

軟弱地盤に立脚する構造物の振動性状について

早稲田大学理工学部 正員 堀井 健一郎

早稲田大学大学院 学生員 〇工修 川原 睦人

I. 緒言

軟弱な地盤中に基礎を有する構造物においては、その地震時の挙動を推定しようとする場合に、構造物と地盤とどのような関係で結びつけるかが問題となる。われわれは昭和42年以来、青森県長泥橋の下部構造の現地振動試験と手掛ける機会にめぐまれ、この種の問題に関して検討を行ってきた。この現地試験においては、通常行われているように構造物に加振装置と取付けて振動を与える方法のみならず、付近地盤上に加振装置を設置して地盤に振動を与える方法も採用し、さらにまた昭和43年5月に北海道大学によって実施された発破による振動試験に際し、構造物にも計器を配置して応答が記録された。なおこの際1968年十勝沖地震の余震による振動も記録されている。

以上の一連の実験結果に関する比較検討および有限要素法を用いて若干の計算を行った結果について報告する。

II. 長泥橋の振動試験結果

長泥橋の概要は橋梁と基礎 Vol. 2, No. 3 に紹介されているが、その特徴は基礎構造にあるといえよう。地盤の状態は表層約30mの深さまでがN値ほとんど0の粘性土と主体とする沖積層であり、以下約20mがN値3~20の砂と粘土の互層、それ以下がN値40以上のよく締まった砂からなる洪積層となっている。このような厚い軟弱層に対して、図-1のような頭部を剛結した立体鋼管組立基礎が用いられていて、試験の対象とした橋脚では、フーチング上面は地表下約2mの位置にあった。

この下部構造に対し次のような現地試験が行われた。すなわち

- 1) 基礎構造を対象とした加振試験。フーチング上面に起振機を据えて水平加振。
- 2) 橋脚構造を対象とした加振試験。
 - a) 橋脚天端に起振機を据えて水平加振。
 - b) 隣接する二橋脚を引寄せ、鋼構被断法により自由振動を発生せしめる。その途中での静的水平試験を含む。
 - c) 付近地盤上に起振機据付台を設け、低周波大出力の起振機を用いて地盤を水平加振。

これらの結果のうち1), 2) a) および2) b) につい

てはその概要を橋梁と基礎 Vol. 1, No. 7 に発表してある。これら一連の試験においてわれわれは当初予想したように加振方法の相違によって構造物の応答のあり方が影響されることを確認するとともにその相違は地盤の構造系に因りするしかたの相違として十分説明できることを確かめた。

図-2 は各種起振方法に対応する共振曲線の一部を示したものである。

図-1 長泥橋 橋脚 構造図

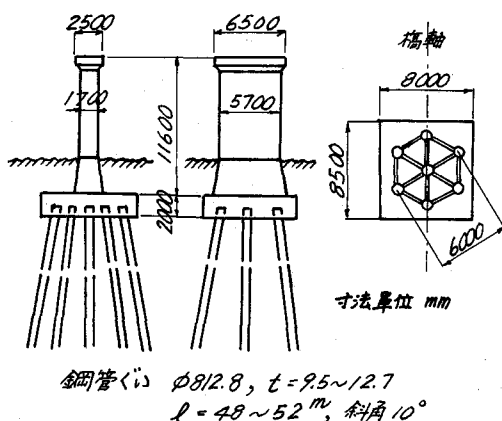
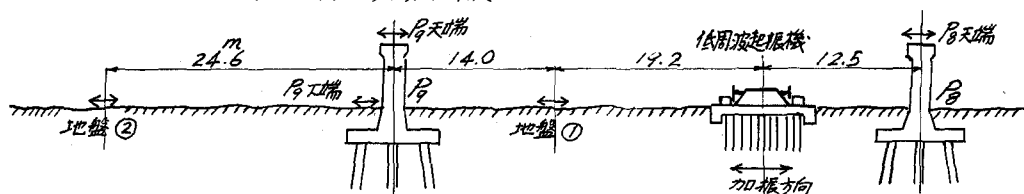


図-2 長泥橋に関する共振曲線

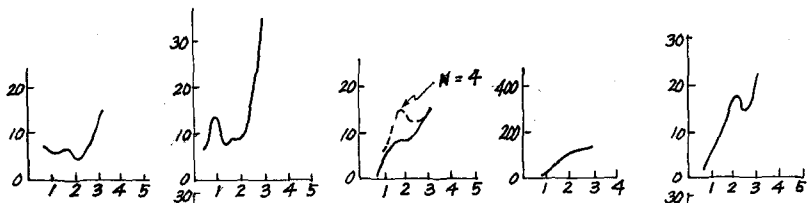


縦軸 振算変位 1st 倍振力 単位 μ/t
横軸 加振振動数 f 単位 $\%s$

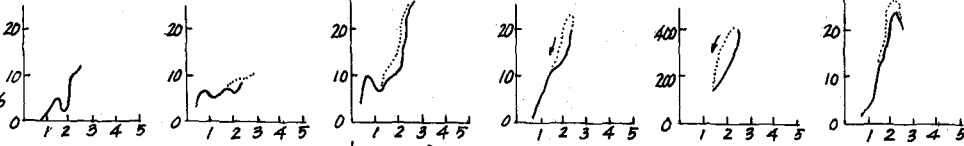
N 起振機偏心重錘枚数
起振力 $P(t) = Q \cdot f^2$

地盤② P_9 下端 P_9 天端 地盤① 起振機台 P_8 天端

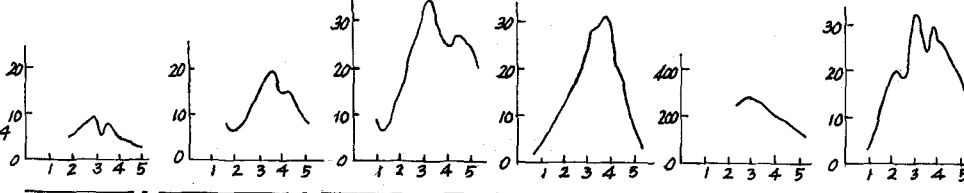
$N=8$
 $Q=1.468$



$N=16$
 $Q=2.936$



$N=4$
 $Q=0.734$

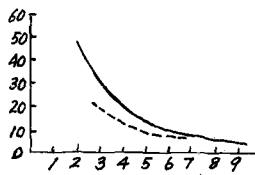


基礎構造共振曲線

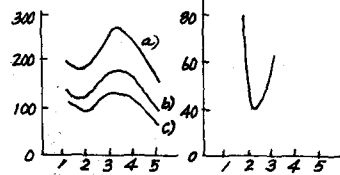
P_9 天端

付近地盤

P_8 天端



フーチング上面にて40^{kg}型起振機使用
—— フーチング本体
----- 土留矢板



P_9 天端にて40^{kg}型起振機使用
a) 天端 b) 中端 c) 下端



P_8 天端にて10^{kg}型起振機使用

北大によって行われた実験による加振および十勝沖地震の余震の場合には橋脚には優勢な固有振動は起こらなかったと報告されている。²⁾ 以上の結果からみて長泥橋のような場合には、構造物を主体と考える解析のみでは地震時の挙動と推定するのに不足であり、それと共に地盤そのものの振動を解析する必要があると思われる。そして地震時の地盤の振動性状が把握できれば、それによって強制される構造物の動的挙動も明らかになると考えられる。そこでその一つの方法として有限要素法を用いて地盤振動の解析を行い2) C)の実測結果と対比してみることに試みた。

III. 有限要素法による地盤振動の解析

従来この種の試みは Clough などにより行われているが、ここでは地盤を線型 Voight 体と考え、外力が調和振動を行う場合について計算してみた。地盤を三角形要素に分割し、分割した各要素について Voight 体を仮定すると、応力-ひずみ関係は次のようにあらわされる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{4C}{3} & -\frac{2C}{3} \\ -\frac{2C}{3} & \frac{4C}{3} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

これより、有限要素法の手法を用いることによって、振動方程式として(2)式が得られる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} \quad (2)$$

ここに $[M]$: 質量行列, $[C]$: 減衰行列, $[K]$: 剛性行列
外力 $\{P\}$ が周期関数 $\{P_0\}e^{i\omega t}$ (i は虚数単位) で与えられる場合には

$$([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])\{x_0\} = \{P_0\} \quad (3)$$

$$\text{ここに } \{x\} = \{x_0\}e^{i\omega t}$$

であるから、応答変位の实数部および虚数部はそれぞれ次のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} x_{0R} \\ x_{0I} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K] - \omega^2[M] & -\omega[C] \\ \omega[C] & [K] - \omega^2[M] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} P_{0R} \\ P_{0I} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

減衰を無視した場合には $[C] = 0$ であるから(5)式のようになる。

$$\{x_0\} = ([K] - \omega^2[M])^{-1} \cdot \{P_0\} \quad (5)$$

実際の計算にあたっては Conjugate Gradient Method を用いて連立一次方程式を解くようにプログラムを作成した。計算結果の一部を図-3 に示してある。

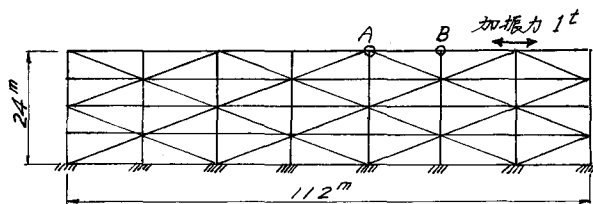
IV. 総括と結論

橋脚天端で加振した場合は 3.3% 付近に、フーチング下面に中心を有する躯体の回転振動の共振点が得られた。また地盤との連成振動と思われる共振点が 1% 以下にあるらしいことが認められた。

地盤に加振した場合には 1~2% 付近に小さいがいくつかの共振点が見られ、また橋脚の回転振動も 3.3% 付近にみられる。北大の測定結果では 3.3% 付近の橋脚固有の振動は顕著ではないと報告されている。一方、有限要素法による計算結果では図-3 に示すように 1~3% の範囲にかなり多くの共振点が見られる。これとその下に示したモードとを比較し、さらに実測結果を参照すれば、構造物固有の 3.3% の共振点以外のものには、何等かの形で地盤の水平変位が関与しているものと推定される。

したがって地震時にこれらがどうなるかを考慮して耐震性を論ずる必要があると考えられる。なお地盤の振動にも 3% 付近に共振点が存在するが、これは橋脚躯体の下部が地中に埋没していることが影響して、橋脚の振動と連成した結果であると判断される。計算結果をみると 3.5% 程度の振動数で地盤は地表に近い上層部が主に振動するという結果が得られている。したがって地表で加振した場合には橋脚の回転振動をも強制する結果となったのであろうと推定される。結論として、橋脚天端で加振した場合には構造物の固有振動が顕著にあらわれること、地盤に加振した場合には地盤の影響を受けた振動があらわれること、有限要素法による解析でこれに定量的な説明をつけることができてきたことが挙げられる。なお以上の計算では境界の処理に問題があり、このまゝでは実状にはそぐわない。また ν が 0.5 程度の材料に対しては、ここで用いた剛性行列が不安定になるなど改善の余地が多い。

図-3 有限要素法による計算結果



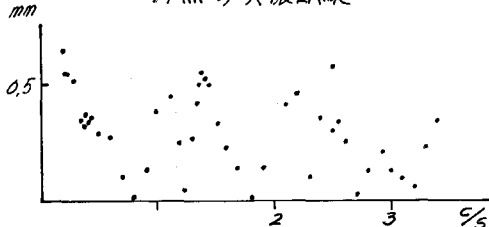
地盤に関する数値

$$E = 6.28 \times 10^2 \text{ t/m}^2$$

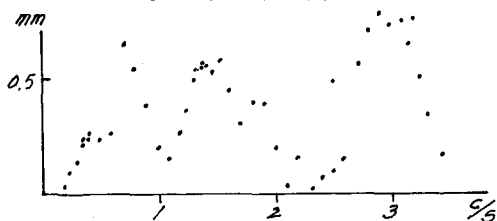
$$\nu = 0.48$$

$$C = 0.06 \text{ t/m}^2 \cdot \text{sec.}$$

A点の共振曲線

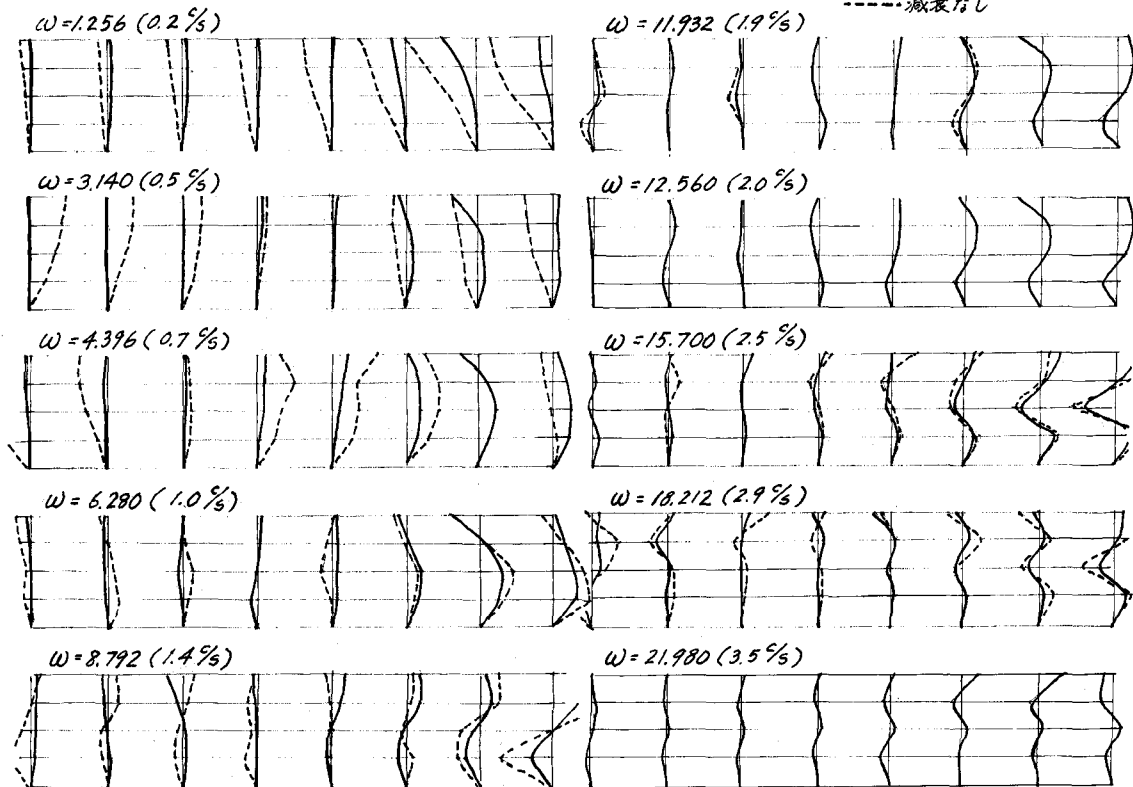


B点の共振曲線



加振振動数によるモードの変化状況

—— 減衰あり
----- 減衰なし



文献

- 1) Idriss, I.M. : Finite Element Analysis for The Seismic Response of Earth Bank, Proc. ASCE., SM3, 1968
- 2) 田治米鏡二他 : 青森県長泥橋の橋脚の振動測定と地盤調査, 物理探鉱 才22巻才1号, 昭和44年2月
- 3) Clough, R.W. and Woodward, R.J. : Analysis of Embankment Stresses and Deformations, Proc. ASCE., SM4, 1967