



機械設備の

支持構造目標塑性率と地震デマンド低減効果 に関する一考察

2022年 9月 5日

落合 兼寛

(一般社団法人) 原子力安全推進協会

世界最高水準の安全性の追求 ~ たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



目的と背景

目的: 電気・機械設備 弾塑性領域の簡易耐震設計手法の検討 適用:比較的小さな塑性化範囲(許容塑性率3~8程度)



- 1 要素塑性率(キャパシティの指標)と全体塑性率(デマンドの指標)
- 2「非弾性エネルギー吸収係数」の振動数依存性(剛構造への適用性)
- 3 弾塑性地震応答の地震動特性依存(重要度係数の設定)

世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.

基礎ボルトのせん断荷重耐力試験(初通過破壊) 試験実施者:東京電力、実施場所:NIED兵庫耐震工学研究センター





ベースプレート 基礎台

柏崎刈羽1号原子炉建屋基礎版観測波形 (最大加速度 680Gal)の約1.9倍で加振

> 加速度0.25 Gで静的に設計した 基礎ボルトの破損が確認されたが 0.41 Gのボルトは破損しなかった



出典:第30回土木学会地震工学研究発表会論文集(2009年)

機器の基礎構造

- コンクリートに埋め込まれた基礎ボルトでも塑性変形(粘り)が期待できる
- ・基礎構造の塑性化によって、高振動数成分の入力が低減される可能性

<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



2質点系地震応答解析モデル



Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.

一般社団法人 **原ナガ女主推進協会** Japan Nuclear Safety Institute

2質点系地震応答解析モデル諸定数(入力値)

	要素1(支持構造)	要素2 (本体構造)		
質点質量	質点1:1 ton	質点2:10 ton		
要素単独の弾性域固有振動数 (Hz)	16.5、23.2、33.2、66.3Hz (質量11 ton の場合の 5、7、10、20 Hz に相当)		1 Hz ~ 30 Hz (265ステップ)	
弾性域 減衰定数	0.05	0.02		
部材の荷重-変位特性	バイリニアモデル			
1次剛性	要素(1質点-1部材要素)単独の固有振動数から算出			
2次剛性(対1次剛性比)	0.05	0.05		
目標塑性率	1(弾性)、1.5、3、5	-(指定せず)		
降伏せん断荷重(降伏耐力)	 目標塑性率から算出 (所要降伏耐力)	系の震度: 検討用地震ZPAの 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0倍		

検討用地震動: 観測記録(地表面での観測波) 56波形 気象庁震度階が「7」及び「6強」の地震動(K-NET、KiK-net) 水平2方向(NS 及び EWを)最大加速度発生方向に合成した1次元波 (ZPA: 最大値 2,765 Gal 最小値 429 Gal)

世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



2質点系地震応答解析モデル諸定数(入力値)

	要素1(支持構造)	要素2(本体構造)		
質点質量	質点1:1 ton	質点2:10 ton		
要素単独の弾性域固有振動数 (Hz)	16.5、23.2、33.2、66.3Hz (質量11 ton の場合の 5、7、10、20 Hz に相当)		1 Hz ~ 30 Hz (265ステップ)	
弾性域 減衰定数	0.05	0.02		
部材の荷重-変位特性	バイリニアモデル			
1次剛性	要素(1質点-1部材要素)単独の固有振動数から算出			
2次剛性(対1次剛性比)	0.05	0.05		
目標塑性率	1(弾性)、1.5、3、5	-(指定せず)		
降伏せん断荷重(降伏耐力)	目標塑性率から算出 (所要降伏耐力)	系の震度: 検討用地震ZPAの 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0倍		

検討用地震動: 観測記録(地表面での観測波) 56波形 気象庁震度階が「7」及び「6強」の地震動(K-NET、KiK-net) 水平2方向(NS 及び EWを)最大加速度発生方向に合成した1次元波 (ZPA: 最大値 2,765 Gal 最小値 429 Gal)

世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



支持構造1次剛性と応答スペクトル解析例



2質点系1次固有周期に対するスペクトル表示、本体降伏耐力設定用震度: 1.0 ZPA

世界最高水準の安全性の追求 ~ たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



支持構造1次剛性と応答スペクトル解析例



以降の解析結果は、支持構造剛性を7 Hz相当について例示する

<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.

2質点系地震応答解析モデル諸定数(入力値)

	要素1(支持構造)	要素2(本体構造)			
質点質量	質点1:1 ton	質点2:10 ton			
要素単独の弾性域固有振動数 (Hz)	23.2 Hz (質量11 ton の場合の 7 Hz に相当)		1 Hz ~ 30 Hz (265ステップ)		
弾性域 減衰定数	0.05	0.02			
部材の荷重-変位特性	バイリ	バイリニアモデル			
1次剛性	要素(1質点-1部材要素)単独の固有振動数から算出				
2次剛性(対1次剛性比)	0.05	0.05			
目標塑性率	1(弾性)、1.5、3、5	-(指定せず)			
降伏せん断荷重(降伏耐力)	目標塑性率から算出 (所要降伏耐力)	系の震度: 検討用地震ZPAの 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0倍			

検討用地震動: 観測記録(地表面での観測波) 56波形 気象庁震度階が「7」及び「6強」の地震動(K-NET、KiK-net) 水平2方向(NS 及び EWを)最大加速度発生方向に合成した1次元波 (ZPA: 最大値 2,765 Gal 最小値 429 Gal)

世界最高水準の安全性の追求 Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



応答スペクトル解析結果例 応答塑性率、応答絶対加速度



- ・本体構造単独の固有周期に対するスペクトル表示
- ・本体構造の降伏耐力:系の震度 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0 ZPA

世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved. 一般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute



応答スペクトル解析結果例 応答塑性率、応答絶対加速度



- ・本体構造単独の固有周期に対するスペクトル表示
- ・本体構造の降伏耐力:系の震度 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0 ZPA

世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.





要素塑性率と全体塑性率

本体構造応答塑性率(要素塑性率)解析



- ・支持構造固有振動数7Hz相当
- ・本体構造の降伏耐力:系の震度 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0 ZPA
- 支持構造の目標塑性率が1.5程度でも、本体構造の降伏耐力が震度換算で
 1.0 ZPA程度あれば、応答塑性率は大略5以下となる。
- 支持構造の目標塑性率が3程度では、本体構造の固有周期に大して安定化し、5程度となってもフラジリティ上の効果は顕著ではない

支持構造の要素塑性率、本体構造の降伏耐力が耐震性能の設計指標となる



「非弾性エネルギー吸収係数」の振動数依存性 課題2 本体構造応答加速度スペクトル解析結果(例) 40 弾性領域での評価 35 支持構造減衰定数:0.05 Absolute Acceleration (m/s²) 30 本体構造減衰定数:0.02 25 20 15 塑性領域での評価 支持構造目標塑性率:3 10 本体構造降伏耐力:1.0 ZPA -EL 1&2 Linear 5 支持構造固有振動数7 Hz相当 DF3.0, 1.0ZPA 0 0.01 0.1

機器の目標塑性率が3程度以上では、固有振動数に依存しない安定した応
 答が期待出来る → 静的震度法適用による簡易塑性域設計・評価が可能

Element 2 Natural Period (s)

・ 振動数に依存しない(剛構造領域でも)2倍以上の応答低減率が期待できる

<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



本体構造応答塑性率スペクトル 56地表観測波形(ZPA:2,765~429 Gal)



支持構造目標塑性率:3

W 29(2011年静岡県東部地震,富士宮観測点) W 37(2011年東北地方太平洋沖地震,馬頭観測点) W 09(平成28年熊本地震前震,益城観測点)

敷地条件等で特異波を除ける場合は、2倍程度で2シグマ達成

弾塑性領域の共振曲線による地震動周波数成分の影響評価

加速度正弦波(1~30 Hz)加振 (周波数応答)

- ・加振波形波数: 30サイクル (初期の20サイクルに漸増部)
- ・加速度加振レベル(5 Hz 加振時): 5段階 5、10、15、20、25 m/s²

(加振振動数に対して速度一定で変化)

世界最高水準の安全性の追求 ~ たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.





<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved. 一般社団法人 原子力安全推進協会
 Japan Nuclear Safety Institute

応答スペクトル/共振曲線比較例 本体構造応答加速度 応答スペクトル



支持構造目標塑性率:3 支持構造相当固有振動数:7 Hz 本体構造降伏耐力震度:1.0 G ・応答スペクトルは入力のス パイク的加速度値が寄与 する(波形特性に依存) ・スパイクの無い波形では、 加速度応答は2次剛性値 に対応する加速度値程度 以下に抑制される



世界最高水準の安全性の追求 ~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.



結 言

電気・機械設備を対象とした2質点系モデルを用いて,記録地震動による弾塑性 応答解析と正弦波形入力の弾塑性共振曲線の解析を実施し,簡易的な弾塑性耐震 設計法の策定に資する下記の知見が得られた.

- 支持構造の目標とする要素塑性率を3程度以上とすることによって(ディテール 設計),系の地震応答は安定化し(入力の周波数成分の影響を受け難くなり),弾 塑性領域での静的な荷重評価が可能となる。
- ② 本体構造は入力地震動の最大加速度値(1.0 ZPA)を静的な震度として算出される降伏耐力(降伏強度)以上に設計することにより、応答要素塑性率は 5 程度以下に抑えることができる.
- ③ ①及び②を満足する設備は、エネルギー吸収効果によって、応答絶対加速度が 弾性状態の 1/2 程度以下に低減され、系全体としての、より合理的な設計が可能となる。
- ④ 地震動入力の特性の変動に対しても、本体構造の応答加速度の最大値は降伏 荷重に関わる震度相当値を大きく上回ることはなく、施設の重要度係数は最大で も2程度が妥当と考えられる(今後、設計用地震動との関係を検討要).

今後,多種多様な電気・機械設備の本体構造及び支持構造を体系的に類別し,それらの構造特性に配慮した簡易的な弾塑性領域の耐震設計法の整備が課題と考えられる.(参考:米国土木学会規格 ASCE/SEI 7-22)





謝 辞

本研究では、(独立行政法人)防災科学技術研究所が公開している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。

<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.





検討用地震動

観測記録(地表観測波) 56波形 気象庁震度階が「7」及び「6強」の地震動(K-NET、KiK-net)

		最大加速度 (Gal)			K-NET/KiK-net		
番号	地震 (観測点)	NS	FW	ID	3方向合成	2方向合成	整理番号
		IND .	LW	00		(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(塩竃)	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 07	2011年東北地方太平洋沖地震(鉾田)	1,355	1,070	811	1,762	1,614	IBR0131103111446
W 08	2004年新潟県中越地震(十日町)	1,716	850	564	1,750	1,747	NIG0210410231756
W 09	平成28年熊本地震前震(益城)	760	925	1,399	1,580	925	KMMH161604142126
W 10	2003年宮城県沖地震(牡鹿)	1,103	1,112	825	1,571	1,566	MYG0110305261824
W 11	平成30年北海道胆振地方中東部の地震(追分)	1,316	929	1,060	1,505	1,428	IBUH011809060308
W 12	2004年新潟県中越地震(小千谷)	1,147	1,308	820	1,501	1,500	NIG0190410231756
W 51	2011年東北地方太平洋沖地震(須賀川)	672	493	298	684	675	FKS0171103111446
W 52	2011年東北地方太平洋沖地震(浪江)	394	660	266	663	661	FKSH201103111446
W 53	平成30年北海道胆振地方中東部の地震(鵡川)	388	661	335	662	662	HKD1261809060308
W 54	2011年東北地方太平洋沖地震(三春)	578	507	360	631	616	FKSH181103111446
W 55	2011年東北地方太平洋沖地震(古川)	444	572	239	586	583	MYG0061103111446
W 56	2011年東北地方太平洋沖地震(岩沼)	411	353	254	434	429	MYG0151103111446

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

<u>世界最高水準の安全性の追求</u>~たゆまぬExcellenceをめざして~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved.

