亀裂損傷が確認された既設ゴムダンパー (HDR-S)の残存性能と劣化要因の分析

大門 大1・鈴木信勝2・山下 章2・長谷川秀也2

¹名古屋高速道路公社 技術管理室(〒462-0844 名古屋市北区清水4-17-30)
²名古屋高速道路公社 整備部 企画整備課(〒453-0804 名古屋市中村区黄金通7-28-1)

名古屋高速では、耐震性能向上のために実施した桁連続化に伴い、中間支点部は鋼製支 承をゴム支承に取り替え、端支点部は鋼製支承を残置しゴムダンパー(HDR-S)を追加設 置した.定期点検により設置から約10年が経過したそれら複数のゴムダンパーの側面ゴム 部において亀裂損傷が確認された.平成26年度に亀裂が発生したゴムダンパーの耐震上 の安全性を確認することを目的に、実橋から損傷したゴムダンパーを撤去しせん断変形 性能の確認試験および橋梁全体系の動的解析を実施した.また平成27年度に亀裂損傷が 発生した原因等の究明を目的として、損傷したゴムダンパーの材料試験を実施した.

キーワード:ゴムダンパー,経年劣化,耐震性能,材料試験

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 速では耐震性能向上のために桁連続化を実施した.中間 支点部は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を目的として,既設 支承をそのまま使用する形で地震時水平力に抵抗するデ バイスであるゴムダンパー(HDR-S)を追加設置した¹⁾. 定期点検により,設置から約10年が経過したそれら複数 のゴムダンパーの側面ゴム部において,**写真-1**,**写真-2** に示す亀裂損傷が確認された.名古屋高速では,これ まで同様の損傷が発見されたことはなく,橋梁全体系 の耐震性能に影響する可能性が懸念された.

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(以下, 損傷ゴムダンパーとい う.)の耐震上の安全性を確認することを目的として, 実橋より損傷ゴムダンパーを撤去し, せん断変形性能 確認試験を実施した.併せて損傷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.

またせん断変形性能試験の結果を受け、ゴムダンパー の特性値が変化した原因および亀裂損傷が発生した原 因の究明を目的として、損傷ゴムダンパーの材料試験 を実施した.



写真-1 ゴムダンパーに発生した亀裂損傷



写真-2 ゴムダンパーの設置状況

2. 損傷したゴムダンパーについて

(1) ゴムダンパーの構造概要

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等のため既設鋼製支承を残置 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、図 -1に示すように残置された鋼製支承(BP者)の前面に 設置されており、常時の移動量が大きい可動沓の箇所で あった.ゴムダンパーの構造図を図-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ー部である.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.
- ・ 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. 損傷したゴムダンパーの残存性能の確認

(1) せん断変形性能確認試験

a)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2体撤去した.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として、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.

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、 損傷ダンパー②で最大20mmであった.



図-1 ゴムダンパー設置概要図





写真-3 ゴムダンパーに発生した亀裂面

表-1	せん新変形性能試験の概要
1X 1	

試験 ステップ	就験概要 水平変位 (mm) 面圧 (N/mm ²)		面圧 (N/mm ²)	加振波形
STEP-1	せん断ひずみ 250%×10回	±138	0.5	正弦波 周期100秒
STEP-2	せん断ひずみ 300%×3回	±165	1.0	正弦波 周期250秒
STEP-3	STEP-3 破断まで 一方向水平載荷		1.0	一定速度 4.0mm/sec

b)試験方法

損傷ゴムダンパー2体およびリファレンス1体のせん断 変形性能確認試験を表-1に示すとおり3段階のステップ で実施した.

c)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-2に示す.また各試験における最大荷重,最大変位 等を表-3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-3,損傷 ダンパー②は図-4に示す.

・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. 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.

・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である損傷ダンパー①とリ ファレンスは、ともに亀裂が生じていない上部鋼板側 から破断した.

表−3 各試験結果のまとめ

		損傷ダ	117-1.3.7		
		1	2	97907X	
	出荷時	2.395	2.389	_	
等価剛性 (kN/mm)	試験値	3.419	3. 123	2.339	
	(比率)	(143%)	(131%)	-	
等価 減衰定数 (%)	出荷時	15.0	15.1	-	
	試験値	12.6	14. 1	16.6	
	(比率)	(84%)	(94%)	_	

:リファレンス

図-3

300

図-4

表-2 等価剛性と等価減衰定数の変化

言ざ 昨会 フテッフ゜	計除結用	損傷ダ	11771.57	
乱海火へ)ソフ	武鞅和未	1	2	97907X
STEP-1 (250%×10回)	平均最大荷重 (kN)	373.8	345.4	262.4
STEP-2 (300%×3回)	平均最大荷重 (kN)	602.8	559.9	368.8
	最大荷重 (kN)	831.3	642.7	857.3
STEP-3 (破断)	破断時水平変位 (mm)	179	163.7	221.1
	破断ひずみ	326%	298%	402%



600

800

800

600

400

200

200

400

-600

水平せん断ひずみ%

100

200

損傷ダンパー②

--:リファレンス

关 中 荷 重 KN

зbo

水平せん断ひずみ%

<STEP-1:せん断ひずみ250%×10回>

<STEP-2:せん断ひずみ300%×3回>

600

400

200

200

400

-600

-200 -- 100

平荷重い

×

00

<STEP-3:破断試験>

\$^{402%}

400

500



1000







水平せん断ひずみ%



(2) 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.

a)解析条件

図-5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(復元モデル)と端支 点部にあるゴムダンパーのみ劣化したモデル(劣化モ デル)の2つとした.また劣化したゴムダンパーの履歴 モデルは,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²³(図-6)を用いた.

b)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-4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-5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 があることなど課題も多くあることから、今後も引き 続き検討が必要である.

4. 損傷したゴムダンパーの劣化要因の推定

(1) 材料試験

a)試験項目

実橋から撤去した損傷ゴムダンパーより切り出した試 験体と当時のゴムダンパーの配合を模して新規製作した ゴム単体(以下,新規製作ゴムという.)の試験体に 対して,**表-6**に示す材料試験を実施した.試験は現時点 での劣化状況を把握するための現状分析に加え,ゴムダ ンパーの主たる劣化原因の推定および劣化傾向の把握を 目的とし,熱とオゾンの2つの劣化因子に着目して促進 試験を行った.熱,オゾンともに促進期間は250時間と 500時間の2パターンとし,促進試験後に**表-6**に示す各種 試験を実施した.



図-5 解析モデルおよび解析ケース



表─4 復	元モテルに対す	・る劣化モデル	・の応答比率
-------	---------	---------	--------

体告诉	大260	大261	大262	大263	大264	
1向脚 1百万	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-5 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	復元モデル	0.138	0.159
最大変位	劣化モデル	0.151	0.176
(m)	(許容値)	(0.549)	(0.584)
橋脚基部	復元モデル	75, 061	72, 182
曲 げモーメント	劣化モデル	81,086	74, 126
(kN·m)	(許容値)	(100, 936)	(81, 593)

表-6 材料試験項目一覧

	衣 0 的Yhuilly 9 日 見						
試験項目		測定項目	損傷ダンパーの試料採取箇所 ^{※1}				
	21251316	引張強さ	ゴム表面から中央部まで3箇所 (2.3.4層目)				
	コーコス古八明天	破断伸び					
	せん断変形試験	静的せん断弾性係数					
現	接着はく離試験	接着性能					
状分	硬さ試験	JIS硬さ	ゴム表面から中央部まで11箇所(5層目)				
析	マイクロコーダー解析	溶存酸素量	ゴム表面から中央部まで7箇所(5層目)				
	熱分解解析	老化防止剤残量	ゴム表面から中央部まで3箇所(5層目)				
	網目鎖密度試験	架橋密度	ゴム表面から中央部まで3箇所(3,5層目)				
	組成分析	アセトン抽出量,ゴム量等	ゴム中央部付近から1箇所(5層目)				
		引張強さ					
/=	フトフレロスの大	破断伸び	ゴム中央部付近から1箇所採取				
促進試験	せん断変形試験	静的せん断弾性係数	(2,3,4層目)				
	硬さ試験	JIS硬さ					
₩ X ※2	マイクロコーダー解析	溶存酸素量	ゴム中央部付近から1箇所採取				
	網目鎖密度試験	架橋密度	(2層目)				

※1:ゴムダンパー上鋼板側から第1層目とする。

※2:熱による劣化促進試験(試験温度70℃,無伸長)と

静的オゾン劣化試験(オゾン濃度50pphm,試験温度40℃,無伸長)を実施

b)現状分析結果

・引張試験(表-7):引張り強さは新規製作ゴムの値 と比べ高い傾向にある.破断伸びは新規製作ゴムの値 と比べ低い傾向にあり,規格値(550%以上)を下回っ た.また引張り強さ,破断伸びともにゴム表面からの 深さや層ごとでの明確な差異は確認されなかった.

・せん断変形試験(表-7):静的せん断弾性率は新規 製作ゴムの値と比べほぼ同じ値であった.またゴム表 面からの深さや層ごとでの明確な差異は確認されな かった.

・接着はく離試験(表-7):接着はく離強さはすべての箇所で規格値(7.0N/mm以上)を満足した.また層ごとで明確な差異は確認されなかったが、ゴム表面付近の値が中央部と比べ低い傾向にある.

・硬さ試験(図-7):硬さは亀裂が発生したゴム表面 付近で比較的高い値を示した.また新規製作ゴムのほ うが硬い値であった.

・マイクロコーダー解析(老化防止剤)(表-7):2種 類の老化防止剤の量を計測した結果、ともに亀裂が発 生したゴム表面付近ではゴム内部の老化防止剤残量と 比べ低い値を示した.

・熱分解解析(図-8):溶存酸素量は亀裂が発生した ゴム表面付近で比較的高い値を示し、ゴム内部ほど値 が低い傾向にある.また新規製作ゴムのほうが高い値 であった.

・網目鎖密度試験(表-7):架橋密度は新規製作ゴム と比べ約2倍程度高い値を示した.またゴム表面からの 深さや層ごとでの明確な差異は確認されなかった.

c)促進試験結果

新規製作ゴムに対し熱とオゾンでそれぞれ促進試験 を行った結果,各試験で劣化速度の差はあるが,2つの 劣化因子ともに同じ劣化傾向であった.唯一架橋密度 だけは,熱酸化劣化後の値が上昇しているのに対し, オゾン劣化後の値はほぼ変化がなかった.同様に損傷 ゴムダンパーに対し促進試験を行った結果,2つの劣 化因子ともに各試験の値にほぼ変化はなかった.参考 までに熱酸化劣化後の架橋密度の変化を図-9に示す. 新規製作ゴムの値が上昇しているのに対し,損傷ゴム ダンパーはほぼ変化がなかった.

(2) FEM解析によるゴム表面伸びの推定

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. また鋼製支承前面に追加設置されたゴムダンパーであ ることから圧縮荷重は載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-10に示すように常時の移動量30%で上部側

表-7 材料試験結果

ゴム表面からの深さ		25mm	85mm	145mm	
217511761 (2)		2層目	19.1	19.9	18.5
		3層目	20.3	19.3	19.7
51張り強さ(N	I∕mm⁻)	4層目	19.1	19.1	19.7
		新規製作ゴム	17.1		
		2層目	430	460	430
	2	3層目	450	440	460
破町伸ひ(N/	mm ⁻)	4層目	440	460	430
		新規製作ゴム		650	-
		2層目	1.42	1.54	1.51
静的せん断引	単性率	3層目	1.55	1.57	1.45
(N/mm²)		4層目	1.54	1.70	1.25
		新規製作ゴム		1.57	-
快差(十/ 핵관	*+	2層目	12.0	14.4	18.4
1女/目 はく内田15 (NI/mm m ²)	KC.	3層目	13.9	10.7	15.4
(N/mm)		4層目	10.7	9.9	13.0
	appp×1	5層目	0.22	0.38	0.37
老化防止剤	6PPD	新規製作ゴム		0.37	-
(%)	THE 0 ×2	5層目	0.36	0.43	0.45
	TMDQ ^{**}	新規製作ゴム		0.49	-
加场应度	加场应应		0.99	1.00	1.05
笨憍密度 (×10 ^{−4} mol/cm ³)		5層目	1.08	0.92	0.96
		新規制作ゴル		0 58	

※1:6PPD:アミン系オゾン劣化防止剤

※2:TMDQ:アミン-ケトン系老化防止剤



図-9 熱酸化劣化結果 (網目鎖密度試験)

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⁴⁾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.



図-10 30% せん断変形時のゴムダンパー表面の伸長率

5. 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)について,各種試験を実施した.試験結果から得られた知見を,下記①~⑧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たが、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 ゴム表面付近では老化防止剤が析出し、酸化が進行したことで、硬さ試験の値が上昇したと推測される。
- ⑥ 熱の影響により架橋が経年的に進行する傾向があることが確認できた.また架橋がある程度進行したゴム(損傷ゴムダンパー)は、その後の劣化が進みにくい傾向であると推測される.
- ⑦ ゴムダンパーの特性値が変化した原因は、主に熱の影響によりゴムダンパー内部まで再架橋が進行したことで、せん断剛性が上昇したことであると 推測される。
- ⑧ FEM 解析結果から、下フランジプレート近傍位置 で常時許容値を超える引張状態が続いた.加えて 過度な引張りが生じた箇所に経年的なオゾンによ る複合的な劣化(老化防止剤の減少と溶存酸素量 の増加,それに伴う硬さの増加や破断伸びの低下 等)が影響し、亀裂が発生したと推測される

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.また 亀裂損傷が発生した原因やゴムダンパーの特性値が変 化した原因について外的劣化因子(熱,オゾン)と構 造的要因が複合的に影響している可能性が高いと推測 された.しかしゴム材料は個体差が大きいとの報告も あり,現時点では試験体数も少ないことから,今後も 引き続き詳細に検討する必要がある.

参考文献

- 加藤, 袁,青木,浅野,小林:機能分離型支承の耐震性 能実験,第58回年次学術講演会概要集,2003.
- 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.
- 4) 名古屋高速道路公社:ゴム支承品質管理要領, 2001.