

重要構造物基礎地盤の安定性評価における 解析条件の設定方法について

寺田賢二¹

¹ (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (〒104-0052 東京都中央区月島一丁目15-7)
E-mail: terada@rwmc.or.jp

重要構造物基礎地盤の地震時安定性についてFEMモデルが用いられることが多いが、その際の解析条件について、解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられる解析領域の広さ、解析メッシュの大きさについて、パラメータスタディーによる合理的設定方法を提案した。また、解析手法として非線形挙動を考慮した等価線形解析と非線形解析の適用性を明らかにした。また、地震時の検討に際しての地盤物性として、動的強度の適用可能性を明らかにした。

Key Words : *finite element method, mesh size, dynamic strength*

1. はじめに

重要構造物基礎地盤については、想定される地震に対しても安定性を保つことが確認されなければならない。昨今の直下型地震など大きな被害を出した地震が続いていることもあり、重要構造物の安定性評価に用いられる地震動も大きなものになってきている。したがって、安定性評価に用いられる方法、条件などについてもよりいっそうの合理的なものが求められつつある。一般にこの安定性評価にはFEM解析などの数値解析手法が用いられることが多いが、これまで安全側の仮定で行われていた評価も、大きな地震荷重に対しての評価に際しては、より合理的で実態に応じた方法、条件での検討が望まれる。ここでは、安定性評価に用いられる解析条件のうち、解析領域の広さ、解析メッシュの大きさ、解析手法、地盤の強度について検討を加えた。

2. 解析領域広さの決定方法

一般にFEMを用いて地盤の動的解析を行う場合には、まず解析対象とする領域をある大きさに限定してモデル化をする必要がある。二次元FEMを用いる場合には、解析領域として幅と深さを決める必要があるが、そのうちここでは幅の決定方法について検討を行った。

モデルの幅は、さらに広くとって解析した場合でも、注目している部分の応答結果がほとんど変わらない程度

に広くなければならない。すなわち、モデルの幅を広げることによって応答結果が変わってしまうようならその幅の広さでは不十分である。一方、あまり広すぎても計算費用が過大となるおそれがある。

重要構造物の基礎地盤の安定性評価の主な目的は、構造物の地震時荷重を受けた地盤が滑り破壊等に対して安定かどうかを検討するものである。したがって構造物の振動を適切に表現できること及び構造物の振動を伴う荷重の地盤への伝達を正確に評価でき、安定性評価が適切に行われることが求められる。

以上の観点から、解析モデルの側方境界位置は、

- ① その位置で構造物の影響が十分小さくかつ、
- ② 側方境界による応力の乱れが検討の主対象領域に影響しない

という条件を満たすようにに設定するのが妥当である。

以上の考え方でモデル領域の幅を検討するため、構造物だけに地震力を作用させた場合の地盤内応力の分布状態を、モデル領域の幅を変えたケースで計算し、各ケースでの構造物周辺における応力分布状態等を比較することによって妥当と思われる側方境界位置を決定した。

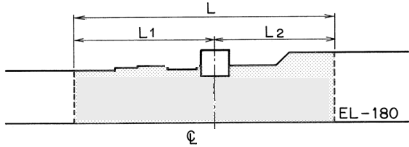
検討ケースは表— 1 に示すとおりで、解析に当たっては下方境界及び側方境界は固定とし、静的弾性解析を用いた。

地震時の地盤の安定性に影響する主な応力はせん断力であるという観点から、地盤に生ずるせん断応力の等応力線を求めそれを比較した。

図—1によると構造物直下のせん断応力度はいずれのケースでも大差はない。しかし、構造物下の深い領域ではCASE-3は他の2ケースに比べ異なっている。すなわち、CASE-1、CASE-2ではほとんどせん断応力の差がないの 비해、CASE-3では側方境界で変形が拘束されたせん断応力が構造物に非常に近い部分に集中する傾向が見られる。したがって、この場合ではCASE-2程度の解析領域の広さが必要であると判断される。

表—1 解析ケース

CASE	下方境界位置	側方境界位置
CASE-1 (大領域)	EL=-180m	L1=600m L2=500m (L=1100m)
CASE-2 (中領域)		L1=500m L2=350m (L=850m)
CASE-3 (小領域)		L1=283.5m L2=217.5m (L=500m)



3. 解析メッシュの大きさの決定方法

(1) 要素の大きさの決定方法

地盤の地震時安定性検討を、動的FEM解析で行う場合の有限要素の大きさについて検討した。

地盤を有限要素に分割する場合、要素の鉛直方向の大きさ h は当該部分のせん断弾性波速度 (V_s)、地震動成分の最大考慮周波数 (f_{max}) に応じて以下の式で算定さ

れる。

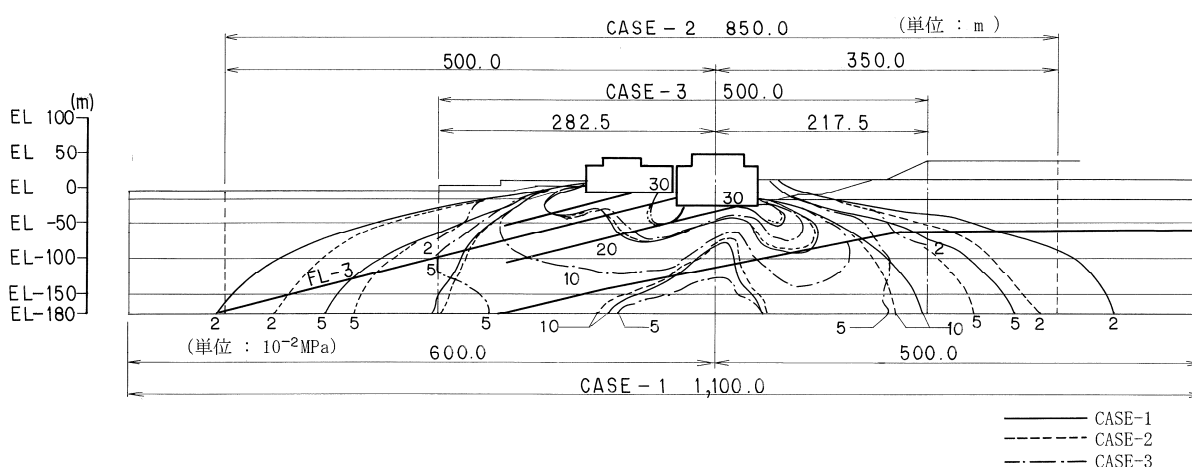
$$h \leq (1/m)(V_s/f_{max}) \quad (1)$$

なお、 m は伝搬する波の周波数成分がフィルターされないようにするための波長の分割数である。式(1)を用いて要素の鉛直方向の大きさ h を決定するには、 f_{max} と m の値が必要となる。

f_{max} については、地震動に含まれる振動数成分のうち、解析対象構造物の安定性を検討する上で必要と考えられる最高振動数を何処に設定するかで決定される。

構造物のない地盤のみの検討であれば、数Hz程度まで考慮すれば十分である。しかし、構造物がある場合、構造物との相互作用を考慮する必要があるため、構造物の固有周期を包絡しなければならない。

m については、モデルの中を上下方向に伝搬するせん断波に注目し、想定した周波数を持つ波動を正しく表現できるように波長の上下方向の分割数を決定する。この m の値は、Lysmerら¹⁾により一般的には4~12であると言われているが、このうちどの値を採用するかは f_{max} との兼ね合いもあり、加速度、速度、変位、応力など応答値の何に注目するかによって変わってくるものと思われる。すなわち、要素の鉛直方向の大きさは、対象とする構造物、着目する応答値の種類、地盤の特性及び地震波の周波数特性等 f_{max} と m を決め h を求めることとなるが、 f_{max} と m についていくつかのケーススタディーを行い応答値の比較検討により決定するのが望ましい。また、水平方向の大きさは、本来水平方向の縦波速度に着目して決定されるものであるが、通常は鉛直方向の数倍程度とられる。



図—1 せん断応力の等応力線

(2) 検討例

メッシュの鉛直方向の大きさについて検討した例を以下に示す。この検討では、地盤の質点分割数をパラメータとして、応答特性、応答結果を比較した。CASE-1, CASE-2, CASE-3は、地盤を深さ方向にそれぞれ64, 32, 16の自由度の質点に分割して計算したものである。

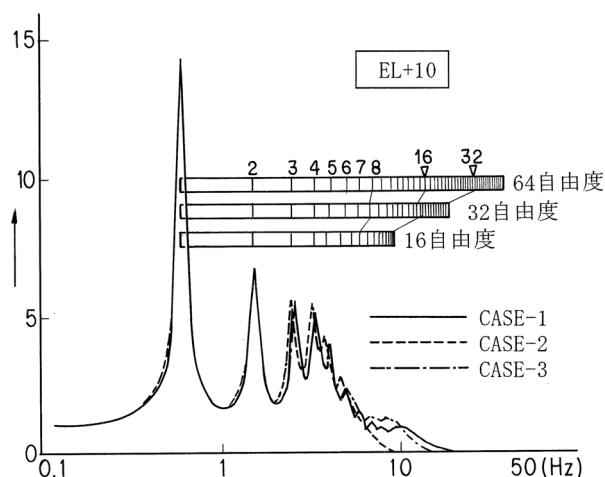
図—2に地表部の加速度伝達関数を示す。図—2によれば、CASE-3では、10Hz以上の成分がほとんど表現されていないのに対し、CASE-1, CASE-2においては、両者の伝達関数に大差なく、ほぼ10Hz程度まで表現できるモデルとなっている。

次に、2種類の地震波を入力した場合の上記3つのモデルの応答結果を図—3に示す。ここで地震波Ⅰはエルセントロ波であり、地震波Ⅱはこれの時間を2倍に延ばしたものである。従って地震波ⅡはⅠに比べて、卓越周期が長周期側に移動したものとされている。

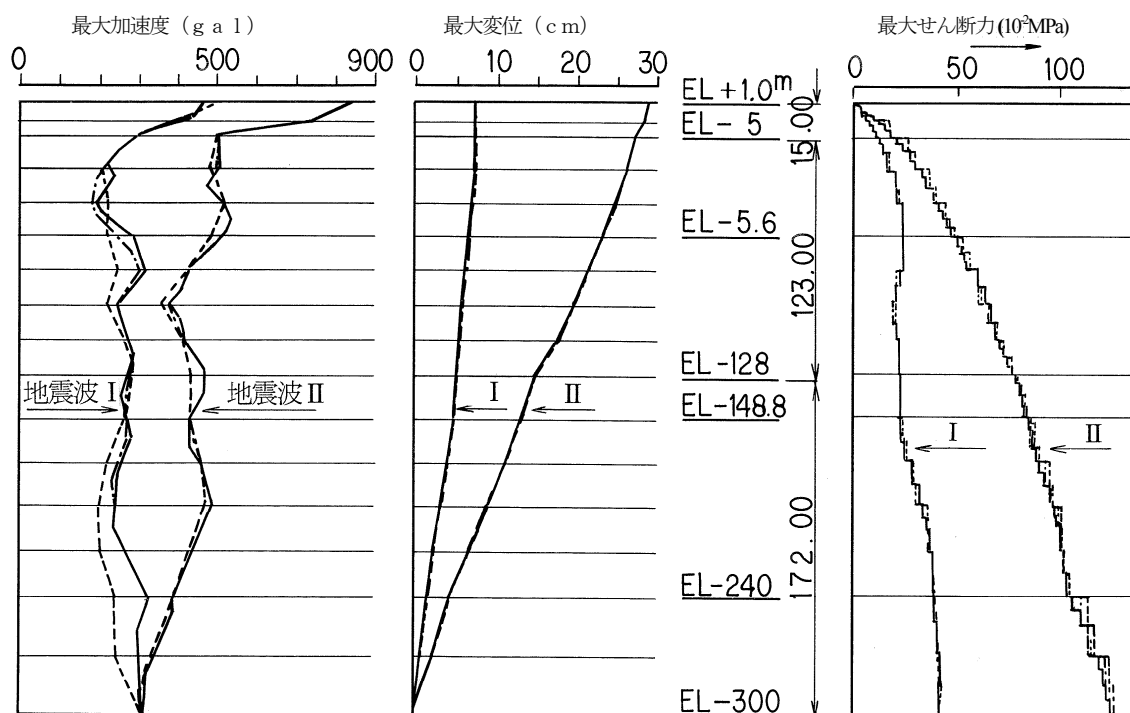
図の結果から以下のことがわかる、

- ① 変位、せん断応力については、質点の分割数がかわってもほぼ同じ最大値最大値分布となる。
- ② 加速度については、CASE-1, CASE-2の両者に大差はないが、CASE-3はこれらと相違が見られる、とくに地震波Ⅱに比べて、短周期である地震波Ⅰの場合に差が見られる。

以上のことより、加速度については高周波成分の応答果に及ぼす影響が強く、変位、せん断応力についてはこの影響が比較的小さいことが示される。従って、応答加速度を評価もしくは設計の対象にする場合は同じ目標周波数に対しても m の値を大きく(5~6以上)、変位、せん断応力を評価もしくは設計の対象とする場合は、 m はもう少し小さい値(4程度)でも良いと考えられる。



図—2 加速度伝達係数の比較



入力最大加速度 300 gal

図—3 最大応答値分布の比較

4. 等価線形化解析と非線形解析の比較

(1) 解析の概要

地盤の剛性と減衰はひずみに大きく依存するため地盤の応力～ひずみの関係の非線形性を考慮する必要がある。地盤の非線形性を考慮した解析方法としては、以下の二つがある。

- ① 地盤の応力～ひずみ関係をできるだけ忠実に再現しようとする非線形解析
- ② 地盤の応力～ひずみ関係を等価なせん断剛性および等価な減衰定数を持つ線形モデルに置換する等価線形化解析

これらの二つの方法での解析結果にどの程度違いがあるかを検討した。

(2) 比較検討結果

検討ケースは以下の通りとした。

- ① CASE-1 SHAKEによる等価線形解析
- ② CASE-2 CASE-1で得られた G_{eq} 、 h_{eq} を使用した線形解析(プログラムNUPP)
- ③ CASE-3 Harden-Dmievichモデルを用いて非線形表示をトリリニアモデルに近似した非線形解析(プログラムNUPP)

なお、入力地震動は八戸波を基盤に150 galとして入力した。

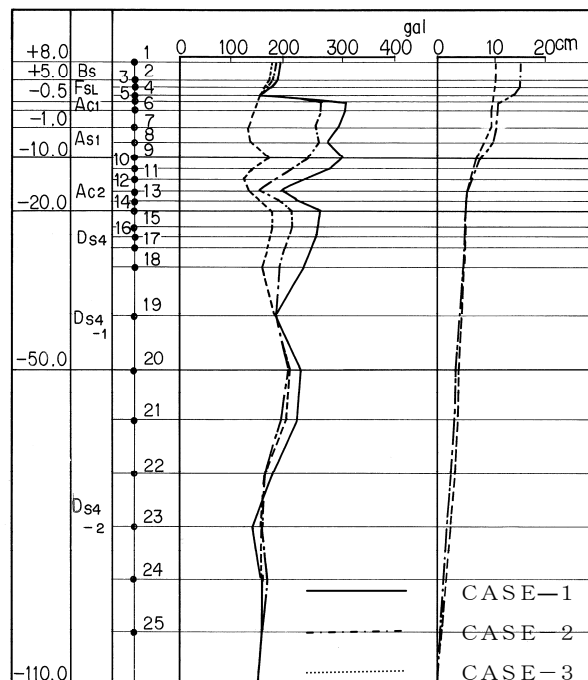
検討結果を図—4に示す。最大応答加速度と最大応答変位は、上部の軟弱層において等価線形化解析の方が著しく大きくなる結果となっている。この傾向は、地震波の種類及び入力加速度レベルに関係なく示されていることから、全般的に、等価線形化解析の応答値は非線形解析の応答値を上回ると言える。

このような傾向について、岩崎²⁾らは、以下のように述べている。「表層地盤の基本固有周期より短い周期に、はっきりしたスペクトルレベルのピークを持つ地震動が等価線形化モデル系に作用した場合、入力地震動の卓越周期に対応して、これに近い固有周期を持つ表層地盤のいずれかの振動モードが選択的に共振に近い状態となり、結果として、その近傍の周期における応答レベルが大きくなるのに対して非線形モデルではこのような状況になっても応答レベルの増減につれて系の固有周期が時間的に変化するため、等価線形化モデルのように選択的共振に陥りにくいためと考えられる。」

今回の解析に於いても上記の考え方で説明できると思われるが、等価線形化解析と非線形解析結果が異なることの要因は以下のようなものがあげられ、さらに分析を進める必要がある。

- ① 地震波の周期特性
- ② 地震波の入力加速度レベル

- ③ 地盤のモデルの分割
- ④ 地盤モデルの剛性の変化の程度
- ⑤ 非線形解析のトリリニアの折れ曲がり点の設定
- ⑥ 非線形解析の線形部分の減衰定数の設定など



図—4 等価線形解析と非線形解析結果の比較

5. 動的強度

地盤の動的な安定性を検討する際、FEM解析には動的な変形特性が使われることが多い。変形係数としては、超音波測定や弾性波速度測定から得られた動的なせん断弾性係数 G_0 を、振動三軸圧縮試験又は動的せん断試験によって得られたせん断弾性係数 G のひずみレベル依存性を用いて補正した値が使われる。

地盤の動的な変形特性については、これまで各種の研究が行われてきており、これらを踏まえた解析用物性値の設定がなされてきている。

一方、最終的な安定性を評価する際に用いられる強度については、動的強度がこれまで実用的な形で整理されてきていないことや静的強度の方が動的強度より小さいということもあり、安全側(保守的)の評価として静的強度が用いられている。しかし、重要構造物の安全性評価では、地震の発生状況を踏まえて、想定する地震力が大きくなってきていることから、現実的な実力評価が重要となっており、動的強度の重要性が高まってきている。

地盤の強度は、载荷速度依存性を示し、载荷速度が速

いと通常の載荷速度の三軸圧縮試験による強度よりも大きな強度となる、一方、地震時には荷重が繰り返し載荷され、累積したダメージを受け強度が低下することも考えられる。

西他³⁾は、3種類の地震波について動的強度試験を行い通常の載荷速度の三軸圧縮試験による静的強度との比較を行っている。図—5、6、7に試験結果を示す。ここで、図の縦軸は動的載荷時の最大時軸差応力と静的強度の比、横軸は同じくひずみの比である。これらの結果によれば、地震波によらず動的な載荷による条件では、通常の載荷速度による静的強度よりも大きな荷重まで破壊しておらず、動的強度は静的強度の10～20%大きい結果となっている。

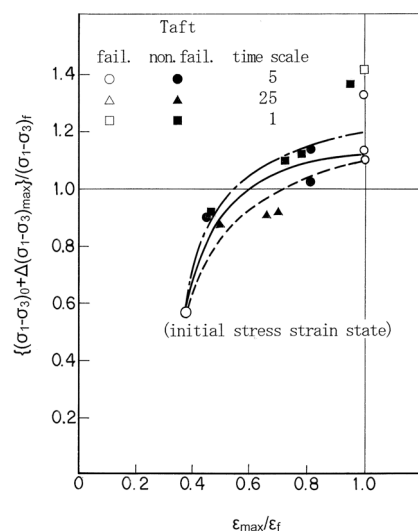
6. まとめ

重要構造物の地震時安定性評価は、従来、地盤の安全性に余裕が十分あったため、安全側（保守側）の仮定や条件で検討が行われていた。しかし、最近では地震発生状況を踏まえて、ますます大きな地震力に対する評価が求められるようになってきており、より合理的、現実的な条件での検討が必要となってきた。ここでは重要構造物の安定性評価を行う上で必要となるいくつかの条件についてケーススタディー結果等をもとに考察を加えた。

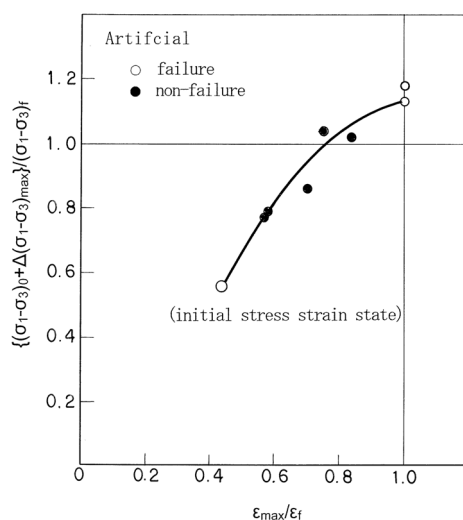
動的FEM解析により、重要構造物の基礎地盤の安定性を評価する場合、解析条件が適切に設定されることが重要である。ここでは、解析領域の広さ、メッシュの大きさ、地盤の非線形性の影響について、ケーススタディー結果を基に検討し、考え方を提示した。

- 1) 解析領域は、狭いと側方境界の影響が構造物の安定性評価に影響を及ぼすため、その影響がない範囲を把握して設定する必要があること
- 2) 解析メッシュの縦方向の大きさは、応答加速度に着目する場合は、比較的小さく（ m が5以上）する必要がある、一方、変位やせん断応力に着目する場合は比較的大きく（ m が4程度）でもよい
- 3) 非線形性を考慮した等価線形化解析の応答値は非線形解析の応答値を上回る

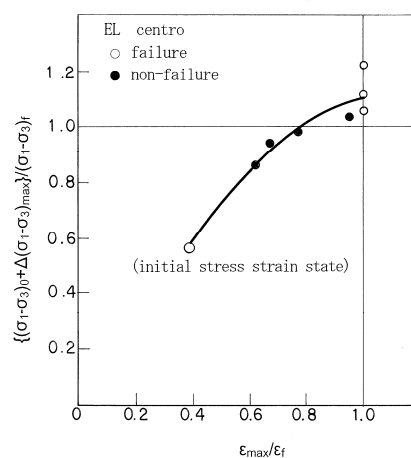
また、安定性評価に用いられる物性のうち、最も安全性評価結果に影響が大きい強度について、既往の試験結果を基に考察を加え、今後の動的強度の採用についての方向性を提示した。



図—5 動的強度（タフト波）³⁾



図—6 動的強度（人工地震波形）³⁾



図—7 動的強度（エルセントロ波）³⁾

参考文献

- 1) Lysmer , Udaka , Tsai , Seed : Flush-A Computer Program For Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC, 75-30, 1975.
- 2) 岩崎, 龍岡, 川島, 森本 : 土の非線形性が地盤の地震応答に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木研究所資料, ISSN0386-5878, 1980.
- 3) 西 好一, 江刺靖行 : 泥岩の力学特性に関する研究 (その4) 振動荷重下における強度—変形特性, 電力中央研究所報告, 研究報告 : 382014, 1982.

PARAMETRIC STUDY ON THE CONDITIONS OF NUMERICAL ANALYSIS FOR STABILITY EVALUATION OF FOUNDATION GROUND

Kenji TERADA

Numerical analysis is useful to evaluate the stability of the foundation ground of important and large structure. When the numerical analysis is used for evaluation of stability of foundation ground, it is important to set the conditions property such as analysis area, mesh size, analysis metho. In this study, several parametric studies were carried out, and desirable conditions are presented by the results of the parametric studies.