



基礎励振を受ける二重構造体のすべり・ロッキング運動における 内部構造物の影響に関する検討

古田和久¹⁾、伊藤智博²⁾、新谷篤彦³⁾

- 1) 学生会員 大阪府立大学大学院工学研究科、博士後期課程 修士(工学)
e-mail : kz-furuta@dyna.me.osakafu-u.ac.jp
- 2) 正会員 大阪府立大学大学院工学研究科、教授 博士(工学)
e-mail : tom.ito@me.osakafu-u.ac.jp
- 3) 大阪府立大学大学院工学研究科、准教授 博士(工学)

要 約

原子力発電所では使用済放射性廃棄物の貯蔵容量が不足しており、それらを一時的に保管する貯蔵施設の建設が計画されている。このような貯蔵施設において、使用済放射性廃棄物は、キャニスタと呼ばれる容器に収納され、そのキャニスタはキャスクと呼ばれる自立した円筒状の容器に収納される。一般的に、キャスクは水平な地盤に固縛されずに自立して設置される。このように、キャスクーキャニスタ系は、地盤に固縛されずに自立する2自由度連成系とみなすことができる。したがって、地震動に対するキャスクーキャニスタ系のすべり・ロッキング運動を評価することは重要である。解析モデルでは、キャスクおよびキャニスタは、互いにばねで連結される剛体として取り扱う。地震動に対するキャスクのすべり量およびロッキング角ならびにキャニスタの振幅を数値解析によって求め、キャスクのすべり・ロッキング運動におけるキャニスタの影響について考察する。

キーワード： 2自由度連成系、地震応答、すべり、ロッキング

1. 緒言

原子力発電所で生成される高放射性廃棄物の一つである使用済み核燃料は、増加の一方をたどり、原子力発電所において貯蔵する場所が不足しつつある。そこで使用済み核燃料を一時的に貯蔵する施設の建設が計画されている。使用済み核燃料は、キャニスタと呼ばれる容器に収納され、そのキャニスタはキャスクと呼ばれる容器に収納される。一般的にキャスクは、地盤に固縛されずに自立している。一方、我国では近年巨大地震が頻繁に発生しており、地震時のキャスクのすべりやロッキングの発生が懸念され、それによる衝突、転倒、あるいはキャニスタの破損を防止することは非常に重要であると考えられる。

従来、キャスク単体のような自立した剛体が基礎励振を受ける場合のすべりやロッキング現象については、多くの研究が成されている。Ishiyamaは、鉛直平面内での剛体の挙動を6つの種類に分けて解析している¹⁾。Shentonらは、鉛直平面内での剛体の挙動に対して運動方程式を導出している²⁾。鄭らは、剛体のロッキング運動の実験をしている³⁾。これらの研究は、いずれも剛体単体のすべり・ロッキング運

動を取り扱ったものであり、著者らも単体のロッキング運動については報告をしている⁴⁾。しかしながら、外部構造物と内部構造物とからなる二重構造体のすべり・ロッキング運動を検討した研究は、ほとんど見受けられない。そこで著者らは、2自由度連成系のすべり・ロッキング運動における内部構造物の影響について基礎的な検討を行い^{5)、6)}、内部構造物の存在により外部構造物のすべり・ロッキング運動が抑制される可能性を示している。

そこで本研究では、キャスクーキャニスタ系を自立した2自由度連成系となる二重構造体として考え、水平方向に地震外力が作用したときの構造体のすべり・ロッキング運動の解析を行う。それにより、キャスクおよびキャニスタの挙動の評価を行うとともに、キャニスタがキャスクのすべり・ロッキング運動に及ぼす影響を明らかにし、キャニスタの制振効果について検討する。

2. 解析モデル

図1(a)に示すように、実際のキャスクーキャニスタ系は、キャニスタの上下端がキャスクの上底と下底とに把持されるように非常に硬いばねで支持され、キャスクは上下方向の変位を拘束されている。この状態で、キャスクに地震外力が作用すると、キャニスタは両端支持はりのように変形する。したがって本研究では、図1(a)に示すように、キャニスタが両端支持はりの1次モードで振動すると想定して、図1(b)に示すように、キャニスタを質点とみなし、このキャニスタがキャスクから見て横方向にだけ変位するようにキャスクにばね支持されているとする。このモデルにおいて、キャスクが地盤に固縛されずに自立している状態で、水平方向に地震外力が作用したときの2自由度連成系のすべり・ロッキング運動を考える。キャスクは中空円筒状の剛体であり、キャニスタの初期位置はキャスクの重心Gにあり、キャスクーキャニスタ系の運動は鉛直平面内で起こるものと仮定する。

図2に、ロッキングしないですべるときの解析モデルの座標系を、図3に、すべらずにロッキングするときの解析モデルの座標系を示す。理論的には、すべりとロッキングとが同時に起こる場合も考えられるが、簡単な模型実験で観察したところ、すべりが先に生じる体系ではロッキングが生じにくく、逆にロッキングが先に生じる体系ではすべりが生じにくい結果となっている。したがって、ここでは検討の初期段階として簡明化を図り、すべりとロッキングとを別々に取り扱う。

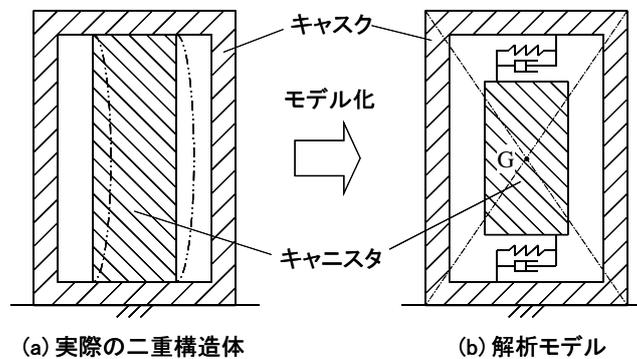


図1 実際の二重構造体および解析モデル化

3. 運動方程式

3.1 ロッキングしないですべるとき

水平方向に基礎励振を受けるときのキャスクーキャニスタ系のすべり運動方程式を導出する。キャスクが地盤上ですべり始める条件を、次式に示す。

$$|m_1 a_h - c\dot{x} - kx| > \mu_s (m_1 + m_2) g \quad (1)$$

ここで、 m_1 はキャスクの質量、 a_h は地盤の加振加速度、 c は粘性減衰係数、 k はキャニスタを支持するばねのばね定数、 x はキャスクから見たときのキャニスタの相対変位、 μ_s はキャスクと地盤との間の最大静

止摩擦係数、 m_2 はキャニスタの質量、 g は重力加速度である。

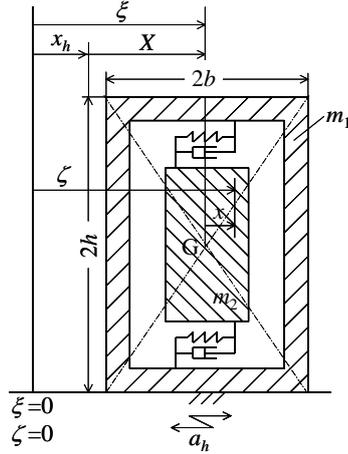


図2 ロッキングしないですべる
ときの解析モデルの座標系

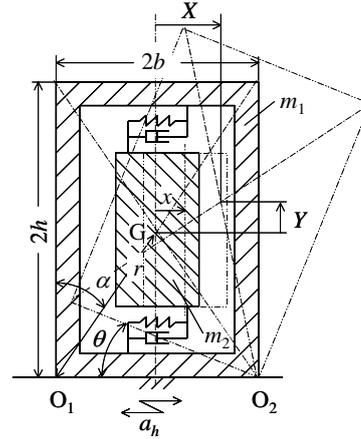


図3 すべらずにロッキングする
ときの解析モデルの座標系

キャスクのすべり運動方程式は、次式で表される。

$$m_1 \ddot{\xi} = c\dot{x} + kx - F \quad (2)$$

ここで、 ξ はキャスクの絶対変位、 F はキャスクがすべっているときの摩擦力であり、それぞれ式(3)、式(4)で表される。

$$\xi = x_h + X \quad (3)$$

$$F = \mu_k (m_1 + m_2) g \operatorname{sgn}(\dot{X}) \quad (4)$$

ここで、 μ_k はキャスクと地盤との間の動摩擦係数、 x_h は地盤の変位、 X は地盤から見たキャスクの相対変位であり、 sgn は符号関数である。

一方、キャニスタの運動方程式は、次式で表される。

$$m_2 \ddot{\zeta} = -kx \quad (5)$$

ここで、 ζ はキャニスタの絶対変位で、次式で表される。

$$\zeta = x_h + X + x \quad (6)$$

3.2 すべらずにロッキングするとき

水平方向に基礎励振を受けるときのキャスクーキャニスタ系のロッキング運動方程式を導出する。キャスクが地盤上で点 O_1 または点 O_2 まわりにロッキングし始める条件を、次式に示す。

$$|m_1 a_h - c\dot{x} - kx| > \frac{b}{h} (m_1 + m_2) g \quad (7)$$

ここで、 b/h はキャスクの縦横比である。

キャスクの点 O_1 または点 O_2 まわりのロッキング運動方程式は、次式で表される。

$$I_O \ddot{\theta} = m_1 a_h r \cos(\alpha - |\theta|) - \{m_1 g r \sin(\alpha - |\theta|) + (c\dot{x} + kx) r \cos \alpha\} \operatorname{sgn}(\theta) \quad (8)$$

ここで、 θ はキャスクのロッキング角度、 r は点 O_1 または点 O_2 からキャスクの重心 G までの距離、 α は点 O_1 または点 O_2 からキャスクの重心 G までの直線とキャスクの軸線との成す角度である。

本研究では、ロッキング運動をするキャスクと地盤との衝突時の減衰を考慮するものとし、剛な地盤についてShentonらが提案した次式(9)をそのまま用いることとする²⁾。

$$\dot{\theta}_2 = \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \alpha\right) \dot{\theta}_1 \quad (9)$$

ここで、 $\dot{\theta}_1$ はキャスクが地盤に衝突する直前の角速度、 $\dot{\theta}_2$ は衝突直後の角速度である。

キャニスタの運動方程式は、次式で表される。

$$m_2 \{ (a_h + \ddot{X}) \cos \theta + x \dot{\theta}^2 + \ddot{Y} r \sin \theta \} = -c\dot{x} - kx - m_2 g \sin \theta \quad (10)$$

式(10)における地盤から見たキャスクの水平方向の相対変位 X は、次式で表される。

$$X = \{ r \sin(\alpha - |\theta|) - b \} \operatorname{sgn}(\theta) \quad (11)$$

式(10)における地盤から見たキャスクの鉛直方向の相対変位 Y は、次式で表される。

$$Y = r \cos(\alpha - |\theta|) - h \quad (12)$$

4. 数値解析

4.1 解析諸元および加振条件

本研究における各種パラメータを表1に示す。キャスクおよびキャニスタの諸元は、文献⁷⁾を参考として設定した。

表1 解析諸元

パラメータ	値	単位
m_1	157×10^3	kg
I_O	2.26×10^6	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$2b$	3.9	m
$2h$	6.1	m
r	3.62	m
α	32.5	deg
μ_s	0.5	-
μ_k	0.2	-

また、キャスクは水平方向に正弦波状の基礎励振を受けるものとし、そのときの加振加速度 a_h を次式で表す。

$$a_h = M_{ah} \sin 2\pi f_{ah} t \quad (13)$$

ここで、 M_{ah} は入力加速度振幅、 f_{ah} は加振周波数である。本報において加振周波数 f_{ah} は、地震波の卓越周波数を考慮して1~10[Hz]としている。

4.2 ロッキングしないですべるとき

4.2.1 キャニスタの有無による時刻歴応答の差

$m_2=30 \times 10^3$ [kg]、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 $M_{ah}=6$ [m/s²]、 $f_{ah}=1$ [Hz]のときの地盤とのキャスクの相対変位 X およびキャスクとのキャニスタの相対変位 x の時刻歴応答を図4に示す。この図に示すように、時刻 t が0秒から0.2秒までの間では、キャスクはすべらず、キャニスタの振幅は小さい。時刻 t が約0.2秒のあたりで、キャスクが X 軸の負方向にすべり出し、キャニスタの振幅が大きくなっている。式(1)の左辺から右辺を引いた値の時刻歴波形を図5に示す。この図から、時刻 t が0.2秒以後は値が正となっており、キャスクとキャニスタとの相互作用によって、キャスクが地盤上ですべり始める条件を満足していることがわかる。

また、キャスクがすべり始める毎に、キャニスタが高い周波数で振動していることが確認された。このキャニスタの振動周波数は、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n=29.1[\text{Hz}]$ である。これらの結果から、キャスクの運動の評価において、キャスクとキャニスタとの間の相互作用を考慮することが重要であることがわかる。

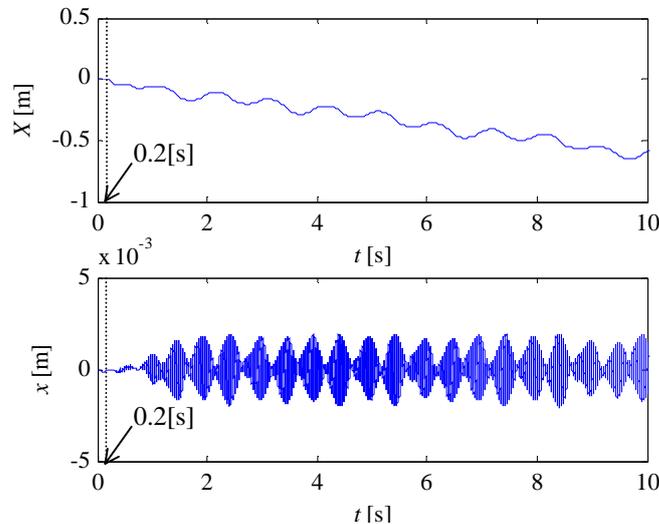


図4 キャスク-キャニスタ系のすべりの時刻歴応答
 $(m_2=30 \times 10^3[\text{kg}], k=1.0 \times 10^9[\text{N/m}], M_{ah}=6[\text{m/s}^2], f_{ah}=1[\text{Hz}])$

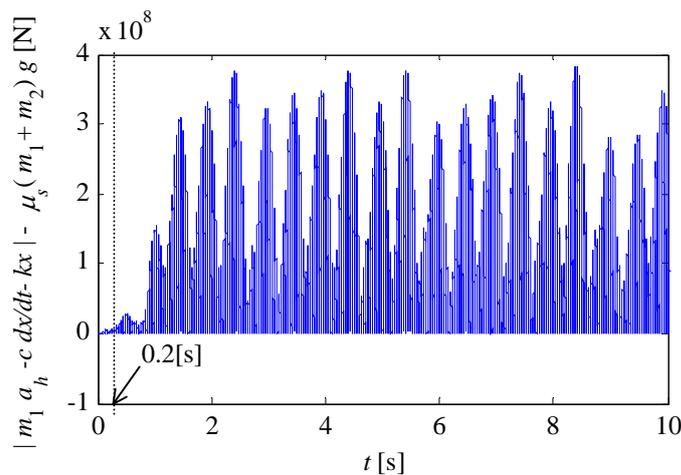


図5 式(1)の左辺から右辺を引いた値の時刻歴波形

キャニスタの影響を調べるために、同じ条件下で、キャニスタの無いキャスク単体がすべり運動する場合について数値解析を行った。キャスクの地盤との相対変位 X の時刻歴応答を図6に示す。この図に示すように、キャスクの振動中心の移動量および振動振幅は、キャニスタがある場合よりも小さくなっている。これからも、キャニスタの振動が、キャスクの運動に影響を及ぼしていることがわかる。

また図4、図6の解析条件において、入力加速度振幅のみ $M_{ah}=10[\text{m/s}^2]$ と増加させたときのキャスクの地盤との相対変位 X の時刻歴応答を図7(a)に示す。また、キャニスタの無いキャスク単体の場合における、キャスクの地盤との相対変位 X の時刻歴応答を図7(b)に示す。図7(a)と図7(b)とを比較すると、キャスク-キャニスタ系の方がキャスク単体よりも、振動中心の移動量および振動振幅がわずかながら小さくなっていることが確認できる。これより、キャニスタの振動が、キャスクの運動を抑制する場合もあることがわかる。

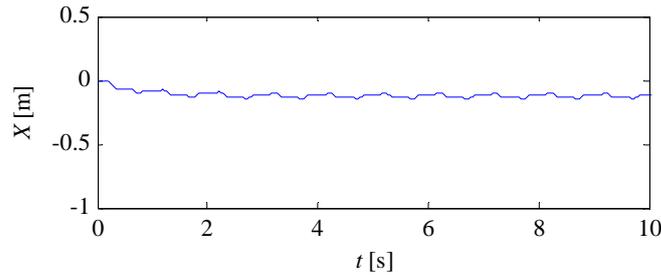
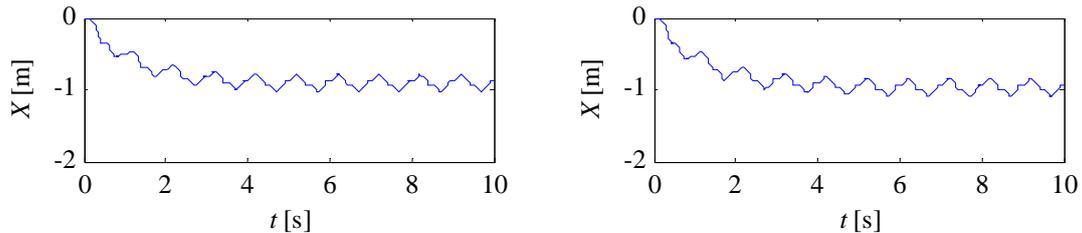


図6 キャスク単体のすべりの時刻歴応答 ($M_{ah}=6[m/s^2]$ 、 $f_{ah}=1[Hz]$)



(a) キャスクーキャニスタ系のすべり応答

(b) キャスク単体のすべり応答

図7 入力加速度振幅を増したときのキャスクの相対変位

($m_2=30 \times 10^3[kg]$ 、 $k=1.0 \times 10^9[N/m]$ 、 $M_{ah}=10[m/s^2]$ 、 $f_{ah}=1[Hz]$)

4.2.2 キャスクのすべりに対する最大すべり量とすべり振幅の入力加速度振幅および加振周波数依存性

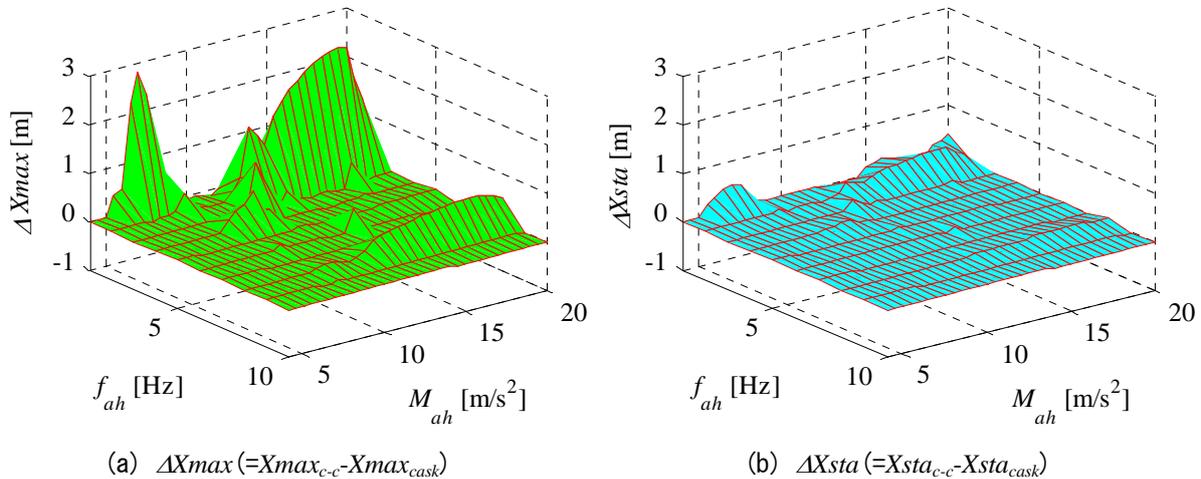
キャスクの質量 m_2 とばね定数 k は、図4、図6の場合と同じとし、入力加速度振幅 M_{ah} を4~20[m/s²]、加振周波数 f_{ah} を1~10[Hz]に変化させたときの数値解析を行う。キャスクーキャニスタ系のキャスクの最大すべり量の絶対値 $X_{max_cask-canister}$ （以後、 X_{max_c-c} と称する）から、キャスク単体の最大すべり量の絶対値 X_{max_cask} を引いた値を ΔX_{max} と定義し、 ΔX_{max} の M_{ah} 、 f_{ah} 依存性を調べたものを図8(a)に示す。また定常状態において、同様の評価を行ったものを図8(b)に示す。図8(b)において、 ΔX_{sta} は、キャスクーキャニスタ系のキャスクの定常時のすべり振幅 $X_{sta_cask-canister}$ （以後、 X_{sta_c-c} と称する）から、キャスク単体の定常時のすべり振幅 X_{sta_cask} を引いた値である。図8(a)に示すように、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が8.5~15[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は負であり、すなわち、 X_{max_c-c} は X_{max_cask} よりも小さい。したがって、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのすべり量を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が5.5~8[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は正であり、すなわち、 X_{max_c-c} は X_{max_cask} よりも大きい。したがって、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのすべり量を増加させる効果があると考えられる。また M_{ah} が4~8[m/s²]で f_{ah} が2~10[Hz]のとき、 ΔX_{max} の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクの最大すべり量におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。一方、キャスクの定常状態における振動振幅については、図8(b)に示すように、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が5.5~9[m/s²]のとき、 ΔX_{sta} の値は正であり、すなわち、 X_{sta_c-c} は X_{sta_cask} よりも大きい。したがって、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのすべり振幅を増加させる効果があると考えられる。また、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が14~16[m/s²]のとき、 ΔX_{sta} の値は負であり、すなわち、 X_{sta_c-c} は X_{sta_cask} よりも小さい。したがって、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのすべり振幅を減少させる効果があると考えられる。さらに M_{ah} が4~8[m/s²]で f_{ah} が2~10[Hz]のとき、 ΔX_{sta} の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクのすべり振幅におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

4.2.3 キャスクの最大すべり量に対するキャニスタの支持ばね定数の影響

キャニスタの質量 m_2 を $30 \times 10^3[kg]$ に固定して、ばね定数 $k=1.0 \times 10^6$ 、 1.0×10^9 、 $1.0 \times 10^{12}[N/m]$ のそれぞれの値において、入力加速度振幅 M_{ah} と加振周波数 f_{ah} を図8と同様に変化させたときの数値解析を行う。3種類のばね定数 k について、図8(a)と同様、 ΔX_{max} を求めた結果を図9(a)、(b)、(c)に示す。

ばね定数 k が $1.0 \times 10^6[N/m]$ のときは、図9(a)に示すように、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が10~20[m/s²]のとき、 ΔX_{max}

の値は負であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクの最大すべり量を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が8~10[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は正であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのすべり量を増加させる効果があると考えられる。また M_{ah} が3~20[m/s²]で f_{ah} が4~10[Hz]のとき、 ΔX_{max} の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクの最大すべり量におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。



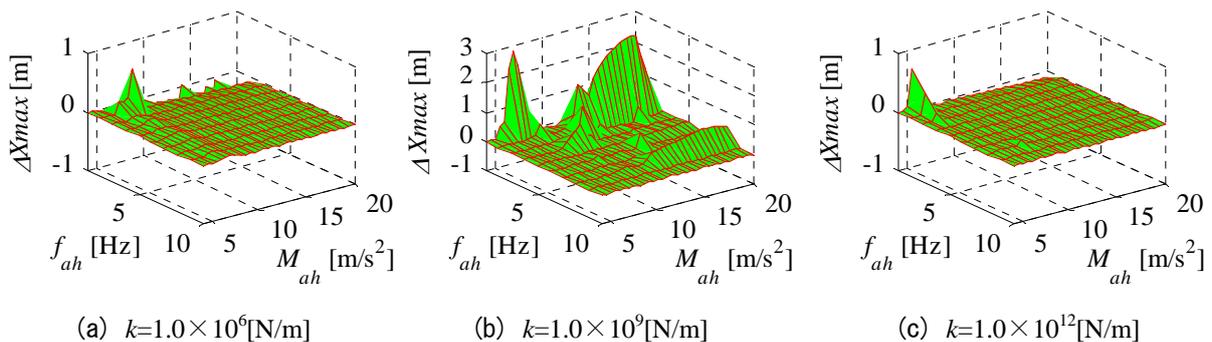
(a) $\Delta X_{max}(=X_{max_{c-c}}-X_{max_{cask}})$

(b) $\Delta X_{sta}(=X_{sta_{c-c}}-X_{sta_{cask}})$

図8 キャスクのすべりに対する入力加速度振幅および加振周波数依存性
($m_2=30 \times 10^3$ [kg]、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m])

図9(b)に示すばね定数 k が 1.0×10^9 [N/m]の傾向は、前節4.2.2に述べたとおりである。

ばね定数 k が 1.0×10^{12} [N/m]のときは、図9(c)に示すように、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が4.5~6[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は正であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのすべり量を増加させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が6.5~20[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は負であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのすべり量を減少させる効果があると考えられる。また M_{ah} が8~20[m/s²]で f_{ah} が4~10[Hz]のとき、 ΔX_{max} の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクの最大すべり量におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。



(a) $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]

(b) $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]

(c) $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]

図9 キャスクの最大すべり量に対するキャニスタの支持ばね定数の影響

入力加速度振幅 M_{ah} が10[m/s²]、15[m/s²]、20[m/s²]の場合のデータを取り出し、 ΔX_{max} の周波数応答の形式で整理したものを図10(a)、(b)、(c)に示す。図10(a)~(c)において青線×印は $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合、赤線○印は $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合、緑線□印は $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合を示す。図10(a)~(c)に共通して、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合のみ、キャスク単体のときよりも最大すべり量が大きくなっている周波数領域がある。また $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合、図10(c)に示す $M_{ah}=20$ [m/s²]で加振周波数 $f_{ah}=1$ [Hz]のときに、キャスク単体に比べて最大すべり量が小さくなっている。それ以外では、いずれのばね定数でも、最大すべり量がキャスク単体とほとんど変わらない。

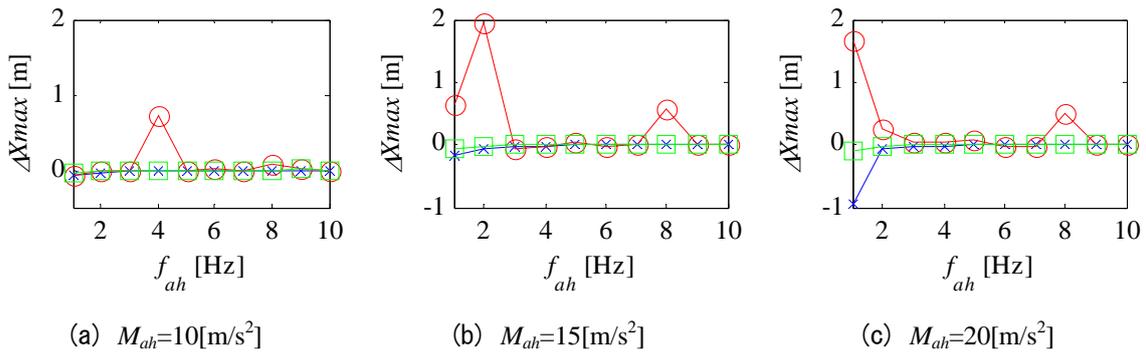


図10 最大すべり量の周波数応答に対するばね定数の影響

(\times : $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]、 \circ : $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 \square : $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m])

図10と同様、加振周波数 f_{ah} が1[Hz]、5[Hz]、10[Hz]の場合のデータを取り出し、 ΔX_{max} の入力加速度振幅依存性を整理したものを、それぞれ図11(a)、(b)、(c)に示す。図11(a)～(c)において青線 \times 印は $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合、赤線 \circ 印は $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合、緑線 \square 印は $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合を示す。図11に示すように、 f_{ah} が1[Hz]と5[Hz]とでは、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合に、キャスク単体のときよりも最大すべり量が大きくなっている入力加速度振幅領域があるが、 $f_{ah}=10$ [Hz]では最大すべり量の差はほとんどない。一方、図11(a)に示すように、 $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合には、入力加速度振幅が大きい領域で、他の k の値に比べてキャスク単体のときよりも最大すべり量が小さくなっている入力加速度振幅領域がある。

以上の結果から、キャスクのすべりを抑制できるキャニスタの支持ばね定数 k の値が存在することがわかった。

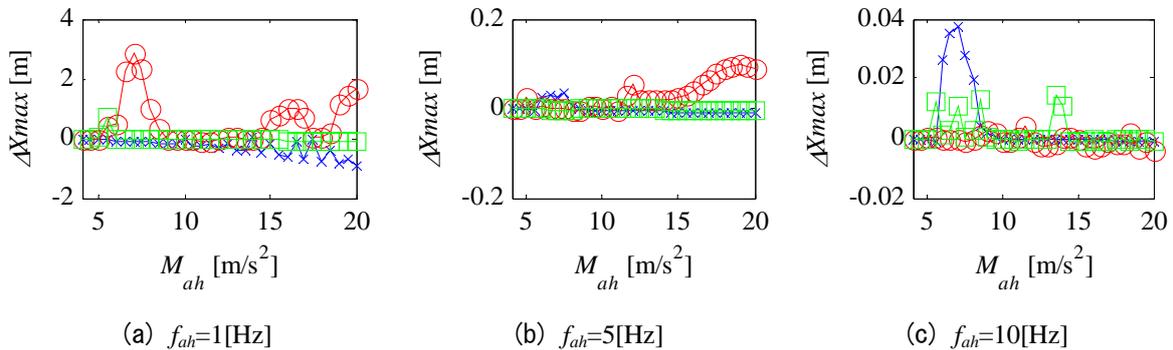


図11 入力加速度振幅依存性に対するばね定数の影響

(\times : $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]、 \circ : $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 \square : $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m])

4.2.4 キャスクの最大すべり量に対するキャニスタの質量の影響

キャニスタの支持ばね定数 k を 1.0×10^9 [N/m]に固定して、キャニスタの質量 $m_2=6 \times 10^3$ 、 30×10^3 、 80×10^3 [kg]のそれぞれの値において、入力加速度振幅 M_{ah} と加振周波数 f_{ah} を図8と同様に变化させたときの数値解析を行う。3種類のキャニスタの質量 m_2 について、図8(a)と同様に ΔX_{max} を求めた結果を図12(a)、(b)、(c)に示す。

キャニスタの質量 m_2 が 6×10^3 [kg]のときは、図12(a)に示すように、 f_{ah} が1~3[Hz]で M_{ah} が5.5~20[m/s²]のとき、 ΔX_{max} の値は負であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのすべり量を低減させる効果があると考えられる。一方、他の M_{ah} 、 f_{ah} の条件では、 ΔX_{max} の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクの最大すべり量におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

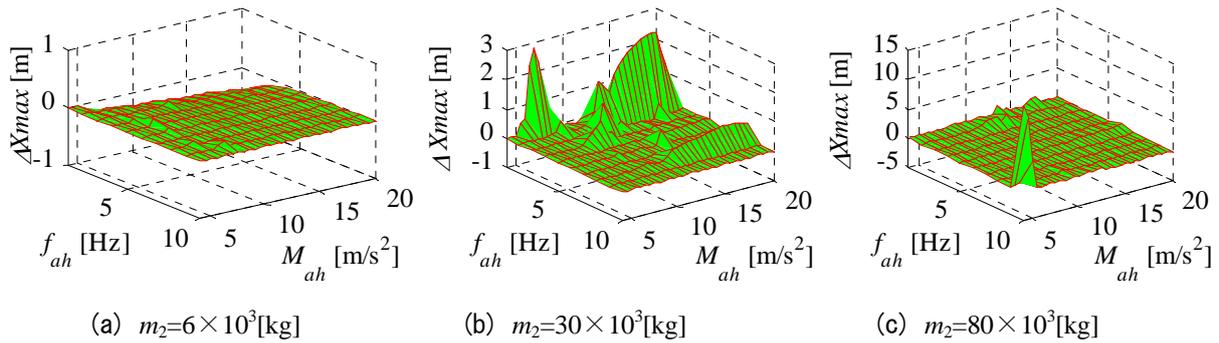


図12 キャスクの最大すべり量に対するキャニスタの質量の影響

図12(b)に示すキャニスタの質量 m_2 が 30×10^3 [kg]のときの傾向は、前々節4.2.2に述べたとおり、キャニスタの影響により、キャスクのすべり量がより増加する傾向が見られる。

キャニスタの質量 m_2 が 80×10^3 [kg]のときは、図12(c)に示すようにさらにこの傾向が強くなり、大部分の領域で ΔX_{max} の値は正である。特に、 f_{ah} が7[Hz]以上、 M_{ah} が 5.5 [m/s²]以下のときは、 ΔX_{max} の値が非常に大きくなっている。これは m_2 が増加すると、キャニスタのばね力が増加し、キャスクのすべり運動に対するキャニスタの影響が大きくなり、またキャニスタの固有振動数 f_n が低下し、加振周波数に近くなるためと考えられる。

以上の結果から、キャスクのすべりを抑制するためには、キャニスタの支持ばね定数 k を小さくして、ばね反力を小さくする方が有利であることがわかった。また、キャニスタの質量 m_2 を小さくして、キャニスタからキャスクへのばね反力を小さくしても、キャスクのすべり抑制に有利であることがわかった。しかし、いずれの場合も傾向が単純ではないことが判明した。

4.3 すべらずにロッキングするとき

4.3.1 キャニスタの有無による時刻歴応答の差

$m_2=30 \times 10^3$ [kg]、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 $M_{ah}=8$ [m/s²]、 $f_{ah}=1$ [Hz]のときのロッキングについて数値解析を行い、キャスクのロッキング角度 θ およびキャニスタのキャスクとの相対変位 x の時刻歴応答を求めた。この結果を図13に示す。この図に示すように、時刻 t が0秒から3秒までの間では、キャスクは周期的に θ の正方向にロッキングし、その後、小さな振幅で自由ロッキング運動をする。キャスクが地盤に衝突するときにキャニスタにその衝撃力が作用して、キャニスタは高い周波数で振動し始める。このキャニスタの振動周波数は、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n=29.1$ [Hz]である。時刻 t が3秒以降では、キャスクのロッキングの周期性が崩れる。これはキャスクのロッキング運動とキャニスタの振動との位相のずれによって引き起こされると考えられる。

キャニスタの影響を調べるために、同じ条件下で、キャニスタの無いキャスク単体がロッキング運動する場合について数値解析を行った。キャスクのロッキング角度 θ の時刻歴応答を図14に示す。この図に示すように、時刻 t が0秒から3.5秒までの間では、ロッキング角度 θ の振幅が徐々に増加し、時刻 t が3.5秒以降では、ロッキング運動がほぼ定常状態になり、地盤の振動と同期している。このときのロッキング振幅は約3度である。著者らの以前の研究において⁴⁾、キャスク単体と地盤との衝突時の減衰を考慮しない場合に、キャスク単体に種々の初期角度を与えたときのキャスク単体のロッキング卓越振動数を求めている。この結果では、キャスク単体のロッキング卓越振動数は、ロッキング振幅に強く依存し、初期角度が約3度のときのキャスク単体のロッキング卓越振動数が約1[Hz]であることが示されている。時刻 t が4秒以後で、キャスク単体のロッキング振幅が約3度で頭打ちとなり、地盤の加振周波数と同じ周波数でロッキングするのはこのためと考えられる。この現象は、リミットサイクルにおける共振挙動に非常に似通っている。一方、図13に示すように、キャスク-キャニスタ系のロッキング角度の最大値は約0.6度である。このことから、キャニスタが存在することによって、キャスクの共振を防止し、キャスクのロッキング角度を減少できる可能性があることがわかる。

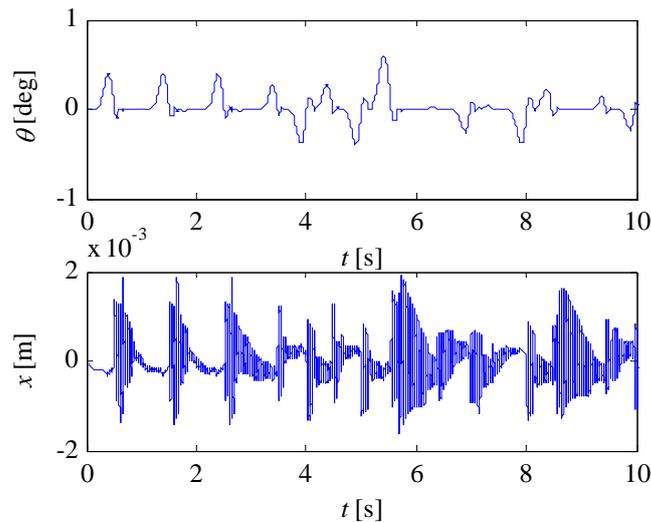


図13 キャスクーキャニスタ系のロッキングの時刻歴応答 ($m_2=30 \times 10^3$ [kg]、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 $M_{ah}=8$ [m/s²]、 $f_{ah}=1$ [Hz])

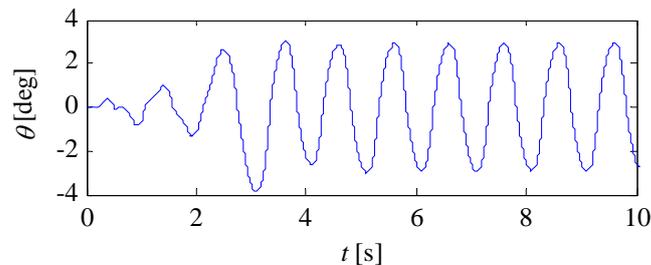


図14 キャスク単体のロッキングの時刻歴応答 ($M_{ah}=6$ [m/s²]、 $f_{ah}=1$ [Hz])

また入力加速度振幅 M_{ah} の影響を見るため、 m_2 、 k 、 f_{ah} の値は図13と同一とし、 $M_{ah}=12$ [m/s²]としたときのキャスクのロッキング角度 θ およびキャニスタのキャスクとの相対変位 x の時刻歴応答を図15に示す。また、キャニスタの影響を調べるため、同じ条件下で、キャニスタの無いキャスク単体のすべり運動の数値解析を行った。キャスクのロッキング角度 θ の時刻歴応答を図16に示す。図15と図16とを比較すると、キャスクーキャニスタ系の方が応答波形は不規則であるが、キャスク単体よりもロッキング角度 θ の絶対値の最大値が大きくなっていることが確認できる。これより、この条件下ではキャニスタの振動が、キャスクのロッキング運動を助長していると考えられる。

4.3.2 キャスクの最大ロッキング角度の入力加速度振幅および加振周波数依存性

キャニスタの質量 m_2 とばね定数 k を図13、図14の場合と同様とし、入力加速度振幅 M_{ah} を4~20[m/s²]、加振周波数 f_{ah} を1~10[Hz]に変化させたときの数値解析を行う。キャスクーキャニスタ系のキャスクのロッキング角度の絶対値の最大値 $\theta_{cask-canister}$ (以後、 θ_{c-c} と称する) からキャスク単体のロッキング角度の絶対値の最大値 θ_{cask} を引いた値を $\Delta\theta_{max}$ と定義し、 $\Delta\theta_{max}$ の M_{ah} 、 f_{ah} 依存性を調べたものを図17に示す。この図に示すように、 f_{ah} が1~2[Hz]で M_{ah} が8~9[m/s²]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は負であり、すなわち、 θ_{c-c} は θ_{cask} よりも小さい。したがって、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのロッキング角度を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1~4[Hz]で M_{ah} が9.5~20[m/s²]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は正であり、この範囲では、キャニスタの存在がキャスクのロッキング角度を助長させる可能性があると考えられる。また M_{ah} が6~20[m/s²]で f_{ah} が5~10[Hz]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクのロッキング角度におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

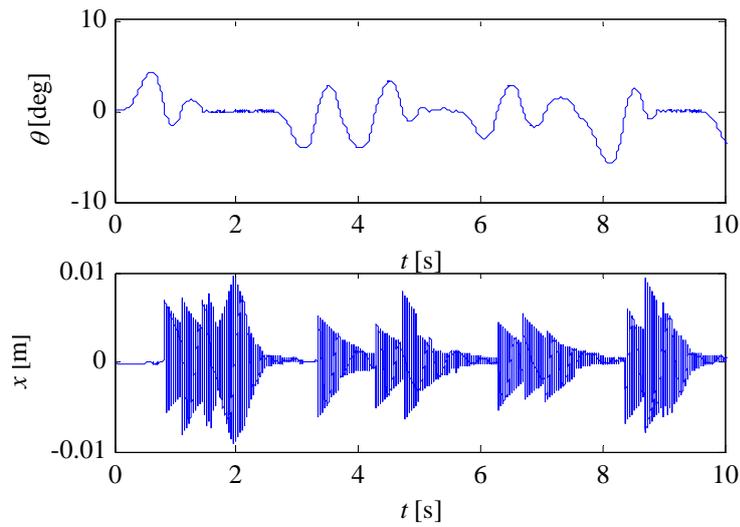


図15 キャスクーキャニスタ系のロッキングの時刻歴応答
 $(m_2=30 \times 10^3[\text{kg}]、k=1.0 \times 10^9[\text{N/m}]、M_{ah}=12[\text{m/s}^2]、f_{ah}=1[\text{Hz}])$

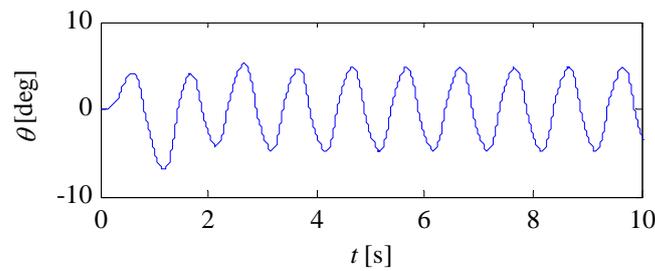


図16 キャスク単体のロッキングの時刻歴応答 $(M_{ah}=12[\text{m/s}^2]、f_{ah}=1[\text{Hz}])$

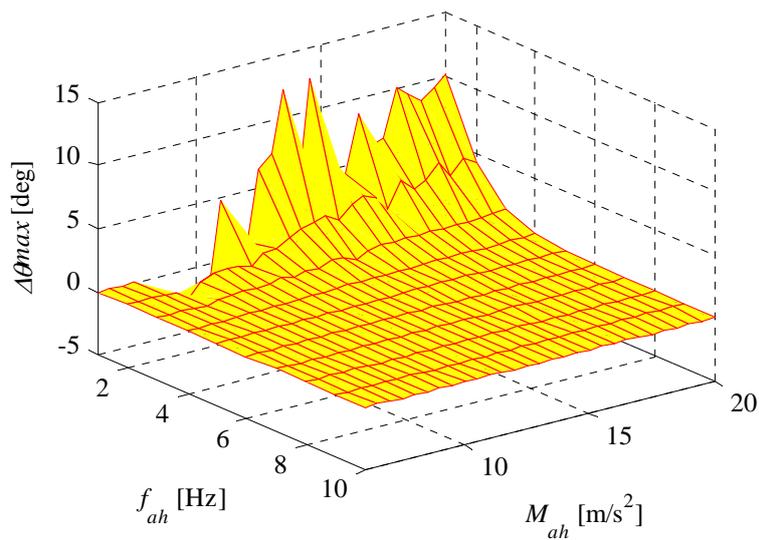


図17 キャスクのロッキングに対する入力加速度振幅および加振周波数依存性
 $(m_2=30 \times 10^3[\text{kg}]、k=1.0 \times 10^9[\text{N/m}])$

4.3.3 キャスクの最大ロッキング角度に対するキャスクの支持ばね定数の影響

キャスタの質量 m_2 を 30×10^3 [kg]に固定して、ばね定数 $k=1.0 \times 10^6$ 、 1.0×10^9 、 1.0×10^{12} [N/m]のそれぞれの値において、入力加速度振幅 M_{ah} 、加振周波数 f_{ah} を図17と同様に変化させたときの数値解析を行う。3種類のばね定数 k について、図17と同様、 $\Delta\theta_{max}$ を求めた結果を図18(a)、(b)、(c)に示す。

ばね定数 k が 1.0×10^6 [N/m]のときは、図18(a)に示すように、 f_{ah} が1~2[Hz]で M_{ah} が8~9[m/s²]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は負であり、この範囲ではキャスタの存在がキャスクのロッキング角度を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1~4[Hz]で M_{ah} が9.5~20[m/s²]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は正であり、この範囲ではキャスタの存在がキャスクのロッキング角度を助長させる可能性があると考えられる。また M_{ah} が6~20[m/s²]で f_{ah} が5~10[Hz]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクのロッキング角度におけるキャスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

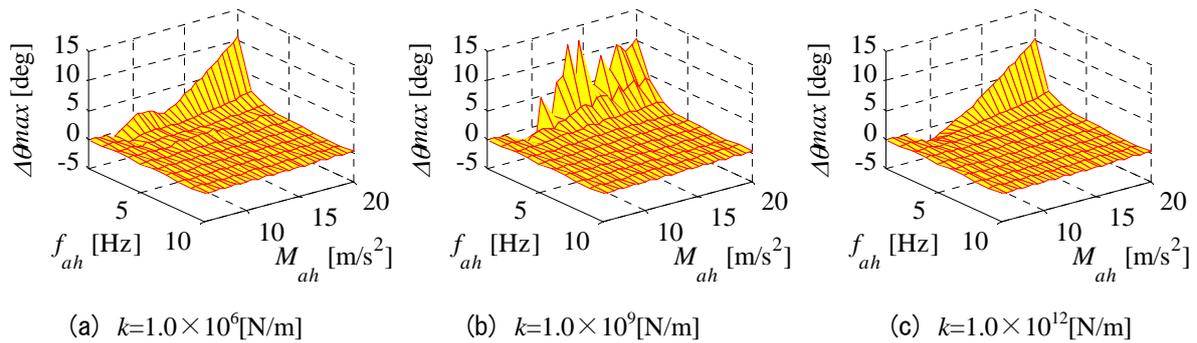


図18 キャスクの最大ロッキング角度に対するキャスタの支持ばね定数の影響

図18(b)に示すばね定数 k が 1.0×10^9 [N/m]の傾向は、前節4.3.2に述べたとおりである。

ばね定数 k が 1.0×10^{12} [N/m]のときは、図18(c)に示すように、 f_{ah} が1~2[Hz]で M_{ah} が8~13[m/s²]のとき $\Delta\theta_{max}$ の値は負であり、この範囲ではキャスタの存在がキャスクのロッキング角度を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が13.5~20[m/s²]のとき $\Delta\theta_{max}$ の値は正であり、この範囲ではキャスタの存在がキャスクのロッキング角度を助長させる可能性があると考えられる。また M_{ah} が6~20[m/s²]で f_{ah} が3~10[Hz]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクのロッキング角度におけるキャスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。このように巨視的には、加振周波数が小さくかつ入力加速度振幅が大きい場合、キャスタの存在によりロッキング角度が増加する傾向にあると言える。

入力加速度振幅 M_{ah} が10[m/s²]、15[m/s²]、20[m/s²]の場合のデータを取り出し、 $\Delta\theta_{max}$ の加振振幅依存性を整理したものを図19(a)、(b)、(c)に示す。図19(a)~(c)において青線×印は $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合、赤線○印は $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合、緑線□印は $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合を示す。図19(a)~(c)に共通して、 $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合、低い加振周波数領域でキャスタの存在によりキャスクのロッキングが増加する傾向にあることがわかる。この傾向は、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 1.0×10^{12} [N/m]の場合もほぼ同様であるが、 $M_{ah}=10$ [m/s²]のときには、キャスタによりロッキングが抑制される傾向にあることがわかる。それ以外の領域では、 $\Delta\theta_{max}$ の値は概ね0であり、キャスクのロッキング角度におけるキャスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

図19と同様、加振周波数 f_{ah} が1[Hz]、5[Hz]、10[Hz]の場合のデータを取り出し、 $\Delta\theta_{max}$ の入力加速度振幅依存性を整理したものを図20(a)、(b)、(c)に示す。図20(a)~(c)ににおいて青線×印は $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]の場合、赤線○印は $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合、緑線□印は $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合を示す。図20(b)~(c)に示すように、 f_{ah} が5[Hz]、10[Hz]では、 $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]の場合には、 $M_{ah}=8$ [m/s²]以上では $\Delta\theta_{max}$ の値は正であり、キャスク単体のときよりも最大ロッキング角度が大きくなっている。また図20(a)~(c)に示すように、 $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m]の場合には、いずれの加振周波数でも $M_{ah}=8$ ~13[m/s²]の領域で $\Delta\theta_{max}$ の値が負となり、キャスク単体よりも最大ロッキング角度が小さくなっている。さらに $M_{ah}=13$ [m/s²]以上になると、キャスク単体に比べて最大ロッキング角度が徐々に大きくなっていくことがわかる。しかしな

から巨視的には、全体の傾向はいずれのばね定数においても、入力加速度振幅が大きいほどロッキング角度はより増加し、加振周波数が小さいほどロッキング角度がより増加する傾向にあることがわかる。

以上の結果から、キャスクのすべりを抑制できるキャニスタの支持ばね定数、入力加速度振幅、加振周波数の値が存在することがわかる。

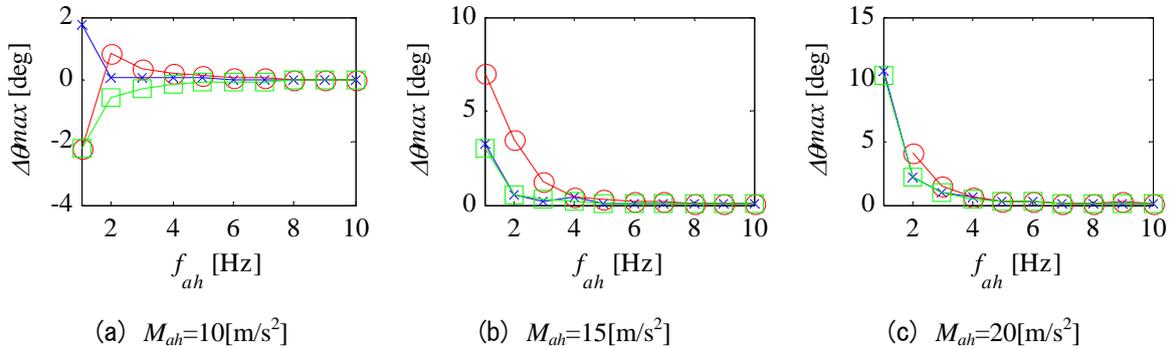


図19 ロッキング周波数応答に対するばね定数の影響

(\times : $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]、 \circ : $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 \square : $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m])

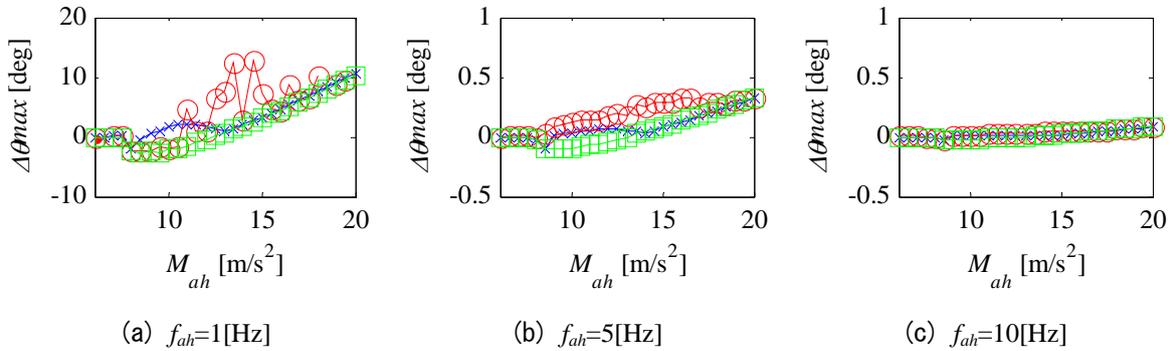


図20 入力加速度振幅依存性に対するばね定数の影響

(\times : $k=1.0 \times 10^6$ [N/m]、 \circ : $k=1.0 \times 10^9$ [N/m]、 \square : $k=1.0 \times 10^{12}$ [N/m])

4.3.4 キャスクの最大ロッキング角度に対するキャニスタの質量の影響

キャニスタの支持ばね定数 k を 1.0×10^9 [N/m]に固定して、キャニスタの質量 $m_2=6 \times 10^3$ 、 30×10^3 、 80×10^3 [kg]のそれぞれの値において、入力加速度振幅 M_{ah} と加振周波数 f_{ah} を図17と同様に变化させたときの数値解析を行う。3種類のキャニスタの質量 m_2 について、 $\Delta\theta_{max}$ を求めた結果を図21 (a)、(b)、(c)に示す。

キャニスタの質量 m_2 が 6×10^3 [kg]のときは、図21 (a)に示すように、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が8~9[m/s²]のとき $\Delta\theta_{max}$ の値は負であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのロッキング角度を低減させる効果があると考えられる。一方、 f_{ah} が1[Hz]で M_{ah} が9.5~20[m/s²]のとき $\Delta\theta_{max}$ の値は正であり、この範囲ではキャニスタの存在がキャスクのロッキング角度を助長させる可能性があると考えられる。また f_{ah} が4~10[Hz]で M_{ah} が6~20[m/s²]のとき、 $\Delta\theta_{max}$ の値は概ね0であり、この範囲ではキャスクのロッキング角度におけるキャニスタの影響は、ほとんど無視できると考えられる。

図21 (b)に示すキャニスタの質量 m_2 が 30×10^3 [kg]の傾向は、前々節4.3.2に述べたとおりで、巨視的な傾向は $m_2=6 \times 10^3$ [kg]のときと同様である。

キャニスタの質量 m_2 が 80×10^3 [kg]のときは、図21 (c)に示すように、 f_{ah} 、 M_{ah} の組み合わせにより、 $\Delta\theta_{max}$ の値が不規則的に正、0、負の値をとるが、全体的にその絶対値が、他の m_2 に比較して非常に小さい。したがって、この場合ではキャスクのロッキング角度におけるキャニスタの影響は、あまり大きくないと考えられる。

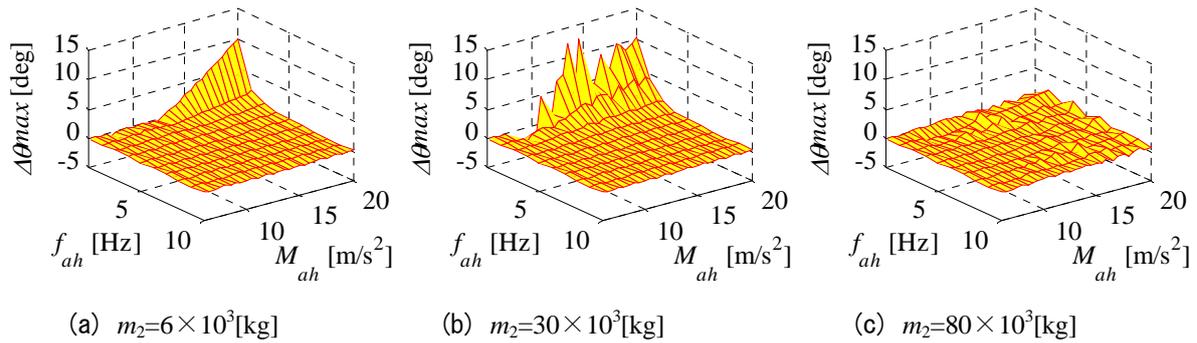


図21 キャスクの最大ロッキング角度に対するキャニスタの質量の影響

以上の結果から、キャスクのロッキングを抑制するためには、大きな傾向としては、キャニスタの固有振動数 f_n は、加振周波数から離す方が良いことがわかった。ロッキングは、本質的に低周波数・大振幅の入力に対して大きな応答を示すことから、キャニスタの支持ばね定数 k を大きくして、キャスクのロッキングとキャニスタの振動との共振を避けることが望ましい。キャニスタの質量 m_2 に関しては、傾向が単純でないことが判明した。

5. 結言

キャスクーキャニスタ系を、固縛されないで自立する二重構造体として取り扱い、水平方向に正弦波外力が作用したときのすべり運動およびロッキング運動の運動方程式を導出し、これらの挙動に対する入力加速度振幅および加振周波数の影響を検討した。また、キャニスタを支持するばねのばね定数およびキャニスタの質量の影響についても検討を行った。その結果、二重構造体のすべり運動およびロッキング運動において、ばね支持されるキャニスタがキャスクの運動に大きな影響を及ぼすことが確認できた。またキャニスタの支持ばね定数やキャニスタの質量を適切な値にすることによって、二重構造体のキャスクのすべり運動またはロッキング運動を、キャスク単体の場合に比べて抑制できる可能性があることを確認できた。しかし系の非線形性が非常に強く、すべりとロッキングとを同時に抑制できるキャニスタの設計は単純ではないため、最終的にはそれぞれの条件で解析をする必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Ishiyama, Y. : Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 1982, pp.635-650.
- 2) Shenton, H. W. and Jones, N. P. : Base Excitation of Rigid Bodies I: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, Vol.117, 1991, pp.2286-2306.
- 3) 鄭萬溶、鈴木浩平：剛体ブロック形構造物のロッキング振動に関する基礎的研究、日本機械学会論文集、C編、62巻、603号、1996年11月、pp. 4139-4146.
- 4) FURUTA, K., ITO, T., SHINTANI, A. : Fundamental Study on Sliding Motions of Two-Degree-of-Freedom Coupled Systems and Rocking Motion of a Rigid Body, Journal of System Design and Dynamics of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.2, No.1, 2008, pp.36-44.
- 5) 古田和久、伊藤智博、新谷篤彦：すべりを伴う2自由度連成系における内部構造物の影響、日本機械学会2007年度年次大会講演論文集、No. 07-1、Vol. 5、2007年9月、pp. 13-14.
- 6) 古田和久、伊藤智博、新谷篤彦：基礎励振を受ける2自由度連成系のロッキング現象の検討、日本機械学会論文集、C編、74巻、741号、2008年5月、pp. 1093-1098.
- 7) 電中研レビュー第52号、2006年、財団法人 電力中央研究所.

(受理：2008年4月14日)
(掲載決定：2008年7月7日)

Study on the Influence of a Inner Structure on Sliding and Rocking Motions of a Dual Structure Subjected to Base Excitation

FURUTA Kazuhisa ¹⁾, ITO Tomohiro ²⁾ and SHINTANI Atsuhiko ³⁾

1) Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

2) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Dr. Eng.

3) Associate Professor, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Many spent fuels coming out of the nuclear power station are planned to be stored in the special site in Japan until they are reprocessed. In this site, the spent fuels are installed in a cylindrical container called canister. And the canister is installed in the outer cylinder called cask which is a free-standing structure. Therefore, it is very important to reduce the seismic response of the cask at the seismic event. In this study, the sliding and rocking motions of a cask are evaluated analytically. In an analytical model, the cask and the canister are treated as rigid bodies which are connected by a spring, because the cask and canister system is seen as a two-degree-of-freedom coupled system. The equations of motions are derived for sliding and rocking motions when the floor is subjected to the horizontal excitation. The displacement and the rocking angle of the cask are evaluated by numerical simulations. The effects of the canister vibration on the cask motion are discussed.

Key Words: Two-degree-of-freedom coupled system, Seismic response, Sliding, Rocking