

# 地震時外力に着目した地下構造物横断方向に適用 する応答変位法の計算精度と地盤バネに関する考察

## STUDY ON THE ACCURACY OF SEISMIC DEFORMATION METHOD FOCUSING ON EXTERNAL FORCES AND THE INTERACTION SPRING

村井和彦<sup>1)</sup>・大塚久哲<sup>2)</sup>・矢葺亘<sup>3)</sup>

Kazuhiko MURAI, Hisanori OTSUKA and Wataru YABUKI

Various seismic design method for underground structures has been proposed. But the applicability of each method has not been discussed thoroughly. In this paper, the accuracy of seismic deformation method (SDM) for the transversal direction of the underground structures is examined focusing on seismic external forces by comparing FEM dynamic analysis. The generating mechanism of seismic external forces, the re-evaluation of modeling and seismic forces of SDM are also discussed. It is made clear that the difference of seismic force obtained by SDM and FEM is caused by the difference of interaction spring and impedance matrix.

**Key Words:** underground structures, seismic deformation method, seismic external forces, interaction spring

### 1. はじめに

現在、地下構造物横断方向の耐震設計を静的に行う場合には、応答変位法、静的FEMによる方法などが用いられているが、その適用性については、未だ十分な議論はなされていない。これら手法のうち、最も一般的である応答変位法は、モデル化が容易なため実務設計上の利便性が高く、駐車場設計・施工指針<sup>1)</sup>(以下駐車場指針と称する)などにも規定されている。しかしながら、この方法には、地盤と構造物との相互作用をモデル化する地盤バネについて、非常に複雑な相互作用を表現する合理的な方法が確立されていない<sup>2)</sup>、構造物の実際の変形に即して評価する必要がある<sup>3)</sup>などの指摘があり、地盤バネの適切な評価方法の確立が課題となっている。これに対して、静的FEMによる方法<sup>例えば<sup>4)</sup></sup>は、相互作用の影響をバネでモデル化することが回避できる精度の良い方法であるが、これを標準的なものとした場合は、すべての設計においてFEMによる解析が必要となり、合理的ではない場合もある。したがって、実務設計に供するためには、応答変位法の計算精度に関する議論が重要であると考えられる。

筆者ら<sup>5)</sup>は、矩形断面の地下構造物横断方向を対象に、周波数領域の複素応答法による等価線形動的解析(以下等価線形動解と称する)を行い、地盤と構造物の剛性比や重量差が構造物の変形特性や地震時外力分布に及ぼす影響を評価検討している。また、これと作用荷重の整合性を図ったうえで、駐車場指針に規定されている応答変位法による計算を実施し、等価線形動解の結果を正解とした場合の応答変位法の断面力精度には、配置する地盤バネ値分布や地盤と構造物の剛性比や重量差の影響があることを示すとともに、精度を同列で比較するには、構造物に作用する地震時外力分布に着目することが合理的であることを示している<sup>6)</sup>。

1) 正会員 工学修士 戸田建設(株)本社土木設計室(九州大学大学院工学研究科博士後期課程在学)

2) フェロー 工学博士 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

3) 正会員 修士(工学)九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

このような知見を踏まえ、本研究では、FEM系モデルを用いた動的解析に対する応答変位法の計算精度を地震時外力分布に着目して考察し、地震時外力の発生要因や、応答変位法におけるモデル化や作用させる荷重の物理的意味を再評価するとともに、両手法において地震時外力が相違する理由を地盤パネに着目して明らかにしたものである。

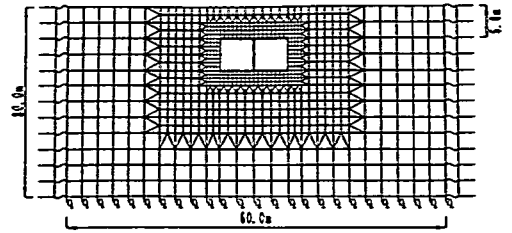


図-1 解析対象モデル

## 2. 解析条件

本研究において対象とするモデルは文献<sup>5), 6)</sup>と同じであり、議論を容易にするために単純なものとして、図-1に示すように、層厚30mの単一層表層地盤内の土被り5mの位置に、標準的な1層2室矩形断面の構造物が設置されている場合を想定している。また、ここで対象とするケースは、文献<sup>5)</sup>で示したものの一部であり、地盤条件は沖積粘性土を想定した軟質地盤、入力地震動は兵庫県南部地震の際に神戸大学にて観測されたNS成分の加速度振幅を一律に2倍としたものとした。一方、対象構造物は、常時荷重のみを考慮して設計し、全断面有効のコンクリート剛性を用いたもの、ひび割れ発生による剛性低下を想定して各断面の断面2次モーメントを一律に1/2としたもの、各部材の断面厚が一律に2倍になることを想定したもの(それぞれ、TypeA, B, Cと称する)の3タイプとした。構造物部材の単位体積重量は、0, 24.5, 49.1 kN/m<sup>3</sup>の3タイプ(それぞれ単位体積重量①, ②, ③と称する)とした。このうち、単位体積重量①は、動的相互作用問題としての評価に従うと、地盤と構造物の剛性差に起因するキネマティック相互作用のみを考慮していることとなり、単位体積重量②および③は、同じく重量差に起因する慣性力相互作用の影響が付加されることとなる。

動的解析の手法は、複素応答法による周波数領域の2次元動的有限要素解析であるが、このような条件にて等価線形動解を実施した場合、地震時に構造物との動的相互作用の影響を受ける近傍地盤では、諸条件に応じて地盤物性値が同深度の自由地盤とは異なる値となる<sup>7)</sup>。しかしながら本研究では、その後の展開を容易にするため、このような近傍地盤の物性値の影響は考慮しないこととし、自由地盤を対象とした1次元等価線形動解より得られた収束物性値を全解析領域に用いた線形動的解析(以下1次元等価線形動解と称し、図ではD.A.と略称する)を実施した。なお、今回のケースでは、等価線形動解と1次元等価線形動解の断面力の相違は10%以下であることを別途確認<sup>8)</sup>している。また、ここで対象とする時刻は、文献<sup>4)</sup>に従い、自由地盤における構造物上下床版位置に最大相対変位が発生する時刻としている。

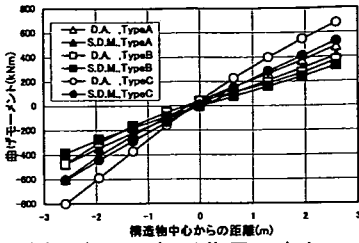
一方、応答変位法(以下図ではS.D.M.と略称する)は駐車場指針の方法を基本としたが、作用させる荷重は、1次元等価線形動解との比較のため、上記時刻における自由地盤の応答値より算出した。また、地盤パネの算定は、同指針に規定されている静的FEMにて各節点に単位強制変位を一律に与える方法による。但し、同指針では、パネ値を部材ごとに平均化することを規定しているが、このような平均化を施した場合は、各節点で得られた値をそのまま用いた場合に比して断面力精度が低下することを確認している<sup>9)</sup>ため、ここでは、平均化は行っていない。また、算定において用いる地盤物性値は、1次元等価線形動解で用いたせん断弾性係数である。

なお、本研究では、文献<sup>9)</sup>と同様に、応答値をキネマティック相互作用と慣性力相互作用の寄与分に分離して評価することとする。

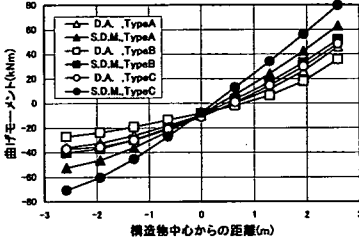
## 3. 応答変位法の精度と地震時外力

### (1) 断面力の比較による応答変位法の精度

解析結果のうち、まず、各ケースにおける1次元等価線形動解と応答変位法(以下両手法と称する)の断面力の相違に着目する。以下では、慣性力相互作用の寄与分は、各構造物タイプの見かけの単位体積重量を

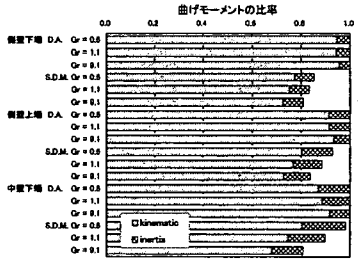


(a) キネマティック相互作用の寄与

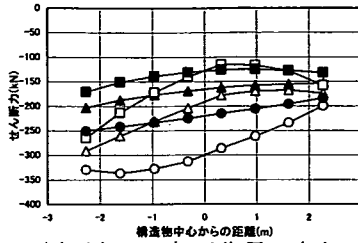


(b) 慣性力相互作用の寄与

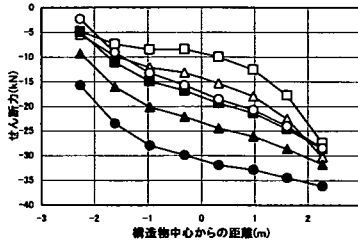
図-2 曲げモーメント分布 (左側壁)



(a) 曲げモーメント

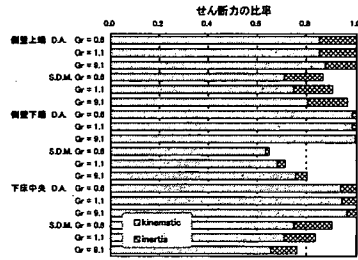


(a) キネマティック相互作用の寄与

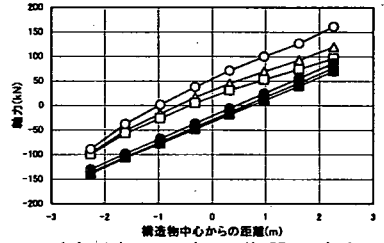


(b) 慣性力相互作用の寄与

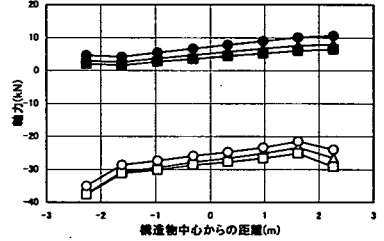
図-3 せん断力分布 (左側壁)



(b) せん断力

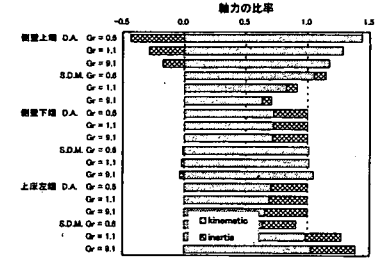


(a) キネマティック相互作用の寄与



(b) 慣性力相互作用の寄与

図-4 軸力分布 (左側壁)



(c) 軸力

図-5 両手法による断面力における各相互作用の寄与率

等価とするため、TypeA、Bについては単位体積重量③と①、TypeCについては単位体積重量②と①の差を示して評価することとする。図-2～4は、それぞれの相互作用の寄与分について、両手法による構造物左側壁の曲げモーメント、せん断力、および軸力分布を比較したものである。これより、曲げモーメントに関しては、それぞれの相互作用の寄与分とも、両手法の分布形状に大きな相違はないが、構造物中心から離れるほど値の相違が顕著となっていることがわかる。これに対してせん断力は、特にキネマティック相互作用の寄与分において、両手法で値のみならず分布形状も異なっている。曲げモーメントやせん断力に関するこれらの傾向は、構造物のTypeに応じた相違、換言すれば、構造物剛性の影響も認められる。一方、軸力に関しては、構造物剛性の影響は小さいものの、両手法での相違が大きく、特に慣性力相互作用の寄与分については、両手法で符号が逆になっていることが特徴的である。

次に、1次元等価線形動解に対する応答変位法の断面力精度を、同様にキネマティック相互作用と慣性力相互作用の寄与分に分離して評価する。図-5は、各ケースの構造物代表位置に着目し、それぞれの相互作用に起因する両手法の断面力を、1次元等価線形動解における断面力を基準として示したものである。図の縦軸には、式(1)で定義した地盤と構造物の剛性比Grも併記している。

$$Gr = Ge / Gf \quad (1)$$

ここに、Gr：剛性比、Ge：構造物の見かけのせん断弾性係数、Gf：構造物中心深度における自由地盤のせん断弾性係数

これより、曲げモーメントやせん断力に関しては、両手法の相違は、特にキネマティック相互作用の寄与分において顕著であることがわかる。また、キネマティック相互作用の寄与分は、Grに対して単調に変化する

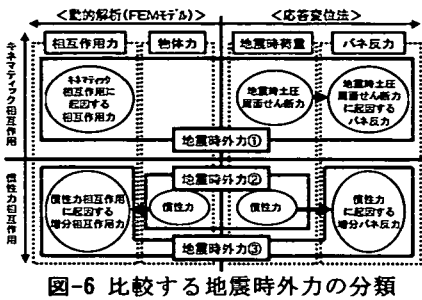


図-6 比較する地震時外力の分類

る傾向も認められるが、着目する断面力や位置によりその傾向は異なり、これを定量的に評価することは困難であると考えられる。一方、軸力については、キネマティック相互作用の寄与分における両手法の相違が顕著であるとともに、着目する位置によっては、慣性力相互作用の寄与分の相違も認められる。なお、軸力では慣性力相互作用の寄与分が負になっているものもあるが、これは、それぞれの相互作用の寄与分の符号が逆となる現象を示している。

## (2) 地震時外力の比較

次に、両手法における地震時外力分布を比較し、応答変位法の精度を分析する。ここでは、1次元等価線形動解における地震時外力は、文献<sup>9)</sup>と同様、地盤と構造物の接触面に作用する相互作用力と物体力である慣性力に区分し、これを①キネマティック相互作用に起因する相互作用力、②慣性力、③慣性力相互作用に起因する増分相互作用力の3種類に分類する。一方、応答変位法については、作用させる地震時荷重は、地震時土圧、周面せん断力、慣性力の3種類であり、系の釣合いは配置している地盤パネに構造物の変位に相応した反力が作用して成り立っているが、これを1次元等価線形動解と同列で比較するため、①キネマティック相互作用に起因する地震時荷重とパネ反力の和、②慣性力、③慣性力相互作用に起因するパネ反力の3種類に分類する。図-6に、ここで比較する両手法における地震時外力の分類を模式的に示す。なお、文献<sup>9)</sup>では、慣性力は、自由地盤の水平方向応答加速度を用いて評価しうることを確認しているため、以下では、両手法の地震時外力①および③に着目してする。また、ここでは、1次元等価線形動解の地震時外力は対象とした時刻の静的作用力であると仮定していることとなるが、骨組みモデルにこれら地震時外力を静的に作用させた場合の断面力は、1次元等価線形動解における同時刻の断面力と等価であることを確認している。

図-7は、両手法における曲げモーメントやせん断力の相違が顕著であるキネマティック相互作用に着目し、法線、接線方向の地震時外力①を比較したものである。これより、両手法における地震時外力の相違は、特に側壁法線方向において顕著であることがわかる。また、下床版法線方向では、隅角部近傍を中心に相違が顕著であり、構造物剛性の小さいTypeBでは隅角部ごく近傍に限定されるが、剛性の大きいTypeCでは部材中央付近から相違しているなど、構造物の剛性の影響も認められる。さらに、上床版法線方向では、応答変位法は、構造物剛性の相違に起因する地震時外力の相違が適切に評価できていないこととなる。これに対して、接線方向については、両手法の地震時外力は隅角部を除き大きな相違はなく、法線方向と比較して概ね良く一致した分布となっている。一方、図-8は、法線接線方向の地震時外力③を比較したものである。これより、応答変位法による地震時外力③は、法線方向の隅角部近傍を除き、地震時外力①に比して精度が良いことがわかる。

以上の検討より、応答変位法の断面力が1次元等価線形動解に対して相違するのは、キネマティック相互作用の寄与分のうち、構造物剛性に応じて相違する法線方向の地震時外力分布を精度良く評価できていないことが主要因であることが明らかとなった。

## 4. 相互作用力の発生要因と応答変位法との対応

### (1) 相互作用力の発生要因

本章では、動的解析における相互作用力に着目し、立石の知見<sup>9)</sup>や川島の成書<sup>10)</sup>を参考にその発生要因を考察するとともに、応答変位法の基本式を再整理し、モデル化や作用外力について考察する。

まず、構造物を取り去った空洞地盤の変位を用い、相互作用力の発生要因を考察する。文献<sup>9)</sup>では、地盤と構造物の動的相互作用問題を扱う解析手法の1つである動的サブストラクチャー法を地下構造物横

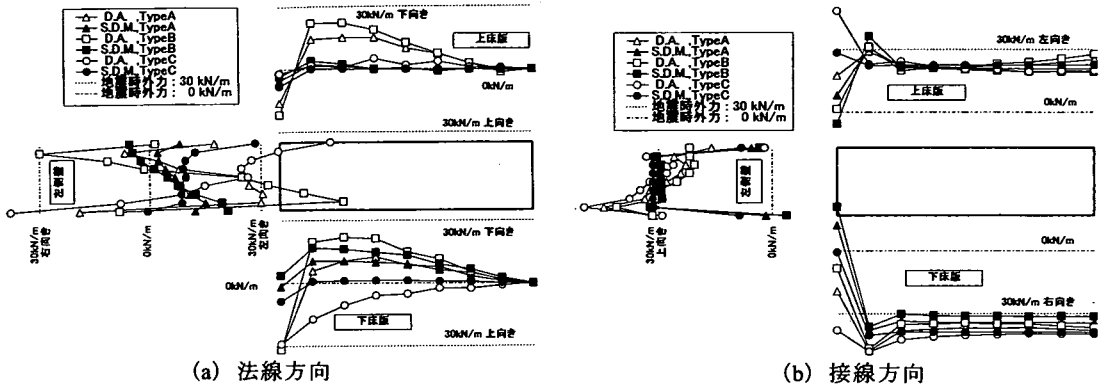


図-7 地震時外力①の比較

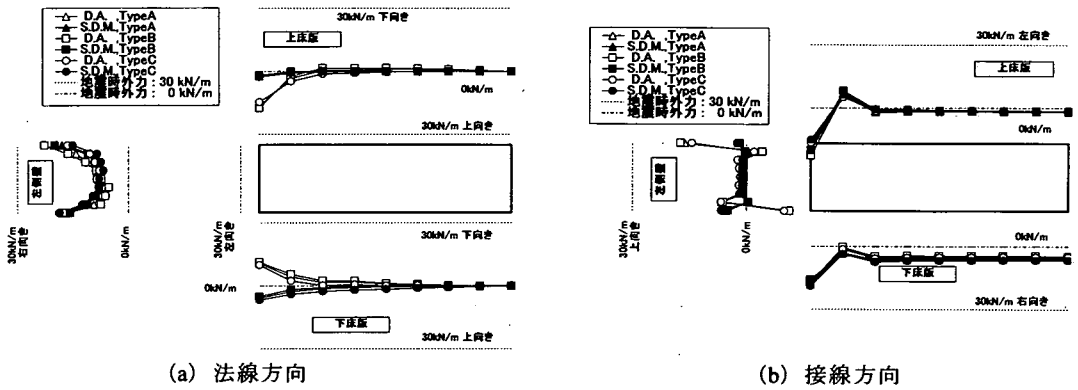


図-8 地震時外力③の比較

断方向に適用し、これにいくつかの仮定を設け静的問題に帰着することにより、駐車場指針に規定されている応答変位法に関する基本式を次式のように導いている。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [K_{II}] + [K^{G_{10}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_s\} \\ \{n\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SI}] \\ [M_{IS}] & [M_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_s\} \\ \{\ddot{n}\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K^{G_{10}}]\{r_{10}\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[K]$ ：構造物剛性マトリックス、 $\{r\}$ ：変位ベクトル、 $S$ ：地盤と接しない構造物節点を示す添字、 $I$ ：地盤と接する構造物節点を示す添字、 $G$ ：空洞地盤を示す添字、 $[K^{G_{10}}]$ ：地盤インピーダンスマトリックス

ここで、インピーダンスマトリックスについては、算定方法も含め、第5章にて後述する。

一方、相互作用力を外力として直接評価する場合は、式(2)は以下のように表現される。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [K_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_s\} \\ \{n\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SI}] \\ [M_{IS}] & [M_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_s\} \\ \{\ddot{n}\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $\{F\}$ ：相互作用力ベクトル

式(2)と(3)を比較すると、相互作用力は、次式に示すように空洞地盤と構造物との相対変位ベクトルに地盤インピーダンスマトリックス（以下、インピーダンスと称する）を乗じたものとして表現できる。

$$\{F\} = [K^{G_{10}}] \{r_{10} - n\} \quad (4)$$

ここで、式(4)の物理的意味を考察する。図-9は、単位体積重量①の場合の構造物の変形形状を、空洞地盤および自由地盤の変形とともに示したものである。ここで、空洞地盤を構造物が無剛性の場合と考えると、右側の構造物変位ベクトルは空洞地盤の変位ベクトルと等しくなり、相互作用力は全節点に関して作用しな

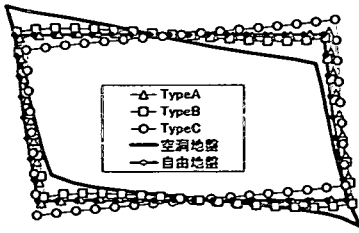


図-9 地盤と構造物の変形

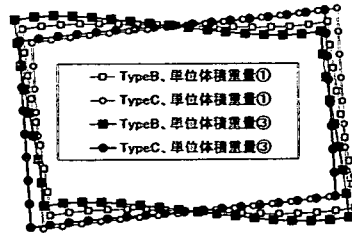


図-10 構造物変形と単位体積重量

いこととなる。これは、空洞地盤は表面応力が 0 となる境界条件を満たす変形が生じることと等価である。次に、構造物に剛性がある場合を考えると、構造物の変位はその剛性に応じて空洞地盤の変位とは異なり、相対変位ベクトルが 0 ベクトルでは

なくなり、これにインピーダンスを乗じた相互作用力が発生する。後述するように、インピーダンスには構造物剛性の影響はなく、空洞地盤の形状や物性値により一意に定まるものであるため、特に法線方向で顕著である構造物剛性に起因する相互作用力分布の相違は、空洞地盤との相対変位の相違、すなわち、構造物変形の相違に起因していることとなる。また、接線方向ではこのような影響が小さいのは、構造物剛性の相違による同方向の相対変位の相違が小さいことに起因している。

次に、慣性力相互作用の影響が付加された場合について考察する。図-10 は、構造物 TypeB および C について、単位体積重量①と③の場合の変形形状を示したものである。図より、慣性力が作用する場合は、無質量構造物の場合と比較して水平や回転変位が大きくなるのがわかる。一方、このような場合の相互作用力は、キネマティック相互作用の寄与分と慣性力相互作用の寄与分の線形和と考え、式(4)を変形すると、

$$\{F\} = [K_w^0] \{r_1^0 - r_1 + r_1 - n\} = [K_w^0] \{r_1^0 - r_1\} + [K_w^0] \{r_1 - n\} \quad (5)$$

ここに、k: 無質量構造物を示す添字

となる。これより、慣性力相互作用に起因する増分相互作用力は、図-10 に示した単位体積重量③と①の相対変位に起因して発生することがわかる。

以上をまとめると、相互作用力は、構造物の影響を受けることにより生じる空洞地盤と構造物の相対変位に起因して発生するものであり、変形した空洞地盤を系全体の釣合い条件を満足する形状にまでさらに変形させる力の反作用と定義すれば、物理的意味が明解となる。また、構造物変位と相互作用力は、空洞地盤の変位およびインピーダンスを介して一義的に関連づけられることとなる。

## (2) 応答変位法との対応

次に、自由地盤の変位を用い、応答変位法との対応を考察する。図-9 に示したように、単純せん断変形である自由地盤の変形においても、空洞地盤の変形に対して相対変位が発生する。そこで、式(4)を空洞-自由地盤の相対変位と自由地盤-構造物の相対変位に分離し、次のように変形する。

$$\{F\} = [K_w^0] \{r_1^0 - n + r_1 - r_1\} = [K_w^0] \{r_1^0 - n\} + [K_w^0] \{r_1 - r_1\} \quad (6)$$

ここに、f: 自由地盤を示す添字

これを式(4)と比較すると、式(6)の右辺第2項は、構造物位置にある地盤をサブストラクチャーとして取り出した場合に作用する相互作用力を示すものであることがわかるが、これはすなわち、自由地盤に作用する接線方向のせん断力であり、応答変位法においては、モデルに作用させる力の1つである周面せん断力に相当する。このように考えると、周面せん断力は、式(4)を自由地盤の変位を用いて表すためのものであり、物理的には、変形した空洞地盤を自由地盤の変形形状にするための力の反作用であると定義できる。

また、式(3)と(6)を、構造物の加速度は自由地盤の加速度で評価できることも考慮し、応答変位法の考え方と対比すべく整理すると、式(7)となる。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [K_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_I\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_{G10}]\{r_1\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SI}] \\ [M_{IS}] & [M_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_S\} \\ \{\ddot{r}_I\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_{G10}]\{\ddot{r}_1\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_{G10}]\{r_1 - r_1\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式(7)においては、右辺第1項が慣性力、第2項が地震時土圧、第3項が周面せん断力に相当する。また、

左辺第2項は、地震時外力を直接評価する場合は右辺外力項とすべきものであるが、応答変位法においては支持条件を示す項となる。これより、応答変位法における作用力は、構造物に作用する地震時外力そのものではなく、適切な支持条件も含めて設定したモデルに対して作用させる力であることがわかる。これら作用力の精度については、周面せん断力は前述のように自由地盤のせん断応力相等となるため問題はないが、地震時土圧はインピーダンスの精度に依存する。また、慣性力は、地震時外力としても作用力としても精度に関する問題はない。一方、応答変位法における地震時外力の精度に関しては、左辺の支持条件項も重要となる。キネマティック相互作用に起因する法線方向相互作用力が構造物剛性の影響を受けるのはこの項の寄与であり、また、慣性力相互作用に起因する増分相互作用力も、慣性力項に相応した支持条件項にて評価される。これに対して、キネマティック相互作用に起因する接線方向相互作用力が自由地盤のせん断応力で概ね評価できるのは、同方向では周面せん断力項の寄与が大きいためである。

総じて、応答変位法は物理的根拠を有する合理的な手法であるが、その精度は地盤バネにて示す相互作用のモデル化問題に帰着することとなり、具体的には、文献<sup>9)</sup>でも示唆されているが、地盤バネとインピーダンスの相違であると考えられる。なお、応答変位法に用いる地盤バネは、固定端を有する反力バネではなく、空洞もしくは自由地盤の変位を荷重に変換する相互作用バネと理解すれば物理的意味が明解となる。

### 5. インピーダンスと地盤バネ

#### (1) インピーダンスによる相互作用力の算定

本章では、インピーダンスの諸特性を整理し、式(4)より求めた相互作用力の精度を評価するとともに、これと地盤バネの相違や応答変位法の高度化を考察する。

インピーダンスの各要素は、空洞地盤をFEMにてモデル化し、空洞表面の各節点に個別に強制単位調和振動を与え、各節点で得られる反力より求めるものであり、地盤バネと同じ次元となる。また、これら各要素値は、空洞地盤の形状および物性値より一義的に定まるが、動的に求めたインピーダンスには周波数依存性があり、減衰の評価も必要となることが知られている<sup>11)</sup>。そこで、周波数領域の複素応答法にて加振周波数をパラメータとしてインピーダンスを求め、式(4)による相互作用力の周波数依存性や精度を評価する。

今回の算定方法では、インピーダンスの各要素は複素数となり、減衰はその虚数部にて評価されるが、図-11は、このうち静的および加振周波数を地盤の基本振動数として求めた実数部だけのインピーダンスを式(4)に代入して求めた相互作用力と、1次元等価線形動解および応答変位法による相互作用力を、地盤と構造物の剛性差の大きい構造物 TypeB および TypeC の法線方向について比較したものである。これより、インピーダンスを用いて式(4)より求めた相互作用力は、若干の周波数依存性はあるものの、法線方向においても応答変位法と比較して精度が向上していることがわかる。すなわち、今回のケースでは、インピーダンスとして静的なものを用いても、相互作用力を精度良く評価できることが示された。

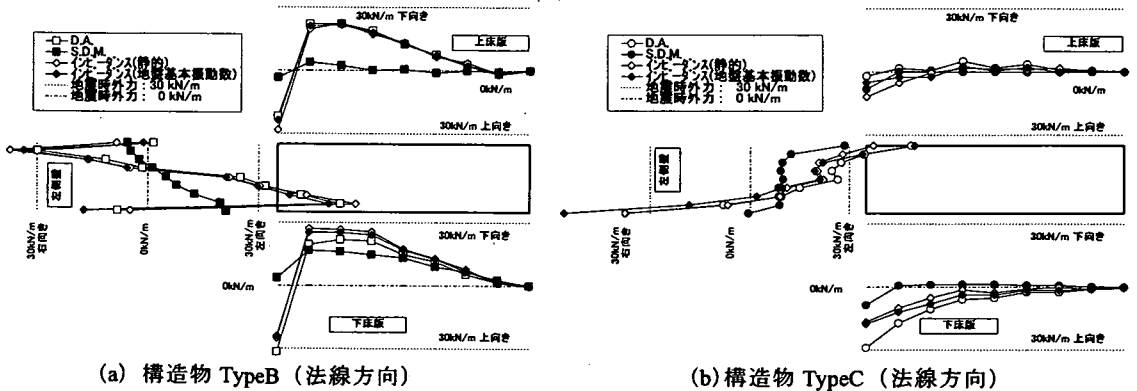


図-11 インピーダンスを用いた相互作用力分布の周波数依存性と精度比較

## (2)地盤パネの問題点と応答変位法の精度向上

次に、静的インピーダンスと地盤パネを比較する。静的インピーダンスは、空洞表面の節点数を  $n$  とすると、 $2n \times 2n$  の正方対称行列であり、その自由度は  $n(2n+1)$  となる。これに対して、地盤パネの自由度は  $2n$  であり、インピーダンスに比して自由度の縮約が図られている。自由度の縮約の際に付加される条件は、各節点間の幾何学的関係であり、地盤パネが変形に起因して相違するとの知見と等価となる。例えば、本研究で用いた地盤パネは、構造物が剛体であるとして自由度の縮約を図っていることとなるが、図-7で示したように、応答変位法において慣性力相互作用に起因する増分相互作用力の精度が良いのは、図-9に示す慣性力相互作用に起因する増分変位が剛体変位に近似できるためと考えられる。

以上のように考えると、応答変位法における精度良い地盤パネの算定には、あらかじめ想定した変形に応じた強制変位を与えるとともに、計算で得られた変形と地盤パネとの適合性を図る収束計算が必要となる。また、本研究では対象としていないが、地下構造物が非線形領域に入ることを想定する場合は、損傷発生の位置や順序、およびその進展に応じた相対変位や相互作用力が生じるため、上記適合手順がさらに煩雑となると想定される。これに対してインピーダンスは、地盤を等価線形弾性体としてモデル化する場合は、構造物が非線形領域に入る場合も含め、任意の変形に対する相互作用力を精度良く評価できるものと考えられる。これをFEMモデルによる方法と比較すると、その精度が等価であるとともに、非線形特性や剛性など、構造物に関するパラメータ解析に対し、地盤の影響が分離できることとなり、実務設計上の利点がある。

## 6. 結論

本研究では、以下のことが明らかとなった。

- 1) 応答変位法による曲げモーメントやせん断力は、キネマティック相互作用の寄与分において精度が悪いが、これは、特に構造物に作用する法線方向の相互作用力を精度良く評価できていないためである。
- 2) 相互作用力は、空洞地盤と構造物の相対変位に起因して発生し、インピーダンスを介して一義的に求めることができる。また、応答変位法は、物理的根拠を有する合理的な方法ではあるが、その精度はインピーダンスと地盤パネの相違の問題に帰着できる。
- 3) インピーダンスには周波数依存性があるものの、今回のケースでは、減衰を考慮せず、静的に求めたものを用いても、相互作用力の精度良い評価が可能である。また、応答変位法に用いる地盤パネは、インピーダンスの自由度を各節点間の幾何学的関係より縮約したものであり、精度向上には構造物の変形に応じた評価が必要である。一方、インピーダンスは、任意の変形に対してFEMモデルによる場合と等価な精度を有するとともに、実用面での利点もある。

謝辞：本研究における動的解析の遂行においては、(株)地震工学研究所の内田治氏に多大なるご支援を賜った。応答変位法の計算は、九州大学大学院工学研究科修士1年井手智明氏のご協力を得た。本解析にあたって使用した神戸大学の地震波形は、関西地震観測研究協議会提供によるものである。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会: 駐車場設計・施工指針同解説, 1992.11、2) 土木学会トンネル工学委員会: 開削トンネルの耐震設計, トンネルライブラリー 9, pp.95, 1998.10、3) 土木学会地震工学委員会: トンネル耐震設計の方向と基本課題 トンネル耐震性研究小委員会報告, pp.72-75, 1998.3、4) 片山ら: 地下埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 I, pp.737-738, 1985.9、5) 村井ら: 地震時における地下構造物横断方向の変形と外力に関する基礎的考察, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.1715-1726, 2000.3、6) 村井ら: 近傍地盤のせん断弾性係数が地盤パネ定数および応答変位法による断面力に及ぼす影響, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.497-500, 1999.7、7) 村井ら: 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回地震工学研究発表会, pp.1713-1714, 1999.7、8) 村井ら: 静的FEMによる地下構造物の耐震設計に用いる近傍地盤のせん断弾性係数に関する考察, 第35回地震工学研究発表会, pp.2157-2158, 2000.6、9) 立石: 応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究, 土木学会論文集 No.441/I-18, pp.157-166, 1992.1、10) 川島編著: 地下構造物の耐震設計, 鹿島出版会, pp.43-50, 1994.6、11) 土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会: 基礎・地盤・構造物系の動的相互作用-相互作用効果の耐震設計への導入-, 1992.9