

換算震度を用いた杭基礎を有する橋脚フーチング挙動の把握

九州大学大学院工学府

学生員 ○ 榊 豊和

九州大学大学院工学研究院

フェロー 大塚 久哲

(株)構造技術センター

正会員 岩上 憲一

1. はじめに

杭基礎の大地震時を想定した静的設計法としては、上部構造の慣性力のみを考慮した道路橋示方書¹⁾と、上部構造の慣性力と地盤変位を考慮した鉄道標準²⁾の2つの基準に大別される。前者は上部構造、橋脚、フーチングにそれぞれ静的震度を作用させている。この時、上部構造と橋脚は同一の震度である。後者は、フーチングを上部構造の一部とみなして上部構造に静的震度を、さらに杭に地盤変位を作用させている。その際、どちらの基準においても震度及び地盤変位の作用方向は同じ方向としている。

しかしながら、フーチングの挙動が必ずしも上部構造と一致しないとの指摘³⁾もあり、経済的な設計法の提案という点で橋脚フーチング挙動の把握が重要である。そこで、本研究では構造物の固有周期(T_s)と地盤の固有周期(T_g)をパラメトリックに変化させた動的解析を行い、その結果より換算震度(後述)を求め橋脚とフーチングに作用する力の把握を行った。

2. 解析概要

図-1に対象とした橋梁基礎の形状概要図を示す。これを基本とし、杭長及び周面地盤より地盤の固有周期(T_g)と $\beta \cdot L$ (β は杭の特性値、 L は杭長)を変化させた地盤モデル4種類(表-1)、上部構造重量と橋脚高さ(橋脚重量)より構造物の固有周期(T_s)を変化させた構造物モデルを12種類(表-2)作成し、計48個のモデルに対して動的解析を行った。

なお、入力波としては傾向の把握を目的として正弦波を、また実設計との整合性を図る為に実地震波(東神戸大橋 GL-33)を入力した。また、減衰はレーリー減衰を使用し、橋脚及び杭体は非線形部材とした。

3. 正弦波入力による橋脚フーチング挙動の把握

本検討では主としてフーチングの挙動に着目していることから、正弦波の周期は地盤の固有周期(T_g)と同一の周期とし、上部構造の振動よりもフーチングの振動(地盤変位)が卓越するような波形とした。図-2は、上部構造重量作用位置と杭頭位置(フーチング位置)の加速度時刻歴の一例(Case1, Case16)を示したものである。

① $T_g/T_s < 1$

Case1($T_g/T_s=0.78$)では上部構造と杭頭位置(フーチング部)は、ほぼ逆位相に近い関係となっており、上部構造とフーチングには逆向きの力が作用していることが分かる。

② $T_g/T_s > 1$

Case16($T_g/T_s=2.81$)では上部構造とフーチングは同位相に近い関係となっており、同じ方向の力が作用していることが分かる。

他の解析ケースからも同様の結果が得られたことから、 $T_g/T_s < 1$ のケースでは逆位相であり、上部構造とフーチングには逆向きの荷重が、 T_g/T_s の増加に伴い逆位相から同位相に近づき、 $T_g/T_s > 1$ のケースでは上部構造とフーチングに同じ方向の力が作用していると考えられる。

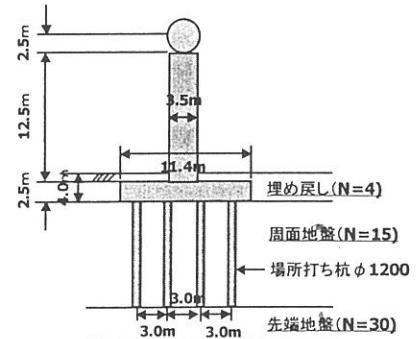


図-1 形状概要図

表-1 地盤モデル

	TypeGA	TypeGB	TypeGC	TypeGD
杭長(m)	18	12	18	24
L/D	15	10	15	20
周面地盤N値	15		2	
先端地盤N値		30		
$\beta \cdot L(m^{-1})$	4.5	1.7	2.6	3.5
地盤の固有周期(T_g)	0.454	0.522	0.727	0.904

表-2 構造物モデル

基本モデル		TypeSA-1	TypeSA-2	TypeSA-3	TypeSA-4	
上部工重量		1200				
上部構造物	橋脚重量	W ₀ (t)				
	橋脚質量	W ₀ (t)	335.6	440.6	545.6	230.6
	橋脚高さ	H ₀ (m)	12.5	18.5	20.5	8.5
	減衰定数	h _s		0.02		
	固有周期	T _s (sec)	0.580	0.890	1.247	0.321
上構工重量1.5倍モデル		TypeSB-1	TypeSB-2	TypeSB-3	TypeSB-4	
上部工重量		1800				
上部構造物	橋脚重量	W ₀ (t)				
	橋脚質量	W ₀ (t)	335.6	440.6	545.6	230.6
	橋脚高さ	H ₀ (m)	12.5	18.5	20.5	8.5
	減衰定数	h _s		0.02		
	固有周期	T _s (sec)	0.701	1.072	1.497	0.390
上構工重量2.0倍モデル		TypeSC-1	TypeSC-2	TypeSC-3	TypeSC-4	
上部工重量		2400				
上部構造物	橋脚重量	W ₀ (t)				
	橋脚質量	W ₀ (t)	335.6	440.6	545.6	230.6
	橋脚高さ	H ₀ (m)	12.5	18.5	20.5	8.5
	減衰定数	h _s		0.02		
	固有周期	T _s (sec)	0.804	1.227	1.710	0.448

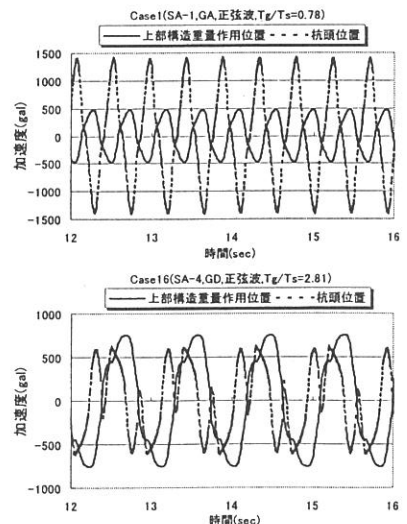


図-2 加速度時刻歴

4. 換算震度による上部構造とフーチングの入力荷重の定量化

4.1 換算震度法

柱基部とフーチング下面の断面力(モーメント M 及び水平力 S)は、柱から上部の震度を k_{h1} (モーメント用)、 k_{h2} (水平力用)とし、フーチングの震度を k_{h3} (モーメント用)、 k_{h4} (水平力用)とすれば図-3のような釣り合い式で表現することが出来る。これらの式より震度を逆算する。求められた震度を換算震度と呼ぶ。

モーメント及び水平力による震度が同等の場合、 $k_{h1}=k_{h2}$ 、 $k_{h3}=k_{h4}$ の関係が成り立つ。また、フーチングが上部構造と同じ振幅で振動していれば $k_{h1}=k_{h3}$ ($k_{h2}=k_{h4}$)となり、異なる振動をしていれば $k_{h1} \neq k_{h3}$ ($k_{h2} \neq k_{h4}$)となる。さらに k_{h1} と k_{h3} (k_{h2} と k_{h4})の符号が異なれば逆方向に荷重が作用していることになる。

4.2 T_g/T_s と換算震度(k_{h1} , k_{h3})の関係

計算によって、 $k_{h1}=k_{h2}$ 、 $k_{h3}=k_{h4}$ が成立し、モーメント及び水平力による震度は同等であることを確認したので、以下の換算震度はすべて k_{h1} 及び k_{h3} を使用することとする。また、入力波として実地震波(東神戸大橋 GL-33)を使用した。

なお、換算震度は杭の本数を決定する要因になっている杭体に発生する曲げモーメントに着目し、最大曲げモーメントが発生する時刻における震度とした。

図-4は T_g/T_s と k_{h1} (上部構造の換算震度)、 k_{h3} (フーチングの換算震度)を静的設計における設計水平震度(それぞれ k_{hp} と k_{hg})で割った値の関係を示したものである。 k_{h1} と k_{h3} が逆方向から同方向へ移行する遷移領域は、東神戸大橋 GL-33 波入力では $T_g/T_s=0.9 \sim 1.1$ であり、概ね1付近を境に上部構造とフーチングの換算震度の作用方向が異なっていることが分かる。また、上部構造の換算震度は小さいが、フーチングの換算震度は逆に静的解析における設計水平震度よりも大きくなっている。また、 $T_g/T_s < 1$ では正弦波入力で確認したように、上部構造に対してフーチングが逆向きに動くことによって上部構造の換算震度は相殺されさらに小さくなっている。

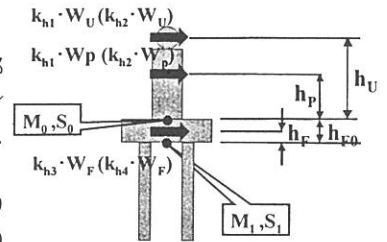
続いて、フーチングの震度を T_g 及び $\beta \cdot L$ と比較した。ここで、 β は杭の特性値を表し、 $\beta \cdot L=3$ を境に値が大きければ長い杭、小さければ短い杭であることを示している。 $\beta \cdot L=4.5$ (長杭)、 1.7 (短杭)の遷移領域が $T_g/T_s=0.9 \sim 1.0$ となっているのと比較して、 $\beta \cdot L=2.6, 3.5$ (中間杭)は $1 \sim 1.6$ であり、 $\beta \cdot L$ の違いにより遷移領域の傾向が多少異なっているといえる。また、これらの結果を $\beta \cdot L$ ではなく地盤の固有周期(T_g)と比較したところ、地盤が長周期になるにつれて遷移領域が多少右側に移動していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、 T_g と T_s をパラメトリックに変化させた正弦波入力による動的解析結果より橋脚とフーチングの地震時挙動の基本的な特性を、実地震波入力による動的解析結果から換算震度を求めたところ、上部構造とフーチングにおける震度の作用方向が概ね $T_g/T_s=1$ 付近を境に異なり、 $T_g/T_s \geq 1$ では同方向、 $T_g/T_s < 1$ では逆方向に作用することが分かった。これらの結果を踏まえた静的震度の改善案(概念図)を図-6に示す。①の場合には現在の設計法と同様に上部構造とフーチングには同方向の震度を、②の場合には逆方向の震度を作用させる。この方法を用いることでより合理的な杭基礎の耐震設計が出来ると思われる。

参考文献

- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編,平成14年3月
- (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計,1999.10
- 岩上憲一,大塚久哲:杭基礎の静的設計におけるフーチング慣性力算定の改善に関する基礎的研究,第11回日本地震工学シンポジウム,2002.11



$$M_0 = W_U \cdot k_{h1} \cdot h_U + W_P \cdot k_{h1} \cdot h_P$$

$$S_0 = W_U \cdot k_{h2} + W_P \cdot k_{h2}$$

$$M_1 = W_U \cdot k_{h1} \cdot (h_U + h_F) + W_P \cdot k_{h1} \cdot (h_P + h_F) + W_F \cdot k_{h3} \cdot h_F$$

$$S_1 = W_U \cdot k_{h2} + W_P \cdot k_{h2} + W_F \cdot k_{h4}$$

図-3 換算震度法

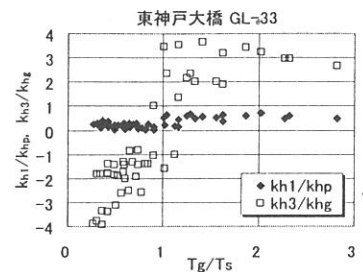


図-4 T_g/T_s と換算震度の関係

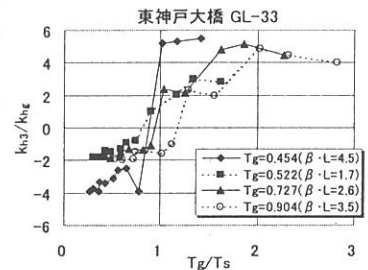


図-5 T_g/T_s と換算震度の関係
(T_g 及び $\beta \cdot L$ で比較)

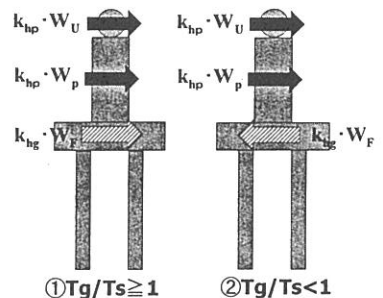


図-6 静的解析改善法案(概念図)