

京都大学工学部 正員 後藤尚男
京都大学大学院 学生員 高田至郎

1. まえかき

地中に埋設された構造物の地震時における振動性状は、埋設物を取り巻く地盤の複雑さや、地中における地震波の多様性などによって、未だに解明されていない点が多い。本研究は、地盤内に埋設された平面的な広がりをもつ構造物を対象として、その横断面における地盤と構造物の相互作用について検討を加えたものである。このような振動系は、連続弾性体として解析をすることが困難であり、ここでは、2次元有限要素法を用いて解析を進めた。最初に、均質な地盤を対象として、設定した振動モデルの妥当性について論じ、境界条件、地盤の横幅、分割の仕方などの影響について調べた。次に、基盤より一様な入力を受ける表層地盤内に埋設された構造物について、3種類の振動モデルを用い、埋設深さの相異が振動特性に及ぼす効果について、構造物の変位や、周辺地盤の応力分布を求め、それらについて比較検討を行った。

2. 基礎運動方程式

多自由度系の運動方程式は、すでに知られているように次式で書き表わされる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{z}\} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $[M]$ はmass matrixであって、ここでは、分割要素の質量を節点に集中させる lumped mass matrix を用いた。 $[C]$ はdamping matrixであり、分割要素に定数として与え、各三角要素の頂点に等分に受けもつようにした。 $[K]$ はstiffness matrixであって、変位とひずみの関係を与えるmatrix $[B]$ 、および応力とひずみの関係を与えるmatrix $[D]$ を用いると、 $[K] = [B]^T [D] [B]$ で表示される。 $\{x\}$ はdisplacement vector、 $\{\ddot{z}\}$ は入力のacceleration vectorである。また、式(1)を解いて得られる $\{x\}$ を用いると、stress vector $\{\sigma\}$ は次式で与えられる。

$$\{\sigma\} = [D][B]\{x\} \quad \text{----- (2)}$$

3. 地盤モデル

(1)固有振動数、固有モード：地盤は均質とし、ポアソン比0.35、ヤング係数 $2,000 \text{ kg/cm}^2$ 、単位体積重量 2.0 gf/cm^3 を用いて、有限要素法により、地盤の非減衰固有振動数、および固有モードを計算した例がFig.1(a)である。境界条件としては、下端は固定、側方の境界は水平方向には自由、上下方向には固定とし、節点数35、要素数48の分割を用いた。地盤のせん断1次振動のみに着目して、弾性波動論を用いれば、その固有振動数 ω_g は、 v_x を地盤内を伝播する横波速度、 H を地盤層の厚さとして、周知の次式で求められる。

$$\omega_g = \pi v_x / 2H \quad \text{----- (3)}$$

式(3)で与えられる連続体計算値は 7.4779 rad/sec であり、Fig.1(a)の1次固有振動数 7.556 rad/sec

とかなりよく一致している。また、後者の固有振動数に対応するモードはせん断型になっている。

(ii) 境界条件の影響

Fig. 1 には、3種類の境界条件について、それぞれ、水平振動、上下振動、ロッキング振動の固有振動数とモードを示した。(a)は水

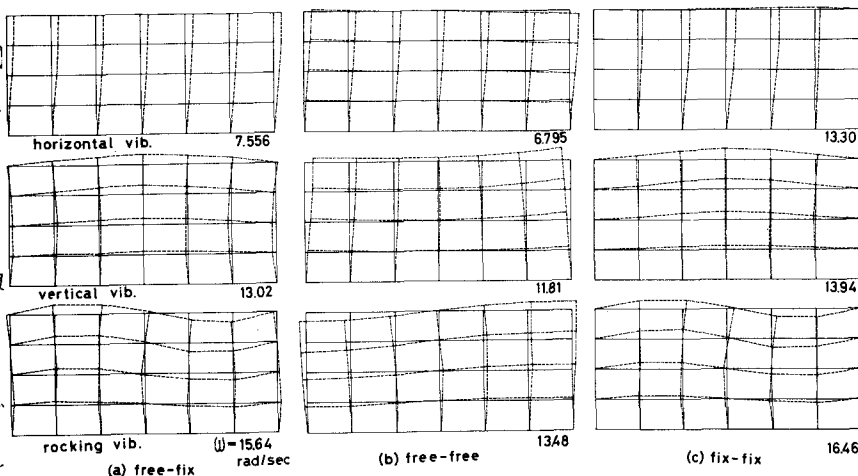


Fig.1 Vibrational mode of ground

平方向：自由，上下方向：固定，(b)は両方向とも自由，(c)は両方向とも固定の場合についての計算結果である。水平振動についてみれば，両方向とも自由な境界条件の場合には，モードはせん断型となっているが，固有振動数は連続体計算値よりも若干小さくなっている。両方向が固定の条件の場合には，モード，固有振動数とも連続体計算値とは相当に離れていることが知られる。上下振動，ロッキング振動については，水平方向自由，上下方向固定の場合と両方向とも固定の場合とは固有振動数，固有モードとも類似しており，両方向とも自由な場合には，固有振動数は小さな値をとり，そのモードは他の条件の場合と異っている。これらのことより，側方の境界条件としては，水平方向：自由，上下方向：固定の条件を用いるのが比較的安全であろうと考えられる。

(iii) 地盤の横幅の影響

横幅 b の影響について検討を行なう。地盤層の厚さ H を一定 (40 m) として， b を 60, 90, 120 m と変化させた場合について，固有振動数との関係を示したのが Fig. 2 であり，これは水平振動，上下振動，ロッキング振動に対応する固有振動数を $b=60$ m のときの値に対する比として求めたものである。水平振動については， b が変化しても，固有振動数にはほとんど変動がなく，連続体計算値に接近していく傾向もみられない。また，上下振動については， b が増加すれば，固有振動数は減少するが，その減少割合は， b が増加すれば小さくなることから知られる。ロッキング振動については， b の影響はかなり重要であり，このモードを取り扱う場合には，さらに大きく横幅をとる必要があるものと思われる。以上の検討はいずれも，側方の境界条件が水平自由，上下固定の場合について行なったものであり，上下振動，ロッキング振動においては，境界条件の影響によるものが含まれていると考えられる。

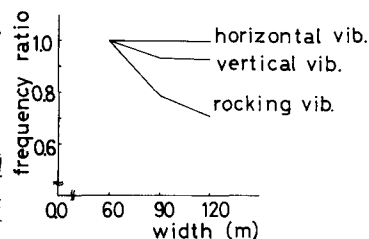


Fig.2 Effects of width

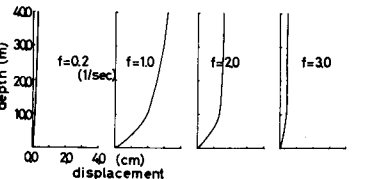
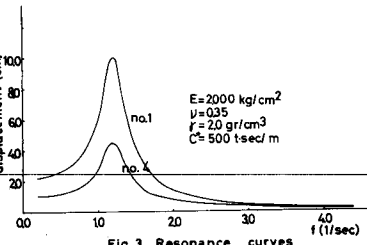
(iv) 分割の影響

分割の仕方が地盤の固有振動数に与える影響について検討をするために，分割法の異なる3種類のモデル ($b=60$ m) について計算を行なった。上下方向の分割を4のままとし，水平方向の分割を4

分割から3分割にした場合には、各次数の固有振動数は若干小さくなるがその影響は小さい。また、水平方向の分割を4のままとし、上下方向を4分割から2分割にした場合にも、固有振動数は少し小さな値となるが、その影響は少ないことが知られた。1次モードについては、分割が細かいほど連続体計算値に近づくが、ここで取り扱っているような、均質地盤でみる限りにおいては、分割数が少なくても連続体計算値と非常にかけ離れた固有振動数となるようなことはない。

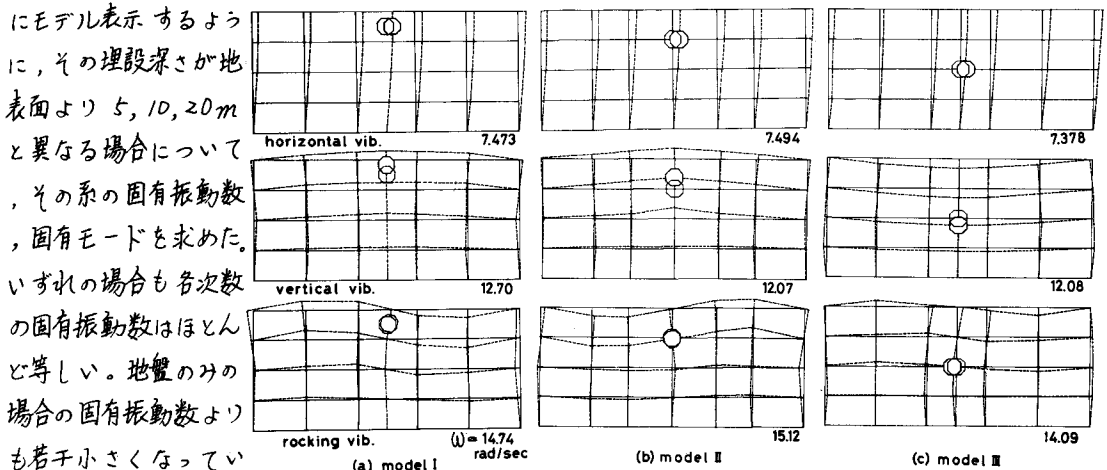
(v) 地盤の共振曲線および減衰

地盤層下端に水平方向の一定加速度入力(100 gal)が作用した場合の地表面における変位の共振曲線を示したのが Fig. 3 である。 $\tau = 1.2$ 1/sec に共振点がみられ、この値は地盤層の1次固有振動数 1.19 1/sec にほとんど一致している。また、他の振動数では共振点がみられないことから、地盤層においては、せん断振動が卓越していることが知られる。また、この計算においては、減衰としては、分割要素に $C^* = 500$ t·sec/m の値を与え、三角形要素の頂点に等分し、節点間の減衰力として作用するようにした。Fig. 3 で得られた共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法によって等価粘性減衰定数として求めれば、この C は約 0.13 に相当し、また、 $C^* = 1,500$ t·sec/m として計算すれば 0.22 に相当し、地盤の減衰定数としてはほぼ妥当な値であると考えられる。Fig. 4 は地盤層の深さ方向における応答変位の分布を示したもので、入力振動数に応じた振動形状がみられる。地中埋設物の振動を論じる場合には、とくに地盤内振動性状を的確につかふことが必要であろう。



4. 埋設構造物の振動

(i) 地盤-埋設構造物系の固有振動数および固有モード：ヤング係数 $2,000$ kg/cm²、ポアソン比 0.17、単位体積重量 3.30 gr/cm³ なるコンクリート製の正八角形断面の構造物が、Fig. (a), (b), (c) にモデル表示するよう



に、その埋設深さが地表面より 5, 10, 20 m と異なる場合について、その系の固有振動数、固有モードを求めた。いずれの場合も多次数の固有振動数はほとんど等しい。地盤のみの場合の固有振動数よりも若干小さくなっているが、その相異はわず

かであり、Fig. 5 に示すような振動系では構造物が埋設されることによって、固有振動数に与える影響は少ないと考えてよからう。また、モードについてみれば、構造物の動きは全く地盤の振動性状に追随しており、したがって、深い地点に埋設された構造物ほどその動きは小さくなっている。さらに、高次の固有振動数と固有モードについて検討した結果、埋設構造物自体の固有振動と思われる値を得ることはできなかった。

(ii) 埋設構造物の共振曲線

地盤層下端に水平方向の入力を与えた場合について、埋設構造物頂部における周波数応答を求めたところ、3つのモデルについて、ピーク値が異なるのみでいずれも Fig. 3 と同様の曲線が得られた。これらの曲線は、構造物の埋設されていない地盤のみのモデルを用いた場合の構造物頂部の深さに相当する地点での共振曲線とほとんど一致することがわかった。これは、固有モードについての検討の結果からも理解されるところであり、埋設構造物の応答変位については、結局、その地点での地盤の振動性状を的確に知ればよいことになる。

(iii) 埋設構造物周辺地盤の応力分布

Fig. 6 は埋設深さの異なる3つの振動モデルについて、それぞれ、埋設構造物周辺の応力分布を示したものである。地盤層の共振振動数付近の $f=1.0$ 1/sec のときの値についての計算結果である。 σ_x , σ_y , τ_{xy} いずれの応力についても、埋設構造物下部の加振方

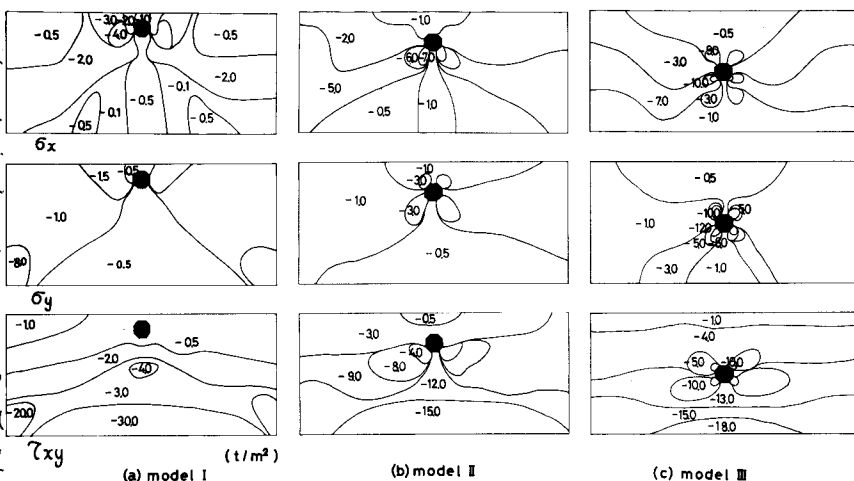


Fig. 6 Stress distribution in the ground ($f=1.0$ 1/sec)

向と 45° の方向に応力の集中がみられ、この傾向は構造物埋設位置が深くなるに従って、顕著になることが知られる。応答変位の場合については、埋設構造物と地盤との相互作用は明瞭に見られないが、応力分布についてはその影響が顕著である。さらに、周辺地盤の応力の分布は構造物の形状や、地盤と埋設構造物の剛度によっても変動するものと推定され、さらに十分な検討が必要であろうと思われる。なお、計算は京都大学大型計算センター FACOM 230-60 によった。

〔参考文献〕

- 1) O.C. Zienkiewicz: The finite element method in structural and continuum mechanics, McGraw-Hill, 1967.
- 2) 坂田政則: 沈埋トンネル耐震設計計算法に対する一試案, Proceedings of the third Japan earthquake engineering symposium-1970, pp. 739-746.