

## 遠心振動台実験による基礎入力動の低減効果に関する研究

関 崇 夫

## Study of Effect of Reduction in Foundation Input Motion based on Centrifuge Large Shear Box Shaking Table Tests

Takao Seki

## Abstract

The effect of the reduction in foundation input motion due to the soil-structure interaction is important for evaluating the earthquake input to building structures. A centrifuge shaking table test is an effective method to obtain the data to verify the nonlinear soil-structure interaction at large earthquakes. This paper describes the utility of the centrifuge test for evaluating the input motion of an embedded foundation and the influence of both the embedding depth of the foundation and the nonlinearity of the soil, thus revealing the effect of the reduction in the foundation input motion. As a result, it was found that the larger the embedding depth of the foundation, the larger was the effect of the reduction in the foundation input motion. The reduction in the foundation input motions was large over low frequency ranges due to the soil nonlinearity. The simulation analyses performed by using 2-dimensional FEM demonstrated good agreement with the experiment results. Therefore, the utility of the centrifuge shaking table test to study the effect of the reduction in the foundation input motion of an embedded foundation subjected to a large earthquake was confirmed.

## 概 要

建物と地盤の動的相互作用による入力低減効果は、建物への地震入力を評価する上で重要である。遠心振動台実験は兵庫県南部地震における工学的基盤上の地震波を上回る入力が可能で、地震観測では十分に入手できない大地震時の非線形動的相互作用効果を検証するためのデータを得る有効手段と期待される。そこで本報では、1)埋込み基礎の入力動評価に対する遠心振動台実験の有用性、2)埋込み深さの差異が入力低減効果に及ぼす影響、3)地盤の非線形性が入力低減効果に与える影響を検討するために遠心振動台実験と非線形有限要素解析を実施した。その結果、1)基礎の埋込み深さが大きいほど、基礎入力動の低減効果が大きい。2)入力地震動レベルが大きくなると、地盤の非線形化により低い振動数範囲から基礎入力動の低減効果が大きい。3)2次元FEMを用いたシミュレーション解析により実験結果を概ね評価可能である。以上より、大地震時の埋込み基礎の入力動評価に対する遠心振動台実験の有用性が確認された。

## 1. はじめに

建物と地盤の動的相互作用による入力低減効果は、建物への地震入力を評価する上で重要で、これらを解明するために地震観測やIG場の振動台実験<sup>1),2)</sup>による研究が行われている。特に地震観測は、建築物への入力動の評価などの動的相互作用効果の解明を目的として1970年以降継続的に行われている<sup>3),4),5)</sup>。また近年の大地震時に、地盤で大きな加速度記録が得られているが建物被害が少ないことが多く、大地震時に建物へ入力する地震動特性の解明が大きな課題となっている<sup>6),7)</sup>。しかし、地震観測から大地震時におけるこれらの課題を解決するためには、長期間の高密度観測によりデータを蓄積する必要があり、これを補完する実験手法が必要である。

近年、強震時の杭支持建物の挙動解明を目的として、遠心振動台を利用した研究が行われている<sup>8)</sup>。遠心場における振動台実験は相似則が明確で、基礎に作用する地盤の拘束圧の影響を再現できるなどの特徴があり、地震

時に地盤を介して建物へ入力する入力動の評価のため、地震観測では十分に得られない大地震時における非線形動的相互作用効果を検証するためのデータを蓄積するうえで、有効な手法と考えられる。

また、2000年6月に施行された改正建築基準法では、構造安全性の検証法として限界耐力計算法が新たに導入され、一般の建築物の耐震解析に動的相互作用の効果が考慮されるようになった。しかし課題も多く、それらを解決し精度をあげるためにも地震観測や実験から得られるデータをもとにその知見を反映し、より実情に則した合理的な評価法を提案していく必要がある。

以上のような背景より本報では、大地震時に強非線形化する地盤に埋込まれた基礎を対象に、1)埋込み基礎の入力動評価に関する遠心振動台実験の有用性、2)埋込み深さの差異が入力低減効果に及ぼす影響、3)地盤の非線形性が入力低減効果に与える影響について検討するために、大型せん断土槽による遠心振動台実験を実施した。有限要素法による非線形動的解析を実施し、解析手法の

妥当性を確認するために遠心実験との比較・検討を行った。さらに既往の基礎入力動の簡易評価法との対応について検討を加え、新たな評価式の提案を行いその適用性について検討を行った。

## 2. 地震波加振実験概要

### 2.1 実験方法

大型せん断土槽内に埋込み基礎を模擬した模型基礎を設置した振動台実験である。地盤は第2種地盤相当の2層地盤とした。計測は地盤中の水平加速度、基礎底面位置の水平・鉛直加速度について行った。せん断土槽の大きさは約2×1×0.55m、遠心力は50Gである。

実験に使用する振動台の有効振動数範囲は20~200Hzである。したがって50G場相似則を考慮して1G場に換算すると、有効振動数範囲は0.4~4Hz (0.25~2.5秒)である。

また、以降の実験・解析結果では、実現象との対応を考慮して、相似則を考慮した1G場相当スケール（長さ、変位：50倍，速度：1倍，加速度：1/50，時間，周期：50倍，振動数：1/50，荷重：50<sup>2</sup>倍）に変換して記述した。

### 2.2 模型概要

模型概要をFig.1に示す。埋込み深さの異なる2種類（Ab1, Ab2）の基礎模型は、平面300mm×300mm、高さが100mm, 200mm、重量がそれぞれ約5.5kg, 9.0kgのアルミ製で、内部にはアルミ板を格子状に溶接し剛性を高めた。基礎の外周面には接着剤により砂を貼付することにより周辺地盤との摩擦力を確保した。

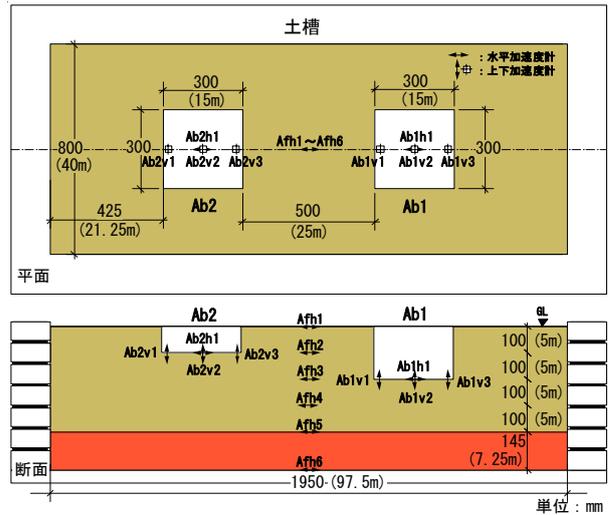
地盤は、表層と基盤層からなる2層の成層地盤とし、表層地盤は乾燥砂（8号ケイ砂）を用いて空中落下法により作成した。表層地盤の相対密度Drは50%、密度1.3g/cm<sup>3</sup>、S波速度(Vs)は130m/s程度である。また基盤層は、ソイルセメントにより作成し、密度1.7g/cm<sup>3</sup>、S波速度(Vs)は550m/s程度である。

地盤平面は、相似則を考慮した1G場換算値で約40m×100m、表層地盤の深さは20mである。基礎模型は15m×15m、それぞれ5m, 10m表層地盤中に埋込まれている。

### 2.3 入力地震動

入力地震動には、建築基準法の告示スペクトル<sup>9)</sup>に適合させた模擬地震波を用いた。入力地震動のレベルとして小地震、損傷限界地震、安全限界地震、極大地震レベルの4段階の地震を設定した。小地震は安全限界地震の1/20、極大地震は安全限界地震の1.5倍を目標とした。Table 1に実験で計測されたせん断土槽底面の測点[Afh6]の最大加速度値を示す。

Fig.2にその代表例として、安全限界地震時の加速度時刻歴波形と減衰h=0.05の速度応答スペクトルを示す。平均で約100cm/sを上回る大きさの地震動である。



図中の寸法は実スケール、括弧内は1G場換算値  
Fig. 1 模型概要  
Outline of Test Model

Table 1 実験ケース  
Experiment Case

実験ケース	地震動レベル	1G場換算値の最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )
CASE-1	小	21
CASE-2	損傷限界	77
CASE-3	安全限界	353
CASE-4	極大	455

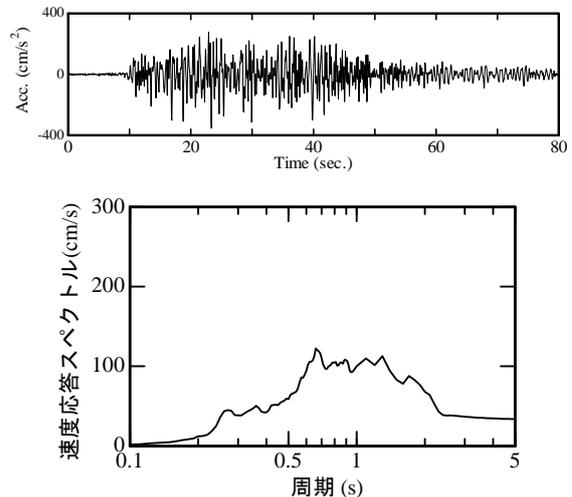


Fig. 2 入力地震波と速度応答スペクトル(h=0.05)  
Acceleration Time History and Velocity Response Spectrum of Input Motion

## 3. 地震波加振実験結果

### 3.1 速度応答スペクトルと伝達関数

Fig.3に、小地震、損傷限界地震、安全限界地震、極大地震時の基礎底面中央[Ab1h1, Ab2h1]、地表面[Afh1]の速度応答スペクトルを示した。地盤が弾性範囲と想定さ

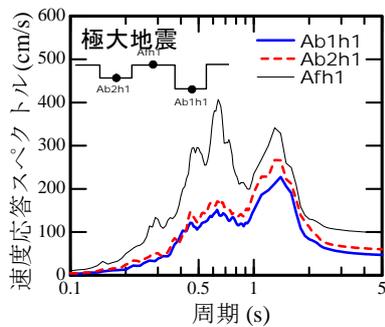
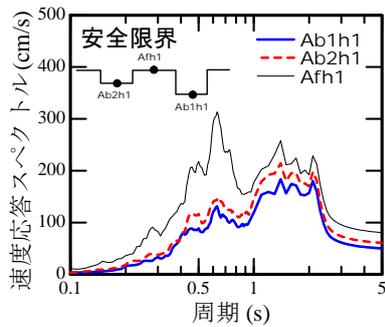
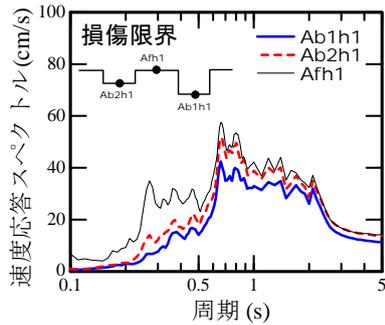
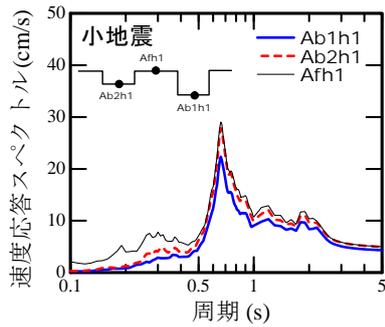


Fig.3 速度応答スペクトル(h=0.05)  
Velocity Response Spectra at Ground Level  
and Base Bottoms (h=0.05)

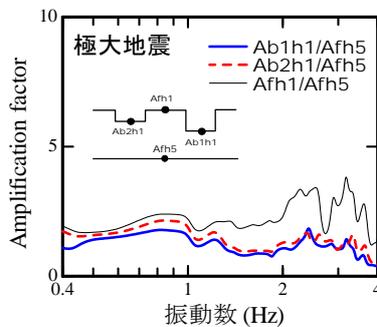
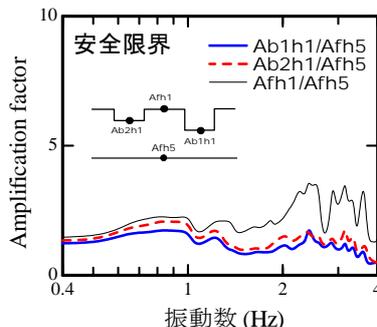
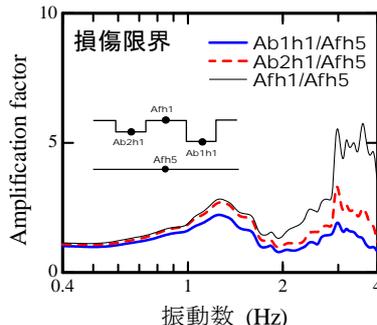
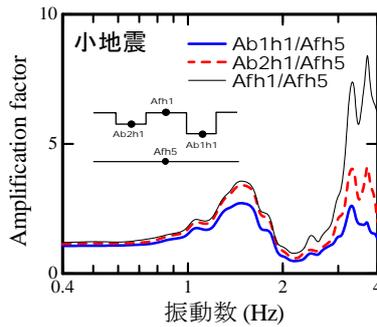


Fig.4 伝達関数  
Transfer Function

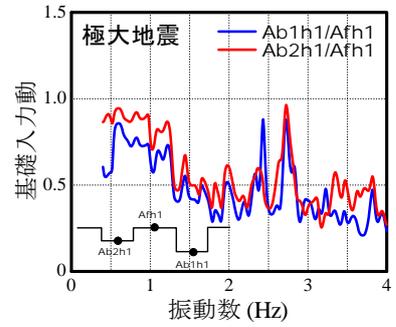
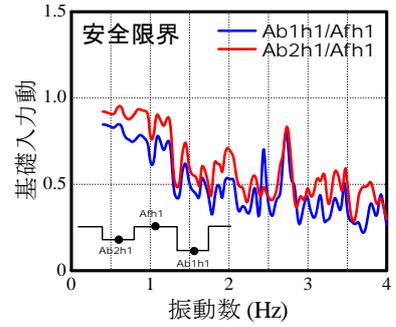
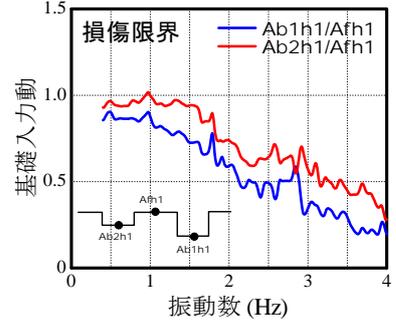
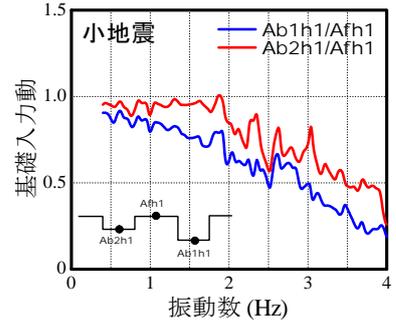


Fig.5 基礎入力動  
Foundation Input Motion at Base Bottoms

れる小地震時では0.65秒がピークとなる。さらに入力レベルが、損傷限界地震、安全限界地震と大きくなるにつれ、ピークが短周期から長周期域に移行していくことがわかる。

安全限界地震時には、地表面[Afh1]で応答速度が300cm/sを超える地震動の大きさとなるが、基礎が埋込まれることにより180~200cm/s程度まで応答が低減し、基礎の埋込みによる地震入力低減効果が認められる。

Fig.4に基盤層上面[Afh5]に対する基礎底面の伝達関数(Parzenのスペクトル・ウィンドウを用い、バンド幅0.1

で平滑化)を示した。小地震時の場合、1.54Hz付近に線形1次卓越振動数のピークが、損傷限界地震時では1.26Hz付近に確認できる。安全限界地震、極大地震時になると1Hz以下の振動数範囲で明瞭なピークが現れず、0.7~0.9Hz範囲で卓越する振動数特性を示す。これは入力レベルが大きくなるにつれ地盤非線形の影響により、地盤の卓越振動数が低振動数域に移行し、その応答倍率も低下する。また、基礎が埋め込まれることで地表面と比較して短周期成分の低減が大きく、小地震、損傷限界地震時では2Hz以上の振動数範囲で、安全限界地震、極

大地震時では1Hz以上の振動数範囲で入力低減が大きい。

### 3.2 基礎入力動

Fig.5に小地震, 損傷限界地震, 安全限界地震, 極大地震時の各基礎の基礎入力動 (基礎底面中央と地表面 [Afh1]とのフーリエスペクトル比, Parzenのスペクトル・ウィンドウを用い, バンド幅0.1で平滑化) を示す。各図ともに, 埋込みが深い[Ab1h1]の方が埋込みが浅い[Ab2h1]よりも低い振動数域からの入力低減効果大きい。また安全限界地震時では振動数の増加に伴い基礎入力動は減少し, [Ab1h1]では1.5Hz付近から, [Ab2h1]では1.75Hz以降一定となる傾向を示している。

次に, 入力地震動レベルについて比較すると, 入力加速度が大きくなるに伴い, 表層地盤の非線形化によりスペクトル比の谷となる振動数が低振動数側へ移行し, 振動数の低い範囲から基礎入力動が小さくなるのがわか

る。これらの傾向は, 既往の基礎入力動に関する解析的検討結果<sup>10)</sup>からも確認され, 埋込み基礎の入力動評価に対す遠心振動台実験の有用性が確認された。

## 4. シミュレーション解析

### 4.1 解析モデル

実験結果のシミュレーション解析は, せん断土槽の長辺方向の地盤を対象とした2次元FEMにより, 基礎と地盤を一体でモデル化した。Fig.6に解析モデルを示す。モデル化の領域は水平方向97.5m, 深さ方向は基盤上面の20mまでの領域とし, 境界条件は底面に固定境界, 側面は水平ローラー境界とした。

各層の初期せん断弾性係数は上載圧の0.5乗依存として設定した。基礎は剛体と仮定し, 減衰はレーリー減衰とした。地盤の非線形特性として修正 R-O モデルを用

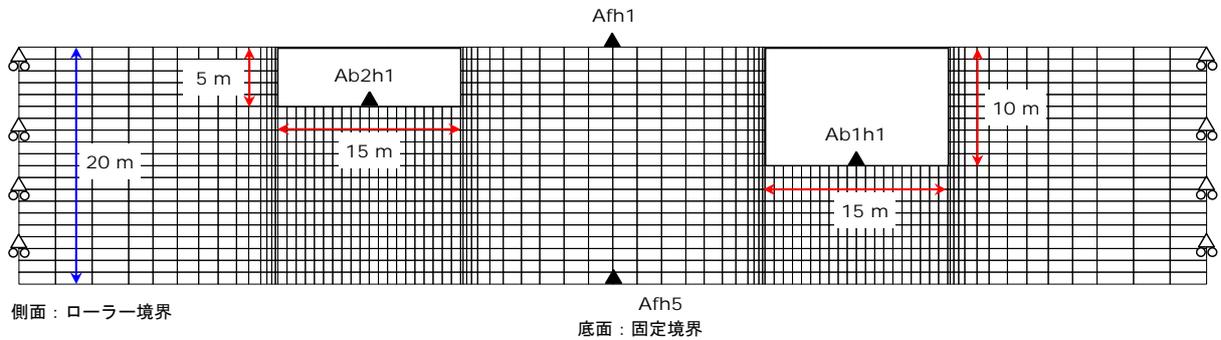


Fig.6 解析モデル  
Finite Element Mesh for Analysis

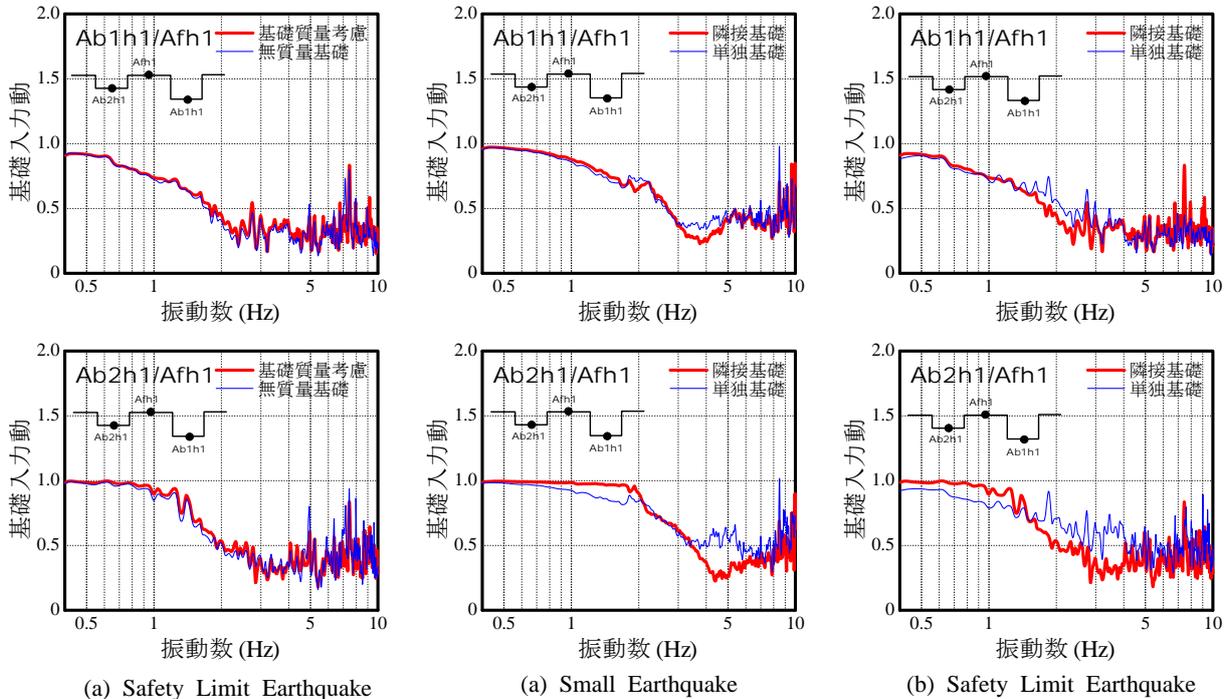


Fig.7 基礎重量が基礎入力動に与える影響  
Influence of Weight of Model Given to  
Foundation Input Motion

Fig.8 隣接基礎が基礎入力動に与える影響  
Influence of Adjacent Base Given to  
Foundation Input Motion

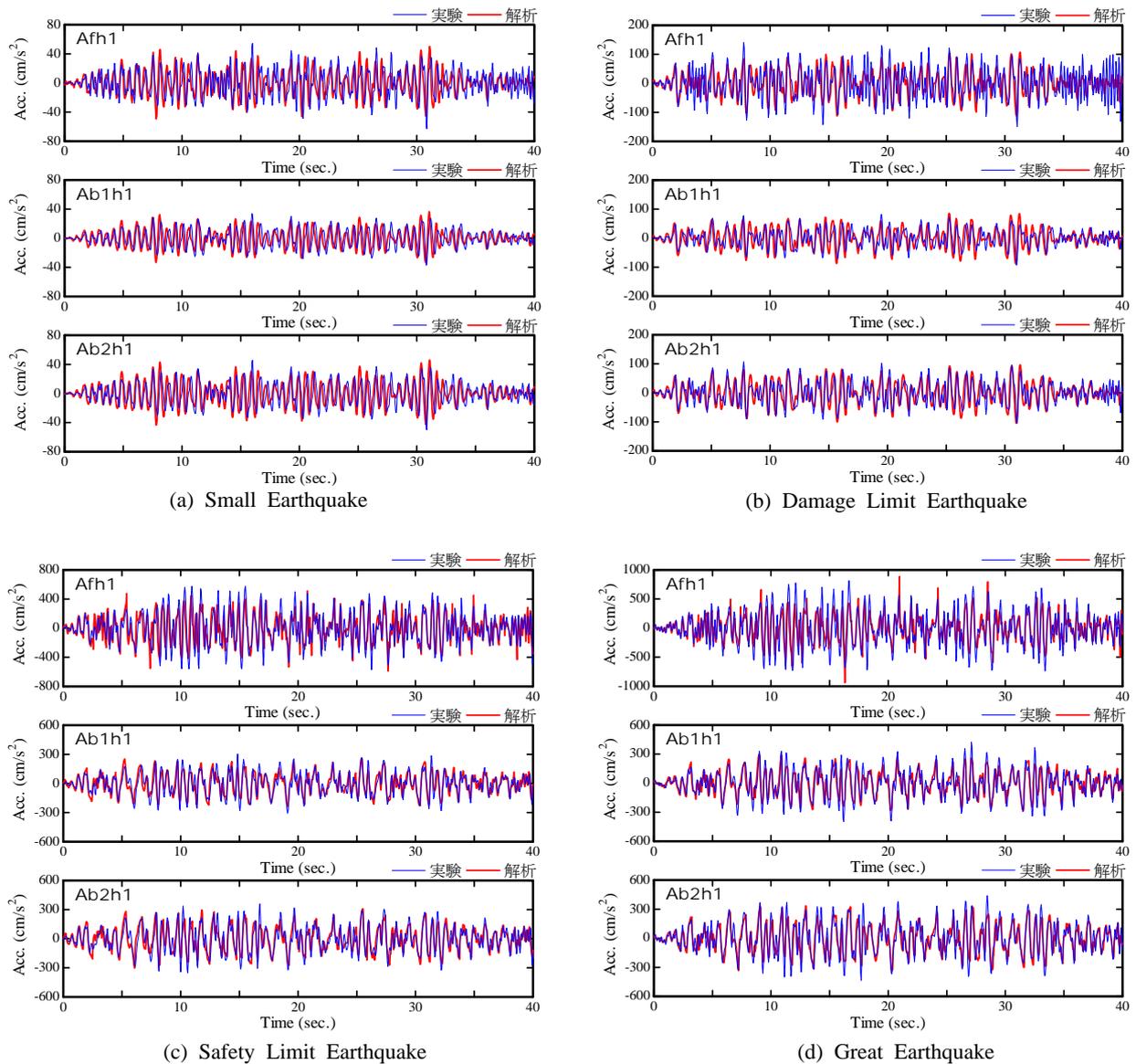


Fig.9 応答加速度波形の実験結果と解析結果の比較  
Comparison of Time History of Acceleration between Experiments and Analyses

い、基準歪み  $\gamma_{0.5}$  と最大減衰  $h_{max}$  は、異なる上載圧で数ケース行った三軸動的変形試験結果から深さ毎に上載圧を考慮して設定した。また基礎重量は、基礎底面中心位置に集中質量として与えた。

入力地震動は、各加振実験で基盤層上面[Afh5]で計測された加速度記録を用いた。計算ポイントはFig.6に示す、地表面[Afh1]と基礎底面中央[Ab1h1, Ab2h1]の3地点である。

#### 4.2 基本検討

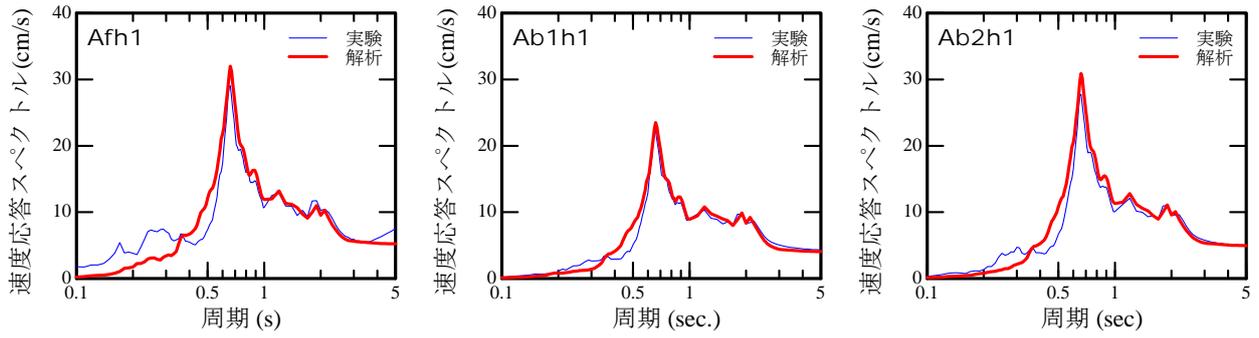
ここでは、シミュレーション解析に先立ち、基礎重量と隣接基礎の存在が基礎入力動へ与える影響について検討を行った。

##### 4.2.1 基礎重量が基礎入力動へ与える影響

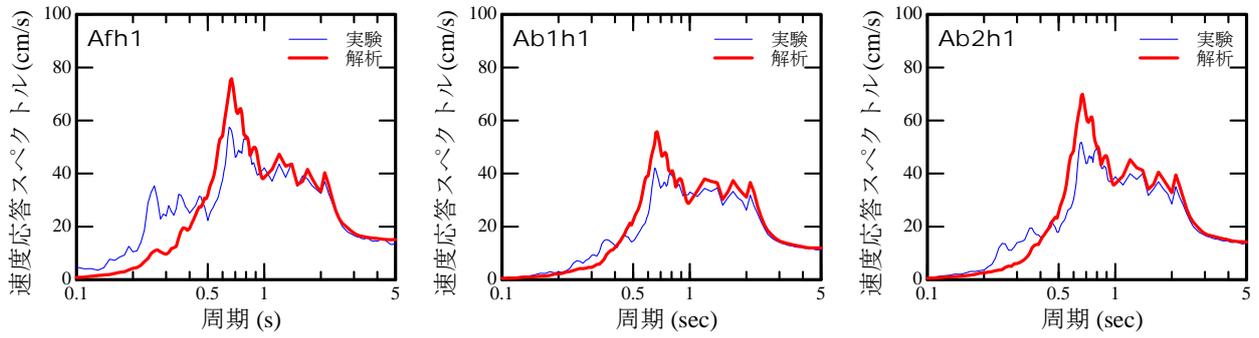
基礎重量が基礎入力動へ与える影響 基礎入力動の評価には無質量剛基礎の応答が必要となる。しかしこれを模型実験で実現することは不可能で、ある程度の重量を有することになる。ここでは、模型基礎の重量が基礎入力動に与える影響の検討を行った。Fig.7に検討結果の代表例として、安全限界地震時の基礎入力動を示す。図から明らかなように、模型基礎の慣性力の影響は小さい。

##### 4.2.2 隣接基礎が基礎入力動へ与える影響

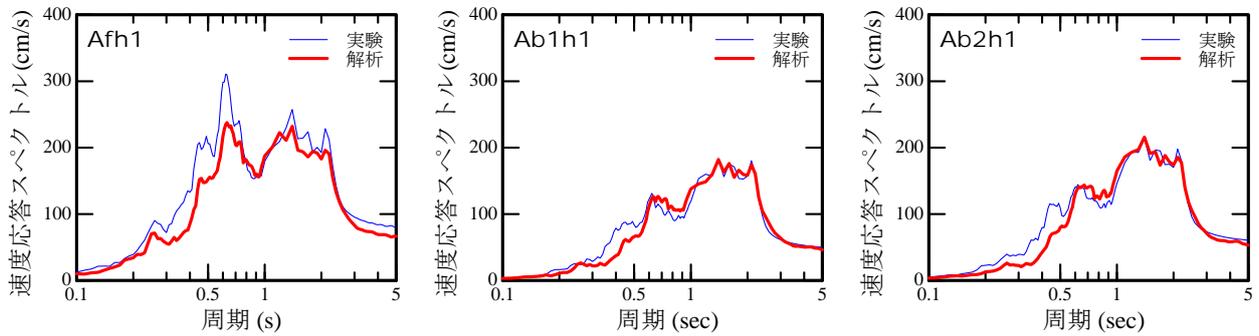
ここでは、隣接する剛性の高い基礎の存在が基礎入力動に与える影響の検討を行った。Fig.8に代表例として小地震、安全限界地震時の基礎入力動を示す。図中の凡例で、隣接基礎とはFig.6に示す解析モデルによる結果を、単独基礎とは検討対象以外の基礎を地盤に置換したモデルで解析



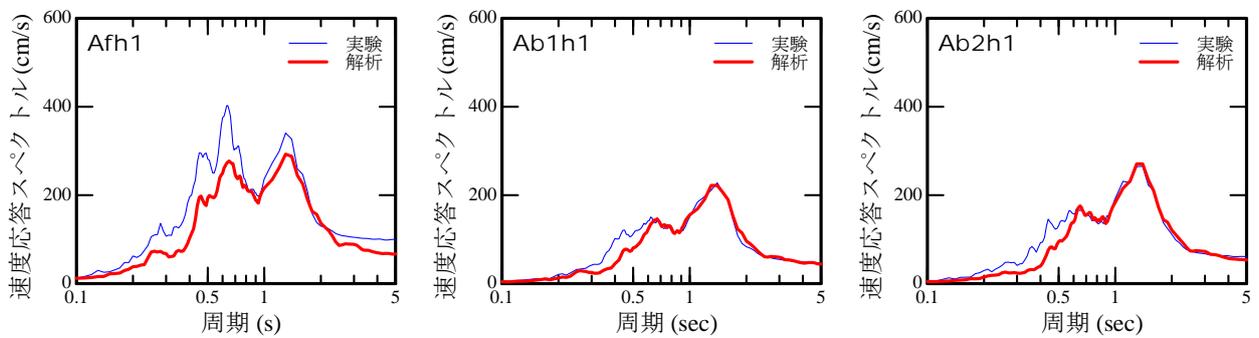
(a) Small Earthquake



(b) Damage Limit Earthquake



(c) Safety Limit Earthquake



(d) Great Earthquake

Fig. 10 速度応答スペクトルの実験結果と解析結果の比較 (h=0.05)  
Comparison of Velocity Response Spectra between Experiments and Analyses (h=0.05)

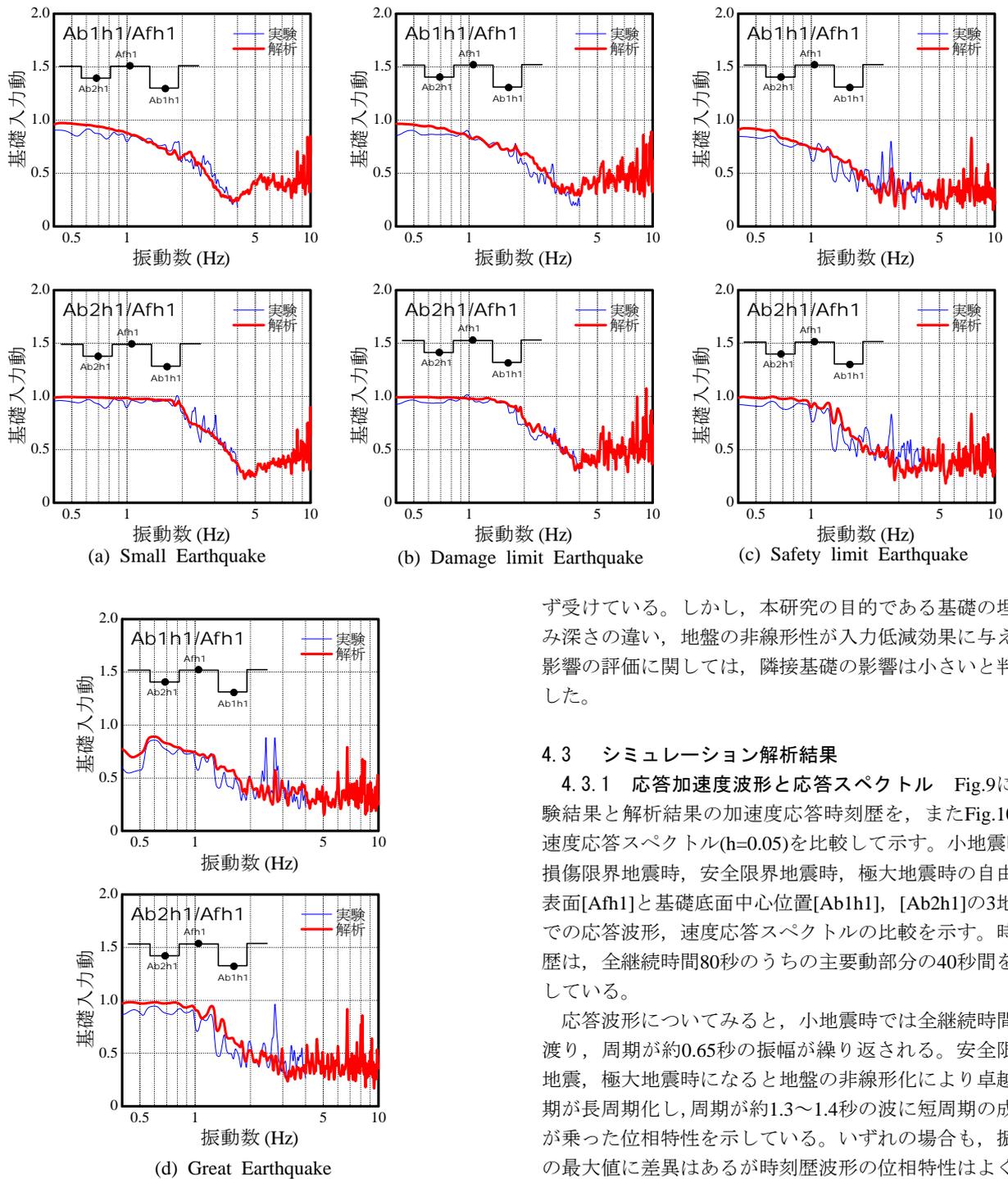


Fig.11 基礎入力動の実験結果と解析結果の比較  
Comparison of Foundation Input Motion between Experiments and Analyses

した結果を示している。深埋込みの[Ab1h1]については隣接基礎の影響は小さい。浅埋込みの[Ab2h1]では、隣接基礎として解析するとある振動数まで基礎入力動の低減が見られず、それを過ぎると大きく低減する傾向を示している。一方、単独基礎として解析すると、振動数の増加に伴い漸減する振動数特性を示す。このように、浅埋込みの[Ab2h1]の場合については、隣接基礎の影響を少なから

ず受けている。しかし、本研究の目的である基礎の埋込み深さの違い、地盤の非線形性が入力低減効果に与える影響の評価に関しては、隣接基礎の影響は小さいと判断した。

#### 4.3 シミュレーション解析結果

4.3.1 応答加速度波形と応答スペクトル Fig.9に実験結果と解析結果の加速度応答時刻歴を、またFig.10に速度応答スペクトル( $h=0.05$ )を比較して示す。小地震時、損傷限界地震時、安全限界地震時、極大地震時の自由地表面[Afh1]と基礎底面中心位置[Ab1h1]、[Ab2h1]の3地点での応答波形、速度応答スペクトルの比較を示す。時刻歴は、全継続時間80秒のうちの主要動部分の40秒間を示している。

応答波形についてみると、小地震時では全継続時間に渡り、周期が約0.65秒の振幅が繰り返される。安全限界地震、極大地震時になると地盤の非線形化により卓越周期が長周期化し、周期が約1.3~1.4秒の波に短周期の成分が乗った位相特性を示している。いずれの場合も、振幅の最大値に差異はあるが時刻歴波形の位相特性はよく整合した結果が得られた。

速度応答スペクトルについてみると、各地震時とも実験結果と解析結果は概ね整合した結果が得られた。入力地震動レベルが大きくなるに伴い、応答スペクトルの卓越周期が長周期側に移行する。また解析結果からも基礎が埋込まれることで、地表面と比較して短周期成分の低減が大きくなることが確認された。

4.3.2 基礎入力動 Fig.5に示した実験結果と同様に、解析結果から得られた応答加速度波形の地表面と、基礎

Table 2 相互作用係数  
Coefficient of SSI

泉・三浦の提案式 <sup>12)</sup>	修正式
(i) $0 \leq T < T_2$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_2) - 1.0}{T_2} \cdot T + 1.0 \quad (3)$	(i) $0 \leq T < T_2$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_2) - 1.0}{T_2} \cdot T + 1.0 \quad (6)$
(ii) $T_2 \leq T < T_1$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_1) - \beta'(T_2)}{T_1 - T_2} \cdot T + \frac{\beta'(T_2) \cdot T_1 - \beta'(T_1) \cdot T_2}{T_1 - T_2} \quad (4)$	(ii) $T_2 \leq T < T_1$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_1) - \beta'(T_2)}{\left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2}\right)} \cdot \frac{1}{T^2} + \frac{\beta'(T_2) \cdot T_2^2 - \beta'(T_1) \cdot T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} \quad (7)$
(iii) $T_1 \leq T$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_1) - 1.0}{\frac{1.0}{T_1} - 0.1} \cdot \left(\frac{1.0}{T} - \frac{1.0}{T_1}\right) + \beta'(T_1) \quad (5)$	(iii) $T_1 \leq T$ $\beta'(T) = \frac{\beta'(T_1) - 1.0}{\frac{1.0}{T_1^2} - 0.01} \cdot \left(\frac{1.0}{T^2} - \frac{1.0}{T_1^2}\right) + \beta'(T_1) \quad (8)$

底面中央とのフーリエスペクトル比から基礎入力動を算定した。Fig.11に実験結果と解析結果を比較して示す。

小地震や損傷限界地震の場合、実験結果と同様に振動数の増加に伴い、基礎入力動が低下する傾向をよく捉えている。埋込みの深い[Ab1h1]では0.5Hzの低振動数域から、埋込みが浅い[Ab2h1]では2Hz付近から低減が大きくなる。また、実験では評価できない4Hz以上の振動数範囲では、4Hz前後で谷となりその後増加傾向を示す。

安全限界地震、極大地震時の場合、解析結果は実験結果と同様に、深埋込の[Ab1h1]では0.5Hzの低振動数範囲から、また浅埋込の[Ab2h1]では1Hzを越えたあたりから低減が大きくなり、2~3Hz近傍で最小となりその後一定となる傾向を示している。全体的に解析結果は実験結果と概ね整合し、解析手法の妥当性が確認された。

### 5. 基礎入力動の簡易評価法の提案

一般の中低層建築物の耐震設計に動的相互作用の効果を導入するためには、地震時に建築物に入力する基礎入力動を適切に評価できる簡易な評価法が有用である。埋込み基礎の入力低減効果の簡易評価法として、原田<sup>11)</sup>、泉・三浦<sup>12)</sup>の提案式がある。ここでは、実験結果に対し泉・三浦の提案式の適用性を検討するとともに、より実情に則した簡易評価式の提案を行う。

泉・三浦は、限界耐力計算法<sup>9)</sup>で用いられている基礎の埋込みによる入力損失（入力低減効果）を評価する相互作用係数 $\beta'$ が、短周期領域で過大評価となるために、基礎入力動も過大評価となることを指摘し、その解決法を下記のように提案している。

(a)工学的基盤上の地盤増幅率を1.0の代わりに、解放工学的基盤に対する工学的基盤の伝達関数で評価する。

$$G_B = \frac{1.57h}{1.57h + \alpha} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$  は表層地盤と工学的基盤のインピーダンス比、 $h$  は表層地盤の等価減衰定数を示す。

(b) 地表面と工学的基盤間での増幅率を直線分布の変わりに、1次、2次の固有モードとする。地表面位置での増幅率は、限界耐力計算法の各次の増幅率 ( $G_{S1}$ ,  $G_{S2}$ ) としている。

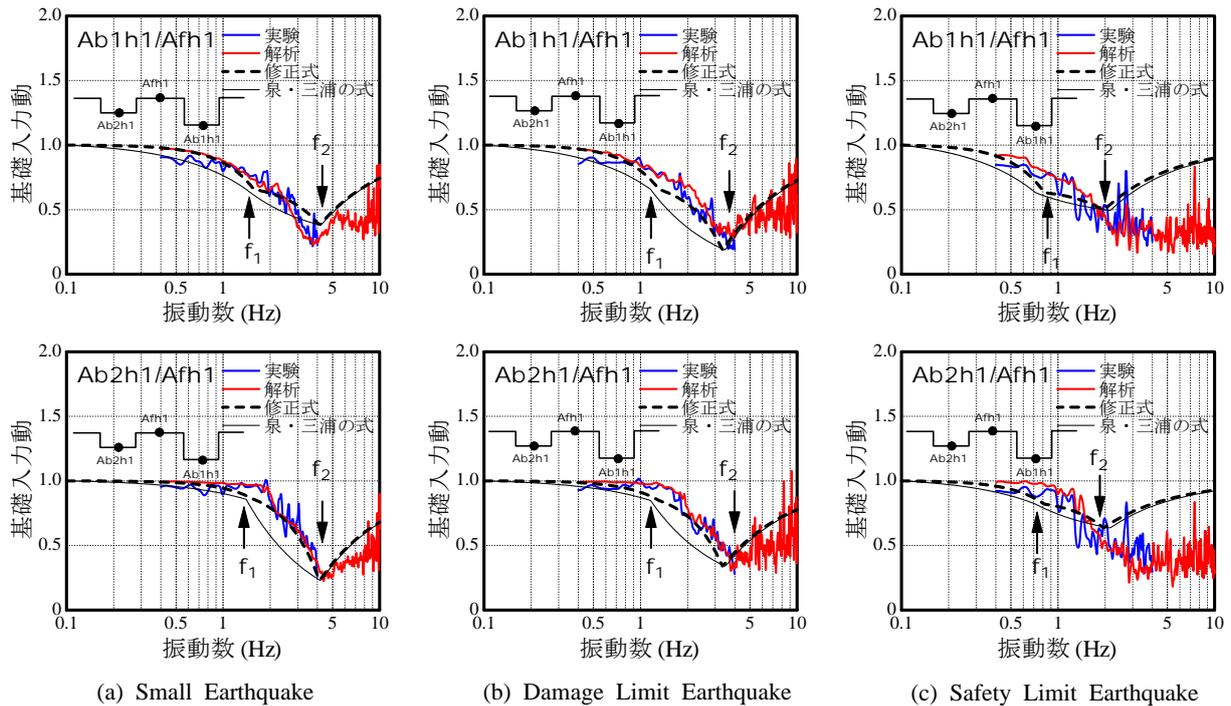
各次の相互作用係数は(2)式で与えられている。

$$\beta'(Ti) = \frac{K_{bh} \cdot G_{si}(De) + K_{he} \cdot G_{si}(De/2)}{K_{hb} + K_{he}} \cdot \frac{1}{G_{si}} \quad (2)$$

ここに、 $K_{hb}$ ,  $K_{he}$  は基礎底面と側面の水平地盤ばね、 $G_{si}(De)$ ,  $G_{si}(De/2)$  は基礎底面と基礎側面位置での地盤増幅率、 $G_{si}$  は地表面の増幅率を表す。

全周期帯での相互作用係数 $\beta'$ をTable 2に示す。(4), (5)式を適用して過去の設計事例に対して検討した結果、地盤の二次周期を $T_2 = T_1 / 3$ で評価すると、地層構成によっては精算法による2次周期に対してばらつきが多い。そこでここでは、周期 ( $T_1$ ,  $T_2$ ) として固有モード解析時の固有周期を採用し、泉・三浦の提案式に修正を加えた(7)~(8)式を用いる。

Fig.12に小地震、損傷限界地震、安全限界地震、極大地震時の実験結果と相互作用係数 $\beta'$ の計算結果の比較を示す。相互作用係数 $\beta'$ の算定に必要な水平地盤ばね（底面、側面）、地盤増幅率 $G_S$ と固有モードを算定するための地盤定数は、Fig.6に示した解析モデルの最左列の地盤要素のFEMの解析結果より得られた、各要素の有効せん断ひずみ（最大せん断ひずみ $\times 0.65$ ）と動的三軸変形試験結果から等価せん断剛性、減衰定数を評価して用いた。実験結果と比較すると、泉・三浦の提案式は実



(a) Small Earthquake

(b) Damage Limit Earthquake

(c) Safety Limit Earthquake

験結果と概ね対応している。しかし、1次固有振動数  $f_1$  と2次固有振動数  $f_2$  の間で低減効果を過大に評価していることがわかる。さらに修正式を適用することにより、この振動数帯での実験結果との対応が改善されている。

また、4Hz～10Hzの振動数範囲をFEMによる解析結果と比較すると、小地震、損傷限界地震時まではFEMによる解析結果を包絡する。安全限界地震、極大地震時では、実験、解析ともに大きく増幅することなく一定値となる傾向があるため、相互作用係数  $\beta'$  は安全側の評価となる。

また利用方法としては、相互作用係数  $\beta'$  を用い基礎の埋込みによる入力動の低減効果を考慮した設計用加速度応答スペクトル  $S_a$  を次式で算定し、上部構造物の耐震検討に使用する。

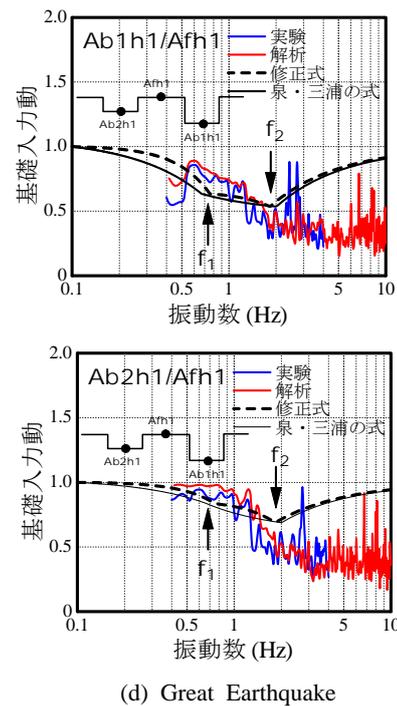
$$S_a(T, h) = \beta' \cdot \eta \cdot G_S \cdot S_{a0}(T, h = 0.05) \quad (9)$$

ここに、 $\alpha S_{a0}(T, h = 0.05)$  : 解放工学的基盤面で規定された減衰定数5%の標準加速度応答スペクトル。 $\eta$  : 連成効果による加速度低減率

## 6. まとめ

大地震時に地盤が非線形化する地盤を対象に、それに埋込まれた基礎の入力動評価に関する遠心実験の適用性を検討するとともに、埋込み深さの差異や地盤の非線形が入力低減効果に与える影響について大型せん断土槽による遠心振動台実験を行った。また、2次元非線形FEMによるシミュレーション解析結果から、以下の知見を得た。

- 1) 基礎の埋込み深さが大きいほど、水平方向の基礎入力動の低減効果が大きい。
- 2) 入力地震動のレベルが大きくなると、地盤の非線形



(d) Great Earthquake

Fig. 12 基礎入力動の実験結果、解析結果と簡易評価式の比較

### Comparison of Foundation Input Motion obtained Experiments, Analyses and Coefficient of SSI

化によりスペクトルが谷となる振動数が低振動域へ移行し、低い振動数範囲から基礎入力動が小さくなることを実験により確認した。

- 3) 2次元FEMによるシミュレーション解析を行い、地盤と基礎の応答性状を実験結果と比較した結果、実験結果

を概ね模擬することができた。

4) 今回の実験結果とシミュレーション解析結果から、基礎入力動が振動数の増加に伴い低下し、谷となる振動数以降の範囲で、基礎入力動が大きく増幅する傾向は見られなかった。

5) 既往の基礎入力動の簡易評価式は、実験結果と概ね対応する。それを過去の設計事例についての検討結果を反映させた評価式を提案し、これを適用するとさらに実験結果との対応が向上することを示した。

6) 以上より大地震時の埋込み基礎の入力動評価に対する遠心振動台実験の有用性が確認された。

#### 参考文献

- 1) 松島豊, 水野二十一, 飯場正紀他: 有効入力に着目した埋込み構造物の模型振動実験とその解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B, pp. 517-526, (1986. 8)
- 2) 飯場正紀, 田守伸一郎, 北川良和: 建物—地盤連成系模型の振動台実験による杭基礎への地震作用の基本性状, 日本建築学会論文報告集, 第566号, pp. 29-36, (2003. 4)
- 3) 大田外気晴, 丹羽正徳, 上野薫: 軟弱地盤上杭基礎建物の地震応答性状, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 540-546, (1978. 11)
- 4) 井口道雄, 宇波桃子, 安井譲, 箕輪親宏: 大型振動台基礎と周辺地盤の同時地震観測に基づく基礎入力動, 日本建築学会論文報告集, 第537号, pp. 61-68, (2000.)
- 5) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第587号, pp. 77-84, (2005.)
- 6) 安井譲, 井口道雄, 赤木久真, 林康裕, 中村充: 1995年兵庫県南部地震における有効基礎入力動に関する考察, 日本建築学会論文報告集, 第512号, pp. 111-118, (1998)
- 7) 壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一, 額瀨一起, 工藤一嘉, 真田靖士: 2004年新潟県中越地震における余震観測と被害調査による入力地震動の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. C-2, pp. 719-720, (2005.)
- 8) 例えば, 藤森健史, 栗本修, 若松邦夫: 大型遠心せん断土槽実験に基づく群杭基礎の強震時応力特性評価, 大林組技術研究所報, No. 66, pp. 31-36, (2003. 1)
- 9) 国土交通省建築研究所編著: 改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景, ぎょうせい, (2001. 3)
- 10) 安達直人, 渡辺哲史, 引田真規子, 宮本裕司: 地盤の非線形性を考慮した低層建物の入力損失効果の検討, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 686-689, (2006)
- 11) 原田隆典他: 有効地震動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文報告集, No. 362, pp. 435-440, (1985)
- 12) 泉洋輔, 三浦賢治: 限界耐力計算法における基礎入力動評価の合理化に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第616号, pp. 57-65, (2007. 6)