

第2部 パネル討論

「地震に関する国民の不安にどう対処するか」

ー設計経験者の視点からの問題提起ー

落合 兼寛

日本原子力技術協会 テクニカルアドバイザー

問題Ⅰ： 耐震設計(工学)は

理解されるか？

どの程度

理解されているか？

理解され得るか？

新潟県中越沖地震に関する よくある質問 ①

「想定を超える地震動」でも

原子力発電所の耐震設計手法で設計された

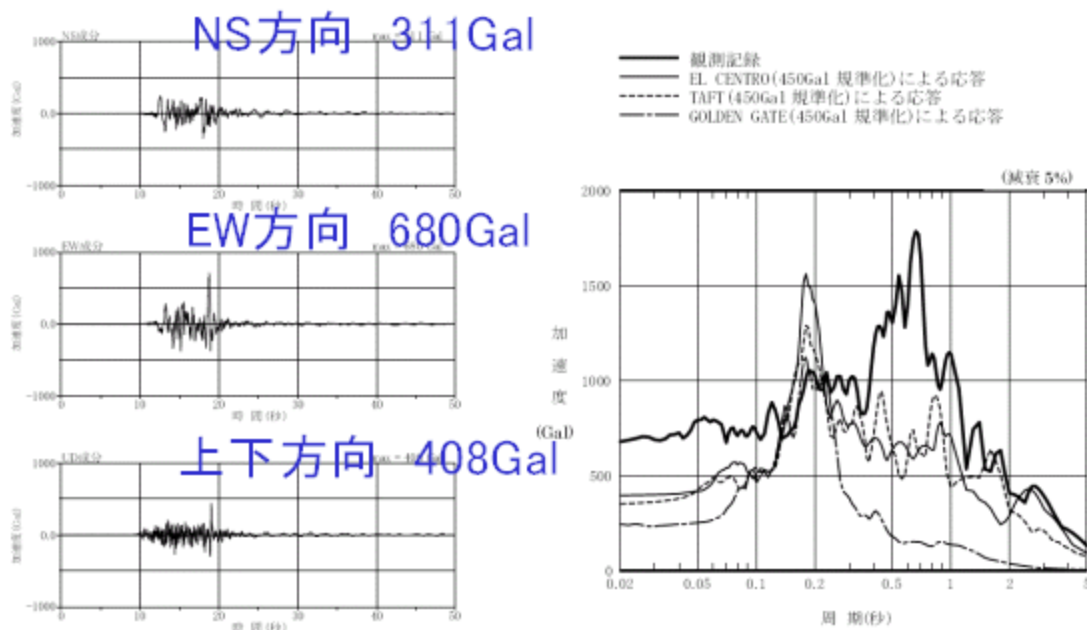
建物内の設備が壊れなかったのはなぜか？

私は次のように考えています

視点

「想定を超える地震動」で 設備には
どの程度の地震荷重が加わったのか

1号機原子炉建屋基礎版上の観測波形



時刻歴加速度波形

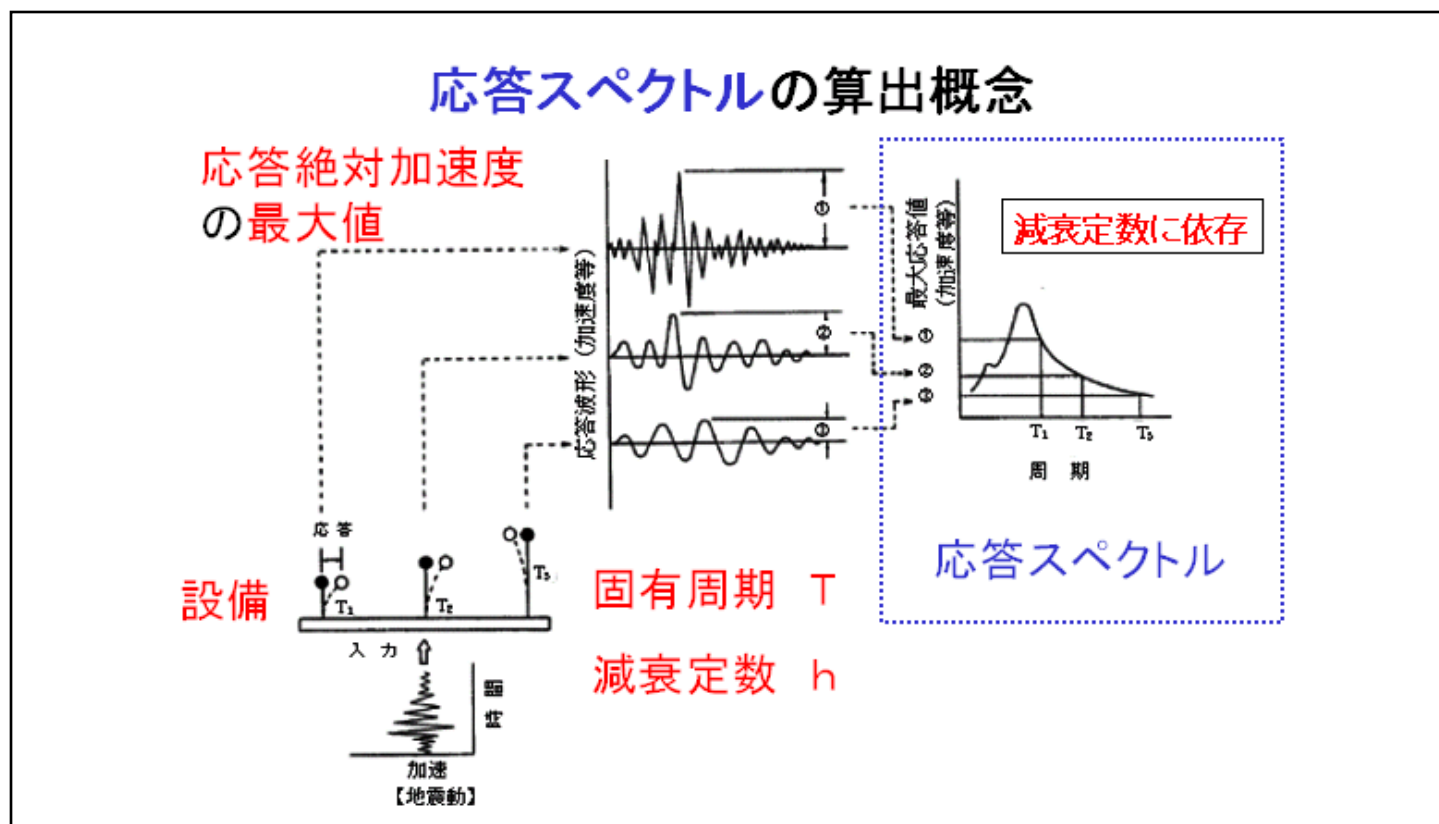
床応答スペクトル(EW)

平成19年7月30日東京電力がホームページ上で公開

用語

応答スペクトルは設備の耐震設計に使用する値(絶対加速度最大値)を表している

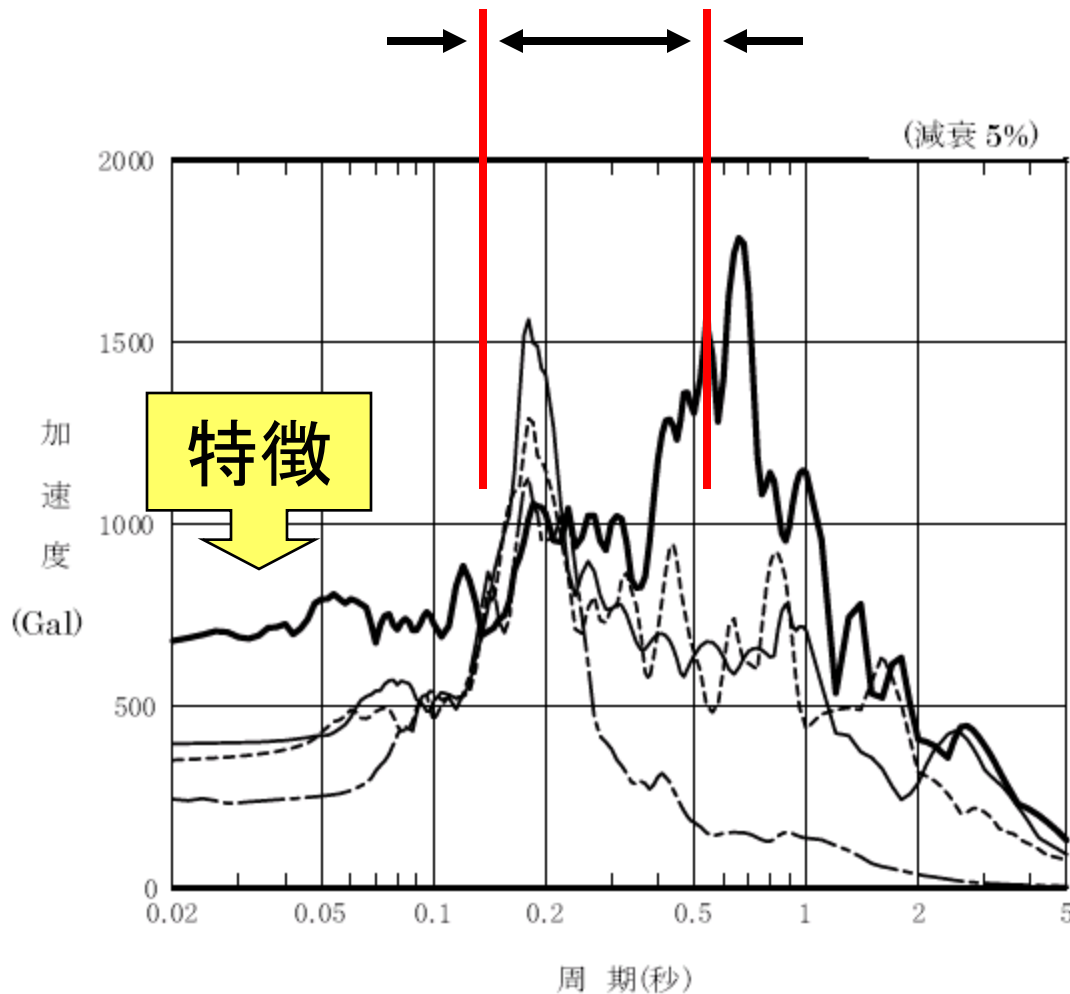
フーリエスペクトルなどの波形分析結果とは異なる
— 多くの人が誤解 —



宮城県沖地震に関する東北電力のホームページより

1号機原子炉建屋基礎版上の設備の荷重

剛領域 共振領域 柔領域

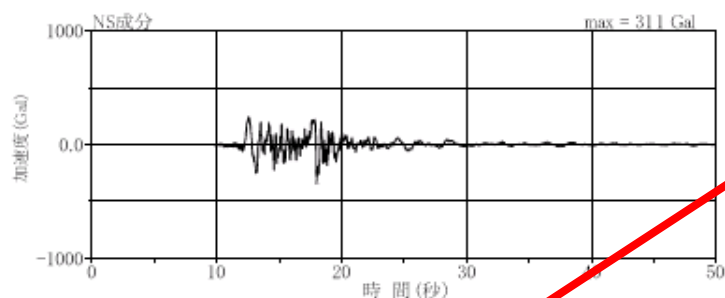


剛構造設計を基本
方針としているの
で柔領域の設備は
限定的

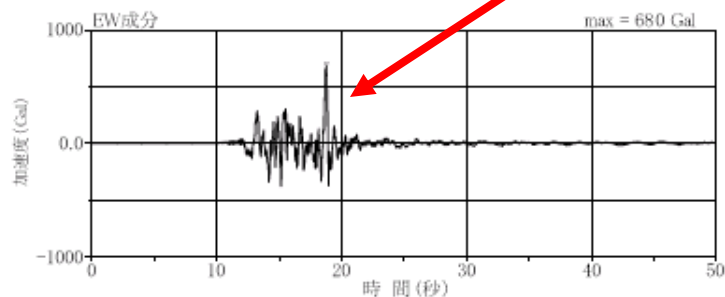
共振領域では建物と
の共振を動的解析
の余裕で対応

剛領域にはパルス波
の特徴が出ている

「想定を超える揺れ」による荷重の特徴



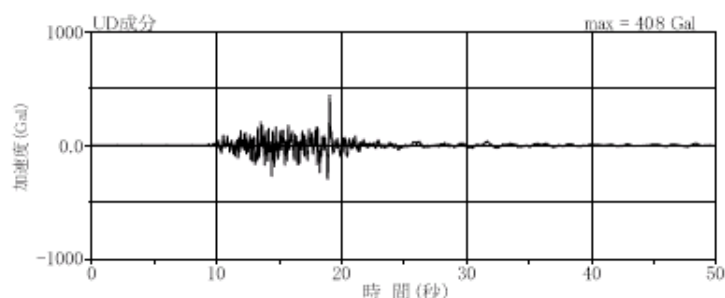
比較的周期の長い
パルス状の加速度波形



EW方向

建屋の基礎版上でも観測

1号機では680Gal

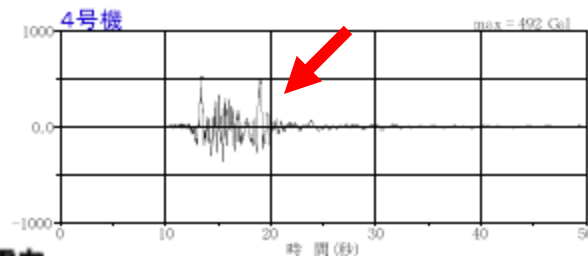
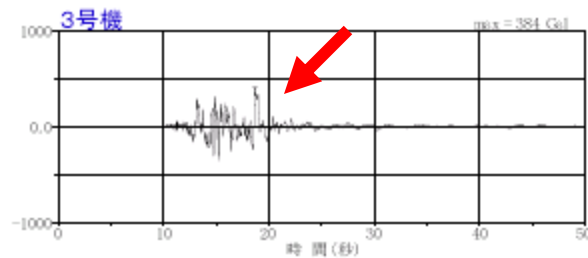
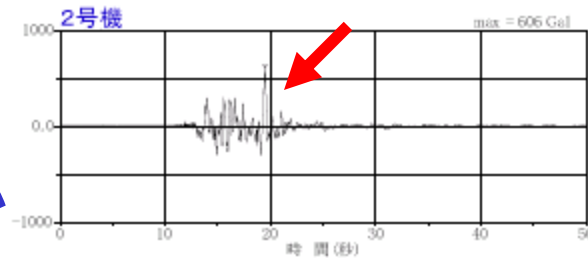
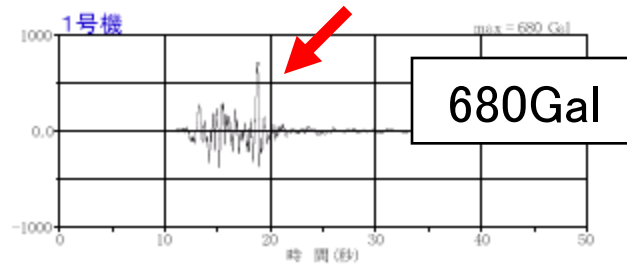


1号機原子炉建屋基礎版上

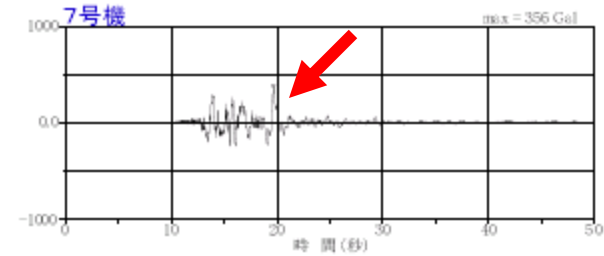
直下地震でこのようなパルス波が断層の破壊方向に発生する場合は
1995年1月17日の兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)
でも知られている

原子炉建屋基礎版EW方向の観測波形(号機比較)

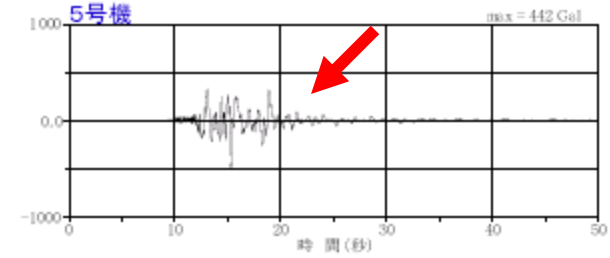
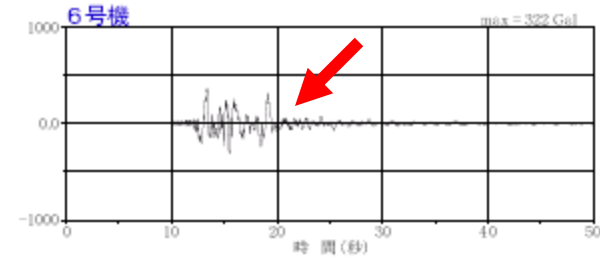
1号機



4号機



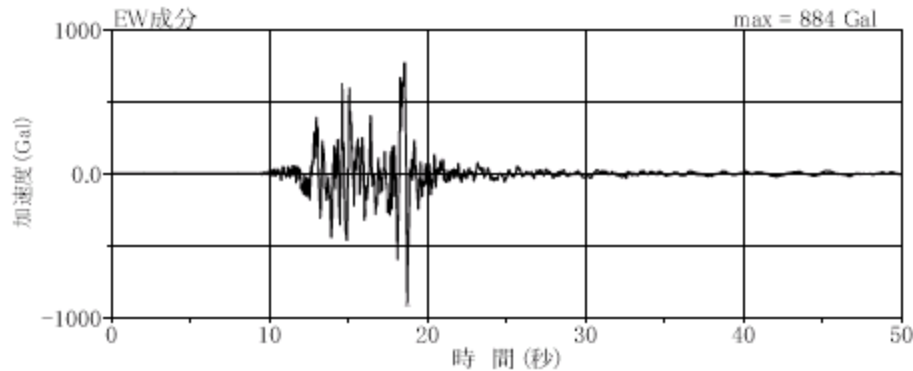
7号機



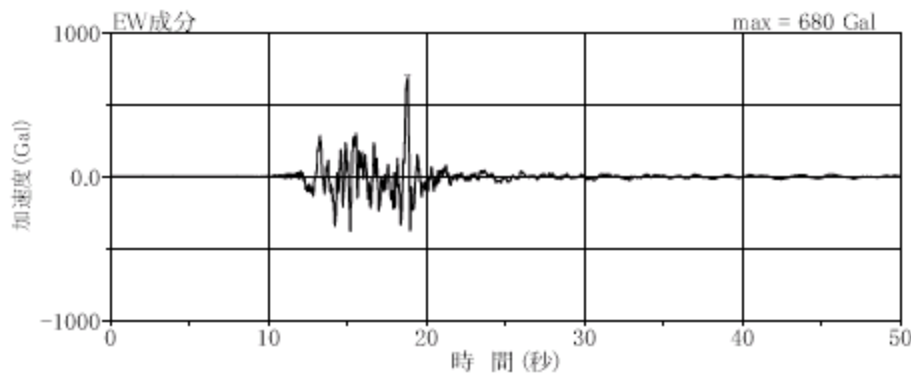
5号機

- ・不規則波と指向性のあるパルス波が組み合わされている
- ・継続時間が短い
→荷重の繰返し数は小さい

長周期パルス波に対する原子炉建屋の応答



1号機原子炉建屋2階



1号機原子炉建屋基礎版

動的構造設計の基本

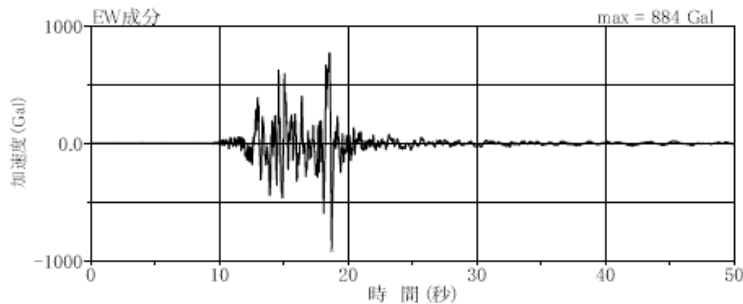
「動的、衝撃的の作用は衝撃係数」

「繰返し作用は疲労係数」

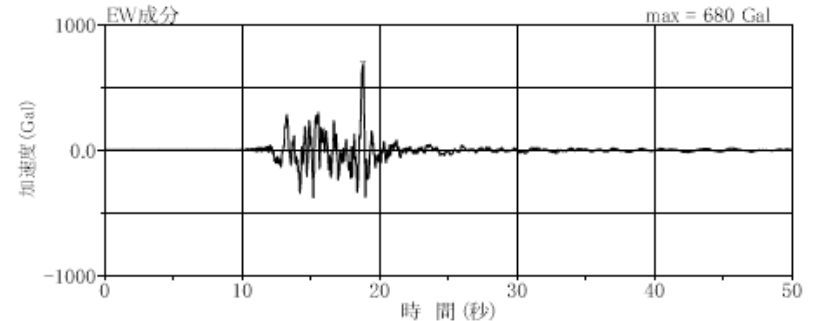
現在の原子力発電所耐震設計の基礎を築いた武藤清博士の言

出典:「構造物の動的設計」

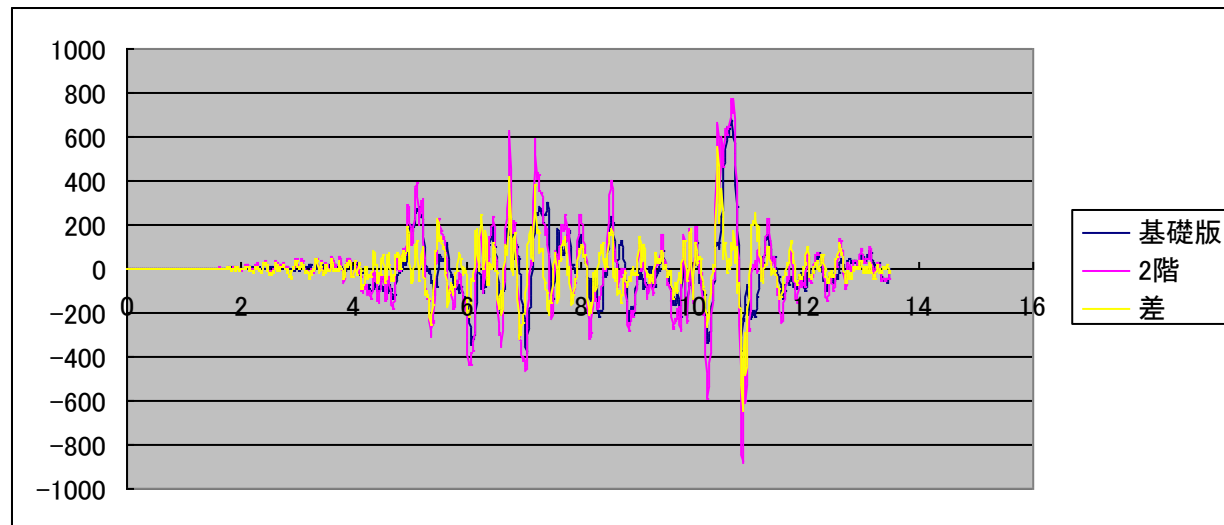
建屋の振動挙動(1号機原子炉建屋)



建屋2階の応答絶対加速度



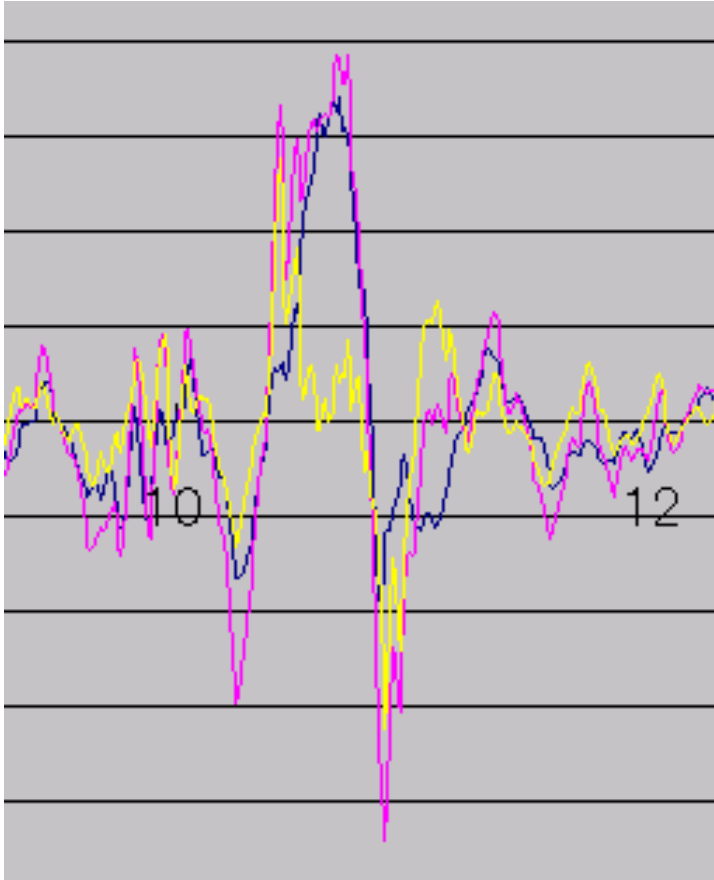
基礎版の応答絶対加速度



地動加速度を差し引いた建屋自体の応答(相対加速度の差)

新潟県中越沖地震長周期パルス波の特色

ー建屋内設備の耐震設計の視点からー

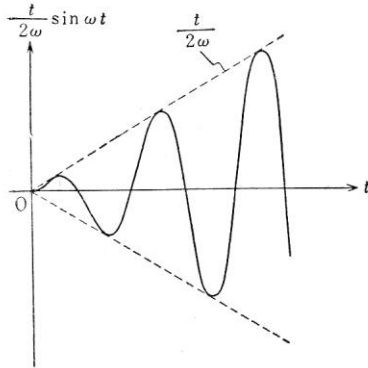


パルス部拡大図

- ・**パルス**は長周期(原子炉建屋の2サイクル程度継続)であり建物を振動させている
- ・建屋内のパルス波の立ち上がり部は緩やか
→建屋内設備の**衝撃係数**は小さい
- ・建屋の自由振動は急速に減衰している
→軟質岩盤に設置され、地中に深く埋め込まれた原子炉建屋の**減衰定数**は極めて大きい(**地下逸散減衰**)

長周期パルス波が構造物に与える影響

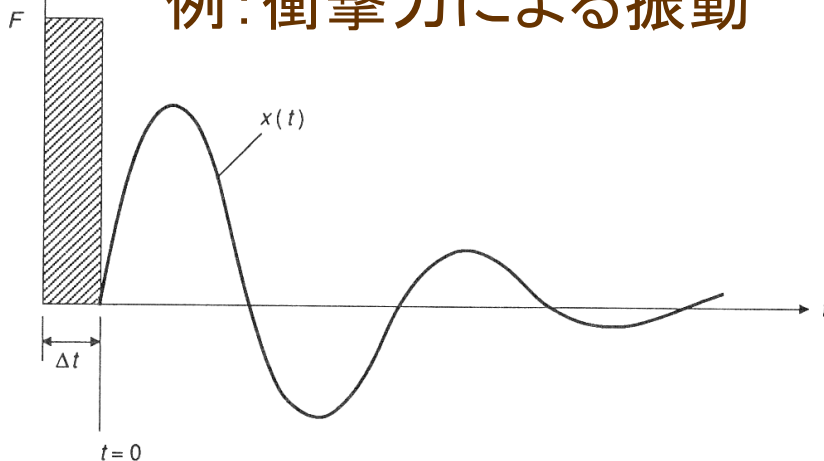
統計的地震動想定(ランダム波)



- ・構造物の振動が成長
(地震動では3～4倍)
- ・建屋内設備が建物と共振するとエネルギー蓄積されて破壊に至る(低サイクル疲労破壊)

長周期強震動想定(パルス波)

例: 衝撃力による振動



- ・構造物は自由振動し、減衰して静定
- ・エネルギーは蓄積されず、加速度破壊に類似(終局耐力ではダクティリティが重要)
- ・減衰の大きな系では疲労破壊には至らない

1号機原子炉建屋内設備の地震荷重レベル

「想定を超える基準地震動を受けた」安全設備の荷重レベル

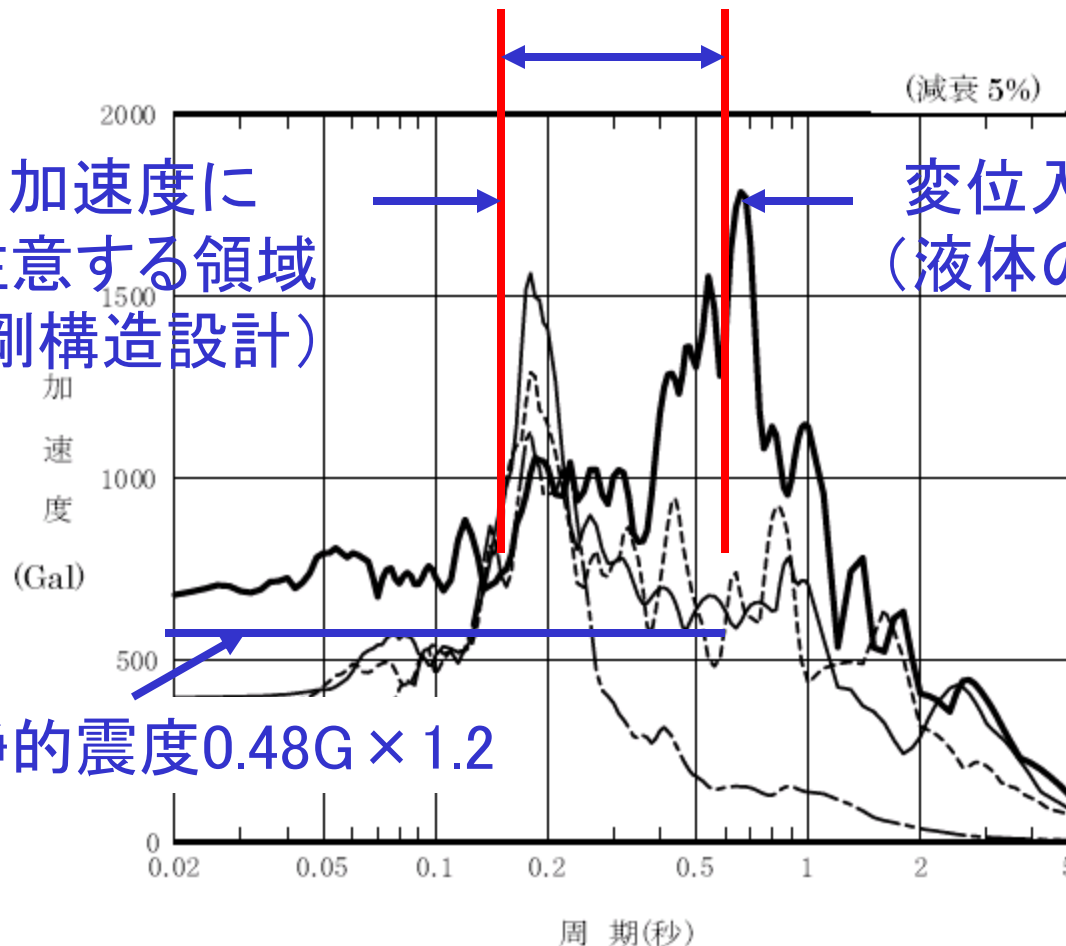
エネルギー(速度)に
注意する領域

: 耐力の余裕
+ 動的解析の余裕

加速度に
注意する領域
(剛構造設計)

変位入力に注意する領域
(液体の揺動、排気塔など)

静的震度0.48G × 1.2



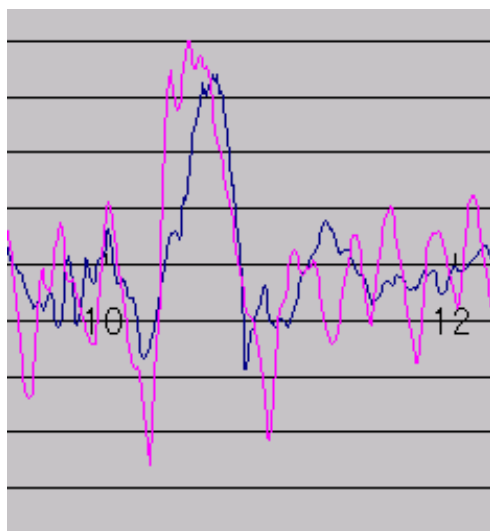
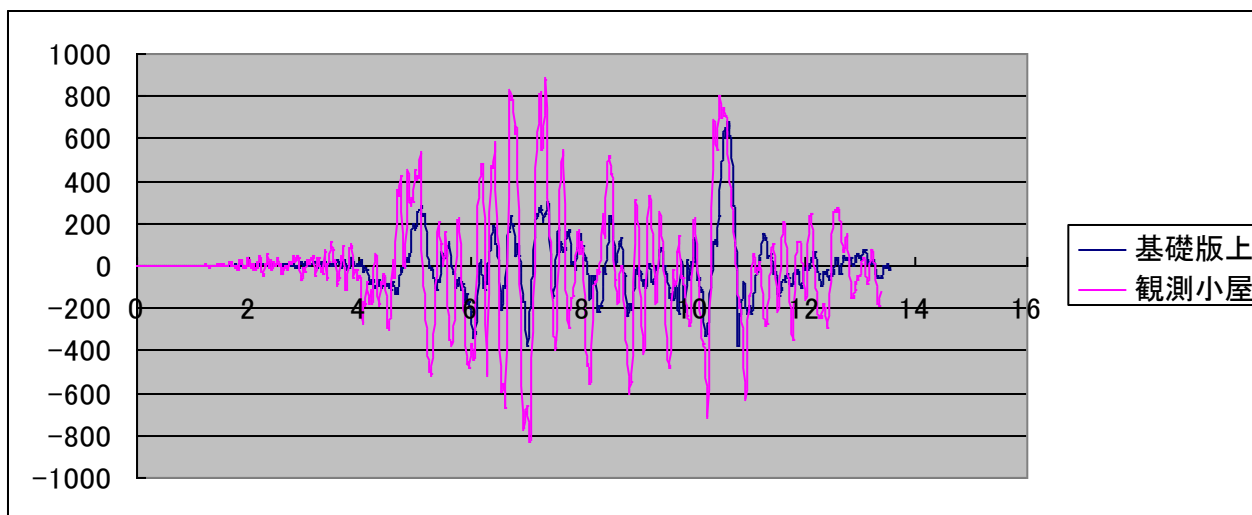
$$\frac{680\text{Gal}}{273\text{Gal}} = 2.5\text{倍}$$

$$\frac{680\text{Gal}}{0.48\text{G}} = 1.5\text{倍}$$

〔 静的震度はS1の
許容値に抑える 〕

屋外設置と原子炉建屋内設置の地震入力

1号機地震観測小屋(890Gal)と原子炉建屋基礎版(680Gal)



パルス部拡大

- ・建屋内のパルス波は立上りが緩やかに変化しており、衝撃係数は緩和されている
- ・深く埋め込まれた原子炉建屋はランダム波の入力が小さい
- ・軟質岩盤の建屋の固有周期は長く、剛構造設計が効果的

建屋内設備は建屋で守られている

私の「安心」感は共有されるでしょうか？

相互理解の環境作り:

間違いを恐れずに自分の考えを述べ、前向きに討議する開かれた(明るい)環境

理解を妨げる問題 ① :「時間の制約」

十分な説明の時間が無い

← メディアなどを通して、たとえ断片的であつても語り続ける

理解を妨げる問題 ② :「用語」

分かり難さ度 = 振動(構造動力学) × 原子力

原子力発電所耐震設計「用語」の問題点

○特殊用語:

例 (床)応答スペクトル、絶対加速度、
減衰(減衰定数、減衰係数、減衰比)

○同じ漢字で意味の違う用語

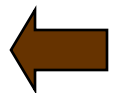
例 震度(気象庁**震度**階) ⇔ 震度(静的**震度**)

○曖昧なまま使われている用語

例 (余裕、裕度、安全率):耐震裕度

○専門家でもイメージの違う用語

例 塑性変形(塑性化度で混乱)、
許容応力(荷重条件との関係)、弾性／線形



定義の明確化と説明用ツール(模型、シミュレーションなど)の整備

理解を妨げる問題点 ③ :「工学」

「工学」は「理学」よりも理解し難い？

○技術分野が広範で複雑に入り組んでいる

耐震設計：構造力学、動力学（振動、衝撃）、材料力学、破壊力学、土木工学、建築工学……

○全てが解明されてはいない（経験で補われている）

耐震設計：地震という現象自体が不確か（分からない）
経験に基づく「基本方針」が重要

○設計者が自己責任のもとで判断を加えている

設計品質：作成→審査→承認

「基本方針」に基づく耐震設計者の工学的判断



理解を助ける手法（統計的手法など）の導入と継続的な努力

問題Ⅱ：歯切れの悪い回答は無意味か？

新潟県中越沖地震に関する よくある質問 ②

「中越沖地震で、余裕はどのくらいあったのか」

「耐震設計には余裕がどれくらいあるのか」

「原子力発電所はどの程度の地震まで安全なのか？」

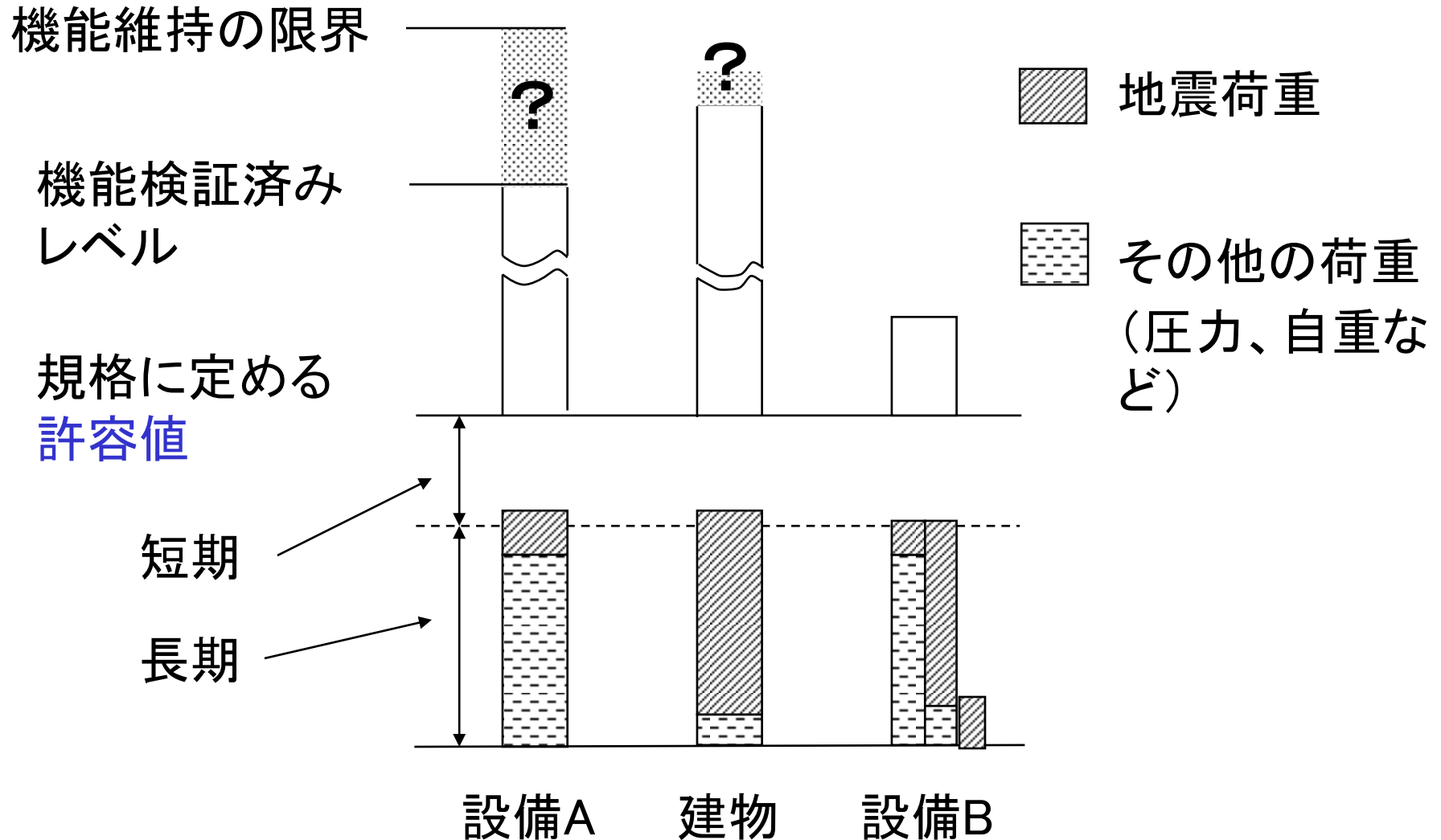
現在は「限界」を説明する裏付けに乏しい

- ・損傷形態は地震動の特性に依存するが、限界となるような規模の地震動特性が不明（経験がない）
- ・地震荷重は敷地条件の影響を強く受けるので、標準的な回答は出来ない（発電所の個別評価が必要）

「限界」の解明には、長期にわたる研究と莫大なパワーを要する（従来の手法では理解されないか？）

耐震裕度のイメージ

《規格に定める許容値を超えても安全は確保される》



これまでの耐震裕度の検討手法

《S1で設計し、S2で安全上の余裕を評価する》

JEAG4601－1970(1970年)

設計地震(耐震A、Asクラスの施設を動的解析する地震:許容応力度**設計**)

安全余裕検討用地震(Asクラスの施設の安全上の**余裕を検討**する地震、設計地震の通常1.5倍)

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(1981年)

設計用最強地震(耐震A、Asクラスの施設を動的解析する基準地震動S1をもたらす地震:許容応力度**設計**)

設計用限界地震(耐震Asクラスの施設を動的解析する基準地震動S2をもたらす地震:**終局耐力に対して安全余裕、機能維持**)

〔 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(2006年) 〕

基準地震動Ss、弾性設計用地震動Sd

例 Asクラス施設の構造決定プロセス

構造の計画

静的地震荷重

動的地震荷重(設計地震／設計用最強地震)

: 許容応力度設計

詳細構造の決定

安全余裕検討用地震／設計用限界地震

: 機能維持評価

(機能維持が満足されない場合は構造計画に戻る)

信頼性の高い耐震設計とするために重要なのは、設計地震荷重に対する許容応力度設計

これで、耐震裕度が決定すると言っても過言ではない

問題Ⅲ 専門家として「信頼」に応えるには？

○見える、継続的、真摯な努力(スキを作らない)

地震後再起動のガイドラインの確立

長周期強震動への備え

○耐震設計者(構造設計者)のパワー強化

迅速な対応

○見解の統一 (塑性変形が必要以上に強調された)

機械設備耐震設計の教科書(参考書)整備

(日本機械学会編「耐震設計と構造動力学」、1985年)

建築の分野では、大地震に遭遇して被害を出しながらも人々の信頼は失っていないように見える

(地震被害発生を謙虚に受け止め、その都度、建築基準法などの改訂を迅速に行っている)

「地震に関する国民の不安にどう対処するか」

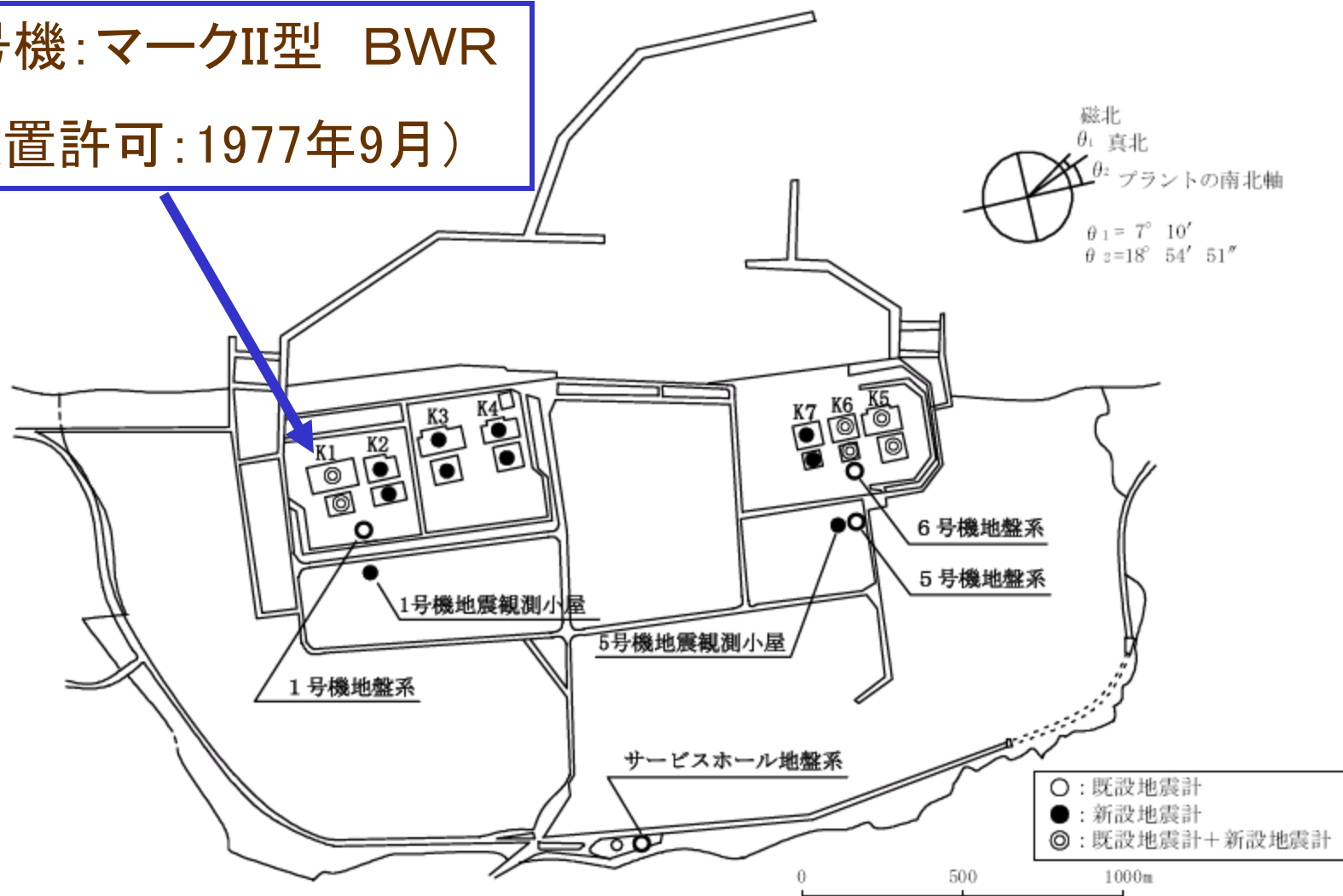
日本固有の耐震設計技術(工学)は、地震の不確かさ(理学)に対してもロバストなものであるとの技術的確信を持って

本日の パネル討論の結論を

愚鈍に実行し、説明していく(少なくとも努力している真摯な姿をみてもらう)

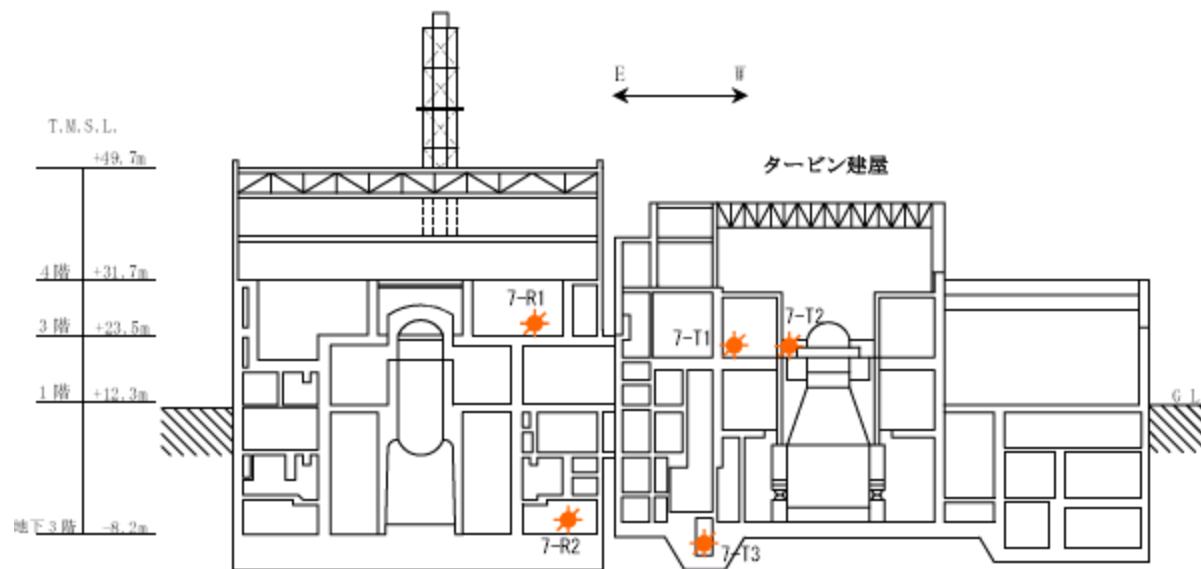
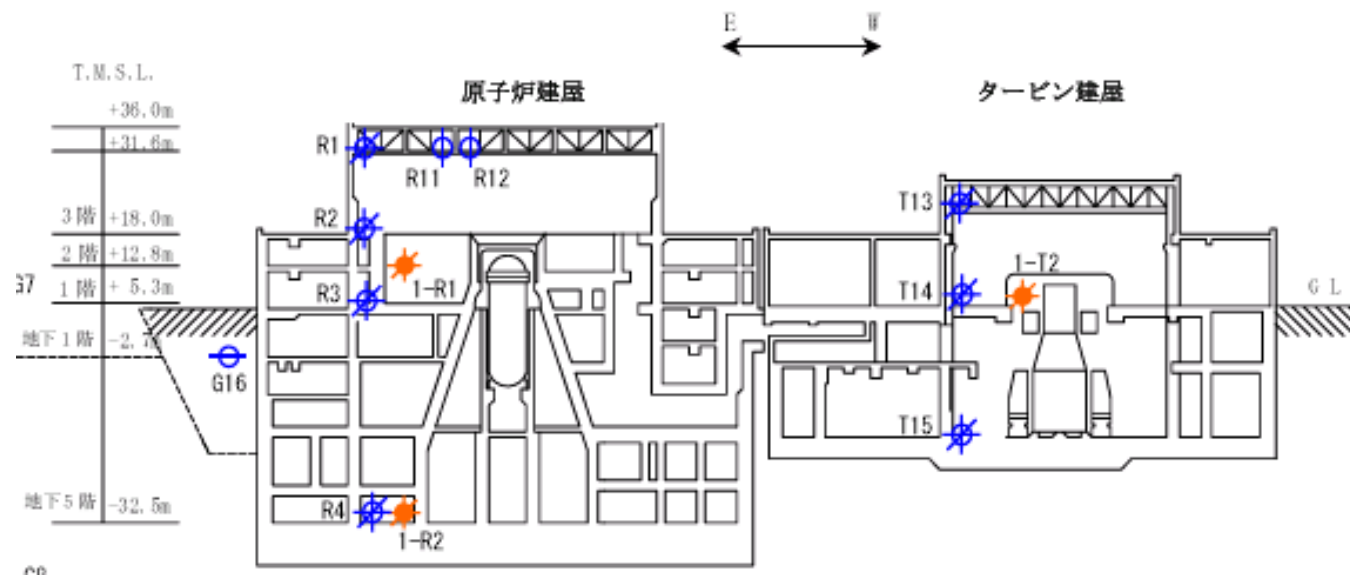
柏崎刈羽原子力発電所の概要

1号機:マークII型 BWR
(設置許可:1977年9月)



発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(旧、1981年7月)

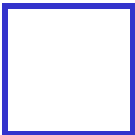
建屋 縦断面図（埋め込み状況）



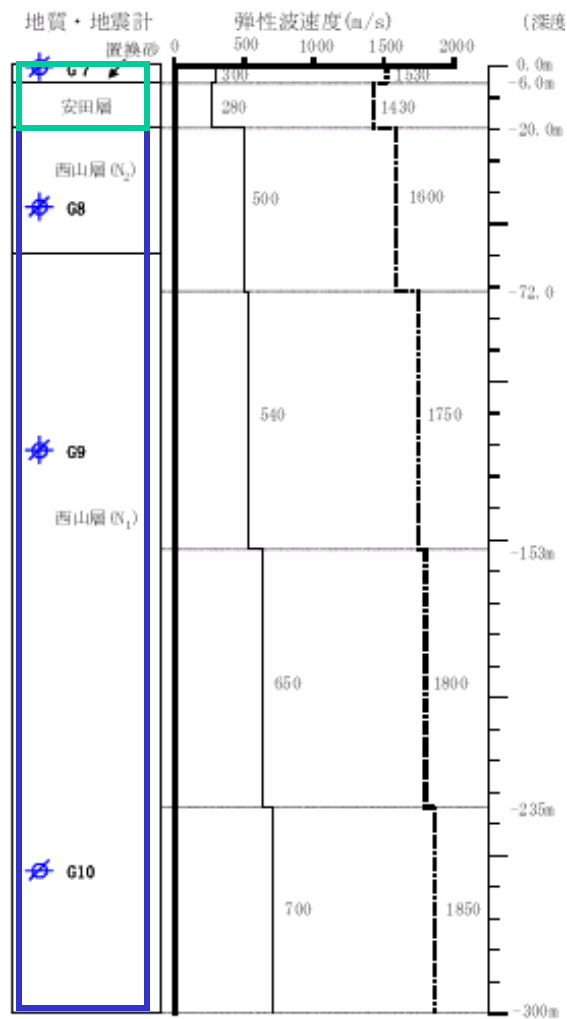
地層 せん断波速度

発電所の地層構造

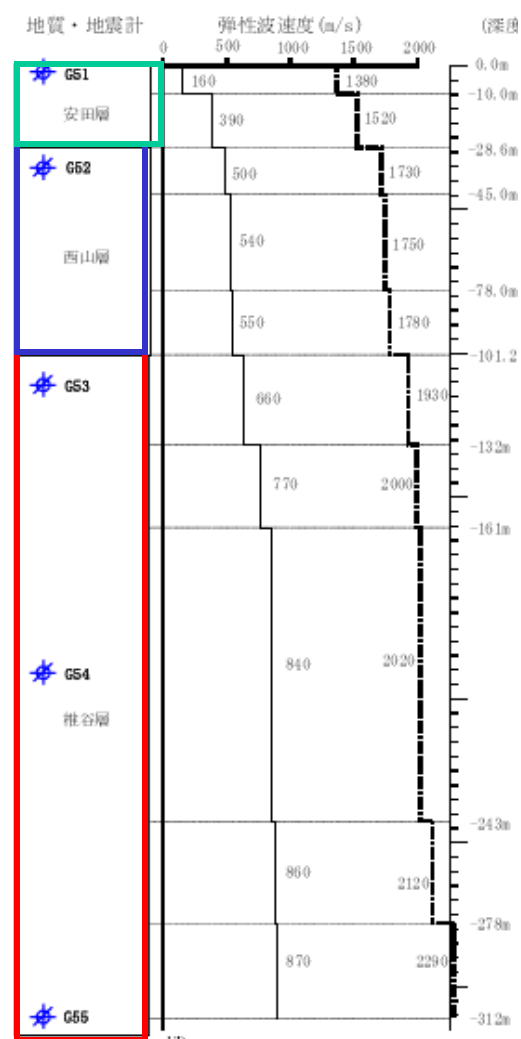

安田層
約300m/s


西山層
約500m/s
～700m/s


椎谷層
約660m/s
～870m/s



1号機側

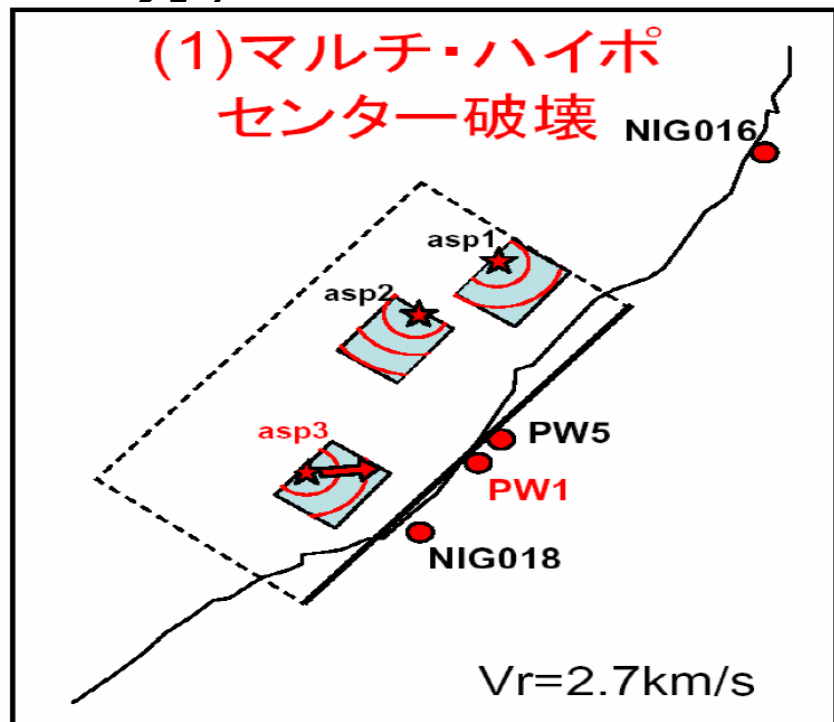


5号機側

地表

深さ
300m

新潟県中越沖地震(平成19年7月16日10時13分)



(入倉孝次郎地震動研究所HPより)

地震諸元

規模: マグニチュード6.8

震源深さ: 17km

原子力発電所との距離

震央距離: 16km

震源距離: 23km

地震直後(7月30日)に東京電力が地震記録
(時刻歴加速度波形、応答スペクトル)を公表

想定していた直下地震と中越沖地震

地震	直下地震(想定)	中越沖地震
マグニチュード*	6.5(改訂前)	6.8(現行)
震源距離	10km	23km

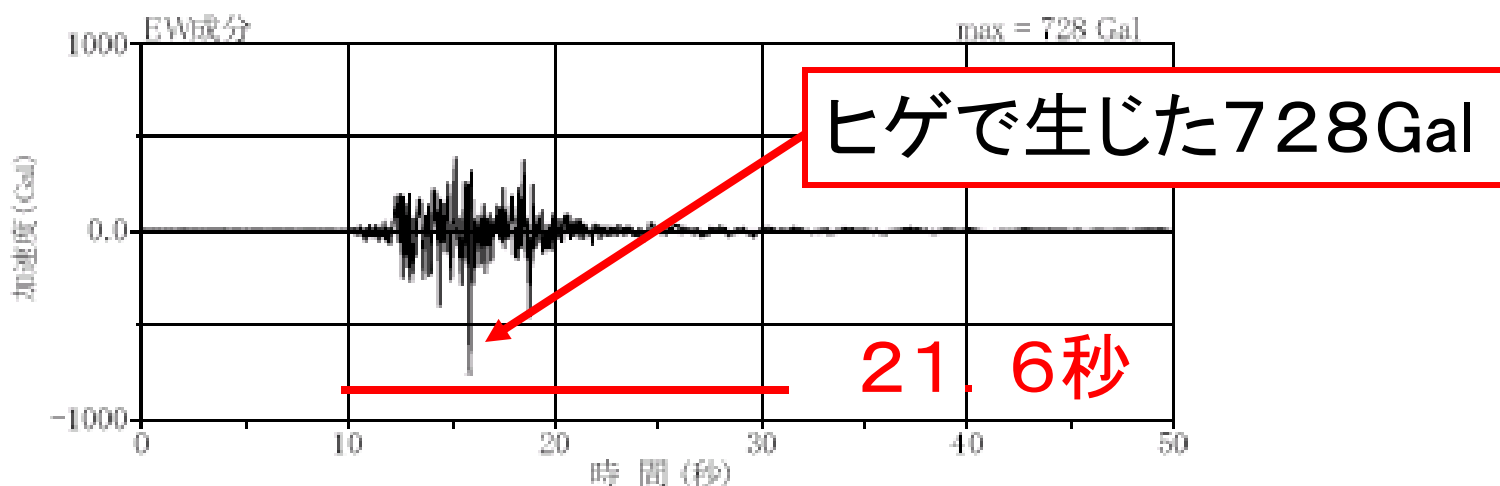
* 気象庁マグニチュード

解放基盤表面での地震動(JAEG-4601により算出)

地震動	想定	中越沖地震
最大速度 (エネルギー)	13.5 kine	9.2 kine
地震動継続時間	17.4秒	21.6秒

中越沖地震の地震動継続時間

岩盤での観測波形 サービスホール T.M.S.L. -182.3m



中越沖地震で発生した地震のエネルギーは耐震設計上の想定内と思われる

(深層防護で想定した直下地震は妥当であった)

地震波のヒゲに関する耐震設計工学的判断

米国の有効最大加速度値の考え方

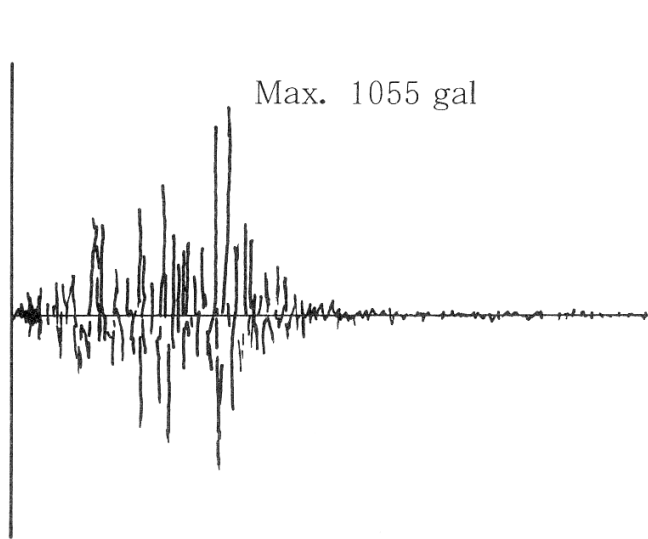


図 3-16 Pacoima ダムの原記録

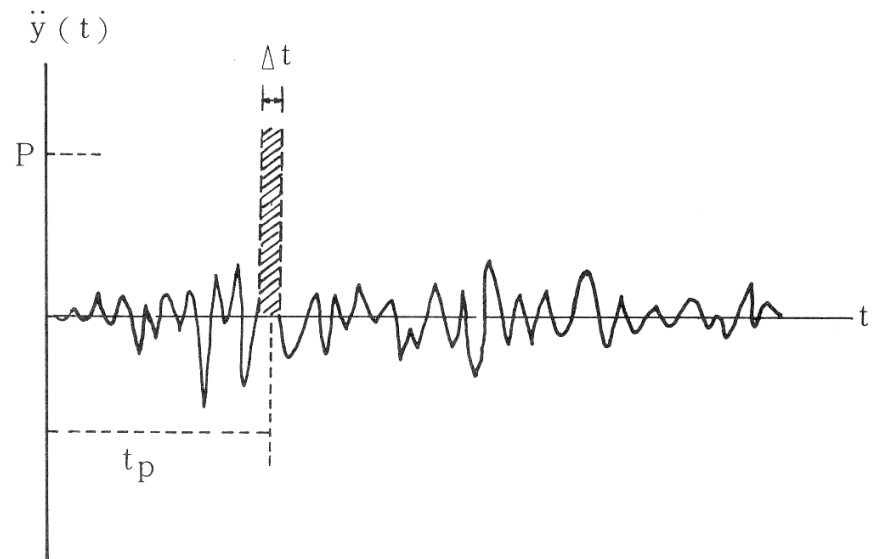


図 3-17 加速度波形上のスパイクの模式図

最大応答変位 $|\Delta x(t)|_{\max} = P \Delta t / \omega_0$

スパイク状のピークを有している地震動はその最大加速度値の大きさに比して構造物の被害は大きくない

建築工学専門家の判断

わが国の原子炉施設耐震設計の基本方針

旧指針以前(JAEG-4601-1970)から受け継がれた

- ・ 粘りのある材料選定
- ・ 剛構造設計
- ・ 着岩
- ・ 経験に基づく地震荷重の想定(静的震度法)

水平

重要度分類	建物および構築物	機器、配管など
Aクラス	Cクラスの震度の3倍と動的解析により定まる水平地震力の大きな値	動的解析による加速度と左記の加速度の1.2倍による地震力
Bクラス	Cクラスの震度の1.5倍	左記の震度の1.2倍、重要な共振のおそれのある設備は動的にも解析
Cクラス	建築基準法に定める震度	左記の震度の1.2倍

地震経験に基づく静的設計法の特徴

建築基準法の静的震度(Cクラス設備設計用)は、関東大震災レベルの地震でも人命保護は保てるとの考えに基づくもの



静的: 時間変化が無い

静的震度 0.6 の設計

(Aクラス)

とは

37° 傾けて設計すること

構造物の地震応答

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\ddot{y}[M]\{1\}$$

静的設計とは、応答を低減する時間効果も減衰も考慮に入れない厳しい条件

1号機原子炉建屋内設備の衝撃係数

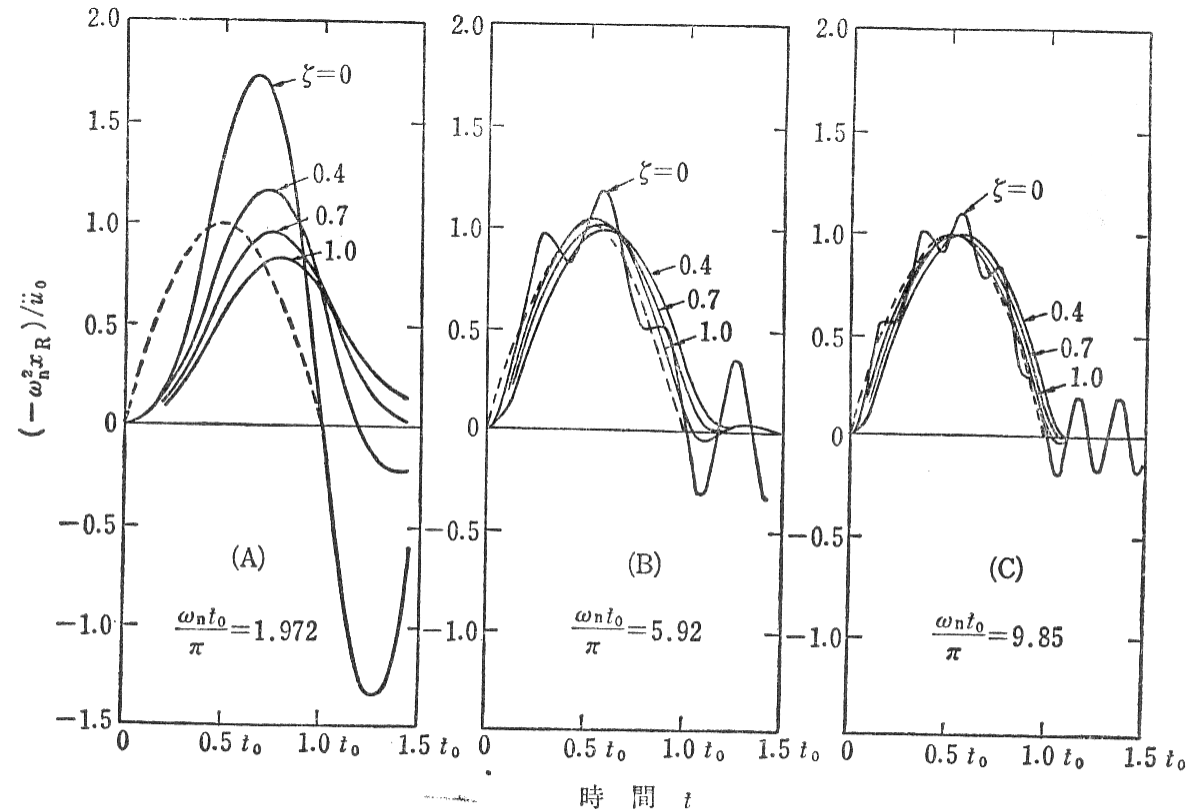
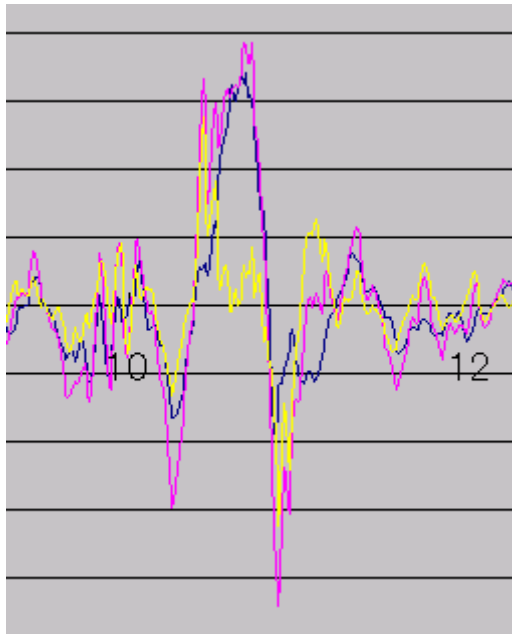
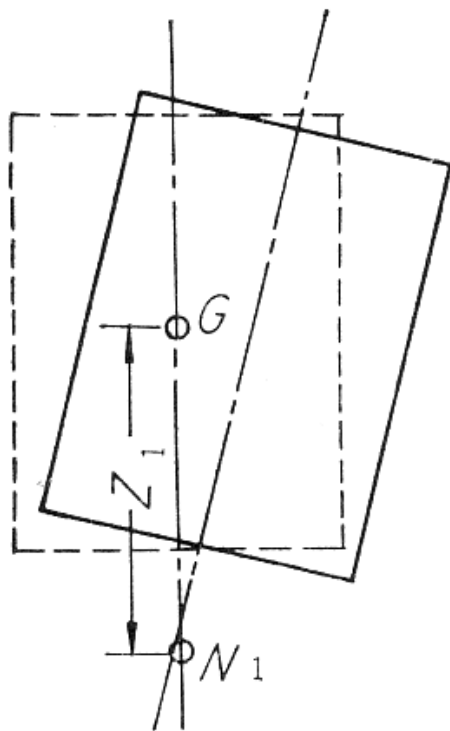


図 4.6.8 半正弦波に対する応答 (Levy と Kroll による)¹⁾

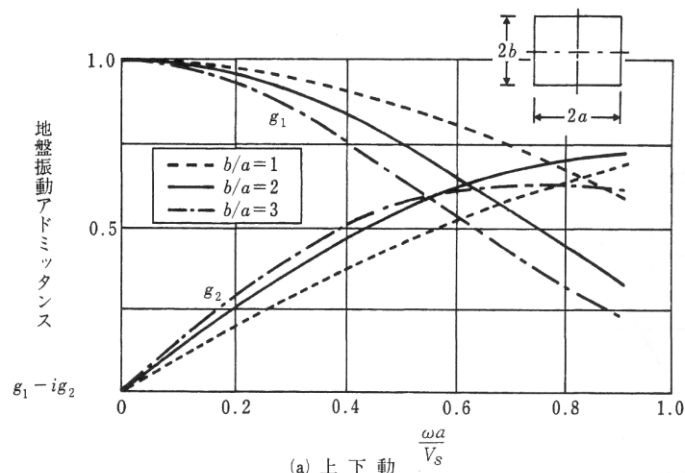
1) Levy, S and W.D. Kroll: Research Paper 2138, J. Research Natl. Bur. Standards, 45: 4 (1950).

衝撃係数は機器の割増率1.2を下回っている

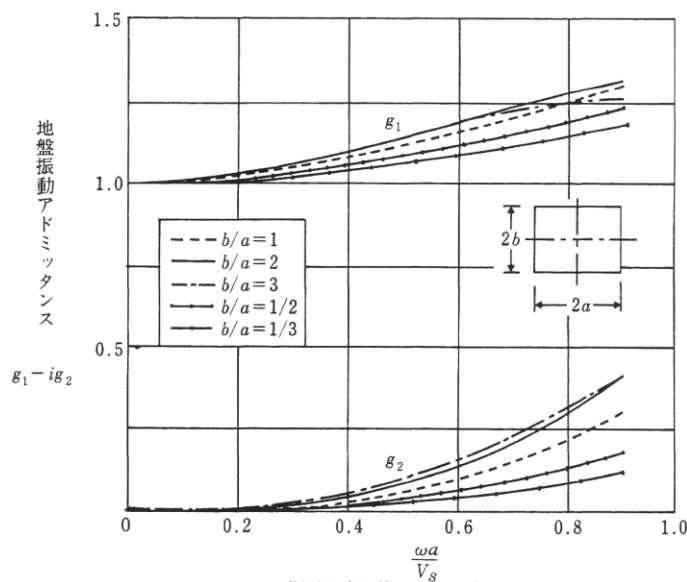
建屋・地盤相互作用の減衰効果



(a) 1次振動形



(a) 上下動



(b) 回転動

例

多治見博士の
振動アドミタンス
理論

建物が振動する
と、地盤から振動
エネルギーが逃
げていく

(逸散減衰)

軟質岩盤、深く埋
め込まれた建屋
では特に大きい

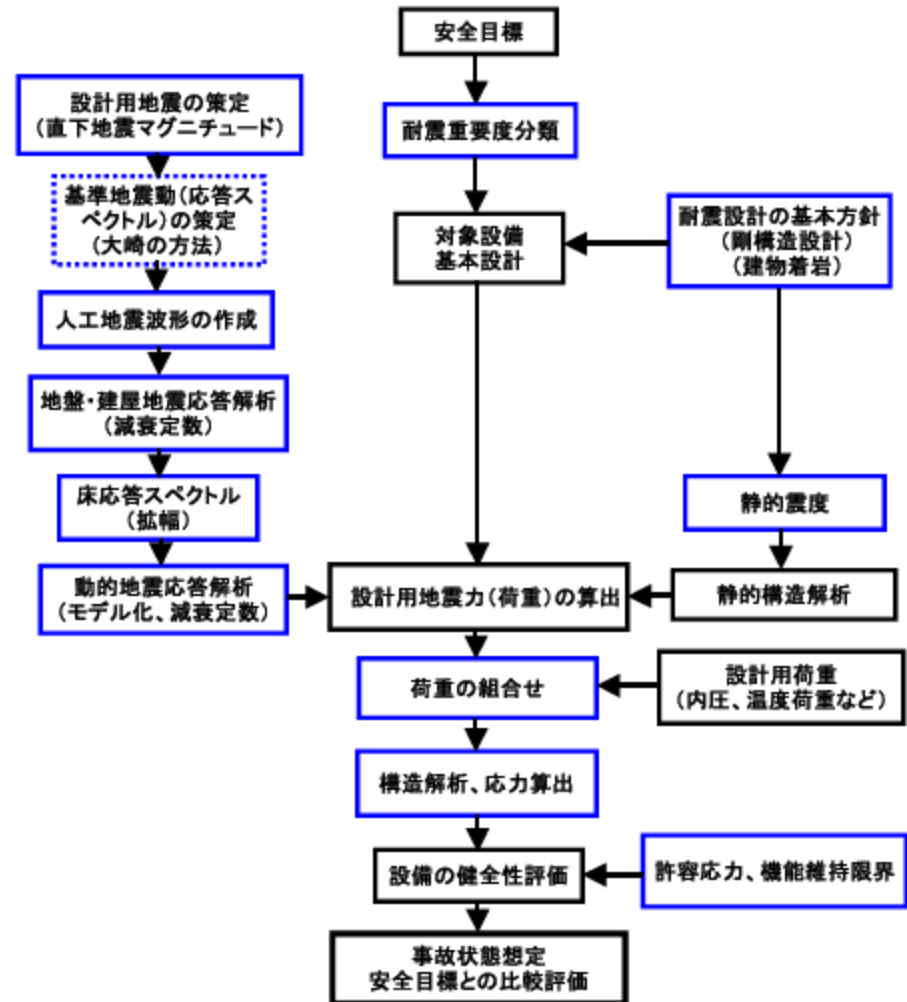
耐震設計体系の余裕

耐震設計体系

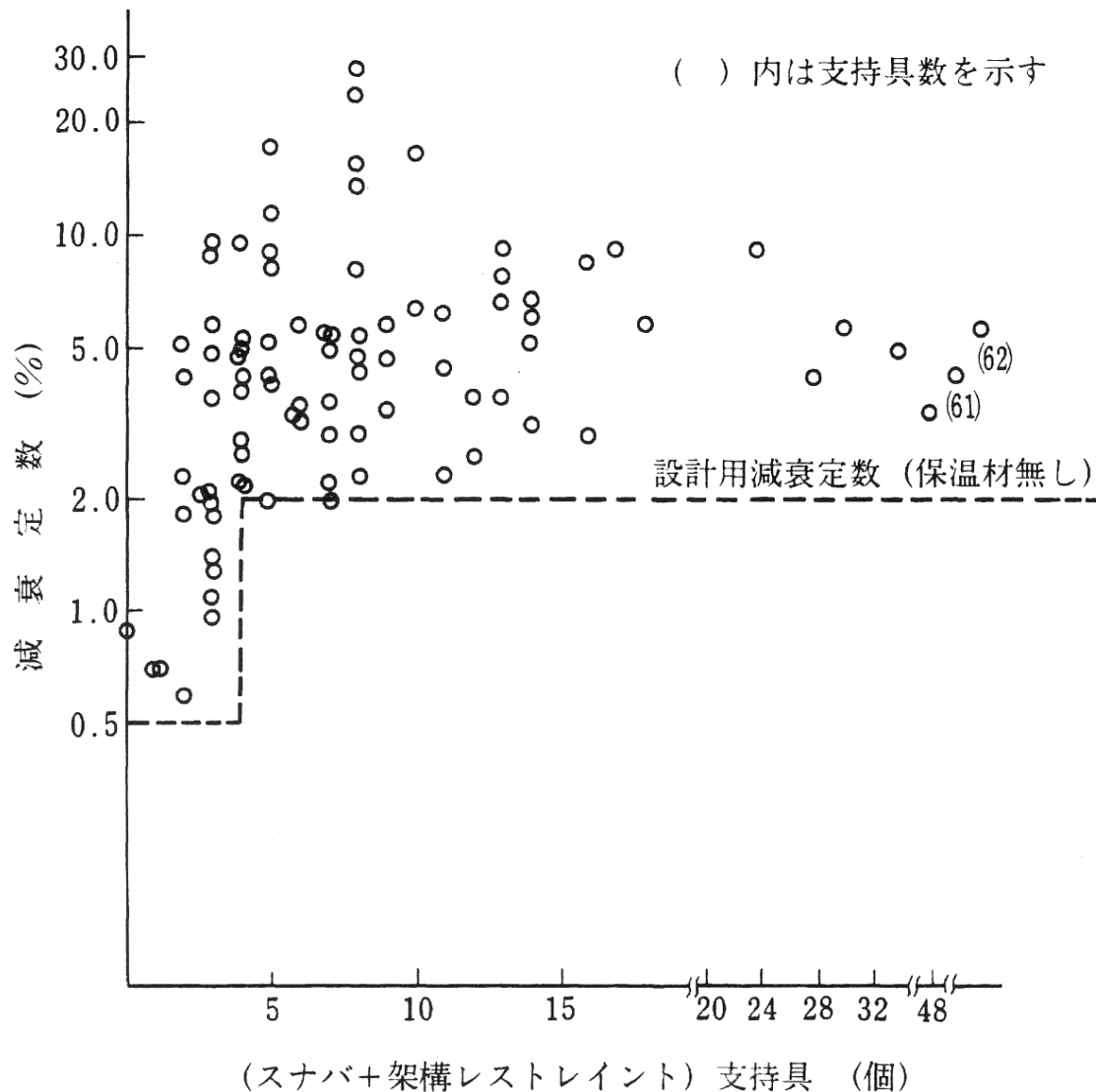
余裕は設計体系(地震荷重算出と構造強度評価)にちりばめられ、個々の対象物によっても異なる

余裕とリスクの相互関係が重要

地震動の持つ不確かさは、剛構造設計、静的震度、動的解析の余裕で対処されている



例1 配管動的解析の減衰定数



測定データは大きくばらつくように見えるが配管系の構成により傾向は把握できる。設計的には大きな分類で下限値を使用している



現実的耐力評価

- ・分類の細分化
- ・統計的扱い

課題：変位依存性があり、終局耐力状態ではより大きくなる

(出典: JEAG4601-1991追補版)

例2 実力値と設計時点の前提値

表ー1 シミュレーション解析に用いたヤング係数の計算

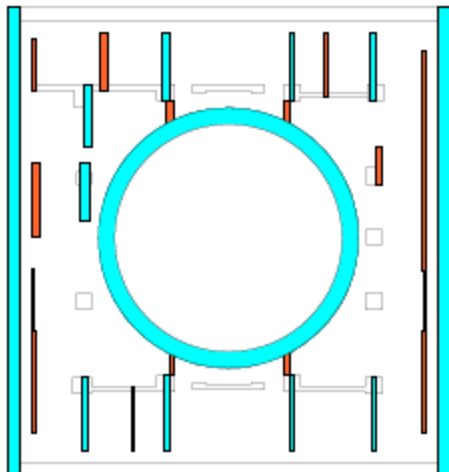
号機	部位	第 6 回構造 WG (10/23) で報告の値			ヤング係数の計算	
		設計基準 強度	実強度 (kg/cm ²)	採用値 (kg/cm ²) [N/mm ²]	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ヤング係数 E (N/mm ²)
1 号機	外壁	240	457	450 [44.1]	23.5 (36<Fc≤48)	29.0 × 10 ³
	内壁		423			
2 号機	外壁		511			
	内壁		447			
5 号機	外壁		470			
	内壁		488			
3 号機	外壁	330	560	500 [49.0]	24.0 (48<Fc≤60)	31.3 × 10 ³
	内壁		473			
4 号機	外壁		513			
	内壁		501			
6 号機	外壁		677			
	内壁		516			
7 号機	外壁		613			
	内壁		572			
備 考					γ は鉄筋コンクリートの単位体積重量から 1 を差し引いた値とする (RC 規準 5 条、7 条)	

原子炉建屋コンクリートの実強度は、設計に用いた設計基準強度より大きい

↓ 現実的耐力評価

実強度で再評価

↑
↓
加力方向



例3 建屋壁断面算定の工学的判断

設計時にはせん断有効壁面積を小さく評価(耐震壁)

⇒ 完成後の実配置を考慮し、せん断に有効な補助壁面積を加算

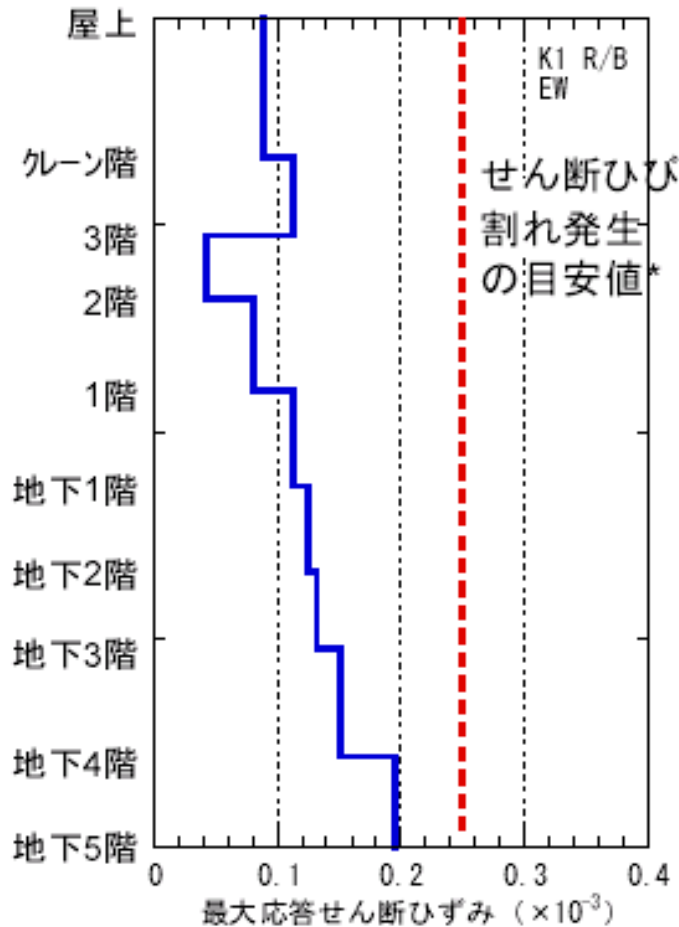
(出典:08.01.11 東京電力(株)公開資料)

1号機 原子炉建屋EW方向シミュレーション結果

(減衰は設計値を想定)

・建物の設計は静的震度が支配的(パルス波と比較すべきは静的震度)

・減衰などによって動的応答が更に低減する 建物の余裕



耐震壁構造は、せん断ひび割れの発生後も**数倍の耐力**を有すると言われている
また、ひび割れを生じると減衰の効果により応答は更に低減する

「新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋の応答評価について」 08. 01. 11 東京電力(株)

建物の弾塑性(非線形)応答スペクトル

建物のひび割れが進むと、機械・電気設備の耐震余裕は大きくなる

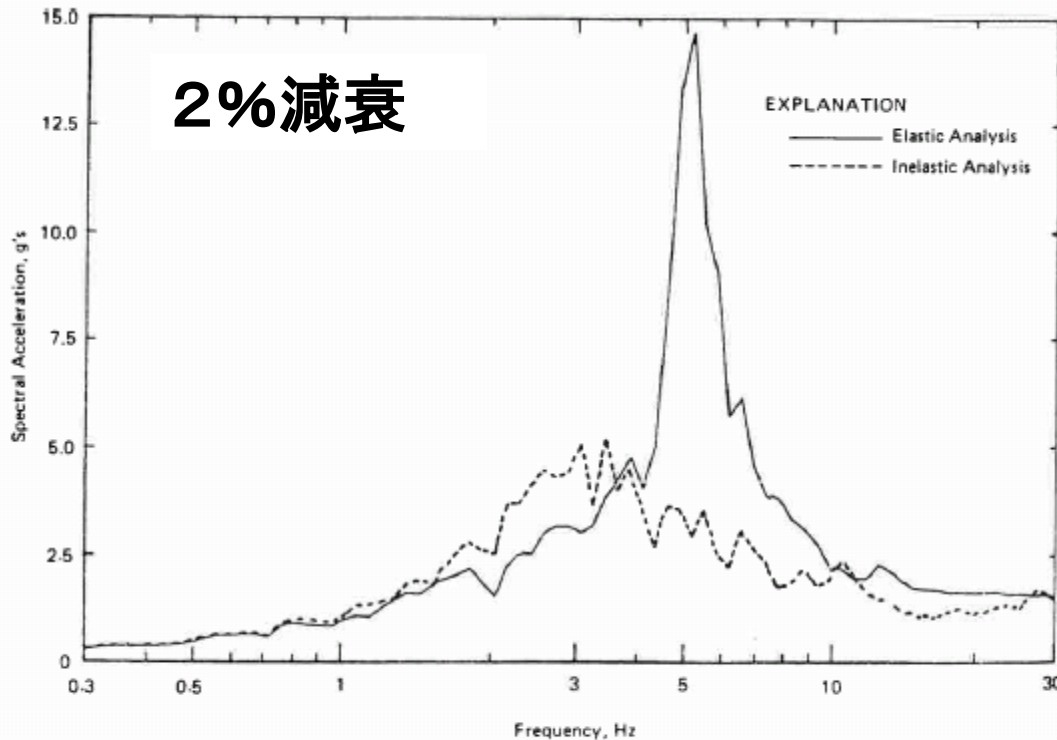


Figure E-10. Comparison of elastic and inelastic in-structure response spectra at node 14 in internal structure for artificial accelerogram (0.5g) fixed-base model. Source: (48).

米国の解析例(PWR、0.5G)

ひび割れによって

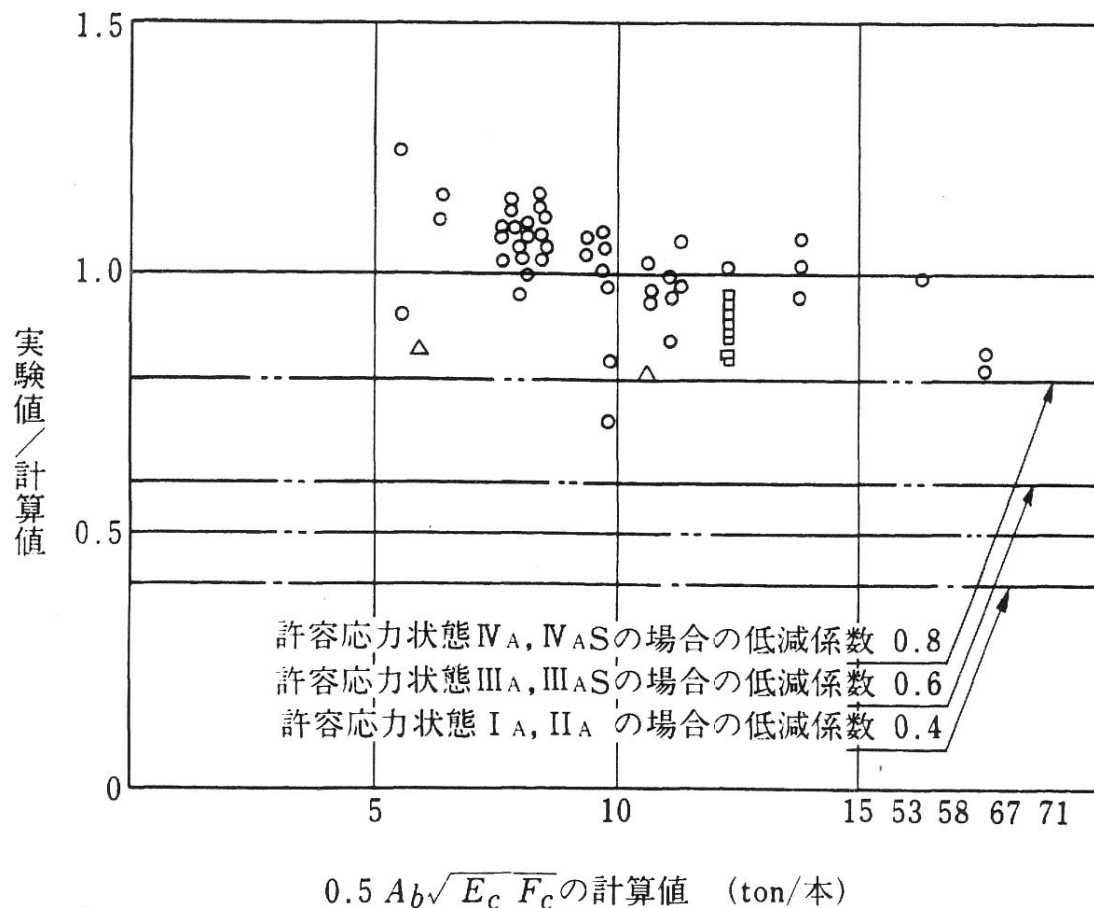
- ・内部減衰が増大
- ・固有周期が長くなり共振から外れる

高振動数領域での低減効果が大
きい

建屋・地盤相互
作用(逸散減衰)
でも同様の効果

長周期パルス波による破壊モード

エネルギー吸収が少ない部位の破壊

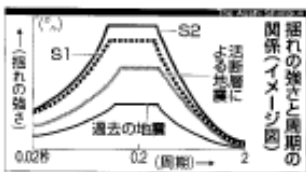


柏崎刈羽原子力発電所は施工管理が徹底されており、品質のバラツキが少ない

許容値に対する余裕、発生応力比に対する余裕などの効果が出ている

基礎ボルト複合破壊の終局耐力

女川原発 想定超す揺れ



宮城県沖で8月16日に発生したマグニチュード(M)7.2の地震で、東北電力・女川原子力発電所(同県女川町、石巻市)は、設計上想定した「限界」以上の揺れに襲われた。M7.5級とされた「同域沖地震」が来たらどうなるのか。国内にある原発の耐震指針見直しを進める、原子力安全委員会の議論に影響が出ている。

(小林 隆 桑山 朗人)

安全委「宮城県沖」にらみ詰め

原子力安全委員会の耐震指針検討分科会が今月9日、女川原発について、巨大地震が起きた場合の影響を懸念する声が相次いだ。

耐震設計の指針は国の原子力委員会が78年に策定、原子力安全委員会が81年に一部改定したものが現在も使われている。指針の考え方の要となるのは、2種類の標準地震動(S1、S2)だ。S1は、原発周辺で過去1万年間に動いた活断層による地震と、記録のある地震から想定される「最強地震」。S2はそれを5万年間までの過去のより、別にM6.5の直下型地震も考えた「限界地震」で、S1よりも大きく「おそるべき」想定ではない巨大地震を想定するものになっている。

その結果、揺れの強さを周知で示した一応明瞭な場所でも起きた阪神

耐震指針議論に「激震」

答スペクトル」の連続曲線は、どこをとっても、実際の地震のスペクトルが、S1を下回る形に取まっていなければならぬという上だ。

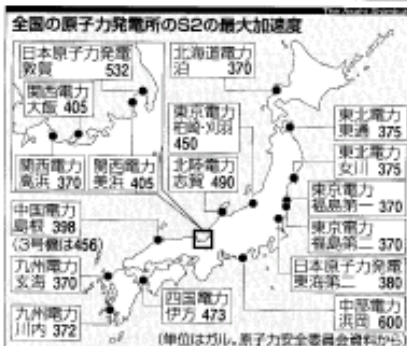
ところが、東北電力が地下8.8の地震計データをもとに、8月16日の地震を解析したら、周期0.02秒と0.1秒の範囲で0.4秒付近で、解析値がS1を上回っていた。0.05秒付近の揺れは8.8ガル(ガルは加速の単位)に達し、S2の想定値(6.7ガル)も超えていた。

耐震指針の見直しは、阪神大震災(M7.3)を機に検討が始まった。原発は活断層を避けて建設され、活断層がないとされた場所でも指針が想定する直下型地震は、最大M6.5までだった。

ところが、活断層が不明瞭な場所でも起きた阪神

朝日新聞の誤解例

応答スペクトルは「耐震設計審査指針」の問題ではない



国内の商用原発で耐震性能を今目安とするのが、S1やS2の「最大」最大値から求める。最も大きいS2の最大加速度を想定しているのが、原発の地点ごとに、

最大加速度が耐震指標 浜岡原発は補強工事へ

基準となる指標を想定して、その揺れの強さを最大値から求める。最も大きいS2の最大加速度を想定しているのが、原発の地点ごとに、

委員の間で「S2が小

さすぎた」「S1とS2の差がわかりにくい」などの意見が出ている。委員の一人倉本孝・京都大学学長(産学連携推進学)は「想定される宮城沖地震は今回より

確実に大きい」と指摘する。主査代理の大竹政和・東北大学教授(地震学)は「今回の地震が特殊なのか、耐震指針の考案方に問題があったのか、詰めなければいけない」と話している。

は、中部電力の浜岡原発だ。東海地震の震源域に位置しており、直下M8級の地震が起きる可能性が高く、600ガルと定めている。

中部電力は、今年1月、この値を1.6号機で1千ガルとする補強工事の計画を発表した。海水取り入れ口の配置を強化したり、排気管を鉄骨で固めたりする。70年代に建設した1、2号機では主要配管の補強を行う予定だ。

原子力安全委員会が耐震指針を見直し、浜岡原発で進む工事の必要性を含め、全国の原発が再検討を余儀なくされる。

私の思い： 今、何故 ロバストな設計手法を強調したいのか

宮城県沖地震

(05. 08. 16)

能登半島沖地震

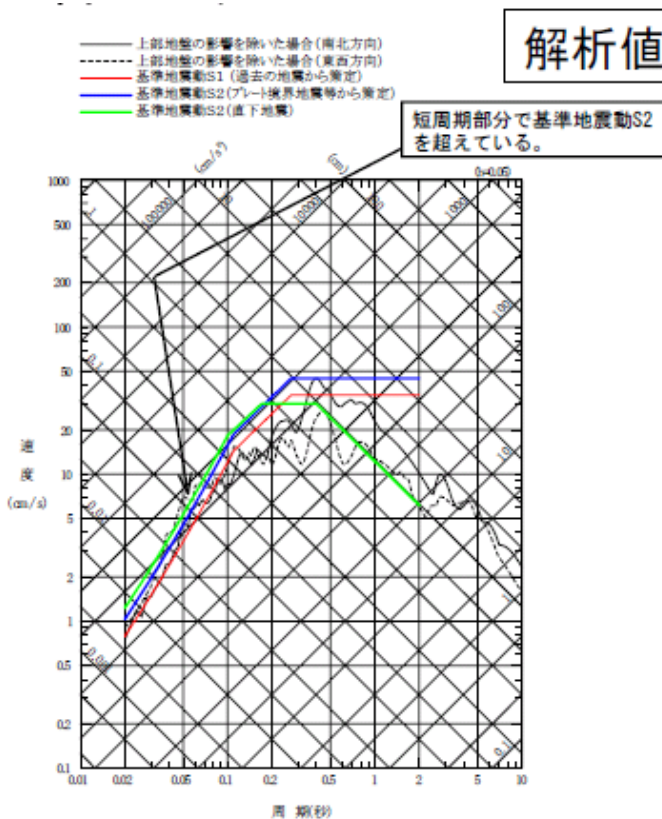
(07. 03. 25)

Google検索 48,400件

外乱、誤差に強い設計 例タグチメソッド

地震学（理学） 自然現象の解明真理の追究

耐震設計（工学） 不確かさの残る中で、機能を満足するものを作る



解析的に上部地盤の影響を取り除いた
応答スペクトル

宮城県沖地震女川観測波

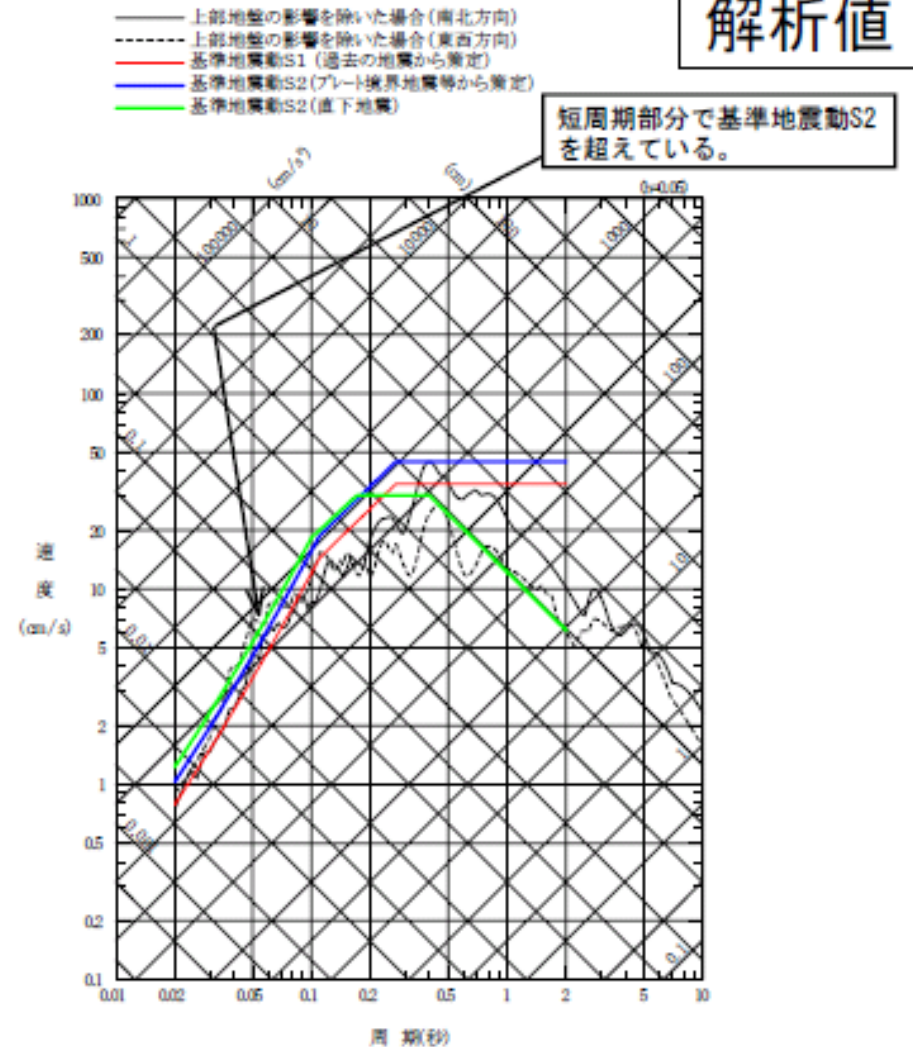
平成17年宮城県沖地震

2005年8月16日

Mj = 7.2

震源深さ 42km

震央距離73kmの女川原子力発電所で観測された地震動(解放基盤表面に解析で引き戻したものが基準地震動S2の応答スペクトルからはみ出したことが観測された



解析的に上部地盤の影響を取り除いた
応答スペクトル

(出典:東北電力ホームページ)

地震時の疲労に関する許容応力例

種別	1次＋2次応力	1次＋2次＋ピーク応力
クラス1 (第1種)	$3S_m (=2S_y)$ S1又はS2地震動のみによる応力振幅について評価する	S1又はS2地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数を求め、運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲れ累積係数との和が1.0以下であること
クラス2 (第3種)	S1又はS2地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数が1.0以下であること。 <u>ただし、地震のみによる1次＋2次応力の変動値が$2S_y$以下であれば疲れ解析は不要である</u>	

シェークダウン限界と低サイクル疲労

繰返し荷重で塑性ヒステリシスループを発生しない限界
(シェークダウン限界)から1次と2次応力の和を $2S_y$ (弾性計算の見かけ上)に制限している

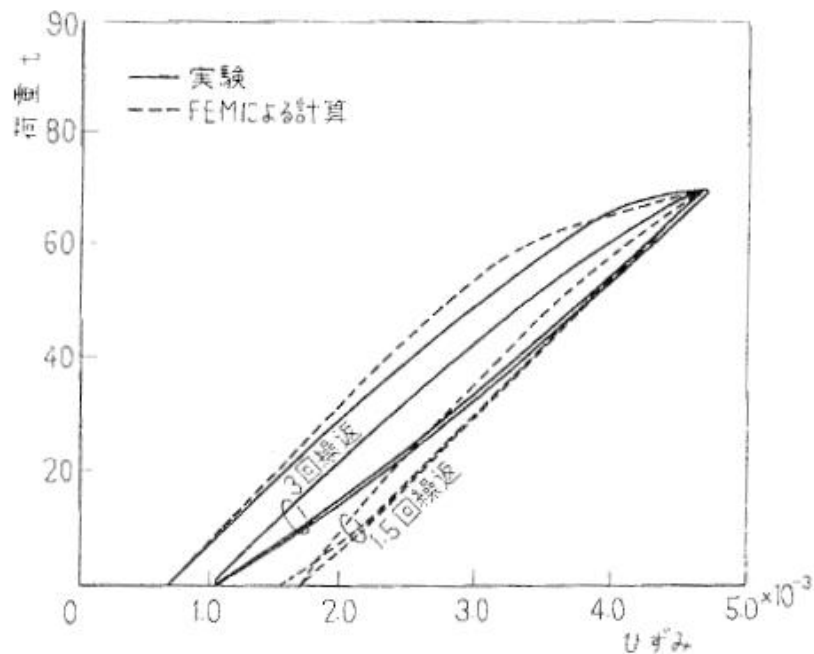


図3 荷重-ひずみ線図の例 ($2.08 P_y$)

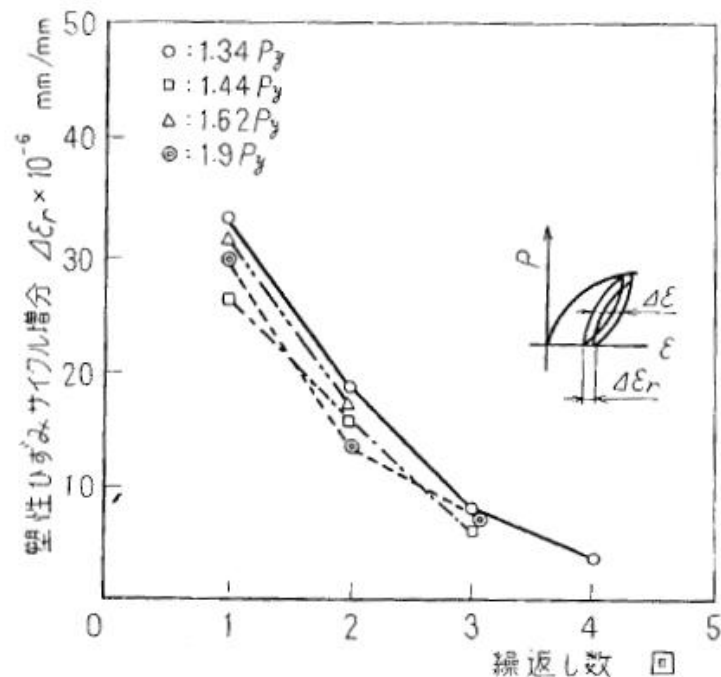


図2 塑性ひずみサイクル増分の変化 (実験)

耐震設計上特に重要な地震以外の荷重（私見）

1. 内圧（地震荷重と重ね合わせて評価する場合）

配管の設計許容限界を上回る荷重での損傷モード：

ラチェット変形を伴う低サイクル疲労

（内圧と地震荷重の重畳による進行性変形）

参考資料：JNES、「原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 配管終局強度」、04基構報-0002

構造上の対策：配管レイティングのアップ

：耐震サポートの強化

2. 熱応力（通常時の問題として）

地震による荷重を低減するために、配管の耐震サポートを強化すると、配管の温度変化による変位を拘束して熱応力が大きくなる（通常時の安全余裕を低下させる）

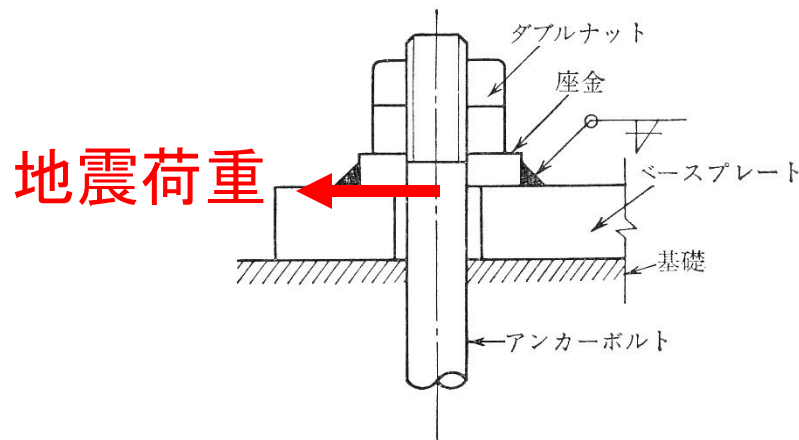
構造上の対策：耐震支持構造としてスナッバーを採用

地震荷重(応力)の割合

- 機械設備に加わる荷重の種類(内圧、自重、機械荷重、積載荷重、衝撃力、熱応力、配管反力など)と荷重の比率は個々の設備により異なる(一般に、圧力配管は内圧の比率が大きい:許容応力に長期と短期の差がある)
- 機械設備に地震荷重しか加わらないものでも、応力レベルでは設計者の考え方で異なる

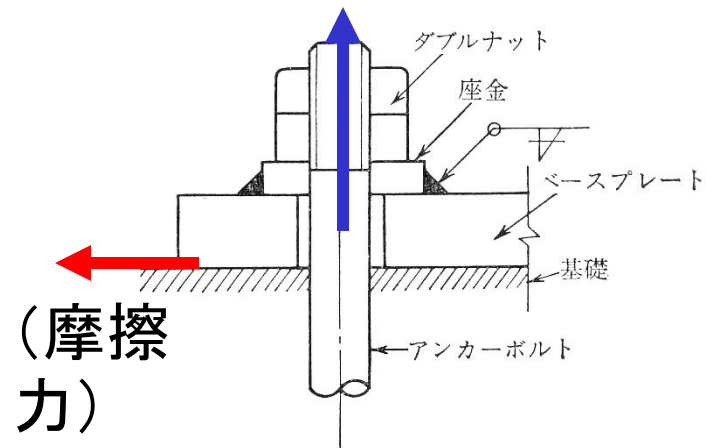
例 アンカーボルト

設計者A 初期締付けなし



ボルトには地震荷重のせん断と曲げが加わる

設計者B 初期締付けあり



ボルトには通常時の締め付け(引張)荷重が主に加わる