

亜炭廃坑地域における振動特性に関する実験的研究

東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 正会員 アイダン・オメル
 東海大学 海洋学研究科 海洋工学専攻 学生会員 大洞 光央
 (株) システムソフト 解析事業部 正会員 小倉 洋一
 名古屋大学 名誉教授 正会員 川本 眺万

1. はじめに

近年、東海大地震の発生がいよいよ現実味を帯び、地震時の災害や2次災害に対する対策が重要度を増している。特に、地下に廃坑の存在する地域では日常的に地盤の沈下や陥没など地盤災害が発生し、地震時にはその危険性が高まると考えられる。さらに、地下に空洞を有する地盤の地表面での振動特性についても注目すべきであるが、このような報告は少なく、いまだ明らかにされていない点が多い。

東海地方（愛知県・岐阜県）はかつて日本最大の亜炭産出地であったため、地下に廃坑を有する地域が多数存在する。このような地域でも都市化が進んでおり、新たな住宅地の開発や道路建設が多くなってきている。例えば、名古屋近辺で住宅地の開発、都市高速道路、愛知万博用モノレールの建設地は亜炭廃坑地域を通る。さらに東海大地震の危険地域に指定された御嵩町などでは亜炭廃坑地域の地震時の挙動が危惧されている。

亜炭坑では主に柱を残すことで、採掘する際の安定を確保する採掘法がとられた（残柱方式）。本研究では残柱方式によって採掘された亜炭廃坑に注目し、振動台を使用した模型実験により、亜炭廃坑地域での地震を想定した地表面の動的挙動を調べた。

2. 実験概要

2.1 材料特性

模型実験には $50 \times 50 \times 21[\text{mm}^3]$ のプラスチックブロックを使用した。プラスチックブロック単体の物性値を表-1として以下に示す。さらに、ブロックを重ねた場合の弾性波速度の変化を調べた結果を図-1として示す。図-1より、層の数（不連続面の数）が多くなると弾性波速度は減少し、ある一定値に近づいていることがわかる。この結果から層数 N と弾性波速度 V_p の関係は以下のような関数によって近似することが可能である。

$$V_p = 2100 \left(1 - 0.91 \frac{N}{1+N} \right) \quad (1)$$

表-1 模型材料の物理特性

単位体積重量 (kN/m ³)
13.33
弾性波速度 (km/s)
2.0-2.1
摩擦角
20-22

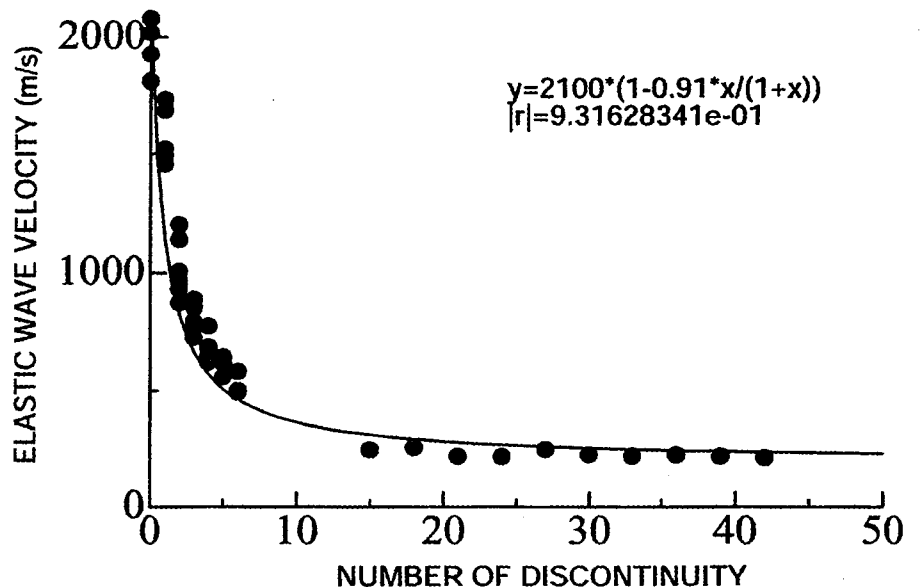


図-1 模型材料の層数と弾性波速度の関係

2.2 実験装置

振動実験で用いた実験装置は振動台である。これは東海大学海洋土木工学科所有のもので、最大 100[kg] の物体に約 600[gal]までの加速度を与えるものである。最大変位量は 100[mm]で、振動台の面積は 1×1[m²]である。この装置に与えた条件は、振幅が 50[gal]の一定値とし、周波数を 2~20[Hz]と変化させた。

作成した模型地盤の模式図を図-2 に示す。プラスチックブロックを水平の層構造となるように千鳥積みにて木枠の中に配置し模型地盤を作成した。また、木枠の内側には模型ブロックの衝突によって発生する反射波を消すために、厚さ 5[mm]のゴムを粘性ダンパーとして挿入した。

今回の実験の計測項目である加速度計は、模型地盤と空洞内部及び地表面を比較するため4箇所に設置した。加速度計を Acc とすると、Acc-1 は振動台に、Acc-2 は空洞底面に、Acc-3 は地表面で空洞の真上に、Acc-4 は地表面で残注の真上である。これらの加速度計はアンプを通してパソコンに接続し自動計測を行った。この加速度記録は 5[ms]の間隔で測定し、30[Hz]のフィルターをかけた。

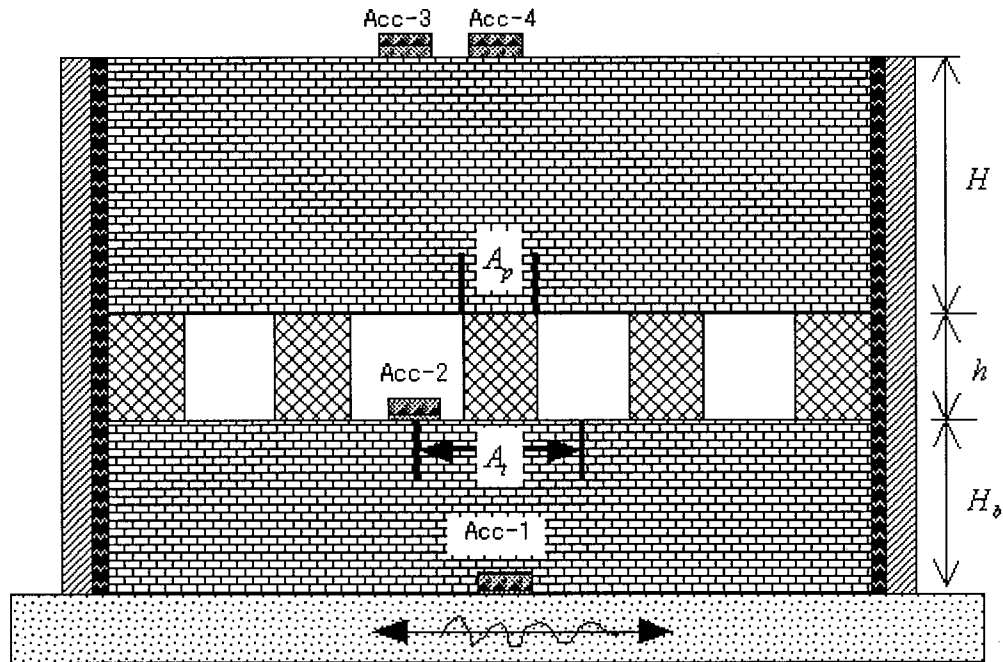


図-2 模型地盤模式図

2.3 実験条件

図-2 の模型地盤を使用して、空洞の幅や深さを变化させた実験を行った。空洞の幅は、残柱の幅を A_p とし、それぞれの残柱が受け持つべき領域の幅を A_t として、掘削率 A_t/A_p を 1・2・3・5 の 4 通りに变化させた。この中で、掘削率 1 のケースは空洞がない状態のものである。また、空洞の深さは、残柱の高さを h 、深さを H として、土かぶり比 H/h を 2・3・5 の 3 通りに变化させた。以下に使用した模型の写真を示す。

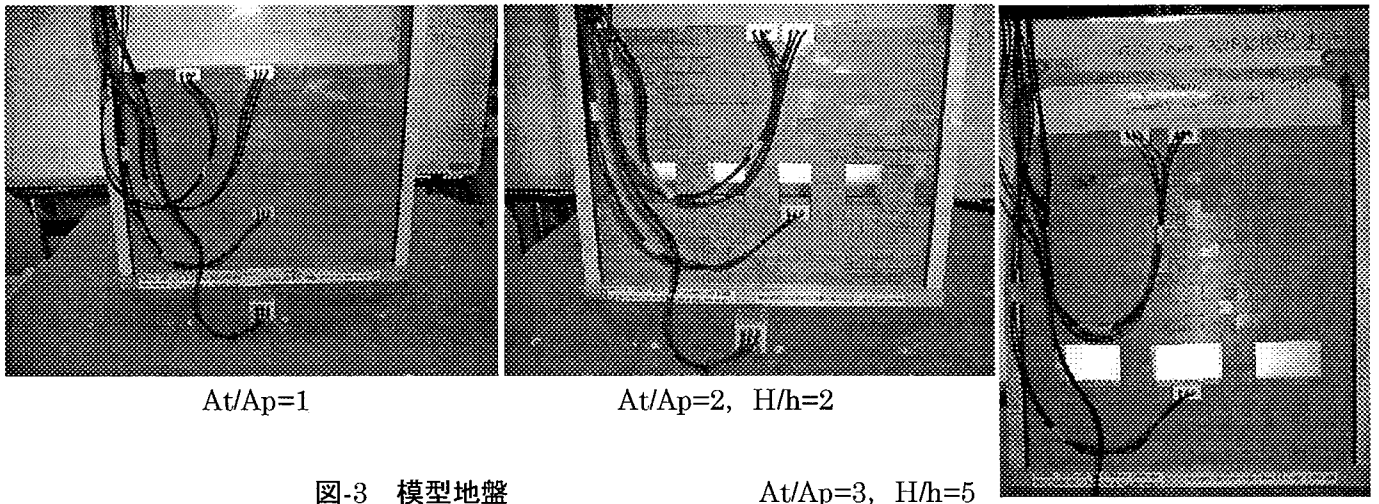


図-3 模型地盤

$A_t/A_p=3, H/h=5$

3. 実験結果

模型地盤で計測した各位置での加速度記録の例を以下に図-4として示す。

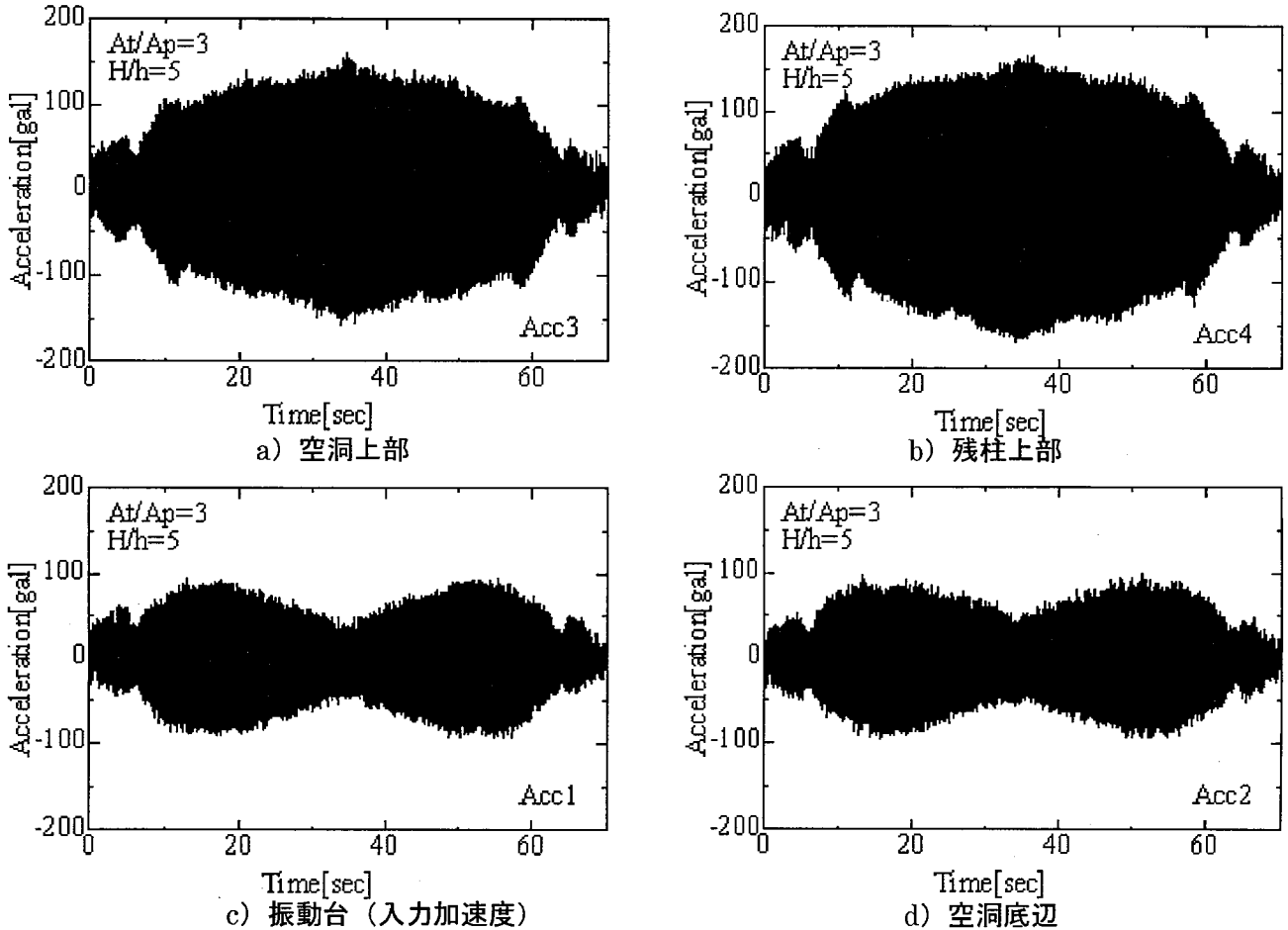


図-4 掘削率3、土かぶり比5の場合の各位置での加速度記録（振動方向成分）

図-4から、地表面で振動が増幅されており、特に残柱上部での振動が最も大きく増幅されている。また、空洞の底辺では振動がほとんど増幅されていない。この2点の特徴はすべてのケースで見られた。そこで、図-5に残柱上部の加速度記録を示す。ここで、土かぶり比5は同条件とし掘削率の違いを比較する。

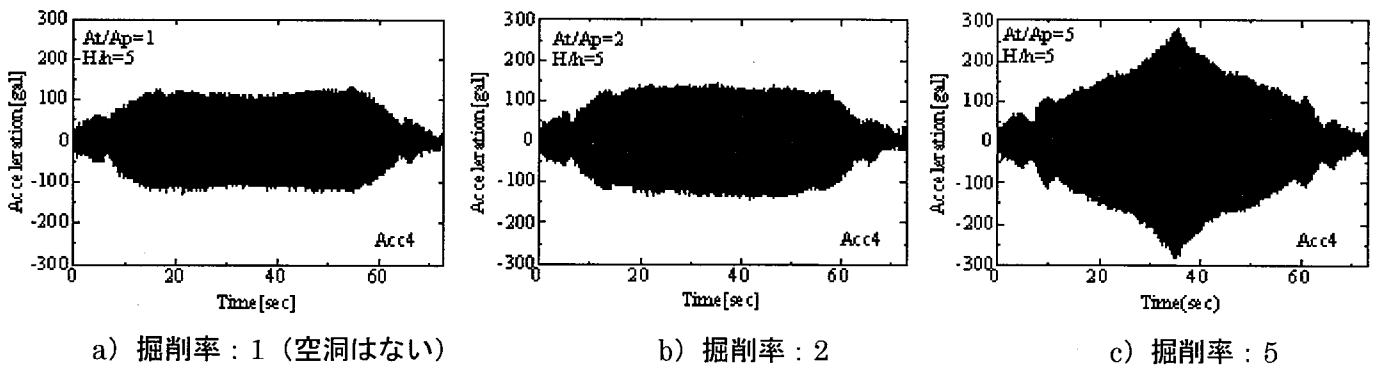


図-5 残柱上部の加速度記録の比較

H/h=5のケースでの加速度の最大値を表-2に示す。At/Ap=1の空洞がない場合の最大値とその他のケースを比較すると、掘削率2では1.1倍、3では1.3倍、5では2.1倍となっている。このことから、空洞の掘削率が大きいほど地表面で振動がより増幅されることが明らかとなった。土かぶり比を変化させて比較した場合にも、土かぶり比が大きくなると振動が増幅される結果が得られた。この主な原因は空洞上部の質量が多くなることに加え、重心が高くなるからであると考えられる。

表-2 各ケースにおける加速度の最大値（残柱上部）

掘削率	Max Acc. [gal]
At/Ap=1	132.09
At/Ap=2	144.56
At/Ap=3	165.96
At/Ap=5	280.41

上記の結果から掘削率が低い地域でも、地震による振動を受けて残柱の一部が破壊され、掘削率が大きくなると揺れが大きくなることも考えられる。このことが残柱破壊の連鎖的にも繋がるとも考えられる。

4. FFT 解析

加速度応答に対して FFT 解析を行い、掘削率と土かぶり比の変化による模型地盤の固有周期の変化を検討した。以下に前出の土かぶり率 5 で一定とし、掘削率を変化させた場合の解析結果を図-6 として示す。

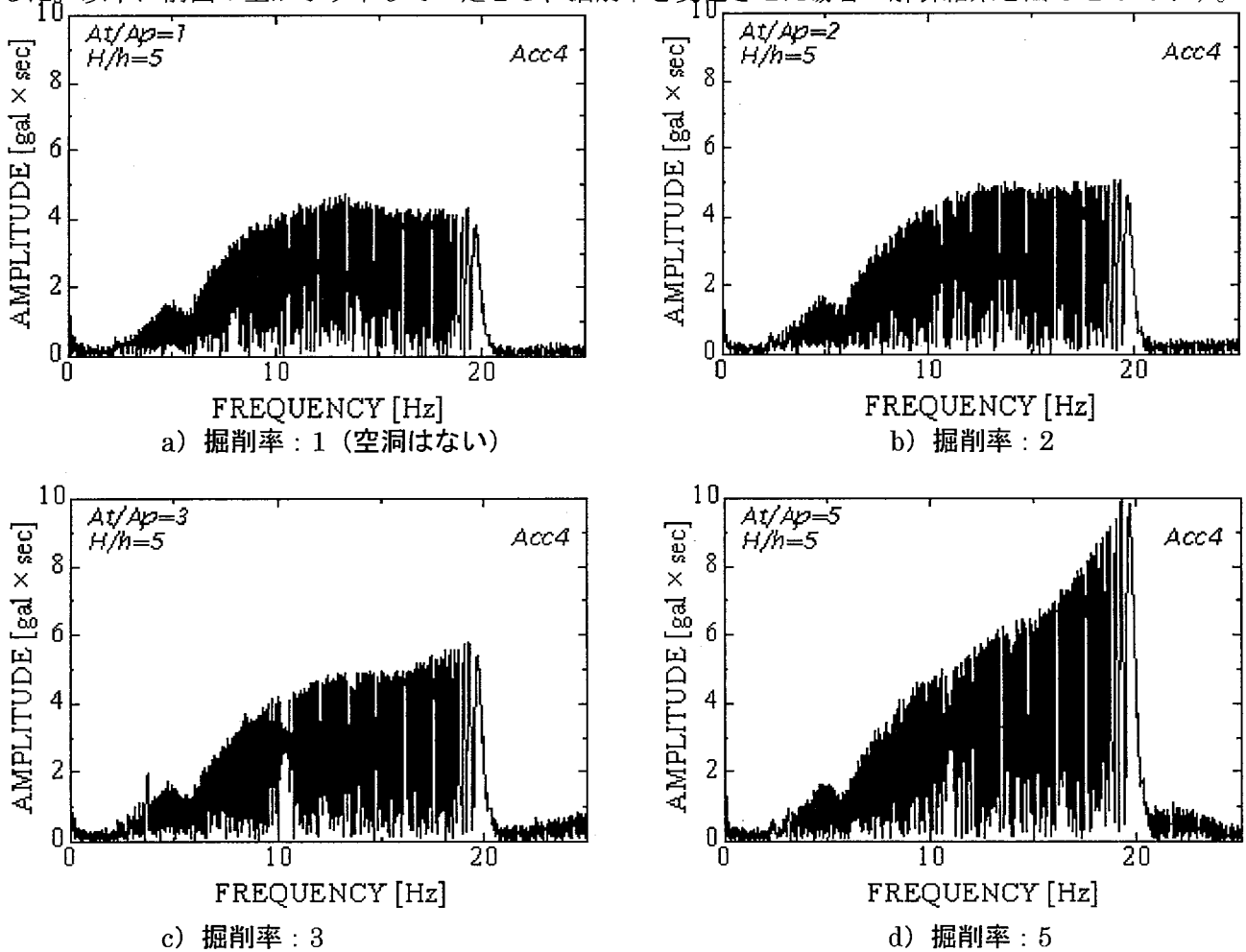


図-6 残柱上部の加速度応答に対する FFT 解析結果

図-6 の a) を見ると、残柱上部の加速度応答に対する固有周期が明確ではないが、最大値は 13.4[Hz]に存在する。掘削率が 2・3・5 のケースではそれぞれ、19、19.2、19.3[Hz]の値を示し、僅かではあるが掘削率の増加に伴い固有周期も増加する傾向にある。

すべてのケースでの固有周期を表-3 にまとめる。土かぶり比の低い浅い空洞で掘削率を増加させると、固有周波数が増加する傾向を確かめることができる。

表-3 各ケースにおける固有周波数[Hz]

	At/Ap=1	At/Ap=2	At/Ap=3	At/Ap=5
H/h=2	13.6	12.9	14.2	17.9
H/h=3	12.9	12.5	12.9	19.3
H/h=5	13.4	19	19.2	19.3

5. 等価な解析モデルの提案

実験結果を比較検討するためにモデル地盤を単純化し、等価な解析モデルを提案する。水平振動に対して、単層地盤の固有周期 T_p は次式で与えられる

$$T_p = \frac{4H}{V_s} ; V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

ここで、 H は地表面から基面までの深さ、 V_s は層のせん断波速度、 G はせん断弾性係数である。

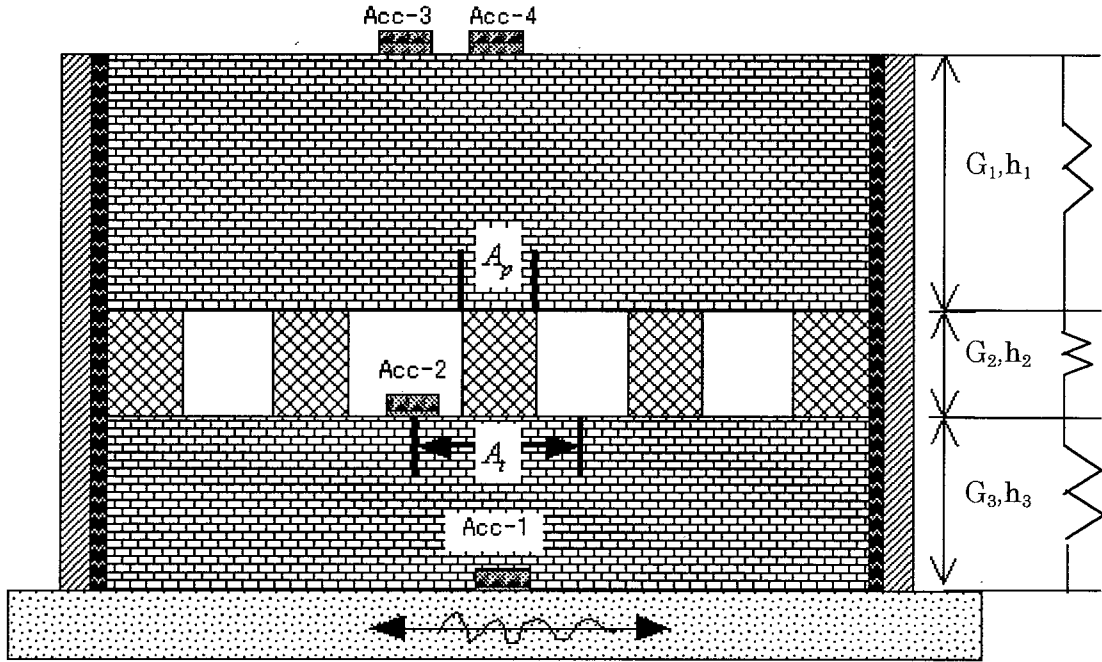


図-7 模型地盤の等価なモデル化

今回の模型地盤を図-7のように3層構造とみなした場合、その等価なせん断波速度は下記のように求めることができる：

$$\bar{V}_s = \sqrt{\frac{\alpha G_1 G_2 G_3}{\alpha \lambda_1 G_2 G_3 + \lambda_2 G_1 G_3 + \alpha \lambda_3 G_1 G_2} \cdot \frac{1}{\lambda_1 \rho_1 + \alpha \lambda_2 \rho_1 + \lambda_3 \rho_3}} \quad (3)$$

ここで $\alpha = \frac{A_p}{A_t}$; $\lambda_1 = \frac{h_1}{H}$; $\lambda_2 = \frac{h_2}{H}$; $\lambda_3 = \frac{h_3}{H}$ である。

$\lambda = \lambda_2$, $1 - \lambda = \lambda_1 + \lambda_3$, $G_1 = G_2 = G_3 = G$, $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$ とすると、上式は下記のようになる。

$$\bar{V}_s = V_s \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda + \alpha(1 - \lambda)} \cdot \frac{1}{\alpha \lambda + (1 - \lambda)}} \quad (4)$$

したがって、式 (2) と式 (4) から、空洞が存在する模型地盤の正規化固有周期は下記のように得られる：

$$\frac{\bar{T}}{T_p} = \sqrt{\frac{\lambda + \alpha(1 - \lambda)}{\alpha} \cdot (\alpha \lambda + (1 - \lambda))} \quad (5)$$

図-8の a) に掘削率と土被り比を変化させて行った解析結果を示す。図からわかるように、掘削率が大きくなるに連れて固有周期も長くなる。この結果は模型実験の結果とほぼ同様な傾向を示している。亜炭層の下面から地表までの深さが一定として土被り比を変えた場合 (層の厚みのみの変化)、見かけ固有周期は小さくなる。一方、層の厚み一定で土被り比を変化させた場合、式 (5) を下記のように書くことができる。

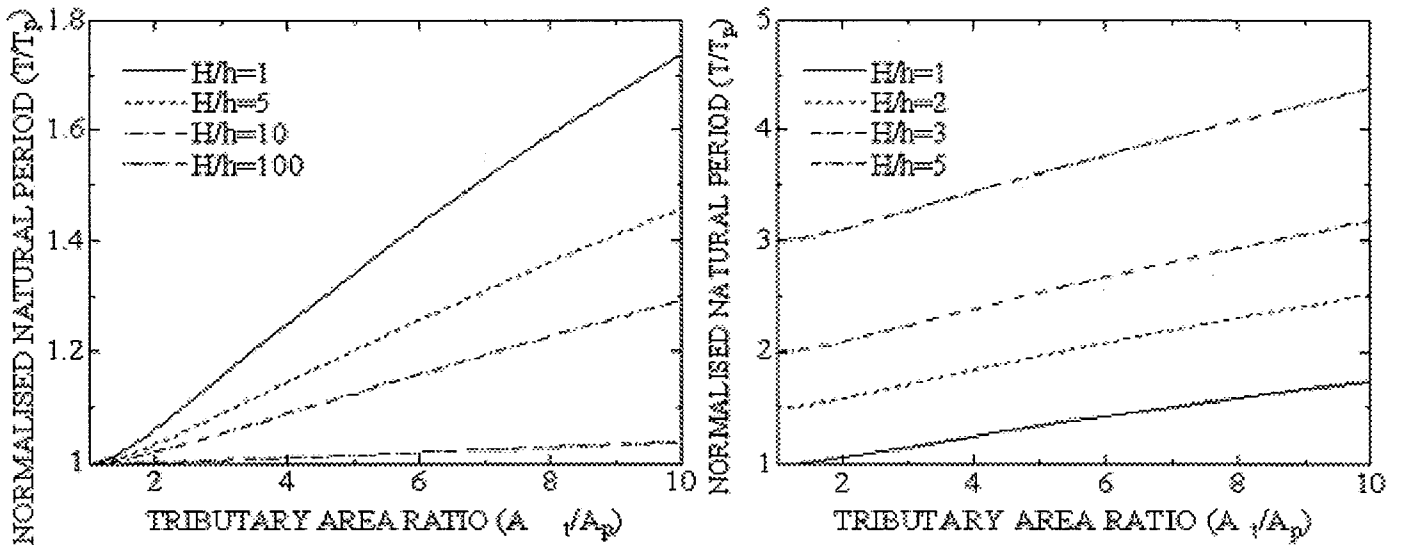
$$\frac{\bar{T}}{T_p} = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \sqrt{\frac{\lambda + \alpha(1 - \lambda)}{\alpha} \cdot (\alpha \lambda + (1 - \lambda))} \quad (6)$$

上式における T_p は下記のように仮定した。

$$T_p = \frac{4H_0}{V_s} ; H = H_0 + \Delta H$$

式 (6) を用いて行った解析結果を図-8の b) に示す。図からわかるように、地盤の固有周期は土被り比が増加するとその値が長くなることを意味している。この結果は実験結果とほぼ同等の傾向を示している。

いえる。



a) 土かぶり一定

b) 層の厚さ一定

図-8 掘削率と土被り比を変化させた場合正規化固有周期の変化

6. 結論

今回行った振動実験と解析結果より下記のような結論を導くことができる

- ① 地表面の振動は、空洞の真上に比べて残柱の真上における加速度の増幅率が高い。また、空洞内部で振動はほとんど増幅されない。
- ② 掘削率が大きくなると加速度の増幅率も大きくなる。また、その固有周期も影響を受ける。
- ③ 実験より土被りの影響も確認されたが、その影響は掘削率の影響と比較して相対的に小さい。しかし、解析モデルの結果から、土かぶり比が重要なパラメーターであることも明らかである。
- ④ 提案した解析モデルを用いると実験的に確認された傾向を力学的に説明することが可能である。