

単純鋼ラーメン模型の非線形動的挙動に関する実験的研究

東京大学生産技術研究所 正員 久保慶三郎
同 上 正員 片山恒雄
国 鉄 正員 久岡 勉

1. ま え が き

構造物や構造部材の非線形動的応答に関する研究の多くは、準静的な繰返し載荷によるものや力学的モデルを仮定した動的数値解析である。筆者らは単純な1層1スパンの小型鋼製ラーメン模型について、主として非線形挙動に注目した振動台試験を実施したので、その概略を紹介する。

本文中で使用される記号は次のとおりである。

a_0 : 正弦波入力加速度振幅, またはランダム波入力最大加速度

a_s : 正弦波入力による模型頂部の応答加速度振幅, またはランダム波入力による最大応答加速度

$\beta = a_s/a_0$, m : 模型頂部の質量, k : 模型の弾性時ばね定数

F_y : 模型の応答降伏力, $\bar{\omega}$: 模型の弾性時の固有円振動数

$\omega_r = 2\pi f_r$: 模型の非線形定常振動時の共振円振動数, $\lambda = \omega_r/\bar{\omega}$: 振動数比

A : 模型の非線形共振時の変位振幅, $\mu = Ak/F_y$: 塑性率

h_e : 非線形共振時の等価粘性減衰定数, k_e : 非線形共振時の等価ばね定数, $d = a_0 m/F_y$

2. 模型および実験方法

実験に用いた模型は支間長1m, 支柱高30cmの鋼製ラーメンであり, 桁の断面は19mm×130mmとし, 鉛のおもりを付加して桁の重量を変化させた。支柱は厚さ5.5mm, 幅120mmの鋼板の内側を切り取った2柱式とし, 柱部分の幅を変化させた。桁の重量および支柱の剛性を変化させた5種類の模型の諸元および微小振幅の自由振動から求めた固有振動数を表-1に示す。

今回の実験では橋軸方向の挙動に注目し, 初期剛性・応答降伏力・降伏後の性状を求めるための静的載荷実験および振動台による正弦波入力とランダム波入力の動的実験を実施した。正弦波入力の実験では振動台加速度を一定にして共振振動数付近で振動数を変化させて定常応答値を測定し, さらに振動台加速度を変化させて上記の実験を繰返した。ランダム波入力の実験では, El Centro, Taft および釧路の3地震波形を1倍, 2倍,

表-1 実験した模型ラーメンの諸元

模型名	主 桁		支 柱	固有振動数 (Hz)
	I (cm ⁴)	W (kg)		
A1	7.43	33	0.0278	7.36
A2	7.43	66	0.0278	5.55
A3	7.43	110	0.0278	4.25
B	7.43	110	0.0278	5.89
C	7.43	110	0.0278	7.10

4倍のテープ速度で再生させた9種類の波形を最大加速度を変化させて振動台入力とした。実験に用いた振動台は, 最大積載重量5t, 振動台の大きさ2m×1.5m, 加振条件は最大振幅75mm, 無負荷時の最大速度および最大加速度はそれぞれ70

cm/s および 1500 gal であり、加速度制御方式を採用しているため加速度波形の再現性が極めて良いのが特徴である。

3. 実験の結果および考察

(1) 正弦波入力実験 振動台加速度を変化させて共振点付近で加振する実験から得られた模型頂部の絶対応答加速度の共振曲線の一例を図-1に示す。図-2は図-1に示された結果を加速度応答倍率の共振曲線として表わしたものである。模型Bについては、実験から得られた最大応答加速度は1250 gal 程度であるが、他の模型では共振時の最大応答加速度が1800 gal 程度まで達した例もある。図-1から、入力正弦波振幅の増大に伴って、共振振動数が低下するとともに、減衰量が増加して共振曲線の形 $a_s(\text{GAL})$

状が平坦になり、こま
くよく見られる。

また、弾性振動時には約13と大きな値を示す加速度応答倍率が、振動台加速度が増加し共振振動数が低下するにつれて大幅に減少することが

わかる。

図-1 模型Bの応答加速度共振曲線

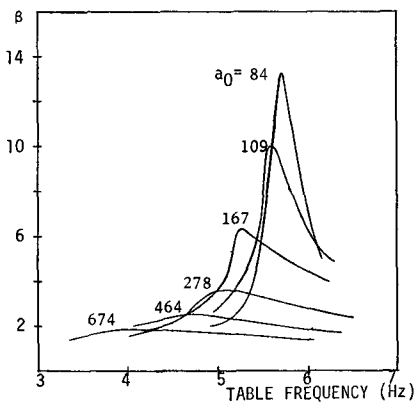
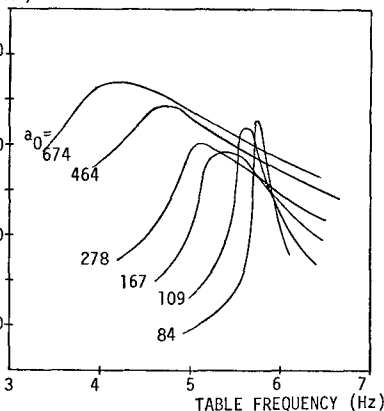


図-2 模型Bの加速度応答倍率共振曲線

非線形振動の程度を表わすパラメータとして塑性率が用いられることがある。図-3は、模型Bの共振時のいくつかの振動特性と塑性率との関係を示したものである。等価粘性減衰定数 h_e は

$$h_e = \frac{a_0}{2A\omega_r^2}$$

によって求めたものであるが、別に $h_e = 1/2\beta$ によって得られる値とも良い一致を示した。

ところで、塑性率そのものが振動実験の結果から求められる応答量の1つであり、実際的には振動系の性質と入力波の強さから、塑性率をも含めた各種応答量が得られることが望まれる。このような意味から、本報文では、模型と入力波の性質のみから次式で定められる無次元のパラメータ α を用いて実験結果を整理した。

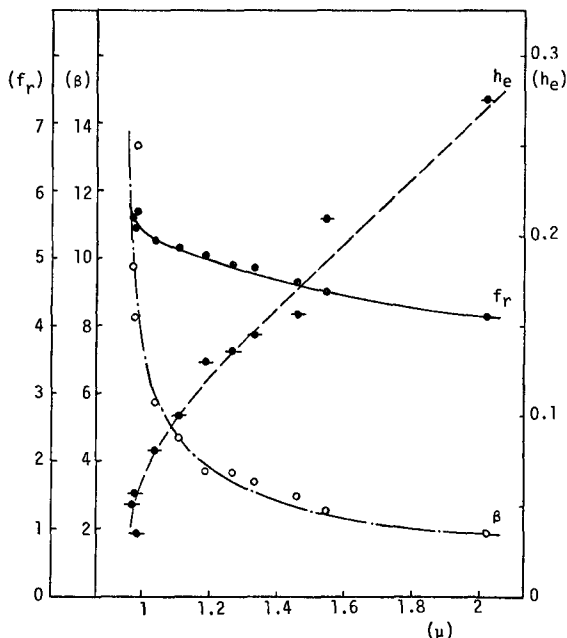


図-3 模型Bの共振時振動特性と塑性率の関係

$$\alpha = \frac{m a_0}{F_y}$$

1 質点系の定常共振状態に関連した無次元パラメータとしては、加速度応答倍率 β 、振動数比 λ 、等価粘性減衰定数 h_e および塑性率 μ があるが、非線形振動におけるこれらの量の基本的性質を理解するにはパラメータ α が極めて便利である。

まず、完全に塑性域に入った定常振動では $m a_0 = F_y$ であるから、 α と β の定義から明らかのように $\alpha \beta = 1$ なる関係があり、したがって減衰定数は $h_e = \alpha/2$ で表わされる。正弦波入力による実験結果はほぼ完全にこの関係を裏付けている。これらの関係が成立していれば、簡単な計算によって、弾塑性系の非線形共振時の等価粘性定数が $h_e = F_y/A$ となっていることがわかる。このとき、非線形共振時の振動数は $\omega_r = \sqrt{k_e/m}$ となり、振動数比 λ と塑性率 μ の間に $\lambda^2 \mu = 1$ なる関係があることになる。

すなわち、非線形共振時の性質を表わす 4 つの量のうち、 β と h_e は α によって定まり、 λ または μ のいずれかと α の関係が明らかになれば、 α をあたえることによりすべての応答量が求められることになる。図-4 は、実験結果から得られた振動数比 λ とパラメータ α の関係を示したものである。非線形時における共振振動数の低下のようすは模型によって少しずつ異なっているが、概格的にはほぼ直線的に減少している。図-5 は $\lambda^2 \mu$ の値をパラメータ α に対してプロットしたものである。パラメータ α が増加すると $\lambda^2 \mu$ の値もわずかに増加する傾向も見られるが、実用的にはほぼ一定と見なしてよいであろう。しかし、一定の値は前述のように 1 とはならず、0.85 程度である。以上

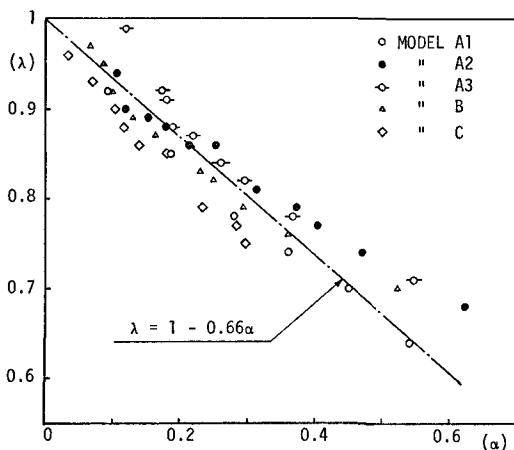


図-4 振動数比 λ とパラメータ α の関係

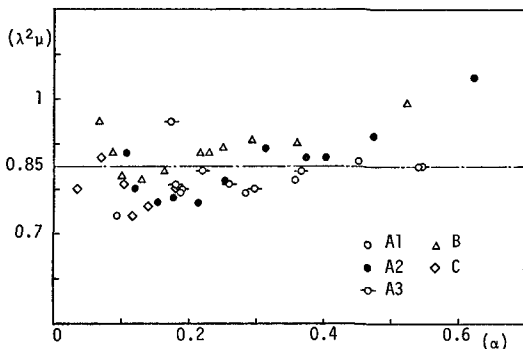


図-5 $\lambda^2 \mu$ と α の関係

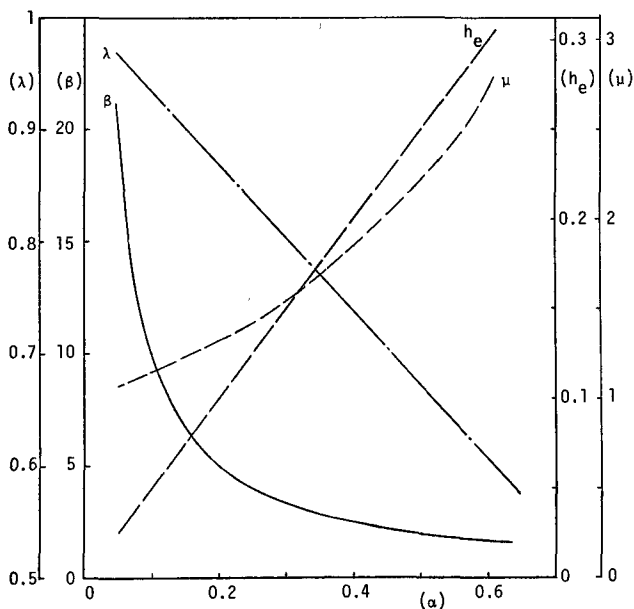


図-6 正弦波加振による各種応答量とパラメータ α の関係

の検討と実験結果とから、今回の実験に用いたような単純な鋼製ラーメンの正弦波入力による非線形系振時の特性値とパラメータとの関係を模式的に示したものが図-6である。図-6は、弾塑性性に近い復元力特性をもつ質点系の定常共振状態における応答に関して、定量的な意味も含めてかなり一般性を有するものと考えられる。

(2) ランダム波入力実験 図-7は9個のランダム波入力に対する模型の加速度応答倍率とパラメータとの関係を示したものである。ランダム波入力の場合には、 α 、および α_s として、それぞれランダムな振動台加速度の最大値および模型頂部の最大応答加速度値を用いている。図-7のような表わし方によつて、各種の地震波形が弾塑性振動に及ぼす影響の度合を明瞭に区別することができる。

また、最大加速度の大きさだけを変化させた同一のランダム波形を加振したときの、模型頂部応答加速度のパワースペクトルと入力加速度波形のパワースペクトルの比の平方根を模した結果によれば、入力加速度値が大きくなり塑性域に入つて振動している場合には、弾性振動時にくらべてピークの高さは著しく低下するが、ピークをあたえる振動数の低下は正弦波加振の場合のように大きくない。このことは、たとえ塑性域に入るような大きなランダム入力を受ける場合でも、正弦波入力の場合とは異なり、弾性時の剛性に近い等価剛性で振動している時間が大部分であることを示している。

正弦波加振とランダム波加振の場合とで、振動系に作用する有効入力の相異を見ようとするのが図-8(a)、(b)である。正弦波入力の場合には一般にパラメータ α が0.15

程度以上では応答加速度がほぼ一定となり、振動系が完全に弾塑性振動をしていることがわかるが、ランダム波入力の場合には、大体 $\alpha = 0.5$ 位まで応答加速度が増加しつつある。すなわち、同一の構造物を動的外力で降伏させるためには、ランダム波の場合、正弦波の約3倍の最大加速度が必要であることを示している。

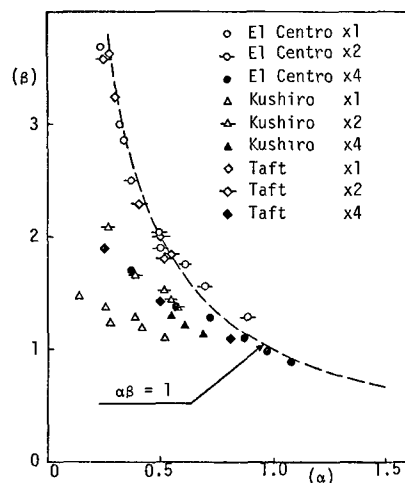


図-7 ランダム波加振における加速度応答倍率と α の関係

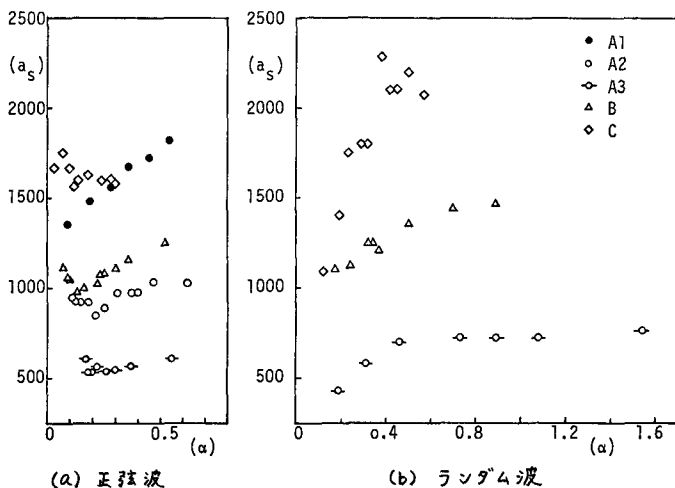


図-8 応答加速度とパラメータ α の関係