

## 鉄道ラーメン高架橋の地震被害解析と地震復旧費用の算定

野口 聡<sup>1</sup>・落合 康<sup>3</sup>・服部尚道<sup>1</sup>・前田欣昌<sup>1</sup>・大滝 健<sup>2</sup>・吉川弘道<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 東急建設株式会社 技術本部 土木エンジニアリング部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷一丁目16-14）

<sup>2</sup>正会員 工博 東急建設株式会社 技術本部 土木エンジニアリング部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷一丁目16-14）

<sup>3</sup>武蔵工業大学 工学部 都市基盤工学科（〒158-0087 東京都世田谷区玉堤一丁目28-1）

<sup>4</sup>正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部 都市基盤工学科（〒158-0087 東京都世田谷区玉堤一丁目28-1）

### 1. はじめに

鉄道は都市内および都市間輸送において重要な役割を担っており、その主要施設と構造物の耐震性能の確保は地震国日本において緊急かつ重大な課題である。先の阪神・淡路大震災では、柱部材のせん断破壊、これに伴う床版の落下など、多くの鉄道ラーメン高架橋が被災を受けたことも記憶に新しい。

地震リスク解析<sup>1)2)</sup>において筆者らはこれまで鉄道構造物を対象とした地震リスク解析システム<sup>3)~5)</sup>の構築を模索し、図-1のような解析フローを提案している。本論は、鉄道ラーメン高架橋を解析対象として、一連の地震リスク解析のうち構造物の耐震性評価および脆弱性評価として重要な地震損失関数に必要な復旧費用について算定したものである。

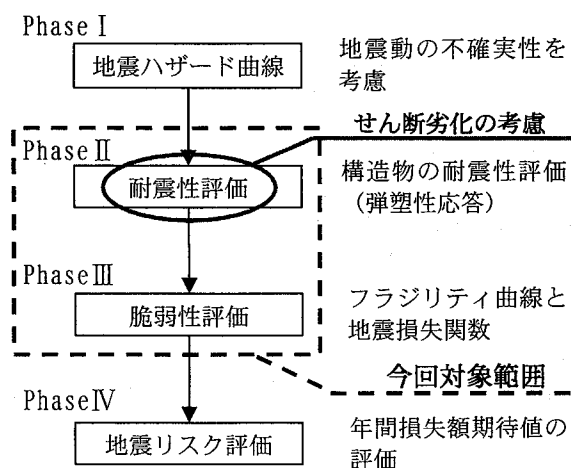


図-1 地震リスク解析のフロー<sup>5)</sup>

具体的には、耐震性能の異なる3種類のラーメン高架橋を設定して、静的プッシュオーバー解析を実施し、P-Δ関係を算出し、大変形に伴うせん断劣化（いわゆる曲げ降伏後のせん断破壊）を考慮した。

次に、主要部位の損傷イベントと損傷レベルを算

出し、最終的に設計震度を横軸とする復旧費用（すなわち地震損失関数）を求めた。

本論では地震リスク解析に適用するため、図-2に示すように、Priestleyらの方法<sup>1)</sup>によるせん断劣化を考慮した耐震性能評価<sup>7)8)</sup>と復旧費用算定を行った。

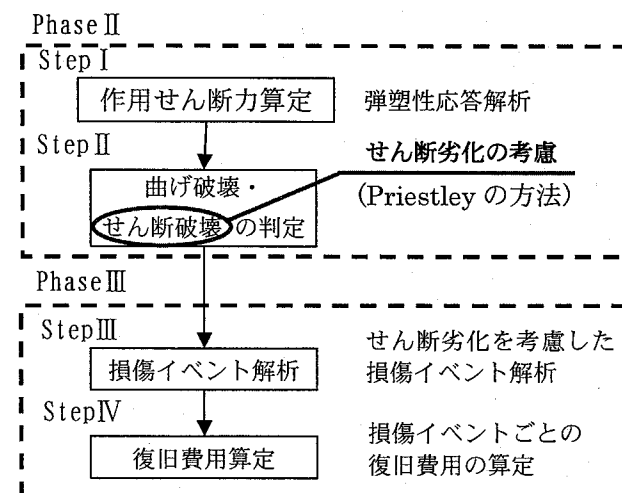


図-2 せん断劣化を考慮した脆弱性評価のフロー

### 2. コンクリートのせん断劣化の評価

#### (1) Priestleyらの方法とせん断劣化係数 $k$

Priestleyらは<sup>1)</sup>、せん断耐力のうち、コンクリート寄与分 $V_c$ を式(1)のように提案している。

$$V_c = k \sqrt{f'_c} A_e \quad \dots (1)$$

ここに  $f'_c$ : コンクリートの設計圧縮強度  
 $A_e$ :  $0.8A_{gross}$  ( $A_{gross}$ : 実断面積)

$$k = \begin{cases} 0.29 & (\delta \leq 2\delta_y) \\ -0.095(\mu - 2) + 0.29 & (2\delta_y \leq \delta \leq 4\delta_y) \\ -0.0125(\mu - 4) + 0.1 & (4\delta_y \leq \delta \leq 8\delta_y) \\ 0.042 & (8\delta_y \leq \delta) \end{cases}$$

$\mu$ : 変位靱性率

この係数  $k$  を初期値 0.29 で除し、せん断劣化係数  $\zeta$  として、式(2)のように書き換える<sup>8)</sup>。

$$V_c = 0.29 \zeta \sqrt{f'_c} A_c \quad \dots (2)$$

$$\zeta = \begin{cases} 1.0 & (\delta \leq 2\delta_y) \\ -0.3272\mu + 1.655 & (2\delta_y \leq \delta \leq 4\delta_y) \\ -0.04325\mu + 0.518 & (4\delta_y \leq \delta \leq 8\delta_y) \\ 0.172 & (8\delta_y \leq \delta) \end{cases}$$

すなわち、初期値を  $\zeta=1$  として、以降、せん断耐力を  $\mu$  の増加とともに、低下させるものである。

## (2) 鉄道構造物への適用

鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物(平成16年4月)<sup>9)</sup>(以下H16標準)において、棒部材の設計せん断耐力  $V_{yd}$  は式(3)の通り定義されている。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad \dots (3)$$

$V_{cd}$  : せん断補強鋼材以外(コンクリート)が受持つせん断耐力

$V_{sd}$  : せん断補強鋼材が受持つせん断耐力

このうち、式(3)の  $V_{cd}$  にせん断劣化係数  $\zeta$  を乗じて曲げ変形の進行に伴うせん断耐力の低減を考慮する。

$$V_{yd} = \zeta V_{cd} + V_{sd} \quad \dots (4)$$

## (3) せん断破壊の判定

作用せん断力  $V_d$  に対し、せん断耐力  $V_{yd}$  を超過した時、その要素(又は部位)がせん断破壊したとする。

$$V_d > V_{yd} \quad \dots (5)$$

## 3. 耐震性評価

### (1) 対象構造物

解析対象構造物として表-1の3種類を設定した。各ケースの一般図と柱梁配筋図を図-3、図-4に示す。

表-1 解析対象構造物

|          | Case1                | Case2               | Case3               |
|----------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 適用標準     | 平成16年 <sup>9)</sup>  | 平成4年 <sup>10)</sup> | 平成4年 <sup>10)</sup> |
| 適用計算例出版年 | 平成17年 <sup>11)</sup> | 平成8年 <sup>12)</sup> | 平成8年 <sup>12)</sup> |
| 柱断面(W×h) | 850×850              | 600×650             | 600×650             |
| 柱軸方向鉄筋比  | 2.64%                | 3.29%               | 3.29%               |
| 柱の帯鉄筋量   | 4D16@125             | 2D13@100            | 2D13@200            |
| 柱の帯鉄筋比   | 1.18%                | 0.42%               | 0.21%               |
| 設計水平震度   | $K_{h0}=1.8$         | $K_{h0}=1.0$        | $K_{h0}=1.0$        |

・ **Case 1** : 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物 照査例 RCラーメン高架橋<sup>11)</sup>(以下H17計算例)の線路直角方向中間部C5ラーメンを用いた。

・ **Case 2** : 限界状態設計法による設計計算例 RCラーメン高架橋<sup>12)</sup>(以下H8計算例)の線路直角方向の中間部ラーメンを用いた。

・ **Case 3** : せん断劣化によるせん断破壊を想定し、Case2と同様の構造で柱帯鉄筋量が鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物(平成4年11月)<sup>10)</sup>(以下H4標準)の最小帯鉄筋量0.2%程度としたもの。

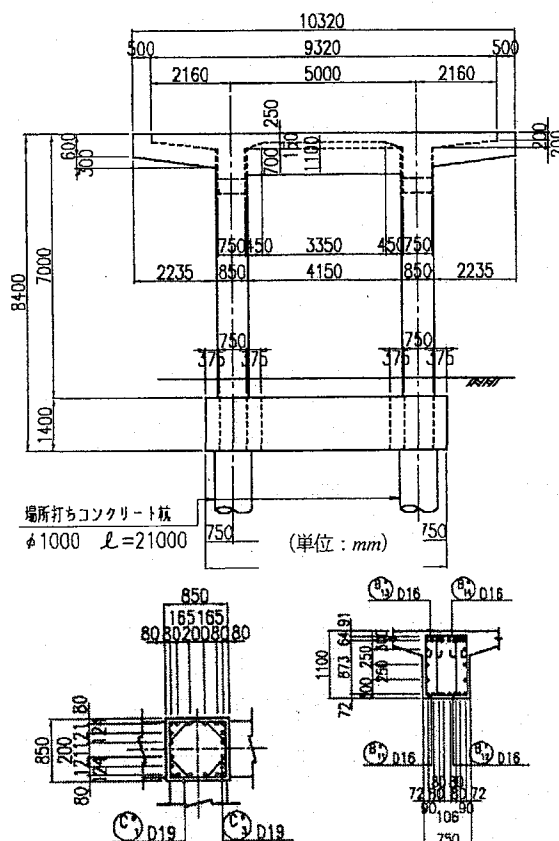


図-3 H17 計算例 一般図・柱梁配筋図

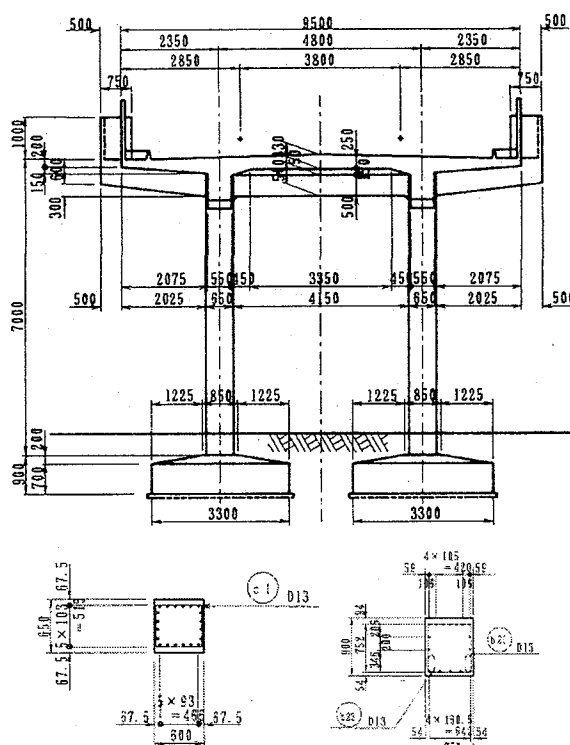


図-4 H8 計算例 一般図・柱梁配筋図

## (2) 構造物のモデル化

解析モデルは全て張出しラーメン構造である。また、各部材は材端バネのM- $\theta$ でモデル化した。

図-5に解析モデルを、表-2に材端バネにおける断面性能を示す。また、基礎については固定とした。

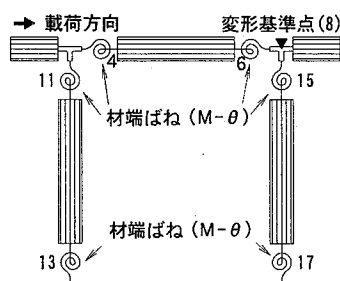


図-5 解析モデル (Case1, Case2, Case3共通)

表-2 材端バネ(塑性ヒンジ要素)における断面性能

(a) Case1

| 要素番号 | 部材幅<br>B(mm) | 部材高<br>D(mm) | せん断<br>スパン断<br>h/2(m) | 曲げ耐力<br>Mu(kN) | せん断力<br>Vu(kN) | せん断耐力<br>Vyd(kN) | 曲げ耐力<br>比せん断<br>Vyd/Vu |
|------|--------------|--------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|------------------------|
| 4    | 750          | 1100         | 2.075                 | 2797           | 1348           | 2561             | 1.90                   |
| 6    | 750          | 1100         | 2.075                 | 4888           | 2356           | 2561             | 1.09                   |
| 11   | 850          | 850          | 2.700                 | 2212           | 819            | 2216             | 2.70                   |
| 13   | 850          | 850          | 2.700                 | 2247           | 832            | 2216             | 2.66                   |
| 15   | 850          | 850          | 2.700                 | 2212           | 819            | 2216             | 2.70                   |
| 17   | 850          | 850          | 2.700                 | 2247           | 832            | 2216             | 2.66                   |

(b) Case2

| 要素番号 | 部材幅<br>B(mm) | 部材高<br>D(mm) | せん断<br>スパン断<br>h/2(m) | 曲げ耐力<br>Mu(kN) | せん断力<br>Vu(kN) | せん断耐力<br>Vyd(kN) | 曲げ耐力<br>比せん断<br>Vyd/Vu |
|------|--------------|--------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|------------------------|
| 4    | 750          | 900          | 2.075                 | 858            | 413            | 716              | 1.73                   |
| 6    | 750          | 900          | 2.075                 | 1756           | 846            | 716              | 0.85                   |
| 11   | 600          | 650          | 3.050                 | 852            | 279            | 777              | 2.78                   |
| 13   | 600          | 650          | 3.050                 | 1023           | 335            | 777              | 2.32                   |
| 15   | 600          | 650          | 3.050                 | 852            | 279            | 777              | 2.78                   |
| 17   | 600          | 650          | 3.050                 | 1023           | 335            | 777              | 2.32                   |

(c) Case3

| 要素番号 | 部材幅<br>B(mm) | 部材高<br>D(mm) | せん断<br>スパン断<br>h/2(m) | 曲げ耐力<br>Mu(kN) | せん断力<br>Vu(kN) | せん断耐力<br>Vyd(kN) | 曲げ耐力<br>比せん断<br>Vyd/Vu |
|------|--------------|--------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|------------------------|
| 4    | 750          | 900          | 2.075                 | 858            | 413            | 716              | 1.73                   |
| 6    | 750          | 900          | 2.075                 | 1756           | 846            | 716              | 0.85                   |
| 11   | 600          | 650          | 3.050                 | 852            | 279            | 576              | 2.06                   |
| 13   | 600          | 650          | 3.050                 | 1023           | 335            | 576              | 1.72                   |
| 15   | 600          | 650          | 3.050                 | 852            | 279            | 576              | 2.06                   |
| 17   | 600          | 650          | 3.050                 | 1023           | 335            | 576              | 1.72                   |

## (3) Priestleyの方法の柱部材への適用

ラーメン構造の柱にPriestleyらの方法を適用するにあたり、柱の変曲点を考慮し、系全体の変位量を柱の上下の部材角で比例配分したものを各材端バネ部の変位量とした。

## 4. 耐震性能解析結果

解析は静的非線形解析プログラムを用いたプッシュオーバー解析とした。損傷レベルの決定および終局判定については鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>13)</sup> (以下耐震標準)により、柱は損傷レベル4、梁は損傷レベル3を終局としたが、損傷イベントおよび復旧費用算定のため、変形基準点の水平変位量 $\Delta=400\text{mm}$ までプッシュオーバー解析を行った。

本解析では列車荷重は無視した。

### (1) 解析結果

表-3にプッシュオーバー解析による損傷レベル別到達水平震度を示す。

Case1では柱4箇所(要素13, 17, 11, 15)の順に損傷レベル2、柱基部左(要素13)、同右(同17)、柱頂部左(同11)、同右(同15)の順に損傷レベル3、右柱基部、同頂部、左柱基部、同頂部の順に損傷レベル4に到達する。

Case2では塑性ヒンジが柱基部と梁に2箇所ずつ形成され、柱基部左(要素13)から右(同17)、梁左端(同4)から右(同6)の順に損傷レベル2に、梁右端から柱基部左、柱基部右、梁左端の順に損傷レベル3に、梁右端から柱基部右、柱基部左、梁左端の順に損傷レベル4に到達する。

Case3ではCase2同様、塑性ヒンジが柱基部と梁に2箇所ずつ形成され、柱基部左(要素13)から右(同17)、梁左端(同4)から右(同6)の順に損傷レベル2に到達するが、柱基部右から左、柱頂部左から右の順に損傷レベル3に、梁右端から柱基部右、柱基部左、梁左端の順に損傷レベル4に到達する。

表-3 各モデルの損傷レベル別到達水平震度

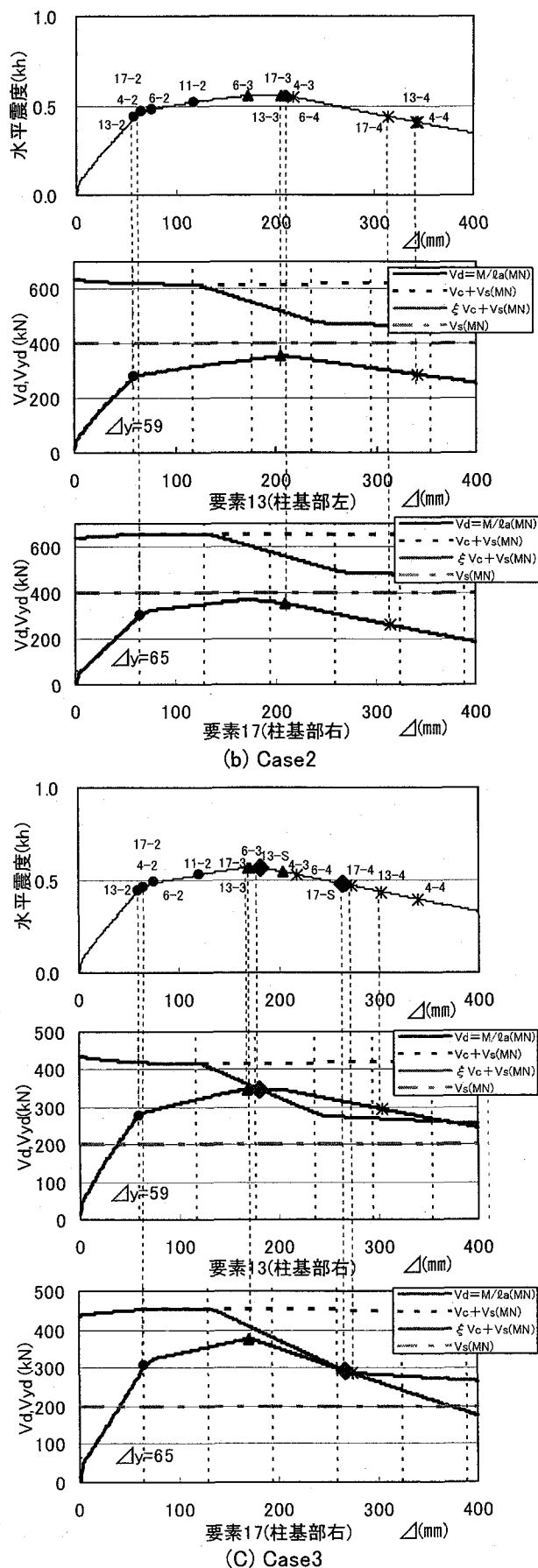
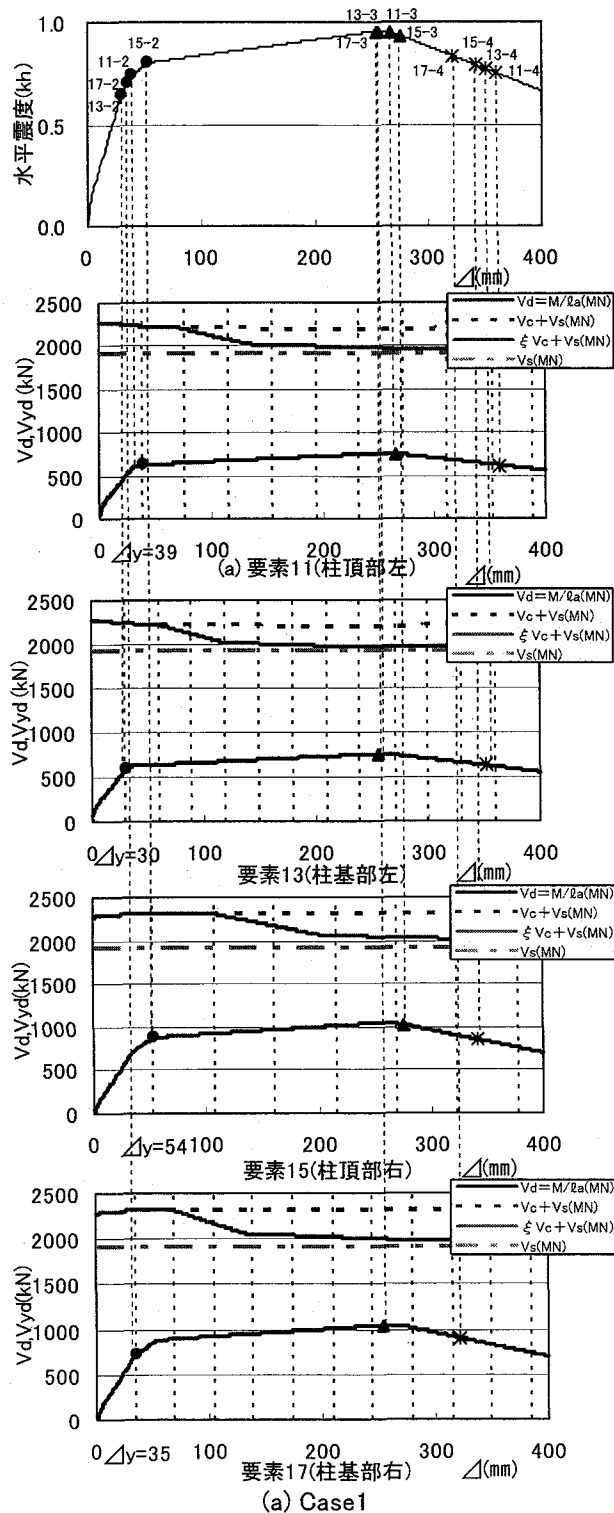
| 損傷レベル | Case1                                      | Case2           | Case3           |
|-------|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 2     | kh <sub>0</sub> ③0.644<br>$\Delta_y$ 30mm  | ③0.434<br>59mm  | ③0.434<br>59mm  |
| 3     | kh <sub>0</sub> ⑦0.954<br>$\Delta_u$ 254mm | ⑥0.554<br>173mm | ⑦0.565<br>169mm |
|       | $\mu_d$ 8.4                                | 2.9             | 2.8             |
| 4     | kh <sub>0</sub> ⑩0.644<br>$\Delta_n$ 321mm | —               | —               |
|       | $\mu_d$ 10.7                               | —               | —               |

注) ①数字は最初にその損傷レベルに到達した要素番号  
太字は構造物系の終局到達時を表す

図-6に各ケースの水平震度-水平変形関係を示すとともに、主要部位のせん断力とせん断耐力の履歴を示した。これにより、各部位のせん断破壊の判定(式(4)の図化)を行うことができる。

Case1, Case2では曲げ降伏後のせん断劣化を考慮してもせん断力を下回らないため、せん断破壊は発生しない。

一方、Case3では柱基部の塑性ヒンジ要素13において $\Delta=181\text{mm}$ でせん断破壊となる。Case3は柱の帯鉄筋量の下限値0.2%を若干上回る0.21%である。H4標準の柱の構造細目として示されている最小帯鉄筋量0.2%を満足してもせん断破壊が生じるケースがあることが明らかになった。



凡例 ●-損傷レベル2到達点, ▲-損傷レベル3到達点  
※-損傷レベル4到達点, ◆-せん断破壊発生点

図-6 震度-変形関係とせん断破壊の判定

#### 4. 地震損傷イベント解析と復旧費用の算定

##### (1) エネルギー一定則による等価水平震度の算出

提案する地震リスク解析では、得られた荷重変位関係より図-7 に示すエネルギー一定則を仮定して、式(6)より等価水平震度を求める。

なお、構造物全体の荷重変位関係は、降伏剛性と最大耐力に基づくバイリニアで近似した。

図-8に各ケースの各損傷イベントに対する等価水平震度の算出結果を示す。

$$C_e = C_y \sqrt{2(\Delta_r / \Delta_y) - 1} \quad \cdots (6)$$

ここに、 $C_e$ ：弾性応答震度，  $C_y$ ：降伏震度，  
 $\Delta_y$ ：降伏変位，  $\Delta_r$ ：応答変位

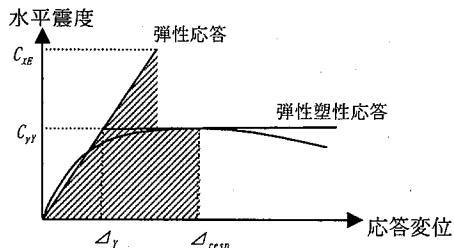


図-7 エネルギー一定則<sup>11)</sup>

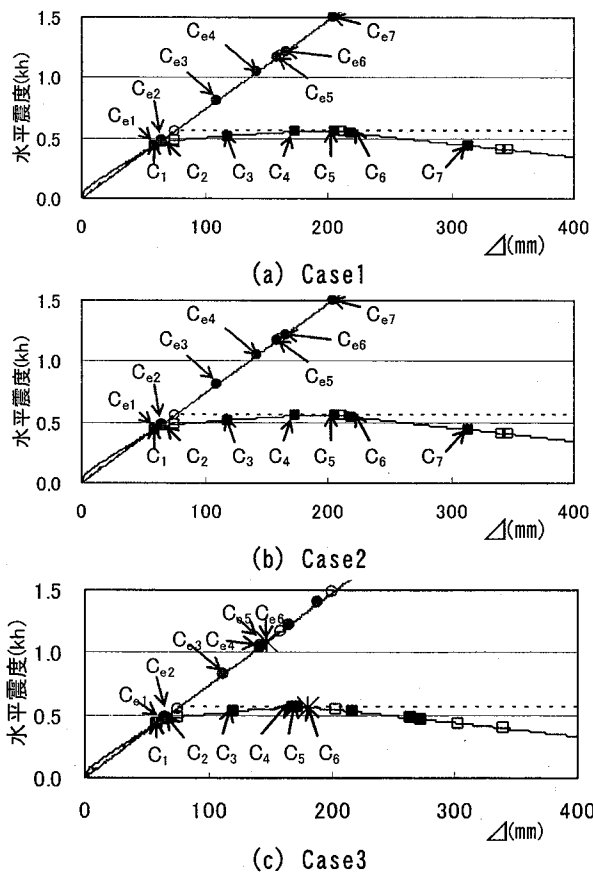


図-8 エネルギー一定則適用結果

##### (2) 損傷イベント解析および復旧費用の算定

さらに各ケースに対して地震損傷イベント解析<sup>5)</sup>および復旧費用の算定<sup>5)14)</sup>を行った。地震動に対する構造物の応答特性から、プッシュオーバー解析により、ある水平震度においてある塑性ヒンジ要素に損傷イベントが発生した場合、その水平震度において対称の位置にある塑性ヒンジ要素にも同様の損傷イベントが発生したものとした。

また柱部材にせん断破壊が生じた場合、以後の損傷イベントは発生しないものとし、せん断破壊時の復旧費用（損失額）は、該当する塑性ヒンジ要素の曲げによる損傷レベル4到達時と同じ復旧費用とした。

ここに示す復旧費用は1径間あたりの額である。

損傷イベントと復旧費用算定結果を表-4に、等価水平震度と復旧費用の関係を図-9に示す。

表-4 損傷イベントと復旧費用

(a) Case1 (1径間長=10.0m)

| イ<br>ベ<br>ン<br>ト | 柱<br>下<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 支<br>保<br>工 | 復<br>旧<br>費<br>用<br>(千円) | Δ <sub>R</sub><br>(mm) | 震<br>度<br>等<br>価<br>水<br>平<br>(khe) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|                  | ○                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.000                    | 0                      | 0                                   |
| C <sub>1</sub>   | ●                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.644                    | 30                     | 125                                 |
| C <sub>2</sub>   | ●                | ●                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.837                    | 39                     | 483                                 |
| C <sub>3</sub>   | ▲                | ▲                | ○                | ○                | ○                | —           | 3.081                    | 254                    | 636                                 |
| C <sub>4</sub>   | ▲                | ▲                | ▲                | ○                | ○                | —           | 3.160                    | 266                    | 789                                 |
| C <sub>5</sub>   | ■                | ■                | ■                | ○                | ○                | ★           | 3.498                    | 321                    | 14,021                              |
| C <sub>6</sub>   | ■                | ■                | ■                | ○                | ○                | ★           | 3.614                    | 341                    | 14,224                              |

(b) Case2 (1径間長=8.0m)

| イ<br>ベ<br>ン<br>ト | 柱<br>下<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 支<br>保<br>工 | 復<br>旧<br>費<br>用<br>(千円) | Δ <sub>R</sub><br>(mm) | 震<br>度<br>等<br>価<br>水<br>平<br>(khe) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|                  | ○                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.000                    | 0                      | 0                                   |
| C <sub>1</sub>   | ●                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.434                    | 59                     | 79                                  |
| C <sub>2</sub>   | ●                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.552                    | 75                     | 244                                 |
| C <sub>3</sub>   | ●                | ●                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.809                    | 118                    | 541                                 |
| C <sub>4</sub>   | ●                | ●                | ●                | ○                | ○                | —           | 1.050                    | 173                    | 5,386                               |
| C <sub>5</sub>   | ▲                | ▲                | ○                | ○                | ○                | —           | 1.171                    | 206                    | 5,454                               |
| C <sub>6</sub>   | ▲                | ▲                | ●                | ○                | ○                | ★           | 1.216                    | 219                    | 17,015                              |
| C <sub>7</sub>   | ■                | ■                | ■                | ○                | ○                | ★           | 1.501                    | 314                    | 17,217                              |

(c) Case3 (1径間長=8.0m)

| イ<br>ベ<br>ン<br>ト | 柱<br>下<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 柱<br>上<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 横<br>梁<br>端<br>部 | 支<br>保<br>工 | 復<br>旧<br>費<br>用<br>(千円) | Δ <sub>R</sub><br>(mm) | 震<br>度<br>等<br>価<br>水<br>平<br>(khe) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|                  | ○                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.000                    | 0                      | 0                                   |
| C <sub>1</sub>   | ●                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.434                    | 59                     | 79                                  |
| C <sub>2</sub>   | ●                | ○                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.478                    | 65                     | 244                                 |
| C <sub>3</sub>   | ●                | ●                | ○                | ○                | ○                | —           | 0.824                    | 120                    | 541                                 |
| C <sub>4</sub>   | ▲                | ▲                | ○                | ○                | ○                | —           | 1.042                    | 169                    | 609                                 |
| C <sub>5</sub>   | ▲                | ▲                | ●                | ○                | ○                | —           | 1.054                    | 172                    | 5,454                               |
| C <sub>6</sub>   | ■                | ■                | ■                | ○                | ○                | ★           | 1.085                    | 181                    | 17,191                              |

凡例 ○：損傷レベル1，●：損傷レベル2，  
 ▲：損傷レベル3，■：損傷レベル4，  
 ×：せん断破壊，★：仮受支保工必要

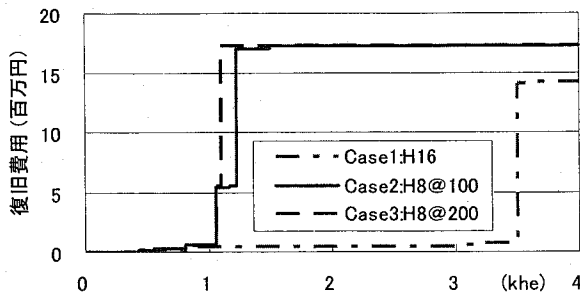


図-9 等価水平震度と復旧費用の関係図

1箇所の塑性ヒンジ要素の損傷レベルが4に達すると復旧工事の際に仮受支保工が必要となるので、損傷レベル4到達後の復旧費用は高額になる。

Case1 では等価水平震度  $khe$  が概ね 3.5 以下では各部材の塑性ヒンジ要素における損傷レベルも 3 に到達せずせん断破壊も発生しない。よって  $khe=1.0$  から  $Khe=3.5$  程度の水平地震力が作用しても 1 径間あたりの復旧費用は数 10 万円程度である。

Case2 では等価水平震度  $khe=1.0$  を超過すると損傷レベル 3 に到達し、 $khe=1.2$  程度で損傷レベル 4 に到達する。そのため、概ね  $khe=1.2$  以上の水平地震力が作用すると復旧費用が高額になる。

Case3 ではせん断劣化の影響により  $khe=1.0$  程度でせん断破壊する。そのため、概ね  $Khe=1.0$  以上の水平地震力が作用すると復旧費用が Case2 よりも高額になる。

したがって、Case2 と Case3 を比較するとき、曲げ破壊とせん断破壊の復旧費用を同額とした場合においても、せん断劣化によって生じるせん断破壊によって構造物の耐震性能や復旧費用に大きな影響を及ぼすと考えられる。

また、本論では、せん断破壊による復旧費用を曲げ破壊による復旧費用と同額としたが、実際のせん断破壊による復旧費用は一般的に曲げ破壊の場合より高額になる。

よって、今後実情に基づいたせん断破壊による復旧費用を算定して評価する必要がある。

## 5. 結論

今回の解析の結果、以下の結論を得た。

- (1) 鉄道構造物のラーメン高架橋を対象とした、曲げ降伏後の変形に伴うせん断耐力の低減を考慮したせん断破壊の判定方法を構築した。
- (2) Priestleyの方法に基づいて曲げ降伏後のせん断耐力の低減を考慮した場合、H4標準に規定された柱部材の最小帯鉄筋比0.2%を満足した柱部材でもせん断破壊が生じる可能性があり、せん断

劣化は構造物の耐震性能や復旧費用に大きな影響を及ぼす可能性がある。

- (3) 実際のせん断破壊による復旧費用は一般的に曲げ破壊の場合より高額になると考えられる。従って、実情に基づいたせん断破壊による復旧費用のより適切な評価が今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 吉川弘道：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計講座「第5講第4章 次世代の耐震設計法-地震リスク解析とリスクマネージメント-」, CTC Webセミナー, civil-eye.com, p179-205, <http://www.civil-eye.com/webseminar/yoshikawa/>.
- 2) 遠藤昭彦, 吉川弘道：鉄筋コンクリート橋脚に対する地震リスク評価手法の適用, 構造工学論文集, Vol. 49A, p435-446, 2003.
- 3) 大滝健, 服部尚道, 前田欣昌, 野口聡, 吉川弘道：鉄道ラーメン高架橋の地震リスク解析と損傷期待値の算定, 東急建設技術研究所所報32, 2006.
- 4) 服部尚道, 大滝健, 前田欣昌, 野口聡, 吉川弘道：鉄道構造物の地震損傷期待値と地震リスクカーブの算定, 日本地震工学シンポジウム, Vol12, 2006.
- 5) 前田欣昌, 野口聡, 大滝健, 服部尚道, 吉川弘道：RCラーメン高架橋の地震損傷イベント解析と地震損失評価, 構造工学論文集, Vol. 53A, 2007. (投稿中)
- 6) Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M., : "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 7) 吉川弘道, 青戸拓起, 高丸弘美, 大江亮二：鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答解析とせん断劣化を考慮した動的破壊解析, 応用力学論文集, Vol. 3, p645-656, 2000. 8.
- 8) 白子将則, 吉川弘道：RC柱のせん断劣化と変形性能評価に関する研究, 土木学会論文集No. 802/V-69, p1-14, 2005. 11.
- 9) 財団法人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(平成16年4月), 2004.
- 10) 財団法人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(平成4年11月), 1992.
- 11) 財団法人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 照査例 RCラーメン高架橋, 2005.
- 12) 財団法人鉄道総合技術研究所：限界状態設計法による設計計算例 RCラーメン高架橋, 1996.
- 13) 財団法人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(平成11年10月), 1999.
- 14) 玉井真一, 笹谷輝勝, 渡辺忠朋：コンクリート構造物の耐震性能とライフサイクルコスト, コンクリート技術シリーズ コンクリート構造物の耐震性能照査, 社団法人土木学会, p179-202, 2000. 4.