

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2 人工地震による応答)

森 高 勇
武 田 寿 一

概 要

本建物の人工地震による観測結果と種々の仮定に基づいて行なったモーダルアナリシによる応答計算値とを比較検討したが、高次減衰については周期に逆比例させた内部減衰よりも小さく仮定した方が実状に近くなる。

1. 序

横浜ドリームランド高層ホテルは、その施工時から一連の振動実験を行ない、その竣工時には人工地震による観測データ¹⁾も得られている。本建物の振動特性については既に報告²⁾済みであるが、さらに高次にわたっての振動特性についてもその後解析を行なった。本報告は、人工地震による測定値と Modal Analysisによる応答理論値とを比較検討したものである。

本建物は、地上22階、地下2階のK型ブレース構造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。その詳細については既報²⁾を参照されたい。

人工地震による測定データ¹⁾はB2 F.L.と1 F.L.とでは加速度計による加速度記録が、地上階では変位計(固有周期1秒)による変位記録が得られている。

なお、計算では全て1 F.L.で固定と仮定し、1 F.L.の記録波を入力とした。この場合、厳密には1 F.L.でのロッキングも考慮する必要があるが、ここでは無視した。

2. 建物の振動特性

既報では1次～6次の固有値解析しか行なわなかったが、ここでは置換質点系の全モードについてその固有値解析を行なった。

2.1. 固有値解析

建物を1階床面で固定とし、地上22層を13質点に置換したが、その性状マトリックスおよび解析上の仮定の詳細は既報の Case E²⁾を参照されたい。

固有値解法は、Power MethodとJacobi Methodとの2種の解法によったが、両者の結果は全モードにわたって、固有周期では有効数字5桁までは完全に一致し、刺激関数もその誤差は0.03%以下でほとんど一致した。表一1にPower Methodによる刺激関数 β_u を、表一2に固有周期の計算値と実測値とを示す。

2.2. 考察

一般に、一様な剛性分布と一様な質量分布を持つ片持梁のモード形については、その次数とnodeの数とは一致するものである。ところで表一1に示すように、本建物の場合11次と12次以外はその一致をみるが、11次と12次とはそれぞれ12, 11とそのnodeの数が逆になっている。これは本建物の剛性と質量との分布状態が一様ではないことによるものであろう。

i	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	12次	13次
13	1.4905	-.7119	.3958	-.3207	.3222	-.3121	.2471	-.1771	.1074	-.0409	-.0049	.0047	.0000
12	1.3772	-.5309	.2169	-.0842	-.0289	.1410	-.2011	.1985	-.1445	.0496	.0189	-.0124	-.0000
11	1.3007	-.3815	.0611	.0951	-.2028	.2420	-.1901	.1057	-.0457	.0272	-.0205	.0089	.0000
10	1.1441	-.0656	-.2237	.2237	-.1644	-.0738	.2765	-.3095	.2331	-.1094	.0179	-.0027	-.0000
9	0.9806	.2240	-.3509	.1452	.1353	-.1991	-.0296	.2649	-.3294	.1843	-.0260	.0008	.0001
8	0.8082	.4505	-.2709	-.1525	.2201	.1049	-.2837	.0501	.2596	-.2254	.0391	.0000	-.0001
7	0.6323	.5763	-.0368	-.2911	-.0424	.1765	.2322	-.3468	-.0750	.2367	-.0618	-.0002	.0001
6	0.4613	.5831	.2091	-.1323	-.2275	-.1154	.1380	.3363	-.1364	-.2193	.1030	.0004	-.0003
5	0.3060	.4745	.3178	.1366	-.0403	-.1360	-.2605	-.0409	.2381	.1563	-.1522	-.0004	.0011
4	0.1678	.2999	.2722	.2562	.1894	.1052	.0092	-.2536	-.2024	-.0598	.2192	.0003	-.0037
3	0.0587	.1134	.1217	.1508	.1645	.1661	.3050	.3015	.0119	-.0955	-.3194	-.0003	.0216
2	0.0220	.0421	.0485	.0659	.0819	.0952	.2216	.3362	.1643	.0566	-.0747	-.0001	-.0595
1	0.0041	.0073	.0097	.0155	.0239	.0341	.1058	.2332	.1991	.1468	.2104	.0002	.0097

表一1 刺激関数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	12次	13次
計算値	1.3355	.3889	.1954	.1199	.0844	.0650	.0515	.0420	.0353	.0314	.0263	.0243	.0101
実測値	1.14	.345	.195	.110	.080	.060	—	—	—	—	—	—	—

表—2 固有周期

Case	減衰定数 h										固有周期	入力波	応答値	計算ピッチ sec	
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次					
1	.027	.044	.053	.093	.128	.171	—	—	—	—	—	実測値	加速度	相対変位	0.005
2	"	"	"	"	"	"	—	—	—	—	—	"	変位	絶対変位	"
3	.027	.089	.158	.280	.385	.512	—	—	—	—	—	"	加速度	加速度	"
4	.027	.0243	.0352	.0579	.0783	.1036	—	—	—	—	—	"	"	"	0.0025
5	.0333	.0621	.1163	.1872	.2647	.3434	.4330	.5309	.6314	.7083	計算値	"	"	"	"
6	.15	.15	.15	.15	.15	.15	.15	.15	.15	.15	"	"	"	"	"

表—3 仮定減衰定数 h と計算假定

3. 変位応答

図—1に示すような多質点系の応答解析をモーダルアナリシスによって行なう。解析に際し、未知数のとり方（絶対量か相対量か）あるいはbaseの入力波の種類（加速度か変位か）によって、二種類の振動方程式が考えられ、図—1の1質点系の場合、次の二式が成立する。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{y}_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\ddot{X} + 2h\omega\dot{X} + \omega^2X = \omega^2y_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 x = base に対する相対変位

X = 絶対変位

y_0 = base の絶対変位

h = 減衰定数

ω = 円振動数

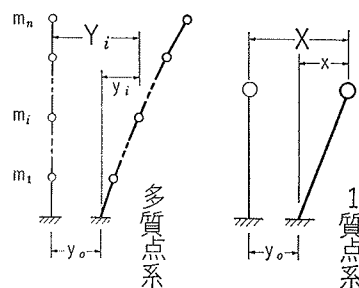
すなわち、(1)式は base の加速度を入力波とし、相対量を応答値とする場合であり、(2)式は base の変位を入力波とし、絶対量を応答値とする場合である。ただ(1)式と(2)式とは、 $h=0$ の場合には両者とも全く同一の内容の式となるが、 $h \neq 0$ の場合には減衰項のみ両者でその意味が相違してくる。

次に、両式から本建物の変位応答について解析したもののうち、2 Case をここに示す。2 Case とも刺激関数に表—1の計算値を、固有周期に表—2の実測値を、減衰定数に表—3の仮定値をとり、数値解法は、Runge Kutta Gill's Method により計算時間ピッチを0.005sec にとった。なお、7次モード以上はカットした。

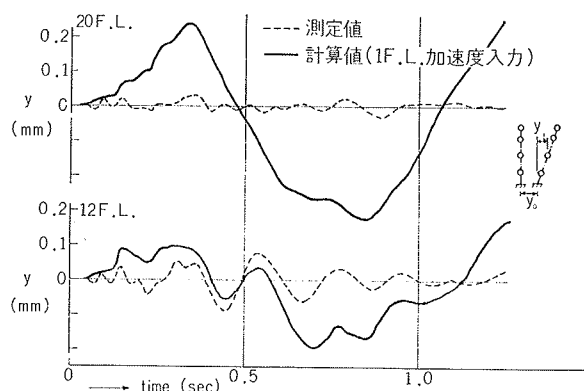
3.1. 相対変位応答解析 (Case 1)

Case 1 は base に対する相対変位を求めたものである。まず(1)式において、1 F.L. の加速度記録波（図—5の実線）を入力波として、図—1の1質点系の応答相対変位 x を求め、次式

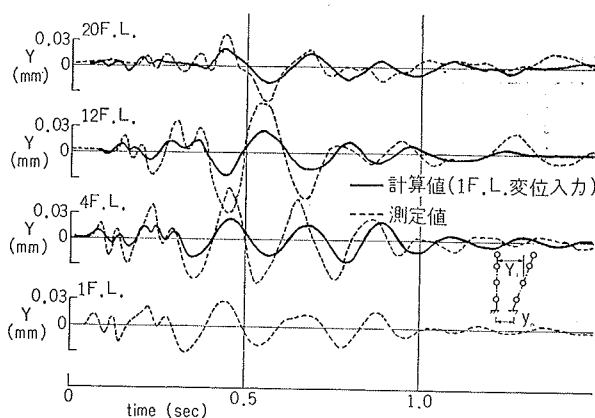
$$y_i = \sum_s \beta_s \cdot u_i \cdot s \cdot x \quad \dots\dots\dots(3)$$



図—1 質点系



図—2 応答相対変位 (Case 1)



図—3 応答絶対変位 (Case 2)

から、図一1の多質点系としての応答相対変位 y を求めた。この結果を図一2に示すが、図中の点線は各層の変位記録（図一3の点線）から強引ではあるが1 F.L.の変位を引いたものである。

3.2. 絶対変位応答解析 (Case 2)

Case 2は絶対変位を求めたものである。まず(2)式において、入力波 y_0 に1 F.L.の変位記録（図一3）を採用し、図一1の1質点系の応答絶対変位 X を求め、次式

$$Y_i = \sum_s \beta_s \cdot u_i \cdot s X \dots\dots\dots(4)$$

から、図一1の多質点系としての応答絶対変位 Y を求めた。この結果を図一3に示すが、図中の点線は各層の変位記録である。

なお、減衰定数 h は両 Case とも同一にとったが、1次については実測値をとり、2次と3次以上とは内部減衰（周期に逆比例）とした場合の値のそれぞれ $1/2$, $1/3$ にとったものである。

3.3. 考察

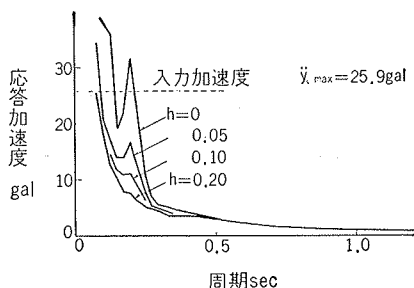
図一2の Case 1 と実測値とを比較すると、特に20 F.L.で計算値は1次が卓越しているのに対し、測定値は1次がほとんど出ていない。このことは減衰定数の仮定を変えるだけでは説明できるものではない。

ところで、変位の測定に際して使用した検出器の固有周期は1秒で、建物自体の1次固有周期にほぼ一致しているため、1次周期付近の gain は高次に比し小さいと考えられ、変位記録自体に疑問点もある。図一1の相異点はこの事も原因していよう。

次に、図一3の計算値と測定値とを比較してみると、図一2とは異なり両者はかなり似ていて、減衰の仮定によっては測定値にさらに似た計算値を得ることもできるかもしれない。しかし、上述の gain についての変位記録自体の疑問点はなお残っている。

4. 加速度応答

ところで、1次の加速度は高次のそれに比し小さいから、変位記録自体を加速度曲線に変換すれば、前記の疑問点も緩和されよう。ただ、この場合には低次特



図一4 加速度スペクトル

に1次の性状がとらえにくくなる。

4.1. 変位記録の加速度変換

ここで、地上階の変位記録を全て加速度曲線に変換する。まず、テイラー展開式から誘導される次式

$$f''(t) = \{ (f_{-4} + f_4) - 16(f_{-3} + f_3) + 64(f_{-2} + f_2) + 16(f_{-1} + f_1) - 130f_0 \} / 144h^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{ここに、} f_i = f(t + ih), i = 0 \sim \pm 4$$

によって、2階微分を行なったが、位相に関する補正は行っていない。時間刻みは $h = 0.01 \text{ sec}$ にとった。なお、(5)式はラグランジュの5点法式を2度適用したものと一致するものである。

ところで、1 F.L.のみは変位と加速度との両記録が得られているから、変位記録から求めた加速度曲線と生の加速度記録との比較ができる。図一5に、両者を示すがかなり良く一致している。

4.2 1 F.L. 加速度のスペクトル

ここで、加速度応答解析に際して入力波 \ddot{y}_0 として用いる1 F.L.の生の加速度記録（図一5の実線）の加速度応答スペクトルを求めてみる。図一4にその結果である1質点系の弾性応答スペクトルを示す。通常地震波のスペクトルと異なり、非常に短周期側にずれていて、かつピークからの落ち方が急激であるという点に特徴がある。

ところで、表一2の本建物の固有周期を図一4に当てはめると判るように、1次と2次の応答値は非常に小さいから、建物の応答加速度曲線は3次以上によってほぼ決まるといえよう。

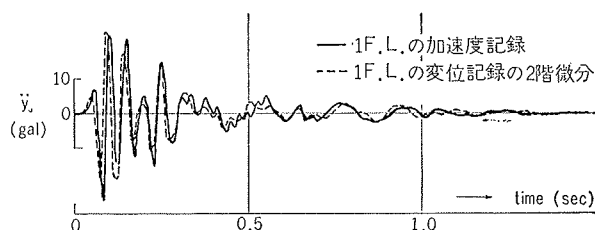
4.3. 絶対加速度応答解析 (Case 3~6)

次に、本建物の応答絶対加速度について解析を行なった Case 3~6 の4 Case について記す。4 Case とも刺戟関数 f_u に表一1の計算値を採用し、減衰定数と固有周期とは表一3のように仮定した。

まず、1 F.L.の加速度記録を入力波 \ddot{y}_0 として、図一1の1質点系の応答絶対加速度 \ddot{x} を(1)式から求め、次式

$$\ddot{Y}_i = \sum_s \beta_s \cdot u_i (s \ddot{x} + \ddot{y}_0) \dots\dots\dots(6)$$

から、図一1の多質点系の応答絶対加速度 \ddot{y} を求める。数値解法は、Runge Kutta Gill's Method により、計算ピッチは表一3のようにとった。そして Case 3, 4は7次以上を、Case 5, 6は11次以上をカットした。



図一5 1 F.L. の加速度

なお、表—3の減衰定数について説明すると、Case 3は1次に実測値をとり、高次は周期に逆比例する内部減衰とした。Case 4は1次に実測値をとり、その20%と80%とを周期にそれぞれ逆比例、比例させた内部減衰と外部減衰との和を高次減衰とした。Case 5は1次の減衰を $h_1=0.0333$ とし、その50%づつを周期に逆比例するものと比例するものとに分け、両者の和を高次減衰とした。Case 6は1次から10次まで全て $h=0.15$ と仮定した。

以上のCase 3, 4, 5, 6の結果をそれぞれ図—6, 7, 8, 9に示す。図—10に、Case 6の各モードごとの1質点系の応答絶対加速度を示す。

4.4. 考察

Case 3の図—6によると、純内部減衰型の計算値は測定値よりもかなり小さい。また、Case 5の図—8も同様の傾向があり計算値が測定値よりもかなり小さい。これはCase 5の減衰の仮定が純内部減衰に近いことによるものであろう。

次に、図—9の各次の減衰を全て同一の $h=0.15$ と仮定したCase 6の計算値は測定値にかなり近いものとなっている。ただ、1次と2次との減衰がこの仮定では非常に大き過ぎるが、前述のように1次と2次とは本応答解析ではほとんど影響しないから、ここでは問題にする必要はない。

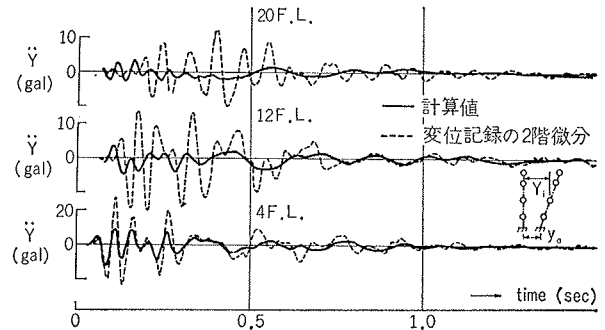
ところで、Case 4の図—7とCase 6の図—9との両計算値を比較すると、減衰がCase 4の方がCase 6よりも小さいにもかかわらず、応答計算値は下層階ではCase 6の方がCase 4よりも大きく、矛盾している。これはCase 4では7次以上を、Case 6では11次以上をカットしたことによるもので、Case 4では高次が消去されているためである。このように、高次の減衰があまり大きくないとか、刺激関数があまり小さくない場合には、高次がかなり大きい影響を及ぼす。

5. まとめ

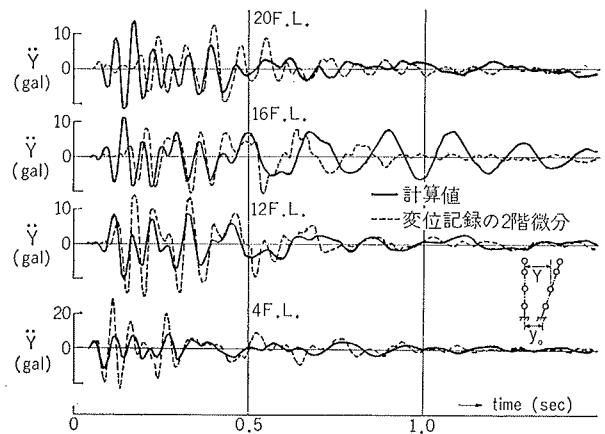
- (i) 人工地震による本測定結果では、1次の性状が捕え難く、ほぼ3次以上の影響が大きい。
- (ii) 高次の減衰定数は、内部減衰と仮定したものよりはかなり小さいものである。本建物の場合で、大略15%程度のものであろう。
- (iii) 加速度のモーダルアナリシスを行なう場合には、かなりの高次までを考慮する必要がある。減衰が小さい場合とか刺激関数が小さくない場合には、特にその必要がある。
- (iv) 実際の建物の固有モード形については、モードの次数とそのモード形の node の数とは、特に高次

において必ずしも一致しない。

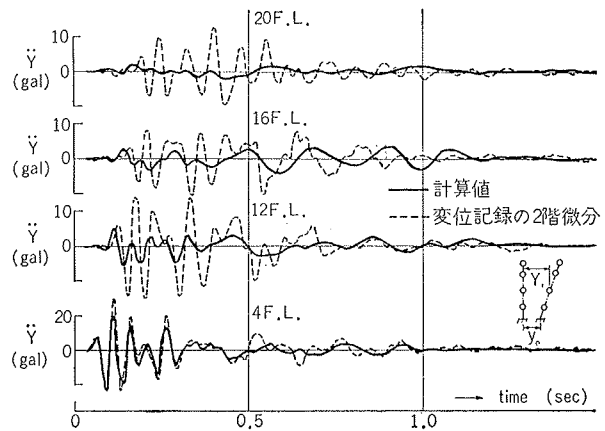
終りに、本研究にあたり東大教授梅村博士、同大沢博士、震研田中先生、当組機械計算東京分室松岡室長にご指導を、また当技研振動研究室のご協力をいただきました。ここに謝意を表す。



図—6 応答加速度 (Case 3)



図—7 応答加速度 (Case 4)



図—8 応答加速度 (Case 5)

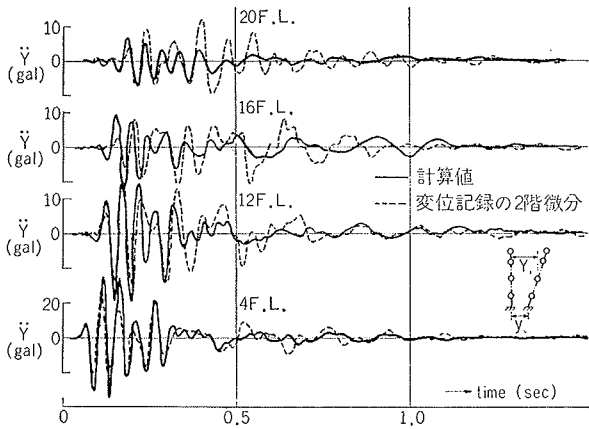


図-9 応答加速度 (Case 6)

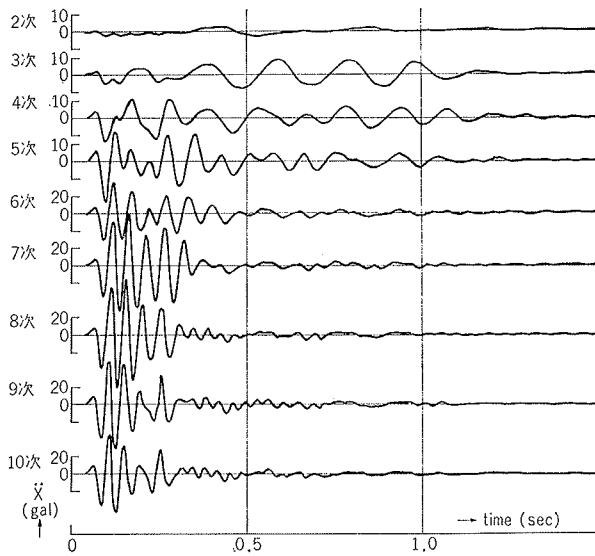


図-10 各モードの応答加速度 (Case 6)

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, S. 40.9
- 2) 森高, 松岡, 武田, 吉岡 『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)』、大林組技術研究所報 No. 1, 1966