
原子炉建屋の鉛直方向のシミュレーション解析における 床応答スペクトルの短周期での鋭いピークについて

平成20年7月24日

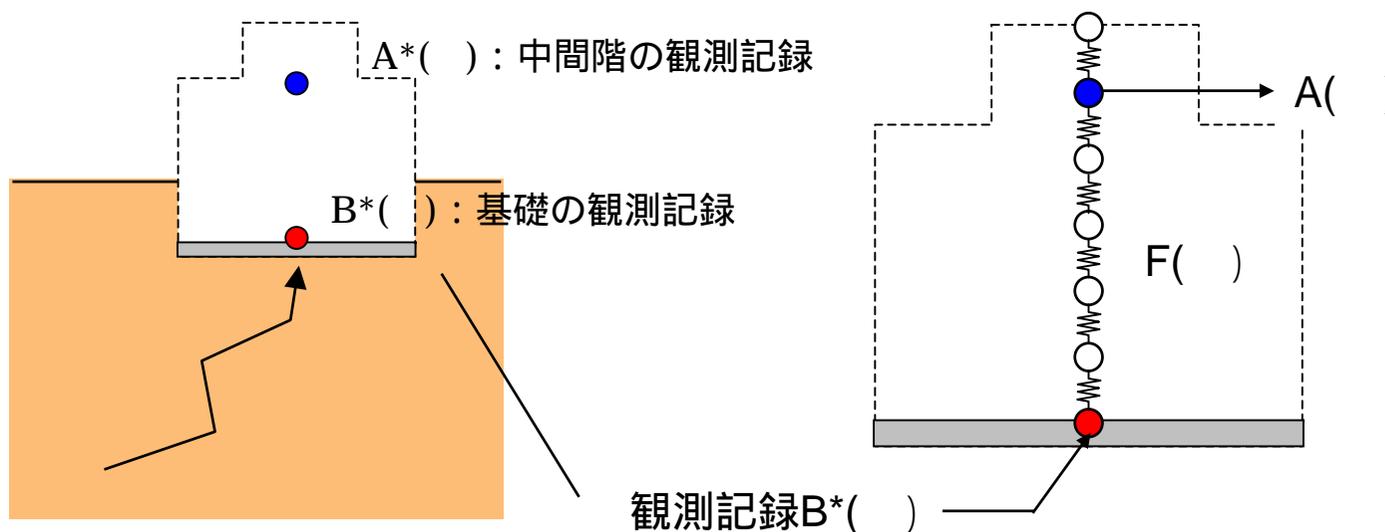
東京電力株式会社

はじめに

鉛直方向に対するシミュレーション解析においては、基礎固定の1本棒の鉛直ばねモデルを用いた解析結果による伝達関数に、基礎の観測記録 $B^*()$ を掛け合わせることにより、中間階の応答 $A()$ を計算し、観測記録 $A^*()$ と比較している。

$$A() = F() \times B^*()$$

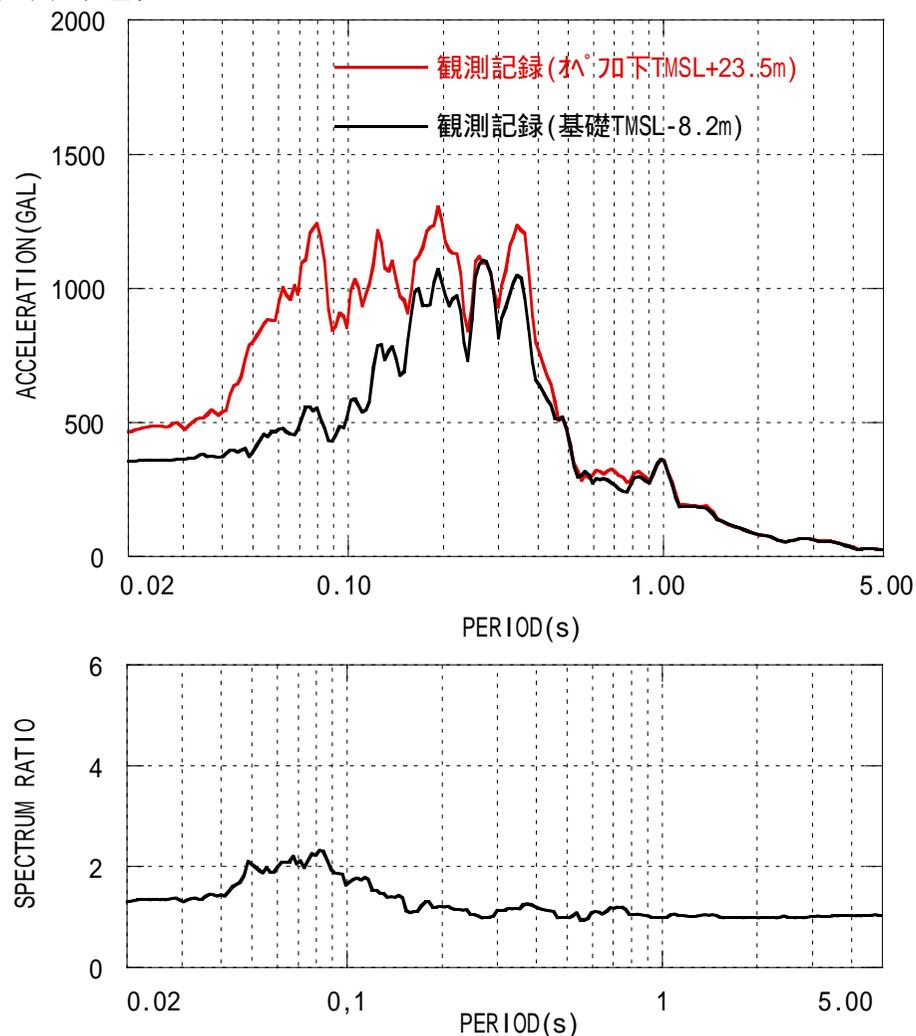
$F()$: 基礎に対する中間階の伝達関数



シミュレーション解析に用いた鉛直地震応答解析モデルの概念図

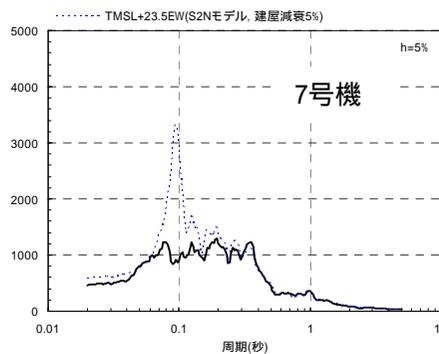
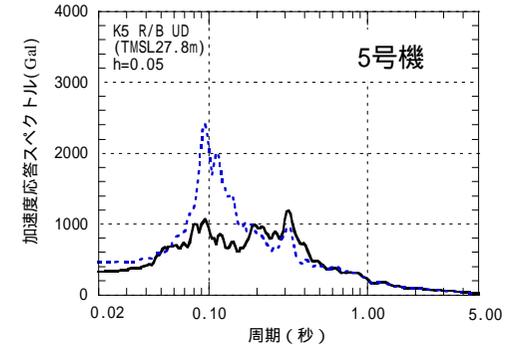
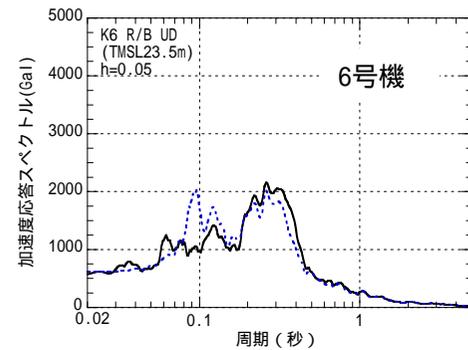
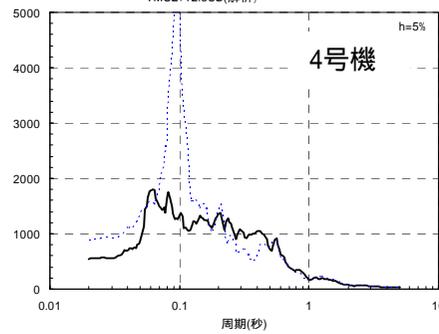
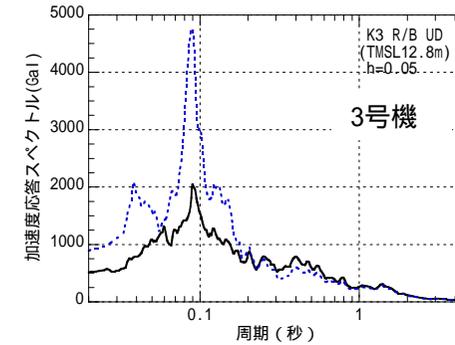
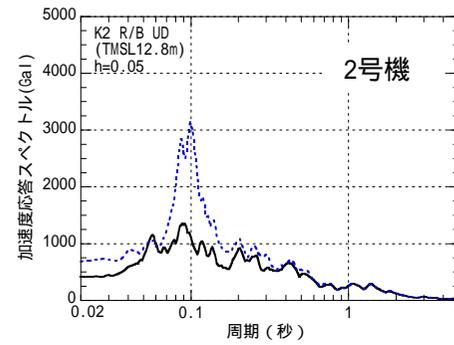
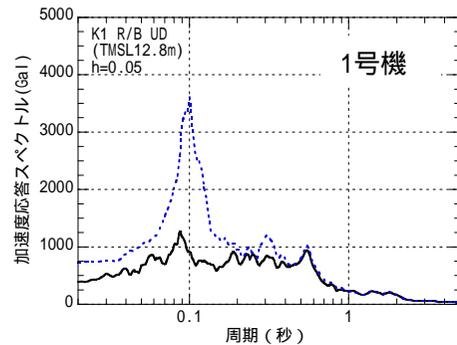
観測記録のスペクトルの特性

7号機 原子炉建屋



7号機原子炉建屋の基礎に対する中間階の応答倍率は、0.05～0.1秒(10～14Hz)付近で増幅するものの、約2倍程度である。

設計モデルによるシミュレーション

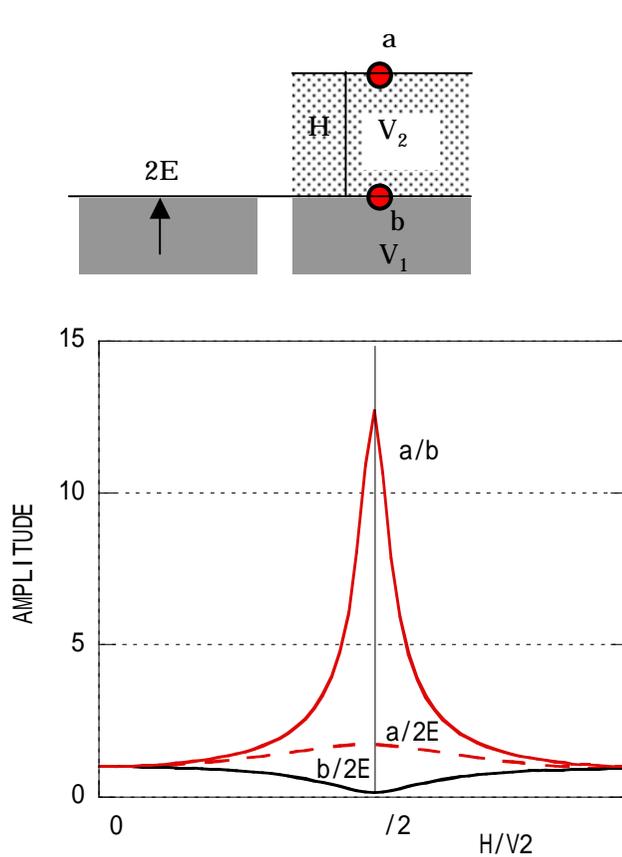


全ての号機においてシミュレーション解析では10Hz近傍に観測記録にはない鋭いピークが現れる。
この10Hzとは、解析モデルの基礎固定条件での1次固有振動数に対応している。

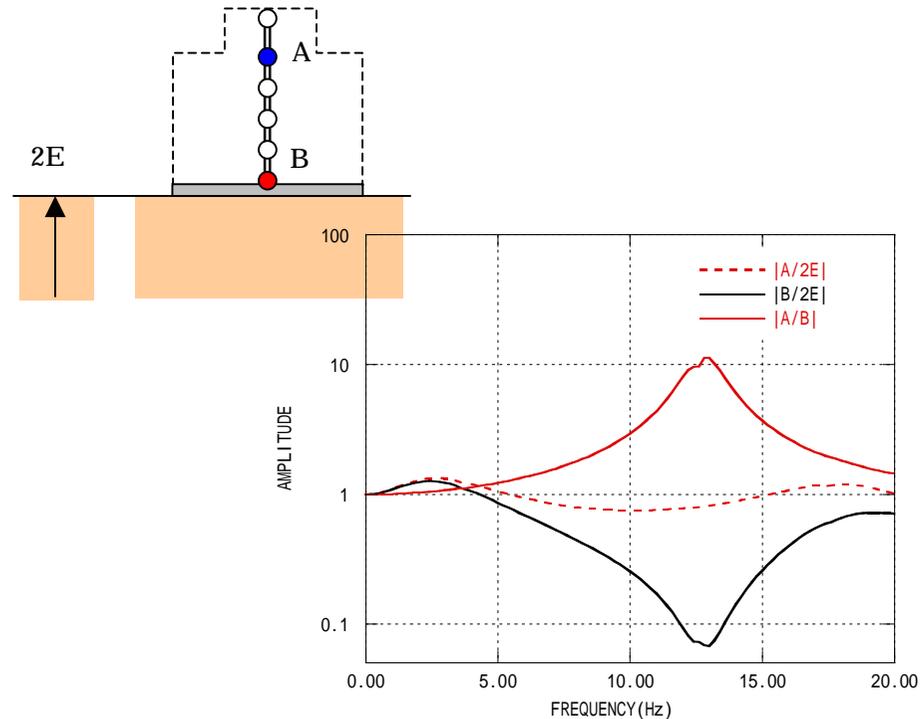
(コンクリートの実強度等を考慮したシミュレーションモデルによるシミュレーションではかなりの改善は見られるものの、固有振動数が移動し13Hz付近に鋭いピークが現れる場合がある。)

シミュレーション解析で鋭いピークが生じた理由-1

田治見先生はその著書「建築振動学」において、大きな建物が一様な地盤上にある場合にその応答は表層地盤を有する2層地盤の応答と類似していることを述べている。



2層地盤の周波数伝達関数
 $q = 0.5$: $\nu = 0.5$ の場合



5号機原子炉建屋の周波数伝達関数

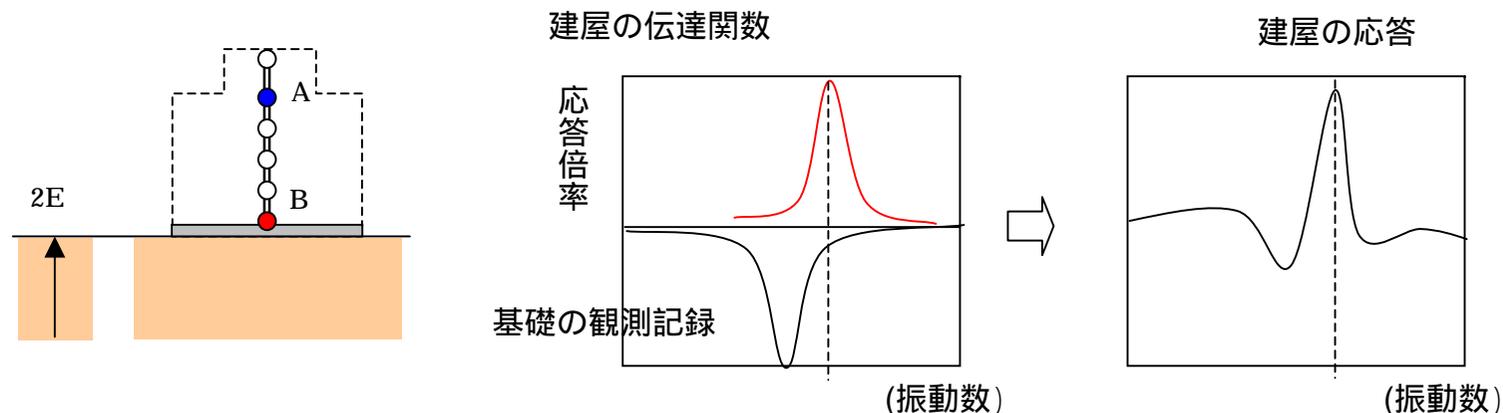
2層地盤と同様に、建屋の基礎固定の1次固有振動数において、基礎の振幅は0に近い値の谷となる。

シミュレーション解析で鋭いピークが生じた理由-2

基礎の観測記録 $B^*()$ には、建屋の基礎固定の振動特性が谷という形で色濃く反映されている。

シミュレーション解析においては、この基礎の観測記録 $B^*()$ に建屋の伝達関数 $F() = A / B$ を乗じて中間階の応答 $A()$ を求めるが、建屋の伝達関数が実現象に対して正確に評価できていない場合には、ピークと谷がずれることにより建屋の基礎固定の1次振動数の波が卓越して、鋭いピークが生じることになる。当然ながら、建屋の伝達関数を正確に評価できた場合にはこのようなピークは発生しないということになるが、現実的には全てを正確に解析モデルに反映するのは困難な場合が多い。

$$\text{中間階の応答}A() = \text{建屋伝達関数}F() \times \text{基礎の観測記録}B^*()$$



JNES殿から提案のあった解析モデルの分析

■ JNES殿から提案のあった解析モデル

軸対称FEMモデルを採用する

地盤はソリッド要素でモデル化を行うものの、建屋側面では地盤と接触しない仮定とする

建屋の壁や床はシェル要素でモデル化する

基礎版は剛床と仮定せずソリッド要素でモデル化する

コンクリートの減衰定数は3%と仮定する

■ 東京電力における評価

JNES殿の提案事項を吟味してみると、軸対称FEMモデルで側面地盤もモデル化しているものの、建屋側面とは接触させない仮定にしていることなどから、床応答スペクトルに効果があるのは、主に の仮定であるだろうとの評価を行った。

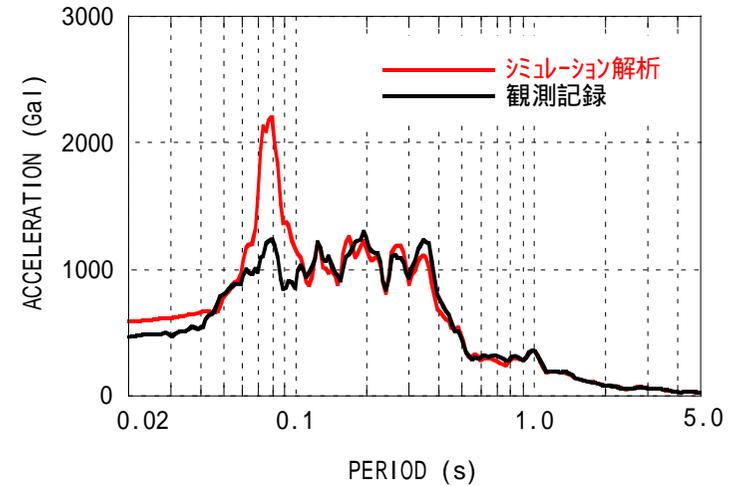
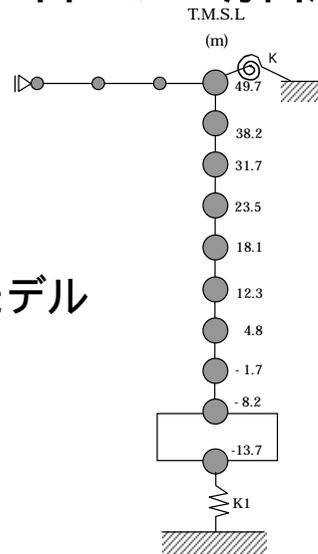
このため、基礎マットを分割した多軸質点系モデルでの解析を実施し、観測記録との対比を試みた。

基礎マットの剛性を評価したモデルによる試算例（1）

7号機において次の条件での解析による試算を実施

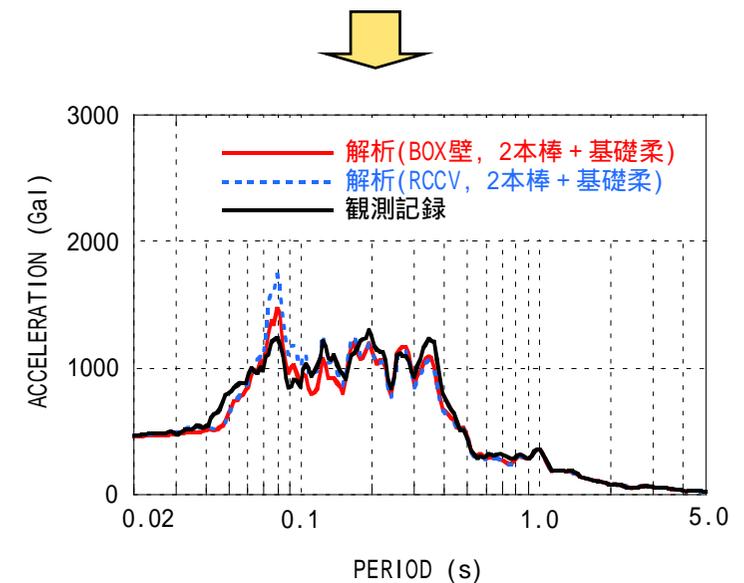
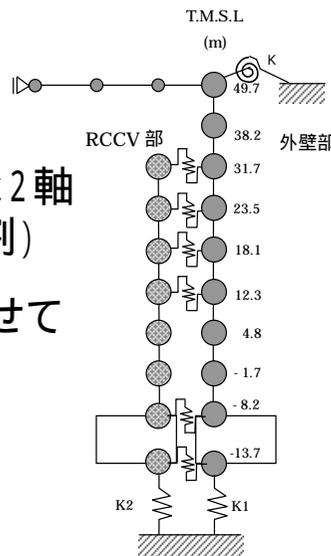
ケース1

- ・1軸質点系モデル
- ・基礎マットは剛体と仮定
- ・現在のシミュレーション解析モデル

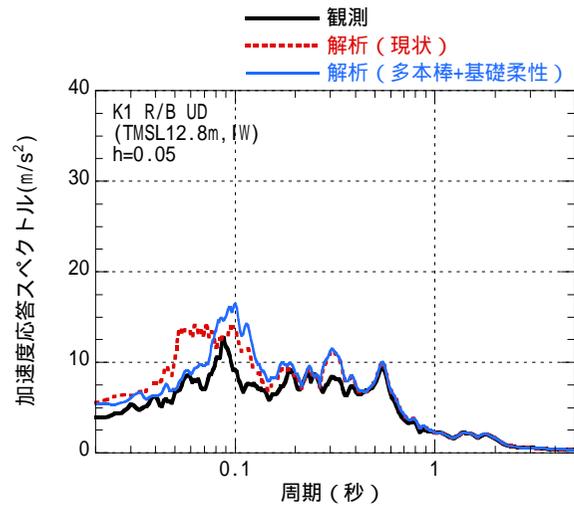


ケース2

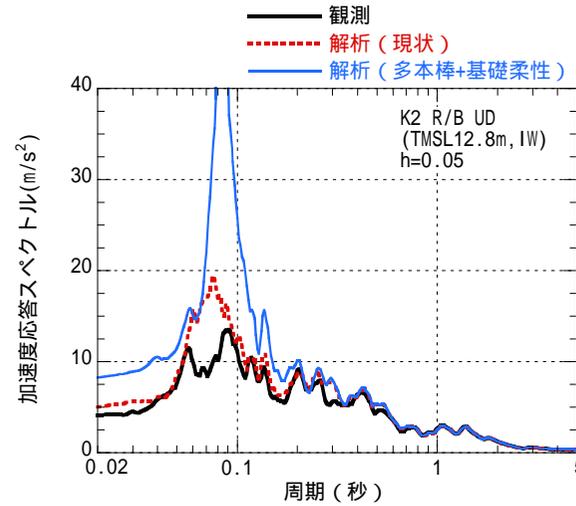
- ・2軸質点系モデル
- ・質点系は水平モデルと同様な2軸 (R/B外壁部とRCCV部に分割)
- ・基礎マットも上部構造に合わせて2分割して剛性を評価



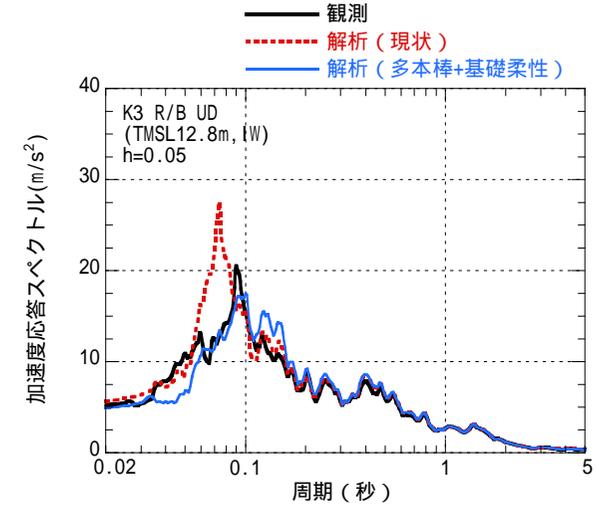
基礎マットの剛性を評価したモデルによる試算例（2）



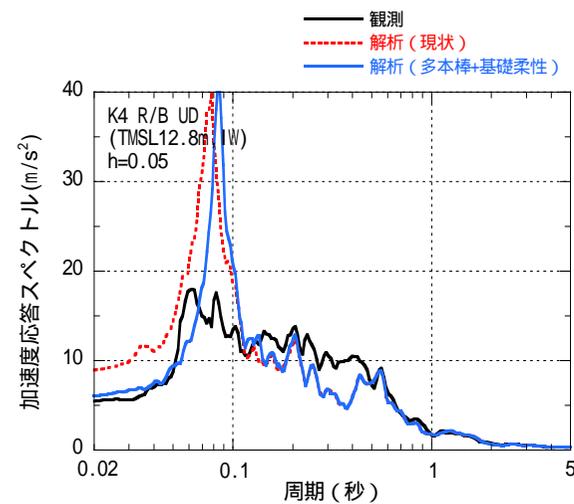
1号機 R/B



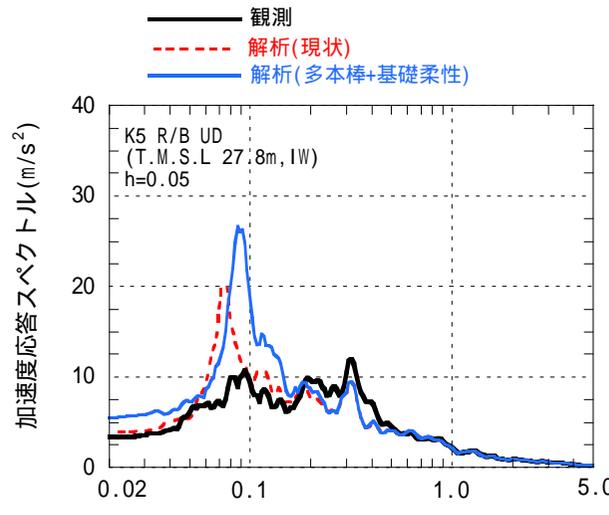
2号機 R/B



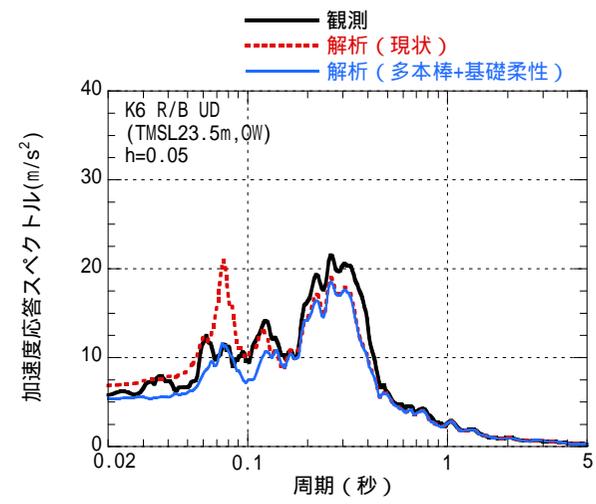
3号機 R/B



4号機 R/B



5号機 R/B



6号機 R/B

基礎マットの剛性を評価したモデルによる試算のまとめ

■K-7の場合

基礎マットを分割した多軸質点系モデルでの解析により、これまでのシミュレーション解析結果よりも、中間階の観測記録とより整合する結果となった。

■K-1～6の場合

結果は号機によってまちまちである。

K-1/3/6: 改善が見られる

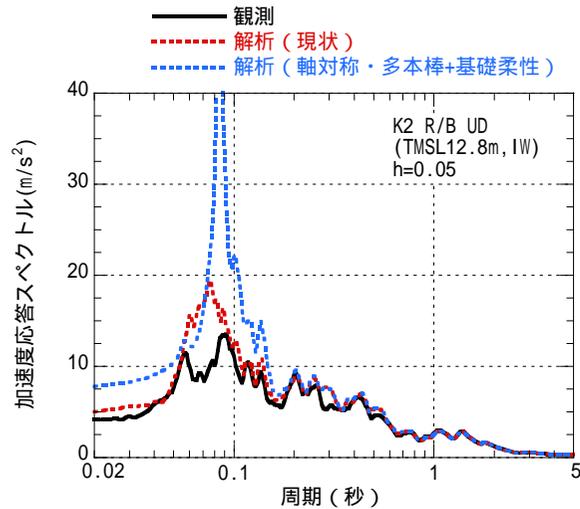
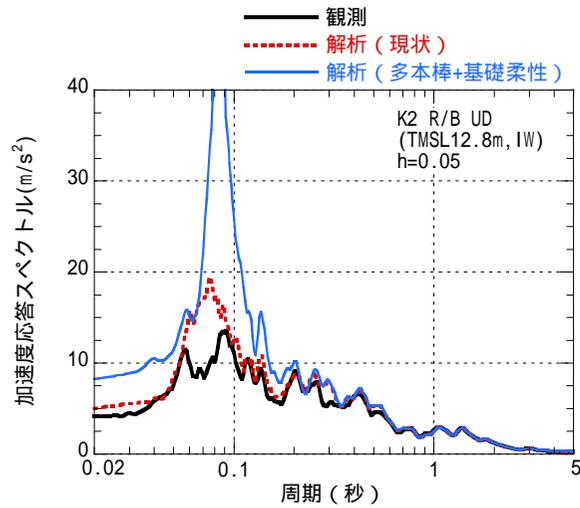
K-4/5: ほぼ同等程度

K-2: 前よりも悪くなっている

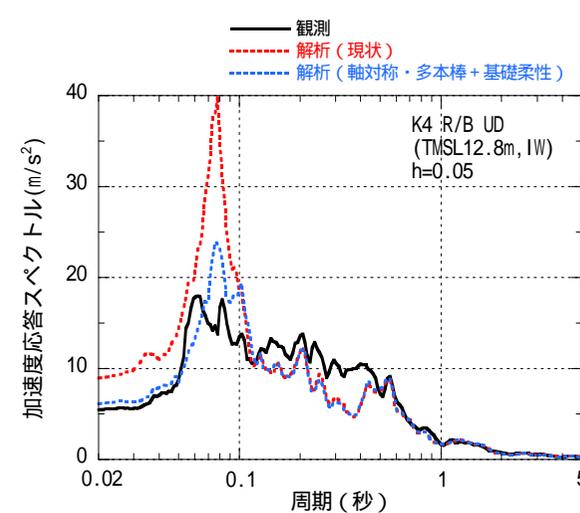
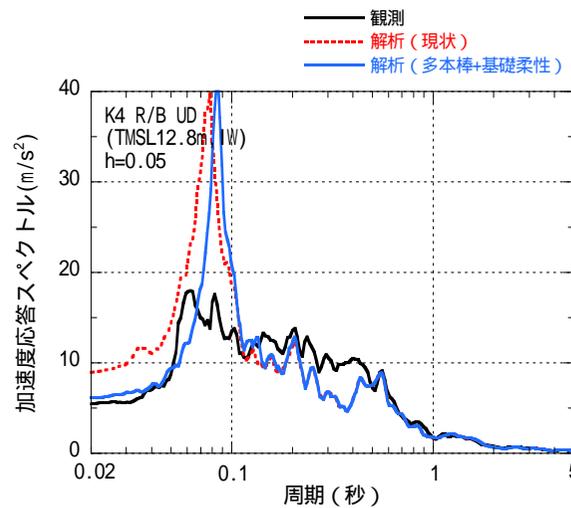
■追加検討

基礎マットを分割した多軸質点系モデルでの解析は、K-7の観測記録に合わせるためには有効であるが、他号機の条件によっては乖離が大きくなる場合もある。ただし、この解析手法は厳密にはJNES殿提案の手法とは異なるので、改善が見られなかったK-2/4/5については、JNES殿提案の軸対象FEM解析モデルでの追加検討を行った。

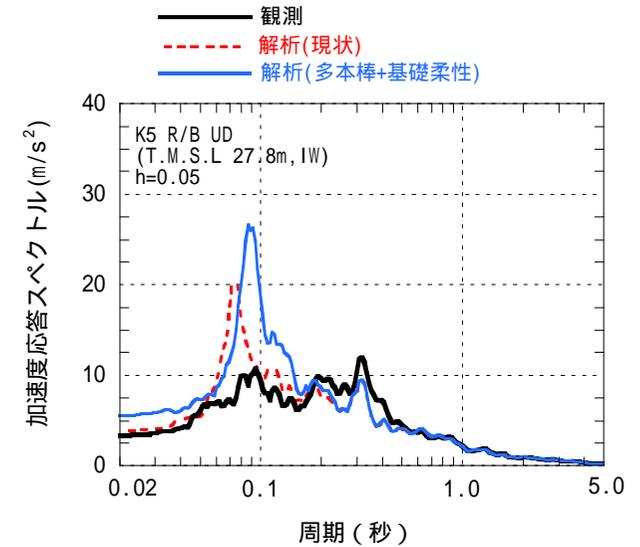
軸対称FEM解析による追加検討



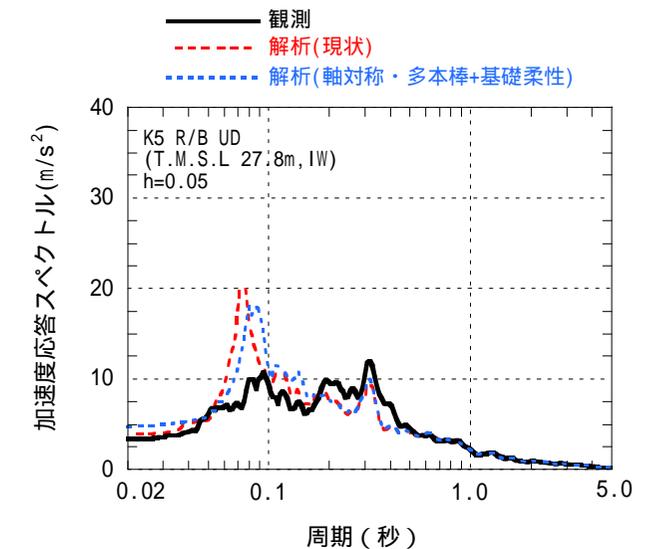
2号機 R/B



4号機 R/B



周期(秒)

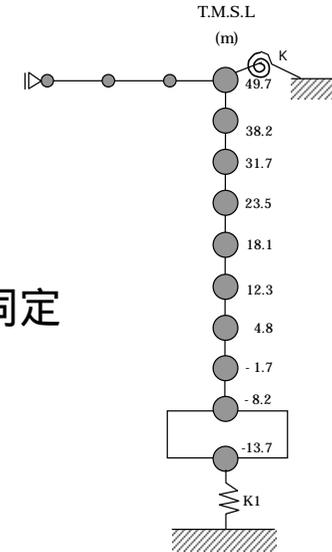
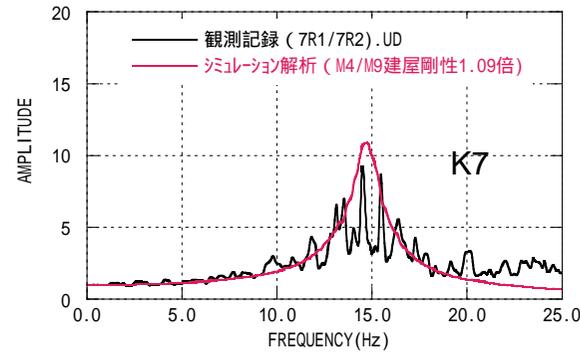
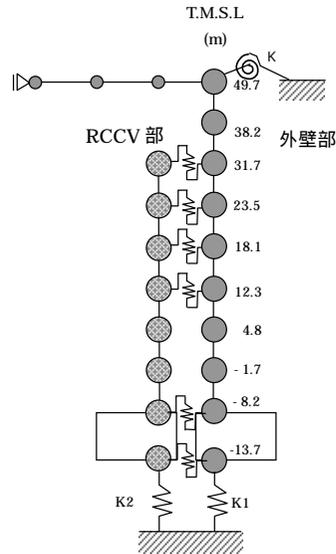


5号機 R/B

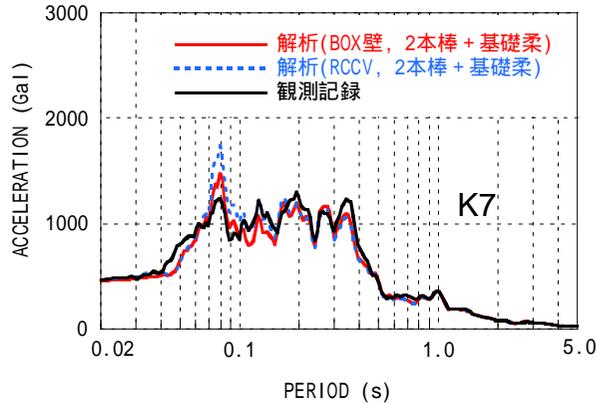
全ての号機（ K-1 ~ 7 ）の観測記録に整合させる手法

- JNES殿提案の手法（軸対象FEMモデルに基礎マットの剛性等を反映）を用いた解析結果は、K-7の場合などでは観測記録との整合性が良いが、K-2の場合などではより乖離してしまうこともあることが分かった。
- これまでのシミュレーション解析において発生していた短周期のピークは、前述したように建屋の伝達関数が正確に評価できていないことが、根本的原因であると考えられる。そのためには、建屋の伝達関数を正確に解析モデルに反映することが必要だが、短期的な解決は難しい面が多い。
- ここでは、新潟県中越沖地震のシミュレーション解析の場合だけに限定した手法になるが、観測記録の伝達関数を見ながら建屋の軸剛性を係数倍して振動特性を同定し、ケーススタディを行ってみることとした。

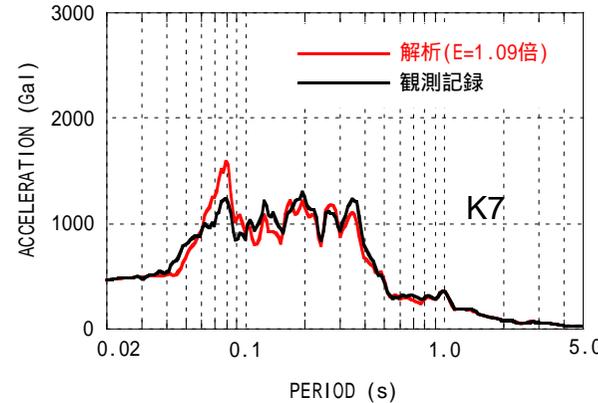
建屋の振動特性を同定したシミュレーション(1)



伝達関数による建屋の振動特性の同定



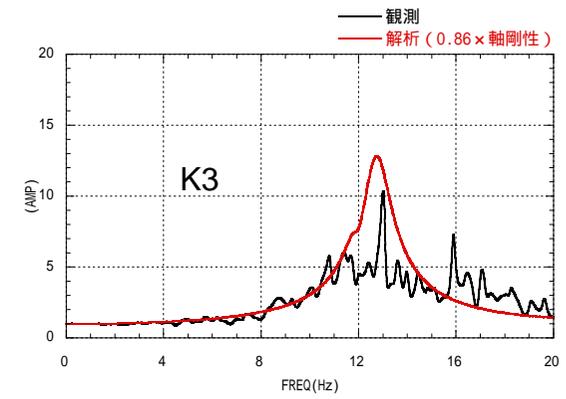
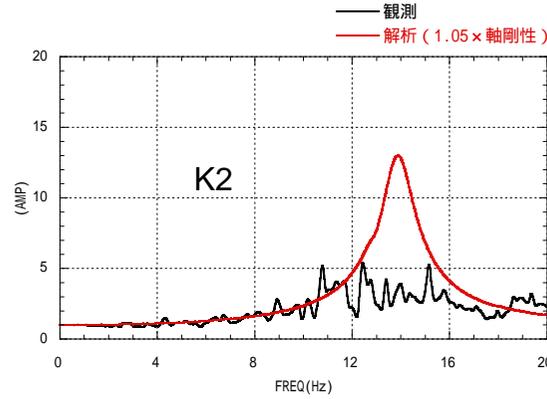
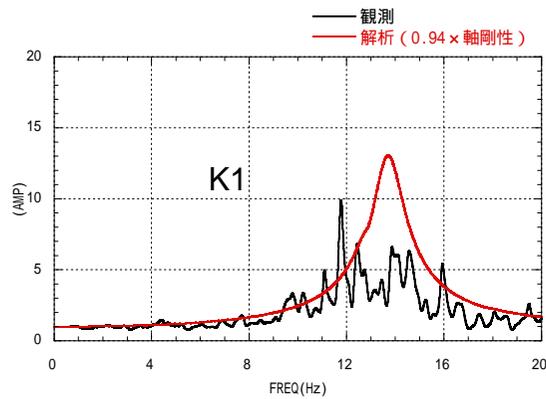
2軸質点系モデルでの解析結果



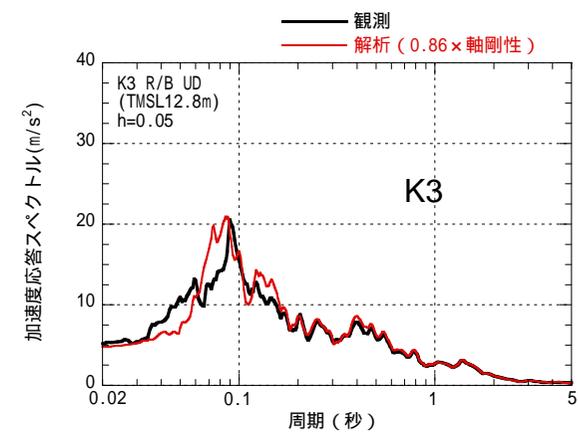
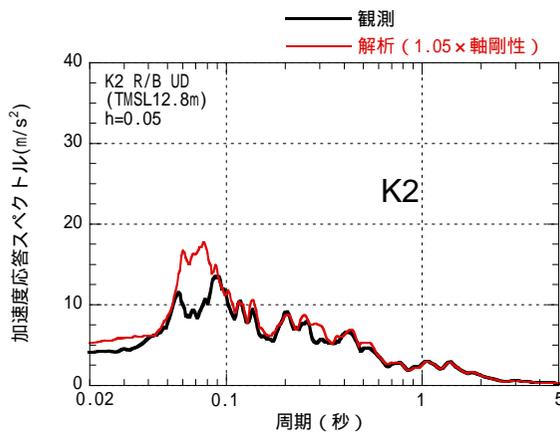
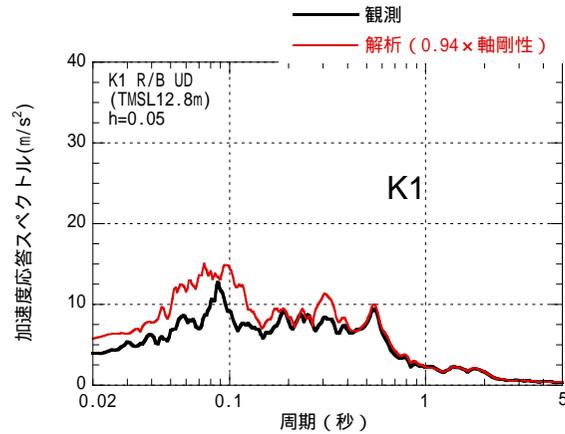
同定した振動特性を用いた解析結果(1軸質点系)

建屋の振動特性を観測記録から同定すると、短周期でのピークは大幅に改善される。
 この場合には、1軸質点系モデルでも観測記録との整合性は良い。

建屋の振動特性を同定したシミュレーション (2)

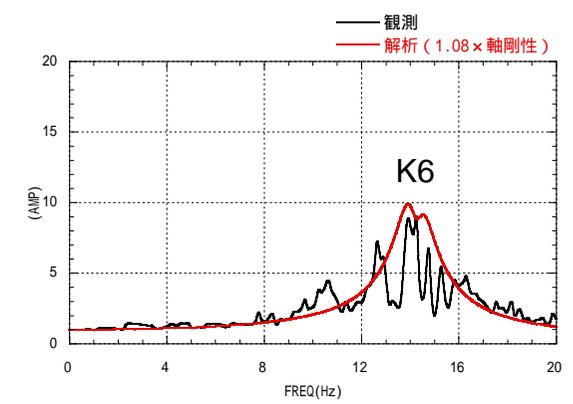
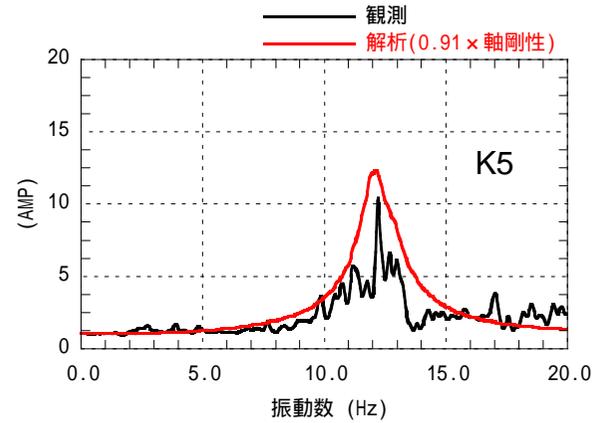
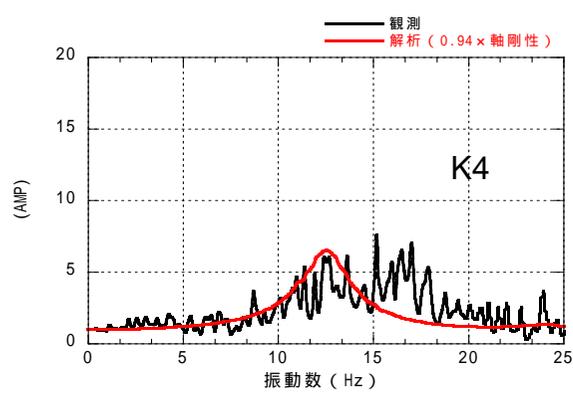


伝達関数による建屋の振動特性の同定

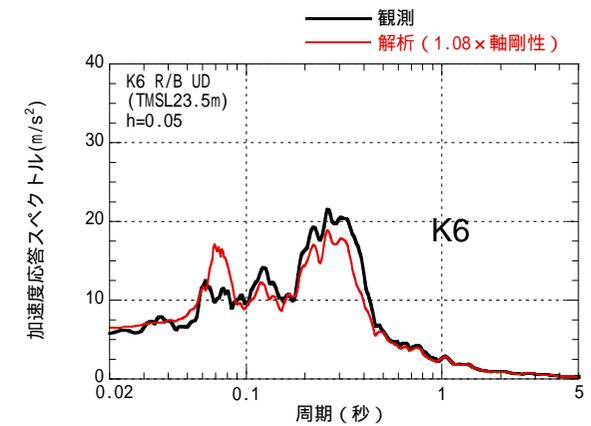
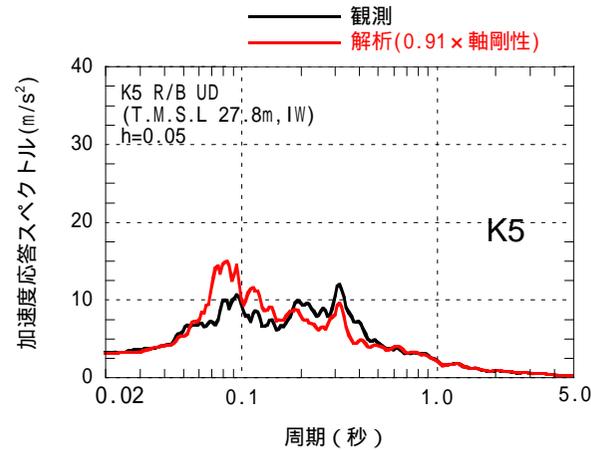
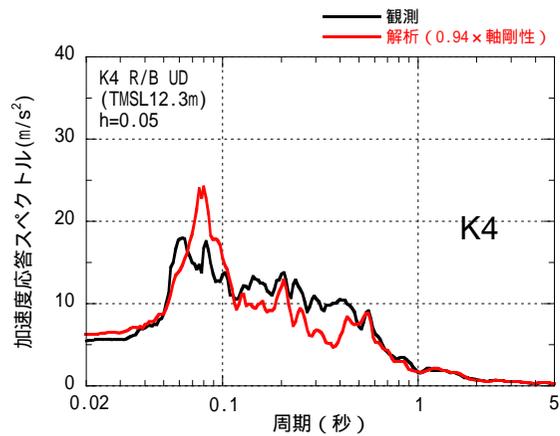


同定した振動特性を用いた解析結果

建屋の振動特性を同定したシミュレーション (3)



伝達関数による建屋の振動特性の同定



同定した振動特性を用いた解析結果

まとめと今後の方向性

これまでのシミュレーション解析において0.08秒前後に発生するピークは、伝達関数を正しく評価できていない場合に、基礎マット側にある谷の部分と対になっている山の部分が現れてきたものと推定される。

JNES殿提案の改善手法は、K-7の場合には改善するが、他の全ての号機での改善には繋がらない(例えばK-2の場合は乖離がさらに大きくなる)。

観測記録との適合性を向上するためには、根本的な原因である正しい伝達関数を持つ解析モデルの構築が必要である。しかしながら、これを短期的に解決することは難しい面が多く、今後の継続的な検討が必要である。

今回の中越沖地震の観測記録との適合性だけを考えるのであれば、実際の観測記録の伝達関数に対して剛性の係数倍により近似させるというケーススタディが考えられる。ただし、この係数は号機によって傾向が異なるなど、複数の要因の複合効果である可能性を示唆している。

今回の中越沖地震の健全性評価に当たっては、従来のシミュレーション解析結果を用いるか、今回新たに検討した実際の観測記録から同定した解析モデルの結果を用いるかは、議論のあるところだと考える。当社としては、中越沖地震の健全性評価は、従来のシミュレーション解析結果を用いることとしたい。