

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-028-10-20 改3
提出年月日	2020年8月21日

最新知見として得られた減衰定数の採用について
(使用済燃料貯蔵ラック)

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1.	はじめに	1
2.	燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較	1
2.1	燃料ラックの構造と燃料プール内の配置	1
2.2	燃料ラックの耐震設計手法について	3
2.3	既工認と今回工認の耐震設計手法の比較	4
3.	減衰特性の確認試験	5
3.1	実物大試験供試体の概要	5
3.2	燃料ラックの水中加震試験装置及び試験手法について	6
3.3	試験結果	16
3.4	実物大試験における試験条件の妥当性	20
4.	試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定	21
4.1	実機応答と供試体応答の比較	21
4.2	設計用減衰定数の設定	23
5.	結論	26

別紙-1 プール水及び燃料集合体の体数が減衰定数に与える影響

別紙-2 試験水槽の形状決定方法

別紙-3 試験における水深の影響について

別紙-4 試験方法及び減衰定数の算出方法

別紙-5 ハーフパワー法について

別紙-6 自由振動波形からの減衰定数の算出方法

別紙-7 正弦半波加振試験における振動台の影響について

別紙-8 スロッシングによる減衰への影響について

別紙-9 固有振動数と減衰定数の関係について

: 今回ご提示資料

別紙-5 ハーフパワー法について

加振力 $Fe^{i\omega t}$ を受ける 1 自由度系の振動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Fe^{i\omega t} \quad (1)$$

上式の解を $x = Ae^{i\omega t}$ として、式(1)に代入すると、

$$A = \frac{F}{-m\omega^2 + ic\omega + k} = \frac{F}{k \left\{ \left(1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right) + i \frac{c}{k} \omega \right\}}$$

ここで、固有円振動数 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 、減衰定数 $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c\omega_0}{2k}$ とおくと

$$A = \frac{F}{k \left[\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]}$$

よって、

$$x = \frac{1}{k \left[\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]} Fe^{i\omega t}$$

となる。

よって、加振力 $Fe^{i\omega t}$ に対する変位の振動伝達特性の振幅は式(2)で与えられる。

$$A' = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (2)$$

いま $\zeta \leq 1$ とすると式(2)の振幅曲線はピーク値付近で $\omega = \omega_p$ に対しほぼ対称である。

そこで ω_p より少し低い ω_L 点の振幅を A_L とする。

$$\Delta\omega/2 = \omega_p - \omega_L = \omega_0 - \omega_L \quad (\omega_p \approx \omega_0) \text{ より}$$

$$A_L = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2\right)^2 + 4\zeta^2 (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2}}$$

$$\approx \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}$$

一方,

$$A_{\max} = \frac{1}{2k\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta k}$$

となる。 A_{\max} と A_L の比 R は

$$R = \frac{A_{\max}}{A_L} = \frac{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$$

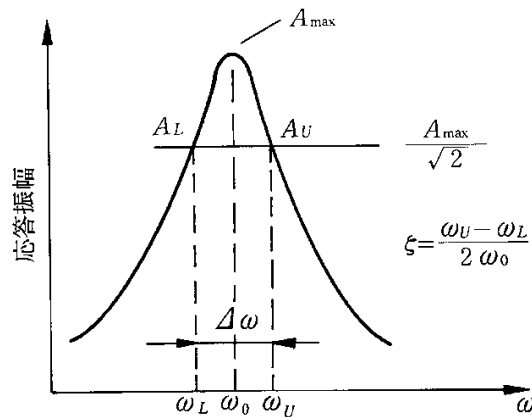
となり, 整理すると

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega / \omega_0}{\sqrt{R^2 - 1}}$$

となる。 $R = \sqrt{2}$ とすると以下のように簡単になる。

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0} = \frac{f_U - f_L}{2f_0}$$

よって, 周波数応答の $A_{\max} / \sqrt{2}$ を示す周波数 f_U と f_L 及び固有振動数 f_0 を計測すれば減衰定数 ζ を求めることができる。この減衰定数測定方法をハーフパワー法という(第5-1図)。



第5-1図 ハーフパワー法

【補足事項】減衰定数算定に適用したハーフパワー法の導出式について

第5-1表にハーフパワー法の導出式の比較を示す。別紙5では、一般的な①相対変位から求める導出式を記載した。一方、別紙4正弦波掃引試験では絶対応答加速度を用いているため、②絶対応答加速度から求める導出式が、試験方法との整合性からは妥当である。ただし、減衰定数 ζ を求める算定式は、同一の式が得られる。

第5-1表 ハーフパワー法の導出式の比較

	①相対変位から求める場合 (別紙5記載)	②絶対応答加速度から求める場合 (別紙4正弦波掃引試験)
運動方程式	$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Fe^{i\omega t}$	$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\ddot{x}_0$
応答振幅 A'	$A' = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$	$A' = \frac{\sqrt{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$
A_L	$A_L \approx \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(\Delta\omega/\omega_0)^2 + 4\zeta^2}}$	$A_L \approx \frac{\sqrt{1 + 4\zeta^2}}{\sqrt{(\Delta\omega/\omega_0)^2 + 4\zeta^2}}$
A_{max}	$A_{max} \approx \frac{1}{2\zeta k}$	$A_{max} \approx \frac{\sqrt{1 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$
比率 R	$R = \frac{A_{max}}{A_L} = \frac{\sqrt{(\Delta\omega/\omega_0)^2 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$	$R = \frac{A_{max}}{A_L} = \frac{\sqrt{(\Delta\omega/\omega_0)^2 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$
減衰定数 ζ	$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0} = \frac{f_U - f_L}{2f_0}$	$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0} = \frac{f_U - f_L}{2f_0}$