

# 溶岩層上の建築物における地下空洞の影響に関する検討



保井 美敏 \*1

海老澤弘道 \*2 手塚 純一 \*2  
金子 治 \*1 成田 修英 \*1  
山本 健史 \*1

## 概 要

免震レトロフィットにより耐震改修される建築物が地下空洞を持つ溶岩層に直接基礎で支持されていることから、この地下空洞が支持力と入力地震動に与える影響について、2次元FEMにより解析的に検討を行った。支持力の検討では溶岩層のポアソン比および溶岩層に作用する側圧の影響とその安全性について検討した。その結果以下の結論が得られた。

1. 支持力に関しては、ポアソン比や側圧係数の影響を考慮しても、常時荷重に対し安全率3以上、常時荷重+地震時荷重に対し安全率1.5以上となっており、溶岩層は十分安全性を確保している。
2. 水平方向の入力地震動に関しては、最大値・疑似速度応答スペクトルともほぼ同様に空洞の影響はほとんどなかった。
3. 上下方向の入力地震動に関しては空洞の影響で最大値がやや大きくなり、疑似速度応答スペクトルは0.06秒より短周期でやや差が生じている程度である。

## A STUDY ON INFLUENCE OF CAVES AT A ROCK SITE FOR BUILDING FOUNDATION

Mitoshi YASUI\*1 Hiromichi EBISAWA\*2  
Junichi TEZUKA\*2 Osamu KANEKO\*1  
Nobuhide NARITA\*1 Takeshi YAMAMOTO\*1

A base isolation retrofit building is planned on a rock site with caves. The influence of caves for bearing capacity and for input motions are studied on analytical methods with 2-dimensional FEM. For bearing capacity the safety, are studied on Poisson's ratio and lateral earth pressure. The results are summarized as follows;

1. For bearing capacity, the rock site with caves is safe regardless of Poisson's ratio and lateral earth pressure. Safety factors are over 3 for stationary loading and over 1.5 for temporary loading.
2. It is no influence of caves at the rock site for lateral direction of input motions, because maximum values of accelerations and pseud-velocity response spectra are nearly equal.
3. It is little influence of caves at the rock site for vertical direction of input motions, because maximum values of accelerations with caves are a little larger than the values no cavitations and pseud-velocity response spectra shorter than 0.06 seconds on period are a little larger than the spectra no caves.

\*1 技術研究所 \*2 構造設計部

\*1 Technical Research Institute \*2 Structural Engineering Dept

# 溶岩層上の建築物における地下空洞の影響に関する検討

保井 美敏<sup>\*1</sup> 海老澤弘道<sup>\*2</sup>  
 手塚 純一<sup>\*2</sup> 金子 治<sup>\*1</sup>  
 成田 修英<sup>\*1</sup> 山本 健史<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

免震レトロフィットにより耐震改修される建築物が地下空洞を持つ溶岩層に直接基礎で支持されていることから、この地下空洞が支持力と入力地震動に与える影響について、2次元 FEM により解析的に検討を行った。支持力の検討では溶岩層のポアソン比および溶岩層に作用する側圧の影響とその安全性について検討した。

地下空洞は基礎から 1～2m 程度と 10m 程度の上下 2 か所に存在している。一連の解析は上部の地下空洞（以降、「第 1 空洞」と称す）はエアミルクで充填し、下部の地下空洞（以降、「第 2 空洞」と称す）は空洞のまま残す検討を行った。なお、エアミルクの物性については設計時には実績に基づく値を用いていたが、本解析では施行前に実施した試し練りの結果から設定した値とし、一部、実設計とは異なる入力値を設定している。

## 2. 支持力に関する検討

### 2.1 解析モデルと地盤定数

建物基礎と第 1 空洞・第 2 空洞の 2 つの地下空洞が重なる代表的な位置関係を 2 次元 FEM 解析モデルにして図-1 に示す。上部建物部分は、5 階建て部分の高層部と 1 階建て部分の低層部からなっている。第 1 空洞はレーザー測量にて形状を詳細に計測しており、この結果を基にモデル化した。

載荷荷重状態を図-2 に示す。常時（長期）荷重、地震時荷重（水平荷重および転倒モーメントによる鉛

直荷重）ともに独立ワーチング直下（常時・地震時水平の基礎梁による荷重は基礎幅全体）に載荷している。荷重の大きさを一覧にして表-1 に示す。

地盤定数を表-2 (1) に示す。表層 1（盛土）と表層 2（玉石層）は弾性材料とし溶岩層は D-min 法モデル（非線形材料）<sup>1)</sup> を用いた。D-min 法モデルは図-3 に示すモデルで非線形特性をあらわすパラメータは表-2 (2) に示す設定とした。溶岩層の圧縮強度、引張強度はボーリングコアによる岩石試験結果を用いた。充填材（エアミルク）は配合試験に基づいて変形係数を、過去の実績に基づいてポアソン比を設定した。

解析はポアソン比と側圧係数が溶岩層の安全率に影響を与えると考え、表-3 に示す 3 ケースを実施した。ケース 1 は溶岩層の材料 D-min 法モデルの初期ポアソン比 0.25 として破壊時のポアソン比を 0.48<sup>2)</sup>、ケース 2 は初期・破壊時ともポアソン比 0.48、ケース 3 は自重解析時に表層は側圧係数を 0.5、溶岩層の側圧係数を 1.0 として建物荷重解析はケース 1 と同じにした。ケース 1、ケース 2 の自重応力解析はポアソン比から求めた側圧係数を用いた。解析は自重解析（弾性解析）と建物荷重解析（非線形解析）による 2 ステップで行った。

### 2.2 解析結果

安全率は Mohr-Coulomb の破壊基準（ $C=34\text{N/mm}^2$ 、 $\phi=61.5^\circ$ ）を用いて図-4 のとおり求めた。安全率は、常時荷重 3 以上、（常時+地震荷重時）1.5 以上確保することとした。

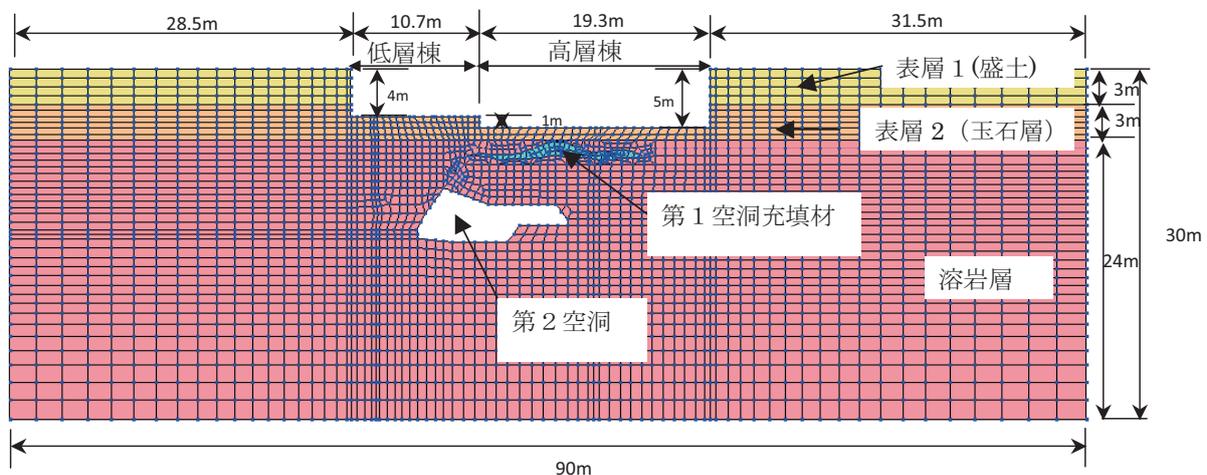


図-1 解析モデル

<sup>\*1</sup> 技術研究所 <sup>\*2</sup> 構造設計部

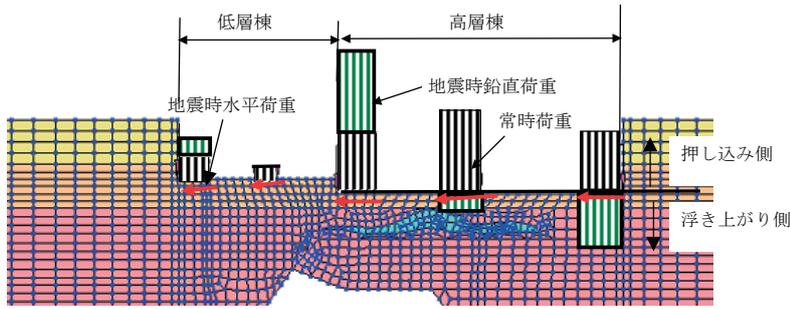


図-2 荷重載荷状況

荷重の種類	考慮している荷重	
常時荷重	固定荷重+積載荷重	
地震時荷重	地震時鉛直荷重	地震時転倒モーメントによる変動軸力
	地震時水平荷重	地震時層せん断力

表-1 荷重一覧

通り芯	常時 (kN/m <sup>2</sup> )	変動軸力 (kN/m <sup>2</sup> )	地震時水平荷重 (kN/m <sup>2</sup> )
Y3	665	- 617	297
Y2	876	- 147	384
Y1	693	679	230
Y0'	70	1	196
Y0	103	40	176

表-2 (1) 材料定数一覧

	初期変形係数 E <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	初期ポアソン比	材料モデル	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粘着力 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊時変形係数	破壊時ポアソン比
表層1	1 × 10 <sup>6</sup>	0.25	弾性	-	-	-	-	-
表層2	2 × 10 <sup>6</sup>	0.25	弾性	-	-	-	-	-
溶岩層	3 × 10 <sup>6</sup>	0.25	D-min	21	2.2	3.4	0.001 × E <sub>0</sub>	0.48
充填材	6 × 10 <sup>5</sup>	0.25	弾性	-	-	-	-	-

表-2 (2) 非線形特性一覧

破壊包絡線指数 a	ゆるみ係数 k	非線形特性指数 m	非線形特性指数 n
1	2	0.5	0.25

表-3 解析ケース一覧

ケース	溶岩層ポアソン比	側圧係数 (自重解析時)	備考
1	初期 0.25 ~ 破壊 0.48	ポアソン比より算定	基本ケース
2	初期 0.48 ~ 破壊 0.48	ポアソン比より算定	ポアソンの影響
3	初期 0.25 ~ 破壊 0.48	表層は 0.5, 溶岩層は 1.0	側圧係数の影響

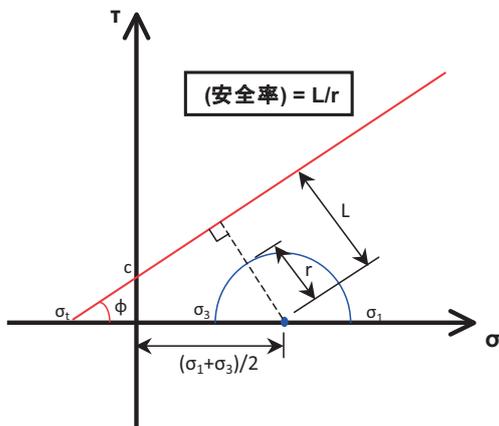
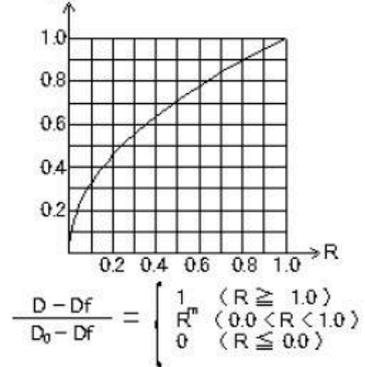
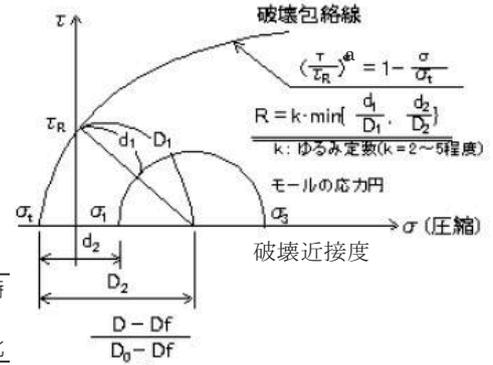
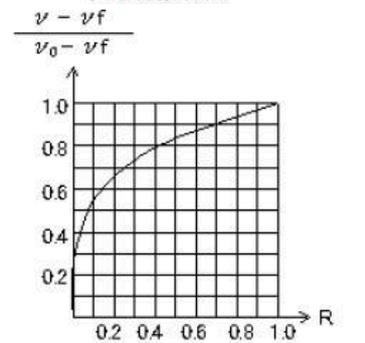


図-4 安全率の評価



において  
 m : 非線形特性指数  
 D<sub>0</sub> : 初期変形係数  
 D<sub>f</sub> : 破壊時変形係数

変形係数特性



において  
 n : 非線形特性指数  
 nu<sub>0</sub> : 初期ポアソン比  
 nu<sub>f</sub> : 破壊時ポアソン比

ポアソン比特性

図-3 D-min 法モデル概要<sup>1)</sup>



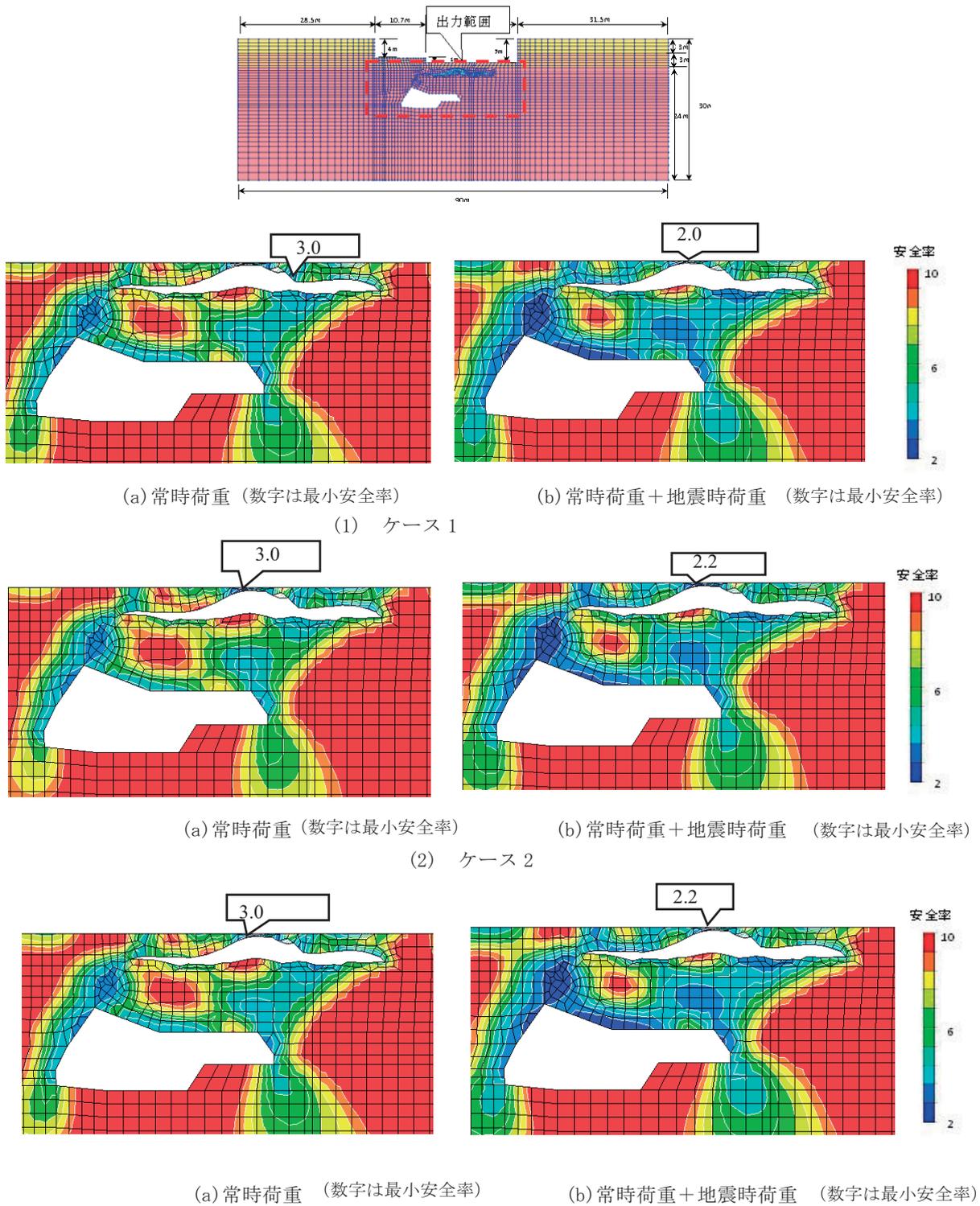


図-6 安全率分布

表-4 最小安全率一覧

ケース		安全率	安全率の目標値
ケース 1	常時	3.0	3
	常時+地震時	2.0	1.5
ケース 2	常時	3.0	3
	常時+地震時	2.2	1.5
ケース 3	常時	3.0	3
	常時+地震時	2.2	1.5

### 3. 入力地震動に関する検討

#### 3.1 解析モデルと材料定数

静的解析同様、第1空洞を充填し、第2空洞をそのままに残すことの入力地震動に与える影響を動的FEM解析を用いて解析的に検討を行った。解析モデルを図-7に示す。上端はGL-5mの高層棟の基礎が位置する深さとし、基礎部分は一体に挙動すると考えられることより、剛体ビームを設置している。GL-30mから地震動を入力し地表の応答波形を求めた。検討は解析モデルに示す検討対象位置と同じ深さ位置の1次元解析結果（第1空洞、第2空洞とも存在しない場合）を比較対象とすることで、第1空洞を充填し第2空洞が存在する影響について検討した。

材料定数を表-5に示す。地盤剛性については、溶岩層は事前に実施されたPS検層結果を用い、充填材（エアミルク）は材料の歪依存性を考慮し静的試験から微小ひずみの値を求め1000MN/m<sup>2</sup>を設定した。ポアソン比については、溶岩層はS波速度とP波速度の関係より求め、充填材は0.25を設定した。

解析は4ケースで、水平動については告示波3波（JMA-NS位相、Elcentro-NS位相、HACHINOHE-NS位相）、上下動については告示波1波（JMA位相）で、計4ケースを実施した

#### 3.2 解析結果

解析結果を空洞無（1次元解析）と空洞有（2次元解析）の応答波形（加速度波形）と疑似速度応答スペクトルについて図-8～11に示す。ここで、「空洞無」は空洞を無視した1次元解析の結果、「空洞有」は第1空洞を充填した状態（第2空洞は充填せず）での2次元解析の結果である。

図-8～10から明らかのように、水平動に関しては充填材の影響はほとんど受けず、最大値、疑似速度応答スペクトルともほぼ同様となる。

一方、図-11の上下動の結果では上下動は若干空

洞の影響を受け、最大値で15%程度空洞有が大きく、疑似速度応答スペクトルは0.06秒より短周期で空洞有がやや大きくなっている程度である。

これらより、充填材のヤング係数がE=1000MN/m<sup>2</sup>程度あれば水平動・上下動とも第1空洞を充填し第2空洞をそのままにする影響はないと考えられる。

### 4. まとめ

基礎直下の第1空洞をエアミルクで充填し、第2空洞を残した溶岩層について、支持力に関する検討と入力地震動への影響を2次元FEMにより検討し、以下の結論を得た。

(1) 支持力に関しては、ポアソン比や側圧係数の影響を考慮しても、常時荷重に対し安全率3以上、常時荷重+地震時荷重に対し安全率1.5以上となっており、溶岩層は十分安全性を確保している。

(2) 水平方向の入力地震動に関しては、最大値・疑似速度応答スペクトルともほぼ同様で空洞の影響はほとんどなかった。

(3) 上下方向の入力地震動に関しては空洞の影響で最大値がやや大きくなり・疑似速度応答スペクトルは0.06秒より短周期でやや差が生じている程度である。

#### 参考文献

- 1) 伊藤忠テクノソリューションズ：理論マニュアル静的解析、pp.134.2009
- 2) 地盤工学会：設計用地盤定数の決め方—岩盤編—、pp.142-143、平成20年

表-5 材料一覧

地盤	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	S波 速度 (m/s)	P波 速度 (m/s)	単位体積 重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポア ソン 比
溶岩層	3160	750	1700	22	0.38
充填材	1000	750	580	7	0.25

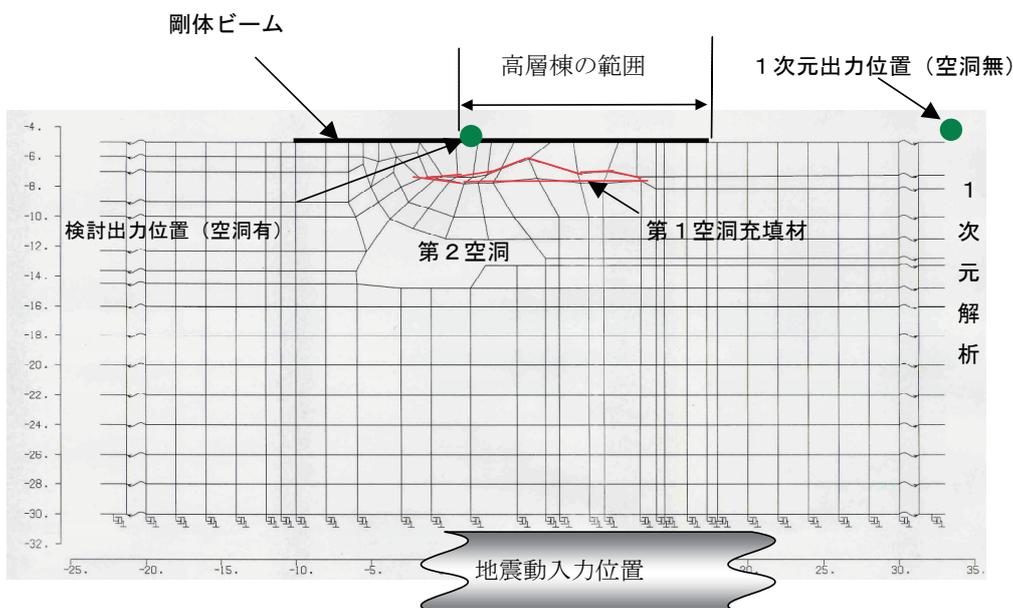
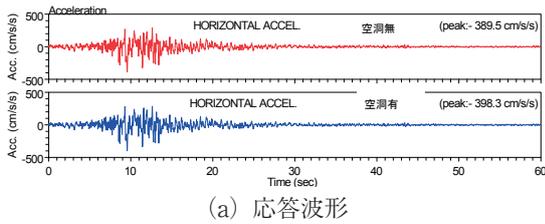
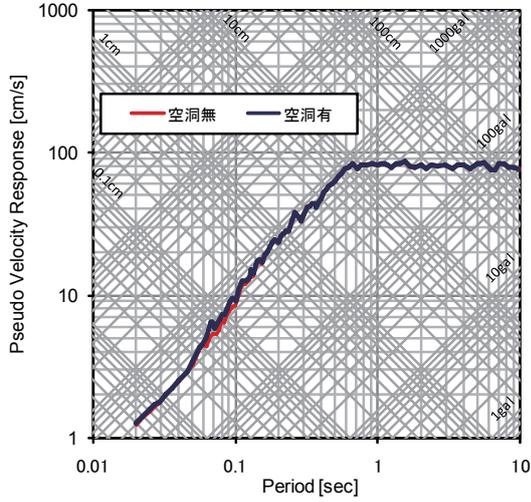


図-7 解析モデル

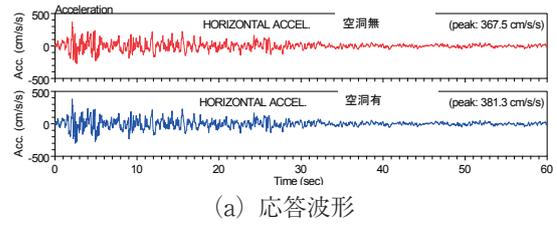


(a) 応答波形

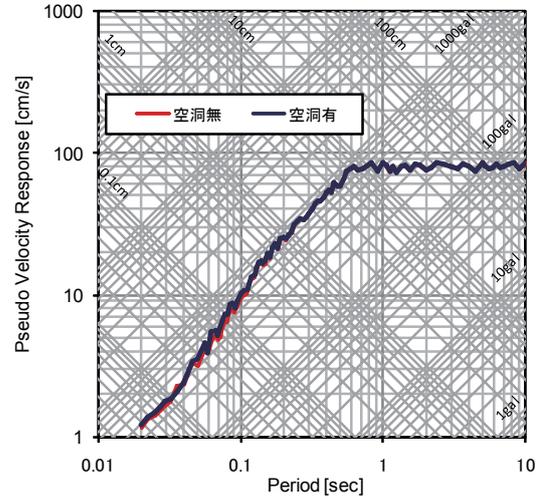


(b) 擬似速度応答スペクトル

図-8 解析結果 (水平: JMA-NS 位相)

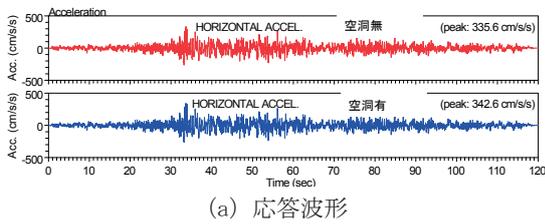


(a) 応答波形

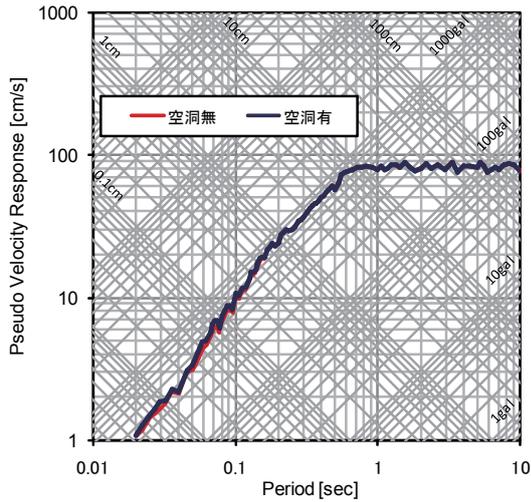


(b) 擬似速度応答スペクトル

図-9 解析結果 (水平: Elcentro-NS 位相)

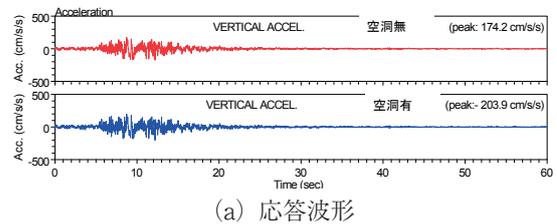


(a) 応答波形

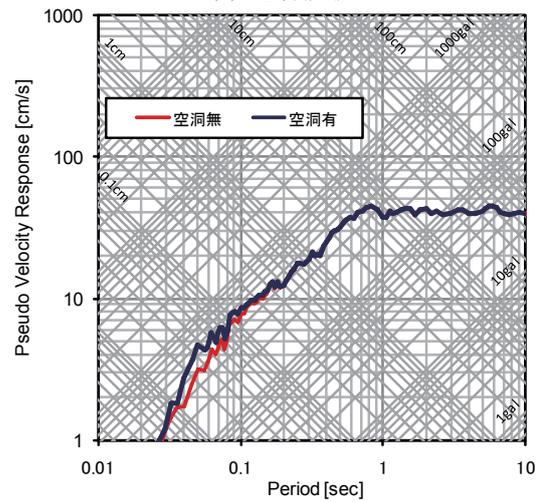


(b) 擬似速度応答スペクトル

図-10 解析結果 (水平: HACHINOHE-NS 位相)



(a) 応答波形



(b) 擬似速度応答スペクトル

図-11 解析結果 (上下: HACHINOHE-UD 位相)

