

本資料は 113 年 10 月 14 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)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
2P7	J1458 94-002	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



社内資料

PNC ~~第~~ J1458 94-002

1994年2月

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



Internal Document
PNC ^Z J1458 94-002
February, 1994

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. 土質材料の振動特性に係わる調査検討	1-2
1.2. 人工バリアの地震応答解析モデル/ コードの開発	1-2
1.3. 振動実験データにもとづく人工バリアモデルの妥当性の検討	1-2
2. 文献調査	2-1
2.1. 文献調査の方法	2-2
2.1.1. INISによる文献検索	2-2
2.1.2. JICST による文献検索	2-3
2.1.3. その他の調査方法	2-4
2.2. 文献調査の概要	2-4
2.3. 文献調査のまとめ方	2-5
2.3.1. 調査項目	2-5
2.4. 粘性土の振動特性	2-6
2.4.1. せん断試験と粘性土の振動特性	2-6
2.4.2. せん断試験と間隙水圧の関係	2-7
2.4.3. ベントナイトの動特性	2-8
2.5. 粘性土中の間隙水の挙動に関する文献	2-9
2.5.1. 多孔質媒体内での2相系支配方程式	2-10
2.5.2. ベントナイト内の水分移動	2-11
2.6. 粘性土の構成式モデル、解析事例に関する文献	2-12
2.7. 調査した文献についての検討と今後の課題	2-14
2.7.1. 粘性土の振動特性	2-14
2.7.2. 粘性土中の間隙水の挙動	2-15
2.7.3. 粘性土に関する構成式、解析事例	2-15
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. 周波数応答解析機能	3-4
3.4. 履歴減衰の導入	3-8
3.5. 入出力	3-15
3.6. 機能追加部分の検証	3-18
3.6.1. 地震荷重のフーリエ変換ルーチンの検証	3-18
3.6.2. 周波数応答解析部分の検証	3-19
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. 数式モデル	4-3
4.1.4. 物性値	4-4
4.1.5. 加振	4-5
4.1.6. モデルと境界条件	4-5
4.1.7. 解析結果のまとめ	4-6
4.2. 砂層の液状化実験データと解析結果の比較	4-10
4.2.1. 概要	4-10
4.2.2. 解析時の仮定	4-10
4.2.3. 数式モデル	4-11
4.2.4. 物性値	4-12
4.2.5. 加振	4-12
4.2.6. モデルと境界条件	4-12
4.2.7. 解析結果のまとめ	4-13
4.3. 実固有値解析	4-15
4.3.1. 概要	4-15
4.3.2. 解析時の仮定	4-15
4.3.3. 数式モデルと解法	4-15
4.3.4. 物性値	4-16
4.3.5. モデルと境界条件	4-16
4.3.6. 解析結果のまとめ	4-17
4.4. 実験データによる解析コードの妥当性の評価	4-18
4.4.1. 内容	4-18
4.4.2. 解析時の仮定	4-18
4.4.3. 数式モデル	4-18
4.4.4. 物性値	4-19
4.4.5. 加振	4-19
4.4.6. モデルと境界条件	4-19
4.4.7. 解析結果	4-20
4.5. 実験データによる解析コードの妥当性の評価	4-25
4.5.1. 内容	4-25
4.5.2. 解析時の仮定	4-25
4.5.3. 数式モデル	4-25
4.5.4. 物性値	4-26
4.5.5. 加振	4-26
4.5.6. モデルと境界条件	4-27

4.5.7. 解析結果とまとめ	4-27
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
付録1. 変更、追加サブルーチン	A-1

表目次

表2.1.3-1 文献速報調査結果	2-17
表2.1.3-2 文献速報調査結果	2-18
表2.1.3-3 文献速報調査結果	2-19
表2.1.3-4 文献速報調査結果	2-20
表2.1.3-5 文献速報調査結果	2-21
表2.1.3-6 文献速報調査結果	2-22
表2.1.3-7 文献速報調査結果	2-23
表2.1.3-8 文献速報調査結果	2-24
表2.1.3-9 文献速報調査結果	2-25
表2.1.3-10文献速報調査結果	2-26
表2.1.3-11文献速報調査結果	2-27
表2.1.3-12文献速報調査結果	2-28
表2.2-1 文献リスト	2-29
表2.2-2 文献リスト	2-30
表2.2-3 文献リスト	2-31
表2.2-4 文献リスト	2-32
表2.2-5 文献リスト	2-33
表2.2-5 文献リスト	2-34
表4.1.4-1 2相系線形解析で用いた物性	4-28
表4.1.7-1 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での相対変位、絶対加速度の最大値	4-29
表4.1.7-2 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での応力、ひずみ、間隙水圧の最大値	4-30
表4.1.7-3 相対変位、絶対加速度の比較	4-31
表4.1.7-4 応力、ひずみ、間隙水圧の比較	4-32
表4.2.4-1 解析で用いた物性	4-33
表4.3.4-1 実固有値解析で用いた物性値	4-34
表4.3.4-1 実固有値解析結果	4-35
表4.4.4-1 データ解析で用いた物性値	4-36
表4.4.7-1 解析結果	4-37
表4.5.7-1 動的解析結果	4-38
表4.5.7-2 動的解析結果	4-39
表5.1-1 モデル／コードの開発計画	5-3

図目次

図2.4.1-1	せん断強度とひずみの関係	2-35
図2.4.1-2	振動数の違いによる動的強度の変化	2-36
図2.4.2-1	間隙水圧と繰り返しせん断ひずみの大きさの関係	2-37
図2.4.3-1	せん断弾性係数 G と静的偏差応力 σ_s の関係	2-38
図2.4.3-2	せん断弾性係数 G と拘束圧の関係	2-38
図2.4.3-3	せん断弾性係数 G と含水量の関係	2-39
図2.4.3-4	せん断弾性係数 G / 初期せん断弾性係数 G_{max} とせん断ひずみの関係	2-39
図2.4.3-5	三軸試験装置で不規則載荷を加えた場合の軸ひずみの変化	2-40
図2.5.2-1	水分分布と固相分布の変化1	2-41
図2.5.2-2	水分分布と固相分布の変化2	2-42
図2.6-1	関口～太田モデルにおける入力パラメータ取得のための実験と推定手順	2-43
図2.6-2	INSモデルによる解析事例	2-44
図3.1-1	時間領域と周波数領域の比較事例	3-23
図3.2-1	時間領域での比較例	3-24
図3.2.2	周波数領域での比較例	3-25
図3.2-3	本年度作業内容と等価線形解析	3-26
図3.4-1	変位と力の関係	3-27
図3.4-2	逐次解法と等価線形解法	3-28
図3.5.1-1	運動方程式の解法	3-29
図3.5.1-2	材料の物性値の設定	3-30
図3.5.1-3	周波数応答解析の設定	3-31
図3.5.1-4	地震データの継続時間	3-32
図3.5.1-5	地震荷重時間点の配置	3-33
図3.5.1-6	節点値周波数応答データの出力指定	3-34
図3.5.1-7	節点値周波数応答データの出力設定	3-35
図3.5.1-8	要素値周波数応答データの出力指定	3-36
図3.5.1-9	応力周波数応答データの出力設定	3-37
図3.5.1-10	ひずみ周波数応答データの出力設定	3-38
図3.5.1-11	間隙水圧周波数応答データの出力設定	3-39
図3.5.1-12	節点値分布データの出力指定	3-40
図3.5.1-13	節点値分布データの出力設定	3-41
図3.5.1-14	要素値分布データの出力指定	3-42
図3.5.1-15	応力分布データの出力設定	3-43
図3.5.1-16	ひずみ分布データの出力設定	3-44

図3.5.1-17間隙水圧分布データの出力設定	3-45
図3.5.1-18入力データ例	3-46
図3.5.1-19出力結果	3-47
図3.5.1-20解析結果のポスト処理例	3-48
図3.5.1-21追加サブルーチンの構成	3-49
図3.6.2-1 検証用モデル図	3-50
図3.6.2-2 変位、加速度の比較	3-51
図3.6.2-3 応力の比較	3-52
図3.6.2-4 応力の比較	3-53
図4.1.6-1 人工バリア試験体と解析モデル	4-40
図4.1.6-2 拘束条件	4-41
図4.1.6-3 非排水条件	4-41
図4.1.7-1 比較に用いた節点	4-42
図4.1.7-2 比較に用いた要素	4-42
図4.1.7-3 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での相対変位の時刻歴	4-43
図4.1.7-4 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での絶対加速度の時刻歴	4-44
図4.1.7-5 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での最大せん断応力の時刻歴	4-45
図4.1.7-6 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での間隙水圧の時刻歴	4-46
図4.1.7-7 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での変形	4-48
図4.1.7-8 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での間隙水圧の分布	4-50
図4.1.7-9 透水係数 1.0×10^{-2} cm/s での変形	4-52
図4.1.7-10 透水係数 1.0×10^{-5} cm/s での変形	4-54
図4.1.7-11 透水係数 1.0×10^{-8} cm/s での変形	4-56
図4.1.7-12 透水係数 1.0×10^{-2} cm/s での間隙水圧の分布	4-58
図4.1.7-13 透水係数 1.0×10^{-5} cm/s での間隙水圧の分布	4-60
図4.1.7-14 透水係数 1.0×10^{-8} cm/s での間隙水圧の分布	4-62
図4.2.6-1 モデル図	4-63
図4.2.6-2 文献記載のモデル	4-64
図4.2.7-1 実験結果と2相系解析での解析結果の比較	4-65
図4.2.7-2 実験結果と1相系解析での解析結果の比較	4-66
図4.3.5-1 小型振動試験用モデルと計測位置	4-67
図4.3.5-2 振動試験装置	4-67
図4.3.5-3 実固有値解析用モデルと拘束条件	4-68
図4.3.6-1 スイープ試験結果	4-69
図4.3.6-2 ベントナイト充填密度 1.63gf/cm^3 での各モデルでの固有振動数	4-70
図4.3.6-3 ベントナイト充填密度 1.42gf/cm^3 での各モデルでの固有振動数	4-71

図4.3.6-4 モード図	4-72
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	4-73
図4.4.5-1 EL-CentroN-S波形（最大加速度200gal）	4-74
図4.4.6-1 人工バリア小型振動試験供試体と解析モデル	4-75
図4.4.6-2 解析用モデルの拘束条件	4-76
図4.4.7-1 加速度に関する解析結果	4-77
図4.4.7-2 変位に関する解析結果	4-78
図4.4.7-3 AVSによる各時間点での変位の分布のポスト処理	4-79
図4.4.7-4 試験データと解析結果の最大加速度の比較	4-80
図4.4.7-5 試験データと解析結果の絶対加速度波形の比較	4-81
図4.4.7-6 試験データと解析結果の絶対加速度のフーリエ振幅スペクトルの 比較	4-82
図4.4.7-7 フーリエ振幅スペクトルの平滑化	4-83
図4.4.7-8 スイープ試験結果	4-84
図4.4.7-9 パラメータ解析手順と結果	4-85
図4.4.7-10 ペントナイトの各パラメータの解析結果への影響	4-86
図4.4.7-11 ひずみ 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} での解析結果の比較	4-87

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. 1. 1 I N I Sを用いた文献検索

広く関連文献にあたるため、以下のキーワードを用いた。

キ ー ワ ー ド	
日 本 語	英 語
① ベントナイト	BENTNITE
② 粘土	CLAY
③ 間隙水	PORE WATER
④ 層間水	INTERLAYER WATER
⑤ 地震	SEISMIC EARTH QUAKE
⑥ 応答	RESPONSE
検 索	
(① or ②) and (③ or ④ or ⑤ or ⑥)	
対 象	
1980 ~ 1993	

以上の検索結果127文献の文献名が挙げたが、粘土の熱伝導特性、化学的特性、組成に関する文献が多く含まれていた。検索結果のなかで、今年度の調査に関連する粘土材の振動実験データ、非線形解析の事例もしくは水分移動に関する文献は1件のみであった。

2. 1. 2 J I C S Tを用いた文献検索

I N I Sの検索結果、関連文献が極めて少なかったことから商用データベースであるJ I C S Tを用いて土木関連の文献検索を実施した。ただし、層間水、間隙水をキーワードに含んだ場合、粘土材の組成、化学特性に関する文献が多く今回対象とする文献が殆ど得られないことから、これを除外した。

キ ー ワ ー ド	
日 本 語	英 語
① ベンナイト	BENTONITE
② 粘土	CLAY
③ 地震	SEISMIC
④ 応答	EARTH QUAKE RESPONSE
検 索	
(① or ②) and (③ or ④)	
対 象 文 献	
1975 ~ 1993	

検索結果、163文献が得られたが、このなかから軟弱粘土層での地震波の観測、地震波速度と組成の関係、実務的な粘土地盤の強度推定法、特定地域の地盤構成に関する調査等の文献を除外すると今回の調査目的に関連すると思われる文献は19文献にとどまった。

この中で、現在入手済みの文献は11文献である。また、11文献のうち3文献については内容がほぼ同じであった。

2. 1. 3 その他の調査方法

データベース検索結果得られた文献が少数であったため、書籍、土木関係科学技術文献速報（国会図書館蔵書）を参考に文献調査を実施した。調査結果については表2.1.3-1～12に示す。現段階で入手できた関連文献は10文献となっている。

2. 2 各文献の概要

今回、前記の調査方法により関連文献として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を入手した。

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%以下の場合図2.4.1-1（文献1）に示すように宇部粘土ではせん断強度比（ τ_{dss}/τ_{ss} ）が1以上となっていることから理解できるように、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、図2.4.1-2（文献5）に見られるように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得られている。

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図2.4.2-1 に示すように、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。なお破壊現象に向かう以前の間隙水圧の安全増加の過程において、カオリン粘土を対象としたものであるが調査した文献中に

$$\text{Log} (u/\sigma_v) = \text{Log}_{10} A + B \text{Log}_{10} N$$

σ_v : 拘束圧 A, B : 係数

u : 間隙水圧 N : くり返し数

の関係が見られることが示されている。なお、A、Bは振動数に依存し、振動数が大きくなるにつれAが減少する傾向にあるとのことである。

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 kgf/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（図2.4.3-1）が示されている。

$$G = 17.65 + 0.108 \sigma_d$$

G : 動的せん断弾性係数 (ksi)

σ_d : 静的偏差応力 (psi)

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

また、せん断弾性係数 G と拘束圧が両対数軸上で線形関係を持つこと（図2.4.3-2）、せん断弾性係数は含水量の増加に伴って増加すること（図2.4.3-3）、せん断弾性係数とせん断ひずみの関係（図2.4.3-4）も示されている。

他にベントナイトの振動特性に関連したものとしては、ベントナイトを含有する泥水固化土を対象とした一軸圧縮試験、三軸試験の結果について記載された文献があり、三軸試験では、不規則な軸荷重を与えた場合の結果が示されている。結果の一部については図2.4.3-5に示すが、塑性変形の結果として残留ひずみが記録されている。また、次のような知見も得られている。

- 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。

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（ポラスメディア）内での土、間隙流体の多次元的挙動については、1941年にBiotにより定式化された。その後、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、水の多次元的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。次にZienkiewiczらにより拡張された2相系支配方程式（文献9）についてまとめる。

$$\sigma = \sigma' - mP$$

$$d\varepsilon = L du$$

$$d\sigma' = D(d\varepsilon - d\varepsilon^0 + mdp/3K_s)$$

$$L^T \sigma' + \rho g = \rho \ddot{u} + \rho_f \dot{w}$$

$$-\nabla p + \rho_f g = k^{-1} \dot{w} + \rho_f \ddot{u} + \rho_f \dot{w}$$

$$\nabla^T w + w^T \varepsilon + pn/K_f + (1-n)p/K_s - m^T \sigma' / K_s = 0$$

σ : 応力

σ' : 有効応力

ε : ひずみ

u : 土骨格の変位

w : 土、間隙水の相対変位

p : 間隙水圧

ρ : 土の密度

ρ_f : 水の密度

k : 透水係数

K_s : 土粒子の体積弾性係数

K_f : 水の体積弾性係数

m : (1, 1, 1, 0, 0, 0)

上式は間隙水圧の増加により生じる土粒子のひずみの影響、土、水の相互作用が考慮されており、岩盤、砂層、粘土層を対象とした2相系解析コードに広く用いられている。

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)によればダルシー形式の水分移動方程式の適用が可能としている。

文献8では、流束 q (cm/d)は、

$$q = -k \{ (\partial \phi / \partial z) + 1 \}$$

k : 透水係数

で表現されるとしている。ポテンシャル ϕ は圧力ポテンシャル以外に水中イオンが粘土粒子の荷電により拘束されることを踏まえて、駆動力としてオスモティックポテンシャルも考慮している。

また、ベントナイト中の水分分布を再現する為に上式に連続の式を適用し、

$$\partial \theta / \partial t = \partial \{ k (d \phi / d \theta) \cdot (\partial \theta / \partial z) \} / \partial z + \partial k / \partial z$$

θ : 間隙率

を得ている。これを用いて求めた計算値と実験データとの比較を図2.5.2-1 ~2 に示す。実験結果と計算値はよく一致するが、現在のところ一次元の範囲での研究にとどまっている。

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。

村山、柴田等の速度過程論は粘性土のレオロジカルモデルの研究へと発展し、Christensen, Singh, Mitchell, Bardenらにより種々の実験式が提案された。一方、Roscoeらの研究はその後"Cam-Clay"と呼ばれる理想粘性土の構成式を誘導するに到った。文献18にはCam-Clayモデルの骨子と適用上の問題点がまとめられている。また、太田、畠らは柴田のダイレイタンシー式とDruckerの塑性体理論を用いてRoscoeらのCambridge理論と等価な構成式をもとめた。1982年にはPande Pietreszczakらにより土のモデルを取り扱う降伏曲面のほかに反射圧密曲面、共役圧密曲面、反射共役曲面と呼ばれる曲面を導入した反射曲面モデルが提唱されている。

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Perry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シーの時間依存性を考えてPerry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。入力パラメータの決定手順については図2.6-1に示す。

粘土材を対象とした解析事例が記述されている文献としては、文献14がありINSモデルを用いた2次元解析が行われている。解析結果では図2.6-2に示すように、残留変位がう

まく表現されている。

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。しかしながら、前記のように現状では入手できた文献は20文献にとどまっている。

ここでは、各項目ごとに入手文献の内容について検討するとともに、今後の課題についてまとめる。

2. 7. 1 粘性土の振動特性

ベントナイトの振動特性に係わるものは2文献のみであった。1つの文献では、せん断弾性係数 G とひずみ γ の関係のみではなく、 G と偏差応力 σ_d の関係、 G と含水量の関係、 G と拘束圧の関係が記述されておりこの点で興味深い。

文献(3)では、ベントナイトを含有した泥水固化土を対象としているが正弦波、エルセントロ、十勝沖地震波を軸差応力 q の履歴として入力した場合の供試体の軸ひずみ、間隙水圧のデータが得られており、今後モデルを開発した場合の検証用データ計測手段として参考となる。

湿潤密度 1.6gf/cm^3 のベントナイトはひずみ 0.1% 以下では弾性体として取り扱うことが可能であるが、小型振動実験でのベントナイトのひずみは解析結果から、 $0.001\% \sim 0.01\%$ 程度と推測できる。このことから、解析コードを非線形性、塑性まで考慮したモデルへの拡張を行った場合、振動試験から得られるデータのみで検証が可能であるか再検討がせまれる。前述の三軸試験装置による不規則荷重を用いた物性試験なども検証用データ取得のために振動試験と平行して実施することを考えていく必要がある。

ベントナイトの振動特性に関する文献を中心に調査を行ったため、入手できた文献は限定されたが、一般の粘土の関する振動実験データについては、調査を継続すれば更に多くの文献入手が可能である。

2. 7. 2 粘性土中の間隙水の挙動

今回入手した文献（文献 9）に記載された多孔質媒体内の 2 相系方程式は岩盤、砂層、粘土層を対象として一般に良く用いられている。一方、ベントナイト内の水移動は極めて複雑で一般の 2 相系方程式がそのまま適用可能かどうか疑問が残る。このような複雑なベントナイト内の水の流れに関しても、一次元に限定されるが水分移動に関するモデルの確立および実験によるモデルの検証が行われつつある。

一方、ベントナイトの透水係数が極めて小さく、地震の継続時間は数十秒～数分と短いため振動中に水分の移動は極めて少ないとも考えられる。しかしながら、実処分では埋設期間が長期におよびこの間のベントナイトの状態として様々なシナリオが想定される。今後、種々のシナリオで想定されるベントナイトの状態についての調査、考察を行う必要がある。

2. 7. 3 粘性土に関する構成式、解析事例

ベントナイトの構成式に関して記載した文献を今回の調査では入手できなかった。膨潤性粘土の構成式に関しての文献はデータベース、土木関係の科学技術目録においても見あたらず、今後も入手できる可能性は低い。一般の粘性土については多くの構成式が発表されており、今後これらのモデルをベースとしてベントナイトの特性を表現していく方法が有効だと思われる。

弾－粘塑性モデルを用いた場合、入力パラメータとして多くの材料定数が必要となるが文献の一部には、必要データを入手する手順について書かれた文献（文献 13）もあり今後このような文献をより多く入手する必要がある。モデル検討のうえでも今回入手済の文献だけでは不十分であり、文献調査を継続するとともに各モデルについて、その特色をまとめ、適性を判定することが重要である。

2. 7. 4 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から得られる実験データのみで粘塑性まで考慮したモデルの検証が可能であるのか、また、モデル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、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えられる。しかしながら、実処分での埋設期間は長期におよびベントナイトの状態としては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うえで、2相系方程式を含めそれぞれのシナリオに適した人工バリアモデルを確立していくことが必要である。

表2.1.3-1 文献速報調査結果

1	題 名	A comparison of some constitutive law for soils under radially symmetric loading and unloading
	著 者	GUDEHUG. G
	掲載雑誌	Proc Int Conf Numer Methods Geomech 3rd 790402 Vol1 4 P1309~1323 (1980)
2	題 名	Stress -strain theory for normally consolidated clay
	著 者	LADE. P. V
	掲載雑誌	Proc Int Conf Numer Methods Geomech 3rd 790402 Vol14 P1325~1323 (1980)
3	題 名	有限要素法による圧密現象の一解法
	著 者	山上 沢男、植田 康宏
	掲載雑誌	土木学会論文報告集 302号 P67~78 (1980)
4	題 名	A bounding surface soil plasticity model
	著 者	DAFALIAS. Y. F, HERRMANN. L. R
	掲載雑誌	Soils Cycl Transient Loading Vol1 P335~345 (1980)
5	題 名	Mechanical behavior of clays cyclic loading
	著 者	MEIMON. Y
	掲載雑誌	Soils Cycl Transient Loading Vol1 P77~87 (1980)

表2.1.3-2 文献速報調査結果

6	題 名	Finite element solution of boundary value problems in soil mechanics
	著 者	PREVOST. J. H, HUGHES. T. J. R
	掲載雑誌	Soils Cycl Transient Loading Vol1 P263～276 (1980)
7	題 名	A "geotechnical" stress variables approach to cyclic behaviour of soils
	著 者	NOVA. R, HUECHEL. T
	掲載雑誌	Soils Cycl Transient Loading Vol1 P301～314 (1980)
8	題 名	Peak strength of clay soils after a repeated loading history
	著 者	SANGREY. D. A, FRANCE. J. W
	掲載雑誌	Soils Cycl Transient Loading Vol1 P421～430 (1980)
9	題 名	土のダイレイダンシーと異方性
	著 者	吉田昭治
	掲載雑誌	新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報 2号 P115～122 (1980)
10	題 名	Some notes on Masing's law and non-linear response of Soil desposits
	著 者	OHSAKI. Y
	掲載雑誌	F350A J Fac Eng Univ Tokyo Ser B 3 5 巻 4 号 P513～536 (1980)

表2.1.3-3 文献速報調査結果

11	題 名	変形し得る多孔体中の流れの支配式に関する考察
	著 者	山上 沢男
	掲載雑誌	F028A 土木学会論文報告集 304号 P95~104 (1980)
12	題 名	せん断、圧縮と構成方程式
	著 者	金谷 健一
	掲載雑誌	F369 土と基礎 28巻 12号 P5~9 (1980)
13	題 名	Interaction problems in soil-structure mechanics with material nonlinearity
	著 者	RUNESSON, K, TAGNFORS, H, WIBERG, N. E
	掲載雑誌	E860A Comput Struct 12巻 4号 P581~592 (1980)
14	題 名	地盤の地震応答に及ぼす土の線形性の影響
	著 者	岩崎敏男、川島一彦、竜岡文夫
	掲載雑誌	土木技術資料 22巻 12号 P637~647 (1980)
15	題 名	流動論的考察による地震時の地盤振動シミュレーション
	著 者	大槻明、春海けい三郎
	掲載雑誌	構造工学シンポジウム 27th P67~76 (1980)

表2.1.3-4 文献速報調査結果

16	題 名	粘性土の動剛性率と減衰定数の挙動についてⅡ 主に過圧密比の影響について
	著 者	齊藤二郎、平間邦興、鳥居原誠
	掲載雑誌	大林組技術研究所報 22号 P86～91 (1980)
17	題 名	Soils as an anisotropic kinematic hardening soil
	著 者	FINN.W.D.L, MARTIN.G.R
	掲載雑誌	Prepr Am Soc Civ Eng ASCE-80-521 P24 (1980)
18	題 名	Plasticity models for soils, Part I : Theory and calibration Part II : Comparison and discussion
	著 者	MIZUNO.E, CHEN.W.F
	掲載雑誌	PB Rep (USA) PB-81-120065 P74 (1980)
19	題 名	Multi-dimensional elasto-plastic consolidation analysis by finite element method
	著 者	MATUI.T, ABE.N
	掲載雑誌	土質工学会論文報告集 21巻 1号 P79～95 (1981)
20	題 名	Analysis of soil response with different plasticity models
	著 者	MIZUNO.E, CHEN.W.F
	掲載雑誌	Prepr Am Soc Civ Eng ASCE-80-637 P14 (1980)

表2.1.3-5 文献速報調査結果

21	題 名	土の変形と破壊について 対数ひずみによる表現
	著 者	線引恵一
	掲載雑誌	東海大学記要 工学部 1980 2号 P137～145 (1980)
22	題 名	粘土地盤の多次元弾塑性圧密解析
	著 者	松井保、阿部信晴
	掲載雑誌	生産と技術 33巻 3号 (1981)
23	題 名	Mechanical properties of cohesive soil after repeated loading
	著 者	AKAI.K, OHNISHI.Y
	掲載雑誌	Proc Jpn Congr Marter Res 24巻 P237～240 (1981)
24	題 名	粘性土の弾塑性応力ひずみ時間関係
	著 者	たな橋由彦
	掲載雑誌	長崎大学工学部研究報告 17号 P79～86 (1981)
25	題 名	粘性土層の振動性状
	著 者	稲富隆昌
	掲載雑誌	港湾技研資料

表2.1.3-6 文献速報調査結果

26	題 名	Behaviour of clay on cyclic stress -strain history
	著 者	MATSUI.T, ABE.N
	掲載雑誌	Soil Mech Found Eng 10th Int Conf 1981 vol3 P261~264 (1981)
27	題 名	Application of a stress - strain - time relation
	著 者	FOERSTER.W, GEORGI.P
	掲載雑誌	Soil Mech Found Eng 10th Int Conf 1981 vol3 P405~408 (1981)
28	題 名	Shear stress - strain - time behaviour of clays
	著 者	MESRI.G, CASTRO.A
	掲載雑誌	Geotechnique 31巻 4号 P537~552 (1981)
29	題 名	地盤材料の動的性質の測定と耐震設計
	著 者	国生剛治
	掲載雑誌	電力土木 175号 P4~8 (1981)
30	題 名	An anisotropic , critial state model for soils subject to cyclic loading
	著 者	MROZ.Z, NORRIS.V.A
	掲載雑誌	Geotechnique 31巻 4号 P451~469 (1981)

表2.1.3-7 文献速報調査結果

31	題 名	粘性土の動剛性率と減衰定数の挙動についてⅢ 広いひずみ領域での変形特性
	著 者	齊藤二郎、平間邦興
	掲載雑誌	大林組技術研究所報 24号 P78～81 (1982)
32	題 名	地盤の変形と間隙水挙動との相互作用の解析法
	著 者	中川加明一郎、駒田広也
	掲載雑誌	電力中央研究所土木技術研究所研究報告 P33 (1982)
33	題 名	Double layer theory and compressibility of clays
	著 者	SRIDHARAN, A, JAYADEVA, M. S
	掲載雑誌	Geotechnique 32巻 2号 P133～144 (1982)
34	題 名	粘性土の動的強度特性に関する周期の影響
	著 者	梅原靖文、大根田秀明、樋口よし章
	掲載雑誌	土質工学研究発表会講演集 17th(2-2) P1713～1716 (1982)
35	題 名	粘土の構造を考慮した変形挙動
	著 者	風間秀彦、竹内信次
	掲載雑誌	土質工学研究発表会講演集 17th(2-1) P385～388 (1982)

表2.1.3-8 文献速報調査結果

36	題 名	粘性土の弾塑性応力ひずみ時間挙動について
	著 者	たな橋由彦、伊勢田哲也
	掲載雑誌	土質工学研究発表会講演集 17th(2-1) P385～388 (1982)
37	題 名	土の構成式
	著 者	松岡元
	掲載雑誌	土と基礎 30巻 6号 P95～96 (1982)
38	題 名	軟弱地盤の有限要素解析と現場計測との比較
	著 者	木村浩、田原正登
	掲載雑誌	土質工学研究発表会講演集 17th(2-2) P1957～1960 (1982)
39	題 名	Mechanical behaviour of cohesive soil under repeated loading
	著 者	AKAI, K, OHNISHI
	掲載雑誌	Int Conf Recent Adv Geotech Earthqu Eng Soil Dyn 1981 Vol1 P75～80 (1981)
40	題 名	Constitutive equations for sands and overconsolidated clays under dynamic loads based on elasto-plasticity
	著 者	OKA, F, WASHIZU, H
	掲載雑誌	Int Conf Recent Adv Geotech Earthqu Eng Soil Dyn 1981 Vol1 P71～74 (1981)

表2.1.3-9 文献速報調査結果

41	題 名	Constitutive modeling and soil-structure interaction
	著 者	DESAI, C. S
	掲載雑誌	NATO Adv Study Inst Ser C 9 2 巻 P103~143 (1982)
42	題 名	Constitutive models for clays and sands
	著 者	AKAI, K., ADACHI, T
	掲載雑誌	Proc Workshop Limit Equilib Plast Gen Stress Strain Geotech Eng 1980 P815~838 (1981)
42	題 名	Constitutive equations for normally consolidated clay based on elastoviscoplasticity
	著 者	ADACHI, T., OKA, F
	掲載雑誌	土質工学会論文報告集
43	題 名	Nonlinear hyperelastic (green) constitutive models for soils : predictions and comparison
	著 者	SALEEB, A. F., CHEN, W. F
	掲載雑誌	Proc Workshop Limit Equilib Plast Gen Stress Strain Geotech Eng 1980 P265~285 (1981)
44	題 名	Plasticity models for soils comparison and discussion
	著 者	MIZUNO, E
	掲載雑誌	Proc Workshop Limit Equilib Plast Gen Stress Strain Geotech Eng 1980 P328~351 (1981)

表2.1.3-10 文献速報調査結果

45	題 名	A critical state model for predicting the behaviour of clays
	著 者	WROTH. C. P
	掲載雑誌	Proc Workshop Limit Equilib Plast Gen Stress Strain Geotech Eng 1980 P592~627 (1981)
46	題 名	Soil constiutive model assessment
	著 者	YOUNG. R. N
	掲載雑誌	Appl Plast Gew Stress Strain Geotech Eng P1~6 (1982)
47	題 名	A generalized bounding surface constitutive model for clay
	著 者	DAFALIAS. Y. F, HERRMANN. L. R
	掲載雑誌	Appl Plast Gew Stress Strain Geotech Eng P78~95 (1982)
48	題 名	Soil as an anisotropic kinematic hardening solid
	著 者	FINN. W. D. L, MARTIN. G. R
	掲載雑誌	Appl Plast Gew Stress Strain Geotech Eng P96~114 (1982)
49	題 名	Analysis of soils response with diffrent plasticity models
	著 者	MIZUNO. E, HCEN. W. F
	掲載雑誌	Appl Plast Gew Stress Strain Geotech Eng P115~138 (1982)

表2.1.3-11 文献速報調査結果

50	題 名	総合地盤解析システム S I G N A S の機能と問題点
	著 者	銭高組技術研究部
	掲載雑誌	銭高組 7号 P224~227 (1983)
51	題 名	Finite element analysis of soil consolidation, with special reference to the case of strain hardening elastoplastic stress-strain model
	著 者	MAGNAN, J. P., BELKEZIZ, A
	掲載雑誌	Proc 4th Int Conf Numer methods Geomech 1982 Vol1 P327~336 (1982)
52	題 名	Multi-dimensional consolidation analysis of soft clay
	著 者	MATSUI, T., ABE, N
	掲載雑誌	Proc 4th Int Conf Numer methods Geomech 1982 Vol1 P337~347 (1982)
53	題 名	An elastoplastic - viscoplastic constitutive modeling of cohesive soil
	著 者	DAFALLA, Y
	掲載雑誌	Numer Model Geomech P126~138 (1982)
54	題 名	Extended critical state model for an isotropically consolidated clays
	著 者	STIPHOU, A. S
	掲載雑誌	Numer Model Geomech P183~188 (1982)

表2.1.3-12 文献速報調査結果

55	題 名	Numerical implementation of a bounding surface soil plasticity model
	著 者	HERRMANN, L. R, DAFALIAS, Y. F
	掲載雑誌	Numer Model Geomech P334~343 (1982)
56	題 名	Application of critical state soil models to the prediction of the behaviour of a normally consolidated low plasticity clay
	著 者	GENS, A, POTTS, D. M
	掲載雑誌	Numer Model Geomech P312~323 (1982)

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%での繰返し数 $N5_i$ と SR_i (SR = 軸差応力 / 一軸圧縮強度) には $\text{Log } N5_i = \{ (SR_i - B) / A \} \text{Log } 10$ 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

N o	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一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ること、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

N o	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.	O. 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、土との相互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
1 3	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。
1 4	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。
1 5	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、 $S_N = S_{N-1} (1 + 0.5 S_{N-1})^{1/t}$ $N: \text{サイクル}, S_N: \text{低下指数}$ $t: \text{低下パラメータ}$ が導入されている。
1 6	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
1 7	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
1 8	土の構成式	松岡元	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。 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。
1 9	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ずれが生じてくる。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	本文献ではクーロン、ドラッグーの規準と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。

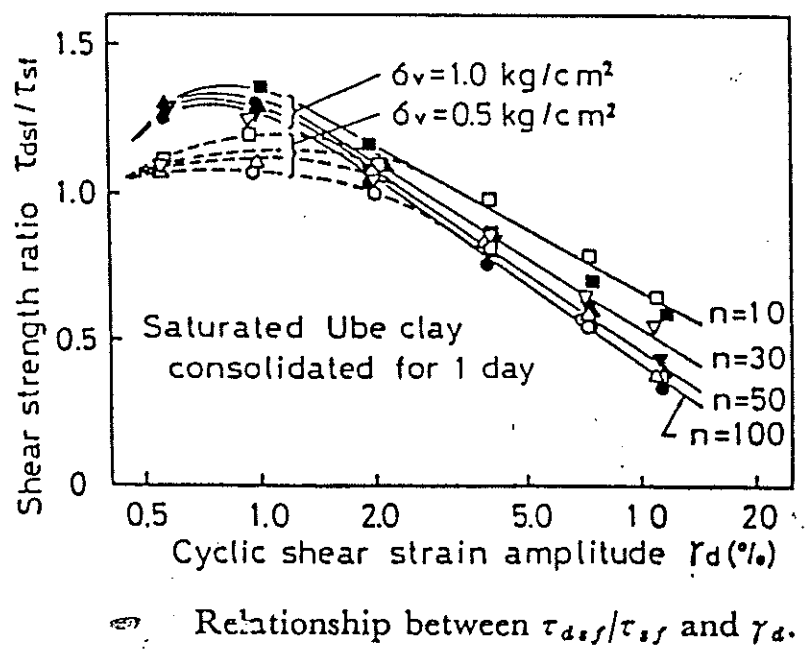


図2.4.1-1 セン断強度とひずみの関係

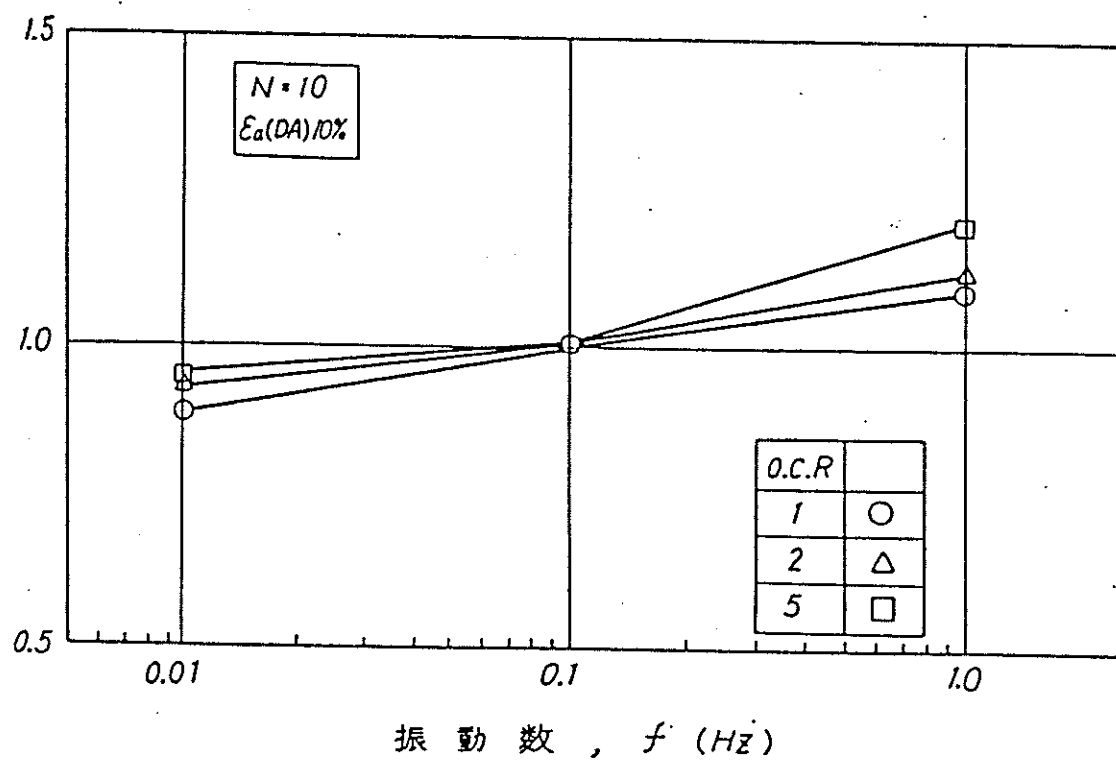


図2.4.1-2 振動数の違いによる動的強度の変化

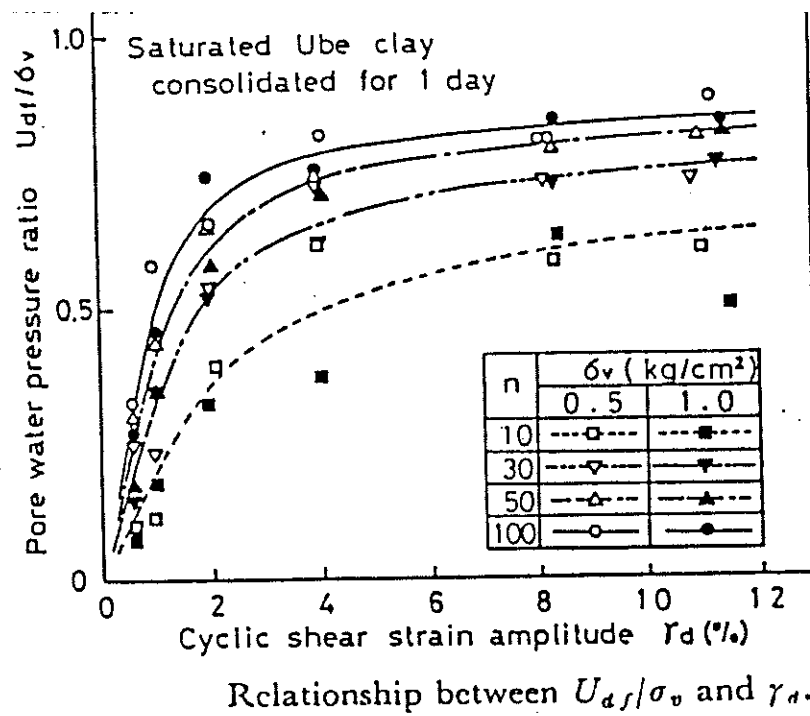


図2.4.2-1 間隙水圧と繰返しせん断ひずみの大きさの関係

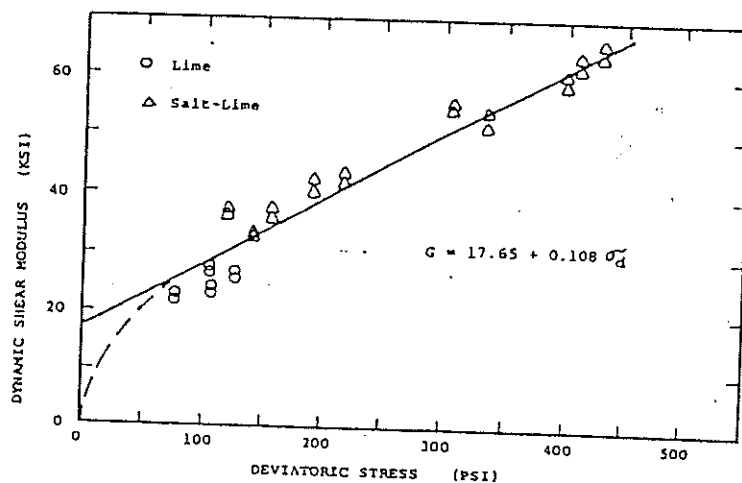
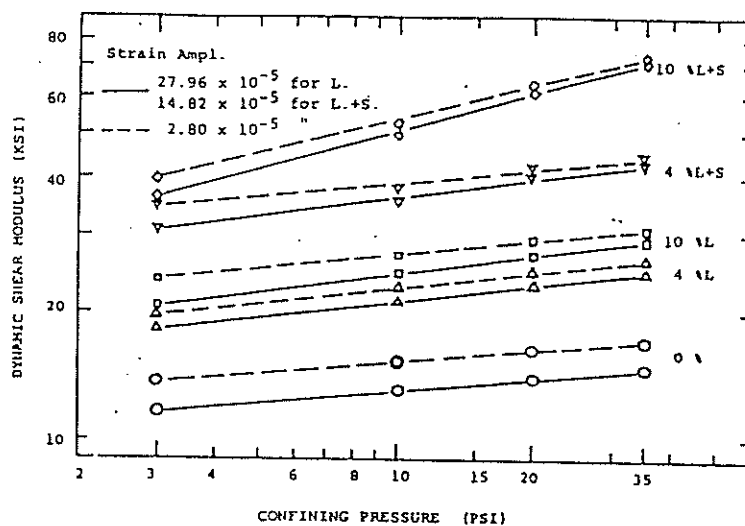
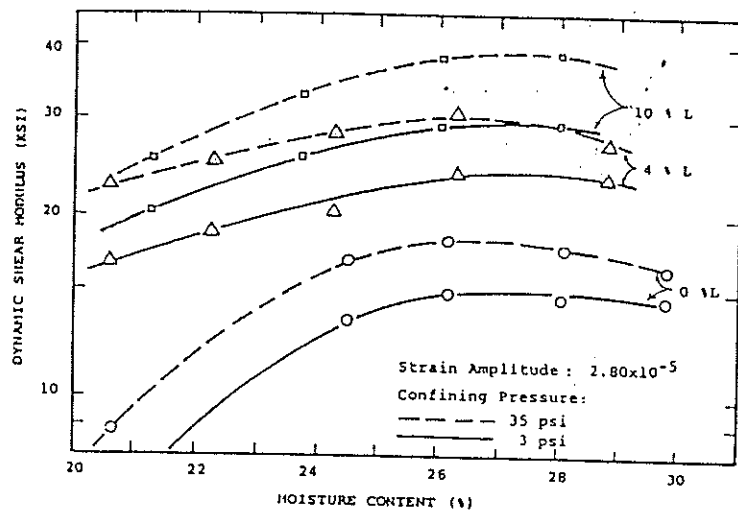


図2.4.3-1 せん断弾性係数 G と静的偏差応力 σ_d の関係



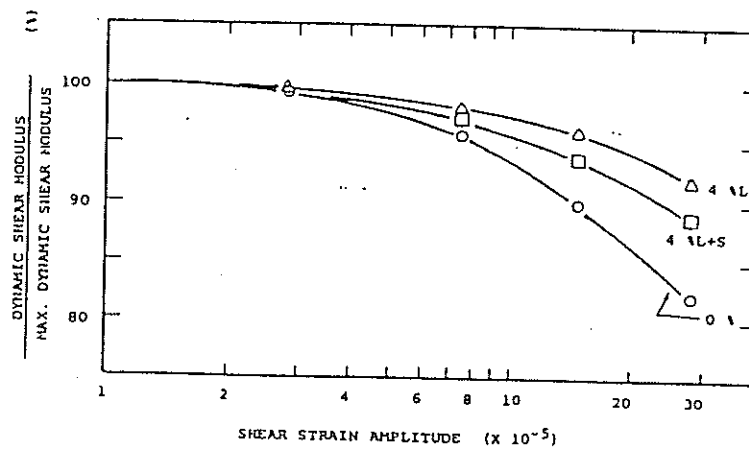
ベントナイト

図2.4.3-2 せん断弾性係数 G と拘束圧の関係



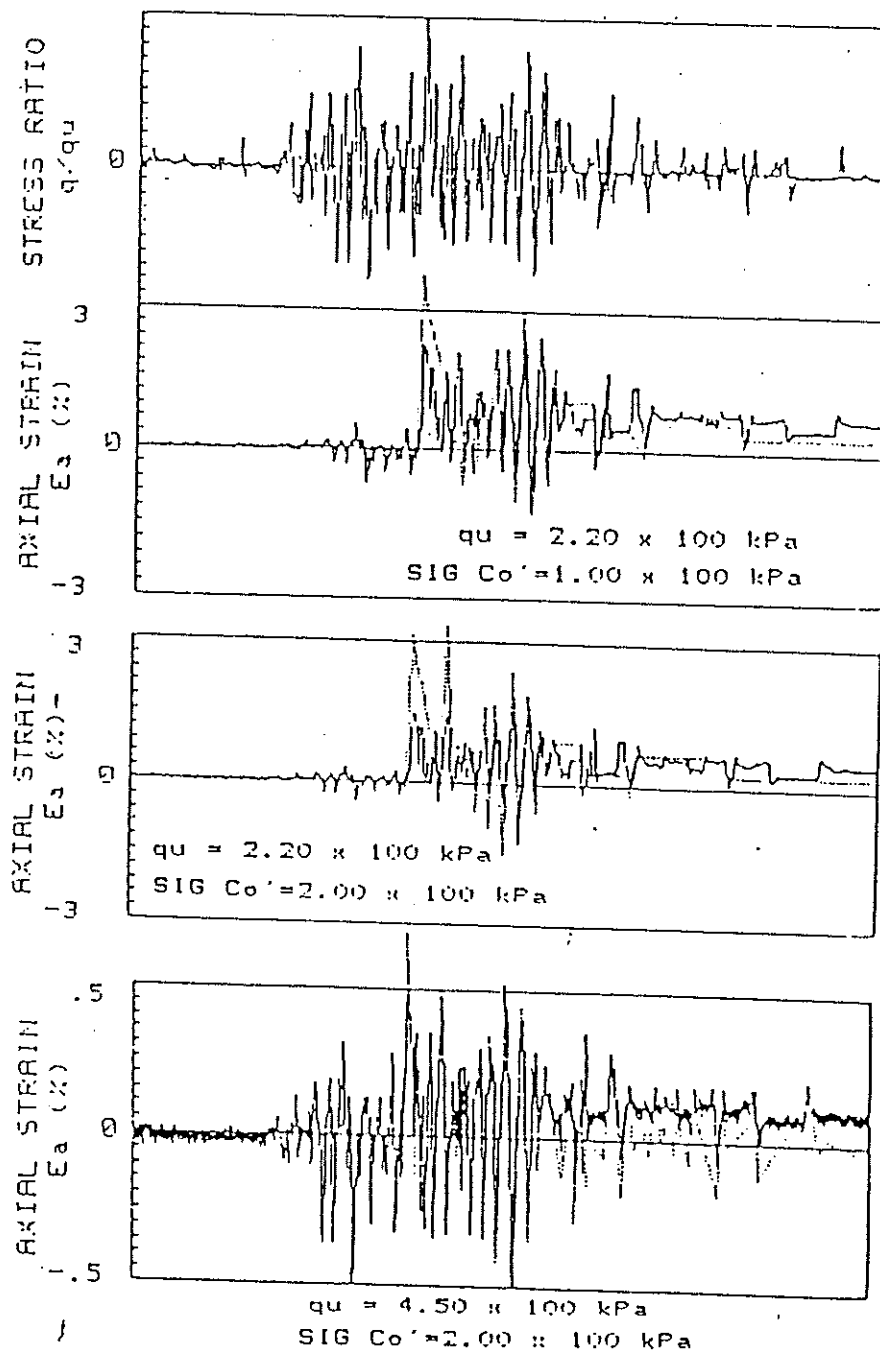
ベントナイト

図2.4.3-3 せん断弾性係数 G と含水量の関係



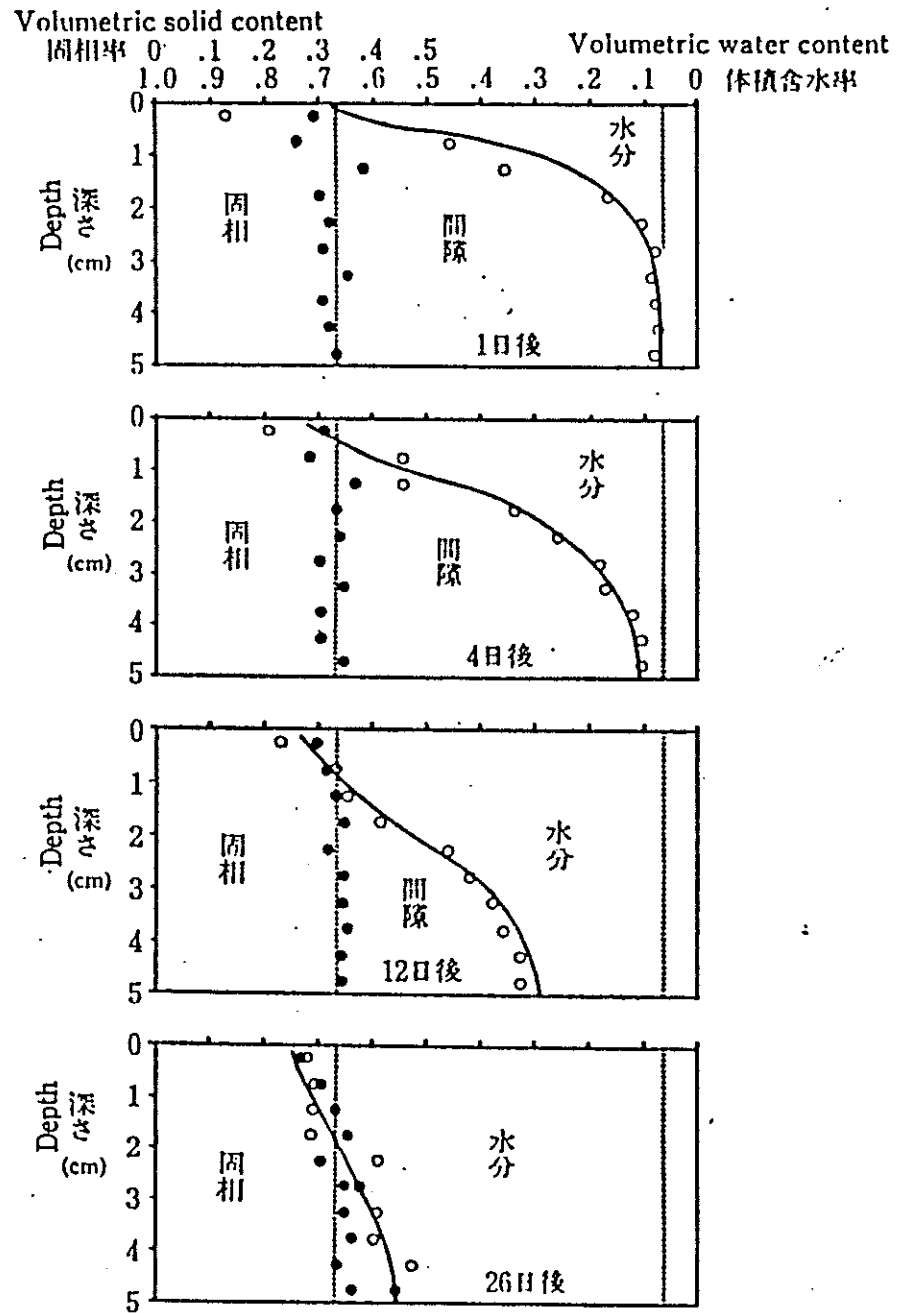
ベントナイト

図2.4.3-4 せん断弾性係数 G / 初期せん断弾性係数 G_{max} とせん断ひずみの関係



十勝沖地震 (1968) 余震・青森 (EW)

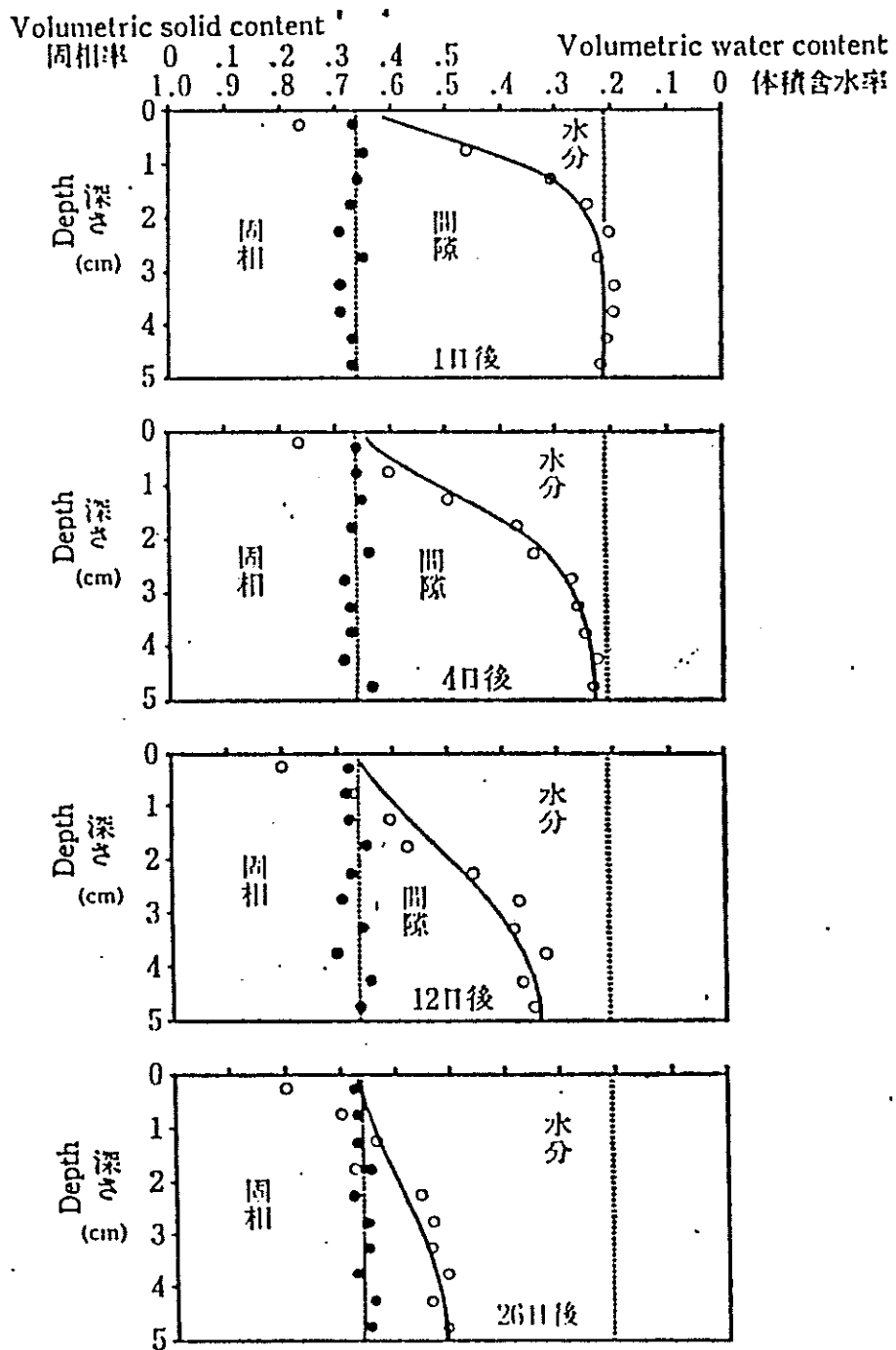
図2.4.3-5 三軸試験装置で不規則載荷を加えた場合の軸ひずみの変化



Changes of water and solid profiles with time

図2.5.2-1 水分分布と固相分布の変化

(実験データ=プロット、計算値=実線)



(pF 5.0 水分試料)

Changes of water and solid profiles with time

図2.5.2-2 水分分布と固相分布の変化

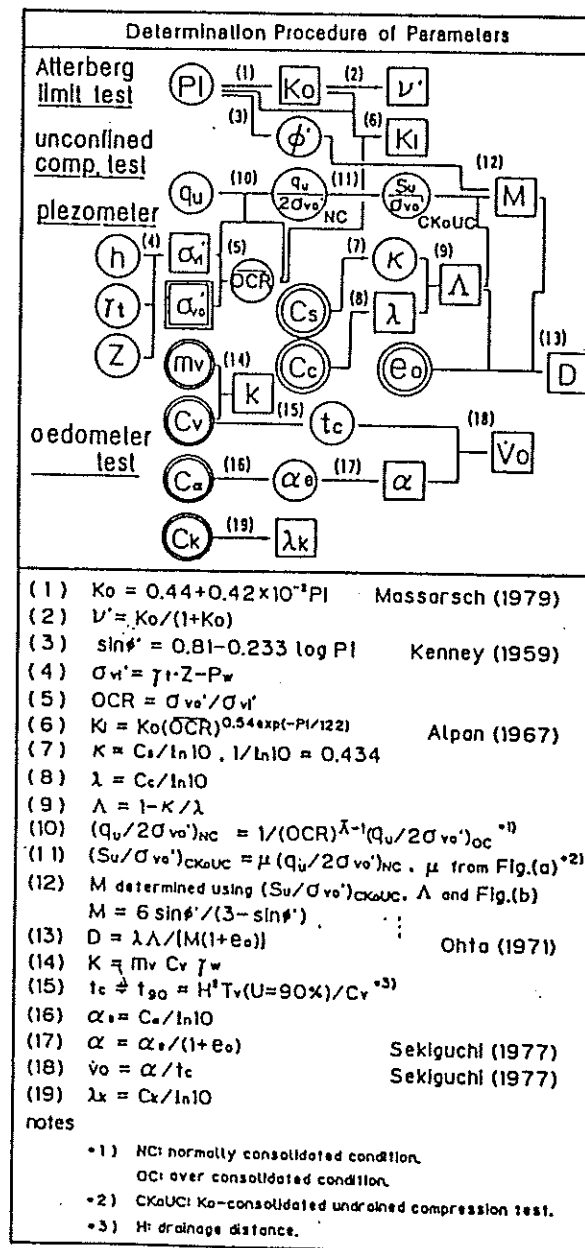
(実験データ=プロット、計算値=実線)

入力パラメーターとその試験方法¹⁾

	analysis parameter	main laboratory test	remarks
material properties	Λ irreversibility ratio	triaxial consolidation test	$\Lambda = 1 - \frac{\nu_p'}{\lambda}$
	M critical state parameter	triaxial CU test	$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$
	D coefficient of dilatancy	triaxial CD ($p^* = \text{const.}$) test	$D = \frac{\lambda - \kappa}{M(1 + e_0)}$
	ν^* effective poisson ratio	triaxial CU test	G
	α coefficient of secondary compression	triaxial consolidation test	$\alpha = \frac{d\nu}{d(\ln t)}$
	$\dot{\nu}_0$ initial volumetric strain rate	triaxial consolidation test	$\dot{\nu}_0 = \alpha / t_c$
preconsolidation stress	σ_{v0}' preconsolidation vertical pressure	oedometer test	
	K_0 coefficient of earth pressure at rest	triaxial K_0 -consolidation test	
initial stress	σ_{vi}' effective overburden pressure	unit weight test	$\sigma_{vi}' = \gamma z$ ⁴⁾
	K_I coefficient of in-situ earth pressure at rest	triaxial K_0 -swelling test	
	k coefficient of permeability	permeability test	$k = \gamma_w m_v c_v$

stress parameter $\eta_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{ij} - \sigma_{jj})^2 + (\sigma_{ji} - \sigma_{ii})^2 + (\sigma_{ij} - \sigma_{ji})^2 + (\sigma_{ji} - \sigma_{ii})^2 + (\sigma_{ij} - \sigma_{ii})^2 + (\sigma_{ji} - \sigma_{ii})^2]}$ ⁵⁾

- 1) $\lambda = 0.434 C_c$, $\kappa = 0.434 C_s$ 4) z : depth from ground surface
 2) G: elastic shear modulus 5) σ_{ij}' : effective stress tensor
 3) t_c : time at the end of primary consolidation

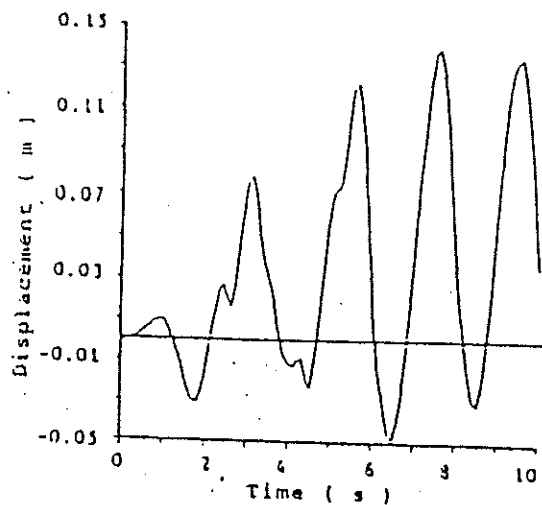


入力パラメーターの決定チャート

図2.6-1 関口～太田モデルにおける入力パラメータ取得のための実験と推定手順

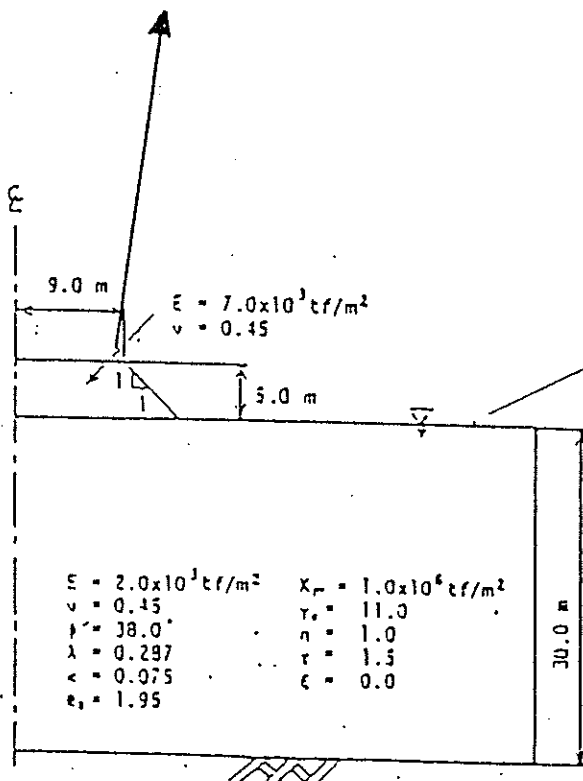
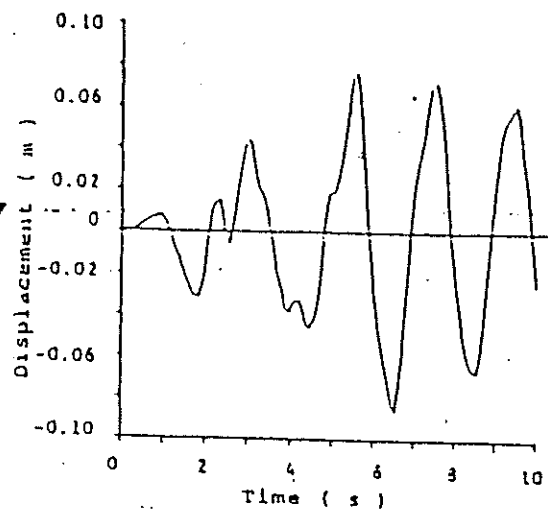
EL-Centro N-S波（最大加速度0.1g）を用いた解析

盛土天端



天端での残留変位が表現されている。

表面



Embankment-Clay ground system analyzed

図2.6-2 INSモデルによる解析事例

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、周波数領域間の変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2つの解析結果を比較したものであるが、両者の違いを明確ではない。これに対し図3.2-2 は同じ結果を周波数領域で比較したグラフであるが、これによると高振動数領域での両者の違いが明確である。

(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. 4 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. 周波数応答解析機能（複素応答解析）

（1）複素応答解析の理論の概略

動的線型解析での離散化した運動方程式は次式で表現される。

$$[M] \{\ddot{u}_t\} + [C] \{\dot{u}_t\} + [K] \{u_t\} = p_t \quad (3.3-1)$$

$[M]$: 質量マトリクス $[K]$: 剛性マトリクス

$[C]$: 減衰マトリクス p_t : 外力

$\{u\}$: 変位ベクトル

ただし、 $p_t = p(k \cdot \Delta t)$ $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N$

いま、時間間隔 Δt ごとの N 個の時系列の p_t を調和励振力の和で近似する（フーリエ級数近似）ことができる。

$$p_t = \operatorname{Re}\left(\sum_{l=1}^{N/2} P_l e^{i\omega_l t}\right) \quad (3.3-2)$$

ここで、

$$\omega_l = 2\pi l/N \Delta t \quad l = 1, 2, 3, \dots, N/2 \quad (3.3-1)$$

$$P_l = \begin{cases} (1/N) \sum_{k=0}^{N-1} P_k e^{-i\omega_l k \Delta t} & s = N/2 \\ (2/N) \sum_{k=0}^{N-1} P_k e^{-i\omega_l k \Delta t} & s = 1, 2, \dots, (N/2)-1 \end{cases} \quad (3.3-4)$$

とする。

調和励振力に対しては応答も調和振動することから、

$$\{u_t\} = \operatorname{Re} \left(\sum_{i=1}^{N/2} \{U\}_i e^{i\omega_i t} \right) \quad (3.3-5)$$

となる。

ω_i についてのみ考えると(3.3-1)、(3.3-2)、(3.3-5) より次のことが成立する。

$$-\omega^2 [M] \{U\}_i e^{i\omega_i t} + i\omega [C] \{U\}_i e^{i\omega_i t} + [K] \{U\}_i e^{i\omega_i t} = P_i e^{i\omega_i t} \quad (3.3-6)$$

両辺を $e^{i\omega_i t}$ で割ってまとめると、

$$([K] + i\omega [C] - \omega^2 [M]) \{U\}_i = \{P\}_i \quad (3.3-7)$$

したがって、式(3.3-7) を $N/2$ 個の周波数について解いてそれぞれの $\{U\}_i$ を求めれば、式(3.3-5) から、応答値が判明する。

(2) 解法

① 時間領域から周波数領域への変換

式(3.3-2) (地震波のフーリエスペクトル解析) 等で必要となる時間領域から周波数領域での変換 (フーリエ変換) においては, J. W. Cooley と J. W. Tukey による高速フーリエ変換 (FFT) を用いる。通常のフーリエ変換のアルゴリズムでは 2^N 個のデータに対して、 2^{2N} 回の計算が必要であるが FFT では $2^N \times N$ 回ですみデータ数が多い場合は有利となる。今回、コードで使用する FFT については時間領域でのデータ数が 2 の累乗個の場合のみ適用が可能なアルゴリズムを用いる。時間領域でのデータ数が 2 の累乗個でない場合、例えばデータ数 $N=800$ の場合はデータのあとに振幅 0 のデータを付加することにより 2 の累乗個となるようにする。 $N=800$ の場合であれば、224 個のデータを付加することにより、 $1024=2^{10}$ 個のデータとする。この作業は、コードにて自動的に実行される。データを 2 の累乗個に限る理由については任意個のデータのフーリエ変換を行う FFT のアルゴリズムでは、データ数が素数の場合多くの時間がかかり FFT のメリットは失われること、振幅 0 のデータを付加によりリンク効果を低減できることによる。

② 複素マトリクスをもつ方程式の解法

式(3.3-7) の周波数空間での弾性体運動方程式

$$[-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K^*]] \{U\} = \{P\}$$

(注) K^* は履歴減衰を考慮にいれた複素剛性マトリクス

においてそれぞれのマトリクスは次のようになる。

[M] : 実対称行列 (質量)

[C] : 実対称行列 (レーリー減衰及び相互作用)

[K*] : 複素対称行列 (剛性)

U_i : 複素変位ベクトル (未知ベクトル)

P_i : 複素荷重ベクトル

ω : 角周波数

(注) 今回のコード改良においては P_i 複素荷重ベクトルは、地震荷重のみを考える。

(3.3-7) 式の解法について簡単にまとめると各 ω ごとに

① $[-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K^*]]$ の(LDL^T) 分解

[L] : 左下三角行列 (スカイライン全体行列)

[D] : 複素対角行列

② 前進・後退代入法により応答変位の取得

$$\{U\}_i = (LDL^T) \{P\}_i$$

③ 複素ひずみ ε^*_{ij} の取得

$$\{\varepsilon^*\} = [B] \{U\}_i$$

④ 複素応力 σ^*_{ij} の取得

$$\{\sigma^*\} = [D] \circ \{\varepsilon^*\}$$

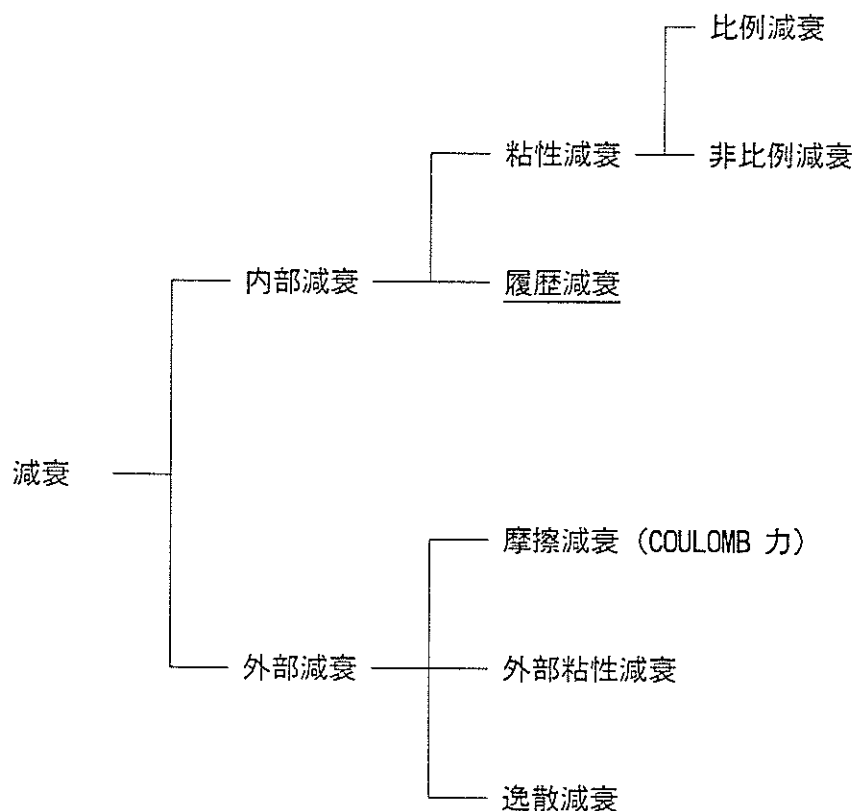
[D] $\circ$: 複素弾性行列

を繰り返す。

3. 4. 履歴減衰の導入

(1) 減衰機構

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。履歴減

衰の効果について3. 3章(3.3-7) 式の複素剛性マトリクス $[K^*]$ により反映される。以下に、簡単な1質点系での粘性減衰、履歴減衰の比較についてまとめる。

(2) 粘性減衰

質量 M ，バネ定数 K なる1質点系に減衰定数 C のダッシュポットで表される粘性減衰を与えた場合の運動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad x : \text{変位} \quad (3.4-1)$$

(3.4-1) 式からわかるように、減衰力 Cx は速度（すなわち周波数）に比例する。(3.4-1) 式より自由振動の時の式を定めると

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (3.4-2)$$

となる。

この式を初期条件 $t=0$ で、 $x=x_0$ ， $\dot{x} = 0$ のもとに(3.4-2) を解くと

$$x = (x_0/(1-h^2)^{1/2})e^{-h\omega_0 t} \cos((1-h^2)^{1/2} \omega_0 t - \psi) \quad (3.4-3)$$

$$\psi = \tan^{-1}(h/(1-h^2)^{1/2})$$

ω_0 : 固有角振動数

h : 減衰定数

図3.4-1 の上段、下段の図は(3.4-2) 式における波形及び力～変位の関係の概略図を示している。変位最大→変位 0（例えば、A→B）に進むとき減衰力がなければ、蓄えられたエネルギーは全て運動エネルギーになるが、減衰力により一部エネルギーが消費される。（A→B では下図のA b Oが減衰により消散されるエネルギー）

A→Cへの1／2周期に消費されるエネルギー（減衰エネルギー）を式(3.4-3) から求めると

$$\Delta W = 1/2 \cdot Kx_0^2(1 - \exp((-2\pi h)/(1 - h^2)^{1/2})) \quad (3.4-4)$$

ここで、初期ひずみエネルギー $W = 1/2 \cdot Kx_0^2$ （図3.4-1 下図のAaB の面積）を用いてエネルギー消費率 $\Delta W/W$ を求めると

$$\Delta W/W = 1 - \exp((-2\pi h)/(1 - h^2)^{1/2}) \approx 2\pi h \quad (3.4-5)$$

また、1周期で消費されるエネルギーを $\Delta W'$ とすると(3.4-5) 式から

$$\Delta W'/W = 4\pi h \quad (3.4-6)$$

が成り立つ。

(2) 履歴減衰

周波数に依存しない減衰を考慮した振動の式として次の式を考える。

$$M\ddot{x} + (C' / \omega) \dot{x} + Kx = f \quad (3.4-7)$$

C' : 履歴減衰係数

(3.4-7) 式より自由振動の時の式を定めると

$$M\ddot{x} + (C' / \omega) \dot{x} + Kx = 0 \quad (3.4-8)$$

(3.4-8) 式の減衰力項 $(C' / \omega) \dot{x}$ は周波数に依存しない。

$x = \exp(i\omega t)$ を解として想定すれば、(3.4-8) 式は

$$M\ddot{x} + (K + iC') x = 0 \quad (3.4-9)$$

となる。ここで、複素バネ定数 $K^* = K (1 + i (C'/K))$ を導入すれば、

(3.4-8) 式は

$$M\ddot{x} + K^* x = 0 \quad (3.4-10)$$

となる。

(3.4-10)式の解については

$$x = A \exp(-h_H \omega t) \cdot \exp(i \omega t) \quad (3.4-11)$$

A : 定数

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \omega^2 (1 - h_H^2) \\ C'/K = 2h_H (1 - h_H^2)^{1/2} \end{cases} \quad (3.4-12)$$

ω_0 : 固有角振動数

h_H : 等価履歴減衰定数 $h_H = (C' / \omega) / C_{CR}$

C_{CR} : 式(3.4-7)での臨界減衰係数
となる。

h_H が十分小さい場合、(3.4-12)式は

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \omega^2 \\ C'/K = 2h_H \end{cases} \quad (3.4-13)$$

となる。

ところで、式(3.4-13)の下式の右辺の値 C'/K と $\Delta W'/W$ の間には

$$(\Delta W'/W)_{\text{cycle}} = 2\pi \cdot C'/K$$

の関係があるから、

$$(\Delta W'/W)_{\text{cycle}} = 4 \pi h_H \quad \text{または、} \quad (3.4-14)$$

$$(\Delta W'/W)_{\text{rad}} = 2 h_H$$

が成立し、これは形式的には粘性減衰の場合の式(3.4-6)と同じになる。

(3) まとめ

a. 粘性減衰

$$M\ddot{x} + \underline{C\dot{x}} + Kx = f \quad (3.4-15)$$

減衰

b. 履歴減衰

$$M\ddot{x} + \underline{K^* x} = f \quad (3.4-16)$$

減衰含む

$$K^* = K(1 + 2ih_H)$$

以上は1質点系でのことであるが、本コードではこれを拡張した次の運動方程式を解いている。

$$\{-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K^*]\}\{U\} = \{p\}$$

[M] : 質量マトリクス U : 変位ベクトル

[C] : レーリー減衰及び相互作用 p : 外力ベクトル

[K*] : 複素剛性行列

$[K^*]$ が1質点系での式(3.4-16)での複素バネ定数 K^* にあたる。また、減衰としては、粘性減衰であるレーリー減衰も同時に考慮できるようになっている。

(注) 今回、等価線形解析法までの拡張を行わないが、等価線形法では、図3.4-2 の上図のような履歴曲線をもつ非線形な対象物を図3.4-2 の下図のような履歴曲線をもつ等価線形弾性体で近似して計算の簡便化をはかっている。ここで、等価とは一周期のエネルギー消費である $\Delta W'/W$ が等しいことを意味している。

3. 5. 入出力

周波数応答解析機能を付加するに当たり、追加もしくは変更となった入力データ及び解析結果の出力例について簡単にまとめる。

(1) 入力フォーマットの追加、変更

現在、入力データについては下記のようなカードグループに分類されているが、表中の○が記されたカードグループにおいて追加もしくは変更を行った。

カードグループ	追加、変更の有無	備考
CONST		
SCON	○	動的解析での解法の選択
GEOM		
MATR	○	履歴減衰定数の追加
FEM		
BOUN		
SLOA		
TABL		

STEP		
INIT		
FREQ	○	計算、出力に関する周波数の指定
PHST		
EHST		
PDIS		
EDIS		
FPHS	○	節点時刻歴データの出力指定
FEHS	○	要素時刻歴データの出力指定
FPDI	○	節点データの分布出力
FEDI	○	要素データの分布出力

追加、変更部分については図3.5-1 ～10に詳述する。

(2) ファイルの追加

機能の追加に伴い次のファイルの追加を行う。

ユニット番号	内容	形式
FT21	ポスト処理用ファイル	LRECL=133 RECFM=FB

(3) 出力例

結果出力に関しては、ユニット番号FT06に次の出力を行う。

- ① 節点もしくは要素番号
- ② 種別
- ③ 周波数
- ④ 周波数に対する複素応答値
- ⑤ 応答値の実部
- ⑥ 応答値の虚部
- ⑦ 位相

詳細については、図3.5-11に示す。

また、AVS による後処理を行うためFT21に次の出力を行う。

- ① 節点もしくは要素番号
- ② 種別
- ③ 周波数
- ④ 周波数に対する複素応答値（絶対値）
- ⑦ 位相

AVS 出力例については、図3.5-12に示す。なお、グラフ出力での対数表示は後処理コードにおいて指定を行う。

（４） 今年度の作業において追加したサブルーチン

今年度のコード改良作業においては、入出力部、地震荷重のフーリエスペクトル解析、周波数応答解析部の変更および追加を行った。追加したサブルーチンおよびその構成については図3.5-13に示す。また、各サブルーチンの詳細については、付録１－変更、追加サブルーチンの詳細に示す。

3. 6. 機能追加部分の検証

3. 6. 1 地震荷重のフーリエ変換ルーチンの検証

(1) 検証方法

次の地震荷重データを用いて手計算結果との比較を行う。

m	0	1	2	3	4	5	6	7
t	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
x_m	0	100	206	200	-100	-50	-50	100

(2) フーリエ係数の計算

複素フーリエ係数 C_k

$$C_k = 1/N \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi k m/N)}$$

手計算により $C_0 \sim C_3$ を求めると,

$$C_0 = 1/8 \quad (x_0 + x_1 + \dots + x_7)$$

$$= 50$$

$$C_1 = 1/8 \quad (x_0 + x_1 e^{-i(\pi/4)} + \dots + x_7 e^{-i(7\pi/4)})$$

$$= 16.915 - 53.34i$$

$$C_2 = 1/8 \quad (x_0 + x_1 e^{-i(\pi/2)} + \dots + x_7 e^{-i(7\pi/2)})$$

$$= -31.25 + 31.25i$$

$$C_3 = 1/8 \quad (x_0 + x_1 e^{-i(3\pi/4)} + \dots + x_7 e^{-i(21\pi/4)})$$

$$= 8.081 + 9.135i$$

(3) コードによる計算結果

$$C_0 = 5.000E+01$$

$$C_1 = 1.692E+01 - (5.335E+01)i$$

$$C_2 = -3.125E+01 + (3.125E+01)i$$

$$C_3 = 8.081E+00 + (9.135E+00)i$$

(4) 結果

以上のように手計算，コードによる計算結果は一致した。

3. 6. 2 周波数応答解析の検証

(1) 検証方法

1 相系モデルを用いて材質の減衰を考慮せずに時間領域で動的解析を行い、これを F F T により周波数領域に変換した値と周波数応答解析を行った結果との比較を行った。

(2) 検証用モデルの形状と境界条件

図3. 6. 2-1 に示す矩形のモデルを用いて解析を実施した。最下部、最上部の4節点についてはX, Y, Z方向とも拘束をおこなった。

(3) 物性値

8つの要素全てについて、ヤング率 $1.2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.4、重量密度 $1.0 \times 10 \text{ gf/cm}^3$ を用いた。

(4) 入力波形

入力加振波は水平方向の最大加速度 100 gal 、周波数 2 Hz の正弦波を用いた。加振荷重の入力のステップ間隔(Δt)は 0.002 秒として、 4096 ステップの入力を行った。

(5) 解析結果

比較は変位、加速度については変位がもっとも大きいと予想される節点17、応力については要素5にて行った。時間領域で解析を行った結果と周波数領域にて解析を行った結果は図3.6.2-2 に変位、加速度の比較を図3.6.2-3 ～4 に応力の計算結果の比較を示す。両者はほぼ一致した。

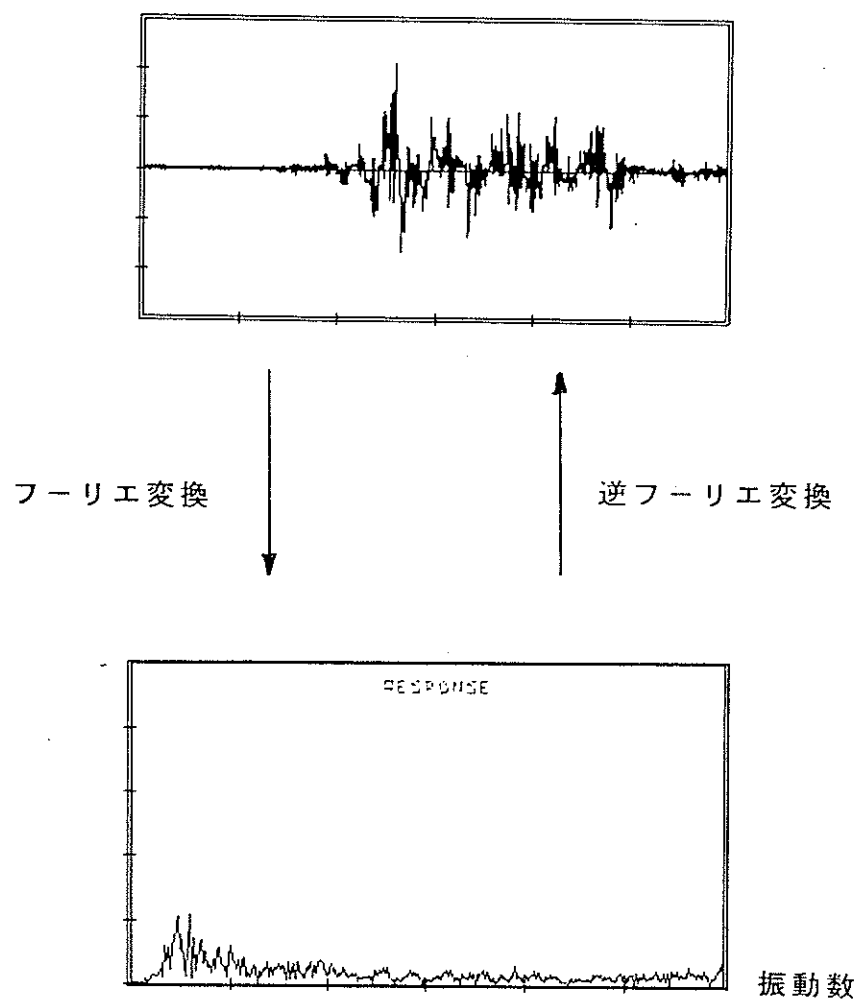


図3.1-1 時間領域と周波数領域

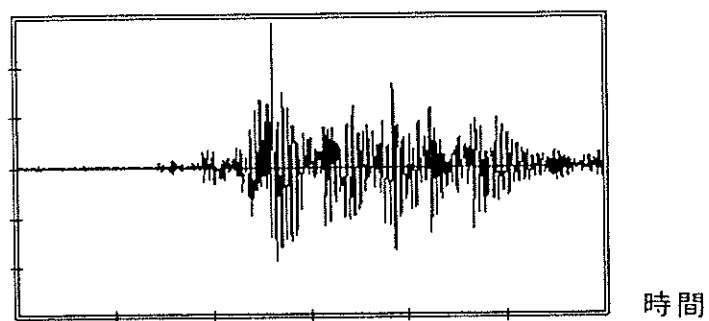
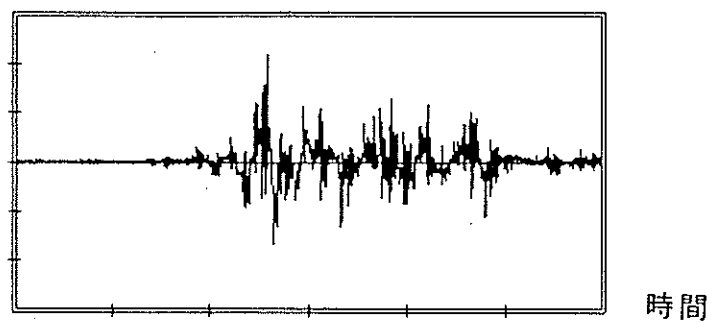
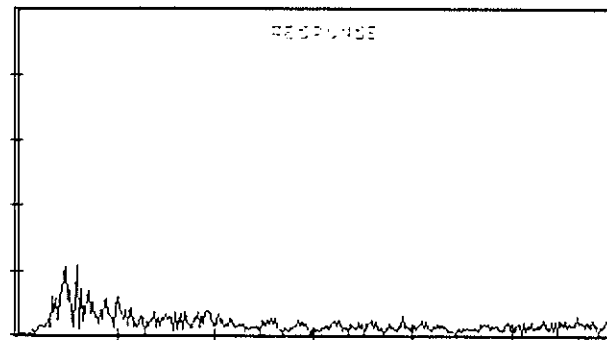
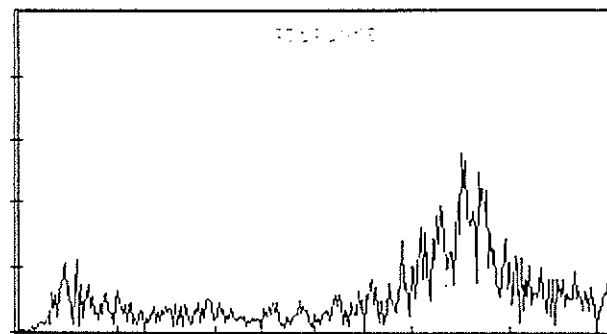


図3.2-1 時間領域での比較



振動数



振動数

図3.2-2 周波数領域での比較

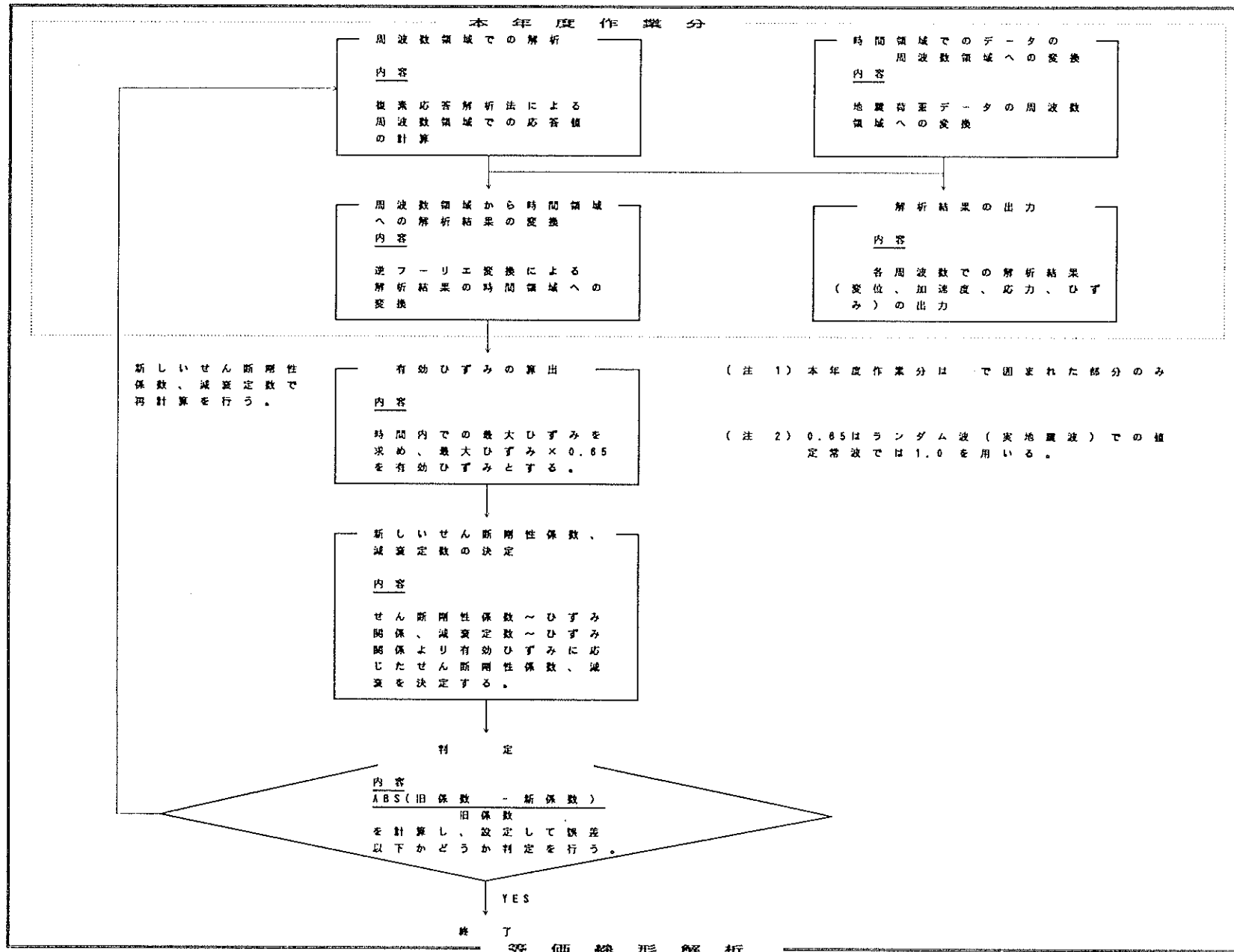
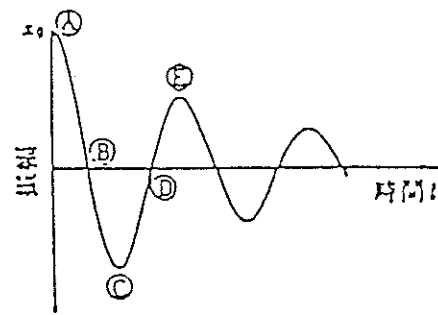


図3.2-3 本年度作業内容と等価線形解析



履歴ループ

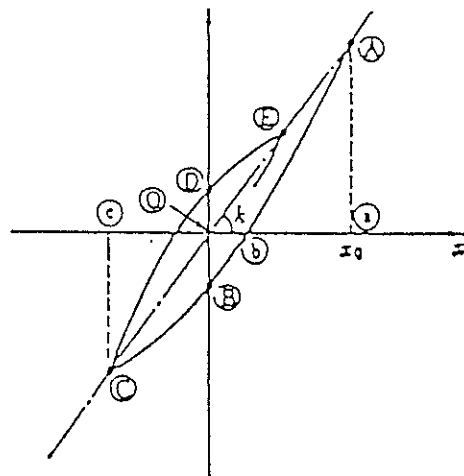
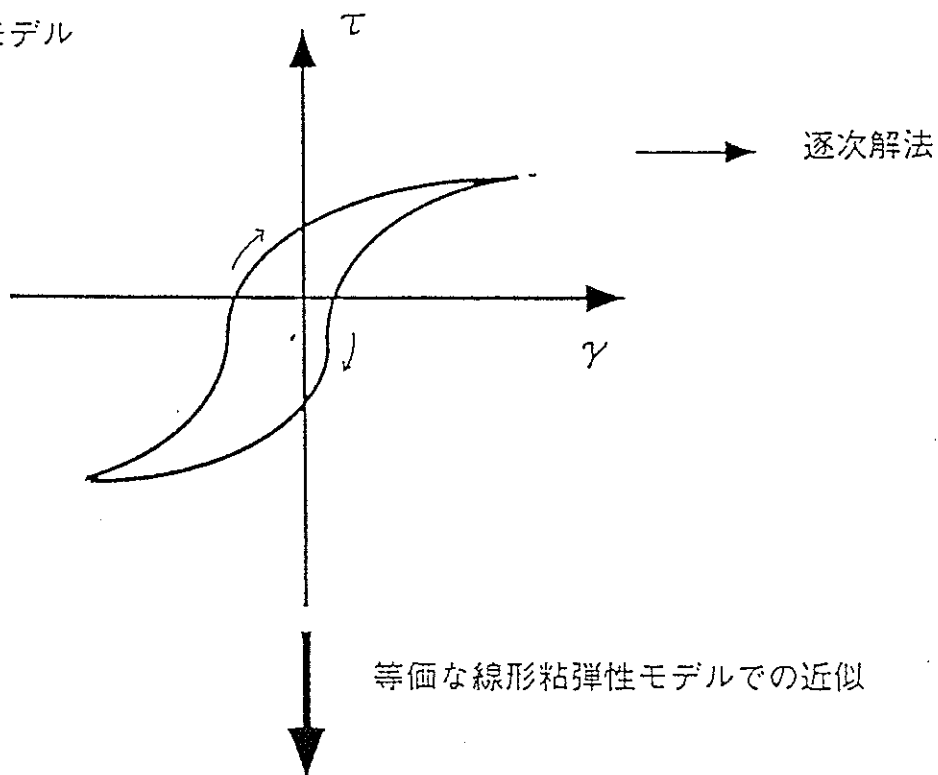
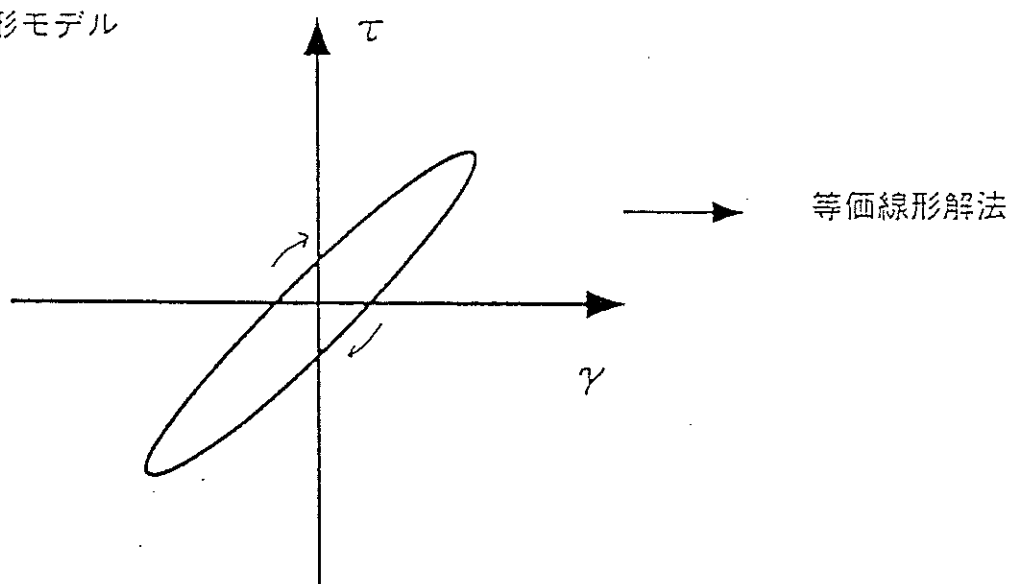


図3.4-1 変位と力の関係

非線形モデル



等価線形モデル



(注) 等価であるとは損失係数 $\Delta w/w$ が等しいことを意味する。

図 3.4-2 逐次解法と等価線形解法

[illegible]

VARIABLE	COLUMNS	ENTRY
DYNA	1~4	方程式の解法指示
METH	10~14	'INTE' = 直接積分法
		'FREQ' = 周波数応答解析法

図3.5.1-1 運動方程式の解法

VARIABLE	COLUMNS	ENTRY
R7	31 ~ 40	土骨格のせん断弾性係数 (虚数部)
R8	41 ~ 50	土粒子の体積弾性係数 (実数部)
R9	51 ~ 60	土粒子の体積弾性係数 (虚数部)
R10	61 ~ 70	水の体積弾性係数 (実数部)
IC	72	継続指示 (以下3レコード目)
R11	21 ~ 30	水の体積弾性係数 (虚数部)

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
R17	31 ~ 40	土骨格のレーリー減衰係数 2
R18	41 ~ 50	水のレーリー減衰係数 1
R19	51 ~ 60	水のレーリー減衰係数 2
R20	61 ~ 70	履歴減衰係数

[illegible][illegible]

図3.5.1-3 周波数応答解析設定

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				</			
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----	--	--	--

VARIABLE	COLUMNS	ENTRY
FTIM	1 ~ 4	ヘッダー'FTIM'の記入
DT	11 ~ 15	地震荷重データの時間間隔

図3. 5. 1-4 地震荷重データの継続時間

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
ETPN	1～ 4	ヘッダー'ETPN'の記入
DT1	11～ 20	最初の時間点間隔
NT1	21～ 25	DT1 で解析する時間点数
DT2	31～ 40	2 番目の時間点間隔
NT2	41～ 45	DT2 で解析する時間点数
DT3	51～ 60	3 番目の時間点間隔
NT3	61～ 65	DT3 で解析する時間点数

$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$

[illegible][illegible]

図3.5.1-6 節点値周波数応答データの出力指定

[illegible]

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
DISP	1～4	ヘッダー 'DISP' の記入
NODS	11～15	節点値の出力を開始する節点番号
NODE	16～20	節点値の出力を終了する節点番号
NDI	21～25	節点値を出力する節点番号の増分
K1	26～27	UU成分の出力指定
K2	28～29	WW成分の出力指定

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
K9	42~ 43	ML成分の出力指定
IOPT	46~ 49	変位、速度、加速度の出力指定

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
K3	30~31	WM成分の出力指定
K4	32~33	TU成分の出力指定
K5	34~35	TV成分の出力指定
K6	36~37	TW成分の出力指定
K7	38~39	UL成分の出力指定
K8	40~41	VL成分の出力指定

図3.5.1-7 節点値周波数応答データの出力設定

[illegible][illegible]

図3.5.1-8 要素値周波数応答データの出力指定

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
STRS	1 ~ 4	ヘッダー' STRS' の記入
IAL	8 ~ 10	' ALL' で全成分
IELS	11 ~ 15	応力出力を開始する要素番号
IELE	16 ~ 20	応力出力を終了する要素番号
IELI	21 ~ 25	応力を出力する要素番号の増分
ICMP1	26 ~ 30	出力成分 (IAL フラグで有効)

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
ICMP2	31 ~ 35	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP3	36 ~ 40	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP4	41 ~ 45	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP5	46 ~ 50	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP6	51 ~ 55	出力成分 (IAL フォンで有効)

図3.5.1-9 応力値周波数応答データの出力設定

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
STRN	1～ 4	ヘッダー'STRN'の記入
IAL	8～ 10	'ALL'で全成分
IBLS	11～ 15	応力出力を開始する要素番号
IBLE	16～ 20	応力出力を終了する要素番号
IBLI	21～ 25	応力を出力する要素番号の増分
ICMP1	26～ 30	出力成分 (IAL カラで有効)

図3.5.1-10 ひずみ周波数応答データの出力設定

[illegible]

VARIABLE	COLUMNS	ENTRY
PORE	1 ~ 4	ヘッダー' PORE' の記入
IAL	8 ~ 10	' ALL' で全成分
IELS	11 ~ 15	応力出力を開始する要素番号
IELE	16 ~ 20	応力出力を終了する要素番号
IELI	21 ~ 25	応力を出力する要素番号の増分
ICMPI	26 ~ 30	出力成分 (IAL フォンで有効)

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
ICMP2	31 ~ 35	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP3	36 ~ 40	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP4	41 ~ 45	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP5	46 ~ 50	出力成分 (IAL フォンで有効)
ICMP6	51 ~ 55	出力成分 (IAL フォンで有効)

図3.5.1-11 間隙水圧周波数応答データの出力設定

[illegible][illegible]

図3.5.1-12 節点値分布データの出力指定

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
D I S P				F R E Q U E N C Y																K T N				I O P T																																																							

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
DISP	1 ~ 4	ヘッダー 'DISP' の記入
FREQUENCY	11 ~ 20	出力する周波数
NTM	21 ~ 25	出力する計算点番号
LOPT	26 ~ 30	変位、速度、加速度のオプション

図3.5.1-13 節点分布データの出力設定

[illegible][illegible]

図3.5.1-14 要素値分布データの出力指定

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
S T R S				F R E Q U E N C Y																N Y M																																																											

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
STRS	1 ~ 4	ヘッダー 'STRS' を記入
FREQUENCY	11 ~ 20	出力する周波数
NTM	21 ~ 25	出力する計算番号

図3.5.1-15 応力分布の出力設定

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
P O R E												F R E Q U E N C Y										N I N																																																								

VARIABLE	COLUMN	ENTRY
PORE	1 ~ 4	ヘッダー 'PORE' を記入
FREQUENCY	11 ~ 20	出力する周波数
NTM	21 ~ 25	出力する計算番号

図3.5.1-17 間隙水圧の出力設定

```

CONT-----
TITL SEISMIC ANALYSIS MODEL (3DIMENSION SAMPLE MODEL)
RUN INIT 0.3 0.25 1.E-3 20
PARM 3D
PROB 1
PHAS 980
GRAV 1
FILE 1
SCON-----
STTL DYNAMIC ANALYSIS
EXEC DYNA
SOLV NONL
DYNA FREQ
----- (UNIT=CM ) -----
GEOM
NODE 1 0.000 0.000 0.000
NODE 2 10.000 0.000 0.000
NODE 3 10.000 10.000 0.000
NODE 4 0.000 10.000 0.000
NODE 5 0.000 0.000 10.000
NODE 6 10.000 0.000 10.000
NODE 7 10.000 10.000 10.000
NODE 8 0.000 10.000 10.000
NODE 9 0.000 0.000 20.000
NODE 10 10.000 0.000 20.000
NODE 11 10.000 10.000 20.000
NODE 12 0.000 10.000 20.000
NODE 13 0.000 0.000 30.000
NODE 14 10.000 0.000 30.000
NODE 15 10.000 10.000 30.000
NODE 16 0.000 10.000 30.000
NODE 17 0.000 0.000 40.000
NODE 18 10.000 0.000 40.000
NODE 19 10.000 10.000 40.000
NODE 20 0.000 10.000 40.000
NODE 21 0.000 0.000 50.000
NODE 22 10.000 0.000 50.000
NODE 23 10.000 10.000 50.000
NODE 24 0.000 10.000 50.000
NODE 25 0.000 0.000 60.000
NODE 26 10.000 0.000 60.000
NODE 27 10.000 10.000 60.000
NODE 28 0.000 10.000 60.000
NODE 29 0.000 0.000 70.000
NODE 30 10.000 0.000 70.000
NODE 31 10.000 10.000 70.000
NODE 32 0.000 10.000 70.000
NODE 33 0.000 0.000 80.000
NODE 34 10.000 0.000 80.000
NODE 35 10.000 10.000 80.000
NODE 36 0.000 10.000 80.000
MATR-----
MTR1HEXA8 1 1 0 18.2857 0.0 0.4
C
C
1.00E-3
FEM-----
ELEM 101HEXA8 1 1 2 3 4 5 6 7 8
ELEM 102HEXA8 1 5 6 7 8 9 10 11 12
ELEM 103HEXA8 1 9 10 11 12 13 14 15 16
ELEM 104HEXA8 1 13 14 15 16 17 18 19 20
ELEM 105HEXA8 1 17 18 19 20 21 22 23 24
ELEM 106HEXA8 1 21 22 23 24 25 26 27 28
ELEM 107HEXA8 1 25 26 27 28 29 30 31 32
ELEM 108HEXA8 1 29 30 31 32 33 34 35 36
BOUN-----
NODB 1 111000000
NODB 2 111000000
NODB 3 111000000
NODB 4 111000000
NODB 5 001000000
NODB 6 001000000
NODB 7 001000000
NODB 33 001000000
NODB 34 001000000
NODB 35 001000000
NODB 36 001000000
SLOA-----
EART 111 1.0 0.0 0.0 1.0
TFNC 111 555
TABL-----
FTAB 555 0.000E+00 0.000E+00 1.000E-02 1.224E+01 2.000E-02 2.430E+01 C
3.000E-02 3.599E+01 4.000E-02 4.714E+01 5.000E-02 5.758E+01 C
6.000E-02 6.715E+01 7.000E-02 7.572E+01 8.000E-02 8.314E+01 C
9.000E-02 9.932E+01 1.000E-01 9.415E+01 1.100E-01 9.757E+01 C
1.200E-01 9.952E+01 1.300E-01 9.997E+01 1.400E-01 9.892E+01 C
1.800E-01 8.033E+01 1.900E-01 7.243E+01 2.000E-01 6.345E+01 C
5.130E+00 1.185E+01 5.140E+00 2.392E+01 5.150E+00 3.362E+01 C
5.160E+00 4.679E+01 5.170E+00 5.726E+01 5.180E+00 6.686E+01 C
5.190E+00 7.546E+01 5.200E+00 8.292E+01 5.210E+00 8.914E+01 C
INIT-----
FDCM-----
FTIM 0 500
ETPT 0.01 500
FPFS-----
DISP 5 100 0001
DISP 33 100 0001
FEHS-----
PORE ALL 109
FPDI
DISP 200 0101
EDIS
STRN 300 0101
END

```

図3.5.1-18 入力データ例

出力例

節点番号		方向		種別	
↓		↓		↓	
NODE NO. = 41		MI=UU		DISPLACEMENT	
NO.	HE LZ	REAL	IMAG	ABS	PHASE
1	1.000E-01	1.745E-05	-2.699E-06	1.766E-05	-8.8
2	3.000E-01	1.720E-05	-2.632E-06	1.740E-05	-8.7
3	5.000E-01	1.751E-05	-2.762E-06	1.772E-05	-9.0
4	7.000E-01	1.818E-05	-3.065E-06	1.843E-05	-10.6
5	9.000E-01	1.924E-05	-3.613E-06	1.957E-05	-12.4
6	1.100E+00	2.077E-05	-4.584E-06	2.127E-05	-15.6
7	1.300E+00	2.287E-05	-6.388E-06	2.374E-05	-21.4
↑	↑	↑	↑	↑	↑
周波数	実部	虚部	応答値	位相	
E10.3	E10.3	E10.3	E10.3	F6.3	

図3.5.1-19 出力結果

各周波数に対する応答値

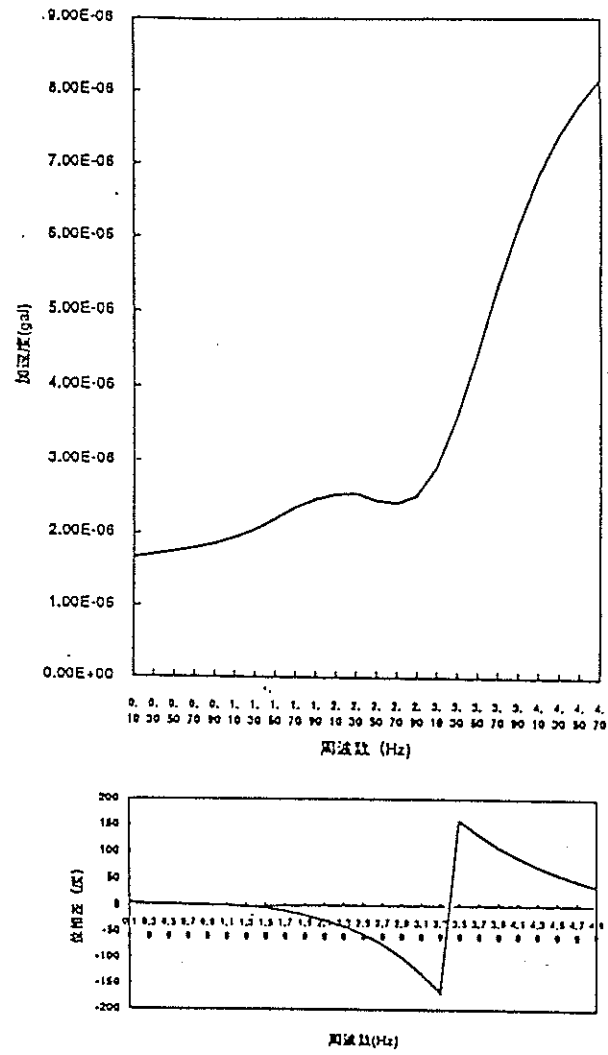
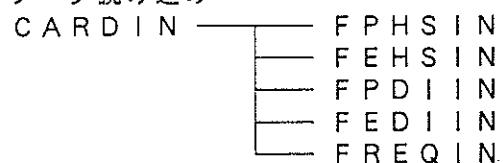


図3.5.1-20 解析結果のポスト処理例（周波数応答図）

プログラム構成（改良，追加部分のみ）

・データ読み込み



・周波数応答解析

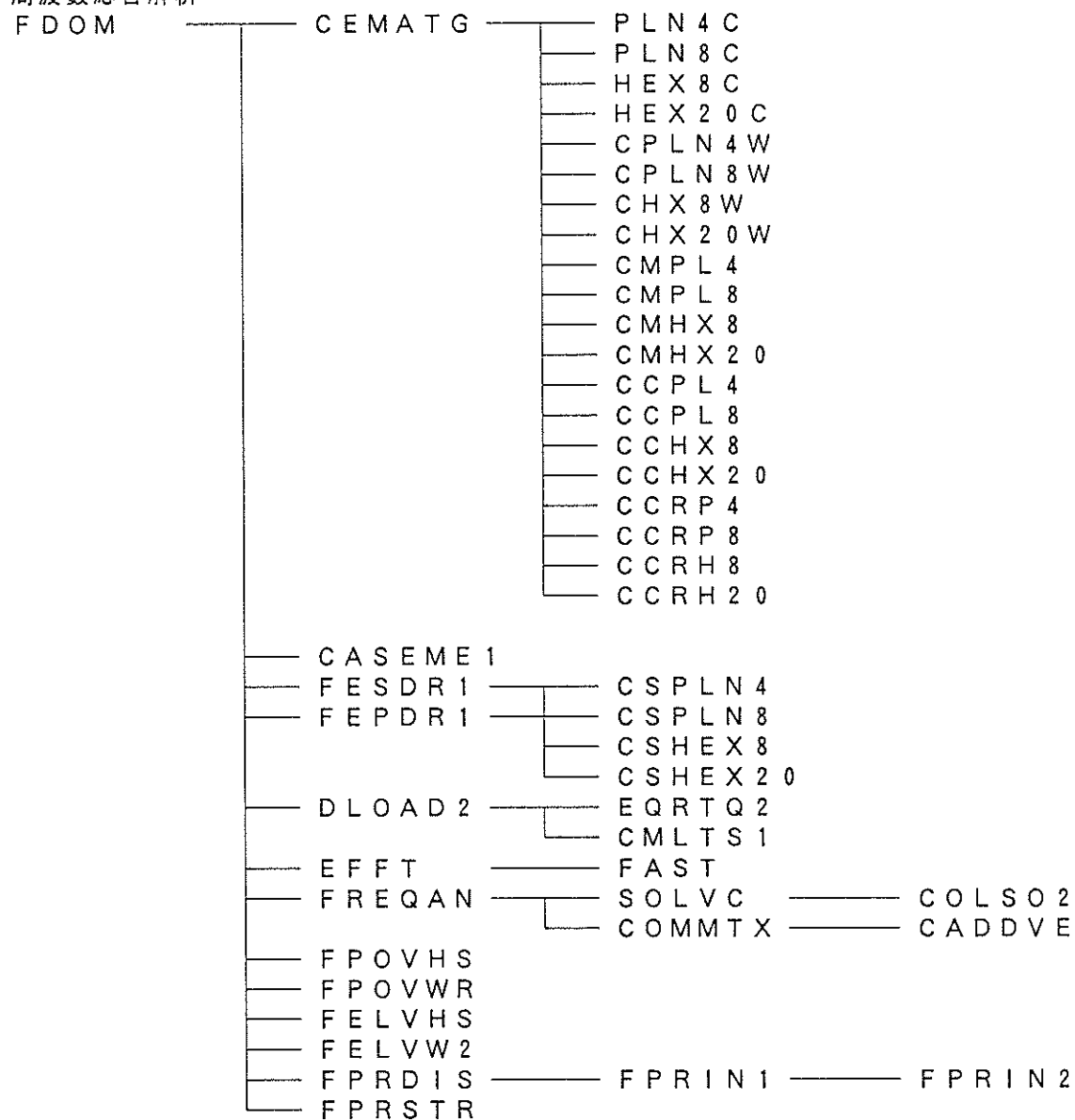
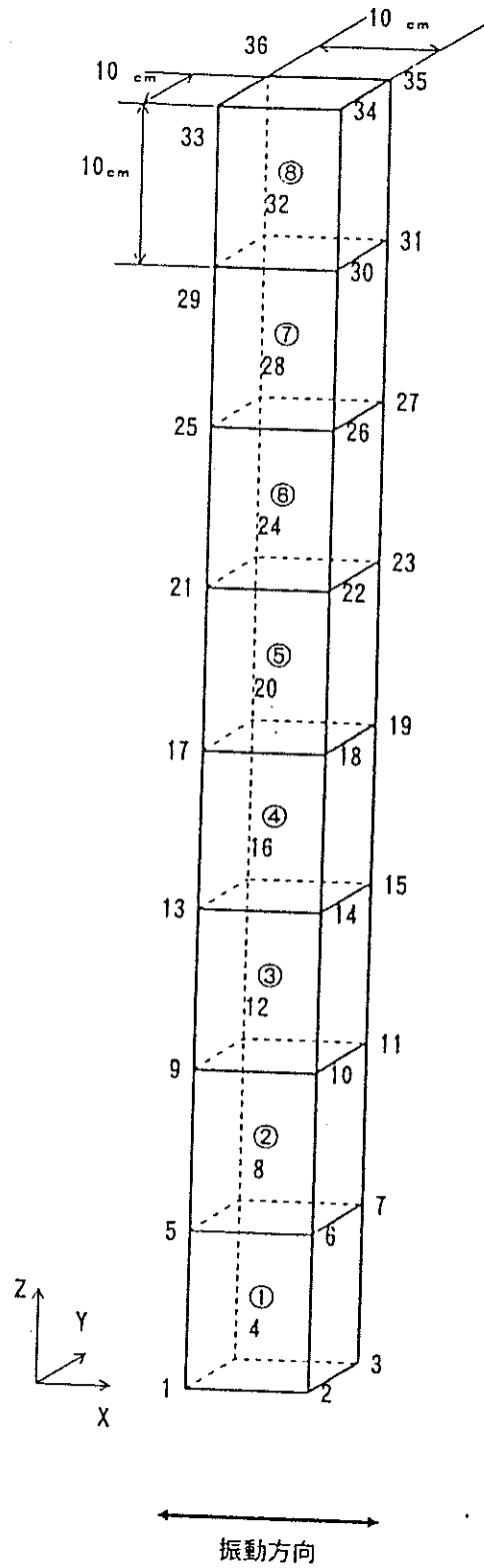


図3.5.1-21 追加サブルーチンの構成



拘束条件

節点 1 ~ 4 : X, Y, Z
 節点 33 ~ 36 : X, Y, Z

図中の数字は節点番号、丸数字は要素番号を示している。

図3.6.2-1 検証用モデル図

時間領域での解析結果の変換値

NO.	HELZ	REAL	IMAG	ABS	PHASE
1	0.000E+00	-2.432E-04	0.000E+00	2.432E-04	0.0
2	1.721E-01	-2.447E-04	-5.750E-06	2.447E-04	-88.7
3	2.441E-01	-2.470E-04	-1.153E-05	2.472E-04	-87.3
4	3.662E-01	-2.510E-04	-1.778E-05	2.524E-04	-86.0
5	4.883E-01	-2.580E-04	-2.436E-05	2.600E-04	-84.6
6	6.104E-01	-2.685E-04	-3.130E-05	2.704E-04	-83.3
7	7.324E-01	-2.814E-04	-3.989E-05	2.842E-04	-82.0
8	8.545E-01	-2.970E-04	-4.906E-05	3.022E-04	-80.7
9	9.766E-01	-3.151E-04	-6.018E-05	3.239E-04	-79.4
10	1.099E+00	-3.358E-04	-7.382E-05	3.504E-04	-78.1
11	1.221E+00	-3.594E-04	-9.132E-05	4.000E-04	-76.8
12	1.343E+00	-3.853E-04	-1.148E-04	4.599E-04	-75.5
13	1.465E+00	-4.132E-04	-1.483E-04	5.486E-04	-74.3
14	1.587E+00	-4.432E-04	-1.911E-04	6.518E-04	-73.1
15	1.709E+00	-4.753E-04	-2.434E-04	7.779E-04	-71.9
16	1.831E+00	-5.095E-04	-3.051E-04	9.280E-04	-70.7
17	1.953E+00	-5.458E-04	-3.762E-04	1.104E-03	-69.6
18	2.075E+00	-5.842E-04	-4.568E-04	1.312E-03	-68.4
19	2.197E+00	-6.247E-04	-5.469E-04	1.553E-03	-67.3
20	2.319E+00	-6.672E-04	-6.466E-04	1.827E-03	-66.2
21	2.441E+00	-7.117E-04	-7.569E-04	2.134E-03	-65.1
22	2.563E+00	-7.582E-04	-8.770E-04	2.472E-03	-64.0
23	2.686E+00	-8.067E-04	-1.007E-03	2.840E-03	-63.0
24	2.808E+00	-8.572E-04	-1.156E-03	3.239E-03	-61.9
25	2.930E+00	-9.097E-04	-1.324E-03	3.669E-03	-60.9

節点17の変位

周波数領域での解析結果

NO.	HELZ	REAL	IMAG	ABS	PHASE
1	0.000E+00	-2.432E-04	0.000E+00	2.432E-04	0.0
2	1.721E-01	-2.430E-04	-5.704E-06	2.439E-04	-88.7
3	2.441E-01	-2.460E-04	-1.134E-05	2.469E-04	-87.3
4	3.662E-01	-2.514E-04	-1.764E-05	2.520E-04	-86.0
5	4.883E-01	-2.585E-04	-2.418E-05	2.586E-04	-84.7
6	6.104E-01	-2.682E-04	-3.136E-05	2.700E-04	-83.3
7	7.324E-01	-2.810E-04	-3.942E-05	2.800E-04	-82.0
8	8.545E-01	-2.979E-04	-4.874E-05	3.012E-04	-80.7
9	9.766E-01	-3.170E-04	-5.982E-05	3.235E-04	-79.4
10	1.099E+00	-3.403E-04	-7.344E-05	3.569E-04	-78.1
11	1.221E+00	-3.691E-04	-9.086E-05	4.024E-04	-76.8
12	1.343E+00	-4.030E-04	-1.143E-04	4.594E-04	-75.5
13	1.465E+00	-4.420E-04	-1.478E-04	5.480E-04	-74.3
14	1.587E+00	-4.861E-04	-1.905E-04	6.511E-04	-73.1
15	1.709E+00	-5.352E-04	-2.427E-04	7.771E-04	-71.9
16	1.831E+00	-5.893E-04	-3.047E-04	9.272E-04	-70.7
17	1.953E+00	-6.484E-04	-3.762E-04	1.102E-03	-69.6
18	2.075E+00	-7.125E-04	-4.568E-04	1.310E-03	-68.4
19	2.197E+00	-7.816E-04	-5.469E-04	1.551E-03	-67.3
20	2.319E+00	-8.557E-04	-6.466E-04	1.825E-03	-66.2
21	2.441E+00	-9.348E-04	-7.569E-04	2.132E-03	-65.1
22	2.563E+00	-1.018E-03	-8.770E-04	2.470E-03	-64.0
23	2.686E+00	-1.107E-03	-1.007E-03	2.838E-03	-63.0
24	2.808E+00	-1.201E-03	-1.156E-03	3.237E-03	-61.9
25	2.930E+00	-1.300E-03	-1.324E-03	3.667E-03	-60.9

節点17の加速度

NO.	HELZ	REAL	IMAG	ABS	PHASE
1	0.000E+00	3.381E+00	0.000E+00	3.381E+00	0.0
2	1.721E-01	3.394E+00	8.003E-02	3.395E+00	-88.6
3	2.441E-01	3.433E+00	1.620E-01	3.437E+00	-87.3
4	3.662E-01	3.500E+00	2.477E-01	3.509E+00	-86.0
5	4.883E-01	3.599E+00	3.394E-01	3.614E+00	-84.6
6	6.104E-01	3.733E+00	4.399E-01	3.759E+00	-83.3
7	7.324E-01	3.912E+00	5.522E-01	3.931E+00	-82.0
8	8.545E-01	4.147E+00	6.833E-01	4.203E+00	-80.6
9	9.766E-01	4.455E+00	8.383E-01	4.533E+00	-79.2
10	1.099E+00	4.864E+00	1.029E+00	4.971E+00	-77.8
11	1.221E+00	5.418E+00	1.272E+00	5.565E+00	-76.8
12	1.343E+00	6.197E+00	1.599E+00	6.400E+00	-75.5
13	1.465E+00	7.351E+00	2.067E+00	7.636E+00	-74.3
14	1.587E+00	9.112E+00	2.801E+00	9.629E+00	-73.1
15	1.709E+00	1.266E+01	4.143E+00	1.312E+01	-71.9
16	1.831E+00	1.615E+01	7.403E+00	1.741E+01	-70.7
17	1.953E+00	2.101E+01	1.073E+01	2.241E+01	-69.6
18	2.075E+00	2.848E+01	1.413E+01	2.992E+01	-68.4
19	2.197E+00	3.948E+01	1.873E+01	4.281E+01	-67.3
20	2.319E+00	5.501E+01	2.483E+01	6.073E+01	-66.2
21	2.441E+00	7.648E+01	3.383E+01	8.466E+01	-65.1
22	2.563E+00	1.072E+02	4.646E+01	1.184E+02	-64.0
23	2.686E+00	1.501E+02	6.383E+01	1.666E+02	-63.0
24	2.808E+00	2.081E+02	8.833E+01	2.340E+02	-61.9
25	2.930E+00	2.861E+02	1.213E+02	3.247E+02	-60.9

NO.	HELZ	REAL	IMAG	ABS	PHASE
1	0.000E+00	3.376E+00	0.000E+00	3.376E+00	0.0
2	1.721E-01	3.388E+00	7.928E-02	3.399E+00	-88.7
3	2.441E-01	3.427E+00	1.604E-01	3.431E+00	-87.3
4	3.662E-01	3.495E+00	2.453E-01	3.503E+00	-86.0
5	4.883E-01	3.593E+00	3.362E-01	3.609E+00	-84.7
6	6.104E-01	3.720E+00	4.359E-01	3.745E+00	-83.3
7	7.324E-01	3.907E+00	5.401E-01	3.945E+00	-82.0
8	8.545E-01	4.142E+00	6.772E-01	4.197E+00	-80.7
9	9.766E-01	4.450E+00	8.319E-01	4.527E+00	-79.4
10	1.099E+00	4.850E+00	1.021E+00	4.964E+00	-78.1
11	1.221E+00	5.412E+00	1.264E+00	5.538E+00	-76.8
12	1.343E+00	6.191E+00	1.590E+00	6.392E+00	-75.6
13	1.465E+00	7.346E+00	2.057E+00	7.620E+00	-74.4
14	1.587E+00	9.206E+00	2.792E+00	9.600E+00	-73.1
15	1.709E+00	1.266E+01	4.132E+00	1.332E+01	-71.9
16	1.831E+00	1.615E+01	7.391E+00	1.740E+01	-70.7
17	1.953E+00	2.101E+01	1.073E+01	2.240E+01	-69.6
18	2.075E+00	2.848E+01	1.413E+01	2.992E+01	-68.4
19	2.197E+00	3.948E+01	1.873E+01	4.281E+01	-67.3
20	2.319E+00	5.501E+01	2.483E+01	6.073E+01	-66.2
21	2.441E+00	7.648E+01	3.383E+01	8.466E+01	-65.1
22	2.563E+00	1.072E+02	4.646E+01	1.184E+02	-64.0
23	2.686E+00	1.501E+02	6.383E+01	1.666E+02	-63.0
24	2.808E+00	2.081E+02	8.833E+01	2.340E+02	-61.9
25	2.930E+00	2.861E+02	1.213E+02	3.247E+02	-60.9

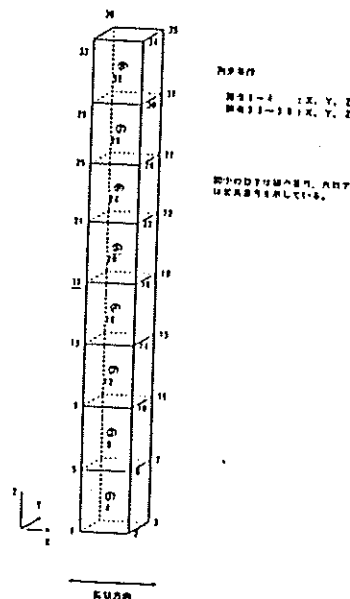


図3.6.2-2 変位、加速度の比較

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. 数式モデル

解析コードにおいては、Biotの多孔質体内の2相系支配方程式を用いている。
以下に土骨格、間隙水の力の釣合い式、見かけ上の2相系の体積弾性係数についてまとめる。

(1) 土骨格の釣合い式

$$\begin{aligned} & \dots \dots \\ & \phi \rho_s u + ((\phi^2 \rho_f g)/k)(u-U) + \text{div}(\sigma' - \sigma_0) \\ & \quad - (\alpha - \phi) \text{grad}(P - P_0) + f_s = 0 \end{aligned}$$

(2) 間隙水の釣合い式

$$\begin{aligned} & \dots \dots \\ & \phi \rho_f U - ((\phi^2 \rho_f g)/k)(u-U) - \phi \text{grad}(P - P_0) + f_f = 0 \end{aligned}$$

(3) 圧力と体積ひずみの関係

$$\phi \text{div} U + (\alpha - \phi) \text{div} u = -P/Q$$

$$\text{但し、} Q = 1/(\phi/k_f + (\alpha - \phi)/k_s), \quad \alpha = 1 - (k_f/k_s)$$

なお、各記号は次の内容を示している。

u : 土骨格質点変位ベクトル	ρ_s : 土骨格質量密度
U : 間隙水質点変位ベクトル	ρ_f : 間隙水質量密度
Q : 見かけの2相系体積弾性係数	k_f : 水体積弾性係数
P : 間隙水圧	k_T : 土骨格体積弾性係数
f : 外力	k_s : 土粒子体積弾性係数
ϕ : 間隙率	
k : 透水係数	

4. 1. 4. 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4.1.4-1 に示す。

4. 1. 5. 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. 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。モデル形状については図4.1.6-1 に示す。

(2) 固体（土骨格）に関する拘束条件

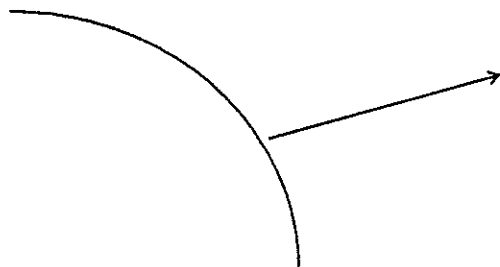
全体モデル（分割前）の側面及び端面にあたる部分の節点についてはX, Y, Z 軸方向の拘束を行った。対称面については、モデルの対称性を考慮して、X=0 面ではX 軸方向のみの拘束、Z=0 面ではZ 軸方向のみの拘束、Y=0 面ではX 軸及びZ 軸方向の拘束を行った。詳細については、図4.1.6-2 に示す。

(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 4.1.6-3 に示す。

(注) MPC（多点拘束）による法線方向の非排水条件の設定

法線ベクトル = (n_x, n_y, n_z)



水質点変位ベクトル (U, V, W)

非排水条件

$$\underline{U \cdot n = n_x \cdot U + n_y \cdot V + n_z \cdot W = 0}$$

4. 1. 7. 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。内容は、

- ① 相対変位、絶対加速度、応力、間隙水圧の最大値
- ② 各節点でのY軸方向変位、加速度及び各要素での最大せん断応力、間隙水圧の比較
- ③ $t = 0.235$ 秒、 0.240 秒、 0.245 秒、 0.250 秒での変位、間隙水圧の挙動
- ④ 透水係数をパラメータとした解析

となっている。

(1) 相対変位、絶対加速度、応力、間隙水圧の最大値

表4.1.7-1、4.1.7-2 示すように、土の相対変位の最大値はY軸方向に $2.0717\text{E-}4\text{cm}$ 、絶対加速度はY軸方向に $1.0196\text{E}+3 \text{ cm/s}^2$ (gal)となっている。変位は極めて小さく、入力加速度(1000gal)の増幅はほとんど生じていない。また、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/cm^2 程度のオーダーであり、ベントナイトの膨潤圧($10 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2$ 程度)に比べ、かなり小さいものとなっている。

(2) 各節点での変位、加速度及び各要素での最大剪断応力、間隙水圧の比較

a. Y軸方向の変位と加速度

人工バリアモデルより、図4.1.7-1、4.1.7-2 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。

時刻歴応答図4.1.7-3、4.1.7-4 によると、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。

b. 最大せん断応力と間隙水圧

図4.1.7-5 に示す様に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、図4.1.7-6 にしめされるように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。

c. 透水係数の影響

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) 変位、間隙水圧の分布

図4.1.7-7 に加振開始から $t = 0.235$ 秒、0.240 秒、0.245 秒、0.250秒でのモデルの変形を、図4.1.7-8 に間隙水圧の分布を示す。 $t = 0.235$ 秒において加振加速度はY軸方向に対して(水平)正の最大値をとり、0.245 秒において負の最大値をとる。

a. 変形図

図4.1.7-7 によるといずれの時間点においてもオーバーパックを中心に加振方向に大きな変位が生じている。

b. 間隙水圧の分布

図4.1.7-8 の右の図は $t=0.235$ 秒（正の向きの加速度が最大となる時刻）での間隙水圧の分布を表した図である。図によれば、 $t=0.235$ 秒ではオーバーパック後方の端面付近の間隙水圧が高くなっている。これに、比べオーバーパック付近はほぼ0である。 $t=0.240$ 秒（加速度が0 となる時刻）では、モデル全体で間隙水圧は0 となっている。 $t=0.245$ 秒（加速度が負の最大値をとる時刻）では $t=0.235$ 秒とは対照にオーバーパックの変位に伴い、オーバーパック後方の間隙水圧が低くなっている。

(4) 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。図4.1.7-9、4.1.7-10、4.1.7-11に 1.0×10^{-2} cm/s、 1.0×10^{-5} cm/s、 1.0×10^{-8} cm/sの3 ケースの時刻 $t=0.235$ 秒、0.240 秒、0.245 秒、0.250秒でのモデルの変形図、図4.1.7-12、4.1.7-13、4.1.7-14に間隙水圧のコンター図を示す。

a. 変位、加速度の最大値の比較

表4.1.7-3 によると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、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 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。変形図の比較においても $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 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 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ の場合が1.1倍～1.5倍程度大きな値となっている。間隙水圧のコンタ図では $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ の場合では $t=0.240$ 秒で端面上部に間隙水圧上昇部が発生し、 $t=0.235$ 秒時に発生したオーバーパック後方の間隙水圧は負の値をとっている。これは、透水係数が高いため、オーバーパックの変形に伴う間隙水の移動がスムーズにおこなわれるためであると考えられる。一方、表4.1.7-4からも推測できるように $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 以下では変形図同様類似性が見られる。

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. 数式モデル

解析コードにおいては、Biotの多孔質体内の2相系支配方程式を用いている。
以下に土骨格、間隙水の力の釣合い式、見かけ上の2相系の体積弾性係数についてまとめる。

(1) 土骨格の釣合い式

$$\begin{aligned} \phi \rho_s u + ((\phi^2 \rho_f g)/k)(u-U) + \text{div}(\sigma' - \sigma_0) \\ - (\alpha - \phi) \text{grad}(P - P_0) + f_s = 0 \end{aligned}$$

(2) 間隙水の釣合い式

$$\phi \rho_f U - ((\phi^2 \rho_f g)/k)(u-U) - \phi \text{grad}(P - P_0) + f_f = 0$$

(3) 圧力と体積ひずみの関係

$$\phi \text{div} U + (\alpha - \phi) \text{div} u = -P/Q$$

$$\text{但し、} Q = 1/(\phi/k_f + (\alpha - \phi)/k_s), \quad \alpha = 1 - (k_r/k_s)$$

なお、各記号は次の内容を示している。

u : 土骨格質点変位ベクトル	ρ_s : 土骨格質量密度
U : 間隙水質点変位ベクトル	ρ_f : 間隙水質量密度
Q : 見かけの2相系体積弾性係数	k_r : 水体積弾性係数
P : 間隙水圧	k_r : 土骨格体積弾性係数
f : 外力	k_s : 土粒子体積弾性係数
ϕ : 間隙率	
k : 透水係数	

4. 2. 4. 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4.2.4-1 に示す。

4. 2. 5. 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. 6. モデルと境界条件

モデル形状については図4.2.6-1 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4.2.6-1 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4.2.6-2 に示す。

4. 2. 7. 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. 6-1 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. 7-1 、図4. 2. 7-2 にまとめる。

図4. 2. 7-1 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. 7-2 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1 0 0 gal（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。詳細については表4. 3. 4-1 に示す。

4. 3. 5 モデルと境界条件

(1) 小型振動試験装置

図4. 3. 5-1 に示すようにオーバーパック及びベントナイト中に計測機器を配置した人工バリアモデルに対して図4. 3. 5-2 の振動台にて10Hz～60Hzのスイープ試験を実施して共振点を求めた。

(2) 解析用モデルの形状

小型振動試験供試体を模擬した円柱状のモデルにて解析を実施した。モデル形状については図4. 3. 5-3 に示す。なお、モデルの節点数は8 9 1、要素数は8 0 0となっている。

(3) 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。詳細については、図4. 3. 5-3 に示す。

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、表4. 3. 6-1、図4. 3. 6-2 ～ 4. 3. 6-3 にまとめる。モード形については、小型振動試験供試体、2倍スケール、人工バリア実規模（小型振動試験供試体の10倍スケール）それぞれ同一で、一次モード形は円柱軸方向（Y軸方向）へのオーバーパックを中心とした変位、二次モード形は周方向へのオーバーパックを中心とした変位が生じている。モード図については、ベントナイト湿潤密度 1.6gf/cm^3 での小型振動試験供試体モデルを用いた解析結果について図4. 3. 6-4 に示す。図においては、薄色の実線が変形を濃色の実線が原型図を表している。

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。

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

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。その他の利用した物性値については表4. 4. 4-1 に示す。

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。EL-Centro N-S 波の0～10秒間の波形については図4. 4. 5-1 に示す。

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。図4. 4. 6-1 に解析に用いたモデルを示す。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。詳細については図4. 4. 6-2 に示す。

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。なお、解析結果のポスト処理についてはA V Sを用いた。図4. 4. 7-1 ～2 に試験での計測点と同一点での加速度、変位の時刻歴応答図を示す。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。また、地震加速度入力から4. 325, 4. 385, 4. 425 秒時の変位の分布については図4. 4. 7-3 に示す。変位がオーバーパック付近を中心に振動方向に生じていることが理解できる。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62%～65%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. 7-4 に示す。また、波形については、図4. 4. 7-5 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4.4.7-6 に示す。また、図4.4.7-7 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。この性質は図4.4.7-8 のスイープ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。周波数応答解析での結果は地震加速度、オーバーパック上、ベントナイト中ともフーリエ振幅スペクトルの最大値、波形は50 Hz未満の領域ではほぼ一致いる。50 Hz以上領域では地震加速度、試験データに比べてやや大きな値が記録されている。

ベントナイト中の値に関しては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 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前述の図4.4.7-8のベントナイト中の加速度倍率を示す下2図において、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4.4.7-9にまとめる。

(4) パラメータ解析結果

①せん断弾性係数、減衰定数、密度の解析結果への影響

a. せん断弾性係数の変更による解析結果への影響

他のパラメータを変更せずせん断弾性係数が小さくした場合、オーバーパックの加速度の際立った増加がみられ試験データの1.5倍程度となった。

本解析ケースではオーバーパック上とベントナイト中の加速度の比は1.0 : 0.7となり、加速度の比は試験データに近いものとなった。

b. 減衰定数の変更による解析結果への影響

予想されるように減衰定数が大きくなるにつれ、オーバーパック上の節点での加速度は減少を示し、ベントナイト中の節点での加速度は増加を示す。その結果、各節点間での加速度のばらつきは小さくなる。

c. 密度の変更による解析結果への影響

密度が大きくなるにつれ、加速度は大きくなる傾向にある。ただし、本ケースではベントナイトの剛性が高いため ($G=43\text{kgf/cm}^2$)、密度の変更による影響は小さい。

解析結果については図4.4-10に示す。

② せん断弾性係数 G ～せん断ひずみ γ の変化の解析結果への影響

いずれのケースのベントナイト中の最大加速度は試験データより大きくなり試験データの再現はできなかった。①から得られた知見から、減衰定数を小さくすればベントナイト中の加速度は減少し、試験データに近づくことが予想されるがそれとともにオーバーパック上の加速度が増加しオーバーパック上の加速度の一致は見られないと思われる。

(5) 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。

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

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4.1.4-1 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
土重量密度	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	7.77 gf/cm^3	
水重量密度		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^{-4} 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4.1.7-1 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での相対変位、絶対加速度の最大値

相対変位(cm)			
相	方向	値(cm)	時間(sec)
土 骨 格	X	2.6834E-05	2.5500E-01
	Y	2.0717E-04	2.5500E-01
	Z	2.6782E-05	2.5500E-01
間 隙 水	X	2.6834E-05	2.5500E-01
	Y	2.0716E-04	2.5500E-01
	Z	2.6782E-05	2.5500E-01
絶対加速度(cm/s ²)			
相	方向	値(cm/s ²)	時間(sec)
土 骨 格	X	3.0981E+01	3.1000E-02
	Y	1.0996E+03	1.5000E-02
	Z	3.0977E+01	3.1000E-01
間 隙 水	X	3.0981E+01	3.1000E-02
	Y	1.0996E+03	1.5000E-02
	Z	3.0977E+01	3.1000E-01

表4.1.7-2 透水係数 1.0×10^{-11} cm/s での応力、ひずみ、間隙水圧の最大値

応力(kgf/cm ²)		
種別	値(kgf/cm ²)	時間(sec)
σ_x	1.2415E-01	2.5500E-01
σ_y	1.6309E-01	2.5500E-01
σ_z	1.2401E-01	2.5500E-01
τ_{xy}	4.6749E-02	2.5500E-01
τ_{yz}	4.6729E-02	2.5500E-01
τ_{zx}	5.5590E-02	2.5500E-01
ひずみ		
種別	値	時間(sec)
ε_x	5.4946E-07	2.5500E-01
ε_y	1.1833E-06	2.5500E-01
ε_z	5.4866E-07	2.5500E-01
γ_{xy}	6.3926E-05	2.5500E-01
γ_{yz}	6.3905E-05	2.5500E-01
γ_{zx}	6.4465E-06	2.5500E-01
間隙水圧(kgf/cm ²)		
種別	値(kgf/cm ²)	時間(sec)
P	1.4289E-01	2.5500E-01

表4.1.7-3 相対変位、絶対加速度の比較

相対変位 (cm)					
透水係数		$1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-11} \text{cm/s}$
土 骨 格	X	3.0671E-5	2.6892E-5	2.6834E-5	2.6834E-5
	Y	2.6636E-4	2.0774E-4	2.0717E-4	2.0717E-4
	Z	3.1009E-5	2.6840E-5	2.6782E-5	2.6782E-5
間 隙 水	X	4.4910E-5	2.6887E-5	2.6834E-5	2.6834E-5
	Y	2.8212E-4	2.0802E-4	2.0716E-4	2.0716E-4
	Z	4.4843E-5	2.6836E-5	2.6782E-5	2.6782E-5
絶対加速度 (cm/s ²)					
透水係数		$1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$	$1.0 \times 10^{-11} \text{cm/s}$
土 骨 格	X	2.1136E+1	3.0740E+1	3.0980E+1	3.0981E+1
	Y	1.0926E+3	1.0993E+3	1.0996E+3	1.0996E+3
	Z	2.0792E+1	3.0736E+1	3.0977E+1	3.0977E+1
間 隙 水	X	2.2719E+1	3.0740E+1	3.0980E+1	3.0981E+1
	Y	1.0918E+3	1.0993E+3	1.0996E+3	1.0996E+3
	Z	2.2728E+1	3.0737E+1	3.0977E+1	3.0977E+1

表4.1.7-4 応力、ひずみ、間隙水の比較

応力 (k g f / c m ²)				
透水係数	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-11}
σ_x	1.1952E-1	1.4411E-1	1.2416E-1	1.2415E-1
σ_y	1.4300E-1	1.7501E-1	1.6307E-1	1.6309E-1
σ_z	1.2233E-1	1.4399E-1	1.2402E-1	1.2401E-1
τ_{xy}	3.6130E-2	4.7750E-2	4.6757E-2	4.6749E-2
τ_{yz}	3.6174E-2	4.7750E-2	4.6736E-2	4.6729E-2
τ_{zx}	1.7573E-2	2.0347E-2	5.5585E-2	5.5590E-2
ひずみ				
透水係数	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-11}
ϵ_x	6.3966E-6	5.5337E-6	5.4945E-6	5.4946E-6
ϵ_y	1.9296E-5	1.1946E-5	1.1833E-5	1.1833E-5
ϵ_z	6.6640E-6	5.5260E-6	5.4865E-6	5.4866E-6
γ_{xy}	7.6528E-5	6.4104E-5	6.3926E-5	6.3926E-5
γ_{yz}	7.6024E-5	6.4082E-5	6.3905E-5	6.3905E-5
γ_{zx}	6.6416E-6	6.4633E-6	6.4465E-6	6.4465E-6
間隙水圧 (k g f / c m ²)				
透水係数	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-11}
P	1.5061E-1	1.4007E-1	1.4290E-1	1.4289E-1

表4. 2. 4-1 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	$1.11 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$	土質動力学の基礎 石原著
土粒子体積弾性係数	砂	$0.33 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	土質動力学の基礎 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	1.45 g/cm^3	文献1
水重量密度		1.008 g/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4.3.4-1 解析時に使用した物性値

物 性		物 性 値	備 考
ベントナイトヤング率	DT-22	$4.20 \times 10^1 \text{ kgf/cm}^2$	PNC 殿試験データ
ベントナイトヤング率	DT-24	$1.20 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$	PNC 殿試験データ
オーバーパックヤング率		$2.10 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$	機械工学便覧
ベントナイト湿潤密度	DT-22	1.42 gf/cm^3	PNC 殿試験データ
ベントナイト湿潤密度	DT-24	1.63 gf/cm^3	PNC 殿試験データ
オーバーパック密度		7.77 gf/cm^3	防災研殿にての打合資料 (H5.3.18)
ベントナイトポアソン比		0.4	PNC 殿平成3年度レポート
オーバーパックポアソン比		0.3	機械工学便覧

(注) ヤング率Eについてはせん断弾性係数Gより

$$E = 2(1 + \nu) \cdot G$$
 として求めている。

表4.3.6-1 実固有値解析結果

モデル	モード	固有振動数 (Hz)	
		乾燥密度0.7 gf/cm ³ (湿潤密度1.4 gf/cm ³)	乾燥密度1.0 gf/cm ³ (湿潤密度1.6 gf/cm ³)
小型振動試験供試体モデル	1	7.2228×10^1	1.1881×10^2
	2	9.8989×10^1	1.6387×10^2
	3	1.1131×10^2	1.8174×10^2
2倍スケールモデル	1	3.6114×10^1	5.9405×10^1
	2	4.9494×10^1	8.1935×10^1
	3	5.5658×10^1	9.0867×10^1
人工バリア実規模モデル	1	7.2228	1.1881×10^1
	2	9.8989	1.6387×10^1
	3	1.1131×10^1	1.8174×10^1

表4. 4. 4-1 解析で用いた物性

項目	値	参 考 資 料
ベントナイトせん断弾性係数	$4.30 \times 10^1 \text{ kgf/cm}^2$	PNC 殿試験データ (DT-24)
ベントナイトポアソン比	0.4	PNC 殿平成3年度レポート
ベントナイト減衰定数	0.025	PNC 殿試験データ (DT-24)
ベントナイト密度	$1.63 \times 10^4 \text{ gf/cm}^3$	PNC 殿試験データ (DT-24)
オーバーパックせん断弾性係数	$0.81 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$	機械工学便覧 (ヤング率 $2.10 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ より算出)
オーバーパックポアソン比	0.3	機械工学便覧
オーバーパック密度	7.77 gf/cm^3	打合資料 (H. 5. 3. 18 IHI殿より提供)
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

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

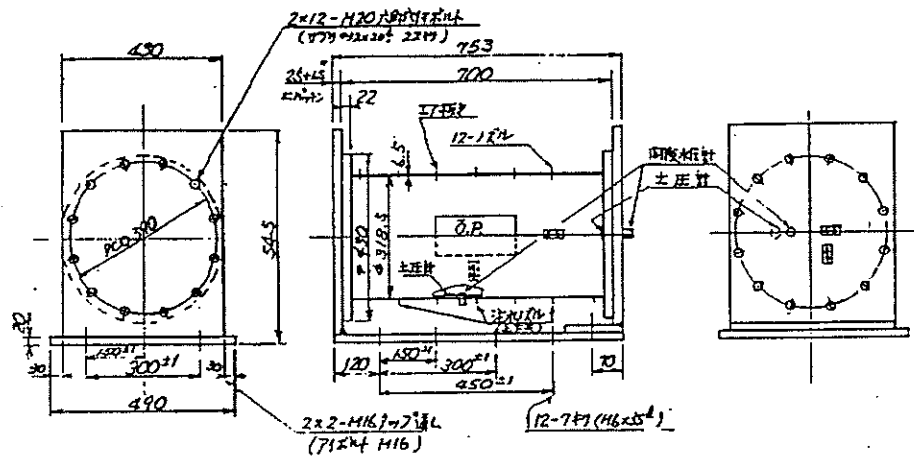
項 目		解 析 結 果
応力 (kgf /cm ²)	σ_x	1.0345×10^{-2}
	σ_y	1.4791×10^{-2}
	σ_z	1.0345×10^{-2}
	τ_{xy}	5.4160×10^{-3}
	τ_{yz}	5.4160×10^{-3}
	τ_{zx}	5.9650×10^{-4}
ひずみ	ε_x	8.2782×10^{-6}
	ε_y	2.7389×10^{-5}
	ε_z	8.2782×10^{-6}
	γ_{xy}	6.2861×10^{-5}
	γ_{yz}	6.2861×10^{-5}
	γ_{zx}	9.8467×10^{-6}

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



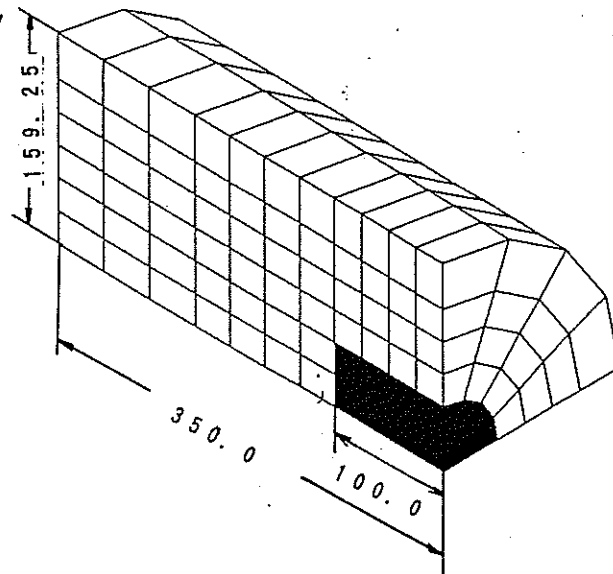
人工バリア試験体寸法図

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



解析モデル (1/8)

単位 : mm

図4.1.6-1 人工バリア試験体と解析モデル

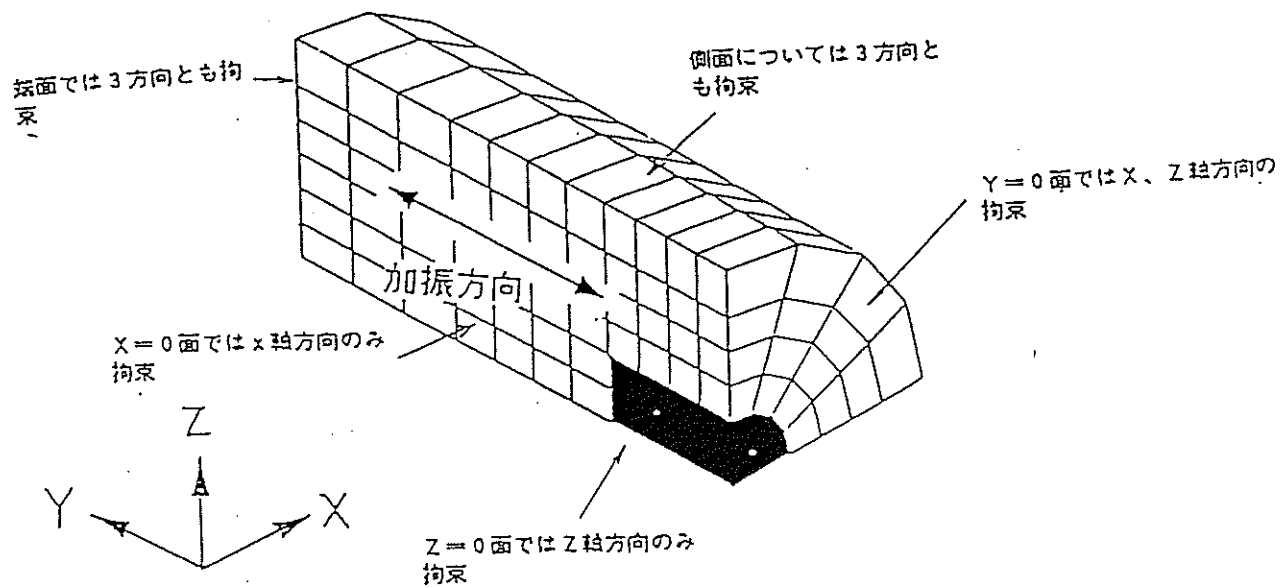


図4.1.6-2 拘束条件

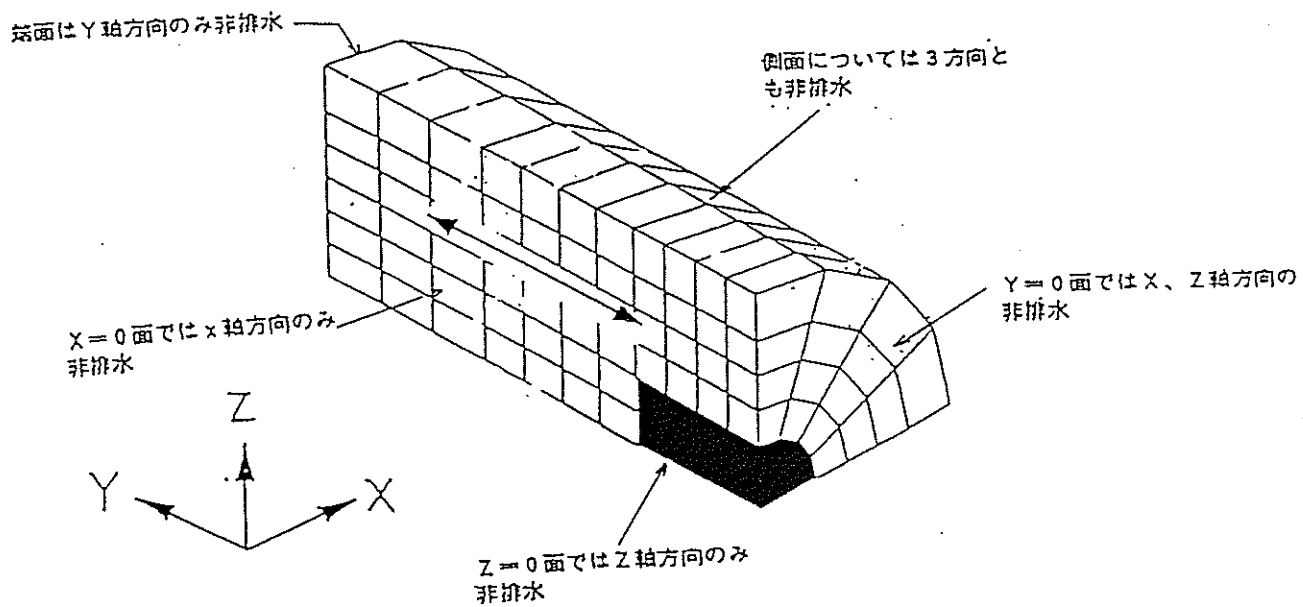


図4.1.6-3 非排水条件

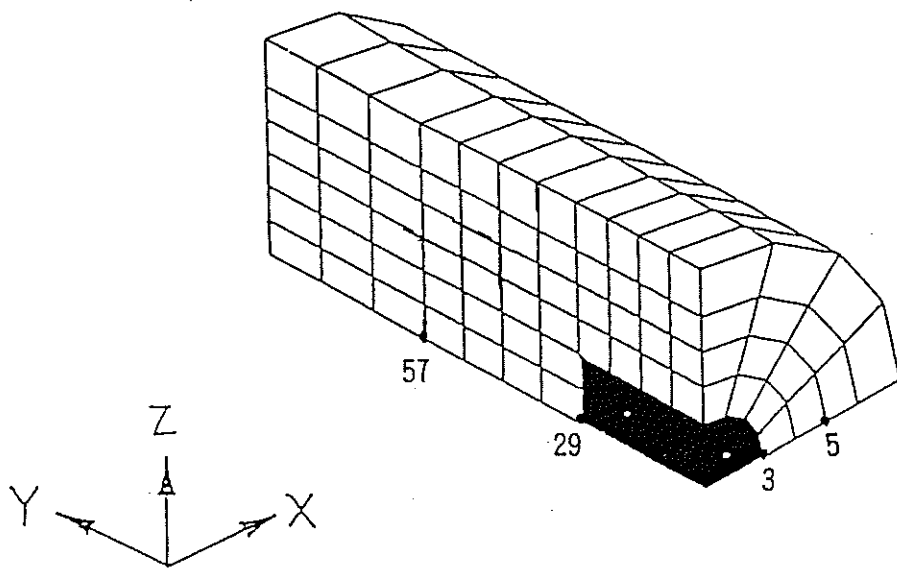


図4.1.7-1 比較に用いた節点

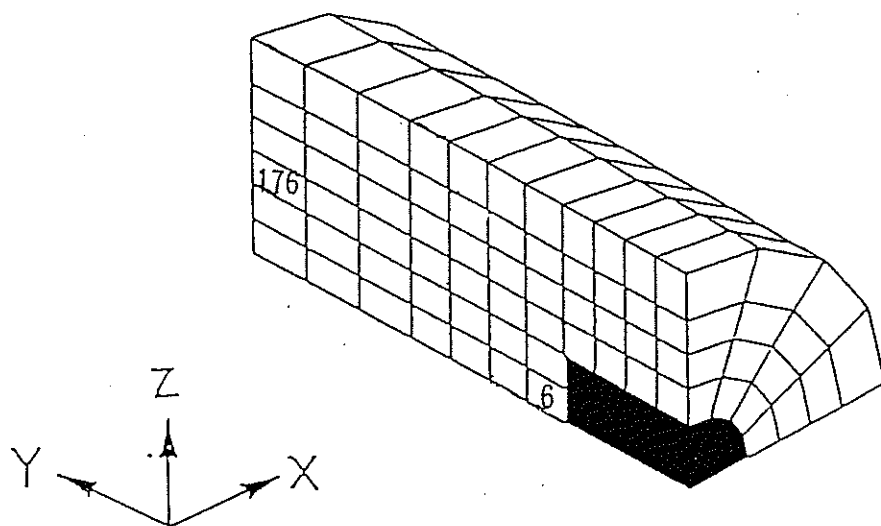
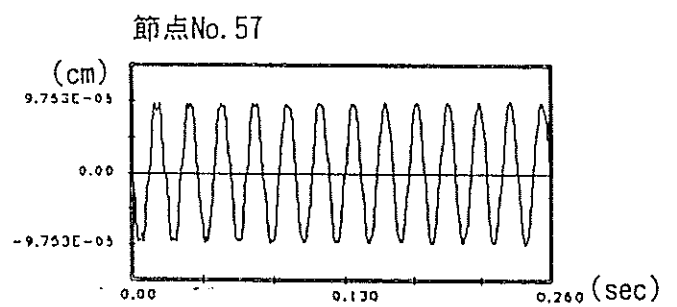
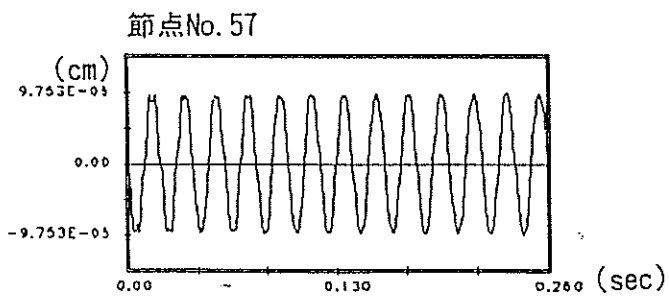
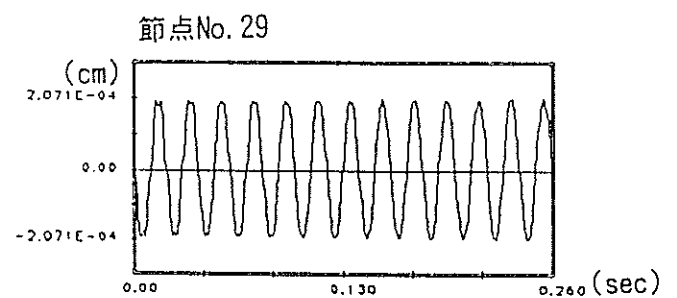
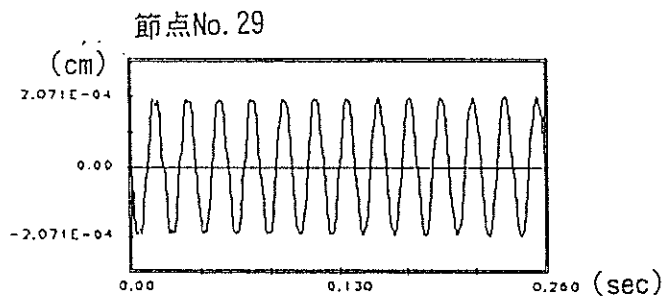
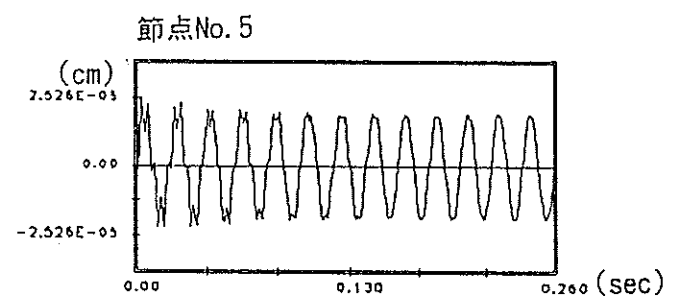
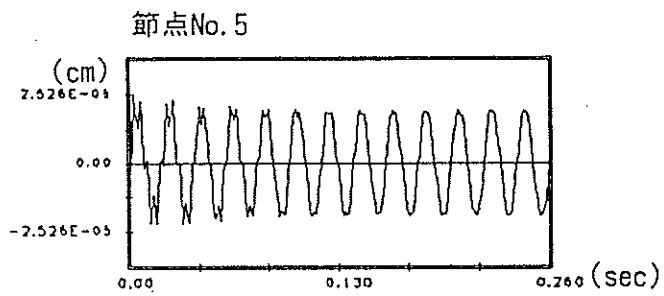
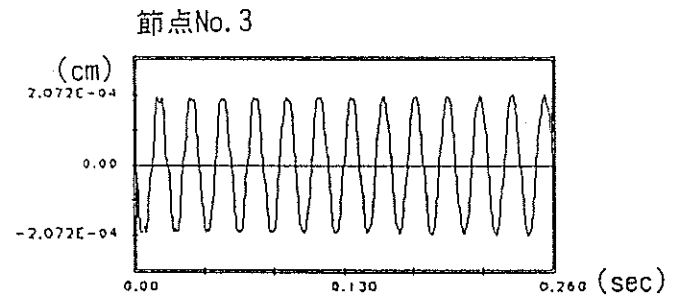
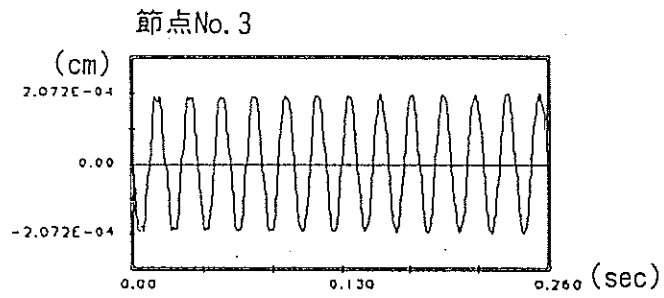
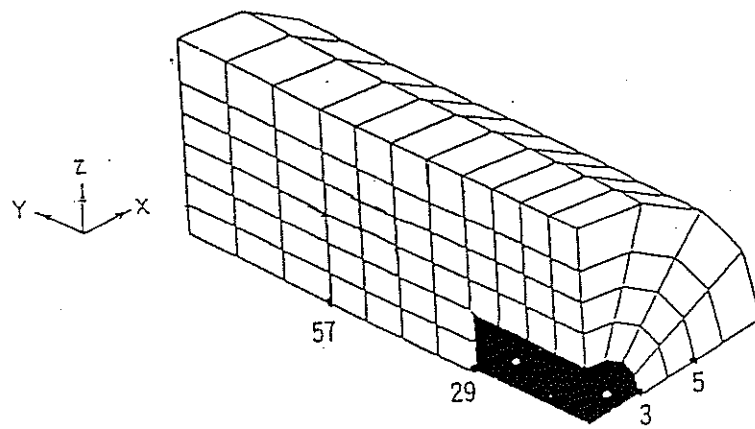


図4.1.7-2 比較に用いた要素



土骨格

間隙水

図4.1.7-3 透水係数 1.0×10^{-10} での相対変位の時刻歴

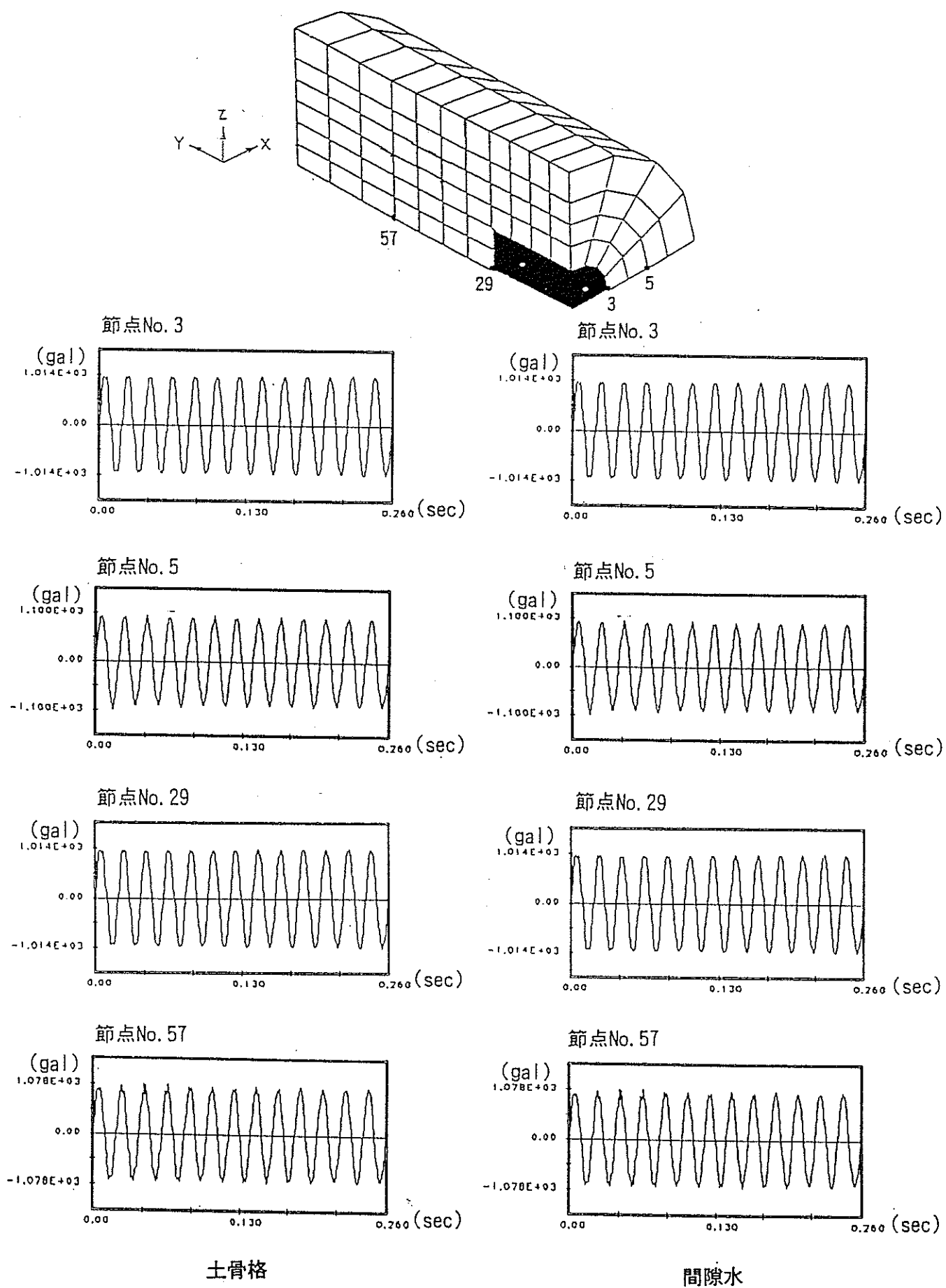
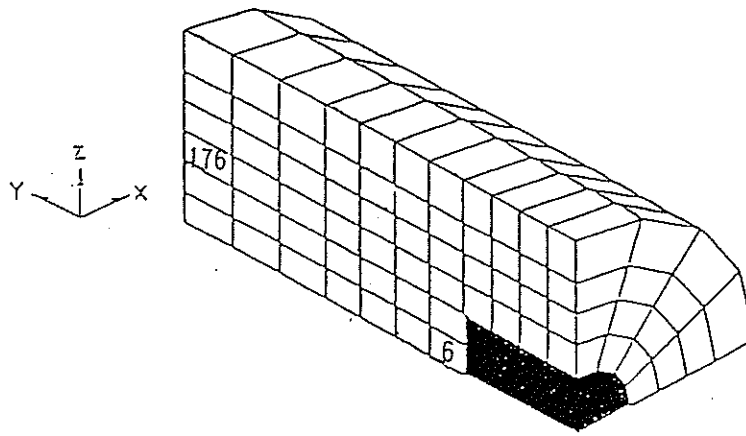
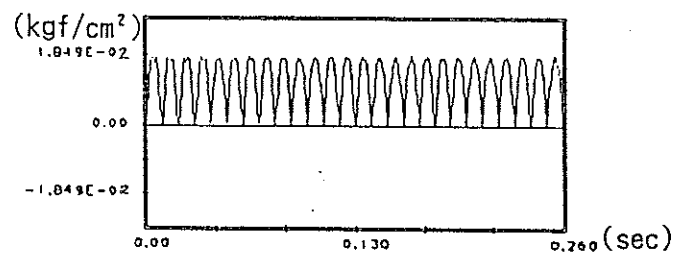


図4.1.7-4 透水係数 1.0×10^{-10} での絶対加速度の時刻歴



要素No. 60



要素No. 176

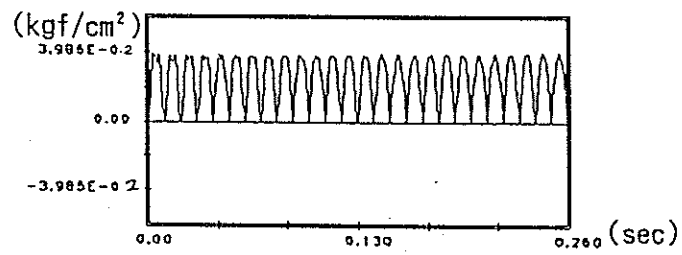
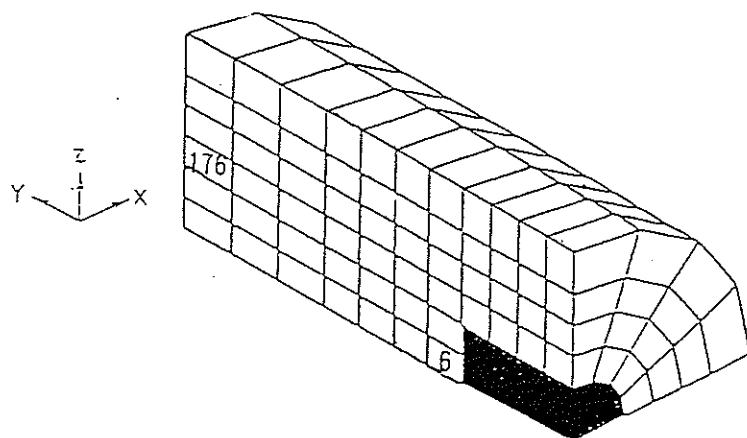
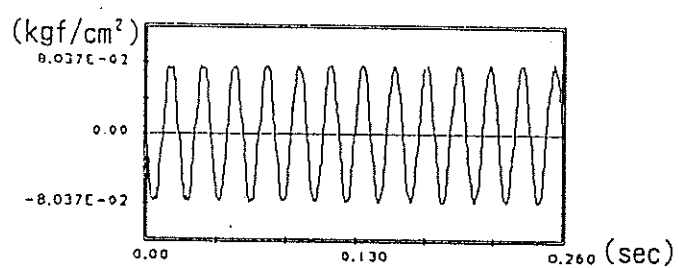


図4.1.7-5 透水係数 1.0×10^{-10} での最大せん断応力の時刻歴 (ガウス点1)



要素No. 60



要素No. 176

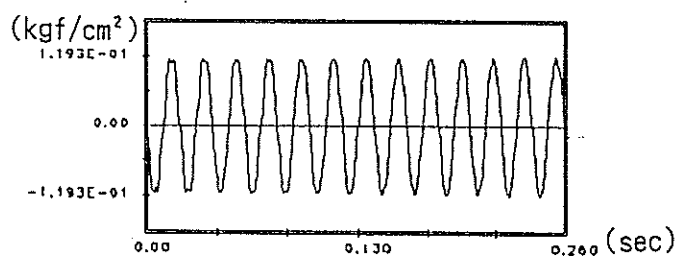


図4.1.7-6 透水係数 1.0×10^{-10} での間隙水圧の時刻歴（ガウス点1）

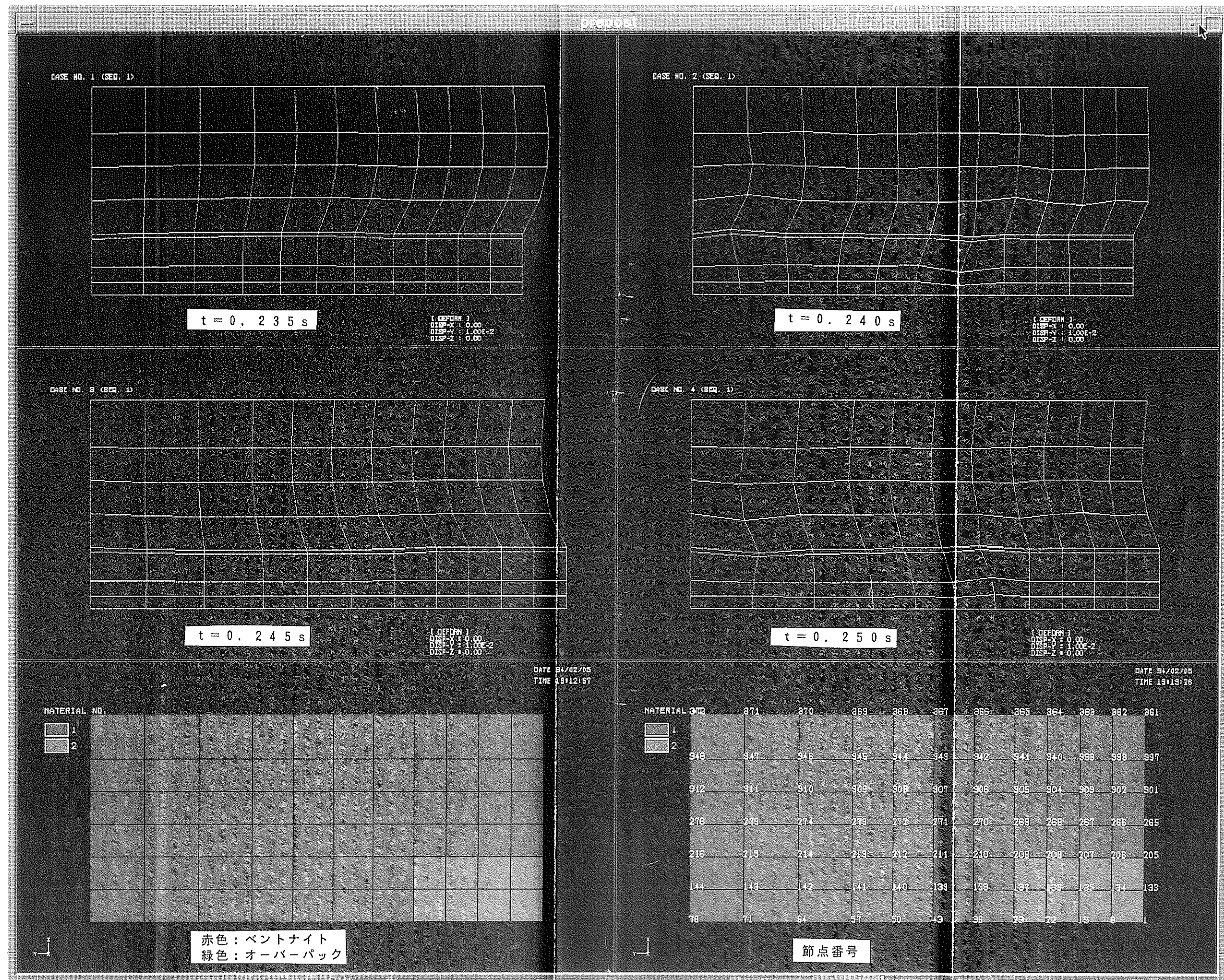


図4.1.7-7 透水係数 $1.0 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ での変形

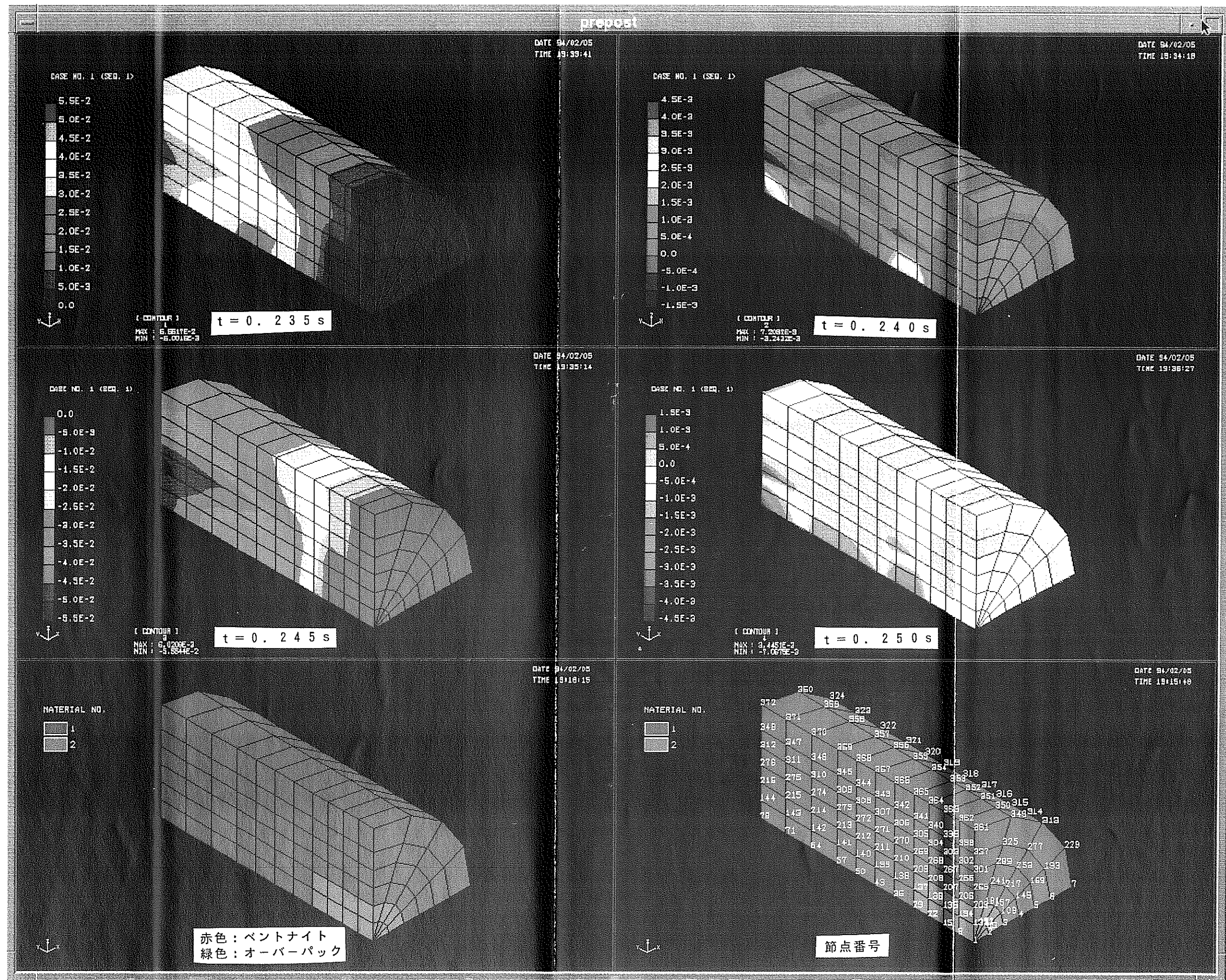


図4.1.7-8 透水係数 1.0×10^{-11} での間隙水圧の分布

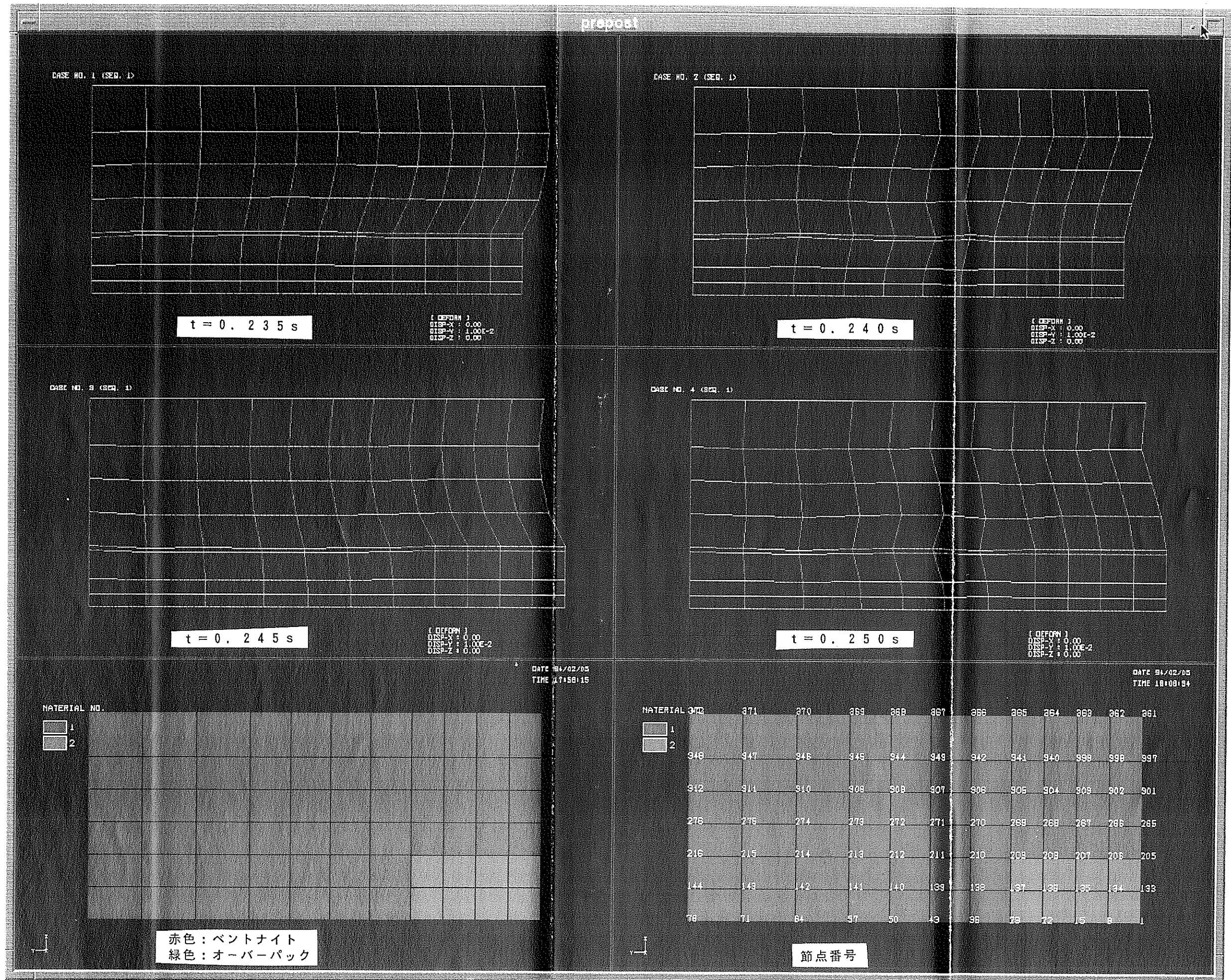


図4.1.7-9 透水係数 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ での変形

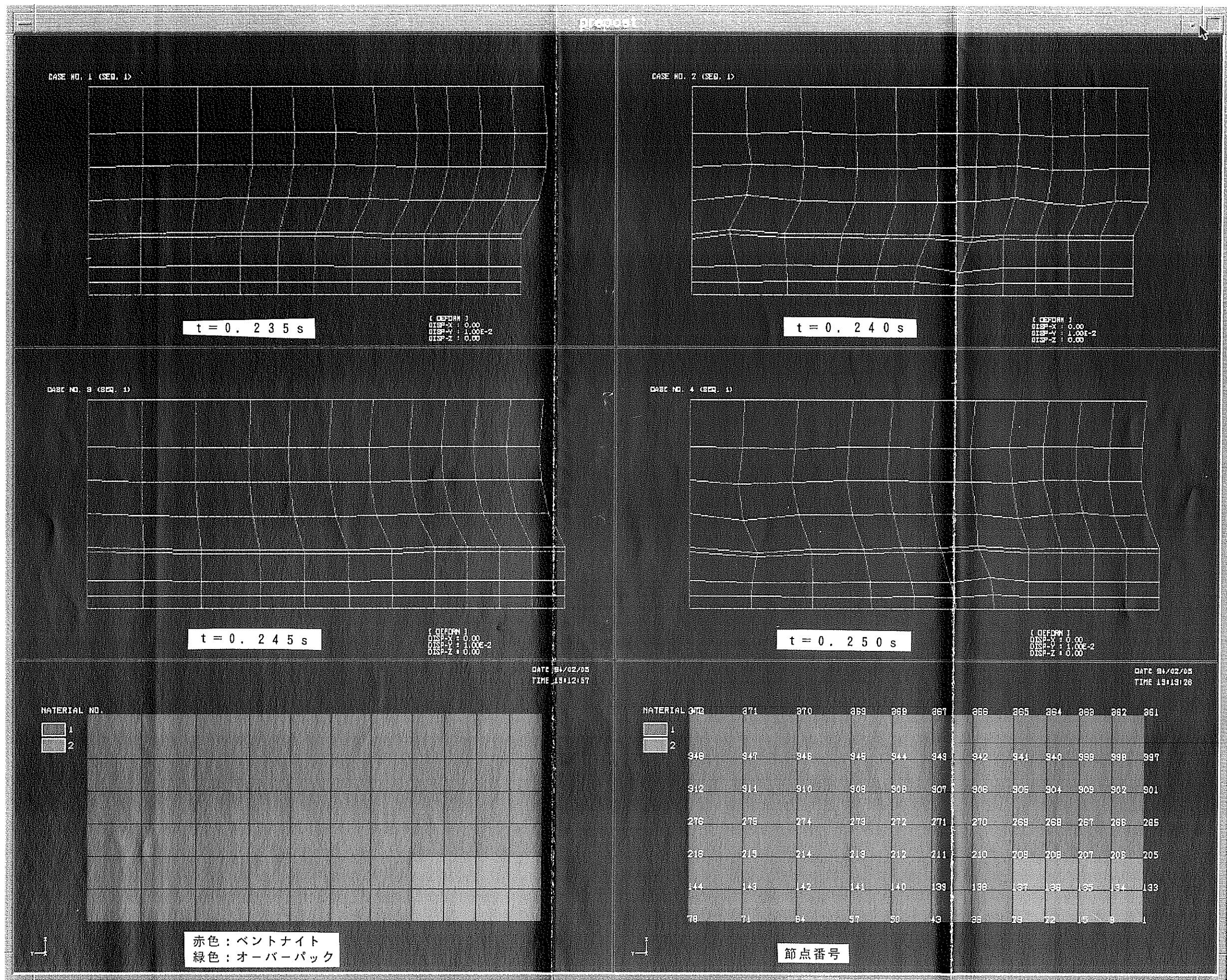


図4.1.7-10 透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ での変形

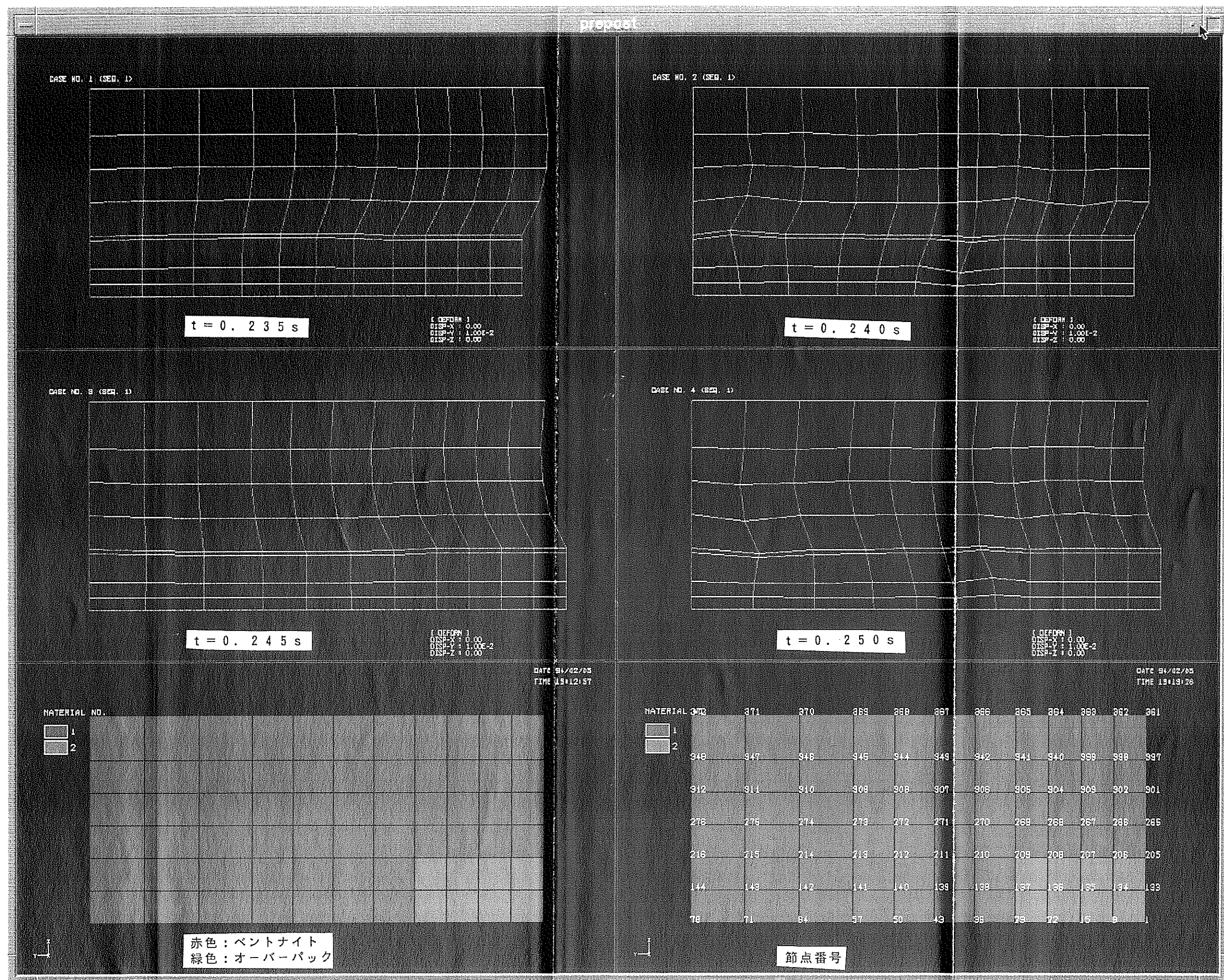


図4.1.7-11 透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ での変形

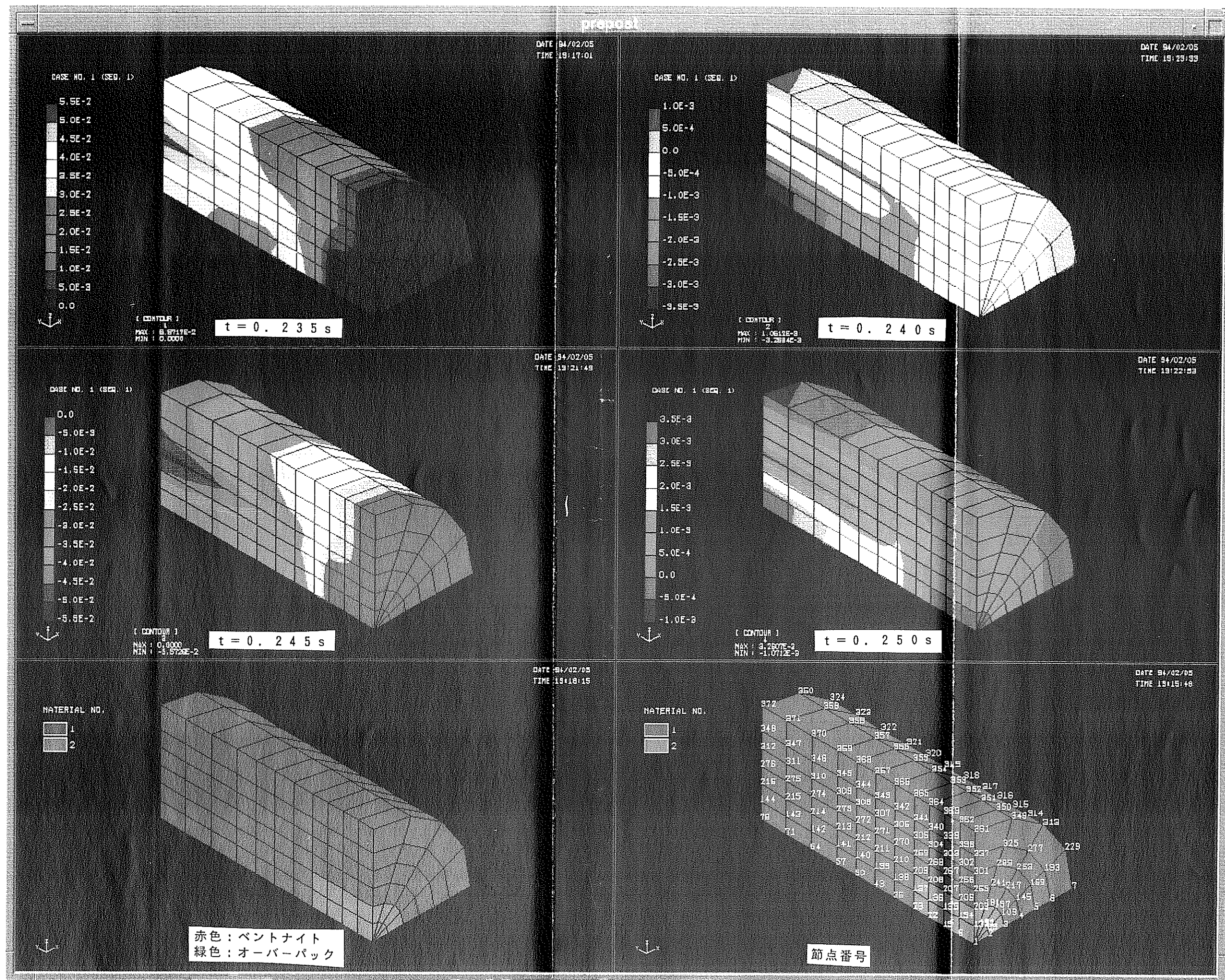


図4.1.7-12 透水係数 1.0×10^{-2} cm/s での間隙水圧の分布

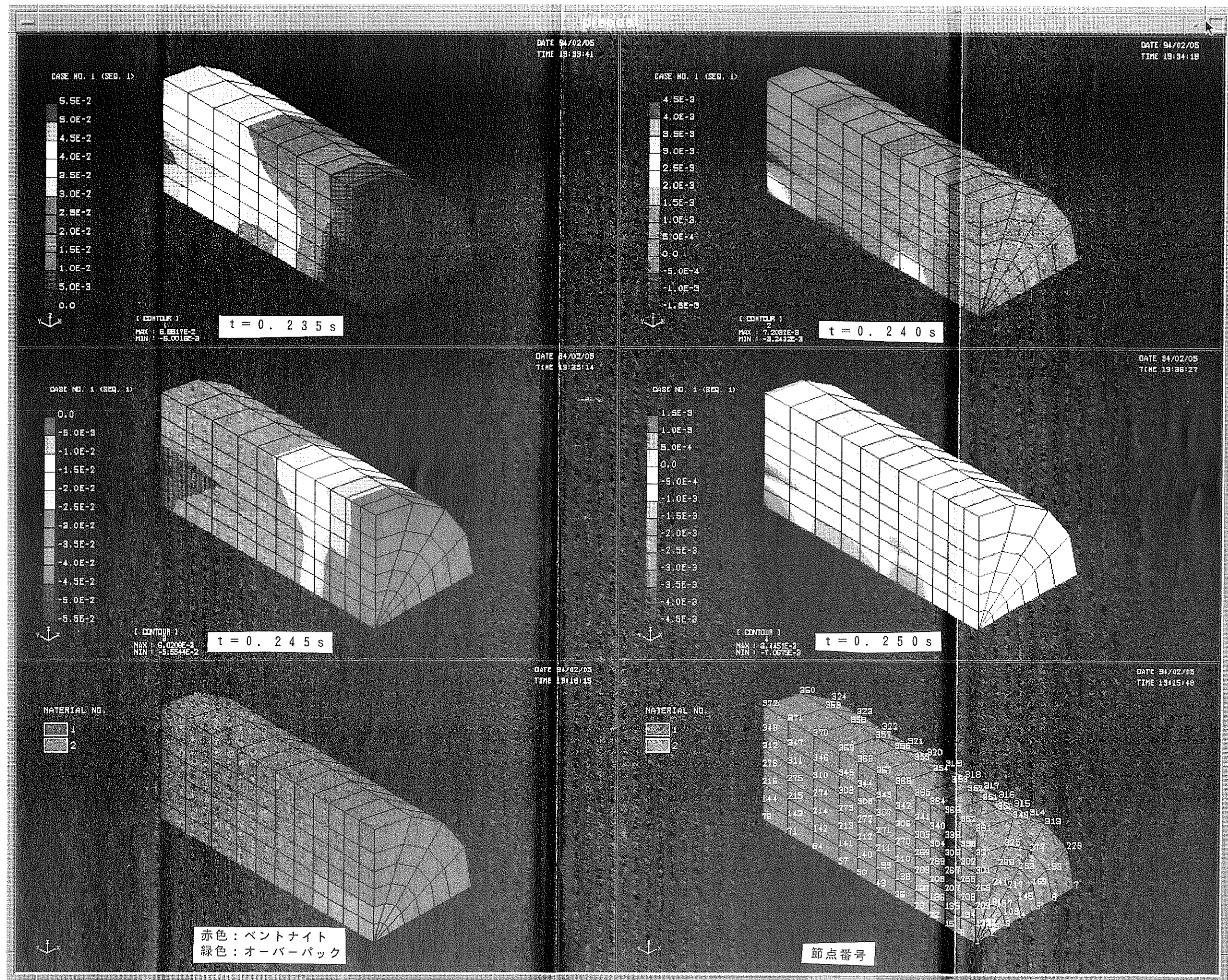


図4.1.7-13 透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ での間隙水圧の分布

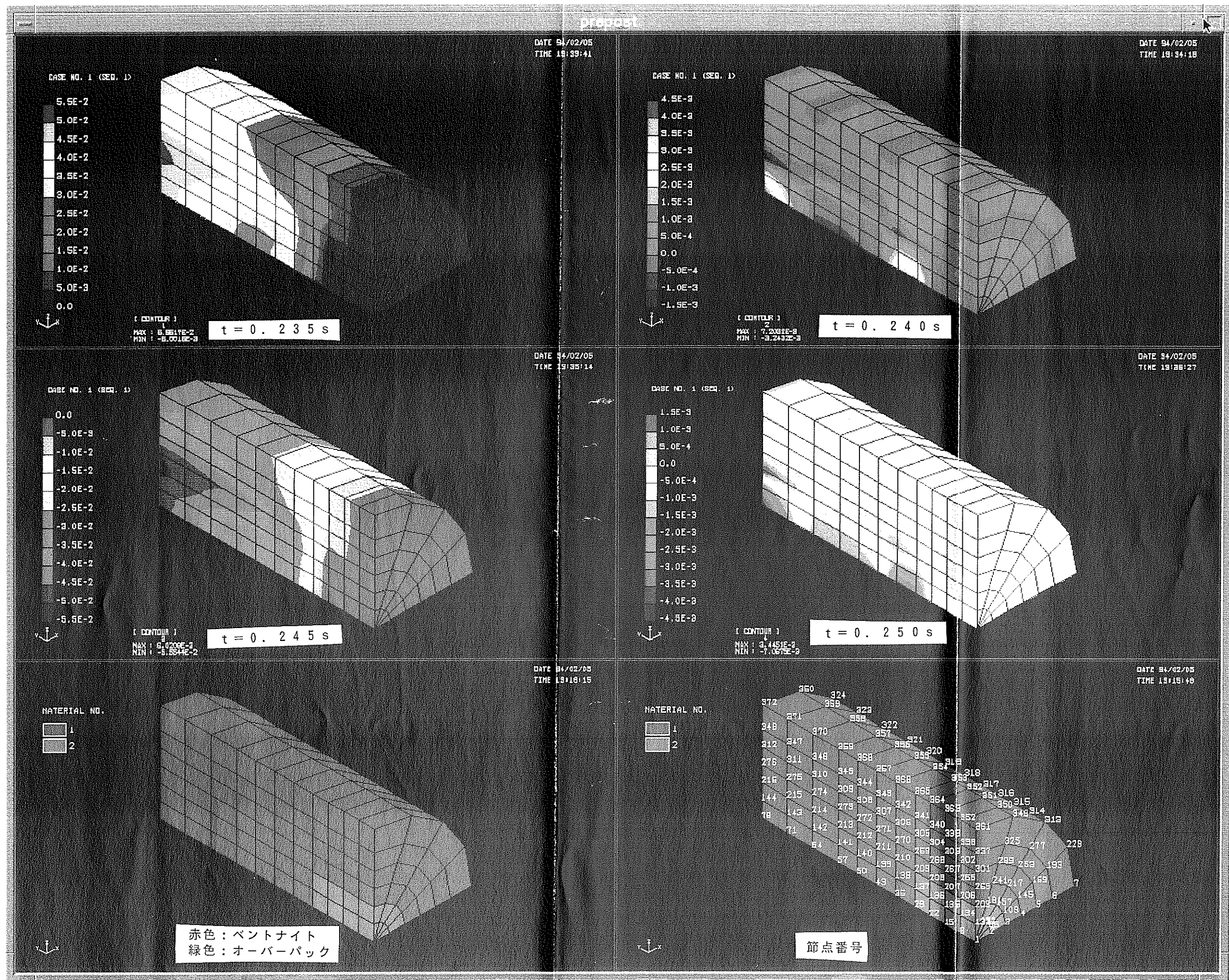
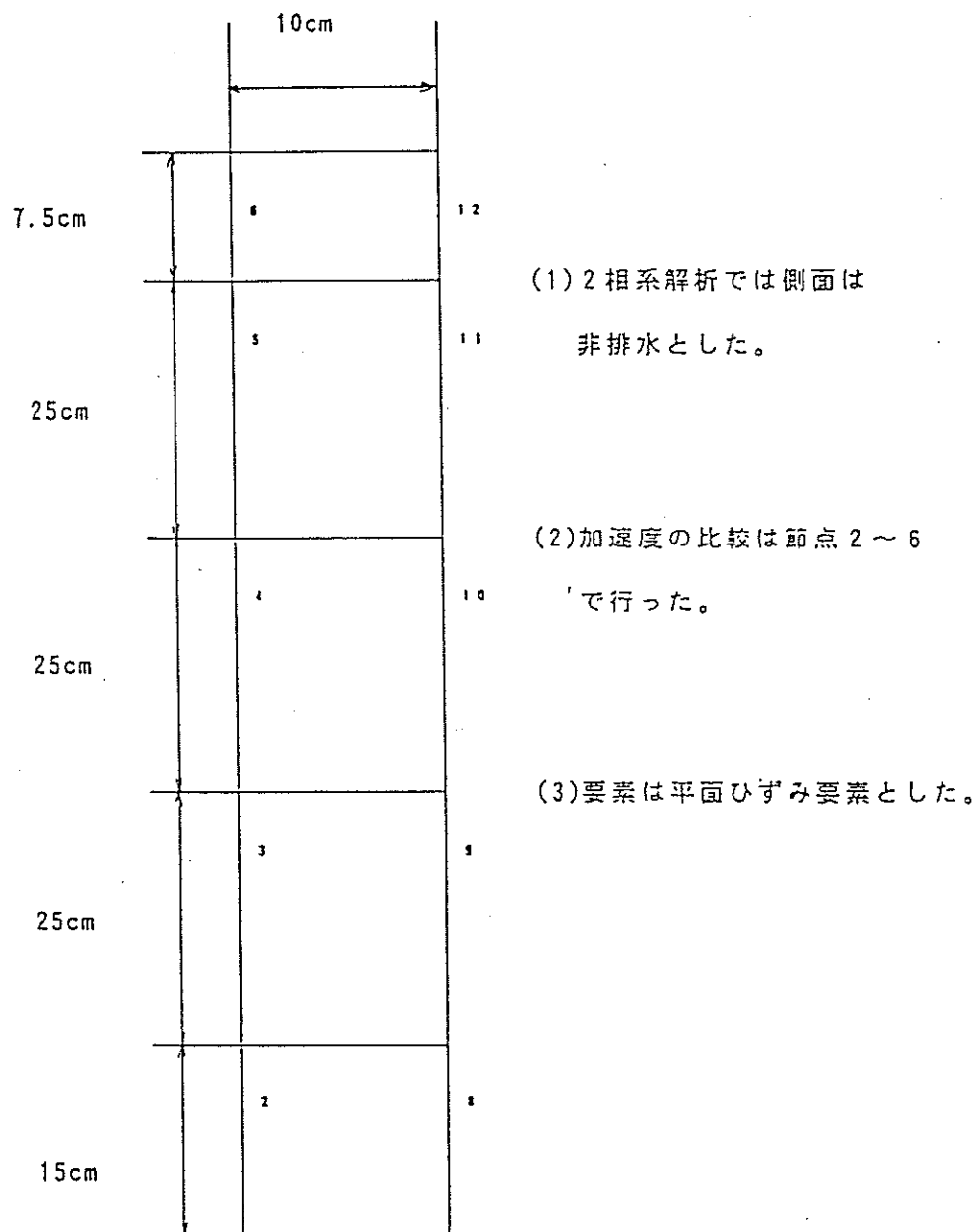
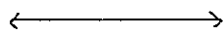


図4.1.7-14 透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ での間隙水圧の分布

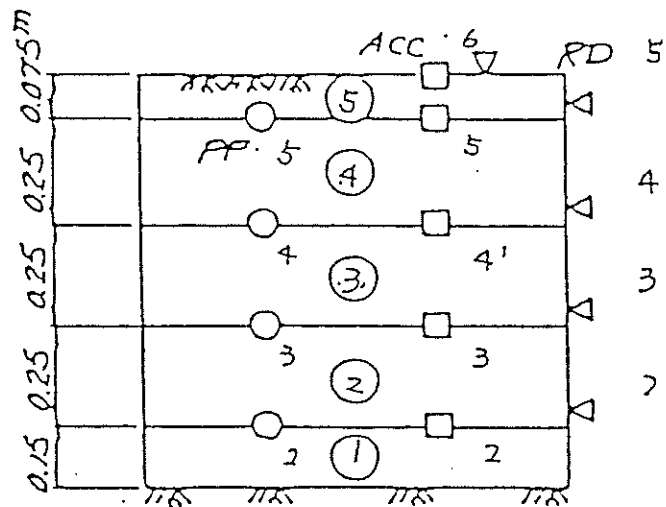


拘 束



加 振 200gal 9.86Hz

図4.2.6-1 モデル図



モデルの層厚

実験での測定点

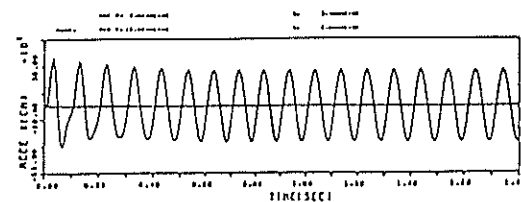
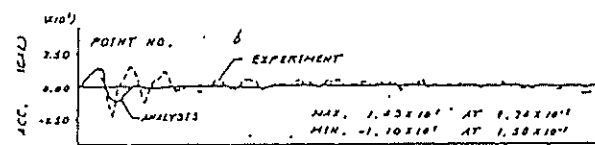
A. 加速度

P. 間げき圧

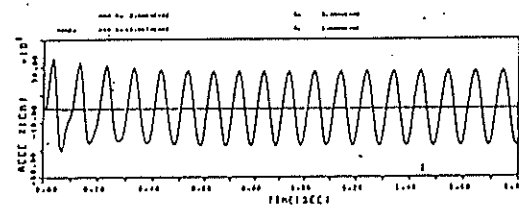
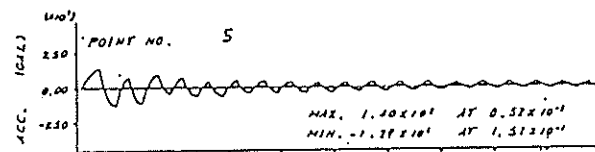
RD. セン断ひずみ

図4.2.6-2 文献記載のモデル

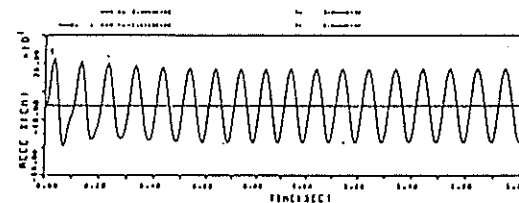
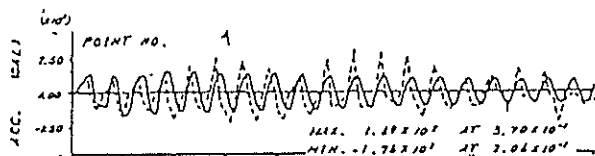
節点 6



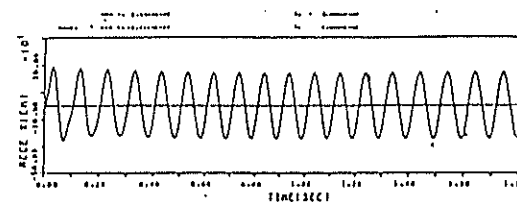
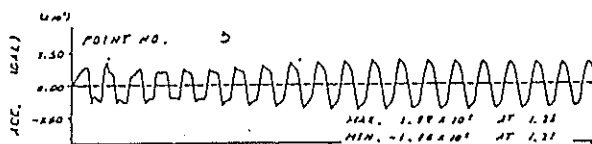
節点 5



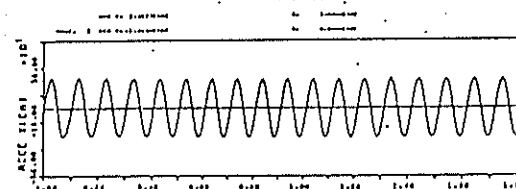
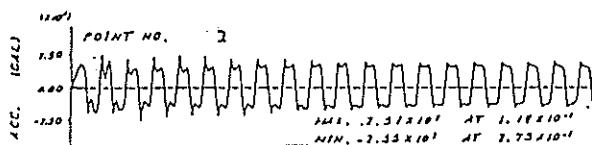
節点 4



節点 3



節点 2

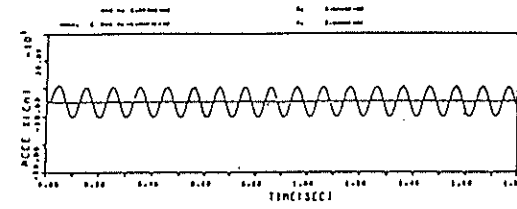
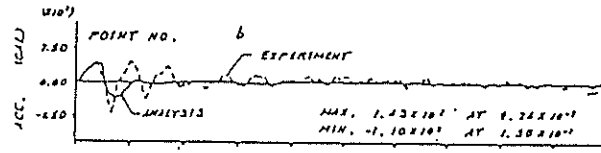


文献データ

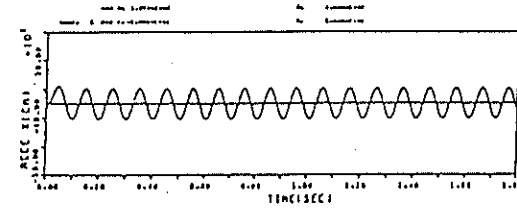
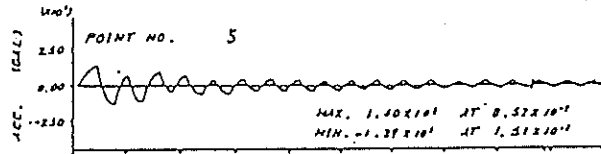
解析結果

図4.2.7-1 実験結果と2相系解析での解析結果の比較

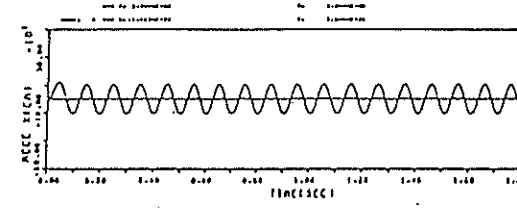
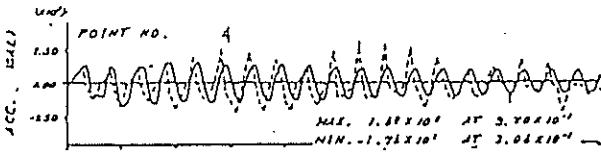
节点 6



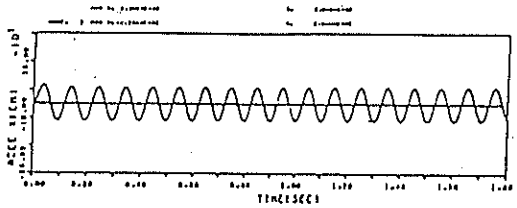
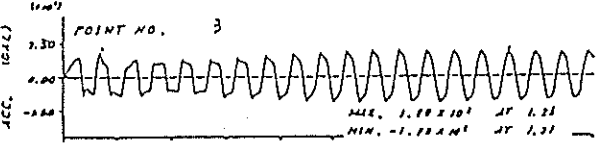
节点 5



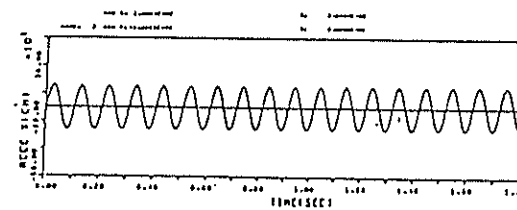
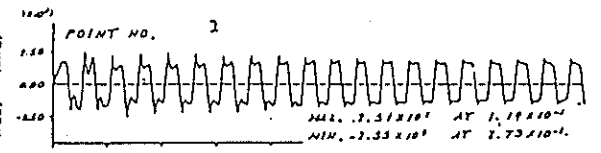
节点 4



节点 3



节点 2



文献データ

解析結果

図4.2.7-2 実験結果と1相系解析での解析結果の比較

小型試験体センサ配置図

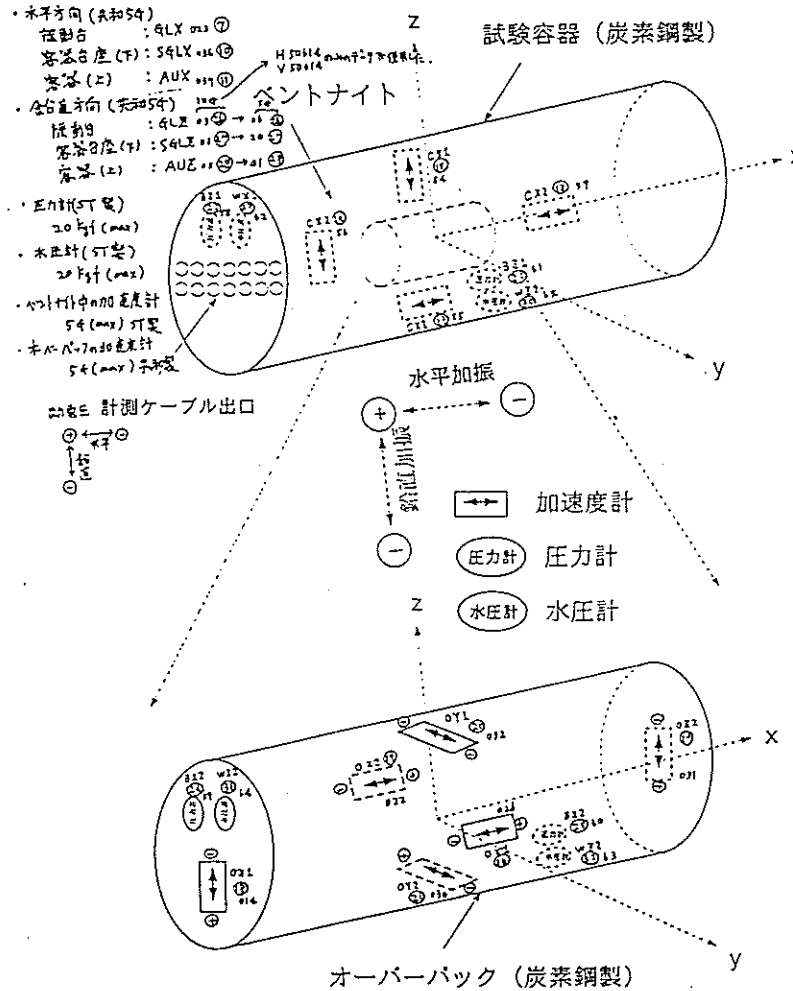


図4.3.5-1 小型振動試験用モデルと計測位置

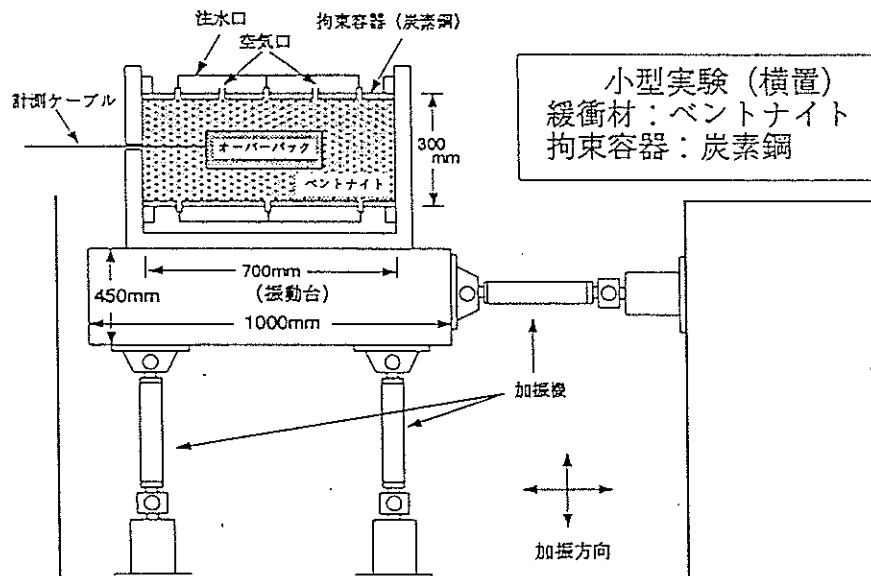


図4.3.5-2 振動試験装置

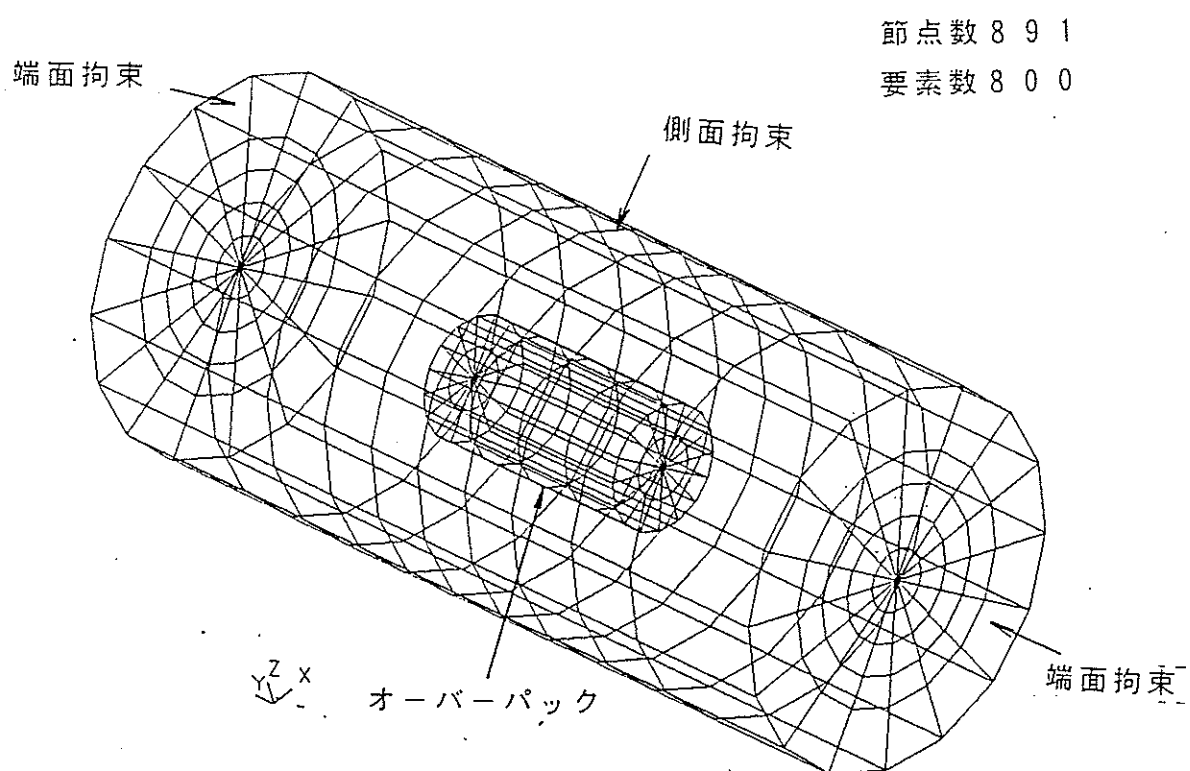


図4.3.5-3 実固有値解析用モデルと拘束条件

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: DRtape.H1210_1

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

Input : AUX

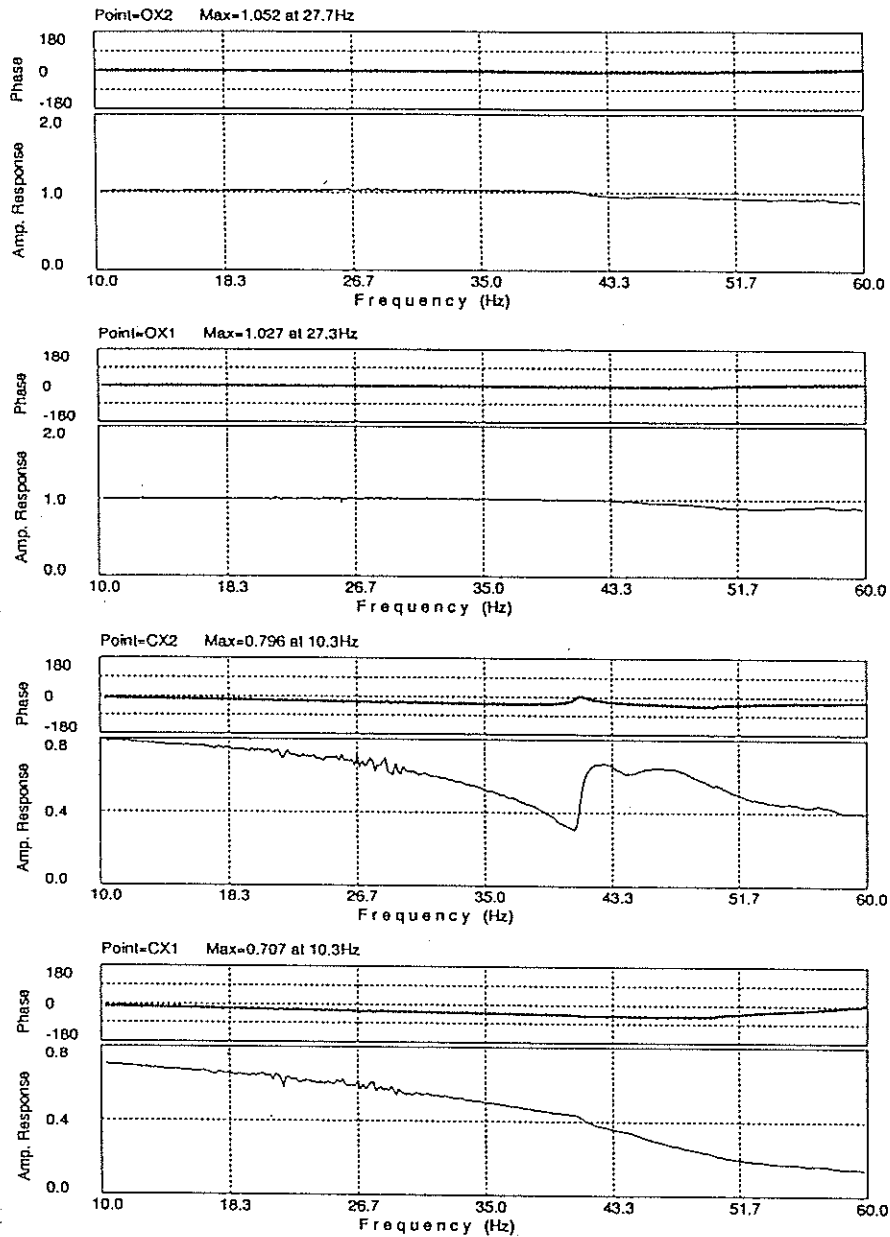


図4.3.6-1 スイープ試験結果

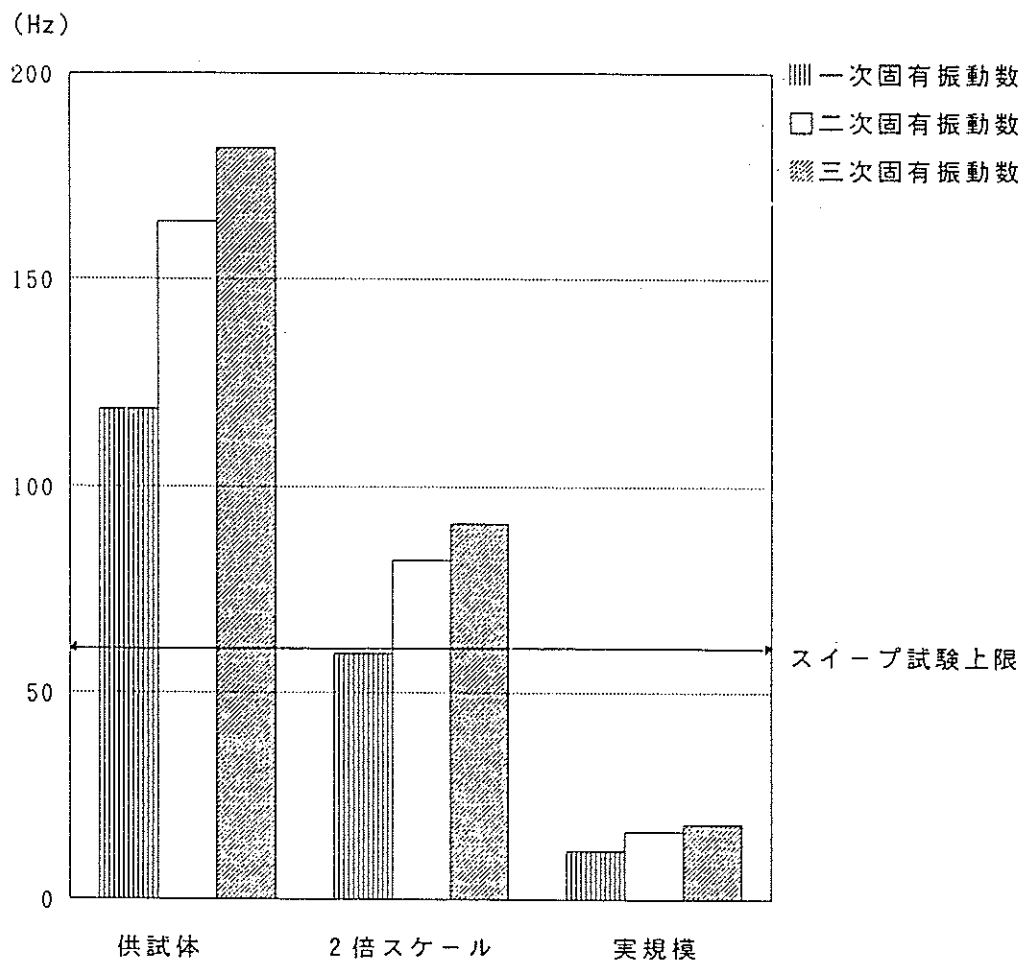


図4.3.6-2 ベントナイト充填密度 $1.63\text{gf}/\text{cm}^3$ (湿潤時) 各モデルでの固有振動数

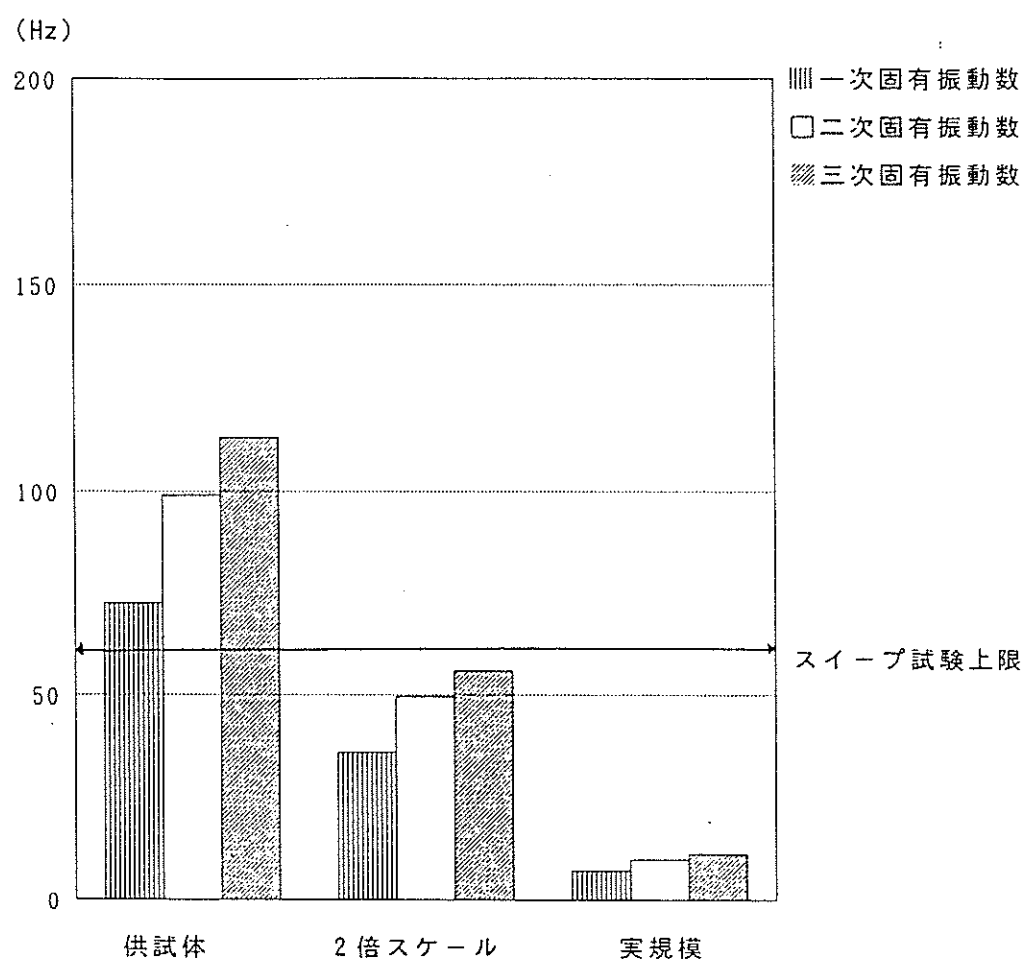
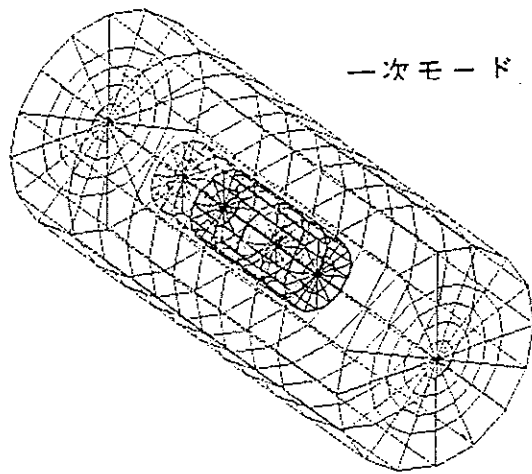
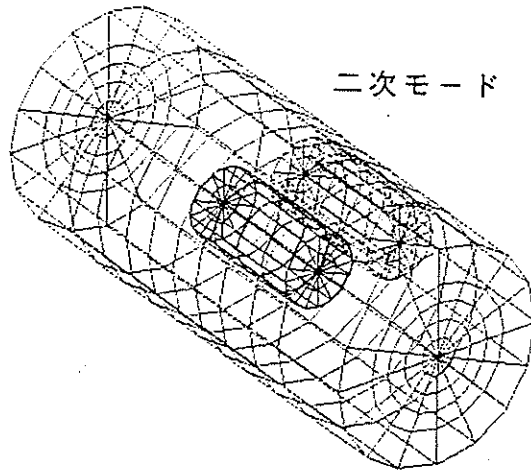


図4.3.6-3 ベントナイト充填密度 $1.42\text{gf}/\text{cm}^3$ （湿潤時）各モデルでの固有振動数

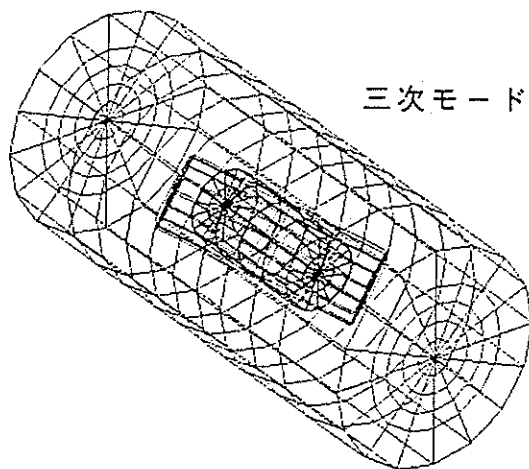


一次モード

濃線 原型
淡線 変形



二次モード



三次モード

図4.3.6-4 モード図

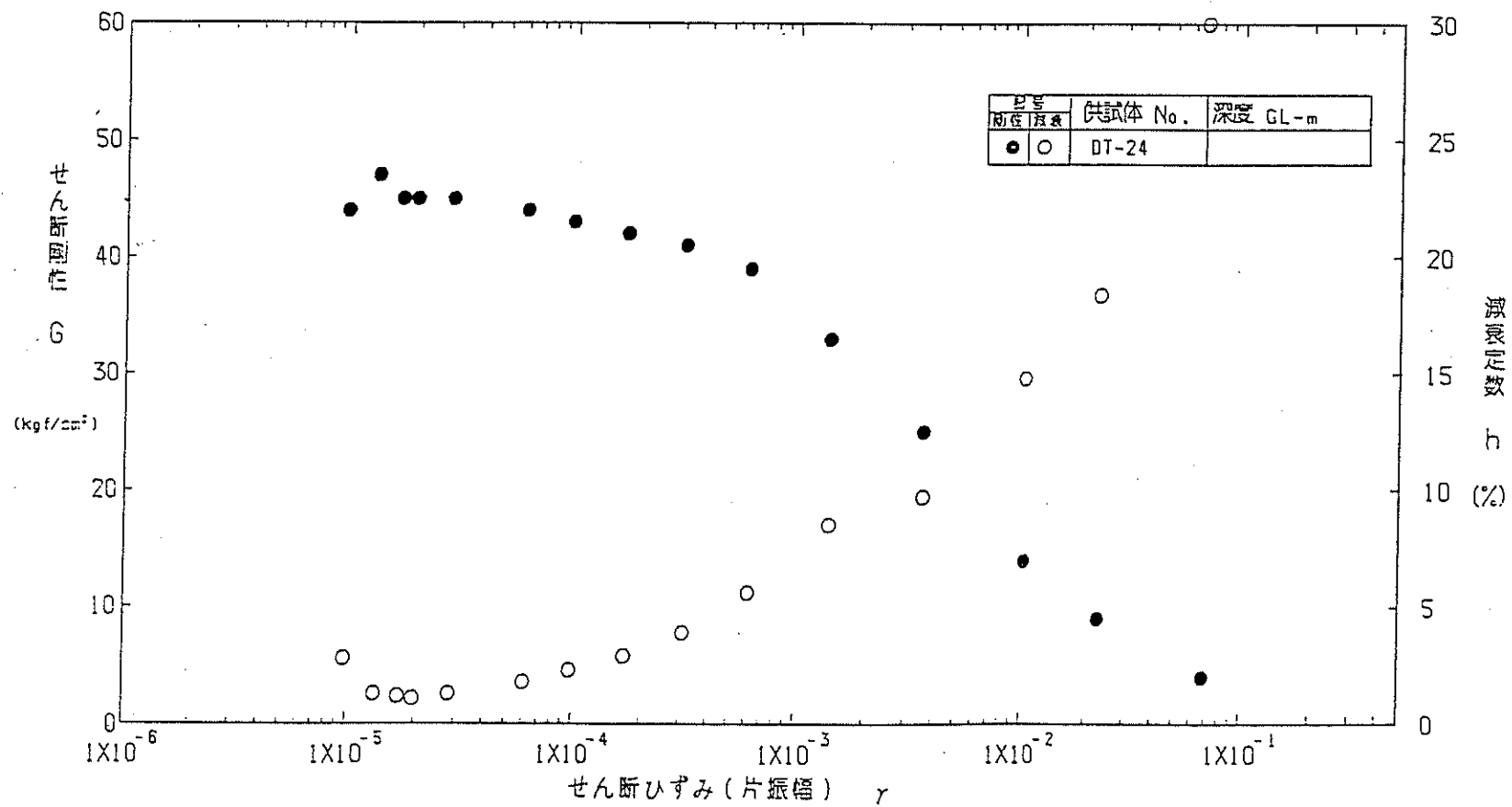


図4.4.4-1 DT-24におけるせん断弾性係数 G ～せん断ひずみ γ の関係

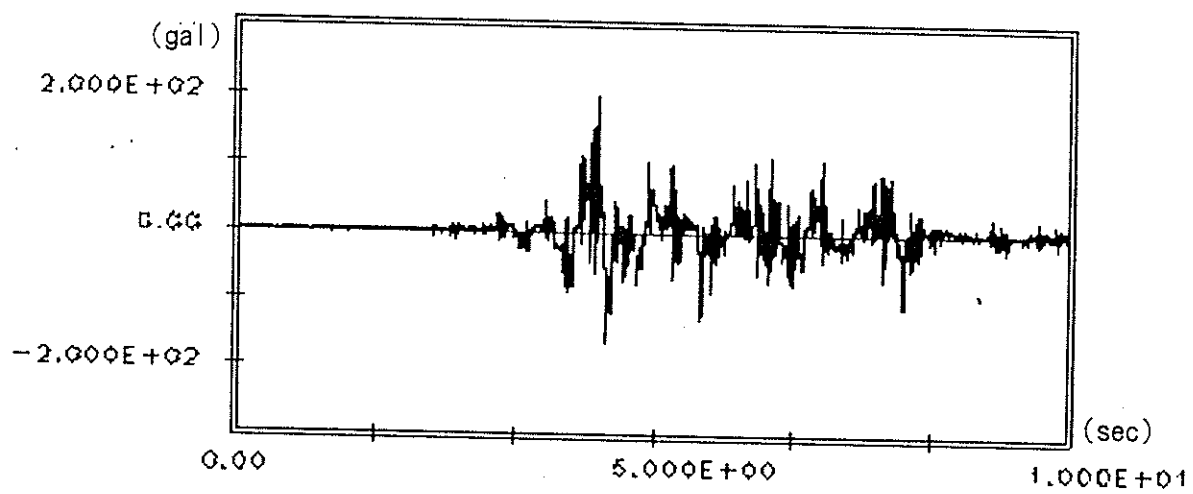


图4.4.5-1 EL-Centro N-S 波形 (最大加速度200gal)

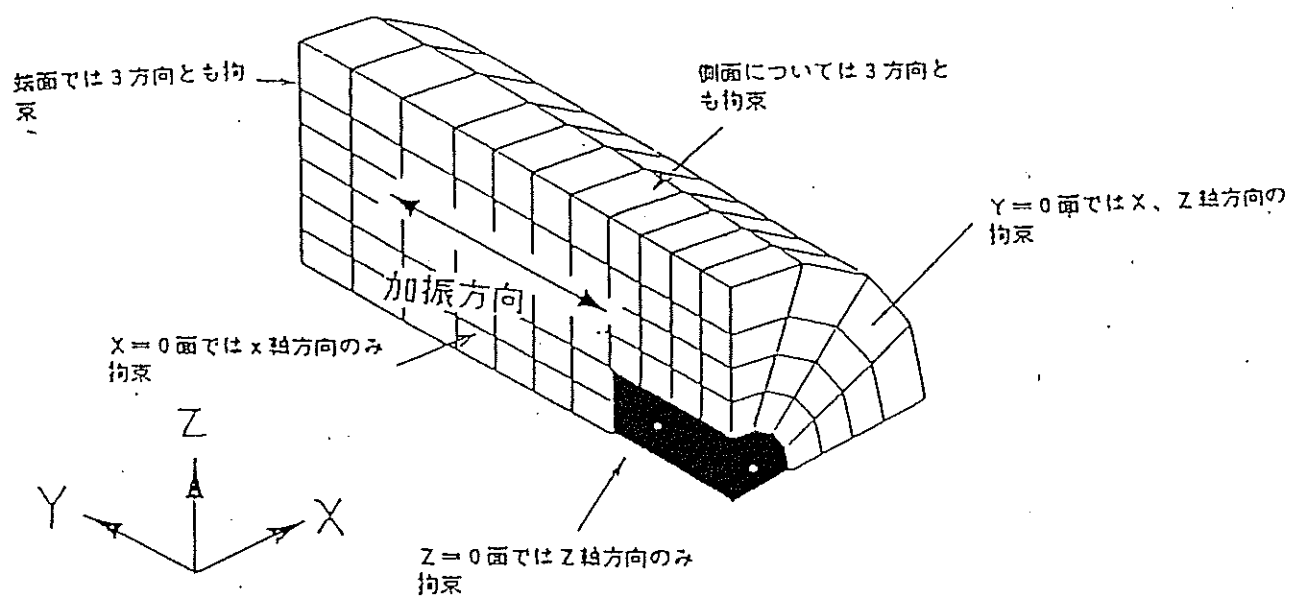
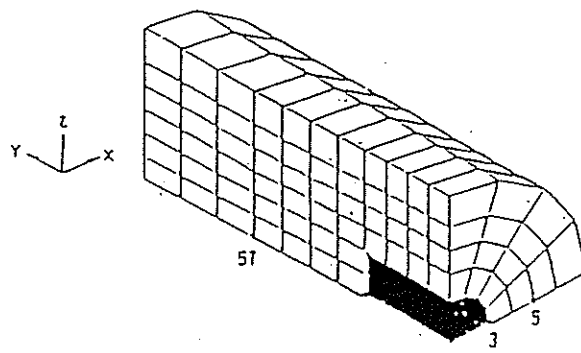
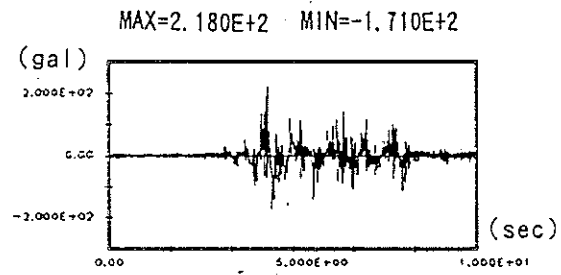


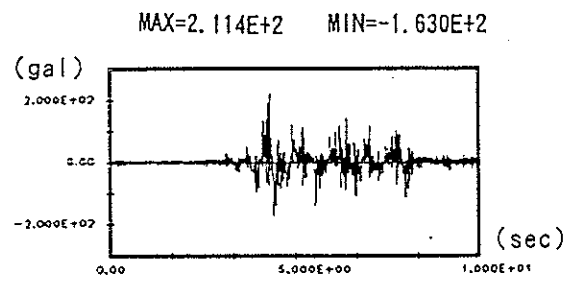
図4.4.6-2 解析用モデルの拘束条件



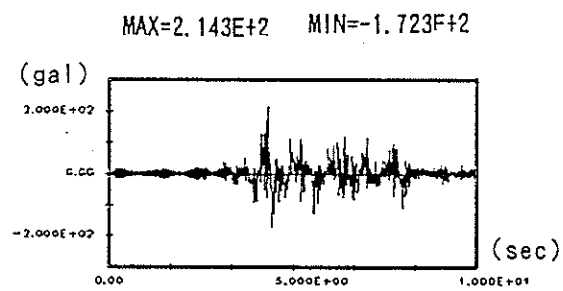
節点
3



節点
5



節点
57



地震
加速
度:

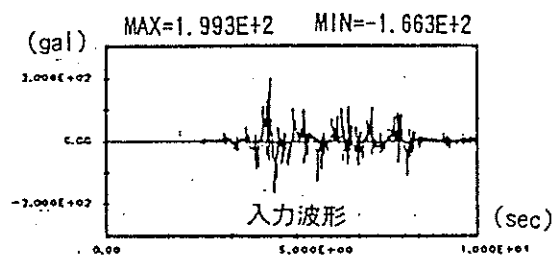
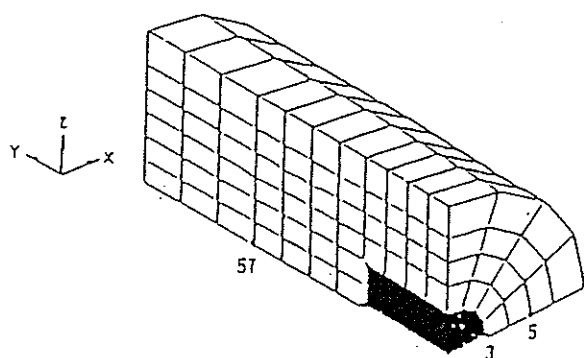
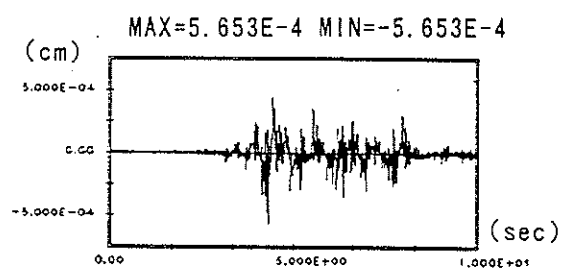


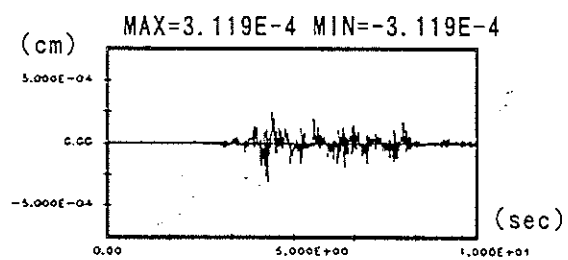
図4.4.7-1 加速度に関する解析結果



節点
3



節点
5



節点
57

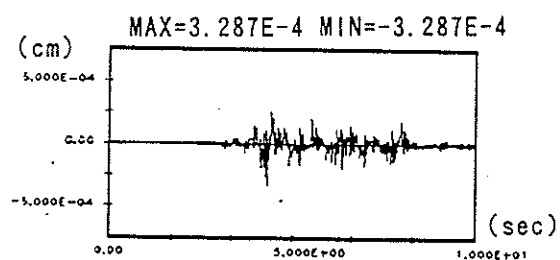
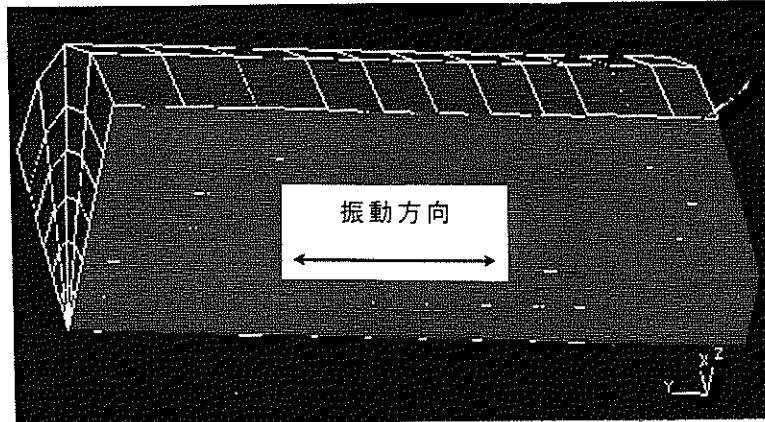


図4.4.7-2 変位に関する解析結果

振動開始から4.325 秒後



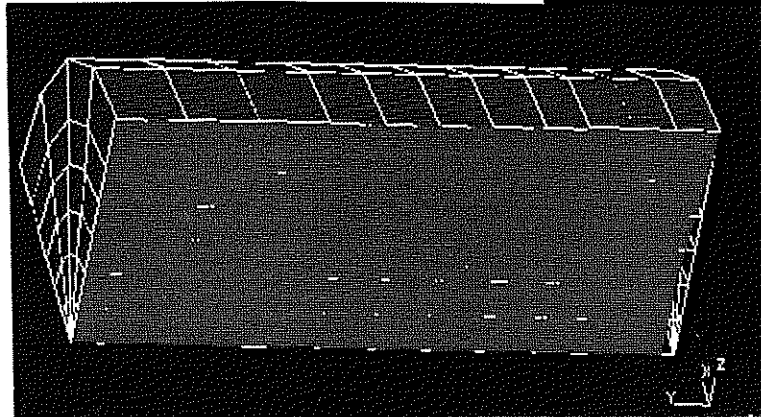
白線 原型

青色 変形

倍率 : 変位 $\times 10000$

オーバーパック付近

振動開始から4.385 秒後



振動開始から4.425 秒後

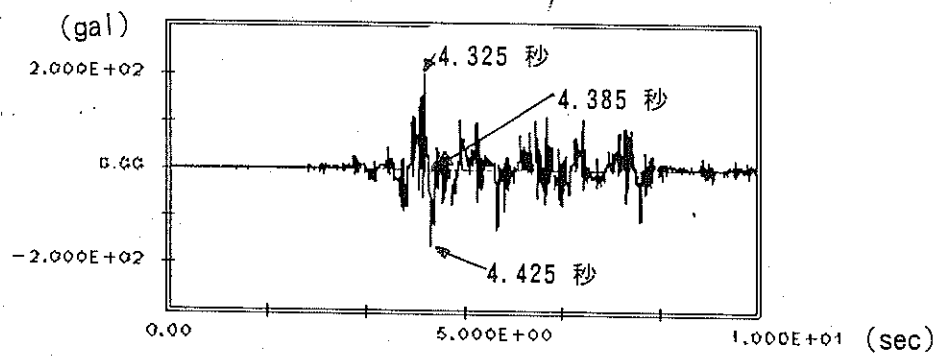
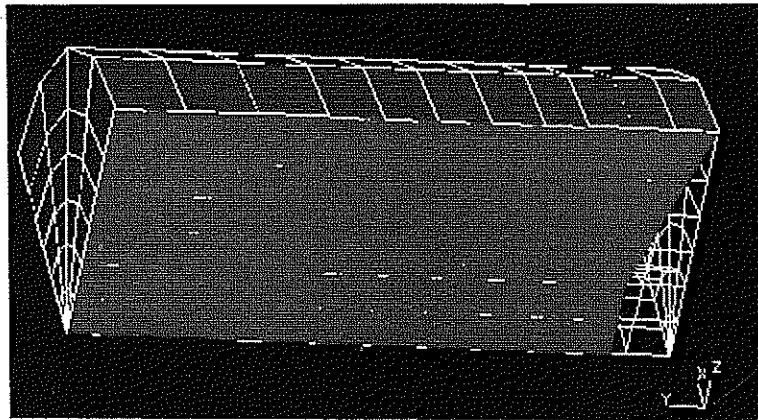


図4.4.7-3 AVSによる各時間点での変位の分布のポスト処理

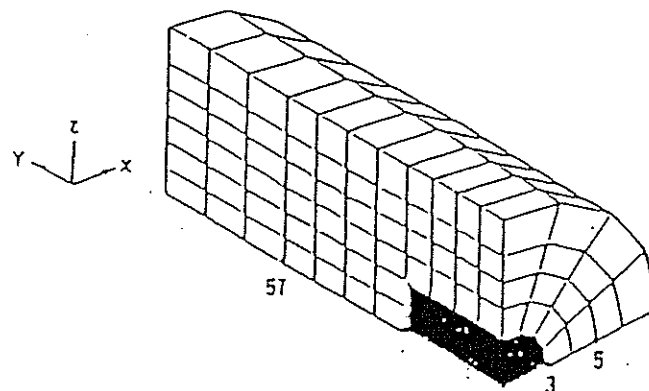
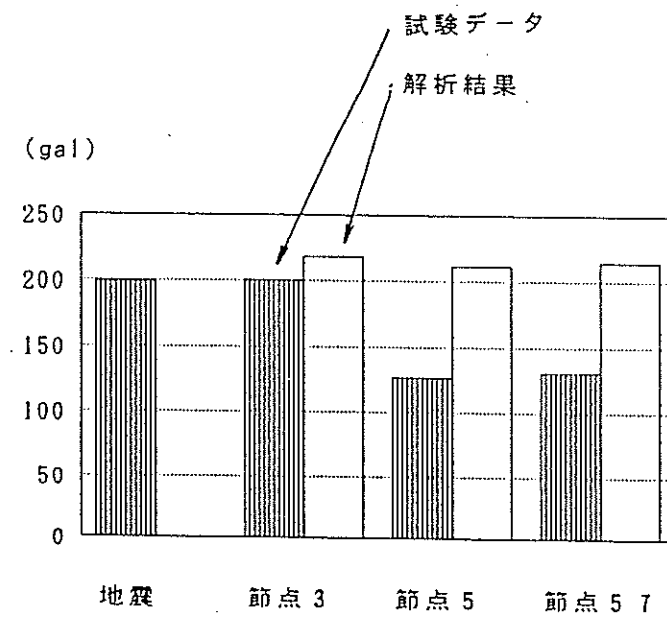


図4. 4. 7-4 試験データと解析結果の最大加速度の比較

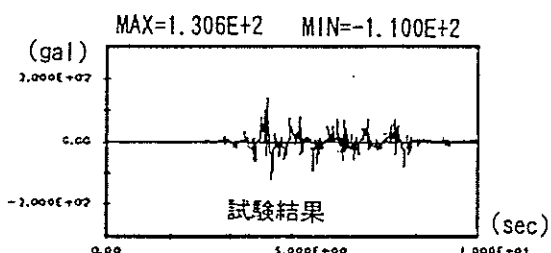
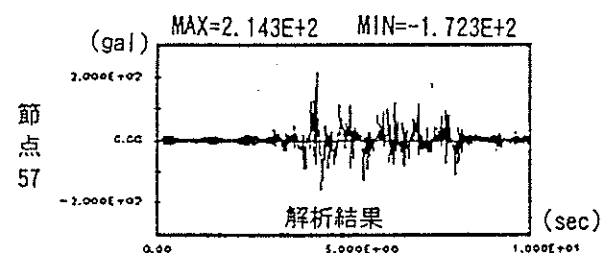
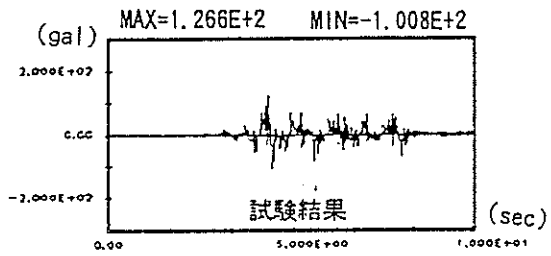
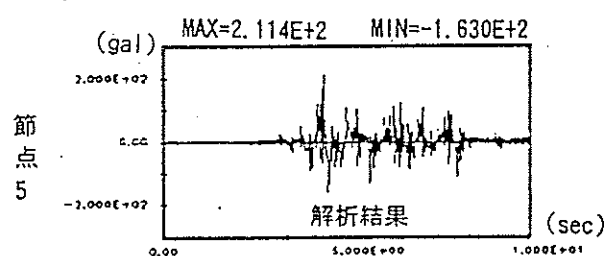
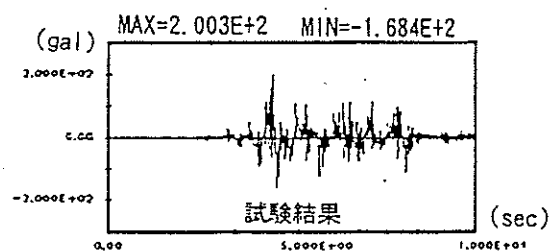
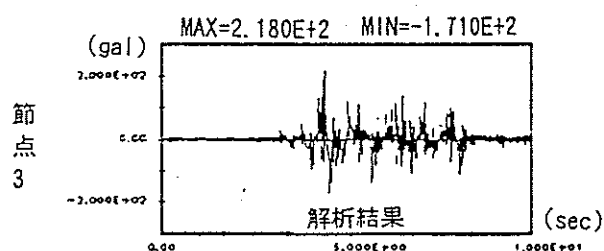
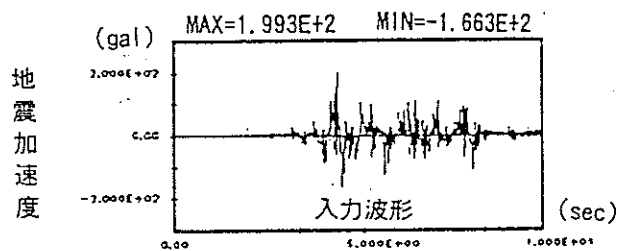
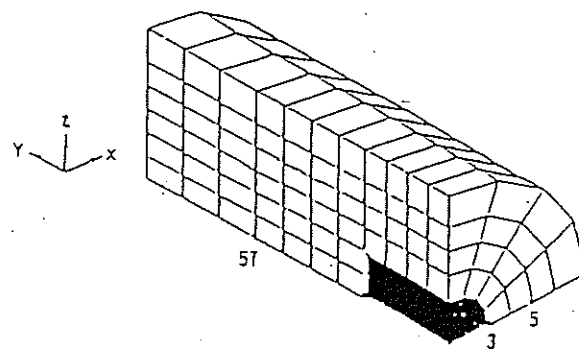


図4.4.7-5 試験データと解析結果の絶対加速度波形の比較

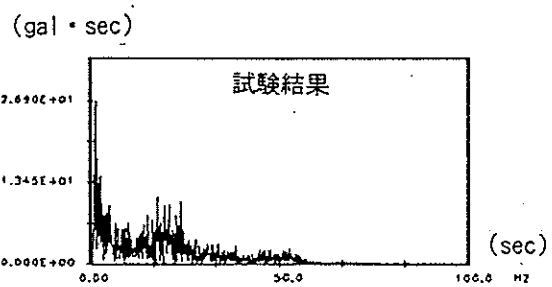
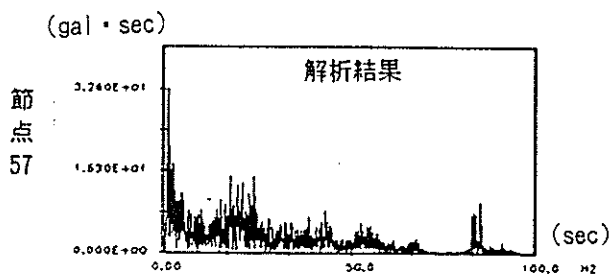
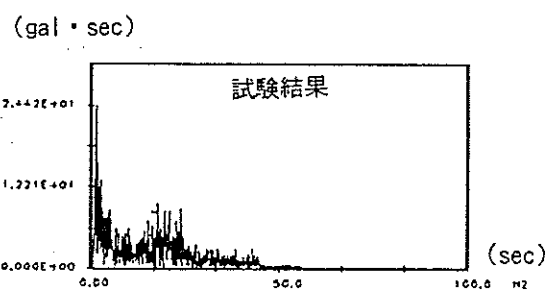
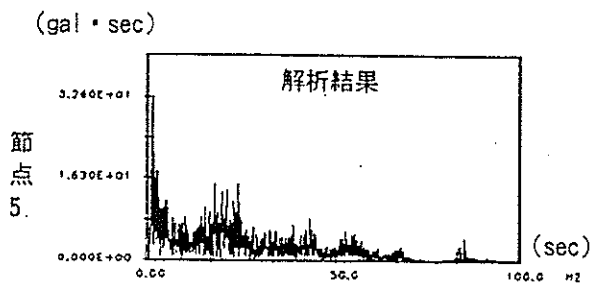
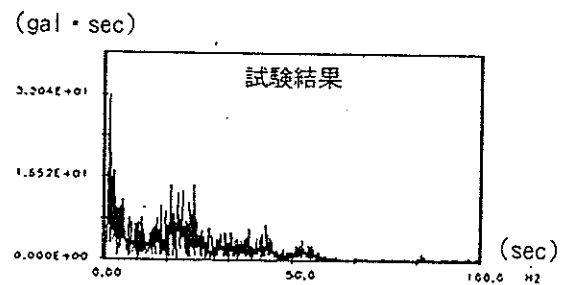
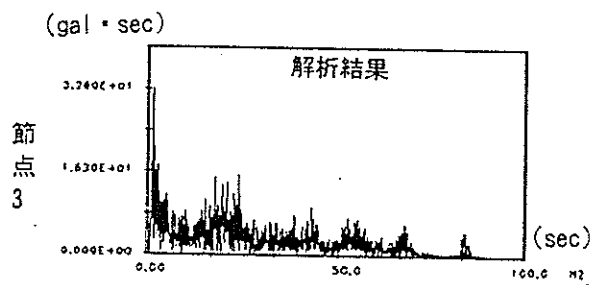
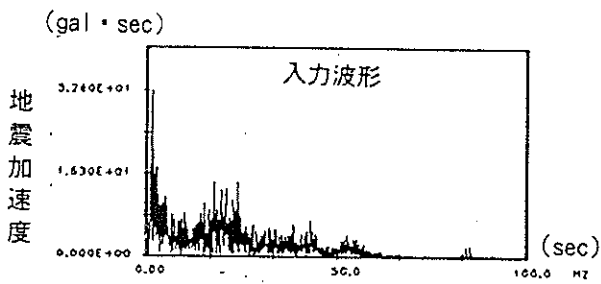
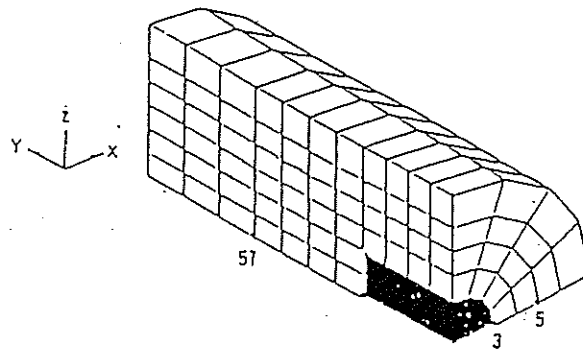


図4. 4. 7-6 試験データと解析結果の絶対加速度フーリエ振幅スペクトルの比較

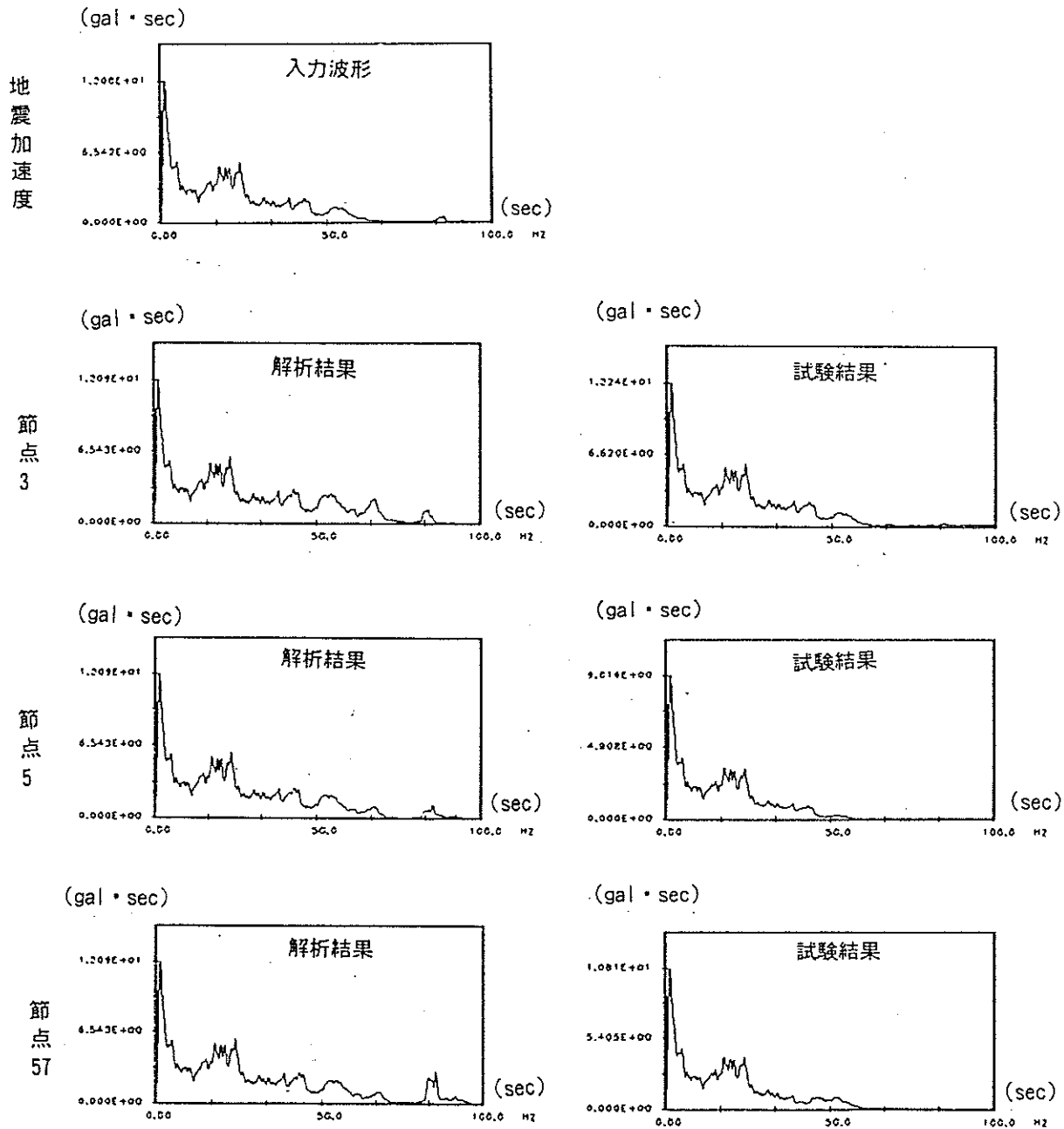
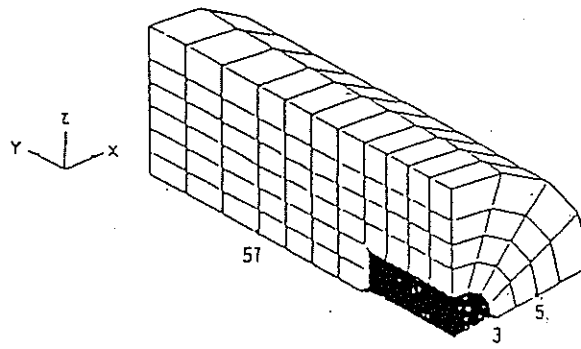


図4.4.7-7 フーリエ振幅スペクトルの平滑化

注水後

注水前

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: DRlapr.H1206_1
File.1 SWEEP 10-60 Hz, 300sec, H(X) (50 gal)
Input : AUX

SWEEP EXCITATION RESPONSE ANALYSIS

File: DRlapr.H50705_sweep1
File.4 SWEEP 10-70 Hz, 360sec, H(X) (50 gal), sampling=200Hz
Input : AUX

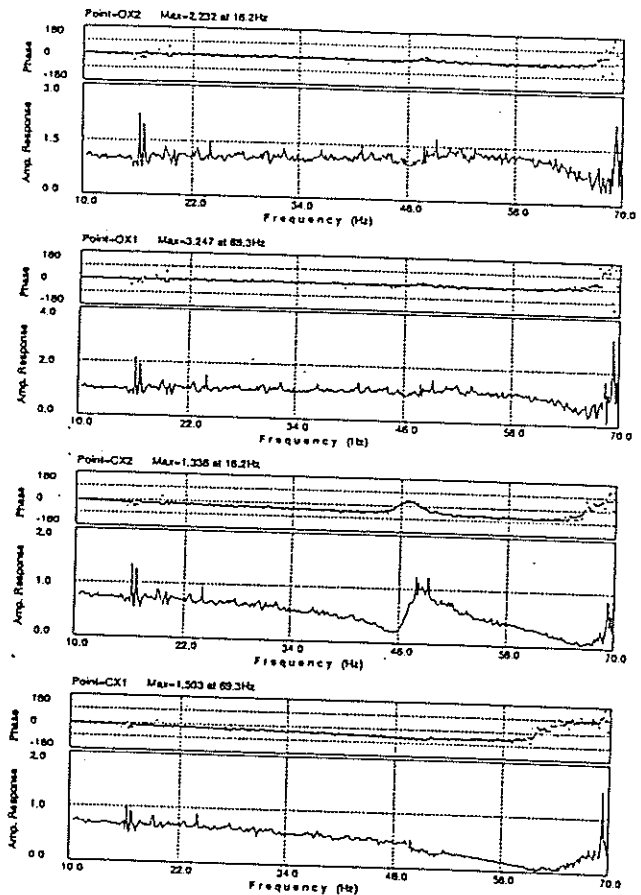
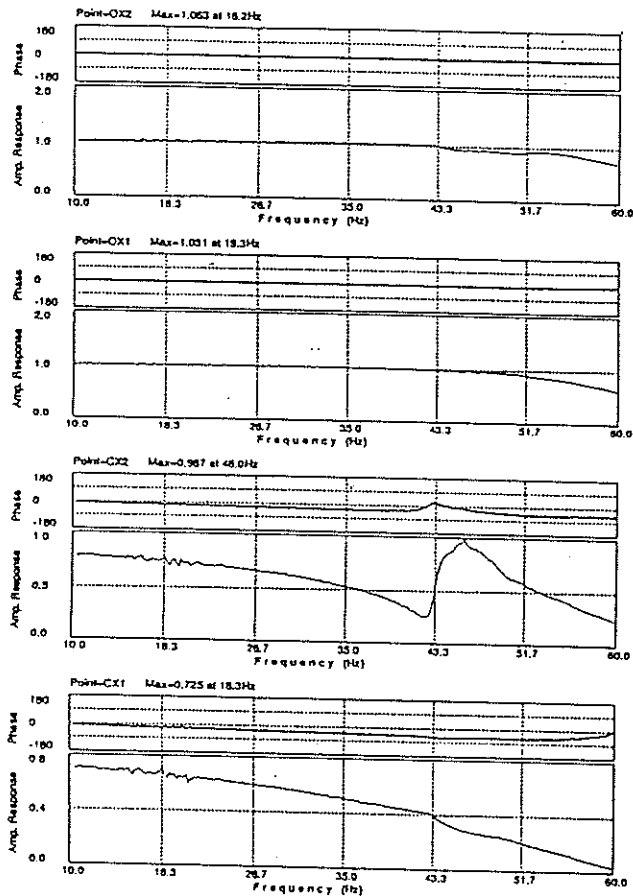


図4.4.7-8 スイープ試験結果

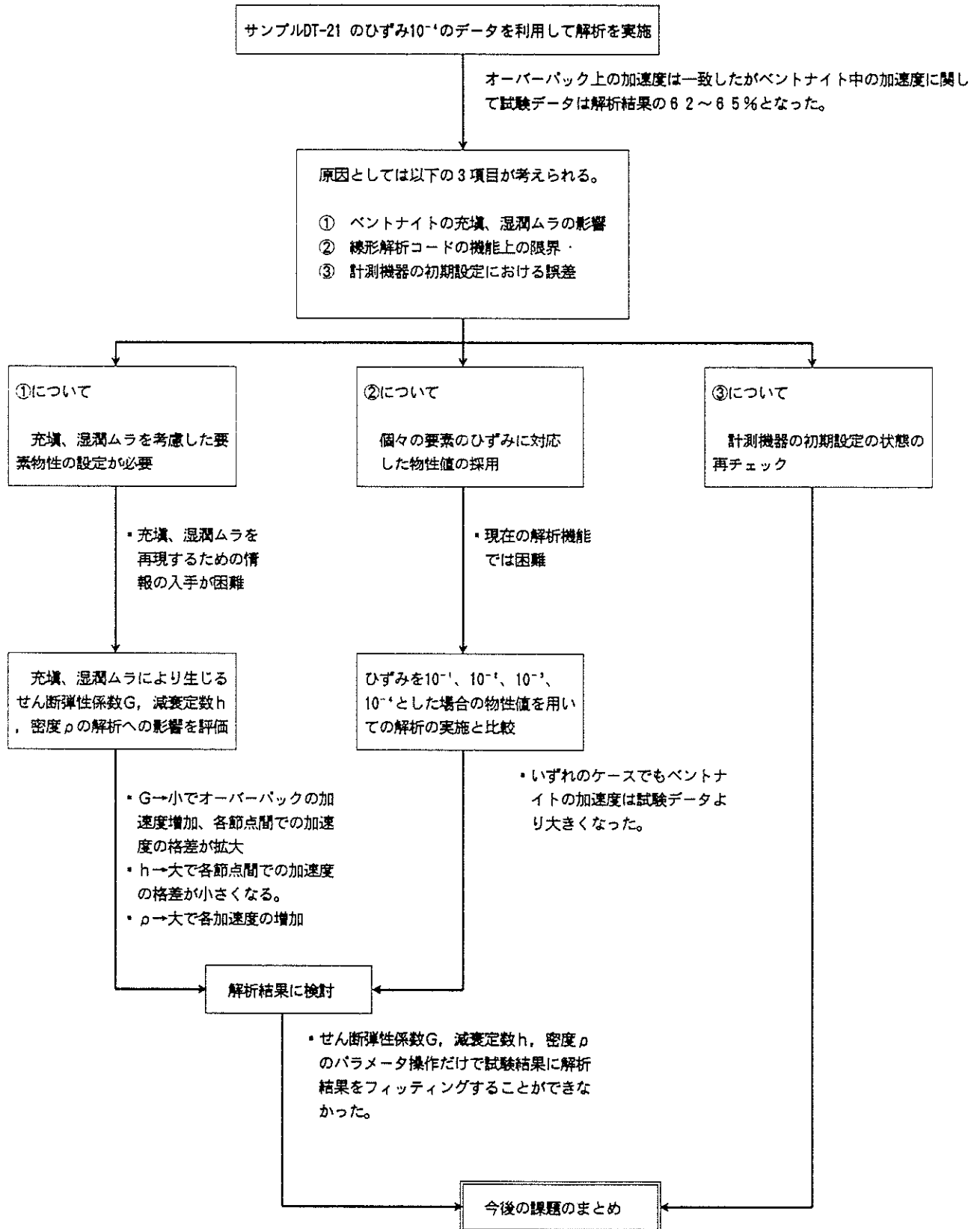
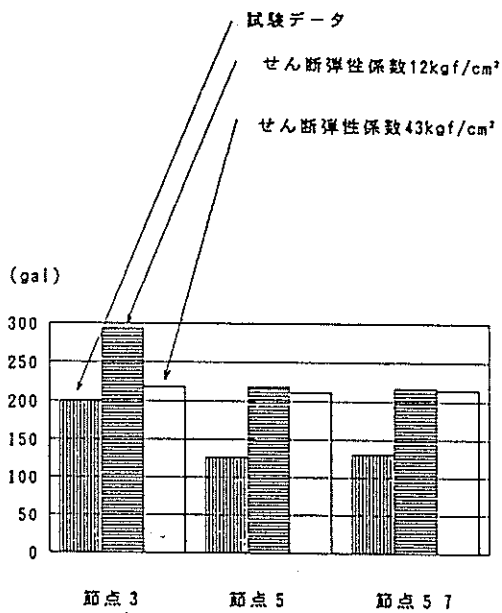
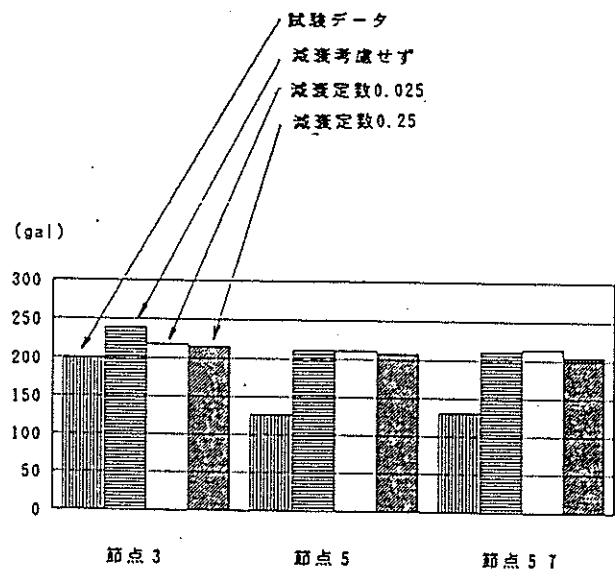


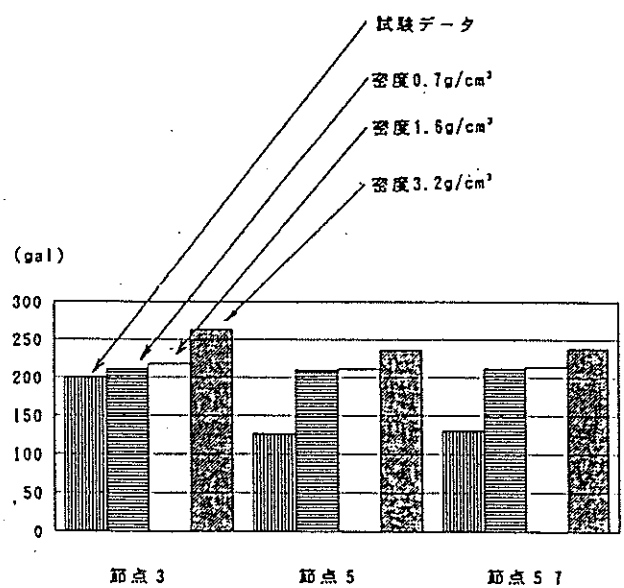
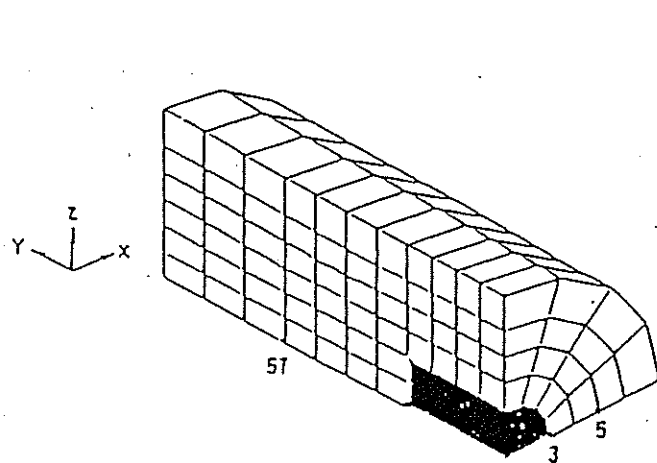
図4. 4. 7-9 パラメータ解析手順と結果



せん断弾性係数をパラメータとした解析結果

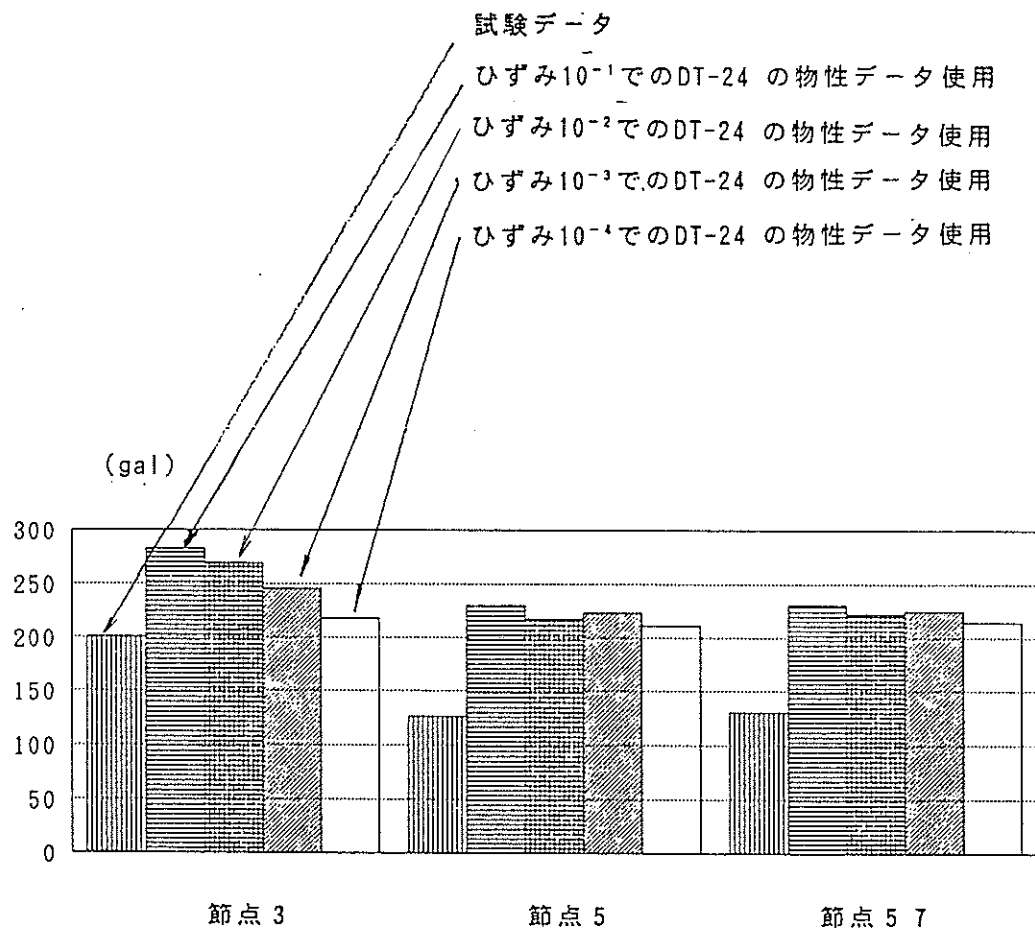


減衰定数をパラメータとした解析結果



密度をパラメータとした解析結果

図4.4.7-10 ベントナイトの各パラメータの解析結果への影響



ひずみ	せん断弾性係数(kgf/cm ²)	減衰定数	固有振動数(Hz)
10^{-1}	9.8	0.25	34
10^{-2}	36.0	0.15	65
10^{-3}	105.0	0.075	111
10^{-4}	120.0	0.025	118

図4.4.7-11 ひずみ 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} での物性値を用いた解析結果の比較

5 今後の課題

本年度の研究項目として、

- ① 土質材料の振動時の物性に関する文献調査
- ② 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相系動的等価線形解析機能	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検討	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が可能)	粘生境界の追加	ジョイント要素の追加
3. モデル／コードの妥当性の検討		・模擬振動試験予備解析 ・小型振動試験予備解析 ・模擬振動試験データ解析	・小型振動試験データを用いた周波数応答解析機能の検証	・等価線形解析機能解析による解析の実施と試験結果との比較検討	・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

[illegible]

サブルーチン FPHSIN (IFPHS, NUM, MAXSZ, NEXT, IERR)

節点値時刻歴データ出力指定読み込みルーチン

[illegible]

サブルーチン FEHSIN (IFEHS, MAXSZ, NEXT, IERR, NOD, NENT, INTORD)

要素値時刻歴出力指定読み込みルーチン

[illegible]

サブルーチン FPD11N (DFREQ, NF, IFPD1, MAXSIZ, NEXT, IERR)

節点値分布データ出力指定読み込みルーチン

[illegible]

サブルーチン FEDLIN (DFREQ, NF, IFEDI, MAXSIZ, NEXT, IERR)

要素値分布データ出力指定読み込みルーチン

[illegible]

サブルーチン FREQIN (NTEAR, DTEAR, NF, DFREQ, MAXSIZ, NEXT, IERR)

周波数応答解析に関する情報読み込みルーチン

[illegible]

サブルーチン FDOM (IWK, NWK, NUM, NOD, COD, ICOD, NPCOD, MAT, RMAT, IFIX, MPCT, IMPC, CMPC, NENT, INTORD, NT, DTIME, INODL, IPRES, IEART, RNODL, PRES, EART, IFNSP, FNSP, FTABL, PWEI, ESTRO, EPPRE0, ISAVE, IPHST, IEHST, IPDIS, IEDIS, IEXTYP, DTEAR, NTEAR, DFREQ, NF, IFPHS, IFEHS, IFPDI, IFEDI)		
地震荷重フーリエスペクトル解析及び周波数応答解析ルーチン		
引数名	引数の型	引数の内容
IWK	INTEGER * 4 IWK(NWK)	データ保存用データテーブル
NWK	INTEGER * 4	IWKの大きさ
NUM	INTEGER * 4	節点番号
NOD	INTEGER * 4	節点データ
COD	REAL * 8	節点座標値データ
ICODE	INTEGER * 4	節点座標系参照テーブル
NPCOD	INTEGER * 4	節点座標系定義テーブル
MAT	INTEGER * 4	要素材料定義テーブル
RMAT	REAL * 8	要素材料テーブル
IFIX	INTEGER * 4	節点拘束に関する情報
MPCT	INTEGER * 4	MPC結合定義データ
IMPC	INTEGER * 4	MPC結合定義データ
CMPC	REAL * 8	MPC結合定義データ
NENT	INTEGER * 4	使用せず
INTORD	INTEGER * 4	要素積分点数定義テーブル
NT	INTEGER * 4	使用せず
DTIME	REAL * 8	使用せず
INODL	INTEGER * 4	外圧データテーブル開始アドレス
IPRES	INTEGER * 4	面分布圧力データテーブル開始アドレス
IEART	INTEGER * 4	地震外力データテーブル開始アドレス
RNODL	REAL * 8	動的節点荷重定義テーブル開始アドレス (使用せず)
PRES	REAL * 8	動的面分布荷重定義テーブル開始アドレス (使用せず)
EART	REAL * 8	地震荷重関数の数
IFNSP	INTEGER * 4	時間関数定義データテーブル
FNSP	REAL * 8	時間関数定義データテーブル

引数名	引数の型	引数の内容
FTABL	REAL * 8	離散点データテーブル
PWEI	REAL * 8	節点質量
ESTR0	REAL * 8	初期応力データテーブル
EPPRE0	REAL * 8	初期間隙水圧データテーブル
ISAVE	INTEGER * 4	出力ファイル情報
IPHST	INTEGER * 4	節点値時刻歴出力指定データテーブル（使用せず）
IEHST	INTEGER * 4	要素値時刻歴出力指定データテーブル（使用せず）
IPDIS	INTEGER * 4	節点値分布出力指定データテーブル
IEDIS	INTEGER * 4	要素値分布出力指定データテーブル
IEXTYP	INTEGER * 4	使用せず
DTEAR	REAL * 8	地震荷重データのタイムステップ
NTEAR	INTEGER * 4	地震荷重の数（＝現在は1）
DFREQ	REAL * 8	使用せず
NF	INTEGER * 4	使用せず
IFPHS	INTEGER * 4	節点値周波数歴出力指定データテーブル
IFEHS	INTEGER * 4	要素値周波数歴出力指定データテーブル
IFPDI	INTEGER * 4	節点値分布出力データテーブル
IFEDI	INTEGER * 4	要素値分布出力データテーブル

サブルーチン CEMATG (CEK, CEKW, CEM, CEC, EK, EKW, EM, EC, IEK, IEKW, IEM, IEC, IENO, ISPEC, IMNO, NDEG, NODE, COD, ICOD, NPCOD, NNOD, NCOD, NNPE, LIST, IPTYPE, MAT, RMAT, NORD, NORDPP, IRAYDP, IATRAN, ARTRAN, PMASS, IMASS)			
質量マトリクス、剛性マトリクス、減衰マトリクス作成ルーチン			
引数名	引数の型		引数の内容
CEK	COMPLEX * 16	CEK(NDEG, 1)	複素剛性マトリクス (土)
CEKW	COMPLEX * 16	CEKW(NDEG, 1)	複素剛性マトリクス (水)
CEM	COMPLEX * 16	CEM(NDEG, 1)	複素質量マトリクス
CEC	COMPLEX * 16	CEC(NDEG, 1)	複素減衰マトリクス
EK	REAL * 8		剛性マトリクス (土)
EKW	REAL * 8		剛性マトリクス (水)
EM	REAL * 8		質量マトリクス
EC	REAL * 8		減衰マトリクス
IEK	INTEGER * 4		作成フラグ
IEKW	INTEGER * 4		作成フラグ
IEM	INTEGER * 4		作成フラグ
IEC	INTEGER * 4		作成フラグ
IENO	INTEGER * 4		要素識別番号
ISPEC	INTEGER * 4		要素種類
IMNO	INTEGER * 4		要素材料番号
NDEG	INTEGER * 4		全自由度
NODE	INTEGER * 4		要素構成データテーブル
COD	REAL * 8		節点座標値テーブル
ICOD	INTEGER * 4		節点座標系参照テーブル
NPCOD	INTEGER * 4		節点座標系定義テーブル
NNOD	INTEGER * 4		節点数
NCOD	INTEGER * 4		節点座標系の数
NNPE	INTEGER * 4		要素構成データテーブル数
LIST	INTEGER * 4		出力ファイル番号
IPTYPE	INTEGER * 4		問題タイプ (=1 平面応力、=2 平面ひずみ、=3 3次元)

サブルーチン PLN4C (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EK, CEK, LIST, NDEG, NORD, NORDPP, IPTYPE)

四辺形一次要素の剛性複素マトリクス作成ルーチン (固体)

[illegible]

サブルーチン HEX8C (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EK, CEK, LIST, NDEG, NORD, NORDPP,
IATRAN, ARTRAN)

六面体一次要素の要素複素剛性マトリクス作成ルーチン (固体)

[illegible]

2 2. サブルーチン CHX20W (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EK, CEK, LIST, NDEG, NORD, NORDPP, IATRAN, ARTRAN)

六面体二次要素の要素複素剛性マトリクス (流体)

[illegible]

サブルーチン CCPL4 (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EC, CEC, LIST, NDEG, NORD, NORDPP)

四辺形一次要素の要素相互作用マトリックスの作成（2相系解析のみ利用）

[illegible]

サブルーチン CCPL8 (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EC, CEC, LIST, NDEG)

四辺形二次要素の要素相互作用マトリクスの作成（2相系解析のみ利用）

[illegible]

サブルーチン CCHX8 (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EC, CEC, LIST, NDEG, NORD, NORDPP,
IATRAN, ARTRAN)

六面体一次要素の要素相互作用マトリクスの作成（2 相系解析のみ利用）

[illegible]

サブルーチン CCHX20 (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EC, CEC, LIST, NDEG, IATRAN, ARTRAN)

六面体二次要素の要素相互作用マトリックスの作成（2相系解析のみ利用）

[illegible]

サブルーチン CCRH8 (IENO, IMNO, NODE, COD, MAT, RMAT, EC, CEC, LIST, NDEG, EM, EK, EKW)

六面体一次要素の要素減衰マトリクス

[illegible]

サブルーチン CASME1 (EM, INDE, A, NAREA, ID, MAXA, NDEG, N9, NNOD, NFSET, LIST)

全体マトリクス作成ルーチン

[illegible]

サブルーチン FESDR1 (STRES, STRAIN, NSTR, IENO, ISPEC, IMNO, NDEG, NODE, COD, ICOD, NPCOD, NGP, NNOD, NCOD, NNPE, NORD, LIST, IPTYPE, MAT, RMAT, NMAT, DISP, ID, NDOF, UE, INDE, STRHS, IATRAN, ARTRAN)			
応力・ひずみ計算ルーチン			
引数名	引数の型		引数の内容
STRES	COMPLEX * 16	STRES(NSTR, NGP)	応力データテーブル
STRAIN	COMPLEX * 16	STRAIN(NSTR, NGP)	ひずみデータテーブル
NSTR	INTEGER * 4		応力種類の数
IENO	INTEGER * 4		要素識別番号
ISPEC	INTEGER * 4		要素種類
IMNO	INTEGER * 4		要素材料番号
NDEG	INTEGER * 4		全自由度
NODE	INTEGER * 4		要素構成節点データテーブル
COD	REAL * 8		節点座標値テーブル
ICOD	INTEGER * 4		節点座標系参照テーブル
NPCOD	INTEGER * 4		節点座標系定義テーブル
NGP	INTEGER * 4		ガウス積分点数 (固体)
NNOD	INTEGER * 4		節点数
NCOD	INTEGER * 4		節点座標系の数
NNPE	INTEGER * 4		要素を構成する節点の数
NORD	INTEGER * 4		ガウス積分点数 (一方向)
LIST	INTEGER * 4		出力ファイル番号
IPTYPE	INTEGER * 4		問題タイプ
MAT	INTEGER * 4		要素材料定義テーブル
RMAT	REAL * 8		要素材料テーブル
NMAT	INTEGER * 4		材料の数
DISP	COMPLEX * 16	DISP(8)	ワークエリア (変位)
ID	INTEGER * 4		変位成分の全体方程式での自由度番号
NDOF	INTEGER * 4		全自由度
UE	COMPLEX * 16	UE(NDEG)	変位

サブルーチン FEPDR1 (PPRE, IENO, ISPEC, IMNO, NDEG, NODE, COD, ICOD, NPCOD, NGP, NNOD, NCOD, NNPE, NORD, LIST, IPTYPE, MAT, RMAT, NMAT, DISP, ID, NDOF, UE, INDE, UEW, INDEPP, IATRAN, ARTRAN)		
間隙水圧計算ルーチン		
引数名	引数の型	引数の内容
PPRE	COMPLEX * 16 PPRE(NGP)	間隙水圧データテーブル
IENO	INTEGER * 4	要素識別番号
ISPEC	INTEGER * 4	要素種類
IMNO	INTEGER * 4	要素種類
NDEG	INTEGER * 4	全自由度
NODE	INTEGER * 4	要素構成節点データテーブル
COD	REAL * 8	節点座標値テーブル
ICOD	INTEGER * 4	節点座標系参照テーブル
NPCOD	INTEGER * 4	節点座標系定義テーブル
NGP	INTEGER * 4	ガウス積分点数 (流体)
NNOD	INTEGER * 4	節点数
NCOD	INTEGER * 4	節点座標系の数
NNPE	INTEGER * 4	要素を構成する節点の数
NORD	INTEGER * 4	ガウス積分点数 (一方向)
LIST	INTEGER * 4	出力ファイル番号
IPTYPE	INTEGER * 4	問題タイプ
MAT	INTEGER * 4	要素材料定義テーブル
RMAT	REAL * 8	要素材料テーブル
NMAT	INTEGER * 4	材料の数
DISP	COMPLEX * 16 DISP(NDOF)	ワークエリア (変位)
ID	INTEGER * 4	変位成分の全体方程式での自由度番号
NDOF	INTEGER * 4	全自由度
UE	COMPLEX * 16 UE (NDEG)	変位データ
INDE	INTEGER * 4	要素を構成する節点の自由度に関するデータテーブル (固体)
UEW	COMPLEX * 16 UEW(NDEG)	変位データ (流体)

サブルーチン CSPLN8 (STRES, STRAIN, DISP, S, T, IENO, NODE, COD, MAT, RMAT, LIST, IPTYPE, STRHS)

四辺形二次要素に関する応力、ひずみ計算ルーチン

[illegible]

サブルーチン CSHEX8 (STRES, STRAIN, DISP, S, T, U, IEND, NODE, COD, MAT, RMAT, LIST, STRHS,
IATRAN, ARTRAN)

六面体一次要素に関する応力，ひずみ計算ルーチン

[illegible]

[illegible]

サブルーチン DLOAD2 (FVEC, NDOF, TIME, ID, NNOD, NOD, NELEM, NNODL, NPRES, NEART, NFNC, NTABF, INODL, IPRES, IEART, RNODL, PRES, EART, IFNSP, FNSP, FTABL, MPCT, IMPC, CMPC, NCOND, LIST MAT, RMAT, NMAT, COD, EARV, IATRAN, ARTRAN, MAXSZ, N)		
地震荷重計算ルーチン		
引数名	引数の型	引数の内容
FVEC	REAL * 8	地震荷重ベクトル
NDOF	INTEGER * 4	節点の自由度にかんする情報
TIME	REAL * 8	時間点
ID	INTEGER * 4	変位成分の全体マトリクスの自由度番号
NNOD	INTEGER * 4	節点数
NOD	INTEGER * 4	要素構成データテーブル
NELEM	INTEGER * 4	要素数
NNODL	INTEGER * 4	節点荷重の数 (現在使用していない)
NPRES	INTEGER * 4	圧力荷重の数 (現在使用していない)
NEART	INTEGER * 4	地震荷重の数 (現在 = 1)
NFNC	INTEGER * 4	地震荷重を表す関数の数
NTABF	INTEGER * 4	地震荷重データテーブルの数
INODL	INTEGER * 4	節点荷重データテーブルの開始アドレス
IPRES	INTEGER * 4	圧力荷重データテーブルの開始アドレス
IEART	INTEGER * 4	地震荷重データテーブルの開始アドレス
RNODL	REAL * 8	節点荷重データテーブル
PRES	REAL * 8	圧力荷重データテーブル
EART	REAL * 8	地震荷重データテーブル
IFNSP	INTEGER * 4	時間関数定義テーブルの開始アドレス
FNSP	REAL * 8	時間関数定義テーブル
FTABL	REAL * 8	地震荷重データテーブル
MPCT	INTEGER * 4	MPC 結合定義データ
IMPC	INTEGER * 4	MPC 結合定義データ
CMPC	REAL * 8	MPC 結合定義データ
NCOND	INTEGER * 4	MPC 条件の数

サブルーチン EARTQ2 (NFSET, FVEC, NNOD, ID, NEART, IEART, EART, NFNC, IFNSP, FNSP, NTABF, FTABL, TIME, LIST, EARV, N, MPCT, IMPC, CMPC, NCOND)		
地震荷重計算ルーチン		
引数名	引数の型	引数の内容
NFSET	INTEGER * 4	自由度
FVEC	REAL * 8	地震荷重ベクトル
NNOD	INTEGER * 4	節点数
ID	INTEGER * 4	変位成分の全体マトリクスの自由度番号
NEART	INTEGER * 4	地震荷重の数 (= 現状では1)
IEART	INTEGER * 4	地震外力データテーブル開始アドレス
EART	REAL * 8	地震荷重定義データテーブル
NFNC	INTEGER * 4	地震荷重関数の数
IFNSP	INTEGER * 4	時間関数定義データテーブル
FNSP	REAL * 8	時間関数定義データテーブル
NTABF	INTEGER * 4	離散点で定義されるテーブル関数の数
FTABL	REAL * 8	離散データテーブル
TIME	REAL * 8	時間
LIST	INTEGER * 4	出力ファイル番号
EARV	REAL * 8	地震荷重ベクトル
N	INTEGER * 4	ステップ
MPCT	INTEGER * 4	MPC 結合定義データ
IMPC	INTEGER * 4	MPC 結合定義データ
CMPC	REAL * 8	MPC 結合定義データ
NCOND	INTEGER * 4	MPC 条件式の数

サブルーチン CMLTS1 (A, V, AV, MAXA, ND, LIST)

スカイラインマトリクスとベクトルの演算ルーチン
($A * V = A V$)

[illegible]

サブルーチン FREQAN (A1, A2, A3, A4, D, D2, MAXA, NEQ, OMEGA, LIST)

周波数応答解析ルーチン

[illegible]

サブルーチン SOLVC (A, D, MAXA, NEQ, LIST)

連立一次方程式計算ルーチン

[illegible]

サブルーチン COLS02 (A, B, LC, NEQ, NL, KK)

直接法による連立一次方程式の解を求めるルーチン

[illegible]

サブルーチン COMMTX (COMMTX, CSTIF, CMASS, CDAMP, MAXA, NDOF, LIST, OMEGA)

マトリクス ($[K] + i \omega [C] - \omega^2 [M]$) の作成ルーチン

[illegible]

サブルーチン CADDVE (VC, VA, VB, NVEC, ALPHA, BETA, LIST)

ベクトル加算ルーチン ($V C = \alpha V A + \beta V B$)

[illegible]

サブルーチン FPOVWR (PHSTA, IPFLG, NPOINT, NNCD, NITEM, LIST, NUM, IHSTFL, IHSTF2, IFPHS, NPHST)

節点値 時刻歴データ出力ルーチン

[illegible]

サブルーチン FELVHS (STRESS, STRAIN, PPRE, NOD, NELEM, INTORD, LIST, NPOINT, NITEM, ITNO, FREQ)
EHSTA, IEFLG)

要素値	計算結果保存ルーチン
-----	------------

[illegible]

