

地震応答に対する地盤構造の影響

那須 誠¹ 北村直樹² 大場恒彦³

¹フェロー 工博 前橋工科大学教授 建設工学科(〒371 群馬県前橋市上佐鳥町460)

²正会員 前橋市立工業短期大学教授 建設工学科(〒371 群馬県前橋市上佐鳥町460)

³日本物理探鑿(株) 技術本部 技術部長(〒143 東京都大田区中馬込2-2-12)

2次元有限要素法を使い、1種類の入力地震波と高架橋モデルで地盤だけを4種モデルにした地震応答解析を行った。地盤は単純な水平成層構造で層数が1～3層である。各モデルでの応答計算結果からこれら地盤の違いを主にスペクトル比を用いて識別することを試みた。

Key Words : seismic response, ground structure, FEM, spectrum ratio

1. はじめに

地震による各種構造物の被害は、地震の規模やそれら構造物の強度等にも影響されるが、その設置地盤の状況にも強く依存することが知られている。

その地盤条件としては、不連続な場所例えば水平方向に硬軟土層が接する場所や垂直方向で軟質土層が中間部に分布するような場所等が挙げられ、そうした場所での多くの地震被害例を既に報告した。¹⁾ それらの地盤を単純なモデルで代表させ、杭基礎にある2層3径間ラーメン高架橋に対する地震応答解析を2次元有限要素法を使って行い、地盤構造がその応答値におよぼす影響を調べたので報告する。

2. 地震被害と地盤構造

これまでの調査結果によると、地震被害は、硬軟土質を問わず均質な地盤で少なく、水平あるいは垂直方向に不連続な地盤構造上に構造物がある場合が多い。①砂、礫等の優勢な自然堤防や扇状地と粘性土層が優勢な沖積低地等との境界部、②埋没谷の周縁部や、その中で軟質土層が不均等な厚さで分布する場所、③硬質土層の下に軟質あるいは極軟質土層が分布する上下逆転型地盤、④軟質土層が不均等な厚さで分布する地盤、⑤図-1²⁾のような軟質土層中の構造物が地盤を改変した場所等が挙げられる。

こうした地盤においては、地盤に不同変位が発生したり、軟弱土層での大きな変位が考えられ、さらに、人工改変地盤では硬質化した改変地盤が不動点

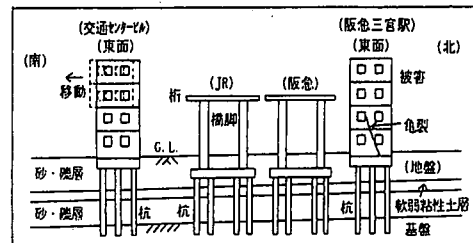


図-1 人工的に地盤不連続部を作った例

のような作用をし、周囲の地盤が、地震時衝撃力をそこに加えるといった機構が推察される。

3. 地震応答解析

(1)解析条件

解析にMFLUSHを使用し、剛性率や減衰定数の歪依存性を考慮した等価線形化法による非線形計算を行った。

a)地盤および高架橋のモデル化

地盤モデルは4種とし、その大きさは60m×22mで共通である。土層は、N値3の軟質土層、N値41の硬質土層を基本とし、それらにN値13の中間的性状の土層を加えた。これら土層を四角形のソリッド要素で分割、その物性値を「建造物設計標準(基礎構造物、抗土圧構造物)」や「道路橋示方書」により決定した。剛性率や減衰定数の歪依存特性は文献3)によった。4種地盤モデルは、

モデル1：硬質モデルでほとんどN値41土層。

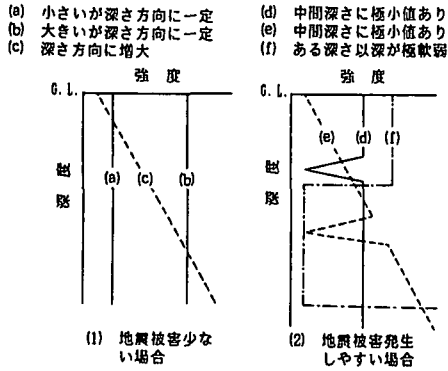


図-2 地盤強度の深度方向分布

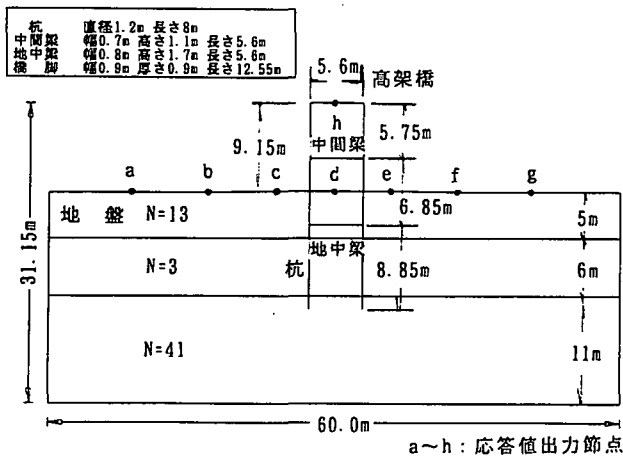


図-3 解析モデル (モデル2)

モデル2：上下逆転型で水平成層構造。N値13土層が5m厚さ、次にN値3土層が6m厚さ、最下層にN値41土層が11m厚さ。

モデル3：水平2層モデルでN値3土層が11m厚さ、N値41土層が同じく11m厚さ。

モデル4：軟質モデルでN値3土層だけのモデル。で、図-2²⁾に示す簡略モデルを参考にした。

高架橋は4種の解析モデルとも同じで、モデル2、3では支持杭で他は摩擦杭である。杭は場所打ち杭で、高架橋地中部は12.25m、地表部は9.15m長さである。5.6m長さの地中梁、中間梁を有し、床版部は張出し部を含めて11.5mの長さであるが、モデル化では長さ5.6mとし、その張出し部や上に載る軌きょう部等を半スパン分考慮し集中荷重として扱った。こうした部材すべてをビーム要素とし、剛性率や断面積等の物性値を与えた。表-1に地盤および高架橋の物性値を、図-3に解析モデル2を示す。

b) 入力地震動

入力地震動は4種モデル全て同じ波形とし、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における加速度波形N

表-1(1) 地盤部物性値一覧表

土質・N値	単位体積重量 (tf/m ³)	初期剛性率 (tf/m ²)	μ ^o / μ ^v 比	初期減衰定数(%)
沖積砂礫土 N=13	1.8	6500	0.492	5
沖積粘性土 N=3	1.6	3400		
洪積砂礫土 N=41	1.9	14800	0.400	
硬質地盤 N=70	1.9	100000		
弾性基盤	2.1	105000	0.400	

N値9~70地盤はソリッド要素

表-1(2) 高架橋及び杭部物性値一覧表

剛性率 (tf/m ²)	断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)	有効セン断面積比	備考
1167000	2.449	0.0802	0.833	床版部両端
	3.609			床版部中央
	0.523			中間梁両端
	0.770	0.0776		中間梁中央
	1.859	0.4478		地中梁両端
	1.360	0.3275		地中梁中央
1125000	0.810	0.0547	0.750	構脚
	1.131	0.1018		杭

全てビーム要素
材料は鉄筋コンクリートで、単位体積重量は2.5tf/m³、ポアソン比は0.2、減衰定数は0.05で共通。集中荷重として床版部梁の5節点にそれぞれ15.28tfを載せる。

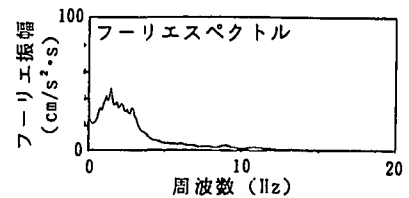
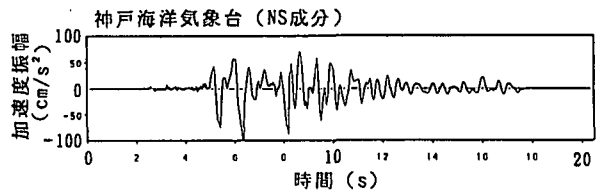


図-4 入力地震動

S成分を最大振幅100cm/s²に調整して使用した。約16秒の波形部の前後に約4秒の0振幅を付加してあり、図-4にそれを示した。この入力波を水平方向加振で底面に入力した。

c) 計算条件

計算条件として、左右境界はエネルギー伝達境界に、底面は粘性境界にした。解析周波数は20Hzまでとし、床版部の5節点に約15tfの等荷重をそれぞれ集中荷重として載荷した。

(2) 解析結果

解析結果として、地表7節点と高架橋天端上3節点における応答波形と高架橋天端で最大変位を示した時点での高架橋構造物内だけのセン断力および曲げモーメント分布を求めた。図-5には地表節点間の

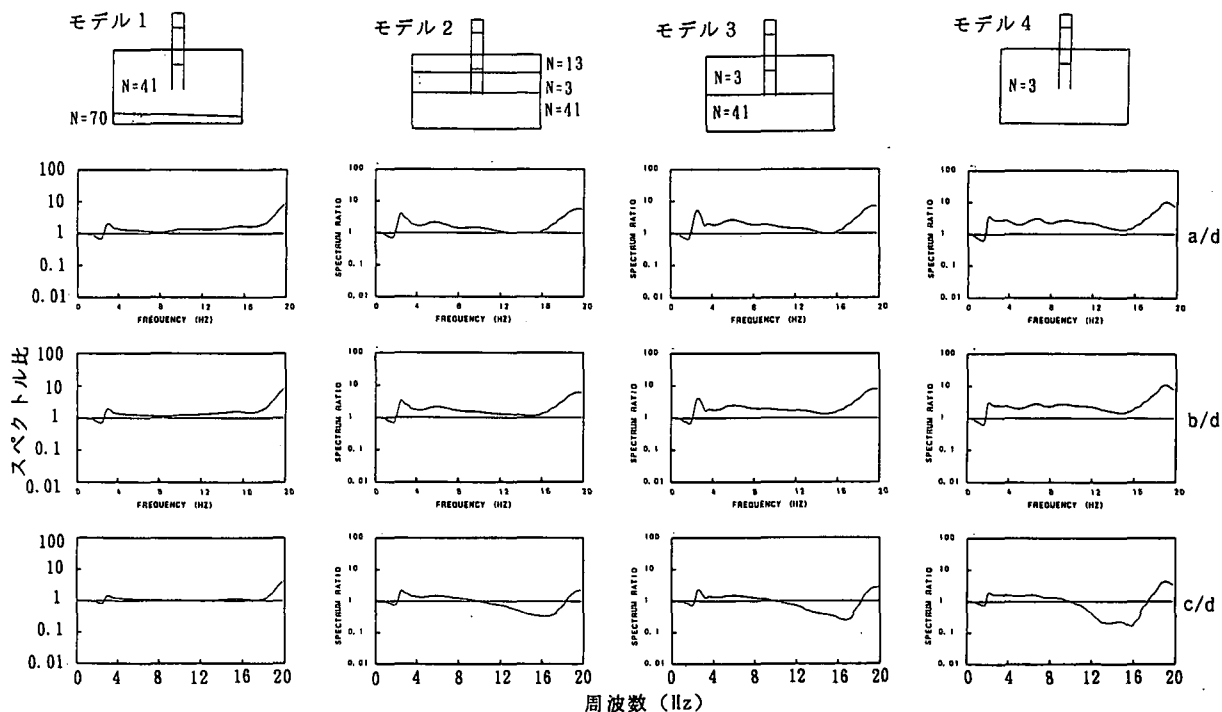


図-5 各モデルでの高架橋直下および他の地表節点間のスペクトル比の比較

スペクトル比を高架橋直下節点に対する他の節点との比で各モデルとも示した。

a) 応答波形

各モデルごとに、a、b、c、d、h 節点での最大振幅を加速度、速度、変位とも表-2に示し、それらの卓越周波数を表-3に示した。

地盤モデルは1、2、3、4の順に軟質度を増し、高架橋から離れた地表節点ではその順にいずれの応答値とも大きくなり、入力波に対する加速度振幅の倍率も1.3~1.8とその順で大きくなる。一方、高架橋近傍（高架橋下部工長さ以内の距離範囲）の地表節点（c、d）や高架橋天端節点では、応答変位ではほぼそうした関係があるものの、モデル1（加速度が大きい）、モデル2、3（加速度、速度とも小さい）、モデル4（加速度、速度とも大きい）とモデルを分類することができる。こうしたグループ化は表-3に示した卓越周波数でも可能である。

高架橋の応答では、入力波に対する加速度振幅倍率が3~4.3倍で、モデル2、3が3倍程度と他2モデルにくらべ小さい。

b) スペクトル比

10Hz以下の周波数帯域の地表節点間のスペクトル比は非常に似た形を呈し、2Hz付近でいずれのモデルともスペクトル比1をはさんで凹凸がみられる。その凹部、凸部のピークを示す周波数を表-4に示したが、モデル間でスペクトル比に差が見られる凸部のスペクトル比を併記した。

表-2 主な節点での各地盤モデルによる最大応答値の比較（水平成分、入力地震動100gal、高架橋は全モデル同じ）

モデル		a 節点	b 節点	c 節点	d 節点	h 節点
モデル 1	ACC(cm/s ²)	+ 110.82 - 129.86	106.37 135.30	102.54 151.01	116.60 168.08	410.08 425.90
	VEL(cm/s)	+ 13.69 - 12.88	13.92 13.20	14.64 14.50	15.70 15.81	31.01 28.76
	DIS(cm)	+ 0.52 - 0.36	0.56 0.34	0.68 0.42	0.80 0.51	2.03 1.72
モデル 2	ACC(cm/s ²)	+ 119.55 - 144.37	104.91 138.43	107.52 132.84	122.20 132.11	319.42 297.76
	VEL(cm/s)	+ 15.69 - 15.84	15.05 15.21	14.01 14.88	12.85 16.64	25.09 32.43
	DIS(cm)	+ 0.98 - 0.69	0.97 0.70	1.02 0.86	1.17 1.08	2.40 2.61
モデル 3	ACC(cm/s ²)	+ 133.22 - 158.78	112.67 151.88	117.51 138.40	127.12 133.79	302.26 302.03
	VEL(cm/s)	+ 16.59 - 14.92	15.94 13.89	14.15 14.42	12.92 16.18	26.20 31.92
	DIS(cm)	+ 0.91 - 0.75	0.92 0.71	0.99 0.90	1.14 1.11	2.39 2.57
モデル 4	ACC(cm/s ²)	+ 95.13 - 183.92	101.56 186.23	115.87 188.21	156.00 196.47	356.55 335.30
	VEL(cm/s)	+ 20.51 - 21.30	20.96 21.84	22.19 24.54	24.24 28.52	36.20 51.12
	DIS(cm)	+ 2.87 - 1.89	2.99 2.03	3.35 2.36	3.82 2.73	6.35 5.21

表-3 各地盤モデルでの主な節点における
応答卓越周波数

モデル番号	卓越周波数 (Hz)								
	節点a, b			節点c, d			節点h		
	ACC	VEL	DIS	ACC	VEL	DIS	ACC	VEL	DIS
モデル1	2.2	1.4	1.4	2.2	2.2	2.2	2.4	2.4	2.4
モデル2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
モデル3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.9	1.5	1.5
モデル4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

表-4 スペクトル比のピーク周波数とスペクトル比

モデル番号	スペクトル比のピーク周波数		凸部のスペクトル比
	凹部	凸部	
1	2.2~2.4	2.9~3.0	1.4~2.0
2	1.6~1.8	2.4~2.5	2.1~4.0
3	1.7~1.9	2.5~2.6	2.4~5.1
4	1.4~1.6	2.1~2.2	1.9~3.5

表-5 諸応答値等の各モデルグループ間での比較

モデルグループ	水平地盤性状	地表c, d節点での振幅			高架橋h節点での振幅等				応答波形卓越周波数	地表節点間スペクトル比凸部		せん断力、曲げモーメント最大値	杭根入れの有無
		加速度	速度	変位	加速度	速度	変位	他		周波数	スペクトル比		
モデル1	硬・均質	中	小	小	大	小	小	加速度共振	大	大	小	大	無
モデル2,3	硬・軟・互層	小	↓	↓	小	小	↓		↓	↓	大	小	有
モデル4	軟・均質	大	大	大	中	大	大	変位共振	小	小	中	大	無

d節点より遠方節点とのスペクトル比程、スペクトル比ピーク周波数はわずかに低くなり、スペクトル比は大きくなる。凸部のスペクトル比はモデル1、4にくらべモデル2、3の場合が大きき得られており、d節点のスペクトル比凸部周波数でのスペクトル振幅が他の節点にくらべ相対的に小さいことを示している。

(3)考察

地震応答解析結果では、地盤が均質で摩擦杭の場合と互層地盤で基盤に杭を根入れした場合とで、応答値に明瞭な差が得られた。従って、解析モデルをモデル1、モデル2、3、モデル4の3グループに分け、得られた応答値を各モデルグループ相互間の相対的な大小関係等で比較し表-5に示した。

軟質な地盤でより大きな加速度振幅等が得られていることや、杭を根入れした場合に高架橋およびその直下地盤の振動が摩擦杭の場合にくらべて小さくなり、逆に大きな地表節点間のスペクトル比となったことも妥当な結果と考えられる。

高架橋はモデル4で1.2Hzの周波数で大きく変位し、モデル1では2.4Hzで大きな加速度を有した。地盤や杭基礎の違い、それに入力地震波の特性等が影響していると考えられる。

4. おわりに

同一入力地震波で同じ高架橋構造物に対する地震応答解析を、水平成層構造の4モデルについて実施

した。今回、実際に地震被害のあった地盤や構造物の物性値を利用し、その層構造だけを種々変化させた。地盤構造の違いや杭基礎の根入れ状況の違いが明らかな応答差となってあらわれた。しかし、地震被害のあった地盤に近いモデル2が必ずしも顕著な応答を示さなかった。

今後はさらにモデル計算を行って、地震被害と地盤構造との関係、特に、上下逆転型地盤、即ち互層構造地盤の地震応答を調べる予定である。

参考文献

- 1)那須 誠：地震被害形態と地盤形状および土質構成の関係、鉄道総研報告, Vol. 8, No. 5, PP. 35-40, 1994
- 2)那須 誠：阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定(その2)、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, C-7, PP. 185-192, 1997
- 3)那須 誠, 羽矢 洋：鉄道線路沿いの土の動的性質—動的変形定数と液状化強度—, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 1, PP. 45-51, 1988