた応力～ひずみ曲線を骨格曲線と履歴曲線に分離し、それぞれを関数で表す方法として、Hardin-Drnevich モデルやRamberg-Osgoodモデルが提案されている。このような、解析では時間領域において微少な時間間隔で運動方程式を解き応力～ひずみ関係を逐次追跡する方法が取られる。Hardin-Drnevich モデル、Ramberg-Osgoodモデルとも一長一短があるが本年度の開発においては実際の土質材料の特性を2つのパラメータを用いて柔軟に表現できる利点を有するRamberg-Osgoodモデルを採用することとした。

### 3. 3 Ramberg-Osgoodモデル

Ramberg-Osgoodモデルにおいて骨格曲線は一軸圧縮強度 $\tau_f$ と実験定数 $\alpha$ 、 $\beta$ を用いて以下の式で表現される。

$$G_0 \gamma = \tau \left( 1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^\beta \right) \quad (3.3-1)$$

$\tau$  : せん断応力

$\gamma$  : せん断ひずみ

$G_0$  : 最大せん断弾性係数

(ひずみが $10^{-6}$ 以下でのせん断弾性係数)

式(3.3-1)から理解できるように、ひずみ $\gamma \rightarrow \infty$ の場合、 $\tau \rightarrow \infty$ となり、実際の土質材料の特性に合わなくなる。

#### 3. 3. 1 Masing則と履歴曲線

骨格曲線では除荷、再載荷に対する応力～ひずみ関係の履歴曲線が定義されていないため、通常履歴曲線は骨格曲線にもとづき、Masing則を適用する。

Ramberg-Osgoodモデルにおいて一般形は、せん断応力 $\tau$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関数として

$$G_0 \gamma = f(\tau) \quad (3.3.1-1)$$

で表現される。いま、せん断応力とせん断ひずみが折り返し点 $(\tau_a, \gamma_a)$ から出発して履歴ループをつくる為には除荷においては、

$$\frac{G_0 (\gamma - \gamma_a)}{m} = f\left(\frac{\tau - \tau_a}{m}\right) \quad (3.3.1-2)$$

再載荷においては、

$$\frac{G_0(\gamma + \gamma_a)}{m} = f\left(\frac{\tau + \tau_a}{m}\right) \quad (3.3.1-3)$$

なる関数を用いればよい。m は骨格曲線を引き延ばす倍率をあらわすが通常2を用いる。  
式(3.3.1-2)、(3.3.1-3)を用いて式(3.3-1)の除荷曲線、再載荷曲線を求めると、  
次のようになる。

#### ① 除荷曲線

$$G_0(\gamma - \gamma_a) = (\tau - \tau_a) \left(1 + \alpha \left| \frac{(\tau - \tau_a)}{2\tau_f} \right|^s\right) \quad (3.3.1-4)$$

$\tau_a$  : 折り返し時のせん断応力

$\gamma_a$  : 折り返し時のせん断ひずみ

#### ② 再載荷曲線

$$G_0(\gamma + \gamma_a) = (\tau + \tau_a) \left(1 + \alpha \left| \frac{(\tau + \tau_a)}{2\tau_f} \right|^s\right) \quad (3.3.1-5)$$

$\tau_a$  : 折り返し時のせん断応力

$\gamma_a$  : 折り返し時のせん断ひずみ



なお、不規則載荷時の履歴ループについては以下の規則に従う。(図 3.3.1-1～ 3.3.1-2)

1. 除荷～再載荷ループが骨格曲線上に戻ってくる前の小さな履歴ループは骨格曲線に Masing則を適用して作成する。
2. 除荷～再載荷ループが骨格曲線に戻ってきた後は骨格曲線上を動く

減衰定数hについては、以下の曲線で表現されてる。

$$h = \frac{2\alpha}{\pi} \cdot \frac{\beta}{\beta+2} \left( \frac{|\tau/\tau_a|^s}{1 + \alpha|\tau/\tau_a|^s} \right) \quad (3.3.1-6)$$

### 3. 4 液状化現象を評価するためのアルゴリズム

本年度のモデル／コード開発においては非線形解析と同時に振動中に土質材料中で生じる間隙水圧の変化と液状化の判定を行う計算機能を追加した。間隙水圧の変化と液状化の判定を行う計算機能は一定振幅応力による砂の非排水せん断試験から得られる間隙水圧上昇量と繰返し回数の関係を正弦曲線で近似したものを利用する方法を採用している。

ただし、この機能を利用する場合、一定振幅応力による砂の非排水せん断試験から得られる実験パラメータの取得が必要であると同時に入力データにて初期有効上載圧と初期間隙水圧を定義しなければならない(マニュアルの初期応力、初期間隙水圧の項を参考)。

#### 3. 4. 1 SBEDの過剰間隙水圧の評価式

SBEDらは一定振幅の繰返し载荷による比較的ゆるい砂の液状化実験での過剰間隙水圧の上昇量  $u$  と応力振幅の繰返し数  $N$  の関係を以下の  $\sin^{-1}$  の関数で表すことを提案した(SEE D, "Pore-Water Pressure Changes during Soil Liquifaction", ASCE, VOL. 102, GT4, 1976)。

$$u / \sigma_{ci}' = (2 / \pi) \sin^{-1} (N / N_r)^{1/2\xi} \quad (3.4.1-1)$$

$u$  : 過剰間隙水圧

$\sigma_{ci}'$  : 有効上載圧

$N$  : 繰返し数

$N_r$  : 液状化回数

$\xi$  : 実験定数(詰めかたに依らず砂により一定)

式(3.4.3-1)より、

$$\begin{aligned} N / N_r &= \left\{ \sin \frac{\pi \cdot (u / \sigma_{ci}')}{2} \right\}^{2/\xi} \\ &= \left\{ \frac{1 - \cos(\pi \cdot (u / \sigma_{ci}'))}{2} \right\}^{\xi} \end{aligned} \quad (3.4.1-2)$$

ここで、繰返し回数比  $N / N_r$  を  $r_N$ 、過剰間隙水圧比  $u / \sigma_{ci}'$  を  $r_u$  で表すと、上の式は

$$r_N = \left\{ \frac{1 - \cos(\pi \cdot r_u)}{2} \right\}^{\xi} \quad (3.4.1-3)$$

となる。

### 3. 4. 2 不規則応力への適用

SEEDらの式は一定応力振幅の下での間隙水圧の上昇を表している。これを不規則応力に対して適用するためACCUMULATIVE DAMAGE CONCEPT にもとづき拡張を行う(Annaki.M, "Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics", ASCE, Vol.103, GT6, 1977)。

ACCUMULATIVE DAMAGE CONCEPT の基本的な概念は以下の通りである。

応力振幅 $S_i$ の応力波での液状化回数を $N_{iR}$ とする。ある不規則波の中に $S_i$ の応力振幅が $N_i$ 含まれるとするとACCUMULATIVE DAMAGE  $D_i$ は

$$D_i = N_i / N_{iR} \quad (3.4.2-1)$$

不規則波の中にある全ての振幅を考慮して、それらが与える影響は不規則振幅の順序によらず、線形重ね合わせが可能であると仮定すれば、

$$D = \sum_i D_i = \sum_i N_i / N_{iR} \quad (3.4.2-2)$$

$D$  が1に達すれば液状化が生じたことになる。

今回の適用ではさらに次のような拡張、仮定を設けている。

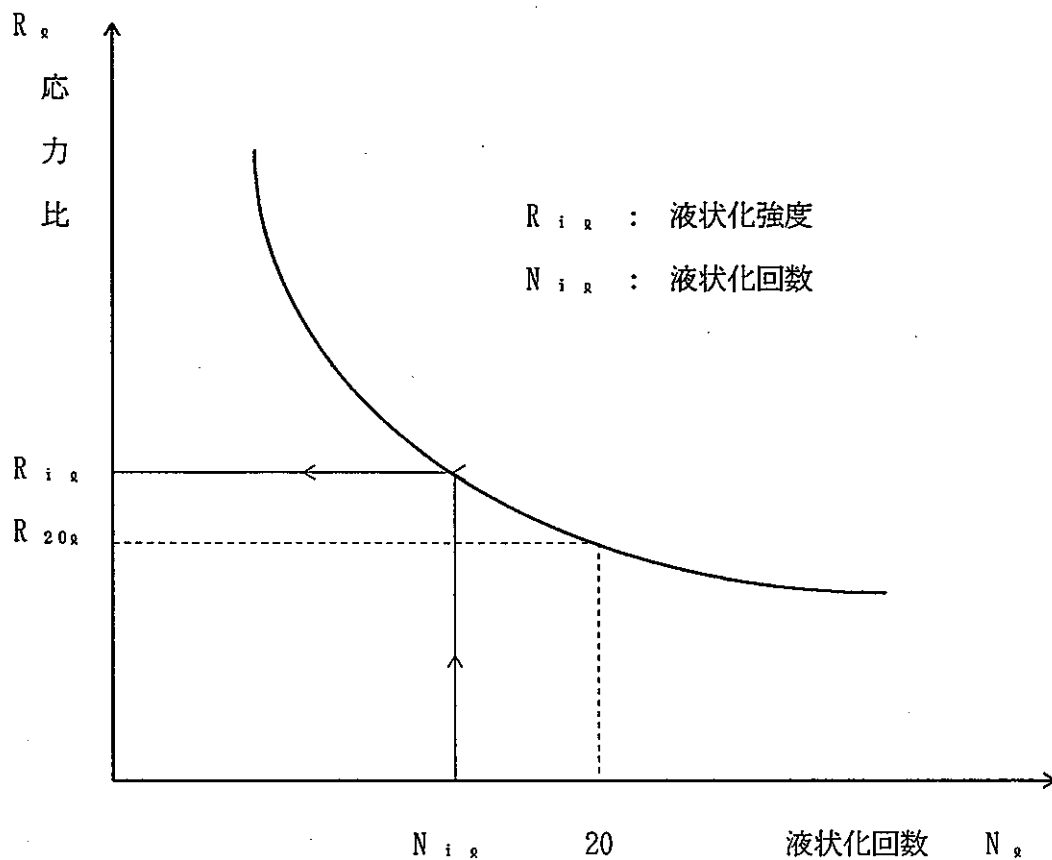
① 液状化応力比 $R_R$ と液状化回数 $N_R$ の間に

$$N_R / 20 = (R_R / R_{20R})^\eta \quad (3.4.2-3)$$

の関係があると仮定する。式(3.4.2-3)よりある液状化応力比 $R_R$ が計算できた場合、実験より定数 $\eta$ が既知であるならば不規則応力を一定振幅波形に換算した液状化回数が判明する。

ただし、液状化応力比 $R_R$ は液状化回数 $N_R$ で液状化が生じる繰返しせん断応力比 $R$ ( $=\tau / \sigma_{ci}'$ )を表している。

$R_{20R}$ は液状化回数20回の場合のせん断応力比である。



② 式(3.4.2-1)において $N_{iR} = 1/2$ とする。すなわち、不規則波において振幅 $S_i$ の波が $1/2$ 波長含まれるとして考え、応力がゼロクロスしてから、次のゼロクロスまでの間隙水圧に注目する。

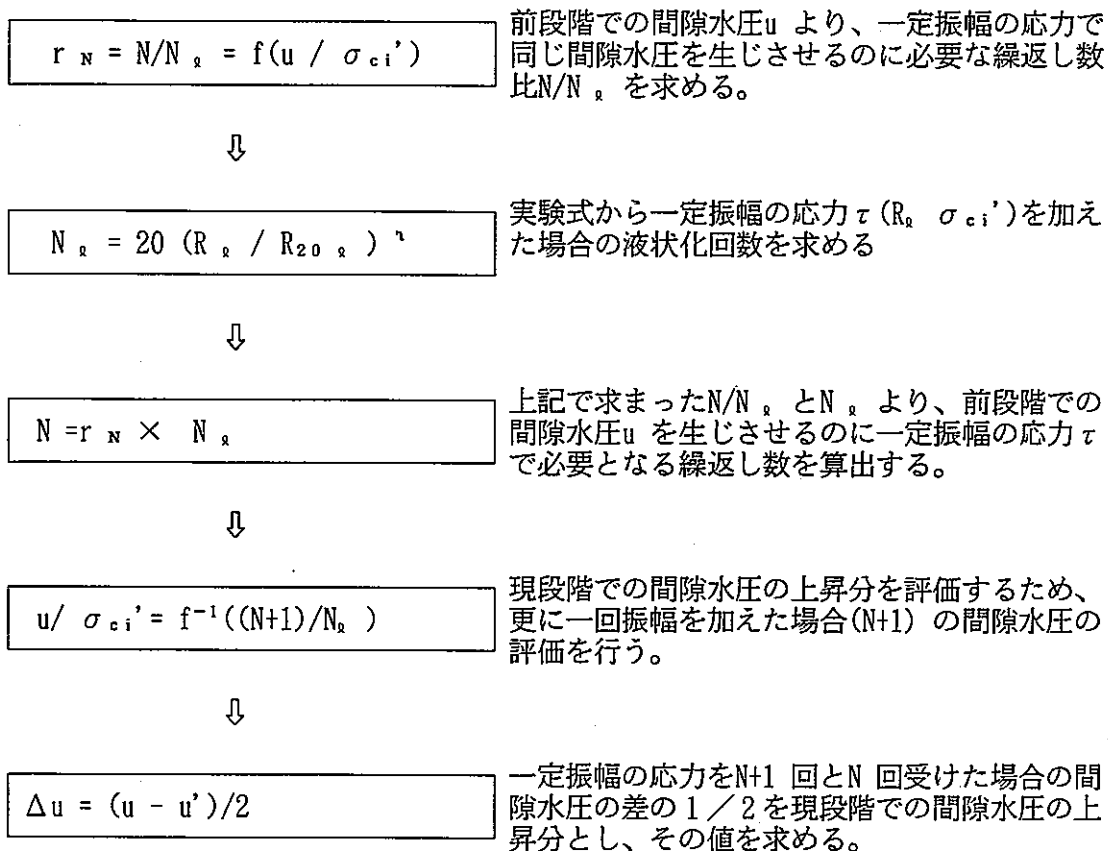
③ 間隙水圧上昇の割合 $u/\sigma_{ci}'$ 、すなわち $D$ と繰返し回数 $N$ の関係式を式(3.4.2-1)のような単純な直線関係とはせずに

$$D = u/\sigma_{ci}' = f^{-1}(N/N_{iR}) \quad (3.4.2-4)$$

$f$ は、間隙水圧上昇式(3.4.1-3)を表している。

### 3. 4. 3 間隙水圧評価の手順

間隙水圧評価のアルゴリズムについて以下に示す。



### 3. 5 プログラムの構成

非線形解析機能、間隙水圧評価機能を導入するにあたり、入力カードの読み込みおよび計算ルーチンに関してのサブルーチンの追加を行った。

#### 3. 5. 1 入力カードの変更

非線形解析の指定をするためカードグループSCONにカードMODLの追加を行った。また、せん断弾性係数G のヒストリー、分布の出力のためカードグループGHST, GDIS の追加を行った。

#### 3. 5. 2 計算ルーチンの追加

非線形解析機能、間隙水圧評価機能の追加に伴って、入力データ読み込みに関するサブルーチンGHSTIN、GDISIN、Ramberg-Osgoodモデルを用いたせん断弾性係数更新に関するサブルーチンROMDL、CLOSP、NEWTON、間隙水圧の上昇分の評価に関するサブルーチンLIQUIF、PPADD の追加を行った。

### 3. 6 非線形解析機能の検証

本年度文献調査で入手した文献「過剰間隙水圧発生・消散過程を考慮した液状化地盤の地震応答性状」では、飽和砂地盤を対象に最大加速度を100 gal に補正したEL-Centro N-S 波を基盤入力波として、Ramberg-Osgoodモデルを用いた動的一次元非線形弾性解析と液状化の評価を行っている。本文献には基本的な物性データが明確に記載されていること、EL-Centro N-S 波のデータについては既に入手できていることから、文献記載の解析結果を検証用データとして用いることとした。

ただし、過剰間隙水圧の評価で用いる実験式（Seedの式等）が開発したコードと本文献では異なるため、これに関する実験パラメータについては、平成4年度文献集より「砂層の液状化現象についての数値シミュレーション」および本年度入手した文献である「水平地盤の液状化解析」を参考に定めた。

#### 3. 6. 1 検証用モデルの形状と境界条件

検証用文献においては、図3.6.1-1に示す飽和砂地盤を一次元せん断モデルにて表現している。本検証では、開発したコードの3次元解析機能を利用するため、3次元の8節点ソリッド要素を用いて一次元的なモデル化を行った。図3.6.1-2に概略図を示す。境界条件は下面を完全固定とし、側面は鉛直方向（z方向）の自由度のみ拘束した。

#### 3. 6. 2 物性値

本検証で用いた主な物性値を表3.6.2.1に示す。砂のせん断弾性係数については検証用文献に記載されている図3.6.2-1に基づき、深度に応じた値を定めたものである。減衰は1次の減衰定数 $h_1=0.05$ をレーリー減衰に換算し定めたものである。なお、表中のレーリー減衰係数は後述のRamberg-Osgoodモデルのパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ と区別する為、 $\alpha'$ 、 $\beta'$ と記す。ポアソン比については検証用文献に記載がない為、平成4年度文献集より、「FLUSH」で利用している値0.33を採用した。また、Ramberg-Osgoodモデルのパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ および基準ひずみ $\gamma_R$ については、検証

用の文献に記載されている  $\alpha=0.3$ 、 $\beta=2.0$ （文献での  $N$  と  $\beta$  は  $N=\beta+1$  の関係にある。<sup>\*1)</sup> および  $\gamma_R=0.001$  を採用した。過剰間隙水圧の評価に用いる砂の内部摩擦角  $\phi$ 、実験定数  $\xi$  および  $\eta$  は文献「水平地盤の液状化解析」記載のデータを参考に、それぞれ  $37^\circ$ 、 $0.5$  および  $-3.89$  と定めた。液状化応力比  $R_{20}$  については、文献「砂層の液状化現象についての数値シミュレーション」に記載の実験値  $0.24$  を採用した。

\*注1) 検証用文献では、Ramberg-Osgoodモデルの骨格曲線を次式で表している。

$$\frac{\gamma}{\gamma_R} = \frac{\tau}{\tau_f} + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^N$$

ここに、

- $\tau_f$  ; 一軸圧縮強度
- $\gamma_R$  ; 基準ひずみ
- $\alpha$ 、 $N$  ; パラメータ

本コードで用いた(2.4.2-2)式を  $\tau_f$  除して整理すると、パラメータ  $\beta$  と上記パラメータ  $N$  の間に  $N = \beta + 1$  の関係が成り立つ。

### 3. 6. 3 入力波形

入力加振波は水平方向の最大加速度  $100 \text{ gal}$  のEL-Centro N-S 波形を用いた。検証用文献記載の入力波と本検証で用いた入力波を図3.6.3-1に示す。加振荷重の入力のステップ間隔 ( $\Delta t$ ) は  $0.001$  秒として、 $10000$  ステップの解析を行った。

### 3. 6. 4 解析結果の比較

比較は検証用の文献に記載されている地表付近の加速度、過剰間隙水圧の各時刻層応答について行った(図3.6.4-1参照)。文献記載の解析結果では地表付近の応答倍率は約4倍となっているが、本検証の計算結果は示すように2.5倍程度となった。この約37%の相違としては、以下の要因が関与していると考えられる。

- ① 地盤のせん断剛性の設定に誤差が入る。
- ② レーリー減衰の設定が不明確。



①の地盤のせん断剛性については、検証用文献に深度別のデジタル値が記載されておらず、図3.6.2-1より計り取りで設定したことによる誤差が考えられる。また、②のレーリ減衰については、一次モードの周波数 $\omega_1$ および減衰定数 $h_1$ より以下の関係に基づきレーリ減衰係数 $\alpha'$ 、 $\beta'$ に置き換えた際の相違が考えられる。

$$h_1 = \alpha' / 2\omega_1 + \beta' \omega_1 / 2$$

上式を用いると、減衰定数 $h_1$ を与える範囲で係数 $\alpha'$ 、 $\beta'$ を如何に設定しても1次の減衰は取り込めているが高次のモード減衰を完全に無視した形になる。検証用文献には減衰定数 $h$ が記載されているのみで、使用したレーリ減衰係数までは記載されていない。従って、使用したレーリ減衰係数の相違により、検証結果と文献記載の結果の相違を生じさせていると考えられる。

過剰間隙水圧の変化および液状化の発生については、検証用データに示されるように初動から最大加速度が発生する時刻までの時間が短いEL-Centro N-S 波形においては過剰間隙水圧の上昇率は大きく初動後2秒で液状化に至る。図3.6.4-2の比較図に示すように本検証での計算結果では過剰間隙水圧の急変は1.2秒付近で生じており、液状化も検証用のデータより早い時刻に生じている。この相違は以下の要因によるものと考えられる。

- ① 地表付近の応答加速度の相違
- ② 過剰間隙水圧の評価モデルの特徴

①の応答加速度については、図3.6.3-1に示すように文献記載の応答加速度と本検証で得られた応答加速度では波形が異なることが分かる。特に、波の周期と最大値に至る迄の平均振幅が異なっている。検証結果は文献記載の応答加速度に比較し、波の周期が小さく、最大加速度が発生するまでの平均振幅が大きい。一般に、加速度の最大振幅が発生するまでの時間が短いほど、また最大振幅が発生するまでの平均振幅が大きい程、過剰間隙水圧の上昇量が大きく液状化が早期に発生する。一方、②の過剰間隙水圧の評価モデルの特徴とは、本コードで採用しているSeedの式に関して言えることである。文献「砂層の液状化現象についての数値シミュレーション」では、同評価モデルを用いた正弦波入力に対する解析結果が示されている。本検証にて用いたモデルと形状モデルは異なるが、最大加速度にいたるまでに要する時間が短い地震波に対しては、本コードで採用した評価モデルは間隙水圧の上昇を過剰に見積もる性質を有すと考えられる。(図3.6.4-3参考)

以上、地表付近の応答加速度および過剰間隙水圧を用いて既存の結果との一致を試みたが、解析条件が不明な点や評価モデルが異なる点等があり、完全に再現することが困難であった。しかしながら、本コードへの非線形解析機能追加および過剰間隙水圧の評価機能追加に伴い、コード機能の妥当性が確保されていることを示す必要がある。そこで、上記検証と併せて深度別の応答加速度および線形解析結果と非線形解析結果との比較を通じ定性的な検証を行った。この結果、図3.6.4-4に示す深度別の応答加速度より、地震波の入射面から地表に近づくにつれて応答倍率が増加していることが確認できた。また、図3.6.4-5に示す線形解析結果と非線形解析結果との比較より、2つの解析結果がほぼ一致していることが分かる。これは、本検証の様なひずみレベルが小さい範囲にある場合は、系の非線形性がほとんど現れないことを示している。

### 3. 6. 5 検証結果のまとめ

本年度のコード機能追加に伴う検証を実施したが、検証用データの情報不足および詳細不明等の理由より十分な検証ができたとは言いがたい。コードの実用化に向け、追加する機能や必要とするデータが複雑かつ多岐にわたるため、常に比較用として十分な解析結果や理論解が存在するとは限らない。今後、これまでに十分な検証が行われている既存コードを用い、ベンチマーク的な検証を実施することが必要となる。

表3.6.2-1 検証用解析で用いた物性値

要素番号	$G_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (kgf/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	$\gamma_R$	$\alpha$	$\beta$	$\phi$ (度)	$\eta$	$\xi$	$R_{20\ell}$
101	1550	$1.85 \times 10^{-3}$	0.33	0.001	0.30	2.00	37	-3.89	0.50	0.24
102	1500									
103	1450									
104	1400									
105	1300									
106	1200									
107	1100									
108	1000									
109	900									
110	750									
111	550									
112	350									

(注)  $G_0$  : 最大せん断弾性係数、 $\rho$  : 重量密度、 $\nu$  : ポアソン比、 $\gamma_R$  : 基準ひずみ、 $\alpha$ 、 $\beta$  : R-O モデル実験定数  
 $\phi$  : 内部摩擦角、 $\eta$ 、 $\xi$  : 液状化実験定数、 $R_{20\ell}$  : 液状化応力比

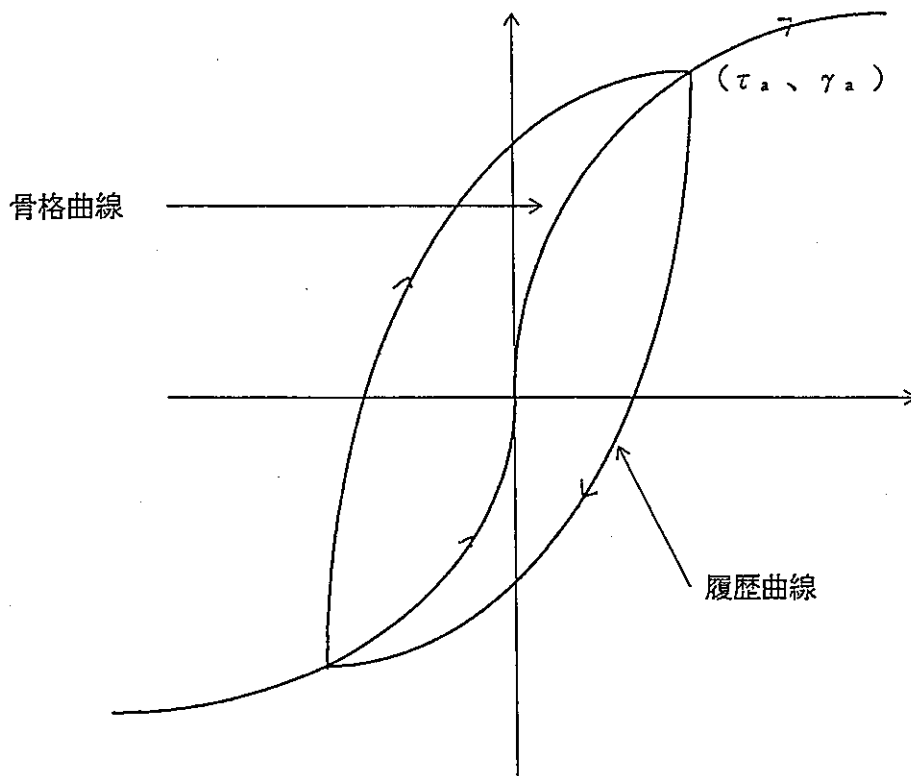


図3.3.1-1 骨格曲線と履歴ループ

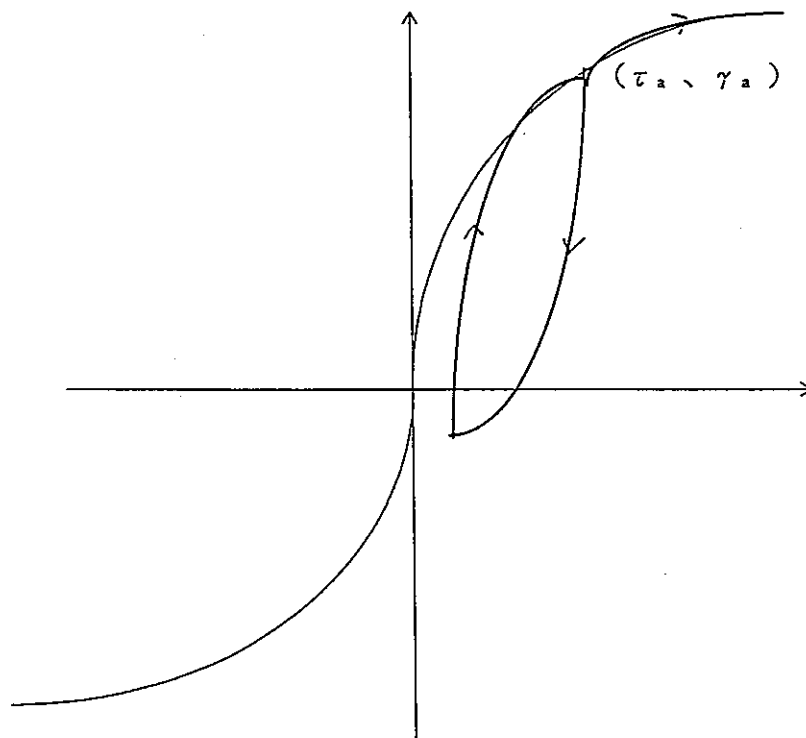


図3.3.1-2 不規則載荷とMASINGの規則

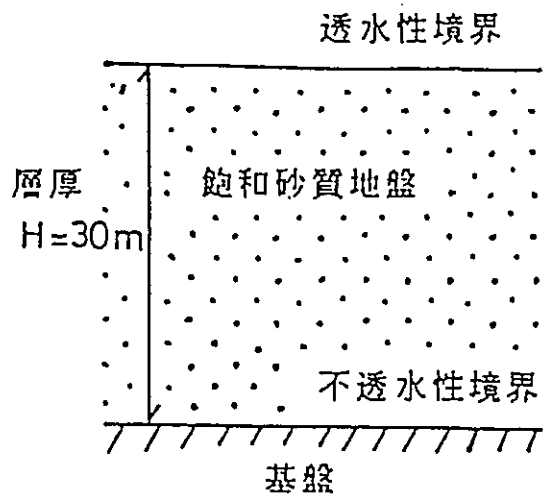


図3.6.1-1 検証用文献で解析対象とした飽和砂地盤

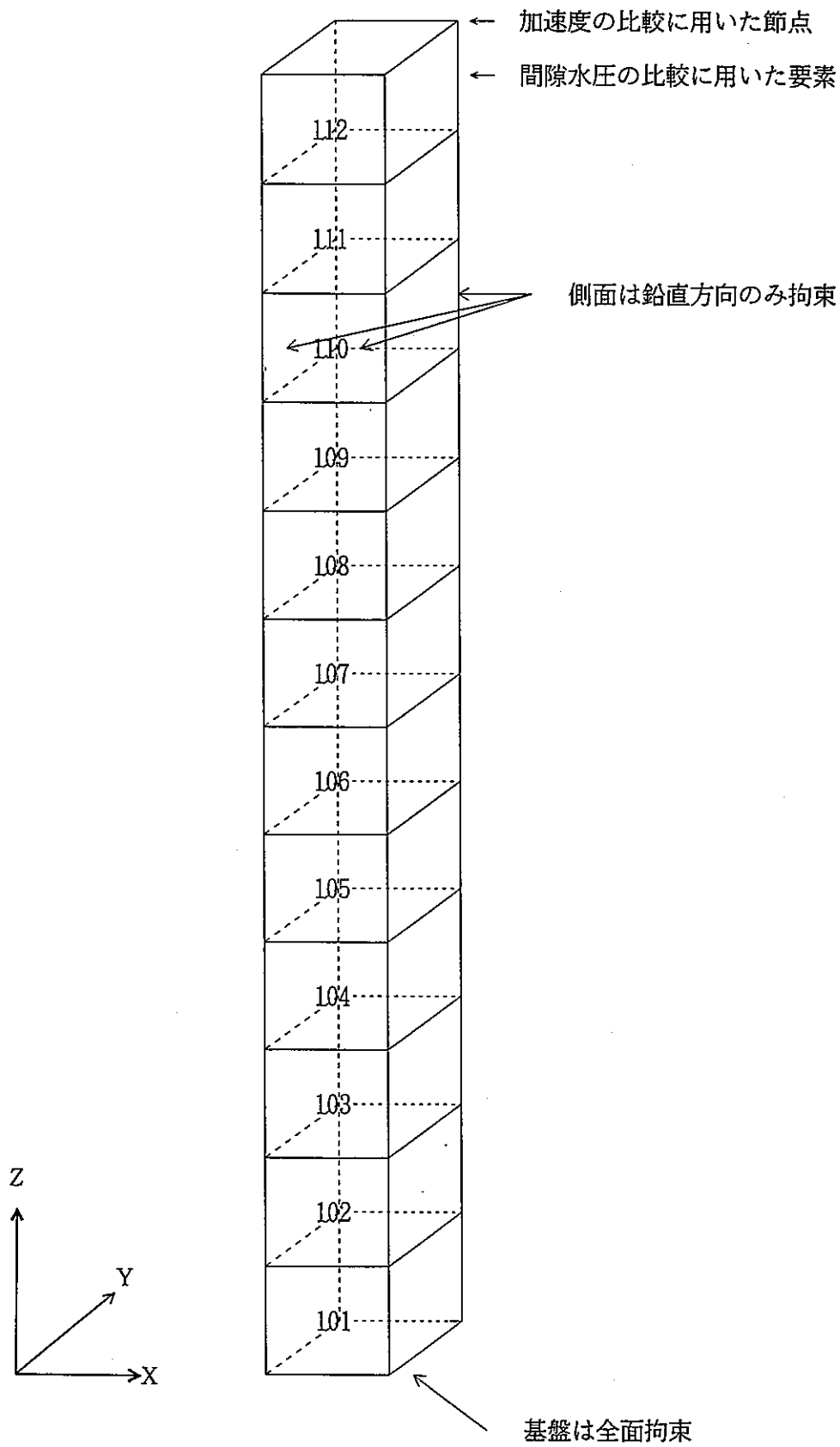


図3.6.1-2 3次元解析用モデル

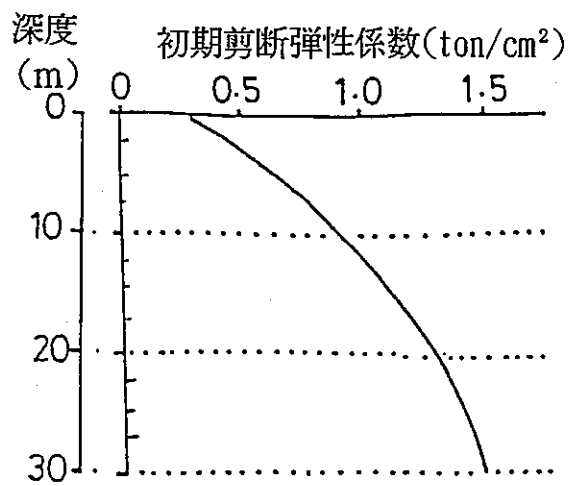


図3.6.2-1 検証用文献に記載されている深度～せん断弾性係数関係

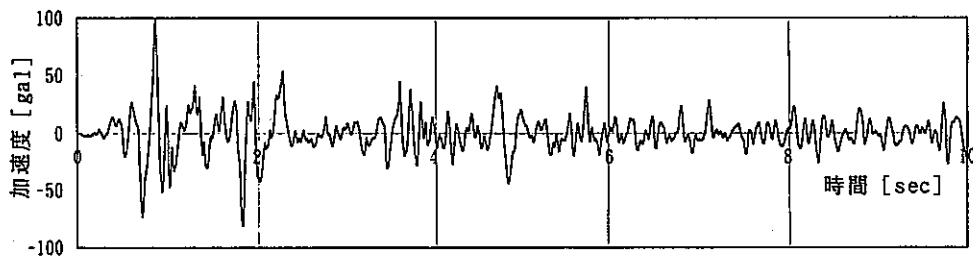
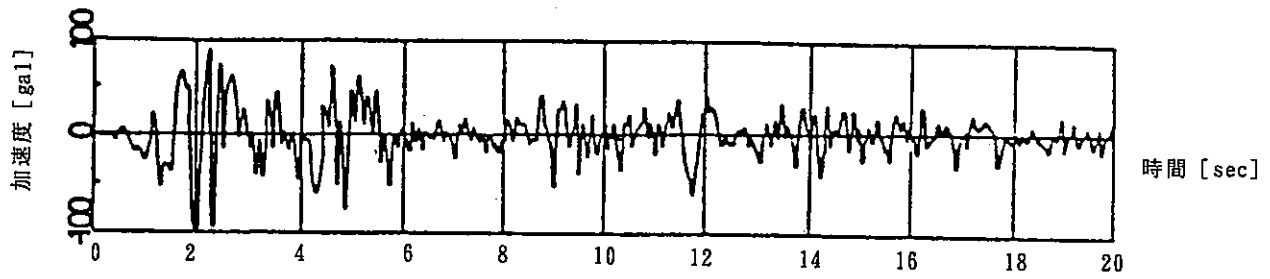


図3.6.3-1 検証用文献に記載されている入力波および本検証で用いた入力波



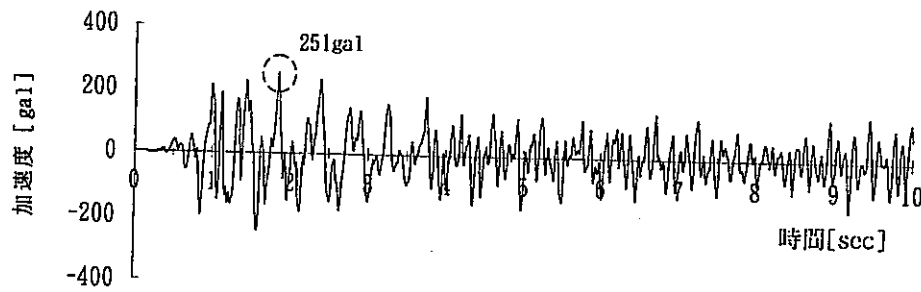
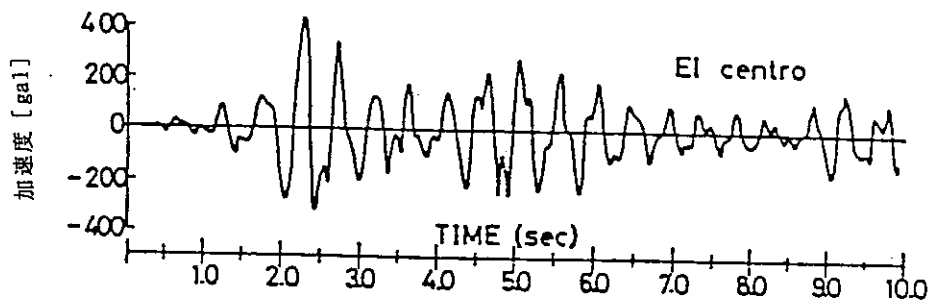


図3.6.4-1 文献記載の地表付近の加速度データとの比較

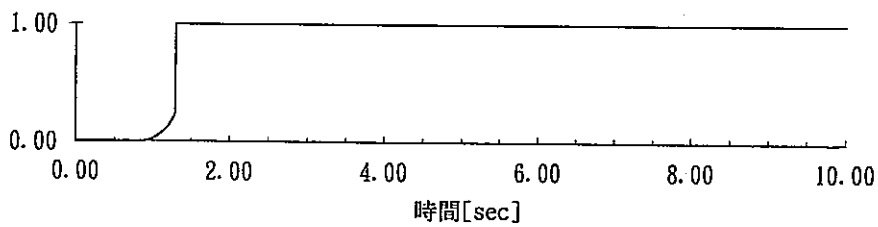
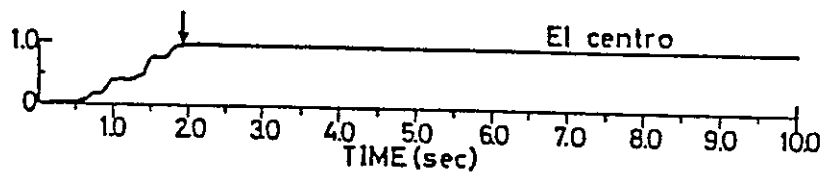


図3.6.4-2 文献記載の地表付近の過剰間隙水圧データとの比較

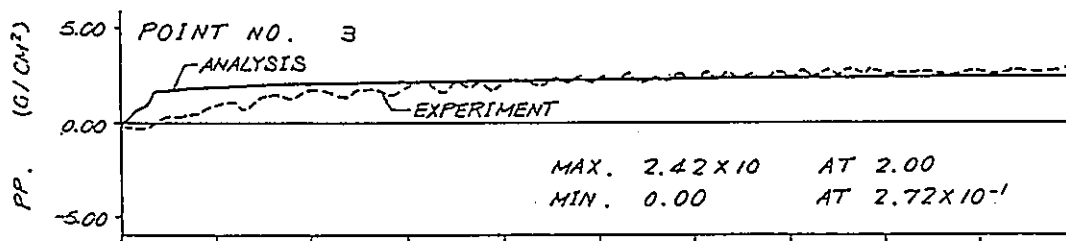


図3.6.4-3 砂層の液状化現象についてのシミュレーションに記載の解析結果  
(平成4年度文献集に記載)

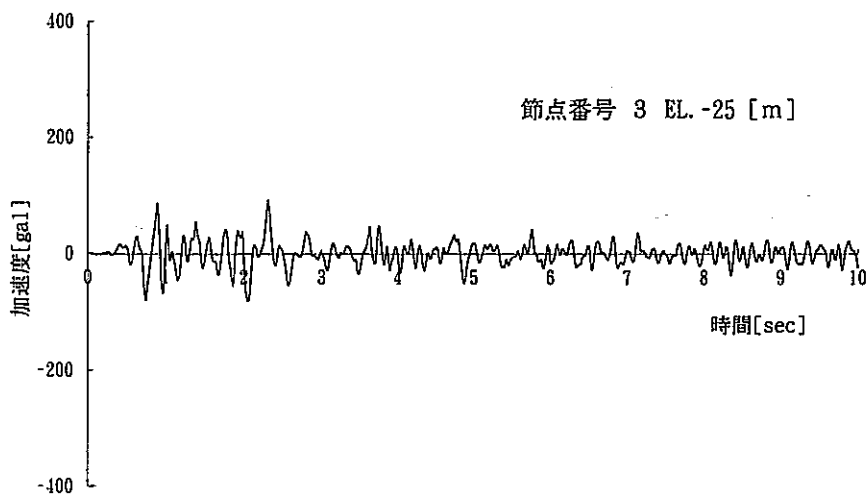
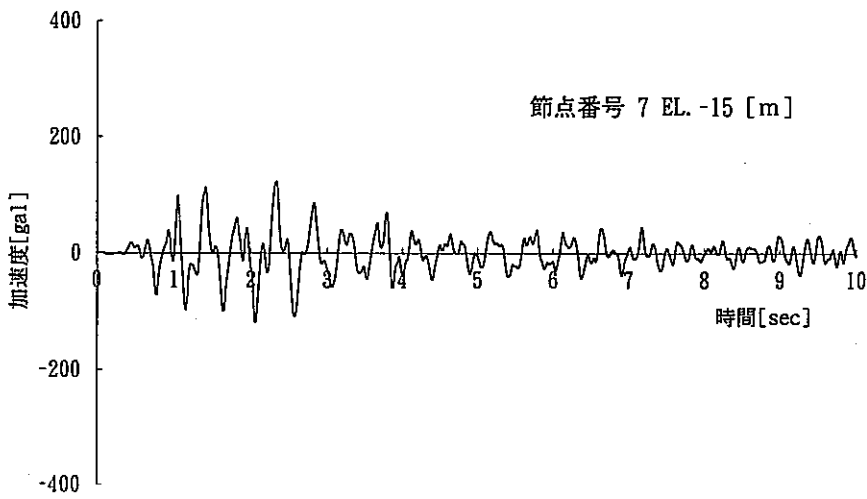
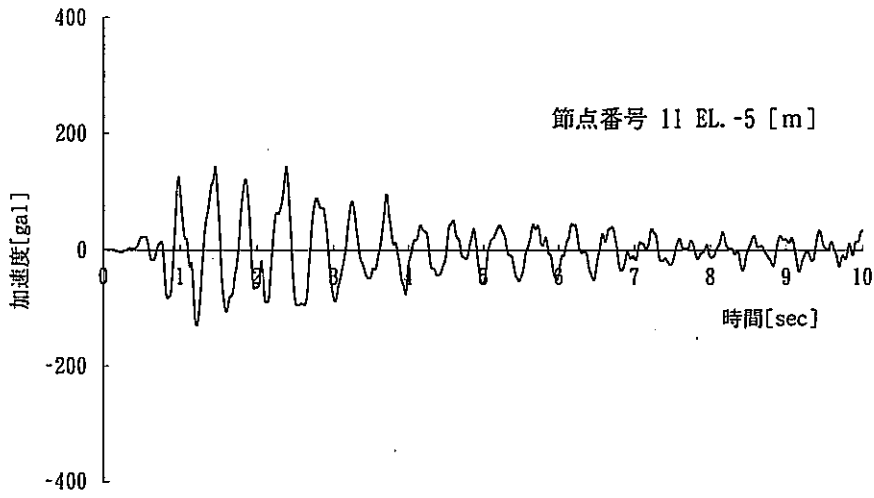


図3.6.4-4 深度による応答加速度の比較  
( $\nu$ - $\eta$ -減衰係数  $\alpha=0.959$ 、 $\beta=0.002$ )

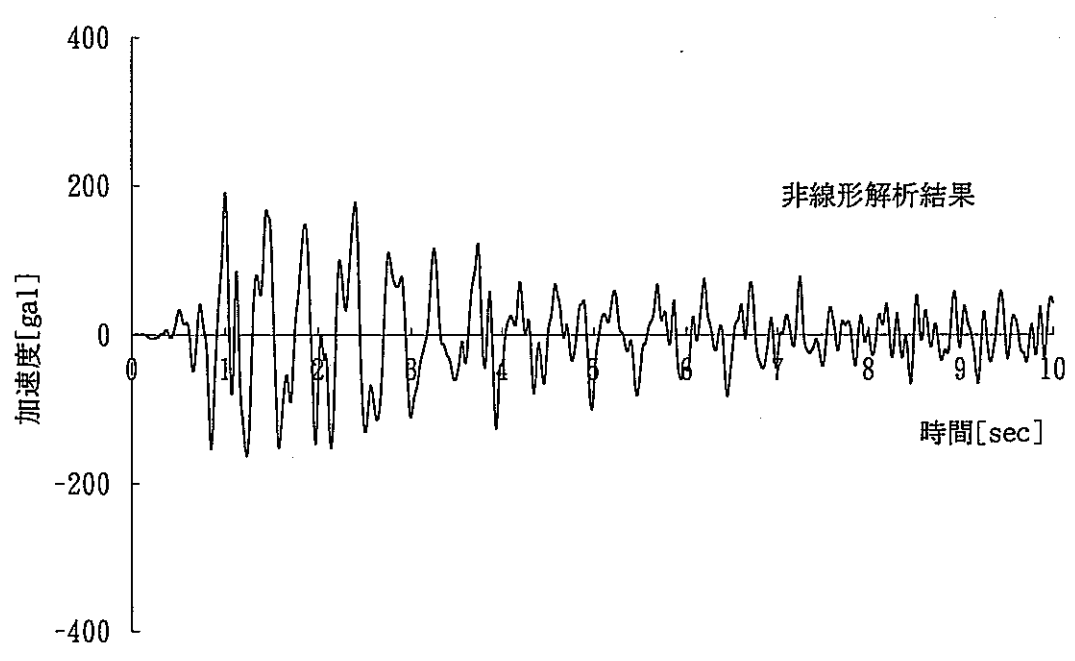
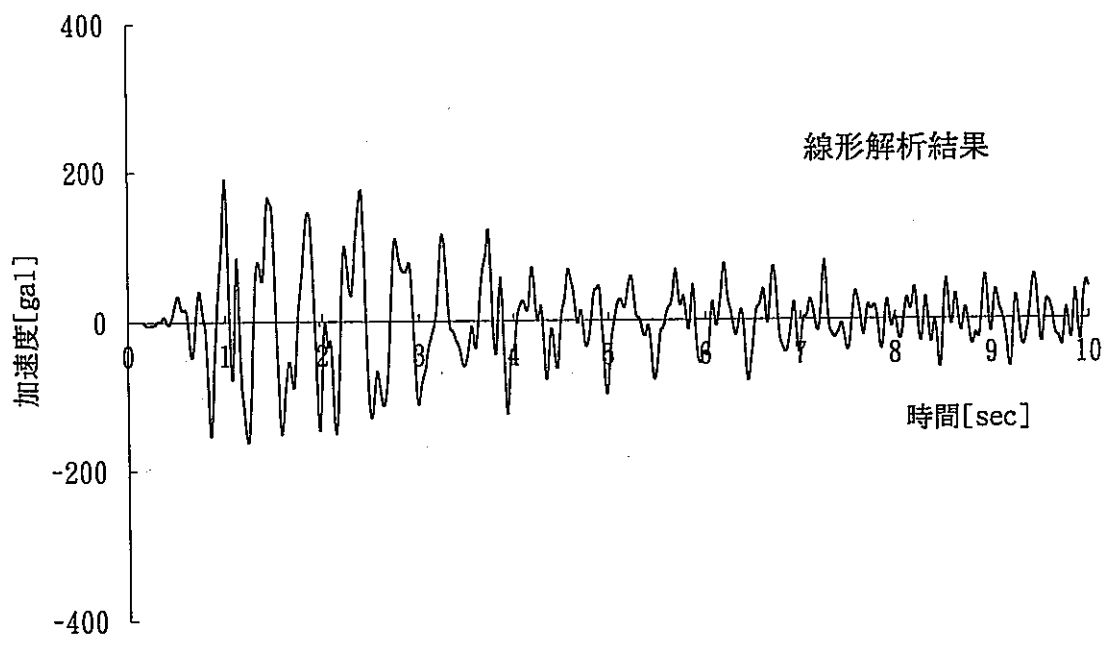


図3.6.4-5 線形解析結果と非線形解析結果との比較  
 ( $\nu$ - $\eta$ -減衰係数  $\alpha=0.959$ ,  $\beta=0.002$ )

#### 4. 振動実験にもとづくモデル／コードの妥当性の評価

モデル／コードの妥当性の評価のため本研究にて開発したコードにより大型振動試験装置にて実規模の1／5スケールの人工バリア供試体を使用して行われた試験の解析を行った。

## 4. 1 実固有値解析

### 4. 1. 1 概要

大型振動試験での供試体のモデル化を行い、そのモデルを用いて実固有値解析を行った。実固有値解析においては既存の物性データを用いて解析を行った。

### 4. 1. 2 解析時に用いた仮定

現解析コードの機能上の制約、計算機環境等から解析においては以下の仮定を設けた。

- ① 固有値解析の機能が1相系での解析に限定されるため解析は1相系で実施した。
- ② 固有値方程式としてMK型の方程式を解いている。

### 4. 1. 3 数式モデルと解法

実固有値解析においては剛性マトリクスK、質量マトリクスMにより表された次のMK型の固有値問題を解いている。

#### (1) MK型の固有値問題

$$Kx = \lambda Mx$$

ここで、 $\lambda$ は固有振動数に関する固有値を表しており、 $x$ は振動モードに関連する固有ベクトルを表している。

#### (2) サブスペース法

K, Mが正則かつ対称であることから、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て解くサブスペース法を用いた。

#### 4. 1. 4 物性値

ベントナイトのせん断弾性係数および減衰定数はPNC殿所有の湿潤ベントナイトを用いた試験データより、ひずみが $10^{-4}$ の場合のサンプルDT-22 の値を引用した。使用した物性値の詳細については表4.1.4-1 に示す。

#### 4. 1. 5 モデルと境界条件

##### (1) 振動試験装置

図4.1.5-1 に示すようにオーバーパック及びベントナイト中に計測機器を配置した人工バリアモデルに対して大型振動台にて30Hz～50Hzのスweep試験を実施して共振点を求めた。使用した加速度により共振点は異なっているがその値はどの計測点においても30Hz～40Hzの範囲にある。

##### (2) 解析用モデルの形状

大型振動試験供試体（実規模の1/5スケール）を模擬した円柱状のモデルにて解析を実施した。モデル形状については図4.1.5-2 に示す。

##### (3) 解析用の拘束条件

大型振動試験供試体の容器にあたるモデルの側面と端面についてはX, Y, Z 軸方向の拘束を行った。詳細については図4.1.5-2 に示す。

#### 4. 1. 6 解析結果のまとめ

ヤング率を $40\text{kgf/cm}^2$  (乾燥密度  $0.7\text{gf/cm}^3$ ) とした場合、一次固有震動数は $36.1\text{Hz}$ となっており、試験結果で得られた $30\text{Hz}\sim 40\text{Hz}$ の範囲に入っている。試験結果では、使用した加速度が大きくなるにつれて共振点が小さくなってきているが、これはベントナイトの物理的な非線形特性（せん断弾性係数の低下など）に起因するものと考えられる。今後ベントナイトのせん断弾性係数等をパラメータとして解析を行い、この現象の理論的裏付けをとることが必要である。



## 4. 2 動的解析結果

### 4. 2. 1 概要

大型振動試験で用いた供試体のモデル化を行い、動的解析を行った。応答ひずみレベルが比較的小さい範囲では、系の非線形性は期待できない。従って、解析手法として線形、非線形および平成6年度に機能追加を行った等価線形のいずれを用いても結果に差異はない。本節ではベントナイトの応力～ひずみ関係に関して、線形、非線形および等価線形の3通りの解析を行い、試験結果との比較を行った結果を示す。

### 4. 2. 2 解析時に用いた仮定

現解析コードの機能上の制約、計算機環境等から解析においては以下の仮定を設けた。

- ① 現在入手可能である物性データの関係から解析は1相系で行う。
- ② 応力～ひずみ関係に関しては線形モデル、Ramberg-Osgoodモデルおよび等価線形モデルを用いた。
- ③ 線形解析ではベントナイトのせん断弾性係数 $G$ 、減衰定数 $h$ は動燃事業団殿所有の実験データよりひずみ $1.0 \times 10^{-4}$ での値を用いた。

### 4. 2. 3 物性値

本解析に用いた諸物性値を表4.2.3-1に示す。ベントナイトのせん断弾性係数および減衰定数は、動燃事業団殿所有の湿潤ベントナイトを用いた試験データより、ひずみが $1 \times 10^{-4}$ の場合の値（図4.2.3-1 参照）を引用した。ただし、等価線形解析の際は、種々のひずみレベルに応じた正規化せん断弾性係数（初期せん断弾性係数で規格化）および減衰定数を予め必要とする為、同試験データを基に表4.2.3-2に示す値を定めた。Ramberg-Osgoodモデルのパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ については、ベント

ナイトのような粘土材の試験データ等を入手することが困難であった為、平成4年度文献集より「砂層の液状化現象についての数値シミュレーション」記載の砂層の値を暫定的に採用した。

#### 4. 2. 4 加振方法

加振方向はオーバパック長手方向(図4.2.5-1参照)とし、試験において容器上で観測されたEL-CentroNS 波形、宮城沖地震EW波形、八戸地震EW波形を入力地震波とし、それぞれの波形の最大値近傍の3秒間の解析を行った。ただし、等価線形解析については1秒間の解析を行った。

#### 4. 2. 5 解析モデルと境界条件

##### (1) 解析用モデルの形状

加振方向、モデルの対称性を考慮し、1/8に分割したモデルにて解析を実施した。モデル形状については図4.2.5-1に示す。

##### (2) 解析用の境界条件

全体モデルの側面及び端面にあたる部分についてはX, Y, Z 軸方向の拘束を行った。対称面についてはモデルの対称性を考慮して、X=0 面では、X 軸方向のみの拘束、Z=0 面ではZ 軸方向のみの拘束、Y=0 面ではX 軸及びZ 軸方向の拘束を行った。境界条件の詳細については図4.2.5-1に示す。

##### (3) 解析における時間ステップ幅

非線形解析において、計算の時間ステップは解析の精度、安定に係わる重要な要因である。今回のRamberg-Osgoodモデルを用いた解析においては、時間ステップ幅( $\Delta t$ )を0.001 秒として解析を行った。

#### 4. 2. 6 解析結果のまとめ

図4.2.6-1~4.2.6-9 に試験結果と解析結果の応答加速度の比較を示す。各図の左上に示した入力地震波は試験において容器上で観測された加速度波形であり、解析において入力加速度として用いたものである。試験結果と解析結果の比較は、オーバーパック上の点（モデルでは節点3）、オーバーパックと容器の半径方向の中間点（モデルでは節点5）およびオーバーパックと容器の軸方向の中間点（モデルでは節点57）の3点を用いた。節点5と節点57はベントナイト中の点である。試験データに注目すると、これら3つの評価点で観測された加速度は、容器上の加速度にはほぼ一致していることが分かる。このことは供試体全体がほぼ剛体として挙動していることを示している。

前述の通り、解析は線形解析、非線形解析および等価線形解析の3種類の解析を実施した。線形解析結果および等価線形解析結果は比較を行ったいずれの点においても試験結果とほぼ一致した。非線形解析においてもEL-CentroNS地震波を用いた場合のオーバーパック上の点（モデルでは節点3）を除いて試験結果とほぼ一致した。EL-Centro NS 地震波を用いた場合、オーバーパック上の点において試験結果との違いがみられるのは解析時の時間ステップ幅が大きすぎるため、ひずみの変化に対してせん断弾性係数に大きな変化が生じる領域（例えば、ひずみが $10^{-3}$ 以上）では実際のせん断弾性係数と計算上のせん断弾性係数に大きな誤差が生じる為と考えられる。

表4.1.4-1 物性データ

材料	物性	ケース1
ベントナイト	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> ) *	40
	ポアソン比	0.4
	密度(gf/cm <sup>3</sup> )	1.42
オーバーパック	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.1×10 <sup>6</sup>
	ポアソン比	0.3
	密度(gf/cm <sup>3</sup> )	7.77

(注\*) ヤング率E についてはせん断弾性係数G より  
 $E = 2(1 + \nu)G$  として算出した。

表4.2.3-1 物性値

材料	物性値	解析手法		
		線形解析	非線形解析	等価線形解析
ベントナイト	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )	4.0×10 <sup>1</sup>	4.0×10 <sup>1</sup>	表4.2.3-2 参照
	ポアソン比	0.4	0.4	0.4
	密度(kgf/cm <sup>3</sup> )	1.42×10 <sup>-3</sup>	1.42×10 <sup>-3</sup>	1.42×10 <sup>-3</sup>
	減衰定数	0.025	0.025	表4.2.3-2 参照
	パラメータ* <sup>1</sup>	—	α=2.64, β=1.2	—
	基準ひずみ* <sup>2</sup>	—	0.01	—
オーバーパック	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.1×10 <sup>6</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>
	ポアソン比	0.3	0.3	0.3
	密度(kgf/cm <sup>3</sup> )	7.77×10 <sup>-3</sup>	7.77×10 <sup>-3</sup>	7.77×10 <sup>-3</sup>
	減衰定数	—	—	—

(注1) パラメータ α、β はR-0モデルにて骨格曲線の式

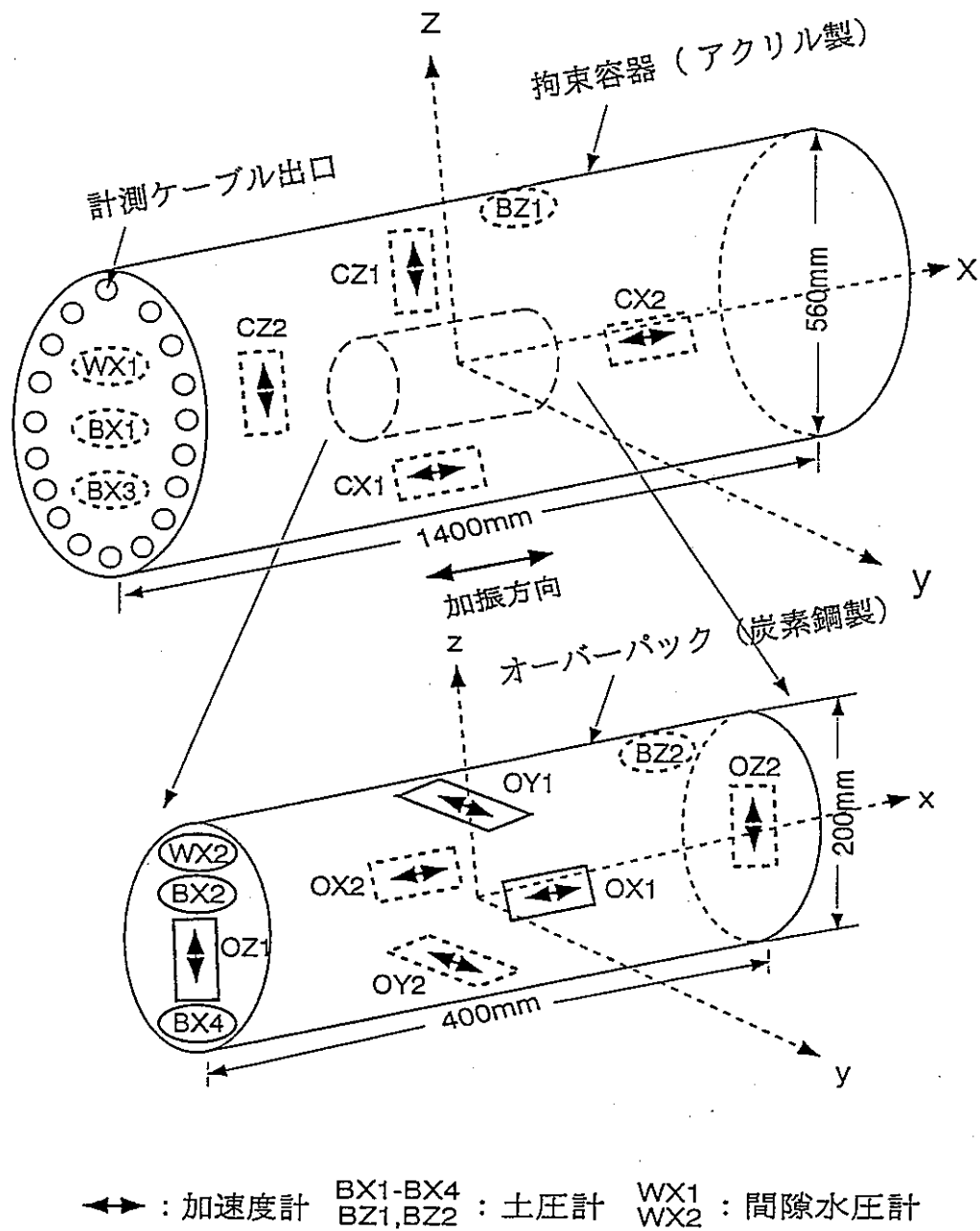
$$G \cdot \gamma = \tau (1 + \alpha |\tau / \tau_y|)^\beta$$

で利用される実験定数。

(注2) 上記の注1の  $\tau_y$  は  $\tau_y =$  初期せん断弾性係数  $G_0 \times$  基準せん断ひずみ  $\gamma_r$  より算出される。

表4.2.3-2 等価線形解析で用いた物性値

項 目		ひずみ	等価線形解析
ベントナイト	初期せん断剛性 [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	—	1.43×10 <sup>1</sup>
	正規化せん断弾性係数	1.0×10 <sup>-8</sup>	1.00
		1.0×10 <sup>-5</sup>	1.00
		1.0×10 <sup>-4</sup>	0.88
		8.0×10 <sup>-3</sup>	0.83
		3.0×10 <sup>-3</sup>	0.77
		9.0×10 <sup>-2</sup>	0.71
		7.0×10 <sup>-2</sup>	0.60
		1.0×10 <sup>-2</sup>	0.48
		7.0×10 <sup>-1</sup>	0.23
	減衰定数	1.0×10 <sup>-8</sup>	0.015
		1.0×10 <sup>-5</sup>	0.015
		1.0×10 <sup>-4</sup>	0.025
		8.0×10 <sup>-3</sup>	0.033
		3.0×10 <sup>-3</sup>	0.075
		9.0×10 <sup>-2</sup>	0.075
		7.0×10 <sup>-2</sup>	0.095
		1.0×10 <sup>-2</sup>	0.138
		7.0×10 <sup>-1</sup>	0.265
	ポアソン比		
重量密度[kgf/cm <sup>3</sup> ]			1.42 ×10 <sup>-3</sup>
オーバーパック	せん断弾性係数[kgf/cm <sup>2</sup> ]		8.10 ×10 <sup>5</sup>
	ポアソン比		0.30
	重量密度[kgf/cm <sup>3</sup> ]		7.77 ×10 <sup>-3</sup>



中型試験体 (横置き) のセンサー配置図

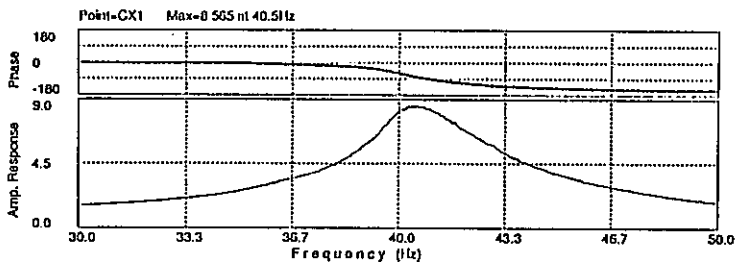
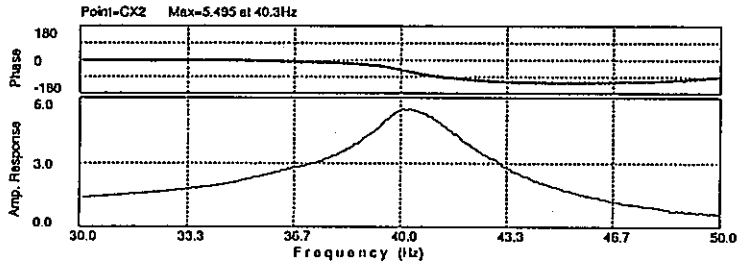
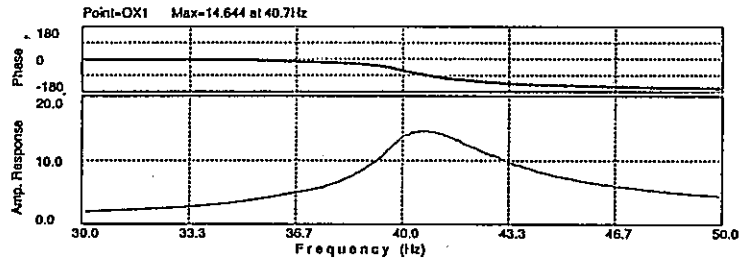
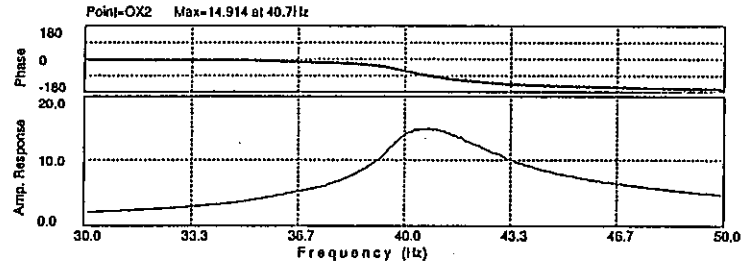
図4.1.5-1 供試体と計測装置の配置

加振加速度 50gal

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: LOGS/LASES\_datafile.05.25.95.n1.10:34:02.LOG  
SWEEP 30-50 Hz ( 50gal, 400s)

Input : GLX



加振加速度150gal

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: LOGS/LASES\_datafile.05.25.95.n4.11:07:17.LOG  
SWEEP 30-50 Hz ( 150gal, 400s)

Input : GLX

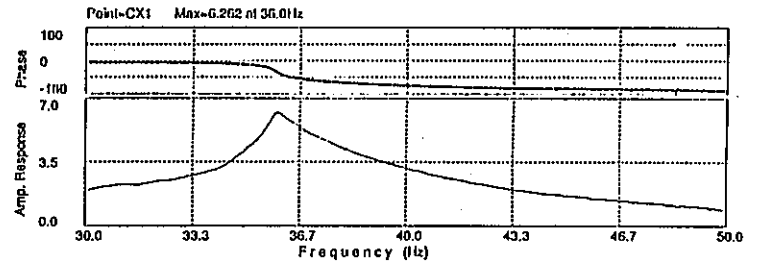
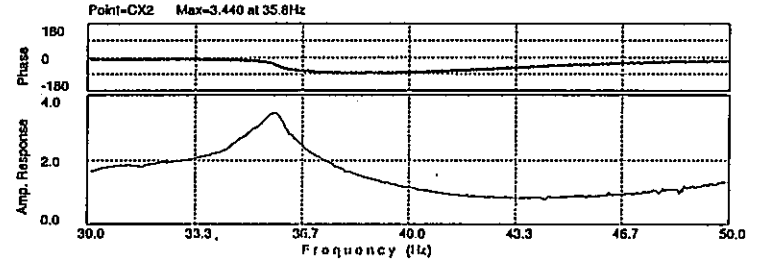
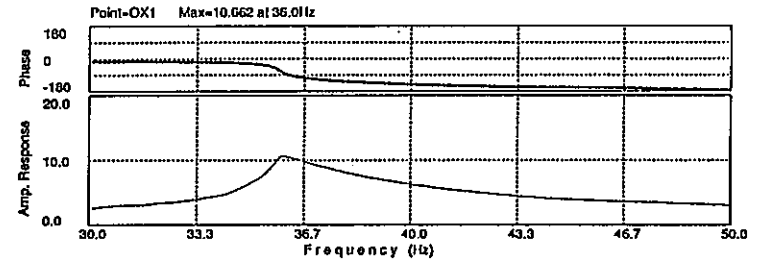
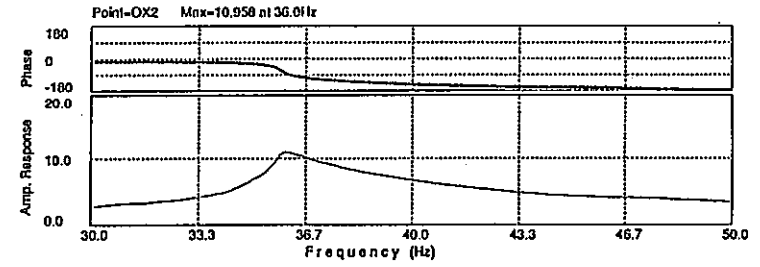


図4.1.5-2 スイープ試験結果

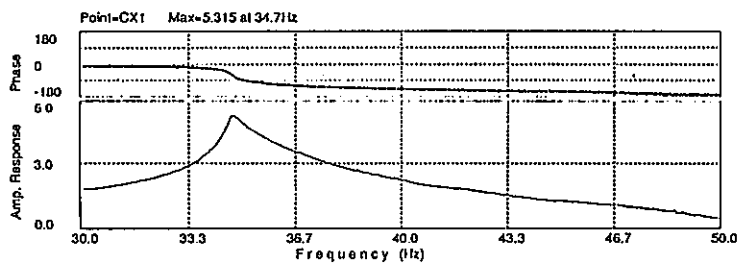
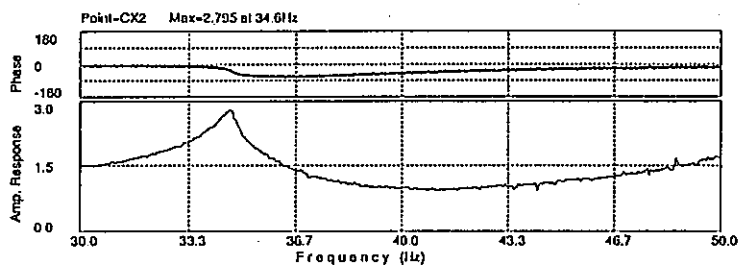
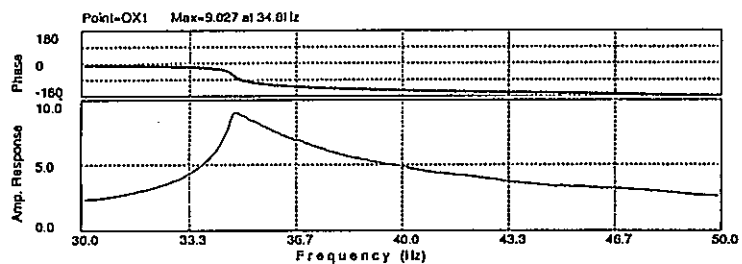
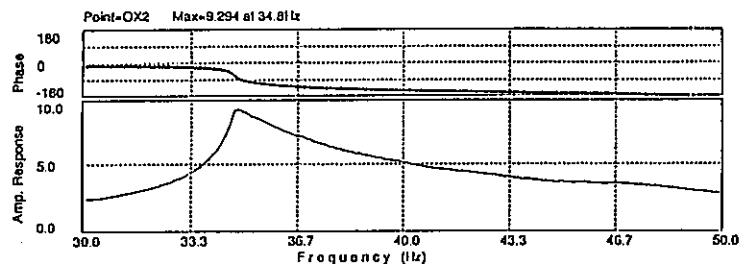


加振加速度200gal

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: LOGS/LASES\_datafile.05.26.95.n14.14:01:32.LOG  
SWEEP 30-50 Hz (200gal, 400s)

Input : GLX



加振加速度250gal

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: LOGS/LASES\_datafile.05.26.95.n15.14:10:42.LOG  
SWEEP 30-50 Hz (250gal, 400s)

Input : GLX

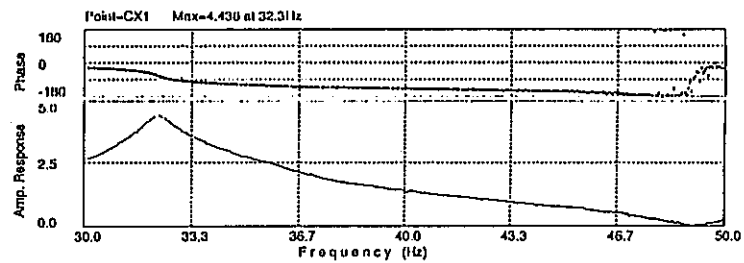
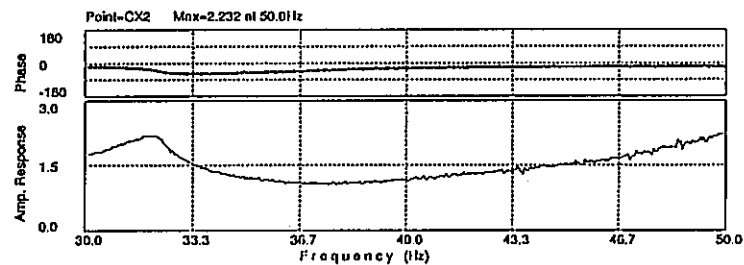
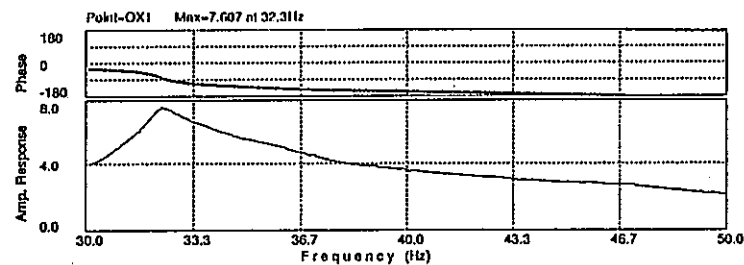
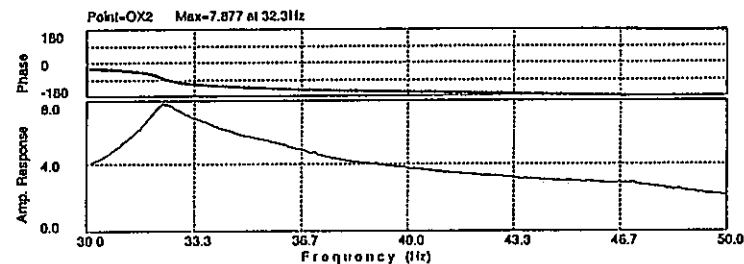


図4.1.5-3 スイープ試験結果

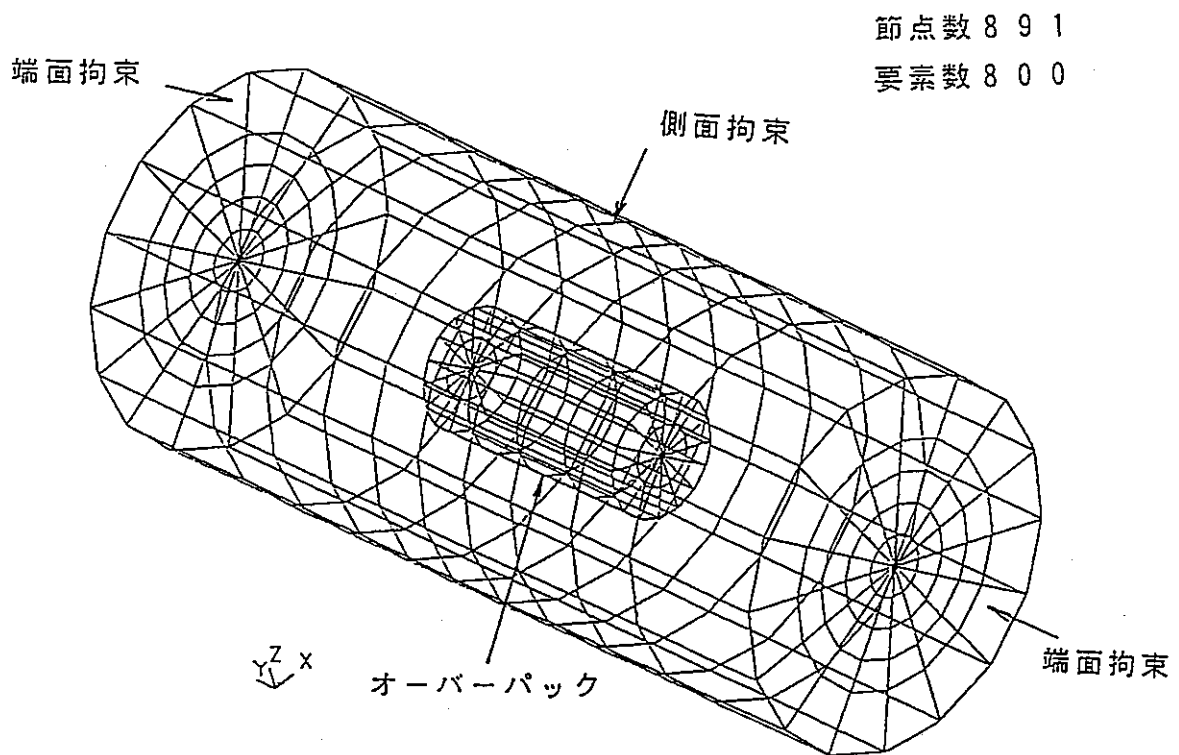


図4.1.5-4 固有値解析用3次元モデル

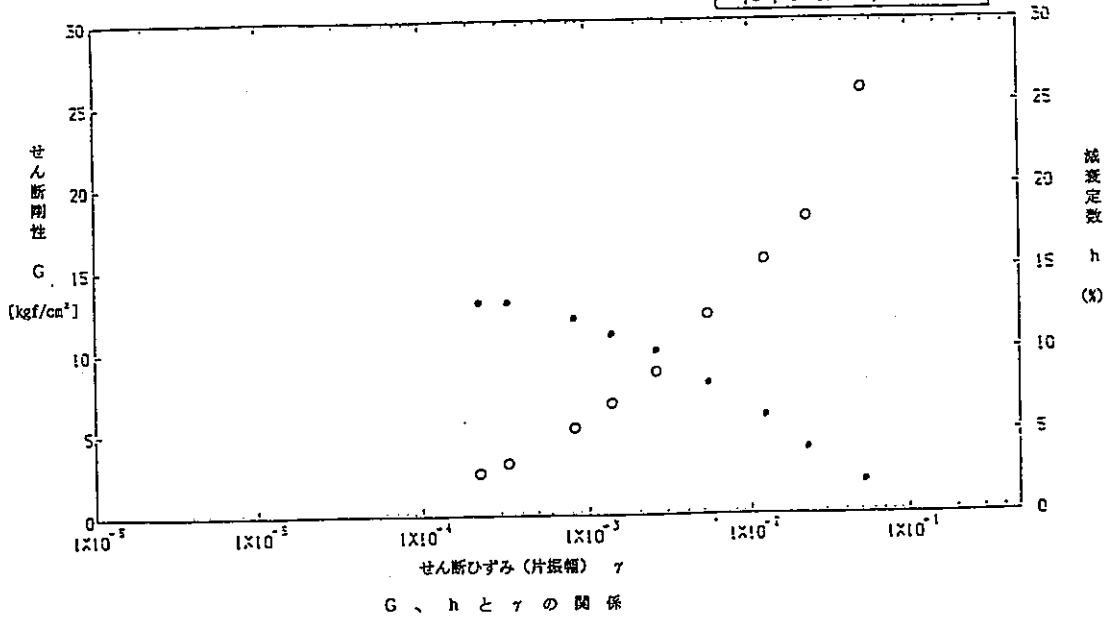


図4.2.3-1 DT22のせん断弾性係数～せん断ひずみ、

減衰定数～せん断ひずみの関係

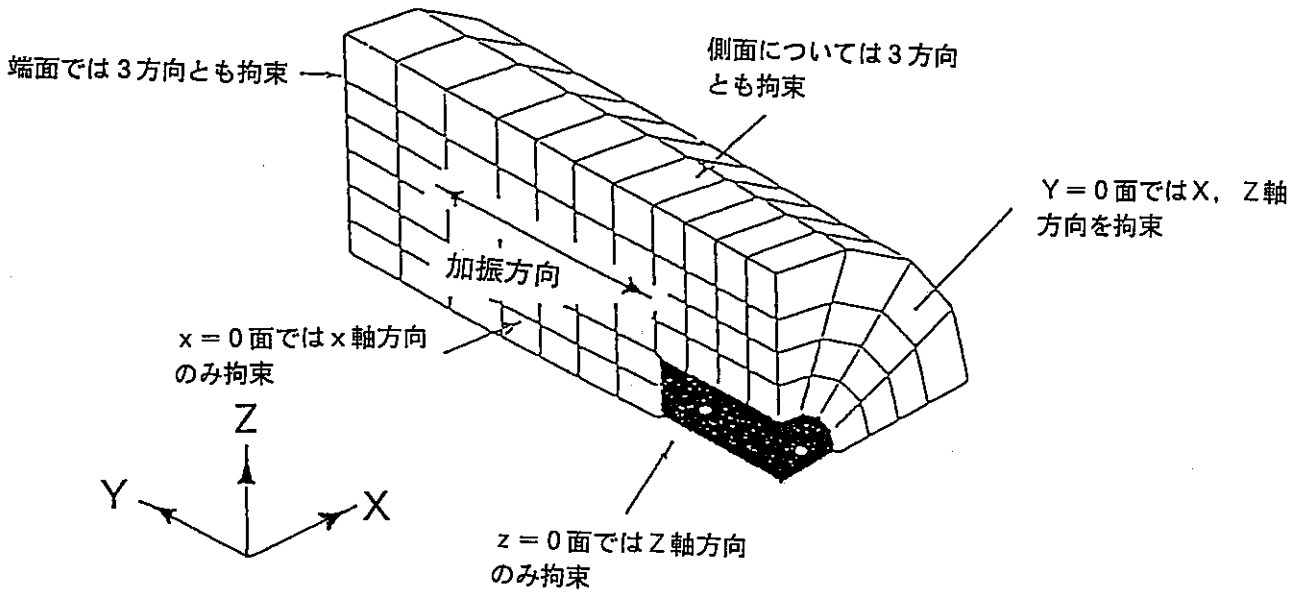


図4.2.5-1 動的解析用モデル

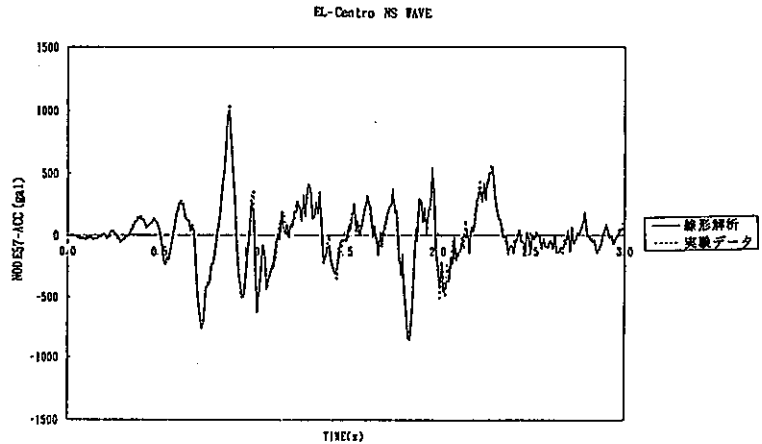
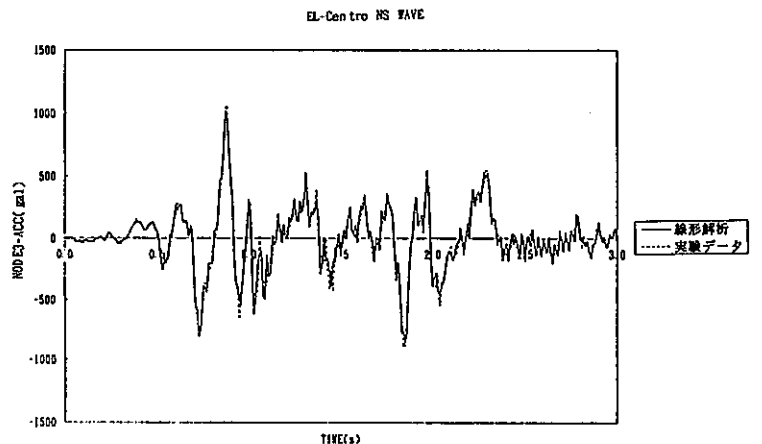
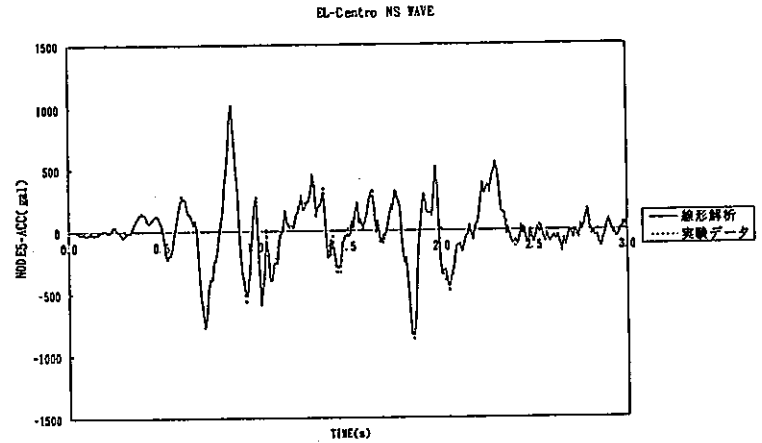
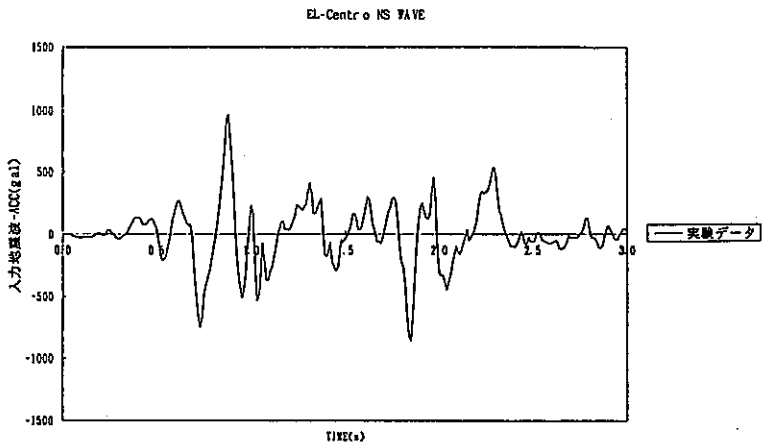
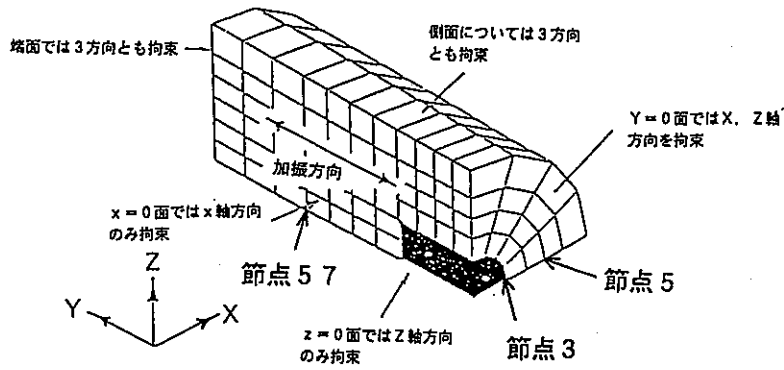


図4.2.6-1 線形解析結果と試験データとの比較 (EL-Centro)

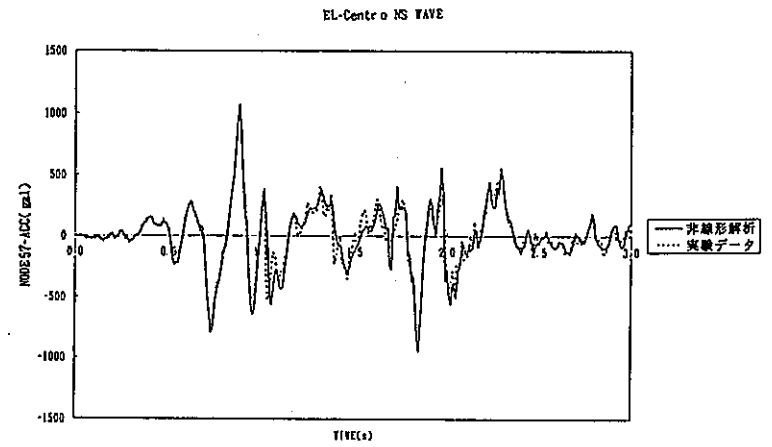
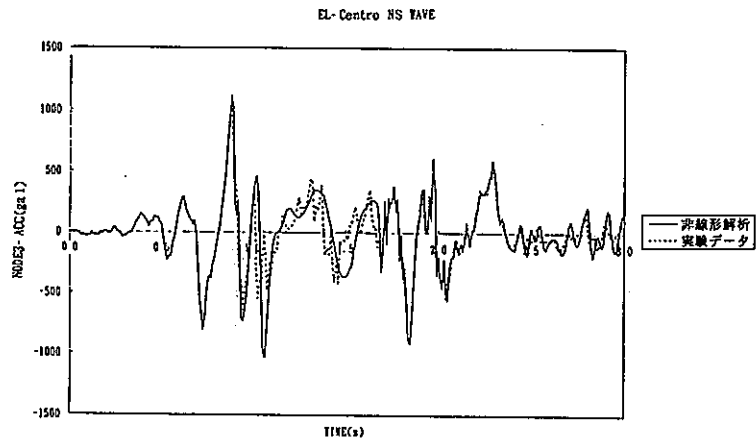
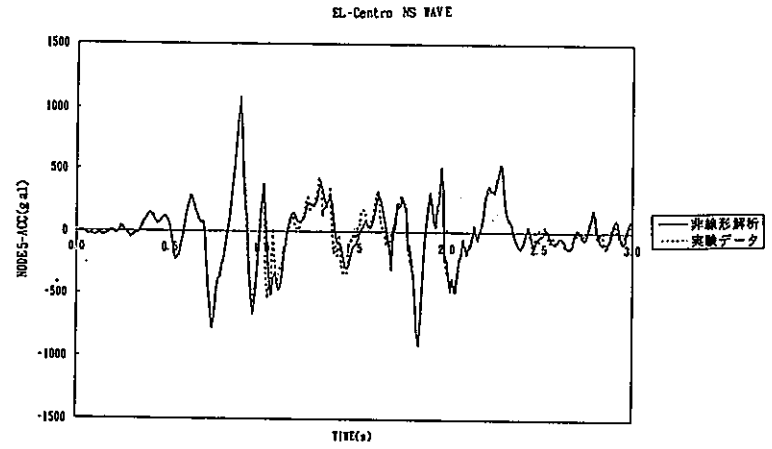
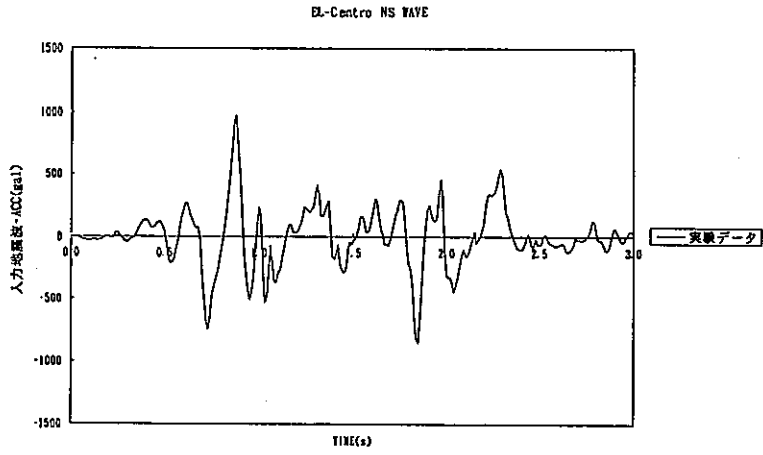
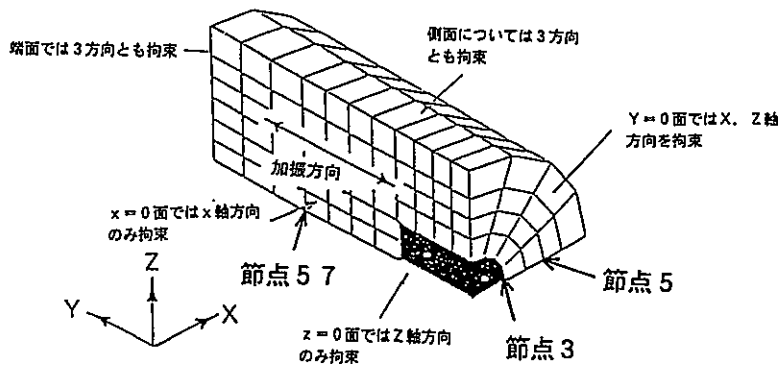


図4.2.6-2 非線形解析結果と試験データとの比較 (EL-Centro)

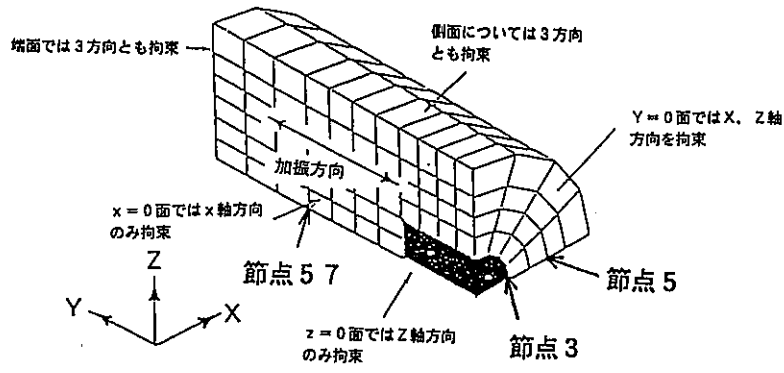
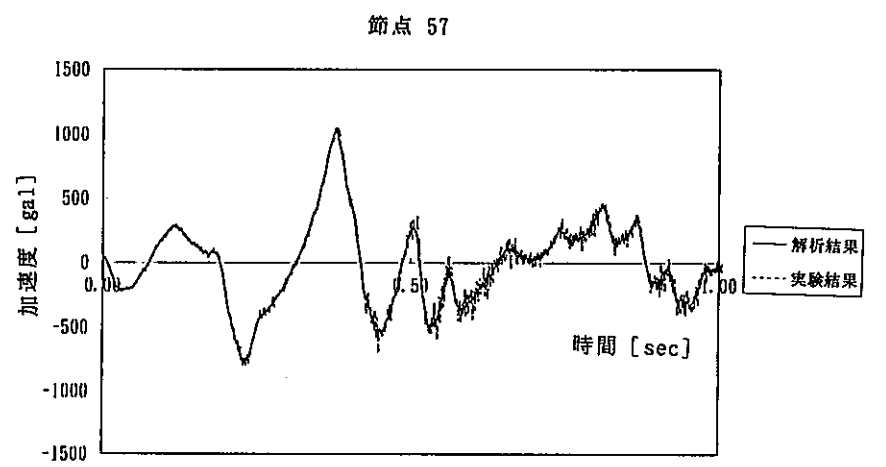
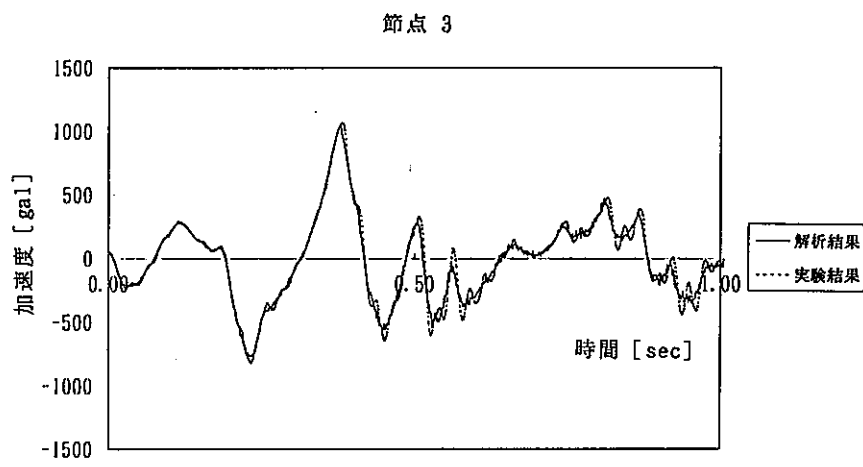
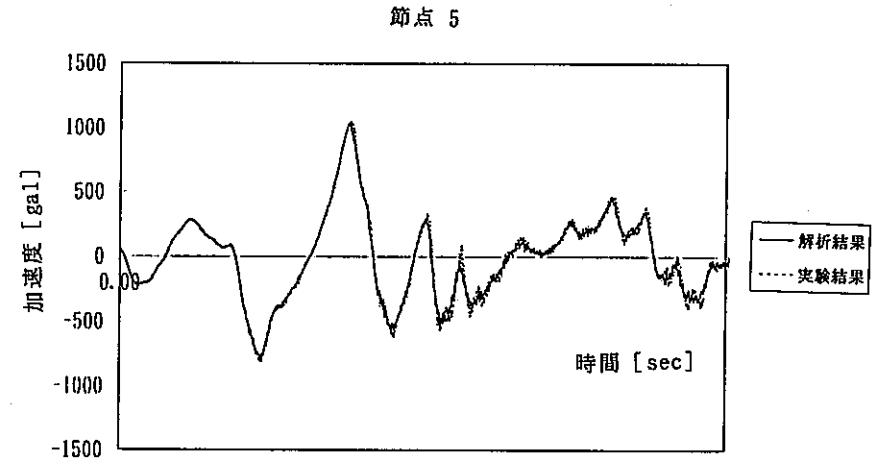
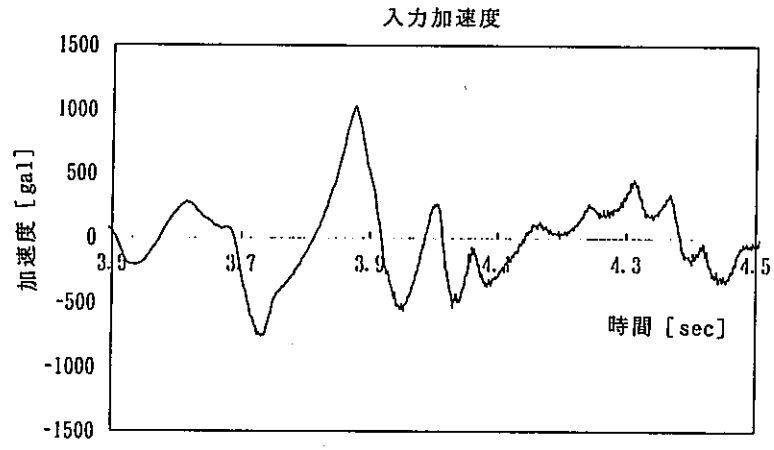


図4.2.6-3 等価線形解析結果と試験データとの比較 (BL-Centro)



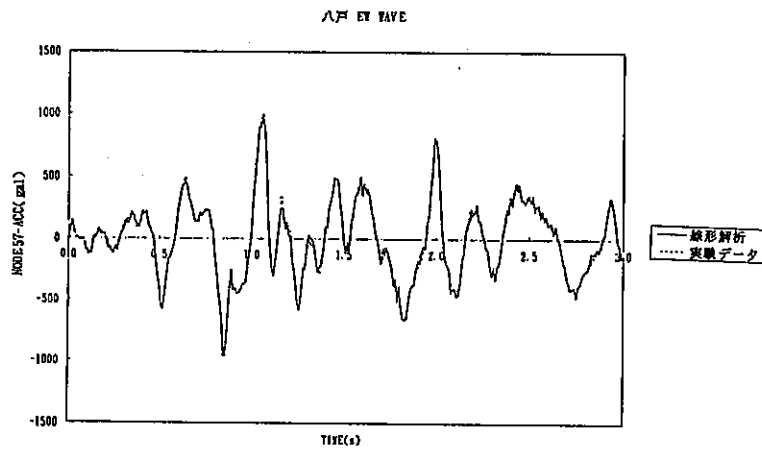
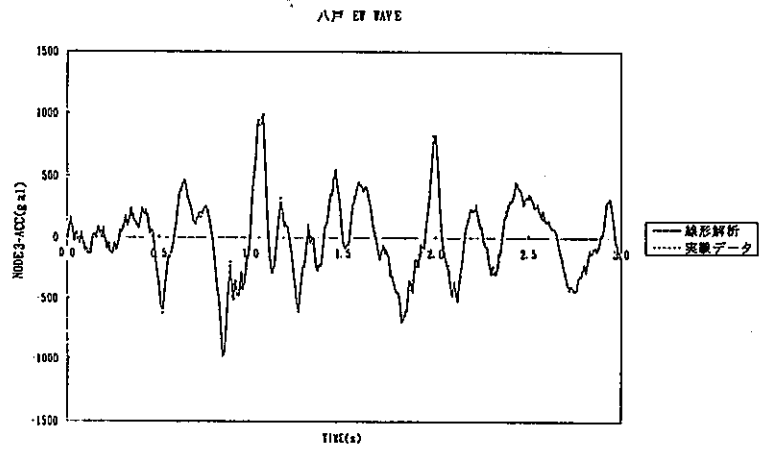
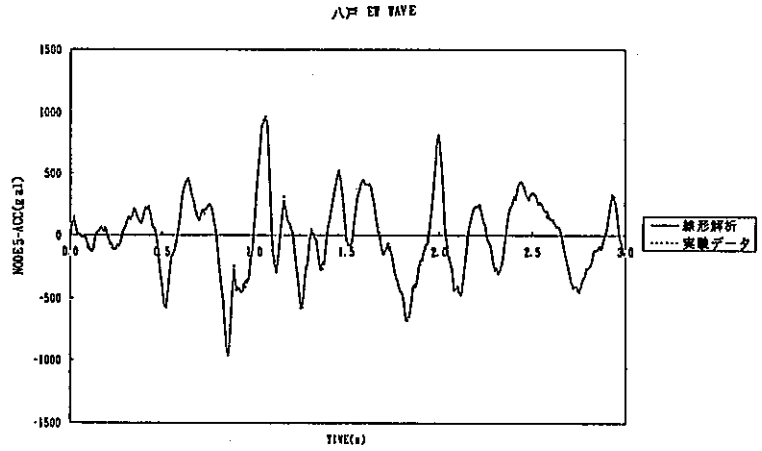
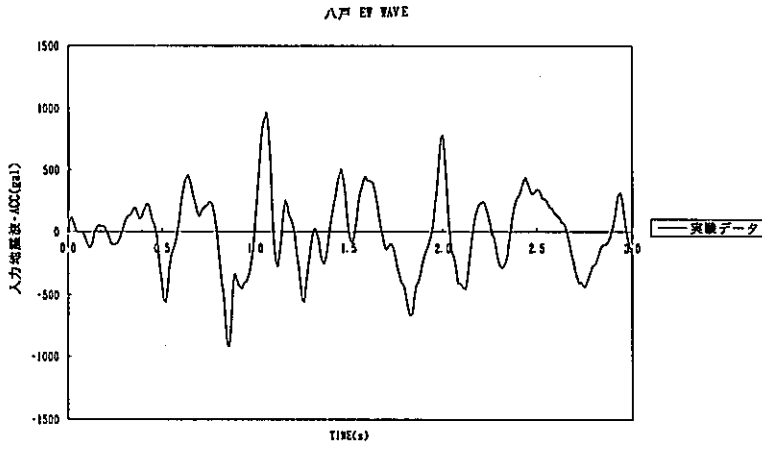
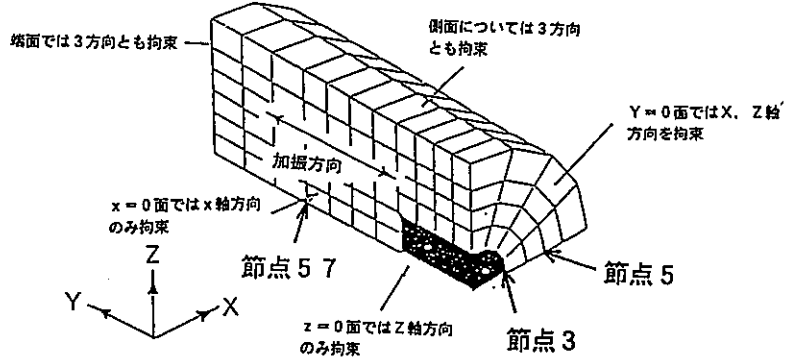


図4.2.6-4 線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)

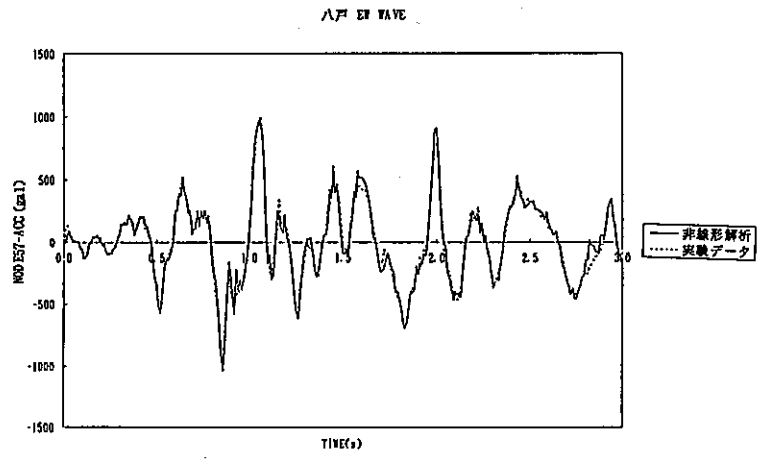
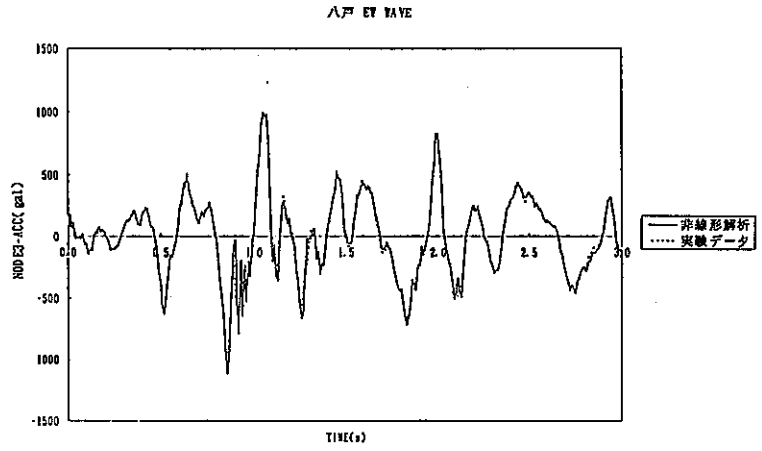
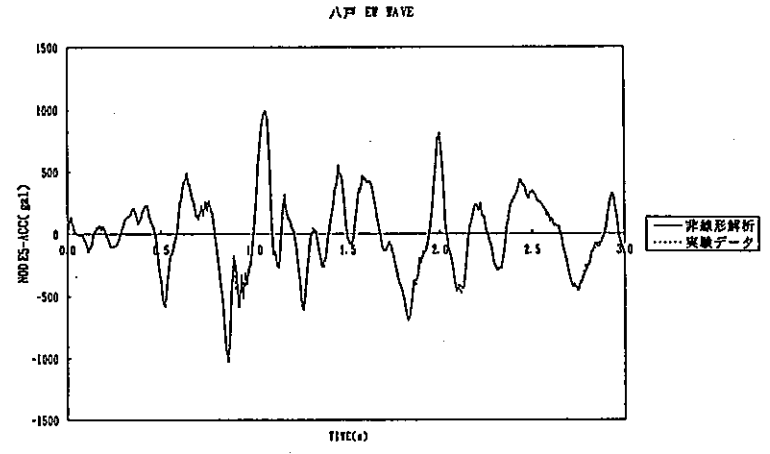
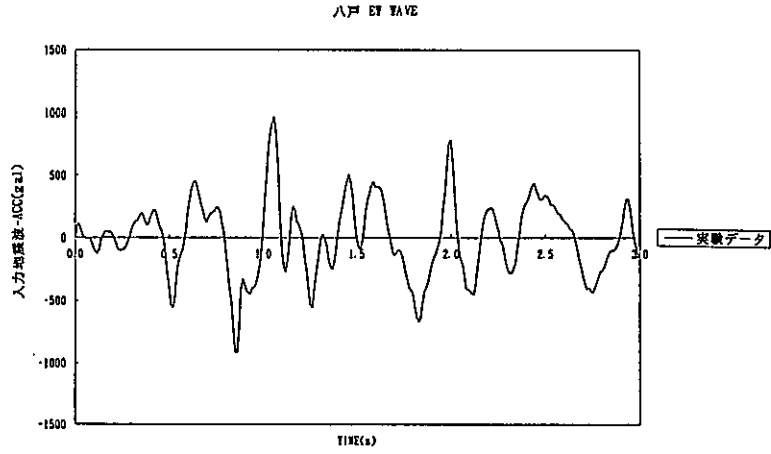
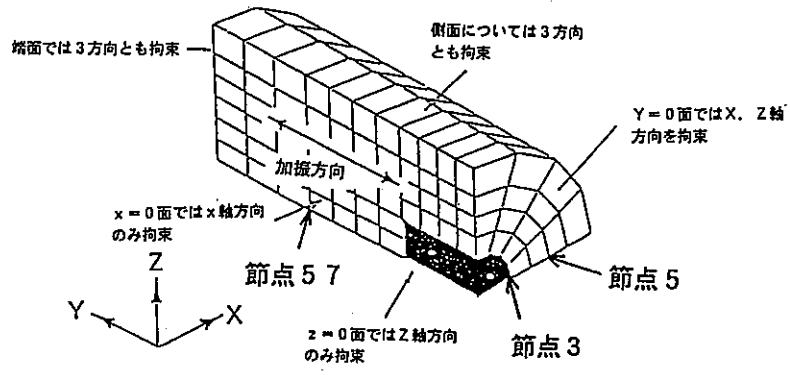
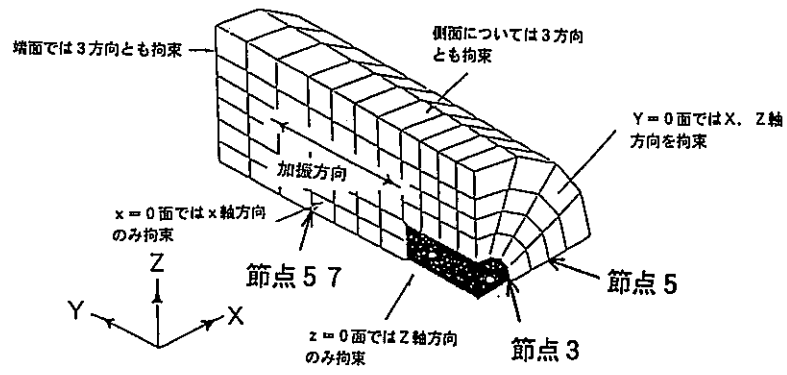
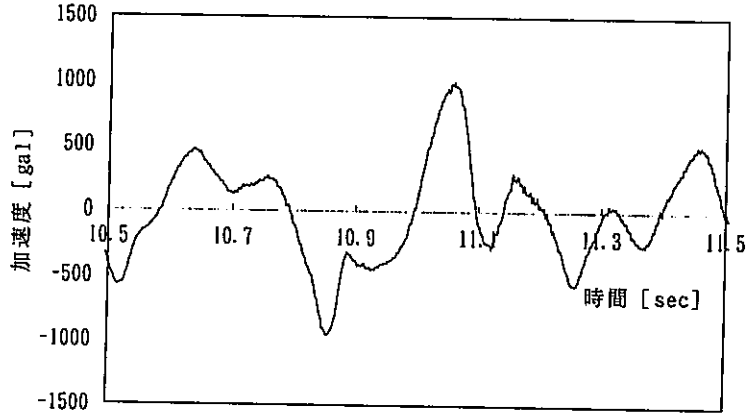


図4.2.6-5 非線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)

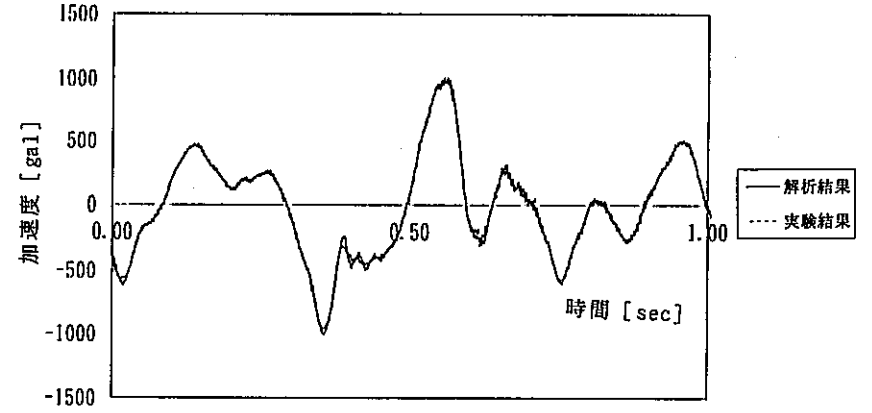




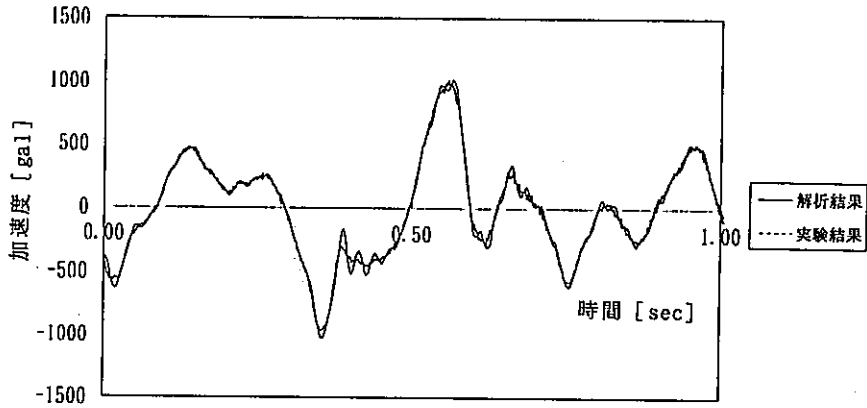
入力加速度



節点 5



節点 3



節点 57

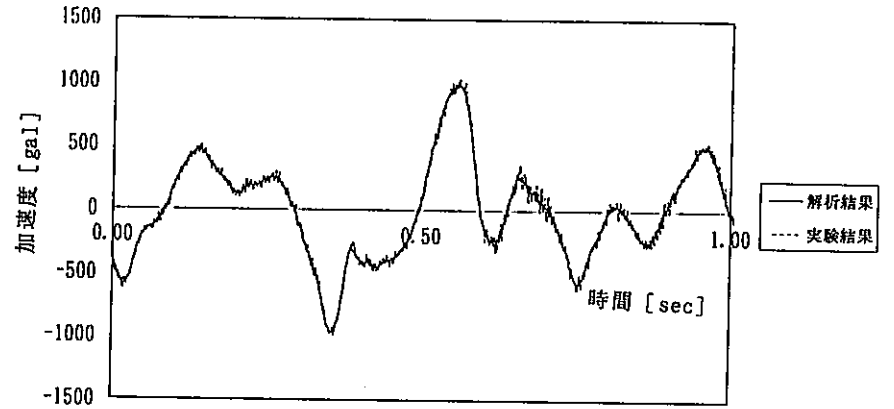


図4.2.6-6 等価線形解析結果と試験データとの比較 (八戸)

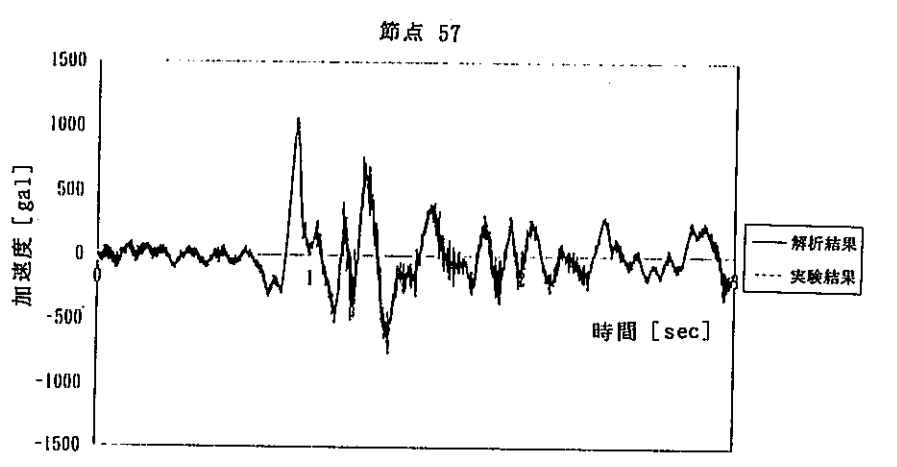
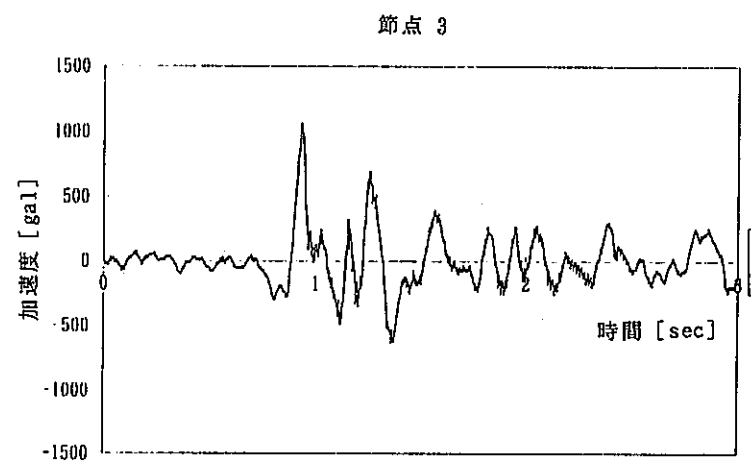
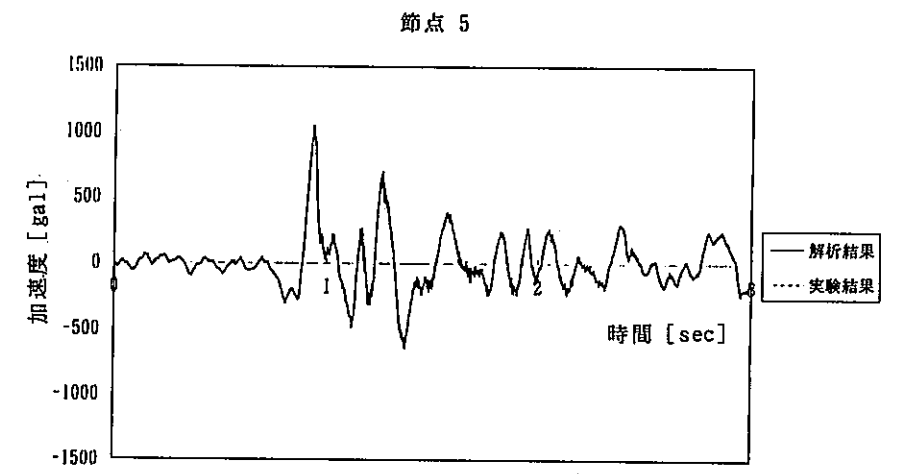
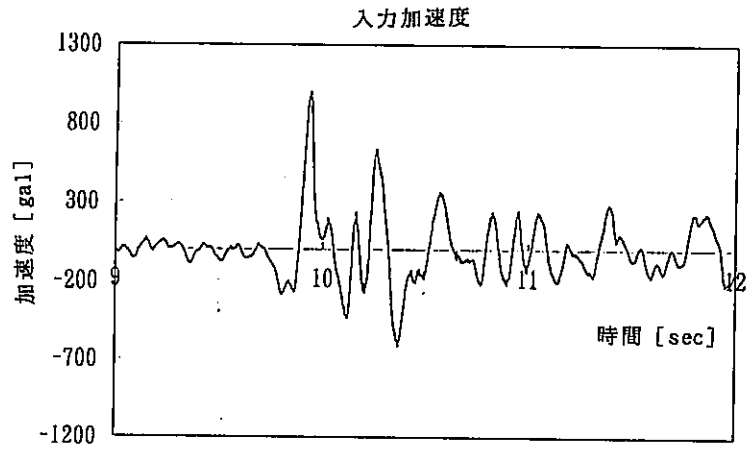
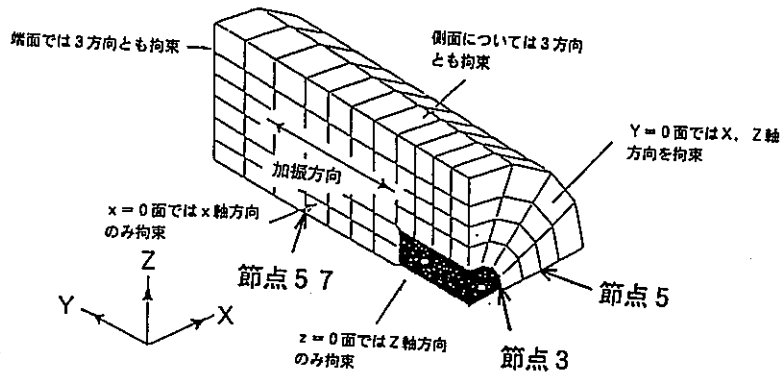


図4.2.6-7 線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)

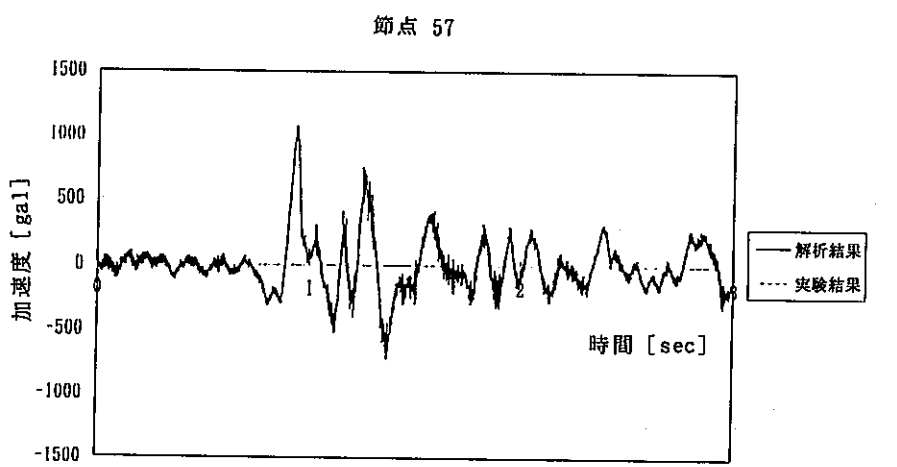
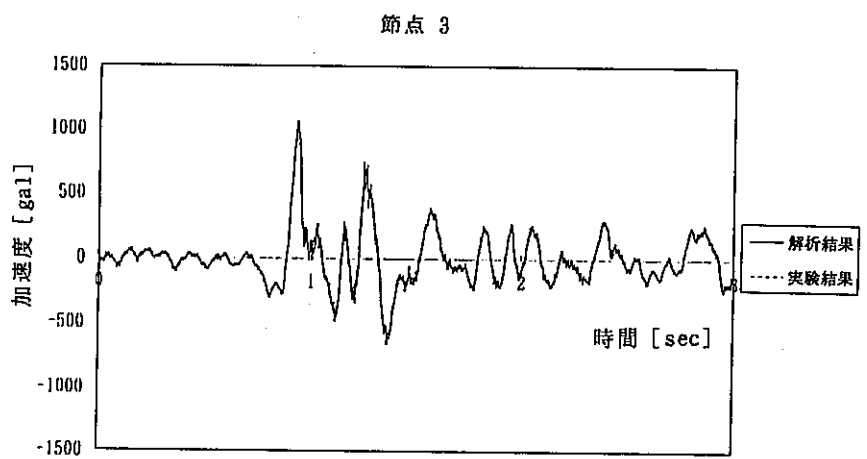
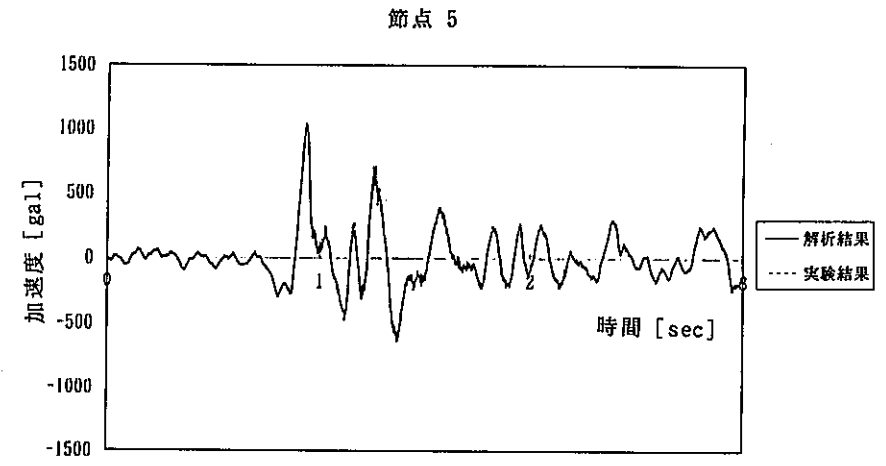
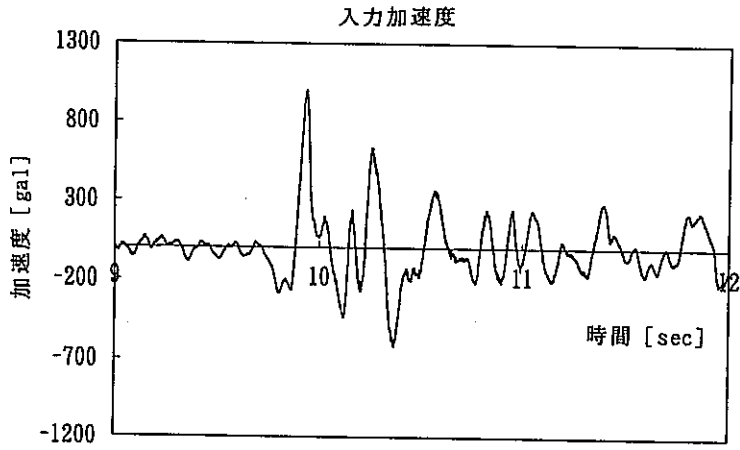
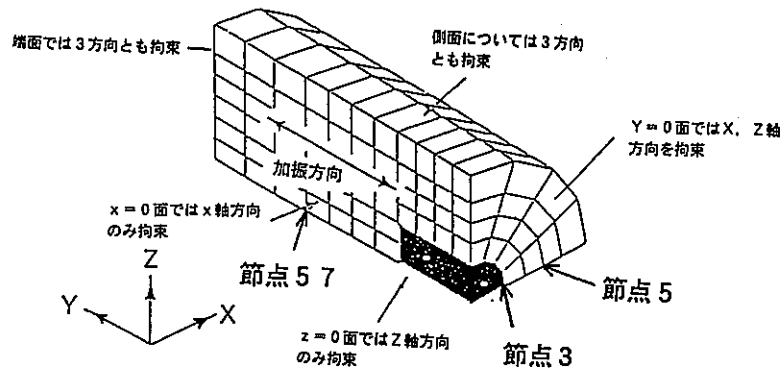


図4.2.6-8 非線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)

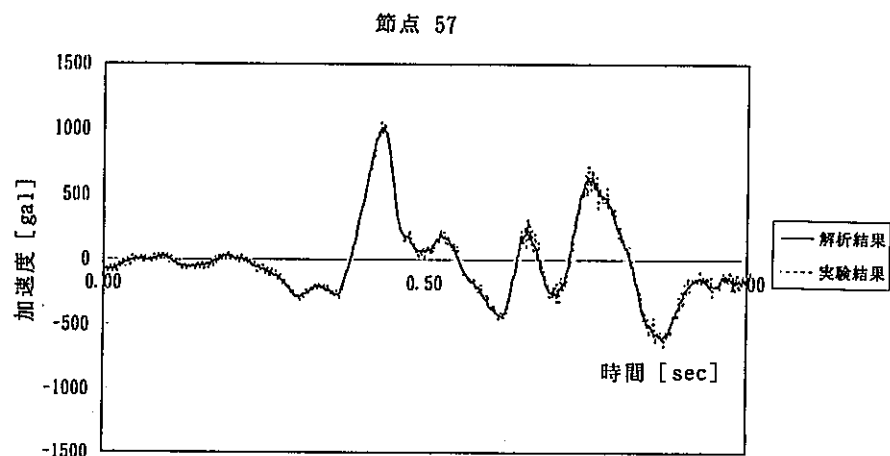
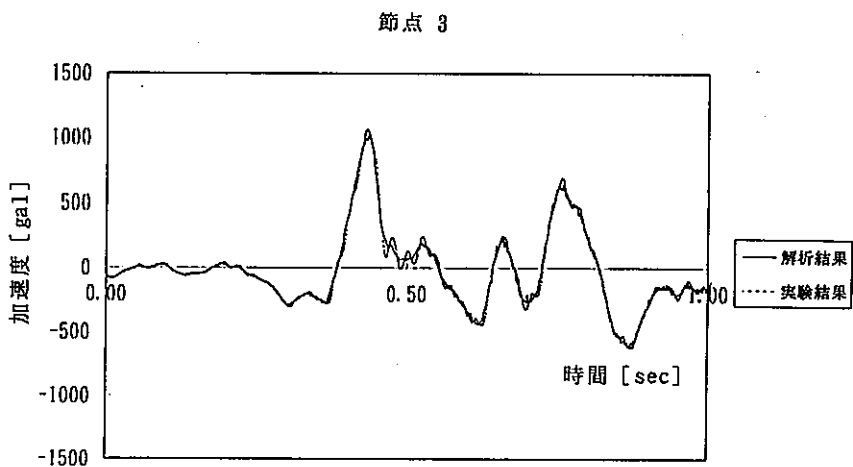
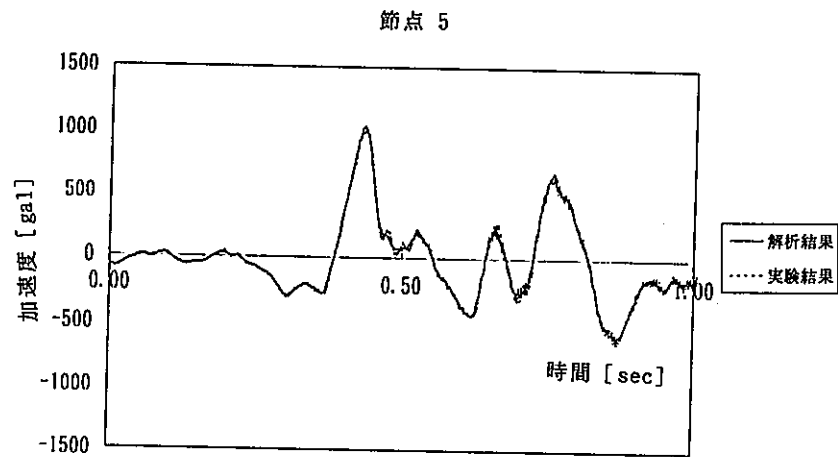
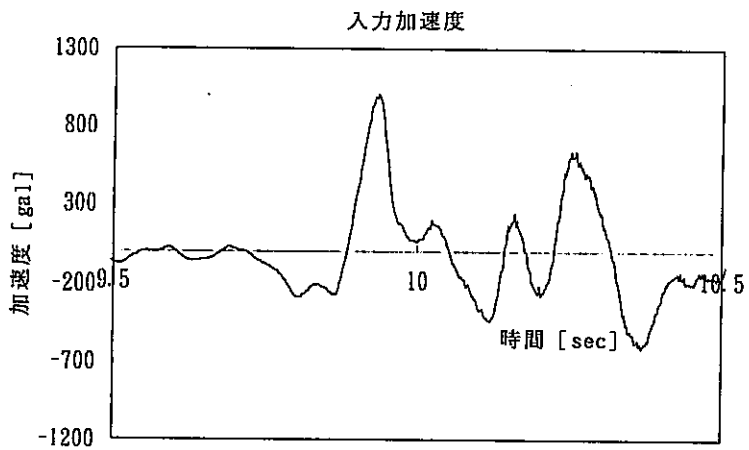
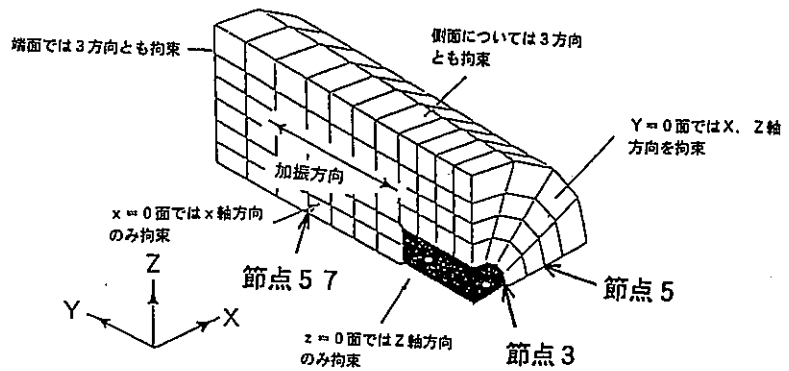


図4.2.6-9 等価線形解析結果と試験データとの比較 (宮城沖)

## 5 今後の課題

本年度の研究項目として、

- ① 公開文献の調査
- ② Ramberg-Osgoodモデルを用いた非線形解析機能の追加
- ③ モデル/コードの妥当性の評価および検討

を実施した。これらの研究を通して得られた知見とこれからのモデル/コード開発における展望についてまとめる。

### 5. 1 モデル/コードの開発とこれからの展望

#### ①ベントナイトの力学特性のモデル化

現在、実施されている振動試験での加振加速度では人工バリア供試体に生じるひずみは $10^{-3}$ 以下に限定され、Ramberg-Osgoodを使用した非線形弾性解析でも十分その振動挙動を再現できることが判明した。ただし、実際の処分場での高レベル放射性廃棄物の地下深部での埋設期間は数百年におよびその間には上記の実験で想定した地震加速度を上回る地震の発生や、地震の繰り返しによるベントナイトの不均質性の発生、オーバーパックのベントナイト中における沈下等の振動実験では考慮されていない状況が発生することも考えられる。今後は、超長期間においておこりうる人工バリアシステムを取り巻く状況の変化についても配慮し、様々なケースについての解析を実施していくことが肝要であると考えられる。

また、本年度は加振時に時々刻々と変化する土粒子間の間隙水圧の変化を追跡するため、Seedらにより提唱された実験式を拡張して利用したが、その他の実験式も含めて飽和砂地盤の液状化を予測するために開発された手法であり、ベントナイトのような透水性の低い粘土への適用が適切であるかどうかの判定を下すまでに今回の研究成果では至らなかった。実験式に利用する実験定数の取得も含め、必要であれば液状化試験を実施しこれらの実験式の適用性についての評価を行っていく必要がある。

また、粘土の粘弾塑性挙動、過剰間隙水圧の挙動、人工バリアの化学的バ

リア性能に影響をおよぼすオーバーパックの沈下現象などを統一的に取り扱うことのできる手法として、粘土の粘弾塑性モデルの導入も地震応答解析コードの精度を上げるうえで無視できない。ただし、このようなモデルを導入した場合、モデルで使用するパラメータの取得のための実験の煩雑さ、困難さが問題となってくると思われる。

## ② 実際の処分環境下での解析に必要となる機能

現在の解析作業は振動台上に固定された人工バリアモデルを対象として進められているが、実際の処分環境下での無限領域への波の逸散現象、岩盤との接合面などの不連続面の存在などを考慮すれば、伝達境界、粘性境界、ジョイント要素などの実用的な機能が求められる。また、本年度の文献調査を通して、知見が得られたように地下構造物は地震の入力角度、入力基盤の形状、地震波において卓越している周波数域によってその地震応答性状に大きな影響を受ける今後このようなことを考慮しての解析条件の設定行っていくことは重要な課題である。

上記のことを踏まえて今後の行うべき解析についての一案を表5.1-1 に示す。

表5.1-1 人工バリアモデル/コードによる今後の解析方針

解 析			地 震 波
モ デ ル	解 析 条 件	機 能 追 加	
振動実験モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パラメータ解析                             <ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトの充填密度</li> <li>ベントナイトの透水係数</li> <li>ベントナイトのヤング率</li> </ul> </li> <li>・ジョイント要素の利用</li> </ul>	ジョイント要素	EL-CentronS波 宮城沖 新潟 K-1
岩盤等のモデル化を含めた実処 分場の模擬モデル (たて坑、よこ坑)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パラメータ解析                             <ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトの充填密度</li> <li>ベントナイトの透水係数</li> <li>ベントナイトのヤング率</li> <li>岩盤の密度</li> <li>岩盤の透水係数</li> <li>岩盤のヤング率</li> </ul> </li> <li>・岩盤、人工バリア間にジョイント要素の利用</li> </ul>	ジョイント要素	EL-CentronS波 宮城沖 新潟 K-1

(注1) パラメータ解析における各パラメータの上限、下限値については実験での物性値、文献調査等により決定する。

## 6. あとがき

本年度は昨年度に引き続き公開文献の調査を通じて粘土材の振動特性に関するデータの収集を行った。これにより既存のモデル/コードの適用限界と、人工バリアシステム地震応答解析モデル/コードの今後の課題について明確することができた。本年度のモデル/コードの開発においては緩衝材の非線形な力学特性をモデル化するために応力～ひずみ関係をRamberg-Osgoodモデルを用いた非線形弾性解析機能の追加と非線形解析時に時々刻々と変化する間隙水圧についての評価を行うための実験式の導入を行った。現在、実験データを用いた解析を通して、現コードの問題点、今後追加が必要と思われる機能、人工バリアの地震遭遇時の健全性について定量的評価を行うために必要となる解析内容等について徐々に明らかになってきた。このことを踏まえ、本年度の研究をさらに進展させるためには、次のステップとして、

- ① 緩衝材振動特性に関するデータの調査
- ② 実処分場のモデル化、解析条件の設定

を、課題として挙げるができる。