

非比例減衰系の応答特性の評価

鹿児島大学工学部 正員 ○中馬礼士郎 正員 河野 健二
 鹿児島大学工学部 正員 吉原 進 学生員 池上 成洋

1. まえがき

構造物の地震応答解析において減衰マトリックスの評価は、重要な問題となる。特に、基礎-地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した地盤応答解析では、それぞれの部分の減衰の大きさが異なるため、非比例形の減衰マトリックスの扱いが必要になる。非比例減衰マトリックスを有する系においては、厳密には非減衰時の固有値解析に基づく応答解析はできない。一般に非比例減衰系の応答解析は複素固有値解析を用いて解くことができるが、この方法は系のマトリックスの自由度を倍にして扱うため計算が煩雑になる。また、構造物の地震応答解析においては、特定の地震波が設定されている場合を除いて、標準的な応答スペクトルが広く利用されるが、これを非比例減衰系の応答解析に用いる場合、減衰マトリックスの対角化が必要となる。特に、ここで問題となるのは、固有振動数が接近する場合であり、減衰マトリックスの対角化だけでは応答を十分に表わすことはできない。そこで、本研究では、非比例減衰マトリックスの対角化に伴う応答の近似化について、振動モード間の連成を考慮した影響係数を用いて応答の評価を行い検討を加えた。

2. 応答スペクトルを用いた非比例減衰系の応答解析

構造物の地震応答解析においては、応答スペクトルが頻繁に利用される。これを用いて非比例減衰系の応答解析を行なう場合、減衰マトリックスの対角化が必要になってくる。非減衰時のモデルマトリックス $[\tilde{\Phi}]$ を用いて、非比例減衰マトリックスの対角化を行ない、減衰定数 $\tilde{\beta}_j$ 、固有振動数 $\tilde{\omega}_j$ が求まると、応答スペクトルを用いて各点での応答が求められる。この方法によって求めた応答は、各次振動モードの最大値に注目しているのので、一般に、二乗平均応答 (RMS 応答) として表わされる。すなわち、1 点の変位応答は、

$$X_1^2 = \sum_j (\Phi_{1j} S_j)^2 \quad (1)$$

と表わされる。ただし、 Φ_{1j} は 1 点における j 次モードの値を表わしており、 S_j は $\tilde{\beta}_j, \tilde{\omega}_j$ に対する応答スペクトルによる応答量を表わしている。しかしながら、一般に、構造物系の応答を支配する振動モードの固有振動数が接近すると、振動モード間の連成が生じるため、減衰マトリックスの対角化だけでは、十分に表わされないこのような固有振動数が接近する場合の応答は、振動モード間の相関を考慮することによって、さらに良い近似が得られると思われる。すなわち、1 点の変位応答は、

$$X_1^2 = \sum_j \sum_k A_{jk} \Phi_{1j} \Phi_{1k} S_j S_k \quad (2)$$

と表わされる。ここで、係数 A_{jk} は、 j 次と k 次の振動

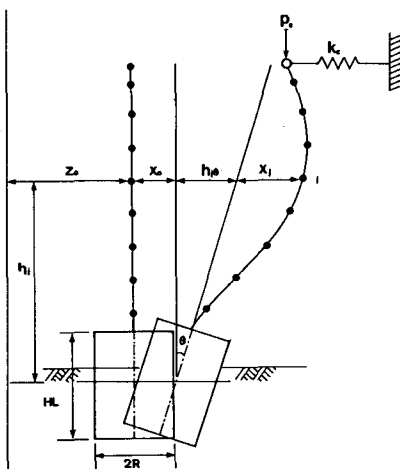


図1 解析モデル

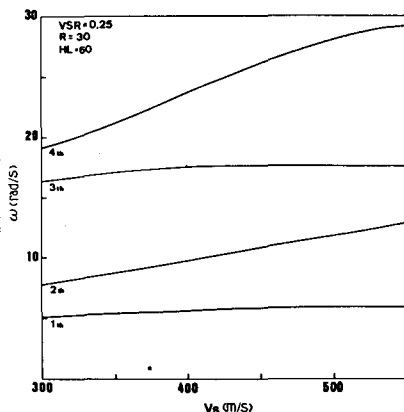


図2 Vsによる固有振動数の変化

モードが応答におよぼす影響を示したものであり、その係数としては、Rosenblueth やKiureghianによる方法が提案されている。本解析では、ホワイトノイズ入力に対する1次モードの応答に及ぼす連成項の影響を求め、RMS 応答の形で応答を求めることを試みている。そして直接地震波入力に対して線形加速度法による応答解析を行ない、応答スペクトル法との比較を行なっている。本研究で用いた振動系は、図1に示す吊橋の搭一基礎系をモデル化したものである。また、入力地震波として、TAFT 1952 S69E, TAFT 1952 N21E, EL CENTRO NSを用いて応答スペクトルを求め応答解析を行なった。図2は、上層と下層地盤のせん断波速度比0.25、基礎の半径30m 高さ60m に対する全体系の固有振動数の変化を示したものである。また、その時の各入力地震波に対する応答変位を図3～図5に示す。これらの図において、横軸は地盤せん断波速度、縦軸はこの振動モデルの最大変位（節点5）を与えており、無次元化した形の $X_5 \omega_1^2 / \ddot{Z}_g \max$ で表わされる。ただし、 ω_1 は1次の固有振動数を、 $\ddot{Z}_g \max$ は、入力地震動の最大加速度を表わしている。図2から下層地盤せん断波速度300(m/s)において、1次モードと2次モード、3次モードと4次モードが接近することが分かる。そこで、図3～図5の各入力地震波に対する応答は、全体に地盤せん断波速度300(m/s)付近において、モード間の連成が生じているのが分かる。特に非減衰時の $\beta_j, \tilde{\omega}_j$ を用いて求めた二乗和応答とRosenblueth による応答は、地震波入力による応答解析結果と相違していることがわかる。しかし、Kiureghianによる応答とモードの連成を考慮した本解析による応答は、その影響による相違が見られるものの、割合良い近似を与えていると思われる。さらに、各入力地震波で見るとTAFT 1952 S69Eでは、Kiureghianによる応答が最も良い近似を与えているが、連成の影響が少ない、 $V_s=400$ (m/s) 以降よりも連成の影響の大きいと思われる、 $V_s=300$ (m/s) 付近において、良い近似を与えている。また、TAFT 1952 N21Eでは、モードの連成を考慮した本解析による応答が最も良い近似を与えている。さらに、EL CENTRO NSではKiureghianによる応答も良い近似を与えているが、本解析による応答のほうが、より良い近似を与えているこのように振動モード間の連成が応答に及ぼす影響は入力地震波の特性によっても異なっていることが分かる。

3. あとがき

本解析で扱ったような非比例減衰系に対しては、全体にKiureghianによる応答と、モードの連成を考慮した本解析による応答は、割合良い近似を与えている。しかし入力地震波の特性によっても、その応答評価は異なるため、今後さらに検討を加える必要があると思われる。

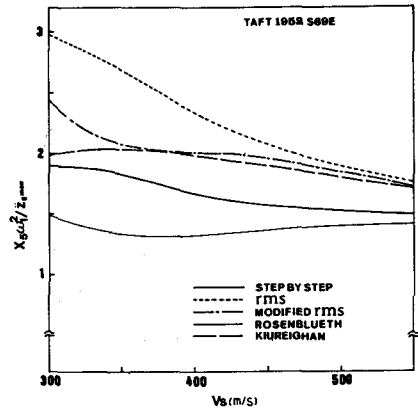


図3 変位応答特性

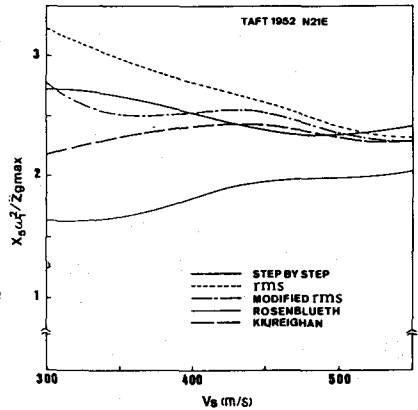


図4 変位応答特性

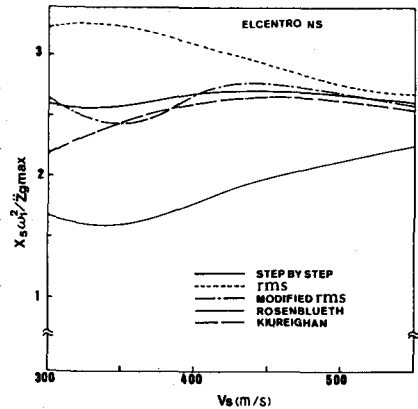


図5 変位応答特性