

近接加振源からの波動入射を受ける矩形剛構造物周辺の 地表面振動

VIBRATION OF GROUND SURFACE AROUND RIGID STRUCTURE WITH RECTANGULAR
BASE DUE TO WAVES RADIATED FROM ADJACENT SOURCE

北村 泰寿*

By Yasutoshi KITAMURA

This paper deals with the harmonic response of the ground surface around a rigid structure with rectangular base resting on an elastic ground and being excited by the traveling wave from an adjacent source. The contour diagrams of the amplitude ratio defined as the ratio of displacement in the wave field with the structure to the one in the free wave field are examined. Though the screening effect of waves by the structure is similar to that by trenches in the range of high frequencies, this effect is caused by the interference of the wave in the free field and the one in the scattered field excited by vibrations of the structure.

Keywords: elastic half space, elastic wave propagation, dynamic soil-structure interaction, wave scattering

1. はじめに

建設工事や交通機関などによって発生する周辺地域の振動を考えると、複雑な地層、地形等の条件が振動の伝達特性に及ぼす影響を調べることは重要な問題であるが、次に述べるような2つの問題も注目されよう。その1つは、近接した加振源から伝わってきた波動が構造物に入射する際に生じる入力損失効果である。この問題の理解は構造物内部の振動増幅、減少等を考えるときに必要となる。他の1つは、波動伝播経路に構造物が存在する場合、構造物周辺の地盤振動が構造物の存在しない場合に比べて、いかなる増幅、減少を示すかである。公害振動とよばれるような振動を対象とすると、その規制は地盤振動に対してなされることが多く、構造物の存在による周辺地盤の振動特性を把握することは防振対策上からも関心事である。たとえば、防振壁の効果が種々検討されているが、波動伝播経路の地表面に剛な構造物が介在するときにも振動遮断が生じると考えられ、その程度や範囲を知ることは興味ある問題である。

従来より、地震波入射による構造物の応答には入力損失が生じることが知られており¹⁾、理論解析および実測

に基づく多くの研究成果が発表されている^{2)~4)}。この入力損失の評価にかかわる構造物周辺地表面の振動には、地盤が構造物の存在によって拘束される効果が含まれている^{5),6)}。一方、近接した加振源からの波動入射を受ける構造物およびその周辺地盤の振動についても同様のことがいえるが、これらに注目した研究は少ない。たとえば、二次元問題では、半無限弾性地盤表面の剛基礎を介した波動伝播特性⁷⁾、半無限粘弾性地盤上の箱形柔性構造物の応答⁸⁾などに関する解析がみられる。前者では、剛基礎前後における表面変位の周波数応答、特定周波数における地中変位分布が調べられているが、後者では地盤振動は対象外である。また、三次元問題としては、周辺地盤の動的応答を考慮した機械基礎設計のため、半無限粘弾性地盤上の円形および矩形基礎周辺の表面振動が調べられている^{9),10)}。これらの論文では、基礎自体を加振源として、基礎と基礎から遠点の地盤間の近似伝達関数を提示することを目的としている。

このような状況において、本研究は、文献7)の研究を三次元の場合に拡張して、近接した加振源からの波動入射を受ける半無限弾性地盤表面の矩形剛構造物周辺地表面の振動特性を調べたものである。なお、入射波動による構造物の応答解析に際しては、Thau¹¹⁾の提案によるドライビングフォースの考え方を導入し、斜め入射波

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

動による二次元剛板の動的挙動を解析した Oien¹²⁾の手法に準拠して定式を行っている。

2. 解析手法の概要

図-1 に示すように、調和型加振力によって発生する波動が地表面の矩形剛構造物に入射する場合を考える。任意受振点の変位 (全体波動場の変位) u は、構造物が存在しない自由波動場の変位 u^f と構造物の振動によって生じる散乱波動場の変位 u^s の重ね合わせとして得られるが、問題は散乱波動場の変位 u^s を求めることである。この解析手法の概要を示したものが図-2 で、変位 u^s は図中の Step 1~5 の手順によって計算される。

いま、Thau¹¹⁾の提案に基づいて、変位 u^s を変位 u^p と u^R に分ける ($u^s = u^p + u^R$) とし、これらの変位は次の条件を満たすものとする。

$$(u^f + u^p)_s = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$(u^R)_s = U^R \dots\dots\dots (2)$$

ここに、下添字 S は構造物と地盤の接触面、 U^R は構造物底面の鉛直、水平変位である。このとき、構造物底面の複素剛性 K を介して、構造物の運動方程式が次式のように与えられる。

$$M\ddot{U} + KU = -P^D \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 M は構造物の質量マトリックス、 U は構造物底面中央点の変位成分で $U = \{U^R(0), \phi\}^T$ 、 ϕ は回転角

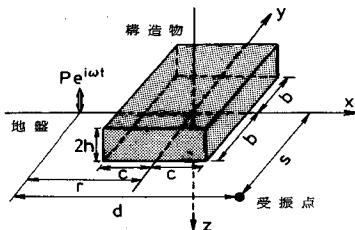


図-1 解析モデル

である。また、 P^D はドライビングフォースで、式 (1) より自由表面の変位境界条件を $(u^p)_s = -(u^f)_s$ とする混合境界値問題を解いて得られる。次に合力として $KU + P^D$ を与える構造物底面の接触圧分布を境界条件とする応力境界値問題を解けば、散乱波動場における受振点の変位 u^s を求めることができる。

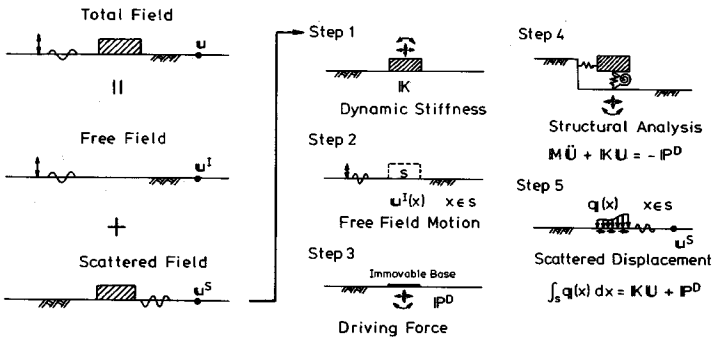
ここで、変位 u^s を求める実際の解析手順について簡単に説明しておく (図-2 b) 参照)。

- ① Step 1 において、あらかじめ構造物底面の複素剛性 K を求めておく。
- ② Step 2 の自由波動場において、外加振力による構造物底面に相当する位置 (接触面 S) の変位 u^f を求める。
- ③ Step 3 で変位 u^f の逆変位を境界条件とする混合境界値問題を解き、ドライビングフォース P^D を求める。
- ④ Step 4 では、ドライビングフォース P^D を外力として構造物-地盤系の動的相互作用問題を解き、構造物の応答を求める。
- ⑤ Step 5 において、Step 4 の動的相互作用解析で得られる構造物底面の接触圧を加振力として任意受振点の変位を求めれば、これが散乱波動場の変位 u^s となる。

ところで、複素剛性およびドライビングフォースを求めなければならないが、これらは構造物底面の接触圧を未知量とする積分方程式を解く問題となり、解析的に解を得ることはできない。本研究では、構造物と地盤の接触面を有限個の要素に分割し、影響係数の概念を用いて、各要素の未知接触圧に関する連立一次方程式を解く問題に帰着させる数値計算法¹³⁾を利用する。

3. 計算結果とその考察

本研究では、図-1 に示すように解析モデルは x 軸に



a) Decomposition of Displacement Field b) Sub-structure Method

図-2 解析手順の概要

表-1 計算条件

b/c	h/c	ρ_0/ρ	論文中の表示
1.0	1.0	1.0	Case A
1.0	0.5	1.0	Case B
1.0	1.0	0.5	Case C
2.0	1.0	1.0	Case D
$\nu = 1/3$		$r/c = 3.0$	

関して対称，加振源は振幅 P の鉛直点加振力とし，地盤の内部減衰は考慮しない．数値計算に必要な諸定数およびパラメーターの組合せは表-1の値とする．なお， b, c, h はそれぞれ構造物の奥行，幅，高さの半分の長さ， ρ_0, ρ は構造物および地盤の密度， ν は地盤のポアソン比， r は加振源から構造物底面中央点までの距離である．また，記述の便宜上，各パラメーターの組合せを表中の略称（論文中の表示とある欄）で表示する．さらに，計算結果は無次元振動数 $\alpha_0 (= \omega c / V_s)$ (ω は加振円振動数， V_s は地盤の横波速度) に対して図示する．

(1) 計算精度に対する若干の検討

構造物と地盤の接触面を有限個の要素に分割する数値計算法においては，接触面の分割数を増し要素を小さくすれば，複素剛性，ドライビングフォースおよび構造物

底面の接触圧分布の計算精度は当然向上する．著者はこの分割数の影響について，複素剛性に関するものであるが，若干の検討結果を文献13)に報告した．この結果を参考にするとともに，演算コストの面から，本研究では構造物底面が正方形 ($b/c=1.0$) の場合で 10×10 の分割数を採用する．この分割総数のもとで，図-3に示す2種類の分割メッシュについて，メッシュの違いが構造物の応答および受振点の変位に及ぼす影響を調べておく．

図-4は構造物と地盤が完全密着の条件のもとで得られる複素剛性を示したものである．なお，図中， G はせん断弾性係数， K_{VV}, K_{MM}, K_{HH} はそれぞれ鉛直，回転，水平複素剛性である．また，水平と回転の連成振動に対する複素剛性 K_{HM} (あるいは K_{MH}) は値が小さいので

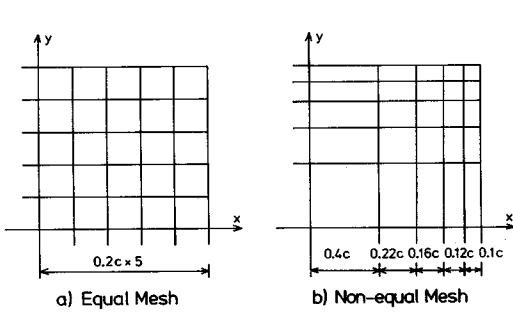


図-3 分割メッシュ

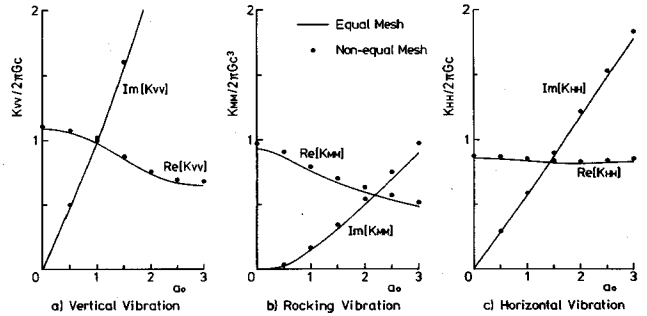


図-4 複素剛性 (正方形底面)

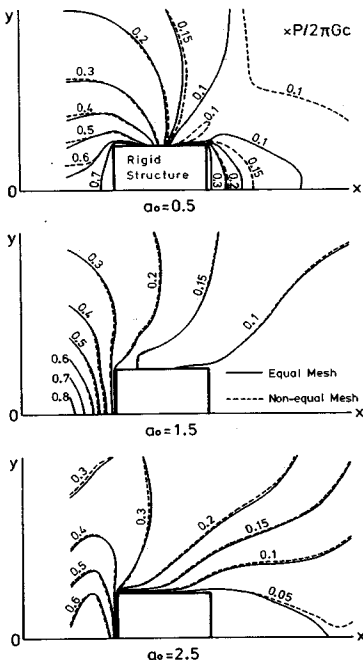


図-5 鉛直変位振幅の等高線 (Case A)

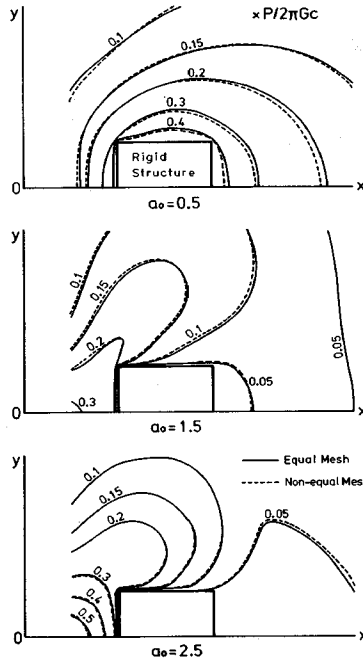


図-6 x方向水平変位振幅の等高線 (Case A)

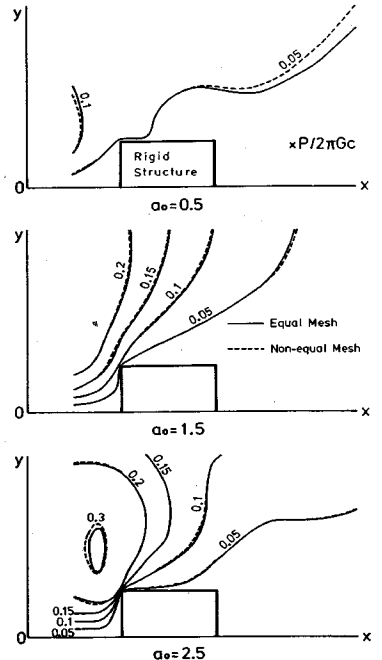


図-7 y方向水平変位振幅の等高線 (Case A)

示していない。同図より、分割メッシュによる回転剛性 K_{MN} の差異は鉛直剛性 K_{VV} および水平剛性 K_{HH} のそれに比べてやや大きい、メッシュの違いが複素剛性の計算精度に及ぼす影響は小さいものと考えられる。また、構造物の応答に及ぼす影響であるが、メッシュの違いによる複素剛性の差異が小さいことから、同様の計算内容によって得られるドライビングフォースも大差ないものとみなされ、分割メッシュが構造物応答の計算精度に及ぼす影響も小さいものと考えられる。

次に、Case A の場合について、構造物周辺の地表面変位の等高線を示したものが図-5~7である。これらの図において、原点が点加振力の作用している位置である。また、 x 軸に関して対称であるため、 y 軸の片側のみを図示してある。前述のように、構造物と地盤の接触面を有限個の要素に分割する数値計算法を利用しているが、その際各要素の接触圧は等分布とし、各要素の変位は要素中央点で代表させるという仮定を設けている。このため、接触圧分布の精度は分割メッシュの影響を大きく受け、この接触圧分布を加振力とする受振点の変位には大きな差異が生じるのではないかと予想された。しかし、鉛直変位の $a_0=0.5$ の場合において、構造物後方の 0.1 の等高線に大きな差異がみられるほかは、 x 方向および y 方向水平変位も含めて分割メッシュの違いが構造物周辺の変位に及ぼす影響はそれほど大きくはない。特に、高い振動数では両者の差異はほとんど問題とはならないであろう。

以上より、接触面の分割数に関する問題は重要ではあるが、構造物の存在による振動遮断効果を定量的に厳密に評価するのでなければ、図-3 に示す分割モデル程度でも遮断効果の大体の様子を把握することはできよう。なお、不等分割モデルでは構造物底面の辺長比を変更するとき分割幅の設定が問題となるので、以下の計算では図-3 a) に示す要素寸法 ($c/5 \times c/5$) の等分割モデルを用いる。

(2) 構造物および地表面各点の周波数応答

図-8 は、加振源からの波動入射を受ける構造物底面中央点の鉛直変位、水平変位および回転角の周波数応答を示したものである。水平変位と回転角は連成しているため共振振動数は一致しているが、鉛直変位の共振振動数とは若干ずれている。また、水平と回転の連成振動における 2 次の共振ピークは現われていない。ところで、鉛直変位の共振ピークは水平変位、回転角の共振ピークほど鋭くなっていない。これは、たとえば図-4 に示すように、鉛直振動に対する複素剛性の虚部、すなわち地

盤の逸散減衰が、水平と回転の連成振動に対する逸散減衰に比べて大きくなっており、構造物の鉛直振動に対しては地盤の減衰効果が大きくなるためであると考えられる。

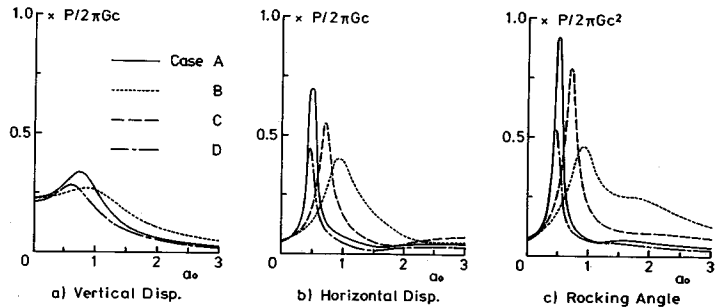


図-8 構造物の周波数応答

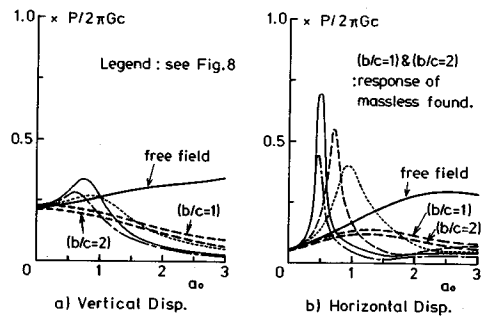


図-9 入力損失効果

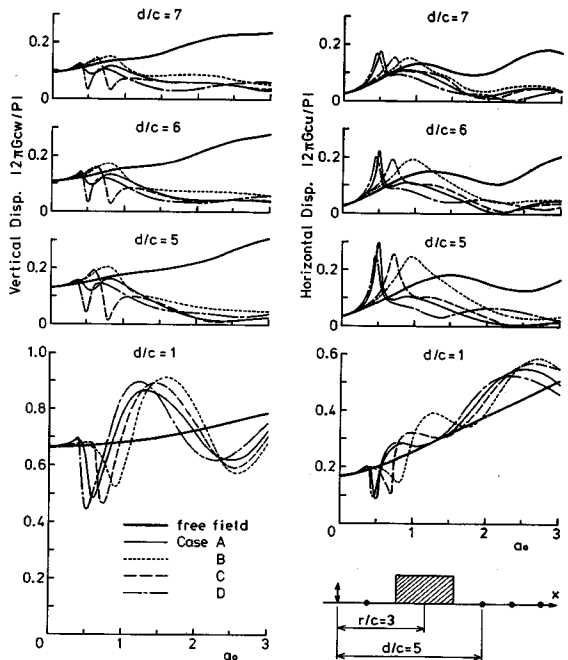


図-10 受振点の周波数応答 (x 軸上)

ここで、参考のため図—8の鉛直変位と水平変位の周波数応答に、質量をもたない正方形剛板 ($b/c=1.0$) と長方形剛板 ($b/c=2.0$) の変位応答を重ねたものが図—9である。また、同図には、構造物が存在しない自由波動場における構造物底面中央点に相当する位置の変位の周波数応答も描いてある。なお、自由波動場の変位については、 $\omega r/V_s = (r/c)(\omega c/V_s) = 3a_0$ として、無次元振動数 $\omega r/V_s$ を与えて求めたものである。近接した加振源からの波動入射を対象とするとき、図—9に示す変位 (図中の太実線) を自由波動場の変位として定義できるかどうかは問題であるが、振動数が高くなるとともに構造物の変位は自由波動場の変位よりも小さくなっており、構造物の応答には著しい入力損失が生じていることがわかる。

次に、図—10は、図中に示すように構造物の前方 (加振源側) および後方の x 軸上の地表面各点において、鉛直変位 (w) および x 方向水平変位 (u) の周波数応答が振源からの距離とともにどのように変化するか調べたものである。図中の d は加振源から受振点までの x 軸方向の距離である。なお、 x 軸が対称軸であるため、 x 軸上の y 方向水平変位は0である。

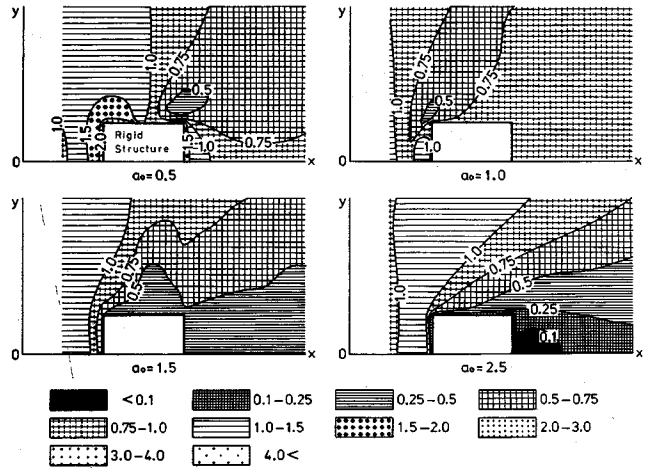
まず、鉛直変位の場合において、構造物の前方 ($d/c=1.0$) では、構造物が存在するときの変位は自由波動場のみの変位のまわりに変動している。一方、後方 ($d/c=5.0\sim 7.0$) では、低振動数域における変位の変動は構造物の共振の影響もあって単純ではないが、高振動数域では振動が大きく遮断されている様子がわかる。また、同じく後方の応答において、振動数が高くなるとともに各ケースの変位の差異は小さくなっており、構造物、地盤条件等に多少の違いがあっても、高振動数域での振動遮断効果は同程度のものになると予想される。

水平変位の周波数応答についても、全体的には鉛直変位の場合と同様の傾向といえるが、構造物後方の応答において、低振動数域の変位には構造物の共振の影響が鉛直変位の場合よりも顕著に現われている。また、後方における振動遮断効果は鉛直変位の場合よりも小さい。ところで、構造物が低い Case B や構造物の密度が小さい Case C では、 $d/c=5$ なる距離の周波数応答にみられるように、構造物後方での振動遮断効果を与える a_0 の範囲は高振動数側へ移動している。これらは、文献7)においてもみられた現象で、構造物のサイズ、重量等による

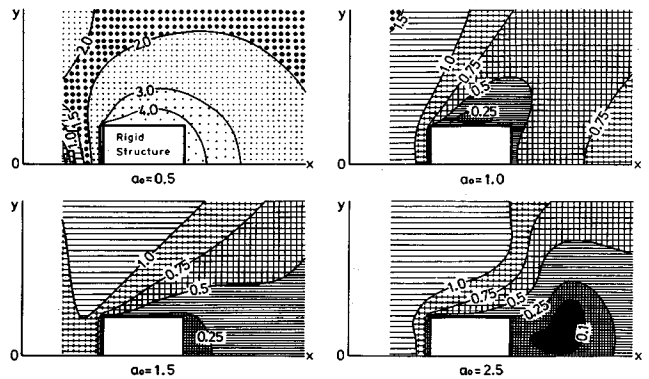
構造物の共振振動数に関係している。

(3) 周辺地表面における振動遮断効果

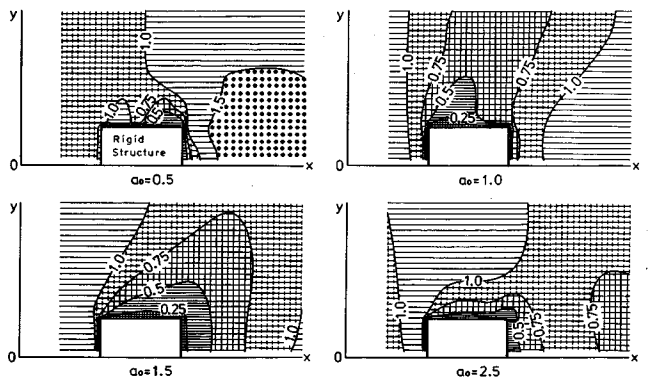
地表面剛構造物の存在による周辺地表面の振動遮断効果を調べるため、地表面の変位振幅を構造物が存在しない自由波動場のみのおきの変位振幅で除した振幅比の等高



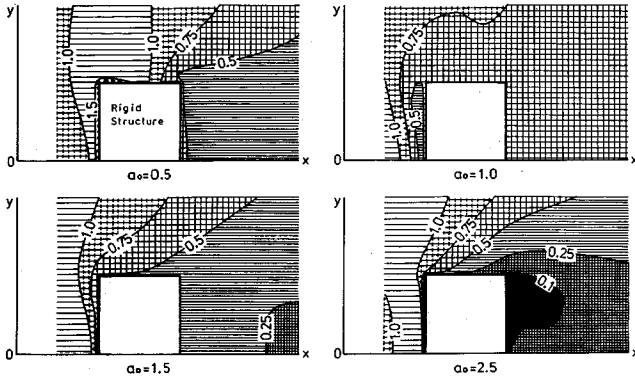
図—11 鉛直変位の振幅比等高線 (Case A)



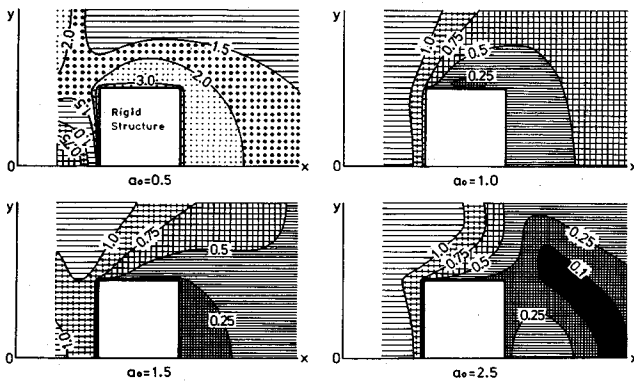
図—12 x 方向水平変位の振幅比等高線 (Case A)



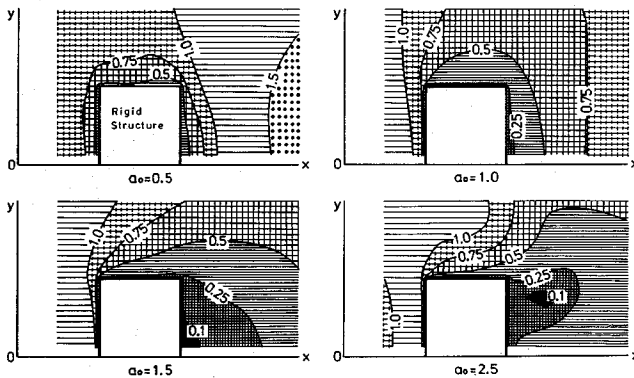
図—13 y 方向水平変位の振幅比等高線 (Case A)



図—14 鉛直変位の振幅比等高線 (Case D)



図—15 x 方向水平変位の振幅比等高線 (Case D)



図—16 y 方向水平変位の振幅比等高線 (Case D)

線, すなわち遮断効果を表わすゾーンを示す. Case A (正方形底面) の場合に対する振幅比等高線を示したものが図—11~13, Case D (長方形底面) の場合に対する結果が図—14~16 である. これらの図において, 加振位置および図示の要領は図—5~7 と同様である. なお, 各図中の色分け記号は図—11 に示すような振幅比の範囲を表わしている.

まず, 正方形底面の場合において, $\alpha_0=0.5$ のときに

は, 構造物の共振の影響を受けて振幅が増幅されるゾーンがみられ, 特に x 方向水平変位では図中のほぼ全域にわたって振幅は増幅されている. 一方, 振動数が高くなるとともに, 振動遮断のゾーンが構造物の側方から後方へ移っていく傾向を示しており, $\alpha_0=2.5$ の鉛直変位および x 方向水平変位では, 後方に振動遮断の著しいゾーンが生じている. これらの原因としては, 自由波動場を伝播する波と構造物の振動を加振源とする散乱波動場の波との干渉が考えられる. ここで, 一例として Case A の場合について, 構造物の前後の x 軸上の受振点における自由波動場の変位 u' (成分は u', w'), 散乱波動場の変位 u^s (u^s, w^s), 全体波動場の変位 u (u, w) の振幅と偏角の振動数に対する変化を調べると図—17 のようになる.

同図より, 変位 u^s には $\alpha_0=0.5$ で共振ピークが生じているが, この共振振動数付近での u^s の偏角の変化は一樣ではない. 構造物の後方 ($d/c=5$) の水平変位 u^s と u' はほぼ同位相であるが, 他の変位については変位 u^s と u' が打ち消し合うような位相差となっている. 一方, 振動数が高くなれば, 後方の受振点における変位 u^s と u' はほぼ同振幅, 逆位相の関係にある. しかし, 前方では, 変位 u^s の振幅は u' よりも小さく, 両変位の位相差の変化によって変位 u は u' の回りに変動するような形となっている. これより, 構造物の後方に発生する振動遮断ゾーンは, 自由波動場の変位と散乱波動場の変位が同振幅, 逆位相の関係か, あるいはそれに近い状態になることによって形成されることがわかる.

次に, 長方形底面の場合についても, 全体的には正方形底面の場合と類似の傾向を示しているといえる. ただ, $\alpha_0=2.5$ では振動遮断の著しいゾーンの現われ方が正方形底面の場合と若干異なっており, 構造物後方の隅角部付近へ移動する様子がみられる. もし, このような現象が生じるとするならば, さらに構造物底面の辺長

比を大きくすることによって振動遮断の著しいゾーンはどのように変化するか, また文献7) の二次元剛板による振動遮断効果との関連性はどうかなどは興味ある問題である. しかし, 先に述べたように, 構造物と地盤の接触面の分割数による計算精度から考えて, 本研究の分割モデルではこの点に関してあまり厳密な議論はできない. 今後, さらに精度の高い分割モデルによってこの現象を確かめる必要がある.

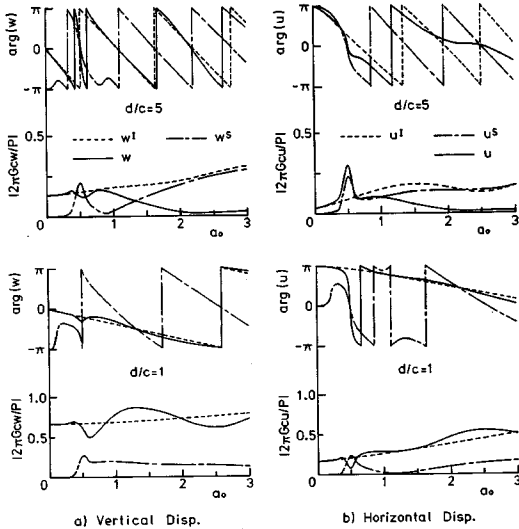


図-17 受振点の変位振幅と偏角 (α 軸上, Case A)

4. おわりに

波動伝播経路に介在する地表面剛構造物によって、加振振動数が高い場合に生じる構造物後方の振動遮断効果は、空溝による遮断効果と類似の傾向となっている。空溝の場合、溝部分が自由表面となるため、地表面近くを伝播する波動が反射される。溝後方の振動には、第1次近似として溝底部以深を通過する表面波のエネルギーが関与しているといわれている¹⁴⁾が、溝底部および側方からの転化波と通過波の干渉も生じている^{15),16)}。一方、本研究では地中方向の変位については調べていないが、文献7)の二次元剛基礎に対する結果を引用すれば、加振振動数が高くなるとともに構造物後方の地中方向においても遮断効果が現われている。空溝の場合と同様に、伝播する波動の地表面近くの波動成分が遮断されているといえるが、構造物の共振振動数付近では周辺地盤に振動増幅が生じている。この現象は、自由波動場の変位と構造物の振動を加振源とする散乱波動場の変位との干渉効果に起因するものである。このように、振動遮断のメカニズムは同じものではないが、両者の現象を波動論的に比較することは今後の興味ある課題であろう。

最後に、本研究の数値計算には増垣孝二君(現・住友重機械工業勤務)の助力を得たことを記して謝意を表し

たい。

参考文献

- 1) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失(第1報), 日本建築学会論文報告集, 第165号, pp.61~66, 1969.
- 2) 澤田義博ほか4名：地震動に対する基礎の制震効果とその特性について, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp.1553~1560, 1982.
- 3) 田中宏志ほか4名：FEMを用いたパラメータスタディによる入力損失効果の定量的評価, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp.1585~1592, 1982.
- 4) 原田隆典ほか2名：有効地震動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, 第362号/I-4, pp.435~440, 1985.
- 5) 三輪 滋ほか2名：常時微動測定による地中構造物の周辺地盤拘束効果の検討, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要, I-458, 1986.
- 6) 北村泰寿：斜め入射SV波による地表剛構造物および周辺地表面の振動, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.607~614, 1987.
- 7) 北村泰寿：地表面の二次元剛基礎を介した波動伝播特性, 土地造成工学研究施設報告(神戸大学), 第3号, pp.93~107, 1985.
- 8) Takahashi, D.: Wave Propagation in Ground-Structure Systems, Part I, Part II, J. Sound and Vibration, Vol.105, No.1, pp.27~36, pp.37~48, 1986.
- 9) 二井義則：垂直方向に振動している矩形剛板より放射される定常振動, 音響学会誌, Vol.40, pp.28~35, 1984.
- 10) 二井義則：水平、回転方向に振動している基礎より放射される定常振動, 音響学会誌, Vol.42, pp.452~460, 1986.
- 11) Thau, S.A.: Radiation and Scattering from a Rigid Inclusion in an Elastic Medium, J. Appl. Mech., Vol.34, Trans. ASME, pp.509~511, 1967.
- 12) Oien, M.A.: Steady Motion of a Rigid Strip Bonded to an Elastic Half Space, J. Appl. Mech., Vol.38, Trans. ASME, pp.328~334, 1971.
- 13) 北村泰寿・桜井春輔：剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法, 土木学会論文報告集, 第290号, pp.43~52, 1979.
- 14) 吉井敏尅：溝によるレイリー波の減衰, 地震, 第24巻, pp.70~71, 1971.
- 15) 早川 清ほか2名：空溝による振動伝播の遮断効果について—質点モデル法による数値計算結果—, 立命館大学理工学研究所紀要, 第41号, pp.93~104, 1982.
- 16) 大保直人・片山恒雄：等価質点系モデルを用いた遮断溝の振動軽減効果に関する数値解析, 土木学会論文報告集, 第335号, pp.51~57, 1983.

(1986.12.17・受付)