

地震時における剛体基礎の塑性沈下に関する一考察

ON INELASTIC SETTLEMENT OF RIGID FOUNDATIONS DURING EARTHQUAKES

後藤 尚 男*・亀田 弘 行**・和田 浩***
By Hisao Goto, Hiroyuki Kameda and Hiroshi Wada

1. 結 言

一般にケーソン基礎のように自重の大きい剛構造物は、常時荷重下ですでにかなりの弾性沈下を生じていると考えられるが、この状態で地震力のような動的外力が作用した場合、基礎体の運動によって地盤が降伏することも考えられる。特に、基礎底面の全域で支持層が降伏すると、基礎体は大きな塑性沈下を生ずることになり、構造物全体にとっても危険な状態を招く。ほとんどの場合、この種の剛体基礎は、地震時にも底面の地盤が降伏しないように設計されるであろうが、静的震度法と動的応答の定量的な関連性や、設計震度を上まわる地震が来襲した場合の終局性状を把握しておくことは重要である。このような観点から、本研究は弾塑性地盤中に根入れされた剛体基礎の地震応答を求め、その塑性沈下の性状を検討したものである。

剛体基礎の地震応答に関する研究は、基礎体とそれを取巻く地盤の動的相互作用の解明を中心課題として発達し、波動論、有限要素法、集中質量系などを解析の手段として多くの研究が行なわれているが(たとえば、参考文献 1)~4)), それらでは地震動を鉛直方向に伝播するせん断波としてその水平成分のみを考慮し、基礎体もまた、回転運動かこれに水平並進運動を加えたモデルを考えるのがほとんどであった。しかし、支持層が降伏するような場合には、基礎体の塑性沈下に対する自重の影響が大きく、その動きが鉛直並進運動であることから、地震動の鉛直成分を考慮する必要が生ずると考えられる。そのために、本研究においては、基礎体は水平・鉛直並進と回転の3自由度系とし、応答解析用の地震動でも水平・鉛直の両成分を考慮した。また、基礎体を支持する

地盤はバイリニア型の弾塑性地盤としたが、それらのうち、基礎体底面においては負の地盤反力(引張)は生じないものとして取り扱った。

2. 振動モデル

(1) 基礎-地盤系のモデル化

基礎体に接する地盤をバイリニア型の履歴特性を有するばね群と、線形減衰を表わすダッシュポット群で表示して、Fig. 1のような剛基礎-地盤系の振動モデルを考える。同図において、基礎体底面には、 N 組のバイリニア型ばねとダッシュポットの系を介して、支持層の地震加速度 \ddot{z} (水平成分)、 \ddot{v} (鉛直成分)が作用する。この場合、基礎体底面と支持層の間では引張抵抗は期待できないものと考え、ばね1組についての復元力は、Fig. 2(a)のような非対称な履歴特性を有する。また、表層の M 組のばねは、Fig. 2(b)のような通常のバイリニア型とする。

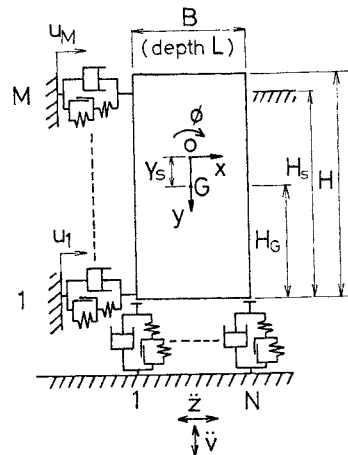


Fig. 1 Dynamic Model of Rigid Foundation-Soil System

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室
** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室
*** 正会員 工修 大林組(株) 土木本部

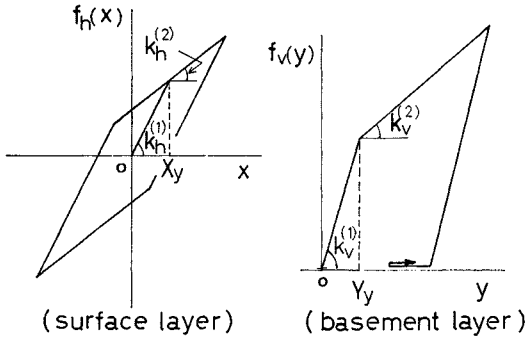


Fig. 2 Hysteretic Characteristics of Soil Reaction

一方地震時の表層の変形 u_i ; ($i=1, 2, \dots, M$) の影響は、表層のばね・ダッシュポット系を介して基礎体に作用するものとする。表層の変形は、Fig. 3 に示したようなバイリニア型ばねを有するせん断型振動系の、支持層の地震動 \ddot{z} に対する応答として算出する。

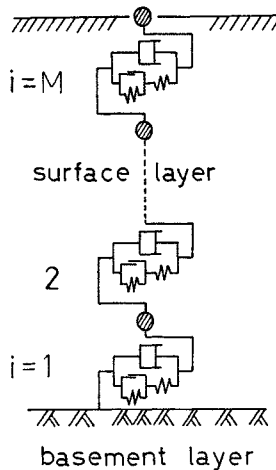


Fig. 3 Dynamic Model of Surface Layer

Fig. 1 の静止状態で、基礎体の重心 G は自重によって Y_s だけ沈下しており、この初期条件が支持層の降伏に影響するから、以下の解析においては、重心 G の応答変位の座標原点 0 は、 G の静止位置より Y_s だけ上方に置く。このようにして得られた振動モデルは、水平変位 x 、鉛直変位 y 、回転角 ϕ を伴う 3 自由度系となる。

(2) 運動方程式

上記の基礎—地盤系の振動モデルに対する運動方程式は次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} mr_G^2 \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^M c_{hi} (H_i - H_G) (\dot{x}_i - \dot{u}_i) + \sum_{j=1}^N c_{vj} r_j \dot{y}_j \\ + \sum_{i=1}^M f_{hi}(x_i - u_i) (H_i - H_G) \\ + \sum_{j=1}^N f_{vj}(y_j) r_j = 0 \\ m \ddot{x} + \sum_{i=1}^M c_{hi} (\dot{x}_i - \dot{u}_i) + \sum_{j=1}^N f_{hi}(x_i - u_i) = -m \ddot{z}(t) \\ m \ddot{y} + \sum_{j=1}^N c_{vj} \dot{y}_j + \sum_{j=1}^N f_{vj}(y_j) - mg = m \ddot{v}(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 m : 基礎体の質量、 r_G : 重心まわりの回転半

径、 c_{hi} : 表層の第 i 番のダッシュポットの減衰係数、 c_{vj} : 支持層の第 j 番のダッシュポットの減衰係数、 $f_{hi}(x_i - u_i)$: 表層の第 i 番のばねの反力、 $f_{vj}(y_j)$: 支持層の第 j 番のばねの反力、 H_G : 基礎体底面から重心までの高さ、 $H_i = iH_s/M$: 表層の第 i 番のばね—ダッシュポット系までの基礎体底面からの高さ ($i=1, 2, \dots, M$)、 $r_j = (2j - N - 1)B / \{2(N - 1)\}$: 基礎体底面中央から支持層の第 j 番のばね—ダッシュポット系までの距離、 ϕ : 基礎体の回転角 (時計方向を正)、 x, y : 支持層に対する基礎体重心のそれぞれ水平 (右向きを正)、鉛直 (下向きを正) 相対変位、 u_i : 表層の第 i 番質点の支持層に対する相対変位 (右向きを正)、 $\ddot{z}(t), \ddot{v}(t)$: 支持層の地震加速度のそれぞれ水平 (右向きを正)、鉛直 (上向きを正) 成分、 $x_i = x + (H_i - H_G)\phi, y_j = y + r_j\phi$

式 (1) をさらに変形し、同式の諸量の一部を無次元表示して次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\phi} + \frac{H_s}{mr_G^2} \sum_{i=1}^M c_{hi} (\nu_i - \nu_G) (\dot{x}_i - \dot{u}_i) \\ + \frac{B}{2mr_G^2} \sum_{j=1}^N c_{vj} \rho_j \dot{y}_j \\ + \frac{gH_s}{r_G^2} \sum_{i=1}^M \Phi_{hi}(x_i - u_i) (\nu_i - \nu_G) \\ + \frac{gB}{2r_G^2} \sum_{j=1}^N \Phi_{vj}(y_j) \rho_j = 0 \\ \ddot{x} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^M c_{hi} (\dot{x}_i - \dot{u}_i) + g \sum_{i=1}^M \Phi_{hi}(x_i - u_i) \\ = -R_h g \ddot{\psi}_h(t) \\ \ddot{y} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^N c_{vj} \dot{y}_j + g \left\{ \sum_{j=1}^N \Phi_{vj}(y_j) - 1 \right\} = R_v g \ddot{\psi}_v(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Phi_{hi}(x_i - u_i) &= \frac{f_{hi}(x_i - u_i)}{mg}, \quad \Phi_{vj}(y_j) = \frac{f_{vj}(y_j)}{mg}, \\ \ddot{\psi}_h(t) &= \frac{\ddot{z}(t)}{|\ddot{z}(t)|_{\max}}, \quad \ddot{\psi}_v(t) = \frac{\ddot{v}(t)}{|\ddot{v}(t)|_{\max}}, \\ R_h &= \frac{|\ddot{z}(t)|_{\max}}{g}, \quad R_v = \frac{|\ddot{v}(t)|_{\max}}{g}, \\ \rho_j &= 2r_j/B, \quad \nu_i = H_i/H_s, \quad \nu_G = H_G/H \end{aligned}$$

また、Fig. 3 に示した表層の運動方程式は次式のよう

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{u}_i - c_{gi+1} (\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) \lambda_{iM} + c_{gi} (\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) \\ - f_{g(i+1)} (u_{i+1} - u_i) \lambda_{iM} + f_{gi} (u_i - u_{i-1}) \\ = -m_i \ddot{z}(t); \quad i=1, 2, \dots, M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 m_i : 表層の第 i 番目質点の質量、 c_{gi} : 表層の第 i 番のダッシュポットの粘性係数、 $f_{gi}(u_i - u_{i-1})$: 表層の第 i 番のばねの反力、さらに、

$$\lambda_{iM} = \begin{cases} 1; & i \neq M \\ 0; & i = M \end{cases}$$

3. 応答計算に用いた振動モデルおよび地震動の諸元

上記のような剛体基礎の振動モデルに対し、地震応答解析を行なった。ここで用いた振動モデルと入力地震動の諸元の概要は **Table 1** のとおりであるが、以下それらについて概説する。

Table 1 Parameter Values of Dynamic Model and Excitation

parameters of foundation body		
dimension	$H=20\text{ m}, B=L=10\text{ m}$	
unit weight	$w=2.3\text{ t/m}^3$	
hysteretic characteristics of soil reaction		
coefficient of soil reaction	$K_v=8.8\text{ kg/cm}^3, K_h=0.59\text{ kg/cm}^3$	
rigidity ratio	$k_{vj}^{(2)}/k_{vj}^{(1)}=0.25, k_{hi}^{(2)}/k_{hi}^{(1)}=0.4$	
vibrational characteristics		
fundamental period	$T_N = \begin{cases} 0.277\text{ sec} & (H_s/H=0.5) \\ 0.194\text{ sec} & (H_s/H=1) \end{cases}$	
damping factor	$h_v=0.3, h_r = \begin{cases} 0.147 & (H_s/H=0.5) \\ 0.236 & (H_s/H=1) \end{cases}$	
types of excitation		
	wave form	deformation of surface layer considered?
case I	sinusoidal	no
case II	sinusoidal	yes
case III	Taft accelerogram	yes
static safety factor of yielding		
$\alpha=0.5\sim 1.1, \beta=0.05\sim 0.25$		

(1) 基礎体の諸元

基礎体の形状・寸法は、高さ $H=20\text{ m}$ 、幅および奥行 $B=L=10\text{ m}$ 、単位体積重量 $w=2.3\text{ t/m}^3$ とする。

(2) 基礎体—地盤系のばね特性

基礎体を取り巻く地盤のばね特性は、土木学会本州四国連絡橋技術調査委員会の報告書(昭. 42)⁵⁾に従い、次のように定めた。すなわち、支持層の鉛直地盤係数 K_v を $K_v=E_R/(I_P B)$ ；(ただし、 $B=L$ より $I_P=0.512$) より算出した。ただし、 E_R はここでは支持層の弾性係数で、同報告書で「花崗岩 A」と呼称されている風化花崗岩の値 $E_R=45\,000\text{ t/m}^2$ を用いた。表層の水平地盤係数は基礎底面深さで K_h 、地表で 0 となる三角形分布とし、 K_h は $K_h=E_s/(I_P L)$ ；(ただし、 $L=B$ より $I_P=0.512$) より算出した⁵⁾。ここに E_s は表層の平均弾性係数で、上記報告書の「洪積泥層」に相当する値 $E_s=3\,000\text{ t/m}^2$ を用いた。

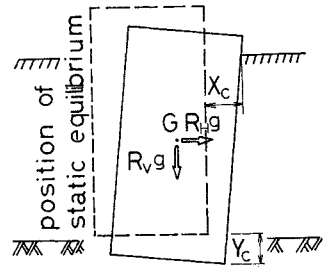
以上の地盤係数より、基礎体を支持するばねの初期剛性 $k_{vj}^{(1)}, k_{hi}^{(1)}$ を求めた。 $k_{vj}^{(1)}$ は基礎底面ですべて

等しく、 $k_{hi}^{(1)}$ は、表層の水平地盤係数の分布に対応する三角形分布とした。地盤の弾塑性剛性比 (**Fig.2**) には、それぞれ $k_{vj}^{(2)}/k_{vj}^{(1)}=0.25, k_{hi}^{(2)}/k_{hi}^{(1)}=0.4$ を用いた。なお、用いたばねの個数は、支持層で $N=9$ 、表層で $M=5$ である。

次に支持層および表層の降伏変位 Y_y, X_y はそれぞれ次式より算出する。

$$Y_y = \alpha(Y_s + Y_c), X_y = \beta X_c \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 Y_c および X_c は、**Fig. 4** に示したように、地震力が静的に作用することによる地盤の鉛直・水平変位の最大値である。したがって、 α, β は、震度法



によって耐震設計を行なった場合の、支持層および表層の降伏安全率(静的)を表わしている。本研究では、 $\alpha=0.5\sim 1.1, \beta=0.05\sim 0.25$ の範囲を計算の対象とした。通常剛体基礎は、 $\alpha > 1$ なるように設計が行われるであろうが、1. 節でも述べたように、設計震度を上まわる地震動が来襲した場合の終局性状を、塑性沈下の面から検討することが本研究の目的の一つであることから、 $\alpha < 1$ の領域をも対象としたものである。

(3) 基礎体—地盤系の減衰係数

支持層および表層のダッシュポットの減衰係数 c_{vj}, c_{hi} は、それらと対をなすばねの初期剛性および基礎体の質量を用いて次式より算出した。

$$c_{vj} = 2 h_v' \sqrt{m k_{vj}^{(1)}}, c_{hi} = 2 h_h' \sqrt{m k_{hi}^{(1)}} \dots\dots(5)$$

ただし、 h_v', h_h' は振動系全体の減衰特性から決まる定数であるが、ここでは $h_v' = h_h' = 0.1$ とする。

(4) 基礎体—地盤系の振動特性

以上の諸元から算出された基礎体—地盤系の基本固有周期は、 $T_N=0.277\text{ sec} (H_s/H=0.5), 0.194\text{ sec} (H_s/H=1)$ 、鉛直振動の減衰定数は $h_v=0.3$ 、基礎底面まわりの回転振動の減衰定数は $h_r=0.058 (H_s/H=0), 0.147 (H_s/H=0.5), 0.236 (H_s/H=1)$ となる。

(5) 表層の諸元

Fig. 3 の表層の振動モデルの諸元としては次のような値を用いた。単位体積重量： 1.8 t/m^3 、層厚： $H_s=10, 20\text{ m}$ 、せん断弾性係数：基礎底面深さで $3\,000\text{ t/m}^2$ の三角形分布、降伏ひずみ： 1×10^{-3} 、弾塑性剛性比 k_{g2}/k_{g1}

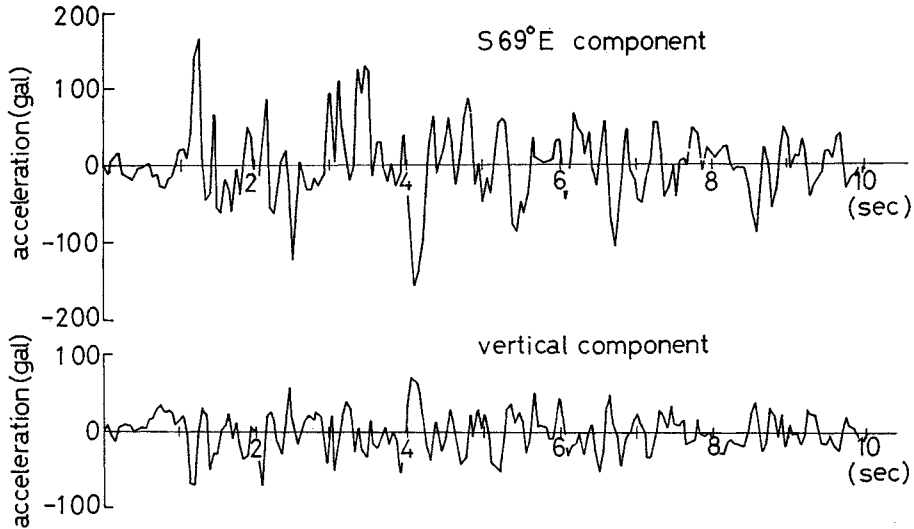


Fig. 5 Taft, Calif., U.S.A., July, 1952 Accelerogram

=0.4。

(6) 入力加速度

支持層からの入力加速度としては次のような2種類を考える。

$$\text{正弦波: } \ddot{z} = R_h g \sin \frac{2\pi}{T_N} t, \quad \ddot{v} = R_v g \sin \frac{2\pi}{T_N} t \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Taft 加速度波形} \\ \ddot{z} = R_h g \ddot{z}_T(t) / |\ddot{z}_T(t)|_{\max} \\ \ddot{v} = R_v g \ddot{v}_T(t) / |\ddot{v}_T(t)|_{\max} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 R_h, R_v はそれぞれ水平・鉛直震度を表わし、式(4)の α, β を介して地盤の降伏変位 Y_y, X_y と結びつけられる。また、式(7)中の $\ddot{z}_T(t), \ddot{v}_T(t)$ は、Taft, Calif., U.S.A., July, 1952の加速度記録のそれぞれ水平(S 69°E)および鉛直成分で、それらの波形をFig. 5に、主要部のパワースペクトル密度をFig. 6に示した。 $|\ddot{z}_T(t)|_{\max}, |\ddot{v}_T(t)|_{\max}$ は、それぞれ $\ddot{z}_T(t), \ddot{v}_T(t)$ の絶対最大値である。また鉛直・水平震度の比は $R_v/R_h=0.5$ とする。

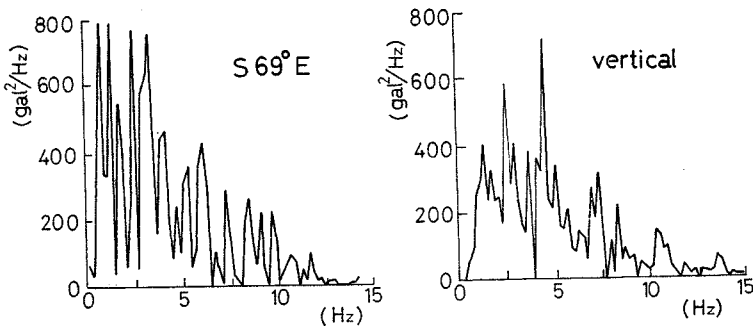


Fig. 6 Power Spectra of the Taft Accelerogram

式(6),(7)の入力波形の相違に加えて、表層の変形の影響をも検討するために、応答計算は次のような三つの場合について行なった。

- case I : 表層が支持層と同一の正弦振動を行う、すなわち $u_1 = \dots = u_M = 0$ の場合。
- case II : 支持層は正弦振動を行い、これに対する運動方程式(3)の解を表層の変形 u_1, \dots, u_M として用いる場合。
- case III : 支持層からの入力として Taft 加速度波形を用い、case II と同様に表層の変形を考慮する場合。

4. 剛体基礎の塑性沈下に関する考察

(1) 沈下応答曲線

前節までに示した剛体基礎—地盤系の振動モデルについて応答計算を実施した。結果の一部をFig. 7~9に示した。本研究で取扱っているような剛体基礎の支持層が地震時に降伏する場合には、底面端部でまず降伏が生じ、順次中央部に向かうものと考えられるから、地震応答時に底面中央で降伏が生ずる場合には、底面全域で支持層が降伏し、その結果かなり大きな塑性沈下が発生するものと考えられる。このような特性を検討するため、Fig. 7~9は基礎底面中央の沈下応答を示したもので、それぞれ入力加速度の case I~III に対応する。

Fig. 7~9 において、いずれの

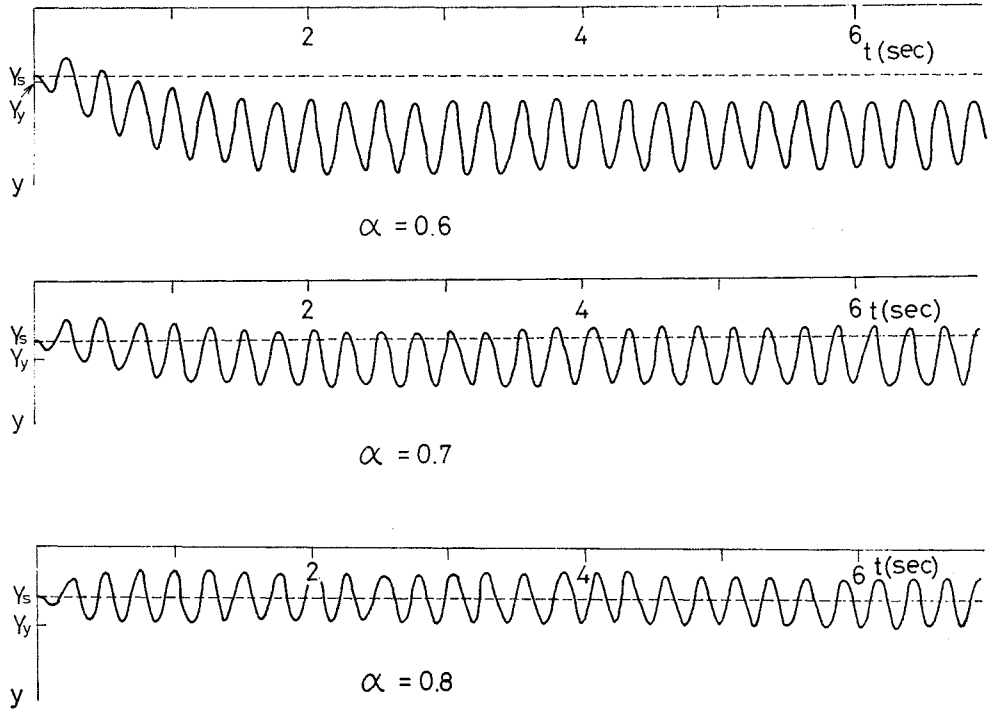


Fig. 7 Vertical Displacement of Foundation (case I)

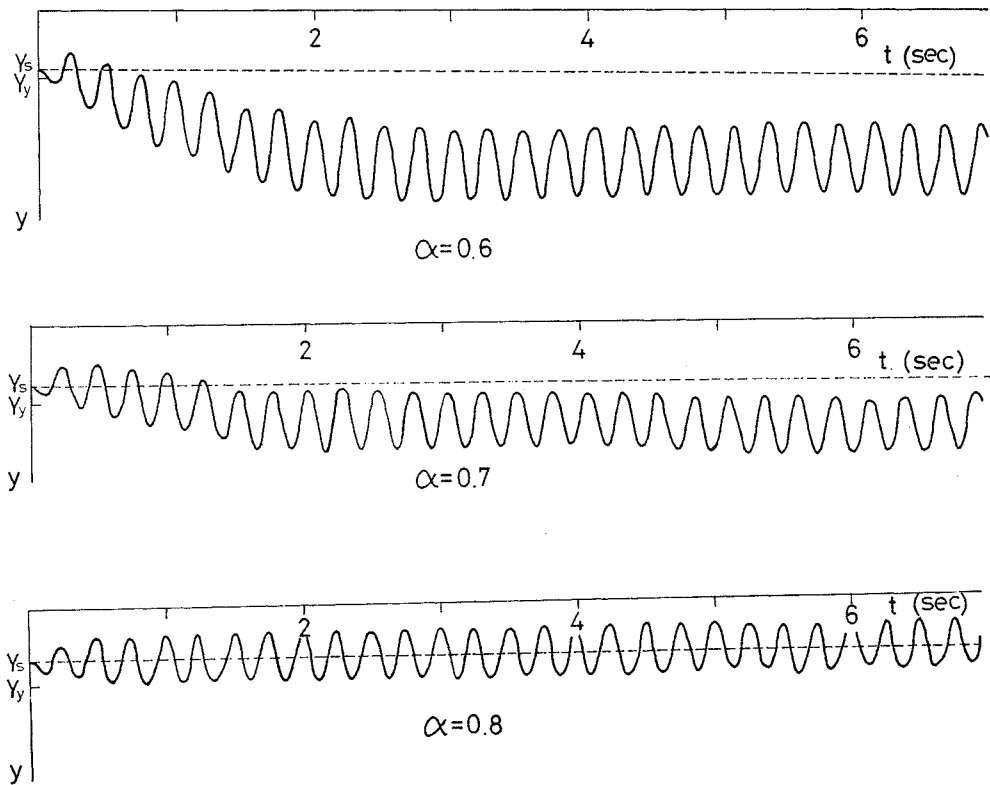


Fig. 8 Vertical Displacement of Foundation (case II)

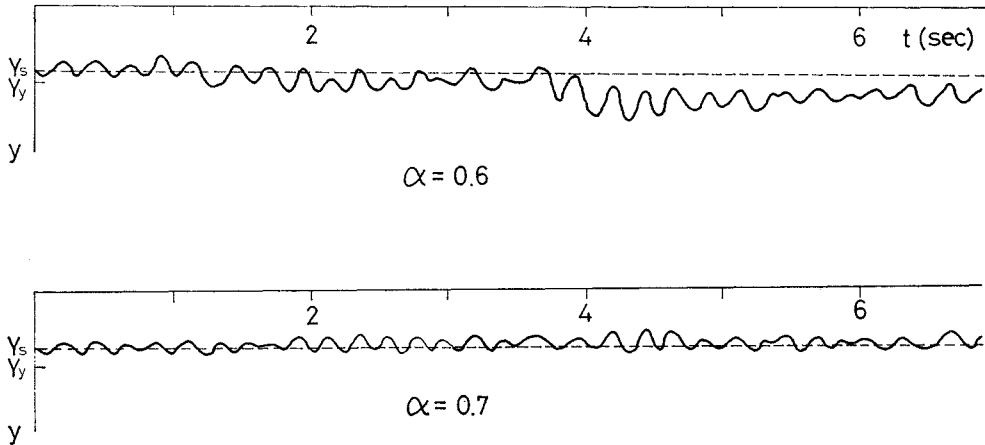


Fig. 9 Vertical Displacement of Foundation (case III)

場合も降伏安全率 α が小さいほど、大きな塑性沈下が発生しているのがわかる。Fig. 7, 8 の正弦波入力の場合には、定常加振によって応答の初期の段階で塑性沈下が完了しており、かつ入力の周期と振動系の基本固有周期が等しいため、応答の振動振幅もかなり大きな値となっている。また、case I, II とも基礎の塑性沈下は $\alpha < 0.7$ で発生していることは同様であるが、 α の同じ値に対しては、表層の変形を考慮した case II のほうが、これを考慮しない case I より大きな塑性沈下を示している。これより、塑性沈下の大きさについて、表層の変形の影響が無視できないことがわかる。

次に Fig. 9 の case III においては、採用した地震動が非定常かつ不規則な Taft 加速度波形のため、塑性沈下の進行にはかなりの時間を要しており、振動振幅も case I, II に比べて小さい。 $\alpha = 0.6$ の場合、 $t = 4$ sec 前後で最も急激に塑性沈下が発生しているが、これは、Fig. 5 において、入力地震動が鉛直・水平成分とも最大加速度を示す時刻と一致している。さらに、Fig. 9 では、塑性沈下が生ずる α の値は $\alpha \approx 0.6$ の範囲で Fig. 7, 8 の場合より小さく、これは基本固有周期と等しい周期の正弦波による定常加振の場合ほどには塑性沈下が進行しないことを示している。

Fig. 7~9 は $\beta = 0.05$ に対する結果であるが、 β の他の値についても上記と同様の結果が得られていることから、表層の降伏安全率 β は基礎体の塑性沈下には大きな影響を持たないと考えてよさそうである。

(2) 基礎底面の地盤反力分布

基礎体の底面における地盤反力分布の変動を Fig. 10 に示した。同図は Fig. 8 (case II) の $\alpha = 0.6$ の場合について、応答開始から $t = 2T_N \approx 0.55$ sec 前後までの変化の様子を示している。図中の破線は、静止時の自

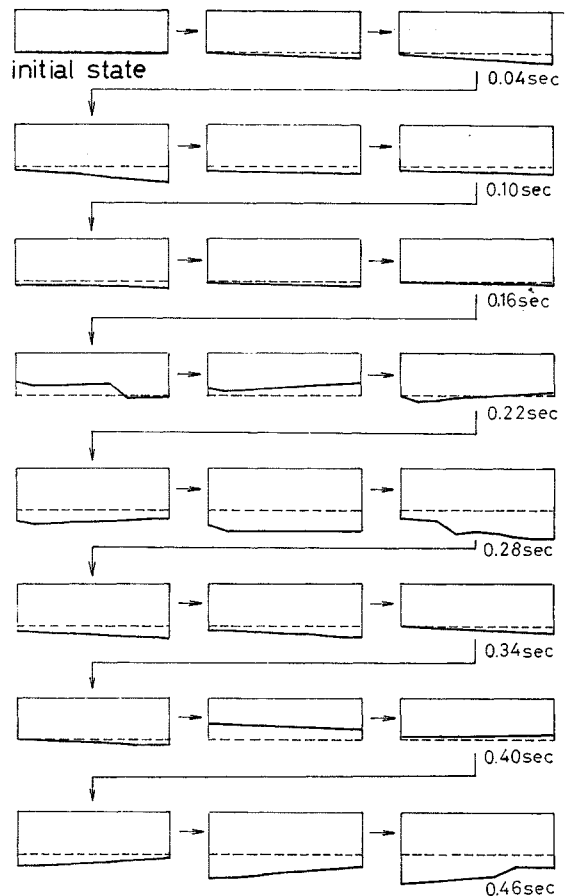


Fig. 10 Distribution of Dynamic Subgrade Reaction

重のみによる地盤反力を示す。Fig. 8 からわかるように、この場合には応答開始後ただちに塑性沈下が進行しているが、その影響は、Fig. 10 においては、応答の初期の段階で地盤反力分布形状が直線性を失うこととなって現われている。

次に Fig. 10 において、動的地盤反力は左右に傾斜を繰り返す一方、全体として静的反力の両側に変動している。これらの変動のうち、前者は入力加速度の水平成分および表層の変形による基礎体の回転振動の影響、後者は入力加速度の鉛直成分による基礎体の上下振動の影響と考えられる。このような観点から Fig. 10 を検討すると、次のようなことがわかる。まず、地盤反力分布は上下振動の影響を支配的に受けており、これに回転振動の影響が加わって、全体として塑性沈下を進行させる。また、本研究の範囲では、底面地盤反力が0になった場合はなく、したがって、回転振動により、静的反力が解消されて基礎の一端が浮き上る現象はみられなかった。山本⁹⁾によれば、表層のない振動モデル（ただし、 K_b が若干異なる）では、このような浮き上りがみられたことから、Fig. 10 の場合には、表層がケーソンの回転振動をある程度拘束していると考えられる。

表層が基礎体の回転振動に与える影響としては、次の二つが考えられる。すなわち、表層が変形することによって基礎体の回転が強制される効果、および表層のばねによる拘束、表層内での振動エネルギーの消費・逸散によって基礎体の回転を抑制する効果である。Fig. 10 に関する上記の結果は、これらのうち後者の影響が卓越していることを示すものであろう。ただし、以上は根入長が $H_s=0.5H$ に対する結果であり、後述のように $H_s=H$ の場合には塑性沈下が増大するから、本研究の範囲では、根入長が大きくなるとともに、表層の変形の影響が増大するものと考えられる。この点については、表層の振動モードとの関連で次項で再び論ずることにする。

(3) 基礎の塑性沈下を生ぜしめる α の範囲

4. (1) でみたように、剛体基礎の塑性沈下に対して、基礎底面での静的降伏安全率 α の及ぼす影響が大きいことを知った。このことは、塑性沈下は、地震動が強大なほど、また基礎の降伏変位が小さいほど発生しやすいという当然の事柄を表わしているが、その定量的な傾向を把握しておくことは重要である。そこで、 $\alpha < \alpha_c$ で基礎底面中央に塑性沈下が発生するような α_c を本研究の計算結果から選び出したのが Table 2 である。 α_c を用いて、塑性沈下に対する安全率 α/α_c を求めることができる。同表から次のようなことがわかる。i) α_c の値が1を越えることはなく、本研究で対象とした範囲では、震度法によって支持層が降伏しないように設計を行えば、すなわち $\alpha > 1$ にしておけば、実地震時に動的効果によって支持層の一部が降伏することはあっても、基礎底面全域に及ぶような大きな塑性沈下が生ずる可能性は小さい。ii) case-I では表層の厚さ H_s が α_c の

Table 2 Critical Values of α for Inelastic Settlement

	H_s/H	fundamental period T_N (sec)	α_c
case I	0.5	0.277	0.7
	1.0	0.194	0.7
case II	0.5	0.277	0.7
	1.0	0.194	1.0
case III	0.5	0.277	0.6
	1.0	0.194	0.8

値に影響を持たないのに対して、case II, III では H_s が大きくなると α_c が増加する傾向にある。このことから $H_s/H > 0.5$ の範囲では、表層の変形による回転振動が増大し、これが上下振動による塑性沈下をいっそう助長するものと考えられる。ただし、本研究で対象とした表層のモデルの応答では、基本モードが卓越しており、高次モードが卓越する場合には、表層の変形の影響は、上記の結果とは異なることもあると考えられる。

(4) 本研究の結果の適用範囲について

数値計算結果に関するこれまでの検討から、i) 剛体基礎の塑性沈下に対して、地震動の鉛直成分の影響が大きいこと、ii) 表層厚 H_s が大きい場合（たとえば、 $H_s/H > 0.5$ ）には、 H_s が大なるほど表層の変形の影響によって基礎体の回転振動、ひいてはその塑性沈下が助長され、逆に H_s が小さくなると、表層は基礎体の回転振動を拘束する傾向があること、iii) 基礎底面全域にわたるような大きな塑性沈下は比較的発生しにくいことなどが確かめられた。しかしこれらの結論は、前節 3. のような振動モデルの諸元に対する結果であって、あらゆる場合にそのまま適用できるものではない。したがって、これらの諸元を基準とした場合に、本研究の結論を定性的に適用しうる範囲を検討しておくことが必要である。

本研究で対象とした振動モデルの諸元は次のような特徴を有する。すなわち、i) $H/B=2$ なる、高さの半分程度の幅を有する剛体基礎であり、底面地盤の影響を無視できず、鉛直地動の影響を受けやすい。ii) 基礎体の単位体積重量 2.3 t/m^3 は全重量が 4600 t/m^2 であることを意味し、かなりの重量構造物である。これは、鉛直地震動による塑性沈下を大きくする要素と考えられる。iii) 支持層の剛性は表層の剛性の15倍であり、軟弱な表層を貫いて堅固な地盤に支持されるタイプであり、支持層の安定性が基礎全体の耐震安全性に支配的な影響を持つ。これらより、本研究の結果の適用可能な範囲は、比較的幅が広く ($H/B \leq 2$ 程度) 重量の大きな剛体基礎が、軟弱な表層を貫いて堅固な支持層まで根入された場合ということができよう。

これとは逆に、高さ比べて幅が狭く ($H/B \gg 2$)、ま

た支持層の剛性と表層の剛性が本研究ほどには異ならない場合、さらに重量があまり大きくない場合（細長い基礎体では必然的にこのようになる）には、基礎体の沈下に対する表層の摩擦抵抗の影響が増大することと相まって、底面反力および鉛直地震動の影響は小さくなり、基礎体の地震応答には表層の変形が支配的な影響を持つようになると考えられる。

5. 結 言

本研究においては、弾塑性地盤中に根入れされた剛体基礎の地震応答を、主として塑性沈下に対する安定性の面から検討した。得られた結論を要約すれば以下のとおりである。

(1) 剛体基礎の塑性沈下は主として地震動の鉛直成分によって発生し、基礎体の慣性による回転振動によって助長され、さらに表層の変形により影響を受ける。

(2) 定常正弦波加振では塑性沈下が応答開始とともに速かに進行して一定値に近づくのに対し、Taft 加速度記録のような不規則な入力波形では、最大加速度が発生する時刻の前後でほとんどの塑性沈下が進行する。

(3) 地震時の地盤の振動において、表層の基本モードが卓越する場合には、表層の厚さ H_s が基礎体の高さ H に比べて小さいとき、表層は基礎体の回転運動を拘束し、 H_s の増大とともに（たとえば $H_s/H > 0.5$ ）表層の変形により基礎体の回転振動が増大し、塑性沈下が助長される傾向にある。

(4) 基礎の塑性沈下に対しては支持層の降伏安全率の影響が大きく、表層の降伏安全率はあまり影響しない。

(5) 震度法によって支持層が降伏しないように設計を行えば、すなわち支持層の静的降伏安全率 α を 1 より大きくしておけば、実地震時には動的効果によって支

持層の一部が降伏することはあっても、基礎底面全域が降伏するような塑性沈下が生ずる可能性は小さい。設計震度を上まわる地震が来襲した場合には、当然塑性沈下の恐れがあるが、そのような塑性沈下が発生する静的降伏安全率 α の範囲としては、Table 2 が参考となる。

(6) 本研究で対象としたのは比較的幅が広く、重量の大きな剛体基礎が軟弱な表層を貫いて比較的堅固な支持層に根入された場合で、このような特徴が失われぬ範囲で、上記 (1)~(5) の結論は定性的に成り立つと考えられる。

謝 辞：本研究の予備段階として、また本研究の解析結果の考察における参考として、元京都大学大学院工学研究科学生 山本 博氏（現日本電信電話公社技術局）の研究⁹⁾ に負うところが大きい。ここに記して感謝の意を表する。また、本研究における数値計算は、京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田治見宏：深い基礎を有する構造物の地震応答について、日本地震工学シンポジウム（1966）講演集、昭. 41.10, pp. 255-260.
- 2) 後藤尚男・土岐憲三・吉原 進：多自由度表示による地盤一構造物基礎系の振動解析について、京都大学防災研究所年報, 12 号 A, 昭. 44. 3, pp. 273-287.
- 3) 後藤尚男・土岐憲三・秋吉 卓：不規則外力を受ける基礎構造物の非定常応答、京都大学防災研究所年報, 13 号 B, 昭. 45. 3, pp. 579-592.
- 4) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Soil-Structure Interaction of Massive Embedded Structures During Earthquakes, Preprint for 5 WCEE, Rome, 1973, No. 233.
- 5) 土木学会・本州四国連絡橋技術調査委員会：本州四国連絡橋技術調査報告書, 付属資料 2, 耐震設計指針（1967）昭. 42. 7, pp. 74-75.
- 6) 山本 博：弾塑性地盤上にある剛基礎の地震応答に関する基礎的研究、京都大学大学院工学研究科修士論文, No. 462, 昭. 45. 3.

（1974. 3.15・受付）