

地震時の機器・配管系の 弾塑性応答特性と耐震設計裕度

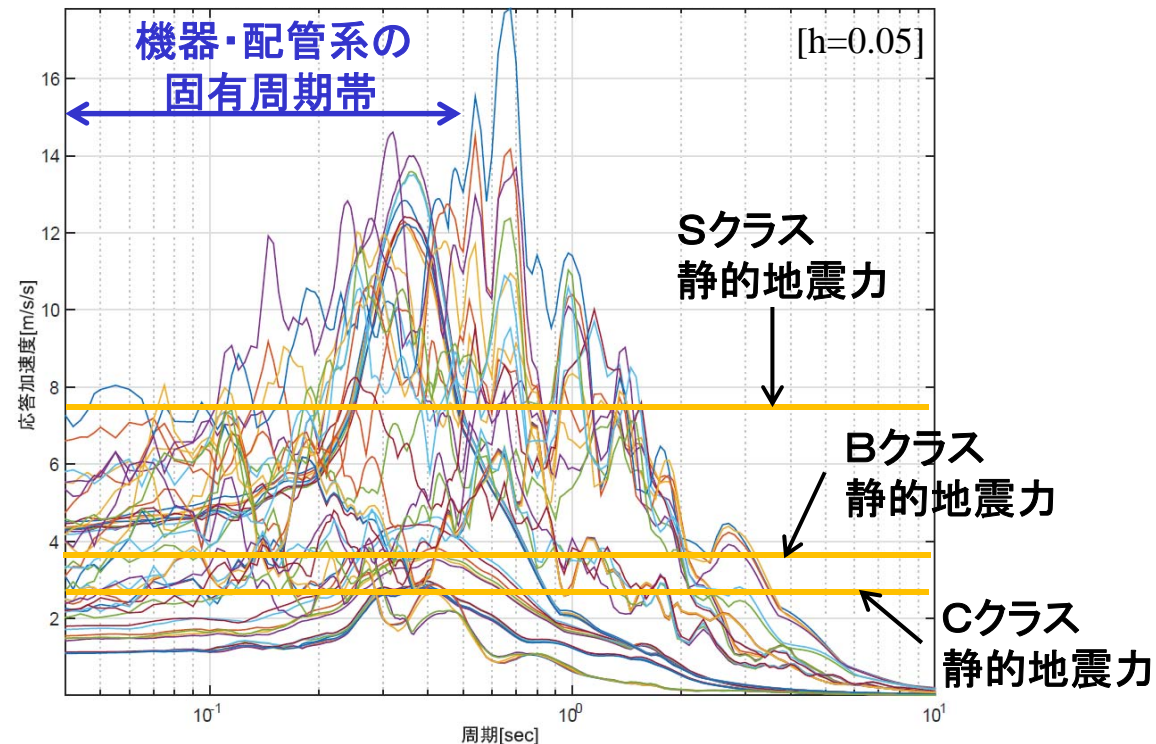
中国電力株式会社

田村伊知郎

1. 機器・配管系の耐震信頼性 —原子力発電所の地震被災事例から—
2. 機器・配管系の弾塑性応答特性
3. 弾性設計した機器・配管系の耐震設計裕度
4. まとめ

1. 機器・配管系の耐震信頼性—原子力発電所の地震被災事例から—

■ 地震時に作用した地震力と機器・配管系の設計用静的地震力



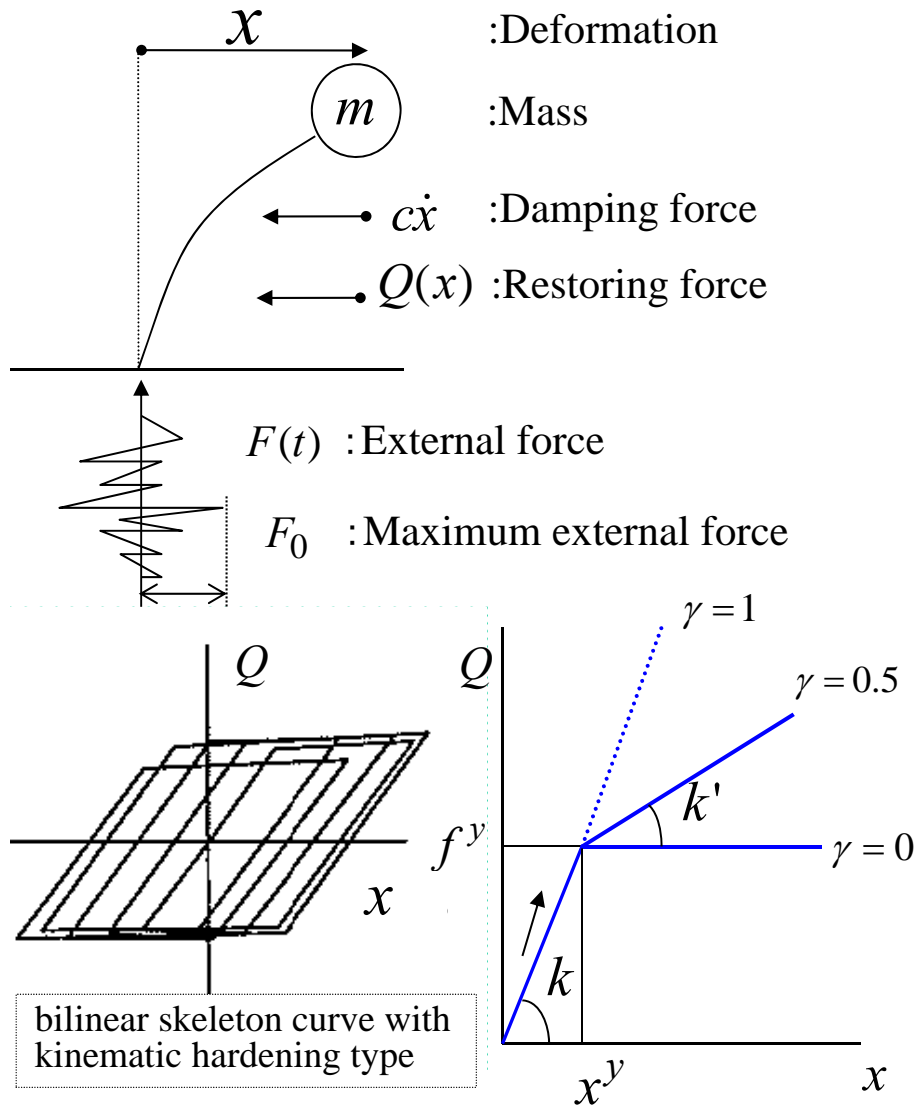
女川発電所，福島第一，第二発電所，東海第二発電所，浜岡発電所
原子炉建物基礎版上観測記録*の加速度応答スペクトル(EW方向)

- 原子力発電所に作用した地震力はS, B, Cクラスの静的地震力を大幅に超過.
- 動的地震力による設計をしていないB, Cクラスの多くの機器・配管系は弾塑性応答したと推定されるが，岩着した建屋内の機器・配管系の損傷はわずかであった.

* 東北電力(株)，東京電力ホールディングス，中部電力(株)，日本原子力発電(株)提供

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

2.1 弾塑性応答する1自由度系と運動方程式



■ **弾性域の運動方程式**

$$\ddot{x} + 2h\omega \dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_E \quad (|x| \leq x^y)$$

■ **塑性域の運動方程式**

$$\ddot{x} + 2h\omega \dot{x} + \omega'^2 x + (\omega^2 - \omega'^2)x^y = -\ddot{x}_E \quad (x > x^y)$$

ここで

- \ddot{x}_E : 外力の加速度時刻歴 ($= F(t)/m$)
- x^y : 系の降伏変位 ($= f^y/k$)
- ω : 一次剛性の固有振動数 ($= \sqrt{k/m}$)
- ω' : 二次剛性の固有振動数 ($= \sqrt{k'/m}$)
- h : 減衰比 ($= c/\sqrt{mk}$)

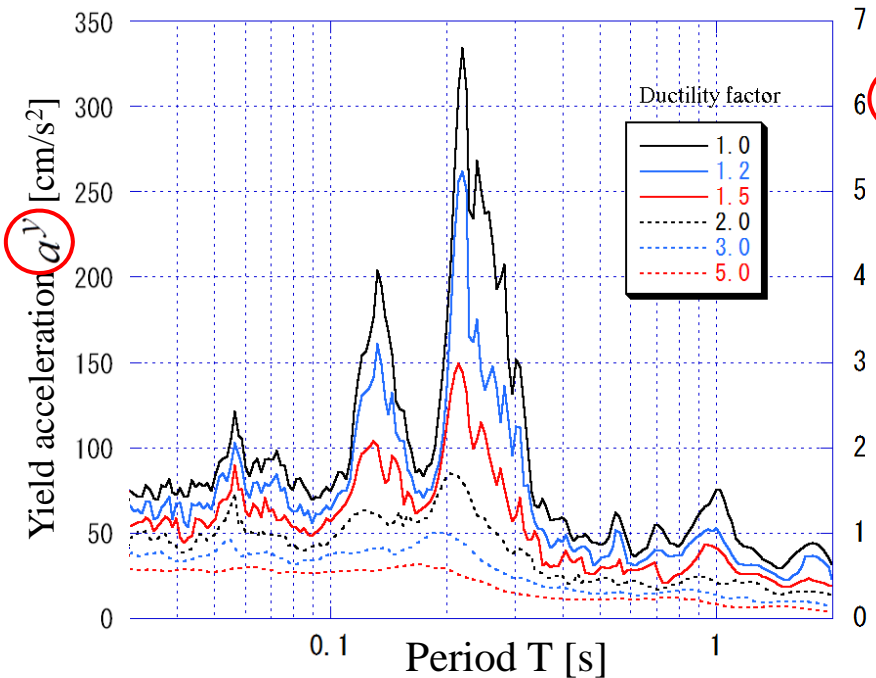
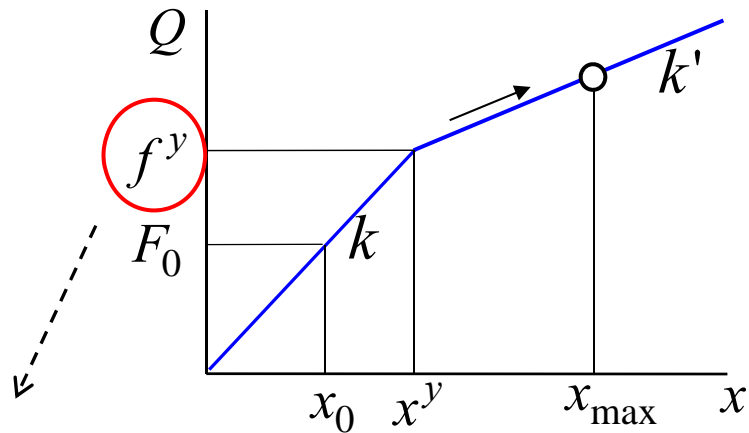
■ **剛性比** : $\gamma \equiv k'/k$

- 非線形系(弾完全塑性型) : $\gamma = 0$
- 非線形系 : $0 < \gamma < 1$
- 線形系 : $\gamma = 1$

1自由度系と復元力特性

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

2.2 弾塑性床応答スペクトル



■ 弾性域の運動方程式

$$\ddot{D} + 2h\omega\dot{D} + \omega^2 D = -\omega^2 \ddot{x}_E / a^y \quad (|D| \leq 1)$$

■ 塑性域の運動方程式

$$\ddot{D} + 2h\omega\dot{D} + \omega'^2 D + (\omega^2 - \omega'^2) = -\omega^2 \ddot{x}_E / a^y \quad (D > 1)$$

ここで
 D : 時間依存塑性率 $(= x / x^y)$
 a^y : 系の降伏加速度 $(= f^y / m)$

塑性(変形)率 : $\mu \equiv x_{\max} / x^y = \max\{|D|\}$

外力基準化降伏耐力 : $\chi \equiv f^y / F_0$

1自由度非線形系について、塑性率、剛性比、減衰比をパラメータに、系の固有周期と降伏耐力の関係を図示したものを弾塑性(床)応答スペクトル(必要耐カスペクトル)という。

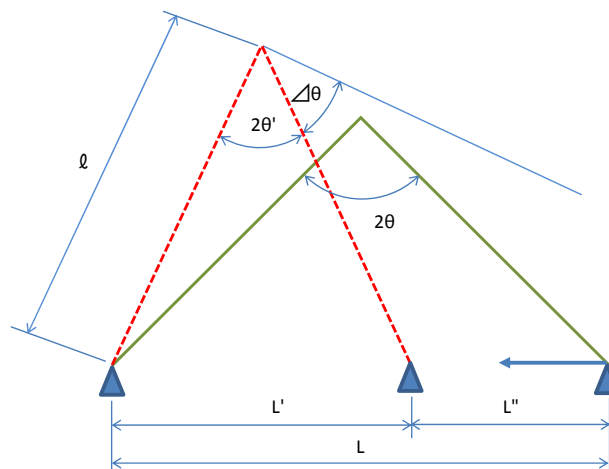
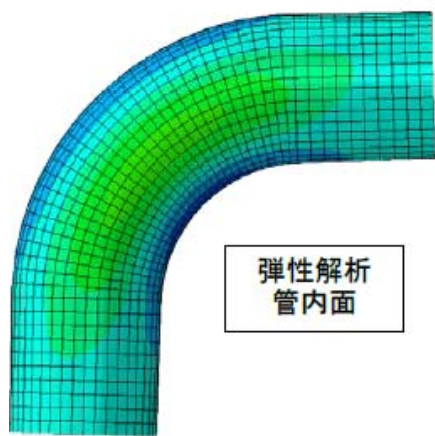
弾塑性床応答スペクトル [$\gamma=0.2, \mu=1.0 \sim 5.0, h=0.02$]

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

2.3 機器・配管系の許容塑性率

- 原子力発電所耐震設計技術規定 (JEAC4601-20008) 参考値
 - 配管支持構造物 3程度
- Newmark, Inelastic design of nuclear reactor structures and its implication on design of critical equipment (1977)
 - 軽量機器 1.0-1.5
 - 重量機器 1.2-2
 - 配管 1.5-3
 - 鋼材(引張り,曲げ) 2.5-10

■ 配管エルボの塑性(変形)率と変位(角度)の関係 (例)



形状	ロングエルボ
材質	STS410
外径(mm)	216.3
板厚(mm)	12.7
塑性率 1 (弾性変形)	$\Delta\theta = \text{約 } 0.75^\circ$
塑性率 3	$\Delta\theta = \text{約 } 2.25^\circ$

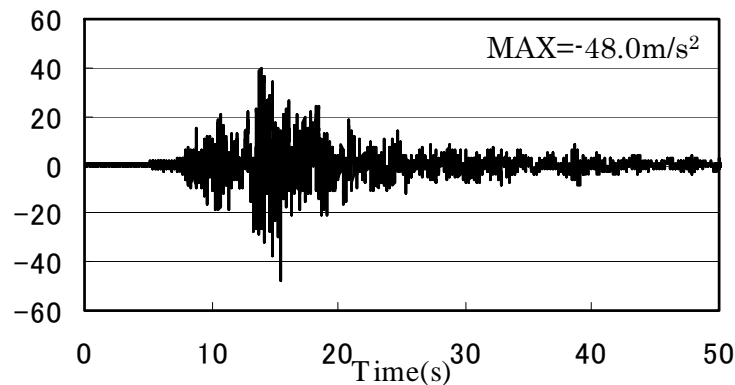
配管エルボの面内曲げ応力分布

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

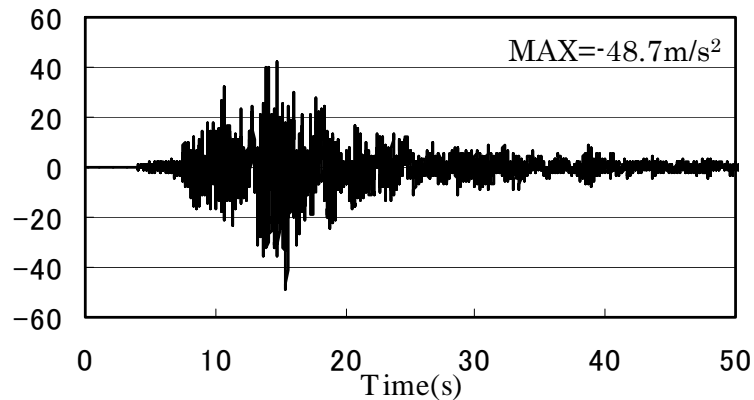
2.4 地震床応答の観測記録

建物により応答増幅した地震床応答の観測記録から弾塑性床応答スペクトルを計算した.

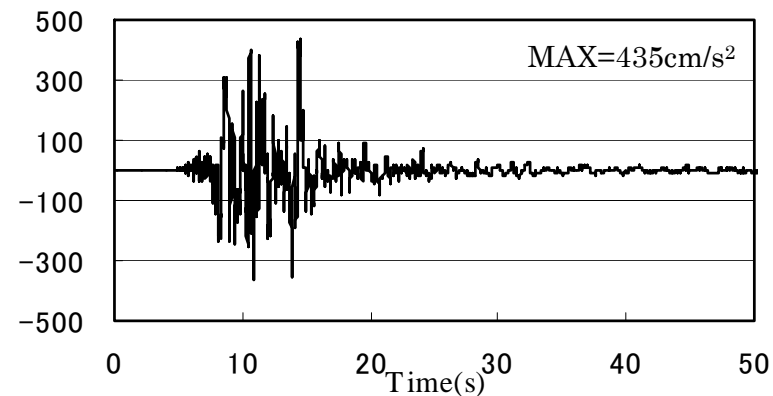
- 鳥取県西部地震(2000.10.06)の島根原子力発電所2号機(NS-2)原子炉建物
(1次固有周期:0.22s)床の観測記録
- 新潟県中越沖地震(2007.7.16)の柏崎刈羽原子力発電所7号機(KK-7)原子炉建物
(1次固有周期:0.43s)床の観測記録



The Western-Tottori Earthquake at NS-2 R/B ch24



The Western-Tottori Earthquake at NS-2 R/B ch26



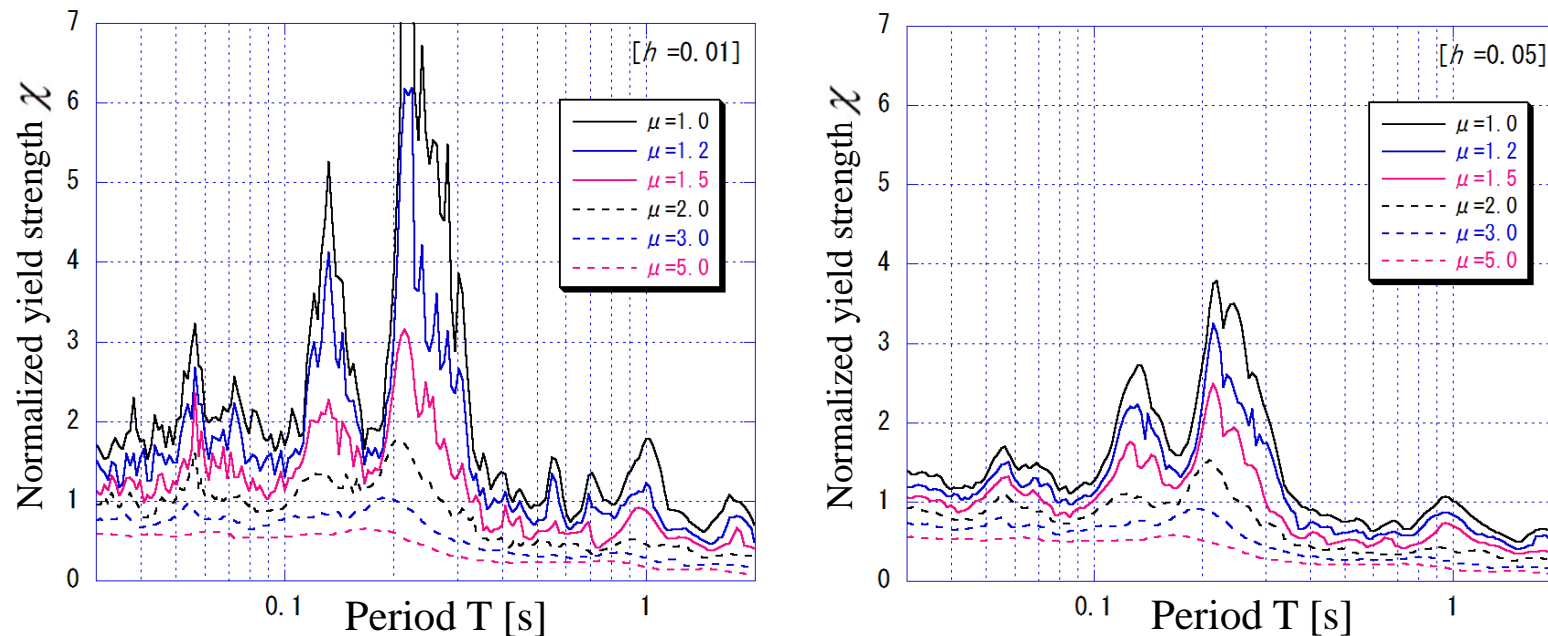
The Niigata-Chuetsu-Oki Earthquake at KK-7 R/B ch7R-1

床応答の時刻歴波形

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

2.5 地震床応答に対する1自由度系の弾塑性応答特性

7

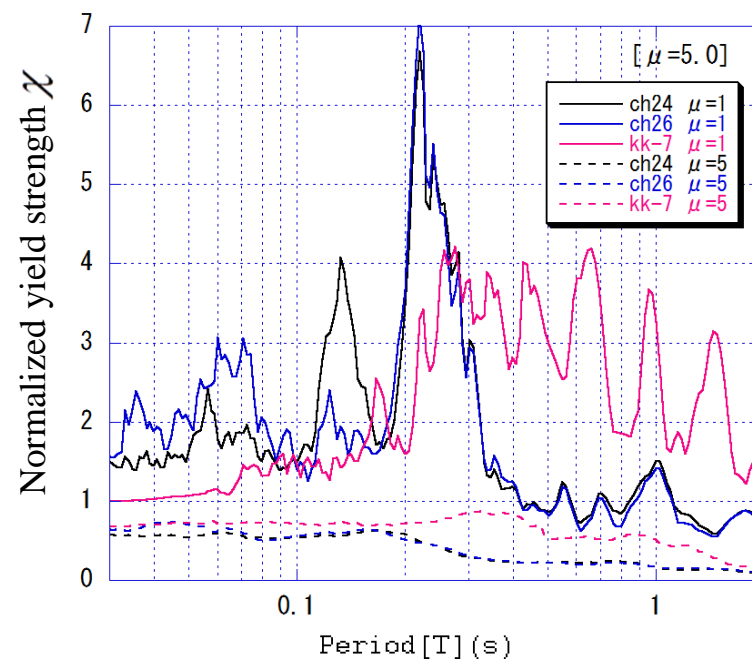
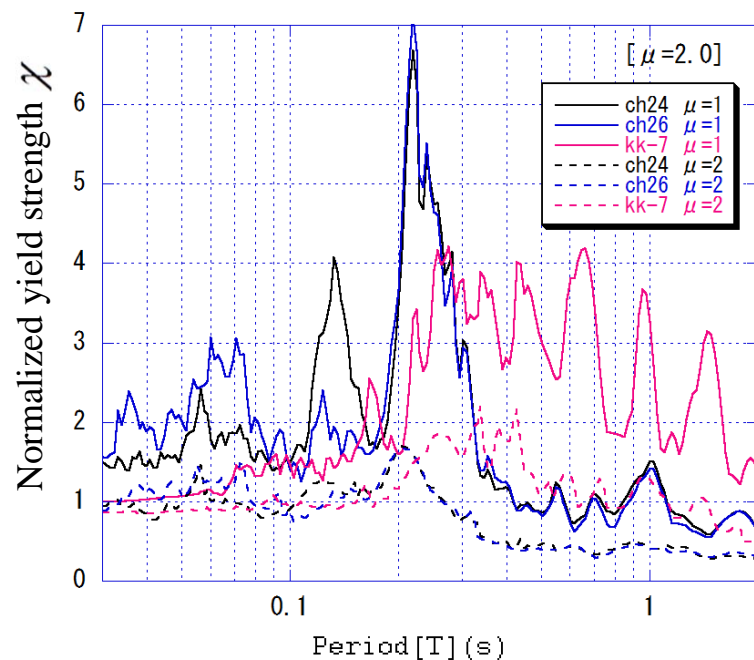


弾塑性床応答スペクトル [ch24, $\gamma=0.2$, $\mu=1.0\sim 5.0$, $h=0.01/0.05$]

- 許容する塑性率の増加に伴い系に必要な降伏耐力は減少する. 塑性率 $\mu=1.5$ 程度のわずかな塑性変形でも, 必要な降伏耐力が大きく低減する. さらに許容する塑性率を増加させると, 系に必要な降伏耐力は減少するが, その減少率は小さくなる.
- 許容する塑性率の増加に伴い, 系に必要な降伏耐力の固有周期依存性が小さくなり, 必要な外力基準化降伏耐力は約1, 即ち必要な降伏耐力は外力最大値 F_0 程度となる.

2. 機器・配管系の弾塑性応答特性

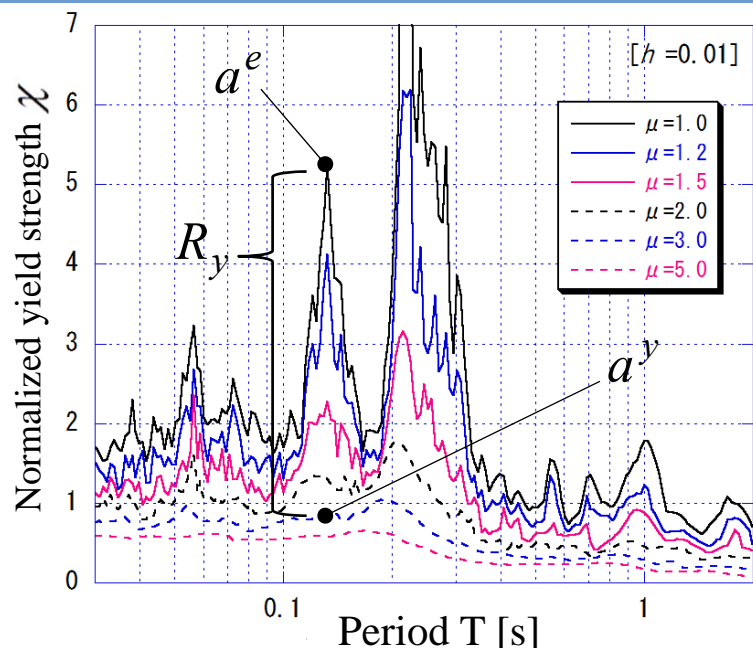
2.5 地震床応答に対する1自由度系の弾塑性応答特性



弾塑性床応答スペクトル[NS-2ch24/26/KK-7ch7R-1, $\gamma=0.2$, $\mu=2.0/5.0$, $h=0.02$]

- 前頁で確認した機器・配管系の弾塑性応答特性は、異なる地震、サイト、建物においても同じである。

3. 弾性設計した機器・配管系の耐震設計裕度



弾塑性床応答スペクトル[NS-2 ch24, γ=0.2, h=0.01]

- 降伏耐力低減係数

$$R_y \equiv \frac{a^e}{a^y(\mu)}$$
- 左の弾塑性床応答スペクトルの場合、許容塑性率を3程度とすると、降伏耐力低減係数は2~10程度である。

■ 弾性域及び塑性域の運動方程式より、以下の関係が成り立つ。

$$\mu(a^y, F(t)) = \mu(a^e / R_y, F(t)) = \mu(a^e, R_y F(t))$$

塑性率 μ の変形を許容する系に必要な降伏耐力は、系が弾性に止まるために必要な耐力 a^e の $1/R_y$ となる。

弾性設計した系(降伏耐力 a^e)が塑性率 μ に達する床応答は、設計に用いた床応答 $F(t)$ の R_y 倍となる。

■ 応答増幅領域にある機器・配管系を弾性設計した場合、非常に大きな耐震余裕を持つ。

- 塑性変形を許容すると、機器・配管系に必要な降伏耐力は低減し、許容する塑性変形を大きくするほど、必要な降伏耐力は低減する。
- 機器・配管系に必要な降伏耐力の低減は、特に応答増幅領域で大きい。その結果、塑性率3程度の変形で系に必要な降伏耐力は固有周期に係わらず、設置床における外力の最大値(床の最大応答加速度×質量)程度となる。
- 弾塑性床応答スペクトルを用いると、系の降伏耐力から耐震裕度を容易に概算することができる。
- 床応答スペクトルの応答増幅領域で弾性設計した機器・配管系に塑性率3程度の変形を許容すると、その余裕は弾性設計した地震動の数倍にもなる。

- (1) Chopra, A. K. (2011). Dynamics of Structures, 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, USA, pp.257-305.
- (2) Newmark, N. M., Inelastic design of nuclear reactor structures and its implication on design of critical equipment, Proceedings of International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(1977), K 4/1.
- (3) 田村伊知郎, 松浦真一, 弾塑性応答スペクトルに基づく機器の弾塑性特性に関する考察, JSME Dynamics and Design Conference 予稿集, No.512(2011).
- (4) 田村伊知郎, 松浦真一, 地震力に対する機器・配管系の弾塑性応答評価法(一自由度系の弾塑性応答特性の考察), 日本機械学会論文集, Vol.82, No.835 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00467.
- (5) 東北電力, 東京電力ホールディングス, 中部電力, 日本原子力発電, 地震観測記録
- (6) Veletsos, A. S. and Newmark, N. M. (1960). “Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions,” Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Vol.2, pp.895-912.

Thank you for your attention !

