

深部地下空洞および内部構造物の振動挙動 に関する研究（1）

動力炉・核燃料開発事業団および防災科学技術研究所
との共同研究中間報告

1995年4月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

1995年4月

深部地下空洞および内部構造物の振動挙動に関する研究（1）

--- 動力炉・核燃料開発事業団および防災科学技術研究所との共同研究中間報告 ---

実施責任者：間野 正，石川 博久
報 告 者：志水 伸二，谷口 航

要 旨

わが国のように地震の多い地質環境条件下における地層処分では、人工バリアシステムの健全性を保つために、地震等に対する人工バリアシステムの耐震性評価が必要である。

本研究は、地層処分システムにおける人工バリアシステムの耐震性を、工学規模の人工バリア振動試験により確認評価するとともに、人工バリアシステムの耐震解析評価手法の確立を図るもので、科学技術庁・防災科学技術研究所（以下「防災研究所」とする。）と動力炉・核燃料開発事業団（以下「動燃事業団」とする。）が共同で実施しているものである。

本報告書は、中間報告として現在までの研究成果の一部をまとめたものである。
得られた結果の主な内容を以下に示す。

- (1) 小型模擬緩衝材試験体を用いた振動試験から、シリコンゴムを用いた試験体は、非線形特性を示す要素がなく剛体に近い特性を示し、各地震波特有の周期に目立った応答はしないことが分かった。また、試験と解析との比較から、固有振動数はほぼ一致したが、実地震波による加速度応答に関しては、オーバーパック上の両結果が若干相違する結果が得られた。
- (2) 小型緩衝材試験体を用いた振動試験から、ベントナイトを用いた試験体は、小型模擬緩衝材試験体と同様、非線形特性を示す要素がなく剛体に近い特性を示し、各地震波特有の周期に目立った応答はしないことが分かった。また、試験と解析との比較から、固有振動数に関して、両結果はほぼ近い値を示し、充填密度が増えるにつれ、固有振動数も増えることが推測された。また、試験結果の一部にベントナイト中の加速度が若干低下する点が見られたが、オーバーパックは、地震により特別増幅することなく、人工バリアは一体となって挙動しているものと推測された。

目 次

1. はじめに	1
2. 研究内容	2
3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	4
3.1 解析機能	5
3.1.1 固有値解析	5
3.1.2 地震応答解析	5
4. 小型模擬緩衝材試験体を用いた振動試験と動的解析	9
4.1 小型模擬緩衝材試験体を用いた振動試験	9
4.1.1 小型模擬緩衝材試験体	9
4.1.2 試験方法	12
4.1.3 主要試験結果	14
4.1.3.1 スイープ試験結果	14
4.1.3.2 地震応答試験結果	19
4.1.4 試験結果のまとめ	24
4.2 振動試験データに基づく動的解析	25
4.2.1 固有値解析	25
4.2.1.1 物性値	25
4.2.1.2 モデルと境界条件	26
4.2.1.3 解析結果	27
4.2.2 地震応答解析	28
4.2.2.1 物性値	28
4.2.2.2 加振	28
4.2.2.3 モデルと境界条件	28
4.2.2.4 解析結果	30
4.2.3 解析結果のまとめ	33

5. 小型緩衝材試験体を用いた振動試験と動的解析	34
5.1 小型緩衝材試験体を用いた振動試験	34
5.1.1 小型緩衝材試験体	34
5.1.2 試験方法	39
5.1.3 主要試験結果	41
5.1.3.1 スイープ試験結果	41
5.1.3.2 地震応答試験結果	46
5.1.5 試験結果のまとめ	47
5.2 振動試験データに基づく動的解析	48
5.2.1 固有値解析	48
5.2.1.1 物性値	48
5.2.1.2 モデルと境界条件	49
5.2.1.3 解析結果	50
5.2.2 地震応答解析	53
5.2.2.1 物性値	53
5.2.2.2 加振	53
5.2.2.3 モデルと境界条件	53
5.2.2.4 解析結果	55
5.2.3 解析結果のまとめ	64
6. まとめと今後の課題	65
7. 謝辞	65
8. 参考文献	66

1.はじめに

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材からなる人工バリアシステムは、長期にわたってガラス固化体と地下水の接触や核種の溶出移行の抑制等、様々な物理的・化学的バリア性能を要求される¹⁾。これらバリア性能の前提条件としては、人工バリアシステムが健全な状態で存在することが必要である。したがって、我が国のように地震の多い地質環境条件下における地層処分においては、上記人工バリアシステムの健全性担保のために、地震に対する人工バリアシステムの耐震性評価が必要となる²⁾。

本研究は、地層処分システムにおける人工バリアシステムの耐震性を、工学規模の人工バリア振動試験により確認評価するとともに、人工バリアシステムの耐震解析評価手法の確立を図るものであり、防災研究所と動燃事業団が、平成4年度からの4カ年計画として共同で実施しているものである。

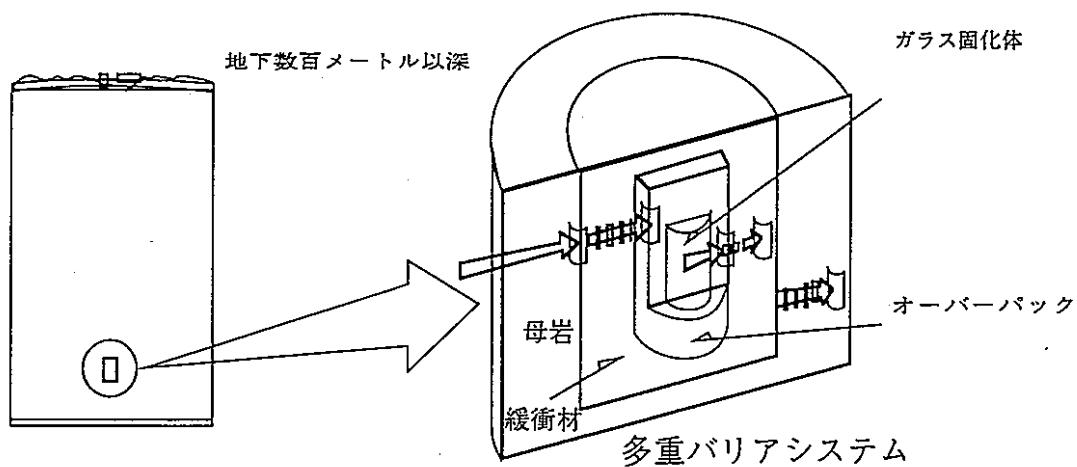


図-1.1 地層処分概念図

2. 研究内容

人工バリアシステムの耐震性評価は、地層処分システムの性能評価の観点から重要なテーマである。しかしながら、人工バリアシステムの構成要素である緩衝材の候補材であるペントナイトは、粘弾塑性特性を有し、水分を吸収して膨潤するという複雑な性質を持つ材料であり、このような性質を有する物質で構成される系の振動挙動に関する評価手法は確立されていない。

そこで、緩衝材の密度等をパラメータとした人工バリアシステムの工学規模の振動試験を行い、それを評価するための地震応答解析モデル／コードの開発及び確認を行い、人工バリアシステムの耐震性評価手法の確立を図る。

研究内容を以下に示す。

- (1) 人工バリアシステムの振動試験（防災研究所担当）
- (2) その耐震解析評価手法の確立（動燃事業団担当）
- (3) 人工バリアシステムの耐震性評価（防災研究所および動燃事業団担当）

緩衝材の候補材であるベントナイトは、特異な材料であるため、相似則を考慮した縮尺模型振動試験に合う適切な代替材料は見当たらない。

したがって、実材料を用いた小型振動試験により、緩衝材の充填密度等の影響を評価した後、実規模により近い中型あるいは、大型振動試験を行い、人工バリアシステムの耐震性を評価することとする。

実材料を用いた試験に先だって、まず初めに内部の状態を可視化できる装置を用いて振動試験を行い、試験手法の確認及び基礎データの取得を行った。

試験の主な内容を以下に示す。

(1) 小型模擬緩衝材振動試験

小型緩衝材振動試験を実施するにあたり、処分坑道横置方式1ユニットの1/10スケールの試験体を用いた小型模擬緩衝材振動試験（緩衝材にシリコンゴムを用いた振動試験）により、小型緩衝材振動試験のための試験手法、装置機能の確認及び基礎データの取得を行うとともに、解析モデル／コードの適用性の確認を行う。

(2) 小型緩衝材振動試験

中型あるいは大型緩衝材振動試験を実施するにあたり、小型模擬緩衝材振動試験と同スケールの試験体を用いた小型緩衝材振動試験により、緩衝材の充填密度等の影響評価、解析モデル／コードの適用性の確認、および中型あるいは大型振動試験のための試験条件及び装置機能の確認を行う。

(3) 中型あるいは大型緩衝材振動試験

小型模擬緩衝材振動試験、小型緩衝材振動試験で得た知見を基に、大型振動台を用いたより実規模に近い中型あるいは大型緩衝材振動試験を行って、人工バリアシステムの耐震性を評価・確認するとともに、耐震解析評価手法の確立を図る。

現在、小型模擬緩衝材振動試験、小型緩衝材振動試験は、ほぼ終了している段階である。

3.人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発³⁾

人工バリアシステムの地震応答解析では、岩盤・緩衝材の特性、岩盤・緩衝材中の間隙水の影響度合、埋設物・緩衝材・岩盤の形状、埋設物・緩衝材・岩盤の相互作用を適確に表わすことが解析コードに要求される。これらを全て満たす解析コードは、現在のところ存在していないため、それらを適確に表現できる解析モデル／コードの開発が必要となる。そこで、本研究では、粘弾塑性モデル、透水モデル、各種減衰モデル、各種境界条件等を表現でき、有効応力解析、一～三次元解析、構造物－地盤の相互作用解析、二相系連成解析等を行えるコード開発を最終目標とする。これらのことを念頭に、現在までに以下の仕様に基づきコードを開発した。

表-3.1 開発コード仕様

解析手法	有限要素法
次元	一次元、二次元、三次元
解法	直接積分法
応力～ひずみモデル	弾性モデル
減衰モデル	レーリー減衰
応力モデル	有効応力モデル
出力	加速度、速度、変位、応力、ひずみ、間隙水圧

3.1 解析機能

開発したコードにおいて、固有値解析⁴⁾はサブスペース法、地震応答解析⁴⁾では運動方程式をニューマーク法を用いて解く方法とした。

3.1.1 固有値解析

固有値解析は、以下の手順で行う。

- (1) 要素剛性、質量行列の作成
- (2) 全体剛性、質量行列の作成
- (3) サブスペース法による固有値計算

図-3.1の左側に固有値解析のフローチャートを示す。

3.1.2 地震応答解析

地震応答解析は、以下の手順で行う。

- (1) 作業エリア（メモリ）の算定
- (2) 要素剛性、質量、減衰行列の作成
- (3) 全体剛性、質量、減衰行列の作成
- (4) 初期応力、水圧の加算
- (5) 地震荷重の計算
- (6) 時間離散化された運動方程式の計算

図-3.1～3.3に地震応答解析フローチャートを示す。

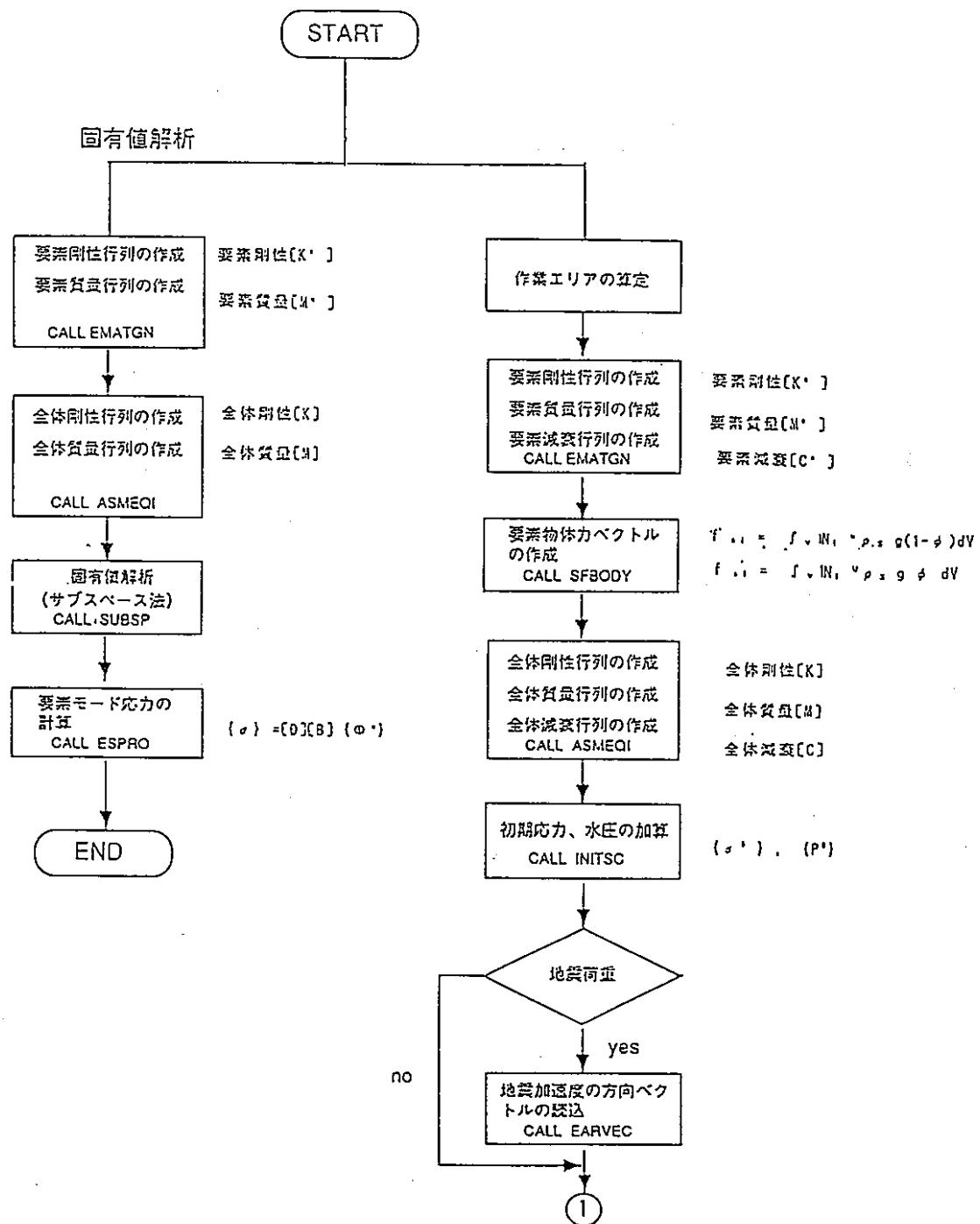


図-3.1 プログラムフロー1

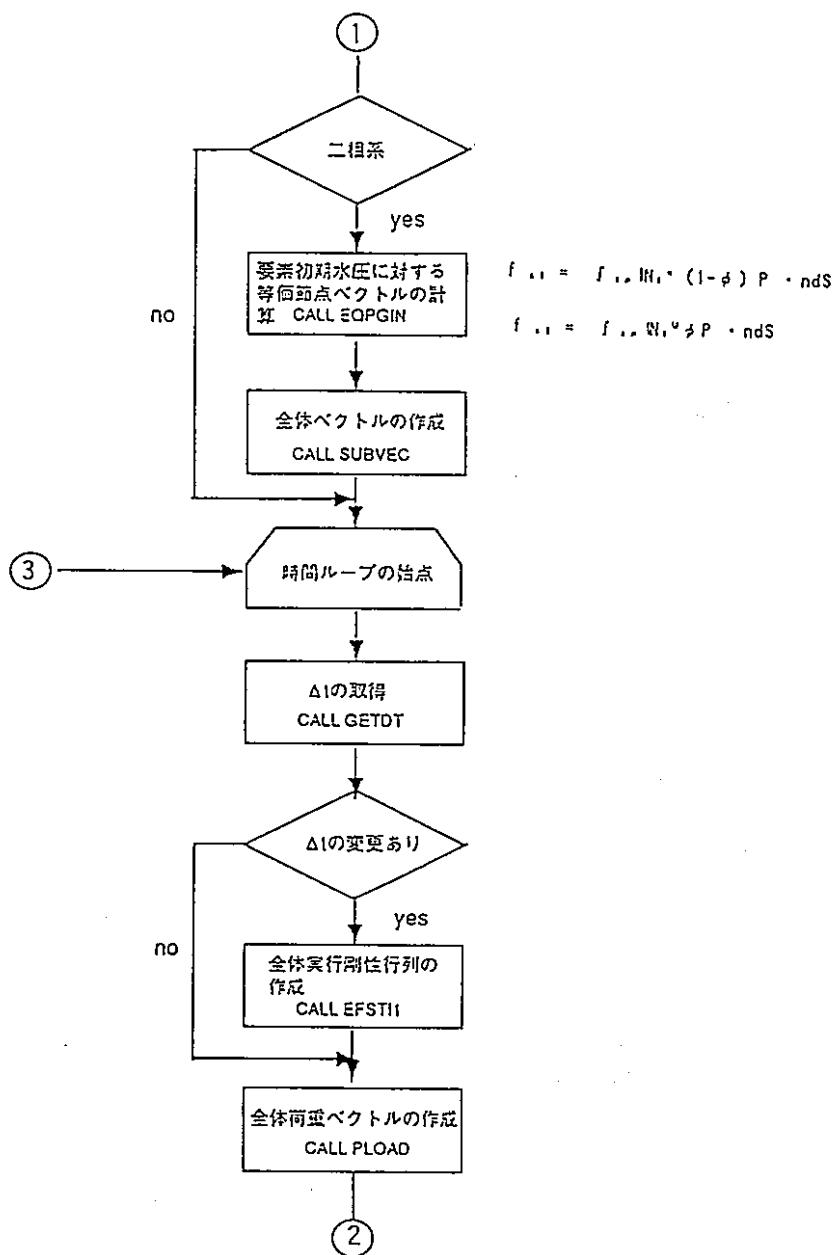


図-3.2 プログラムフロー2

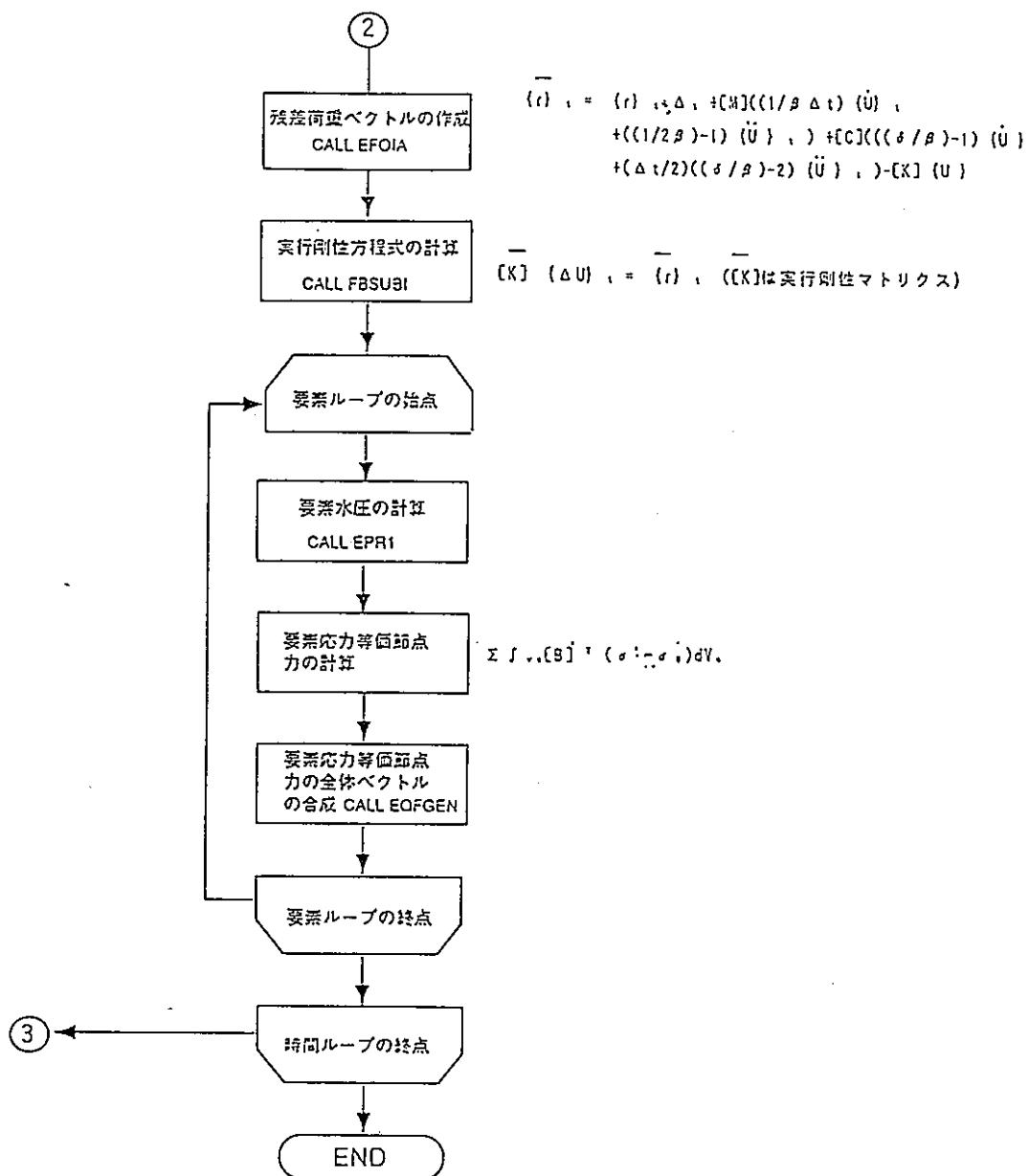


図-3.3 プログラムフロー3

4. 小型模擬緩衝材試験体を用いた振動試験と動的解析

4.1 小型模擬緩衝材試験体を用いた振動試験⁵⁾

4.1.1 小型模擬緩衝材試験体

模擬緩衝材試験体は、2次元小型振動台に搭載可能な大きさにするために、現在考えられている廃棄物定置方式案¹⁾の内、処分坑道横置方式1ユニットの1/10スケールのモデルとした。小型模擬緩衝材試験体は、模擬緩衝材、模擬オーバーパック、拘束容器からなり、模擬緩衝材は、振動試験時にオーバーパックの挙動を直接観察できるような透明なゴム状物質で、取り扱いが比較的容易なシリコンゴム（信越シリコンKE-103）とした。模擬オーバーパックは、候補材である炭素鋼製とし、シリコンゴムの中心に設置した。容器はアクリル製とし、ステンレス鋼で補強した。

小型模擬緩衝材試験体の振動台設置状況を図-4.1.1、写真-4.1.1に、試験体寸法を図-4.1.2に示すとともに、試験体の仕様を表-4.1.1に示す。また、継ぎ手方式の2次元小型振動台の性能を表-4.1.2に示す。

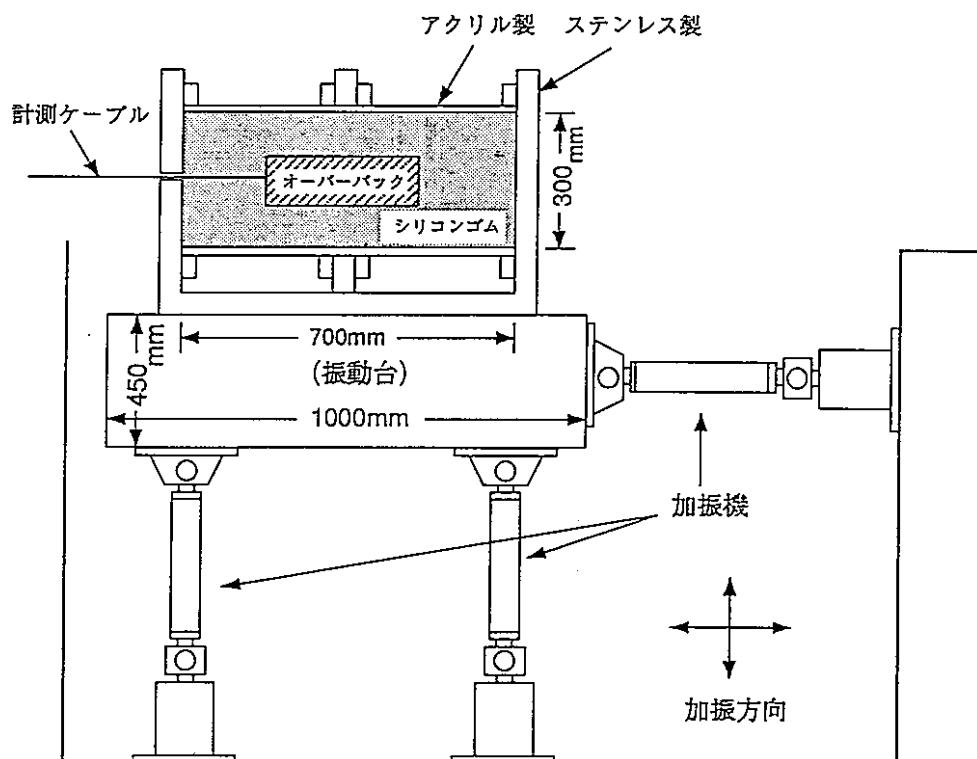


図-4.1.1 小型模擬緩衝材試験体の振動台設置状況図

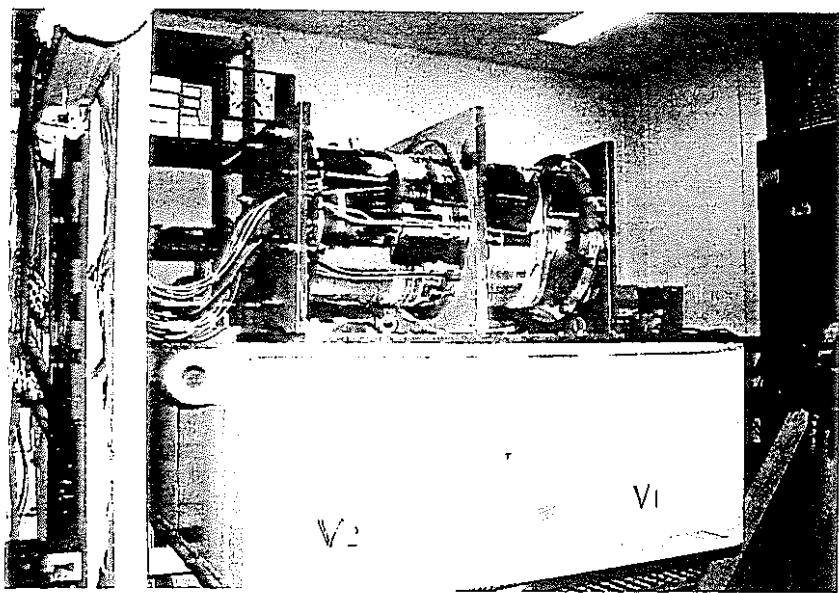


写真-4.1.1 小型模擬緩衝材試験体設置状況

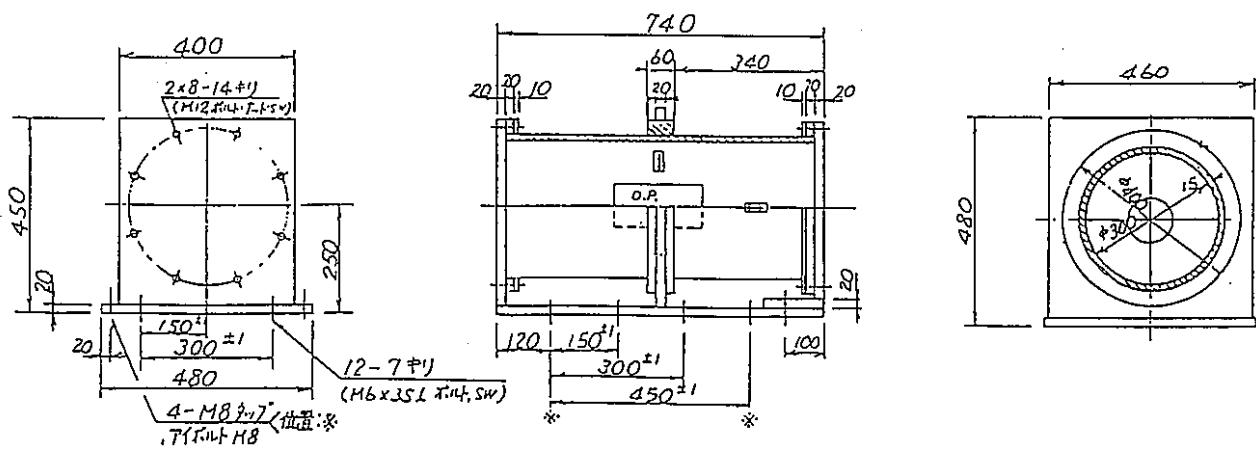


図-4.1.2 小型模擬緩衝材試験体寸法図 (単位mm)

表-4.1.1 小型模擬緩衝材試験体の仕様

拘束容器	
形状	円筒形で密封型
材質	アクリル
寸法	直径300mm x 長さ700mm
肉厚	15mm
補強材	ステンレス鋼
模擬緩衝材	
材質	シリコンゴム
外観	無色透明
比重	0.97 (25度の時)
硬度	18
模擬オーバーパック	
形状	円筒形
材質	炭素鋼
重量	12kg
寸法	直径100mm x 長さ200mm

表-4.1.2 繼ぎ手方式2次元振動台の諸元

振動台面積	1000mm x 1000mm
最大搭載重量	1 ton
最大変位 (水平・鉛直共)	50mm
最大速度 (水平)	620mm/sec
最大速度 (鉛直)	140mm/sec
最大加速度 (水平・鉛直共)	1G (980gal)

4.1.2 試験方法

(1) 計測

計測は、加速度及び圧力について行った。各部の計測は、水平方向及び鉛直方向の2方向の加振を行うため、2方向分のセンサーを取付けた。なお、模擬オーバーパックには、3成分の加速度計を取付けた。各部の計測点は以下の通りである。

振動台

水平：加速度計 1 点

鉛直：加速度計 1 点

拘束容器

水平：加速度計 2 点（台座、上面各 1 点）

 圧力計 1 点 (BX1) (内側側面)

鉛直：加速度計 2 点（台座、上面各 1 点）

 圧力計 1 点 (BZ1) (内側側面)

シリコンゴム中

水平：加速度計 2 点 (CX1、CX2)

鉛直：加速度計 2 点 (CZ1、CZ2)

模擬オーバーパック

水平：加速度計 2 点 (OX1、OX2) 、圧力計 1 点 (BX2)

鉛直：加速度計 2 点 (OZ1、OZ2) 、圧力計 1 点 (BZ2)

奥行き：加速度計 2 点 (OY1、OY2)

これらデータの同時記録を行った。収録はデジタルテープレコーダーを用い、200Hzでサンプリングした。各部のセンサー（振動台、拘束容器の台座及び上面を除く）配置を図-4.1.3に示す。なお、加速度計には共和製AS-5GBを用い、圧力計には共和製BE-10KCを用いた。

(2) 試験項目

振動試験は、水平方向及び鉛直方向とも同様で、最初にスイープ波加振により、小型模擬緩衝材試験体であるシリコンゴム及びシリコンゴム中に置いた模擬オーバーパックの固有振動数の検索を行い、次に、実地震波による地震応答試験を行った。実地震波は振動実験で一般的に用いられる各種地震波を用いた。なお、これらの試験に先立って拘束容器単体の応答試験も実施し、模擬緩衝材等の充填後の応答挙動と比較した。

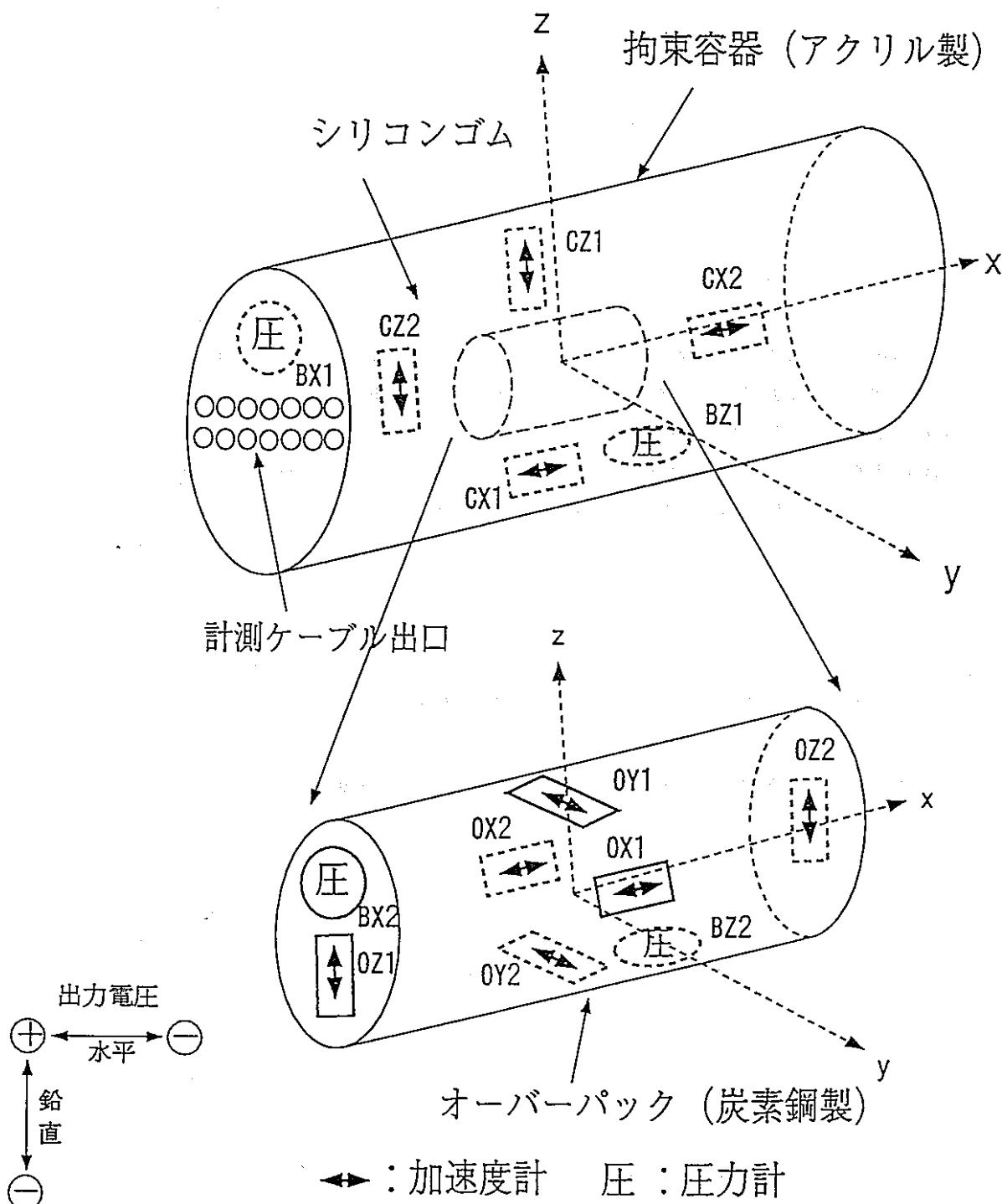


図-4.1.3 センサー配置図

4.1.3 主要試験結果

スイープ加振から、水平、鉛直方向における固有振動数及び応答倍率等が得られ、実地震波加振から、各地震波による最大加速度比及びシリコンゴムの最大圧力が得られた。

ここでは、得られた結果の一部を示す。

4.1.3.1 スイープ試験結果

(1) 拘束容器の振動特性

スイープ加振は、水平方向及び鉛直方向ともに周波数帯10～60Hzまでを300秒、60～10Hzまでを同じく300秒とし、加振加速度を100galとして試験を行った。スイープ加振で拘束容器の上面に取付けた加速度計と振動台に取付けた加速度計から求めた応答倍率及び固有振動数を表-4.1.3に示す。

固有振動数は、模擬緩衝材等の充填後は充填前に比べて多少低くなっているが、応答倍率は、充填前後でほとんど変わらないことが分かった。また、応答倍率は、水平方向では2～3倍程度、鉛直方向では1倍程度と、拘束容器の影響はあまり受けないと推測された。

表-4.1.3 拘束容器の固有振動数及び応答倍率

加振方向	加振条件	加振周波数帯 (Hz)	固有振動数 (Hz)	応答倍率
水平	充填前	10～60	55.2	2.8
		60～10	53.5	2.1
	充填後	10～60	50.0	2.7
		60～10	49.5	2.6
鉛直	充填前	10～60	59.5	1.3
		60～10	59.3	1.2
	充填後	10～60	51.5	1.3
		60～10	51.2	1.2
スイープ時間300秒、加振加速度100gal				

(2) 小型模擬緩衝材試験体の振動特性

スイープ加振は、水平方向及び鉛直方向ともに周波数帯10~60Hzまでを300秒、60~10Hzまでを同じく300秒とし、それぞれの加振加速度を20gal、50gal及び100galとして試験を行った。表-4.1.4に周波数帯10~60Hzにおける小型模擬緩衝材試験体の固有振動数及び応答倍率を示す。

表-4.1.4 小型模擬緩衝材試験体の固有振動数及び応答倍率

加振方向	計測点名	20gal		50gal		100gal	
		固有振動数 (Hz)	応答倍率	固有振動数 (Hz)	応答倍率	固有振動数 (Hz)	応答倍率
水平	OX1	52.7	33.7	52.3	21.2	54.0	19.3
	OX2	52.7	21.1	51.3	16.7	54.0	17.9
	CX1	51.8	22.2	51.3	20.1	51.5	12.6
	CX2	52.3	8.0	52.3	5.7	53.8	4.8
鉛直	OZ1	53.3	55.4	53.2	53.0	53.2	27.6
	OZ2	51.7	36.9	53.2	29.6	53.3	16.3
	CZ1	53.3	31.2	53.2	29.6	53.3	18.0
	CZ2	53.3	18.1	53.2	15.9	53.3	9.8
スイープ時間300秒 加振周波数帯10~60Hz							

1) 水平方向加振の特徴

計測点OX1及びOX2は、模擬オーバーパックに取付けた加速度計であり、計測点CX1及びCX2は、シリコンゴム中に置いた加速度計である。これらと振動台に取付けた加速度計から応答伝達関数を求めた。周波数帯10～60Hzと60～10Hzの振動挙動を比較したところ、固有振動数及び応答倍率は多少違うものの、応答曲線は同じ傾向を示した。このことから本試験体には、摩擦やギャップなど強い非線形特性を示す要素はないことが推測された。

加振加速度を20gal、50gal及び100galとした時の応答曲線を比較したところ変化は顕著にあらわれた。以下に周波数帯10～60Hz、加振加速度を20gal、50gal及び100galとしたときの応答伝達関数の特徴について述べる。

模擬オーバーパックに取付けたOX1とOX2は、対称に取付けた加速度計である。OX1とOX2を比較したところ、応答曲線の形状は似ており、表-4.1.4から固有振動数もほとんど同じ値を示すことが分かった。応答倍率は20gal及び50galの時、OX1はOX2より1.5倍程度大きかった。

図-4.1.4に20gal、50gal及び100galで加振した時のOX1の応答伝達関数を示す。応答曲線は、加振加速度の大きさによる変化が顕著に現われていた。特に、100galの加振時は、20gal及び50gal加振時の応答曲線の谷の辺り(52～56Hz近辺)が盛り上がりっていた。また、表-4.1.4から応答倍率は約17～34倍の範囲であり、応答倍率は加振加速度が大きくなるに従って小さくなる傾向であった。固有振動数は51～54Hzの範囲であった。

シリコンゴム中の加速度計CX1は、模擬オーバーパックの下方に設置し、CX2は模擬オーバーパックの横に設置したものである。CX1とCX2を比較したところ、応答曲線は100galの加振以外では、同じような形状であったが、固有振動数はCX2の方が高くなっていたり、応答倍率はCX2よりもCX1の方が約3倍程度大きかった。

図-4.1.5に20gal、50gal及び100galで加振した時のCX2の応答伝達関数を示す。CX1の応答曲線は、加振加速度によりほとんど変化しなかったが、加振加速度100gal時のCX2では、応答曲線の山の部分が広がっていた。表-4.1.4から、応答倍率は約5～22倍の範囲であり、応答倍率は加振加速度が大きくなるに従って小さくなる傾向であった。固有振動数は、51～54Hzの範囲であった。

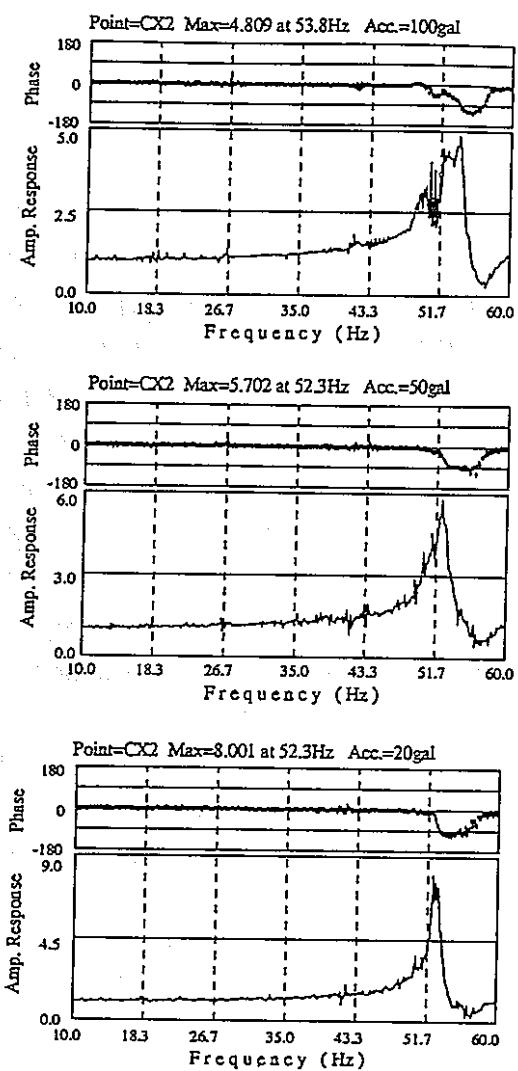
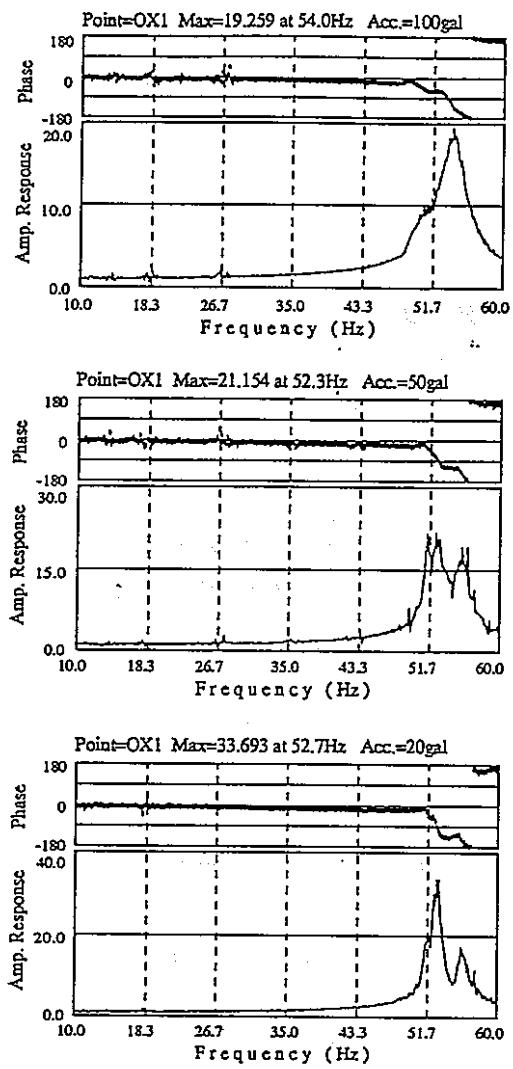


図-4.1.4 計測点OX1の応答伝達関数 図-4.1.5 計測点CX2の応答伝達関数

2) 鉛直方向加振の特徴

計測点OZ1及びOZ2は模擬オーバーパックに取付けた加速度計であり、計測点CZ1及びCZ2はシリコンゴム中に置いた加速度計である。これらと振動台に取付けた加速度計から応答伝達関数を求めた。周波数帯10~60Hzと60~10Hzの振動挙動を比較したところ、固有振動数及び応答倍率はばらついているものの、共振曲線は同じ傾向を示した。このことから本試験体には、摩擦やギャップなど強い非線形特性を示す要素はないことが推測された。

加振加速度を20gal、50gal及び100galとした時の応答曲線を比較したところ、水平方向加振時ほどではないが変化があらわれた。以下に周波数帯10~60Hz、加振加速度を20gal、50gal及び100galとした時の応答伝達関数の特徴について述べる。

模擬オーバーパックに取付けたOZ1とOZ2は、対称に取付けた加速度計である。OZ1とOZ2を比較したところ、固有振動数はほとんど同じ値を示したものの、OZ2の応答曲線には、応答倍率の比較的大きい盛り上がり(51~52Hz付近)があった。また、OZ1の応答倍率は、OZ2のそれより、1.5倍程度大きかった。

次に、加振加速度の大きさで応答伝達関数を比較した。20galと50gal加振における応答曲線は、ほとんど同じ形状を示し、100gal加振における応答曲線は、水平方向加振時(100gal)のOX1及びOX2と同じ傾向を示した。表-4.1.4から応答倍率は16~55倍の範囲であり、応答倍率は加振加速度が大きくなるに従って、小さくなる傾向であることが分かった。また、固有振動数は、52~53Hzの範囲であった。

シリコンゴム中に置いたCZ1は、模擬オーバーパックの上方に置き、CZ2は模擬オーバーパックの横に置いた加速度計である。CZ1とCZ2を比較したところ、表-4.1.4に示すように固有振動数は53Hz近辺でほとんど差はなく、応答曲線も同じ傾向を示していた。応答倍率はCZ2よりもCZ1の方が約2倍程度大きかった。

表-4.1.4から、模擬オーバーパックと同様、応答倍率は10~32倍の範囲であり、応答倍率は加振加速度が大きくなるに従って小さくなる傾向であることが分かった。また、固有振動数は、模擬オーバーパックとほぼ同じ53Hz近辺であった。

4.1.3.2 地震応答試験結果

高レベル放射性廃棄物は地下数百メートル以深に埋設されるため、振動実験で使用する地震波も地下深部で観測されたものが適当であると思われる。しかしながら、現在、振動実験で利用できる地下深部で得られた大加速度の地震波は見当たらない。そのため、一般的に振動実験で使用される代表的な実地震波を用いた。用いた実地震波は、エルセントロのN-S成分（以下EL-NSとする）、八戸のE-W成分（HC-EW）及び宮城県沖のE-W成分（MI-EW）の3種類である。加振加速度を最小50gal程度から段階的に大きくして、最大加速度1G（980gal）近くまでの加振を行った。

振動台性能から、振動台の最大変位が50mm以内になるように、長周期成分をカットするハイパスフィルター（2.24Hz以下の周波数をカットする）を使用して加振を行った。なお、ハイパスフィルターの影響については、各地震波により明確な差はあらわれず、本試験において、ハイパスフィルター使用の影響はないものと考えられた。

地震応答の評価は、振動台の最大加速度を基準とした各計測点（拘束容器上面に取付けた加速度計、OX1、OX2、CX1、CX2、OZ1、OZ2、CZ1、CZ2）の最大加速度比及びシリコンゴム最大圧力（BX1、BX2、BZ1、BZ2）と加振加速度の関係から行った。

(1) 最大加速度比の比較

図-4.1.6に示す水平方向加振時において、加振加速度が250～500gal程度までの一 部を除けば、模擬オーバーパック上の計測点OX1及びOX2の最大加速度比は1倍程度であった。また、OX1及びOX2はいずれの地震波加振でも同じ最大加速度比を示した。これは、OX1及びOX2が、模擬オーバーパックに対称に取付けた加速度計であるため、最大加速度比が同じになったものと考えられる。

また、シリコンゴム中の計測点CX1及びCX2の最大加速度比は、加振加速度の大きさによらず、両計測点ともに1倍程度であった。

図-4.1.7に示す鉛直方向加振時において、加振加速度が250～500gal程度までは、オーバーパック、シリコンゴムに設置した計測点の最大加速度比はばらついており、特に100gal付近では2倍以上になった。しかしながら、500gal以上の加振加速度では、水平方向加振時と同様1倍程度であった。また、いずれの地震波加振でも、500gal程度まではOZ1の最大加速度比が大きく、500gal以上では、両計測点とも最大加速度比は1倍程度であった。これは、OZ1及びOZ2は模擬オーバーパックに対称に取付けた加速度計ではあるが、500gal程度まではOZ1の近くに取付けてある圧力計が影響しているものと推測された。

以上のことから、最大加速度比は、水平、鉛直方向加振とも同様な傾向を示し、3種類の実地震波（EL-NS、HC-EW、MI-EW）加振でもほぼ同様な傾向を示すことが分かった。

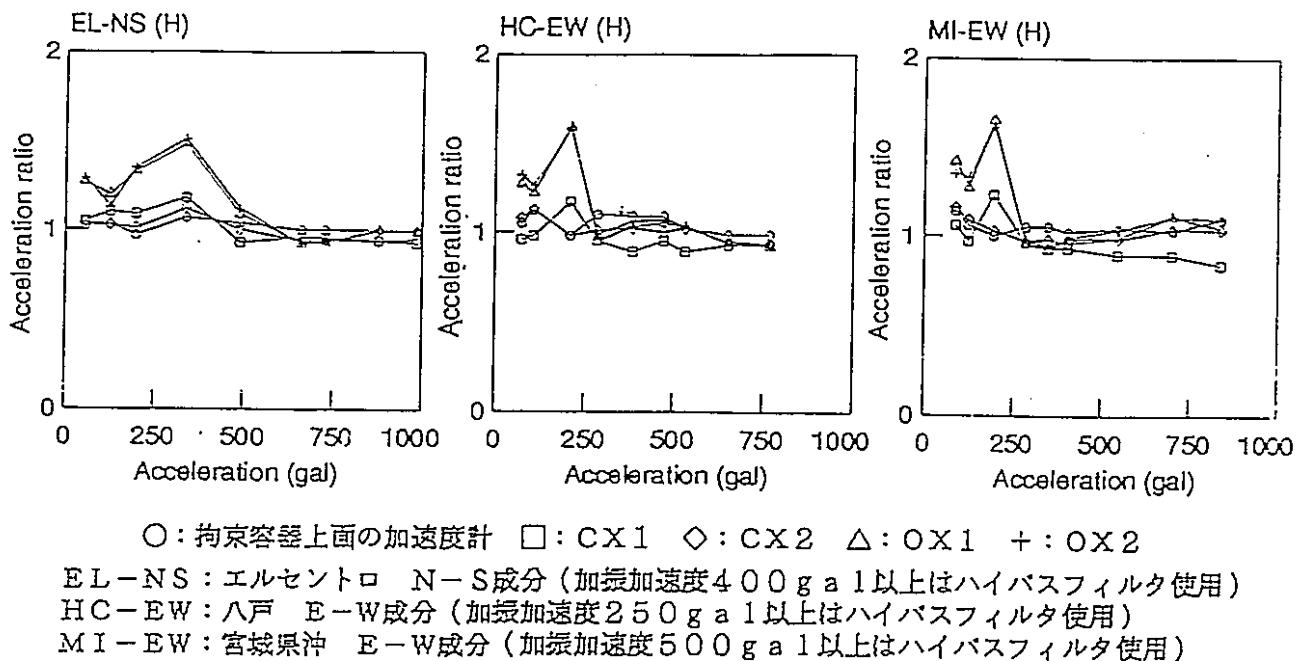


図-4.1.6 水平方向加振時の最大加速度比

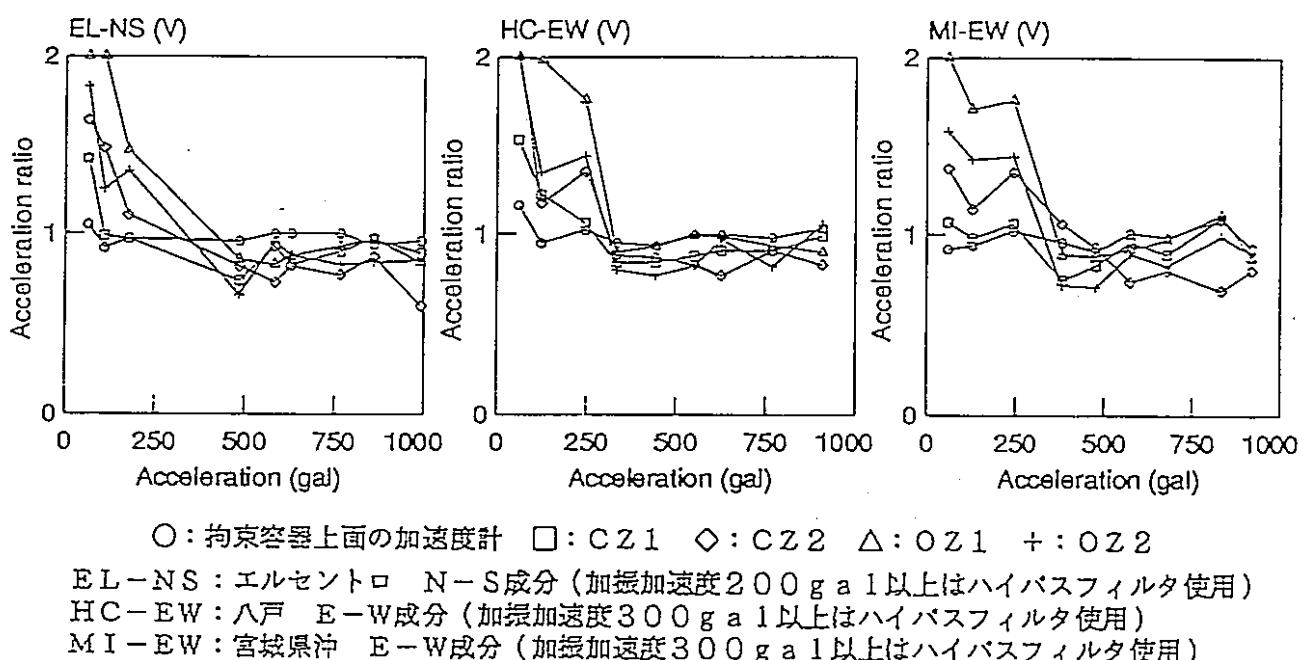


図-4.1.7 鉛直方向加振時の最大加速度比

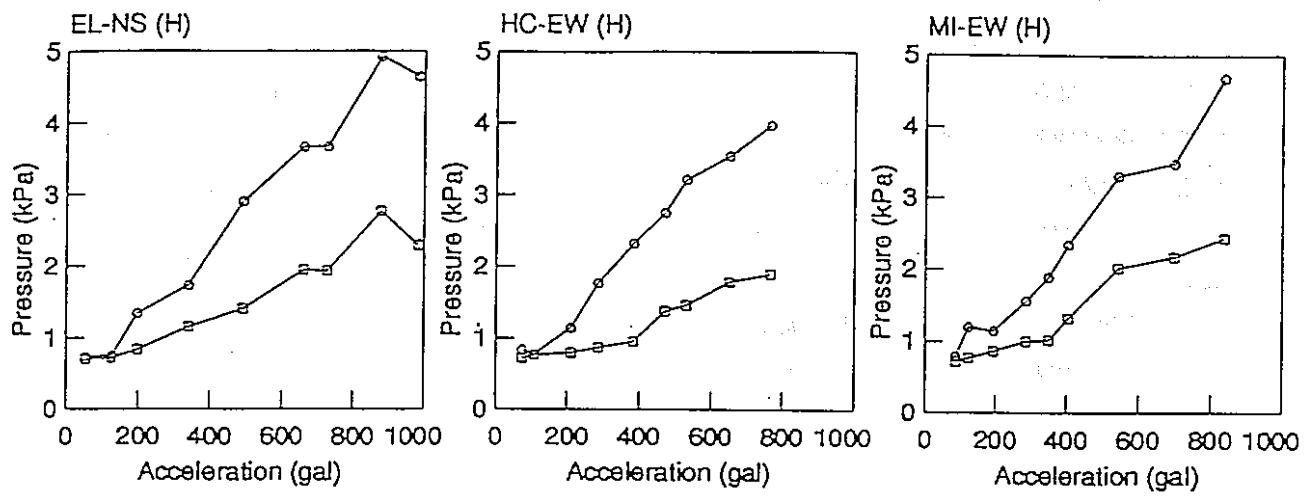
(2) 最大圧力の比較

図-4.1.8に示す水平方向加振時において、シリコンゴム中の圧力を比較した結果、BX1はBX2の2倍以上の圧力であった。

図-4.1.9に示す鉛直方向加振時において、シリコンゴム中の圧力を比較した結果、BZ1及びBZ2の最大圧力は同じであった。

水平方向加振時及び鉛直方向加振時の最大圧力を比較すると、BX2、BZ1及びBZ2は同じ大きさであり、BX1は他の2倍の大きさであった。傾向として、加振加速度に比例して最大圧力も大きくなつた。

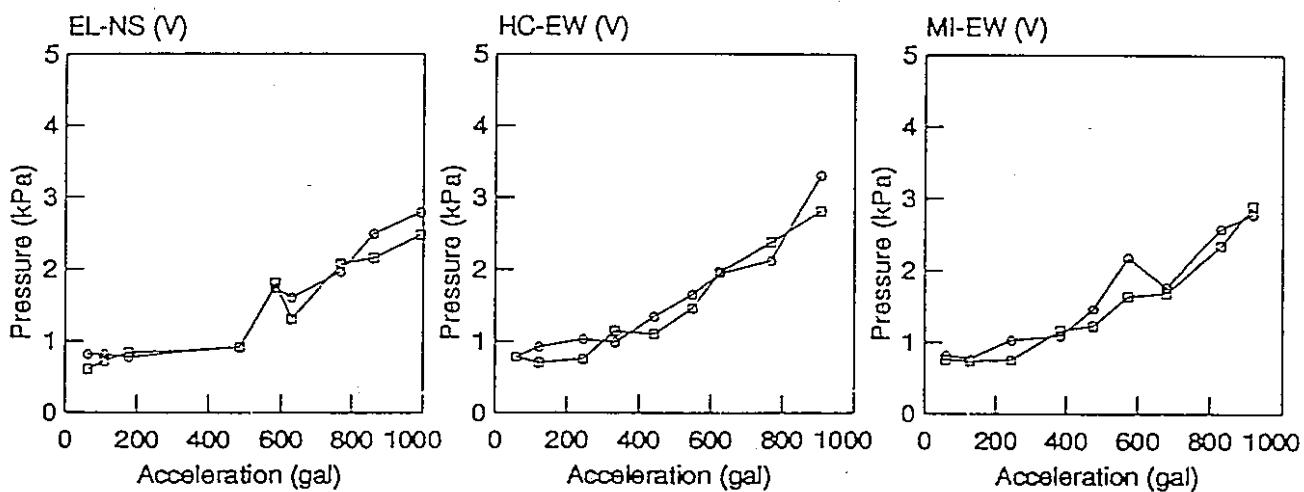
また、シリコンゴムの最大圧力分布の形状を比較すると、各計測点の分布形状は、3種類の実地震波（EL-NS、HC-EW、MI-EW）加振ともほぼ同様な傾向を示した。



○ : BX1 □ : BX2

EL-NS : エルセントロ N-S成分 (加振加速度400 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)
 HC-EW : 八戸 E-W成分 (加振加速度250 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)
 MI-EW : 宮城県沖 E-W成分 (加振加速度500 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)

図-4.1.8 水平方向加振時のシリコンゴムの最大圧力



○ : BZ1 □ : BZ2

EL-NS : エルセントロ N-S成分 (加振加速度200 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)
 HC-EW : 八戸 E-W成分 (加振加速度300 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)
 MI-EW : 宮城県沖 E-W成分 (加振加速度300 g a 1以上はハイパスフィルタ使用)

図-4.1.9 鉛直方向加振時のシリコンゴムの最大圧力

4.1.4 試験結果のまとめ

小型模擬緩衝材試験体を用いて、スイープ加振及び実地震波加振を行い、試験手法の確認及び基本データの取得を行った。

スイープ加振から、水平、鉛直方向加振時の固有振動数は、51～54Hzであり、小型模擬緩衝材試験体（模擬オーバーパック及びシリコンゴム）は、非線形性を示す要素がなく、剛体に近い特性を示すことが分かった。

実地震波加振から、小型模擬緩衝材試験体は、各地震波特有な周期に目立った応答はしないことが分かった。

これらから、本試験体では、模擬オーバーパック及びシリコンゴムが一体になり、剛体として挙動していたものと推測された。

4.2 振動試験データに基づく動的解析³⁾

本研究で開発したモデル／コードの実現象への適応性評価の為、小型模擬緩衝材振動試験結果の一部に基づいて、固有値解析及び地震応答解析を行った。

4.2.1 固有値解析

人工バリアモデルに対し固有値解析を行い、その結果をまとめた。解析対象としては、小型模擬緩衝材振動試験の試験体と同寸法のモデルとした。

4.2.1.1 物性値

解析に用いた物性値を表-4.2.1に示す。

シリコンゴムの物性については、製品仕様及び便覧⁶⁾の値を参考にして、オーバーパックの物性については、便覧⁷⁾の値を参考にして設定した。

表-4.2.1 解析に用いた物性値

シリコンゴム	せん断弾性係数 (gf/cm ²)	2.3×10 ³
	ポアソン比	0.495
	重量密度 (g/cm ³)	0.97
	減衰定数	0.1
オーバーパック	せん断弾性係数 (gf/cm ²)	8.1×10 ³
	ポアソン比	0.3
	重量密度 (g/cm ³)	7.8

4.2.1.2 モデルと境界条件

(1) 解析用モデルの形状

図-4.1.2の試験体寸法図に基づき、円柱状のモデルを用いて解析を実施した。モデル形状を図-4.2.1に示す。なお、本モデルは、節点数891、要素数800である。

(2) 解析用の拘束条件

小型振動試験供試体の容器の部分にあたるモデルの側面及び端面については、X,Y,Z軸方向の拘束を行った。拘束条件を図-4.2.1に示す。

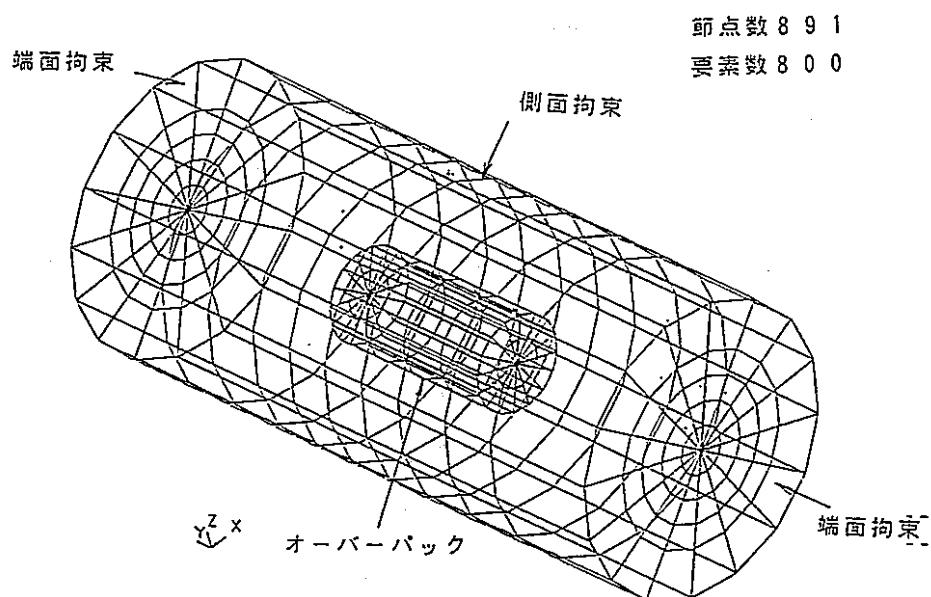
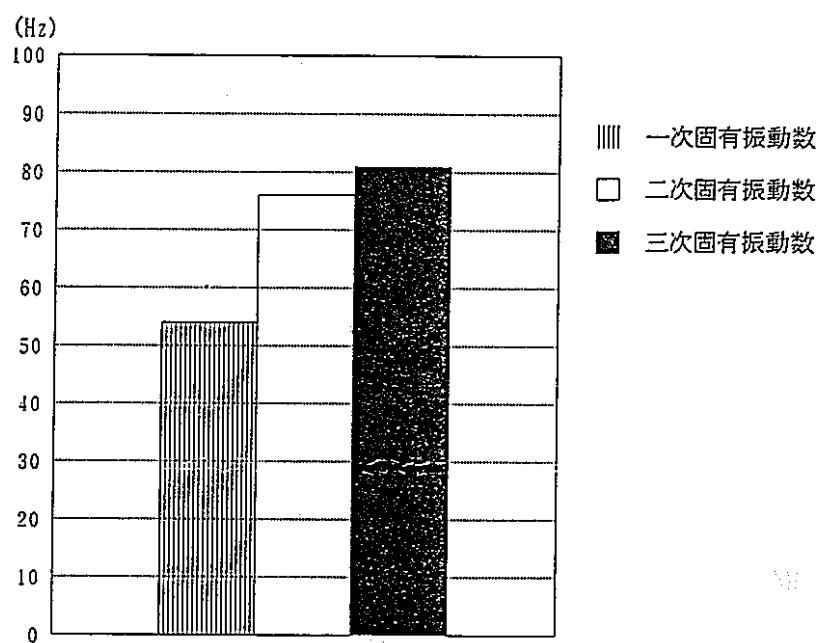


図-4.2.1 固有値解析用モデルと拘束条件

4.2.1.3 解析結果

小型模擬緩衝材振動試験を模擬した解析において、一次固有振動数は54Hz、二次固有振動数は76Hz、三次固有振動数は81Hzとなった。

小型模擬緩衝材試験において、水平方向加振におけるオーバーパック上の計測点(OX1、OX2)の固有振動数は約51～54Hz近辺（表－4.1.4、図－4.1.4参照）であり、解析結果の一次固有振動数54Hzとほぼ一致していた。



図－4.2.2 固有振動数

4.2.2 地震応答解析

小型模擬緩衝材振動試験における実地震波による水平方向加振時の試験データの一部を用いて解析との比較を行った。

ここでは、EL-NS（エルセントロN-S成分）地震波の結果を用い、加速度について検討した。

4.2.2.1 物性値

解析に用いた物性値は、固有値解析での値と同様であり、表-4.2.1に示す。

4.2.2.2 加振

加振方向は水平方向とし、試験において容器上で計測された地震波（エルセントロ地震模擬入力波）を用いて、加振開始から10秒間の解析を行った。

4.2.2.3 モデルと境界条件

(1) モデル形状

加振方向、モデルの対称性を考慮し、1/8モデルにて解析を実施した。モデル形状を図-4.2.3に示す。なお、本解析で用いたモデルの要素数は264、節点数は372である。

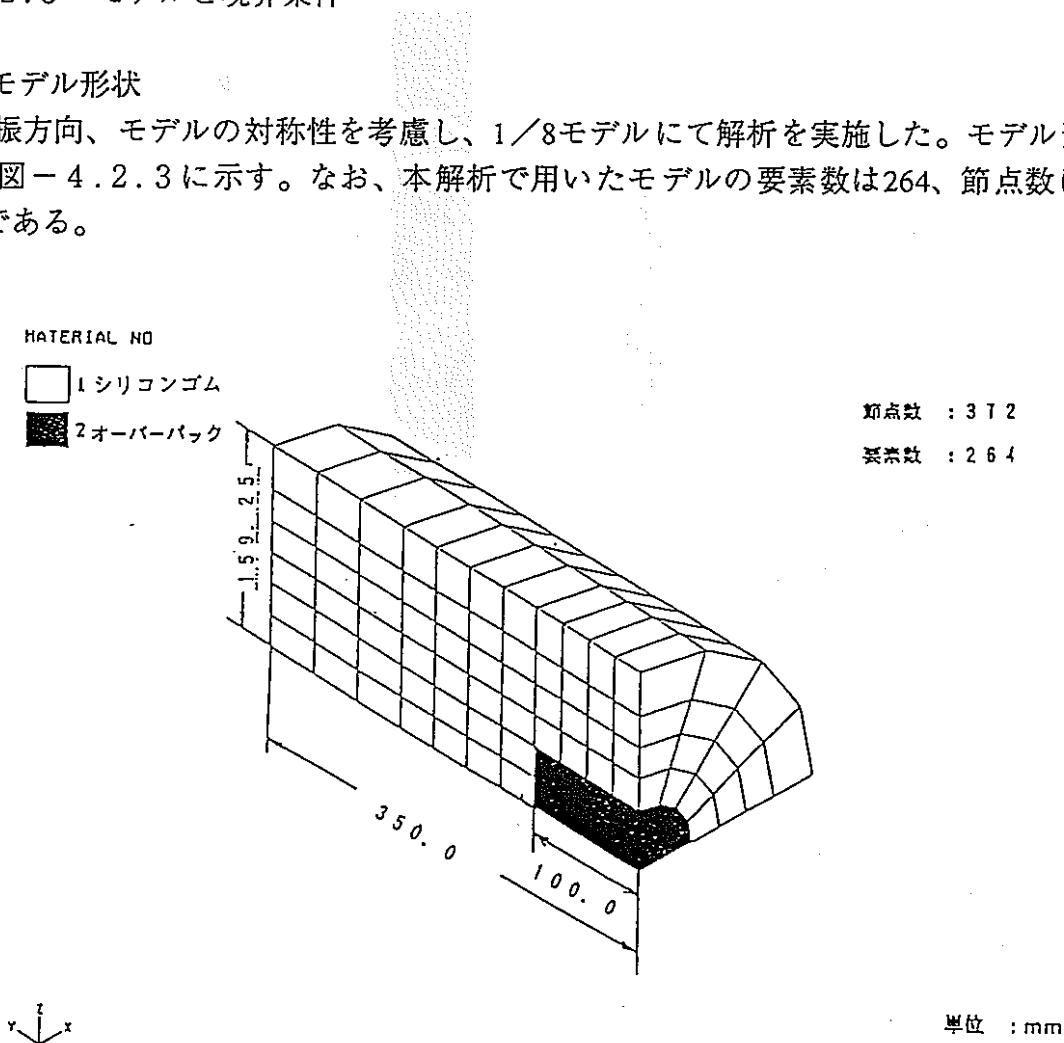


図-4.2.3 小型模擬緩衝材振動試験解析用モデル

(2) 境界条件

全体モデルの側面及び端面にあたる部分の節点についてはX,Y,Z軸方向の拘束を行った。また、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。

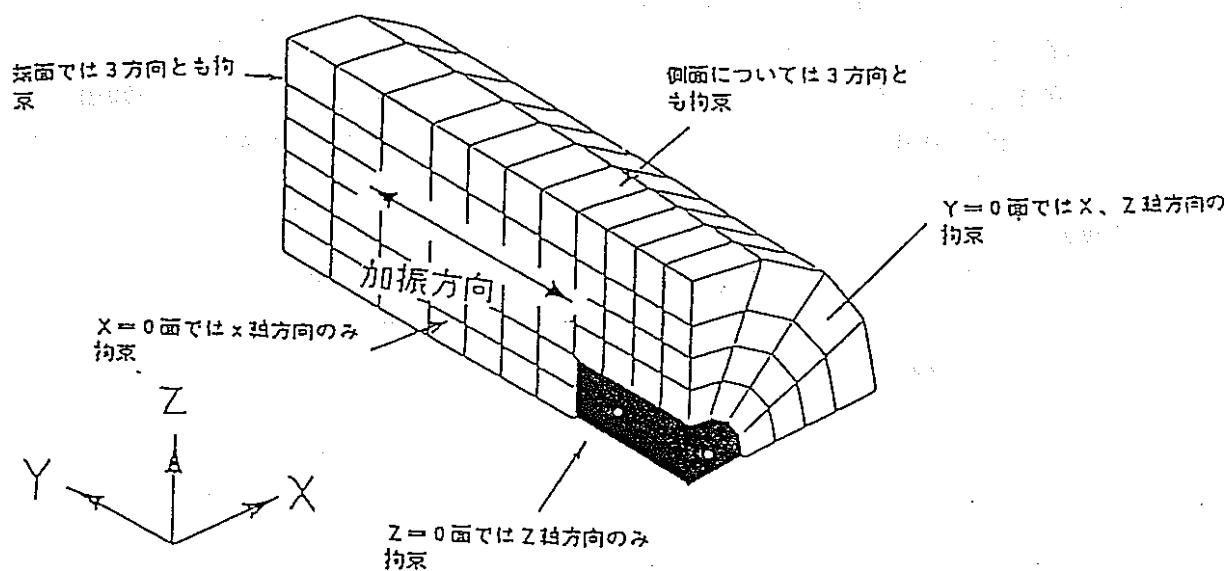


図-4.2.4 解析用モデルの拘束条件

4.2.2.4 解析結果

図-4.2.5, 6に試験結果と解析結果の比較を示す。各図の左上に示した入力波形は、試験において容器上で計測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、各図の上に示すようにオーバーパック上の点A (OX1) 、シリコンゴム中の点B (CX1) 、点C (CX2) において行なった。

図-4.2.5の加速度応答時刻歴に関する結果及び図-4.2.6のフーリエスペクトルに関する結果から、試験データにおいて、すべての点における最大加速度は、入力地震波とほぼ一致し、人工バリアは一体となって振動していることが観測された。一方、解析結果において、点A (オーバーパック) の最大加速度は、入力地震波及び点B、点Cのそれより、約30%程度大きく、人工バリア内でオーバーパックは、若干増幅されていることが推測された。

また、フーリエスペクトルを比較すると試験、解析とも同様な形状を示した。特に、点A (オーバーパック) において、スペクトルは、試験、解析とも55Hz近辺で他の点より若干増幅されていた。

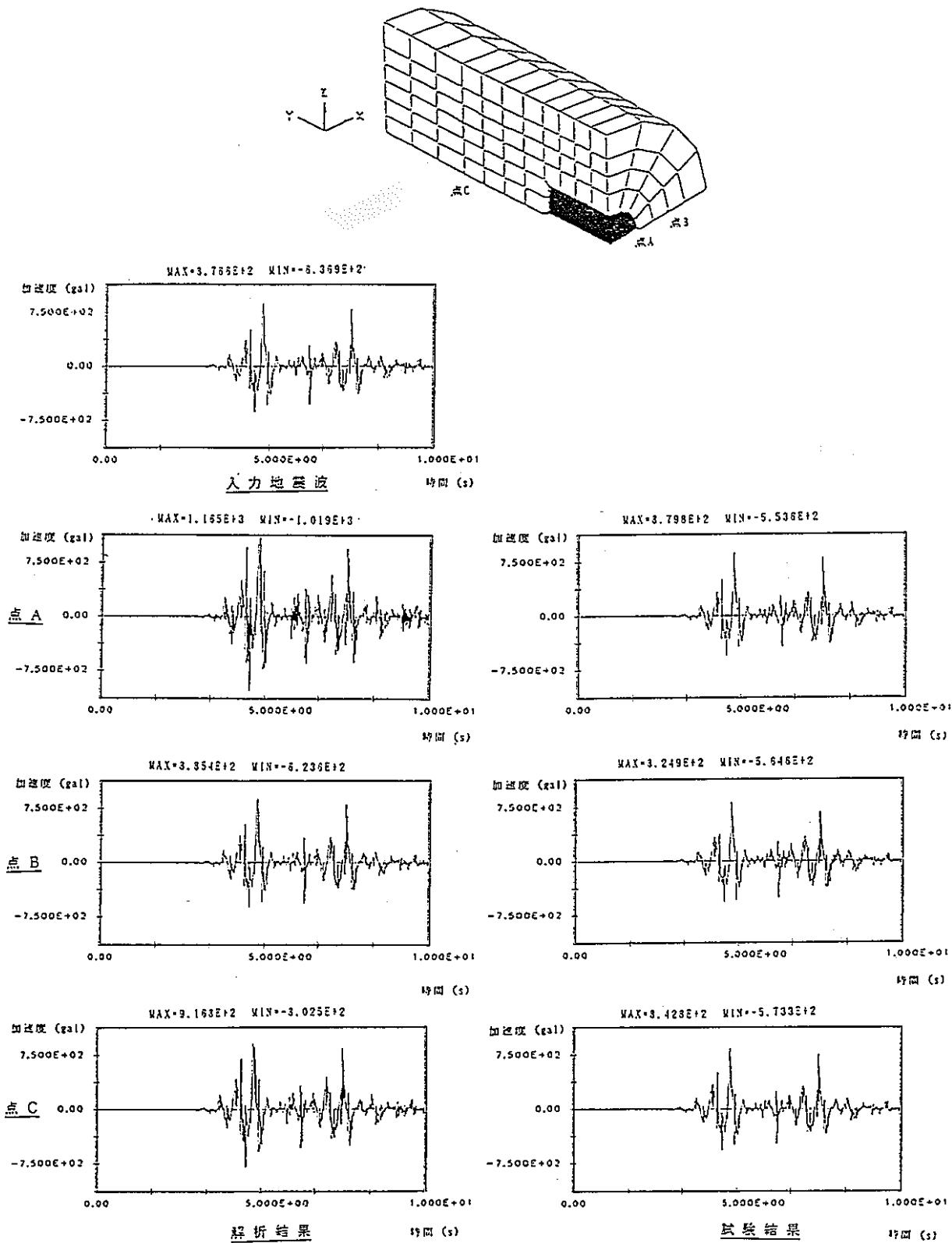


図-4.2.5 試験結果と解析結果の比較検討（加速度応答時刻歴）

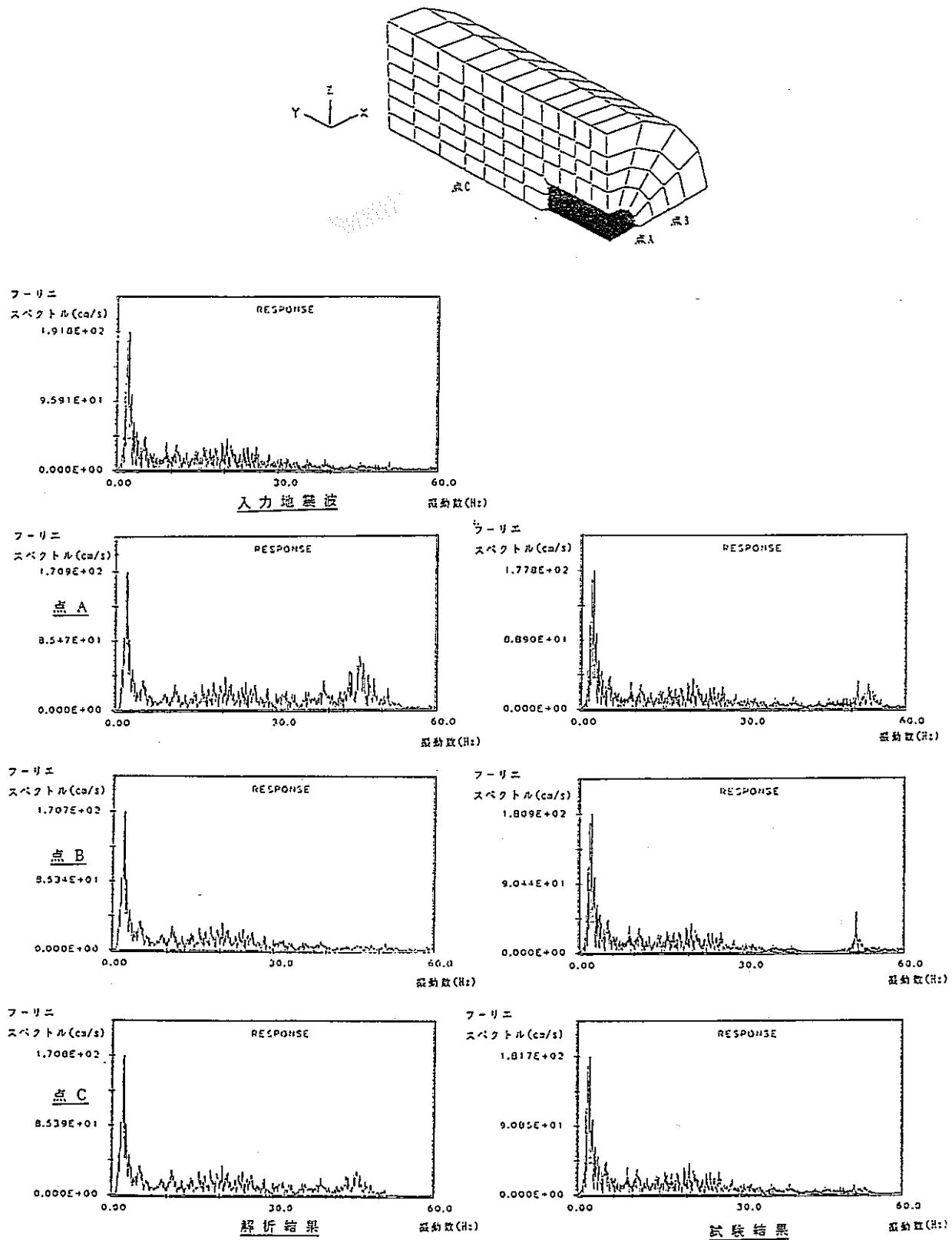


図-4.2.6 試験結果と解析結果の比較検討（加速度フーリエスペクトル）

4.2.3 解析結果のまとめ

本解析結果の固有振動数は、試験結果の固有振動数とほぼ一致していた。しかしながら、地震応答解析から、実地震波による加速度応答に関しては、両結果が若干相違するとの結果が得られた。解析結果によるオーバーパックの最大加速度は、試験結果と相違し、人工バリア内で若干増幅されるとの結果が得られた。一方、フーリエスペクトルにおいて、解析結果は試験結果と同様な傾向を示していた。

5. 小型緩衝材試験体を用いた振動試験と動的解析

5.1 小型緩衝材試験体を用いた振動試験⁸⁾

5.1.1 小型緩衝材試験体

(1) 概要

緩衝材試験体は、模擬緩衝材試験体と同様、2次元小型振動台に搭載可能な大きさにするために、現在考えられている廃棄体定置方式案¹⁾の内、処分坑道横置方式1ユニットの1/10スケールのモデルとした。小型緩衝材試験体は、緩衝材、模擬オーバーパック、拘束容器からなり、緩衝材には、その候補材であるベントナイトを用いた。模擬オーバーパックは、候補材である炭素鋼製とし、ベントナイトの中心に設置した。容器は、ステンレス製とし、注水によるベントナイトの膨潤圧にも耐えられる強度にした。

小型緩衝材試験体の振動台設置状況を図-5.1.1、写真-5.1.1に、試験体寸法を図-5.1.2に示すとともに、小型緩衝材試験体の仕様を表-5.1.1に示す。

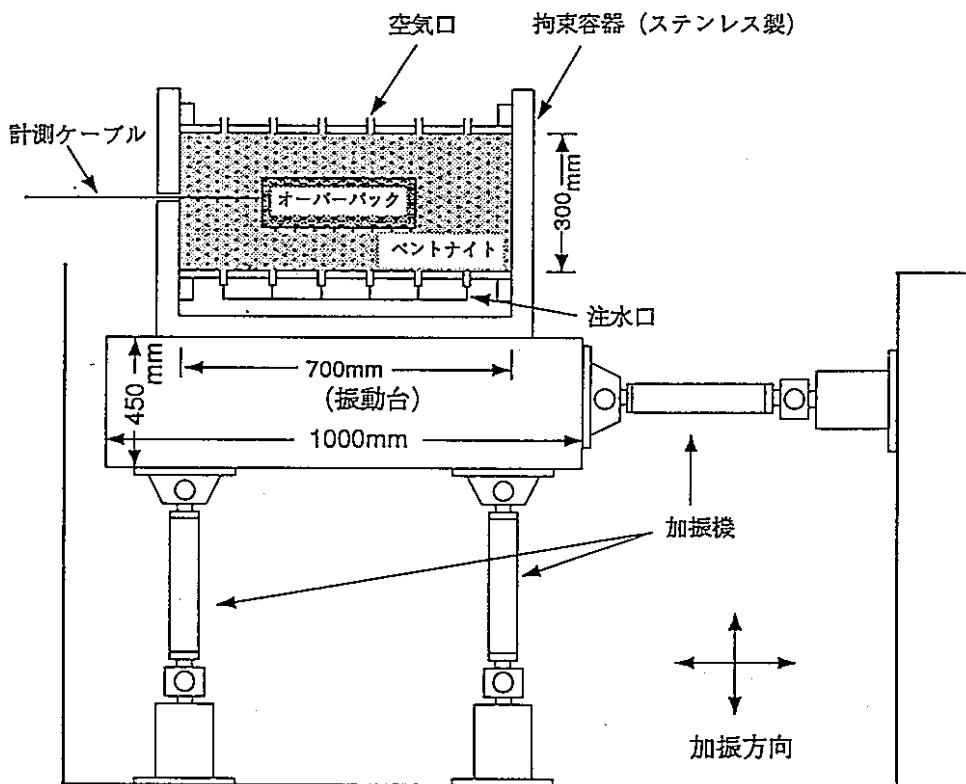


図-5.1.1 小型緩衝材試験体の振動台設置状況図

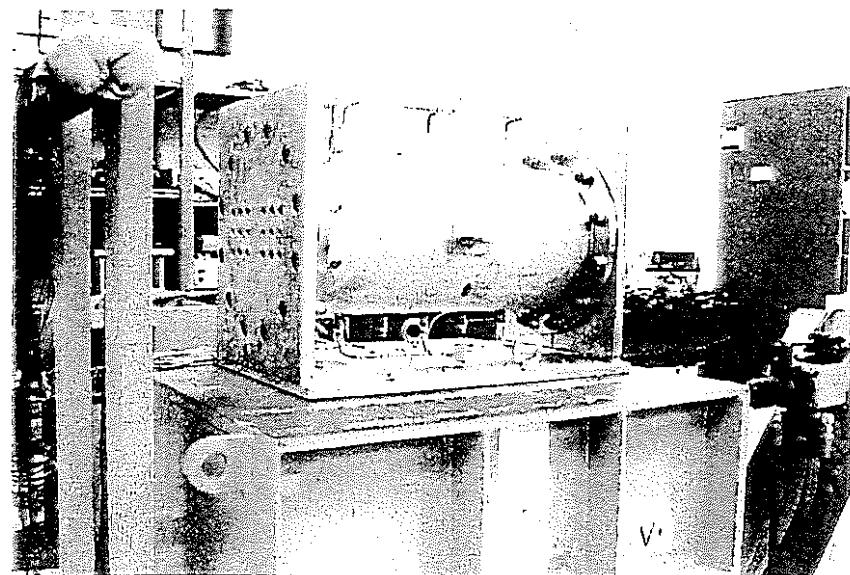


写真-5.1.1 小型緩衝材試験体設置状況

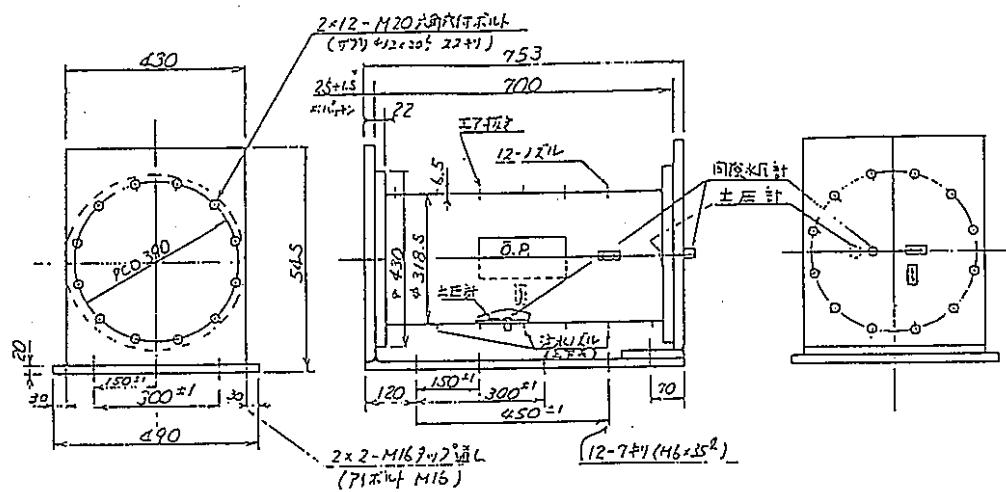


図-5.1.2 試験体寸法図（単位mm）

表-5.1.1 小型緩衝材試験体の仕様

拘束容器（天然バリアに相当）	
形状	円筒形で密封型
材質	ステンレス鋼
寸法	直径300mm x 長さ700mm
板厚	6.5mm
耐圧力	10kg/cm ² G
緩衝材	
材質	ベントナイト（クニゲルV1）
見掛け比重	0.60~0.75
粒度	250mesh90%以上通過
膨潤力	16ml/2g以上 (クニミネ工業品質特性値による)
模擬オーバーパック	
形状	円筒形
材質	炭素鋼
重量	12kg
寸法	直径100mm x 長さ200mm

(2) ベントナイトの充填

本試験では、振動の影響をより把握しやすくするためと、試験体の浸潤時間を短縮するため、緩衝材密度を極力低くして充填した。充填密度は、乾燥密度で0.7、0.8、 1.0g/cm^3 の3種類とした。ベントナイトの充填とともに、模擬オーバーパック、加速度計等の設置を行った。

ベントナイトの充填状況を表-5.1.3に示す。

表-5.1.3 ベントナイト充填状況

試験ケース	試験ケース1	試験ケース2	試験ケース3
材料	ベントナイト	ベントナイト ケイ砂(3号と5号)	ベントナイト
含水比(%)	5.8	7.0	9.0
充填密度(g/cm^3)	0.7	0.8	1.0
充填状況	粉末のベントナイトを容器に入れ、ほとんど締め固めずに充填した。	粉末のベントナイトを容器に入れ、軽く締め固めながら充填した。 ケイ砂は、水を均質浸潤させるため、容器の内側に1cmの厚さで設置した。	粉末のベントナイトを容器に入れ、かなり締め固めながら充填した。

(3) 注水方法

ペントナイト充填後、試験体を浸潤状態にするため、水を注入した。水を短時間で浸透させるため図-5.1.3のような注水装置を用いた。これは、アキュムレーター内で蒸留水の圧力を高めて試験体に注水する方法である。

注水は、試験体が飽和状態になると仮定される水量を目標に行った。注水した蒸留水の量は、小型試験体の下にはかりを置き、試験体の重量から求めた。注水圧力は $1 \sim 3 \text{kg/cm}^2$ の範囲とした。

振動試験終了後に試験体の内部を観察した結果、ペントナイトへの浸透状況は、ケース3では場所によりかなりばらつきがあるが、ケース1及びケース2では場所によるばらつきがなくほぼ均一に浸透していることが観察された。また、注水にかかった日数は、ケース1では約48日、ケース2では約54日、ケース3では約65日であった。

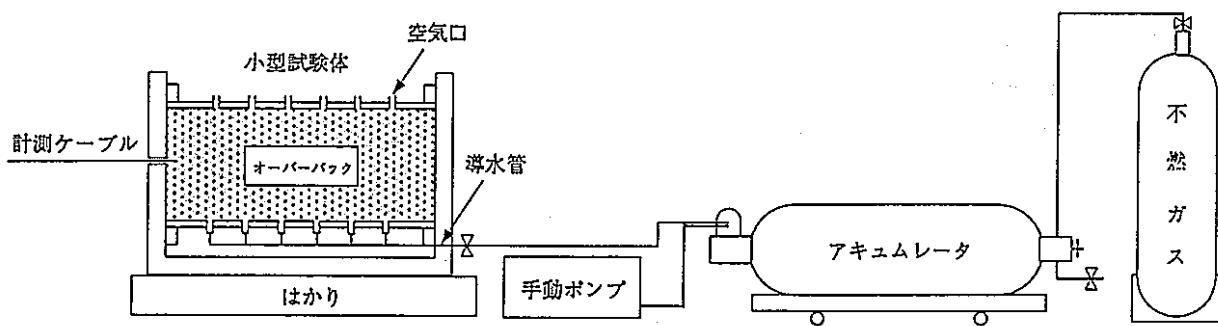


図-5.1.3 試験体及び注水装置

5.1.2 試験方法

(1) 計測

計測は、加速度及び圧力について行った。水平方向及び鉛直方向の2方向の加振を行うため、各部の計測には、2方向分のセンサーを取付けた。なお、模擬オーバーパックには、3成分の加速度計を取付けた。各部の計測点は以下の通りである。

振動台

水平：加速度計1点

鉛直：加速度計1点

拘束容器

水平：加速度計2点（台座、上面各1点）

土圧計1点（BX1）（内側側面）、間隙水圧計1点（WX1）（内側側面）

鉛直：加速度計2点（台座、上面各1点）

土圧計1点（BZ1）（内側側面）、間隙水圧計1点（WZ1）（内側側面）

ベントナイト中

水平：加速度計2点（CX1、CX2）

鉛直：加速度計2点（CZ1、CZ2）

模擬オーバーパック

水平：加速度計2点（OX1、OX2）、土圧計1点（BX2）、

間隙水圧計1点（WX2）

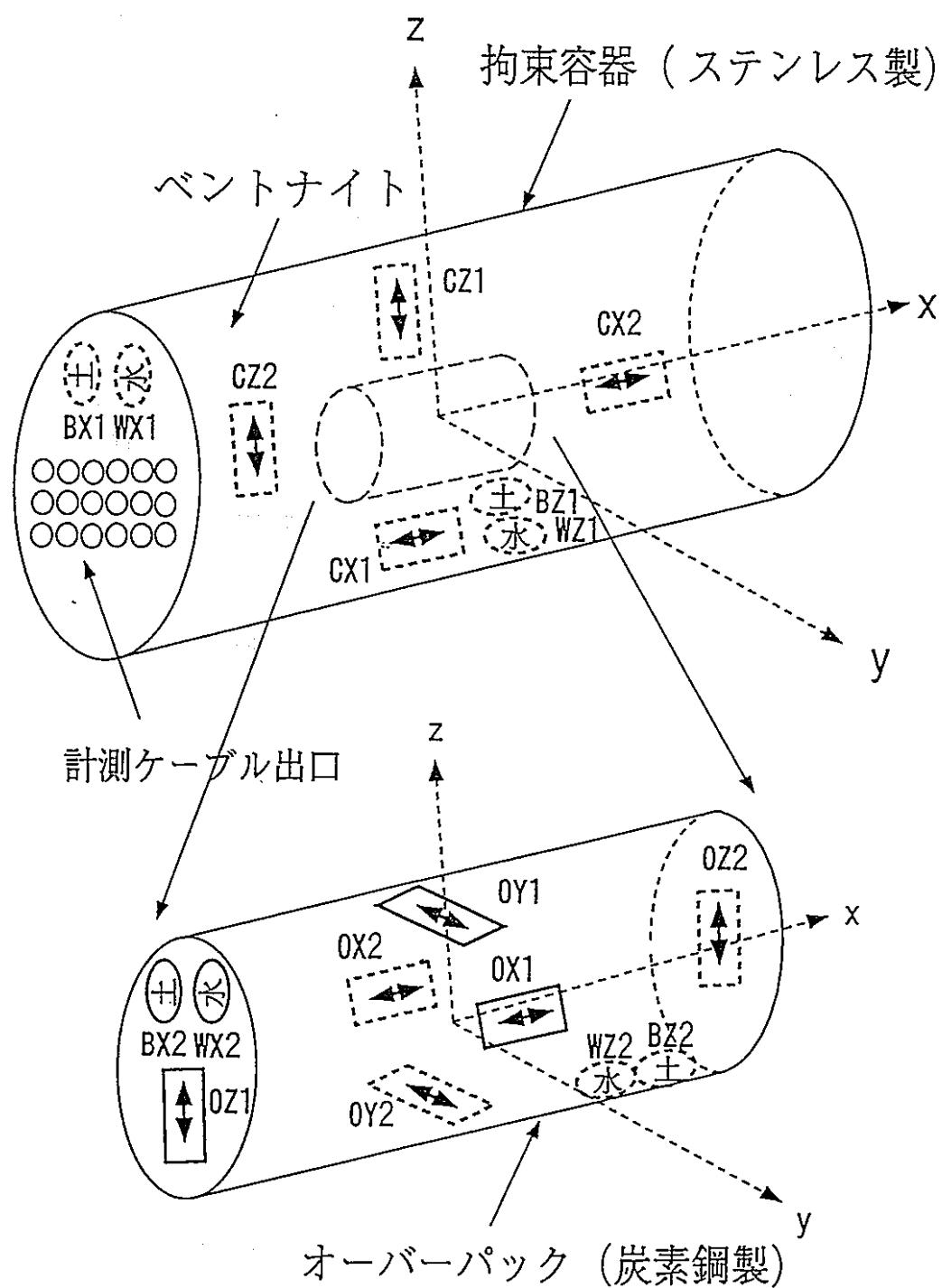
鉛直：加速度計2点（OZ1、OZ2）、土圧計1点（BZ2）、間隙水圧計1点（WZ2）

奥行き：加速度計2点（OY1、OY2）

これらデータの同時記録を行った。収録はデジタルテープレコーダーを用い、500Hzでサンプリングした。各部のセンサー（振動台、拘束容器の台座及び上面を除く）配置図を図-5.1.4に示す。なお、加速度計は、共和製AS-5GB及びエス・ティー研究所製AL5-5を用い、土圧計及び間隙水圧計は共和製BE-10KC及びエス・ティー研究所製PM10-20を用いた。

(2) 試験項目

振動試験は、水平方向及び鉛直方向とも同様で、最初にスイープ波加振により、小型緩衝材試験体であるベントナイト及びベントナイト中に置いた模擬オーバーパックの固有振動数の検索を行い、次に、実地震波による地震応答試験を行った。実地震波は振動実験で一般的に用いられる各種実地震波及び釜石鉱山で観測された実地震波⁹⁾を用いた。なお、これらの試験に先立って拘束容器単体の応答試験も実施し、緩衝材等の充填後の応答挙動と比較した。



→ : 加速度計 土 : 土圧計 水 : 間隙水圧計

図-5.1.4 試験体センサー配置図

5.1.3 主要試験結果

振動試験は、ベントナイトの充填状況が異なる3種類の試験体について行った。ここでは、充填密度が最も低く、ベントナイトとオーバーパックとの相関関係が最も顕著に現われた試験ケース1の振動試験の結果について述べる。

5.1.3.1 スイープ試験結果

(1) 拘束容器の振動特性

緩衝材等の充填前のスイープ加振は、水平方向及び鉛直方向ともに周波数帯10~60Hzまでを300秒、60~10Hzまでを同じく300秒とし、加振加速度を100galとして試験を行い、充填後のスイープ加振は、水平方向及び鉛直方向ともに周波数帯30~90Hzまでを360秒、90~30Hzまでを同じく360秒とし、加振加速度を100galとして試験を行った。

スイープ加振において振動台に取付けた加速度計と拘束容器の上面に取付けた加速度計から求めた固有振動数及び応答倍率（水平方向加振時）を表-5.1.5に示す。

水平方向では、ベントナイトの充填前と充填後で固有振動数にほとんど変化がなく、固有振動数は47Hz~51Hzの範囲であり、応答倍率は3倍~6倍であった。また、鉛直方向では、加振周波数帯での応答倍率がほぼ1倍であり、固有振動数は求まらなかった。

表-5.1.5 拘束容器の固有振動数及び応答倍率

加振方向	加振条件	加振周波数帯 (Hz)	固有振動数 (Hz)	応答倍率
水平	充填前	10~60	49.5	5.8
		60~10	47.3	4.4
	充填後	30~90	49.5	3.6
		90~30	51.2	4.7
充填前：スイープ時間300秒 (10~60、60~10Hz) 充填後：スイープ時間360秒 (30~90、90~30Hz) 加振加速度100gal				

(2) 小型緩衝材試験体の振動特性

スイープ加振は、水平方向及び鉛直方向ともに周波数帯30～90Hzまでを360秒、90～30Hzまでを同じく360秒とした。それぞれの加振加速度を20gal、50gal及び100galとして試験を行った。

1) 水平方向加振の特徴

計測点OX1及びOX2は、模擬オーバーパックに取付けた加速度計であり、計測点CX1及びCX2はベントナイト中に置いた加速度計である。これらの加速度計と振動台に取付けた加速度計から応答伝達関数を求め、応答曲線の比較検討を行った。

表-5.1.6に加振周波数帯30～90Hz及び90～30Hzの固有振動数及び応答倍率を示す。また、図-5.1.5に水平方向加振、加振加速度100gal、加振周波数帯30～90Hzの小型緩衝材試験体の応答伝達関数を示す。

表-5.1.6の加振周波数帯での比較から、加振周波数帯30Hz～90Hzの応答曲線と90Hz～30Hzの応答曲線は、同じ傾向を示し、加振周波数帯の影響はあまりないことが分かった。このことから本試験体において、摩擦やギャップなど強い非線形特性を示す要素がないことが推測された。しかしながら、計測点CX1の固有振動数、応答倍率が、他の点より低く、加速度計の設置状況が他と違っていたことが推測された。

OX1及びOX2の応答曲線を比較したところ、図-5.1.5に示すように応答曲線は、同じ傾向を示し、OX1及びOX2は、同じ挙動をしていることが確認された。

また、OX1及びOX2の固有振動数は、約88Hz近辺であり、応答倍率は5倍近くであった。しかし、50Hz辺りをピークに60Hzにかけて応答倍率の大きい周波数帯があった。これは、拘束容器単体での振動実験で得られた結果と良く似ており、拘束容器の固有振動が影響したものと推測された。

また、ベントナイト中に置いた加速度計CX2とOX1及びOX2の応答曲線を比較したところ、図-5.1.5に示すように応答曲線は、同じ傾向を示し、応答倍率は若干大きいものの、固有振動数は同じであることが分かった。このことから、模擬オーバーパックはベントナイトと一体となって振動したと推測された。

表-5.1.6 小型緩衝材試験体の固有振動数及び応答倍率

加振方向	計測点名	30～90Hz		90～30Hz	
		固有振動数 (Hz)	応答倍率	固有振動数 (Hz)	応答倍率
水平	OX1	88.3	4.7	87.8	4.7
	OX2	88.3	4.8	87.8	4.9
	CX1	49.5	1.7	51.2	2.0
	CX2	88.3	5.7	87.8	5.6

スイープ時間360秒
加振加速度100gal

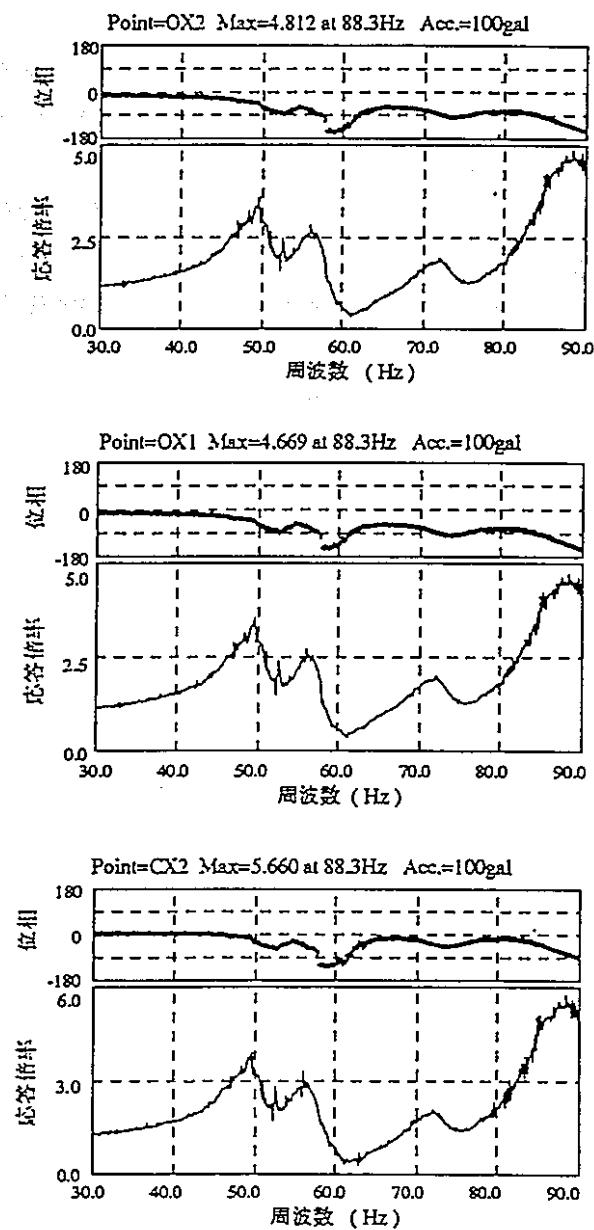


図- 5.1.5 水平方向の応答伝達関数

2) 鉛直方向加振の特徴

計測点OZ1及びOZ2は模擬オーバーパックに取付けた加速度計であり、計測点CZ1及びCZ2はベントナイト中に設置した加速度計である。これらの加速度計と振動台に取付けた加速度計から固有振動数と応答伝達関数を求めた。

加速度が他より大きく、固有振動数が最も低くあらわれると推測される加振加速度100galの時のベントナイト及びオーバーパックの応答倍率は、80Hz付近で2倍、90Hz付近で4倍になった。しかしながら、固有振動数は90Hz以上の周波数帯にあると推測され、応答倍率は正確に求められなかった。また、周波数帯を30Hz～90Hz、90Hz～30Hzとしても応答曲線に変化はなかった。このことから本試験体において、摩擦やギャップなど強い非線形特性を示す要素がないことが推測された。

応答曲線の形状は、ベントナイト及びオーバーパックとも同じ傾向を示し、ベントナイトとオーバーパックは一体となって振動したと推測された。

5.1.3.2 地震応答試験結果

振動試験で使用する地震波については、小型模擬緩衝材振動試験と同様に一般的に振動実験で使用されている代表的な実地震波を用いた。また、動燃事業団が岩手県釜石鉱山において観測している実地震波⁹⁾も使用した。この実地震波は、1993年9月6日、岩手県南部を震源とし、観測点K-1（標高865m、地表近く）及びK-6（標高250m）で観測されたデータである。観測点K-1で得られた地震波を以下K-1とする。

小型模擬緩衝材振動試験時と同様、長周期成分をカットするハイパスフィルター（2.24Hz以下の周波数をカットする）を使用して最大加速度1G（980gal）近くまでの加振を行った。

地震応答の評価は、小型模擬緩衝材振動試験時と同様、振動台の最大加速度を基準とした各計測点の最大加速度比及びシリコンゴム最大圧力と加振加速度の関係から行った。

ここでは、水平方向加振時における実地震波K-1とEL-NSの比較検討について述べる。

(1) 最大加速度比の比較

振動台に取付けた加速度計の最大加速度と計測点（拘束容器上面に取付けた加速度計、OX1、OX2、CX2）の最大加速度との比を求めた。

図-5.1.6に最大加速度比を示す。2種類の実地震波（K-1、EL-NS）加振による各計測点の最大加速度比は1倍程度であり、倍率の差はあるものの同じ傾向を示した。また、オーバーパックに取付けた加速度計（OX1、OX2）及びベントナイト中に置いた加速度計（CX2）とも顕著な違いは見られなかった。このことから本試験体は実地震波に含まれている特有な周期（長周期成分を除く）には、応答しない剛体に近い特性を示すものであると推測された。

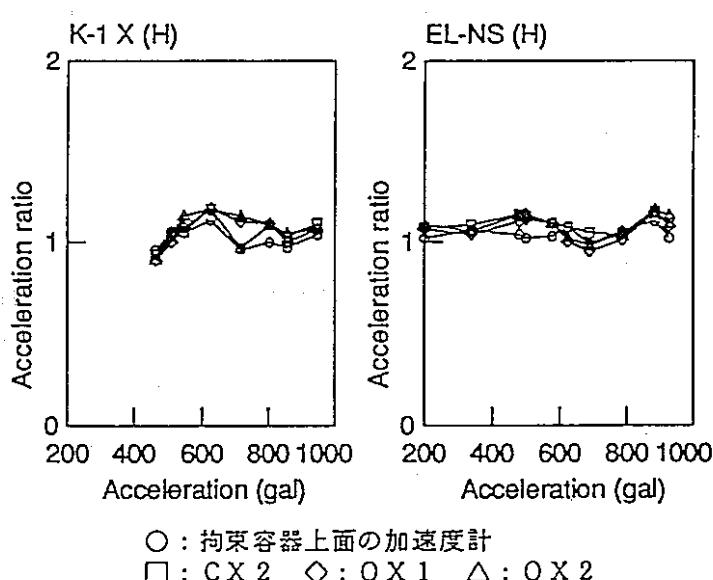


図-5.1.6 水平方向加振時の最大加速度比

(2) 最大圧力の比較

加振加速度とベントナイトの圧力との関係を評価するために、ベントナイトの圧力 (BX1、BX2) の最大値を図-5.1.7に示す。BX1は容器内側に取付けた土圧計であり、BX2はオーバーパックに取付けた土圧計である。また、両圧力計は向かい合った位置に取付けてある。図-5.1.7から、BX1は、加速度が大きくなれば圧力も大きくなり加速度との相関が見られた。しかし、BX2は、BX1に比較して、加速度との相関が顕著ではなかった。これは、模擬緩衝材試験体の時と同様な傾向であった。このことから、オーバーパックは、緩衝材と一緒に挙動しているものと推測された。

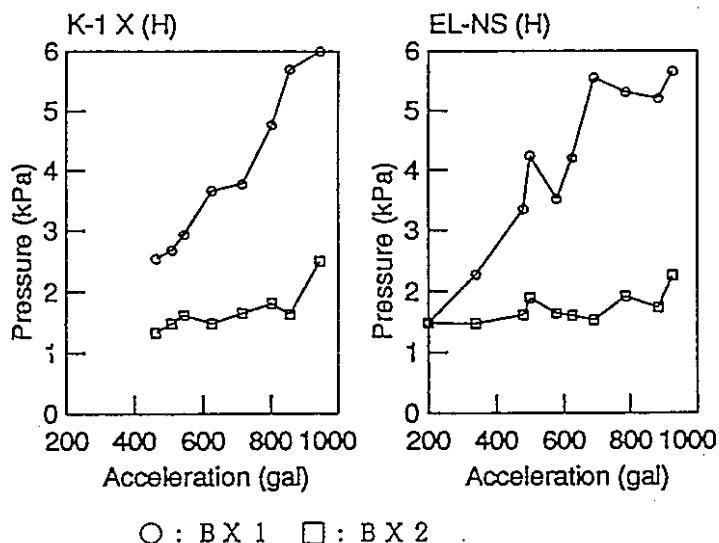


図-5.1.7 水平方向加振時のベントナイトの最大圧力

5.1.4 試験結果のまとめ

小型緩衝材試験体を用いたスイープ加振及び実地震波加振を行い、試験手法の確認及び基本データの取得を行った。

スイープ加振から、水平方向加振時の試験体の固有振動数は88Hz程度であり、鉛直方向加振時では90Hz以上であると推測された。また、小型緩衝材試験体（模擬オーバーパック及びベントナイト）は非線形性を示す要素がなく、剛体に近い特性を示すことが分かった。

また、実地震波加振から、小型緩衝材試験体は、各地震波に特有な周期に目立った応答はしないことが分かった。

これらから、緩衝材としてベントナイトを用いた試験体では、ベントナイトとオーバーパックが一体になり、剛体として挙動していたものと推測された。

5.2 振動試験データに基づく動的解析¹⁰⁾

本研究で開発したモデル／コードの試験データへの適応性評価のため、現在までに行なわれた3回の小型緩衝材振動試験結果の1部に基づいて、固有値解析及び地震応答解析を行った。

5.2.1 固有値解析

人工バリアモデルに対し固有値解析を行い、その結果をまとめた。解析対象としては、小型緩衝材振動試験の供試体と同寸法のモデルとした。参考として、試験体の2倍スケールのモデル、試験体の10倍スケールのモデル（処分坑道横置き方式1ユニットモデル）についての解析も行った。

5.2.1.1 物性値

解析に用いた物性値を表-5.2.1に示す。

ペントナイトのせん断弾性係数等については、土質試験法（土質工学会編）に準じて実施した動的三軸試験結果¹¹⁾から得られた微小ひずみレベル（ 1.0×10^{-4} 程度）の値を参考にして設定した。また、オーバーパックの物性は、便覧⁷⁾の値を参考にして設定した。

表-5.2.1 解析に用いた物性値

項目	試験データ1	試験データ2	試験データ3	
ペントナイト	せん断弾性係数 (gf/cm ²)	1.3×10^4	2.9×10^4	4.2×10^4
	ポアソン比	0.4	0.4	0.4
	充填密度 (g/cm ³)	0.7	0.8	1.0
	浸潤密度 (g/cm ³)	1.4	1.5	1.6
	減衰定数	0.025	0.025	0.025
オーバーパック	せん断弾性係数 (gf/cm ²)	8.1×10^8	8.1×10^8	8.1×10^8
	ポアソン比	0.3	0.3	0.3
	重量密度 (g/cm ³)	7.8	7.8	7.8

5.2.1.2 モデルと境界条件

(1) 解析用モデルの形状

図-5.1.2の試験体寸法図に基づき、円柱状のモデルを用いて解析を実施した。モデル形状を図-5.2.1に示す。なお、本モデルの節点数は891、要素数は800である。

(2) 解析用の拘束条件

小型振動試験供試体の容器の部分にあたるモデルの側面及び端面については、X,Y,Z軸方向の拘束を行った。拘束条件を図-5.2.1に示す。

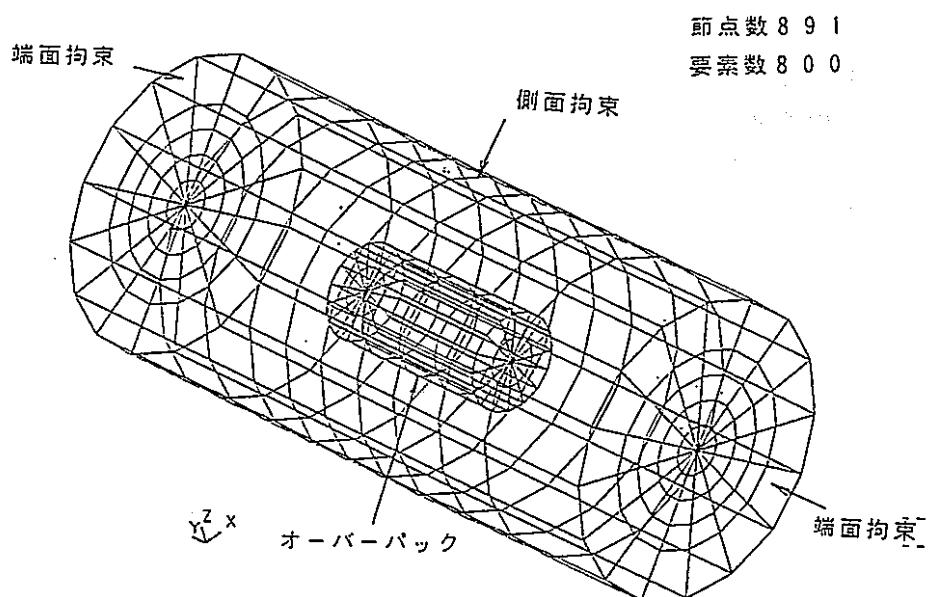


図-5.2.1 固有値解析用モデルと拘束条件

5.2.1.5 解析結果

小型緩衝材試験体を模擬したモデルを用いて解析行った結果、試験ケース1の一次固有振動数は72Hz、二次固有振動数は99Hz、三次固有振動数は110Hzとなった。

試験ケース2の一次固有振動数は98Hz、二次固有振動数は140Hz、三次固有振動数は150Hzとなった。

試験ケース3の一次固有振動数は120Hz、二次固有振動数は160Hz、三次固有振動数は180Hzとなった。

小型緩衝材振動試験のスイープ試験の結果（試験ケース1）において、水平方向加振におけるオーバーパック上の計測点（OX1、OX2）の固有振動数は約88Hz近辺（図-5.1.5参照）であり、解析結果の一次固有振動数72Hzと若干相違するものの、ほぼ近い値を示すことが分かった。

また、解析から、試験体の規模を大きくした場合、固有振動数が下がることが明らかになった。

なお、各ケースでの解析結果の詳細については、表-5.2.2、図-5.2.2～4にまとめる。

表-5.2.2 固有値解析結果

モデル	モード	固有振動数 (Hz)		
		試験ケース1	試験ケース2	試験ケース3
試験体モデル	1	72	98	120
	2	99	140	160
	3	110	150	180
2倍スケールモデル	1	36	49	59
	2	48	68	82
	3	56	76	91
10倍スケールモデル	1	7	10	12
	2	10	14	16
	3	11	15	18

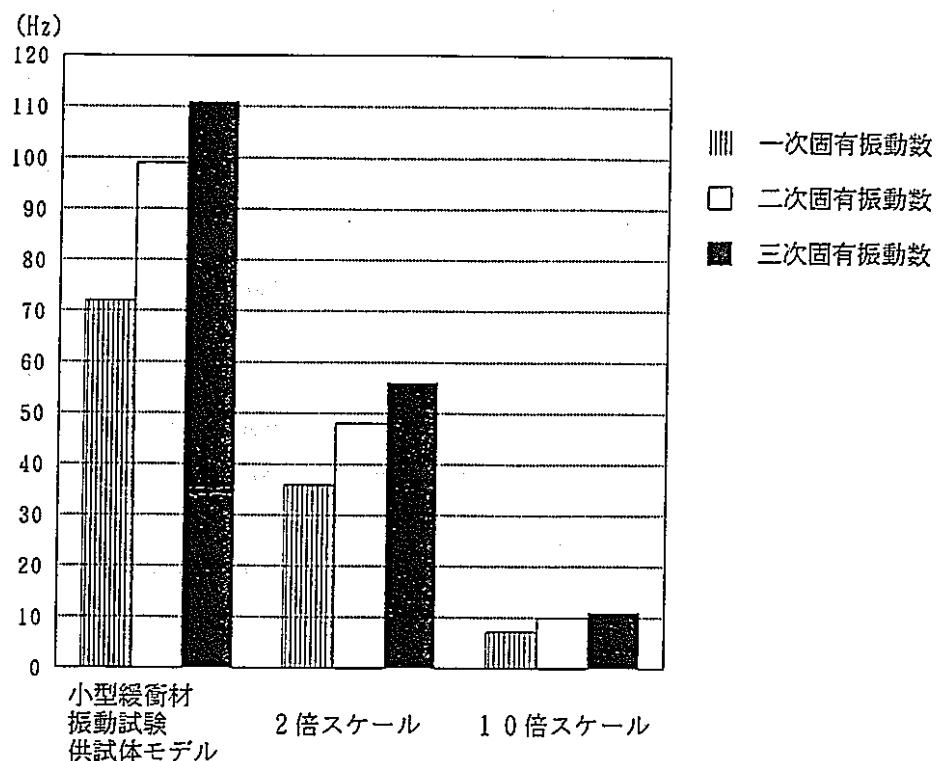


図-5.2.2 試験ケース1の各モデルでの固有振動数

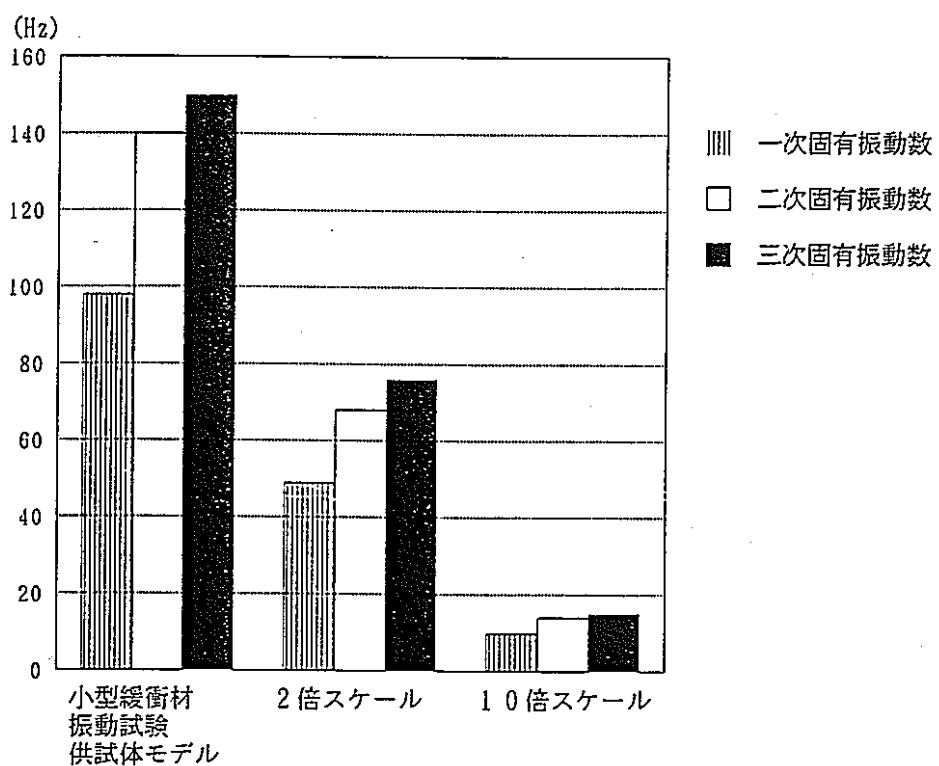


図-5.2.3 試験ケース2の各モデルでの固有振動数

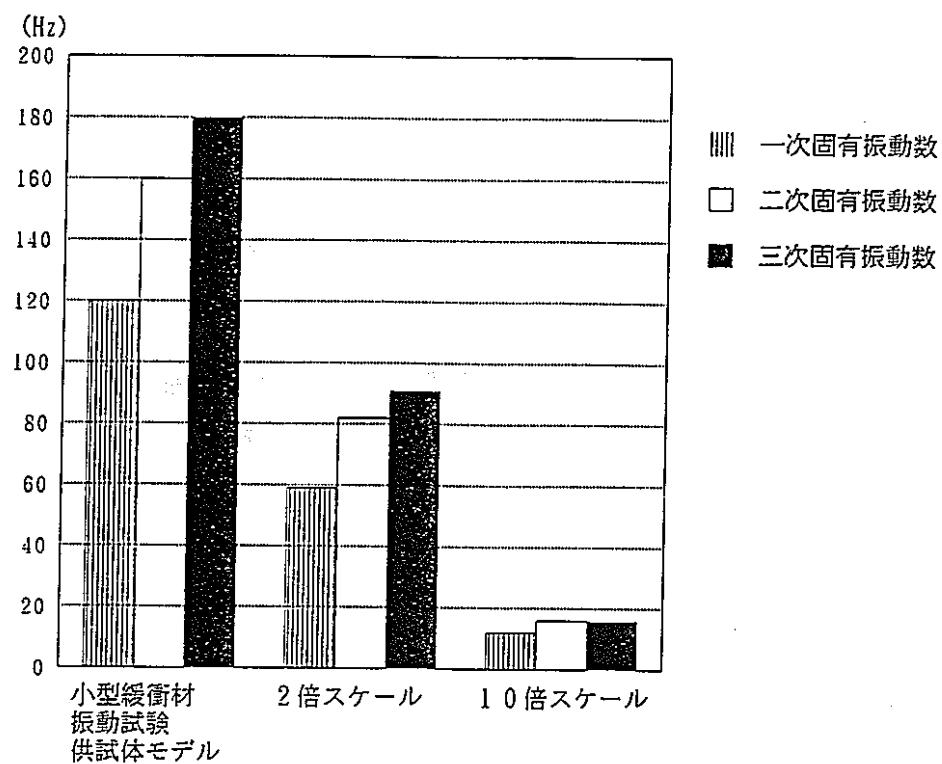


図-5.2.4 試験ケース3の各モデルでの固有振動数

5.2.2 地震応答解析

小型緩衝材振動試験における実地震波による試験データを用いて解析との比較を行った。ここでは、EL-NS（エルセントロN-S成分）地震波の結果を用い、加速度について検討した。

5.2.2.1 物性値

解析に用いた物性値は、固有値解析での値と同様とし、表-5.2.1に示す。

5.2.2.2 加振

加振方向は水平方向とし、試験において容器上で計測された地震波（エルセントロ地震模擬入力波）を用いて、加振開始から10秒間の解析を行った。

5.2.2.3 モデルと境界条件

(1) モデル形状

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-5.2.5に示す。なお、本解析で用いたモデルの要素数は264、節点数は372である。

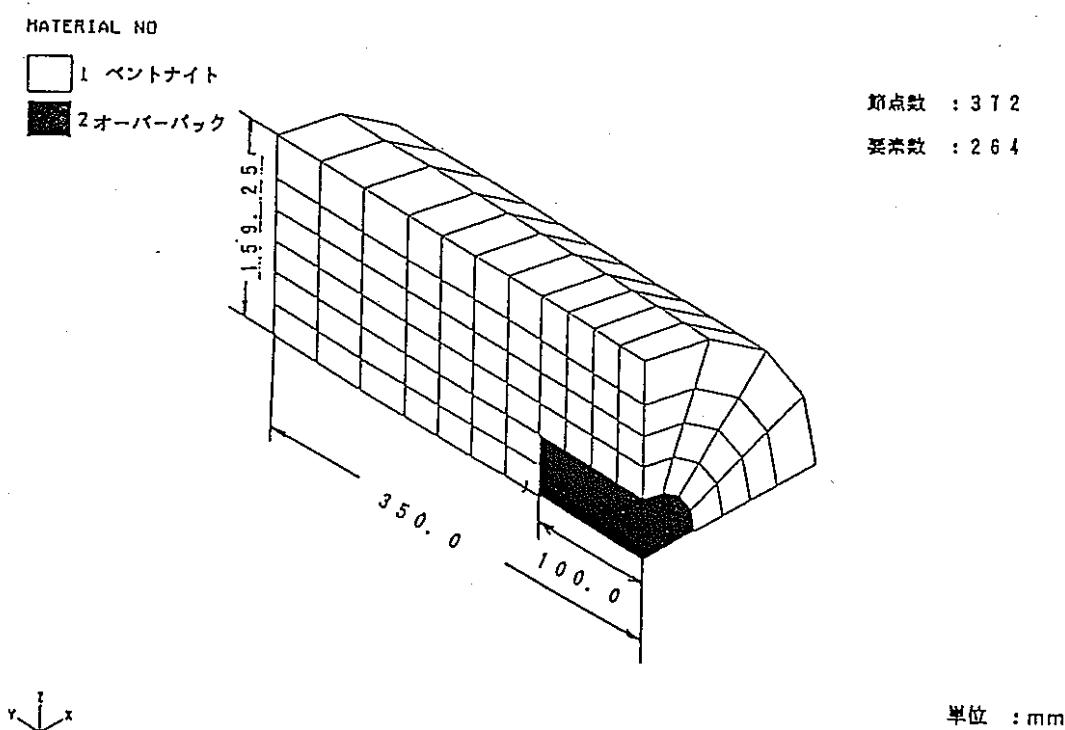


図-5.2.5 小型緩衝材振動試験解析用モデル

(2) 境界条件

全体モデル（分割前）の側面及び端面にあたる部分の節点についてはX,Y,Z軸方向の拘束を行った。また、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。拘束条件を図-5.2.6に示す。

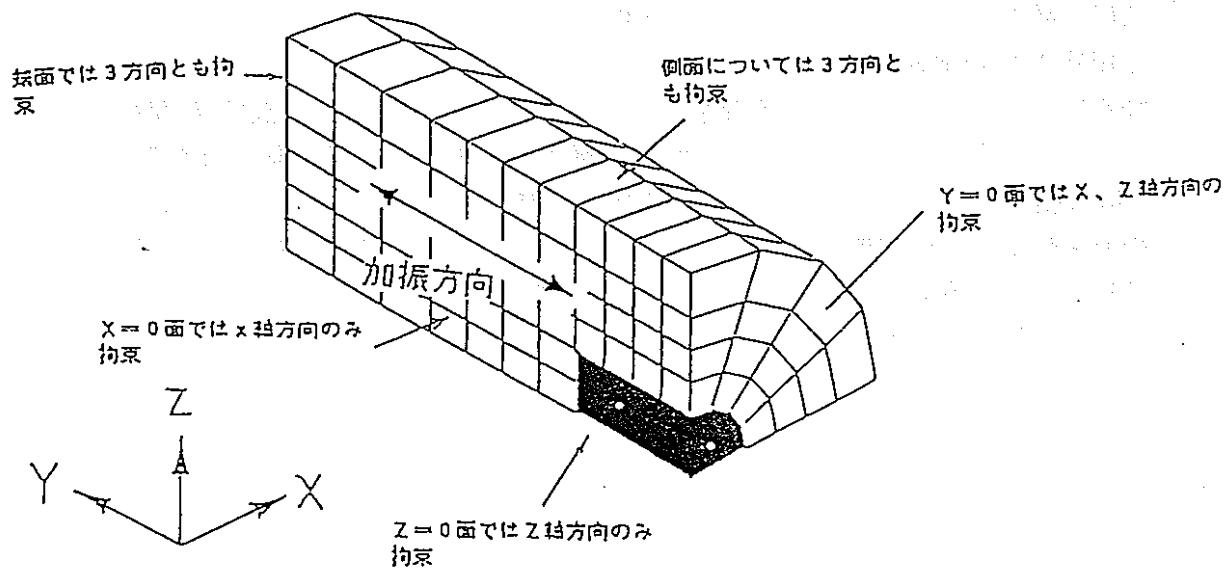


図-5.2.6 解析用モデルの拘束条件

5.2.2.4 解析結果

図-5.2.7～12に試験結果と解析結果の比較を示す。各図の左上に示した入力波形図は、試験において容器上で計測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、各図の上に示すようにオーバーパック上の点A (OX1) 、ベントナイト中の点B (CX1) 、点C (CX2) において行なった。

(1) 試験ケース1に基づいた比較 (図-5.2.7, 8)

試験結果において、点A (オーバーパック) と容器上で記録された加速度波形はほぼ一致したが、点B (ベントナイト中) と点C (ベントナイト中) では、容器上で記録された加速度のそれぞれ64%、74%と小さくなっていた。しかしながら、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た。ベントナイト中で特に低減される周波数領域は見られなかった。

解析結果において、点A、点B、点Cの加速度は、いずれの点においても容器上の加速度より5%程度大きくなっていたが、点A、点B、点Cの3点での加速度は、試験データと異なりほぼ一致していた。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た。

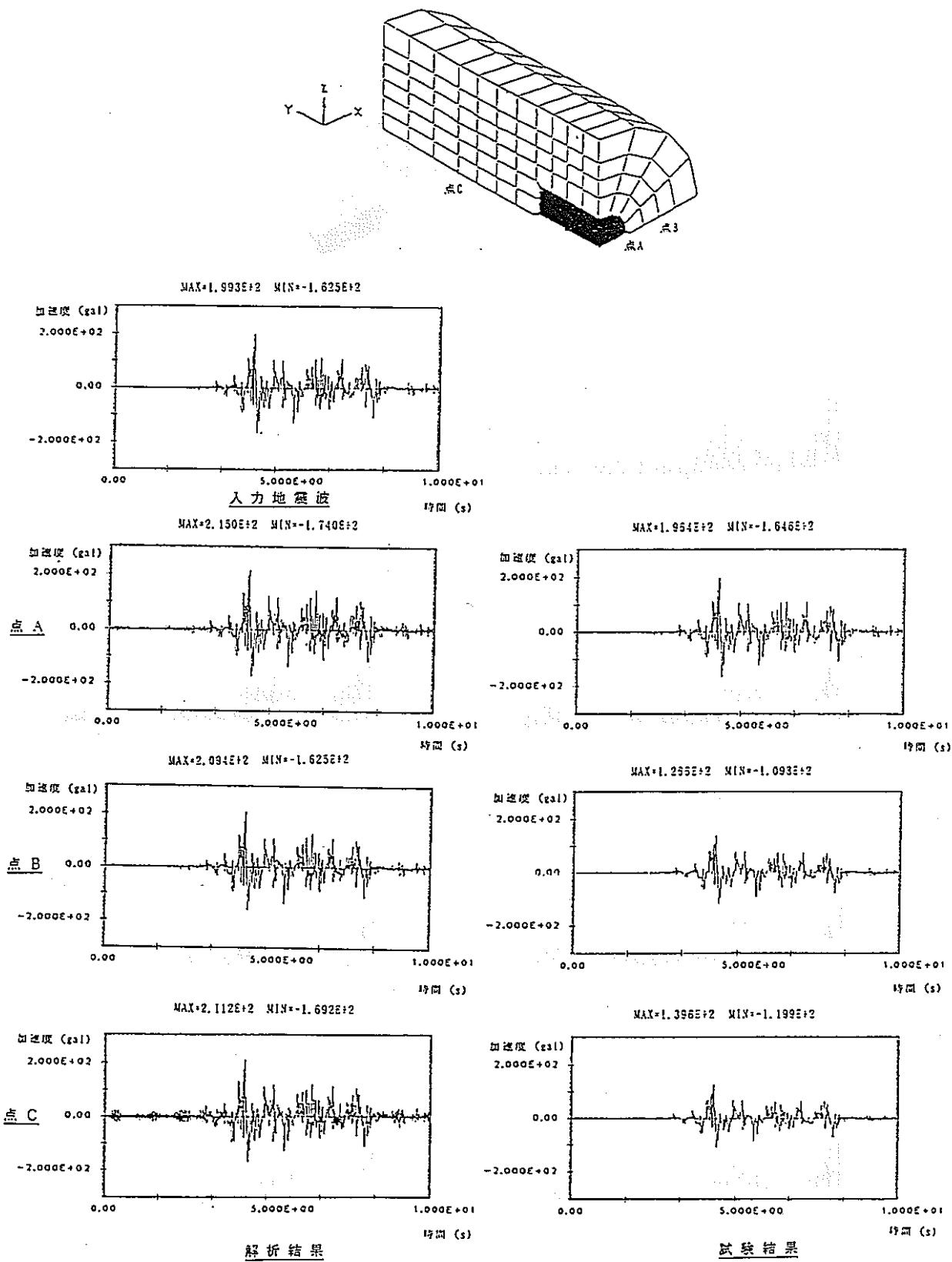


図-5.2.7 試験ケース1の比較検討（加速度応答時刻歴）

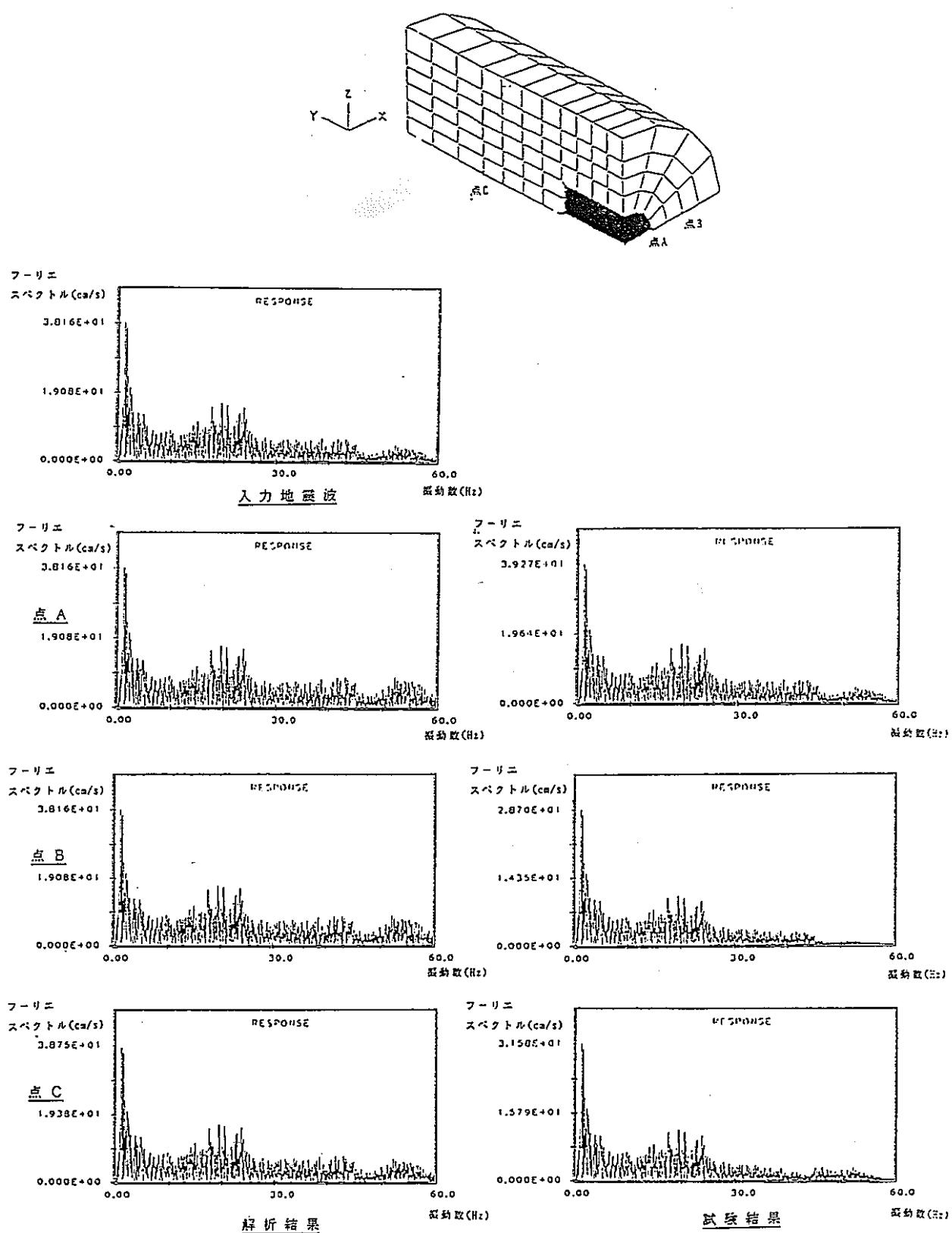


図-5.2.8 試験ケース1の比較検討（加速度フーリエスペクトル）

(2) 試験ケース2に基づいた比較(図-5.2.9,10)

試験結果において、点A(オーバーパック)と点C(ベントナイト中)での加速度は、容器上で記録された加速度波形とほぼ一致したが、点B(ベントナイト中)では、容器上で記録された加速度の20%程度であり、かなり小さくなっていた。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た。ベントナイト中で低減される周波数領域は見られなかつた。

解析結果において、点A、点B、点Cの3点での加速度は、試験結果と異なりいずれの加速度も容器上の加速度とほぼ一致していた。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た。

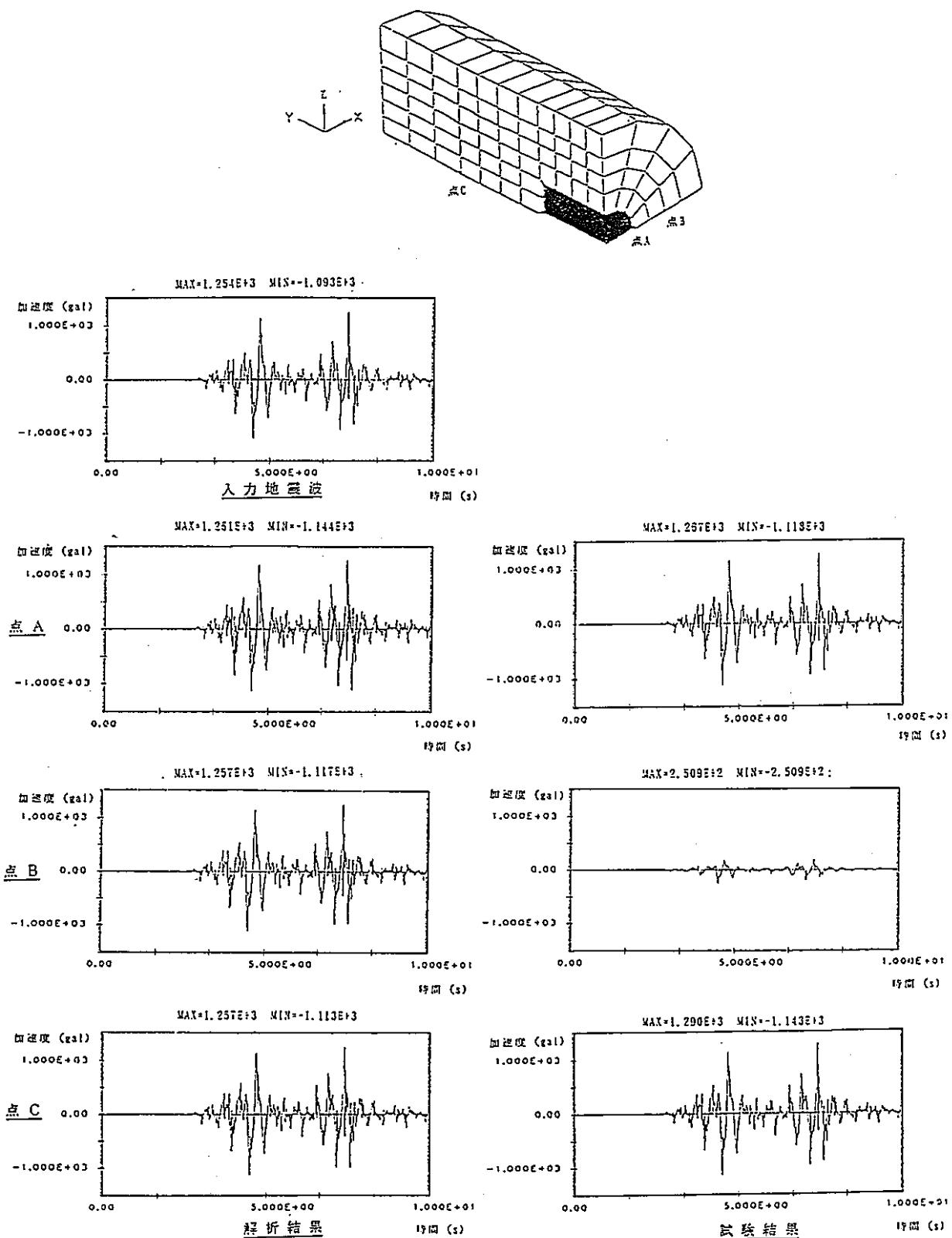


図-5.2.9 試験ケース2の比較検討（加速度応答時刻歴）

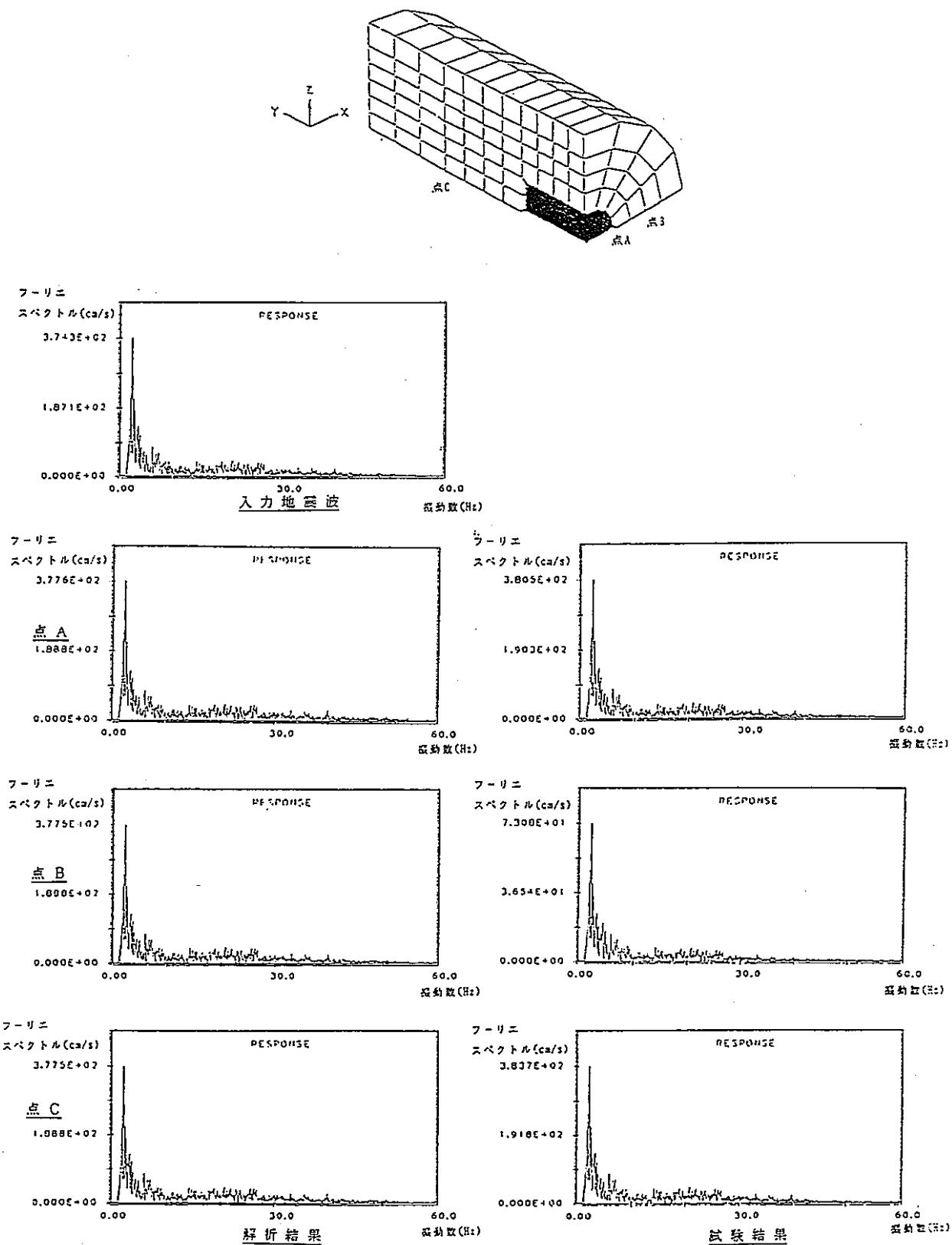


図-5.2.10 試験ケース2の比較検討（加速度フーリエスペクトル）

(3) 試験ケース3に基づいた比較(図-5.2.11,12)

試験結果において、点A(オーバーパック)と点C(ベントナイト中)での加速度は、容器上で記録された加速度波形とほぼ一致したが、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60%程度と小さく、試験ケース2の場合と同様な傾向が見られた。しかしながら、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た。ベントナイト中で特に低減される周波数領域は見られなかった。

解析結果において、点A、点B、点Cの加速度は、いずれの点においても容器上の加速度より13~28%程度大きくなっていた。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た。

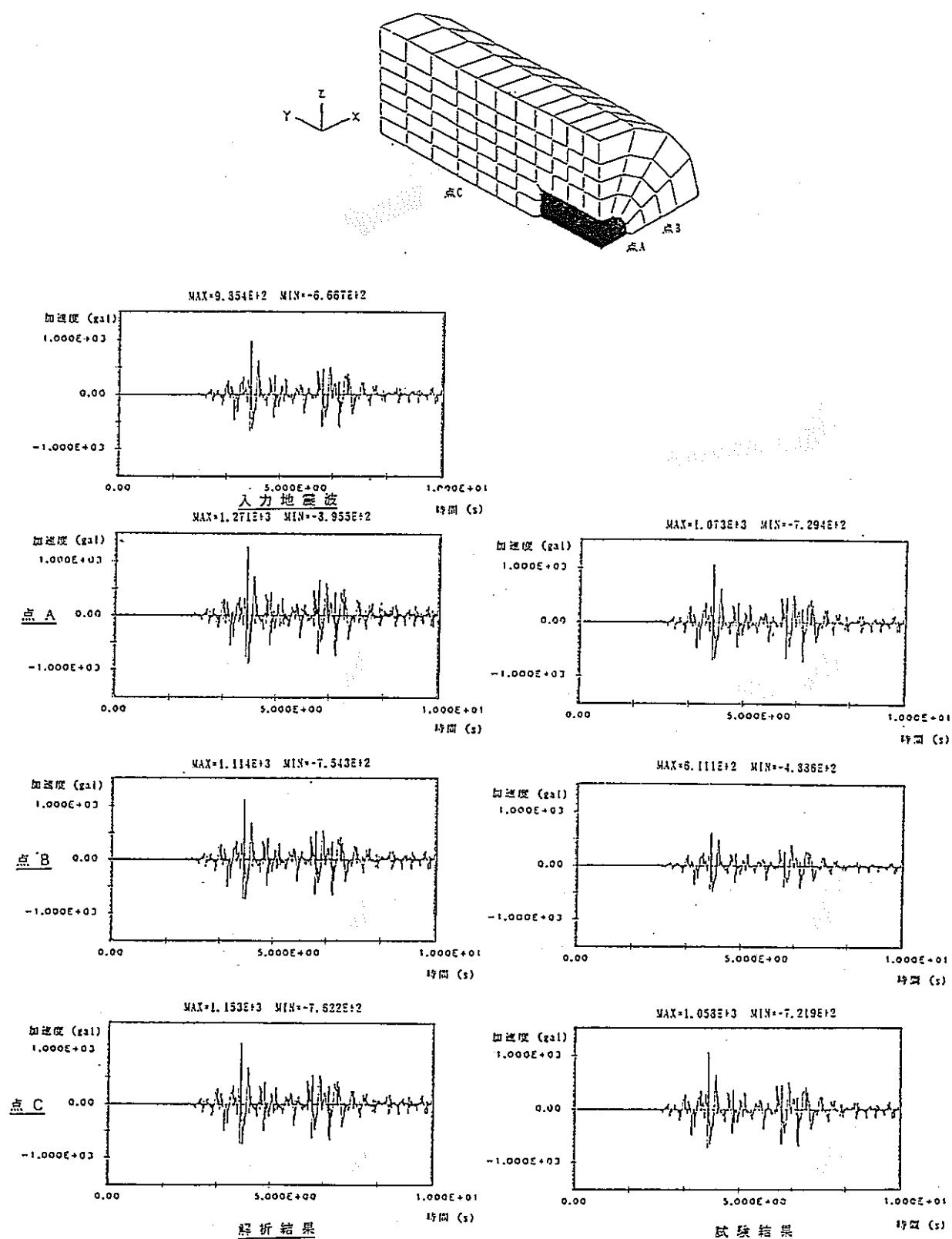


図-5.2.1.1 試験ケース3の比較検討（加速度応答時刻歴）

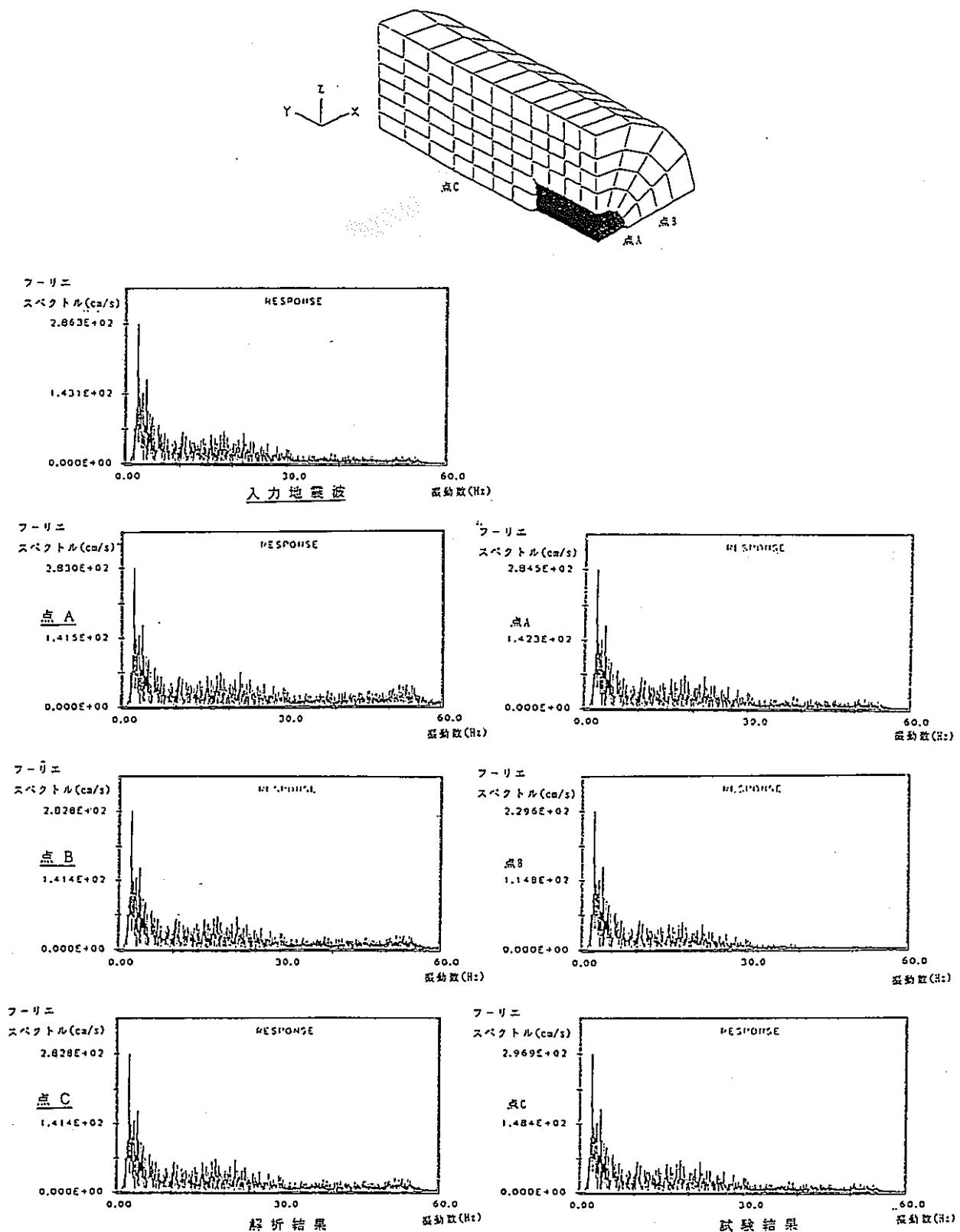


図-5.2.1.2 試験ケース3の比較検討（加速度フーリエスペクトル）

5.2.3 解析結果のまとめ

固有値解析から、解析結果は試験結果をほぼ再現しているものと思われ、密度の増加に伴い、固有振動数も増加することが推測された。また、試験体の規模が大きくなることにより、固有振動数が小さくなることが推測された。

地震応答解析から、ベントナイト中の加速度は、入力波形、オーバーパック上の加速度とほぼ同じであることが推測されたが、試験結果の1部に、ベントナイト中の加速度が、入力波形やオーバーパック上の加速度と比較して、若干低くなっている点が見られた。しかしながら、オーバーパック上の最大加速度は、試験、解析ともほぼ一致し、人工バリア内でオーバーパックが特に增幅されず、ベントナイトと一体となって振動していることが推測された。

6.まとめと今後の課題

我が国は、世界でもまれに見る地震多発国である。このような地質環境条件において、高レベル廃棄物の地層処分を考える場合、地震による影響を予測し、その耐震性を考慮に入れたシステムを考える必要がある。そこで、人工バリアシステムにおける振動の影響を試験及び解析により解明していくことを目的に本研究を実施してきている。

現在までに得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 小型模擬緩衝材試験体のスイープ試験から、シリコンゴムを用いた試験体は、摩擦やギャップなどの強い非線形特性を示す要素がなく剛体に近い特性を示した。また、実地震波加振から、本試験体は各地震波特有の周期に目立った応答はしないことが分かった。また、試験と解析との比較から、固有振動数に関しては、ほぼ一致するとの結果が得られたが、実地震波による加速度応答に関しては、両結果が若干相違するとの結果が得られた。
- (2) 小型緩衝材試験体のスイープ試験から、ベントナイトを用いた試験体は、摩擦やギャップなどの強い非線形特性を示す要素がなく剛体に近い特性を示した。また、実地震波加振から、本試験体は、各地震波特有の周期に目立った応答はしなかった。試験と解析との比較から、固有振動数に関して、両結果はほぼ近い値を示し、充填密度が増えるにつれ、固有振動数も増えることが推測された。また、実地震波による加速度応答に関しては、試験結果の一部にベントナイト中の加速度が若干低下する点が見られたが、オーバーパックは、地震により特別増幅することなく、人工バリアは一体となって挙動しているものと推測された。

以上のことから、本スケールの模擬緩衝材及び緩衝材試験体は、振動時に非線形的な挙動をすることなく、若干相違する部分があるものの人工バリアは一体となって挙動しているものと推測された。また、これらの試験から、人工バリアの振動挙動に関する試験の手法が確認され、解析コードの適用性が確認された。しかしながら、試験体の規模がより大きくなつた場合、様々な影響が想定される。今後の課題として、より大きな規模の試験を行うとともに、試験条件（入力地震波を含め）を詳細に検討し、精度の高いデータを取得していく必要があるものと思われる。また、ベントナイトの動特性を忠実に表現できる解析コードをさらに整備していくことが必要であると考えられる。

7.謝辞

本研究の共同研究先である防災研究所の御子柴正氏には、数多くの助言を頂いた。また、試験データの解析及び解析コード／モデルの開発については、コンピュータソフト開発（株）に協力して頂いた。ここに記し感謝の意を表したい。

8. 参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団（1992）：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書（平成3年度），PNC TN 1410 92-081.
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団（1994）：地層処分研究開発の現状（平成5年度），PNC TN 1410 94-094.
- 3) CSD：人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発(1993)，
PNC SJ 1458 93-001
- 4) 土木学会編：動的解析と耐震設計（第2巻）「動的解析の方法」，技報堂出版
- 5) 御子柴正，小川信行，箕輪親宏：深層地下空洞及び内部構造物の挙動に関する研究（1994），科学技術庁平成4年度国立機関原子力試験研究成果報告集，第33集，pp22-1～22-8
- 6) 材料工学便覧
- 7) 機械工学便覧
- 8) 御子柴正，小川信行，箕輪親宏：深層地下空洞及び内部構造物の振動挙動に関する研究(1995)，科学技術庁平成5年度国立機関原子力試験研究成果報告集，第34集，pp21-1～21-6
- 9) 資源・素材学会：地震に関する調査研究(X) (1994)，PNC ZN 1552 94-001.
- 10) CSD：人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発(2) (1994)，
PNC SJ 1458 94-002
- 11) 志水伸二，菅野毅：人工バリアシステムにおける地震の影響について—ベントナイトの動的変形特性と人工バリアシステムの振動挙動に関する基礎的検討— (1994)，
PNC PN 8410 94-310