

鋼管橋脚の耐震計算に使用すべき地震波について

九州大学 助教授 小坪 清真
九州工大 助手 ○高西 照彦

1. まえがき

著者等は前著⁽¹⁾において、比較的硬い地盤で得られた地震記録を下層基盤での入力波として用い、上層軟弱地盤の変形を考えた場合の鋼管橋脚の地震応答を計算した。しかし、今日得られている実際の地震波はその大部分が地表面で記録されたものであつて基盤での地震波とは当然異なっているはずである。本論では地表面で得られた地震記録を用いて地盤の変形を考える場合と地盤の変形を考えない場合とについて、鋼管橋脚の地震応答を計算し地盤の変形が鋼管橋脚の変位に及ぼす影響を求めた。

2. 鋼管橋脚の振動モデル

解析には前著と全く同一の鋼管橋脚を用いた。すなわち、図-1(a)に示すような鋼管橋脚を図-1(b)に示すような多質点系に置換して計算を行った。

3. 地震時における地盤の振動

地表面での地動変位 $\bar{u}_s$ が与えられた場合橋脚の変位応答を求めるには、まず、地表層内各点での地動変位 $\bar{u}$ を求めなければならぬ。地震波を地表面に垂直な方向に伝わるせん断形の平面波とし、座標軸を図-2のようにとれば、地動変位 $\bar{u}$ は次の微分方程式から求められる。

$$\frac{\gamma_s}{g} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(G \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 t は時間、 γ_s は土の単位体積重量、 G は地盤のせん断弾性係数、 $\bar{u}$ は地盤の絶対水平変位である。今、地盤は一様な弾性体であると仮定すると G は一定となり(1)式の一般解は f_1, f_2 を z, t についての任意の関数として次のように求められる。

$$\bar{u} = f_1\left(t - \frac{z}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{z}{v}\right) \quad (2)$$

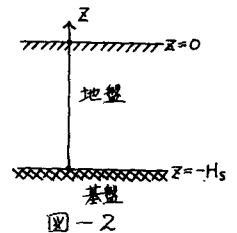
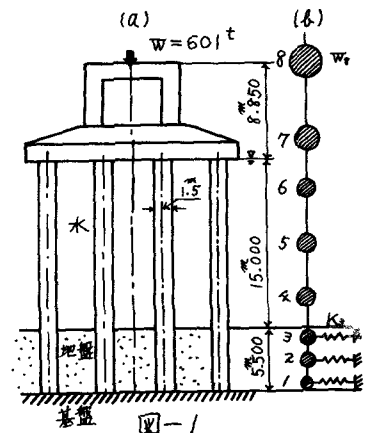
ここに、 $v = \sqrt{g \cdot G / \gamma_s}$ である。

境界条件として地表面でのせん断力が0でなければならぬから(2)式は $\left(G \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)_{z=0} = 0$ を満足せねばならない。したがって、 $\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)_{z=0} = \left[-\frac{1}{v} f_1'\left(t - \frac{z}{v}\right) + \frac{1}{v} f_2'\left(t + \frac{z}{v}\right)\right]_{z=0} = 0$ から $f_1'(t) = f_2'(t)$ ゆえに、 $f_1(t) = f_2(t)$ となる。結局、(2)式は次の形に書ける。

$$\bar{u} = f\left(t - \frac{z}{v}\right) + f\left(t + \frac{z}{v}\right) \quad (3)$$

さて、地表面での地震動を $\bar{u}_s$ とすれば、(3)式において $z=0$ として $\bar{u}_s = 2f(t)$ となる。したがって、逆に地表面での地震動が既知の場合には地表層内各点での地動変位は次式によつて表わされる。

$$\bar{u}(t, z) = \frac{1}{2} \left\{ \bar{u}_s\left(t - \frac{z}{v}\right) + \bar{u}_s\left(t + \frac{z}{v}\right) \right\} \quad (4)$$



$\bar{u}_s$ を用いれば鋼管下端 ($z = -H_s$) での地震変位 ϕ は次のように表わされる。

$$\phi(t) = \frac{1}{2} \left\{ \bar{u}_s(t + \frac{H_s}{V_s}) + \bar{u}_s(t - \frac{H_s}{V_s}) \right\} \quad (5)$$

したがって、鋼管下端と地層任意点 z との相対変位 u は $\bar{u} = \phi + u$ の関係に (4), (5) 式を用いて、次のように表わされる。

$$u(t, z) = \frac{1}{2} \left[\left\{ \bar{u}_s(t - \frac{z}{V_s}) - \bar{u}_s(t + \frac{H_s}{V_s}) \right\} + \left\{ \bar{u}_s(t + \frac{z}{V_s}) - \bar{u}_s(t - \frac{H_s}{V_s}) \right\} \right] \quad (6)$$

また、基盤での地震加速度 $\ddot{\phi}$ は次のように表わされる。

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{2} \left\{ \ddot{u}_s(t + \frac{H_s}{V_s}) + \ddot{u}_s(t - \frac{H_s}{V_s}) \right\} \quad (7)$$

地表面での地震変位記録 $\bar{u}_s(t)$ が与えられると (6) 式により地層内任意点 z_i と鋼管下端との相対変位 u_i が刻々計算される。また、地表面の地震加速度 $\ddot{u}_s(t)$ が与えられた場合には $\bar{u}_s = \int \int \ddot{u}_s dt dt$ により地表面の変位が求められ、これを (6) 式に使用すればよい。

4. 橋脚の変位応答

橋脚の変位応答は前着に示したように次の式から求められる。

橋脚の r 次の振動型を Y_{ri} とすれば、橋脚の i 点の変位は次式のように書ける。

$$y_i = \sum_{r=1}^{\infty} a_r Y_{ri} \quad (8)$$

a_r は r 次の振動型の大きさを表わし次の微分方程式より求められる。

$$\ddot{a}_r + 2\zeta_r n_r \dot{a}_r + n_r^2 a_r = -\beta_r \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^g e_{ri} u_i \quad (9)$$

$$\text{ここに、} \quad \beta_r = \frac{\sum_{i=1}^g \frac{W_i}{g} Y_{ri}}{\sum_{i=1}^g \frac{W_i}{g} Y_{ri}^2}, \quad u_i = u(t, z_i), \quad e_{ri} = \frac{K_i Y_{ri}}{\sum_{i=1}^g \frac{W_i}{g} Y_{ri}}$$

K_i は i 点の地盤のバネ定数で $K_i = kND\alpha_l$. k は地盤反力係数, D は鋼管外径, N は鋼管数, α_l は鋼管の地中における分割長である。

(7) 式から得られる $\ddot{\phi}$ と (6) 式から得られる u_i を (9) 式に入れて刻々の a_r を計算することからできる。

5. 地表面での地震加速度が与えられた場合の応答計算

(1) 地盤の動き 地表面の地震波が与えられた場合の応答を計算するには (6)-(7) 式によって地盤の変位 u および橋脚下端における地盤加速度 $\ddot{\phi}$ を求めればよいが、前式は地盤の弾性定数が一様な場合であるので前着に示した弾性定数が三角形分布の場合に対して応答を求めるために、ここでは、次のような便法により前着の計算結果を利用した。先づ、前着に示したように与えられた基盤上の加速度 $\ddot{\phi}$ により地盤の相対変位 u_i および地表面の絶対加速度 $\ddot{\phi} + \ddot{u}_s = \ddot{\bar{u}}_s$ を地盤のせん断振動の方程式

$$\frac{W_i}{g} \ddot{u}_i = -k_i(u_i - u_{i-1}) + k_{i+1}(u_{i+1} - u_i) - \mu_i(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + \mu_{i+1}(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - \frac{W_i}{g} \ddot{\phi} \quad (10)$$

$$(i = 1, 2, \dots, g, \quad u_g = 0, \quad k_{g+1} = \mu_{g+1} = 0)$$

を用いて求め、これを (9) 式に使用すれば、このときの応答は結果的には地表面加速度 $\ddot{\bar{u}}_s$ が与えられ、地盤変形を考慮する場合の解と見ることが出来る。(10) 式で u_i は地盤を履歴系に置換した場合の i 点の基盤に対する相対変位, W_i は履歴系 i の重量, k_i は i 点と $i-1$ 点の相対変位に比例するバネ定数, μ_i は i 点と $i-1$ 点との相対速度に比例する減衰係数, g は地盤中の履歴系の数である。

次に、今得られた地表面加速度 $\ddot{\bar{u}}_s$ を与えられたものとして (9) 式において $\ddot{\phi} = \ddot{\bar{u}}_s$, $u_i = 0$ とおいて、応答計算をすれば、このときの応答は地表面加速度 $\ddot{\bar{u}}_s$ が与えられ地盤変形を考慮しない場合の解と見ることが出来る。したがって、両者の場合と比較すれば地表面加速度が与えられた場合の地盤変形の

影響を求めることのできる。さて、地盤変形の影響を明らかにするにはいろいろ性質の異なった地盤に対する橋脚の変位応答を計算する必要がある。既に前着においていろいろ性質の異なった地盤に対するせん断振動を計算してあるので、ここでは、そのデータをそのまま利用して計算を進めた。

(2) 応答計算 図-1は計算に用いた鋼管橋脚で諸元その他はすべて前着のものに同じである。計算は橋脚の下端が基盤とヒンジ結合の場合について行った。地盤の性質は表-1に示すように前着から々通りの場合を選んで計算した。いづれの場合にも地盤反力係数は深さ方向に三角形分布とし地盤のせん断弾性係数 G との比を $G/k_s=20$ とした。上記々通りのうち $N0.3$ は地盤の固有週期 T_g と橋脚の固有週期 T_s とが相等しい場合、 $N0.1$ と $N0.2$ は $T_s > T_g$ の場合、 $N0.4$ は $T_s < T_g$ の場合である。

N0	1	2	3	4
k_s (kg/cm^2)	4	0.4	0.29	0.04
G_s (kg/cm^2)	80	8.0	5.80	0.80
T_g (sec)	0.444	1.402	1.67	4.44
T_s (sec)	1.17	1.64	1.67	1.75
T_s/T_g	2.63	1.17	1.00	0.39

表-1

図-3は $N0.1 \sim N0.4$ の各種の地盤の変位時間曲線で実線は u_1 、点線は u_2 である。いづれも減衰常数 $h_g=0.2$ として計算した。

図-4は上記々通りの場合の橋脚頂部の変位応答の時間的变化を示したもので実線は地盤の変形を考えない場合、点線は地盤の変形を考えた場合である。橋脚の減衰常数 h_s は $0.02, 0.05, 0.10$ の3通りに変えて計算したが、図-4はこのうち $h_s=0.02$ の場合を示した。

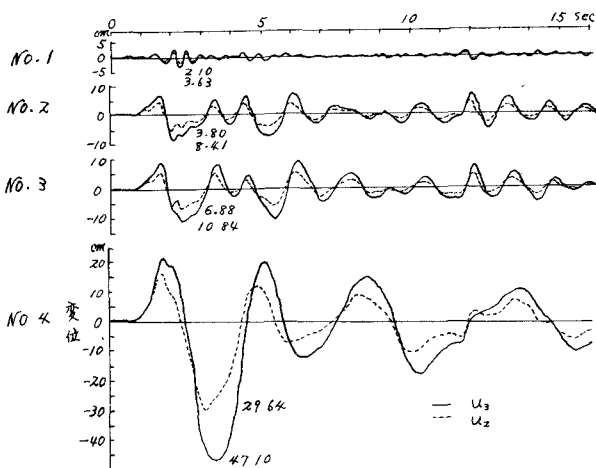


図-3 地盤の応答変位 ($h_g=0.2$)

図-5は橋脚頂部の変位応答曲線の最大値をプロットしたものである。図

5から $N0.1 \sim N0.4$ のすべての場合に対して、地盤の変形を考えないときの方が橋脚の変位が大きくなっていることが分る。地盤の固有週期と橋脚の固有週期とが近接している場合には地盤の変形を考えたときと考えないときとでその差が特に大きくなっている。

図-6は地盤の変形を考えた場合の橋脚変位と地盤変形を考えない場合の橋脚変位との比 T_s/T_g を横軸にとりいろいろの橋脚の減衰常数に対して表わしたものである。

本論において地盤の変形を考慮しない場合とは地盤が地震時において上層も下層も全く同様な水平運動をすると見做される場合であって、その際、上下両層は一体となって地表面で得られた地動変位に従って水平運動を行う。地震波が基盤から地表層には入るとそこで重複反射をくり返しその地盤の性質に応じた波がより増巾される結果、地表面で記録された地震波にはその地盤の固有週期に近い波が多く含まれるようになる。したがって、上層地盤の性質の影響をうける場所での地表面の地震記録をそのままの形で使って地盤の変形を考えずに橋脚の耐震設計をする時は、橋脚の固有週期が地盤の

それに近い場合には橋脚の変位応答を大きく見積り過ぎることになる。

前著においては地盤の変形を考えない場合の入力波として基盤での地震波を用いて橋脚の変位応答を求め地盤の変形を考えた場合のそれと比較して地盤が極端に軟弱な場合を除けば一般に前者の方が変位が小さいことを述べた。前著と本論から地盤の変形を考慮する場合の橋脚の応答変位は、地盤の変形を考えないで入力波として基盤での地震波を用いた場合と地表面での地震波を用いた場合の両者の橋脚変位の中間にあるといえる。

(1): 小坪 高西「鋼管橋脚の耐震設計に関する研究 その1, その2」
九大工学集報 vol.39, No.3, 4
昭41.12

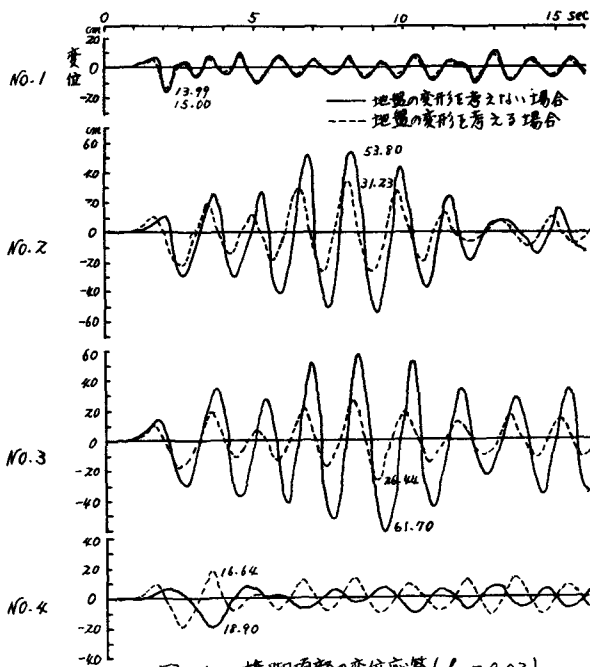


図-4 橋脚頂部の変位応答 ($k_s = 0.02$)

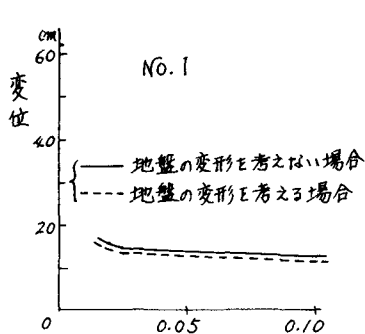
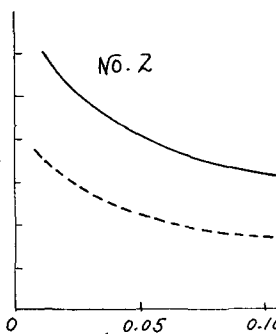
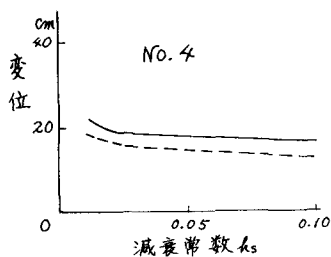
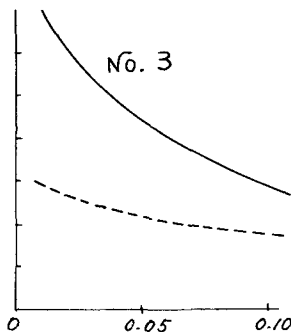


図-5



減衰係数 k_s



減衰係数 k_s

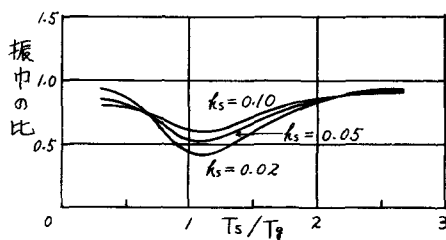


図-6