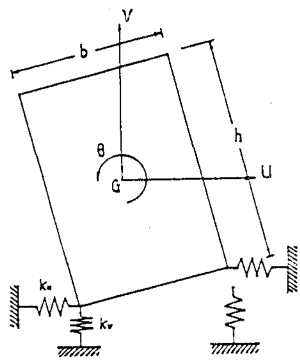
（Ⅰ－17） 調和外力を受ける剛体の浮上りに関する検討

東京電機大学　大学院　学生員○鈴木　知宏
東京大学　名誉教授　正会員　奥村　敏恵
東京電機大学　理工学部　正会員　松井　邦人

Ⅰ　はじめに

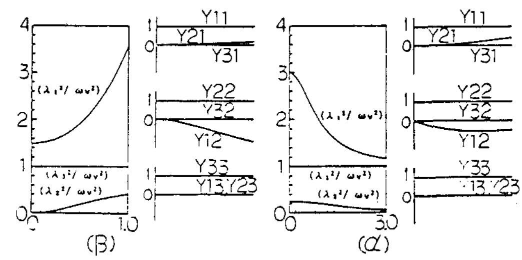
地震力の作用を受ける構造物の動的解析は、通常線形弾性理論に基づいて行なわれるが、強い地震力の作用を受ける場合、構造物は種々の非線形挙動を示す。従って、このような非線形現象の特性を把握することが、より合理的な耐震設計につながるものである。そこで本研究は、構造物が地震力の作用を受ける際に構造物基礎が地盤から浮上る現象に注目し、上部構造を単純化し剛体であると考え、また入力外力も簡単な形の調和外力を用いて、剛体の浮上りを伴う非線形動的挙動の特性を明確にし、現象発生の因子を究明するものである。



図－1　解析モデル

		ε_L	ε_R
1	両端接触	1	1
2	1点浮上	0	1
3		1	0
4	両端浮上	0	0

表－1　接触状態



図－2　固有値、固有ベクトルの変化

Ⅱ　解析モデル

本研究では図－1に示すように、構造物を剛体と仮定した。そして地盤を鉛直方向と水平方向の２方向のバネに置き換え、そのバネによって剛体の底辺端部を支持するものとした。さらに剛体が浮上り現象を起こし得るように、鉛直バネを剛体底辺端部に完全には固定せずに、剛体を鉛直バネの上に置くような形式の支持状態とした。そしてこの振動モデルに関して運動方程式をたてると式-(1)のようになる

ここで　α：形状比（$\alpha=h/b$）　$\omega_H{}^2=2k_H/m$　$\omega_V{}^2=2k_V/m$　とし　ε_L、ε_R は剛体底辺端部の接触状態を表すパラメータであり　$\varepsilon=1$　は接触　$\varepsilon=0$　は浮上りを示す。また、この運動方程式において、鉛直方向と水平方向のバネ剛性比（β）と形状比（α）の変化に対する固有値、固有ベクトルを図－２に示した。

Ⅲ　浮上り発生限界

このような振動モデルの浮上りの発生因子としてまず構造系に関しては、鉛直方向、水平方向のバネ剛性比および、それぞれのバネ剛性、そして剛体の質量、さらに剛体の形状比および、減衰定数、等が考えられる。また入力系に関しても、仮に入力加速度に正弦波のような簡単な周期関数を用いたとしても、加速度振幅、周波数、位相差、等のさまざまな要素が非常に複雑に影響する。そこで、それぞれの要素を整理しながら、モーダル解析により運動方程式を解くと、浮上りが起こる限界での条件式が式－(2) のように得られる。

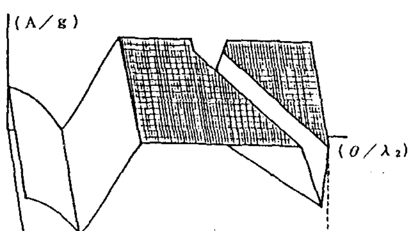
$$\begin{bmatrix} \frac{1+\alpha^2}{12} & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b\ddot{\theta} \\ \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{4}\alpha^2\omega_H{}^2+\frac{1}{2}(\varepsilon_L+\varepsilon_R)\omega_V{}^2 & \frac{\alpha}{2}\omega_H{}^2 & -\frac{1}{4}(\varepsilon_L-\varepsilon_R)\omega_V{}^2 \\ \frac{\alpha}{2}\omega_H{}^2 & \omega_H{}^2 & \\ -\frac{1}{4}(\varepsilon_L-\varepsilon_R)\omega_V{}^2 & & \frac{1}{2}(\varepsilon_L+\varepsilon_R)\omega_V{}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b\theta \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -u_0 \\ -v_0-g \end{bmatrix} \qquad (1)$$

$$
\frac{A}{4\kappa}\left[\frac{\left(-\frac{\alpha\beta^2}{2(\beta^2-C_1^2)}\right)^2}{\left\{\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2-1\right\}^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^4 C_2^4+4h^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2 C_1^2C_2^2\right\}}+\frac{\left(\frac{2(\beta^2-C_2^2)}{\alpha\beta^2}\right)^2}{\left\{\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2-1\right\}^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^4 C_2^4+4h^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2 C_2^4\right\}}\right.
$$

$$
\left.+\frac{2\left(\frac{\beta^2-C_2^2}{\beta^2-C_1^2}\right)\left\{\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2-1\right\}\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2-1\right\}\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^4 C_2^4+4h^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2 C_1C_2^3\right\}}{\left\{\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2-1\right\}^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^4 C_2^4+4h^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2 C_1^2C_2^2\right\}\left\{\left\{\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2-1\right\}^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^4 C_2^4+4h^2\left(\frac{\theta}{\lambda_2}\right)^2 C_2^4\right\}}\right]\geqq 1 \qquad (2)
$$

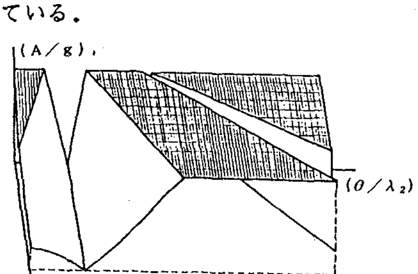
ここで（θ/λ_2）は１次のロッキングに関する固有円振動数に対する入力加速度の円振動数の比
（A／ｇ）は重力加速度に対する入力加速度振幅の比
βは鉛直と水平のバネ剛性比、ｈは減衰定数を表す

（２）式を用いて、入力系（θ/λ_2）、（Ａ／ｇ）構造系β、α、ｈ、の解析モデルの浮上りにおける相関を図示すると以下のようになる。



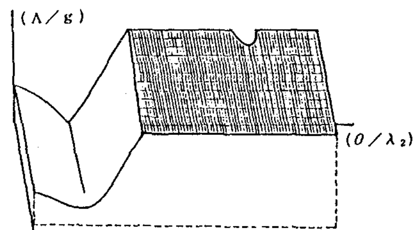
図－３

ここで、図中の境界面の上側で浮上りが発生することを示す。図－３は、（θ/λ_2）、（Ａ／ｇ）、βに関して浮上り発生限界を求めたもので、βの増加に伴い１次の共振点での浮上り発生領域は全く変わらないことを示している。そして図中の右側の細いくぼみは２次の共振点での領域を示し、（Ａ／ｇ）の小さい場合は、浮上りを発生せず、また浮上りの起こり得る（θ/λ_2）の範囲が非常に小さいことを示している。



図－４

図－４は（θ/λ_2）、（Ａ／ｇ）、α、に関して浮上り発生限界を求めたもので、αの増加に伴い、浮上りの起こる（θ/λ_2）の範囲が段々と広がっていることを示している。また２次の共振点での領域も狭いながらも同様にαの増加に伴って、浮上りの起こる（θ/λ_2）の範囲が広がっていることを示している。



図－５

図－５は（θ/λ_2）、（Ａ／ｇ）、ｈ、に関して、浮上り発生限界を求めたもので　、ｈの増加に伴い（Ａ／ｇ）の小さい場合は除々に浮上りが発生しにくくなっており、また２次の共振点では減衰が大きくなると（Ａ／ｇ）が小さな範囲では、ほとんど浮上りが起こらないことを示している。

Ⅳ　まとめ

本研究により、浮上りという幾何学的に非線形な現象を伴った剛体のロッキング振動に関し、その発生因子がほぼ明らかになった。それによると、浮上り発生は鉛直、水平のバネ剛性比に依存せず、入力加速度の振幅、および剛体の形状比に敏感に影響する。そして入力加速度が小さい場合に減衰の有無による影響が大きい。また２次、３次の共振点についての浮上りは、１次の共振点に比べ、非常に狭い範囲の浮上り発生領域を示す。

Ⅴ　参考文献

１）柴田：最新耐震構造解析　森北出版（1981）
２）鈴木、奥村、松井：Nigam-Jennings法による剛体のロッキング振動解析（第41回年次講演会）