

## 経年劣化により損傷したゴムダンパー（HDR-S）の 耐震性能の確認試験および考察

大門 大<sup>1</sup>・中山 裕昭<sup>2</sup>・水谷 明嗣<sup>3</sup>・林田 慈大<sup>4</sup>・鈴木 森晶<sup>5</sup>・後藤 芳顕<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 名古屋高速道路公社 整備部（〒462-0844 愛知県名古屋市中区清水四丁目 17-30）

<sup>2</sup>名古屋高速道路公社 交通管理部（〒462-0844 愛知県名古屋市中区清水四丁目 17-30）

<sup>3</sup>工修 名古屋高速道路公社 経営企画部（〒462-0844 愛知県名古屋市中区清水四丁目 17-30）

<sup>4</sup>名古屋高速道路公社 整備部（〒462-0844 愛知県名古屋市中区清水四丁目 17-30）

<sup>5</sup>正会員 博(工) 愛知工業大学工学部土木工学科教授（〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247）

<sup>6</sup>フェロー会員 工博 名古屋工業大学次世代耐震工学研究所（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）

### 1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震を受け、名古屋高速では耐震補強工事を実施する中で、単純桁の桁連続化に伴いゴム支承への取替およびゴムダンパーの設置を行ってきた。しかし設置から約10年が経過した複数のゴムダンパー（HDR-S）において写真-1に示す亀裂損傷が確認された。名古屋高速では、これまで同様の損傷が報告されたことはなく、橋梁の耐震性能に影響することが懸念された。

本研究では設置から約10年が経過し、亀裂損傷が発生したゴムダンパーの耐震性能を確認することを目的として、実橋より損傷したゴムダンパーを撤去し、性能確認試験および材料試験を実施した。併せて損傷したゴムダンパーと同等品のゴムダンパー（以下、リファレンスという。）を新規製作し、同様の試験を行い損傷したゴムダンパーの結果と比較することで、亀裂損傷による影響を確認した。

本論文は、経年劣化による亀裂損傷がゴムダンパーの耐震性能に与える影響について、試験結果等から考察を行ったものである。



写真-1 ギョムダンパーに発生した亀裂損傷

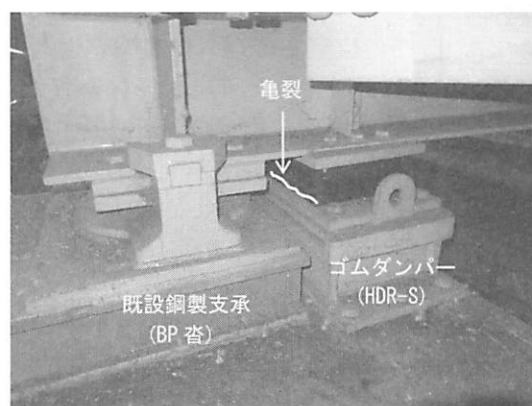


写真-2 ギョムダンパーの設置状況

### (1) ギョムダンパーの概要

名古屋高速では、平成13年度からの上部工（鋼桁）の連続化工事において、中間支点部は既設鋼製支承をゴム支承に取り替え、端支点部は路面の段差防止やそれに伴う振動抑制のため既設鋼製支承を残

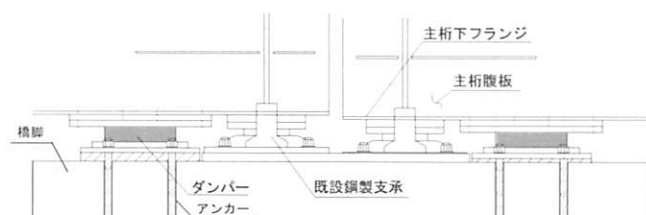


図-1 ギョムダンパー設置概要図

置し、新たにレベル2地震時のみに機能するゴムダンパーを設置した。今回亀裂が確認されたゴムダンパーは、写真-2、図-1に示すように残置された鋼製支承（BP杓）の前面に設置されており、常時の移動量が大きい可動杓の箇所であった。

ゴムダンパーの構造諸元を表-1、構造図を図-2に示す。既設構造物の取合いを考慮し、ゴムダンパーの構造は高さを抑えた下フランジタイプであり、下部鋼板とゴムは加硫接着されている。亀裂が確認されたのは、下部鋼板と積層ゴムが加硫接着されているテーパ部である。なお対象のゴムダンパーは、常時鉛直荷重は受けていない。

## (2) ゴムダンパーの損傷状況

ゴムダンパーに亀裂が確認されたことを受け、同様の条件下で設置されているゴムダンパー135基を対象に臨時点検を実施した。その結果、点検対象であるゴムダンパーの約60%に亀裂が確認された。またゴムダンパーに発生した亀裂には、以下の特徴があることが確認された。

- ・ 亀裂は下部鋼板とゴムの加硫接着位置近傍で発生している。
- ・ 亀裂は橋軸方向のゴムダンパー前面と背面の両側に発生している（図-2）。
- ・ 亀裂はゴムの伸長方向に対し直角に発生している。
- ・ 亀裂の外観は、複数の亀裂が重なり合い直線的に生じている（写真-3）。

## (3) FEM解析による表面伸びの把握

亀裂の発生位置は下部鋼板に加硫接着されたゴム縁端部であり、この位置でのゴム伸長率が過大となったことから亀裂が発生した可能性がある。そこで、せん断変形時の被覆ゴムの表面伸びを把握することを目的にFEM解析を実施した。解析条件として、水平変位は温度変化による常時のせん断ひずみ30%とした。またダンパーであることから圧縮荷重は载荷させない条件とした。

FEM解析の結果、亀裂発生位置である下部鋼板側と上部鋼板側のゴム表面伸びに大きな差があることが判明した。図-3に示すように常時の移動量30%で上部側の伸長率は10%程度であるのに対して、下部側の伸長率は20%を超えていた。これは名古屋高速道路公社の品質管理要領<sup>1)</sup>で規定されている静的オゾン劣化試験（JIS K 6259）の試験条件であるゴム伸長率20%を超える環境下である。下部鋼板とゴムの接着部近傍では、常時の移動量において局所的に想定を超える伸びが発生していることが確認された。

表-1 構造諸元

| ゴム種別           | 有効平面寸法<br>[橋軸×直角] | ゴム層厚<br>$\Sigma t_e$  | 1次形状<br>係数 S1 | 2次形状<br>係数 S2 |
|----------------|-------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| HDR-S<br>(G12) | 270×370mm         | 11mm×5層<br>(全層厚 55mm) | 7.1           | 4.9           |

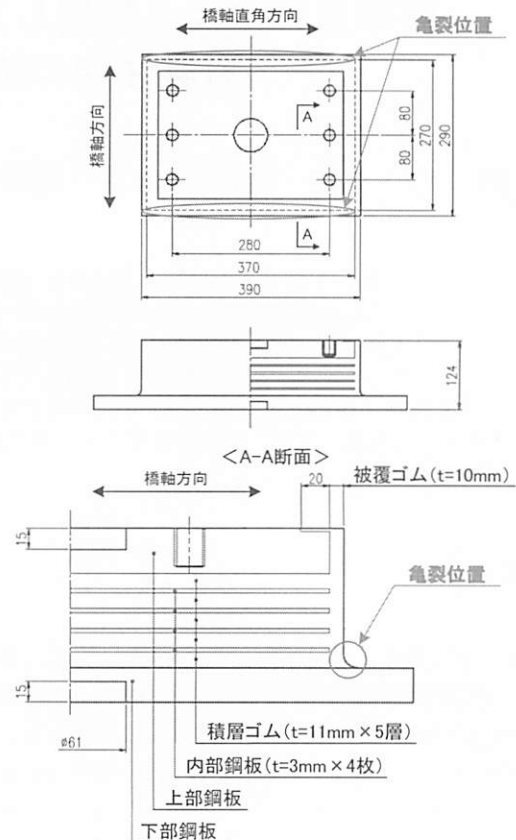


図-2 ゴムダンパー構造図

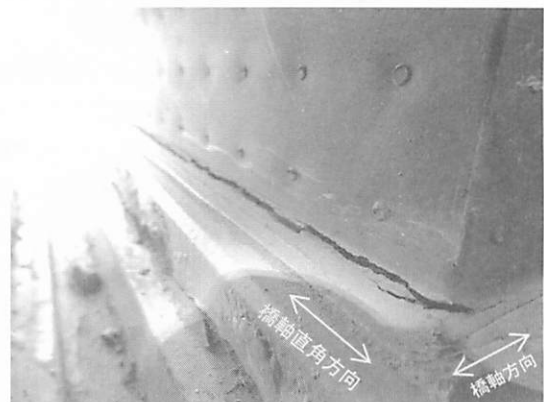


写真-3 ゴムダンパーに発生した亀裂面

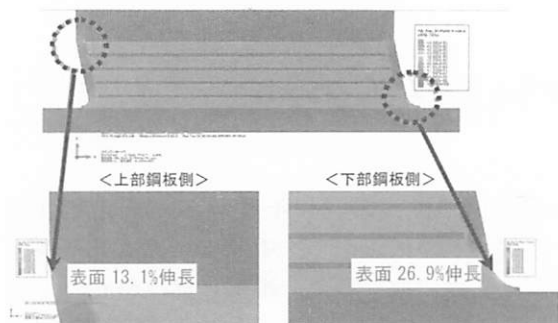


図-3 30%せん断変形時

3. 耐震性能確認試験

(1) 試験体

試験に使用するゴムダンパーは、温度変化時のせん断ひずみが大きく、比較的亀裂が大きいものを選定し、現地から3体撤去した。せん断変形性能試験に2体、材料試験に1体を使用した。また過去のせん断変形性能試験の実績に損傷したゴムダンパーと同一形状のものが無いため、破断ひずみ等を比較することを目的に、損傷したゴムダンパーと同一材料・同一形状・同一製造会社で新規に製作したリファレンス1体も併せてせん断変形性能試験を実施した。

実験に使用するゴムダンパーの出荷時のパラメータを表-2に示す。現状の亀裂深さを把握するため、試験前に損傷したゴムダンパーにせん断ひずみ15%を与え、針金にて計測した。その結果、亀裂深さは損傷ダンパー①で最大8mm(写真-4)、損傷ダンパー②で最大20mm(写真-5)であった。

(2) 試験方法

損傷したゴムダンパー2体およびリファレンス1体の性能確認試験を表-3に示すとおり目的別に3段階のステップで実施した。今回の試験では、愛知工業大学の耐震実験センターにある2,000kN静的アクチュエータを使用し、変位制御によりせん断載荷した。また装置下部にある750kN油圧ジャッキ4基を使用し、各試験に最低限必要な圧縮荷重を載荷した。載荷装置の設置状況を写真-6、概要図を図-4に示す。

表-2 出荷時のパラメータ

|              | 設計値   | 損傷ダンパー |       |
|--------------|-------|--------|-------|
|              |       | ①      | ②     |
| 等価剛性 (kN/mm) | 2.196 | 2.395  | 2.389 |
| 等価減衰定数 (%)   | 13.6  | 15.0   | 15.1  |

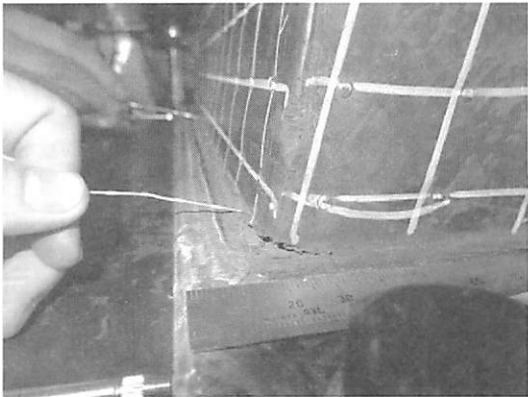


写真-4 損傷ダンパー①の亀裂(亀裂深さ最大8mm)

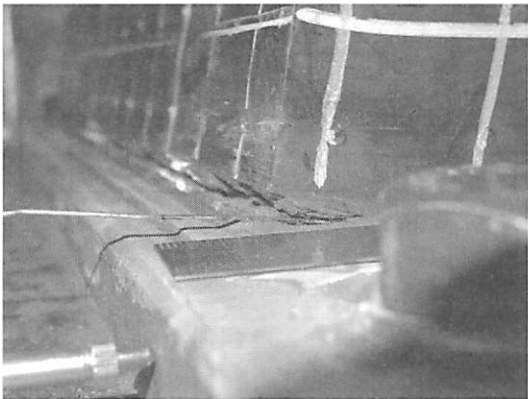


写真-5 損傷ダンパー②の亀裂(亀裂深さ最大20mm)

表-3 せん断変形性能試験の概要および目的

| 試験<br>ステップ | 試験概要               | 水平変位<br>(mm) | 面圧<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 加振波形              | 目 的                                               |
|------------|--------------------|--------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|
| STEP-1     | せん断ひずみ<br>250%×10回 | ±138         | 0.5                        | 正弦波<br>周期100秒     | 等価剛性、等価減衰定数を計測し、出荷検査時の値と比較する。(特性値の変化)             |
| STEP-2     | せん断ひずみ<br>300%×3回  | ±165         | 1.0                        | 正弦波<br>周期250秒     | 設計許容値に相当する水平変位を繰返し与え、水平荷重-水平変位の挙動を確認する。(L2地震時の性能) |
| STEP-3     | 破断まで<br>一方向水平載荷    | —            | 1.0                        | 一定速度<br>4.0mm/sec | 破断するまで水平変位を与え、破断時のせん断ひずみを確認する。(残存水平限界性能)          |



写真-6 載荷装置

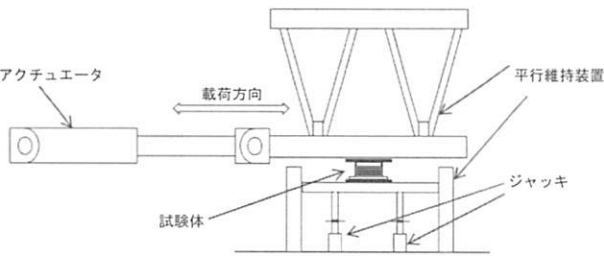


図-4 載荷装置概要図

(3) 試験結果

試験結果から得られた等価剛性および等価減衰定数を表-4に示す。また各試験における最大荷重、最大変位等を表-5にまとめた。リファレンスと比較した各ステップにおける荷重履歴曲線を損傷ダンパー①は図-5、損傷ダンパー②は図-6に示す。

a) STEP-1 (せん断ひずみ 250%×10 回)

損傷ダンパーの特性値は、出荷時の値と比べ等価剛性が最大 143%に増加しており、それに伴い等価減衰定数は最大 84%に減少している。また STEP-1 の荷重履歴曲線からも、損傷ダンパーはリファレンスと比べ剛性の傾きが増加していることがわかる。

b) STEP-2 (せん断ひずみ 300%×3 回)

STEP-2 における損傷ダンパーとリファレンスの

荷重履歴曲線では、損傷ダンパー①、②ともに安定した履歴を示し、ゴムの破断等の異常は確認されなかった。

c) STEP-3 (破断までの一方向載荷)

損傷ダンパー①、②ともに破断ひずみは、リファレンスと比較して低下しているものの、設計時の許容せん断ひずみ 289% (レベル 2 地震時) を満足した。ゴムダンパーの破断時の状況 (写真-7) は、全てゴム本体からの破断であり、下部鋼板および内部鋼板界面での破断はなかった。また破断位置は、亀裂深さが最大 20mm と深い損傷ダンパー②のみ下面亀裂位置から破断した。試験前の亀裂深さが最大 8mm である損傷沓①と新規製作沓は、ともに亀裂が生じていない上部鋼板側から破断した。

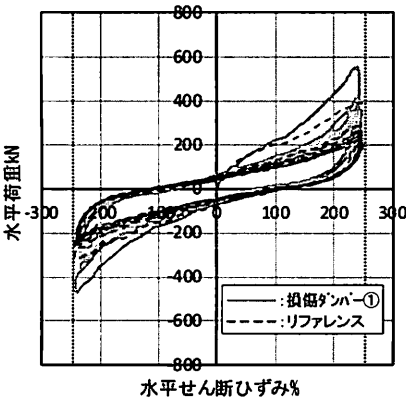
表-4 等価剛性と等価減衰定数の変化

|                 |      | 損傷ダンパー |        | リファレンス |
|-----------------|------|--------|--------|--------|
|                 |      | ①      | ②      |        |
| 等価剛性<br>(kN/mm) | 出荷時  | 2.395  | 2.389  | —      |
|                 | 試験値  | 3.419  | 3.123  | 2.339  |
|                 | (比率) | (143%) | (131%) | —      |
| 等価減衰定数<br>(%)   | 出荷時  | 15.0   | 15.1   | —      |
|                 | 試験値  | 12.6   | 14.1   | 16.6   |
|                 | (比率) | (84%)  | (94%)  | —      |

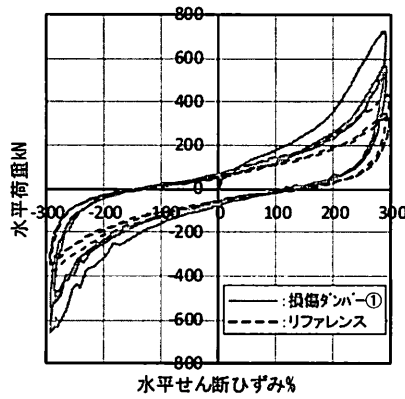
表-5 各試験結果のまとめ

| 試験ステップ               | 試験結果            | 損傷ダンパー |       | リファレンス |
|----------------------|-----------------|--------|-------|--------|
|                      |                 | ①      | ②     |        |
| STEP-1<br>(250%×10回) | 平均最大荷重<br>(kN)  | 373.8  | 345.4 | 262.4  |
| STEP-2<br>(300%×3回)  | 平均最大荷重<br>(kN)  | 602.8  | 559.9 | 368.8  |
| STEP-3<br>(破断)       | 最大荷重<br>(kN)    | 831.3  | 642.7 | 857.3  |
|                      | 破断時水平変位<br>(mm) | 179    | 163.7 | 221.1  |
|                      | 破断ひずみ<br>(%)    | 326%   | 298%  | 402%   |

<STEP-1:せん断ひずみ 250%×10 回>



<STEP-2:せん断ひずみ 300%×3 回>



<STEP-3:破断試験>

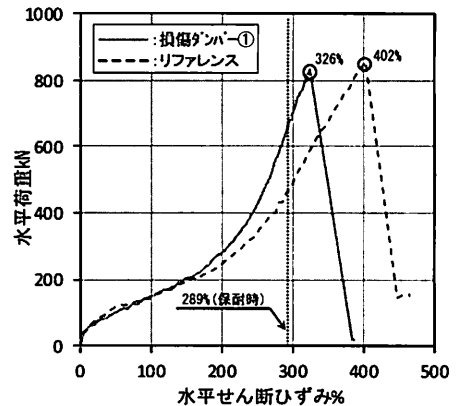
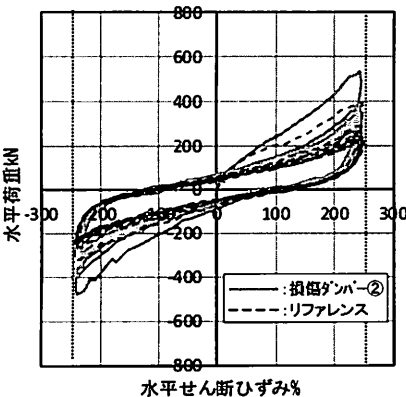
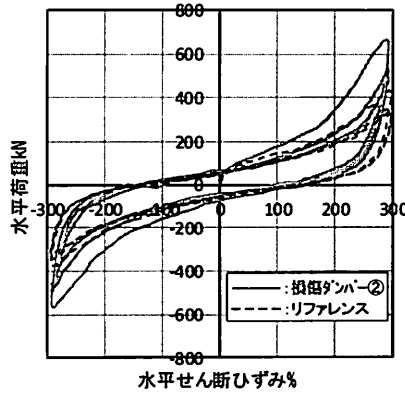


図-5 損傷ダンパー①とリファレンスの荷重履歴曲線の比較

<STEP-1:せん断ひずみ 250%×10 回>



<STEP-2:せん断ひずみ 300%×3 回>



<STEP-3:破断試験>

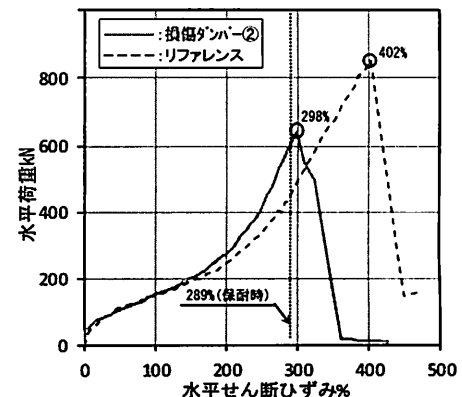


図-6 損傷ダンパー②とリファレンスの荷重履歴曲線の比較

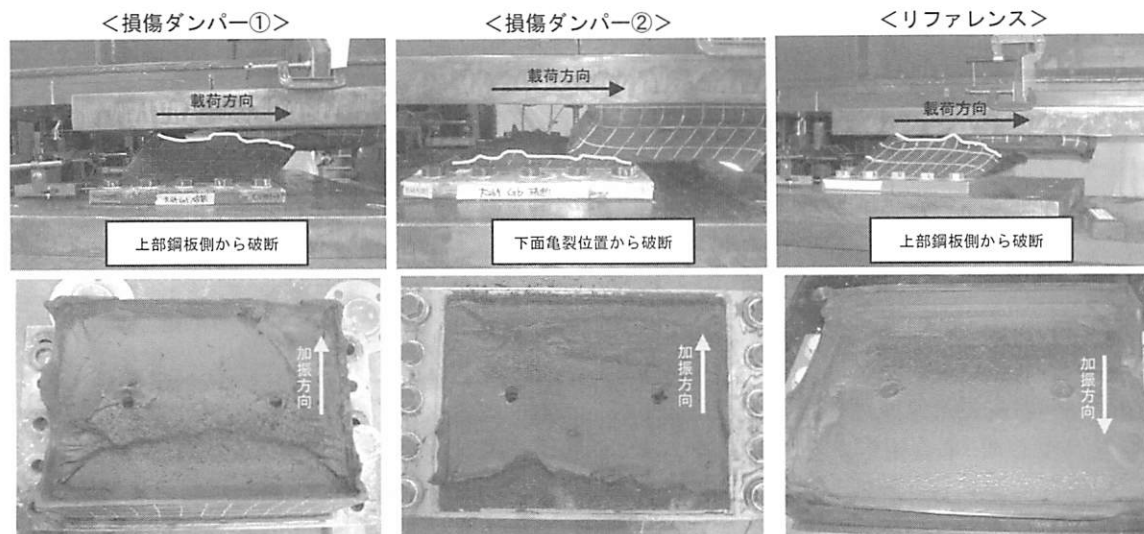


写真-7 ゴムダンパーの破断時の状況

#### 4. 動的解析による橋梁全体系での照査

性能確認試験の結果、損傷したゴムダンパーは特性値の変化が見られたものの、ゴム本体は一定の耐震性能が確保できていることを確認した。ここでは等価剛性の増加や等価減衰定数の減少等のゴムの特性値の変化が橋梁全体系としての耐震性能に与える影響について、非線形動的解析により確認する。

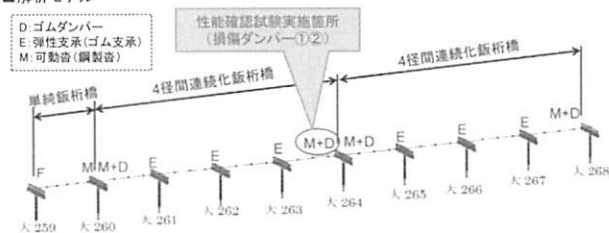
##### (1) 解析条件

図-7 に解析モデルおよび解析ケースを示す。解析モデルは隣接桁の影響を考慮したモデルとし、解析ケースは設計当時を復元したモデルと常時移動量が多く損傷が確認されている端支点部のゴムダンパーのみ劣化した2つのモデルとした。また劣化したゴムダンパーの履歴モデルは、図-8 に示すように性能確認試験結果（せん断ひずみ 250%×10 回）から得られた特性値の変化を参考に作成したトリリニアモデル<sup>2)3)</sup>を用いた。

##### (2) 解析結果

復元モデルと劣化モデルのレベル2地震動における橋軸方向の応答値の比率を表-6 に示す。端支点部の支承せん断ひずみは復元モデルと比べ 10～15%程度減少した。それに伴い端支点部の橋脚の天端最大変位および橋脚基部の曲げモーメントが約 10%増加している。これは端支点のゴムダンパーの剛性が増加したことにより、地震時に端支点部の橋脚が負担する水平力が増加したためと考えられる。次に端支点の橋脚（大 260, 大 264）の応答値と許容値を表-7 に示す。劣化モデルの応答値は増加したものの許容値以下であることから、現在のゴムダンパーの劣化程度であれば橋梁全体系の耐震性に大きな問題は

##### ■解析モデル



##### ■解析ケース

| 解析ケース   | 大260           | 大261               | 大262               | 大263               | 大264               |
|---------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 復元モデル | 弾性支承<br>ゴムダンパー | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S |
| 2 劣化モデル | 弾性支承<br>ゴムダンパー | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S | 当初 HDR<br>当初 HDR-S |

図-7 解析モデルおよび解析ケース

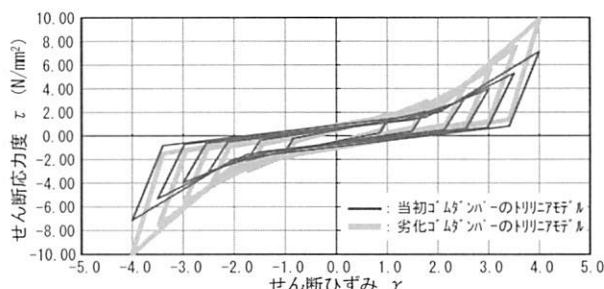


図-8 ゴムダンパーのトリリニアモデル

表-6 復元モデルに対する劣化モデルの応答比率

| 橋脚番号        | 大260 | 大261 | 大262 | 大263 | 大264 |
|-------------|------|------|------|------|------|
|             | 端支点  | 中間支点 | 中間支点 | 中間支点 | 端支点  |
| 支承せん断ひずみ    | 89%  | 99%  | 99%  | 99%  | 86%  |
| 橋脚天端最大変位    | 110% | 97%  | 97%  | 97%  | 111% |
| 橋脚基部曲げモーメント | 108% | 100% | 99%  | 100% | 103% |

※上記に示す応答比率は劣化モデルの応答値÷復元モデルの応答値である。

表-7 端支点の橋脚の許容値との比較

|                    |       | 大260      | 大264     |
|--------------------|-------|-----------|----------|
|                    |       | 端支点       | 端支点      |
| 橋脚天端最大変位 (m)       | 復元モデル | 0.138     | 0.159    |
|                    | 劣化モデル | 0.151     | 0.176    |
|                    | (許容値) | (0.549)   | (0.584)  |
| 橋脚基部曲げモーメント (kN・m) | 復元モデル | 75,061    | 72,182   |
|                    | 劣化モデル | 81,086    | 74,126   |
|                    | (許容値) | (100,936) | (81,593) |



ないと考えられる。しかし、中間支点にあるゴム支承においても、ゴムダンパーと同様にせん断剛性の上昇など特性値が変化している可能性があることやゴムダンパーの劣化が今後どのように進行するか不明であることなどから、今後も引き続き検討が必要である。

5. 材料試験

ゴムダンパーの亀裂損傷原因の推定を目的として材料試験を実施した。亀裂損傷が発生したゴムダンパーと同じ配合で作成した新規製作ゴムでも同様の材料試験を実施することで試験結果の比較を行った。また損傷ダンパーの材料試験体は、外的因子による劣化の影響を把握することを目的に、亀裂位置近傍のゴム表面側とその内部側からそれぞれ採取した。

材料試験の測定項目および測定結果を表-8に示す。損傷ダンパーの硬度は、新規製作ゴムと比較しほぼ変化がなかった。引張強さは、新規製作ゴムの値とほぼ同じ値であるが、破断伸びは、53～57%に低下している。溶存酸素量は、新規製作ゴムと比較しほぼ変化がなかった。単位体積あたりの分子鎖が結合した点の数を示す架橋密度は、新規製作ゴムと比較して2倍程度に増加しており、架橋が進行したと思われる。またすべての試験項目において、ゴム表面側とその内部側で顕著な値の違いは確認されなかった。

表-8 材料試験の測定項目および測定結果

| 測定項目                 | 単位                | 規格値<br>(G12)           | 新規製作<br>ゴム | 損傷ダンパー   |          |
|----------------------|-------------------|------------------------|------------|----------|----------|
|                      |                   |                        |            | 表面側      | 内部側      |
| 硬度<br>(JIS-K-6253)   | —                 | —                      | 82.0       | 81.3     | 80.0     |
| 引張強さ<br>(JIS-K-6251) | N/mm <sup>2</sup> | 11N/mm <sup>2</sup> 以上 | 16.0       | 17.1     | 17.1     |
| 破断伸び<br>(JIS-K-6251) | %                 | 550%以上                 | 756.0      | 397.0    | 430.5    |
| 溶存酸素量                | %                 | —                      | 1.42       | 1.50     | 1.50     |
| 架橋密度                 | mol/cc            | —                      | 2.02E-04   | 4.32E-04 | 4.11E-04 |

6. おわりに

設置から約 10 年が経過し亀裂損傷が発生したゴムダンパー（HDR-S）の性能確認試験および材料試験の結果から得られた知見を、下記①～⑤に示す。

① 設置から約 10 年が経過し亀裂損傷が発生したゴムダンパーは、等価剛性が増加し、等価減衰定数が減少している。経年劣化によりゴムが硬化しせん断剛性が上昇したことで特性値が変化したと推測される。

- ② せん断ひずみ 300%×3 回の試験において安定した履歴を示していること、破断ひずみが許容値以上であることから、レベル 2 地震時の水平耐力は満足している。
- ③ 亀裂深さが最大 20mm あり、被覆ゴムより内部に亀裂が進展している損傷ダンパー②の破断ひずみは、リファレンスと比べ 75%程度に低下していることから、亀裂損傷が終局耐力に影響を及ぼしたと推測される。
- ④ ゴムダンパーのせん断剛性が上昇しており、耐震性能の低下が懸念されるが、橋梁全体系の動的解析で検討した範囲においては、ゴムの剛性上昇による影響は小さいと推測される。
- ⑤ 溶存酸素量は、ゴム表面側と内部側で変化なく、新規製作ゴムと比べてもほぼ同じ値であることから酸化による劣化の可能性は低い。また架橋密度が新規製作ゴムと比べ 2 倍程度に増加していることから、架橋の進行がせん断剛性の上昇に寄与した可能性があると推測される。

以上のことから、損傷したゴムダンパーは現時点では一定の耐震性能を満足していると考えられる。しかし亀裂損傷が発生した原因および今後の経年劣化の影響については不明な部分もあることから、引き続きさらに詳細に検討する。

7. 謝辞：本研究を実施するにあたり、「支承の長期耐久性に関する共同研究」において、国立研究開発法人土木研究所、株式会社高速道路総合研究所、首都高速道路株式会社、阪神高速道路株式会社の共同研究のメンバーの方々から多くの助言や御協力をいただいた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 名古屋高速道路公社：ゴム支承品質管理要領, 2001.
- 2) 名古屋高速道路公社：ゴム支承の繰返しせん断変形性能試験実施要領(案), 2001.
- 3) 名古屋高速道路公社：名古屋高速道路非線形動的解析実施要領(案), 2003.