

本資料は H13 年 10 月 4 日付けで登録区分
変更する。

[技術情報グループ]

本資料は 11 年 7 月 25 日付けで

登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

人工バリアの地震応答解析モデル/コードの開発(II)

— 概 要 —

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書概要)

技 術 資 料		
開示区分	レポート No.	受領日
PT	J1458 94-001	1994, 5, 20
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		

1994 年 2 月

コンピュータソフト開発株式会社

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。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(II)

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) 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った。
- (2) 平成4年度業務で得られた成果をもとに、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・核燃料開発事業団の委託により実施した研究成果である。

契約番号 : 050D0172

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 (II)

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 was researched.
- (2) As the results of research in last year, 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 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. 土質材料の振動挙動に係わるデータの調査検討	1-2
1.2. 人工バリアの地震応答解析モデル/ コードの開発	1-2
1.3. 振動実験データに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
2.2. 文献調査の概要	2-2
2.3. 文献調査のまとめ方	2-3
2.3.1. 調査項目	2-3
2.4. 粘性土の振動特性に関する文献	2-4
2.4.1. せん断試験と粘性土の振動特性	2-4
2.4.2. せん断試験と間隙水圧の関係	2-5
2.4.3. ベントナイトの動特性	2-5
2.5. 粘性土中の間隙水の挙動に関する文献	2-6
2.5.1. 多孔質媒体内での2相系支配方程式	2-6
2.5.2. ベントナイト内の水分移動	2-7
2.6. 粘性土の構成式モデル、解析事例に関する文献	2-7
2.7. 調査した文献についての検討と今後の課題	2-8
2.7.1. 粘性土の振動特性	2-8
2.7.2. 粘性土中の間隙水の挙動	2-8
2.7.3. 粘性土に関する構成式、解析事例	2-8
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. 時間領域と周波数領域	3-1
3.2. 周波数領域における解析の利点	3-2
3.3. 履歴減衰の導入	3-4
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. 人工バリアモデルを用いた2相系線形解析	4-2
4.1.1. 概要	4-2
4.1.2. 解析時の仮定	4-2
4.1.3. 物性値	4-3
4.1.4. 加振	4-3
4.1.5. モデルと境界条件	4-3
4.1.6. 解析結果のまとめ	4-4
4.2. 砂層の液状化実験データと解析結果の比較	4-6
4.2.1. 概要	4-6
4.2.2. 解析時の仮定	4-6

4.2.3. 物性値	4-7
4.2.4. 加振	4-7
4.2.5. モデルと境界条件	4-7
4.2.6. 解析結果のまとめ	4-8
4.3. 実固有値解析	4-10
4.3.1. 概要	4-10
4.3.2. 解析時の仮定	4-10
4.3.3. 数式モデルと解法	4-10
4.3.4. 物性値	4-11
4.3.5. モデルと境界条件	4-11
4.3.6. 解析結果のまとめ	4-12
4.4. 実験データによる解析コードの妥当性の評価	4-13
4.4.1. 内容	4-13
4.4.2. 解析時の仮定	4-13
4.4.3. 数式モデル	4-13
4.4.4. 物性値	4-14
4.4.5. 加振	4-14
4.4.6. モデルと境界条件	4-14
4.4.6. 解析結果	4-15
4.5. 小型振動試験モデルの2倍スケール、10倍スケールでの解析	4-19
4.5.1. 内容	4-19
4.5.2. 解析時の仮定	4-19
4.5.3. 数式モデル	4-19
4.5.4. 物性値	4-20
4.5.5. 加振	4-20
4.5.6. モデルと境界条件	4-20
4.5.6. 解析結果	4-21
5. 今後の課題	5-1
5.1. モデル／コードの開発とこれからの展望	5-1
6. あとがき	6-1
7. 参考文献	7-1

表目次

表2.2-1 文献リスト	2-9
表2.2-2 文献リスト	2-10
表2.2-3 文献リスト	2-11
表2.2-4 文献リスト	2-12
表2.2-5 文献リスト	2-13
表2.2-6 文献リスト	2-14
表4.1.3-1 2相系線形解析で用いた物性	4-22
表4.2.3-1 解析で用いた物性	4-23
表4.4.7-1 解析結果	4-24
表4.5.7-1 動的解析結果	4-25
表4.5.7-2 動的解析結果	4-26
表5.1-1 モデル／コードの開発計画	5-3

図目次

図3.1-1 時間領域と周波数領域の比較事例	3-5
図3.2-1 時間領域での比較例	3-6
図3.2.2 周波数領域での比較例	3-7
図3.2-3 本年度作業内容と等価線形解析	3-8
図4.1.5-1 人工バリア試験体と解析モデル	4-27
図4.1.5-2 拘束条件	4-28
図4.1.5-3 非排水条件	4-28
図4.1.6-1 比較に用いた節点	4-29
図4.1.6-2 比較に用いた要素	4-29
図4.2.5-1 モデル図	4-30
図4.2.5-2 文献記載のモデル	4-31
図4.2.6-1 実験結果と2相系解析での解析結果の比較	4-32
図4.2.6-2 実験結果と1相系解析での解析結果の比較	4-33
図4.3.6-1 スイープ試験結果	4-34
図4.3.6-2 ベントナイト密度 1.63gf/cm^3 での各モデルの固有振動数	4-35
図4.3.6-3 ベントナイト密度 1.42gf/cm^3 での各モデルの固有振動数	4-36
図4.4.4-1 DT-24におけるせん断弾性係数 G ～せん断ひずみ γ の関係	4-37
図4.4.7-1 試験データと解析結果の最大加速度の比較	4-38
図4.4.7-2 試験データと解析結果の絶対加速度フーリエ振幅スペクトルの比較	4-39
図4.4.7-3 フーリエ振幅スペクトルの平滑化	4-40
図4.4.7-4 パラメータ解析手順と結果	4-41

1. まえがき

高レベル放射性廃棄物の処分としては、地中深部に埋設を行う地中処分が有効な手法としてクローズアップされている。放射性核種の中には人間に対して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、埋設期間中の環境に対する安全性の確保が重要な問題となる。高レベル放射性廃棄物からの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への溶解が考えられている。

地下水への接触を防ぐ意味でも、人工バリアシステムには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の化学的、水理学的に高度なバリア性能が要求される。また、化学的バリア性能を確保する前提条件として、人工バリアが健全であることが不可欠である。この為、人工バリアの物理的バリア性能、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性能評価など実験、数値解析の試みがなされている。我が国のような地震多発地帯においては人工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定量的評価方法の確立が重要な課題の一つである。このことから平成4年度においては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た。この様な昨年度の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

解析コードへの平成6年度、平成7年度での弾-粘塑性モデル、ベントナイト中の2相系支配方程式の導入を念頭に、以下の項目の公開文献の調査を行った。

- ①土質材料の振動挙動に係わるデータの調査検討
- ②土質材料中の間隙水の挙動に関する実験データ、理論の調査検討
- ③粘土材料に関する構成式モデル、解析事例の調査検討

1. 2 人工バリアの地震応答解析モデル/コードの開発

一般の不規則変動する波について周期成分を解析することによりその波がどのような周波数成分を含むか判別できる。振動物体の特性を理解する上で上記の解析結果は重要な情報となる。本年度は等価線形解析法への拡張を考慮し、周波数応答解析機能の追加を行った。

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

- ①2相系モデルを用いた人工バリアモデル試解析
- ②砂層の液状化実験データと開発したコードによる解析結果の比較

2. 文献調査

オーバーパックは地中深部でベントナイト、岩盤、地下水に囲まれた環境下に埋設される。緩衝材として利用されるベントナイトの役割としては周辺岩盤との間隙および亀裂開口部等の充填、地下水に対する止水性、廃棄物から溶出する放射性核種の遅延効果、人工バリアの温度上昇の抑制、オーバーパックに対する応力緩衝性、支持性などがあげられる。

人工バリアの耐震機能の上でもベントナイトのはたす役割は非常に大きいと言える。従って人工バリアの耐震評価を定量的に行う場合、ベントナイトの動特性は評価を左右する重要な入力パラメータである。このことから本年度はベントナイトの動特性に関する実験データの入手を念頭に調査、検討を進めた。ただし、ベントナイトの振動実験データに調査範囲を限定した場合、公開文献が極めて少ないと思われることから、調査対象を一般の粘性土までひろげ、粘性土の動特性に関連すると思われる文献の調査を実施した。

調査した内容については以下に示す。

- ①粘性土の振動挙動に関する文献、データ
- ②粘性土中の間隙流体の挙動に関する実験データ、理論
- ③粘性土に関する構成式モデル、解析事例

入手文献については概要をまとめるとともに、また、入手した文献の記載データ、モデルが今後のモデル／コードの改良、拡張において利用可能であるかどうかの検討、評価を行った。

2. 1 文献の調査方法

調査対象が、土質材料ということから、土木分野を中心としての文献調査を実施した。現在、科学技術系の文献の多くがデータベースに登録されている為、調査効率を考慮してこれを利用した。

2. 2 各文献の概要

今回、関連文献として20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 粘性土の振動挙動に係わる文献 6文献
- ② 粘性土の間隙水の挙動に関する文献 6文献
- ③ 粘性土の構成式モデル、解析事例に関する文献 8文献

① 粘性土の振動挙動に係わる文献

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、破壊ひずみ、破壊線の決定、減衰定数の測定、間隙水圧の累積の測定をまとめた文献となっている。実験対象の多くは宇部粘土、有明粘土等であり、極めて大きな膨潤特性を有すベントナイトに関する文献は2文献のみとなっている。

② 粘性土の間隙水の挙動に関する文献

粘性土内の間隙水の挙動に関して記述した文献は現段階で6文献まで入手しており、3文献はポーラスメディア内の2相系支配方程式について論じたものである。他の3文献は一次元でのベントナイト内の水分移動論について記述されたものとなっている。

③ 粘性土の構成式モデル、解析事例に関する文献

粘性土の構成モデルとしては、反射曲面モデル、関口～太田モデル、INSモデル、Cam-Clayモデル等が著名であるが、足立、太田らの提唱しているモデルに関しての文献も入手した。

各文献の内容を表2.2-1～2.2-6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20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目的

(3) 概要

次項の2. 4では調査結果から得られた内容についてまとめる。

2. 4 粘性土の振動特性

土の粒径の小さな粒子からなる粘着性のある粘性土と粒径の大きな粒子からなる粘着性のない砂質土に通常区分できるが、これは圧密、強度に関する特性が異なることによる。各々の特性は有効応力、密度、土粒子構造骨格に依存している為、せん断特性に現れる相違も載荷条件に対する密度、有効応力の変化の割合によるものと考えることができる。このことから砂質土と粘性土は一見全く異なる材料のようであるが、小さなひずみ速度でせん断した場合、互いのせん断特性にはそれほど大きな差は生じていない。このようなことを考慮すれば、砂質土と粘性土を積極的に区別して取り扱う理由は見あたらない。ただし、粘性土は特性が時間依存する為、これが問題となる場合砂質土と区別して取り扱う必要がある。

2. 4. 1 せん断試験と粘性土の振動特性

一般にせん断履歴を受けた後、粘性土のくり返しせん断強度は、くり返しせん断ひずみ振幅が大きく、また、そのくり返し回数が多いほど低下する。しかし、せん断ひずみ振幅が2～3%以下の場合、文献1に記載されているように宇部粘土ではせん断履歴による土粒子構造の安定のため、一種のひずみ硬化現象が生じる。

一方、動的強度に及ぼす載荷振動数の影響については載荷振動数が高いほど動的強度が大きくなる。振動数が10倍になれば、動的強度は10%ほど上昇するなどの実験結果が文献5に記載されている。

2. 4. 2 セン断試験と間隙水圧の関係

くり返しせん断中の過剰間隙水圧の上昇はひずみを与えられると同時に発生し、ひずみ振幅が大きいほど高くなっている。砂においては過剰間隙水圧の低下とせん断強度は比例関係にあるが、粘性土では粘着力が間隙水圧の増加、減少を拘束するため、両者の関係は砂ほど明確ではないとされている。

間隙水圧の増加より粘土材が破壊に至る過程においても破壊直前に間隙水圧が急増する過程が砂ほど顕著でない。

2. 4. 3 ベントナイトの動特性

ベントナイトへの水の浸潤に伴い膨潤が生じる。その要因としては①電荷をもつ粒子間の電氣的反発力、②層状の構造に起因する層間の陽イオンの水和や水分子間力による層間の拡大などが考えられている。また、その膨潤による圧力は数 10 kg f/cm^2 という大きな圧力となることが知られており、水分を吸収したベントナイトの動特性が通常の飽和粘土とは異なることが十分考えられる。ベントナイトの振動特性について記述した文献は極めて少ないが、本年度入手した文献中ベントナイトの動的せん断弾性係数及び減衰について記述されたもの（文献2）があり、 G について次の実験式が示されている。

$$G = 17.65 + 0.108 \sigma_d$$

G : 動的せん断弾性係数 (k s i)

σ_d : 静的偏差応力 (p s i)

すなわちせん断弾性係数は静的偏差応力拘束とともに増加し両対数軸上では線形となる。

また、ベントナイトを含む泥水固化土の一軸圧縮試験、三軸試験の結果として

- ① 非排水圧縮試験、伸張試験の破壊ひずみは2.5%である。
- ② 軸ひずみ1%以下では弾性的挙動である。

などの実験事実が得られている。

2. 5 粘性土中の間隙水の挙動に関する文献

粘性土の間隙水は強度、減衰特性に大きく影響するため、粘性土の振動中の間隙水の挙動について検討することは重要な課題である。一般の岩盤、砂層、粘土層などの多孔質媒体（ポーラスメディア）内での土、間隙流体の多次元の挙動については、1941年にBiotにより定式化された。この後、混合体理論からの誘導によりそれらの方程式の妥当性が証明された。

その方程式の数値的解析手段についてはGhaboussi（文献11）等によって研究がおこなわれ、1980年代にZienkiewiczにより様々な解法がまとめられた。一方緩衝材として使用されるベントナイトはモンモリロナイト等から構成され、層状構造となっており、水はこの層状体の間に吸収され層間に保有される。層間の水の移動は電気力、分子間力等の影響を大きく受け、一般の砂層、岩盤にみられるような粒子間の間隙に水が保有され自由に移動できる状態とは大きく異なる。また、層間での水の移動によりベントナイトに膨潤圧が生じ、剛性その他の特性に大きく影響をあたえる。以下に今回の文献調査で得られた内容についてまとめる。

2. 5. 1 多孔質媒体（ポーラスメディア）内での2相系支配方程式

ポーラスメディア内での土、水の多次元な運動方程式についてはBiotにより確立された。Biotの研究によれば、ポーラスメディア内では応力波の伝播の周波数により、間隙流体の流れがポアズイユ流で仮定できるか否がきまるため、低周波数領域の伝播、高周波数領域での伝播に分けて論じられている。

1980年代初めにはBiotの運動方程式はZienkiewiczらにより数値解法の研究がなされた。

2. 5. 2 ベントナイト内での水分移動

2. 5. 1での2相系運動方程式には、土、水の相互作用力項が導入されておりこれは通常の圧力ポテンシャル、水頭ポテンシャルのみを考慮したダルシー則と本質的には同等なものである。

ベントナイト中の水分移動に関しても、Smiles, 中野らの研究(文献6、7、8)はダルシー形式の水分移動方程式の適用が可能と結論づけている。

2. 6 粘性土の構成式モデル、解析事例に関する文献

土質力学が他の材料力学と異なる点は構成式の違いにあると言える。構成式の検討は土質力学における大きなテーマのひとつである。

粘性土の構成式は時間依存性挙動と弾-塑性挙動の2つの項目を表現することが構成式を定める上で重要となってくる。1950年~1960年代にかけて粘性土の構成式に関する先駆的な研究が発表された。それらの研究としては、村山、柴田らの速度過程論(late process theory)にもとづいた粘性土の時間依存性挙動に関する研究やRoscoeらによる粘性土の弾-塑性挙動に関する研究が挙げられる。

更に、粘性土のより一般的な構成式として弾-粘塑性理論にもとづいて幾つかのモデルが提唱されている。

文献17の足立、岡野モデルはPerynaの理論にもとづいてCambridge理論の拡張をおこなっている。その後関口、太田らは粘性土の二次圧密特性ならびダイレイタンスの時間依存性を考えてPerynaの理論によらない角度から弾-粘塑性体の関口~太田モデルを定めた。

関口~太田モデルに関しては解析時必要となるパラメータについて、実験手順と推定方法が文献13に記載されている。これによれば、関口~太田モデルに必要なパラメータは三軸CU試験、三軸CD試験、三軸圧密試験、透水試験から得ることが出来る。

2. 7 調査した文献についての検討と今後の課題

将来的には、ベントナイトを含めた土質材料の非線形特性のモデル化、2相系運動方程式の確立を行い、それをコード化することを目的として本年度の文献調査を実施した。ここでは今後の課題についてまとめる。

2. 7. 1 文献調査の結果得られた今後の検討課題

先に述べたように、本年度の文献調査は①土質材料の振動挙動に係わるデータ②土質材料中の間隙水の挙動に関する実験データ、理論③粘性土の構成式、解析事例の調査を行った。このような文献調査を通じて以下のような今後の検討、必要事項が明らかになった。

- (1) 現在行われている人工バリアモデル振動実験で生じるひずみ範囲内ではベントナイトは弾性挙動を示すことから、非線形モデル、弾塑性モデル等を導入した場合の検証実験の方法としてどのような方法が考えられるか検討していく必要がある。
- (2) 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考えられる。
粘性土の構成式は数々提唱されているため今後更に多くの文献の調査を行い各モデルの特色、適用範囲、入力パラメータとその推定方法についてまとめていく必要がある。
- (3) ベントナイトのような透水係数が著しく小さな粘性土においては現在行われている振動実験のような限られた振動時間内では、水分移動による解析結果への影響は少ないと考られる。しかし、実処分では埋設期間が長期間におよびその間のベントナイトの状態として様々なシナリオが考えられる。したがって、種々のシナリオで想定されるベントナイトの状態を考察した上で、2相系支配方程式を含めそれぞれのシナリオに適した人工バリア解析モデルの検討が必要となってくる。

表2.2-1 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
1	くり返しせん断履歴をうけた飽和粘土の強度に関する実験的研究	大原資生、山本哲郎、生田裕彦	単純せん断試験機と三軸圧縮試験機を用いて、地震を受けた後の粘土が有する静的、動的強度に関して実験及び検討をまとめた文献。粘土は砂と異なり過剰間隙水圧とせん断強度の間に比例関係が得られない。間隙水圧の上昇によりせん断強度が一時的に増加するなどの砂の場合とは異なる実験事実が得られている。
2	DYNAMIC PROPERTIES OF EXPANSIVE SOILS TREATED WITH ADDITIVE	Y. S Chde , W. C. Au	本文献では、石灰、塩、石灰-塩混合の膨張性粘土についてせん断応力や、減衰定数などの動的特性についての研究が記載されている。研究結果として以下の知見がまとめられている。 ① 偏差応力 σ_d とGとは $G = 17.65 + 0.108 \sigma_d$ の関係がある。 ② 減衰は拘束圧とともに増加する。また含水量に関係しない。
3	セメント・ベントナイト・モルタルの特性に関する実験 累積損傷度理論による流水固化土のひずみ時刻歴の推定	本田 裕、 有本勝二、 日下部 伸	累積損傷度理論を用い泥水固化土の地震時挙動をシミュレートする手法を実験により検討を行っている。正弦波荷重を用いた実験より軸ひずみ両振幅5%での繰り返し数 N_5 と SR_5 (SR_5 = 軸差応力/一軸圧縮強度) には $\text{Log } N_5 = \{ (SR_5 - B) / A \} \text{Log } 10$ の関係があることが記載されている。
4	粘土の非排水くり返しせん断特性	小西純一、 大島則雄	粘性土の力学的挙動を明らかにするためにカオリンを用いた非排水繰り返し三軸圧縮試験を行った結果についてまとめた文献。 間隙水圧に関して試験結果より、3つの過程、即ち、立ち上がり、安定、急増が見られるが、急増過程は砂ほど顕著でないとの実験結果が得られている。

表2.2-2 文献リスト

No.	文献名	著者	概要
5	硬化粘性土の地震強度特性に関する実験的検討	金谷守、岡本敏朗、国生剛治	赤木節粘土を飽和させた試材を用いて硬質粘土の地震時挙動に影響を及ぼす因子、過圧密、載荷振動数、初期せん断応力履歴について振動三軸試験及び中空ねじり試験の結果をまとめた文献。①過圧密比が大きくなれば、動的強度が増加する。②振動数が10倍になれば、動的強度が10%程度増加していく等の実験事実がえられている。
6	INFILTRATION INTO A SWELLING MATERIAL	D. E. Smiles	膨潤性を有す粘土を対象としたダルシー則にもとづく次元水分移動モデルと実験結果の比較が記載された文献。膨潤性をもつ粘土は通常の粘土とは浸潤において時間スケールが異なり、水の浸潤により膨潤性をもつ粘土のポテンシャルは低下しないが、通常の粘土では低下することが指摘されている。
7	TRANSIENT AND STEADY-FLOW EXPERMENTS TESTING THEORY OF WATER FLOW IN SATURATED BENTONITE	D. E. Smiles	物質座標系を用いたベンナイト内の水分移動方程式の実験による検証をまとめた文献。カラムを用いた実験と理論は良く一致しており膨潤性をもつ粘土材においてもダルシー形式の水移動方程式が適用可能であることが示されている。
8	拘束された不飽和粘土の浸潤と膨張圧	中野政詩、雨宮悠	容器で側面拘束した不飽和粘土の表面に水が与えられた場合の水分分布の変化、固相率の変化、表面に発生する膨潤圧の変化を求めまとめた文献。ベントナイト内の水分移動においても従来の水分移動論(ダルシー形式)の拡張的応用が可能としている。

表2.2-3 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
9	SOILS AND OTHER SATURATED MEDIA UNDER TRANSIENT, DYNAMIC CONDITIONS GENERAL FORMULATION AND THE VALIDITY OF VARIOUS SIMPLIFYING ASSUMPTIONS.	D. C. Zienkiewicz P. Bettess	岩盤、土などのポーラスメディアの動特性について記述した文献。文献中では2相系支配方程式として拡張したBiotの方程式を用いている。なお、2相系方程式は土と水の相対変位、土の変位を未知数としたu-w形式を採用している。
10	THEORY OF PROPAGATION ELASTIC WAVES IN A FLUID-SATURATED POROUS SOLID	M. A. Biot	粘性流体により飽和された多孔質媒体内での弾性波（応力波）の多次元的な伝播について理論を展開した文献。間隙流体の圧縮性、土との相関係が考慮されている。また、伝播が低周期の場合、間隙流体の流れは簡単なポアズイユ流であると仮定するが、高周期ではその仮定は成立しないため、理論を低周期領域と高周期領域にわけ展開している。
11	VARIATIONAL FORMULATION OF DYNAMICS OF FLUID-SATURATED POROUS SOLID	Jamshid Ghaoussi, Edward. L. Wilson	Biotの理論をもとにポーラスメディアの動解析の理論とFEMを用いたその支配方程式の数値解析手法についてまとめた文献。
12	土の応力、変形、強度特性	柴田徹、 太田秀樹、 関口秀雄	戦後より今日に至までの土質力学の流れ及び現状についてまとめられている。土質力学におけるケンブリッジ理論、マンチェスター理論の歴史、比較、問題点についての簡単な記述が掲載されている。

表2.2-4 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
13	弾、粘塑性有限要素の入力パラメータ決定における一軸圧縮強度の利用	太田秀樹、鍋谷雅司	弾、粘塑性構成を用いて地盤の解析を実施する場合多くの入力パラメータの入手が不可欠である。本文献では比較的容易に得ることのできる一軸圧縮強度を用いて、筆者らの提案する関口-太田モデルのパラメータの設定手順について記述している。
14	異方硬化モデルによる粘土地盤の地盤応答解析	兵動正幸、村田秀一	土の変形挙動は初期応力状態及びその後の応力経路に大きく依存する。このような現象を表現する異方硬化の概念の導入を用いたモデルとしてはMrozらのINSモデルがある。本文献では同モデルを二次元的に拡張したモデルを用いて解析、及び試解析を実施している。
15	APPLICATION OF MODULUS DGRADATION OF CLAY	CHEN .ATF	同期荷重下では弾性係数が低下する現象が生じる。本文献では弾性係数低下の影響について数値解析結果の比較検討を行っている。 不規則荷重下での弾性係数低下指数として、 $S_N = S_{N-1} (1 + 0.5 S_{N-1}^{-1})^{-1}$ N:サイクル、 S_N : 低下指数 t: 低下パラメータ が導入されている。
16	飽和粘土の応力～ひずみ～時間関係	赤井浩一、足立紀尚、安藤信夫	弾-粘塑性体として土質材料構成方程式の誘導の際の基礎とする目的で有効応力 (Terzaghi) の立場から粘性土の時間依存性について現象論的立場から実験事実を検討しまとめた文献。著者らは他の文献にて粘土の弾-粘塑性モデルを発表しており、その検証も行っている

表2.2-5 文献リスト

No	文献名	著者	概要
17	A CONSTITUTIVE EQUATION FOR NORMALLY CONSOLIDATED CLAY	Toshi Adachi Masahisa Okano	本文献記載の理論はPerynaの弾-塑性理論を基礎に粘土の時間依存性を表現するためにcritical state energy理論による拡張を行っている
18	土の構成式	松岡元	<p>本文献ではCam-Clayモデルの骨子の説明とその問題点が記載されている。問題点については以下のようにまとめられている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 三軸圧縮、伸長試験データと理論が一致しない。 ② 八面体せん断力と塑性ひずみ増分の方向は実際の土では一致しない。 ③ 土の破壊はMohr-Coulomb規準に近いが、Cam-Clayでは拡張されたMises 規準と考えている。
19	PLASTICITY MODELS FOR SOILS	E. Mizuno, W. F. Chen	土の構成モデルとして非線形弾性モデル、2つの異なる楕円硬化曲面をもつモール・クーロン形式の弾塑性モデル、3次元の楕円曲面をもつモール・クーロン形式の弾塑性モデルを用いて粘土、砂のせん断試験、三軸試験結果との比較を行っている。せん断試験では拘束圧が高くなると非線形弾性モデルではデータと大きくなりが生じてくる。三軸試験でも拘束圧が高くなるとデータとの違いが顕著になる。これは、塑性ひずみが生じてくることによる。

表2.2-6 文献リスト

No	文 献 名	著 者	概 要
20	ANALYSIS OF SOIL RESPONSE WITH DIFFERENT PLASTICITY MODELS	E. Mizuno, W. F. Chen	<p>本文献ではクーロン、ドラッグラーの規準とCAPモデルによる解析結果の比較について記述されている。砂を対象とした解析では古典的なモデルでは砂の収縮現象が表現できなかったが、CAPモデルでは可能であった。</p>

3. 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

実地震波を入力加速度として用いた場合に生じる応答波形は一般に不規則な波形となる。不規則変動する応答波形については周期成分を解析することによりその波がどのような振動成分を含むか判別することができる。対象物の振動特性を理解するうえでこの振動成分に関する情報は有用な情報である。本年度は、昨年度の研究成果から非線形解析への機能拡張の必要性が生じたことも考慮して、等価線形解析機能への機能拡張を念頭に、等価線形解析機能の一部である周波数応答解析機能の追加を行った。

3. 1. 時間領域と周波数領域

図3.1-1 の上図は加速度を縦軸に時間を横軸にとって表したグラフである。現象を時間によって不規則に変わる量としてとらえており、このような取扱いの範囲を時間領域(time domain)という。これに、対して下図は加速度を縦軸に、周期を横軸にとって表したグラフであり、このように現象を一定周波数で周期的に変動する現象の重ね合わせとしてとらえる方法がある。このような取扱いをする領域を周波数領域(frequency domain)をいう。周波数応答解析では周波数領域での運動方程式が解析対象とされる。時間領域、周波数領域間の交換はフーリエ変換及び逆フーリエ変換を用いて行う。

3. 2. 周波数領域における解析の利点

(1) 振動数成分の検出

周期成分を解析することにより、波がどのような振動数を含み、どのような周波数成分の振幅がおおきいか判別できる。図3.2-1 は時間領域で解析結果を比較したものであるが、両者の違いは明確ではない。これに対し図3.2-2 は同じ2つの解析結果を周波数領域で比較したグラフであるが、これによると両者の高振動数領域での違いが判別できる。

(2) 減衰機構

土の減衰特性は周波数に依存しない非粘性減衰であることがよく知られている。周波数応答解析では複素数の領域で解析をおこなう為、周波数に依存しない履歴減衰を容易に導入することができる。

履歴減衰については、3. 3章にて記述する。

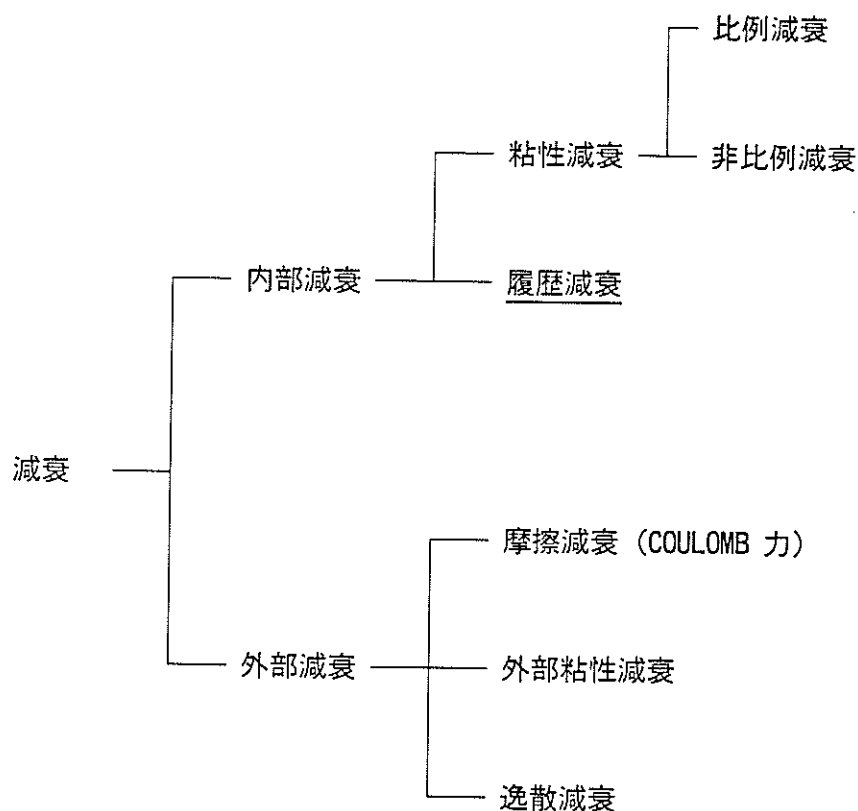
(3) 等価線形解析法との関連

今回の周波数応答解析機能の組み込みは等価線形解析機能導入を行う場合に必要となる機能の一部でもある。非線形特性をもつ対象物の解析においては、応力または変位履歴を時間領域で逐次追跡して加速度、ひずみ等を求める逐次解法と周期外力のもとで、一周あたりエネルギー消費がほぼ等しくなる弾性体（等価線形弾性体）により近似的に計算を行う等価線形解析法とがある。等価線形解析法による解析は非線形弾性体の応答解析を少ない入力パラメータ、時間で行える近似的な解析法として広く用いられている。等価線形解析手法においては、計算の簡略化、履歴減衰の導入を目的に周波数空間で解析を実施する。このときの応答解析法として、一般に周波数応答解析法が用いられる。本年度作業内容と等価線形解析法との関係については図3.2-3 に示す。

(注) 上記の周波数応答解析は解析を複素空間上で行うため、複素応答解析とも呼ばれる。

3. 3. 履歴減衰の導入

減衰を生じさせる原因としては、建物であれば骨格の接合部の摩擦、部材変形に伴う熱エネルギーへの転換、地盤であれば粘性や周辺への波動エネルギーの逸散、弾塑性履歴等が考えられる。減衰を生じさせる要因が振動系の内部にあるか外部にあるかにより下図のように分類できる。



通常、土の内部減衰として周波数依存（即ち速度に依存）の粘性減衰機構を仮定すれば、運動方程式は解法上取扱いやすいものとなるため、粘性減衰（例えば比例減衰の一種であるレーリー減衰）が用いられる。しかし、経験的に土の減衰特性は周波数に依存しないことは良く知られている。複素応答解析法では複素領域で解析を実施するため、周波数に依存しない減衰機構である履歴減衰を内部減衰機構のモデルとして導入することができる。

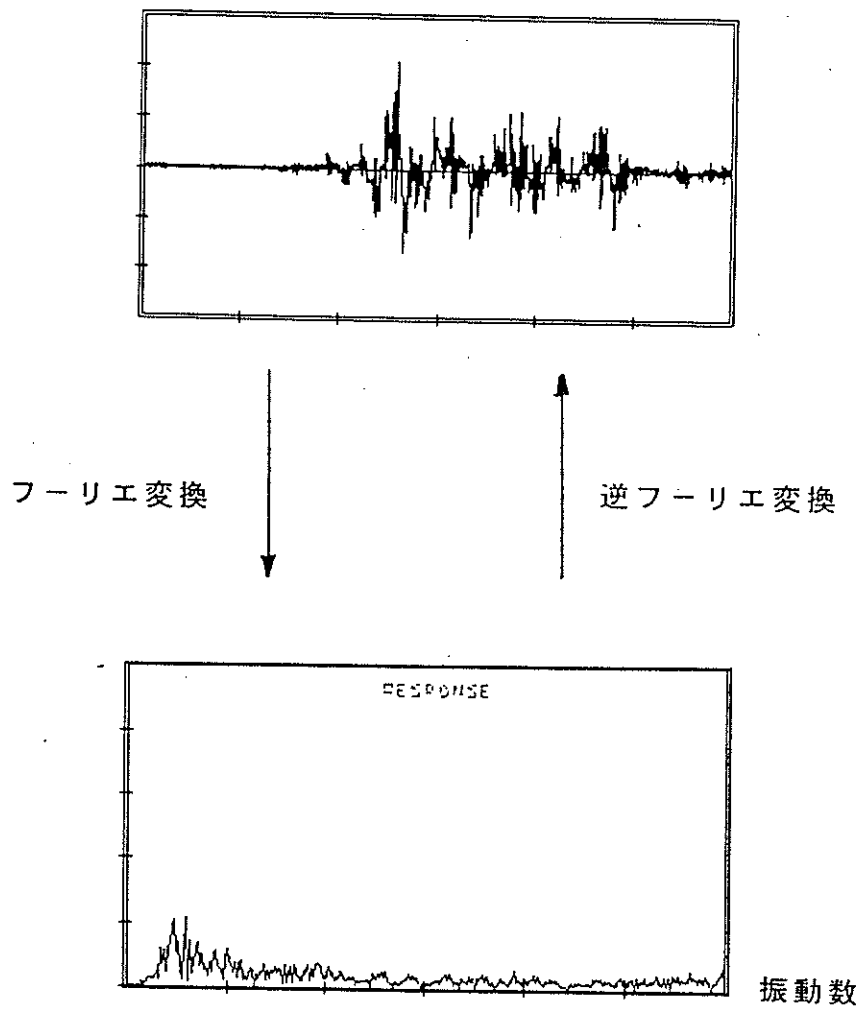
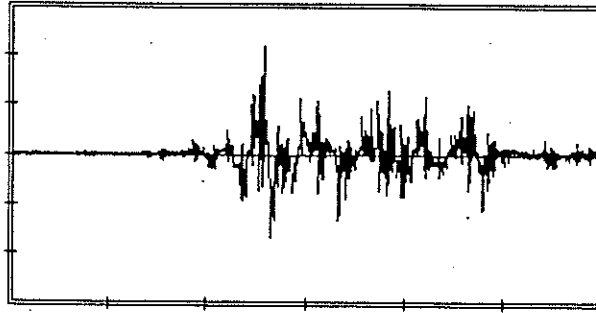
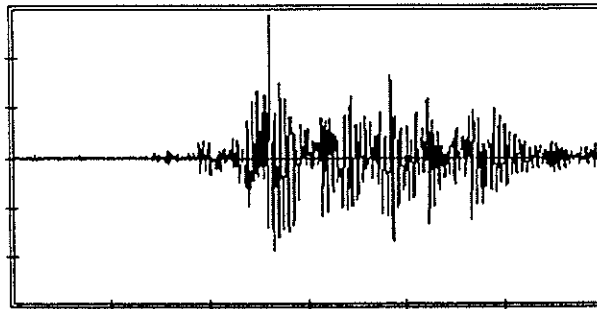


図3.1-1 時間領域と周波数領域

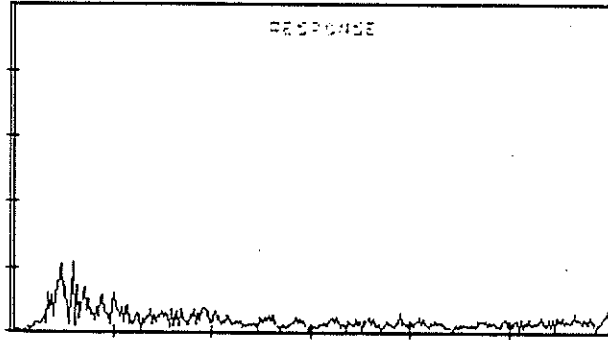


時間

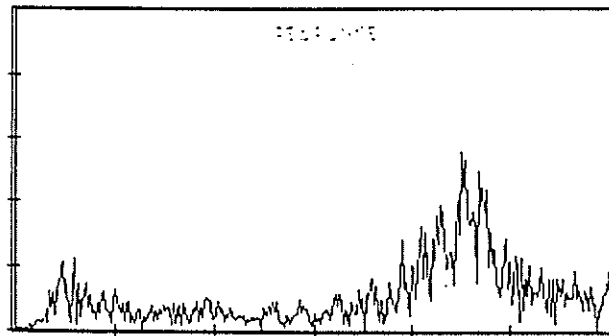


時間

図3.2-1 時間領域での比較



振動数



振動数

図3.2-2 周波数領域での比較

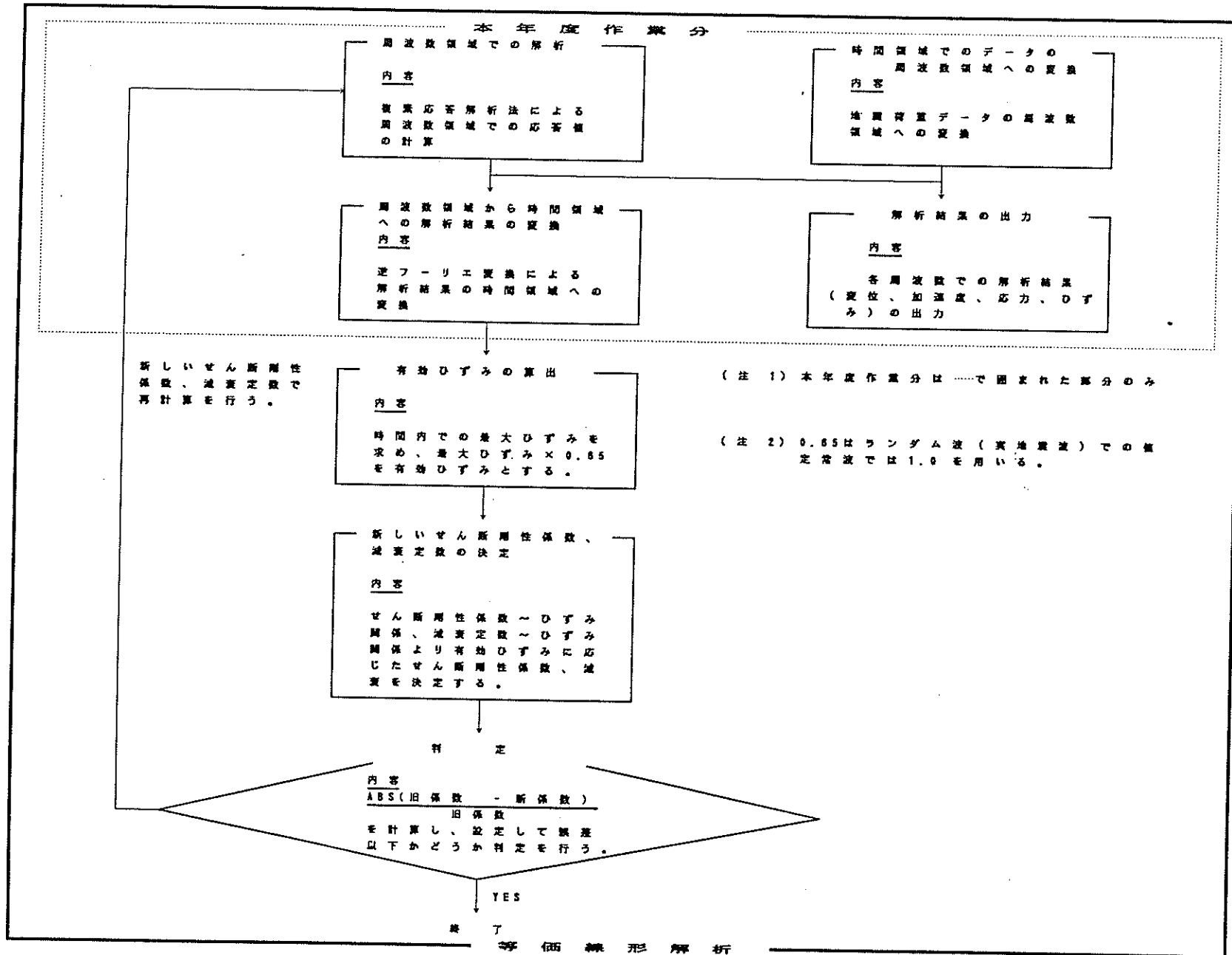


図3.2-3 本年度作業内容と等価線形解析

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 人工バリアモデルを用いての2相系試解析
- ② 砂層の液状化実験データと開発したコードの解析結果の比較
- ③ 小型振動試験にもとづくデータ解析

4. 1. 人工バリアモデルを用いた2相系線形解析

4. 1. 1. 概要

人工バリアモデルに対し土-水2相系線形動的解析を行い、その加振時の土の変位、応力、間隙水圧等に関する解析結果をまとめた。

4. 1. 2. 解析時の仮定

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 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ② 緩衝材においては間隙流体は飽和状態であるとした。
- ③ 緩衝材の膨潤性、層間水の挙動については考慮せず、通常の砂地盤と同様に取り扱った。
- ④ 間隙水の境界面からの流入、流出は微量であるとした。
- ⑤ 分割を施したモデルにて解析を行うため、モデルの加振方向は軸方向とした。
- ⑥ 初期応力、初期間隙水圧は0とした。

4. 1. 3. 物性値

ベントナイトの物性値については乾燥時のベントナイトの物性データを入手できなかったためPNC 殿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-24 の値を引用した。詳細については表4.1.3-1 に示す。

4. 1. 4. 加振

加振方向は水平方向とし、加速度波形は最大加速度1000gal の正弦波形を用いた。また、加振の振動数は5.0 Hzとし1.2周期まで解析を実施した。

4. 1. 5. 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4.1.5-1 に示す。

(2) 固体（土骨格）に関する拘束条件

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。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。詳細については、図4.1.5-2 に示す。

(3) 流体（間隙水）に関する拘束、及び非排水条件

対称面に関しては土骨格と同様な拘束を行った。端面、側面に関してMPC 拘束を用いて面に対して法線外向きに非排水条件を適用した。詳細については、図4.1.5-3 に示す。

4. 1. 6. 解析結果のまとめ

以上の解析条件での解析結果について以下にまとめる。

(1) 相対変位、絶対加速度、応力、間隙水圧の最大値

土の相対変位の最大値はY軸方向に $2.0717E-4$ cm, 絶対加速度はY軸方向に $1.0196E+3$ cm/s² (gal)となった。変位はオーバーパックを中心に生じているが極めて小さい。また、入力加速度(1000gal)の増幅もほとんど生じていない。一方、加振方向以外のX、Z方向においては変位、加速度とも加振方向のものとは比べそれぞれ1/8、1/30と小さい。応力、間隙水圧においては 10^{-1} kgf/cm²程度のオーダーでありベントナイトの膨潤圧(10~30kgf/cm²程度)に比べ、かなり小さいなものとなっている。

(2) 各節点、要素での値の比較

人工バリアモデルより、図4.1.6-1、4.1.6-2に示すように振動実験でデータを収集する箇所に近い節点4つ、要素2つを選択し、Y軸方向の相対変位、絶対加速度、最大せん断応力、間隙水圧の比較を行った。

相対変位についてはオーバーパック上の節点3及び29の値が大きく、ベントナイト中の5、57の4~8倍となっている。

加速度においては、どの節点も同様な最大加速度を示しており、いずれも加振加速度(1000gal)と同程度の値となっている。

土骨格、間隙水の変位、加速度の波形は一致している。透水係数が非常に小さいことから、土骨格間の間隙水の流入、流出は殆ど生じていないことが分かる。最大せん断応力においては、容器付近の要素176での値が大きく、これはオーバーパック付近の要素60の約2倍の値となっている。又、間隙水においてもオーバーパックの要素176での値が大きく、60での値の1.5倍となっている。

透水係数が 1.0×10^{-11} cm/sと低いため、各節点での変位、加速度とも土骨格、間隙水の値は一致し、土骨格間での間隙水の大きな流入、流出は生じていない。

(3) 透水係数をパラメータとした解析結果の比較

透水係数 1.0×10^{-11} cm/sでは間隙水の挙動は土骨格の挙動と一致し、間隙水の流入、流失といった現象は見られない。ここでは、透水係数をパラメータとして、 1.0×10^{-2} cm/s、 1.0×10^{-5} cm/s、 1.0×10^{-8} cm/sの3 ケースの解析を実施し、 1.0×10^{-11} cm/sの解析結果との比較をおこなった。

a. 変位、加速度の最大値の比較

相対変位の最大値は透水係数が 1.0×10^{-5} cm/s以下ではほぼ同じ値となる。 1.0×10^{-2} cm/sの場合は、他と比較して土骨格においてはY軸方向では1.3倍、間隙水については1.4倍程度大きな値となっている。また、 1.0×10^{-2} cm/sの場合は、土と水の変位の差が顕著である。加速度については土骨格のY軸方向では、どの透水係数でも同等の値となっている。変形においても 1.0×10^{-5} cm/s以下では類似性がみられる。

b. 応力と間隙水圧の比較

応力及び間隙水圧においても 1.0×10^{-2} cm/sの場合が1.1倍～1.5倍程度大きな値となっている。 1.0×10^{-5} cm/s以下では変位同様に類似性が見られる。

4. 2. 砂層の液状化実験データと解析結果の比較

4. 2. 1. 概要

文献（電中研研究報告381023：砂層の液状化現象についての数値シミュレーション）に記載された実験データ及び解析事例（質点系モデル）と地盤応答解析コードによる解析結果の比較を実施した。

4. 2. 2. 解析時の仮定

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 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ② 緩衝材においては間隙流体は飽和状態であるとした。
- ③ 間隙水の境界面からの流入、流出はないとした。
- ④ 2相系モデルとしてはBiotの方程式を用いた。
- ⑤ モデルの加振方向は水平方向（S波）とした。
- ⑥ 初期応力、初期間隙水圧は0とした。

4. 2. 3. 物性値

基本的には文献記載の物性値を用いたが、文献記載の解析が質点系モデルであったため、幾つかの物性値については他文献を参照し、値を定めた。

詳細については表4. 2. 3-1 に示す。

4. 2. 4. 加振

加振方向は水平方向とし加速度波形は最大加速度 200gal の正弦波形を用いた。また、加振の振動数は9.86Hz とし、時間ステップ0.002 s で1200ステップまで解析を行った。

4. 2. 5. モデルと境界条件

モデル形状については図4. 2. 5-1 に示すモデルを用いて、質点系によるLAYERモデルを表現した。拘束条件、2相系での非排水条件についても図4. 2. 5-1 に示す。また、文献記載の実験モデル、解析モデル（質点系R-0 モデル）については図4. 2. 5-2 に示す。

4. 2. 6. 解析結果のまとめ

以下に文献記載の実験データおよび質点系での解析結果と開発コードの解析結果の比較をまとめる。

絶対加速度の比較においては前述の図4. 2. 5-1 の節点2～6の水平方向加速度を用いて行った。解析コードにおいては2相系、1相系での2ケースの解析を実施した。解析結果については図4. 2. 6-1、図4. 2. 6-2にまとめる。

図4. 2. 6-1の比較において、実験データに比べ2相系での解析結果は節点3及び節点1では大きめの値となっている。特に、実験データが節点1では時間とともに振幅が減衰していくのに比べ、解析結果では減衰は起こらず基盤の加速度が1.5倍程度に増幅されて継続している。また、節点3においても、解析結果の方が1.2倍～1.6倍程大きく、波形も実験データほど鋭角となっていない。波形の違いは、砂の動特性が非線形特性をもつにもかかわらず、現解析コードの機能が線形解析のみに限られていることにより生じていると考えられる。また、実験データでは各節点で計測された加速度の位相に違いが見られるが、解析結果ではどの節点の加速度も同位相となっている。これは、解析コードで採用している減衰機構は比例減衰となっているが実際の砂の減衰特性は比例減衰のみでは表現できないためと思われる。次にモデル材質を1相系として解析を行った。この解析結果と実験データとの比較を図4. 2. 6-2に示す。2相系に比べ節点1、3の加速度は小さくなっている。節点3での加速度の大きさは実験データのほぼ1/2に近い値となっている。節点1においてはほぼ0となっていく実験データに比べ、解析結果では100gal（基盤加速度の1/2程度）の加速度が継続している。

一方、文献記載のR-0モデル及びSeedらの実験式（間隙水圧）を用いた質点系モデルによる解析では実験データに類似した結果が得られている。

これは、間隙水圧評価の実験式、R-0モデルのパラメータが実験データをもとに定められているため、実験に対応した高精度な式となっていることによる。

上記のように、解析結果と実験データに大きな相違が生じた原因としては、現コードでは、非線形特性、非粘性減衰機構が表現できないこと、実験環境についての情報が文献記載事項から十分に得られず、質点系モデルを模擬したモ

デル形状の問題がある等が考えられる。これらの点を明確にするために今後、実験データ解析が記載された文献の調査を継続するとともに解析コードに等価線形解析機能追加後、再度解析結果と調査した実験データ及び線形解析との比較を行う必要がある。

4. 3 実固有値解析

4. 3. 1 概要

人工バリアモデルに対し1相系での実固有値解析を行いその結果をまとめた。解析対象として、小型振動試験の供試体と同寸法のモデル、供試体の2倍スケールのモデル、供試体の10倍スケールのモデル（人工バリアの実規模モデル）の3モデルについてベントナイトの充填密度をそれぞれ湿潤密度 $1.4\text{gf}/\text{cm}^3$ 、 $1.6\text{gf}/\text{cm}^3$ として解析を行った。

4. 3. 2 解析時の仮定

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 固有方程式としてはMK型の方程式を解いている。
- ③ 実固有値解析においては第三次の固有値まで求めた。

4. 3. 3 数式モデルと解法

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

(1) MK型の固有値問題

$$Kx = \lambda Mx$$

(2) サブスペース法

K, Mが正則かつ対称であることから、大次元の固有値問題を部分空間の固有値問題に帰着させて解くサブスペース法を用いた。

4. 3. 4 物性値

ベントナイトのせん断弾性係数についてはPNC 殿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、ヤング率 $E = 42.0, 120 \text{ kgf/cm}^2$ を引用した。

4. 3. 5 モデルと境界条件

(1) 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。なお、モデルの節点数は891、要素数は800となっている。

(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。

4. 3. 6 解析結果のまとめ

スweep試験の結果については図4. 3. 6-1 に示す。図4. 3. 6-1 において、オーバーパック上の計測点 (OX1, OX2)では地震加速度の増幅率は全域で1.0 となっており共振現象は生じていない。また、ベントナイト中の計測点 (CX1, CX2) においても増幅率は1.0 未満であり、ここでも共振現象は記録されていない。

一方、小型振動試験を模擬したモデルではサンプルDT-22(ベントナイト湿潤密度 1.4gf/cm^3)では一次固有振動数は72. 3Hz、二次固有振動数は99. 0Hz、三次固有振動数は111. 3Hz となった。また、サンプルDT-24(ベントナイト湿潤密度 1.6gf/cm^3)では一次固有振動数は118. 8 Hz、二次固有振動数は163. 9Hz、三次固有振動数は181. 7Hz となった。この解析結果は10~60Hzで実施されている試験では共振現象が試験範囲では記録されないことを示しており、このことは上記の試験結果と一致する。平成6年度予定されている現在の供試体の2倍スケールのモデルを用いた場合、サンプルDT-22 では一次固有振動数は36. 1Hz、二次固有振動数は49. 5Hz、三次固有振動数は55. 7Hz、サンプルDT-24 を使用した場合は一次固有振動数は59. 4 Hz、二次固有振動数は81. 9Hz、三次固有振動数は90. 9Hzとなっている。人工バリア実規模スケールでは、DT-22 では一次固有振動数は7. 2Hz、二次固有振動数は9. 9Hz、三次固有振動数は11. 1Hz、サンプルDT-24 を使用した場合は一次固有振動数は11. 9 Hz、二次固有振動数は16. 4Hz、三次固有振動数は18. 2Hzとなっている。この解析結果から、現在のモデルの2倍スケール、10倍スケールでの振動試験では現在のスweep試験の範囲でも共振点が記録されると予想される。

なお、各ケースでの解析結果の詳細については、図4. 3. 6-2 ~4. 3. 6-3 にまとめる。

4. 4 実験データによる解析コードの妥当性の評価

4. 4. 1. 内容

本項は開発したコードの実現象への適用性を評価するため、小型振動試験の試験データを用いて解析モデル/コードの評価を行った。

4. 4. 2. 解析時の仮定

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 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ② 2相系解析で必要とされる入力パラメータ（物性値）が入手できなかったため、1相系線形解析を実施した。
- 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. 4. 3. 数式モデル

解析コードにおいては、1相系解析においては以下の釣り合い式を用いている。

$$\rho_s \cdot u + C u + \text{div}(\sigma' - \sigma_0) - f_s = 0$$

u : 土質点変位ベクトル ρ_s : 土質量密度

C : 減衰

4. 4. 4. 物性値

ベントナイトの物性値についてはPNC 殿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DT-24 (図4. 4. 4-1 参照、湿潤密度 1.6gf/cm^3)の値を引用した。

4. 4. 5. 加振

加振方向は水平方向とし、小型試験において容器上で計測した最大加速度 200gal のEL-Centro N-S 波を用いて、加振開始より50秒間の解析を行った。

4. 4. 6. 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。なお、モデルでは要素数は264、節点数は372となっている。

(2) 土骨格に関する拘束条件

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。対称面、反対称面については、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. 7. 解析結果

以上の解析条件のもとに、時間領域での解析及び本年度機能追加を行った周波数応答解析機能を用いて周波数領域での解析を実施し、試験データとの比較を行った。加速度についてはいずれの節点においても地震加速度とほぼ同じ波形を示している。解析結果として得られたデータについて表4. 4. 7-1 にまとめる。振動中の変位の最大値は 10^{-4} cm, 応力の最大値は 10^{-2} kgf/cm², ひずみの最大値は 10^{-5} 程度のオーダーとなっている。

(1) 時間領域での試験データと解析結果の比較

節点での加速度の比較

加速度の最大値では、オーバーパック上の節点の値は試験データ 2 0 0 gal、解析結果 2 1 8 gal とほぼ一致した。

一方、ベントナイト中の加速度については、解析結果ではベントナイトの剛性が高いため 2 点とも最大値は入力加速度とほぼ一致しているが、試験での計測値は解析結果およびオーバーパックでの計測値の 6 2 % ~ 6 5 % 程度にとどまっている。波形は、各解析結果、試験データとも地震加速度の形状とほぼ同一であり非線形特性を示すような波形のみだれ、大きな位相のずれ、特定の時間点での増幅等は生じていない。

最大加速度の比較については図4. 4. 7-1 に示す。

(2) 周波数領域での試験データと解析結果の比較

節点での加速度の比較

試験結果と解析結果のフーリエ振幅スペクトルについては図4.4.7-2 に示す。また、図4.4.7-3 は1 Hzのバンド幅でスペクトルの平滑化を行った図となっている。

試験データにおいてはフーリエ振幅スペクトルの形状についてはどの節点においても地震加速度の波形とほぼ同一であり、いずれの計測点においても特定周波数で地震動とは異なるピークは記録されていない。このことから0～100 Hzには共振振動数が存在してないことが推測できる。ベントナイト中の計測点での値は地震加速度およびオーバーパック上の加速度から得られた値の62～65%程度となっている。また、ベントナイト中の試験データは地震加速度にくらべ、80 Hz付近の高周波数成分の減少が見られる。この性質はスリーブ試験結果でもみられ、ベントナイトの一種のローパスフィルターとしての性質があらわれている。解析結果と試験データを比較すれば、ベントナイト中の値に関して時刻歴応答と同様に試験データより50%ほど大きな値となっている。

(3) 解析結果の検討

試験データと解析結果の比較において、前記のようにオーバーパック上の計測点での値はほぼ一致したが、ベントナイト中では両者の違いは大きい。

試験データと解析結果の加速度がベントナイト中で異なる原因については

- ①供試体へのベントナイトの充填時の密度のバラツキや湿潤ムラなどによりベントナイトのせん断弾性係数、減衰定数、密度が解析で用いたひずみ 1.0×10^{-4} でのDT-24の物性値とは異なる可能性があること。
- ②現在の線形解析機能ではせん断弾性係数～ひずみ関係を適時みたすための繰り返し収束計算機能がないため、各要素でのひずみを 10^{-4} と仮定して物性値を定めたがこれが不適切であること。
- ③計測値は注水前、注水後とも10Hz付近においても応答倍率は1.0になっておらず0.7程度にとどまっている。このことから計測機器の初期設定での誤差の可能性があること。

が考えられる。

上記のうち①については、密度のバラツキや湿潤ムラに応じて各要素の物性値を決める必要があるがバラツキ、ムラの程度に関する情報が入手できないため今回は密度のバラツキや湿潤ムラにより生じるせん断弾性係数、減衰定数、密度の変化が解析結果に及ぼす影響についてパラメータの内1パラメータのみ変更して解析を実施し、評価を行った。②については各要素ごとにそれぞれのひずみに応じて物性値を適時に変化させる必要があるが、現在の解析コードではこの機能を持たないため、DT-24のひずみ 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} での物性値を用いて解析を実施し評価を行った。パラメータ解析の手順、結果については図4.4.7-4にまとめる。

(4) まとめと今後の課題

今回のパラメータスタディではベントナイト中の加速度について試験データと解析結果に一致は見られなかった。原因としては4.4.7の(3)において述べたベントナイトの充填時のバラツキや湿潤ムラ、ベントナイトの動特性を表現する上での解析機能の不備、計測機器の初期設定誤差などが考えられる。解析機能の不備に関しては今後、等価線形解析機能を追加(次年度予定)するとともに再解析を実施して今回の解析結果との比較を行う予定である。また試験環境の問題点については、充填方法、注水方法、計測機器の設置方法の改善を通じてその可能性を排除していくことが肝要であると思われる。

4. 5 小型振動試験モデルの2倍スケール、10倍スケールでの解析

4. 5. 1. 内容

本項は平成6年度実施が予定されている小型振動試験モデルを2倍にスケールアップしたモデルについて応答解析を行い、現在の試験モデルとの比較をまとめたものである。さらに、10倍スケールの実処分場と同規模のモデルについての解析、比較も同時に実施した。

4. 5. 2. 解析時の仮定

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 応力～ひずみ関係に関しては線形であるとした。
- ② 2相系解析で必要とされる入力パラメータ（物性値）が入手できなかったため、1相系線形解析を実施した。
- 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. 5. 3. 数式モデル

解析コードにおいては、1相系解析においては以下の釣り合い式を用いている。

$$\rho_s \cdot u + C \text{utdiv}(\sigma' - \sigma_0) - f_s = 0$$

u : 土骨格質点変位ベクトル

ρ_s : 土骨格質量密度

C : 減衰

4. 5. 4. 物性値

ベントナイトの物性値についてはPNC 殿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DT-24 の値を利用した。。

4. 5. 5. 加振

加振方向は水平方向とし、最大加速度200galのEL-Centro N-S 波を用いて、加振開始より50秒間の解析を行った。

4. 5. 6. 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。モデルでは要素数は264、節点数は372となっている。

(2) 土骨格に関する拘束条件

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 軸方向との拘束を行った。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. 5. 7. 解析結果とまとめ

以上の解析条件のもとに、加速度、応力、ひずみの比較を行った。

(1) 加速度の比較

Y軸方向の最大加速度を小型振動試験モデルを規準に、2倍スケールモデル、10倍スケールモデルと比べた場合、ベントナイトの充填密度を $1.63\text{gf}/\text{cm}^3$ とした解析ではそれぞれ約1.5倍、3.5倍となっている。また、ベントナイトの充填密度を $1.43\text{gf}/\text{cm}^3$ とした解析においても、約1.6倍、4.6倍となっている。

(3) 応力の比較

振動方向の応力である σ_v においては、2倍スケールモデル、10倍スケールモデルと比較した場合それぞれ、ベントナイトの充填密度を $1.63\text{gf}/\text{cm}^3$ とした解析では約3倍、30倍、充填密度を $1.42\text{gf}/\text{cm}^3$ とした解析で約3.1倍、13倍となっている。

(4) ひずみの比較

せん断ひずみは最も大きい10倍スケールのモデルにおいても 10^{-3} 程度である。2倍スケールではせん断ひずみはひずみは 10^{-4} 程度となっている。ベントナイト試験データからの推測では 10^{-3} 以上で非線形特性が顕著になることから、10倍スケールのモデルを用いた振動試験では非線形な挙動があらわれると予想される。

解析結果からはベントナイトの充填密度を $1.63\text{gf}/\text{cm}^3$ （湿潤）の場合、2倍スケールモデルを用いても加速度では現行のモデルの1.5倍程度の加速度となりひずみも 10^{-4} 程度であることから非線形挙動が生じない可能性が高いと推測できる。

解析結果については表4.5.7-1～2にまとめる。

表4.1.3-1 2相系線形解析で用いた物性値

項目		値	備考
土骨格ヤング率	ベントナイト	$1.20 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$	DT-24試験データより引用 機械工学便覧より引用
	オーバーバック	$2.10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	
土骨格ポアソン比	ベントナイト	0.4	PNC殿H.3 レポートより引用 機械工学便覧より引用
	オーバーバック	0.3	
土骨格体積弾性係数	ベントナイト	—	ヤング率及びポアソン比より自動算出 ($K=E/3(1-\nu)$)より算出
	オーバーバック	—	
土粒子体積弾性係数	ベントナイト	$5.00 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	土質力学の基礎 (石原著、鹿島出版) p61 記載の表4-2 の粘土粒子圧縮率より算出
	オーバーバック	—	
水体積弾性係数		$2.23 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	理科年表1993(丸善)より引用
土質量密度	ベントナイト	0.99 gf/cm^3	DT-24試験データより引用 防災研殿にての打合資料 (H.5.3.18)より引用
	オーバーバック	1.77 gf/cm^3	
水質量密度		1.00 gf/cm^3	—
間隙率	ベントナイト	0.63	DT-24試験データより引用
透水係数	ベントナイト	$1.0 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$	H.3 レポートより引用(乾燥密度 1.2 gf/cm^3 の場合)
減衰定数	ベントナイト	0.025	DT-24試験データより引用 原子力発電耐震設計指針より引用
	水	0.005	
初期応力		0	考慮してない
初期間隙水圧		0	考慮してない

(注1) サンプルDT-24 のヤング率、減衰定数は剪断ひずみが 1.0×10^{-1} の場合のデータを引用した。

(注2) 水の減衰定数は原子力発電耐震設計指針記載の液体揺動時の値を引用した。

表4.2.3-1 解析で用いた物性

項目		値	参 考 資 料
土骨格ヤング率	砂	$2.31 \times 10^2 \text{kgf/cm}^2$	文献1 (下記文献名記載)
土骨格ポアソン比	砂	0.4	理科年表 (93)
土骨格体積弾性係数	砂	$1.11 \times 10^2 \text{kgf/cm}^2$	土質力学の基礎 石原著
土粒子体積弾性係数	砂	$0.33 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$	土質力学の基礎 石原著
水体積弾性係数		$2.23 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$	理科年表 (93)
土重量密度	砂	1.45g/cm^3	文献1
水重量密度		1.008g/cm^3	理科年表 (93)
間隙率	砂	0.4	文献1
透水係数	砂	$5.50 \times 10^{-3} \text{cm/s}$	文献1
初期応力		0	考慮していない
初期間隙水圧		0	考慮していない

(文献1)砂層の液状化現象についての数値シミュレーション 電中研 研究報告書 381023

表4.4.7-1 解析結果

項 目		解 析 結 果
変位 (cm)	X方向	3.5625×10^{-5}
	Y方向	5.6534×10^{-4}
	Z方向	3.5625×10^{-5}
速度 (kine)	X方向	6.8306×10^{-3}
	Y方向	8.7494×10^{-2}
	Z方向	6.8306×10^{-3}
加速度 (gal)	X方向	5.6518×10^0
	Y方向	2.1819×10^2
	Z方向	5.6518×10^0

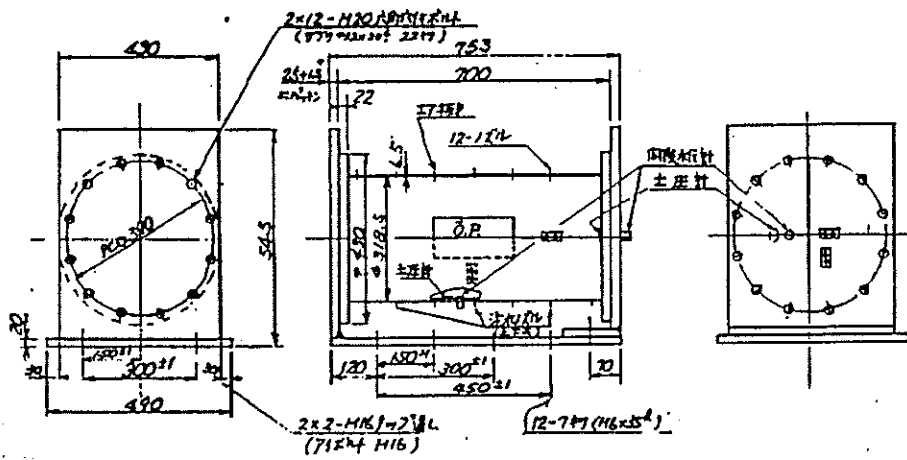
項 目		解 析 結 果
応力 (kgf /cm ²)	σ_x	1.0345×10^{-2}
	σ_y	1.4791×10^{-2}
	σ_z	1.0345×10^{-2}
	τ_{xy}	5.4160×10^{-3}
	τ_{yz}	5.4160×10^{-3}
	τ_{zx}	5.9650×10^{-4}
ひずみ	ϵ_x	8.2782×10^{-6}
	ϵ_y	2.7389×10^{-5}
	ϵ_z	8.2782×10^{-6}
	γ_{xy}	6.2861×10^{-5}
	γ_{yz}	6.2861×10^{-5}
	γ_{zx}	9.8467×10^{-6}

表4.5.7-1 動的解析結果 (変位、速度、加速度)

		ベントナイト乾燥密度 (0.7gf/cm ³)			ベントナイト乾燥密度 (1.0gf/cm ³)		
		小型振動試験 実規模モデル	2倍スケール モデル	10倍スケール モデル	小型振動試験 実規模モデル	2倍スケール モデル	10倍スケール モデル
変位 (cm)	X方向	1.6556E-04	1.0902E-03	2.4111E-02	3.5625E-05	2.1063E-04	1.4076E-02
	Y方向	2.0828E-03	1.1666E-02	2.1744E-01	5.6534E-04	2.8756E-03	8.8560E-02
	Z方向	1.6556E-04	1.0902E-03	2.4111E-02	3.5625E-05	2.1063E-04	1.4676E-02
速度 (cm/s)	X方向	5.7061E-02	2.1570E-01	1.4273	6.8306E-03	6.6409E-02	1.3699
	Y方向	6.1559E-01	2.1717E+00	7.6446	8.7494E-02	7.3505E-01	5.9049
	Z方向	5.7061E-02	2.1570E-01	1.4273	6.8306E-03	6.6409E-02	1.3699
加速度 (gal)	X方向	2.4221E+01	7.1124E+01	1.2413E+02	5.6518E+00	2.2706E+01	1.8792E+02
	Y方向	3.3645E+02	5.2888E+02	4.6048E+02	2.1819E+02	3.3106E+02	7.7556E+02
	Z方向	2.4221E+01	7.1124E+01	1.2413E+02	5.6518E+00	2.2706E+01	1.8792E+02

表4.5.7-2 動的解析結果 (応力、ひずみ)

		ベントナイト乾燥密度 (0.7gf/cm ³)			ベントナイト乾燥密度 (1.0gf/cm ³)		
		小型振動試験 実規模モデル	2倍スケール モデル	10倍スケール モデル	小型振動試験 実規模モデル	2倍スケール モデル	10倍スケール モデル
応力 (kgf/cm ²)	σ_x	1.6358E-02	5.2501E-02	2.1830E-01	1.0345E-02	3.0367E-02	3.2198E-01
	σ_y	2.3099E-02	7.3745E-02	3.0546E-01	1.4791E-02	4.3155E-02	4.5283E-01
	σ_z	1.6358E-02	5.2500E-02	2.1830E-01	1.0345E-02	3.0366E-02	3.2198E-01
	τ_{xy}	8.3024E-03	2.6183E-02	1.0704E-01	5.4160E-03	1.5689E-02	1.4761E-01
	τ_{yz}	8.3024E-03	2.6183E-02	1.0704E-01	5.4160E-03	1.5689E-02	1.4761E-01
	τ_{zx}	9.1314E-04	2.8874E-03	1.1876E-02	5.9650E-04	1.7266E-03	1.6912E-02
ひずみ	ϵ_x	3.6833E-05	1.1965E-04	5.1291E-04	8.2782E-06	2.3638E-05	2.8896E-04
	ϵ_y	1.1388E-04	3.6283E-04	1.4966E-03	2.7389E-05	7.3384E-05	8.1499E-04
	ϵ_z	3.6833E-05	1.1965E-04	5.1291E-04	8.2782E-06	2.3638E-05	2.8896E-04
	γ_{xy}	2.7021E-04	8.3533E-04	3.3542E-03	6.2861E-05	1.7847E-04	1.5739E-03
	γ_{yz}	2.7021E-04	8.3533E-04	3.3542E-03	6.2861E-05	1.7847E-04	1.5739E-03
	γ_{zx}	3.3350E-05	1.1044E-04	4.9188E-04	9.8467E-06	2.2252E-05	2.8293E-04

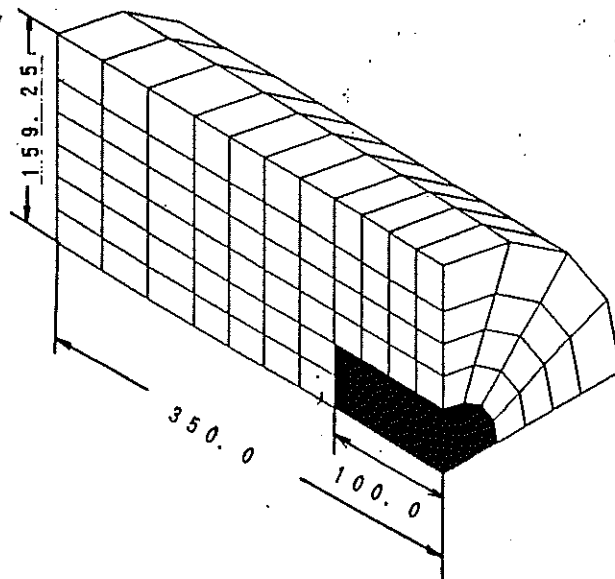


人工バリア試験体寸法図

MATERIAL NO.

- 1 ベントナイト
- 2 オーバーバック

節点数 : 372
要素数 : 264



単位 : mm

解析モデル (1/8)

図4.1.5-1 人工バリア試験体と解析モデル

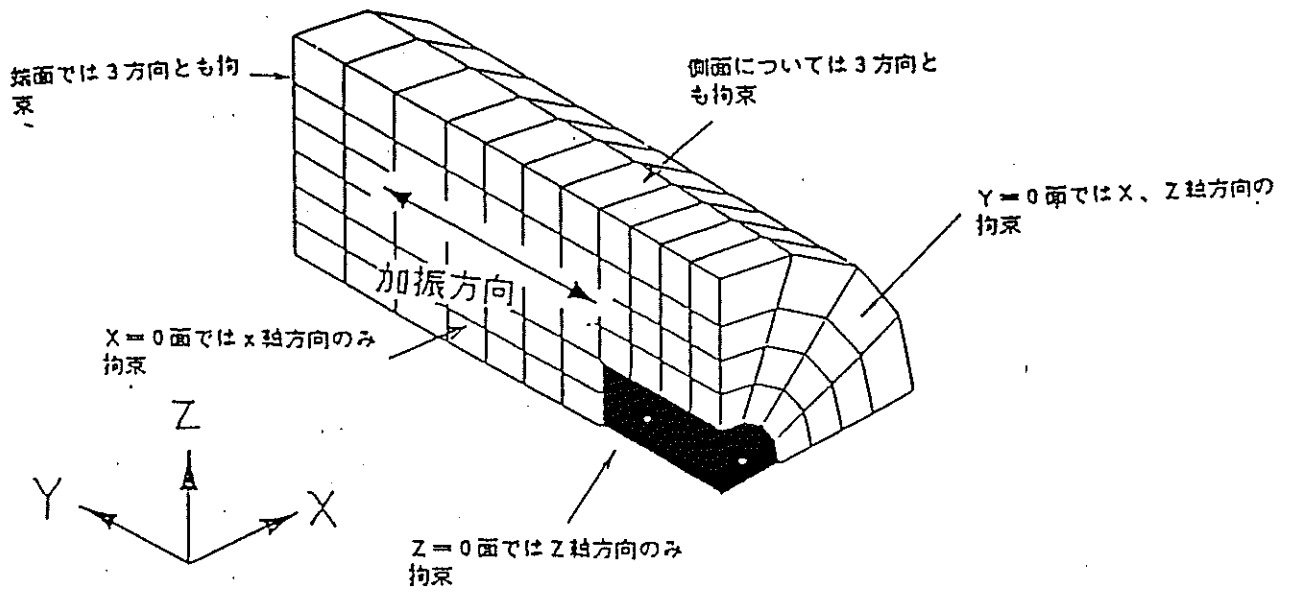


図4.1.5-2 拘束条件

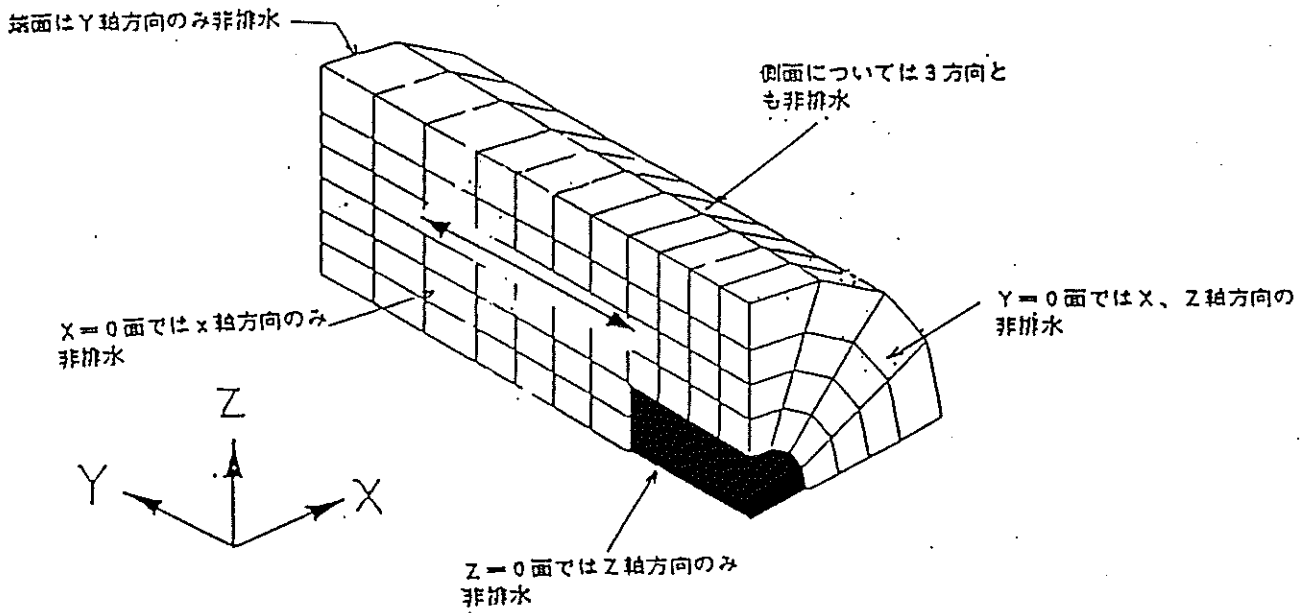


図4.1.5-3 非排水条件

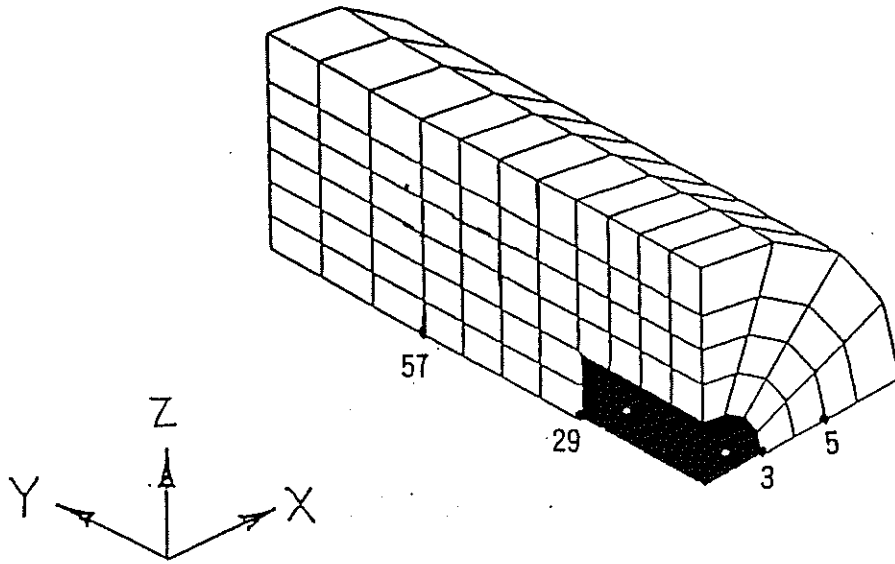


図4.1.6-1 比較に用いた節点

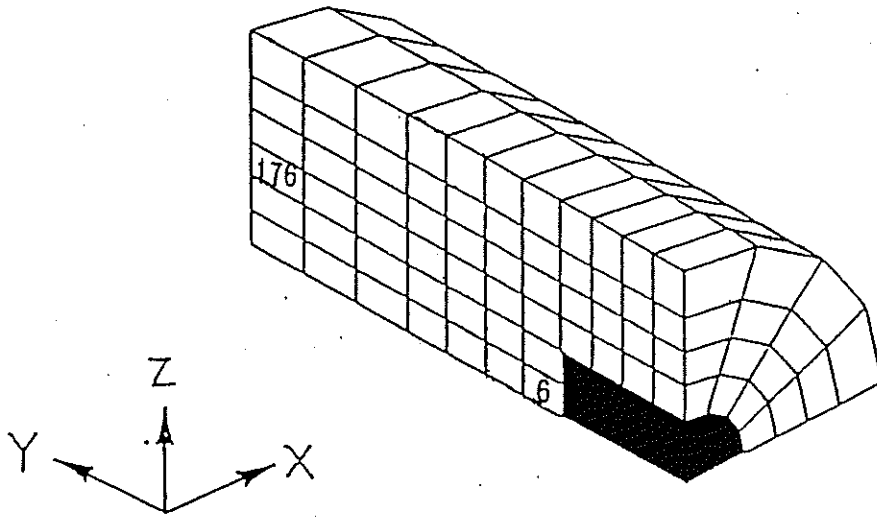
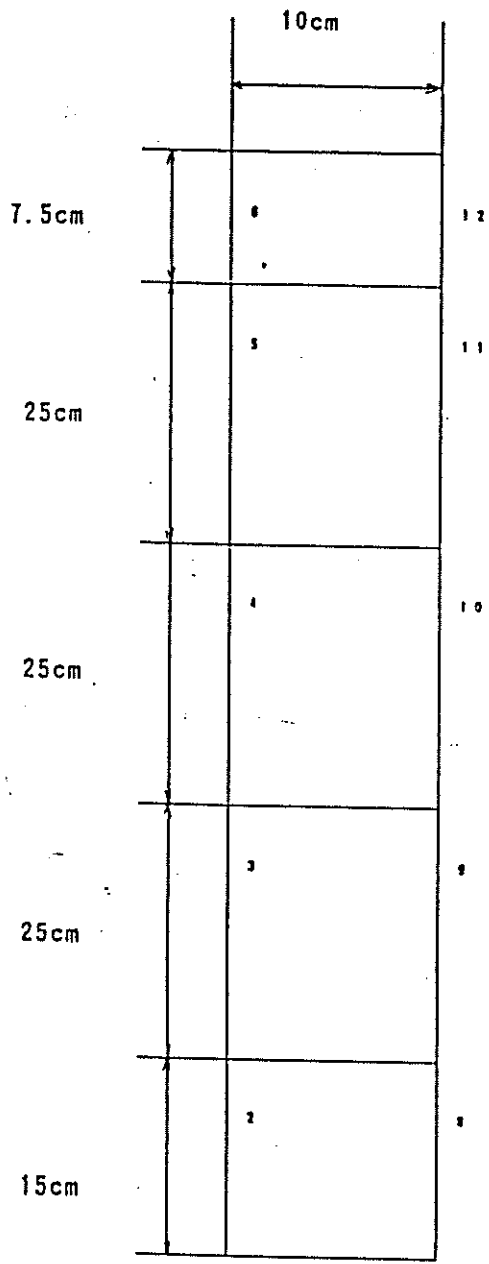


図4.1.6-2 比較に用いた要素

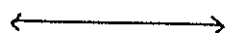


(1) 2相系解析では側面は
非排水とした。

(2) 加速度の比較は節点 2 ~ 6
で行った。

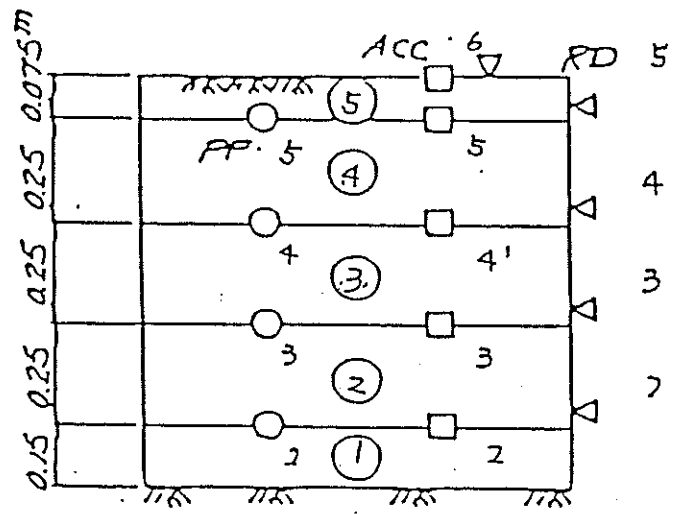
(3) 要素は平面ひずみ要素とした。

拘 束



加 振 200gal 9.86Hz

図4.2.5-1 モデル図



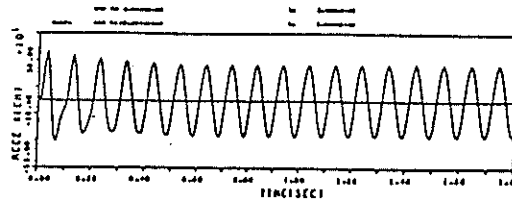
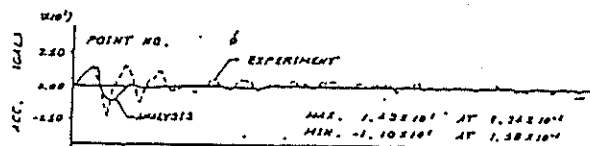
モデルの層厚

実験での測定点

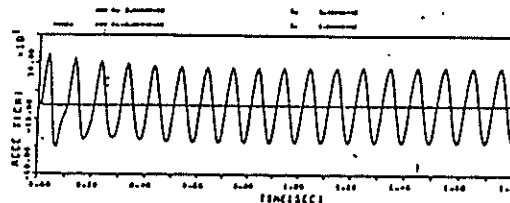
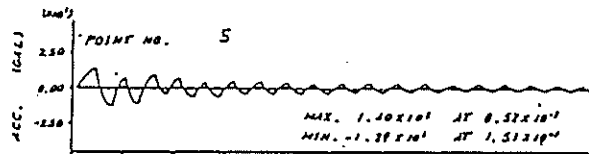
- A. 加速度
- P. 向ヶキ圧
- RD. センサ出力

図4.2.5-2 文献記載のモデル

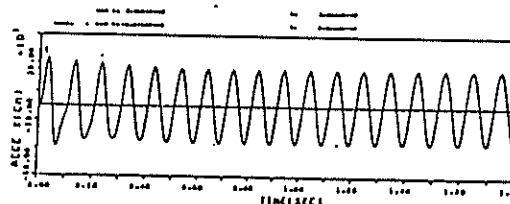
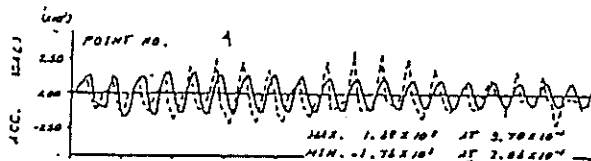
点6



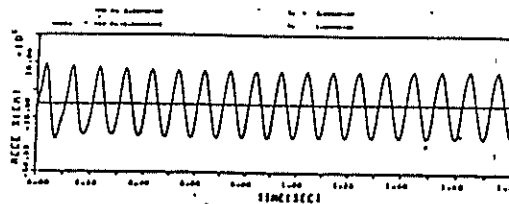
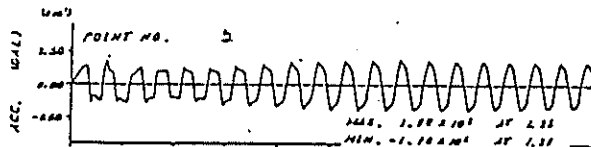
点5



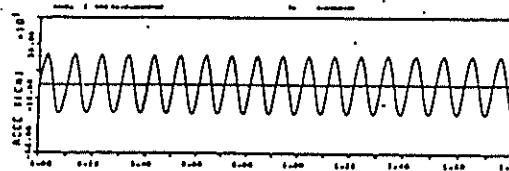
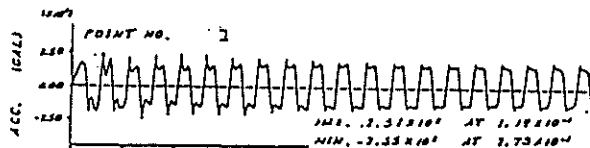
点4



点3



点2

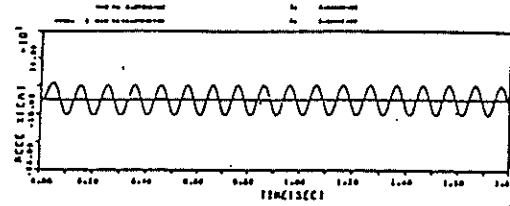
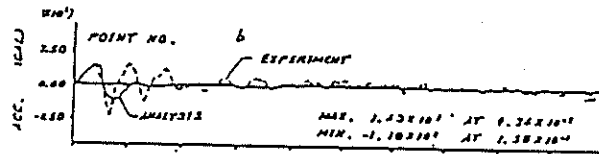


文献データ

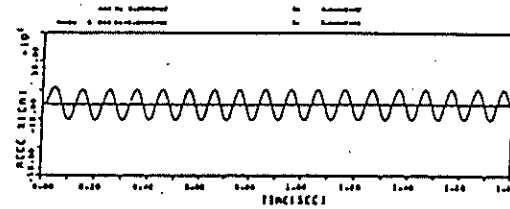
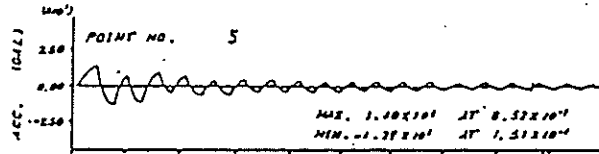
解析結果

図4.2.6-1 実験結果と2相系解析での解析結果の比較

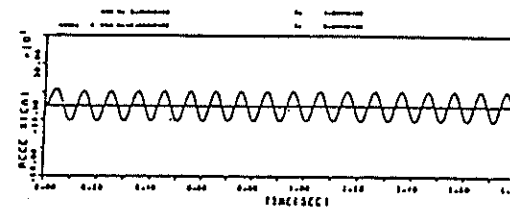
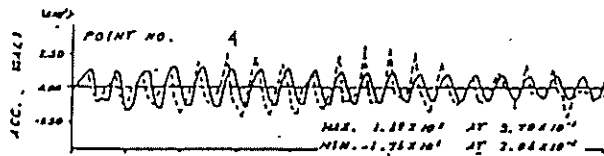
点6



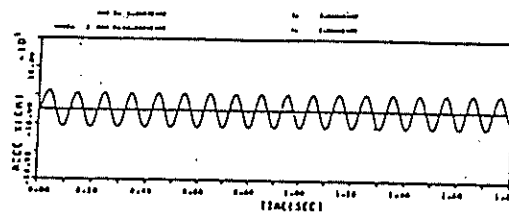
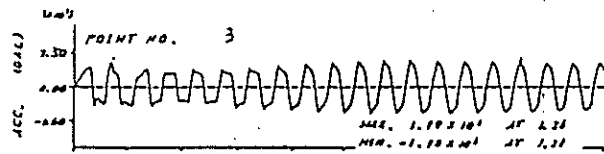
点5



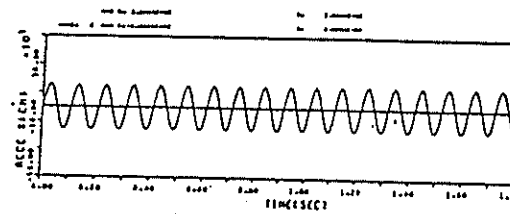
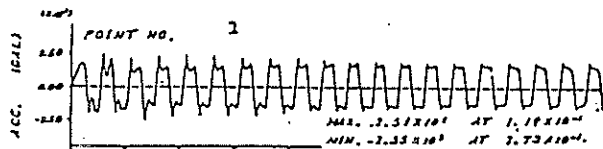
点4



点3



点2



文献データ

解析結果

図4.2.6-2 実験結果と1相系解析での解析結果の比較

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: DRtape.H1210_1

File.1 SWEEP 10-60 Hz , 300sec , H(X) (100 gal)

Input : AUX

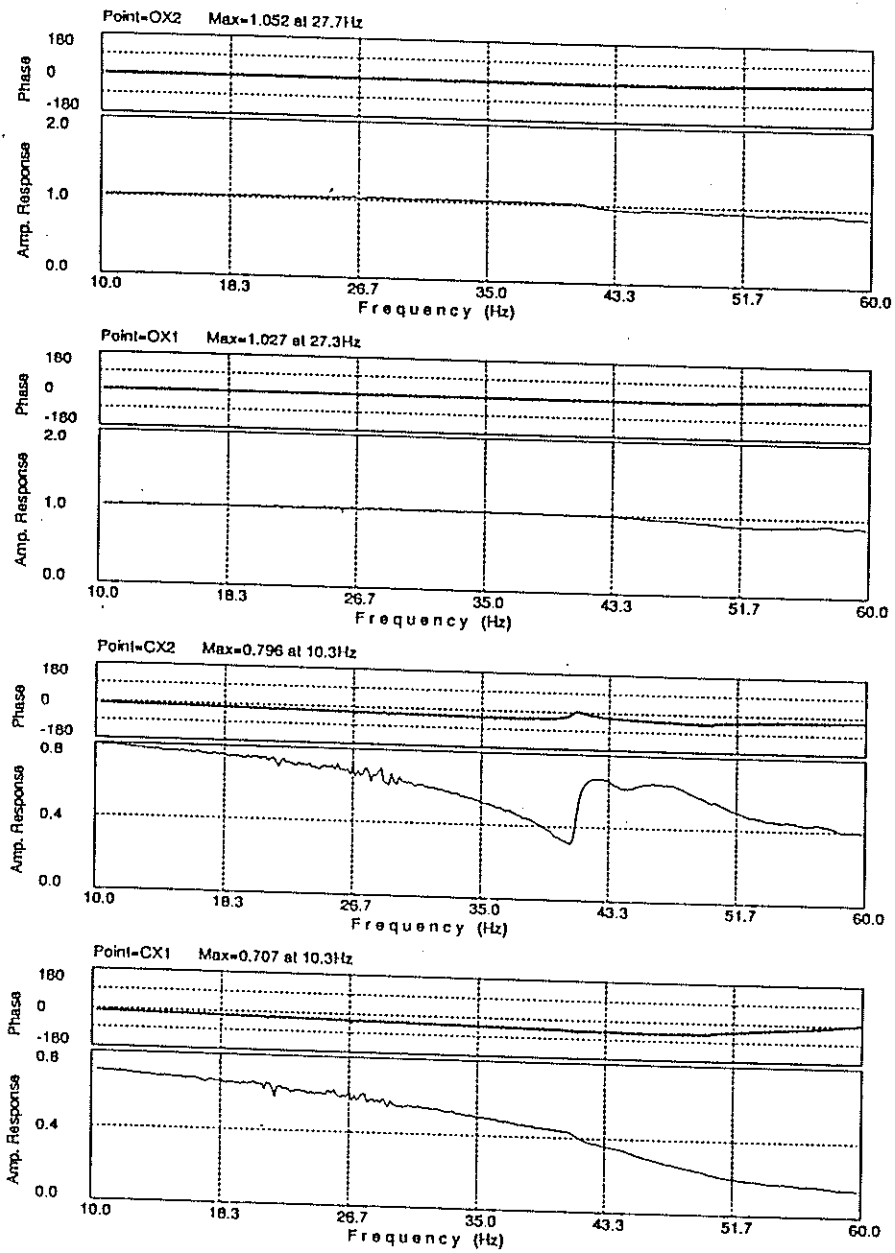


図 4.3.6-1 スイープ試験結果

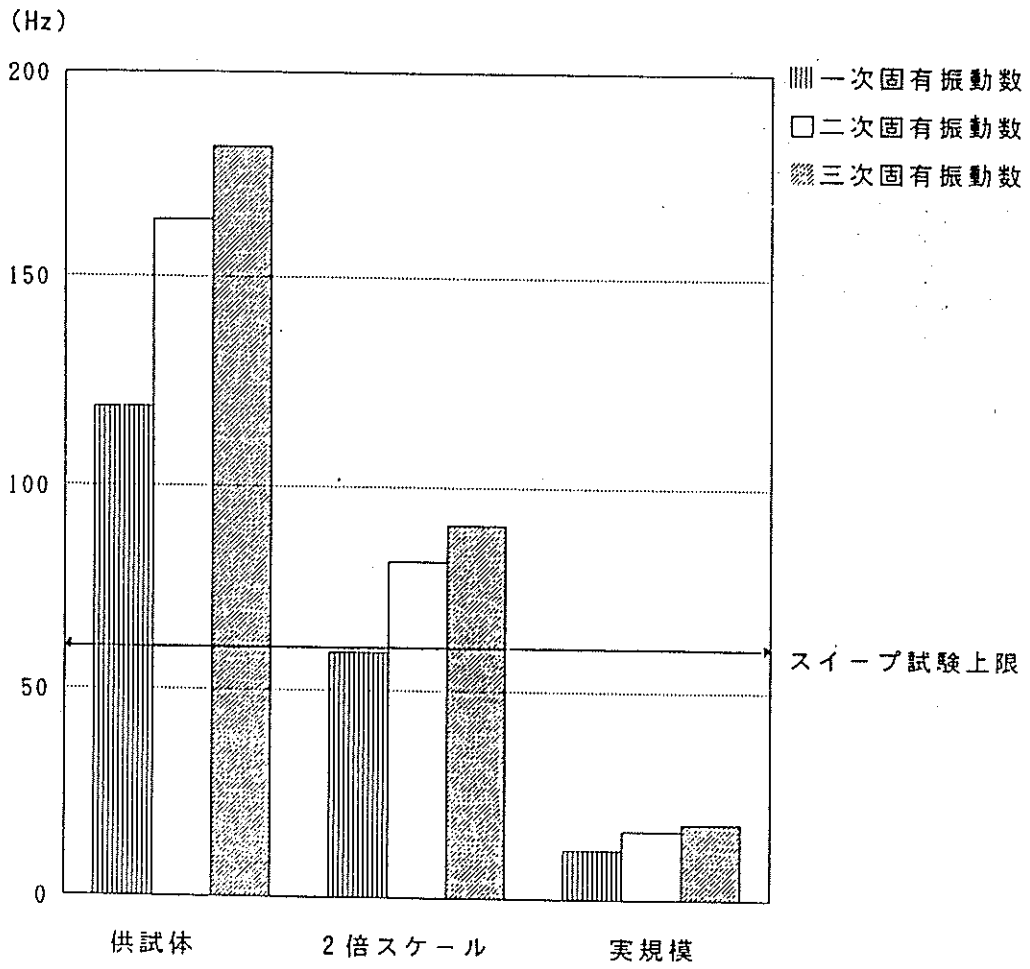


図4.3.6-2 ベントナイト充填密度 1.63gf/cm^3 (湿潤時) 各モデルでの固有振動数

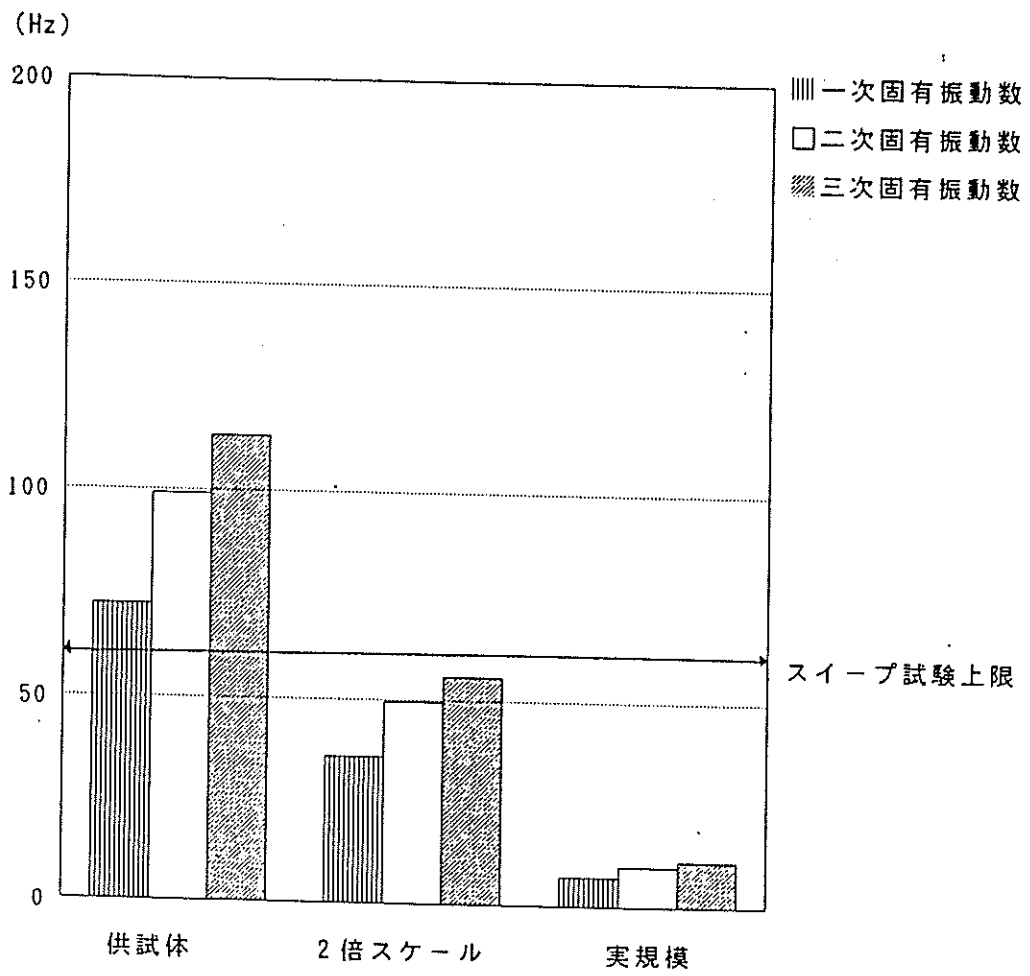


図4.3.6-3 ベントナイト充填密度 1.42gf/cm^3 (湿潤時) 各モデルでの固有振動数

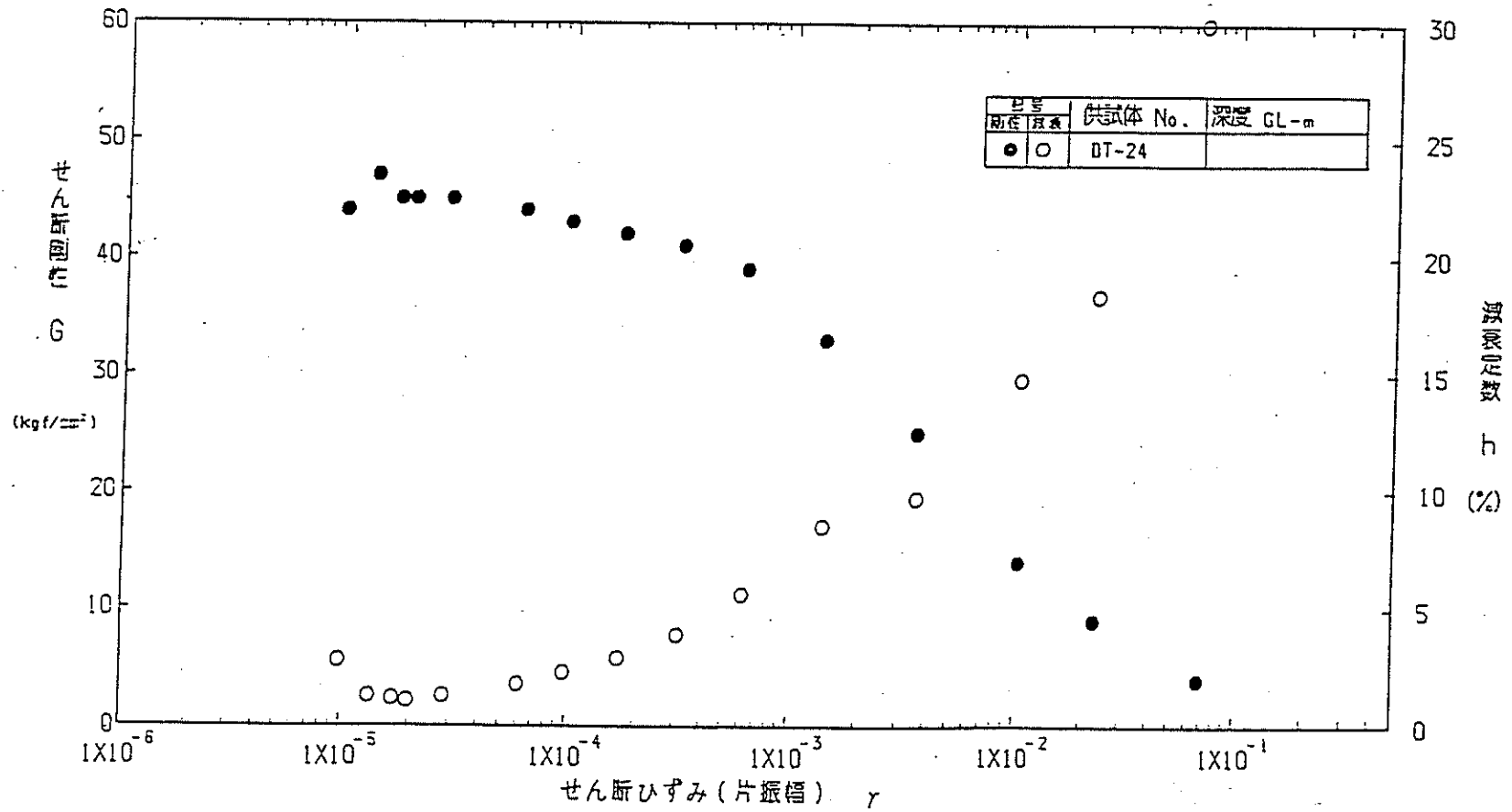


図4.4.4-1 DT-24におけるせん断弾性係数G～せん断ひずみ γ の関係

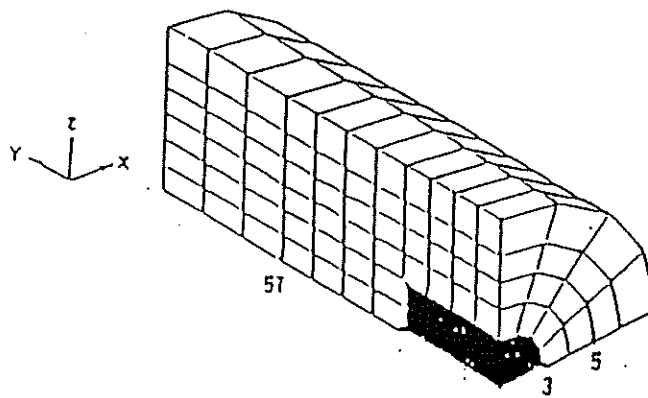
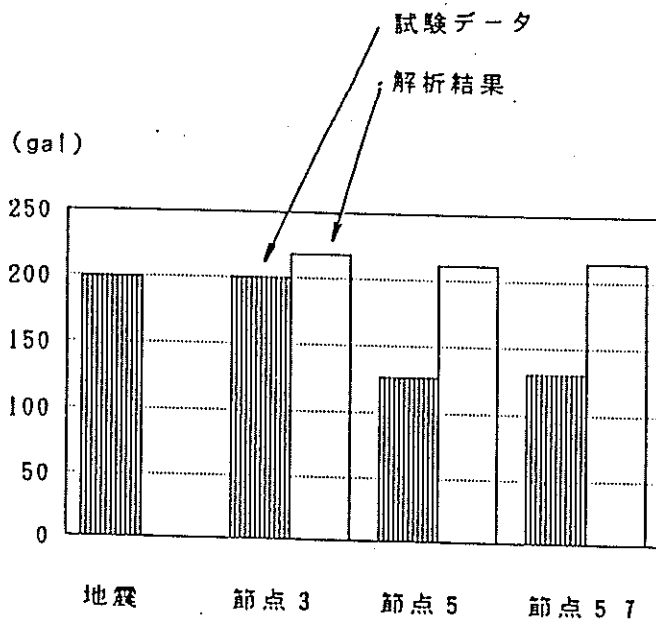


図4.4.7-1 試験データと解析結果の最大加速度の比較

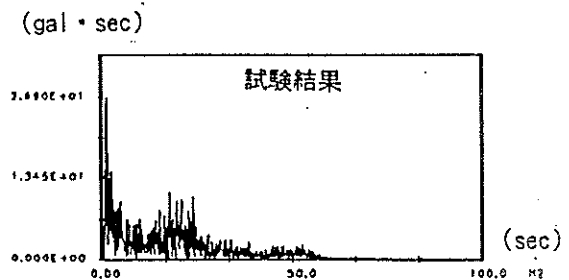
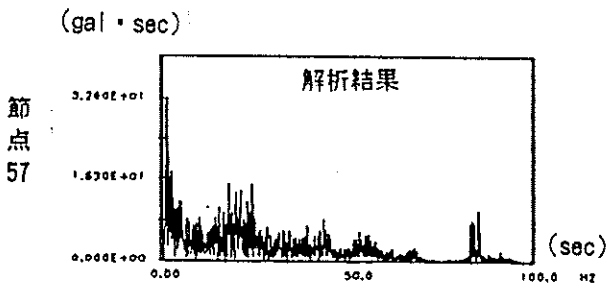
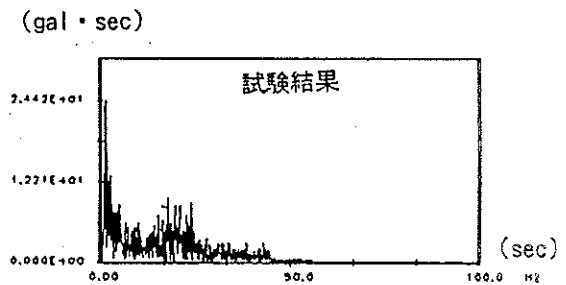
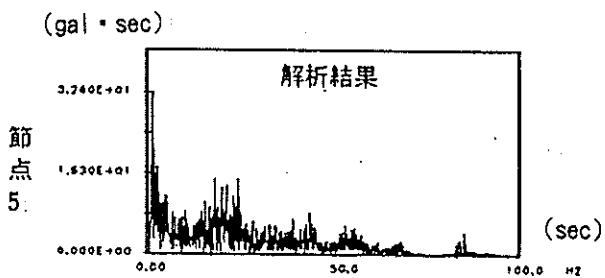
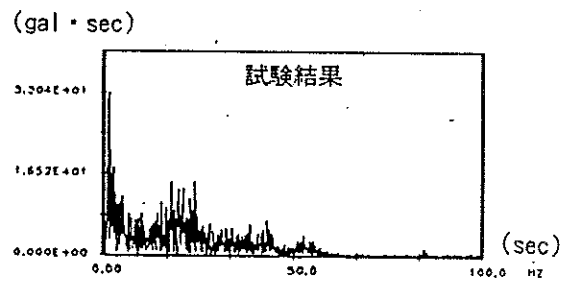
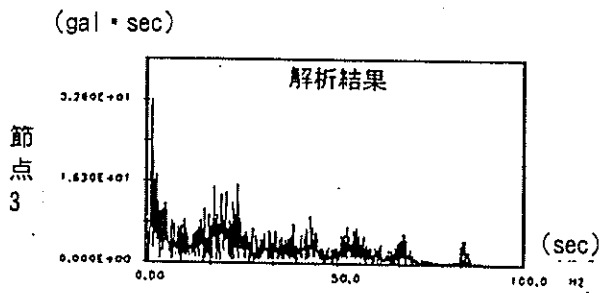
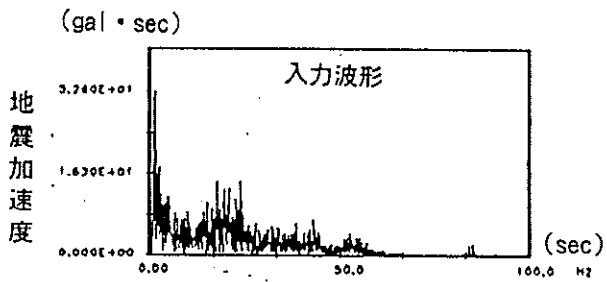
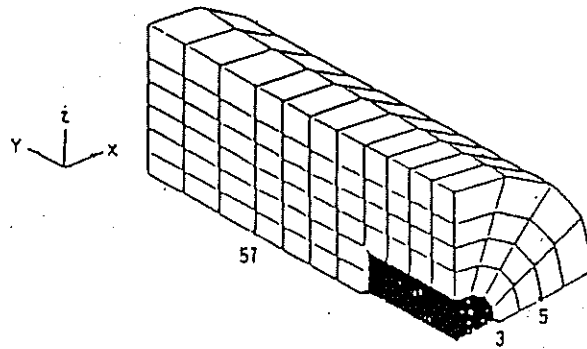


図4.4.7-2 試験データと解析結果の絶対加速度フーリエ振幅スペクトルの比較

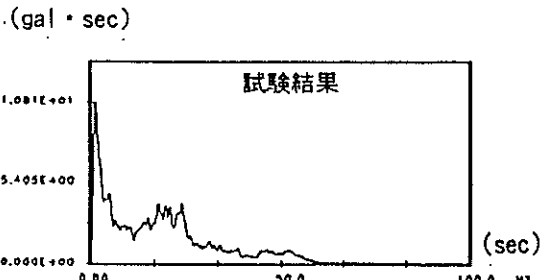
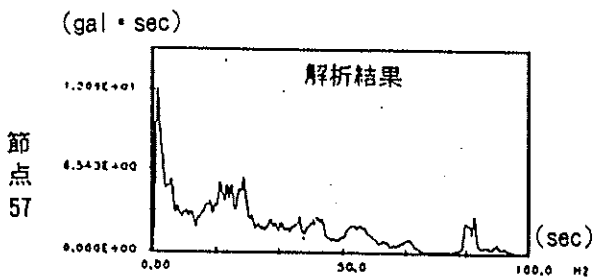
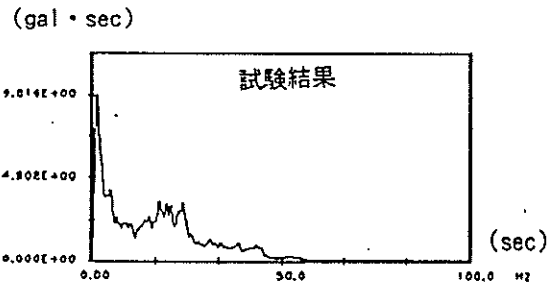
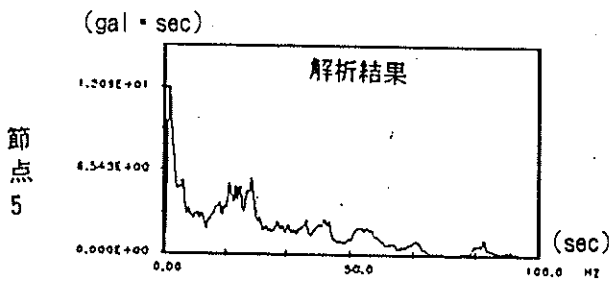
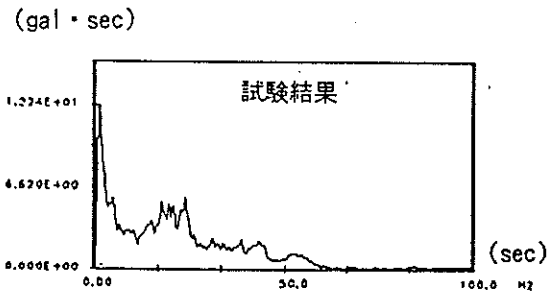
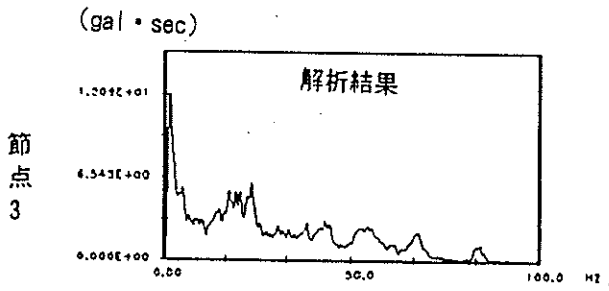
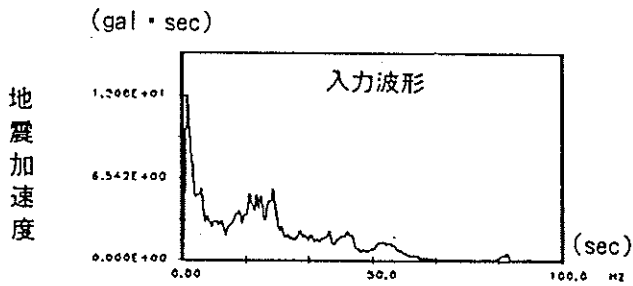
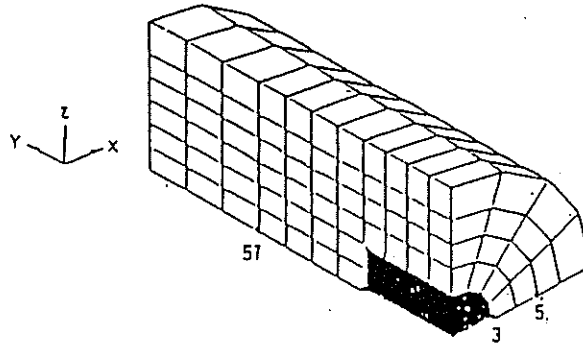


図4.4.7-3 フーリエ振幅スペクトルの平滑化

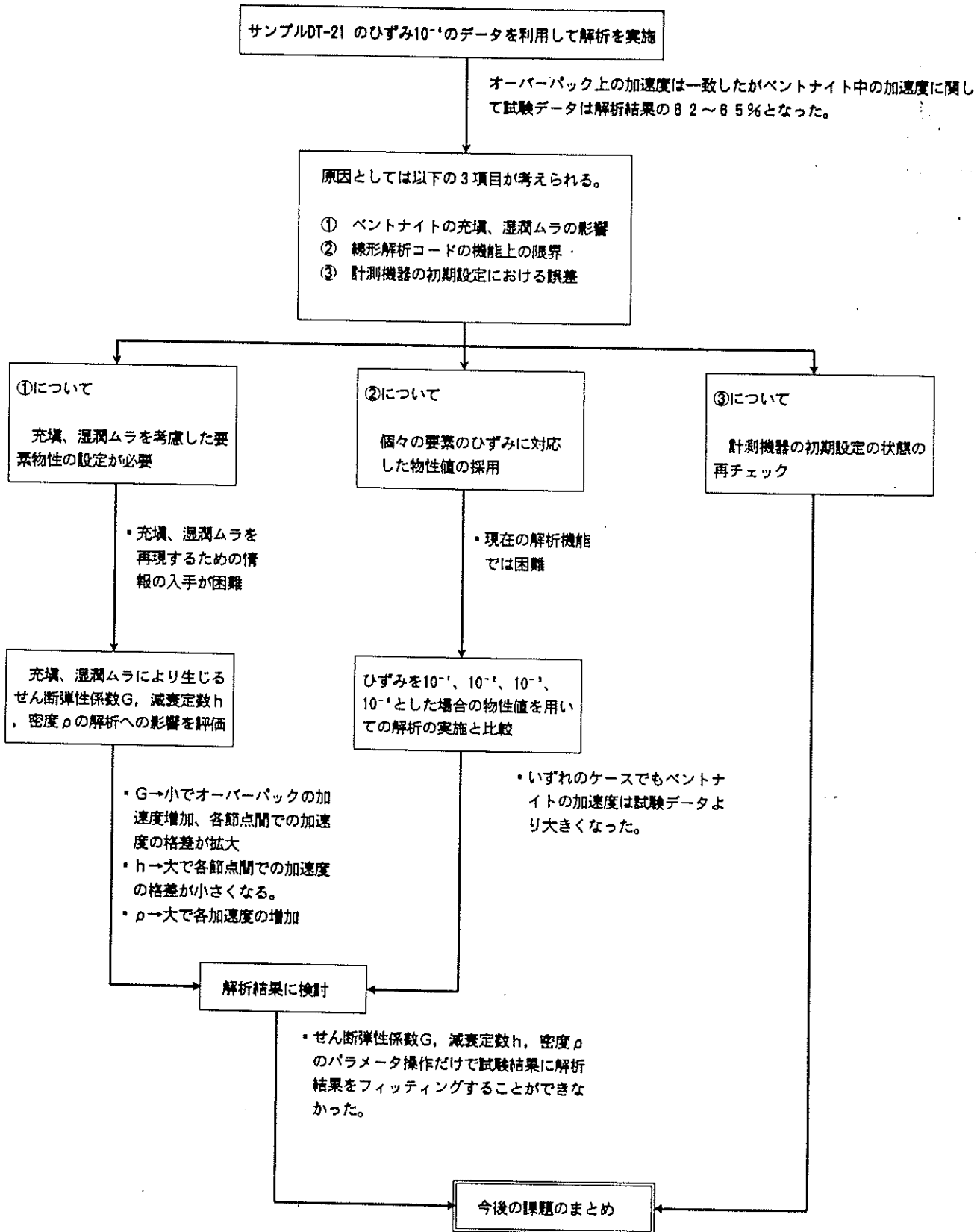


図4.4.7-4 パラメータ解析手順と結果

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 周波数応答解析機能の追加
- ③ モデル／コードの妥当性の評価および検討

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

5. 1 モデル／コードの開発とこれからの展望

① ベントナイトの力学特性のモデル化

現在、解析コードは線形解析機能のみであり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りつつある。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解析結果から現在の人工バリアモデルに振動中生じるベントナイトのひずみは0.1%以下と推測でき、このようなひずみの範囲ではベントナイトは弾性的挙動を示すと思われる。このような事実を考慮すると、弾-粘塑性解析機能を導入した際の検証実験の方法について再度検討する必要があると思われる。

② ベントナイト中の水分の移動

ベントナイト中の水分はベントナイトの膨潤圧、剛性に大きく影響することから、振動中の水分移動について考察することは重要である。

現在、ベントナイト中の水分移動については、モデルとその検証がおこなわれつつある。ベントナイト中の水分移動は粒子間の電気力、水分子間力などのミクロな現象が関連しており、それらのミクロな現象モデルを土、水を連続体として解析を行っている現在のコードに組み込んだ場合、計算負荷が非常に大きくなることが考えられる。また、ベントナイトの透水係数は小さいため振動実験のような限られた時間内では水分の移動による影響は小さいが、実処分での埋設期間を長期間に及ぶためベントナイトの状態としては様々な状態が想定される。今後は、考えられる種々のシナリオでのベントナイトの状態について考察するとともに、2相系方程式も含めシナリオに適した人工バリア解析モデルの検討を行なっていく必要がある。

③ 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。

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。

表 1-1 今後のモデル/コード開発計画

年 度		平成 4 年 度	平成 5 年 度	平成 6 年 度	平成 7 年 度
1. 文献調査		既存モデル/コードの調査、検討	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	粘土材の振動特性に係わる文献調査
2. コードの開発	解 析 機 能	2相系動的線形解析機能	周波数応答解析機能の追加	2相系動的等価線形解析機能の追加 2相系動的粘弾塑性解析機能の追加開始	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	膨潤性をもつ粘土内の2相系支配方程式
	② 土の構成式	等方線形弾性体モデル	等方線形弾性体モデル	等価線形弾性体モデルの導入 粘弾塑性モデルの導入の開始	粘弾塑性モデルの導入
	③ 運動方程式の解法	直接積分法	周波数応答解析	粘弾塑性解析を目的とした直接積分法への拡張の開始	粘弾塑性解析を目的とした直接積分法への拡張
	④ 解析次元	1 ~ 3 次 元			
	⑤ 減衰モデル	レーリー減衰	履歴減衰	レーリー減衰	レーリー減衰
	⑥ その他	時刻歴データのプロット出力機能	Hour-Glass抑制機能追加 (少ない積分点での解析への対応)	粘土境界の追加	ジョイント要素の追加
3. モデル/コードの妥当性の検証		<ul style="list-style-type: none"> ・構造物数値モデル予備解析 ・小変位数値モデル予備解析 ・構造物数値モデルデータ解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・小変位数値モデルデータを用いた周波数応答解析機能の検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・等価線形解析用材料による解析の実施と試験結果との比較検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・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

6. あとがき

本年度は公開文献の調査を通じて粘土材の振動特性に関するデータの収集を行った。これによりモデル／コードの適用限界を明確にするとともに、人工バリアシステム地震応答解析モデル／コードの今後の開発指針を定めることができた。

この指針においては緩衝材の力学特性のモデル化、間隙流体挙動の解析機能が大きな柱となっている。本年度の開発においては緩衝材の非線形な力学特性をモデル化するための第一ステップとして周波数応答解析機能の追加を実施した。本機能の拡張として将来、等価線形解析法が導入可能となる。現在、実験データを用いた解析を通して、現コードの問題点、今後追加が必要と思われる機能等について徐々に明らかになってきている。このことを踏まえ、本年度の研究をさらに進展させるためには、次のステップとして、

- ① 緩衝材振動特性に関するデータの調査
- ② 緩衝材中の水分移動の定式化
- 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

を、課題として挙げるができる。

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)
鷲津久一郎 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