

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足-028-10-16 改2
提出年月日	2020年8月14日

排除水体积質量の考慮による応答低減について

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 概要

制御棒・破損燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）について、今回工認の基準地震動 S_s で耐震性の評価を実施した場合、サポート部基礎ボルトの許容値を満足しない状況となった。そこで、近年の先行プラント等での適用事例に注目し、今回工認では、発生応力の算出において、水とラックの相互影響を精緻に評価するため、排除水体積質量の考慮による応答低減の効果を織り込んで、評価を実施している。

2. ラックの耐震計算における質量条件の考え方

(1) 付加質量

ラックは水中に設置され、地震時の振動は周囲の水の影響を受けるため、従来から水の影響を付加質量として考慮し、気中での振動挙動として解いている。

なお、本書で「付加質量」と称するものは、V-2-4-1(1)「制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書」においては「排除水質量」と定義・表記している。

(2) 排除水体積質量

既工認における評価では、浮力に相当するものとして、水中に設置される機器が排除する流体の質量（排除水体積質量）の減算を考慮していなかったが、今回工認では、この排除水体積質量減算の効果を織り込んで評価を実施している。

上記(1)、(2)の質量の概念は、後述する(2.2-1)式から展開する考え方であり、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」の立形ポンプの例で引用されている二重円筒モデルの考え方によるものと同じ式で表される。なお、先行プラントにおいても、上記事項について適用しており、一般的な考え方である。

以下に、ラックの耐震計算における水の影響について、付加質量及び排除水体積質量の考え方を示す。

2.1 付加質量について

構造物が流体中で振動する場合、流体－構造物間の相互作用により水中構造物は、複雑な振動特性を示し、固有振動数及び応答が低下することが知られている。一般に、このような現象を評価するためには、付加質量の概念が用いられており、流体中にある物体が加速度を受けて運動する場合、構造物は流体を押し退けて進むことになり、流体を排除するのに必要な力 F_w が作用する。

F_w は、加速度 α に比例し、

$$F_w = m_v \cdot \alpha \quad (2.1-1)$$

m_v : 構造物の形状等によって決定される質量（付加質量）

で表される。

また、周囲に流体が存在しないとした場合に、質量 M の物体に加速度 α を与えるために必要な力 F_S は、

$$F_S = M \cdot \alpha \quad (2.1-2)$$

で表される。

したがって流体中の場合、同一の加速度を与えるために必要な力 F は、上述の力の和として下記にて表せる。

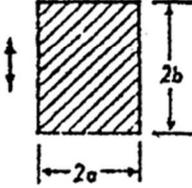
$$F = F_S + F_W = (M + m_V) \cdot \alpha \quad (2.1-3)$$

(2.1-3)式は、同一の加速度を与えるために流体中においては、あたかも質量が m_V だけ増加したような傾向を示すことを意味しており、 m_V を付加質量と呼び ASME 「Table of Hydrodynamic Mass Factors for Translational Motion」 (以下「ASME テーブル」という。) で構造物の形状ごとにこの付加質量を算出する方法がまとめられている (長方形断面の場合の抜粋を表 2.1-1 に示す。表では、付加質量を m_h として表している。)

表 2.1-1 ASME テーブル

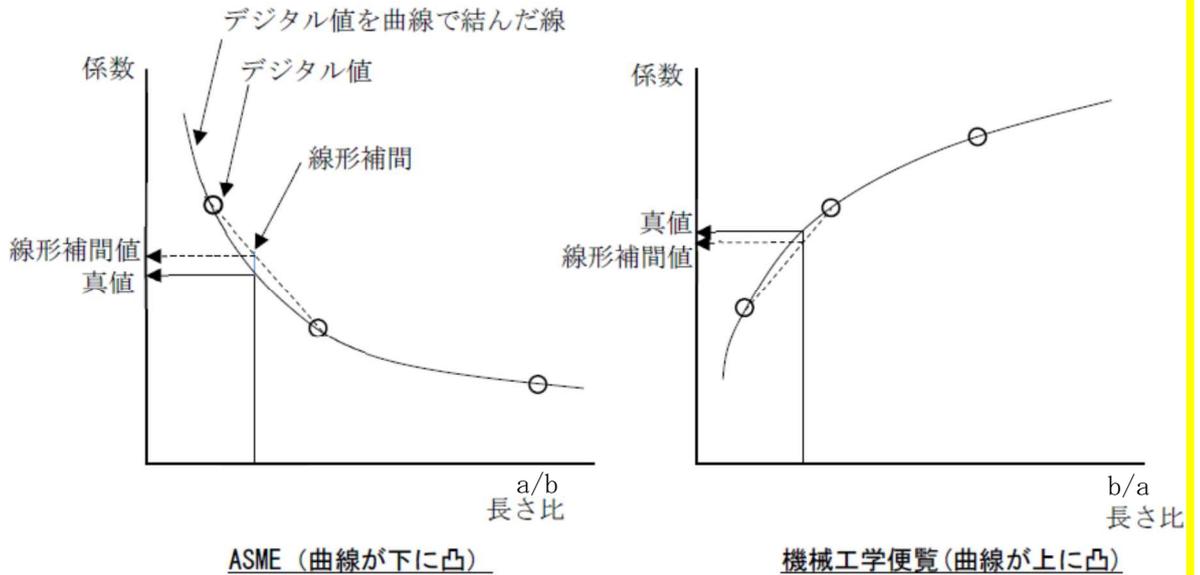
TABLE 1

TWO-DIMENSIONAL BODIES

SECTION THROUGH BODY	TRANSLATIONAL DIRECTION	HYDRODYNAMIC MASS PER UNIT LENGTH	SOURCE
	Vertical		
	$a/b = \infty$	$m_h = 1 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 10$	$m_h = 1.14 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 5$	$m_h = 1.21 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 2$	$m_h = 1.36 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1$	$m_h = 1.51 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/2$	$m_h = 1.70 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/5$	$m_h = 1.98 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/10$	$m_h = 2.23 \pi \rho a^2$	(4) t

注：付加質量係数の算出

付加質量係数を線形補間して求める場合、機械工学便覧と比較して付加質量係数が大きくなる ASME に記載の値を使用している。



ASME と機械工学便覧の付加質量係数の比較

2.2 付加質量及び排除水体積質量の概念

(1) 二重円筒モデル

ラックの耐震設計においては、前述のように ASME テーブルの値から付加質量を求めて計算しているが、その考え方は参考文献(1)においては、二重円筒の流体連成振動のモデルとして説明されている。二重円筒モデルを図 2.2-1 に示す。ここで、二重円筒の間に流体が存在する系の振動は、(2.2-1)式にて表すことができ、付加質量の定義式から内筒の排除水体積質量については、(2.2-2)式にて表すことができる。

一方、実際のラック類の評価では、矩形のプール内のラックを対象としているが、表 2.1-1 に示されるように、矩形であっても単位長さあたりの流体力学的質量（付加質量）は、 $\pi \rho a^2$ の倍数となる形で整理され、二重円筒モデルと同様といえる。

よって、ラック及び使用済燃料貯蔵プールを二重円筒で簡易的に表すと、内筒をラック、外筒をプールとみなすことができる。

なお、 M_{11}, M_{12}, M_{22} は Fritz の論文（参考文献(2)）に基づき算出される。

$$\left(\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.2-1)$$

ここに

M_1, M_2 : 内筒及び外筒の質量

$$M_{11} = \pi a^2 L \rho \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad : \text{内筒の自己付加質量} \quad (2.2-1a)$$

$$M_{12} = M_{21} = -2\pi a^2 L \rho \left(\frac{b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad : \text{相互影響による付加質量} \quad (2.2-1b)$$

$$M_{22} = \pi b^2 L \rho \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad : \text{外筒の自己付加質量} \quad (2.2-1c)$$

- a = 内筒の外半径
- b = 外筒の内半径
- \ddot{u}_1, \ddot{u}_2 = 内筒, 外筒の絶対加速度
- x_1, x_2 = 内筒, 外筒の相対変位
- k_1, k_2 = 内筒, 外筒の剛性
- L = 内筒および外筒の長さ
- ρ = 流体の密度

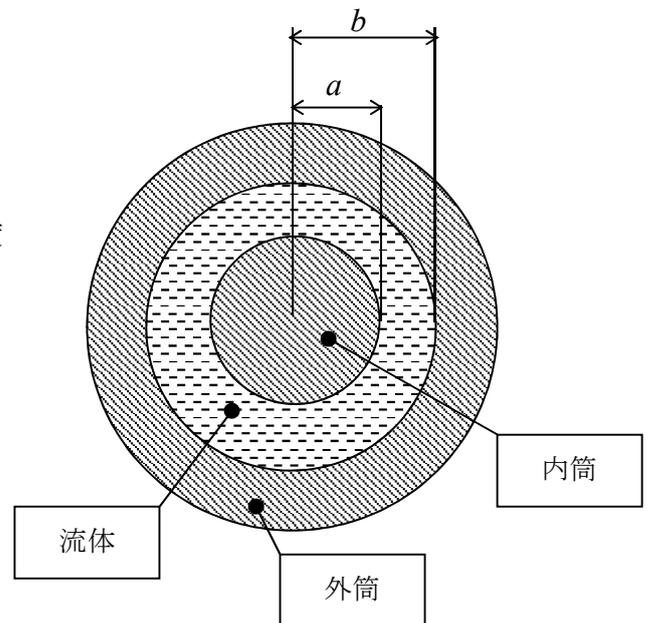


図 2.2-1 二重円筒モデル

ここで、上記の式の定義により、二重円筒の外筒が内筒に対して十分に大きいとすると、(2.2-1a)式及び(2.2-1b)式は下式になることから、 $M_{11} + M_{12}$ は(2.2-2)式となる。

$$M_{11} = \pi a^2 L \rho \quad (2.2-1a')$$

$$M_{12} = -2\pi a^2 L \rho \quad (2.2-1b')$$

$$M_{11} + M_{12} = -\pi a^2 L \rho (= -M_d) \quad (2.2-2)$$

(2.2-2)式は、内筒の排除水体积質量に相当する。これを $-M_d$ と表現する。

(2) 二重円筒モデルの矩形ラックへの適用について

図 2.2-1 の二重円筒モデルと比較して、矩形ラックと使用済燃料貯蔵プールからなる体系は、流体部分が広いこと、内筒及び外筒の形状が矩形であることが相違している。それでも二重円筒モデルを矩形ラックに適用することが可能であることを以下に説明する。

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」の立形ポンプの例において、「なお、バレルがない立形斜流ポンプの場合には、 d_2 を無限大にして用いる。」(d_2 は図 2.2-1 の

外筒内側直径 $2b$ に相当) とあり、これはポンプと取水槽壁 (一般に矩形) との間の広い流体部分に対して二重円筒モデルを適用することに相当する。この例において、このような取り扱いが可能であるのは、理論の前提「①相対変位は微小である。②軸方向流れは無視できる。③ポテンシャル流れである。」を逸脱しないためである。同様に、矩形ラックと使用済燃料貯蔵プールからなる体系の場合も理論の前提を逸脱しない。

また、排除水体積質量は、二重円筒モデルの(2.2-2)式のとおり、単に機器体積と流体密度の積であることから、矩形ラックの場合にも応用が可能である。

以上から、二重円筒モデルの矩形ラックへの適用が可能である。

2.3 ラックに加わる力

付加質量及び排除水体積質量を用いて、ラックに加わる力を求める。

\ddot{u}_g を地震による入力加速度とすると

$$\ddot{u}_1 = \ddot{u}_g + \ddot{x}_1$$

$$\ddot{u}_2 = \ddot{u}_g + \ddot{x}_2$$

これを用いて、(2.2-1)式は以下に書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} M_1 + M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_2 + M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = -\ddot{u}_g \begin{bmatrix} M_1 + M_{11} + M_{12} \\ M_2 + M_{21} + M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.3-1)$$

ここで、外筒の剛性が非常に大きい場合には、 $x_2 = 0$ となり、(2.3-1)式は下式のように書き換えられる。

$$(M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -\ddot{u}_g (M_1 + M_{11} + M_{12}) \quad (2.3-2)$$

上記(2.3-2)式は、水中において質量 $(M_1 + M_{11})$ の振動は、外筒からの相互影響による付加質量 M_{12} の影響を受けて、加振されていることを表している。

ここで、(2.3-2)式の右辺質量を左辺と同様に $(M_1 + M_{11})$ で代表して、これを補正するために、右辺について比率 β を用いて書き換えると(2.3-3)式を得る。

(2.3-3)式は、気中において質量 $(M_1 + M_{11})$ が地震加速度の β 倍に低減された入力で、振動することと同様であると考えることができる。

$$(M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -\beta \cdot (M_1 + M_{11}) \cdot \ddot{u}_g \quad (2.3-3)$$

この係数 β は各質量を用いて下式で与えられ、これを低減係数と呼ぶこととする。

$$\beta = \frac{M_1 + M_{11} + M_{12}}{M_1 + M_{11}} \quad (2.3-4)$$

ここで、(2.2-2)式より、

$$\beta = \frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} \quad (2.3-5)$$

と表されることから、ラックに加わる力 F として下記 (2.3-6) 式が得られる。

$$F = (M_1 + M_{11}) \left\{ \frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} \alpha \right\} = (M_1 - M_d) \cdot \alpha \quad (2.3-6)$$

一方、固有振動数については、(2.3-3)式から水中の場合が求められ、気中の場合については自己付加質量 M_{11} が無いとして下記の通り求められる。

$$\text{水中： } \omega_w^2 = \frac{k_1}{M_1 + M_{11}} \quad (2.3-7)$$

$$\text{気中： } \omega_a^2 = \frac{k_1}{M_1} \quad (2.3-8)$$

両者の比を取って整理すると固有振動数の比として下記を得る。

$$\frac{\omega_w}{\omega_a} = \sqrt{\frac{M_1}{M_1 + M_{11}}} \quad (2.3-9)$$

3. 耐震評価上の付加質量及び排除水体積質量の扱い

耐震評価上のラックが水中で振動する場合の固有振動数と発生応力は、気中で振動する場合に比較して表 3-1 に示すとおりとなる。

既工認では、付加質量のみ考慮して固有振動数の低減を織り込んでいたが、今回工認でラックの耐震評価を行うにあたり、ラック本体、ラック内の貯蔵物及びラックセル内と構造物の含水分が占める体積に相当する水質量分を、応力計算において排除水体積質量 M_d として減算を考慮した。

表 3-1 気中で振動する場合と比較した固有振動数と発生応力

	既工認	今回工認
固有振動数	$\sqrt{\frac{M_1}{M_1 + M_{11}}}$ 倍	同左
低減係数	$\frac{M_1}{M_1 + M_{11}}$ 倍	$\frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}}$ 倍
発生応力	$F = M_1 \cdot \alpha$	$F = (M_1 - M_d) \cdot \alpha$

M_1 : 内筒の質量 (ラックの質量)

M_{11} : 付加質量

M_d : 排除水体積質量

α : 加速度

4. 付加質量の計算について

4.1 ラック部

(1) 長辺方向

ラック長辺方向時 $a=300$ mm

ラック長辺方向時 $b=842.5$ mm

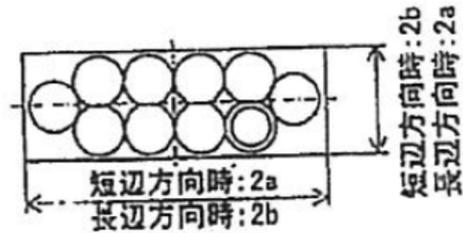


図 4-1 計算モデル図 (ラック上面)

$$\frac{a}{b} = 0.3561$$

ASME テーブルより $a/b=0.5$ の時 付加質量係数 $k_1=1.70$

$a/b=0.2$ の時 付加質量係数 $k_2=1.98$

$\therefore a/b=0.3561$ の時

$$k = k_1 + \frac{(k_2 - k_1)}{(0.2 - 0.5)} \cdot (0.3561 - 0.5)$$

付加質量係数 $k=1.8343$

ラック高さ $h_1=3102$ mm

水の密度 $\rho = 1.0 \times 10^{-6}$ kg/mm³

付加質量 $mv_{l1} = k \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot h_1$

$$= 1609 \text{ kg}$$

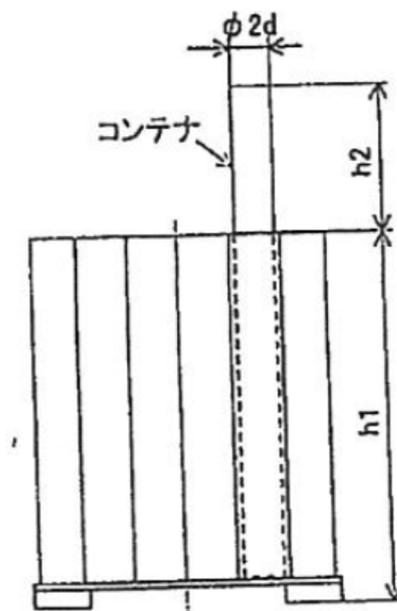


図 4-2 計算モデル図 (ラック側面)

(2)短辺方向

ラック短辺方向時 $a=842.5 \text{ mm}$

ラック短辺方向時 $b=300 \text{ mm}$

$$\frac{a}{b}=2.8083$$

ASME テーブルより $a/b=5$ の時 付加質量係数 $k_1=1.21$

$a/b=2$ の時 付加質量係数 $k_2=1.36$

$\therefore a/b=2.8083$ の時

$$k=k_1+\frac{(k_2-k_1)}{(2-5)} \cdot (2.8083-5)$$

付加質量係数 $k=1.3196$

ラック高さ $h_1=3102 \text{ mm}$

水の密度 $\rho=1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

$$\begin{aligned} \text{付加質量 } m_{vs1} &= k \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot h_1 \\ &= 9128 \text{ kg} \end{aligned}$$

4.2 コンテナ上部

円形断面のためラック長辺、短辺で付加質量は同じ。

円形断面の時 付加質量係数 $k=1.00$

コンテナ径 $d=$  mm

コンテナ上部高さ $h_2=$  mm

水の密度 $\rho=1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

$$\begin{aligned} \text{付加質量 (長辺方向)} m_{v12} &= k \cdot \pi \cdot \rho \cdot d^2 \cdot h_2 \times 10 \\ &= 497 \text{ kg} \end{aligned}$$

付加質量 (短辺方向) $m_{vs2}=m_{v12}=497 \text{ kg}$

4.3 コンテナ上端 (鉛直方向)

コンテナ 10 体が装填されている場合、コンテナ上端に  mm (2d) の平板が 10 面構成されるが、保守的評価として、シートプレート短辺 600 mm (2a) を直径とする平板の水平板の質量がコンテナ上端に働くとした。

平板の時 付加質量係数 $k=1.00$

コンテナ上端 $a=300 \text{ mm}$

コンテナ上端 $b=842.5 \text{ mm}$

コンテナ長辺 $h=2 \cdot b$

水の密度 $\rho=1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

$$\begin{aligned} \text{付加質量 } m_{vz} &= k \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot h \\ &= 476 \text{ kg} \end{aligned}$$

4.4 全体付加質量

- (1)長辺方向： $mv_x = mv_{l1} + mv_{l2} = 2106 \text{ kg}$
 (2)短辺方向： $mv_y = mv_{s1} + mv_{s2} = 9625 \text{ kg}$
 (3)鉛直方向： $mv_z = 476 \text{ kg}$

5. 排除水体積質量の計算について

5.1 ラックの質量

(1)質量内訳

- (a)ラック本体： $m_R = 1200 \text{ kg}$
 (b)破損燃料（燃料集合体）： $m_F = 3000 \text{ kg}$ （ $300 \text{ kg/体} \times 10 \text{ 体}$ ）
 (c)コンテナ： $m_C = 800 \text{ kg}$ （ $80 \text{ kg/体} \times 10 \text{ 体}$ ）

コンテナ質量の内訳は以下の通り

$$\begin{array}{l} \square : m_c \square = \square \text{ kg} \\ \square : m_c \square = \square \text{ kg} \end{array}$$

- (d)内部水1（ラックパイプーコンテナ間）： $mw_1 = 767 \text{ kg}$
 (e)内部水2（コンテナー燃料集合体間）： $mw_2 = 982 \text{ kg}$
 (f)内部水3（ラックパイプ間）： $mw_3 = 165 \text{ kg}$

(2)密度

- ・水： $\rho_w = 1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- ・SUS304： $\rho_{sus} = 7.93 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- ・ \square ： $\rho \square = \square \text{ kg/mm}^3$

(3)破損燃料（燃料集合体）排除水体積

$$v_F = \square \text{ mm}^3$$

(4)排除水体積質量内訳

- (a)ラック本体体積分： $m_{Rth} = \left(\frac{m_R}{\rho_{sus}}\right) \cdot \rho_w = 151.324 \text{ kg} \doteq 150 \text{ kg}$
 (b)破損燃料（燃料集合体）体積分： $m_{Fth1} = v_F \cdot \rho_w = \square \text{ kg}$
 (10本分) $m_{Fth} = m_{Fth1} \times 10 = \square \text{ kg}$
 (c)コンテナ体積分： $m_{cth1} = \square = 11.57046 \text{ kg}$
 (10本分) $m_{cth} = m_{cth1} \times 10 = 115.705 \text{ kg} \doteq 115 \text{ kg}$
 (d)内部水1（ラックパイプーコンテナ間）： $mw_{1th} = 767 \text{ kg}$
 (e)内部水2（コンテナー燃料集合体間）： $mw_{2th} = 982 \text{ kg}$
 (f)内部水3（ラックパイプ間）： $mw_{3th} = 165 \text{ kg}$

(5) ラック全体排除水体積質量

$$m_{th} = m_{R_{th}} + m_{F_{th}} + m_{c_{th}} + m_{w1_{th}} + m_{w2_{th}} + m_{w3_{th}} = 2540 \text{ kg}$$

6. まとめ

既工認では、(2.3-5)式において排除水体積質量 $M_d = 0$ とし、安全側の評価として排除水体積質量の減算による効果を考慮していなかったが、実機が水中構造物であることから、評価の精緻化のため、付加質量及び排除水体積質量の両方を考慮することとした。これまで述べた通り排除水体積質量減算は、理論式から求められるものであることから、解析方法の種類に係わらず適用可能であると考えられる。

よって、今回工認では、(2.3-5)式による低減係数 β を用いて、発生応力の評価時に排除水体積質量減算の効果を織り込んで、評価を実施している。

7. 参考文献

- (1) ASCE, 2000, Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures (ASCE 4-98)
- (2) R. J. FRITZ, 1972, 「The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solid」, Journal of Engineering for Industry.