

## 野付牛高架橋の免震設計と地震時保有水平耐力の照査

内林美樹<sup>1</sup>・横山佐人志<sup>2</sup>・大島俊之<sup>3</sup>・久保和子<sup>4</sup>・川原壮一郎<sup>5</sup>・村田捷次<sup>6</sup>

<sup>1</sup> (株) 中神土木設計事務所 (〒090 北海道北見市寿町3丁目5-4)

<sup>2</sup> (株) 中神土木設計事務所 (〒090 北海道北見市寿町3丁目5-4)

<sup>3</sup> フェロー会員 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090 北海道北見市公園町165番地)

<sup>4</sup> 学生員 北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 (〒090 北海道北見市公園町165番地)

<sup>5</sup> オイレス工業(株) (〒105 東京都港区芝大門1丁目3-2 芝細田ビル)

<sup>6</sup> 北見市役所 (〒090 北海道北見市北5条東5丁目1番地)

### 1. まえがき

本橋は、北見市の国道39号線と並行し、市街地から東西へ抜ける幹線道路である。橋梁設置箇所は15%程度の急勾配をもつ沢地で、橋下には市道もあり、周辺が公園であることから、当橋梁の耐震性が重要となっている。設計の流れとしては、平成5年に予備設計を行っているが、その後、実施設計中に道路橋示方書<sup>1)</sup>の改定がなされたため、新示方書に準じて設計を行うこととなる。橋梁形式は基本的には変更せず、免震支承を用いて耐震設計を行うこととした。なお、北見市は北海道でも有数の寒冷地であり、気温が-30℃まで下がる日が数日あ

る。免震支承を用いる場合、環境温度の低下により免震装置の性能の変化がどの程度影響するかを検討する必要がある。ここでは、北見工業大学で行われた実験結果をもとに検討した。

### 2. 野付牛高架橋の設計概要

#### (1) 橋梁形式

- ・橋長 120m 曲線橋 R=150m
- ・支間長 33.8m+50.0m+33.8m
- ・上部工 3径間連続ポステン方式2室箱桁橋
- ・下部工 橋台(逆T式・箱式)、橋脚(壁式2基)
- ・基礎工 鋼管杭中掘り工法セメントパネ噴出攪拌方式

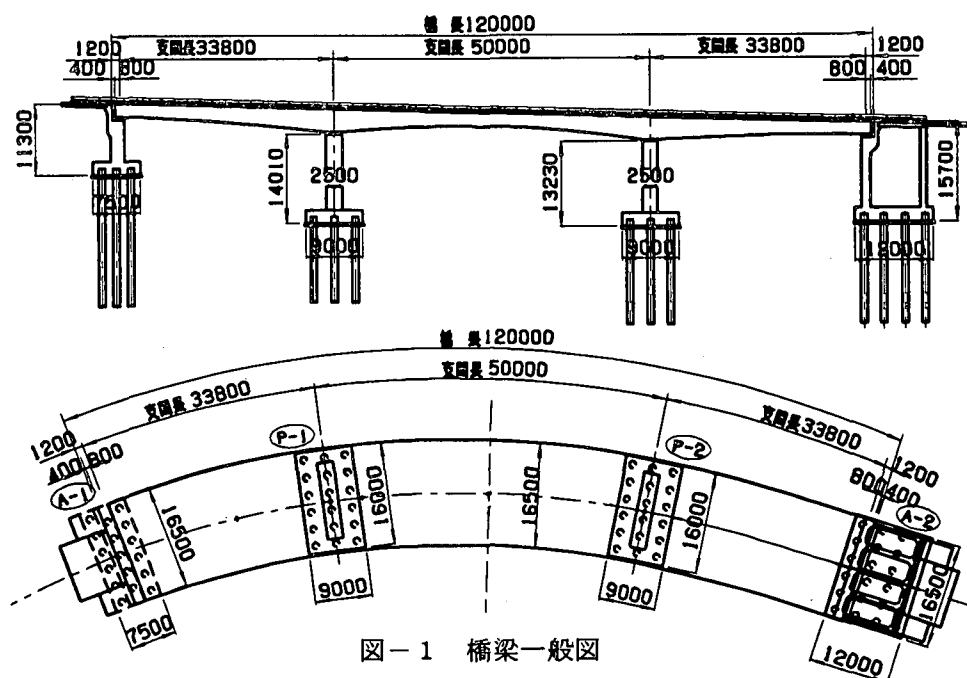


図-1 橋梁一般図

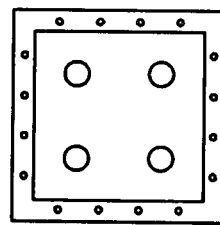
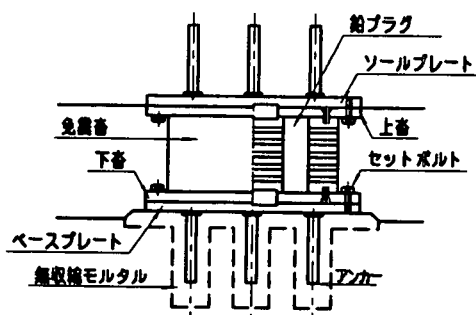
## (2) 免震設計

本橋においては、下部工の剛性が高く、支承条件を全固定とみなした時の地震時保有水平耐力法に用いる固有周期が0.514秒と短く、また、3径間連続であることから免震設計を行い、長周期化と減衰性能の向上により、慣性力の低減を図っている。本橋の方針としては、曲線橋であるため橋軸方向、橋軸

直角方向全て免震化とし、橋軸方向としては曲線方向に橋軸中心線と見なし設計を行う。新示方書 耐震設計編および 道路橋の免震設計法マニュアル(案)<sup>2)</sup>に従い選定した鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の形状およびその特性値と耐震設計結果をそれぞれ図-2、表-1に示す。

表-1 LRBの特性値と耐震設計結果

|             |                                                 | 震 度 法   |        |        |         | 地震時保有水平耐力法タイプⅠ |        |        |         | 地震時保有水平耐力法タイプⅡ |        |        |         | 備 考                    |
|-------------|-------------------------------------------------|---------|--------|--------|---------|----------------|--------|--------|---------|----------------|--------|--------|---------|------------------------|
|             |                                                 | A-1     | P-1    | P-2    | A-2     | A-1            | P-1    | P-2    | A-2     | A-1            | P-1    | P-2    | A-2     |                        |
| 橋 軸 方 向     | 上部構造変位 $\delta$ (cm)                            | 4.04    |        |        |         | 11.6           |        |        |         | 17.6           |        |        |         |                        |
|             | 橋の固有周期 $T$ (s)                                  | 0.881   |        |        |         | 1.17           |        |        |         | 1.33           |        |        |         |                        |
|             | 橋の減衰定数 $h$ (%)                                  | 26.6    |        |        |         | 24.1           |        |        |         | 23.1           |        |        |         |                        |
|             | 設計水平震度 $k_{hcm}$                                | 0.21    |        |        |         | 0.72           |        |        |         | 1.24           |        |        |         |                        |
|             | 等価水平震度 $k_{hem}$                                | -       |        |        |         | 0.34           |        |        |         | 0.40           |        |        |         |                        |
|             | 下部構造の等価剛性 (tf/m)                                | 209601  | 63589  | 77780  | 456312  | 209601         | 20560  | 25110  | 456312  | 209601         | 20560  | 25110  | 456312  |                        |
|             | 橋脚の減衰定数 (%)                                     | 10      | 20     | 20     | 10      | 10             | 20     | 20     | 10      | 10             | 20     | 20     | 10      |                        |
|             | 基礎構造の剛性 (tf/m)                                  | 169086  | 585700 | 310100 | 651800  | 169086         | 585700 | 310100 | 651800  | 169086         | 585700 | 310100 | 651800  |                        |
|             | 基礎の減衰定数 (%)                                     | 30      | 30     | 30     | 30      | 30             | 30     | 30     | 30      | 30             | 30     | 30     | 30      |                        |
|             | 設計変位 $u_B$ (cm)                                 | 4.0     | 3.4    | 3.5    | 4.0     | 9.2            | 8.9    | 8.8    | 9.3     | 17.4           | 16.9   | 16.8   | 17.4    |                        |
|             | 有効設計変位 $u_{Be}$ (cm)                            | 2.8     | 2.4    | 2.4    | 2.8     | 6.4            | 6.2    | 6.2    | 6.5     | 12.2           | 11.8   | 11.8   | 12.2    |                        |
|             | 免震支承の等価剛性 $3K_B$ (tf/m)                         | 2304    | 12401  | 12401  | 2304    | 1867           | 7527   | 7558   | 1855    | 1174           | 5084   | 5093   | 1170    |                        |
|             | 等価減衰定数 $h_B$                                    | 27.3    | 27.3   | 27.3   | 27.3    | 25.8           | 25.1   | 25.2   | 25.8    | 24.2           | 22.7   | 22.7   | 24.1    |                        |
|             | 鉛直ひずみ $\gamma_o$ (%)                            | 48.7    | 62.8   | 61.7   | 47.4    | 49.2           | 63.1   | 62.0   | 47.8    | 49.8           | 63.5   | 62.4   | 48.5    |                        |
|             | せん断ひずみ $\gamma_s$ (%)                           |         |        |        |         |                |        |        |         |                |        |        |         | <150(震度法)<br><250(保耐法) |
|             | 局部せん断ひずみ $\gamma_r (= \gamma_o + \gamma_s)$ (%) |         |        |        |         |                |        |        |         |                |        |        |         | <278(震度法)<br><417(保耐法) |
|             | 慣性力の分担率                                         | 0.089   | 0.404  | 0.417  | 0.090   | 0.106          | 0.390  | 0.396  | 0.108   | 0.103          | 0.394  | 0.400  | 0.104   |                        |
| 橋 軸 直 角 方 向 | 上部構造変位 $\delta$ (cm)                            | 3.6     |        |        |         | 9.3            |        |        |         | 17.5           |        |        |         |                        |
|             | 橋の固有周期 $T$ (s)                                  | 0.83    |        |        |         | 1.05           |        |        |         | 1.28           |        |        |         |                        |
|             | 橋の減衰定数 $h$ (%)                                  | 27.2    |        |        |         | 25.1           |        |        |         | 23.0           |        |        |         |                        |
|             | 設計水平震度 $k_{hcm}$                                | 0.21    |        |        |         | 0.72           |        |        |         | 1.42           |        |        |         |                        |
|             | 等価水平震度 $k_{hem}$                                | -       |        |        |         | 0.34           |        |        |         | 0.43           |        |        |         |                        |
|             | 下部構造の等価剛性 (tf/m)                                | 7065106 | 667241 | 778159 | 5945748 | 7065106        | 182900 | 212900 | 5945748 | 7065106        | 182900 | 212900 | 5945748 |                        |
|             | 橋脚の減衰定数 (%)                                     | 10      | 20     | 20     | 10      | 10             | 20     | 20     | 10      | 10             | 20     | 20     | 10      |                        |
|             | 基礎構造の剛性 (tf/m)                                  | 169086  | 585700 | 310100 | 651800  | 169086         | 585700 | 310100 | 651800  | 169086         | 585700 | 310100 | 651800  |                        |
|             | 基礎の減衰定数 (%)                                     | 30      | 30     | 30     | 30      | 30             | 30     | 30     | 30      | 30             | 30     | 30     | 30      |                        |
|             | 設計変位 $u_B$ (cm)                                 | 3.6     | 3.5    | 3.5    | 3.6     | 9.2            | 8.9    | 8.8    | 9.3     | 17.4           | 16.9   | 16.8   | 17.4    |                        |
|             | 有効設計変位 $u_{Be}$ (cm)                            | 2.5     | 2.5    | 2.5    | 2.5     | 6.4            | 6.2    | 6.2    | 6.5     | 12.2           | 11.8   | 11.8   | 12.2    |                        |
|             | 免震支承の等価剛性 $3K_B$ (tf/m)                         | 2304    | 12401  | 12401  | 2304    | 1867           | 7527   | 7558   | 1855    | 1174           | 5084   | 5093   | 1170    |                        |
|             | 等価減衰定数 $h_B$                                    | 27.3    | 27.3   | 27.3   | 27.3    | 25.8           | 25.1   | 25.2   | 25.8    | 24.2           | 22.7   | 22.7   | 24.1    |                        |
|             | 鉛直ひずみ $\gamma_o$ (%)                            | 48.7    | 62.8   | 61.7   | 47.4    | 49.2           | 63.1   | 62.0   | 47.8    | 49.8           | 63.5   | 62.4   | 48.5    |                        |
|             | せん断ひずみ $\gamma_s$ (%)                           |         |        |        |         |                |        |        |         |                |        |        |         | <150(震度法)<br><250(保耐法) |
|             | 局部せん断ひずみ $\gamma_r (= \gamma_o + \gamma_s)$ (%) |         |        |        |         |                |        |        |         |                |        |        |         | <278(震度法)<br><417(保耐法) |
|             | 慣性力の分担率                                         | 0.079   | 0.420  | 0.421  | 0.079   | 0.103          | 0.397  | 0.397  | 0.103   | 0.096          | 0.404  | 0.403  | 0.096   |                        |



|      | A 1, A 2  | P 1, P 2    |
|------|-----------|-------------|
| 平面形状 | 70cm×70cm | 130cm×130cm |
| 有効形状 | 68cm×68cm | 128cm×128cm |
| ゴム厚  | 1.5cm×12層 | 3.0cm×4層    |
| 鉛プラグ | φ10m×4本   | φ19m×4本     |
| 支承数  | 3基        | 3基          |

図-2 LRBの形状と一般図

また、環境温度の低下に伴って免震装置の免震効果がどのように変化していくのかを実験した『低温条件における免震装置の機能確認実験』<sup>3)</sup>の結果をもとに等価剛性および等価減衰定数の振幅依存性などを総合的に判断して、低温時（－30℃）の等価剛性増加比率 $\alpha = 1.5$ ，等価減衰定数の減少比率 $\beta = 0.9$ として設計上でも検討していく。

### 3. 動的応答解析

#### (1) 設計条件

解析は、DYNA2Eを用いて行った。解析モデルは、図-3に示す様に橋軸方向の2次元フレーム解析とした。動的解析を行う上で固有値解析をハウスホルダー法，直接積分の方法としてNewmarkの $\beta$ 法を用いた。減衰は道示V耐震設計編に従い、ひずみエネルギー比例減衰とした。また、上部工，橋台，橋脚フーチング部を線形要素とし、橋脚躯体の非線形性を武田モデルの非線形要素とした。免震支承は、バイリニアモデルの非線形形とし、地盤ばねは杭基礎を考慮した水平ばね、回転ばね、水平回転の連成ばねを設置した。入力地震波は、「道路橋の

耐震設計に関する資料」<sup>4)</sup>の2種地盤用のTYPEⅡの振幅調整波3波を用いた。

#### (2) 解析結果および照査

以上の様に解析して得られた、応答値を表-2に示す。また、静的解析における橋脚の保有水平耐力照査（表-3）と、動的解析による照査（表-4）を以下に示す。

表-2 動的解析による応答値

|   |                   | T2-II-1 | T2-II-2 | T2-II-3 | 平均値   |
|---|-------------------|---------|---------|---------|-------|
| A | 桁の変位 (m)          | 0.332   | 0.336   | 0.361   | 0.343 |
|   | 橋脚天端の変位 (m)       | 0.012   | 0.011   | 0.012   | 0.012 |
|   | 1 免震支承の変位 (m)     | 0.320   | 0.325   | 0.349   | 0.331 |
|   | 橋脚基部の曲げモーメント(t/m) | —       | —       | —       | —     |
| P | 桁の変位 (m)          | 0.331   | 0.336   | 0.361   | 0.343 |
|   | 橋脚天端の変位 (m)       | 0.097   | 0.094   | 0.120   | 0.104 |
|   | 1 免震支承の変位 (m)     | 0.234   | 0.242   | 0.241   | 0.239 |
|   | 橋脚基部の曲げモーメント(t/m) | 12683   | 12819   | 13565   | 13023 |
| P | 桁の変位 (m)          | 0.331   | 0.336   | 0.361   | 0.343 |
|   | 橋脚天端の変位 (m)       | 0.080   | 0.079   | 0.098   | 0.086 |
|   | 2 免震支承の変位 (m)     | 0.251   | 0.257   | 0.263   | 0.257 |
|   | 橋脚基部の曲げモーメント(t/m) | 11804   | 11964   | 13559   | 12442 |
| A | 桁の変位 (m)          | 0.331   | 0.336   | 0.361   | 0.343 |
|   | 橋脚天端の変位 (m)       | 0.015   | 0.094   | 0.120   | 0.076 |
|   | 2 免震支承の変位 (m)     | 0.316   | 0.242   | 0.241   | 0.266 |
|   | 橋脚基部の曲げモーメント(t/m) | —       | —       | —       | —     |

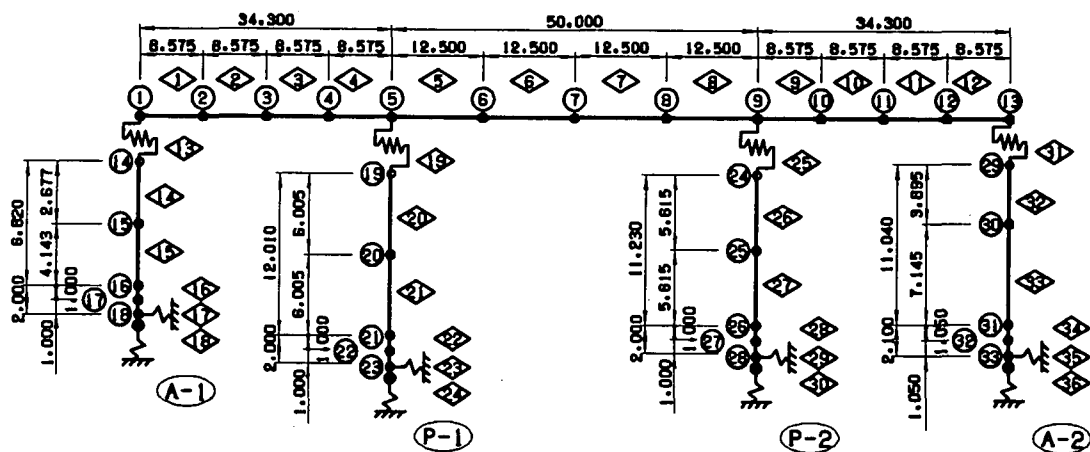


図-3 解析骨組モデル図

表-3 静的解析による保有耐力の照査

|                   |                    | P-1      |          |          |          | P-2      |          |          |          |
|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                   |                    | タイプⅠ     | タイプⅡ     | タイプⅠ     | タイプⅡ     | タイプⅠ     | タイプⅡ     | タイプⅠ     | タイプⅡ     |
| 破壊形態              |                    | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       | 曲げ       |
| 地震時保有水平耐力         | $P_a$ (tf)         | 908.811  | 908.789  | 3385.688 | 3386.835 | 967.208  | 967.249  | 3548.081 | 3549.255 |
| (等価水平震度) × (等価重量) | (tf)               | 763.858  | 777.414  | 842.298  | 1015.934 | 767.392  | 780.934  | 833.408  | 1005.450 |
| 終局水平耐力            | (tf)               | 908.811  | 908.789  | 3385.688 | 3386.835 | 967.208  | 967.249  | 3548.081 | 3549.255 |
| せん断耐力             | (tf)               | 2233.231 | 2391.978 | 4451.366 | 4554.557 | 2233.231 | 2391.978 | 4451.366 | 4554.557 |
| 等価水平震度            | $K_h c m e$        | 0.34     | 0.34     | 0.35     | 0.42     | 0.34     | 0.34     | 0.35     | 0.42     |
| 許容塑性率             | $\mu_a$            | 2.051    | 5.059    | 1.546    | 3.337    | 2.135    | 5.407    | 1.534    | 3.285    |
| 設計水平震度            | $K_h c m$          | 0.50     | 0.87     | 0.50     | 0.99     | 0.50     | 0.87     | 0.50     | 0.99     |
| 等価固有周期            | $T$ (s)            | 1.26     | 1.37     | 1.12     | 1.24     | 1.26     | 1.37     | 1.12     | 1.24     |
| 等価重量              | $W$ (tf)           | 2246.641 | 2288.512 | 2406.565 | 2418.890 | 2257.036 | 2296.866 | 2381.166 | 2393.929 |
| 許容残留変位            | $\delta_{ra}$ (cm) | 12.010   | 12.010   | 15.610   | 15.610   | 11.230   | 11.230   | 14.830   | 14.830   |
| 残留変位              | $\delta_r$ (cm)    | 0.70     | 5.03     | 0.00     | 0.00     | 0.42     | 3.78     | 0.00     | 0.00     |
| 応答塑性率             | $\mu_r$            | 1.26     | 2.90     | 0.56     | 0.75     | 1.18     | 2.63     | 0.56     | 0.72     |
| 降伏変位              | $\delta_y$ (cm)    | 4.42     | 4.42     | 1.85     | 1.85     | 3.85     | 3.85     | 1.67     | 1.67     |

表－４ 動的解析による保有耐力の照査

|             |                | A-1   | P-1    | P-2    | A-2   |
|-------------|----------------|-------|--------|--------|-------|
| 免震支承<br>の照査 | 応答変位の平均値 (m)   | 0.331 | 0.239  | 0.257  | 0.266 |
|             | せん断ひずみ         | 1.841 | 1.992  | 2.142  | 1.480 |
|             | 許容せん断ひずみ       | 2.5   | 2.5    | 2.5    | 2.5   |
| 橋脚<br>の照査   | 降伏変位 (m)       | -     | 0.044  | 0.039  | -     |
|             | 応答変位の平均値 (m)   | -     | 0.104  | 0.086  | -     |
|             | 応答塑性率          | -     | 2.345  | 2.225  | -     |
|             | 許容塑性率          | -     | 5.059  | 5.407  | -     |
|             | 応答慣性力の平均値 (tf) | -     | 1084.3 | 1108.0 | -     |
|             | 地震時保有水平耐力 (tf) | -     | 908.8  | 967.2  | -     |

表－４より、支承については表－１の静的解析の値と比べて数値は大きい、許容値は満足していることがわかる。橋脚については保有水平耐力を越えているが、柱の鉄筋をD29からD32にあげることで対処できる。

また、前述の免震支承の低温時（－３０℃）の特性の変化率 $\alpha$ 、 $\beta$ を用いて、低温時における等価剛性および、等価減衰定数を求め、常温時（＋２０℃）と低温時のときの動的解析を同様にを行い保有水平耐力照査などの結果を比較した。照査結果をそれぞれ表－５、表－６に示す。それぞれの照査結果をみると、表－５で、P－２橋脚の支承のせん断ひずみが許容値を越えているが、これは支承を線形モデルとして解析したためと思われる。常温時については、前述のように、非線形性を考慮して解析しているため、設計に影響はないものとして進める。常温時と低温時を比べると、低温時では、支承の変位は小さくなるが、逆に橋脚天端での変位が大きくなり橋脚の応答塑性率に影響することがわかった。表－６をみると、応答塑性率が常温時の約1.5倍程度増加しているが、許容値は満足している。

表－５ 動的解析による照査（常温時）

|             |                | A-1   | P-1    | P-2    | A-2   |
|-------------|----------------|-------|--------|--------|-------|
| 免震支承<br>の照査 | 応答変位の平均値 (m)   | 0.413 | 0.279  | 0.302  | 0.410 |
|             | せん断ひずみ         | 2.294 | 2.325  | 2.517  | 2.290 |
|             | 許容せん断ひずみ       | 2.5   | 2.5    | 2.5    | 2.5   |
| 橋脚<br>の照査   | 降伏変位 (m)       | -     | 0.044  | 0.039  | -     |
|             | 応答変位の平均値 (m)   | -     | 0.145  | 0.122  | -     |
|             | 応答塑性率          | -     | 3.288  | 3.177  | -     |
|             | 許容塑性率          | -     | 5.059  | 5.407  | -     |
|             | 応答慣性力の平均値 (tf) | -     | 1122.2 | 1199.6 | -     |
|             | 地震時保有水平耐力 (tf) | -     | 908.8  | 967.2  | -     |

表－６ 動的解析による照査（低温時）

|             |                | A-1   | P-1    | P-2    | A-2   |
|-------------|----------------|-------|--------|--------|-------|
| 免震支承<br>の照査 | 応答変位の平均値 (m)   | 0.374 | 0.173  | 0.188  | 0.330 |
|             | せん断ひずみ         | 2.078 | 1.439  | 1.569  | 1.831 |
|             | 許容せん断ひずみ       | 2.5   | 2.5    | 2.5    | 2.5   |
| 橋脚<br>の照査   | 降伏変位 (m)       | -     | 0.044  | 0.039  | -     |
|             | 応答変位の平均値 (m)   | -     | 0.216  | 0.200  | -     |
|             | 応答塑性率          | -     | 4.879  | 5.195  | -     |
|             | 許容塑性率          | -     | 5.059  | 5.407  | -     |
|             | 応答慣性力の平均値 (tf) | -     | 1139.1 | 1221.4 | -     |
|             | 地震時保有水平耐力 (tf) | -     | 908.8  | 967.2  | -     |

## ５．まとめ

今回、動的解析により保有水平耐力の照査を行ったが、支承の変位、橋脚に作用する水平力が静的解析によるものより大きかったことから、静的解析で想定していた地震力が小さかったのではないかとと思われる。また、免震支承の低温化による特性の変化が、橋脚に作用する水平力には大きな影響を及ぼさないが、橋脚の変位に影響することがわかった。本論文では、環境温度が－３０℃に低下する場合を含めた免震設計を実施したもので、低温時の動的解析は等価剛性の増加と等価減衰定数の減少により考慮した。照査の結果、設計条件を満足することが確かめられた。今後の課題としては、支承周辺の実際の温度条件の把握や橋軸直角方向の詳細な検討などを考えている。

謝辞：本設計の解析にあたりましては、開発工営社の青地知也さんの多大なるご協力を得ましたことをここに記します。また、本論文を進める上で、北見工業大学：三上助教授、山崎助手、オイレス工業：佐藤氏、その他多くの方々のご協力、助言がありましたことに謝意を表します。

## 参考文献

- （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ～Ⅴ，1996.12
- （財）土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル（案），1994.10
- 大島，三上，山崎，久保，池永，斉藤，本間，村田：免震支承の耐寒性の実験および免震橋梁設計，第13回寒地技術シンポジウム，1997.11
- （社）日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月
- 大島，三上，山崎，池永，松井，久保：低温条件における免震装置の機能確認実験，構造工学論文集Vol.44A，1998.3
- 林亜紀夫：橋梁への免震機構の適用性に関する研究，学位論文（東京都立大），1997.3
- 林，高橋，大島，目黒，本間，内林：土木学会北海道支部 論文報告集 第53号(A)，1997.2
- 小山田欣祐，佐藤昌志，谷本俊充，林亜紀夫：低温域における橋梁免震装置の実験的研究，構造工学論文集，pp.707-714，1996.3
- 久保，松井，大島，池永，高橋：鉛プラグ入り積層ゴム支承の低温環境における使用性，土木学会第52回年次学術講演会概要集，Ⅰ－B349，1997.9