



## 基礎励振を受ける二重構造体のすべり挙動における 隙間部液体の影響に関する検討

古田和久<sup>1)</sup>、伊藤智博<sup>2)</sup>、新谷篤彦<sup>3)</sup>

- 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み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。この貯蔵施設において、使用済み放射性廃棄物は、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とから、キャスク-キャニスタ系は、自立する二重構造体とみなすことができる。したがって、地震時には二重構造体が大きなすべり運動を生じることが懸念されている。地震動に対するキャスクのすべり量を低減するために、キャスクとキャニスタとの隙間に液体を封入し、その液体の付加質量を利用した制振方法を提案し、その制振効果を評価する。本研究では、解析において、キャスクおよびキャニスタは、互いにばねおよび減衰器で連結される剛体として取り扱う。

キーワード： 二重構造体、地震応答、すべり、制振、隙間部液体

### 1. 緒言

原子力発電所で生成される高レベル放射性廃棄物の一つである使用済み核燃料は、増加の一途をたどり、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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、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、正弦波加振時の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ついて検討を行い、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<sup>3)~8)</sup>。

本研究では、内部構造物と外部構造物との隙間部に液体を封入した状態で、水平方向に地震外力が作用したときの二重構造体のすべり挙動の解析を行い、内部構造物および液体の付加質量が二重構造体のすべり運動に及ぼす影響を明らかにするとともに、そ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-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-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、すべり運動にはロッキングが伴わないものとする。

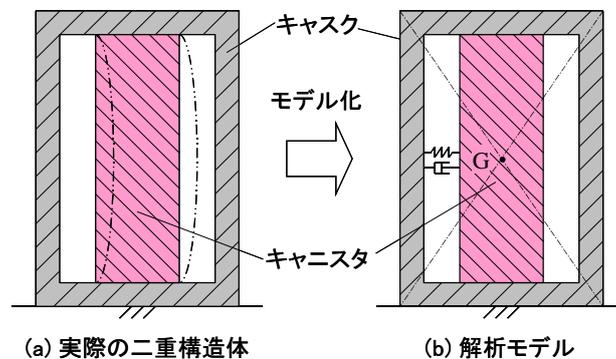


図1 実際の二重構造体および解析モデル化

## 3. 運動方程式

### 3.1 同心二重円筒構造物の内筒および外筒が連成振動する場合の液体の付加質量

本節では、二重構造体を図3に示すような同心二重円筒構造物とみなして、その外筒であるキャスクと内筒であるキャニスタとの隙間部に液体を封入し、この状態で外力が加わったときに連成振動する場合のキャスクおよびキャニスタに加わる液体の反力を求める。このような場合の液体の付加質量については、Fritz<sup>9)</sup>が解析的に評価している。一方、キャスク-キャニスタ系においても、キャニスタの上下端には隙間がほとんど無く、キャニスタが1自由度系として振動した場合、隙間部の液体は2次元流れとなるので、ここではFritzの理論を適用する。なお厳密には、液体には粘性があるので流動減衰効果があると考えられるが、ここでは液体付加質量の制振効果を見るために、流動減衰効果については無視することとする。

キャスクの内径を $2R$ 、キャニスタの外径を $2r_0$ とし、キャスク・キャニスタの相対変位 $\xi$ ・ $\zeta$ は半径方向の隙間部の間隔 $R-r_0$ に比べて小さく、液体は非粘性・非圧縮性流体であると仮定すると、隙間にある流体は速度ポテンシャル $\lambda$ を持つ。したがって、液体の半径方向速度 $V_r$ および周方向速度 $V_\sigma$ は、次式で表される。

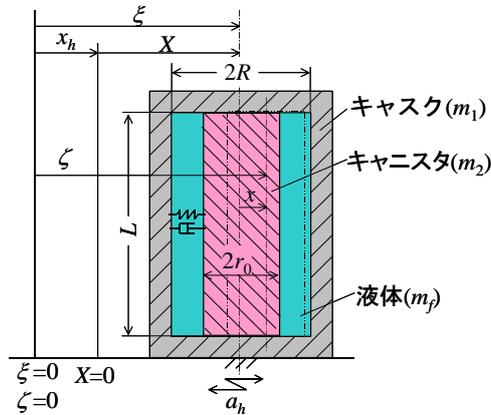


図2 ロッキングしないですべての解析モデルの座標系

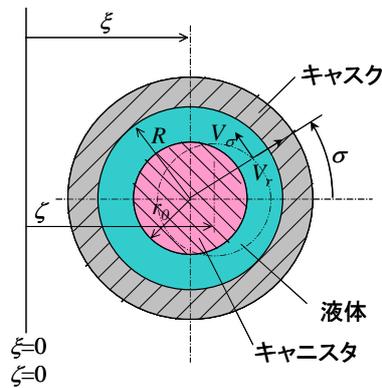


図3 内筒および外筒が連成振動する同心二重円筒構造物のモデル

$$V_r = -\frac{\partial \lambda}{\partial r}, \quad V_\sigma = -\frac{1}{r} \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma} \quad (1)$$

また、境界条件は次式となる。

$$-\frac{\partial \lambda}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \dot{\zeta} \cos \sigma, \quad -\frac{\partial \lambda}{\partial r} \Big|_{r=R} = \dot{\xi} \cos \sigma \quad (2)$$

連続の式は、次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \sigma^2} = 0 \quad (3)$$

式(3)の解を変数分離形で、次式で仮定する。

$$\lambda = f(r) \cos \sigma \quad (4)$$

式(4)を式(2)、(3)に代入すると、

$$r^2 \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + r \frac{\partial f}{\partial r} - f = 0 \quad (5)$$

となり、式(5)は容易に解けて、 $f$ は次式で表される。

$$f = \frac{C_1}{r} + C_2 r \quad (6)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$ は定数である。式(6)を式(4)に代入して、境界条件式(2)を適用すると、

$$-\left(\frac{-C_1}{r_0^2} + C_2\right) \cos \sigma = \dot{\zeta} \cos \sigma, \quad -\left(\frac{-C_1}{R^2} + C_2\right) \cos \sigma = \dot{\xi} \cos \sigma \quad (7)$$

となるので、定数 $C_1$ 、 $C_2$ は次式で表される。

$$C_1 = \frac{R^2 r_0^2}{R^2 - r_0^2} (\dot{\zeta} - \dot{\xi}), \quad C_2 = \frac{\dot{\zeta} r_0^2 - \dot{\xi} R^2}{R^2 - r_0^2} \quad (8)$$

一方、キャニスタおよびキャスクに作用する液体の反力 $F_{f1}$ 、 $F_{f2}$ は、Lagrangeの式によって次式で与えられる。

$$F_{f1} = -\frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\zeta}} + \frac{\partial T_f}{\partial \zeta}, \quad F_{f2} = -\frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\xi}} + \frac{\partial T_f}{\partial \xi} \quad (9)$$

ここで、 $T_f$ は液体の運動エネルギーである。

キャニスタの振幅が、隙間部の間隔 $R-r_0$ に比べて十分に小さいと仮定すると、式(9)の右辺第2項は無視できる。したがって、

$$F_{f1} = -\frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\zeta}}, \quad F_{f2} = -\frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\xi}} \quad (10)$$

と表される。

一方、液体の運動エネルギー $T_f$ は、次式で表される。

$$T_f = \int_{r_0}^R \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho_f r L dr d\sigma (V_r^2 + V_\sigma^2) \quad (11)$$

ここで、 $\rho_f$ は流体の密度、 $L$ はキャニスタの軸線方向の長さである。

また、液体の半径方向速度 $V_r$ および周方向速度 $V_\sigma$ は、次式で与えられる。

$$V_r = \left(\frac{C_1}{r^2} - C_2\right) \cos \sigma, \quad V_\sigma = \left(\frac{C_1}{r^2} + C_2\right) \sin \sigma \quad (12)$$

式(11)を $\dot{\zeta}$ 、 $\dot{\xi}$ で偏微分すると、次式のようになる。

$$\frac{\partial T_f}{\partial \dot{\zeta}} = \frac{1}{2} \rho_f L \int_{r_0}^R \int_0^{2\pi} r dr d\sigma \left( \frac{\partial V_r^2}{\partial \dot{\zeta}} + \frac{\partial V_\sigma^2}{\partial \dot{\zeta}} \right), \quad \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\xi}} = \frac{1}{2} \rho_f L \int_{r_0}^R \int_0^{2\pi} r dr d\sigma \left( \frac{\partial V_r^2}{\partial \dot{\xi}} + \frac{\partial V_\sigma^2}{\partial \dot{\xi}} \right) \quad (13)$$

式(8)、(12)から、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_r^2}{\partial \dot{\zeta}} &= 2V_r \frac{\partial V_r}{\partial \dot{\zeta}} = 2 \left( \frac{C_1}{r^2} - C_2 \right) \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left( \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \cos^2 \sigma \\ \frac{\partial V_r^2}{\partial \dot{\xi}} &= 2V_r \frac{\partial V_r}{\partial \dot{\xi}} = -2 \left( \frac{C_1}{r^2} - C_2 \right) \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) \cos^2 \sigma \\ \frac{\partial V_\sigma^2}{\partial \dot{\zeta}} &= 2V_\sigma \frac{\partial V_\sigma}{\partial \dot{\zeta}} = 2 \left( \frac{C_1}{r^2} + C_2 \right) \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left( \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \sin^2 \sigma \\ \frac{\partial V_\sigma^2}{\partial \dot{\xi}} &= 2V_\sigma \frac{\partial V_\sigma}{\partial \dot{\xi}} = -2 \left( \frac{C_1}{r^2} + C_2 \right) \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right) \sin^2 \sigma \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となるので、式(13)に式(14)を代入すると、

$$\frac{\partial T_f}{\partial \dot{\zeta}} = \pi\rho_f L \left( \frac{R^2 + r_0^2}{R^2 - r_0^2} r_0^2 \dot{\zeta} - \frac{2R^2 r_0^2}{R^2 - r_0^2} \dot{\xi} \right), \quad \frac{\partial T_f}{\partial \dot{\xi}} = -\pi\rho_f L \left( \frac{2R^2 r_0^2}{R^2 - r_0^2} \dot{\zeta} - \frac{R^2 + r_0^2}{R^2 - r_0^2} R^2 \dot{\xi} \right) \quad (15)$$

となり、式(10)に式(15)を代入すると、

$$F_{f1} = -\pi\rho_f L \left( \frac{R^2 + r_0^2}{R^2 - r_0^2} r_0^2 \ddot{\zeta} - \frac{2R^2 r_0^2}{R^2 - r_0^2} \ddot{\xi} \right), \quad F_{f2} = \pi\rho_f L \left( \frac{2R^2 r_0^2}{R^2 - r_0^2} \ddot{\zeta} - \frac{R^2 + r_0^2}{R^2 - r_0^2} R^2 \ddot{\xi} \right) \quad (16)$$

となる。ここで、

$$M_1 = \pi\rho_f L r_0^2, \quad M_2 = \pi\rho_f L R^2, \quad M_H = M_1 \frac{R^2 + r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (17)$$

とおくと、式(16)から、キャニスタおよびキャスクに作用する液体の反力 $F_{f1}$ 、 $F_{f2}$ は、次式で表される。

$$F_{f1} = -M_H \ddot{\zeta} + (M_1 + M_H) \ddot{\xi}, \quad F_{f2} = (M_1 + M_H) \ddot{\zeta} - (M_1 + M_2 + M_H) \ddot{\xi} \quad (18)$$

### 3.2 二重構造体のすべり運動方程式

本節では、水平方向に基礎励振を受けるときの二重構造体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。

$$|m_1 a_h - c\dot{x} - kx - F_{f2}| > \mu_s (m_1 + m_2 + m_f) g \quad (19)$$

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、 $\mu_s$ 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、 $m_f$ は隙間部液体の質量、 $g$ は重力加速度である。

キャスクのすべり運動方程式は、次式で表される。

$$m_1 \ddot{\xi} = c\dot{x} + kx + F_{f2} - F \quad (20)$$

ここで、 $\xi$ 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(21)、式(22)で表される。

$$\xi = x_h + X \quad (21)$$

$$F = \mu_k (m_1 + m_2 + m_f) g \operatorname{sgn}(\dot{X}) \quad (22)$$

ここで、 $\mu_k$ 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、 $\operatorname{sgn}$ 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。

$$m_2 \ddot{\zeta} = -c\dot{x} - kx + F_{f1} \quad (23)$$

ここで、 $\zeta$ はキャニスタの絶対変位で、次式で表される。

$$\zeta = x_h + X + x \quad (24)$$

## 4. 数値解析

### 4.1 解析諸元

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<sup>10)</sup>を参考として設定した。

#### 4.2 正弦波加振時のすべり挙動

本節では、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。

$$a_h = M_{ah} \sin 2\pi f_{ah} t \quad (25)$$

ここで、 $M_{ah}$ は加振加速度振幅、 $f_{ah}$ は加振周波数である。本報において加振加速度振幅 $M_{ah}$ は、近年観測された地震波の最大加速度を考慮して最大 $20[\text{m/s}^2]$ までとし、加振周波数 $f_{ah}$ は、地震波の卓越周波数を考慮して $1\sim 10[\text{Hz}]$ としている。

表1 解析諸元

パラメータ	値	単位
$m_1$	$157 \times 10^3$	kg
$m_2$	$30 \times 10^3$	kg
$2R$	1.9	m
$2r_0$	1.6	m
$L$	4.5	m
$\rho_f$	1000	$\text{kg/m}^3$
$\mu_s$	0.5	-
$\mu_k$	0.2	-

##### 4.2.1 隙間部液体の有無による時刻歴応答の差

液体が隙間部に封入されていない状態のばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n$ を $5.00[\text{Hz}]$ （支持ばね定数 $k=3.0 \times 10^7[\text{N/m}]$ ）に設定する。液体が隙間部に封入されると、液体の付加質量によって、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_{ni}$ は $3.02[\text{Hz}]$ に低下する。加振条件 $M_{ah}=6[\text{m/s}^2]$ 、 $f_{ah}=8[\text{Hz}]$ としたときの、液体を封入した状態の二重構造体における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。このときキャニスタは、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_{ni}=3.02[\text{Hz}]$ で振動する。

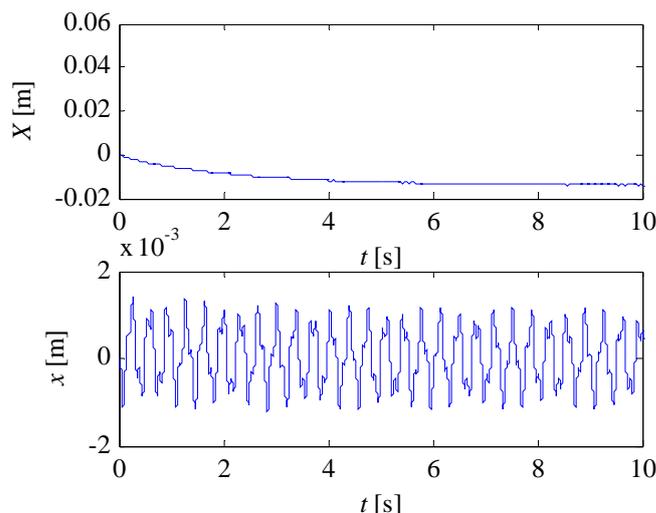


図4 液体封入時の二重構造体のすべり時刻歴応答  
( $M_{ah}=6[\text{m/s}^2]$ 、 $f_{ah}=8[\text{Hz}]$ 、 $f_n=5.00[\text{Hz}]$ 、 $f_{ni}=3.02[\text{Hz}]$ )

隙間部液体の影響を調べるために、同じ条件下で、液体未封入時の二重構造体における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5に示す。この図に示すように、キャスクの振動中心の最大すべり量は、液体封入時よりも大きくなっており、キャニスタは、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n=5$ [Hz]で振動する。したがって、隙間部液体が、キャスクおよびキャニスタの運動に影響を及ぼしていることがわかる。

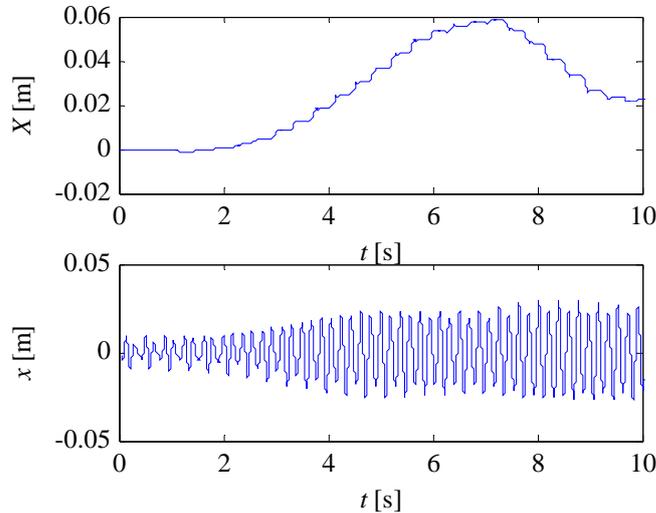


図5 液体未封入時の二重構造体のすべり時刻歴応答  
( $M_{ah}=6$ [m/s<sup>2</sup>]、 $f_{ah}=8$ [Hz]、 $f_n=5.00$ [Hz])

#### 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

ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n=5$ [Hz]とし、入力加速度振幅 $M_{ah}$ を4~20[m/s<sup>2</sup>]、加振周波数 $f_{ah}$ を1~10[Hz]に変化させ、液体封入時の二重構造体に正弦波入力を加えたときのキャスクの最大すべり量の絶対値 $Xmax_{ccl}$ を求める。それを加振振幅 $x_{ah}$  ( $=M_{ah}/4\pi^2 f_{ah}^2$ )で割って無次元化した最大すべり応答倍率 $Xmax_{ccl}/x_{ah}$ を図6に示す。また同条件で加振したときの液体未封入時の二重構造体の最大すべり量の絶対値 $Xmax_{cc}$ を、加振振幅 $x_{ah}$ で割って無次元化した最大すべり応答倍率 $Xmax_{cc}/x_{ah}$ を図7に示す。

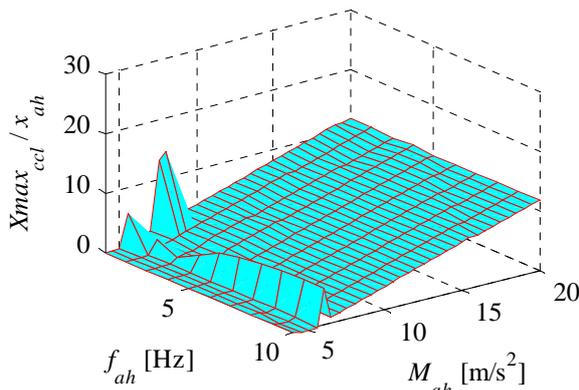


図6 液体封入時のキャスクの最大すべり  
応答倍率 $Xmax_{ccl}/x_{ah}$

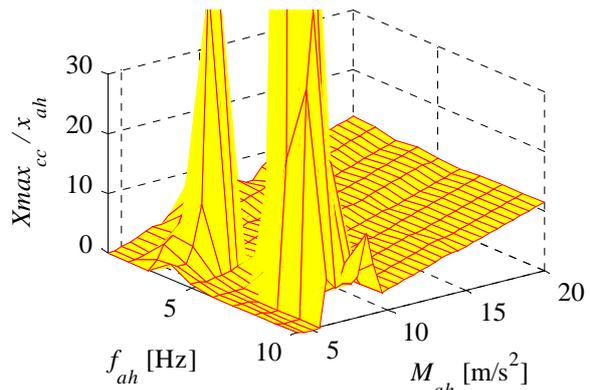


図7 液体未封入時のキャスクの最大すべり  
応答倍率 $Xmax_{cc}/x_{ah}$

図6に示す液体封入時のキャスクの最大すべり応答倍率 $Xmax_{ccl}/x_{ah}$ は、加振加速度振幅 $M_{ah} \geq 10$ [m/s<sup>2</sup>]については加振周波数 $f_{ah}$ に依存せず $M_{ah}$ の増加とともに単調に増加している。この傾向は、図7に示す液体未封入時の二重構造体の場合でも、ほぼ同様である。しかし $M_{ah} < 10$ [m/s<sup>2</sup>]では両者とも単純ではなく、図6では、 $M_{ah}=6$ [m/s<sup>2</sup>]で $f_{ah}=3$ [Hz]を除く $f_{ah}$ の全範囲と、 $M_{ah}=8$ [m/s<sup>2</sup>]前後で $f_{ah}$ が1[Hz]の範囲で、最大すべり応

答倍率 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ が大きくなっている。一方、図7では、 $M_{ah}$ については $6.5[m/s^2]$ 前後、 $f_{ah}$ については $4[Hz]$ 付近および $8\sim 9[Hz]$ の範囲で、最大すべり応答倍率 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ が非常に大きくなっている。図6では、 $f_{ah}$ が $3[Hz]$ 付近、図7では、 $f_{ah}$ が $5[Hz]$ 付近において、 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ が小さく抑えられているが、これは、ばね-キャニスタ系の固有振動数に対応しており、キャニスタと入力波との共振により、キャニスタ反力が大きくなり、それがキャスクのすべりを抑制する方向に作用しているためと考えられる。さらに液体が封入されたことによって、 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ のピークが大幅に低減されていることがわかる。

次に、液体封入時の二重構造体のキャニスタの振幅の最大値 $x_{max_{cc}}$ を加振振幅 $x_{ah}$ で割って無次元化した振幅倍率 $x_{max_{cc}}/x_{ah}$ を図8に示す。また同様に、液体未封入時のキャニスタの振幅の最大値 $x_{max_{cc}}$ を加振振幅 $x_{ah}$ で割って無次元化した振幅倍率 $x_{max_{cc}}/x_{ah}$ を図9に示す。図8および図9から、加振周波数 $f_{ah}$ がばね-キャニスタ系の固有振動数と一致する付近において、キャニスタの振幅倍率 $x_{max_{cc}}/x_{ah}$ はピークを示しており、これは前述の入力波との共振を示すものである。図6および図7において、これらの $f_{ah}$ の範囲でキャスクの最大すべり応答倍率 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ が低下していることから、キャニスタは動吸振器的な挙動を示していると考えられる。さらに、図9に見られる $M_{ah}$ が $6\sim 9[m/s^2]$ 、 $f_{ah}$ が $6\sim 10[Hz]$ の範囲におけるキャニスタの振幅倍率の増大を、図8に示すように、隙間部に液体を封入したことによって大幅に低減できている。これに対応して、図6に示すように、キャスクの最大すべり応答倍率 $X_{max_{cc}}/x_{ah}$ も大幅に低減できている。

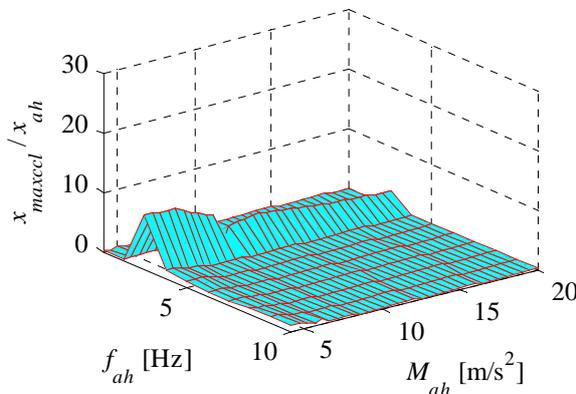


図8 液体封入時のキャニスタの最大振幅  
応答倍率 $x_{max_{cc}}/x_{ah}$

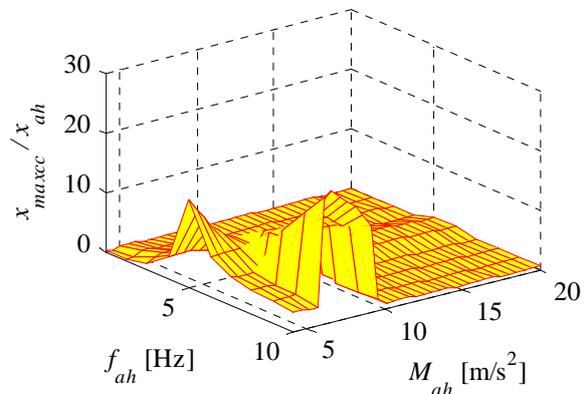


図9 液体未封入時のキャニスタの最大振幅  
応答倍率 $x_{max_{cc}}/x_{ah}$

#### 4.2.3 キャスクの最大すべり量に対するキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔の影響

キャニスタの外径 $2r_0$ を $1.4, 1.6, 1.8[m]$ と変化させることで、キャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R(=R-r_0)$ を $0.25, 0.15, 0.05[m]$ に変化させて数値解析を行い、キャスクの最大すべり量に対するキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R$ の影響を検討した。このとき、液体未封入時のばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n$ ならびに加振加速度振幅 $M_{ah}$ および加振周波数 $f_{ah}$ の範囲は、図6の値の範囲と同様である。液体封入時の二重構造体を基礎励振したときのキャスクの最大すべり量の絶対値 $X_{max_{cc}}$ から、同条件で加振したときの液体未封入時の二重構造体の最大すべり量の絶対値 $X_{max_{cc}}$ を引いた値を $\Delta X_{max}$ と定義し、 $\Delta R=0.25[m]$ の場合の $\Delta X_{max}$ の $M_{ah}, f_{ah}$ 依存性を図10(a)に、 $\Delta R=0.15[m]$ 場合のものを図10(b)に、 $\Delta R=0.05[m]$ の場合のものを図10(c)に示す。

図10(a)に示すキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R=0.25[m]$ では、 $f_{ah}$ が $1\sim 4[Hz]$ で $M_{ah}$ が $4.5\sim 10[m/s^2]$ のときには $\Delta X_{max}$ の値は正であり、この範囲では、隙間部液体がキャスクの最大すべり量を増加させる方向に作用していると考えられる。一方、それ以外の範囲では、 $\Delta X_{max}$ の値が概ね零以下であり、この範囲では隙間部液体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。

図10(b)に示すキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R=0.15[m]$ では、 $f_{ah}$ が $1[Hz]$ で $M_{ah}$ が $5[m/s^2]$ 前後および $8[m/s^2]$ 前後のとき、 $\Delta X_{max}$ の値は正であり、この範囲では、液体がキャスクの最大すべり量を増加させる方向に作用している。一方、それ以外の範囲では、 $\Delta X_{max}$ の値が概ね零以下であり、この範囲では隙間部液体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。

図10(c)に示すキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R=0.05[m]$ では、 $f_{ah}$ が $1[Hz]$ で $M_{ah}$ が $6[m/s^2]$ 前後、

10[m/s<sup>2</sup>]前後、13[m/s<sup>2</sup>]前後および17[m/s<sup>2</sup>]前後のとき、ならびに $M_{ah}$ が6[m/s<sup>2</sup>]で $f_{ah}$ が1~3[Hz]のとき $\Delta X_{max}$ の値は正であり、この範囲では、隙間部液体がキャスクの最大すべり量を増加させる方向に作用している。一方、それ以外の範囲では、 $\Delta X_{max}$ の値が概ね零以下であり、この範囲では隙間部液体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。

また図10(a)~(c)を比較すると、加振条件によっては、隙間部液体がキャスクのすべり量を助長する場合があるものの、全体としてみれば、キャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R$ が小さくなるにつれて、 $\Delta X_{max}$ の最大値が小さくなるとともに、 $\Delta X_{max}$ の値が零以下になる範囲が多くなっている。したがって、キャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R$ を小さくすることによって、二重構造体の最大すべり量を低減することができると考えられる。

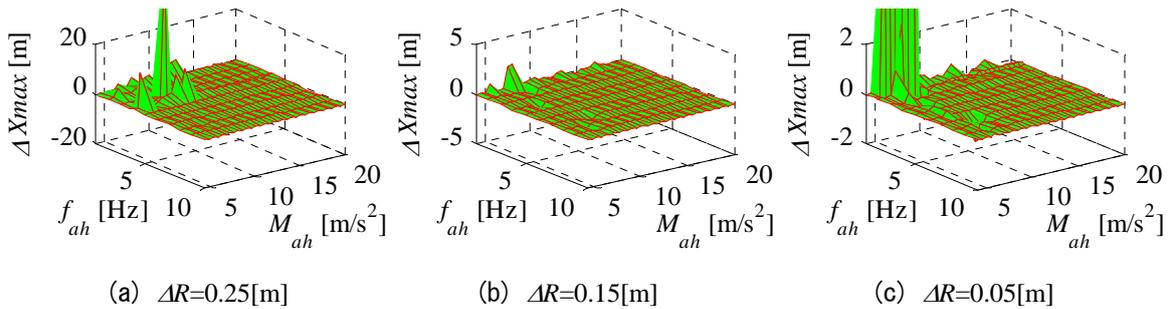


図10 キャスクの最大すべり量に対するキャスクとキャニスタとの隙間部間隔の影響

#### 4.2 地震波加振時のすべり挙動

本節では、水平方向の入力地震波として、新潟県中越沖地震において柏崎市で観測された地震波を用いた。その加速度波形を図11に示す<sup>11)</sup>。また、この入力地震波の加速度応答スペクトルを図12に示す。図12より入力地震波の卓越周波数は、約4[Hz]である。

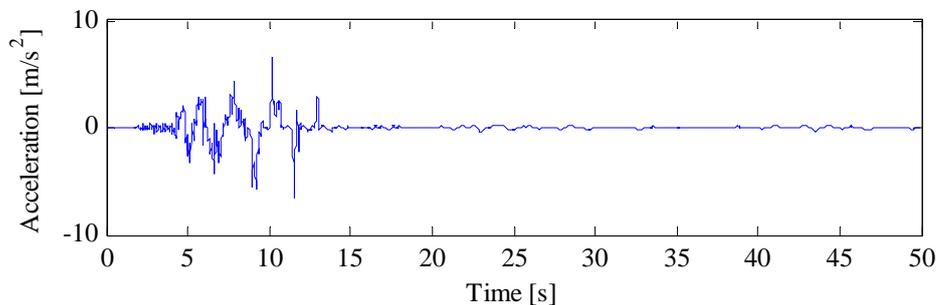


図11 新潟県中越沖地震加速度波形（柏崎市）<sup>11)</sup>

ここでは、キャスクのすべり挙動を顕在化させるため、まず、液体未封入時のばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_n$ を前述の地震波の卓越振動数と同じ4[Hz]として地震波を入力し、そのときの液体封入時の二重構造体におけるキャスクと地盤との相対変位 $X$ およびキャニスタのキャスクとの相対変位 $x$ を求めた。これらの時刻歴応答を図13に示す。この図に示すように、時刻 $t$ が0秒から約9秒までの間では、キャスクはすべらず、またキャニスタは、単なる線形1自由度系として振動し、その振幅は小さい。時刻 $t$ が約9秒のあたりで、キャスクが $X$ 軸の正方向にすべり出し、急激に荷重がかかるためキャニスタの振幅が大きくなっている。そして時刻 $t$ が約12秒のあたりで、キャスクのすべりが止まり、再びキャニスタは、線形1自由度系として振動し、その振幅は徐々に小さくなる。キャスクがすべり出すときには、このようなキャスク、キャニスタ、液体との相互作用による反力も考慮したすべり条件式(19)を満足していると考えられる。またキャスクがすべり始める毎に、キャニスタの振幅が大きくなっていることが確認できる。

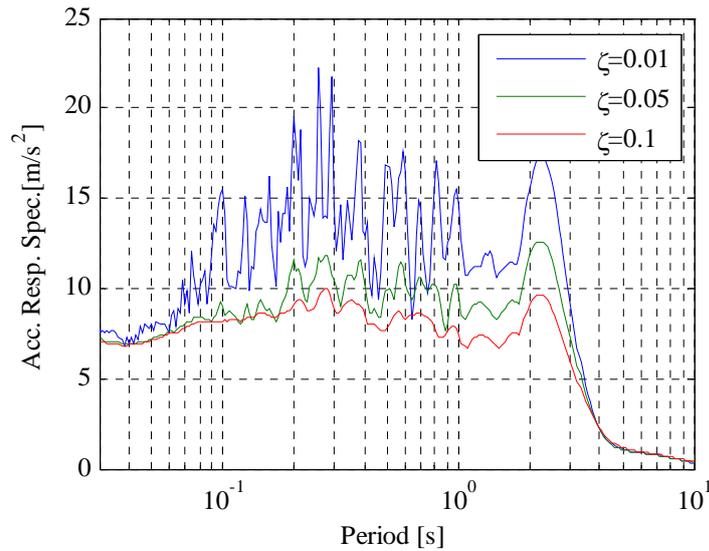


図12 加速度応答スペクトル

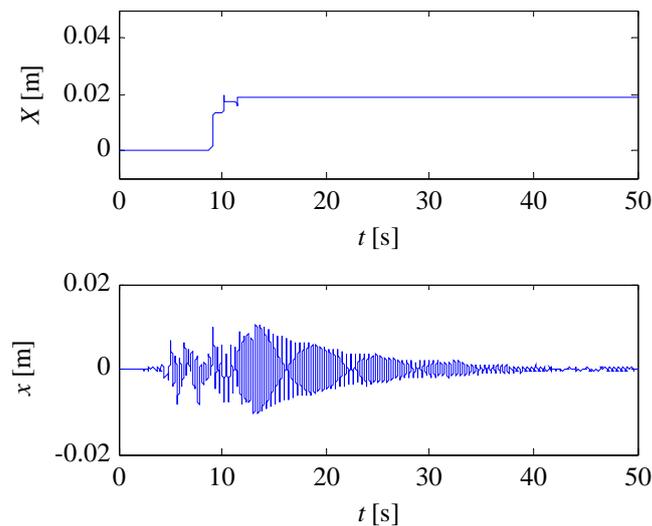


図13 地震波入力に対する液体封入時の二重構造体の時刻歴応答

隙間部液体の影響を調べるために、同じ条件下で、液体未封入時の二重構造体がすべり運動する場合について数値解析を行った。キャスクと地盤との相対変位 $X$ 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14に示す。液体未封入時の二重構造体のすべり運動の挙動は、図13に示す液体封入時の二重構造体のすべり運動に似ている。しかし、キャスクの最大すべり量を比較すると、図14に示す液体未封入時では $X=0.032$ [m]に対して、図13に示す液体封入時では $X=0.019$ [m]と小さくなっており、液体封入時の二重構造体の方が移動量が小さくなっている。これからも隙間部液体の存在が、キャスクのすべりを抑制する効果を持つことがわかる。

さらに、液体封入時の二重構造体について、キャニスタの外径 $2r_0$ を1.4、1.6、1.8[m]と変化させることで、キャスクとキャニスタとの隙間部の間隔 $\Delta R$ を0.25、0.15、0.05[m]に変化させて、そのときの最大すべり量と、液体未封入時の最大すべり量とを比較したものを図15に示す。なお、 $\Delta R$ が0.25、0.15、0.05[m]の場合のばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_{nl}$ は、それぞれ3.7、2.9、1.7[Hz]である。この図から、液体封入時の二重構造体の方が液体未封入時の二重構造体よりもキャスクの最大すべり量が小さく、隙間部液

体による制振効果があることがわかる。また、隙間部の間隔 $\Delta R$ が小さくなるとともに、ばね-キャニスタ系の固有振動数 $f_{ni}$ が低下し、図12に示す入力地震波の加速度応答スペクトルの読み取り値は、若干変化するが、その変化幅は小さく、キャスクのすべりに与える加速度応答スペクトルの凹凸の影響は無視できるものと考えられる。以上のことから、キャスクとキャニスタとの隙間部の液体は、キャスクのすべりを抑制する効果を有し、隙間部の間隔 $\Delta R$ を小さくするほど、付加質量 $M_H$ が大きくなり、その結果、隙間部の間隔 $\Delta R$ を小さくした場合に制振効果が大きくなる傾向にあることがわかった。

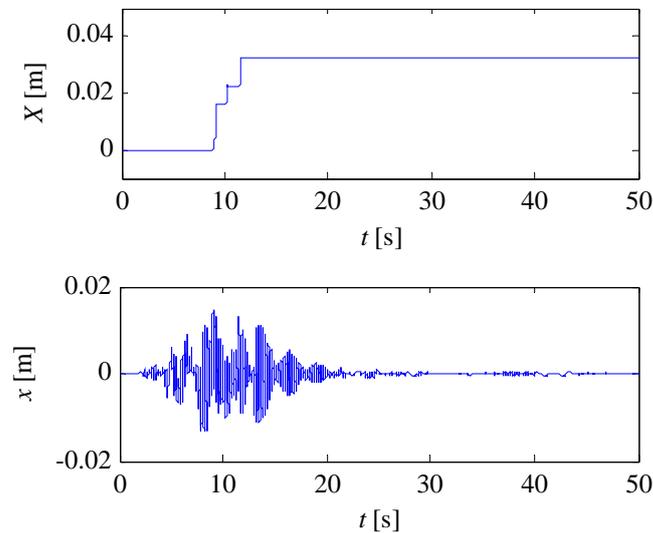


図14 地震波入力に対する液体未封入時の二重構造体の時刻歴応答

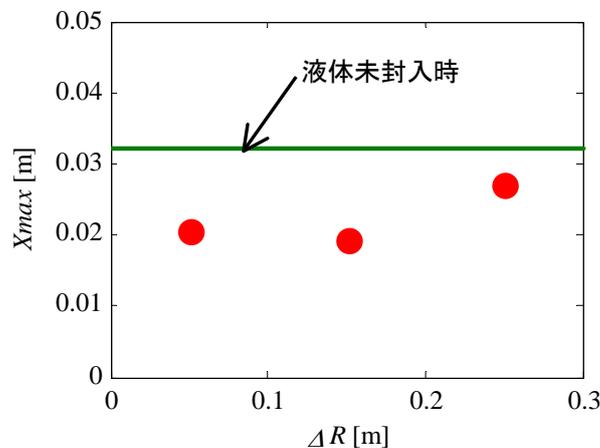


図15 地震波入力に対する液体封入時の二重構造体におけるキャスクとキャニスタとの隙間部の間隔の影響

## 5. 結言

キャスク-キャニスタ系を二重構造体として取り扱い、キャスクとキャニスタとの隙間部に液体を封入して、水平方向に正弦波または地震波を入力したときのすべり運動を評価し、隙間部液体がキャスクのすべり量に与える影響を評価した。隙間部に液体を封入することによって、液体の付加質量効果により、キャスクとキャニスタとが液体を介して相互作用し、キャニスタからの液体反力がキャスクのすべり応答倍率を抑制することがわかった。また、キャニスタの外径を変化させることで、隙間部の間隔を

変化させた結果、隙間部の間隔が小さくなるにつれて、キャスクの最大すべり量をさらに低減しうることがわかった。

#### 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) 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, Mar. 2008, pp.36-44.
- 4) 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.
- 5) Furuta, K., Ito, T., Shintani, A. : Rocking and Sliding Motions of a Freely Standing Structure Coupled with Inner Structure, *Proceedings of 2008 ASME Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2008) (CD-ROM)*, July 2008, PVP2008-61086.
- 6) 古田和久、伊藤智博、新谷篤彦：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、*日本地震工学会論文集*、8巻、3号、2008年8月、pp. 31-45.
- 7) Furuta, K., Ito, T., Shintani, A. : Effects of the Internal Vibration System on the Rocking Motion of a Rigid Body, *Proceedings of MOVIC 2008 (CD-ROM)*, Sept. 2008, 1117.
- 8) 古田和久、伊藤智博、新谷篤彦：地震動を受ける2自由度連成系のすべり運動の検討、*日本機械学会論文集*、C編。（掲載決定）
- 9) Fritz, R. J. : The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Feb. 1972, pp. 167-173.
- 10) 電中研レビュー第52号、2006年、財団法人 電力中央研究所.
- 11) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク Kyoshin Net (K-NET) <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>  
(受理：2008年11月12日)  
(掲載決定：2009年1月28日)

# **Study on the Influence of Liquid in an Annular Region on Sliding Motion of a Dual Structure Subjected to Base Excitation**

FURUTA Kazuhisa <sup>1)</sup>, ITO Tomohiro <sup>2)</sup> and SHINTANI Atsuhiko <sup>3)</sup>

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**

In nuclear power stations, the storage of a lot of spent fuels is becoming a serious problem because of the shortage of the residual space of the spent fuel pool. It is planned to construct another plant where the spent fuels are temporarily stored. In that plant, the spent fuels will be installed in a container called canister. The canister, in turn, will be stored in an outer cylindrical container called cask, which will be a free-standing structure. Thus, the cask-canister system is seen as a two-degree-of-freedom coupled system. Therefore, it is very important to evaluate the sliding motion of the cask-canister system subjected to seismic excitations. In an analytical model, the canister and the cask are treated as rigid bodies that are connected by a spring and a dashpot, and liquid is encapsulated in an annular region between the cask and the canister. The equations of motion are derived for the sliding motion when the floor is subjected to a horizontal base excitation. The sliding displacement of the cask and the relative displacement of the canister against the cask are evaluated by numerical simulations. The effects of the liquid in the annular region is effective in reducing the sliding motion of the cask.

*Key Words: Dual structure, Seismic response, Sliding, Damping, Liquid in an annular region*