

京都大学工学部 正員 山田 善一
 京都大学工学部 正員 ○古川 浩平
 京都大学工学部 正員 河野 健二

1. まえがき

軟弱地盤上に建設される構造物は、杭やピア等の基礎により支持され、地盤と基礎、および基礎と上部構造物の相互作用により複雑な振動性状を示す。また、軟弱地盤層が厚い場合には杭が固い支持基盤にまで達し得ないことも考えられ、このような場合の相互作用についても不明な点が多い。

これらの軟弱地盤上に高橋脚高架橋が建設される場合の基礎と高橋脚橋の相互作用による振動特性を求め、以下に示す実験および解析を行ない、地盤を含めた基礎と高橋脚橋の相互作用について若干の考察を行なう。

2. 振動実験

(1) 実験モデル 本実験のモデルは軟弱地盤上に杭を基礎とした高橋脚橋が建設される場合の振動特性を調べるものであるため、モデルの作製にあたり以下のことを考え、モデルを設計した。

- ① 地盤はある程度弾性的であり、その固さがある程度の範囲内で自由にたれること。
- ② 杭に關してはプロトタイアの群杭効果を考慮して群杭効果があると思われる程度の本数でモデル化すること。
- ③ 上部構造としては、プロトタイアの橋軸直角方向の振動性状を調べるものなので、モデルは橋軸直角方向の剛性をもつ自由度系1棒構造とすること。

これらを考慮して、地盤のモデルとしては直径70cmのゴムで作った円筒形の容器の中に尿素系の土質安定剤であるエスロックUを入れたものを地盤のモデルとした。エスロックUの濃度については波動方程式に基いて波速度がプロトタイアとの相似律を満足するように決めた。杭基礎に關しては地盤中の杭の動的挙動は余り明らかではないが、ここでは杭は変位に比例する地盤からの反力項をもった振動はりと考え、曲げ振動方程式が相似律を満足するように設計した。モデルの材料としてはグラスファイバーを用いた。上部構造としては2次元的なはりの曲げ振動と考え、曲げ振動方程式が相似律を満足するように設計した。用いた材料はアクリライトである。なおプロトタイアとモデルの縮小率は振動台等の制約を考慮して長さ1/267、時間1/10とした。

(2) 実験の目的および方法

① 地盤の固さによる影響 ② 上部構造物の剛性

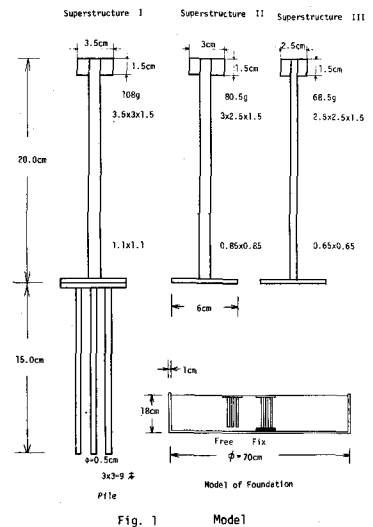


Fig. 1 Model

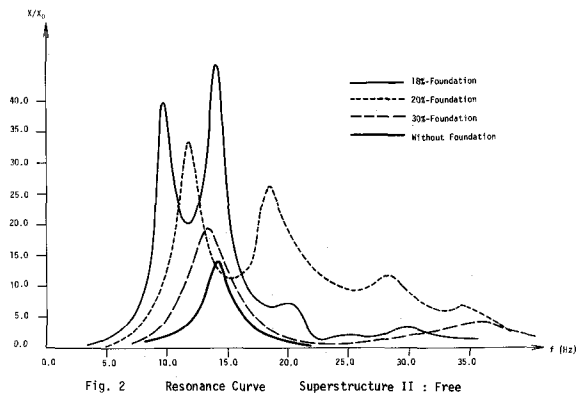


Fig. 2 Resonance Curve Superstructure II : Free

による影響 ③杭が固い基礎で支持されている場合と支持されていない場合の影響 もある。

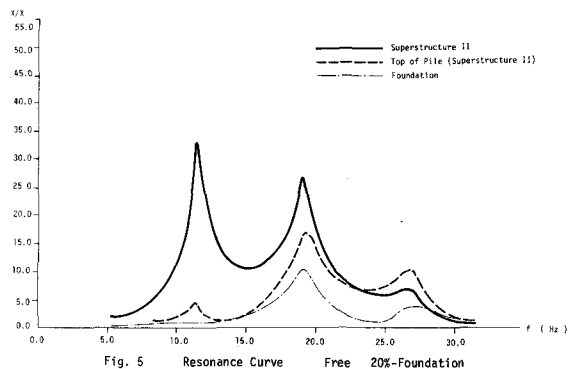
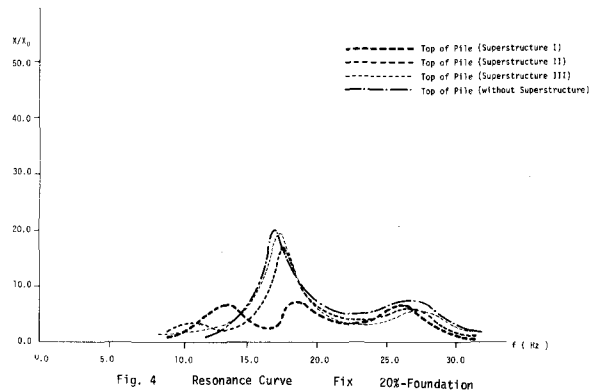
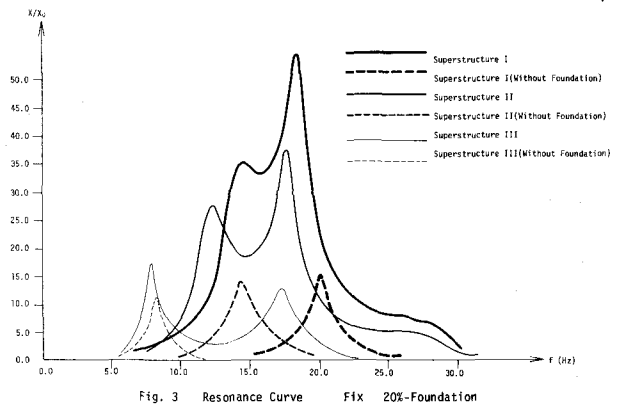
実験としては、①に対してはエスロックUの濃度を30%、20%、18% の3種類に変化させた。以下図中X%-Foundation とあるのはこの場合である。②に対しては上部構造物の剛性を3種類変化させた。図中上部構造物Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとあるのはこの場合であり、Ⅰが剛性が最も大きくⅢが最も小さい。③に対しては杭を底面に固定した場合と固定しない場合を行った。図中Fix, Free とあるのは固定した場合、固定しない場合を示す。これらのモデル図をFig. 1 に示す。

(3) 実験結果および考察 Fig. 2 は上部構造物がⅡで杭の固定条件もFreeとし、地盤の濃度を18%から30%へ変化した場合の上部構造物上端の共振曲線である。図中Without Foundation というのは地盤のない上部構造物だけの場合である。図から明らかなように、エスロックUの濃度が小さくなるにつれて、すなわち地盤が軟弱になるにつれて、1次の共振振動数が小さくなり、逆に1次の応答倍率は大きくなる。このことは杭基礎と上部構造物が一体となり、2振動するためと考えられ、杭基礎と上部構造物とを分離して解析することは系全体としての振動特性を誤ると考えらる可能性があり、杭基礎・上部構造物系を一体として解析する必要があることを示している。更に、これらの応答に対して地盤の影響が大きいということも同時に示している。

Fig. 3 は地盤が20%で杭の固定条件もFixとし上部構造物をⅠ、Ⅱ、Ⅲと変えた場合である。この図より明らかなように、上部構造物の剛性が大きい程1次の共振振動数が下がることになる。

Fig. 4 はFig. 3と同じく地盤が20%で杭をFixとし上部構造物をⅠ、Ⅱ、Ⅲおよび上部構造物なしと変えた時の杭上端の共振曲線である。Fig. 3およびFig. 4を比べてみると構造物の2次の応答にあって、上部構造物の剛性が大きい程上部構造物の応答は大きくなり、逆に杭上端の応答は小さくなる。同じことは地盤が30%の場合についても言える。このことから上部構造物と地盤を含めた基礎の剛性の比というものが系全体の応答に影響をおよぼしていることがわかる。

上部構造物がない場合の杭上端の応答と上部構造物がある場合の杭上端の応答とを比べ



るといふ場合も上部構造物のある場合の方が小さい。このことは杭基礎と上部構造物とを分離して解析する場合に境界条件として十分考慮に入れたおかげでなければならないことを示している。

Fig. 5は地盤が20%。杭をFix。上部構造物がⅠの場合の上部構造物上端、杭上端、地盤の共振曲線である。この図より20%の地盤では地盤の共振点は20Hz付近にあることがわかる。Fig. 3から上部構造物Ⅰの共振点は20Hz付近、Ⅱは15Hz付近、Ⅲは8Hz付近にあることがわかる。上部構造物Ⅰの共振点と地盤の共振点が非常に近づいている。この場合Fig. 3から明らかのように応答が非常に大きくなる。特に1次より2次の応答の方が大きくなる。地盤の共振点と上部構造物の共振点とが接近しているFig. 5の場合にはそれ程大きな応答にはなっていない。これらのことから、地盤と上部構造物の固有振動数が接近していると応答が非常に大きくなるので固有振動数を分離することが好ましい。また杭の共振点と地盤の共振点がほとんど同じところにあるところから、杭基礎の共振は地盤の共振によって起こされるものと考えられる。

Fig. 6は地盤が20%。上部構造物がⅠで杭の固定条件をFree, Fixと変化させた場合である。この図よりFixの方がFreeより連成変動がより顕著であることがわかる。

なお、これらの実験は振動台の制約もあり、直径70cm、深さ10cm程度のゴム容器で地盤をモデル化したため周辺の境界の影響など不明な点も多い。また上部構造物を橋脚の剛性だけを考えた自由度モデルとしたため、桁の影響や他の橋脚の影響などについては考慮に入れていないが、これらの点については今後更に検討を行なう予定である。

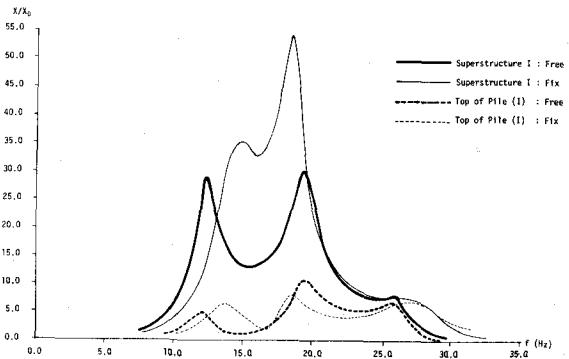


Fig. 6 Resonance Curve Superstructure I 20%-Foundation

3. 有限要素法による解析

(1) 解析目的 地盤を含めた基礎と高橋脚橋の相互作用を考慮した地震応答解析を行なうには、まず地盤と構造物とで構成される振動系を特定の力学モデルによって表現することが必要である。ここでは有限要素法を用いてモデル化を行なった。この場合最も問題となるのはこの有限要素法モデルにおいて、地盤・杭基礎系の力学定数をいかにして決めればよいかということである。ここでは有限要素法による解析をするためには地盤と杭とをどのように扱えばよいかと考え、その結果を用いて杭基礎の高橋脚橋の解析を行なう。ここで例として取り上げるのは着の洲高梁橋のボーリング地点No.5とNo.18であり、そこに設けられる杭基礎はFig. 7に示すような合計30本のリバーズ杭である。

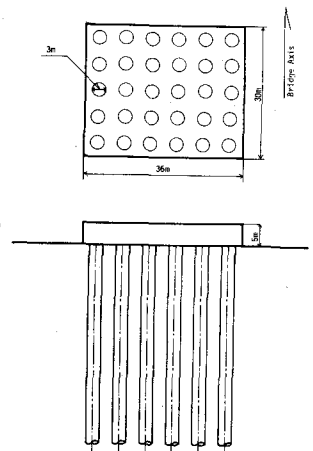


Fig. 7

(2) 杭のモデル化 地盤・杭基礎系の地震応答解析を行なう場合、杭をどのようにモデル化するのが最も重要な課題となる。有限要素法で解析することが可能なモデル化の方法と考えると次の2つの方法がある。

① Fig. 8に示すように、杭の招入れによりその部分の剛性が高められるものと考えた解析を行なう方法。

② Fig. 9に示すように、杭を地盤要素の分割線上にあるはりとして仮定して、このはりによって地盤要素の節点間の剛性が高められるとして解析を行なう方法。

である。①と②の方法と比較検討した結果、ここでは取り扱って容易でかつコンピュータの容量も少なくする②の方法で解析を行なうこととし、その場合の杭基礎部分の変形係数を推算する際に①と②の解析結果を利用

用する。①と②の方法により計算を行ない結果を比較してみると杭基礎部分の変形係数は地盤の変形係数に $1.0 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ または、 $2.0 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ 程度の値を加算したものが適當であるうと推定された。

(3) 解析結果 以上の結果を用いて Fig. 7 に示す杭基礎の上に高さ 45m の橋脚がある場合を想定して計算を行なった。用いた入力地震波は El Centro 1940 NS 成分であり、最大加速度を 200 gal に換算して使用した。また用いた杭基礎部分の変形係数は地盤の変形係数に $1.0 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ を加算した値である。ボーリング地点 No. 5 は軟弱地盤層の厚さが 52m、No. 18 は 97m であり、No. 18 は杭が基盤にまで達していない。その結果を Table 1 に示す。応答値についてはフーチング上端と橋脚上端の 2 点について計算した。この表より、

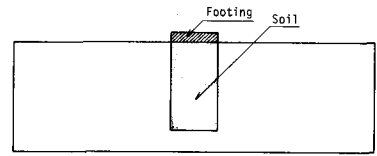


Fig. 8

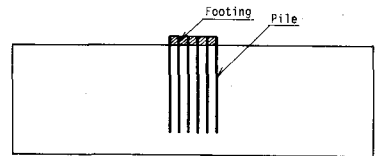


Fig. 9

Table 1

Max. Response		Without Pier			With Pier					
		Top of Footing			Top of Footing			Top of Pier		
		DISPL. (cm)	VEL. (cm/s)	ACCEL. (gal)	DISPL. (cm)	VEL. (cm/s)	ACCEL. (gal)	DISPL. (cm)	VEL. (cm/s)	ACCEL. (gal)
B.P. No. 5	$\beta = 5\%$	13.9	56.2	302.7	12.3	53.2	300.5	22.5	102.7	489.4
	$\beta = 10\%$	11.6	47.9	278.7	10.6	45.4	273.1	19.2	87.8	400.2
	$\beta = 20\%$	10.3	37.5	244.6	8.9	35.4	231.6	13.8	67.2	311.0
B.P. No. 18	$\beta = 5\%$	35.0	82.9	363.9	34.5	85.4	338.9	41.8	109.8	358.3
	$\beta = 10\%$	27.2	67.3	332.3	27.1	65.5	311.8	33.1	80.4	330.7
	$\beta = 20\%$	17.9	49.3	291.0	18.0	47.7	274.9	22.0	55.4	293.8

ボーリング地点 No. 5 では橋脚上端で橋脚がない場合と比べて、変位・速度・加速度とも大きく増加し橋脚による増幅効果を示しているが、フーチング上端では並に低下している。ボーリング地点 No. 18 では橋脚のある場合ない場合と比べてフーチング上端では低下しているが、橋脚上

端では余り変わらない。これは杭基礎が基盤にまで達しているか否かの違いに起因するものと思われる。いずれの場合も、橋脚のある場合はない場合と比べてフーチング上端の応答が低下することを認めるが、このことは杭基礎と上部構造物との相互作用が無視できないことを示している。

なおこれらは、杭基礎部分の剛性が杭の根入れにより高められたという簡単な方法を用い、かつこの変形係数は地盤の変形係数に $1.0 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$ という値を加算して計算しているが、これらの点については今後検討の余地があるものと思われる。

4. 結び

以上の実験および解析に対する個々の考察はすでに行なったが、これらをまとめると、

- ① 地盤が軟弱なほど、杭基礎と上部構造物との相互作用が大きくなるため、杭基礎・上部構造物全体系としての解析が必要である。
- ② 地盤と上部構造物の固有振動数が接近している時応答が非常に大きくなるので好ましくない。
- ③ 基礎と上部構造物とも分離して解析する際、その間の境界条件として基礎と上部構造物の相互作用の影響をも十分考えておく必要がある。

5. 謝辞

これらの実験および解析を行なうにあたり、当時京都大学工学部の学生であつた北沢杜介君（現京都大学大学院）、落合辰巳君（現矢作建設）の大いなる助力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献 建設省土木研究所報告書 “高い橋脚をもつ橋の中山地震による変形の解析” 1964 年。