

動的地盤ばねの幾何学的非線形性を考慮した基礎浮上り解析

Uplift Analysis of Base Mat Considering Geometrical Nonlinearity of Dynamic Ground Impedance

福和 伸夫*

小柳 義雄*

市川 隆之*

by Nobuo Fukuwa, Yoshio Koyanagi, Takayuki Ichikawa

The method of a seismic response analysis considering the uplift of a base mat based on the wave propagation theory is proposed. In order to consider the effect of vertical response that results from the uplift and from a vertical input motion, the nonlinearity of spring constants and viscous damping coefficients due to reduction of the contact area between the base mat and the ground is introduced. The spring constants are given by the static spring constants of a rectangular foundation, and the damping coefficients are calculated from the imaginary part of dynamic impedance functions at the first natural frequency of the soil-structure system. The dynamic restoring forces of springs are obtained by considering the nonlinearity of springs and the eccentric length between the center of a base mat and of a contact area.

As a result of an application to the typical BWR Mark II nuclear reactor building, it is found that the horizontal response is influenced a little by a vertical input motion but the vertical response is fairly generated by uplift.

1. はじめに

我が国の原子力発電所は硬質岩盤上に立地することが多いが、特に、高地震帯では、耐震設計上、基礎浮上りが重要な問題点となっている。しかし、基礎浮上り問題については未だ十分に解明されているとはいえず、解析的研究や実験的研究により種々の検討が行われている。

基礎浮上り解析のポイントは、地震応答解析モデルでの基礎浮上りの考慮の仕方と、地震応答解析結果の接地率(または浮上り率)評価である。

既往の主な研究には以下のものがあり、それぞれの観点から浮上り問題を論じている。

水平・回転方向に地盤ばねの非線形性を考慮した解析例として、長瀬ら¹⁾の動的グラウンドコンプライアンスを考慮して補正外力を用いた解析、佐々木

ら²⁾の浮上りを考慮した動的地盤ばねを用いた解析がある。市川ら³⁾は基礎版下にウィンクラースpringを設け滑動も考慮した解析を行っている。浮上り・滑動を考慮した解析としてはWolf⁴⁾もある。他に、水平2方向入力時に浮上に伴う捻れ応答が生じることを示した田治見ら⁵⁾の研究がある。

上下方向入力を考慮した解析としては、武藤ら⁶⁾、山田ら⁷⁾の研究がある。いずれも地盤係数法による地盤ばねを用い、前者は水平・上下の2方向、後者は水平2方向と上下の3方向の地盤ばねの浮上り非線形性を考慮した解析である。

剛基礎の地盤反力分布を用いた解析としては、剛な基礎のモーメント-回転角関係を簡略的に求め、回転非線形を考慮したZinnら⁸⁾の研究がある。

また、構造物-地盤系を2次元FEMでモデル化し

* 工修 清水建設(株) 大崎研究室 (〒100 東京都千代田区 内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

構造物—地盤間に剥離と滑動を表現するジョイント要素を設け、一体として解析した土岐ら⁹⁾、林ら¹⁰⁾の研究がある。この手法では、接地率は直接的に求めることができる。

実験的研究としては、上田ら¹¹⁾、矢野ら¹²⁾の一連の研究があり、浮上り現象の解明、解析方法の検証が行われている。しかし、通常の模型実験では、模型地盤が薄く、浮上りの生じやすい重心の高い試験体が用いられている。

一方、設計で慣用されている地震応答解析モデル¹³⁾は、構造物を質点系、地盤を相互作用ばねとしたスウェイ・ロッキングモデルであり、地盤の回転ばね定数のみに幾何学的非線形性を考慮することにより、基礎浮上りの影響を取り入れている。しかし、地盤係数法に基づいており、地盤ばねの非線形性の考え方および上下地震動の考慮の仕方に不明確な点を残している。

即ち、地盤係数法に基づいた解析では、一般に上下方向の地盤係数が回転ばねから求められ、上下ばねが2倍程度大きく評価されている。そのために、上下動も考慮して解析する場合、上下方向の振動特性が変化するおそれがある。

そこで、本論では接地面積に応じた地盤ばねを算定し、基礎中心と接地面中心の偏心距離を考慮して基礎浮上り時の地盤反力を求めることにより、減衰も含め、地盤ばね全成分の幾何学的非線形性を考慮した応答解析方法を提案する。本解析法は比較的簡易に地盤ばねの非線形性、上下動入力の導入が可能であり、耐震設計への応用が期待できる。

2. 解析方法

基礎浮上り問題は、本質的には基礎版の接地面積の変化による幾何学的非線形問題である。そこで、接地面積に応じた地盤ばねを各時間ステップ毎に設定するとともに、基礎版中心と接地面中心との偏心距離の変動を考慮して解析を行う。

図-1のように基礎幅 L 、基礎奥行 D の矩形基礎版を有する重量 W の構造物を対象とする。

図-2のように浮上り時の基礎版中心位置の釣合いを考えると、基礎版中心位置の地盤反力は、

$$N = N_S + N_D \\ = N_S + K_V(u_y + e \cdot u_\theta) + C_V(v_y + e \cdot v_\theta) \quad \dots (1)$$

$$Q = K_H \cdot u_x + C_H \cdot v_x \quad \dots (2)$$

$$M = K_\theta \cdot u_\theta + C_\theta \cdot v_\theta + e \cdot N - e \cdot u_\theta \cdot Q \quad \dots (3)$$

$$e = \frac{1}{2} \text{sign} u_\theta \cdot (L - l)$$

と得られる。ここに、 N 、 Q 、 M は上下、水平、回転方向の地盤反力、 $N_S (= W/g)$ は上下方向の静的地盤反力、 N_D は動的地盤反力である。 u_x 、 u_y 、 u_θ は各々基礎版下端中心における水平、上下、回転方向の動変位、 v_x 、 v_y 、 v_θ は各方向の速度、 l は接地長さ、 e は基礎版中心と接地面中心の偏心距離である。また、 K_H 、 K_V 、 K_θ 、 C_H 、 C_V 、 C_θ は各々基礎版形状が $l \times D$ の矩形基礎の水平、上下、回転方向の地盤ばね定数および減衰係数であり、動的地盤ばねをばね定数と粘性減衰係数に置換している。

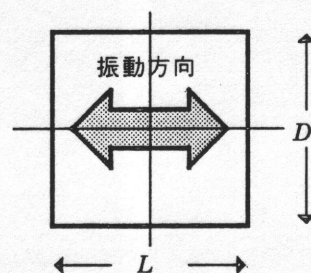


図-1 対象構造物の基礎平面形状

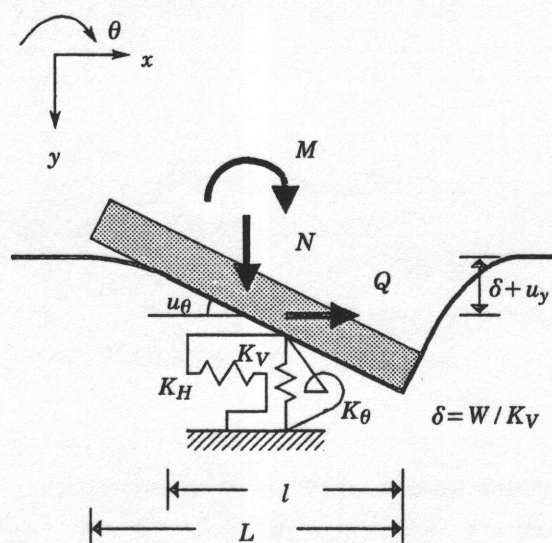


図-2 基礎浮上り時概念図

(1)~(3)式において接地長さ l は基礎版下の反力分布に応じて求められる。反力分布を線形仮定すると浮上り限界モーメントは $M_U = NL/6$ で与えられ、

$$l = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{M}{N} \right) : M > NL/6 \quad \dots (4)$$

$$= L : M \leq NL/6$$

のように接地長さ l が求められる。剛な帯基礎の静的反力分布¹⁴⁾を仮定すると、浮上り限界モーメントは $M_U = NL/4$ となり、接地長さ l は、

$$l = 4 \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{M}{N} \right) : M > NL/4 \quad \dots (5)$$

$$= L : M \leq NL/4$$

で与えられる。現実の構造物では(4)~(5)式の中間になると考えられる。本論では応答に与える反力仮定の影響を考察する。

構造物に対する動的地盤反力は(1)~(3)式から復元力 Q として与えられ、

$$Q = (Q, N_D, M) \quad \dots (6)$$

最終的に解くべき釣合い方程式は、(7)式となる。

$$M \cdot a + C \cdot v + K \cdot u + Q = -M \cdot a_0 \quad \dots (7)$$

ここに、 a 、 v 、 u は加速度、速度、変位ベクトル、 a_0 は入力加速度ベクトル、 M 、 C 、 K は構造物系の質量、減衰、剛性マトリックスである。解析の手順は、まず前ステップで得られた復元力を用いて接地長さ l を(4)または(5)式により求め、浮上り判定をし、地盤ばね定数 K_H 、 K_V 、 K_R および減衰係数 C_H 、 C_V 、 C_R を求める。次に(6)式により動的復元力を求め、(7)式を解く。この一連の計算を各時刻ステップで解が収束するまで繰り返し行う。

3. 動的地盤ばねの幾何学的非線形性

一般に動的地盤ばね K_D は周波数特性を有しているが、ここでは図-3に示すように、静的ばね定数 K_S と構造物・地盤連成系の1次固有振動数位置で定義した粘性減衰係数 C で近似する。すなわち、

$$K_D = K_R + i \cdot K_I \approx K_S + i \omega \cdot C \quad \dots (8)$$

矩形基礎の地盤ばね定数は、一様分布荷重が作用する場合の中心点評価および平均評価時には解析的に求められるが、剛基礎や柔性基礎の場合には離散化手法により求める必要がある。例えば、一様分布

荷重時の中心点評価の場合には、

$$K_V = \frac{0.8814 \times K_{V0}}{\lambda \log\{(\sqrt{1+\lambda^2} + 1)/\lambda\} + \log(\sqrt{1+\lambda^2} + \lambda)}$$

$$K_H = \frac{0.4407 \cdot (2-\nu) \times K_{H0}}{\lambda \log\{(\sqrt{1+\lambda^2} + 1)/\lambda\} + (1-\nu) \log(\sqrt{1+\lambda^2} + \lambda)}$$

$$K_\theta = \frac{0.1102 \times K_{\theta 0}}{\lambda^3 \log\{(\sqrt{1+\lambda^2} + 1)/\lambda\}} \quad \dots (7)$$

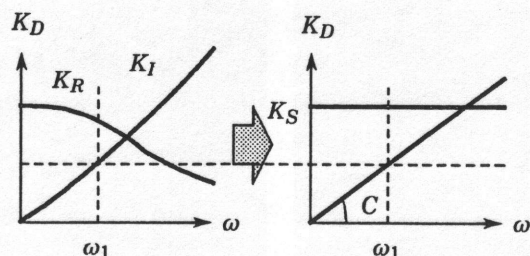
と表される。ここに、 K_{V0} 、 K_{H0} 、 $K_{\theta 0}$ は $D \times D$ の正方形基礎版のばね定数、 μ 、 ν 、 λ は地盤のせん断弾性係数、ポアソン比および基礎版のアスペクト比 ($\lambda = D/l$) である。

また、減衰係数は解析的に求めることはできないので、動的ばねの虚数部分の傾きから求める。

図-4に地盤定数が $V_S = 1000 \text{ m/s}$ 、 $\nu = 0.4$ 、 $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$ 、基礎形状が $80 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ のときのばね定数および減衰係数と接地長さとの関係を正方形基礎版に対する補正係数として示す。地盤ばねの評価は一様分布荷重時の中心点評価による。なお、減衰係数を算定した振動数は 5 Hz とし、接地率による固有振動数の変動は考慮していない。

同図にみられるように、ばね定数・粘性減衰係数ともに、水平・上下の並進成分では接地長さと比較的線形関係に近いが、回転成分は接地長さの変化に非常に敏感である。

地盤係数法は、本解析法と比較すると、全面接地時の上下ばね定数を2倍程度大きく、かつ上下ばねの粘性減衰係数を1/2以下に評価している。これは基本的に異なる上下モードと回転モードを同一の地盤係数で表現しているためである。また、接地率による地盤ばねの変動が本解析法と地盤係数法とでは大きく異なっており、浮上り時の振動特性に差異があ



(a) 動的地盤ばね (b) 近似地盤ばね

図-3 動的地盤ばねの近似

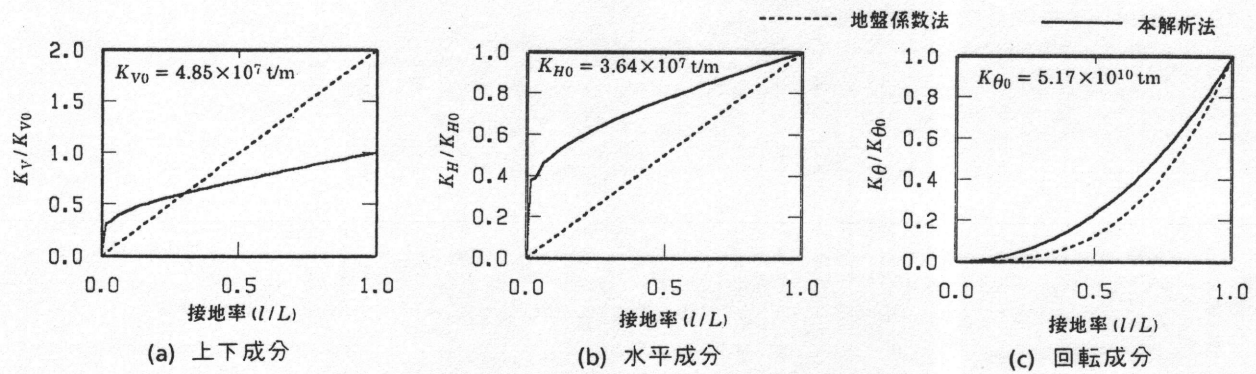


図-4 接地率と地盤ばね定数の関係

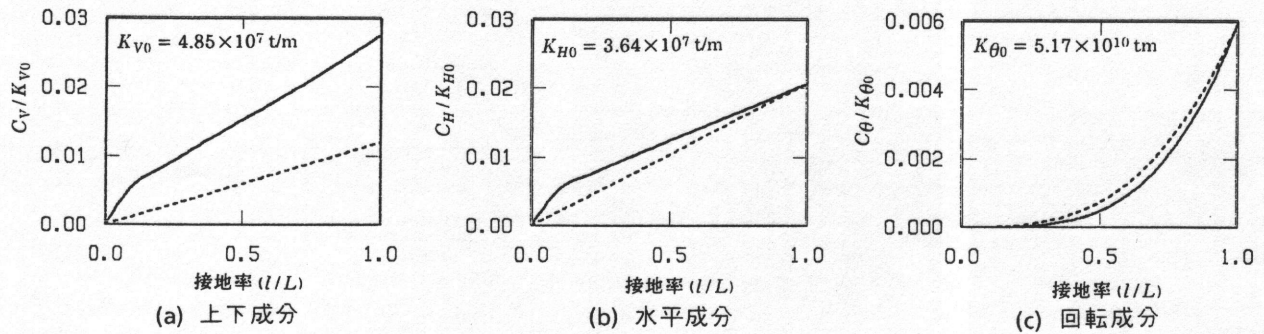


図-5 接地率と粘性減衰係数の関係

ることが予想される。

なお、地盤ばね定数・粘性減衰係数の接地長さによる補正係数はポアソン比、地盤ばねの評価方法にはあまり依存しない。

4. 静的なモーメントー回転角関係

本解析法は基本的に動的なモーメントー回転角関係を与えるが、既往の解析法と比較するために、図-6に静的なモーメント(M)ー回転角(θ)ー接地率(l/L)関係を示す(地盤定数：表-1、基礎寸法：80m×80m、構造物重量：317000t、地盤ばね：一様応力分布中心点評価)。同図には、接地率算定時に線形の反力分布を仮定した場合($M_U = NL/6$)と、剛な帯基礎の反力分布を仮定した場合($M_U = NL/4$)が、地盤係数法と比較して示されている。

線形の反力分布を仮定した本解析法($M_U = NL/6$)と地盤係数法とは $M-l$ 関係が一致しているので、浮上り開始時のモーメントは等しいが、図-5に示した回転ばねの差によって浮上り後のモーメントは本解析法($M_U = NL/6$)の方が大きくなっている。一方、剛基礎の反力分布を仮定した場合($M_U = NL/4$)は $M-l$ 関係が前2者と異なり、浮上り開始時のモーメントが大きくなるが、 $M-\theta$ 関係は線形の反力分布を仮定した場合と大きな差異は見られない。

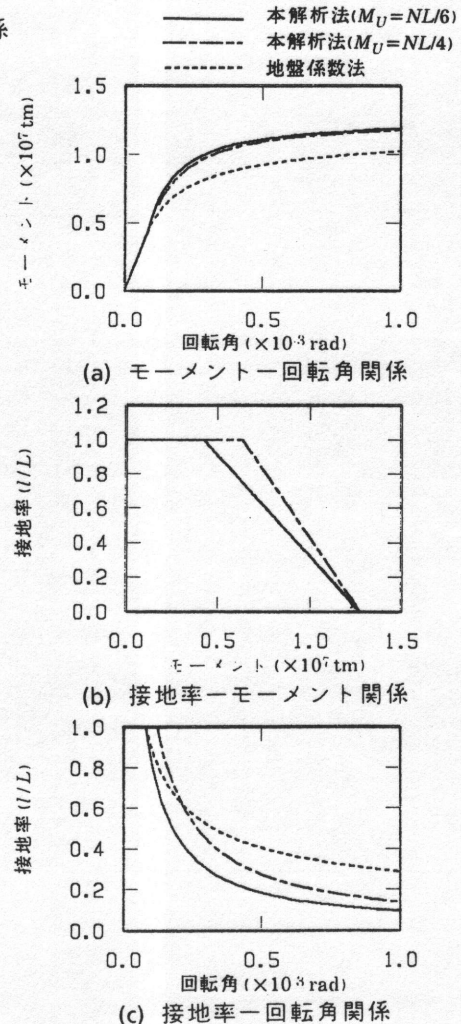


図-6 静的モーメント加力時の $M-\theta-l$ 関係

5. 適用例

本論で提案した解析方法を標準的なBWR MARK II型原子炉建屋の地震応答解析に適用する。地盤条件は表-1に示すように比較的硬質な岩盤とし、建屋は1本棒の質点系にモデル化する。建屋諸元を表-2に示す。入力地震波はEl Centro 1940 NSおよびUDを、水平最大加速度が800Galになるように基準化して用いる。図-7~8に加速度波形および加速度応答スペクトル($h=0.05$)を示す。数値計算は収れん法により、時間刻みを0.002秒、収れん回数を3としている。

接地率の変化とともに地盤ばね定数が変動し、建屋・地盤連成系の固有振動数は接地率の関数となる。表-3に代表的な接地率に対する水平および上下方向の1次固有振動数を示す。接地率が小さくなると地盤ばねが減少するために水平・上下方向ともに長周期化している。地盤ばねは一様応力分布平均評価により算定している。また、地盤ばねの減衰係数算定時に各時刻における固有振動数の変動を考慮する。

図-9に建屋の最大応答加速度分布を地盤係数法による結果と比較して示す。

水平応答には解析方法・上下動入力の有無に拘らず大きな差異は見られないが、上下応答は本解析法と地盤係数法とで大きく異なっている。これは、地盤係数法では、上下ばねが大きいために建屋の弾性変形による増幅効果が大きく、かつ上下方向の減衰係数が小さいためと考えられる。また、水平入力の場合、基礎浮上りによって励起される上下動の値は、本解析法では水平応答の1/3~1/4、地盤係数法では約1/2~1/3となっており、浮上りに伴う上下応答はかなり大きいことがわかる。一方、本解析法の反力分布の仮定による応答の差は、水平入力時の上下応答において建屋上部で見られるのみである。

図-10~11に燃料取替床位置(質点番号8)及び基礎版上端位置における床応答曲線を示す。

水平応答については、浮上りの影響の大きい固有振動数の3倍調位置で、本解析法($M_U=NL/6$)と地盤

表-1 地盤諸元

せん断波速度 V_S (m/s)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (t/m ³)	せん断弾性係数 G (t/m ²)
1,000	0.4	2.0	204,080

表-2 建屋諸元表

建屋モデル 質点番号 高さ m	重量 $\times 10^3$ t	回転慣性 $\times 10^5$ t $\cdot$ m ²	軸断面積 m ²	せん断断面積 m ²	断面2次モーメント $\times 10^4$ m ⁴
10 ● 76.5	3.5	9.5	70.	50.	4.
9 ● 65.0	3.6	11.5			
8 ● 57.0	13.9	32.4	110.	50.	5.
7 ● 46.3	27.9	57.0	610.	130.	6.
6 ● 38.3	20.0	64.0	650.	210.	11.
5 ● 30.8	20.8	75.0	650.	290.	15.
4 ● 24.5	40.4	180.0	670.	350.	17.
3 ● 18.7	33.6	210.0	1290.	510.	39.
2 ● 12.5	30.1	190.0	1600.	590.	46.
1 ● 3.3	123.2	660.0	1600.	590.	47.

建屋総重量317,000t
基礎版は80m×80mの正方形基礎

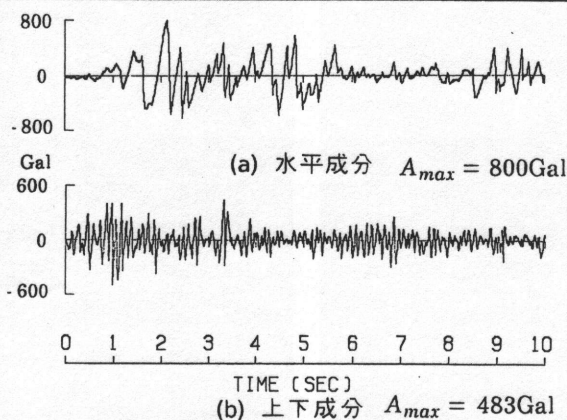


図-7 入力波の加速度波形

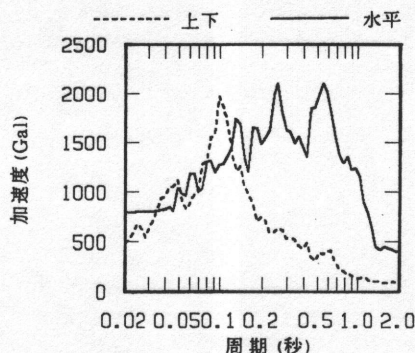


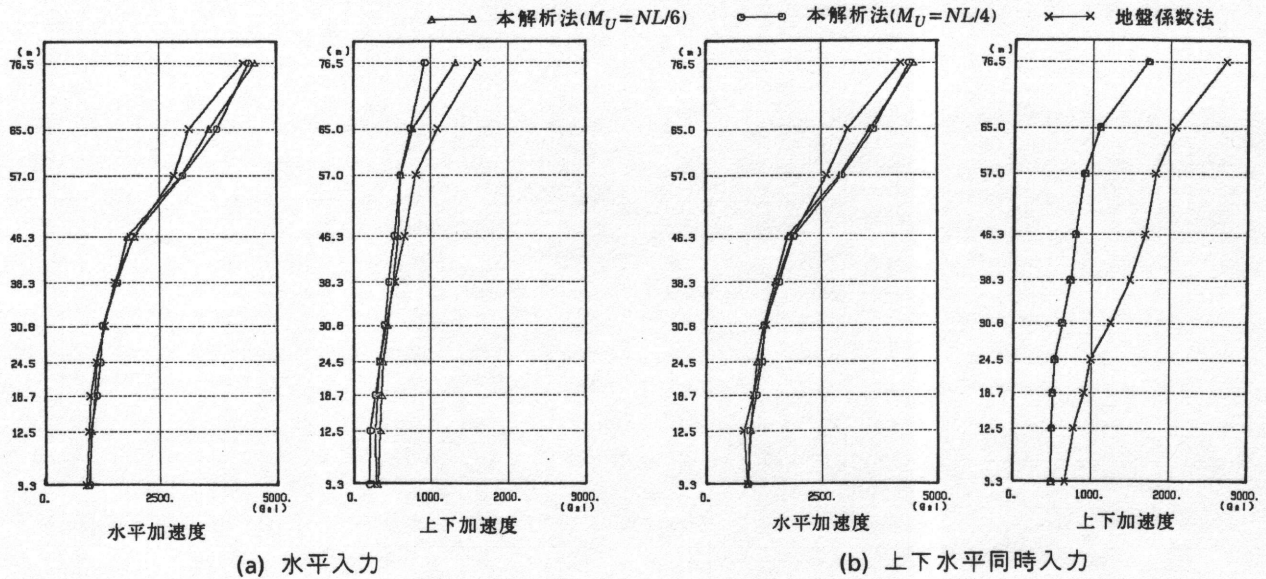
図-8 入力波の加速度応答スペクトル

係数法とに若干の差異が見られるが、概ねよく対応している。

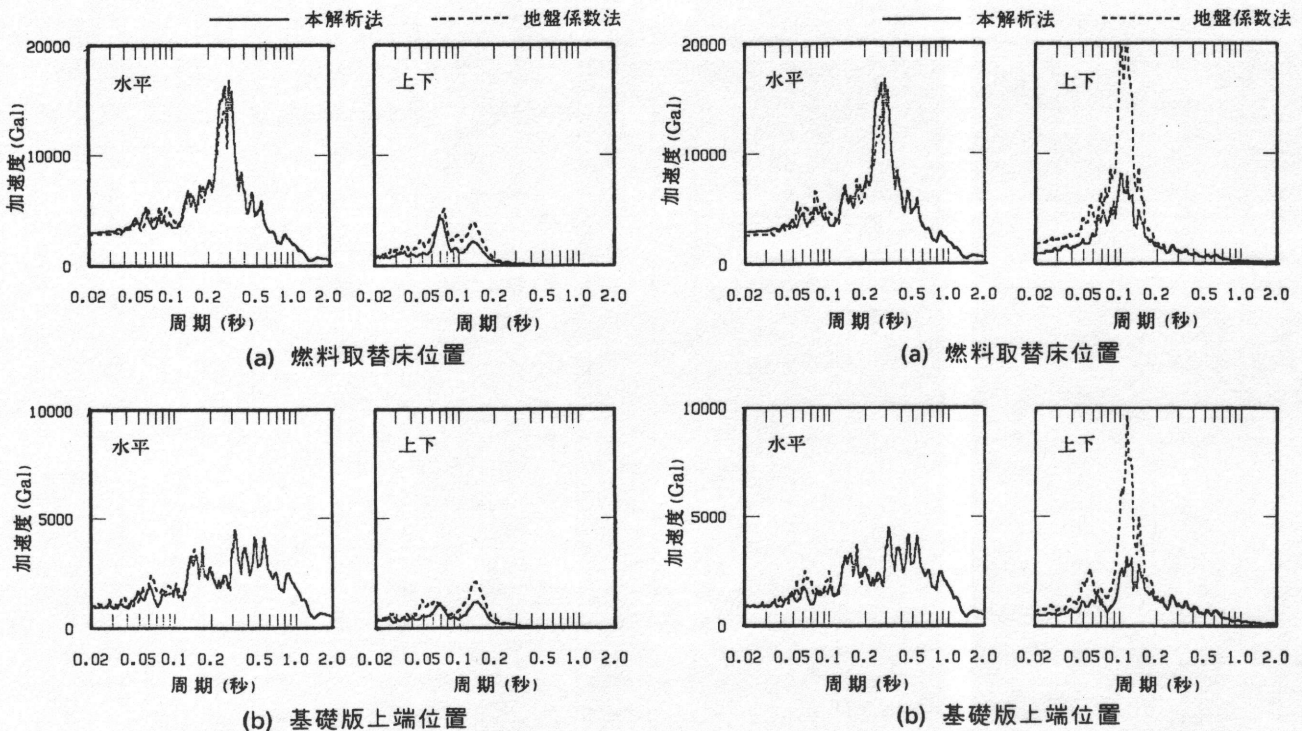
上下応答については、水平入力の場合、応答成分が0.2秒以下の短周期のみとなっているが、これは、上下応答が基礎浮上によって励起されるためであり、地盤係数法の方が大きな値となっている。一方、上下水平同時入力時には解析方法によって応答の差が明瞭に現れている。地盤係数法では、固有周期(約0.11秒)が入力上下動の卓越周期に一致しており、かつ上下方向の減衰係数が小さいために大きな上下応答を生じている。

表一3 接地率と固有振動数

	接地率 l/L	水平1次固有振動数 (Hz)	上下1次固有振動数 (Hz)
本解析法	1.00	3.467	6.242
	0.75	3.169	5.882
	0.50	2.595	5.435
	0.25	1.521	4.823
地盤係数法	1.00	3.467	8.802



図一9 最大応答加速度分布



図一10 水平入力時の床応答曲線

図一11 上下水平同時入力時の床応答曲線

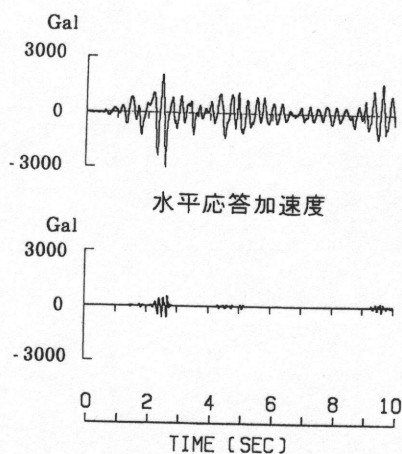
図-12~13に燃料取替床位置の水平及び上下応答波形を示す。図-12は本解析法($M_U=NL/6$)、図-13は地盤係数法による結果である。水平応答については解析方法や上下動入力の有無に拘らず同様の応答特性を示している。上下応答については、水平入力時には浮上り時に発生する上下力によって上下動が励起され微小時間で減衰しているが、上下水平同時入力時には、本解析法と地盤係数法とは応答振幅・位相ともに異なった特性を示している。本解析法の応答波形は比較的水平上下動の位相特性に類似しているのに比べ、地盤係数法の応答波形は包絡波形が入力動と異なっており、建屋の増幅特性が反映されている。

図-14~16に基礎版の接地率の時刻歴波形を、表-4に最小接地率を示す。

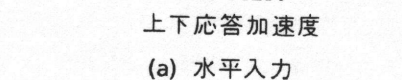
まず、水平入力の場合、接地率波形を比較すると、解析方法による差異はあまりみられない。接地率は、本解析法($M_U=NL/4$)が最も大きく、

表-4 最小接地率

解析方法	入力方向	接地率 (%)
本解析法 ($M_U=NL/6$)	水平	40
	水平+上下	39
本解析法 ($M_U=NL/4$)	水平	57
	水平+上下	58
地盤係数法	水平	54
	水平+上下	50
慣用設計法	上下震度考慮	0
	上下震度無視	32

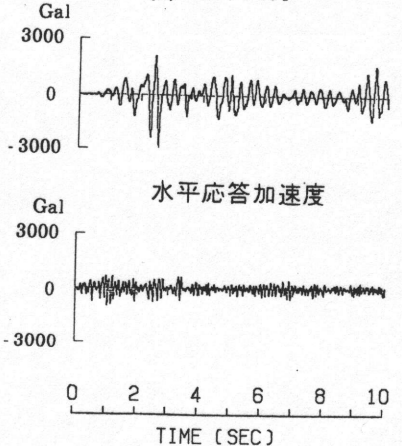


水平応答加速度

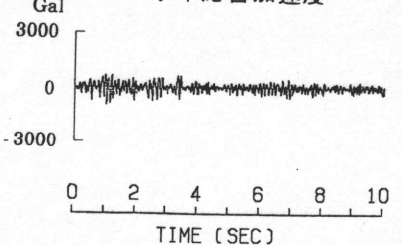


上下応答加速度

(a) 水平入力



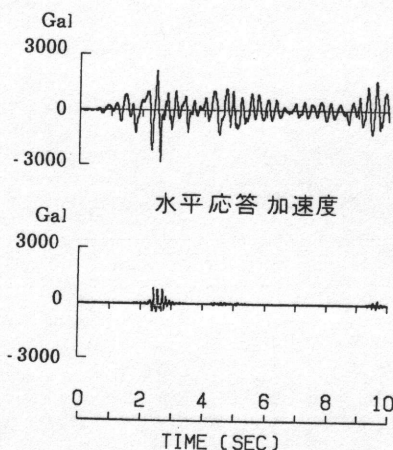
水平応答加速度



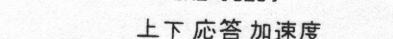
上下応答加速度

(b) 上下水平同時入力

図-12 本解析法による燃料取替床位置の応答波形

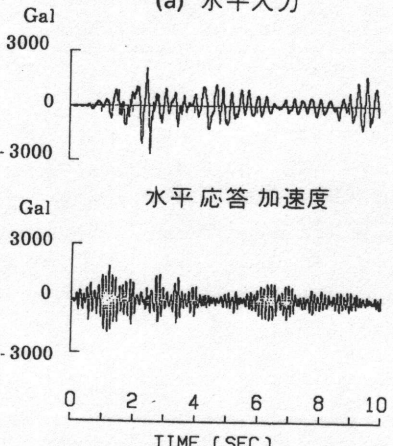


水平応答加速度

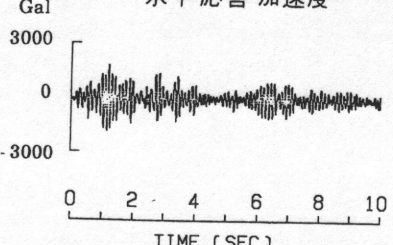


上下応答加速度

(a) 水平入力



水平応答加速度



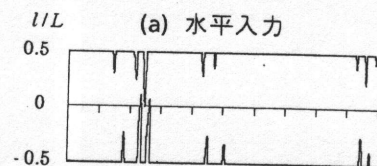
上下応答加速度

(b) 上下水平同時入力

図-13 地盤係数法による燃料取替床位置の応答波形

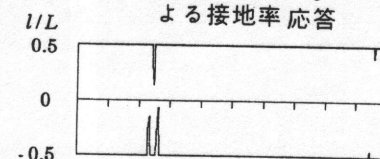


(a) 水平入力

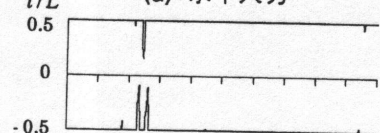


(b) 上下水平同時入力

図-14 本解析法($M_U=NL/6$)による接地率応答

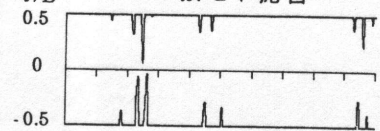


(a) 水平入力

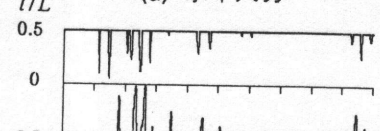


(b) 上下水平同時入力

図-15 本解析法($M_U=NL/4$)による接地率応答



(a) 水平入力



(b) 上下水平同時入力

図-16 地盤係数法による

接地率応答

地盤係数法、本解析法($M_U=NL/6$)の順に小さい。これは、(4)~(5)式から接地率算定時に反力を剛板分布仮定した場合には接地率が大きく評価され、また、図-6から本解析法が大きなモーメントを生じやすいためである。

次に、水平入力と上下水平同時入力の場合の接地率波形を比較すると、両者はよく対応しており、上下入力の影響は小さい。しかし、地盤係数法では大きな上下応答が生じ、上下軸力の変動が大きいいため、水平入力時にはみられない時刻でも浮上りが現れている。

最小接地率については、水平入力時と同様の傾向がみられる。参考として示した慣用設計法(地盤ばねの減衰は、水平成分20%、回転成分7.5%の履歴減衰型)の接地率では、上下地震動の影響を静的上下震度として自重低減を行うため、接地率が零となっており、非常に安全側の結果を示している。この点については、上下地震動の特性が明らかにされることによって、今後十分に改善の余地が残されていると考えられる。

6. まとめ

動的な地盤ばねの幾何学的非線形性を考慮した基礎浮上り解析法を提案し、上下動の影響について、地盤係数法や慣用設計法との比較を通して検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- ① 水平動入力の場合、浮上りによる水平応答への影響は小さいが、上下応答が少なからず生じる。
- ② 上下動入力が入力水平応答や接地率に与える影響は小さい。
- ③ 従って、慣用設計法における上下震度による自重低減は接地率を過小評価する傾向がある。
- ④ 地盤係数法は上下ばねを大きく減衰を小さく評価するので、上下応答が大きくなる傾向がある。
- ⑤ 接地率算定時に反力分布を線形仮定したものと剛板仮定したものとは、後者の方が接地率を大きく与える傾向がある。

なお、本論では、弾性論に基づいて地盤ばね-接

地率関係、接地率-モーメント関係などを設定したが、今後実証的データとの対応をもとに、これらの妥当性を検証していく予定である。

謝 辞

本研究を行うに当たり、清水建設(株)原子力設計部の平間敏彦氏に数値計算を手伝って頂きました。また、同大崎研究室の中井正一、吉田一博両氏には貴重なご意見を頂きました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 長瀬正, 瀬川輝夫, 久徳敏治: 動的グラウンドコンプライアンスを考慮した基礎浮上り非線形地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.695~696, 1981年9月
- 2) 佐々木幸男, 対島義幸, 野嶋治, 今沢民雄: 原子炉建屋の弾塑性地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.863~866, 1978年9月
- 3) 市川隆之, 小柳義雄, 平島新一: 基礎の浮き上がり非線形性を考慮した原子炉建屋の地震応答解析(スウェーデン及び逸散減衰の非線形性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.815~816, 1980年9月
- 4) J.P.Wolf: Soil-structure interaction with separation of base mat from soil (lifting-off), Nuc. Engr. Des. 38, pp.357~384, 1976
- 5) 田治見宏, 下村幸男: 基礎浮き上がりによって生ずる捻れ振動の誘起について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.625~626, 1979年9月
- 6) 武藤清, 小林俊夫: 水平上下同時入力に対する原子力発電所の非線形ロッキング地震応答解析, 日本建築学会論文報告集第276号, pp.69~77, 1979年2月
- 7) 山田正明, 河村壮一: 建屋基礎の地震時浮上り性状に関する研究(水平-上下3方向地震動を受ける剛体の解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1951~1952, 1983年9月
- 8) R. Zinn, and F. Stangenberg: Base mat uplift effects on the seismic response of a rectangular nuclear building, 7th SMIRT, K9/3, pp.115~122, 1983
- 9) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀: 強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動, 土木学会論文報告集第302号, pp.31~41, 1980年10月
- 10) 林康裕, 市川隆之, 小柳義雄, 浮上りとすべりを考慮した非線形FEM地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.763~764, 1985年10月
- 11) 上田憲司, 小林正則, 寺田自助, 河村壮一, 山田正明: 建屋基礎の地震時安定性評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2313~2317, 1984年10月
- 12) 矢野明義, 佐藤仁人, 原昭夫, 内藤幸義: 弾性地盤上の剛体建屋模型の浮き上り振動実験とその解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.755~762, 1983年9月
- 13) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会: 昭和55年度耐震設計の標準化に関する調査報告書 別冊1(建屋系), 1980年
- 14) H. G. Poulos, and E. H. Davis: Elastic solutions for soil and rock mechanics, John Wiley & Sons, pp.165~166, 1974