



機械設備の所要耐カスペクトルと静的耐震設計

2021年 9月 13日

落合 兼寛

(一般社団法人) 原子力安全推進協会



目的と背景

目的： 塑性領域を考慮した簡易耐震設計手法の検討

Newmarkが提案した塑性域の簡易評価法
地震デマンドを低減した応答スペクトル：

(適用範囲：許容塑性率3～8程度)

Inelastic Design Spectra

応答絶対加速度の低減率

塑性率： μ

< 2 Hz : μ
(変位一定則)

2 - 8 Hz : $\sqrt{2\mu - 1}$
(エネルギー一定則)

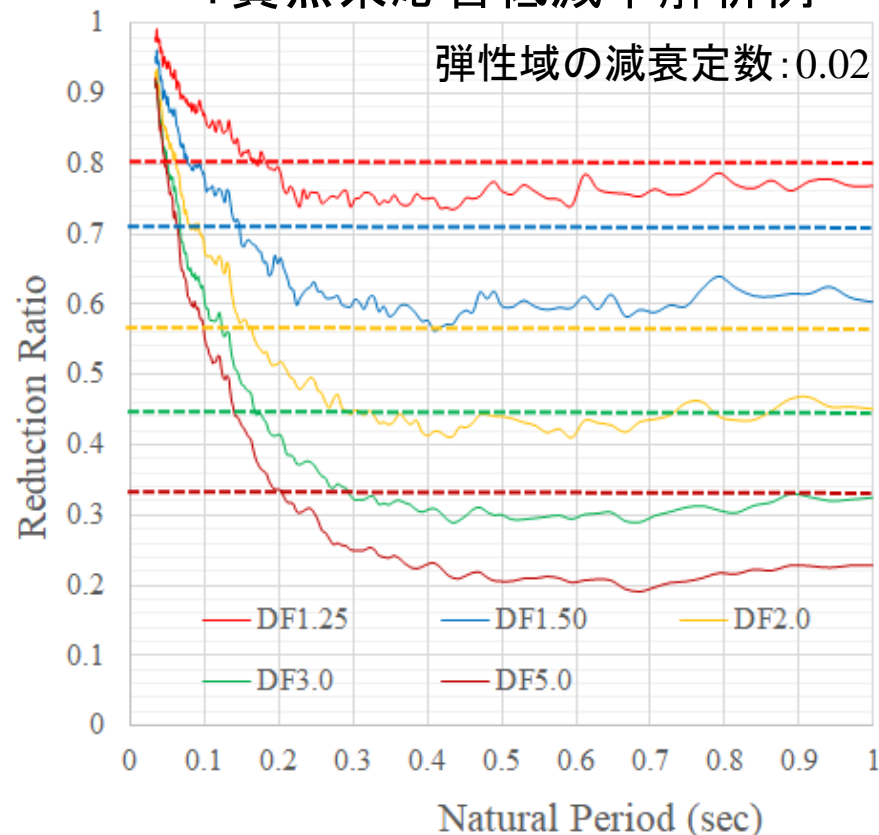
8 - 33 Hz : べき関数で内挿

課題：

「非弾性エネルギー吸収係数」
の振動数依存性

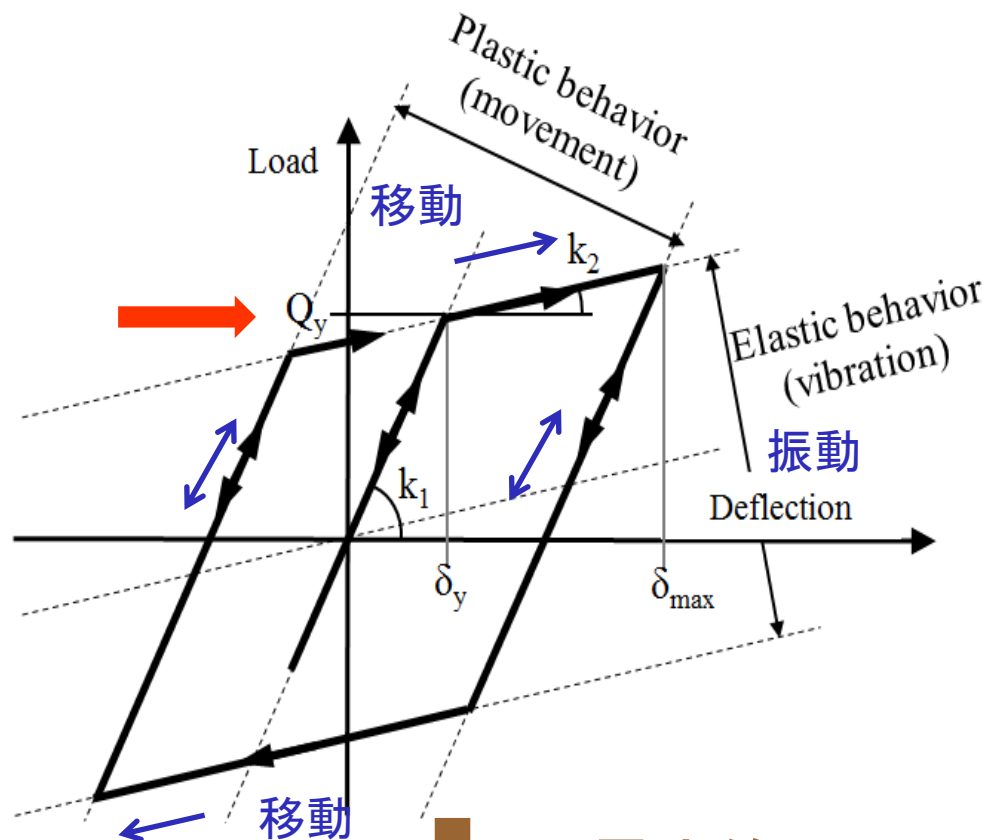
高振動数領域の評価と対策

1質点系応答低減率解析例



所要耐カスペクトル

動的 荷重-変形特性 (バイリニア型)



構造系を決定する定数

初期剛性 $k_1 = \frac{4 \pi^2 W}{T^2 g}$

T: 固有周期 W: 重量

二次剛性 k_2

減衰定数 h (弾性域)

降伏耐力 $Q_y = \alpha W$

α : 降伏層せん断力係数
(機械設備の静的震度に相当)

地震応答

応答塑性率

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

所要耐カスペクトル

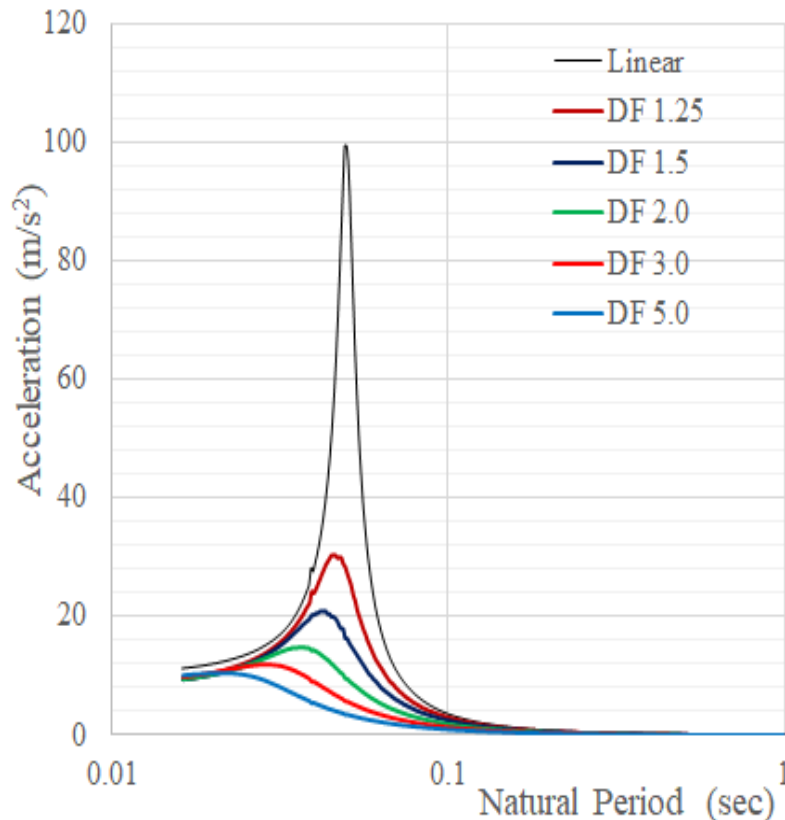


(絶対加速度)応答スペクトルと所要耐カスペクトル

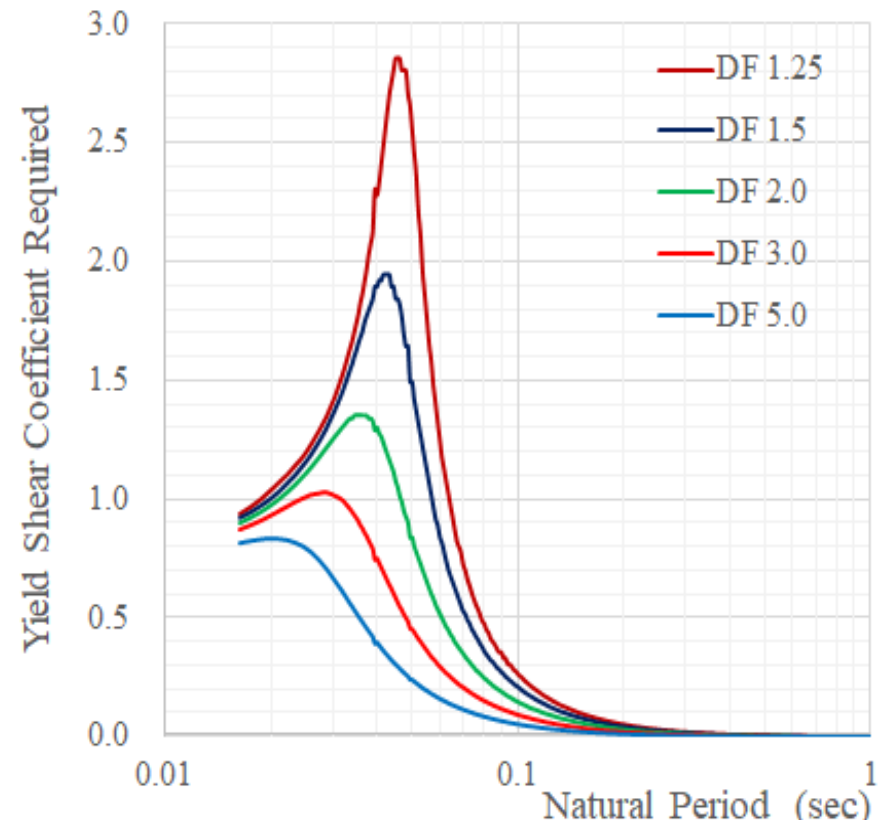
1質点バイリニアモデル： 弾性域減衰定数 0.05
2次剛性比率 0.05

加振条件： 20Hz正弦波、最大加速度 10 m/s²、10サイクル

絶対加速度応答スペクトル



所要耐カスペクトル



検討用地震動

観測記録(地上波) 52波形

気象庁震度階が「7」及び「6強」に近い地震動(K-NET、KiK-net)

番号	地震(観測点)	最大加速度 (Gal)					K-NET/KiK-net 整理番号
		NS	EW	UD	3方向合成	2方向合成 (NS & EW)	
W 01	2008年岩手・宮城内陸地震(一関西)	1,143	1,433	3,866	4,022	1,434	IWTH250806140843
W 02	2011年東北地方太平洋沖地震(築館)	2,700	1,268	1,880	2,933	2,765	MYG0041103111446
W 03	2008年岩手・宮城内陸地震(東成瀬)	1,319	2,449	1,094	2,599	2,482	AKTH040806140843
W 04	2011年東北地方太平洋沖地震(塩竈)	758	1,969	501	2,019	1,970	MYG0121103111446
W 05	2011年東北地方太平洋沖地震(日立)	1,598	1,186	1,166	1,845	1,844	IBR0031103111446
W 06	2011年東北地方太平洋沖地震(仙台)	1,517	982	290	1,808	1,807	MYG0131103111446
W 47	2011年東北地方太平洋沖地震(須賀川)	672	493	298	684	675	FKS0171103111446
W 48	2011年東北地方太平洋沖地震(浪江)	394	660	266	663	661	FKSH201103111446
W 49	平成30年北海道胆振地方中東部の地震(鶴川)	388	661	335	662	662	HKD1261809060308
W 50	2011年東北地方太平洋沖地震(三春)	578	507	360	631	616	FKSH181103111446
W 51	2011年東北地方太平洋沖地震(古川)	444	572	239	586	583	MYG0061103111446
W 52	2011年東北地方太平洋沖地震(岩沼)	411	353	254	434	429	MYG0151103111446

2000年鳥取県西部地震、2003年宮城県沖地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2011年静岡県東部地震、2013年栃木県北部地震、平成28年熊本地震、平成30年北海道胆振地方中東部の地震、

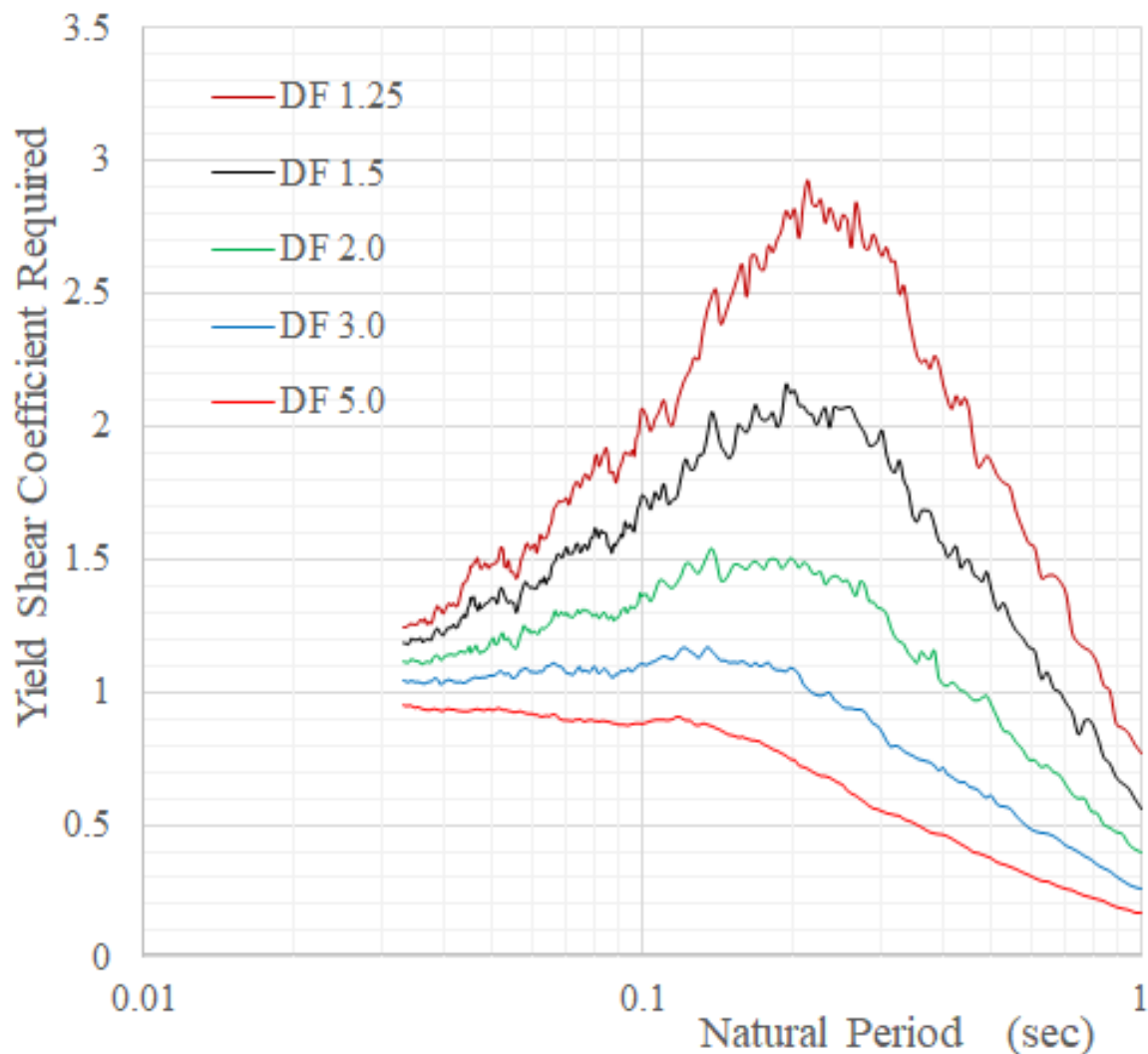
水平方向 NS 及び EWを最大加速度発生方向に合成し1自由度系に入力

ZPA : 最大値 2,765 Gal 最小値 429 Gal



検討用地震動の所要耐カスペクトル

52 観測波形 に対する 1質点系の応答平均値



1質点系モデル

バイリニア型復元力特性

弾性域減衰定数: 0.05

2次剛性比率: 0.05

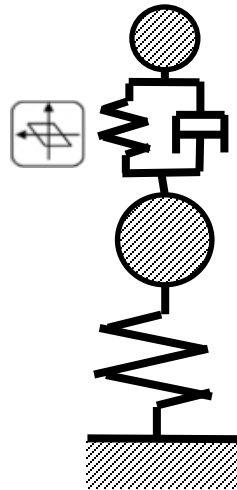


建物からの地震入力影響評価

2質点モデルによる機械設備弾塑性地震応答

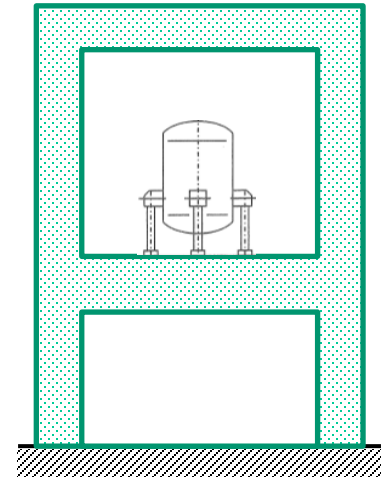
質点2
(機械設備)

質点1
(建物等支持構造物)



部材2
(復元力特性:
バイリニア型)

部材1
(復元力特性:
線形)



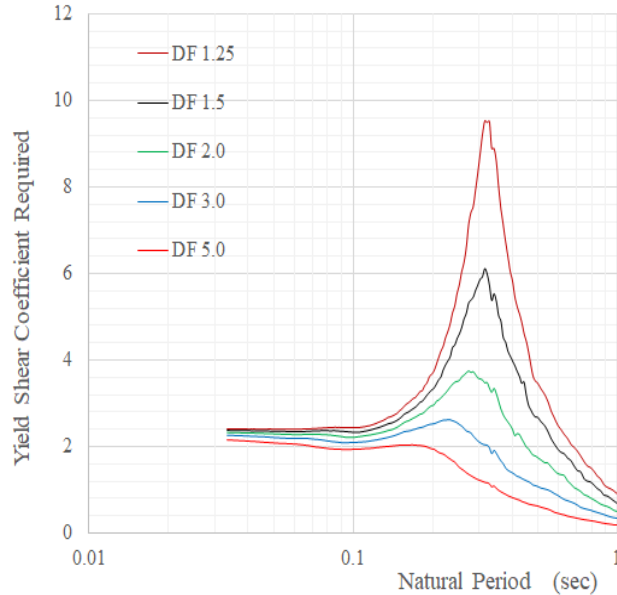
解析諸元

	質点1 (部材1)	質点2 (部材2)
質量	100, 000 ton	100 ton
固有振動数(弾性域)	3 Hz, 6 Hz, 10 Hz, 20 Hz	1 Hz ~ 30 Hz
減衰定数(弾性域)	0.05	0.02
荷重-変形特性	線形	バイリニア型(2次剛性比:0.05)
目標塑性率	— (1.0)	1.25, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0

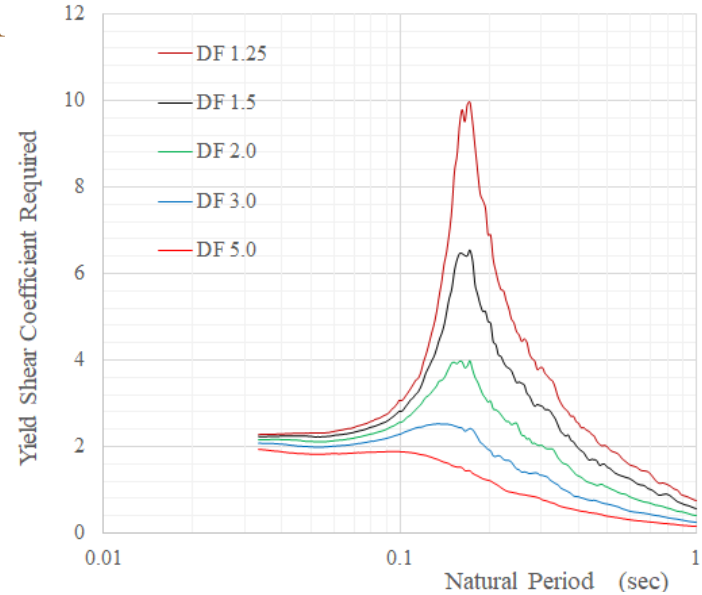


質点2(機械設備)の所要耐カスペクトル解析例

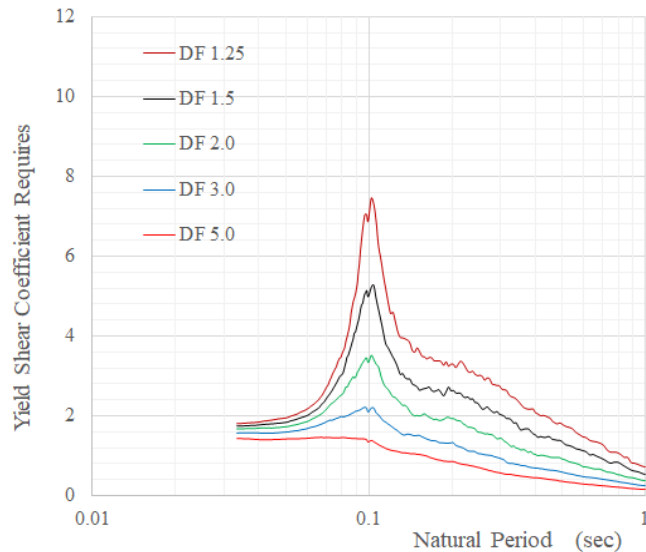
質点1
3 Hz



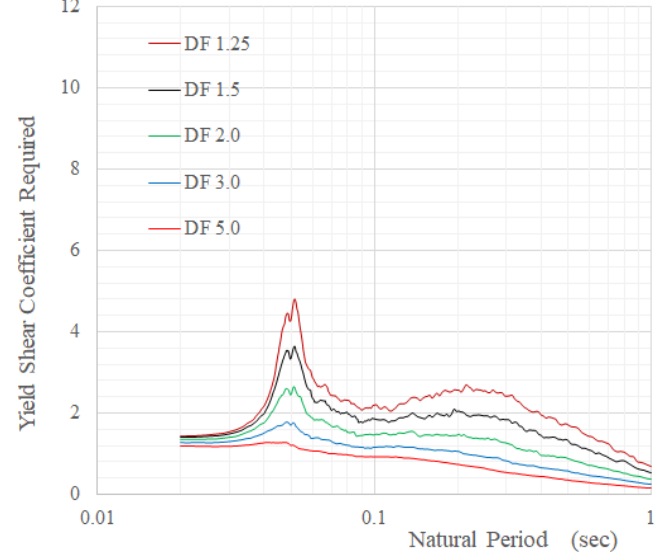
質点1
6 Hz



質点1
10 Hz



質点1
20 Hz



塑性領域：所要耐カスペクトルと静的震度設計

弾性領域：絶対加速度応答スペクトルと静的震度設計

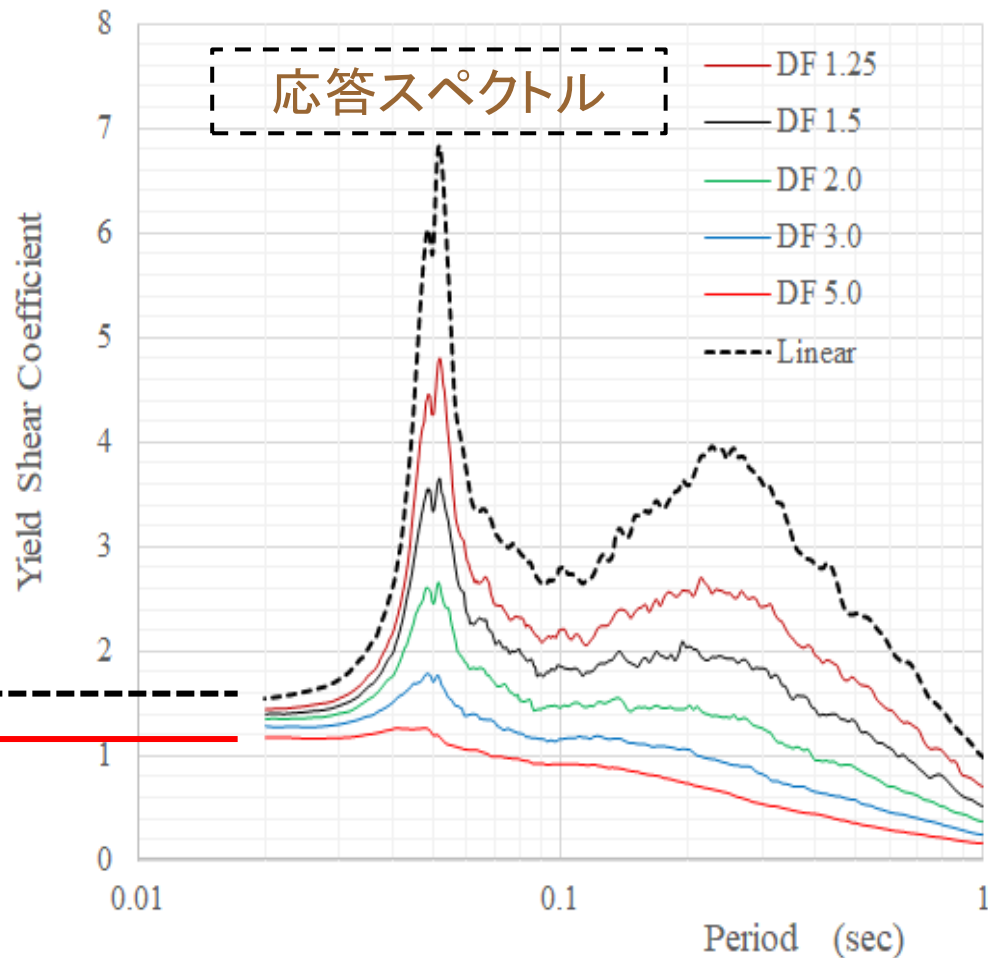
所要耐カスペクトル

例 質点1固有振動数：20Hz

弾性領域の静的震度

塑性領域の静的震度

目標塑性率 5.0



限界状態の評価で目標塑性率が5程度以上の構造物については、
全固有振動数領域で静的震度による簡易的な耐震設計が可能

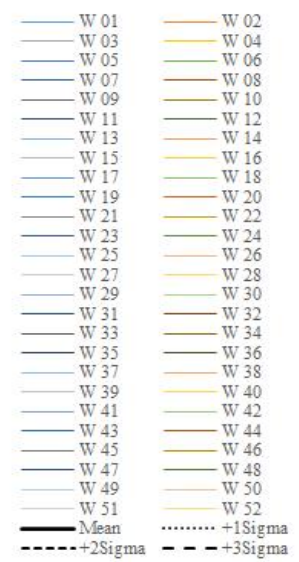
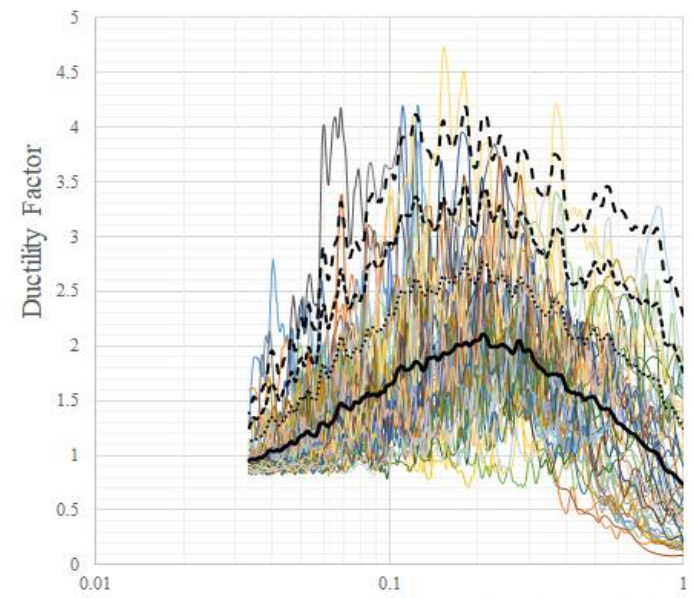
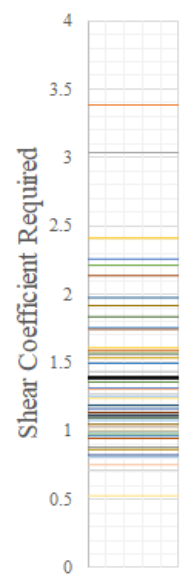


塑性領域の静的震度 → 応答塑性率スペクトル (1)

1質点系モデル

ケースA

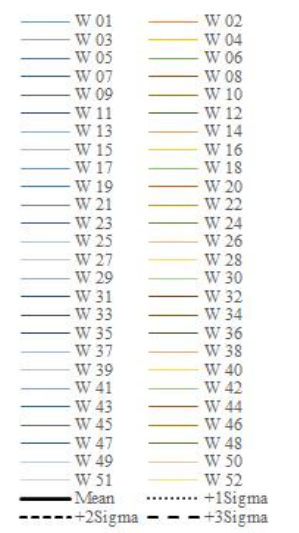
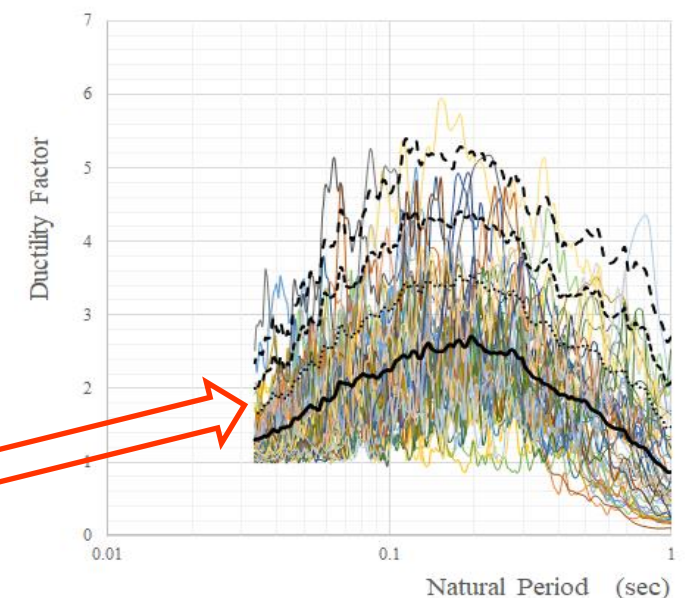
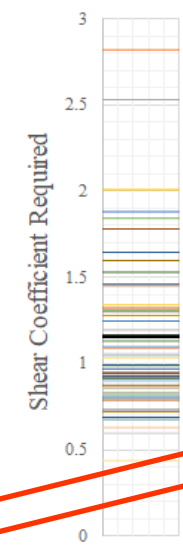
静的震度: ZPAの1.2倍



静的震度

ケースB

静的震度: ZPAの1.0倍



高振動数域で
過剰な設計要求



塑性領域の静的震度 → 応答塑性率スペクトル (2)

1質点系モデル

高振動数域での過剰な設計要求 → 静的震度の適正化



「有効最大加速度値」概念の導入

ケースC

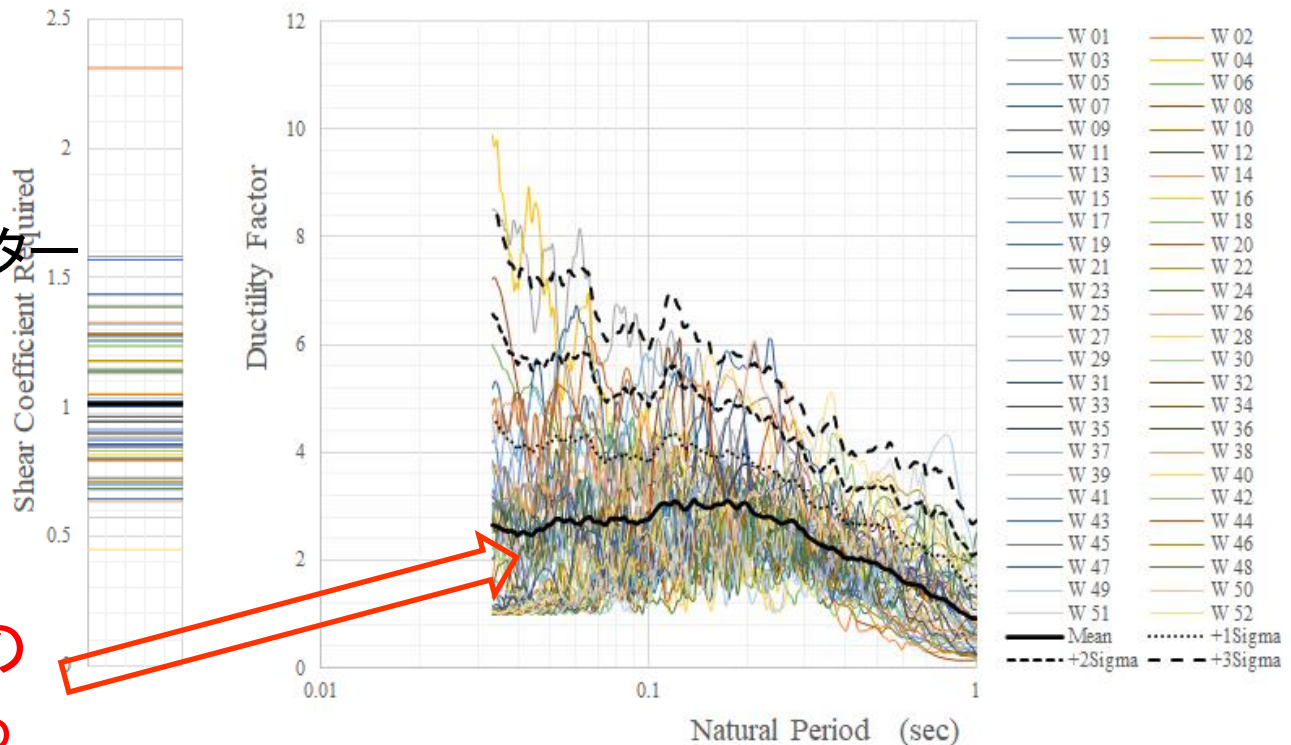
静的震度:

10Hz

ハイカットフィルター

後の

ZPAの1.0倍



高振動数域での改善が見られる

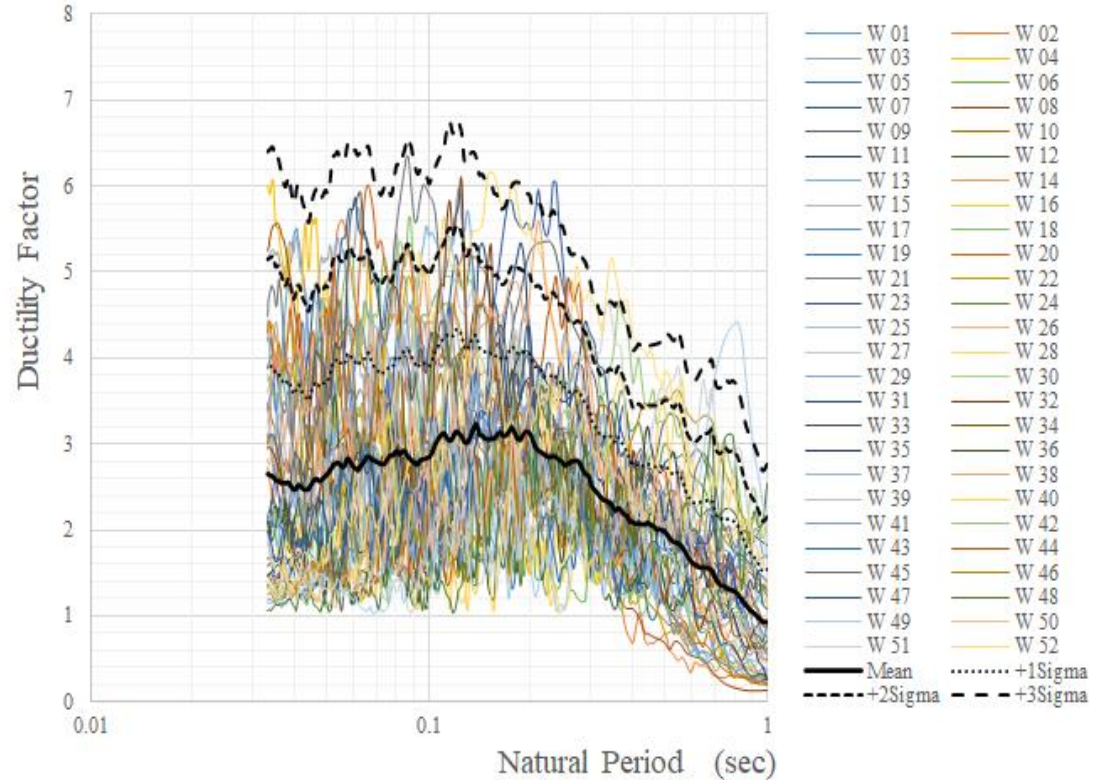
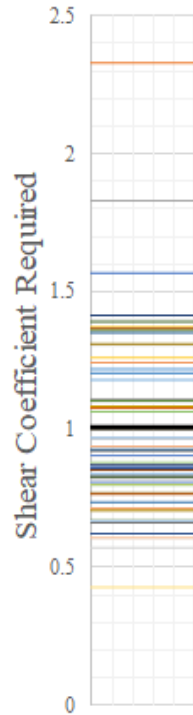
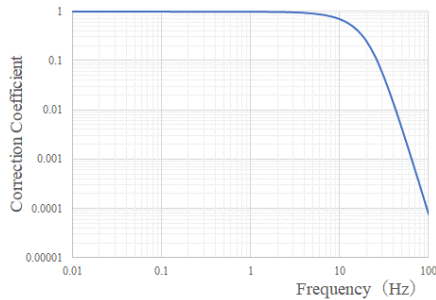


塑性領域の静的震度 → 応答塑性率スペクトル (3)

1質点系モデル

ケースD

静的震度:
気象庁計測震度の
ハイカットフィルター
後の
ZPAの1.0倍



ZPA値(単位:G)

波形No	観測記録	原波形 (a)	フィルター後 (b)	b / a
W04	2011年東北地方太平洋沖地震(塩竈)	2.01	1.37	0.68
W03	2008年岩手・宮城内陸地震(東成瀬)	2.53	1.83	0.72
W06	2011年東北地方太平洋沖地震(仙台)	1.84	1.36	0.74

結 言

塑性領域を考慮した簡易耐震設計手法の検討を目的として、「所要耐カスペクトル」の特性を考慮した静的震度を用いた耐震設計法の可能性を検討した

1. 限界状態の評価で目標塑性率が3～5程度以上の構造物については、全固有振動数領域で静的震度による耐震設計が可能
2. 塑性領域の静的震度は、目標塑性率に応じて、ZPA（弾性領域の静的震度）より小さくなる
3. 観測波形の応答塑性率スペクトルは、同一の静的震度に対して高振動数領域では低下する（損傷し難い）傾向を示す
4. 入力波形にスパイクがあるような波形については、気象庁計測震度の算出に用いられているハイカットフィルターを用いることで、高振動数での余剰を排除できる

今後の課題

類別された機械設備に対する適用性評価とデータの蓄積
（限界状態を考慮した 構成要素の目標／許容塑性率の設定）



謝 辞

本研究では、(独立行政法人)防災科学技術研究所が提供しているK-NET及びKiK-netの地震観測記録を用いて地震応答解析を実施いたしました。ここに感謝申し上げます。

