

# Dynamical Effects of an Elastic Ground on Foundation-Structure System

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-12-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鳥海, 勲, 竹内, 吉弘, TORIUMI, Isao, TAKEUCHI, Yoshihiro メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10098/4651">http://hdl.handle.net/10098/4651</a>

福井大学  
工学部 研究報告  
第22巻 第1号  
昭和49年3月

## 基礎—構造物系における地盤の連成効果

鳥海 勲\*・竹内吉弘\*

### Dynamical Effects of an Elastic Ground on Foundation-Structure System

Isao TORIUMI, Yoshihiro TAKEUCHI

(Received Oct. 11, 1973)

Dynamical effects of one mass model with circular rigid foundation on an elastic ground are investigated by making use of "dynamical ground compliance", i. e. the transfer function of characteristics of an elastic ground. Amplitude characteristics and phase characteristics of this model are evaluated, with regard to four kinds of the ground factors (shear wave velocity of ground medium). The numerical results are graphically represented and discussed on interaction effects of ground in respect to foundation-structure system.

#### 1. まえがき

一般に地下部分を有する建築構造物の地震時の動的挙動を正確に評価するためには、構造物の基礎形式を含めて周辺地盤が建物に及ぼす種々の影響に対する適正なる現象的、理論的把握が不可欠である。この点に関して、現在建設されている高層建物や原子炉建屋などの如くその規模や機能などより地下階や、あるいは剛基礎を有する構造物については特に周辺地盤の取扱いは重要な問題であり、従って当然、現在行なわれている構造物の地震応答解析に用いられている動力学モデル化においてはそれぞれの場合についてその諸仮定に対する厳密な検討が必要となる。

一般には基礎周辺地盤の影響は主として次の3点に分けることが出来ると考えられる。

- i) 周辺地盤へのエネルギー逸散による減衰効果
- ii) 側土圧の効果
- iii) 地表面以下基礎底面までの多入力効果

これ等の諸問題は、もとより本質的に互いに関連す

るものであるが、解析的手法の点より見れば特にi)についてはその基本的理論解に関し *dynamical ground compliance* としてかなり以前より取扱われており、近年盛んに研究が行なわれている地盤—構造物系の相互作用の問題に対する主たる *approach* として数多くの論文が発表されている。

本論文では ii), iii) の問題を含めた総合的な周辺地盤の取扱いに関する第一段階として i) の問題のみを取上げ、最も基本的なモデルと考えられる半無限弾性地盤上に円形基礎を持つ一質点系構造物の地盤連成効果に対して数値解析を行なった。解析に当っては Arnold et al. による *dynamical ground compliance* の理論解の数値計算例を使用し、地盤—構造物連成系各部の振巾特性および位相特性に対して検討を加えた。

#### 2. 一質点系構造物の振巾特性および位相特性

Fig.1 に示す如き半無限弾性地盤上に円形の剛基礎を有する一質点系構造物の基礎運動方程式は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{d^2 u_T}{dt^2} + c \frac{du_T}{dt} + k(u_T - u_B + h\phi) &= 0 \\ m_0 \frac{d^2 u_B}{dt^2} &= -m_1 \frac{d^2 u_T}{dt^2} + K_H(u_G - u_B) \\ m_1 \frac{I_1}{A_1} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + m_0 \frac{I_0}{A_0} \frac{d^2 \phi}{dt^2} &= hm_1 \frac{d^2 u_T}{dt^2} - K_R \phi \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

ここで  $m_0$ ; 基礎質量,  $m_1$ ; 上部構造質量,  $k$ ; 上部構造物の持つせん断剛性,  $r_0$ ; 円形基礎板の半径,

$I_1, I_0$ ; 上部構造および基礎の回転慣性,  $A_1, A_0$ ; 上部構造および基礎の断面積

$$\left. \begin{aligned} \text{地動変位} \quad u_G &= U_G e^{j\omega t} \\ \text{上部構造質量中心の絶対変位} \quad u_T &= U_T e^{j(\omega t - \theta_T)} = \bar{U}_T e^{j\omega t} \\ \text{基礎の回転角} \quad \phi &= \bar{\phi} e^{j(\omega t - \theta_\phi)} = \bar{\phi} e^{j\omega t} \\ \text{基礎の絶対変位} \quad u_B &= U_B e^{j(\omega t - \theta_B)} = \bar{U}_B e^{j\omega t} \\ \text{基礎中心の地動に対する相対変位} \quad u &= u_G - u_B = (U_G - \bar{U}_B) e^{j\omega t} \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

$$\left. \begin{aligned} K_H &= \mu r_0 \times \frac{1}{f_{1H} + jf_{2H}}, \quad K_R = \mu r_0^3 \times \frac{1}{f_{1R} + jf_{2R}} \\ \mu &= \rho v_s^2, \quad a_0 = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \times \omega \times r_0 \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

$$\left[ \begin{array}{ccc} -k, & k - m_1 \omega^2 + jc\omega, & \\ K_H - m_0 \omega^2, & -m_1 \omega^2, & \\ 0, & m_1 \omega^2, & -m_1 \omega^2 \frac{I_1}{A_1} \frac{1}{h^2} - m_0 \omega^2 \frac{I_0}{A_0} \frac{1}{h^2} + K_R \frac{1}{h^2}, \end{array} \right]$$

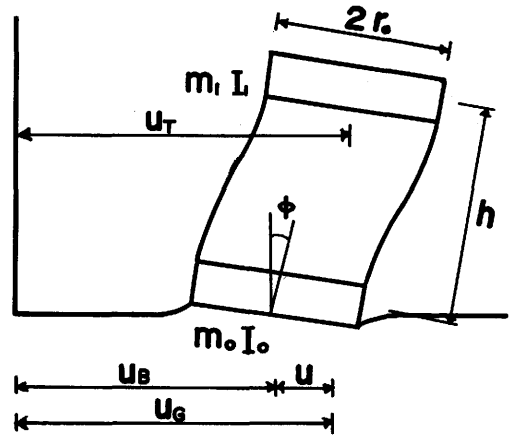


Fig.1 Foundation-structure system on an elastic ground

$\rho$ : 地盤の密度,  $\mu$ : 地盤のせん断剛性率,  $\omega$ : 角振動数,  $j$ : 虚数単位

$K_H, K_R$ はそれぞれ水平変位および回転の dynamical ground compliance で  $f_{1H}, f_{1R}$  および  $f_{2H}, f_{2R}$  はそれぞれの実数部および虚数部である。

(1)式を(2)式を用いて matrix 表示すれば次式となる。

$$\left[ \begin{array}{ccc} k, & & \\ 0, & & \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \bar{U}_B \\ \bar{U}_T \\ h\bar{\phi} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ K_H U_G \\ 0 \end{array} \right\} \dots(4)$$

従って(4)式の係数 matrix をDとし, その determinant  $\det |D|$  を零と置くことにより振動数方程式が得られる。

また上部質量, 基礎の水平変位および基礎の回転角

の地盤変位に対する振巾特性および位相特性をそれぞれ  $\bar{U}_T, \bar{U}_B, \bar{\phi}, \theta_T, \theta_B, \theta_\phi$  とし,  $D_T, D_B, D_\phi$  を以下の determinant を持つ matrix とすれば次の諸式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \det |D_T| &= \left| \begin{array}{ccc} -k, & 0, & k \\ K_H - m_0 \omega^2, & K_H U_G, & 0 \\ 0, & 0, & -m_1 \frac{I_1}{A_1} \frac{1}{h^2} - m_0 \omega^2 \frac{I_0}{A_0} \frac{1}{h^2} + K_R \frac{1}{h^2} \end{array} \right| \\ \det |D_B| &= \left| \begin{array}{ccc} 0, & k - m_1 \omega^2 + jc\omega, & k \\ K_H U_G, & -m_1 \omega^2, & 0 \\ 0, & m_1 \omega^2, & -m_1 \frac{I_1}{A_1} \frac{1}{h^2} - m_0 \omega^2 \frac{I_0}{A_0} \frac{1}{h^2} + K_R \frac{1}{h^2} \end{array} \right| \\ \det |D_\phi| &= \left| \begin{array}{ccc} -k, & k - m_1 \omega^2 + jc\omega, & 0 \\ K_H - m_0 \omega^2, & -m_1 \omega^2, & K_H U_G \\ 0, & m_1 \omega^2, & 0 \end{array} \right| \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{U}_T &= |\tilde{U}_T/U_G| = |D_T/D| = \left| \frac{\text{Re}(D_T) + j \text{Im}(D_T)}{\text{Re}(D) + j \text{Im}(D)} \right| \\
 &= |\alpha_T + j\beta_T| \\
 \tilde{U}_B &= |\tilde{U}_B/U_G| = |D_B/D| = \left| \frac{\text{Re}(D_B) + j \text{Im}(D_B)}{\text{Re}(D) + j \text{Im}(D)} \right| \\
 &= |\alpha_B + j\beta_B| \\
 \tilde{\phi} &= |\tilde{\phi}_h/U_G| = |D\phi/D| = \left| \frac{\text{Re}(D\phi) + j \text{Im}(D\phi)}{\text{Re}(D) + j \text{Im}(D)} \right| \\
 &= |\alpha\phi + j\beta\phi|
 \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_i &= \frac{\text{Re}(D_i)\text{Re}(D) + \text{Im}(D_i)\text{Im}(D)}{(\text{Re}(D))^2 + (\text{Im}(D))^2} \\
 \beta_i &= \frac{\text{Im}(D_i)\text{Re}(D) - \text{Re}(D_i)\text{Im}(D)}{(\text{Re}(D))^2 + (\text{Im}(D))^2}
 \end{aligned} \right\} i=T, B, \phi \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \theta_T &= -\tan^{-1}(\beta_T/\alpha_T) \\
 \theta_B &= -\tan^{-1}(\beta_B/\alpha_B) \\
 \theta\phi &= -\tan^{-1}(\beta\phi/\alpha\phi)
 \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

上式中 Re, Im はそれぞれ実数部および虚数部を示す。

3. 数値解析結果

数値解析は一質点系構造物として基礎と等しい質量を持つ RC 構造物を想定し、振巾特性および位相特性に対し種々の S 波速度 Vs (せん断剛性率 μ) の弾性地盤に関して数値計算を行なった。その際、弾性地盤上の基礎の dynamical ground compliance は Arnold et al. により計算された poisson ratio ν=0 の場合の理論解を用いた。その数値の曲線を Fig.2 に示す。

本計算に使用した上部構造物、基礎および地盤の特性の諸元は次の通りである。

- 上部構造 質量(m<sub>1</sub>); 8.33×10<sup>3</sup> (t.sec<sup>2</sup>/m)
- せん断剛性(k); 3×10<sup>7</sup> (t/m)
- 断面 2 次モーメント (I<sub>1</sub>); 1.8904×10<sup>5</sup> (m<sup>4</sup>)
- 断面積 (A<sub>1</sub>); 1.5405×10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)
- 上部質量中心と基礎板との中心距離 (h); 2.006×10 (m)
- 基礎 質量(m<sub>0</sub>); 8.33×10<sup>3</sup> (t.sec<sup>2</sup>/m)
- 底板半径(r<sub>0</sub>); 2.215×10 (m)
- 底面積 (A<sub>0</sub>); 1.5405×10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)
- 断面 2 次モーメント (I<sub>0</sub>); 1.8904×10<sup>5</sup> (m<sup>4</sup>)

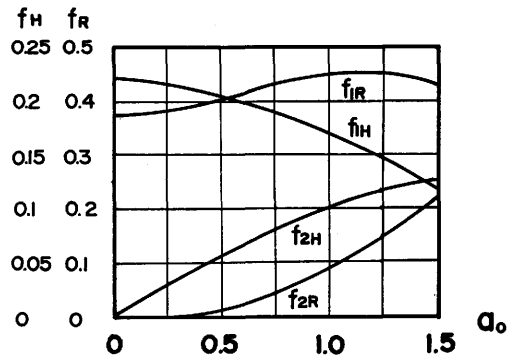


Fig.2 f<sub>H</sub> (horizontal translation) and f<sub>R</sub> (rotation) curves of dynamical ground compliance; ν (poisson ratio)=0

地盤	単位体積当り重量 (ρ)	2.5 (t/m <sup>3</sup> )
	せん断波速度 (Vs)	2300 (m/sec)
		1610 (m/sec)
		920 (m/sec)
		230 (m/sec)

(6)式および(8)式に求められた上部構造の振巾特性  $\tilde{U}_T$  および位相特性  $\theta_T$  の数値解析結果を Fig.3 および Fig.4に、基礎の回転に関する特性  $\tilde{\phi}_B, \theta_\phi$  を Fig.5, Fig.6 に、基礎の水平変位に関する特性  $\tilde{U}_B, \theta_B$  を Fig.7, Fig.8 に示す。横軸はいずれも(3)式中のパラメーター a<sub>0</sub> である。

上部構造の振巾特性  $\tilde{U}_T$  の a<sub>0</sub> に関する最低次のピーク位置および位相特性  $\theta_T$  の 90° の位相差を示す点よりこの連成系の一次固有振動数は以下の通り求めることができる。

Vs(m)	a <sub>0</sub>	ω'	f'(Hz)	T'(sec)	h(%)
∞	—	59.90	9.53	0.105	—
2300	0.45	46.73	7.43	0.134	(5)
1610	0.53	38.53	6.13	0.163	(10)
920	0.62	25.75	4.10	0.244	
230	0.65	6.75	1.07	0.931	

ω', f' および T' はそれぞれ一次の固有円振動数, 固有振動数および固有周期であり Vs=∞ の値は基礎固定の場合の一質点系構造物の固有振動数に対応するものである。これ等の共振振動数は  $\tilde{U}_B, \tilde{\phi}$  の振巾特性のピークの位置および  $\theta_B, \theta_\phi$  の位相差 90° の点としてもあらわれているが、振巾特性にあらわれたピーク位置は僅かずつではあるが  $\tilde{U}_B, \tilde{U}_T, \tilde{\phi}$  の順にずれており  $\tilde{U}_B$  の振動数が最も低くなっている。

上記の数値中  $h(\%)$  は連成系に対し地盤におけるエネルギー逸散による減衰を等価な粘性減衰比として  $\text{power}^{1/2}$  の点より求めたものである。 $\tilde{U}_T$  および  $\tilde{U}_B$  のピークは  $V_s$  が大になる程高く、且つ鋭くなる。このことは構造物側に減衰をとらず地盤のエネルギー逸散のみが存在するため  $V_s$  の値が大なる程、即ち地盤が剛になる程減衰量が減少することをあらわすものである。しかしながら  $\tilde{U}_B$  に関しては地盤の剛性がその変位量に直接関係するため  $\tilde{U}_T$  の振巾が増大する程には増大する傾向を示さない。

基礎の水平変位に関する位相特性  $\theta_B$  (Fig.6) は他の位相特性とかなり異った傾向を示し  $V_s=230\text{m}$  の場合は連成系の一次固有周期付近では位相差  $90^\circ$  の点に達せず、且ついずれの  $V_s$  の値に対する特性も共振振動数を過ぎた振動数領域で一旦負の位相特性となり再び正の領域に入る。この特性を更に詳細に検討するため、(6)式および(8)式中の  $\tilde{U}_B$ ,  $\theta_B$  に関する実数部  $\alpha_B$  および虚数部  $\beta_B$  をあらわしたものが Fig.9 である。グラフ中  $\alpha_B=0$  の点は  $\theta_B$  に対し位相角  $90^\circ$ ,  $\beta_B=0$  の点は位相角  $0^\circ$  の点である。

全体として基礎の水平変位に関する  $\tilde{U}_B$ ,  $\theta_B$  は振動数に対しかかなり複雑な特性を示すが基礎の回転および上部構造に対する  $\tilde{\varphi}$ ,  $\theta_\phi$  および  $\tilde{U}_T$ ,  $\theta_T$  は振動数に対しほぼ安定した動きを示していると言える。

#### 4. あとがき

本論文では半無限弾性地盤上の一質点系構造物の地盤の連成効果に対する振巾特性および位相特性の定性的、定量的な評価のための数値解析を行なった。

上部構造物については固有振動数約  $9.5\text{Hz}$  の RC 建造物を想定し、地盤は S 波速度  $V_s=2300\text{m}\sim 230\text{m}$  の範囲の岩盤のような剛な特性を持つ地盤から、 $V_s=230\text{m}$  の通常の剛さの地盤までの比較的広いパラメーター領域を設定した。その結果、上部質量および基礎の回転に関する挙動はこれ等のパラメーター領域においてはほぼ安定した傾向を示すが、基礎の水平変位に関する  $\tilde{U}_B$ ,  $\theta_B$  の動きは複雑である。しかしながらこれ等の挙動の複雑さそのものは例えば上部質点の挙動に比して定量的には連成系全体として顕著でない。

ここでは最も基本的な一質点構造物を設定し、地盤一構造物系の連成効果に対する検討を加えたが地盤連成の取扱いに関しては、**まえがき**で述べた如く ii), および iii)に関する statics および dynamics の領域を含めての評価も耐震工学上の問題として極めて重要であり、ここで取扱った i) の問題の基本仮定——剛

基礎と弾性地盤——に対する検討、例えば剛基礎の浮上り、あるいは弾性基礎などに関する問題とあわせて今後の課題と考えられる。

#### 参考文献

- i) I. Toriumi; "Vibration in Foundations of Mechanics", Technology Reports of the Osaka Univ., No.146, vol 5, 1955
- ii) R. N. Arnold, G. N. Bycroft & G. B. Warburton, "Forced Vibrations of a Body on an Infinite Elastic Solid.", Journal of Applied Mechanics, No.3, vol.22, 1955
- iii) W. T. Thomson & T. Kobori, "Dynamical Compliance of Rectangular Foundations on an Elastic Half-space", Journal of Applied Mechanics, vol.30, Dec. 1963
- iv) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有, "弾性地盤上の構造物の動特性について", 京大防災研究所年報, 第9号, 昭41.3
- v) R. A. Parmelee, "Building-Foundation Interaction Effects", A. S. C. E., vol. 93, No. EM2, 1967
- vi) A. Castellani, "Foundation Compliance Effects on Earthquake Response Spectra," A.S.C.E., vol.96, No. SM4, 1970
- vii) J. Bielak, "Earthquake Response of Building-Foundation Systems", C.I.T., Doctoral Thesis, 1971

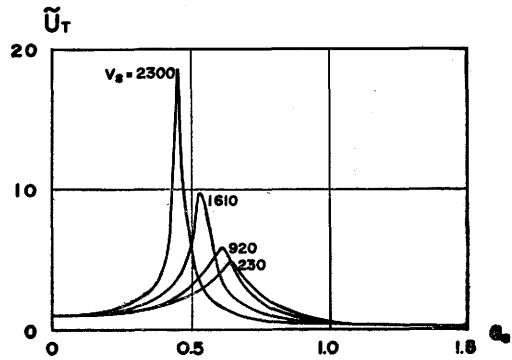


Fig.3 Amplitude characteristics of horizontal translation of the upper mass;  $\tilde{U}_T$

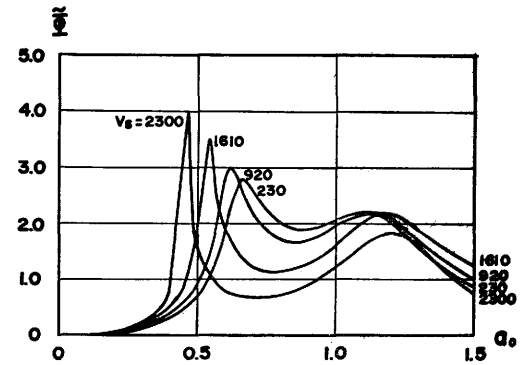


Fig.5 Amplitude characteristics of translational displacement at the upper mass by rotation of foundation;  $\tilde{\varphi}$

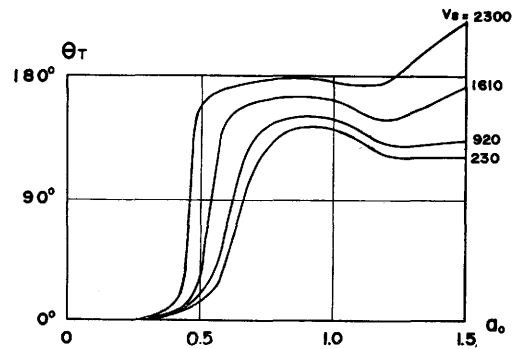


Fig.4 Phase characteristics of horizontal translation of the upper mass;  $\theta_T$

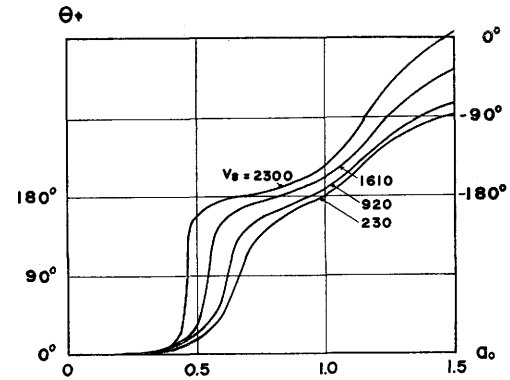


Fig.6 Phase characteristics of translational displacement at the upper mass by rotation of foundation;  $\theta_\phi$

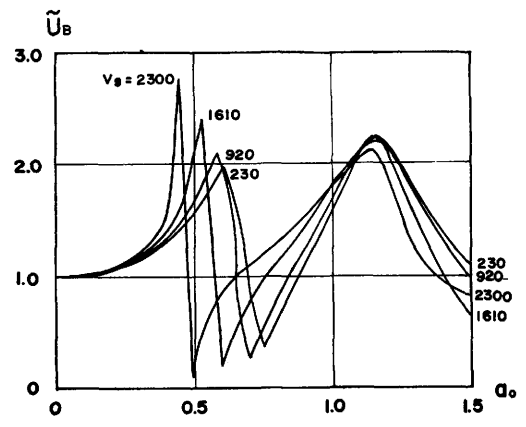


Fig.7 Amplitude characteristics of horizontal translation of the foundation;  $\tilde{U}_B$

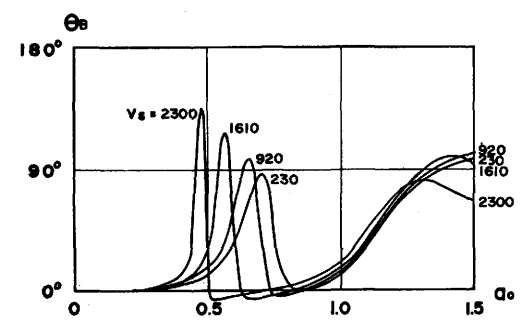


Fig.8 Phase characteristics of horizontal translation of the foundation;  $\theta_B$

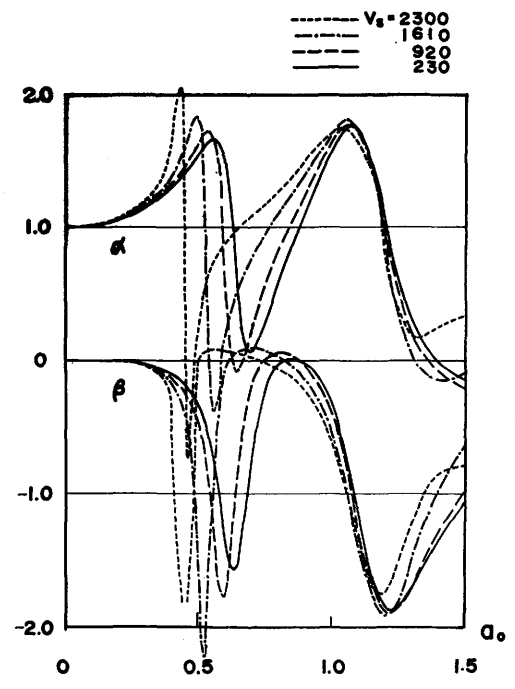


Fig.9 Real parts and imaginary parts of  $\theta_B$