

岩盤における設計用地震動評価手法  
(耐専スペクトル) について

2007/08/24

独立行政法人

原子力安全基盤機構

社団法人 日本電気協会 原子力発電耐震設計  
専門部会(耐専) 最新の経験的地震動評価法に  
ついて審議され、基準地震動の合理的な策定方  
法が取りまとめられた。

- ・ 1999年 地震基盤から定義した解放基盤の  
地震動評価手法を提案
- ・ 2001年～ 内陸地殻内地震の適用性検討
- ・ 2002年 OECD/NEAワークショップへ発表
- ・ 2005年 内陸地殻内地震、スラブ内地震の  
適用性を追加

## 目次

### 1. 耐専スペクトルの位置付け

- なぜ経験的方法が必要か
- 従来の経験的方法の課題

### 2. 耐専スペクトルの特徴

- 硬質岩盤における地震動データベース
- 物理的意味が明解な経験式の採用
- 地震基盤から設定した解放基盤の地震動評価
- 巨大地震に対する適用性
- 内陸地殻内地震に対する適用性
- やや深発・スラブ内地震に対する評価

### 3. 耐専スペクトルの骨子

- 解放基盤面の地震動スペクトル
- 異なる減衰定数のスペクトル
- 地震動の経時特性

3

### 1. 耐専スペクトルの位置付け

4

## 1-1 なぜ経験的方法が必要か

### ◆耐専スペクトル

- 距離減衰式に基づく地震動の経験的評価法

### ◆経験的方法

- 基本式:  $S(T) = f(M, X)$

### ◆経験的方法の必要性

- 実観測記録に基づいて設定
  - 実現象の平均像を忠実に再現
- 断層モデルを用いた場合も経験式で確認
  - 例: 強震動評価のレシピ

5

## 1-2 従来の経験的方法の課題

### ◆基になるデータセット

- 硬質岩盤の記録が少ない

### ◆経験式の表現

- 物理的意味が不明瞭

### ◆地盤増幅率の考え方

- どの程度の基盤に対する増幅か

### ◆点震源の仮定

- 断層面の面的な拡がりの考慮が必要

### ◆震源近傍の地震動

- 破壊伝播効果の取り扱い

### ◆上下動の評価

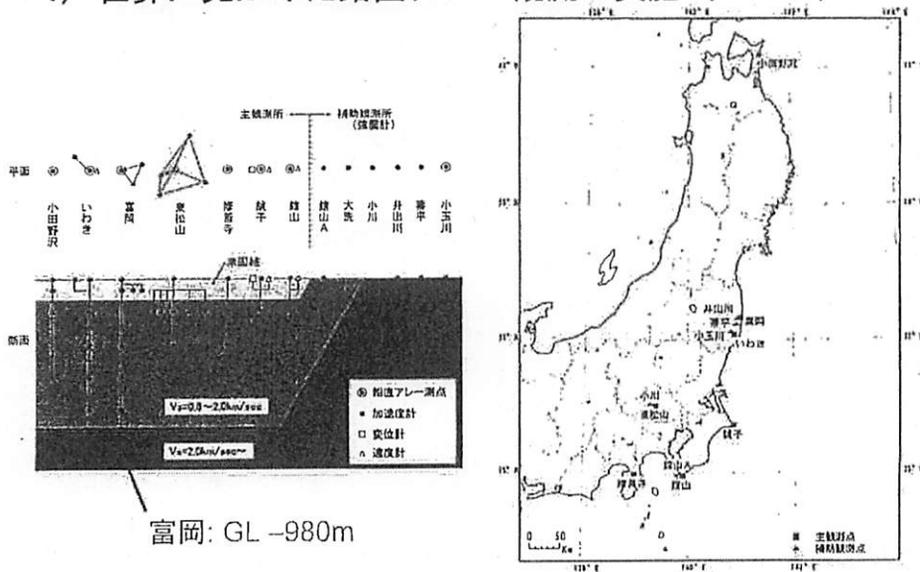
6

## 2. 耐専スペクトルの特徴

7

### 2-1 硬質岩盤における地震動データベース

#### 1) 世界に先がけた鉛直アレー観測の実施 (1977~)



8

2) 高精度の地震観測記録  
によるデータベースの構築

◆ 条件

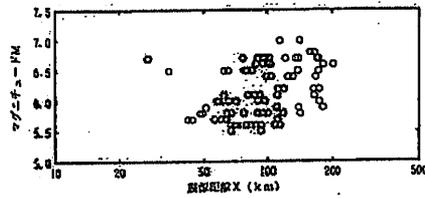
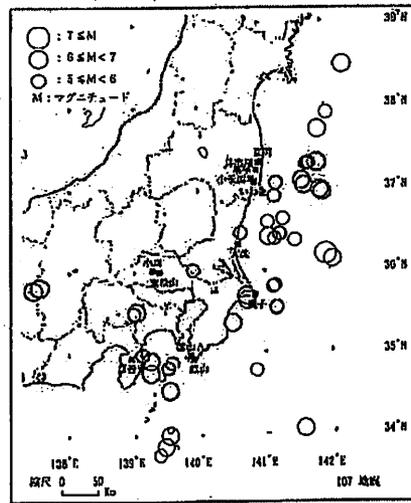
- $M \geq 5.5$
- $D \leq 60\text{km}$
- $X \leq 200\text{km}$
- $T_c \geq 5\text{s}$

◆ 結果

- 107地震地点
- 水平214波
- 上下107波



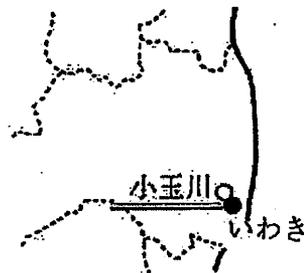
大MIは国内・海外の多地点記録で確認



3) 地震基盤サイトの選定

■ KDG (小玉川観測点)

- ◆ 地震基盤が露頭
- ◆ 観測記録が多い
- ◆ 当該地域の入射波に対応



#### 4) 観測点の地盤条件

■  $V_s = 0.5 \sim 2.7 \text{ km/s} : V_p = 1.7 \sim 5.5 \text{ km/s}$

地点名	略号	観測位置	地盤速度( $V_s$ )	記録成分数	データの補正
富岡	TMK	GL-100m	0.70km/s	30	はぎとり
井出川	IDG	GL	2.00km/s	6	無(抜き厚2.0m)
榑平	HKD	GL	2.70km/s	4	無(抜き厚6.9m)
小玉川	KDG	GL-10m	2.20km/s	20	地盤特性の補正
いわき	IWK	GL-21m	1.18km/s	38	はぎとり
大洗	OAR	GL-14m	1.00km/s	16	無
東松山	HMY	GL-58m	0.75km/s	18	はぎとり
小川	OGW	GL-10m	2.1km/s	6	無
銚子	CHS	GL-18m	1.4km/s	32	はぎとり
館山	TTY	GL-43m	0.6km/s	12	無
館山A	TTA	GL	0.5km/s	10	無(抜き厚1.5m)
修善寺	SZJ	GL-36m	0.65km/s	22	はぎとり
合計				214	

11

### 2-2 物理的意味が明解な経験式の採用

#### 1) 経験式の設定

◆ 無限媒質の遠方近似解

$$F(f) = \frac{R_{0\phi} \omega^2}{4\pi\rho V_s^3} M_0(f) \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{V_s Q(f)}\right) G(f) \quad (1)$$

◆ 経験的距離減衰式

$$\log F(f) = a(f)M - (\log X + b(f)X) + c(f) \quad (2)$$

◆ (1)式と(2)式の比較:  $M_0(f) = P_0(f) 10^{a(f)M}$  と仮定

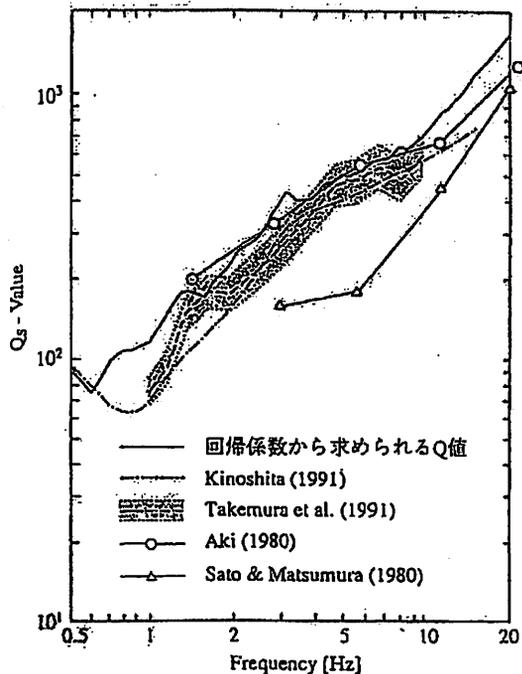
$$a(f) = (\log M_0(f) - \log P_0(f)) / M$$

$$b(f) = (\log e) \pi f / V_s Q_s(f)$$

$$c(f) = \log(R_{0\phi} P_0(f) G(f) / 4\pi\rho V_s^3)$$

12

経験式のb(f)から評価したQ値と既往研究の比較



13

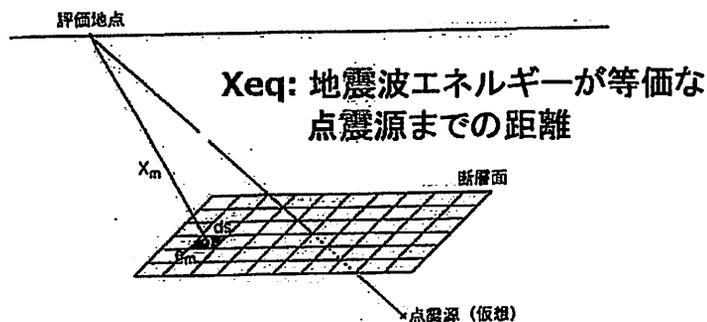
2) 断層面の面的な拡がりの効果を等価震源距離で考慮

$$X_{eq}^{-2} = \int e_m X_m^{-2} ds / \int e_m ds \quad (1)$$

$X_m$ : 観測点から断層面の各微小領域mへの距離 (km)

$e_m$ : 断層面上の各微小領域mからの地震波エネルギーの相対的放出分布

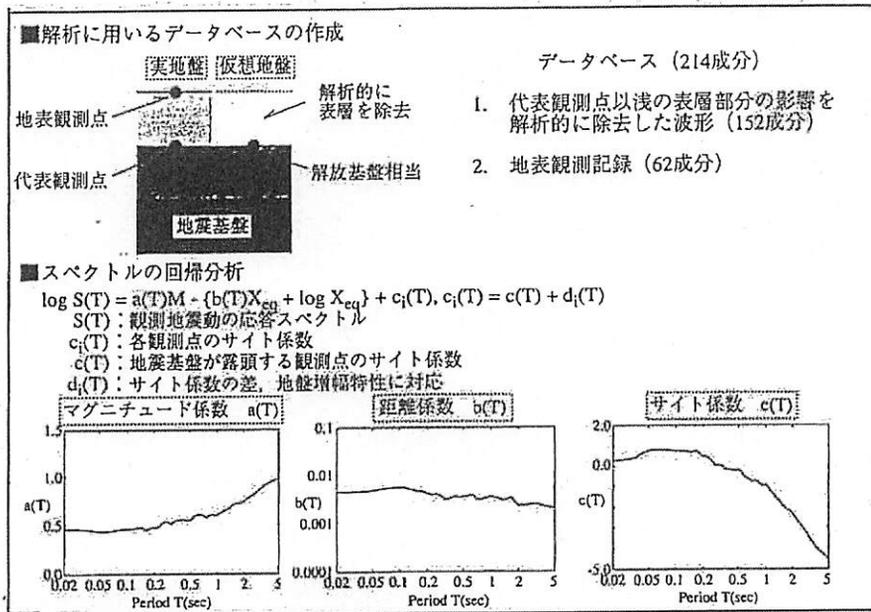
$ds$ : 断層面の微小領域mの面積 (km<sup>2</sup>)



14

## 2-3 解放基盤における地震動評価

### 1) 回帰分析



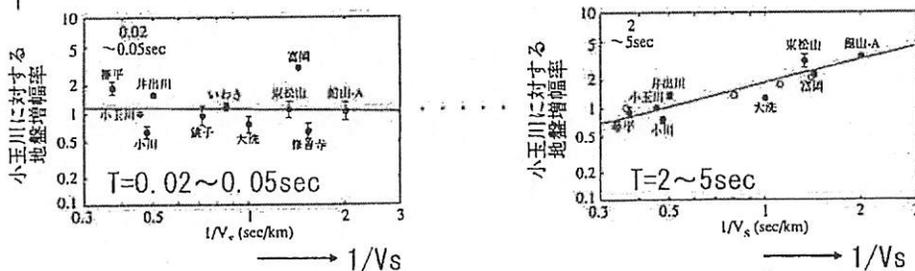
15

### 2) 地震基盤からの地盤増幅率

$$\log pSv(T) = a(T)M - (\log X + b(T)X) + c_i(T)$$

サイト係数  
 地震基盤(小玉川) = 2.0

地盤増幅率のVs依存性

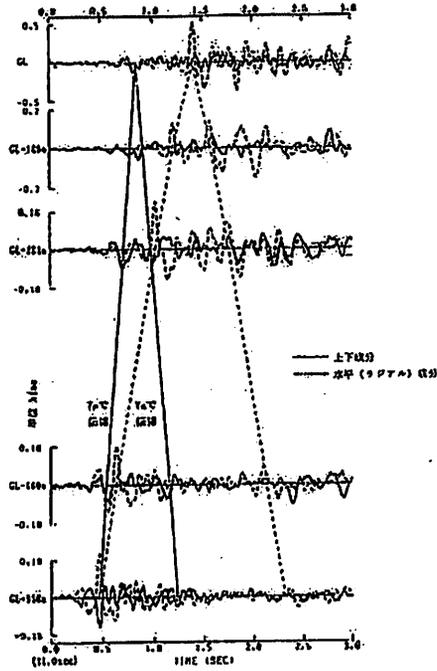


地盤のVsに応じた地震基盤からの増幅率の評価

16

### 3) 上下動の考え方

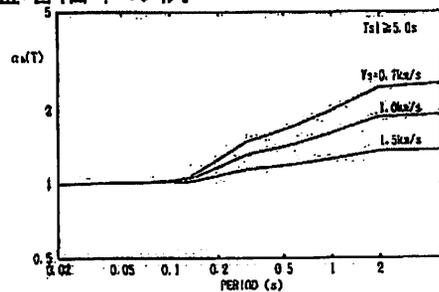
- ◆ S波到達以降を対象
- ◆ 地震基盤まではS波
- ◆ 地震基盤でSV-P変換
- ◆ 地盤はP波で伝播
- ◆ 地盤のV<sub>p</sub>で整理



17

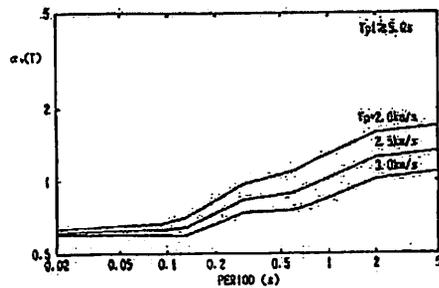
### 4) Vs、Vpごとの地盤増幅率の例

水平動の例



〔水平動〕 地盤増幅率を示す係数 $\alpha(T)$ のS波速度による周波数依存性

上下動の例



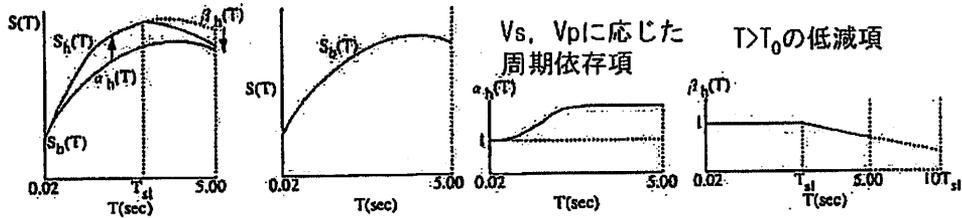
〔上下動〕 地盤増幅率を示す係数 $\alpha(T)$ のP波速度による周波数依存性

18

### 5) 解放基盤の地震動評価

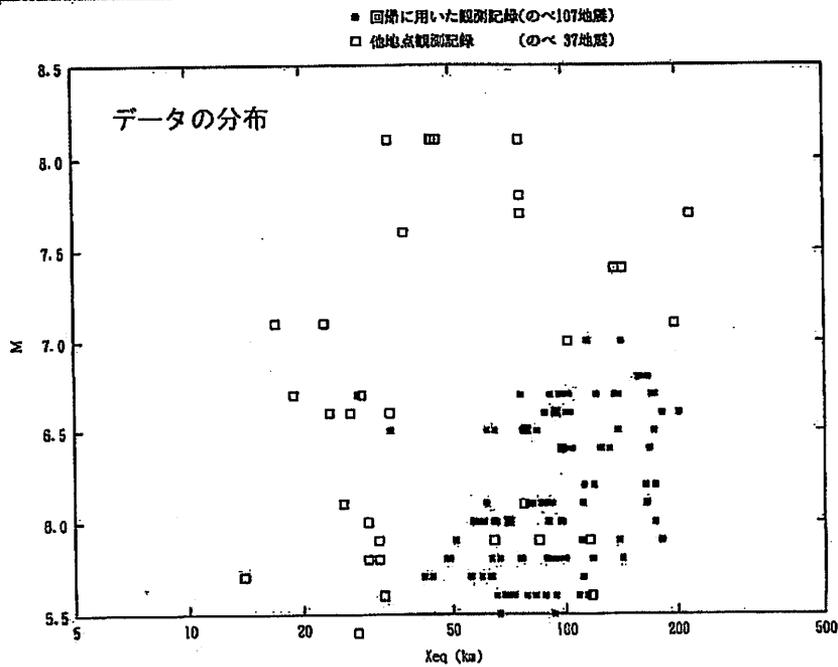
$$\text{解放基盤表面における平均応答スペクトル} = \text{地震基盤における平均応答スペクトル} \times \text{地盤増幅の補正項}$$

地盤増幅率の補正 × 地盤の卓越周期の補正

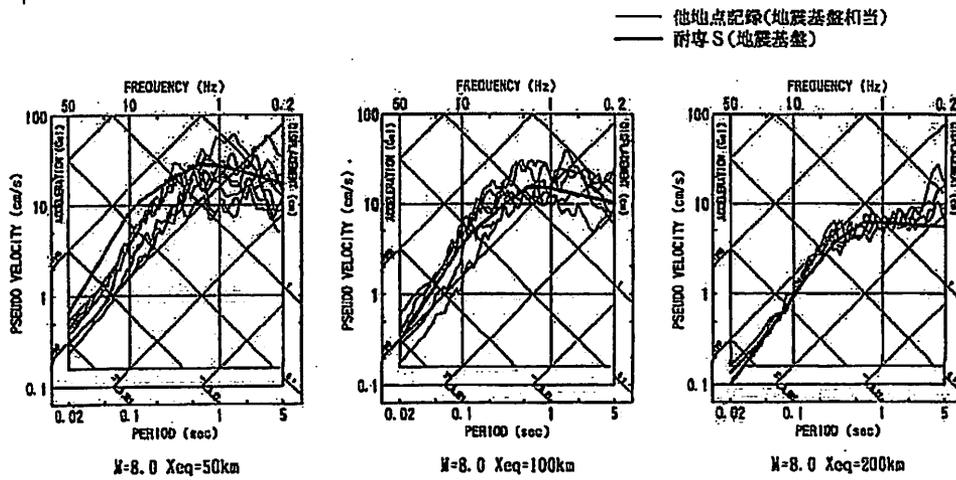


$$\log pSv(T) = a(T)M - (\log X + b(T)X) + c(T)$$

### 6) 国内および海外の他地点の大振幅記録に対する適用性



## 2-4 巨大地震に対する適用性

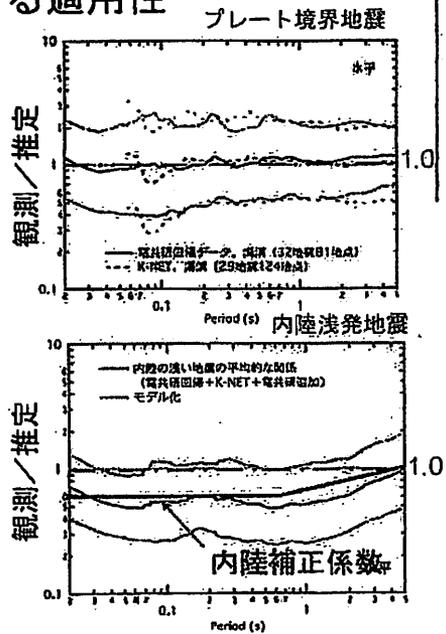
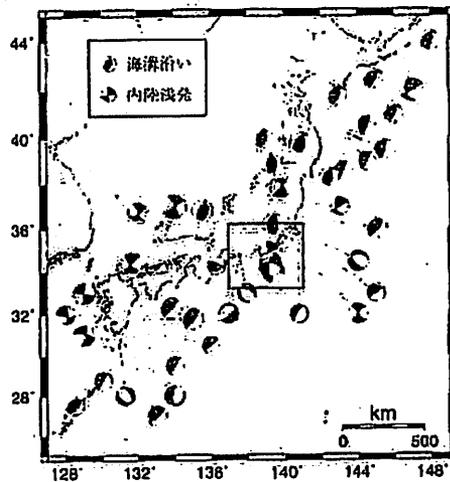


1985年チリ、1985年メキシコ地震を含むM8クラスの地震

21

## 2-5 内陸地殻内地震に対する適用性

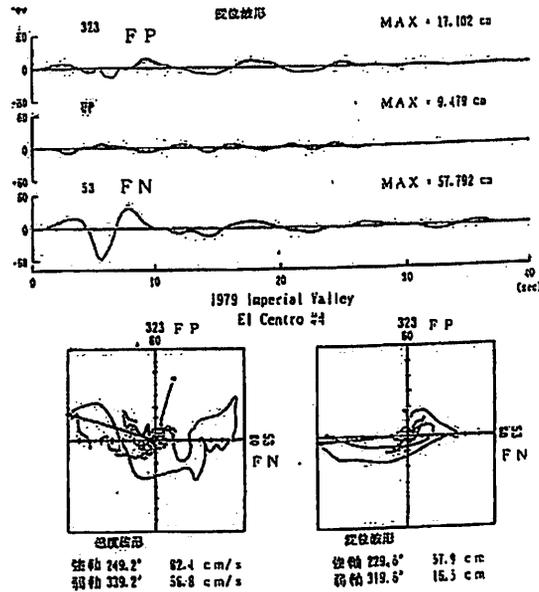
1) K-NET記録も加えた検討  
 ⇒内陸補正係数の提案



水平動

22

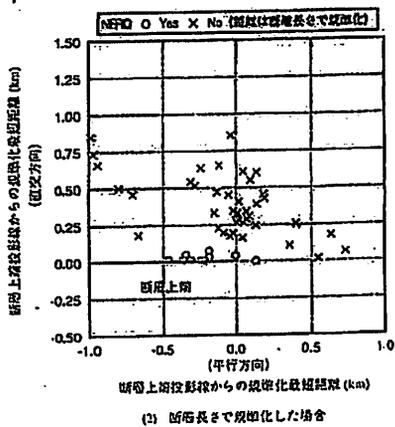
## 2) 震源近傍の破壊伝播効果 (NFRD) の考慮



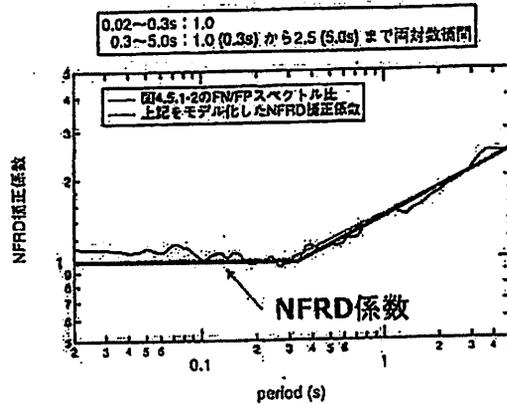
震源近傍の観測記録はFN(断層直方向)が卓越

23

FN/FPが卓越する範囲  
(横ずれ断層の例)



震源近傍の観測記録から定めた  
FN/FPの平均 (NFRD係数) とモデル化



24

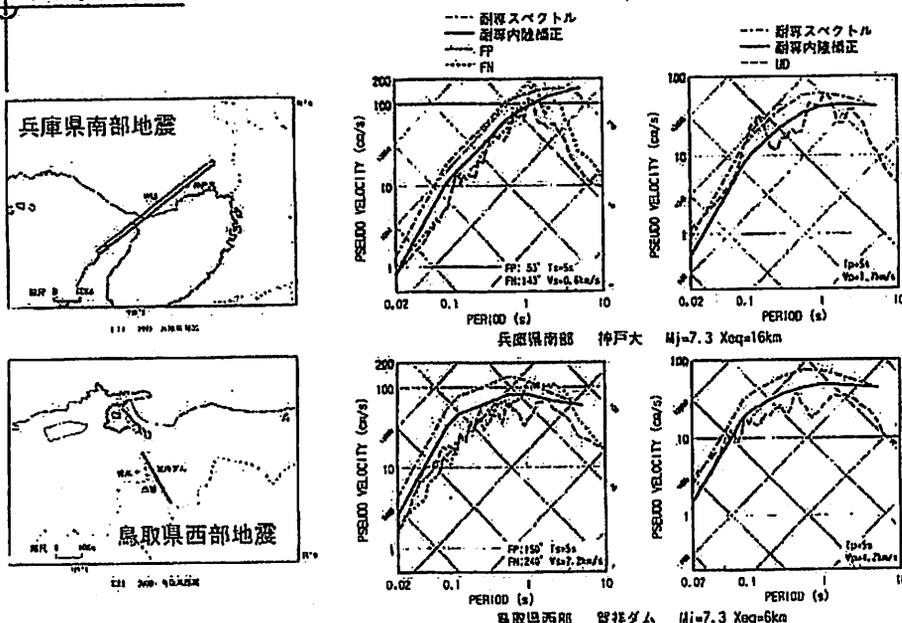
### 3) 近年の地震による適用性の確認

#### 対象とした内陸地殻内地震

年月日	Earthquake	Xeq計算に用いた震源モデル	Site	Mw (HRV)	Mj*1	Xeq (km)	*7 NFRD (km/s)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Vs/Vp 出典
日本 1995.1.17	兵庫県南部	Kakehi et al. [7]	神戸大*2	6.9	7.3	16	○	0.6	1.7	[16]
2000.11.6	鳥取県西部	Yagi & Kikuchi [8]	賀保ダム	6.8	7.3	6		2.2	4.2	地震
			伯太*3	6.8	7.3	11		2.8		[17]
米国 1971.2.9	San Fernando	Heaton [9]	Pacoima Dam *4	6.6	7.1	8	○	1.5	3.0	[18]
			Caltec Seism. Lab.	6.6	7.1	29		0.83	1.3	[17]
			Griffith Park	6.6	7.1	25		0.75	1.75	[18]
1979.8.6	Coyote Lake	Liu & Helmberger [10]	Girloy #1	5.8	6.0	16		2.2	2.75	[20]
1984.4.24	Morgan Hill	Hartzell & Heaton [11]	Girloy #1	5.2	6.5	24		2.2	2.75	[20]
1989.10.18	Loma Prieta	Wald et al. [12]	Girloy #1	7.0	7.6	30		2.2	2.75	[20]
			Lexington Dam	7.0	7.6	20	○	0.87	2.1	[21]
1994.1.17	Northridge	Wald & Heaton [13]	Pacoima Dam *5	6.7	7.2	21	○	1.5	3.0	[18]
			Griffith Park	6.7	7.2	33		0.75	1.75	[18]
			USC Sta. 17	6.7	7.2	29		1.0	2.0	[18]
トルコ 1999.8.17	Kocaeli	Sekiguchi & iwata [14]	Gebze (GBZ)	7.4	8.1	33	○	0.78	2.13	[22]
			Sakarya (SKR)	7.4	8.1	22		1.05	2.57	[23]
台湾 1999.9.21	集集	Yagi & Kikuchi [15]	TCU052 *6	7.6	7.7	20	○	0.62		[24]
			TCU065	7.6	7.7	23	○	0.72		[24]
			TCU067	7.6	7.7	20	○	0.76		[24]
			TCU068	7.6	7.7	24	○	0.58		[24]
			TCU071	7.6	7.7	16		0.98		[24]
			TCU072	7.6	7.7	16		1.22		[24]
			TCU074	7.6	7.7	23		1.1		[24]
			TCU075	7.6	7.7	24	○	0.98		[24]
			TCU076	7.6	7.7	26	○	0.75		[24]
			TCU102	7.6	7.7	26	○	0.93		[24]

25

#### 兵庫県南部地震、および鳥取県西部地震

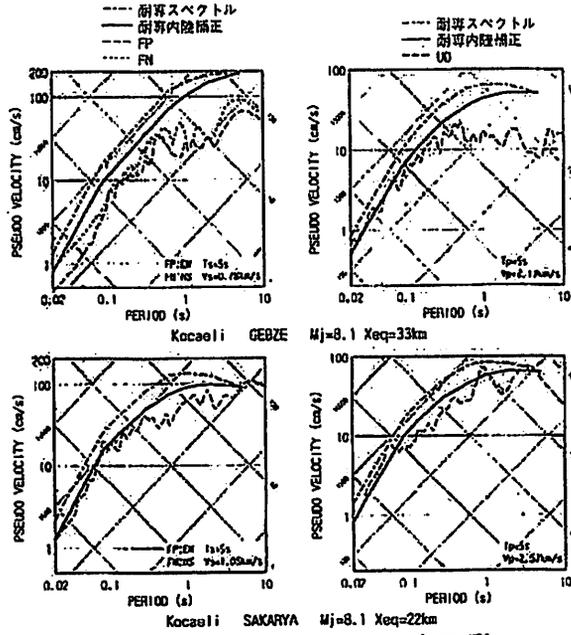
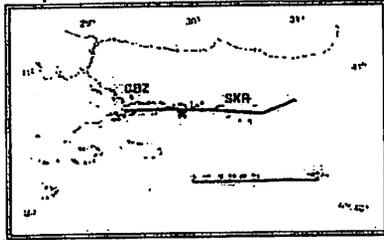


水平動

上下動

26

# トルコ・コジャエリ地震

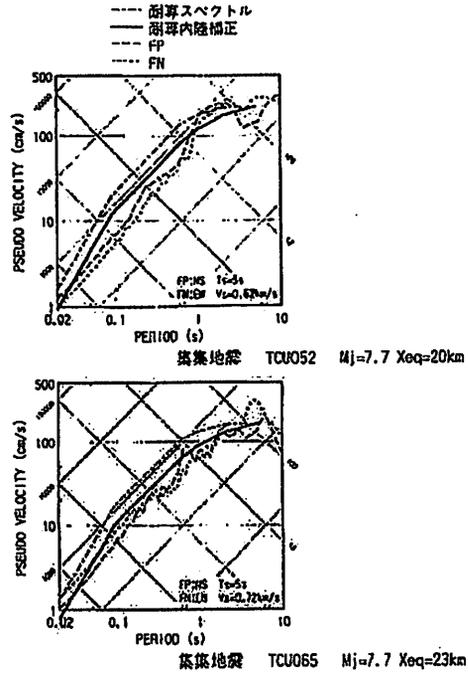
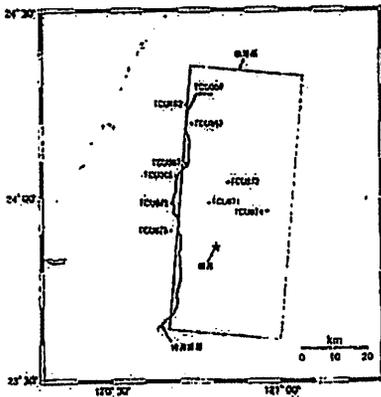


水平動

上下動

27

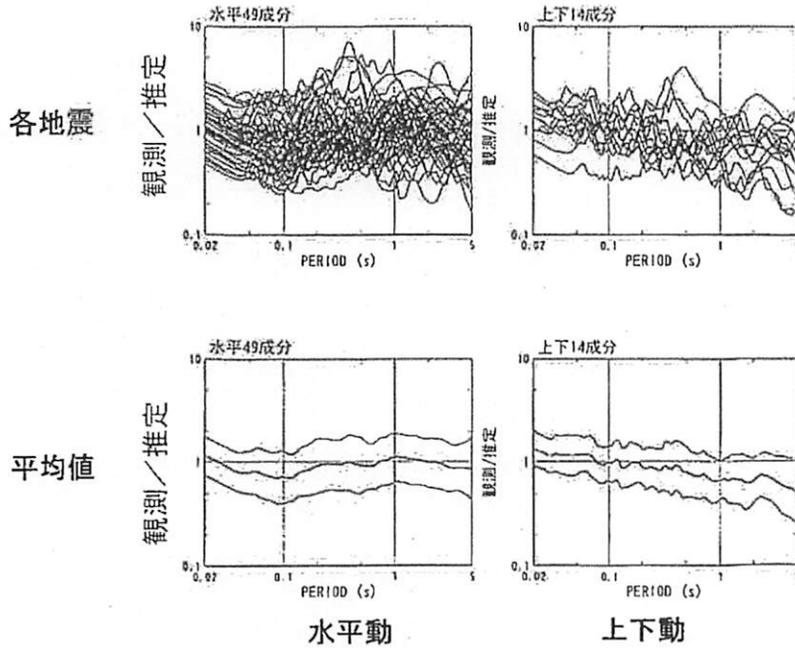
# 台湾・集集地震



水平動

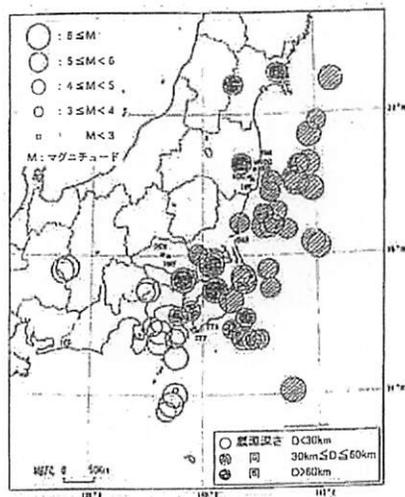
28

## 近年の内陸地殻内地震による残差



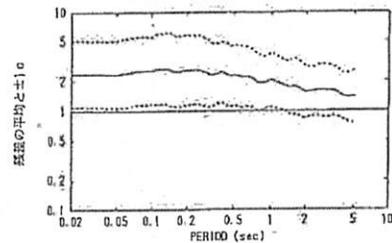
29

## 2-6 やや深発・スラブ内地震 (耐専データセットの範囲外)



電共研観測点の配置と震央位置

60km以深の地震の  
残差(観測/推定)



短周期の励起が大きい

- ・サイトの記録を用いて残差を評価
- ・耐専スペクトルに残差を上乗せ
- ・地域性を考慮した評価をサイト毎に実施

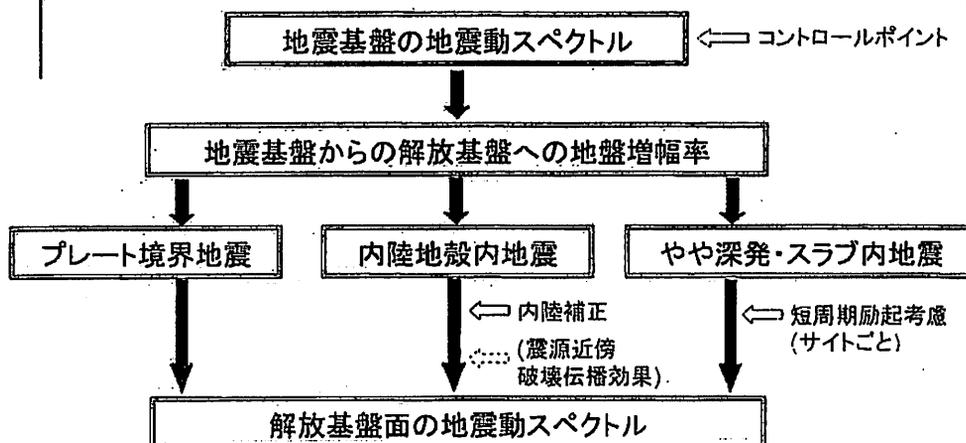
30

### 3. 耐専スペクトルの骨子

31

#### 3-1 解放基盤面の地震動スペクトル

解放基盤表面における水平および上下地震動は、地震基盤における水平地震動を共通として、これに水平動の地盤増幅率および上下動の地盤増幅率を乗じて求められる。



32

	M	X <sub>eq</sub> (km)	コントロールポイントの座標 pS <sub>v</sub> (cm/s)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			TA(s)	TB(s)	TC(s)	TD(s)	TE(s)	TF(s)	TG(s)	TH(s)
			0.02	0.09	0.13	0.30	0.60	1.00	2.00	5.00
極近距離	8.5	40	1.62	18.44	27.32	47.87	68.05	64.66	53.52	40.06
	8	25	1.69	20.05	28.96	48.22	67.80	65.25	52.51	38.35
	7	12	1.40	17.20	24.84	33.86	43.42	36.42	25.15	17.85
	6	6	1.04	12.82	18.51	21.84	23.17	17.41	9.64	3.88
近距離	8.5	80	0.73	7.36	11.43	22.92	34.79	32.58	27.60	21.96
	8	50	0.67	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.70	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.64	19.10	24.83	20.69	14.46	10.37
	6	8	0.77	9.45	13.65	16.23	17.18	12.73	7.16	2.89
中距離	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	16.04	14.96	12.73	10.37
	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.68	4.87	3.64
	6	25	0.21	2.49	3.60	4.54	4.84	3.98	2.07	0.86
遠距離	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.10	0.80	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
	7	125	0.046	0.43	0.70	1.34	1.81	1.59	1.26	1.05
	6	78	0.041	0.45	0.65	0.95	1.03	0.80	0.49	0.22

1) 地震基盤の  
コントロール  
ポイント

33

### 3-2 異なる減衰定数のスペクトルへの変換

h=5% 以外の減衰定数への変換方法

$$S_h(T_i, h) = S_h(T_i) \cdot \eta(T_i, h)$$

$$S_v(T_i, h) = S_v(T_i) \cdot \eta(T_i, h)$$

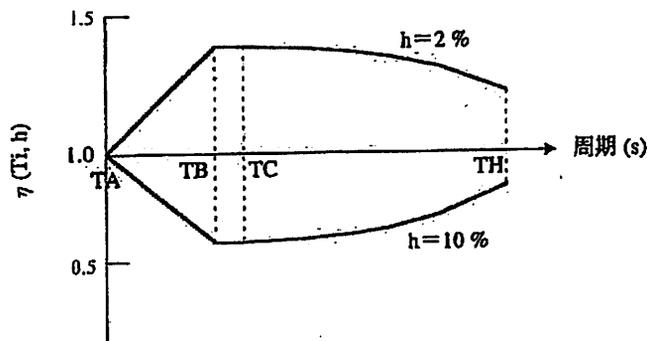


図4 減衰定数hによる応答スペクトルの補正係数

34

### 3-3 地震動の経時特性

$$E(t) = (t/t_B)^2 \quad (0 < t \leq t_B)$$

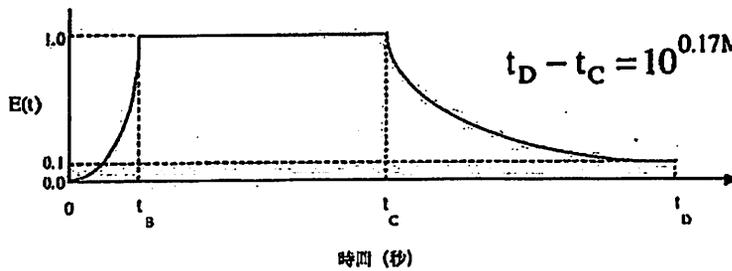
$$E(t) = 1 \quad (t_B < t \leq t_C)$$

$$E(t) = e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C}(t - t_C)} \quad (t_C < t \leq t_D)$$

$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$



35

END

36

## 参考 主な発表論文

- ◆【地震観測】表俊一郎・太田外気晴, 1982, 岩盤における強震アレー観測, 日本地震工学シンポジウム(第6回), 193-200.
- ◆【応答スペクトル】高橋克也・武村雅之・藤堂正喜・渡辺孝英・野田静男, 1998, 様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式, 第10回日本地震工学シンポジウム, 547-552.
- ◆【スペクトルインバージョン解析】Takemura, M., K. Kato, T. Ikeura, and E. Shima, 1991, Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, J. Phys. Earth, 39, 537-552.
- ◆Kato, K., M. Takemura, T. Ikeura, K. Urao, and T. Uetake, 1992, Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, J. Phys. Earth, 40, 175-191.

37

## 続き

- ◆【等価震源距離】Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura, and M. Takemura, 1993, Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics, 218, 69-81.
- ◆【最適化地盤モデル(水平地震動)】武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田寛・大島豊, 1993, 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 446, 1-11.
- ◆【最適化地盤モデル(上下地震動)】藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉脩・高橋克也・武村雅之・田中英郎, 1995, 堆積地盤における上下地震動の特性と $Q_p$ 構造, 日本建築学会構造系論文集, 475, 45-54.

38