

(5) 鉄道高架橋の震害と原因の推定 (その2)

(財) 鉄道総合技術研究所 西村昭彦  
 松本信之  
 棚村史郎  
 (株) 京浜急行電鉄 井上章彦

1. 被害原因の推定の考え方

その1において本高架橋の被害の状況、高架橋および地盤の振動特性の調査について述べた。ここではこの結果に基づき構造物に生じた加速度および構造物の部材耐力を算定し、被害原因を推定する。

まず、構造物の耐力は設計の照査、変状調査および材料試験などから骨組モデルにより被災前の現有耐力を算出する。

構造物に生じた加速度は地盤の調査結果から地盤モデルを作成し、この基盤に記録された地震動を入力し地表面の応答波形を求める。つぎに、この波形の応答スペクトルを求め構造物の振動性状から構造物に生じた加速度の推定を行なう。なお、地盤のせん断弾性係数のひずみ依存性も調査しており、応答計算に考慮する。こうして求めた加速度と構造物の耐力を比較することにより被害の原因を推定する。

2. 地盤のモデル化と応答計算

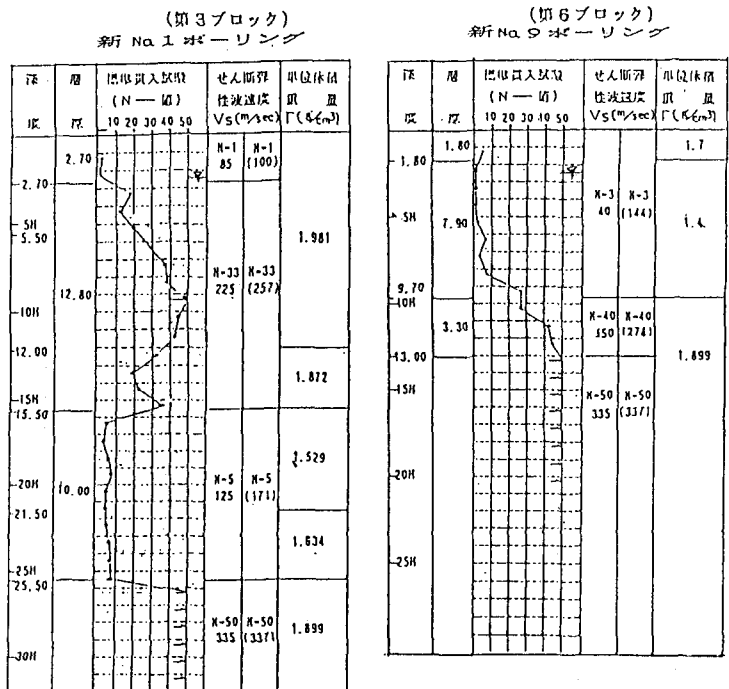
(1) 地盤の卓越振動数

地盤のモデルは弾性波試験 (PS検層) から得られたせん断波速度を用いて作成することとした。地盤のモデルは高架橋の第3、4、6ブロック (以下B3、B4、B6と表す) について作成した。B3、B6の地盤モデルおよび計算に用いた諸数値を図-1に示す。なお、モデルの基盤としてN値が50以上の層とした。このモデルから得られる地盤の卓越振動数を表-1に示す。

(2) 地盤の応答計算結果

前述した地盤モデルを用い、重複反射理論により地震応答計算を行なった。計算プログラムはSHAKEを使用した。地盤の減衰定数は0.02とした。地震波は港湾技術研究所で測定された波形を用い基盤に入力した。

この波形は最大加速度が70galである。地震波の波形とNS成分の応答スペクトルを図-2に示す。計算は地盤のせん断弾性係数が線形の場合とひずみによる低下を考慮する場合の両方を行なった。せん断弾性係数および減衰定数の変化のデータは振動三軸試験から得られた値を使用した。線形と非線形の計算



注1. ( ) 内の数値はN値より算出した \$V\_s\$ を示す  
 注2. N値より \$G\_0\$ の算定式  
 粘土土層 \$V\_s = 100 \cdot N^{0.5}\$  
 砂質土層 \$V\_s = 80 \cdot N^{0.5}\$

図-1 地盤のモデルと諸数値

結果を表-2、3に示す。これによるとB6にせん断弾性係数の低下の影響がみられ、加速度が小さくなっているが他の地盤はあまり変化していない。

### 3. 高架橋の応答加速度の推定

高架橋の応答加速度は地盤の地震応答解析で得られた地表面加速度波形の応答スペクトルから推定する。このスペクトルを計算するにあたって、高架橋の減衰定数を求める必要がある。これまでに行なわれた高架橋の減衰定数は平均的には5%程度であり、以後はこの値を使用するが、応答スペクトルはこのほか2%、10%についても計算した。

地盤のせん断弾性係数のひずみ依存性を考慮した場合の応答スペクトルを図-3に示す。

以上の結果から中間砂質土層を持つ地盤の方が最大応答加速度が大きいこと、その値は700gal以上になること、しかし表層が粘性土系で中間砂質土層を持たない地盤では応答加速度は300gal程度であることが確かめられた。このことは、本高架橋でB2、B3に被害が生じ、ほかには目立った被害がないこと、またすぐ近くにある同様の高架橋（地盤が粘性土で中間砂質土層を持たない）に被害がなかったこととよく対応しているといえる。

### 4. 構造物の耐力の計算

#### (1) 耐力の計算方法

本高架橋について設計の照査を行ない、設計当時の技術基準<sup>1)</sup>に対してはその強度を満足していることが判明した。しかし実際に高架橋は柱上端にせん断破壊を生じているので、各部材の被災前の耐力の評価を行なうこととした。これは、設計図より

得られる各部材の断面における耐力を算定し、せん断破壊に至る水平力（水平震度に換算）を算出することである。この断面耐力の算定には①計算モデルおよび耐力の計算式の検討、②材料強度の評価、③施工精度の検討を行なう必要がある。

まず、材料については、本高架橋の柱部材より、はつり出した鉄筋およびコア抜きをしたコンクリート

表-1 地盤の卓越振動数

ボーリング箇所	卓越振動数(Hz)	高架橋ブロック
新No.1	1.25 5.20	第1高架橋 B3
新No.7	1.00 2.35 3.95	" B4
新No.9	1.00 3.13	" B6

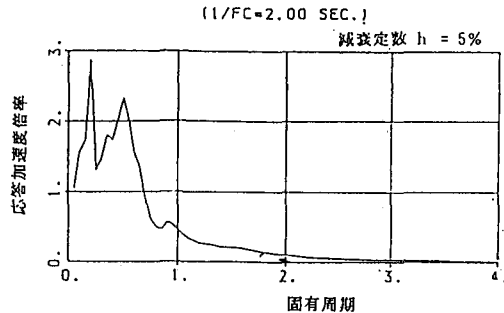
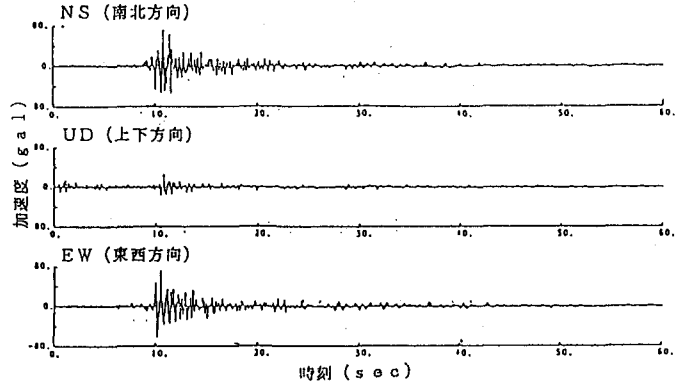


図-2 入力地震動（運輸省港湾技術研究所）

表-2 地表面波形の変位、速度、加速度の最大値（線形計算）

ボーリング No.	最大変位 (cm)			最大速度 (kine)			最大加速度 (gal)		
	NS	EW	GO	NS	EW	GO	NS	EW	GO
新No.1	1.04	1.28	1.03	10.2	12.2	9.4	166	163	127
新No.7	2.13	2.13	2.67	15.7	20.6	18.1	152	192	173
新No.9	1.52	1.40	1.97	11.2	13.0	11.2	142	86	138

注) GO:合成波

の強度試験を行ない、使用材料の強度の確認を行なった。その結果、コンクリートの圧縮強度はいずれも設計基準強度を上回り、平均圧縮強度は  $282\text{kgf/cm}^2$  であった。また、鉄筋もすべての試験体でSD30の規格を満足し、その平均降伏点応力度は、軸方向鉄筋で、 $3860\text{kgf/cm}^2$ 、帯鉄筋で  $3830\text{kgf/cm}^2$  であった。さらに、被害を受けた柱の軸方向鉄筋は明瞭な降伏棚を有していることより、地震時に降伏点を

を超える荷重を受けていないこと、一方帯鉄筋は明瞭な降伏棚を有しておらず、ひずみ硬化の現象がみられることより地震時に降伏点を

を超える荷重を受けたことが考えられる。したがって、構造物全体としては、曲げ降伏に達する荷重を受ける以前に柱上部がせん断破壊したものと推定される。

施工については、被災後、各部材の寸法を詳細に測定した結果特に施工誤差は認められず、設計断面寸法が確保されていることが確認された。

以上のことから材料や寸法に特に問題はないことが確認されたので、断面耐力の計算を行なった。この解析に用いるモデルは地盤の支持状態を適切に評価できる弾性骨組解析モデルとした。これは、先に述べたように、鉄筋の試験結果から、せん断破壊が先行したと考えられるからである。

計算に用いる部材の強度は材料の試験結果に基づいて決定した。また、杭周面には水平ばねおよび鉛直方向せん断ばねを、杭先端には鉛直ばねをそれぞれ考慮した。これらのばねも部材と同様弾性とした。またばねの値はN値から建造物設計標準（基礎構造物）<sup>2)</sup>によって算出した。

## (2) 耐力の推定

図-4、5に柱上端における作用断面力と曲げ耐力およびせん断耐力の関係を示す。

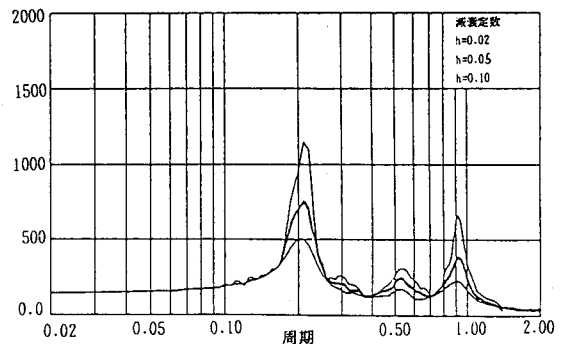
計算結果によると部材を破壊させるためには、かなり大きな水平力が作用しなければならないが、いずれの部材においてもせん断破壊が曲げ破壊より先行する結果となり、この弾性計算で得られた破壊のモードは現場の状態とほぼ一致していると考えられる。耐力の計算式は土木学会<sup>3)</sup>や建造物設計標準<sup>4)</sup>に採用されている方式を用いた。

しかし、本検討で用いたせん断耐力算定式は実験室で得られたデータをもとに作成した実験式であるので、構造物が実験の環境と同じような条件にあることが必要であるが、本高架橋がそのような状態にあったとは考えにくく、次に示すようなせん断耐力を変動させる要因があったと考えられる。

表-3 地表面波形の変位、速度、加速度の最大値（等価線形法）

ボーリング No.	最大変位 (cm)			最大速度 (kine)			最大加速度 (gal)		
	NS	EW	GO	NS	EW	GO	NS	EW	GO
新No.1	1.20	-	-	8.2	-	-	144	-	-
新No.7	2.13	-	-	13.6	-	-	149	-	-
新No.9	1.57	-	-	11.4	-	-	77	-	-

新No.1 (水深第1高架橋第3ブロック)



新No.9 (水深第1高架橋第6ブロック)

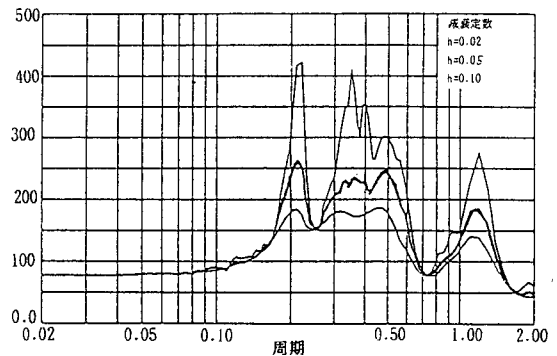


図-3 各地盤の加速度応答スペクトル（等価線形法）

①せん断耐力算定式の精度によるもの  
(±10%程度)

②柱上端における軸方向鉄筋の抜け出しに起因するもの(0~-20%程度)

③帯鉄筋の加工状況に起因するもの

以上の要因を勘案すると、各部材のせん断耐力は計算で得られた数値より最大で70%程度まで低下することがあると考えられる。したがって、本高架橋には、柱上端でせん断破壊をした実状からみて、水平震度で0.65~0.90の水平力が作用したものと考えられる。

### 5. 被害原因の推定

これまでの解析において構造物に生じた加速度の推定と構造物の断面耐力の検討を行なった。この構造物について、設計の照査、材料試験などから得られる被災前の現有耐力の評価を行なった結果、高架橋の強度は建設当時の技術基準に規定されている地震に対して必要とする強度より大きかったが、被害を受けた部材はせん断破壊が曲げ破壊より先行する構造であり、構造物へ設計震度に換算して約0.65~0.90程度

の水平力が加われば、柱上端にせん断破壊を生じたであろうという計算結果が得られた。一方、高架橋に生じた地震動の推定では、地震記録および地盤と構造物の調査より地盤の卓越周期、構造物の固有周期の算出を行ない、地震応答計算を行なって高架橋に生じた加速度を推定した。この結果、高架橋の上部工には700gal程度の可能性は十分あることがわかった。また、この付近の地形は溺れ谷の形状を示しており、狭い谷のなかで地震動が増幅され、計算以上の大きな加速度を生じたことも考えられる。

また、せん断破壊の場合、エネルギー吸収力が小さくじん性も小さいので、破壊が生じるまでは構造物は線形に近い状態で運動することが考えられることから、この応答加速度は水平震度0.7にほぼ等しいとすることが出来る。この値は柱にせん断破壊を生じさせる範囲に入っており、この加速度が被害の原因であったと推定できる。

したがって、今回の千葉県東方沖地震は、M6.7クラスの中規模地震であったが、特に地震動、高架橋付近の地盤および高架橋の特性が競合しあい、高架橋に大きな加速度を生じさせたことが被害の主要原因と推定される。

#### [参考文献]

- 1) 日本国有鉄道：建造物設計標準（鉄筋コンクリートおよび無筋コンクリート）、昭和45年
- 2) 日本国有鉄道：建造物設計標準（基礎構造物、抗土圧構造物）、昭和61年
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書、昭和61年
- 4) 日本国有鉄道：建造物設計標準（鉄筋コンクリートおよび無筋コンクリート）、昭和58年

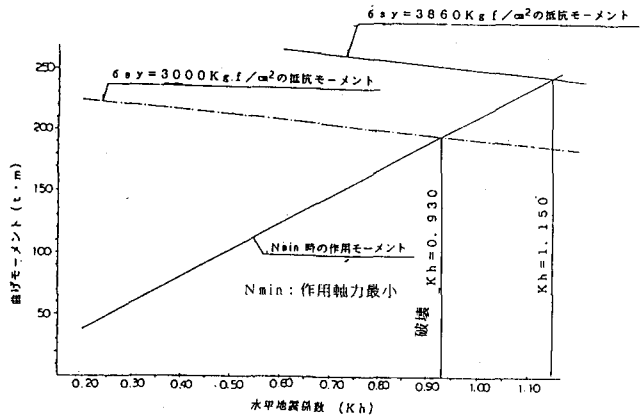


図-4 曲げ耐力グラフ (柱上端、軸力最小の場合)

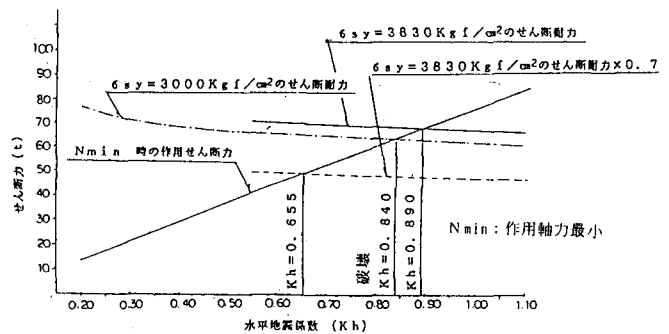


図-5 せん断耐力グラフ (柱上端、軸力最小の場合)