

付加構造物系の最悪地震応答特性

— 床応答増幅係数による解析 —

Least Feasible Seismic Response of the Secondary Appendage System
— Analysis by Using Floor Response Amplification Factor —

鈴木浩平*

Kohei SUZUKI

1. ま え が き

各種の産業施設内の建屋など主構造物系に設置された機器・配管・塔槽類などの付加構造物系の耐震性を論ずるとき、主構造物系の応答特性を基準とした床応答解析法が用いられることが多い^{1), 2)}。一方、付加系の重量が主構造物系に比較して無視できるほどは小さくないとき、地震入力や地盤特性を勘案して主構造物系と付加構造物系との結合系モデルを用いて、付加系の応答量を解析的あるいは統計的計算手法により推定しようとする研究もすすめられてきた^{3)~6)}。これらの過程のなかで、付加系応答量を左右する多数のパラメータの整理、はん雑な計算法の簡略化・実用化⁷⁾、および応答量の不確定性の把握により耐震設計の信頼性を向上させる問題などが重要な課題となってきた。

本稿は上記の観点から、まず付加構造物と主構造物の固有周期が一致する最悪条件下における付加系の応答特性を多数個の入力地震波を用いて解析した結果について述べる。つぎに、「床応答増幅係数」の提案・導入により、付加系の最悪応答量が固有周期の変動に大きくは依存しない量で整理できることを見出し、主構造物系との重量比および付加系の減衰係数をパラメータとしてこの係数の期待値、分散などの計算を行ない、その統計的性質を評価することにより設計に供しうる資料としての信頼性を向上させようとする。

2. 地震応答解析

2.1 解析モデルと運動方程式

本研究では、主構造物系と付加構造物系の相互作用の影響をも評価するため、応答解析に使用するモデルは両構造物の連結質点モデルとする。図1に示すような主構造物系とそれに設置されたいくつかの付加構造物系が多質点モデルで模擬できる結合モデルの方程式は、一般に次式で記述される。

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = -M\ddot{y} \quad (1)$$

ここで \ddot{y} は地動加速度をあらわし、 Z は各質点の地動に対する相対変位 $z = x - y$ を要素とするコラムマトリク

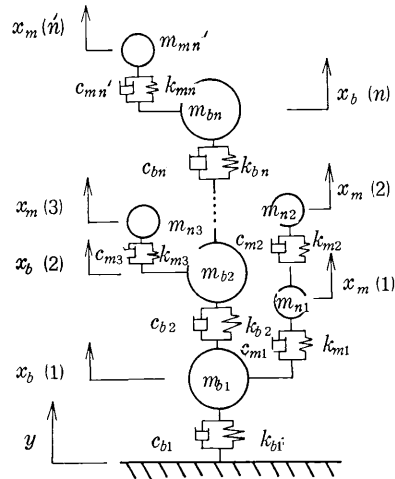


図1 多質点主構造物—付加構造物結合系モデル
スである。 M 、 C および K はそれぞれ質量マトリクス、粘性減衰マトリクスおよび剛性マトリクスをあらわしており、これらは主構造物系(添字 b)と付加構造物系(添字 m)に関して分割するとつぎのようにあらわせる。

$$M = \begin{pmatrix} M_b & O \\ O & M_m \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_b & C_{bm} \\ C_{mb} & C_m \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} K_b & K_{bm} \\ K_{mb} & K_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここでマトリクス C_{bm} 、 C_{mb} 、 K_{bm} 、 K_{mb} は、両構造物質点の結合点における相互作用に関するものである。図1のように主構造物が n 質点、付加構造物が n' 質点で模擬できるとき、マトリクスの大きさは M_b 、 C_b 、 K_b が $n \times n$ 、 M_m 、 C_m 、 K_m が $n' \times n'$ 、 C_{bm} 、 K_{bm} が $n \times n'$ 、さらに、 C_{mb} 、 K_{mb} は $n' \times n$ となる。方程式(1)を主構造物系と付加構造物系に関して分離し、地動に対する相対変位の形に書きなおすと、

$$\left. \begin{aligned} M_b \ddot{Z}_b + C_b \dot{Z}_b + K_b Z_b + C_{bm} \dot{Z}_m + K_{bm} Z_m - M_b \ddot{y} \\ M_m \ddot{Z}_m + C_m \dot{Z}_m + K_m Z_m + C_{mb} \dot{Z}_b + K_{mb} Z_b = -M_m \ddot{y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

しかし付加系の応答変位を議論するときは、一般に主構造物系の設置点に対応する質点に関する相対変位で記述の方が便利なことが多い。このとき、方程式は、

$$\begin{aligned} M_m \ddot{X}_{mb} + C_m \dot{X}_{mb} + K_m X_{mb} &= -M_m x_b(j) \\ &= -M_m \{ \ddot{z}_b(j) + \ddot{y} \} \end{aligned} \quad (4)$$

* 研究員

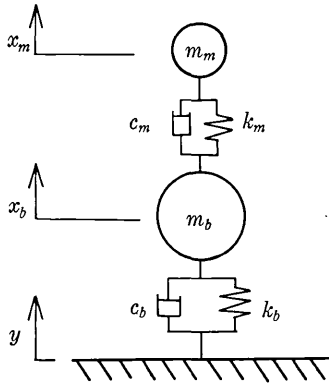


図2 2質点結合系モデル

の形をとる。ここで $x_b(j)$ は主構造物系の j 番目の質点の絶対変位であり、 $X_{mb} = X_m - x_b(j)$ である。 X_m は付加系の絶対変位をあらわすマトリクスである。

本研究では、もっとも簡単なモデルとして図2に示すような両構造物系をそれぞれ1質点系で代表させた2質点結合系モデルを対象として解析をすすめる。このモデルの運動方程式は式(3)を用いると、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z}_b + 2(\zeta_b \omega_b + \gamma \zeta_m \omega_m) \dot{z}_b + (\omega_b^2 + \gamma \omega_m^2) z_b \\ - \gamma (2\zeta_m \omega_m \dot{z}_m + \omega_m^2 z_m) = -\ddot{y} \\ \ddot{z}_m + 2\zeta_m \omega_m \dot{z}_m + \omega_m^2 z_m - 2\zeta_m \omega_m \dot{z}_b - \omega_m^2 z_b = -\ddot{y} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\omega_b = \sqrt{k_b / m_b}$ 、 $\omega_m = \sqrt{k_m / m_m}$ は両系の固有円振動数、 $\zeta_b = c_b / 2\sqrt{m_b k_b}$ 、 $\zeta_m = c_m / 2\sqrt{m_m k_m}$ は両系の減衰係数比、また $\gamma = m_m / m_b$ は両系モデルの質量比をあらわす。

2.2 付加系の応答解析

表1 解析に用いた強震記録(19波)

地震名 (site) 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	221	39.00
	UD	373	39.00
越前岬沖 (尼ヶ崎高架橋) 1963. 3. 27	橋軸方向	28	32.00
	橋軸直角方向	36	32.00
	UD	14	32.00
新潟 (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

方程式(5)の右辺の強制入力 \ddot{y} として、地表強震記録を採用することにより、付加系質点の最大応答諸量を求める。入力として用いた強震記録は表1に示す19波である。Taftと十勝沖以外については上下動記録も採用しているが、これはこれらの地震において上下動が比較的大きかったこと、および水平動応答特性との差異を検討するためであり、ここでは同時入力による応答解析は行っていない。

応答計算に必要な諸パラメータのうち、主構造物モデルの減衰係数比 ζ_b は代表値として0.05に固定する。また付加系モデルの減衰係数比 ζ_m と質量比 γ は、つぎの諸値を選んだ。

$$\zeta_m = 0.01, 0.02, 0.1, 0.2$$

$$\gamma = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$$

ここで $\gamma = 0$ は、付加系モデルの質量が主構造物系のそれに比し十分小さく、前者の応答が後者の応答に影響を与えない場合に相当する。また両系モデルの固有周期は、0.05sから5.0sの範囲内で16個選び、主構造物モデルの固有周期 T_b を固定した点において付加系モデルの固有周期 T_m を変化させ、その最大応答を計算している。

図3はこのようにして計算した加速度応答曲線、図4は速度応答曲線群の一例である。図3についてみると、 T_b を固定した個々の応答曲線にみられるいくつかのピークのうち最も卓越したものは、いくつかの例外(この場合4.0s)を除くと、 $T_b = T_m$ なる点で生じている。0.5s、0.8sなどにみられる鋭いピークは粘性減衰が小さい

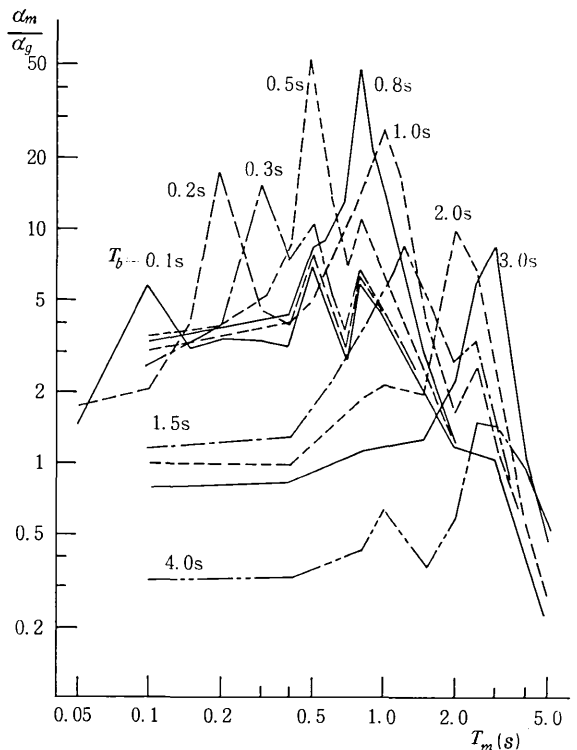


図3 付加系加速度応答曲線群
(十勝沖 EW, $\gamma = 0, \zeta_m = 0.01$)

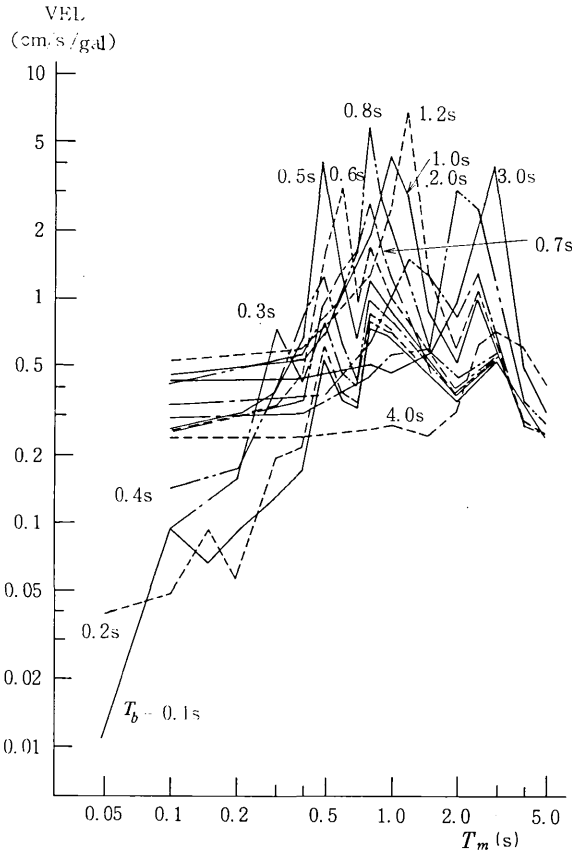


図4 付加系速度応答曲線群
(十勝沖 EW; $\gamma=0; \zeta_m=0.01$)

ときの response spectrum のピークに対応しており、入力波の特性を反映している。上記の特徴は速度応答曲線群にもあらわれており、さきに佐藤⁴⁾により明らかにされた $T_b = T_m$ における顕著な応答卓越性が「やや長周期」の領域においても保持されることが確認された。

このように主構造物系と付加構造物系の固有周期が一致することは、付加構造物の耐震設計上の最悪条件になると考えられ、 $T_b = T_m$ なる点での最大応答を包絡した $T_b - T_m$ 応答スペクトル⁴⁾はこの最悪条件を示す基準となりうる。図5と図6は、このようにして求めた $T_b - T_m$ 加速度応答スペクトルの例である。これらの曲線は、当然のことながら入力地震動の周波数特性に強く依存したものとなるため、各入力について最悪条件下での応答量の包絡特性を示すという有益な情報を与える反面、その形状やピーク位置には入力波によって大きな差異があり、直接的には、一般の付加構造物の耐震設計に採用するデータとはなりにくいという問題点をもつ。

3. 床応答増幅係数とその統計的性質

図5と図6には、減衰係数比を主構造物モデルの減衰係数比 $\zeta_b = 0.05$ に一致させた場合の1質点系の応答スペ

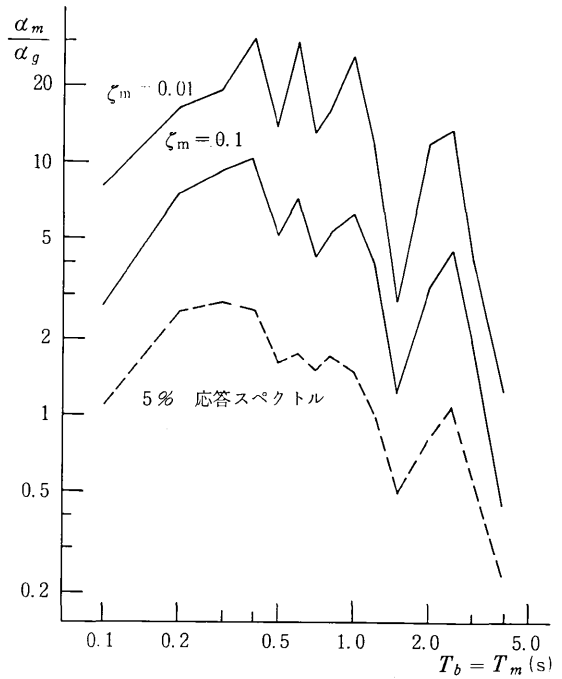


図5 $T_b - T_m$ 加速度応答スペクトル (十勝沖 NS; $\gamma=0$)

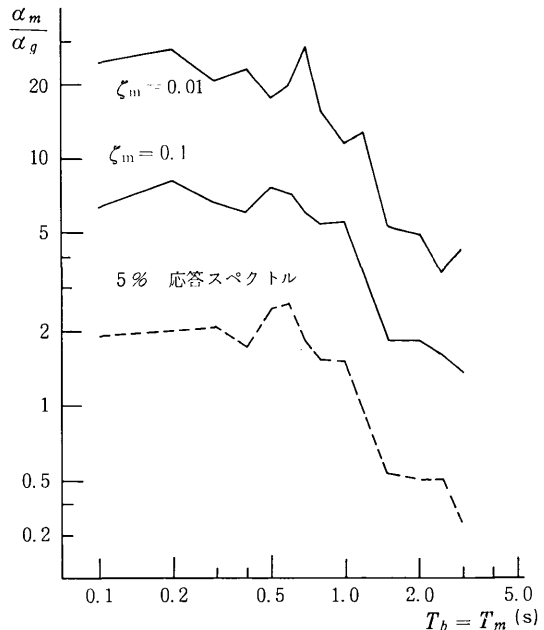


図6 $T_b - T_m$ 加速度応答スペクトル (El Centro NS, $\gamma=0$)

クトルをあわせて示してある。これらの図から、 $T_b - T_m$ 応答スペクトルと1質点系スペクトルの形状やピーク位置が良く似た特徴をもつことが理解される。従ってこの類似性に着目し、 $T_b = T_m$ なる条件下での付加系の応答量を対応する固有周期をもつ1質点系の応答スペクトル値で除した値は、実質的には主構造物系床面(設置点)に対する付加系の応答増幅量となり、入力波の周波数特性に強くは依存せず比較的固有周期の変動に影響されな

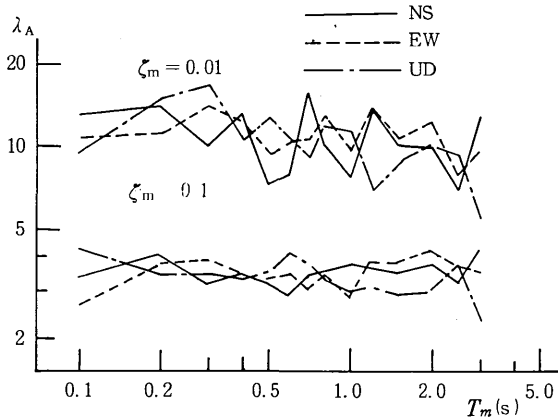


図7 加速度床応答増幅係数 (El Centro, $\gamma = 0$)

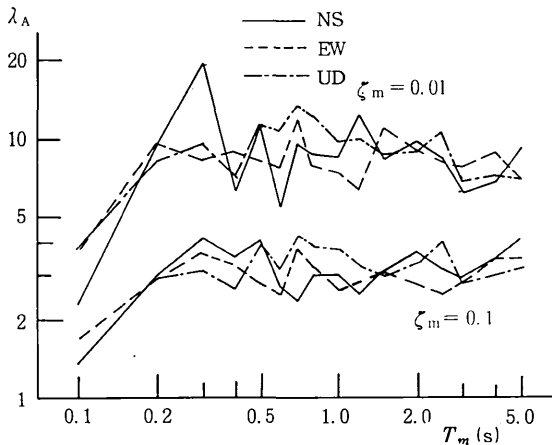


図8 加速度床応答増幅係数 (新橋, $\gamma = 0$)

い値となることが期待される。以下、この値を床応答増幅係数とよび、 λ なる記号であらわすことにする。

図7と図8は、加速度応答に関して上記の床応答増幅係数を計算した例である。これらの値の固有周期による変動は、地震入力によりその様相を異にするが、大局的には $T_b - T_m$ 応答スペクトルに比べて非常に変動幅が小さくなるのが理解される。El Centro 波のような不規則性の強い入力のと看、とくに付加系の粘性減衰量が大なるときにはその変動幅は小さくなるのが推定される。

つぎに前記19波を入力としたときの床応答増幅係数の統計的性質について調べてみる。表2は、各固有周期別の19波による期待値と分散を計算した例 ($\gamma = 0$) であり、表3はそれらの固有周期全体について計算した加速度、速度および変位に関する期待値と変異係数を、 γ と ζ_m をパラメータとして整理したものである。まず期待値についてみると、 ζ_m が大なるほど、また γ が増すほど小さくなる。 γ が増加すると、付加系の応答は主構造物系の応答と独立には議論できなくなり、床応答増幅係数のもつ物理的意味も失なわれるが、 γ を0から0.1まで変化させたときの加速度についての19波による平均的特性を

表2 加速度床応答増幅係数の期待値および分散 ($\gamma = 0$)

T_b (s)	ζ_m 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 各床応答増幅係数の期待値と変異係数 (全固有周期にわたる期待値)

ζ_m	γ	ζ_m 期待値				変位係数			
		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
	0.01	6.44	5.73	3.04	2.05	0.134	0.131	0.102	0.077
	0.1	3.00	2.94	2.38	1.87	0.115	0.116	0.109	0.077
速 度	0	10.16	7.94	3.44	2.26	0.191	0.163	0.104	0.088
	0.01	6.79	6.04	3.26	2.23	0.134	0.132	0.104	0.088
	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
	0.01	6.72	6.03	3.39	2.40	0.120	0.116	0.094	0.051
	0.1	3.28	3.23	2.76	2.28	0.088	0.087	0.072	0.053

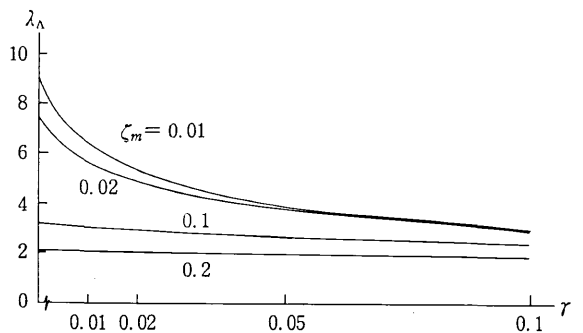


図9 加速度床応答増幅係数の期待値

示したのが図9である。 γ と ζ_m をパラメータとして、この曲線を最小自乗法によって二次曲線近似を行なうと、たとえば加速度応答については、 $0 \leq \gamma \leq 0.1$, $0.01 \leq \zeta_m \leq 0.2$ において

$$\lambda_A = a\gamma^2 + b\gamma + c \tag{6}$$

$$\begin{cases} a = 50,400\zeta_m^2 - 15,200\zeta_m + 1,030 \\ b = -7,300\zeta_m^2 + 2,250\zeta_m - 160 \\ c = 240\zeta_m^2 - 835\zeta_m + 9 \end{cases}$$

表4 水平動入力と上下動入力による比較
($\gamma = 0.005$)

床応答増幅係数		水平動入力(14波)				上下動入力(5波)			
		ζ_m				ζ_m			
		0.01	0.02	0.1	0.2	0.01	0.02	0.1	0.2
加 速 度	期待値	7.37	6.31	3.11	2.06	7.57	6.52	3.20	2.09
	分散	1.19	0.78	0.12	0.03	0.81	0.51	0.06	0.01
速 度	期待値	7.44	6.38	3.18	2.15	7.56	6.52	3.25	2.17
	分散	2.40	1.61	0.28	0.09	1.29	0.86	0.09	0.02
変 位	期待値	7.63	6.59	3.44	2.37	7.85	6.80	3.49	2.40
	分散	1.12	0.73	0.10	0.03	0.84	0.54	0.05	0.01

なる近似式を得る。このような表現式は、耐震計算に有効となることが期待される。

一方、分散についてみると、表2から明らかなように、とくに減衰が小さいときには固有周期ごとの変動はかなり大きい。分散の値自体も短周期側においては大きく、変位係数に直すと0.3~0.5にもなる。しかし、減衰係数が大なるときは0.1sの短周期、2.0s以上の長周期域を除いた領域では、ほぼ一定の値になっている。表3の固有周期全体にわたる変異係数の期待値をみると上記の傾向はいっそう明確となり、質量比のいかんにかかわらず、 ζ_m が0.1以上のときはほぼ0.1以下になっており、図9の特性、あるいは式(6)の推定値が信頼度の高いものであることを裏づけている。

さて本研究で用いた表1に示した19波の強震記録のうち5波は上下動記録である。これら上下動入力のパワースペクトルを計算してみると、周期全体にわたり水平動入力に比べ平相な広帯域不規則性を示していることがわかった。そこで水平動14波と上下動5波とによる床応答増幅係数の期待値と分散を比較したのが表4である。加速度、速度、変位とも上下動入力の場合の方が分散の小さいことが理解される。水平動入力の標本数が多いことを考慮することの差はさらに大きいと思われる。すなわち床応答増幅係数は、上下動入力に対する耐震設計にはより信頼性があるといえる。

4. あとがき

種々の設計条件に適合した設計スペクトルや模擬地震波など設計地震動が整備されつつある現況のもとで、付構造物系の最悪応答量を、床応答増幅係数の形で統計的に整理した。実際の耐震設計はここで述べたような最悪条件でなされることは考えられず、両系の固有周期は接近しないようにとられるであろう。従って、この点から最悪条件下で得た特性を、実用に供せるデータとして整備していくことが今後の課題となろう。

本研究の遂行に関し、本所第2部佐藤壽芳教授から多大の助言と討論をいただいた。厚く感謝申し上げる。また本研究の計算は東京都立大学工学部青木繁助手に負うところが大きい。同君の助力に感謝する。

(1977年2月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本電気協会, 「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG 4601-1970), (昭45. 10)
- 2) 高圧ガス保安協会, 「コンビナート保安防災技術指針」(KHK E 007-1974), (昭49. 6)
- 3) Penzien, J. et al., Proc. 3WCEE, Vol. 2 (1965), 476
- 4) 佐藤, 東大生産技術研究所報告, Vol. 15, No 1, (昭40. 11)
- 5) Newmark, W. J. et al., Proc. 4WCEE, Vol. 2 (1969) B-37
- 6) Amin, M. et al., Proc. ASME 1st Congr. on Pressure Vessel & Piping (1971-5)
- 7) 佐藤ほか, 機械学会講演論文集, 760-3 (昭51. 4) 131