

大槻 明 共著  
春海佳三郎

## “地震時の大規模地下空洞周辺の波動伝播機構” への討議

(土木学会論文報告集, 第339号・1983年11月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

北原道弘 (東海大学)・西村直志・廣瀬壮一 (京都大学)

By Michihiro KITAHARA, Naoshi NISHIMURA and Sohichi HIROSE

無限弾性体中の空洞の動的解析は、動弾性学における重要なテーマの1つであるとともに、近年、その工学的興味も増大して、多くの研究がなされています。われわれも境界積分方程式法を用いて、著者らと同様の問題を解析していることから、興味深く読ませていただきました。しかしながら、解の精度、ならびに、その記述に関していくつかの疑問をもちましたので、ここに、討議として提起したいと思います。

### (1) Pao あるいは Mow and Mente の解析解に関する記述について

p.228 上から18行目～21行目の文章において、“Paoの解では、…違いによるものと思われる。”とありますが、この記述は、正しくないと思われます。Pao あるいは Mow and Mente による解は、境界条件を満足するように求められた固有関数の無限級数和として表わされており、数学的にも厳密なものです。ただし、数値計算上は、無限級数和を有限級数和に置き換えなければならないので、計算結果にその打ち切り誤差が含まれることが予想されますが、実際、計算を実行してみると、この級数和の収束性はよく、初項から、10～15項程度を考慮すれば、十分であることがわかります。また、Pao あるいは Mow and Mente などによって求められた定常解を逆フーリエ変換することにより、空洞に沿って回り込む波や、空洞表面における表面波なども確認されています<sup>1)</sup>。

### (2) 解の精度について

上述のことより、著者らの結果と Pao らの結果の差異は、他に原因があるものと思われます。

a) 著者らの解は、時間領域における逐次計算によって得られるいわゆる過渡解であるのに対して、Pao らの解は、定常解です。したがって、その両者の比較においては、過渡的挙動が無視できるほどに時間が経ったときの定常的最大変位を Pao らの解と比較されていると

思いますが、どの程度の経過時間を考慮しておられるのでしょうか。また、そのとき、確かに時間的に定常な変位応答が得られているのでしょうか。われわれの意見としては、Pao あるいは Mow and Mente による定常解を逆フーリエ変換して得られる過渡的変位応答を、著者らの数値解の精度の検証に用いた方がよいと思います。

b) Fig.4 あるいは Fig.5 の計算においてはどのような物質定数 (ポアソン比) を用いられたのでしょうか。特に Mow and Mente は平面ひずみ状態を仮定しているのに対し、Pao は平面応力状態を仮定していますので注意が必要です。なお、波動現象を忠実に表現するためには、FEM-質点系モデル要素の取り方について、十分な注意が必要であると思われますが、どのような要素分割がされているのでしょうか。

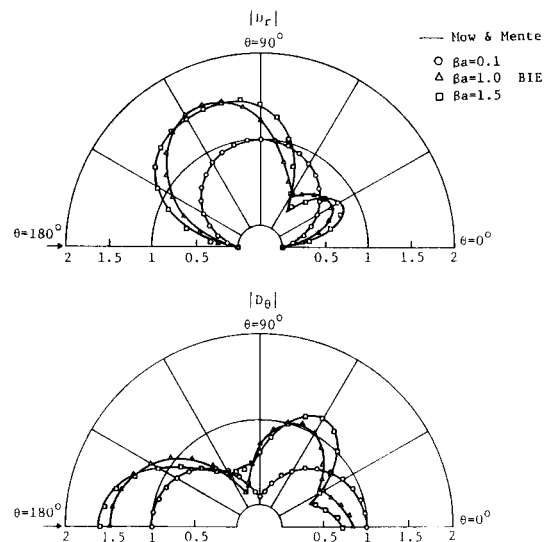


Fig.1 Distribution of  $|D_r|$  and  $|D_\theta|$  for various  $\beta_a$  with  $\nu=0.25$  (cavity).

なお、参考のために、われわれが境界積分方程式法を用いて得た解を Mow and Mente の解と比較したものを、Fig. 1 に示します<sup>2)</sup>。これは、著者らの Fig. 5 に対応するのですが、平面ひずみ状態、ポアソン比  $\nu=0.25$  を仮定し、空洞境界は、48 分割、境界上の変位は一定要素を用いて近似しました。

参考文献

1) Pao, Y.-H. and Mow, C. C. : Diffraction of Elastic

Waves and Dynamic Stress Concentration, Rand Corporation, Ch. 3, 1971.

2) Niwa, Y., Kitahara, M. and Ikeda, H. : The BIE Approach to Transient Wave Propagation Problems Around Elastic Inclusions, Theo. and Appl. Mech., Vol. 32, pp. 183~198, 1984.

(1984. 5. 21・受付)

▶回答者 (Closure)

大槻 明 (清水建設)・春海佳三郎 (群馬大学)

By Akira OHTSUKI and Kasaburo HARUMI

本文を詳細に検討され、討議まで頂いたことに対しお礼を申し上げます。まず、討論者が指摘された厳密解と本手法による解の差異の原因は、本手法の解の精度によるものであるとしたうえで議論を進めることにします。

波動伝播問題を本手法のように離散化手法により求める場合、要素幅、計算時間間隔、定常状態に達するまでの継続時間、有限境界からの反射波の有無が、解の精度に大きく影響します。本論文では、要素幅、計算時間間隔に関しては以下の基準を1つの目安として解析を行っています。

要素長さ ( $\Delta h$ ) は、1 波長 ( $L$ ) を 10 等分以上分割できる細かさとしています。

$$\Delta h \leq L/10 \dots\dots\dots (1)$$

時間間隔 ( $\Delta t$ ) は、要素の長さおよび伝播速度より定めています。

$$\Delta t = \alpha \cdot \Delta h / \sqrt{V_p^2 + V_s^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $V_p$  は縦波速度、 $V_s$  は横波速度、 $\alpha$  は経験的に 0.8 の値を使用しています。また、定常状態に十分に達するまでの継続時間および境界からの反射波の有無は、応答波形から判定し適切な値を定めています。すでに上述の基準を1つの目安として種々の解析を行っています<sup>1)~3)</sup>、Appendix I に示すように定常応答問題および過渡応答問題に対してかなりの精度で解析が行われています。本論においても、今までの経験から上述の基準をもとに要素幅については、空洞境界を 20 分割できる要素幅とし、計算時間間隔は 0.005 秒、入力波は 4 波長としております。これに対し討議者は空洞境界を 48 分割し境界積分方程式を用いて解の精度を検討されております。そこで、再度本手法を用いて Mow の解について検討を試みました。

解析に用いたケースは、 $\beta\alpha$  が 1.5 ( $\beta=2\pi f/V_s$ ;  $f$  は振動数、 $V_s$  は横波速度、 $\alpha$  は空洞半径)、ポアソン比 0.25 です。空洞境界は 36 分割とし、空洞周辺地盤は式 (1) より要素幅を定め、倍精度で解析を行いました。なお、入力波は前回と同様に 4 波長入力し定常状態を確認しました。Fig. 1 にはその結果を示してあります。こ

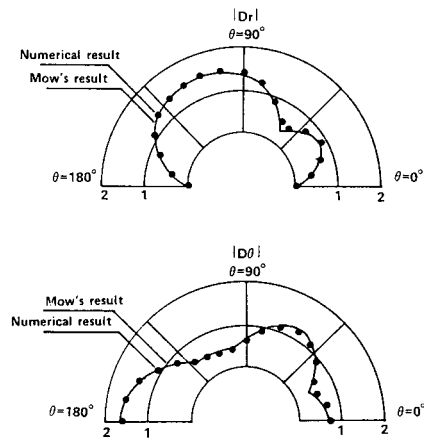


Fig. 1 Distributions of the maximum horizontal and vertical surface displacements ( $\beta\alpha=1.50$ , incident SV waves).

の結果より、本解析結果と Mow の解はよい対応関係にあります。したがって本論文で示した厳密解との差異の原因は空洞境界の要素分割に主な原因があったものと考えられます。式 (1) は無限地盤での基準であり、自由境界面のある場合には、その幾何学的形状や応力集中などを考慮に入れて要素分割を行う必要があるかと思われます。なお、本論で扱っている他のケース(地下空洞 1 基, 2 基, 3 基)については十分な要素分割が行われています。

定常問題を議論するうえからは討議者が用いた境界積分方程式は本手法よりも適した方法といえます。一方、本手法の目的とするところは、大地震時の挙動までを含めた複雑な地盤を実際に即して解析することであり、また、複雑な地盤中の波動伝播の視覚を通じた検討にあります<sup>4), 5)</sup>。この意味において本論文の主観は、空洞周辺に発生する複雑な波動伝播メカニズムを調べることにあります。本手法の実際問題に対する解析精度については<sup>6)</sup>、Appendix II に示すように実地震波を十分シミュレートできるものとなっており、本手法は十分実用に寄与するものと思われます。

最後に著者らの拙論に対し有益な示唆を与えて頂いた

ことに感謝するとともに、討議者の熱意に敬意を表わす次第であります。

### Appendix I

#### (1) Wong の解との比較<sup>1)</sup>

SV 波が半円形谷に垂直入射および 75 度斜め入射したときの地表の応答を比較した。

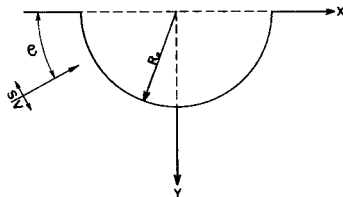


Fig. 2 Semi-cylindrical canyon.

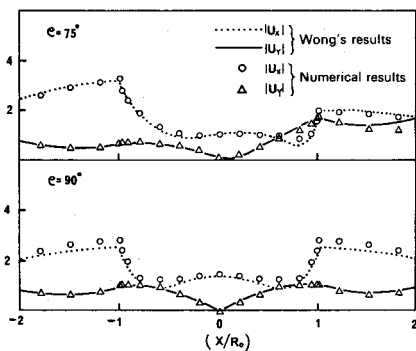


Fig. 3 Amplification patterns induced by incident SV waves ( $\eta=0.5, \mu=1/3$ ).

#### (2) McGarr と Alsop および Drake の解との比較<sup>2)</sup>

レイリー波が崖背面より入射したときの反射透過率を求めた。

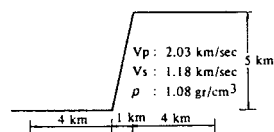


Fig. 4 A half-space with a step at its surface. This model is similar to models analysed by McGarr and Alsop and Drake.

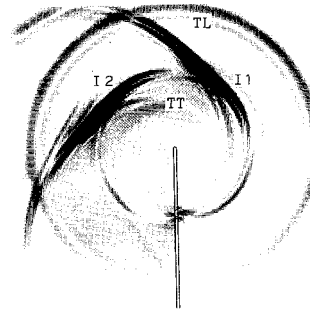
Table 1 Half-space with a step elevation (Drake).

	Reflection factors			Transmission factors		
	McGarr and Alsop	FEM (Drake)	Present solution	McGarr and Alsop	FEM (Drake)	Present solution
Lower side to upper side	-0.03	-0.13	-0.13	0.36	0.53	0.50
Upper side to lower side	-0.07	-0.35	-0.36	0.51	0.57	0.53

Period = 13.312 s

#### (3) Baborovsky の実験結果との比較<sup>3)</sup>

シュリーレン装置を使用し、クラックが存在するガラス媒質中の波動伝播を光学的に検出したものを、本手法の解と比較した。このケースでは横波のパルス波をクラックに対し 45 度で入射した。



TL : Longitudinal tip-wave I1 : Ongoing shear wave  
TT : Shear tip wave I2 : Retroreflected shear wave

Fig. 5 Reflection of transverse wave pulse by a tip of a crack computed by present method.

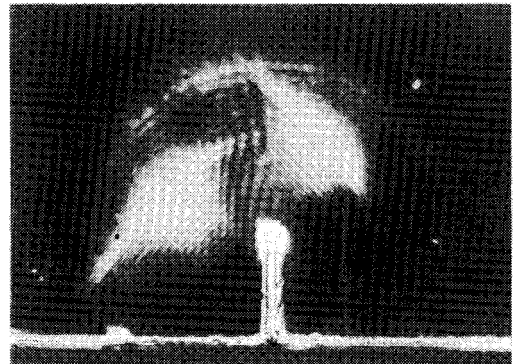


Fig. 6 Photograph of reflection of transverse wave pulse obtained by Schlieren method.

## Appendix II

実際に傾斜基盤で記録された地震波形を用い、地表の応答波形を本手法により求め、地表における観測波形と比較した<sup>6)</sup>。

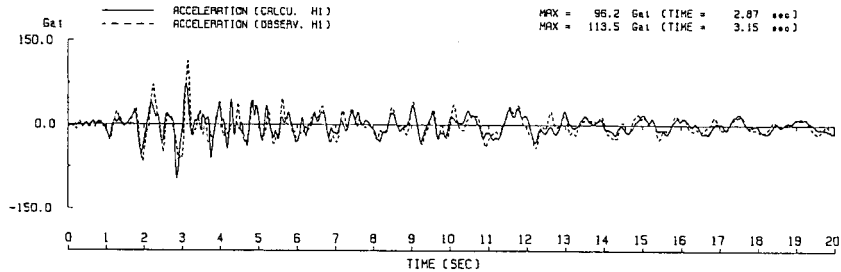


Fig.7 Comparison of observed and calculated accelerations and displacements.

## 参考文献

- 1) Ohtsuki, A. and Harumi, K. : Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves, earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol.11, pp.441~462, 1983.
- 2) Ohtsuki, A., Yamahara, H. and Harumi, K. : Effect of topography and surface inhomogeneities on seismic Rayleigh waves, Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol.12, pp.37~58, 1984.
- 3) Harumi, K., Saito, T. and Ohtsuki, A. : Motion pictures of the computer simulation of elastic waves, 10th World Conference on Non-Destructive Testing, pp.1079~1083, 1982.
- 4) 大槻 明・山原 浩・春海佳三郎：レーリー波による不整形地盤の挙動，土木学会論文報告集，第337号，pp.27~36，1983.
- 5) 大槻 明：SV波およびレーリー波入力による不整形地盤の非線形挙動に関する一考察，第39回土木学会年次学術講演会，pp.815~816，1984.
- 6) 大槻 明・田蔵 隆・清水勝美：傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ，土木学会論文報告集，第350号，pp.291~300，1984.

(1984.10.29・受付)