

(117) 軟弱地盤中における杭基礎の地震時断面力に関する検討

○株式会社長大 正員 矢部 正明¹⁾
建設省土木研究所 正員 川島 一彦²⁾
建設省土木研究所 正員 星 隈 順 一²⁾

1. ま え が き

道路橋示方書によれば、杭基礎の耐震設計は、上部構造と下部構造の慣性力を静的に作用させたときに生じるフーチング底面の外力に対する杭基礎全体の安定照査（押込み力、引抜き力、水平方向変位）と杭体に生じる断面力（軸力、曲げモーメント、せん断力）に対する応力照査によって実施されている。そこで考慮されている地震力は、設計水平震度で0.1~0.33という大きさである。また、地盤の影響は、地盤バネとして考慮されているだけであり、地震時に生ずる地盤の変位が杭基礎に与える影響については、考慮されていない。しかし、軟弱地盤中における杭基礎においては、地震時に生ずる地盤の変位が杭基礎に与える影響は、大きいと思われる。特に、稀に起こる大きな地震による地盤の変位に対しては、杭体がそれに追従できるかどうか（十分な変形性能を有しているかどうか）は何ら照査されていない。

本文は、稀に起こる大きな地震に対する杭基礎の動的な照査を実施することを目的とし、その第一ステップとして、軟弱地盤中における杭基礎を試設計し、それに対して地震応答解析を行い、杭基礎に生じる地震時断面力の応答特性についてまとめたものである。

2. 杭基礎の試設計

試設計は、3径間連続橋の固定支承を有する橋脚の杭基礎を想定し、場所打ち杭と鋼管杭を対象とした。図-1は、対象とした軟弱地盤である。地盤の特性値は1.42秒となり、耐震設計上の地盤種別は、Ⅲ種地盤である。深度0~-7mの間には、液状化層が存在し、土質定数を1/3に低減した。深度-35mを境に沖積層と洪積層に分かれ、N値も2から7へと変化している。また、深度-44~-48mの間には、N値29という比較的固い層が存在している。

表-1は、試設計の結果である。杭本数は、両杭基礎とも水平方向変位の照査によって決まっている。場所打ち杭の鉄筋量は、フーチング最縁部の杭の浮力考慮時（軸力最小時）で決まっている。また、鋼管杭の板厚は、フーチング最縁部の杭の浮力無視時（軸力最大時）で決まっている。図-2は、曲げモーメントの分布に従って、鉄筋量や板厚を変化させた結果である。場所打ち杭は、最大曲げ、1/2最大曲げ、最小抵抗曲げの各モーメントに抵抗できるように、各位置の鉄筋量が決められている。鋼管杭は、最大曲げ、1/2曲げの各モーメントに抵抗できるように、各位置の板厚が決められている。

3. 杭基礎の地震応答解析モデル

地震応答解析モデルは、橋軸方向を対象に、線形のバネ~マス系モデルとした。具体的には、地震時に支持する上部構造重量を質点とし、下部構造と杭基礎を線形の梁要素によってモデル化した。杭基礎は、杭頭部を剛結とし、橋軸直角方向の各杭列を集約した。地盤は、せん断振動系としてモデル化（1列モデル）した。杭基礎と地盤間を結ぶバネは、道路橋示方書Ⅳ下部構造編とⅤ耐震設計編に従って算出した。考慮した質量は、橋軸方向の質量とフーチングの橋軸直角方向の軸に関する回転慣性である。また、杭に囲まれた範囲の土は、杭基礎の付加質量とした。

減衰定数は、下部構造0.05、杭基礎は逸散減衰を考慮して0.30、地盤はせん断ひずみとして 10^{-3} レベルを想定して0.10とした。モード減衰定数は、ひずみエネルギー比例減衰によって評価した。

入力地震動は、設計上の耐用年数内に1~2回生じることが期待される地震として震度法レベル、稀に起こる大きな地震として地震時保有水平耐力レベルを想定した。地震動は、解析モデルの基盤面より入力されるので、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編における時刻歴応答解析用標準波形を耐震設計上の地盤面において想定した応答レベルになるように重複反射理論で、基盤面の波形に変換した。

4. 杭基礎の固有振動特性

表-2は、固有値解析結果である。両杭基礎とも、1～4次の間に地盤の1～3次と上・下部構造（橋脚）の1次が存在している。地震時の応答値は、これら4つの固有振動モードによってほぼ決まっている。

地盤の1次は、地盤と杭基礎と一緒に水平方向に変形するモード形状をしている。上・下部構造の1次（場所打ち杭3次、鋼管杭2次）は、フーチングのロッキングを伴っている。

後述の地震応答解析において、杭体に生じる断面力は、それぞれ次のような固有振動モードでその応答値が決まっている。杭体の軸力は、両杭基礎とも地盤の1、2次と上・下部構造の1次によって応答が決まっている。これらのうち、地盤の1次を除けば、何れも比較的大きなフーチングのロッキングを伴う固有振動モードである。杭頭部の曲げモーメントは、場所打ち杭が地盤の1～3次、鋼管杭が地盤の2、3次と上・下部構造の1次によって応答が決まっている。地中部最大曲げモーメントは、両杭基礎とも地盤の1次によって応答が決まっている。なお、地震応答解析では、有効質量比の累計が95%以上となる固有振動モード（場所打ち杭が15次、鋼管杭が13次）までを考慮した。

5. 杭体に生じる地震時断面力の応答特性

図-3は、震度法レベルにおける両杭基礎の最大加速度分布を示したものである。場所打ち杭の下部構造天端では、440gal程の加速度となり設計水平震度よりも大きいことがわかる。鋼管杭の下部構造天端では、240gal程の加速度となり設計水平震度よりも小さいことがわかる。

図-4は、震度法レベルにおける両杭基礎の最大曲げモーメント分布（フーチング底面を0.0m）を示したものである。両杭基礎で、その分布形状は近似しており、杭頭部とN値が2から7に変化（地盤バネの値が約2倍に変化）している軟弱層の境界付近で大きな曲げモーメントが発生している。ただし、その値には大きな開きがあり、杭頭部で場所打ち杭が鋼管杭の約3倍、地中部最大曲げモーメント位置で場所打ち杭が鋼管杭の約5倍という曲げモーメントを生じている。

以上の応答特性は、地震時保有水平耐力レベルにおいても同様な傾向を示している。また、震度法レベルと地震時保有水平耐力レベルでは、各応答値とも、後者の方が前者の約3倍程の大きさとなっている。

表-3は、地震応答解析より得られた断面力とそれを用いた杭体の応力照査結果である。表中には、応力的に最も厳しいフーチングの最縁端の杭に関する結果を示してある。表より、次のようなことが言える。

- i) 杭基礎は、地盤と一緒に変位しており、杭頭変位は、震度法、地震時保有水平耐力の両レベルにおいて、両杭基礎とも設計時の許容変位（1.5cm）よりも大きい。
- ii) 震度法レベルでは、軸力最小時（浮力考慮時）に場所打ち杭の地中部最大曲げモーメント位置で、コンクリートおよび鉄筋ともに許容応力度よりも大きな応力が発生している点を除けば、両杭基礎とも、応力照査結果を満足している。
- iii) 地震時保有水平耐力レベルでは、鋼管杭の杭頭部を除けば、許容応力度よりも大きな応力が発生している。
- iv) 場所打ち杭は、大きな曲げモーメントが生じている場合、引抜き時に軸力（圧縮が正）が減少すると、応力状態が厳しくなり、発生応力が許容応力度を上回ることがある。
- v) 鋼管杭は、大きな曲げモーメントが生じている場合、押込み時に軸力が増加すると、応力状態が厳しくなり、発生応力が許容応力度を上回ることがある。

表中の応力照査結果は、最大軸力と最大曲げモーメントの発生時刻を無視して行っているが、実際には、両者の最大値発生時刻は異なる。そこで、最大曲げモーメント発生時刻における、曲げモーメントと軸力を用いて応力照査を実施したが、結果は表-3と同様であった。

6. まとめ

軟弱地盤中における杭基礎の地震応答解析結果より、次のような点が得られた。

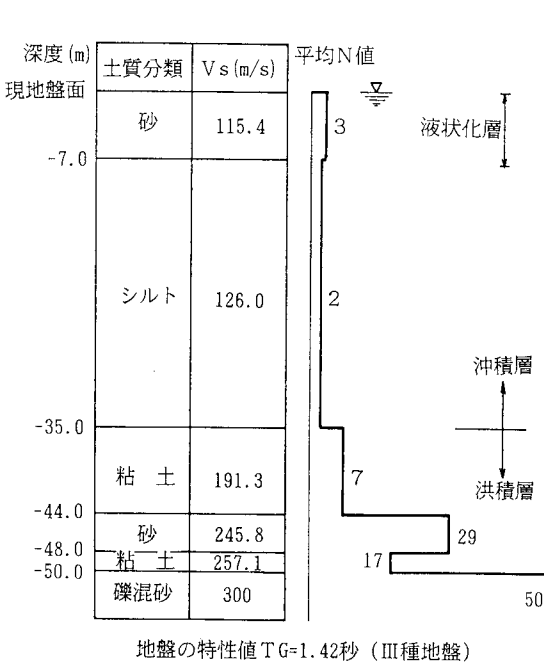
- i) 同一の地盤および同一の設計条件であっても、杭の種類によってその地震応答特性は異なる。
- ii) 軟弱地盤中の地盤条件が急変する境界付近に発生する地中部最大曲げモーメントは、地盤の変位によ

て生じている。

iii) フーチングのロッキングによって発生する軸力が、応力照査結果に大きな影響を及ぼしている。

今後は、杭体の変形性能や軟弱地盤における地盤の変位の影響の設計への反映等を検討する必要があると考える。

(連絡先) 1)つくば市梅園2丁目7番3号, 2)つくば市旭1番地



地盤の特性値 TG=1.42秒 (III種地盤)

図-1. 対象とした軟弱地盤

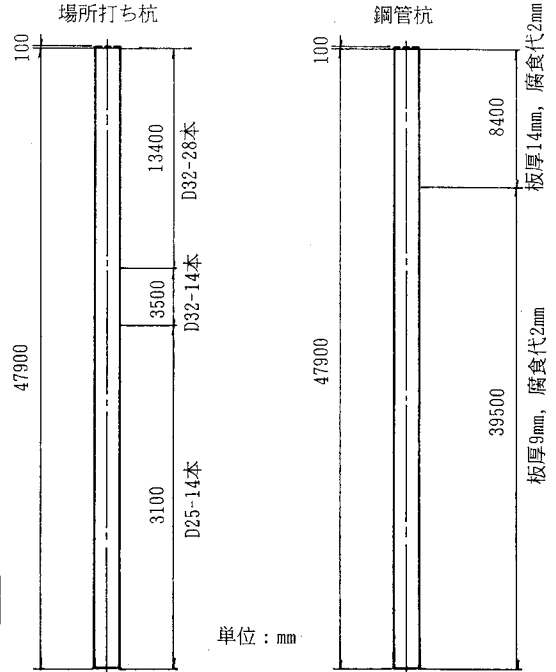


図-2. 曲げモーメントによる杭基礎の断面変化

表-1. 杭基礎の試設計結果

設計条件等	場所打ち杭	鋼管杭	
上・下部構造	幅員：上下2車線20.7m 橋長：3@35=105m 支承：M-F-F-M RC製張出し式橋脚 躯体高さ：12m		
設計地震力	設計水平震度0.33		
杭長(m)	48.0	48.0	
杭径(mm)	φ1500	φ1000	
杭本数	18本	36本	
水平方向変位(cm)	1.49(1.50)	1.49(1.50)	
橋軸方向 杭頭応力 (kgf/cm ²)	圧縮	91.3(120)	1435(2100)
	引張り	2950(3000)	920(2100)

注. Mは可動, Fは固定, ()内は、許容値

表-2. 杭基礎の固有振動特性

杭基礎	固有振動特性			各次応答値/最大応答値(%) [*]		
	次数	固有周期	モード形状	軸力	杭頭曲げ	地中曲げ
場所打ち杭	1次	1.50	地盤の1次	37.5	66.1	72.2
	2次	0.52	地盤の2次	226	38.9	0.6
	3次	0.49	橋脚の1次	202	8.4	0.3
	4次	0.33	地盤の3次	10.5	40.7	17.8
鋼管杭	1次	1.53	地盤の1次	73.1	13.2	76.8
	2次	0.62	橋脚の1次	108	82.5	0.0
	3次	0.53	地盤の2次	103	108	8.5
	4次	0.34	地盤の3次	14.4	39.9	7.7

*) 杭体に生じる断面力に着目

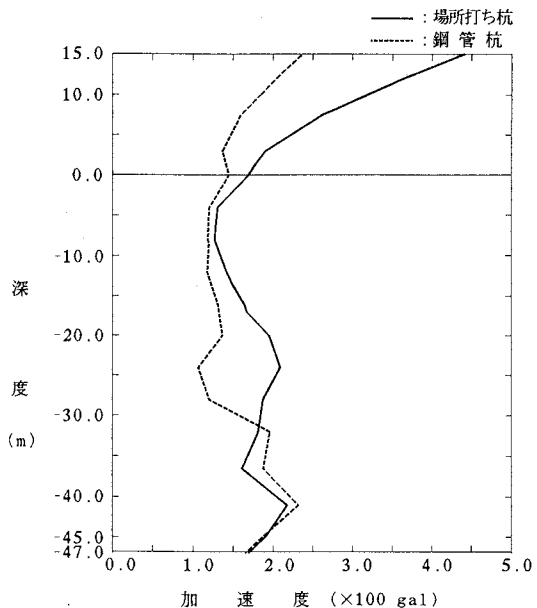


図-3. 最大加速度分布 (震度法レベル)

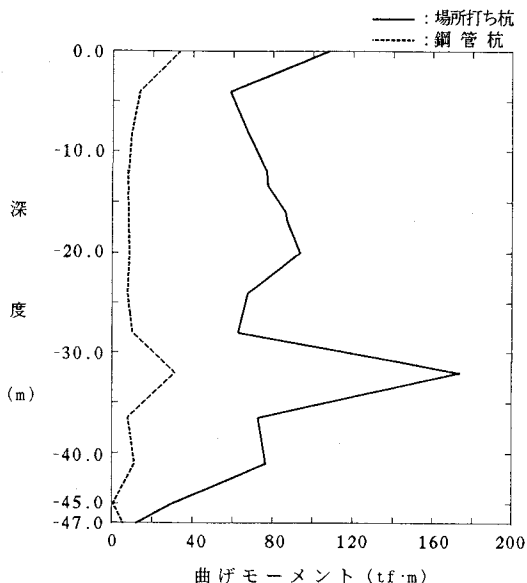


図-4. 杭体に生じる最大曲げモーメント分布 (杭1本当たりの値, 震度法レベル)

表-3. 地震応答解析結果に基づいた杭体の応力照査結果 (フーチングの最縁端の杭に着目)

杭基礎の種類		場所打ち杭				鋼管杭					
入力地震動のレベル		震度法		保有耐力		震度法		保有耐力			
浮力の考慮・無視(軸力)		無視	考慮	無視	考慮	無視	考慮	無視	考慮		
杭頭部水平変位 (cm)		5.8		20.6		6.1		20.4			
軸力 (tf)		441.7	-66.4	973.2	-598.0	158.3	32.6	283.0	-92.1		
杭頭部	曲げモーメント (tfm)	107.9		340.9		33.3		113.1			
	各断面力による応力 (kgf/cm ²)	軸力	圧縮	21.0	-3.2	46.3	-28.8	426.8	87.8	762.7	-248.1
		曲げモーメント	圧縮	45.7 (120)		144.3(120)		369.9(2100)		1255.0(2100)	
	引張り		1274.2 (3000)		4025.8(3000)		369.9(2100)		1255.0(2100)		
	軸力と曲げによる応力 (kgf/cm ²)	圧縮	47.5	44.7	137.2	123.9	796.7	457.7	2017.7	1006.9	
引張り		5.7	1625.7	508.4	7237.0	-56.8	282.1	492.4	1503.2		
地中部最大曲げ	曲げモーメント (tfm)	173.8		545.2		31.2		97.2			
	各断面力による応力 (kgf/cm ²)	軸力	圧縮	23.6	-3.6	51.9	-32.1	583.2	120.0	1042.2	-339.1
		曲げモーメント	圧縮	132.2 (120)		414.6(120)		585.0(2100)		1821.0(2100)	
	引張り		5785.6(3000)		18149.1(3000)		585.0(2100)		1821.0(2100)		
	軸力と曲げによる応力 (kgf/cm ²)	圧縮	83.7	135.6	296.4	427.9	1168.2	705.0	2863.2	1481.9	
引張り		548.8	6945.2	4209.3	28690	1.9	465.1	778.8	2160.1		

注. 浮力無視=軸力最大時, 浮力考慮=軸力最小時, ()内は、許容応力度