

(158) 重要構造物の地震応答および滑動安全性に及ぼす根入れ効果の3次元解析

山口大学大学院 ○福嶋研一
山口大学工学部 三浦房紀

1. はじめに

従来、原子炉施設を始めとする重要にして巨大な構造物の設計は岩盤支持をその基本方針としている。しかし、耐震性向上に関する技術の蓄積と地震学・地質学等の新たな知見により、第四紀層地盤上の立地についても安全性を十分確保することが可能であると考えられつつある。ただ、建屋が地盤内に埋設されている場合の根入れ効果については、3次元動的解析法を用いるなどの厳密な検討が行われているとはいえない。

そこで、本研究ではFEMを用いて構造物-地盤系の3次元解析を行い、構造物の根入れが構造物とその周辺地盤の応答および構造物の滑りに対する安全性に及ぼす効果を調べたものである。あわせて2次元解析も行い、その有効性と限界についても考察を加えた。

2. 解析方法

構造物-地盤相互作用系の運動方程式は次式で与えられる¹⁾。

$$\begin{aligned} (M)\{\ddot{u}\} + \{(C) + \sum_i (C)_i\}\{\dot{u}\} + (K)\{u\} \\ = (M)\{\ddot{z}\} + \{f\} + \sum_i (G)_i\{u^f\}_i + \sum_i \{(G_c)_i + (C)_i\}\{\dot{u}^f\}_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 (M) 、 (C) 、 (K) はそれぞれ系全体の質量、減衰、剛性マトリクスであり、 $\{u\}$ は時刻 $n\Delta t$ における節点変位ベクトルである。 n はステップ数、 Δt は時間間隔であり、 \cdot は時間微分を表している。また $(C)_i$ ($i=FR, BA, L, R$) は人為的に設けられた仮想境界での逸散波動エネルギーを吸収するための粘性境界マトリクス、 $(G)_i$ は側方境界剛性マトリクス、および $(G_c)_i$ は側方境界減衰マトリクスである。さらに $\{u^f\}_i$ 、 $\{\dot{u}^f\}_i$ は自由地盤の変位ベクトルと速度ベクトルであり、自由地盤の運動方程式を解くことによって求まる。

構造物と地盤との接触面には不連続性を表現し、この面における応力を評価するためにジョイント要素を導入する²⁾。この要素の働きによって構造物と地盤との相互作用は非線形的な挙動を呈すので、先の運動方程式は時間領域で解かなければならない。ここでは Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) を用いて数値積分し、荷重伝達法を用いて非線形の取り扱いをしている。

3. 解析モデル

構造物とその周辺地盤を有限要素に離散化した解析モデルを Fig-1. に示す。構造物の大きさを幅 4.5 m、高さ 4.0 m とし、地盤の解析領域は幅 16.5 m、深さ 5.0 m と設定した。また、有限要素の大きさは入力する地震波の波長を考慮にいれて、構造物および地盤ともに幅 1.5 m、高さ 1.0 m としている。

本研究では根入れ深さを 0 m、1.0 m および 2.0 m の3つのケースについて解析を行う。これらのモデルは Fig-1. の Model-1, Model-2, Model-3 に対応する。Model-1 は全く根入れを行わない場合を、また Model-3 は構造物の半分を地下に埋設した場合を想定したモデルである。

構造物を支持する地盤は第四紀層を想定しているので、地下水および地盤の非線形的挙動を考慮する必要があると思われる。しかし、今回の解析では2次元解析と3次元解析の違いを明らかにすることに重点をおいているので、これらの複雑な挙動については別の機会にゆずる。解析に用いた材料定数を Table-1 に示す。なお、ここでは構造物の単位体積重量はその接地圧が 4.5 tf/m^2 となるように 1.2 tf/m^3 とした。

以上に述べた解析モデルについて動的解析を行うのであるが、今回使用した入力地震波形としてはエル・セントロ波(NS成分)、八戸波(NS成分)ならびに開北波(NS成分)の3種の観測地震波形を用いた。これ

らの地震波形は地表面での観測波形なので、1次元波動理論より基盤における波形に変換し、これを入力地震波形とした。ただしこれらの波は構造物の存在しない自由地盤に入力した際に、地表面の最大応答加速度が300 galになるように振幅を調整したものを、X方向のみに加振を行う。

入力波形の卓越振動数はエル・セントロ波: 1.3 Hz, 八戸波: 0.5 Hz, 開北波: 3.6 Hzである。これらの値とFig-1. に示した解析モデルの固有振動数を比較すると、エル・セントロ波の卓越振動数は解析モデルの固有振動数とほぼ等しく、八戸波, 開北波ではそれぞれ長周期, 短周期な波であることがわかる。

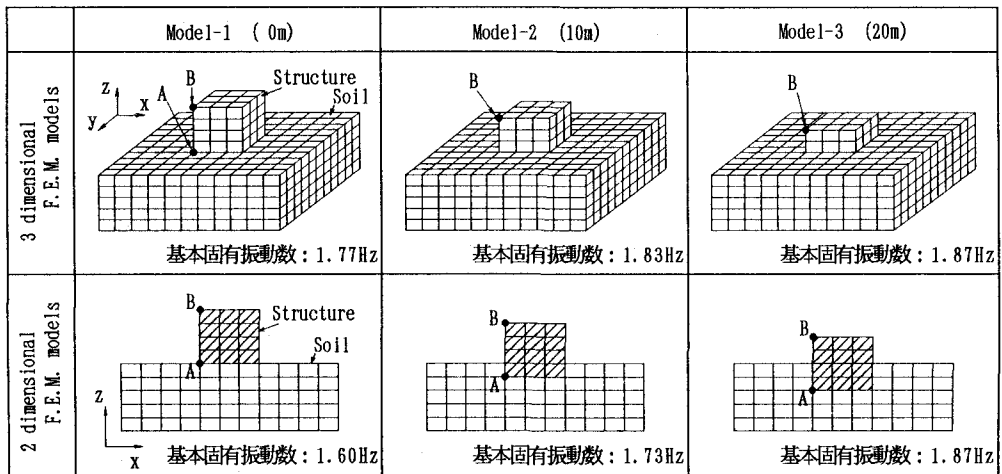


Fig-1. Models for analyses.

Table-1. Physical properties of the models.

		Structure	Soil			
Solid element	Unit Weight	1.2 tf/m ³	1.9 tf/m ³	Joint element	k_x, k_y	500,000 tf/m ³
	S wave velocity	2000 m/s	400 m/s		k_z	630,000 tf/m ³
	Poisson's ratio	0.17	0.40		C	10 tf/m ²
	Damping factor	5 %	5 %		ϕ	30°

4. 根入れ効果の評価

4.1 構造物の応答

Fig-1. に示した構造物のPointA, Bにおける最大応答加速度値の根入れ深さによる変化をFig-2. に示す。根入れが深くなるほど構造物の応答が減少する様子が明かであり、またその割合は構造物上部で大きいこともわかる。

2次元解析と3次元解析の結果を比較すると、根入れのないモデルでは大きな差が生じているが、根入れを行った場合にはほぼ等しい結果になる。また、PointAでは2次元解析、PointBでは3次元解析の応答が大きく現れる傾向がある。

4.2 周辺地盤の応答

地震時における構造物の存在しない自由地盤では、その運動は解析領域内で平面的に一樣になる。しかし、地盤-構造物相互作用系では構造物の運動によって生じる慣性力が地盤に作用することにより、構造物を中心として周辺地盤の応答が乱される。これについて、入力地震波としてエル・セントロ波, 八戸波を用いた

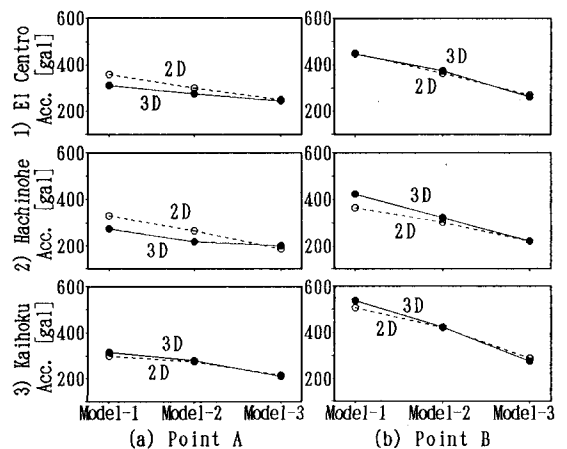


Fig-2. Responses of structure.

場合の計算結果をFig-3. に示す。(a)は3次元、(b)は2次元解析による周辺地盤の地表面における最大応答加速度値の分布を示したものである。中心の空白域が構造物の位置する所であり、その周辺で構造物の影響が強く現れている。逆に構造物から離れるに従ってその影響が減少している様子が明らかである。また根入れを深くすることによって、構造物が周辺地盤に影響を及ぼす範囲が狭くなっている様子もわかる。

3次元解析における構造物の中心を通るX方向の最大応答加速度の分布と、2次元解析のそれを比較すると、根入れのないモデルでは両者の間に差がみられる。すなわち後者は前者と比べると、自由地盤の応答値300 galに対して大きな変動が見られる。また、根入れを行ったモデルではあまり差が生じていない。

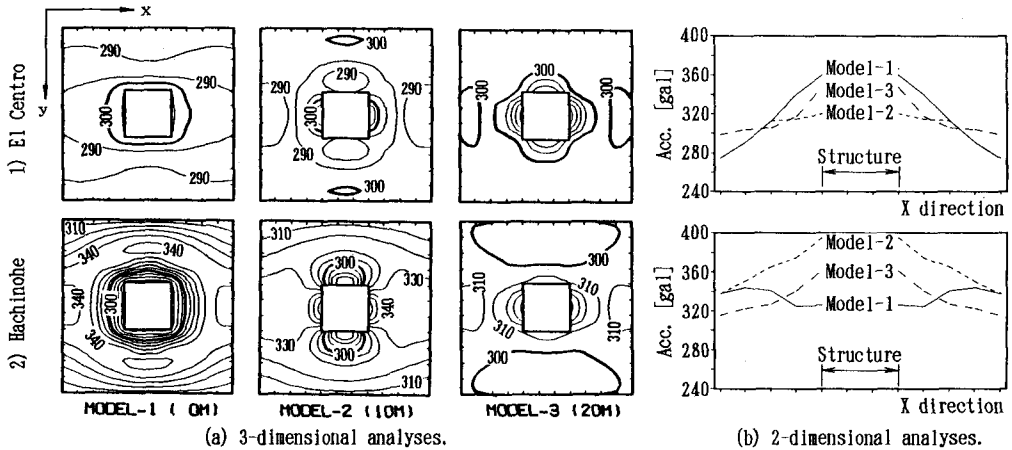


Fig-3. Response of the surface of the earth.

4.3 構造物の安全率

構造物の滑動現象に対する安全率を評価するために、次式で与えられるT. S. F. (全体安全率: Total Safety Factor) とL. S. F. (局所安全率: Local Safety Factor) を用いる³⁾。

$$T. S. F. = \left| \frac{\sum \tau_{yi} A_i}{\sum \tau_i A_i} \right|_{\min}, \quad L. S. F. = \left| \frac{\tau_{yi}}{\tau_i} \right|_{\min}. \quad (2)$$

ここに A_i はジョイント要素を構成する節点の分担する面積、 τ_i はその節点に生じるせん断応力、 τ_{yi} はせん断降伏応力である。 τ_{yi} はジョイント要素の定数 C 、 ϕ と節点に作用する垂直応力の関数 (モルクーロンの破壊基準を仮定) であり、 τ_i とともに時間の関数である。すなわちL. S. F. は節点ごとに求められる安全率の最小値を意味し、T. S. F. は構造物と地盤との接触面を総合して考えた場合の安全率である。

これらの値に対する根入れの影響を調べた結果がFig-4. である。(a)はT. S. F.、(b)はL. S. F. についてそれぞれ3次元および2次元の結果を比較したものである。これによると、構造物を支持層に根入れすることによりその安全率が高くなるのがわかる。とくにL. S. F. に関しては根入れの深さが0 mと10 mの場合には滑動が生じてい

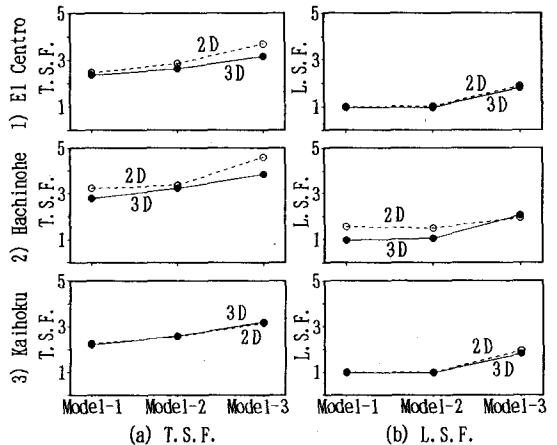


Fig-4. Comparison between 3D with 2D.

るのに対し、根入れの深さを20mにすることによってそれを抑止することが可能であることがわかる。また T. S. F. の値について3次元解析と2次元解析を比較してみると、3次元解析による安全率が低く危険側に現れているが、以下これについて考察をする。

Fig-5. は、Model-2. にエルセントロ波を入力した際に T. S. F. が最小となった時刻における構造物底面の応力状態を示したものである。(a)は加振方向のせん断力、(b)は接地圧の分布を示したものである。3次元解析の図中に示した中心線に沿う応力結果と2次元解析の結果を比較すると、最も異なるのは接地圧であり、2次元解析の方が大きく現れている。この原因は解析領域に対する構造物の重量の差に起因するものと思われる。2次元解析では平面ひずみとして取り扱われるので、質量が実際のものより過大評価されている。その結果として、鉛直力が大きく現れるためにせん断抵抗力が増し、安全率が高くなるものと考えられる。

Fig-6. は構造物に生じた相対変位を基にして算出した構造物の最大傾斜角を示したものである。この値は構造物のロッキングの程度を示すものと考えられる。

3次元解析、2次元解析ともに根入れを行うことにより傾斜角が急激に減少している様子が明らかであるが、多くの場合に2次元解析の方が大きな傾斜を生じていることがわかる。Model-1. の結果に現れている両者の差は2次元解析の場合に構造物の質量が過大評価されているからと考えられる。Model-2. では質量の差に加え、根入れに伴う構造物側面と地盤との摩擦抵抗の有無により、両モデルの結果に最も大きな差が現れたものと思われる。すなわち3次元モデルでは加振方向に平行な構造物側面と地盤との間の摩擦抵抗を表現できるため、この作用により構造物のロッキングが抑えられたものと考えられる。一方の2次元モデルではこの抵抗力が現せないために大きな傾斜を生じたと考えられる。さらに根入れを深くしたModel-3. では加振方向に直角な面での抵抗力によってロッキングを抑制する働きを十分有するので、両者の結果にあまり差が生じなかったものと考えられる。

5. まとめ

3次元構造物-地盤相互作用系の動的解析を行い、構造物の根入れ効果の評価を試みた。これにより3次元解析を行うことの有効性を明らかにし、その効果を知ることができた。逆に3次元解析を行うことなく2次元解析で代替させることのできる現象や応答についてもその可能性を見いだせたものと思う。今後は地盤の材料非線形性の影響、3成分同時入力時の挙動等の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 三浦房紀・沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，No. 404, 1-11, 1989.
- 2) 三浦房紀・岡重嘉泰・沖中宏志：3次元ジョイント要素を用いた破壊伝播の解析，山口大学工学部研究報告，第36巻，第1号，1985.
- 3) Toki, K., Miura, F. and Oguni, Y.: Dynamic slope stability analyses with a nonlinear finite element method, Earthquake Engng. and Struct. Dyn., Vol. 13, pp151~171, 1985.

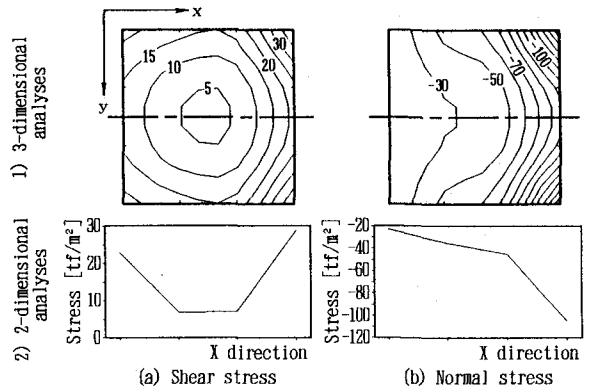


Fig-5. Stress state.

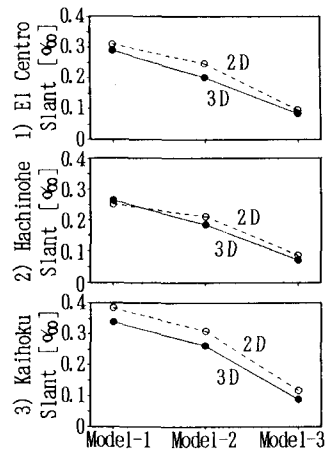


Fig-6. Slant of the structure.