

単純鋼構造系の動的復元力特性に関する実験的研究*

服 部 秀 人**

1. ま え が き

耐震工学上、構造物の非線形応答に関して、解明すべき問題が多々ある。それらの中で、最も基本的な問題の一つと考えられるものとして、構造物の動的復元力特性の評価が挙げられる。これに関する基礎的研究として、伯野らによるはりの動的実験⁽¹⁾、渡辺による軟鋼の実験⁽²⁾、国井らによる単純系の実験⁽³⁾⁽⁴⁾、Hanson によるヒステリシスに関する実験的研究⁽⁵⁾等が挙げられる。しかしながら地震に代表されるような地動入力に対する、構造物の破壊に至る応答の過程はいまだ十分に解明されているとは言えない。非線形応答を程する構造物の動的復元力特性は一般に、力-変位の履歴ループをもとに評価されるが、実地震時における構造物の変位応答の入手が困難なこと、減衰力の評価が難しいこと等が原因して適確には把握しにくい⁽⁶⁾。本研究では、1自由度系とみなせる門型ラーメン型の単純鋼構造模型を対象として、静的交番載荷実験と振動台を用いた正弦波地動入力による非線形振動実験を行い力-変位の履歴ループから、静的な復元力特性と動的なそれとを比較し、模型の鋼材からなる柱の弾塑性挙動にもとづく非線形応答特性を検討した。

2. 実験および結果

2.1 模型

図1に模型の諸寸法を示す。はりの部分は柱をはさんで固定するために3つの塊からなり、応答変位を容易に測定できるようにするため、せん断変形タイプのラーメンとなるよう剛にした。材質は铸铁である。

柱はSS41鋼材を用いた。幅40mm厚2.3mmとかなりスレンダーであるため、製作時の残留応力が気になる。そのため柱材に限り、模型組立て前にアニーリング(870°C, 1hr, f.c)を施した。

2.2 静的載荷実験

模型を平面ラーメン構造とみなし、はりの部材軸の位置に、その軸方向に水平力 P を導入する。 P に対応したはりの変位 x と柱上下端の曲げひずみを測定する。交番載荷の荷重振幅を1kgずつ増していき、柱の固定端が全断面降伏して変位が一気に増大するまで載荷をくり返す。柱を取り換えて新しい模型を組み立て、新た

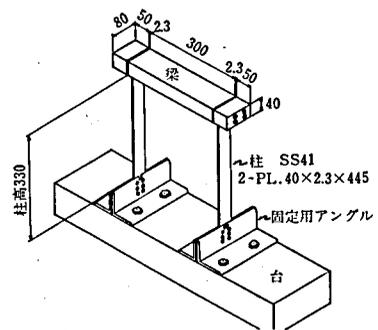


図1 模型一般図

* 昭和51年10月 土木学会第31回年次学術講演会において発表

** 土木工学科 助手

原稿受付 昭和52年9月30日

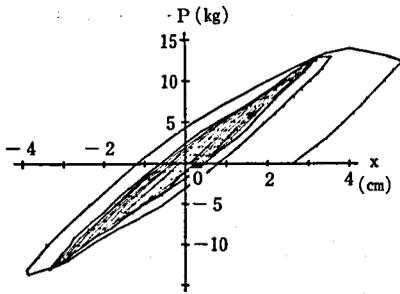


図2 静的履歴ループ(模型No.5)

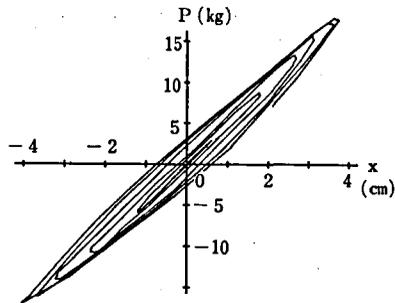


図3 動的履歴ループ(模型No.22)

なデータを取る。以上の手順により模型2体について静的実験を行った。結果から得られた力-変位の履歴ループの一例を図2に示す。2体の実験結果から柱の固定端は水平変位 x が約 2.5cm で降伏し、約 3.5cm で全断面降伏したと推定される。

2・3 非線形振動実験

静的実験と同様、はりと柱下端の固定アングルは同一のものをを用い、順次等寸法の柱を取り換え、模形7体について非線形振動実験を行った。

各模型ごとに、非線形振動実験に先だち微小な初期変位により自由振動実験を行い、その模型の固有振動数 ω_0 および減衰定数 h を測定した(表1)。非線形振動実験では、模型を振動台上に固定し、正弦波地動入力を与えた。動的な弾塑性挙動をみたいがため、共振に近い応答を生じさせるべく所定の振動数の正弦波地動を与えようとしたが、振動台の制御がむずかしく、若干の誤差が生じた。所定の入力波の振動数と実際のそれとを、模型の固有振動数 ω_0 との比として表1に示す。

表1 模型の固有振動数、減衰定数及び入力振動数

模 型 No.	22	23	24	25	26	27	28
固有振動数 ω_0 (r/s)	20.7	20.5	20.6	20.7	20.6	20.4	20.6
減衰定数 h	0.0030	0.0039	0.0038	0.0030	0.0047	0.0044	0.0032
入力振動数(ω) (比; ω/ω_0)	所定の ω/ω_0	0.95	1.05	1.1	1.0	1.0	0.95
	実際の ω/ω_0	0.973	1.049	1.080	0.976	1.009	0.978

入力波の変位振幅は次のようにして定め、入力の目安とした。模型の固有振動数 ω_0 と減衰定数 h および所定の入力振動数 ω とから、1自由度系の線形応答の定常解を計算する。その解の応答変位振幅が、 $x = 3.5\text{cm}$ (柱の全断面降伏相当変位) に等しくなるように入力の変位振幅を逆算する。

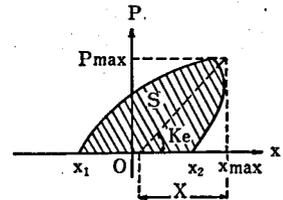
はりの部材軸位置における応答の絶対変位および絶対加速度、振動台の(入力)変位および加速度、そして参考として柱固定端の曲げひずみをそれぞれ測定した。応答の絶対変位から入力変位を時間軸上で差引くことにより、静的実験におけるはりの変位 x と対応した、はりの応答の相対変位が得られる。模型の1自由度系としての質点の質量は、はり部分が柱

に比べかなり重いことから、便宜的にはりとそこへ取り付けてある加速度計と柱の上半分のそれぞれの重量の総和から、 $m=0.0106\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{cm}$ と算出された。非線形振動実験において、静的実験における載荷力 P と対応する力は、はりを主体とする質点の慣性力であり、その質点の質量と絶対加速度との積により計算される。厳密には減衰力をその値から差引く必要があるが、線形振動時における減衰定数が表 1 に示すごとく微小であるためこれを無視した。

以上により求めた慣性力 P と相対変位 x とから、静的実験結果と同様な力-変位の履歴ループを描いた。その一例を図 3 に示す。

2.4 実験結果の整理

図 3 の履歴ループから、応答波形の半周期（履歴の半ループに対応）ごとに等価剛性 K_e と半ループの面積 S を求める。 K_e と S の定義を図 4 に示す。ループの面積は、非線形振動時の損失エネルギーであり、等価線形化法の等価減衰定数と密接な関連をもつ重要な物理量である。図 2 の静的な履歴ループからも同様に等価剛性 K_e と半ループの面積 S とを算出した。それぞれ、 K_e と S について、半ループの変位振幅 X （図 4 参照）との関係を図 5、7 に示す。応答の半周期における変位振幅が途々に増大して、最初のピークに達するまでの領域について、 K_e - X 関係、 S - X 関係それぞれ最小自乗近似し、静的なデータの最小自乗近似式と比較したのが図 6、8 である。



S ; 半ループの面積 (斜線部)
 $X = |x_{\text{max}} - \frac{x_1 + x_2}{2}|$
 $K_e = \frac{P_{\text{max}}}{X}$

図 4 任意の半ループ

実際の入力加速度を用いて各模型ごとに線形応答計算を行った結果、応答のはじめの部分では、 $X=1.5\text{cm}$ 位まで実験

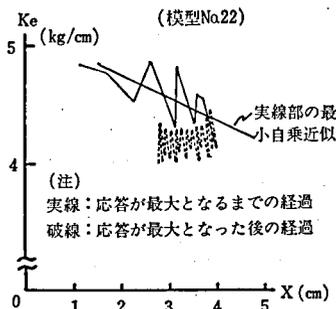


図 5 動的 K_e - X の一例

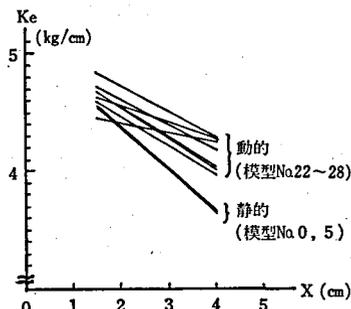


図 6 K_e - X の比較

の応答値と良く一致した。したがって、 $X=1.5\text{cm}$ 以下の変位振幅における履歴ループは実質的に減衰エネルギーとして作用しないと判断し、図 6、8 においては $X \geq 1.5\text{cm}$ の範囲で静的と動的を比較した。

非線形振動を確認するため、各模型の実験値について加速度応答倍率を計算し、図 9 に示した。

2.5 実験結果のまとめ

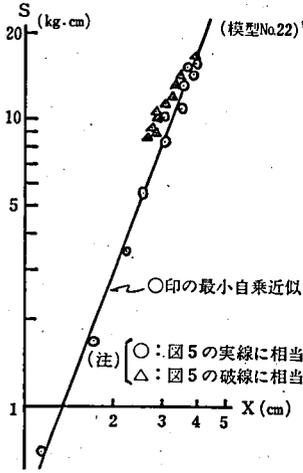


図7 動的 S-X の一例

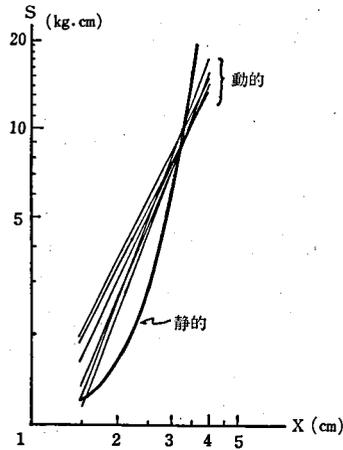


図8 S-Xの比較

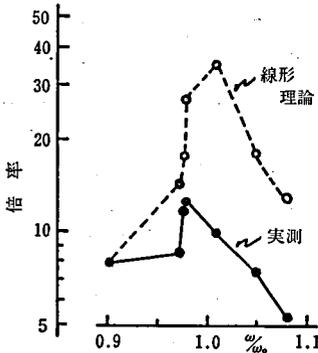


図9 加速度応答倍率

1) 非線形振動の特徴として予想されるところの応答倍率の低下および共振点のずれが確認された(図9). 2) 静的, 動的双方非線形領域において, 応答の振幅が増大するにつれ等価剛性が低下する. そして, その低下の度合は静的の方が顕著である. また動的の方が等価剛性が大きい(図6). 3) 応答の振幅が増大すると履歴ループの面積も増大する. そしてある振幅以下では動的の面積が静的を, それ以上では静的が動的をそれぞれ上回る. ある振幅とは, 柱材の全断面降伏相当変位 ($x \approx 3.5\text{cm}$) と対応する値かと思われる(図8). 4) 応答の振幅が最大値に達するまでの等価剛性の低下の度合と, それ以後振幅が減少していくときの等価剛性の増加の度合とは等しくなく, 剛性の変化には処女的特性と非処女的特性が存在するように思われる. 同様な特性が履歴ループの面積についてもいえる(図5, 7).

3. あとがき

非線形振動を程する単純鋼構造について, 静的な載荷実験結果と関連させ, その復元力特性をかなり知ることができた.

結果の検討にあたっては, できるだけ平易に非線形振動の応等計算ができるよう, 等価線形化法の見地から諸パラメーターを整理した.

構造物の静的な復元力特性と動的なそれとでは若干の差異を有するとの結果を得た訳であるが, 現在までに各方面で蓄積された静的載荷実験のデータが豊富なことを考えると, 静的な復元力特性を有効に振動の応答計算に利用したいものである. このことについては次報で考察を加えたい.

謝辞

本実験の模型製作にあたり御指導, 御協力をいただいた本学機械工学科関川三男教授なら

びに同芳賀 武助手に感謝の意を表します。

なお、本研究は筆者が昭和50年度の文部省内地研究員として、東京都立大学工学部へ留学し国井隆弘助教授の御指導のもとに行ったものである。ここに国井隆弘助教授はじめ研究室の方々に感謝の意を表します。また、この機会を与えていただき、さらに種々御便宜を図っていただいた森本弥三八校長はじめ本学教職員の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 伯野他「はりの動的破壊時の復元力特性に関する基礎的実験」1962年2月土木学会論文報告集162号
- (2) 渡辺「軟鋼の動的弾塑性復元力特性」1970年10月 土木学会論文報告集182号
- (3) 国井他「単純系の模型実験による履歴減衰の評価」昭和49年10月土木学会年次学術講演会
- (4) 国井他「単純系の動的復元力特性に関する実験的研究」昭和51年1月第3回土木学会関東支部年次研究発表会
- (5) Hanson "Comparison of Static and Dynamic Hysteresis Curves." Proc. ASCE, EMS, Oct. 1966
- (6) 家村他「強震記録を利用したRC建築物の劣化履歴復元力解析」1974年10月土木学会論文報告集230号