

## 橋脚の塑性化によって生じる ゴム支承の回転変形に関する一考察

姫野 岳彦<sup>1</sup>・運上 茂樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 上席研究員（同上）

### 1. はじめに

道路橋における耐震設計では、レベル2地震動に対して耐震性能2あるいは3を確保する必要がある、このとき、橋脚の特性は塑性領域に入ること想定して設計を行うことが多い<sup>1)</sup>。このため、橋脚全体の変形を考えると、その基部に塑性化による回転変形が生じ、この影響はその天端にも同様な回転（傾き）を与えることになる。一方、上部構造はこのような変形に対して十分に剛であるとする、この両者間に設置されたゴム支承には、橋脚の回転による影響が変形要素として作用する可能性が考えられる。つまり、ゴム支承における地震時の変形状態は鉛直荷重による圧縮変形、水平荷重によるせん断変形、および橋脚の塑性化による回転変形の3つが同時に載荷されることになる。

しかしながら、現行のゴム支承の設計法を考えると、回転の影響は、活荷重載荷状態における上部構造のたわみ角を考慮しているのみであり、地震時には、鉛直および水平荷重に対しての照査は行うが、回転変形に関しては想定していない。また、実際にゴム支承を有するRC橋脚に対してハイブリッド地震応答実験を行った結果、橋脚の塑性化によってゴム支承に回転変形が生じることが確認されており、橋脚の回転角に応じた影響をゴム支承の設計に考慮すべきとの指摘もなされている<sup>2)</sup>。

そこで本文では、地震時におけるゴム支承の変形状態の評価を行うにあたり、局部せん断ひずみによる照査法を取り上げ、回転要素が加わることによって生じるゴム支承の破断性能への影響について検討を行った。

### 2. 検討条件

#### (1) 変形状態

図-1に示すように、上部構造に慣性力Hが作用することによって、ゴム支承および橋脚天端に水平変位 $\delta_s$ 、 $\delta_p$ が、橋脚基部には塑性回転角 $\theta_p$ が生じる。このとき、この $\theta_p$ の作用により支承部には $\theta_s$ の回転が付加されるため、ゴム支承は図-2に示すような変形状態になると考えられる。

なお、橋脚の回転による影響を考えた場合には、ゴム本体の変形以外にも、支点位置に高低差が生じることによって、支承が負担する分担重量が変動する可能性なども考えられるが、ここでは、ゴム本体の回転変形による違いにのみ着目することとした。

#### (2) 検討ケース

回転の影響を試算するにあたり、そのモデルとして、一般的な都市内高架橋を想定し、既往の設計例<sup>3)</sup>を参考に5径間連続2主箱桁橋におけるゴム支承形状を選定した。このときの緒元を表-1に示す。

また、支承部と橋脚の回転角については図-1から、

$$\theta_s = \theta_p = \frac{\delta_p}{h_p} \quad (1)$$

と考え、表-2に示すように橋脚高さ $h_p$ を10m～25m、橋脚天端での水平変位 $\delta_p$ を5～20cmと仮定し、回転角 $\theta_p$ 、 $\theta_s$ を求め、1/500～1/50radの範囲で検討を行った。なお、従来よりゴム支承の設計で考慮してきた上部構造のたわみによる回転角は、一般に鋼橋では1/300～1/150rad<sup>4)</sup>程度であることを考えると、1/50radは非常に大きな回転角であると言える。

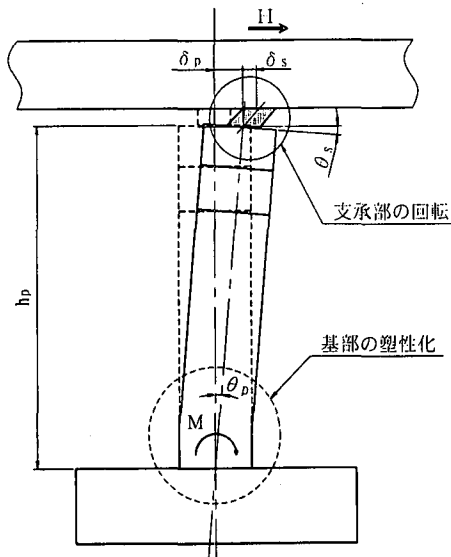


図-1 想定する変形状態

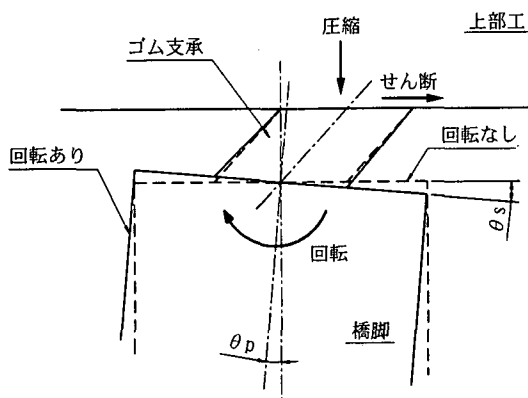


図-2 ゴム支承の変形状態

### 3. ゴム支承の変形状態の評価法

#### (1) 局部せん断ひずみによる照査式

本研究では、ゴム支承に生じる圧縮、せん断、回転の各要素を一般化された設計式上で評価することができる局部せん断ひずみ<sup>3)4)</sup>について検討を行う。

この照査式は、図-3に示すような各変形による局部的なひずみをそれぞれ、圧縮ひずみ $\gamma_c$ 、せん断ひずみ $\gamma_s$ 、回転ひずみ $\gamma_r$ として、それらが同時に作用するときの合計ひずみ $\gamma_t$ を次式により評価している。

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_r \quad (2)$$

ここで、このときの各ひずみは、 $S_1$ : 1次形状係数、 $\delta_c$ : 圧縮変形量、 $\Sigma t_e$ : 総ゴム厚、 $\delta_s$ : 水平変形量、 $a/b$ : ゴムの平面寸法比、 $\theta_s$ : 回転角、 $n$ : ゴム層数とすると、

$$\gamma_c = \frac{8.5S_1\delta_c}{\Sigma t_e}, \gamma_s = \frac{\delta_s}{\Sigma t_e}, \gamma_r = 2\left(1 + \frac{a}{b}\right)^2 S_1^2 \frac{\theta_s}{n} \quad (3)$$

表-1 ゴム支承形状

|      | G値<br>G<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 橋軸<br>a<br>(mm) | 橋直<br>b<br>(mm) | 厚み<br>t <sub>e</sub><br>(mm) | 層数<br>n | 総厚<br>Σ t <sub>e</sub><br>(mm) | 形状<br>係数<br>S <sub>1</sub> |
|------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---------|--------------------------------|----------------------------|
| 端支点  | 1.0                             | 880             | 880             | 21                           | 14      | 294                            | 9.9                        |
| 中間支点 | 1.0                             | 1450            | 1450            | 34                           | 6       | 204                            | 10.0                       |

表-2 橋脚モデルと回転角 $\theta_p$ (rad)

|                              |    | 橋脚天端での変位量 $\delta_p$ (cm) |       |       |       |
|------------------------------|----|---------------------------|-------|-------|-------|
|                              |    | 5                         | 10    | 15    | 20    |
| 橋脚高<br>h <sub>p</sub><br>(m) | 10 | 1/200                     | 1/100 | 1/67  | 1/50  |
|                              | 15 | 1/300                     | 1/150 | 1/100 | 1/75  |
|                              | 20 | 1/400                     | 1/200 | 1/133 | 1/100 |
|                              | 25 | 1/500                     | 1/250 | 1/167 | 1/125 |

圧縮ひずみ:  $\gamma_c$       せん断ひずみ:  $\gamma_s$

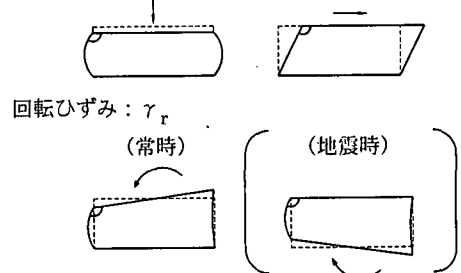


図-3 局部せん断ひずみ

により与えられる。

従来の設計法では、常時荷重に対しては回転の影響をふまえ、式(2)の3要素を考慮していたが、地震時に対しては同式の $\gamma_r=0$ として用いられてきた。従って、ここでは地震時に対してもこの $\gamma_r$ を求め、 $\gamma_t$ へ加算したときの影響について検討する。

なお、式(2)、(3)により算出された $\gamma_t$ はゴムの設計上の破断ひずみ $\gamma_u$ に対して、安全率 $f_a$ を見込んだ許容ひずみ $\gamma_{ta}$ によって照査している。

$$\gamma_t \leq \gamma_{ta} = \frac{\gamma_u}{f_a} \quad (4)$$

#### (2) 照査式の位置付け

上記に示したように、この照査式は各変形によるひずみをそれぞれ独立して載荷させた状態を考え、それらの単純和として全体を評価している。しかしながら、最近の研究では、この方法は必ずしもゴムの破断性状を精度良く評価しているとは言い難く、かつ、かなりの安全側を与えていることが指摘されている。

たとえば、圧縮とせん断の同時載荷状態におけるFEM解析結果<sup>5)</sup>では、 $\gamma_s$ が100%を越える大変形領域に入ると、合計ひずみ $\gamma_t$ は $\gamma_c$ と $\gamma_s$ の単純な和では表現できなくなり、 $\gamma_c$ の寄与率が低下して、 $\gamma_s$

表-3 回転ひずみの計算結果

| 回転角<br>$\theta_p$<br>(rad) | 端支点<br>$\gamma_r$<br>(%) | 中間支点<br>$\gamma_r$<br>(%) |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1/50                       | 112%                     | 268%                      |
| 1/100                      | 56%                      | 134%                      |
| 1/150                      | 37%                      | 89%                       |
| 1/200                      | 28%                      | 67%                       |
| 1/300                      | 19%                      | 45%                       |
| 1/500                      | 11%                      | 27%                       |

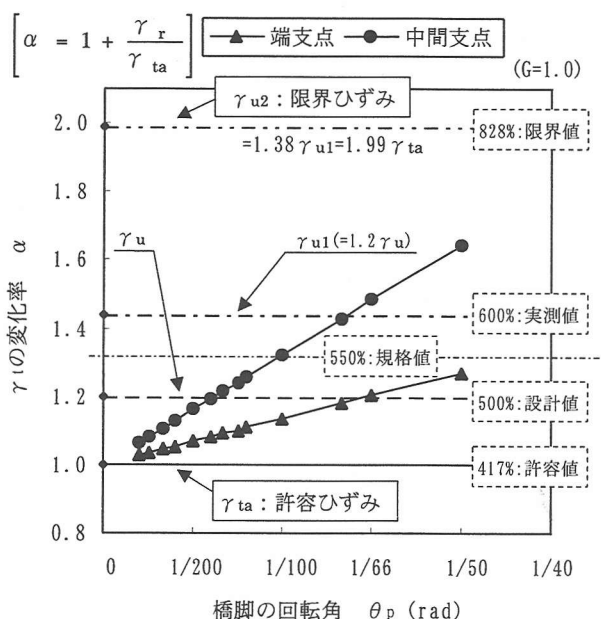


図-4 回転変形が合計ひずみ $\gamma_t$ に与える影響

が支配的になることを示している。また、局部せん断ひずみをパラメータとしたゴム支承の疲労耐久性試験（以下、疲労試験）結果<sup>6)</sup>では、計算上の合計ひずみ $\gamma_t$ を1000%程度（供試体の許容ひずみ $\gamma_{ta}$ の2倍以上）発生させた変形状態でも、300回～500回の繰返し载荷に耐えることができ、その破断要因は主として $\gamma_s$ であることを確認している。さらに、既往の理論式にゴムの圧縮性等を導入して、より精度の高い評価式の提案<sup>7)</sup>などもなされている。

このような背景をふまえ、現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>では地震時における局部せん断ひずみの照査は行わなくてよいとの改訂がなされている。従って、本照査式の適用性は限定的なものにとどまることになるが、a)現状、一般化されている設計式の中で回転の影響を反映できるものが他にないこと、b)疲労試験結果から地震時相当の载荷回数に対する限界ひずみがある程度推測することが可能であること、c)従来のゴム支承は局部せん断ひずみにより照査されているため、これらの既設計支承に対して、回転の影響を検討する場合には同一の手法が適当であること、などから本研究ではこの照査法を採用した。

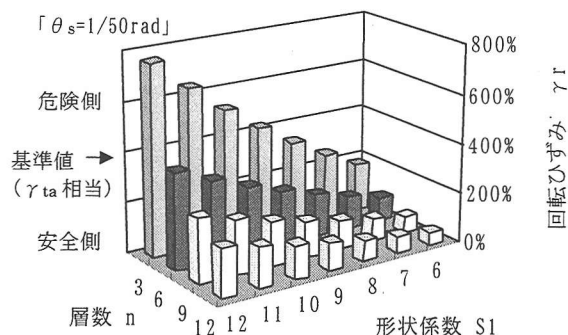


図-5 形状によるひずみ分布

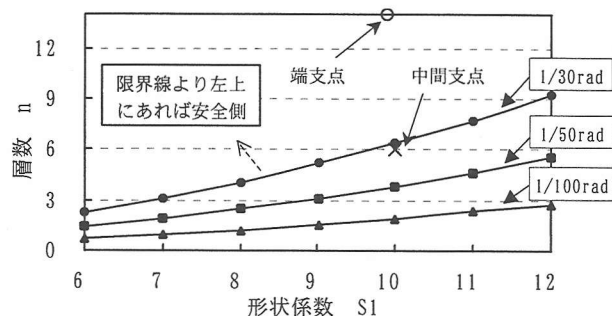


図-6 安全範囲

## 4. 計算結果

### (1) 回転ひずみの影響

$\gamma_r$ の計算結果の例を表-3に示すが、これより、 $\gamma_r$ は $\theta_p$ により増加していき、中間支点における1/50radのケースでは約270%にも達し、ゴムの破断ひずみが500～600%であることを考慮すると、 $\gamma_r$ だけで非常に大きな割合をしめることが分かる。また、両支点を比較すると、中間支点の方が大きな値を示しているが、これは設計条件の違いによるものであり、一般に中間支点は端支点到比べて、 $S_1$ が大きく、層数 $n$ が少なくなることから、式(3)の $\gamma_r$ 算出式とあわせて考えるとこの傾向は明らかである。

また、図-4には $\gamma_r$ の加算による合計ひずみ $\gamma_t$ への影響を把握するため、その変化率 $\alpha$ を許容ひずみ $\gamma_{ta}$ を基準として、

$$\alpha = 1 + \frac{\gamma_r}{\gamma_{ta}} \quad (5)$$

により算出した結果を示す。ここで、この図には各ひずみ状態における指標をいくつか併記しているが、それぞれ、次のような関係にある。なお、以下の( )内の数値は本検討に用いた $G=1.0\text{N/mm}^2$ におけるひずみ値を示す。

$\gamma_u$ は設計上の破断ひずみ（500%）であり、ゴム材料の規格値（550%）よりも1割ほど低く設定されている。また、 $\gamma_{ta}$ は許容ひずみで安全率 $f_a=1.2$ <sup>3)</sup>により求まる（417%）。ここで、ゴム支承の実製品における破断ひずみの実測値 $\gamma_{u1}$ を考えると、支承

メーカー各社の試験データを整理した結果<sup>8)</sup>から、その数値は $1.2\gamma_u$ 程度(600%)であることが確認されている。さらに、疲労試験結果<sup>9)</sup>から局部せん断ひずみを用いたときの実際の限界ひずみ $\gamma_{u2}$ を算出することを考えると、このとき作成されたS-N曲線を参考に、99%信頼区間の下限式にレベル2地震動に対して支承部で考慮すべき載荷回数Nを50回<sup>1)</sup>と設定すれば、破断ひずみの実測値 $\gamma_{u1}$ を基準として、

$$\frac{\gamma_{u2}}{\gamma_{u1}} = 2.224 - 0.196 \times \log(N) \pm 3.499$$

$$\times \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{9} + \frac{(\log(N) - 3.551)^2}{6.271}\right\}} \times 0.013 = 1.38 \quad (6)$$

を得る。このことから、最終的に実際の限界ひずみ $\gamma_{u2}$ は許容ひずみ $\gamma_{ta}$ に対して、 $1.2 \times 1.2 \times 1.38 = 1.99$ 倍の位置(828%)にあると考えられる。

以上のことから、 $\gamma_r$ を地震時に考慮した場合、合計ひずみ $\gamma_t$ は設計上の許容ひずみ $\gamma_{ta}$ および破断ひずみ $\gamma_u$ 等を上回るケースがあるが、本照査式における限界ひずみと考えられる $\gamma_{u2}$ に対しては、検討の範囲内では安全側に入ることが確認できる。

## (2) 回転ひずみの許容範囲

先の結果から、局部せん断ひずみによる照査法では、従来の許容ひずみの値は実際の限界ひずみに対して、安全率2を有していることが考えられるが、これは一方で、以下の式を満たせば、地震時に回転変形が付加されてもゴム支承としては安全であるとの判断が可能であることを示している。

$$\gamma_r \leq \gamma_{ta} \quad (7)$$

そこで、一般的な橋梁用ゴム支承として使用頻度の高い形状を想定して、式(7)を満たす範囲に関する検討を行った。ゴム形状を正方形とした場合に、 $\gamma_r$ のパラメータとなる $\theta_s$ 、 $S_1$ 、 $n$ の3つに着目して、 $\theta_s = 1/50\text{rad}$ 、 $S_1$ を6~12、 $n$ を3~12層とした範囲における $\gamma_r$ の計算結果を図-5に示す。 $S_1$ が大きくなるほど、層数 $n$ が少なくなるほど $\gamma_r$ は増加していくが、 $\gamma_{ta}$ (ここでは約400%)を越えるケースはごく一部にしか過ぎない。

図-6には $1/30$ 、 $1/50$ 、 $1/100\text{rad}$ の各回転角における $\gamma_r = \gamma_{ta}$ となる限界線を示すが、この結果、積層構造は一般に3層以上とすることを考えると、回転角が $1/100\text{rad}$ 以下では形状によらず $\gamma_{ta}$ を越えることはなく、一方、 $1/50\text{rad}$ などでは形状によりこれを越えるケースがあることが確認できる。また、この図を用いることにより、対象とする支承形状を図

中にプロットし、発生する回転角と比較することによって、その安全性の判定を容易に行うことが可能となる。今回、検討を行ったモデルの場合では、橋脚の回転角は最大で $1/96\text{rad}$ であったため、安全側と判断できる。

## 5. まとめ

橋脚の塑性化によるゴム支承の回転の影響について、局部せん断ひずみ照査法を通して検討を行った結果、得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) ゴム支承に生じる地震時の回転ひずみは、その形状および橋脚の回転角によっては、数百%程度の非常に大きな値をとる場合がある。
- 2) 局部せん断ひずみ照査法における実際の破断限界ひずみを疲労試験結果から算出すると、従来の許容ひずみは安全率2を有していることが分かり、このことをふまえると、回転変形を考慮してもゴムの破断性能に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。
- 3) 地震時の回転ひずみとして許容できる範囲を導いたことによって、この影響に対しての安全性の判定が簡易的な手法により可能であることを示した。

なお、本文では、既往の設計式や試験結果等を用いて、回転による影響を把握するための概略的な検討を行ったが、ここで想定しているような大きな回転ひずみが生じる領域に関する研究をはじめとして、今後、種々の影響を正確に評価するために、詳細な実験的・解析的研究を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002。
- 2) 庄司学，川島一彦：鉄筋コンクリート橋脚の塑性回転が高減衰積層ゴム支承の設計に及ぼす影響，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1069-1072，2001。
- 3) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，1992。
- 4) 日本道路協会：道路橋支承便覧，1991。
- 5) 松田泰治，大塚久哲，中島崇之，矢葺宣：FEMを用いた積層ゴムの力学特性に与える形状パラメータの影響評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.895-904，2001。
- 6) 今井隆：各論 支承部の耐震設計，基礎工，Vol.30，No.6，pp.61-64，2002。
- 7) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三，Lewangamage Chamindalal SUJEEWA：積層ゴム支承の鉛直変形，ねじれ変形，回転変形および破断に関する設計式の構築，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，Vol.5，pp.289-296，2002。
- 8) 須藤千秋，猪熊康夫，牧口豊，森重行雄：実物大を含めた積層ゴムのゴム破断伸びの実測試験，土木学会年次学術講演会，Vol.53，pp.680-681，1998。