

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

人工バリアシステムにおける地震の影響について

— ベントナイトの動的変形特性と人工バリアシステム
の振動挙動に関する基礎的検討 —

1994年9月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

転
載
い。

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

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

改

本

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

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

人工バリアシステムにおける地震の影響について
--- ベントナイトの動的変形特性と
人工バリアシステムの振動挙動に関する基礎的検討 ---

実施責任者：間野 正，石川 博久
報告者：志水 伸二，菅野 毅

要 旨



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

本報告書では、人工バリアシステムの耐震性評価に必要な緩衝材（ベントナイト）の動特性を動的三軸試験から求め、それを入力データとして有限要素法を用いた動的解析を行い、人工バリアシステムの振動挙動の基礎的傾向を考察することとした。

なお、試験はベントナイトの乾燥密度で0.7、1.0、1.3 g/cm³ の3種類で行い、それから得られた物性を用い9ケースの解析を行った。

検討の結果、主に以下のことが分かった。

- (1) 動的三軸試験より、乾燥密度が0.7 g/cm³ のグループでの最大せん断剛性は13~17 kgf/cm²と小さく、乾燥密度が1.0 g/cm³ のグループでの最大せん断剛性は45 kgf/cm²、乾燥密度が1.3 g/cm³ のグループでの最大せん断剛性は70~100 kgf/cm²となっており、乾燥密度の増加に伴うせん断剛性の増加は顕著であった。一方、減衰定数 h について見ると、各乾燥密度グループでの有意な差はなかった。
- (2) 試験結果を用いた動的解析より、オーバーパック周りで発生する最大相対変位が約1.2 cmであり、地震時にオーバーパックがほとんど変位しないことが推測された。また、発生するせん断応力は、乾燥密度0.7 g/cm³ の場合を除き、ベントナイトのせん断強度より十分小さく、破壊しないことが推測された。また、入力地震波の加速度に比較して、オーバーパック周りの加速度は若干増幅されると思われるが、全体的に人工バリア内でオーバーパックは安定に存在すると推測された。

目 次

1. はじめに	1
2. 緩衝材の動的変形特性の検討	2
2.1 試験材料	2
2.2 試験に用いた供試体	2
2.3 試験装置	4
2.4 試験内容	5
2.5 試験結果	5
2.6 まとめ	10
3. 人工バリアシステムの振動挙動に関する数値解析	11
3.1 解析断面	11
3.2 解析ケース及び物性	12
3.3 解析手法について	13
3.4 解析結果	14
3.5 まとめ	28
4. まとめと今後の課題	29
5. 謝辞	29
6. 参考文献	30
7. 添付資料	31

1.はじめに

ガラス固化体、オーバーバック及び緩衝材からなる人工バリアシステムは、長期にわたって高レベル放射性廃棄物と地下水の接触や核種の溶出移行の抑制等、様々な物理的・化学的バリア性能を要求される。これらバリア性能の前提条件としては、人工バリアシステムが健全な状態で存在することが必要である。したがって、わが国のように地震の多い地質環境条件下における地層処分では、人工バリアシステムの健全性を保つために、地震等に対する人工バリアシステムの耐震性評価が必要となる。

本報告書では、人工バリアシステムの耐震性評価に大きく関係すると思われるベントナイトの動特性の把握と地震時における人工バリアシステムの振動挙動の基礎的傾向を把握することにより、高レベル放射性廃棄物地層処分における地震時の人工バリアシステムの動特性に関する一傾向を考察することとした。

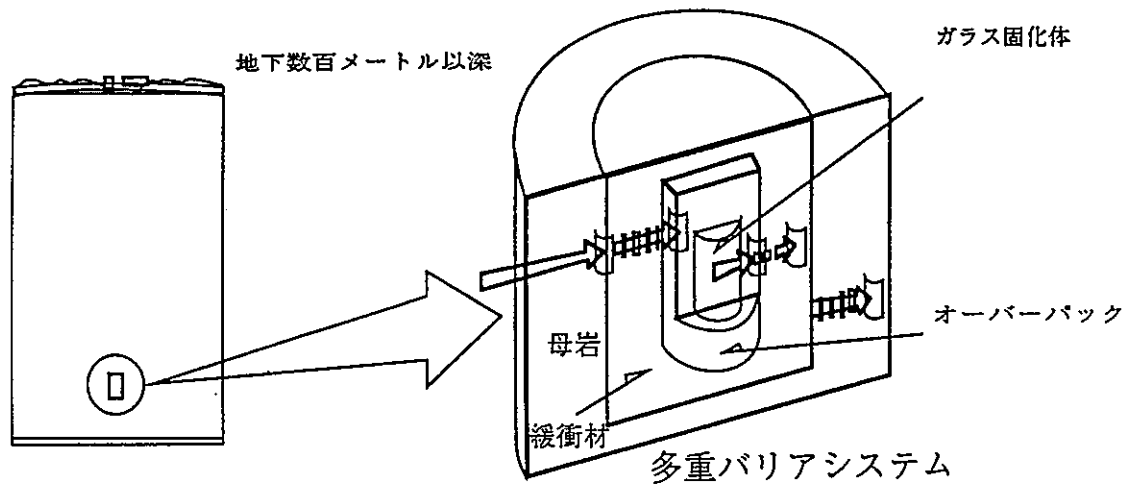


図-1.1 地層処分概念図

2.緩衝材の動的変形特性の検討

地盤の地震応答解析を行うには、土の発生歪に対する剛性の変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ の関係)及び減衰定数の変形特性 ($h \sim \gamma$ の関係)が必要となる。ここで、 G はせん断弾性係数、 G_0 は微小ひずみレベルでのせん断弾性係数、 h は減衰定数、 γ はせん断ひずみである。

そこで、動的三軸圧縮試験機を用い、土の動的変形特性を求めた。

2.1 試験材料

人工バリアシステムを構成する緩衝材の一候補として、モンモリロナイトを主成分とする粘土(ベントナイト)が考えられている。ここでは、国産のベントナイトの一種である山形県月布産の製品(クニゲルV1、クニミネ工業)を使用した。

2.2 試験に用いた供試体

本試験に用いた供試体は、乾燥密度で 0.7、1.0、1.3 g/cm^3 を目標として作成し、その後水を浸潤させ、飽和させたものである。

動的変形試験を行う前に、各乾燥密度につき4供試体を作成し浸潤させた後、三軸圧縮試験(UU試験)を行った。拘束圧は4供試体それぞれで0.2、2.0、4.0、7.0 kgf/cm^2 とした。

三軸圧縮試験の結果を表-2.1に示す。

表-2.1 三軸圧縮試験結果一覧表

	供試体 (0.7)				供試体 (1.0)				供試体 (1.3)			
浸潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.418	1.436	1.439	1.441	1.609	1.623	1.612	1.626	1.779	1.800	1.781	1.801
乾燥密度 (作成時) ρ_d (g/cm ³)	0.696	0.705	0.706	0.707	0.957	0.965	0.959	0.967	1.263	1.278	1.265	1.279
含水比 w (%)	103.8	103.8	103.8	103.8	68.1	68.1	68.1	68.1	40.8	40.8	40.8	40.8
側方向応力 σ_3 (kgf/cm ²)	0.20	2.00	4.00	7.00	0.20	2.00	4.00	7.00	0.20	2.00	4.00	7.00
圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kgf/cm ²)	0.260	0.347	0.392	0.632	0.502	0.567	0.639	0.620	1.145	1.414	1.136	1.286
粘着力 C (kgf/cm ²)	0.122				0.247				0.565			
せん断抵抗角 ϕ (度)	1.4				0.5				0.6			

注) 浸潤密度、含水比、乾燥密度は供試体作成時の値

2.3 試験装置

試験に用いた装置の概要を図-2.1に示す。本装置は空圧式サーボ機構を有した動的三軸圧縮試験機であり、空圧ピストンにより载荷を行う機構になっている。試験の際には、試験体を所定の拘束条件により、圧密した上で、空圧サーボを制御して動的な载荷を行う。また、側圧はコンプレッサーから供給された空圧により所定の圧力に調整し、さらに増幅器を介して水圧へと転換してセル内へ供給する方式により载荷される機構となっている。

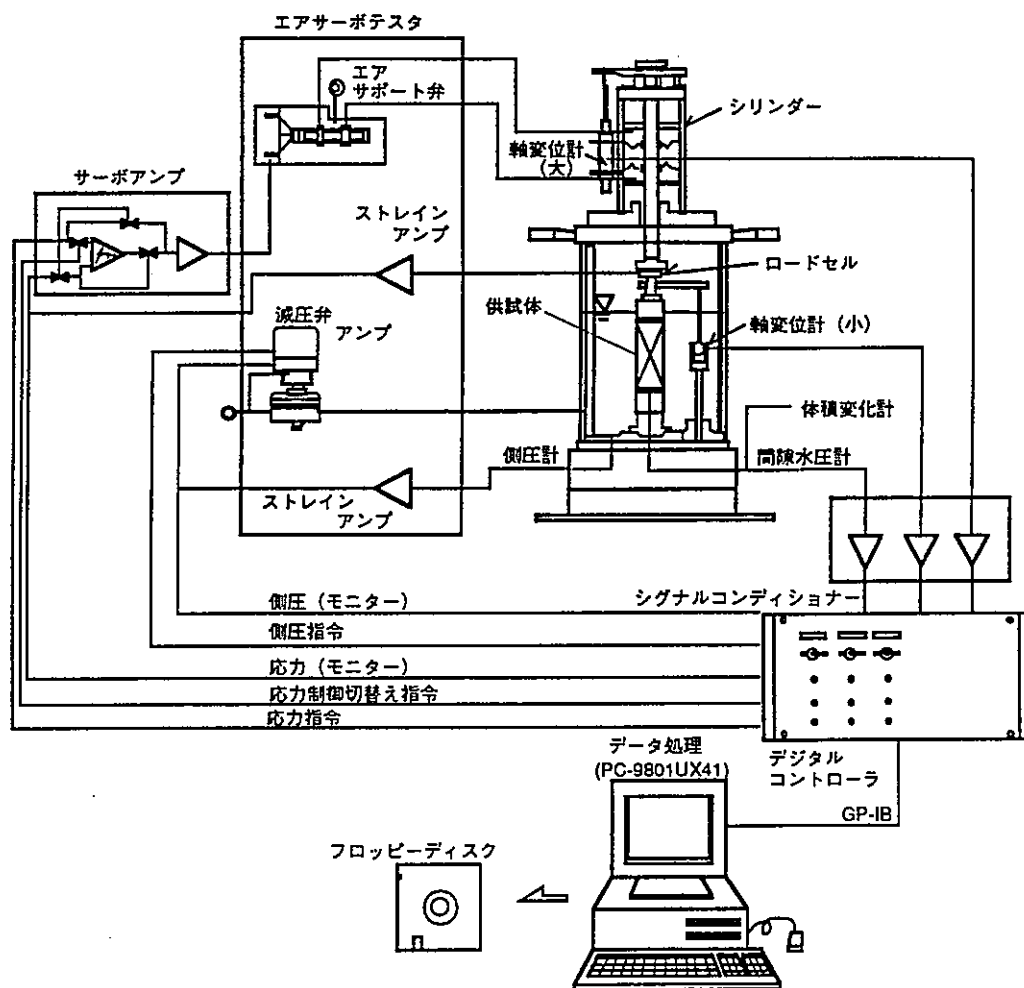


図-2.1 試験装置概要

2.4 試験内容

本試験は等方圧密非排水条件のもとで、軸差応力振幅を制御する応力制御により行った。なお、拘束圧 σ_3 は各乾燥密度グループごとに1.0、2.0、4.0 kgf/cm²とした。軸差応力振幅は1試験体に対してひずみの小さい方から大きい方へ10段階程度変化させるステージテスト方式により載荷し、各段階においては、周波数が0.5Hzの正弦波を10回程度加えた。

2.5 試験結果

試験結果を各乾燥密度グループごとにせん断剛性G、減衰定数hとせん断ひずみ γ の関係として図-2.2~2.4に示す。ここで各ケースの表示として、G、h及びG/G₀の後の数字は拘束圧を示すものとした。(例えばG-1.0は、拘束圧1.0 kgf/cm²時のGを表す。)

図から分かるように、乾燥密度が0.7 g/cm³のグループでの微小ひずみにおけるせん断剛性(以下「最大せん断剛性」という。)は13~17 kgf/cm²と小さく、乾燥密度が1.0 g/cm³のグループでの最大せん断剛性は45 kgf/cm²、乾燥密度が1.3 g/cm³のグループでの最大せん断剛性は70~100 kgf/cm²となっており、乾燥密度の増加に伴うせん断剛性の増加は顕著である。

図-2.5~2.7に正規化せん断剛性G/G₀、減衰定数hとせん断ひずみ γ の関係を示す。

図より正規化せん断剛性G/G₀が0.5となるせん断ひずみは、乾燥密度が0.7 g/cm³のグループで $\gamma = 8 \times 10^{-3}$ 、乾燥密度が1.0 g/cm³のグループで $\gamma = 4 \times 10^{-3}$ 、乾燥密度が1.3 g/cm³のグループで $\gamma = 2 \times 10^{-3}$ となっている。

一方、減衰定数hについて見ると、各乾燥密度グループでの有意な差はない。

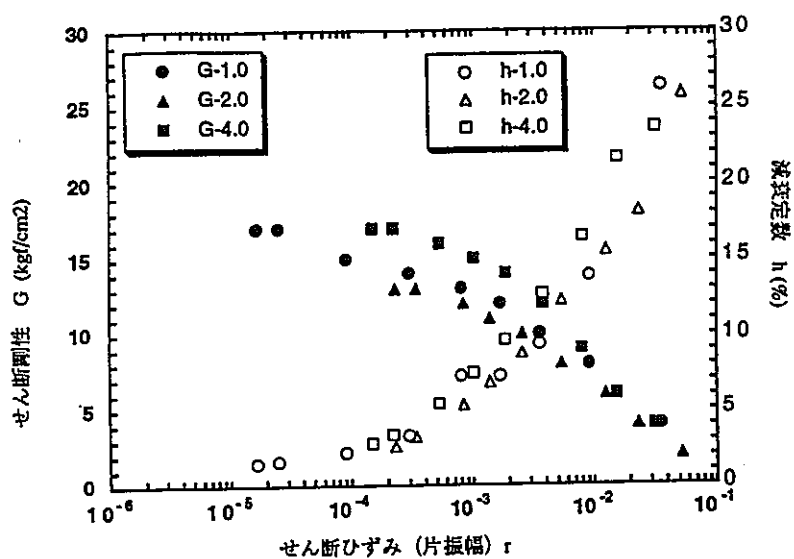


図-2.2 G,hと γ の関係 ($\rho d=0.7 \text{ g/cm}^3$)

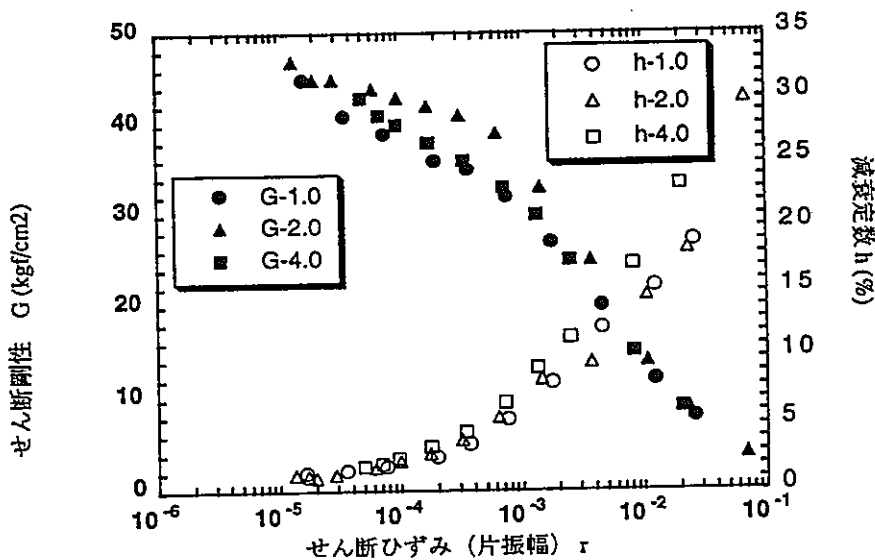


図-2.3 G,hと γ の関係 ($\rho d=1.0 \text{ g/cm}^3$)

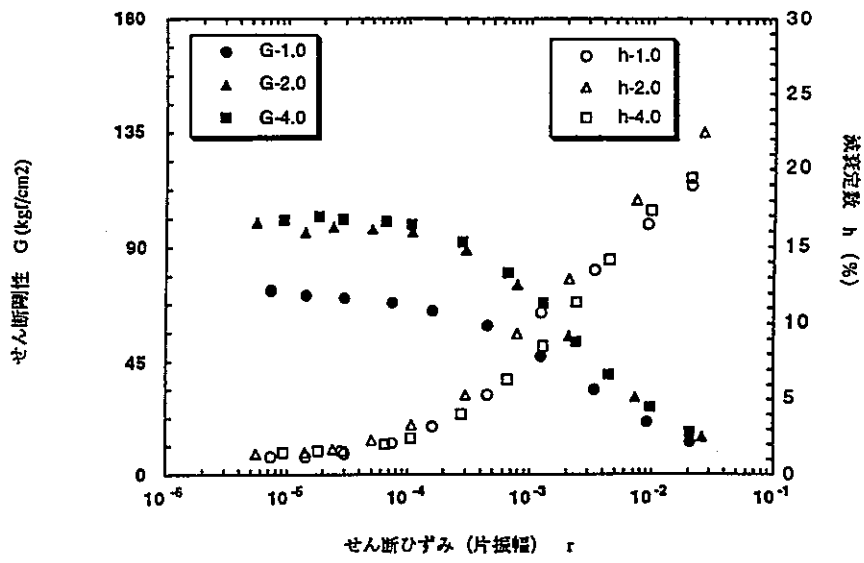


図-2.4 G,hと γ の関係 ($\rho d=1.3 \text{ g/cm}^3$)

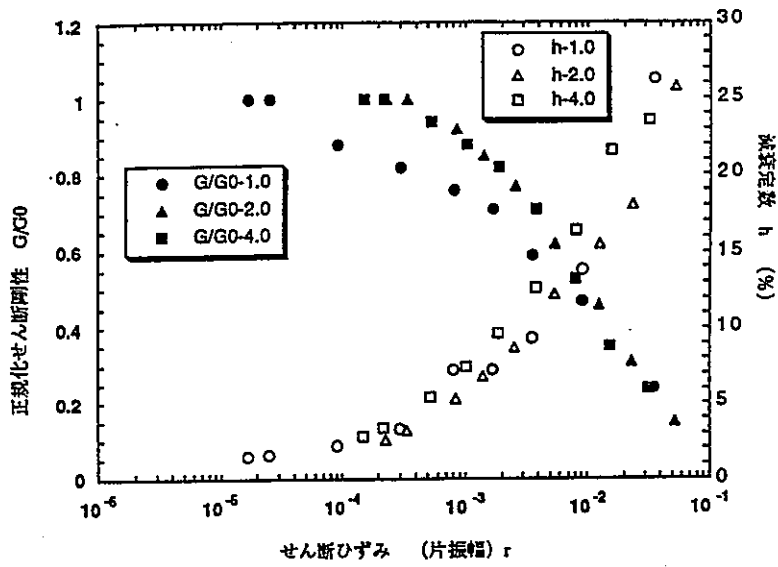


図-2.5 G/G_0 , h と γ の関係 ($\rho d=0.7 \text{ g/cm}^3$)

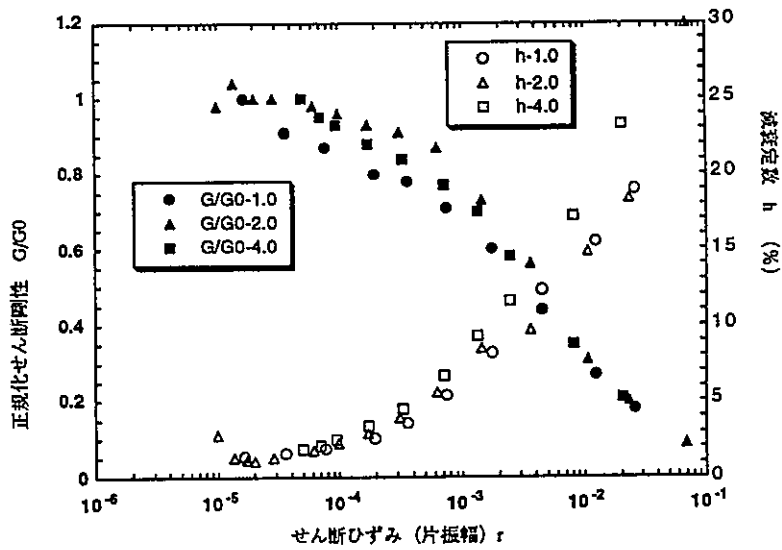


図-2.6 G/G_0 , h と γ の関係 ($\rho d=1.0 \text{ g/cm}^3$)

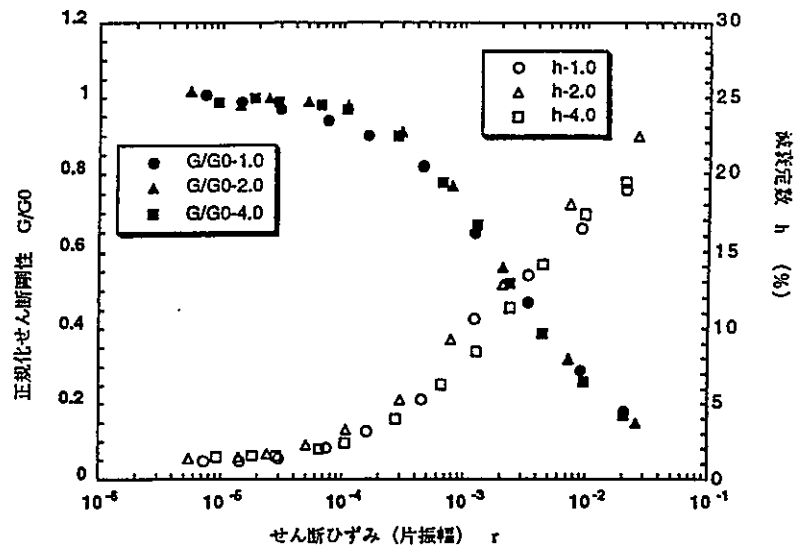


図-2.7 G/G_0 , h と γ の関係 ($\rho d=1.3 \text{ g/cm}^3$)

2.6 まとめ

土質材料は粒状体としての性質、土粒子と水・空気との混合体としての性質などをもち合わせており、その動的性質もひずみの大きさや載荷震動数などにより変化する。とくにひずみレベルの影響は顕著であり、 10^{-4} 以下では波動伝播に代表される弾性的性質、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ では変形係数や減衰定数の変化、過剰間隙水圧や体積の変化を伴う弾塑性的性質、 10^{-2} 以上ではすべりや沈下などの破壊現象を示す。

表-2.2に示すように、これら幅広いひずみレベルの影響を把握するための試験としては、動的三軸試験法が適切であり、ここでは本試験法に基づいて試験を行った。その結果、ベントナイトのせん断剛性、減衰定数のひずみ依存性も顕著であることが分かった。また、各乾燥密度によるせん断剛性の変化が顕著であることが分かった。一方、減衰定数 h について見ると、各乾燥密度での有意な差はなかった。

表-2.2 各種室内試験のひずみや振動数のレベルと現象の対応
(文献2)より引用して加筆修正)

ひずみの大きさ	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
現象	波動・振動		亀裂、不等沈下		すべり、締固め	
力学的特性	弾性		弾塑性		破壊	
超音波パルス法	*****					
共振法	*****					
動的三軸試験法	*****					

3. 人工バリアシステムの振動挙動に関する数値解析

本報告書の第2章において、緩衝材の一候補である浸潤したベントナイトの動的変形特性（動的せん断剛性と減衰定数の微小ひずみから大ひずみにわたる変化）を調べた。地震時における人工バリアシステムの振動応答を推定し、その変形挙動を推測するため、試験より得られた値に基づいて、動的解析によく用いられるエルセントロNS波による解析を行った。解析には、汎用の総合地盤解析コードであるSIGNASを用いた。

3.1 解析断面

高レベル廃棄物の定置方式には、様々な方式が考えられているが、その中の有力候補として、処分孔縦置方式と処分坑道横置方式が挙げられている。ここでの検討には、廃棄物周りの緩衝材が厚くオーバーパックの振動挙動の影響が大きいと思われる処分坑道横置方式の1断面を取り出して2次元で解析した。解析断面を図-3.1に示す。ここで、境界条件は周囲固定とした。

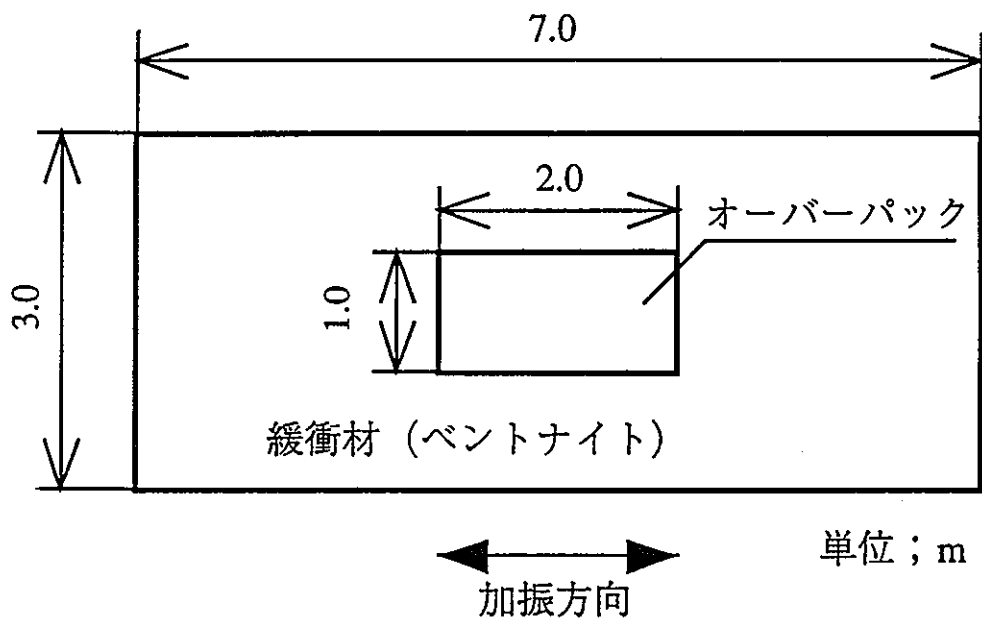


図-3.1 解析断面図

3.2 解析ケース及び物性

解析は、表-3.1に示す9ケースについて行った。また、解析には表-3.1及び表-3.2の物性を用いた。

正規化せん断剛性、減衰定数及びひずみの関係は2章で得られた各拘束圧（1.0、2.0、4.0 kgf/cm²）における各乾燥密度（0.7、1.0、1.3 g/cm³）の値を用いた。

表-3.1 解析用ケース及び物性（ベントナイト）

ケース名	σ_3 (kgf/cm ²)	最大せん断剛性 G0 (kgf/cm ²)	浸潤密度 (g/cm ³)	ポアソン比
D0.7G01.0	1.0	17	1.4	0.4
D1.0G01.0		45	1.6	
D1.3G01.0		72	1.8	
D0.7G02.0	2.0	13	1.4	
D1.0G02.0		45	1.6	
D1.3G02.0		98	1.8	
D0.7G04.0	4.0	17	1.4	
D1.0G04.0		43	1.6	
D1.3G04.0		102	1.8	

注) ケース名としてDのすぐ後の数字は乾燥密度を表し、G0のすぐ後の数字は拘束圧を表すものとする。

表-3.2 解析用物性（オーバーパック）

弾性係数 E (kgf/cm ²)	単位体積重量 (g/cm ³)	ポアソン比
2.1x 10 ⁶	7.24	0.3

注) オーバーパックの単位体積重量は、ガラス固化体を含めた重さをオーバーパックの外周の体積で割った値を用いた。

3.3 解析手法について

近年の土質材料の動的物性の研究の発達により、動的物性に与える種々の影響因子のなかで、とくに動的ひずみ振幅レベルの与える影響が耐震問題において重要であることが明らかにされ、ひずみレベルの影響を近似的に取り込んだ解析法が1970年ごろから行われるようになってきた。これは一般に等価線形解析とよばれ、地盤の各部に生じるひずみレベルに対応して設定した物性値を用いて線形解析を行う方法で、通常数回にわたり線形解析を繰り返して発生するひずみと用いた物性値の関係に矛盾のなくなった時点の解を求める。

解析対象としたのは、人工バリアシステム（オーバーバック、ベントナイト）であり、基盤から加速度 \ddot{z} が入力した場合の運動方程式は、以下のようなになる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -\{m\}\ddot{z}$$

ここに $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰定数、バネ定数に関するマトリクスで、 $\{\ddot{U}\}$ 、 $\{\dot{U}\}$ 、 $\{U\}$ は質点系の加速度、速度、変位ベクトル、 $\{m\}$ は入力加速度の方向と一致した質量の成分をならべ、それ以外の成分はゼロとしたベクトルである。数値解法は等価線形化法で解析を行うために複素応答法を用いた。

3.4 解析結果

動的三軸試験で得られた各乾燥密度におけるせん断剛性と減衰定数およびひずみの関係を用いて等価線形解析を行った結果を表-3.3に示す。

ここで、オーバーパック周りの端点をA点、ベントナイト中の1点をB点とした。

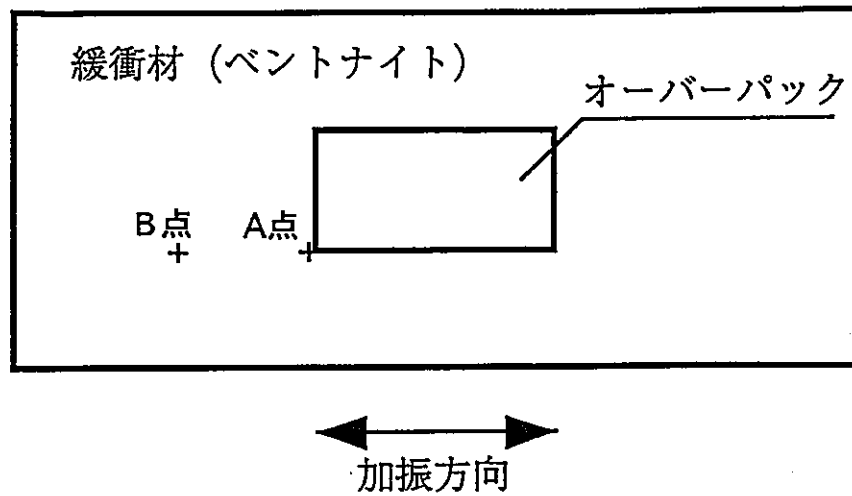


図-3.2 解析断面図

表-3.3 解析結果

ケース名	最大変位 (cm)	最大せん断応力 (kgf/cm ²)	最大加速度 (cm/s ²)	
			A点	入射波
D0.7G01.0	1.14	0.133	-711	350
D1.0G01.0	0.376	0.107	-588	350
D1.3G01.0	0.209	0.118	-586	350
D0.7G02.0	1.20	0.117	-608	350
D1.0G02.0	0.325	0.119	-618	350
D1.3G02.0	0.0968	0.087	390	350
D0.7G04.0	0.819	0.114	-654	350
D1.0G04.0	0.330	0.102	-559	350
D1.3G04.0	0.0934	0.085	393	350

(1) 加速度応答について

図-3.3に入力地震波であるエルセントロNS波の加速度応答時刻歴を図-3.4~3.5に解析より得られたA点(オーバーパック端点)、B点(ベントナイト中)の加速度応答時刻歴の一例(解析ケースD0.7G01.0)を示す。これより、入力地震波の加速度に比較し、オーバーパック周りの加速度がとくに増幅されることが分かった。入力地震波に対するオーバーパック周りの加速度応答は、最大で2倍程度であった。

図-3.6~3.14にA点(オーバーパック端点)における各ケースの加速度応答時刻歴(実線)と入力地震波であるエルセントロNS波の加速度応答時刻歴(点線)との比較を示す。乾燥密度 1.3 g/cm^3 の最大加速度は、 0.7 g/cm^3 のそれより小さく、密度の増加、すなわち、せん断剛性の増加により、最大加速度は小さくなり入力地震波の加速度に近づくことが分かった。

乾燥密度 1.3 g/cm^3 でせん断剛性が大きい場合のオーバーパック周りの加速度応答時刻歴の形状は、入力地震波とほぼ同形状を示し、緩衝材中でのオーバーパックの振動は、増幅されず、周囲の岩盤と同じ振動挙動を示すことが推測された。

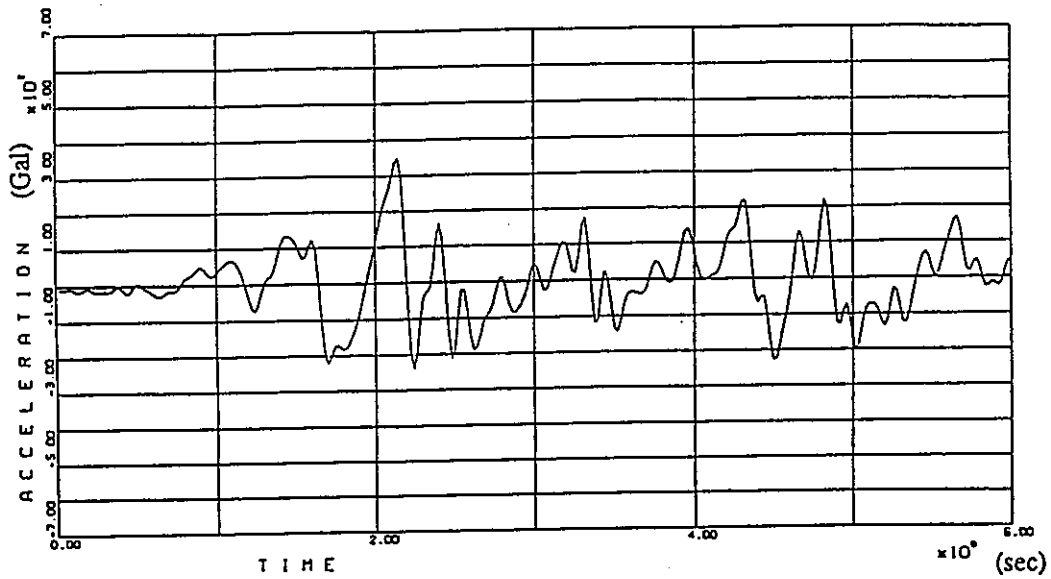


図-3.3 地震入力波（エルセントロNS波）の加速度応答時刻歴

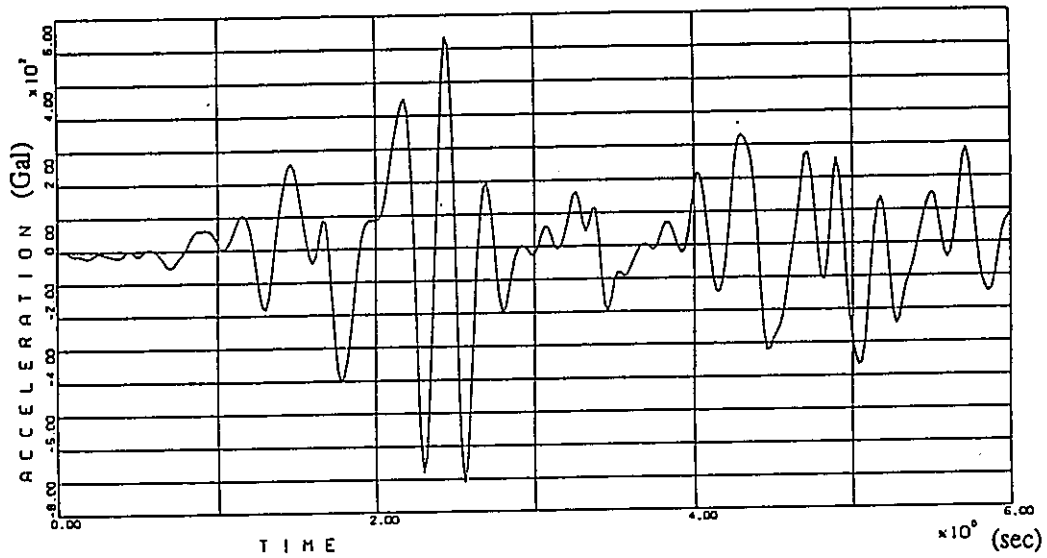


図-3.4 A点（オーバーパック端点）の加速度応答時刻歴

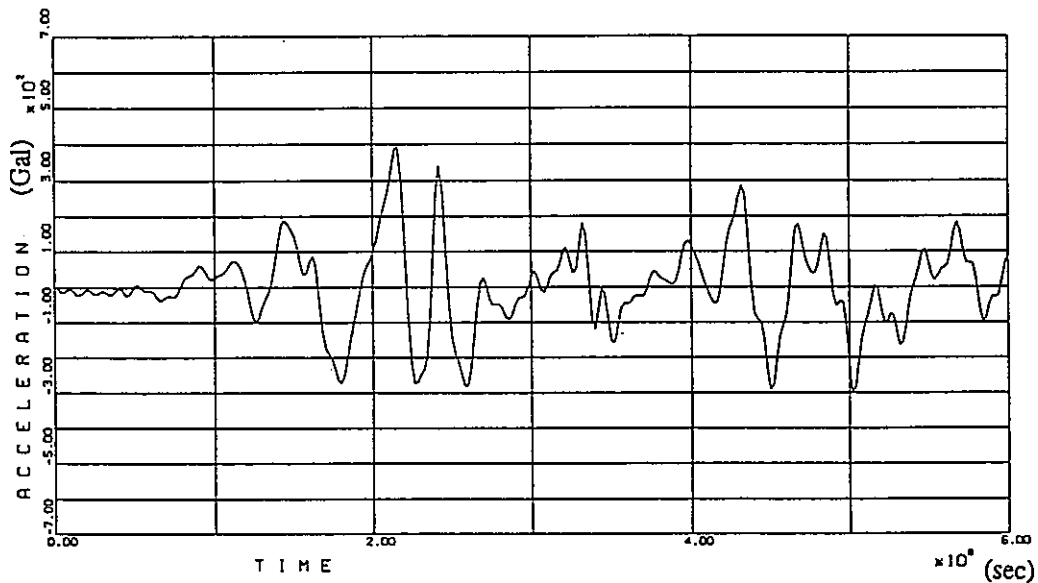


図-3.5 B点（ベントナイト中）の加速度応答時刻歴

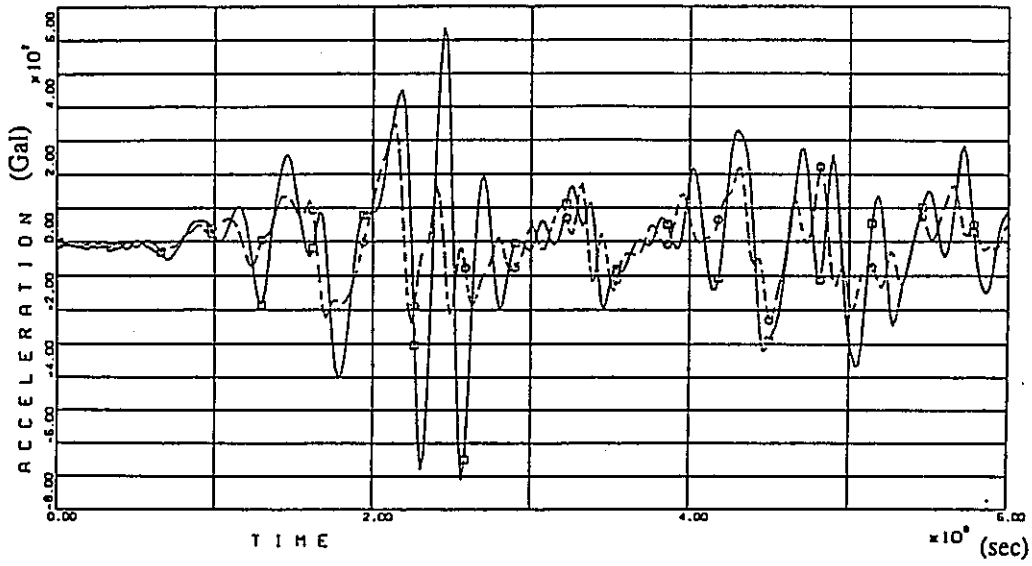


图-3.6 加速度応答時刻歴 (D0.7G01.0)

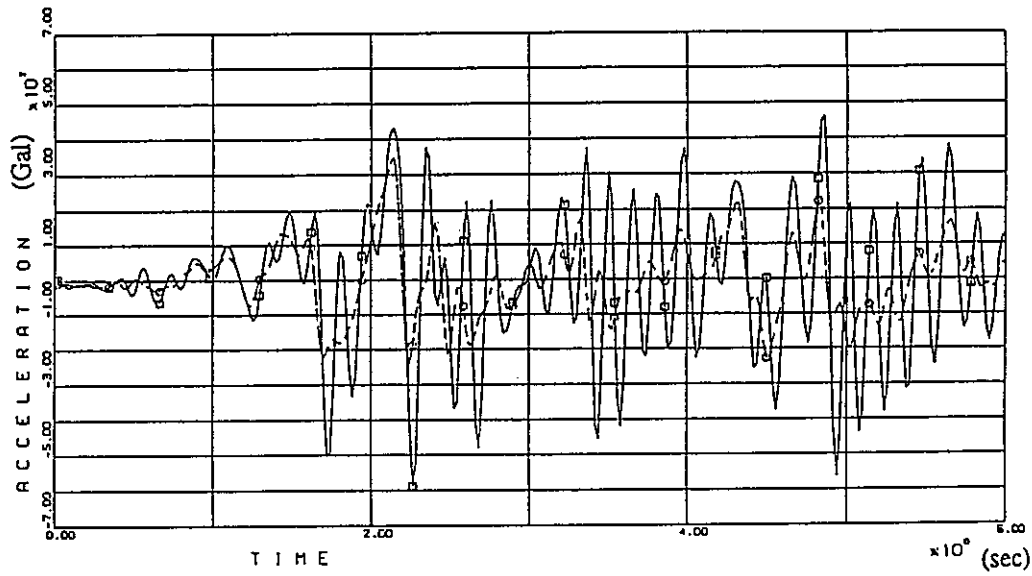


图-3.7 加速度応答時刻歴 (D1.0G01.0)

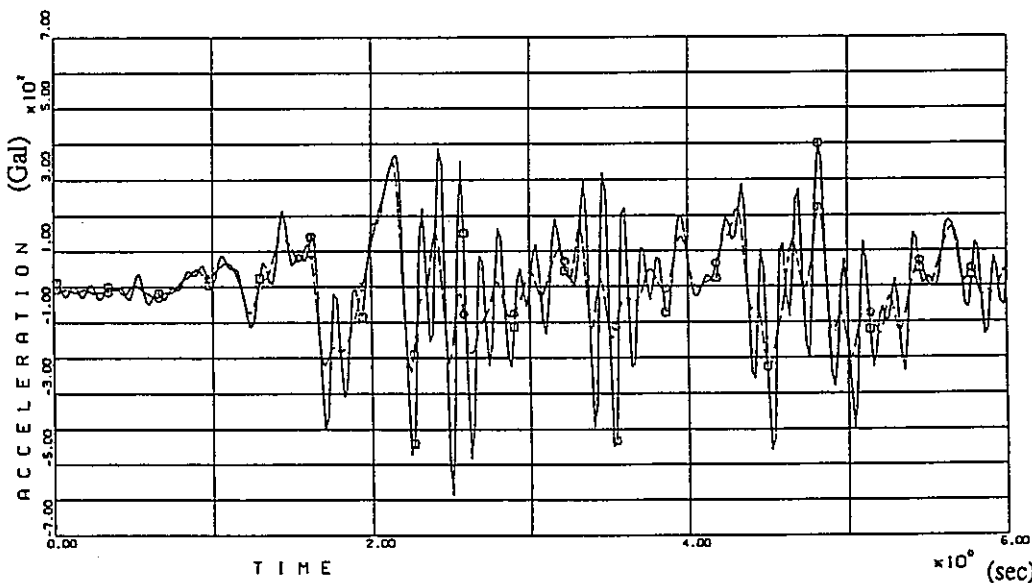


图-3.8 加速度応答時刻歴 (D1.3G01.0)

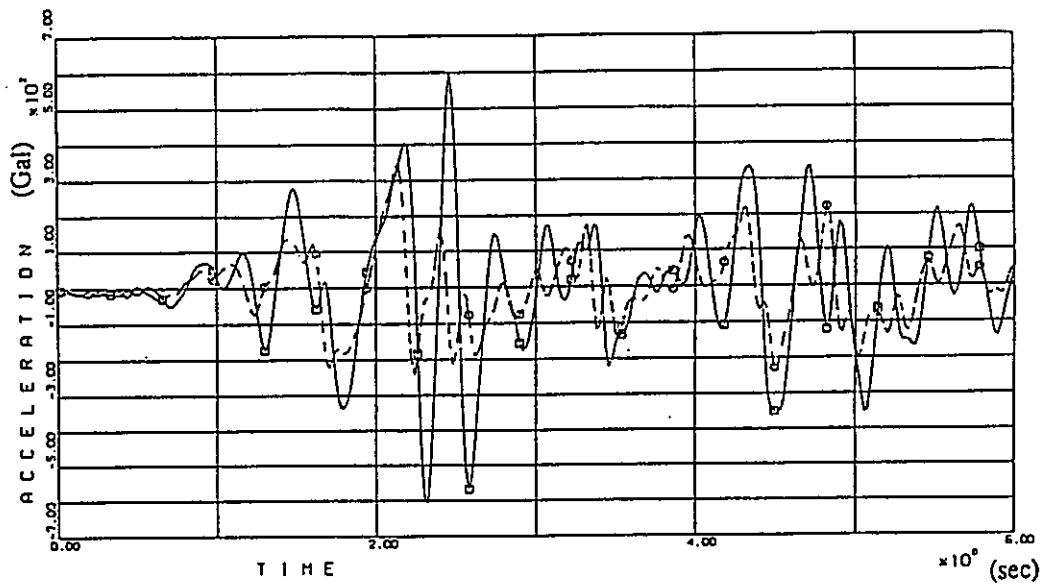


图-3.9 加速度応答時刻歴 (D0.7G02.0)

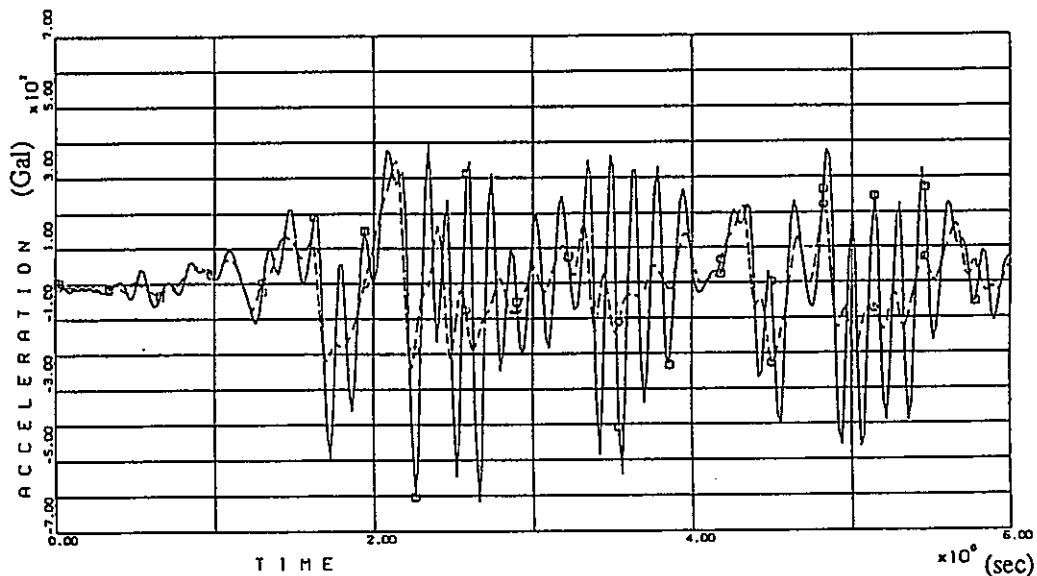


图-3.10 加速度応答時刻歴 (D1.0G02.0)

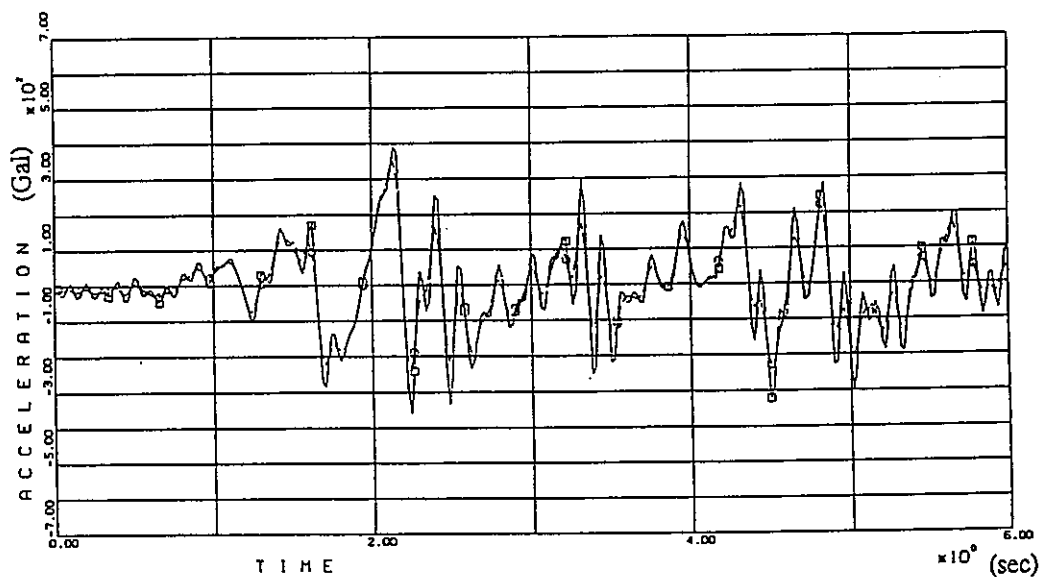


图-3.11 加速度応答時刻歴 (D1.3G02.0)

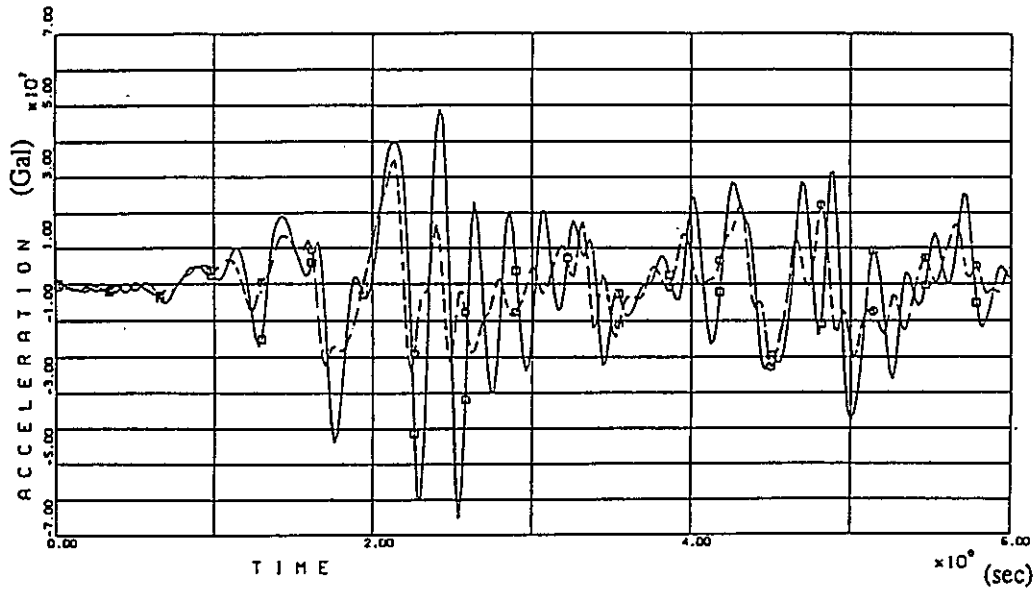


图-3.12 加速度応答時刻歴 (D0.7G04.0)

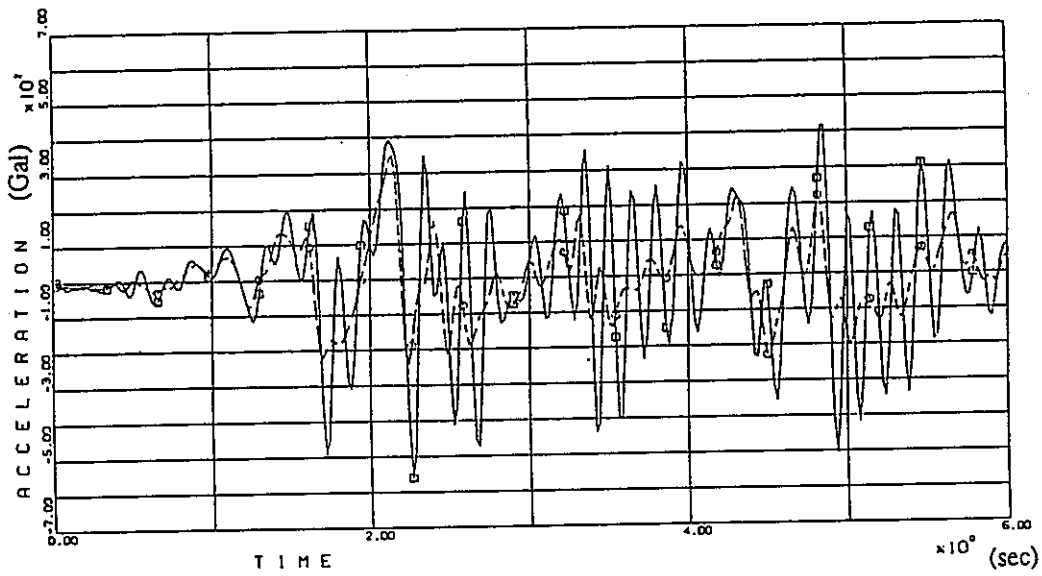


图-3.13 加速度応答時刻歴 (D1.0G04.0)

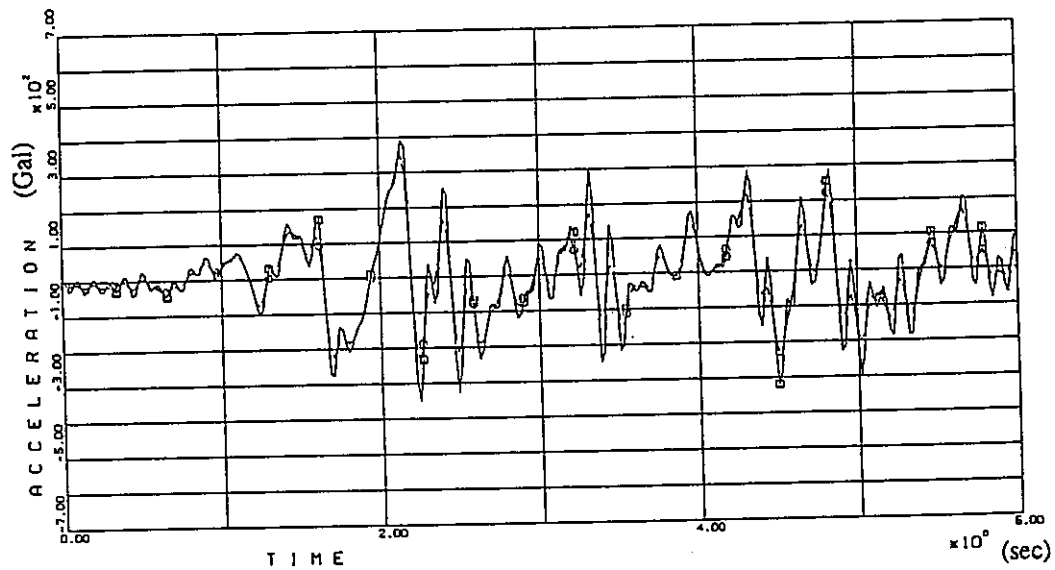


图-3.14 加速度応答時刻歴 (D1.3G04.0)

(2) 地震加振方向の変位について

本解析により、地震時の最大相対変位はオーバーパック周り特に振動方向の位置で発生することが推測された。変位の最大値は、乾燥密度が一番小さく、せん断剛性が最小の時（解析ケースD0.7G02.0）に生じ、その値は、約1.2cmであった。変位の最小値は、密度が高く、せん断剛性が最大の時（解析ケースD1.3G04.0）に生じ、その値は、約0.1cmであった。

これより、密度の増加、すなわち、せん断剛性の増加により、変位が小さくなることが分かった。

図-3.15～3.23に解析より得られた変位図を示す。

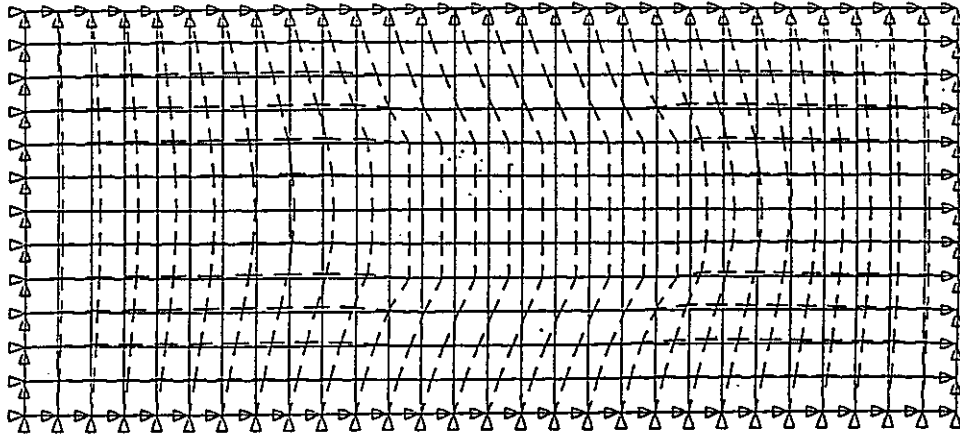


図-3.15 変位図 (D0.7G1.0の場合：最大変位1.1cm)

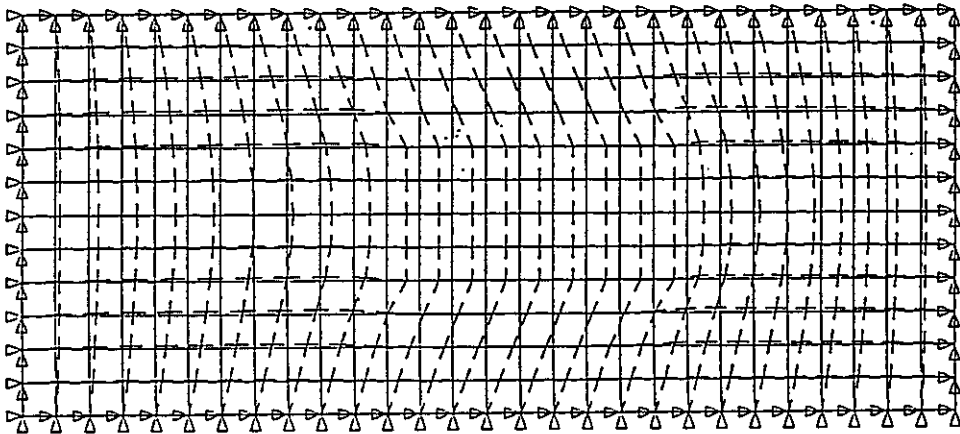


図-3.16 変位図 (D1.0G1.0の場合：最大変位0.4cm)

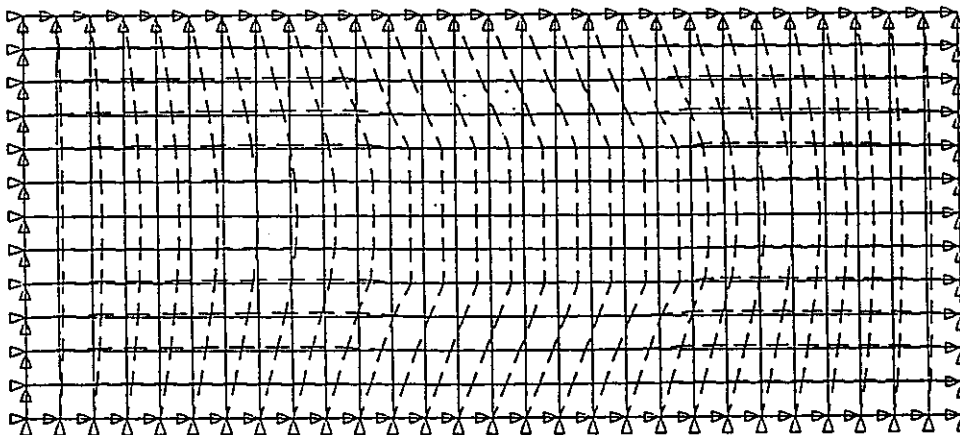


図-3.17 変位図 (D1.3G1.0の場合：最大変位0.2cm)

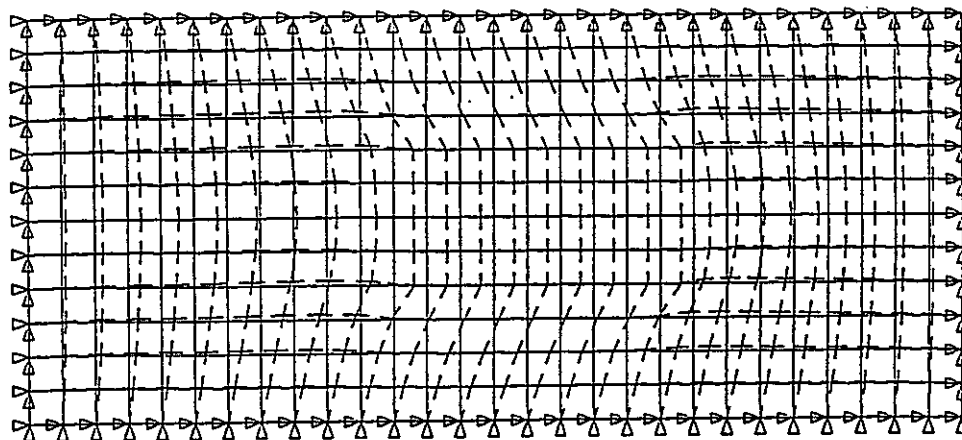


図-3.18 変位図 (D0.7G2.0の場合：最大変位1.2cm)

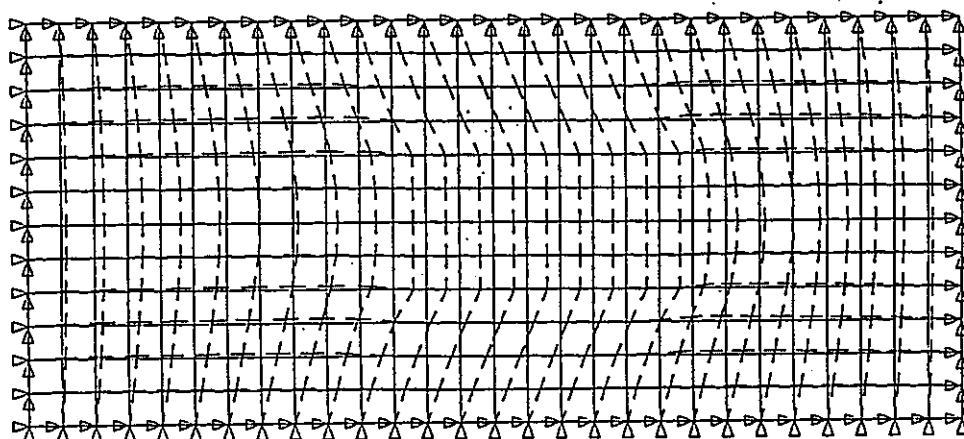


図-3.19 変位図 (D1.0G2.0の場合：最大変位0.3cm)

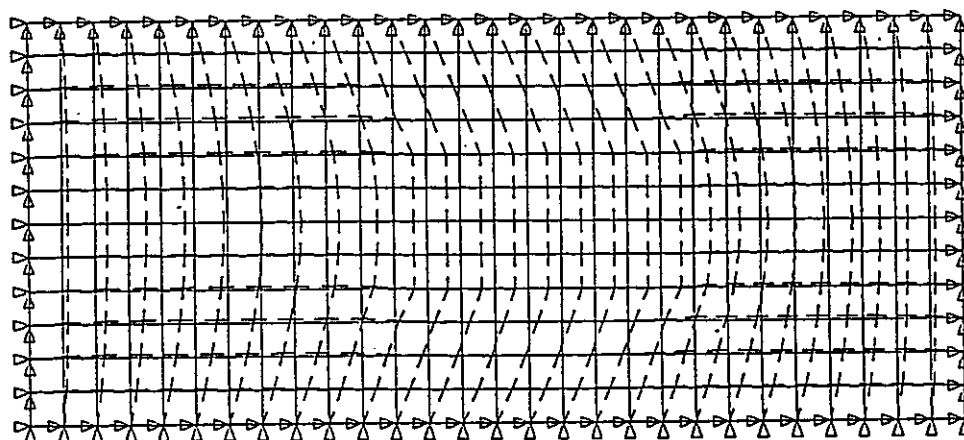


図-3.20 変位図 (D1.3G2.0の場合：最大変位0.1cm)

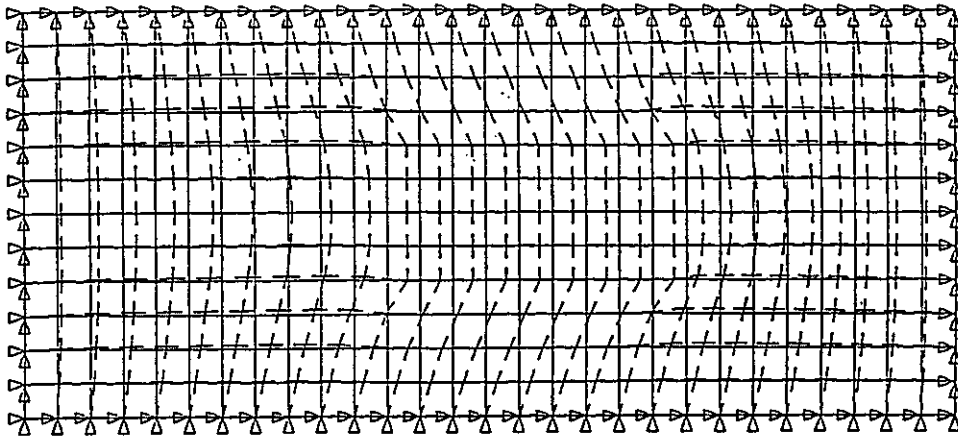


図- 3.2 1 変位図 (D0.7G4.0の場合：最大変位0.8cm)

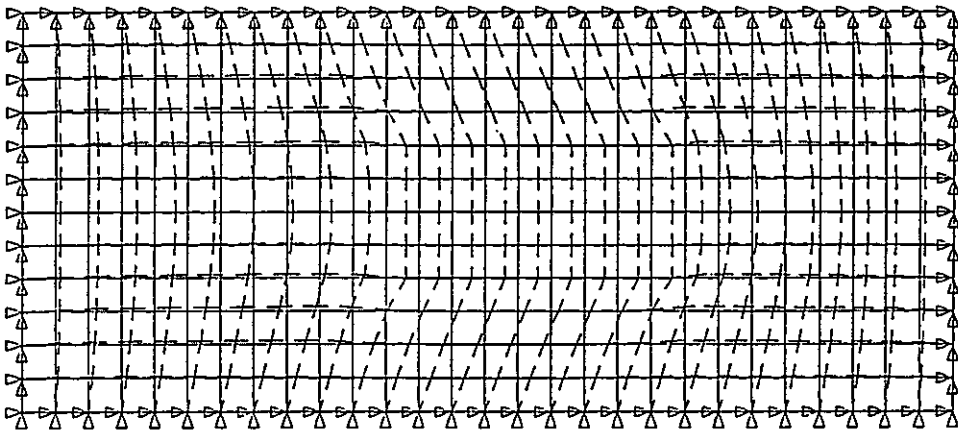


図- 3.2 2 変位図 (D1.0G4.0の場合：最大変位0.3cm)

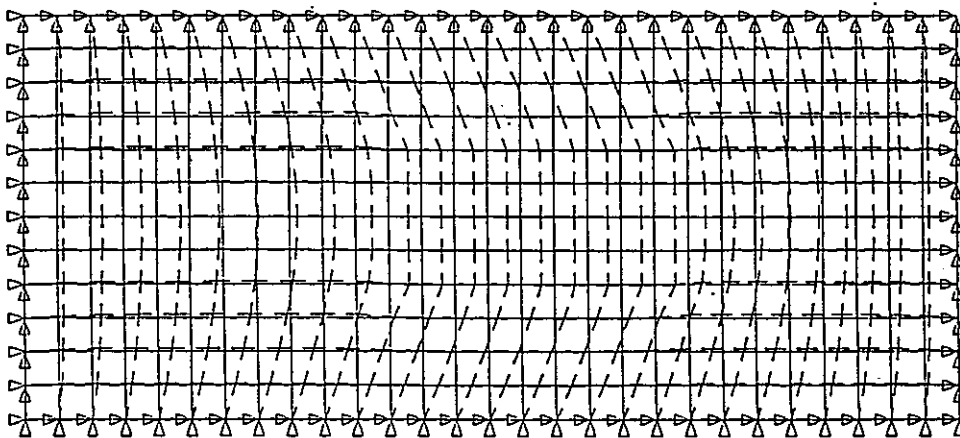


図- 3.2 3 変位図 (D1.3G4.0の場合：最大変位0.1cm)

(3) せん断応力について

地震時において、せん断応力の最大値は、オーバーパック周りで発生すると推測された。せん断応力の最大値は、変位と同様に乾燥密度が一番小さく、せん断剛性が最小の時（解析ケースD0.7G1.0）に生じ、その値は、 0.133 kgf/cm^2 であった。この値は、三軸圧縮試験（UU試験）で得られたせん断強度より大きく、オーバーパック周りで緩衝材がせん断破壊する可能性を示している。しかしながら、乾燥密度 1.0 g/cm^3 以上においては、いずれも三軸圧縮試験（UU試験）で得られたせん断強度より小さく、せん断破壊は起こらないと推測された。現在考えられている埋戻し材の仕様では、緩衝材の乾燥密度が 1.8 g/cm^3 以上であり、十分安全だと推測された。

図-3.24～3.32に解析より得られた最大せん断応力分布図を示す。

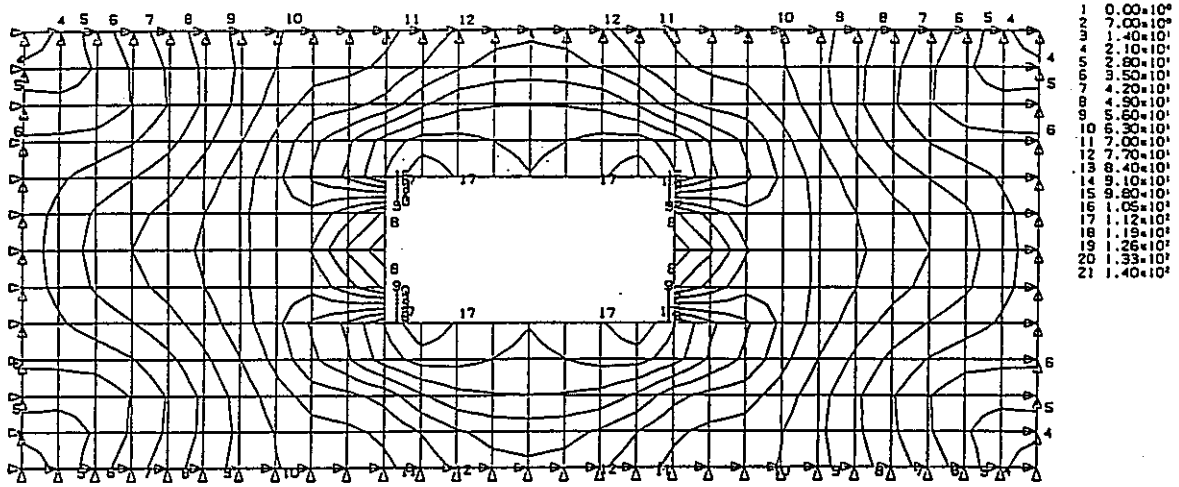


図-3.24 せん断応力分布図 (D0.7G01.0の場合：最大せん断応力0.133 kgf/cm²)

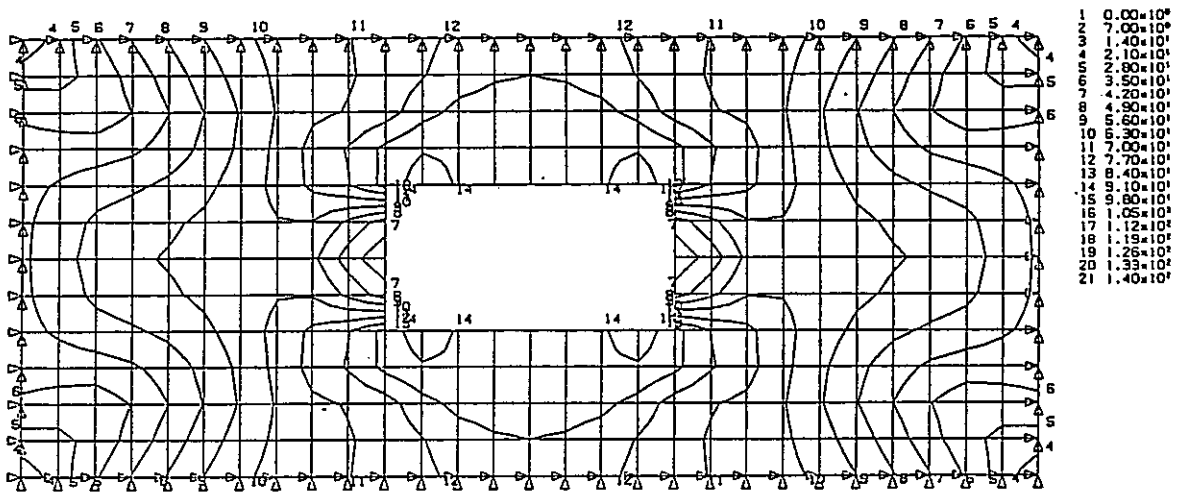


図-3.25 せん断応力分布図 (D1.0G01.0の場合：最大せん断応力0.107 kgf/cm²)

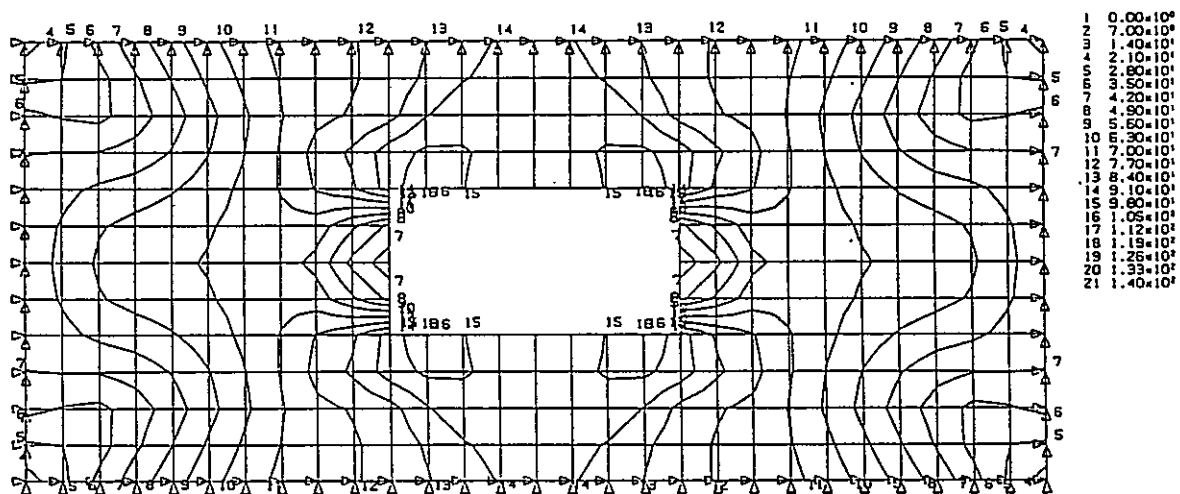


図-3.26 せん断応力分布図 (D1.3G01.0の場合：最大せん断応力0.118 kgf/cm²)

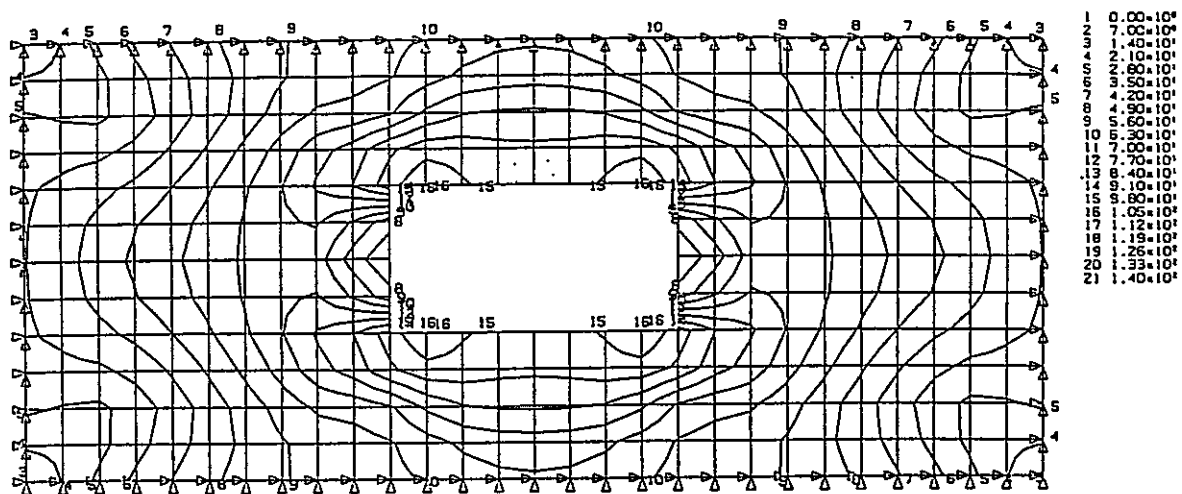


図-3.27 せん断応力分布図 (D0.7G02.0の場合：最大せん断応力0.117 kgf/cm²)

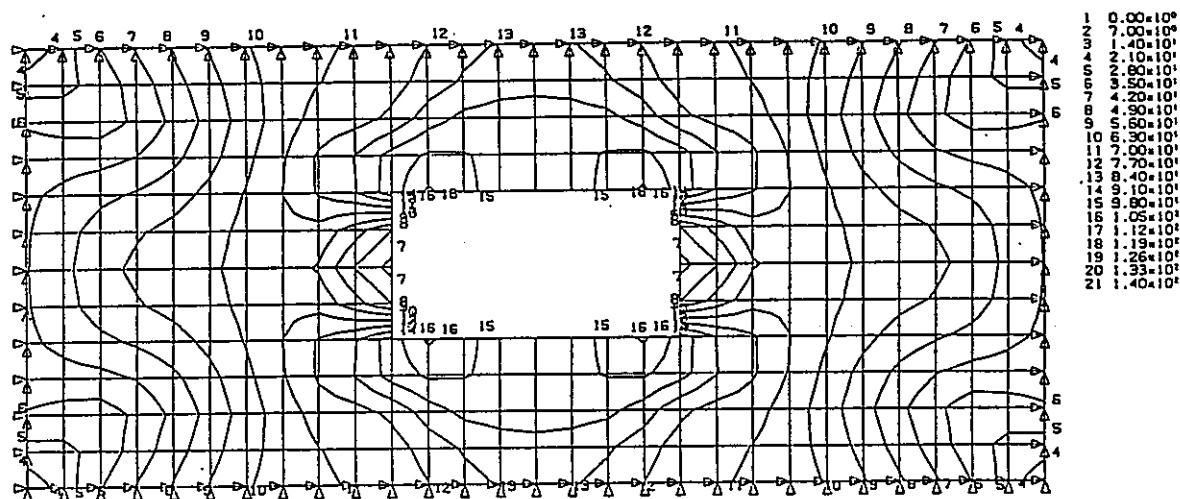


図-3.28 せん断応力分布図 (D1.0G02.0の場合：最大せん断応力0.119 kgf/cm²)

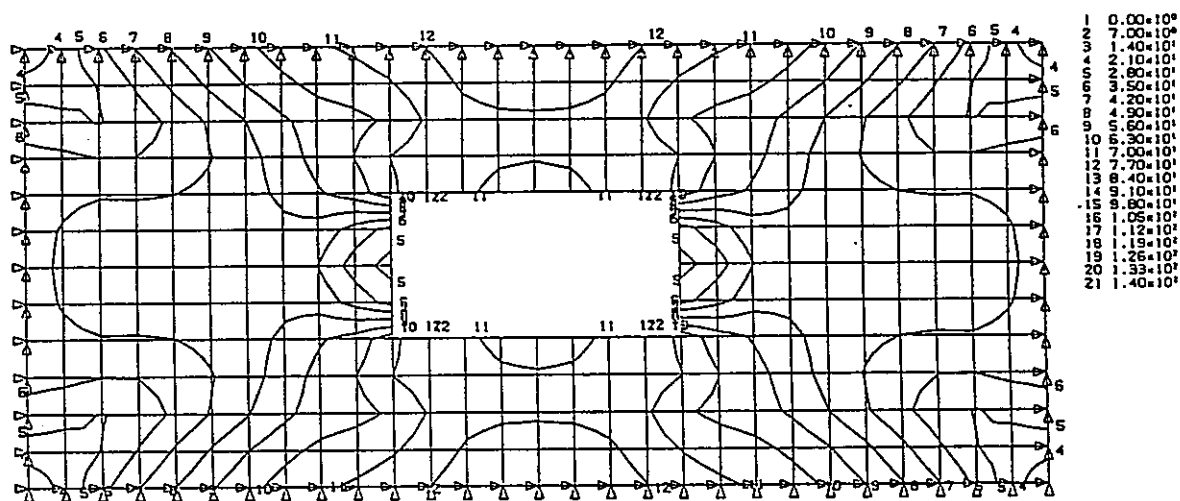


図-3.29 せん断応力分布図 (D1.3G02.0の場合：最大せん断応力0.087 kgf/cm²)

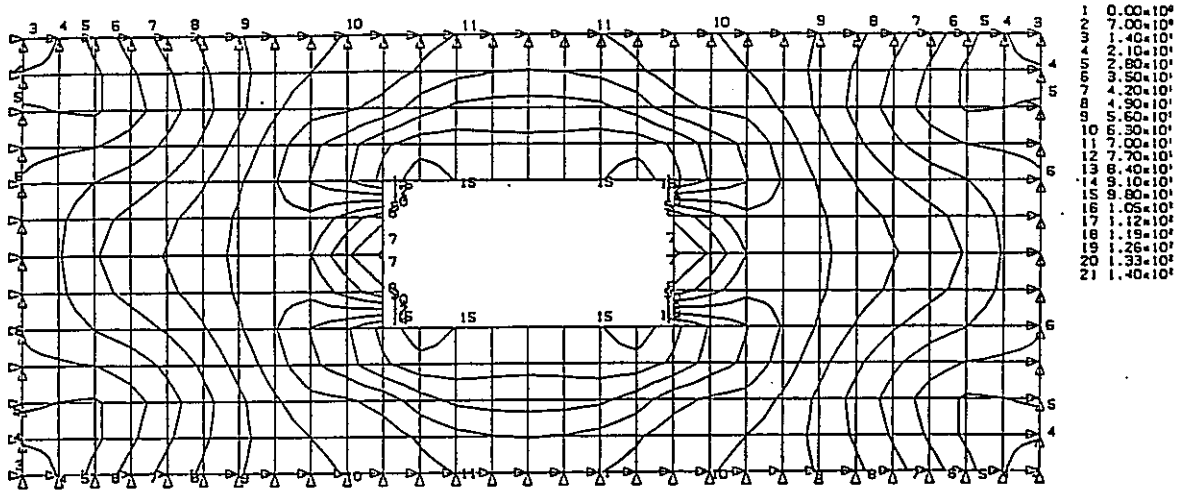


図-3.30 せん断応力分布図 (D0.7G04.0の場合：最大せん断応力0.114 kgf/cm²)

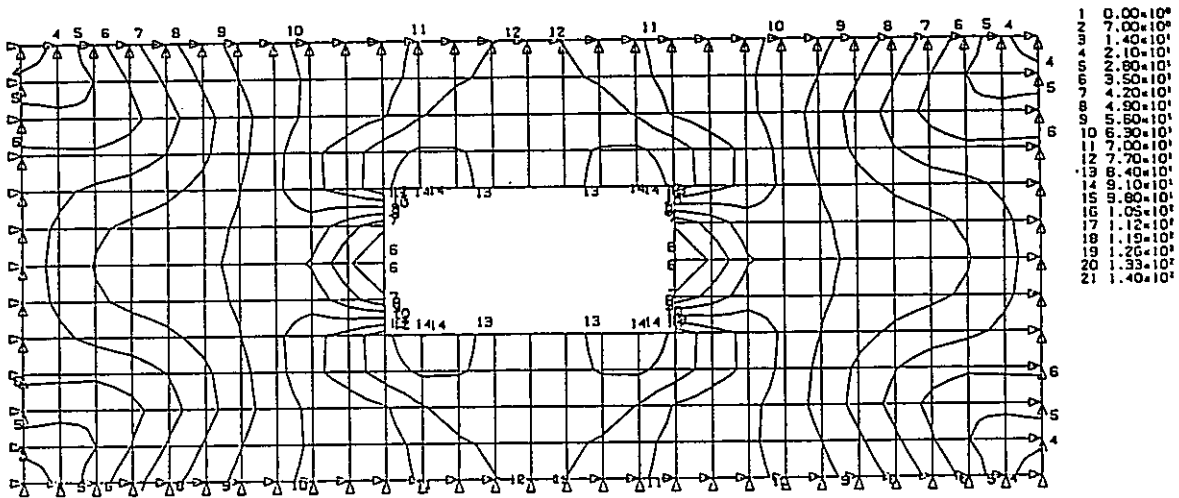


図-3.31 せん断応力分布図 (D1.0G04.0の場合：最大せん断応力0.102 kgf/cm²)

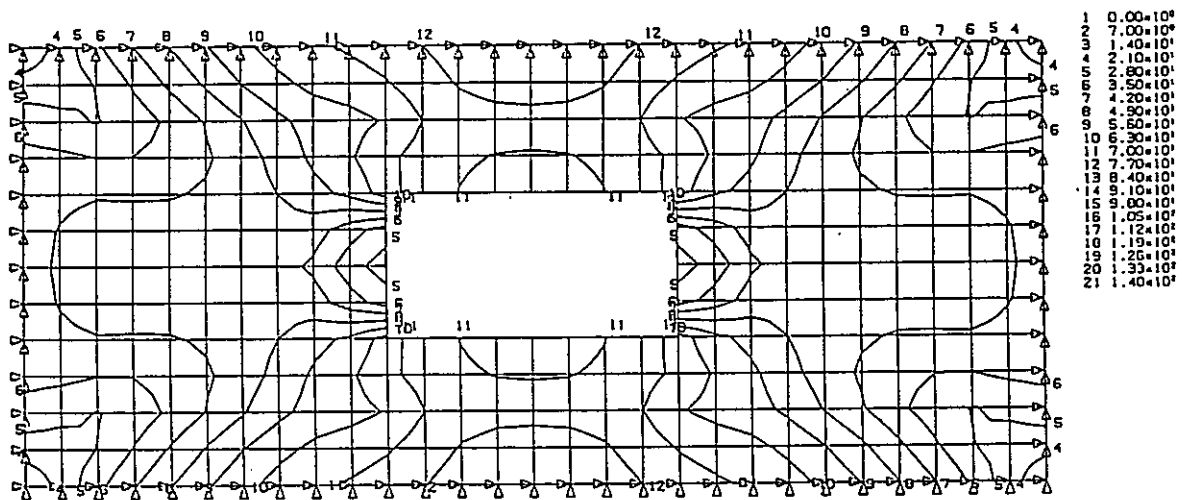


図-3.32 せん断応力分布図 (D1.3G04.0の場合：最大せん断応力0.085 kgf/cm²)

3.5 まとめ

解析の結果より、発生する最大変位が約1.2 cmであり、地震時にオーバーバックがほとんど変位しないことが推測された。また、発生するせん断応力は、乾燥密度0.7 g/cm³の場合を除き、ベントナイトのせん断強度（粘着力）より十分小さく、破壊しないことが推測された。また、入力地震波の加速度に比較して、オーバーバック周りの加速度は若干増幅されると思われるが、全体的に人工バリア内でオーバーバックは安定に存在すると推測された。

4. まとめと今後の課題

我が国は、世界でもまれに見る地震多発国である。このような地質環境条件において、高レベル廃棄物の地層処分を考える場合、地震による影響を予測し、その耐震性を考慮に入れたシステムを考える必要がある。

本検討では限定された条件ではあるが、人工バリアシステムの地震時における基礎的な振動挙動を推測することができた。

今後の課題として、人工バリアシステムの忠実なモデル化（3次元モデルを含む）や境界条件の考え方、入力地震波の考え方を整理してより適切な解析条件で検討する必要があると思われた。

現在、地下深部での地震挙動について把握するため、釜石鉾山等において地震波の観測が行われており、また、人工バリアの振動挙動を把握するため防災科学技術研究所との共同研究が行われている。

これらのデータが蓄積された段階でさらに詳細な検討を行うことが必要であると思われた。

5. 謝辞

緩衝材の動的三軸試験については、鹿島建設（株）に協力して頂いた。また、動燃事業団大洗工学センター構材室の森下室長代理には、数多くの助言を頂いた。さらに、地層処分開発室の並河努氏にも貴重な助言を頂き、検査開発株式会社の酒井裕一氏にはデータ整理等でご協力頂いた。ここに記し感謝の意を表したい。

6. 参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団（1992）：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書（平成3年度），PNC TN 1410 92-081.
- 2) 土木学会編：動的解析と耐震設計（第1巻）「地震動・動的物性」，技報堂出版
- 3) 土木学会編：動的解析と耐震設計（第2巻）「動的解析の方法」，技報堂出版
- 4) 土木学会編：動的解析と耐震設計（第3巻）「エネルギー施設」，技報堂出版
- 5) 国生剛治（1981）：土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答，
電力中央研究所総合報告 No.301
- 6) 西好一，江刺靖行，国生剛治：振動載荷時における軟岩の強度－変形特性（1984），
電力中央研究所報告 383050
- 7) CSD：人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（1993），
PNC SJ 1458 93-001
- 8) CSD：人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（2）（1993），
PNC SJ 1458 94-002

添付資料

動的三軸試験結果一覽

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d 0.7 \sigma 1.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 1.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 17 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	1.65E-05	17	1.5	1.00
2	2.48E-05	17	1.6	1.00
3	9.06E-05	15	2.2	0.88
4	2.96E-04	14	3.3	0.82
5	8.00E-04	13	7.2	0.76
6	1.67E-03	12	7.2	0.71
7	3.54E-03	10	9.3	0.59
8	9.02E-03	8	13.8	0.47
9	3.53E-02	4	26.3	0.24

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d0.7\sigma 2.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 2.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 13 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	2.27E-04	13	2.6	1.00
2	3.33E-04	13	3.2	1.00
3	8.30E-04	12	5.3	0.92
4	1.38E-03	11	6.8	0.85
5	2.55E-03	10	8.7	0.77
6	5.36E-03	8	12.2	0.62
7	1.24E-02	6	15.5	0.46
8	2.30E-02	4	18.1	0.31
9	5.22E-02	2	25.8	0.15

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d0.7 \sigma 4.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 4.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 17 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	1.48E-04	17	2.8	1.00
2	2.18E-04	17	3.4	1.00
3	5.19E-04	16	5.4	0.94
4	1.01E-03	15	7.4	0.88
5	1.85E-03	14	9.6	0.82
6	3.75E-03	12	12.6	0.71
7	7.89E-03	9	16.4	0.53
8	1.53E-02	6	21.6	0.35
9	3.14E-02	4	23.6	0.24

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d1.0\sigma1.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 1.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 45 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	1.64E-05	45	1.4	1.00
2	3.57E-05	41	1.6	0.91
3	7.64E-05	39	1.9	0.87
4	1.95E-04	36	2.6	0.80
5	3.60E-04	35	3.6	0.78
6	7.41E-04	32	5.4	0.71
7	1.73E-03	27	8.2	0.60
8	4.46E-03	20	12.3	0.44
9	1.22E-02	12	15.5	0.27
10	2.58E-02	8	19.0	0.18

試験結果一覧表

試料番号 pd1.0σ2.0深度 (GL-m) -----

$\sigma_c = 2.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 45 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	9.84E-06	44	2.8	0.98
2	1.34E-05	47	1.3	1.04
3	1.71E-05	45	1.2	1.00
4	1.98E-05	45	1.1	1.00
5	2.85E-05	45	1.3	1.00
6	6.09E-05	44	1.8	0.98
7	9.83E-05	43	2.3	0.96
8	1.71E-04	42	2.9	0.93
9	3.12E-04	41	3.9	0.91
10	6.21E-04	39	5.6	0.87
11	1.42E-03	33	8.5	0.73
12	3.62E-03	25	9.7	0.56
13	1.05E-02	14	14.8	0.31
14	2.30E-02	9	18.4	0.20
15	6.89E-02	4	30.0	0.09

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d1.3\sigma 1.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 1.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 72 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	7.26E-06	73	1.2	1.01
2	1.42E-05	71	1.2	0.99
3	2.96E-05	70	1.4	0.97
4	7.41E-05	68	2.1	0.94
5	1.61E-04	65	3.2	0.90
6	4.53E-04	59	5.3	0.82
7	1.24E-03	47	10.7	0.65
8	3.41E-03	34	13.5	0.47
9	9.11E-03	21	16.5	0.29
10	2.09E-02	13	19.0	0.18

試験結果一覧表

試料番号 $\rho d1.3\sigma 2.0$

深度 (GL-m)

$\sigma_c = 2.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 98 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2)$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	5.43E-06	100	1.4	1.02
2	2.39E-05	96	1.5	0.98
3	2.39E-05	98	1.7	1.00
4	5.04E-05	97	2.3	0.99
5	1.08E-04	96	3.3	0.98
6	3.00E-04	89	5.3	0.91
7	7.89E-04	75	9.3	0.77
8	2.09E-03	55	12.9	0.56
9	7.32E-03	31	18.1	0.32
10	2.58E-02	15	22.5	0.15

試験結果一覧表

試料番号 pd1.3σ4.0深度 (GL-m) -----

$\sigma_c = 4.00 \text{ kgf/cm}^2$		$G_o = 102 \text{ kgf/cm}^2$		
Step.	せん断ひずみ γ	せん断剛性 $G \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	減衰定数 $h \text{ (\%)}$	G / G_o
1	9.21E-06	101	1.5	0.99
2	1.79E-05	102	1.6	1.00
3	2.84E-05	101	1.6	0.99
4	6.45E-05	100	2.0	0.98
5	1.06E-04	99	2.4	0.97
6	2.79E-04	92	4.0	0.90
7	6.59E-04	80	6.3	0.78
8	1.28E-03	68	8.5	0.67
9	2.40E-03	53	11.4	0.52
10	4.44E-03	40	14.2	0.39
11	9.66E-03	27	17.4	0.26
12	2.06E-02	17	19.5	0.17