

3次元FEMを用いた地盤 - 建屋の基礎浮き上がり評価に関する研究

栗本 修 秋元 理仁
(本社原子力本部技術部)

今塚 善勝
(本社原子力本部技術部)

A Study on Evaluation of Seismic Response considering Basemat Uplift for Soil-building System using 3D-FEM

Osamu Kurimoto Masahito Akimoto
Yoshikatsu Imazuka

Abstract

Basemat uplift of a structure is an important problem in seismic design for nuclear facilities. It has been evaluated from the dynamic response of a structure using a Sway-Rocking (SR) model. However, it is pointed out that the accuracy of this model decreases as the uplift becomes large. This paper describes the seismic response of a soil-structure system using a three-dimensional finite element method, which will be useful to evaluate nonlinear phenomena.

概 要

原子力施設の耐震設計上、重要な課題である基礎浮き上がり評価法について、現行設計手法ではスウェイ・ロッキング(SR)モデルの回転インピーダンスに幾何学的非線形性を考慮した手法で評価されてきたが、埋め込み基礎や不整形地盤への適用は制限される。本研究ではSRモデルの適用範囲を越える場合にも適用でき、かつ精度よく基礎浮き上りを評価できることを目的として、3次元FEMにより地盤、基礎、建屋をモデル化し、解析モデルや定数設定の妥当性検証の手順を踏みながら、地盤 - 建屋連成系の地震時の浮き上がり非線形応答について検討した。

1. はじめに

原子力施設の耐震設計において重要な検討課題である基礎浮き上がりについて、現行設計手法ではSRモデルの回転インピーダンスに幾何学的非線形性を考慮した手法¹⁾で評価されてきたが、埋め込み基礎や不整形地盤への適用は制限される。一方、近年の著しい計算機性能の向上により3次元FEMによる大規模モデルを用いた地震応答解析の実務への適用も可能になってきている。しかしながら、FEMによるモデル化の際には半無限媒体である地盤を有限領域で切り取ること、時刻歴非線形解析を行うにはモデル境界には粘性境界などの単純境界を用いざるを得ないことなどから、地盤モデルの妥当性の検討が必要である。また、浮き上りを表現するためにFEMではJOINT要素を用いるが解析の安定性・精度を確保できるよう留意する必要がある。本研究では3次元FEM地盤モデルを用い、まず解析モデルや定数設定の妥当性の検

証を行い、SRモデルの適用範囲を越える場合にも適用でき、かつ精度よく解析できることを確認し、基礎浮き上りを生じる建屋の地震時の非線形応答について検討する。

2. 地盤インピーダンス、基礎入力動

地盤 建屋の連成弾性問題における基本物理量である地盤インピーダンスと基礎入力動は種々の方法により求めることができる。ここでは精算解を与えると考えられる弾性波動論に基づく手法との比較を行うことにより3次元FEMによる地盤モデルの妥当性を確認する。

2.1 検討方法

Fig. 1に示すように、まず解放基礎表面位置で入力地震動(原波)を定義し、一次元重複反射理論に基づき3次元FEM地盤モデル下端位置での地震動を求める。これを3

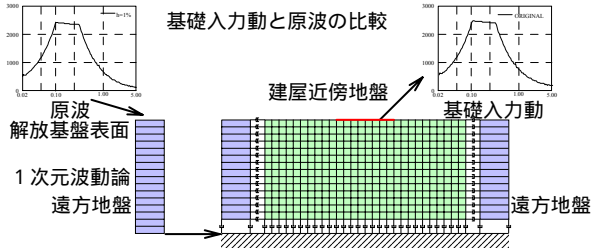


Fig. 1 基礎入力動に関する検討方法
Evaluation Procedure of Foundation Input Motion

次元FEM地盤モデルに入力し地盤モデル表層の応答(基礎入力動)を求める。本研究の検討対象である地盤上に直接設置する埋込みのない基礎の基礎入力動は地表面応答に一致するので地表面応答を原波と比較することでモデルの妥当性を確認できる。次に, Fig. 2の左図に示すように3次元FEM地盤モデルに対し地盤地表面に加振力を与える上部加振解析を行い地盤インピーダンスを求める。この結果を弾性波動論に基づく手法である振動アドミタンス理論(VA)²⁾と比較する。さらにFEMにおいて基礎浮き上がりを表現するために用いるジョイント要素の初期剛性の設定について検討する。ジョイント要素の初期剛性は, 理論上は無限大であるが数値解析上は計算可能な大きな値を与えることになり, どの程度の値とするかは目安が明確ではない。そこでFig. 2の右図のようにジョイント要素を介して地盤に定常加振力を加えることでインピーダンス解析を行い, ジョイント要素の初期剛性の与え方に対する基準を検討する。

2.2 解析モデル

3次元FEMの解析モデルはFig. 3に示すように1/2対称条件を用い, 地盤をブリック要素により, 建屋支持地盤と自由地盤を接続する側面及び底面は粘性境界としてダッシュポットによりモデル化する。なお, 加振問題であるインピーダンス解析では, 内部領域からの波動逸散のみを吸収できれば良いため, 粘性境界の外側は固定端として自由地盤の自由度は考慮していない。地盤は $V_s=1800\text{m/s}$, $V_p=3700\text{m/s}$ の硬質岩盤とし, 内部減衰は0とした。

2.3 基礎入力動

入力地震動としてFig. 4に示す検討用地震動を用いた。建屋基礎中心ライン上の地表面各点における加速度応答時刻歴を求め, 減衰1%の加速度応答スペクトルで原波と比較した。代表的な地点(F1~F8)の応答をFig. 5に示す。検討対象が一様地盤上の埋め込みのない基礎であることから, 基礎入力動は地表面応答に一致し, いずれの地点においても同一の応答となるはずである。F1~F8の地点における応答は原波の応答スペクトルと同等であり, 基礎入力動として適切に表現されており, 本検討で設定した解析モデルが妥当であることが分かる。

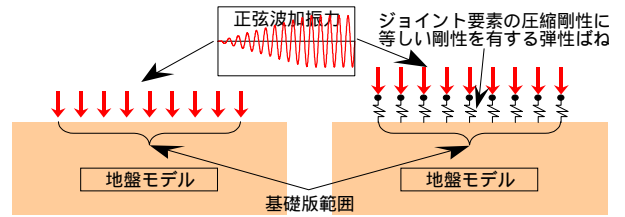


Fig. 2 地盤インピーダンス, ジョイント要素初期剛性の与え方に関する検討方法
Evaluation Procedure of Impedance Function and Initial Stiffness of Joint Elements

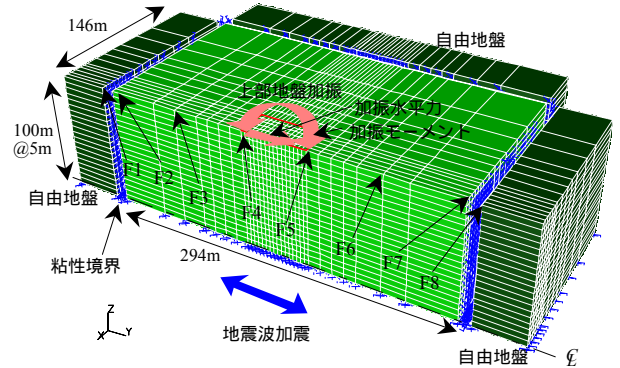


Fig. 3 3次元FEMモデル(地盤系)
3D-FE Model of Soil System

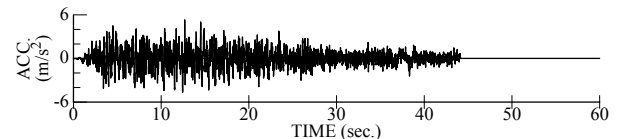


Fig. 4 検討用地震動
Input Earthquake Motion

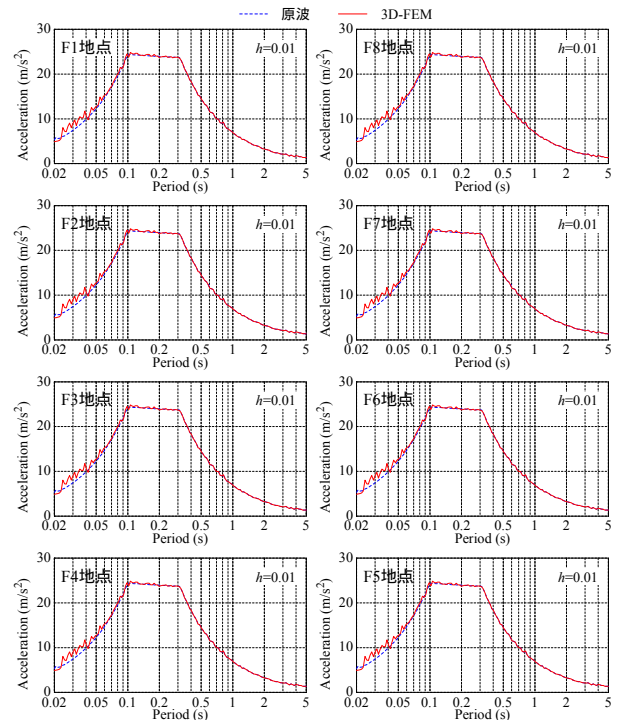


Fig. 5 代表的な地点における基礎入力動(地表面応答)
Responses of Ground Surface

2.4 地盤インピーダンスの検討

水平インピーダンスを求める場合には基礎位置に相当する部分に水平方向に一樣分布の正弦波加振力を与え、基礎部分の応答水平変位について平均をとる。Fig. 6に示すように加振力 Q と平均変位 U および平均変位の加振力からの位相差を ϕ とすると、複素水平地盤インピーダンスは $K_H = Qe^{i\phi}/U$ で表わされる。同様にして、鉛直方向に逆対称三角形分布となる正弦波加振力を与え、基礎部分の応答鉛直変位について加振力の重み付き平均をとり、平均回転角を求めることで回転インピーダンスが求められる。加振振動数を変えて時刻歴応答解析を繰返すことで振動数ごとの複素地盤インピーダンスを得る。

3次元FEMより求めた複素地盤インピーダンスをVAと比較してFig. 7に示す。VAは基礎の変位を一樣とした場合と、基礎下の応力を一樣とした場合の2通りの仮定条件で求めた。水平インピーダンスはVAとほぼ同等の結果を示し、実部・虚部の値、振動数依存性もよく対応している。一方、回転インピーダンスは振動数依存性がやや強く現われる傾向となっているが概ねVAに対応している。

2.5 ジョイント要素の初期剛性の検討

Fig. 8にジョイント要素の初期剛性の違いによる水平および回転インピーダンスの検討結果を示す。VA理論による静的地盤インピーダンスの5倍をジョイント要素の初期剛性として与えたケースでは、水平インピーダンスの虚部および回転インピーダンスの実部と虚部で地盤を直接加振して求めた結果をかなり下回る。これに対し地盤インピーダンスの50倍および100倍をジョイント要素の初期剛性として与えたケースでは地盤を直接加振して求めた場合とほぼ一致したインピーダンスを得ることができる。したがって、本検討の対象地盤・基礎に対してはジョイント要素の初期剛性として、地盤インピーダンスの50倍程度以上の剛性が目安になると考えられる。

3. 浮き上がり非線形特性

文献3)において弾性理論解に基づくMindlin解やGreen関数法に基づく手法により地盤の3次元性を考慮した剛基礎の浮き上がり特性をSRモデルに適用できるように整理され、現行設計手法に取り入れられている。本章では浮き上がり非線形特性について、地盤 - 基礎系の3次元FEMモデルを用いて、静的および動的転倒モーメント(M) - 回転角(θ)、転倒モーメント(M) - 接地率(η)関係を求め、現行設計手法との対応関係を調べる。また、静的・動的 M - θ 、 M - η 関係を定量的に把握する。

3.1 検討方法

Fig. 9は地盤インピーダンスの検討に用いたFig. 3のモデルに無質量剛基礎のブリック要素と基礎 - 地盤間のジョイント要素を付加したモデルである。転倒モーメントを剛基礎に与え、その応答回転角を求める。Fig. 10に示

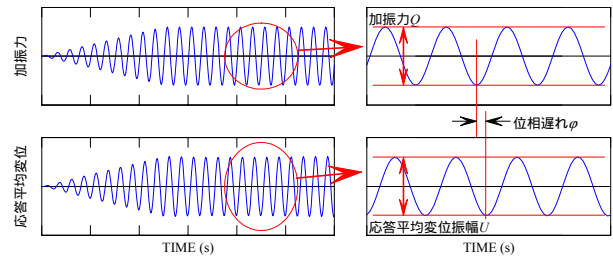


Fig. 6 地盤インピーダンスの算定方法
Evaluation Procedure of Impedance Function

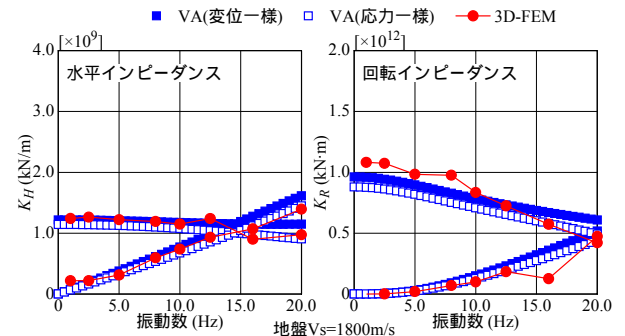


Fig. 7 地盤インピーダンス
Comparison of Impedance Functions
obtained from 3D-FEM and VA

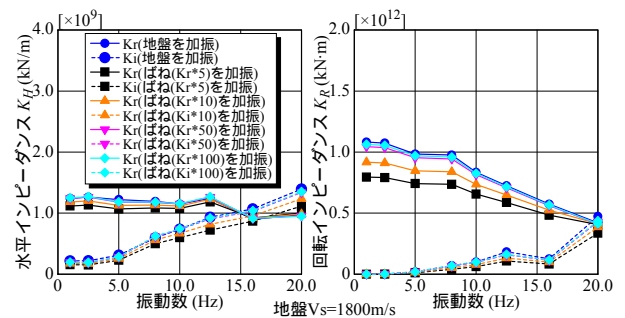


Fig. 8 ジョイント要素の初期剛性の与え方による地盤インピーダンスの比較
Influence to Impedance Functions due to Initial Stiffness of Joint Elements

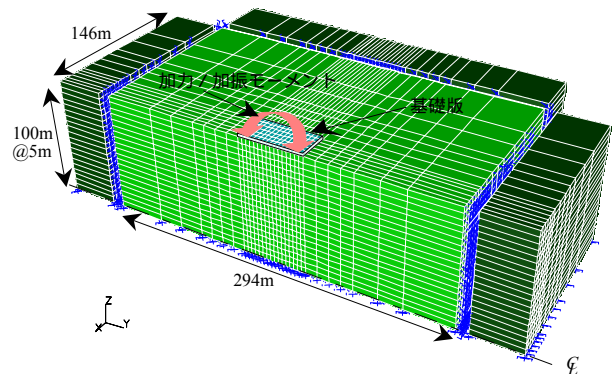


Fig. 9 3次元FEMモデル(地盤 - 基礎系)
3D-FE Model of Soil-Foundation System

すように転倒モーメントを静的加力となる場合は加力ステップごとの漸増荷重、動的加振の場合はインピーダンス解析に用いた正弦波とする。転倒モーメントは浮き上

がり非線形特性が明確に現れるように各振動数で接地率が40%程度まで進展するようその最大値を設定した。

3.2 3次元FEMによる静的浮き上がり非線形特性

Fig. 11に静的 $M-\theta$, $M-\eta$ 関係を示す。図中には現行設計手法で用いられている関数近似モデルの地反力一様・三角形分布仮定 ($\alpha=6.0$)および地反力剛版分布仮定 ($\alpha=4.7$)による結果を併記してある。関数近似モデル($\alpha=4.7$)は3次元弾性論に基づき設定されたモデル³⁾である。また、各手法による浮き上がり開始モーメント M_0 、浮き上がり開始回転角 θ_0 も図中に示した。関数近似モデルでは M_0 及び M と θ 、接地率 η と θ の関係は次式³⁾で与えられる。

$$M_0 = \frac{WL}{\alpha}, \frac{M}{M_0} = \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha-2}{2} \left(\frac{\theta_0}{\theta} \right)^{\frac{2}{\alpha-2}}, \eta = \left(\frac{\theta_0}{\theta} \right)^{\frac{2}{\alpha-2}}$$

(W : 建屋重量, L : 基礎幅)

3D-FEMと関数近似モデル($\alpha=4.7$)はほぼ対応した特性を示している。一方、従来から設計においてよく用いられている関数近似モデル($\alpha=6.0$)との比較では浮き上がり開始モーメント M_0 は3次元FEMの方が大きく(浮き上がりにくく)なっており、浮き上がり開始後も関数近似モデル($\alpha=6.0$)に比べ浮き上がりが進展しにくいことがわかる。

3.3 3次元FEMによる動的浮き上がり非線形特性

加振振動数1Hz, 5Hzおよび10Hzにおける加振モーメント(転倒モーメント), 応答回転角, 接地率の時刻歴をFig. 12に、動的 $M-\theta$ 関係, 動的 $M-\eta$ 関係をFig. 13に示す。まず、1Hz加振時の応答についてみると、回転角は浮き上がりを生じるまでは正弦波で応答しているが、浮き上がり後は波形がひずみ、三角波の様相を呈している。接地率の時刻歴では正弦波加振による浮き上がり-接地-浮き上がりの繰り返しが表現されている。動的 $M-\theta$ 関係,

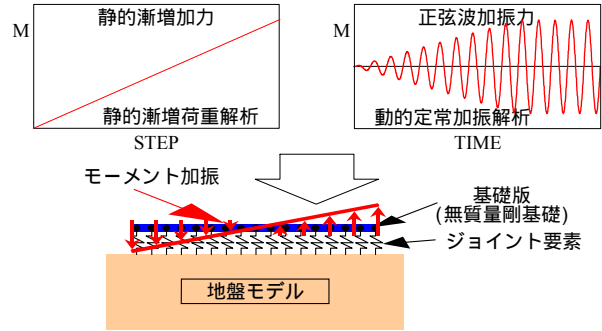


Fig. 10 $M-\theta$, $M-\eta$ 関係の解析手順
Analysis Procedure of $M-\theta$ and $M-\eta$ Relationships

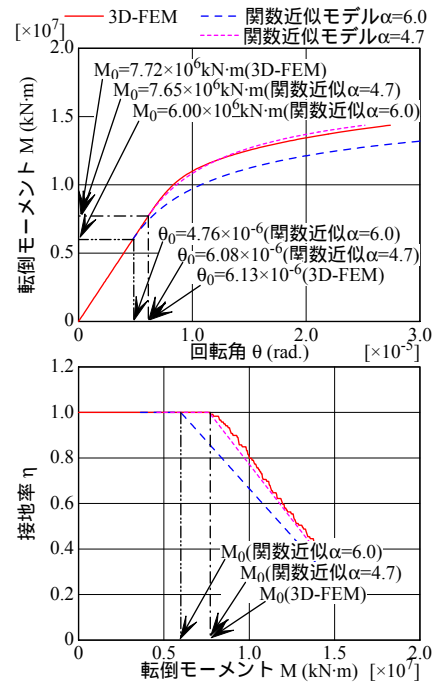


Fig. 11 静的 $M-\theta$, $M-\eta$ 関係
Static $M-\theta$ and $M-\eta$ Relationships

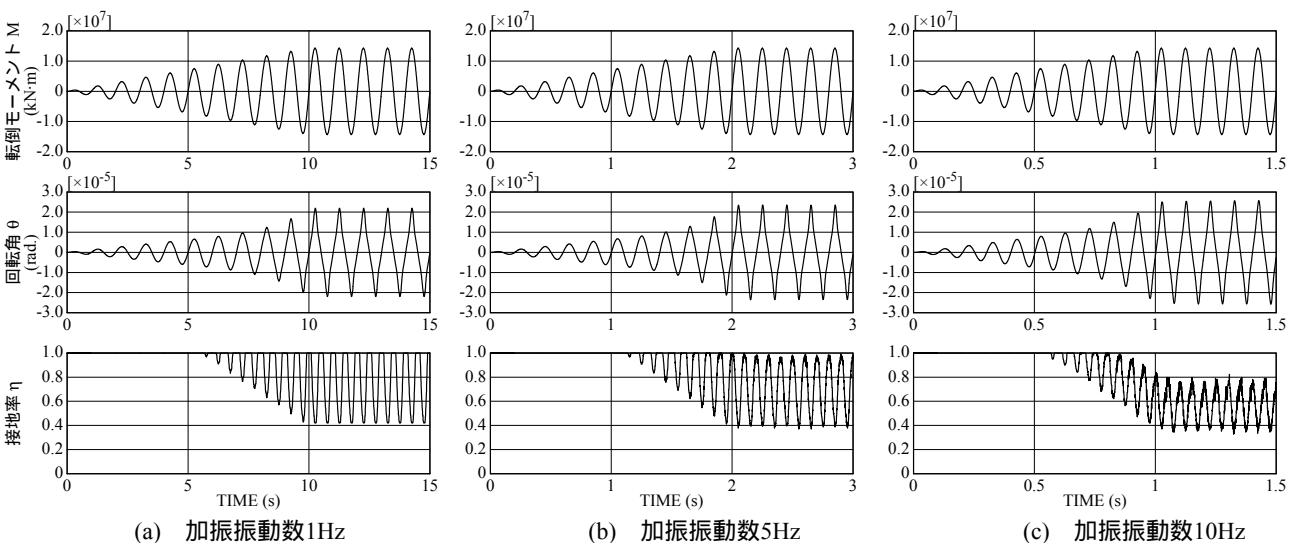


Fig. 12 転倒モーメント, 回転角, 接地率の時刻歴

Time Histories of Overturning Moment, Rotational Angle and Contact Ratio

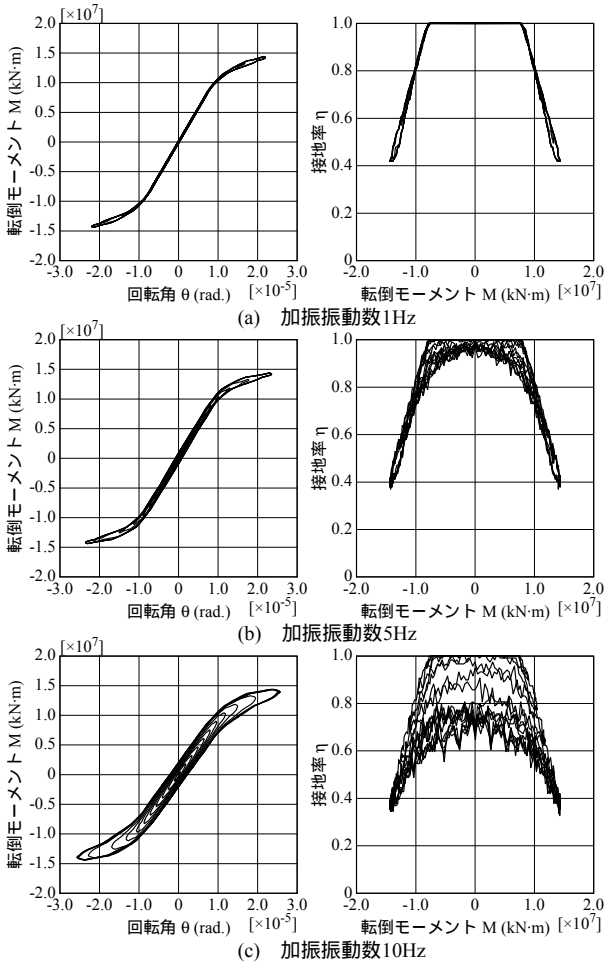


Fig. 13 動的M- θ 、M- η 関係
Dynamic M- θ and M- η Relationships

動的M- η 関係ではほぼ静的M- θ 関係、静的M- η 関係を原点を中心に負方向にも拡張した履歴を示している。これはVs=1800m/sの硬質地盤の1Hz加振では地盤への逸散減衰がほとんどないためといえる。5Hz加振では回転角の応答波形はやはり浮き上がりにもない三角波のように波形のピークが鋭角になる。接地率は最大の浮き上がりを生じる時刻帯では1Hz加振と同様であるが、加振モーメントが小さくなり100%再接地に戻る時刻帯で接地率が安定しない。この傾向は10Hz加振時にさらに顕著に現われ本来100%接地状態になると考えられる時刻帯でも80%程度の接地率(20%程度は浮き上がっている)となっている。これは基礎下の地盤で浮き上がりに伴い地盤震動が生じ、基礎版の挙動と対応しなくなったためと考えられる。10Hz加振時の動的M- θ 関係は、1Hz加振時に比べ逸散減衰が付加された性状を示し、浮き上がり開始までは楕円形であり、浮き上がり後は先端が尖るものの一定の履歴面積を有し逸散減衰が付加された性状を示す。動的M- η 関係でも同様に逸散減衰が付加された性状を示すが、接地率の時刻歴で述べたように加振モーメントが小さくなり本来100%の接地状態に戻る時刻帯でも浮き上がりを生じているジョイント要素があるため、見かけ上の減衰がさらに大きいように見える結果となる。

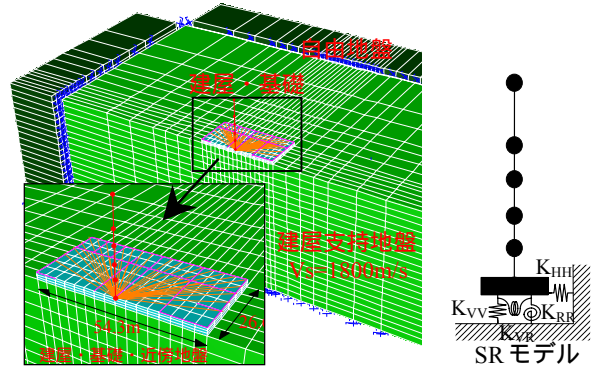


Fig. 14 3次元FEMモデル(地盤 - 基礎 - 建屋系)
3D-FE Model of Soil-Foundation-Building System

4. 地盤 - 基礎 - 建屋連成系の地震応答解析

基礎浮き上がりを考慮した地盤 - 基礎 - 建屋の動的挙動に関して3次元FEMと設計に用いられている誘発上下動考慮のSRモデルによる解析手法の違いが建屋応答に及ぼす影響について剛基礎、地盤Vs=1800m/sを対象に検討する。入力地震動はFig. 4の検討用地震動を用いた。

4.1 解析モデル

SRモデルでは建屋剛性、質量などは3次元FEMと同一とし、文献3で提案された上下自由度を考慮した誘発上下動考慮モデル(剛版反力仮定)を用い、VAによる水平、回転および上下地盤インピーダンスを基礎下にとりつけている。回転、上下インピーダンスには基礎浮き上がりによる非線形特性を与えた。

3次元FEMの地盤 - 基礎系モデルは前章と同一とする。RC造(1~4層)とS造(最上層)よりなる建屋を集中質点(5質点) - ビーム要素とする。Fig. 14に地盤 - 基礎系モデルおよび建屋モデルをSRモデルと対比して示す。さらに建屋上部と基礎版を接続する剛ビームを基礎版上面に配置する。この剛ビームは建屋上部への地震動入力と建屋上部に生じるせん断力と曲げモーメントを基礎版へ伝達する役割を果たす。基礎版下端と地盤はジョイント要素で接続し基礎版と地盤との剥離(基礎浮き上がり)を考慮する。ジョイント要素の初期剛性はVAによる地盤インピーダンスの100倍の値を設定している。ジョイント要素以外は線形材料として扱う。

4.2 地震応答解析結果

Fig. 15 ~ Fig. 17に3次元FEMとSRモデルによる建屋応答の比較を示す。Fig. 15に水平および上下最大応答加速度と最大せん断力、曲げモーメントの比較を示す。水平応答は概ね対応した値であり手法の違いによる差異は小さいといえるが、建屋頂部の水平最大加速度の相違がせん断力の違いとして現われてくる。これは3次元FEMは剛性比例減衰、SRモデルでは歪エネルギー比例減衰を用いており、減衰の設定がわずかに異なっているためと考

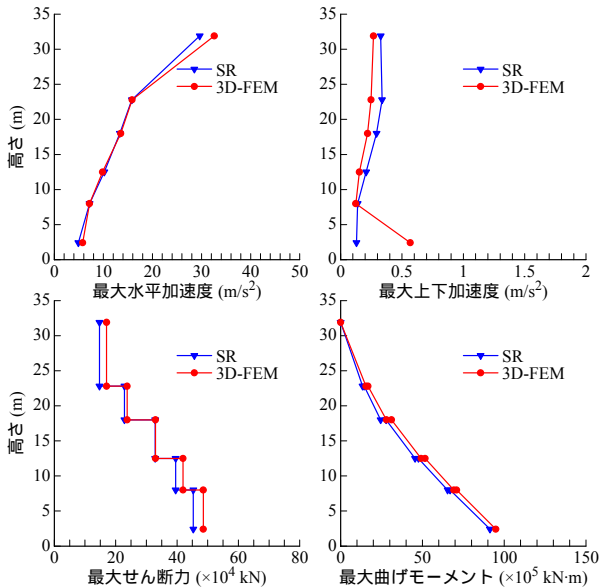


Fig. 15 解析手法の違いによる建屋最大応答値の比較
Comparison of Maximum Responses

えられる。上下応答については基礎版を除けば応答値とその分布形もほぼ同等である。基礎版ではパルス的な応答波形になっているため差異が生じたと考えられるが、浮き上がりによる誘発上下動の生成メカニズムのさらなる検討が必要である。

Fig. 16は建屋頂部と基礎上面の水平および上下加速度応答スペクトルの比較である。水平応答に関しては最大値と同様に建屋頂部の0.2秒付近のピーク値に若干の差異が見られ3次元FEMの方が大きな値となっているが、スペクトル特性はほぼ同等であり特に基礎上面での応答は振幅、周期特性とも等価といえる。上下応答でもSRモデルと3次元FEMは周期全般にわたりほぼ同等である。

Fig. 17に示す接地率の時刻歴の比較では、浮き上がりを生じる時刻はほぼ等しいものの最小接地率は3次元FEMの方がやや大きく浮き上がりにくいことを表わしている。

5. まとめ

3次元FEMを用いた地盤 - 建屋連成系の浮き上がり非線形解析を行い以下の知見を得た。

- 1) ジョイント要素の初期剛性の設定は本検討条件の下ではVAによる地盤インピーダンスの50倍程度以上の剛性を与えれば、ジョイント要素が地盤 - 建屋動的相互作用特性を変化させない。
- 2) 静的 $M-\theta$ 関係では3次元FEMと文献3で設定された関数近似モデル($\alpha=4.7$)はほぼ対応した特性を示し、動的 $M-\theta$ 関係では応答回転角波形、接地率の変化という浮き上がりによる非線形性の特徴を把握することができた。
- 3) SRモデルとの比較では水平・上下応答とも最大応答値、応答スペクトルで概ね対応し、手法の違いによる差異は小さい。

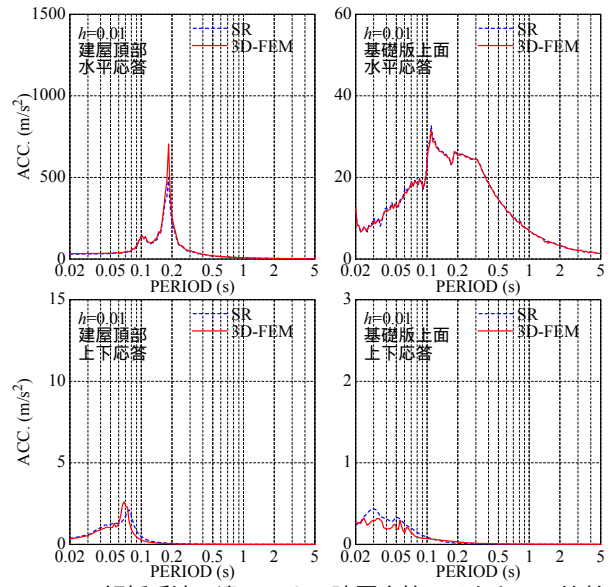


Fig. 16 解析手法の違いによる建屋応答スペクトルの比較
Comparison of Acceleration Response Spectra

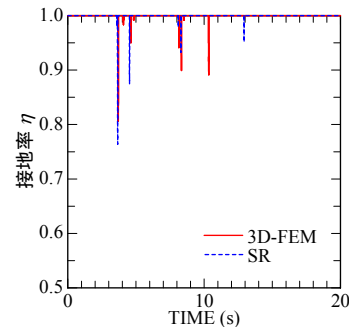


Fig. 17 解析手法の違いによる接地率時刻歴の比較
Comparison of Time History of Contact Ratio

以上より、3次元FEMは基礎浮き上がり評価する有用な手法といえ、従来SRモデルでは適用が制限される埋め込み基礎や不整形地盤に対しても適用可能である。

謝辞

本研究は日本原子力発電(株)のご指導のもとに実施しました。貴重なご助言と様々な配慮を頂きました関係各位の方々に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-1991追補版, (1991)
- 2) 田見宏：建物と地盤の相互作用, 建築構造学大系1, pp.53-105, (1968)
- 3) 田中英朗ほか：基礎浮き上がり非線形特性の合理的評価法に関する検討(その1～その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B, pp. 1675-1682, (1994)