

長期間供用されたパッド型ゴム支承の特性評価

井上 崇雅¹・青木 康素²・星隈 順一³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修（工） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 博（工） 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室 室長
(前 国立研究開発法人土木研究所 上席研究員)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震以降、支承構造としてゴム支承が広く普及してきており、ゴム支承のストックが年々増加してきている。一方で、建築構造での適用方法と比較すると、橋で用いるゴム支承の使用環境は、耐久性の観点からは厳しい条件である。このため、将来のゴム支承の維持管理を適切に実施していく必要がある観点から、近年、長期間供用下にあったゴム支承の経年劣化が力学的特性に与える影響などの研究がなされてきている^{1)~3)}。ゴム支承の機能を保持していくことから、経年劣化がその力学的特性に与える影響を明らかにしておくことが求められる。

このような背景から、著者らは撤去橋梁を活用してゴム支承の経年劣化の影響を検証する臨床的な研究を実施している。本研究では、長期間供用下にあったパッド型ゴム支承の力学的特性や材料特性を検証することを目的とし、供用開始から26年経過したパッド型ゴム支承を用いて、圧縮特性試験及び材料特性試験を実施した。

2. 撤去支承の概要

(1) 橋梁概要

本研究で対象としたパッド型ゴム支承で支持された橋の全景を写真-1に、上部構造が撤去された後の橋座の状況を写真-2に、支承配置図を図-1にそれぞれ示す。本橋は海岸線から220mの塩害環境下に位置する橋梁であり、橋梁形式は、橋長45.0m、



写真-1 橋の全景

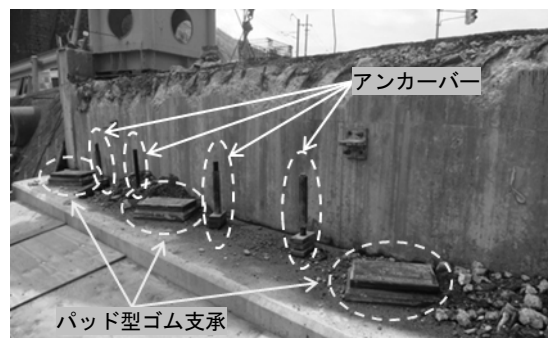


写真-2 上部構造が撤去された後の橋座の状況

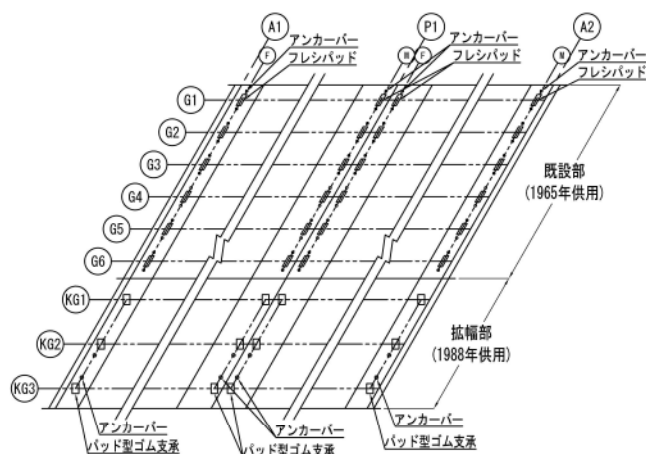


図-1 支承配置図

幅員 16.55m の単純 PC ポステン T 桁橋 2 連である。下部構造は、RC 壁式橋脚、逆 T 式橋台となっている。本研究では、1988 年に供用された拡幅部側のパッド型ゴム支承を対象として試験を実施した。

(2) 撤去支承

撤去した12体のパッド型ゴム支承の寸法を図-2に示す。支承は可動側6体、固定側6体であり、平面寸法は、可動側と固定側ともに、橋軸300mm×橋直450mmである。内部の構成は可動側は、単層厚15mmの4層、厚さ8mmの上下ゴム板2枚、固定側は単層厚17mmの2層、厚さ7mmの上下ゴム板2枚で構成されている。側面は厚さ5mmの被覆ゴムで覆われており、被覆ゴム及び内部のゴムの種類はクロロブレンゴム(CR)でせん断弾性係数は1.0N/mm²である。また、内部鋼板は材質SS400、厚さ1.6mmである。

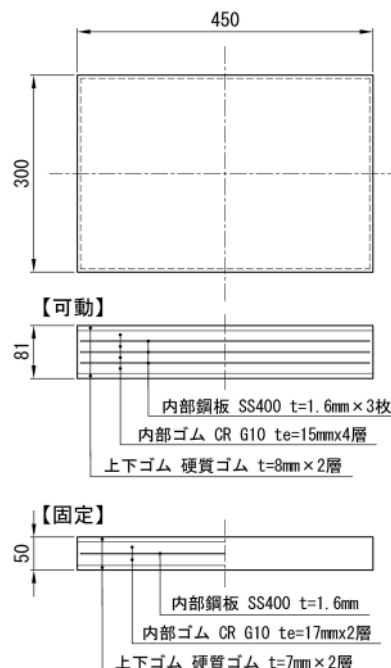


図-2 撤去したパッド型ゴム支承の寸法

(3) 劣化状況

撤去した支承12体のうち、10体のパッド型ゴム支承の観察結果を表-1に示す。撤去時のゴム支承に対して、ゴム支承の側面のき裂の評価を行った。き裂の評価は、JIS K 6259に記載されている「き裂の評価方法」により行った（表-2）。ただし、このき裂の評価方法は、ゴムのオゾン劣化試験後のき裂を評価する方法であることから、あくまでも参考として評価を行った。写真-3に示すとおり、A1橋台のゴム支承3体の側面にひび割れが確認された。ひび割れの状態は浅い細かなひび割れであり、被覆ゴムの範囲で収まっていると考えられる。また、撤去時のゴム支承の切断面を写真-4に示す。切断面の内部鋼板に腐食が生じている状況は確認されず、ゴム部に

表-1 劣化調査結果

種別	供試体名	評価結果			
		1側面	2側面	3側面	4側面
固定	A1K-G1	A-2	—	B-2	—
	A1K-G2	—	—	—	A-2
	A1K-G3	—	—	B-2	—
可動	P1LK-G1	—	—	—	—
	P1LK-G2	—	—	—	—
	P1LK-G3	—	—	—	—
固定	P1RK-G1	—	—	—	—
	P1RK-G2	—	—	—	—
	P1RK-G3	—	—	—	—
可動	A2K-G1	—	—	—	—

「—」:き裂なし

表-2 き裂の評価方法

き裂の数及びランク付け	き裂の大きさ、深さ及びランク付け
A:き裂少数	1. 肉眼では見えないが10倍の拡大鏡では確認できるもの
B:き裂多数	2. 肉眼で確認できるもの
C:き裂無数	3. き裂が深くて比較的大きいもの(1mm未満)
	4. き裂が深くて大きいもの(1mm以上3mm未満)
	5. 3mm以上のき裂又は切断を起こしそうなもの

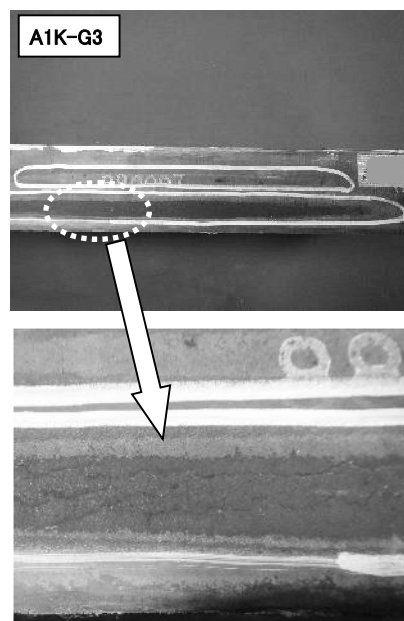
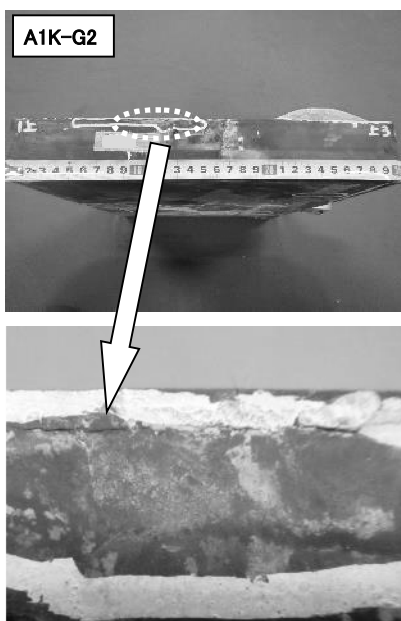
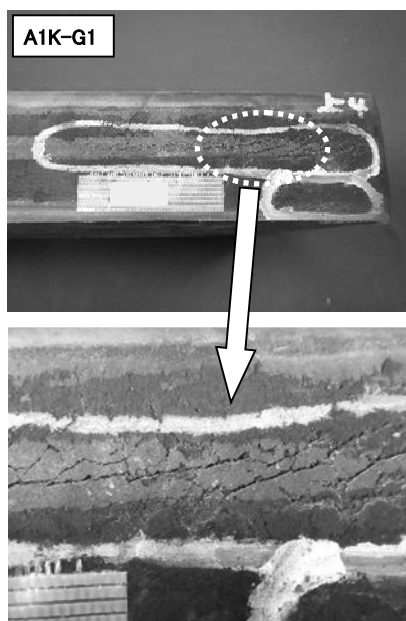


写真-3 側面のひび割れ状況

表-3 供試体諸元

供試体名	ゴム本体辺長		せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	ゴム1層厚	ゴム層数	ゴム総厚	一次 形状係数 S1	二次 形状係数 S2	ゴム部 有効面積 A _o (mm ²)
	橋軸 A (mm)	橋軸直角 B (mm)		t (mm)	n (層)	Σ t (mm)			
P1LK-G1	300	400	1.0	15	4	60	5.83	4.83	127600
A2K-G2,G3	300	400	1.0	15	4	60	5.83	4.83	127600
リファレンス支承	300	400	1.0	15	4	60	5.83	4.83	127600

関してもクラック等の異状は確認されなかった。

3. 特性試験の概要

(1) 供試体

供試体諸元を表-3 に示す。可動側の撤去した支承の他に、経年的な影響を受けていない供試体として、撤去した支承の諸元を再現させたリファレンス支承を新規に製作し、材料特性について撤去した支承との比較を行った。

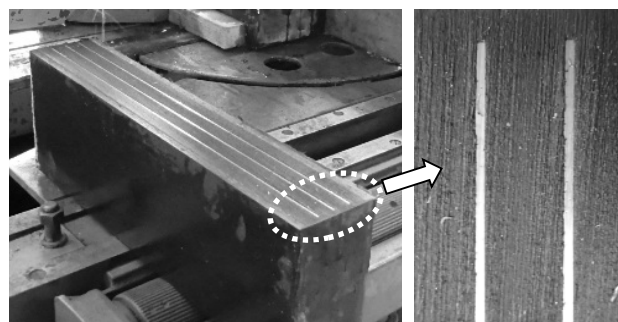


写真-4 ゴム支承の切断面 (A2K-G3)

(2) 圧縮特性試験

撤去支承に対して、撤去した後の圧縮ばね定数と繰返し圧縮载荷により圧縮疲労を受けた状態での圧縮ばね定数の変化を評価するために、圧縮疲労試験を実施した。セットアップ状況を写真-5 に示す。

当該支承設計時の S48 道路橋支承便覧⁴⁾において記されていた疲労試験の繰返し回数は 3 万回であるが、それよりも多い繰返し回数の条件下も含めて圧縮特性の変化を調査するため、本研究では、あえて繰返し回数 5 万回までは最小圧縮応力度を 1.5N/mm²、最大圧縮応力度を 5.0N/mm² とする荷重振幅による繰返し载荷を行った。さらに、圧縮疲労により最終的にゴム支承本体にどのような損傷が生じ、圧縮特性にどの程度の変化が生じるかを把握するため、荷重振幅における最大圧縮応力度を 12.0N/mm² (H16 道路橋支承便覧⁵⁾に記載されている最大圧縮応力度) にまで引き上げて試験を継続した。また、圧縮疲労試験前、繰返し回数 1 万回、5 万回、10 万回のそれぞれの段階で圧縮特性試験を実施した。

ここで、圧縮ばね定数は、圧縮特性試験における 3 回目の载荷パスで圧縮応力度が 1.5~5.0N/mm² の範囲での結果に基づいて算定した。H16 道路橋支承便覧では、圧縮ばね定数を評価するための圧縮応力度の着目範囲は 1.5~6.0N/mm² であるが、本研究では、試験対象としたゴム支承が製造された当時は、圧縮応力度の最大値が 5.0N/mm² であったことから、1.5~5.0N/mm² の範囲に着目して圧縮ばね定数を評価することとした。なお、鉛直変位については 4 箇

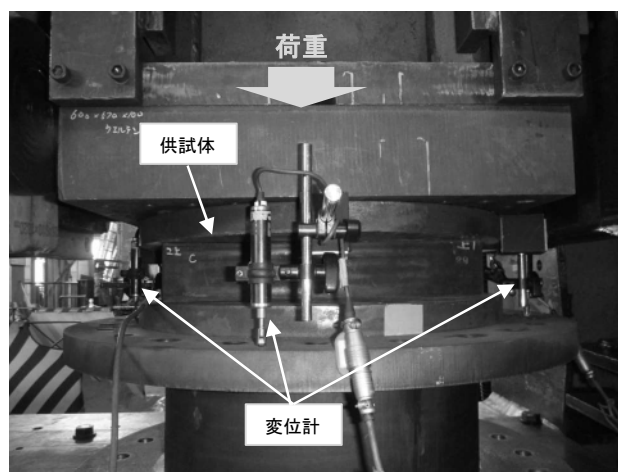


写真-5 セットアップ状況

所に設置した変位計により計測した各変位量の平均値から算出した値である。

(3) 材料特性試験

撤去支承の材料特性を評価するために、ゴム支承から試験片を取り出し、以下に示す試験を行った。

- 引張試験
- せん断変形試験
- デュロメータ硬さ試験
- 接着はく離試験
- 老化防止剤残量試験
- 溶存酸素量試験

(4) 観察調査

圧縮疲労を受けたゴム支承の損傷状況の評価するために、圧縮疲労試験終了後にパッド型ゴム支承を切断し、支承の切断面の調査を行った。

4. 特性試験及び観察調査の結果

(1) 圧縮疲労の評価

圧縮疲労試験前に実施した圧縮特性試験により評価された圧縮ばね定数は、表-4 に示すように設計値に対して 14.1%大きくなっていた。現行の品質管理基準⁵⁾では、試験により測定した圧縮ばね定数が設計値に対して $\pm 30\%$ 以内であることが求められているが、撤去時の支承の圧縮ばね定数は、その要求水準を満足している状態であった。

圧縮疲労試験の結果を図-3 に示す。縦軸は圧縮ばね定数、横軸は繰返し回数とし、各繰返し回数後の試験により計測された圧縮ばね定数と試験前の値からの変化率を図中に示した。5 万回の繰返し载荷後における圧縮ばね定数は、試験前に比べて 6%程度低下するに留まった。その後、荷重振幅における最大圧縮応力度を 12.0N/mm^2 に引き上げて 5 万～10 万回の繰返し载荷を行ったところ、その繰返し载荷の影響による圧縮ばね定数は、5 万回時の圧縮ばね定数に対して 12%程度減少する結果となったが、現行の品質管理基準⁵⁾の要求水準内であった。

(2) 材料特性の評価

ゴムの材料特性の変化を評価するために、ゴム支承を切断し、試験片を取り出した上で各種材料試験を行った。各支承の試験片の取り出し位置を図-4 に示す。リファレンス支承の試験片の取り出し位置については、支承側面部及び中央部を採取した。なお、各試験の評価は、当該支承設計時の S48 道路橋支承便覧の基準を基本としたが、当時の基準にないものは、H16 道路橋支承便覧に記されている規格値に対して評価を行った。

a) 引張試験

JIS K 6251 に基づき、引張試験を行った。引張強さと側面からの距離の関係を図-5 に、切断時伸びと側面からの距離の関係を図-6 に示す。引張強さについては、すべての箇所において現行の規格値 15N/mm^2 以上⁵⁾を満足した。また、破断時伸びにおいても、設計当時の規格値 350%以上⁴⁾を満足する結果となった。

b) セン断変形試験

JIS K 6254 に基づき、25%静的せん断弾性率を評

表-4 圧縮疲労試験前の圧縮ばね定数

測定値 kN/mm	設計値 ^{注)} kN/mm	対設計値 %
549	481	+14.1

注)設計値は当時の基準で算出

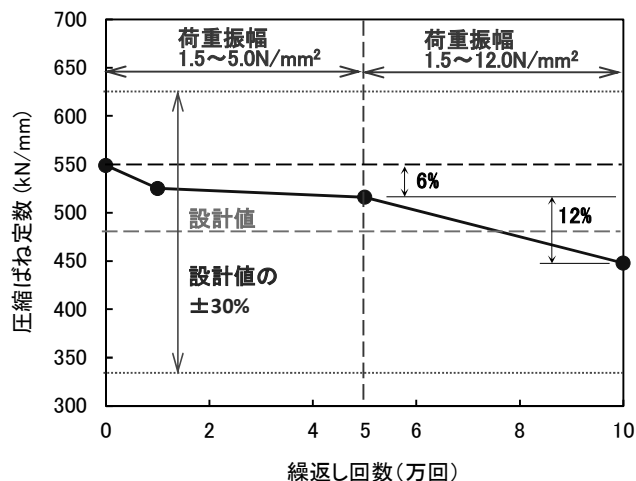


図-3 各繰返し回数後における圧縮ばね定数

価した。各支承のせん断弾性率と側面からの距離の関係を図-7 に示す。せん断弾性係数についても、側面からの距離に関係なく一定のせん断弾性率を有していることがわかる。

c) デュロメータ硬さ試験

JIS K 6253 に基づき、デュロメータ硬さを評価した。デュロメータ硬さと側面からの距離の関係を図-8 に示す。デュロメータ硬さは側面付近 (20mm 付近) において支承中央部に対して 9%程度硬化する傾向が示された。

d) 接着はく離試験

JIS K 6256 に基づき、90° はく離試験を行った。はく離強さと側面からの距離の関係を図-9 に示す。いずれの距離においても規格値 7N/mm^2 を上回るはく離強さを示した。

e) 老化防止剤残量試験

老化防止剤を抽出するために、ガスクロマトグラフィ質量分析計法 (GC/MS法) で定性試験を行い、ガスクロマトグラフ (GC) で定量試験を行った。老化防止剤残量と側面からの距離の関係を図-10 に示す。リファレンス支承は側面の距離に関係なく、一定の老化防止剤残量を有しているが、撤去支承においては、側面からの距離15mm付近の間で老化防止剤残量が減少していることがわかる。これはオゾン劣化が進行しているためと考えられる。既往の研究⁶⁾では、オゾン劣化は進行具合によってゴムの引張強さや破断伸びを低下させる可能性が指摘さ

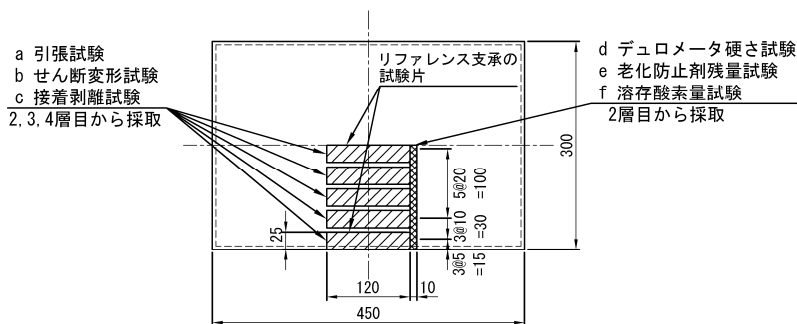


図-4 試験片の取り出し位置

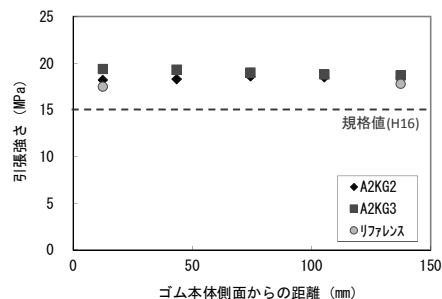


図-5 引張強さ

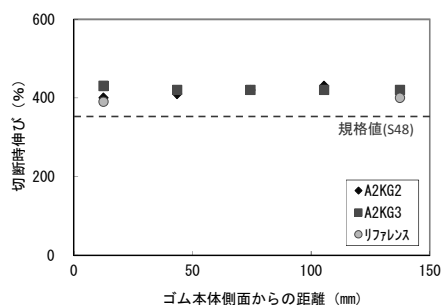


図-6 切断時伸び

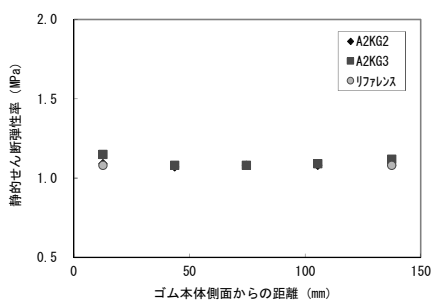


図-7 静的せん断弾性率

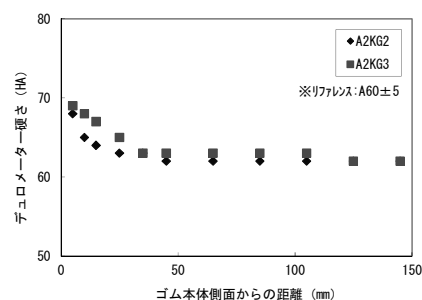


図-8 デュロメータ硬さ

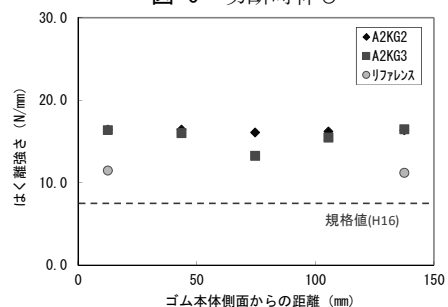


図-9 90° はく離強さ

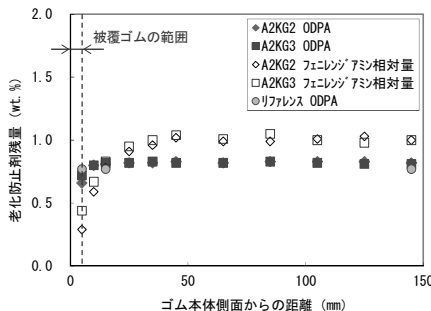


図-10 老化防止剤残量

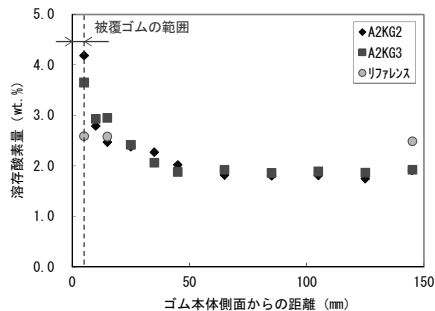


図-11 溶存酸素量

れている。側面から5mm付近までの範囲で老化防止剤残量が特に減少しているが、この範囲は設計上被覆ゴムという扱いとなっている。また、引張強さや切断時伸びの結果をみてもわかるように、支那の部材設計で考慮している断面内部のゴムへのオゾン劣化進展の影響は結果的に小さく抑えられていると評価できる。

f) 溶存酸素量試験

溶存酸素量を評価するためにマイクロコーダーで酸素量試験を行い、ゴム材料に含まれる酸素量を測定した。溶存酸素量と側面からの距離の関係を図-11に示す。リファレンス支那は側面の距離に関係なく、一定の溶存酸素量を有しているが、撤去支那においては、側面から25mm付近にかけて溶存酸素量が増加している。これは酸化が進行しているためである。酸化劣化もオゾン劣化と同様に、既往の研究⁹⁾では、進行具合によっては、ゴムの引張強さや破断時伸びを低下させる可能性がある。側面から5mm付近までの範囲で溶存酸素量が特に増加しているが、老化防止剤残量と同様に、設計上側面から

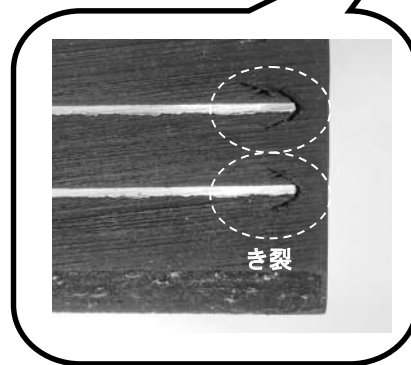
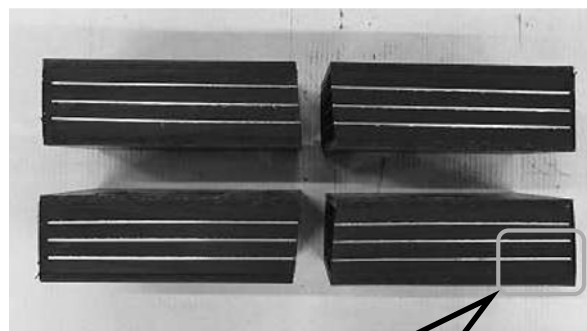


写真-6 圧縮疲労試験後のゴム支那の内部状態

5mm までの範囲は被覆ゴムという扱いとなっていたことや、引張強さと切断時伸びの結果をみてもわかるように、支承の部材設計で考慮している断面内部への影響は抑えられていると考えられる。

(3) 観察調査

圧縮疲労試験後のパッド型ゴム支承を切断し、切断面の調査を行った。切断後のゴム支承内部の状況を写真-6 に示す。内部のゴムについては、内部鋼板端部よりゴム支承の中心側へと向かうき裂が生じていることが内部鋼板端部においてすべての箇所を確認された。別途、圧縮疲労試験をしていないパッド型ゴム支承に対して同様に切断面の調査を行ったところ、切断面ではき裂は生じていなかった(写真-4)。このことから、圧縮疲労試験によってき裂が発生したと考えられ、このき裂が圧縮ばね定数を低下させる要因となったと推測される。ただし、圧縮疲労試験時のどの時点でこのき裂が生じたかは特定できていない。

5. まとめ

本研究では、長期間供用されたパッド型ゴム支承を対象に、圧縮疲労試験及び材料特性試験を行い、経年劣化が圧縮特性や材料特性に及ぼす影響について検討した。本研究の範囲ではあるが、得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 繰返し圧縮疲労の影響による最終的なゴム支承の損傷モードとしては、内部鋼板の端部周辺のゴム部から支承の中心の方向へとき裂が進展する形態となることが確認できた。
- (2) 老化防止剤残量試験を行った結果、ゴム支承の側面から 15mm 付近の間でオゾン劣化が進行していることを確認した。また、溶存酸素量試験を行った結果、ゴム支承の側面から

25mm 付近の間で酸化が進行していることを確認した。

- (3) ゴムの引張強さ及び破断時伸びについては、側面からの距離に関係なく、一定の強度を有していた。オゾン劣化や酸化劣化は生じていたものの、その強度への影響は小さい結果であった。

謝辞：本研究の検証に用いたパッド型ゴム支承は、国土交通省東北地方整備局秋田河川国道事務所の御協力により提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 篠原聖二，星隈順一：地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性評価に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学）（公社）土木学会，Vol. 71 No. 4（地震工学論文集第34巻），P. L587-L599，2015.
- 2) 林訓裕，足立幸郎，五十嵐晃，党紀，濱野真彰，東出知大：積層ゴム支承の経年劣化損傷が残存性能に与える影響検討，第17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. 197-202，2014.
- 3) 大門大，中山裕昭，水谷明嗣，林田慈大，鈴木森晶，後藤芳顕：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.
- 4) （社）日本道路協会：道路橋支承便覧，1973.
- 5) （社）日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 6) 伊藤義人，矢澤晃夫，佐藤和也，顧浩声，忽那幸浩，山本吉久：橋梁支承用ゴムの環境劣化特性に関する基礎的研究，土木学会論文集No.794，I-72，253-266，2005.