

復元力特性に及ぼす減衰力の影響について*

服 部 秀 人**

1. ま え が き

近年我国においても強震計観測網が整備され、各地の地盤および構造物に強震計が設置されている。そして1965年8月に始まった松代群発地震とか、また最近では1974年の伊豆半島沖地震、今年1月の伊豆大島近海地震、2月と6月の宮城県沖地震など日本列島で頻発した大地震の強震記録が各所で採取された。これらの記録波形はプレートテクトニクスで知られる地震の発生原因の研究や、せん断モデルに代表される発震機構の研究、地震波の伝播、地盤の振動そして構造物の地震応答等さまざまな研究に活用されている。

地盤・構造物等の地震応答計算ではそれらの持つ剛性・粘性等のいわゆる復元力特性の適切な評価が大切であり、そのため強震記録が室内模型実験とともに有効に利用されている⁽¹⁾⁽²⁾。強震記録から地震時における復元力特性を推定する場合、粘性等による減衰力を無視すると扱いが簡単になることが多く便利である。しかし当然厳密性を欠く訳であるから、減衰の大小と復元力特性との関係を知っておく必要がある。そこで bi-linear 復元力特性を有する1自由度系をモデルにして、正弦波入力による応答について減衰力の影響を調べることにする。

2. 計 算 方 法

2-1 bi-linear 復元力特性

bi-linear 復元力特性は非線形振動における代表的な復元力特性モデルである。1自由度系の場合の運動方程式は次式で与えられる。

$$(\ddot{x} + \ddot{z}) + 2h\dot{x} + f(x) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし x , \dot{x} , \ddot{x} はそれぞれ応答の変位、速度、加速度であり、 \ddot{z} は地動入力加速度、 h は減衰定数、 p は線形振動時の固有振動数である。 $f(x)$ は復元力であり、 n を弾塑性傾斜率、 x_y を降伏変位、そして応答速度の符号が変わる時点の変位を x_0 として次式により与えられる。

$$f(x) = (1-n)p^2x \pm np^2(x_y \mp x_0) \quad \dots\dots\dots(2)$$

上式を具体的に表わせば、図1において、

(i) $\dot{x} > 0$ で $A_1 \rightarrow A$, $D \rightarrow E$, $C_1 \rightarrow C_1'$ の場合

$$f(x) = p^2x - np^2(x_y + x_0) \quad \dots\dots\dots(2a)$$

(ii) $\dot{x} < 0$ で $A \rightarrow B$, $E \rightarrow E_1$ の場合

* 昭和53年2月土木学会中部支部研究発表会において発表

** 土木工学科 助手

原稿受付 昭和53年9月30日

$$f(x) = (1-n)p^2x + np^2x_y \quad \dots\dots\dots (2b)$$

(v) $\dot{x} < 0$ で $A \rightarrow A_1$, $B \rightarrow C$, $E_1 \rightarrow E_1'$ の場合

$$f(x) = p^2x + np^2(x_y - x_0) \quad \dots\dots\dots (2c)$$

(vi) $\dot{x} < 0$ で $C \rightarrow D$, $C \rightarrow C_1$ の場合

$$f(x) = (1-n)p^2x - np^2x_y \quad \dots\dots\dots (2d)$$

となる。

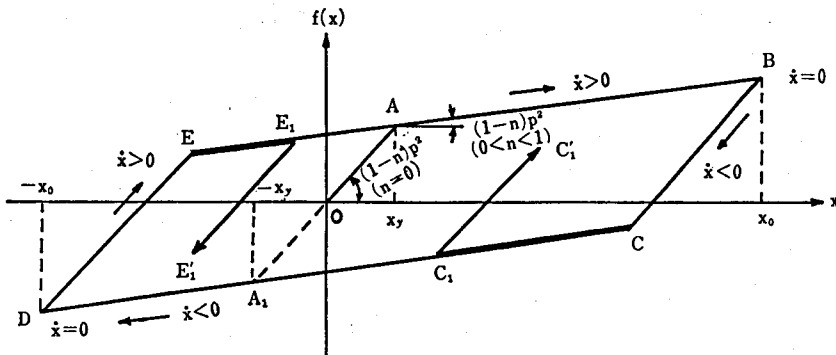


図1 bi-linear 復元力特性

これが bi-linear 復元力特性モデルであり、図1から見てとれるように、2つの線形バネにより非線形性を表現するものである⁽³⁾。

2.2 パラメータ

本数値実験は次の3種類のパラメータについて行った。

- (1) 減衰定数 h ; $h=0.05, 0.1, 0.5$ の3種。
- (2) 弾塑性傾斜率 n ; $n=0.2, 0.8$ の2種。
- (3) 降伏変位 x_y を表わす指標 μ ; $\mu=0.4, 0.8$ の2種。ただし μ は系が初期剛性のみで応答するとしたときの最大応答変位 x_{max} に対する x_y の比で定義する。従って μ が1に近いほど線形応答に近い bi-linear となる。

以上の h, n, μ を組合わせ、合計12種類の応答計算を行った。ただし系の固有振動数 $p=2\pi \text{ rad/s}$, 地動入力変位 $z=\sin 2\pi t$ として、系が共振する入力を与え復元力履歴ループをはっきり描かせるようにした。

2.3 復元力履歴ループ

系の運動方程式(1)より復元力 $f(x)$ は(3)式のように表示できる。また減衰力を無視することにより近似的に(4)式によっても表示できる。

$$P = f(x) = -(\ddot{x} + \ddot{z}) - 2h\dot{p}\dot{x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P = f(x) \approx -(\ddot{x} + \ddot{z}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

強震記録は一般に応答の絶対加速度 $(\ddot{x} + \ddot{z})$ である。この応答加速度と同時に入力加速度 \ddot{z} が記録されておれば、応答の相対変位 x は

$$x = \iint \{(\ddot{x} + \ddot{z}) - \ddot{z}\} dt \cdot dt \quad \dots\dots\dots(5)$$

により求められ、従って(3)式、(4)式等で復元力履歴ループを描かせることができる。(3)式右辺第2項は減衰力を示すのであるが、減衰 h は非線形領域にあっても変化しないことになる。実際は不明確であって、bi-linear モデルにおいては便宜的にそう假定したに過ぎない。強震記録から復元力特性を推定する際この減衰力がやはり扱いにくい存在であって、(4)式により近似的に復元力を求めようとする場合を考える。等価線形化法の観点から復元力特性を推定しようとする場合にはむしろ(4)式により復元力履歴ループを描き、系の粘性による減衰効果と非線形な弾塑性応答によるそれとを一緒にまとめて扱える便利さがあるかも知れない。しかし応答計算で最も重要な因子である系の剛性を応答の履歴ループから判定する場合には、bi-linear モデルであろうと等価線形化モデルであろうと、(3)式と(4)式とから得られる剛性の値にある程度の差異が生ずるのであろう。図2に(3)式と(4)式とから得られる復元力履歴ループを示す。減衰力を無視すると見掛けの復元力が増して履歴ループがふくらむことが分る。図2程度のループのふくらみでは(3)式が示す実線と(4)式の示す破線の傾きは双方同程度であり、判定され

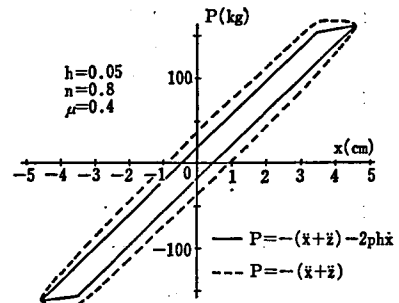


図2 履歴ループ

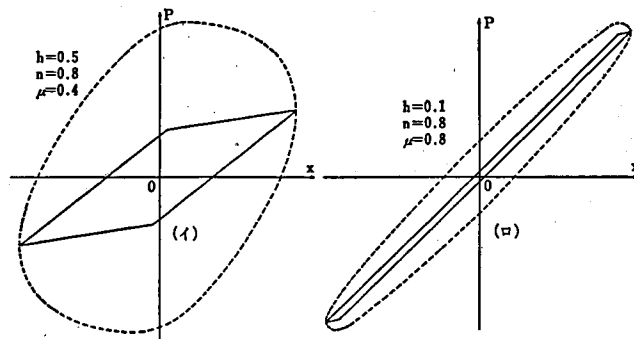


図 3

る剛性の値にもさほどの差異は表われないと思われる。しかしパラメータを変えて図2と同様にプロットした図3を見ると、減衰力の有無による相違がはっきりする。

3. 計算結果

3.1 履歴ループの面積について

図2、図3等に示す実線が囲む履歴ループの面積を S_b 、破線のそれを S_h とし、両者の面

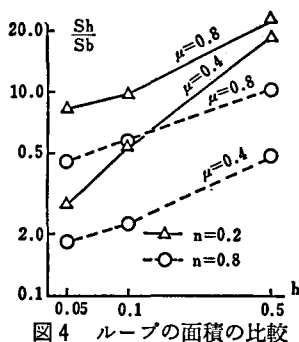


図4 ループの面積の比較

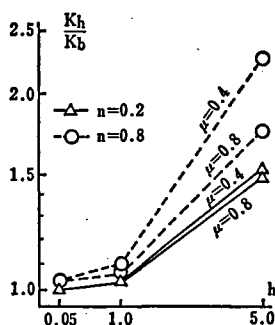


図5 剛性の比較

積比を各パラメータごとにプロットしたのが図4である。

S_b は弾塑性振動によるエネルギー損失を、 S_h は弾塑性振動と粘性とを加え合わせた損失エネルギーを示すが、ともに非線形振動でありこれらと等価な線形系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。面積比 S_h/S_b と系の減衰定数とは両対数紙上でほぼ直線関係にあり、減衰定数が大きくなると面積比も増す。 μ が大きく n が小さいほど面積比が大きい。すなわち、応答の非線形性が小さい場合ほど履歴ループのふくらみの度合いが大きいといえる。

3.2 剛性について

図2、3等の履歴ループにおいて復元力 P の最大値 P_{max} と変位 x の最大値 x_{max} とから P_{max}/x_{max} なる一種の等価剛性を求める。破線のループについて求めた値を K_h 、実線のそれを K_b とし両者の比 K_h/K_b と減衰定数 h との関係を図3に示す。

$h=0.1$ 程度では剛性の差異は数パーセントであるが、 $h=0.5$ では50パーセントから100パーセントも異なることが分る。 μ が小さく n が大きいほど剛性の差異が大きくなる。

4. あとがき

巻末の資料⁽⁴⁾⁽⁵⁾によれば、減衰定数の値が0.1より大きいような構造物は橋梁の下部構造とか擁壁等で、他の多くの構造物では0.05前後の値である。たとえばけた橋・トラス橋等の減衰定数は0.02程度であり、アーチダムでは0.03程度、地盤の場合は一概には言えないが大体0.05程度である。従って強震記録から構造物の復元力特性を推定する場合には下部構造等以外減衰力の評価に余り神経を使わなくともよからう。ただ減衰力を考慮するか否かにより履歴ループの面積が大きく異なることを知っておく必要がある。このことは等価線形化法を用いる場合に重要なことである。bi-linear モデルの初期剛性にはほとんど減衰力の影響が表われない。よって減衰定数が0.1以下の一般の構造物について強震記録から復元力特性を推定する場合減衰力を無視してもその影響は大きくないと考えられる。末筆ながら終始御指導いただいた東京都立大学国井隆弘助教授に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 荻本他「強震観測から推定される井筒基礎橋脚の非線形振動」土木学会第31回年次学術講演会，昭和51年10月。
- (2) 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」土木学会論文報告集 第230号，1974年10月。
- (3) 小高「耐震構造の総合研究」宇野書店，1964年。
- (4) 土木学会「地震応答解析と実例」技報堂，1973年。
- (5) 岡本「耐震工学」オーム社，1971年。