

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

DYNAMIC RESPONSES OF RIGID FOUNDATIONS AND GROUND SURFACE
DUE TO OBLIQUELY INCIDENT SV WAVES

北村 泰寿*

by Yasutoshi KITAMURA

This paper deals with the harmonic response of the ground surface around rigid rectangular foundations rested on the elastic ground and excited by the incident SV wave with arbitrary angle. The frequency responses of the horizontal displacement along the ground surface around the single and the two rigid cube foundations are examined. It is found that the displacements of the ground surface near the foundation and between the two foundations are affected by the foundation movements and that the displacement far from the foundation approaches to the free field motion. When the input loss is evaluated by the transfer function between the ground near the foundation and the foundation base, it might be underestimated in comparison with the loss based on the amplitude ratio of the foundation base movement to the free field motion.

1. はじめに

従来より、地震波入射による構造物の応答については、理論解析および実測に基づく数多くの研究成果が発表されている。これに対して、地震波入射による地表面の挙動については、地中 Inclusion や地盤の不整形性による地表面振動の増幅効果などが調べられているが、地表構造物の存在が周辺地表面の振動に及ぼす影響に注目したものは少ない。本研究に取り上げた問題は地震波動の入力損失¹⁾に関係するもので、解析的に入力損失を論ずるときには、その効果は構造物の振動と自由波動場の地表面振動との比で評価されている²⁾。一方、実測資料に基づいて入力損失を論ずるとき、その評価には周辺地表面の観測データが用いられている^{3), 4)}。この場合、周辺地表面の観測データには、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ものと考えられる⁵⁾。本研究は、この種の問題の解釈に一助となることを意図して、半無限弾性地盤表面の矩形剛構造物が斜め下方から平面SV波の入射を受けるとき、構造物の動的応答とともに、構造物周辺の地表面がいかなる動的挙動を示すかについて調べたものである。

構造物の動的応答解析において、構造物-地盤系のモデル化には種々のものが考えられているが、サブストラクチャー法に基づく解析手法を利用するとき、質量-ばね系への変換には2つの考え方がある。その1つはThau⁶⁾の提案によるドライビングフォースの導入であり、他の1つは原田ら⁷⁾によって示されている有効地震動の導入である。両者の相違は、構造物の存在によって散乱される波動場を2つの波動場に分けるときの考え方にある。前者の考え方に基づいて、Oien⁸⁾は斜め入射波動を受ける二次元剛板の動

* 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)

的挙動を、また Wong ら⁹⁾は波動入射方向の違いによる矩形剛板の応答を調べている。本研究では、この Oien の手法に準拠して、剛構造物の振動に対する定式を行っている。

2. 解析手法の概要

図-1に示すように、地表剛構造物にSV波が斜め入射する場合を考えるとき、構造物周辺地盤の変位 u は、構造物が存在しない自由波動場の変位 u^I と構造物の振動によって発生する散乱波動場の変位 u^S の重ね合わせとして得られる。この解析手順の概要を示したものが、図-2である。

散乱波動場において、次式の混合境界条件が構成される。

$$(u^I + u^S)_s = U^R \quad (1)$$

$$(\sigma)_F = 0 \quad (2)$$

ここに、下添字Sは構造物と地盤の接触面、Fは接触面以外の地表面、 U^R は構造物底面の鉛直および水平変位、 σ は応力成分である。いま、Thau⁶⁾の提案に基づいて、変位 u^S を変位 u^D と u^R に分け($u^S = u^D + u^R$)、式(1)よりこれらの変位が次式の条件を満たすものとする。

$$(u^D + u^I)_s = 0 \quad (3)$$

$$(u^R)_s = U^R \quad (4)$$

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。

$$M\ddot{U} + KU = -P^D \quad (5)$$

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 は回転角である。 P^D はドライビングフォースで、式(3)より地表面の変位境界条件を $(u^D)_s = -(u^I)_s$ とする混合境界値問題を解いて得られる。つぎに、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変位 u^S を求めることができる。なお、解析手法のさらに詳しい記述は文献10)に譲る。また、複素剛性およびドライビングフォースを求めるための数値計算には文献11)の方法を利用する。

3. 計算結果とその考察

本研究では、剛構造物の形状は立方体($b/c = 1$, $h/c = 1$)、SV波の水平入射角は 0° 、振幅は1、地盤のポアソン比は $1/3$ とする。図-3に示すように、構造物は単独の場合(Case A)と中心間の離隔距離が $8c$ の双設の場合(Case B)を対象とし、地表面上の受振点は x 軸および y 軸上に配置する。また、計

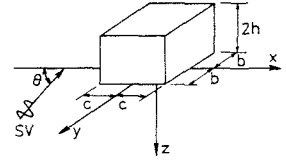


Fig.1 Description of model

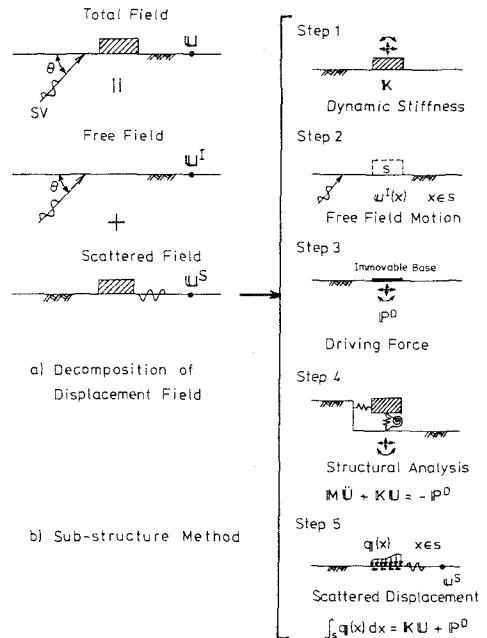


Fig.2 Outline of analysis procedure

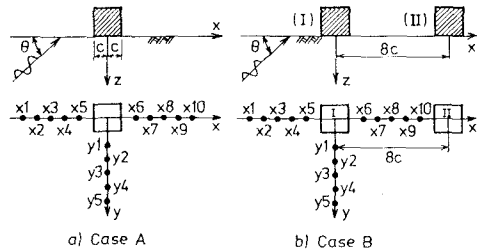


Fig.3 Arrangement of response points

算結果については、S V波の鉛直入射角 θ および構造物と地盤の密度比 ρ をパラメータとして、無次元周波数 α_0 ($=\omega c/V_s$, ω は入射波の円振動数, V_s は地盤の横波速度)に対する構造物底面中央点および地表面各点のx方向水平変位の周波数応答を示す。

ところで、本研究では複素剛性およびドライビングフォースの計算に文献11)の数値解法を利用している。この解法では、構造物と地盤の接触面を有限個の要素に分割し、未知接触圧に関する積分方程式の離散化を計っている。したがって、接触面の分割数を増し要素を小さくすれば、計算精度は当然向上する。複素剛性の計算精度に対する文献11)の検討結果を考慮するとともに、演算コストの面から、本研究では 10×10 の分割数を採用する。参考のため、この分割総数のもとで、分割メッシュの違いが、図-3に示すCase Aの受振点の内、x5, x6の水平変位に及ぼす影響を調べたものが図-4である。不等分割メッシュでは、端部での応力集中を考慮して、端部に近づくほど小さな要素を配置している。同図より、分割メッシュの違いが地表面変位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、構造物の水平変位についても図-4と同程度の差異となっている。これより、以下の計算では、 10×10 の分割数の等分割メッシュを用いる。

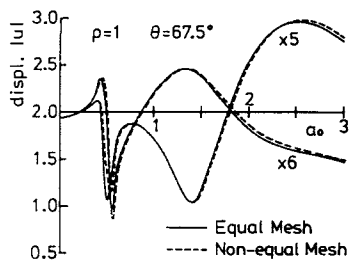


Fig.4 Accuracy of response (Case A)

(1) 構造物の周波数応答

図-5, 6はS V波の入射角が構造物の水平変位の周波数応答 (Case Bについては構造物 I) に及ぼす影響を調べたものである。なお、これらの図の縦軸は自由波動場の地表面の水平変位で構造物の変位を除いた変位振幅比である。また、 $\rho=0$ は構造物の質量が零であることを意味する。

密度比が $\rho=0$ の応答は有効地動を表わしており、周波数 α_0 が大きくなるとともに入力損失が生じていることがわかる。なお、入射角が $\theta=90^\circ$ 、すなわち鉛直下方から入射する場合、構造物底面の各点は同位相入力となり入力損失は生じない。一方、構造物が質量を持つ $\rho=1$ の場合、Case A, Bいずれにおいても、 $\alpha_0=0.5$ および 1.5 付近に応答のピークが生じている。このピーク周波数は入射角にほとんど依存していないが、Case Bの応答曲線は双設構造物の相互作用による連成振動の影響を受けてわずかに変動している。また、限界入射角 (この場合、 $\theta_c=60^\circ$) 以下である $\theta=56.25^\circ$ の応答と $\theta=67.5^\circ \sim 90^\circ$ の応答の間には若干の差異がみられる。なお、 $\theta=90^\circ$ の応答は入力地動に損失がないときの周波数応答で、構造物の質量効果を表わしている。

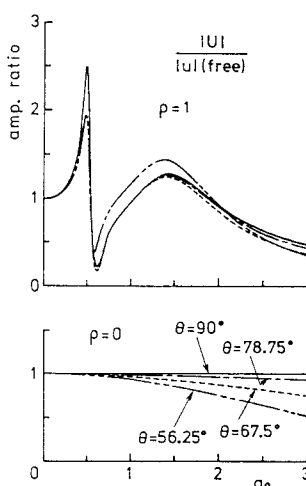


Fig.5 Frequency response of foundation (Case A)

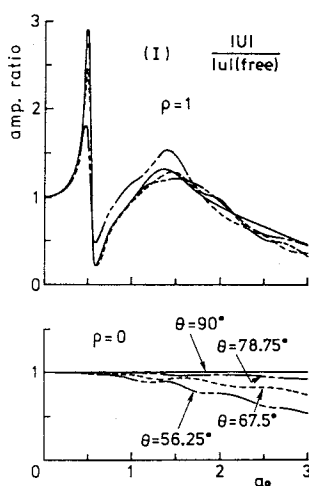


Fig.6 Frequency response of foundation I (Case B)

(2) 地表面の応答に及ぼす入射角の影響

図-7, 8は、 $\rho=1$ の場合について、図-3の受振点の内、Case Aのx3, Case Bのx3, x8での

水平変位の周波数応答に及ぼす入射角の影響を調べたものである。いずれの入射角においても、周波数が $\alpha_0 = 0.5$ 付近に応答の減少がみられるが、これは図-5、6に示した構造物の応答に対応したものとなっている。一方、構造物応答の第2のピークである $\alpha_0 = 1.5$ 前後に対する地表面応答は入射角による影響を大きく受けている。これは、散乱波動場の変位と自由波動場の変位の位相差が入射角によって変化し、構造物と地表面の振動モードが混ざり合うためである。また、図-8のx8の応答については、受振点が双設構造物間の中央点に位置しており、構造物間の相互作用の影響を受け、構造物からの距離が等しいx3の応答よりも変動が大きくなっている。

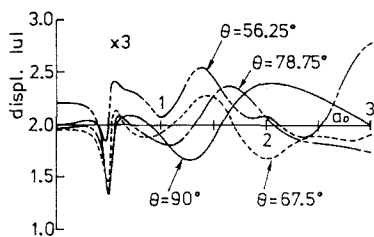


Fig.7 Frequency response at x3 for different θ (Case A, $\rho = 1$)

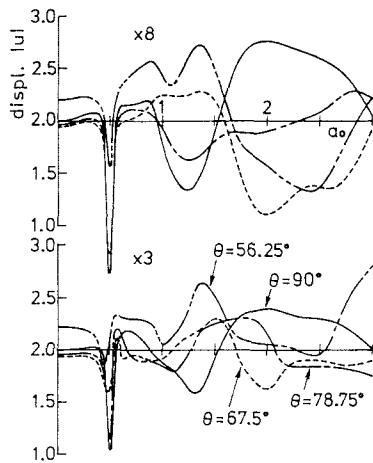


Fig.8 Frequency response at x3 and x8 for different θ (Case B, $\rho = 1$)

(3) 地表面各点における周波数応答

入射角が $\theta = 90^\circ$ と $\theta = 67.5^\circ$ のとき、 $\rho = 1$ の場合について、図-3の各受振点における水平変位の周波数応答を示したものが図-9～14である。まず、Case Aの図-9～11について、構造物から離れるとともに地表面応答の変動は小さくなり、自由波動場の水平変位（振幅は $\alpha_0 = 0$ の値で、周波数に対して平坦）に近づいていく様子がわかる。また、x軸上の応答とy軸上の応答を比較するとき、y軸上

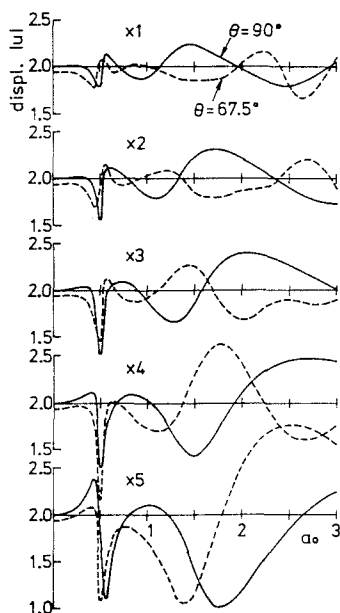


Fig.9 Change of frequency response along x axis (Case A, $\rho = 1$)

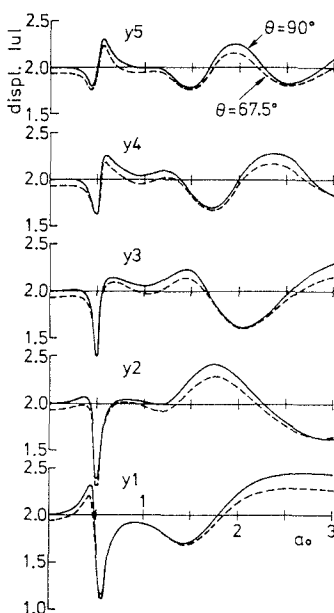


Fig.10 Change of frequency response along y axis (Case A, $\rho = 1$)

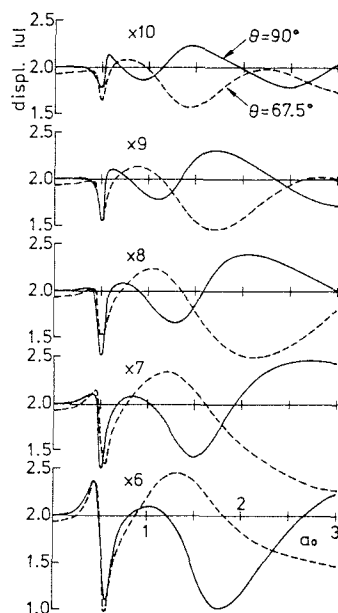


Fig.11 Change of frequency response along x axis (Case A, $\rho = 1$)

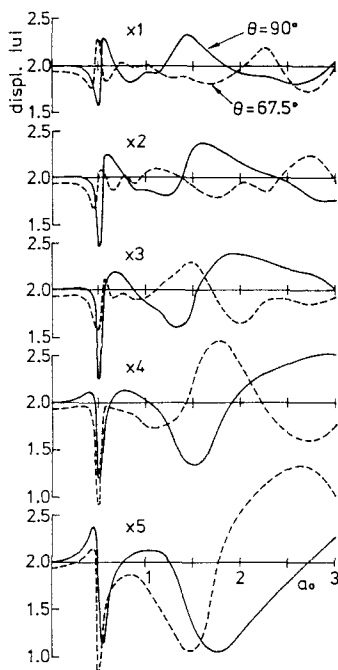


Fig.12 Change of frequency response along x axis (Case B, $\rho=1$)

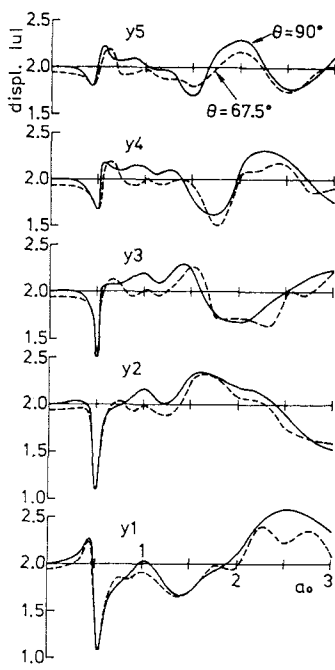


Fig.13 Change of frequency response along y axis (Case B, $\rho=1$)

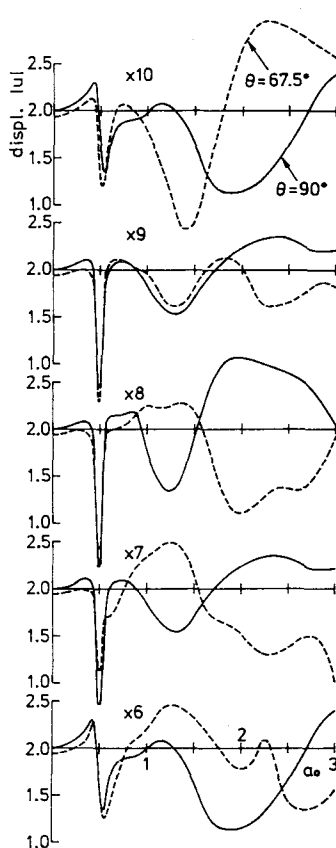


Fig.14 Change of frequency response along x axis (Case B, $\rho=1$)

の応答には入射角による大きな差異はみられない。本研究では、解析モデルの設定において、入射波動および構造物は x 軸に関して対称としている。このため、構造物には x 軸方向の水平運動、 y 軸回りの回転運動および上下運動しか生じない。したがって、構造物の運動が y 軸上の応答に及ぼす影響は比較的単純なものになると考えられる。一方、 $\theta=67.5^\circ$ に対する x 軸上の応答では、構造物の前方 ($x1 \sim x5$) と後方 ($x6 \sim x10$) の応答に差異が生じており、前方 $x5$ の応答は後方 $x6$ のそれよりも大きく変動している。

つぎに、Case B の図-12～14 について、全体的に地表面各点の応答は Case A の場合に比べて複雑な変動を示しているが、これは双設構造物の相互作用の影響が加わるためであろう。しかし、構造物 I の前方 ($x1 \sim x5$) および側方 ($y1 \sim y5$) の周波数応答は Case A の図-9、10 とよく似た性状を示しており、構造物から離れるとともに応答は小さくなり、自由波動場の水平変位に近づいている。一方、 $\theta=67.5^\circ$ に対する双設構造物間の地表面応答では、構造物 I の後方 $x6$ の応答の変動は前方 $x5$ のそれより小さく、また構造物 II の前方 $x10$ の応答は $x5$ と同様に大きく変動している。なお、構造物間の中央点の $x8$ における応答の変動は必ずしも小さくなっていない。これは、構造物間の離隔距離や構造物のサイズ等に影響されることではあるが、中央点であれば構造物間の相互作用の影響が最も少ないと速断できない一面を示しているものと考えられる。

(4) 地表面-構造物間の伝達関数

地表面と構造物の間の伝達関数によって入力損失を調べるとき、構造物の応答には構造物の質量効果が含まれている。また、図-9～14 に示したように、地表面各点の変位には構造物の振動による地表面振動（散乱波動場の変位）が付加されるため、構造物周辺地盤の周波数応答は自由波動場の応答の回りに変

動している．とくに，構造物の近傍および Case Bにおける双設構造物間の受振点では，その変動は大きくなっている．これより，入力損失の判定には，構造物の質量効果とともに，地表面上のいかなる点と構造物の間の伝達関数を調べるかが関係してくる．

入射角が $\theta=90^\circ$ のときには，図-5，6から入力損失が生じないことがわかっている．ここで，参考のため，構造物から無限遠点に相当する自由波動場の地表面と構造物底面中央点（Case Bでは構造物 I）との間の伝達関数を，入力損失のない $\theta=90^\circ$ の伝達関数で除したものが図-15，16である．これは， $\theta=90^\circ$ の構造物の周波数応答を基準として，構造物の質量効果を除去したものである．なお， $\rho=1$ については，図-5，6の各入射角に対する周波数応答を $\theta=90^\circ$ の応答で除したものと同じである．質量効果の小さい $\rho=0.01$ の伝達関数は図-5，6の $\rho=0$ の応答と一致しており，密度比が $\rho=0.01$ 程度であれば質量が零の構造物とみなせる．一方， $\rho=1$ の場合も，周波数が高くなるとともに $\rho=0.01$ の伝達関数に近づく傾向を示している．この傾向は入射角 θ が大きくなるほど強いが，構造物が質量を持つ場合，波動の入射角によって構造物-地盤系の動的相互作用効果が異なるためであろう．

つぎに，図-3に示す受振点の内，Case Aについてはx5と構造物，Case Bについてはx6およびx8と構造物 I の間の伝達関数を調べたものが図-17～19である．これらの図も，前図と同様に， $\theta=90^\circ$ の自由波動場の地表面と構造物間の伝達関数で除してある． $\rho=1$ の場合，地表面振動には散乱波動の変位が付加されるため，周波数帯域によっては各伝達関数は図-15，16に示す伝達関数よりも相当大きくなっている．これらの結果は，たとえば図-9，14に示されるx5（Case A）およびx6，x8（Case B）の周波数応答を見れば明らかであろう．また， $\rho=0.01$ の場合についても，構造物の質量効果が小さいため $\rho=1$ の場合ほど顕著ではないが，同様の傾向にあることがわかる．

ところで，図-17～19の伝達関数を求めた x5，x6 は構造物

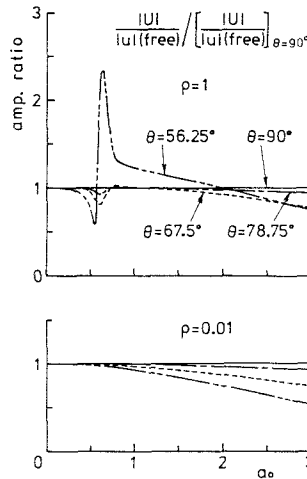


Fig.15 Transfer function between surface of free field and foundation (Case A)

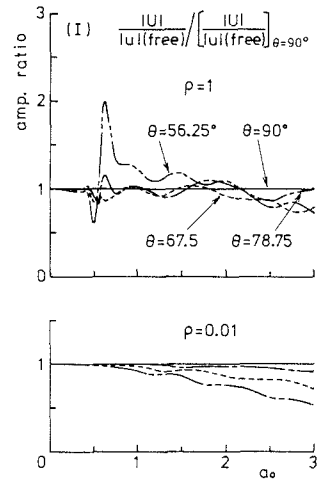


Fig.16 Transfer function between surface of free field and foundation I (Case B)

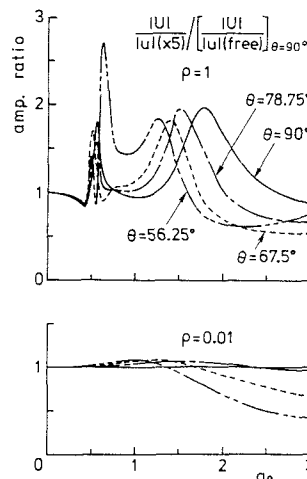


Fig.17 Transfer function between x5 and foundation (Case A)

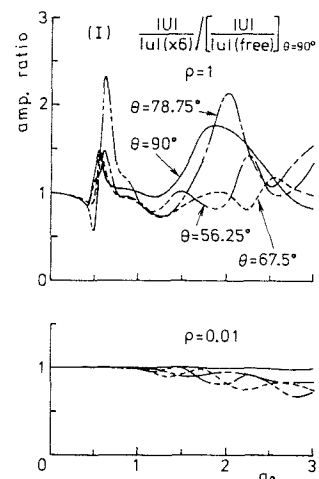


Fig.18 Transfer function between x6 and foundation I (Case B)

物側面から構造物の半幅 c だけ離れた点であり、 x_8 は $3c$ 離れた双設構造物間の中央点である。したがって、散乱波動場において、構造物の振動による影響を受けやすい受振点である。そこで、Case A の場合について、 $\theta = 67.5^\circ$ のとき、構造物から受振点が離れるとともに伝達関数がどのように変化するかを示したものが図-20 である。受振点が構造物から離れる ($x_5 \rightarrow x_1$) とともに、伝達関数の変動は小さくなり、 $\rho = 1$ および $\rho = 0.01$ のいずれの伝達関数も図-15 の $\theta = 67.5^\circ$ のそれに近づく傾向を示している。

これらの結果より、構造物近傍

の測点と構造物での観測波形を用いて両者間の伝達関数で入力損失を評価するとき、その効果を過小評価する場合がある。また、構造物の質量効果が小さい場合であっても、剛な構造物底面によって地盤を拘束する効果は周辺地表面に及び、入力損失の判定には構造物から十分遠点の地表面での観測波形を必要とすることに留意しなければならない。

4. おわりに

本研究は構造物-地盤系のモデル化がきわめて限定された条件に対するものであるが、入射 S V 波による地表剛構造物および周辺地表面の水平変位応答について結果をまとめるとつぎのようである。

- (1) 構造物応答のピーク周波数は S V 波の入射角にほとんど依存していない。
- (2) 振動数が高くなるとともに地表面応答は入射角による影響を大きく受けており、構造物と地表面の振動モードが混ざり合っている。
- (3) 波動の進行方向と直角方向 (y 軸) の地表面各点における応答への波動入射角の影響は小さい。
- (4) 単独の構造物に S V 波が斜め入射するとき、波動の進行方向 (x 軸) の地表面各点の応答は構造物の前方と後方で差異を生じており、構造物に近づくにつれて後方よりも前方で大きく変動する傾向となっている。
- (5) 双設構造物の場合の地表面応答は、単独の構造物の場合に比べて複雑になる傾向にあるが、全体的には単独の場合と類似の性状を示している。なお、構造物間の中央点での地表面応答は必ずしも小さくなっていない。
- (6) 構造物近傍の地表面と構造物の間の伝達関数で入力損失を評価する場合、地表面振動には散乱波動の変位が付加されるため、自由波動場の地表面振動に対する入力損失よりもその効果を過小評価する可能性がある。

今後は、実際の構造物-地盤系に近づけるため、地盤の多層性、構造物の根入れの影響、地盤の非線形性の効果などを考慮しなければならないと考えている。

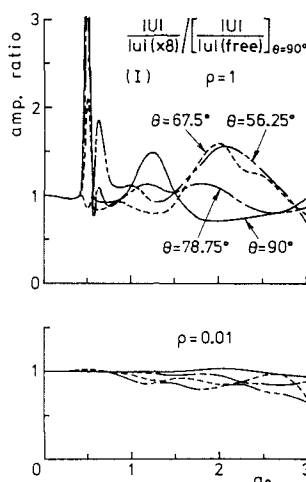


Fig.19 Transfer function between x_8 and foundation I (Case B)

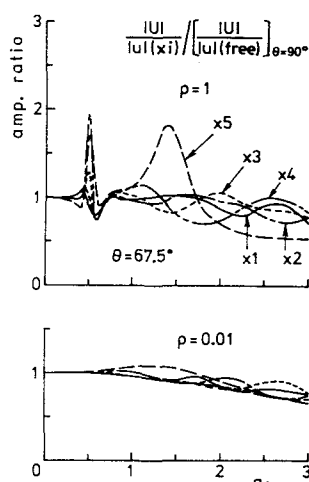


Fig.20 Transfer function between ground surface and foundation (Case A)

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) 田中宏志 他4名：F E M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.
- 3) 澤田義博 他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.
- 4) 原田隆典 他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 他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) 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.
- 7) 原田隆典 他2名：地中埋設剛体構造物の地震応答解析モデルの考え方，土木学会論文報告集，第334号，pp.173～176，1983.
- 8) 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.
- 9) Wong, H. L. and J. E. Luco : Dynamic Response of Rectangular Foundations to Obliquely Incident Seismic Waves, Int. J. Earthquake Engng Struct. Dynamics, Vol.6, pp.3～16, 1978.
- 10) 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.
- 11) 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.

（1986年10月17日 受付）