

横浜ドリームランド高層ホテルの耐震性に関する研究

(その1. 振動特性)

森 高 勇
 松 岡 進士郎
 (機械計算室)
 武 田 寿 一
 吉 岡 研 三

概 要

最近、構造物のダイナミックデザインがさかんに行なわれているが、その基本となる振動特性を、超高層第一号の本建物について吟味したものである。固有周期について構造体の剛性を綿密に計算し、二次部材として扱っている部材を考慮すれば周期がかなり実験値と一致してくる。また本建物のように塔状の建物はせん断振動系に置換した場合と曲げせん断系に置換した場合とで高次振動では相当の差を生ずる。一方一次振動については、固有周期、固有モードに関し一次振動に対応した曲げを考慮すれば、両者はほぼ一致する。

1. 序

近來の耐震工学のめざましい発達により、超高層建築構造物の dynamic analysis が盛んに行なわれるようになった。横浜市戸塚の横浜ドリームランドホテル

エムパイアは、この種の設計が適用され、そして施工された我国超高層の第一号である。

しかし、dynamic analysis と言っても種々の問題をかかえているわけで、地震と地盤、地盤と建物の相互関係などの問題、せん断質点系置換の問題、建物の

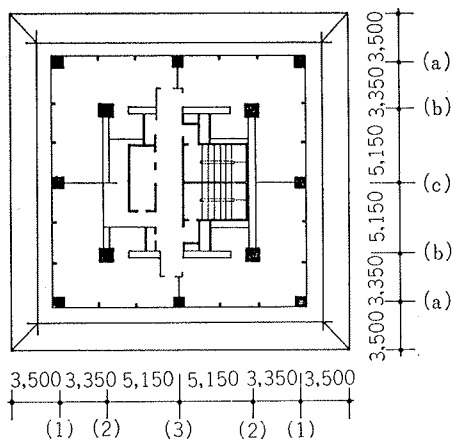


図-1 基準階平面図

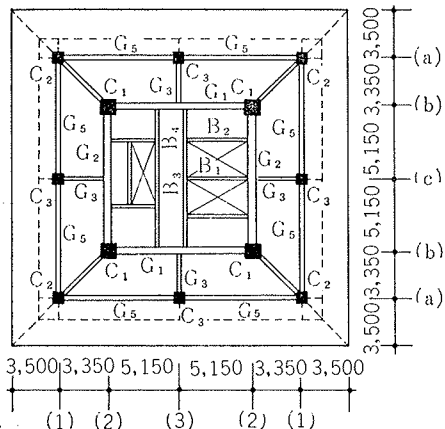


図-2 基準階梁伏図

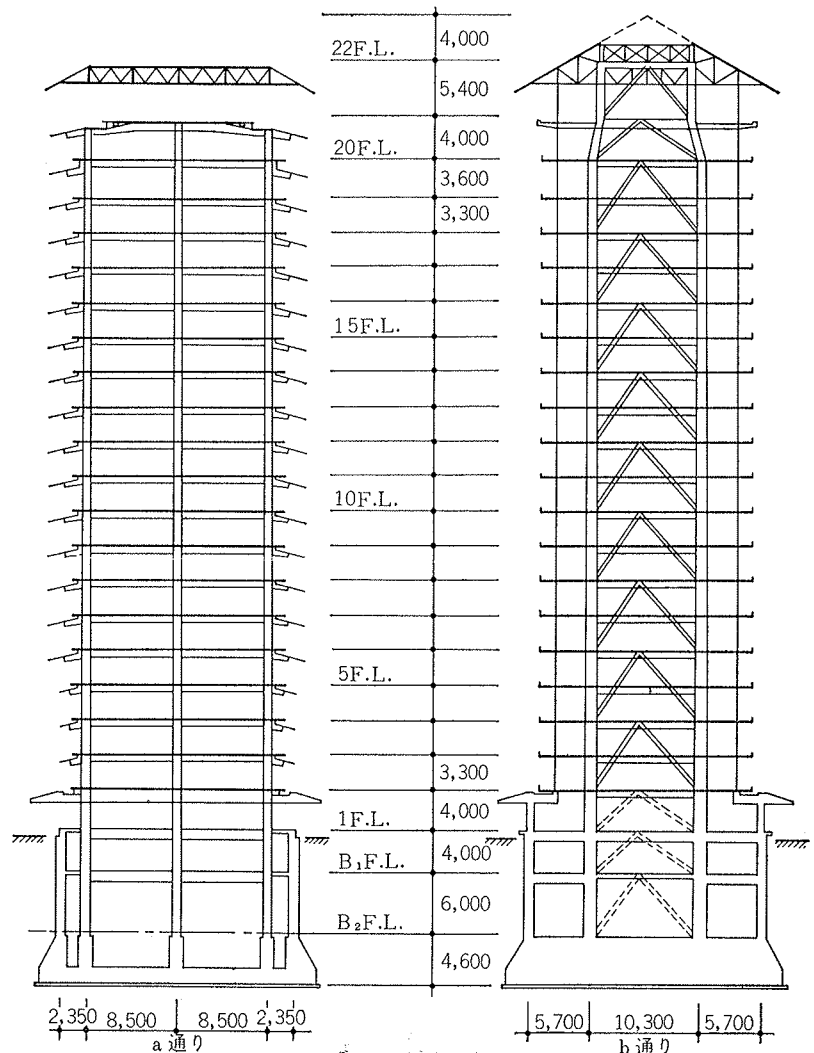


図-3 軸組図

剛性の減衰、終局強度などをより深く、正確に捕える努力が各所で行なわれている。

幸い、本建物についてはその施工時から一連の振動実験がなされており、¹⁾ 設計段階とはやや異なった立場から、この実験と理論的解析とを比較検討し、将来に資そうとするものである。

本報では、上記の問題のうち、建物のせん断質点系とせん断曲げ質点系の問題、固有周期、固有モードといった振動特性について報告する。一般の建物では、固有周期計算値と実際とでなかなか一致しない例が多く、それが構造体の計算法そのものに問題があるのか、二次部材の影響なのかといった点で参考になれば幸いと思う。

なお、次号では応答関係について報告する予定である。

2. 建物概要

本建物は、図-1, 2, 3に示すように地上22階、地下2階の塔状ホテル建築で、基礎底面は礫層で直接支持されている。

構造フレームは、中央の4本の支柱で囲まれた1スパン正方形のコアを構成するメイントラス部と、8本の外柱よりなる外周の純ラーメン部とで構成されている。さらに、階段周りとエレベーター周りとは、厚さ90mmのコンクリート間仕切壁がスラブと一体に立ち上がっている。設計段階では、横力に対してはメイントラス部のみを考え、外周ラーメンはメイントラスから強制変形を受けるとして設計されている。

メイントラスは、図-3のb通り軸組図の中央1スパンで、1階おきのK状のブレース構造となっている。外周ラーメンは、図-3のa通り図に示すように純ラーメン構造である。

主要部材の断面を表-1に示すが、柱は鉄骨鉄筋コンクリート造、梁およびブレースは純鉄骨造である。コンクリートは、9階以上が軽量コンクリート、8階以下が普通コンクリートとなっている。

なお、1階と地階のコア周りでは、厚いコンクリート壁(1階で600mm、地下で750mm)がブレースを包み、地階ではさらに、外周およびプランの対角線上にも強剛な壁が配置されている。

3. フレーム解析

本建物を1階床面で固定と仮定し、地上階部分を曲げせん断質点系と仮定した場合の変位係数マトリックスを求めるために、次の5 Cases のフレーム解析を行なった。ここに、変位係数マトリックスとは、ある層に単位外力をかけた時の各層の変位を各要素とするマトリックスのことである。各 Case とも各部材を曲げ、せん断、軸方向変形を起す線材に置換し、材料定数を表-2のごとく仮定した。

Case A; メイントラス部のみを取り出し、これをピン節トラスと仮定する。ただし、中間階(奇数階)の梁は無視する。1階は厚い壁がブレースを包んでいるため、この壁全体を1本の線材に置換して考えたため、1階のみは1本の仮想柱のみとなる。

Case B; Case A のピン節トラスを剛節トラスと仮定し、中間階の梁も考慮する。

Case	E _s	E _c	E _{LC}	G _s	G _c	G _{LC}
A~D	2.1	.21	.10	.81	.09	.045
E	"	.35	.20	"	.15	.085

註) E; ヤング率, G; せん断弾性係数, S; 鉄, C; コンクリート
LC; 軽量コンクリート

表-2 材料定数 (10⁹kg/cm²)

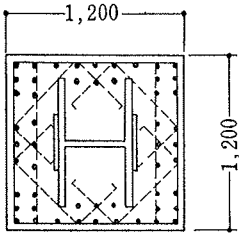
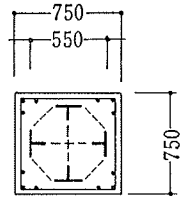
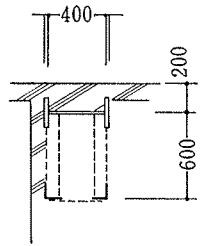
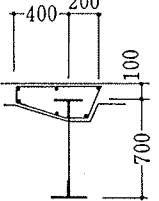
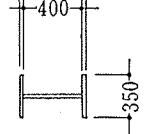
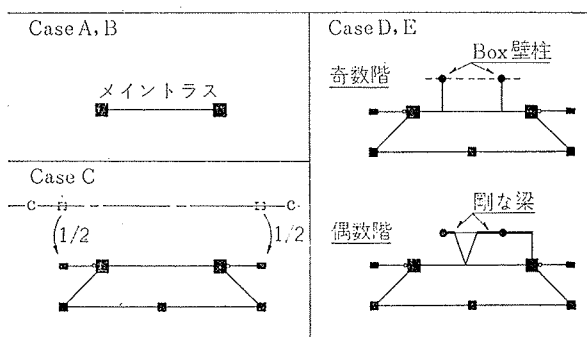
部材階	C ₁ 2, 3	C ₂ 2, 3	G ₁ , G ₂ 4, 6	G ₅ 3~20	V 2, 3
断面					
鉄骨及び鉄筋	F. 2 R-900×50 F. 2 R-400-32 W. R-400×50 鉄筋 52-D32 フープ 13φ-@200	8 L _s -90×90×10 鉄筋 14-D25 フープ 13φ-@250	F { 2 R-200×22(中央) 2 R-200×28(端部) W. R-400×12 2 L _s -100×100×10 ラチス L-125×75×7 タイプレート FB-125×9	2 L _s -90×90×7(上) 2 L _s -100×100×10(下) W. R-6 鉄筋 6-16φ	F. 2 R-350×22 W. R-400×12

表-1 主要部材断面表

- Case B; Case B について、設計せん断力を外力とした場合の層間変位から求めたバネ定数をもつ純せん断置換系と仮定した場合。
- Case C; Case B のメイントラスに、外周ラーメンが付加された場合。
- Case D; Case C に、さらに階段周りとエレベーター周りのコンクリート間仕切壁が付加された場合。
- Case E; Case D と同一の構造系であるが、コンクリートの材料定数のみを表-2のごとく変えた場合。



注) 直交方向には変形を起さない支点を各節に設ける
 図-4 各 Case の仮定骨組プラン

以上の各 Case の骨組プランを図-4に示す。骨組は中心C列に関して対称であるため、半分の骨組について計算を行なった。変位方向 (a, b, c 方向) に直交する方向には、各節点で変位および回転を拘束する支点を仮定し、直交方向には変形が起らないとした。

なお、階段周りとエレベーター周りの壁は、プラン上おのおの Box 状であるため、変位方向の壁を Web これに直交する壁を Flange とみなす線材としての剛性をもとめ、図-4に示すように、これを階段とエレベーターのおのおの中心に位置する2本の仮想柱とした。この仮想柱には、各床面で壁幅の長さを持つ剛な境界梁を片持梁として考慮した。また、メイントラスと壁とを結ぶ直交方向の梁の境界効果などは、等価的な線材で両者を結ぶことによって考慮した。そして、外周ラーメン、メイントラス、壁おのおのが同一水平変位を起すよう、おのおのを各床面で剛な線材で結んである。

次に、変位方向に直交するメイントラス部(2通り)のブレースについて考える。もし、これがブレースではなく壁である場合には、Box 材としての Flange の効果は大きい。しかし、これがブレースの場合では、梁の剛性が十分大でなければその効果は小さく、本建物の場合、直交面内ブレースを柱の軸方向剛性に置換すると、わずか0.3%にすぎない。ゆえに、ここではこれを無視した。

4. 固有値解析

上記の各 Case の置換質点系を図-5に示ように、Case A のみ11質点系に、他は13質点系に置換した。また、表. 3に上記で求めた変位係数マトリックスのうち、Case Eの場合を示す。このマトリックスは、対角要素に関して対称であるから、右上半分に変位係数マトリックスを左下半分に逆マトリックスを、参考までに記した。すなわち、右上は、ある質点に単位外力をかけた時の各質点の変位を表わしているのに対し、左下は、ある質点のみに単位変位を与えた時の各質点の反力を表わしている。

さて、置換質点系の自由振動時の振動方程式は次式となる。

$$[A] \cdot [M] \cdot \ddot{x} = \frac{1}{\omega^2} \dot{x} \dots \dots \dots (1)$$

[A]: 変位係数マトリックス

[M]: 質量マトリックス

x : 変位ベクトル (固有ベクトル)

ω : 円振動数 (固有値)

	m_i	t/g	m_i	m_i	m_i
22F.L.	.336		.553	.553	.336
	.434				.434
20	.388		.790	.790	.574
	.372				
	.336		.691	.523	.690
				.336	
			.673	.505	.672
15	.336		.672	.672	.674
	.341				
			.680	.680	.682
10	.341		.735	.735	.734
	.444				
	.423		.859	.647	.856
				.424	
			.847	.635	.846
5	.423				
	.428		.855	.855	.640
	.428				.428
1F.L.	1.640		1.860	1.860	1.640
21質点		11質点	13質点	13質点	
元系		置換系	置換系	置換系	
Case		A	B	C,D,E	

図-5 質点置換系図

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	.1821 ⁻⁴ .1102 ⁶	.1984 ⁻⁴	.2129 ⁻⁴	.2390 ⁻⁴	.2634 ⁻⁴	.2876 ⁻⁴	.3124 ⁻⁴	.3374 ⁻⁴	.3623 ⁻⁴	.3868 ⁻⁴	.4119 ⁻⁴	.4259 ⁻⁴	.4501 ⁻⁴
2	-.7656 ⁵	.5659 ⁻⁴ .1292 ⁶	.9142 ⁻⁴	.1287 ⁻³	.1485 ⁻³	.1624 ⁻³	.1740 ⁻³	.1849 ⁻³	.1954 ⁻³	.2056 ⁻³	.2160 ⁻³	.2216 ⁻³	.2320 ⁻³
3	.2650 ⁵	-.6535 ⁵	.2026 ⁻³ .5340 ⁵	.3359 ⁻³	.3998 ⁻³	.4400 ⁻³	.4707 ⁻³	.4982 ⁻³	.5242 ⁻³	.5494 ⁻³	.5750 ⁻³	.5886 ⁻³	.6142 ⁻³
4	-.2692 ⁴	.1173 ⁵	-.1855 ⁵	.8137 ⁻³ .1778 ⁵	.1091 ⁻²	1244 ⁻²	.1346 ⁻²	.1430 ⁻²	.1509 ⁻²	.1583 ⁻²	.1659 ⁻²	.1699 ⁻²	.1774 ⁻²
5	.6010 ³	-.2665 ⁴	.5638 ⁴	-.1156 ⁵	.1779 ⁻² .1506 ⁵	.2197 ⁻²	.2434 ⁻²	.2614 ⁻²	.2773 ⁻²	2923 ⁻²	.3074 ⁻²	.3154 ⁻²	.3302 ⁻²
6	-.1207 ³	.5696 ³	-.1250 ⁴	.3849 ⁴	-.9324 ⁴	.3088 ⁻² .1156 ⁵	.3608 ⁻²	.3945 ⁻²	.4222 ⁻²	.4478 ⁻²	.4731 ⁻²	.4868 ⁻²	.5110 ⁻²
7	.2307 ²	-.1748 ³	.3759 ³	-.8859 ³	.2781 ⁴	-.7252 ⁴	.4698 ⁻² .1011 ⁵	.5380 ⁻²	.5858 ⁻²	.6269 ⁻²	.6669 ⁻²	.6884 ⁻²	.7257 ⁻²
8	-.2992 ²	.1458 ³	-.2585 ³	.3646 ³	-.6837 ³	.2335 ⁴	-.6829 ⁴	.9940 ⁴	.6689 ⁻²	.7551 ⁻²	.8199 ⁻²	.8800 ⁻²	.9119 ⁻²
9	.3640 ²	-.1510 ³	.2214 ³	-.2031 ³	.1751 ³	-.4383 ³	.2230 ⁴	-.6980 ⁴	.9081 ⁻² .1026 ⁵	.1016 ⁻¹	.1105 ⁻¹	.1150 ⁻¹	.1226 ⁻¹
10	-.3106 ²	.8346 ²	-.1289 ³	.8831 ²	.2454 ²	.3143 ¹	-.4406 ³	.2361 ⁴	-.6981 ⁴	.1195 ⁻¹ .9476 ⁴	.1335 ⁻¹	.1400 ⁻¹	.1502 ⁻¹
11	.4068 ²	-.3618 ²	.2866 ²	.6995 ²	-.2426 ³	.2485 ³	-.1918 ³	-.6292 ¹	.1821 ⁴	-.6969 ⁴	.1562 ⁻¹ .1599 ⁵	.1661 ⁻¹	.1800 ⁻¹
12	-.4563 ²	.5015 ²	.1277 ²	-.1457 ³	.3032 ³	-.3238 ³	.4030 ³	-.7449 ³	.3265 ³	.2512 ⁴	-.1337 ⁵	.1664 ⁵	.1790 ⁻¹
13	.1080 ²	-.5390 ²	.3798 ¹	.6528 ²	-.9627 ²	.1279 ³	-.1503 ³	.3737 ³	-.3167 ³	-.1390 ²	.2614 ⁴	-.5552 ⁴	.2194 ⁻¹ .2910 ⁴

註) 表中の最後の値は指数を表わす。(例: $-.1450^{-4} = -0.1450 \times 10^4$)

表-3 変位係数マトリックス表 (Case E) 右上:[A](cm/t), 左下:[A]⁻¹(t/cm)

(1)式は、すなわち固有値問題であって、ここではこれを乗べき法 (power method) で解いた。その結果を表-4, 図-6, 7, 8に示す。表-4に各 Case の固有周

期と実測値を、図-6に Case B, C, D の刺激関数を、図-7に Case E の刺激関数と実測モードを、図-8に Case B, B' の刺激関数を示す。

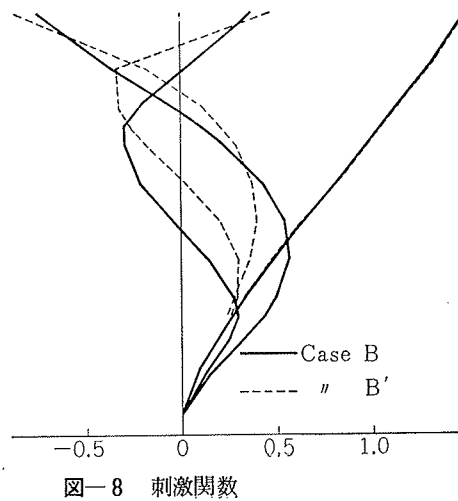
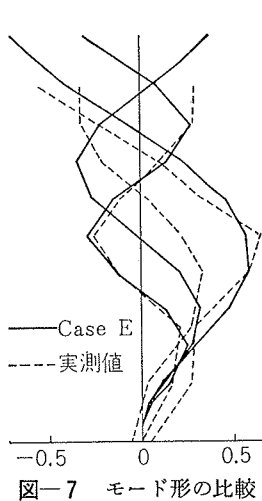
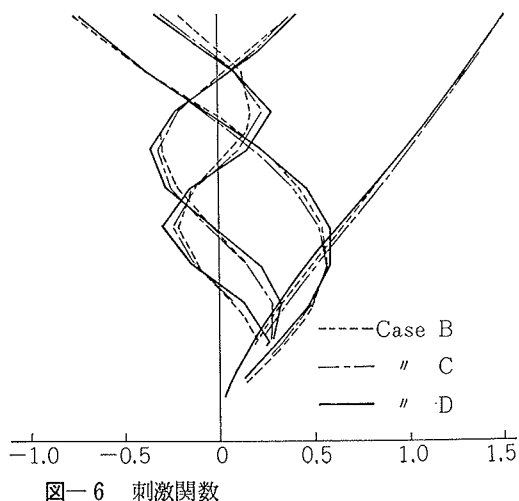
Case	1次	2 "	3 "	4 "	5 "	6 "
A	1.821	.616	.346	.242	.196	
B (B')	1.745 (1.751)	.585 (.750)	.330 (.511)	.226 (.369)	.179 (.283)	
C	1.540	.517	.290	.196	.154	
D	1.453	.430	.219	.137	.099	
E	1.336	.389	.195	.120	.084	.065
実測値	1.140	.345	.195	.110	.080	.060

表-4 固有周期 (sec)

5. 考察

各 Case を全体的にみると、Case B' を別にして、モード形にはさほど差はみられず、固有周期は剛性の増加とともに短くなっている。以下、細部にわたって比較検討を行なってみる。

i) Case A と B とを比較することによって、ピン節から剛節および中間梁の有無の効果がわかる。表-4の固有周期によると、両者は5次までさほど差がみられず、剛性に換算してみても1~5次までそれぞれ



9, 10, 10, 14, 20% の増加率にしかならない。自明ではあるが、このことはトラストとしての性状をもの語っている。

ii) 表-4の Case B, C, D を比較すると、外周ラーメン、間仕切壁の剛性効果のために周期が短くなってゆくことがわかる。ところが、モード形によってその割合に違いがあるということが、その比率からわかる。そこで外周ラーメン、間仕切壁それぞれが、メイントラスに対してどの位の効果を持つかを、次の仮定に基づいて概略的に求めてみた。

一般に、質量が一定であれば、

$$T \propto \sqrt{I/K} \dots\dots\dots(2)$$

T : 固有周期

K : 剛性

今、メイントラス、外周ラーメン、間仕切壁それぞれの全体的な剛性を簡単に K_T, K_R, K_W と仮定し、

$$\left. \begin{array}{l} \text{Case B については, } K=K_T \\ \text{'' C '' , } K=K_T+K_R \\ \text{'' D '' , } K=K_T+K_R+K_W \end{array} \right\} \dots\dots(3)$$

が成立するものと仮定する。表-4の固有周期表より、(2), (3)式を連立させれば、 $K_R/K_T, K_W/K_T$ が各モードごとに求まる。その結果を表-5に示す。

表-5によると、 K_R/K_T は低次より高次までほぼ一定であるのに対し、 K_W/K_T は高次になるにしたがって急激に大きくなっている。すなわち、これはラーメンと壁の剛性々状の違いを表わしている。

	1次	2 "	3 "	4 "	5次
K_R/K_T	.280	.280	.295	.330	.360
K_W/K_T	.165	.570	.965	1.390	1.910

表-5 剛性比率

iii) Case E は Case D の普通および軽量コンクリートのヤング係数をそれぞれ .35/.21=1.67倍、.20/.10=2.0倍にしたのであるが、両者の固有周期の比較から剛性に換算して1~5次までそれぞれ 18, 22, 26, 30, 38%の増加率にしかならない。これは、梁とプレートが純鉄骨であることおよび柱の鉄筋比(鉄骨も含む)が大きいことによっている。高次になるにしたがって増加率が大きくなっているのは、上記のコンクリート壁の影響であろう。

iv) Case D と実測値との固有周期についてみると、実測値の方が小さく Case D の約80%程になっている。しかし、コンクリート定数をあげた Case E と実測値とでは、3次以上では良く合致しているが、なお1次で実測値が Case E の約85%と小さくなっている。

v) 図-6の Case B, C, D の刺激関数は三者ともさほど差がみられない。また、Case A および E もこれらの曲線にほぼ合致するものである。

vi) 図-7に Case E の2, 3, 4 次の刺激関数と実測モード形とを示しているが、両者の変位の平方和が一致するように実測値の方を定数倍にして描いたものである。しかしながら、実測値の方は、最高測定点が20 F.L. であること、1 F.L. でもある程度の変位が表われていること、測定変位が微小で測定誤差も大きいことなどの点から、理論モード形との比較は非常にむずかしく、参考までにここに示したものである。

vii) 図-7および表-2をみると、Case B と B' とは1次でほぼ一致しているのに対し、高次になるにしたがって両者の誤差が次第に大きくなっている。これは本建物が曲げの性状が強いということを示している。1次が比較的よく一致したのは、純せん断バネ定数の算定の際に仮定した外力分布が、1次モード形の場合に近かったことによるものであろう。

6. まとめ

建物の微振動時の周期でも、2次的部材をも考慮すれば計算によってある程度の推定はつく。

本建物の場合、外周ラーメン、階段まわりの間仕切壁などが剛性に大きく寄与し、特に壁は高次振動になる程その傾向が強くなる。

また、本建物のごとき塔状建物は純せん断系に置換すると、2次以上の高次で大きい誤差を生ずる。これは本建物が曲げの要素が強いということを示している。

終わりに、本研究にあたり東大教授梅村博士の御助言をいただきました。ここに謝意を表わします。

〔参考文献〕

- (1) 渡辺清治 他“横浜ドリームランド高層ホテル振動実験”1~4 建築学会大会号 昭和40年9月
- (2) 雑誌「カラム」No. 14, p.19~p.49 八幡製鉄発行