

名古屋大学 学生会員 石黒 進也

名古屋大学 学生会員 河村 哲也

名古屋大学 正会員 田辺 忠顕

1. 序

阪神大震災は RC 構造物に、大きな被害をもたらした。今後の耐震設計には、この教訓が生かされる必要があるが、まずその破壊の原因の究明が重要である。本研究は、中でも山陽新幹線武庫川橋梁の破壊に焦点を当て、地震入力をシステム全体の解析から同定することを試みる。武庫川橋梁は、南北に流れる武庫川に架かり、左 75 度の斜角のある PC 桁 11 連の橋梁である。損傷の状況は、各橋脚に輪切り状にかぶりコンクリートの剥離、そして軸方向鉄筋の降伏が見られた。この原因を解析的に調べるため、橋梁全体の解析を行って一本の橋脚への地震入力を明らかにすることが必要である。本研究では真のシステムについては、解析が行えなかったが、2 本の橋脚とその間の主桁群を一つのシステムとして解析した。その際に、地盤と橋脚の連成効果もできうる限り精度良く取り込むために、重複反射理論を用いて基盤から橋脚ケーソン位置における地盤振動を推定し、さらに地質構造を反映した地盤ばねを介して応答変位法によって解析を行った。これらの解析を行って、一本の橋脚への地震入力が、どのような要因によって影響され、また実際どの程度であったか、検討する。

2. 地震入力のかえ方

地震動による応答解析を行う場合、本来はその場所で記録された地震波を使用すべきである。しかしながら、武庫川橋梁での地震記録はないので、基盤で得られた地震波が、その上の軟らかい地盤を通過する際の増幅を計算して武庫川橋梁橋脚位置の地盤振動を推測することにする。基盤振動として、武庫川橋梁から東へ約 7.5km に位置する関西電力総合研究所において記録された地中深度 97m の地震加速度記録を利用する。そこでの地震記録は南北・東西・上下の 3 方向あり、それぞれ推定断層からの距離を考えた距離補正を行った。そして、重複反射理論を用いた地盤の地震応答プログラム「SHAKE」を使って、その地震記録を基盤に入力し構造物モデルの地盤質点付近の地盤層 3 層の振動波形を求めた。次に、2 本の橋脚には 3 層の水平方向 (NS・EW) と最下層の鉛直方向 (UD) の 3 方向の波形を地盤ばねを介して質点に入力する。このようにして地盤ばねでつながれたケーソンに各々異なった波形が入力される。

3. 地盤ばねの算定

橋梁基礎地盤についてのデータは、鉄道総合研究所のボーリングデータの柱状図のみを用いた。そのデータから土質の境界、N 値が変化するところを目安として地下 30 m までの多層平行層モデルを 2 種類作成した。また、この地盤はすべて砂層・砂礫層のどちらかであるので、ポアソン比は土質にかかわらず 0.49、単位体積重量についても道路橋示方書を参考にして、 2.0 tf/m^3 としている。そのモデルから地盤ばね係数は示方書を参考にし求める。そして、1 つのケーソンは 3 分割しそれぞれに質点をおいたモデルとなっているので、質点の地中深度付近の地盤の 3 層のばね係数を使う。ケーソンをモデル化した質点の上から 2 層の 4 質点は、水平方向地盤ばねのみの x, y 方向ばね、最下点の 2 質点は鉛直方向地盤ばね、

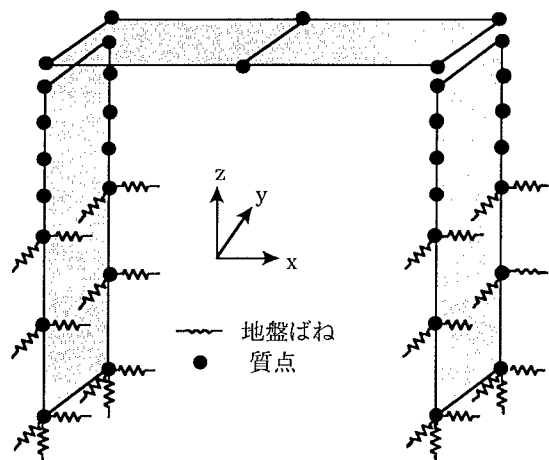


図-1 マスばね系モデル

水平方向とせん断のばねの和をとったばねらの x, y, z 方向のばねをつなげることにした。

4. 構造物のモデル化

解析の対象とする橋梁一連を図-1のようにマスばね系にモデル化した。そして、橋脚ケーソン部に地盤ばねを取り付け、地盤も含めた構造物モデルを解析に用いた。

5. 構造物応答解析

動的解析を行う上での運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{X}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{X}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ X_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$[M]$ 、 $[C]$ は構造物質点の質量マトリクス、レーリー減衰を考慮した減衰マトリクスを表している。上式の剛性マトリクスについては、構造物と地盤ばねの両方を考慮したものとなっている。 $[K_{11}]$ は構造物部分の剛性マトリクスに地盤ばねの剛性を加えたもの、 $[K_{12}]$ 、 $[K_{21}]$ 、 $[K_{22}]$ は地盤の剛性マトリクスである。そして、 $\{X\}$ は構造物の変位を表し、 $\{X_0\}$ は「SHAKE」によって求められた地盤の変位波形となる。運動方程式(1)を解くとき、

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K_{11}]\{X\} + [K_{12}]\{X_0\} = \{0\} \quad (2)$$

のように式を変形し解くこととした。

この方程式を解くにあたり、地震応答解析で最も広く用いられている Newmark の β 法の平均加速度法 ($\beta = 1/4$) を用いた。平均加速度法は、時間刻みの大きさにかかわらず無条件に安定であるので、解が発散することが無いという特徴を持っている。この式(2)を実際に解き、 $\{X\}$ を求めた。

6. 解析結果と考察

橋脚の設計に直接必要な橋脚天端に注目した。そこでの最大水平加速度は $5.368 m/sec^2$ (536.8gal)、最大鉛直加速度 $= 4.908 m/sec^2$ (490.8gal)、最大変位は x 、 y 、 z 方向それぞれ 6.876cm、2.231cm、0.641cm となった。また、得られた変位から構造物全体の挙動を見てみたところかなり複雑であり、2本の橋脚の振動の周期が大きく異なり、当然の事ながらねじれの力も生じているようである。

また、地震上下動についても検討を行った。橋脚躯体部の質点に働く力を変位から求め、そこに働く断面力に注目することにした。2本の橋脚について、断面力を最大振幅時付近について求めた。引張側を見るとたかだか $0.3 kgf/cm^2$ であり、これが正しいとすると直接コンクリート橋脚を破壊する要因とはなり得ない。しかしながら、ここでは橋脚断面の平均断面応力を求めているが、実際は断面の各位置によって応力がかかなり異なるので、更に検討の余地がある。また今回は橋梁全システムの解析は行っていないのでここにも検討の余地がある。

7. 結論

本研究の解析の結果で以下の結論を得ることができた。

- 1) 基礎地盤の性質の違いより、構造物への入力波形に大きな差を生じることが確認された。
- 2) 構造物全体の変形形態を知ることにより橋脚においては複雑な3次元振動が生じている。
- 3) 橋脚最上部での最大加速度は、水平方向(EW) 537gal、鉛直方向(UD) 491gal とのり、鉛直方向の加速度がかなり大きくなっている

今後の課題として、橋梁システム全体(11連の橋脚及び橋桁)に同解析を適用し入力の大さを検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，V 耐震設計編，丸善，1990
- 2) 花田和史、澤田義博：阪神大震災が教えるもの，建築知識，June，1995，pp. 29-36
- 3) 柴田明徳：最新 耐震構造解析，森北出版，1981