

建物の浮き上がり挙動を表現可能な解析手法の高度化

遠心载荷試験の再現解析による解析手法高度化へ向けた取り組み

Advanced Analysis Method for Grasping the Behavior of Up-lifted Foundation

Study to Advance the Analysis Method through Simulation Analysis of Shaking Table Test under Centrifuge Gravity

(原子力土建部 設計管理G)

(Engineering & Management Group, Civil & Architectural Engineering Department Nuclear Power Division)

1Gを超える地震動に対する建物の応答を解析した場合、建物の傾きに伴い基礎版の一部が地盤から浮き上がる可能性があるが、この浮き上がり挙動を精度よく表現可能な解析手法は確立されていない。そこで、遠心载荷試験により建物の浮き上がり挙動を把握し、試験結果を解析で再現することにより、浮き上がり挙動を精度よく表現可能な解析手法の高度化に取り組んだ。

When conducting seismic response analysis for earthquake motions of more than 1.0G, a section of the structure's foundation may uplift from the ground as the building tilts. However, an evaluation method that can accurately grasp the behavior of up-lifted foundations has not yet been established.

In response, we grasped the behavior of up-lifted foundations by conducting the shaking table test under centrifuge gravity, and we worked to develop an advanced analysis method that can accurately grasp the behavior of up-lifted foundations by simulating the results of the shaking table test.

1 背景

浜岡原子力発電所では、1Gを超えるような非常に大きな地震動を想定する必要がある。大地震時には建物の基礎版の一部が浮き上がる可能性が考えられるが、特に、浮き上がりが大きい場合の挙動を精度よく表現できる解析手法は十分に確立されているとは言い難い。

本稿では、地震動による建物の浮き上がり挙動を把握することを目的とした遠心载荷試験を行い、複数の解析モデルを用いた試験結果の再現解析により、建物の浮き上がり挙動を精度よく表現可能な解析手法を高度化した取り組みについて報告する。

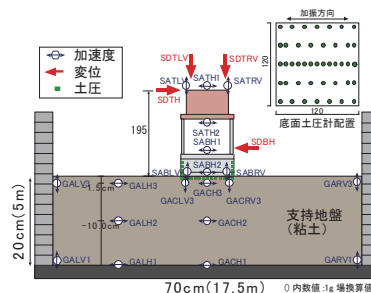
試験に使用した試験体の断面図および計測点の配置を第2図に示す。建物の浮き上がり挙動と支持地盤状態の把握を目的として、加速度・変位・土圧を測定し、計測点は建屋モデル・基礎版底面・支持地盤に適切に配置した。この内、基礎版底面の土圧の測定結果から、浮き上がりの指標となる接地率（基礎版が地盤に接する割合）を算出する。

加振方向は水平1方向とし、浜岡で想定される地震動の形状を模擬した入力地震動（第3図）を作成し、遠心振動台を介して試験体底面へ地震動を入力した。地震動レベルは、接地率が100%から20%程度のデータ取得を目標として段階的に設定し、試験を実施した。

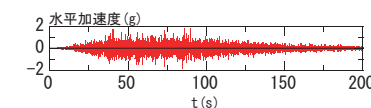
2 遠心载荷試験の概要

(1) 遠心载荷試験装置

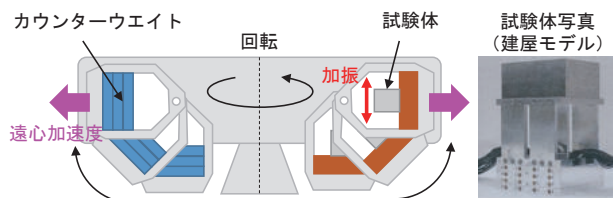
遠心载荷試験装置とは、小型の試験体に遠心加速度を付与することにより実物大に近い応力状態を再現できる装置であり、遠心加速度を発生させる回転装置と地震動を入力する遠心振動台で構成される（第1図）。今回は、地震時における原子炉建屋の基礎版と支持地盤の接触状態を実物大に近い状態で再現することを目的に使用した。



第2図 試験体と計測点配置



第3図 入力地震動の形状



第1図 遠心载荷試験装置

(2) 試験条件

試験体のうち、建屋モデルは原子炉建屋の振動特性や浮き上がり挙動をできる限り再現可能な形状とし、支持地盤モデルは想定する地盤固さの調整に適した粘性土により作製した。遠心加速度場は建屋モデルの大きさから25Gとした。

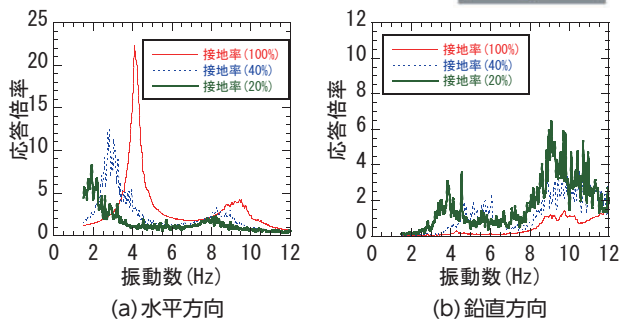
3 試験結果

遠心载荷試験により100%、60%、40%、20%程度の接地率となる浮き上がり挙動のデータを取得した。

(1) 建屋の水平・鉛直振動特性

建屋モデル基礎版底面から頂部までの応答増幅特性を第4図に示す。水平方向では、地震動レベルが小さい接地率100%のケースで4.0Hz付近に明瞭な1次ピークが認められ、地震動レベルの増大に伴い1次ピーク振動数と応答倍率が低下している。また、水平動から誘発される鉛直方向の応答では、地震動レベルの増大に伴い全振動数帯域

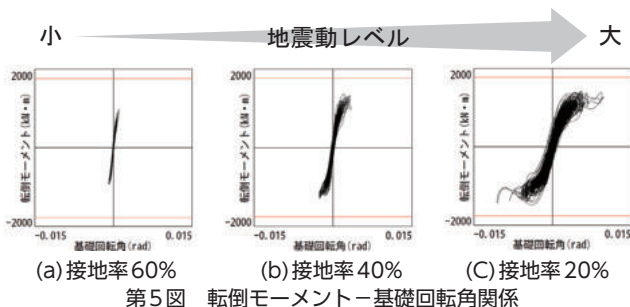
で応答倍率が増加する傾向が認められた。これらの特性は、建屋の浮き上がり挙動に起因する影響と考えられる。



第4図 応答増幅特性の比較

(2) 浮き上がり挙動 (転倒モーメントと基礎回転角)

建物の浮き上がり挙動として、転倒モーメントと基礎回転角の関係を第5図に示す。転倒モーメントとは建屋を転倒させようとする力であり、基礎回転角とは基礎版の傾きを表す指標である。転倒モーメントは、地震動レベルの増大に伴い大きくなるが、基礎回転角が大きくなる、即ち浮き上がりが大きくなるにつれて頭打ちとなり、理論式から求まる限界値 (赤線) に達しないことを確認した。



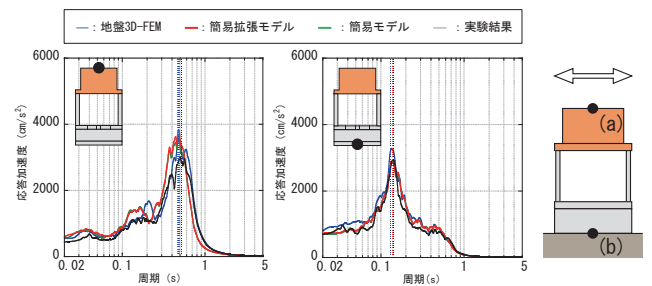
第5図 転倒モーメント-基礎回転角関係

(2) 再現解析結果

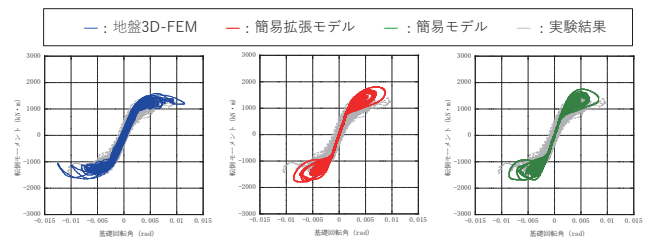
再現が困難とされる接地率が最も小さい20%の再現解析結果を第7図、第8図に示す。

地震時の建物挙動の分析で一般的に用いられる水平加速度応答スペクトル図において、建屋モデル頂部及び基礎部で試験結果と各解析モデルが概ね対応している。頂部における振動特性のピークは、簡易モデル、簡易拡張モデルでややずれているが、地盤3D-FEMは良く対応している。

転倒モーメントと基礎回転角の関係は、全ての解析モデルで、試験で確認された頭打ち状態を良く再現できている。特に、地盤3D-FEMは他の解析モデルに比べ、原点付近 (繰り返しの浮き上がり挙動) での試験結果の再現精度が高い。



第7図 加速度応答スペクトル (水平)

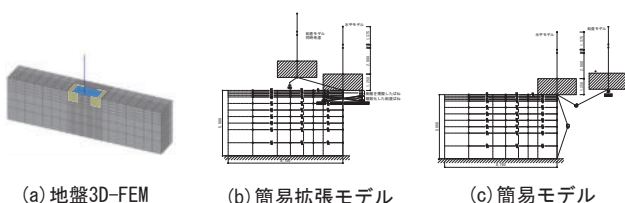


第8図 転倒モーメント-基礎回転角関係 (接地率20%)

4 再現解析

(1) 解析モデル

再現解析では、(a) 地盤3D-FEM、(b) 簡易拡張モデル、(c) 簡易モデルの3種類の解析モデルを用いた (第6図)。地盤3D-FEMは基礎版底面・側面と地盤間の接触状態や建物周辺地盤の特性を詳細に表現する最も詳細な解析手法である。また、簡易拡張モデルは、基礎版の底面と地盤間の接触状態を表現するばねについて、簡易モデルよりも詳細にモデル化した解析手法である。



第6図 再現解析に用いた解析モデル

5 まとめ

建物の浮き上がり挙動データを取得するために建屋と地盤を試験体とした遠心载荷試験を実施した上で、接地率100%~20%程度の試験結果に対して、3種類の地震応答解析モデルを用いた再現解析を実施した。

全ての解析モデルにおける解析結果は、浮き上がりが大きい場合においても、試験結果を精度良く再現できることを確認した。特に地盤3D-FEMを用いることで非常に高い精度で再現解析を実施できることを確認した。

以上より、建物の浮き上がりが大きい場合でも、基礎版と地盤間の接触状態や建物周辺地盤の特性を適切にモデル化することで、地震時の浮き上がり挙動を精度よく表現できることを確認した。



執筆者/石川慎也