

# 推定地震波による構造物の動的応答

構造物技術研究部コンクリート構造

研究室長 谷村幸裕

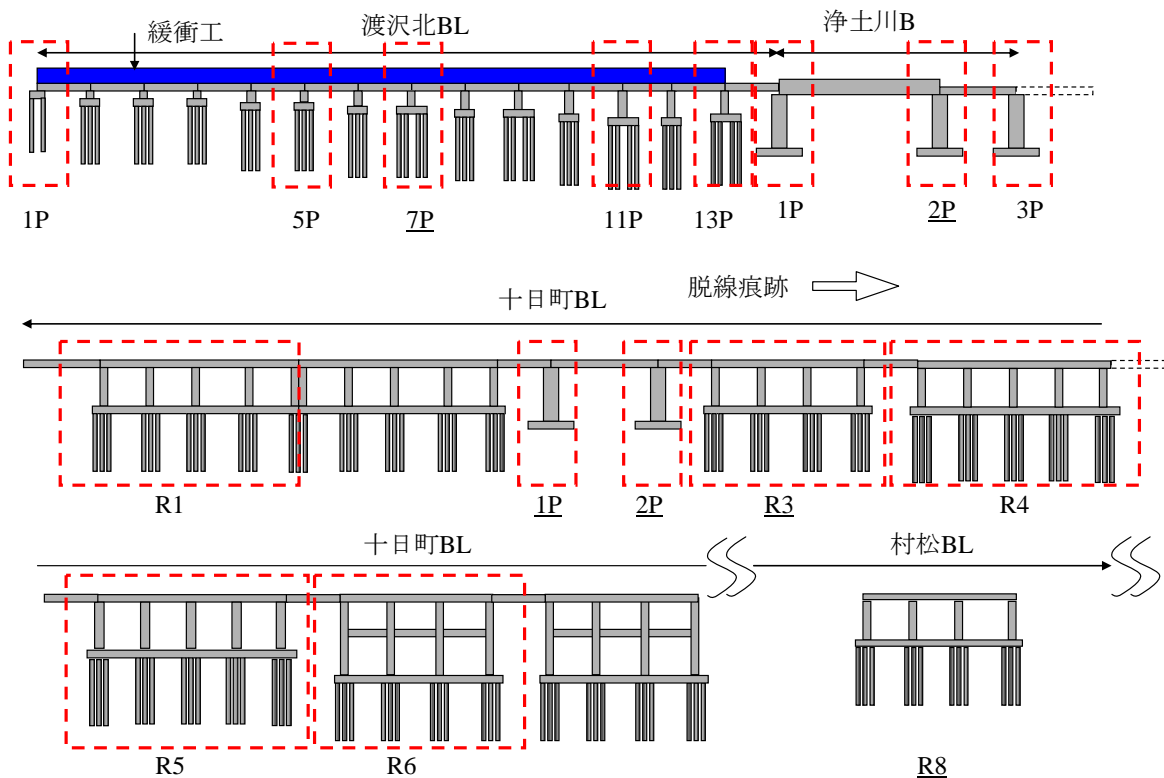
## 1. はじめに

新潟県中越地震において脱線した車両が地震時に走行したと考えられる区間には多数の高架橋等の構造物が存在する。車両走行シミュレーションにより車両の挙動を把握するためには、これを支持する構造物の挙動を精度よく推定したうえで、各輪軸位置における振動変位を求める必要がある。そこで、対象となる構造物の状況を調査し、多数の構造物の挙動を精度よく、かつ効率的に解析するためのモデル化を行い、推定地震波を受けた場合の地震応答解析を実施した。

## 2. 解析対象構造物

### 2.1 構造物の概要

解析対象区間は、脱線痕跡、地震動の継続時間、列車速度、構造形式等を考慮し、図1に示す渡沢北 BL～十日町 BL R6 とした。非線形解析においては効率化を図るため、類似構造物の解析結果を共用することとし、図に示す 15 構造物の解析を実施した。渡沢北 BL は RC 単純桁と壁式橋脚、浄土川 B は PC 下路桁と壁式橋脚、十日町 BL は主にラーメン高架橋で構成されている。



注) 構造物名称の下線は材料試験実施構造物を、点線枠囲いは非線形解析実施構造物を示す。

BL: 高架橋, B: 橋りょう, P: 橋脚, A: 橋台

図1 解析対象構造物

## 2.2 材料調査

図1に示す6箇所の構造物からコンクリートおよび鉄筋を採取し、その結果を解析に反映した。試験結果にばらつきが見られたが、解析目的が走行シミュレーションに用いる構造物の全体挙動の把握であることから、その平均値（コンクリート圧縮強度  $f'_{ck}=33\text{N/mm}^2$ 、軸方向鉄筋降伏強度  $f_{yk}=370\text{N/mm}^2$ 、軸方向鉄筋ヤング係数  $E_s=200\text{kN/mm}^2$ ）を全ての構造物に適用することとした。

## 3. 解析の概要

### 3.1 解析方法

地震時の各輪軸位置での変位時刻歴を、比較的簡易なモデルで効率的に求めるために、以下の手順で計算した。

- (1) 静的非線形解析：構造物毎に構造物と地盤を一体でモデル化し、プッシュオーバー解析により荷重変位関係を求める。
- (2) 動的非線形解析：(1)の結果を用いて1自由度系に置換し、推定地震波を入力して、全対象構造物天端の変位を求める。
- (3) (2)の結果より、連続した構造物の応答を計算し、動的角折れの影響を考慮して各輪軸位置での変位時刻歴を求める。

### 3.2 静的非線形解析

図2に解析モデルの例を示す。鉄道構造物等設計標準・耐震設計<sup>1)</sup>、コンクリート構造物<sup>2)</sup>に準拠して、平面骨組モデルを用い、柱・橋脚く体の非線形性は曲げモーメント-部材角 ( $M-\theta$ ) 関係、杭等は曲げモーメント-曲率 ( $M-\phi$ ) 関係により表現した。地盤は非線形ばねでモデル化し、建設時の記録に加えて新たに地質調査を実施し、その結果を反映した。荷重は死荷重のみを考慮し、水平力は柱梁接合部（橋脚はく体天端）およびフーチング中心に載荷した。なお、十日町 BL R1, R2 の柱は、鋼板巻き補強されていたが、補強鋼板等は柱端に定着されていないため、充填モルタルおよび根巻きコンクリート分だけ断面が増加したものとして考慮した。

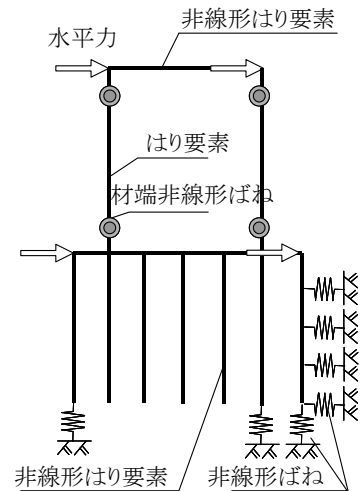


図2 静的非線形解析モデル例  
(杭基礎ラーメン高架橋)

図3に十日町 BL R3 の静的非線形解析結果を示す。本構造物は主として柱が降伏して非線形化するため、動的解析に用いる荷重～変位関係の骨格線を、図に示すようにバイリニアでモデル化することとした。その他の構造物についても、静的非線形解析によって得られた結果から、各構造物の降伏過程を考慮して動的解析に用いる荷重～変位関係の骨格線モデルを作成した。

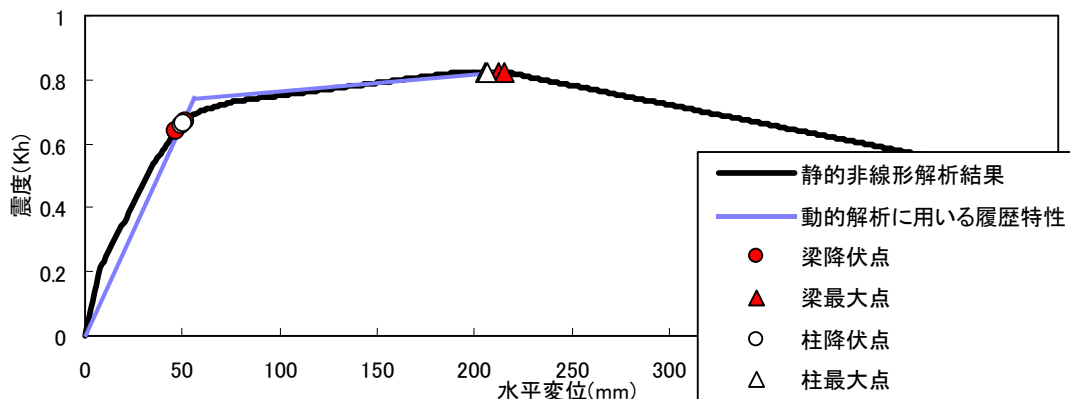


図3 十日町 BL R3 静的非線形解析結果

### 3.3 動的非線形解析

次に、構造物を図4に示すように、等価なばねと質量を有する1自由度系に置換し、動的非線形解析を実施した。等価なばねの特性は、静的非線形解析より得られた骨格線を用い、各構造物に対応する地点の地表面加速度波形を入力して、構造物天端位置での応答値を算定した。図5～7に解析結果の例として、十日町 BL R3 の応答履歴図、絶対加速度波形、相対変位波形を示した。いずれの構造物も概ね弾性域から多少塑性域に入った程度の応答に留まっており、構造物の損傷程度が軽微であることを示しているが、これは実際の被災状況と整合している。

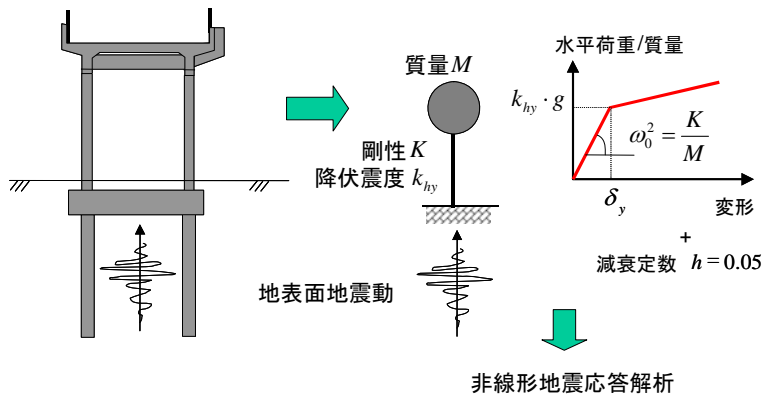


図4 動的解析モデルの概念図

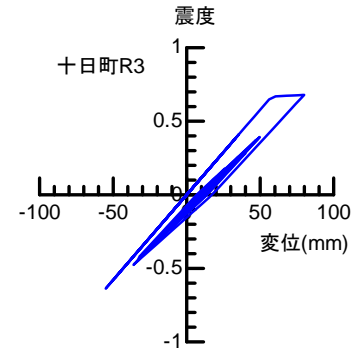


図5 構造物の応答履歴図  
(十日町 BL R3)

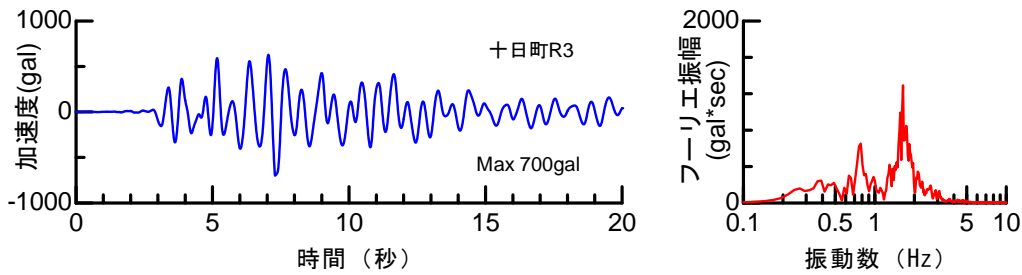


図6 構造物天端の絶対加速度波形とフーリエスペクトル (十日町 BL R3)

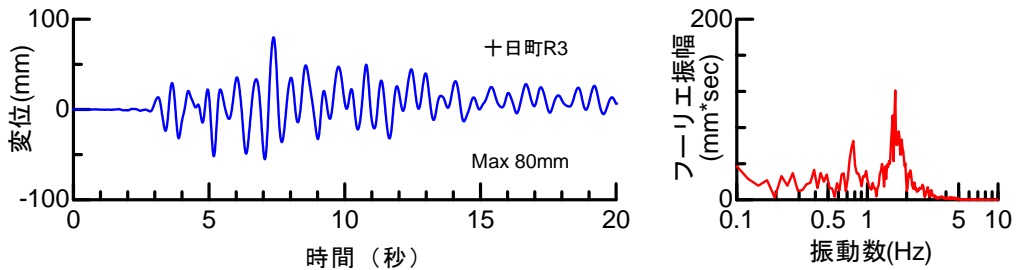


図7 構造物天端の相対変位波形とフーリエスペクトル (十日町 BL R3)

### 3.4 連続した構造物の応答計算

動的解析により得られた各構造物の応答解析結果をもとに、走行車両の各輪軸位置における振動変位を算定する。高架橋の上を走行する列車は、地震により横方向に振動する各構造物の上を次々に通過するが、構造物境界通過時にはその時点で生じている動的な角折れの影響が加味される<sup>3)</sup>。そこで、図8に示す手順により、このような影響を考慮し、構造物の振動波形を算定した。

図9に、構造物及び緩衝区間の変形計算の例として、列車先頭の輪軸の走行開始地点 205k801m、列車速度 204km/h の場合における、計算開始より 7.5 秒後の構造物の変形および輪軸の走行位置を示した。横軸は計算上の座標であるが、これに相当する営業キロ程を上方に併記した。左側縦

軸は絶対変位を，右側補助縦軸は構造物境界に発生する相対角折れ量を示す。角折れの量は 10/1000 程度である。

図 10 に，輪軸位置における振動波形の例として，先頭から 4 軸分の振動波形を示した。このようにして求められた振動波形を，車両モデルの輪軸に入力することにより，構造物上を走行しながら地震動を受ける状態を再現することができると考えられる。

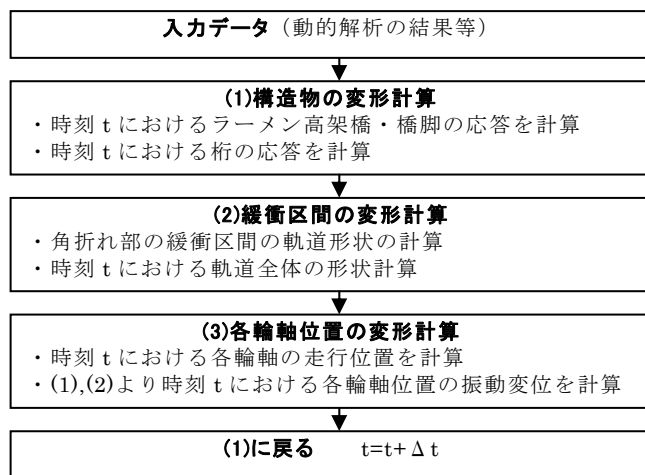
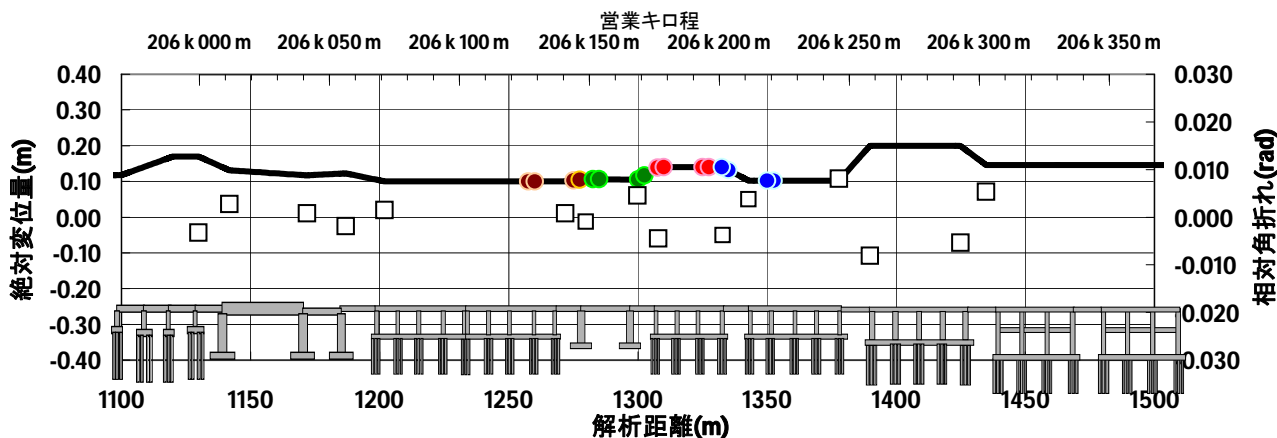


図 8 動的角折れを考慮した解析手順

#### 4. まとめ

地震時に車両が走行したと考えられる区間に存在する多数の高架橋等の挙動を，効率的かつ精度よく推定するため，比較的簡易なモデルを組み合わせることで解析を実施した。被害状況からおおよそ妥当な結果が得られたため，これらを用いて車両挙動解析を行った。



注) ●：輪軸(4 両分)の走行位置，実線：構造物の変位（左側目盛），□は構造物境界における角折れ（右側目盛）

図 9 構造物及び緩衝区間の変形計算の例

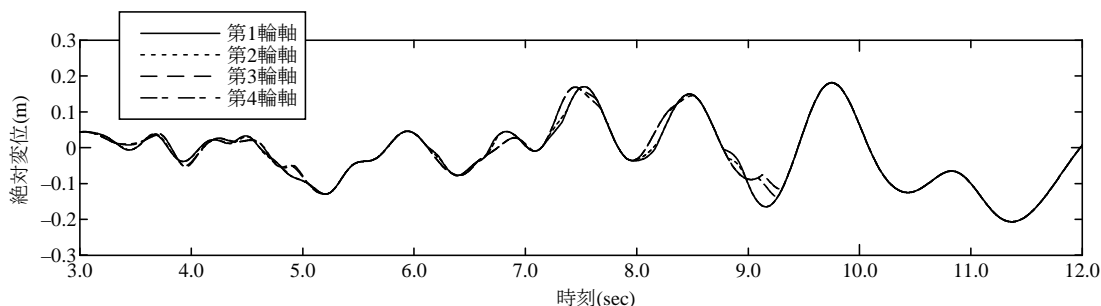


図 10 輪軸位置における動的角折れを考慮した振動波形の例

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），2004.
- 3) 佐藤，三浦：走行安全ならびに乘心地を考慮した線路構造物の折角限度，鉄道技術研究報告，No.820，1972.