

地震時の大規模地下空洞周辺の波動伝播機構

MECHANISM OF WAVE PROPAGATION AROUND LARGE CAVERN DUE TO SV WAVE

大槻 明*・春海佳三郎**

By Akira OHTSUKI and Kasaburo HARUMI

1. はじめに

地震時の岩盤中の空洞周辺応力を理論的に検討した研究は、いままでに数多くなされている。たとえば、従来から用いられてきた方法の1つとして、固有関数で展開した級数解を使い、円型空洞が無限均一地盤中に存在する場合の動的解を求めた研究がある^{1),2)}。これに対し、近年では動的境界値問題を積分方程式に帰着させて解く方法が提案され、任意形状の空洞や多数空洞周辺応力について解析が行われている³⁾。

上述のこれらの研究は、特に、定常状態における空洞表面の最大変位や最大応力といったものがその中心になっており、空洞周辺における波動伝播のメカニズムについては触れられていないように思われる。そこで、本論文では、少し視点を変え、空洞周辺での波動伝播がどのように行われるか、特に、近年空洞の大型化に伴い空洞の幾何学的寸法に比べ比較的短い波長の地震波が入射した場合、空洞がどのような挙動を示すか、空洞各点の最大応答値と関連づけて検討した。

2. 解析手法とモデル

従来から空洞周辺の過渡応答解析を行う方法としては、FEMや差分といった逐次数値解析法がある。FEMは、複雑な解析を行える反面、データ作成時間や計算時間、容量が非常に大きくなる傾向がある。一方、差分法は、計算時間、容量が小さい反面、複雑なモデルを解くことはできない。そこで、本解析では、すでに開発した手法⁴⁾を用い、Fig. 1に示すように空洞およびその近傍地盤はFEMで、その他の領域は質点系モデル（一種の差分）でモデル化する。これにより、上述した手法

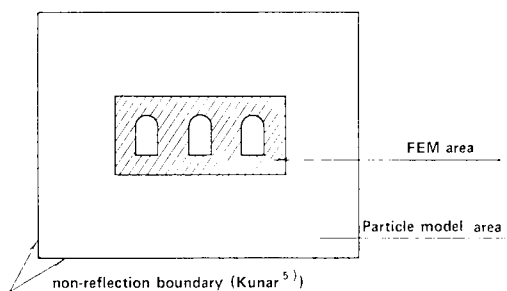


Fig. 1 Analytical model combining FEM with particle model (FDM).

のおおのの欠点を補い、より効率的な計算が可能となった。

本解析に用いる地下空洞の形状寸法をFig. 2に示す。モデル1を基本に、モデル2はモデル1の空洞が2基、モデル3は、空洞が3基40m間隔で並列に隣接している。地盤定数は、縦波速度3000 m/s、横波速度1500 m/s、密度2.6と仮定し

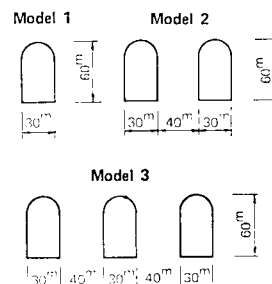


Fig. 2 Analytical model of cavern.

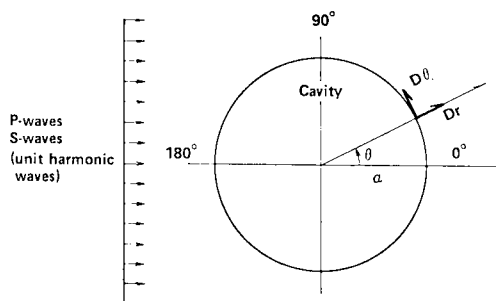


Fig. 3 Analytical model of cylindrical cavity in infinite elastic medium.

* 正会員 清水建設(株)大崎研究室

** 理博 群馬大学教授 工学部

た。入射波としては、SV 波の Sine 変位波形を垂直入射する。

3. 解の精度

Fig. 3 に示した解析モデルについて、まず、既往の研究結果、PAO¹⁾ および MOW²⁾ の解と比較してみた。

縦波入射の場合 空洞表面での最大変位 D_r , D_θ を **Fig. 4** に示す。図中には本手法と PAO の方法によって求めた値をプロットしてある。**Fig. 4** をみると $\theta=90^\circ$ から 180° の範囲では、両手法ともかなりよい一致を示している。これに対し $\theta=0^\circ$ から 90° では、両手法の結果には若干の差異が認められる。この理由としては、本手法による解は波動方程式を直接数値積分したものであるのに対し、PAO の解は解析的に求めた定常解であること、また、本手法では入射波の空洞に沿って回り込む波や空洞表面の表面波も考慮しているのに対し、PAO の解では、空洞よりハンケル関数で逸散する反射波のみを考慮している違いによるものと思われる。全体的には両手法ともよい一致をみている。

横波入射の場合 本手法と MOW の方法によって求めた値を **Fig. 5** に示す。**Fig. 5** をみると、縦波の場合と同様に横波の場合も $\theta=90^\circ$ から 180° では両手法の解は一致しているが、 $\theta=0^\circ$ から 90° では若干の差異が認められる。この理由としては、前述したことが同様に考えられる。

以上のことから、本手法は波長と要素長さ、伝播速度と時間刻みとの関係を十分に考慮して計算を行えば、かなりの精度で解が得られることがわかった。精度を保つには以下のことに注意する必要がある。要素長さ (Δh) は、一波長 (L) を十等分以上分割できる細かさがよい⁹⁾。

$$\Delta h \leq L/10$$

また、時間刻み (Δt) は、次式を満足するように決める必要がある。

$$\Delta t = \alpha \cdot \Delta h / \sqrt{V_P^2 + V_S^2}$$

ここで、 V_P は縦波速度、 V_S は横波速度である。 α は経験的に 0.8 前後の値をとればよい。

4. 地下空洞周辺の波動伝播機構

空洞周辺の波動伝播の様相をみるため、Sine 変位波

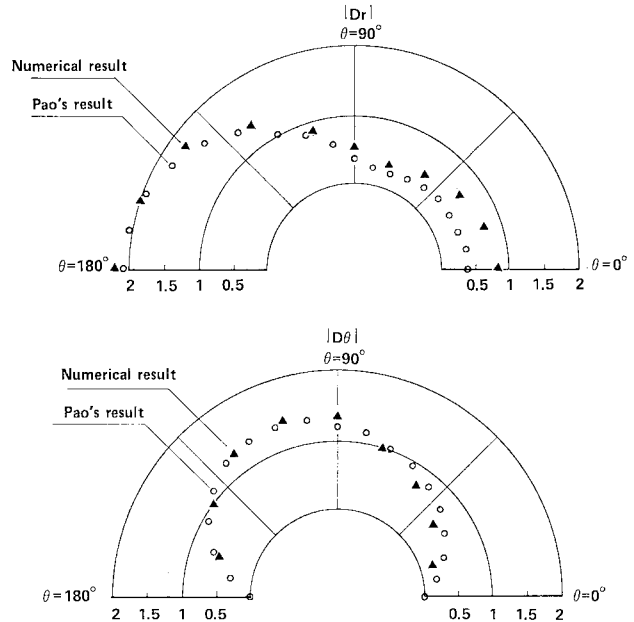


Fig. 4 Distribution of maximum displacement ($\alpha\alpha=1.57$ incident P waves).

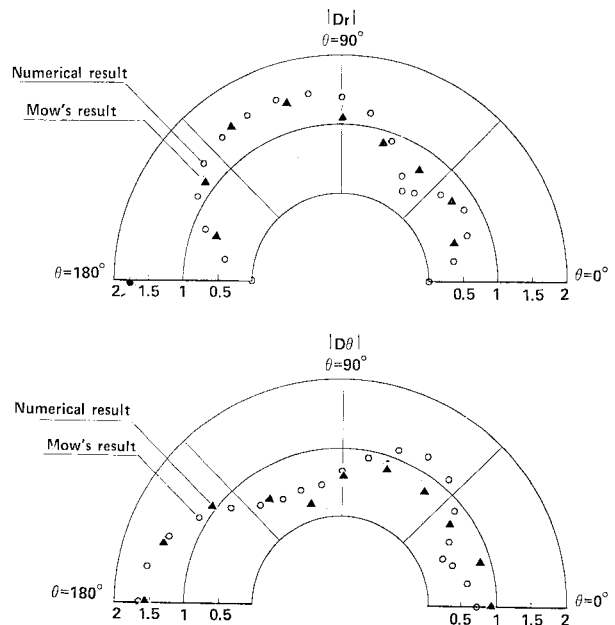


Fig. 5 Distribution of maximum displacement ($\beta\alpha=1.5$, incident SV waves).

形を 2 波垂直入射させた。**Fig. 6** には、ある時刻における空洞およびその近傍の波動伝播状況を変位ベクトル表示した。ケース 1 では、空洞寸法に比べて入射波の波長がかなり長い (5 Hz)、空洞が存在することによる波動の乱れはなく、空洞は周辺地盤の動きと一体となってせん断変形している様子が認められる。これに対

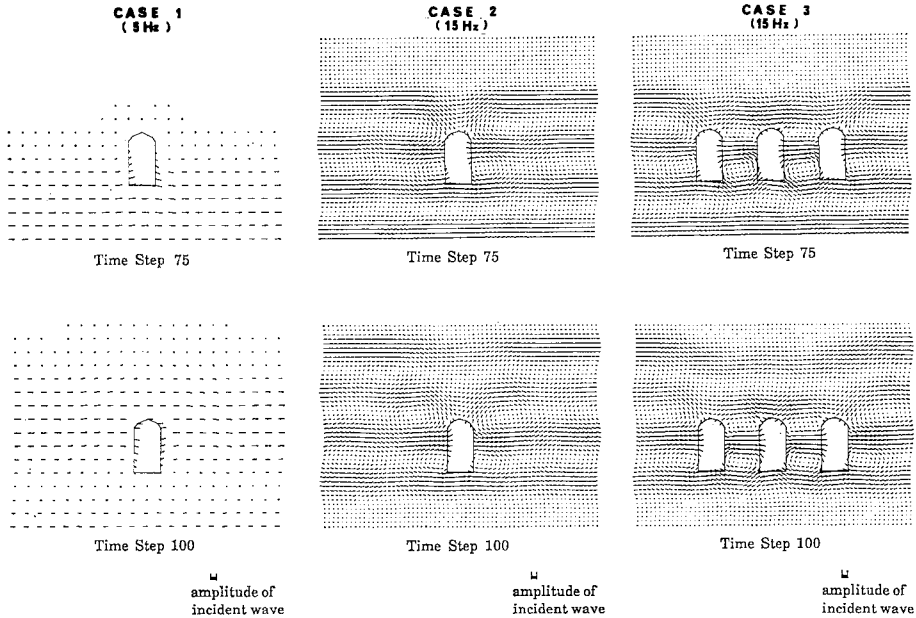


Fig. 6 Wave propagation around cavern.

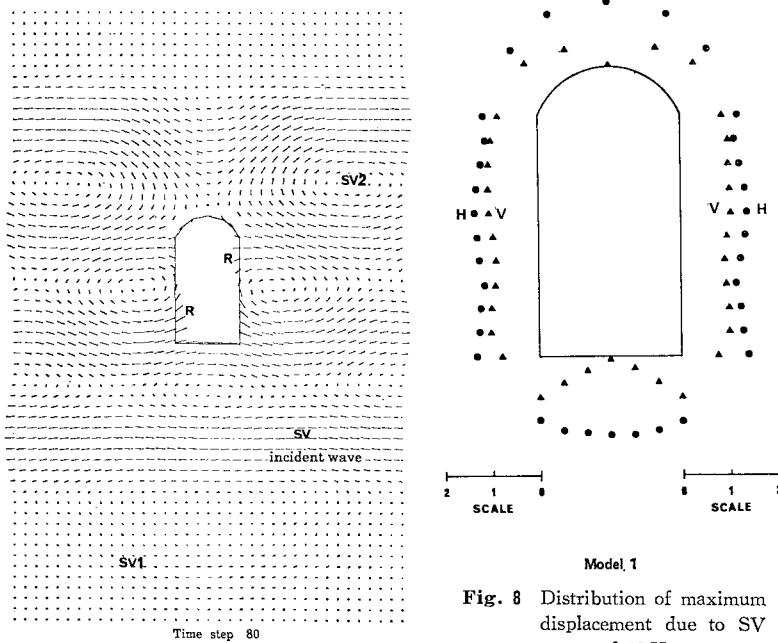


Fig. 7 Wave propagation around cavern (Case 2) due to SV waves of 15 Hz.

し、ケース 2 をみると、入射波の波長がケース 1 の場合に比べ短くなったため (15 Hz)、空洞周辺ではかなりの波動の乱れが認められる。この乱れは Fig. 7 の拡大図をみるとわかるように、おもに、空洞より同心円状に生じる反射 SV 波 (SV 1) によるもので、この反射 SV 波と入射波 (SV) が合成され空洞周辺には渦巻き状の

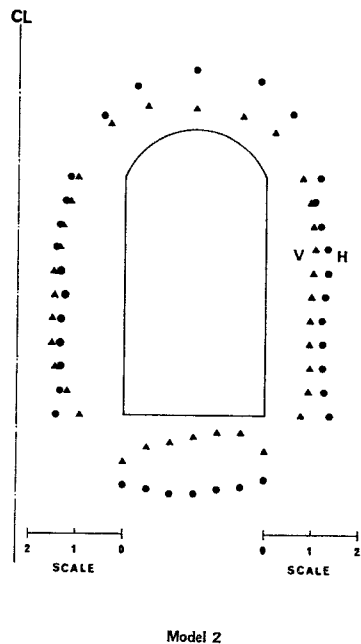
波 (SV 2) が形成されている。一方、空洞側壁には側壁に沿って進む表面波 (R) が生じている。このため、側壁には 5 Hz の場合にみられなかった鉛直動成分が顕著に認められ、空洞は複雑な変形モードとなっている。ケース 3 では、空洞 3 基の場合の波動伝播は、ケース 2 の空洞 1 基の場合のそれと大きくは異なっていない。しかし、中央の空洞や中央の空洞に面している左右の空洞の側壁は隣接する空洞の影響を若干受けており、振幅が 1~2 割程度 1 基のそれよりも大きくなっている。

入射波の波長が空洞寸法に比べて短くなるにつれ、空洞の挙動は複雑になっており、空洞のせん断変形のみを考慮したモデル

だけでは空洞の挙動を十分表現できないことが推測される。

5. 空洞表面の変位分布

前節の検討 (Fig. 6) から、入射波の周波数 5 Hz の場合よりも 15 Hz の場合の方が、空洞およびその周辺地盤の挙動は複雑であり、また空洞からの反射波も顕著で



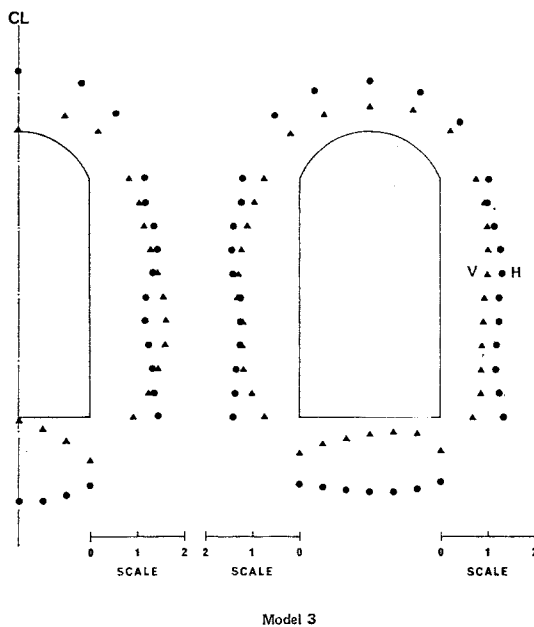
Model 2
Fig. 9 Distribution of maximum displacement due to SV waves of 15 Hz.

あった。そこで、ここでは、特に 15 Hz に入射波を限定し、定常振動における空洞表平の最大変位を各モデルについて調べ、Fig. 8~10 に示した。図中、空洞各点の最大水平変位を黒丸印で、最大鉛直変位を黒三角印でプロットした。このときの入射波の振幅は単位振幅として入力した。

空洞 1 基では、空洞底面で水平変位が大きく入射波の振幅の約 2 倍、側壁では水平変位のほかに鉛直変位がかなり生じており、水平変位で 1.5、鉛直変位で 1.2 程度生じている。一方、空洞上端部の変位は、側壁の変位と同程度のものが生じている。空洞 2 基では、空洞が互に向かい合っている側の側壁で変位の増加がみられ、水平変位は 1 基の場合に比べ 1~2 割大きく、鉛直変位は 1 基に比べ最大 5 割程度大きくなっている。また、その側壁中央部付近では、水平変位より鉛直変位の方が大きくなっている。空洞 3 基の場合は、2 基の場合と同様に空洞が互に向かい合っている側の側壁、特に中央の空洞の側壁に、1 基の場合よりも大きな振幅が認められる。これは、空洞の相互干渉によるものと思われる。

6. ま と め

入射波の波長が空洞寸法に比べて短くなるにつれ、空洞の挙動は複雑になるため、空洞のせん断変形のみを考慮したモデルだけでは空洞の挙動を十分表現できないこ



Model 3
Fig. 10 Distribution of maximum displacement due to SV waves of 15 Hz.

とが推測される。すなわち、入射波の波長が短くなると空洞表面に表面波が生じ、空洞は鉛直動を含む複雑な変形モードとなっている。しかし、本手法によって得られた鉛直動を含む複雑な変形モードをどの程度考慮すればよいか不明であり、今後の実測資料の蓄積が必要であろう。空洞が隣接することによる影響は、隣接間隔、入射波波長と空洞の比などによって種々異なるものと思われる。本解析結果から空洞が互に向かい合っている側の側壁で、変位が大きくなる傾向が認められた。

参 考 文 献

- 1) PAO, Y. : Dynamical stress concentration in an elastic plate, *J. Applied Mechanics*, pp. 299~305, 1962.
- 2) Mow, C. and L.T. Ment : Dynamic stresses and displacements around cylindrical discontinuities due to plane harmonic shear waves, *J. Applied Mechanics*, pp. 598~604, 1973.
- 3) 丹羽義次・小林昭一・横田和男 : 積分方程式による任意形状、多数空洞周辺応力の解析, *土木学会論文報告集*, No. 195, pp. 27~35, 1971.
- 4) Ohtsuki, A. and K. Harumi : Effect of topographies and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves, *Earthquake Eng. struct. dyn.*, Vol. 11, pp. 441~462, 1983.
- 5) Kunar, W.D. and L. Rodriguez-Ovejero : A model with nonreflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses, *Earthquake eng. struct. dyn.*, Vol. 8, pp. 361~374, 1980.
- 6) Ilan, A., L.J. Bond and M. Spirack : Interaction of a compressional impulse with a slot normal to the surface of an elastic half space, *geophys. J.* 57, pp. 463~477, 1979.