

建設省土木研究所

正員 栗林栄一

同

正員 岩崎敏男

1. まえがき

構造物の地震応答解析において線型力学系と仮定する場合と非線型力学系と仮定する場合とがある。前者に関しては二・三の応答スペクトル曲線がすでに与えられ、モーダルアナリシスを行うのみでも容易に最大応答を算定しうる。一方後者に関連して地震観測・実験等により構造物の非線型挙動が指摘されてあり、構造物ないしは基礎地盤の非弾性と考慮した非線型応答解析の例がみられる。しかしその場合には特定の構造物にある限られた地震動を作用させて応答を求めたものが多く、構造物の性質あるいは地震動の波形とその振幅が想定したものから変化したときの応答量の変化を判断するためには高度の予備知識を必要とする。従って個々の構造物に関して地震波形を入力とした複雑な非線型応答計算をその都度実施しているのが現状である。そこで我々は復元力が bi-linear である 1 自由度非線型系に関して、解析結果の普遍性と相似律に基づいて検討し、さらに橋梁に関する地震応答の实测値を応答解析で再現してそれらの結果の適用しうる範囲を明らかにした。

2. Bi-linear 系の地震応答解析の基本

1 自由度 bi-linear 系が地震動を受けたときの運動方程式は

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -M\ddot{Z}_g \quad (1)$$

と表わされる。ここに M は質点の質量、 C は粘性減衰係数、 F はバネの復元力で図.1 に示すようにヒステリシスを有し、 X は質点の地盤に対する相対変位、 $\ddot{Z}_g$ は地動加速度である。無次元表示すると、

$$\frac{\ddot{\xi}}{p^2} + 2\eta\frac{\dot{\xi}}{p} + f(\xi, \eta) = -\frac{1}{\gamma} \frac{\ddot{Z}_g}{\ddot{Z}_{g\max}} \quad (2)$$

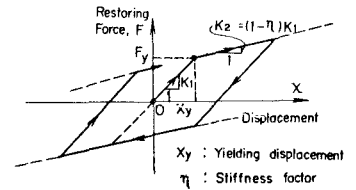


図.1 系の復元力特性

と変形される。ここに、 $p = \sqrt{K_1/M}$ (固有円振動数; 固有周期 $T = 2\pi/p$)、 $\eta = C/2\sqrt{MK_1}$ (減衰定数)、 $\eta = 1 - K_2/K_1$ (剛度比)、 $\xi = X/X_y$ (変位パラメータ)、 $f = F/F_y$ (復元力パラメータ)、 $X_y = \gamma \ddot{Z}_{g\max} / p^2$ (降伏変位; γ : 係数)、 $F_y = K_1 X_y$ (降伏力)、 $\ddot{Z}_{g\max}$: $\ddot{Z}_g$ の絶対最大加速度である。さてこの運動方程式の相似律についてバッキンガムの π 定理によって検討した結果、二つの系において η , η および $\ddot{Z}_g / (\gamma \ddot{Z}_{g\max})$ の 3 つの量が等しければ応答値も相似すること、さらに二つの系の間で時間座標の変更が許されない場合には同一地震動に対して p (あるいは T)、 η , η および γ の 4 つの量が等しければ応答量は同値となることが判った。従って各種の地震動 ($\ddot{Z}_g$) に対して、種々の特性値 (p , η , η および γ) を有する bi-linear 系を想定し (2) 式を解析すれば系統的に応答値が求まり、スペクトル曲線を描き得る。同一の特性値を有する系に対して数多くの地震動を入力とする解析を実施すれば、それらの平均応答スペクトルを求めることも可能となる。さらにこれらのスペクトル曲線から、1 自由度 bi-linear 系にモデル化することのできる構造物の地震応答は容易に算定しうることになる。

3. 地震応答の実測例と解析例

松代群衆地震における主要な18回の地震に対する落合橋ごの実測結果を図.2に示す。横軸は地盤加速度の最大値(a_g)、縦軸は橋脚上の応答加速度の最大値(a_R)である。 a_R - a_g の関係は $a_R=a_g$ なる直線に対して左上り右下りの傾向が明らかであり、本橋の非線型性が明確に現われているといえる。次に図.3は特定の地震動に対する非線型スペクトル曲線の一例である。横軸は固有周期(T)、縦軸は加速度倍率(β)であり、パラメータとして $h=0.1$; $\eta=0.6$; $\gamma=0.5, 1.0, 1.5$ および線型がとられている。 $T=0.1 \sim 0.5$ 秒の範囲で β が小さい程 β は低下している。また表.1は6回の代表的地震について実測値と応答解析値とを比較したものである。強震時には非線型応答解析結果が実測値とよく対応を示している。

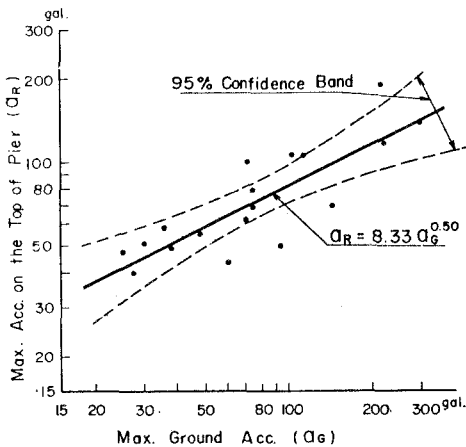


図.2 落合橋における松代地震の観測結果

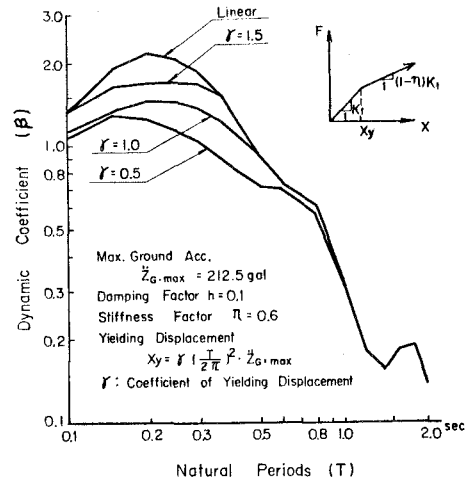


図.3 非線型応答スペクトルの一例

4. 結論

- (1) Bi-linear系の地震応答解析においては相似律が成立する。4箇のパラメータを用いることによって一般的に地震応答スペクトル表示が可能となる。
- (2) 地震観測による橋梁の応答は非線型を示し、bi-linear系の応答解析結果と良好な対応を示す。
- (3) 図.3に示した非線型応答スペクトル曲線は与えられた T , h , η および γ の範囲で普遍的に成立する。
- (4) 実測による応答は、同橋と同値の T , h , η および γ の他の構造物でも同じように生ずる現象である。
- (5) もし松代地震の波形の特性が他の地震のそれと類似しているのであれば、上記の(2)~(4)はより普遍的な結論であるといえる。

Earthquake		Observed Max Acc.		Analyzed Response Acc.		
No.	Date Time	Ground	Top of Pier	Linear	Nonlinear Case 1	Nonlinear Case 2
		a_g (gal)	a_R (gal)	a_R^L (gal)	a_R^{N1} (gal)	a_R^{N2} (gal)
I	Apr. 5, '66 17:52	30.0	51.3	43.7	43.7	43.7
II	Feb. 12, '66 04:05	60.0	43.8	55.1	55.1	54.0
III	May 6, '66 19:08	70.0	100.0	97.1	97.1	80.5
IV	May 28, '66 14:21	102.5	107.5	156.4	128.1	106.6
V	Apr. 5, '66 17:51	212.5	190.0	325.8	187.0	195.5
VI	Apr. 17, '66 10:21	302.5	145.0	303.4	202.7	211.8

表.1 実測結果と解析結果
(松代地震による落合橋の観測)