

東京都立大学 学生会員 斉藤隆治

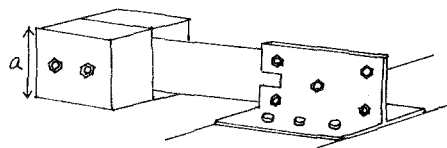
同 正会員 国井隆弘

1. まえがき

地震による構造物の降伏から破壊へのプロセスを考えると、降伏後の復元力特性の非線型性あるいは履歴性が非常に重要な問題となる。そこで、この非線型性を考慮する為に、静的復元力特性のモデル化(Bi-Linear-Type, Jennings-Type等)あるいは等価線形化法等の手法が用いられている。一方、動的復元力特性は、静的復元力特性に比べて、塑性領域に於いて、より高い剛性を持ち、この傾向は共振点付近で顕著になる、ということが明らかにされている。本研究では、単純系の試験体を正弦波を起振する振動台にセットし、種々の振動数の入力のもとで、非線型振動実験を行ない、各々の動的復元力特性を描き、各ループの面積、等価剛性、最大変位の変化等を調べ、動的復元力特性に検討を加えた。

2. 静的載荷曲げ試験

図-1に示すような片持梁型式の試験体のマスの中心に、図-2のような載荷装置を用い、交番繰返し載荷を行ない、荷重-変位図(一例として図-3)を作製し、さらに、その結果を基にして、数個の開いたループを取り出し、各々、最大変位 δ_{max} 、面積 S 、等価剛性 k_e を求め、図-4、図-5に示すような試験体の「最大変位-面積」の関係及び「最大変位-等価剛性」の関係を求めた。



片持梁: 板厚 3.20 mm, 幅 44.90 mm
固定端からマスの中心までの長さ 180 mm

マス: 100 × 100 × 80 (a方向)

図-1 試験体

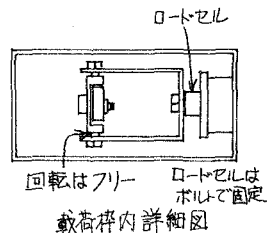
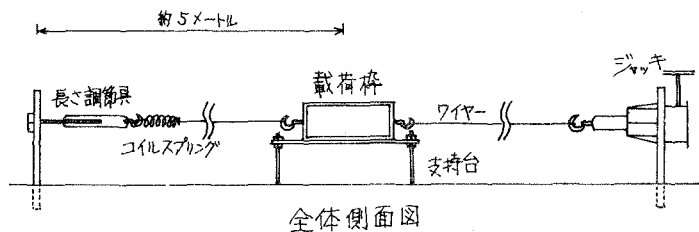


図-2 静的載荷曲げ試験装置概略図

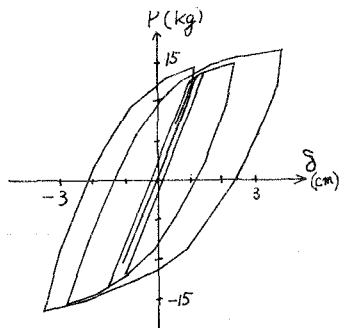
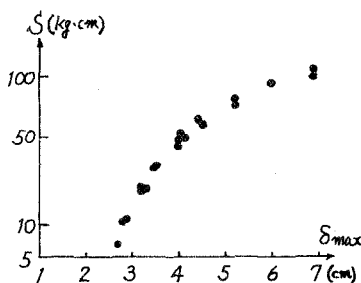
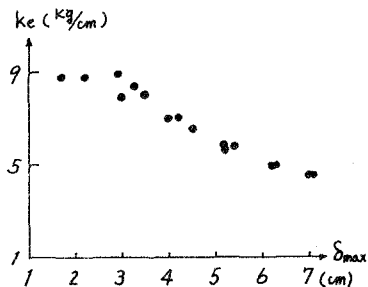


図-3 荷重-変位図

図-4 δ_{max} - S の関係図-5 δ_{max} - k_e の関係

3. 自由振動実験

強制振動実験に用いる各試験体の固有振動数及び減衰定数を自由振動実験より得られる質点の応答加速度波形より求めた。尚、変位測定は、図-6に示す装置で、ブリッジを組んで行なった。

各試験体の固有振動数は、表-2、減衰定数は、図-7に示す。図-7の横座標、全振幅 100 は 145 gal に相当する。

図-7より、全振幅が 100 gal を越える弾性範囲内では、減衰定数は、ほぼ一定であることがわかる。

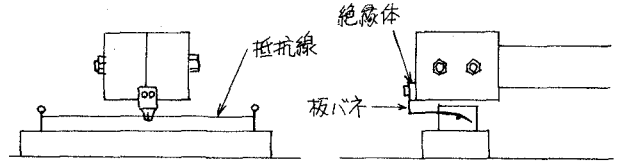


図-6 変位測定装置

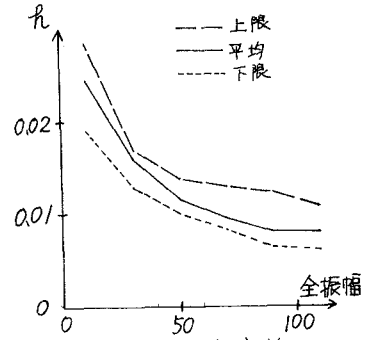


図-7 減衰定数

4. ロッキング振動の影響

本研究に用いた試験体のマスは、相当の大きさを持っている為、この系を完全な1自由度系とみなすのは、不適当であり、マスの重心回りの慣性モーメントを考慮して、ロッキング振動の影響について、考えてみた。

振動系の運動方程式は、次の様に与えられる。

$$\begin{cases} m\ddot{y} + \frac{12EI}{l^3} - \frac{6EI}{l^3}(\lambda + l_1)\theta = 0 \\ J\ddot{\theta} + \frac{6EI}{l^3}(\lambda + l_1)y + \frac{EI}{l^3}(4\lambda^2 + 6\lambda l_1 + 3l_1^2)\theta = 0 \end{cases}$$

m : 質量、 l : 梁の長さ、 l_1 : マスの軸方向長さ、 J : マスの重心回りの慣性モーメント

運動方程式より、1次、2次のモード形を求め、外力(加速度入力)を、 $2000 \sin \omega t$ 、外力の振動数を、3Hz、7Hz、11Hz、15Hz、19Hz、23Hzとして、モーダルアナリシスにより、数値計算し、2次モードの全応答量に対する比を求めた。尚、計算はすべて弾性範囲内で行ない、計算時間は1秒とした。計算結果は、表-1に示す。

表-1 2次モードの全応答量に対する比 (%)

外力の振動数 応答の order		3Hz	7Hz	11Hz	15Hz	19Hz	23Hz
Y_{max} の $\frac{1}{10}$ 以下	Y	0.296	0.042	0.449	1.303	1.294	1.507
	θ	2.918	0.403	4.095	14.42	10.90	12.41
Y_{max} の $\frac{1}{10}$ 以上	Y	0.051	0.003	0.059	0.141	0.147	0.287
	θ	0.491	0.029	0.558	1.327	1.377	2.654

Y : 水平変位の全応答量に対する2次モードの影響

θ : 回転角の全応答量に対する2次モードの影響

表-1より、本研究では、ロッキング振動(2次振動)の影響は無視しても差しつかえないといえる。

5. 強制振動実験及び結果

振動モデルをチャンネル及びアングルを用いて、振動台上にボルトで固定し、質点部と台上に加速度計、片持梁部の埋込端に歪ゲージを設置し、又、質点の変位は、図-6の装置を用いて測定を行なった。入力の振幅は、予め、線型強制振動実験より得られた加速度応答倍率により、試験体の応答加速度が、降伏加速度の1.25倍、1.75倍

となるように決め、又、入力の円振動数は、 ω/ω_0 が 0.7, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.20, 1.50 となるように決定し、非線型振動実験を行った。実験より得られた動的復元力特性の例を、図-8 に示し、非線型振動実験の入力の振動数 f 、各試験体の固有振動数 f_0 、 f/f_0 、加速度応答倍率（線型振動時 R_A 、非線型振動時 R_B ）を表-2 にまとめた。又、動的復元力特

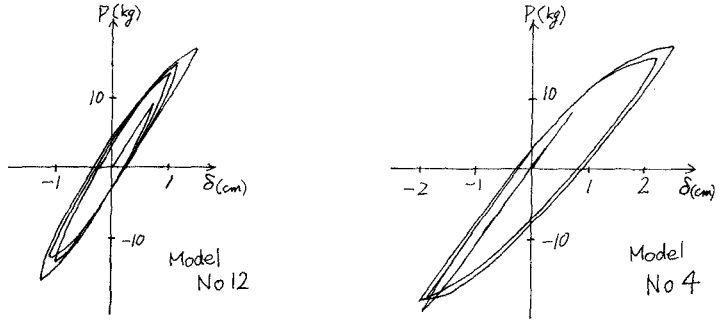


図-8 動的復元力特性の例

表-2

Model	f	f_0	f/f_0	R_B	R_A
No 1	4.43	6.42	0.69	2.90	3.18
2	4.26	6.48	0.66	2.83	
3	5.37	6.45	0.83	4.62	
4	5.32	6.38	0.83	3.55	4.18
5	5.71	6.43	0.89	9.27	
6	5.67	6.36	0.89	7.19	
7	6.11	6.32	0.97	17.3	26.8
8	6.25	6.43	0.97	13.7	
9	6.52	6.42	1.02	9.14	
10	6.47	6.50	1.00	6.78	27.5
11	6.71	6.43	1.04	3.69	
12	6.63	6.43	1.03	2.87	
13	7.64	6.43	1.19	2.16	1.83
14	7.98	6.47	1.23	1.68	
15	9.14	6.43	1.42	1.23	
16	9.62	6.43	1.50	0.93	0.84

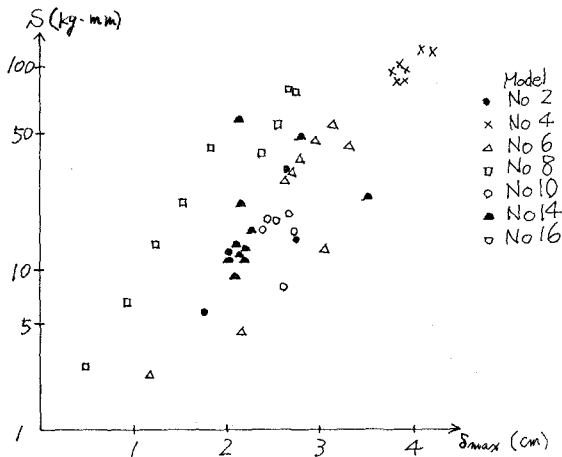


図-9 δ_{max} - S の関係

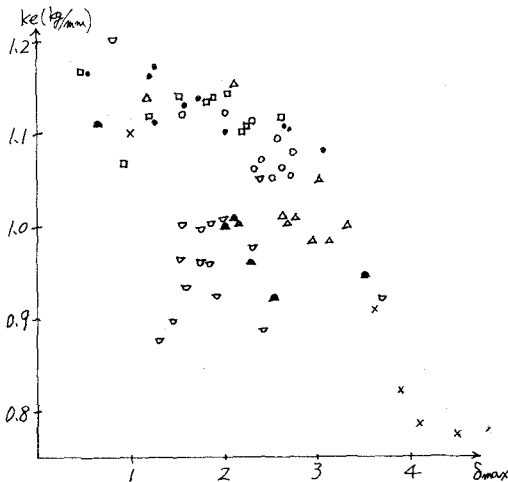


図-10 δ_{max} - ke の関係

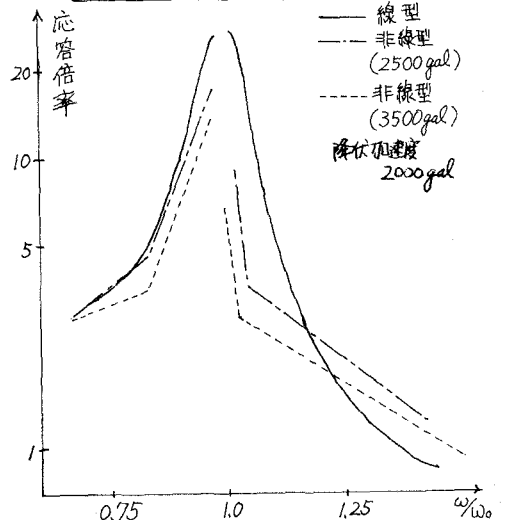


図-11 加速度応答倍率曲線

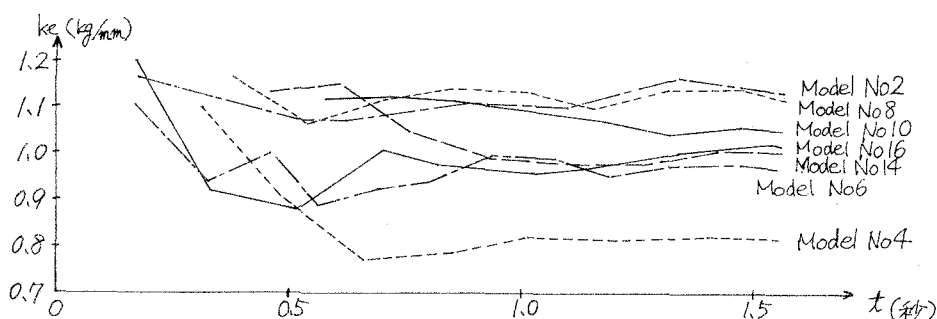


図-12 等価剛性の時間的推移

性の各ループの $\delta_{max} - S$ 、 $\delta_{max} - k_e$ の関係を図-9、図-10に示す。図-11には、線型、非線型時の加速度応答倍率曲線を描いた。図-12には、等価剛性の時間的推移を描いた。

6. 実験結果の考察

図-9 ($\delta_{max} - S$)、図-10 ($\delta_{max} - k_e$) は、ばらつきが非常に大きく、又、各試験体の最大応答もかなり異なっている。したがって、 ω/ω_0 をパラメータとした傾向は、つかみにくい。しかし、静的なもの(図-4、図-5)と比較すると、前者は、 δ_{max} が同じ値の場合、常に S は静的なものを上まわることから、非線型振動時の減衰性の効果を示しているといえる。又、後者は、 δ_{max} が同じ値の場合、常に k_e は静的なものを上まわることから、非線型振動をすることによって、剛性が上昇することを示しているといえる。

図-11(共振曲線)より、試験体が、線型限界を越えて、非線型振動を生じることによって、明らかに応答倍率は低下している。その低下率は、応答が共振点に近づくほど、又、応答が下まわればとも顕著になることがわかる。又、非線型振動による「共振点のずれ」の現象が現われている。これも、応答が大きくなるほど、著しいようである。

図-12より、 ω/ω_0 が 1.0 より大きい試験体 No.14, No.16 の降伏後の剛性の回復は、他の試験体よりも大きいようである。しかし、各試験体の最大応答を示す時間と最大応答値が、各々違っている為、一般性のある議論は、しにくい。

本研究は、今後、 k_e を推定し、バネ定数 k の変化を求め、それを応答計算に用いて実験値の再現性と調べ、さらに、1サイクル毎のループに対する等価線型化手法による実験値の再現性のチェック、動的復元力特性を Bilinear-Type, Jennings-Type 等に置換し、シミュレーションを行ない、それらを静的なものと比較等の方向に進めるつもりである。

<参考文献>

1) 国井・福井：単純系の非線型応答特性に関する模型実験，1994.5，第1回関東支部年次研究発表会

2) 国井・荻本：単純系の模型実験による履歴減衰の評価，1994.10，第29回年次学術講演会講演概要集

最後に、本研究に用いた模型の製作の労をとって下さった本学の福井留男助手、ならびに、実験及び解析に協力していただいた菊池敏男氏(大林組技研)、服部秀人氏(長野高専助手)、杉崎要君(本学学生)に深く感謝の意を表します。