

既設ゴムダンパー（HDR-S）の劣化原因究明を 目的とした材料試験

大門 大¹・鈴木信勝²・山下 章²・長谷川秀也³

¹正会員 工修 名古屋高速道路公社 技術管理室（〒462-0844 愛知県名古屋市中村区清水四丁目 17-30）

²名古屋高速道路公社 整備部（〒453-0804 愛知県名古屋市中村区黄金通七丁目 28-1）

³正会員 工修 名古屋高速道路公社 整備部（〒453-0804 愛知県名古屋市中村区黄金通七丁目 28-1）

1. はじめに

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 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ため、それらゴムダンパーの耐震上の安全性を確認することを目的として、平成 26 年度に実橋から撤去した亀裂が発生したゴムダンパー（以下、損傷ゴムダンパーという。）を用いた性能確認試験および橋梁全体系の動的解析を実施した²⁾。その結果、性能確認試験ではゴムダンパーの特性値の変化（等価剛性の増加，等価減衰定数の減少）が確認されたものの、動的解析により現状の損傷程度であれば耐震性能を満足していることを確認した。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、未だ不明な部分が多くあることから、平成 27 年度に損傷ゴムダンパーの材料試験を実施した。これらの内容について述べる。

2. 損傷したゴムダンパーについて

今回材料試験で用いる損傷ゴムダンパーは、既設鋼製支承（BP 査）の桁中央側前面の橋脚梁上に設置されており、常時の移動量が比較的大きい端支点の



写真-1 ギョムダンパーに発生した亀裂損傷

表-1 ギョムダンパーの構造諸元

ギョム種別	有効平面寸法 (橋軸×直角)	ギョム層厚	形状係数	
			S ₁	S ₂
HDR-S (G12)	270×370mm	11mm×5層	7.1	4.9

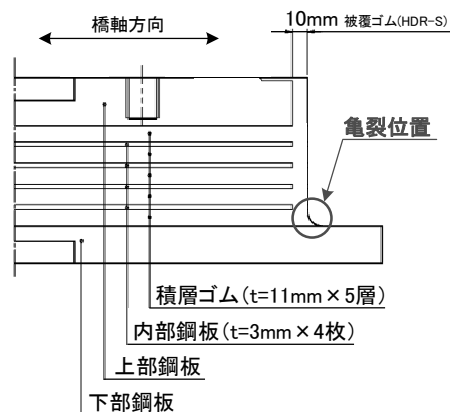


図-1 ギョムダンパー構造図

可動柵側であった。ゴムダンパーの構造諸元および構造図を表-1、図-1にそれぞれ示す。ゴムダンパーの構造は、設置スペースの制約から高さを抑えた下フランジタイプであり、亀裂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確認された。なお対象ゴムダンパーは、常時鉛直荷重は受けていない。

3. 材料試験の内容

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-2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、促進試験後に試験体を取り出し表-2に示す各種試験を実施した。

4. 現状分析結果

(1) 引張試験（引張り強さ、破断伸び）

引張り強さは、表-3 に示すように出荷時の値（18.8MPa）と比べて 98%～108%に値が大きくなった

傾向にある。また破断伸びは、表-3 に示すように出荷時の値（600%）と比べ 72%～77%に値が小さくなり全体的に規格値（550%）を下回る傾向にある。引張り強さ、破断伸びともにゴム表面からの深さや層毎で明確な差異は確認されなかった。

表-3 現状分析結果一覧

ゴム表面からの深さ		25mm	85mm	145mm	
引張り強さ(N/mm ²)		2層目	19.1	19.9	18.5
		3層目	20.3	19.3	19.7
		4層目	19.1	19.1	19.7
		新規製作ゴム	17.1		
破断伸び(N/mm ²)		2層目	430	460	430
		3層目	450	440	460
		4層目	440	460	430
		新規製作ゴム	650		
静的せん断弾性率(N/mm ²)		2層目	1.42	1.54	1.51
		3層目	1.55	1.57	1.45
		4層目	1.54	1.70	1.25
		新規製作ゴム	1.57		
接着はく離強さ(N/mm ²)		2層目	12.0	14.4	18.4
		3層目	13.9	10.7	15.4
		4層目	10.7	9.9	13.0
老化防止剤(%)	6PPD※ ¹	5層目	0.22	0.38	0.37
		新規製作ゴム	0.37		
	TMDQ※ ²	5層目	0.36	0.43	0.45
		新規製作ゴム	0.49		
架橋密度(×10 ⁻⁴ mol/cm ³)		2層目	0.99	1.00	1.05
		5層目	1.08	0.92	0.96
		新規製作ゴム	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

表-2 材料試験項目一覧

試験項目		測定項目	JIS規格	損傷ダンパーの試料採取箇所※1
現状分析	引張試験	引張強さ	JIS K 6251	ゴム表面から中央部まで3箇所(2,3,4層目)
		破断伸び		
	せん断変形試験	静的せん断弾性率	JIS K 6254	
	接着はく離試験	ゴムと内部鋼板との接着性能	JIS K 6256-2	
	硬さ試験	JIS硬さ	JIS K 6253-3	ゴム表面から中央部まで11箇所(5層目)
	マイクロレーダー解析	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)
促進試験 ①熱劣化※2 ②オゾン劣化※3	引張試験	引張強さ	JIS K 6251	ゴム中央部付近から1箇所採取(2,3,4層目)
		破断伸び		
	せん断変形試験	静的せん断弾性係数	JIS K 6254	
	硬さ試験	JIS硬さ	JIS K 6253-3	
	マイクロレーダー解析	溶存酸素量	—	ゴム中央部付近から1箇所採取(2層目)
	網目鎖密度試験	架橋密度	—	

※1: ゴムダンパー上鋼板側から第1層目とする。

※2: 試験温度70℃、無伸長の条件下で熱による劣化促進試験(JIS K 6257)を実施。

※3: オゾン濃度50pphm、試験温度40℃、無伸長の条件下で静的オゾン劣化試験を実施。

(2) せん断変形試験

25%静的せん断弾性率は、表-3 に示すように規格値(1.2Mpa)と比べ全体的に値が大きい傾向であった。しかし新規製作ゴムの値と比べると大きな差は見られなかった。ゴム表面からの深さや層毎で明確な差異は確認されなかったが、ゴム表面からの深さが深いほど層毎の値のパラツキが大きくなる傾向があった。

(3) 接着はく離試験

接着はく離強さは、表-3 に示すようにすべての箇所で規格値(7.0N/mm)を満足していた。層毎で明確な差異は確認されなかったが、ゴム表面からの深さが深いほど接着はく離強さが若干大きくなる傾向にあった。

(4) 硬さ試験

硬さは、図-2 に示すように亀裂が発生した表面付近で若干ではあるが高い値を示した。また新規製作ゴムのほうが高い値を示した。理由として、製作、配合等の個体差によるものと考えられる。

(5) マイクロコーダー解析(溶存酸素量)

溶存酸素量は、図-3 に示すように亀裂が発生した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全体的に高い酸素量を示した。理由として、製作、配合等の個体差によるものと考えられる。

(6) 熱分解解析(老化防止剤残量)

老化防止剤は、耐オゾン性の向上を目的としたアミン系オゾン劣化防止剤と耐熱性の向上を目的としたアミン-ケトン系老化防止剤の2種類の老化防止剤の量を計測した。その結果、図-4に示すように2種類の老化防止剤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。

(7) 網目鎖密度試験(架橋密度)

架橋密度は、図-5に示すように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。

(8) 組成分析

当時のゴムダンパーで使用されていた配合材料の一部が製造中止であったことから、新規製作ゴムは、損傷ダンパーの当時の配合を模して作成されたものである。

組成分析において、配合される成分量(アセトン抽出量、ゴム量、カーボンブラック量、灰分)を計測した結果を図-6 に示す。新規製作ゴムと損傷ダンパーに含まれる成分は、ほぼ同じ量であることを確認した。

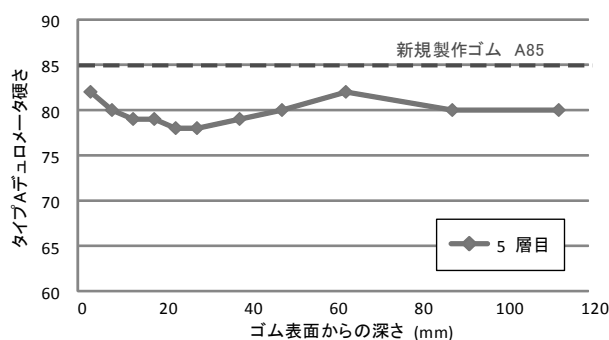


図-2 硬さ試験結果

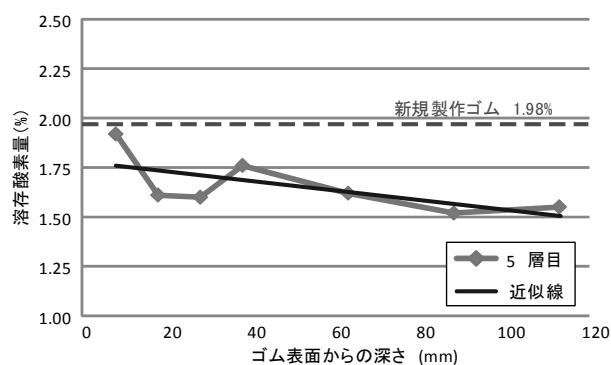


図-3 マイクロコーダー解析結果

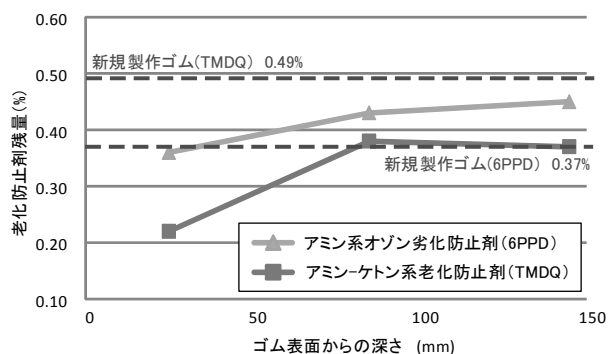


図-4 熱分解解析結果

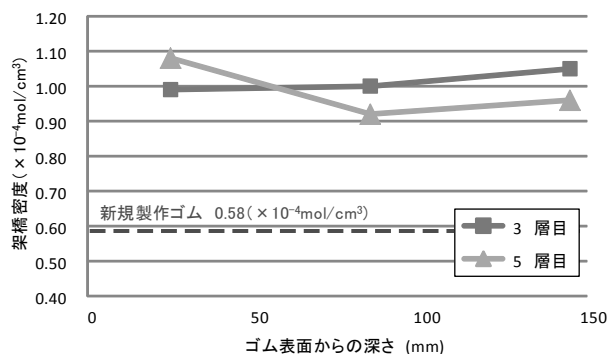


図-5 網目鎖密度試験結果

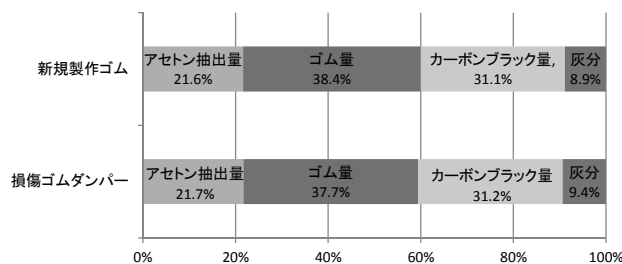


図-6 組成分析結果

5. 促進試験結果

促進試験は、熱劣化とオゾン劣化の2つの劣化要因でそれぞれ実施した。ともに促進期間は250時間と500時間とし、各促進期間を経過した試験体において、基礎試験（引張り試験、せん断変形試験、硬さ試験、マイクロコーダー解析試験、網目鎖密度試験）を行い、促進前の値からの変化を確認することで、劣化因子ごとの劣化傾向を把握した。なお促進前の値に対する促進後の値の比率（以下、変化率という。）に着目し、各試験項目をまとめた。

(1) 引張試験（引張強さ、破断伸び）

促進劣化による引張強さの推移と変化率を図-7に示す。熱劣化後の引張強さは、新規製作ゴムではほぼ変化がなかった。損傷ゴムダンパーにおいても、顕著な変化は確認されなかった。またオゾン劣化後の引張り強さも同様の傾向を示しており、新規製作ゴム、損傷ゴムダンパーともに顕著な変化は確認されなかった。

促進劣化による破断伸びの推移と変化率を図-8に示す。熱劣化後の破断伸びは、新規製作ゴムでは促進時間の経過とともに値が小さくなる傾向が確認された。損傷ゴムダンパーにおいても、促進時間の経過とともに値が小さくなる傾向があるが、新規製作ゴムの変化率と比べ、その劣化傾向は小さい。またオゾン劣化後の新規製作ゴムの引張り強さは熱劣化と比べその変化率は小さいものの、促進時間の

経過とともに値が小さくなる傾向を示した。損傷ゴムダンパーは、顕著な変化は確認されなかった。

(2) せん断変形試験

促進劣化による静的せん断弾性率の推移と変化率を図-9に示す。熱劣化後の静的せん断弾性率は、新規製作ゴムでは促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。損傷ゴムダンパーにおいては、その傾向は小さいものの促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。新規製作ゴムと損傷ゴムダンパーの変化率を比べると、新規製作ゴムの方が劣化割合が大きい傾向にあった。またオゾン劣化後の静的せん断弾性率も新規製作ゴムでは熱劣化と比べその変化率は小さいものの、促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向を示した。損傷ゴムダンパーは、新規製作ゴムと比べ変化率は小さいが促進時間の経過とともに値が若干大きくなる傾向が確認された。

(3) 硬さ試験

促進劣化による硬さの推移と変化率を図-10に示す。熱劣化後の硬さは、新規製作ゴムでは促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。損傷ゴムダンパーでも、新規製作ゴムと同様に促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。変化率については、新規製作ゴム、損傷ゴムダンパーともほぼ同じ比率であった。またオゾン劣化後の硬さは、熱劣化の結果とほぼ同様の傾向を示した。

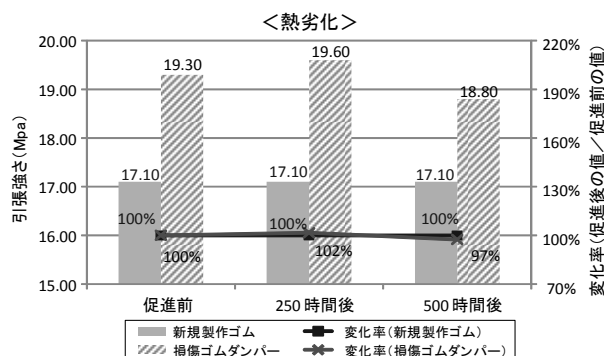


図-7 促進劣化による引張強さの変化

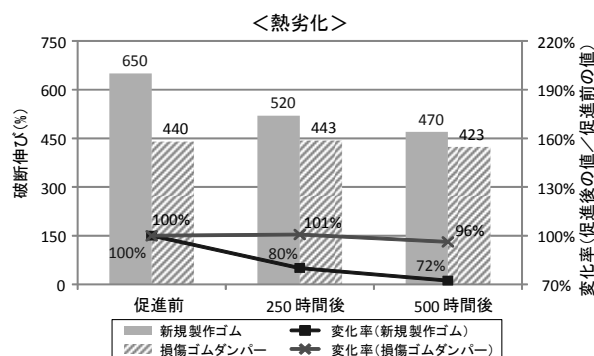
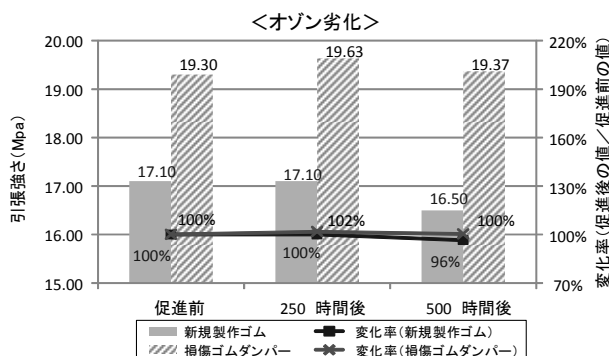
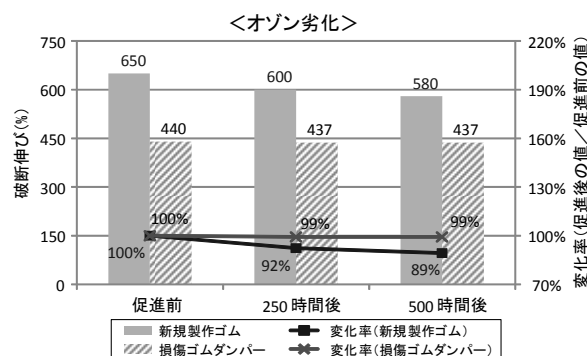
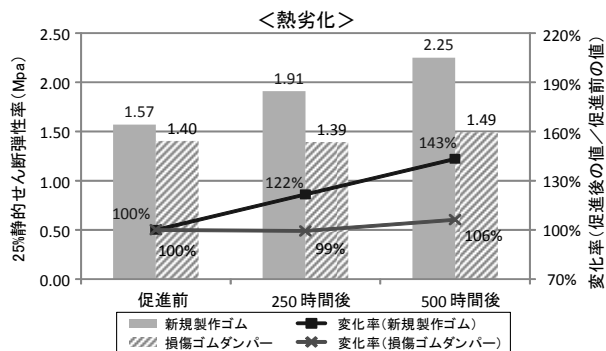


図-8 促進劣化による破断伸びの変化



(4) マイクロコーダー解析（溶存酸素量）

促進劣化による溶存酸素量の推移と変化率を図-11に示す。熱劣化後の溶存酸素量は、新規製作ゴムでは促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。損傷ゴムダンパーにおいても、同様の傾向が確認された。変化率については、新規製作ゴム、損傷ゴムダンパーともほぼ同じ比率であった。またオゾン劣化後の溶存酸素量は、熱劣化の結果とほぼ同様の傾向を示した。



(5) 網目鎖密度試験（架橋密度）

促進劣化による架橋密度の推移と変化率を図-12に示す。熱劣化後の架橋密度は、新規製作ゴムでは促進時間の経過とともに値が大きくなる傾向が確認された。一方損傷ゴムダンパーでは、促進劣化による変化がほぼ無いことが確認された。またオゾン劣化後の架橋密度は、新規製作ゴム、損傷ゴムダンパーともにほぼ変化がなかった。

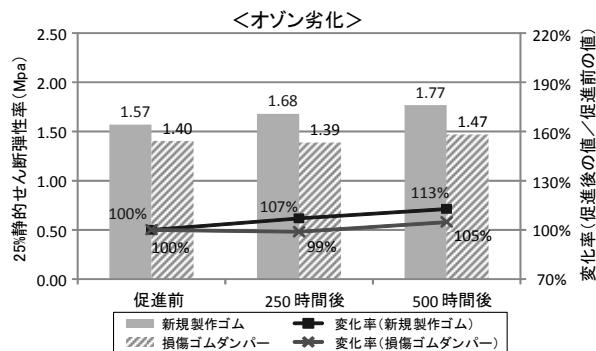


図-9 促進劣化による静的せん断弾性率の変化

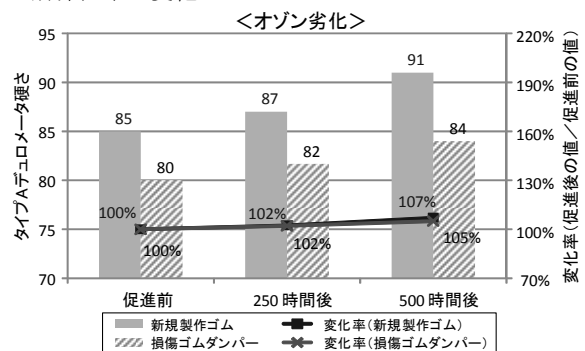
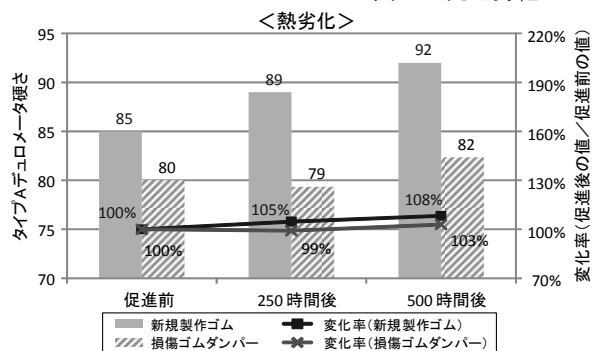


図-10 促進劣化による硬さの変化

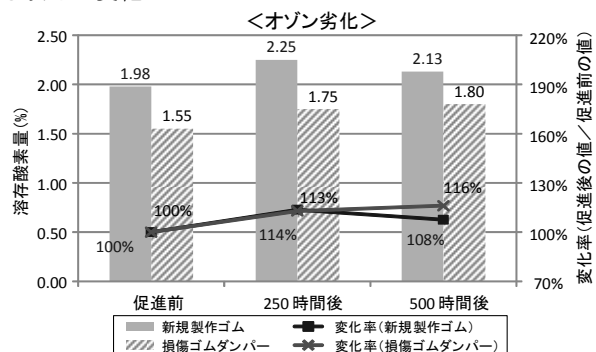
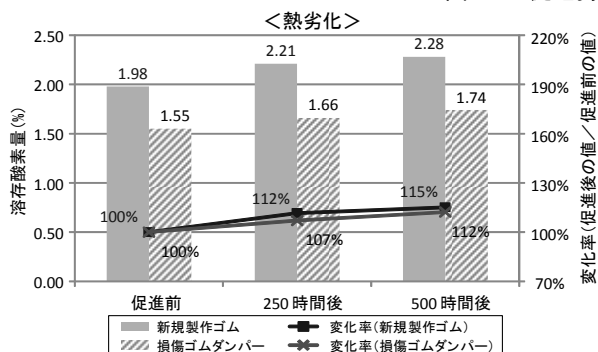


図-11 促進劣化による溶存酸素量の変化

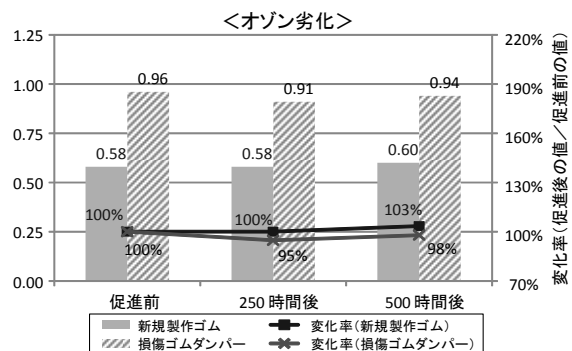
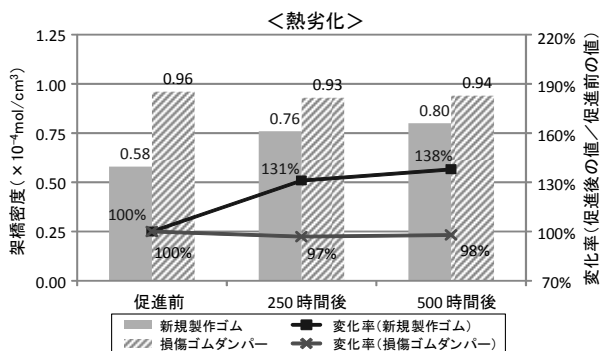


図-12 促進劣化による架橋密度の変化

6. まとめ

材料試験から得られた知見および考察を、下記①～⑥に示す。

- ① 引張試験の結果、ゴム材料が硬化し変形能が低下しており、損傷ゴムダンパーの性能確認試験結果²⁾と同じ傾向であった。促進試験結果からも同様の傾向（経年で破断伸びは低下するが、引張強度はほぼ変化がないこと）が確認できた。
- ② 接着はく離試験の結果、すべての試験体で規格値を満足しているが、ゴム表面付近の接着力が内部と比べ相対的に低い傾向が確認された。
- ③ 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。
- ④ 劣化速度に差はあるものの熱とオゾンの 2 つ劣化要因による各試験の劣化傾向（変化率）は、ほぼ同様の傾向を示した。唯一新規製作ゴムの架橋密度のみオゾンによる劣化がほぼ無いのに対して、熱による劣化（架橋密度の増加）が顕著である傾向を示した。
- ⑤ 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があると推測される。

- ⑥ ゴムダンパーの特性値が変化した原因の一つとして、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可能性があるとの推測される。

促進試験後の各試験における変化率（劣化傾向）は、全体的に新規製作ゴムと比べ損傷ゴムダンパーの方が比較的緩やかな傾向であることが確認された。そのため、現状のゴムダンパーの耐震性能が急激に悪化するようなゴム材料自体の劣化進行は生じにくいと推測される。しかし、現時点では材料試験および促進試験の試験体数が少ないため、劣化傾向を精度良く予測することは困難である。またゴムダンパーの形状の違いによる内部温度の分布やその影響範囲についても不明である等、その他検討課題も多くあることから、今後も引き続き検討を進める。

参考文献

- 1) 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) 大門，中山，水谷，林田，鈴木，後藤：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，第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 pp. 487-492，2015。