

地下構造物横断方向の非線形域における耐震性能評価法の適用性に関する考察

村井和彦¹・大塚久哲²・矢葺亘³・井手智明⁴

¹正会員 博(工) 戸田建設株式会社本社土木設計室(〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 教授(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 修(工) 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 助手(同上)

⁴学生員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 修士課程 (同上)

大規模地震動時には、地下構造物横断方向においても非線形領域に入る場合がある。このような場合には、その耐震性能の指標を有意な精度で評価しうる手法を選択する必要がある。しかしながら、このための評価方法は、未だ体系化されているとは言い難く、実務設計においては、応答変位法、静的FEMによる方法、非線形逐次積分法など、種々の方法で評価しているのが現状である。本文は、地盤-構造物の相互作用のモデル化や地下構造物横断方向の非線形域での地震時挙動などの知見を踏まえ、静的非線形解析の適用性や、静的解析が適用しうる場合での荷重作用方法を検討し、地下構造物横断方向の非線形域における耐震性能評価法について考察を加えたものである。

Key Words : *underground structures, seismic design, non-linear region, static analysis, dynamic analysis, applicability, evaluation of seismic performance*

1. はじめに

大規模地震動時には、地下構造物横断方向においても非線形領域に入る場合がある。このような場合には、例えば部材応答塑性率など、構造物の耐震性能を示す指標を有意な精度で評価しうる解析手法を選択する必要がある。しかしながら、このための評価方法は、未だ体系化されているとは言い難く、実務設計においては、応答変位法、静的FEMによる方法、非線形逐次積分法など、種々の方法で評価しているのが現状である。本文は、地盤-構造物の相互作用のモデル化や、非線形逐次積分法による地下構造物横断方向の非線形域での地震時挙動などについて筆者らがこれまでに得た知見を踏まえ、静的非線形解析の適用性や、静的解析が適用しうる場合での荷重作用方法を検討し、地下構造物横断方向の非線形域における耐震性能評価法について考察を加えたものである。

2. 相互作用のモデル化に関する考察

筆者ら¹⁾は、図-1に示す地盤および構造物条件のモデルを対象に、自由地盤の収束物性値を全解析領域に適用することで地盤の非線形特性を評価した周波数領域の複素応答法による等価線形動的解析と、同じ条件のもとでの応答変位法の計算結果とを、断面力とともに、地震時外力にも着目して比較している。その結果、応答変位法の計算精度は、地盤と構造物の接触面に作用する法線方向の地震時外力(以下相互作用力と称する)の精度の問題に帰着し、図-2に示す地盤インピーダンスマトリックスと地盤パネの相違に起因していることを示している。この知見を、マトリックスにおける要素自由度に着目して考察すると、前者は $2n \times 2n$ (n : 空洞表面の節点数)の正方対称行列で、自由度は $n(2n+1)$ であるのに対し、後者は $2n \times 2n$ の正方対角行列で、自由度は $2n$ と縮約されたものとなっていることとなる。また、自由度縮約における付加条件は、 $n(2n-1)$ 個存在する各節点間の幾何的關係であり、駐車場指針

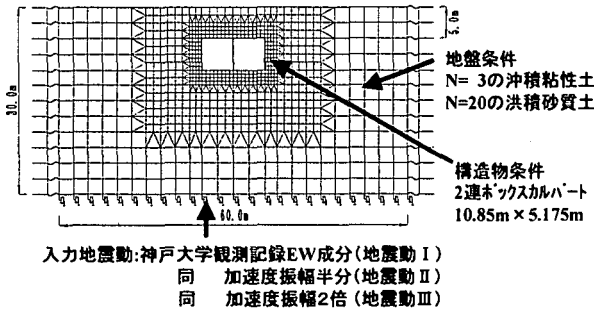


図-1 解析モデルおよび解析条件

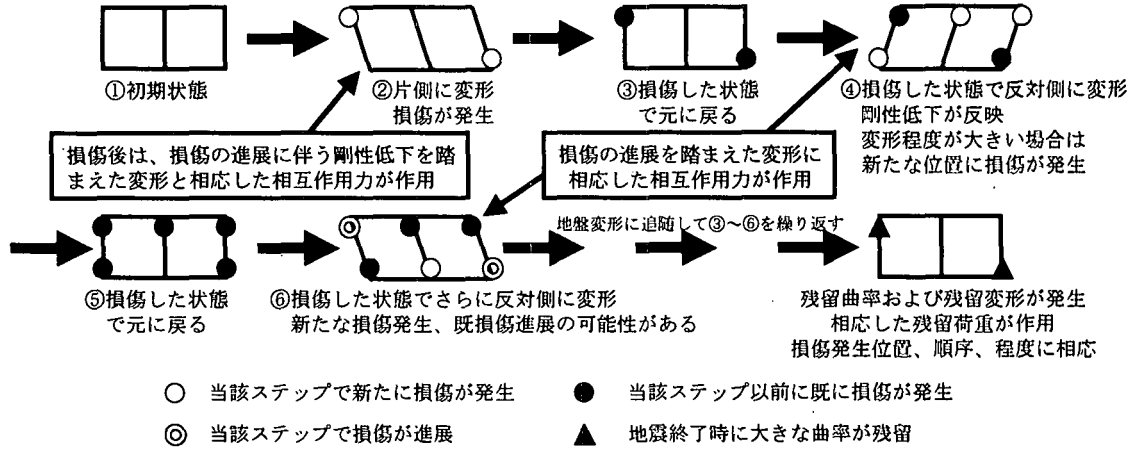


図-2 地盤インピーダンスマトリックスと地盤バネの概念

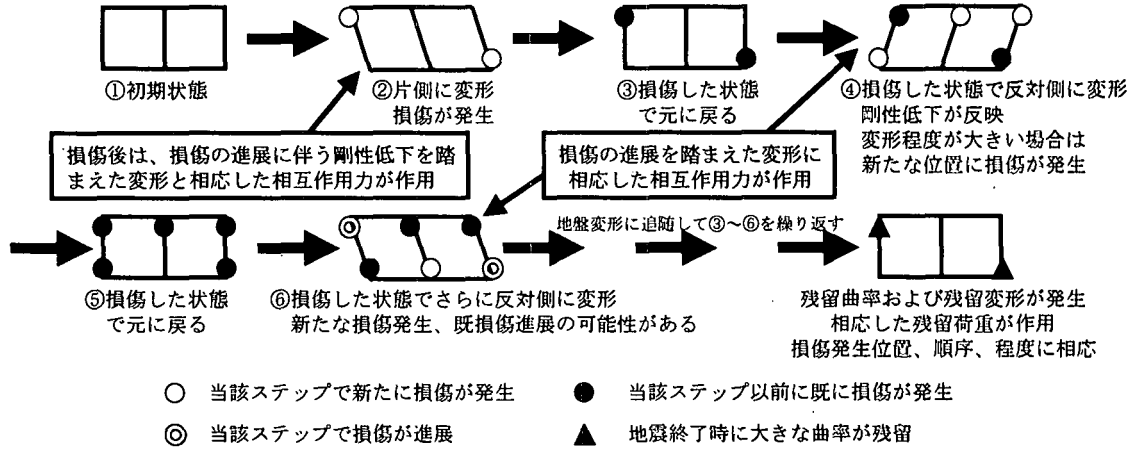


図-3 地下構造物横断方向の非線形地震時挙動の概念

²⁾に規定されている地盤バネ算定方法は、その算出過程において、構造物が剛体であるとの条件が付加されていることとなる。したがって、応答変位法の計算精度を向上させるためには、地盤バネの算出、もしくは、地盤インピーダンスマトリックスの自由度を縮約する過程において、構造物変形との適合条件を満足させるステップが必要となる。

このような知見は、構造物を等価な弾性体としてモデル化した結果に基づくものである。一方、本文で対象とする構造物非線形域での評価においては、作用する荷重の精度が部材の応答曲率や応答塑性率などの評価指標の精度に及ぼす影響が顕著となるため、より精度良く相互作用力を評価しうるモデルを用いる必要がある。また、応答変位法の精度向上のために、地盤バネの変形適合性を満足させるステップを組み込む際には、生じる損傷程度に相応した変形を加味する必要があり、その手順は非常に煩雑となる。したがって、構造物非線形域を対象とする場合における相互作用のモデル化では、FEMモデルを用いることが、合理的であると考えられる。そこで以下では、FEMモデルを用いた全体系モデルを検討の対象とする。

3. 地震時挙動と静的FEM解析の適用性

一方筆者ら^{3), 4)}は、文献¹⁾と同じモデルを対象に、入力地震動として実地震波および正弦波の加速度倍率をパラメータとした、逐次積分法による非線形動的FEM解析を実施し、地下構造物横断方向の地震時挙動や、相互作用力を詳細に分析している。その結果、構造物が非線形域に入る場合は、その挙動は高次不静定構造物のものとなり、損傷が生じた後の変形は、それまでに生じている損傷状態の影響を受け、作用する相互作用力もこれに相応していること、自由地盤の上下床版位置における最大相対変位発生時刻が、必ずしも部材の最大塑性率発生時刻とは対応しておらず、繰り返し交番変形過程の中で損傷が進展する可能性があること、などの知見を示し、構造物が非線形領域に入る場合の地震時挙動を、図-3のようにまとめている。

また、文献⁴⁾では、構造物には同じ履歴モデルを用い、地盤の非線形挙動は、自由地盤を対象とした周波数領域の複素応答法による等価線形化解析で得られた収束物性値を用いて評価する場合（以下地盤等価線形動的解析と称する）と、履歴モデルを用いて直接考慮する場合（以下地盤非線形動的解析と称する）の解析結果を比較している。その結果、地盤等価線形動的解析は、地震動が大きくなると、地盤条件によっては自由地盤の変形挙動が適切に評価できないことがあること、また、これを適切に評価しうる場合においても、近傍地盤の非線形履歴の影響

が大きくなると、構造物に作用する相互作用力や部材応答塑性率が精度良く評価できない場合があることなどを示している。

ここで、地盤等価線形動的解析と静的FEM解析の代表例である地盤応答震度法⁵⁾を比較する。地盤応答震度法は、まず、自由地盤について周波数領域の複素応答法による等価線形化法にて応答解析を実施し、上下床版位置における最大相対変位発生時刻の応答加速度より、系全体に作用させる地震時外力を算定するとともに、地盤物性値はその際に得られた収束物性値を適用する手順となっている。すなわち、この方法は、構造物や近傍地盤の応答加速度に起因する慣性力が自由地盤の応答加速度より評価でき、近傍地盤の減衰特性も自由地盤のものと同一と仮定すると、地盤等価線形動的解析を1時刻断面に着目して静的問題に帰着したものと捉えることができる。したがって、その適用範囲を評価する着目点として、地盤等価線形動的解析と同様、自由地盤の挙動を等価線形化法にて適切に評価しうる場合、かつ、近傍地盤の非線形履歴の影響が構造物の応答値に及ぼす影響が小さく、自由地盤の等価線形物性値にて評価しうる事が挙げられる。

4. 静的FEM解析における荷重作用方法

構造物が非線形域に入る場合を対象に静的FEM解析を適用する際には、前章で考察した地盤挙動に着目した検討に加え、図-3に示した交番過程の中で損傷が進展する現象にも留意が必要である。そこでここでは、地盤応答震度法を基本に、構造物の非線形特性として、常時荷重より定まる配筋断面を対象とした骨格曲線に加えて、武田型履歴特性もモデル化し、慣性力を正負交番に作用させるステップ解析を実施し、その荷重作用方法について検討を加えた。

ここで対象とした解析ケースは、文献⁴⁾にて実施したもののうち、前章の考察より静的解析により評価しうると判断したものであり、地盤はN値が3の沖積粘性土を想定したもの、入力地震動は、兵庫県南部地震における神戸大学観測記録 EW 成分の加速度振幅を2倍としたもの（以下標準ケースと称する）を基本とし、構造物の損傷がさらに大きくなる状態を想定し、同じ地盤物性値にて慣性力のみを2倍としたもの（以下慣性力2倍ケースと称する）、構造物が左右非対称の場合の一例として中壁の位置を右に0.6m移動させたもの（以下、非対称ケース①、②と称する）とした。

また、正負交番に作用させる慣性力の繰り返し回

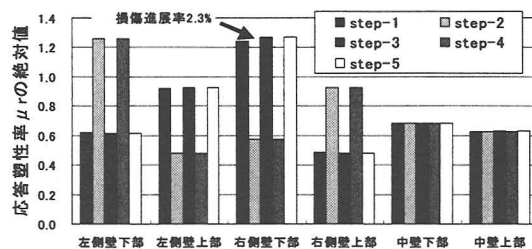


図-4 各載荷ステップの応答塑性率絶対値(標準ケース)

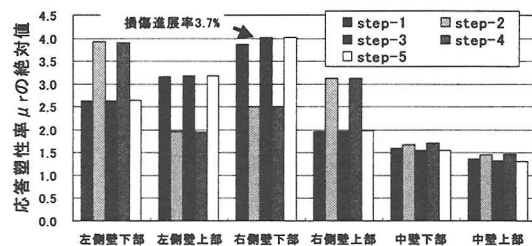
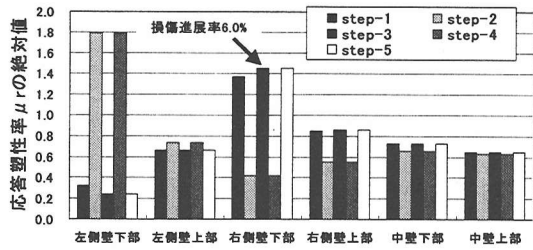


図-5 各載荷ステップの応答塑性率絶対値(慣性力2倍ケース)

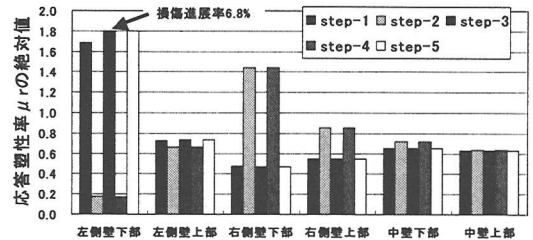
数は、部材の応答塑性率が一定の変動となることが確認できる5ステップまでとした。荷重作用方向は、対称なモデルのケースについては、第1ステップを構造物が左にせん断変形する方向としたが、非対称ケースについては、第1ステップにおける荷重作用方向を構造物が左にせん断変形する方向とする場合（以下初期左変形と称する）と、右にせん断変形する方向とする場合（以下初期右変形と称する）の2種類について解析を実施した。

図-4は、標準ケースを対象に、主要部材位置における各載荷ステップでの応答塑性率の絶対値を示したものである。図より、右側壁下部では、第1ステップと第3ステップで部材の損傷進展が認められ、両ステップにおける損傷進展率は2.3%となっていることがわかる。これは、第1ステップで構造物に生じた損傷が第3ステップでの損傷状態に影響を及ぼしているためであり、静的ステップ解析を実施すると図-3に示した損傷進展現象が評価できることを示している。また、このようなステップ解析で得られた結果は、入力地震動に対する応答以上の交番変形挙動を考慮したものとなり、構造物の損傷状態を安全側に評価していることとなる。図-5は、慣性力2倍ケースについて同様に示したものである。これより、本ケースにおけ損傷進展率は、例えば右側壁下部では3.7%と、より大きな値となっていることがわかる。これは、損傷の進展現象が構造系全体の損傷程度に相応して大きくなることを示している。

図-6は、非対称ケースについて、初期左変形と初期右変形の場合を示したものである。これらより、初期左変形の場合は右側壁下部に、また、初期右変形の場合は左側壁下部に損傷進展が認められ、それ



(a) 初期左変形



(b) 初期右変形

図-6 各載荷ステップの応答塑性率絶対値(非対称ケース)

それぞれの損傷進展率は 6.0%および 6.8%となっていることがわかる。これは、構造物が非対称な場合は、対称な場合に比して、損傷進展が大きくなることを示している。また、このような非対称構造物の場合には、本ケースのように 2 種類の荷重作用パターンを実施する必要があることとなる。

以上より、静的 FEM による方法にて非線形領域に入る地下構造物の耐震性能を評価する場合において、構造物の非線形特性として骨格曲線のみを評価し、地震時荷重を個別に作用させる方法では、繰返し変形過程における構造物の損傷進展が評価されず、安全側の評価をするためには、構造物の履歴特性もモデル化し、これに損傷が進展しなくなるまで地震時荷重を交番に繰返し作用させるステップ解析を実施することが必要となることが示された。但し、今回示したケースにおける損傷進展率は、実務上無視しうる程度であり、このような解析を要するのは、損傷進展がさらに顕著となる場合であると考えられる。また、構造物の履歴モデルの設定に応じて、損傷進展率の値は相違すると考えられる。

5. 適用性に関するまとめ

本章では、これまでに得られた知見に基づき、地下構造物横断方向の非線形領域を考慮した耐震性能評価法の適用性について整理する。ここでは、第 2 章の考察に基づき、相互作用のモデル化に FEM モデルを用いることを前提としている。

適用性の検討に際しては、まず、地盤挙動に着目

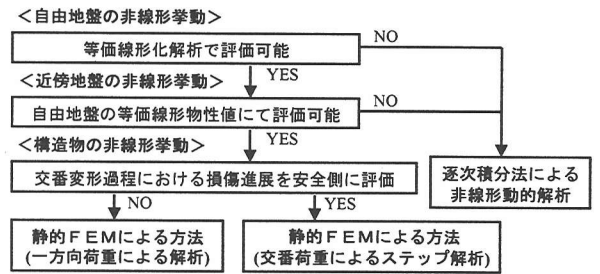


図-7 非線形域における耐震性能評価法適用性検討フロー

し、静的解析が適用しうるか否かの判定が必要となる。その条件とは、第 3 章で示したように、自由地盤の挙動を等価線形化法にて適切に評価しうる場合、かつ、近傍地盤の非線形履歴の影響が構造物の応答値に及ぼす影響が小さく、自由地盤の等価線形物性値にて評価しうる場合である。例えば非常に大きな地震動を想定する場合など、この条件を満足しない場合には、静的解析の適用は限定され、地盤非線形動的解析を用いる必要があることとなる。

これに対して、上記条件を満たす場合には、静的 FEM を用いた解析が適用できるが、その際においても、構造物の損傷が交番変形過程の中で進展する現象を安全側に評価する必要がある場合は、第 4 章で示したステップ解析を実施する必要がある。

上記地下構造物横断方向の非線形域における耐震性能評価法に関する検討フローを、図-7 に示す。但し、このような適用性に関する定量的な評価指標を確立していくためには、解析に用いるモデルの選択やパラメータの設定が結果に及ぼす影響を分析するとともに、種々の条件のもとでの解析事例を蓄積していく必要があり、今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 村井和彦・大塚久哲・矢葺亘：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、トンネル工学研究論文・報告集第 10 巻、pp.79-86、2000.11
- 2) (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
- 3) 村井和彦・大塚久哲・井手智明：地下構造物横断方向の損傷進展過程と耐震性能照査に関する考察、土木学会西部支部・九州橋梁構造工学研究会 土木構造・材料論文集第 16 号、pp.107-115、2000.12
- 4) 村井和彦・大塚久哲・井手智明：地下構造物横断方向の曲げ損傷進展過程と耐震性評価法に関する一考察、構造工学論文集 Vol.47A、pp.579-590、2001.3
- 5) 片山幾夫・足立正信・嶋田穠・都築富雄・瀬下雄一：地下埋設物構造物の実用的な準動的解析手法-「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、1985