

(79) 減衰効果を考慮した基礎の浮き上り応答解析手法の提案

(財) 電力中央研究所 ○大友敬三
岩楯敏広

1. はじめに

強震時において基礎に浮き上りが生じた場合には、基礎底面地盤からの波動伝播の遮断や、基礎が再接地する時のエネルギー損失などの影響により減衰効果が現れてくるものと考えられ、著者らは既にこの現象を実験的に明らかにしている¹⁾。したがって、基礎浮き上りに伴う幾何学的非線形性を考慮した地震応答解析を行う場合には、浮き上り時の減衰効果を定量的に把握し、これを解析アルゴリズムに組み込む必要がある。

本研究は、浮き上りによる減衰効果を評価し得る解析手法を提案することを目的とするものであり、地盤・基礎連成模型を対象とする振動台実験で得られたデータに基づいて非線形S-R解析モデルを作成し、これによる応答解析を実験結果に適用して、解析手法の妥当性について検討したものである。

2. 振動台実験の概要

まず、応答解析を適用した基礎浮き上りに関する振動台実験の概要について説明する。

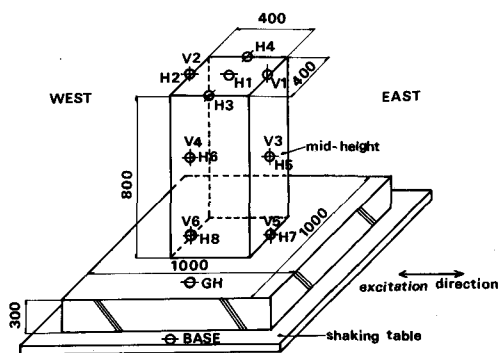
図-1に示すように振動台上に地盤・基礎連成模型を設置した。本実験では、なるべく単純化した形で浮き上り現象を再現できるように意図した。

地盤模型の寸法は100cm×100cm×30cmで、材料には弾性体とみなせるシリコンゴムを用いた。振動計測が容易でかつ、なるべく柔らかいことなどの条件を満たす範囲内で硬質、軟質の2種類の地盤を用意した。両者の地盤の弾性諸定数は弾性波速度測定により求め、表-1に示す値となった。

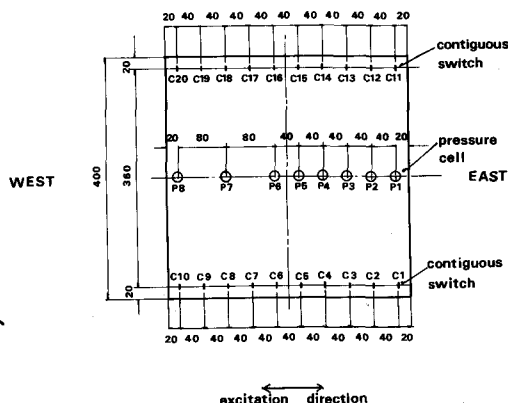
基礎模型は模型自身の弾性変形を防ぐため、アクリル製の剛体とした。寸法は平面寸法40cm×40cm、高さ80cm、と背を高くし、ロッキングによる浮き上りが生じやすいプロポーションとした。全体重量は100kgfである。

基礎には図-1(a)に示すようにひずみゲージ式加速度計を配置した。また、地盤には図-1(b)に示すような間隔で半導体型の土圧計、接点出力型の近接スイッチをそれぞれ8個、10個×2列、埋設し、接地率（基礎が浮き上った時の接地長ささと基礎長さの比）を詳細に調べられるように意図した。近接スイッチは基礎底面に埋込んだターゲット金属と反応することにより地盤と基礎の離間を電氣的に直接、計測できるセンサーである。

振動台による加振は水平加振とし、浮き上り応答



(a) 加速度計の配置



(b) 土圧計、近接スイッチの配置

図-1 地盤・基礎連成模型と測点配置

特性の把握を主目的とする定振動数正弦波加振、浮き上りによる減衰特性の把握を主目的とする正弦波振動数ステップ加振（浮き上り共振試験）、後述する応答解析手法の適用を主目的とする地震波加振（EL CENTRO波（時間軸 1/5）を模擬したもの）であり、それぞれ入力加速度を小から大へと変化させた加振を行った。振動台実験の結果から、浮き上りに伴って水平応答の共振振動数および加速度応答倍率が低下すること、上下動入力が無くても上下動が誘発されること、などの諸特性を確認したが、これの詳細については文献1）を参照してもらいたい。

3. 応答解析手法

(1) モデル化

地盤・基礎連成模型を図-2に示すような1質点系の単純なS-Rモデルにモデル化した。このモデルのロッキングばねは浮き上りを表現させるために非線形で、スウェイばねは線形で取り扱うこととした。線形範囲内のばね定数は静的FEM解析により算定した。

静的FEM解析から算定したばね定数値が妥当であるかを確認するために固有値解析を行った。地盤と基礎を分離した状態での自由振動試験で得られている固有振動数と固有値解析結果を比較したが、実験値の固有振動数と概略一致させるために表-1で示した弾性波速度測定に基づく弾性定数値を若干、修正したうえでばね定数値を決定した。

(2) M-θ曲線の設定

本解析では、ロッキングばねの非線形性を、地盤反力係数法に基づき、基礎下端に働く転倒モーメントMと基礎中心回転角θの関係、すなわちM-θ曲線²⁾で考慮した。M-θ曲線は次式で表せる。

$$M/M_0 = 3 - 2\sqrt{\theta_0/\theta}, \quad M_0/\theta_0 = K_{R0} \quad (1)$$

ここに、 M_0 、 θ_0 ：それぞれ浮き上り限界モーメント、限界回転角、 K_{R0} ：線形ロッキングばね定数、である。また、(1)式はロッキングばねの接線剛性が接地率の3乗に比例して低下することを意味している。

図-3に軟質地盤のM-θ曲線を示す。同図中には定振動数正弦波加振から得た実験値、および地盤と基礎の間に図-4の応力-ひずみ関係で示されるジョイント要素を挿入した静的FEM解析によるMとθの関係を示してあるが、それぞれのM-θ関係は比較的、良く対応している。このことより、(1)式のM-θ曲線が浮き上り応答解析に十分適用できるものと判断できる。

表-1 模型地盤の弾性諸定数

type	γ [gf/cm]	ν	E [kgf/cm]	G [kgf/cm]	V_s [m/s]	V_p [m/s]
Herd	1.466	0.266	34.2	13.5	30	53
Soft	1.442	0.208	10.3	4.3	17	28

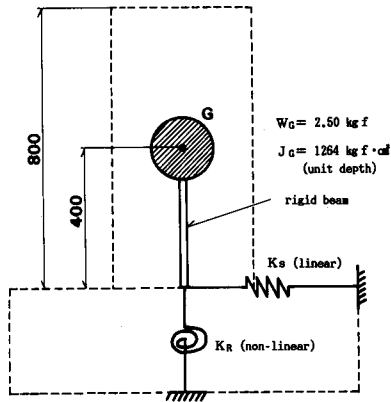


図-2 地盤・基礎連成模型のモデル化

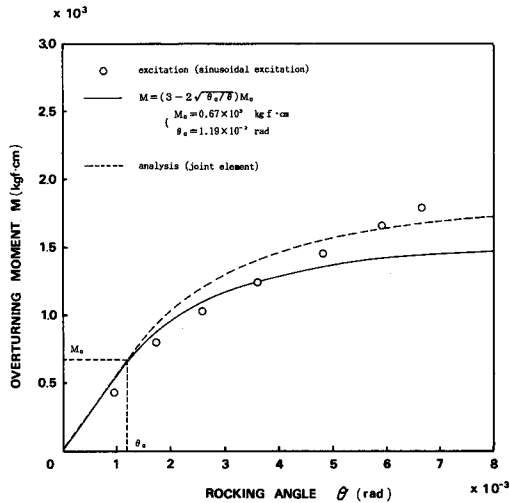


図-3 M-θ曲線

(3) 減衰特性の設定

本解析では、非線形ロッキングばね部の減衰に対して浮き上り時の減衰特性を導入した。図-5中のプロットは軟質地盤を対象とし、入力加速度の大きさを変化させた浮き上り共振試験の結果に基づいて整理した接地率 μ と地盤・基礎連成モデルのモード減衰定数 h の関係である。接地率の減少、すなわち浮き上りの進行に伴って減衰定数が顕著に増加することがわかる。

これに対して、減衰定数が接地率の3乗の逆数に比例すると仮定した関係式、

$$h = h_0 \cdot (1/\mu^3) \quad (2)$$

h_0 : 浮き上り前の減衰定数

を同図中に示したが、(2)式は実験値の傾向をほぼ良くとらえているとみなせる。(2)式は(1)式で示したロッキングばねの剛性低下と双対的な関係を示すものといえる。(2)式で示される減衰特性は浮き上り時の減衰量を積極的に評価できるものであり、これを応答解析に組み込むこととした。

(4) 動的解析

浮き上り現象は非線形な振動系となるため、本解析では振動方程式を時刻歴の逐次計算により、直接積分して解く。また、(2)式の減衰特性を次式のような形で解析的に評価した。

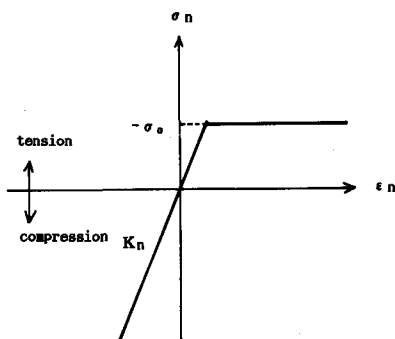
$$[Ce] = h_0 [Ke] / \pi f_0 \quad (3)$$

ここに、 h_0 、 f_0 : それぞれ、浮き上り前の減衰定数、固有振動数、 $[Ce]$ 、 $[Ke]$: それぞれ、ばね要素部の減衰行列、剛性行列である。(2)式の関係を保つために $[Ke]$ の変化(剛性低下)に応じて h_0 だけが接地率の3乗の逆数に比例して増加するように変化させ、 $[Ce]$ は一定とするように設定した。 $[Ke]$ はNewton法により各時間ステップごとに变化させた。直接積分の方法にはNewmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた。積分の時間間隔は0.0025秒である。

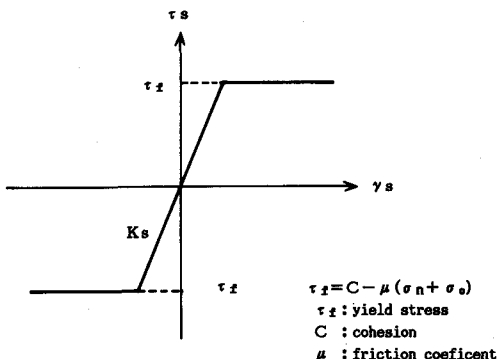
4. 解析結果

ここでは、軟質地盤を対象とした解析結果について説明する。

まず、浮き上りを伴う基礎の応答に対して図-2のモデルで線形解析を行った結果を例示する。図-6は地震波(最大入力加速度239gal)を入力したケ



(a) normal direction



(b) shear direction

図-4 ジョイント要素の応力-ひずみ関係

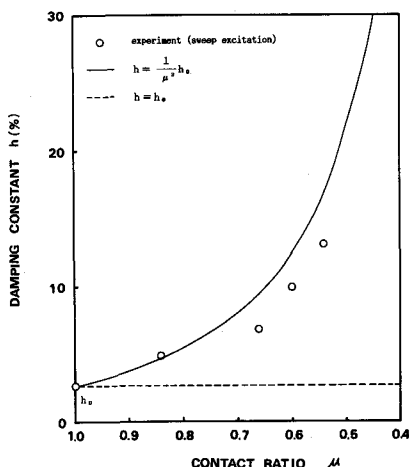


図-5 接地率とモード減衰定数の関係

ースの基礎重心の水平応答の加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) の実験値と解析値の比較である。なお、この場合の応答は接地率65%である。何よりも、線形解析では浮き上りを伴う基礎の応答を過大に評価しており、浮き上り時の減衰効果を適切に導入した非線形解析を適用すべきことが示唆される。

一方、同じケースの基礎重心の水平応答について、実験結果と本解析による加速度応答スペクトルを比較したものを図-7に示す。卓越周期の位置については実験結果と解析結果では若干のずれは生じているものの応答値については実験結果と良く一致する。卓越周期の位置がずれているのは本解析で設定した $M-\theta$ 曲線の剛性低下の精度がやや低かったためと考えられる。

図-8は基礎重心の上下応答についての比較である。実験値のスペクトルの0.05秒に現われているピークは基礎が浮き上って地盤と衝突することにより誘発された上下動と考えられるが、本解析ではこれに関して表現できていない。これは図-2で示したS-Rモデルには誘発上下動を評価する要素が含まれていないためである。

本報で提案したS-Rモデルによる解析手法を検証するため、地盤と基礎の離間を図-4のような応力-ひずみ関係で表現したジョイント要素を挿入した動的FEMによる解析を行った。解析結果は図-7, 8に示してあ

るが、S-Rモデルとジョイント要素モデルの両者の応答スペクトル形状は概略一致し、いずれも実験結果とほぼ対応していることがわかる。このことから、本研究で提案したS-Rモデルによる解析手法が減衰効果を考慮した基礎の浮き上り応答評価に十分適用できるものと判断される。

5. まとめ

本報では、振動台実験データに基づいて、浮き上り時の減衰効果を評価し得るS-R解析モデルを提案し、解析手法の妥当性を実験結果およびジョイント要素モデルによる解析結果との照合により明らかにした。今後は、誘発上下動の評価も可能なようにモデルの改良を進めていく予定である。

＜謝 辞＞ 本解析を行うにあたっては、日科技研(株)の方々の御助力を得た。未筆ながら深謝の意を表すものである。

＜参考文献＞ 1) 大友 ほか：基礎の浮き上り振動に関する検討（減衰効果を考慮した解析手法の提案）、電中研報告 No U 86062, 1987。
2) 日本電気協会：建物の地震時の基礎浮き上りの評価法, 1986。

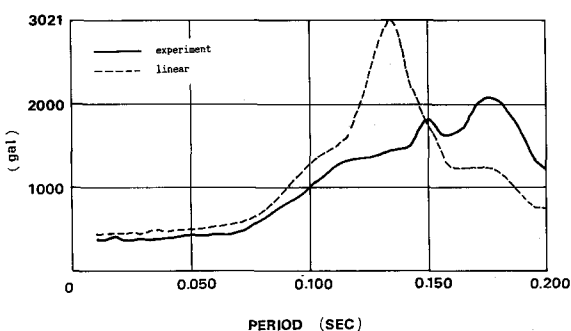


図-6 水平応答の加速度応答スペクトル (線形解析)

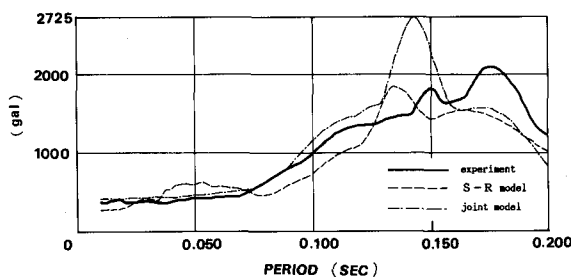


図-7 水平応答の加速度応答スペクトル (非線形解析)

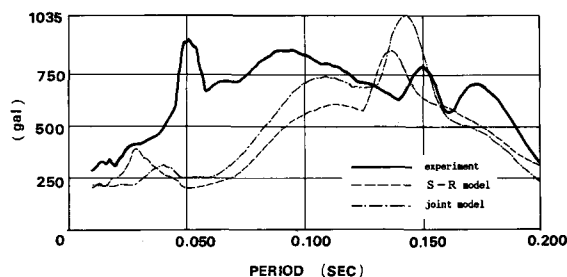


図-8 上下応答の加速度応答スペクトル (非線形解析)