

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発III
(2)
— 成果報告書 —

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

2000年2月

コンピュータソフト開発株式会社

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

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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

JNC TJ 8400 2000-064

2000年2月

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発III

森 康二^{*1} 根山敦史^{*1}
中川浩一^{*1}

要 旨

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムに於けるニアフィールドの耐震安定性の評価を目的として、以下の検討を実施したものである。

(1) 解析コードの妥当性の検証

本研究で開発してきた三次元有効応力解析コードは、とくに間隙水圧を考慮しない1相系解析機能に対しては、振動実験等による実測データとの比較を通じて検証を行ってきた。本年度は、サイクル機構で別途実施した緩衝材の液状化試験データを用い、間隙水圧の挙動に着目した有効応力解析機能の検証を行った。

(2) 2000年レポートに対する補足解析

2000年レポートでは代表的な処分場デザインのオプションを念頭に置いたニアフィールド地震応答解析および評価を行い、人工バリアシステムの耐震安定性を確保できる見通しを得ることができた。その一方で、オーバーパッカー緩衝材間や緩衝材-岩盤間等の材料不連続面の応答を規定するモデルパラメータが、評価上重要な因子であるとの知見が得られた。今年度は、上記の2000年レポートに示した検討結果を支援するため補足解析を行い、耐震安定性に関する総合的評価を行った。

(3) 防災研との共同研究取りまとめに対する補足検討

平成4年度から進められてきた人工バリアシステムの耐震安定性評価に関する共同研究は、今年度を目処に成果を取りまとめることとなっている。本研究では、実測されたデータとの比較を通じて、解析コードの検証作業を段階的に進めてきた。本検討では、最新版の解析コードを用いた一連の実験データ解析を改めて行い、上記共同研究の取りまとめに資するデータ整備を行った。

本報告書は、コンピュータソフト開発株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究内容である。

機構担当部課室及び担当者：東海事業所 環境・保全研究開発センター 処分技術部
処分バリア性能研究グループ

*1 環境工学グループ

JNC TJ 8400 2000-064

February, 2000

Development of the Evaluation Methodology for Earthquake Resistance of the Engineered Barrier System (III)

Koji Mori^{*1}, Atsushi Neyama^{*1}, and Koichi Nakagawa^{*1}

Abstract

In this study, the following tasks have been performed in order to evaluate the stability of earthquake resistance for the engineered barrier system (EBS) of High Level Waste (HLW) geological isolation system.

(1) Validation studies for the liquefaction model

The function of single-phase analysis without interaction between soil and pore water in three-dimensional effective stress analysis code, which had been developed in this study, have been verified using by actual vibration test data. This fiscal year, some validation studies for the function of liquefaction analysis was conducted using by actual measured data through the laboratory liquefaction test.

(2) Supplemental Studies for JNC Second Progress Report

Through the JNC second progress report, it was considered that the stability of earthquake resistance of the engineered barrier system would be maintained under the major seismic event. At the same time we have recognized that several model parameters for joint-crack element, which takes into account for the response behavior of material discontinuous surface such as between overpack and buffer material, will become important in the response behavior of the whole EBS. This year, we have studied about several topics, which arise from technical discussion on JNC second progress report and we have discussed about total seismic stability of EBS.

(3) Supplemental Studies for joint study with NRIDP

At this fiscal year, the joint study with National Research Institute for Disaster Prevention (NRIDP) will be final stage. Up to this day, incremental validation studies had been continued using by mesured data obtained from vibration test. In this final stage, validation analysis has been conducted again using by current version new analysis code and maintained the validation data which will be contribute to the joint study mentioned above.

This work was conducted by Computer Software Development Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

JNC Liaison : Barrier Performance Group Waste Isolation Research Division
Waste Management and Fuel Cycle Research Center TOKAI WORKS

*1 Environmental Engineering Group

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発III

	項数
1. まえがき	
1. 1 研究目的	1-1
1. 2 研究項目	1-1
1. 2 研究内容	1-1
2. 解析コードの妥当性の検証 ; TASK1	2-1
2. 1 液状化試験の概要	2-1
2. 2 解析方針	2-2
2. 3 解析モデルおよび解析ケース	2-2
2. 4 荷重条件	2-3
2. 5 解析結果と考察	2-4
3. 2000年レポートに対する補足解析 ; TASK2	3-1
3. 1 はじめに	3-1
3. 2 緩衝材で発生するせん断応力について ; TASK2a	3-1
3. 3 材料不連続面の低剛性領域を考慮した固有値解析 ; TASK2b	3-8
3. 4 レファレンスケースにおける非線形解析と等価線形解析の比較 ; TASK2c	3-12
3. 5 ジョイント物性のパラメータスタディ ; TASK2d	3-21
3. 6 地震波のパラメータスタディ ; TASK2e	3-34
3. 7 軟岩系処分孔堅置きケースの補足解析 ; TASK2f	3-61
4. 防災研との共同研究取りまとめに対する補足検討 ; TASK3	4-1
4. 1 解析モデルと評価点	4-1
4. 2 解析ケースと材料物性値	4-2
4. 3 入力地震動	4-3
4. 4 解析結果と考察	4-3
5. まとめ	5-1
6. 結言	6-1
7. 謝辞	7-1
8. 参考文献	8-1

表目次

項

表 2. 1 - 1	液状化試験条件（圧密条件、載荷条件）	2-1
表 2. 1 - 2	液状化試験に用いた供試体と液状化の有無	2-2
表 2. 3 - 1	主な解析条件	2-2
表 2. 3 - 2	解析ケースと供試体の縦弾性係数	2-3
表 3. 2. 4 - 1	材料物性値	3-2
表 3. 3. 4 - 1	固有値解析結果（処分坑道横置き、緩衝材飽和）	3-10
表 3. 4. 3 - 1	材料物性値	3-14
表 3. 4. 3 - 2	解析に用いたせん断剛性、履歴減衰	3-15
表 3. 5. 2 - 1	ジョイント物性をパラメータとした解析ケース	3-22
表 3. 5. 3 - 1	材料物性値	3-22
表 3. 6. 2 - 1	加振方向をパラメータとした解析ケース	3-35
表 3. 7. 3 - 1	材料物性値	3-62
表 4. 2 - 1	解析ケース	4-2
表 4. 2 - 3	主な材料物性値	4-2
表 4. 2 - 3	等価線形解析で用いる γ -G/G _{max} , γ -h/h _{max} の関係	4-3

図目次

項

図2.2-1	液状化試験データ	2-3
図2.3-1	液状化試験データ解析モデル（1/4 対称モデル）	2-4
図2.5-1	液状化試験解析結果（間隙水圧）	2-5
図2.5-2	液状化試験解析結果（軸ひずみ）	2-6
図2.5-3	液状化試験解析結果（せん断応力）	2-7
図2.5-4	液状化試験解析結果（せん断ひずみ）	2-8
図3.2.1-1	処分坑道横置き方式ニアフィールド解析モデル	3-3
図3.2.1-2	ニアフィールド耐震性評価モデル／1スパン1/8対称モデル	3-4
図3.2.3-1	入力地震動（硬岩系岩盤、地下1000m）	3-4
図3.2.5-1	応答加速度（絶対加速度）	3-5
図3.2.5-2	応答変位波形（相対変位）	3-6
図3.2.5-3	加速度フーリエスペクトル	3-6
図3.2.5-4	せん断応力コンタ（単位[Pa]）	3-7
図3.2.5-5	せん断ひずみコンタ（単位[ー]）	3-7
図3.3.2-1	固有値解析モデル	3-9
図3.4.2-1	評価点および評価断面（処分坑道横置き方式、坑道断面）	3-13
図3.4.3-2	せん断ひずみγーせん断剛性G、履歴減衰hの関係	3-16
図3.4.4-1	応答加速度（等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態）	3-18
図3.4.4-2	応答変位（等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態）	3-18
図3.4.4-3	加速度フーリエスペクトル (等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態)	3-19
図3.4.4-4	応答加速度（等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態）	3-19
図3.4.4-5	応答変位（等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態）	3-20
図3.4.4-6	加速度フーリエスペクトル (等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態)	3-20
図3.5.2-1	解析モデルおよび評価点	3-27
図3.5.4-1	応答変位	3-28
図3.5.4-2	応答加速度	3-29
図3.5.4-3	加速度フーリエスペクトル	3-30
図3.5.4-4	せん断応力の経時変化(1/2)	3-31
図3.5.4-4	せん断応力の経時変化(2/2)	3-32
図3.5.4-5	初期剛性法による収束計算の概念；その1	3-33
図3.5.4-6	初期剛性法による収束計算の概念；その2	3-33

図3.6.2-1	評価点および評価断面(図中単位;m)	3-38
図3.6.2-2	固有値解析結果変形モード(実線;変形前,破線;変形後)	3-39
図3.6.4-1	正弦波加振による応答加速度(解析ケースA-1;X方向加振)	3-40
図3.6.4-2	正弦波加振による応答加速度(解析ケースA-2;Y方向加振)	3-40
図3.6.4-3	応答変位(解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-41
図3.6.4-4	応答加速度(解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-41
図3.6.4-5	加速度フーリエスペクトル (解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-42
図3.6.4-6	応答変位(解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-42
図3.6.4-7	応答加速度(解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-43
図3.6.4-8	せん断応力コンター (解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-44
図3.6.4-9	せん断ひずみコンター (解析ケースB-1;X方向加振,エルセントロ波)	3-45
図3.6.4-10	X方向応答変位 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-46
図3.6.4-11	Y方向応答変位 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-46
図3.6.4-12	X方向応答加速度 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-47
図3.6.4-13	Y方向応答加速度 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-47
図3.6.4-14	X方向加速度フーリエスペクトル (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-48
図3.6.4-15	Y方向加速度フーリエスペクトル (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-48
図3.6.4-16	応答変位 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-49
図3.6.4-17	応答加速度 (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-49
図3.6.4-18	せん断応力コンター (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-50
図3.6.4-19	せん断応力コンター (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-51
図3.6.4-20	せん断ひずみコンター (解析ケースB-2;XY方向加振,エルセントロ波)	3-52
図3.6.4-21	せん断ひずみコンター	

（解析ケース B-2 ; XY 方向加振，エルセントロ波）	3-53
図 3. 6. 4-2 2 応答変位（解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-54
図 3. 6. 4-2 3 応答加速度（解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-54
図 3. 6. 4-2 4 加速度フーリエスペクトル （解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-55
図 3. 6. 4-2 5 応答変位（解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-55
図 3. 6. 4-2 6 応答加速度（解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-56
図 3. 6. 4-2 7 せん断応力コンター （解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-57
図 3. 6. 4-2 8 せん断ひずみコンター （解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-58
図 3. 6. 4-2 9 せん断応力コンター （解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-59
図 3. 6. 4-3 0 せん断ひずみコンター （解析ケース B-3 ; Z 方向加振，エルセントロ波）	3-60
図 3. 7. 2-1 処分孔豎置き方式ニアフィールド解析モデル (レファレンスケース, 軟岩系、処分深度 500m)	3-63
図 3. 7. 2-2 評価点および評価断面（処分孔豎置き方式 ; mm）	3-64
図 3. 7. 4-1 人工バリア内の応答変位（乾燥状態）	3-65
図 3. 7. 4-3 人工バリア内の応答加速度（乾燥状態）	3-65
図 3. 7. 4-3 加速度フーリエスペクトル（乾燥状態）	3-66
図 3. 7. 4-4 せん断応力コンター (τ_{yz} [Pa] ; 乾燥状態)	3-67
図 3. 7. 4-5 せん断ひずみコンター (γ_{yz} [-] ; 乾燥状態)	3-68
図 3. 7. 4-6 人工バリア内の応答変位	3-69
図 3. 7. 4-7 人工バリア内の応答加速度	3-69
図 3. 7. 4-8 加速度フーリエスペクトル	3-70
図 3. 7. 4-9 せん断応力コンター (τ_{yz} [Pa] ; 飽和状態)	3-71
図 3. 7. 4-10 せん断ひずみコンター (γ_{yz} [-] ; 飽和状態)	3-72
図 4. 1-1 振動実験データ解析モデル（節点数 371, 要素数 264）	4-1
図 4. 3-1 エルセントロ波	4-4
図 4. 3-2 八戸波	4-5
図 4. 3-3 宮城沖波	4-6
図 4. 4-1 解析結果 （解析ケース EL-1 ; 非線形解析, エルセントロ波, 減衰 2.5%）	4-7
図 4. 4-2 解析結果 （解析ケース EL-2 ; 非線形解析, エルセントロ波, 減衰 20%）	4-8
図 4. 4-3 解析結果	

図 4. 4-4	(解析ケース EL-3 ; 等価線形解析, エルセントロ波, 減衰 2.5%)	4-9
	解析結果	
図 4. 4-5	(解析ケース EL-4 ; 等価線形解析, エルセントロ波, 減衰 20%)	4-10
	解析結果	
図 4. 4-6	(解析ケース HC-1 ; 非線形解析, 八戸波, 減衰 2.5%)	4-11
	解析結果	
図 4. 4-7	(解析ケース HC-2-1 ; 非線形解析, 八戸波, 減衰 20%)	4-12
	解析結果	
図 4. 4-8	(解析ケース HC-3 ; 等価線形解析, 八戸波, 減衰 2.5%)	4-13
	解析結果	
図 4. 4-9	(解析ケース HC-4 ; 等価線形解析, 八戸波, 減衰 20%)	4-14
	解析結果	
図 4. 4-10	(解析ケース MI-1 ; 非線形解析, 宮城沖波, 減衰 2.5%)	4-15
	解析結果	
図 4. 4-11	(解析ケース MI-2 ; 非線形解析, 宮城沖波, 減衰 20%)	4-16
	解析結果	
図 4. 4-12	(解析ケース MI-3 ; 等価線形解析, 宮城沖波, 減衰 2.5%)	4-17
	解析結果	
	(解析ケース MI-4 ; 等価線形解析, 宮城沖波, 減衰 20%)	4-18

1. まえがき

1. 1 研究目的

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成される人工バリアシステムは、極めて長期にわたり、地下水との接触や放射性核種の溶出・移行の抑制など、様々な物理的・化学的な隔離性能が要求される。この隔離性能を保持するための1つの前提条件としては、人工バリアシステムが構造的に健全な状態で存在することが挙げられる。

我が国は世界有数の地震多発地帯に位置しており、地層処分システムの実現に向けては、地震時の人工バリアシステムの挙動を把握し、耐震安定性を論じるための評価手法の確立と関連する知見やデータの蓄積が重要となる。

本研究では、これまでに土／水連成系の動的相互作用を考慮した三次元地震応答解析コードを開発しており、科学技術庁防災科学技術研究所（以下、防災研）で実測された縮尺スケール振動試験データ等を用いた検証作業を進めてきた。また、処分環境を現実的にモデル化するための諸機能を段階的に整備してきており、実規模の処分システムを想定したニアフィールドの解析・評価を通じて、地震時に緩衝材がせん断破壊に至る可能性は少なく、人工バリアは周辺岩盤と一体となって応答するケーススタディを例示している。

今年度は、第二次取りまとめ（以下「2000年レポート」）ニアフィールド耐震安定性評価において、主要な課題として挙げられた幾つかの項目について追加検討を行うとともに、関係する知見ならびにバックデータの整備を行うことを目的とする。さらに、今年度を目処に取りまとめが予定されているサイクル機構および防災研間の共同研究の最終段階として、これまでに検討を行った解析結果等に関する情報整理を行う。

1. 2 研究項目

- (1) 解析コードの妥当性の検証
- (2) 2000年レポートに対する補足解析
- (3) 防災研との共同研究取りまとめに対する補足検討
- (4) 報告書の作成

1. 3 研究内容

- (1) 解析コードの妥当性の検証；TASK1

昨年度までに、緩衝材を構成する土／水間の動的相互作用を考慮した三次元有効応力解析コードを開発・整備しており、とくに土／水間の相互作用を考慮しない一相系解析機能に対しては、防災研にて実測された縮尺スケール模擬人工バリアの振動試験データ等を用いた検証作業を行ってきた。

本年度は、サイクル機構で別途取得された緩衝材の液状化試験データを用い、間隙水圧の動的挙動に着目した二相系解析機能の検証を行い、本プログラムで導入した間隙水圧評価モデルの実現象への適用性について補足検討を行う。

(2) 2000 年レポートに対する補足解析 ; TASK2

2000 年レポートでは処分坑道横置き、処分孔豎置き等の代表的な処分場デザインのオプションを念頭に置いたニアフィールド耐震性評価を行い、人工バリアシステムの地震時の安定性を確保できる見通しを得ることができた。その一方、オーバーパック一緩衝材間や緩衝材一岩盤間等の材料不連続面の挙動が人工バリアシステム全体の応答性状に大きく関与しており、評価上重要な因子であるとの見通しが得られた。

本検討では、上記の 2000 年レポートに示された検討結果を支援するため下記項目に関する補足解析を行い、人工バリアシステムの耐震安定性に関する総合的評価を行う。

① 緩衝材で発生するせん断応力について ; TASK2a

緩衝材内の間隙水圧を考慮しない一相系解析を前提とした 2000 年レポートレファレンスケースでは、ニアフィールド周辺岩盤までを含めた 1 スパン全周モデル（処分坑道内に一定間隔で定置された複数ガラス固化体のうち、一区画を解析領域に設定）を用いて、地震時に緩衝材内で発生するせん断応力に着目した評価を行った。緩衝材一オーバーパック間や緩衝材一岩盤間の材料不連続面の応答挙動については、ジョイント要素によりモデル化を行った。また、オプションケースとしては緩衝材内の土／水連成系の動的相互作用を考慮した二相系解析を行い、ニアフィールド周辺岩盤を除いたオーバーパック一緩衝材系の 1 スパン 1/8 対称モデルを用いて、繰り返しせん断応力による緩衝材中の過剰間隙水圧の発生に着目した評価を行った。間隙水圧の蓄積に伴う土骨格せん断剛性の低下は保守的に無視し、緩衝材内側および外側（処分坑道の径方向の大きさに応じて「内側」、「外側」とする。すなわち、オーバーパックと緩衝材の境界領域を緩衝材内側、緩衝材と周辺岩盤の境界領域を緩衝材外側と定義する）の境界はともに拘束条件（ジョイント要素を使用しない）とした。

上記のレファレンスケースとオプションケースでは、緩衝材内側および外側の境界条件の取り扱いに差異があるため、緩衝材内に発生するせん断応力が若干異なり、ジョイント要素を用いないオプションケースでは、より剛体的に挙動する傾向が認められている。ここでは、上記オプションケースと同様のモデル化（すなわち、1 スパン 1/8 対称モデル）において一相系解析を行い、2000 年レポートに示した解析結果との比較を通じて、緩衝材で発生するせん断応力とシステム応答性状について傾向の相違を確認する。

② 材料不連続面の低剛性領域を考慮した固有値解析 ; TASK2b

昨年度に行った人工バリアの固有値解析（処分坑道横置き方式のみ）では、緩衝材が乾燥状態の場合で約 77Hz、飽和状態の場合で約 66Hz となることがわかった。この周波数帯域は、これまでに使用してきた実地震動（エルセントロ、宮城沖、八戸沖、岩手県南部沖ほか）の卓越周波数～10Hz に比較して十分大きく、人工バリアと共に共振する可能性はない。しかしながら、2000 年レポートに示した一部の結果（ケース 1 - 2 ; 処分坑道横置

き方式、緩衝材飽和状態、ジョイント要素を考慮)では、10Hz近傍の周波数成分の応答増幅が顕著になる傾向が認められている。これは、ジョイント要素を設けた材料不連続面に起因するものであり、システム全体としての実質的なせん断剛性が低下したことによる人工バリア固有周波数の低下によるものと解釈された。

本検討では、これらの解釈を補足することを目的に、材料不連続面における低剛性領域を考慮した固有値解析を行うとともに、剛性をパラメータとした感度解析を通じて固有周波数への影響を定量的に確認する。ただし、低剛性領域のモデル化方法については、剛性マトリクスが特異になる可能性があり、ジョイント要素をそのまま用いることはできない。擬似的に適当な剛性を割り当てた三次元ソリッド要素やバネ要素等を用いたモデル化を併せて検討する。

③ レファレンスケースにおける非線形解析と等価線形解析の比較 ; TASK2c

2000年レポートにおける解析体系は、半無限領域中を伝搬する地震波、材料不連続面の力学特性、ベントナイトの非線形特性の考慮など、処分環境の現実的なモデル化に必要な諸機能を積極的に取り込んだものである。このうちベントナイトの非線形特性については、周波数応答解析に基づく等価線形体としての取り扱いが考えられたが、ジョイント要素を設ける必要性などから、直接時間積分法に基づく Ramberg-Osgood モデル（以下、RO モデルと記す）を採用することとした経緯がある。

本検討では、この材料非線形性に関するモデル化のオプションに着目し、2000年レポートに示した RO モデルと等価な材料構成則に従う等価線形体としてのモデル化を行い、両者の比較を通じて、モデル化手法の相違ならびに評価の保守性の観点から考察を加える。なお、現段階では材慮不連続面を等価線形体としてモデル化する適当なパラメータ（ひずみレベルに応じた緩衝材のせん断剛性、履歴減衰）がないため、両解析においてジョイント要素は考慮しないこととする。

④ ジョイント物性のパラメータスタディ ; TASK2d

前記のとおり、2000年レポートに示した検討を通じて、オーバーパッカー緩衝材間の材料不連続面の力学的挙動は、人工バリア全体の応答性状に大きく影響を及ぼす重要な因子であるとの見通しが得られている。

地震波が鉛直下方から上方に処分場を通過する際の人工バリアの応答挙動は、緩衝材一岩盤間の不連続領域に設けられたのジョイント部において地震力を伝達する形態に支配される。地震動による運動エネルギーがジョイント部の不連続変形を伴う運動エネルギーとして伝達される場合は、緩衝材の伝達する弾性エネルギーが少なくなり、結果的に人工バリアは周辺岩盤一体となった剛挙動となる。また、ジョイント部が不連続変形を伴わない弾性エネルギーとして伝達する場合は、緩衝材内に運動エネルギーが伝達し、内部の応力状態はそれらとの平衡を保持することとなる。前者は緩衝材乾燥の状態に相当し、後者

は緩衝材飽和の状態に相当する。これらの傾向から、ジョイント要素部において地震力を伝達する形態と人工バリアシステムの応答性状との関係は密接であり、相互の関係を定量的に把握することが重要と考えられる。

本検討では、ジョイント要素の応答挙動を規定するモデルパラメータ（剛性、粘着力、内部摩擦角など）を対象とした感度解析を通じて、人工バリアシステムの応答性状との関係を定量評価する。

⑤ 地震波のパラメータスタディ；TASK2e

2000年レポートに示した検討では、これまでに使用してきた実地震波データ（エルセントロ、宮城沖、八戸、釜石など）の有するパワースペクトルを概略で比較し、保守的に最も地震エネルギーが大きいエルセントロ波を用いた。これらの地震波データは、いずれも卓越周波数が～10Hz程度のものである。人工バリアの固有周波数は50Hz以上となることから、実質的な応答増幅は極めて小さいことが確かめられている。これらの過去の観測データを用いた解析は、現段階で特定の地震波を選定できる確固たる論拠はなく、人工バリアシステムの応答性状を共通の地震波に対して論じる観点で意味をもつものである。今後の処分事業の進展を踏まえつつ、サイト固有の情報を勘案した入力地震波の選定ロジックをつめる必要がある。

以上のように、評価に用いる入力地震動のバリエーションが不確定である現段階では、入力地震動に関して最も保守的と考えられるケースを抑えておくことが適当である。本検討では、入力地震波の卓越周期（たとえば、人工バリアの固有周期近傍に周期をもつ模擬的な正弦地震波）や加速度レベルなどをパラメータとした感度解析を行い、人工バリアの応答性状と力学的安定性について検討する。

⑥ 軟岩系処分孔堅置きケースの補足解析；TASK2f

昨年度に行った処分坑道横置き方式（レファレンスケース）の解析では、ジョイント要素の有無に関する両ケースの解析を行い、それらの比較を通じてジョイント要素の応答性状と人工バリアシステムへの影響に関する考察を行った。しかしながら、処分孔堅置き方式については、ジョイント要素を考慮したケースのみの検討に止まった。

本検討では、処分孔堅置き方式においてジョイント要素を考慮しないケースの解析を行い、処分坑道横置き方式と同様の考察を行うこととする。

(3) 防災研との共同研究取りまとめに対する補足検討；TASK3

サイクル機構および防災研は、人工バリアシステムの耐震性評価に関する共同研究を平成4年度から行っており、今年度を目処に、これまでの成果を取りまとめる計画となっている。本研究では縮尺スケール人工バリアの振動実験に資する予備検討や実測された諸データ（加速度、応力など）との比較等を行い、解析コードの検証作業を段階的に進め

てきている。その一方で、段階的な機能追加や小規模な改良、不具合修正等を行っている解析コードについては、検証に用いたバージョンの一貫性が必ずしも十分に取れていません。従って、本検討では最新版の解析コードを用いた実験データ解析を改めて行い、共同研究の取りまとめに資するための一連のデータ整備を行うこととする。

2. 解析コードの妥当性の検証 ; TASK1

昨年度までに緩衝材における土／水連成系の動的相互作用を考慮した三次元有効応力解析コードを開発し、間隙水圧を考慮しない一相系解析機能に対しては、実施された振動試験データ等との比較を通じて、実現象を概ね再現できる見通しを得ている。

本検討では、サイクル機構で別途取得された緩衝材の液状化試験データを用い、間隙水圧の応答挙動に着目した二相系解析機能の検証を行い、本プログラムで導入した間隙水圧評価モデルの実現象への適用性について検討を追加する。

2. 1 液状化試験の概要

本試験は高さ 100mm、直径 50mm の飽和ケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）を対象とした動的載荷試験を行ったものである。供試体の乾燥密度は 1.6Mg/m³ である。軸力の載荷については 3 t 法で圧密終了を確認したのち、幾つかの繰返し応力振幅比の下で周期 0.1Hz の正弦波を与えている。

試験側から提示された情報（本検討で利用可能な情報）は以下のとおりである。

- ・供試体寸法
- ・試験条件（表 2. 1 - 1 参照）
- ・実測された過剰間隙水圧
 - ・ // 軸ひずみ
 - ・ // 軸差応力

液状化試験に用いた供試体と繰返し載荷の回数ならびに液状化の有無に関する結果は表 2. 1 - 2 に示すとおりである。液状化は間隙水圧が有効拘束圧に等しくなったときに生じるものとしている。

表 2. 1 - 1 液状化試験条件（圧密条件、載荷条件）

圧密条件	有効拘束圧 σ'_c (MPa)	2.94	0.49
	側圧 (MPa)	3.136	0.686
	背圧 (MPa)	0.196	0.196
載荷条件	載荷波形	正弦波	正弦波
	載荷周波数 (Hz)	0.1	0.1
	繰返し応力振幅比 ^(注1)	0.241, 0.145, 0.100	0.150

(注 1) $\sigma_d / 2 \sigma'_c$ の値。 σ_d は繰返し軸差応力。

表 2. 1-2 液状化試験に用いた供試体と液状化の有無

供試体 No	繰返し応力比 [—]	載荷回数 [回]	液状化の有無	圧密応力 [kgf/cm ²]
1	0.241	2	無 ^(注1)	30
2	0.149	10	無 ^(注2)	
3	0.100	1,000	無	
4	0.145	1,000	無	
5	0.150	1,000	無	5

(注1) 軸ひずみ 10%到達まで

(注2) 軸ひずみ 5%到達まで

2. 2 解析方針

まず始めに、液状化試験に用いた供試体に関して、その剛性が分かっていないため、これをパラメータとした感度解析を行い、過剰間隙水圧の試験結果（供試体 No4, 応力比 0.145）と一致する剛性を概略でキャリブレートする（実測された軸ひずみと一致する範囲でスコーピングキャリブレーションを実施）こととする。次いで、この結果に基づき 2000 年レポート二相系解析オプションケースにおいて、緩衝材部の剛性を低下させた場合の過剰間隙水圧の発生量を予測し、液状化の可能性を判断することとする。

2. 3 解析モデルおよび解析ケース

図 2. 3-1 に解析モデルを示す。供試体は均一に調合・製作されているものと仮定し、全体の 1/4 となる対称モデルを用いる。供試体内部の初期応力としては、圧密試験終了後の応力状態として、拘束圧 $\sigma'_c=3.318 \text{ MPa}$ （有効拘束圧 30 kgf/cm^2 +背圧 2 kgf/cm^2 ）の等方圧縮状態を仮定した。

表 2. 3-1 主な解析条件

縦弾性係数 E	117.6 [MPa]
ポアソン比	0.49 [—]
密度	$1.96 \times 10^4 \text{ [N/m}^3\text{]}$
液状化パラメータ η	-3.11 [—]
液状化応力比 RL20	0.592 [—]
内部摩擦角	16.6 ^(注) [deg]
間隙水圧の消散	考慮しない

(注) 応力経路上の破壊線の勾配を規定する。

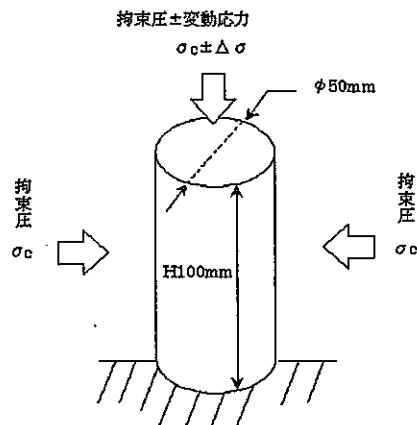
表2. 3-2 解析ケースと供試体の縦弾性係数

ケース 1	117.6 MPa (基準ケース)
ケース 2	105.8 MPa (-10%)
ケース 3	94.1 MPa (-20%)
ケース 4	58.8 MPa (-50%)
ケース 5	58.8 MPa ^{注)}

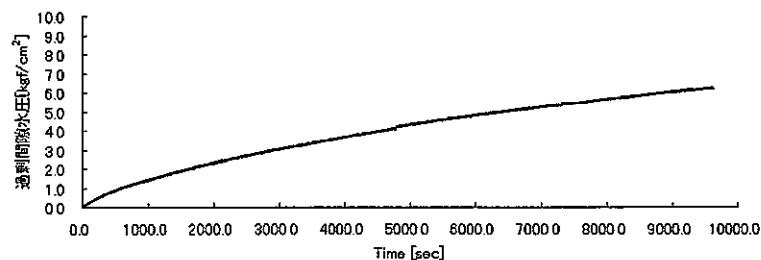
(注) 2000年レポート2相系解析のバックアップケース

2. 4 荷重条件

供試体に載荷する繰返し荷重については、軸差応力相当の大きさ（約 0.9MPa）を目安として、周波数 0.1Hz の正弦荷重を与えた。



(a) 試験体緒元



(b) 解析結果試験体 N o 4 (応力比 0.145)

図2. 2-1 液状化試験データ

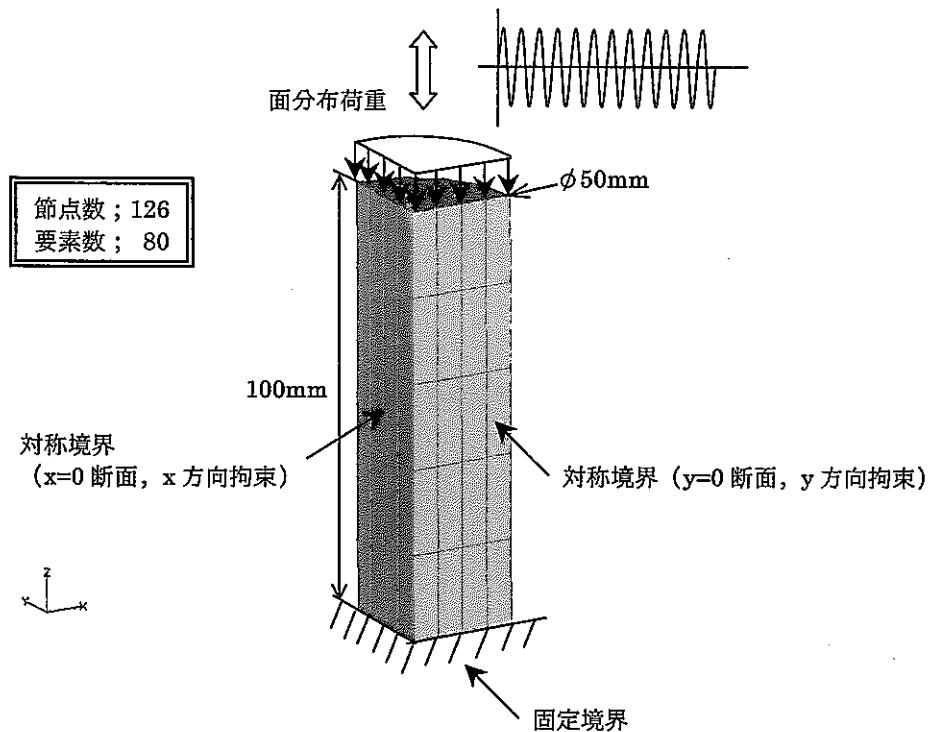


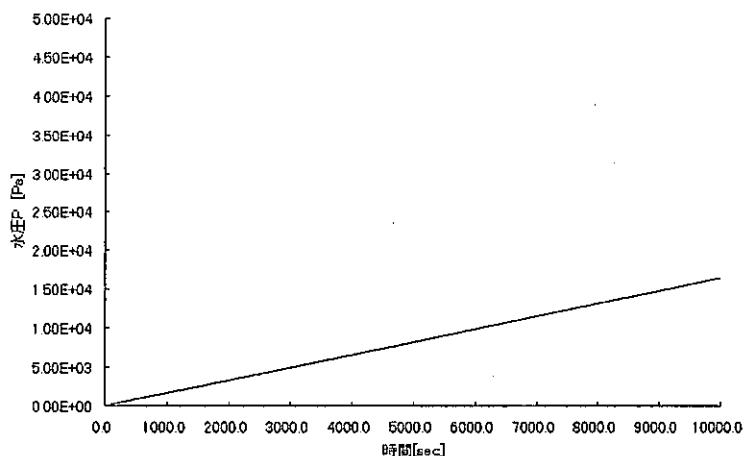
図2.3-1 液状化試験データ解析モデル（1/4 対称モデル）

2.5 解析結果と考察

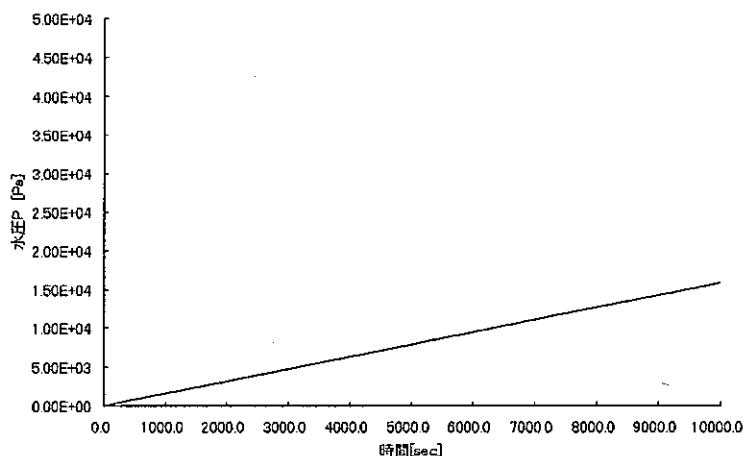
図2.5-1～図2.5-4に間隙水圧、直ひずみ、せん断応力およびせん断ひずみの解析結果を示す。

液状化試験データ解析については、過剰間隙水圧の発生量に対する剛性の感度は比較的小さく、試験結果と約1桁の相違が生じることがわかった。また、剛性を1オーダ以上低下させたケースでは、供試体の非線形性が顕著になり、収束状況が極端に悪化する傾向となつた。

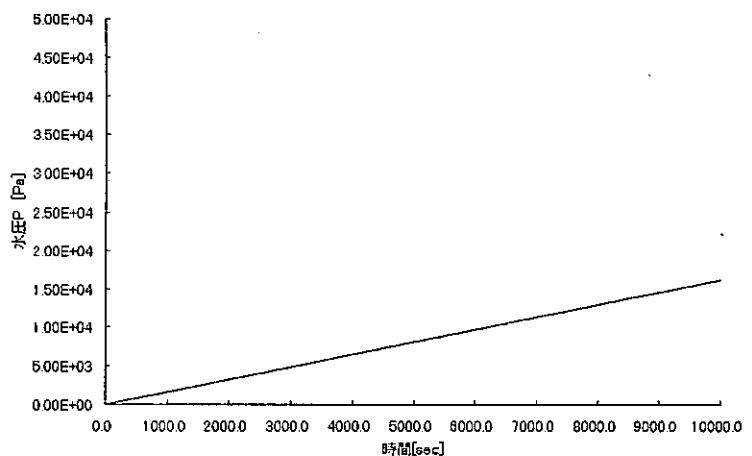
2000年レポートにおける二相系解析のバックアップでは、オーバーパック腐食膨張後の間隙水圧の蓄積・消散を、緩衝材の剛性を半分にして計算した（ケース1-4）結果、繰返しせん断サイクルによる間隙水圧の発生は、初期間隙水圧や腐食膨張圧に比較して十分小さく、剛性の低下による影響は少ないことがわかった。



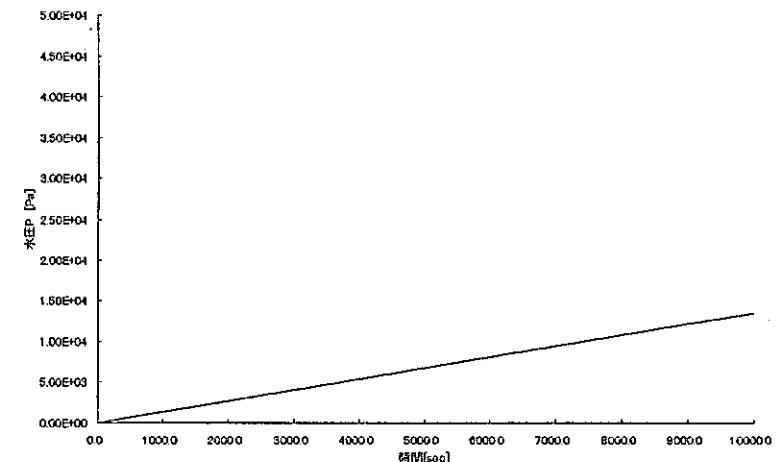
(a) ケース 1 ; $E=117.6\text{MPa}$ (基準ケース)



(c) ケース 3 ; $E=94.1\text{MPa}$ (基準ケース-20%)



(b) ケース 2 ; $E=105.8\text{MPa}$ (基準ケース-10%)



(d) ケース 4 ; $E=58.8\text{MPa}$ (基準ケース-50%)

図 2 . 5 - 1 液状化試験解析結果 (間隙水圧)

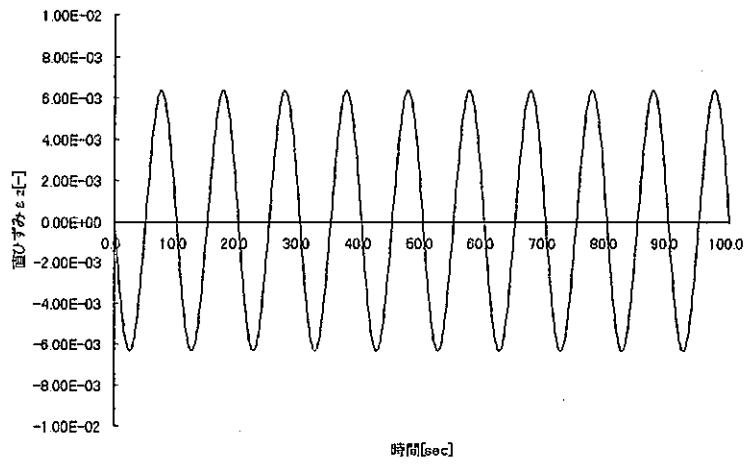
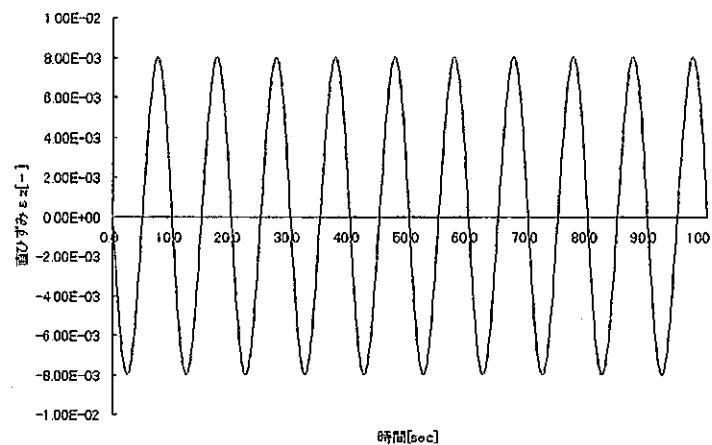
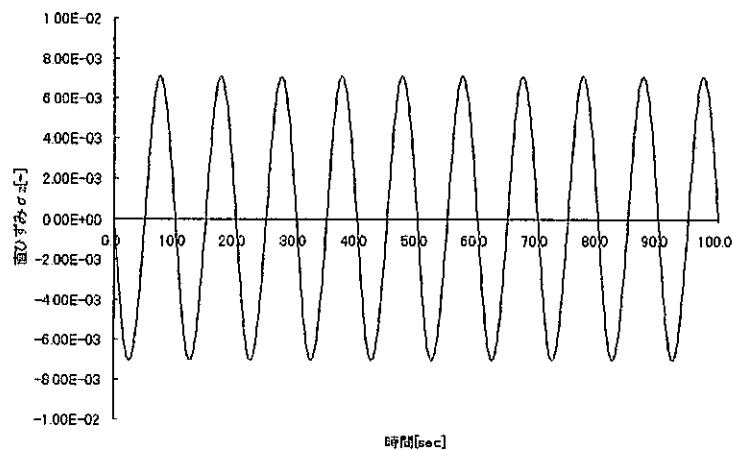
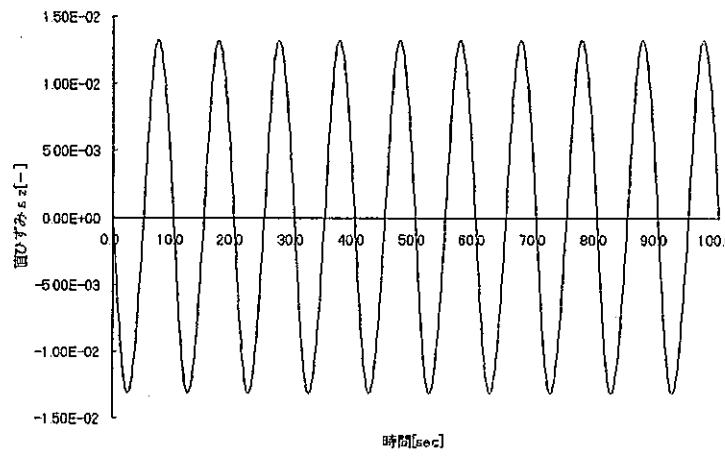
(a) ケース 1 ; $E=117.6\text{MPa}$ (基準ケース)(c) ケース 3 ; $E=94.1\text{MPa}$ (基準ケース-20%)(b) ケース 2 ; $E=105.8\text{MPa}$ (基準ケース-10%)(d) ケース 4 ; $E=58.8\text{MPa}$ (基準ケース-50%)

図 2 . 5-2 液状化試験解析結果 (軸ひずみ)

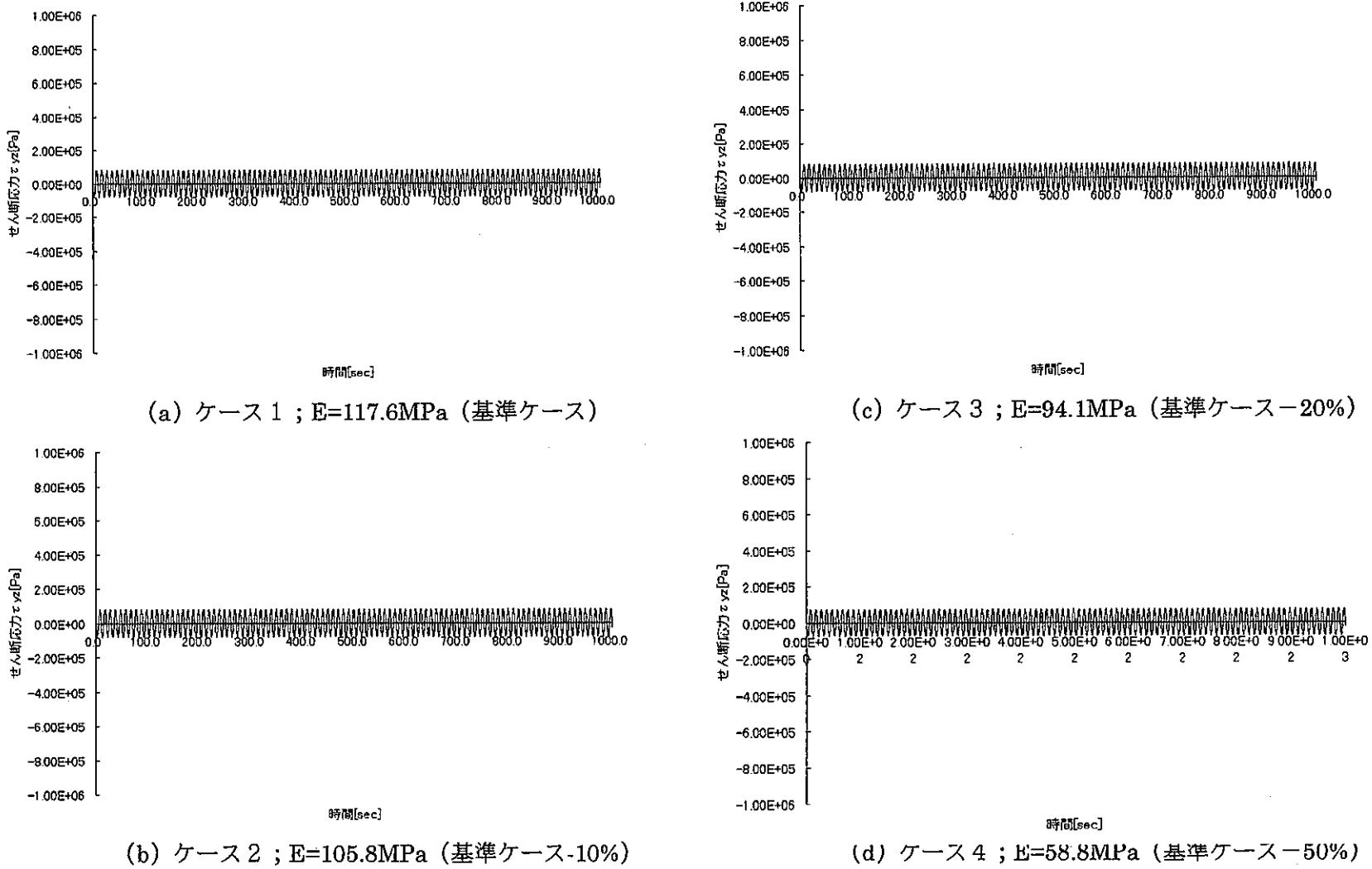


図 2 . 5 – 3 液状化試験解析結果 (せん断応力)

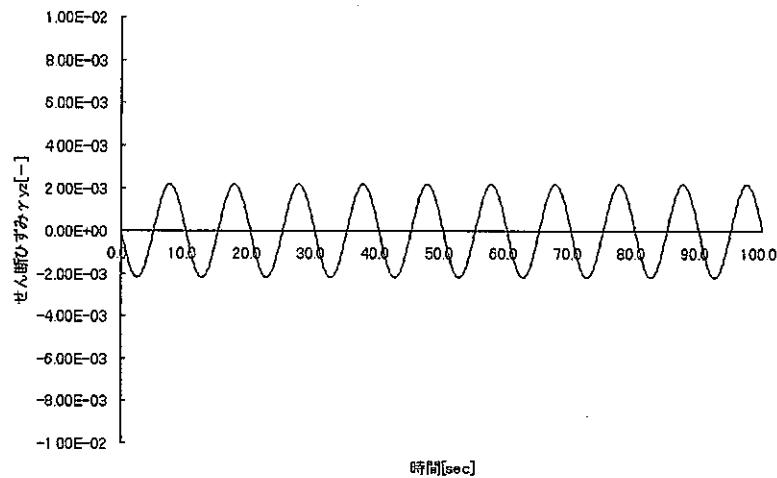
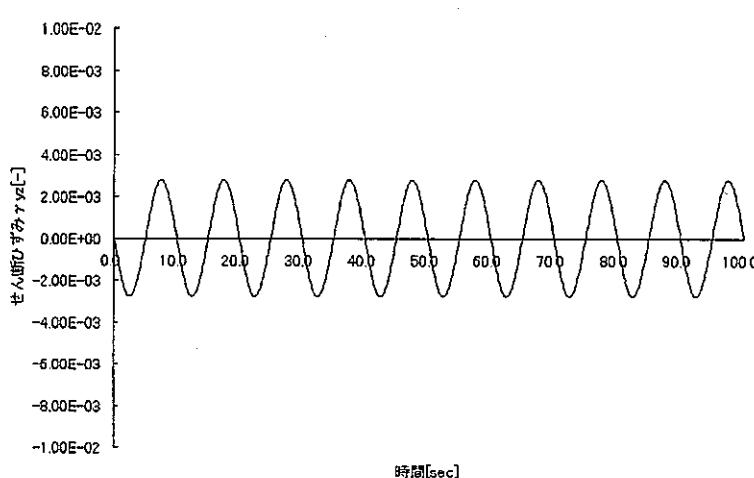
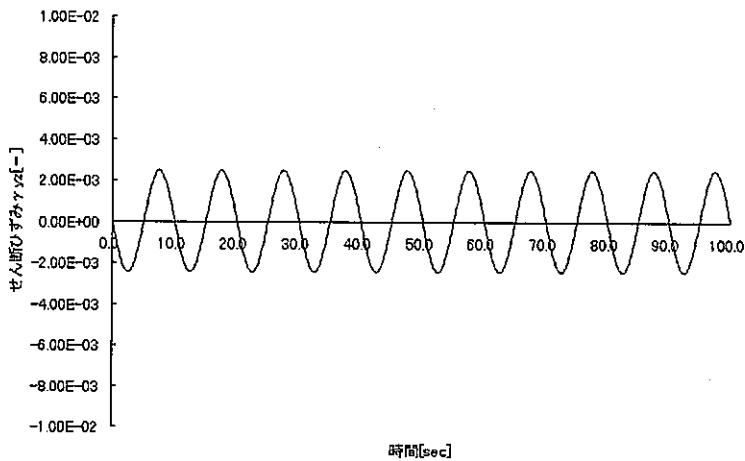
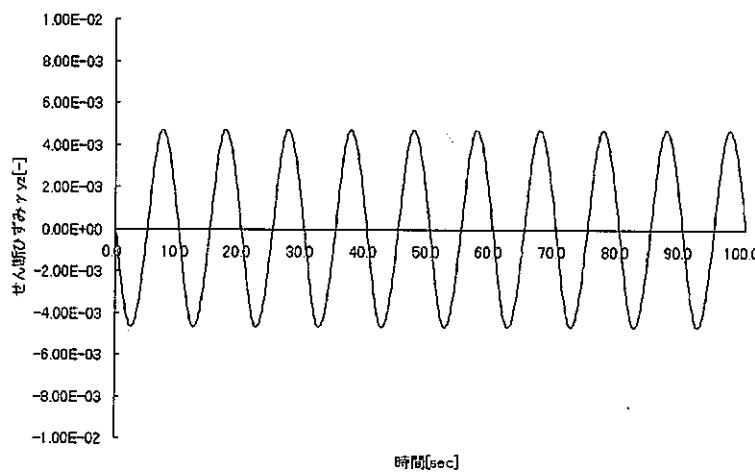
(a) ケース 1 ; $E=117.6\text{MPa}$ (基準ケース)(c) ケース 3 ; $E=94.1\text{MPa}$ (基準ケース-20%)(b) ケース 2 ; $E=105.8\text{MPa}$ (基準ケース-10%)(d) ケース 4 ; $E=58.8\text{MPa}$ (基準ケース-5)

図 2 . 5 - 4 液状化試験解析結果 (せん断ひずみ)

3. 2000 年レポートに対する補足解析 ; TASK2

3. 1 はじめに

2000 年レポートでは処分坑道横置き方式、処分孔豎置き方式等の代表的な処分場デザインのオプションを考慮したニアフィールド耐震性評価を行い、人工バリアシステムの地震時の安定性を概ね確保できる見通しを得た。また、これを通じて、地震時の人工バリアシステム全体の応答挙動は、オーバーパック一緩衝材間や緩衝材一岩盤間等の材料不連続面の取扱いが重要であり、これらの挙動を支配するモデルパラメータが評価上重要な因子となるとの見通しを得た。

これに関連して、このような材料不連続面を含む系の応答特性の把握、さらには評価に用いた解析コードの妥当性を、より確実なものとするためには、解析のバリエーションを考慮した結果の相互比較（例えば、直接時間積分法による非線形解析と周波数応答解析による等価線形解析の比較）が必要であるとの認識に至った。

ここでは、2000 年レポートに示した検討結果を支援するための下記項目に関する補足解析を行い、人工バリアシステムの耐震安定性に関する総合的評価を行う。

3. 2 緩衝材で発生するせん断応力について ; TASK2a

3. 2. 1 目的

2000 年レポートに示したレファレンスケースの一相系解析では、周辺岩盤までを含めた 1 スパン全周モデル（図 3. 2. 1-1 参照；処分坑道横置き方式の例）を用いて、主として緩衝材内で発生するせん断応力に着目した評価を行った。緩衝材一オーバーパック間ないし緩衝材一岩盤間の材料不連続境界については、境界面における滑りや面外方向の剥離を考慮できるジョイント要素によりモデル化した。また、オプションケースの二相系解析では、ニアフィールド周辺岩盤を除くオーバーパック一緩衝材系の 1 スパン 1/8 対称モデル（図 3. 2. 1-3 参照）を用いて、繰り返しせん断応力により発生する緩衝材中の過剰隙水圧の蓄積量に着目した評価を行った。このとき、隙水圧の蓄積に伴う土骨格せん断剛性の低下は保守的に無視し、緩衝材内側および外側の境界はともに拘束条件とした。

これらのケースでは、緩衝材内側（オーバーパックと緩衝材の接触面）および外側（緩衝材と岩盤の接触面）の境界条件の取り扱いに差異があるため、緩衝材内部に発生するせん断応力の傾向が若干異なる。これらの境界面の自由度を拘束したオプションケースでは、レファレンスケースに比較して、より剛に挙動する傾向が認められた。ここでは、2000 年レポートに示した解析結果との比較を通じて、緩衝材で発生するせん断応力とシステム応答性状について傾向の相違を確認する。

3. 2. 2 解析モデル

解析モデルは、上記の 1 スパン 1/8 対称モデル（図 3. 2. 1-2）と同様とする。隙水の存在を前提としないため、水理境界条件は考慮する必要がない。オーバーパック一緩

衝材の内側境界付近や岩盤と接する外側境界付近については、メッシュ分割を幾分細かくした。節点数および要素数は、それぞれ 825, 594 である。対称面を含む周辺の力学的境界条件は、以下のとおり定めた。

- x 断面 ($x=0.0$) は x 方向拘束
- y 断面 ($y=0.0$) は x, z 方向拘束
- z 断面 ($z=0.0$) は z 方向拘束
- その他の境界面は完全拘束

解析評価点については、2000 年レポートと同様に図 3. 2. 1-3 中に示した点 B (緩衝材内部)、点 C (オーバーパックコーナー部) の 2箇所を設けた。

3. 2. 3 入力地震動

解析に用いる入力地震動は、2000 年レポートと同様にエルセントロ地震動を表層 (E.L. ± 0m) 観測波とした処分深度 (E.L.-1000m) における地中地震波である。この地震波は、地下 1000m までの地盤を水平多層地盤と仮定し、一次元重複反射理論に基いた逆解析により算出したものである。これより、解析には入力地震動の最大加速度が発生する付近を抜き出した 3.0 秒間 (実波の 3.0~6.0 秒) を用いた (図 3. 2. 3-1 参照)。

3. 2. 4 材料物性値

材料物性値は、2000 年レポートと同様に表 3. 2. 4-1 に示すとおり定めた。

表 3. 2. 4-1 材料物性値

緩衝材 (飽和状態)	ヤング率 [MPa]	1.176×10^2
	ボアソン比 [-]	0.490
	密度 [N/m ³]	1.960×10^4
	RO モデルパラメータ α	1.51
	// β	1.92
	基準ひずみ [-]	0.0043
オーバーパック	ヤング率 [MPa]	2.058×10^4
	ボアソン比 [-]	0.30
	密度 [N/m ³]	7.624×10^4
	減衰定数 [-]	0.005

3-3

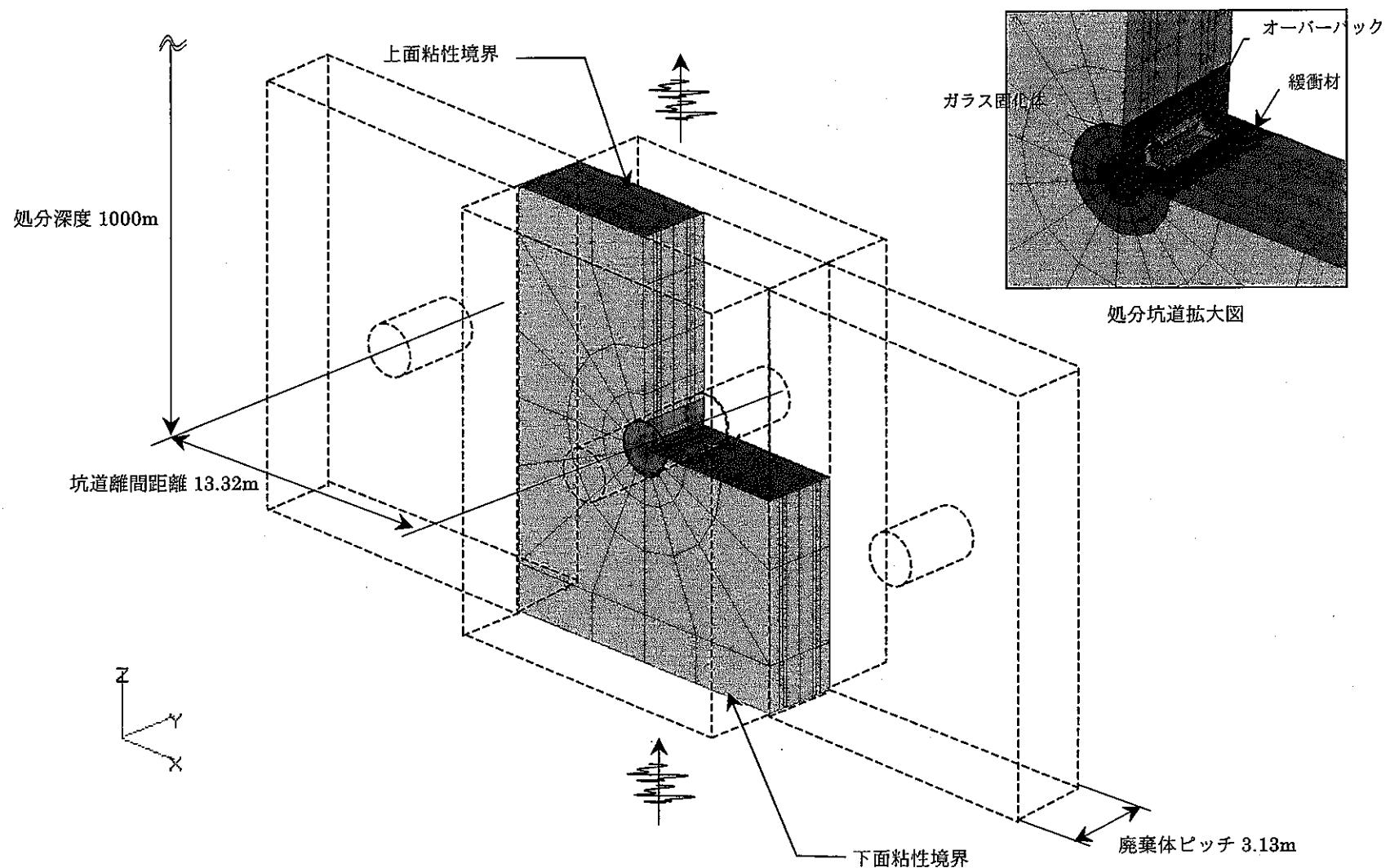


図3.2.1-1 処分坑道横置き方式ニアフィールド解析モデル（レファレンスケース、硬岩系、処分深度 1000m）

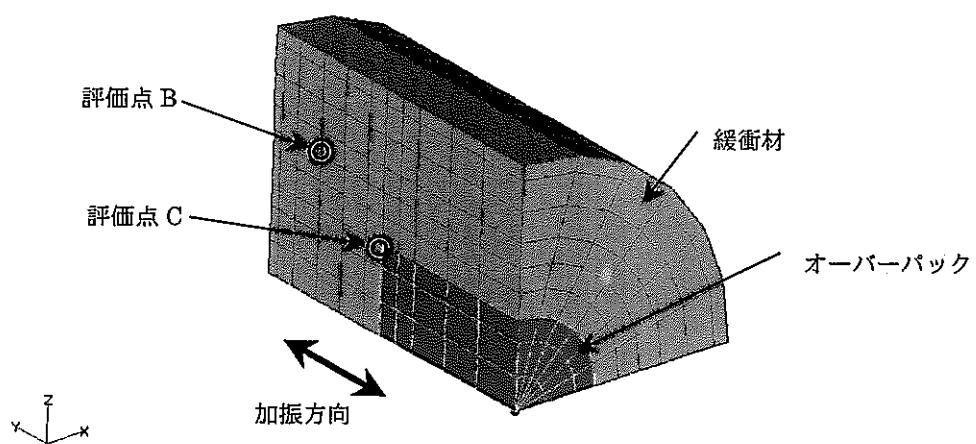


図3.2.1-2 ニアフィールド耐震性評価モデル／1スパン 1/8 対称モデル
(オプションケース、処分坑道横置き方式の例)

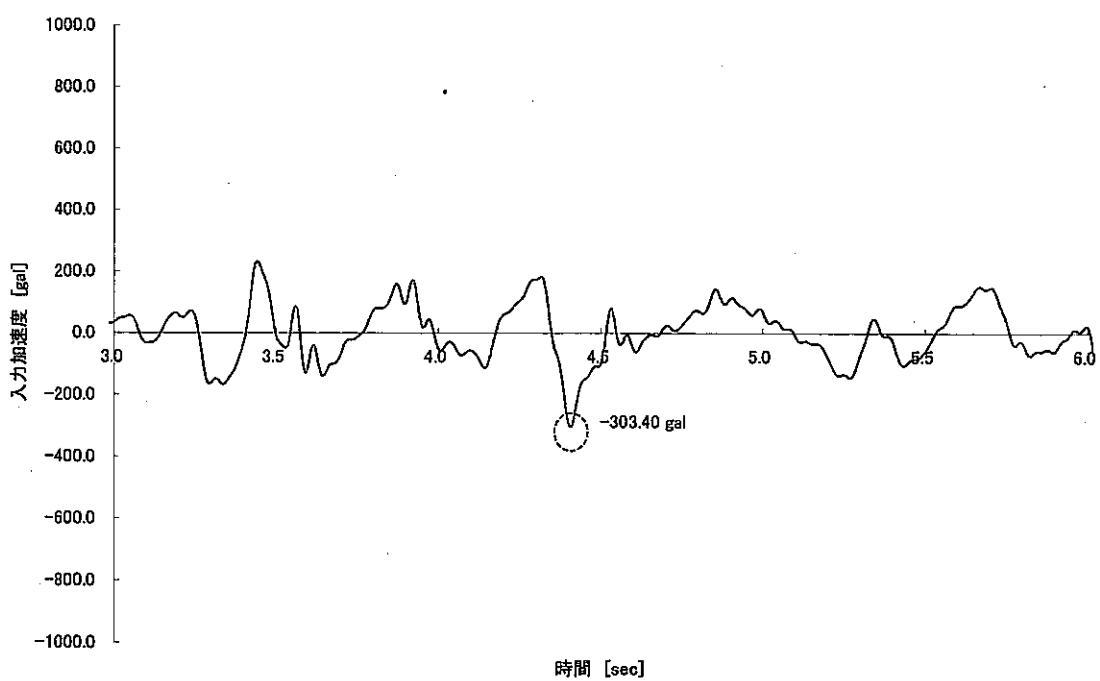


図3.2.3-1 入力地震動（硬岩系岩盤、地下1000m）

3. 2. 5 解析結果および考察

図3. 2. 5-1～図3. 2. 5-2に、上記の評価点 B,C における応答加速度および応答変位を示す。両評価点における応答加速度と入力地震動として用いた加速度波形は概ね一致しており、顕著な応答の増幅傾向は認められない。変位については、オーバーパックコーナー部となる評価点 C で 10^5m オーダのわずかな応答成分が見られるが、緩衝材全体が一体となった剛拳動であると言える。図3. 2. 5-3に示した加速度フーリエスペクトルにおいても、各評価点におけるフーリエスペクトルは入力波のそれとほぼ同一であり、全体として剛拳動になっていることが確認できる。

図3. 2. 5-4、図3. 2. 5-5に入力加速度が最大となる付近（加振後 1.413 秒）におけるせん断応力コンターおよびせん断ひずみコンターを示す。2000 年レポートに示したオプションケースでは、間隙水圧の蓄積・消散に伴う土骨格のせん断剛性の低下を保守的に考慮していないため、緩衝材内で発生するせん断応力、せん断ひずみはそれらの解析結果と同一になる。図3. 2. 5-4より、緩衝材内のせん断応力は 1KPa 以下となり、緩衝材の一軸圧縮強度 0.1MPa をせん断破壊の目安とした場合、十分小さいことが確認できる。せん断ひずみについても、おおよそ $10^{-5} [-]$ オーダ以下となり、発生するひずみの大きさに依存した非線形性は顕著にならないことがわかる。

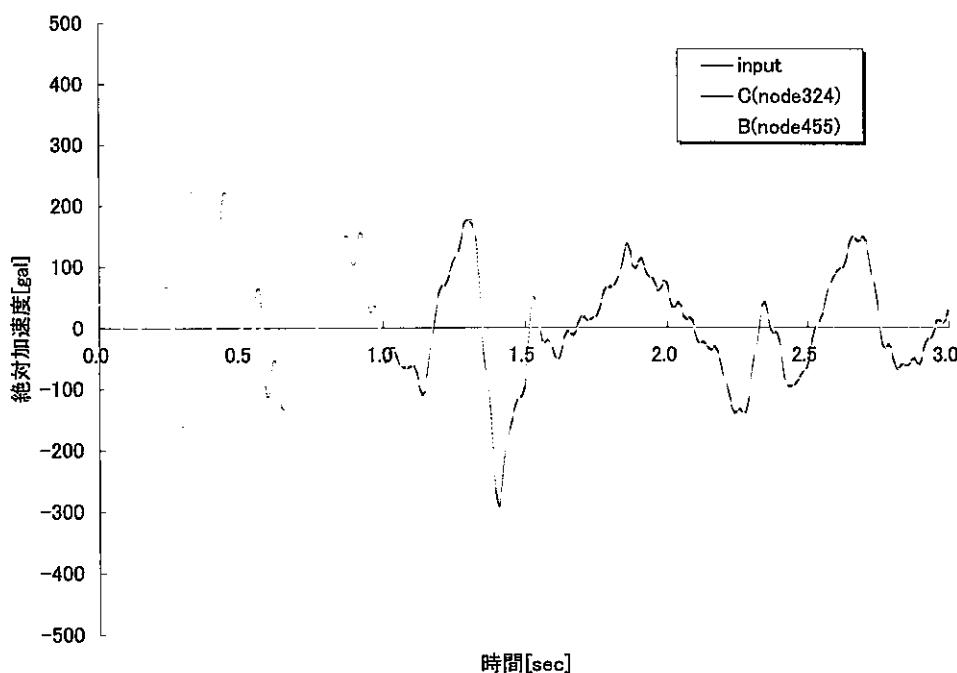


図3. 2. 5-1 応答加速度（絶対加速度）

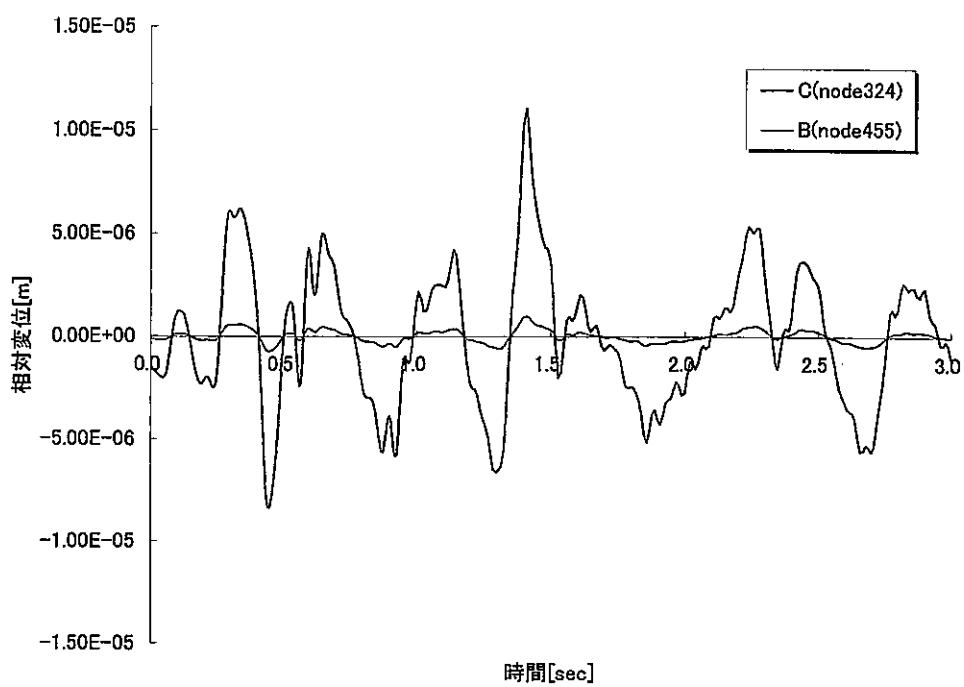


図3.2.5-2 応答変位波形（相対変位）

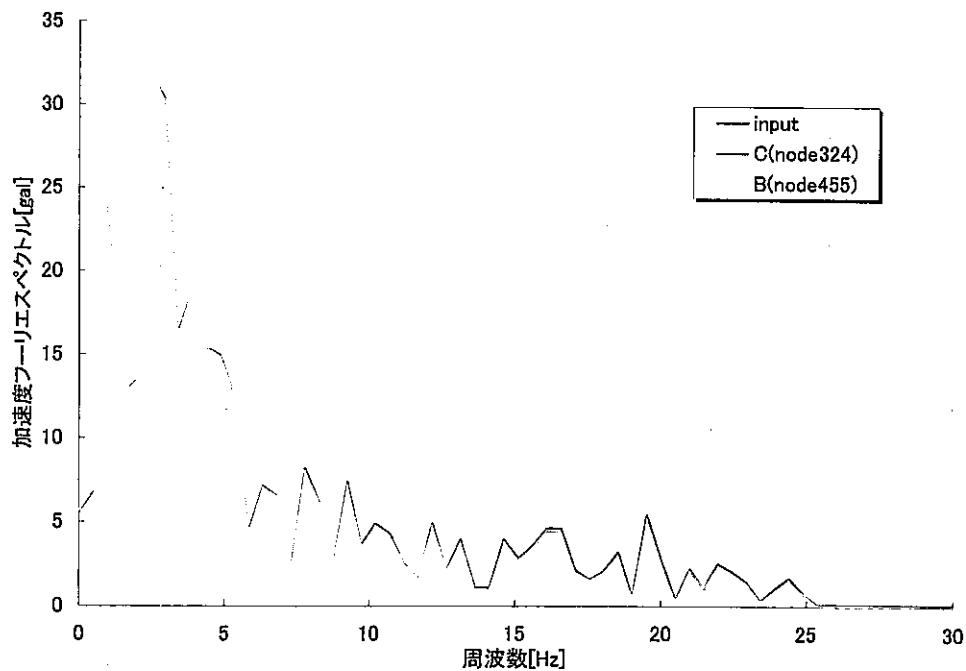


図3.2.5-3 加速度フーリエスペクトル

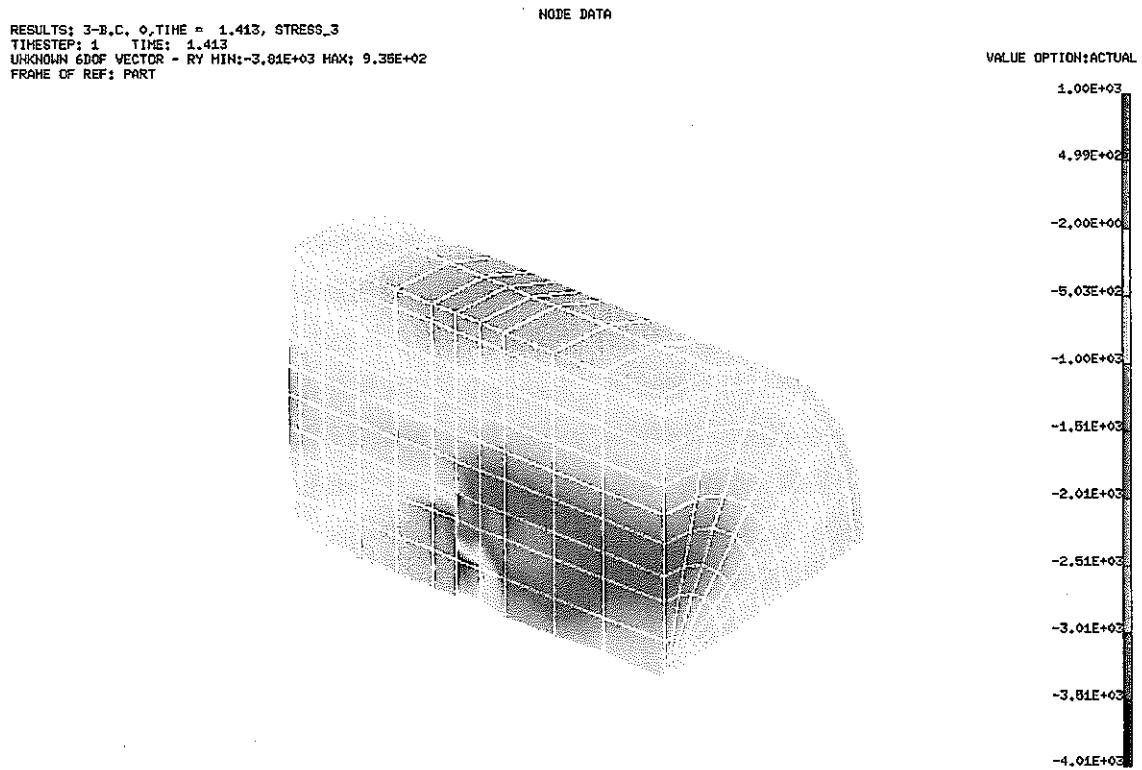


図3.2.5-4 せん断応力コンタ（単位 [Pa]）

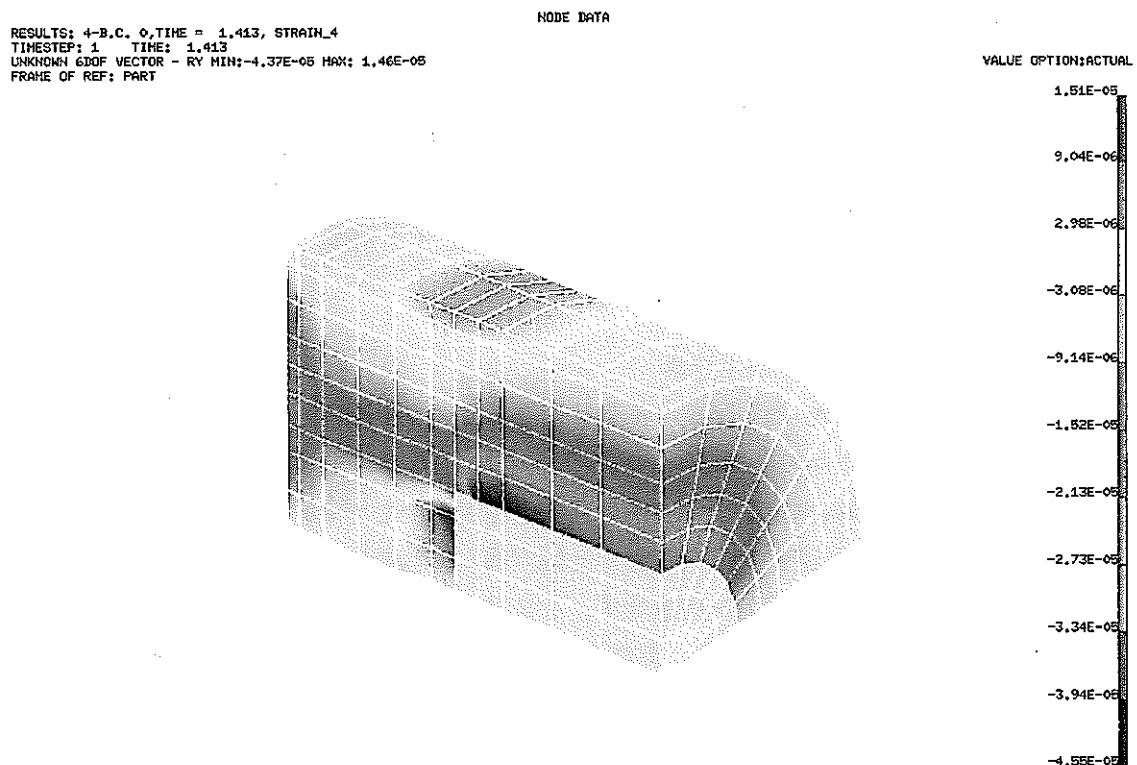


図3.2.5-5 せん断ひずみコンタ（単位 [-]）

3. 3 材料不連続面の低剛性領域を考慮した固有値解析 ; TASK2b

3. 3. 1 目的

昨年度に行った人工バリア系の固有値解析（処分坑道横置き方式）では、乾燥状態の緩衝材で約 77Hz、飽和状態で約 66Hz となることがわかった。この周波数帯域は、これまでに使用した地震動（エルセントロ、宮城沖、八戸沖、岩手県南部沖ほか）の卓越周波数（～10Hz）に比較して十分大きく、人工バリアがこれらの入力地震動と共振する可能性は少なく、かつ人工バリアはほぼ剛体として挙動する見通しが得られた。

一方、緩衝材と周辺岩盤の材料不連続面における力学的な弱面をジョイント要素によりモデル化した場合は、10Hz 近傍の周波数成分の応答が顕著になる傾向が認められている。この傾向は、ジョイント要素を含めた人工バリアシステム全体としての実質的なせん断剛性が低下したことによるものと解釈した。

本検討では、これらの解釈を補足するためのバックデータを提示することを目的に、材料不連続面の低剛性領域をモデル化した固有値解析を行うとともに、材料不連続面の剛性のパラメータとした感度解析を通じて固有周波数への影響を確認する。さらに、使用実績が豊富で信頼性が十分と考えられる汎用有限要素解析コード FINAS を用いた比較解析を併せて行い、ここでの検討結果をバックアップする。

なお、上述の材料不連続面に相当する低剛性領域のモデル化については、剛性マトリクスの特異性の観点からジョイント要素をそのまま用いることはできない。したがって、不連続面の剛性を擬似的に持たせた三次元ソリッド要素やバネ要素によるモデル化を併せて検討する。

3. 3. 2 解析モデル

本検討で使用する解析モデルを図 3. 3. 2-1 に示す。岩盤-緩衝材間の材料不連続面の力学特性については、下記の 2 とおりでモデル化を行った。

- バネ要素
- 薄層形状の三次元ソリッド要素

図 3. 3. 2-1 に示した (a) 図は、不連続面をジョイント剛性とほぼ等しい剛性をもつバネ要素でモデル化したものである。バネ要素の自由度は、

- ① 並進 3 自由度のみ拘束しない（他の回転自由度は全て拘束）
- ② 加振方向となる坑道長手方向（図中 y 軸方向）の並進自由度のみ拘束しない
- ③ 加振方向の並進自由度のみ拘束せず、1 スパンの人工バリアが周期的に対称に定置される周期境界を考慮する多点拘束条件（MPC 拘束条件）を設定する

の 3 パターンを定めた。また、(b) 図は低剛性のソリッド要素でモデル化したものである。両モデルをもとに、周辺岩盤のモデル化は行なわず、岩盤と接する節点自由度を完全拘束にすることで模擬することとした。

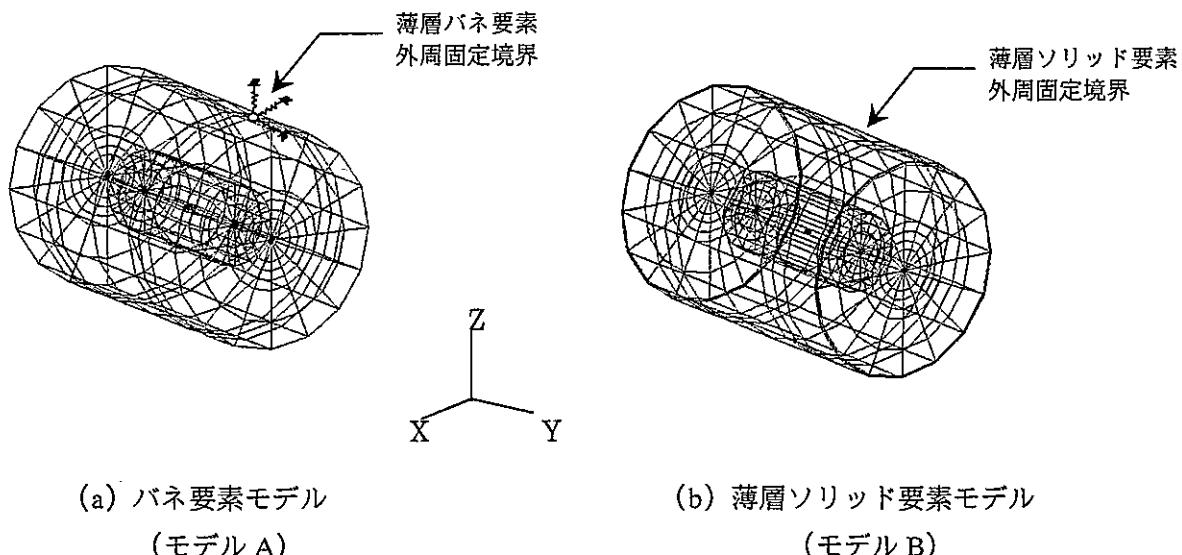


図 3.3.2-1 固有値解析モデル

3.3.3 材料物性値

本検討で用いる材料物性値を以下に示す。ばね要素やソリッド要素でモデル化した不連続面の材料物性値は緩衝材と同一とする（基準ケース）。この基準ケースに対して、不連続面の剛性をパラメータとして感度解析を実施し、不連続面の剛性低下による系の固有周波数に及ぼす影響を確認する。

• 緩衝材（飽和）	；密度	19.60	[kN/m ³]
	；ポアソン比	0.49	[−]
	；ヤング率	117.6	[MPa]
• オーバーパック	；密度	76.24	[kN/m ³]
	；ポアソン比	0.30	[−]
	；ヤング率	205.8	[MPa]
• ガラス固化体	；密度	21.56	[kN/m ³]
	；ポアソン比	0.25	[−]
	；ヤング率	803.6	[MPa]

3.3.4 解析結果および考察

表 3.3.4-1 に緩衝材－周辺岩盤境界に相当する材料不連続面の剛性をパラメータとした感度解析の結果を FINAS による解析結果と併せて示す。解析ケース 1～5 は FINAS による解析結果であり、解析ケース 6～13 は本研究で開発中の地震応答解析コードを用いた解析結果である。このうち解析ケース 1、6 および 10 は、バネ要素ないし薄層ソリ

ット要素に緩衝材と同じ剛性を適用した基準ケースとなるものであり、2000 年レポートの検討に相当するものである。

表3.3.4-1 固有値解析結果（処分坑道横置き、緩衝材飽和）

解析ケース	モデル種別	バネ剛性 [N/m]	ヤング率 [MPa]	基本周波数 [Hz]	使用コード
1	モデル A	—	117.6	89.93	FINAS
2 ⁽²⁾		1.0×10^6	—	14.63	
3 ⁽³⁾		1.0×10^6	—	11.16	
4 ⁽⁴⁾		1.0×10^6	—	11.16	
5		1.0×10^5	—	3.62	
6	モデル B	—	117.6	88.94	JNC
7		—	1.00	35.82	
8		—	0.10	11.84	
9		—	0.01	3.76	
10		—	117.6	98.01	
11		—	1.00	49.58	
12		—	0.10	11.96	
13		—	0.01	3.79	

(注1) 解析ケース1、6、10は分冊ケース1-2に相当

(注2) バネ剛性並進3成分に同一の剛性(等方バネ)。並進3自由度のみ拘束しない。

(注3) 加振方向(坑道長手方向)のみ拘束しない。

(注4) 加振方向(坑道長手方向)のみ拘束しない&人工バリア端部 MPC 拘束(周期対称条件)

(注5) モデルA; 緩衝材周辺にバネ要素を設けたケース(図3.3.2-1 モデルA)

(注6) モデルB; 緩衝材周辺に薄層状のソリッド要素を設けたケース(図3.3.2-1 モデルB)

(1) 基準ケース

基準ケースに相当する解析ケース1、6および10では、材料不連続面のモデル化の方法に依らず、人工バリアの一次周波数は90Hz程度となった。しかしながら、解析ケース6と10では、FINASと本解析コードの間で約10Hz程度の差異が認められる。2000年レポートにおける検討では、上記の差異を補間する目的で、国内外で使用実績の豊富なNASTRANコードによる解析を行い、基準ケースで固有周波数が約60数Hzなることを確認した。通常は緩衝材の乾燥密度が増加するにつれ、固有周波数は大きくなる傾向にあり、1/5縮尺スケール人工バリアの場合では、乾燥密度0.7~1.0kg/cm³付近で固有周波数がおよそ36Hz~53Hz程度となることがこれまでの検討を通じてわかっている。この関係と本検討における形状および乾燥密度の相違から、NASTRANによる解析結果が実際の現象を適切に再現しているものと判断し、この結果をもって2000年レポートの検討を進めることとした経緯がある。なお、本年度の新たな検討として、ABAQUSを用い

て上記と同様の解析を試みた結果から上記の NASTRAN の解析結果とほぼ一致することが確認できている。

本解析コード、FINAS および ABAQUS の固有値解法は部分空間反復法（サブスペース法）を用いており、解析コード間の解法による相違はない。それぞれの解析結果の差異は、対象とする系内に極端に剛性の異なる領域が存在することによる桁落ち、あるいは収束判定等のプログラム内部での取扱いの違いに起因するものと思われるものの、細部の原因は現段階では特定はできていない。今後、これらの解析事例および運用上の知見を蓄積しつつ、コードの適用範囲の把握ならびに信頼性向上に資することが重要である。

(2) 材料不連続面の剛性の相違による人工バリア固有周波数への影響

上記のとおり、基準ケースにおいて解析コード間の固有周波数の差異が認められるものの、剛性低下による固有周波数への影響を比較し、システムに及ぼす影響を定性的に論じることはできる。ここでは、表 3. 3. 4-1 に示した解析結果に基づき、それぞれの解析ケース間の相対的な比較を通じ、材料不連続面の剛性の相違による人工バリア固有周波数への影響を定性的に考察する。

表 3. 3. 4-1 に示した解析結果より、使用した解析コードおよび材料不連続面のモデル化方法の相違によらず、不連続面の剛性の相違による人工バリア固有周波数への影響は顕著であることがわかる。緩衝材一岩盤間の不連続な領域を考慮することにより、人工バリアシステムとしての固有周波数は 10Hz 程度まで低下する。したがって、2000 年レポートの検討で認められた動的応答解析における 10Hz 近傍の応答増幅は、緩衝材一岩盤間の材料不連続面が寄与しているものと考えられる。地震時に緩衝材が一体となって剛な応答挙動となるためには、緩衝材に比較して材料不連続面の剛性が著しく低下していないことが前提となる。たとえば、本検討からは材料不連続面の剛性が緩衝材のそれより 1~2 桁程度小さい範囲であれば、システムとしての固有周波数の低下は著しくなく、人工バリアが周辺岩盤と一体となった剛な応答挙動を示す傾向があると言える。

3. 4 レファレンスケースにおける非線形解析と等価線形解析の比較 ; TASK2c

3. 4. 1 目的

2000 年レポートでは、地盤の半無限性や材料不連続面、さらには隣接する廃棄体や緩衝材の材料非線形性の考慮など、現実的な処分体系のモデル化手法を積極的に取り込んだ検討を進めてきた。このうち緩衝材の材料非線形性の考慮では、周波数応答解析に基づく等価線形体としての取り扱いが考えられたが、ジョイント要素を設ける必要性等から、直接時間積分法を前提とした RO モデルを採用した。

ここでは、上記の材料非線形性に関するモデル化方法のオプションに着目し、2000 年レポートで示した RO モデルと等価な材料構成モデルに従う等価線形体によりモデル化した動的応答解析を行い、両者の比較を通じて、評価の保守性の観点から解析手法ならびにモデル化手法の相違による影響を考察する。ただし、現段階では材慮不連続面を等価線形体としてモデル化する適当なパラメータ（ひずみレベルに応じた緩衝材のせん断剛性、履歴減衰）がないため、両解析においてジョイント要素は考慮しないこととする。

3. 4. 2 解析モデル

使用する解析モデルは 2000 年レポートレファレンスケースと同一とする（図 3. 2. 1 - 1 参照；処分坑道横置き方式）。入力地震波についても、3. 2 節と同様に 2000 年レポートと同一とし、処分深度-1000m における地中波を重複反射理論により同定したものを用いる（図 3. 2. 3 - 1 参照）。評価点および評価断面については、図 3. 4. 2 - 1 に示すとおり設定した。

3. 4. 3 材料物性値

本検討では、緩衝材中に地下水が浸潤飽和する前後の 2 つの状態（乾燥状態、飽和状態）に着目する。表 3. 4. 3 - 1 にそれぞれの材料物性値を示す。

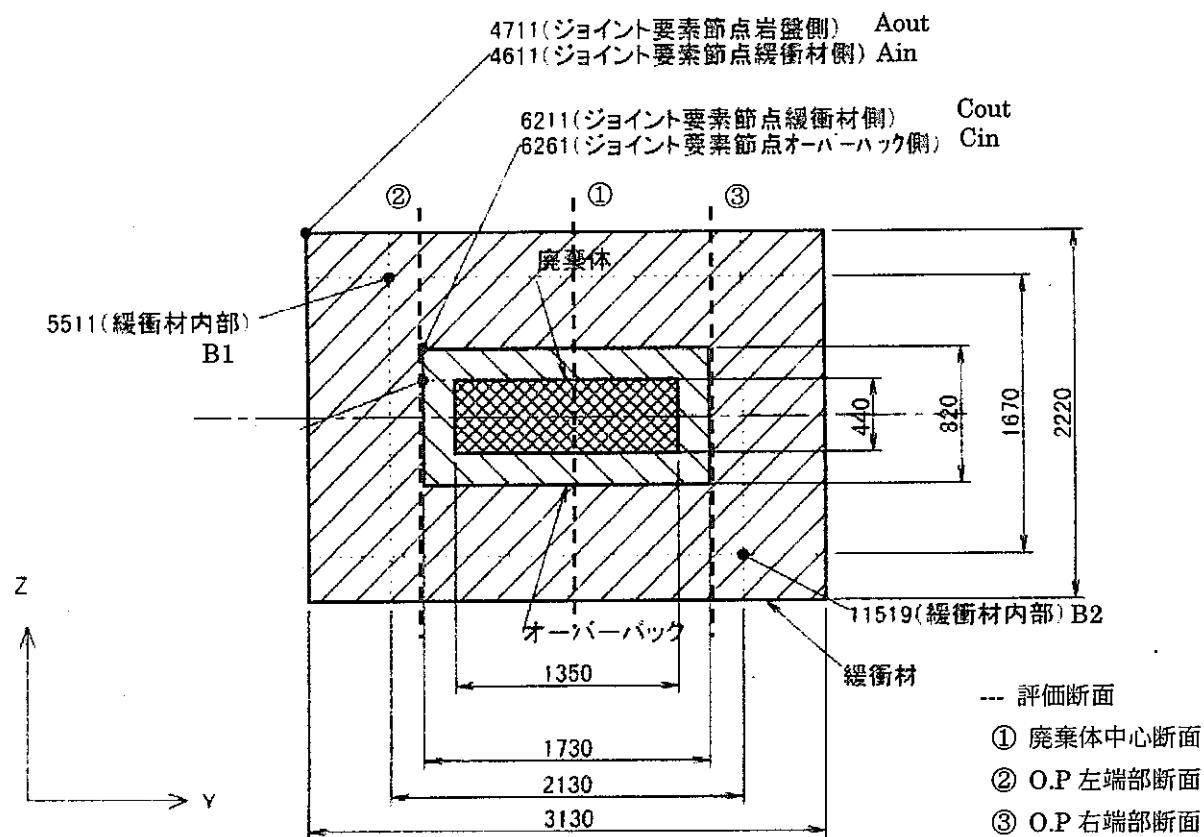


図3.4.2-1 評価点および評価断面（処分坑道横置き方式、坑道断面）

表3.4.3-1 材料物性値

緩衝材（飽和状態）	ヤング率 [MPa]	1.176×10^8
	ポアソン比 [-]	0.490
	密度 [N/m ³]	1.96×10^4
緩衝材（乾燥状態）	ヤング率 [MPa]	2.388×10^8
	ポアソン比 [-]	0.200
	密度 [N/m ³]	1.568×10^4
オーバーパック	ヤング率 [MPa]	2.058×10^{10}
	ポアソン比 [-]	0.30
	密度 [N/m ³]	7.624×10^{10}
	減衰定数 [-]	0.005

緩衝材を等価線形体としてモデル化する際のせん断ひずみ γ とせん断剛性 G_{max} ならびにせん断ひずみ γ と履歴減衰 h の関係は、2000年レポートで用いた RO モデルに従い、表3.4.3-2のとおり定めた。これらのデータは、次式を満足する正規化されたせん断剛性 G/G_{max} および履歴減衰比 h/h_{max} を繰返し収束計算により求めたものである。

$$\sqrt{\left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \cdot \left[1 + \alpha \left(\frac{G \cdot \gamma}{\tau_f}\right)^{\beta-1}\right]} - 1 = 0 \quad (3.4.3-1a)$$

$$h = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\beta-1}{\beta+1} \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (3.4.3-1b)$$

ここに、 α 、 β はそれぞれ RO モデルを規定するモデルパラメータである。 τ_f は破壊せん断強度である。図3.4.3-2は、表3.4.3-2に示したデータをグラフ化したものである。これらの関係から、一般の土質材料で認められるひずみレベルの増加に伴う剛性の低下、ならびに履歴減衰の増加傾向が確認できる。せん断剛性については、せん断ひずみが $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 程度で最大せん断剛性の約 $1/2$ となることがわかる。ベントナイトのような多孔質の土質材料では、地下水の浸潤により強度が低下するため、飽和状態に比較して乾燥状態の方がせん断剛性の絶対値は大きい。飽和状態の緩衝材は、せん断ひずみ 10^{-4} 付近で剛性低下が始まり、乾燥状態ではせん断ひずみ 10^{-5} 付近で剛性低下が見られる。最大せん断剛性の大きい乾燥状態の緩衝材の方がひずみレベルの増加に伴う剛性低下の傾向が顕著であると言える。履歴減衰についても同様の傾向が認められ、せん断ひずみが $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 付近で最大履歴減衰の約 $1/2$ となり、乾燥状態の緩衝材の方がひずみレベルの増加に伴う減衰增加の傾向が顕著になる。

表3.4.3-2 解析に用いたせん断剛性、履歴減衰

せん断ひずみ	乾燥状態		飽和状態	
	正規化せん断剛性	正規化履歴減衰	正規化せん断剛性	正規化履歴減衰
1.20E-06	0.9968	0.003235	0.9992	0.000806
1.40E-06	0.9963	0.003725	0.9991	0.000928
1.60E-06	0.9958	0.004208	0.999	0.001049
1.80E-06	0.9953	0.004685	0.9988	0.001169
2.00E-06	0.9949	0.005157	0.9987	0.001288
3.00E-06	0.9926	0.007456	0.9981	0.001868
5.00E-06	0.9882	0.01183	0.997	0.002983
7.00E-06	0.9841	0.01599	0.996	0.004056
9.00E-06	0.9801	0.01999	0.9949	0.005101
1.10E-05	0.9762	0.02387	0.9939	0.006124
2.10E-05	0.9584	0.04176	0.989	0.011
4.10E-05	0.9276	0.07259	0.9801	0.02
6.10E-05	0.9013	0.099	0.9717	0.02836
8.10E-05	0.8781	0.1222	0.9639	0.03624
0.000101	0.8574	0.143	0.9564	0.04374
0.000201	0.7774	0.2232	0.9232	0.07698
0.000401	0.6774	0.3235	0.8706	0.1298
0.000601	0.6133	0.3878	0.829	0.1715
0.000801	0.5669	0.4344	0.7947	0.2059
0.001001	0.531	0.4703	0.7654	0.2353
0.002001	0.4241	0.5776	0.6632	0.3378
0.004001	0.3294	0.6726	0.552	0.4493
0.006001	0.2812	0.7209	0.4875	0.514
0.008001	0.2504	0.7518	0.4434	0.5582
0.01	0.2284	0.7738	0.4105	0.5912
0.02	0.1702	0.8322	0.3178	0.6842
0.04	0.1255	0.877	0.241	0.7612
0.06	0.1046	0.898	0.2035	0.7988
0.08	0.09182	0.9108	0.18	0.8224
0.1	0.08293	0.9197	0.1635	0.839

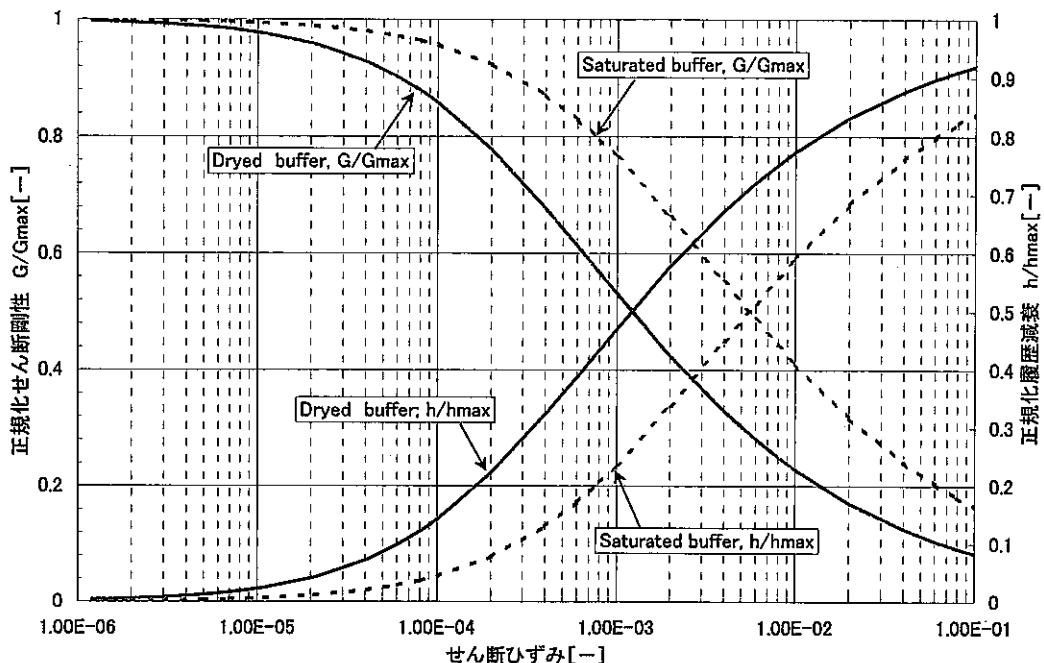


図3.4.3-2 せん断ひずみ γ －せん断剛性G、履歴減衰hの関係

3.4.4 解析結果および考察

図3.4.4-1～図3.4.4-6に応答加速度、変位および加速度フーリエスペクトルを非線形解析結果と比較した結果を示す。

乾燥状態および飽和状態とともに、本解析（等価線形解析）より得られた応答加速度は、リンク効果に起因すると思われる短周期の応答成分が現れているものの、非線形解析結果と概ね良好に一致している。緩衝材の応答量は十分小さく、比較的に剛な応答挙動となることが確認できる。加速度フーリエスペクトルについては、20Hz～30Hz付近で両解析手法による相違がやや顕著になり、周波数の増加に伴い等価線形解析の結果が次第に大きくなる傾向が認められる。この相違は、等価線形解析と非線形解析における入射波（粘性境界要素の関与）の取扱いの相違によるものと思われる。時間領域で直接積分することができる非線形解析では、モデル底面からの地震波の入射を逐次追跡し、運動方程式の荷重項に必要な（入射面における）地震荷重成分を時々刻々と見積もることができるものの、周波数応答計算に基づいた等価線形解析では、モデル内の節点毎に同じ荷重が作用すること（慣性加振）を前提としているため、プログラミングの上で例外処理を行う必要がある。

いま、周波数領域における運動方程式を次式で表す。

$$([K] + i\omega[C] - \omega^2[M]) = \alpha_k P \quad (3.4.4-1)$$

ここで、左辺は左から順に弾性力、減衰力および慣性力に関する項であり、右辺は荷重項である。Pは地震波の各自由度に対する荷重影響係数であるため、任意の周波数に対して

同じになる。周波数応答計算では、まず荷重 P について応答量を求め、それに係数 α_k を乗じることにより全自由度の応答を求めることがある。モデル全体に同じ荷重が作用する場合は問題ないが、地震波の伝播を伴う入射波解析では、モデル内の節点毎に異なる地震荷重が作用することになる。遠方自由地盤との連成を考慮し、モデル側面で荷重を受ける場合も同様のことが言える。このような場合、モデル内の節点毎に異なる荷重ベクトルの時系列データから周波数系列データをフーリエ変換により作成し、周波数成分 k の値を上式の荷重項に入れて応答計算を行なう手続きをとっている。フーリエ変換を行なう際は、同じ時系列データであっても使用するデータ点数、刻み幅、周波数の上限値の与え方などにより周波数系列データが異なる場合がある。

これらの処理内容を勘案すると、等価線形解析と非線形解析の解析結果に認められた相違は、粘性境界要素を併用したことによる荷重項の評価方法の差異に起因するものと考えることができる。

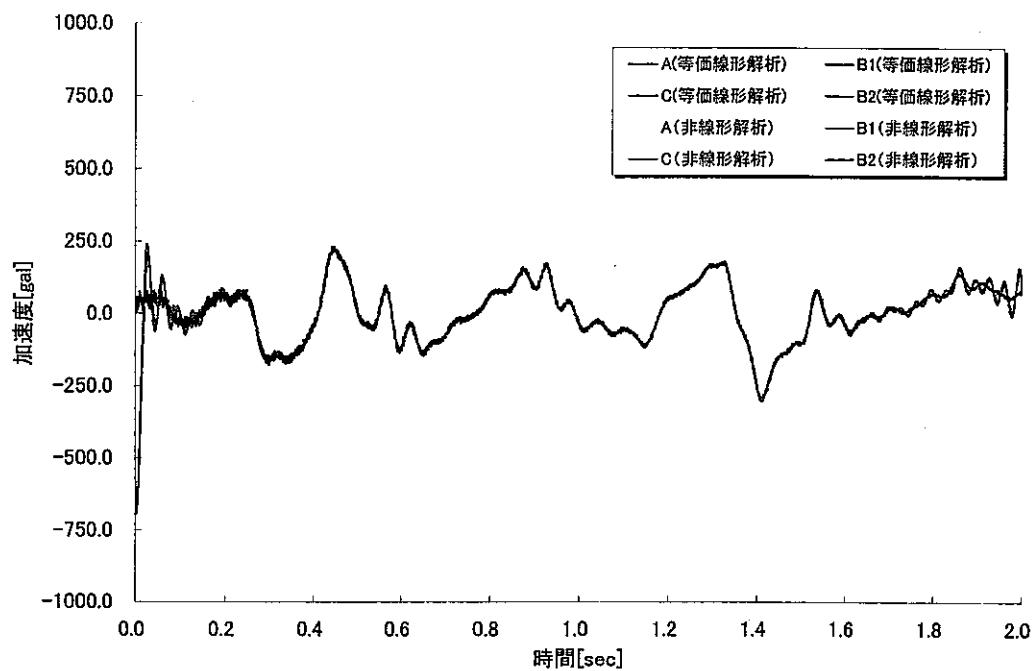


図3.4.4-1 応答加速度
(等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態)

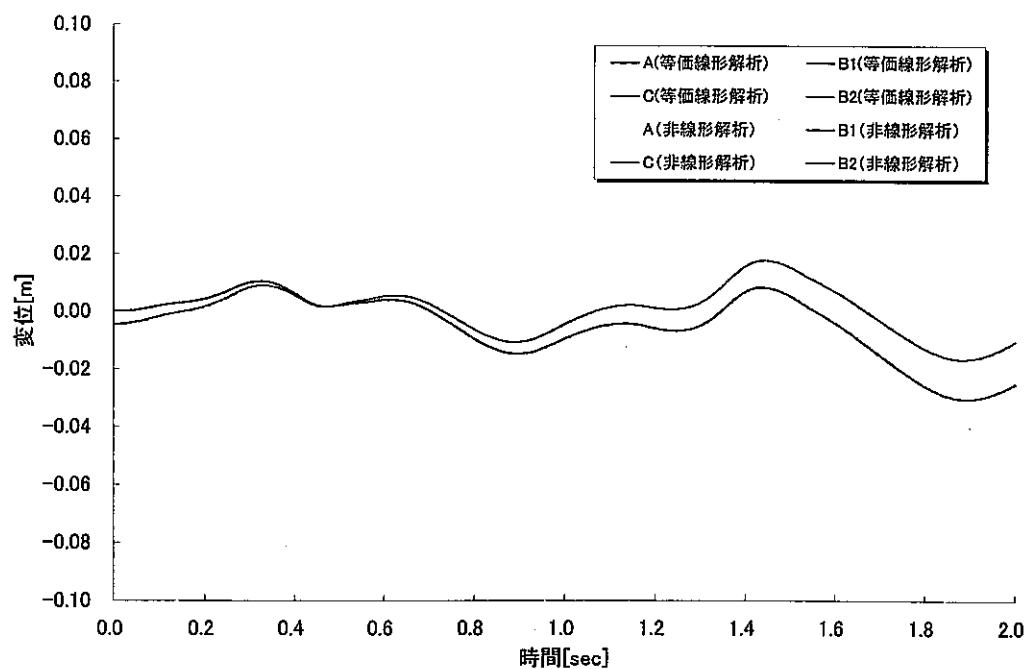


図3.4.4-2 応答変位
(等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態)

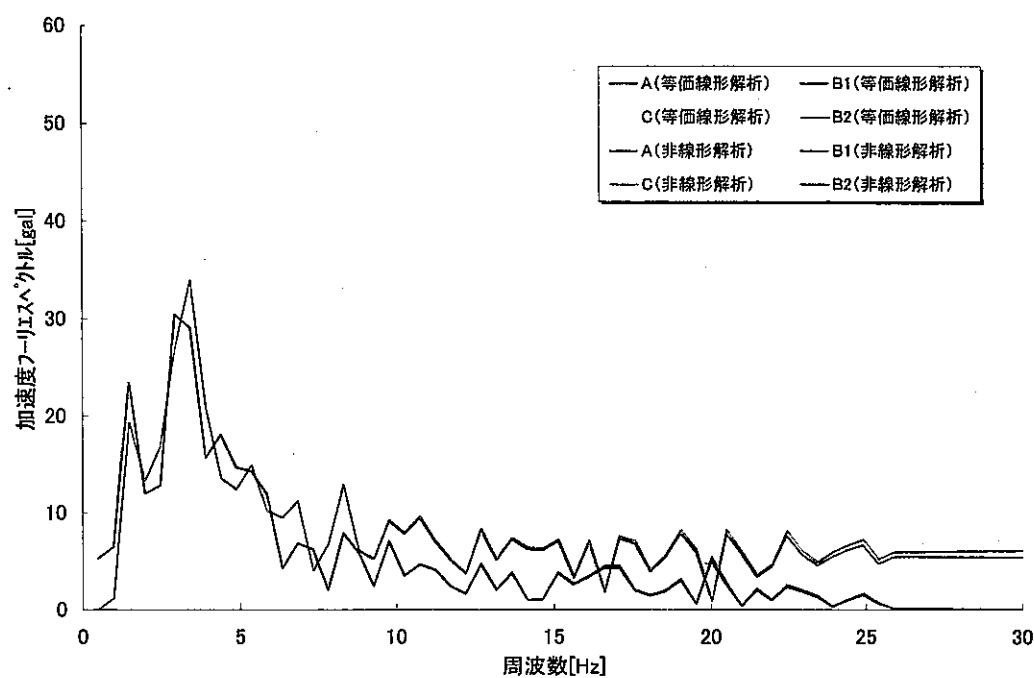


図3.4.4-3 加速度フーリエスペクトル
(等価線形解析と非線形解析の比較；乾燥状態)

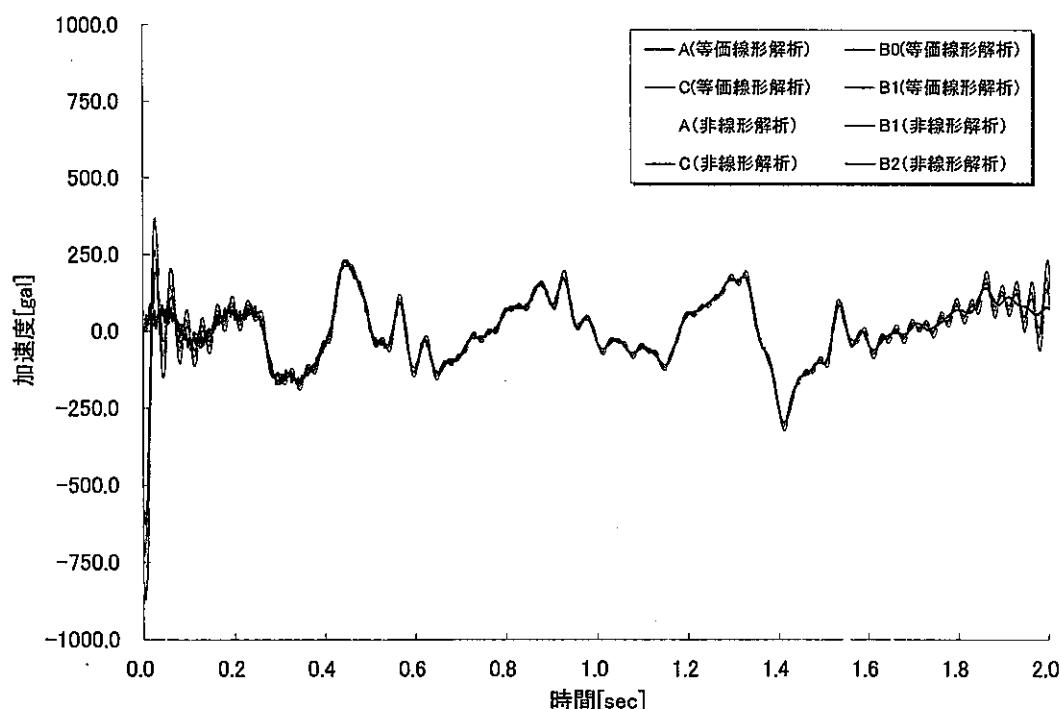


図3.4.4-4 応答加速度
(等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態)

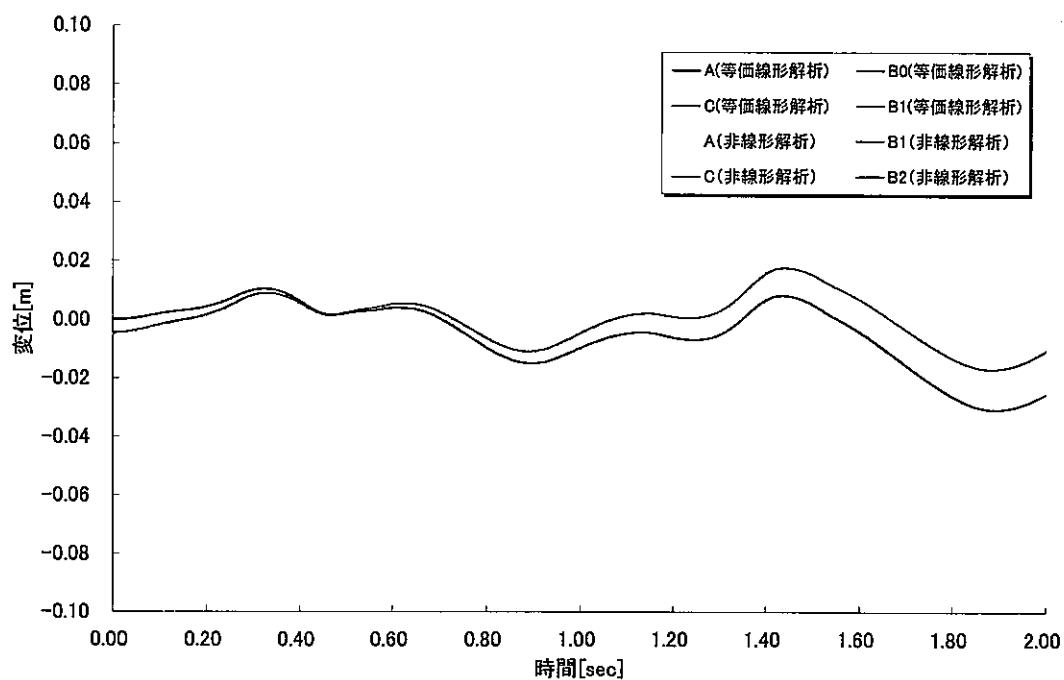


図3.4.4-5 応答変位
(等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態)

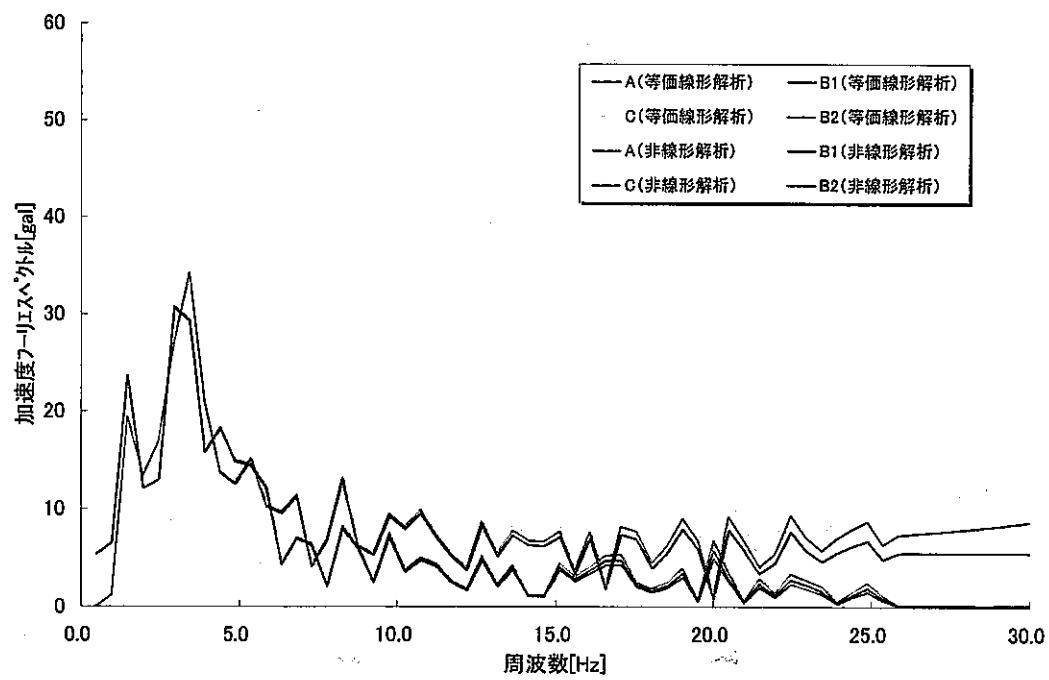


図3.4.4-6 加速度フーリエスペクトル
(等価線形解析と非線形解析の比較；飽和状態)

3. 5 ジョイント物性のパラメータスタディ ; TASK2d

3. 5. 1 目的

2000年レポートに示した検討を通じて、オーバーパック緩衝材間の材料不連続面の応答を規定するモデルパラメータについては、緩衝材の応答挙動に大きく影響を及ぼす重要な因子であるとの知見が得られている。すなわち、地震波が処分場を通過する際に示す緩衝材の応答挙動は、緩衝材-岩盤間に設けられたのジョイント部において地震力を伝達する形態に支配される。地震動による慣性エネルギーが不連続変形を伴うジョイント部の弾性エネルギーとして伝達する場合は、緩衝材の伝達する弾性エネルギーが少なくなり、結果的に緩衝材周辺の岩盤のみが運動する。また、ジョイント部が不連続変形を伴わない弾性エネルギーとして伝達する場合は、緩衝材内に運動エネルギーが伝達し、内部の応力状態はそれらとの平衡を保持する。前者は緩衝材乾燥の状態に相当し、後者は緩衝材飽和の状態に相当する。これらの傾向から、ジョイント要素部において地震力が伝達される形態と人工バリアシステムの応答性状との関係は密接であり、相互の関係を定量的に把握することが重要であると考える。

本検討では、ジョイント要素の応答挙動を規定するモデルパラメータ（剛性、粘着力、内部摩擦角など）を対象とした感度解析を通じて、人工バリアシステムの応答性状との関係を予察的に把握する。

3. 5. 2 解析モデルおよび解析ケース

本検討では、地震荷重が作用した際の緩衝材およびジョイント部（緩衝材-岩盤間の材料不連続面）の応答と相互の関係について、ジョイント要素の力学特性に対する応答性状への感度と併せて考察する。解析モデルは、ジョイント要素の岩盤側の自由度（岩盤に接する自由度）を固定し、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる人工バリア領域のみを考慮した簡易化した系を対象とし、ジョイント要素の力学特性に対する影響について概略把握することを目的とした。図3. 5. 2-1に解析モデル（処分坑道横置き方式）を示す。

本検討で対象とする解析ケースを表3. 5. 2-1に示す。解析ケース 2D を基準ケースとし、ケース 2D-2～2D-3 ではジョイント部の剛性低下に伴う人工バリア応答性状への影響を確認する。また、ケース 2D-4～2D-5 では、緩衝材の剛性低下に対する応答性状への影響を確認する。

入力地震動は、3. 2. 3項の検討と同様に、エルセントロ波の地下 1000m における地中地震波（図3. 2. 3-1参照）を用いる。

なお、評価点については、人工バリアの応答性状に着目するためガラス固化体中心を含めた緩衝材内部の領域に複数箇所（図中 A～F 点）設け、変位、加速度の時間変化を確認することとする。また、ジョイント部およびその近傍の緩衝材領域におけるせん断応力についても確認する。

表3.5.2-1 ジョイント物性をパラメータとした解析ケース

解析ケース	緩衝材（飽和状態） ヤング率 [Mpa]	ジョイント部 せん断剛性 Ks[N/m]
2D-1	117.6	4.410×10^6
2D-2	117.6	4.410×10^4
2D-3	117.6	4.410×10^2
2D-4	1.176	4.410×10^6
2D-5	1.176×10^{-2}	4.410×10^6

3.5.3 材料物性値

本検討で使用した材料物性値を表3.5.3-1に示す。

表3.5.3-1 材料物性値

緩衝材 (飽和状態)	ヤング率 [MPa]	117.6 (注)
	ポアソン比 [-]	0.49
	密度 [N/m ³]	1.960×10^4
	RO モデルパラメータ α // β	1.51
	基準ひずみ [-]	0.0043
ガラス固化体	ヤング率 [MPa]	8.036×10^4
	ポアソン比 [-]	0.25
	密度 [N/m ³]	2.156×10^4
オーバーパック	ヤング率 [MPa]	2.058×10^4
	ポアソン比 [-]	0.30
	密度 [N/m ³]	7.624×10^4
	減衰定数 [-]	0.005
ジョイント要素	垂直剛性 K_n [N/m]	3.181×10^{10}
	せん断剛性 K_s [N/m]	4.410×10^6 (注)
	粘着力 [MPa]	0.146
	内部摩擦角 [deg]	0.0

(注) 基準ケース

3. 5. 4 解析結果および考察

表3. 5. 2-1に示した全5ケースの解析について、A~F(図3. 5. 2-1参照)の各評価点における応答変位、応答加速度およびジョイント部、緩衝材におけるせん断応力の時間変化と加速度フーリエスペクトルを整理した。

まず始めに、基準ケースとなる解析ケース2D-1についてシステムの応答性状を確認し、解析ケース2D-2~2D-3の結果と併せてジョイント要素におけるせん断剛性(K_s)の影響を確認する。同じく、基準ケースならびに解析ケース2D-4~2D-5の結果から緩衝材におけるせん断剛性の影響を確認する。これらの確認を通じて、ジョイント部と緩衝材のせん断剛性の相対的な差異によるシステム全体の応答性状に及ぼす影響を定性的に考察する。また、図3. 5. 4-2に示した応答加速度に含まれる短周期成分の応答について、本解析コードで採用している直接積分法と非線形解法の数値安定性の観点から議論を展開する。

(1) 基準ケース

図3. 5. 4-1~図3. 5. 4-3に各評価点における応答変位、応答加速度および加速度フーリエスペクトルを示す。基準ケースとなるケース2D-1では、10Hz近傍の短周期の応答成分が顕著となり、入力加速度に対して2~3倍の応答の増幅が認められる。これは、本来、岩盤と接するジョイント要素の自由度を固定境界としたことによるものである。岩盤領域をモデル化し、粘性境界要素により地盤の半無限性を適切にモデル化することにより、この応答増幅は回避することができるものである。しかし、本検討ではジョイント要素を含めた人工バリアシステムの応答性状について、とくに緩衝材とジョイント部の剛性の相対的な差異が応答に及ぼす影響を定性的に把握することを目的としているため、上記の有限領域をモデル化したことによる固定境界の応答成分への影響を含めたままで議論をすすめることとする。

ジョイント要素で発生するせん断応力は、滑りが発生する応力レベル 10^5Pa (内部摩擦角がゼロであるため、せん断破壊に至る応力にジョイント面に垂直方向の応力成分は寄与しない。粘着力のみがせん断破壊に至る上限値となる。)より十分小さく、弾性範囲に留まっていることがわかる(図3. 5. 4-4参照。図中A点は緩衝材内の要素積分点、B点はジョイント要素の積分点における結果を表す)。基準ケースにおける系内の力学的平衡状態は、ジョイント要素における弾性力と人工バリア(緩衝材、オーバーパックおよびガラス固化体)における弾性力、慣性力および減衰力とが外荷重となる地震力と釣り合っている。

(2) ジョイント要素せん断剛性(バネ剛性 K_s)の影響

上記の基準ケースに対してジョイント要素のせん断剛性を小さくするに従い(ケース2D-2~ケース2D-3)10Hz近傍の応答増幅がなくなり、人工バリアの応答がほとんど発生していない状態になる。これは、ジョイント要素におけるせん断抵抗が非常に

小さいため、外荷重に対して変形しやすく、ジョイント部の弾性力のみで地震力とほぼ釣り合ったためである。このとき、緩衝材周囲の不連続面のみの変形が支配的となり、人工バリアは概ね静止状態にある。実際には、ジョイント部の過大な変形に対しては坑道端からの壁面反力が抵抗すると思われる。しかし、せん断破壊後の塑性変形は永久変形として残り、ガラス固化体の定置間隔が局所的に接近する可能性が考えられる。複数の人工バリアを考慮した坑道スケールの体系において、坑道端からの反力の影響を確認することが重要である。

(3) 緩衝材せん断剛性 G の影響

上記(1)項で述べた基準ケースに対して緩衝材の剛性を 2 衍小さくしたケース 2D-4 では、人工バリアの応答増幅が顕著になる。図 3. 5. 4-3 に示した加速度フーリエスペクトルからは、入力地震波の卓越周波数とほぼ同じ周波数領域 (3Hz~5Hz) で共振傾向を示していることが確認できる。これは、基準ケースに対して剛性を小さくしたことにより、系の固有周波数が低下したためである。緩衝材の剛性をさらに小さくしたケース 2D-5 では固有周期付近における応答の増幅はなくなるものの、人工バリアの応答はゆったりとした変形挙動が支配的となる。これらのケースでは、緩衝材は一体となった剛挙動を示すことはなく、緩衝材内における変形量やひずみレベルが極端に大きくなる。また、緩衝材の非線形性に伴う剛性低下によりガラス固化体の定置、保持性能に悪影響を及ぼすものと思われる。

(4) 不連続面および緩衝材の剛性と系の応答性状との関係

以上の結果より、ジョイント要素によりモデル化した不連続面のせん断剛性と緩衝材の剛性の相対的関係が人工バリアシステムの全体に及ぼす影響を定性的に考察することができる。以下に本検討を通じて得られた知見をまとめる。

- ・ジョイント部のせん断剛性 K_s を 2 衍低下させた場合、この領域における変形のしやすさが卓越し、人工バリアが静止状態したピストン状の変形モードとなる。ジョイント部の変形が弾性限界を超え、塑性変形となる場合は、過大な変形が永久変形として残るため、坑道端の反力の寄与を勘案できる坑道スケールでの評価が重要となる。
- ・地震によるエネルギーをジョイント部における弾性変形により（弾性エネルギーとして）負担している場合であっても、緩衝材の剛性が 2 衍以上も低下するケースでは、緩衝材内の応答増幅が顕著になる。ジョイント部の変形に伴うシステム全体の応答性状への影響は少ない。したがって、ジョイント部の変形の程度によらず、緩衝材の剛性はガラス固化体の定置性能を維持できる範囲で確保しなければならない。

(5) ジョイント要素を含む系の数値安定性

最後に、図3.5.4-2に示した応答加速度に含まれる短周期の成分について、本解析コードで採用している時間積分法と数値安定性の観点から考察を付け加える。

本解析コードは時間積分法にニューマーク β 法、非線形解法は線形剛性を用いた反復法（初期剛性法）を採用している。初期剛性法を用いた収束アルゴリズムでは、時刻 t における変位から次の時間点 $t + \Delta t$ の解を求めるために、以下に示す実効方程式を解くことにより、各イタレーションポイントにおける残差不平衡力と釣り合う変位増分ベクトル $\{\bar{u}\}^i$ を求ることになる。

$$[\hat{K}] \{\bar{u}\}^i = \{r\}_{t+\Delta t}^i \quad (3.5.4-1)$$

ここに、 $[\hat{K}]$ は実効剛性マトリクス、 $\{r\}_{t+\Delta t}^i$ はイタレーション i における時刻 $t + \Delta t$ の残差不平衡力であり、それぞれ以下のように表される。

$$[\hat{K}] = [K] + a_0 [M] + a_1 [C] \quad (3.5.4-2)$$

$$\{r\}_{t+\Delta t}^i = \{Q\}_{t+\Delta t} - [M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}^i - [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t}^i - \{s\} \quad (3.5.4-3)$$

係数 a_0 、 a_1 はニューマークパラメータ、 $\{s\}$ は応力や間隙水圧による等価節点力ベクトルである。(3.5.4-1)式からイタレーション i における変位増分ベクトル $\{\bar{u}\}^i$ を計算し、ニューマークパラメータを用いた漸化関係式より加速度、速度、変位を更新する。次式で表すエネルギーノルムに関する収束判定を行い、許容誤差の範囲に収まらない場合は、上記の変位増分を加味した新しい変位ベクトルを作成の上、同様の手続きを行う。

$$\{E\}^{i+1} = \{\bar{u}\}^{iT} \cdot \{r\}_{t+\Delta t}^i \quad (3.5.4-4)$$

以上の概念を一次元的に表した模式図を図3.5.4-5に示す。上式(3.5.4-4)は図中斜線部の面積に相当する不平衡力の成す仕事を表している。

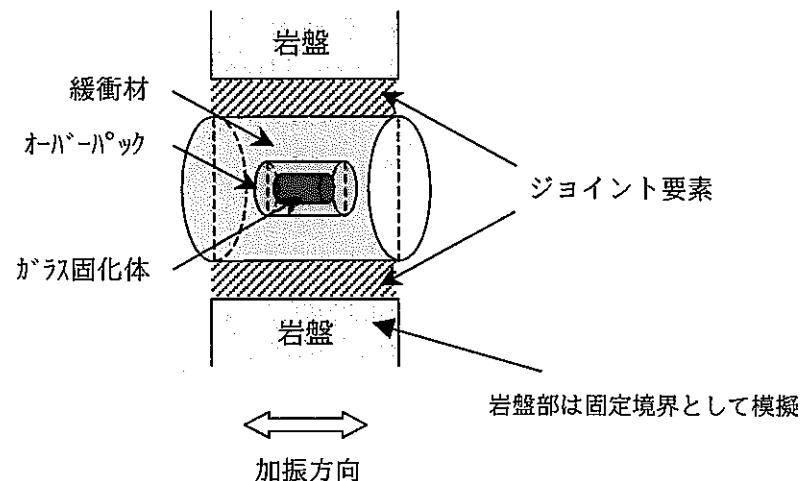
対象とする系の荷重と変形の関係が上に凸となる場合は、空間的に閉じた連続な單一領域に対応し、硬化材料のような変形特性を示す(図3.5.4-5)。一方、ジョイント要素などを設けることにより、複数の閉じた空間領域から構成される場合(1つの連続領域を複数の連続領域に完全に分割する場合)は、非硬化材料のような変形特性となる(図3.5.4-5)。前者の場合は、上記のエネルギーノルムが変位の修正に伴い収束する(図3.5.4-5の斜線部の面積が十分小さくなる)傾向にある。この場合、エネルギーノルムの中に弾性エネルギーに相当する部分が含まれており、

これが十分小さい値に収束することを同時に意味している。従って、弾性エネルギーを十分小さくし、かつ系内の非弾性エネルギー（図3.5.4-5参照）を全て吸収できる平衡点を見つけることと同じ意味である。一方、後者の場合は変位の修正に係わらず常に同じエネルギーノルムとなり収束しないことがわかる（図3.5.4-6参照）。すなわち、非硬化材料のような変形特性を有する系ではエネルギーノルムを用いた収束判定を行うことに物理的意味は少ない。しかし、実際に計算を行ってみると、非硬化材料の変形特性を有する系であっても収束するケースは多く、これは慣性力や減衰力の寄与により見掛け上収束しているように見えるに過ぎないと考えることができる。この物理的意味の希薄な見掛け上の収束が、図3.5.4-2に示した応答加速度に含まれる短周期成分の応答を生じさせているものと思われる。計算点が弾性域にある場合でも、他の領域に比較して剛性が著しく小さい領域が複数の閉じた領域を構成するケースでは、上記の見掛け上の収束に至ることが予想される。

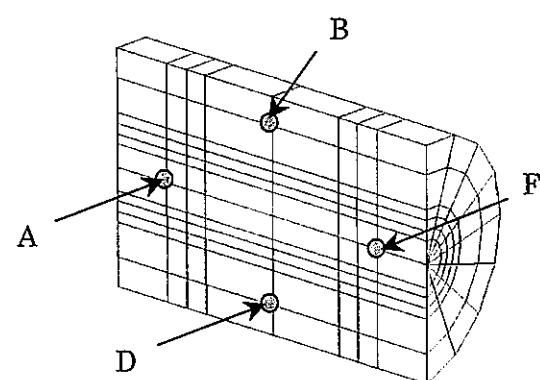
現段階では、上記の見掛け上の収束に起因する短周期の応答成分については、以下に示す方策により解析結果を安定化させる処置が適当と考える。

- ・平滑化手法（移動平均など）を用いて短周期成分を後処理的に除去する。
- ・緩衝材外周に相当する坑道壁面における境界荷重を求めた後、人工バリアのみのモデルに時間依存の節点荷重を作成させた応答計算を行う。

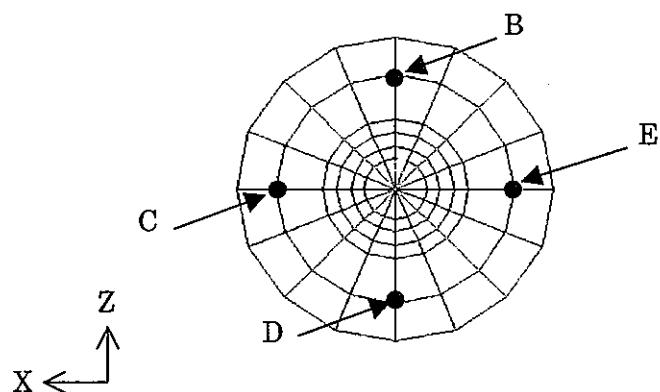
以上の議論をまとめると、非硬化材料のような変形特性を有する系を扱う場合、本解析コードで採用したエネルギーノルムを収束判定に用いた繰返し計算では数値解が不安定になるケースがあり、解析結果の後処理や解析のアプローチを工夫する必要があると考える。



(a) 解析モデル概念



(b) 解析モデル断面図($x=0$ 断面)



(c) 解析モデル断面図 ($Y=0$ 断面)

図 3.5.2-1 解析モデルおよび評価点

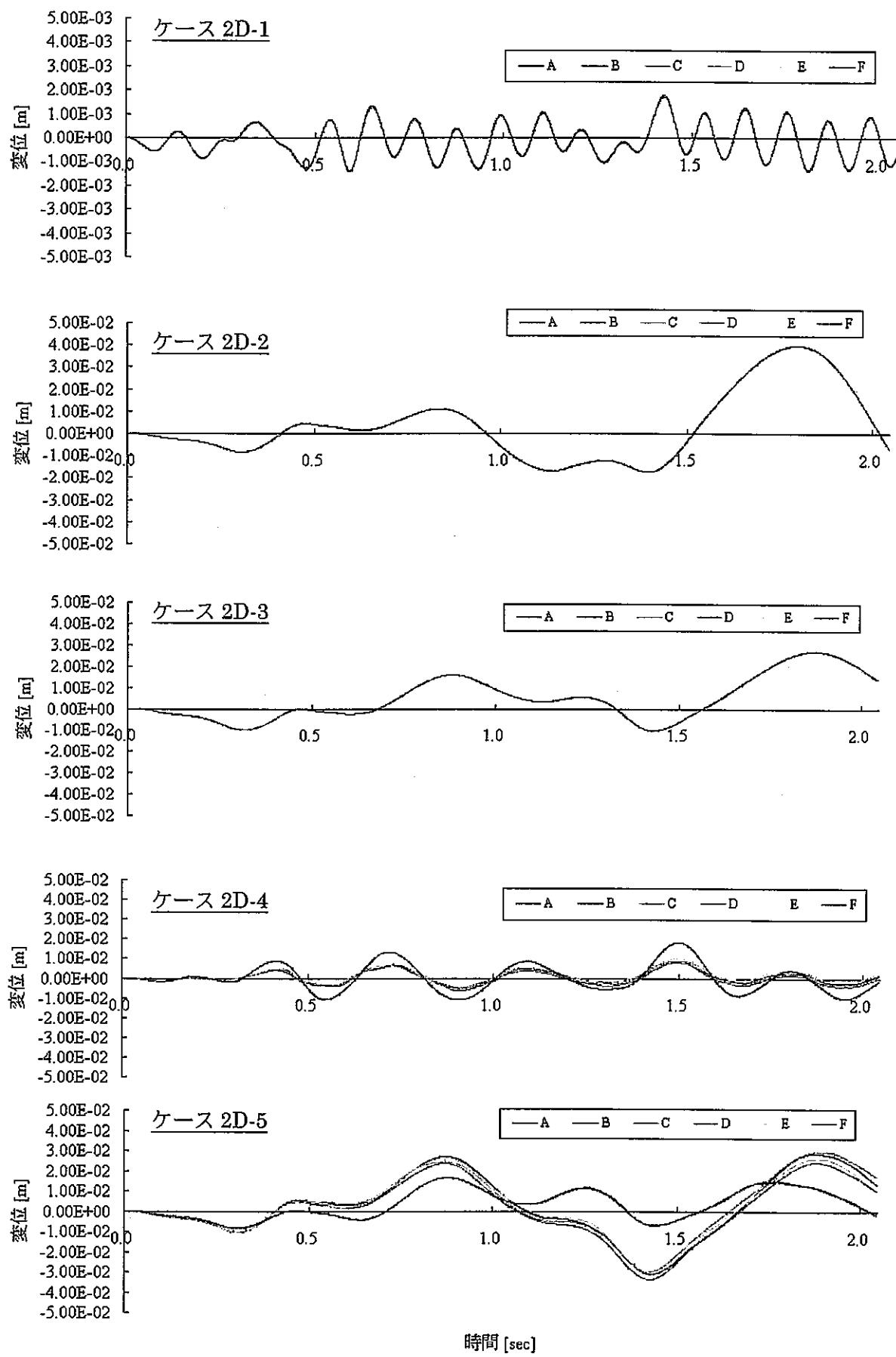


図 3. 5. 4-1 応答変位

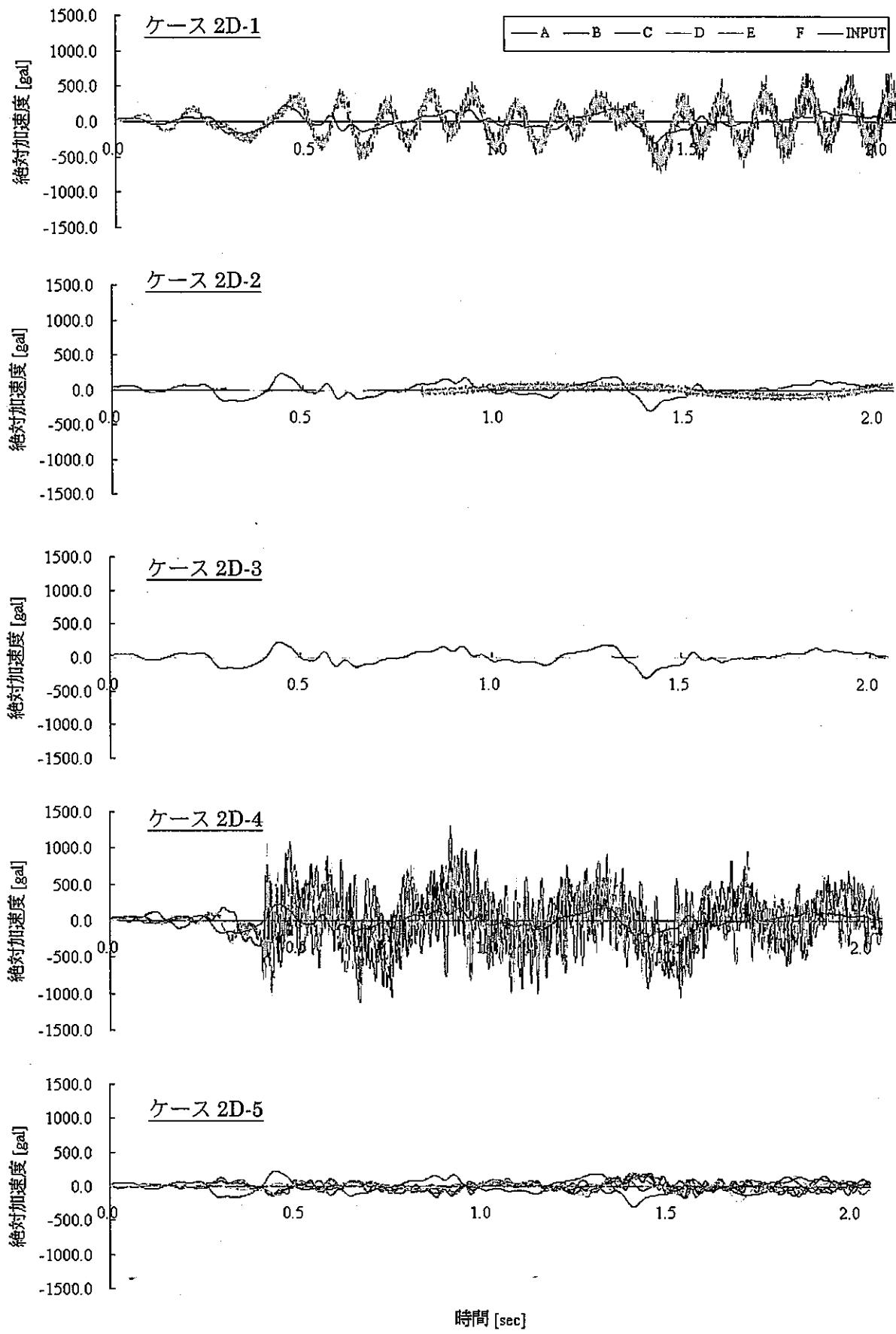


図 3. 5. 4-2 応答加速度

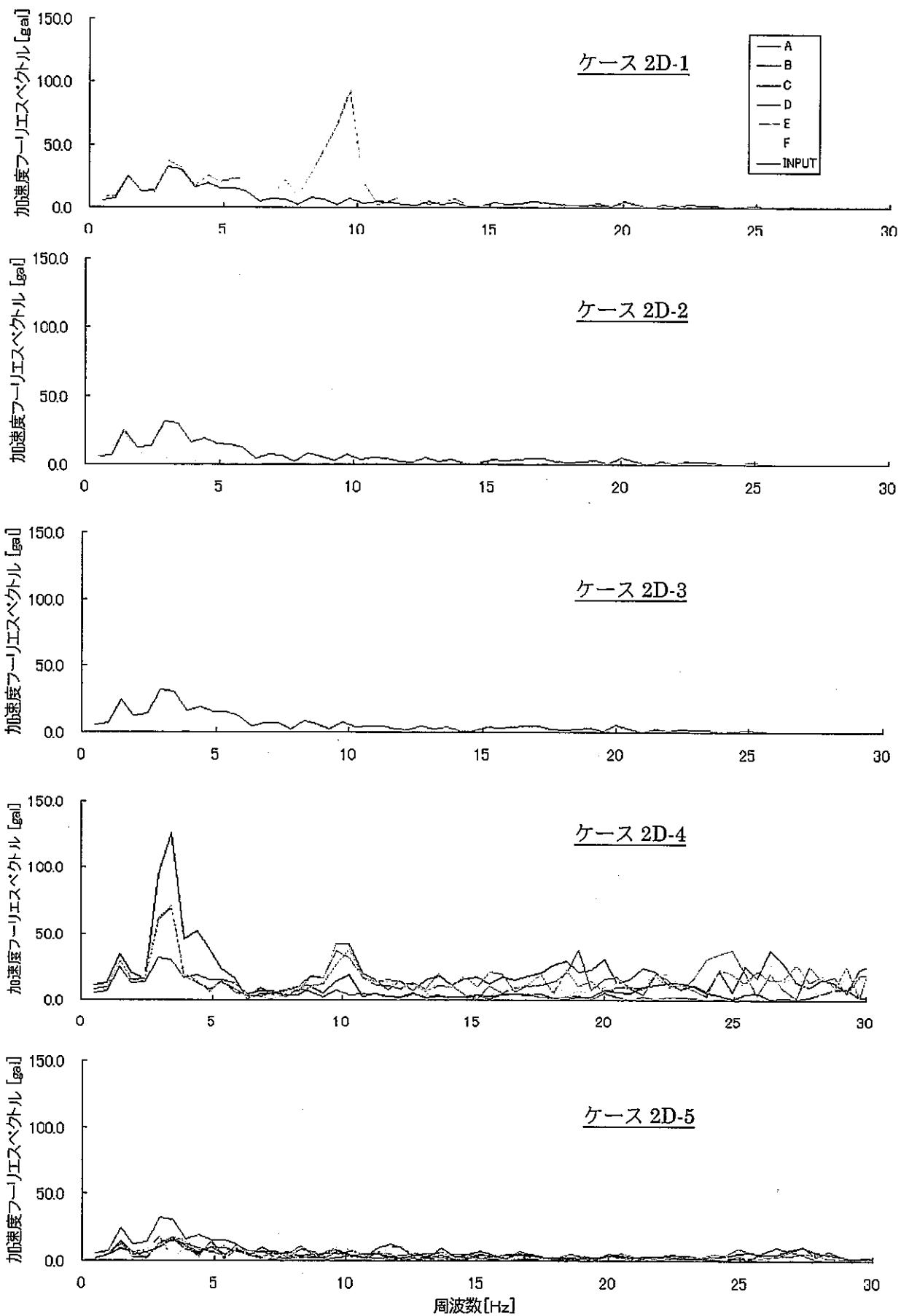


図3.5.4-3 加速度フーリエスペクトル

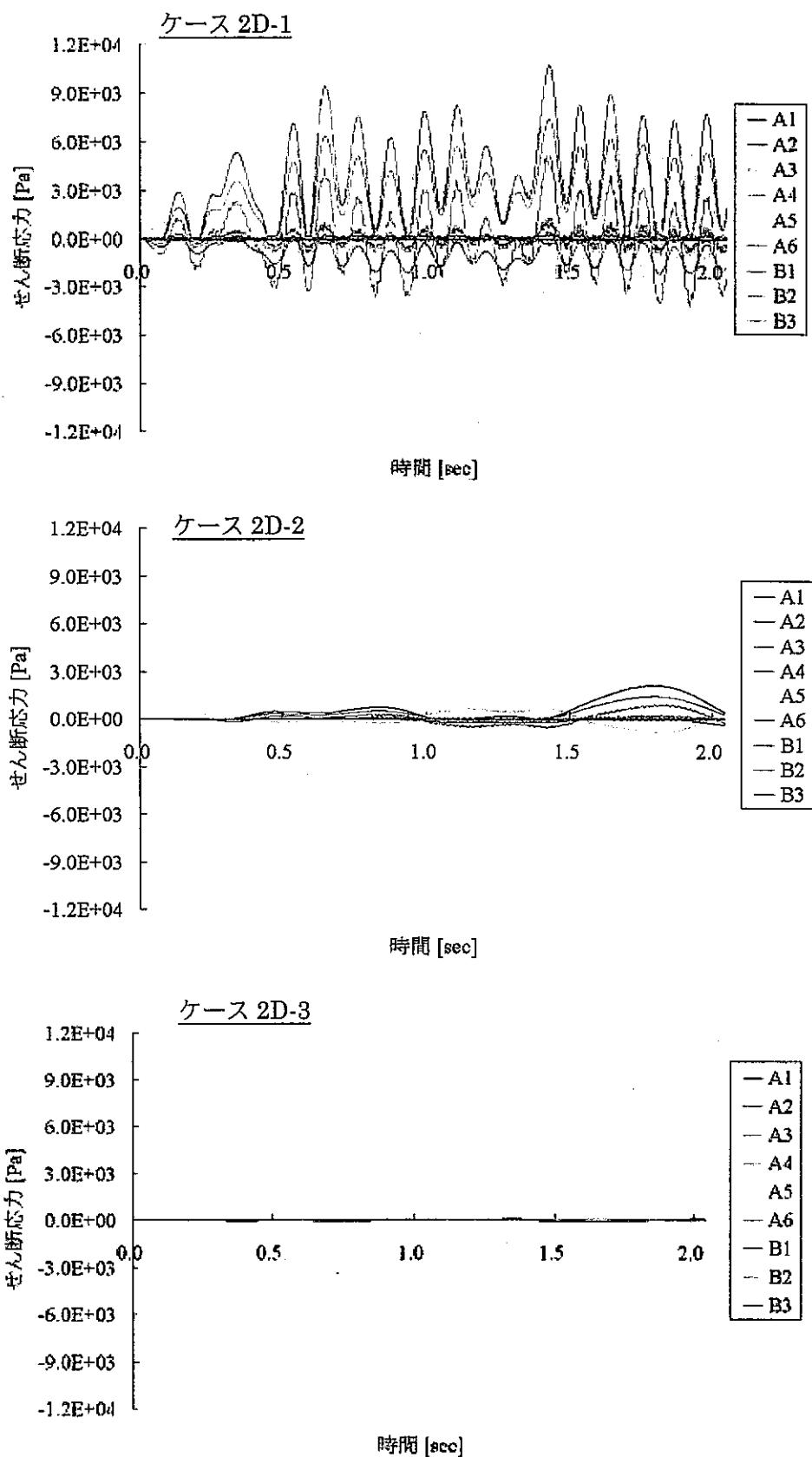


図3．5．4-4 せん断応力の経時変化 (1/2)

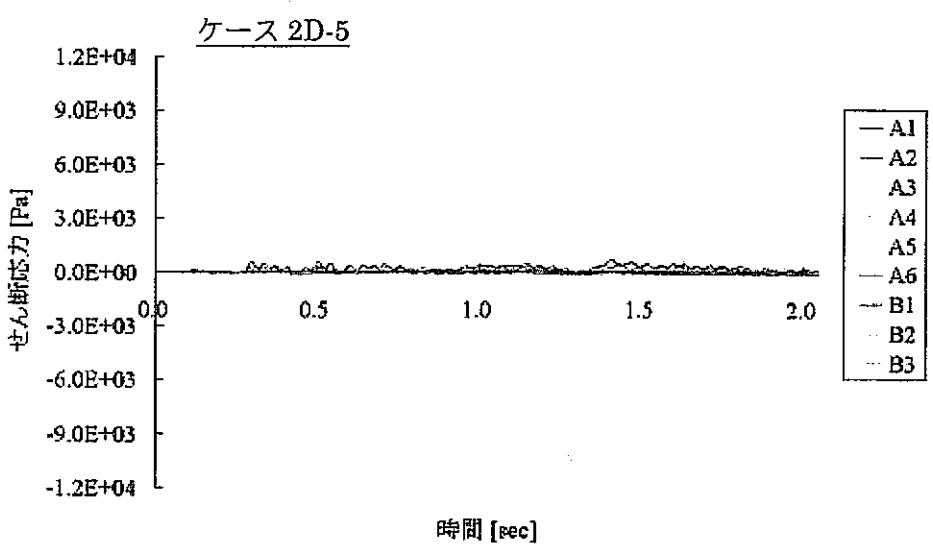
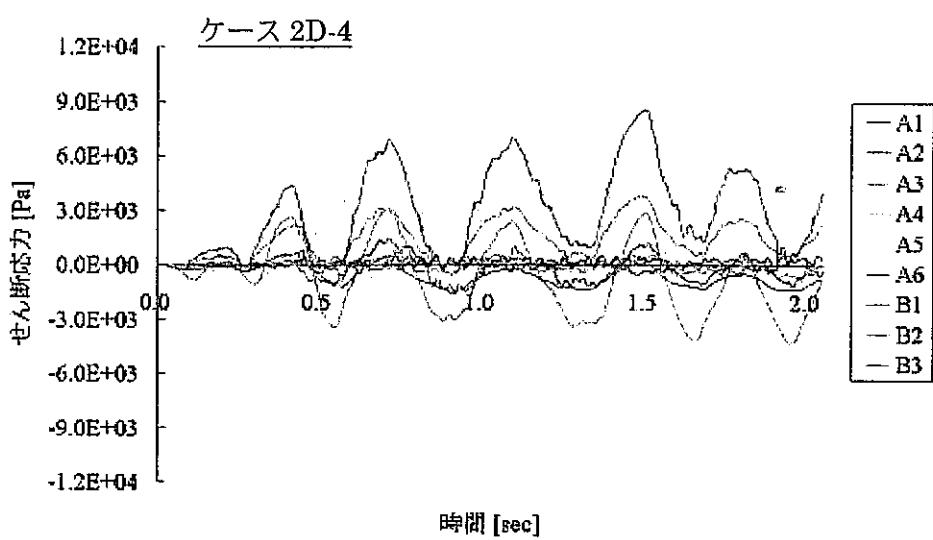


図3．5．4-4せん断応力の経時変化 (2/2)

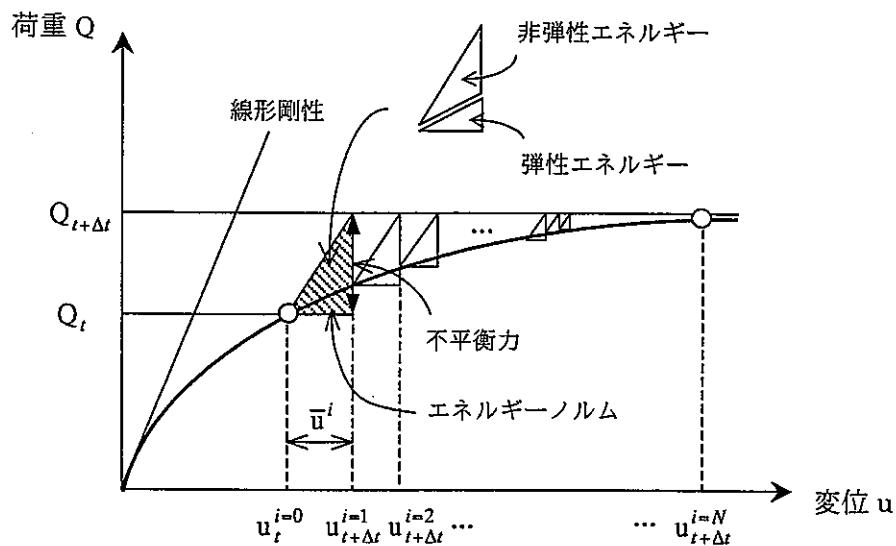


図3.5.4-5 初期剛性法による収束計算の概念；その1
(対象とする系が硬化材料のような変形特性を有する場合)

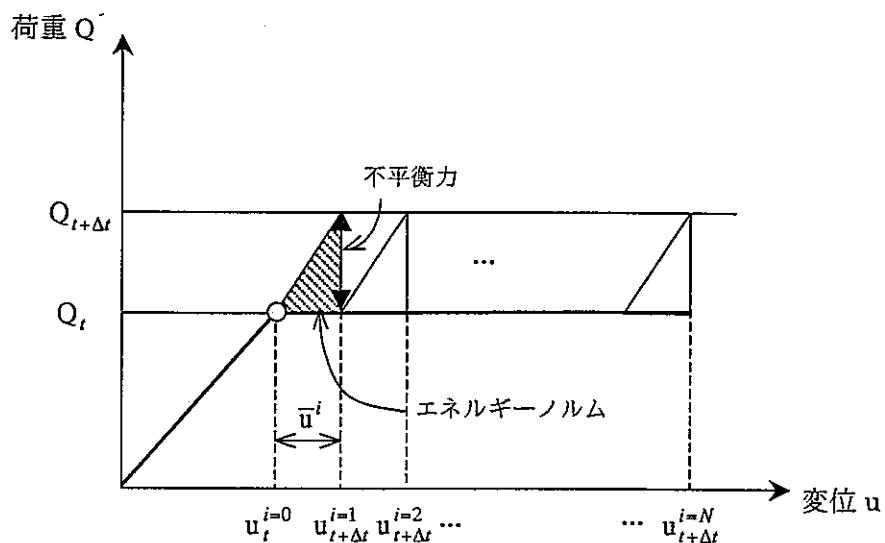


図3.5.4-6 初期剛性法による収束計算の概念；その2
(対象とする系が非硬化材料のような変形特性を有する場合)

3. 6 地震波のパラメータスタディ ; TASK2e

3. 6. 1 目的

2000 年レポートに示した検討では、これまでに使用してきた各種地震波データ（エルセントロ、宮城沖、八戸、釜石など）の有するパワースペクトルを概略で比較し、保守的に最もエネルギーが大きいエルセントロ波を用いた。これらの地震波データは、いずれも卓越周波数が 10Hz 以下のものである。人工バリアの固有周波数は 50Hz 以上となることから、実質的な応答増幅は極めて小さいことが確かめられている。これらの過去の観測データを用いた解析は、人工バリアシステムの応答性状を共通の地震波に対して論じる観点で意味をもつものであり、現段階で特定の地震波を選定できる論拠はない。今後の処分事業の進展を踏まえつつ、サイト固有の情報を勘案した入力地震波の選定ロジックを確立する必要がある。

本検討は、これまでに使用してきたエルセントロ波を基準ケースとし、加振方向をパラメータとした感度解析を行い、人工バリアシステムの応答性状への影響を確認する。また、解析モデルの固有値近傍の周波数成分を持つ正弦波を想定し、これを仮想的な入力地震動とした動的応答解析を行い、人工バリアシステムの力学的健全性を評価する。一般に実測される地震動の卓越周波数は 10Hz よりも小さく、また、固有周波数が 50Hz になると想られる人工バリアと共振する可能性はきわめて小さい。固有値付近の周波数成分のみを持つ正弦波で模擬した入力地震動は、当該モデルに対して最も顕著な応答を生じさせ、保守性を勘案したワーストケースの 1 つに相当するものと考えられる。

以上の検討より上で述べた入力地震動の選定ロジック確立に資する知見ならびにバックデータを提供することが可能になる。

3. 6. 2 解析モデルおよび解析ケース

解析モデルは処分坑道横置き方式を対象とし、モデル化領域とメッシュ分割幅については、これまでに得られた知見に基づき地震波の伝搬挙動を適切に表現できる範囲で定めた（図 3. 4. 3-1 参照）。境界条件についても、これまでと同様にモデル上面および下面を粘性境界要素とし、モデル底面から入射した地震波が鉛直上方に伝搬するとともに、内部構造物による反射波を吸収できるようにした。側面境界については隣接する人工バリアを模擬するため、鏡面対称の位置関係にある節点自由度を多点拘束条件とした。また、動的応答解析に先立ち実固有値解析を行い、本解析モデルの固有周波数に相当する周期を有する擬似的な地震動を作成することとした。このとき、固有値解析における剛性マトリクスの特異性を排除するため、モデル上面、下面是固定境界とした。側面境界については上述の動的応答モデルと同様に多点拘束条件とした。

解析ケースは、表 3. 6. 2-1 に示す全 5 ケースを設定した。解析ケース A-1 および A-2 では、予め実施した実固有値解析の結果に基づき、一次固有周波数に対応する周期をもつ正弦波を入力地震動とした動的応答解析を行うものである。実固有値解析の結果、本解

析モデルの一次振動モードは坑道軸方向（Y 軸方向）に沿った並進運動が支配的となり、固有周波数は約 38Hz となることが分かった。また、二次振動モードは、坑道軸方向に直交する水平方向（X 軸方向）の並進運動となり、固有周波数は約 41Hz となることが分かった（図 3.6.2-1～図 3.6.2-2 参照）。これらの結果を踏まえ、解析 A-1 および A-2 では、それぞれ X、Y 軸方向を加振方向とした動的応答解析を行うこととした。一方、解析ケース B-1～B-2 はエルセントロ波を用いた動的応答解析を行うものであり、第二次取りまとめまでに検討してきた Y 軸方向以外の成分を加振方向とした。

なお、材料物性値は 2000 年レポートレファレンスケースと同一（表 3.2.4-1 参照）とした。

表 3.6.2-1 加振方向をパラメータとした解析ケース

解析ケース	加振方向（方向ベクトル成分で表示）			入力地震動
	X 成分	Y 成分	Z 成分	
A-1	1.0	0.0	0.0	正弦波
A-2	0.0	1.0	0.0	
B-1	1.0	0.0	0.0	エルセントロ波
B-2	0.7	0.7	0.0	
B-3	0.0	0.0	1.0	

3.6.3 評価点および評価断面

評価点および評価断面については、人工バリア内の応力・ひずみ状態ならびにモデル全体の応答性状が確認できるよう、図 3.6.3-1 に示すとおり設定した。

評価点は、緩衝材内部の複数箇所に B1～B8 を設け、変形ならびに加速度の応答増幅の程度を確認する。また、それらをモデル中心（ガラス固化体中心）に設けた評価点 G1 と比較することにより、人工バリアシステム全体としての応答性状を確認する。さらに、処分坑道下側および上側の岩盤中に評価点 R1、R2 を設け、モデル下面の粘性境界より入射した地震波が鉛直上方に伝搬する挙動を確認するとともに、系全体としての応答性状を確認する。人工バリア内の応力・ひずみ状態は、図中に示した 3 つの断面（A-A 断面、B-B 断面、C-C 断面）を設け、それぞれの断面における分布傾向を確認する。

3.6.4 解析結果及び考察

(1) 正弦波加振による人工バリアシステムの応答性状

X 方向加振及び Y 方向加振による応答加速度を図 3.6.4-1～図 3.6.4-2 に示す。坑道軸と直交する X 方向加振による応答加速度からは、ガラス固化体の中心に設けた評価点 G1 で入力地震波に対する僅かな増幅が認められるが、緩衝材内部に設けた評価点 B1～B8 および岩盤内に設けた評価点 R1、R2 においては顕著な応答増幅は認められない。地

震波の上方伝播に伴う時間遅れがあるものの、人工バリアは概ね一体となった応答となっている。また、坑道軸方向と一致する Y 方向加振による応答加速度からは、ガラス固化体の中心に設けた評価点 G1 及び緩衝材内部に設けた評価点 B1~B8 において入力地震波に対する応答増幅（10 倍以上）が顕著になり、一次固有周期以外の長周期の応答成分も含まれていることが確認できる。岩盤部に設けた評価点 R1、R2 においては、応答の増幅はみられず、モデル下面から入射した地震波が鉛直上方へ伝搬することによる位相差が生じていることが確認できる。

これより、人工バリアシステムの固有値近傍の周波数をもつ正弦波による模擬地震を想定したケースでは、坑道軸方向と直行する X 方向加振の場合は加振方向に対して周辺岩盤が坑道部を支持しているため、大きな応答の増幅は生じないことがわかる。一方、坑道軸方向と一致する Y 方向加振の場合は、周辺岩盤の寄与が少ないため、人工バリアに顕著な応答の増幅（とくに、長周期の応答成分が寄与する）を発生させることがわかる。

(1) 解析ケース B-1 (エルセントロ波、X 方向加振)

坑道軸と直交する方向へ加振した結果を図 3. 6. 4-3～図 3. 6. 4-9 に示す。前記の正弦波加振のケースと同様に、応答加速度および加速度フーリエスペクトルより、人工バリア内に顕著な応答増幅は生じないことがわかる。図 3. 6. 4-8 に示したせん断応力センターからは、緩衝材内のせん断応力は岩盤のそれに比較して 2 枝以上小さく発生しており、緩衝材が顕著な応力緩衝性を有していることが確認できる。また、せん断応力の大きさも 10^4 Pa 程度であり、ペントナイトの一軸圧縮強度 0.1MPa に比較して十分小さい。せん断ひずみについては、オーバーパック付近の緩衝材内側の領域でやや大きな値～ 10^4 となっているが、非線形性が顕著になるひずみレベルではない。これは、オーバーパック両端におけるコーナー部を緩衝材が支えているためと思われる。

(2) 解析ケース B-2 (エルセントロ波、XY 面内加振)

坑道軸と 45° の方向で加振した結果を図 3. 6. 4-10～図 3. 6. 4-21 に示す。応答変位、応答加速度および加速度フーリエスペクトルについては、それぞれ X 成分、Y 成分の結果を示した。また、せん断応力およびせん断ひずみセンターについては、XY 面 (Z 断面) 内の 2 つの成分 (τ_{zx} , τ_{yz} , γ_{zx} および γ_{yz}) について整理した。

加振方向が坑道軸と 45° の交差角を有するため、X 方向および Y 方向の各成分に寄与する応答変位、応答加速度は坑道軸方向 (Y 軸方向) のみに加振したときに比較して小さくなる。X、Y 成分の応答加速度は概ね同一になっており、人工バリアが一体となって剛な応答挙動となっていることが確認できる。また、緩衝材で発生するせん断応力についても十分小さく、いずれの成分 (τ_{zx} , τ_{yz}) とも顕著な応力緩衝性を示していることが確認できる。せん断ひずみの両成分 (γ_{zx} , γ_{yz}) についても $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあり、非線形性は顕著にならないことがわかる。また、坑道軸と角度をもつ方向に加振しているため、緩衝材内

のせん断ひずみ分布は左右が逆になる傾向を示している。これは緩衝材に発生するせん断ひずみは、内部に定置されたオーバーパック（ガラス固化体を含む）との相互作用により定まるものであることを示している。

(3) 解析ケース B-3 (エルセントロ波、Z 方向加振)

深さ方向に加振したケースの解析結果を図3.6.4-22～図3.6.4-30に示す。応答変位、応答加速度および加速度フーリエスペクトルについては、Z成分の結果のみを示した。せん断応力およびせん断ひずみセンターについては、X断面およびY断面のZ成分 (τ_{zx} , τ_{yz} , γ_{zx} および γ_{yz}) について整理した。

前記(1)項の解析ケース B-1 と同様に、応答加速度および加速度フーリエスペクトルより、人工バリア内に顕著な応答増幅は生じないことがわかる。図3.6.4-27 および図3.6.4-29 に示したせん断応力センターからは、緩衝材内のせん断応力は岩盤のそれに比較して十分小さく、顕著な応力緩衝性を有していることが確認できる。また、せん断応力の大きさも 10^4 Pa 以下であり、ペントナイトの一軸圧縮強度 0.1MPa に比較して十分小さい。緩衝材内で発生するせん断ひずみは、オーバーパック付近の緩衝材内側の領域でやや大きな値となっているものの、全体的に 10^{-5} 以下にあり、非線形性が顕著になることはない。前記のとおり、緩衝材で発生するせん断ひずみについては、緩衝材とオーバーパック（ガラス固化体を含む）に作用する慣性力の差に起因するものと思われ、オーバーパック近傍の内側領域で付均一な分布となっている。

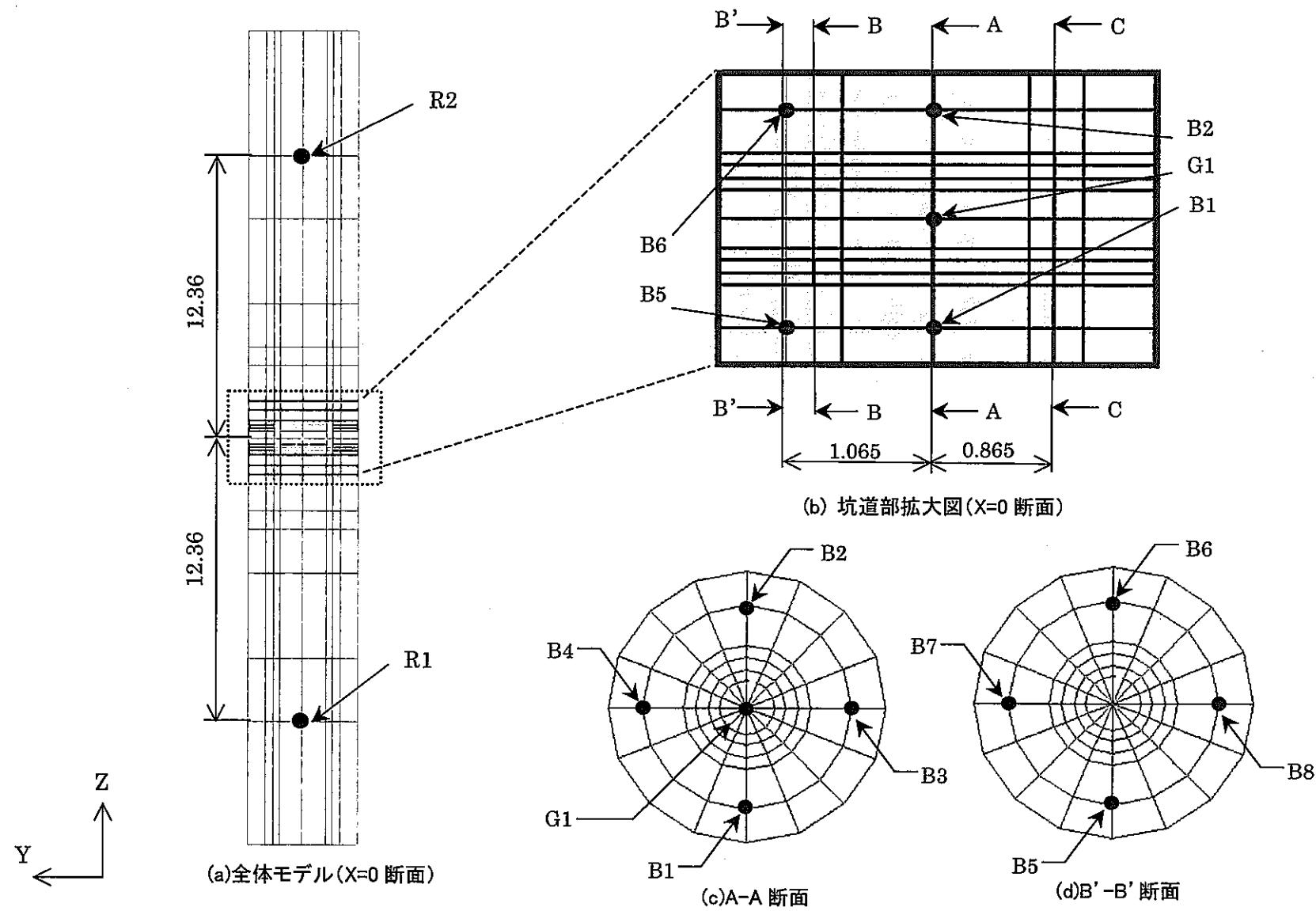


図3.6.2-1 評価点および評価断面 (図中単位; m)

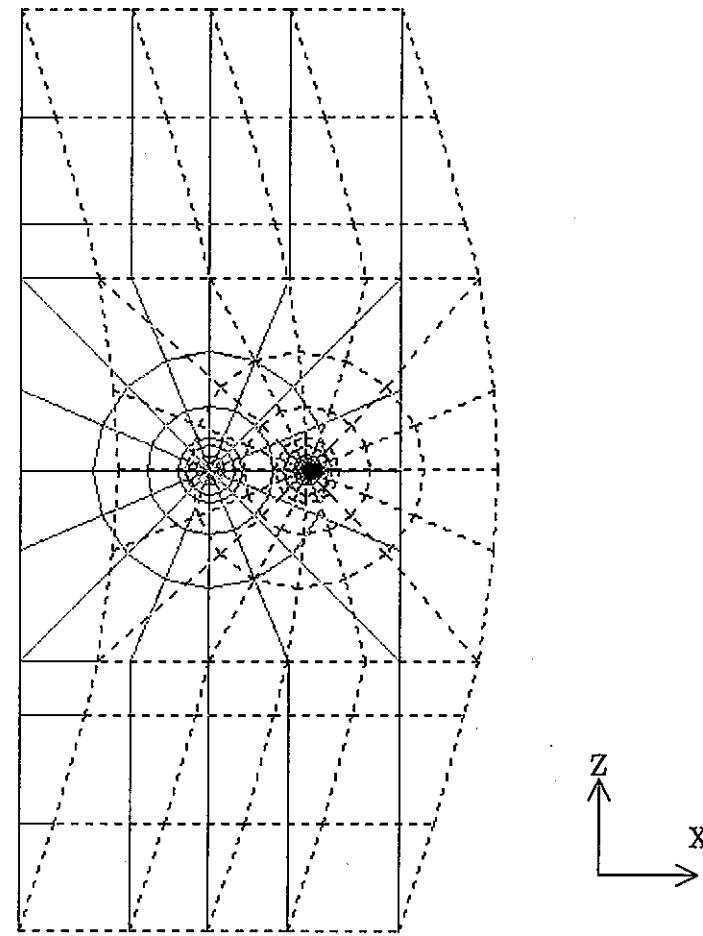
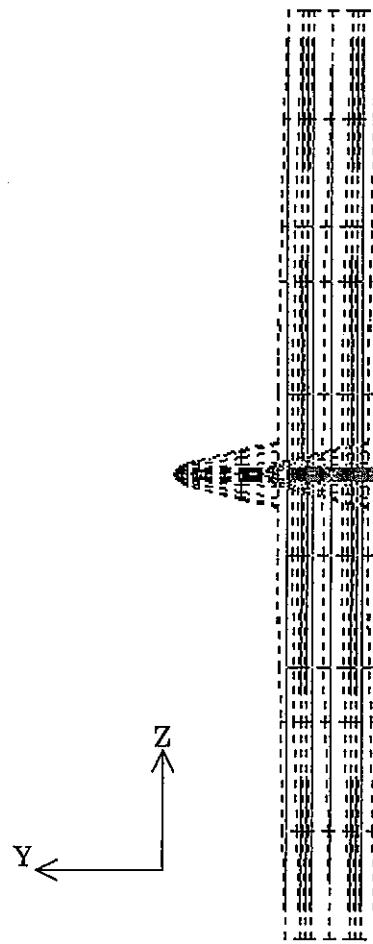


図3.6.2-2 固有値解析結果変形モード（実線；変形前，破線；変形後）

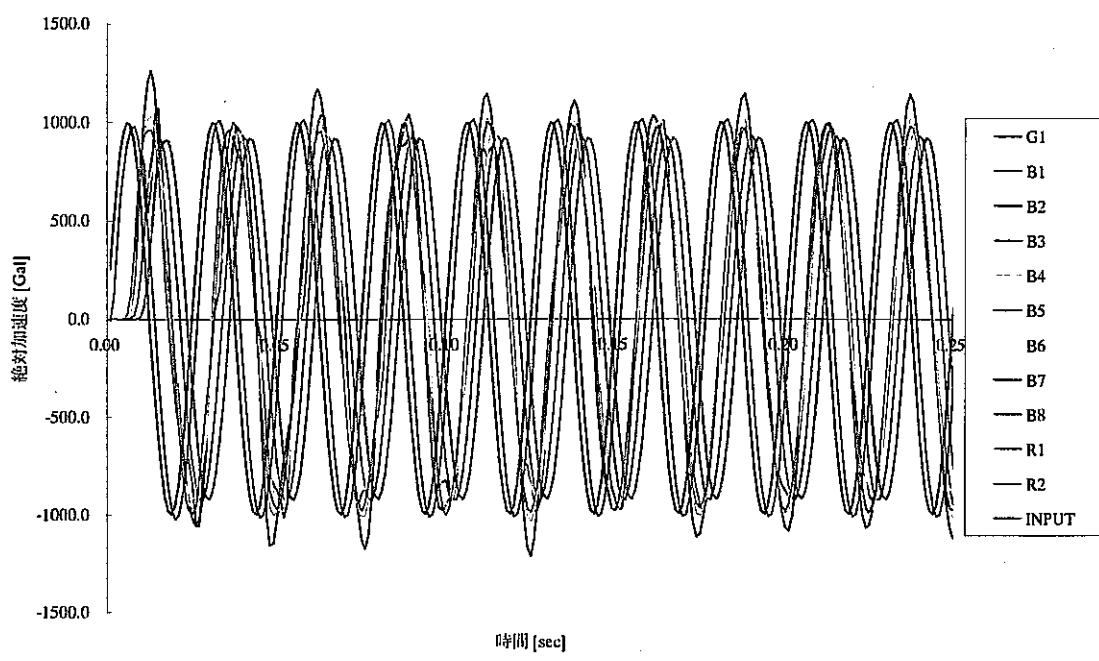


図3.6.4-1 正弦波加振による応答加速度
(解析ケースA-1; X方向加振)

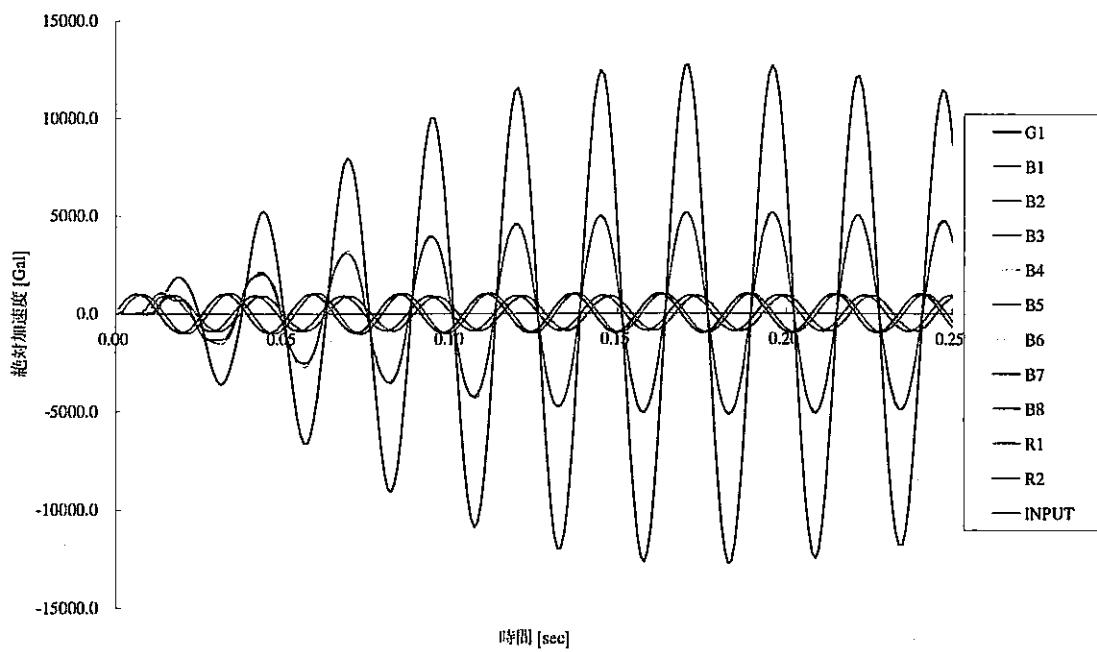


図3.6.4-2 正弦波加振による応答加速度
(解析ケースA-2; Y方向加振)

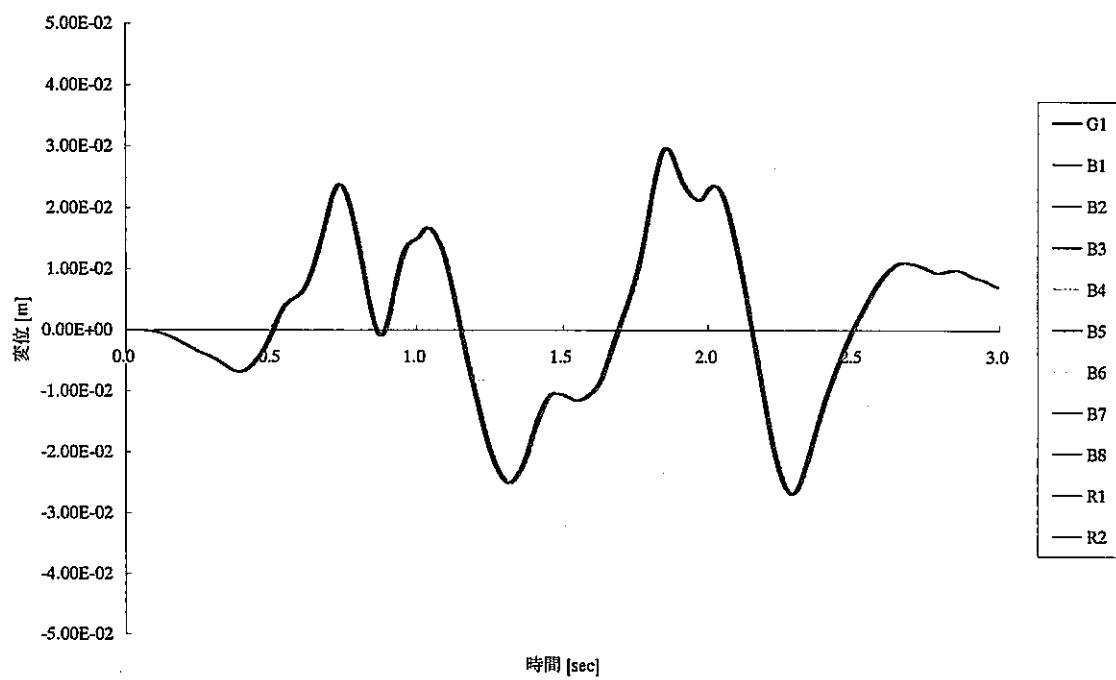


図3.6.4-3 応答変位
(解析ケース B-1; X 方向加振, エルセントロ波)

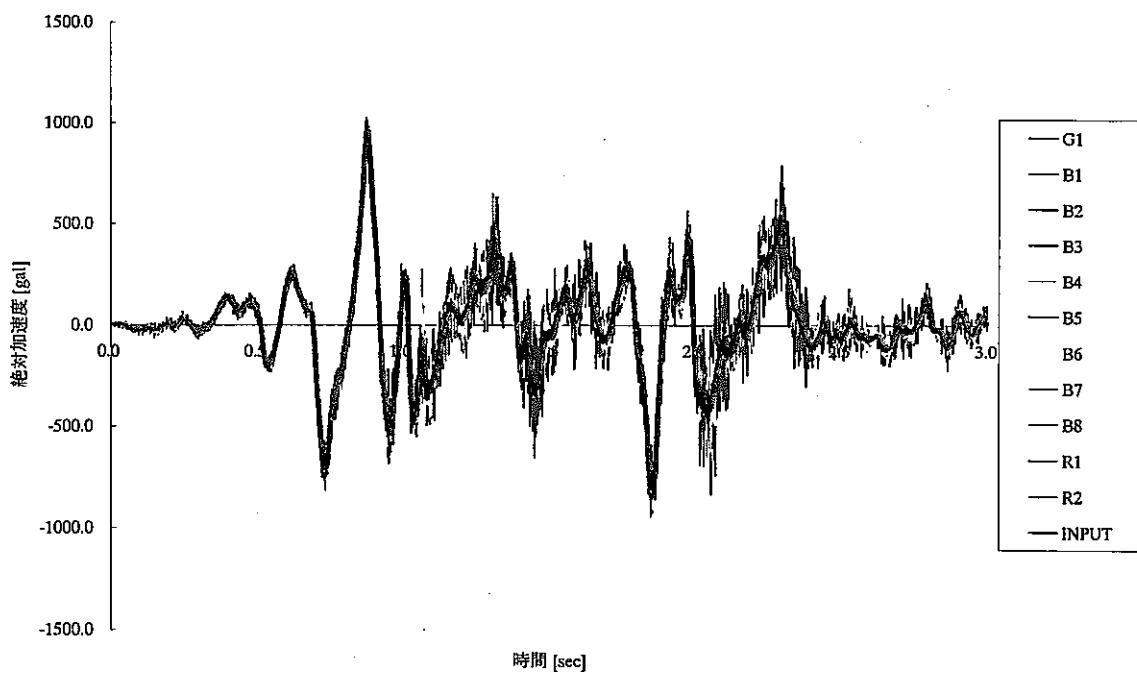


図3.6.4-4 応答加速度
(解析ケース B-1; X 方向加振, エルセントロ波)

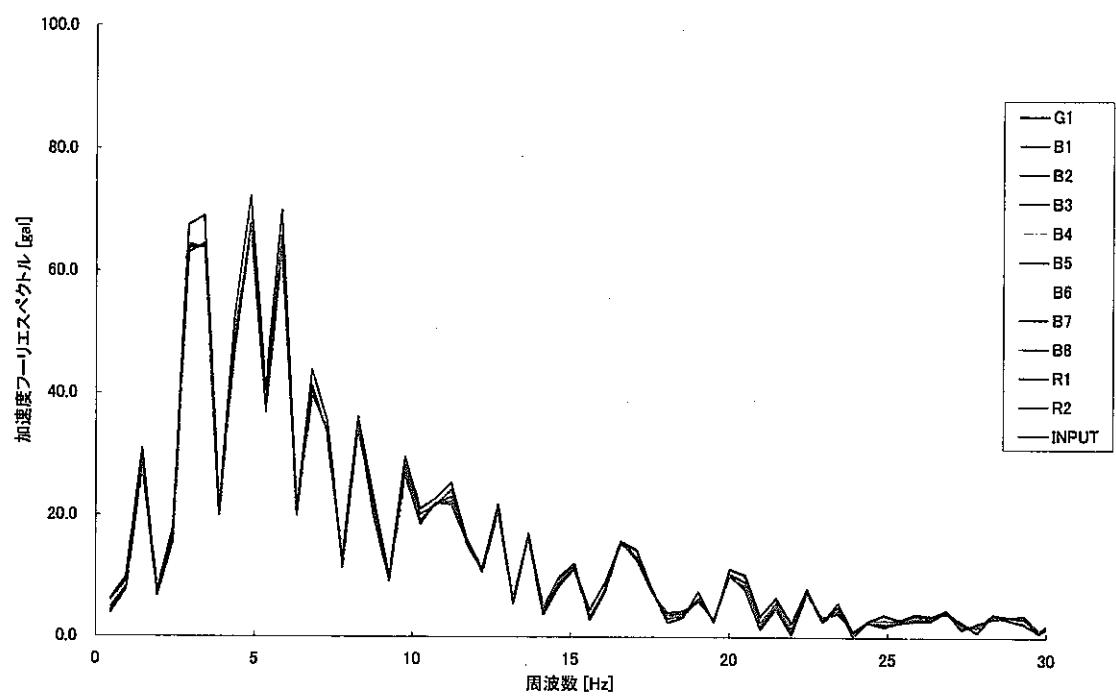


図3.6.4-5 加速度フーリエスペクトル
(解析ケースB-1; X方向加振, エルセントロ波)

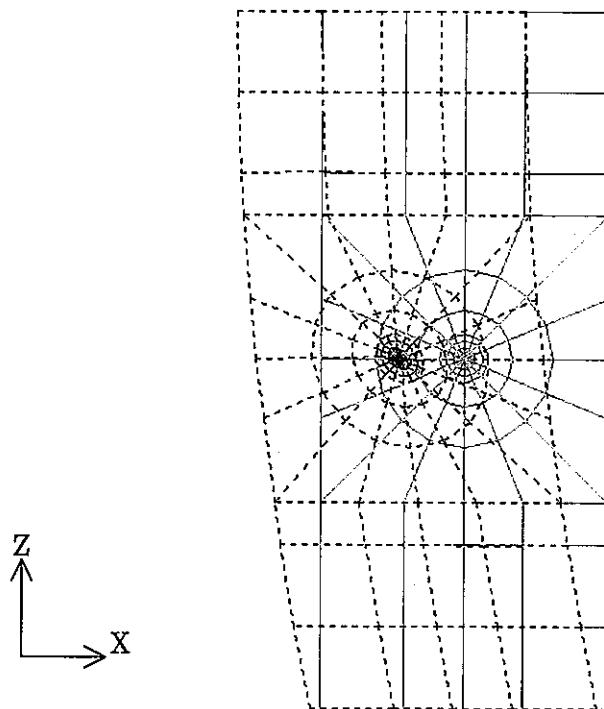


図3.6.4-6 応答変位
(解析ケースB-1; X方向加振, エルセントロ波)

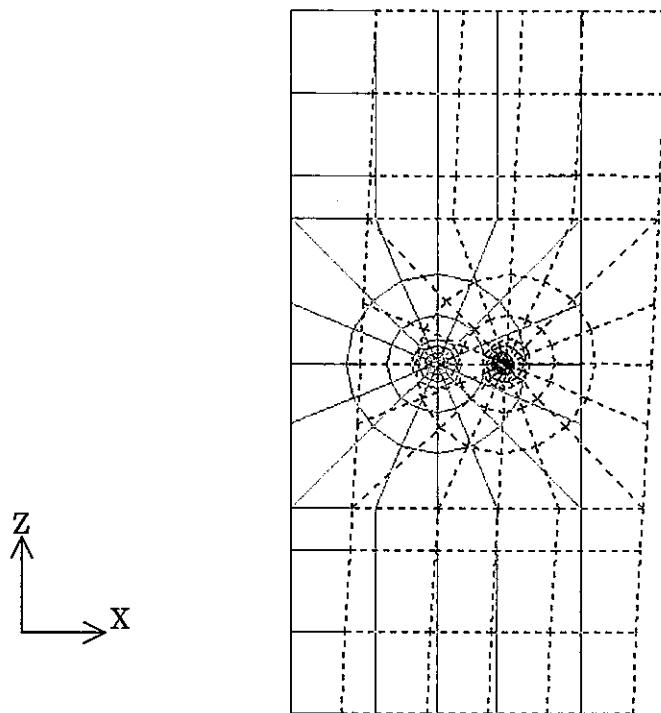


図3.6.4-7 応答加速度
(解析ケースB-1; X方向加振, エルセントロ波)

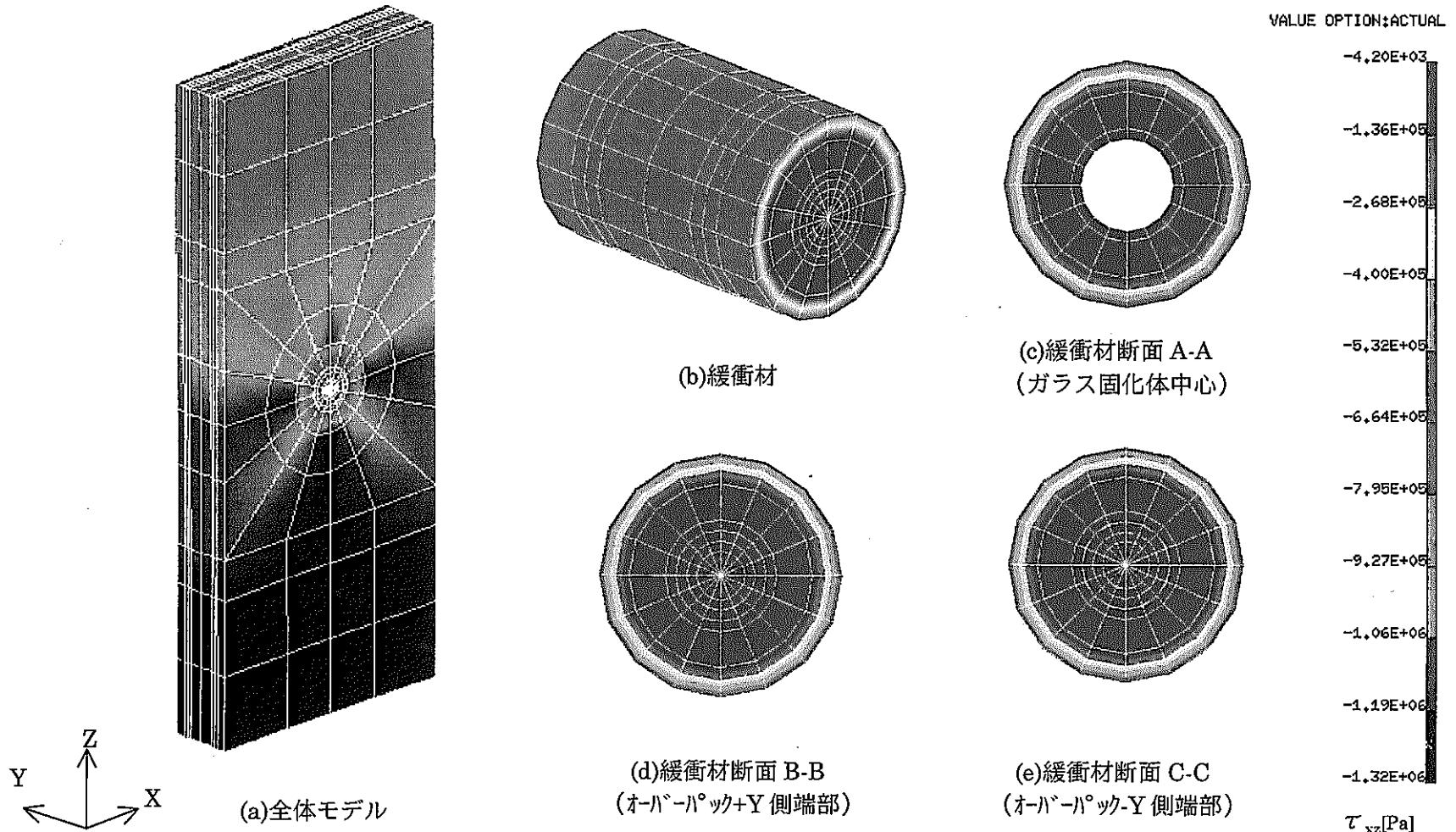


図3.6.4-8せん断応力コンター（解析ケースB-1；X方向加振，エルセント波）

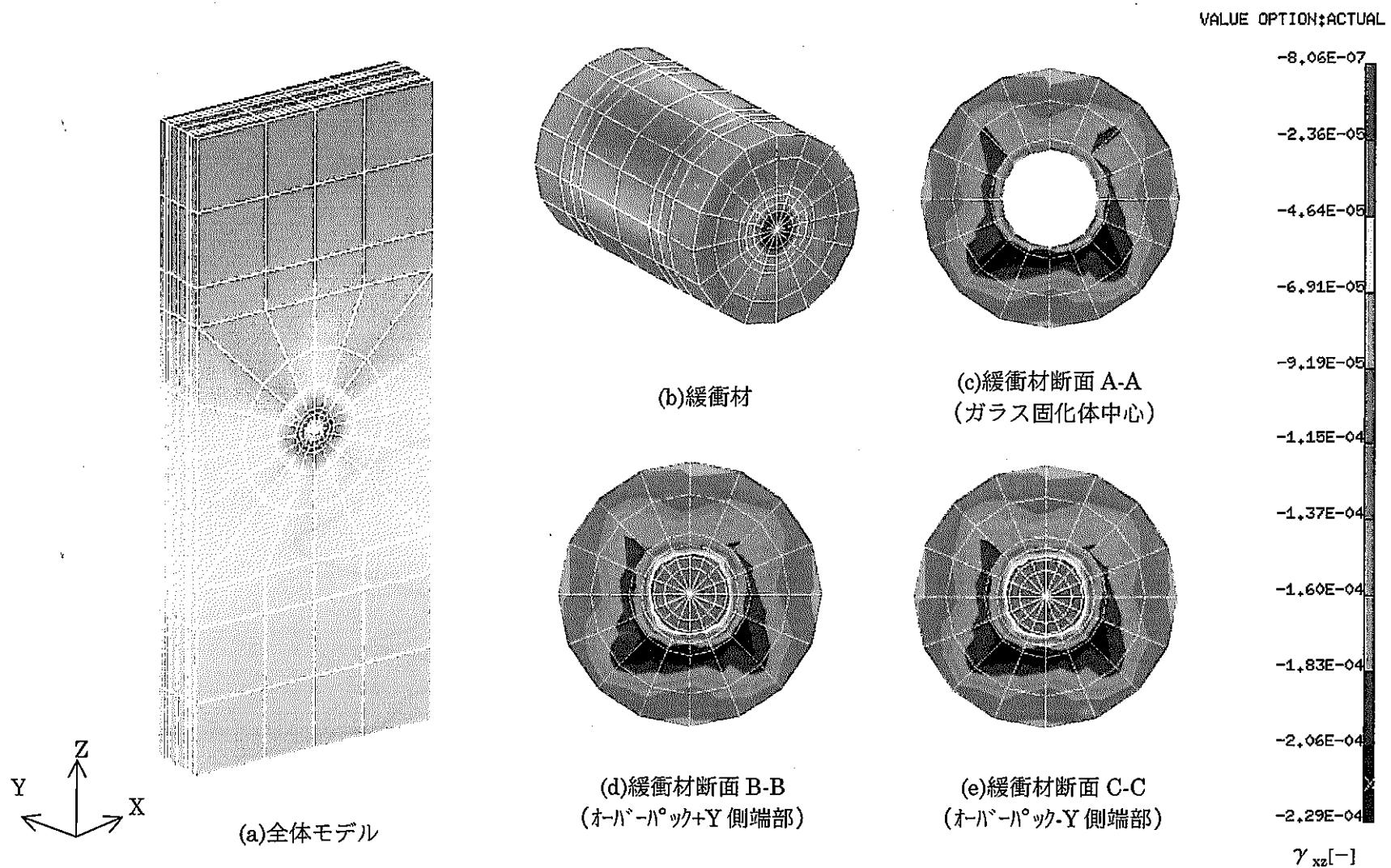


図 3.6.4-9 せん断ひずみコンター（解析ケース B-1；X 方向加振，エルセント波）

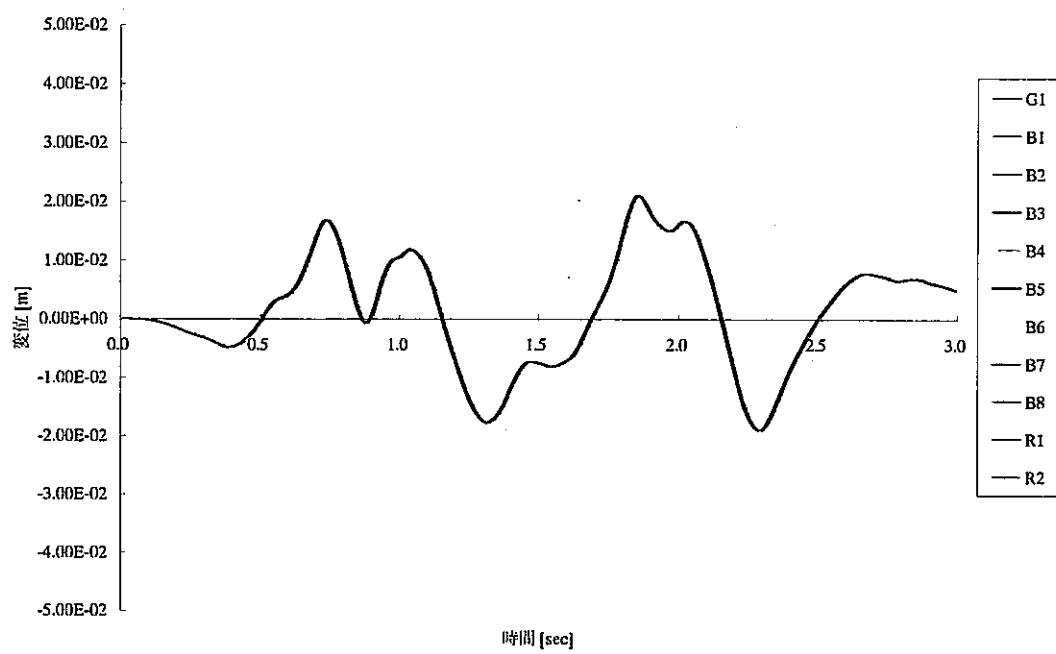


図3.6.4-10 X方向応答変位
(解析ケース B-2 ; XY 方向加振, エルセントロ波)

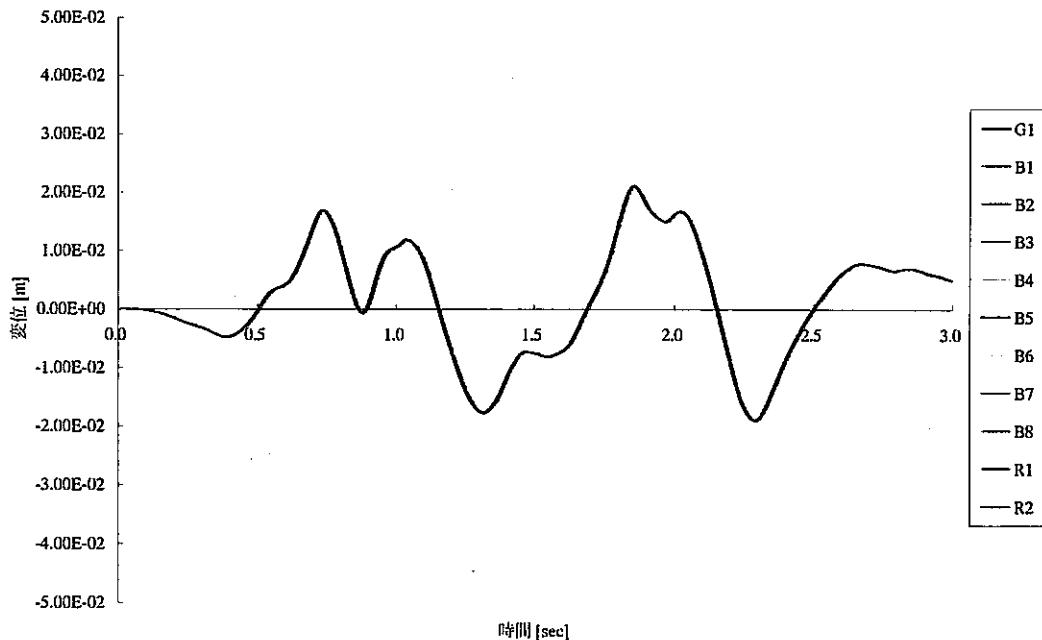


図3.6.4-11 Y方向応答変位
(解析ケース B-2 ; XY 方向加振, エルセントロ波)

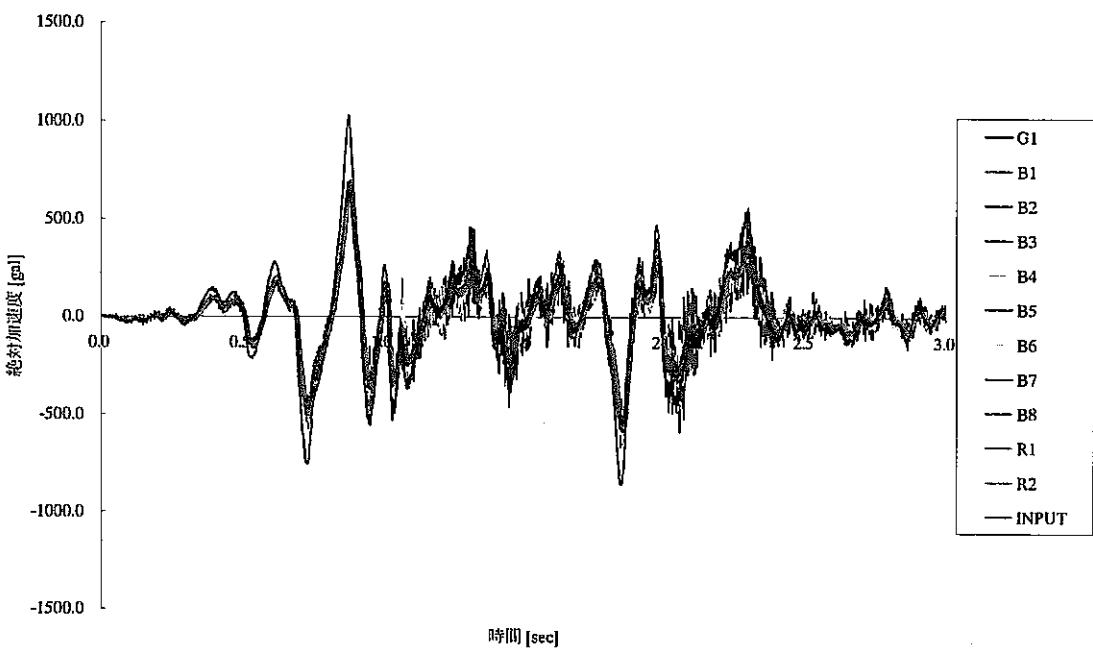


図3.6.4-12 X方向応答加速度
(解析ケース B-2 ; XY 方向加振, エルセントロ波)

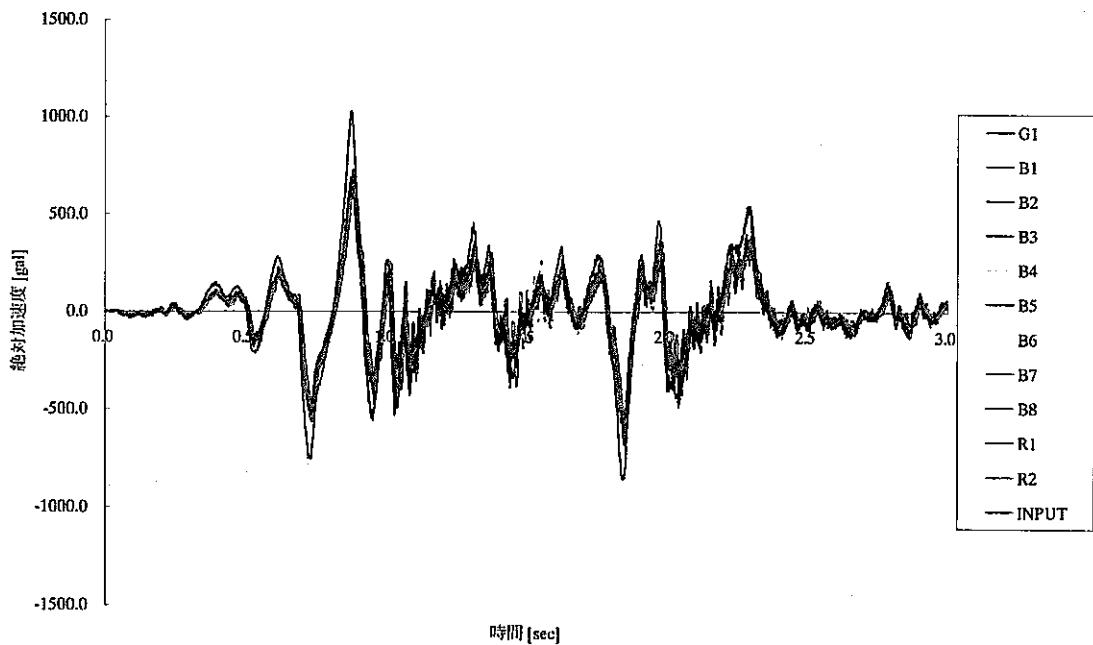


図3.6.4-13 Y方向応答加速度
(解析ケース B-2 ; XY 方向加振, エルセントロ波)

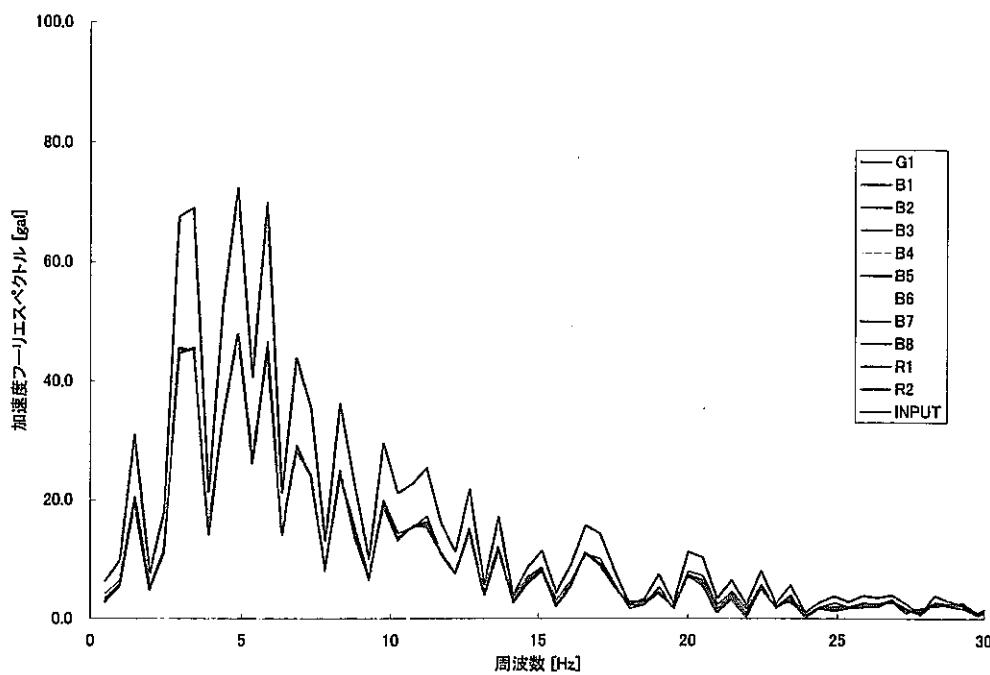


図3.6.4-14 X方向加速度フーリエスペクトル
(解析ケースB-2; XY方向加振, エルセントロ波)

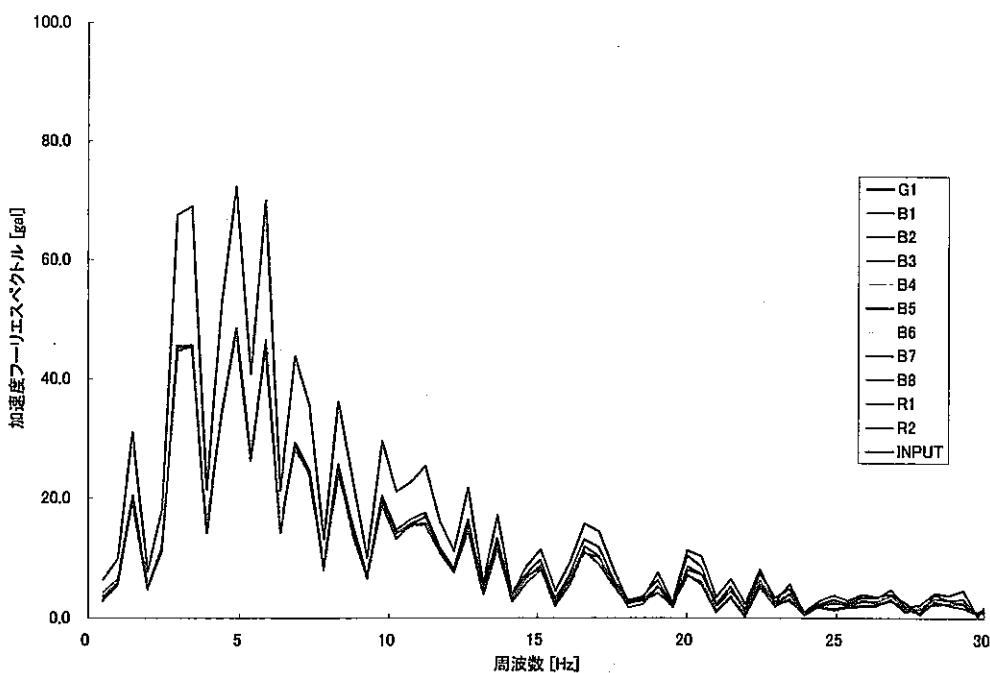


図3.6.4-15 Y方向加速度フーリエスペクトル
(解析ケースB-2; XY方向加振, エルセントロ波)

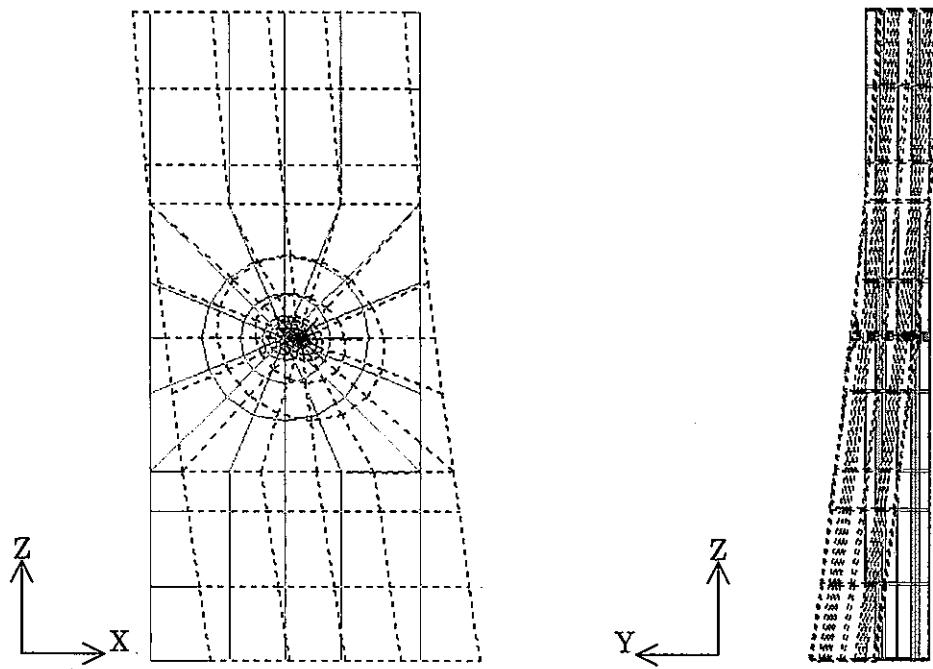


図3.6.4-16 応答変位（解析ケースB-2；XY方向加振，エルセントロ波）

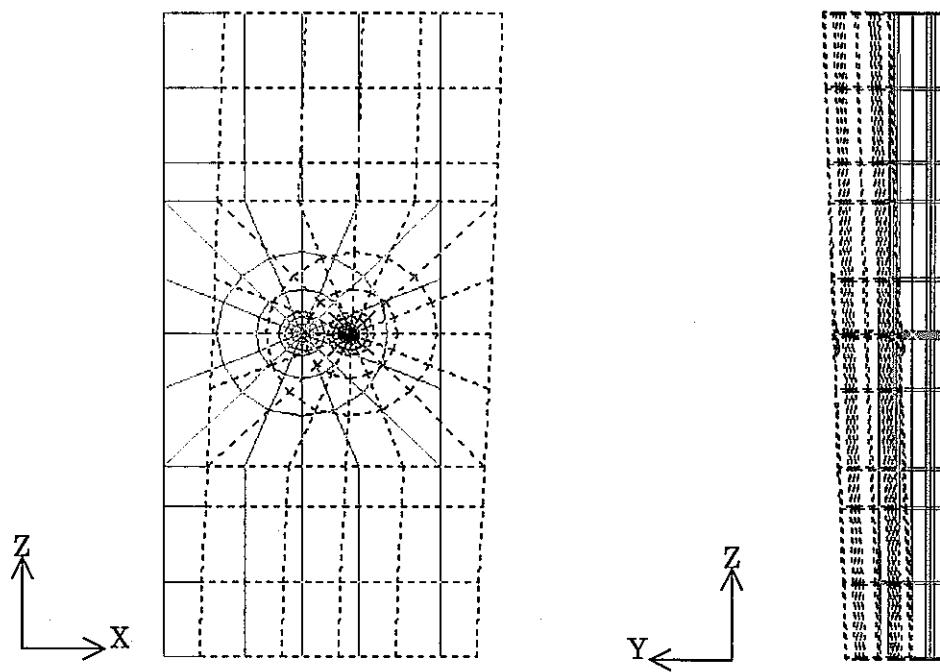


図3.6.4-17 応答加速度（解析ケースB-2；XY方向加振，エルセントロ波）

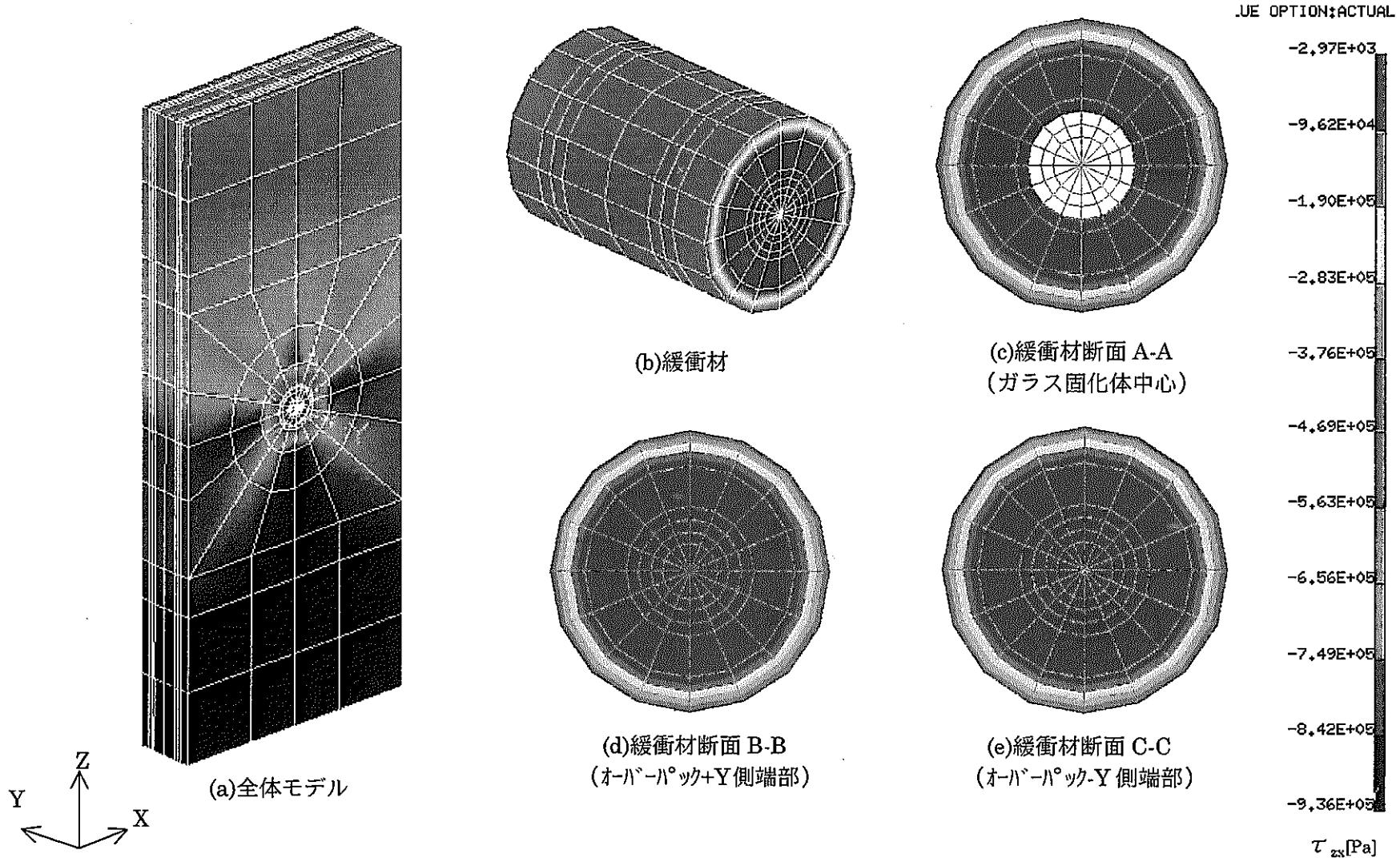


図 3.6.4-18せん断応力コンター（解析ケース B-2；XY 方向加振，エルセントロ波）

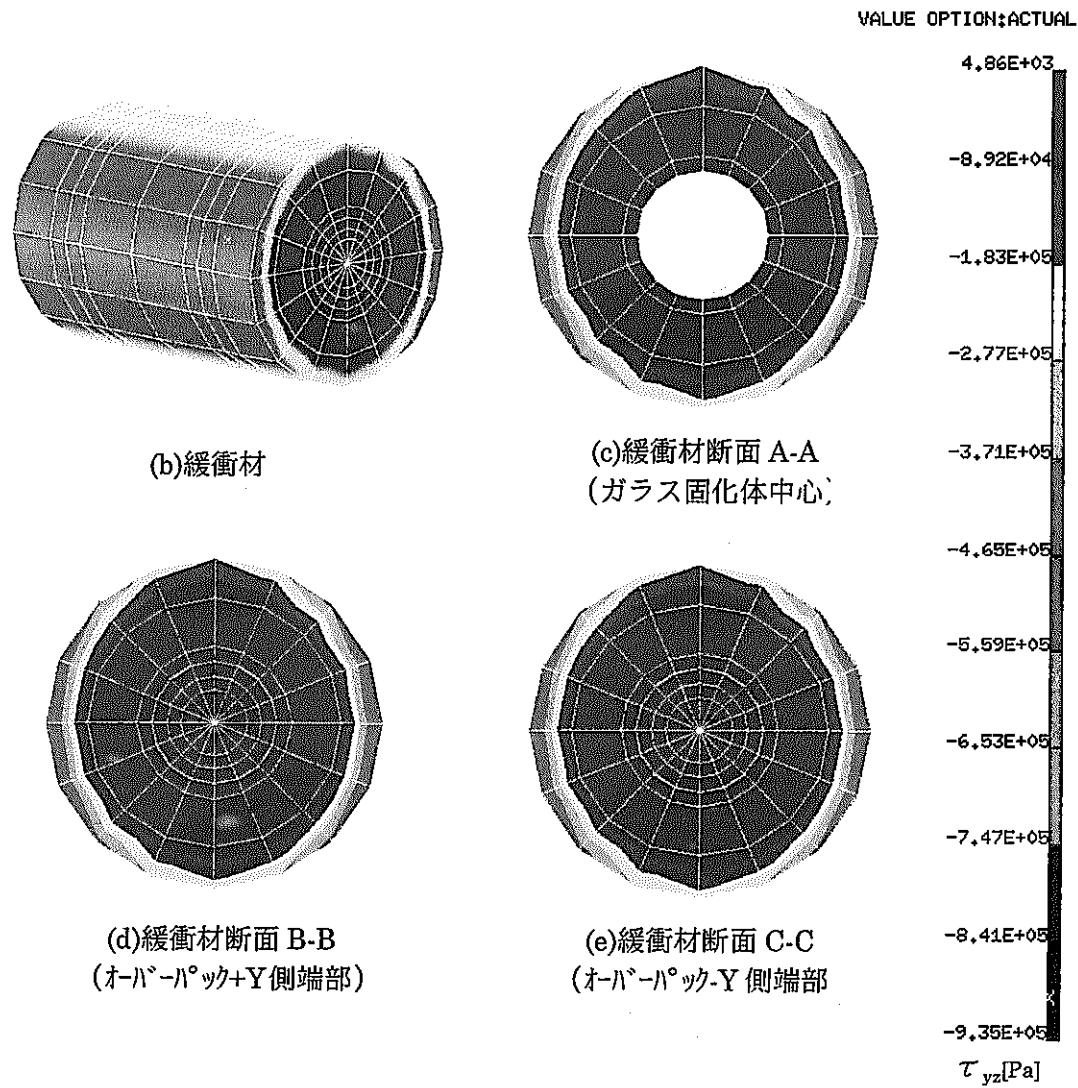
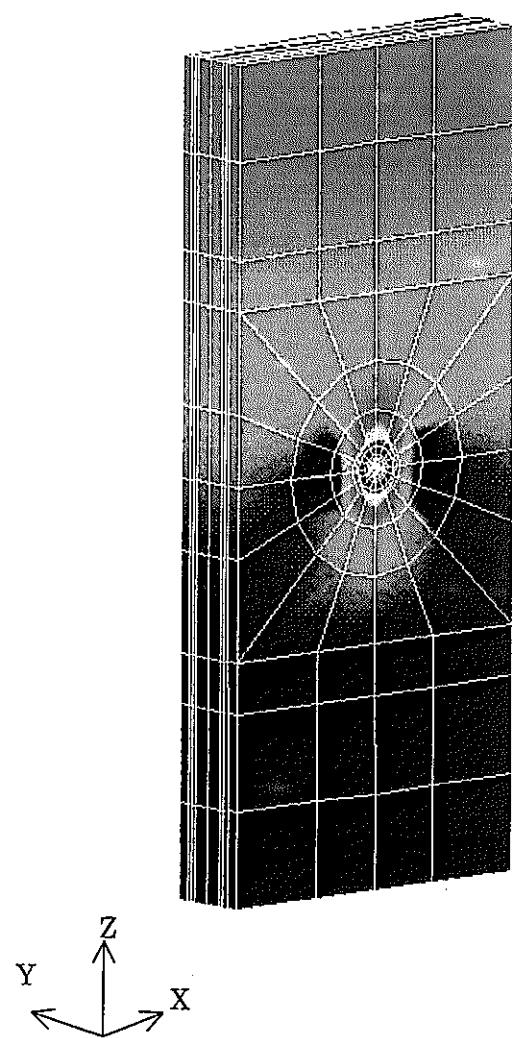


図3.6.4-19せん断応力コンター（解析ケースB-2；XY方向加振，エルセントロ波）

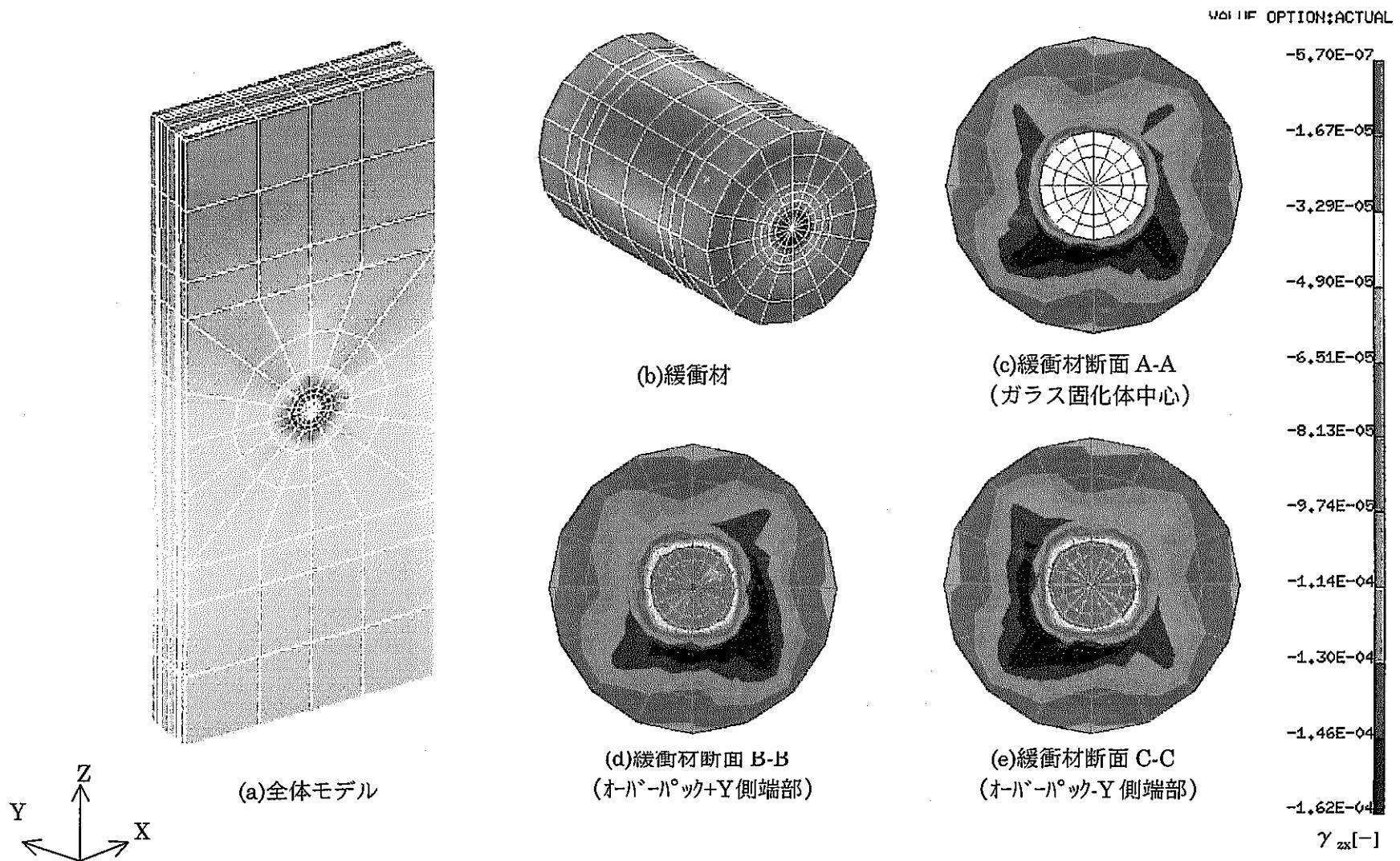


図3.6.4-20 せん断ひずみコンター（解析ケースB-2；XY方向加振，エルセントロ波）

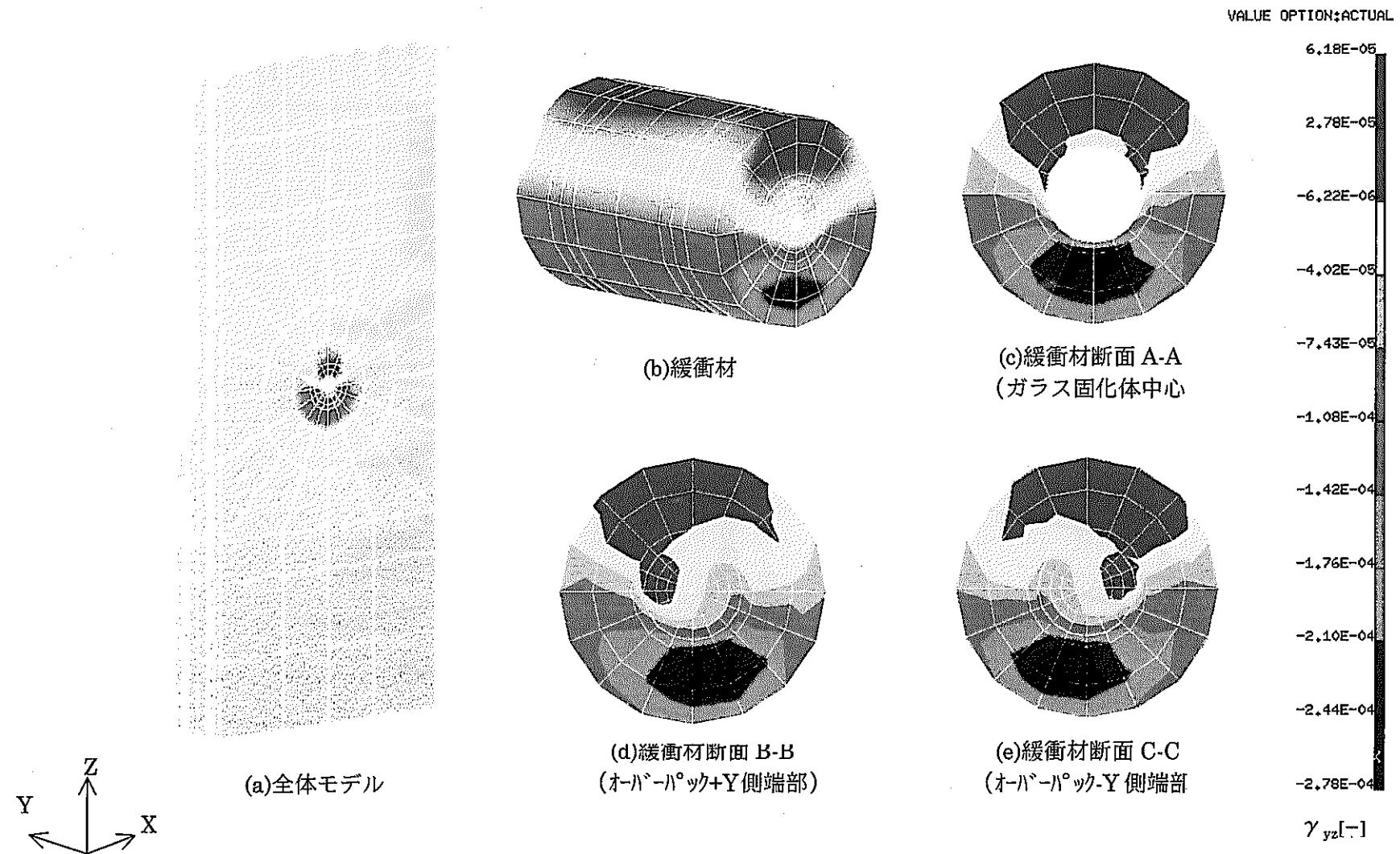


図3.6.4-21 せん断ひずみコンター（解析ケースB-2；XY方向加振，エルセントロ波）

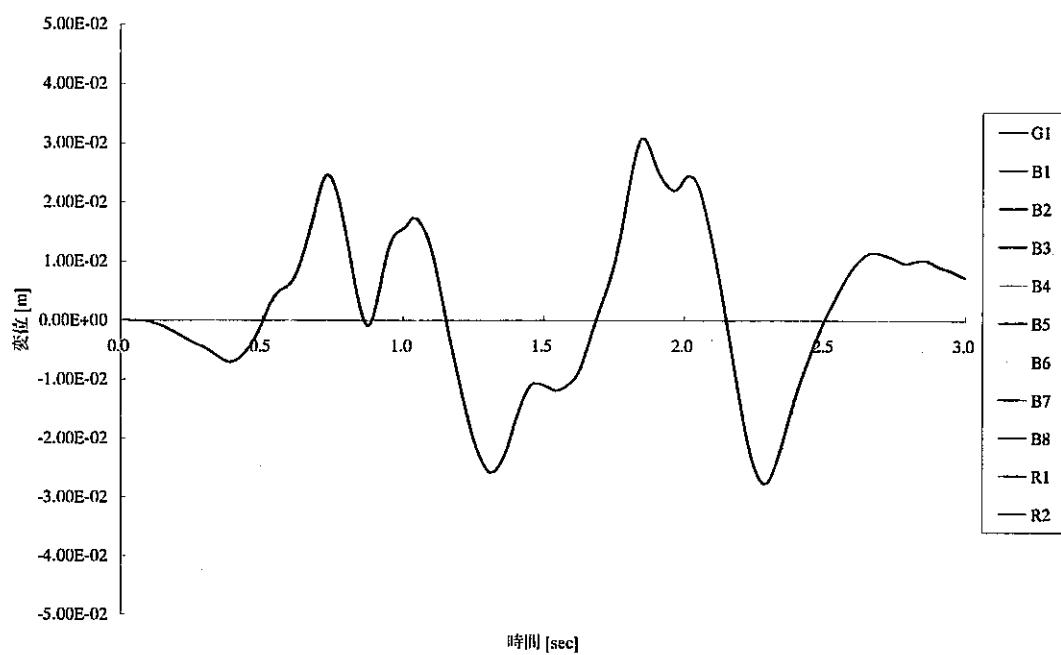


図3.6.4-22 応答変位
(解析ケースB-3; Z方向加振, エルセントロ波)

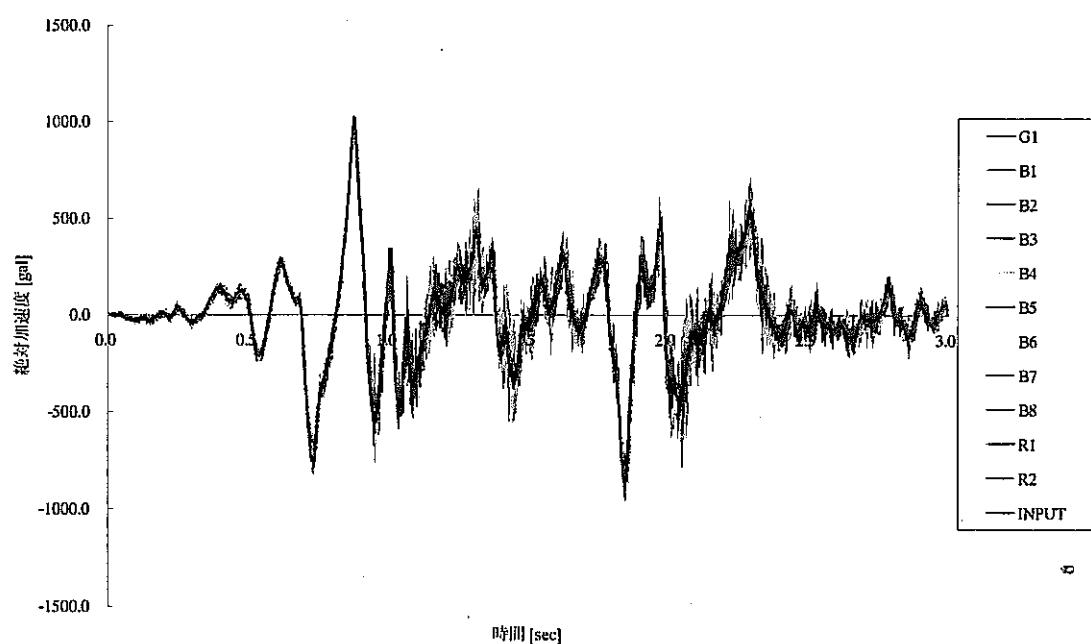


図3.6.4-23 応答加速度
(解析ケースB-3; Z方向加振, エルセントロ波)

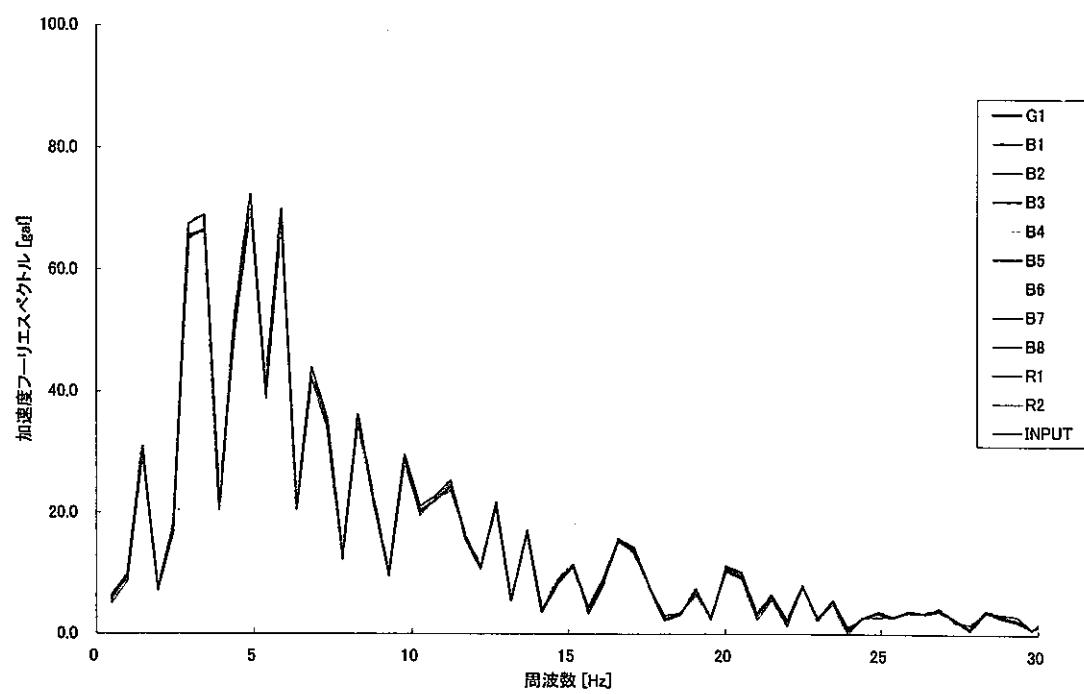
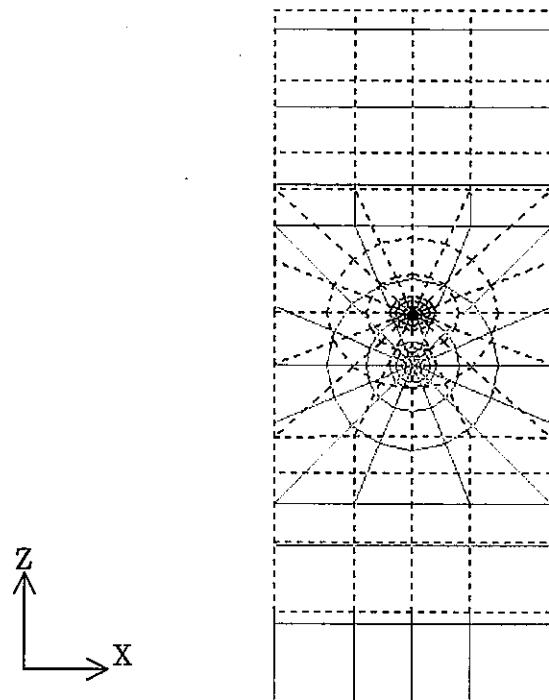


図3.6.4-24 加速度フーリエスペクトル



(解析ケース B-3 ; Z 方向加振, エルセントロ波)

図3.6.4-25 応答変位 (解析ケース B-3 ; Z 方向加振, エルセントロ波)

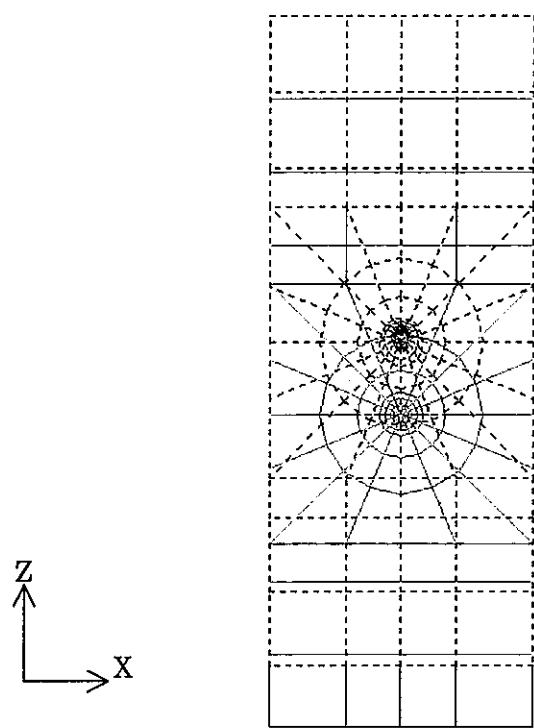


図3.6.4-26 応答加速度（解析ケースB-3；Z方向加振，エルセントロ波）

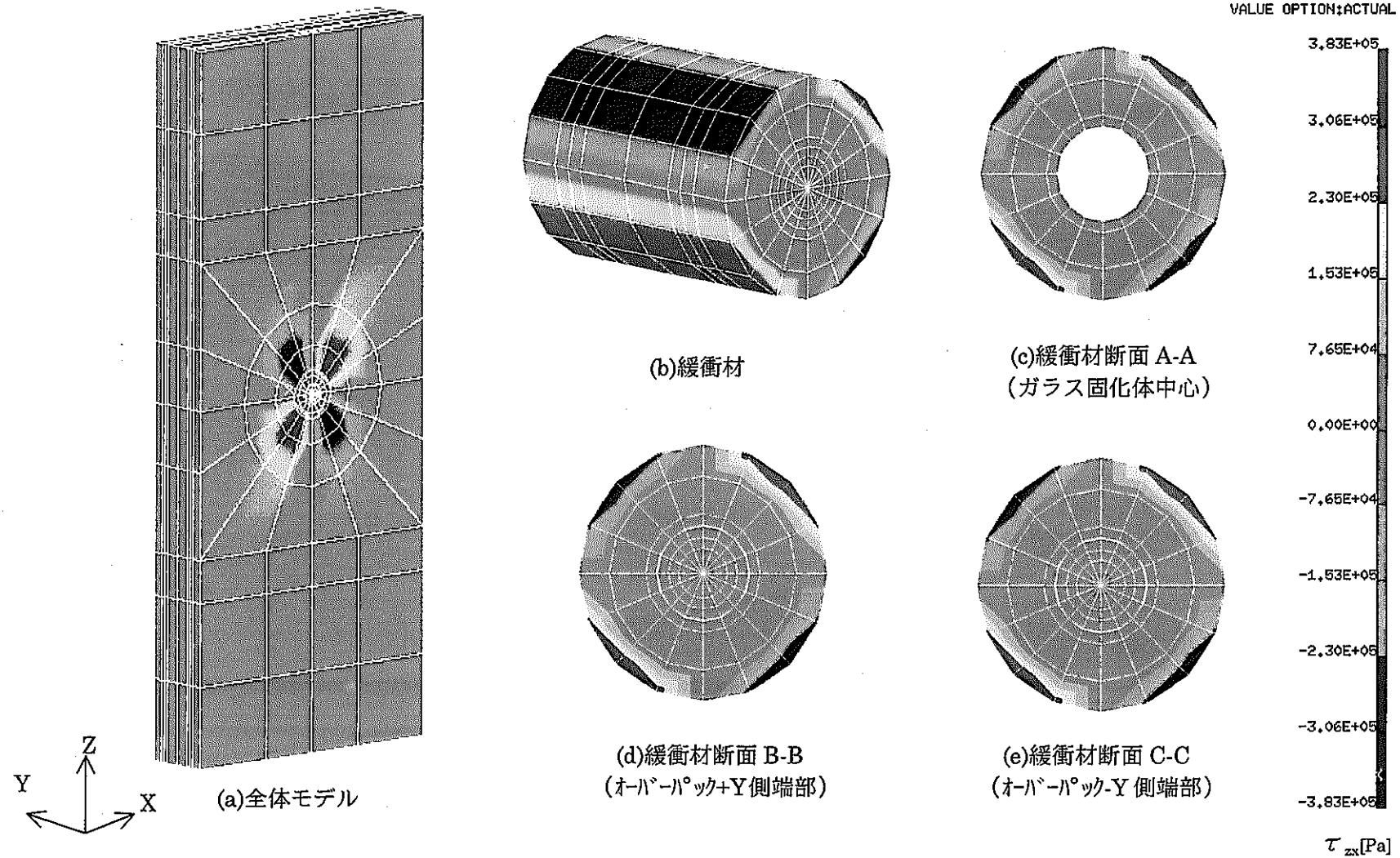


図3.6.4-27 せん断応力コンター（解析ケース B-3；Z 方向加振，エルセントロ波）

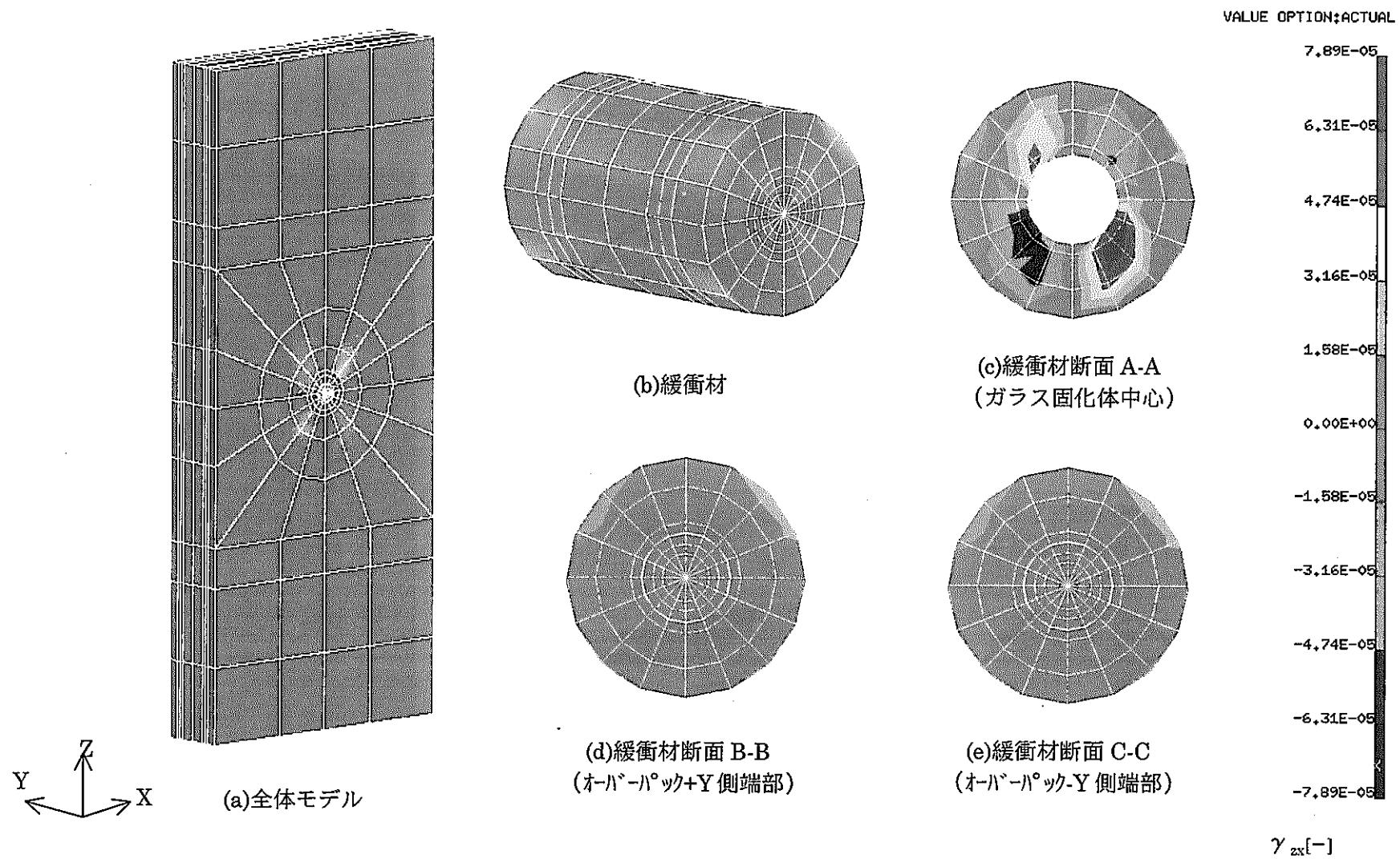


図3.6.4-28 せん断ひずみコンター（解析ケースB-3；Z方向加振，エルセントロ波）

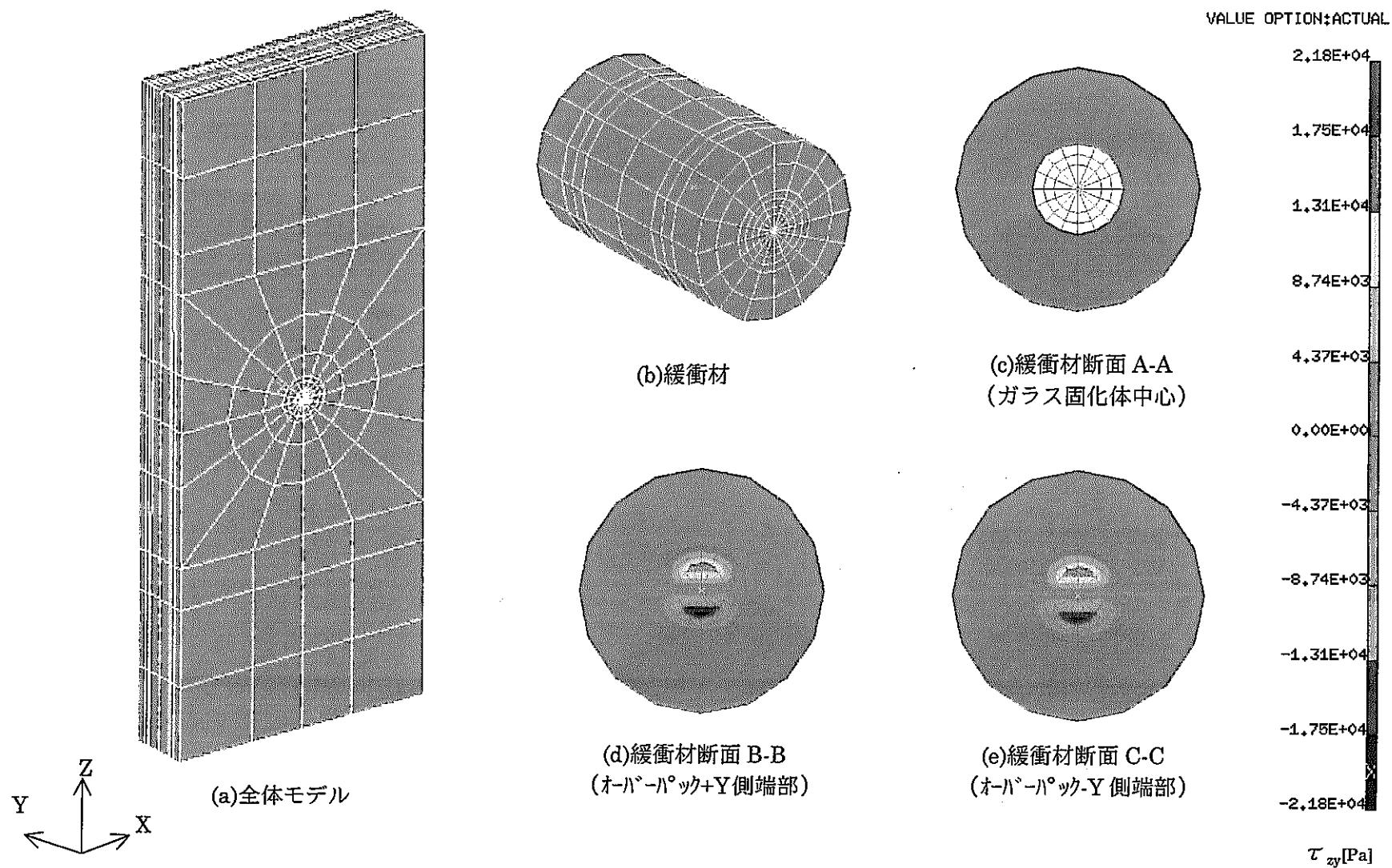


図3.6.4-29 せん断応力コンター（解析ケースB-3；Z方向加振，エルセントロ波）

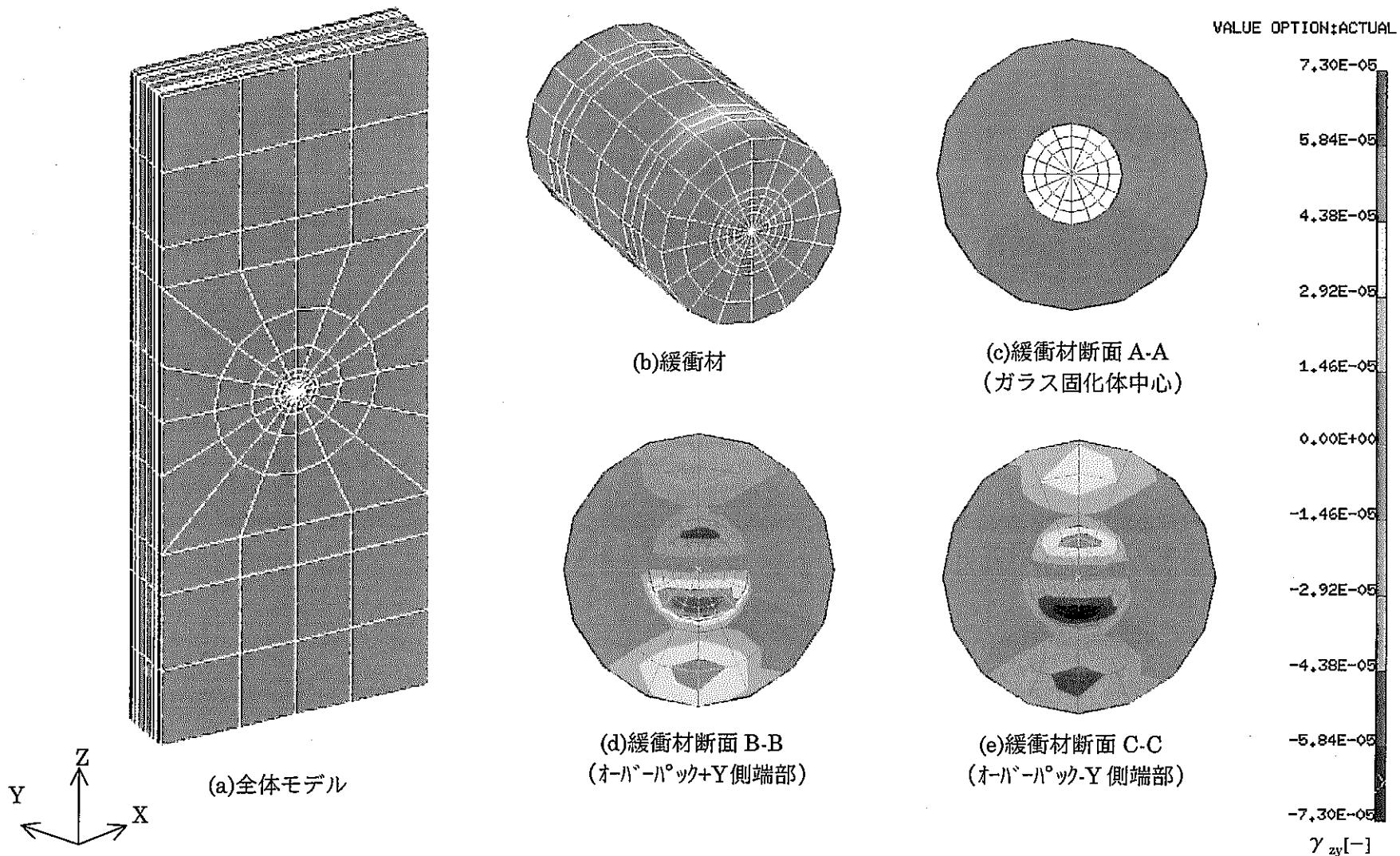


図3.6.4-30 せん断ひずみコンター（解析ケースB-3；Z方向加振，エルセントロ波）

3.7 軟岩系処分孔豎置きケースの補足解析 ; TASK2f

3.7.1 目的

昨年度に行った処分坑道横置き方式（レファレンスケース；硬岩系、処分深度 1000m）の解析では、ジョイント要素の有無に関して両ケースの解析を行い、それらの比較を通じてジョイント要素の応答性状と人工バリアシステムへの影響に関する考察を行った。しかしながら、処分孔豎置き方式（軟岩系、処分深度 500m）については、ジョイント要素を考慮したケースのみの検討に留まっている。ジョイント要素の有無は緩衝材内で発生するせん断応力の大きさに影響し、とくにジョイント要素をモデル化しない場合は、緩衝材の弾性力、減衰力および慣性力により地震力と力学的平衡状態を保つため、緩衝材で発生するせん断応力が過大となる可能性がある。

本検討では、処分孔豎置き方式のジョイント要素を考慮しないケースについて解析を行い、2000年レポートに示した処分坑道横置き方式と同様の考察を行う。

3.7.2 解析モデル

図3.7.2-1に処分孔豎置き方式のニアフィールド解析モデルを示す。図3.2.1-1に示した処分坑道横置き方式と同様に、モデル上下面に粘性境界要素を設け、側面は多点拘束境界とし隣接するガラス固化体の影響を考慮した体系をモデル化した。

評価点は、処分孔内の緩衝材の応答挙動を確認できるよう、図3.7.2-2に示すとおり設定した。なお、入力地震動については処分坑道横置き方式の場合と同様の手続きにより（3.2.3項参照）、処分深度 500m における地中地震波を同定したものを用いた。

3.7.3 材料物性値

3.4.3項の検討と同様に、緩衝材中に地下水が浸潤飽和する前後の2つの状態（乾燥状態、飽和状態）を想定する。表3.7.3-1に材料物性値を示す。

3.7.4 解析結果および考察

乾燥状態および飽和状態の各ケースについて、前記の評価点における応答変位、応答加速度および加速度フーリエスペクトルとせん断応力センター、せん断ひずみセンターを図3.7.4-1～図3.7.4-6に示す。

いずれのケースにおいても、人工バリア内の応答加速度に顕著な増幅は認められない。応答変位についても評価点間で差異は見られず、最大で 10mm 以下（粘性境界要素を用いた入射波解析を行っているため絶対変位で出力）となっている。

処分孔内の緩衝材領域で発生するせん断応力は、乾燥、飽和の両ケースともに 10^3Pa （緩衝材内側）～ 10^5Pa （緩衝材外側）の範囲にあり、緩衝材外側に対して内側の方が小さな値となっている。また、処分孔下端の岩盤と接する端面で発生するせん断応力が最も大きく、緩衝材の一軸圧縮強度と同レベルの約 0.1MPa となる。この傾向は処分孔周辺の岩盤領域

で発生する応力の大きさに関係しており、緩衝材と岩盤間の急激な応力レベルの変化に起因するものである。緩衝材一岩盤間をジョイント要素によりモデル化した場合は、地震波の伝播に伴う外荷重をジョイント部における弾性変形によって一部負担できるため、緩衝材一岩盤間の応力の急激な変化は幾分緩和されるものと思われる。この傾向は処分孔横置き方式のケースと同様のものであるが、処分孔豎置き方式の場合、加振方向と不連続面のせん断方向が一致しないため、ジョイント要素におけるエネルギーの伝達の程度は小さい。加振方向とジョイント要素のせん断方向が一致する処分坑道横置き方式の方がエネルギーの伝達の程度は大きい。緩衝材領域で発生するせん断ひずみについては、ガラス固化体周辺のわずかな領域でやや大きな値（約 10^{-4} ）となっているものの、全体的に 10^{-5} 程度のオーダであり非線形性は顕著にならない。ガラス固化体付近で大きなせん断応力が発生するのは、ガラス固化体と緩衝材に作用する慣性力（質量）の差によるものと考えられる。

表 3.7.3-1 材料物性値

緩衝材（飽和状態）	ヤング率 [MPa]	1.176×10^2
	ポアソン比 [-]	0.490
	密度 [N/m ³]	1.96×10^4
緩衝材（乾燥状態）	ヤング率 [MPa]	2.388×10^2
	ポアソン比 [-]	0.200
	密度 [N/m ³]	1.568×10^4
オーバーパック	ヤング率 [MPa]	2.058×10^4
	ポアソン比 [-]	0.300
	密度 [N/m ³]	7.624×10^4
	減衰定数 [-]	0.005
岩盤（軟岩系）	ヤング率 [MPa]	7.60×10^3
	ポアソン比 [-]	0.369
	密度 [N/m ³]	2.156×10^4
	減衰定数 [-]	0.02

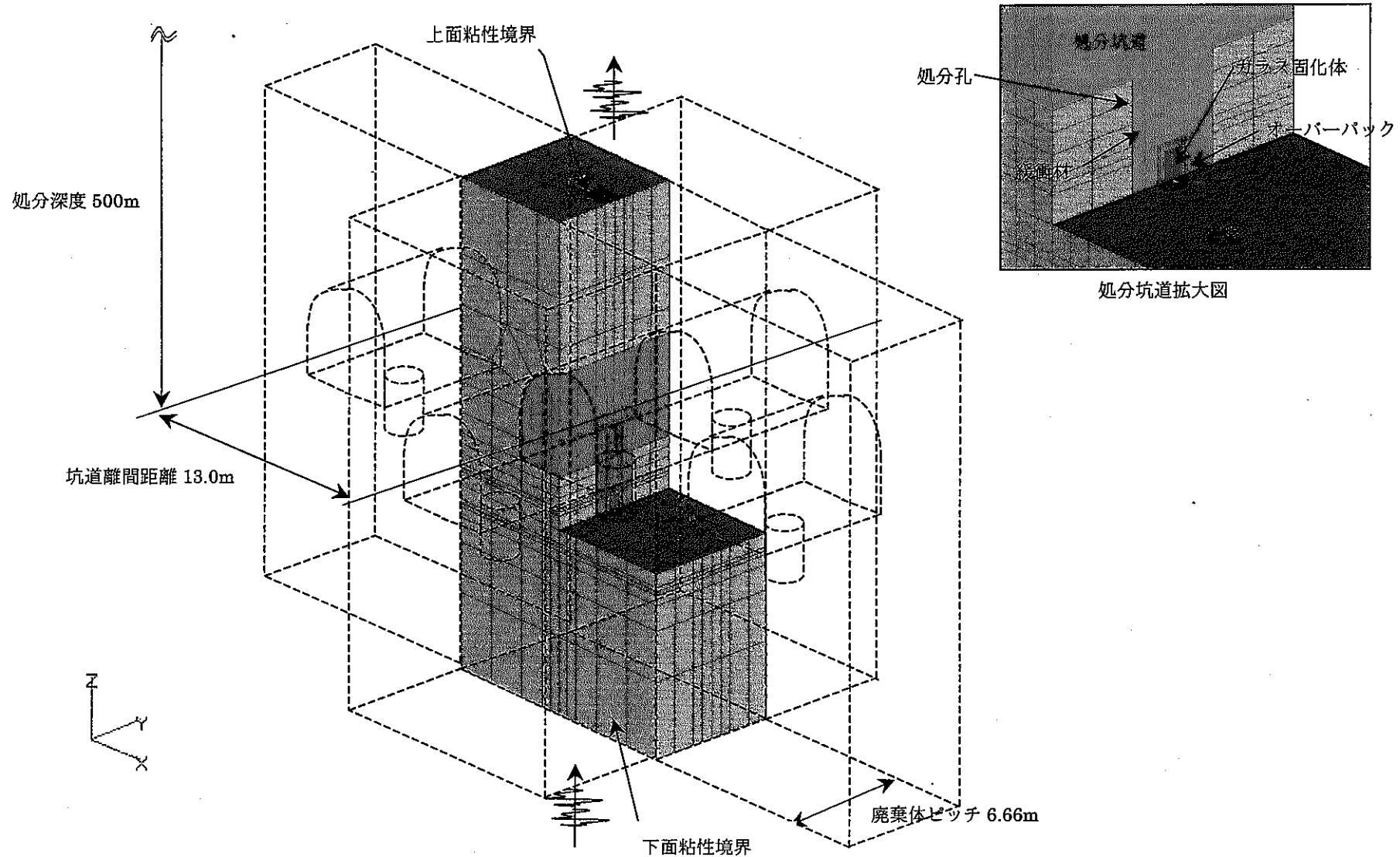


図3.7.2-1 処分孔堅置き方式ニアフィールド解析モデル（レファレンスケース、軟岩系、処分深度 500m）

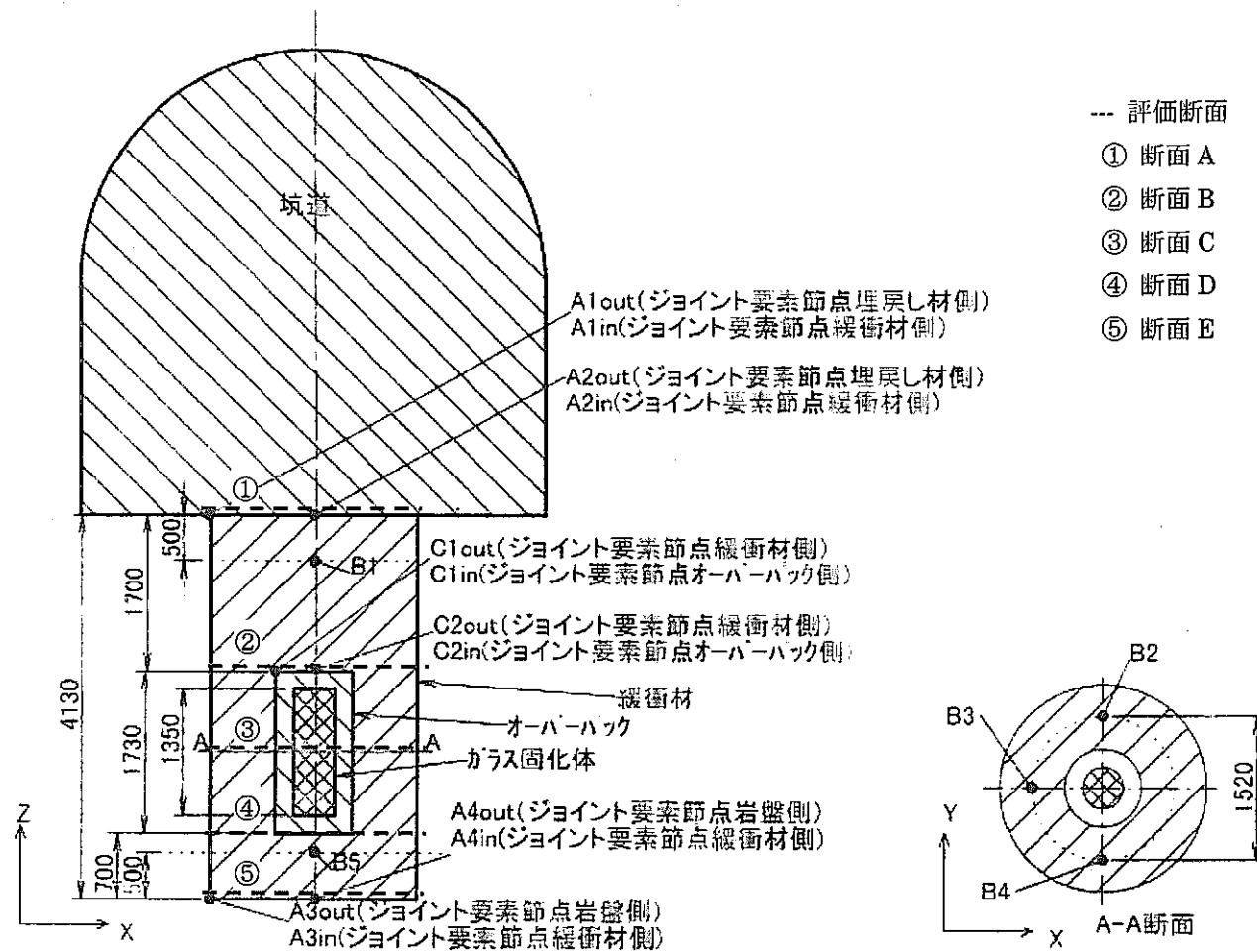


図 3. 7. 2-2 評価点および評価断面 (処分孔設置方式; mm)

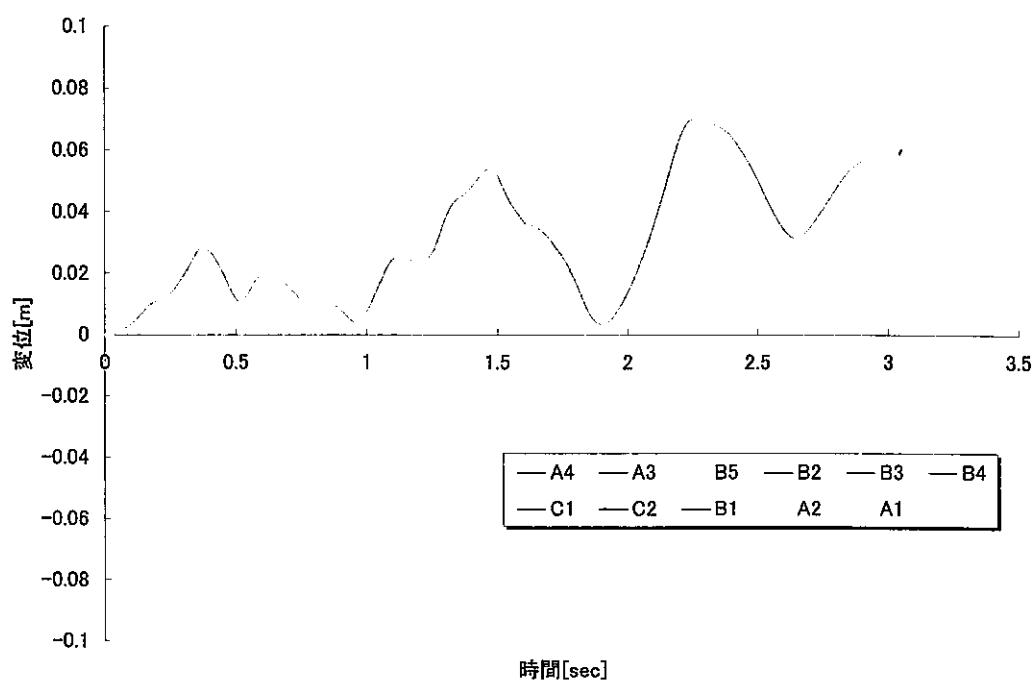


図3.7.4-1 人工バリア内の応答変位（乾燥状態）

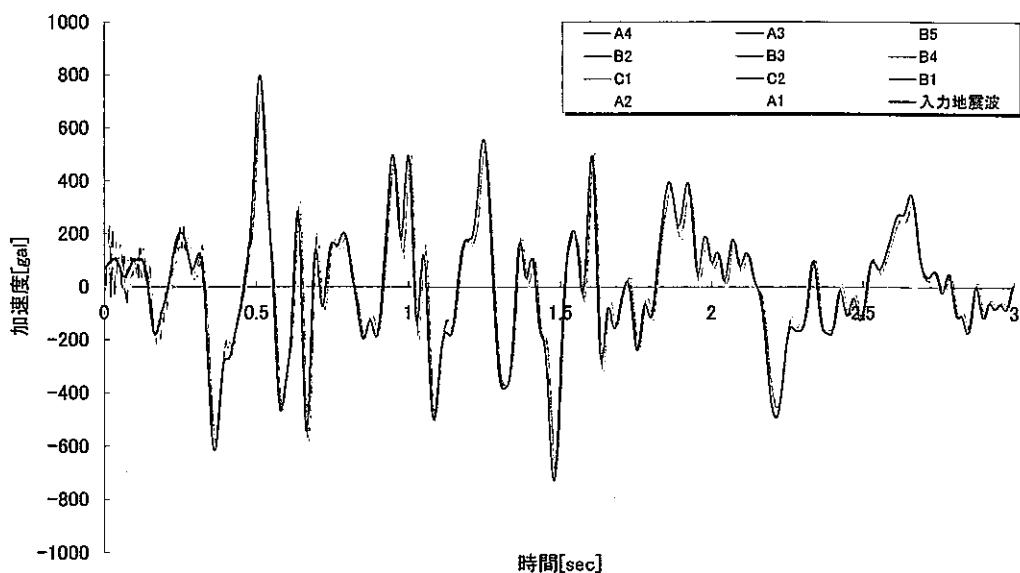


図3.7.4-3 人工バリア内の応答加速度（乾燥状態）

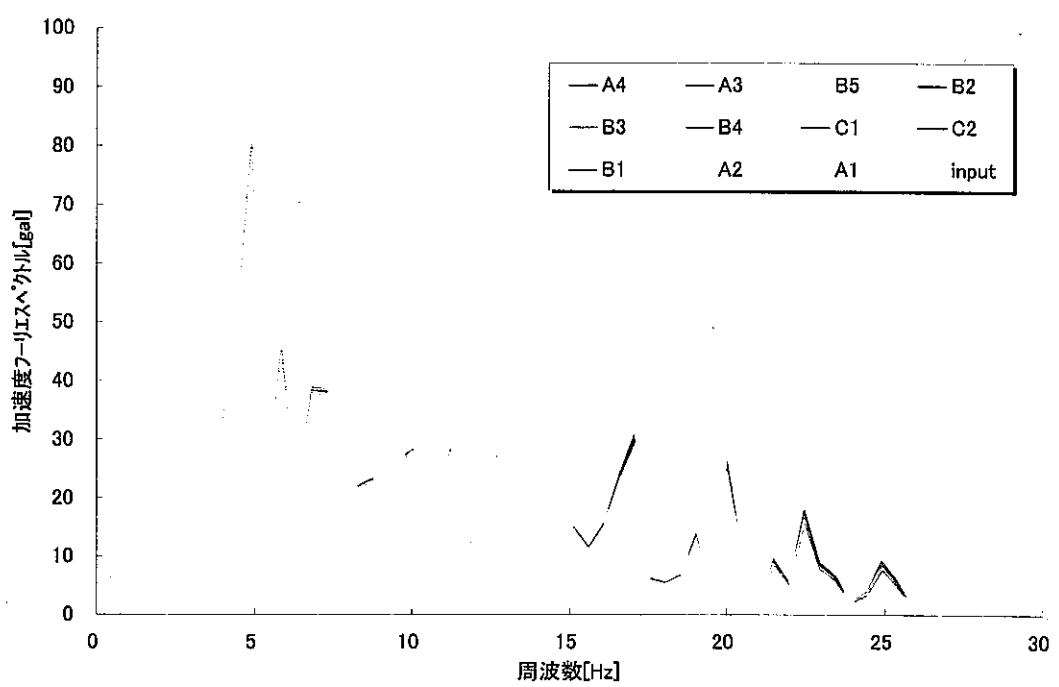


図3.7.4-3 加速度フーリエスペクトル（乾燥状態）

3-67

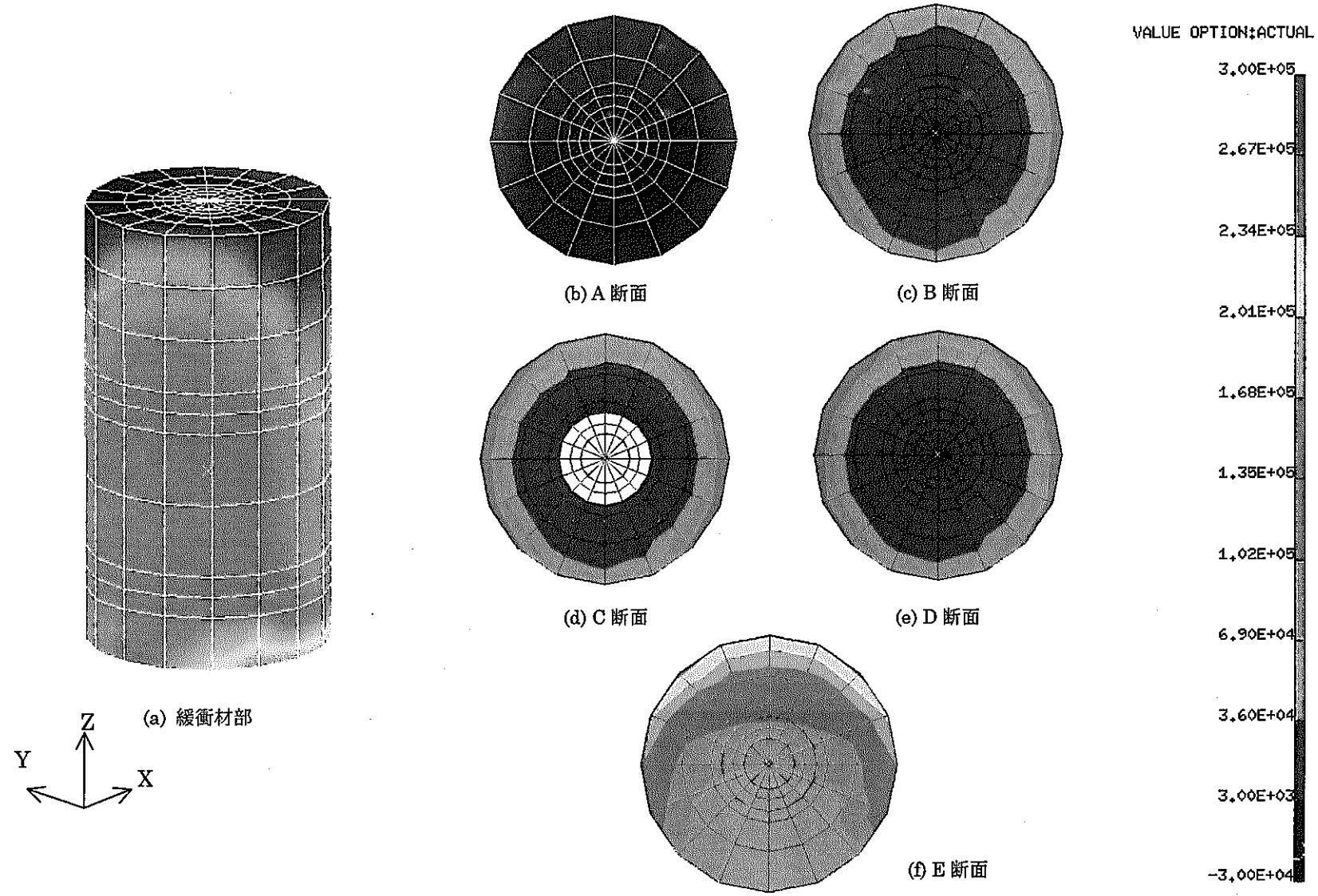


図3.7.4-4 せん断応力コンター (τ_{yz} [Pa]; 乾燥状態)

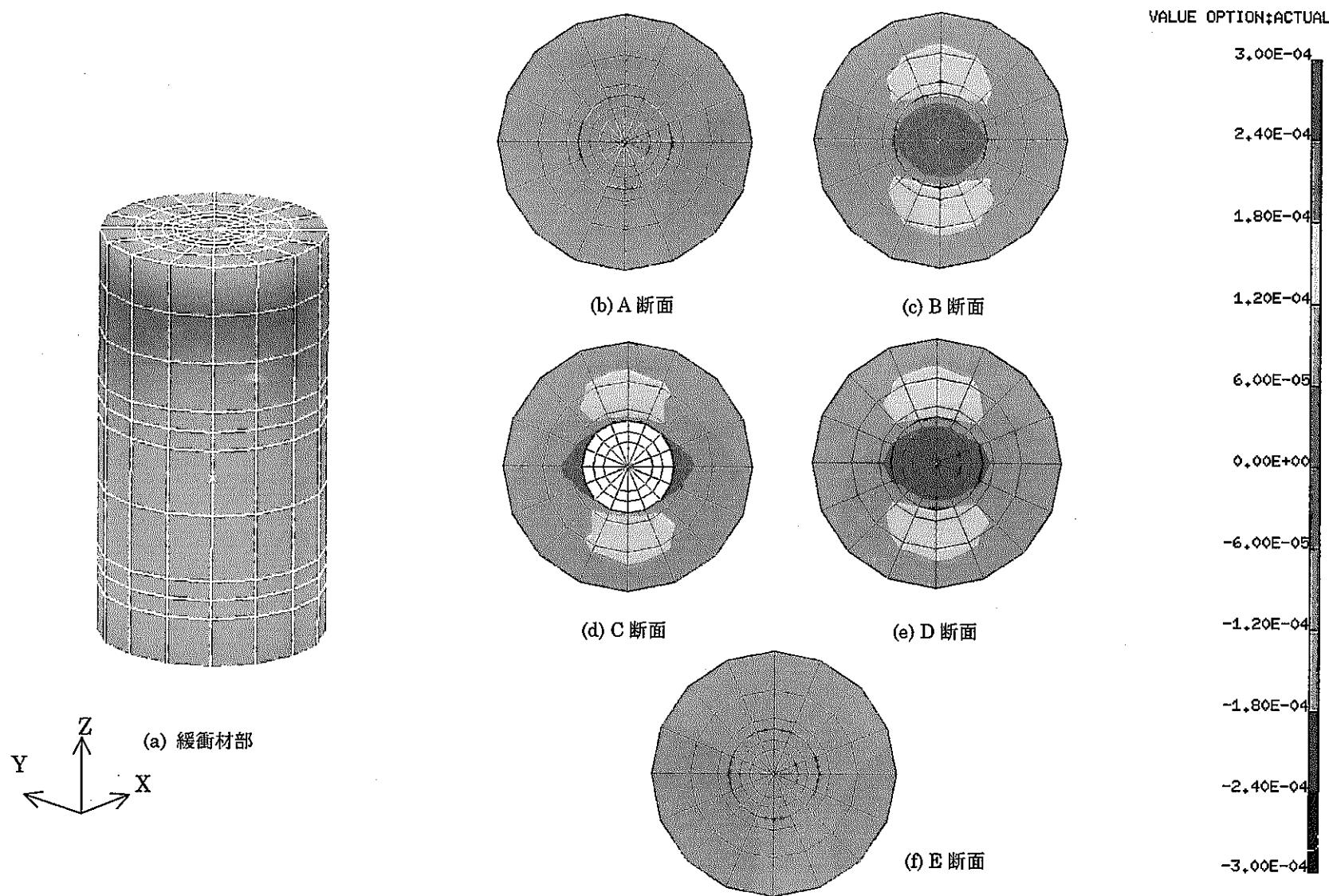


図3.7.4-5せん断ひずみコンター (γ_{yz} [-]; 乾燥状態)

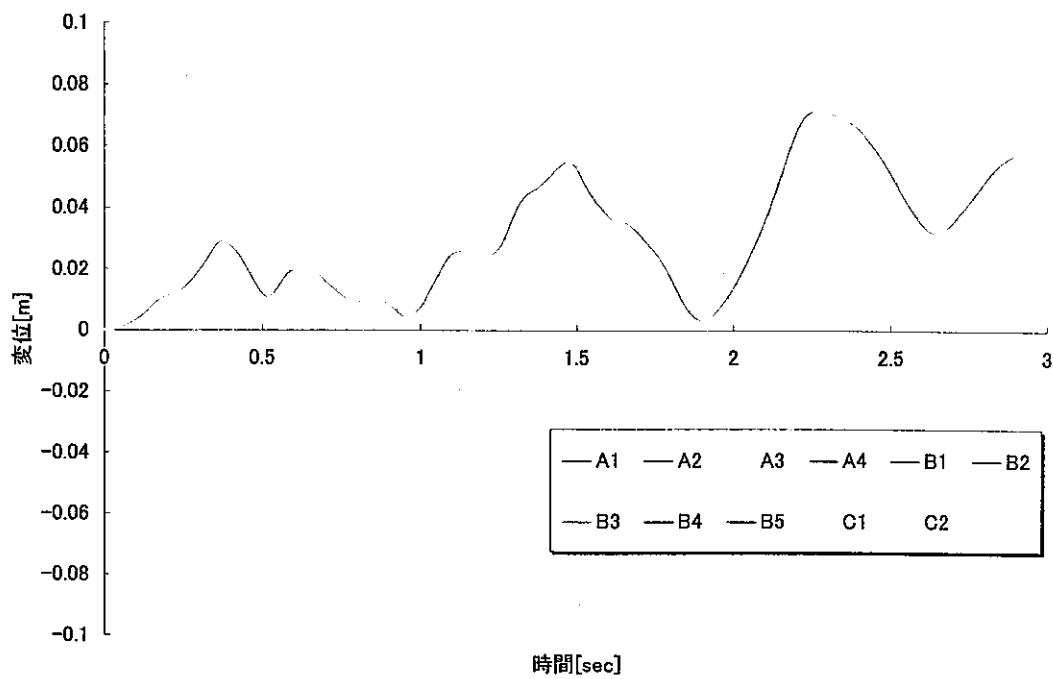


図3.7.4-6 人工バリア内の応答変位

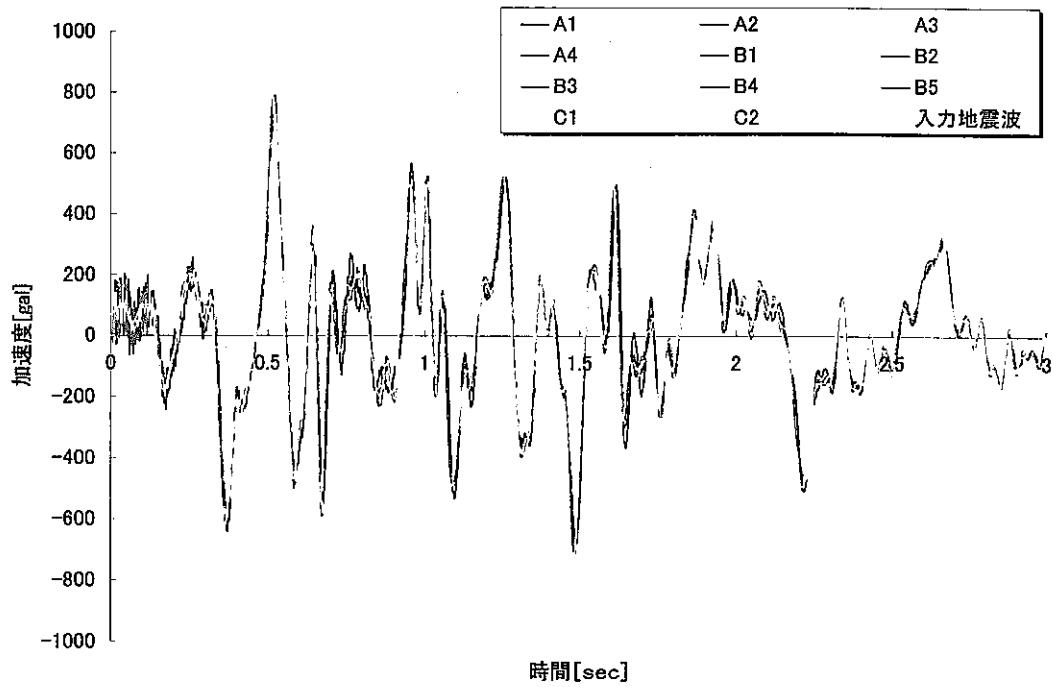


図3.7.4-7 人工バリア内の応答加速度

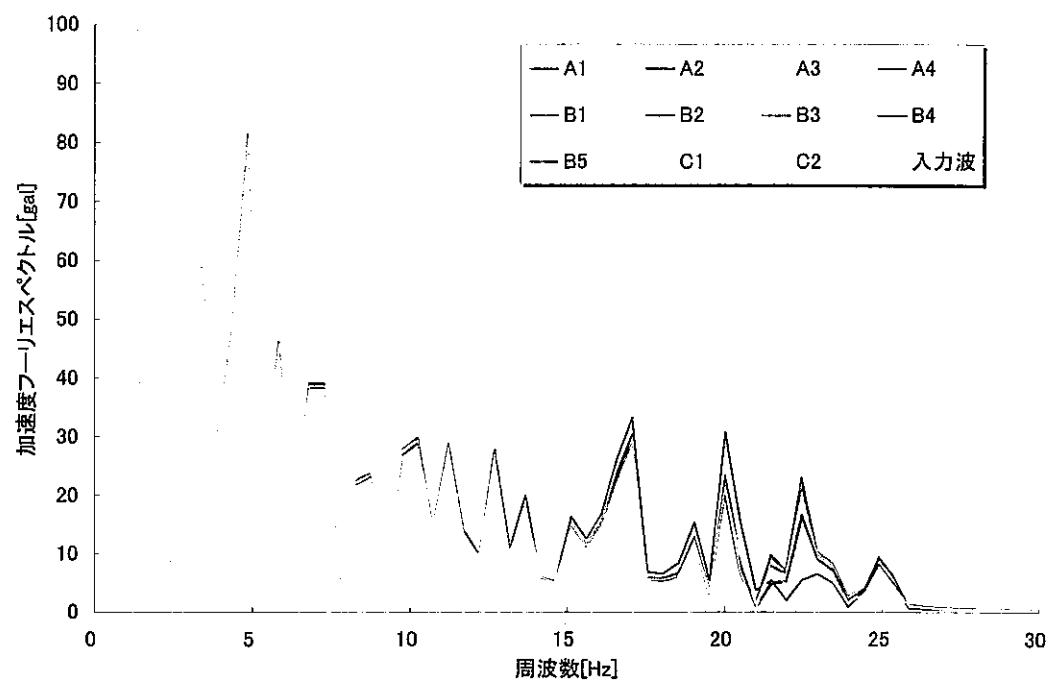


図3. 7. 4-8 加速度フーリエスペクトル

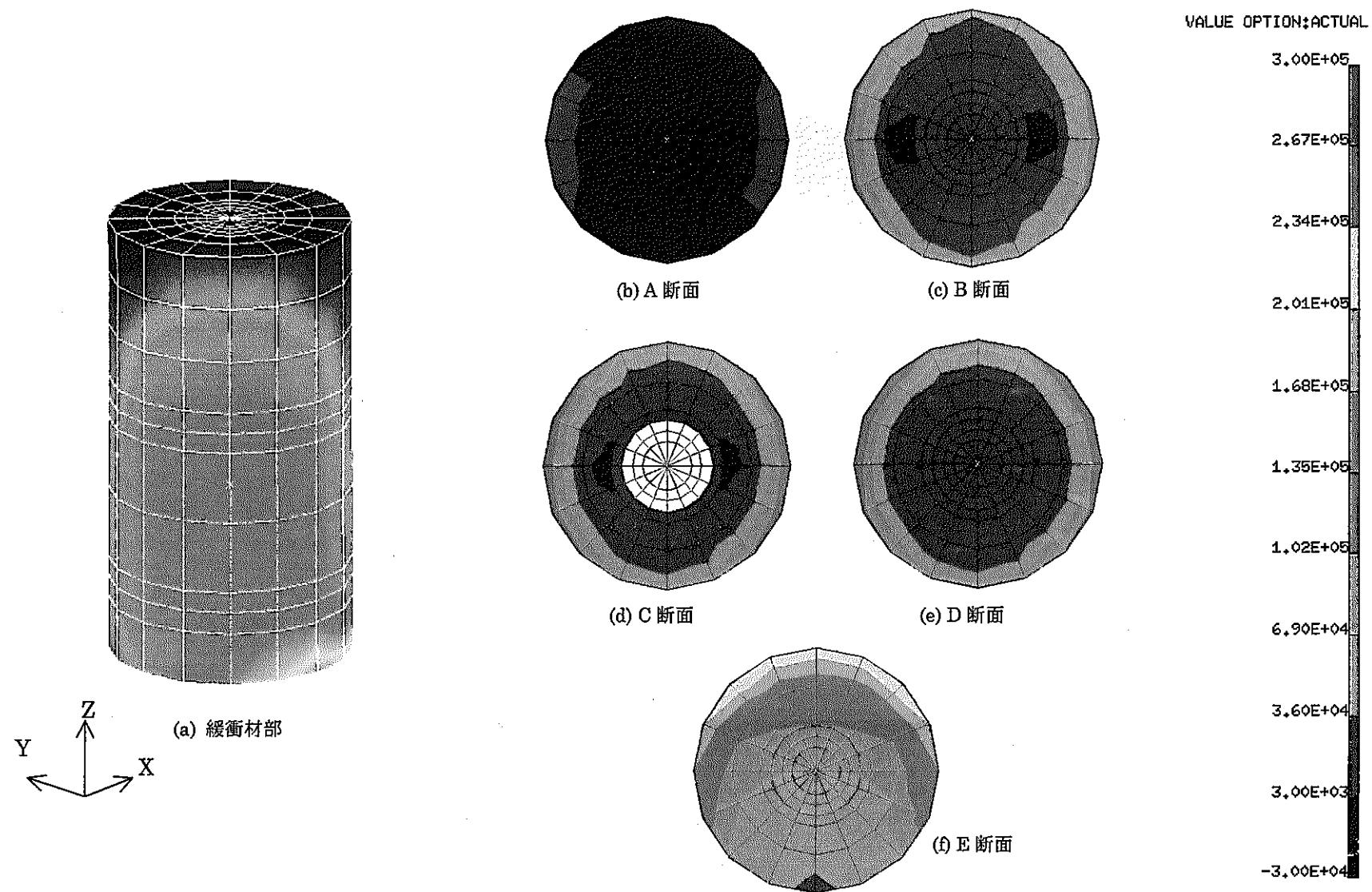


図3.7.4-9 せん断応力コンター (τ_{yz} [Pa]; 飽和状態)

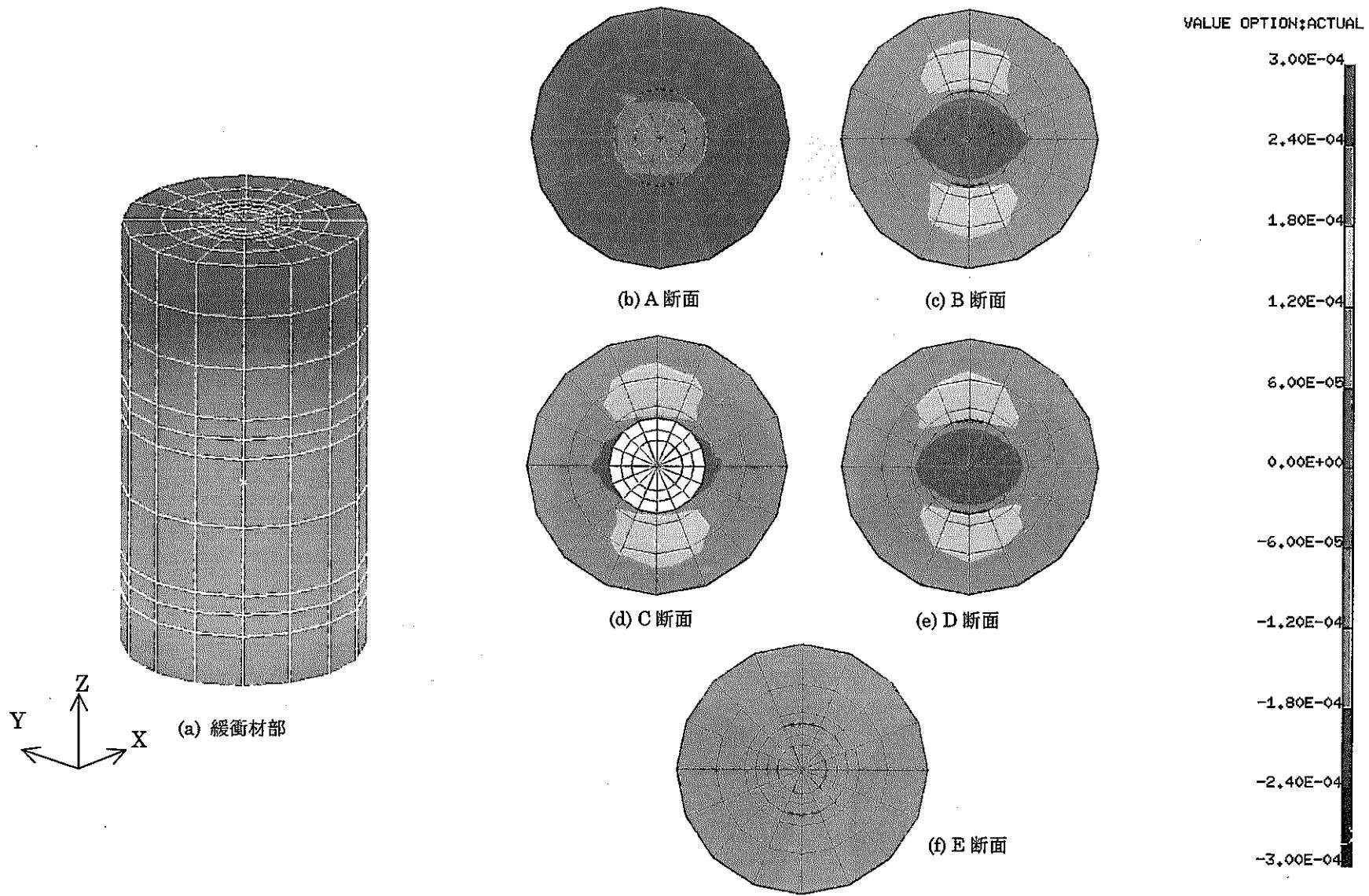


図3.7.4-10せん断ひずみコンター (γ_{yz} [-]; 飽和状態)

4. 防災研との共同研究取りまとめに対する補足検討 ; TASK3

本研究では、これまでに防災研で実施してきた縮尺スケール人工バリア振動実験に資する予備解析や得られた実測データとの比較等を行い、解析コードの検証作業を段階的に進めてきた。この間、開発中の解析コードについては、小規模な機能改良や不具合の修正等を断続的に行ってきている。

ここでは、最新版の解析コードを用いた一連の実験データ解析（1/5スケール振動実験モデル）を改めて行い、上記共同研究の取りまとめに資する一連の解析結果を整備することを目的とする。

4. 1 解析モデルと評価点

これまでと同様に、1/5スケール人工バリア振動実験モデルの供試体が均一に製作されていることを前提とし、1/8対称領域を図4. 1-1に示すとおりモデル化した。使用要素は全て8節点ソリッド要素であり、節点数および要素数はそれぞれ371、264である。図中に併記した節点A,BおよびCは後述する解析出力点（評価点）であり、それぞれオーバーパックと緩衝材の境界部、ベントナイト半径方向の中点およびベントナイト軸方向の中点に対応している。

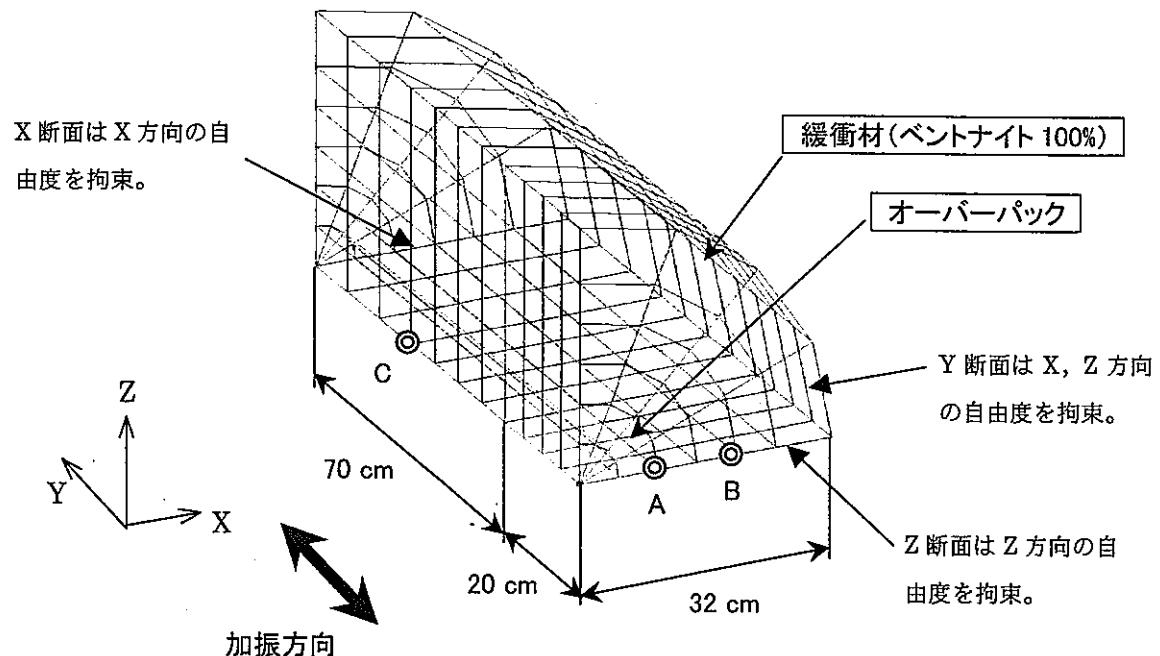


図4. 1-1 振動実験データ解析モデル（節点数371、要素数264）

4. 2 解析ケースと材料物性値

解析ケースは入力地震動、解析種別およびベントナイトの減衰定数をパラメータに、全12ケースを設定した（表4. 2-1）。ベントナイトの非線形特性はROモデルを前提とした直接積分法による非線形解析、発生するせん断ひずみの大きさに依存して物性パラメータを逐次更新する等価線形解析の2とおりを適用する。また、ベントナイトの減衰定数については、動的三軸試験で得られた基準データの約10倍を用いることで振動実験で実測されたデータを良好に再現することがわかっているため、上記の解析種別毎に2とおりの減衰定数を適用する。入力地震動については後述する。

その他の主な物性値は、表4. 2-3～表4. 2-4に示すとおりである。

表4. 2-1 解析ケース

解析ケース	入力地震動	解析種別	減衰定数
EL-1	エルセントロ波	非線形解析	2.5%
EL-2			20%
EL-3		等価線形解析	2.5%
EL-4			20%
HC-1	八戸波	非線形解析	2.5%
HC-2			20%
HC-3		等価線形解析	2.5%
HC-4			20%
MI-1	宮城沖波	非線形解析	2.5%
MI-2			20%
MI-3		等価線形解析	2.5%
MI-4			20%

表4. 2-3 主な材料物性値

緩衝材	ヤング率 [kgf/cm ²]	40.0
	ポアソン比 [-]	0.40
	密度 [kg/cm ³]	1.43×10^{-3}
	減衰定数 [-]	履歴減衰として考慮
オーバーパック	ヤング率 [kgf/cm ²]	2.10×10^6
	ポアソン比 [-]	0.30
	密度 [kgf/cm ³]	7.77×10^{-3}

表4. 2-3 等価線形解析で用いる γ -G/Gmax, γ -h/hmax の関係

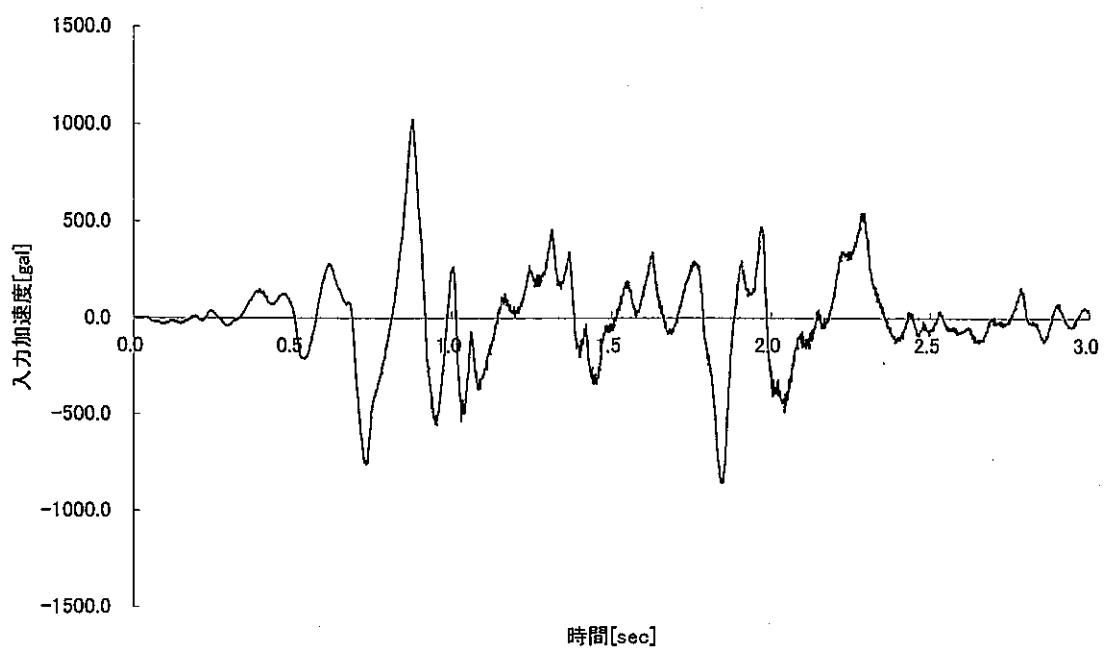
せん断ひずみ [-]	正規化せん断剛性 G/Gmax [-]	正規化履歴減衰 h/hmax [-]
1.00E-06	1.00	0.06
1.00E-05	1.00	0.06
1.00E-04	0.88	0.09
8.00E-03	0.83	0.12
3.00E-03	0.77	0.28
9.00E-02	0.71	0.28
7.00E-02	0.60	0.36
1.00E-02	0.48	0.52
7.00E-01	0.23	1.00

4. 3 入力地震動

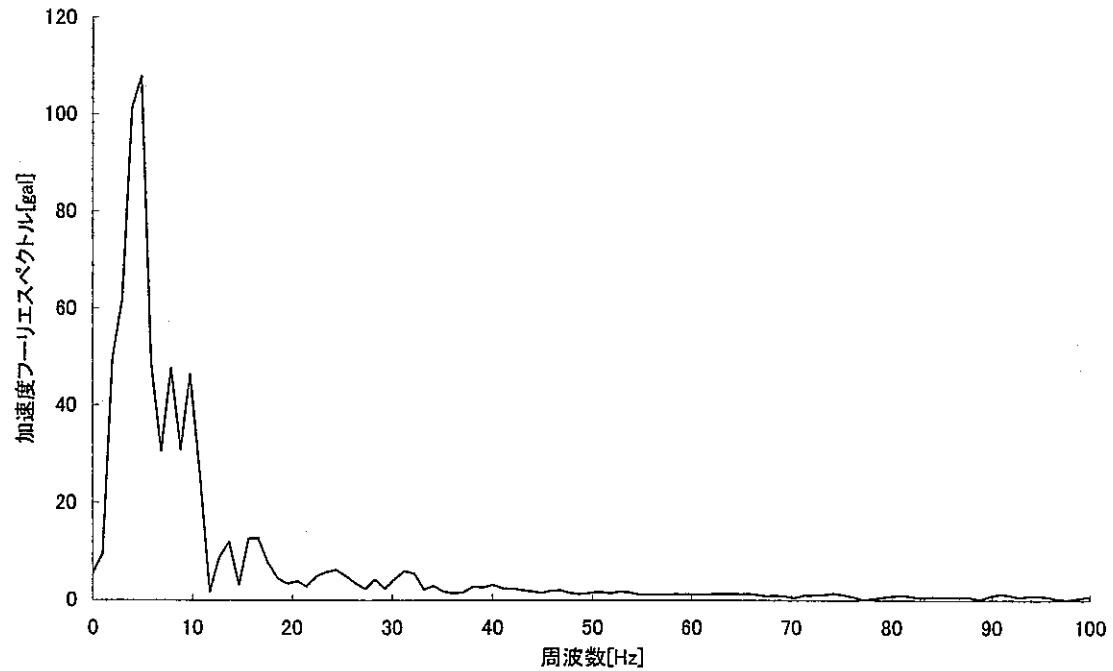
解析に用いる入力地震動はエルセントロ波、八戸波および宮城沖波の3つの実地震波を想定した。図4. 3-1～図4. 3-3に、これらの加速度波形とフーリエスペクトルを示す。いずれの地震動も加速度波形は時間間隔0.001秒で実測されたものであり、時間軸についてスケーリングを行ったものである。解析では、それぞれの地震波の最大加速度が発生する時間点近傍の3.0秒間のデータを用いた(0.001秒×3000点)。

4. 4 解析結果

最新版の解析コードを用いて計算した結果、昨年度までに得られたデータを良好に再現することができ、最新版コードが正常に機能していることが確認できた。これらの解釈については、これまでの検討で既にまとめられているため割愛する。ここでは各ケースにつき、応答変位、応答加速度、加速度フーリエスペクトルを整理するに留める。なお、非線形解析についてはせん断応力センター及びせん断ひずみセンターを併記した(図4. 4-1～図4. 4-12)。

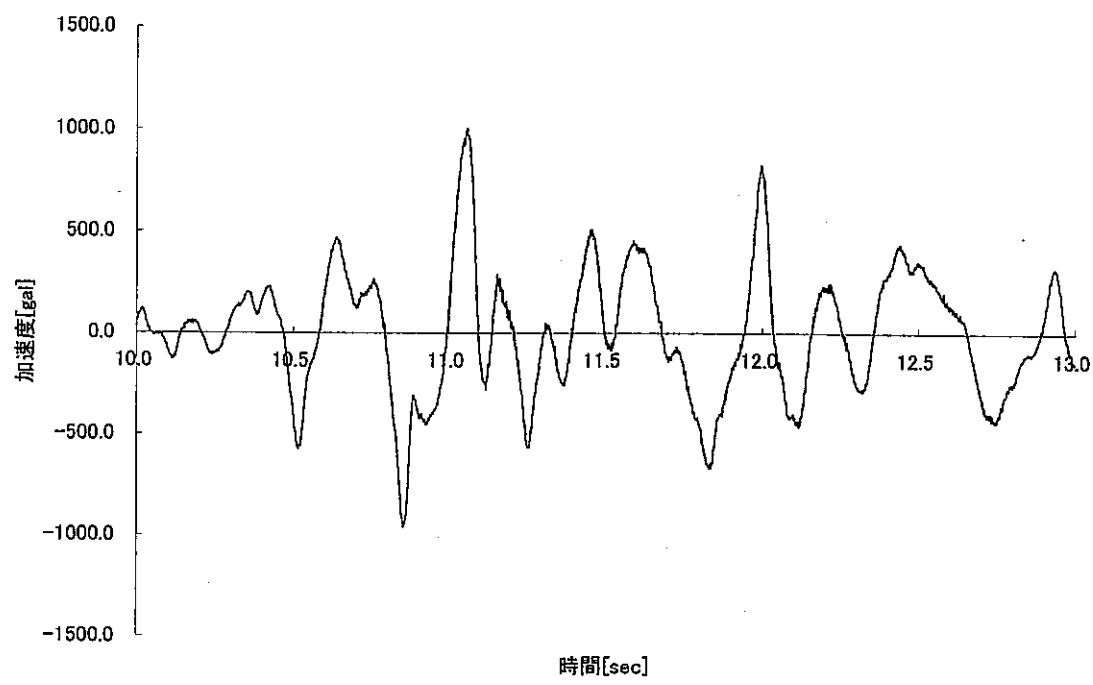


(a) 加速度履歴

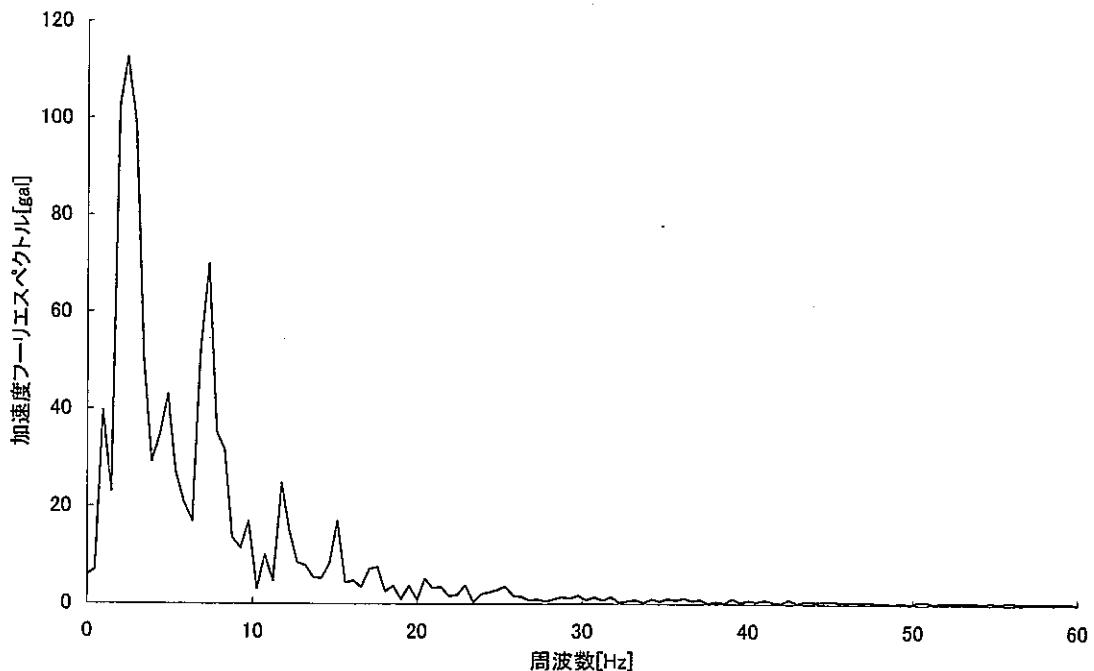


(b) 加速度フーリエスペクトル

図4. 3-1 エルセントロ波

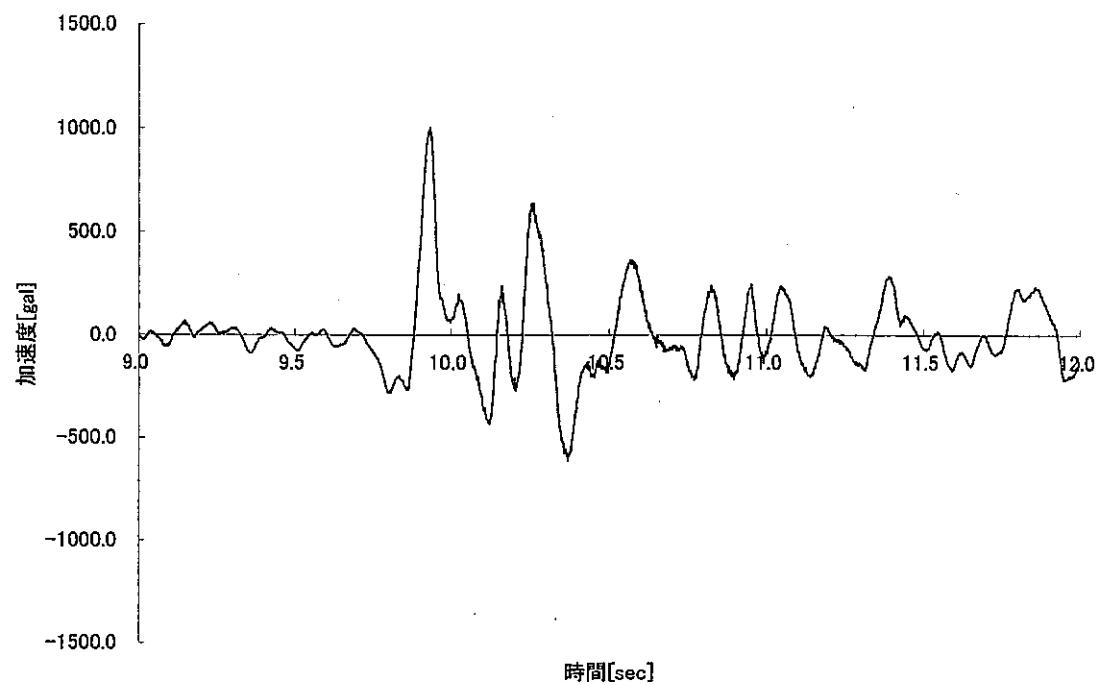


(a) 加速度履歴

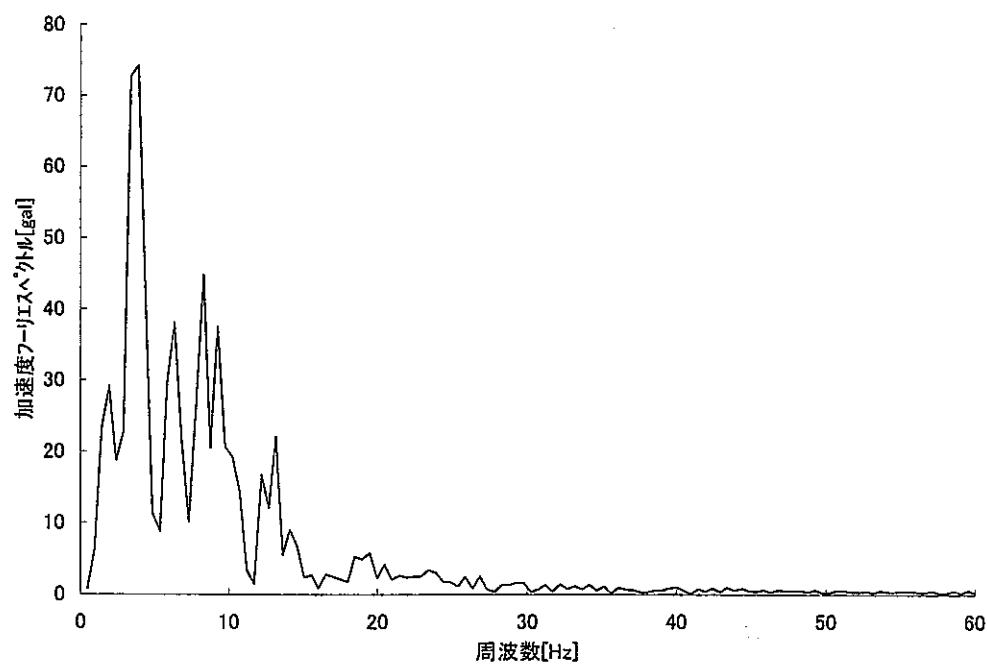


(b) 加速度フーリエスペクトル

図4. 3-2 八戸波

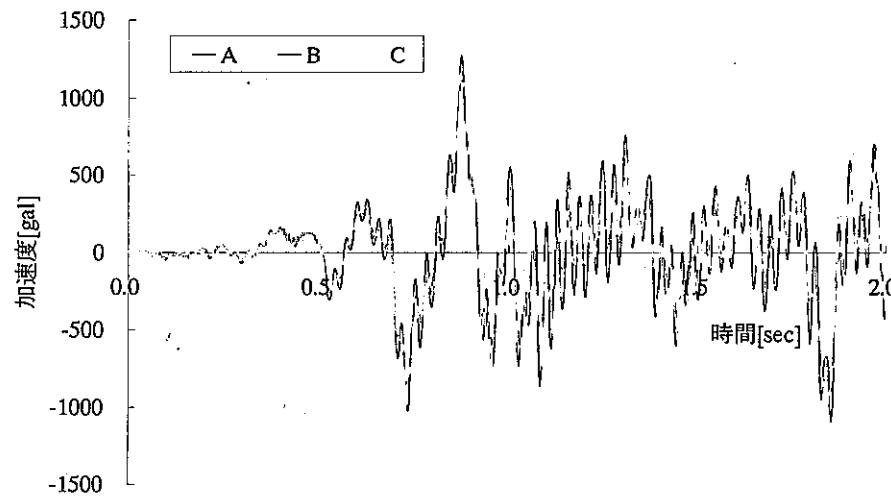


(a) 加速度履歴



(b) 加速度フーリエスペクトル

図 4. 3-3 宮城沖波

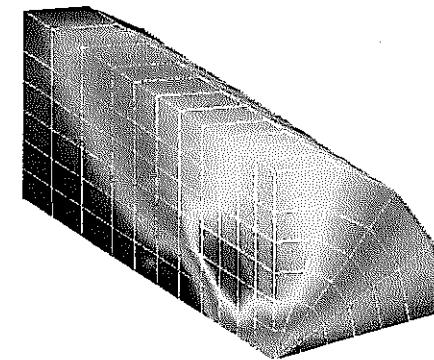


(a) 応答加速度 [gal]

RESULTS: 3-B.C. 0, TIME = 0.077, STRESS_3
TIMESET: 1 TIME1 = 0.077
UNKNOWN DOF VECTOR - RY HHH=1,31E-06 MAX: 2.71E-03
FRAME OF REF: PART

NODE DATA

VALUE OPTION:ACTUAL

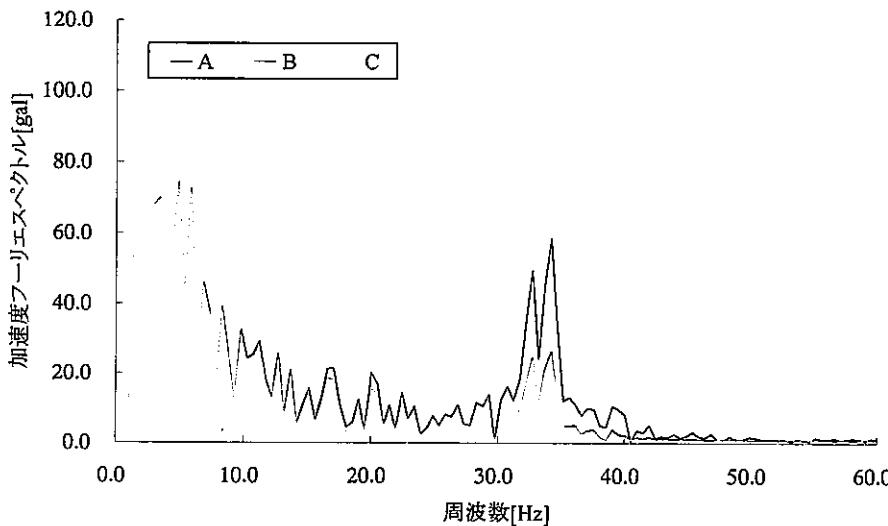
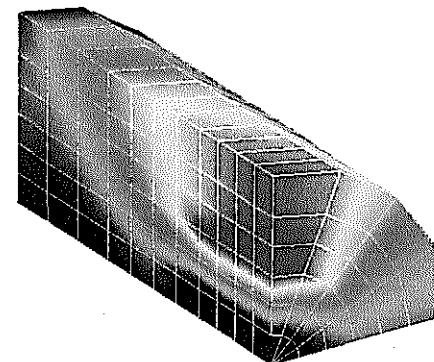


(c) せん断応力分布 [kgf/cm²]

RESULTS: 4-B.C. 0, TIME = 0.077, STRAIN_4
TIMESET: 1 TIME1 = 0.077
UNKNOWN DOF VECTOR - RY HHH=2,03E-05 MAX: 1.69E-03
FRAME OF REF: PART

NODE DATA

VALUE OPTION:ACTUAL



(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図 4. 4-1 解析結果（解析ケース EL-1；非線形解析，エルセントロ波，減衰 2.5%）

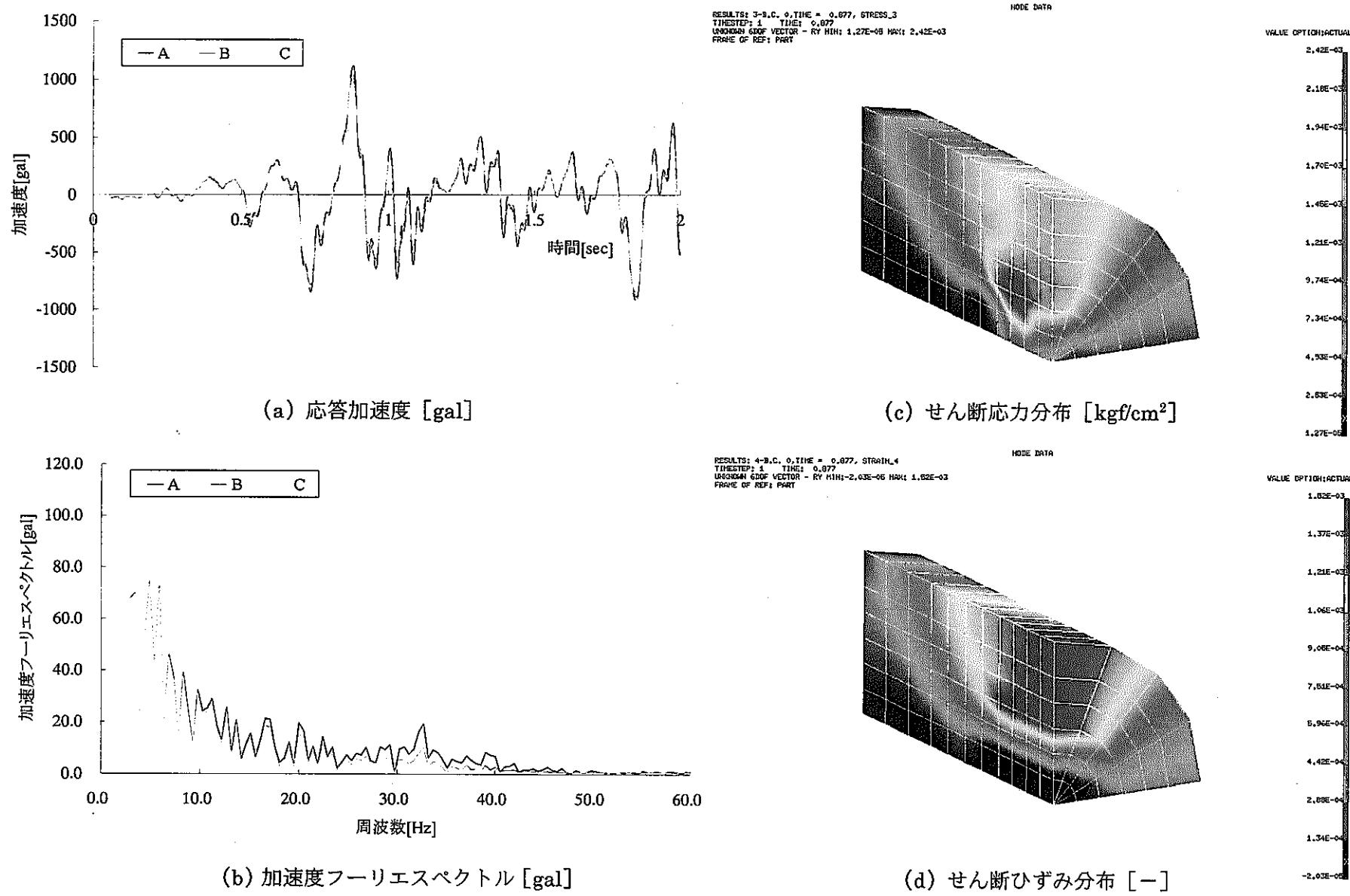
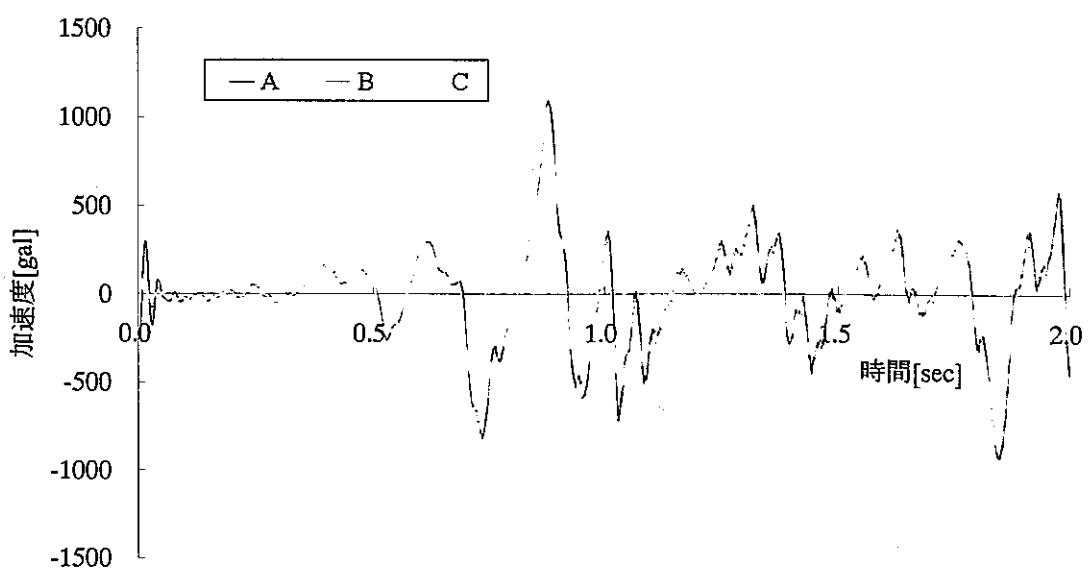
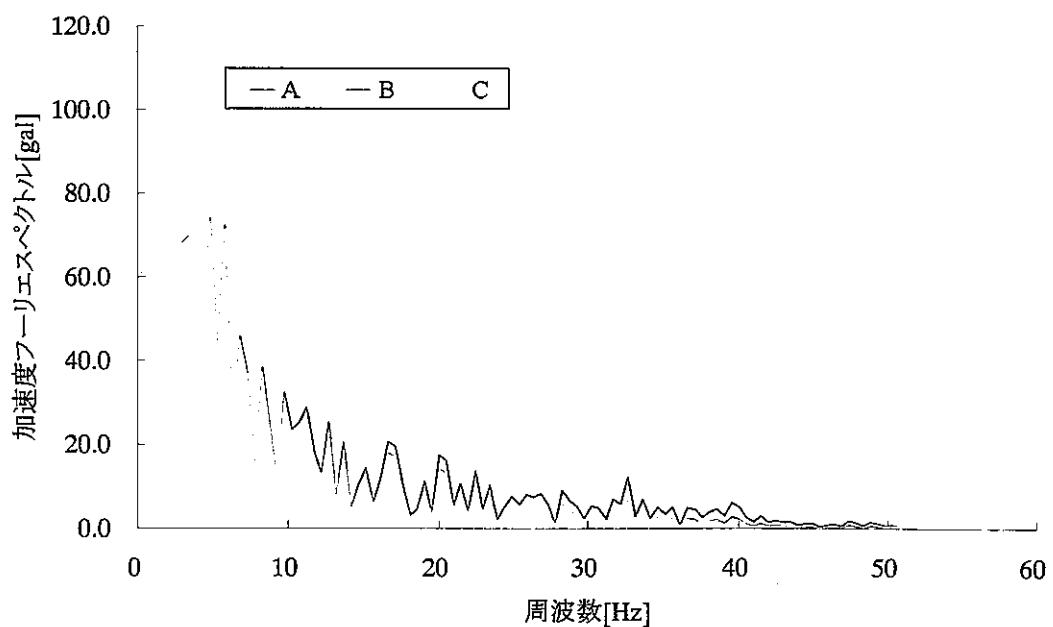


図4.4-2 解析結果（解析ケース EL-2；非線形解析，エルセントロ波，減衰 20%）

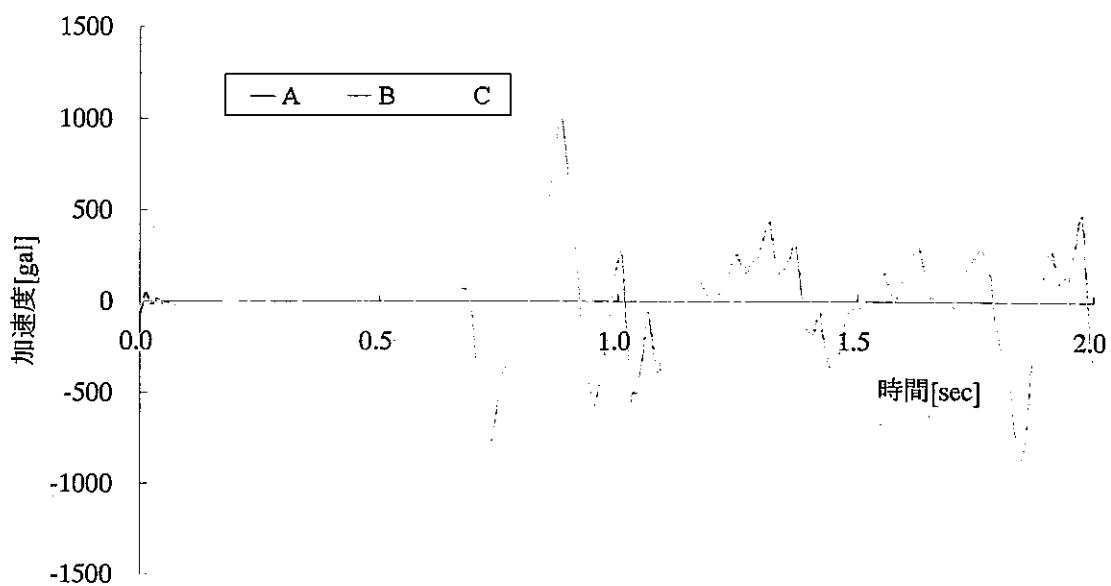


(a) 応答加速度 [gal]

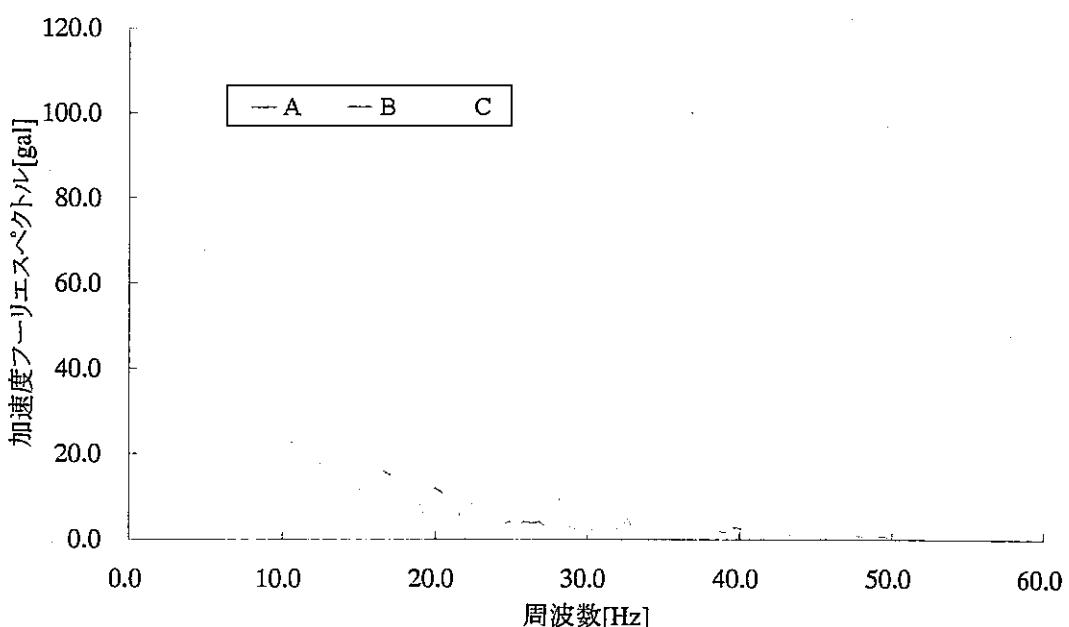


(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図4. 4-3 解析結果
(解析ケース EL-3; 等価線形解析, エルセントロ波, 減衰 2.5%)



(a) 応答加速度 [gal]



(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図 4. 4-4 解析結果
 (解析ケース EL-4; 等価線形解析, エルセントロ波, 減衰 20%)

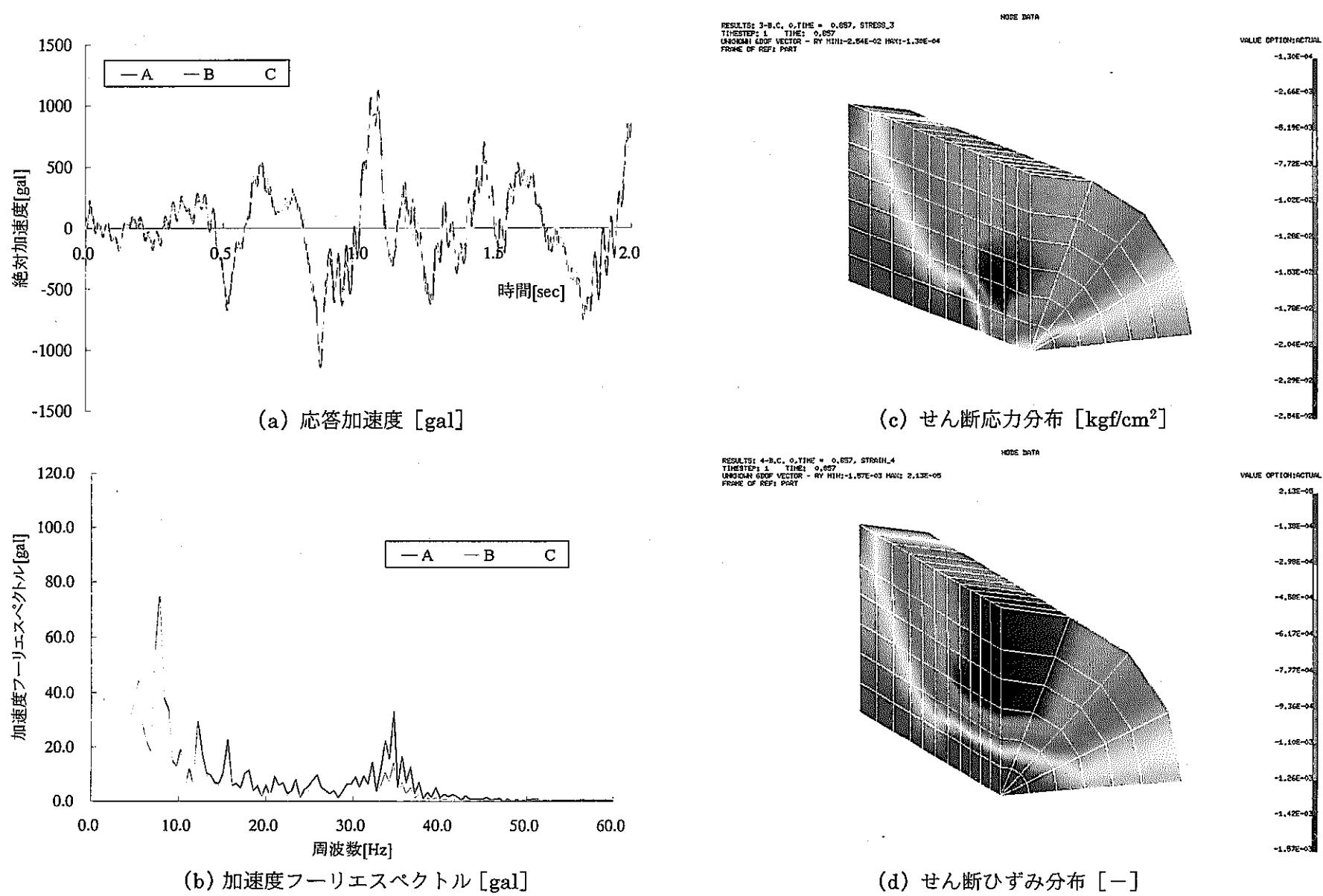


図4.4-5 解析結果（解析ケース HC-1；非線形解析，八戸波，減衰 2.5%）

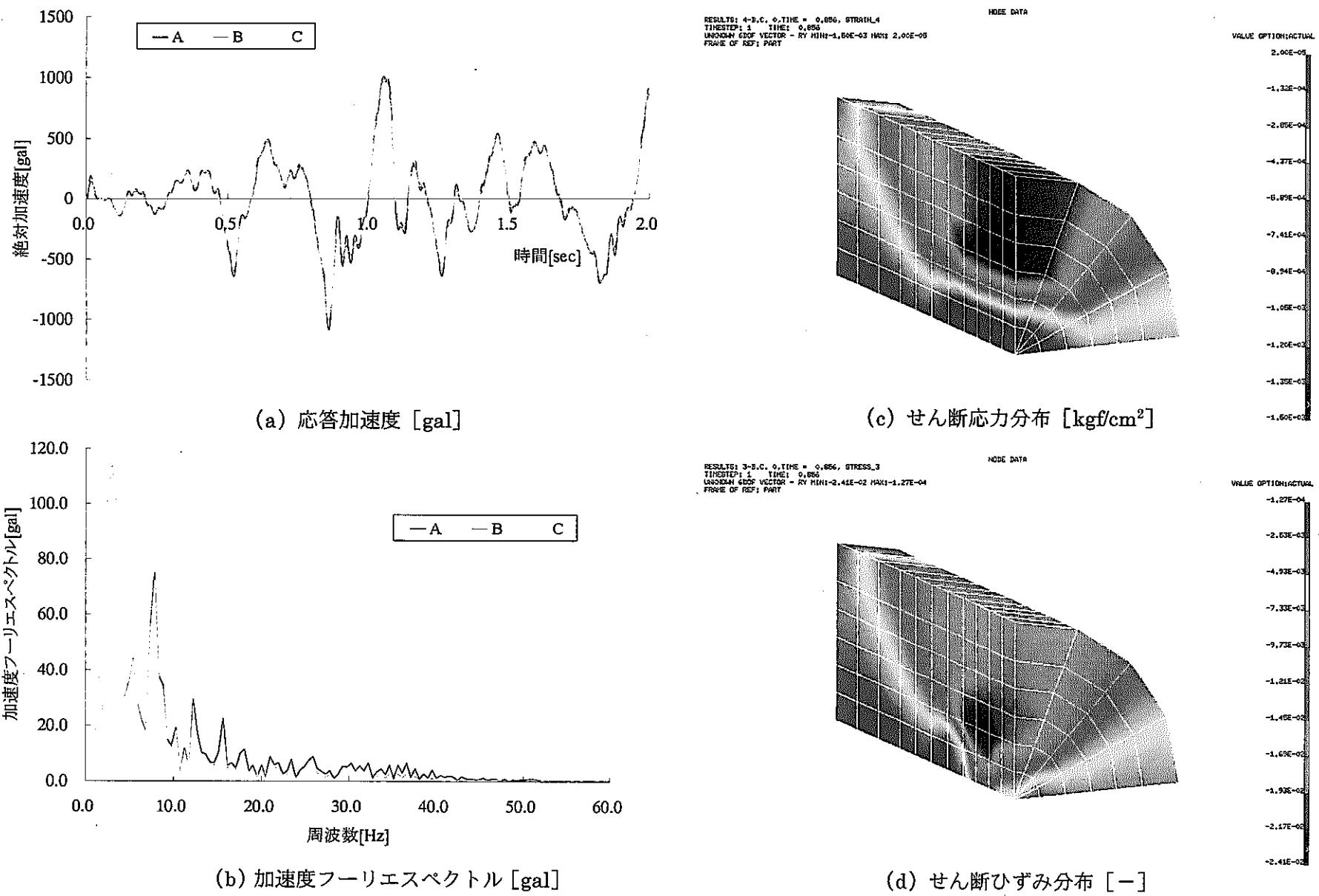
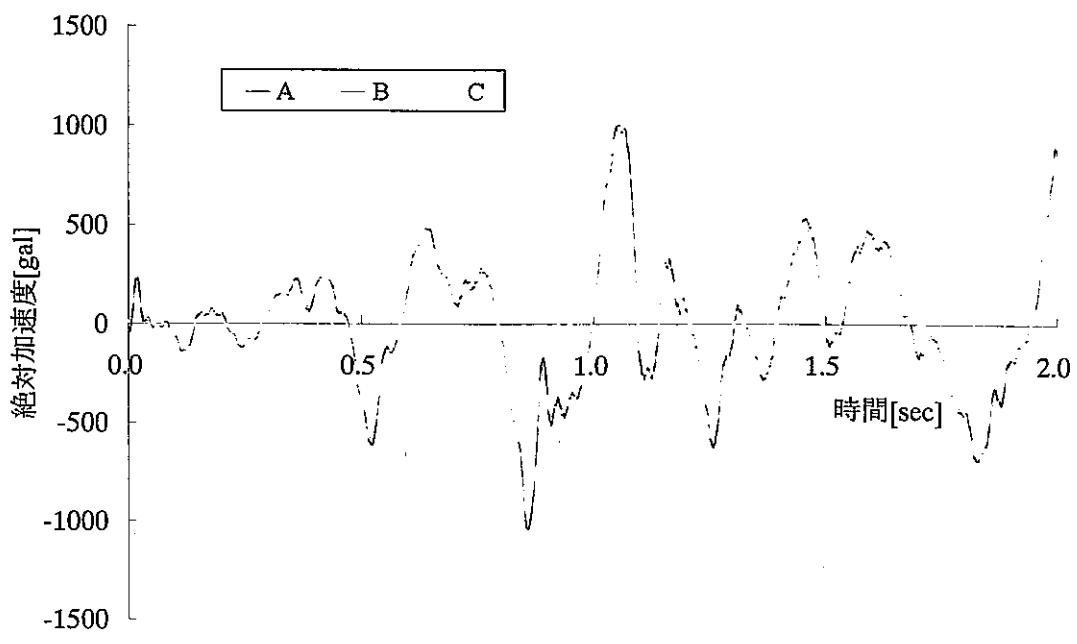
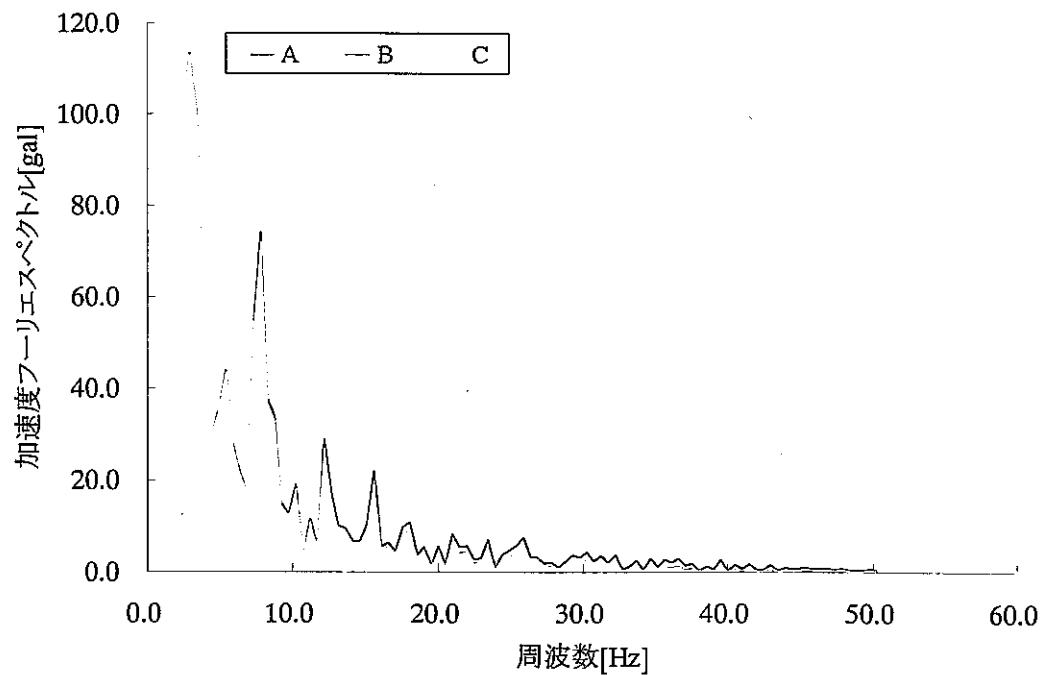


図4.4-6 解析結果（解析ケース HC-2-1；非線形解析，八戸波，減衰 20%）

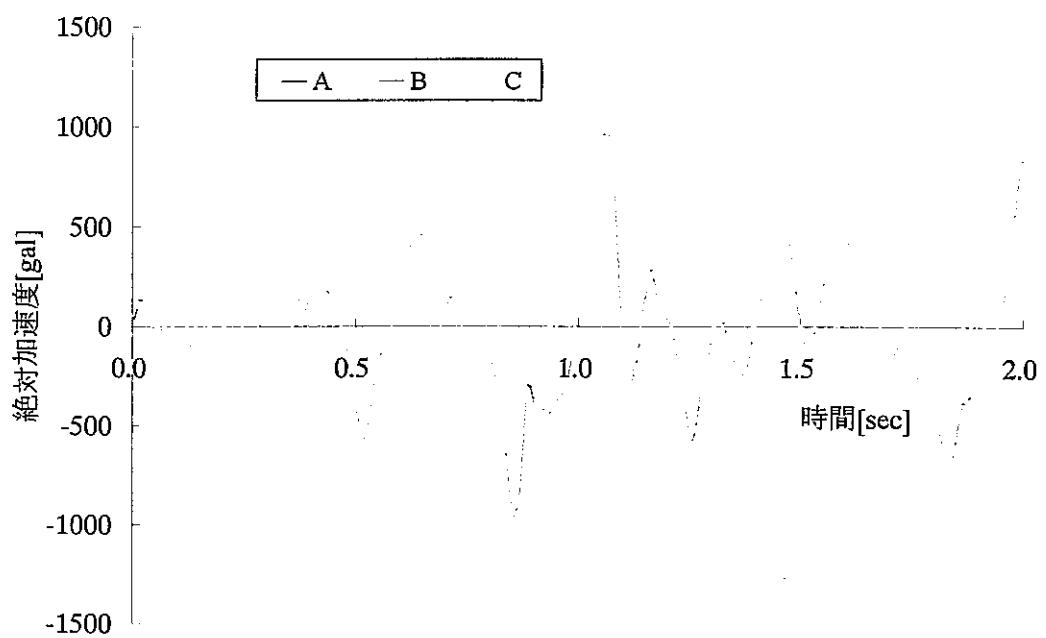


(a) 応答加速度 [gal]

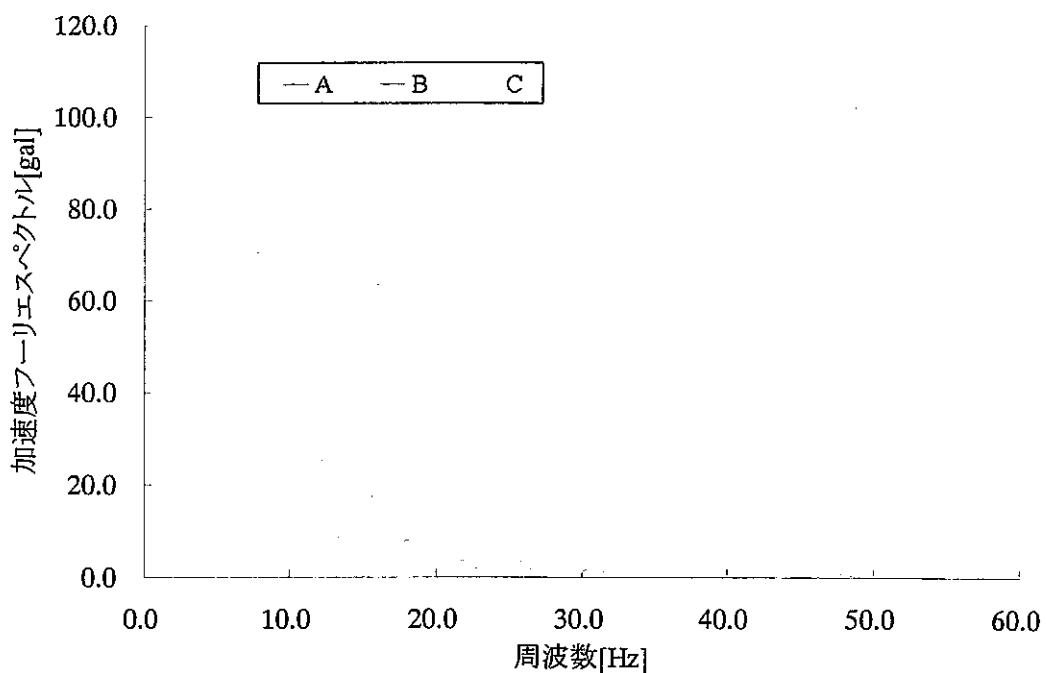


(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図4.4-7 解析結果
 (解析ケース HC-3; 等価線形解析, 八戸波, 減衰 2.5%)



(a) 応答加速度 [gal]



(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図 4. 4-8 解析結果
(解析ケース HC-4; 等価線形解析, 八戸波, 減衰 20%)

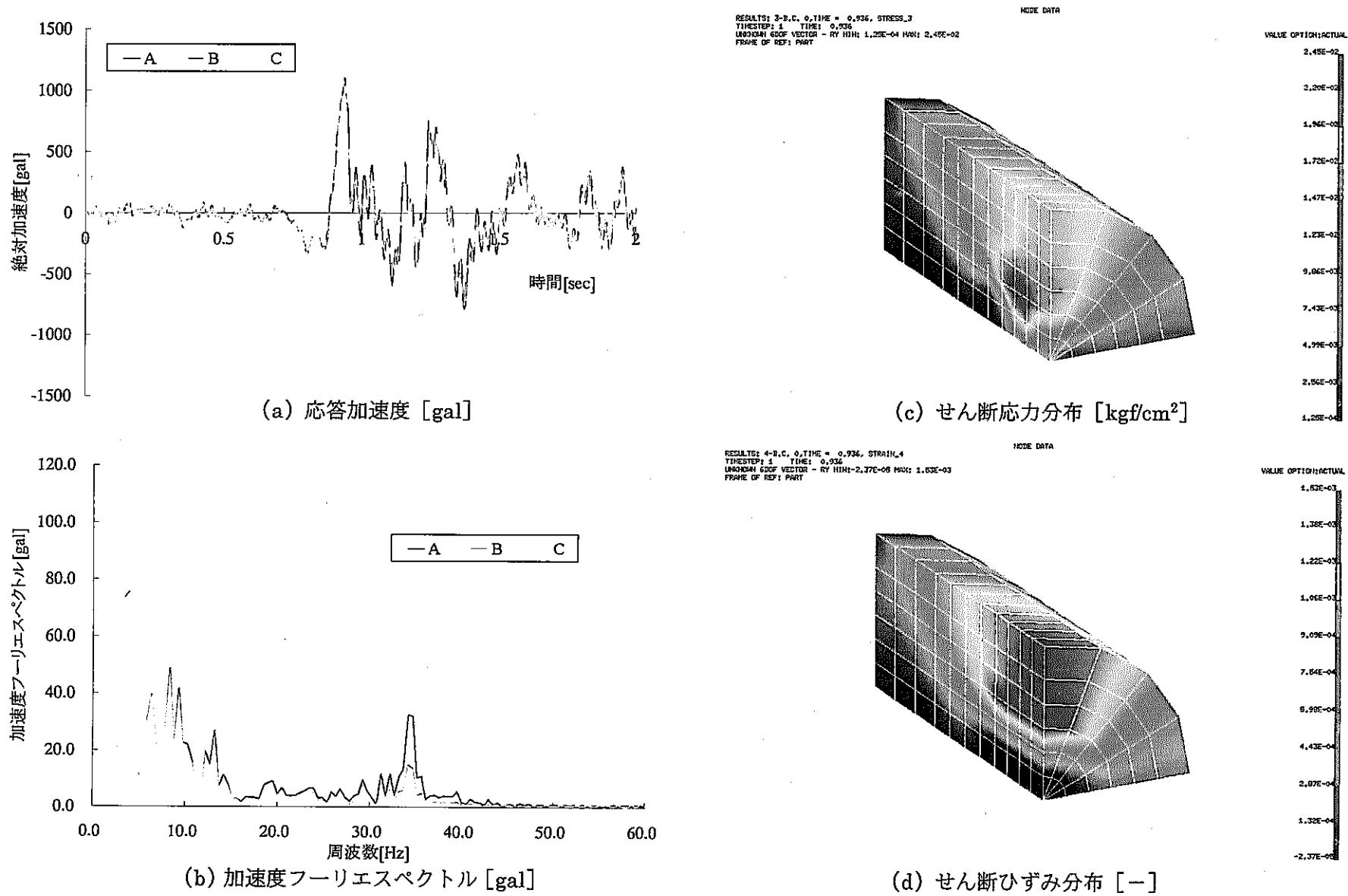


図 4.4-9 解析結果（解析ケース MI-1；非線形解析，宮城沖波，減衰 2.5%）

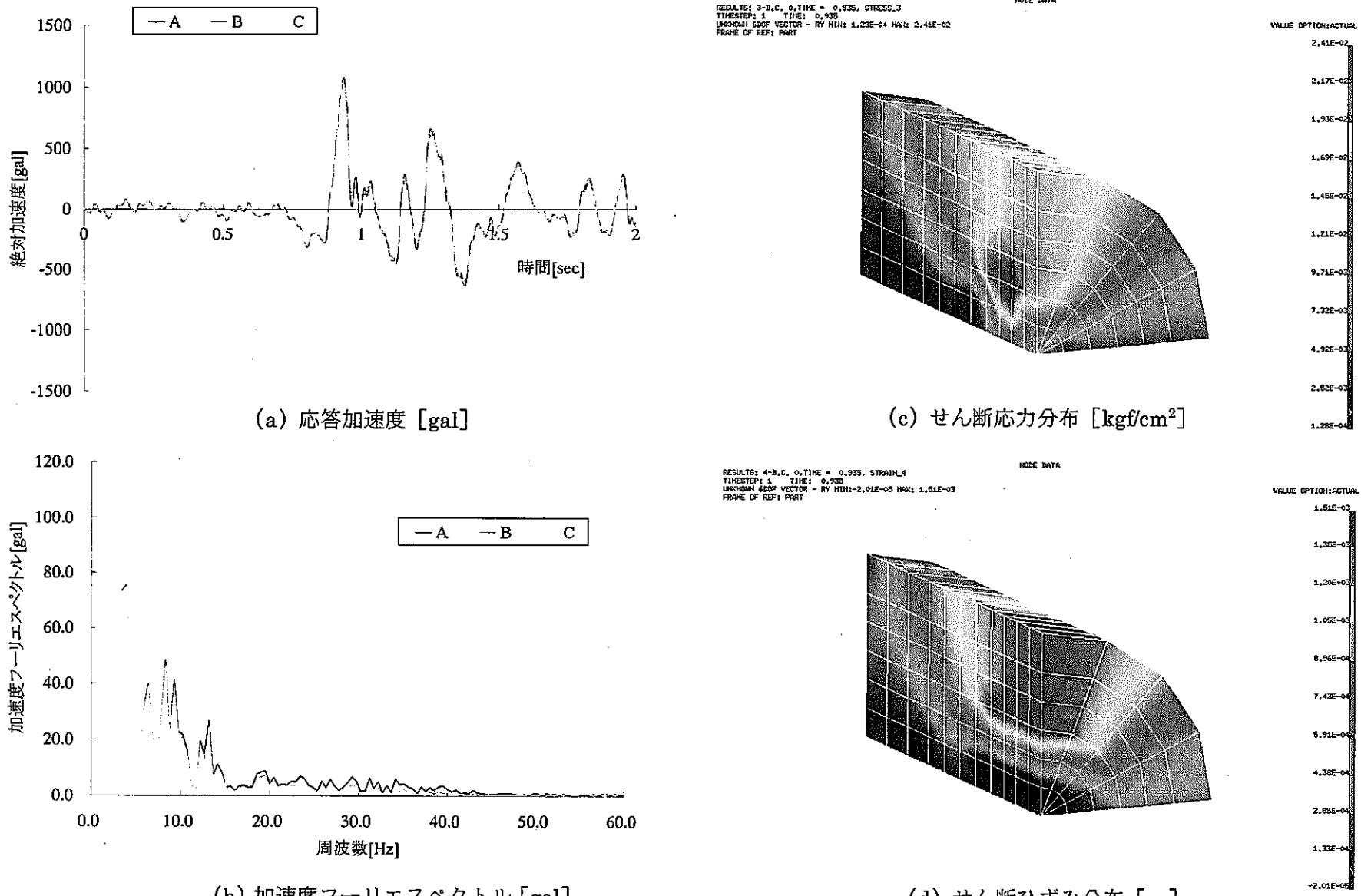
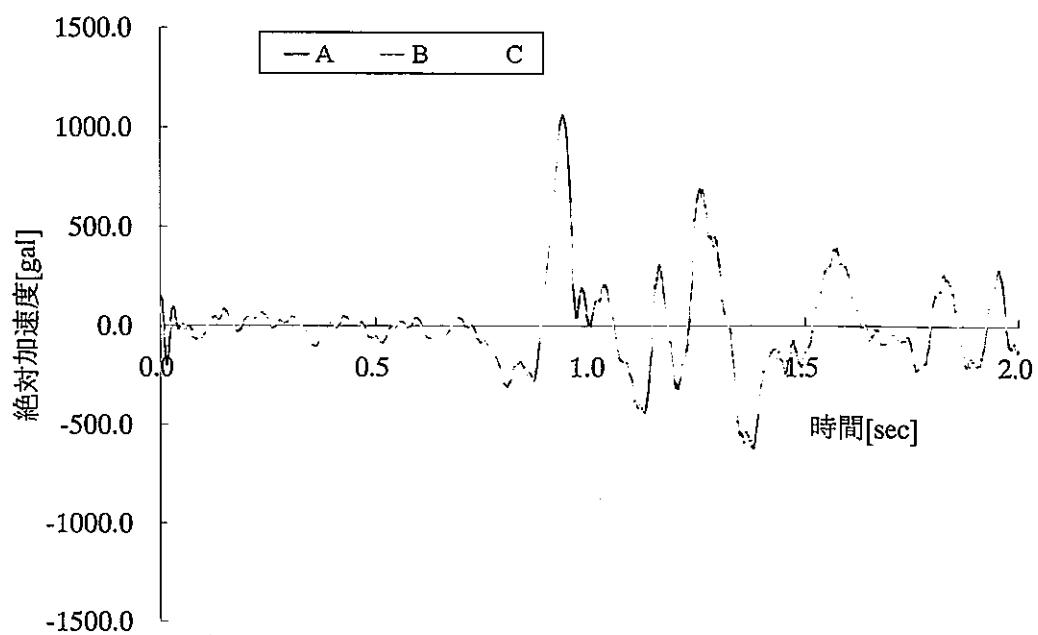
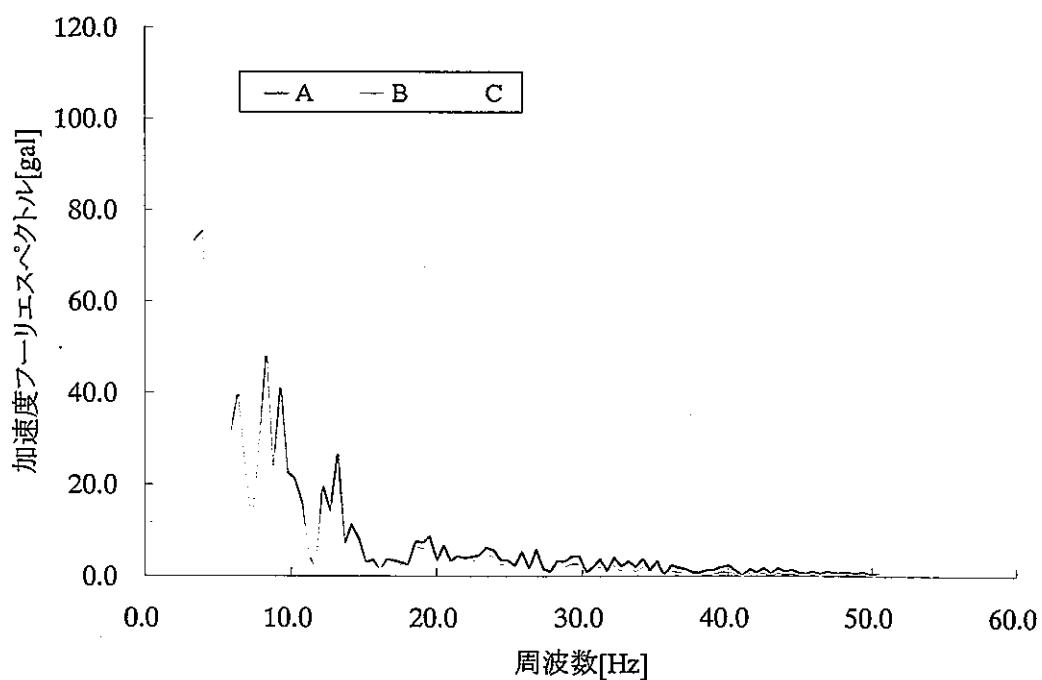


図4.4-10 解析結果（解析ケース MI-2；非線形解析、宮城沖波、減衰 20%）

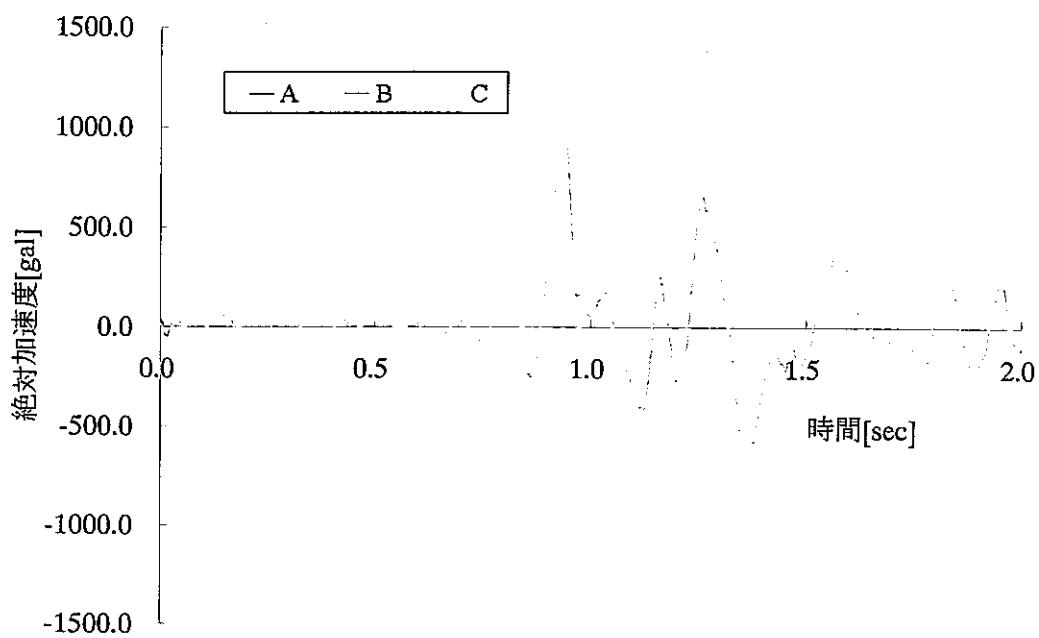


(a) 応答加速度 [gal]

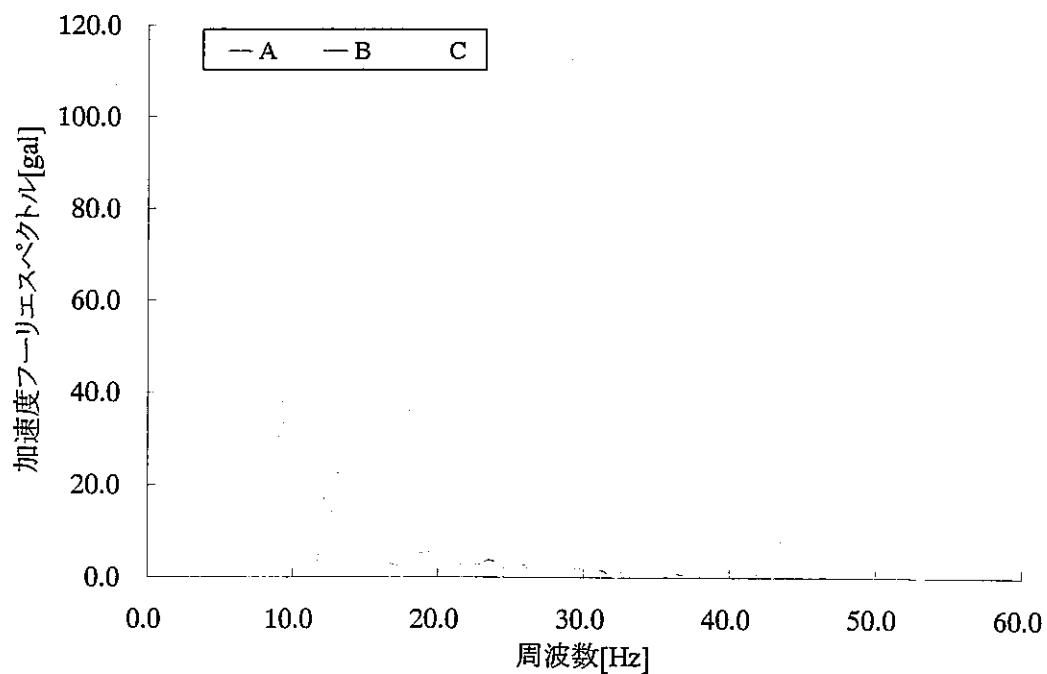


(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図 4. 4-11 解析結果
(解析ケース MI-3; 等価線形解析, 宮城沖波, 減衰 2.5%)



(a) 応答加速度 [gal]



(b) 加速度フーリエスペクトル [gal]

図4. 4-12 解析結果
(解析ケース MI-4; 等価線形解析, 宮城沖波, 減衰 20%)

5. 結言

これまで段階的に開発してきた人工バリアの地震応答解析モデル／コードを用い、処分場ニアフィールドの耐震性評価手法を検討するとともに、実際の処分環境を想定したニアフィールド地震応答解析を行い、耐震安定性の確保に関する見通しを得ることができた。今後、実施主体の設立等により処分事業が具体化する状況下では、処分場の実現に向けた中長期的な将来像を見据えた諸課題をクリアにしていくとともに、異分野の専門家や国民からの理解を得ることが重要になる。その意味で、これまでに実施してきた研究成果を踏まえつつ、今後検討すべきと思われる課題を以下に示す。

(1) 入力地震波の設定

本研究では、人工バリアシステムの耐震性評価を行うにあたり、過去の著名地震波を表層観測波として推定した処分深度の地中地震波を動的地震応答解析の入力地震動として利用してきた。実際には不確定な入力地震動に対して、特定の地震波を利用することに明確な論拠はないものの、系の応答性状を共通の地震波に対して比較するという見解から、多くの既往研究でも同様の方法がとられている（梅村ほか、1984）。また、地震観測データの少ない地下深部を対象としていることやサイトを特定していない等を勘案すると、現段階で既存の工学システムと同様のアプローチを探ることは困難である。今後サイトが設定され、人工バリアシステムを取り巻く地質環境条件が絞り込まれた段階では、サイト固有の情報を勘案した入力地震動の想定が必要になる。

(2) 評価基準の設定

現時点での耐震安定性に関する評価基準や指針は未整備であり、本研究ではとくに緩衝材のせん断破壊ならびに過剰間隙水の発生による液状化の有無に着目した解析・評価を行ってきた。人工バリアシステムの耐震性評価では、システムの力学的な健全性に加えて、核種封じ込めの観点から地震がバリア性能に影響を与えないことを示す必要がある。地震に誘発されるバリア性能への間接的な影響に関しては、例えば処分場に作用する外乱により場の透水性が変化し、結果的に核種移行特性へ影響を及ぼすなど、米国で一部検討がなされている（U.S.DOE、1998）。今後、耐震安定性に関与する重要な事象の抽出・整理を体系的に行い、それらに応じた評価基準、指針の整備が必要となる。その様な基準と照らし合わせることで、解析・評価の具体的手順やモデル化方法に関する合理化が議論できるようになる。

兵庫県南部地震（1995年）を契機に地震災害に対する国民の関心は高まっているものの、現段階では解析・評価の結果を必ずしも分かり易く提示できていない。また、解析の結果得られるデータ量も膨大であり、評価を行う上でのデータハンドリングには非常に多くの労力を要している。今後は、解析の結果を3次元アニメーション等により容易に可視

化することができ、解析・評価を行う側の理解促進はもとより、幅広い情報普及活動を支援できる環境整備が必要と考える。

6. 謝辞

本研究を実施にあたり、核燃料サイクル開発機構の関係各位に多大の御指導、ご教示を頂きました。ここに記して感謝致します。

7. 参考文献

- － 動力炉・核燃料開発事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書」－ PNC TN 1410 92-081－、1992
- － 動力炉・核燃料開発事業団「地層処分研究開発第2次取りまとめ第1ドラフト－PNC TN 1412 98-013－」1998
- － 川本、林 正夫「地盤工学における有限要素解析－地質力学と岩盤力学へのアプローチ－」第4版、培風館、1978
- － U.S.Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management Yucca Mountain Site Characterization Office "Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain" Volume 3: Total System Performance Assessment, December 1998.
- － 戸川隼人「有限要素法による振動解析」サイエンスライブラリ情報電算機=33、サイエンス社、1984（昭和59年）
- － O.C.Zienkiewicz, P.Bettess "Soil and other Saturated Media under Transient, Dynamic Condition; General Formulation and Validity of Various Simplifying Assumptions", Soil Mechanics, Transient and Cyclic load 1982
- － 原書；K.J.Bathe, E.L.Wilson "Numerical Methods in Finite Element Analysis" 1976、訳書；菊池文雄「有限要素法の数値計算」科学技術出版社 1979
- － 原書；D.R.J.Owen, E.Hinton "Finite Element in Plasticity Theory and Practice" 1980、訳書；山田嘉昭「塑性の有限要素法」科学技術出版社 1988
- － R.E.Goodman, R.L.Taylor, T.L.Brekke, "A Model for the Mechanics of Jointed Rock", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. May, 1968
- － Lysmer.J Kuhlemeyer.R.L, "Finite dynamic model for infinite media", Proc. ASCE, EM4 , pp859-877, 1969
- － Robert Pyke, "Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loadings", Journal of

the Geotechnical Engineering Division pp715-726, June 1979

— 宮崎浩徳「液状化時における有効応力解析の現状」富士総研技報 Vol.1,
No.2、pp272-284、1990

— Annaki,M. Lee,K.L, "Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics",
Proc.ASCE, Vol 103, GT6, pp549-564, 1977

— 梅村、大澤ほか「新しい耐震設計講座 耐震設計の基礎」オーム社、1984