

人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（Ⅲ）

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書概要)

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
又	J1458 95-001	1995.6.6
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		

1995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(Ⅲ)

明石浩一*1, 根山敦史*1
中川浩一*1

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5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5年度研究委託で得られた成果をもとに、等価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 : 060D0172

事業団担当部課室および担当者 : 環境技術開発部地層処分開発室 (志水伸二)

*1 : 科学技術部

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

Koichi Akashi *¹, Atsushi Neyama *¹

Koichi Nakagawa *¹

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 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 : Waste Technology Development Division , Geological Isolation Section, Shinji Shimizu

*1 : Scientific Engineering Department

目次

1. まえがき	1-1
1.1. 土質材料の振動特性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. 振動実験データにもとづく人工バリアモデルの妥当性の検討	1-2
2. 文献調査	2-1
2.1. 文献調査の方法	2-2
2.1.1. 粘性土の動的性質に関する文献集による文献調査	2-2
2.1.2. JICST による文献検索	2-2
2.2. 各文献の概要	2-3
2.3. 文献調査のまとめ方	2-5
2.3.1. 調査項目	2-5
2.4. 文献調査の結果えられた今後の検討課題	2-6
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. 解析手法の選択	3-1
3.2. 1相系の運動方程式	3-1
3.3. 2相系の運動方程式	3-2
3.4. 残留間隙水圧モデルの組み込み	3-5
3.5. 間隙水圧挙動の評価と解析手法	3-6
3.6. 残留間隙水圧の評価方法 ～間隙水圧モデルについて～	3-6
3.7. 実験式による間隙水圧の評価方法	3-7
3.8. 等価線形解析機能追加に伴うプログラムの変更	3-8
3.9. 等価線形解析機能の検証	3-9
3.10. 過剰間隙水圧の評価式の検証	3-11
4. 振動実験にもとづくモデル/コードの妥当性の検討	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. 物性値	4-2
4.1.4. モデルと境界条件	4-3
4.1.5. 解析結果のまとめ	4-3
4.2. 動的解析結果	4-4
4.2.1. 概要	4-4
4.2.2. 解析時に用いた仮定	4-4
4.2.3. 物性値	4-4
4.2.4. 加振方法	4-5
4.2.5. モデルと境界条件	4-5

4.2.6. 解析結果のまとめ	4-6
4.3. 小型振動試験1～3に関する動的解析	4-7
4.3.1. 概要	4-7
4.3.2. 解析時に用いた仮定	4-7
4.3.3. 物性値	4-7
4.3.4. 加振方法	4-8
4.3.5. モデルと境界条件	4-8
4.3.6. 解析結果のまとめ	4-9
4.4. 等価線形解析による試解析	4-11
4.4.1. 概要	4-11
4.4.2. 解析時に用いた仮定	4-11
4.4.3. 物性値	4-11
4.4.4. 加振方法	4-12
4.4.5. モデルと境界条件	4-12
4.4.6. 解析結果のまとめ	4-12
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	5-3
6. あとがき	6-1
7. 参考文献	7-1
付録1. 変更、追加サブルーチン	A-1

表目次

表2.2-1 文献リスト	2-7
表2.2-2 文献リスト	2-8
表2.2-3 文献リスト	2-9
表2.2-4 文献リスト	2-10
表2.2-5 文献リスト	2-11
表2.2-6 文献リスト	2-12
表2.2-7 文献リスト	2-13
表3.6-1 解析手法	3-12
表3.10-1開発したコードによる各時間ステップでの過剰間隙水圧の評価	3-13
表4.1.3-1 物性値データ	4-13
表4.1.5-1 実固有値解析結果	4-14
表4.2.3-1 物性データ	4-15
表4.3.3-1 実験データ解析で用いた各物性値	4-16
表4.4.3-1 等価線形解析で用いた各物性値	4-17
表5.1-1 モデル／コードの開発計画	5-3

図目次

図3.1-1	1 相系全応力解析の概要(間隙水圧の評価なし)	3-14
図3.1-2	全応力解析の概要(間隙水圧の評価あり)	3-15
図3.1-3	有効応力解析の概要	3-16
図3.2-1	本年度研究内容と等価線形解析	3-17
図3.4-1	等価線形解析での残留間隙水圧評価式の活用法	3-18
図3.8-1	入力データ例	3-19
図3.8-2	出力結果例	3-20
図3.10-1	モデル図	3-21
図3.10-2	解析結果	3-21
図4.1.3-1	ペントナイトのせん断弾性係数～ひずみ、減衰定数～ひずみの関係	4-18
図4.1.4-1	計測機器の配置	4-19
図4.1.4-2	小型振動試験装置	4-19
図4.1.4-4	解析用モデル	4-20
図4.1.4-5	拘束条件	4-20
図4.2.5-1	解析用モデル	4-21
図4.2.5-2	拘束条件	4-21
図4.2.6-1	実験データと解析ケース1の比較	4-22
図4.2.6-2	実験データと解析ケース2の比較	4-23
図4.2.6-3	実験データと解析ケース3の比較	4-24
図4.2.6-4	実験データと解析ケース4の比較	4-25
図4.2.6-5	実験データと解析ケース5の比較	4-26
図4.2.6-6	各点でのフーリエスペクトルの比較	4-27
図4.3.6-1	EL-Centro 地震波による実験データ解析1 (加速度時刻歴応答波形の比較)	4-28
図4.3.6-2	EL-Centro 地震波による実験データ解析1 (加速度フーリエスペクトルの比較)	4-29
図4.3.6-3	宮城沖地震波による実験データ解析1 (加速度時刻歴応答波形の比較)	4-30
図4.3.6-4	宮城沖地震波による実験データ解析1 (加速度フーリエスペクトルの比較)	4-31
図4.3.6-5	八戸地震波による実験データ解析1 (加速度時刻歴応答波形の比較)	4-32
図4.3.6-6	八戸地震波による実験データ解析1 (加速度フーリエスペクトルの比較)	4-33
図4.3.6-7	EL-Centro 地震波による実験データ解析2 (加速度時刻歴応答波形の比較)	4-34

図4.3.6-8 EL-Centro 地震波による実験データ解析 2	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-35
図4.3.6-9 宮城沖地震波による実験データ解析 2	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-36
図4.3.6-10 宮城沖地震波による実験データ解析 2	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-37
図4.3.6-11 八戸地震波による実験データ解析 2	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-38
図4.3.6-12 八戸地震波による実験データ解析 2	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-39
図4.3.6-13 EL-Centro 地震波による実験データ解析 3	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-40
図4.3.6-14 EL-Centro 地震波による実験データ解析 3	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-41
図4.3.6-15 宮城沖地震波による実験データ解析 3	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-42
図4.3.6-16 宮城沖地震波による実験データ解析 3	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-43
図4.3.6-17 八戸地震波による実験データ解析 3	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-44
図4.3.6-18 八戸地震波による実験データ解析 3	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-45
図4.3.6-19 K-1 地震波による実験データ解析 3	
(加速度時刻歴応答波形の比較)	4-46
図4.3.6-20 K-1 地震波による実験データ解析 3	
(加速度フーリエスペクトルの比較)	4-47
図4.4.3-1 動的三軸試験より得られたベントナイトの動特性	4-48
図4.4.6-1 線形解析と等価線形解析の解析結果の比較	4-49

1. まえがき

高レベル放射性廃棄物の処分としては、放射性核種を含む廃棄物を溶融ガラスとともに固体化を行い、金属容器で密閉し、地中数百メートルの深部に埋設を行う地層処分が処分方法として有力視されている。埋設期間中に高レベル放射性廃棄物から放射性物質の生活圏への移行が生じる一因としては地下水の廃棄物に対する接触と放射性物質の地下水への溶解が考えられている。地下水に溶けだした放射性核種の中には人間に生活環境に重大な影響を及ぼす放射能が長い期間にわたって存在し、そのような地下水の移動により我々の生活圏が危険にさらされる可能性も考えられる。このため埋設期間中の人工バリアの健全性の評価は大きな課題である。

人工バリアシステムには化学的、物理学的に高度なバリア性能が要求され、地下水への浸透の遅延、ガラス固化体との接触、核種移行の抑制など機能が期待される。ただし、このような高度な化学的、物理学的機能が完全に機能するためには、人工バリアが健全であることが要求される。人工バリアの物理的特性について定量的な評価をおこなうために様々な、実験、例えば、地下深部でのオーバーパックの耐圧性、廃棄物の発熱に対する挙動評価など実験、数値解析の試みが継続されて行われ、様々な知見が得られている。我が国では地震が頻繁に生じる環境にあり、バリアの物理的性能評価の一環として地震遭遇時のバリアの挙動、健全性についての定量的評価方法の確立が不可欠である。このためから平成4年度から継続して3次元線形地盤応答解析コードの開発を行い、既存のモデル／コードに関する文献調査、振動実験から得られたデータを用いて検証作業及び問題点の抽出を進めてきた。この様な研究成果をふまえて、現在のモデル／コードの高度化、適用領域の拡張を行う為次項の項目を実施した。

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5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するうえで、重要な入力データである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。また、開発中のコードの機能検証を行うためのデータ収集も同時に実施した。

- ①土質材料を対象に動的解析において粘弾塑性構成モデルを用いた解析事例、2相系解析のモデル及び解析事例、実験データと解析結果の比較、入力パラメータ取得のための実験方法
- ②等価線形解析手法を用いた解析事例、検証事例、他のモデル(R-Oモデル)との比較事例
- ③振動中の土質材料中の水の挙動に関するモデル化事例
- 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

平成5年度において機能追加を行った周波数応答解析機能の拡張として、等価線形解析機能を追加し、土質材料の非線形特性を考慮した解析を可能とした。

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耐震機能を左右するものとしてベントナイトは無視できない存在であり、その役割は重要である。このことから、ベントナイトの地震時の挙動に関して定量的に評価のできる数学モデルを構築することは大きな課題となっている。モデルを構築するうえで、ベントナイトの振動時の挙動に関するデータを入手し、検討及び評価を行うことは不可欠な作業となってくる。このことから本年度も引き続き、振動時の土質材料の粘弾塑性挙動、間隙水の挙動を解析時に再現するうえで参考とする試験データ及びモデル化事例の調査、検討を行うことを目的とした。また、解析時に用いる地震波の波形、加速度及び地盤の物性データ等の参考資料とするために文献の調査も実施した。それに加え現在の解析手法で評価できる範囲、限界を検討するうえで、砂地盤に関する解析事例、また、地中埋設物の解析を実施するうえでの境界条件等を検討するために参考となる地下構造物の地震応答解析事例まで調査範囲をひろげ調査を行った。

調査した内容については以下に示す。

- ①土質材料を対象に動的解析において粘弾塑性構成モデルを用いた解析事例、2相系解析のモデル及び解析事例、実験データと解析結果の比較、入力パラメータ取得のための実験方法
- ②等価線形解析手法を用いた解析事例、検証事例、他のモデルとの比較事例
- ③振動中の土質材料中の水の挙動に関するモデル化事例
- 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

本年度は調査範囲の拡張に伴い、引き続き効率的な調査手段であるデータベースの利用を行うとともに、今回入手した”粘性土の動的性質に関する文献集”を参考に文献の調査をおこなった。

2. 1. 1 粘性土の動的性質に関する文献集による文献調査

土質学会刊”粘性土の動的性質に関する文献集”を参考に粘性土の粘弾塑性に関する実験データ、等価線形モデル、粘弾塑性モデルを用いた解析事例及び解析時に使用する物性値についての取得方法が記載された文献のピックアップを行った。

2. 1. 2 J I C S Tを用いた文献検索

商用データベースであるJ I C S Tを用いて土木関連の文献検索を実施した。ただし、今回は昨年度より検索範囲をひろげ、次の2通り検索を実施した。また、前年度の調査を踏まえ調査範囲を1987以降とした。

(1) 地盤の関して粘弾塑性モデルを採用した解析事例の検索

キ ー ワ ー ド	
日 本 語	英 語
① 地震	EARTHQUAKE
② 応答	RESPONSE
③ 粘弾塑性	VISCOELASTOPLASTIC
④ 弾粘塑性	ELASTOVISCOPLASTIC
検 索	
(①or②) and (③or④)	
対 象 文 献	
1987 ~ 1994	

検索結果では地上建屋についての応答挙動に関する文献が多く見られ、検索結果のうち対象となる文献は2文献であった。

(2) 地盤に関する弾塑性モデルを採用した解析事例の検索

(1)での検索結果、該当文献が少なかつたため、解析対象を拡張するため以下のキーワードを用いて再度検索を実施した。

キ　ー　ワ　ー　ド	
日　本　語	英　語
① 地震	EARTHQUAKE
② 応答	RESPONSE
③ 弾塑性	ELASTOPLASTIC
検　索	
(①or②) and③	
対　象　文　献	
1987 ～ 1994	

(1)の検索と同様地上建屋に関する文献が多く、今回の文献調査の目的に該当する内容の文献は15文献となった。

2. 2 各文献の概要

今回、前記の調査方法により関連文献として28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 粘性土の振動挙動、間隙水の挙動に関する文献 | 10文献 |
| ② 等価線形解析と他の解析手法の比較 | 4文献 |
| ③ 粘性土、砂の構成モデル、解析事例に関する文献 | 12文献 |
| ④ 原子力建屋及び地下構造物を対象とした地震応答解析事例 | 2文献 |

① 粘性土の振動挙動、間隙水の挙動に関する文献

一軸圧縮試験、軸対称三軸試験、せん断試験により粘性土の応力～ひずみ関係、破壊現象の定量的な判定法、間隙水圧の累積に伴う粘土の液状化現象の観察などが行われている。対象とされる粘土は川崎粘土、有明粘土、ベントナイト等となっている。ベントナイトについては粒子間構造と粘性土の力学的性質の対応関係より、複雑な粘土粒子の配列をある程度まで単純化したモデルが提案されている。

② 等価線形解析と他の解析手法の比較

土の非線形特性をある程度簡易的に表現する解析手法である等価線形解析手法と時間領域で逐次土の特性の変化を追従していく完全非線形解析手法、例えばR-Oモデルを採用した非線形解析手法の比較について論じている。

③ 粘性土、砂の構成式モデル、解析事例に関する文献

粘性土の構成モデルとして、関口～太田モデル、足立～岡モデル、砂に関する最近の構成モデルとして、マルチサーフェスモデル等に関して記載されている文献を入手した。

また、より現実的な解析を実施するために、FEM + FDM, FEM+GALERKIN-LITS 法の組合せを行って解析を実施している事例についても入手した。

④ 原子力建屋及び地下構造物を対象とした地震応答解析事例

風化軟質岩盤上に立地する原子力発電所の建屋と地盤の耐震安定性に関して現在一般に使用されている手法を用いて建屋、地盤の地震応答、地盤の安定性の面から評価を行っている。

各文献の内容を表2.2-1 ～2.2-7 にまとめる。

2. 3 文献調査のまとめ方

今回、土木分野での関連文献として28文献を入手した。各文献について出典、著者、概要及び実験に関する記述がある場合は実験の概要についてもまとめた。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. 3. 1 調査項目

20文献について一般情報、実験に関する情報、概要をまとめた。項目の詳細については次にまとめる。

(1) 一般情報

①文献No

②タイトル

③著者

④出典

(2) 実験に関する記載

①対象

②内容

(3) 概要

2. 4 文献調査の結果得られた今後の検討課題

本年度の文献調査は①粘性土の振動挙動、間隙水の挙動に関する文献②等価線形解析と他の解析手法の比較③粘性土、砂の構成モデル、解析事例に関する文献④原子力建屋及び地下構造物を対象とした地震応答解析事例の検討を行った。これらの調査から、以下のような今後の検討、必要事項があきらかになった。

- (1) 弾-粘塑性モデルを導入する場合、既存の粘性土に関する構成式からベントナイトの動特性を表現するのに適切な式を選択し利用していくことが肝要である。

粘性土の構成式は数々提唱されているが、複雑な構成式を採用しているモデルでは構成式中に数多くの材料定数が含まれるとともに、材料定数そのものの意味が不明確になっているものも多い。また、その決定方法があいまいなもの、困難なものがある。また、一部の挙動については旨く再現できない。

関口～大田モデルのような実績があり、パラメータ設定の方法が確立され、容易に決定できるモデルの採用が望ましい。

- (2) 等価線形解析は残留ひずみ等が問題となってくる場合、十分に地盤の挙動を再現できない。ただし、加速度、せん断ひずみ等については完全非線形解析に比較して大きめの計算結果を示すことから、安全サイドの評価を行うことができる。
- (3) 低塑性で透水性の高い粘性土に関しては等方圧密条件下では液状化生じることがある。人工バリアの実環境下でベントナイトの特性、環境について検討を行い、液状化の可能性について再考することが必要である。

表2.2-1 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
1	繰返し荷重を受けた低塑性粘性土の間隙水圧・変形特性	中園裕, 中瀬明男, 竹村次郎 蓬来晃文	塑性指数の小さな中間土に対して三軸試験を行いその動的特性を調査、研究している。等方圧密供試体においては蓄積間隙水圧が拘束圧の80%程度となるとひずみ振幅が急増して液状化現象が生じている。これに対してKO圧密供試体では間隙水圧の蓄積量は拘束圧に比べ低い値で頭打ちになった。
2	繰返し荷重を受けた粘土の応力～ひずみ関係	梅崎健夫, 落合英俊, 林重徳 大嶺聖	繰返し荷重時の複雑な粘土の変形挙動を繰返し回数毎に静的荷重問題に置換して評価する簡便な方法により繰返し回数毎に成立する粘土の構成モデルを提案している。透水性の低い粘性土を対象とする場合、圧密や排水に伴うせん断変形においては粘土層内部に有効応力が生じていることが明確となった。
3	繰返し荷重時における粘土の応力・ひずみ	岡二三生, 鷺巣均	本文献では過圧密領域における新たな塑性ポテンシャルを仮定することにより弾塑性論を用いて過圧密領域での土の挙動を表現できる粘性土、砂の応力～ひずみ関係を記述している。このモデルを用いて解析を行った結果、時間依存性を考慮していないので初期の荷重での間隙水圧の発生量が過大となった。
4	地震応答解析のための土の動的性質 (3. 地震応答解析への適用例)	斉藤彰, 吉田映	本文献においては扇島埋立地を対象に深層ボーリングによる地盤構成の調査、PS速度検層、中空三軸ねじり試験等を用いて土の動的特性を求めて地盤の地震応答解析を行い、その結果をまとめている。解析結果から土の非線形性の影響は加速度、せん断応力応答において顕著であり、共に減少している。また比重2.61～2.69の粘土層においては、加速度の減少がみられた。

表2.2-2 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
5	shock-tubeによる土中の波動伝播に関する研究(その3)	赤井浩一, 岡二三生	shock-tubeによる飽和粘性土中の波動伝播実験と間隙水圧の挙動を予測する構成関係を用いて衝撃を受ける飽和粘性土の挙動について解析及び考察を行っている。実験結果から①応力波の減衰は応力レベルに依存している②粘性土の弾性的性質が遅延弾性的なものであることが判明した。
6	shock-tubeによる土中の波動伝播に関する研究(その4)	赤井浩一, 岡二三生, 北健二	飽和粘性土を対象に、弾性流体と粘弾-粘塑性体からなる2相混合体理論を導き、飽和粘性土の構成関係について言及し、土中の波動伝播実験結果について考察した文献である。多相混合体理論の基礎方程式の誘導においてはGreen, Naghiの方法を用いている。
7	正規圧密粘土における異方性と時間効果	関口秀雄, 太田秀樹	本文献では、正規圧密粘土のダイレイタンスーにおよぼすせん断方向の反転の効果を検討し筆者らの提案してきたモデルを拡張し、異方性と時間効果を共に説明する構成式を誘導している
8	ペースト状態における粘性土の動的粘弾性の理論的考察	藤井克己, 中野政詩	粒子間構造と粘性土の力学的性質の対応関係を明らかにするために、複雑な粘土粒子の配列と結合様式をある程度まで単純化した微視的モデルについてその力学的性質を量的に導出し、実験値との対応をみることが必要となる。この観点に立って粒子集合体を仮想し、このモデルに対して多粒子系の振動論と高分子材料の知見を採用することにより粘土の動的粘弾性を論理的に導出している。

表2.2-3 文献リスト

No	文献名	著者	概要
9	ペースト状態におけるベントナイトの粘弾性について	藤井克己, 中野政詩	本文献では粒子間構造の影響が顕著にあらわれると予想される沈定容積濃度前後の濃度について強制振動型粘弾性測定装置を用いて、位相差方により粘弾性測定を試みている。 Ca ²⁺ 型とNa ⁺ 型の2種類のベントナイトの試料を作成し間隙水中の試料体積を同じくして、振動周期を変更した場合、Ca ²⁺ 型では振動周期が小さいほど剛性率が大きくなり粘性率が小さくなった。
10	繰返し弾粘塑性構成式とその自然粘土への適用	足立紀尚, 三村衛, 岡二三生 大野康年, 長屋淳一	本文献では粘土の繰返し挙動を明らかにするために空圧制御の三軸試験装置を用いて非排水せん断試験等を行い大阪堺泉北港内の粘土の過圧密境界面を明らかにしている。土の構成式として岡、足立による弾粘塑性構成式に破壊応力成分を導入して拡張を行った弾粘塑性構成式を利用して解析を行っている。
11	種々の液状化対象地盤の地震応答解析	畠山昭, 井上素行, 安田進 森本巖, 伴夏夫	本文献では液状化対象砂層を表層に持つ数多くの地盤について地震応答解析を行い地盤構成等と α_{smay} , γ_d の関係についての調査を実施している。 解析対象としたモデル地盤は大崎氏により分類された地盤モデルより5つのタイプの地盤モデルを採用している
12	地震時地盤安定性に関する完全非線形解析と等価線形解析の比較	西好一, 金谷守	地震時地盤安定性に関する完全非線形解析と等価線形解析の比較を行っている。入力加速度が30gal程度と比較的小さい時には両者に差は見られないが、入力加速度が60gal, 200galと増大するにつれて等価線形による結果が加速度とせん断応力は大きめに、せん断ひずみは小さめに評価する傾向にあることが判明した。

表2.2-4 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
1 3	ランベルグ・オズグットモデルによる地盤の地震応答解析	岩崎俊雄, 川島一彦, 森本巖	本文献ではランベルグ・オズグットモデルを用いて地盤の地震応答解析を行い、その結果を従来使われている等価線形法による結果と比較し、土の非線形性が地盤の応答に及ぼす影響について検討している。解析においては入力地震動として伊豆半島沖地震と豊後水道沖地震の2種類の地震動を用いた。豊後水道地震波を用いた場合、固有周期付近を除いては等価線形での解析結果の応答加速度のほうが大きくなった。
1 4	砂地盤の液状化解析プログラム「DYNALD」	大保直人, 林和男, 上野健治 永井文男, 堀越清視 J. H. Prevost	米国プリンストン大学のPrevost 教授は三次元応力テンソル場で定式化した砂の構成式を三軸圧縮試験、伸張試験に適用している。この構成式を組み込んだ次元液状化プログラム「DYNALD」の開発を行っている。DYNALDを用いた液状化解析は液状化実験であらわれる負の過剰間隙水圧比の発生等がよく表現できている
1 5	東京低地の地盤の地震応答	小川好	地震時の地盤の応答を予測するうえで問題となるのは、地震力によって地盤内に発生する応力とひずみの間の非線形的な性質である。このような性質を考慮する解析法としては等価線形化法と時刻歴解析法がある。本文献ではIwanの並列モデルと直列モデルを用いた時刻歴解析法と等価線形化法の比較を行っている。最大加速度、最大せん断応力については等価線形化法の方が大きくなることが判明した。
1 6	地震時における基礎地盤の安定性評価(その5) 繰返し載荷時における非弾性構成式の提案と地震応答解析への応用	西好一, 金谷守	水で飽和した地盤を固体と液体からなる二相混合体として捉え、Biotの運動方程式に基づいた線形応答解析手法を非線形問題へ適用できるよう拡張を行っている。

表2.2-5 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
17	MODELLING OF CYCLIC BEHAVIOUR OF SAND WITH COMBINE HARDENING	Hiroyoshi Hirai	<p>本文献では砂を対象として繰返し載荷時の挙動について以下のモデル化を行っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ①ケンプリッジモデルの一般化 ②等方及び移動硬化の結合 ③非関連流れ則の採用 ④Ziegler の移動硬化の拡張 ⑤降伏面の収縮の表現
18	2-D ELASTOPLASTIC SEISMIC SHEAR RESPONSE OF EARTH DAMS : THEORY	M. Elgamal, M. Abdel-Ghaffar Jean-Herve Prevost	<p>地震時の長方形の渓谷にあるアースダムの地震時の応答について2次元モデルで表現し、解析を行っている。この解析ではダムの材質の非線形性、履歴特性、ひずみ依存性などが考慮されている。材質の応力～ひずみ関係としてはmultisurface kinematic plasticity theoryに基づいた弾塑性構成式を採用している。</p>
19	2-D ELASTOPLASTIC SEISMIC SHEAR RESPONSE OF EARTH DAMS : APPLICATION	M. Elgamal, M. Abdel-Ghaffar Jean-Herve Prevost	<p>本文献では文献18で提案されている弾塑性モデルを用いてアースダムの非線形解析を行っている。利用する地震波形については、強度、中程度の最大加速度を有す2種類の地震波形を用いている。解析結果の比較においては、1次元解析と2次元解析、均質地盤と不均質地盤の間に大きな差異が見られた。</p>
20	TWO-DIMENSION NONLINEAR RESPONSE ANALYSIS DURING EARTHQUAKE BASED ON THE EFFECTIVE STRESS METHOD	Mamoru Kanatani, Koichi Nishi Makoto Kawakami Masayuki Ohnami	<p>Biotの多孔質体の弾性理論と弾塑性理論に基づいた固～液二相系の地震動に対する支配方程式を導出し、これにより二次元有効応力解析プログラムNAFSSを開発している。このプログラムを用いて解析を行っており液化現象がうまく表現できている。</p>

表2.2-6 文献リスト

No	文献名	著者	概要
2 1	NUMERICAL ANALYSIS OF THE NONLINEAR EARTHQUAKE RESPONSE OF AN EARTH DAM	S. J. Lacy, J. H. Prevost	液状化の生じやすい場所において地震での崩壊が生じることがわかっているが、地震の際の地盤材料の強度の低下や液～土の相互作用の効果を考慮したコードは報告されていない。本資料においては2相系の非線形解析コードによるアースダムの地震応答解析の結果について報告されている。解析結果では水～土の相互作用力により1相系と2相系の応答加速度について比較すれば2相系の方が小さくなっている。
2 2	TWO-PHASE ELASTO-PLASTIC SEISMIC RESPONSE OF EARTH DAM : APPLICATION	A. N. Yiagos, J. H. Prevost	本文献では2相系の解析コードによりSanta Felicia アースダムとLong Valley アースダムの解析を行い地震時に観測されたデータとの比較を行っている。解析結果と観測データの加速度はよく一致しており、またプログラムが十分に液状化予測が可能であることが確認できた。
2 3	LOCAL-GLOBAL FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE SEISMIC RESPONSE OF EARTH DAMS	M. Zeghal, A. M. Abdel-Ghaffar	本文献においては局所的な形状関数と全体的な形状関数を組合せ柔軟性に富んだFEM解析と計算コストの面で有利なガラキン・リッツ法を併用した解析法を提案している。
2 4	CONSTITUTIVE RELATIONS FOR SAND UNDER CYCLIC LOADING BASED ON ELASTO-PLASTICITY THEORY	西好一, 金谷守	本文献においては、有効応力比の見地からの降伏関係と応力比～塑性ひずみ増分比から導かれるポテンシャル関係より砂の構成関係が定式化されている。砂の変形で生じる主応力軸の回転を考慮するため関口～大田の応力パラメータが用いられている。

表2.2-7 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
25	FEM-FDM COUPLED LIQUEFACTION ANALYSIS OF A POROUS SOIL USING AN ELASTO-PLASTIC MODEL	Fusao Oka, Atsushi Yashima Toru Shibata, Mitsuru Kato Ryosuke Uzuoka	本文献ではBiotの二相混合理論に基づいて土～水をカップリングした支配方程式を提案している。支配方程式を解くにあたっては土骨格の変位u、間隙水圧Pを未知数とするu-P法を用いている。またトータルの自由度を少なくするためのFEM-FDMの組合せを行っている。
26	CENTRIFUGE VALIDATION OF A NUMERICAL MODEL FOR DYNAMIC SOIL LIQUEFACTION	Radu Popescu, J. H. Prevost	本文献では解析手法の精度を立証する為に行われた遠心実験のモデル化、解析と試験結果の比較について記述されている。ハーバード大で開発された "DYNAFLOW. v93" の解析結果は加速度、過剰間隙水圧の上昇についてよい一致がみられた。
27	原子力発電所地下立地方式のケーススタディによる成立性評価	日比野敏, 駒田広也, 本荘静光 藤原義一, 本島睦, 中川加明一郎 野崎隆司	本文献では風化軟質岩盤上に立地する原子力発電所の建屋と地盤の耐震安定性を現在使用させている手法を用いて地質、地盤、建屋、地盤の地震応答、地盤の安定性の面から評価を行っている。
28	原子力発電所の風化軟質岩盤立地に関する耐震安定性評価	緒方信英, 西好一, 本荘静光 志田原功, 千木良雅弘, 楠建一郎 工藤康二, 野崎隆司	原子力発電所の立地に関して新立地方式の一つである地下立地は立地点も豊富で景観や自然の環境保全にもすぐれ将来有望な立地方式である。本文献では我が国の代表的な地形について地下式原子力発電所立地のケーススタディを行いその成立性を確認している。

3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

以下は平成6年度的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 解析手法の選択

解析コードにおいてはオプションの設定により、解析モデルとして1相系モデル（間隙水圧考慮しない）、1相系モデル（間隙水圧計算）、2相系モデルの3つの解析方法を選択できる。

各解析手法の概要については図3.1-1～3.1-3に示す。

3. 2 1相系の運動方程式

基礎式及びその離散化に関しては、次のようになる。

$$\begin{array}{ccccccc} \rho u & + & C u & - \operatorname{div}(\sigma - \sigma_0) & + & f & = 0 \quad \dots \dots \dots (2-1) \\ \text{慣性力} & & \text{減衰力} & & & \text{外力} & \end{array}$$

u は質点変位、 ρ は質量密度、 σ は全応力を表す。

ここで、初期応力 σ_0 が0であると仮定すると(2-1)式は

$$\rho u + C u - \operatorname{div} \sigma + f = 0 \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

となる。

非線形材料では、材料特性がひずみに依存して変化することから、等価線形解析解析のアルゴリズムでは、入力パラメータにて定義した応力～ひずみ関係が満足されるまで材料特性を変化させ解を求める計算が繰り返し行われる。

計算アルゴリズムについては図3.2-1 に示す。

3. 3 2 相系運動方程式

土骨格と水の質点変位が微小と仮定しかつ水の対流項を無視したラグランジュ形式で記述した動的釣合式とその離散化の手順について示す。

① 土骨格の動的釣合

$$(1-n) \rho_s u + (n^2 \rho_f g/k)(u - U) + Cu - \text{div}(\sigma' - \sigma_0) - (\alpha - n) \text{grad}(P - P_0) + f_s = 0 \quad \dots (3-1)$$

② 水の動的釣合

$$n \rho_f U + (n^2 \rho_f g/k)(U - u) + CU + n \text{grad}(P - P_0) + f_f = 0 \quad \dots (3-2)$$

u, U は土、水の質点変位、 ρ_s, ρ_f は土骨格、水それぞれの質量密度、 n は間隙率、 k は透水係数、 P は間隙水圧、 σ' は有効応力、 f_s, f_f は外力、 g は重力加速度を表す。また $\alpha = 1 - K_T / K_s$ (K_T, K_s はそれぞれ土骨格及び土粒子の体積弾性係数) であり、これにより、土粒子の膨張による土粒子間の相互作用力を表現している。

③ 土骨格の体積変化と水の体積変化の関係

土骨格の体積変化と水の体積変化の関係は 2 相系の体積弾性係数 Q を仮定して、間隙水圧 P との間に次の関係が成立するとしている。

$$Q ((\alpha - n) \text{div} u + n \text{div} U) = -P \quad \dots (3-3)$$

ただし、

$$Q = 1/((n/K_r) + ((\alpha - n)/K_s))$$

であり、体積弾性係数の非線形性は考慮せずQ に関しては定数となる。

④ 構成式（土骨格）

$$\sigma = D \varepsilon \quad \dots \dots \dots (3-4)$$

ただし、D は弾性応力～ひずみ行列を表す。

現在のところD = D^e（弾性）に限られているが、弾塑性解析では、弾性と塑性を考慮し、D = D^{e,p}（弾塑性）を用いる。平成6年度の機能追加では、D を1相系の等価線形解析と同様に解析中の繰り返し計算により、土骨格の非線形性を表現する。

⑤ 適合条件

$$\varepsilon = B u \quad \dots \dots \dots (3-5)$$

ただし、B はひずみ行列を表す。

$$\text{これより、} \sigma = D B u \quad \dots \dots \dots (3-6)$$

以上、(3-3) ～(3-6) 式により、(3-1)、(3-2) 式上の応力σと間隙水圧P は土骨格と水の質点変位u ,Uによりあらわすことができる。

2相系の等価線形解析では土骨格のみ非線形性を考慮して入力パラメータにて定義した応力～ひずみ関係が満足されるまでDを変更して解を求める繰り返し計算が行われる。K' _{ij}については非線形は考慮しない。

3. 4 残留間隙水圧モデルの組み込み

一般に間隙水圧の評価を行う場合、運動方程式の解法は時間領域で解析を行うことが多い。しかしながら、今回の解析機能の追加では、a. 昨年度の周波数領域での解析機能の拡張として機能追加が可能であること、b. 間隙水圧モデルに関して簡易法を用いれば、複素領域でも間隙水圧モデルを組み込め小さな計算負荷で解析可能であること、c. H-Dモデル、R-Oモデルを用いて時間領域で非線形解析を実施するのに比べて2次元⇒3次元への拡張が容易であること、d. 土の減衰モデルとして非粘性減衰を導入できることから、運動方程式より求まる応力波形より間隙水圧の上昇を計算する手法（図3.1-2, 3.1-3の③部分）として次の方法を用いる。即ち、固有値解析により、基本周期 T_1 を求め、地震継続時間を T_1 を1サイクルとして区分する。（ $T_1 = \Delta T$ とする。）間隙水圧の評価を行う場合、1サイクル（ ΔT ）単位で各要素単位ごとに等価線形解析を行いその結果より残留間隙水圧評価式（実験式）を用いて ΔT ステップずつ残留間隙水圧の評価を行う。概要については図3.4-1に示す。具体的な手順については以下にまとめる。本解析コードでは、間隙水圧モデルを組み込むことにより、龍岡らの式を用いて最終的な液状化判定のみをおこなうSIGNASとは異なり、間隙水圧の上昇過程の追跡も可能となる。

3. 5 間隙水圧挙動の評価と解析手法

地震時の間隙水圧挙動を予測する方法としては、1970年代の後半に全応力解析で得られるせん断応力波形から、実験式を用いて残留間隙水圧を評価する方法が提案された。Seedらは間隙水圧を直接求める実験式と圧密方程式を組合せ、間隙水圧の消散を考慮した解析を行った。

一方、地震時の地盤挙動に対する間隙流体の影響を評価するために、有効応力 ($\sigma = \sigma' - P$, σ : 全応力、 σ' : 有効応力、 P : 間隙水圧) にもとづく解析手法がある。土の骨格と間隙流体の相互作用を表現しえる理論として、Biotの多孔質体内の変形理論があるが、地盤の地震応答解析に対し間隙流体の影響を直接取り込む場合、前記の理論を用いる。

多孔質体の変形理論を構成する支配方程式は次のとおりである。

- ① 土の骨格に対する運動方程式
- ② 間隙流体に対する運動方程式
- ③ 間隙流体に対する連続の式
- ④ 有効応力の表示式
- ⑤ 有効応力に基づく土の構成式
- ⑥ ひずみの適合条件

有効応力解析においては①、②の運動方程式の取扱い方により連成解析と非連成解析に分類できる。

3. 6 残留間隙水圧の評価方法 ～間隙水圧モデルについて～

有効応力解析では繰り返しせん断力が加わっている間の間隙水圧の変化、つまり有効応力の変化による応力～ひずみ関係の変化に応じて計算をおこなっている。透水を考慮する場合には応力の計算⇒残留間隙水圧の評価⇒間隙水圧の消散の計算⇒有効応力の変化を考慮した応力～ひずみ関係の再設定⇒応力の計算を繰り返す行う。

残留間隙水圧の評価方法としては、実験式にもとづく方法、弾塑性論にもとづ

残留間隙水圧の評価方法としては、実験式にもとづく方法、弾塑性論にもとづく方法などがある。弾塑性論にもとづく方法では、応力～ひずみの関係式（構成則）を用いて間隙水圧や体積変化を表現できるため特別な評価を必要としない。有効応力及び全応力に着目しての解析手法と応力～ひずみモデルの関係を表3.6-1にまとめる。

3. 7 実験式による間隙水圧の評価方法

砂相の残留間隙水圧を評価する方法としては、Seed等の用いた非排水状態において実施される繰返しせん断試験（液状化試験）から残留間隙水圧の挙動を求める方法と Finn等のおこなったせん断時の残留体積ひずみと有効応力の減少に伴う膨張による体積ひずみの和を0として、残留間隙水圧を求める方法がある。今回の機能追加で用いる間隙水圧モデルはSeed式を暫定的に用いる。

3. 8 等価線形解析機能の追加に伴うプログラムの変更

等価線形解析機能を追加するに当たり、追加もしくは変更となった入出力データ及び解析結果の出力例について以下にまとめる。

(1) 入出力フォーマットの追加、変更

現在、入力データについては下記のようなカードグループに分類されているがその内 SCON、MATR については内容の変更を行い、またFREQ、MTBL、FPHS、FEHS、FPDI、FEDIの追加を新たに行った。

入力データ例については、図3.8-1 に示す。

(2) ファイルの追加

機能の追加に伴い次のファイルを追加した。

ユニット番号	内 容	形 式
FT21	ポスト処理用ファイル	LREC =133 RECFM=FB

(3) 出力例

結果についてはユニット番号FT06に次の出力を行う。

- ① 節点もしくは要素番号
- ② 種別
- ③ 時間
- ④ 応答値の実部
- ⑤ 応答値の虚部

出力結果については、図3.8-2 に示す。

3. 9 等価線形解析機能の検証

(1) 検証方法

1 相系モデルを用いて材質の減衰を考慮せずに時間領域で動的解析を行い、これを等価線形材料のひずみ依存を無視した場合（ひずみに応じて物性値を更新しない）の等価線形解析との計算結果と比較した。

(2) 検証用モデルの形状と境界条件

1/8 スケールの人工バリアモデルを用いて解析を実施した。

(3) 物性値

ベントナイト部分について、ヤング率 $1.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.4、重量密度 1.0 gf/cm^3 、オーバーパック部分についてはヤング率 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.3、重量密度 $7.7 \times 10 \text{ gf/cm}^3$ を用いた。

(4) 入力波形

入力加振波は水平方向の最大加速度 100 gal 、周波数 10 Hz の正弦波を用いた。加振荷重の入力のステップ間隔（ Δt ）は 0.002 秒として、 1024 ステップの入力を行った。

(5) 解析結果

比較は変位、加速度については節点3、5、57を用いた。両者はほぼ一致した。

3. 10 過剰間隙水圧の評価式の検証

(1) 検証方法

電力中央研究所報告 :381023 ”砂層の液状化現象についての数値シミュレーション”に記載された液状試験データ（過剰間隙水圧の計測）との比較、検討を行った。

(2) 検証用モデルの形状と入力地震波

検証用として、図3.10-1に示すような液状化試験をモデル化したものを採用した。実験と同様に最下層より最大加速度250gal、周波数10Hzの正弦波形の地震波を入力し、2秒間の解析を実施した。また、比較を行った過剰間隙水圧の位置は図3.10-1に示すように、最下層での値となっている。

(3) 物性値

試験時に使用した砂の物性値を基準に砂層の初期せん断弾性係数は $2.53 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$ 、密度は 1.99 g/cm^3 とした。

(4) 解析結果

図3.10-2に試験データ、電中研のコードによるシミュレーション、開発コードによるシミュレーション結果を示す。また開発コードによる各時間ステップでの過剰間隙水圧の上昇過程については表3.10-1に示す。開発コードでは間隙水圧が初期拘束圧に達した時点で液状化が生じたとして間隙水圧の計算を終了するようになっている。電中研のコードによるシミュレーションでは1波目に間隙水圧が大幅に上昇し、ほぼ液状化状態に達している。開発コードによるシミュレーションでは試験結果より短時間で液状化状態に達しているが、電中研のコードによるシミュレーションの結果よりは間隙水圧の急上昇は改善されている。

表3.6-1 解析手法

	有効応力解析			全応力解析
連成、非連成	連成モデル		非連成モデル	非連成モデル
透水モデル	多孔質体の変形理論		圧密方程式	圧密方程式
応力～ひずみ関係	弾塑性モデル	非線形モデル	線形モデル	線形モデル
			非線形モデル	等価線形モデル
				非線形モデル
間隙水圧モデル	—	実験式	実験式	実験式
備考				開発コード

表3.10-1 開発したコードによる各時間ステップでの過剰間隙水圧の評価

ステップ	時間(S)	過剰間隙水圧(gf/cm ²)
1	0.05	3.222
2	0.10	7.038
3	0.15	1.109 × 10 ¹
4	0.20	1.533 × 10 ¹
5	0.25	2.427 × 10 ¹
6	0.30	2.680 × 10 ¹
7	0.35	3.150 × 10 ¹
8	0.40	3.623 × 10 ¹
9	0.45	4.099 × 10 ¹
10	0.50	4.573 × 10 ¹
11	0.55	4.830 × 10 ¹

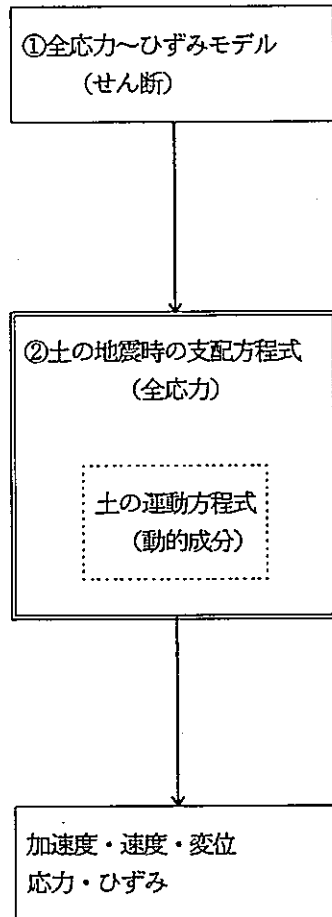


図3.1-1 1相系全応力解析の概要 (間隙水圧の評価なし)

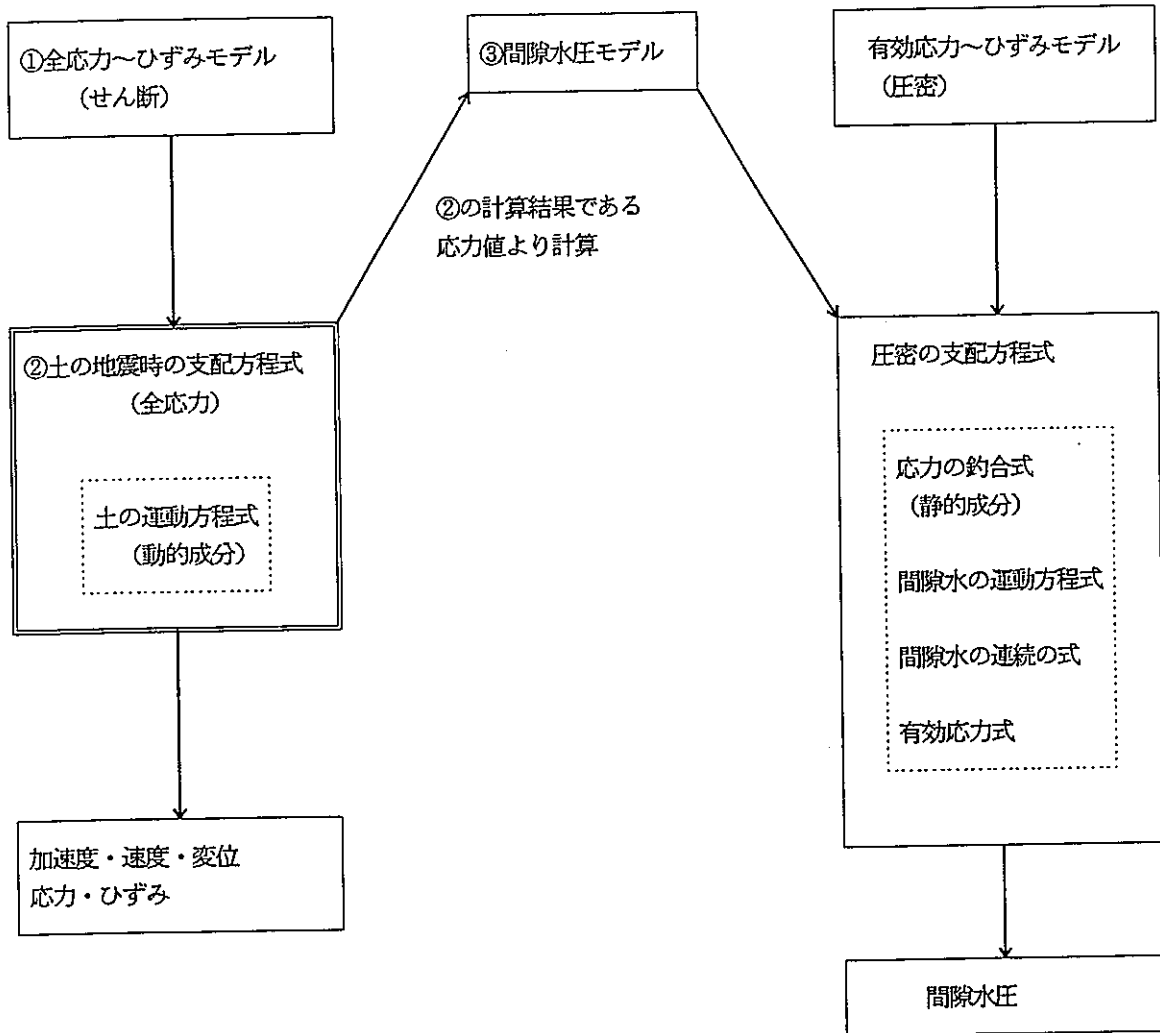


図3.1-2 全応力解析の概要（間隙水圧の評価あり）

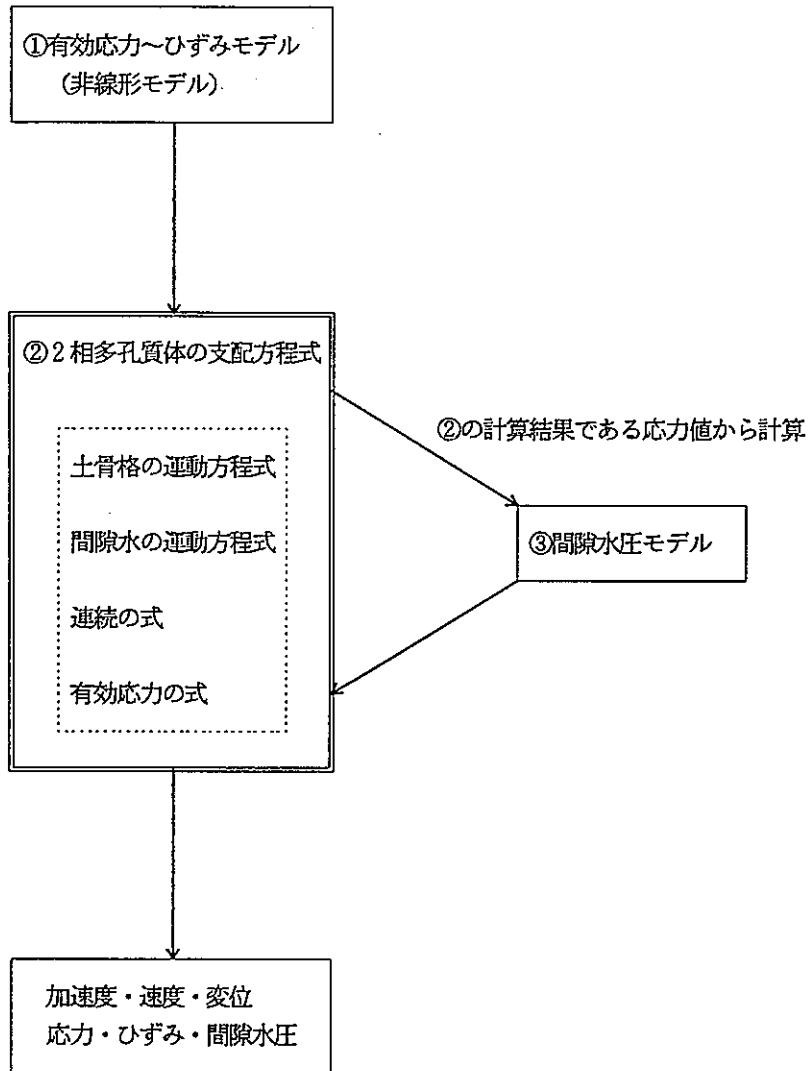


図3.1-3 有効応力解析の概要

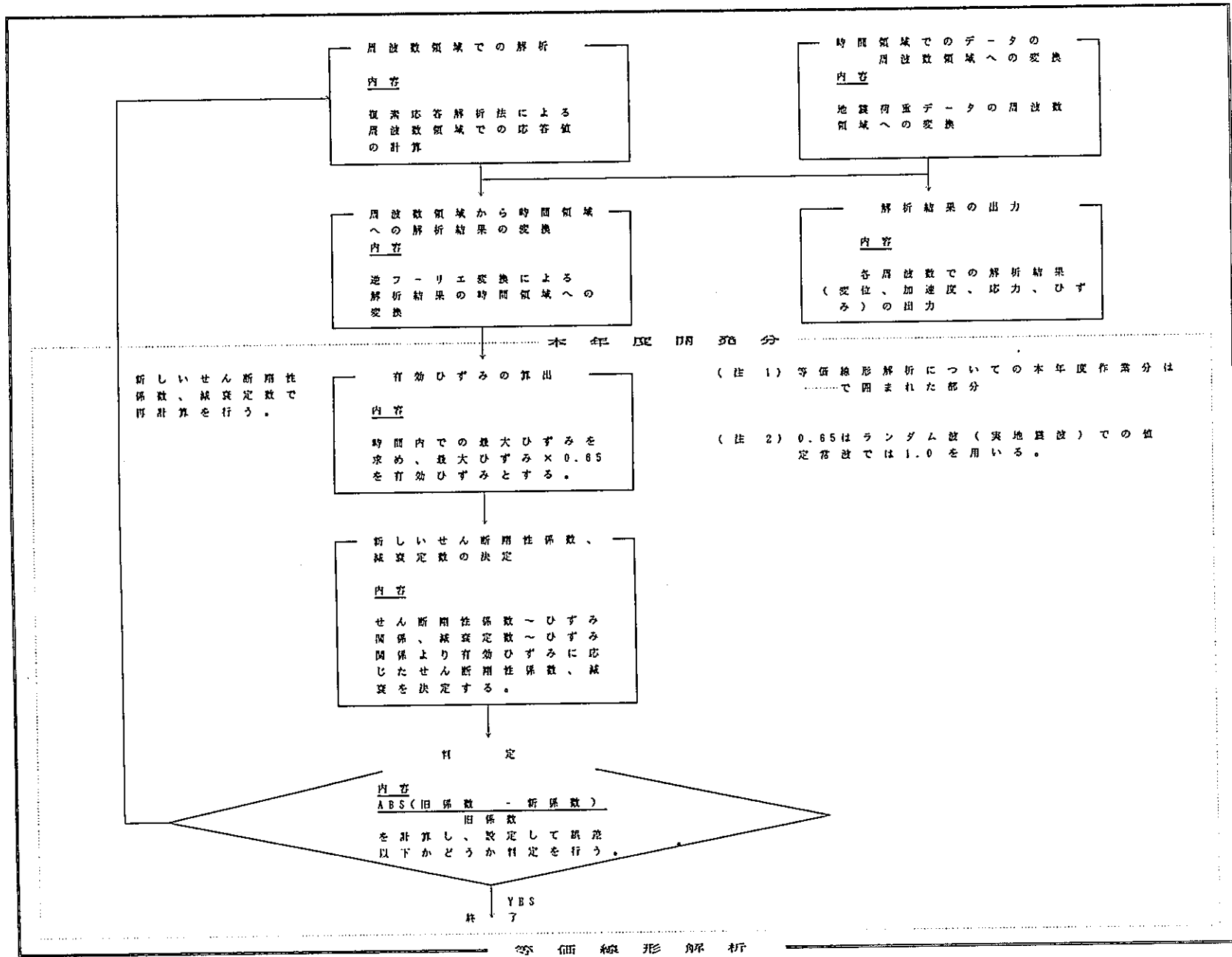


図3.2-1 本年度研究内容と等価線形解析

通常の有効応力解析（非線形解析）

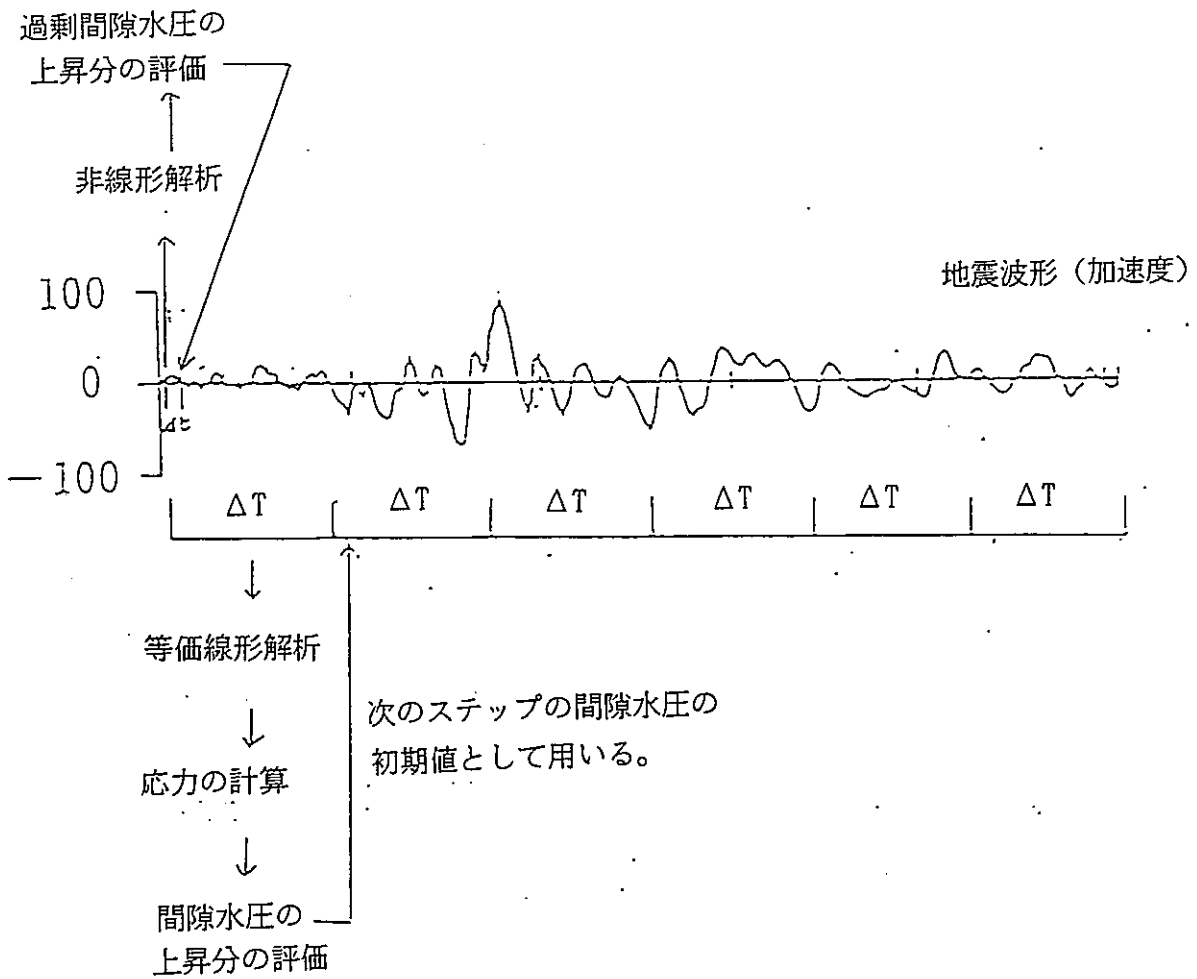


図3.4-1 等価線形解析での残留間隙水圧評価式の活用法（簡易法）

```

-----
LST  FEM-SEISMIC ANALYSIS MODEL (SEISMIC LOAD-> MIYAGI E-W)
ACM   INT
PARAM  3.0  0.25  0.25  0.2-E  1
FEAS  1
DAVA  1
FILE  1
-----
LST  DYNAMIC JO ANALYSIS
STEP  DVA
ELEM  1
SOLV  ELEM
DVA   FEAS
RATE  3.45
DDE   2.21  1.0
DVT   32.73
-----
ELEM  (OK)
MODE  1      3.200  0.200  0.200
MODE  2      13.250  3.200  3.200
MODE  3      23.200  13.200  3.200
MODE  4      3.200  13.200  3.200
MODE  5      3.200  3.200  13.200
MODE  6      13.200  3.200  13.200
MODE  7      10.200  14.200  10.200
MODE  8      3.200  12.200  13.200
MODE  9      3.200  3.200  16.200
MODE 10      10.200  2.200  13.200
MODE 11      16.200  10.200  13.200
MODE 12      3.200  13.200  16.200
MODE 13      3.200  3.200  13.200
MODE 14      15.200  1.200  12.200
MODE 15      13.200  16.200  13.200
MODE 16      0.200  14.200  13.200
MODE 17      3.200  2.200  14.200
MODE 18      12.200  3.200  14.200
MODE 19      10.200  13.200  14.200
MODE 20      3.200  12.200  13.200
MODE 21      3.200  3.200  16.200
MODE 22      17.200  3.200  13.200
MODE 23      10.200  14.200  10.200
MODE 24      3.200  13.200  13.200
MODE 25      2.200  2.200  16.200
MODE 26      12.200  3.200  13.200
MODE 27      10.200  13.200  16.200
MODE 28      3.200  13.200  13.200
MODE 29      0.200  3.200  17.200
MODE 30      10.200  3.200  16.200
MODE 31      16.200  13.200  17.200
MODE 32      3.200  3.200  17.200
MODE 33      0.200  3.200  16.200
MODE 34      10.200  3.200  17.200
MODE 35      10.200  13.200  16.200
MODE 36      3.200  16.200  16.200
-----
MATR  1  1  3  1.2E+3  0.0  0.0
          1.4E-3
-----
MATR  1  1  3  1.1E+6  0.0  0.0
          7.7E-3
-----
MATR  1  34  1.1E+4  1.0  0.0  1.20  0.0
          1.1E+4  0.35  0.0  1.30  0.0
          1.1E+3  3.75  3.9  7.30  0.0
          1.1E+1  0.10  2.1  11.30  0.0
          1.1E+1  0.13  1.0  16.30  0.0
-----
ELEM  101KELAA  1  1  2  3  4  5  6  7  8
ELEM  102KELAA  1  5  6  7  8  9  10 11 12
ELEM  103KELAA  1  3  10 11 12 13 14 15 16
ELEM  104KELAA  1  11 14 15 16 17 18 19 20
ELEM  105KELAA  1  17 18 19 20 21 22 23 24
ELEM  106KELAA  1  21 22 23 24 25 26 27 28
ELEM  107KELAA  1  15 16 17 18 19 20 21 22
ELEM  108KELAA  1  19 20 21 22 23 24 25 26
-----
NODES  BOUNDARY DEFINITION
NODE  1  111000000
NODE  2  111000000
NODE  3  111000000
NODE  4  111000000
NODE  5  300000000
NODE  6  000000000
NODE  7  300000000
NODE  8  300000000
NODE  9  000000000
NODE 10  000000000
NODE 11  300000000
NODE 12  300000000
NODE 13  300000000
NODE 14  000000000
NODE 15  300000000
NODE 16  000000000
NODE 17  000000000
NODE 18  000000000
NODE 19  000000000
NODE 20  000000000
NODE 21  000000000
NODE 22  000000000
NODE 23  000000000
NODE 24  000000000
NODE 25  000000000
NODE 26  300000000
NODE 27  000000000
NODE 28  300000000
NODE 29  000000000
NODE 30  000000000
NODE 31  000000000
NODE 32  000000000
NODE 33  111000000
NODE 34  111000000
NODE 35  111000000
NODE 36  111000000
-----
ELEM  DDMT WAVE
ELEM  111  3.0  2.5  0.5  1.0
ELEM  112  3.5
-----
TABL  MIYAGI E-W Wave
FEAS  555  2.20000  0.00000  0.00200  24.88800  0.00600  26.17537 C
          0.20000  18.45472  3.20000  84.43270  0.01000  95.20543 C
          0.01250  59.30267  3.01000  74.27872  0.01400  90.48270 C
          0.21400  77.25232  0.23000  58.77852  0.02200  36.81249 C
          0.21400  22.19322  0.22000  -11.33223  0.02400  -36.81249 C
          0.23200  -51.77834  2.01200  -77.35133  0.03400  -90.48270 C
          0.23400  -14.21873  3.23800  -99.80287  0.04000  -99.10565 C
          0.24200  -84.-23778  3.24400  -48.43470  0.04500  -48.17535 C
          0.24400  -24.11437  0.28300  0.30002  0.05200  24.81901 C
          0.25400  48.27929  0.08600  68.81473  0.25800  84.63781 C
-----
STEP  CALCULATION POINT
TIME  0  7
STEP  0  21  7
STEP  INITIAL CONDITION DATA (SEE THE DEFAULT (ALL FEAS))
STEP  FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS PARAMETER
STEP  0  24
STEP  FREQUENCY OUTPUT MODAL VALUES
STEP  3  1VV  0101
STEP  5  1VV  0101
STEP  17  1VV  0101
STEP  57  1VV  0101
STEP  FEAS ALL 4 4 4 1 1 1 1 1
STEP  ALL 176 176 1 1 1 1 1
END

```

図3.8-1 入力データ例

--- TIME HISTORY RESULT OF NODAL

MEANINGS OF SYMBOLS.....
 MI*U : TRANSLATION OF SOLID PARTICLE IN X-DIRECTION
 MI*V : TRANSLATION OF SOLID PARTICLE IN Y-DIRECTION
 MI*W : TRANSLATION OF SOLID PARTICLE IN Z-DIRECTION
 MI*U : ROTATION OF SOLID BODY ABOUT X-DIRECTION
 MI*V : ROTATION OF SOLID BODY ABOUT Y-DIRECTION
 MI*W : ROTATION OF SOLID BODY ABOUT Z-DIRECTION
 MI*UL : TRANSLATION OF WATER PARTICLE IN X-DIRECTION
 MI*VL : TRANSLATION OF WATER PARTICLE IN Y-DIRECTION
 MI*WL : TRANSLATION OF WATER PARTICLE IN Z-DIRECTION

NODE NO. = 3		MI*VV		DISPLACEMENT	
NO.	TIME	VAL(REAL)	VAL(IMAG)		
2	2.000E-03	-4.776E-05	-2.080E-12		
3	4.000E-03	-1.063E-04	-4.639E-12		
4	6.000E-03	-1.584E-04	-1.383E-11		
5	8.000E-03	-2.005E-04	-8.759E-12		
6	1.000E-02	-2.300E-04	-2.009E-11		
7	1.200E-02	-2.447E-04	-2.138E-11		
8	1.400E-02	-2.437E-04	-3.193E-11		
9	1.600E-02	-2.269E-04	-9.913E-12		
10	1.800E-02	-1.355E-04	-1.706E-11		
11	2.000E-02	-1.515E-04	-1.323E-11		
12	2.200E-02	-5.751E-05	-1.276E-11		
13	2.400E-02	-5.718E-05	-3.236E-12		
14	2.600E-02	2.566E-05	3.387E-12		
15	2.800E-02	3.695E-05	1.142E-11		
16	3.000E-02	2.428E-04	2.499E-11		
17	3.200E-02	1.895E-04	8.271E-12		
18	3.400E-02	2.241E-04	1.960E-11		
19	3.600E-02	2.445E-04	2.139E-11		
20	3.800E-02	2.492E-04	3.271E-11		
21	4.000E-02	2.381E-04	2.084E-11		
22	4.200E-02	2.117E-04	2.781E-11		
23	4.400E-02	-7.79E-04	2.260E-11		
24	4.600E-02	-2.212E-04	2.125E-11		
25	4.800E-02	-5.275E-05	5.543E-12		
26	5.000E-02	1.959E-07	1.200E-13		
27	5.200E-02	-5.192E-05	-8.050E-12		
28	5.400E-02	-1.202E-04	-2.094E-12		
29	5.600E-02	-1.708E-04	-1.234E-11		
30	5.800E-02	-2.105E-04	-3.674E-11		
31	6.000E-02	-2.368E-04	-4.115E-11		
32	6.200E-02	-2.481E-04	-5.416E-11		
33	6.400E-02	-2.436E-04	-1.064E-11		
34	6.600E-02	-2.238E-04	-1.958E-11		
35	6.800E-02	-1.898E-04	-1.663E-11		
36	7.000E-02	-1.439E-04	-1.892E-11		
37	7.200E-02	-8.904E-05	-7.857E-12		
38	7.400E-02	-2.865E-05	-3.831E-12		
39	7.600E-02	3.343E-05	4.307E-12		
40	7.800E-02	9.328E-05	1.624E-11		
41	8.000E-02	1.471E-04	1.279E-11		
42	8.200E-02	1.916E-04	2.508E-11		
43	8.400E-02	2.240E-04	2.934E-11		
44	8.600E-02	2.422E-04	4.234E-11		
45	8.800E-02	2.451E-04	3.215E-11		
46	9.000E-02	2.327E-04	4.072E-11		
47	9.200E-02	2.056E-04	3.601E-11		
48	9.400E-02	1.857E-04	3.630E-11		
49	9.600E-02	1.155E-04	1.015E-11		
50	9.800E-02	5.817E-05	7.700E-12		
51	1.000E-01	-2.737E-06	-2.766E-13		
52	1.020E-01	-6.337E-05	-1.098E-11		

NODE NO. = 3		MI*VV		ACCELERATION	
NO.	TIME	VAL(REAL)	VAL(IMAG)		
2	2.000E-03	2.519E+01	-1.956E+00		
3	4.000E-03	4.899E+01	-1.810E+00		
4	6.000E-03	5.970E+01	-1.545E+00		
5	8.000E-03	8.603E+01	-1.179E+00		
6	1.000E-02	9.695E+01	-7.345E-01		
7	1.200E-02	1.018E+02	-2.416E-01		
8	1.400E-02	1.002E+02	2.676E-01		
9	1.600E-02	9.233E+01	7.598E-01		
10	1.800E-02	7.864E+01	1.203E+00		
11	2.000E-02	6.902E+01	1.568E+00		
12	2.200E-02	3.762E+01	1.831E+00		
13	2.400E-02	1.285E+01	1.975E+00		
14	2.600E-02	-1.273E+01	1.992E+00		
15	2.800E-02	-3.756E+01	1.879E+00		
16	3.000E-02	-5.922E+01	1.645E+00		
17	3.200E-02	-7.857E+01	1.305E+00		
18	3.400E-02	-9.726E+01	8.814E-01		
19	3.600E-02	-1.002E+02	4.011E-01		
20	3.800E-02	-1.018E+02	-1.045E-01		
21	4.000E-02	-9.701E+01	-6.927E-01		
22	4.200E-02	-8.513E+01	-1.061E+00		
23	4.400E-02	-6.983E+01	-1.451E+00		

図3.8-2 出力結果例

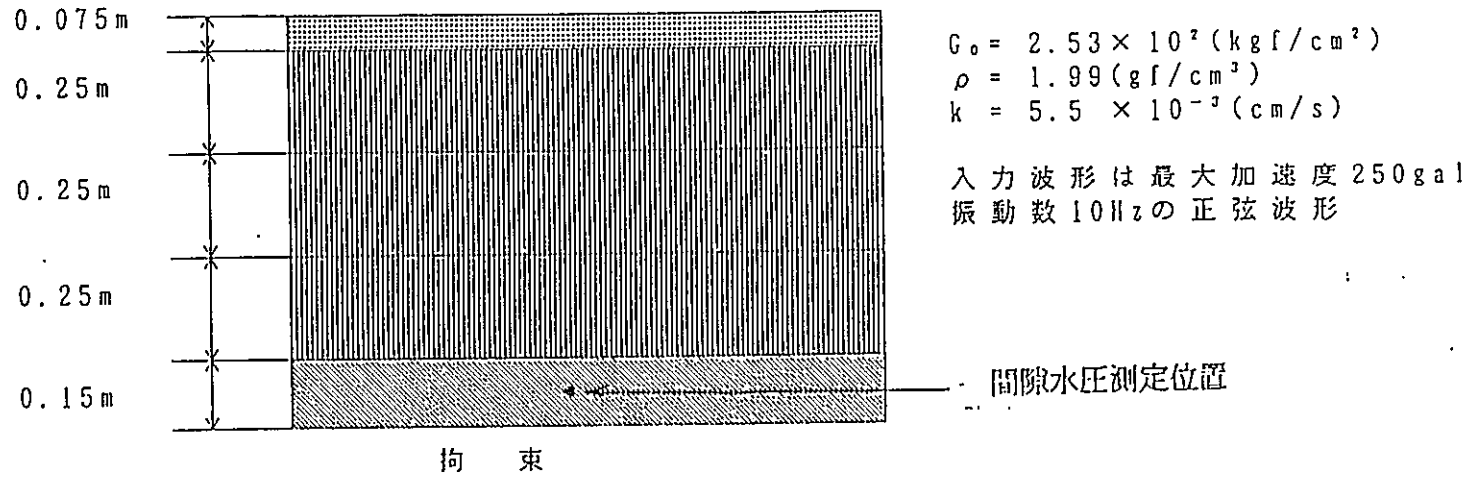


図3.10-1 モデル図 1

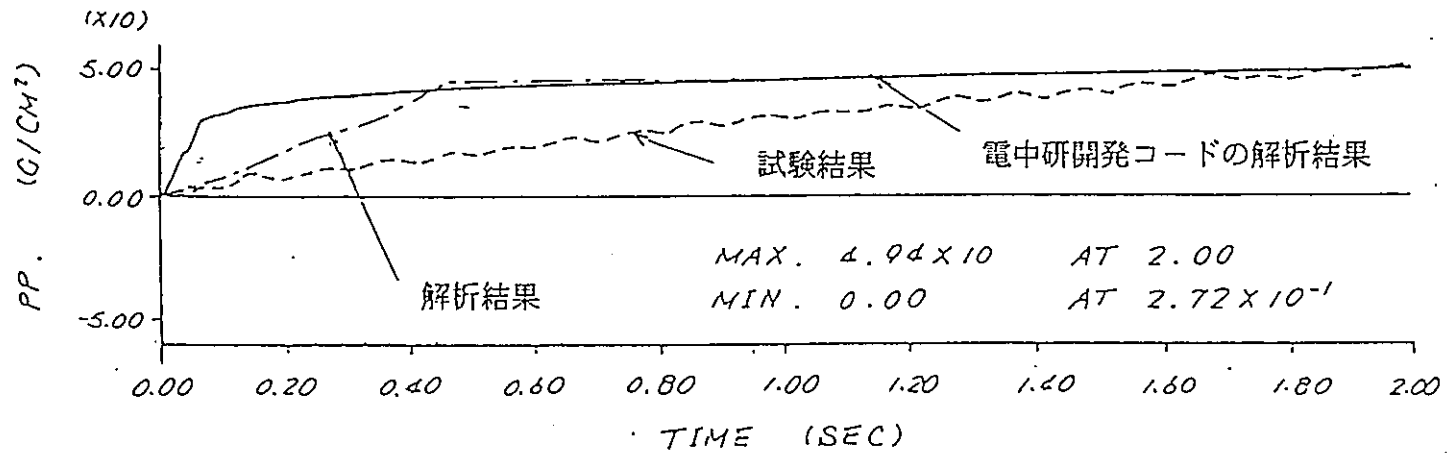


図3.10-2 解析結果

4. 振動実験にもとづくモデル／コードの妥当性の検討

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を用いて以下の解析を実施した。

① 小型振動試験データとコードでの解析結果の比較

4. 1 実固有値解析

4. 1. 1 概要

小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ベントナイトの乾燥密度とせん断弾性係数をパラメータとして解析を行った。

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 物性値

ベントナイトのせん断弾性係数、減衰定数、乾燥重量密度は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, DT-24の値すなわちヤング率 $E = 40.0, 120.0 \text{ kgf/cm}^2$ を引用した。また、前記のサンプルのデータからヤング率 $E = 50.0, 60.0, 80.0 \text{ kgf/cm}^2$ でのベントナイト物性値を推定して利用した。物性データの詳細については図4.1.3-1、表4.1.3-1に示す。

4. 1. 4 モデルと境界条件

(1) 小型振動試験装置

図4.1.4-1 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10Hz～70Hzのスイープ試験を実施して共振点を求めた。共振点は67Hz～68Hzとなった。

(2) 解析用モデルの形状

小型振動試験供試体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4.1.4-2 に示す。

(3) 解析用の拘束条件

小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4.1.4-3 に示す。

4. 1. 5 解析結果のまとめ

解析結果からはヤング率を40kgf/cm²(乾燥密度 0.7gf/cm³)とした場合が、試験結果である67Hz～68Hzにもっとも近い値となった。昨年度の硅砂層を考慮せずに解析を行った場合と今回の解析結果を比較してもほぼ同じ値となっており硅砂層による固有振動数への影響は小さいと考えられる。解析結果の詳細については表4.1.5-1 に示す。

4. 2 動的解析結果

4. 2. 1 概要

小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動的弾性解析を行った。動的弾性解析においてはベントナイトの乾燥密度すなわちせん断弾性係数をパラメータとして解析を行った。

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範囲は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 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ③ 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 1.0×10^{-4} での値を用いた。

4. 2. 3 物性値

ベントナイトのせん断弾性係数、減衰定数、乾燥重量密度は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, DT-24の値を引用した。また、前記のサンプルのデータからヤング率 $E = 50.0, 60.0, 80.0 \text{ kgf/cm}^2$ でのベントナイトのヤング率及び減衰定数を推定して利用した。物性データの詳細については表4.2.3-1に示す。

4. 2. 4 加振方法

加振方向は水平方向とし、試験において容器上で記録された最大加速度1240galの加振波形を用いて、加振開始から10秒間の解析を行った。

4. 2. 5 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に分割を行っ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) 解析用の拘束条件

分割前の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。拘束条件の詳細については図4.2.5-2に示す。

4. 2. 6 解析結果のまとめ

図4.2.6-1～4.2.6-5に試験結果と解析結果の応答加速度の比較を示す。各図の右上に示した入力波形図は試験において容器上で記録された加速度波形である。試験結果と解析結果の比較についてはオーバーパックと容器の半径方向の中間点A、オーバーパックと容器の軸方向の中間点Bとオーバーパック上の点Cにおいて軸方向（Y方向）の加速度を用いて行った。点Aと点Bについてはベントナイト中の点となっている。試験データに注目した場合、容器上の加速度、点Bの加速度、点Cの加速度はほぼ一致するが、点Aの加速度は他の点の1/6程度と極端に小さくなっている。容器とオーバーパック上の加速度がほぼ一致し剛体のような挙動を示していることから、点Aでの計測データの精度について検討を行う必要がある。次にスリーブ試験での記録された共振振動数と解析結果の一次固有振動数がほぼ一致したケース1の物性値を用いて解析を行った結果と試験結果の比較（図4.2.6-1）を行うと、波形そのものは類似しているが各点で得られた加速度は解析結果のほうが試験結果より7%～21%程度上回った。このため、ベントナイトのヤング率をパラメータにしてパラメータ解析を実施した。この結果ヤング率が増加するにつれて、試験値に近づく傾向がみられヤング率80kgf/cm²のケース4、ヤング率120kgf/cm²のケース5では試験結果に近い良好な結果が得られた。ただし、この2ケースでは一次固有振動数の値が、スリーブ試験の結果から大きく離れている。この原因について検討するため、図4.2.6-6に示す試験データのフーリエスペクトルを求めた。各点のフーリエスペクトルはほぼ一致しており、共振振動数とみられる67～68Hz付近で際立ったピークが表れた点は見当たらない。このことから、今後、今回の解析ケースでコードで使用しているモデルの適切性について判断を行うと同時に実験側においても①固有振動数計測の精度 ② 加速度計の精度等について再調査を行う必要がある。

4. 3 小型振動試験1～3に関する動的解析

4. 3. 1 概要

昨年度より3回実施された小型振動試験に対してその供試体のモデル化を行い、動的弾性解析を実施し、各々の試験結果と解析結果の比較を行った。

4. 3. 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相系で実施した。
- ② 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ③ 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 1.0×10^{-4} での値を用いた。

4. 3. 3 物性値

小型振動試験の1回目と3回目に関しては、ベントナイトのせん断弾性係数、減衰定数、乾燥重量密度は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, DT-24の値を引用した。ただし、2回目の小型振動試験においてはベントナイトの乾燥密度は 0.8gf/cm^3 であり、この乾燥密度での物性データは入手できなかった為、前記のサンプルのデータからベントナイト物性値を推定して利用した。物性データの詳細については表4.3.3-1に示す。

4. 3. 4 加振方法

加振方向は水平方向とし、試験において容器上で記録されたEL-Centro 地震波形、宮城沖地震波形、八戸地震波形、K-1地震波形を用いて、それぞれ加振開始から10秒間、30秒間、30秒間、15秒間の解析を行った。ただし、K-1地震波形は三回目の実験（実験3）においてのみ用いられたため、解析についても実験3のみを対象とした。

4. 3. 5 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に分割を行ったモデルにて解析を実施した。

（2）解析用の拘束条件

分割前の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。

4. 3. 6 解析結果のまとめ

図4.3.6-1～4.3.6-20に試験結果と解析結果の比較を示す。各図の右上に示した入力波形図は試験において容器上で記録された加速度波形であり、解析においてこの波形を入力加速度として用いた。試験結果と解析結果の比較についてはオーバーパック上の点A、オーバーパックと容器の半径方向の中間点B、オーバーパックと容器の軸方向の中間点Cにおいて軸方向（Y方向）の加速度を用いて行った。（図4.3.6-1 右上図参照）点Bと点Cについてはベントナイト中の計測点となっている。以下に各試験データと解析結果の比較についてまとめる。

（1） 第1回目の試験データと解析結果の比較

試験データについては点Aと容器上で記録された加速度波形はほぼ一致するがベントナイト中の点Bと点Cでは容器上で記録された加速度のそれぞれ64%、71%と小さくなっている。ただし、加速度フーリエスペクトルを比較すると容器上、点A、点B、点Cとも同様な波形を示している。ベントナイト中で低減される周波数領域は見られない。一方、解析結果に注目すると点A、点B、点Cともいずれの加速度も5%程度容器上の加速度より大きくなっている。解析結果ではA、B、Cの3点での加速度は試験データとは異なり一致している。加速度フーリエスペクトルについては、3点とも容器上で観測されたスペクトルと一致している。

（2） 第2回目の試験データと解析結果の比較

試験データについては点Aと点Cでの加速度は容器上で記録された加速度波形はほぼ一致するがベントナイト中の点Bでは容器上で記録された加速度よりそれぞれ20%程度と小さくなっている。ただし、加速度フーリエスペクトルを比較すると容器上、点A、点B、点Cとも同様な波形を示している。一方、解析結果に注目すると点A、点B、点Cともいずれの加速度も容器上の加速度とほぼ一致している。加速度フーリエスペクトルについては、3点とも容器上で観測されたスペクトルと一致している。

(3) 第3回目の試験データと解析結果の比較

試験データについては点Aと点Cでの加速度は容器上で記録された加速度とほぼ一致するがベントナイト中の点Bでは容器上で記録された加速度の約60%程度と小さくなっており、第2回目の試験と同様の傾向が見られる。

ただし、加速度フーリエスペクトルを比較すると他の試験同様、容器上、点A、点B、点Cとも同様な波形を示している。一方、解析結果に注目すると点A、点B、点Cともいずれの加速度も容器上の加速度より13%～28%程度大きくなっている。加速度フーリエスペクトルについては、3点とも容器上で観測されたスペクトル波形と一致している。

いずれの試験においても、ベントナイト中の一部の加速度が容器上の加速度より小さくなっている点については、波形そのもの及びフーリエスペクトル波形の変化がないこと、及び実験2と実験3でB点の加速度計を変更したところ点Bと他の点の加速度の差が小さくなったことから、再度加速度計の精度について、調査、検討を行う必要がある。また、第三回目の試験においては、若干解析結果が試験結果より大きくなっているが、このケースでは解析モデルにおいてベントナイト乾燥密度を 0.7gf/cm^3 としたが、実際の充填時においてはオーバーパック等の固定のために密度が 0.7gf/cm^3 より大きくなっている可能性が高いと考えられる。

4. 4 等価線形解析による試解析

4. 4. 1 概要

本年度機能追加を行った等価線形解析機能を用いて解析を行い、線形解析との比較を実施した。

4. 4. 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範囲は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。
- 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 1.0×10^{-4} での値を用いた。

4. 4. 3 物性値

ベントナイトに関する物性値は図4. 4. 3-1 に示すPNC 殿が動的三軸圧縮試験より得た乾燥密度 0.70gf/cm^3 の供試体(DT-21)のせん断弾性係数および減衰定数を利用した。線形解析においてはひずみが 10^{-4} の場合のサンプルDT-21の値を引用した。詳細、その他の材質の物性値については表4. 4. 3-1 に示す。

4. 4. 4 加振方法

加振方向は水平方向とし、入力地震波は前述の小型振動試験の内、2度目の試験において用いられたEL-Centro 地震波形の一部を利用した。

4. 4. 5 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に分割を行ったモデルにて解析を実施した。

(2) 解析用の拘束条件

分割前の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。

4. 4. 6 解析結果のまとめ

小型振動試験のケースでは振動試験の際、供試体に生じるひずみが 10^{-5} 以下になるため、ベントナイトの非線形特性は顕著にはあらわれない。この理由から図4.4.6 に示すように線形解析での解析結果と等価線形解析での解析結果はほぼ一致している。本年度のコード開発で付加した砂地盤の過剰間隙水圧評価のための実験式を用いたところ、ひずみが小さなことから、間隙水圧の上昇はほぼ0となった。

表4.1.3-1 物性データ

材料	物性	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
ベントナイト	ヤング率(kgf/cm ²) *	40	50	60	80	120
	ポアソン比	0.4	-	-	-	-
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	0.70	0.725	0.75	0.80	1.0
オーバークック	ヤング率(kgf/cm ²)	2.1×10 ⁶	-	-	-	-
	ポアソン比	0.3	-	-	-	-
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	7.77	-	-	-	-
珪砂	ヤング率(kgf/cm ²)	200	-	-	-	-
	ポアソン比	0.49	-	-	-	-
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	2.03	-	-	-	-

(注*) ヤング率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4.1.5-1 実固有値解析結果

解析ケース	一次固有振動数(Hz)
ケース1	69.56
ケース2	77.63
ケース3	84.53
ケース4	95.61
ケース5	114.11
試験結果	67~68

表4.2.3-1 物性データ

材料	物性	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	備 考
ベントナイト	ヤング率(kgf/cm ²) *	40	50	60	80	120	PNC 殿実験データ参照
	ポアソン比	0.4	—	—	—	—	PNC 殿H.3 レポート参照
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	0.70	0.725	0.75	0.80	1.0	PNC 殿実験データ参照
	減衰定数	0.025	—	—	—	—	PNC 殿実験データ参照
オーバーパック	ヤング率(kgf/cm ²)	2.1×10 ⁹	—	—	—	—	機械工学便覧参照
	ポアソン比	0.3	—	—	—	—	機械工学便覧参照
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	7.77	—	—	—	—	機械工学便覧参照
珪 砂	ヤング率(kgf/cm ²)	200	—	—	—	—	電中研報告381023参照
	ポアソン比	0.49	—	—	—	—	電中研報告381023参照
	乾燥重量密度(gf/cm ³)	2.03	—	—	—	—	電中研報告381023参照

(注 *) ヤング率 Eはせん断弾性係数G より $E = 2(1 + \nu)G$ より算出した。

表4.3.3-1 実験データ解析で用いた各物性値

項 目		実 験 デ ー タ 解 析			備 考
		実験データ解析1	実験データ解析2	実験データ解析3	
ベントナイト	せん断弾性係数(kgf/cm ²)	1.50×10^{-1}	2.85×10^{-1}	4.30×10^{-1}	PNC殿試験データDT-22, 24参照* ¹
	ポアソン比	0.40	⇐	⇐	PNC殿平成3年度レポート参照
	重量密度(乾燥状態)(kgf/cm ³)	1.42×10^{-3}	1.52×10^{-3}	1.63×10^{-3}	PNC殿試験データDT-22, 24参照* ¹
	減衰定数	0.025	⇐	⇐	PNC殿試験データDT-22, 24参照* ¹
オーバーパック	せん断弾性係数(kgf/cm ²)	8.10×10^5	⇐	⇐	機械工学便覧参照
	ポアソン比	0.30	⇐	⇐	機械工学便覧参照
	重量密度(kgf/cm ³)	7.77×10^{-3}	⇐	⇐	打合せ資料(II.5.3.18)参照* ²

(注*1) 実験データ解析2でのベントナイト物性データは入手できなかったため、上記のサンプルDT-22, DT-24より推定した。

(注*2) IHI 殿より提供された資料

表4.4.3-1 等価線形解析で用いた各物性値

項	目	ひずみ	解 析	
			等価線形解析	線形解析
ベントナイト	初期せん断弾性係数 (kgf/cm ²)	-	4.20×10^{-1}	4.20×10^{-1}
	正規化せん断弾性係数	1.0×10^{-4}	1.00	1.00
		1.0×10^{-5}	1.00	1.00
		1.0×10^{-4}	0.88	1.00
		8.0×10^{-5}	0.83	1.00
		3.0×10^{-3}	0.77	1.00
		9.0×10^{-2}	0.71	1.00
		7.0×10^{-2}	0.60	1.00
		1.0×10^{-2}	0.48	1.00
		7.0×10^{-1}	0.23	1.00
	減衰定数	1.0×10^{-6}	0.015	0.015
		1.0×10^{-5}	0.015	0.015
		1.0×10^{-4}	0.025	0.015
		8.0×10^{-3}	0.033	0.015
		3.0×10^{-3}	0.075	0.015
		9.0×10^{-2}	0.075	0.015
		7.0×10^{-2}	0.095	0.015
		1.0×10^{-2}	0.138	0.015
		7.0×10^{-1}	0.265	0.015
	ポアソン比		0.40	↔
重量密度 (乾燥状態) (kgf/cm ³)		1.42×10^{-3}	1.42×10^{-3}	
オーバーバック	せん断弾性係数 (kgf/cm ²)		8.10×10^5	↔
	ポアソン比		0.30	↔
	重量密度 (kgf/cm ³)		7.77×10^{-3}	↔

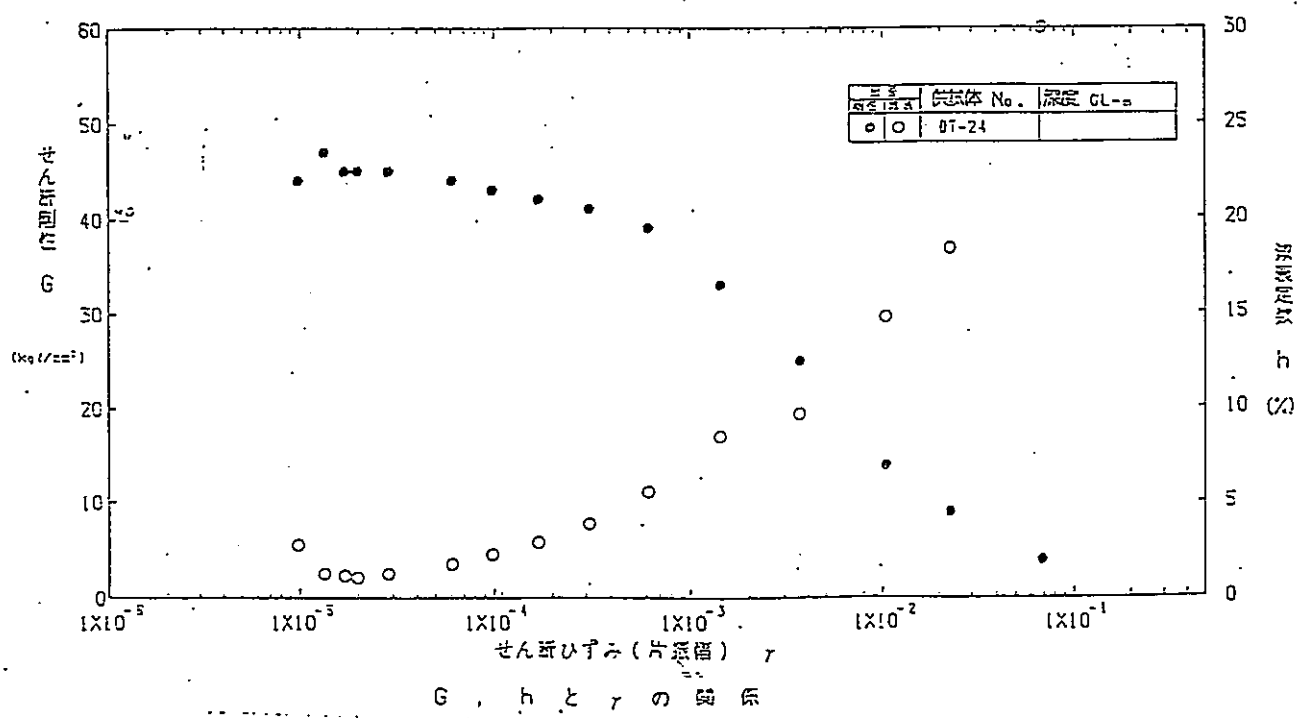
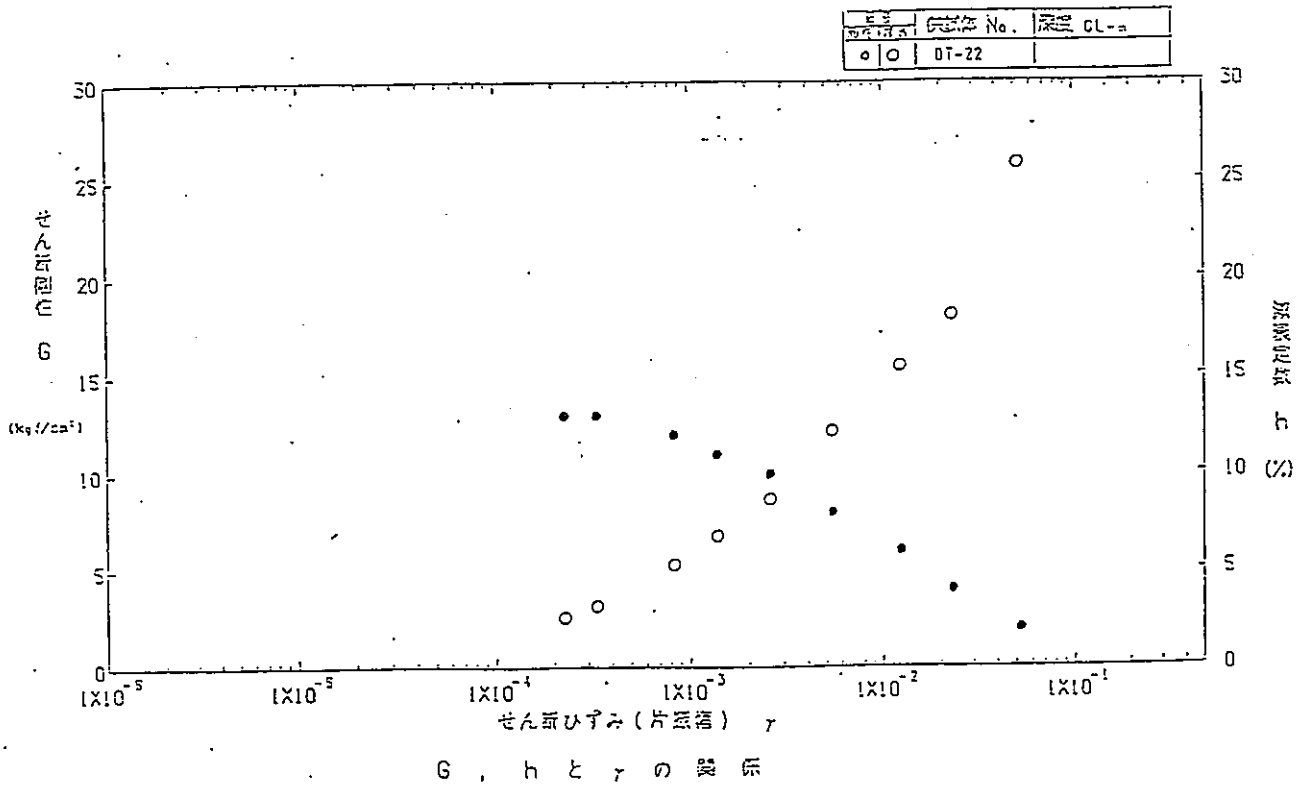


図4.1.3-1 ベントナイトのせん断弾性係数～ひずみ、減衰定数～ひずみの関係

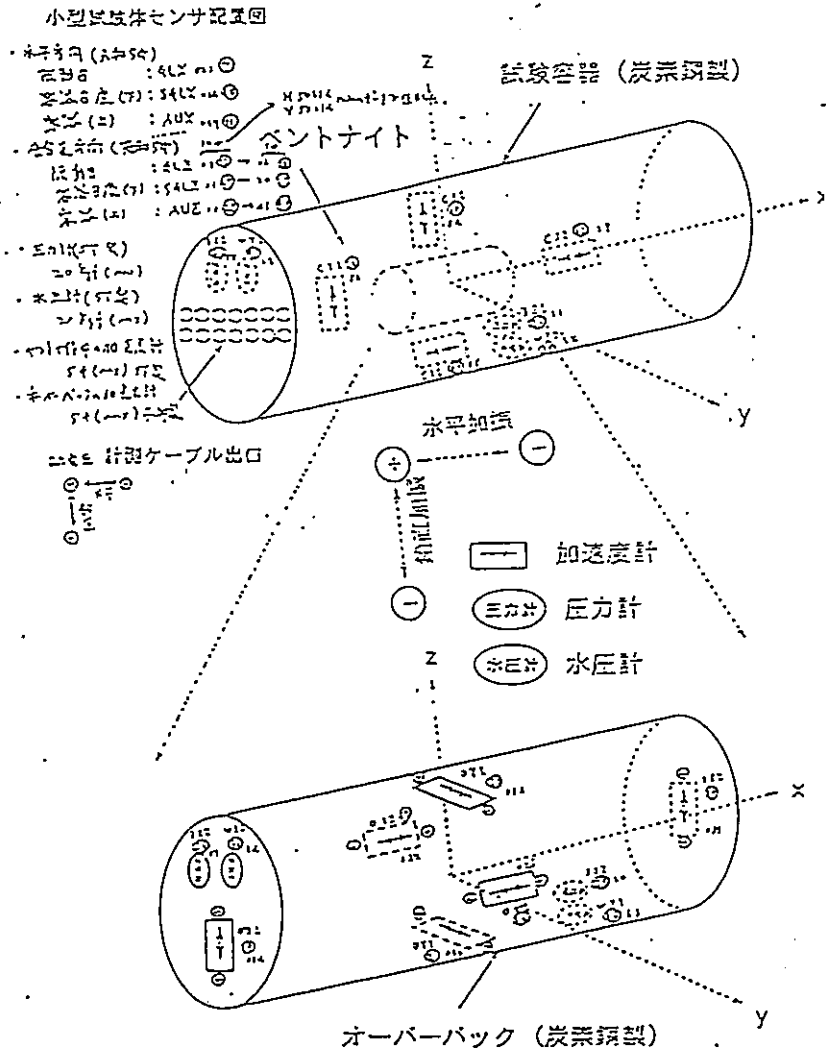


図4.1.4-1 計測機器の配置

節点数1469
要素数1344

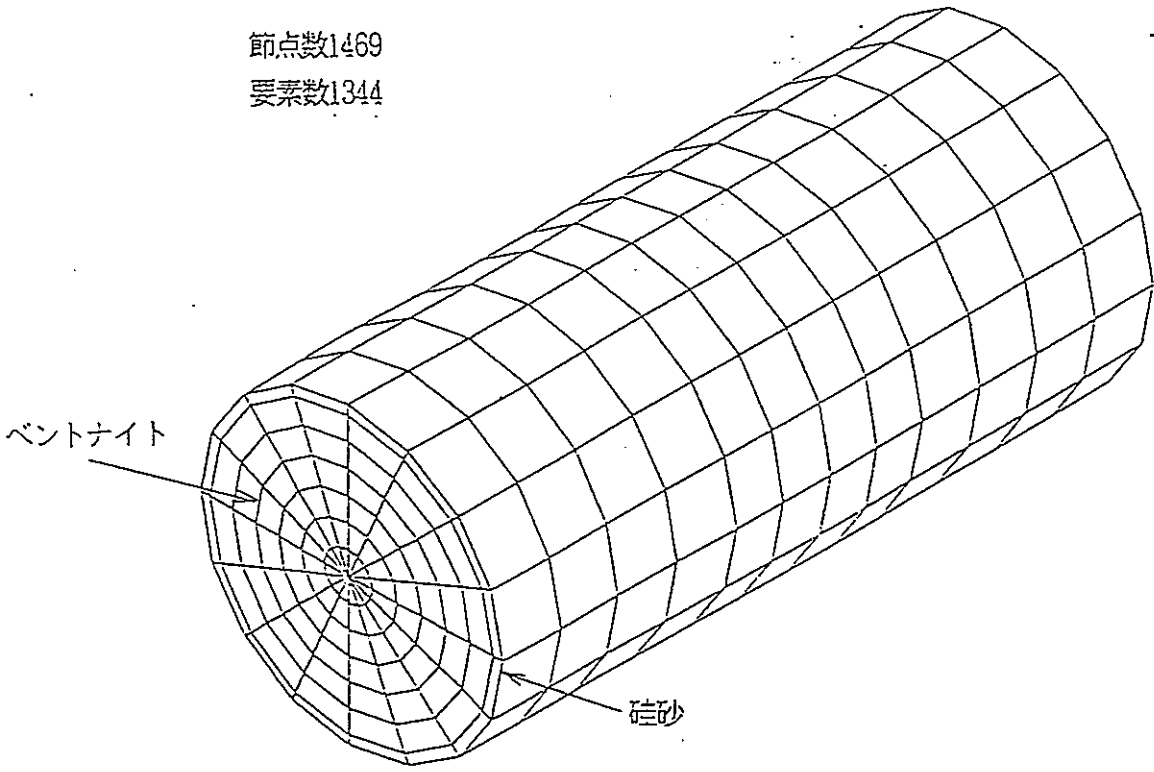


図4.1.4-1 解析用モデル

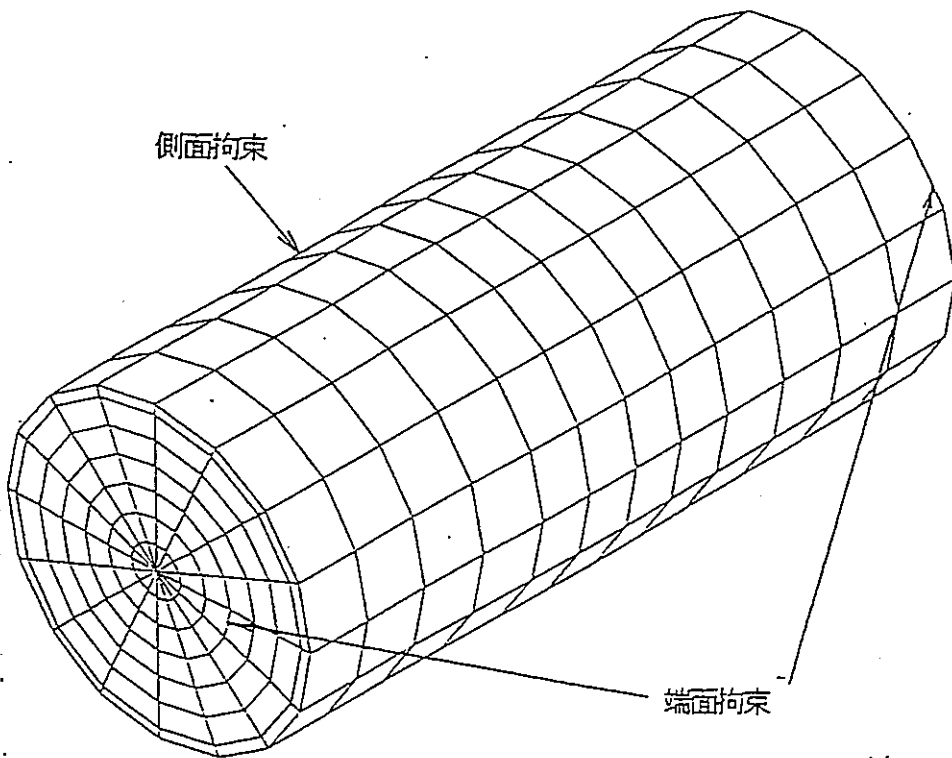


図4.1.4-2 拘束条件

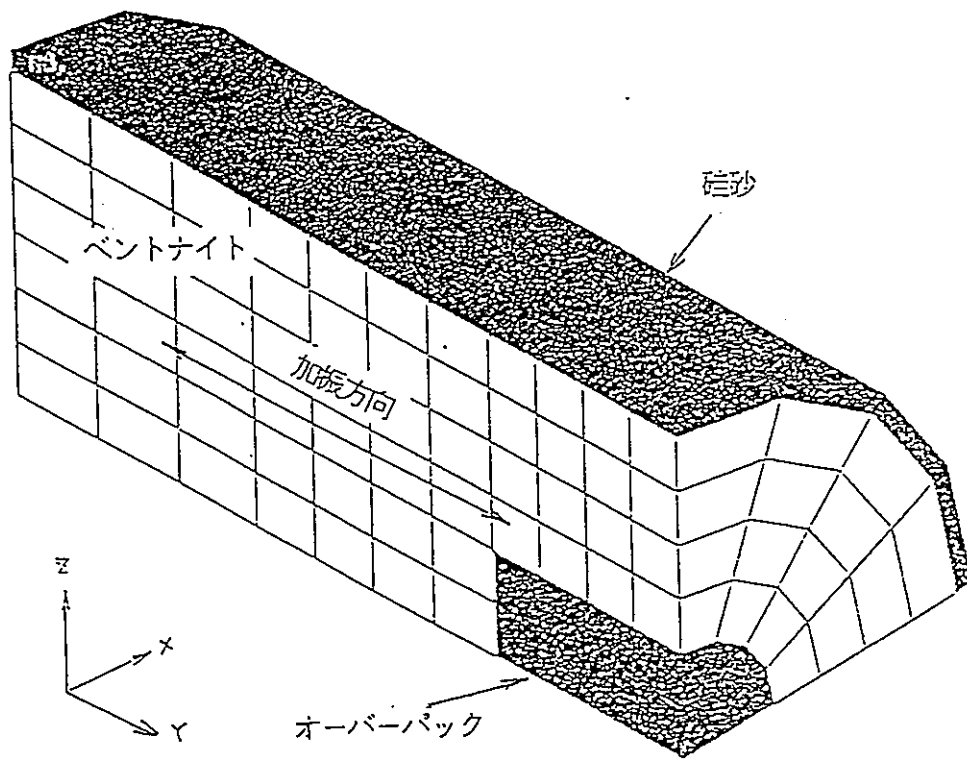


図4.2.5-1 解析用モデル

端面では3方向とも拘束

側面については3方向とも拘束

$Y=0$ 面ではX, Z軸方向の拘束

$X=0$ 面ではX軸方向のみ拘束

$Z=0$ 面ではZ軸方向のみ拘束

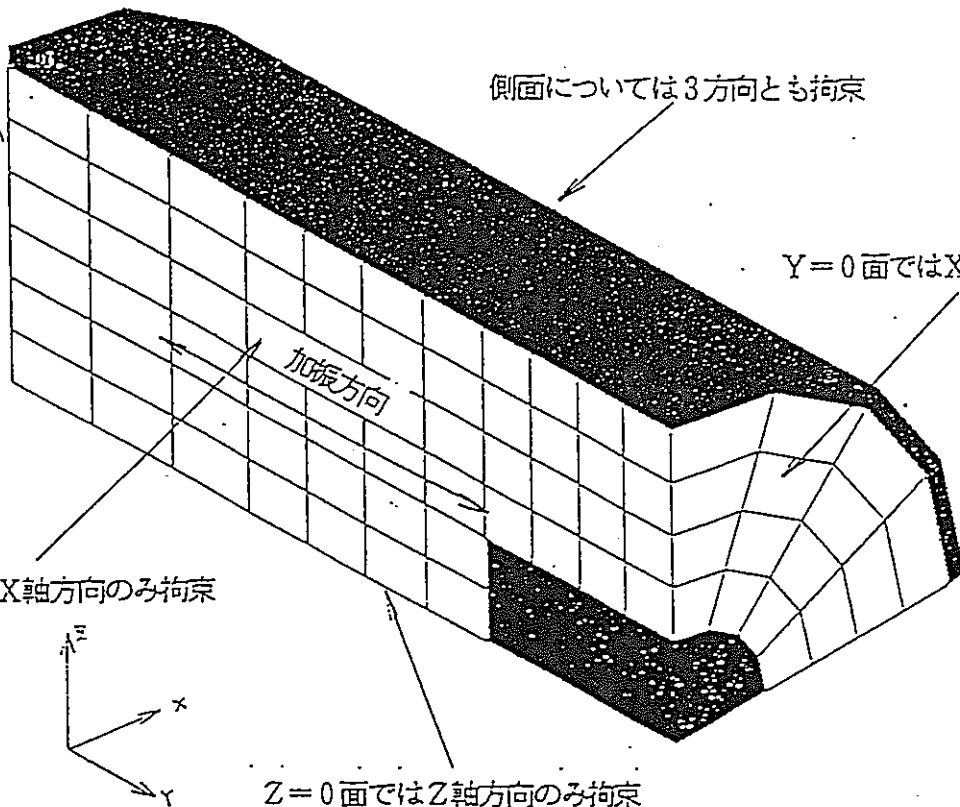


図4.2.5-2 拘束条件

一次固有振動数 69.56Hz

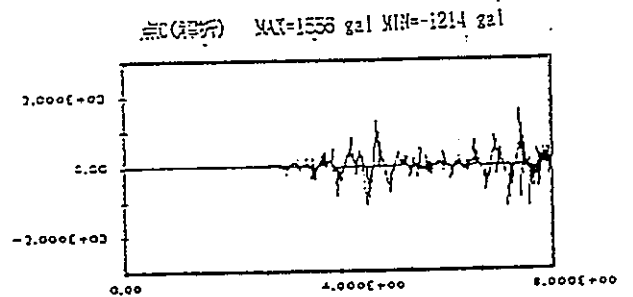
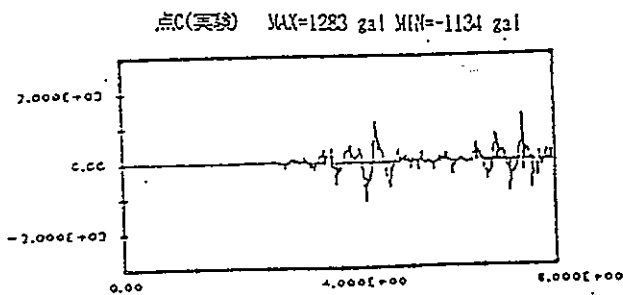
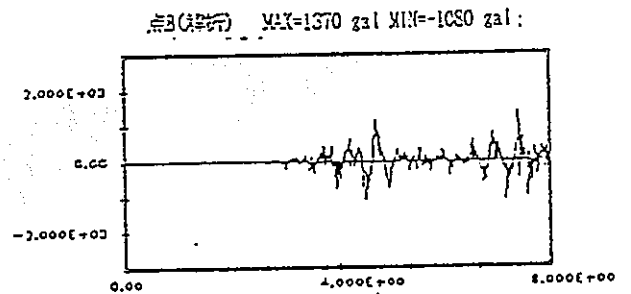
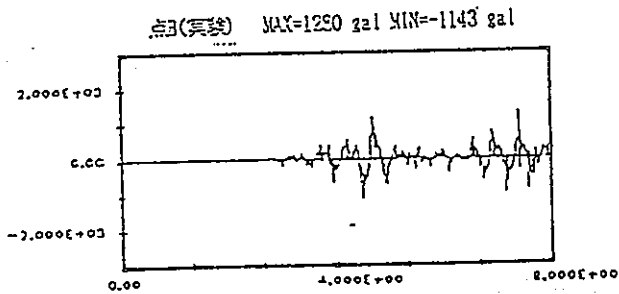
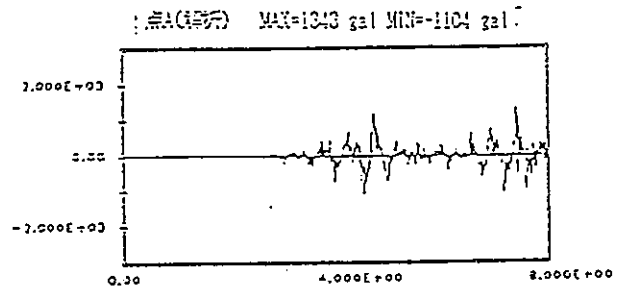
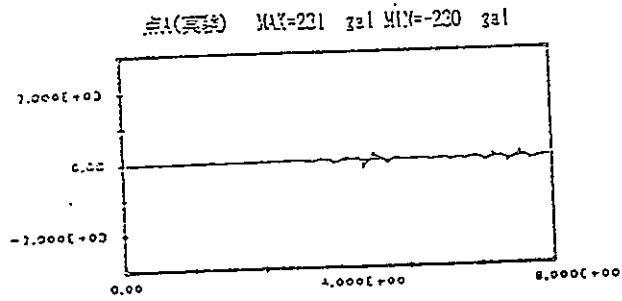
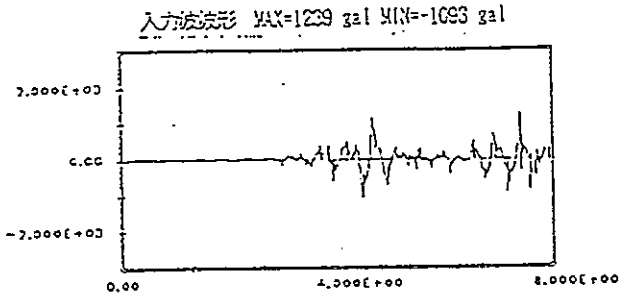
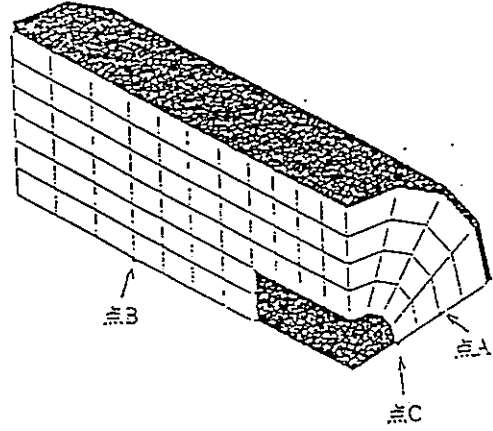
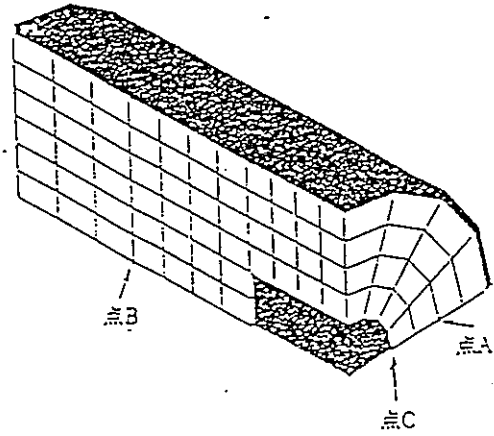
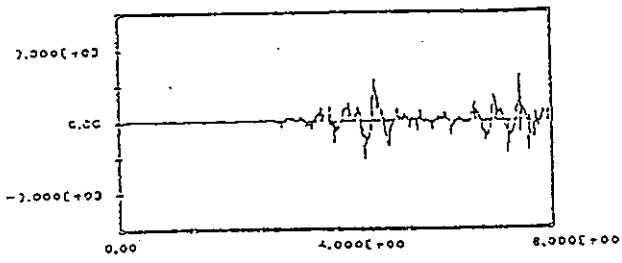


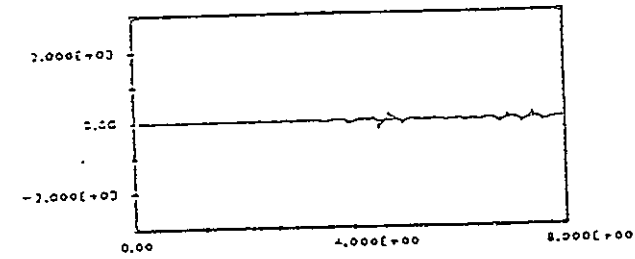
図4.2.6-1 実験データと解析ケース1の比較

一次固有振動数 77.63Hz

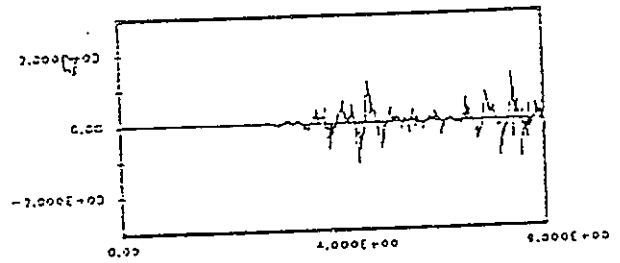
入力波形 MAX=1229 gal MIN=-1093 gal



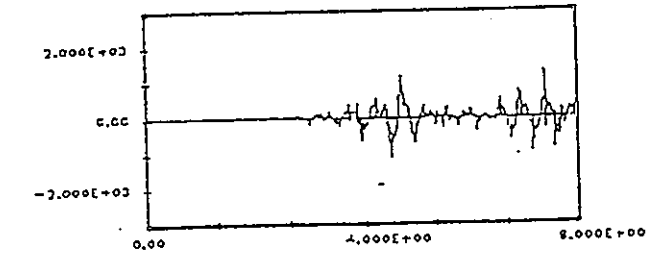
点A(実験) MAX=231 gal MIN=-230 gal



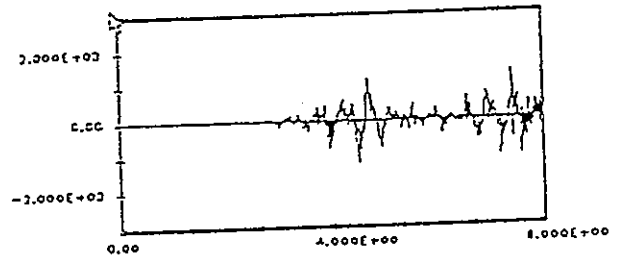
点A(解析) MAX=1305 gal MIN=-1134 gal



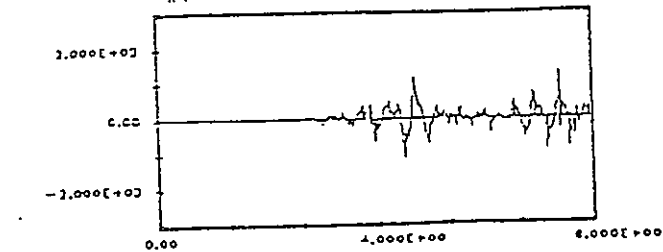
点B(実験) MAX=1280 gal MIN=-1143 gal



点B(解析) MAX=1316 gal MIN=-1183 gal



点C(実験) MAX=1283 gal MIN=-1134 gal



点C(解析) MAX=1482 gal MIN=-1363 gal

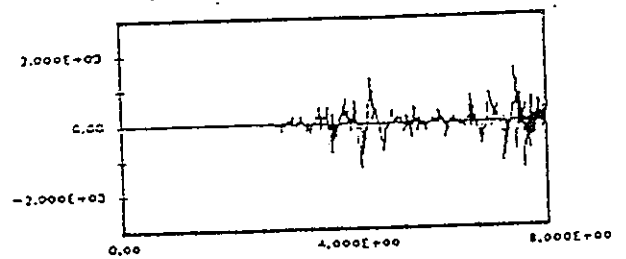


図4.2.6-2 実験データと解析ケース2の比較

一次固有振動数 84.53Hz

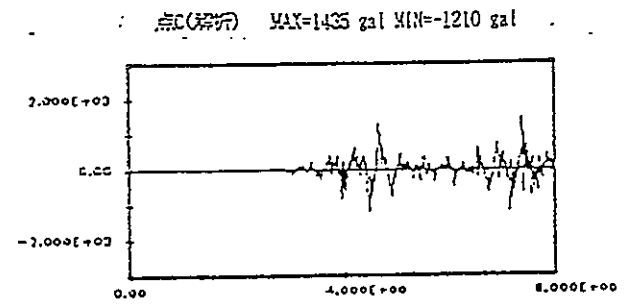
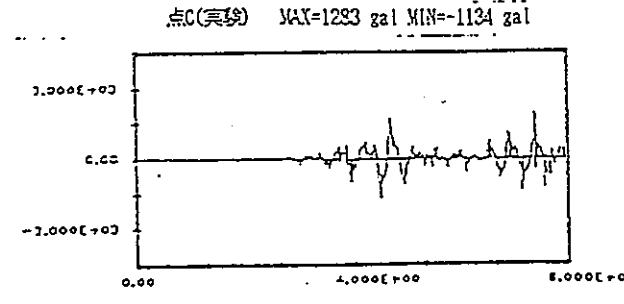
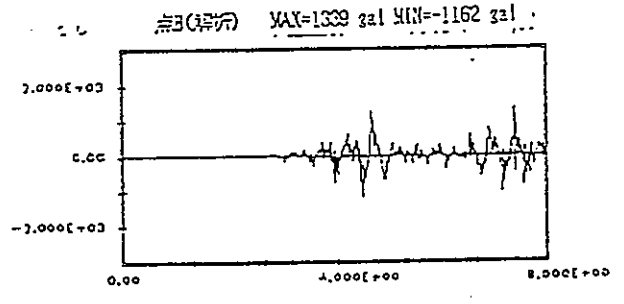
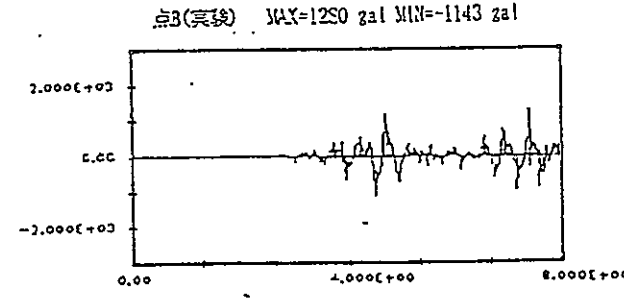
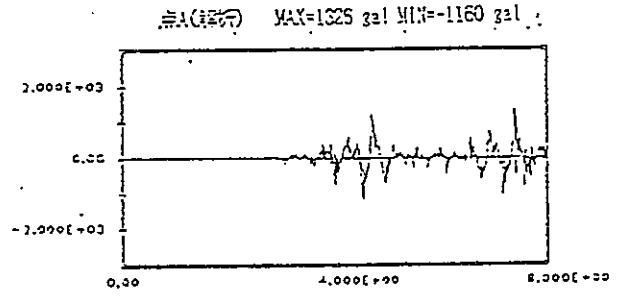
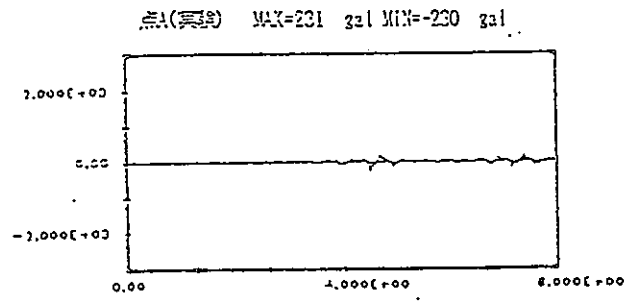
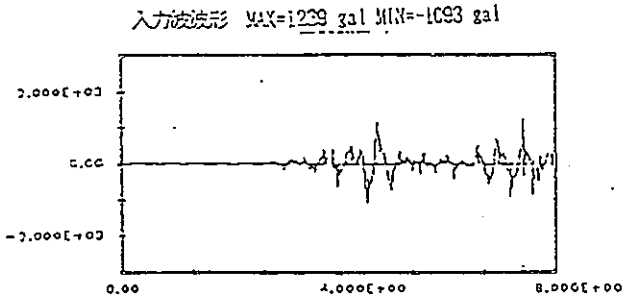
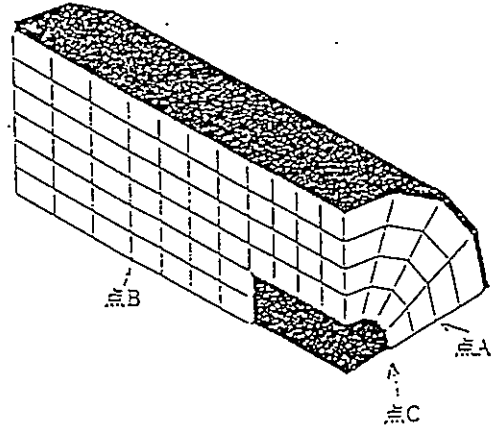
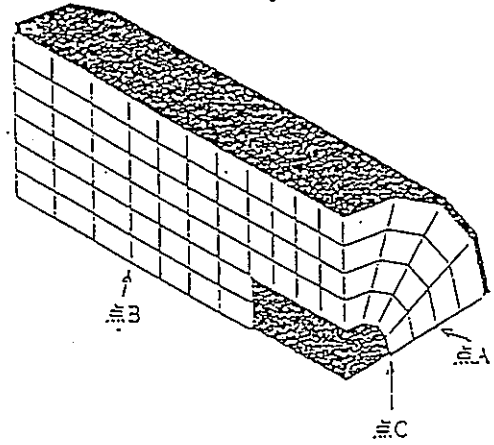
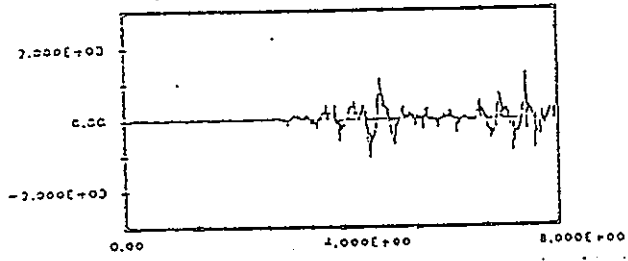


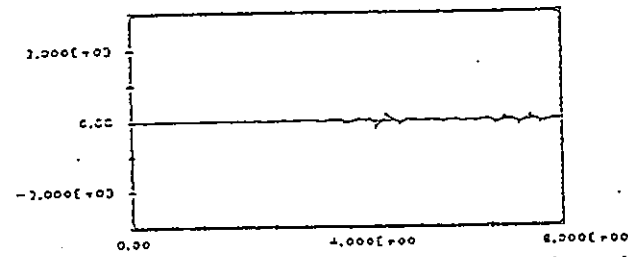
図4.2.6-3 実験データと解析ケース3の比較

一次固有振動数 95.61Hz

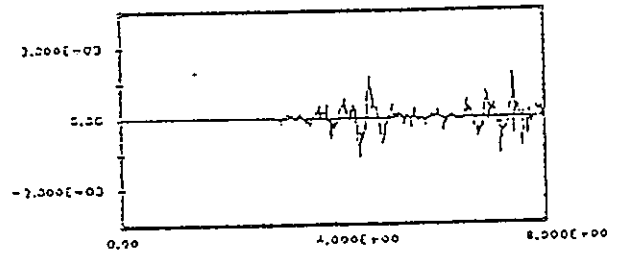
入力波形状 MAX=1239 gal MIN=-1093 gal



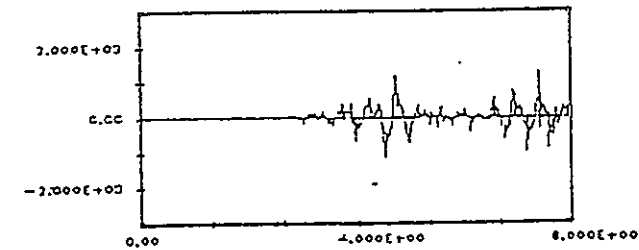
点A(実験) MAX=231 gal MIN=-230 gal



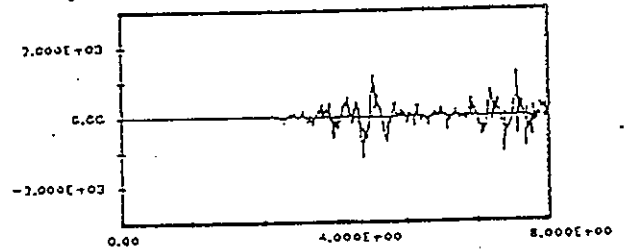
点A(解析) MAX=1265 gal MIN=-1136 gal



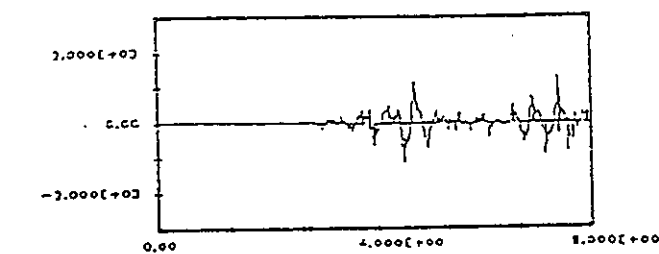
点B(実験) MAX=1280 gal MIN=-1143 gal



点B(解析) MAX=1241 gal MIN=-1184 gal



点C(実験) MAX=1283 gal MIN=-1134 gal



点C(解析) MAX=1281 gal MIN=-1132 gal

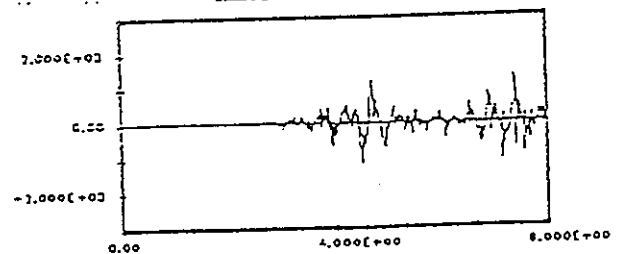
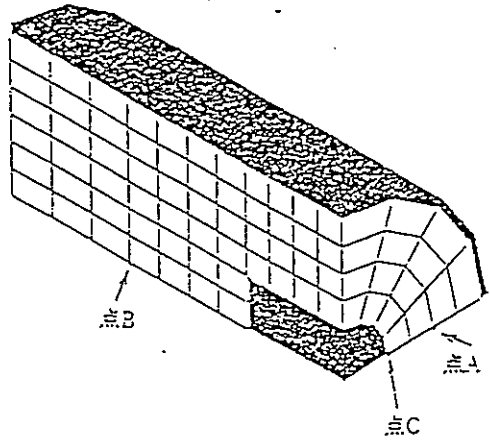
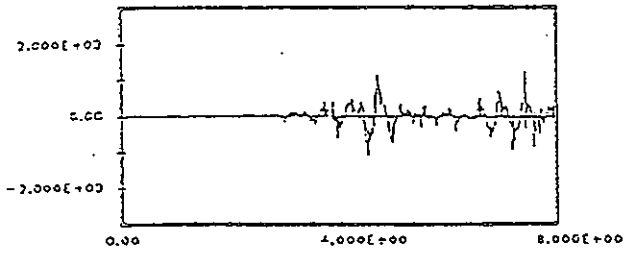


図4.2.6-4 実験データと解析ケース4の比較

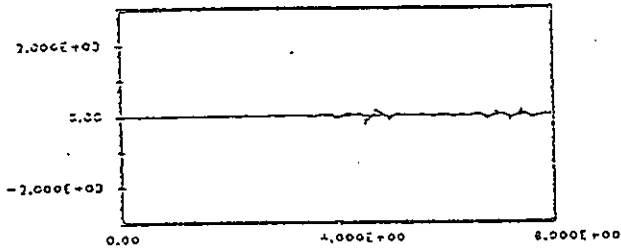
一次固有振動数 114.11Hz



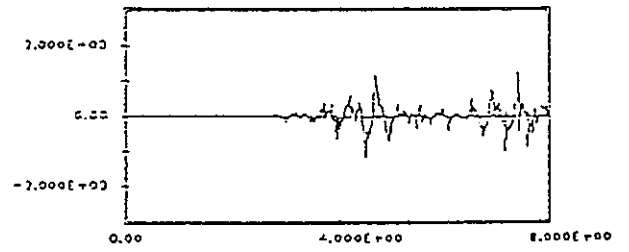
入力波形 MAX=1239 gal MIN=-1093 gal



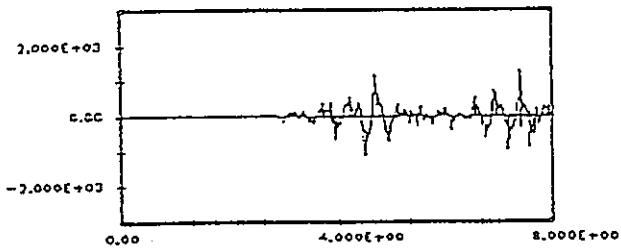
点A(実験) MAX=231 gal MIN=-230 gal



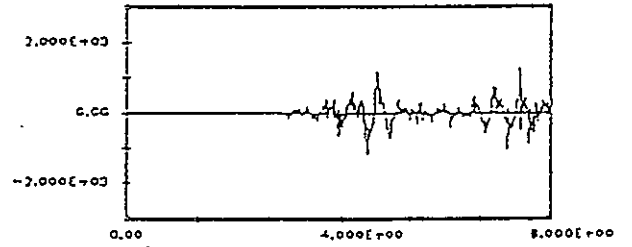
点A(解析) MAX=1242 gal MIN=-1164 gal



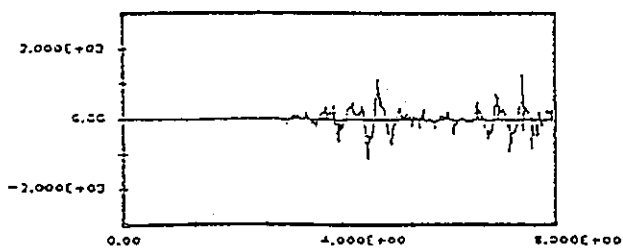
点B(実験) MAX=1290 gal MIN=-1143 gal



点B(解析) MAX=1220 gal MIN=-1176 gal



点C(実験) MAX=1293 gal MIN=-1134 gal



点C(解析) MAX=1290 gal MIN=-1203 gal

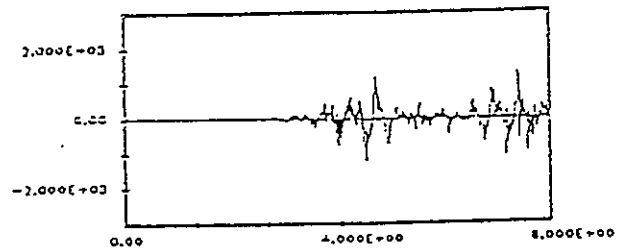


図4.2.6-5 実験データと解析ケース5の比較

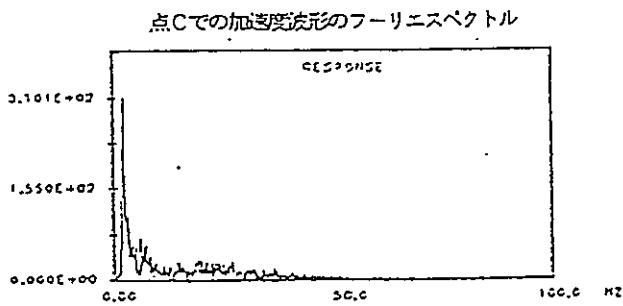
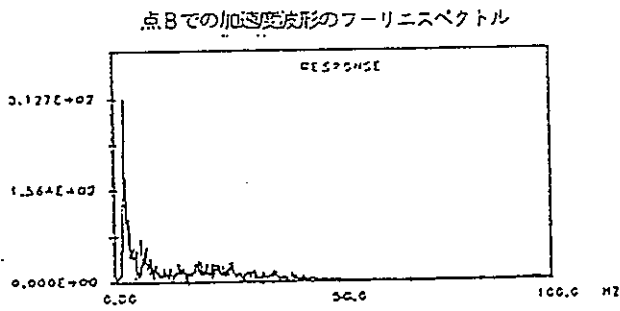
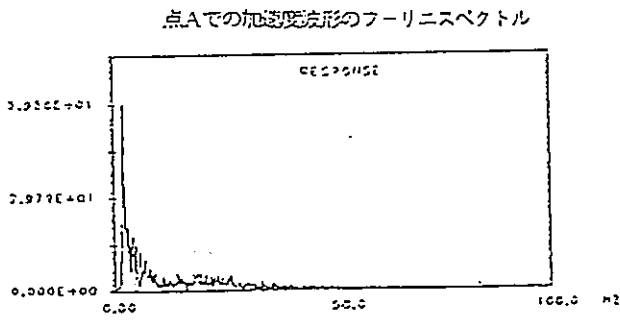
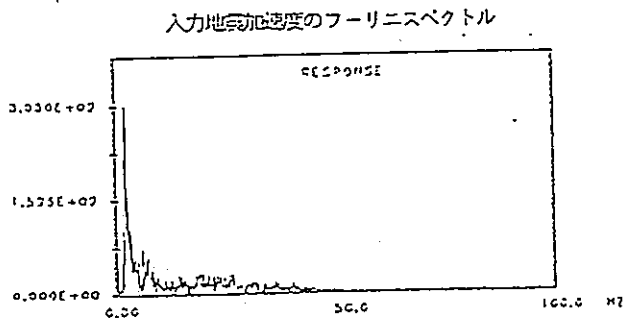
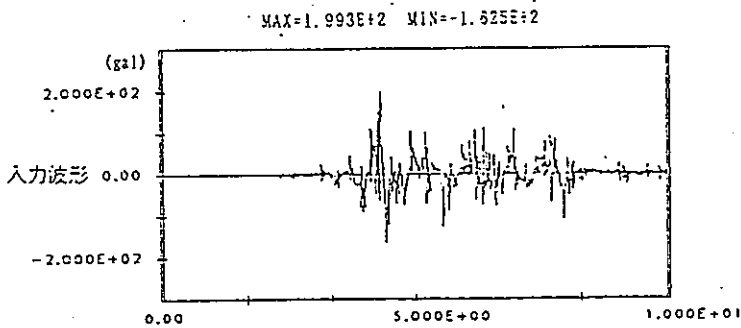
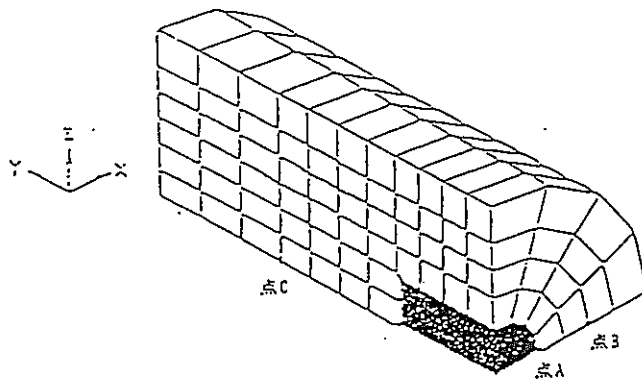
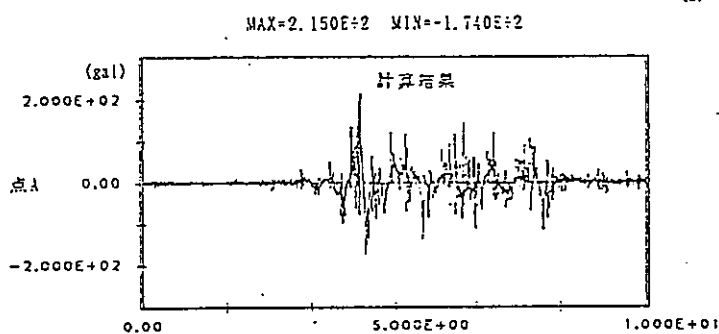


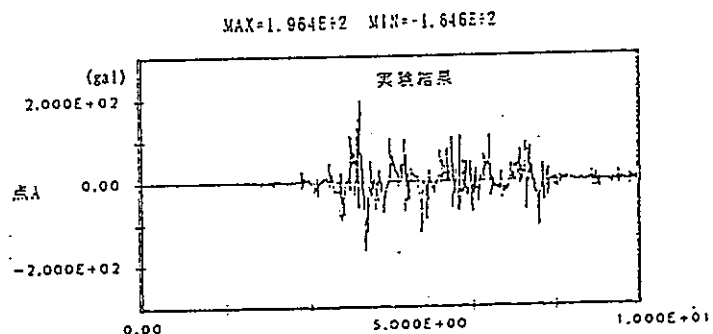
図4.2.6-6 各点でのフーリエスペクトルの比較



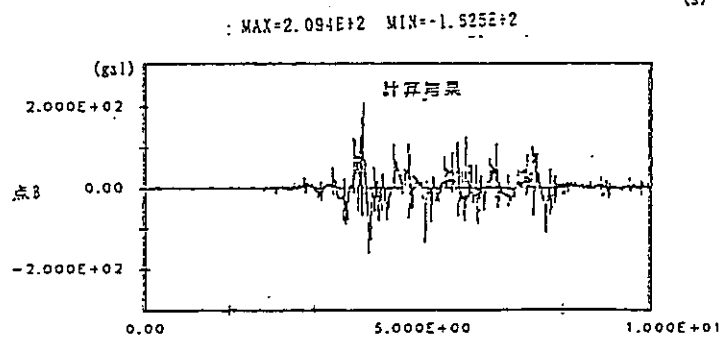
(s)



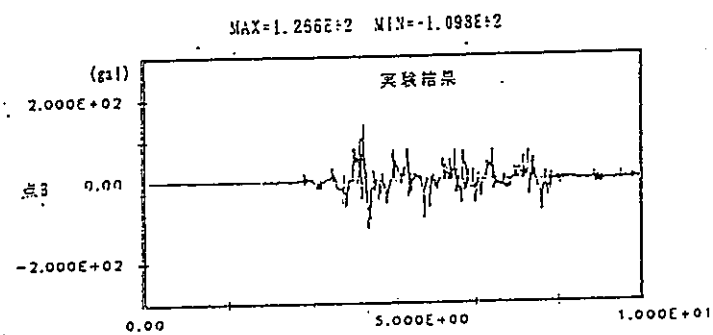
(s)



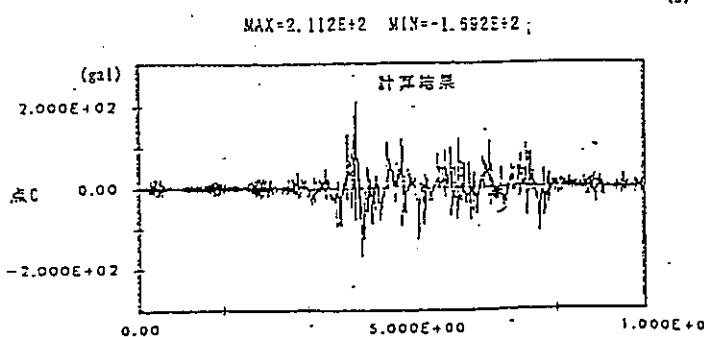
(s)



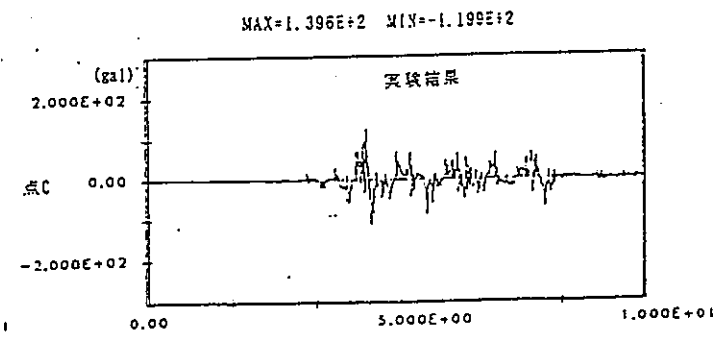
(s)



(s)



(s)



(s)

図4.3.6-1 EL-Centro 地震波による実験データ解析1
(加速度時刻応答波形の比較)

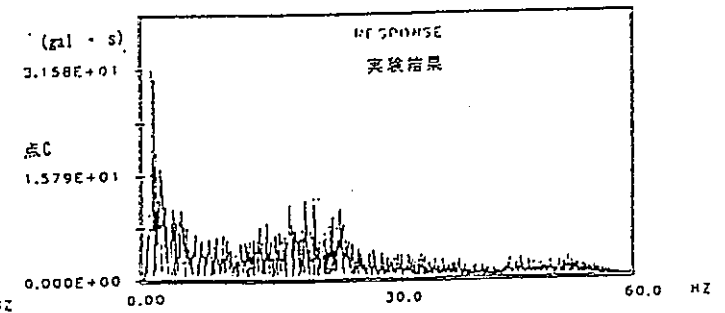
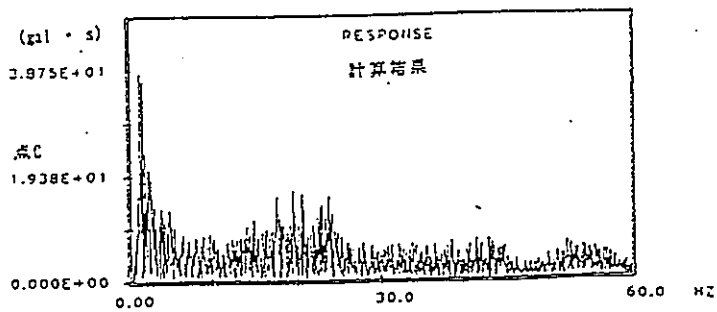
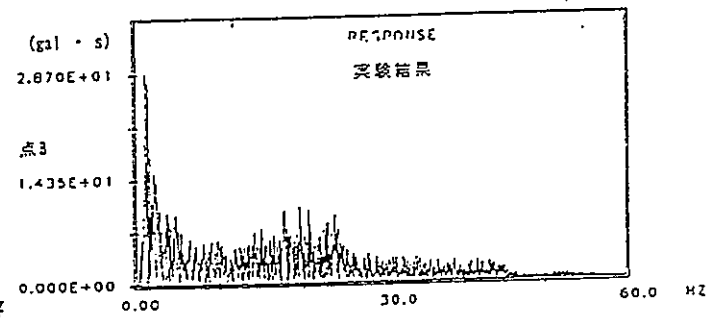
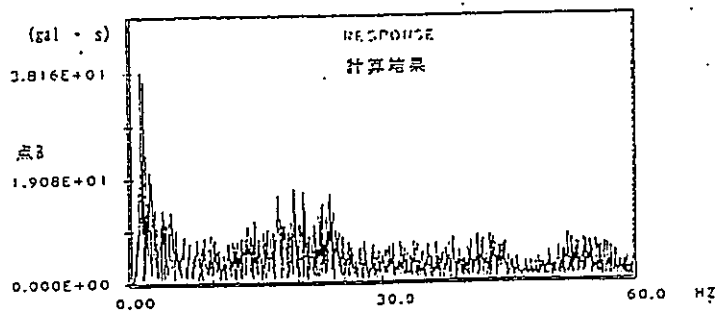
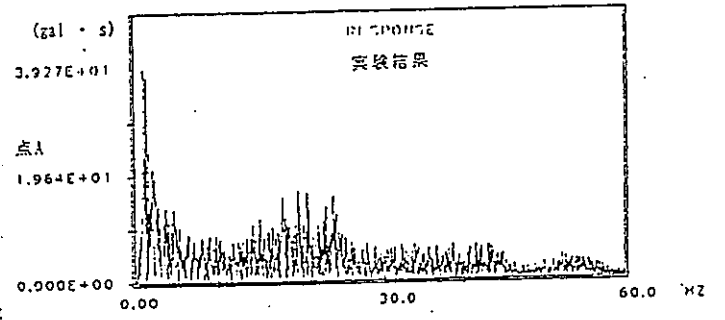
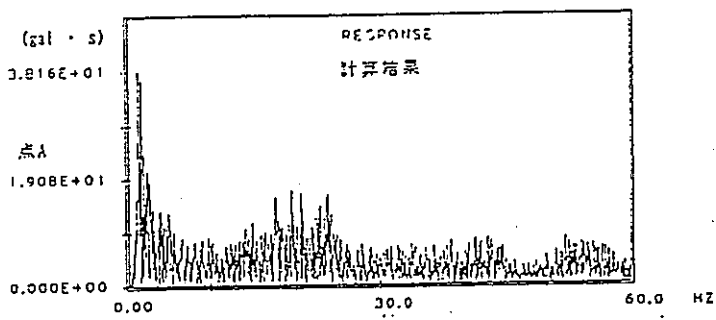
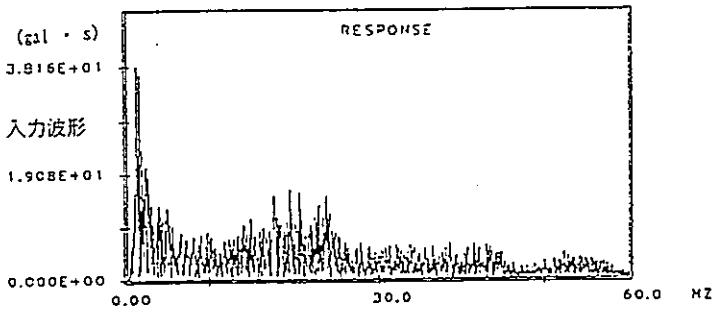
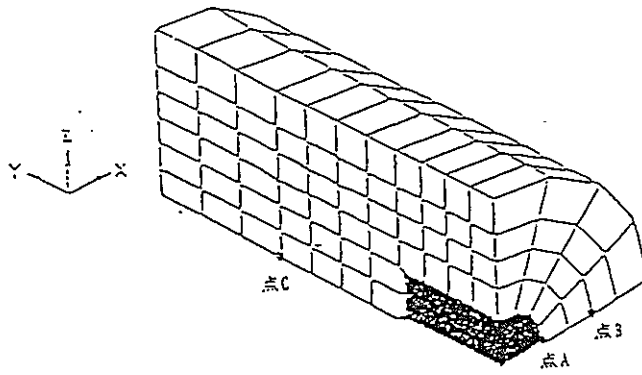


図4.3.6-2 EL-Centro 地震波による実験データ解析1
(加速度フーリエスペクトルの比較)

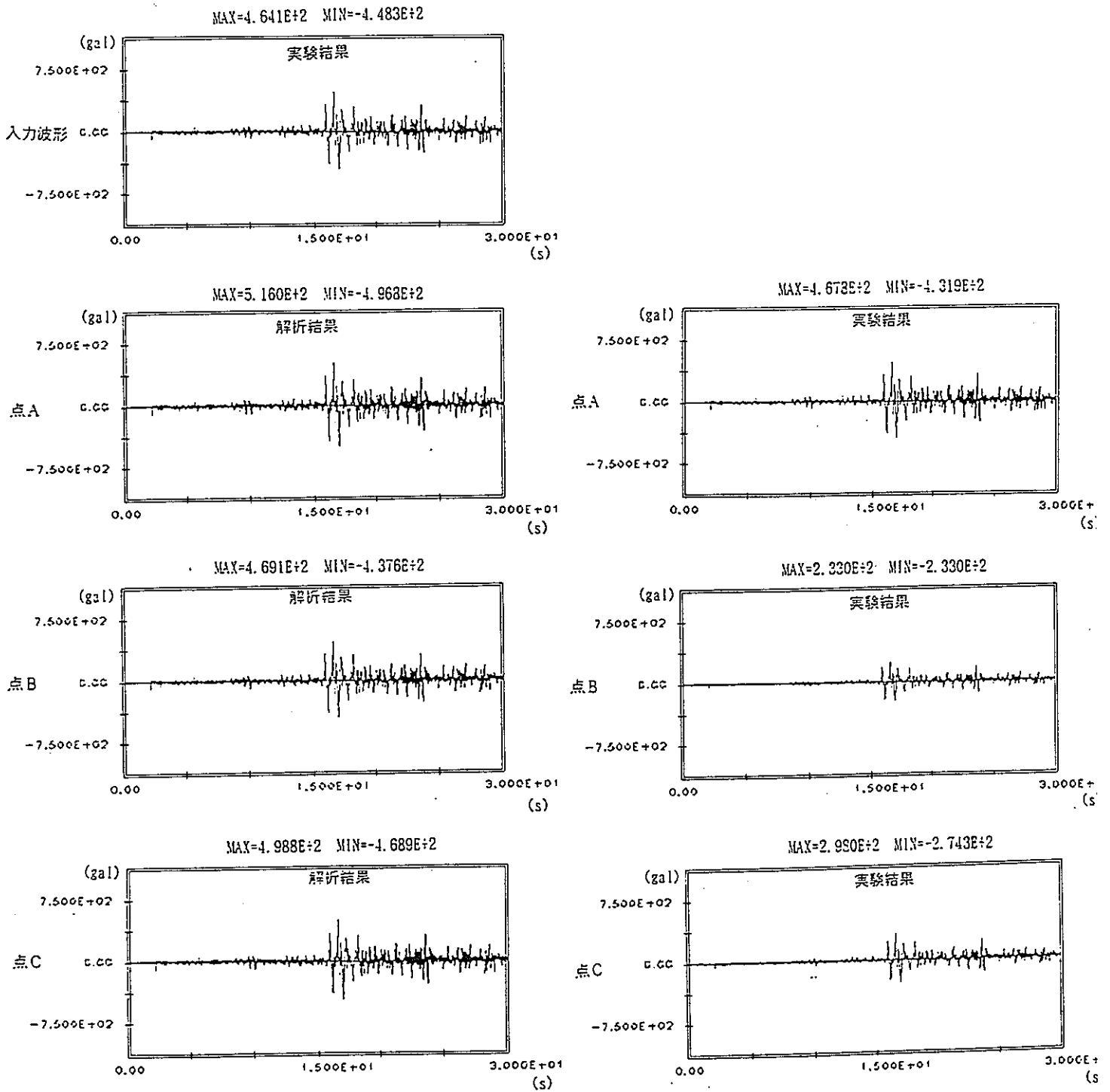
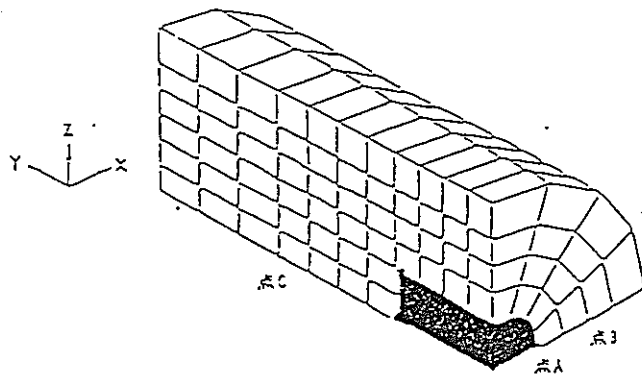


図4.3.6-3 宮城沖地震波による実験データ解析1
(加速度時刻応答波形の比較)

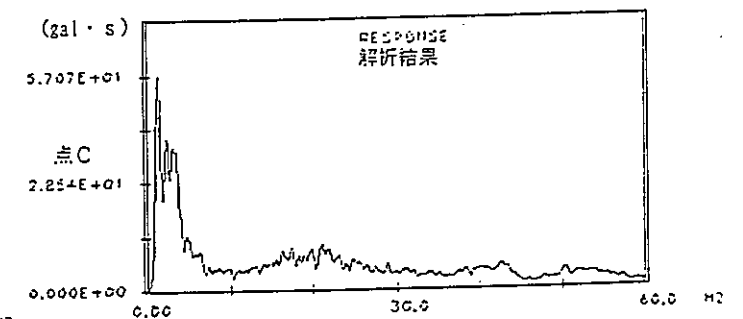
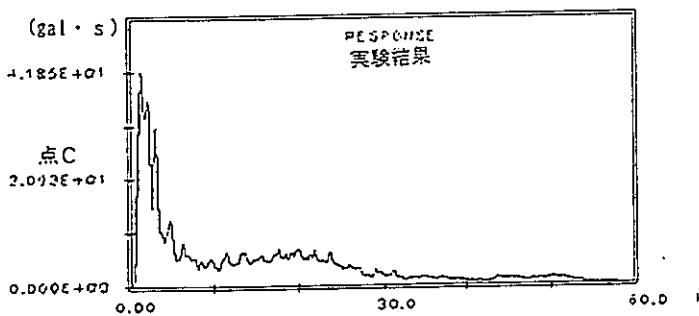
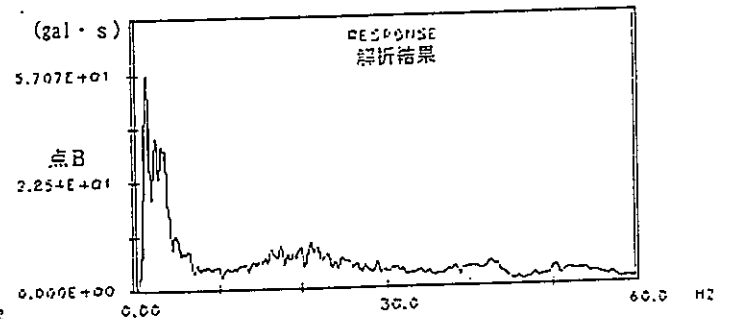
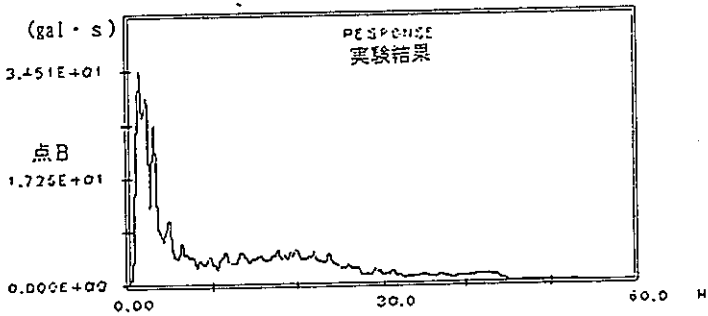
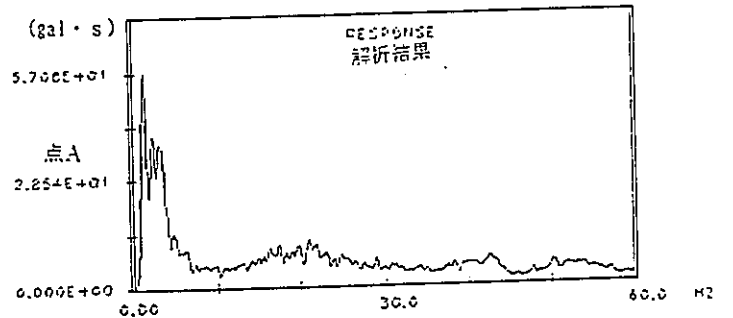
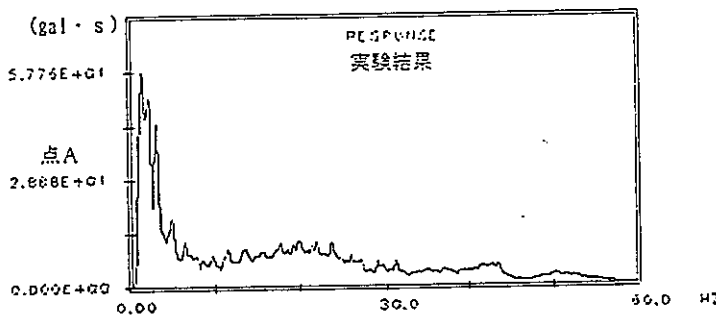
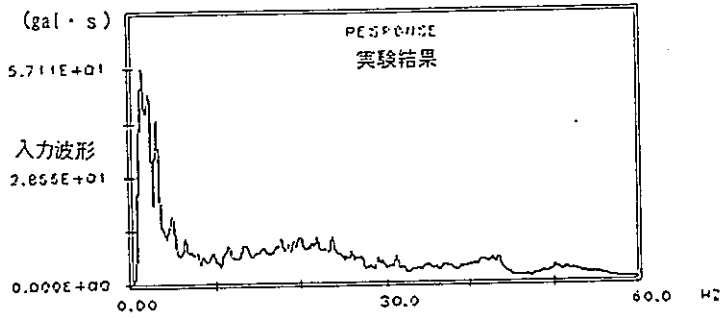
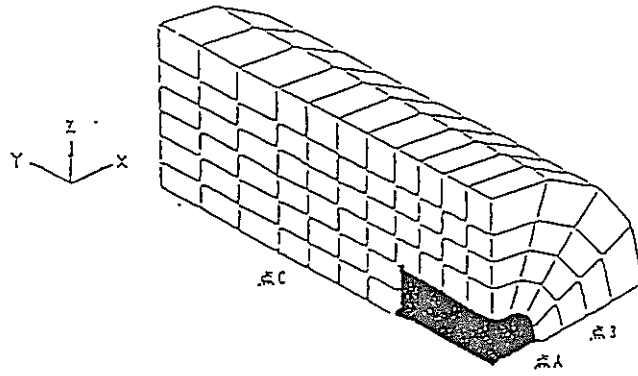


図4.3.6-4 宮城沖地震波による実験データ解析1
(加速度フーリエスペクトルの比較)

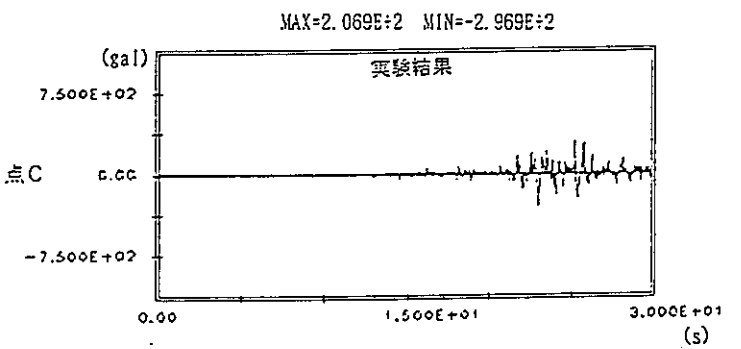
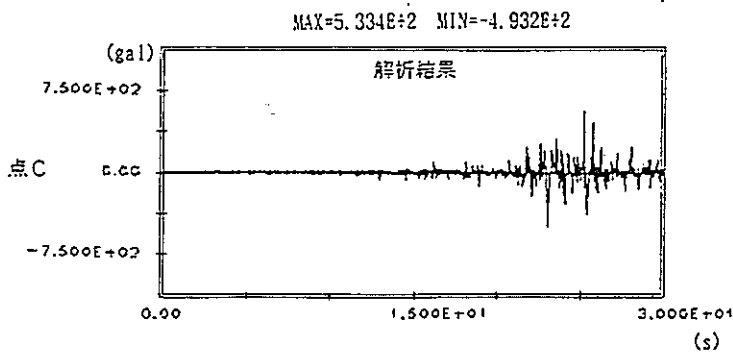
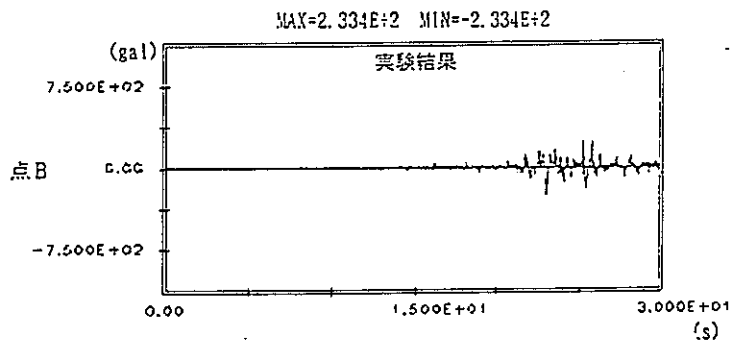
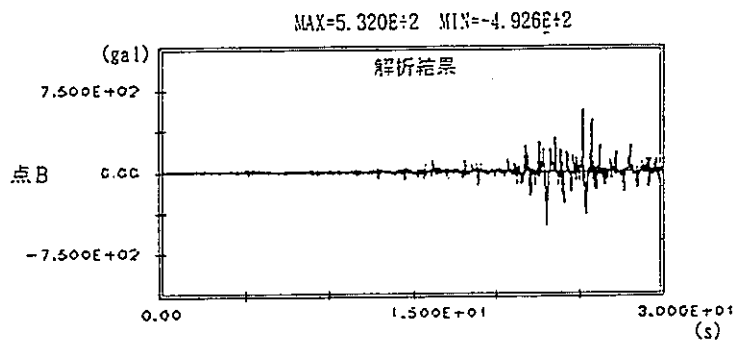
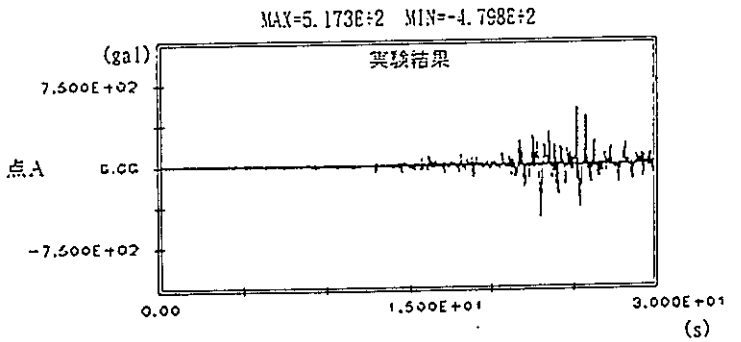
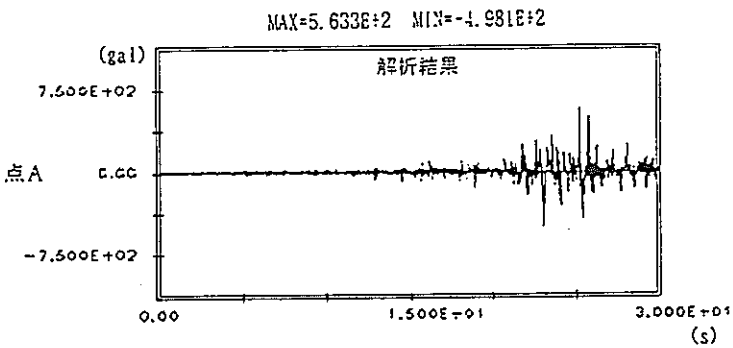
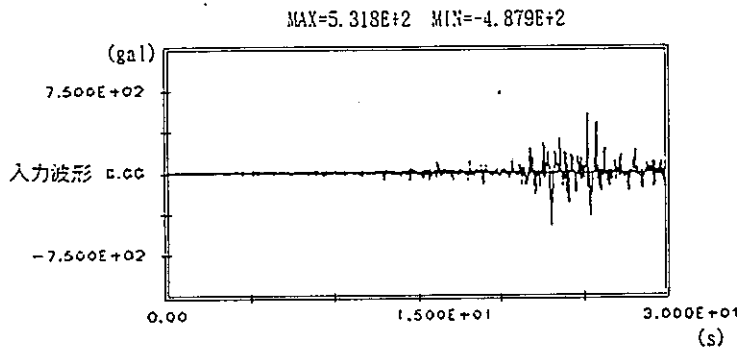
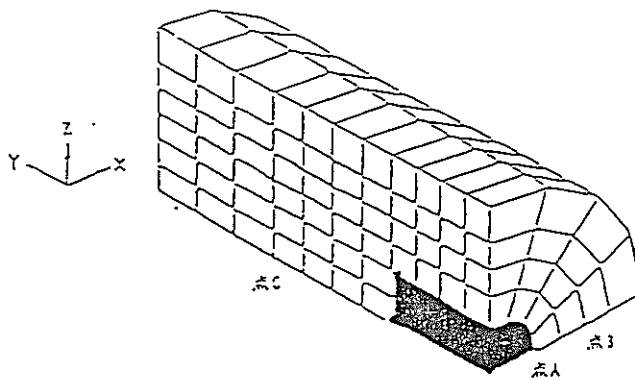


図4.3.6-5 八戸地震波による実験データ解析1
(加速度時刻応答波形の比較)

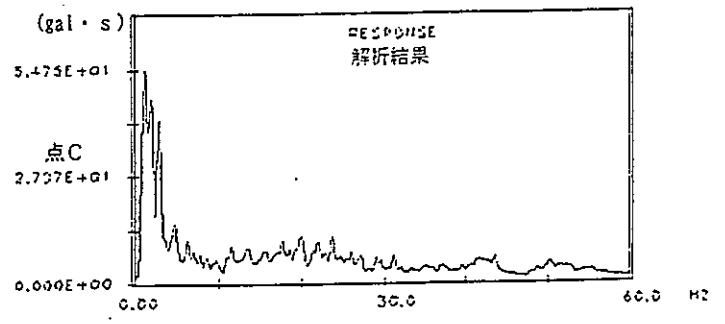
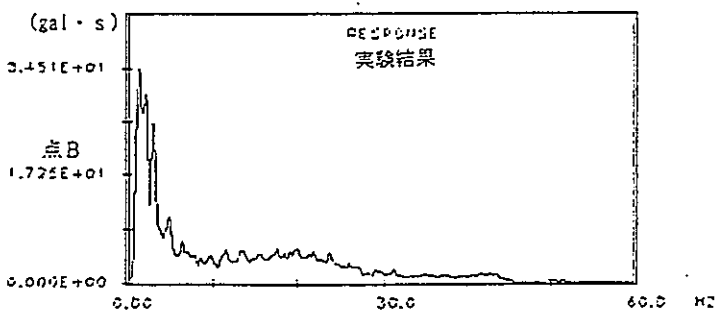
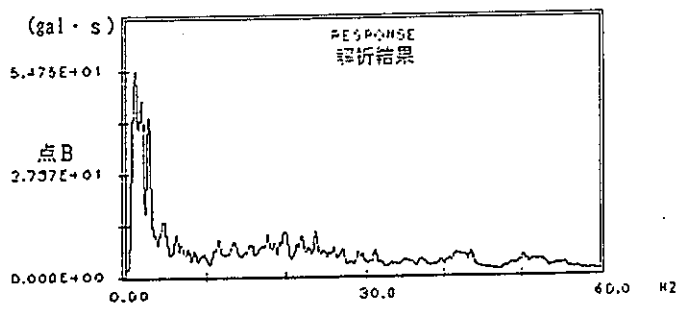
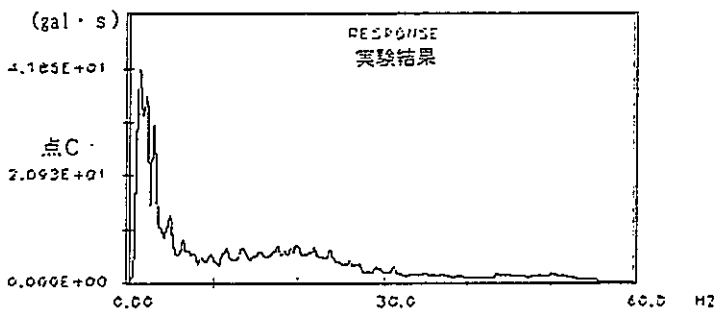
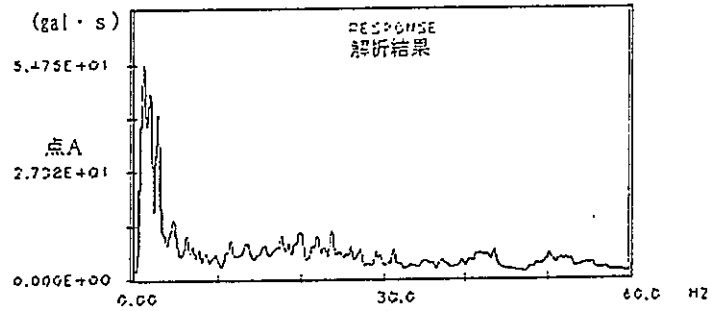
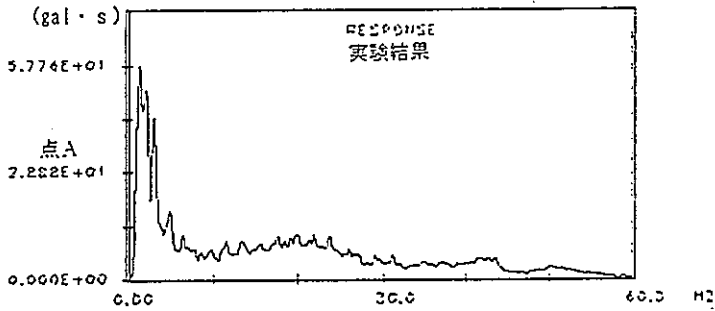
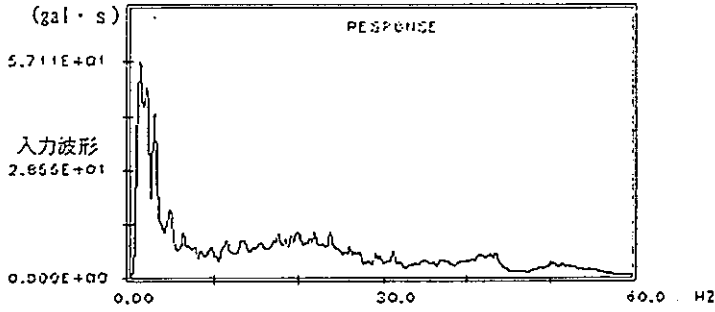
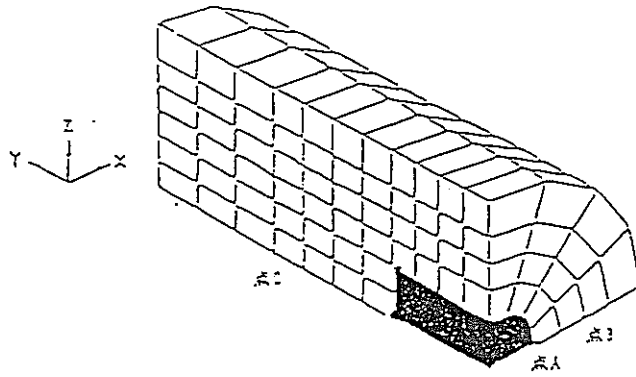


図4.3.6-6 八戸地震波による実験データ解析1
(加速度フーリエスペクトルの比較)

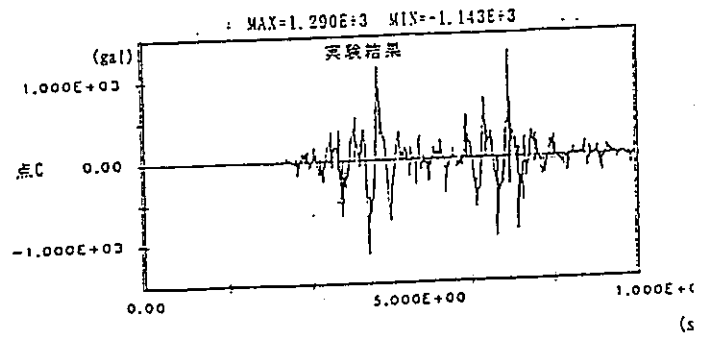
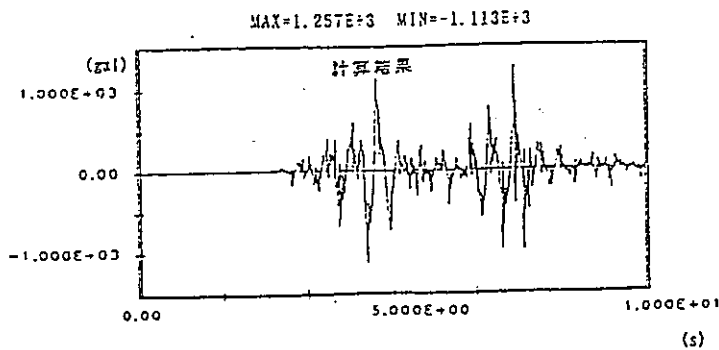
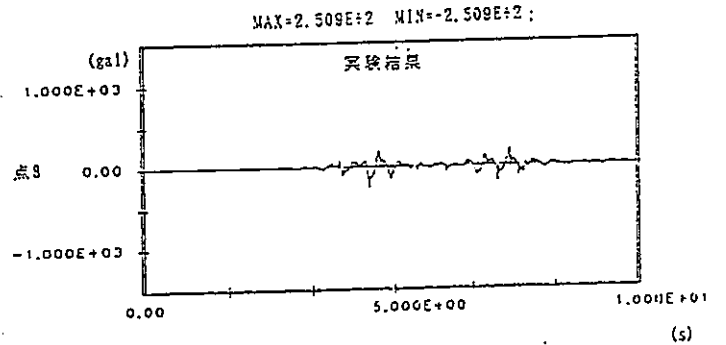
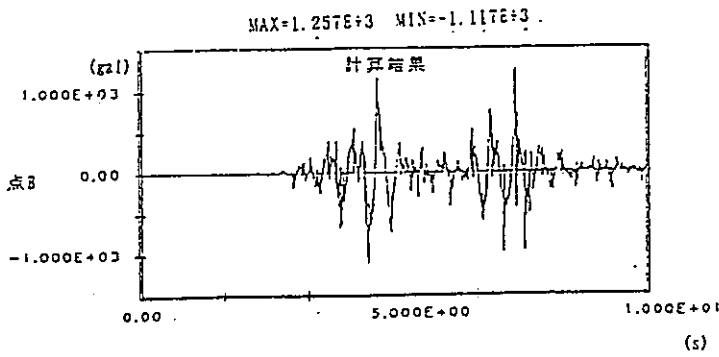
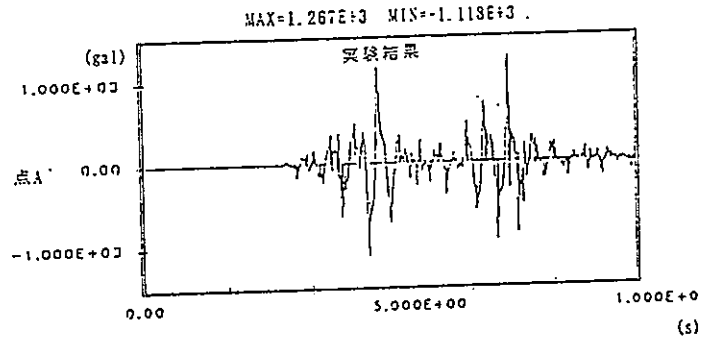
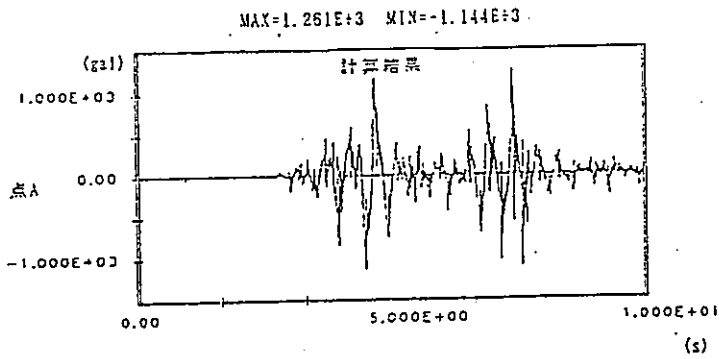
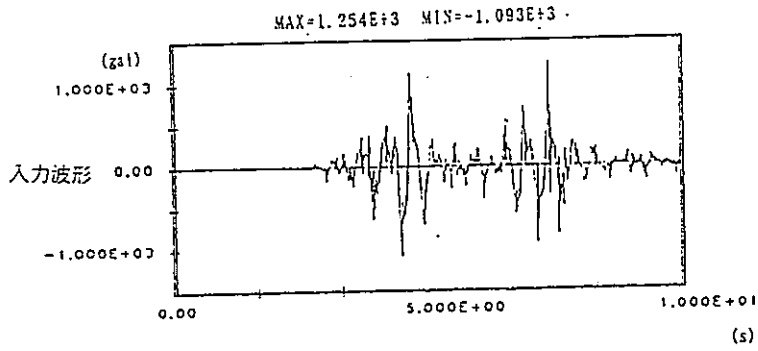
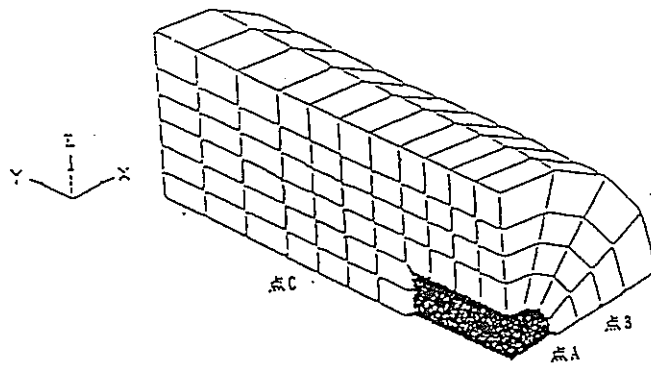


図4.3.6-7 EL-Centro 地震波による実験データ解析2
(加速度時刻応答波形の比較)

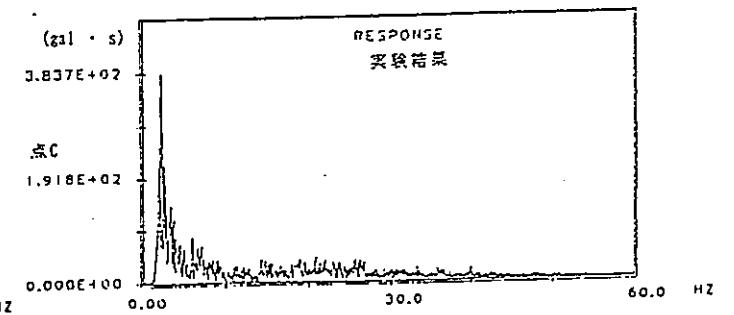
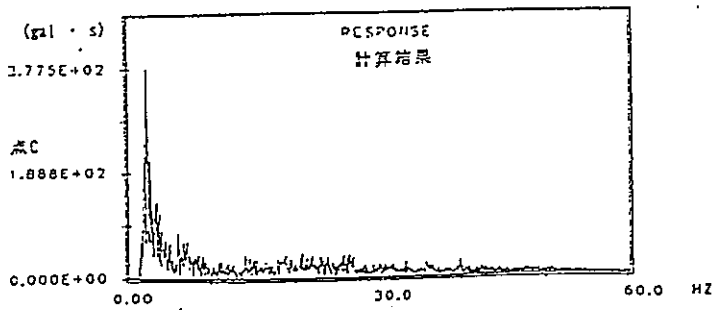
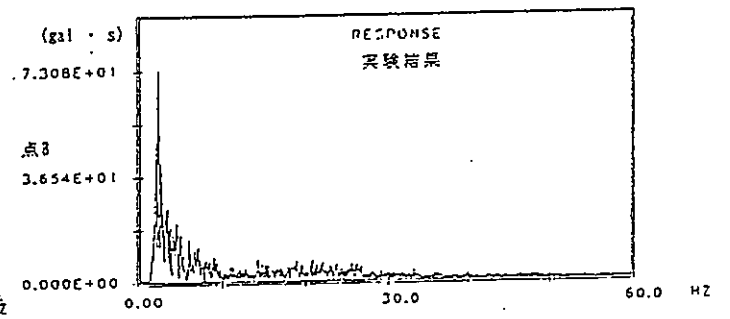
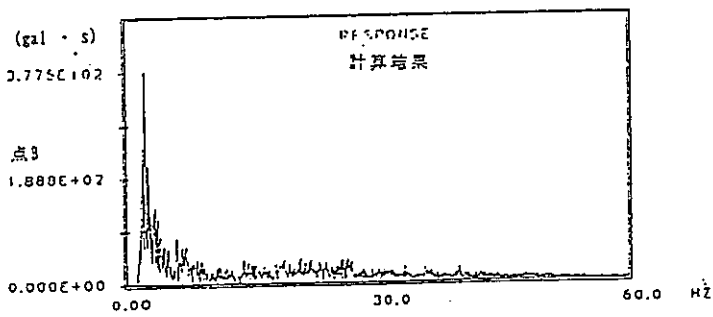
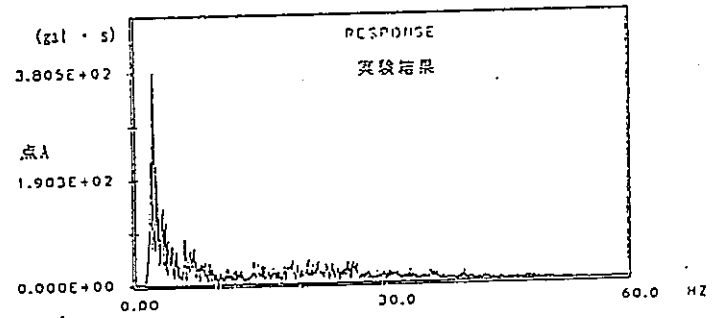
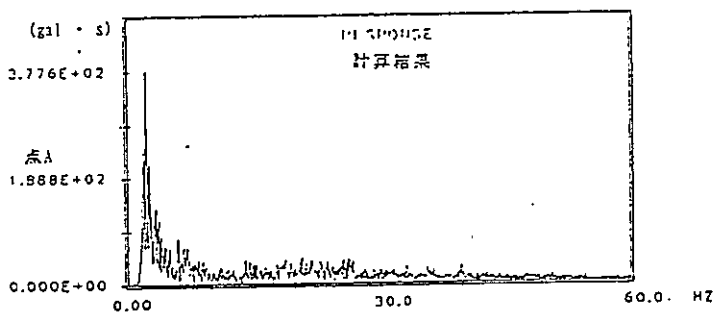
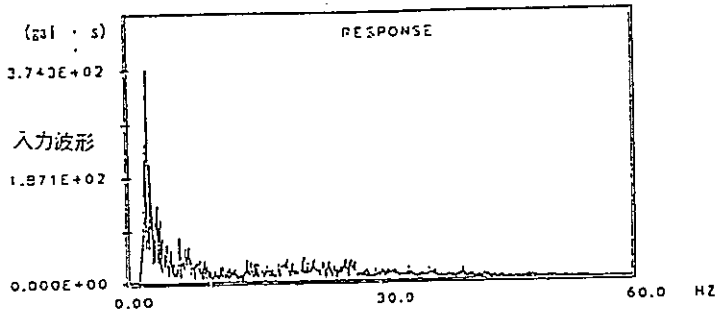
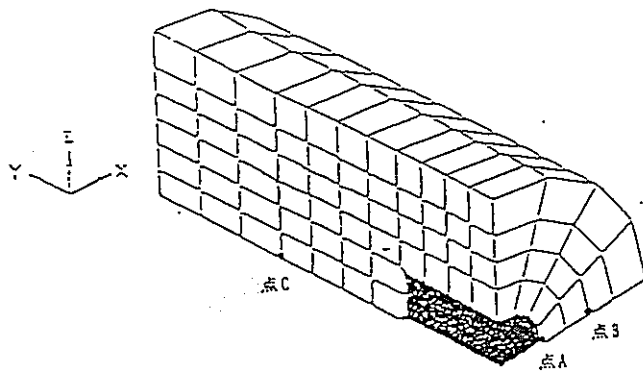
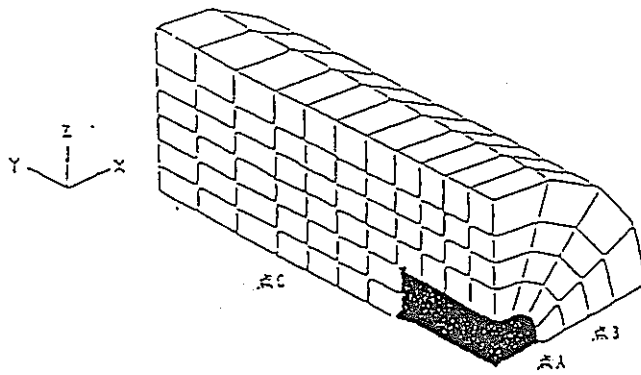
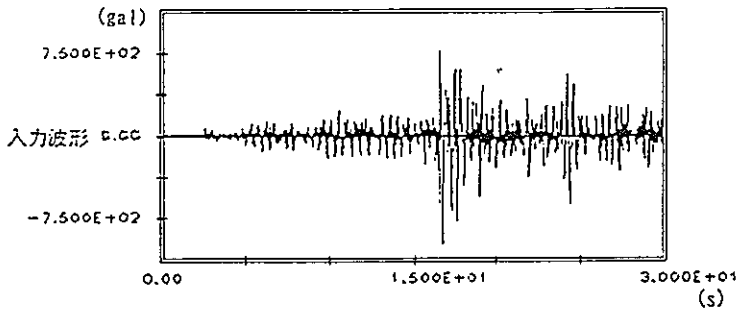


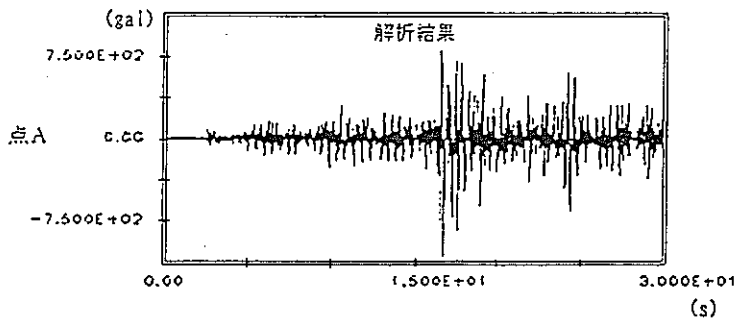
図4.3.6-8 EL-Centro 地震波による実験データ解析2
(加速度フーリエスペクトルの比較)



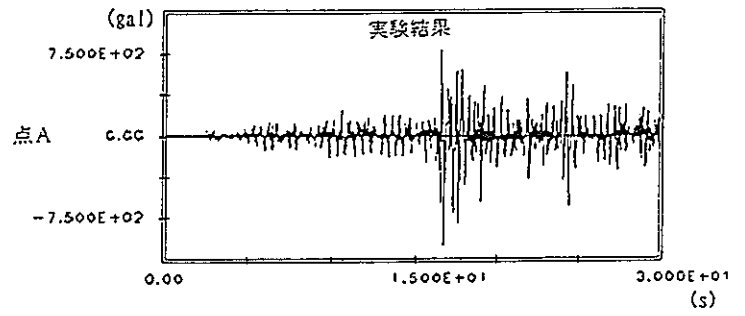
MAX=9.853E+2 MIN=-9.853E+2



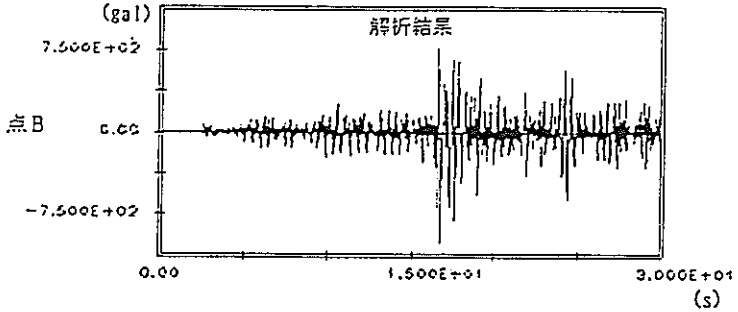
MAX=1.068E+3 MIN=-1.068E+3



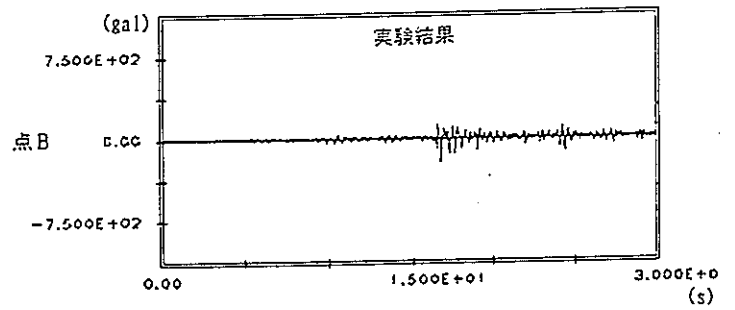
MAX=9.983E+2 MIN=-9.983E+2



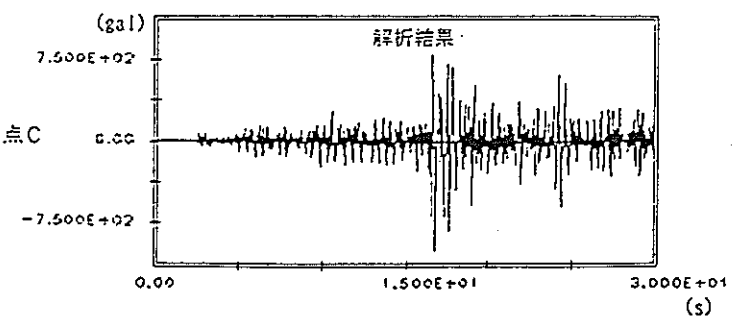
MAX=1.017E+3 MIN=-1.017E+3



MAX=2.119E-2 MIN=-2.119E-2



MAX=1.007E+3 MIN=-1.007E+3



MAX=1.012E+3 MIN=-1.012E+3

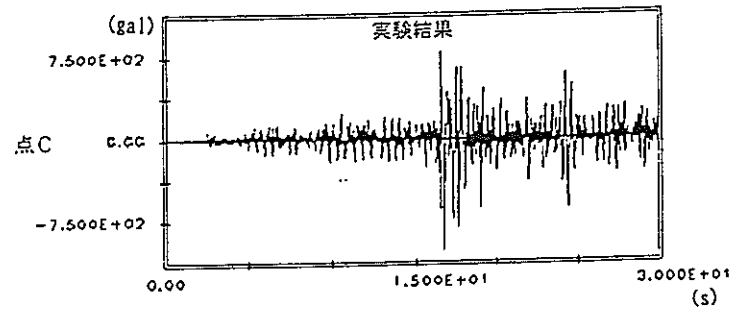


図4.3.6-9 宮城沖地震波による実験データ解析2
(加速度時刻応答波形の比較)

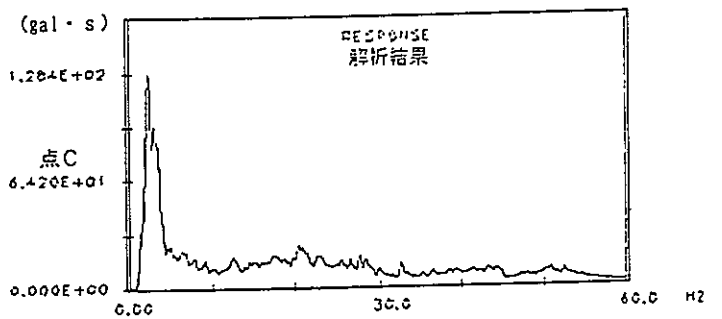
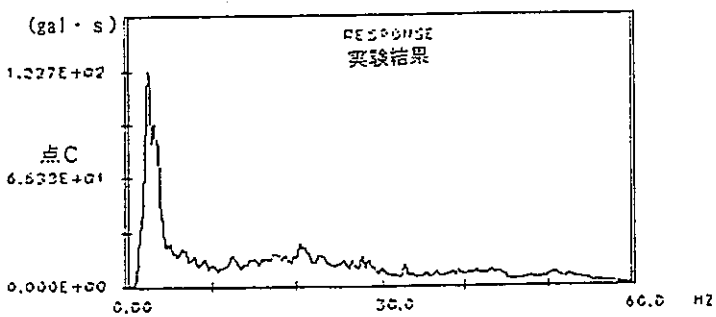
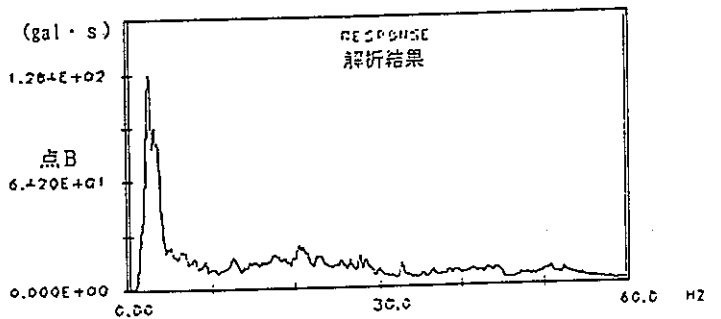
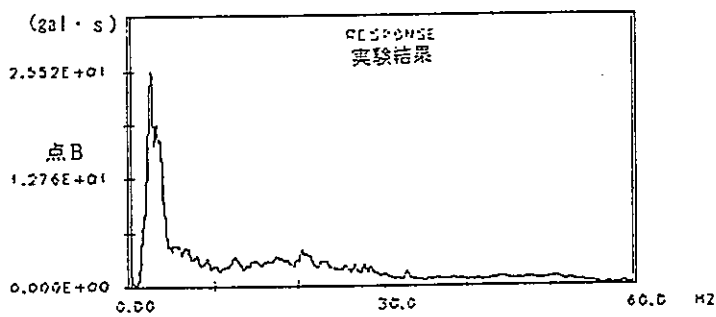
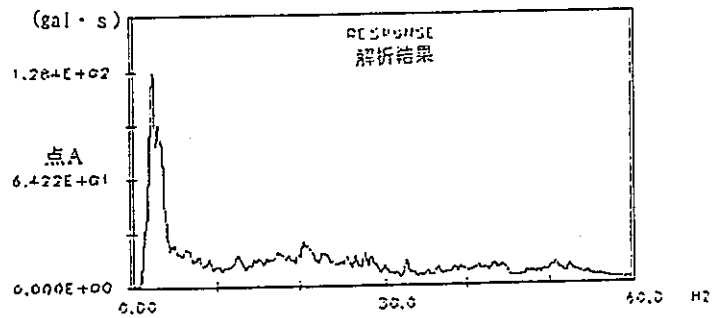
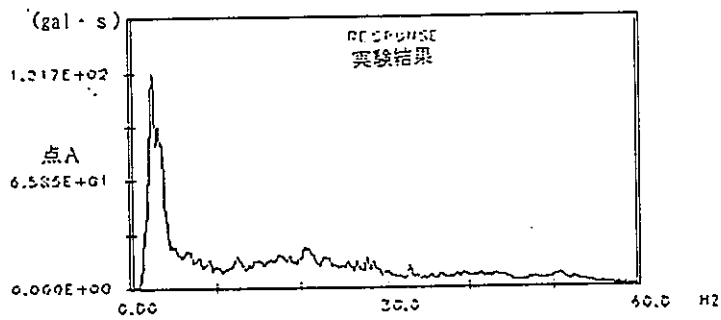
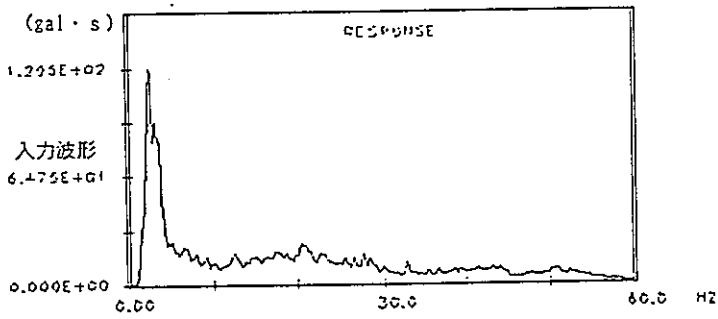
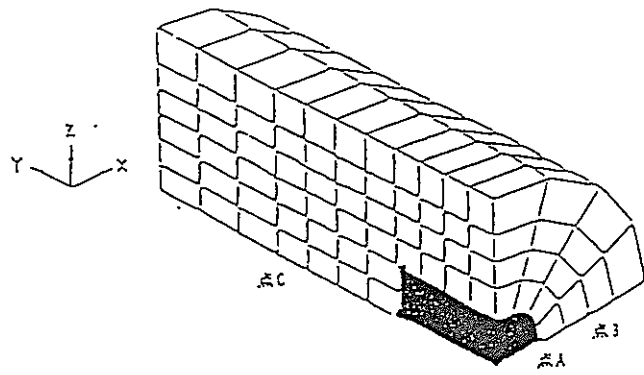


図4.3.6-10 宮城沖地震波による実験データ解析2
(加速度フーリエスペクトルの比較)

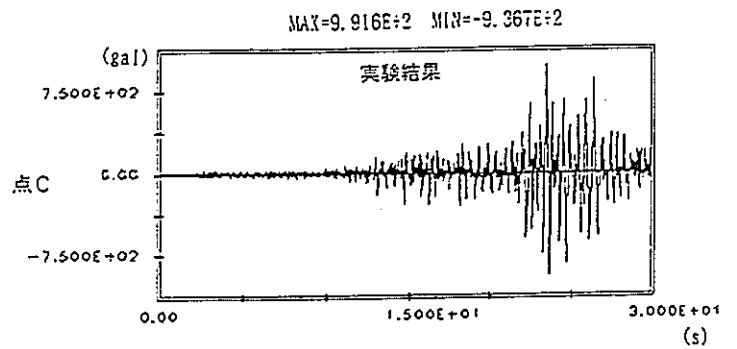
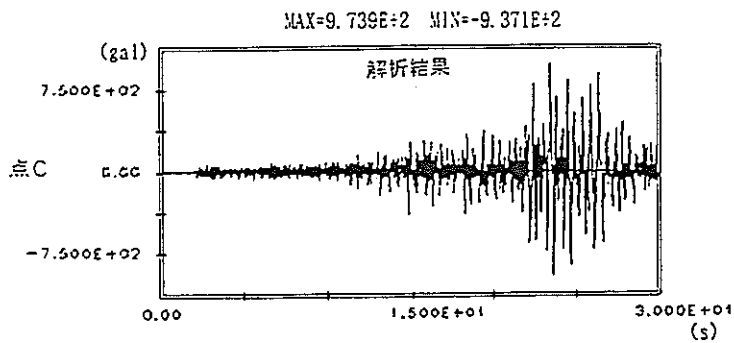
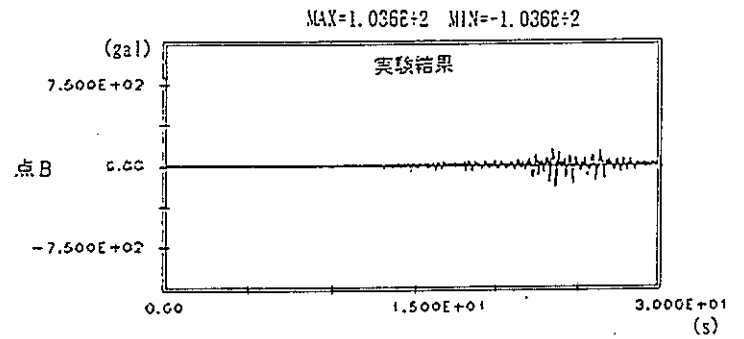
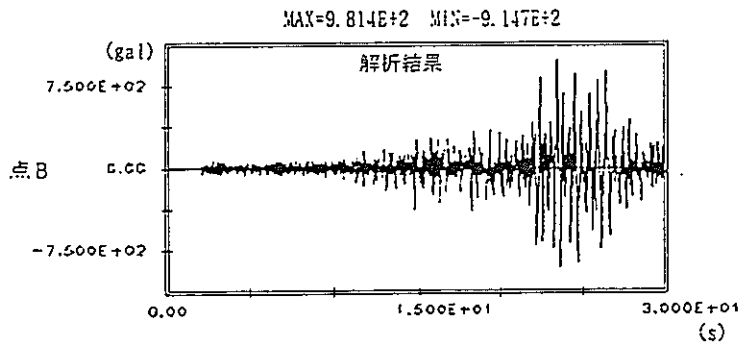
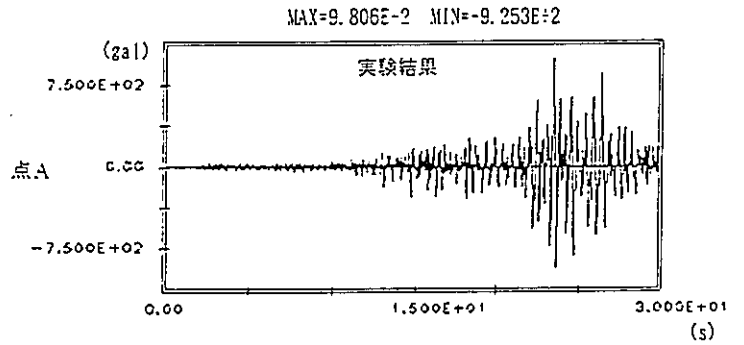
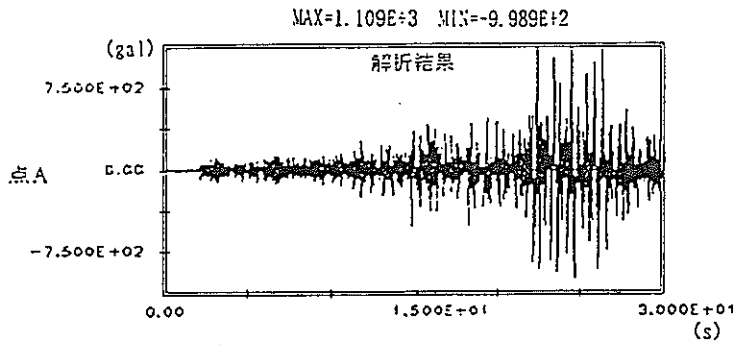
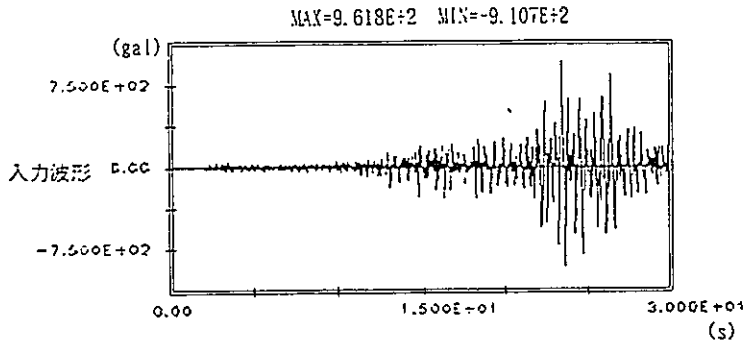
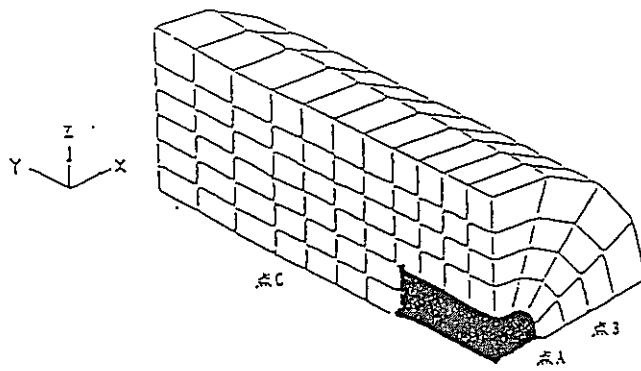


図4.3.6-11 八戸地震波による実験データ解析2
(加速度時刻応答波形の比較)

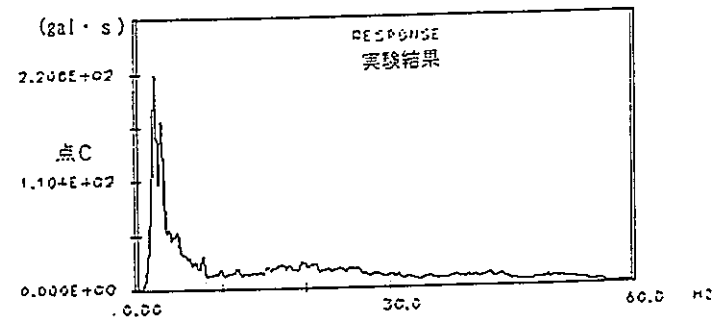
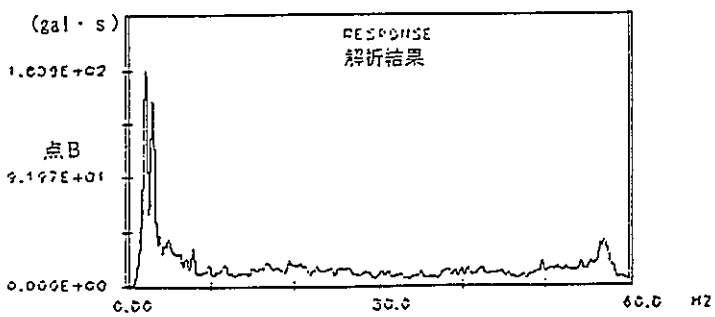
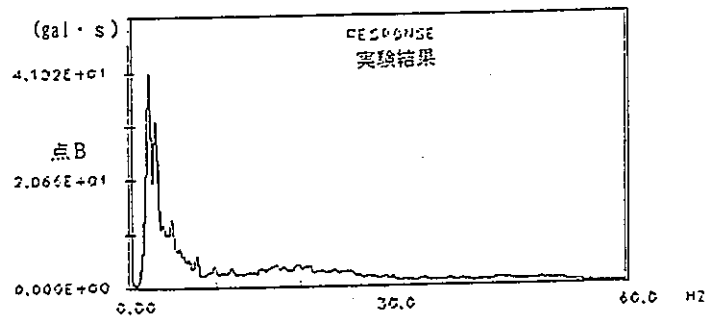
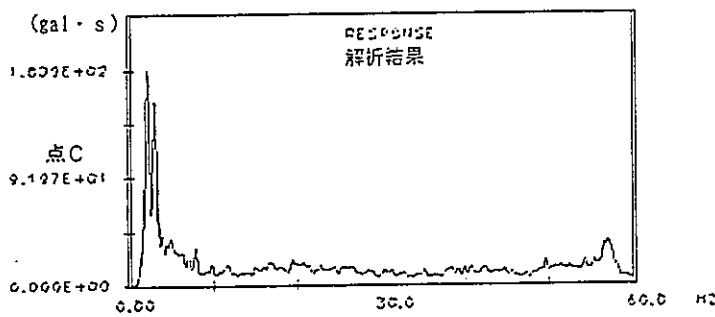
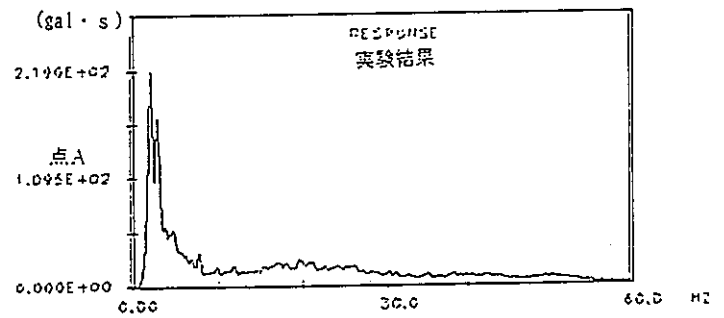
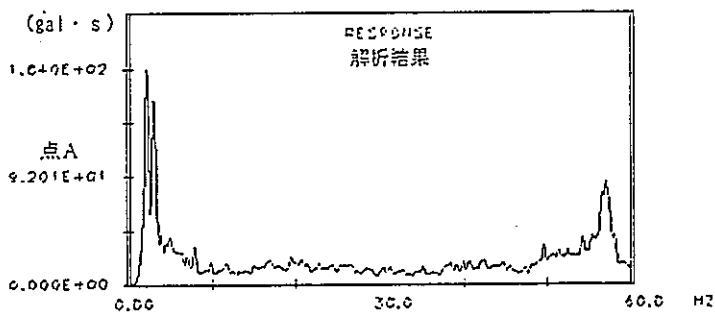
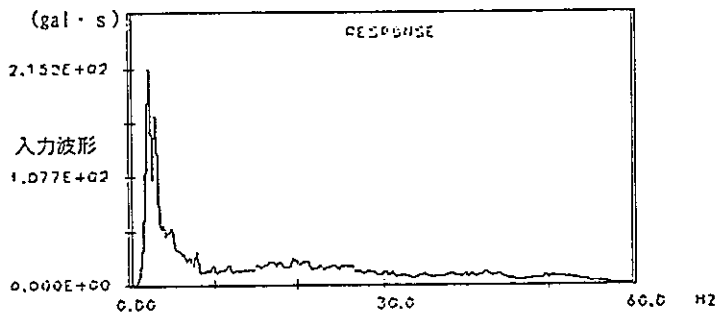
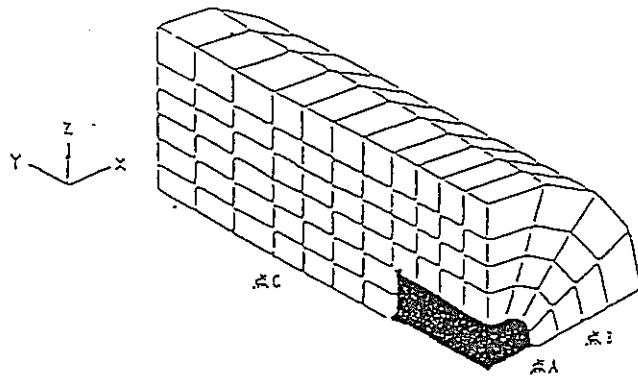


図4.3.6-12 八戸地震波による実験データ解析2
(加速度フーリエスペクトルの比較)

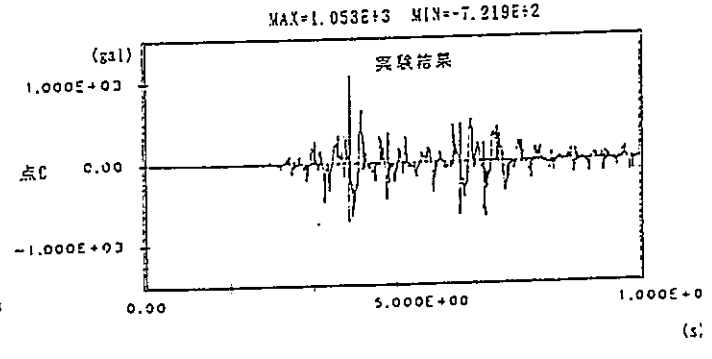
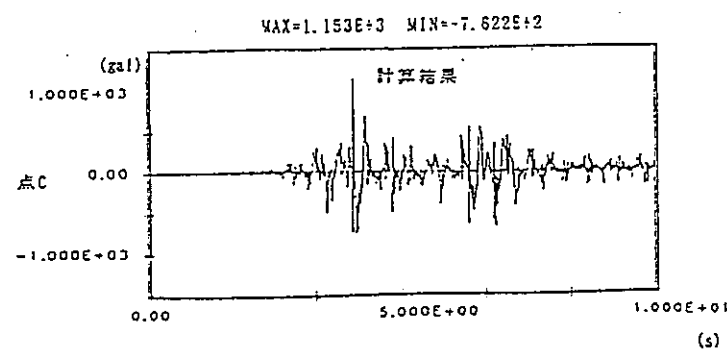
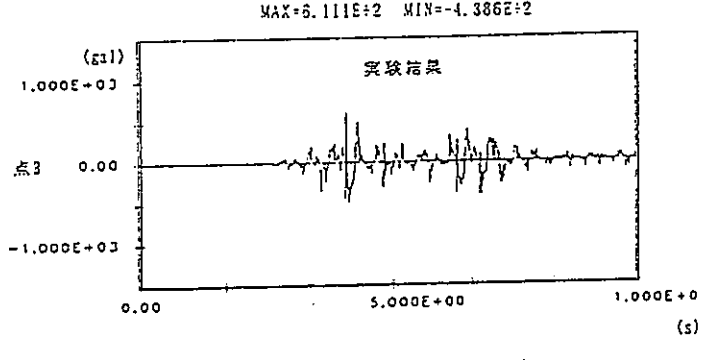
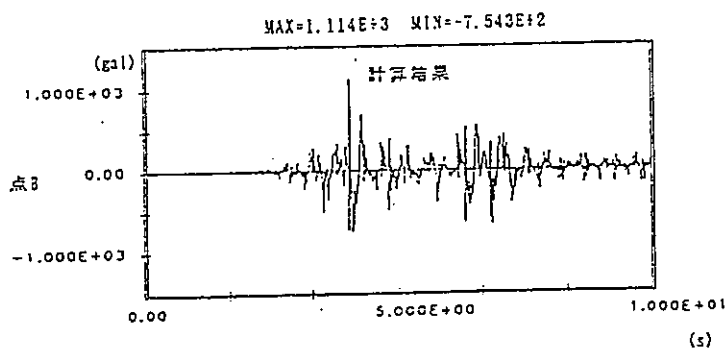
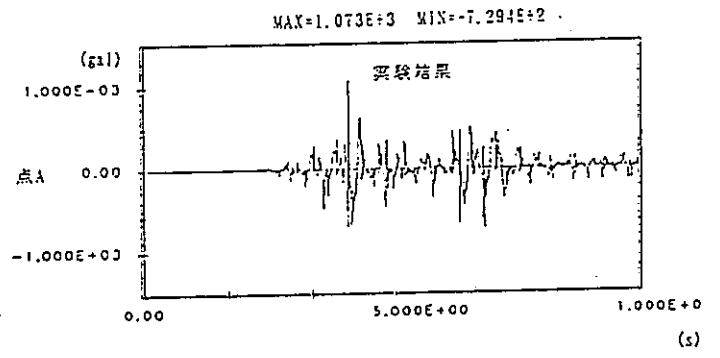
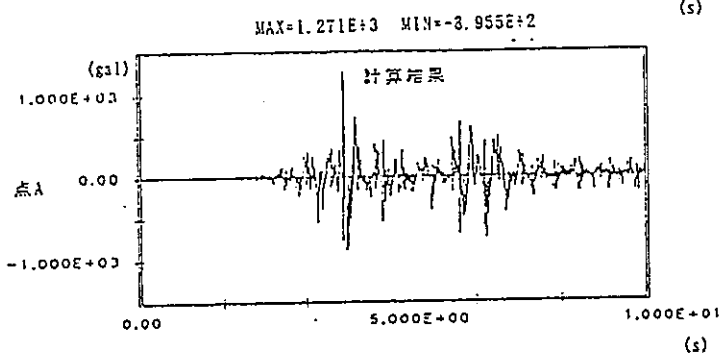
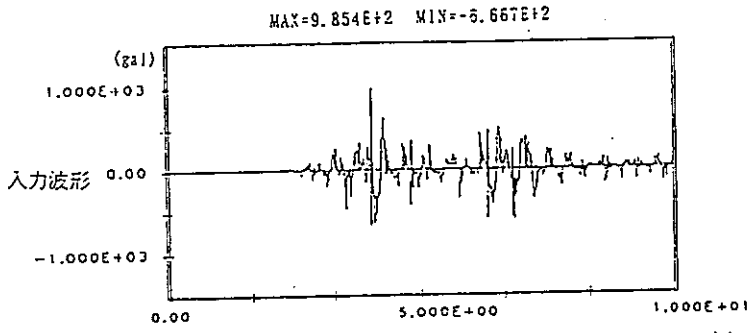
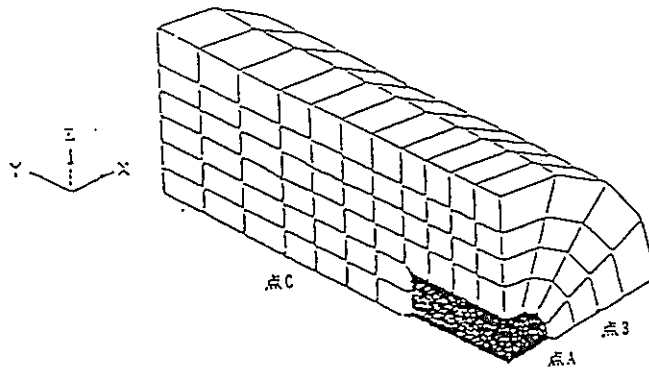


図4.3.6-13 EL-Centro 地震波による実験データ解析3
(加速度時刻応答波形の比較)

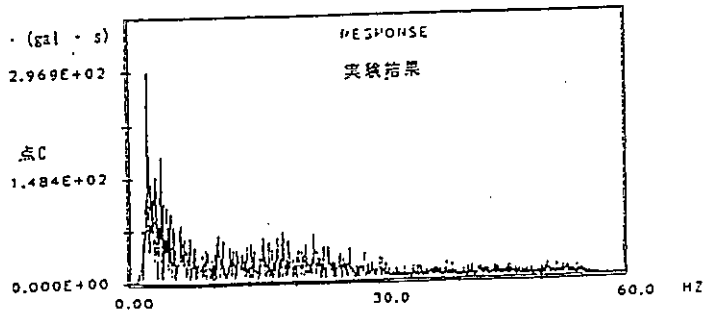
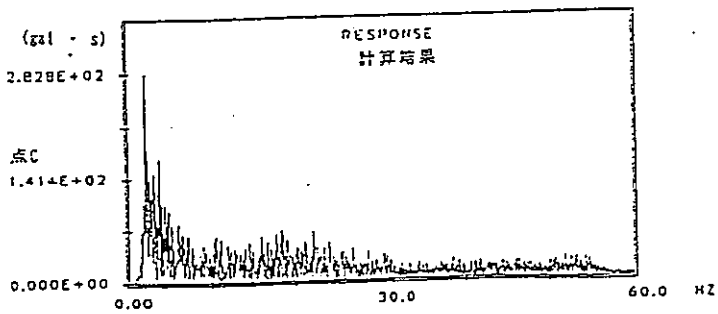
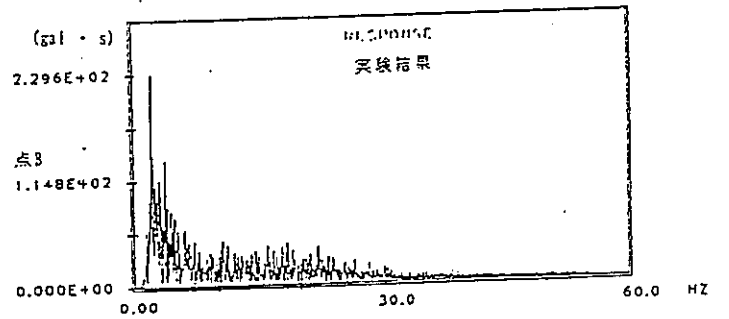
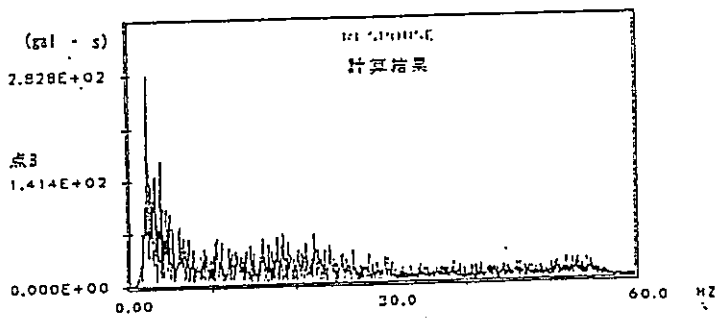
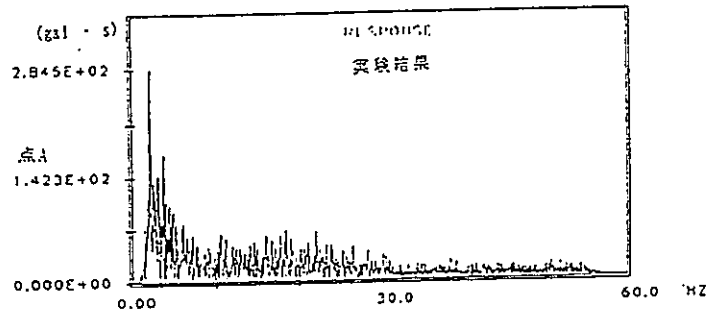
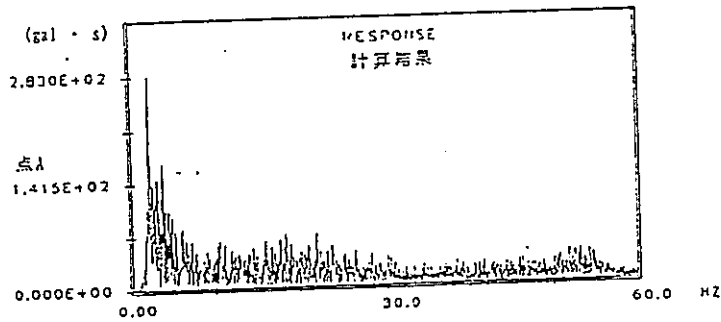
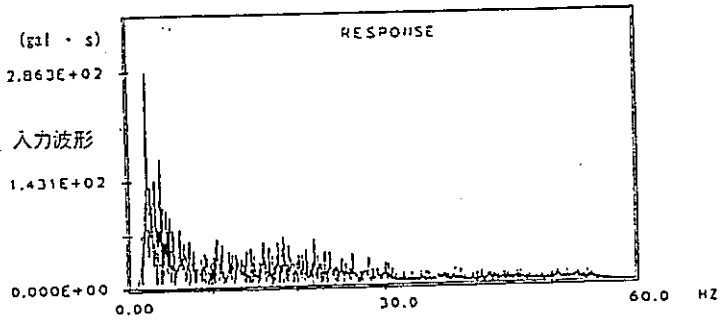
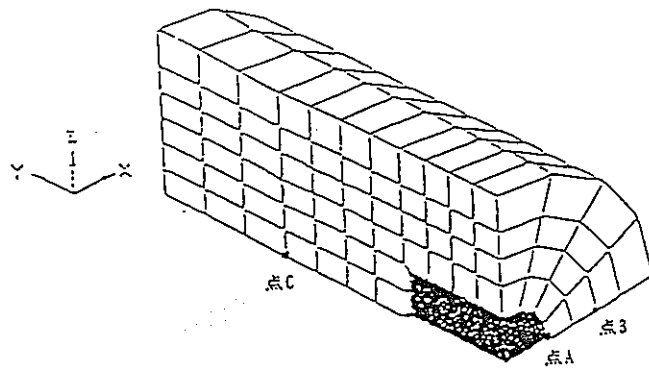


図4.3.6-14 EL-Centro 地震波による実験データ解析3
(加速度フーリエスペクトルの比較)

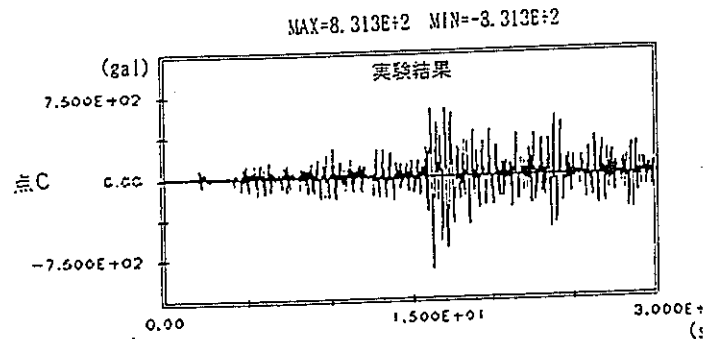
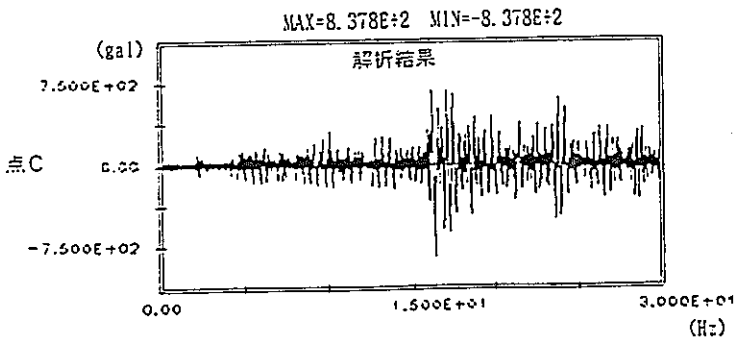
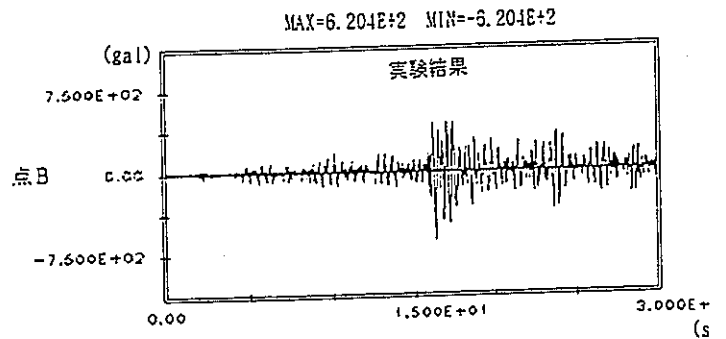
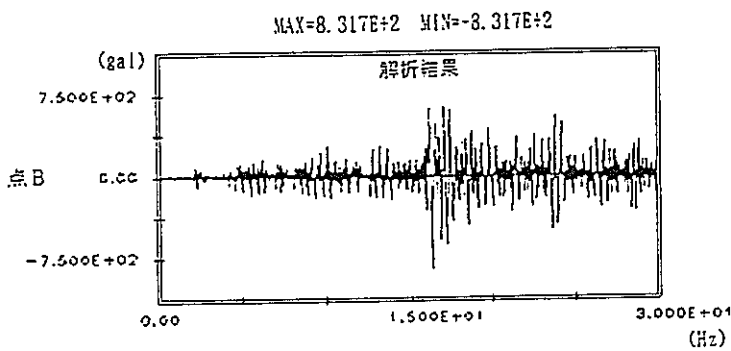
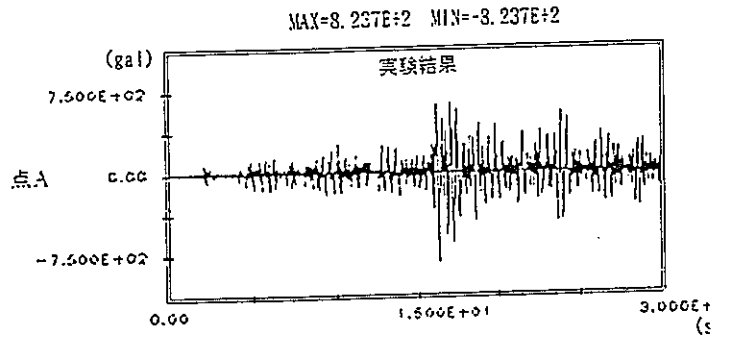
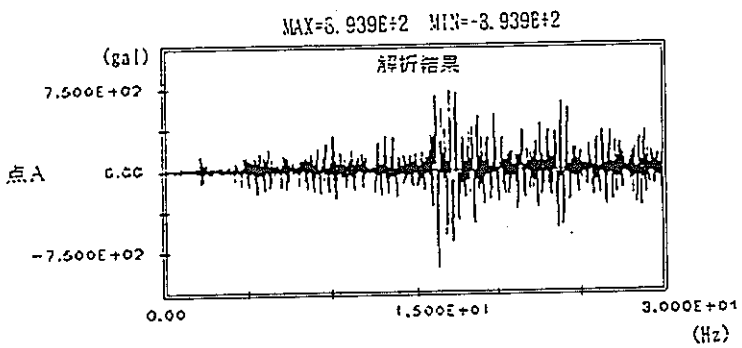
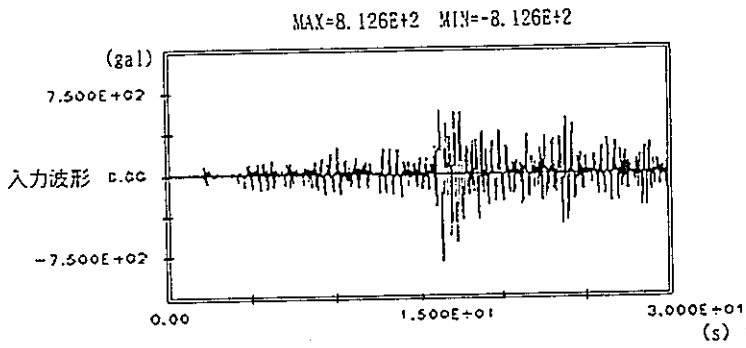
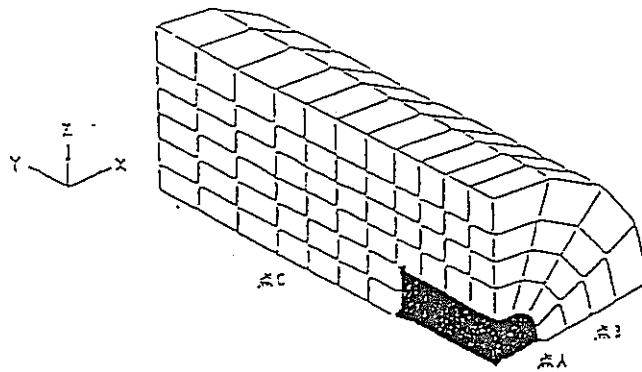


図4.3.6-15 宮城沖地震波による実験データ解析3
(加速度時刻応答波形の比較)

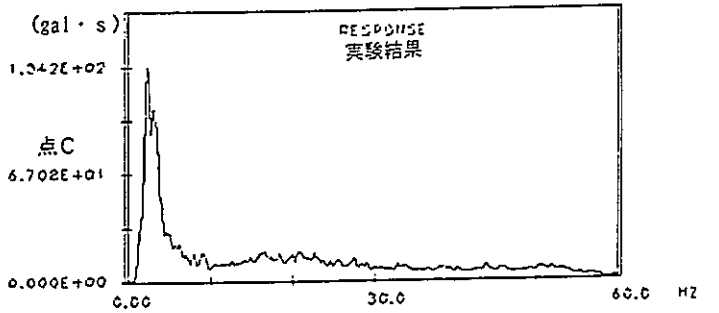
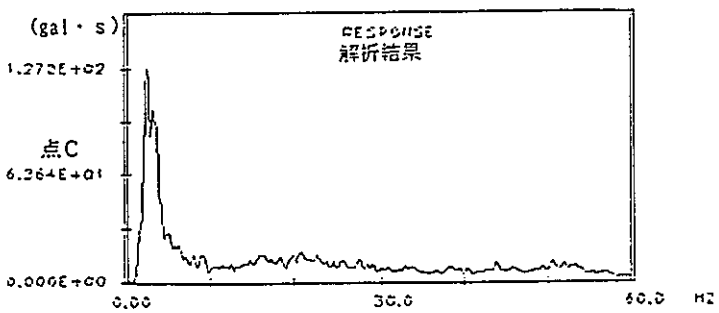
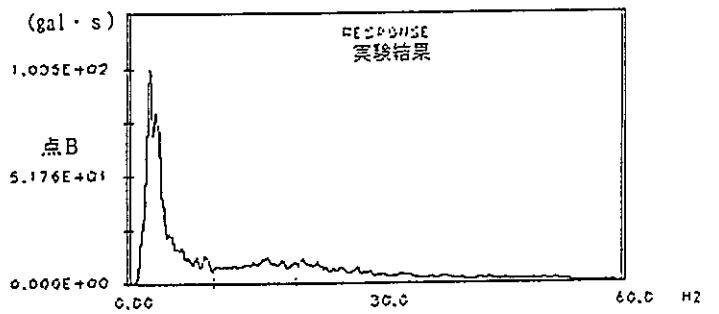
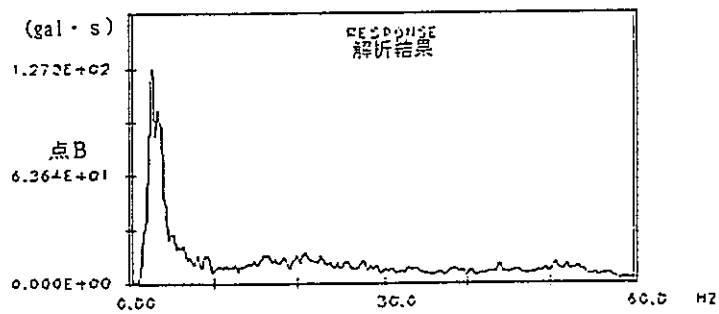
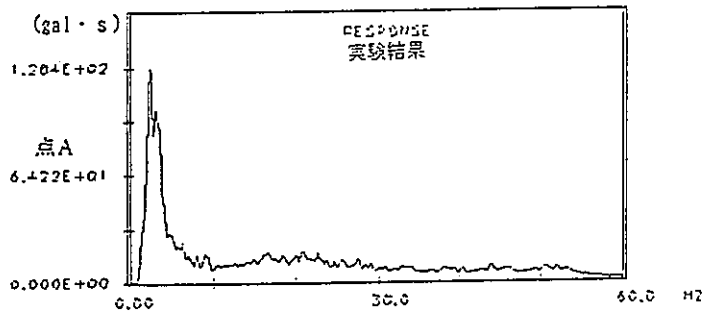
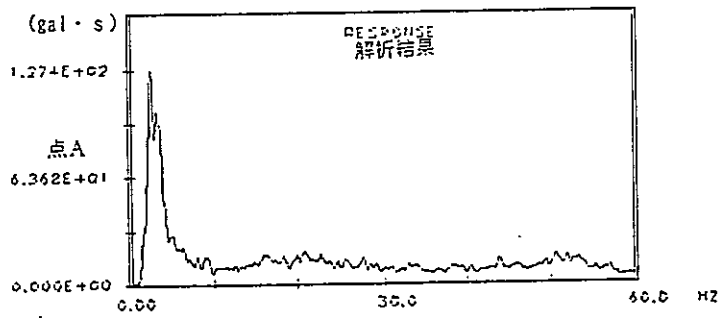
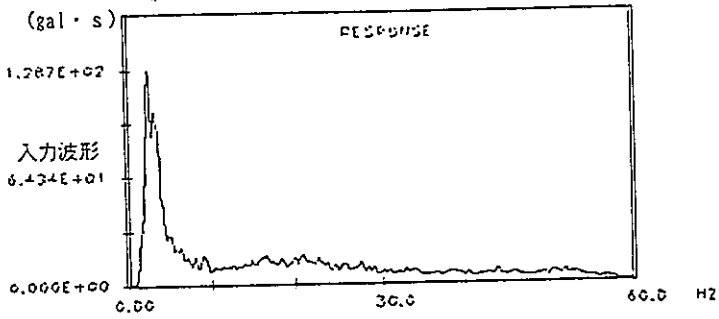
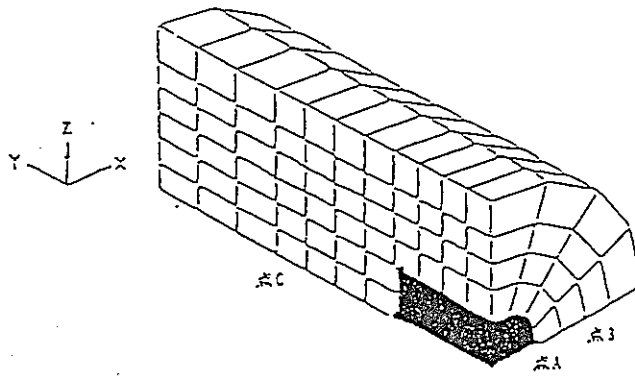


図4.3.6-16 宮城沖地震波による実験データ解析3
(加速度フーリエスペクトルの比較)

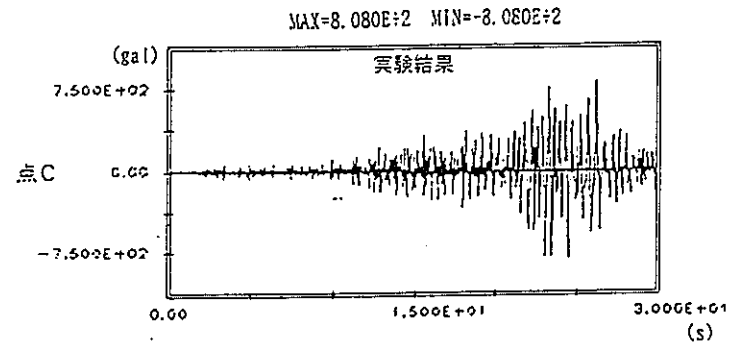
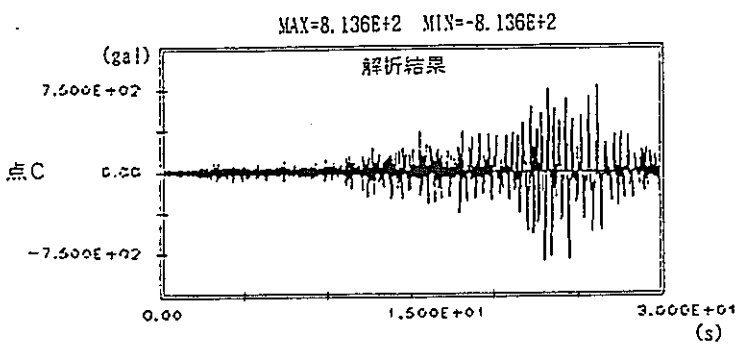
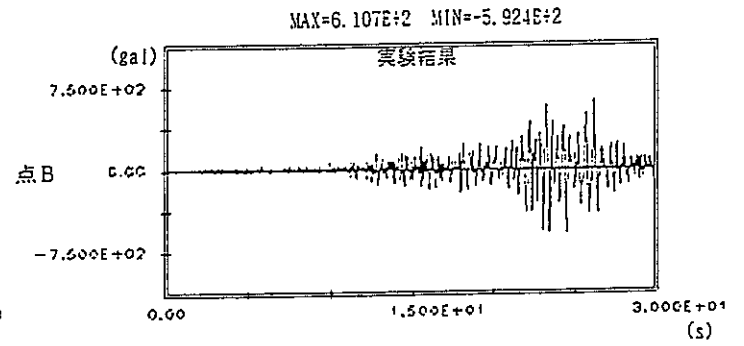
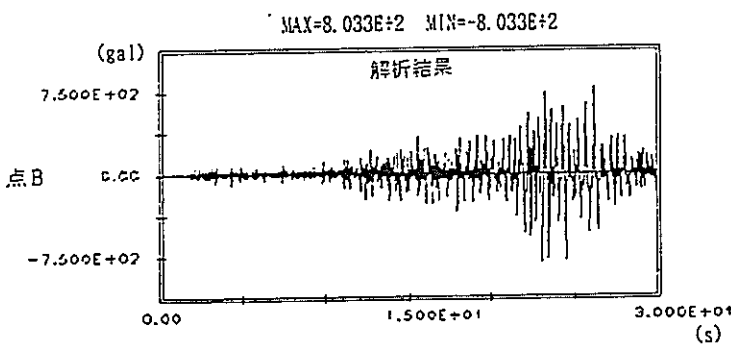
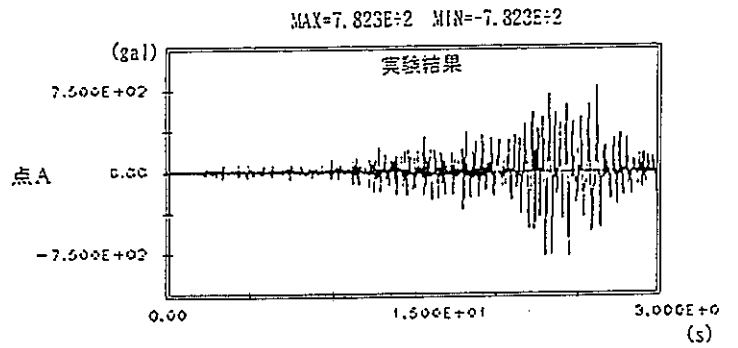
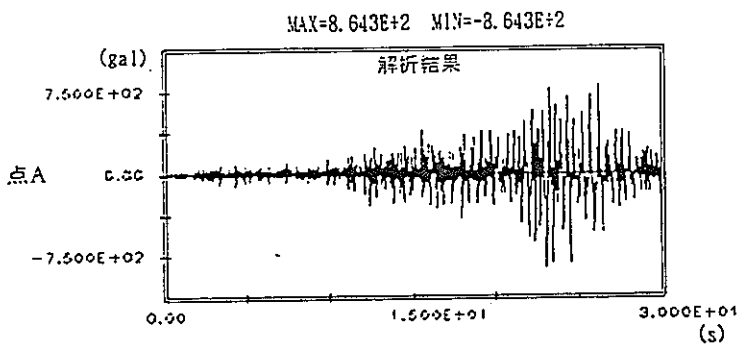
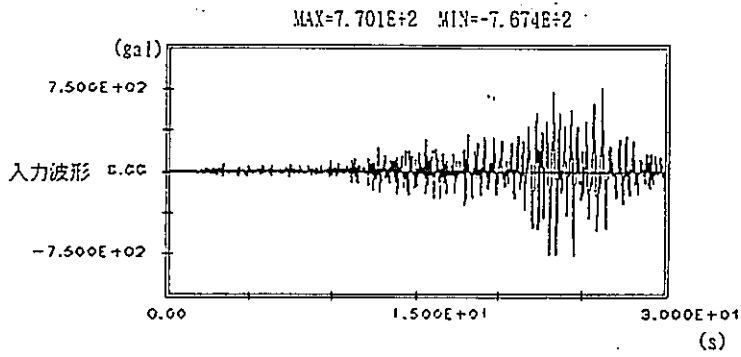
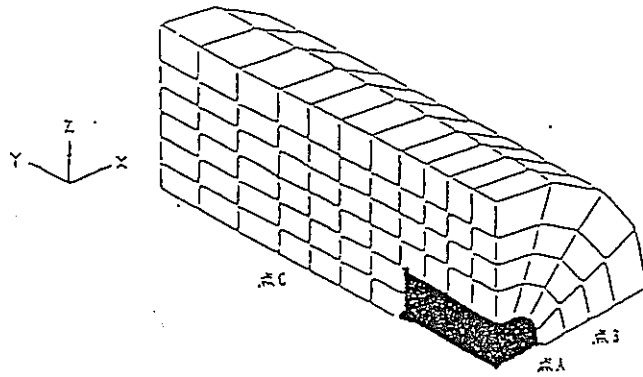


図4.3.6-17 八戸地震波による実験データ解析3
(加速度時刻応答波形の比較)

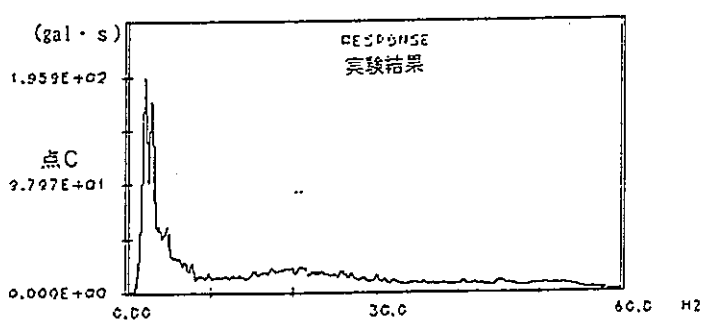
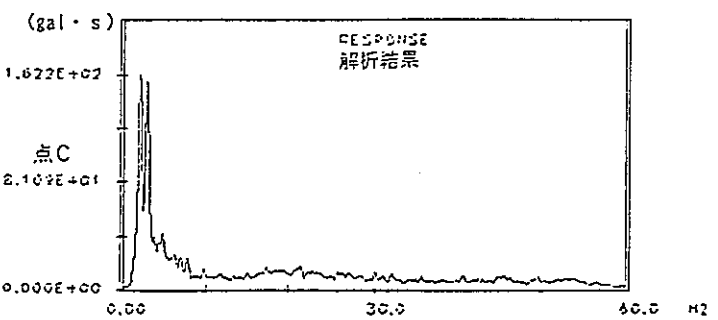
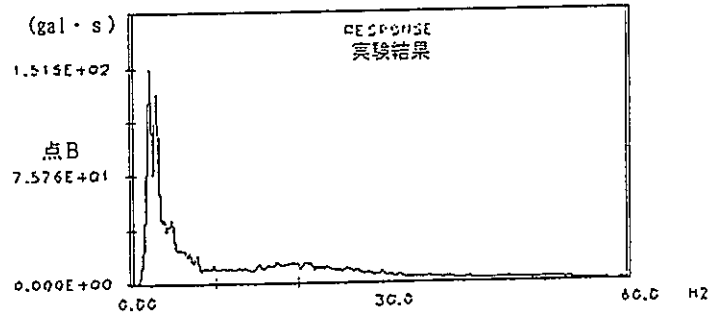
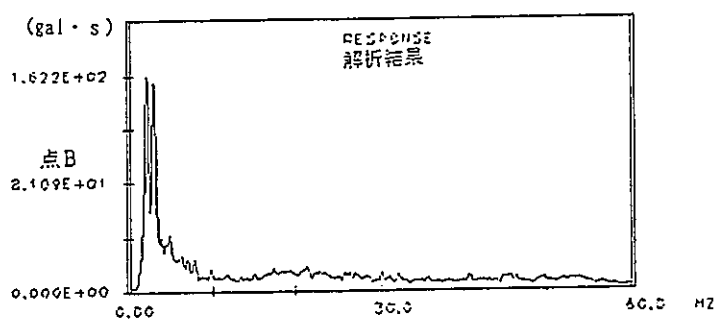
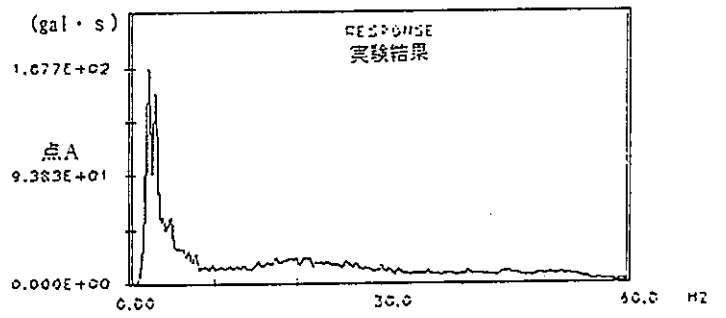
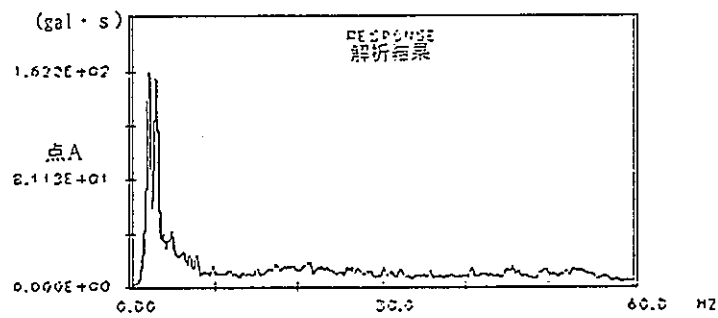
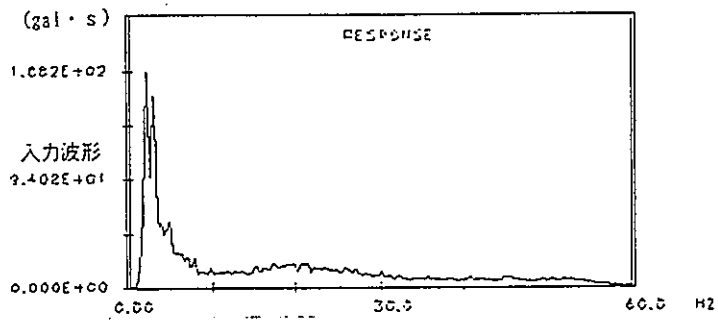
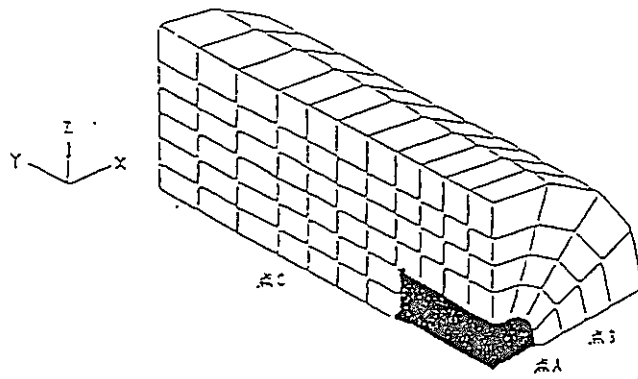


図4.3.6-18 八戸地震波による実験データ解析3
(加速度フーリエスペクトルの比較)

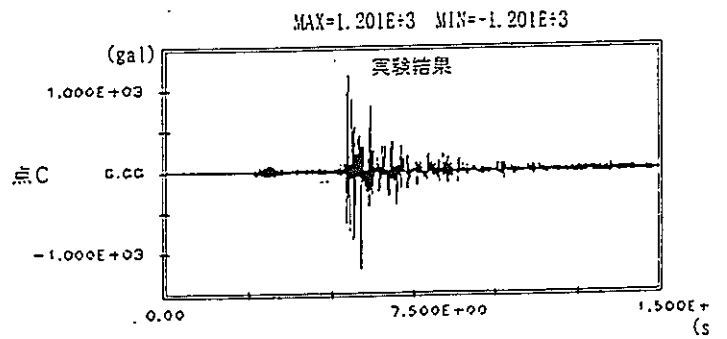
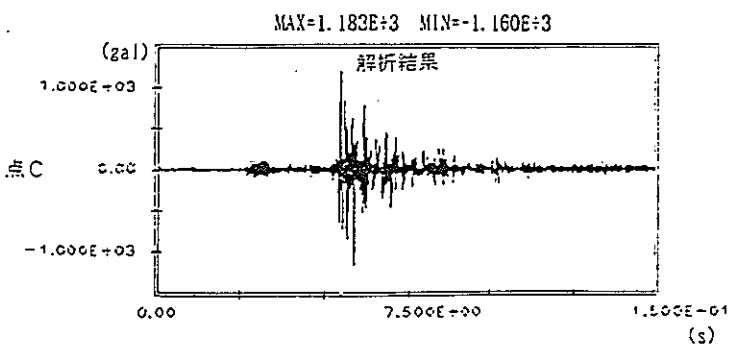
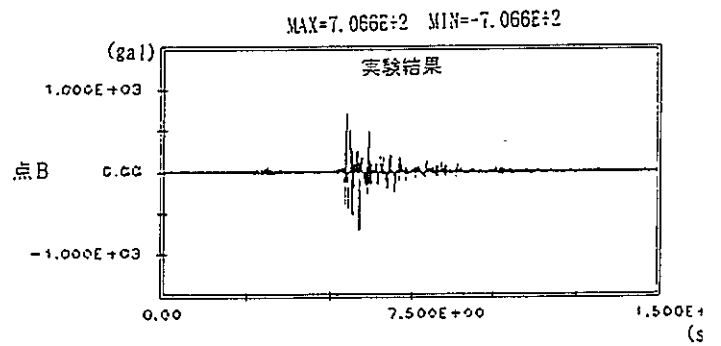
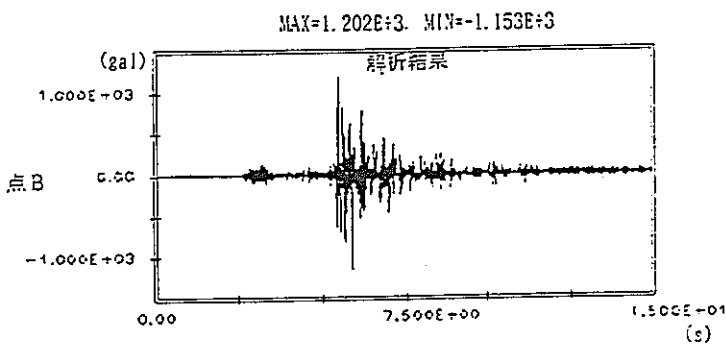
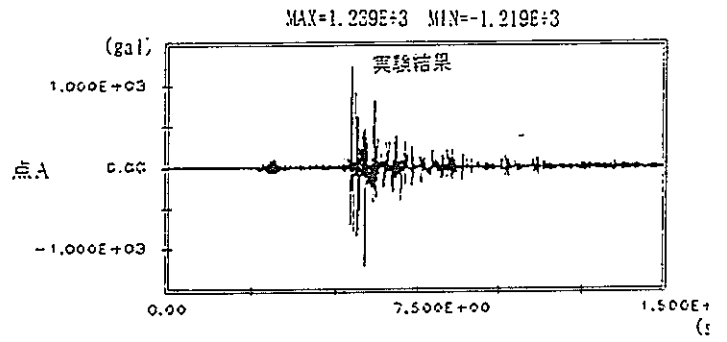
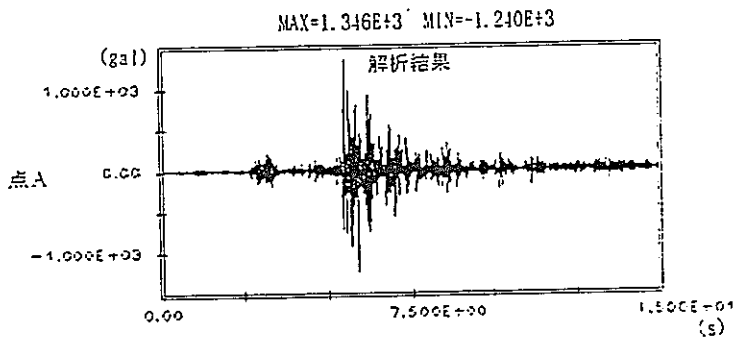
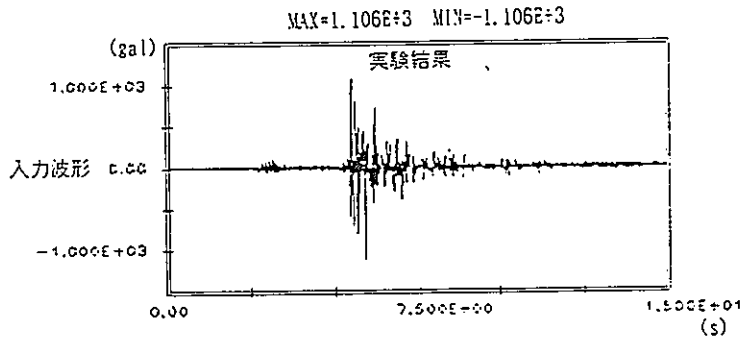
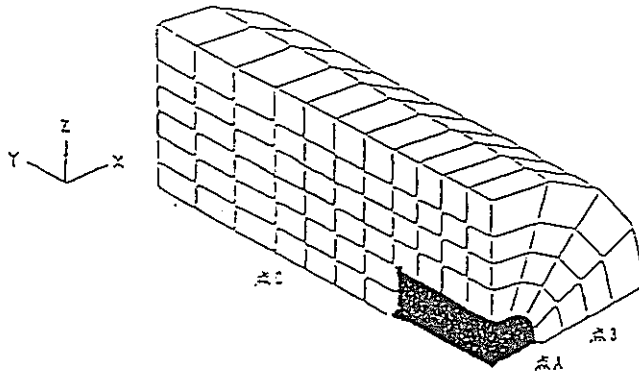


図4.3.6-19 K-1地震波による実験データ解析3
(加速度時刻応答波形の比較)

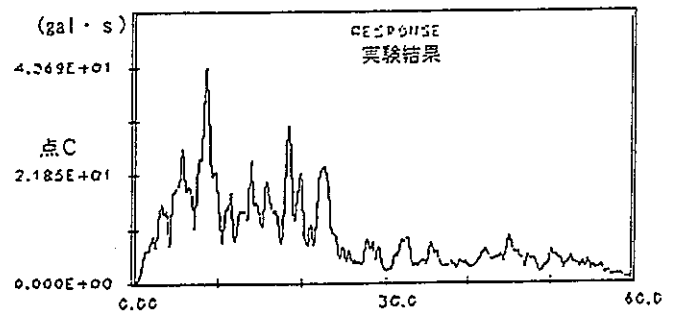
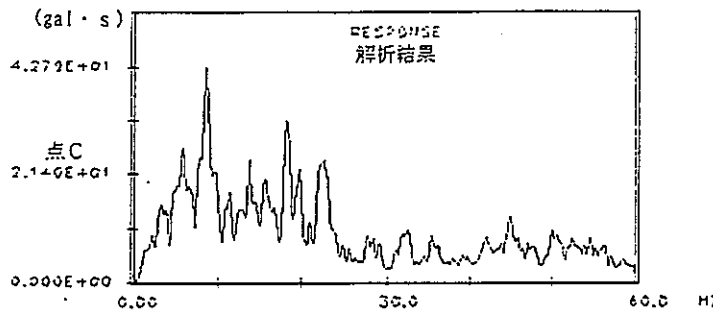
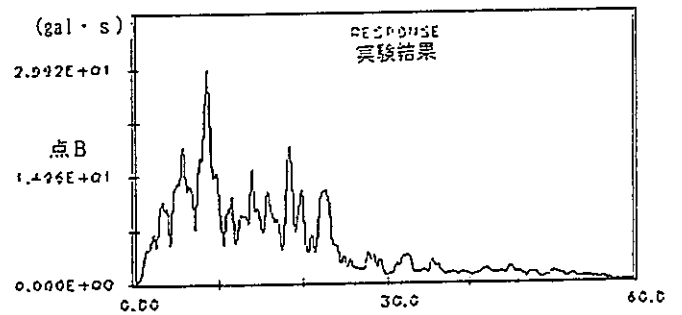
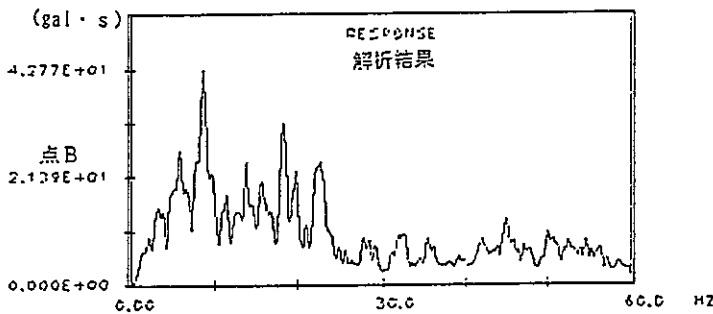
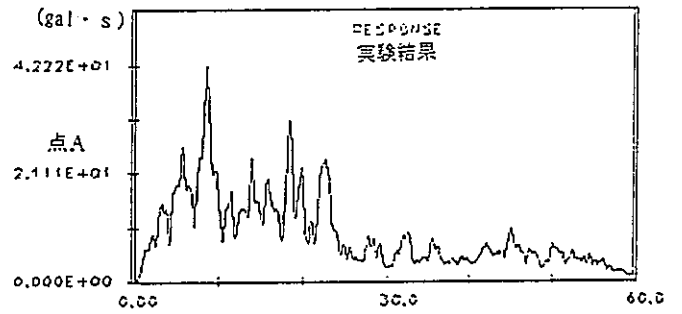
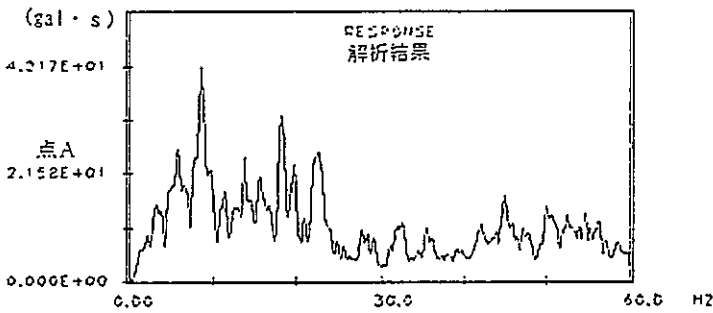
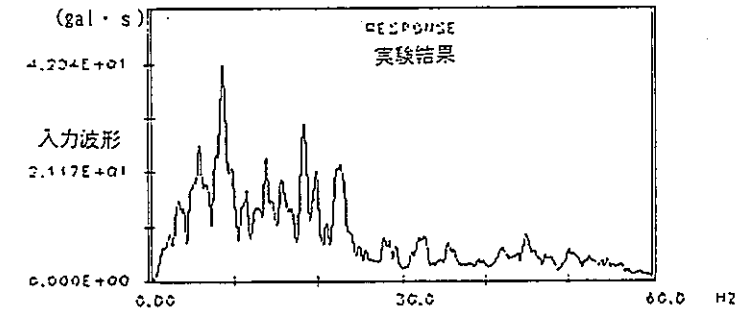
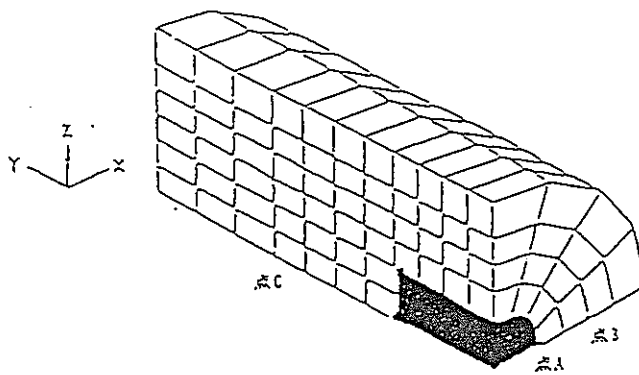


図4.3.6-20 K-1地震波による実験データ解析3
(加速度フーリエスペクトルの比較)

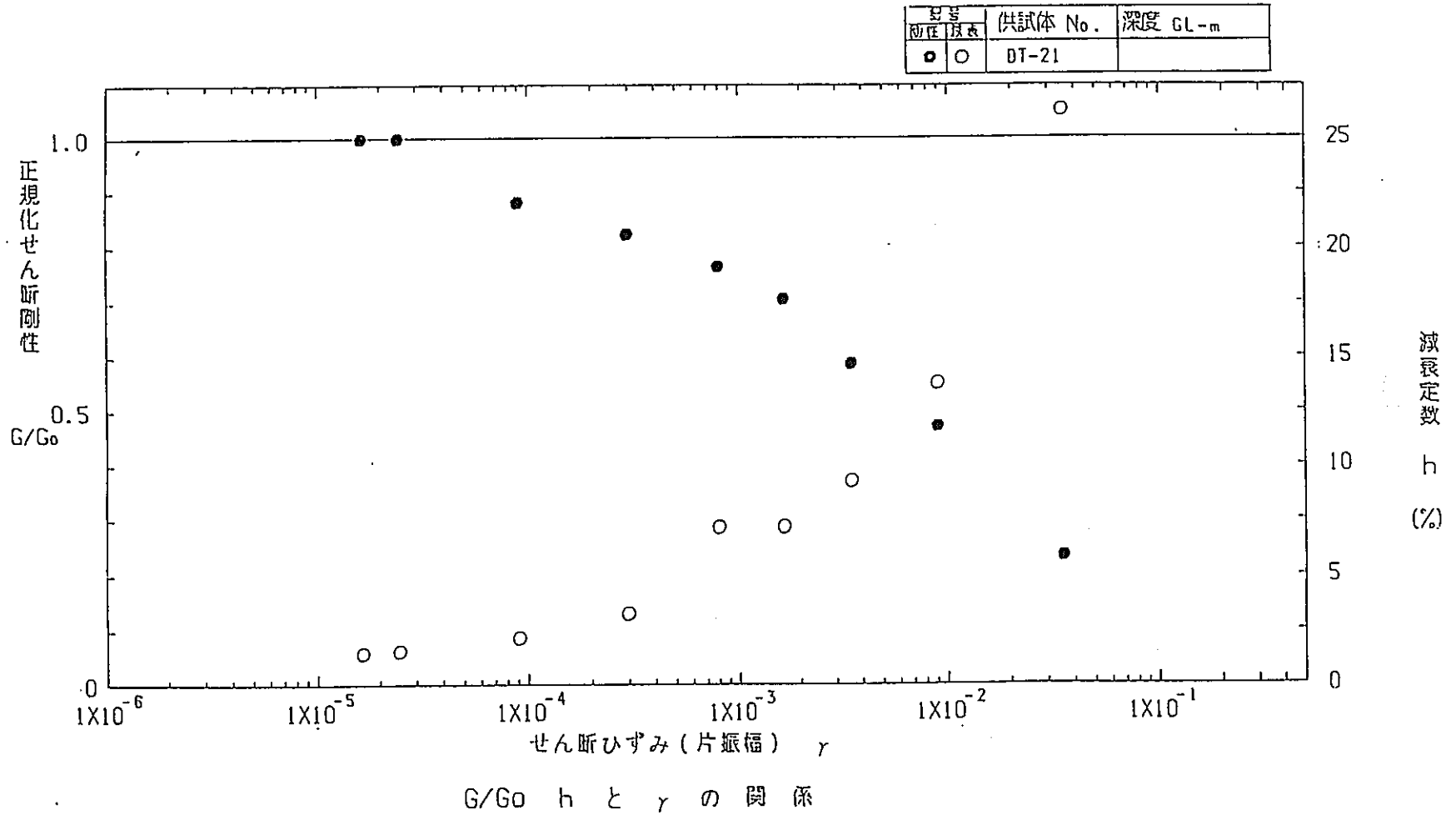
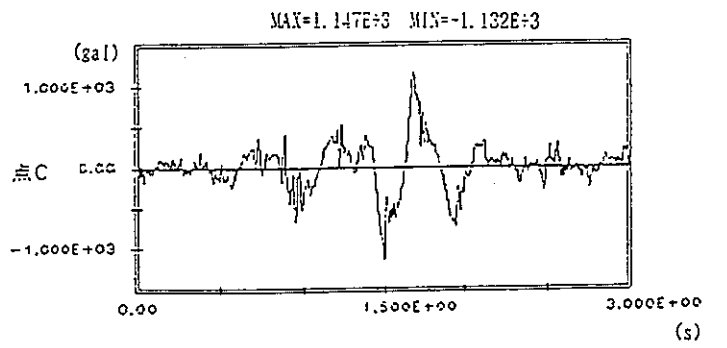
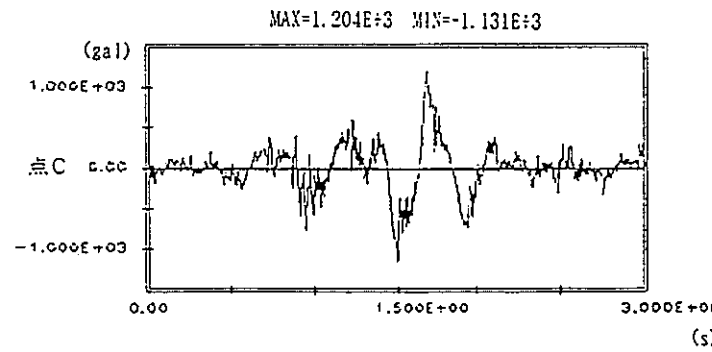
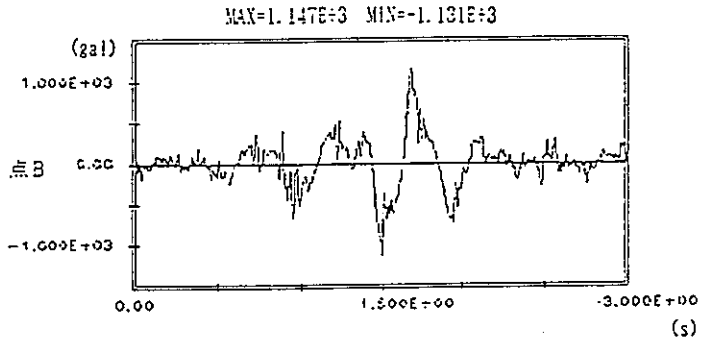
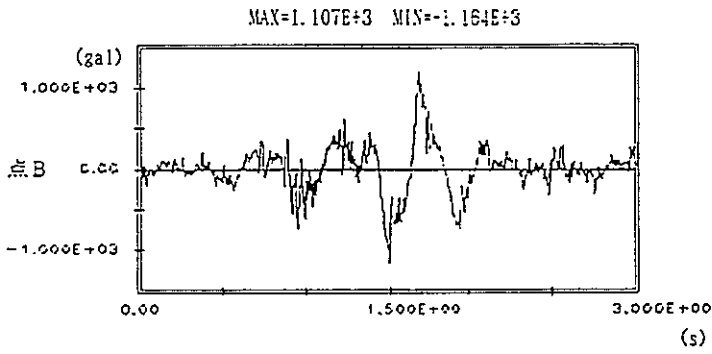
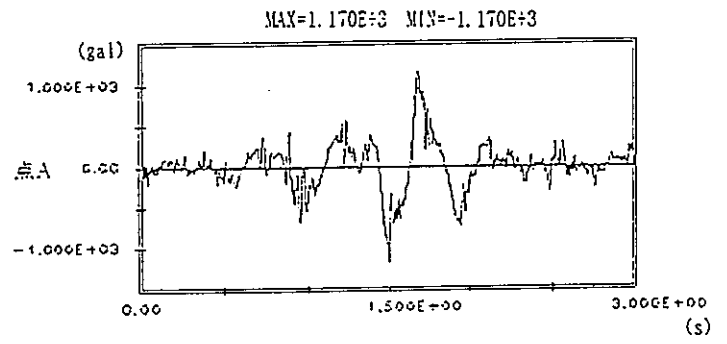
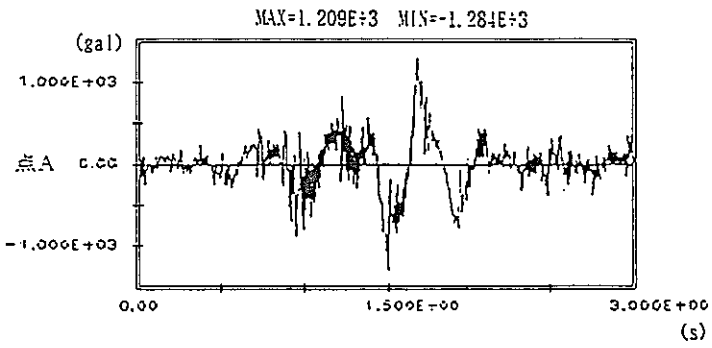
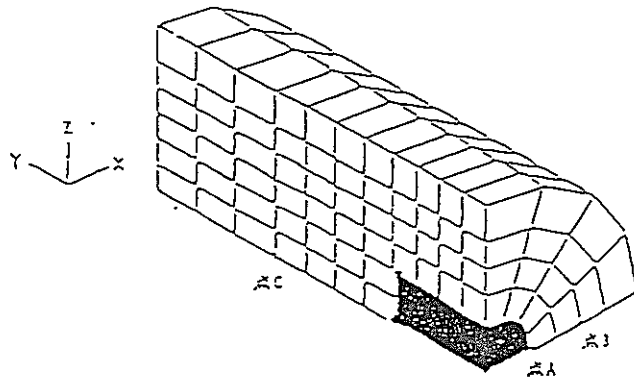


図4.4.3-1 動的三軸試験より得られたベントナイト動特性



線形解析結果

等価線形解析結果

図4.4.6-1 線形解析と等価線形解析の解析結果の比較

5 今後の課題

本年度の研究項目として、

- ① 土質材料の振動時の物性に関する文献調査
- ② 等価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

本年度、解析コードに等価線形法の導入により非線形解析への解析対象の拡張をはかった。通常の粘土材に限れば、様々な構成式が提案され、実験結果と解析の比較が行われている。このことから今後、関連文献の入手、整理、検討を行った後このような既存の粘土材の構成式をベースにして現在のコードの機能を非線形解析機能→弾－粘塑性解析機能へと拡張していくことが考えられる。また、機能の拡張においては通常の粘土材に比べ、ベントナイトが膨潤性等の特殊な性質を持つことを考慮して適時試験データを利用してモデルの考察、モデルの改良、機能追加を行っていくことが肝要である。

現行の振動試験では試験結果と解析結果の比較から弾性解析の範囲で十分対応できると考える。ただし、人工バリアの埋設期間は数百年以上に及びその間に現状では考えられないような大きな地震、地下深部の環境の変化等が生じる可能性も考えられる。このような、ことから弾－粘塑性解析機能への機能の拡張等についてもその必要性を検討する必要があると思われる。

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、地中構造物等の解析事例を通して、境界条件、地下深部の地震の入力波形等についての知見を得ていくことも肝要である。

上記のことを踏まえ、今後の開発展望の一例を、表5.1-1 に示す。

年 度		平成 5 年 度	平成 6 年 度	平成 7 年 度(注)
1. 文献調査		粘土材の振動特性に係わる文献調査	粘土材の振動特性に係わる文献調査	未 定
2. コードの開発	解 析 機 能	周波数応答解析機能の追加	等価線形解析機能の追加	2相系動的・非線形解析機能の追加もしくは2相系動的粘弾塑性解析機能の追加
	① 2相系支配方程式	ビオの多孔質体内の2相系支配方程式	ビオの多孔質体内の2相系支配方程式	ビオの多孔質体内の2相系支配方程式
	② 土の構成式	線形モデル	等価線形モデル	既存の非線形モデルの導入もしくは既存の粘弾塑性モデルの導入
	③ 運動方程式の解法	周波数応答解析	周波数応答解析	非線形解析もしくは粘弾塑性解析を目的とした直接積分法の拡張
	④ 解析次元	1 ~ 3 次 元		
	⑤ 減衰モデル	履歴減衰	レーリー減衰	レーリー減衰
	⑥ その他	Hour-Glass抑制機能追加 (少ない積分点での解析が可能)	-	ジョイント要素の追加 粘性境界の追加
3. モデル・コードの妥当性の検討		・小型振動試験データを用いた周波数応答特性の比較	・等価線形解析による非線形解析の実施と試験結果との比較検討	・非線形モデルもしくは粘弾塑性モデルによる解析の実施と試験結果との比較検討

(注) 表中の網かけ部分は参考記述であり、未定である。

6. あとがき

昨年度と同様、本年度は公開文献を通じて粘土材の振動特性に関するデータの収集、モデル化及び解析事例の調査を行った。粘性土地盤は特性が時間に依存するなど幾つかの点で砂地盤との相違点を見いだすことができる。粘性土地盤は一般的に液状化がにくいと考えられているが、粒度、地質環境等の影響により液状化が生じる可能性について論じられている。粘性土に繰り返し荷重を与えた場合の変形特性は応力状態、荷重の振動数、荷重回数などの影響が複雑にからんでおり、その動的挙動に関する数学モデルの構築が十分になされていない。

一方、ベントナイトの動的挙動のモデル化をミクロな視点から粒子間構造と粘性土の力学的性質の対応関係より、複雑な粘土粒子の配列をある程度まで単純化して行おうとする考え方もある。従来の構成則においては、繰り返し荷重試験での両振り条件と片振り条件等のせん断応力の反転の仕方による変形挙動の違いが十分に表現できない、主応力方向の回転する応力場での塑性変形挙動が説明できない等の問題点があり、現在それらの対応を含めたより正確な構成則を得るための研究が進められている最中である。間隙水の挙動に関してはBiotの多孔質体の変形理論と圧密理論の援用により解析を行っている事例が多い。ベントナイト中では水中イオンが粘土粒子の荷電によって拘束されている等の現象が存在するが地盤の地震応答解析においてそのようなミクロな現象まで考慮した解析事例は見当たらなかった。

本年度の開発においては、緩衝材の非線形挙動のモデル化のため、等価線形解析機能の追加を行った。文献調査を通じて、残留変形が大きな影響を及ぼさない限り等価線形解析は完全非線形解析にくらべ、安全サイドの評価を行うなどの知見が得られた。一方、残留変形成分が大きな場合等価線形解析では問題が生じてくる。今後、より精密な人工バリアの地震応答解析モデル／コードを開発するうえで次の点が重要であると考えられる。

- ① ベントナイトの粘弾塑性特性に関する実験データの調査、データ取得の為の実験
- ② 緩衝材中の水分移動の定式化、既存モデルの利用の可否
- ③ 実験データに基づくモデル／コードの妥当性評価とコードの改良

7. 参考文献

- (1) 動的解析と耐震設計 1巻 地震動・動的物性 (技報堂出版)
土木学会編
- (2) 動的解析と耐震設計 2巻 動的解析の方法 (技報堂出版)
土木学会編
- (3) 地盤工学における有限要素解析 (培風館)
林正夫 著
- (4) 構造物の動的解析 (科学技術出版)
CLOUGH, PENZIEN 著 大崎順彦 訳
- (5) 有限要素ハンドブック (I)、(II) (培風館)
鷺津久一郎 他著
- (6) マトリックス有限要素法 (培風館)
O. C. Zienkiewics 著 山田嘉昭 訳
- (7) 土質動力学の基礎 (鹿島出版)
石原研爾 著
- (8) 振動および応答解析入門 (培風館)
川井忠彦 著
- (9) 行列計算ソフトウェア (丸善)
村田健郎 著

(10) 土木工学体系8 土質力学 (彰国社版)

石原研爾 著

(11) 地震動のスペクトル解析入門 (鹿島出版)

大崎順彦 訳

(12) 新編 土質工学 (国民科学社)

福岡正己 著

(13) 粘性土の動的性質に関する文献集

社団法人 土質工学会

粘性土の動的性質に関する研究委員会