

本資料は2001年10月04日付で

登録区分変更する。

[東海事業所技術情報室]

人工バリアの地震応答解析モデル/コードの開発

— 概 要 —

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書概要)

1993年2月

コンピュータソフト開発株式会社

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

電話: 029-282-1122(代表)
ファックス : 029-282-7980
電子メール: jserv@jnc.go.jp

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

この資料は、
ものです。つい

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

だけに開示する
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は下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室



人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

明石浩一*¹，根山敦史*¹
志賀章郎*²

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) 既存の地震応答解析モデル／コードの文献調査を行い、人工バリアシステムでの既存モデル／コードの適応性及び適用限界の検討を行った。
- (2) 上記の成果をもとに、二相系の三次元動的有効応力解析モデル／コードの開発を行った。
- (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検討を行った。

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

契約番号 : 040D0257

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 (五月女敦)

*1 : 科学技術部 第一開発室

*2 : 科学技術部

This is a blank page



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

Koichi Akashi *¹, Atsushi Neyama *¹

Akio Shiga *²

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 seismic response models and codes was researched, and their models and codes was discussed for their applicability to seismic response analysis for engineered barrier system.
- (2) As the results of research, development of two-phases 3D seismic response analysis code was performed.
- (3) It has been analyzed 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 Soft Development Co, Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Waste Technology Development Division, Geological Isolation Section, Atsushi Saotome

*1 : Engineering Development Section 1 Scientific Engineering Department

*2 : Scientific Engineering Department

This is a blank page

目 次

1.	まえがき	1
2.	既存モデル／コードの調査	2
2-1	各文献の概要のまとめ	2
2-2	既存モデル／コードの機能のまとめ	2
2-3	個々の現象モデルの分類	2
2-4	個々の現象モデルの評価	3
2-5	既存モデル／コードの機能評価	3
2-6	人工バリアシステムの地震応答解析コードに対する 機能の明確化	3
3.	人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	19
4.	振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討	24
4-1	人工バリアシステム簡易モデル（二次元、三次元）に よる固有値、応答解析	24
4-1.1	目的	24
4-1.2	解析条件	24
4-1.3	解析結果	25
4-2	人工バリアシステム簡易モデル（二次元）による境界 荷重条件の設定に係わる影響評価解析	26
4-2.1	目的	26
4-2.2	解析条件	26
4-2.3	解析結果	27
4-3	模擬振動実験予備解析	27
4-3.1	目的	27
4-3.2	解析条件	27
4-3.3	解析結果	28
4-4	小型振動試験予備解析	28
4-4.1	目的	28
4-4.2	解析条件	28
4-4.3	解析結果	29
4-5	模擬振動試験データ解析	29
4-5.1	目的	29
4-5.2	解析条件	29
4-5.3	解析手順	29
4-5.4	解析結果	30
5.	今後の課題	46
6.	あとがき	47

表 目 次

表. 1	文献調査の概要	6
表. 2	文献調査の概要	7
表. 3	文献調査の概要	8
表. 4	文献調査の概要	9
表. 5	文献調査の概要	10
表. 6	文献調査の概要	11
表. 7	文献調査の概要	12
表. 8	各々の現象モデルの分類と特徴	13
表. 9	各々の現象モデルの分類と特徴	14
表. 10	各々の現象モデルの分類と特徴	15
表. 11	各々の現象モデルの分類と特徴	16
表. 12	既存モデルの評価	17
表. 13	既存モデル／コードの機能評価	18
表. 14	開発コードの機能のまとめ	20
表. 15	開発コードの機能のまとめ	21
表. 16	開発コードの機能のまとめ	22
表. 17	開発コードの機能のまとめ	23
表. 18	物性値	31
表. 19	アクリル容器付二次元モデルの解析ケース	32
表. 20	人工バリア物性値	33
表. 21	人工バリア物性値	34

目 次

図. 1	文献調査手順	5
図. 2	二次元解析モデル	35
図. 3	三次元解析モデル (case-1)	36
図. 4	三次元解析モデル (case-2)	36
図. 5	三次元解析モデル (case-3)	36
図. 6	アクリル容器付二次元解析モデル	37
図. 7	アクリル容器付二次元解析モデルの境界条件	38
図. 8	小型振動試験三次元解析モデル	39
図. 9	小型振動試験三次元解析モデル	40
図. 10	各周波数での最大加速度応答倍率と最大相対変位の比較	41
図. 11	モデル寸法図	42
図. 12	各周波数での絶対加速度と相対変位の比較	43
図. 13	シリコンゴム減衰定数をパラメータした解析結果	44
図. 14	解析結果と試験結果の時刻歴データの比較	45

1. まえがき

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材で構成される地層処分の人工バリアシステムは、超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質移行の抑制など様々な物理的、化学的バリア性能を要求される。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種々の事象に対して健全な状態で維持していることが必要である。したがって、本研究では種々の事象のうち我が国の地質環境下において普遍的なものとして地震に着目した。これまでに人工バリアシステムの地震に対する健全性確保のための、耐震性評価は確立していないことから、本研究では以下の項目を実施した。

- ① 既存モデル／コードの調査
- ② 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発
- ③ 振動実験に基づくモデル／コードの妥当性の検討

2. 既存モデル／コードの調査

構造物の耐震安定性を評価するため、それぞれの構造物に適した多くの解析モデル／コードがこれまでに開発されている。ここでは、これらのモデル／コードの文献調査を行い、人工バリアシステムにおける既存モデル／コードの適用性及び適用限界の検討を行う。調査の対象は以下の点に着目した。

- ① 地盤と構造物の動的相互作用
- ② 地下構造物の耐震設計解析

文献調査を実施するに際しては、先ず土木分野の地震応答解析に係わる文献を依頼し、各文献の概要、モデル／コードの機能（入出力パラメータを含む）を表にまとめ、これらのまとめに基づき地震応答解析を行う上で考えられ得る各々のモデルを分類しこれを評価項目とした。次に人工バリアシステム特有の力学に係わる現象特性を考慮した上で、各々の現象モデルに対する評価として点数付けを行い、各評価項目において点数の高い現象モデルを総合的に取り入れた人工バリアシステムの耐震評価モデル／コードを抽出する観点から、本研究では90%の機能を満足する点数を判定基準とした。最後に、今回の文献調査の範囲内で既存のモデル／コードが判定基準に収まっているかどうかの判定を行い、判定基準に入っていれば既存モデル／コードは確定し更に高度化を目指した改良を行い、判定基準に入っていなければ、文献調査を継続するとともに人工バリアシステムの地震応答解析コードに対する機能の明確化を行い、モデル／コード開発の仕様とする。

以上の文献調査のフローを図. 1に示すとともに、図. 1の各ブロックの概要を順次以下に示す。

2-1 各文献の概要のまとめ

土木分野の地震応答解析に係わる文献として、本研究では30件の文献（コードマニュアル、土の力学的性質、間隙水挙動の評価、既存コードによる数値解析事例、地中構造物）を調査し、各文献の概要は、文献のタイトル、発行年数、著者、内容概要を表にてまとめた、各文献の概要を表.1～表.7に示す。

2-2 既存モデル／コードの機能のまとめ

既存モデル／コードの機能のまとめは、解析モデル（幾何形状、次元、境界条件の取扱い、解法、応力－ひずみ関係、減衰、応力モデル）、解析対象（構造物、土壌、間隙水）、入出力パラメータなどを項目に掲げ、これらをまとめたものを成果報告書文献集の原文の前に添付している。

2-3 各々の現象モデルの分類

各々の現象モデルの分類としては、応力－ひずみモデル（線形、等価線形、

弾塑性の実験式、弾塑性論)、間隙水圧モデル(実験式、応力経路、弾塑性論、Endochronic)、形状モデル(連続体、質点系、平面及び立体)、運動方程式の解法(重複反射法、特性曲線法、直接積分法)、透水方程式(Terzagheの式、Biotの式)、解析次元(一、二、三次元)、応力モデル(全応力、有効応力)、減衰モデル(粘性、非粘性、履歴、レーリー)、要素(バネ、粘性、伝達境界、ジョイント)、連成・非連成などを対象とし10項目に分類し、これらの特徴(長短所)をまとめた。これらの結果を表.8~表.11に示す。

2-4 各々の現象モデルの評価

人工バリアシステム特有の力学に係わる現象特性を考慮した結果、地震応答解析コード/モデルに求められる基本的な機能を以下に示す。

- ① 岩盤、緩衝材の特性の表現
- ② 岩盤、緩衝材中の間隙水の影響度表現
- ③ 埋設物、岩盤、緩衝材の形状表現
- ④ 埋設物、岩盤、緩衝材の相互作用
- ⑤ 解析時間の経済性

以上の基本的な機能を念頭において、前に示した各々の現象モデルに対して点数付けを行った。本検討では、必要性の高いモデルに対しては4点を与え必要性の低いモデルに対しては1点を与えた。各々の現象モデルに対する評価結果を表.12に示す。

2-5 既存モデル/コードの機能評価

既存モデル/コードの機能は、人工バリアシステムの力学的な特性を考慮した得点の高いモデルを出来るだけ採用しておく必要がある。本研究では、これらの現象モデルを総合的に取り入れた人工バリアシステムの耐震性評価を実施する上で必要となる点数を判定基準とすることとし、許容点数を35点とした。35点の根拠は、3.5点(個々の現象モデルに対して90%の要求をする)×10(現象モデルの分類項目数)とした。以上の要領に基づき表.13に示す様に既存モデル/コードの機能評価を行った結果、本研究の調査範囲内において許容点数を満足するモデル/コードは無かった。ただし、最も高得点であったコードは、No.4のモデルであり、許容点数を満足するためには、特殊な境界条件の機能追加、3次元への拡張が必要となる。

2-6 人工バリアシステムの地震応答解析コードに対する機能の明確化

本研究の文献調査範囲内では、人工バリアシステムの耐震性評価を実施する上で機能の優れた既存のモデル/コードが得られなかったことから、ここでは、人工バリアシステムの地震応答解析コードに対する機能を明確にし、次章のモデル/コード開発における要求条件または目標とする。地震応答解析コードに対する機能要求条件、目標を以下に示す。

- ① 弾塑性モデルの導入
- ② 粘性減衰、履歴減衰の導入

- ③ 透水モデルの導入
- ④ 有効応力の導入
- ⑤ 一、二、三次元の形状導入
- ⑥ 直接積分法の導入
- ⑦ 特殊な境界条件の導入
- ⑧ 構造物との相互作用を考慮する
- ⑨ 2相系の解析は連成とする

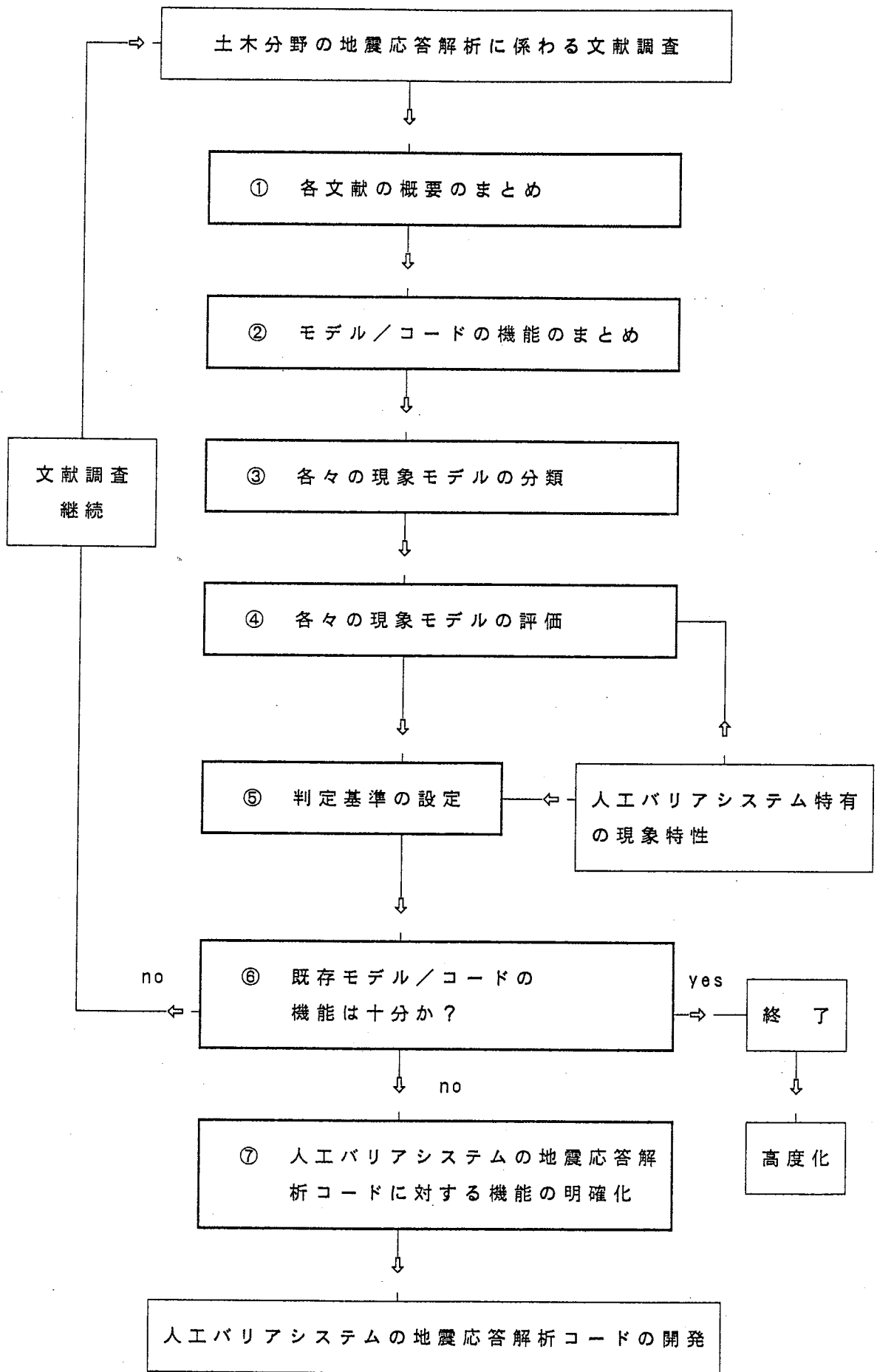


図. 1 文献調査の手順

表. 1 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
1	SHAKE : A COMPUTER PROGRAM FOR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF HORIZONTALLY LAYERED SITES	1972	Schnabel	重複反射理論を用いた一次元等価線形地震応答解析コード SHAKE についてのマニュアル
2	QUAD-4 : A COMPUTER PROGRAM FOR EVALUATING THE SEISMIC RESPONSE OF SOIL STRUCTURES BY VARIABLE DAMPING FINITE ELEMENT PROCEDURES	1973	Idriss , Lysmer	応力～ひずみ、減衰～ひずみモデルに等価線形法を用いた二次元FEMによる地震応答解析コードQUAD-4のマニュアル、本コードにおいては構造物との相互作用、過剰間隙水圧評価を解析する機能は有しない。
3	FLUSH : A COMPUTER PROGRAM FOR APPROXIMATE 3-D ANALYSIS OF SOIL STRUCTURE INTERACTION PROBLEMS	1975	Lysmer , Udaka , Chan	等価線形法を用いたFEMによる地震応答解析コードFLUSHのマニュアル。本コードにおいては各要素毎に粘性境界を用いることで簡易的な三次元解析(実質二次元)を実現している。また伝達境界を用いることでメッシュ数の大幅な削減が可能となっており、FLUSHにおいても構造物はビーム要素で表現され、地盤との相互作用も解析できる。しかしながら液状化判断の材料となる間隙流体の挙動を解析する機能は有していない。
4	PORE-WATER PRESSURE CHANGES DURING SOIL LIQUEFACTION	1976	Seed , Martin	地盤液状化を検討する上で必要となる間隙水圧評価の方法を提案した文献。評価手段のなかで単純せん断試験より得られたた経過式を利用している。過剰水圧の消散についても考慮しており式が提示されている。またこれに関連して透水係数、圧縮率の算出方法も提案されている。上記の手法を用いて作成されたコード'APPOLLO'を新潟地震データに適用于した結果実測とよく一致した結果が得られたことが報告されている。
5	PREDICTION OF LIQUEFACTION IN SAND DEPOSITS DURING EARTHQUAKES	1976	石原 , Lysmer	非排水せん断試験から得られる応力径路と降伏の概念を用いて載荷時の応力径路を予測し、全応力径路と有効応力径路の差から間隙水圧の評価をおこなう方法が提案されている。応力径路モデルにおいてはCyclic Mobility現象についても考慮されている。

表. 2 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
6	飽和砂地盤の液状化を考慮した応答解析	1978	山内, 兵藤, 長山	一次元等価線形法を用いた砂地盤に関する有効応力解析手法に関する文献。間隙水圧評価においては非排水試験結果より得られたSeedらの式を利用している。但し、透水については考慮されておらず、完全な非排水状態下での有効応力解析となっている。
7	砂地盤の液状化過程における応答解析	1979	山内, 兵藤	上記の内容に加え、不規則外力に対する間隙水圧の上昇評価、及び透水を考慮した有効応力解析手法を提案している。
8	地盤の非線形性を考慮した地盤応答解析に関する一検討	1983	今井, 松本, 吉清	弾塑性論に基づく非線形地震応答解析コードの開発とエルセントロ地震波を用いた数値解析が記されている。解析モデルとしては二次元FEMが適用されている。また地盤はO. C. Ziekiewiczの研究をもとに弾粘塑性体としてとらえられており、間隙水圧を考慮して有効応力解析が行われる。但し、透水、及び構造物との相互作用については考慮されていない。
9	2次元非線形解析による不整形地盤の地震時挙動の検討	1984	大槻, 渡辺	基礎の深さが急変する地盤に対してCapモデルを用いて大地震時の不整形地盤の挙動について解析的検討を行った文献。非線形解析を行うため、質点系モデルを融合したハイブリッド手法を用いたコードを開発している。
10	砂層の液状化についての数値シミュレーション	1981	国生, 江刺	新たに開発された三種の液状化解析コード 1) 1次元液状化解析 2) 1次元多入力液状化解析 3) 2次元液状化FEM解析についての報告。いずれも応力～ひずみモデルとしてはH-D及びR-0モデルを採用し非線形解析を行っている。間隙水圧の評価はSeedらの式を用いており疲労蓄積の概念を用いて不規則応力への適用を行っている。またCyclic Mobilityについても考慮されている。なお透水については1次元解析では考慮されていないが、二次元解析では考慮されている。

表. 3 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
11	地震時における飽和砂地盤の等価線形有効応力解析	1983	山内, 橋詰, 兵藤	等価線形法を有効応力解析に適用し計算の簡略化をはかっている。土の非線形モデルは修正H-Dモデルを採用し、間隙水圧評価にはSeedらの手法を用いている。以上の解析法をFEM解析に適用している。解析例として液状化に対する杭の影響が検討されている。
12	ハーディン・トルネビッチモデルによる地盤の非線形地震応答解析	1981	浅田, 川島	H-DモデルとR-0モデルを用いた地盤応答解析の比較を行い、ひずみ大の領域でのH-Dモデルの適用限界について指適している。
13	DYNAMICALLY COUPLED PERCOLATION AND DEFORMATION ANALYSIS OF EARTH DAMS	1975	Shen	Earth Damの応答解析に間隙水圧評価コードFEFESDを用いて液状化等を解析した事例。前記コードはQUAD-4と併用して解析を行うコードであり、間隙水圧評価には応力経路モデルを用いている。
14	SOIL MODULI AND DAMPING FACTORS FOR DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS	1970	Seed, Idriss	$G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ について述べられた文献。 G と σ'_m の関係式、 G_{max} の算出方法。H-Dモデル等について詳細が述べられている。SHAKE等において利用される粘土、土の $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ に関するデータは当文献に記載されている。
15	SEISMIC RESPONSE AND LIQUEFACTION OF SAND	1976	Finn, Byrne, Martin	一次元等価線形法を用いた有効応力解析理論が記された文献。間隙水圧評価は排水試験にもとづく残留体積ひずみを用いる方法が採用されている。文献中全応力解析との比較では最大加速度、応力等について両者に大きな違いが生じる例が報告されている。
16	SOIL MODEL OF EFFECTIVE STRESS FOR SEISMIC LOADING	1981	Zhiling, Yuging	Wang Zhilingにより開発された応答解析コードLSR1980で用いられた有効応力解析法、土質モデルについて記述された文献。間隙水圧上昇に伴うせん断弾性係数の低下、減衰係数の増加を補正するための乗数 α 、 β 、有効応力を考慮した曲線などが提案されている。なお間隙水圧評価にはSeedらの式が用いられ、評価は1/4サイクル単位で実施される。

表. 4 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
17	地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例		大崎, 原, 清田	沖積地盤から採取した試験体から得られたデータをもとにR-0モデルにもとづき新たに土の動力学モデルが提案されている。文献中ひずみ大領域でのH-Dモデルの問題点が指摘されている。
18	地震時における埋立軟弱地盤の応答解析		石原, 根井	埋立軟弱地盤より得られた試料をもとに $G/Go \sim \gamma, h \sim \gamma$ の実測値をもとめSeed-Idrissの提案式(1970)と比較を行っている。G/Goではよい一致は得られていないが、hでは非常に重復反理論モデルを適用して軟弱地盤解析を実施した結果は実測値とよく一致したことが報告されている。
19	岩盤空洞の地震時挙動観測と考案	1984	浜田, 杉原	硬質な粘板岩に掘削された山岳トンネル内での覆行コンクリートのひずみの測定を主とした地震観測の結果が報告されている文献。岩盤内の最大水平加速度は坑口で最大水平加速度の1/3 ~ 2/3、最大鉛直加速度は1/3 ~ 1であることと記載されている。またトンネル覆工の最大ひずみは岩盤内最大加速度が25 galの振動に対して高々 2×10^{-6} 程度であること、トンネル内ひずみ波形状は岩盤の地震時ひずみ波形状と相似形となるとの報告も記されている。
20	DYNAMIC EFFECTIVE STRESS RESPONSE OF SOIL STRUCTURES THEORY AND CENTRIFUGE MODEL STUDIES	1985	Finn	本文献においては等価線形法を用いた全応力解析では共振、間隙水圧、残留ひずみの評価が十分にできないとしてその適用限界が述べられている。従って上述の解析手法を用いたFLUSH等の利用は間隙水圧がそれほど高くなく、土壌の非線形性が顕著に生じない領域までであることが指摘されている。以上ことから著者はH-DモデルによるG~ γ 関係表現、排水下実験から残留ひずみを考慮した間隙水圧評価手法、構造物と土壌間の有効応力解析を提案している。文献中には上述の手法に基づくコードTARA-2による海中タンクモデル応答数値解析例が記載されている。

表. 5 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
2 1	SIMPLIFIED PROCEDURE FOR EFFECTIVE STRESS ANALYSIS OF GROUND RESPONSE	1 9 7 9	Martin, Seed	排水試験下で得られる残留ひずみを用いた過剰間隙水圧式、間隙水の移動、消散モデルについてのFinn, Ghabossi, Zienkiewiczの提案したモデルがまとめられている文献。また文献中、間隙水の移動、消散評価で必要となる圧縮率、透水係数の相対密度からの算出方法、間隙水圧上昇にともなう有効拘束圧低下と剛性低下についての関係式についても記載されている。コードMASH, DESRAを用いた全応力、有効応力による数値解析結果が比較されており、そのなかで液化後の両者の解析結果の差異が目立つことが指摘されている。
2 2	液化化過程における共振現象に関する数値解析	1 9 8 2	森尾、安部、兵藤	本文中地盤系の解析を非関連流動則にもとづく弾塑性解析で行う解析コードを採用している。地盤-構造物連成系力学モデルとしては地盤の有効応力に地盤-抗間の相互ばねが変動するとし非線形モデルを取り入れている。またた応力～ひずみ関係は双曲線形の修正H-Dモデルを採用している。応力状態線において平衡状態線を二次式で近似し、平衡状態線内部では間隙水圧は発生しないと仮定し、簡便な計算を可能としている。
2 3	八郎潟干拓堤防の液化化解析	1 9 8 5	田中忠次、安中正実	本文献においては土壌の構成関係として非関連流れ則を採用したDrucker Pragerの完全塑性体モデルを採用し、二次元非線形応答解析を行っている。但し、弾性域における弾性特性は平均有効応力、偏差ひずみに依存し、変化するものとしている。液化化検討の必要となる間隙水圧評価は砂質の排水条件下での体積変化をEndochronic理論で表現し、この体積変化が非排水下においては間隙水圧上昇に転化するものと仮定し、間隙水圧を見積っている。

表. 6 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
24	砂質地盤の液状化解析例	1980	柴田 徹、佐藤忠信	本文では半無限弾性基盤上にのった水平な飽和成層地盤を対象に一次元FEMによる地震応答解析を行っている。この解析においては基盤層は弾性体と仮定され、地下逸散減衰効果も考慮されている。解析で用いたたた弾塑性理論から導かれては異なる。文献中、入力振幅最大値200、300、500galの入力値に対する数値解析の結果地盤の非線形性が増幅率として表われていることが指摘されている。
25	液状化を考慮に入れた地盤の非線形地震応答解析	1981		本文中使用されているコードでは間隙水を含む土壌挙動の解析を、自生ひずみと間隙水圧を関係づけることにより土骨格のみの運動方程式のみで行う手法をとっている。応力ひずみモデルは、弾塑性理論により構成され、間隙水圧評価は熱力学分野で用いられるEndochronic理論が利用されている。
26	APOLLO-A Computer Program for the Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation in Horizontal Sand Layers During Cyclic or Earthquake Loading	1978	Martin, Seed	間隙水挙動解析コード' APOLLO' のマニュアル。APOLLOは' SHAKE ' 利用により得られた各地層での応力履歴を用いて間隙水圧の評価を行う。間隙水圧に関する基礎方程式は差分法により解を求められている。間隙水圧の評価式としてはSeedらの経験式を利用している。透水係数、圧縮係数については粒子サイズ、及び相対密度から求められている。
27	液状化過程における地盤及び杭、構造物系における地盤及び杭、構造物系への応答解析	1981	森尾敏、安倍勇	本文にはBiotの伝播に関する式に基づいた非線形の構造骨格と間隙水からなる二相系の動的解析手法及び解析結果について述べられている。せん断応力 τ 、 σ' 、 σ'' を双曲線有効応力 σ' に対してせん断応力比 τ/σ' 、 σ''/σ' を双曲線で表示し、応力経路については $1/4$ 楕円で近似を行っている。応力経路についてはCyclic Mobilization現象についても考慮されている。液状化過程での地盤～構造物間の相互作用はPenzien系モデルを導入している。

表. 7 文献調査の概要

No.	文献名	年	著者名	内容
28	砂の繰り返し応力～歪み関係のモデル化	1980	佐藤忠信、柴田徹	本コードでは応力～歪み増分関係を異方、移動硬化を考慮した弾塑性理論にもとづいて表現している。文献中、石原らの実験データとの比較(有効応力)と比較しているが、過剰間隙水圧の挙動、間隙水圧上昇に伴う土壌の剛性低下など実験値を良く適合していることが報告されている。
29	塑性モデルの液状化破壊現象の数値解析	1984	塩見忠彦、田中芳行	等価線型法による液状化解析では地盤の局所破壊、残留変形を予測することが困難である。本文献では多孔質体の2相系の解析と残留変形を用いたZienkiewiczらの2相系理論に基づき反放射曲面モデル(RSモデル)による解析を採用している。境界曲面はCam-Clayモデルにもとづいて定義されている。解析においては透水係数、静的土圧係数、強度定数、初期剪断応力をパラメータをし液状化に及ぼす影響について検討している。解析結果より反放射曲面モデルで液状化現象を定性的に模擬可能であると報告されている。
30	弾塑性構成モデルによる砂地盤の動的応答解析	1984	平井弘義、佐武正雄	本文献では二組の降伏関数と塑性ポテンシャルからなる弾塑性構成モデルを用いた解析コードによる解析結果が報告されている。変相線を超えた場合と超えない場合を考慮して二組の構成式を導いている。応力～歪み関係ではPagerの関連流動則を非関連流動則に一般化したものを採用している。

表. 8 各々の現象モデルの分類と特徴

項 目	特 徴	文献番号
1. 応力ひずみモデル		
(1)線形	<ul style="list-style-type: none"> ・解析領域が弾性領域 ($\gamma \leq 10^{-4}$) に限られる。 ・基本応答解析での利用 	
(2)等価線形	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的少ない計算時間で非線型性を模擬できる。 ・破壊ひずみ近くで誤差が大きいの。 ・残留変形の評価が困難 	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17
(3)実験式 ①H-Dモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ $\gamma \geq 10^{-3}$ で誤差大、ひずみが大きな領域での利用は問題がある。 ・残留変形の評価が可能である。 	10, 11, 12, 14, 17, 20
②R-Oモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・残留変形の評価が可能である。 ・実測値への適応性が良好である。 	10, 12, 17
(4)弾塑性論	<ul style="list-style-type: none"> ・必要な土質定数が多い。計算時間がかかる。 ・精度の高い挙動の解析が可能である。 	8, 9, 23, 24, 25, 28, 29, 30
2. 間隙水圧モデル		
(1)実験	<ul style="list-style-type: none"> ・密な砂への適合性に問題がある。 ・簡便である。 	4, 6, 7, 10, 15, 16, 20
(2)応力経路	<ul style="list-style-type: none"> ・液化初期で生じるCyclic Mobility現象について考慮される。 	5, 13, 24
(3)弾塑性論	<ul style="list-style-type: none"> ・実験データ等の利用によるモデルの修正、改良が必要 	8, 9, 22, 24, 28, 29
(4)Endochronic	<ul style="list-style-type: none"> ・解析コードが少ない。 	23, 25
(5)考慮せず	<ul style="list-style-type: none"> ・液化、間隙水挙動が把握できない。 	1, 2

表. 9 各々の現象モデルの分類と特徴

項 目	特 徴	文献番号
3. 形状モデル		
(1)連続体	<ul style="list-style-type: none"> ・計算時間が少ない。 ・単純水平層のみ対象、広域解析に適する。 	1, 15
(2)質点系	<ul style="list-style-type: none"> ・適性バネ係数の選定に難がある。 ・構造物へ地盤連成での精度に難がある。 ・簡便である。 	6, 7, (9), 10
(3)平面、立体	<ul style="list-style-type: none"> ・不均質、異方地層の表現が可能である。 ・構造物-地盤の相互作用解析が容易である。 	2, 3, 10, 11, 8, 20, 23, 24, 25, 29, 30
4. 運動方程式の解法		
(1)重複反射法	<ul style="list-style-type: none"> ・計算量が少ない。 ・一次元解析のみ適用可能 	1, 18
(2)特性曲線法	<ul style="list-style-type: none"> ・一次元解析のみ 	なし
(3)差分法	<ul style="list-style-type: none"> ・多次元解析、有効応力解析への適用できる。 	なし
(4)有限要素法	<ul style="list-style-type: none"> ・多次元解析、有効応力解析への適用できる。 	
(5)モード合成法	<ul style="list-style-type: none"> ・全応力解析、線形、等価線形解析に適用範囲が限定される。 ・非粘性減衰が適用できる。 	6, 7
(6)直接積分法	<ul style="list-style-type: none"> ・有効応力、非線形解析への適用が可能である。 ・非粘性減衰不可 	2, 10, 20, 23, 24, 25, 28, 29, 30
(7)複素応答法	<ul style="list-style-type: none"> ・全応力、線形、等価線形解析のみ可能ある。 ・非粘性減衰が適用できる。 	3

表. 10 各々の現象モデルの分類と特徴

項 目	特 徴	文献番号
5. 透水方程式		
(1)Terzaghe方程式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一次元解析のみ適用可能である。 	10
(2)Biot方程式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多次元解析での適用が可能である。 	24, 26, 27, 29, 30
6. 解析次元		
(1)一次元	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算量が少ないが、モデルの簡略化が必要である。 	1, 5, 6, 7, 10, 15, 17, 29, 30
(2)二次元	<ul style="list-style-type: none"> ・ 三次元特性が十分に表現できない。 	2, 9, 10, 11, 13, 20, 23, 25
(3)三次元	<ul style="list-style-type: none"> ・ 忠実なモデル化が可能だが計算量が多くなる。 	(3)
7. 連成、非連成 (有効応力解析 の場合)		
(1)連成モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土粒子骨格、間隙流体の相互作用を同時に解析するため精度が高い。 	8, 22, 23, 24, 29, 30
(2)非連成モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算量少、簡便で計算負荷が少ない。 	6, 7, 10, 11, 16, 20, 21, 26
8. 応力モデル		
(1)全応力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 簡便、必要な土質定数少ない。 ・ 有効応力解析に比べ精度で劣る。 	1, 2, 3, 5, 13
(2)有効応力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 必要な土質定数が多い。 ・ 精度の高い二相系の解析が可能である。 	6, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29

表. 11 各々の現象モデルの分類と特徴

項 目	特 徴	文献番号
9. 減衰モデル		
(1)粘性減衰	周波数依存の減衰モデル	2、10、23、24、25
(2)非粘性減衰	周波数に依存しない地震での減衰に忠実なモデル	1、3 (shake, flush)
(3)履歴減衰	材料の非線形性を表現可能。周波数に依存しない。	23、24、25、29
(4)レリーフ減衰	質量および構造に依存する減衰特性	8
10. 要素		
(1)バネ要素	・ 地盤 - 構造物接合面のモデル化	なし
(2)粘性、伝達境界要素	・ 要素数の削減 ・ 無限水平地層の簡易表現	3
(3)ジョイント要素	・ 岩盤の亀裂の表現	なし

表 1 2 既存モデルの評価

岩盤、構面材の特性		評価	
(1) 応力～ひずみモデル	線形モデル	2	
	等価線形モデル	3	
	実線式モデル	3	
	砂地盤弾塑性モデル	3	
	粘土材弾塑性モデル	4	
(2) 減衰モデル	非粘性減衰	3	
	粘性減衰	2	
	レリーフ減衰	2	
	履歴減衰	3	
間隙水の挙動			
(1) 間隙水圧の評価	実験式モデル	2	
	応力経路モデル	2	
	砂地盤弾塑性モデル	3	
	粘土材弾塑性モデル	4	
	Endochronic モデル	3	
(2) 透水モデル	考慮していない	1	
	Terzaghi 方程式	3	
	Biot 方程式	4	
	考慮していない	2	
	全応力モデル	3	
(3) 応力モデル	有効応力モデル	4	
	形状		
	(1) 形状モデル	連続体	2
		質点系	2
平面、立体		4	
一次元		1	
(2) 次元	二次元	3	
	三次元	4	
相互作用			
(1) 構造物との相互作用	解析機能あり	4	
	解析機能なし	1	
(2) 2 相系の解析	連成解法	4	
	非連成解法	3	

計算時間	評価	
(1) 運動方程式の解法	重複反射法	4
	特性曲線法	2
	差分法	3
	モード合成法	3
	直接積分法	2
(2) 境界モデル	複素応答法	3
	粘性境界	4
	伝達境界	
	なし	1

表 1.3 既存コードの評価

コードNo	コード名	文献集 ページ	岩盤、緩衝材の特性		間隙水圧の評価			形状表現		計算時間			相互作用		総点数
			応力～ひずみモデル	減衰モデル	間隙水圧の評価	透水モデル	応力モデル	形状モデル	次元	方程式の解法	境界	構造物との相互作用	二相系解析		
1	SHAKE	P. 1	手法	等価線形モデル	非粘性減衰 (SHAKE)	—	—	全応力	連続体	1次	重複反射法	—	なし	—	22
			評価	3	3	1	2	3	2	1	4	1	1	1	
2	QUAD-4	P. 111	手法	等価線形モデル	粘性減衰	—	—	全応力	平面	2次	直接積分法	—	なし	—	23
			評価	3	2	1	2	3	4	3	2	1	1	1	
3	FLUSH	P. 207	手法	等価線形モデル	非粘性減衰 (FLUSH)	—	—	全応力	平面	2次	直接積分法	伝達境界 粘性境界	あり	—	30
			評価	3	3	1	2	3	4	3	2	4	4	1	
4	—	P. 383	手法	等価線形モデル	非粘性減衰 (SHAKE)	応力経路	—	有効応力	連続体	1次	重複反射法	—	なし	非連成解析	26
			評価	3	3	2	2	4	2	1	4	1	1	3	
5	—	P. 409	手法	等価線形モデル	非粘性減衰 (SHAKE)	実験式	Biot	有効応力	質点	1次	モード合成法	—	なし	連成解析	28
			評価	3	3	2	4	4	2	1	3	1	1	4	
6	—	P. 417	手法	砂地盤弾塑性モデル	レーリー 減衰	砂地盤弾塑性 モデル	—	有効応力	平面	2次	直接積分法	—	あり	連成解析	32
			評価	3	2	3	2	4	4	3	2	1	4	4	
7	TDL	P. 429	手法	実験式 (H-D, R-O)	粘性減衰	実験式	—	有効応力	平面	2次	直接積分法	—	あり	連成解析	31
			評価	3	2	2	2	4	4	3	2	1	4	4	
8	—	P. 433	手法	実験式 (H-D, R-O)	粘性減衰	実験式	Biot	有効応力	質点	1次	直接積分法	—	なし	連成解析	26
			評価	3	2	2	4	4	2	1	2	1	1	4	
9	—	P. 689	手法	実験式 (H-D)	粘性減衰	応力経路	Biot	有効応力	連続体	1次	直接積分法	—	あり	連成解析	30
			評価	3	2	2	4	4	2	1	2	1	4	4	
10	—	P. 697	手法	砂地盤弾塑性モデル	粘性減衰 履歴減衰	Endochronic	—	有効応力	平面	2次	直接積分法	—	なし	連成解析	30
			評価	3	3	3	2	4	4	3	2	1	1	4	
11	—	P. 703	手法	砂地盤弾塑性モデル	粘性減衰 履歴減衰	砂地盤弾塑性 モデル	Biot	有効応力	連続体	1次	直接積分法	—	なし	連成解析	28
			評価	3	3	3	4	4	2	1	2	1	1	4	
12	—	P. 711	手法	砂地盤弾塑性モデル	粘性減衰	Endochronic	—	有効応力	平面	2次	直接積分法	—	なし	連成解析	30
			評価	3	2	3	2	4	4	3	2	1	1	4	
13	APOLLO	P. 717	手法	等価線形モデル	非粘性減衰 (SHAKE)	実験式	Biot	有効応力	連続体	1次	重複反射法	—	なし	非連成解析	26
			評価	3	3	3	4	4	2	1	4	1	1	3	
14	—	P. 803	手法	砂地盤弾塑性モデル	粘性減衰 履歴減衰	砂地盤弾塑性 モデル	Biot	有効応力	連続体	1次	直接積分法	—	なし	—	25
			評価	3	3	3	4	4	2	1	2	1	1	1	

3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

人工バリアシステムの地震応答解析コードに対する機能要求条件に基づき、今年度に導入したモデル／コードの仕様は以下の様にした。

- ① 地盤、構造物の線型特性を考慮したモデルの導入
- ② 土／水の二相系の連成解析、間隙水圧（有効応力）解析機能の導入
- ③ 有限要素法を用いた1～3次元解析機能の導入
- ④ 一般構造物を表現するための要素ライブラリーとしてトラス、梁、シェルバネ要素の導入
- ⑤ メモリーの制約を解消するため動的解析ではアウト・オブ・コアでの計算が可能である。
- ⑥ 解析結果を視覚化するためのプロット出力機能の導入

ただし、これだけの機能では2章に記載の許容点数を満足しないため、段階的に機能追加を行い許容点数を満足させることとする。尚、段階的な機能追加については5章「今後の課題」に記載する。また、本年度のモデル／コードでは、弾塑性論として、砂の液状化で適用されているマルチメカニズムモデルを導入しているが機能の確認は現在のところ行っていない。以上の状況を踏まえ人工バリアの地震応答解析モデル／コードの機能についてまとめたものを表.14～表.17に示す。

尚、ここで開発した人工バリアの地震応答解析モデル／コードは、動燃殿のFACOM機にインストール済である。インストールしたコードのマニュアル、実行、図化处理の手順、データセット名とその内容についての詳細は、成果報告書の付録に添付している。

表. 14 開発コードの機能のまとめ

<p>コード表</p> <p>(1) コード名</p> <p>(2) 作成者</p> <p>(3) 作成年</p> <p>(4) 文献名</p> <p>(5) 掲載雑誌</p>	<p>コンピュータソフト開発株式会社</p> <p>1992</p>
<p>解析モデル</p> <p>(1) 解析手法</p> <p>(2) 次元</p> <p>(3) 粘性境界、伝達境界</p> <p>(4) 解法</p> <p>(5) 応力～歪みモデル</p> <p>(6) 減衰モデル</p> <p>(7) 応力モデル</p>	<p>FEM</p> <p>一次元、二次元、三次元</p> <p>なし</p> <p>直接積分法</p> <p>線型モデル、弾塑性理論に基づくモデル (Multi Mechanism モデル)</p> <p>レーリー減衰</p> <p>有効応力モデル</p>

表. 15 開発コードの機能のまとめ

入力パラメータ		入力パラメータ	
(1) 土壌の単位体積重量	γ_s	(13) 松岡ダイラタンシーパラメータ	μ
(2) 構造物の単位体積重量	γ_w	(14) 松岡ダイラタンシーパラメータ	λ
(3) 土骨格の剪断弾性係数	G	(15) 体積圧縮指数	C_c
(4) 土骨格ヤング率	E	(16) 体積膨張指数	C_s
(5) 土骨格ポアソン比	ν_1	(17) 破壊時のグリチカルパラメータ	M
(6) 土骨格体積弾性係数	K_T	(18) 比体積	η
(7) 土粒子体積弾性係数 #1	K_s	(19) 硬化パラメータ	σ^m
(8) 水粒子体積弾性係数 #1	K_w	(20) 硬化パラメータ	σ^c
(9) 間隙比 #1	n	(21) 硬化パラメータ	b
(10) 透水係数 #1	k	(22) 松岡=3.0 マルチメカニズム	C
(11) 土骨格レリー-減衰係数	α_s, β_s	(23) 松岡≠0.0 マルチメカニズム	S_c
(12) 水レリー-減衰係数 #1	α_w, β_w	(24) 松岡=3.0 マルチメカニズム	μ_{max}

表. 1.6 開発コードの機能のまとめ

入力パラメータ		入力パラメータ	
(25) 規準平均有効応力	#2	σ'	(39) ヤング率
(26) 初期間隙比	#1	e_0	(40) ポアソン比
(27) 異方性パラメータ	#2	A	(41) 板厚
(28) ヤング率		E (トラス)	(42) 剪断板厚
(29) 断面積		A (トラス)	(43) 重量密度
(30) 重量密度		γ (トラス)	(44) x方向ばね
(31) ヤング率		E (ビーム)	(45) y方向ばね
(32) 断面積		A (ビーム)	(46) z方向ばね
(33) 剪断弾性係数		G (ビーム)	(47) x回りばね
(34) y軸方向断面二次モーメント		I_{yy} (ビーム)	(48) y回りばね
(35) z軸方向断面二次モーメント		I_{zz} (ビーム)	(49) z回りばね
(36) 断面極二次モーメント		I (ビーム)	
(37) y軸方向剪断断面積		A_{xy} (ビーム)	
(38) z軸方向剪断断面積		A_{xz} (ビーム)	
			E (シエル)
			ν (シエル)
			T (シエル)
			T_s (シエル)
			γ
			k_x
			k_y
			k_z
			r_x
			r_y
			r_z

表. 1.7 開発コードの機能のまとめ

解析対象	
(1) 構造物	トラス、ビーム、シェル、バネ要素で表現できる。
(2) 土壌	弾塑性モデルパラメータにて対応
(3) 間隙水	1 間隙水圧評価 Multi Mechanism モデルによる評価
出力	
(1) 加速度、速度、変位	各節点での加速度、速度、変位の時刻歴 最大加速度、速度、変位
(2) 応力、歪み	各要素内の積分点での応力、歪み、最大剪断応力の時刻歴 最大応力、歪み
(3) 間隙水圧	各要素内の積分点での圧力時刻歴 最大圧力
概要	
	今回開発した地震応答解析コードは材料の非線型性を考慮した土/水二相系地盤の三次元解析が可能である。非線型モデルとしては石原、KabirajamanyらによるHujeux-Aubryモデルの拡張であるMulti Mechanism モデルを用いている。これにより液化、Cyclic Mobility 現象の再現も可能である。また、より簡便な計算を行うための線型モデルも組み込んでいる。また、要素ラィブラリとしてはトラス、ビーム、シェル、バネ要素が組み込んでおり、一般構造物のモデル化が可能である。

*1：二相系解析に必要なパラメータ

*2：非線型解析に必要なパラメータ

4. 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討

本研究で開発コードを用いて振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討に先立ち種々の予備解析として、

- ① 人工バリアシステム簡易モデル（二、三次元）による固有値、応答解析
- ② 人工バリアシステム簡易モデル（二次元）による境界、荷重条件の設定に係わる影響評価解析

を実施し、実験規模の固有値、応答解析における傾向ならびに条件設定の要領について把握することを目的とする。次に振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討として、

- ③ 小型振動実験の予備解析（三次元）
- ④ 模擬振動実験の予備解析（三次元）
- ⑤ 模擬振動実験のデータ解析（三次元）

の解析を行った。

4-1 人工バリアシステム簡易モデル（二、三次元）による固有値、応答解析

4-1.1 目的

ここでの試解析は、三次元解析で問題とされている計算時間に伴う経済性及び作業の効率化の観点から、二次元の人工バリアシステムにおける簡易モデル（平面ひずみ要素）と三次元簡易モデルの弾性解析結果を比較することにより二次元モデルの適用性について検討することを目的としている。また、動燃殿のFACOM 機へのインストールに際して、当社のIBM 機との解と比較し計算機による差異が無いことの確認も目的としている。

4-1.2 解析条件

(1) 解析モデル（二次元モデル）

横置き的人工バリアシステム（実験装置のスケール）の縦断面をモデル化することとした。本検討では円筒状の形状を矩形状の簡易モデルとして、一辺が10cmの4節点4辺形平面ひずみ要素(plane4)を用いた。解析モデルを図.2に示す。尚、図.2の中央の要素はオーバーパックとし、周辺の要素は緩衝材を示す。

(2) 解析モデル（三次元モデル／ケース1）

横置き的人工バリアシステム（実験装置のスケール）の縦断面をモデル化することとした。本検討では円筒状の形状を矩形状の簡易モデルとして、一辺が10cmの8節点直方体要素(hexa8)を用いた。解析モデルを図.3に示す。尚、図.3の中央の1要素はオーバーパックとし、周辺の26要素は緩衝材を示す。

(3) 解析モデル (三次元モデル/ケース 2)

横置き的人工バリアシステム (実験装置のスケール) の縦断面をモデル化することとした。本検討では円筒状の形状を矩形状の簡易モデルとして、一辺が10cmの8節点直方体要素(hexa8)を用いた。解析モデルを図.4に示す。尚、図.3の中央部一列の3要素はオーバーパックとし、周辺の24要素は緩衝材を示す。

(4) 解析モデル (三次元モデル/ケース 3)

横置き的人工バリアシステム (実験装置のスケール) の縦断面をモデル化することとした。本検討では円筒状の形状を矩形状の簡易モデルとして、一辺が10cmの8節点直方体要素(hexa8)を用いた。解析モデルを図.5に示す。尚、図.5の中央部一列の2要素はオーバーパックとし、周辺の34要素は緩衝材を示す。

(5) 境界条件

境界条件は、三次元モデル/ケース2を除き実験装置スケールの横置き人工バリアシステムが地中に埋設されていると仮定し、周囲の全節点を完全固定した。三次元モデル/ケース2の境界条件は、オーバーパック表面を除き、周囲の全節点を完全固定した。

(6) 物性値

解析で用いた緩衝材、オーバーパックの重量密度、せん断弾性係数、ポアソン比、減衰定数を表.18に示す。

(7) 入力波

動的解析における入力波は、下式の波形関数に周期 $T=0.020(\text{sec})$ 、最大加速度 $F=98(\text{gal})$ を入力した。入力波の振幅方向は、X軸(水平方向)に平行となる条件とした。

$$f(t) = F \cdot \sin[(2\pi/T)t]$$

(8) 時間メッシュ

時間メッシュは $5.0 \times 10^{-4}(\text{sec})$ 、20ステップ(入力波の半波長)にて解析を行った。

4-1.3 解析結果

各モデルの一次固有振動数は二次元モデルが51.8(Hz)、三次元モデル/ケース1が61.7(Hz)、三次元モデル/ケース2は27.7(Hz)、三次元モデル/ケース3が61.5(Hz)となった。一次固有振動数は三次元モデル/ケース2を除いてほぼ一致している。また、三次元モデル/ケース2においてモデル表面の全節点を完全固定とした場合、約60(Hz)となることを確認している。ここで、約10

(Hz)の違いは、3次元モデルにおいて奥行き方向を長くし、メッシュを更に細分割することによって2次元モデルの一次固有振動数に近づくものとする。

応答解析において入力波の半波長では、安定解に達しておらず、ここでの応答解析結果は1次固有振動数の値も含め動燃殿の計算機にプログラムをインストールした際に、当社のIBM機と同一の解が得られていることを確認するためのものであり、両者の解は一致していることを確認した。

4-2 人工バリアシステム簡易モデル（三次元）による境界、荷重条件の設定に係わる影響評価解析

4-2.1 目的

実規模の人工バリアシステムは地下深部に埋設されていることから、一般的に人工バリアシステムへの地震波入力への取扱いは幾何モデルの周辺を完全固定として、全ての完全固定部分から入力する。しかし、振動テーブルに搭載された小型の人工バリアシステムでは、地震波入力の位置が限定されており、小型の人工バリアシステムを格納している容器が剛であれば、周辺を完全固定としてここからの地震波入力を考慮できるが、容器が柔の場合に容器の剛性、地震波入力の位置を考慮する必要がある。本検討では、これらを考慮したパラメータ解析を行いモデル、境界条件に関する影響度評価を行うことを目的とする。

4-2.2 解析条件

(1) 解析モデル

本検討では、図.6の上部に示す試験モデルを想定し、幾何形状は二次元の矩形として図.6に示す様なメッシュ分割でモデル化した。周辺の4辺形要素は容器（ここでは、アクリル製容器を想定）を模擬しており、その内側にある8要素は緩衝材とし、中央部の1要素はオーバーパックを模擬している。4辺形要素は全て二次元の平面ひずみ要素としている。

(2) 境界条件

境界条件は、図.7に示す様に試験モデルの形状を考慮し3ケース設定した。

(3) 物性値

解析で用いた緩衝材、オーバーパックの重量密度、せん断弾性係数、ポアソン比、減衰定数を表.18に示す。また、アクリル容器の物性値は現段階で正確な値が得られなかったことから、表.18に示す様にパラメータとして3ケース考慮することとした。

(7) 入力波

動的解析における入力波は、下式の波形関数に周期 $T=0.025(\text{sec})$ 、最大加速度 $F=98(\text{gal})$ を入力した。入力波の振幅方向は、モデル1、2がX軸（水平方向）に平行となる様にし、モデル3はX軸と45度の角度となる方向に設定した。

$$f(t) = F \cdot \sin[(2\pi/T)t]$$

(8) 時間メッシュ

時間メッシュは $0.01(\text{sec})$ 、300ステップ（12波）にて解析を行った。

4-2.3 解析結果

解析ケースを表.19に示す。最も一次固有振動数が小さいケースは、容器のせん断弾性係数が最も低い $5 \times 10^2(\text{kgf/cm}^2)$ 、境界条件が下面固定の場合で $14.9(\text{Hz})$ となる。その他の境界条件においては約 $27(\text{Hz})$ となる。また、容器のせん断弾性係数が最も高い $5 \times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$ の場合の一次固有振動数は $40 \sim 50(\text{Hz})$ となり、境界条件に依存せずほぼ全面固定とした場合の一次固有振動数になる。また、容器のせん断弾性係数が $5 \times 10^3(\text{kgf/cm}^2)$ 、境界条件が下面固定の場合は約 $23(\text{Hz})$ となり、その他の境界条件においては約 $40(\text{Hz})$ となる。

以上のことから境界条件として側面を固定し、容器のせん断弾性係数が $5 \times 10^3(\text{kgf/cm}^2)$ 以上の場合はあまり固有振動数に影響を及ぼさないことがわかった。よって、実験データ解析を実施する場合は容器のせん断弾性係数を見積もるとともに、パラメータの1つとして考える必要がある。

4-3 模擬振動実験予備解析（三次元）

4-3.1 目的

本研究で開発したモデル/コードの実現象への適用性を評価するため、実験室レベルでの確認解析の実施に先立ち、これまでは小規模モデルの試解析を対象としてきたが、ここでは大規模幾何モデルへのコードの適用性、数値解の吟味を目的とする。

4-3.2 解析条件

(1) 解析モデル

本検討では、模擬振動試験のモデルとして図.8、図.9に示す様な三次元モデルを対象として予備解析を実施した。計算時間等を考慮して動的解析において1/8分割したモデルを用いて解析を実施した。使用要素は8節点立方体要素（hexa8）を用い、中央部に円筒状のオーバーパックが位置し、その周

辺はシリコンゴムとしている。容器については考慮した場合と考慮しない場合の2ケースを考えた。

(2) 境界条件

境界条件は、側面容器を考慮しない場合については外部に位置する節点を全て完全拘束とした。考慮した場合については側面は自由とし、端面のみの拘束を行った。

(3) 物性値

解析で用いたシリコンゴム、オーバーパック、アクリルの重量密度、ヤング率、ポアソン比、減衰定数を表.20 に示す。

4-3.3 解析結果

一次固有振動数は、容器を考慮したモデル、考慮しないモデルともほぼ同一（シリコンゴムポアソン比0.45で33Hz）の値となった。今回解析前にシリコンゴムポアソン比のデータを入手することができなかったが、コードの解析対象が等方性均質弾性体となっている為、便覧等に記載されているゴムのポアソン比の範囲（0.45～0.50）では解析結果への影響が大きい。一次モード形については水平方向（中心軸方向）の変位が卓越している。動的解析ではシリコンゴムポアソン比を0.45に固定し、容器を考慮したモデルを用いてのシリコンゴム減衰定数0.10と0.05の比較を行ったが、差は見られなかった。また5、10、20、30、40、50Hzの正弦波形を加振波とした解析においては図.10 に示すように水平方向加振では30Hz、鉛垂方向の加振では40Hzで最も大きい加速度応答倍率が得られた。

4-4 小型振動試験予備解析

4-4.1 目的

本研究で開発したモデル／コードの実現象への適用性を評価するため、ここでは小型振動試験モデルへのコードの適用性、数値解の吟味を目的とする。

4-4.2 解析条件

(1)小型振動試験のモデルとしては図.11 に示す様な三次元モデルを対象とした。仕様要素は8節点立方体要素を用い、中心部に円筒状のオーバーパックが位置しその周辺はベントナイトとなっている。容器については解析前に物性値を入手できなかったためモデル化は行っていない。

(2)境界条件

外部に位置する節点全て完全拘束とした。

(3)物性値

解析で用いたベントナイト、オーバーパックの物性値については表.21 に示す。

4-4.3 解析結果

一次固有振動数は120 Hzとなり模擬振動試験予備解析に比べかなり大きな値となっている。これはベントナイトのヤング率がシリコンゴムの約17倍となっていることに起因する。一次固有振動数が高い為5～50 Hzの正弦波形による加振を行った結果では図.12 に示すように周波数に対し加速度応答倍率は単調な増加となっている。

4-5 模擬振動試験データ解析

4-5.1 目的

防災研殿にて実施された模擬振動試験データに基づき、本研究で開発したモデル／コードの実現象への適用性評価の為、パラメータ解析を実施した。

4-5.2 解析条件

(1) 模擬振動試験予備解析で用いたモデル及び境界条件を使用した。

4-5.3 解析手順

データ解析においては以下の手順で解析を実施した。

- (1) 各パラメータの一次固有振動数への影響度の評価及び試験結果との比較を行った。
- (2) (1)の結果に基づきシリコンゴムのポアソン比を0.45→0.495に変更し、動的解析を実施した。
- (3) (2)の解析結果と試験結果が大きく異なるため原因をシリコンゴム減衰定数もしくはヤング率によるものと想定し

① シリコンゴム減衰定数をパラメータとした解析

(減衰定数 0.01、0.03、0.05、0.1の4ケース)

② シリコンゴムヤング率をパラメータとした解析

(ヤング率 8.48、13.98、34.95、69.90、
kgf/cm²)

の2通りのパラメータ解析を行った。

- (4) (3)－②の解析にてシリコンゴムヤング率を13.98 kgf/cm² にした場合試験結果と同一傾向となったため、シリコンゴムヤング率を6.99→13.98 kgf/cm² に変更するとともに一次固有振動数が試験結果に合うようポアソン比を0.495→0.48に変更した。

上記の変更を行った後、再度シリコンゴム減衰定数をパラメータとして解析を実施した。

4-5.4 解析結果

シリコンゴムの減衰定数を変更しただけでは試験結果と図.13 示すように同一傾向を示す解析結果を得ることはできなかった。ヤング率を変更した場合が得られることを考えると密閉容器内ではシリコンゴムの剛性は本来より高くなると推測できる。今回の解析ケースでは、ヤング率を 13.98 kgf/cm^2 、減衰定数を 0.1 に設定した場合が、試験結果と最も近いものとなった。

このケースでの各評価点における試験結果と解析結果の比較を図.14 に示す。

表. 18 物性値

材 料	重量密度	せん断弾性係数	ポアソン比	減衰定数
オーバーパック	7.24g/cm ³	2.1E6 kg f/cm ²	0.3	-
ベントナイト	2.00g/cm ³	5.0 kg f/cm ²	0.4	0.05
容器 - 1	1.00g/cm ³	5.0E2 kg f/cm ²	0.3	-
容器 - 2	1.00g/cm ³	5.0E3 kg f/cm ²	0.3	-
容器 - 3	1.00g/cm ³	5.0E4 kg f/cm ²	0.3	-

表. 19 アクリル容器付二次元モデルの解析ケース

	境界条件	アクリル	入力波方向余弦 (X, Y, Z)
モデル 1-1	モデル 1	容器 1	(1, 0, 0)
モデル 1-2	モデル 1	容器 2	(1, 0, 0)
モデル 1-3	モデル 1	容器 3	(1, 0, 0)
モデル 2-1	モデル 2	容器 1	(1, 0, 0)
モデル 2-2	モデル 2	容器 2	(1, 0, 0)
モデル 2-3	モデル 2	容器 3	(1, 0, 0)
モデル 3-1	モデル 3	容器 1	(0.7, 0, -0.7)
モデル 3-2	モデル 3	容器 2	(0.7, 0, -0.7)
モデル 3-3	モデル 3	容器 3	(0.7, 0, -0.7)

表 2 0 人工バリア物性値

実固有値解析での物性値

材 料	比重量(gf/cm ³)	ヤング率(kgf/cm ²)	ポアソン比
シリコンゴム	0.97 * ¹	6.99 * ¹	0.40 , 0.43 0.45 , 0.47 0.49
ア ク リ ル	1.17 * ²	3.0×10 ⁴ * ²	0.35 * ²
オーバーパック	7.77 * ¹	2.1×10 ⁶ * ³	0.3

動的解析での物性値

材 料	比重量(gf/cm ³)	ヤング率(kgf/cm ²)	減 衰 定 数	ポアソン比
シリコンゴム	0.97 * ¹	6.99 * ¹	0.05 , 0.1	0.45
ア ク リ ル	1.17 * ²	3.0×10 ⁴ * ²	0.02 * ⁴	0.35 * ²
オーバーパック	7.77 * ¹	2.1×10 ⁶ * ³	—	0.3

(* 1) I H I 殿所有データ

(* 2) I H I 殿より送付のアクリル物性値資料より引用

但し 比重量については 1.17 ~ 1.20 より 1.17 gf/cm³ を引用

ポアソン比については -25 ~ 50 °C での値を引用

ヤング率については 20 °C での値を引用

(* 3) 機械工学便覧 炭素含有量 0.25 % 以上での値から引用

(* 4) アクリル容器がボルトにより固定されることからこれをボルト及びリベット構造物に類似するものと考え、原子力発電所耐震設計技術指針より、0.02 の値を引用

表 2 1 人工バリア物性値

材 料	比重量(gf/cm ³)	ヤング率(kgf/cm ²)	減 衰 定 数	ポアソン比
ベントナイト	1.60 * ¹ (湿潤)	1.20×10 ² * ¹	0.025 * ¹	0.4 * ²
オーバーパック	7.77 * ³	2.10×10 ⁵ * ⁴	—	0.3* ⁴

(* 1) についてはPNC殿物性値データよりサンプルDT-24 のせん断ひずみ10⁻⁴時の値を引用

(* 2) についてはPNC殿実施の人工バリア二次元解析でのデータを引用

(* 3) については I H I 殿所有データ

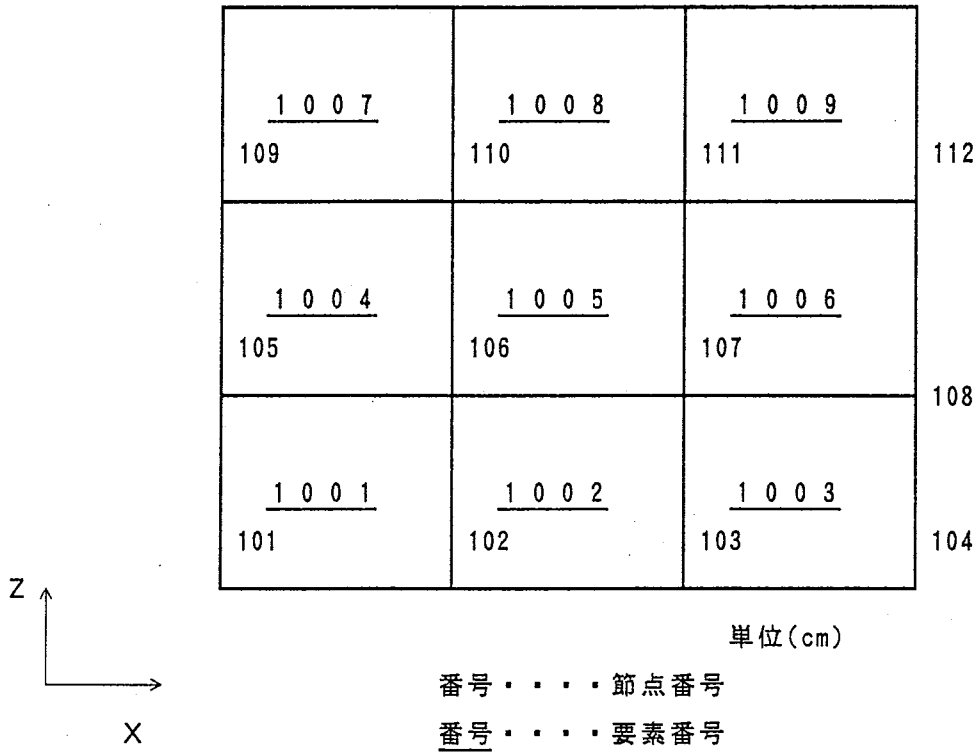
(* 4) については機械工学便覧炭素含有量0.25%以上での値から引用

113

114

115

116



(注1) 中央網掛け要素のみオーバーパックとし、その他の要素は緩衝材とする。

(注2) 外周部はすべて固定する。

図. 2 二次元解析モデル

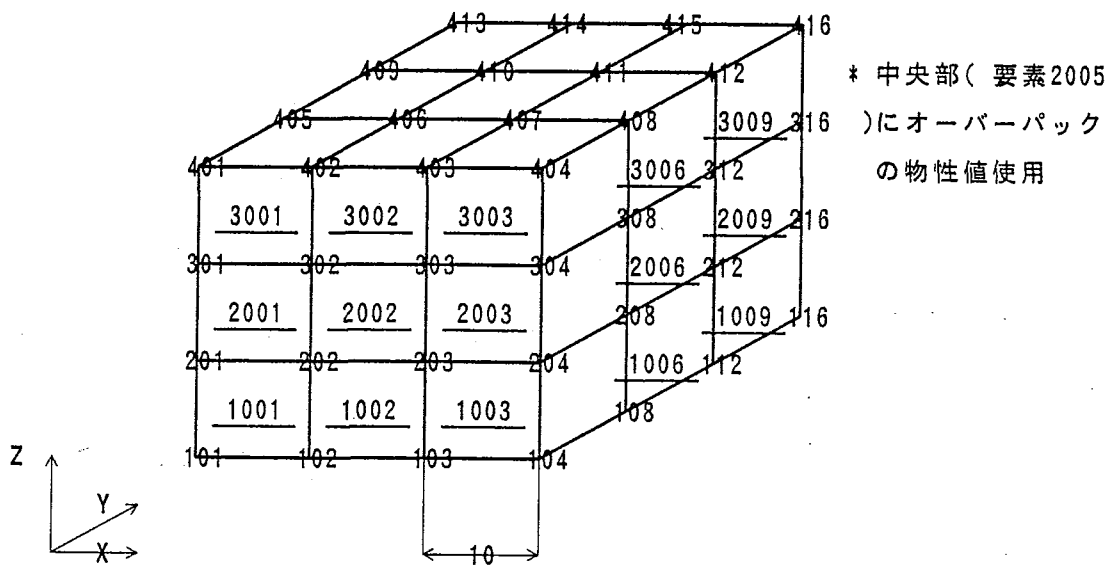


図. 3 三次元モデル(case1)

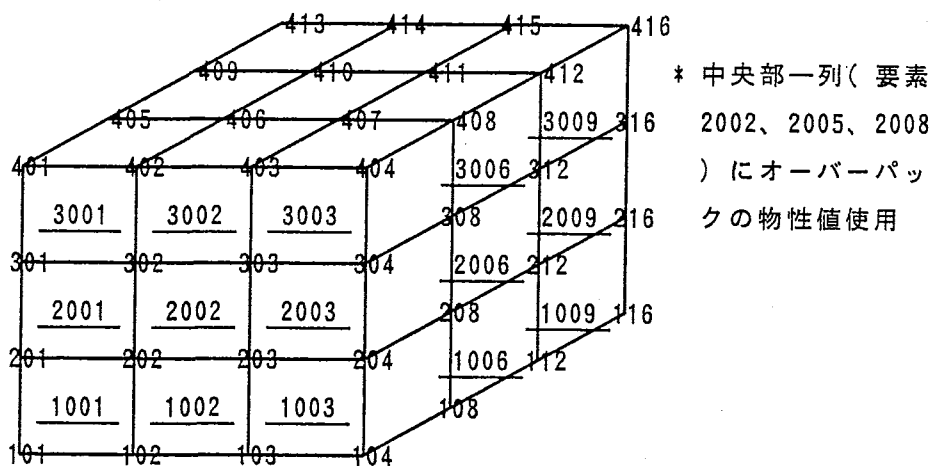


図. 4 三次元モデル(case2)

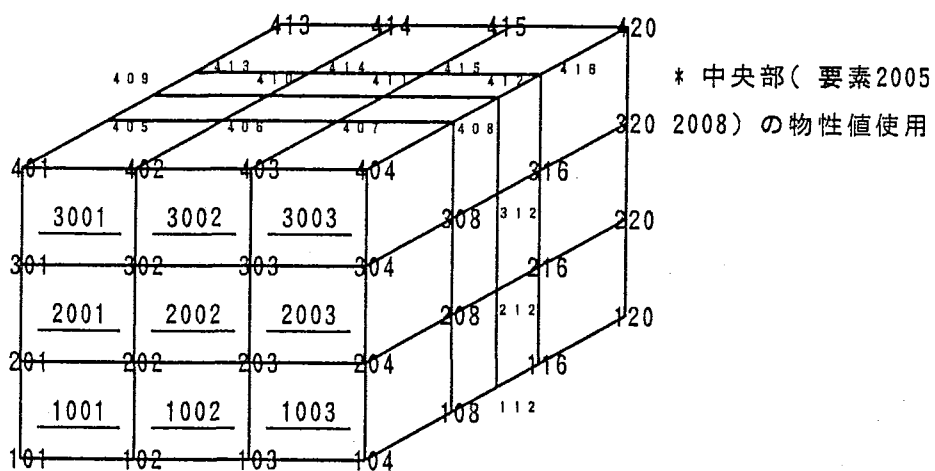
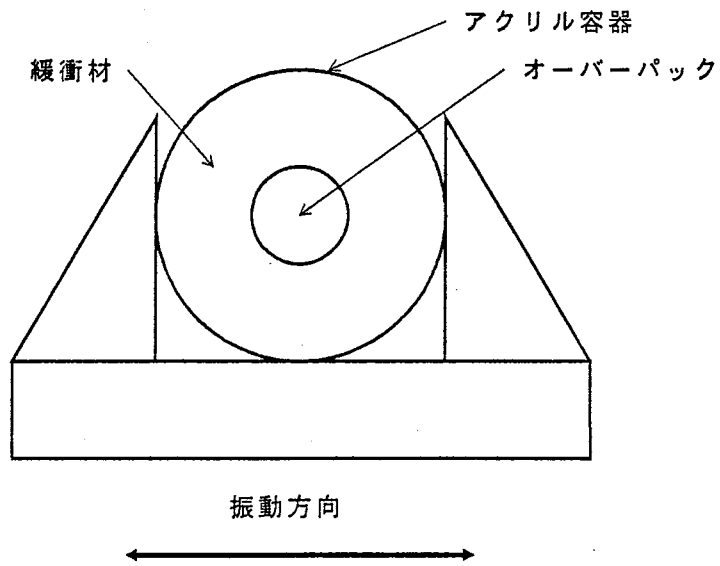


図. 5 三次元モデル(case3)

単位:cm



簡易モデル化

<u>1021</u>	<u>1022</u>	<u>1023</u>	<u>1024</u>	<u>1025</u>
<u>1016</u>	<u>1017</u>	<u>1018</u>	<u>1019</u>	<u>1020</u>
<u>1011</u>	<u>1012</u>	<u>1013</u>	<u>1014</u>	<u>1015</u>
<u>1006</u>	<u>1007</u>	<u>1008</u>	<u>1009</u>	<u>1010</u>
<u>1001</u>	<u>1002</u>	<u>1003</u>	<u>1004</u>	<u>1005</u>

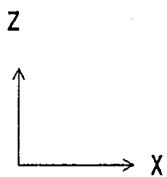
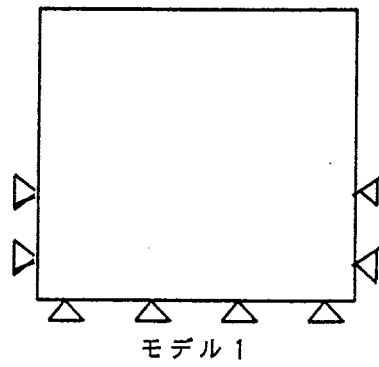
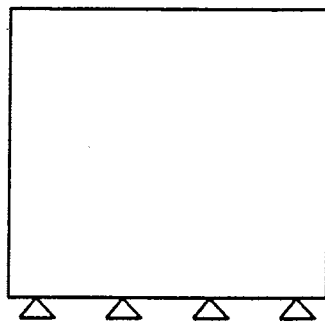


図. 6 アクリル容器付二次元解析モデル図



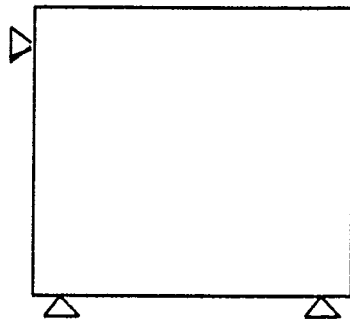
下面+側面拘束モデル

モデル 1



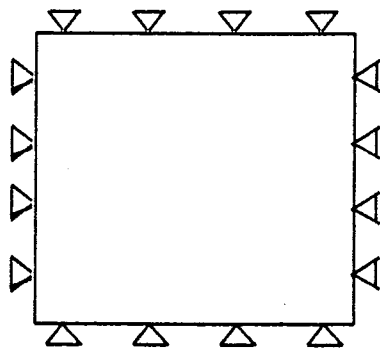
下面拘束

モデル 2



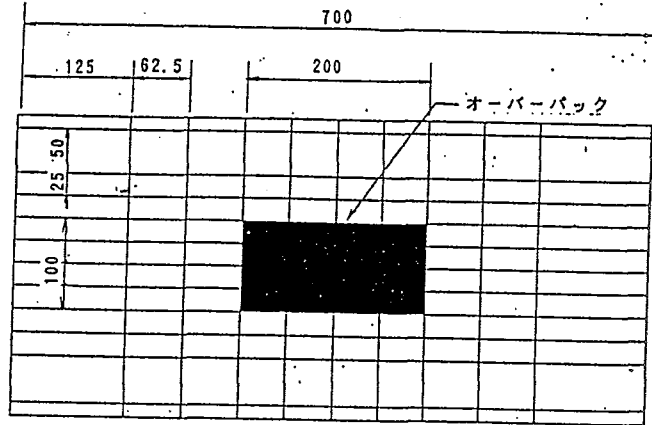
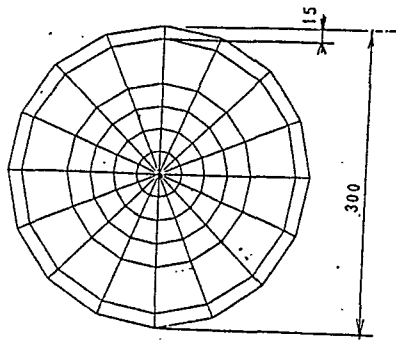
三節点拘束

モデル 3

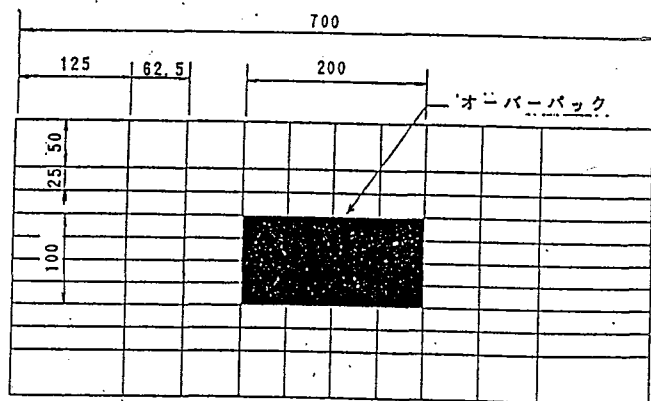
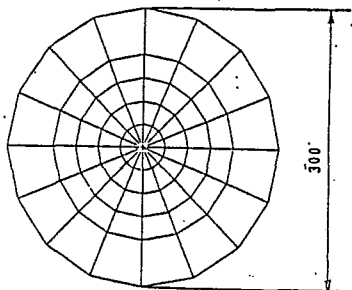


全面拘束モデル

図. 7 アクリル容器付二次元解析モデルの境界条件



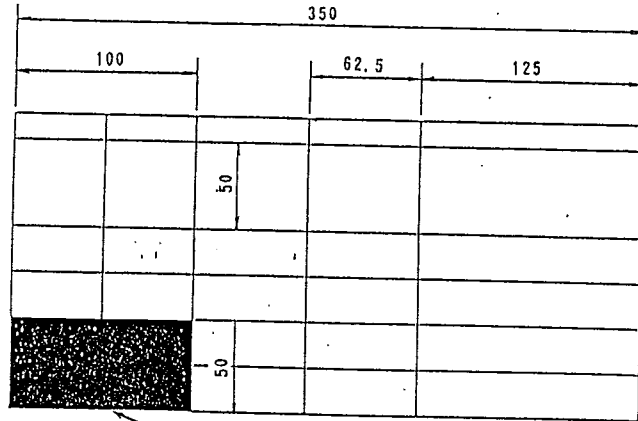
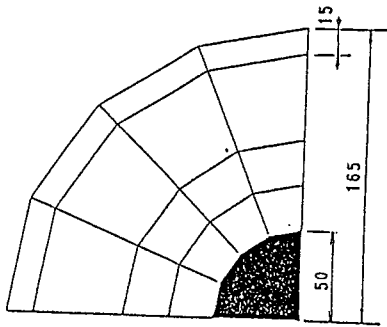
アクリル容器モデル



全側面拘束モデル

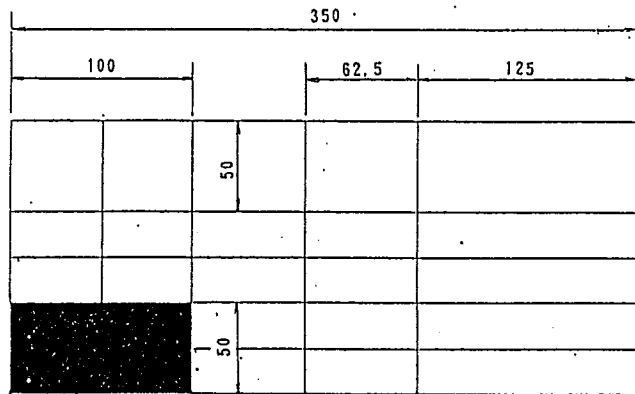
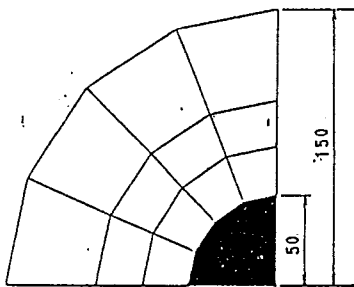
図 8 全体モデル寸法図

図 9



オーバーバック

アクリル容器モデル



オーバーバック

全側面拘束モデル

図 9 1/8 モデル寸法図

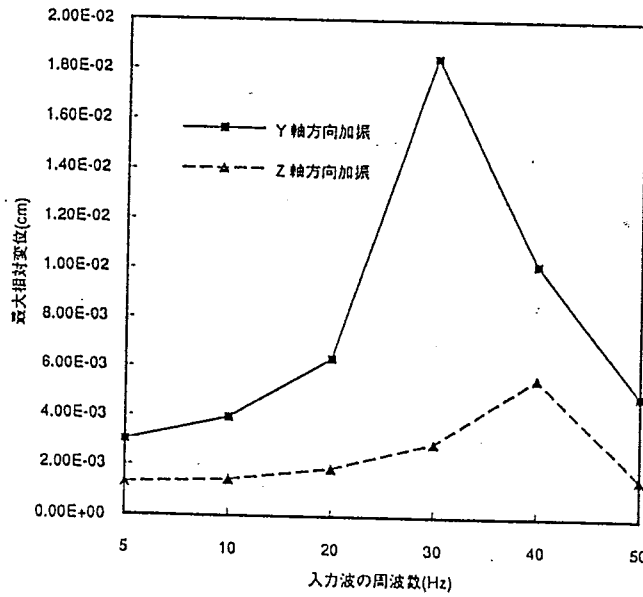
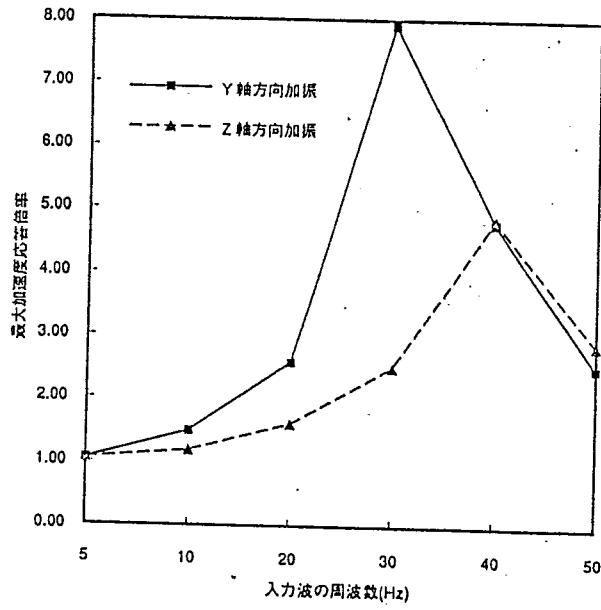


図 10 各周波数での最大加速度応答倍率と最大相対変位の比較

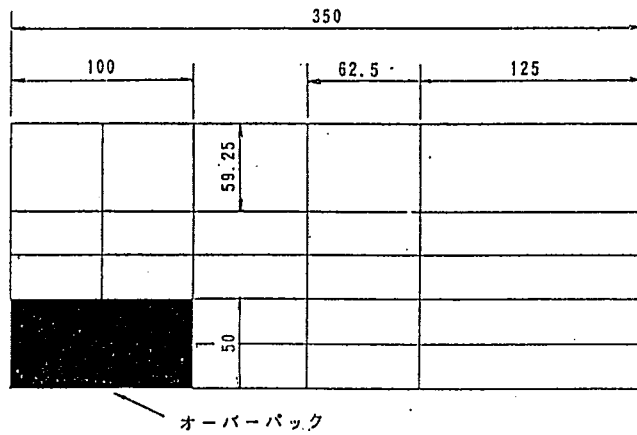
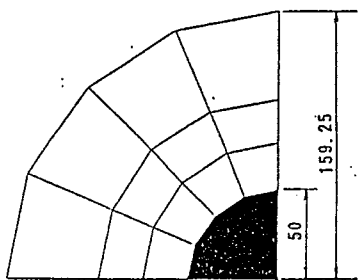
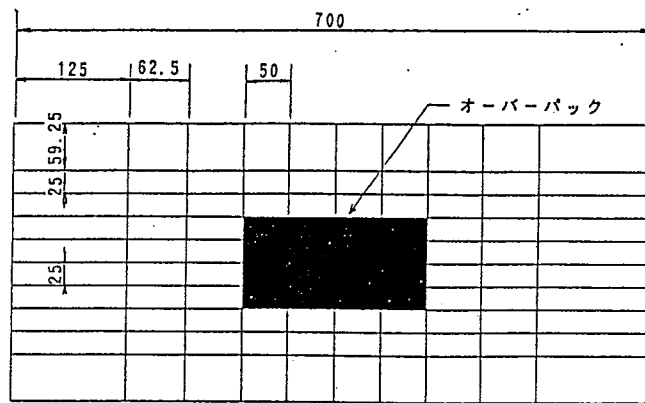
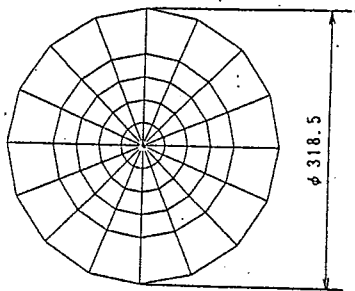


図 1 1 モデル寸法図

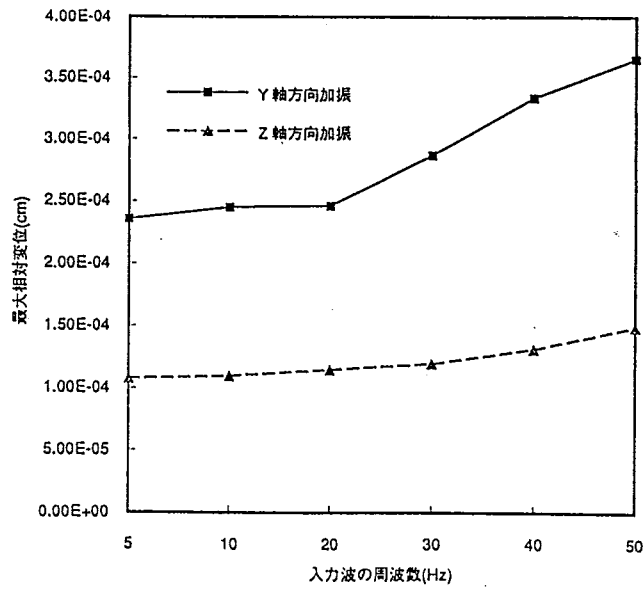
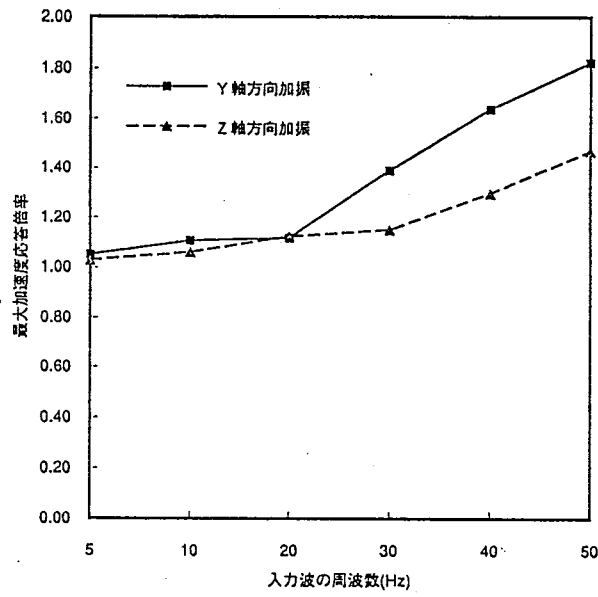
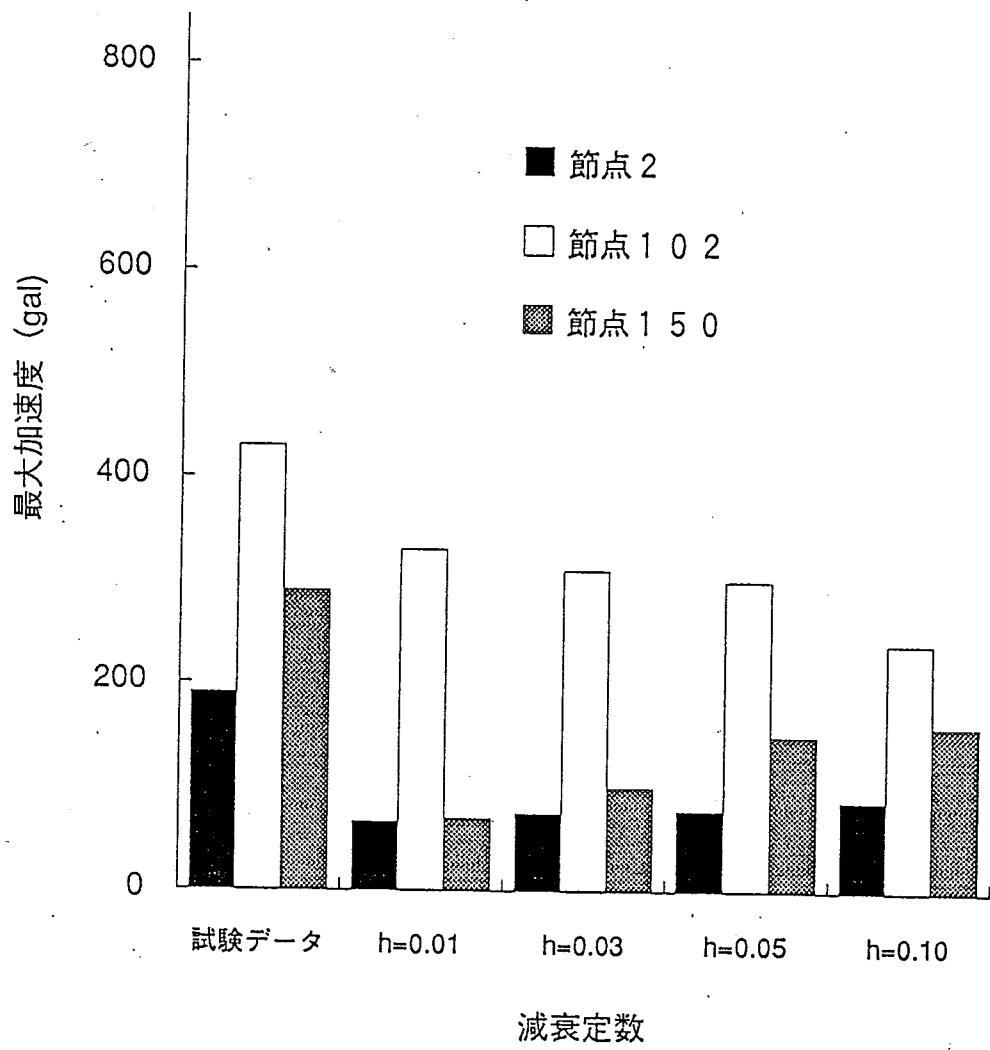
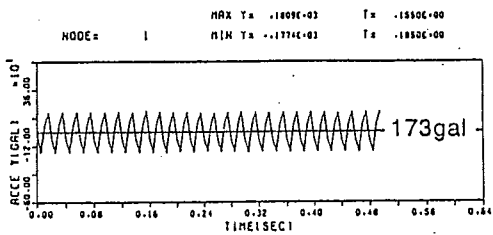


図 1 2 各周波数での絶対加速度と相対変位の比較

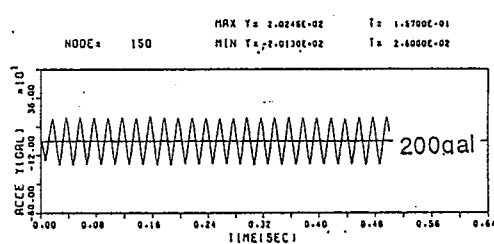
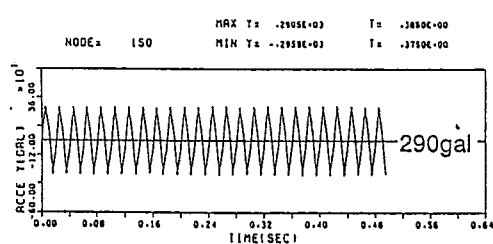
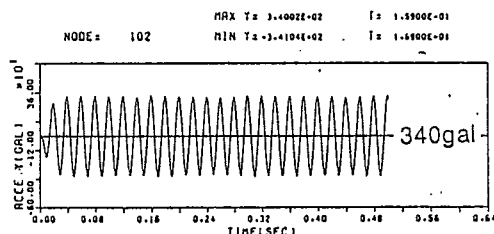
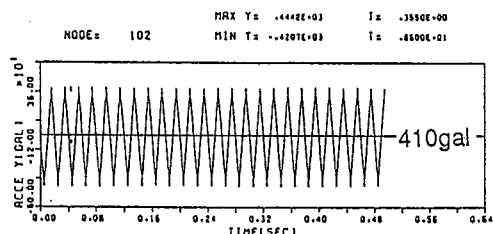
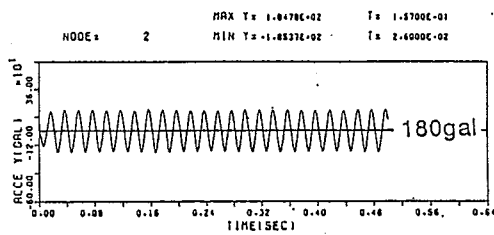
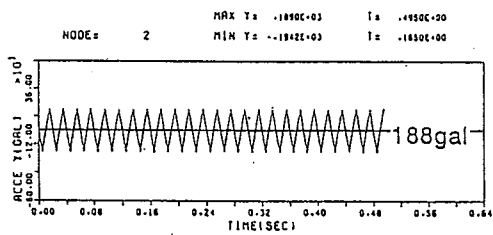
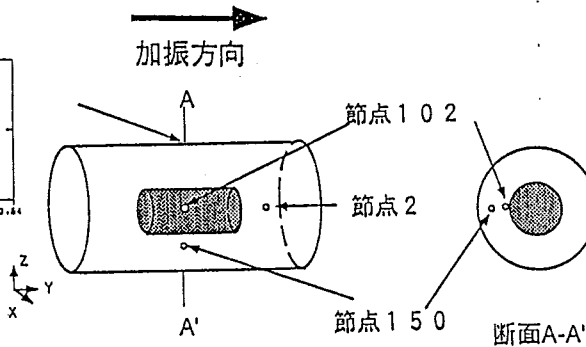


シリコンゴムヤング率 : 6.99kgf/cm²
 シリコンゴムポアソン比 : 0.495

図 13 シリコンゴム減衰定数をパラメータした解析結果



入力波波形



試験結果

解析結果

- シリコンゴムヤング率 : 13.98kg/cm²
- シリコンゴムポアソン比 : 0.48
- シリコンゴム減衰定数 : 0.10
- 一次固有振動数 : 53.8Hz

図 1 4 解析結果と試験結果の時刻歴データの比較

5. 今後の課題

本年度に開発したモデル／コードは、弾性解析までであり、今後、粘弾塑性現象を取り扱うためには段階的に以下の機能をモデル／コードに導入する必要がある。

- ① 等価線形解析機能の追加
- ② 弾塑性論モデルの構築

弾塑性論については、モデル開発のみならず種々の土質定数を入手するための室内実験も合わせて実施する必要がある。以上の改良をそれぞれ1年～2年に渡って実施し、改良後にコードの機能検査（検証）ならびに実験データ解析を実施し、コードの信頼性を高めていく必要がある。

6. あとがき

本年度は、既存モデル／コードの調査、モデル／コードの開発、振動実験に基づくモデル／コードの妥当性の検討に関する研究を行った。既存モデル／コードの調査では、これらの機能、必要なパラメータが明らかとなり、既存のモデル／コードに不足している機能項目を明らかにすることが出来た。また、ここで抽出した機能項目をモデル／コードの開発である程度反映できた。