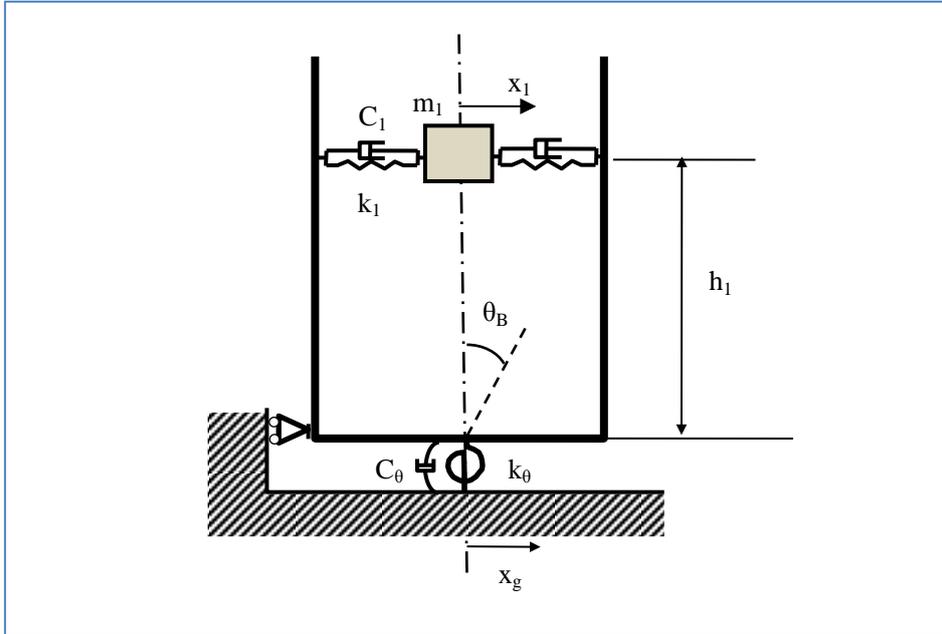


別添資料 1

1 質点減衰付きロックング系モデル

1 質点減衰付きロックング系モデルの概念図を付図 1.1 に示す。



付図 1.1 1 質点減衰付きロックング系モデルの概念図

ラグランジュの方程式を用いて、1 質点減衰付きロックング系モデルの運動方程式は次式で求められる。

$$\begin{bmatrix} m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_B \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 h_1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1.1)$$

一方、ベースシア \$Q\$ 及び転倒モーメント \$M_{EBP}\$ は、次式で表される。

$$Q(t) = m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) + C_1 \dot{x}_1 \quad (1.2)$$

$$M_{EBP}(t) = m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) h_1 + C_\theta \dot{\theta}_B \quad (1.3)$$

ここで、

\$m_1\$: バルジング振動有効液質量(kg)

\$h_1\$: バルジング有効液質量高さ(cm)

\$C_1\$: バルジング振動減衰係数(N.s/cm)

C_θ : タンク基部のロッキング減衰係数(N.s.cm/rad)

k_1 : バルジング振動ばね定数(N/mm)

k_θ : タンク基部のロッキングばね定数(N.cm/rad)

$x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$: 質点の変位(cm)、速度(cm/s)、及び加速度(cm/s²)

$\theta_B, \dot{\theta}_B, \ddot{\theta}_B$: タンク基部のロッキング角変位(rad)、角速度(rad/s)、及び角加速度(rad/s²)

$x_g, \dot{x}_g, \ddot{x}_g$: タンク基礎の変位(cm)、速度(cm/s)、及び加速度(cm/s²)

また、 $u_1 = x_1 + h_1 \theta_B$ とおくと、式 (1) は次式のように表される。

$$m_1 \ddot{u}_1 + C_e \dot{u}_1 + k_e u_1 = -m_1 \ddot{x}_g \quad (1.4)$$

ただし、

$$\frac{1}{k_e} = \left[\frac{1}{k_1} + \frac{h_1^2}{k_\theta} \right] \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{C_e} = \left[\frac{1}{C_1} + \frac{h_1^2}{C_\theta} \right] \quad (1.6)$$

以下、式の誘導過程を示す。

[運動方程式の誘導]

ラグランジュの方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}_1} + \frac{\partial V}{\partial x_1} = 0 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_B} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_B} + \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_B} + \frac{\partial V}{\partial \theta_B} = 0 \quad (1.8)$$

運動エネルギーとポテンシャルエネルギー及び粘性減衰エネルギーは、

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \dot{x}_g + \dot{\theta}_B \cdot h_1)^2 \quad (1.9)$$

$$V = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_\theta \theta_B^2 \quad (1.10)$$

$$F = \frac{1}{2} C_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} C_\theta \dot{\theta}_B^2 \quad (1.11)$$

そして、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_B} \right) = m_1 h_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) \quad (1.13)$$

さらに、

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0 \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta_B} = 0 \quad (1.15)$$

そして、

$$\frac{\partial V}{\partial x_1} = k_1 x_1 \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta_B} = k_\theta \theta_B \quad (1.17)$$

一方、

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_1} = C_1 \dot{x}_1 \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_B} = C_\theta \dot{\theta}_B \quad (1.19)$$

これより、運動方程式は、

$$m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) + C_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = 0 \quad (1.20)$$

$$m_1 h_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g + \ddot{\theta}_B \cdot h_1) + C_\theta \dot{\theta}_B + k_\theta \theta_B = 0 \quad (1.21)$$

マトリックス表示すれば、

$$\begin{bmatrix} m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_B \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 h_1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1.22)$$

また、質点の絶対変位を用いた表示形式は以下のように求められる。

$u_1 = x_1 + h_1 \theta_B$ とおくと、運動方程式は、

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + C_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = 0 \quad (1.23)$$

$$m_1h_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + C_\theta\dot{\theta}_B + k_\theta\theta_B = 0 \quad (1.24)$$

上式 (1.24) を書き直して、

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + \frac{C_\theta}{h_1^2}(\dot{u}_1 - \dot{x}_1) + \frac{k_\theta}{h_1^2}(u_1 - x_1) = 0 \quad (1.25)$$

式 (1.23)、(1.26) 及び (1.25) を比較して、

$$C_1\dot{x}_1 = \left(\frac{C_\theta}{h_1^2}\right)h_1\dot{\theta}_B \quad (1.26)$$

$$k_1x_1 = \left(\frac{k_\theta}{h_1^2}\right)h_1\theta_B \quad (1.27)$$

ここで、 u_1 に関する運動方程式を導入する。この場合、減衰係数を C_e 及びばね係数を k_e とする。

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + C_e\dot{u}_1 + k_eu_1 = 0 \quad (1.28)$$

これより、式 (3.26) 及び式 (1.27) の関係を用いて、

$$C_e\dot{u}_1 = C_e(\dot{x}_1 + h_1\dot{\theta}_B) = C_e\left[\frac{1}{C_1} + \frac{h_1^2}{C_\theta}\right]C_1\dot{x}_1 \quad (1.29)$$

$$k_eu_1 = k_e(x_1 + h_1\theta_B) = k_e\left[\frac{1}{k_1} + \frac{h_1^2}{k_\theta}\right]k_1x_1 \quad (1.30)$$

これより、

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_1\left[\frac{1}{C_1} + \frac{h_1^2}{C_\theta}\right]}\dot{u}_1 \quad (1.31)$$

$$x_1 = \frac{1}{k_1\left[\frac{1}{k_1} + \frac{h_1^2}{k_\theta}\right]}u_1 \quad (1.32)$$

上式の関係を用い、式 (1.23) と式 (1.28) 比較すれば、次式が得られる。

$$\frac{1}{C_e} = \left[\frac{1}{C_1} + \frac{h_1^2}{C_\theta}\right] \quad (1.31)$$

$$\frac{1}{k_e} = \left[\frac{1}{k_1} + \frac{h_1^2}{k_\theta} \right] \quad (1.32)$$

算式の一覧表を以下に示す。

ロッキングばねが非線形の場合には、復元力特性を以下のように置き換えることになる。

1) 2元連立微分方程式表示 (x_1, θ_B) 運動方程式: $k_\theta \theta_B \rightarrow M(\theta_B)$

2) 1元微分方程式表示 (x_1) 運動方程式: $k_e u_1 \rightarrow Q(u_1)$

付表 1.1 1質点減衰付きRモデル一覧表 [線形ロッキングばね k_θ の場合]

	2元連立微分方程式表示 (x_1, θ_B)	1元微分方程式表示 $u_1 = x_1 + h_1 \theta_B$
運動 方程式	$\begin{bmatrix} m_1 & m_1 h_1 \\ m_1 h_1 & m_1 h_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_B \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 h_1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$	$m_1 \ddot{u}_1 + C_e \dot{u}_1 + k_e u_1 = -m_1 \ddot{x}_g$
ばね 定数	k_1, k_θ	$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_1} + \frac{h_1^2}{k_\theta}$
減衰係数	C_1, C_θ	$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{h_1^2}{C_\theta}$
相対 変位	x_1	$x_1 = \frac{k_e}{k_1} u_1$
回轉變位	$h_1 \theta_B$	$h_1 \theta_B = \frac{k_e h_1^2}{k_\theta} u_1$
地動変位	x_g	x_g
絶対 変位	$x_1 + h_1 \theta_B + x_g$	$u_1 + x_g$

別添資料 2

動液圧の影響を考慮したタンク全体の浮き上がりロック特性 「Wozniak モデル」に基づく方法

2.1 計算手順

動液圧の影響を考慮したタンク全体の浮き上がりロック特性計算手順は、以下の 5 段階に分かれる（付図 2.1 参照）。

第 1 段階：隅角部浮き上がり特性計算

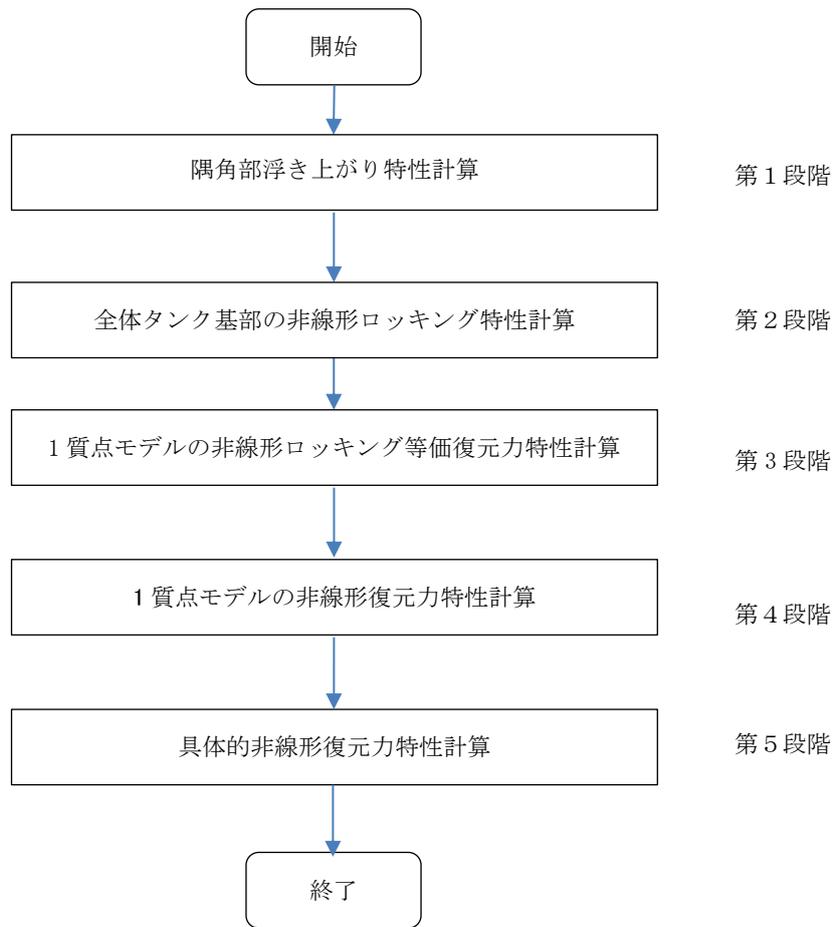
第 2 段階：全体タンク基部の非線形ロック特性計算

第 3 段階：1 質点モデルの非線形ロック等価復元力特性計算

第 4 段階：1 質点非線形ばね系モデルの復元力特性計算

第 5 段階：具体的復元力特性計算

ただし、タンク自重の影響及び、水平地震動によるタンク転倒モーメントに係る動液圧の影響は無視する。



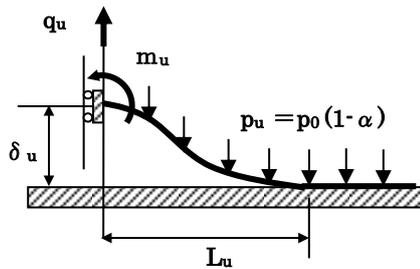
付図 2.1 動液圧の影響を考慮したタンク全体の浮き上がりロック特性計算手順

2.2 隅角部浮き上がり特性計算

Wozniak モデルを用いて計算する。この場合の主な仮定条件は下記のとおりである。
 なお、側板下端に作用する自重の影響は別途取り扱うこととする。

- 1) タンク基礎は剛基礎とする。
- 2) タンク隅角部に作用する内圧は（静液圧+動液圧）とする。
- 3) 隅角部アニュラ板の曲げ剛性 D_s は ∞ とする。隅角部浮き上がり位置のアニュラ板端部は回転拘束(固定)で浮き上がりは可能な境界条件とする。
- 4) アニュラ板は微小変形弾性理論に立脚する単位幅のはりとする。

隅角部浮き上がりモデルは、付図 2.2 に示す通りで、隅角部浮き上がり特性計算手順は付図 2.3 のとおりである。隅角部アニュラ板の曲げモーメント m_u を設定した場合、浮き上がり抵抗力和浮き上がり変位の関係は、次式で表される。



付図 2.2 隅角部浮き上がり・Wozniak モデル

$$q_u = \sqrt[4]{\frac{128}{9} D_a^3 p_u^3 \delta_u} \quad (2.1)$$

ただし、

$$p_u = p_0(1-\alpha) \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{P_{h1}}{P_0} \quad (2.3)$$

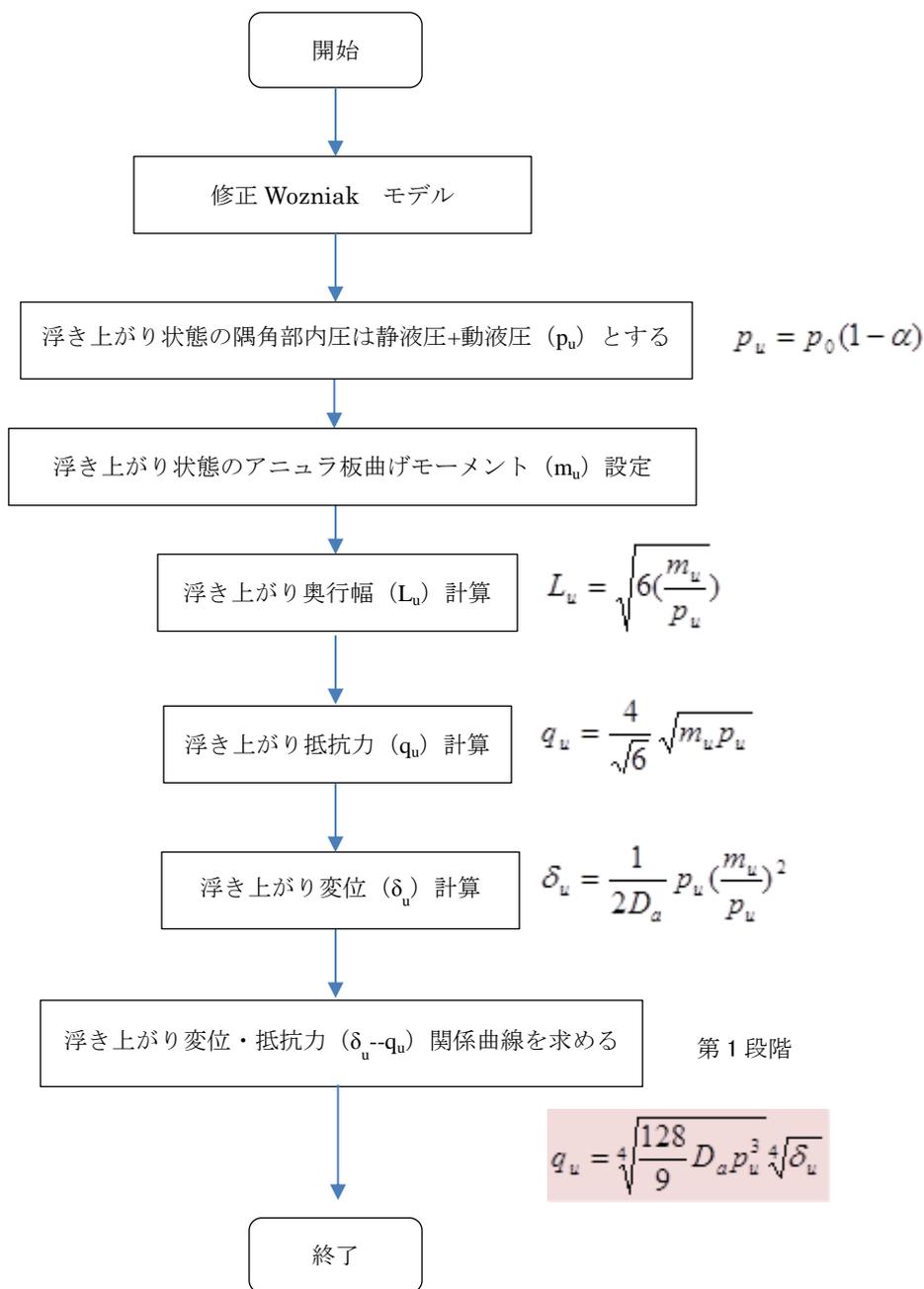
$$\delta_u = \frac{1}{2D_a} \left(\frac{m_u^2}{p_u} \right) \quad (2.4)$$

$$m_u = \sigma_u t_a^2 / 6 \quad (2.5)$$

隅角部アニュラ板が降伏モーメント m_y に達するとき、 $\sigma_u = \sigma_y$ として、降伏浮き上がり抵

抗力 q_y と降伏変位 δ_y の関係が得られる。

また、隅角部アニュラ板に全塑性モーメント m_p に達するとき、 $\sigma_u=1.5\sigma_y$ として、全塑性降伏浮き上がり抵抗 q_p と降伏変位 δ_p の関係が得られる。



付図 2.3 隅角部浮き上がり特性計算手順(第1段階)

2.3 全体タンク基部の非線形ロッキング特性計算

主な仮定条件は下記のとおりである。

なお、側板下端に作用する自重の影響は別途取り扱うこととする。

- 1) 隅角部内圧は、円周にわたって余弦分布し次式で与える（付図 2.4 参照）。

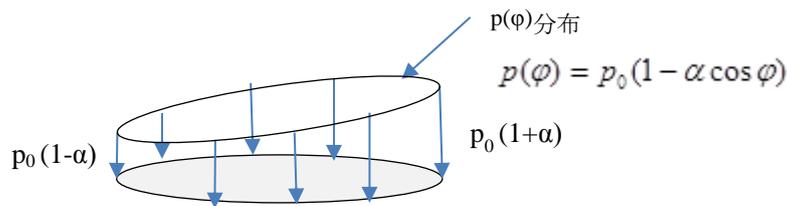
$$p(\varphi) = p_0(1 - \alpha \cos \varphi)$$

- 2) 隅角部浮き上がり変位は、円周にわたって一様傾斜分布し次式で与える（付図 2.5 参照）。

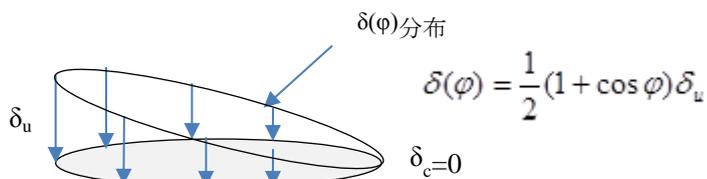
$$\delta(\varphi) = \frac{1}{2}(1 + \cos \varphi)\delta_u$$

- 3) 円周任意点の隅角部の抵抗力は、次式で与える（付図 2.6 参照）。

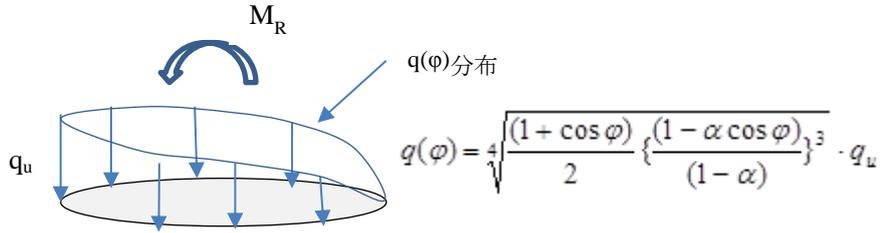
$$q(\varphi) = \sqrt[4]{\frac{(1 + \cos \varphi)}{2} \left\{ \frac{(1 - \alpha \cos \varphi)}{(1 - \alpha)} \right\}^3} \cdot q_u$$



付図 2.4 隅角部の内圧分布



付図 2.5 側板下端の片浮き上がり抵抗力分布と転倒抵抗モーメント



付図 2.6 側板下端の片浮き上がり抵抗力分布と転倒抵抗モーメント

片浮き上がり状態におけるタンク全体基部の非線形ロッキング特性計算手順は付図 2.7 のとおりである。

抵抗転倒モーメント・回転角の関係は次式で表される（付図 2.4 及び付図 2.6 参照）。

$$M_R = C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_t} \quad (2.6)$$

ただし、

$$C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381 \quad (2.7)$$

上式は、以下のように求められる。

抵抗転倒モーメント M_R と隅角部浮き上がり抵抗力 q_u の関係式は、

$$\begin{aligned} M_R &= 2 \int_0^\pi q(\varphi) \cdot (1 + \cos \varphi) R^2 d\varphi = 2q_u R^2 \int_0^\pi \sqrt[4]{\frac{(1 + \cos \varphi)}{2} \left\{ \frac{(1 - \alpha \cos \varphi)}{(1 - \alpha)} \right\}^3} (1 + \cos \varphi) d\varphi \\ &= 2q_u R^2 \int_0^\pi \sqrt[4]{\frac{(1 + \cos \varphi)^5}{2} \left\{ \frac{(1 - \alpha \cos \varphi)}{(1 - \alpha)} \right\}^3} d\varphi \end{aligned} \quad (2.8)$$

これより、積分を実行して二次曲線近似すれば、

$$M_R = 2q_u R^2 f_\varphi(\alpha) \quad (2.9)$$

$$f_\varphi(\alpha) = 2.0571\alpha^2 + 0.7074\alpha + 2.8963 \quad (2.10)$$

一方、片浮き上がりしたタンクの傾斜角 θ_t と隅角部の最大浮き上がり変位 δ_u の関係式は、

$$\theta_t = \frac{\delta_u}{2R} \quad (2.11)$$

これより、隅角部の最大浮き上がり点の抵抗力は、

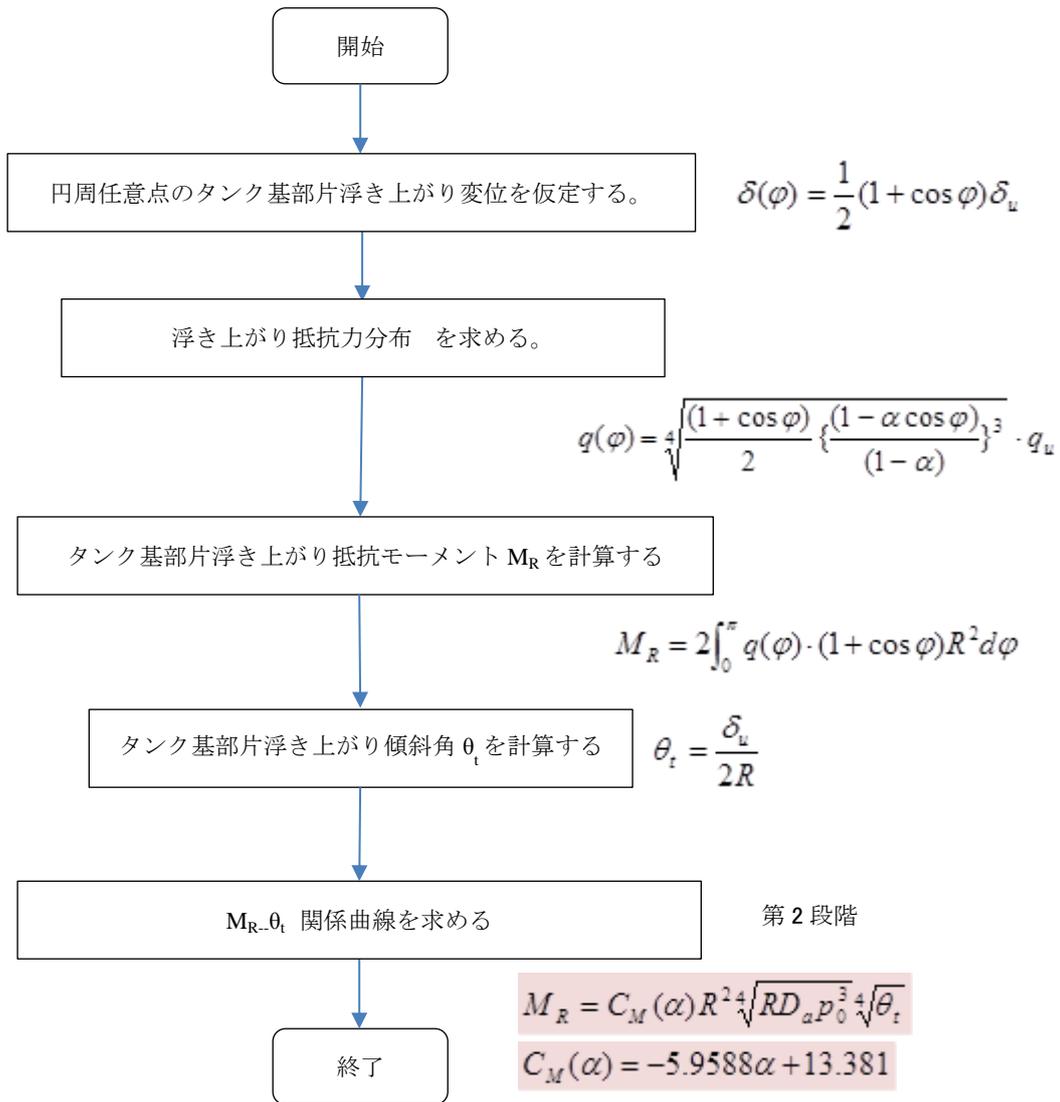
$$\begin{aligned}
q_u &= \sqrt[4]{\frac{128}{9} D_a p_u^3 \cdot \sqrt[4]{\delta_u}} = \sqrt[4]{\frac{256}{9} R D_a p_u^3 \cdot \sqrt[4]{\theta_t}} \\
&= \sqrt[4]{\frac{256}{9} R D_a p_0^3 (1-\alpha)^3 \cdot \sqrt[4]{\theta_t}}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

したがって、

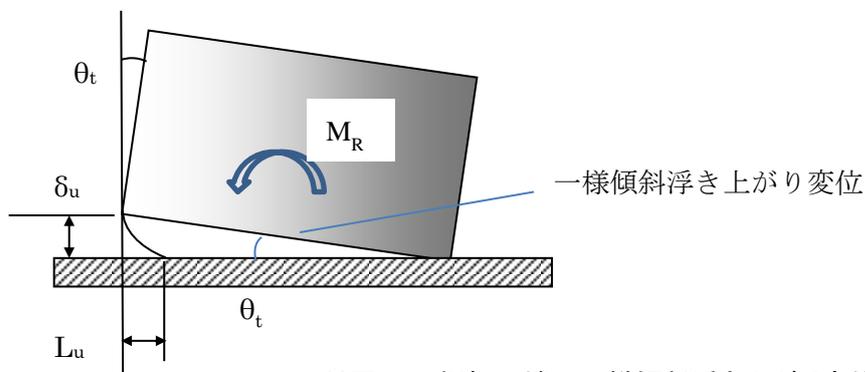
$$\begin{aligned}
M_R &= 2q_u R^2 f_\varphi(\alpha) = \left[2 \sqrt[4]{\frac{256}{9}} f_\varphi(\alpha) \sqrt[4]{(1-\alpha)^3} \right] \times R^2 \sqrt[4]{R D_a p_0^3 \cdot \sqrt[4]{\theta_t}} \\
&= C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{R D_a p_0^3 \cdot \sqrt[4]{\theta_t}}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

ここで、

$$C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381 \tag{2.14}$$



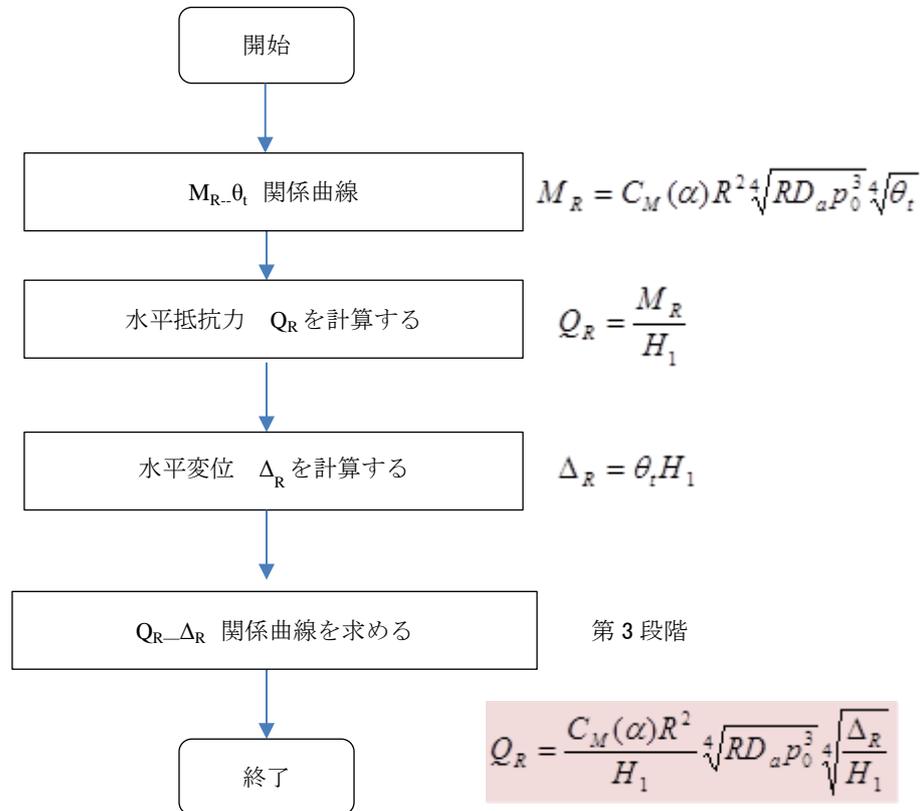
付図 2.7 全体タンク基部の非線形ロッキング特性計算手順(第2段階)



付図 2.8 側板下端の一様傾斜浮き上がり変位(仮定)

2.4 1 質点モデルにおける非線形ロッキング等価復元力特性計算

片浮き上がり状態におけるタンク全体基部の非線形ロッキング等価復元力特性計算手順は次のとおりである。



付図 2.9 質点ばね系モデルにおける非線形ロッキング復元力特性計算手順(第3段階)

非線形ロッキング復元力特性は、次式で表される(付図 2.10 参照)。

$$Q_R = \frac{C_M(\alpha)R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta_R}{H_1}} \quad (2.15)$$

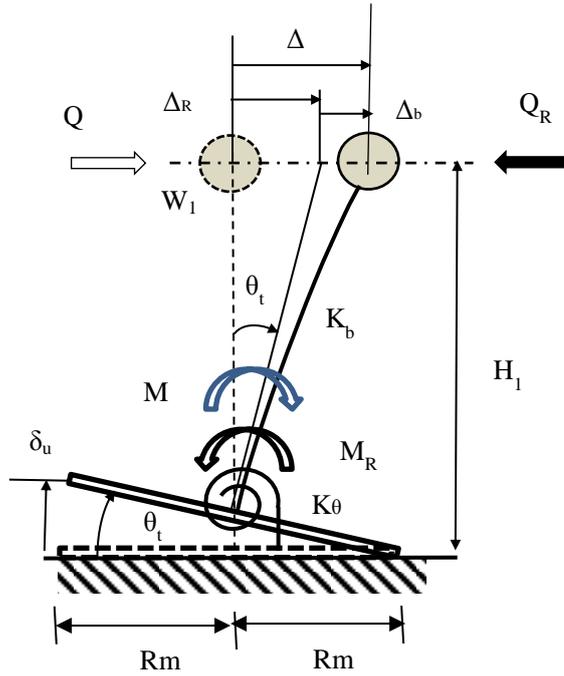
上式は、式(2.15)に、以下に示す式(2.16)と式(2.17)を代入して求められる。

抵抗転倒モーメント M_R と抵抗水平力 Q_R の関係式は、

$$M_R = Q_R \cdot H_1 \quad (2.16)$$

片浮き上がりしたタンクの傾斜角 θ_t と水平変位 Δ_R の関係式は、

$$\theta_t = \frac{\Delta_R}{H_1} \quad (2.17)$$



付図 2.10 1 質点モデルにおけるロッキングに関する 抵抗水平力と水平変位

2.5 1 質点モデルにおける非線形復元力特性計算

1 質点非線形ばね系モデル (SDOF- K_e モデル) の運動方程式は、

$$\left(\frac{W_1}{g}\right)\ddot{\Delta} + C_1\dot{\Delta} + K_e\Delta = -\left(\frac{W_1}{g}\right)\ddot{z}_0 \quad (2.18)$$

非線形復元力は、次式で表される (付図 2.11 参照)。

$$Q(\Delta) = K_e\Delta \quad (2.19)$$

この場合、水平変位は

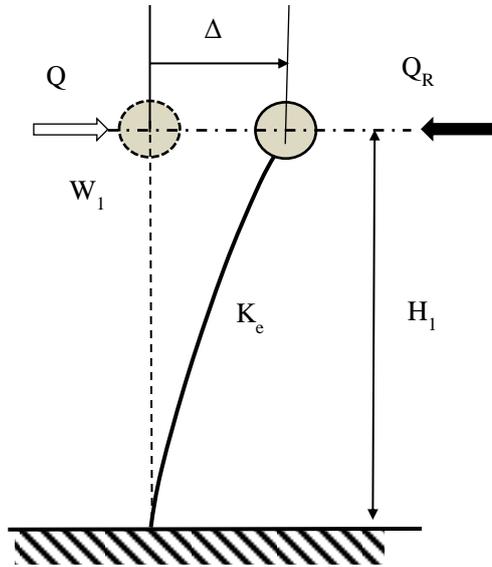
$$\Delta = \Delta_b + \Delta_R = \frac{Q(\Delta)}{K_b} + \Delta_R = \frac{Q_R(\Delta_R)}{K_b} + \Delta_R \quad (2.20)$$

ただし、

$$K_b = \left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2 \left(\frac{W_1}{g}\right)$$

ここで、

K_e : 非線形ばね係数、 T_b : バルジング固有周期、 W_1 : 有効液重量、 C_1 : 減衰係数



付図 2.11 1 質点モデル (SDOF-NR モデル) 抵抗水平力と水平変位

自重の影響を考慮した場合の算式のついては、次表にまとめて示す。

付表 2.5.1 動液圧の影響を考慮した場合の算式 (自重の影響を考慮した場合の算式等)

	自重無視	自重考慮
動液圧比	$\alpha = p_{h1} / p_0$	$\alpha = p_{h1} / p_0$
最大浮き上がり点の内圧	$p_u = p_0(1 - \alpha)$	$p_u = p_0(1 - \alpha)$
$q_u - \delta_u$ 関係式	$q_u = \sqrt[4]{\frac{128}{9}} D_a \sqrt[4]{p_u^3} \sqrt[4]{\delta_u}$	$q_u = \sqrt[4]{\frac{128}{9}} D_a \sqrt[4]{p_u^3} \sqrt[4]{\delta_u} + q_t$
$M_R - \theta_t$ 関係式	$M_R = C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{R D_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_t}$ $C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381$	$M_R = C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{R D_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_t} + 2\pi R^2 q_t$ $C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381$
$Q_R - \Delta_R$ 関係式	$Q_R = \frac{C_M(\alpha) R^2}{H_1} \sqrt[4]{R D_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta_R}{H_1}}$	$Q_R = \frac{C_M(\alpha) R^2}{H_1} \sqrt[4]{R D_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta_R}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$
$Q - \Delta$ 関係式	$Q = Q_R$ $\Delta = \Delta_b + \Delta_R = \frac{Q_R}{K_b} + \Delta_R$	$Q = Q_R$ $\Delta = \Delta_b + \Delta_R = \frac{Q_R}{K_b} + \Delta_R$

比較のため、動液圧の影響を無視した場合の算式について、次表に示す。

付表 2.5.2 動液圧の影響を無視した場合の算式（自重の影響を考慮した場合の算式等）

	自重無視	自重考慮
動液圧比	$\alpha = 0$	$\alpha = 0$
最大浮き上がり点の内圧	$p_u = p_0$	$p_u = p_0$
q_u - δ_u 関係式	$q_u = \sqrt[4]{\frac{128}{9}} D_a \sqrt[4]{p_0^3} \sqrt[4]{\delta_u}$	$q_u = \sqrt[4]{\frac{128}{9}} D_a \sqrt[4]{p_0^3} \sqrt[4]{\delta_u} + q_t$
M_R - θ_t 関係式	$M_R = 2\pi R^2 \sqrt[4]{\frac{256RD_a}{9}} p_0^3 \sqrt[4]{\theta_t}$	$M_R = 2\pi R^2 \sqrt[4]{\frac{256RD_a}{9}} p_0^3 \sqrt[4]{\theta_t} + 2\pi R^2 q_t$
Q_R - Δ_R 関係式	$Q_R = \frac{2\pi R^2}{H_1} \sqrt[4]{\frac{256RD_a}{9}} p_0^3 \sqrt[4]{\frac{\Delta_R}{H_1}}$	$Q_R = \frac{2\pi R^2}{H_1} \sqrt[4]{\frac{256RD_a}{9}} p_0^3 \sqrt[4]{\frac{\Delta_R}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$
Q - Δ 関係式	$Q = Q_R$ $\Delta = \Delta_b + \Delta_R = \frac{Q_R}{K_b} + \Delta_R$	$Q = Q_R$ $\Delta = \Delta_b + \Delta_R = \frac{Q_R}{K_b} + \Delta_R$

（注）消防法の保有水平耐力計算においては、自重無視の算式が用いられている。

2.6 具体的復元力特性計算

(1) 動液圧比とベースシア・転倒モーメントの関係

地震動により発生する動液圧、ベースシア、及び転倒モーメントは以下のように表される。

$$p_{hl} = [K_{hl} \{ (C_{00} - C_{10}) \frac{1}{v_3} + C_{10} \}] p_0 \approx K_{hl} C_{10} p_0 \quad (2.21)$$

$$Q = K_{hl} \{ (W_0 - W_1) \frac{1}{v_3} + W_1 \} \approx K_{hl} W_1 \quad (2.22)$$

$$M = K_{hl} \{ (W_0 H_0 - W_1 H_1) \frac{1}{v_3} + W_1 H_1 \} \approx K_{hl} W_1 H_1 \quad (2.23)$$

一方、動液圧比は次式で定義されている。

$$\alpha = \frac{p_{hl}}{p_0} \quad (2.24)$$

したがって、上式と式 (2.21) より、

$$\alpha = K_{hl} C_{10} \quad (2.25)$$

これより、ベースシア、及び転倒モーメントと動液圧比の関係式は、次式で表される。

$$Q = \frac{\alpha}{C_{10}} W_1 \quad (2.26)$$

$$M = \frac{\alpha}{C_{10}} W_1 H_1 \quad (2.27)$$

(2) 全体タンク基部の非線形ロッキング特性計算

具体的計算手順は、以下のとおりである。

- 1) M_R を設定する。
- 2) $M=M_R$ において、 α を計算する。

$$\alpha = \frac{M_R}{W_1 H_1} C_{10}$$

- 3) $M=M_R$ より、 $\theta=\theta_t$ を計算する。

$$\theta_i = \left[\frac{\left\{ \frac{\alpha}{C_{10}} W_1 H_1 \right\}}{\left\{ C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \right\}} \right]^4$$

4) ステップ 1) ～3) を繰返して、非線形ロッキングばね特性 [M-θ]線図を求める。

別添資料 4 参照

(3) 1 質点モデルにおける非線形ばねの復元力特性

具体的計算手順は、以下のとおりである。

- 1) Q_R を設定する。
- 2) $Q=Q_R$ において、 α を計算する。

$$\alpha = \frac{Q_R}{W_1} C_{10}$$

3) $[Q_R-\Delta_R]$ 関係式より、 Δ_R を計算する。

$$\Delta_R = \left[\frac{\left\{ \frac{\alpha}{C_{10}} W_1 \right\}}{\frac{C_M(\alpha) R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{1}{H_1}}} \right]^4$$

4) 質点の水平変位 Δ を計算する。

$$\Delta = \frac{Q_R}{K_b} + \Delta_R$$

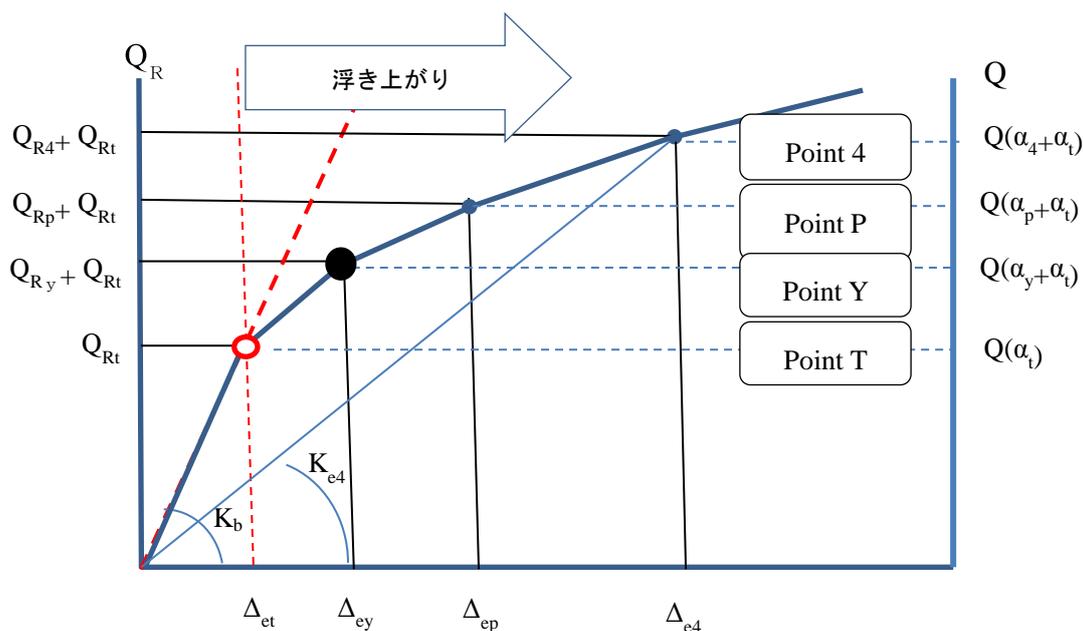
5) ステップ 1) ～4) を繰返して、1 質点モデルにおける非線形水平ばねの復元力特性 [Q-Δ]線図を求める。

別添資料 3 参照

別添資料 3

非線形水平ばね特性を表現する Q-Δ 線図の整理と定式化

剛基上部に置かれている満液円筒形貯槽を 1 質点でモデル化し、非線形水平ばねにより質点に作用する水平力と水平変位の復元力特性線図を付図 3.1 に示す。



付図 3.1 水平力と水平変位の復元力特性線図

各点における浮き上がり状態及び各点の水平変位と水平抵抗力の計算手順は以下に示す。

- | | | |
|-----------------|----------------------------------|---------------------|
| 1) Point T----- | (Q_{Rt}, Δ_{et}) | 浮き上がり開始点 |
| 2) Point Y----- | $(Q_{Ry} + Q_{Rt}, \Delta_{ey})$ | 弾性限界浮き上がり点 |
| 3) Point P----- | $(Q_{Rp} + Q_{Rt}, \Delta_{ep})$ | 塑性関節発生浮き上がり点 |
| 4) Point 4----- | $(Q_{R4} + Q_{Rt}, \Delta_{e4})$ | 想定される最大浮き上がり変位における点 |

必要に応じて、Point 4 の算定式を用いて、線図上に任意点の追加も可能となる。

Point T-----(Q_{Rt} , Δet) の計算手順

- 1) 側板下端に作用する自重抵抗力 q_t に対応するタンク水平抵抗力 Q_{Rt} を計算する。

$$Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad (3.1)$$

(注) Q_{Rt} は、自重による抵抗転倒モーメント M_{Rt} を H_1 で除して求める。

$$Q_{Rt} = M_{Rt} / H_1 = \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad (3.2)$$

- 2) Q_{Rt} と短周期水平地震動による作用水平力 Q_{at} を等しいとおいて、 α_t を計算する。

$$Q_{Rt} = Q_{at} = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) \quad (3.3)$$

これより、

$$\alpha_t = \frac{Q_{Rt} C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (3.4)$$

(注) Q_{at} は、有効液重量 W_1 による作用水平力 (ベースシア) として近似的に求めている。

$$Q_{at} = K_{h1} W f_{w1} = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) \quad (3.5)$$

関係式は以下の通りである。

$$\text{水平抵抗力: } Q = K_{h1} W \left\{ (f_{w0} - f_{w1}) \frac{1}{V_3} + f_{w1} \right\} \approx K_{h1} W f_{w1} \quad (3.6)$$

$$\text{動液圧: } p_h = [K_{h1} \{ (C_{00} - C_{10}) \frac{1}{V_3} + C_{10} \}] p_0 \approx K_{h1} C_{10} p_0 \quad (3.7)$$

$$\text{動液圧と静液圧との比: } \alpha = \frac{p_h}{p_0} = K_{h1} C_{10} \quad (3.8)$$

ここに、

R : タンクの半径

W : 内溶液重量

$$\text{有効液重量: } W_1 = f_{w1} W \quad (3.9)$$

有効液重量係数 :

$$f_{w1} = -0.1429\left(\frac{H}{D}\right)^4 + 0.9653\left(\frac{H}{D}\right)^3 - 2.2807\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 2.3017\left(\frac{H}{D}\right) - 0.1634 \quad (3.10)$$

$$\text{質点重心高さ} : H_1 = f_{H1} H \quad (3.11)$$

$$\text{重心高さ係数} : f_{H1} = 0.0256\left(\frac{H}{D}\right)^4 - 0.1387\left(\frac{H}{D}\right)^3 + 0.216\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 0.0207\left(\frac{H}{D}\right) + 0.3644 \quad (3.12)$$

C_{00} と C_{10} は、特定屋外貯蔵タンクの最高液面高さ H と直径 D との比により求めた係数である。ここでは、 $C_{10}=0.8$ とした(屋外貯蔵所のタンクの基準参照)。

3) $\alpha = \alpha_t$ に対応する Δ_t を求める。

$$Q_t = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) = Q_R = C_M(\alpha_t) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta_t}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad (3.13)$$

これより、

$$C_M(\alpha_t) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta_t}{H_1}} = 0$$

これより、

$$\Delta_t = 0 \text{-----浮き上がりは生じない。}$$

(注) タンク側板下端が片浮き上がり状態にある水平抵抗力と水平変位の関係は、次式で表される。この場合、浮き上がり傾斜 θ_t は最大浮き上がり変位 δ_u を $2R$ で除した値($\theta_t = \delta_u / 2R$)として、円周方向単位幅当りの浮き上がり抵抗力 $q(\phi)$ は、当該円周角位置の動液圧の影響を考慮して求める。そして、浮き上がり抵抗力 $q(\phi)$ によるタンク側板下端の浮き上がり抵抗モーメント M_R を計算し、これを H_1 で除して水平抵抗力 Q_R を求め、その時の水平変位 $\Delta = \theta_t \times H_1$ と関係づけている。

$$Q_R = C_M(\alpha) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\frac{\Delta}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad (3.14)$$

関係式は、

$$M_R = C_M(\alpha) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_t} + 2\pi R^2 q_t \quad (3.15)$$

$$C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381 \quad (1.1) \quad (3.16)$$

4) 1 質点の水平変位 Δ_{et} は、次式により求める。この場合、質点には、

水平力 $Q_{at} = Q_{Rt}$ が作用しているので、基礎固定の弾性有効重量 W_1 の一次固有周期 T_b

から定まるばね係数 K_b に関する変形 Q_t/K_b を考慮する。

$$\Delta_{et} = \Delta_t + \frac{Q_{Rt}}{K_b} = \frac{Q_{Rt}}{K_b} \quad (3.17)$$

ただし、

$$K_b = \left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2 \left(\frac{W_1}{g}\right) = \left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2 \left(\frac{f_{w1}W}{g}\right) \quad (3.18)$$

5) Point T は 次の座標となる。

$$Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad (3.19)$$

$$\Delta_{et} = \frac{Q_{Rt}}{K_b} \quad (3.20)$$

Point Y-----($Q_{Ry} + Q_{Rt}$, Δ_{ey}) の計算手順

1) 弾性限界水平耐力 Q_{Ry} を設定する。

$$Q_{Ry} = \frac{2\pi R^2 q_y}{H_1} \quad (3.21.)$$

ただし、

$$q_y = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_y p_0} \quad (3.22) \quad (\text{Wozniak モデルにおける弾性限界 (降伏) 抵抗力})$$

2) [$Q_{Ry} + Q_{Rt}$]と短周期水平地震動による作用水平力 $Q_{(\alpha_y + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_y + \alpha_t$ を計算する。

$$Q_{Ry} + Q_{Rt} = Q_{(\alpha_y + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_y + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) \quad (3.23)$$

これより、

$$\alpha_y + \alpha_t = \frac{[Q_{Ry} + Q_{Rt}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (3.24)$$

3) $\alpha_y + \alpha_t$ に対応する、 Δ_y を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_y + \alpha_t$ である。

$$Q_{(\alpha_y + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_y + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2)$$

$$= Q_{Ry} + Q_{Rt} = C_M (\alpha_y + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt{\frac{\Delta_y}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$$

これより、

$$\Delta_y = \frac{H_1 [Q_{Ry}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_y + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4} \quad (3.25)$$

4) 1 質点の Δ_{ey} は、次式により求める。

$$\Delta_{ey} = \Delta_y + \frac{[Q_{Ry} + Q_{Rt}]}{K_b} \quad (3.26)$$

5) Point Y は 次の座標となる。

$$Q_{Ry} + Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_y}{H_1} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$$

$$\Delta_{ey} = \Delta_y + \frac{[Q_{Ry} + Q_{Rt}]}{K_b}$$

Point P-----($Q_{Rp} + Q_{Rt}$, Δ_{ep}) の計算手順

1) 第 1 塑性関節発生時水平耐力 Q_{Rp} を設定する。

$$Q_{Rp} = \frac{2\pi R^2 q_p}{H_1} \quad (3.27)$$

ただし、

$$q_p = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_p p_0} \quad (3.28) \quad (\text{Wozniak モデルにおける第 1 塑性関節発生時の抵抗})$$

力)

2) [$Q_{Rp} + Q_{Rt}$] と短周期水平地震動による作用水平力 $Q_{(\alpha_p + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_p + \alpha_t$

$$Q_{Rp} + Q_{Rt} = Q_{(\alpha_p + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_p + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) \quad (3.29)$$

これより、

$$\alpha_p + \alpha_t = \frac{[Q_{Rp} + Q_{Rt}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (3.30)$$

- 3) $\alpha_p + \alpha_t$ に対応する、 Δ_p を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_p + \alpha_t$ である。

$$Q_{(\alpha_p + \alpha_t)} = \frac{\alpha_p + \alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{W1} p_0 R^2)$$

$$Q_{Rp} + Q_{Rt} = C_M (\alpha_p + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt{\frac{\Delta_p}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$$

これより、

$$\Delta_p = \frac{H_1 [Q_{Rp}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4} \quad (3.31)$$

- 4) 1 質点系の Δ_{ep} は、次式により求める。

$$\Delta_{ep} = \Delta_p + \frac{Q_{Rp} + Q_{Rt}}{K_b} \quad (3.32)$$

- 5) Point P は 次の座標となる。

$$Q_{Rp} = \frac{2\pi R^2 q_p}{H_1} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$$

$$\Delta_{ep} = \Delta_p + \frac{Q_{Rp} + Q_{Rt}}{K_b}$$

Point 4-----($Q_{R4} + Q_{Rt}$, Δ_{e4}) の計算手順

- 1) 水平耐力 Q_{R4} を設定する。

$$Q_{R4} = \frac{2\pi R^2 q_4}{H_1} \quad (3.33)$$

ただし、

$$q_4 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_4 p_0} \quad (3.34) \text{ (Wozniak モデルにおけるモーメント } m_4 \text{ 発生時抵抗力)}$$

- 2) $Q_{R4} + Q_{Rt}$ と短周期水平地震動による作用水平力 $Q_{(\alpha_4 + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_4 + \alpha_t$ を計算する。

$$Q_{R4} + Q_{Rt} = Q_{(\alpha_4 + \alpha_t)} = \frac{\alpha_4 + \alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{W1} p_0 R^2) \quad (3.35)$$

これより、

$$\alpha_4 + \alpha_t = \frac{[Q_{R4} + Q_{Rt}]C_{10}}{(\pi f_{W1} p_0 R^2)} \quad (3.36)$$

- 3) $\alpha_4 + \alpha_t$ に対応する、 Δ_4 を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_4 + \alpha_t$ である。

$$\begin{aligned} Q_{(\alpha_4 + \alpha_t)} &= \frac{(\alpha_4 + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{W1} p_0 R^2) \\ &= Q_{R4} + Q_{Rt} = C_M (\alpha_4 + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1} \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt{\frac{\Delta_4}{H_1}} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \end{aligned}$$

これより、

$$\Delta_4 = \frac{H_1 [Q_{R4}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_4 + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4} \quad (3.37)$$

- 4) 1 質点の Δ_{e4} は、次式により求める。

$$\Delta_{e4} = \Delta_4 + \frac{Q_{R4} + Q_{Rt}}{K_b} \quad (3.38)$$

- 5) Point 4 は 次の座標となる。

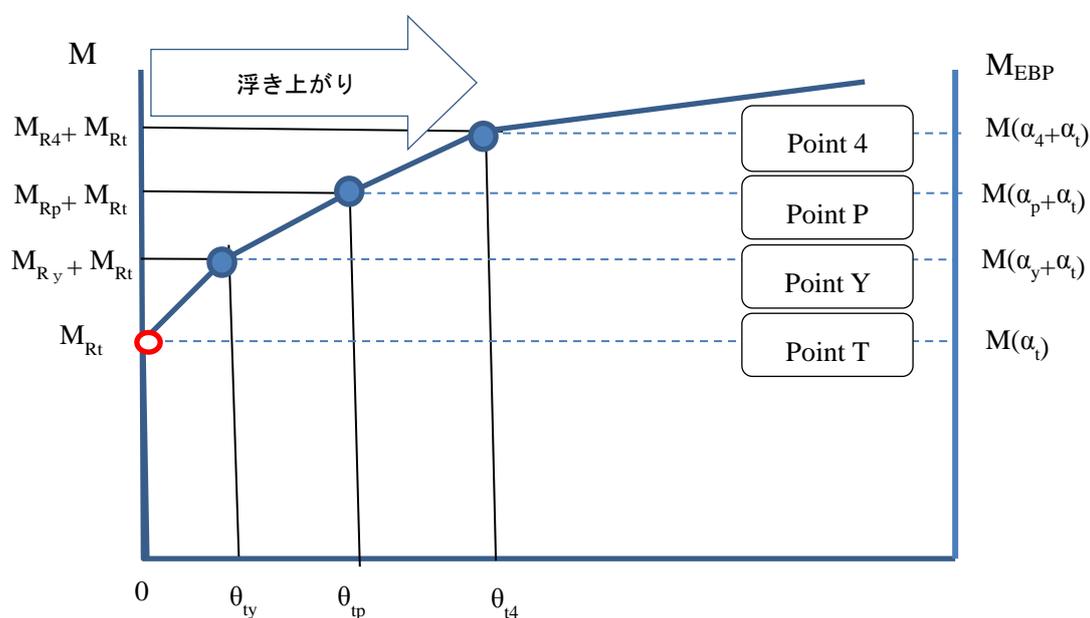
$$Q_{R4} + Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_4}{H_1} + \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1}$$

$$\Delta_{e4} = \Delta_4 + \frac{Q_{R4} + Q_{Rt}}{K_b}$$

別添資料 4

基部に回転ばねありの質点系モデル用の非線形回転ばね特性 (M-θ線図) の整理と定式化

非線形回転ばねの抵抗モーメントと回転角度の復元モーメント特性線図を付図 4.1 に示す。



付図 4.1 抵抗モーメントと回転角度の復元モーメント特性線図

上図における各 Point は下記するとおりであり、計算方法は以下に続いて記述する。

- | | | |
|-----------------|----------------------------------|---------------------|
| 1) Point T----- | $(M_{Rt}, 0)$ | 浮き上がり開始点 |
| 2) Point Y----- | $(M_{Ry} + M_{Rt}, \theta_{ty})$ | 弾性限界浮き上がり点 |
| 3) Point P----- | $(M_{Rp} + M_{Rt}, \theta_{tp})$ | 塑性関節発生浮き上がり点 |
| 4) Point 4----- | $(M_{R4} + M_{Rt}, \theta_{t4})$ | 想定される最大浮き上がり変位における点 |

必要に応じて、Point 4 の算定式を用いて、線図上に任意点の追加も可能となる。

動液圧の変動を考慮した転倒抵抗モーメント M_R と動液圧変動係数 $C_M(\alpha)$ の関係式は、以下に示す；

$$M_R = C_M(\alpha)R^2\sqrt[4]{RD_a p_0^3 \sqrt[4]{\theta_t}} + 2\pi R^2 q_t \quad (4.1)$$

$$C_M(\alpha) = -5.9588\alpha + 13.381 \quad (4.2)$$

Point T-----(M_{Rt} , θ_{t-t}) 計算手順

1) 側板下端に作用する自重抵抗力 q_t に対応するタンク転倒抵抗モーメント M_{Rt} を計算する。

$$M_{Rt} = 2\pi R^2 q_t \quad (4.3)$$

2) M_{Rt} と短周期水平地震動による転倒モーメント $M_{\alpha t}$ を等しいとおいて、 α_t を計算する。

$$M_{Rt} = Q_{\alpha t} H_1 = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \quad (4.4)$$

これより、

$$\alpha_t = \frac{M_{Rt} C_{10}}{H_1 (\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (4.5)$$

注) $Q_{\alpha t}$ は、有効液重量 W_1 による作用水平力（ベースシア）として近似的に求めている。

$$Q_{\alpha t} = K_{h1} W f_{w1} = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) \quad (4.6)$$

関係式は以下の通りである。

$$Q = K_{h1} W \left\{ (f_{w0} - f_{w1}) \frac{1}{v_3} + f_{w1} \right\} \approx K_{h1} W f_{w1} \quad (4.7)$$

$$p_h = [K_{h1} \left\{ (C_{00} - C_{10}) \frac{1}{v_3} + C_{10} \right\}] p_0 \approx K_{h1} C_{10} p_0 \quad (4.8)$$

$$\alpha = \frac{p_h}{p_0} = K_{h1} C_{10} \quad (4.9)$$

3) $\alpha = \alpha_t$ に対応する θ_{t-t} を求める。

$$M_{\alpha} = \frac{\alpha_t}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 = M_{Rt} = C_M (\alpha_t) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_{t-t}} + 2\pi R^2 q_t \quad (4.10)$$

これより、

$$C_M (\alpha_t) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_{t-t}} = 0$$

これより、

$$\theta_{t-t} = 0 \text{-----浮き上がりは生じない。}$$

4) Point T は 次の座標となる。

$$M_{Rt} = 2\pi R^2 q_t$$

$$\theta_{t-t} = 0$$

Point Y-----($M_{Ry} + M_{Rt}$, θ_{ty}) 計算手順

1) 弾性限界タンク転倒抵抗モーメント M_{Ry} を設定する。

$$M_{Ry} = 2\pi R^2 q_y \quad (4.11)$$

ただし、

$$q_y = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_y p_0} \quad (\text{Wozniak モデルにおける弾性限界 (降伏) 抵抗力}) \quad (4.12)$$

2) [$M_{Ry} + M_{Rt}$]と短周期水平地震動による作用水平力 $M_{(\alpha_y + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_y + \alpha_t$ を計算する。

$$M_{Ry} + M_{Rt} = M_{(\alpha_y + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_y + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \quad (4.13)$$

これより、

$$\alpha_y + \alpha_t = \frac{[M_{Ry} + M_{Rt}] C_{10}}{H_1 (\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (4.14)$$

3) $\alpha_y + \alpha_t$ に対応する、 θ_{ty} を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_y + \alpha_t$ である。

$$\begin{aligned}
M_{(\alpha_y + \alpha_t)} &= \frac{(\alpha_y + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \\
&= M_{Ry} + M_{Rt} = C_M (\alpha_y + \alpha_t) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_{ty}} + 2\pi R^2 q_t
\end{aligned} \tag{4.15}$$

これより、

$$\theta_{ty} = \frac{[M_{Ry}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_y + \alpha_t) R^2]^4} \tag{4.16}$$

4) Point Y は 次の座標となる。

$$M_{Ry} + M_{Rt} = 2\pi R^2 q_y + 2\pi R^2 q_t$$

$$\theta_{ty} = \frac{[M_{Ry}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_y + \alpha_t) R^2]^4}$$

Point P-----($M_{Rp} + M_{Rt}$, θ_{tp}) 計算手順

1) 塑性関節発生時タンク転倒抵抗モーメント M_{Rp} を設定する。

$$M_{Rp} = 2\pi R^2 q_p \tag{4.17}$$

ただし、

$$q_p = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_p p_0} \quad (\text{Wozniak モデルにおける塑性関節発生時抵抗力}) \tag{4.18}$$

2) [$M_{Rp} + M_{Rt}$] と短周期水平地震動による作用水平力 $M_{(\alpha_p + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_p + \alpha_t$ を計算する。

$$M_{Rp} + M_{Rt} = M_{(\alpha_p + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_p + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \tag{4.19}$$

これより、

$$\alpha_y + \alpha_t = \frac{[M_{Rp} + M_{Rt}] C_{10}}{H_1 (\pi f_{w1} p_0 R^2)} \tag{4.20}$$

3) $\alpha_p + \alpha_t$ に対応する、 θ_{tp} を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_p + \alpha_t$ である。

$$\begin{aligned}
M_{(\alpha_p + \alpha_t)} &= \frac{(\alpha_p + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \\
&= M_{Ry} + M_{Rt} = C_M (\alpha_y + \alpha_t) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_{tp}} + 2\pi R^2 q_t
\end{aligned} \tag{4.21}$$

これより、

$$\theta_{tp} = \frac{[M_{Rp}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) R^2]^4} \quad (4.22)$$

Point P は 次の座標となる。

$$M_{Rp} + M_{Rt} = 2\pi R^2 q_p + 2\pi R^2 q_t \quad (4.23)$$

$$\theta_{tp} = \frac{[M_{Rp}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) R^2]^4} \quad (4.24)$$

Point 4-----($M_{R4} + M_{Rt}$, θ_{t4}) 計算手順

1) 転倒抵抗モーメント M_{R4} を設定する。

$$M_{R4} = 2\pi R^2 q_4 \quad (4.25)$$

ただし、

$$q_4 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_4 p_0} \quad (\text{Wozniak モデルにおけるモーメント } m_4 \text{ 発生時抵抗力}) \quad (4.26)$$

2) [$M_{R4} + M_{Rt}$]と短周期水平地震動による作用水平力 $M_{(\alpha_4 + \alpha_t)}$ を等しいとおいて、 $\alpha_4 + \alpha_t$ を計算する。

$$M_{R4} + M_{Rt} = M_{(\alpha_4 + \alpha_t)} = \frac{(\alpha_4 + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \quad (4.27)$$

これより、

$$\alpha_4 + \alpha_t = \frac{[M_{R4} + M_{Rt}] C_{10}}{H_1 (\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad (4.28)$$

3) $\alpha_4 + \alpha_t$ に対応する、 θ_{t4} を計算する。この場合、質点に作用する応答加速度に対応する α は $\alpha_4 + \alpha_t$ である。

$$\begin{aligned} M_{(\alpha_4 + \alpha_t)} &= \frac{(\alpha_4 + \alpha_t)}{C_{10}} \times (\pi f_{w1} p_0 R^2) H_1 \\ &= M_{R4} + M_{Rt} = C_M (\alpha_4 + \alpha_t) R^2 \sqrt[4]{RD_a p_0^3} \sqrt[4]{\theta_{t4}} + 2\pi R^2 q_t \end{aligned} \quad (4.29)$$

これより、

$$\theta_{t^4} = \frac{[M_{R^4}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_4 + \alpha_t) R^2]^4} \quad (4.30)$$

Point 4 は 次の座標となる。

$$M_{R^4} + M_{R_t} = 2\pi R^2 q_4 + 2\pi R^2 q_t$$

$$\theta_{t^4} = \frac{[M_{R^4}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) R^2]^4}$$

別添資料 5

質点系モデルの入力諸元の計算シート

付表 5.1 質点系モデルの諸元計算シート (No. 1 計算シート)

質点系モデルによる側板下端の浮き上がり変位計算用諸元		(赤字: 入力値)	
公称容量	VOL (KL)	30000	(KL)
貯槽内径	D	45100	(mm)
側板高さ	Hmax	21270	(mm)
最下段側板厚	t _s	18	(mm)
1/3の最高液高さにおける側板厚	t _{1/3}	13	(mm)
アニュラ板厚	t _a	12	(mm)
鋼材のヤング率 (SM400C)	E	205939.7	(N/mm ²)
鋼材のポアソン比	ν	0.3	(-)
降伏応力	σ _y	245	(N/mm ²)
最高液高さ	H	18802	(mm)
液密度	γ	9.50E-07	(kg/mm ³)
直径/液高さ比	D/H	2.40	(-)
液高さ/直径比	H/D	0.42	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w0}			
$f_{w0} = -0.1408\left(\frac{H}{D}\right)^4 + 0.8427\left(\frac{H}{D}\right)^3 - 1.916\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 2.0933\left(\frac{H}{D}\right) - 0.1172$		0.48	(-)
消防法/有効液重量率 f _{w1}			
$f_{w1} = -0.1429\left(\frac{H}{D}\right)^4 + 0.9653\left(\frac{H}{D}\right)^3 - 2.2807\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 2.3017\left(\frac{H}{D}\right) - 0.1634$		0.47	(-)
スロッシング振動/有効液重量率 f _{w2}			
$f_{w2} = \frac{0.837 \tanh(3.68H/D)}{3.68(H/D)}$		0.50	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h0}			
$f_{h0} = 0.0384\left(\frac{H}{D}\right)^4 - 0.1493\left(\frac{H}{D}\right)^3 + 0.204\left(\frac{H}{D}\right)^2 - 0.0807\left(\frac{H}{D}\right) + 0.4096$		0.402	(-)
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h1}			
$f_{h1} = 0.0256\left(\frac{H}{D}\right)^4 - 0.1387\left(\frac{H}{D}\right)^3 + 0.216\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 0.0207\left(\frac{H}{D}\right) + 0.3644$		0.401	(-)
スロッシング振動/有効液の重心高さ係数 f _{h2}			
$f_{h2} = 1 - \frac{\cosh(3.68H/D) - 1}{3.68(H/D) \sinh(3.68H/D)}$		0.58	(-)
底板に作用する最大静液圧 P ₀ =gγ H		0.18	(N/mm ²)
タンク本体重量 (赤字: 入力値)			
側板重量	Ws0	2.41E+03	(KN)
側板付属品重量	Ws1	3.50E+02	(KN)
浮き屋根重量	Wr0	1.43E+03	(KN)
浮き屋根付属品重量	Wr1	3.51E+02	(KN)
側板+付属品 重量合計	Mt	2.82E+05	(kg)

付表 5.2 質点系モデルの諸元計算シート (No. 2 計算シート)

[計算式と質点系モデルの入力数値]

紫字: モデルの入力値

貯槽の固有周期(バルジング振動) $T_b = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{W}{\pi g E t_{1/3}}}$ $\lambda = 0.067(H/D)^2 - 0.30(H/D) + 0.46$	Tb λ	0.336 0.347	(sec) (-)
固有周期(スロッシング振動) $T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68g} \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)}$	Ts	7.359	(sec)
有効液重量 固定液重量 $M_0 = f_{w0} * M$ 自由液重量 $M_1 = f_{w1} * M$ スロッシング液重量 $M_2 = f_{w2} * M$ 側板重量 Mt 底板重量 Mb 自由液+側板 $M11 = M1 + Mt$	M0 M1 M2 Mt Mb M11	1.37E+07 1.33E+07 1.42E+07 2.82E+05 1.05E+05 1.36E+07	(kg) (kg) (kg) (kg) (kg) (kg)
有効液の重心高さ $H_0 = f_{h0} * H$ $H_1 = f_{h1} * H$ $H_2 = f_{h2} * H$	H0 H1 H2	7.55E+02 7.55E+02 1.09E+03	(cm) (cm) (cm)
ばね係数 バルジング振動 ばね係数 スロッシング振動 ばね係数	K1 K2	4.74E+07 1.03E+05	(N/cm) (N/cm)
減衰係数 バルジング振動 減衰係数 $C_1 = 2\xi_1 \sqrt{M_{11} k_1}$ スロッシング振動 減衰係数 $C_2 = 2\xi_2 \sqrt{M_2 k_2}$	C1 C2	7.61E+05 2.42E+03	(N/(cm/s)) (N/(cm/s))

付表 5.3 質点系モデルの諸元計算シート (No. 3 計算シート)

Point T $Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad \alpha_t = \frac{Q_{Rt} C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $\Delta_{et} = \frac{Q_{Rt}}{K_b}$	QRt	8.26E+06	N
	C10	0.71	-
	α_t	0.04	-
	Δ_{et}	0.17	cm
Point Y $q_y = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_y p_0} \quad m_y = \frac{\sigma_y}{6} t_a^2$ $Q_{Ry} = \frac{2\pi R^2 q_y}{H_1} \quad D_a (= \frac{Et_a^3}{12(1-\nu^2)})$ $\alpha_y = \frac{[Q_{Ry}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $\Delta_y = \frac{H_1 [Q_y]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_y + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4}$ $\Delta_{ey} = \Delta_y + \frac{[Q_{Ry} + Q_{Rt}]}{K_b}$	my	5.88E+03	N
	qy	5.24E+02	N/cm
	QRy	2.22E+07	N
	α_y	0.12	-
	CM	12.39	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	Δ_y	0.10	cm
	Δ_{ey}	0.74	cm
	QRy+Qt	3.05E+07	N
	Point P $m_p = \frac{\sigma_y}{4} t_a^2 \quad q_p = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_p p_0}$ $Q_{Rp} = \frac{2\pi R^2 q_p}{H_1} \quad \alpha_p = \frac{[Q_{Rp}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $\Delta_p = \frac{H_1 [Q_{Rp}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4}$ $\Delta_{ep} = \Delta_p + \frac{Q_{Rp} + Q_{Rt}}{K_b}$	mp	8.82E+03
qp		6.42E+02	N/cm
QRp		2.72E+07	N
α_p		0.15	-
CM		12.23	-
Da		3.26E+06	N.cm
Δ_p		0.23	cm
Δ_{ep}		0.97	cm
QRp+Qt		3.54E+07	N
Point 4 $q_4 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_4 p_0}$ $Q_{R4} = \frac{2\pi R^2 q_4}{H_1} \quad \alpha_4 = \frac{Q_{R4} C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $\Delta_4 = \frac{H_1 [Q_{R4}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_4 + \alpha_t) \frac{R^2}{H_1}]^4}$ $\Delta_{e4} = \Delta_4 + \frac{Q_{R4} + Q_{Rt}}{K_b}$	m4	2.94E+04	N
	q4	1.17E+03	N/cm
	QR4	4.96E+07	N
	α_4	0.27	-
	CM	11.50	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	Δ_4	3.21	cm
	Δ_{e4}	4.43	cm
	QR4+QRt	5.79E+07	N
Point 5 $q_5 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_5 p_0}$	m5	5.41E+04	N
	q5	1.59E+03	N/cm
	QR5	6.73E+07	N
	α_5	0.37	-
	CM	10.93	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	Δ_5	13.32	cm
	Δ_{e5}	14.918	cm
QR5+QRt	7.56E+07	N	

付表 5.4 質点系モデルの諸元計算シート (No. 4 計算シート)

Point T $Q_{Rt} = \frac{2\pi R^2 q_t}{H_1} \quad \alpha_t = \frac{Q_{Rt} C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $M_{Rt} = 2\pi R^2 q_t = Q_{Rt} H_1 \quad \theta_{t-t} = 0$	QRt	8.26E+06	N
	C10	0.71	-
	α_t	0.04	-
	MRt	6.23E+09	N.cm
	θ_{t0}	0.00	rad
Point Y $q_y = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_y p_0} \quad m_y = \frac{\sigma_y}{6} t_a^2$ $Q_{Ry} = \frac{2\pi R^2 q_y}{H_1} \quad D_a (= \frac{Et_a^3}{12(1-\nu^2)})$ $\alpha_y = \frac{[Q_{Ry}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)} \quad M_{Ry} = Q_{Ry} H_1$ $\theta_{ty} = \frac{[M_{Ry}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_y + \alpha_t) R^2]^4}$	my	5.88E+03	N
	qy	5.24E+02	N/cm
	QRy	2.22E+07	N
	α_y	0.12	-
	CM	12.39	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	MRy	1.67E+10	N.cm
	θ_{ty}	1.26E-04	rad
	MRy+MRt	2.30E+10	N.cm
	Point P $m_p = \frac{\sigma_y}{4} t_a^2 \quad q_p = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_p p_0}$ $Q_{Rp} = \frac{2\pi R^2 q_p}{H_1} \quad \alpha_p = \frac{[Q_{Rp}] C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $M_{Rp} = Q_{Rp} H_1$ $\theta_{tp} = \frac{[M_{Rp}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) R^2]^4}$	mp	8.82E+03
qp		6.42E+02	N/cm
QRp		2.72E+07	N
α_p		0.15	-
CM		12.23	-
Da		3.26E+06	N.cm
MRp		2.05E+10	N.cm
θ_{tp}		2.99E-04	rad
MRp+MRt		2.67E+10	N.cm
Point 4 $q_4 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_4 p_0}$ $Q_{R4} = \frac{2\pi R^2 q_4}{H_1} \quad \alpha_4 = \frac{Q_{R4} C_{10}}{(\pi f_{w1} p_0 R^2)}$ $M_{R4} = Q_{R4} H_1$ $\theta_{t4} = \frac{[M_{R4}]^4}{RD_a p_0^3 [C_M (\alpha_p + \alpha_t) R^2]^4}$		m4	2.94E+04
	q4	1.17E+03	N/cm
	QR4	4.96E+07	N
	α_4	0.27	-
	CM	11.50	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	MR4	3.74E+10	N.cm
	θ_{t4}	4.25E-03	rad
	MR4+MRt	4.37E+10	N.cm
Point 5 $q_5 = \frac{4}{\sqrt{6}} \sqrt{m_5 p_0}$	m5	5.41E+04	N
	q5	1.59.E+03	N/cm
	QR5	6.73.E+07	N
	α_5	0.366	-
	CM	10.93	-
	Da	3.26E+06	N.cm
	MR5	5.08.E+10	N.cm
	θ_{t5}	1.766.E-02	rad
	MR5+MRt	5.70E+10	N.cm

別添資料 6

FEM モデルによる抵抗モーメントと回転角度に関する検討

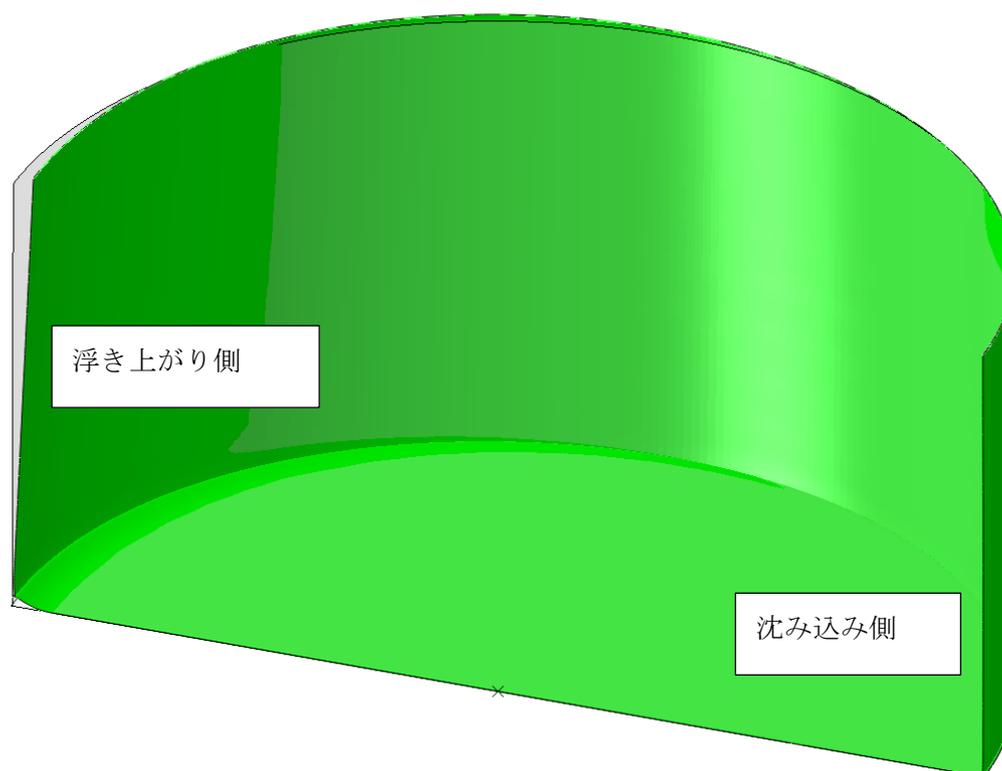
6.1 3D シェルモデルによる解析結果から求めた抵抗モーメントと回転角度の関係

付図 6.1 に示す 3D シェルモデル（平成 26 年度作成したモデル使用）を使用することにより、抵抗モーメントと回転角度の関係を調査するために、以下の FEM 解析を実施した。

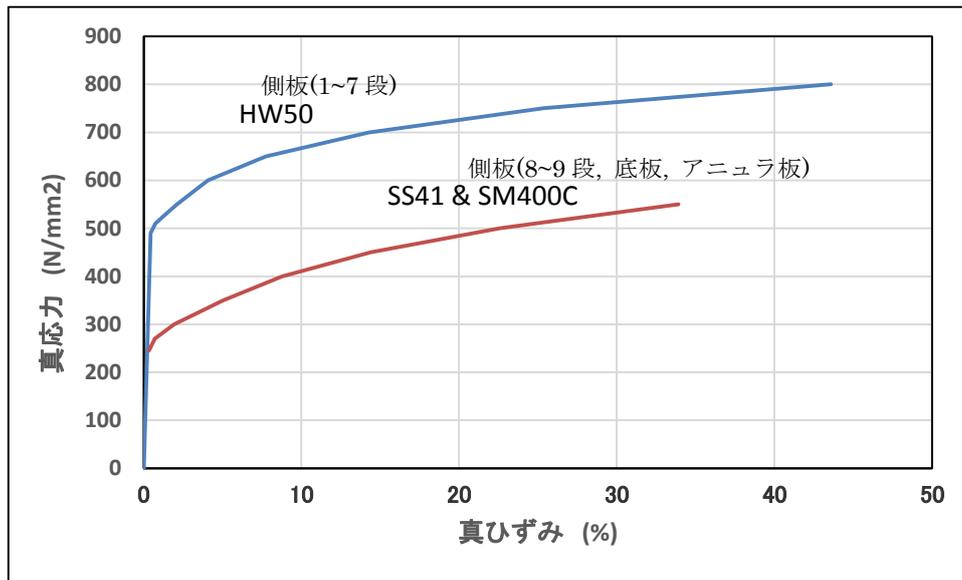
（1）弾塑性、大変形の静解析

荷重は静液圧と動液圧（平成 26 年度で算定した動液圧使用）の両方の分布を考慮した。材料には弾塑性特性を使用した（付図 6.2 参照）。

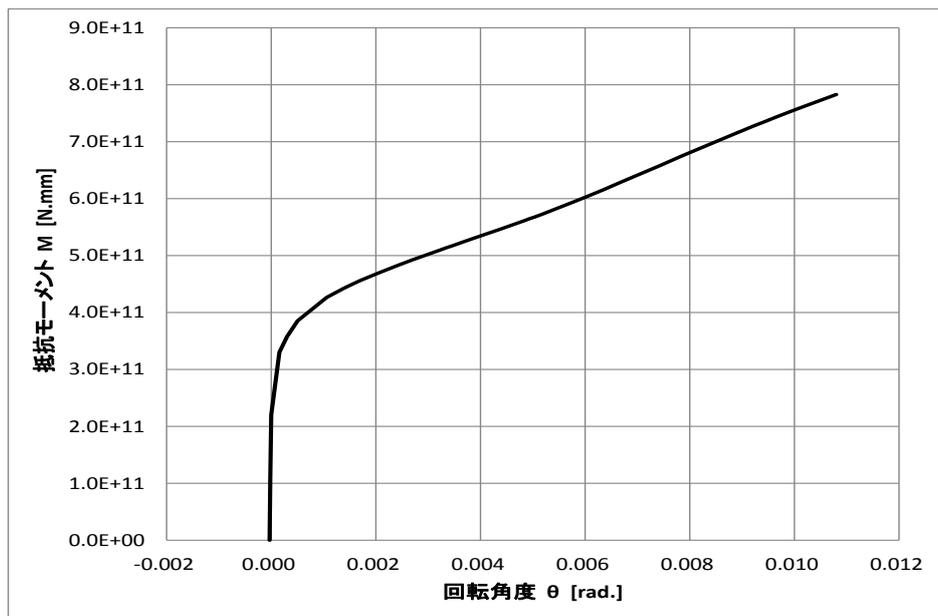
解析結果から求めた抵抗モーメントと回転角度の関係線図（M- θ 線図）を付図 6.3 に示す。



付図 6.1 3D シェルモデルの変形図



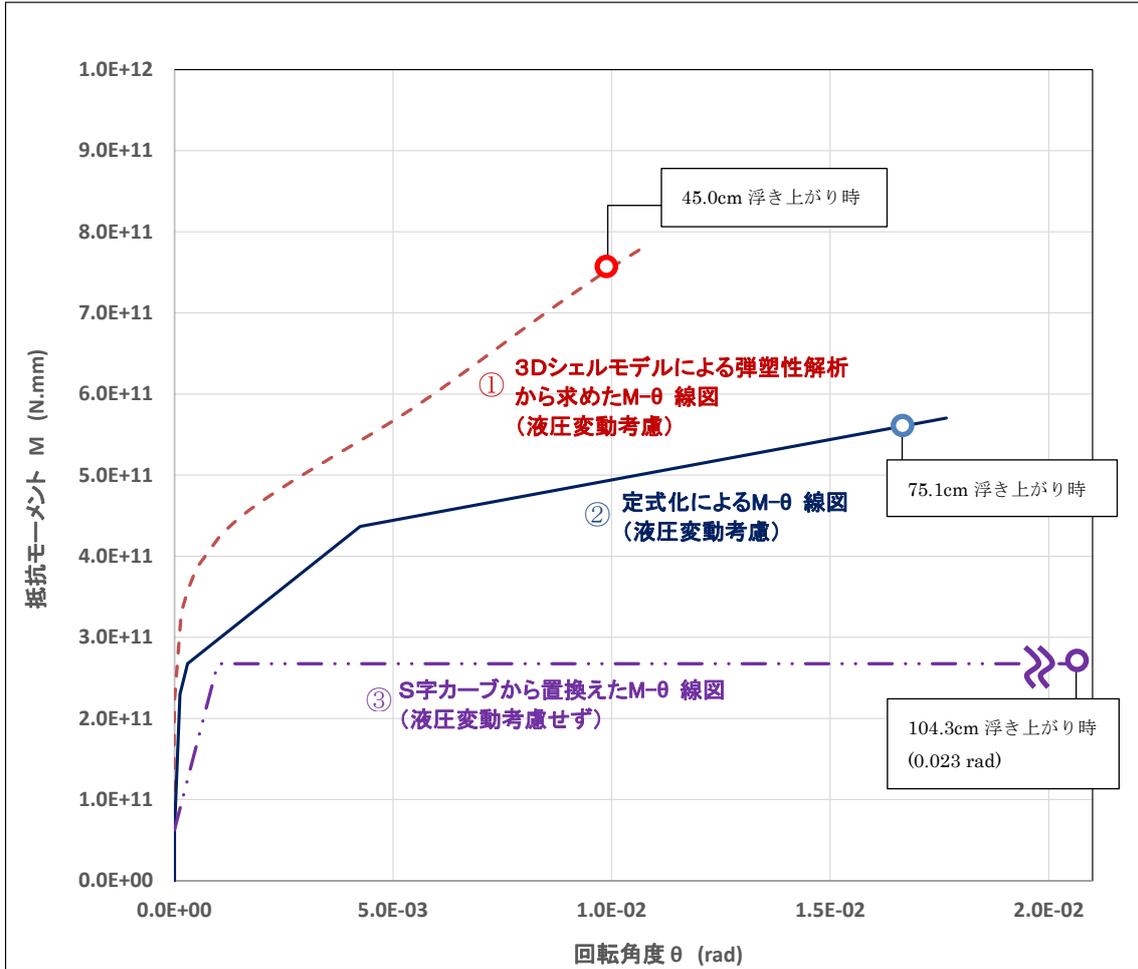
付図 6.2 モデルに使用した応力-ひずみ特性



付図 6.3 3D シェルモデルの M-θ 線図

6.2 各 M-θ 線図の比較

以上の 3D シェルモデルの M-θ 線図と定式化による M-θ 線図との比較図は以下の付図 6.4 に示す。算定された M-θ 線図は FEM 解析から求めた線図より低めの線図であることが確認されたため、この線図を使用して計算される質点系の応答はより厳しい側の結果になると考えられる。



付図 6.4 各 M-θ 線図の比較

これらの M-θ 線図の算出において、タンク基礎条件や材料物性などの条件はそれぞれ異なる。以下表にその条件一覧を記載する。

	タンク基礎	タンク側板	材料特性	幾何学的な条件など	液圧の変動
①	マルチリニア型ばね 3D シェルモデルより算出	ばね支持 (249N/mm ²) 側板の剛性を考慮	弾塑性性 ^{※1}	3D の形状 (大変形も考慮)	あり
②	マルチリニア型ばね 式より算出	剛 剛(モーメントは考慮)	弾完全塑性性 ^{※2}	なし	あり
③	バイリニア型ばね 式より算出 (昨年度使用)	剛	弾完全塑性性 ^{※2}	なし	なし

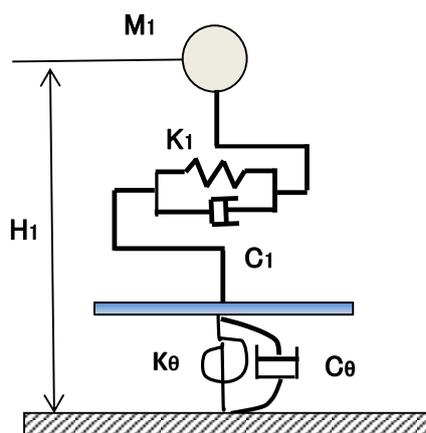
※1 弾塑性特性は付図 6.2 に示すとおり (10%ひずみ時の硬化率 $d\sigma/d\varepsilon$: 約 900N/mm²/-)。

※2 アンジュラ板、底板の材料(SM400C, SS41)の降伏強度は 245N/mm²を使用。

別添資料 7

減衰係数の設定に関する検討

付図 7.1 に示す基部に回転ばねありの 1 質点モデルの水平ばね k_1 と基部の回転ばね k_θ は線形ばねである場合、系全体の等価的なばね定数 k_e と等価的減衰係数 C_e が以下の関係式から求められる。



付図 7.1 減衰係数設定用の 1 質点系モデル

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_1} + \frac{H_1^2}{k_\theta} \quad (7.1)$$

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{H_1^2}{C_\theta} \quad (7.2)$$

ここで、

$$C_e = 2\zeta_e \sqrt{M_1 k_e} \quad (7.3)$$

$$C_1 = 2\zeta_1 \sqrt{M_1 k_1} \quad (7.4)$$

$$C_\theta = 2\zeta_\theta \sqrt{M_1 H_1^2 k_\theta} \quad (7.5)$$

以上の線形関係式を整理して、等価的な減衰比 ζ_e が設定された場合、系の減衰比 ζ_1 と ζ_θ は次式より算定できる。

$$\zeta_1 = \zeta_e \frac{1}{\sqrt{1-\alpha}} \quad (7.6)$$

$$\zeta_\theta = \zeta_e \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (7.7)$$

ここで、 α は以下の式となる。

$$\alpha = 1 - \frac{1}{k_1 \left(\frac{1}{k_1} + \frac{H_1^2}{k_\theta} \right)} \quad (7.8)$$

回転ばねが非線形の場合、すなわち M- θ 線図を使う場合、 k_θ が時時刻刻に変化されるため、以上の関係は成り立っていないことが分かった。

ここで、一つの近似的なやり方としては、M- θ 線図上の各点（4点の平均）の k_θ の平均値を求め、それを用いて、線形関係の式(7.1)によって、系の等価的なばね定数 k_e を求める。 k_1 と k_e が既知であれば、 C_1 を変数として、以下の 1997 年 Malhotra(文献[1])に提案された関係式によって C_θ を概算することができる。

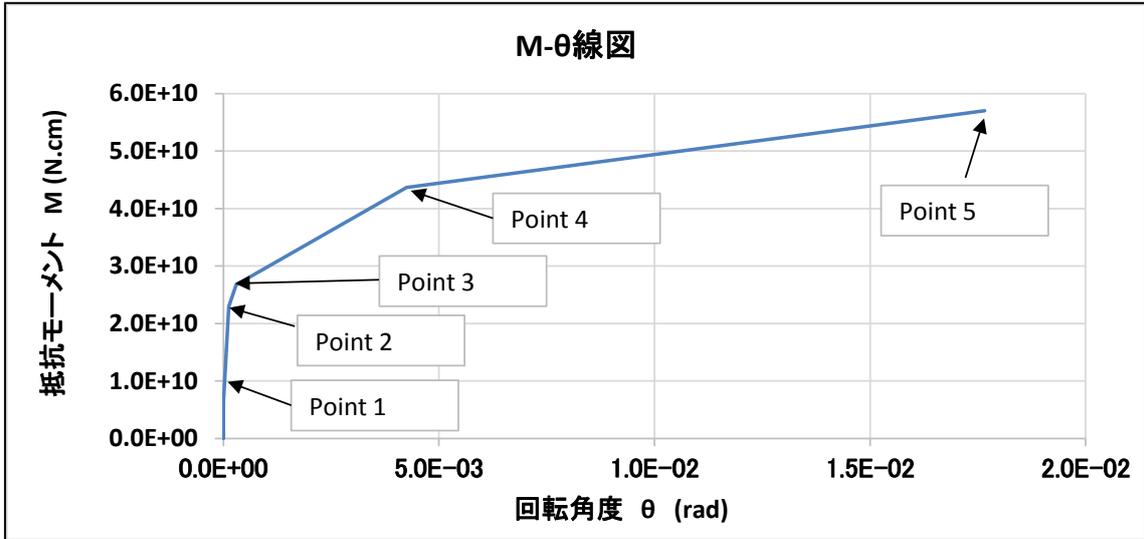
$$C_e = C_1 \left(\frac{k_e}{k_1} \right) + C_\theta \frac{1}{H_1^2} \left(1 - \frac{k_e}{k_1} \right) \quad (7.9)$$

線形関係式の式(7.3)、式(7.4)と式(7.5)を式(7.9)に代入して、整理すると、回転ばねの減衰比の ζ_θ の計算式が以下の式(7.10)に書き換えられる。

$$\zeta_\theta = \frac{[\zeta_e - \zeta_1(\beta / \sqrt{\beta})]H_1}{\sqrt{\frac{k_\theta}{k_e}(1-\beta)}} \quad (7.10)$$

ここでは、 $\beta = k_e / k_1$ とした。

旧法タンク No.3 の M- θ 線図は以下の付図 7.1 に示します。線図から各点の回転ばね剛性 k_{θ_i} 及び計算した 4 点の平均値 k_θ^* を付表 7.1 に示す。



付図 7.2 旧法タンク No. 3 の定式化による M-θ 線図

付表 7.1 旧法タンク No. 3 の M-θ 線図の数値と k_{θ} の平均値

	記号	θ (rad)	M (N.cm)	$K_{\theta i}$ (N.cm/rad)
		0.00E+00	0.00E+00	-
Point 1		0.00E+00	6.23E+09	-
Point 2	θ_{ty}	1.26E-04	2.30E+10	1.82E+14
Point 3	θ_{tp}	2.99E-04	2.67E+10	8.94E+13
Point 4	θ_{t4}	4.25E-03	4.37E+10	1.03E+13
Point 5	θ_{t5}	1.77E-02	5.70E+10	3.23E+12
平均値 K_{θ}^*				7.12E+13

付表 7.2 平均値の K_{θ}^* を用いて算定された各パラメータの数値

k_{θ}^*	k_e	$\beta = k_e/k_1$	k_{θ}^*/k_e
N.cm/rad	N/cm	-	cm ² /rad
7.12E+13	3.44E+07	7.25E-01	2.07E+06

基部固定の 1 質点モデルの減衰係数 C_1 を系全体の等価減衰係数 C_e (すなわち、 $\zeta_e=0.15$) とする。基部固定の 1 質点モデルの応答に対する減衰効果に合わせるため、基部に回転ばねありの 1 質点モデルの ζ_1 を変数とする場合、 ζ_{θ} の計算値は付表 7.3 に示す数値となる。

付表 7.3 ζ_θ の計算値

H_1 (cm)	ζ_e -	ζ_1 -	ζ_θ -
755	0.15	0.05	0.21
		0.1	0.124
		0.15	0

採用

算定された減衰比 $\zeta_1=0.1$ 、 $\zeta_\theta=0.124$ を採用し、これらの結果を用いて算定した1質点モデル、2質点モデル及び3質点モデルの減衰係数 C_1 と C_θ を付表7.4に示す。

付表 7.4 減衰係数 C_1 と C_θ の算定値

モデル 基部に回転ばねあり	回転慣性モーメント I_0 (kg.cm ²)	減衰係数 C_1 (N.s/cm)	減衰係数 C_θ (N.s. cm/rad)
1質点	7.72E+12	5.07E+05	5.81E+11
2質点	1.55E+13	5.07E+05	8.25E+11
3質点	3.24E+13	5.07E+05	1.19E+12

各質点系の回転慣性モーメント I_0 及び回転に対する減衰係数 C_θ は以下の式より算定される。

$$1 \text{ 質点モデル: } I_0 = M_1 H_1^2 \quad C_\theta = 2\zeta_\theta \sqrt{(M_1 H_1^2) k_\theta^*}$$

$$2 \text{ 質点モデル: } I_0 = M_1 H_1^2 + M_0 H_0^2 \quad C_\theta = 2\zeta_\theta \sqrt{(M_1 H_1^2 + M_0 H_0^2) k_\theta^*}$$

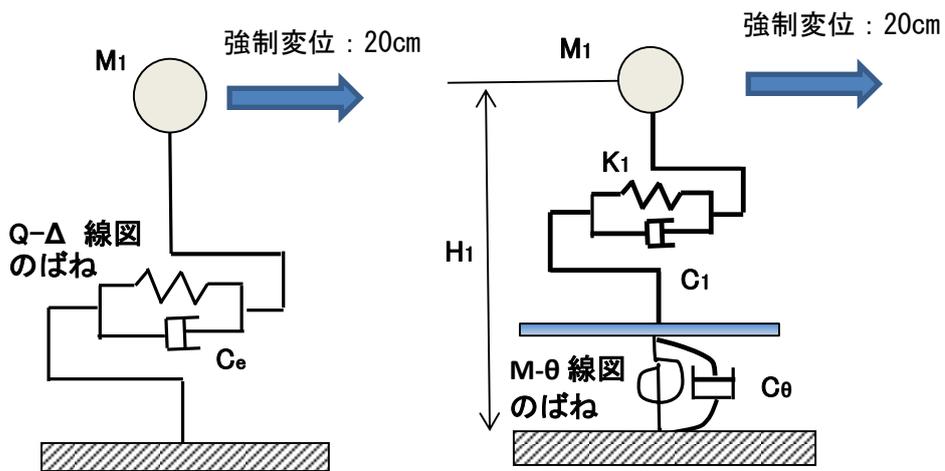
$$3 \text{ 質点モデル: } I_0 = M_1 H_1^2 + M_0 H_0^2 + M_2 H_2^2 \quad C_\theta = 2\zeta_\theta \sqrt{(M_1 H_1^2 + M_0 H_0^2 + M_2 H_2^2) k_\theta^*}$$

減衰の効果を検証するため、付図7.3に示す基部固定（定式化によるQ- Δ 線図使用）、と基部に回転ばねありの2つの1質点モデル（定式化によるM- θ 線図使用）を作成した。以下の2ケースの解析を実施し、結果の比較と検証を行った。

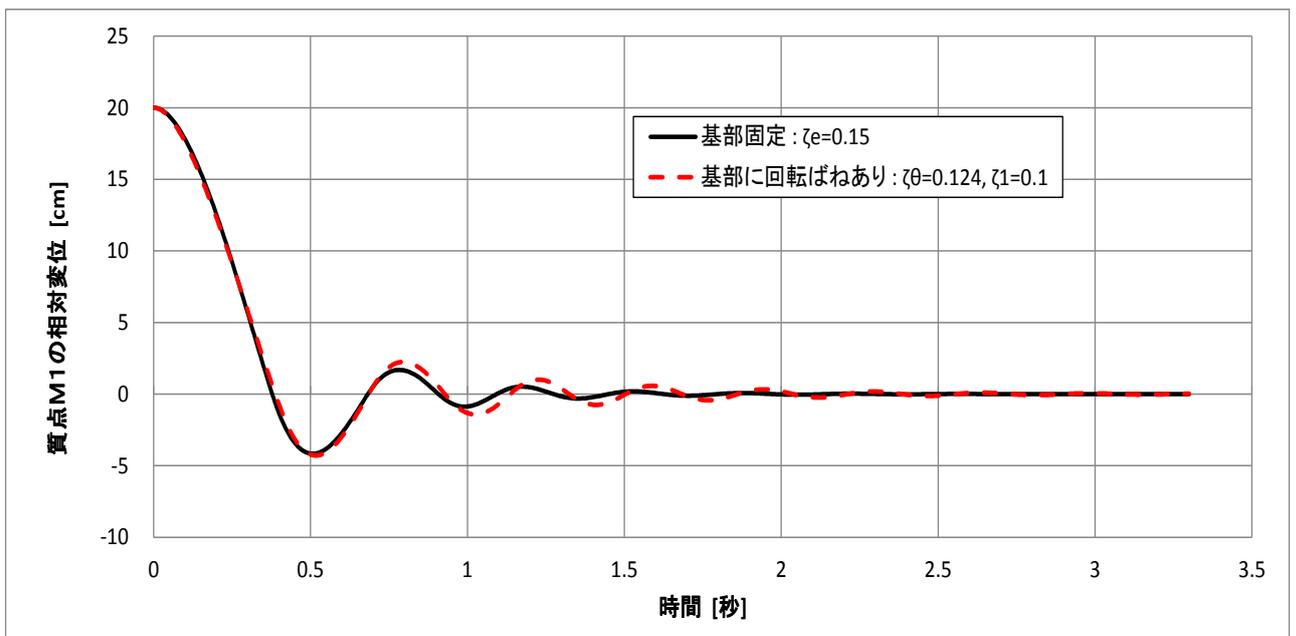
ケース1：等価減衰係数 $C_e=7.61E+5$ N.s/cm（モデル上 C_1 ）（相当減衰比： $\zeta_e=0.15$ ）を使用

ケース2：付表7.4に示す1質点の減衰係数 C_1 と減衰係数 C_θ を使用

両モデルの質点 M_1 に20cmの水平方向強制変位を与えて、求めた質点 M_1 の応答変位の比較図を付図7.4示す。両モデルの結果はよく合っていることが確認された。



付図 7.3 検証用の2つの1質点非線形ばね系モデルの概念図



付図 7.4 質点 M_1 の応答変位の時刻歴 (荷重: 水平方向強制変位 20cm)

(赤色破線: 算定された減衰比 $\zeta_\theta=0.124$ 、 $\zeta_1=0.1$ を使用)

黒色実線: 等価減衰比 $\zeta_e=0.15$ を使用)

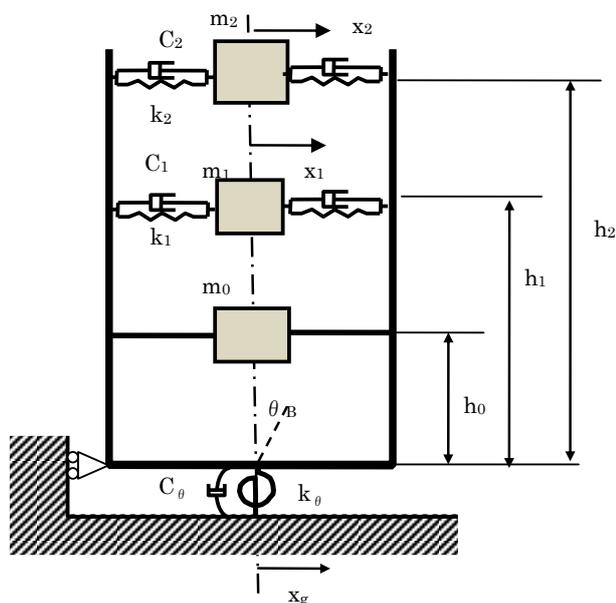
別添資料 8

3 質点非線形ロッキングばね系モデルによる時刻歴地震応答解析

8.1 3 質点非線形ロッキングばね系モデル

タンクのパルジング振動有効固定液質量 M_0 、パルジング振動有効液質量 M_1 及びスロッシング振動有効液質量 M_2 の 3 質点ロッキングばね付きモデルを付図 8.1.1 に示す。この場合、運動方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} m_2 & 0 & m_2 h_2 \\ 0 & m_1 & m_1 h_1 \\ m_2 h_2 & m_1 h_1 & m_2 h_2^2 + m_1 h_1^2 + m_0 h_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ \theta_B \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_2 \\ m_1 \\ m_2 h_2 + m_1 h_1 + m_0 h_0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (8.1)$$



付図 8.1.1 3 質点非線形ロッキングばね系モデル

ここで、

m_0 : パルジング振動有効固定液質量 (kg)

m_1 : パルジング振動有効液質量 (kg)

m_2 : スロッシング振動有効液質量 (kg)

$h_0 (=H_0)$: バルジング有効固定液質量高さ (cm)

$h_1 (=H_1)$: バルジング有効液質量高さ (cm)

$h_2 (=H_2)$: スロッシング有効液質量高さ (cm)

C_1 : バルジング振動減衰係数 (N. s/cm)

C_2 : スロッシング振動減衰係数 (N. s/cm)

C_H : タンク基部のスウェイ減衰係数 (N. s/cm)

C_θ : タンク基部のロッキング減衰係数 (N. s. cm/rad)

k_1 : バルジング振動ばね定数 (N/cm)

k_2 : スロッシング振動ばね定数 (N/cm)

k_H : タンク基部のスウェイばね定数 (N/cm)

k_θ : タンク基部のロッキングばね定数 (N. cm/rad)

$x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$: バルジング質点の変位 (cm)、速度 (cm/s)、及び加速度 (cm/s²)

$x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$: スロッシング質点の変位 (cm)、速度 (cm/s)、及び加速度 (cm/s²)

$x_B, \dot{x}_B, \ddot{x}_B$: タンク基部のスウェイ変位 (cm)、速度 (cm/s)、及び加速度 (cm/s²)

$\theta_B, \dot{\theta}_B, \ddot{\theta}_B$: タンク基部のロッキング角変位 (rad)、角速度 (rad/s)、及び角加速度 (rad/s²)

$x_g, \dot{x}_g, \ddot{x}_g$: タンク基部の変位 (cm)、速度 (cm/s)、及び加速度 (cm/s²)

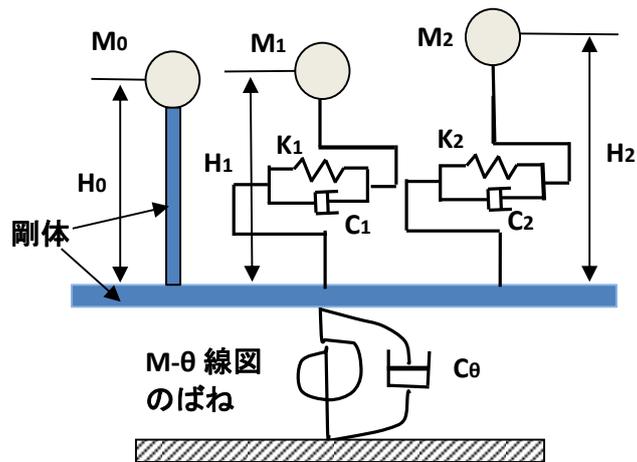
k_1 は、基部固定のタンクのバルジング振動の固有周期から求められる K_b である。

K_2 は、基部固定のタンクスロッシングの固有周期から求められる K_s である。

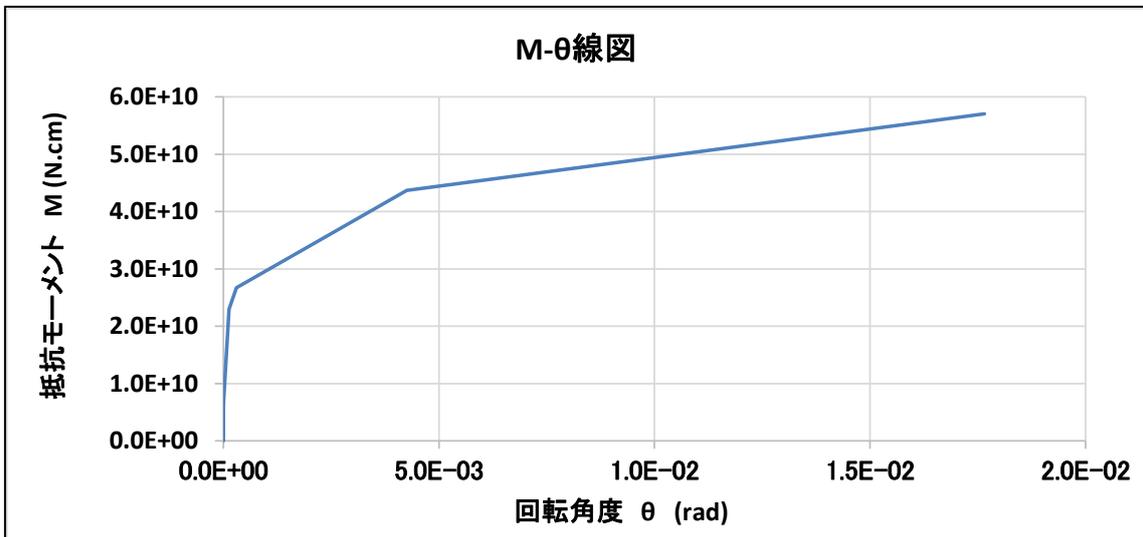
上式の基部のロッキングばね k_θ は非線形ロッキングばね特性 $M-\theta$ 線図による変数である。すなわち、ある回転角度 θ と抵抗モーメント M における $k_\theta = M/\theta$ と計算される。

本検討においては、地盤の弾性ロッキングばね及び地盤の弾性スウェイばねは考慮しない。

ロッキングばねが非線形の場合、解析用の 3 質点モデルは付図 8.1.2 のように現せるこの場合、タンク基部の復元モーメント特性 ($M=k_\theta \theta_B$) を付図 8.1.3 に示す非線形回転ばね特性を表現する $M-\theta$ 線図に置換することとなる。



付図 8.1.2 3 質点非線形ロックンバネ系モデルの概念図



付図 8.1.3 定式化による M-θ 線図

8.2 解析対象タンク及び解析条件

8.2.1 解析対象タンクの主な諸元

本文に示す表 2.4.1.1 と同じである。

8.2.2 3 質点非線形ロックンバネ系モデルの諸元

消防法の算式を用いて計算した 3 質点系非線形ロックンバネモデルの諸元を付表 8.2.2.1 に示す (別添資料 5 に示す諸元計算シート参照)。

バルジング振動減衰係数 C_1 とタンク基部のロックン減衰係数 C_θ は別添資料 7 に示す 1997 年 Praveen K. Malhotra (文献[1]を参照) に提案された計算方法で算定したものである。

付表 8.2.2.1 3 質点非線形ロッキングばね系モデルの諸元

固有周期 (バルジング振動)	T_b	3.36E-01	s
固有周期 (スロッシング振動)	T_s	7.36E+00	s
固定液有効質量	M_0	1.37E+07	kg
自由液有効質量	$M_1 (+M_t)$	1.36E+07	kg
スロッシング液有効質量	M_2	1.42E+07	kg
固定液の重心高さ	H_0	7.55E+02	cm
自由液の重心高さ	H_1	7.55E+02	cm
スロッシング液の重心高さ	H_2	1.09E+03	cm
バルジング振動 ばね係数	K_1	4.74E+07	N/cm
スロッシング振動 ばね係数	K_2	1.03E+05	N/cm
スロッシング振動 減衰係数	C_2	2.42E+03	N. s/cm
バルジング振動 減衰係数	C_1	5.07E+05	N. s/cm
ロッキング・減衰係数	C_θ	1.19E+12	N. cm. s/rad
復元モーメント特性	図 3.1.3 に示す M- θ 線図使用		

注 : M_t は側板の重量分

8.2.3 入力地震波の諸元

本文 2.4.3 節に示す A 地区 EW 波を使用した。

8.2.4 浮き上がり変位の計算方法

基部に回転ばねありの 3 質点モデルの場合、時刻歴応答解析から求めた基部の最大回転角度を用いて、最大浮き上がり変位 $\delta_{u-\max}$ は近似的に次式より計算される。

$$\delta_{u-\max} = \theta_{\max} D \quad (8.2)$$

8.3 時刻歴地震応答解析結果

付表 8.2.2.1 に示す 3 質点モデルの諸元を使用して、A 地区の想定地震動の EW 波を作用した場合の以下の 2 ケースの解析を実施した。

ケース 1 : 定式化による M- θ 線図使用 (付図 8.1.3 参照)

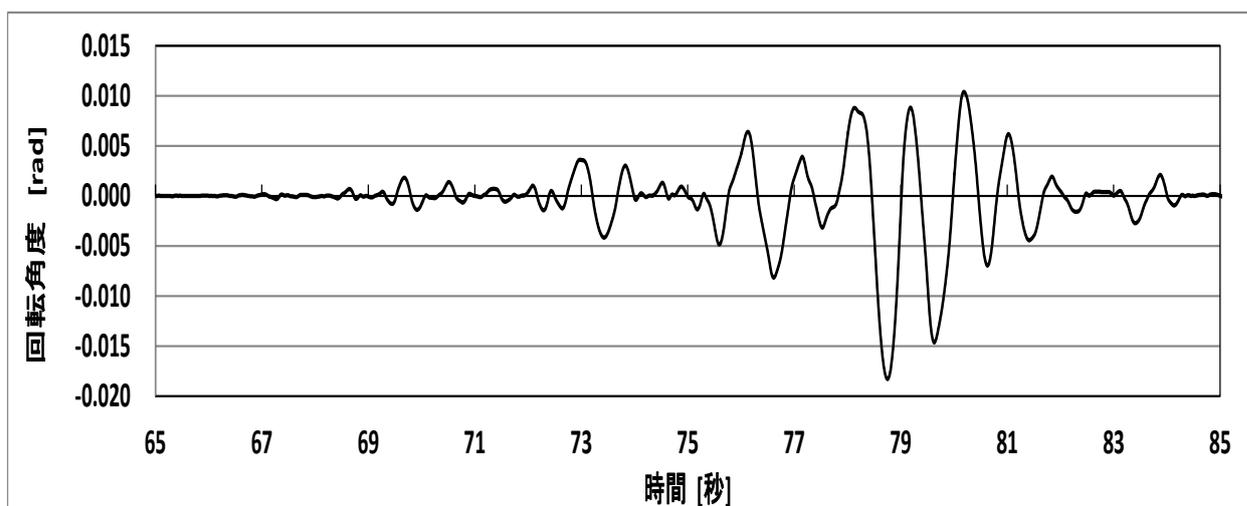
ケース 2 : 3D シェルモデルの M- θ 線図使用 (別添資料 6 参照)

8.3.1 定式による M- θ 線図を使用した 3 質点モデルの時刻歴地震応答解析結果

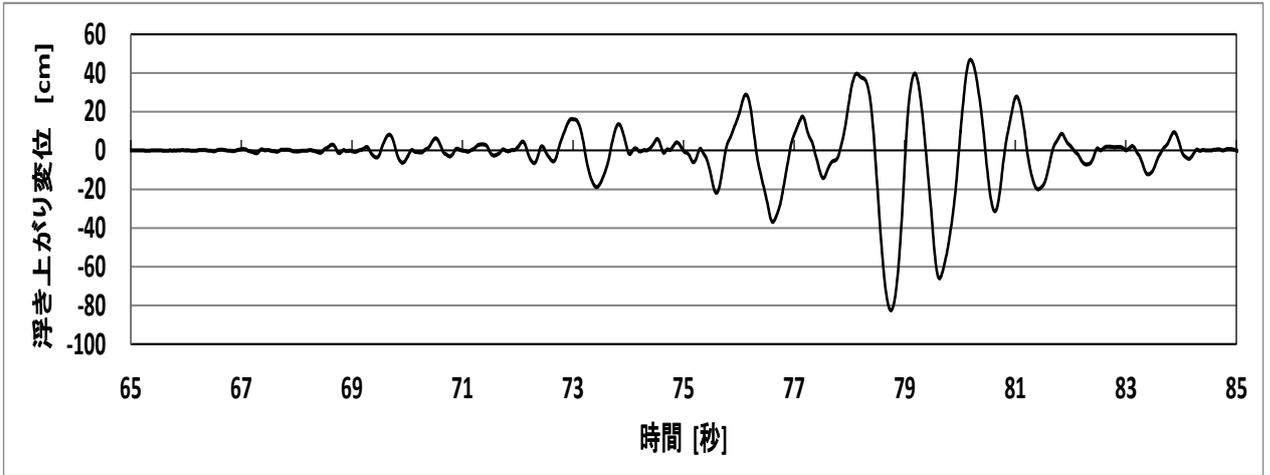
解析対象タンクとする旧法タンク No.3 について、定式化による M- θ 線図を 3 質点モデルの非線形回転ばね特性として使用し、A 地区の想定地震動の EW 波に対して、時刻歴地震応答解析を実施した。得られた当該タンク基部の回転ばねの回転角度、浮き上がり変位及び回数を付表 8.3.1.1、応答解析結果を付図 8.3.1.1 から付図 8.3.1.4 に示す。

付表 8.3.1.1 定式による M- θ 線図を使用した 3 質点モデルの解析結果のまとめ
(想定地震動：A 地区 EW 波)

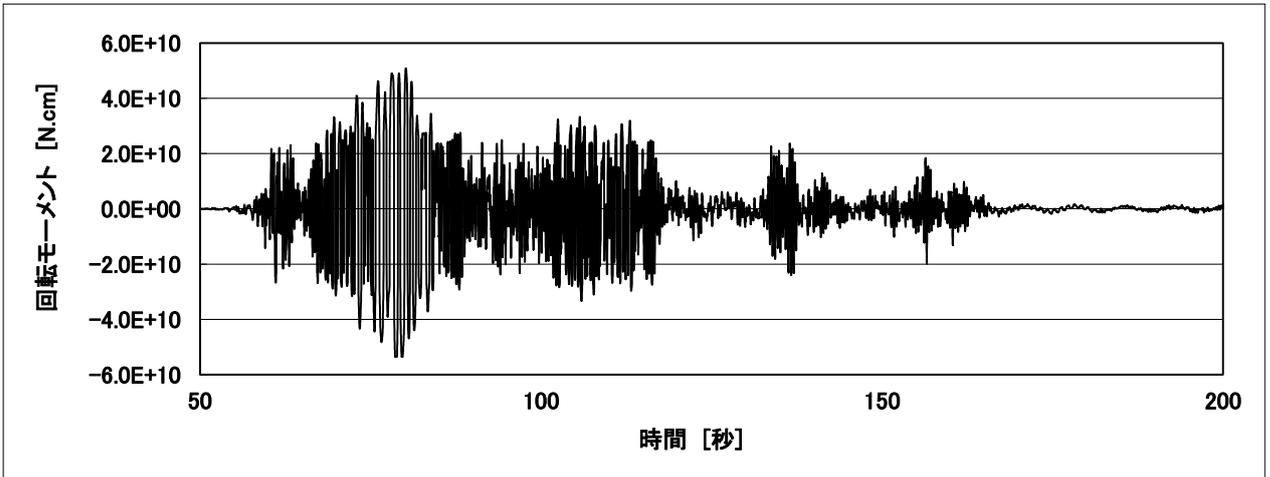
最大/最小 地震加速度 (cm/s ²)	最大/最小 回転角度 (rad)	最大 浮き上がり変位 (cm)	浮き上がり回数
672.2/-767.1	0.010/-0.018	81.2	35



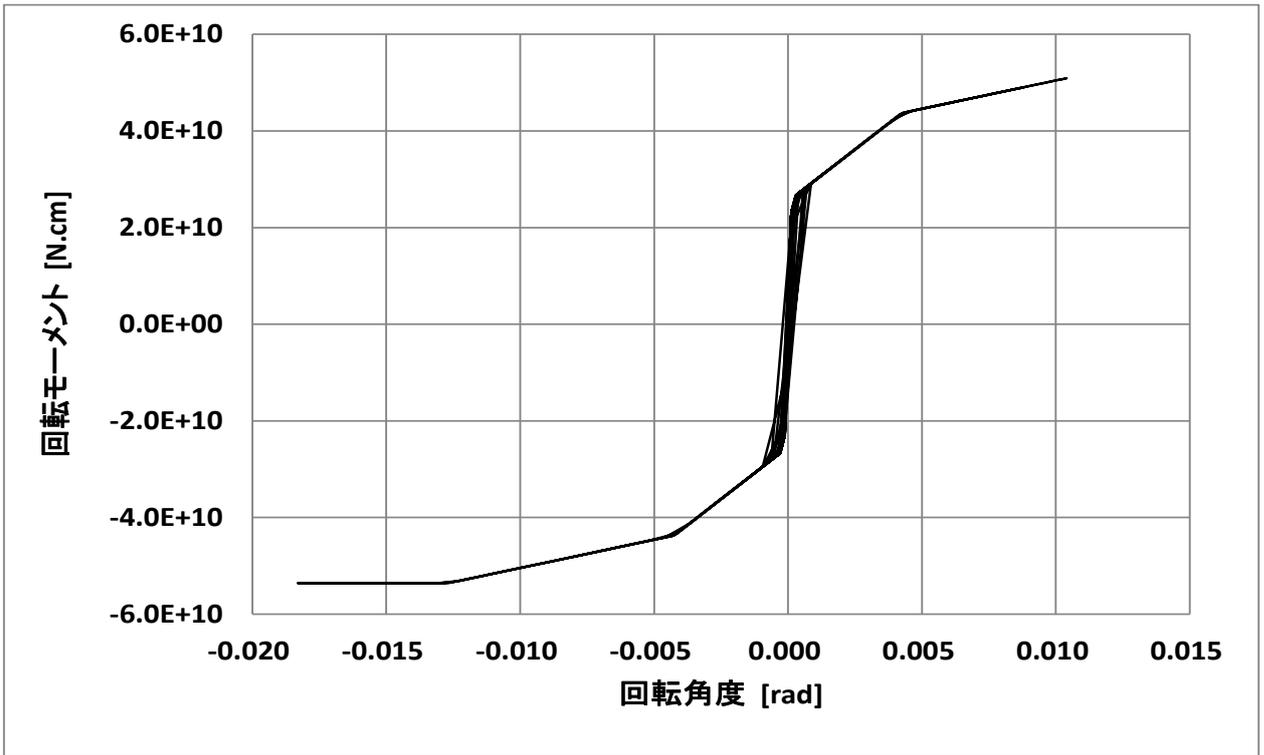
付図 8.3.1.1 回転角度の時刻歴（定式化による M- θ 線図使用）



付図 8. 3. 1. 2 浮き上がり変位の時刻歴 (定式化による M- θ 線図使用)



付図 8. 3. 1. 3 回転ばねに発生した回転モーメントの時刻歴 (定式化による M- θ 線図使用)



付図 8.3.1.4 非線形回転ばねの復元モーメント特性線図(定式化による M- θ 線図使用)

最大浮き上がり変位 (81.2cm) 発生時 (78.8 秒における) の回転モーメント、本文に示す式(2.4)～式(2-7)によって算定された最大応答水平震度及び動液圧比を次表に示す。

付表 8.3.1.2 最大浮き上がり変位発生時(78.8 秒)の最大応答水平震度及び動液圧比

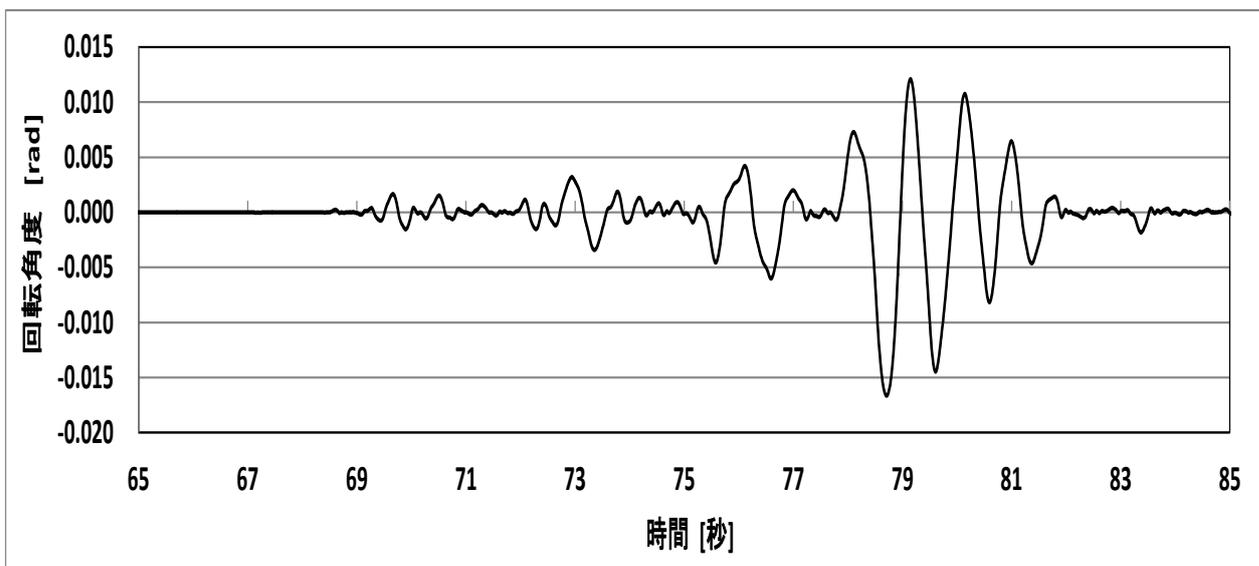
回転モーメント M (N. cm)	応答水平震度 K_{h1}	動液圧 P_{h1} (N/mm ²)	動液圧比 α
5.36E+10	0.533	0.067	0.38

8.3.2 3D シェルモデルの M- θ 線図を使用した 3 質点非線形ばね系モデルの時刻歴地震応答解析結果

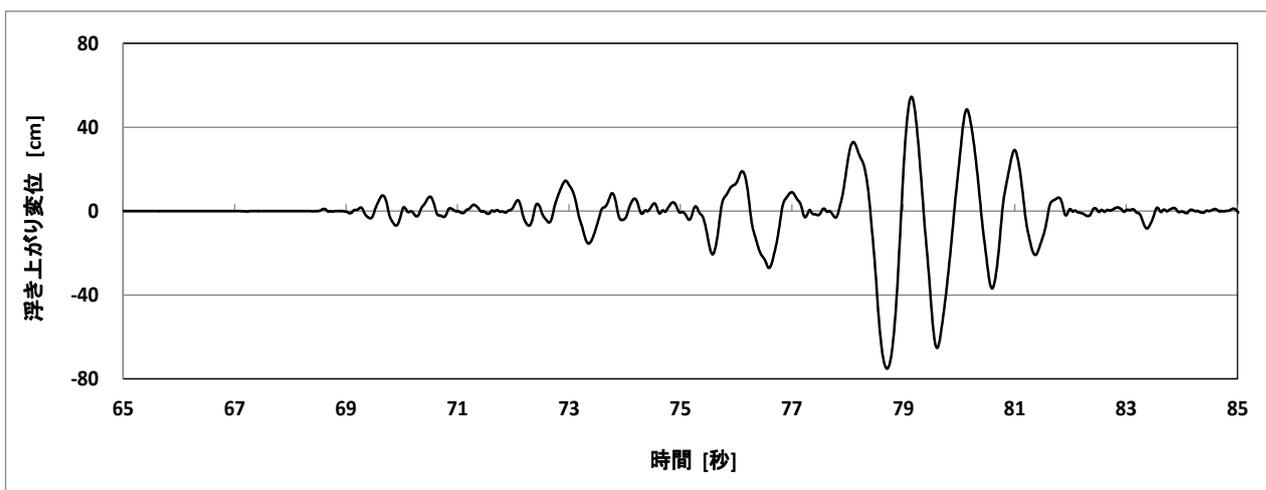
解析対象タンクとする旧法タンク No.3 について、3D シェルモデルの M- θ 線図を 3 質点モデルの非線形回転ばねの復元モーメント特性として使用し、A 地区の想定地震動の EW 波に対して、時刻歴地震応答解析を実施した。得られた当該タンク基部の回転ばねの回転角度、浮き上がり変位及び回数を付表 8.3.2.1、結果の時刻歴出力を付図 8.3.2.1 から付図 8.3.2.4 に示す。

付表 8.3.2.1 3D シェルモデルの M- θ 線図を使用した 3 質点モデルの解析結果のまとめ
 (想定地震動：A 地区 EW 波)

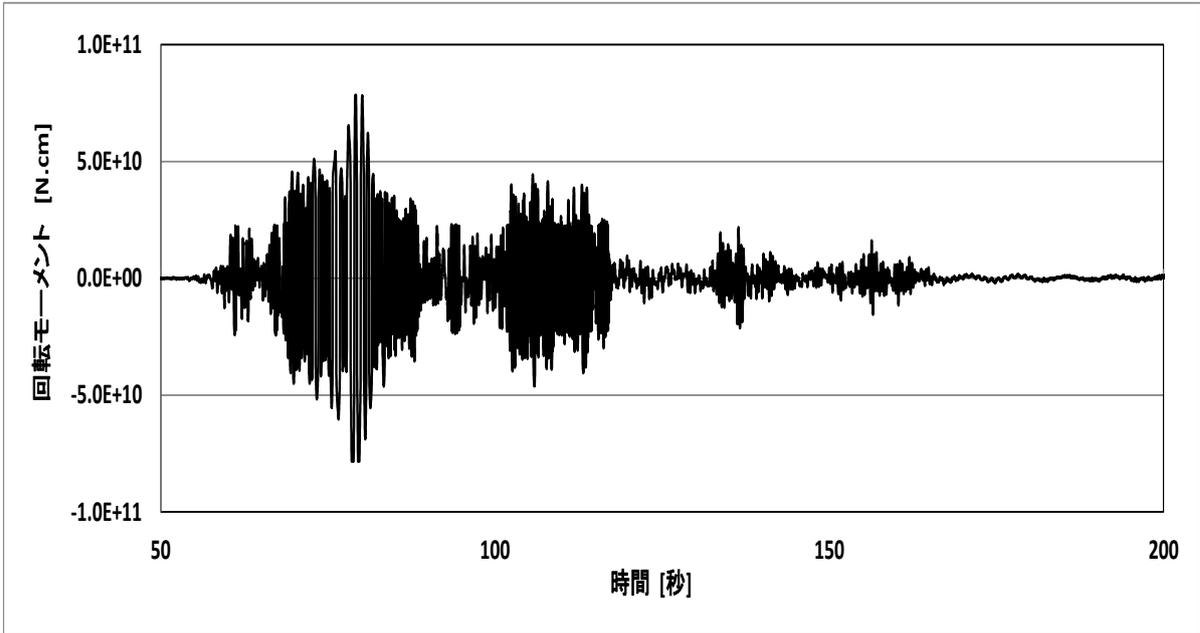
最大/最小 地震加速度 (cm/s ²)	最大/最小 回転角度 (rad)	最大 浮き上がり変位 (cm)	浮き上がり回数
672.2/-767.1	0.012/-0.017	76.7	40



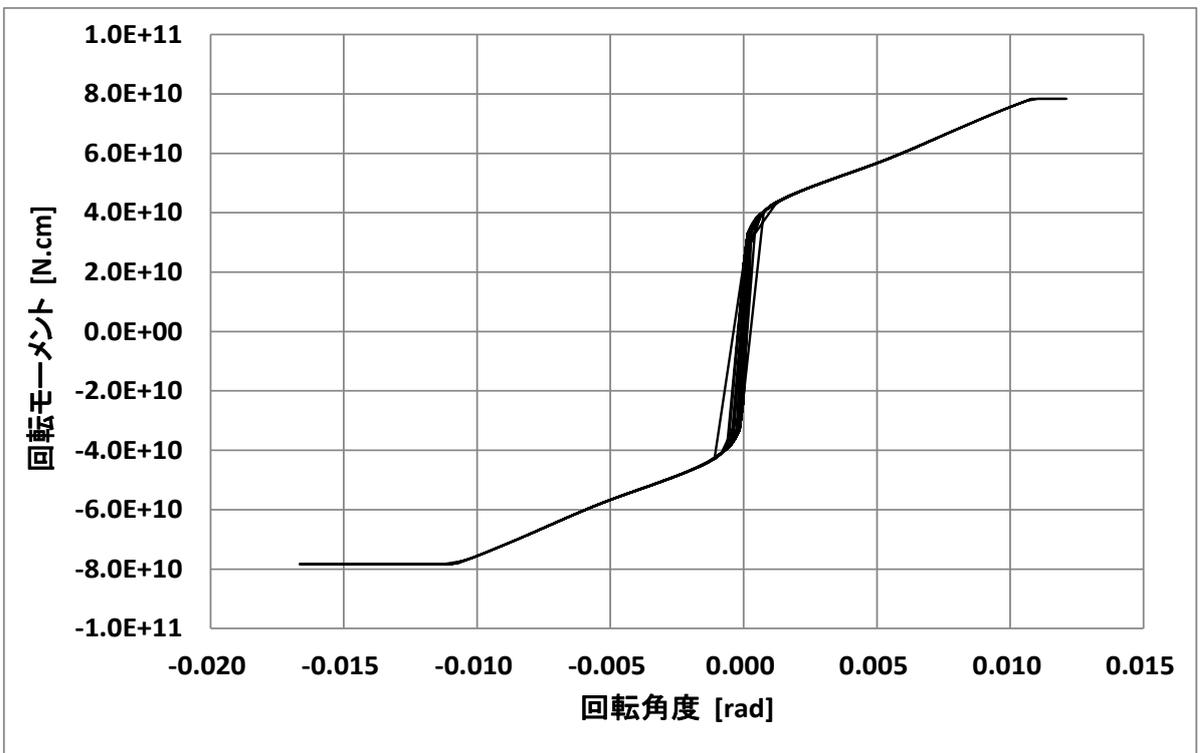
付図 8.3.2.1 回転角度の時刻歴 (3D シェルモデルの M- θ 線図使用)



付図 8.3.2.2 浮き上がり変位の時刻歴 (3D シェルモデルの M- θ 線図使用)



付図 8. 2. 3 回転ばねに発生した回転モーメントの時刻歴
(3D シェルモデルの M- θ 線図使用)



付図 8. 3. 2. 4 非線形回転ばねの復元モーメント特性線図
(3D シェルモデルの M- θ 線図使用)

最大浮き上がり変位 (76.7cm) 発生時 (78.7 秒における) の回転モーメントを用いて、本文に示す式(2.4)～式(2-7)によって算定された最大応答水平震度及び動液圧比を次表に示す。

付表 8.3.2.2 最大浮き上がり変位発生時(78.7 秒)の最大応答水平震度及び動液圧比

回転モーメント M (N. cm)	応答水平震度 K _{h1}	動液圧 P _{h1} (N/mm ²)	動液圧比 α
7.83E+10	0.78	0.097	0.55

8.3.3 3 質点非線形ばね系モデルの解析結果の比較

2 ケースの 3 質点非線形ばね系モデルの時刻歴地震応答解析結果の比較を付表 8.3.3.1 と付表 8.3.3.2 に示す。

付表 8.3.3.1 3 質点非線形ばね系モデルの地震応答解析結果の比較

M-θ 線図	解析結果	回転角度		質点M ₀ (相対変位)		質点M ₁ (相対変位)		質点M ₂ (相対変位)	
		角度 (rad)	時間 (秒)	変位 (cm)	時間 (秒)	変位 (cm)	時間 (秒)	変位 (cm)	時間 (秒)
定式化	最大値	0.010	80.2	13.8	78.8	14.6	78.8	37.4	77.8
	最小値	-0.018	78.8	-7.8	80.2	-9.1	80.2	-32.6	72.4
3Dシェル モデル	最大値	0.012	79.1	12.6	78.7	13.6	78.7	37.3	77.8
	最小値	-0.017	78.7	-9.1	79.1	-11.0	79.1	-32.5	72.4

付表 8.3.3.2 浮き上がり変位の算定結果の比較

M-θ 線図	最大回転角度 (rad)	最大浮き上り変位 (cm)
定式化	0.018	81.2
3D シェルモデル	0.017	76.7

8.4 照査比較検討

定式化による Q-Δ線図及び定式化による M-θ 線図を使用した 1 質点非線形水平ばね系モデルと 3 質点非線形ロッキングばね系モデルの解析結果の比較を付表 8.4.1 に示す。

付表 8.4.1 定式化による復元力・復元モーメント特性を用いた
1 質点と 3 質点モデルの解析結果の比較

	1 質点非線形 水平ばね系モデル (定式化による Q-Δ線図使用)	3 質点非線形 ロッキングばね系モデル (定式化による M-θ 線図使用)
最大浮き上がり変位 δ_{u-max} (cm)	75.1	81.2
最大浮き上がり変位発生時の動液圧比 α^{*1}	0.35	0.38

*1: 消防法式で計算した動液圧比 $\alpha=0.38$

タンク全体の 3D シェルの M-θ 線図を用いた 1 質点非線形水平ばね系モデルと 3 質点非線形ロッキングばね系モデルの解析結果の比較を付表 8.4.2 に示す。

付表 8.4.2 3D シェルモデルの M-θ 線図を用いた
1 質点と 3 質点モデルの解析結果の比較

	1 質点非線形 水平ばね系モデル	3 質点非線形 ロッキングばね系モデル
最大浮き上がり変位 δ_{u-max} (cm)	45.0	76.7
最大浮き上がり変位発生時の動液圧比 α^{*1}	0.55	0.55

別添資料 9

2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec VIII, Division 2 の算定式による応力—ひずみ線図

2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec VIII, Division 2 の算定式で計算した旧法タンク No. 3 の側板（材料：HW50）及びアニュラ板(SS41)と底板（材料：SM400C）の応力—ひずみ線図の数値を付表 9.1 と付表 9.2 及び図 9.1 に示す。

付表 9.1 側板（材料：HW50）の応力—ひずみ線図の計算値

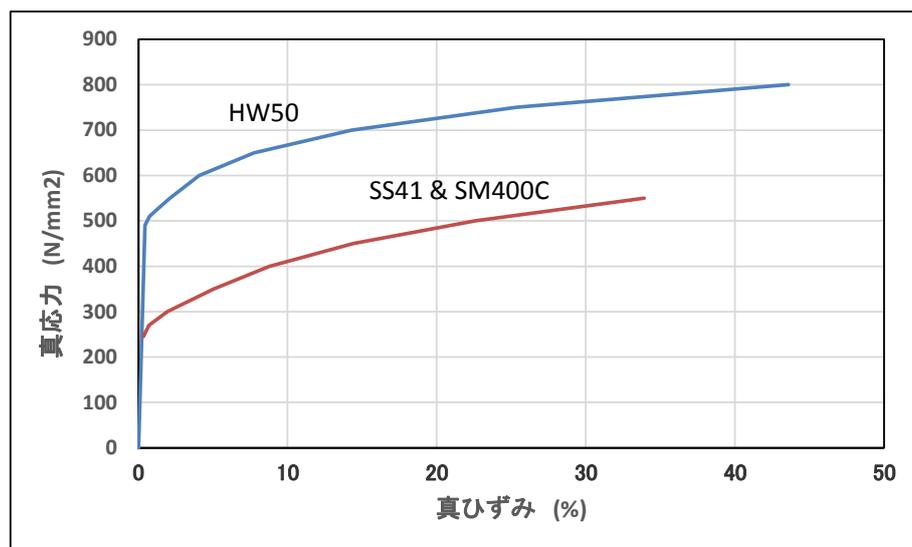
Stress Strain Curve		
σ_{ys}	490	MPa
σ_{uts}	610	MPa
R	0.803279	
K	0.32621	
m2	0.118033	
A2	883.334	
ϵ_p	2.00E-05	
ϵ_{ys}	2.00E-03	
M1	4.80E-02	
A1	6.62E+02	
Ey	205939.7	MPa

σ_t	H	ϵ_1	ϵ_2	γ_1	γ_2	ϵ_{ts}
490	-2	1.92E-03	6.79E-03	0.001882083	0.000122083	0.004383503
500	-1.48908	2.92E-03	8.05E-03	0.002777976	0.000390025	0.005595896
520	-0.46725	6.61E-03	1.12E-02	0.004744693	0.003166872	0.010436576
550	1.06551	2.13E-02	1.81E-02	0.002255762	0.016144203	0.021070651
600	3.620102	1.30E-01	3.77E-02	9.33161E-05	0.037720572	0.040727362
650	6.174693	6.90E-01	7.44E-02	2.98867E-06	0.074370384	0.077529636
700	8.729285	3.23E+00	1.39E-01	8.45288E-08	0.139340602	0.14273974
750	11.28388	1.36E+01	2.50E-01	2.1491E-09	0.249995839	0.253637684
800	13.83847	5.21E+01	4.32E-01	4.97979E-11	0.431915069	0.435799701
850	16.39306	1.84E+02	7.22E-01	1.07438E-12	0.721876619	0.726004041
900	18.94765	6.06E+02	1.17E+00	0	1.171585245	1.175955456

付表 9.2 アニユラ板（材料：SS41）と底板（材料：SM400B）の応力—ひずみ線図の計算値

Stress Strain Curve	
σ_{ys}	245 MPa
σ_{uts}	400 MPa
R	0.6125
K	0.392399
m2	0.2325
A2	708.5004
ϵ_p	2.00E-05
ϵ_{ys}	2.00E-03
M1	1.07E-01
A1	4.77E+02
Ey	205939.7

σ_t	H	ϵ_1	ϵ_2	γ_1	γ_2	ϵ_{ts}
245	-2	1.96E-03	1.04E-02	0.001925735	0.000186808	0.003302212
270	-1.17793	4.87E-03	1.58E-02	0.004445078	0.001366084	0.007122226
300	-0.19144	1.30E-02	2.48E-02	0.007752831	0.010061834	0.019271402
350	1.452709	5.51E-02	4.82E-02	0.002861343	0.045662654	0.050223523
400	3.096857	1.92E-01	8.55E-02	0.000391944	0.08535765	0.08769191
450	4.741004	5.79E-01	1.42E-01	4.41059E-05	0.141940466	0.144169678
500	6.385152	1.55E+00	2.23E-01	4.41043E-06	0.223328681	0.225760986
550	8.029299	3.78E+00	3.36E-01	4.01425E-07	0.3364951	0.339166186
600	9.673446	8.54E+00	4.89E-01	3.38073E-08	0.489226792	0.4921403
650	11.31759	1.80E+01	6.90E-01	2.66751E-09	0.690279014	0.69343528
700	12.96174	3.61E+01	9.49E-01	1.99111E-10	0.949409156	0.95280821
800	16.25004	1.26E+02	1.69E+00	9.64416E-13	1.686091523	1.689976155
900	19.53833	3.79E+02	2.80E+00	0	2.79828532	2.802655531



付図 9.1 応力-ひずみ特性

別添資料 10

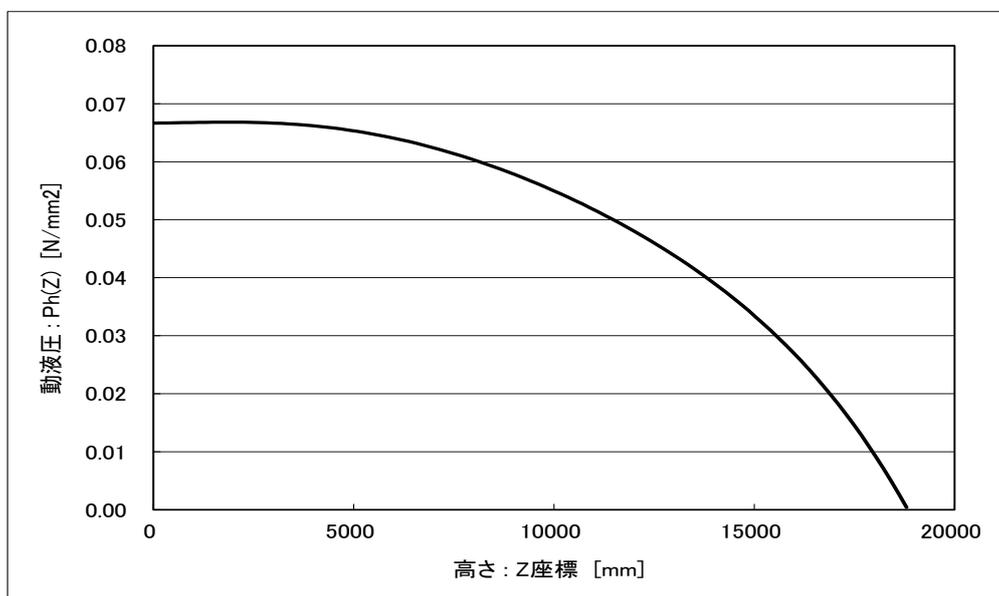
旧法タンク No. 3 の動液圧の計算結果

付表 10.1 旧法タンク No. 3 の動液圧計算用入力データ

D	45100 mm
H	18802 mm
Kh1	0.504
v 3	1.68
ρ	9.50E-07 kg/mm ²

H/D	0.416896
分割	100
ΔH	188.02 mm
g	9.8 m/sec ²
Z	9.01E+12 mm ³

C00	C01	C02	C03	C04	C05
0.782173	-0.12951	0.723741	-4.12859	5.558585	-2.80014
C10	C12	C12	C13	C14	C15
0.716301	0.23289	-0.34748	-1.52302	1.928093	-1.00475



付図 10.1 側板の高さにおける動液圧の分布 (旧法タンク No. 3)

付表 10.2 旧法タンク No. 3 の動液圧計算結果

Z (mm)	Ph0(Z) (N/mm ²)	Ph1(Z) (N/mm ²)	Ph(Z) (N/mm ²)	P = 2D*Ph(z)*π / 4 より		
				P (N/mm)	M (N.mm)	Q (N)
0.00	0.04108	0.02558	0.06665	4721.95	5.0051E+11	6.6342E+07
188.02	0.04101	0.02566	0.06667	4723.18	4.8812E+11	6.5454E+07
376.04	0.04095	0.02574	0.06669	4724.67	4.7590E+11	6.4566E+07
564.06	0.04090	0.02582	0.06672	4726.30	4.6384E+11	6.3678E+07
752.08	0.04085	0.02589	0.06674	4727.98	4.5195E+11	6.2789E+07
940.10	0.04080	0.02596	0.06676	4729.60	4.4023E+11	6.1900E+07
1128.12	0.04076	0.02602	0.06678	4731.09	4.2868E+11	6.1010E+07
1316.14	0.04072	0.02608	0.06680	4732.35	4.1729E+11	6.0121E+07
1504.16	0.04067	0.02614	0.06681	4733.31	4.0607E+11	5.9231E+07
1692.18	0.04063	0.02619	0.06682	4733.89	3.9502E+11	5.8341E+07
1880.20	0.04059	0.02624	0.06682	4734.03	3.8413E+11	5.7451E+07
2068.22	0.04054	0.02628	0.06682	4733.66	3.7341E+11	5.6561E+07
2256.24	0.04049	0.02632	0.06681	4732.72	3.6286E+11	5.5671E+07
2444.26	0.04043	0.02635	0.06678	4731.16	3.5248E+11	5.4781E+07
2632.28	0.04038	0.02638	0.06675	4728.92	3.4226E+11	5.3892E+07
2820.30	0.04031	0.02640	0.06671	4725.97	3.3221E+11	5.3003E+07
3008.32	0.04025	0.02641	0.06666	4722.25	3.2233E+11	5.2115E+07
3196.34	0.04017	0.02642	0.06659	4717.72	3.1262E+11	5.1227E+07
3384.36	0.04010	0.02642	0.06652	4712.36	3.0307E+11	5.0341E+07
3572.38	0.04001	0.02642	0.06643	4706.13	2.9369E+11	4.9455E+07
3760.40	0.03992	0.02641	0.06633	4699.00	2.8447E+11	4.8571E+07
3948.42	0.03982	0.02639	0.06622	4690.95	2.7542E+11	4.7688E+07
4136.44	0.03972	0.02637	0.06609	4681.96	2.6654E+11	4.6807E+07
4324.46	0.03961	0.02634	0.06595	4671.99	2.5782E+11	4.5928E+07
4512.48	0.03949	0.02631	0.06579	4661.05	2.4927E+11	4.5050E+07
4700.50	0.03936	0.02627	0.06563	4649.11	2.4088E+11	4.4175E+07
4888.52	0.03922	0.02622	0.06544	4636.17	2.3266E+11	4.3302E+07
5076.54	0.03908	0.02616	0.06525	4622.21	2.2460E+11	4.2432E+07
5264.56	0.03893	0.02610	0.06503	4607.22	2.1670E+11	4.1564E+07
5452.58	0.03877	0.02603	0.06481	4591.20	2.0897E+11	4.0699E+07
5640.60	0.03861	0.02596	0.06457	4574.16	2.0139E+11	3.9838E+07
5828.62	0.03844	0.02588	0.06431	4556.07	1.9398E+11	3.8979E+07
6016.64	0.03825	0.02579	0.06404	4536.95	1.8674E+11	3.8125E+07
6204.66	0.03806	0.02569	0.06376	4516.80	1.7965E+11	3.7273E+07
6392.68	0.03787	0.02559	0.06346	4495.61	1.7272E+11	3.6426E+07
6580.70	0.03766	0.02548	0.06315	4473.40	1.6595E+11	3.5583E+07
6768.72	0.03745	0.02537	0.06287	4450.15	1.5934E+11	3.4744E+07
6956.74	0.03723	0.02524	0.06247	4425.89	1.5288E+11	3.3910E+07
7144.76	0.03700	0.02511	0.06212	4400.61	1.4659E+11	3.3080E+07
7332.78	0.03677	0.02498	0.06175	4374.32	1.4044E+11	3.2255E+07
7520.80	0.03653	0.02483	0.06136	4347.02	1.3446E+11	3.1435E+07
7708.82	0.03628	0.02468	0.06096	4318.72	1.2862E+11	3.0620E+07
7896.84	0.03602	0.02453	0.06055	4289.43	1.2294E+11	2.9811E+07
8084.86	0.03576	0.02436	0.06012	4259.14	1.1741E+11	2.9007E+07
8272.88	0.03549	0.02419	0.05968	4227.88	1.1203E+11	2.8210E+07
8460.90	0.03521	0.02401	0.05922	4195.63	1.0680E+11	2.7418E+07
8648.92	0.03493	0.02383	0.05876	4162.41	1.0172E+11	2.6632E+07
8836.94	0.03464	0.02364	0.05827	4128.21	9.6789E+10	2.5853E+07
9024.96	0.03434	0.02344	0.05778	4093.05	9.2001E+10	2.5080E+07
9212.98	0.03403	0.02323	0.05727	4056.91	8.7357E+10	2.4314E+07
9401.00	0.03372	0.02302	0.05674	4019.80	8.2857E+10	2.3554E+07
9589.02	0.03341	0.02280	0.05620	3981.72	7.8499E+10	2.2802E+07
9777.04	0.03308	0.02257	0.05565	3942.66	7.4282E+10	2.2057E+07
9965.06	0.03275	0.02234	0.05509	3902.61	7.0204E+10	2.1320E+07
10153.08	0.03241	0.02209	0.05451	3861.58	6.6264E+10	2.0590E+07
10341.10	0.03207	0.02185	0.05392	3819.54	6.2461E+10	1.9868E+07
10529.12	0.03172	0.02159	0.05331	3776.49	5.8792E+10	1.9153E+07
10717.14	0.03136	0.02132	0.05269	3732.42	5.5258E+10	1.8447E+07
10905.16	0.03100	0.02105	0.05205	3687.30	5.1855E+10	1.7750E+07
11093.18	0.03062	0.02077	0.05140	3641.12	4.8582E+10	1.7061E+07
11281.20	0.03024	0.02049	0.05073	3593.85	4.5438E+10	1.6381E+07
11469.22	0.02985	0.02019	0.05005	3545.47	4.2421E+10	1.5710E+07
11657.24	0.02946	0.01989	0.04935	3495.95	3.9530E+10	1.5048E+07
11845.26	0.02905	0.01958	0.04863	3445.25	3.6762E+10	1.4395E+07
12033.28	0.02864	0.01926	0.04790	3393.35	3.4116E+10	1.3752E+07
12221.30	0.02822	0.01893	0.04715	3340.20	3.1590E+10	1.3119E+07
12409.32	0.02778	0.01860	0.04638	3285.76	2.9181E+10	1.2496E+07

12597.34	0.02734	0.01825	0.04559	3229.99	2.6889E+10	1.1884E+07
12785.36	0.02689	0.01790	0.04479	3172.82	2.4712E+10	1.1282E+07
12973.38	0.02642	0.01754	0.04396	3114.21	2.2646E+10	1.0691E+07
13161.40	0.02594	0.01717	0.04311	3054.09	2.0690E+10	1.0111E+07
13349.42	0.02545	0.01679	0.04224	2992.41	1.8843E+10	9.5425E+06
13537.44	0.02495	0.01640	0.04135	2929.08	1.7101E+10	8.9858E+06
13725.46	0.02443	0.01599	0.04043	2864.05	1.5463E+10	8.4412E+06
13913.48	0.02390	0.01558	0.03948	2797.22	1.3926E+10	7.9090E+06
14101.50	0.02335	0.01516	0.03851	2728.51	1.2487E+10	7.3895E+06
14289.52	0.02279	0.01473	0.03752	2657.84	1.1146E+10	6.8832E+06
14477.54	0.02220	0.01429	0.03649	2585.11	9.8977E+09	6.3903E+06
14665.56	0.02160	0.01383	0.03543	2510.21	8.7413E+09	5.9113E+06
14853.58	0.02098	0.01337	0.03434	2433.04	7.6735E+09	5.4466E+06
15041.60	0.02033	0.01289	0.03322	2353.49	6.6917E+09	4.9966E+06
15229.62	0.01966	0.01240	0.03206	2271.44	5.7932E+09	4.5618E+06
15417.64	0.01897	0.01190	0.03087	2186.76	4.9749E+09	4.1427E+06
15605.66	0.01825	0.01138	0.02963	2099.32	4.2338E+09	3.7397E+06
15793.68	0.01751	0.01085	0.02836	2008.99	3.5670E+09	3.3535E+06
15981.70	0.01674	0.01030	0.02704	1915.61	2.9712E+09	2.9846E+06
16169.72	0.01593	0.00974	0.02568	1819.03	2.4430E+09	2.6335E+06
16357.74	0.01510	0.00917	0.02427	1719.10	1.9791E+09	2.3009E+06
16545.76	0.01423	0.00858	0.02281	1615.65	1.5760E+09	1.9874E+06
16733.78	0.01332	0.00797	0.02129	1508.51	1.2299E+09	1.6936E+06
16921.80	0.01237	0.00735	0.01973	1397.49	9.3719E+08	1.4205E+06
17109.82	0.01139	0.00671	0.01810	1282.40	6.9380E+08	1.1685E+06
17297.84	0.01036	0.00605	0.01642	1163.05	4.9570E+08	9.3862E+05
17485.86	0.00929	0.00538	0.01467	1039.24	3.3869E+08	7.3159E+05
17673.88	0.00817	0.00468	0.01286	910.74	2.1837E+08	5.4827E+05
17861.90	0.00700	0.00397	0.01097	777.34	1.3020E+08	3.8957E+05
18049.92	0.00578	0.00323	0.00902	638.81	6.9470E+07	2.5644E+05
18237.94	0.00451	0.00248	0.00699	494.90	3.1274E+07	1.4986E+05
18425.96	0.00318	0.00170	0.00488	345.38	1.0523E+07	7.0866E+04
18613.98	0.00178	0.00090	0.00268	189.99	1.9305E+06	2.0535E+04
18802.00	0.00033	0.00007	0.00040	28.45	0.0000E+00	0.0000E+00