

近傍地盤のせん断弾性係数が地盤バネ定数および 応答変位法による断面力に及ぼす影響

村井和彦¹・大塚久哲²・矢葺亘³

¹正会員 工修 戸田建設株式会社土木設計室(〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)
(九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻博士課程在学)

²フェロ- 工博 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 教授(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 工修 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 助手(同上)

静的手法による大規模地震動時の地下構造物の耐震検討においては、地盤の非線形性の評価を自由地盤の地震応答解析より得られた地盤物性値を用いて行う方法が一般的になりつつあるが、構造物と周辺地盤の剛性や重量が大きく相違する場合は、構造物近傍地盤の物性値が自由地盤の値とは異なることとなる。本研究では、自由地盤の地震応答解析から得られたせん断弾性係数と、構造物の剛性や重量をパラメータにした動的解析より得られた近傍地盤のせん断弾性係数の両方を用い、静的FEMにより地盤バネ定数を求め、このバネ定数を用いた応答変位法と動的解析による断面力を比較することにより、近傍地盤のせん断弾性係数が断面力に及ぼす影響を検討するとともに、応答変位法の計算精度について考察を加えた。

Key Words : *shear modulus, free field, interaction spring, seismic deformation method, dynamic analysis, equivalent linearization, stress resultant*

1. はじめに

地下構造物の耐震検討では地盤非線形性の適切な評価が重要であり、大規模地震動を対象とした静的解析を行う場合は、自由地盤を対象とした1次元等価線形動的解析を実施し、得られた収束値を地盤物性値として用いる方法が一般的となりつつある^{例え}¹⁾。しかしながら、地盤と構造物の剛性や重量が大きく相違する場合は、両者の動的相互作用に起因して、構造物近傍地盤の物性値が同じ深度における自由地盤のものとは相違する傾向にある。

筆者ら^{2), 3)}は、矩形断面を有する地下構造物横断方向を対象とした周波数領域の複素応答法による2次元の動的解析(以下動的解析と称する)を実施し、構造物の剛性や重量をパラメトリックに変化させた場合の近傍地盤のせん断弾性係数の分布が、動的相互作用に起因する構造物の地震時挙動と対応して相違することを明らかにしている。このような傾向が耐震検討結果に及ぼす影響が大きいと、地盤非線形性の評価は構造物もモデル化した2次元動的解

析によらざるを得ないこととなる。

一方、地下構造物横断方向の耐震設計に用いる応答変位法は、設計実務で広く用いられている標準的解析方法となっているが、非常に複雑な地盤と構造物との相互作用を表現する合理的なモデル化の方法が確立されていないとの指摘もなされている⁴⁾。

以上の観点より、本研究では、上記動的解析より得られた近傍地盤のせん断弾性係数と、自由地盤の1次元解析より得られたせん断弾性係数を地盤物性値として、静的FEM解析により地盤バネ定数を算定し、近傍地盤のせん断弾性係数が地盤バネ定数に及ぼす影響を検討した。さらに、これらバネ定数を用いた応答変位法による解析を実施し、得られた断面力と動的解析による断面力とを比較することにより、応答変位法に用いる地盤バネのモデル化や計算精度について考察を加えた。

2. 地盤バネ定数の算定方法および算定条件

地盤バネ定数の算定は、駐車場設計・施工指針⁵⁾

に示されている静的 F E M による方法である。

本研究において対象とした構造物は、文献²⁾で示したもののうち、コンクリートの全断面有効剛性を用いた場合(A)と、各部材の断面二次モーメントを一律に A の 1/2 とした場合(B)、および各部材の断面厚を一律に A の 2 倍とした場合(C)の 3 タイプとした。また、重量の条件は、梁要素の単位体積重量を 0, 24.5, 49.1 kN/m³(それぞれ γ ①, γ ②, γ ③)とした 3 ケースである。

一方、地盤および入力地震動の条件は、近傍地盤と自由地盤のせん断弾性係数の相違が最も顕著であるケースを対象とし、地盤は N 値が 20 の洪積砂質土地盤を想定した層厚 30m の単一層地盤、入力地震動は兵庫県南部地震の際に神戸大学で観測された NS 成分の加速度を一律に 2 倍としたものとした。

静的 F E M 解析に用いる地盤の物性値は、動的相互作用に起因する近傍地盤のせん断弾性係数の相違を考慮した場合(物性値 A)と、自由地盤のせん断弾性係数を用いた場合(物性値 B)を検討の対象とした。物性値 A と B の比は、文献³⁾に示したように、最大で 1.6 程度、最小で 0.4 程度であり、構造物の条件が異なると近傍地盤のせん断弾性係数分布も大きく異なる結果となっている。

なお、以下では、構造物の剛性に関しては、自由地盤のせん断弾性係数に対する構造物の見かけのせん断弾性係数の比(以下 G_e/G_f と称する)で評価することとする。

3. 近傍地盤のせん断弾性係数が地盤バネ定数に及ぼす影響

図-1は、物性値を B とした場合における構造物各部材の地盤バネ定数分布を示したものである。図より、今回の手法で求めた地盤バネ定数は、隅角部で大きく部材中央部では小さい分布形状を示していることがわかる。

図-2は、バネ値の大きい上部隅角部および下部隅角部に着目し、物性値 A と B による地盤バネ定数の比(以下 kn/k_f と称する)と G_e/G_f との関係を、それぞれ水平方向および鉛直方向について示したものである。これらより、隅角部の kn/k_f は G_e/G_f の増加に応じて単調に減少する傾向が認められ、また、構造物の単位体積重量が大きくなると、上部では値が大きくなり、下部では小さくなる傾向となっている。概して構造物と地盤の剛性や重量の相違が小さい場合は kn/k_f が 1 に近い値となっており、地盤バネの算定において物性値 B を用いても影響は小さい。

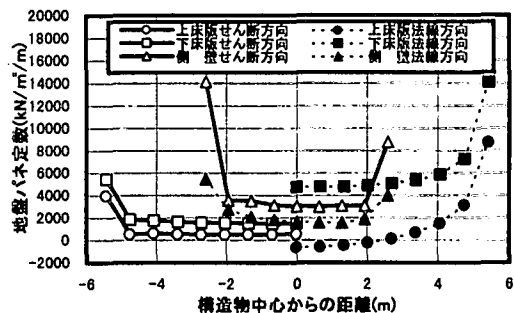
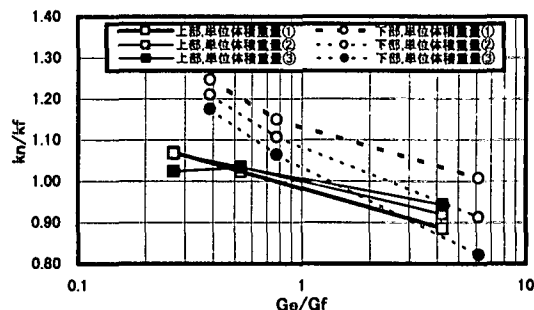
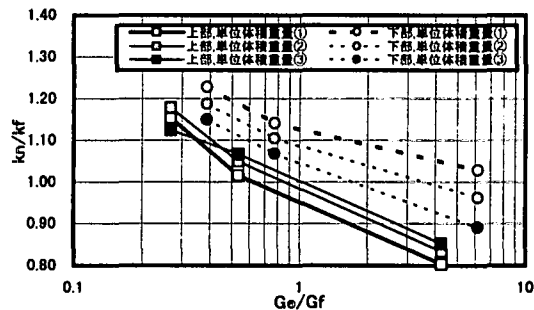


図-1 地盤バネ定数分布(物性値 B)



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-2 隅角部の地盤バネ定数

いが、相違が大きい場合は、近傍地盤のせん断弾性係数が地盤バネ定数に及ぼす影響が大きい結果となっている。今回のケースでは、物性値 A と B を用いた場合の地盤バネ定数の相違は、最大で 25% 程度である。

なお、これらの傾向は、粘性土地盤より砂質土地盤の方が、また、入力地震動が大きい方が顕著になることや、隅角部付近のせん断弾性係数の分布傾向と概ね対応していることを別途確認している。また、部材中央部に関しても、構造物条件に応じた kn/k_f の相違があるが、各部材における分布形状は図-1に示したものと概ね同じであり、値自体の差異は隅角部と比較して小さい。

4. 応答変位法に用いる地盤バネ定数と断面力

(1) 計算条件

応答変位法におけるモデル化に用いた地盤バネ定数は、近傍地盤のせん断弾性係数が断面力に及ぼす

表-1 応答変位法における地盤バネ定数

CASE	物性値	部材内での分布
SP I	A	考慮
SP II	A	平均化
SP III	B	考慮
SP IV	B	平均化

影響を検討するため、物性値 A および B を用いて得られたものを検討の対象とするとともに、図-1に示したような分布を考慮して、得られた値をそのまま用いた場合と、駐車場指針に規定されているように各部材においてこれらを平均化した場合との相違についても検討の対象とした。表-1にここで検討の対象とした地盤バネ定数の設定ケースをまとめる。

また、応答変位法における作用荷重は、自由地盤の動的解析結果より上下床版位置における最大相対変位発生時刻における応答値を抽出して設定することとした。

なお、駐車場指針においては、上床版における地盤バネは考慮しないこととなっているが、ここでは同部材についても地盤バネを考慮している。

(2) 断面力の比較

図-3は、曲げモーメントについて、応答変位法の外力算定と同時刻における動的解析結果に対する応答変位法の結果の比 (M_s/M_d) と G_e/G_f の関係を、値の最も大きい構造物の側壁下部と側壁上部に着目して示したものである。これより、SP I と III の相違はあまり顕著ではないが、構造物剛性が小さい場合ほど、SP I および III と SP II および IV との相違が大きくなっていることがわかる。これは、応答変位法における地盤バネ定数は、近傍地盤のせん断弾性係数よりも、特に構造物の剛性が小さい場合には、部材内での分布を考慮する必要があることを示すものである。また、構造物の剛性が大きい場合は M_s/M_d は 1 に近いが、剛性が小さい場合は 0.6 ~ 0.8 程度となっており、動的解析を正とすると、応答変位法の精度は構造物の剛性が小さいほど良好ではなくなっている。また、単位体積重量が大きいほど、精度が良くなる傾向にある。

図-4は、せん断力の比 (S_s/S_d) について、同様に示したものである。せん断力に関しては、側壁下部では地盤バネの分布の影響が上部と比較して明確とはなっていないものの、曲げモーメントとほぼ同様の傾向を示している。

図-5は、軸力の比 (N_s/N_d) について、側壁下部と下床版端部に着目して、同様に示したものであ

る。近傍地盤のせん断弾性係数の影響よりも構造物剛性が小さい場合の地盤バネ分布の影響が大きい傾向は曲げモーメントやせん断力と同じであるが、構造物の剛性や重量が結果に及ぼす影響は両者とは異なっていることが特徴的である。

総じて、今回のケースでは、近傍地盤のせん断弾性係数が応答変位法による断面力に及ぼす影響は小さいため、自由地盤の物性値を用いて地盤バネ定数を算定しても結果に有意な差は生じないが、構造物の剛性が小さい場合は、地盤バネを平均化することによる差異が生じる結果となっている。また、応答変位法においては、構造物の剛性や重量の条件によっては動的解析結果との差異が大きくなることに留意する必要がある。

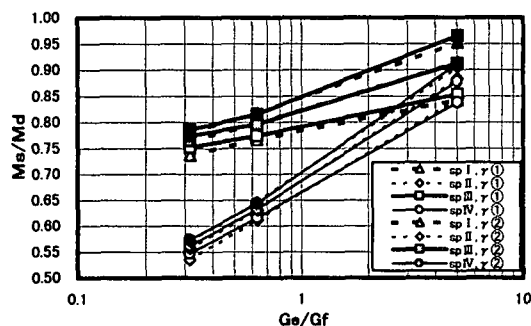
(3) 応答変位法の計算精度に関する考察

ここでは、上記結果をもとに、応答変位法の計算精度について考察する。

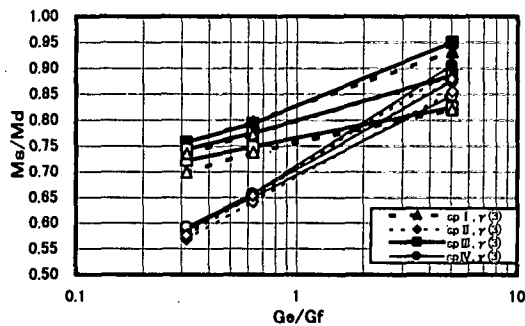
応答変位法は、地盤バネにて支持された骨組みモデルに地震時荷重を作用させる方法であるが、系の釣り合いはこれらの荷重で保たれているわけではなく、さらに各節点に構造物の変位に相応したバネ反力が作用して成り立っている。一方、構造物に作用する地震時外力を直接評価する方法^{例えは6)}を参考に、動的解析結果において、任意時刻における地盤と構造物の力のやりとりである相互作用力と構造物に作用する物体力である慣性力を抽出し、これを梁モデルに作用させると、動的解析における断面力を精度良く求められることを確認している。

このように考えると、応答変位法の計算精度が良い場合とは、構造物モデルに作用させる外力と、これに対応したバネ反力の和が、動的解析における相互作用力と慣性力の和と等価な場合であると考えられる。すなわち、応答変位法の計算精度やその向上に関する検討は、自由地盤の情報より地震時外力を設定した後に、別途設定した地盤バネにて支持された梁モデルにこれら外力を作用させ、地震時外力とバネ反力の和に着目して行う必要があることとなる。

また、ここで用いた地盤バネ定数は、構造物を剛体として求めたものであるが、特に構造物法線方向に作用する力が支配的な曲げモーメントやせん断力では、構造物の変形に相応した法線方向地盤バネの評価が必要であるものと考えられる。ここでの結果では、構造物の剛性や重量が大きい条件で曲げモーメントやせん断力の精度がよいが、これは、このような条件では構造物に剛体運動的な挙動も発生している²⁾ためと考えられる。

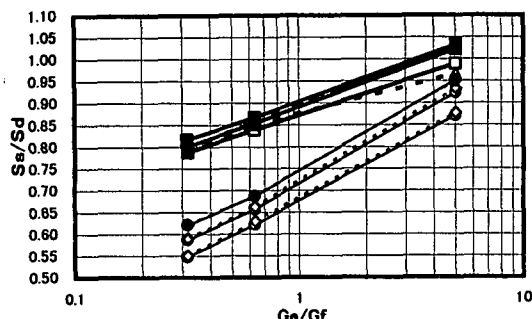


(a) 側壁上部

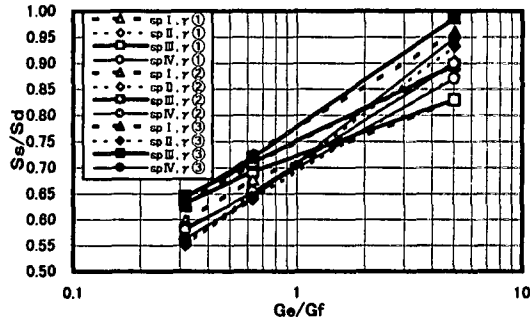


(b) 側壁下部

図-3 動的解析結果に対する応答変位法の曲げモーメントの比

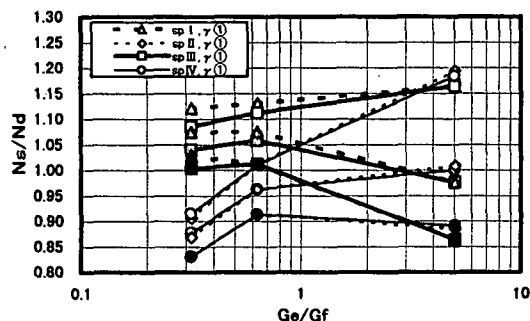


(a) 側壁上部

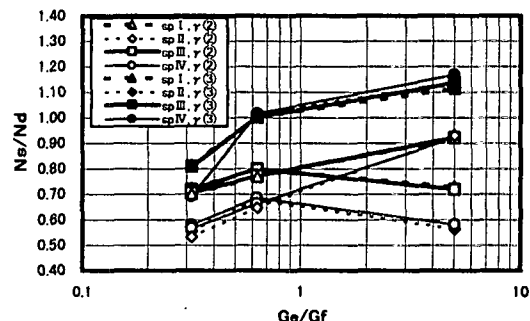


(b) 側壁下部

図-4 動的解析結果に対する応答変位法のせん断力の比



(a) 側壁下部



(b) 下床版端部

図-5 動的解析結果に対する応答変位法の軸力の比

5. まとめと今後の課題

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 静的 F E M による地盤バネ定数の算定において近傍地盤のせん断弾性係数を考慮すると、自由地盤のせん断弾性係数を用いた場合と比較して最大で 25% 程度異なる値となるが、応答変位法による断面力に及ぼす影響は、近傍地盤のせん断弾性係数よりも地盤バネ定数の分布の方が支配的である。
- 2) 応答変位法の計算精度やその向上に関する検討は、地震時外力とバネ反力の和に着目して行う必要がある。また、法線方向の地盤バネは、構造物の変形に相応した評価が必要と考えられる。

今後は、構造物に直接作用する慣性力および相互作用力と応答変位法における地震時外力およびバネ反力を比較して検討を加える予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その 3)-地下構造物の免震設計法マニュアル(案)-, 平成 10 年 9 月
- 2) 村井和彦・大塚久哲・矢葺亘：矩形断面を有する地下構造物の地震時挙動と変形特性, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.1607-1618, 1999.3
- 3) 村井和彦・大塚久哲・矢葺亘：動的相互作用に起因する地下構造物近傍地盤のせん断弾性係数と地震時挙動, 第 34 回地盤工学研究発表会, 1999.7
- 4) (社)土木学会：開削トンネルの耐震設計, トンネルライブラリー 9, pp.95, 平成 10 年 10 月
- 5) (社)日本道路協会：駐車場設計施工指針・同解説, 平成 4 年 11 月
- 6) 渡辺啓行：地中ダクトの地震時動土圧理論, 土木学会論文集, No.432/ I -16, pp.449-452, 1991.7