

設備機器の地震応答量の実用的な推定法について

青木 繁*・鈴木 浩平*

要 約

大地震時に重要な設備機器が破壊されると、都市機能が維持できなくなるだけでなく、有毒物質が流出する可能性もある。したがって、このような重要な設備機器は大地震時においても破壊しないように設計されなければならない。そのため、設備機器に関して、これまでに地震応答解析などについて多くの研究がなされ、それに基づき耐震設計法の改良がなされてきた。

本稿では、設備機器に関してこれまでに注目されてきた問題について概説した。さらに、設備機器の地震応答量を、それが設置されている建物の地震応答量を基準にして推定できる実用的な手法について述べた。

について述べ、著者らが行った、設備機器の地震応答量の簡易推定法について概説する。

1 はじめに

都市機能維持のための設備機器（たとえば、変電施設や給水施設など）や大都市内および近郊の生産施設内の設備機器（たとえば、生産施設内の貯槽タンクや配管など）が大地震時に破壊すると、都市機能が維持できなくなるだけでなく、有害物質の拡散などの恐れがある。したがって、とくに都市機能維持に必要な設備機器や有害物質が含まれている生産施設内の設備機器は大地震時においても破壊しないように設計されなければならない。そのため、重要な設備機器の耐震設計に関して多くの研究がなされ、これらの研究に基づいて、耐震設計のための技術指針が出されている。（日本電気協会、1970）また、重要な設備機器に対する地震時における被害想定もなされている。（東京都防災会議、1978）

本稿では、このような技術指針や被害想定的基础となる設備機器の耐震設計に関する研究の動向

2 設備機器の耐震設計に関する問題点

設備機器の耐震設計に関して考えられてきたことは、

- 1) 設備機器の地震応答量の推定
 - 2) 確率論による設備機器の信頼性の推定
 - 3) 設備機器の地震応答量低減のための装置の開発
 - 4) 設計裕度の推定
- などがあげられる。

1) については、設備機器は建物内部に設置されている場合が多く、その地震応答は増幅され、変動幅も大きいため、地震応答量の推定がむずかしい。したがって、地震応答量の変動幅がどの程度になるか、また建物の振動特性と設備機器の地震応答量の関係をどのように整理するかなどについて議論がなされてきた。

*東京都立大学都市研究センター・工学部

2) については、設計には経験的に定められる安全率を用いることが多かったが、設備機器などの安全性を確率によって定量的に表わそうとするものである。非常に重要度が高い設備機器はこのような考え方で設計がなされており、破壊確率の推定法などについて議論がなされている。この項に関しては、前報で詳しく述べた。(青木ほか、1982)

3) については、最近注目されている分野である。1) でも述べたように、設備機器は建物内に設置されることが多い。したがって、とくに上層階に設置された設備機器の地震応答は大きく増幅される。そのため、通常の設計では大地震時に大きな被害をうける可能性が大きいため、地震応答量を低減する方法が必要となる。このような地震応答量を低減するための装置がいくつか開発されている。(たとえば藤田ほか、1981) 著者らも前報(青木ほか、1982)で破壊確率の低減に関する解析結果を示した。

4) については、設計で地震応答量やその変動幅を安全のために大きく見積ることが多い。多くの設計項目についてこのような見積をすると、最終的には実際に必要な設計値より大きな設計値を用いることになり、設計に余裕がでるが、この余裕が必要以上に大きいと経済的に不合理となる。この設計の余裕をどのように評価するかということが4)の問題点である。余裕は確率論的に評価する必要もあり、この問題に関する報告書も出されている。(USNRC, 1980)

上述の項目の中で、1) は以前から議論されている問題であるが、全ての問題点が解決されたわけではない。設備機器の地震応答量は種々の条件によって複雑に変化し、その設計法も複雑になる傾向があるが、その一方で、設備機器の地震応答量を簡単に推定できるようにしたいという要望も多い。このような状況を背景に著者らが考えた、設備機器の地震応答量の簡易推定法に関して以下に述べる。

3 設備機器の地震応答量の推定法

設備機器の地震応答解析を行う場合、力学モデルを設定する必要がある。実際の設備機器をモデル化すると、複雑になることが多いが、基本的な振動特性に対する地震応答特性を調べておくことは重要なことである。そのため、簡単なモデルを用いた地震応答解析によって地震応答量を簡便に推定する方法を探った。

3-1 推定法の概要

設備機器は建物内に設置されている場合が多いので、地震応答解析において建物の振動特性も考慮する必要がある。設備機器が建物と比較して十分に軽いとき、建物の地震応答波をそのまま設備機器へ入力として与えることによって地震応答解析がなされる(床応答解析)。設備機器の重量が建物に比べて無視できないときは、連成効果を考慮して地震応答解析がなされる。

本稿では、連成効果を考慮して設備機器の基本的な地震応答特性を把握するため、図1に示す2質点結合系モデルを用いて得られた結果を示す。

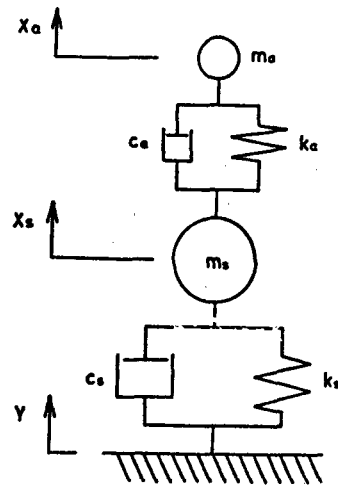


図1 2質点結合系モデル(弾性系)

下の質点系が建物、上の質点系が設備機器を模擬している。建物の地震応答量としては、耐震設計用応答スペクトルとして種々の地盤条件や地震の規模などに対して与えられることが多い。(鈴木、1980)したがって、次の式に示す床応答増幅

係数 (Floor Response Amplification Factor : 以下「FRAF」と記す) によって設備機器の地震応答量を整理することを考えた。

床応答増幅係数 (FRAF) =

$$\frac{\text{設備機器の地震応答量}}{\text{耐震設計用応答スペクトルより得られる建物の地震応答量}} \dots (1)$$

FRAF を提案した根拠および記号や図などの意味は次節以後で詳細に述べることにして、ここでは FRAF を用いて設備機器の地震応答量を求める方法の概要を示す。これを流れ図で示すと図2のようになる。設備機器の地震応答量を求める式をまとめると次のようになる。

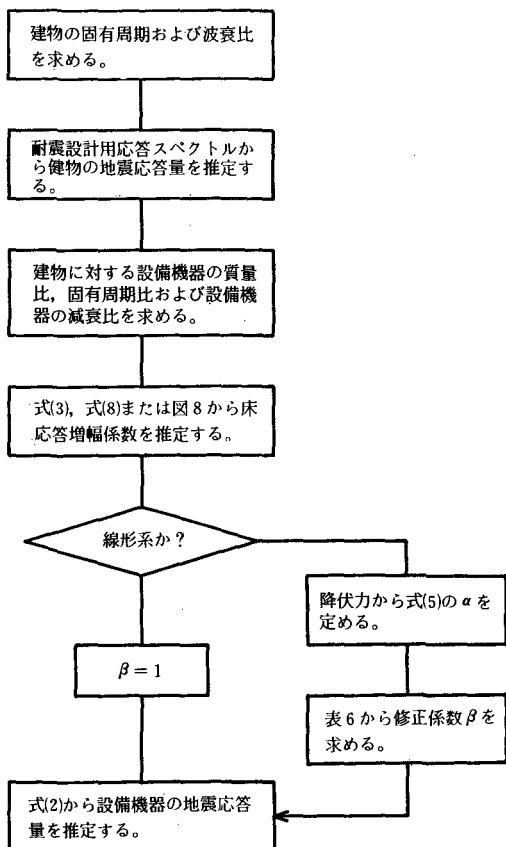


図2 設備機器の地震応答量推定の流れ図

$$R_A = \beta \cdot \text{FRAF} \cdot R_S \dots (2)$$

ここで R_A : 設備機器の地震応答量, R_S : 建物の地震応答量, β : 設備機器が非線形系の場合の修正係数で、線形系の場合は1である。

以下の節で床応答増幅係数の統計的特性などについて詳しく述べる。

3-2 設備機器の地震応答特性

設備機器の地震応答特性を調べるために、図1に示したモデルに実地震波を入力として与えて応答解析をした。使用した地震波を表1に示す。この表に示すように、7種類の代表的な地震波合計19波成分を用いた。設備機器の建物に対する質量比 γ , 設備機器の減衰比 h_a , 建物の減衰比 h_s の値は次のような値を用いた。

γ : 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1

h_a : 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2

h_s : 0.05

設備機器の固有周期 (T_a) および建物の固有周期 (T_s) は0.05秒(s)から5秒の間で選んだ。

まず、設備機器と建物の固有周期が一致する耐震設備上最悪条件における設備機器の地震応答特性を調べ、得られた特性を固有周期が一致しない一般の場合に拡張した。

(1) 設備機器と建物の固有周期が一致する場合

設備機器の地震応答として、絶対加速度応答、建物に対する相対速度および相対変位応答を計算し、それぞれの最大値を求めた。図3に十勝沖EW方向を入力として与えて得られた $h_a=0.01$ のときの加速度応答倍率 (この場合は設備機器の絶対加速応答の最大値と入力地震加速度の最大値の比) を示した。この図から、 T_a と T_s が等しい条件で応答倍率が大きくなるのがわかる。速度および変位の最大値に対しても同じ傾向がみられた。したがって、 $T_a=T_s$ すなわち設備機器と建物の固有周期が一致する条件が設備機器に関して耐震設計上最悪条件であるといえる。 $T_a=T_s$ の条件における設備機器の地震応答量を表わす方法として、この条件での応答量を連ねて得られる

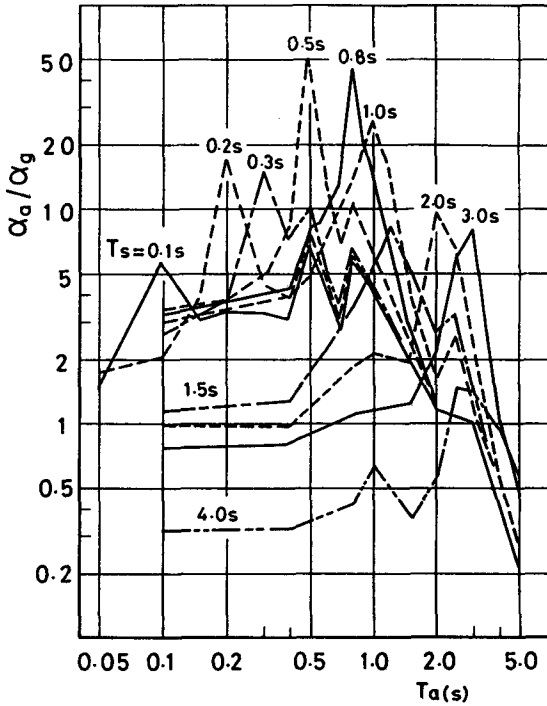


図3 設備機器の加速度応答曲線
(十勝沖EW, $\gamma = 0$, $h_a = 0.01$)

T_s - T_a 包絡スペクトル (佐藤, 1965) がある。その一例を図4に示す。図4に破線で与えられたスペクトルは、建物に対応する1質点系の応答倍率である。この図から、 T_s - T_a 包絡スペクトルと1質点系応答倍率の形状が似ていることがわかる。このため、この比をとることによって、実質上固有周期によらない量が得られると考えられる。この比を最悪床応答増幅係数 (Worst Floor Response Amplification Factor : 以下WFRAFと記す) とよぶことにする。(鈴木ほか, 1978) EI Centro波を入力としたときのWFRAFを図5に示す。この図から、WFRAFは固有周期による変動が小さいことがわかる。したがって、設備機器の地震応答量をWFRAFで整理すると、実用上固有周期によらずに地震応答量を表わせると考えられる。すなわち質量比 γ と設備機器の減衰比 h_a のみの関数で表わせると考えられる。WFRAFの変動を調べるため、表1に示した実地震波を用いて推定した固有周期ごとの加速度に

関するWFRAFの期待値と分散を表2に示す。この表からも、WFRAFが固有周期によらない量であることがわかる。このことは速度および変位応答に対しても成り立つ。

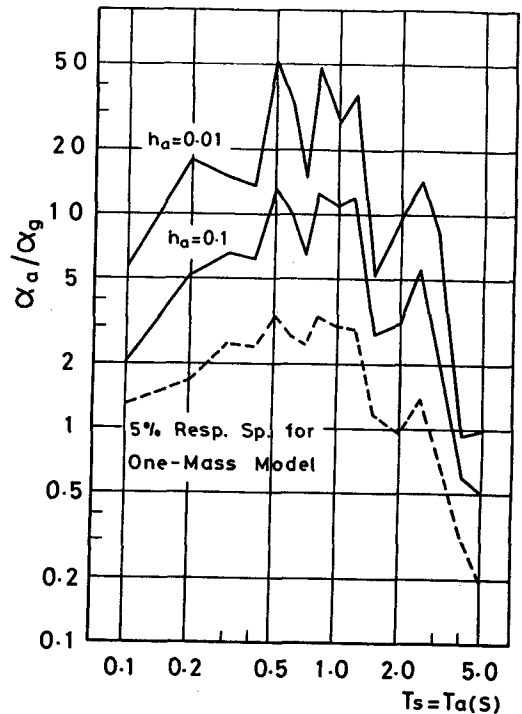


図4 T_s - T_a 包絡スペクトル
(十勝沖EW, $\gamma = 0$)

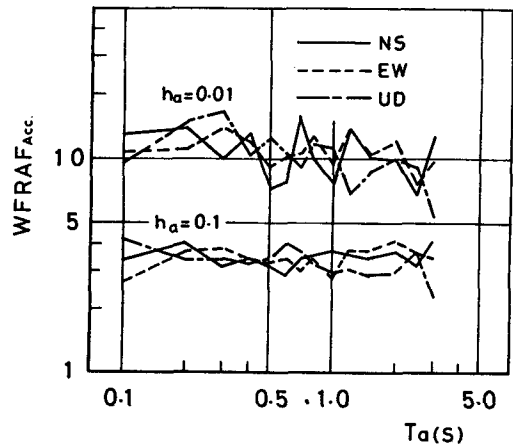


図5 加速度に関するWFRAF
(El Centro, $\gamma = 0$)

表1 解析に用いた地震動

地震名・日付	方向	最大加速度 gal	記録時間 s
El Centro (1940.5.16)	NS	313	35.00
	EW	195	35.00
	UD	—	31.69
Taft (1952.7.21)	S69°E	165	30.80
	N21°E	174	30.80
釧路 (1962.4.23)	NS	244	39.00
	EW	373	39.00
	UD	221	39.00
越前岬沖 (尼ヶ崎高架橋) (1963.3.27)	LG	28	32.00
	TR	36	32.00
	UD	14	32.00
新潟 (県営アパート地階) (1964.6.16)	NS	135	38.00
	EW	157	34.00
	UD	42	29.00
十勝沖 (八戸港湾) (1968.5.16)	NS	225	35.00
	EW	183	35.00
Managua (1972.12.23)	NS	333	26.47
	EW	375	26.46
	UD	320	26.49

WFRAF を実用的な形で表わすため、表2と同様に推定したWFRAFを、選択した固有周期全体にわたって平均化した期待値 ($\overline{\text{WFRAF}}$) および変動係数 (標準偏差と期待値の比) を表3に示す。変動係数は20%以下で、 $\overline{\text{WFRAF}}$ が信頼できる節囲内にあるといえる。 $\overline{\text{WFRAF}}$ を質量比 γ を横軸にとり、減衰比 h_a をパラメータとして表わすと図6の各点のようになる。これに実験式をあてはめると、次の式が最もよく $\overline{\text{WFRAF}}$ を推定できることがわかった。

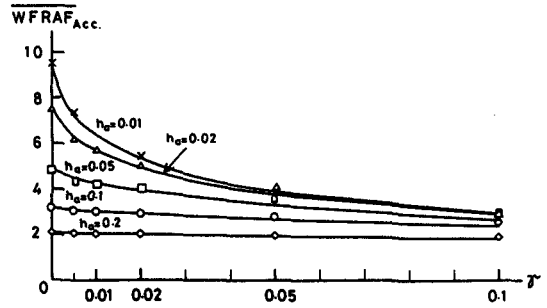


図6 加速度に関するWFRAFの期待値

表2 加速度床応答増幅係数の期待値・分散 ($\gamma=0$)

Ta	ha	期待値				分散			
		0.01	0.02	0.1	0.2	0.01	0.02	0.1	0.2
0.1		6.46	4.99	2.18	1.56	10.36	5.61	0.75	0.18
0.2		10.84	8.18	3.28	2.09	6.62	2.85	0.15	0.03
0.3		11.80	8.93	3.44	2.21	21.20	8.50	0.36	0.05
0.4		9.81	7.60	3.41	2.21	6.29	3.42	0.22	0.03
0.5		10.22	7.91	3.49	2.23	5.20	2.91	0.17	0.02
0.6		10.79	8.14	3.27	2.15	9.00	3.98	0.27	0.04
0.7		10.69	8.00	3.33	2.17	6.64	3.32	0.27	0.04
0.8		11.14	8.43	3.36	2.13	3.40	1.59	0.19	0.03
1.0		10.41	8.11	3.40	2.21	11.83	5.56	0.29	0.02
1.2		11.06	8.54	3.51	2.20	7.12	3.52	0.27	0.04
1.5		9.15	7.21	3.10	2.04	5.65	3.50	0.19	0.04
2.0		9.68	7.62	3.21	2.04	6.25	3.07	0.37	0.10
2.5		8.07	6.84	3.33	2.16	5.60	3.61	0.33	0.07
3.0		9.01	7.26	3.14	2.03	7.35	3.56	0.31	0.05
4.0		6.82	5.74	2.70	1.85	5.53	3.10	0.46	0.14
5.0		7.01	6.14	3.15	2.09	3.91	2.58	0.31	0.10

表3 FRAFの全固有周期にわたる期待値と変動係数

γ \ ha		期待値				変異係数			
		0.01	0.02	0.1	0.2	0.01	0.02	0.1	0.2
加速度	0	9.56	7.48	3.21	2.09	0.169	0.137	0.089	0.045
	0.005	7.37	6.31	3.12	2.07	0.132	0.126	0.102	0.078
	0.01	6.44	5.73	3.04	2.05	0.134	0.131	0.102	0.077
	0.02	5.35	4.94	2.94	2.03	0.132	0.132	0.104	0.078
	0.05	3.93	3.78	2.68	1.96	0.115	0.115	0.109	0.082
	0.1	3.00	2.94	2.38	1.87	0.115	0.116	0.099	0.077
速度	0	10.16	7.94	3.44	2.26	0.191	0.163	0.104	0.088
	0.005	7.80	6.71	3.35	2.25	0.147	0.140	0.106	0.089
	0.01	6.79	6.04	3.26	2.23	0.134	0.132	0.104	0.088
	0.02	5.69	5.25	3.16	2.21	0.123	0.124	0.107	0.090
	0.05	4.14	4.00	2.88	2.15	0.100	0.104	0.102	0.090
	0.1	3.21	3.14	2.58	2.07	0.084	0.088	0.100	0.092
変位	0	9.83	7.75	3.53	2.41	0.195	0.132	0.083	0.073
	0.005	7.63	6.60	3.45	2.41	0.121	0.114	0.080	0.052
	0.01	6.72	6.03	3.39	2.40	0.120	0.116	0.094	0.051
	0.02	5.63	5.25	3.29	2.38	0.118	0.116	0.080	0.052
	0.05	4.20	4.07	3.05	2.35	0.093	0.094	0.083	0.054
	0.1	3.28	3.23	2.76	2.28	0.088	0.087	0.072	0.053

$$\begin{aligned}
 \overline{WFRAF}(\gamma, h_a) &= f_1(h_a) \exp\{-g_1(h_a) \sqrt{\gamma}\}; \\
 0 \leq \gamma \leq 0.04 & \\
 f_1(h_a) &= 16.12 \exp(-5.225 \sqrt{h_a}) \\
 g_1(h_a) &= 10.30 \exp(-9.59 \sqrt{h_a}); 0.01 \leq h_a \leq 0.09 \\
 f_1(h_a) &= 4.33 - 11.2 h_a \\
 g_1(h_a) &= 0.90 - 3.52 h_a; 0.09 < h_a \leq 0.2 \\
 \overline{WFRAF}(\gamma, h_a) &= f_2(h_a) - g_2(h_a) \gamma; 0.04 < \gamma \leq 0.1 \\
 f_2(h_a) &= 62.23 h_a^2 - 27.97 h_a + 5.15 \\
 g_2(h_a) &= 516.7 h_a^2 - 197.0 h_a + 20.53
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式(3)から得られた \overline{WFRAF} の値を図6に実線で示した。

(2) 設備機器と建物の固有周期が一致しない場合

前節で述べた \overline{WFRAF} を、設備機器と建物の固有周期が一致しない一般的な条件に対して適用できるようにすることを考える。 \overline{WFRAF} と同様に、設備機器の地震応答量を耐震設計用応答

ペクトルを基準として表わすため、式(2)に示す床応答増幅係数 (FRAF) (青木ほか, 1981) を計算した。図7に EL Centro NS 方向を入力としたときの加速度に関する FRAF を横軸に設備機器と建物の固有周期の比 (T_a/T_s) を横軸にとり、建物の固有周期 (T_s) をパラメータとして示した。この図から、FRAF は T_a/T_s がほぼ1.5以

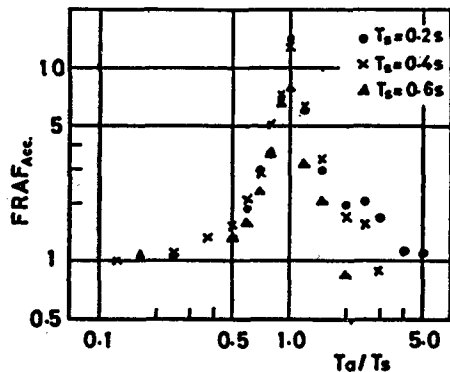
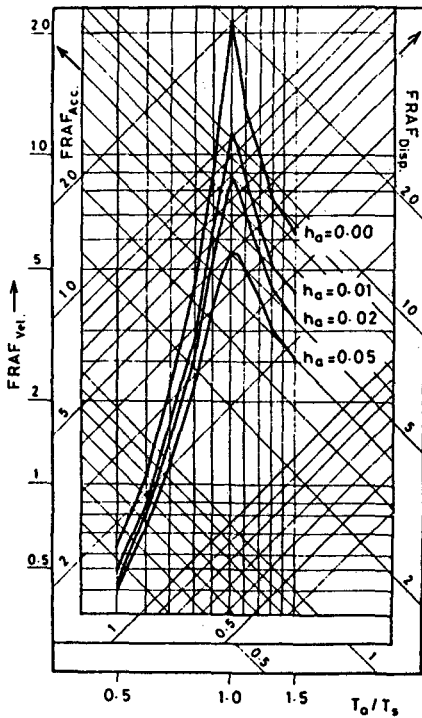


図7 加速度に関する FRAF

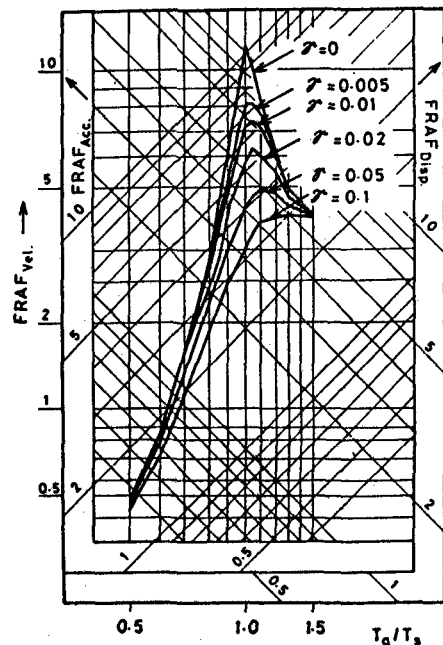
(El Centro NS, $\gamma = 0$, $h_a = 0.01$)

表4 加速度に関するFRAFの期待値および変動係数 ($\gamma = 0, ha=0.01$)

T_a/T_s	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	FRAF	COV
0.50	1.22	1.36	1.54	1.47	1.54	1.57	1.70	1.58	1.50	0.093
0.60	1.39	1.77	1.88	1.86	1.89	2.16	2.14	2.26	1.92	0.136
0.70	1.66	2.27	2.60	2.46	3.05	2.96	3.10	2.66	2.60	0.173
0.80	2.37	3.28	3.91	4.30	3.80	4.62	3.92	3.76	3.75	0.169
0.85	3.04	4.25	5.20	5.61	4.87	5.59	4.87	4.96	4.80	0.163
0.90	4.26	5.39	6.82	8.25	7.10	7.31	6.11	6.44	6.46	0.178
0.95	5.76	7.88	7.99	9.24	9.72	8.86	8.26	7.88	8.20	0.137
1.00	7.26	10.71	11.89	10.28	10.98	11.18	10.96	10.99	10.53	0.124
1.05	6.11	9.70	10.75	9.54	9.02	8.18	8.24	10.33	8.98	0.154
1.10	5.24	7.90	8.15	7.41	7.50	6.82	6.63	7.70	7.17	0.121
1.20	4.09	5.01	6.06	5.27	4.70	4.71	5.13	4.01	4.87	0.126
1.30	3.63	3.93	3.63	3.83	3.42	3.46	3.63	3.04	3.57	0.069
1.50	2.94	3.12	3.06	2.72	2.28	2.49	2.37	1.98	2.62	0.146
1.70	2.82	2.84	2.33	2.03	2.04	1.82	1.70	1.30	2.11	0.237
1.80	2.59	2.93	2.28	1.87	1.70	1.57	1.43	1.13	1.94	0.295
2.00	2.61	1.96	1.84	1.70	1.32	1.33	0.98	1.08	1.60	0.312



(a) $\gamma = 0$



(b) $ha=0.01$

図8 FRAFの三軸曲線表示

下では、 T_s による変動は小さく、 T_a/T_s が与えられればFRAFを容易に推定できると考えられる。 T_a/T_s が0.5以下のとき、FRAFは次式で推定できる。

$$FRAF = \frac{X}{\{1 - (T_a/T_s)\}^2 + 4h_a(T_a/T_s)^2} \quad (4)$$

X は加速度に関して $\sqrt{4h_a^2(T_a/T_s)^2 + 1}$
 速度に関して T_a/T_s
 変位に関して $(T_a/T_s)^2$

$0.5 \leq T_a/T_s \leq 1.5$ のときのFRAFの特徴を調

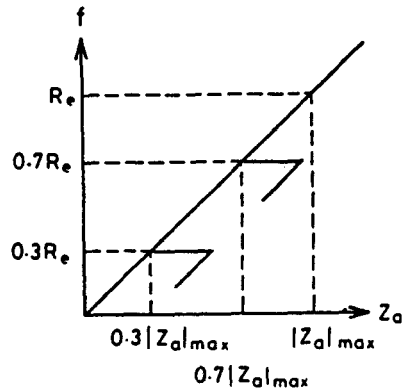


図9 完全弾塑性履歴特性

表5 β の期待値および変動係数 ($\gamma = 0, h_a = 0.01$)

	T_s/T_g	T_a/T_s	期待値		変動係数	
			$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.3$
加 速 度	0.5	0.5	0.825	0.489	0.055	0.048
		1.0	0.732	0.330	0.014	0.019
		2.0	0.724	0.323	0.011	0.017
	1.0	0.5	0.786	0.411	0.047	0.033
		1.0	0.716	0.315	0.004	0.007
		2.0	0.720	0.322	0.009	0.018
	2.0	0.5	0.720	0.346	0.013	0.022
		1.0	0.712	0.311	0.004	0.007
		2.0	0.715	0.316	0.013	0.012
速 度	0.5	0.5	1.529	3.729	0.195	0.181
		1.0	0.754	0.363	0.031	0.051
		2.0	0.799	0.464	0.051	0.099
	1.0	0.5	1.598	2.702	0.177	0.138
		1.0	0.737	0.355	0.017	0.042
		2.0	0.834	0.529	0.099	0.109
	2.0	0.5	0.893	1.316	0.105	0.280
		1.0	0.764	0.361	0.020	0.047
		2.0	0.875	0.585	0.073	0.140
変 位	0.5	0.5	2.477	23.720	0.424	0.414
		1.0	0.829	0.553	0.101	0.230
		2.0	0.913	1.000	0.113	0.293
	1.0	0.5	2.512	8.018	0.276	0.359
		1.0	0.753	0.410	0.013	0.122
		2.0	1.032	1.045	0.097	0.266
	2.0	0.5	1.192	4.608	0.196	0.369
		1.0	0.778	0.422	0.062	0.138
		2.0	0.968	0.971	0.089	0.362

べるため、表1に示した19波の実地震波を入力としたときのFRAFの期待値をTsおよびTa/Tsに対して整理すると、表4のようになる。表4の右の欄に、選択したTs全体にわたって平均化した期待値(FRAF)および変動係数(COV)を示す。変動係数はTa/Tsが1.5以下のとき20%以下で、推定されたFRAFが信頼できる範囲内にあるといえる。

これまで述べてきたようにFRAFは、Ta/Tsで整理できるので、設備機器の地震応答量を表わす便利な指標であるといえる。FRAFを実用的に表示するため、建物の地震応答量を表わすためによく用いられる三軸応答スペクトル(たとえば大崎, 1976)のような形で表わすことを考えた。

図8に、FRAFを三軸線図で示したグラフを示

す。図8(a)は $\gamma = 0$ で h_a を変化させたときのFRAF, 図8(b)は $h_a = 0.01$ で γ を変化させたときのFRAFである。このように表示すると、加速度、速度、変位応答に対するFRAFを同時に表わすことができる。たとえば、 $\gamma = 0$, $h_a = 0.01$, $Ta/Ts = 1.2$ のとき、加速度に関するFRAFは右上りの軸に示されている値を読めばよく、図8(a)からこの場合約5である。速度に関するFRAFは水平軸に示されている値を読めばよく、この場合約6.5である。変位に関するFRAFは左上りの軸に示されている値を読めばよく、この場合は約7.5である。このようにFRAFは、 γ , h_a および Ta/Ts が与えられれば、図8を用いてその値を推定することができる。

表6 β の期待値および変動係数 ($\gamma = 0$, $h_a = 0.001$, $Ta/Ts = 1.0$)
(a)期待値

	Ts/Tg	α								
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
加 速 度	0.5	0.92	0.83	0.73	0.64	0.54	0.43	0.33	0.22	0.12
	1.0	0.91	0.81	0.72	0.62	0.52	0.42	0.32	0.21	0.11
	2.0	0.91	0.81	0.71	0.61	0.51	0.41	0.31	0.21	0.11
速 度	0.5	0.94	0.85	0.75	0.66	0.57	0.47	0.36	0.28	0.18
	1.0	0.92	0.83	0.74	0.65	0.55	0.45	0.36	0.26	0.16
	2.0	0.93	0.84	0.75	0.66	0.56	0.46	0.36	0.27	0.18
変 位	0.5	0.95	0.91	0.83	0.78	0.69	0.62	0.55	0.52	0.58
	1.0	0.93	0.85	0.75	0.68	0.59	0.49	0.41	0.33	0.25
	2.0	0.94	0.88	0.78	0.69	0.61	0.51	0.42	0.34	0.31

(b)変動係数

	Ts/Tg	α								
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
加 速 度	0.5	0.007	0.012	0.014	0.016	0.016	0.021	0.019	0.021	0.027
	1.0	0.004	0.003	0.004	0.004	0.006	0.008	0.007	0.011	0.015
	2.0	0.002	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.005	0.013
速 度	0.5	0.020	0.020	0.031	0.057	0.049	0.054	0.051	0.083	0.113
	1.0	0.009	0.016	0.017	0.025	0.028	0.035	0.042	0.054	0.075
	2.0	0.012	0.014	0.020	0.020	0.029	0.036	0.047	0.061	0.100
変 位	0.5	0.013	0.057	0.101	0.150	0.216	0.215	0.230	0.341	0.525
	1.0	0.014	0.020	0.013	0.062	0.071	0.063	0.122	0.154	0.172
	2.0	0.012	0.054	0.062	0.084	0.089	0.061	0.138	0.221	0.367

(3) 設備機器が非線形系の場合

構造物の非線形性（ガタや塑性変形など）も考慮して耐震設計がなされるようになってきていることを勘案し、設備機器が非線形であるときの FRAF の適用性を検討した。簡単のために、設備機器の復元力特性が図 9 に示す完全弾塑性履歴復元力特性に従う場合を考える。この履歴特性では降伏力がパラメータとなる。降伏力は次式のように定めた。

降伏力 = $\alpha \times$ 線形系の場合の復元力の最大値…(5)

α は非線形性の強さを表わすパラメータで 1 以下の値をとる。

非線形系の応答は入力地震波により大きく変動するので、ここでは入力の特性を規定しやすい定常模擬地震波を用いた。地盤モデルとしては、線形 1 質点系（田治見，1959）を用い、その減衰比に相当する量は 0.4 とした。（佐藤，1965）線形系に対する FRAF を基準として非線形系の地量応答を推定できるようにするため、次式に示すような β の統計量を推定する。

$$\beta = \frac{\text{FRAF}^*}{\text{FRAF}} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、FRAF* は非線形系に対する FRAF を表わす。

定常模擬地震波 20 波を用いて推定した $\gamma = 0$ 、 $h_a = 0.01$ のときの β の期待値および変動係数を表 5 に示す。この表では建物の固有周期と地盤の卓越周期の比 T_s/T_g および設備機器と建物の固有周期の比 T_a/T_s としてそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0 を選んだ。 α は比較的線形性が弱い場合として 0.7, 比較的強い場合として 0.3 を選んだ。この表から、加速度に関しては変動係数が小さく、 β の期待値が信頼できる。その一方で、とくに変位に関しては T_a/T_s が 0.5 および 2.0 のとき変動係数が大きい。これは永久変形の変動が大きいためである。このことから、少なくとも T_a/T_s が 1.0 のとき、 β を用いて FRAF* を推定できる可能性が示された。

次に、 T_a/T_s が 1.0 のとき α による β の変動を調べる。表 6 に α を変えたときの β の期待値および変動係数を示す。この表から、加速度および速度に関しては変動係数はほぼ 10% 以下である。また、 T_s/T_g による期待値の差はほとんどない。変位に関しては、 T_s/T_g が 1.0 のとき変動係数は小さいが、 T_s/T_g が 0.5 および 2.0 のとき α がそれぞれ 0.5 以下および 0.2 以下のとき変動係数が 20% 以上になっている。したがって、少なくとも T_a/T_s が 1.0 のとき、表 6 を用いて FRAF* を推定できる。

4 まとめ

都市機能維持のために必要となる重要な設備機器の地震応答に関してこれまでになされてきた研究の流れおよび問題点について概説した。次に、設備機器の地震応答量を建物の地震応答量で除した床応答増幅係数は、設備機器と建物の質量化、固有周期比および設備機器の減衰比が与えられれば簡便に推定できることを明らかにした。さらに、設備機器が非線形の際の床応答増幅係数の適用性について検討した。この床応答増幅係数を用いることによって、設備機器の地震応答量は図 2 の流れ図によって推定することができる。

末筆ながら、本稿を、1984年3月に定年退官される中野尊正教授に献呈いたします。

文献一覽

- 日本電気協会
1970 「原子力発電所耐震設計法技術指針」
東京都防災会議
1978 「東京区部における地震被害の想定に関する報告書」
青木繁・鈴木浩平
1982 「機械設備の地震時破壊特性の推定について」『総合都市研究』第17号, PP. 69~75
藤田隆史
1981 「設備機器の耐震対策」『生研講習会テキスト』PP. 169~201

- USNRC 論文集』第44巻，第387号，PP. 3749～
1980 「Subsystem Response Review」NUREG/
GR-1706 3758
青木繁・鈴木浩平
- 鈴木浩平 1981 「付加構造物系の地震応答量の簡易推定法
1980 「高圧ガス施設の地震対策の現状と問題点」
『総合都市研究』第11号，PP. 79～93
——床応答増幅係数による推定法——」『日
本機械学会論文集』第47巻，第422号，C編
PP. 1286～1295
- 佐藤壽芳 1965 「機械構造物の耐震設計に関する研究」『東
大崎順彦
京大学生産技術研究所報告』第15巻，第1
1976 「地震動のスペクトル解析入門」鹿島出版
号 会
- 鈴木浩平・青木繁 田治見宏
1978 「付加構造物系の最悪地震応答特性（床応
1959 「耐震理論に関する基礎研究」『東京大学生
答増幅係数による推定法）』『日本機械学会
産技術研究所報告』第8巻，第4号

ESTIMATION METHOD OF EARTHQUAKE RESPONSE OF MECHANICAL EQUIPMENT

Shigeru Acki and Kohei Suzuki

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.20, 1983, pp. 169-179.

Important mechanical equipment in urban areas must be designed so that no performance is lost during and after earthquake excitations. Many studies on earthquake response of such mechanical equipment are presented and a design method based on these studies is offered.

In this paper, first, points of these studies are summarized. Next, a conventional estimating method of earthquake response of mechanical equipment is proposed for a practical aseismic design. This method is based on proposed floor response amplification factor (FRAF) which is the ratio of the maximum response of the mechanical equipment to that of the primary supporting structure. FRAF can be estimated not only through the damping ratio of the mechanical equipment, ratio of mass of the mechanical equipment to that of the supporting structure and ratio of natural period. Therefore, earthquake response of the mechanical equipment can be conventionally estimated by using proposed FRAF.