

I-18

骨組構造物の振動減衰に関する基礎実験

専修大道短大	正員	金子 孝吉
北海学園大	正員	当麻 庄司
北海学園大	正員	早川 寛志
専修大道短大	正員	三上 敬司

I. まえがき

最近、構造物の免震や制震に対する研究が活発になり、その成果は実際の建築物に応用されるようになってきているが、構造物に耐震性をもたせることの原点はあくまで構造物自体が地震力に耐えることができるという耐力構造にあり、その上に立って免震構造や制震構造の考え方が応用されるべきであると考え。そこで構造物にあまり小細工を要せず、構造物の骨組自体にそれなりの耐震性を持たすことができればそれに越したことはない。したがってまず、基本的な骨組構造物の振動性状を把握しておくことが大事である。

本研究は骨組構造物の自由振動の減衰性を調べることに主眼をおき、さらに振動を減少させるべく TLD、TMD による制振効果について実験的に検証しようとしたものである。これまですでに、著者らは骨組構造物における質量分布や骨組構造の形式の違いによってどのように振動の仕方が変わるのか、また非対称に質量が配置された場合はどうなのかを調べる基礎的な模型振動実験を行ってきた^{1), 2)}。

ここではさらに多自由度の振動系における減衰特性を調べるため 2 層骨組構造物の自由減衰振動を計測しその波形から減衰定数を求めて整理した。その結果一般的に言われているように振動振幅が大きいほど減衰が大きいという振幅依存性^{3), 4)}を示すものであったが、非対称構造で起振方向以外の振動成分に関してはほとんど振動振幅が小さいにもかかわらず大きな減衰定数を示すことが確認された。次に、試作の TLD、TMD を骨組構造物模型に取り付けて振動振幅を減少させる制振効果を調べる実験を行った。その結果、構造物の共振周波数に合わせた TLD や TMD を使用すれば十分な制振を行うことができることを確認した。

II. 骨組構造物模型と減衰自由振動実験

実験模型は 2 層と 5 層の多層骨組構造物模型である(写真-1)。部材の材料はアルミニウムのアングル材で、床板には木合板(厚さ 6mm)を用い、また付加重量として銅板(4.5kg/1枚、300 200 10)を高力ボルト 2 本(0.5kg/1本)により本片(0.3kg/1枚)のスペーサーを介して床板に固定した。

実験は模型を油圧サーボ型の振動台上に設置して水平に振動させ、各層における加速度を記録した。その測定箇所はたとえば図-1 に示すように起振方向に対して長手(K 形筋かい方向)に据え付けた 2 層骨組構造物上に加速度計を配置した。実験ではすでに正弦波入力による応答波を測定し、多自由度の各成分に対する共振曲線を求めている。ここで入力する波形は振幅を一定(200gal)にしておき共振周波

数の波と共振しない適当な非共振周波数の波の 2 通りの正弦波で与えた。十分な定常振動をしている時点で振動台の振動を急に停止させてその後の自由減衰振動を測定することにし

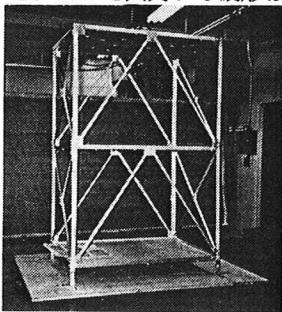


写真-1 多層骨組構造物模型

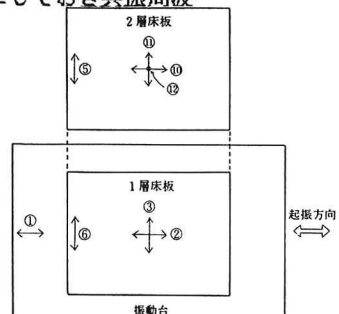
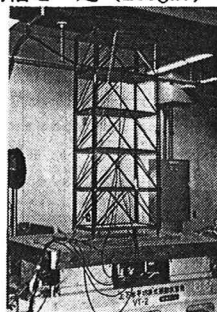


図-1 加速度計設置位置

Experimental Study on Dynamic Damping of Frame Structures

by Takakichi KANEKO, Shouji TOMA, Hiroshi HAYAKAWA and Takashi MIKAMI

た。応答加速度データのコンピュータへの取り込みは 5~10 msec 間隔(200~100回/秒)で行った。2層骨組構造物の質量は鋼板を床板上にボルト締めし、図-2に示すように配置した。ここで図からわかるように A、D、G、HおよびIは鋼板の重量が中心に対して対称に配置されており対称構造と言えるがB、C、EおよびFは重量偏心により非対称構造になっている。また、()内に示されている N、M、L、KおよびJは2層構造模型を起振方向に対して短手(X形筋かい方向)に設置したものである。それぞれケースAあるいはケースBのように表現することにする。

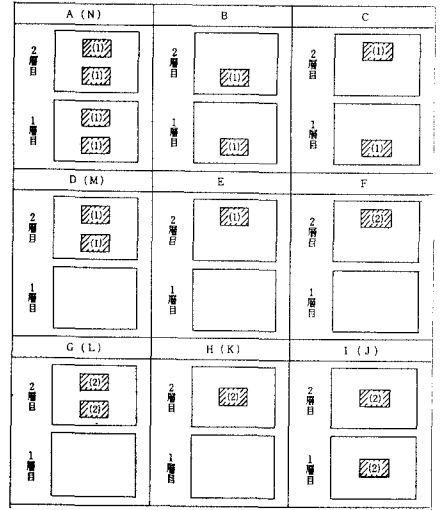


図-2 重量鋼板の载荷位置による各ケース

Ⅲ. 振動実験結果

振動測定されたデータはファイルとしてフロッピー・ディスクに収録されるが、利用する場合はパーソル・コンピュータにより適当なプログラムを用いて再生した。各ケースにおける自由減衰振動の波形は一定した単調な減衰波ばかりではない。図-3には減衰波として顕著にみられる4種類の波を示した。

- [1] は共振状態で振動している波が入力が増止したことにより一定の比率で振幅が減少している。
- [2] は共振の状態から入力が増止すると急激に減衰したかと思うと少し振幅が増加した減少して行くというようにうなりを繰り返している。
- [3] は共振点からはずれた周波数で定常振動している波が入力増止とともに固有の周波数で徐々に減少していく。

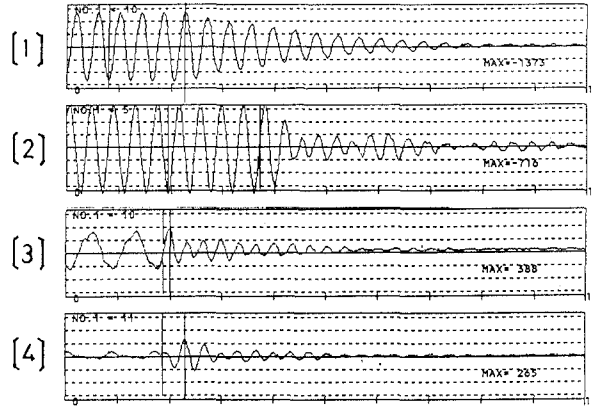


図-3 自由減衰振動の計測波形の分類

- [4] では共振点からはずれて応答振幅も小さな加速度で振動している波が入力増止時に単位インパルスが加わったかごとく振幅が増幅しうなり現象を起こしながら固有の周波数で減少していく。

これらの波形から減衰定数を求める場合従来から用いられている次のような関係式がある。n番目の振幅を x_n それから1周期後の振幅を x_{n+1} とすれば対数減衰率 δ および減衰定数 h には

$$\delta = \log \frac{x_n}{x_{n+1}} = 2\pi \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \dots \dots \dots (1)$$

で関係づけられる。波形[1]のように振幅減衰比が一定な場合は式(1)から $n=1 \sim 10$ での平均で十分に減衰定数が求まる。しかし、特に波形[2]、[3]および[4]のようにいくつかの波が重なったりして一定の比率で減衰していない場合がある。このような場合ここでは減衰の大きなはじめの3、4波と後続の緩やかな減衰の小さい波とを分けて減衰定数を求めることにした。したがって[1]の場合は1つの波の減衰定数は1個で、[2]のような場合では1つの自由減衰波から2つの減衰定数を求めた。

全てのケースについて自由減衰振動の加速度波を計測したわけであるが、その中から図-4には1例としてケースDの場合を示した。

上から、1) 振動台の起振方向入力波、に対し
 応答波として順次、10) 2層床板中央起振方向、
 2) 1層床板中央起振方向、11) 2層床板中
 央起振直角方向、3) 1層床板中央起振直角方向
 、5) 2層床板先端部起振直角方向、6) 1層床
 板先端部起振直角方向、になっている。

このケースDは対称構造になっており起振方向
 への並進曲げ振動が最も支配的な振動形であるた
 め、共振周波数 23 Hz の入力加振およびその停
 止による応答振動はいずれも単調な減衰波形にな
 っている。

しかし、非対称構造のケースでは共振の状態如
 何によっては起振方向以外の成分が支配的になり
 より複雑な波形がみられる。そのような波形の複
 雑さを考慮しながら各ケースについて対数減衰率
 および減衰定数を計算して求めた。

表-1にはまず各ケースにおける最大加速度応
 答倍率を表した。それぞれ共振時のもの(左)と
 非共振時のもの(右)とで分けて示した。

表からわかるようにD、Fのケースでは共振周
 波数 23Hz、24Hz の場合、起振方向 10、2 が
 起振直角方向 11、3、5、6に比べて大きな倍率
 を示している。

一方Aの場合は起振直角方向の 5、6 でもかなり
 大きな倍率を持っている。またB、C、Eは非対
 称構造のケースで共振での応答倍率もあまり大
 きな値を持っていない。

さて次にこれら全ての波形について求めた減衰
 定数を表-2に示した。

数値はすべてパーセント(%)で表しており、た
 とえば 2.6、12.9 などの数値は減衰定数 $h=2.6\%$ 、
 $h=12.9\%$ あるいは減衰定数 $h=0.026$ 、 $h=0.129$
 のように表したものである。したがって、対数
 減衰率で言えば h に 2π を乗じて、 $\delta=0.173$ 、 $\delta=0.809$
 のような値になっている。

ケースA、DおよびGは対称構造であるため、
 図-4の自由減衰波形[1]のように振幅減衰比が
 一定な波形をしているため、共振時(左)の場
 合は減衰定数が1個づつである。それは特に対
 称構造の場合だからではなく非対称構造の場
 合

でもケースFのように単調減少波形になっ
 ている場合があった。そのような場合は起振方
 向あるいは起振直角方向の別なく単調減衰す
 る傾向がある。

一方、非対称構造のケースB、C、Eなど
 では共振時からの自由減衰振動でも単調減衰
 の傾向は見られない。それは起振方向の並進

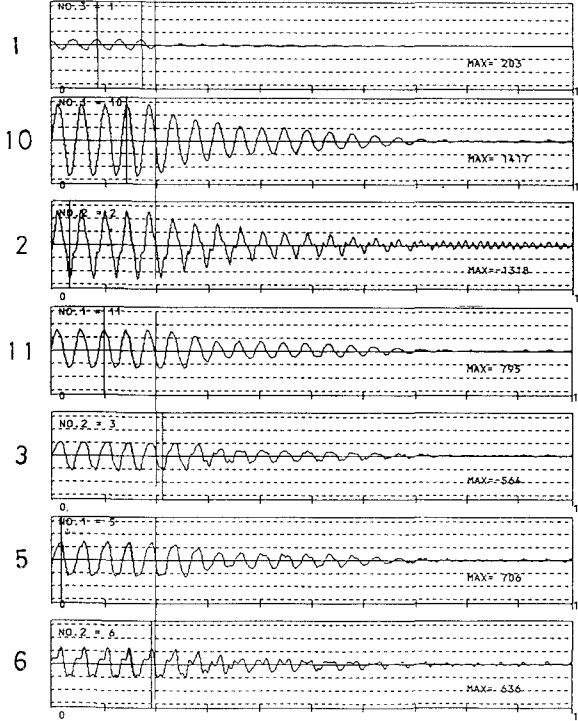


図-4 入力波と自由減衰振動応答波【ケースD】

表-1 最大加速度応答倍率

測点	H z	A		B		C		D		E		F		G	
		17		22		25		23		24		24		18	
起振方向	10 (2層)	6.33	1.40	2.17	1.46	3.52	1.65	6.98	1.54	1.91	1.64	6.93	1.41	2.58	1.61
	2 (1層)	5.62	1.20	1.82	1.17	4.77	1.24	6.49	1.40	1.74	1.20	6.37	1.12	2.18	1.36
起振直角方向	11 (2層)	5.41	0.93	3.22	0.85	2.80	0.69	3.82	0.98	2.96	1.12	4.21	0.55	2.09	1.22
	3 (1層)	4.43	0.74	2.49	0.55	2.40	0.47	2.78	0.70	2.00	0.68	2.93	0.36	1.37	0.82
	5 (2層)	6.77	0.82	3.05	0.73	2.96	0.59	3.48	0.99	2.82	1.11	5.12	0.55	2.21	1.13
	6 (1層)	5.65	0.60	2.12	0.60	2.35	0.42	3.13	0.70	1.88	0.78	3.94	0.45	1.42	0.80

(それぞれのケースで左列が共振時、右列が非共振時の倍率を示している。)

表-2 減衰定数 [% 左列共振時、右列非共振時]

測点	Hz	A		B		C		D		E		F		G	
		17	6	22	6	25	12	23	12	24	12	24	9	18	9
起振	10 (2層)	2.6	12.9 2.9	5.9 4.2	13.2 2.0	8.9 3.2	14.0 2.6	2.8	8.2 4.1	7.0 6.3	14.3 3.6	2.6	6.6 4.1	6.9	22.6 4.9
方向	2 (1層)	2.7	8.2 2.7	6.1 3.7	9.4 4.4	7.2 3.3	18.0 3.6	2.4	6.4 3.3	4.9 3.4	14.1 4.0	2.5	7.7 3.9	9.2	25.0 7.5
起振 直角 方向	11 (2層)	3.3	19.3 2.5	8.1 4.7	6.3 4.5	5.0 2.8	7.0 3.2	2.3	10.8 4.4	18.6 7.2	14.9 6.0	3.0	12.8 6.6	4.4	10.8 4.2
	3 (1層)	3.2	5.1 1.9	7.4 4.8	5.2 4.2	6.1 2.9	10.9 5.6	2.6	9.9 3.5	13.4 6.2	13.1 5.8	2.5	10.2 7.1	4.0	9.2 3.8
	5 (2層)	4.2	15.1 2.3	10.9 5.3	8.0 5.1	3.5 3.2	7.1 4.9	2.3	13.3 4.7	12.5 5.5	14.4 5.3	2.8	7.3 5.3	4.3	16.8 7.6
	6 (1層)	3.4	7.8 2.0	8.9 4.6	6.1 6.0	4.6 2.4	10.0 5.3	3.1	10.6 4.1	8.5 4.4	15.0 5.2	2.6	3.9 7.7	4.8	16.7 7.8

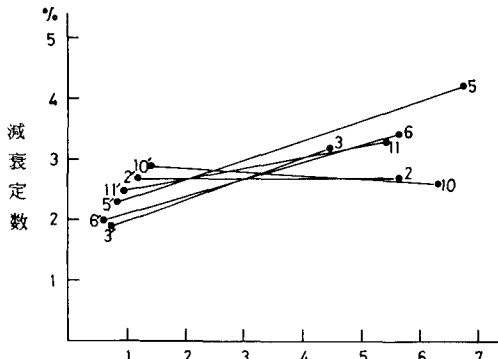


図-5 減衰定数 [ケースA、ダッシュは非共振の場合]

曲げ振動ばかりが支配的な振動系ではなく起振直角方向の成分や鉛直軸回りの回転成分も含まれるような複雑な振動系を示しているからである。このことは構造物の振動を支配する共振時を避けて入力した非共振時の場合にはさらに複雑さが増す傾向にあるとうことである。

さて、減衰定数の値はどうなっているかと言えば、表-2を通覧してみると複雑な自由減衰波形ほど減衰定数の値が大きくなっていることが判る。これも支配的な並進曲げ振動に比べ、回転、捻れあるいは起振直角方向の曲げ振動の場合の方が大きな減衰性を示すものと説明できよう。

表から大局的に減衰性を把握することができたが、もう少し減衰定数を分析してみることにする。

入力波の加速度が 200gal と一定にしているのに対して応答波の振幅は表-1に示してあるように 70gal～1400gal (振幅倍率で0.35倍～7.00倍) 程度にばらついている。それぞれの加速度応答倍率に応じて減衰定数がどのように変化しているかを求めたものがたとえば図-5および図-6である。

図-5はケースAの場合で図-6はケースFの場合であるがいづれも縦軸に減衰定数、横軸に振幅倍率として加速度応答倍率の値を取っている。共振時における減衰定数に対して非共振時後続の単調減衰波の部分の減衰定数を示してあるが後者の場合その測点番号にダッシュを付けて表してある。

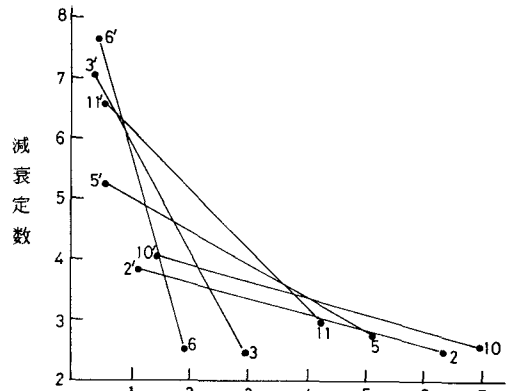


図-6 減衰定数 [ケースF]

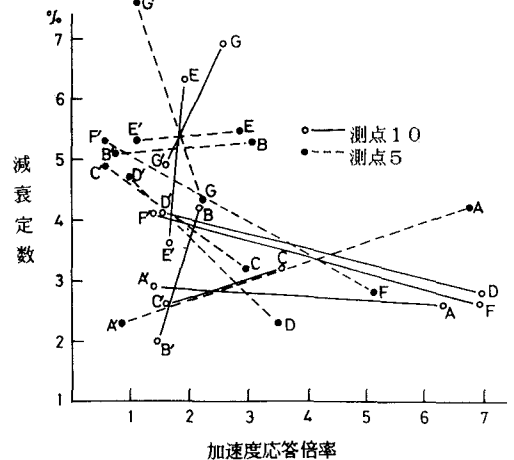


図-7 減衰定数 [測点10と測点5での比較]

しかし、図-6では振幅依存性をまったく覆す結果を示している。いづれの測点においても振幅倍率の小さい場合の減衰定数の方が大きな値を示している。特に起振直角方向の測点に顕著にみられる。

さて、減衰波形の〔2〕のパターンで代表されるケースを特に選んで振幅倍率による減衰定数をプロットしたものが図-8である。全体として減衰定数の値が大きくここにおいても似かよった数値を示す同類項と特異な値を示すものが認められた。

ていると考えられる。振動系に定常な入力波が外力として加われればその外力に逆らって振動することはできず、応答波もやはり定常な波形になっていく。そのときの応答振幅を下げることによってより耐震的な構造物を作製することができる。ただ振動形には卓越しやすいモードがあり、その場合の減衰性があまり高くないのが普通である。

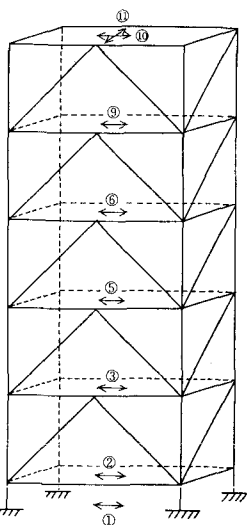


Figure 1 is a line graph showing the relationship between acceleration response rate (x-axis, 0 to 5) and percentage (%) (y-axis, 0 to 20). The graph displays data for two groups: 'E' (Experimental) and 'C' (Control). Each group has five data points labeled E1, E2, E5, E10, E11 and C2, C5, C10, C11, C5. Solid lines connect the points for each group, while dashed lines connect the points for the other group. The 'E' group shows a general downward trend, while the 'C' group shows a general upward trend.

Group	Point	Acceleration Response Rate (x)	Percentage (%) (y)
E	E1	1.2	15.0
E	E2	1.5	13.0
E	E5	1.3	14.0
E	E10	1.8	14.0
E	E11	3.0	18.0
C	C2	4.8	7.0
C	C5	3.2	3.0
C	C10	3.5	10.0
C	C11	2.8	5.0
C	C5	1.0	6.0

— 89 —

ている。ここでは前記の多層骨組構造物模型において支配的な振動となっていた起振方向並進曲げ振動を試作のTLD、TMDを使って制振の状態を調べた。まず、5層模型（図-10）の最上階に図-9に示したような3種類の制振装置を取り付けた。1は食塩水の入った直方体の水槽で長さLが適当に考慮してある。2は簡単な振子で分銅を鉄のワイヤで吊したものである。そして3は比較的短周期用として試作した板バネ振子である。いずれも長さLの変化で周期を調節できるように工夫した。各模型ごとに共振周波数に合わせて応答加速度波を計測していった。いずれのケースでも共振周波数に近づくにしたがって応答振幅が減少し共振点ではきわめて大きな制振効果がみとめられた。

その中でTMD 2の振子の例を図-11および図-12に示した。5層模型でK形筋かいをはずした構造で1Hz付近に共振点を有するものである。図-11にはその波形振幅の違いを示し、図-12は0.5Hz～2.5Hzにおける加速度応答倍率スペクトルである。振子を使用することによって点線で示したように振幅が減少している。

V. あとがき

骨組構造物の減衰性を検討するために、骨組構造物の模型を正弦波入力による定常振動の状態から停止させ自由減衰振動の加速度波を計測する実験を行った。特に多自由度の振動形における減衰特性を調べるため、波形から減衰定数を求め振動振幅に対する大きさを比較した。さらにこの多層骨組構造物に試作の制振装置を取り付けて振動振幅を減少させる制振効果を調べる実験を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 応答加速度は起振方向の並進曲げ振動が支配的であるが、他に起振直角方向振動あるいは鉛直軸回りの回転振動などがみられる。
- (2) 自由減衰振動の波形として次の4種類の波が計測された。[1] 共振時の定常波から単調な一定の比率で振幅が減少していく波、[2] 共振時の定常波から急激な減衰の後一時振幅が増加しまた減少していく波（うなり現象を生じることがある）、[3] 非共振時の定常波から構造物固有の周波数に変わって徐々に減少する波、[4] 非共振時の小振幅定常波から一時的に振幅が増加し構造物の固有の周波数で徐々に減少する波（うなり現象を生じることがある。）
- (3) 波形[1]は振幅減衰比が一定であるが、波形[2]、[3]、[4]では振幅減衰比が変化する。
- (4) 波形[1]が対称構造の場合に多く、起振方向への並進曲げ振動が最も支配的である。それに対し、波形[2]、[3]、[4]は非対称構造の場合に多く、回転振動、捻れ振動あるいは起振直角方向曲げ振動が支配的に生じている。
- (5) 波形[1]の減衰定数は波形[2]、[3]、[4]の減衰定数よりはるかに小さな値を示す。
- (6) 波形[1]では大振幅の減衰定数が小振幅の減衰定数より大きな値になるという振幅依存性を有している。しかし波形[2]、[3]、[4]ではその減衰が振幅に依存するよりも非対称構造に起因するため、非共振時の振幅の小さな振動においても高い減衰性を示している。

このような骨組構造物自身が持っている減衰性についての検討とは別に支配的な並進曲げ振動の振幅を抑えるためにTLD、TMDの効果は十分に確認できた。実験を行ったいずれのケースでも共振周波数に近づくにしたがって応答振幅が減少し共振点ではきわめて大きな制振効果がみとめられた。基礎的なものではあるが、特に非対称性を有する骨組構造物の減衰性を把握する上で貴重なデータを提供してくれた。

参考文献

- 1) 当麻、早川、金子：骨組構造物の振動性状に関する基礎実験、北海学園大学工学部研究報告、1989。
- 2) 金子、当麻、早川：非対称骨組構造物の振動性状に関する基礎実験、土木学会北海道支部研究発表会論文報告集、1989。
- 3) 川島他：模型実験による斜張橋の振動特性の検討、第19回地震工学研究発表会講演概要集、1987。
- 4) K. Kawashima and S. Unjoh : Damping Characteristics of Cable-Stayed Bridges Associated with Energy Dissipation at Movable Supports , Proc. of JSCE , No.404/I-11 , 1989.