

地盤振動加速度の振動数が構造物の最小質量設計に及ぼす影響

菊田 征勇*・松井 邦人**・新延 泰生***

Effects of Ground Acceleration Frequency on Minimum Mass Design of Structures

YUKIO KIKUTA*, KUNIHITO MATSUI** AND YASUO NIINOBE***

Synopsis: Aseismic design is currently conducted based on a seismic coefficient method or its modified method by considering the dynamic response and further in case of particularly important structure a dynamic analysis will be carried out for sake of safety. However a dynamic analysis at a certain frequency results in extreme response beyond an acceptable range.

An optimum structural method in a time dependent domain has been already presented on the structures subject to ground acceleration and showed the effectiveness of our algorithm. Through our past research, it is expected that the frequency will affect the optimized structural system. Hence in this report choosing 10 member truss subject to varying external frequency with constant magnitude of acceleration, a minimum mass design was carried out with constraints on stresses, bucklings and lower bounds of cross sectional dimensions of its members. Influence of the frequency on optimum material distribution is thoroughly investigated. The results shows that the minimum mass of the structure reduces with the increase of damping ratio, the most unfavorable frequency is about 3.50 Hz, the drastic change on the material distribution occurs before and after the external frequency corresponding to the peak value of minimum mass.

It is found that the optimized structure under seismic coefficient method does not meet the requirements, once dynamic analysis is conducted and the amount of violation could exceed beyond the range of safety factor. Furthermore even if the structure associated with the most unfavorable frequency does not necessarily satisfy all the constraints when external frequency changes.

To achieve rational design procedure on a structure subject to dynamic load, it is apparent the need to take into consideration of the external frequency range.

要旨：現在耐震計算は、震度法あるいは応答を考慮した修正震度法によって行われ、特別な場合に動的解析により安全性の照査を行っている。しかし、構造物に動的外力が作用した場合、そ

* 工学部土木工学科 教授

Professor, Civil Engineering Division

** 東京電機大学理工学部建設工学科 教授

Professor, Dept. of Civil and Structural Engineering, Tokyo Denki University

*** 東洋大学工学部土木工学科 助教授

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Toyo University

の卓越振動数の値によっては構造物の応答が大きくなりすぎ、許容範囲を越えてしまうことがある。

我々は既に、構造物に地盤振動加速度が作用した場合について、動的解析を用いた最適化手法を提案し、その有効性を示したが、今回10部材から成るトラス構造物を対象として、地盤振動の加速度振幅は一定であるが、その卓越振動数が種々変る場合について、座屈応力も含めた応力制約および部材断面寸法の制限による最小質量設計を行い、構造物の動的特性がどのように変化するかを研究した。

その結果最小質量は、地盤振動加速度の卓越振動数の影響を大きく受け、この例では 3.50 Hz 付近で最大値を有することが分った。なお、減衰としては構造減衰を考えているが、この減衰が大きくなるにつれ、最小質量は次第に小さくなることも分った。また最小質量が最大となる地盤振動加速度の振動数を境目として、固有振動数や部材の質量配分の割合も大きく変ることが明らかになった。

さらに、最小質量が最大となる断面を設計に用いた場合、地盤振動加速度の振動数によっては危険な応力状態を生じ、最大断面を用いることが必ずしも安全でないことを示した。

なお、同じ制約条件で震度法による最小質量設計も行ったが、この場合の最適断面を用いた構造物に地盤振動加速度を作用させた場合も、安全率ではカバーできないような応力状態を生じることが分った。

1. はじめに

現在耐震計算は、比較的剛性の高い構造物に対して、地震による荷重を構造物に静的に作用させて計算する震度法、あるいは比較的固有周期の長い構造物に対して、強震観測結果に基づき、地震動の特性、構造物の動的特性などを考慮して震度法の設計震度を修正した応答を考慮した修正震度法のいずれかによって計算されており、大規模でかつ地震時の挙動が複雑な橋は動力学的に解析すること（動的解析）により、安全性を照査することになっている¹⁾。

しかし、構造物に動的外力が作用した場合、外力の加速度振幅の値が小さくともその卓越振動数の値によっては構造物の応答が大きくなりすぎ、危険な状態を生じることがある。

ところで我々は既に、地盤振動加速度が構造物の支点に作用した場合について、動的解析による最適化の手法を提案し、トラス構造物を対象として若干の計算例を示して、提案した最適化手法の有効性を示している^{2),3),4)}。

今回、我々が提案した前述の最適化手法を用いて、10部材から成るトラス構造物を対象として、地盤振動加速度を構造物の支点に作用した場合について、振動加速度の振幅は一定でその卓越振動数変る時、座屈も含めた応力制約および部材断面寸法の制限による最小質量設計を行って、構造物の動的特性がどのように変化するかを研究した。さらに、震度法を用いて、同じ制約条件で最適化された構造物の安全性を検討し、地盤振動加速度を受ける構造物を設計する場合の資料を示そうとするものである。

なお動的解析をする場合、応答スペクトル法を用いれば比較的少ない計算時間で動的応答が

求められるが、この研究の目的が、地盤振動加速度の卓越振動数の変化による構造物の動的特性の変化を調べることにあるので、多少時間はかかっても動的応答が精算できる時刻歴応答法を用い、その中でも Newmark の β 法 ($\beta=1/6$) によった。

2. 問題の定義

構造物の支点到地盤振動加速度が入力する場合の最適化に関する手法等は既報の通り^{2),3),4)}であるが、簡単に述べると次のようになる。

最適性の判断の規準（目的関数）としては、構造物の質量、ひずみエネルギー、固有振動数、最大変位、逸散エネルギー、などが考えられるが、ここでは最も頻繁に用いられる構造物の質量を目的関数 ϕ_0 とした。すなわち、設計変数を \mathbf{b} として

$$\text{目的関数} \quad \phi_0 = g_0(\mathbf{b}) \quad (1)$$

制約条件としては、応力（座屈応力も含む）、変位および設計変数の上限、下限等が考えられるが、このうち、応力および変位については一般に

$$\eta(\mathbf{z}_s, \mathbf{z}_D(t), \mathbf{b}) \leq 0 \quad (2)$$

と表わされる。この場合、構造物に静的な荷重が作用している状態で、地盤振動加速度が作用すると考えるもので、 \mathbf{z}_s は静的荷重による構造物の変位で、剛性方程式

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}_s = \mathbf{Q} \quad (3)$$

から求められる。ここに、 $\mathbf{K}(\mathbf{b})$ は剛性マトリックスであり、 \mathbf{Q} は静的外力ベクトルである。

また、 $\mathbf{z}_D(t)$ は地盤振動加速度が作用したときの構造物の相対変位で、運動方程式

$$\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}_D(t) + \mathbf{C}(\mathbf{b})\dot{\mathbf{z}}_D(t) + \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{z}_D(t) = -\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}_0(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_D(0) = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_D(0) = \mathbf{0} \quad (6)$$

から求められる。ここに、 t は時間、 $\mathbf{M}(\mathbf{b})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{b})$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックスを表わし、 $\ddot{\mathbf{z}}_0(t)$ は地盤振動加速度である。なお、 $\mathbf{M}(\mathbf{b})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{b})$ および $\mathbf{K}(\mathbf{b})$ は対称マトリックスであり、 $\mathbf{M}(\mathbf{b})$ と $\mathbf{K}(\mathbf{b})$ は正値である。また、式(5)および(6)は初期条件である。

ところで、式(2)は時間 t の値のいかんにかかわらず満足されなければならない、パラメトリックな制約条件となっている。時間に依存する状態変数 $\mathbf{z}_D(t)$ を含む制約条件の場合、最適制御の理論⁵⁾を用いれば、式(2)は次のように書き換えられる。

$$\phi_i = \int_0^t \hat{\eta}_i dt = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p_i \quad (7)$$

$$\text{ただし,} \quad \left. \begin{array}{ll} \hat{\eta}_i = \eta_i & \text{if } \eta_i > 0 \\ \hat{\eta}_i = 0 & \text{if } \eta_i \leq 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

ここに、 τ は構造物が地盤振動加速度の作用を受け始めてからその応答が最大に達するまでの時間である。

また、設計変数の上限、下限の制約条件は、一般に

$$\phi_i = g_i(\mathbf{b}) \leq 0, \quad i = p_1 + 1, p_1 + 2, \dots, p_2 \quad (9)$$

と表わされる。

以上から、地盤振動加速度の作用を受ける構造物の最適化問題は、制約条件式(7)、(9)を満足し、目的関数式(1)を最小にすることである。

なお、最適化の手法としては、Rosen の傾斜斜影法 (Gradient Projection Method)^{6),7)} を用いており、変数を減少させるために、剛性方程式および運動方程式の随伴方程式を用いて、状態変数の変化量を設計変数の変化量で表わす感度解析を行っている。

3. 数値計算例

数値計算例として、Fig. 1 に示すような6節点10要素の平面トラスの塔状構造物に、地盤振動加速度が作用する場合について、最小質量設計を行った。これは最上部に給水槽などの重量物を積載した構造物を対象としたものである。

i) 材料定数

トラス構造物の構成材料は鋼材で、そのヤング係数は $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ {206 GPa}、密度 $\rho = 0.00785 \text{ kg/cm}^3$ {7.85 Mg/m³} である。

ii) 設計変数

設計変数 b_i は各部材の断面積であり、構造物の対称性、材料の規格化および設計変数の減

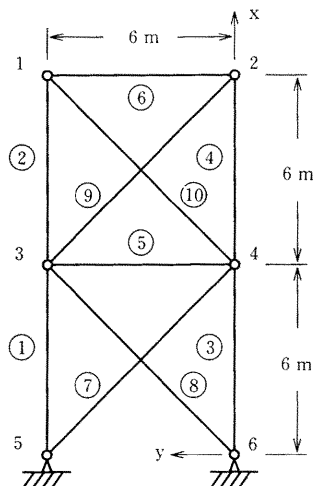


Fig. 1 10 Member Truss Tower

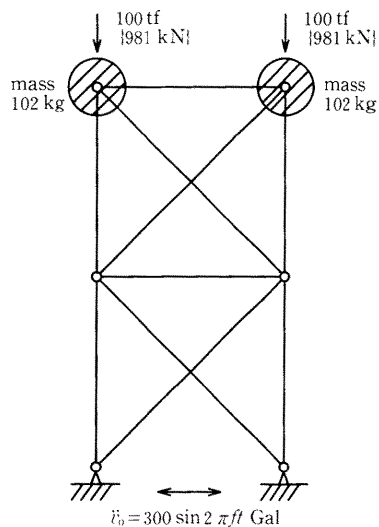


Fig. 2 Seismic Loading

少化を考慮して、2 部材を 1 グループとし、5 グループに分けている。なお、断面積の下限および上限は各グループともそれぞれ 0.10 cm^2 , 1000.00 cm^2 とした。

iii) 制約条件

制約条件としては、前述の部材断面寸法の制限以外には座屈応力も含めた応力制約だけを考慮し、変位制約は考えていない。許容圧縮応力度および許容引張応力度はともに 1400 kgf/cm^2 [137.3 MPa] であり、許容座屈応力度はオイラーの座屈応力度を安全率 1.70 で除した値を用いている。このとき、オイラーの座屈応力を求める場合の断面 2 次モーメント I_i は、設計変数である部材断面積 b_i の関数として $I_i = \alpha b_i^2$ とおいたが、簡単のために $\alpha = 1.00$ とした。

iv) 荷重条件

Fig. 2 に示すように、静的荷重として節点 1 および 2 に重量物 100 tf [981 kN] を載せている。これに相当する質量は 102 kg である。

さらに地盤振動加速度として、水平方向に $\ddot{v}_0 = 300 \sin 2\pi f t \text{ Gal}$ を作用させた。これは、地盤振動加速度の卓越振動数 f の影響を調べるために、加速度を正弦波に単純化したものである。 f の値としては、地震動の卓越振動数が一般に $0.50 \sim 10.00 \text{ Hz}$ であることを考慮して、 $0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 3.75, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00 \text{ Hz}$ の 13 種を用いた。なお、一般的には設計震度と地震動の最大加速度とは一義的に対応するとは限らないが、加速度の振幅 300 Gal は、示方書¹⁾ に示されている設計水平震度の最大値 0.3 にほぼ相当するものと考えて定めたものである。

また、加速度を作用させる時間 τ は、 f の値にかかわらず 3 秒とした。これは $f = 0.50 \text{ Hz}$ の場合を除いて、加速度が 3 波以上作用することになる。なお、運動方程式を解く場合、

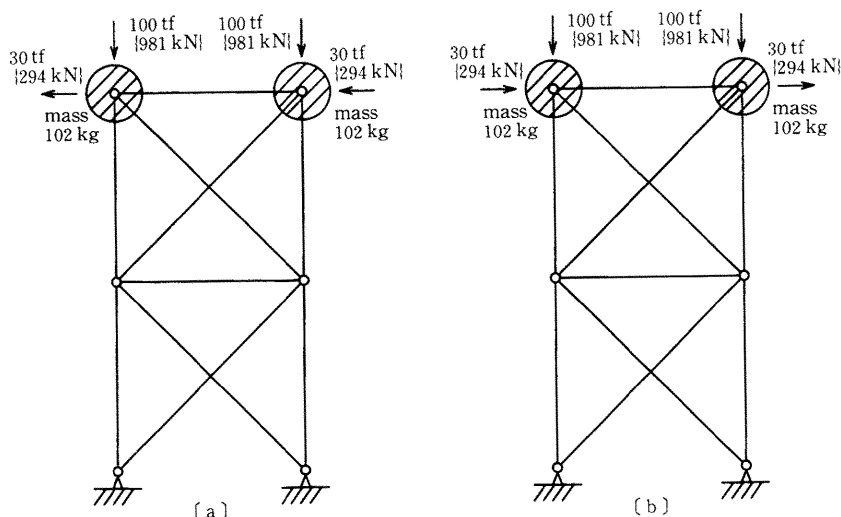


Fig. 3 Seismic Coefficient Loading

Newmark の β 法 ($\beta=1/6$) を用いているが、この場合時間間隔を 0.002s とした。

なお、減衰としては構造減衰を用い、 $C(b)=(h/\pi f_{01})K(b)$ である。ここに h は減衰定数、 f_{01} は 1 次の固有振動数である。減衰の程度を考慮して、 $h=0.00, 0.02, 0.05, 0.10$ の 4 種とした。

以上述べた荷重条件を Seismic Loading と称する。

この Seismic Loading と比較するために、Fig. 3 に示すように、水平震度を 0.3 とした震度法による荷重条件 Seismic Coefficient Loading (SCL) の場合および Fig. 4 に示すように、死荷重のみの場合 Static Loading (SL) についても計算した。

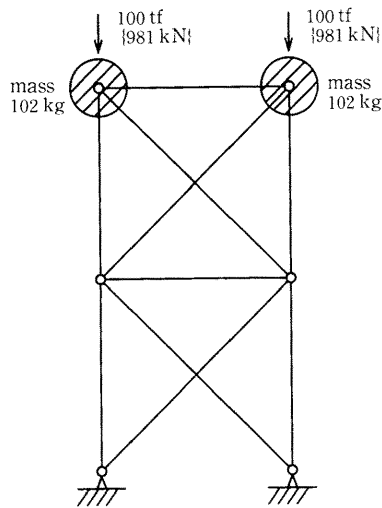


Fig. 4 Static Loading

4. 計算結果および考察

前記諸条件における計算結果を、減衰定数ごとに区分して、Table 1~4 に示す。また比較のためにいずれの場合も、Seismic Coefficient Loading および Static Loading の場合の値を併記した。なお最大変位は絶対値を示す。

Fig. 5 に Optimum Mass の結果を図示する。これを見ると、Optimum Mass は減衰定数の値のいかんにかかわらず、振動加速度の振動数が 0.50 Hz から増大するにつれて、Seismic Coefficient Loading の場合の値から順次増加し、 $h=0.00, 0.02$ の場合には $f=3.50$ Hz で最大となり、 $h=0.05, 0.10$ の場合には $f=3.00$ Hz で最大となっており、これを過ぎると、Optimum Mass は急激に減少し、 $f=8.00$ Hz の時に多少バラツキはあるが、次第に Static Loading の場合の値に収束しているようである。なお、振動数ごとに見れば、減衰が大きくなるにつれて、当然のことながら Optimum Mass は減少している。

Fig. 6~7 に、最適化されたトラス構造物の 1 次および 2 次の固有振動数を図示する。座標

Table 1 Optimum Design for 10 Member Truss (Damping=0.00)

Loading Condition		Optimum Design Variables cm ²					Optimum Masses kg	Natural Frequencies Hz		Max. Displacements cm	
		B1	B2	B3	B4	B5					
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10		1st	2nd	Vertical	Horizontal
Seismic Coefficient Loading		135.38	92.44	0.85	50.56	50.54	3,501	2.10	2.91	0.80	1.72
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	156.16	100.32	0.10*	57.28	57.05	3,940	2.24	2.78	0.80	1.97
	$f=1.00$ Hz	184.96	110.62	0.10*	65.93	65.64	4,538	2.41	2.97	0.80	2.26
	$f=1.50$ Hz	226.89	126.18	0.10*	76.58	76.35	5,364	2.62	3.19	0.80	2.28
	$f=2.00$ Hz	284.19	147.95	0.10*	96.73	95.87	6,638	2.93	3.56	0.80	2.80
	$f=2.50$ Hz	351.12	172.47	0.10*	126.89	125.51	8,296	3.30	4.03	0.80	2.88
	$f=3.00$ Hz	451.16	202.66	0.10*	161.17	159.11	10,427	3.70	4.51	0.78	2.89
	$f=3.50$ Hz	527.88	240.93	0.10*	210.08	206.65	12,795	4.12	5.09	0.80	2.94
	$f=3.75$ Hz	204.40	123.95	0.10*	68.36	68.34	4,915	2.49	3.04	0.80	2.37
	$f=4.00$ Hz	156.70	107.02	0.10*	54.63	54.66	3,941	2.22	2.73	0.80	1.91
	$f=6.00$ Hz	103.28	90.85	3.26	34.95	33.32	2,769	1.79	3.36	0.80	1.05
	$f=8.00$ Hz	116.82	119.57	1.96	39.34	37.16	3,264	1.90	3.06	0.80	0.66
	$f=10.00$ Hz	82.55	81.58	5.80	34.00	30.69	2,463	1.68	3.98	0.80	0.61
	$f=12.00$ Hz	84.28	76.41	5.21	29.06	26.73	2,306	1.62	3.75	0.77	0.52
Static Loading		70.91	69.87	4.74	19.15	13.67	1,808	1.31	3.35	0.78	0.20

Remarks: * indicates lower bound on design variables

Table 2 Optimum Design for 10 Member Truss (Damping=0.02)

Loading Condition		Optimum Design Variables cm ²					Optimum Masses kg	Natural Frequencies Hz		Max. Displacements cm	
		B1	B2	B3	B4	B5					
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10		1st	2nd	Vertical	Horizontal
Seismic Coefficient Loading		135.38	92.44	0.85	50.56	50.54	3,501	2.10	2.91	0.80	1.72
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	151.11	98.40	0.10*	55.69	55.46	3,832	2.21	2.74	0.80	1.93
	$f=1.00$ Hz	178.58	108.60	0.10*	64.11	63.86	4,411	2.38	2.93	0.80	2.21
	$f=1.50$ Hz	220.44	124.08	0.10*	75.24	74.93	5,247	2.59	3.17	0.80	2.54
	$f=2.00$ Hz	273.95	143.92	0.10*	92.43	91.58	6,389	2.87	3.49	0.80	2.78
	$f=2.50$ Hz	338.19	168.11	0.10*	120.82	119.56	7,973	3.23	3.94	0.80	2.87
	$f=3.00$ Hz	416.03	197.59	0.10*	155.41	153.43	9,896	3.61	4.43	0.80	2.93
	$f=3.50$ Hz	508.10	231.98	0.10*	195.43	192.67	12,143	4.01	4.93	0.81	3.00
	$f=3.75$ Hz	182.93	115.52	0.10*	62.81	62.83	4,486	2.38	2.92	0.80	2.19
	$f=4.00$ Hz	136.57	98.79	0.59	47.50	47.43	3,487	2.08	2.75	0.80	1.68
	$f=6.00$ Hz	100.20	86.81	3.71	34.58	33.08	2,698	1.77	3.48	0.80	1.03
	$f=8.00$ Hz	96.68	88.61	3.96	34.68	32.49	2,678	1.76	3.55	0.77	0.69
	$f=10.00$ Hz	82.26	77.74	5.80	32.01	29.14	2,377	1.66	3.94	0.79	0.59
	$f=12.00$ Hz	80.58	74.79	5.60	28.49	25.76	2,239	1.59	3.83	0.78	0.51
Static Loading		70.91	69.87	4.74	19.15	13.67	1,808	1.31	3.35	0.78	0.20

Remarks: * indicates lower bound on design variables

Table 3 Optimum Design for 10 Member Truss (Damping=0.05)

Loading Condition		Optimum Design Variables cm ²					Optimum Masses kg	Natural Frequencies Hz		Max. Displacements cm	
		B1	B2	B3	B4	B5		Hz		cm	
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10		1st	2nd	Vertical	Horizontal
Seismic Coefficient Loading		135.38	92.44	0.85	50.56	50.54	3,501	2.10	2.91	0.80	1.72
Seismic Loading	f= 0.50 Hz	146.89	97.04	0.10*	54.24	54.01	3,741	2.18	2.71	0.80	1.88
	f= 1.00 Hz	174.92	107.29	0.10*	63.04	62.79	4,336	2.36	2.91	0.80	2.17
	f= 1.50 Hz	212.84	121.25	0.10*	73.31	73.04	5,098	2.56	3.13	0.80	2.48
	f= 2.00 Hz	262.85	139.76	0.10*	87.36	86.63	6,111	2.80	3.40	0.80	2.77
	f= 2.50 Hz	321.04	161.71	0.10*	113.09	111.99	7,547	3.14	3.83	0.80	2.85
	f= 3.00 Hz	390.85	188.20	0.10*	144.21	142.47	9,275	3.49	4.28	0.80	2.91
	f= 3.50 Hz	241.70	136.89	0.10*	78.40	78.33	5,655	2.68	3.24	0.80	2.65
	f= 3.75 Hz	161.67	107.69	0.10*	56.25	56.26	4,037	2.25	2.77	0.80	1.98
	f= 4.00 Hz	127.69	94.26	1.47	45.44	45.19	3,312	2.02	3.02	0.80	1.56
	f= 6.00 Hz	97.65	84.12	4.12	34.79	33.27	2,658	1.77	3.60	0.80	1.00
	f= 8.00 Hz	87.74	79.07	4.98	31.13	28.86	2,417	1.67	3.74	0.79	0.67
	f=10.00 Hz	81.40	75.92	5.81	30.66	27.86	2,316	1.63	3.92	0.79	0.57
	f=12.00 Hz	80.74	73.70	5.55	27.86	25.28	2,215	1.58	3.81	0.77	0.50
Static Loading		70.91	69.87	4.74	19.15	13.67	1,808	1.31	3.35	0.78	0.20

Remarks: * indicates lower bound on design variables

Table 4 Optimum Design for 10 Member Truss (Damping=0.10)

Loading Condition		Optimum Design Variables cm ²					Optimum Masses kg	Natural Frequencies Hz		Max. Displacements cm	
		B1	B2	B3	B4	B5		Hz		cm	
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10		1st	2nd	Vertical	Horizontal
Seismic Coefficient Loading		135.38	92.44	0.85	50.56	50.54	3,501	2.10	2.91	0.80	1.72
Seismic Loading	f= 0.50 Hz	144.71	96.18	0.10*	53.47	53.25	3,692	2.17	2.69	0.80	1.85
	f= 1.00 Hz	169.46	105.26	0.10*	61.44	61.20	4,222	2.32	2.87	0.80	2.12
	f= 1.50 Hz	201.57	117.06	0.10*	70.44	70.14	4,875	2.50	3.07	0.80	2.39
	f= 2.00 Hz	244.75	133.11	0.10*	80.91	80.58	5,712	2.70	3.28	0.80	2.70
	f= 2.50 Hz	294.12	151.72	0.10*	101.26	100.31	6,886	2.99	3.64	0.80	2.81
	f= 3.00 Hz	352.10	174.05	0.10*	126.64	125.32	8,314	3.30	4.03	0.80	2.88
	f= 3.50 Hz	165.47	108.32	0.10*	57.90	57.86	4,122	2.28	2.80	0.80	2.03
	f= 3.75 Hz	134.18	96.98	0.83	47.29	47.17	3,444	2.06	2.84	0.80	1.65
	f= 4.00 Hz	122.22	91.44	2.06	44.43	44.07	3,211	1.99	3.19	0.80	1.49
	f= 6.00 Hz	94.64	81.37	4.58	34.78	33.20	2,607	1.75	3.71	0.80	0.96
	f= 8.00 Hz	85.80	76.72	5.12	29.65	27.37	2,339	1.63	3.74	0.79	0.65
	f=10.00 Hz	81.04	74.25	5.73	29.25	26.58	2,261	1.61	3.88	0.78	0.55
	f=12.00 Hz	80.88	72.68	5.47	27.06	24.63	2,187	1.57	3.78	0.78	0.48
Static Loading		70.91	69.87	4.74	19.15	13.67	1,808	1.31	3.35	0.78	0.20

Remarks: * indicates lower bound on design variables

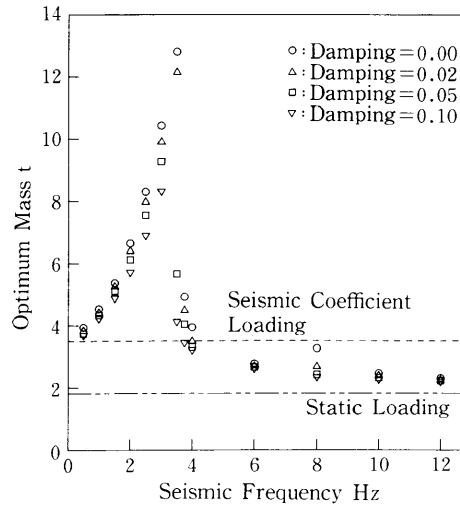


Fig. 5 Optimum Mass in Relation to Seismic Frequency

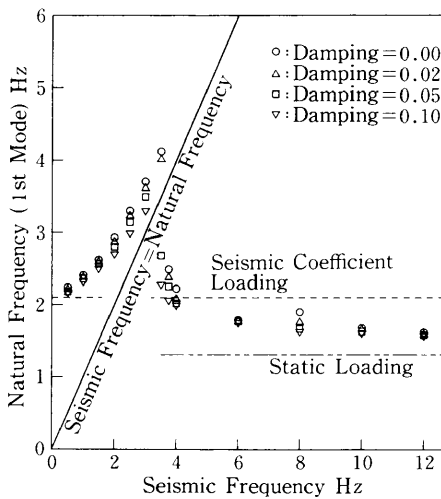


Fig. 6 Natural Frequency (1st Mode) in Relation to Seismic Frequency

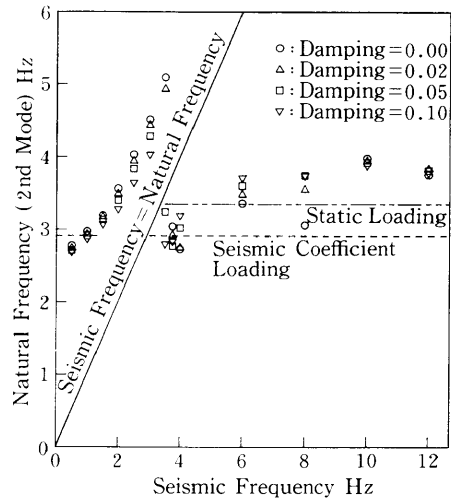


Fig. 7 Natural Frequency (2nd Mode) in Relation to Seismic Frequency

原点からの斜線は、固有振動数が振動加速度の振動数 f と一致した場合、この線上にプロットされることを示している。1次および2次の固有振動数は、減衰定数の値に無関係に、 $f=0.50 \sim 3.00$ Hz では f より大きく、 $f=3.75 \sim 12.00$ Hz では f より小さい。 $f=3.50$ Hz の場合には、 $h=0.00, 0.02$ の時は f より大きく、 $h=0.05, 0.10$ の時は f より小さくなっており、当然のことながら、固有振動数は加速度の振動数とは一致していない。

また1次の固有振動数は、減衰定数の値にかかわらず、加速度の振動数が 0.50 Hz から増えるにつれて Seismic Coefficient Loading の場合の値から順次増加し、 $h=0.00, 0.02$ では $f=$

3.50 Hz で最大となり、 $h=0.05, 0.10$ では $f=3.00$ Hz で最大となっている。これを過ぎると一度急激に減少し、 $f=8.00$ Hz で多少のパラツキはあるが減衰定数に無関係に Static Loading の場合の値に漸近して行くようである。このような変化は Optimum Mass の変化の様子と定性的に非常に良く類似している。

2 次の固有振動数の場合には、加速度の振動数が 0.50 Hz から増えるにつれて減衰定数の値にかかわらず順次増加し、 $h=0.00, 0.02$ では $f=3.50$ Hz で最大になり、 $h=0.05, 0.10$ では $f=3.00$ Hz で最大となる。これは 1 次の場合と同様である。これを過ぎると一度急激に低下した後、1 次の場合と異なり、徐々に上昇して行く。

なお、1 次、2 次とも、固有振動数が最大となる加速度の振動数は、Optimum Mass が最大となる加速度の振動数に一致している。

Table5~8 には、Seismic Coefficient Loading の場合の最適解の設計変数 1（部材 1 および 3）の断面積を 1 とした時の、各載荷条件で得られた最適解の断面積を、Optimum Design Variable Ratio として減衰定数ごとに表示している。また同時に、Seismic Coefficient Loading の場合の Optimum Mass を 1 とし、各載荷条件で得られた Optimum Mass を Optimum Mass Ratio として表示している。また、Fig. 8~11 にはこの Optimum Design Variable Ratio を減衰定数ごとに図示している。

これらによれば、部材断面積は下層の鉛直部材を表わす設計変数 1 が最大で、上層の鉛直部材を表わす設計変数 2、下層の斜材を表わす設計変数 4、上層の斜材を表わす設計変数 5 の順に小さくなっているが、設計変数 4 と 5 の大きさはほとんど変らない。水平部材を示す設計変

Table 5 Optimum Design Variable Ratio and Optimum Mass Ratio (Damping=0.00)

Loading Condition		Optimum Design Variable Ratios					Optimum Mass Ratios
		B1	B2	B3	B4	B5	
		Member 1, 3	meMber 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10	
Seismic Coefficient Loading		1.000	0.683	0.006	0.373	0.373	1.000
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.153	0.741	0.001	0.423	0.421	1.125
	$f=1.00$ Hz	1.366	0.817	0.001	0.487	0.485	1.296
	$f=1.50$ Hz	1.676	0.932	0.001	0.566	0.564	1.532
	$f=2.00$ Hz	2.099	1.093	0.001	0.715	0.708	1.896
	$f=2.50$ Hz	2.594	1.274	0.001	0.937	0.927	2.370
	$f=3.00$ Hz	3.333	1.497	0.001	1.191	1.175	2.978
	$f=3.50$ Hz	3.899	1.780	0.001	1.552	1.526	3.655
	$f=3.75$ Hz	1.510	0.916	0.001	0.505	0.505	1.404
	$f=4.00$ Hz	1.158	0.791	0.001	0.404	0.404	1.126
	$f=6.00$ Hz	0.763	0.671	0.024	0.258	0.246	0.791
	$f=8.00$ Hz	0.863	0.883	0.014	0.291	0.275	0.932
	$f=10.00$ Hz	0.610	0.603	0.043	0.251	0.227	0.703
	$f=12.00$ Hz	0.623	0.564	0.038	0.215	0.197	0.659
Static Loading		0.524	0.516	0.035	0.141	0.101	0.516

Table 6 Optimum Design Variable Ratio and Optimum Mass Ratio (Damping=0.02)

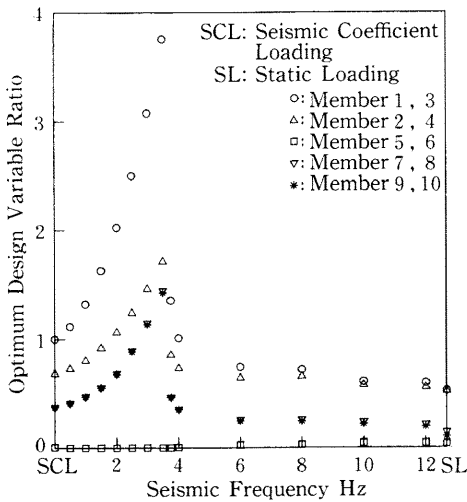
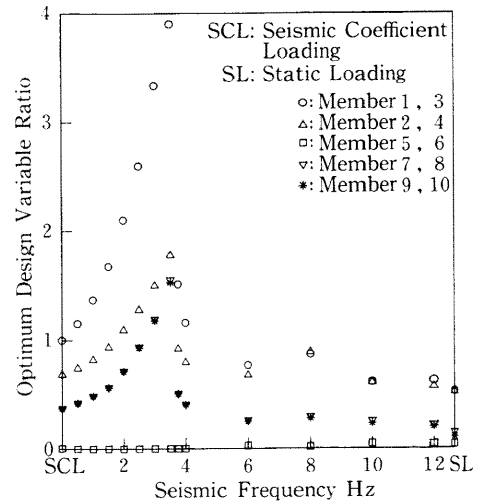
Loading Condition		Optimum Design Variable Ratios					Optimum Mass Ratios
		B1	B2	B3	B4	B5	
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10	
Seismic Coefficient Loading		1.000	0.683	0.006	0.373	0.373	1.000
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.116	0.727	0.001	0.411	0.410	1.095
	$f=1.00$ Hz	1.319	0.802	0.001	0.474	0.472	1.260
	$f=1.50$ Hz	1.628	0.917	0.001	0.556	0.554	1.499
	$f=2.00$ Hz	2.024	1.063	0.001	0.683	0.676	1.825
	$f=2.50$ Hz	2.498	1.242	0.001	0.892	0.883	2.277
	$f=3.00$ Hz	3.073	1.460	0.001	1.148	1.133	2.827
	$f=3.50$ Hz	3.753	1.714	0.001	1.444	1.423	3.468
	$f=3.75$ Hz	1.351	0.853	0.001	0.464	0.464	1.281
	$f=4.00$ Hz	1.009	0.730	0.004	0.351	0.350	0.996
	$f=6.00$ Hz	0.740	0.641	0.027	0.255	0.244	0.771
	$f=8.00$ Hz	0.714	0.655	0.029	0.256	0.240	0.765
	$f=10.00$ Hz	0.608	0.574	0.043	0.236	0.215	0.679
	$f=12.00$ Hz	0.595	0.552	0.041	0.210	0.190	0.640
Static Loading		0.524	0.516	0.035	0.141	0.101	0.516

Table 7 Optimum Design Variable Ratio and Optimum Mass Ratio (Damping=0.05)

Loading Condition		Optimum Design Variable Ratios					Optimum Mass Ratios
		B1	B2	B3	B4	B5	
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10	
Seismic Coefficient Loading		1.000	0.683	0.006	0.373	0.373	1.000
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.085	0.717	0.001	0.401	0.399	1.069
	$f=1.00$ Hz	1.292	0.793	0.001	0.466	0.464	1.238
	$f=1.50$ Hz	1.572	0.896	0.001	0.542	0.540	1.456
	$f=2.00$ Hz	1.942	1.032	0.001	0.645	0.640	1.746
	$f=2.50$ Hz	2.371	1.194	0.001	0.835	0.827	2.156
	$f=3.00$ Hz	2.887	1.390	0.001	1.065	1.052	2.649
	$f=3.50$ Hz	1.785	1.011	0.001	0.579	0.579	1.615
	$f=3.75$ Hz	1.194	0.795	0.001	0.416	0.416	1.153
	$f=4.00$ Hz	0.943	0.696	0.011	0.336	0.334	0.946
	$f=6.00$ Hz	0.721	0.621	0.030	0.257	0.246	0.759
	$f=8.00$ Hz	0.648	0.584	0.037	0.230	0.213	0.690
	$f=10.00$ Hz	0.601	0.561	0.043	0.227	0.206	0.662
	$f=12.00$ Hz	0.596	0.544	0.041	0.206	0.187	0.633
Static Loading		0.524	0.516	0.035	0.141	0.101	0.516

Table 8 Optimum Design Variable Ratio and Optimum Mass Ratio (Damping=0.10)

Loading Condition		Optimum Design Variable Ratios					Optimum Mass Ratios
		B1	B2	B3	B4	B5	
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10	
Seismic Coefficient Loading		1.000	0.683	0.006	0.373	0.373	1.000
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.069	0.710	0.001	0.395	0.393	1.055
	$f=1.00$ Hz	1.252	0.778	0.001	0.454	0.452	1.206
	$f=1.50$ Hz	1.489	0.865	0.001	0.520	0.518	1.393
	$f=2.00$ Hz	1.808	0.983	0.001	0.598	0.595	1.632
	$f=2.50$ Hz	2.173	1.121	0.001	0.748	0.741	1.967
	$f=3.00$ Hz	2.601	1.286	0.001	0.935	0.926	2.375
	$f=3.50$ Hz	1.222	0.800	0.001	0.428	0.427	1.177
	$f=3.75$ Hz	0.991	0.716	0.006	0.349	0.348	0.984
	$f=4.00$ Hz	0.903	0.675	0.015	0.328	0.326	0.917
	$f=6.00$ Hz	0.699	0.601	0.034	0.257	0.245	0.745
	$f=8.00$ Hz	0.634	0.567	0.038	0.219	0.202	0.668
	$f=10.00$ Hz	0.599	0.548	0.042	0.216	0.196	0.646
	$f=12.00$ Hz	0.597	0.537	0.040	0.200	0.182	0.625
Static Loading		0.524	0.516	0.035	0.141	0.101	0.516


Fig. 8 Optimum Design Variable Ratio in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.00)

Fig. 9 Optimum Design Variable Ratio in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.02)

数3は最も小さく、最小断面積となる場合もある。また、振動数が0.50 Hzから増加するにつれて、Optimum Design Variable RatioはSeismic Loadingの場合の値から順次増加し、Optimum Massが最大に達する加速度の振動数でこれも最大に達し、それを過ぎると一度急激に減少するが、その後次第にStatic Loadingの場合に漸近して行くように見える。

なお、加速度の振動数が同じ場合にはOptimum Mass同様、減衰定数が大きくなるにつれて、Optimum Design Variable Ratioも小さくなって行くが、これも当然と言える。

Table 9～12には、最適化された構造物の全質量に対する各部材の質量比を、Optimum

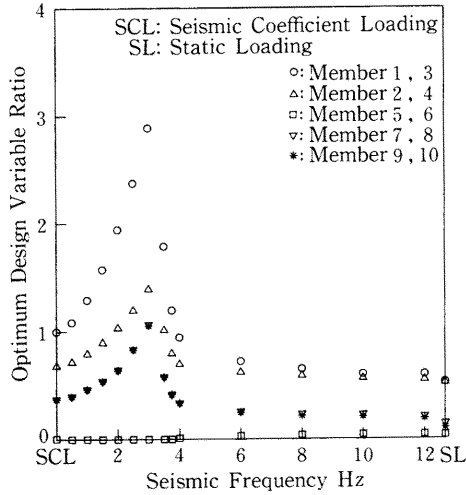


Fig. 10 Optimum Design Variable Ratio in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.05)

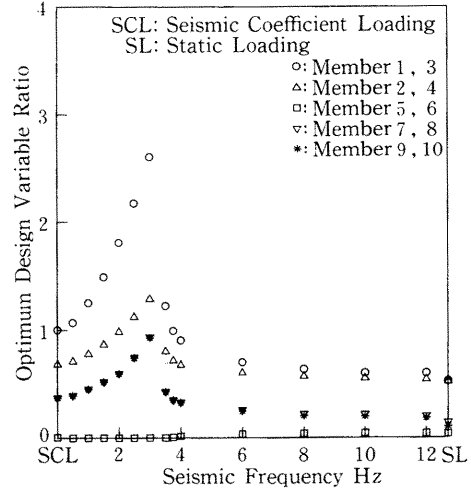


Fig. 11 Optimum Design Variable Ratio in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.10)

Table 9 Optimum Material Distribution (Damping=0.00)

Loading Condition		Optimum Material Distributions (Member Mass/Optimum Mass)				
		B1	B2	B3	B4	B5
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10
Seismic Coefficient Loading		0.182	0.124	0.001	0.096	0.096
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.187	0.120	0.000	0.097	0.096
	$f=1.00$ Hz	0.192	0.115	0.000	0.097	0.096
	$f=1.50$ Hz	0.199	0.111	0.000	0.095	0.095
	$f=2.00$ Hz	0.202	0.105	0.000	0.097	0.096
	$f=2.50$ Hz	0.199	0.098	0.000	0.102	0.101
	$f=3.00$ Hz	0.204	0.092	0.000	0.103	0.102
	$f=3.50$ Hz	0.194	0.089	0.000	0.109	0.108
	$f=3.75$ Hz	0.196	0.119	0.000	0.093	0.093
	$f=4.00$ Hz	0.187	0.128	0.000	0.092	0.092
	$f=6.00$ Hz	0.176	0.155	0.006	0.084	0.080
	$f=8.00$ Hz	0.169	0.173	0.003	0.080	0.076
	$f=10.00$ Hz	0.158	0.156	0.011	0.092	0.083
	$f=12.00$ Hz	0.172	0.156	0.011	0.084	0.077
Static Loading		0.185	0.182	0.012	0.071	0.050

Table 10 Optimum Material Distribution (Damping=0.02)

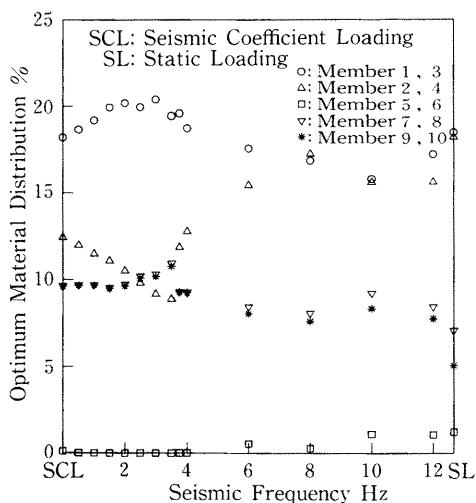
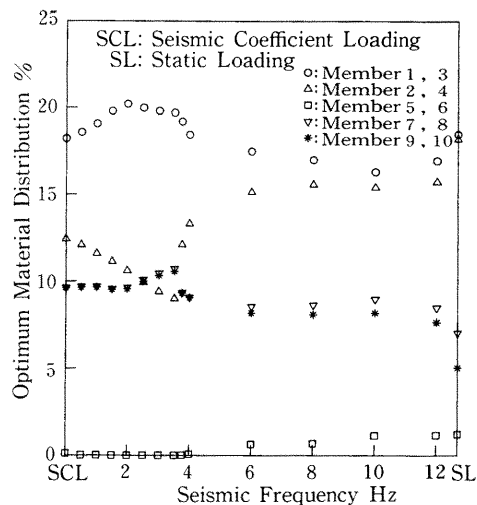
Loading Condition		Optimum Material Distributions (Member Mass/Optimum Mass)				
		B1	B2	B3	B4	B5
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10
Seismic Coefficient Loading		0.182	0.124	0.001	0.096	0.096
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.186	0.121	0.000	0.097	0.096
	$f=1.00$ Hz	0.191	0.116	0.000	0.097	0.096
	$f=1.50$ Hz	0.198	0.111	0.000	0.096	0.095
	$f=2.00$ Hz	0.202	0.106	0.000	0.096	0.095
	$f=2.50$ Hz	0.200	0.099	0.000	0.101	0.100
	$f=3.00$ Hz	0.198	0.094	0.000	0.105	0.103
	$f=3.50$ Hz	0.197	0.090	0.000	0.107	0.106
	$f=3.75$ Hz	0.192	0.121	0.000	0.093	0.093
	$f=4.00$ Hz	0.184	0.133	0.001	0.091	0.091
	$f=6.00$ Hz	0.175	0.152	0.006	0.085	0.082
	$f=8.00$ Hz	0.170	0.156	0.007	0.086	0.081
	$f=10.00$ Hz	0.163	0.154	0.011	0.090	0.082
	$f=12.00$ Hz	0.170	0.157	0.012	0.085	0.077
Static Loading		0.185	0.182	0.012	0.071	0.050

Table 11 Optimum Material Distribution (Damping=0.05)

Loading Condition		Optimum Material Distributions (Member Mass/Optimum Mass)				
		B1	B2	B3	B4	B5
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10
Seismic Coefficient Loading		0.182	0.124	0.001	0.096	0.096
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.185	0.122	0.000	0.097	0.096
	$f=1.00$ Hz	0.190	0.117	0.000	0.097	0.096
	$f=1.50$ Hz	0.197	0.112	0.000	0.096	0.095
	$f=2.00$ Hz	0.203	0.108	0.000	0.095	0.094
	$f=2.50$ Hz	0.200	0.101	0.000	0.100	0.099
	$f=3.00$ Hz	0.198	0.096	0.000	0.104	0.102
	$f=3.50$ Hz	0.201	0.114	0.000	0.092	0.092
	$f=3.75$ Hz	0.189	0.126	0.000	0.093	0.093
	$f=4.00$ Hz	0.182	0.134	0.002	0.091	0.091
	$f=6.00$ Hz	0.173	0.149	0.007	0.087	0.083
	$f=8.00$ Hz	0.171	0.154	0.010	0.086	0.080
	$f=10.00$ Hz	0.166	0.154	0.012	0.088	0.080
	$f=12.00$ Hz	0.172	0.157	0.012	0.084	0.076
Static Loading		0.185	0.182	0.012	0.071	0.050

Table 12 Optimum Material Distribution (Damping=0.10)

Loading Condition		Optimum Material Distributions (Member Mass/Optimum Mass)				
		B1	B2	B3	B4	B5
		Member 1, 3	Member 2, 4	Member 5, 6	Member 7, 8	Member 9, 10
Seismic Coefficient Loading		0.182	0.124	0.001	0.096	0.096
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.185	0.123	0.000	0.096	0.096
	$f=1.00$ Hz	0.189	0.117	0.000	0.097	0.097
	$f=1.50$ Hz	0.195	0.113	0.000	0.096	0.096
	$f=2.00$ Hz	0.202	0.110	0.000	0.094	0.094
	$f=2.50$ Hz	0.201	0.104	0.000	0.098	0.097
	$f=3.00$ Hz	0.199	0.099	0.000	0.101	0.100
	$f=3.50$ Hz	0.189	0.124	0.000	0.094	0.094
	$f=3.75$ Hz	0.184	0.133	0.001	0.091	0.091
	$f=4.00$ Hz	0.179	0.134	0.003	0.092	0.091
	$f=6.00$ Hz	0.171	0.147	0.008	0.089	0.085
	$f=8.00$ Hz	0.173	0.155	0.010	0.084	0.078
	$f=10.00$ Hz	0.169	0.155	0.012	0.086	0.078
	$f=12.00$ Hz	0.174	0.157	0.012	0.082	0.075
Static Loading		0.185	0.182	0.012	0.071	0.050

**Fig. 12** Optimum Material Distribution in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.00)**Fig. 13** Optimum Material Distribution in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.02)

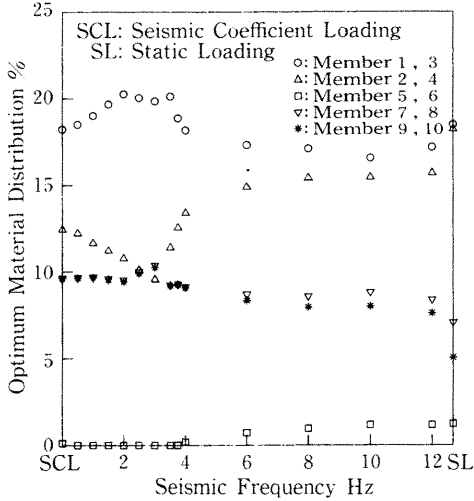


Fig. 14 Optimum Material Distribution in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.05)

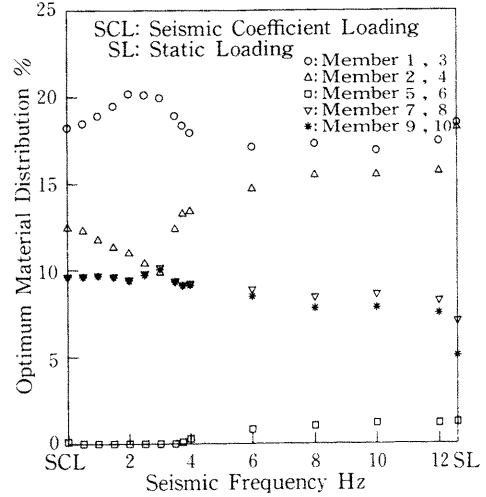


Fig. 15 Optimum Material Distribution in Relation to Seismic Frequency (Damping=0.10)

Table 13 Maximum Ratio of Stresses to Allowable Stresses* of Structural Members (Damping=0.00)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem-ber 1	Mem-ber 3	Mem-ber 2	Mem-ber 4	Mem-ber 5	Mem-ber 6	Mem-ber 7	Mem-ber 8	Mem-ber 9	Mem-ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Loading	f= 0.50 Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.91 *T	0.51 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
	f= 1.00 Hz	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.77 *T	0.52 *T	1.00 *B	0.97 *B	1.00 *B	0.97 *B
	f= 1.50 Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.63 *T	0.50 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
	f= 2.00 Hz	0.95 *C	1.00 *C	0.96 *C	1.00 *C	0.50 *T	0.46 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	f= 2.50 Hz	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.41 *T	0.42 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	f= 3.00 Hz	0.93 *C	0.95 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.32 *T	0.39 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	f= 3.50 Hz	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.97 *C	0.97 *T	0.97 *C	0.97 *T
	f= 3.75 Hz	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.98 *C	0.70 *T	0.45 *T	1.00 *B	0.99 *B	1.00 *B	0.99 *B
	f= 4.00 Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.91 *T	0.42 *T	1.00 *B	0.98 *B	1.00 *B	0.98 *B
	f= 6.00 Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.35 *T	0.98 *B	1.00 *B	0.98 *B	1.00 *B
	f= 8.00 Hz	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	0.98 *C	0.97 *T	0.17 *T	0.99 *B	0.98 *B	0.98 *B	0.97 *B
	f=10.00 Hz	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.34 *T	1.00 *B	0.99 *B	1.00 *B	0.99 *B
	f=12.00 Hz	0.94 *C	0.94 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.39 *T	1.00 *B	0.97 *B	1.00 *B	0.96 *B
Static Loading		0.96 *C	0.96 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.31 *T	1.00 *B	1.00 *B	0.71 *B	0.71 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

*T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})

*C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 14 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members (Damping=0.02)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.94 *T	0.51 *T	1.00 *B	0.97 *B	1.00 *B	0.97 *B
	$f=1.00$ Hz	0.96 *C	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	0.80 *T	0.51 *T	0.93 *B	1.00 *B	0.93 *B	1.00 *B
	$f=1.50$ Hz	1.00 *C	0.91 *C	1.00 *C	0.94 *C	0.65 *T	0.50 *T	1.00 *B	0.91 *T	1.00 *B	0.91 *T
	$f=2.00$ Hz	0.95 *C	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.47 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=2.50$ Hz	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	0.98 *C	0.42 *T	0.42 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.00$ Hz	0.98 *C	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.34 *T	0.38 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=3.50$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.28 *T	0.33 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=3.75$ Hz	1.00 *C	0.91 *C	1.00 *C	0.95 *C	0.78 *T	0.45 *T	1.00 *B	0.85 *B	1.00 *B	0.85 *B
	$f=4.00$ Hz	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *T	0.41 *T	1.00 *B	0.95 *B	1.00 *B	0.95 *B
	$f=6.00$ Hz	0.98 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.38 *T	0.83 *B	1.00 *B	0.81 *B	1.00 *B
	$f=8.00$ Hz	0.94 *C	0.92 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.34 *T	0.97 *B	1.00 *B	0.97 *B	1.00 *B
	$f=10.00$ Hz	0.96 *C	0.97 *C	0.98 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.37 *T	0.91 *B	1.00 *B	0.89 *B	1.00 *B
	$f=12.00$ Hz	0.95 *C	0.96 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.38 *T	0.94 *B	1.00 *B	0.93 *B	1.00 *B
Static Loading		0.96 *C	0.96 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.31 *T	1.00 *B	1.00 *B	0.71 *B	0.71 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

*T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})*C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 15 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members (Damping=0.05)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.97 *T	0.50 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
	$f=1.00$ Hz	0.91 *C	1.00 *C	0.95 *C	1.00 *C	0.81 *T	0.51 *T	0.86 *B	1.00 *B	0.86 *B	1.00 *B
	$f=1.50$ Hz	1.00 *C	0.89 *C	1.00 *C	0.93 *C	0.67 *T	0.50 *T	1.00 *B	0.89 *T	1.00 *B	0.88 *T
	$f=2.00$ Hz	0.94 *C	1.00 *C	0.96 *C	1.00 *C	0.54 *T	0.48 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=2.50$ Hz	1.00 *C	0.96 *C	1.00 *C	0.97 *C	0.44 *T	0.44 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.00$ Hz	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.37 *T	0.39 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.50$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.59 *T	0.45 *T	0.98 *B	1.00 *B	0.98 *B	1.00 *B
	$f=3.75$ Hz	1.00 *C	0.88 *C	1.00 *C	0.94 *C	0.88 *T	0.44 *T	1.00 *B	0.78 *B	1.00 *B	0.78 *B
	$f=4.00$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.42 *T	0.95 *B	1.00 *B	0.95 *B	1.00 *B
	$f=6.00$ Hz	0.96 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.39 *T	0.81 *B	0.87 *B	0.80 *B	1.00 *B
	$f=8.00$ Hz	0.95 *C	0.97 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.38 *T	0.97 *B	1.00 *B	0.96 *B	1.00 *B
	$f=10.00$ Hz	0.95 *C	0.97 *C	0.98 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.38 *T	0.91 *B	1.00 *B	0.89 *B	1.00 *B
	$f=12.00$ Hz	0.94 *C	0.95 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.39 *T	0.92 *B	1.00 *B	0.91 *B	1.00 *B
Static Loading		0.96 *C	0.96 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.31 *T	1.00 *B	1.00 *B	0.71 *B	0.71 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

*T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})*C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 16 Maximum Ratio of Stresses to Allowable Stresses* of Structural Members (Damping=0.10)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	0.98 *T	0.50 *T	0.98 *B	1.00 *B	0.98 *B	1.00 *B
	$f=1.00$ Hz	0.91 *C	1.00 *C	0.94 *C	1.00 *C	0.84 *T	0.51 *T	0.84 *B	1.00 *B	0.84 *B	1.00 *B
	$f=1.50$ Hz	1.00 *C	0.89 *C	1.00 *C	0.93 *C	0.71 *T	0.51 *T	1.00 *B	0.85 *T	1.00 *B	0.85 *T
	$f=2.00$ Hz	0.95 *C	1.00 *C	0.96 *C	1.00 *C	0.58 *T	0.49 *T	0.98 *T	1.00 *B	0.97 *T	1.00 *B
	$f=2.50$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.49 *T	0.45 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=3.00$ Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.41 *T	0.41 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.50$ Hz	1.00 *C	0.92 *C	1.00 *C	0.96 *C	0.86 *T	0.45 *T	1.00 *B	0.83 *B	1.00 *B	0.84 *B
	$f=3.75$ Hz	1.00 *C	0.96 *C	1.00 *C	0.97 *C	1.00 *T	0.42 *T	1.00 *B	0.95 *B	1.00 *B	0.95 *B
	$f=4.00$ Hz	0.96 *C	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.43 *T	0.85 *B	1.00 *B	0.85 *B	1.00 *B
	$f=6.00$ Hz	0.94 *C	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.40 *T	0.79 *B	1.00 *B	0.77 *B	1.00 *B
	$f=8.00$ Hz	0.93 *C	0.97 *C	0.98 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.39 *T	0.90 *B	1.00 *B	0.89 *B	1.00 *B
	$f=10.00$ Hz	0.94 *C	0.97 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.39 *T	0.87 *B	1.00 *B	0.85 *B	1.00 *B
	$f=12.00$ Hz	0.92 *C	0.95 *C	0.99 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.40 *T	0.88 *B	1.00 *B	0.85 *B	1.00 *B
Static Loading		0.96 *C	0.96 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.31 *T	1.00 *B	1.00 *B	0.71 *B	0.71 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})

 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Material Distribution として減衰定数ごとに示す。なお、Fig. 12~15 にこれらの値を図示する。これらは、応力制約および部材断面寸法の制限による最小質量設計をした際の合理的な材料の配分率を示すものである。

これらを見ると、減衰定数の違いによる Optimum Material Distribution の変化はほとんどない。加速度の振動数が $f=0.50$ Hz から増えるにつれて、これらは Seismic Coefficient Loading の場合の値付近から始まり、途中 Optimum Mass が最大となる振動数を過ぎると急激に傾向が変わり、その後次第に Static Loading の場合の値に近づいて行くようである。なお、この Optimum Material Distribution の値の最大値は約20%程度である。

Table 13~16 は、引張応力については一定な許容引張応力に対して、また圧縮応力については一定な許容圧縮応力と部材の断面積により変化する許容座屈応力の内の小さな方の値に対して、各部材の部材応力がどの程度であるかその割合を調べて、その最大値とその時の応力状態を示したものである。これらの値が1.00であれば、部材応力が許容応力度いっぱいになっていることを示す。応力比が最大なものを求めたのは、許容引張応力度と許容圧縮応力度は同一値であるが、許容座屈応力度はこれらの値と一致せず、しかも各部材ごとに変わるので、部材応力とその応力状態に応じた許容応力度の比を求めて、応力制約条件に対する満足度を示そうとするものである。

部材 5 と 6 は部材断面の規格化あるいは設計変数の減少化という点から同一断面にしたが、部材の配置や荷重の作用状況から判断して、両部材が共に制約条件を100% 満足することは考えられず、正にその通りの結果となっている。

部材 6 を除くと、Seismic Coefficient Loading の場合には、各部材とも許容応力いっぱいになっているが、Seismic Loading や Static Loading の場合には必ずしも全部材が許容応力に達しているわけではないことが分る。すなわち、応力制約および部材断面寸法の制限を制約条件として最小質量設計を行った場合に、必ずしも全応力設計にはなっていないことを示している。

なお、水平部材 5 ～ 6 は常に引張応力であり、鉛直部材 1 ～ 4 は圧縮応力状態の時に許容応力に対する満足度が高いが、斜材 7 ～ 10 は部材の断面積、加速度の振動数、減衰定数などにより満足度の高い応力状態は一定せず、引張応力、圧縮応力、座屈応力のいずれかとなる。

Table 17～20 には、Seismic Coefficient Loading で得られた最適部材断面を用いて Seismic Loading を作用させた時、各部材に生じる応力の中で、引張応力、圧縮応力それぞれの応力状態での許容応力との比を求め、その応力比の最大なものの値とその許容応力状態を表示する。

これらの表は、震度法で設計された構造物に地盤振動加速度が実際に作用した場合の応力状態を検討するためのものである。減衰定数の値にかかわらず加速度の振動数が 2.00 Hz の時これらの値は最大となっていて、 $h=0.00$ の場合には最大16.13となり、 $h=0.10$ でも4.59にもなっている。安全率1.70を考慮しても、 $h=0.00$ の場合には $f=1.00\sim 3.00$ Hz、 $h=0.10$ の場合でも $f=1.50\sim 2.50$ Hz の範囲で、1.70を越えている。すなわち、震度法で設計された構造物は、作用する地盤振動加速度の振動数の値によっては、安全率1.70でカバーできない応力状態が発生することを示している。

Table 21～24 には、各減衰定数ごとに、Seismic Loading で得られた最適断面の中で Optimum Mass が最大となる場合の断面積を用いて、加速度の振動数が変わった場合の各部材応力度を求め、Seismic Coefficient Loading の場合と同様にして、許容応力度に対する応力度比の最大なものの値と、その許容応力状態を示したものである。Seismic Loading では加速度の振動数ごとに最適断面も変り、当然のことながら Optimum Mass も変化するが、Optimum Mass が最大の断面を設計に採用した場合、いろいろな振動数の地盤振動加速度が作用しても果して安全であるかどうかを検討しようとするものである。

この場合には減衰定数の値によって様子が変わってくる。 $h=0.00, 0.02$ では $f=3.50$ Hz の最適断面を用いたのであるが、 $f=3.75, 4.00$ Hz で1を越えており、特に $f=4.00$ Hz では4.54ないし3.04となって、安全率1.70を大きく越えている。 $h=0.05, 0.10$ の場合には、 $f=3.00$ Hz での最適断面を用いたのであるが、 $h=0.05$ の場合には $f=3.50, 3.75$ Hz で1を越えており、 $f=3.50$ Hz では2.03となって1.70を越えている。 $h=0.10$ の場合には $f=3.50$ Hz で1を越えてはいる

Table 17 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized under Seismic Coefficient Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.00)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Load- ing	$f= 0.50$ Hz	1.16 *C	1.13 *C	1.09 *C	1.07 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.33 *B	1.25 *B	1.32 *B	1.24 *B
	$f= 1.00$ Hz	1.26 *C	1.47 *C	1.15 *C	1.25 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.51 *B	1.91 *B	1.50 *B	1.90 *B
	$f= 1.50$ Hz	2.25 *C	2.25 *C	1.68 *C	1.68 *C	1.00 *T	0.49 *T	3.46 *B	3.45 *B	3.44 *B	3.44 *B
	$f= 2.00$ Hz	8.78 *C	8.28 *C	5.24 *C	4.96 *C	1.00 *T	0.49 *T	16.13 *B	15.20 *B	16.09 *B	15.15 *B
	$f= 2.50$ Hz	3.20 *C	3.14 *C	2.25 *C	2.23 *C	1.00 *T	0.49 *T	5.17 *B	5.03 *B	5.16 *B	5.02 *B
	$f= 3.00$ Hz	1.70 *C	1.71 *C	1.44 *C	1.45 *C	1.00 *T	0.49 *T	2.26 *B	2.27 *B	2.26 *B	2.26 *B
	$f= 3.50$ Hz	1.29 *C	1.30 *C	1.22 *C	1.24 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.46 *B	1.44 *B	1.46 *B	1.44 *B
	$f= 3.75$ Hz	1.18 *C	1.18 *C	1.17 *C	1.16 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.24 *B	1.22 *B	1.24 *B	1.22 *B
	$f= 4.00$ Hz	1.09 *C	1.07 *C	1.13 *C	1.10 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.07 *B	1.02 *B	1.07 *B	1.02 *B
	$f= 6.00$ Hz	0.82 *C	0.83 *C	1.02 *C	1.03 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.51 *B	0.48 *B	0.51 *B	0.49 *B
	$f= 8.00$ Hz	0.92 *C	0.94 *C	1.48 *C	1.51 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.82 *B	0.83 *B	0.80 *B	0.81 *B
	$f=10.00$ Hz	0.68 *C	0.67 *C	1.01 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.45 *B	0.46 *B	0.45 *B	0.46 *B
	$f=12.00$ Hz	0.63 *C	0.63 *C	0.89 *C	0.88 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.29 *B	0.30 *B	0.29 *B	0.31 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 18 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized under Seismic Coefficient Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.02)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Load- ing	$f= 0.50$ Hz	1.12 *C	1.11 *C	1.07 *C	1.06 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.25 *B	1.23 *B	1.24 *B	1.22 *B
	$f= 1.00$ Hz	1.23 *C	1.35 *C	1.13 *C	1.19 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.44 *B	1.69 *B	1.43 *B	1.68 *B
	$f= 1.50$ Hz	1.94 *C	2.11 *C	1.51 *C	1.60 *C	1.00 *T	0.49 *T	2.83 *B	3.17 *B	2.82 *B	3.15 *B
	$f= 2.00$ Hz	6.36 *C	6.15 *C	3.92 *C	3.81 *C	1.00 *T	0.49 *T	11.43 *B	11.03 *B	11.39 *B	11.00 *B
	$f= 2.50$ Hz	2.77 *C	2.77 *C	2.02 *C	2.02 *C	1.00 *T	0.49 *T	4.32 *B	4.34 *B	4.31 *B	4.33 *B
	$f= 3.00$ Hz	1.52 *C	1.61 *C	1.34 *C	1.39 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.91 *B	2.07 *B	1.91 *B	2.07 *B
	$f= 3.50$ Hz	1.25 *C	1.18 *C	1.20 *C	1.16 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.36 *B	1.22 *B	1.36 *B	1.22 *B
	$f= 3.75$ Hz	1.14 *C	1.04 *C	1.14 *C	1.08 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.01 *B	0.95 *B	1.13 *B	0.95 *B
	$f= 4.00$ Hz	1.03 *C	0.99 *C	1.08 *C	1.06 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.92 *B	0.85 *B	0.92 *B	0.85 *B
	$f= 6.00$ Hz	0.79 *C	0.81 *C	0.96 *C	0.99 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.44 *B	0.48 *B	0.45 *B	0.49 *B
	$f= 8.00$ Hz	0.72 *C	0.74 *C	1.03 *C	1.03 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.42 *B	0.40 *B	0.41 *B	0.39 *B
	$f=10.00$ Hz	0.64 *C	0.66 *C	0.91 *C	0.90 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.34 *B	0.32 *B	0.34 *B	0.32 *B
	$f=12.00$ Hz	0.61 *C	0.62 *C	0.84 *C	0.87 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.24 *B	0.27 *B	0.24 *B	0.27 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *C indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 19 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized under Seismic Coefficient Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.05)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.08 *C	1.10 *C	1.04 *C	1.05 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.17 *B	1.20 *B	1.16 *B	1.19 *B
	$f=1.00$ Hz	1.19 *C	1.32 *C	1.10 *C	1.17 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.36 *B	1.62 *B	1.36 *B	1.61 *B
	$f=1.50$ Hz	1.82 *C	1.93 *C	1.45 *C	1.50 *C	1.00 *T	0.49 *T	2.61 *B	2.82 *B	2.59 *B	2.81 *B
	$f=2.00$ Hz	4.37 *C	4.31 *C	2.84 *C	2.81 *C	1.00 *T	0.49 *T	7.55 *B	7.44 *B	7.52 *B	7.42 *B
	$f=2.50$ Hz	2.30 *C	2.35 *C	1.76 *C	1.79 *C	1.00 *T	0.49 *T	3.42 *B	3.53 *B	3.41 *B	3.52 *B
	$f=3.00$ Hz	1.44 *C	1.48 *C	1.29 *C	1.32 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.75 *B	1.82 *B	1.75 *B	1.82 *B
	$f=3.50$ Hz	1.19 *C	1.05 *C	1.16 *C	1.09 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.25 *B	0.98 *B	1.25 *B	0.98 *B
	$f=3.75$ Hz	1.09 *C	1.00 *C	1.11 *C	1.05 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.04 *B	0.89 *B	1.04 *B	0.89 *B
	$f=4.00$ Hz	0.99 *C	0.97 *C	1.06 *C	1.04 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.85 *B	0.83 *B	0.85 *B	0.83 *B
	$f=6.00$ Hz	0.77 *C	0.80 *C	0.94 *C	0.96 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.41 *B	0.48 *B	0.42 *B	0.48 *B
	$f=8.00$ Hz	0.66 *C	0.70 *C	0.91 *C	0.91 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.32 *B	0.33 *B	0.32 *B	0.33 *B
	$f=10.00$ Hz	0.63 *C	0.65 *C	0.87 *C	0.88 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.27 *B	0.27 *B	0.27 *B	0.27 *B
	$f=12.00$ Hz	0.60 *C	0.61 *C	0.83 *C	0.85 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.22 *B	0.24 *B	0.22 *B	0.24 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

*T indicates allowable tensile stress ($1400 \text{ kg f/cm}^2 \{137.3 \text{ MPa}\}$)*C indicates allowable compressive stress ($1400 \text{ kg f/cm}^2 \{137.3 \text{ MPa}\}$)

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 20 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized under Seismic Coefficient Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.10)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Coefficient Loading		1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B	1.00 *B
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	1.06 *C	1.08 *C	1.03 *C	1.04 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.12 *B	1.16 *B	1.11 *B	1.15 *B
	$f=1.00$ Hz	1.15 *C	1.27 *C	1.08 *C	1.15 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.30 *B	1.53 *B	1.29 *B	1.52 *B
	$f=1.50$ Hz	1.66 *C	1.71 *C	1.36 *C	1.39 *C	1.00 *T	0.49 *T	2.30 *B	2.40 *B	2.28 *B	2.38 *B
	$f=2.00$ Hz	2.87 *C	2.86 *C	2.03 *C	2.02 *C	1.00 *T	0.49 *T	4.62 *B	4.61 *B	4.61 *B	4.59 *B
	$f=2.50$ Hz	1.88 *C	1.88 *C	1.53 *C	1.53 *C	1.00 *T	0.49 *T	2.63 *B	2.62 *B	2.63 *B	2.62 *B
	$f=3.00$ Hz	1.32 *C	1.32 *C	1.22 *C	1.23 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.53 *B	1.50 *B	1.53 *B	1.50 *B
	$f=3.50$ Hz	1.11 *C	0.99 *C	1.11 *C	1.04 *C	1.00 *T	0.49 *T	1.10 *B	0.91 *B	1.10 *B	0.91 *B
	$f=3.75$ Hz	1.02 *C	0.96 *C	1.07 *C	1.02 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.92 *B	0.85 *B	0.92 *B	0.85 *B
	$f=4.00$ Hz	0.93 *C	0.93 *C	1.02 *C	1.01 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.75 *B	0.79 *B	0.75 *B	0.79 *B
	$f=6.00$ Hz	0.72 *C	0.77 *C	0.90 *C	0.93 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.38 *B	0.47 *B	0.38 *B	0.47 *B
	$f=8.00$ Hz	0.63 *C	0.69 *C	0.86 *C	0.88 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.25 *B	0.32 *B	0.25 *B	0.32 *B
	$f=10.00$ Hz	0.61 *C	0.64 *C	0.84 *C	0.85 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.21 *B	0.23 *B	0.21 *B	0.23 *B
	$f=12.00$ Hz	0.59 *C	0.61 *C	0.82 *C	0.83 *C	1.00 *T	0.49 *T	0.18 *B	0.21 *B	0.18 *B	0.21 *B

Remarks: * indicates either *T, *C or *B

*T indicates allowable tensile stress ($1400 \text{ kg f/cm}^2 \{137.3 \text{ MPa}\}$)*C indicates allowable compressive stress ($1400 \text{ kg f/cm}^2 \{137.3 \text{ MPa}\}$)

*B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 21 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized at The Frequency of 3.50 Hz Seismic Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.00)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Member									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 0
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	0.28 *C	0.28 *C	0.40 *C	0.40 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.17 *C	0.17 *T	0.17 *C	0.17 *T
	$f=1.00$ Hz	0.30 *C	0.29 *C	0.42 *C	0.41 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.20 *C	0.20 *T	0.20 *C	0.20 *T
	$f=1.50$ Hz	0.34 *C	0.34 *C	0.45 *C	0.45 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.24 *C	0.24 *T	0.23 *C	0.23 *C
	$f=2.00$ Hz	0.34 *C	0.39 *C	0.46 *C	0.49 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.29 *T	0.29 *C	0.29 *T	0.29 *C
	$f=2.50$ Hz	0.46 *C	0.46 *C	0.55 *C	0.55 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.38 *C	0.38 *T	0.38 *C	0.38 *T
	$f=3.00$ Hz	0.61 *C	0.61 *C	0.67 *C	0.68 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.54 *C	0.54 *T	0.54 *C	0.54 *T
	$f=3.50$ Hz	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.97 *C	0.97 *T	0.97 *C	0.97 *T
	$f=3.75$ Hz	1.59 *C	1.59 *C	1.48 *C	1.48 *C	0.27 *T	0.23 *T	1.64 *T	1.64 *C	1.64 *T	1.64 *C
	$f=4.00$ Hz	4.19 *C	4.09 *C	3.64 *C	3.55 *C	0.27 *T	0.32 *T	4.52 *C	4.52 *T	4.54 *C	4.54 *T
	$f=6.00$ Hz	0.42 *C	0.42 *C	0.56 *C	0.55 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.31 *T	0.31 *C	0.31 *T	0.31 *C
	$f=8.00$ Hz	0.28 *C	0.28 *C	0.44 *C	0.44 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.15 *C	0.15 *T	0.15 *C	0.15 *T
	$f=10.00$ Hz	0.23 *C	0.24 *C	0.42 *C	0.42 *C	0.27 *T	0.23 *T	0.10 *C	0.10 *T	0.10 *C	0.10 *T
	$f=12.00$ Hz	0.22 *C	0.22 *C	0.43 *C	0.43 *C	0.27 *T	0.32 *T	0.08 *C	0.08 *T	0.07 *C	0.07 *C

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 22 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized at The Frequency of 3.50 Hz Seismic Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.02)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	0.28 *C	0.29 *C	0.41 *C	0.41 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.18 *T	0.18 *C	0.18 *T	0.18 *C
	$f=1.00$ Hz	0.30 *C	0.31 *C	0.42 *C	0.43 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.20 *T	0.20 *C	0.20 *T	0.20 *C
	$f=1.50$ Hz	0.32 *C	0.35 *C	0.44 *C	0.46 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.25 *T	0.25 *C	0.25 *T	0.25 *C
	$f=2.00$ Hz	0.36 *C	0.37 *C	0.48 *C	0.48 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.27 *T	0.27 *C	0.27 *T	0.27 *C
	$f=2.50$ Hz	0.47 *C	0.43 *C	0.57 *C	0.53 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.40 *C	0.40 *T	0.40 *C	0.40 *T
	$f=3.00$ Hz	0.60 *C	0.62 *C	0.68 *C	0.69 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.56 *T	0.56 *C	0.56 *T	0.56 *C
	$f=3.50$ Hz	0.99 *C	1.00 *C	0.98 *C	1.00 *C	0.28 *T	0.33 *T	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C
	$f=3.75$ Hz	1.57 *C	1.57 *C	1.47 *C	1.47 *C	0.28 *T	0.33 *T	1.66 *T	1.66 *C	1.66 *T	1.66 *C
	$f=4.00$ Hz	2.77 *C	2.73 *C	2.48 *C	2.44 *C	0.28 *T	0.33 *T	3.04 *C	3.04 *T	3.04 *C	3.04 *T
	$f=6.00$ Hz	0.39 *C	0.38 *C	0.53 *C	0.52 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.27 *C	0.27 *T	0.27 *C	0.27 *T
	$f=8.00$ Hz	0.26 *C	0.26 *C	0.42 *C	0.43 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.12 *C	0.12 *C	0.12 *T	0.12 *C
	$f=10.00$ Hz	0.22 *C	0.23 *C	0.40 *C	0.41 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.09 *T	0.09 *C	0.09 *T	0.09 *C
	$f=12.00$ Hz	0.22 *C	0.21 *C	0.42 *C	0.41 *C	0.28 *T	0.33 *T	0.07 *T	0.07 *C	0.07 *T	0.07 *C

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm²{137.3 MPa})
 *B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 23 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized at The Frequency of 3.00 Hz Seismic Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.05)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	0.36 *C	0.37 *C	0.50 *C	0.51 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.24 *T	0.24 *C	0.24 *T	0.24 *C
	$f=1.00$ Hz	0.37 *C	0.41 *C	0.51 *C	0.54 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.39 *T	0.29 *C	0.28 *T	0.29 *C
	$f=1.50$ Hz	0.41 *C	0.45 *C	0.54 *C	0.57 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.34 *T	0.34 *C	0.34 *T	0.34 *C
	$f=2.00$ Hz	0.53 *C	0.47 *C	0.46 *C	0.59 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.44 *C	0.44 *T	0.44 *C	0.44 *T
	$f=2.50$ Hz	0.64 *C	0.68 *C	0.72 *C	0.75 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.61 *T	0.61 *C	0.61 *T	0.61 *C
	$f=3.00$ Hz	1.00 *C	0.99 *C	1.00 *C	0.99 *C	0.37 *T	0.39 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.50$ Hz	1.85 *C	1.86 *C	1.68 *C	1.69 *C	0.37 *T	0.39 *T	2.02 *T	2.02 *C	2.03 *T	2.03 *C
	$f=3.75$ Hz	1.28 *C	1.28 *C	1.25 *C	1.25 *C	0.37 *T	0.39 *T	1.31 *T	1.31 *C	1.32 *C	1.32 *C
	$f=4.00$ Hz	0.94 *C	0.93 *C	0.98 *C	0.98 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.90 *C	0.90 *T	0.90 *C	0.90 *T
	$f=6.00$ Hz	0.40 *C	0.35 *C	0.57 *C	0.53 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.24 *C	0.24 *T	0.24 *C	0.24 *T
	$f=8.00$ Hz	0.27 *C	0.31 *C	0.47 *C	0.50 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.13 *T	0.13 *C	0.14 *T	0.14 *C
	$f=10.00$ Hz	0.27 *C	0.28 *C	0.48 *C	0.48 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.10 *T	0.10 *C	0.10 *T	0.10 *C
	$f=12.00$ Hz	0.25 *C	0.25 *C	0.47 *C	0.46 *C	0.37 *T	0.39 *T	0.08 *T	0.08 *C	0.08 *T	0.08 *C

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})
 *B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

Table 24 Maximum Ratio of Stresses to *Allowable Stresses** of Structural Members Optimized at The Frequency of 3.00 Hz Seismic Loading When Seismic Frequency Varies (Damping=0.10)

Loading Condition		Maximum Ratios of Stresses to Allowable Stresses of Structural Members									
		B1		B2		B3		B4		B5	
		Mem- ber 1	Mem- ber 3	Mem- ber 2	Mem- ber 4	Mem- ber 5	Mem- ber 6	Mem- ber 7	Mem- ber 8	Mem- ber 9	Mem- ber 10
Seismic Load- ing	$f=0.50$ Hz	0.40 *C	0.41 *C	0.54 *C	0.55 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.27 *T	0.27 *C	0.27 *T	0.27 *C
	$f=1.00$ Hz	0.42 *C	0.45 *C	0.56 *C	0.58 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.32 *T	0.32 *C	0.32 *T	0.32 *C
	$f=1.50$ Hz	0.44 *C	0.49 *C	0.57 *C	0.61 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.37 *T	0.37 *C	0.37 *T	0.37 *C
	$f=2.00$ Hz	0.58 *C	0.52 *C	0.68 *C	0.63 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.48 *C	0.48 *T	0.48 *C	0.48 *T
	$f=2.50$ Hz	0.70 *C	0.72 *C	0.77 *C	0.78 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.65 *T	0.65 *C	0.65 *T	0.65 *C
	$f=3.00$ Hz	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	1.00 *C	0.41 *T	0.41 *T	1.00 *C	1.00 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.50$ Hz	1.01 *C	1.01 *C	1.03 *C	1.03 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.99 *C	0.99 *T	1.00 *C	1.00 *T
	$f=3.75$ Hz	0.82 *C	0.82 *C	0.89 *C	0.88 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.75 *C	0.75 *T	0.76 *C	0.76 *T
	$f=4.00$ Hz	0.70 *C	0.69 *C	0.80 *C	0.79 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.60 *C	0.60 *T	0.60 *C	0.60 *T
	$f=6.00$ Hz	0.38 *C	0.37 *C	0.56 *C	0.55 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.20 *C	0.20 *T	0.21 *C	0.21 *T
	$f=8.00$ Hz	0.28 *C	0.32 *C	0.49 *C	0.52 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.14 *C	0.14 *T	0.14 *C	0.14 *T
	$f=10.00$ Hz	0.28 *C	0.29 *C	0.48 *C	0.49 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.10 *T	0.10 *C	0.10 *T	0.10 *C
	$f=12.00$ Hz	0.25 *C	0.27 *C	0.47 *C	0.48 *C	0.41 *T	0.41 *T	0.08 *T	0.08 *C	0.08 *T	0.08 *C

Remarks: * indicates either *T, *C or *B
 *T indicates allowable tensile stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})
 *C indicates allowable compressive stress (1400 kg f/cm² {137.3 MPa})
 *B indicates allowable buckling stress (Euler buckling stress/1.70)

が、1.03であるから安全率の範囲内である。

以上のことから、地盤振動加速度のある特定の振動数における最適断面を用いて設計した構造物は、Optimum Mass が最大であっても、加速度の振動数が変わった場合には応力制約条件を満足せず、安全率1.70を考慮してもなお危険な場合があることが判断される。なお、このような事態が生じるのは、加速度の振動数が変わるとそれに応じた最適断面積が変り、断面積間のバランスあるいは Material Distribution が変化するためであろうと思われる。

Table 25 には、Seismic Loading の場合の最適解における1次の固有振動数 f_{01} に対する地盤振動加速度の振動数 f の比 f/f_{01} と、水平変位および鉛直変位それぞれについて、Seismic Coefficient Loading の場合の最適解における最大節点変位に対する Seismic Loading の場合の最適解での最大節点変位の比とを、それぞれ Horizontal Magnification Factor Loh, Vertical Magnification Factor Lov として示してある。また Fig. 16 には、振動数比 f/f_{01} と Loh との関係を図示する。これによれば、定性的には1質点系の Magnification Factor の図に類似しているが、減衰定数の違いによる Loh の差異は明確ではない。なお、減衰定数の値によらず、Optimum Mass が最大となる加速度の振動数の時に、 f/f_{01} の値は1に最も近くかつ Loh の値が最も大きいことが分る。

Fig. 17 および18に、減衰定数 $h=0.00$ で地盤振動加速度 $f=3.50$ Hz の場合の最適解における節点変位および部材応力の応答の数例を示す。最適化過程における動的応答は $\tau=3s$ までしか扱っていないが、これらの図には 6s までを示しており、変位応答が最大となる例を取って、3s までに得られた応答が 6s までに得られる応答を大きさでどの程度満足しているかを示

Table 25 Magnification Factor

Loading Condition		Magnification Factors											
		Damping=0.00			Damping=0.02			Damping=0.05			Damping=0.10		
		f/f_{01}	Loh	Lov	f/f_{01}	Loh	Lov	f/f_{01}	Loh	Lov	f/f_{01}	Loh	Lov
Seismic Loading	$f=0.50$ Hz	0.22	1.15	1.00	0.23	1.12	1.00	0.23	1.09	1.00	0.23	1.07	1.00
	$f=1.00$ Hz	0.41	1.32	1.01	0.42	1.28	1.00	0.42	1.26	1.00	0.43	1.23	1.00
	$f=1.50$ Hz	0.57	1.33	1.00	0.58	1.48	1.00	0.59	1.44	1.00	0.60	1.39	1.00
	$f=2.00$ Hz	0.68	1.63	1.00	0.70	1.62	1.00	0.71	1.61	1.00	0.74	1.57	1.00
	$f=2.50$ Hz	0.76	1.67	1.00	0.77	1.67	1.00	0.80	1.66	1.00	0.84	1.64	1.00
	$f=3.00$ Hz	0.81	1.68	0.98	0.83	1.70	1.00	0.86	1.69	1.00	0.91	1.67	1.00
	$f=3.50$ Hz	0.85	1.71	1.00	0.87	1.75	1.01	1.31	1.54	1.00	1.54	1.18	1.00
	$f=3.75$ Hz	1.51	1.38	1.00	1.58	1.28	1.00	1.67	1.15	1.00	1.82	0.96	1.00
	$f=4.00$ Hz	1.80	1.11	1.00	1.92	0.98	1.00	1.98	0.91	1.00	2.01	0.87	1.00
	$f=6.00$ Hz	3.35	0.61	1.00	3.39	0.60	1.00	3.39	0.58	1.00	3.43	0.56	1.00
	$f=8.00$ Hz	4.21	0.38	1.00	4.55	0.40	0.97	4.79	0.39	0.98	4.91	0.38	0.98
	$f=10.00$ Hz	5.95	0.35	1.00	6.02	0.34	0.99	6.13	0.33	0.98	6.21	0.32	0.98
	$f=12.00$ Hz	7.41	0.30	0.97	7.55	0.30	0.97	7.59	0.29	0.97	7.64	0.28	0.97

Remarks: f_{01} indicates natural frequency (1st mode)
 Loh indicates horizontal magnification factor
 Lov indicates vertical magnification factor

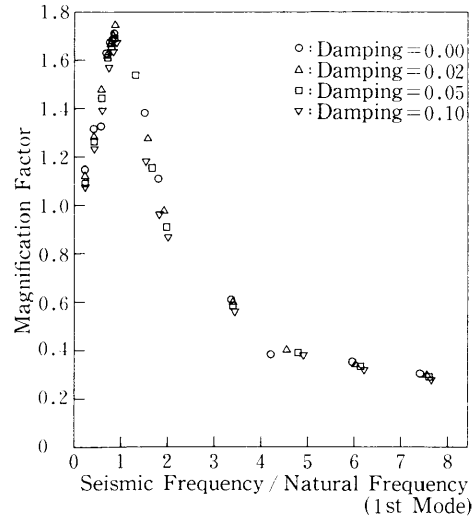


Fig. 16 Horizontal Magnification Factor

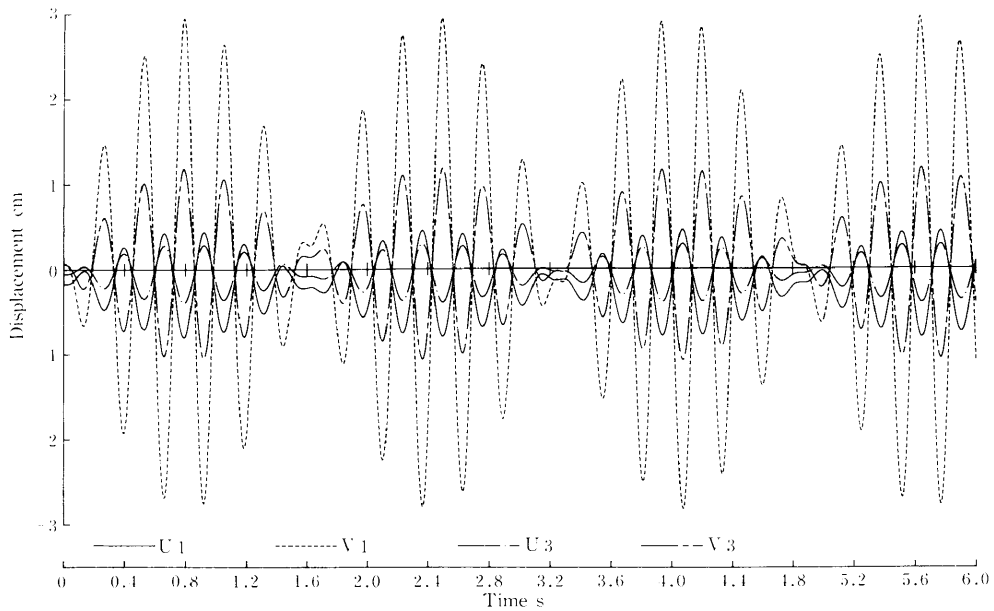


Fig. 17 Displacement Response (Damping=0.00, Seismic Frequency=3.50 Hz)

すと共に、応答の状況を示すものである。この結果、変位応答については98.7%以上、応力応答については99.2%以上満足しており、3s までの応答計算値を用いても妥当であると言える。

同様に、Fig. 19 および20には $h=0.00$, $f=0.50$ Hz の場合の節点変位および部材応力の応答の数例を示す。動的応答計算には通常外力の3波分を作用させれば充分であると言われているが、 $\tau=3s$ では1.5波分しか作用させていないので、3波分 6s までの応答を求めてその満足度を調べようとするものである。この結果は、変位応答については99.6%以上、応力応答につい

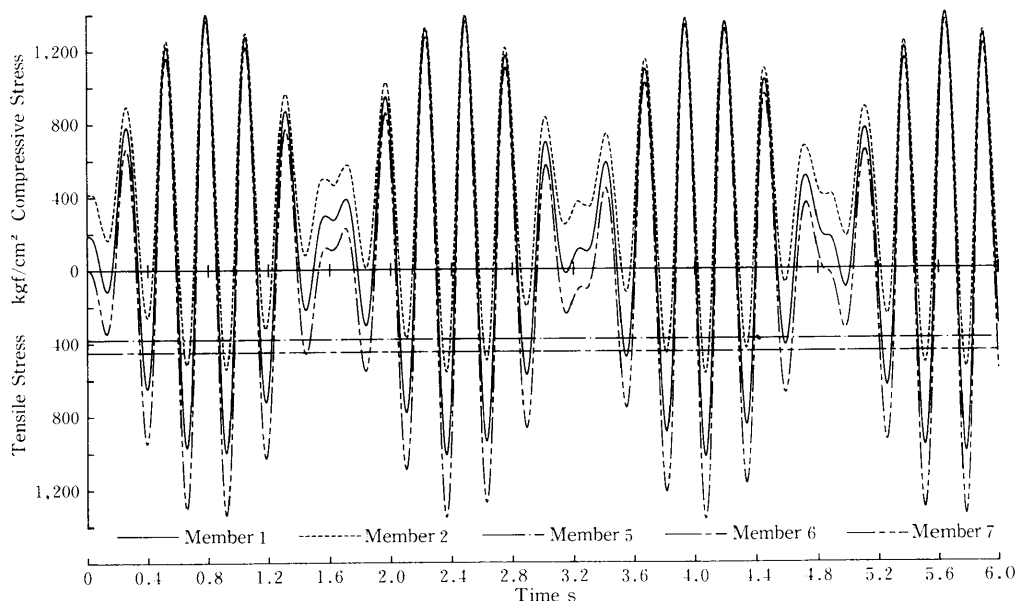


Fig. 18 Stress Response (Damping=0.00, Seismic Frequency=3.50 Hz)

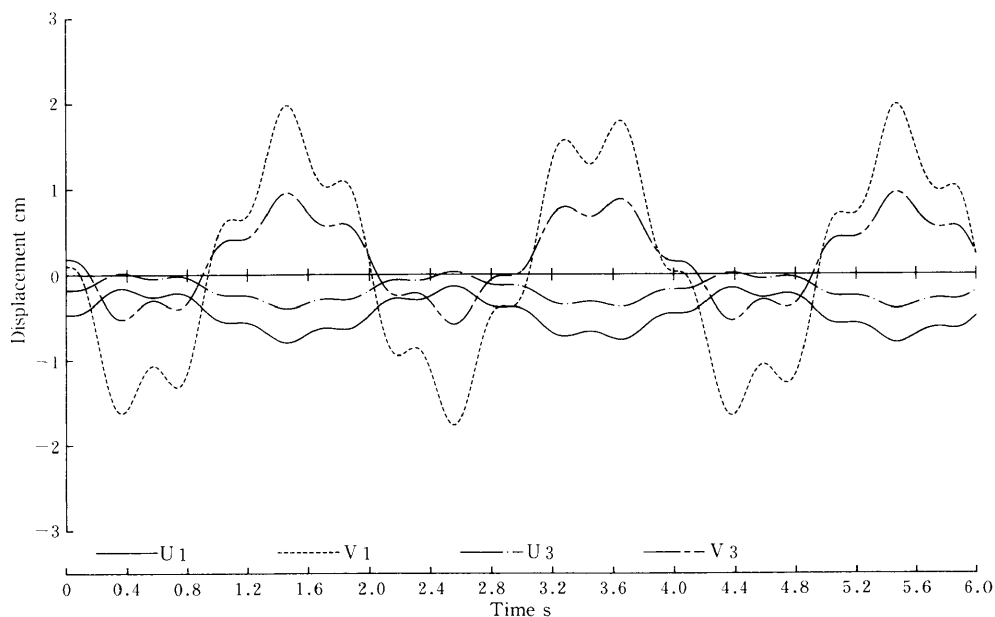


Fig. 19 Displacement Response (Damping=0.00, Seismic Frequency=0.50 Hz)

ては99.7%以上満足しており、この場合も $\tau=3s$ までの応答計算で十分であると言える。

ところで、これらの応力応答で注目されるのは水平部材5および6の応答である。これらの応力は静的荷重のみによる応力で、動的応力は生じていない。両部材の両端の動的変位は、静的節点変位のまわりに、水平には同一変位を、鉛直には上下対称の変位を生じており、地盤面を片持ばりの固定端とする曲げ変形を生じているからと思われる。

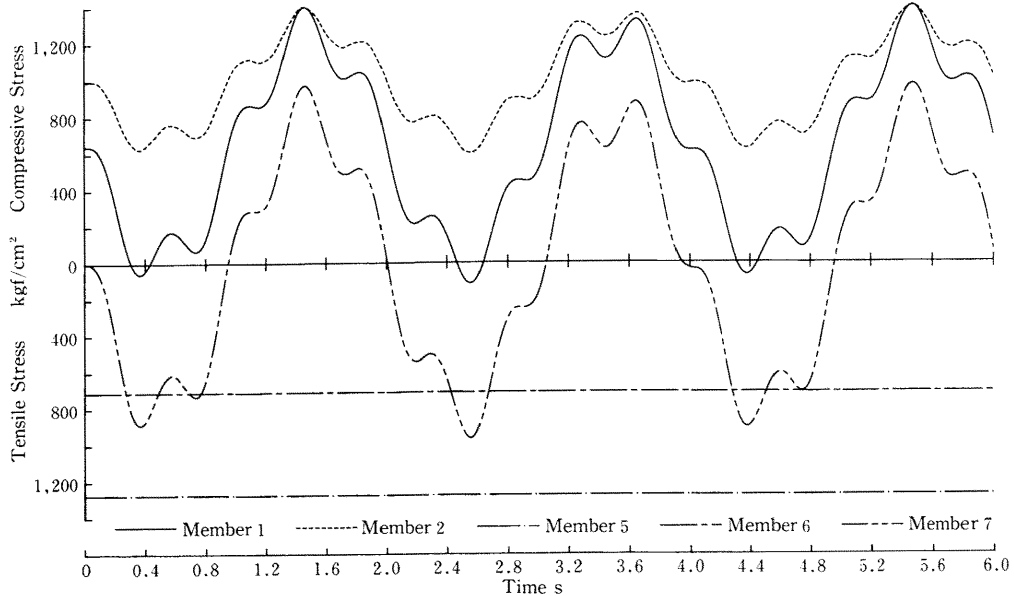


Fig. 20 Stress Response (Damping=0.00, Seismic Frequency=0.50 Hz)

5. ま と め

前述の結果および考察をまとめると次の通りである。

- 1) 地盤振動加速度を受けるトラス構造物の最小質量設計は、加速度振幅が一定な場合、その振動数 f の影響を大きく受ける。例題のトラスでは、 $f=3.50$ Hz 付近でピークを有し、減衰定数の値にかかわらず $f=0.50\sim 3.50$ Hz ではトラスの最小質量は震度法による計算結果よりも大きくなっている。このことから、他の構造物でも、地盤振動加速度のある振動数に対して最小質量が最大となり、震度法による計算値よりも大きくなることが考えられる。
- 2) 最適化されたトラス構造物の1次および2次の固有振動数は、減衰定数 h の値にかかわらず、 $f=0.50\sim 3.00$ Hz の範囲では f よりも高く、 $f=3.75\sim 12.00$ Hz の範囲では f よりも低い。 $f=3.50$ Hz の時には、 $h=0.00$ および 0.02 の場合には f よりも高く、 $h=0.05$ および 0.10 の場合には f よりも低い。
- 3) 減衰作用は最小質量を減少させるが、ピークではその減少率が大きい。
- 4) 最小質量および1次の固有振動数は、 f が小さくなって行くと震度法による計算値に近づき、 f を大きくして行くと死荷重のみの場合に漸近して行く。
- 5) 各部材の断面積は、1層目の鉛直部材が最大で、2層目の鉛直部材、さらに1層および2層目の斜材の順に小さくなる。水平部材の断面積は最小で、断面積の下限を取る場合も多い。
- 6) 構造部材の合理的な材料の配分率は、一般的に1層目の鉛直部材が最大で、1本で全

体質量の約16~20%を占めている。また、最小質量が最大値を取る加速度の振動数を境として配分率が急激に変化する。

7) 応力制約および部材断面寸法の制限によって最小質量設計を行った場合、必ずしも全応力設計にはなっていない。

8) 震度法によって設計されたトラス構造物は、地盤振動加速度の作用を受けた場合、安全率でカバーできないような危険な応力状態を生じることがある。

9) 最小質量が最大となる最適断面を用いて設計されたトラス構造物も、加速度の振動数が変わると安全率でカバーできないような危険な応力状態を生じることがあり、最小質量が最大であるから安全であるとは必ずしも言えない。

10) この例題のような多質点系構造物の場合にも、質点の最大水平変位については1質点系と同様な変位共振曲線が得られるが、減衰定数の特徴は明確ではない。鉛直変位はほとんど変化しないが、水平変位の最大値は、最小質量と同様に振動数の影響を大きく受け、最小質量が最大となる加速度の振動数のとき最大となる。

11) トラス構造物の水平部材は、地盤振動加速度を受けた場合、静的応力のみの状態で時間的に応力の変化はない。

6. あとがき

地盤振動加速度がトラス構造物の支点到作用した場合、加速度振幅の大きさが一定でも卓越振動数が変化すると構造物の動的特性がいかに変化するかを、応力制約および部材断面寸法の制限による最小質量設計を行って明らかにした。

また、震度法による最適断面を用いて設計されたトラス構造物に地盤振動加速度が作用すると、安全率ではカバーできないような応力状態を生じることがあり、許容応力度設計法の立場からは危険な応力状態があることを示した。

さらに、動的解析を行って最小質量が最大となる断面を用いて設計したトラス構造物も、異なった振動数の加速度が作用すると危険な応力状態を生じることがあり、必ずしも安全設計とは言えないことを示した。

今後の研究としては、地盤振動加速度の単一の振動数のみによる最適化ではなく、ある範囲の振動数を受ける構造物の最適化手法を開発することが必要であろう。

最後に、本論文をまとめるに当たり、構造物の動的特性について有益な御指摘をしていただいた土木工学科高田清美専任講師に謝意を表します。

なお本論文の計算には、国士舘大学電子計算機センターの Honeywell DPS 8/70 および東京電機大学計算センターの FACOM M-160 を使用したことを付記する。

(1983年1月21日 受理)

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，昭和55年3月。
- 2) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生：基盤振動を受ける構造物の最適設計，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，I-333，1981年9月。
- 3) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生：地盤振動加速度を受ける構造物の最適設計，国土館大学電子計算機センター紀要，第3号，pp. 1-20，1982年3月。
- 4) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生：地震力を考慮した構造物の最適設計，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 1385-1392，174，1982。
- 5) Bryson, A. E. Jr. and Ho, Y-C.: Applied Optimal Control, Ginn and Company, Waltham, Mass. 1976.
- 6) Rosen, J. B.: The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming, Part I, Linear Constraints, SIAM Journal, Vol. 8, 181, 1960.
- 7) Rosen, J. B.: The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming, Part II, Nonlinear Constraints, SIAM Journal, Vol. 9, 514, 1961.
- 8) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生：最適トラス構造に及ぼす外力の振動数の影響，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，I-26，1982年10月。
- 9) Matui, K., Kikuta, Y., Niinobe, Y. and Yamamoto, K.: Effects on Optimum Structures Due to Change in External Load Frequency, Pro. of the 31th Japan National Congress for Applied Mechanics, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 31, pp. 343-350, 1981.
- 10) Arora, J. S.: On Improving Efficiency of an Algorithm for Structural Optimization and User's Manual for Program TRUSSOPT 3, Technical Report No. 12, Dep. of Mechanics and Hydraulics, University of Iowa, September 1976.
- 11) Haug, E. J. and Arora, J. S.: Applied Optimal Design, Mechanical and Structural System, John Wiley & Sons, 1979.
- 12) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生：構造物の動的応答を考慮した最適化問題，国土館大学工学部紀要，第14号，pp. 68-77，1981年。
- 13) 小坪清真：土木振動学，森北出版，1973年。
- 14) 上原七司：コンピュータによる橋梁と構造の振動解析，森北出版，1970。
- 15) 土岐憲三：構造物の耐震設計，技報堂，1982年。
- 16) 河島佑男：動的応答解析，コンピュータによる構造工学講座 II 4A，培風館，1972。