

(78) 地中構造物の設計に用いる地盤モデルの評価

(株) オリエンタルコンサルタンツ 田中 努

橋 義 則

1. はじめに

多くの沈埋トンネルを始めとする線状構造物の地震応答解析には、図-1に示すような岡本-田村モデル(文献1)などが使われている。このモデルは、構造物の軸線に沿って地盤をバネ・マス系で表わすもので、簡単なため今日トンネルの地震記録の解析や多くの耐震設計に使われているが、地盤条件によっては、FEMモデルとかなり異なる構造物の断面力を得ることがある。

筆者等は、単純化した地盤条件に対して地盤歪みに着目した試算を行ない、バネ・マスモデルを形成する2つの地盤ばねのうち、特に地盤質点間を結ぶK2ばねの値に両モデルの間で2倍程度の差が生ずることを見出した。そして、その評価法を工夫することにより、バネ・マス系とFEMの両モデルの応答をかなり近づけられる見通しを得た。

2. 対象地盤と解析モデル

(1) 対象地盤

バネ・マス系とFEMの両モデルを比較するために、図-2(a)のような地盤モデルを考えた。このモデルは地震時の等価なせん断波速度 V_s が100m/sec(N値2程度)の沖積層が、耐震計算上の基盤面と考えることのできる比較的硬い洪積層の上に厚く堆積した湾岸地域の地盤を想定したものである。地盤の固有周期は、表層の厚い左側で2.4sec、表層の薄い右側で0.8sec、中央部では20%の勾配で、基盤面が傾斜している。

(2) FEMによるモデル

FEMによるモデルは、図-2(b)に示すような、高さ10m、幅50mの要素により構成した。材料定数は、次式により求めた。

$$G = \frac{\gamma}{g} V_s^2$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

ここで、 γ は単位体積重量、 g は重力加速度、 ν はポアソン比で0.490とした。基盤以外の節点に面内2方向、両側方境界では水平のみの自由度を与えて固有値解析を行なった。固有周期と有効質量比を表-1に示す。

(3) バネ・マス系によるモデル

バネ・マス系によるモデルは、図-2(c)に示すように、各質点位置毎の地盤の1次モードを表わす1質点系を結合したものである。質点の間隔は50mとし、FEMの要素分割と合わせた。質量および2種類のばねは岡本-田村モデルの考え方で算定した。固有値解析の結果を同じく表-1に示す。FEMモデルと比較すると、若干のずれはあるもののほぼ似た固有周期と有効質量比が得られている。

3. 地震応答解析

両モデルに対して地震応答解析を行なった。入力地震動は、文献2)に示されるL-1スペクトル(図-3実線)に、開北橋の記録波形(1978年宮城県沖地震)を適合させたもの(図-4)である。

地表面での最大歪み分布を、図-5に示す。FEMによる解析モデルを実線で、バネ・マス系による解析モデルを破線で示した。絶対最大歪みの生ずる位置は両モデルともほぼ同じであるが、バネ・マスモデルでは基盤の傾斜部から表層の厚い部分で、FEMより60%程度大きい歪みを得られた。

4. 地盤質点間ばね(K2)に関する検討

図-5に示した地盤歪みの差はバネ・マスモデルの方が安全側に現われているため、設計上は好ましいものであるが、場合によっては過大設計になる可能性もあろう。この原因は、主に地盤の横方向のばね作用の違いによるものと考えられるため、岡本-田村モデルの質点間ばね(K2)の評価の考え方で、図-6のようにしてFEMモデルに対する水平方向のばねを調べた。

質点間ばね(K2)は、質点に力 F_m を作用させた時に δ_m だけ変位するとすれば、 $K2 = F_m / \delta_m$ で表わされる。この質点は地盤振動の基準振動を表わすから、モード関数 $f(Z)$ を地表面で1.0、刺激係数を β とすると、地盤が地表面で変位 β のせん断1次モードで変形した状態を考えていることになる。このときの地盤の反力を求めれば前述の力 F_m が得られる。いま、単位幅当たりの地盤ばねK2を考えると、バネ・マス系の場合は同図(a)のようになり、次式で求められる。

$$K2 = E \int_0^h \delta(Z) dZ / L, \quad \delta(Z) = \beta f(Z)$$

またFEMに対するばねは(b)のようにして、次式で求められる。

$$K2 = \sum F_i$$

ここで、 F_i は地表面で変位 β 、深さ方向に $\beta \cdot f(Z)$ の変位を生じさせるために必要な節点 i に作用させる力である。

算定結果を表-2に示す。同表より、バネ・マス系のばねはFEMに対するK2ばねの60~70%と小さいことが分かる。K2ばねの値を変えて表-3のケースの地震応答解析を行なった。その結果を、前掲の図-5に重ねて示す。これより、岡本-田村モデルの2倍のばねを持つバネ・マスモデル3は、FEMモデルの絶対最大値付近でかなり良い一致を示している。しかし、表層地盤の厚い部分ではFEMモデルから離れてしまう。バネ・マスモデルの方が表層の厚い部分の振動エネルギーが大きく、基盤が傾斜している部分との相対変位が大きくなっている可能性がある。

表-3のケースのついて、FEMモデルで絶対最大歪みの生じた位置の時刻歴の歪み波形を図-7に示す。いずれもFEMモデルと比較的よく似ているが、バネ・マスモデル3はかなり一致しているといえるであろう。

5. おわりに

今日、地中に線的・面的に広がったトンネルやライフラインの耐震検討を行なう場合には、岡本-田村モデルを基本とするのが一般的である。特に設計実務においては単純でかつ必要に応じて設計上の配慮を加味することも容易なため非常に有効である。しかし、地盤を着目位置のせん断1次振動の有効質量に基づく1質点系で表わすために、構造物軸線に沿う地盤条件の変化が大きき場合には必ずしも十分に地盤全体の挙動を表わし切れない可能性がある。本検討では地盤モデルを形成する要素のうち地盤質点間ばねK2に着目して、FEMモデルのばね作用の方がやや強いという結果を得たが、今後、各地盤質点の質量のバランスについて検討を続けていく予定である。

- 【参考文献】 1) 田村、岡本、浜田；DYNAMIC BEHAVIOR OF A SUBMERGED TUNNEL DURING EARTHQUAKES
東大生産研究所報告 Vol.24, 1975.3
2) 荒川、川島；動的解析用入力地震動の設定法、土木研究所資料 NO.2120, 1984.3

表-1 固有値解析結果

次数	FEMモデル		バネ・マスモデル	
	周期 (sec)	有効質量比 (%)	周期 (sec)	有効質量比 (%)
1	2.300	59.2	2.339	64.5
2	1.663	8.7	1.861	7.7
3	1.179	4.0	1.452	4.3
4	0.919	2.8	1.207	3.4
5	0.834	2.1	1.050	2.6
6	0.826	15.2	0.950	1.9
7	0.818	1.5	0.885	1.1
8	0.779	0.0	0.836	7.6
9	0.723	0.5	0.777	6.8

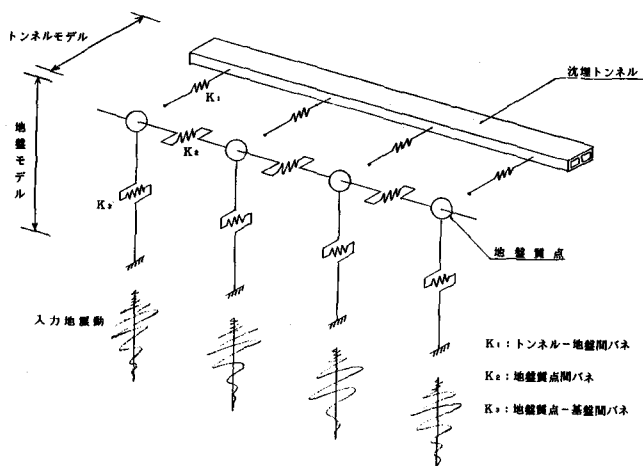
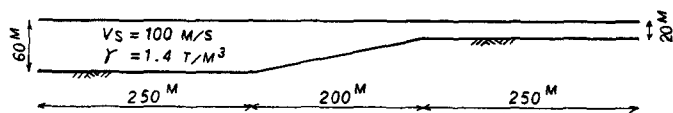


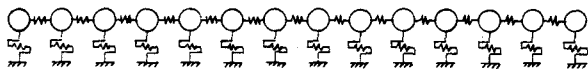
図-1 沈埋トンネル等の地震応答解析モデル



(a) 検討対象地盤



(b) FEMモデル



(c) バネ・マスモデル

図-2 検討地盤モデル

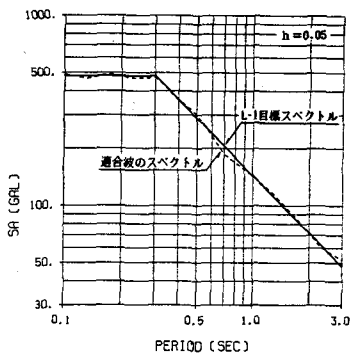


図-3 L-1スペクトル
(実線は文献2より)

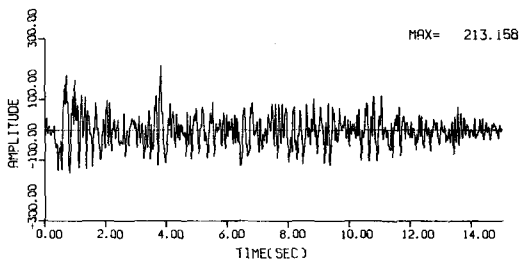


図-4 入力地震動 (開北橋記録のL-1適合波形)

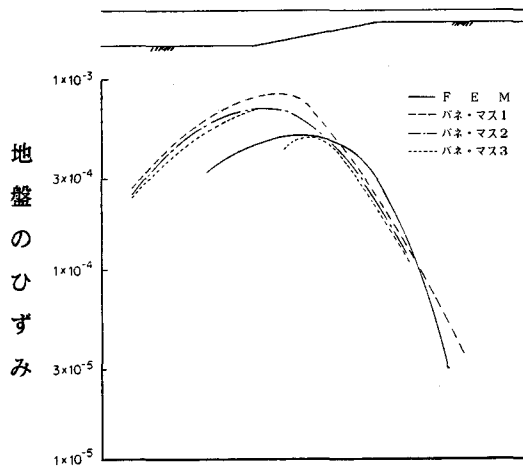


図-5 地表面での最大ひずみ分布

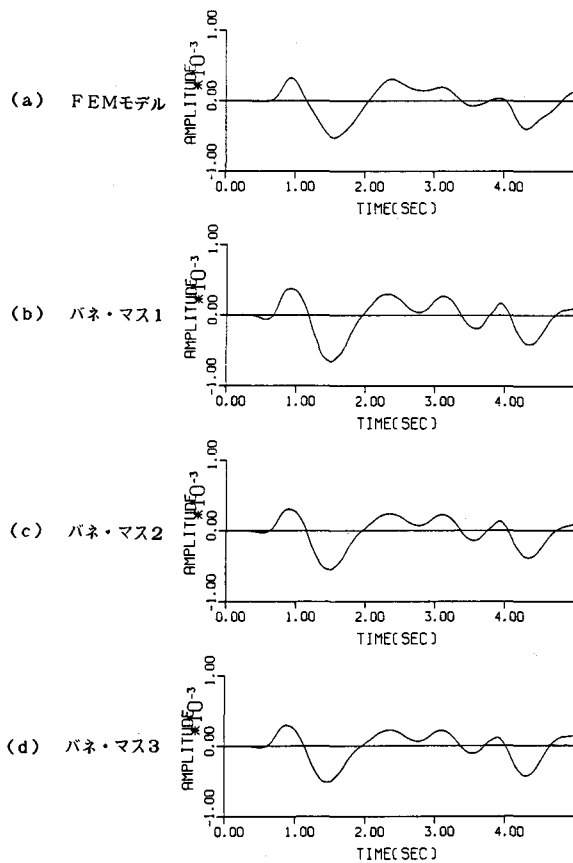
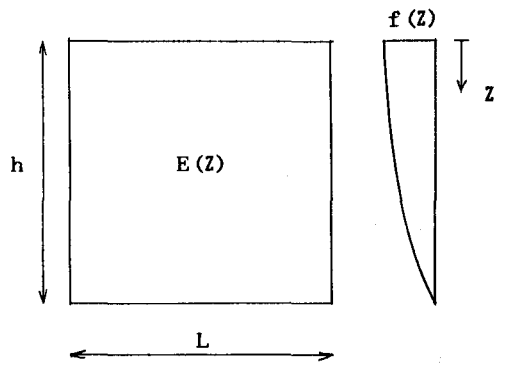
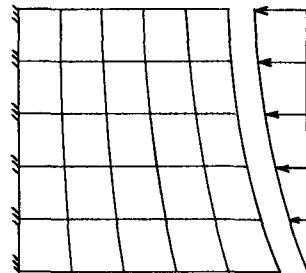


図-7 ひずみ波形 (FEMにおける最大ひずみ発生位置)



(a) 岡本・田村モデル

FEMモデル 地盤の一次モード



(b) FEMによる方法

図-6 質点間ばね (K2) の算定

表-2 K2ばねの比較

岡本・田村モデル	$4 \times 10^4 \text{ t/m}$
FEMモデル	$6 \times 10^4 \text{ t/m}$

表-3 バネ・マスモデル解析ケース

モデル	条件
バネ・マス	1 岡本 - 田村モデル
	2 K2ばねをFEMにより算定
	3 K2ばねを1の2倍とした場合