

ゴム引布製起伏堰の長期性能評価 に関する共同研究報告書

令和 2 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所

大和機械設備株式会社

日東河川工業株式会社

日本自動機工株式会社

バンドー化学株式会社

株式会社丸島アクアシステム

Copyright© (2020) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ゴム引布製起伏堰の長期性能評価 に関する共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所技術推進本部
国立研究開発法人土木研究所技術推進本部
先端技術チーム

総括研究監 藤野 健一

上席研究員 梶田 洋規*1

上席研究員 新田 恭士*2

主任研究員 中島 淳一*3

主任研究員 上野 仁士*4

主任研究員 伊藤 圭*5

国立研究開発法人土木研究所先端材料資源研究センター
材料資源研究グループ

上席研究員 新田 弘之

主任研究員 百武 壮*6

専門研究員 中村 崇*7

研究員 川島 陽子*8

大和機械設備(株)

松林 俊夫

日東河川工業(株)

川村 圭司

日本自動機工(株)

大西 周平

浜本 博幸

金森 豪

高崎 守

バンドー化学(株)

甘中 正敏*9

寺村 篤

山岸 航大*10

(株)丸島アクアシステム

宮田 真治

松岡 春彦

稲葉 晃一

共同研究参加期間

* 1 : 平成 28 年 4 月～平成 30 年 3 月

* 2 : 平成 30 年 4 月～

* 3 : 平成 28 年 4 月～平成 31 年 3 月

* 4 : ～平成 28 年 3 月, 平成 29 年 4 月～

* 5 : 平成 27 年 4 月～平成 29 年 3 月

* 6 : ～平成 31 年 3 月

* 7 : ～平成 30 年 4 月

* 8 : 平成 31 年 4 月～

* 9 : ～平成 28 年 3 月

* 10 : 平成 28 年 4 月～

要旨

ゴム引布を利用したゴム引布製起伏堰（ゴム堰）は、設置の施工性や維持管理の容易さやコスト面の優位性から農業用途として広く普及し、地方整備局では大型の堰にも利用されている。現在、設置から30年以上経過した施設が増えるのに伴い、老朽化等による劣化損傷が顕在化され始め、使用上問題となる事例がみられるようになった。しかし、老朽化したゴム袋体の性能評価方法や維持管理の方法、施設の運用方法等が十分確立されていないのが現状である。

そこで、国立研究開発法人土木研究所は共同研究により、各施設の実態調査を実施し、経年劣化や損傷事例を取りまとめた。また、ゴム引布の長期性能評価手法を検討し、効果的な損傷の点検・補修・運用方法について提案を行う。

ゴム引布製起伏堰の長期性能評価に関する共同研究報告書

目 次

まえがき

1章 研究概要	1
1.1 ゴム堰の概要	1
1.2 ゴム堰の現況	2
1.3 ゴム堰本体の変遷	3
1.4 研究の目的	4
1.5 本報告書の構成	4
2章 ゴム引布の経年劣化および損傷に関する性能評価方法の検討	6
2.1 経年劣化および損傷の整理	6
2.1.1 経年劣化・損傷の分類	6
2.1.2 経年劣化・損傷の事例	10
2.1.3 現場での劣化度合い検証事例	19
2.2 性能評価方法の検討	30
2.2.1 ゴム引布の長期性能評価	30
2.2.2 ゴム袋体ひずみ量の現地調査	32
2.2.3 ゴム引布の温度調査	36
2.2.4 ゴム引布の静的強度特性	38
2.2.5 ゴム引布のクリープ特性	40
2.2.6 ゴム袋体の劣化分析	43
2.2.7 ゴム袋体の材料試験	47
2.2.8 大型供試体のクリープ試験例	61
2.2.9 オゾン劣化試験例	66
2.3 経年劣化および損傷と性能評価方法のまとめ	76
3章 損傷に適した診断および補修法の開発	77
3.1 破損部の診断方法	77
3.1.1 現行の損傷把握手法	77
3.1.2 赤外線サーモグラフィーによる試行	78
3.1.3 非破壊打音解析装置による試行	80
3.2 補修方法および補修材の検討	85
3.2.1 補修方法・材料・前処理方法の分類	85
3.2.2 ゴム引布接着における研磨仕様、接着後養生時間の影響	86
3.2.3 補修方法別の接着強さ評価	93
3.2.4 耐熱・耐水の接着試験	96
3.2.5 補修箇所の耐圧試験	110
3.2.6 塗料型補修材の性能評価	117
3.2.7 塗料型補修材のフィールド評価	121
3.3 適切な診断および補修方法のまとめ	124

4章 応力分布の解析方法の開発	125
4.1 ゴム袋体全体モデルの応力解析	125
4.1.1 概要	125
4.1.2 袋体全体モデルによる応力解析	126
4.1.3 袋体局所モデルによる応力解析	129
4.1.4 袋体全体モデルの応力解析のまとめ	131
4.2 有限要素法によるゴム引布の内部応力解析	132
4.2.1 概要	132
4.2.2 FEMのための材料モデル化と検証解析	133
4.2.3 FEM解析結果と内部応力	136
4.2.4 内部応力の実機に及ぼす影響についての考察	138
4.2.5 有限要素法による内部応力解析のまとめ	139
5章 まとめ	140
参考文献	141

まえがき

ゴム引布を利用したゴム引布製起伏堰（ゴム堰）は、設置の施工性や維持管理の容易さ、コスト面の優位性から農業用途として広く普及しており、治水においても、いくつかの地方整備局では大型の堰にも利用されている。近年、設置から 30 年以上経過した施設が増えており、老朽化による劣化損傷の発生により使用上問題となる事例がみられる。施設は多様な現場環境下で使用されているため、様々な損傷が発生しているが、老朽化に伴うゴム袋体の性能評価方法や維持管理の方法、施設の運用方法が十分確立されていないのが現状である。そのため、損傷があっても機能回復できず、堰としての機能を低下させ、事故のリスクを高める恐れがある。

本共同研究報告書は、各施設の実態調査を行い、ゴム引布の長期性能評価手法を検証した成果をまとめている。また、効果的な損傷の点検方法や補修方法について提案を行うものである。

令和 2 年 3 月

1章 研究概要

1. 1 ゴム堰の概要

ゴム引布製のゴム袋体を扉体とし、給気・抜気により扉体倒伏を可能とするゴム引布製起伏堰（通称：ゴム堰 写真 1.1.1）は、河川の流水制御等を行うため利水・治水用途として全国に広く普及している。

ゴム袋体は円筒状の構造で、その両端は堰柱に、底部は河床コンクリート基礎に所定の金具を用いてボルト止めされ、水圧を受け止めている。その構成素材はゴム引布で、ゴムとナイロン繊維(織布)の複合積層体である（図 1.1.1）。ゴム袋体は工場の製造設備規模の制約から、複数の接合部を有し、熱と圧力による熱加硫の作用で階段状に接合（図 1.1.2）されている。



写真 1.1.1 ゴム堰全景

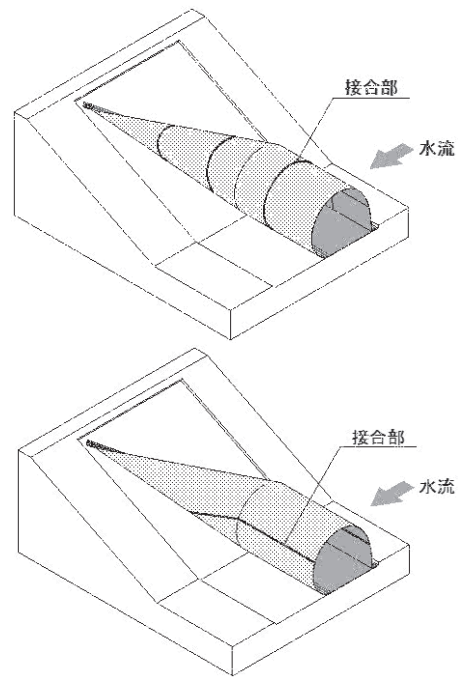
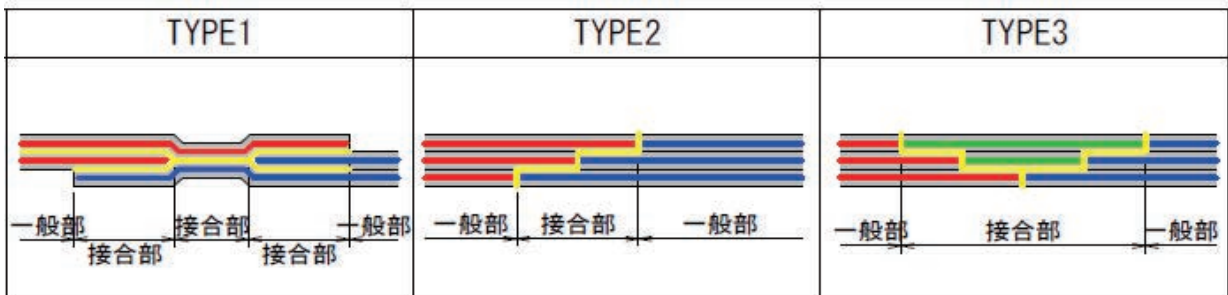


図 1.1.1 ゴム引布接合方法



— 接合面

図 1.1.2 ゴム引布断面構造図

ゴム袋体の製法は各製造者や年代によるため、袋体の製造方法や材料物性は一樣ではない。このため、

ゴム袋体の劣化や損傷には個体差があり、また経年劣化や多様な使用環境により材料物性が大きく変化するので、その状態を一律な傾向として捉えるのは誤りである。このような背景が影響してか、老朽化に伴うゴム引布の性能評価方法や維持管理の方法、施設の運用方法が十分確立されておらず、現場での定まった対応方法がないのが現状である。なお、接合部は経年劣化により、接合強度が低下してはく離する場合がある。ゴム袋体は主に、下記の環境の影響により損傷等のリスクがある為、今も製法や構造などの改善が進められている。

【劣化や損傷の主な要因】

- ・ ドライ状態での陽射しによる高温、オゾン劣化
- ・ 流水圧力、堆砂による偏荷重
- ・ 内圧による常時張力、倒伏時の繰返し応力
- ・ 転石、流木による損傷

1. 2 ゴム堰の現況

ゴム堰は、平成 25 年 7 月時点、国内で約 3,900 箇所以上設置されており、設置から 20~30 年経過したものが増加し、施設の老朽化が顕著である(図 1.2.1)。また、国土交通省が管理しているゴム堰の設置規模について、平成 26 年度時点の堰径間長及び堰高の門数分布を図 1.2.2 と図 1.2.3 に示す。径間長の分布は 20m 以下と 30m 以上に 2 分している。一方、堰高の分布は 2~3m が多数を占めている。国土交通省直轄管理のゴム堰の全国設置数は、平成 24 年時点で 32 堰であり、表 1.2.1 に示す通り、北海道を除く全国に設置されている。

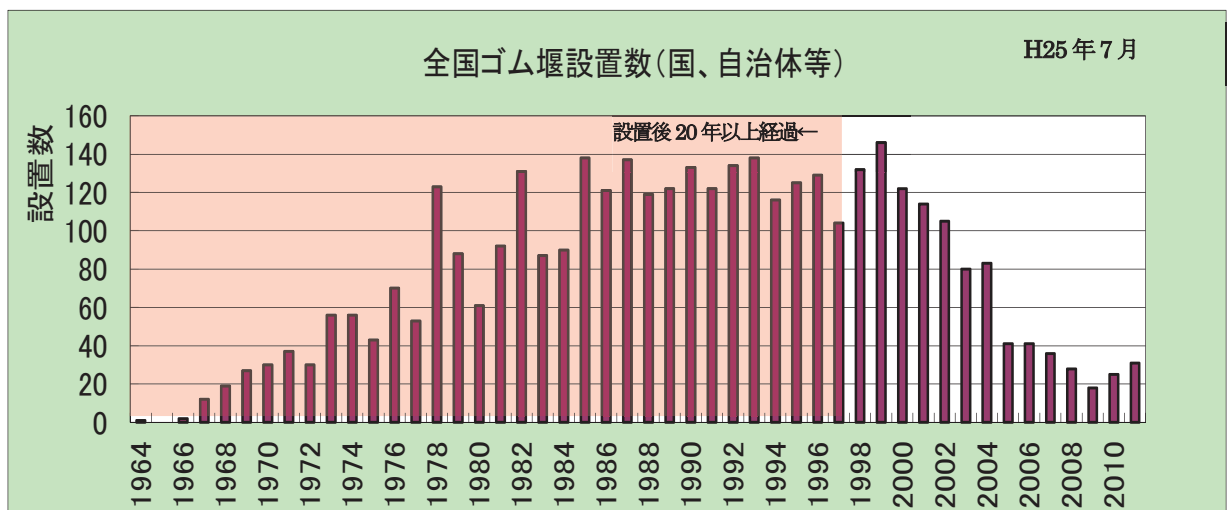


図 1.2.1 年代別ゴム堰設置数の推移

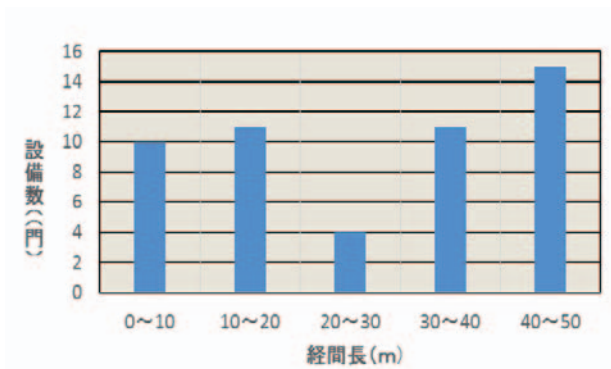


図 1.2.2 ゴム堰径間長の規模分布

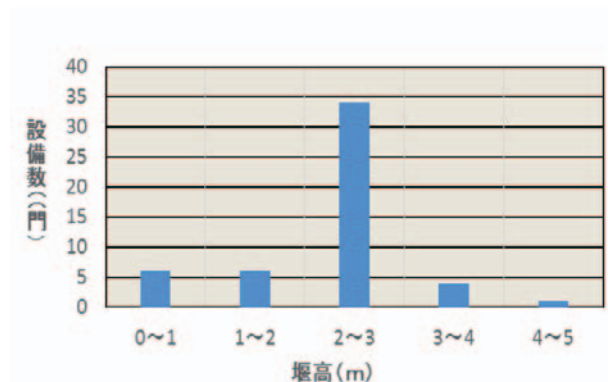


図 1.2.3 ゴム堰堰高の規模分布

表 1.2.1 ゴム堰全国設置箇所分布図

地整等	北海道	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	計
ゴム堰数	0	4	13	0	1	2	3	4	5	32

1. 3 ゴム堰本体の変遷

昭和 39 年に我が国最初のゴム引布製起伏堰が竣工して以来、昭和 53 年に「ゴム引布製起伏堰技術基準（一次案）」が取りまとめられ、その当時は主に小河川の用水堰として使用されてきた。その後、大規模河川への実施例や調査・研究成果などが積み重ねられ、同時に昭和 55 年にはゴム袋体の構造などにも改良・改善品が現れ、昭和 58 年には大型化（堰高 6m 程度）を技術的な目標に検討された成果を集大成した二次案が制定された。さらに、ゴム製起伏堰は大河川への適用事例が多く見られるようになり、施工実績や個別の技術によって得られた技術的知見などにより、ゴム堰本体の構造も更なる改良がなされるようになった。初納入からのゴム本体構造の変化を図 1.3.1 に示す。

現在は、袋体の強度部材であるナイロン繊維を保護する役割であるゴムの厚みを、従来の薄い構造（外皮 1 mm 程度）から厚みを増して、流下物による損傷やオゾン劣化を防ぐための構造に代ってきている。また、フィン部付近に発生する外層ゴム膨れに関しては、内面ゴムの 2 重気室構造にして、内面からの空気圧流出の防止を目的とした工夫がなされている。

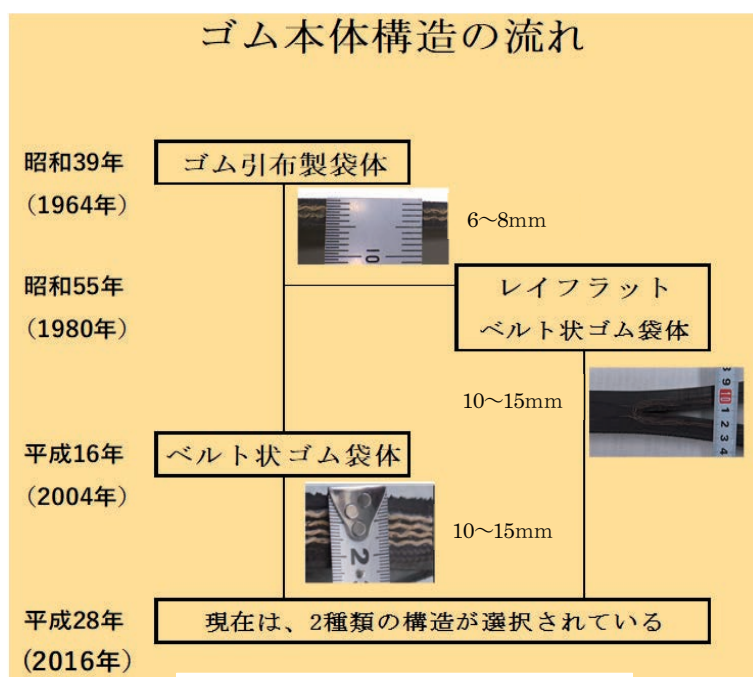


図 1.3.1 ゴム本体構造の変遷

1. 4 研究の目的

近年、ゴム堰は老朽化の進行が顕著であり、ゴム袋体の機能不全や不具合が顕在化してきている。ゴム袋体は、製造者や製造された年代、現場条件により経年劣化のレベルが大きく異なることが知られており、一律の耐用年数や余寿命とはならない。したがって、適正な評価方法により、個別の性状を正確に見極める必要がある。そのためには、物性値や強度などを正確に把握できる実用的な試験方法が求められる。特に、後接着を施した接合部の内面はく離は致命的な損傷に発展する恐れがあるので、注意が必要である。内面はく離は外見ではその把握は困難であることから、非破壊検査装置の開発が望まれる。

次にゴム袋体に損傷等が認められる場合は、その状況に応じた適正な補修が求められるが、袋体の素材であるゴム引布の材質や製造方法、劣化状況等により補修方法や補修による発現強度が異なってくるため、ゴム引布の特性を踏まえた最善の補修手法の選定が必要となる。

以上の背景やニーズを踏まえ、本研究ではゴム袋体の適切な性能評価手法や、破断箇所の診断および補修方法などを明らかにするために、新たな実験的検証を行い、実践的かつ実用的な性状評価方法や補修材の性能をまとめている。各種検討して得られた結果は、示唆に富むものとなっており、施設を保有する施設管理者、ゴム袋体の製造者、設備点検や補修施工を担う専門業者にとって参考となるよう、とりまとめている。

1. 5 本報告書の構成

本共同研究報告書の構成を下記に述べる。

第1章では、まず、ゴム堰の概要と国土交通省を主体とする現況について記載している。

第2章では、ゴム堰の維持管理の要は、正にゴム袋体の経年劣化を知ることがいかに重要であるかを踏

まえ、国内におけるゴム堰の経年劣化の実例に基づき、その傾向分析や補修の実績も含め整理している。また、ゴム引布の劣化性能評価を行うための様々な各種試験方法を網羅している。

第3章では、損傷に適した補修方法の開発のため、損傷部の診断方法、特に、目視での診断が難しい内部はく離の検知について記載している。次に、現場の補修方法としてカバーゴムなどの接着に着目し、その接着力の評価のための各種試験方法や塗料型補修材について記載している。

第4章では、解析的手法の代表格である有限要素法（FEM）により、マクロ及びミクロの観点から袋体の内部応力分布がゴム堰全体に及ぼす影響について考察している。

最後に第5章として、本研究の総括を最終としてとりまとめている。

2章 ゴム引布の経年劣化および損傷に関する性能評価方法の検討

2. 1 経年劣化および損傷の整理

ゴム堰の扉体材料であるゴム引布の劣化について、時間の経過とともに品質・性能が低下する「経年劣化」と運用方法や突発的な事故、災害などによる「損傷」に分けられる。経年劣化の要因として、日射熱、紫外線、オゾン、水その他、恒常的にゴム表面を摩耗させる転石や土砂などが考えられる。一方、損傷の要因には、転石や流下物に起因するものや、低内圧による堰体振動等が挙げられる。また、ゴム引布がコンクリート躯体や固定金具と接触し摩耗することで貫通傷が発生し、この損傷が進行して破裂に至る場合がある。

本節では、それぞれの劣化要因や損傷要因について解説し、現場での事例について紹介する。

2. 1. 1 経年劣化・損傷の分類

(1)劣化要因

①転石摩耗

転石摩耗とは、河川環境から転石によるゴム表面への繰り返し接触、摩耗が予見されており、長い時間を経て外層ゴムを研磨した結果、織布が露見するなどの劣化状態へと至ったものである(写真2.1.1)。転石による摩耗を抑制するためには、外層ゴムの厚くする対策が有効である。



写真 2.1.1 転石摩耗による劣化状態

②老朽化(ゴムの硬化)

老朽化とは、日射熱や紫外線などにより時間の経過とともにゴムが硬化し、ゴム引布の品質・性能が低下する事象とされる。ゴム袋体のゴムは、自動車用タイヤのゴムと同様に、空気中のオゾンや紫外線、日射熱などの影響を受けると硬化が進行し、伸び率の低下にとともに、写真2.1.2のように折れ曲がり部では亀裂が入る。この亀裂が拡大すると外層ゴムが補強繊維からはく離し(写真2.1.3)、補強繊維が直接、紫外線に曝される。破断すると材料強度が低下し、ゴム袋体が破裂する危険性が高まる。

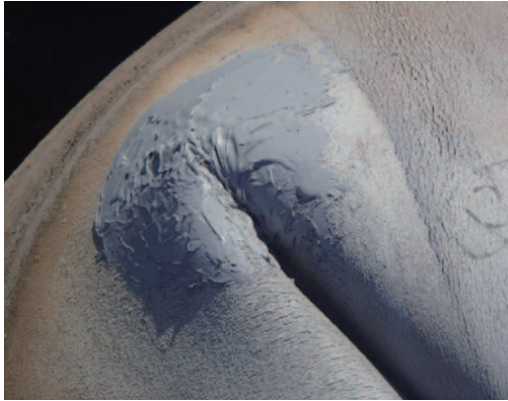


写真 2.1.2 シワ部の亀裂



写真 2.1.3 接合部のはく離

③膨れ

膨れとは膨張媒体である空気が、ゴム堰の補強する織布を通して外層ゴムに達し、外層ゴムと補強織布間の接着力が低下してきた箇所からゴムはく離が生じて、その箇所が長い時間を経て外層ゴムに力が掛かり続けた結果、接着力低下と劣化状態と重なって発生する事象である(写真 2.1.4)。膨張媒体である空気が直接、補強織布に達しない対策が有効と考えられる。

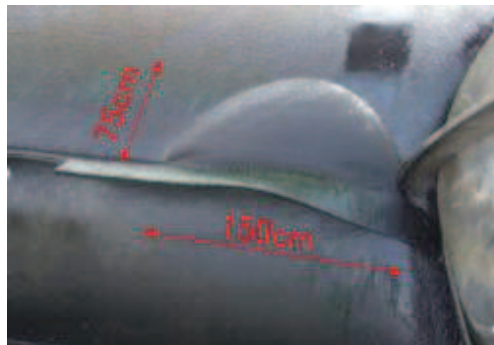


写真 2.1.4 膨れ状態

④層間はく離

大型化したゴム堰は製造設備の制約上、ゴム同士同士の繋ぎ(ジョイント)箇所が必要となる。ジョイント部位は階段状にステップを取って薄いゴムを介して加硫接着されている。層間はく離とは、長い時間を経て当該ゴムが硬化したり、接着力が低下して補強織布の層間が剥がれ、劣化状態へと至ったものである(写真 2.1.5)。

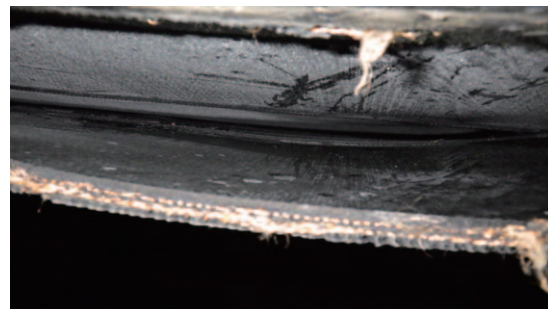
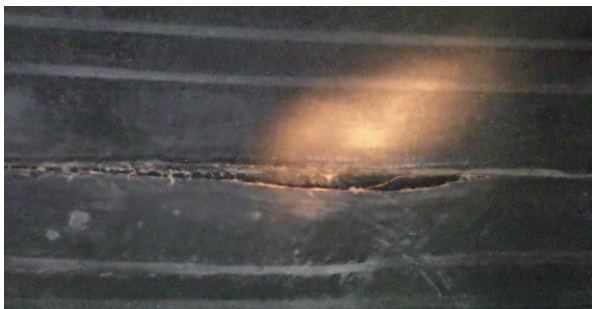


写真 2.1.5 層間はく離事例 (右写真：はく離箇所拡大図)

(2) 損傷要因

① 転石、流下物、ガラス片などによる損傷

先述の劣化要因の転石摩耗とは別に、大型のものや鋭利部のある転石、流下物のゴム袋体への衝突等により、織布の露出や貫通傷が発生するものである。このような転石・流下物はすべてを防ぎきれものではないが、直上流にあった鋭利な転石の発生現場を発見・改修することで発生を低減させた例がある。



写真 2.1.6 流下物による損傷状態

② 堆積土砂除去における作業ミス

袋体倒伏時に上部に堆積した土砂を、バックホウで除去した際にバケットの爪を袋体に引っかけてしまい損傷させた例がある(写真 2.1.7)。このような事故がないよう、作業には細心の注意を払う必要がある。

③ 悪戯

カッターナイフ等を用いて故意に袋体が傷つけられた例がある(写真 2.1.8)。海外ではバンダリズムの対策を目的として、表層ゴムにセラミックスのチップを含有させたり、ステンレスメッシュを用いた袋体の例がある。



写真 2.1.7 バックホウの爪による損傷



写真 2.1.8 カッターナイフによる悪戯での損傷

④コンクリート躯体との擦れ

ゴム引布がコンクリート躯体や固定金具と接触して摩耗することで貫通傷が発生し得る。この損傷が進行するとゴム袋体の破損に至る場合があるので注意が必要である。



写真 2.1.9 コンクリート躯体との擦れによる摩耗損傷（右写真：拡大図）

⑤堰体振動

堰体振動とは、ゴム堰の起立時あるいは倒伏中に、何らかの原因で袋体全体が振動する現象である。これを放置すると、袋体の破損や、側壁と擦れることによる異常摩耗が発生する場合がある。予防策として、袋体上面にフィン等をつけて越流水膜を破壊することで振動発生を抑える方法があるが、まれに効果が見られないケースがある。この場合、袋体内圧を加減することで振動抑制を行っている。また、側壁との擦れが想定される場合は、側壁にウレタン塗装をするなどの保護措置を行っている例がある。



写真 2.1.10 堰体振動した堰の例

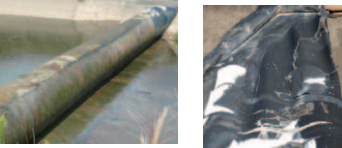



2. 1. 2 経年劣化・損傷の事例

各地のゴム堰は供用開始から数十年経過しているものが多く、劣化や損傷が目立つようになってきた。ここでは、実際のゴム堰の経年劣化や損傷の事例を紹介する。また、補修されているものについては、併せて補修実績についても記載する。

事例集は下記事項についてまとめた。

- ・ 劣化・損傷要因
- ・ 補修位置/劣化・損傷程度
- ・ 堰寸法 (高さ H (m) x 河床幅 W (m))
- ・ 設置年月および経過年数(2018年11月30日時点)
- ・ 補修年月および経過年数(2018年11月30日時点)
- ・ 補修方法
- ・ 補修写真・補修後の使用状況に関する写真

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH × 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
1	転石摩耗	帆布の露出	2.0H×20.0W	1988年3月 (30年)	2016年10月 (2年)	取り替え更新	
2	転石・土砂による摩耗	・補修位置は、堰中央部で倒伏時のゴム袋体下流側端部及び上流側表面部 ・損傷程度は、外層ゴムの摩耗一部、補強繊維露出及び磨滅	6.0H×34.5W	1993年5月 (25年)	2014年 (4年)	ゴム袋体と同一材質の補修用ゴム引布(厚さ2.6mm/幅1m×長さ5m/補強繊維1層)25枚を自然加硫型接着剤で貼り合わせ、補修した。	
3	転石・土砂による摩耗	・補修位置は、堰中央部で倒伏時のゴム袋体下流側端部 ・損傷程度は、外層ゴムの摩耗一部、補強繊維露出	2.6H×36.85W×5	1994年3月 (24年)	2012年 (6年)	ゴム袋体と同一材質の補修用ゴム引布(厚さ2.6mm/幅30cm/補強繊維1層)を自然加硫型接着剤で貼り合わせ、補修した。	
4	転石・土砂による摩耗	表層ゴム及び第1層織布の摩耗劣化	2.6H×36.85W	1994年3月 (24年)	2015年12月 (2年)	ゴム引布を自然加硫型接着剤で貼付	
5	転石・土砂による摩耗	ゴム袋体の補強繊維3層構造のうち、外層布1層摩耗	6.0H×34.5W	1995年5月 (23年)	2015年4月 (3年)	外層ゴム引布1層貼付(自然加硫接着剤適用)	
6	老朽化 転石・土砂による摩耗	表層ゴムおよびゴム引布の接合部のはく離	2.1H×18.0W	1971年3月 (47年)		2014年に更新	

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
7	老朽化 転石・土砂による摩耗	表層ゴム及び補修材のはく離	1.97H×33.0W	1975年3月 (43年)		2018年に更新	
8	老朽化 転石・土砂による摩耗	表層ゴムおよびゴム引布の接合部のはく離	1.22H×31.5W	1978年3月 (40年)	2017年4月 (1年)	ゴム引布を自然加硫型接着剤で貼付	
9	老朽化 転石・土砂による摩耗	表層ゴム及び補修材のはく離	2.78H×32.25W 2.78H×35.75W	1979年3月 (39年)	2016年 (2年)	鉄製ゲートに取り替え工事中	
10	転石・土砂による摩耗および日射熱・紫外線などによる老朽化	外層ゴム(3mmt)が摩耗し、補強繊維が部分的に露出	2.0H×39.W	1979年5月 (39年)	2012年2月 (更新計画中)	外層ゴム引布2層貼付 (自然加硫接着剤適用)	
11	日射熱・紫外線、オゾンなどによる老朽化	・補修位置は、ゴム袋体法部 ・損傷程度は、約10～80cmの範囲で外層ゴムがはく離し補強繊維が露出した。	2.5H×20W	1969年3月 (49年)	2010年 (8年)	ゴム袋体と同一材料の補修用ゴム引布(補強繊維1層)を自然加硫型接着剤で貼付け、補修した。	
12	日射熱・紫外線等による老朽化	外層ゴムの亀裂・はく離による補強繊維の露出及びゴム引布接合部のはく離による空気漏洩	1.5H×4.0W	1971年5月 (47年)	2016年4月 (2年)	ゴム袋体の外面及び内面にそれぞれゴム引布1層貼付け (自然加硫接着剤適用)	

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
13	老朽化	折れシワ部で外層ゴム亀裂、補強繊維が破断	2.7H x 45.8W	1984年3月 (34年)		更新計画中	 
14	日射熱・紫外線等による老朽化及びゴム袋体振動による摩耗	外層ゴムの亀裂・はく離による補強繊維の露出及び補修済ゴム引布のはく離	2.78H x 32.25W 2.78H x 35.75W	1979年3月 (39年)	2015年2月 (3年)	外層ゴム引布1層貼付(自然加硫接着剤適用)	   
15	折れシワ部の応力集中箇所での表面温度上昇及び紫外線劣化	長さ300mm程度の継手表面深さ10mmのみはく離。	3.0H x 36.605W x 1 3.0H x 32.460W x 1	2012年7月 (6年)	2016年3月 (2年)	折れシワ部継手表面割れの上に行進防止のため紫外線及びオゾン遮断するゴムシートを貼り付けした。	<p>損傷部</p>  <p>補修作業中</p>  <p>(補修完了)</p>  <p>(補修完了)</p> 
16	老朽化	折れシワ部で外層ゴム亀裂、補強繊維が破断	2.54H x 36.8W x 2	1987年3月 (31年)	2015年 (3年)	ゴム袋体内外から補強用ゴム引布を自然加硫型接着剤で貼付け	
17	膨れ	本体外観 1号堰左岸側	2.7H x 36.6W	1990年3月 (28年)	2013年 (5年)	膨れを起こしている外層ゴムとフィン部を剥ぎ取り、帆布入りゴムシートを貼り付けて更に外層をゴムで被覆した	 
18	フィン部付近の膨れ	左岸法ン部	2.8H x 17.0W	1980年3月 (38年)	2010年1月 (8年)	フィン部付近の外層ゴムを剥ぎ取り、帆布入りゴムシートを貼り付け最外層をゴムで被覆した。	  

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
19	外面膨れ	ゴム本体部から外面ゴムが膨れ出し、成長を始めたので上部にφ3mmの穴を開けて放置した。	3.8H x 22.9W	1994年3月 (24年)	2015年7月 (3年)	経過観察中	
20	層間はく離	本体ジョイント部付近の帆布層間はく離	3.8H x 30.8W	1994年3月 (24年)	2015年6月 (3年)	取り替え更新	
21	外面はく離	ゴム本体の外側のジョイント部にゴム割れが2mm位の深さで見られた。このまま放置すると進行の恐れあり。	2.45H x 17.2W	1996年3月 (22年)	2018年3月 (0年)	割れの進行を防ぐために上層から200mm幅のゴムシートを貼り付けた。	
22	流下物による損傷	右岸上面 5cm程度の傷	1.0H x 7.0W	1979年3月 (39年)	2006年2月 (12年)	傷の箇所を研磨し、その部位にパンク用ゴムシートを貼り付けた。	
23	転石・土砂による損傷及び摩耗	・補修位置は、倒伏時のゴム袋体下流側端部 ・損傷程度は、径間方向約30mの範囲で外層補強繊維1層が磨滅、及び約0.1m長さの貫通傷	2.0H x 39.0W	1979年3月 (39年)	2012年 (6年)	ゴム袋体と同一材料の補修用ゴム引布を接着剤で貼付け、モハイルヒーターと万力を用いた熱圧着加硫工法にて補修した。	
24	転石による損傷	・補修位置は、堰中央部で倒伏時のゴム袋体下流側端部 ・損傷程度は、約50mmの穴開き損傷	0.8H x 10.4W	1980年5月 (38年)	2016年 (2年)	金属板で穴開き損傷部を密閉し補修した。	

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
25	転石による損傷	約30mm大の貫通傷が生じ、空気が漏洩	1.9H x 23.6W	1986年3月 (32年)	2018年3月 (-)	ゴム袋体と同一材料のゴム引布を表面に貼付(自然加硫接着剤適用)	 
26	流下物による損傷	摩耗が進み帆布の露出が顕著になった。特にみお筋とみられる中央部のゴム本体は、初期厚み8mmのカバーゴム厚が3mm程度まで擦り減っていた。	2.0H x 20.0W	1987年3月 (31年)	2017年3月 (1年)	取替え	  <p>取替え前(倒伏) 取替え前(起立)</p>  <p>取替え後(起立)</p>
27	流下物による損傷	洪水時に流れる石の大きさを最大1.2mで設計したが、洪水後の下流には1.4m前後の石が点在。当初設計以上の石の流下で損傷が発生。補修するも損傷箇所から河川水流下で帆布間の接着力低下が見られた。	4.0H x 26.0W	1998年3月 (20年)	2012年4月 (6年)	取替え検討中	  <p>補修状況 補修完了</p>   <p>転石による損傷 流下物の堆積</p>
28	転石による損傷	約5mm大の貫通傷が生じ、空気が漏洩	0.74H x 17.6W	1996年3月 (22年)	2016年4月 (2年)	直径8mmのゴム栓を差し込み、空気漏洩を遮断	 
29	瓶の破片による損傷	中央下面側 2cm程度	1.65H x 22.2W	1993年3月 (25年)	2012年3月 (6年)	傷の箇所を研磨し、その部位にバンク用ゴムシートを貼り付けた。	  
30	下流側に放置された瓶の破片巻き込みによる損傷	河床付近下面 2cm程度	2.95H x 10.0W	1993年3月 (25年)	2007年6月 (11年)	傷の箇所を研磨し、その部位にバンク用ゴムシートを貼り付けた。	   

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
31	流下物による損傷	30mm程度の貫通傷。	0.9H×13.9W×1	2002/3 (16年)	2012年11月 (6年)	ゴムを開き外面及び内面をグラインダ処理後、帆布入りゴムシートを貼り付けた。	    <p>内面 (補修完了) (補修完了)</p>
32	流下物による損傷	110mm程度の切り貫通傷。	1.35H×23.15W×2	2006/3 (12年)	2010年1月 (8年)	外面及び内面をグラインダ処理後、帆布入りゴムシートを貼り付けた。	    <p>内面 (補修完了) 外面 (補修完了)</p>
33	流下物による損傷 (ガラス片)	最大40mm程度の貫通傷。	1.92H×12W×1	2006/3 (12年)	2012年11月 (6年)	ゴムを開き外面及び内面をグラインダ処理後、帆布入りゴムシートを貼り付けた。	    <p>内面 (補修完了) (補修完了)</p>
34	流下物による損傷 (転石等)	30mm程度の貫通傷数ヶ所。	2.1H×11.02W×1	2007年7月 (11年)	2016年2月 (2年)	ゴムを開き外面広範囲及び内面をグラインダ処理後、帆布入りゴムシートを貼り付け、緩衝材を追加した。	    <p>(補修完了) (補修完了)</p>
35	フィン部経年劣化及び土砂体積を取り除く際のバックホウの爪による損傷	左岸法フィン部及び左岸法部上面 バックホウの爪痕	1.2H×3.8W	1981年3月 (37年)	2006年2月 (12年)	フィン部付近の外面ゴムを剥ぎ取り、帆布入りゴムシートを貼り付け最外層をゴムで被覆した。 バックホウによる傷は、当該部位のゴムを剥がし、帆布入りゴムシートの上に外層ゴムを貼り付けた。	   
36	河川改修後に発生した転石・土砂除去時、バックホウの爪で損傷	二列目金具部上面3箇所及び他上面1箇所 10cm程度の爪痕傷	2.2H×25.0W	2008年3月 (10年)	2008年7月 (10年)	傷の箇所を研磨し、その部位に帆布入りゴムシートを内面から貼り付けた。	   

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH × 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
37	人為的損傷 (流下物による損傷とは考えにくい場所での損傷)	左岸法面 2cm程度の貫通穴	1.0H × 4.0W	2000年3月 (18年)	2012年3月 (6年)	傷の箇所を研磨し、その部位にバンク用ゴムシートを貼り付けた。	
38	カッターナイフによる悪戯	左岸法部上面 25cm程度のカット傷	1.4H × 13.0W	2007年3月 (11年)	2009年3月 (9年)	傷の箇所を研磨し、その部位に帆布入りシートを貼り付けた。	
39	倒伏時、躯体コンクリート面との擦れによる摩耗損傷	・補修位置は、法部の頂部近傍 ・損傷程度は、約25cm × 20cmの穴開き損傷	2.54H × 36.84W × 2	1986年3月 (32年)	2019年7月	ゴム袋体内面及び外面から補修用ゴム引布を自然加硫型接着剤で貼り合わせ、補修した。	
40	倒伏時の不完全倒伏による振動及び躯体コンクリート面との擦れによる摩耗	ゴム袋体に約300mm大の貫通傷が生じ、空気が漏洩。	2.78H × 32.25W 2.78H × 35.75W	1979年3月 (39年)	1996年10月 (22年)	ゴム袋体と同一材料のゴム引布を表面に貼付(ヒーターによる熱圧着補修)	
41	低内圧(Vノッチ状態)での運用時の堰体振動によるゴム袋体の摩耗(位置は固定部近傍)	約200mm大の貫通傷が生じ、空気が漏洩。内圧低下時にはゴム袋体内に浸水	4.31H × (15.63 + 34.5 × 2 + 30.97)W	2000年5月 (18年)	2014年10月 (4年)	ゴム袋体(3層構造)の外側に2層構造のゴム引布を貼付け、内面に1層構造のゴム引布を貼付け補修	
42	河川増水時に操作室が被災し、倒伏が不十分なまま、ゴム袋体が激しく振動し、損傷したものと推測	ゴム引布の破断(河床全長および両法部)	1.9H × 17.9W	1980年6月 (38年)	2017年に更新		

NO.	劣化・損傷原因	補修位置 / 劣化・損傷程度	堰寸法 高さH x 河床幅 W (m)	設置年月 (経過年)	補修年月 (経過年)	補修法	補修写真・補修後の使用状況写真
43	沈下配管修繕に伴い、仮配管設置の為にゴムに開けた給排気口取付箇所の補修	右岸法部上面 フランジ取付用穴 (写真)	1.95H x 16.5W	1985年3月 (33年)	2006年3月 (12年)	損傷部位を研磨し、その上に帆布入りゴムシートを貼り付けた。	
44	本体帆布接着力の低下	空气中曝露と水中曝露の試験を通して、ゴム物性/本体接着力/本体引張強さを18年に渡り調査。その結果から20年経過で本体接着力が耐水接着規格値を割ることが判明した為、本体破壊の前に取り換えた。	2.5H x 10.0W	1988年10月 (30年)	2009年3月 (9年)	取替え	
45	H23新潟・福島豪雨に伴う鉄砲水。越流水深が設計水位0.5H (1.15m) 以上で倒伏させたため、予想を上回る大型、大量転石がゴム上を通過。	上面全域多数 2cm~10cm 程度の無数傷	2.3H x 10.0W	2009年5月 (9年)	2012年3月 (6年)	帆布迄到達していた為傷の箇所を研磨して、その部位に帆布入り、ゴムシートを貼り付けた。	
46	計画更新	設置後33年経過も本体の摩耗は殆んど見られない。但し、ゴムの硬度は硬くなっている。 (ゴム硬度: 62→71)	0.8H x 10.5W	1984年3月 (34年)	2018年3月 (0年)	取替え	

2. 1. 3 現場での劣化度合い検証事例

現場でゴム堰の劣化状態を診断するためには、手法が限られてくる。現場で劣化による破断等が確認された場合、主に、目視での観察や硬度測定、ひび割れ深さの計測を実施するのが妥当である。ここでは、現場での劣化診断の手法や健全性評価の事例を紹介する。

(1)事例1 (2. 1. 2 経年劣化・損傷の事例一覧 No.16)

1) ゴム袋体の目視観察および計測

①ゴム袋体表面のひび割れ位置 (目視観察)

本事例はCR系のゴム袋体のものである。一般にゴムは、屋外曝露により空気中のオゾンや紫外線、日射熱などの影響を受け、時間の経過とともに硬化が進行する。ゴムゲートは起立時、法部の折れシワ部には最大約100%近い伸びが発生する可能性がある。ゴム自身の最大伸び率(切断に至る伸び率)が劣化により減少していくが、この伸び率がゴムに発生する伸び率以下になると、ゴムの分子が切断され、ひび割れが発生する。このひび割れがゴム袋体の内部方向に進行すると、ゲート内の空気が漏洩し、ゲート設備としての機能が損なわれることになる。

当該ゴム堰の外観として、起立状況を写真2.1.11および2.1.12に示す。診断時において、写真2.1.13および2.1.14のとおり、法部の折れシワ部周辺においてひび割れが進行していることが目視確認された。この表面ひび割れはゴム袋体の劣化により見られる現象の一つである。



写真 2.1.11 起立状況 (上流側→下流側)



写真 2.1.12 起立状況 (右岸側→左岸側)



写真 2.1.13 法部折れシワ部のひび割れ



写真 2.1.14 同左 (ひび割れ部にコーキング剤塗布)

②デプスゲージによるゴム袋体表面のひび割れ深さ計測

ひび割れは折れシワ部周辺に発生しているが、範囲が限定的であり、ひび割れの深さは1.0mm～1.2mm（ゴム袋体の厚さ=5.5mm）であった。そのため、内層ゴム層には到達しておらず、現時点では気密性能への影響はないものと考えられた。

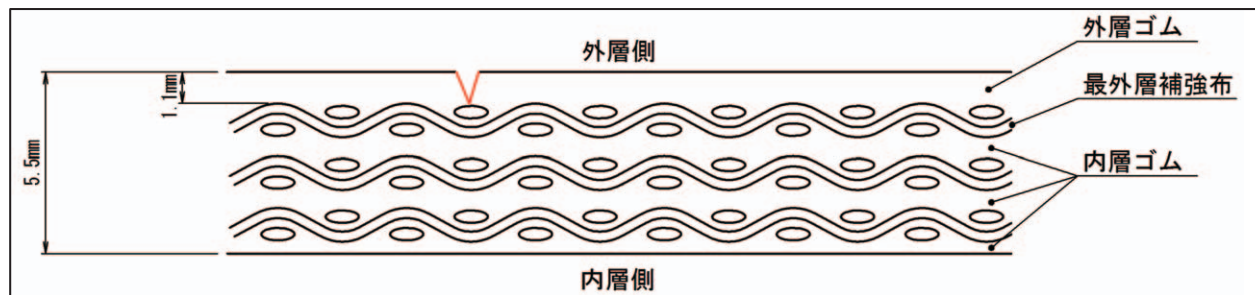


図 2.1.1 ゴム引布の断面構造とひび割れ深さ(V箇所)



写真 2.1.15 デプスゲージによるひび割れ深さ計測



写真 2.1.16 同左（ひび割れ深さ=1.1mm）

③ゴム袋体外層ゴムの硬度測定

当該ゴム堰のゴム硬度を測定した。なお、測定は JIS K6253 に準拠して実施した。当該ゴム堰は CR 系のゴム袋体を使用しており、外層ゴム硬度は、製造時(1987年)の初期値「65」に対して、10年後(1997年)には「72」に上昇し、28年後(2005年)10月には「84」（20箇所平均）にまで上昇していた。写真 2.1.17 および写真 2.1.18 にゴム硬度の計測状況を示す。



写真 2.1.17 外層ゴムの硬度計測（中央部=84）



写真 2.1.18 外層ゴムの硬度計測（折れシワ部=90）

2) ゴム袋体の健全性評価

ゴム袋体の構成材料であるゴム引布は、空気中のオゾンや日射熱などの影響を受けて時間の経過とともに、引張強さおよびゴム／織布間の接着力が低下し、ゴム硬度が上昇する。「ゴム引布製起伏堰技術基準(案)」¹⁾(平成12年発行)(以下、技術基準(案))には、これらのデータが図示されており、これらのデータと本堰の値を比較した。

ゴム引布の強度保持率を図2.1.2に示す。年数の経過に伴い、強度保持率が減少することが知られている。しかし、技術基準(案)よりも経過年数の長い堰の調査結果からわかるように、強度保持率は急激に下がるのではなく、30年経過しても80%前後を推移しているものと考えられる。このグラフに当該ゴム堰の結果を併記したところ、他の堰と同様に強度保持率は低下していたが、低下率は平均的な数値に収まっているものと判断された。また、初期の強度安全率が【>8】であることを考慮すると、現時点でも十分な強度安全率を有するものと考察された。

ゴム引布のゴム／織布間接着力保持率の経時変化を図2.1.3に示す。ゴム引布のゴム／織布間接着力は、測定時においては、他地点のゴム堰と同様に時間の経過とともに低下しているが、低下率は平均的な数値であり、現時点でも十分な接着力を有するものと考察された。

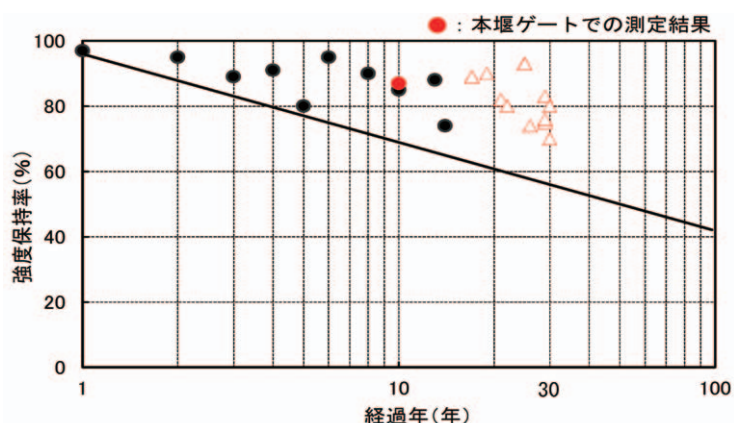


図 2.1.2 ゴム引布の強度保持率経時変化

(●:「ゴム引布製起伏堰技術基準(案)」p.38 図 1.11、△:メーカーによる独自の調査データ(N=11)

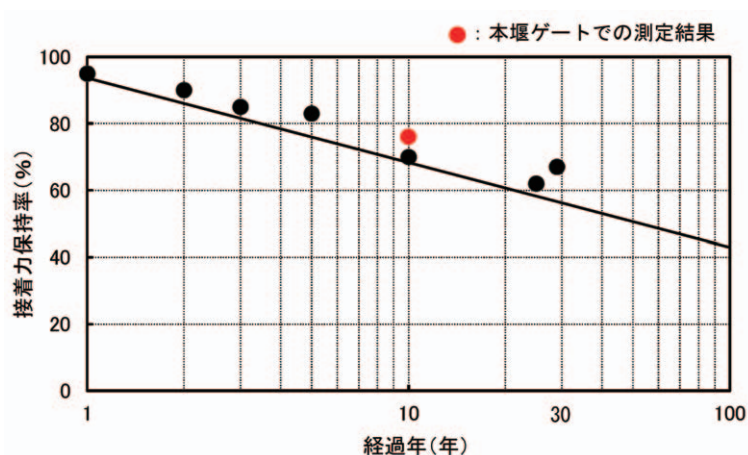


図 2.1.3 ゴム引布のゴム／織布間接着力保持率経時変化

図 2.1.2 及び図 2.1.3 で示したゴム引布の強度保持率と接着力の保持率は、同じ傾向かつ同じ劣化度合いであることを立証しており、重要であると考えられる。これにより、接合部を含むゴム引布の引張試験で、接合部でのせん断はく離がなく、布破断であれば、経年劣化後も布破断であることを保証するからである。しかし、本データは1種類のゴム袋体のデータであり、他の種類のゴム袋体の経年劣化のデータを集積し、同様の結果を得ることができるのか、さらなる検証が必要である。

ゴム袋体外層ゴムの劣化指標の一つであるゴムの硬度を、図 2.1.4 に示す。他地点のゴム堰と同様に時間の経過とともに上昇しているが、上昇率は平均的な数値であり、ひび割れが広範囲に発生する硬度(>90)に到達するまでは約5年の猶予があるものと考えられた。

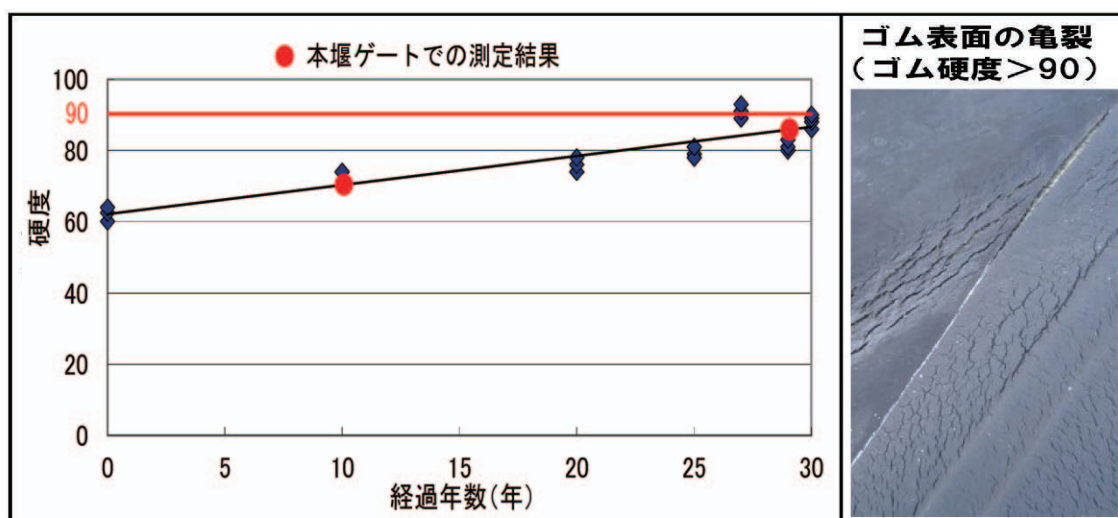


図 2.1.4 外層ゴムの硬度経年変化

(2)事例2 (2. 1. 2 経年劣化・損傷の事例一覧 No.13)

1) ゴム袋体の劣化現況の目視観察および計測

①劣化状況の目視観察

本事例はCR系のゴム袋体のものである。ゴム袋体の全景及び劣化現象であるゴム・補強繊維の亀裂状況を写真2.1.19~写真2.1.21に示す。



写真2.1.19 ゴム袋体全景



写真2.1.20 ゴム・補強繊維の劣化亀裂



写真2.1.21 ゴムの劣化亀裂(法部)

②ゴム袋体損傷部(剥離、ひび割れ)の亀裂深さ

ゴム袋体の亀裂深さをゲージにて計測した結果、写真2.1.22~写真2.1.24のとおり、亀裂は2.0~3.1mmの深さで、外層側の補強繊維層を貫通していた。なお、貫通部の材料強度は、正常部の2/3(3層→2層)に低下していた。図2.1.5にゴム袋体の断面構造を示す。



写真2.1.22 亀裂深さの計測



写真2.1.23 亀裂深さ ; 2mm



写真2.1.24 亀裂深さ ; 3.1mm

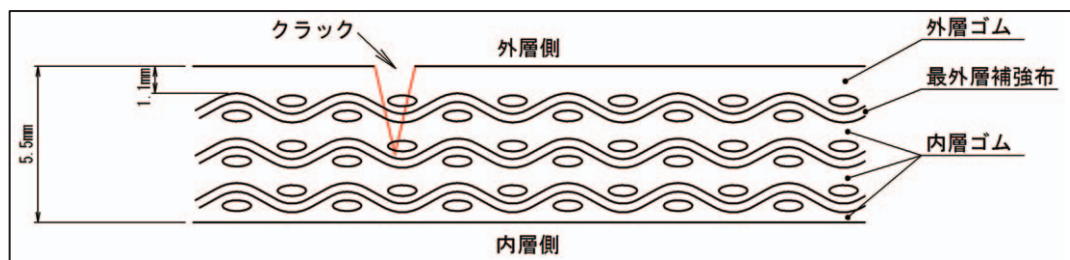


図2.1.5 ゴム袋体の断面構造とひび割れ深さ (V箇所)

③ゴム袋体外層ゴムの硬度測定

外層ゴム硬度を測定した結果、当該ゴム堰のゴム硬度は、部分的に[90]に達していた。ゴムの硬度が90に近づくとゴムに亀裂が生じ、ゴム袋体の屈曲部での短期間のうちに外層ゴムが補強繊維からはく離する現象

が生じており、当該ゴム堰でもはく離の拡大が懸念される。なお、全国のCR系ゴム堰の経過年数に対する外層ゴム硬度の変化や更新実績については、「2.2.7 ゴム袋体の材料試験」にて後述する。

2) ゴム袋体の強度安全率の算出

本堰は建設後約32年経過し、外層ゴムのひび割れや補強繊維からのゴム剥離が観察され、同時に材料劣化(①材料強度低下、②クリープ劣化)が進行していた。ゴム引布製起伏堰技術基準(案)¹⁾には、①ゴム引布の経年的強度保持率や②クリープ破断係数のデータが示されており、これらのデータ(図2.1.6、2.1.7)に基づき、このゴム袋体の強度安全率 S を計算すると以下のとおりである。

$$S = S_0 \times \alpha \times \beta \times \gamma \quad (1)$$

S_0 ; 製造時の材料強度安全率=8.9 (設計計算書の数値引用)

α ; 現在の強度保持率=0.58 (30年経過として) (図2.1.6 参照)

β ; クリープ破断係数=1/2.53 (図2.1.7 参照)

γ ; 補強繊維の有効数=2/3 (3層の内1層が破断し、2層有効)

式(1)に、それぞれの値を代入すると、強度安全率は、

$$S = 8.9 \times 0.58 \times 1/2.53 \times 2/3 = 1.36$$

となる。なお、ただちに破壊するわけではないが、ゴム硬度の数値や袋体の亀裂深さなどを評価し、更新の検討が必要であると考えられた。

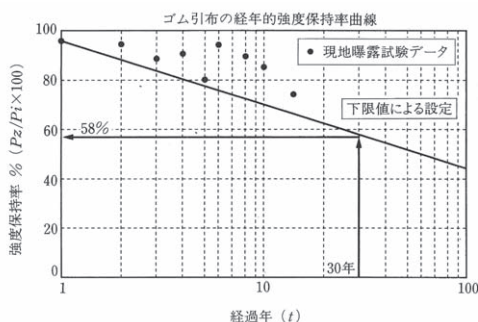


図 2.1.6 ゴム袋体の強度保持率(技術基準(案)引用¹⁾)

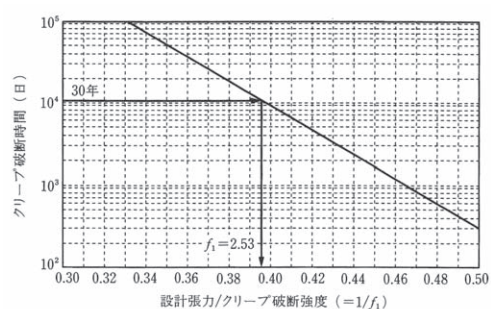


図 2.1.7 クリープ破断係数(技術基準(案)引用¹⁾)

(3) 事例3

1) ゴム袋体の目視観察及び計測

① ゴム袋体表面の摩耗状況 (計測)

今回調査対象にしたゴム堰の袋体は、袋体張力を支える織布 (3層構造) と、これを保護して気密性を確保するゴム層 (外層ゴム (EPDM) $t=8.5\text{mm}$ 、内層ゴム $t=2\text{mm}$) で構成されており、比較的急流地に位置する箇所に設置され、設置後 30 年経過している。

そこで、30 年使用後のゴムの摩耗、損傷、クラックや剥がれ状況を把握するとともに、本体の特性 (引張強度、伸び、硬度) などの物性を調査して劣化の進行度を評価した。



写真 2.1.25 ゴム袋体全景

② 外層ゴムの摩耗

外層ゴムの摩耗量については、中央部 2 ヶ所と両法部付近の合計 4 か所の調査を実施した。

結果は、表 2.1.1 に示す通りであり、法部と中央部では摩耗量に差が見られ法部に比べ中央部の方が、摩耗が激しいことが判る。また、上流より下流に行くほど摩耗が激しくなっていることも判った。

摩耗が最も進んだ部位は、ゴム本体中央部右の下流側先端付近であり、30 年間で 5.6mm の摩耗量になった。ゴム引布製起伏堰技術基準(案)¹⁾では、一般河川での摩耗速度は、最大値が 0.013mm/年以内、出水頻度の大きい河川ではこれを越える事例があるとの記述があるが、当該堰に於いては 0.19mm/年を示しており、特に摩耗量が多い河川であったと言える。また、倒伏時に於いてはゴム本体が河床部にフラットに横たわっていたことから、下面側の外層ゴムの摩耗は見られなかった。

表 2.1.1 ゴム袋体の摩耗量測定結果 (単位:mm)

	外層ゴム厚測定値 初期値:8.5mm			
	左岸法部	中央部左	中央部右	右岸法部
取付部付近 (上流側)	8.6 (-0.1)	5.5 (3.0)	5.5 (3.0)	8.5 (0.0)
中央部	7.2 (1.3)	4.5 (4.0)	4.2 (4.3)	7.5 (1.0)
先端部付近 (下流側)	6.3 (2.2)	3.6 (4.9)	2.9 (5.6)	7.0 (1.5)

上段の数値は測定した外層ゴム厚(残厚)
下段の()内の数値は摩耗量(初期値-残厚)

表 2.1.2 ゴム袋体のゴム強度と伸び測定結果

③ 外層ゴムの強度

外層ゴムの強度は、中央部の本体からサンプルを採取して引張強度と伸びの変化について測定した。

引張強度については、大きなバラツキも無く表面にクラックも発生しておらず、30 年経過しても強度低下は少なく、80%以上の保持率を示

	強度 (規格値11.8MPa以上)			伸び (規格値400%以上)		
	初期値	今回	保持率	初期値	今回	保持率
①	15.3	12.3	80	470	274	58
②	12.7	12.1	95	430	274	64
③	13.9	12.3	88	450	263	58
平均値	14.0	12.2	87	450	270	60
規格値はいずれも初期の要求値						

していた。カバーゴムに採用した EPDM 系ゴムの耐候性の強さが、良い結果をもたらしたものである。一方、伸びの方は初期値に対して 60%程度まで低下しており、ゴムの劣化が進んでいることを表している。

④外層ゴムの硬度

ゴムの劣化を図る指標として硬度の変化があるが、初期値65に比べてゴムの表面（上流側）も裏面（下流側）も硬くなっていた。特に上面の直射日光が当たる箇所は下流側よりも3ポイントも硬くなっており、劣化が進んでいると言える。また、一番固くなっているのはゴム堰の天端に当たる部分である。このことから、直射日光による熱や紫外線の要因は、ゴム物性に悪影響を及ぼすことが判る。

表 2.1.3 外層ゴムの硬度測定結果

初期値	硬度シヨア A : 65	
測定部位	表面	裏面
中央-上流	74	72
中央-中間	75	-
中央-天端	76	73
左岸-上流	73	72
左岸-中間	75	71
平均値	75	72

⑤補強織布の強度

補強織布の強度を測定した所、周方向（流れ方向）の強度は85%の保持率、横断方向は94%の保持率を有しており、双方ともに補強織布の本体はゴムに守られて、初期の値に近い強度を保っている。ここで、周方向に比べ横断方向の強度低下率が低いのは、横断方向は金具に押さえられていて起立時にゴム本体の伸びが抑制されているからと推定される。

表 2.1.4 ゴム堰本体の強度測定結果

周方向	引張強度（設計値240kN/m以上）		
	初期値	今回	保持率
①	434	369	85
②	440	370	84
③	426	366	86
平均値	433	368	85

⑥フィン部（デフレクター部）のはく離と割れ

フィン部のゴムははく離状況を確認した所、法部の皺発生日よりやや内部に入った所に大きなはく離が見られた。はく離は、双方に10cm以上に亘り進行しており、本体の補強織布を通して内部空気が透過し、接着力が低下した部分から膨れたものと推定されている。これは、前頁の経年劣化・損傷の事例 No.17、No.18 の写真に示す通り、堰高が高くなり高張力となる堰や、外層ゴムが厚くなりフィン部と織布層をはく離させる力が大きくなる場合に生じる傾向が見られ、既に2004年以降のゴム堰には改良したフィン構造が使われている。

横断方向	引張強度（設計値160kN/m以上）		
	初期値	今回	保持率
①	340	362	106
②	356	309	87
③	344	308	90
平均値	347	326	94

2) まとめ

調査の結果、30年経過したゴム本体は摩耗が着実に進んでおり、合わせてフィン部の膨れも部分的に発生していたことから、袋体が耐用限界を迎えたと言える。また、交換したサンプルから使用後の強度や摩耗量の変化などを調査した所、ゴムでプロテクトされている補強織布には大きなダメージは無く、ゴムを含めて強度的にも大きな低下は無いことが判った。然しながら局所的な摩耗は進んでおり、特に流れが集中する部分のゴム表面は、他の箇所よりも摩耗量が激しく、流れの集中に合わせて、転石などの流下物がそこを通過してゴム表面の摩耗を促進していったものとみられる。このことは転石の少ない下流域に設置されているゴム堰では見られない現象であり、転石等流下物が多く予想される現場などには、一般的な設計より外皮ゴムの厚くしていたことが過酷な環境下でも標準的な耐用年数まで供用できた最大の要因だったと言える。

(4) 事例 4

1) ゴム袋体の劣化状況の目視観察及び計測

① ゴム袋体表面の目視観察

本事例は EPDM 系のゴム袋体のものである。ゴム袋体の全景を見ても表面にはクラックの発生などは見られなかった。本堰に於いては、設置場所に曝露試験用サンプルを取り付け、7 年、13 年、18 年後のゴム物性変化を調査してきたが、18 年経過時には新たに本体の右岸よりのフィンカット部と右岸法部のフィン部の 2ヶ所から採取したゴムの引張強度と伸びを測定することでゴムの劣化状況を把握することにした。



写真 2.1.26 本体全景

写真 2.1.27 曝露試験片 (空気中)

写真 2.1.28 右岸法部のフィン

② 外層ゴムの試験結果

設置後、7 年、13 年、18 年経過したゴム堰の曝露試験サンプルと 18 年経過後に右岸側のフィン部と右岸法部のフィン部から採取したゴム物性（引張強さ、伸び、硬度）の試験結果を表 2.1.5 に示す。

ただし、硬度については技術基準、規格値などが無いので参考値として併記した。

また、それぞれの保持率も判るように図 2.1.8、図 2.1.9、図 2.1.10 に示す。下の表及び図に示している 20 年後の予想値はこれまでの試験データから最小二乗法を用い二次関数または指数関数で外挿して得られた値である。年次を重ねる毎に保持率が低下（硬度の場合は上昇）してくるものと推測された。

表 2.1.5 外層ゴムの物性変化

		納入時	7年後	13年後	18年後	右岸法 フィン部	右岸 フィン部	20年後 予想	初期物性 規格値	耐熱老化 規格値
引張強さ 〔N/mm ² 〕	水中	21.07	17.2	18.8	20.0	16.3	16.3	18.0	11.8以上	9.8以上
	空気中		18.5	16.2	16.5			15.3		
伸び 〔%〕	水中	570	500	515	492	370	360	482	400以上	300以上
	空気中		540	492	318			336		
硬度 〔参考〕	水中	58	62	62~63	60	70	71	62	-	-
	空気中		60	68~69	70			72		

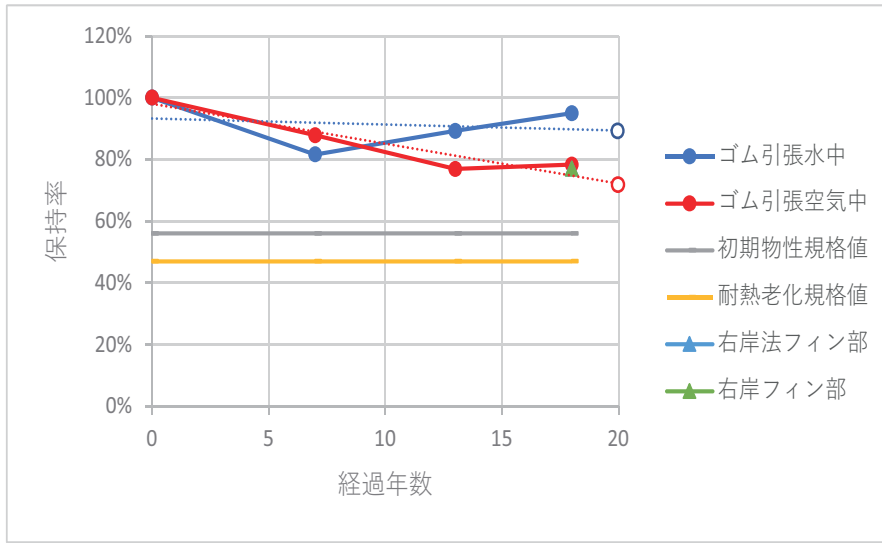


図 2.1.8 外面ゴム物性経年変化 引張強さ (白抜きは予想値)

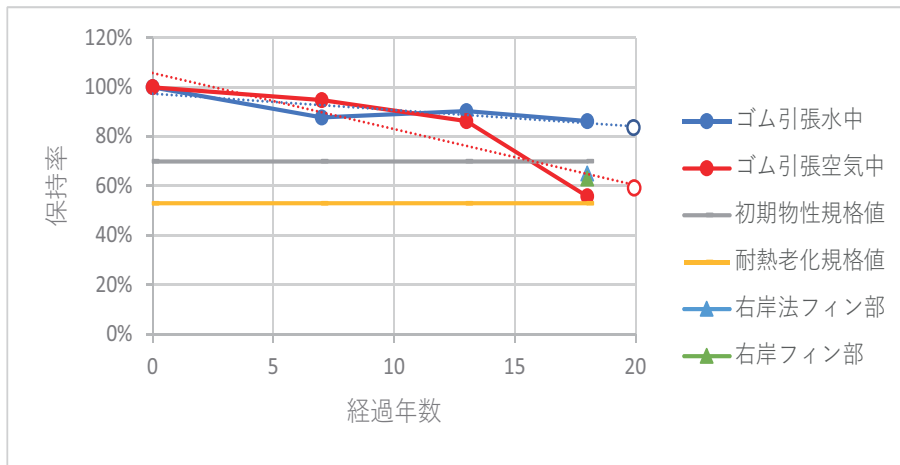


図 2.1.9 外面ゴム物性経年変化 伸び (白抜きは予想値)

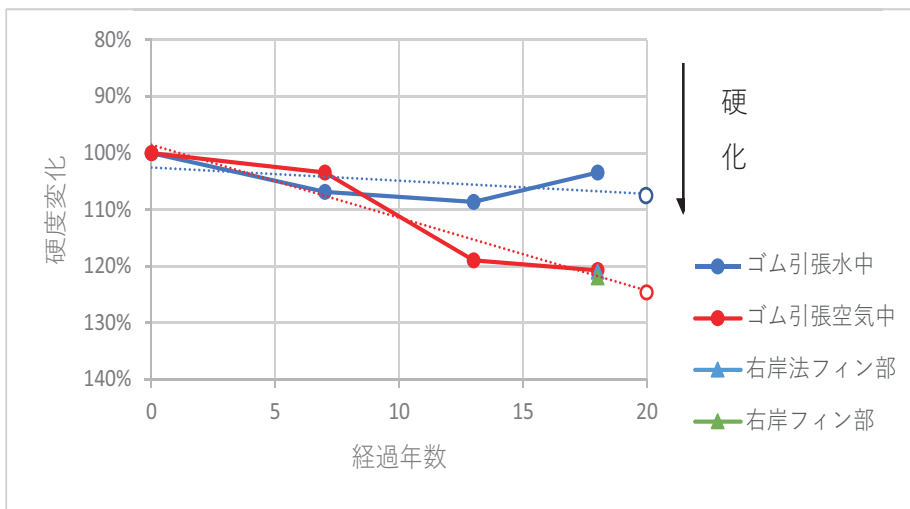


図 2.1.10 外面ゴム物性経年変化 硬度 (参考) (白抜きは予想値)

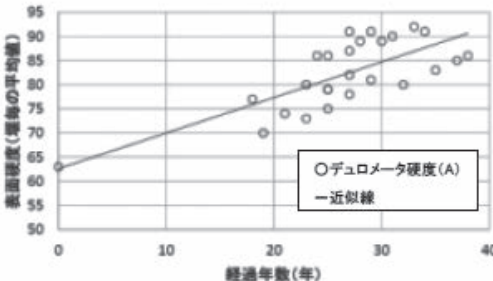
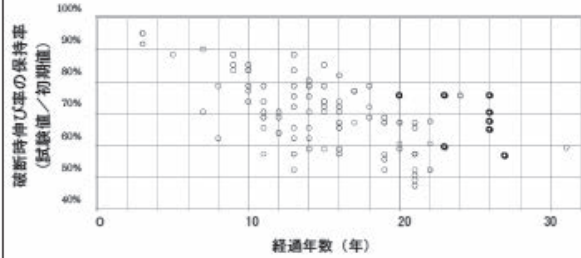
③外層ゴム物性変化からの評価

フィン部のゴム物性は引張強さ、伸び、硬度いずれにおいても空气中サンプルに近い値となっている。つまり、ゴム堰本体のゴム物性もデータと近い値になっていると推測できる。従って、今後のゴム堰本体の劣化度を調査する時には、空中に露出したゴム堰本体からサンプルを採取してそのゴム物性を調査することでゴム堰本体の劣化度がある程度推定できる。

ゴム堰本体の耐久性を低下させる劣化には、ゴムの劣化、接合部の劣化、織布の劣化などがあり、これらの内どれか一つでも劣化が進行すると、ゴム袋体の性能は保てなくなる。

これらの劣化の度合いを直接的に計測する技術などは確立されていないのが現状ではあったが、使用中のゴム堰本体から得られるゴムの劣化（強度、伸び、硬度）のデータを蓄積していくことで、交換の目安を決める判断材料となり得ると考えられる。

表 2.1.6 外層ゴム硬度や破断時伸び率の保持率に関する(参考資料²⁾ P42 の一部抜粋)

	外層ゴムの硬度	破断時伸び率の保持率
理 由	過去の計測結果から、外層ゴムの硬度と経過年数の間には正の相関関係がある。  <p>(注 A 社提供データを基に作成) 経年による外層ゴムの硬度の変化の例</p>	過去の計測結果から、破断時伸び率の保持率と経過年数と間には負の相関関係がある。  <p>(注 B 社提供データを基に作成) 経年による外層ゴムの破断時伸び率の変化の例(参考図)</p>
	外層ゴムの硬度と、ゴム袋体の劣化の度合いの間には、正の相関関係が期待できる。 (外層ゴムの劣化度合いと中間層、内層ゴム、織布、接合部(継手)の劣化度合いの間には正の相関が期待できるため)	外層ゴムの破断時伸び率の保持率と、ゴム袋体の劣化の度合いの間には、負の相関関係が期待できる。 (外層ゴムの劣化度合いと中間層、内層ゴム、織布、接合部(継手)の劣化度合いの間には正の相関が期待できるため)
	外層ゴム厚が比較的薄い場合に表面硬度がゴム層全体の劣化度合いを代表できると考えられる。	外層ゴム厚が比較的厚い場合に深部も含めた評価が可能と考えられる

2. 2 性能評価方法の検討

本節では、ゴム堰の材料の性能評価方法として、材料の物理的性状を調べるための各種試験や、劣化状態を化学的に調べる手法について検討を行ったので、その結果を示す。

2. 2. 1 ゴム引布の長期性能評価

(1) ゴム袋体の損傷形態の分類

図 2.2.1 に主に国土交通省所管のゴム堰の損傷事例を調査し整理したゴム袋体に生じ得る故障モードの分類を示す。ゴム袋体は、ゴム引布を袋状に形成したもので、ゴム引布はナイロン等の繊維を強度材とし、それをゴムで被覆・補強した複合材である。本項では、ゴム引布の静的強度特性、クリープ特性および疲労強度について検討を行ったので報告する。

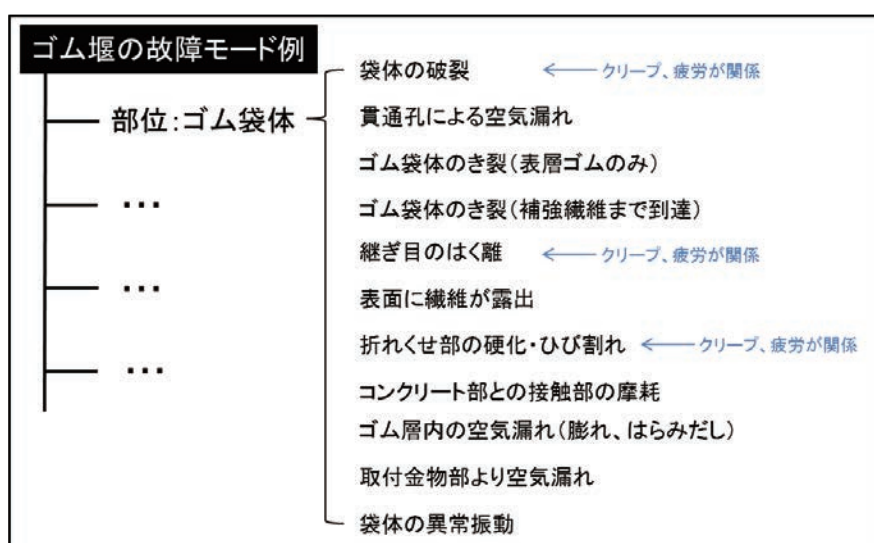


図 2.2.1 ゴム袋体の故障モード例

(2) 余寿命予測手法

袋体のいくつかの損傷モードのうちで、クリープ損傷と疲労損傷が関係するものに注目し、それらの破壊モードにより袋体が損傷する場合の余寿命予測方法を考える。クリープ・疲労相互作用を受ける材料の余寿命を推定する最も簡単な方法として、クリープ損傷と疲労損傷の線形和が1に達したときに破損とする線形累積損傷則に基づく方法がある。

$$\phi_c + \phi_f = \int \frac{dt}{t_r} + \sum \frac{dN}{N_f} = 1 \quad (2)$$

ϕ_c : クリープ損傷量

ϕ_f : 疲労損傷量

t_r : 応力に対応するクリープ破断時間(クリープ損傷寿命)

N_f : 一定ひずみ振幅下における破損までのサイクル数(疲労寿命)

クリープ損傷はクリープ損傷寿命 t_c に対するその状態におかれる時間 Δt の比の総和である。疲労損傷は一定ひずみ振幅下の疲労寿命 N_f に対する実際の繰返し数 N の比の総和である。条件によっては損傷の線形和が 1 にならない場合があるので適切な安全係数を設定した線形損傷則が用いられる。

図 2.2.2 に実機のひずみ量を測定し、クリープ破断線図等を用いることで、ゴム袋体の余寿命を予測する手法のフローを示す。本研究では、まず実機の袋体のひずみ量について現地調査を行った。その結果を引張試験より求めた応力-ひずみ関係と比較し、ゴム引布に作用する実働応力を予測した。さらに、実験によりゴム引布クリープ破断線図を求め、余寿命予測手法の開発を進めた。

余寿命予測手法のフロー

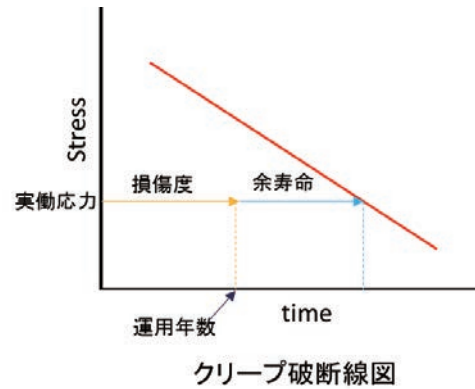
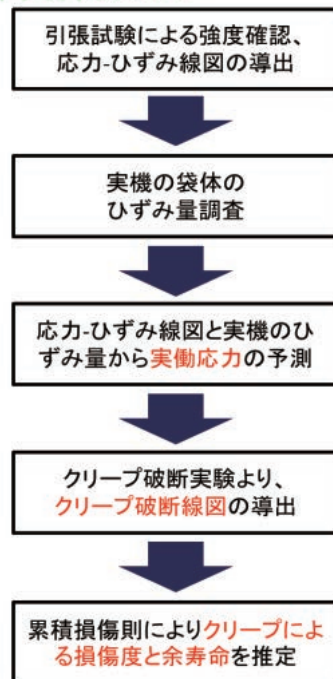


図 2.2.2 余寿命予測手法のフロー

2. 2. 2 ゴム袋体ひずみ量の現地調査

(1) 内部からのひずみ量計測

累積損傷則のクリープに依る損傷度を検討するうえで、実際のゴム袋体に発生している実働応力を求めることが必要である。そのため、実際のゴム袋体の変形を知り、既知の引布の弾性率等を用いた換算により実働応力を推定するために袋体のひずみを測定した。調査を行った堰の緒元は、完成年 1988 年、径間 42.1m、堰高 2.3m、ナイロン織布層数 3 プライ+1、ゴム引布の設計強度 430N/mm、袋体メーカー：A 社であった。

(2) 内部からのひずみ量計測結果

対象のゴム堰は袋体内部への立ち入りが可能であることから、袋体内部に入り、写真 2.2.1 に示すようにマーカーペンにより袋体の表面に 10mm 間隔で全 80mm 間に印をつけ、ゴム袋体の起立時と倒伏時の変位量を定規により測定し、ゴム引布のひずみを求めた。図 2.2.3 に測定結果を示す。各部位とも袋体の断面円周方向でのひずみを示している。この結果、測定した個所において円周方向に約 1~3%程度のひずみが生じていることがわかった。

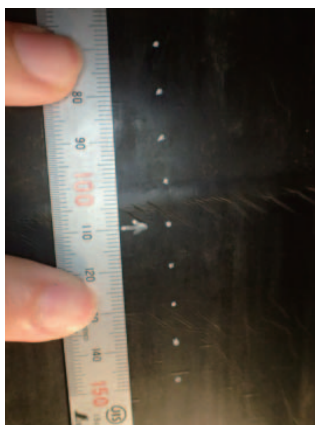


写真 2.2.1 袋体内表面、変位量測定マーキング

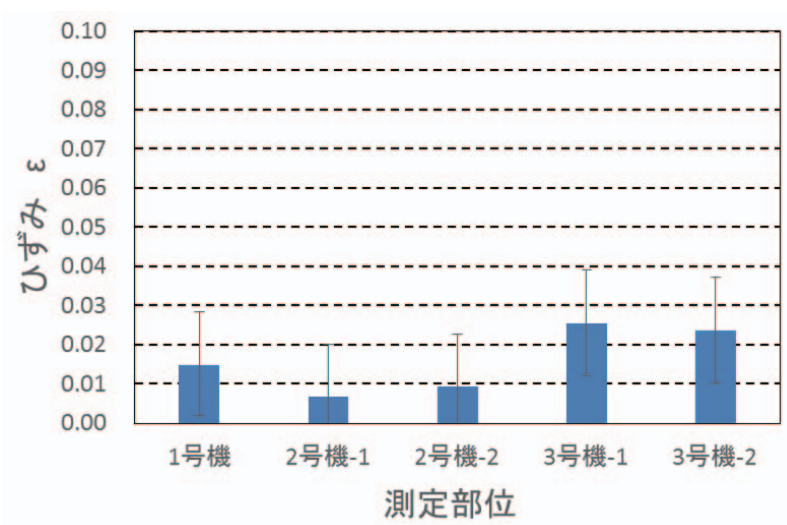


図 2.2.3 袋体内表面、変位量測定結果

(3) 外部表面のひずみ測定

ゴム袋体外部表面のゴム引布の起立/倒伏時のひずみ量の調査を行った。調査を行った堰の緒元は、完成年1987年、径間22.1m、堰高2.1m、ナイロン織布層数3プライ、ゴム引布の設計強度421N/mm、袋体メーカー：B社であった。図2.2.4および写真2.2.2に袋体のひずみ測定箇所について示す。

表2.2.1に測定箇所の緒元と測定条件およびそれより算出した各箇所のひずみ量を示す。図2.2.5に各箇所の袋体周方向および長手方向のひずみ量の比較図を示す。測定は(1)~(7)の7カ所で行い、(3)と(5)は袋体の縦継ぎの接合部である。なお、ゴム袋体の起立時のゲージ圧は0.027MPaであった。

(4) 外部表面のひずみ測定結果

表2.2.1の予想概算応力はフックの法則を用い平面応力状態を仮定して概算した。その際に、ゴム引布の伸びは微小変形域と考え、線形の物性値としてヤング率Eを1052.5N/mm、ポアソン比を0.3として計算した。なお、このヤング率はゴム引布の設計基準強度から換算した値で、非線形性を有すゴム引布の実際のヤング率より剛となることを想定した上で、実働応力の概算を行っている。

これらの結果、ひずみ量は-0.8~4.1%程度であることがわかり、既往研究³⁾で行われた比較的新しいゴム堰袋体の現地ひずみ量測定結果と同じオーダーであることがわかった。

表2.2.1の赤字で示した箇所はひずみ量が圧縮となった箇所である。接合部に関して測定した箇所は2箇所と少ないが、袋体が起立した際に長手方向に圧縮される場合があることがわかった。

これらの値から、測定した箇所において異常なひずみは見られなかったと考えられる。これらの結果を踏まえ、図2.2.2で示した余寿命予測手法を検討する。

表 2.2.1 ひずみ測定条件と結果一覧

位置	方向	中間/ 接合	倒伏時長さ [mm]	起立時長さ [mm]	伸び [mm]	公称ひずみ ϵ	公称ひずみ [%]	予想概算 応力 [N/mm]
(1)	周方向	中間部	95.76	99.07	3.31	0.035	3.46	44.59
	長手方向		98.51	99.82	1.31	0.013	1.33	27.37
(2)	周方向	中間部	95.2	98.94	3.74	0.039	3.93	53.11
	長手方向		96.32	98.45	2.13	0.022	2.21	39.21
(3)	長手方向	接合部	101.36	101.07	-0.29	-0.003	-0.29	-3.01
(4)	周方向	中間部	97.58	100.7	3.12	0.032	3.20	39.09
	長手方向		100.23	100.84	0.61	0.006	0.61	18.13
(5)	長手方向	接合部	100.48	99.65	-0.83	-0.008	-0.83	-8.69
(6)	周方向	中間部	96.15	99.66	3.51	0.037	3.65	41.45
	長手方向		98.89	98.67	-0.22	-0.002	-0.22	10.09
(7)	周方向	中間部	96.43	100.38	3.95	0.041	4.10	50.35
	長手方向		99.16	100.01	0.85	0.009	0.86	24.13

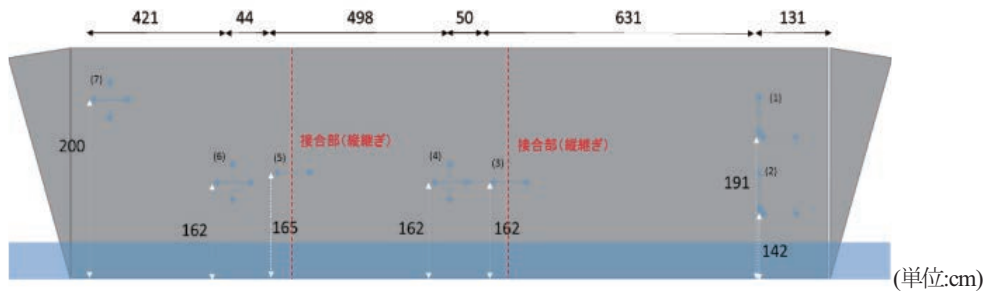
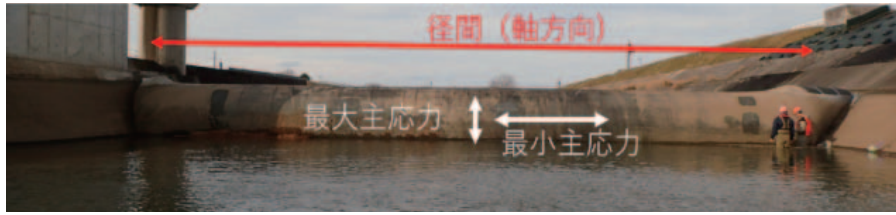


図 2.2.4 ゴム袋体外表面変位量測定時のマーキング

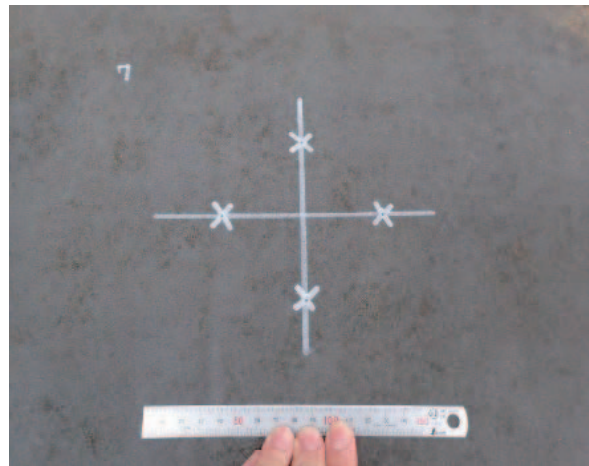


写真 2.2.2 袋体外表面、変位量測定マーキング

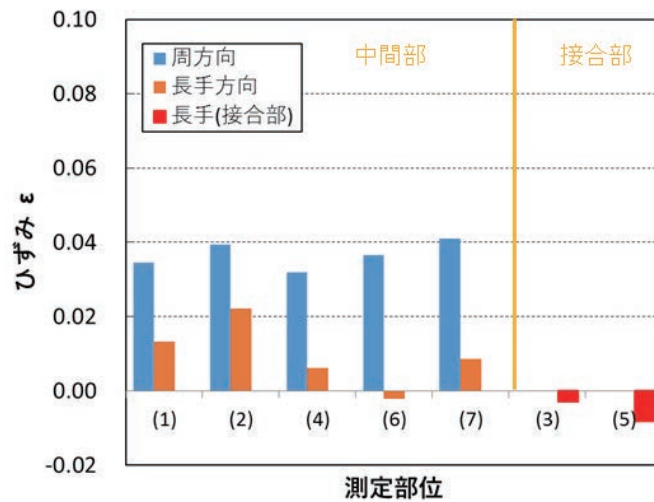


図 2.2.5 外部表面のひずみ量比較

(5)まとめ

- ・ ゴム袋体の内部のひずみを計測したところ、各部位とも袋体の断面円周方向でのひずみが発生しており、測定した個所において円周方向に約1~3%程度のひずみが生じていた
- ・ ゴム袋体の外側表面のひずみを計測したところ、ひずみ量は-0.8~4.1%程度であった。
- ・ 接合部では、袋体が起立した際に長手方向に圧縮されることが示唆された。

2. 2. 3 ゴム引布の温度調査

(1) 概要

ゴム袋体は、黒色をしていることが多く、越流がない状態でゴム堰が運転されていると日射により高温になることがある。これまで、長期に渡る温度の調査事例がなかったため、供試体を用いて1年間の実測を行った。

(2) 試験方法

ゴム引布供試体の表面と裏面に熱電対を取り付け、それぞれの温度を計測した。計測の状況を写真 2.2.3 および写真 2.2.4 に示す。供試体は、(3+1)プライの全厚 15.8mm のゴム引布を用いた。計測間隔は1時間毎とした。供試体設置箇所は、福岡県みやま市であった。



写真 2.2.3 センサーを取り付けたゴム引布供試体

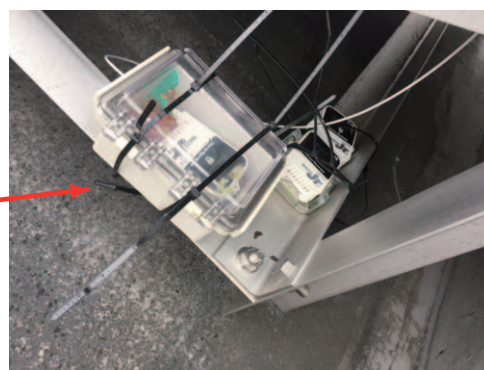


写真 2.2.4 データロガー

(3) 結果

図2.2.6に約1年間の計測結果を示す。7~9月には表面温度が70°Cを超える日があった。一方、表面温度が70°C程度であっても裏面は40~45°C程度であり、ゴム引布の全てが70°Cとなっているわけではなかった。今回、裏面は外気に曝されていた。実際のゴム堰では内部の空気は自由に移動できないので、ゴム表面が加熱されることにより内部の空気も温められる可能性はあるが、ゴム堰の上流側のほとんどは水中にあり、気温より低い温度のため、ゴム堰内部の空気が高温に温められることは考えにくい。したがって、ゴム引布の全層が70°Cになるようなことはないと考えられる。

表2.2.2に各月ごとの最高温度、最低温度、平均温度を示す。7~9月に温度が高く、12~3月がマイナスに達していた。表面温度は-6.5~72.0°Cの範囲、年間平均22.3°C、裏面温度は-4.3~46.8°C、年間平均18.5°Cであった。

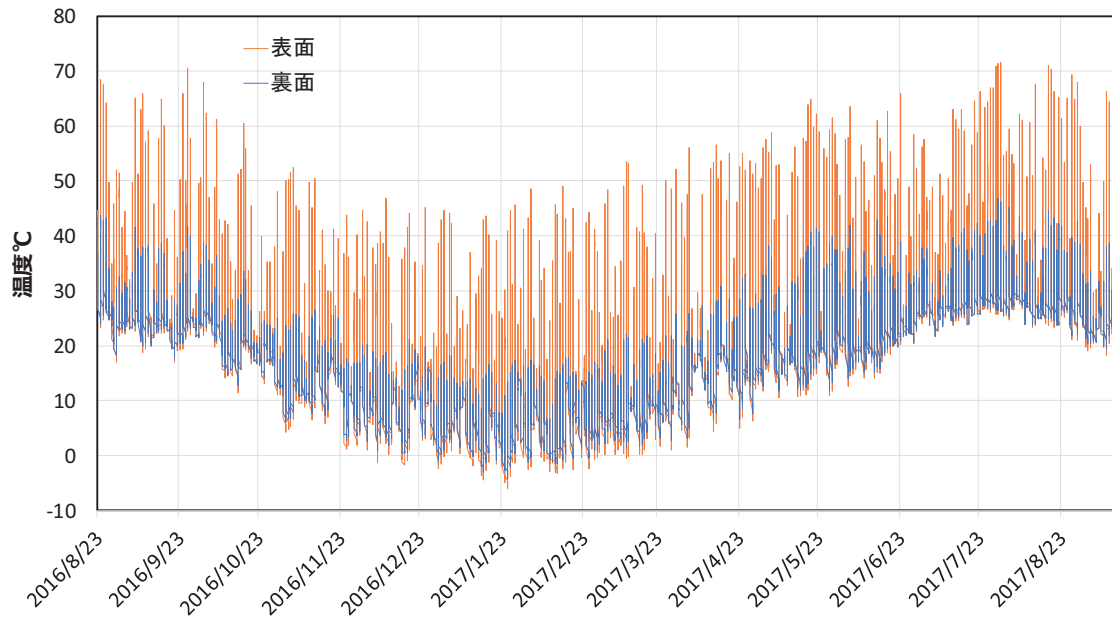


図2.2.6 ゴム引布の表面・裏面の温度測定結果

表2.2.2 ゴム引布の月別最高・最低・平均温度 (2016/9/1~2017/8/31)

	表面温度 (°C)			裏面温度 (°C)		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
9月	70.5	17.0	29.8	41.7	17.7	26.2
10月	68.0	10.8	24.7	39.3	12.2	21.7
11月	52.5	0.9	17.3	26.8	2.7	13.9
12月	47.0	-2.5	12.4	21.8	-1.0	9.3
1月	46.6	-6.5	10.2	18.9	-4.3	6.6
2月	49.1	-3.6	11.2	19.1	-1.6	7.4
3月	54.5	-0.5	14.0	27.2	0.9	10.4
4月	58.1	1.5	21.5	33.1	3.0	17.5
5月	65.0	10.1	27.1	41.4	11.7	22.9
6月	65.9	12.4	28.6	43.5	14.0	24.9
7月	72.0	21.7	34.6	46.8	21.6	30.3
8月	71.1	21.0	35.0	45.2	21.8	30.6
年間	72.0	-6.5	22.3	46.8	-4.3	18.5

(4)まとめ

ゴム引布の温度測定を行った結果、夏季には表面が70°Cに達することが分かった。一方、裏面は45°C程度であり、ゴム引布全層が高温になる可能性は低いものと考えられた。また、年平均では表面で22.3°C、裏面で18.5°Cであった。

2. 2. 4 ゴム引布の静的強度特性

(1) 静的強度試験

ゴム引布の静的強度特性について検討するため、ゴム引布の単軸引張試験を行った。今回、設計強度 500 N/mm、繊維層数 3+1ply、ゴム種別:EPDM、厚さ約 14 mm のゴム引布を用い、ダンベル形状の JIS-A 型試験片にて引張試験を行った。実際のゴム堰は、ゴム引布が水環境下に置かれ、表面ゴムの摩耗などがあった場合には繊維層に水が浸入することも考えられる。このため、乾燥状態と繊維に実際より十分に水を含ませた湿潤状態の試験片を用意し、それぞれの特性を比較することとした。

(2) 静的強度試験結果

静的試験片は大別すると、ゴム引布が製造時に加熱加硫により接合され繊維の切れ目を有す強度的な弱点箇所となる接合部と、それ以外の強度材繊維が連続する中間部の 2 種である。試験条件は乾燥状態の Dry と、真空引きにより繊維を十分に含水させた Wet を用意し、それぞれを比較した。表 2.2.3 に引張試験の試験条件と得られた引張強度と伸び等についての結果一覧を示す。なお、試験片は大別して①中間部と②接合部であるが、①中間部には、繊維が完全に連続しているもの（「中間部」と表記）と製造上の都合で繊維に切れ目がある部位（「中間部（繊維継ぎ目）」と表記）の二つがある。

図 2.2.7 に引張強度の比較図を示す。これらより、Dry に比べ Wet では約 10%ほど破断強度が下がる傾向が見られた。破断時の伸びについては、表 2.2.3 から Dry に比べ Wet では約 5~18%低下したことがわかる。これらの結果について、Wet 時のゴム引布の強度の低下は、参考文献⁴⁾が示す水分を含んだ場合の繊維の引張強度の低下とほぼ同じ割合であった。

図 2.2.8 に接合部 4 の試験結果である応力-ひずみ線図の例を示す。この曲線からは材料の塑性変形と延性破壊の傾向が確認されず、試験したゴム引布では弾性域での破壊傾向が見られた。

表 2.2.3 引張試験の試験条件と結果一覧

部位	試験荷重方向	状態	含水率 (質量分率%)	設計強度 N/mm	引張強度 N/mm	引張強度/ 設計強度	伸び%	強度比 (水中/乾燥)	伸び比 (水中/乾燥)
接合部1	袋体 周方向	Dry	-	500	527.9	1.06	38.8	0.9	0.86
		Wet	2.86		476.8	0.95	33.5		
接合部2		Dry	-		538.2	1.08	25.5	0.91	0.91
		Wet	2.88		487.3	0.97	23.1		
接合部3		Dry	-		551	1.10	27.4	1.03	0.81
		Wet	3.01		565.1	1.13	22.3		
接合部4		Dry	-		610.6	1.22	26.8	0.87	0.9
		Wet	2.76		531.7	1.06	24.2		
中間部 継あり		Dry	-		614.6	1.23	27.5	0.89	0.85
		Wet	2.19		547.8	1.10	23.4		
中間部 継あり2	Dry	-	556	1.11	22.9	0.92	0.96		
	Wet	2.89	513	1.03	21.9				
中間部 継なし	袋体 径間方向	Dry	-	579.7	1.16	27.3	0.89	0.94	
		Wet	2.31	513.8	1.03	25.7			

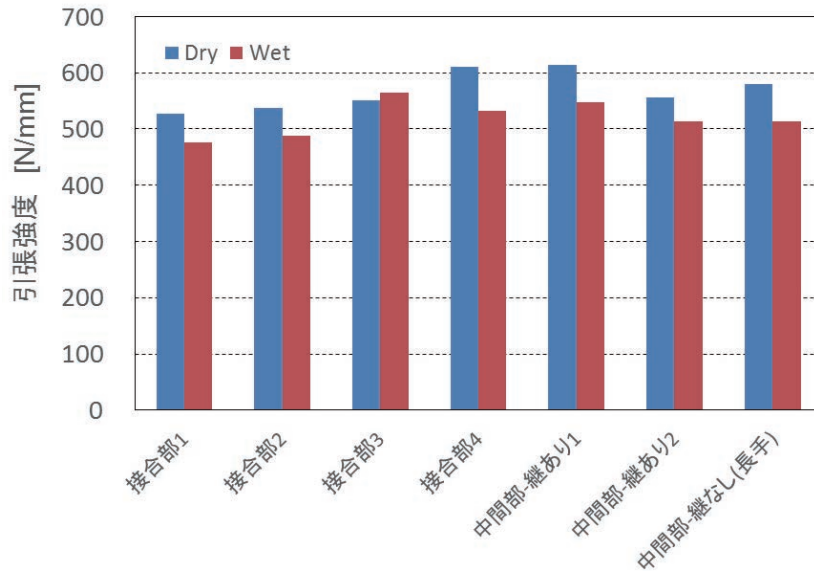


図 2.2.7 引張強度の結果比較

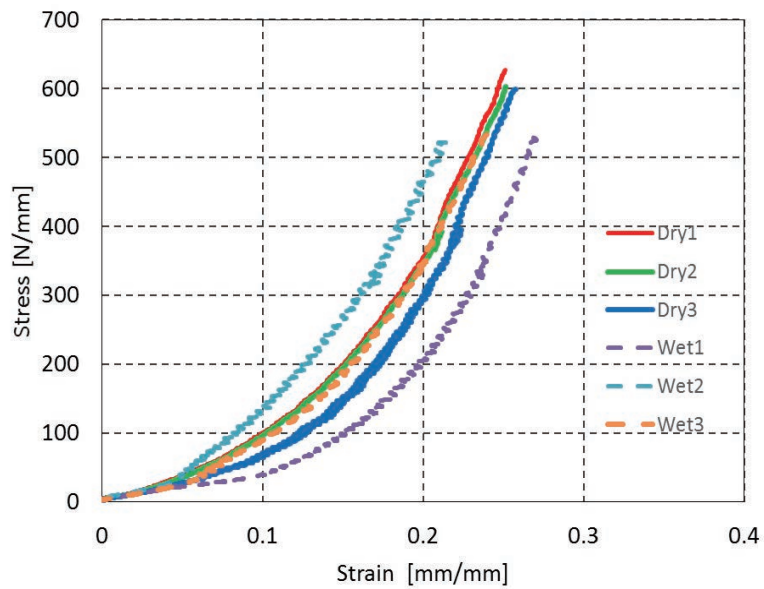


図 2.2.8 応力ひずみ線図(接合部4)

(3) まとめ

- 単軸引張試験の結果、ゴム引布の繊維が湿潤状態であると、一様に強度低下が見られ、その低下は繊維の強度低下によるものと考えられた。
- 単軸引張試験では、接合部の有無による強度差は見られなかった

2. 2. 5 ゴム引布のクリープ特性

(1) クリープ破断試験

式(2)の累積損傷則のクリープ項の決定とゴム引布の基礎的材料特性の時間依存性を確認するためクリープ試験を行った。試験片は前述の単軸引張試験で用いたのと同様のA社製ゴム引布サンプルと未使用品のB社製ゴム引布を用いた。B社製ゴム引布の緒元は、設計基準強度 500 N/mm、ナイロン繊維層 3 層、ゴムは EPDM である。写真 2.2.5 にクリープ試験に用いた試験片を示す。試験片は図に示すようなダンベル形状とし、長さは約 500 mm とした。試験において、試験荷重は設計基準強度の 40~70% とし、試験環境は室温約 20°C にて乾燥状態 (DRY) と水中 (WET)、および水中+高温 (40°C) の主に 3 条件で実験した。



写真 2.2.5 クリープ破断試験片

(2) クリープの破断モード

写真 2.2.6 に実施したクリープ試験で見られた破壊モードを示す。写真 2.2.6 左は繊維が破断する「繊維破断型」の破壊モードで、単軸引張試験の破壊モードと同じである。写真 2.2.6 右は繊維間のゴム界面がせん断力で破壊し繊維層間がはく離する「せん断はく離型」である。A社製試験片において、「せん断はく離型」は、単軸引張試験では見られなかったが、接合部のクリープ破断試験ではこのモードが出現した。これは、ゴム引布接合部において、準静的な荷重条件下での損傷形態と、時間依存型の荷重条件下での形態は異なる場合があることを示唆する。



写真 2.2.6 クリープ破断のモード
(左:繊維破断型、右:せん断はく離型)

(3) クリープ破断試験結果

図 2.2.9 にクリープ破断実験より得られたクリープ破断線図を示す。凡例で、特に表記の無いものは A 社製サンプルの結果である。試験片は大別して①中間部と②接合部であるが、①中間部には、繊維が完全に連続しているもの（「中間部」と表記）と製造上の都合で繊維に切れ目がある部位（「中間部（繊維継ぎ目）」と表記）の二つがある。ただし、引張試験の結果、「中間部」と「中間部（繊維継ぎ目）」は同等の強度を持ったため、ここでは両者を同じ①中間部として考えることとする。

図 2.2.9 では、一部のデータ群に近似曲線を示している。横軸の 10000 時間は約 1 年、100000 時間は約 10 年を表す。縦軸は実験時に荷重制御で設定したクリープ応力を各試験片の基準強度で割り標準化したもので、単軸引張強度との割合を示す。この標準化した応力値と近似曲線の外挿部分が交差する点はその荷重でのクリープに対する寿命となる。A 社の中間部において、DRY と WET を比較すると、わずかに WET の結果が DRY の近似曲線より図下側に位置するが、両者のクリープ破断時間に大きな差がない結果が得られた。しかし、接合部の結果では、DRY（赤印）と WET（赤 X 印）おなじ 0.6 の応力値でクリープ破断時間が 2 オーダ程違う結果となっており、水環境でクリープ強度が低下することが示唆された。接合部の水環境についてはデータが少ないので、今後、検討が必要と考える。

A 社の接合部で DRY と 40°C/WET の結果群を比較すると、40°C/WET は DRY の大きく下側に位置し、高温では同一荷重でクリープ破断時間が短くなることが予想された。ゴム袋体の実際の運用時には太陽光等によりゴム引布の温度は 40°C 以上の高温になることが確認されている。上で述べたように、ゴム袋体の実働応力が引張強度の数パーセントである場合でも、接合部/40°C/WET のような状況で、内部に応力集中が生じている場合などは、早期に部材が破損することも考えられる。この結果と高温条件下での破壊メカニズムについては今後慎重に検討を行うことが必要である。

実際のゴム堰の想定される実働応力を引張強度の 10% 以下と仮定した場合、DRY での試験結果（各中実丸印）はどの条件においても、クリープ破断までの余寿命が 30 年以上と推定される。注意点として、先に述べたように実働応力が内部応力の応力集中等で局部的に高くなる場合も考えられるので、このクリープ破断線図の作成と同時に、ゴムと繊維およびその界面それぞれの正確な内部応力の把握も重要である。

B 社のサンプルは接合部/DRY であり、その結果群は A 社の接合部/DRY の結果と比べると縦軸方向でおよそ 1 割ほど上となる結果が得られた。クリープ時間の増加に対する曲線の傾きは A 社と B 社でほぼ同じ傾向が見られた。

ここでは、作成中のクリープ破断線図を示し、かつ、ゴム引布の様々な環境下でのクリープ特性を調べた。余寿命予測手法の開発を進めるためにはさらにデータを増やし式(2)のクリープ項の精度を高める必要がある。

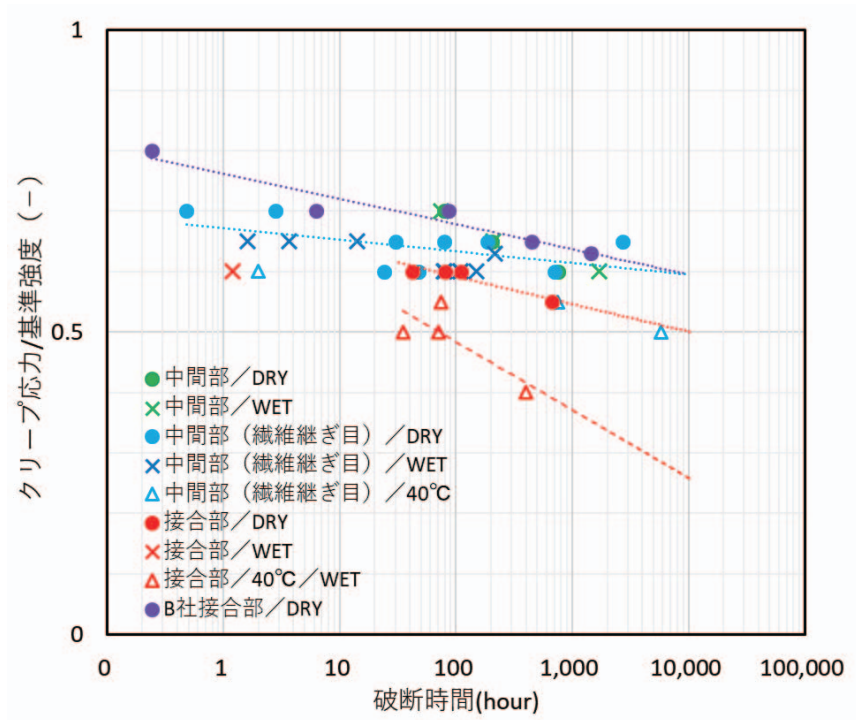


図 2.2.9 クリープ破断線図

(4)まとめ

- ・ クリープ試験では、乾燥・湿潤による差はあまり見られなかった。
- ・ 接合部がある場合、クリープ試験による破断時間が短くなる傾向があり、特に温度が高くなるとその傾向が顕著になった。

2. 2. 6 ゴム袋体の劣化分析

(1) ゴム堰に用いられるゴムの特徴

ゴム堰に用いられる代表的なゴム種であるクロロプレン(CR)とエチレンプロピレンジエン(EPDM)の特徴を表2.2.4に示す。

表 2.2.4 ゴム袋体用ゴムの特徴

	分類	接着性	耐候性	耐熱性	耐紫外線
CR	ジエンゴム	◎	◎	130℃	○
EPDM	非ジエンゴム	○	◎	150℃	◎

CR は天然ゴムや他の合成ゴムの中でも耐候性、耐紫外線性、耐熱性をバランス良く持ち、接着性や加工性を兼ね備えたゴムと言える。一方で EPDM は耐候性、耐熱性、耐紫外線性などの耐久性が非常に高く、屋外の厳しい環境で用いられるゴム堰への適用性が高いが、接着性に関しては難しい場合もある。ゴム堰の用途としては開発当初は CR を主に用いていたが、徐々に EPDM を主成分としたゴムへと移り変わっているというのが現状である。これは、水、オゾン、紫外線、熱などが複合的に劣化の要因となるゴム堰の使用環境において、これまでの点検や劣化診断の指標とされている表層ゴムのクラックの出現やゴム硬度の変化において EPDM が優れているためであると考えられる。

CR はジエン型ゴムと呼ばれる C=C の二重結合を高分子主鎖に有する構造である。一方で EPDM は非ジエン型ゴムであり、二重結合を側鎖に有する構造である。二重結合などの不飽和結合はゴムを硬化する架橋反応部位として導入されているが、同時に、劣化の起点となりやすく、高分子主鎖から劣化が始まるとゴムの特性が失われる影響が大きいと言われている。

(2) 赤外分光分析

1) 概要

ゴムの劣化進行を解析するための一つの指標として赤外分光法を用いたカルボニル基や C=C 二重結合の解析が報告されている^{5,6)}。そこで現地で回収したゴム片に対し、赤外分光分析を用いて化学構造の変化について調べた。法面や越流しない堰など長時間高温に晒させる部位と河床部付近など常時水中環境にある部位を比較し、劣化がゴム部に生じているかどうかを検討した。

2) 方法・材料

材料表面やゴム引布の断面表層の化学構造解析をするため減衰全反射(ATR)法を用いた。ATR 法は球状のダイヤモンドやゲルマニウム製のクリスタルを試料と接触させ、クリスタル内部を通る赤外線をクリスタルと試料の界面で全反射させた時の反射スペクトルを測定する方法であり、対象表面の微小領域を非破壊で分析することができる。

今回の赤外分光分析では上記の C=C などの不飽和基は紫外線やオゾンや熱によって、空気中の酸素や水と反応して C=O になることを利用し、C=O の吸収スペクトル 1750 cm⁻¹ 付近に注目して分析した。分析を試み

たサンプルは表 2.2.5 の二種類である。どちらも国土交通省の河川管理に供用しているゴム堰の端部から数センチ角の分析サンプルを採取し、ATR 法によって赤外分光法によって化学構造を分析した。

表 2.2.5 測定したサンプル

	主成分	供用期間(年)	ゴム硬度
1	CR	28	82-87
2	EPDM	17	65-78

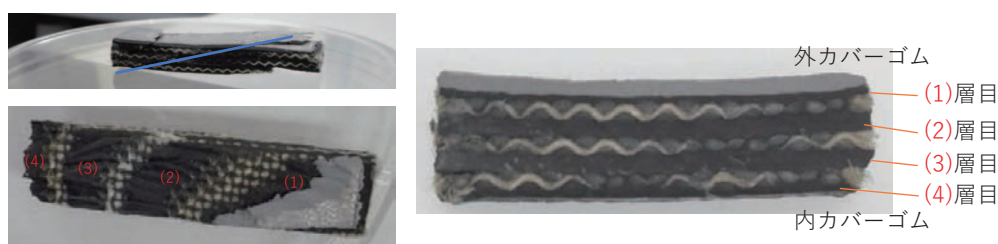


写真 2.2.7 CR 試験片の切り出し例

供用から 28 年間経過した CR 製のゴム堰(1)から法面部位と水中に沈んでいる部位二箇所からサンプルを得た。切り出した試験片の例を写真 2.2.7 に示す。法面では 1 年を通して越流がないため、高温になりやすく紫外線や熱の影響が大きいと考えられる(ゴム硬度 87)。最表層は耐候性顔料を含むため黒色のゴムについてゴムの外側から 1~4 層を写真のように切出し、ATR 法を用いて赤外分光スペクトルを測定した。比較として常に水に浸かっているため熱と紫外線の劣化が少ないと考えられる部位(ゴム硬度 82)の第 3 層から採取したサンプルについてのスペクトル測定を実施した。第 4 層はスペクトルの形状から別種のゴムが用いられていると考えられるため破線で示した。

供用後 17 年経過した EPDM を主成分としたゴム堰(2)についても同様に法面部位(ゴム硬度 78)と水中部位(ゴム硬度 65)で採取したサンプルから繊維間のゴムを切出した。EPDM 試験片の例を写真 2.2.8 に示す。各層近傍のゴム部に対して ATR 法を用いて赤外分光分析を実施した。

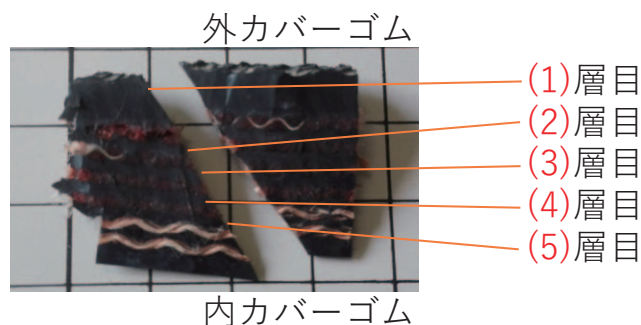


写真 2.2.8 EPDM 試験片の切出し例

3) 結果

CRの結果を図 2.2.10 に示す。劣化の際に現れるカルボニル基由来の 1750 cm^{-1} 付近に注目すると、法面部位の最も表層に近い1層目においてわずかに吸収が見られるが、2層目、3層目と吸収は小さくなり、水中部ではほぼ吸収は見られない。サンプル採取した堰は表層にクラックが見られ、ゴム硬度が増大しているが、CRゴムの劣化による交換の目安となっているゴム硬度90には達しておらず、定期的な点検は必要であるものの運用には問題ない。今回の赤外分光分析の結果からも強度を保つ繊維を保護するゴム部についても劣化は少ないことが示された。

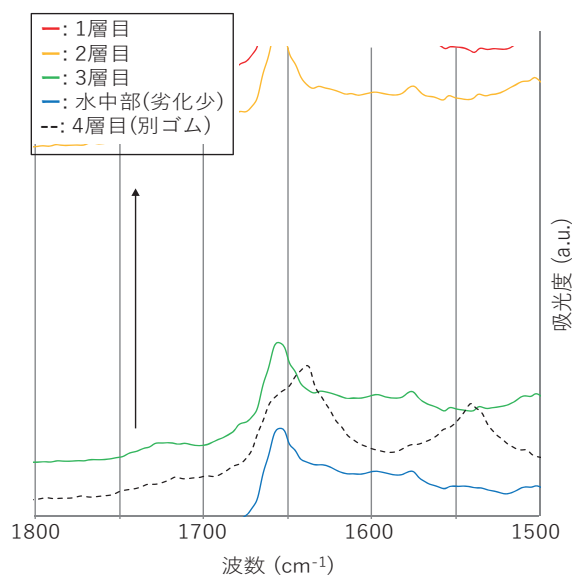


図 2.2.10 CR の赤外分光スペクトル例

続いて EPDM の結果を図 2.2.11 に示す。EPDM は最表層のゴム種は内面と同じであったので表面に近い場所を1層目とし、図 2.2.10 のように5層目までの赤外分光スペクトルを比較した。

CRと同様に劣化の際に現れるカルボニル基由来の 1750 cm^{-1} 付近を観察したが、明確なピークは検出されなかった。第3層、4層に見られる 1590 cm^{-1} 付近にピークが観察できる場合があったが、酸化劣化が生じる場合に観測されるのは $1700\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ 付近に観測されることがある不飽和カルボニルの C=O 伸縮振動吸収⁶⁾ などには該当しないため、添加剤の可能性がある。5層目にあたる内面カバーゴムはゴム引布の強度を保つための層ではないため成分の異なるゴムである可能性もあり、4層目から1層目までのピークの減少が見られるのは劣化防止剤が消費されている様子である可能性もある。水中部位と法面部位に大きな差はなかった。いずれにせよ、赤外分光分析の結果から EPDM ゴムの劣化ピークは見られず、供用17年では強度を保つ繊維を保護するゴム部の劣化はほとんどないことが示された。

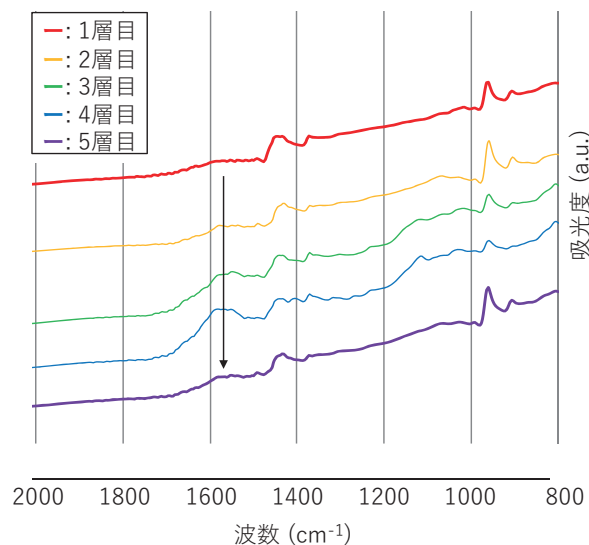


図 2.2.11 EPDM の赤外分光スペクトル例

4) まとめ

赤外分光分析の結果から供用開始から 28 年の CR 製ゴム堰と 17 年の EPDM 製ゴム堰のゴム部の劣化について分析した。ゴム堰用のゴムの熱や紫外線などに対する耐久性は十分に高いことが示された。しかし、一般にゴム製品は成分が開示されず、主成分の他にも様々な役割を持つゴムや添加剤が練り混ぜられており、EPDM ゴムと記載されていてもメーカーや製造時期によってその成分は異なる。赤外分光分析では劣化の指標となるカルボニル基群のピーク増大や添加剤と思われるピークの減少から劣化の診断に寄与できる可能性がある。

現場から得られたゴムや新規製作されたゴム、あるいは、当てゴムで補修した試験片を温水に浸漬して促進劣化させ、供用中のゴム堰での化学劣化に対する相関についての分析が今後の課題である。

2. 2. 7 ゴム袋体の材料試験

(1) 現場採取供試体による材料試験

供用中のゴム堰に対して、現場での目視観察により劣化による亀裂や破断を確認することができる。しかし、材料がどの程度劣化しているかを調べるには、現場での試験では限界がある。ここでは、損傷したゴム堰から試料を採取し、ゴム袋体の材料試験を行ったので報告する。

1) 概要

当該ゴム堰は建設後 33 年が経過し、ゴム堰の標準的な耐用年数(30 年)を超過している。これまで、設備の定期点検時には、ゴム袋体の健全性を定量的に評価するため、外層ゴムのひび割れの深さや硬度を計測し、併せて、ゴム袋体の材料強度や気密性能に影響を与える接合部のはく離の有無についても調査してきた。現地調査の結果では、ゴム袋体法部の折れシワ部において、補強繊維の破断を伴う深さのひび割れや、ゴム引布接合部のはく離が認められている(写真 2.2.9、2.1.10)。また、劣化指標の一つである外層ゴムの硬度が上昇し、他地点においてゴム袋体取替の目安となっている数値「90」を超過していることが判明している。

これらの劣化症状から、ゴム引布材料の強度低下(引張強さ、ゴム/織布の接着力)が想定されたため、ゴム袋体の端部余長部から採取した供試体にて、現在の強度保持率を計測した結果を報告する。

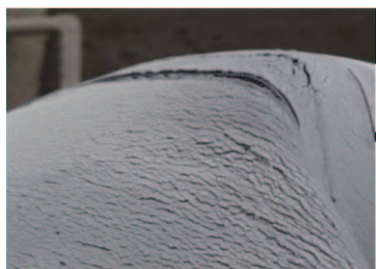


写真 2.2.9 ひび割れの状況

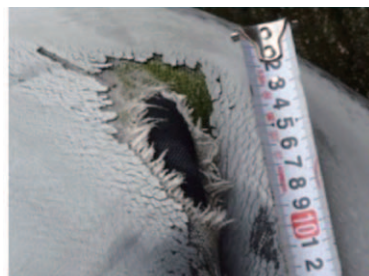


写真 2.2.10 補強繊維の破断状況

2) ゴム袋体の構造及び材料仕様



写真 2.2.11 ゴム袋体の構造(接合部,法部(○部))

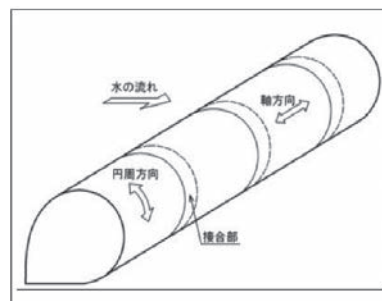


図 2.2.12 ゴム袋体の接合位置図

- ・ 堰高×径間長、法勾配 ; 2.7m×48.5m、1:0.5(両岸)
- ・ 膨張方式、倒伏方式 ; 空気膨張式、両倒れ方式(下流側→上流側への倒伏可)
- ・ 製造方法 ; 圧力缶加硫方式

- ・断面構造、材質、厚さ ; 図 2.2.13、図 2.2.14 参照
- ・ゴム袋体(ゴム引布)の接合構造 (径間方向のみ。円周方向には接合部なし。)

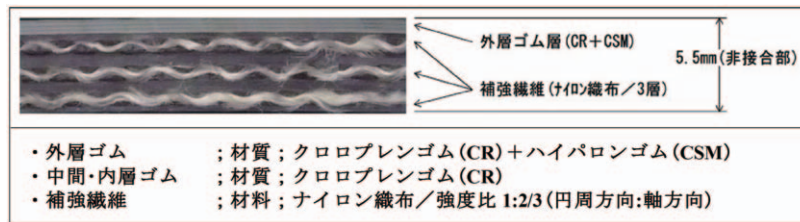


図 2.2.13 断面構造

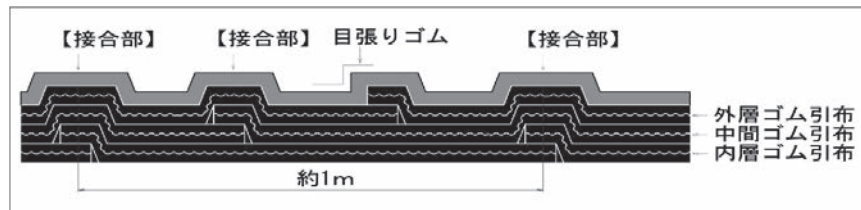


図 2.2.14 断面概略図

3) 試料採取条件および材料試験項目

ゴム袋体材料であるゴム引布(補強層)の劣化状況を把握するため、ゴム袋体から材料試験用の試料を採取した。ゴム袋体構造としては不要な、図 2.2.15 に示す「余長部」から試料採取することとし、採取位置は、以下の条件を考慮して選定した。

- ① ゴムの劣化要因である日射熱の影響を受けやすい法部先端部と日射を受けにくい法部河床近傍位置の 2 箇所を選定し、それぞれ左岸側と右岸側の計 4 箇所から採取する (写真 2.2.12 参照)。
- ② 法部河床近傍の採取位置は、余長部が長く残されている沈砂池側とする。

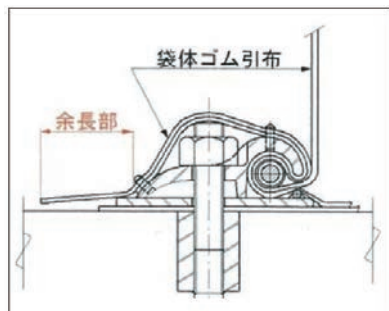


図 2.2.15 試料採取位置(余長部)



写真 2.2.12 試料採取位置(両岸法部2箇所)

材料試験項目は、『ゴム袋体をゲート又は起伏装置に用いる堰のゴム袋体に関する基準(案)』(国土交通省)⁷⁾の規定(3.4.3 ゴム袋体の仕様を規定する試験)に準拠し、表 2.2.6 のとおり、劣化状況を調査するために最も重要な物性値である項目を選定した。なお、この材料試験は、ゴム堰建設当時の物性値との比較を目的とすることから、供試体寸法及び試験方法とも建設当時と同様になるように配慮した。

表 2.2.6 材料試験項目及び試験方法

材料試験項目	試験方法
(1)引張強さ（周方向／横断方向） （横断方向の供試体は、接合部を含む）	JIS L 1096：1979 （短冊状）
(2)ゴムと織布との接着力	JIS K 6256-1：2006 （短冊状）
(3)ゴム引布接合部の接着力（引張強さ） （破断は、織布破断を確認する）	JIS L 1096：1979 （短冊状）

4) 試験結果

①引張試験（全数まとめ）；（ゴム引布接合部（径間）のデータを含む）

ゴム袋体円周方向の供試体による引張強さの計測値を、表 2.2.7、図 2.2.16 に示す。

表 2.2.7 引張強さの計測結果（円周方向）

初期条件 設計張力 0.47 x 10 ⁵ N/m 設計引張強さ 3.77 x 10 ⁵ N/m 以上 当初引張強さ 5.82 x 10 ⁵ N/m 設計耐熱老化 4.65 x 10 ⁵ N/m 以上 設計耐水性 4.65 x 10 ⁵ N/m 以上 N = 3			TB(破断強度: x 10 ⁵ N/m)					
			規格値 (安全率8)	製造時		今回測定強度		
	実強度	設計強度比		実強度	設計強度比 (%)	実強度 降下率 (%)		
一般部	左下	①	3.77	5.82	1.54	5.02	133.1	13.7
		②				5.46	144.8	6.1
		③				5.80	153.8	0.3
	左上	①				6.35	168.4	-9.1
		②				5.82	154.3	0.0
		③				5.82	154.3	0.0
	右下	①				4.93	130.7	15.2
		②				4.99	132.3	14.2
		③				4.79	127.0	17.6
	右上	①				5.91	156.7	-1.5
		②				4.84	128.3	16.8
		③				5.73	151.9	1.5

※ 耐熱老化性 100°C乾熱 x 4日(出荷時試験) : 5.83 x 10⁵ N/m
 ※ 耐水性 70°C温水 x 4日(出荷時試験) : 4.88 x 10⁵ N/m

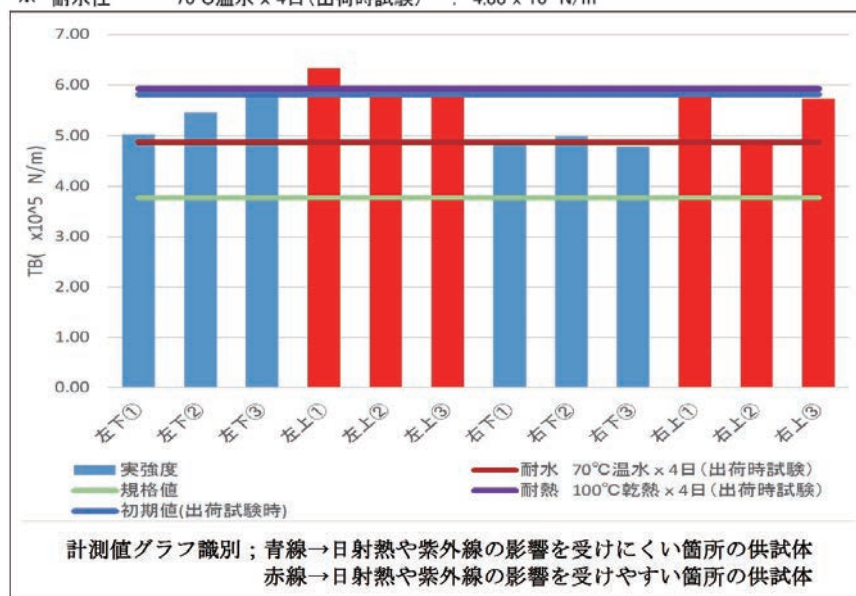


図 2.2.16 引張強さの計測値（規格値、工場出荷時との比較）（円周方向）

また、ゴム袋体径間方向の供試体による引張強さの計測値を、表 2.2.8、図 2.2.17 に示す。

表 2.2.8 引張強さの計測結果（径間方向）

初期条件 設計張力 0.31 x 10 ⁵ N/m 設計引張強さ 2.51 x 10 ⁵ N/m 以上 当初引張強さ 3.69 x 10 ⁵ N/m 設計耐熱老化 基準なし 設計耐水性 基準なし N = 3			TB(破断強度: x 10 ⁵ N/m)					
			規格値 (安全率 ⁰)	製造時		今回測定強度		
				実強度	設計 強度比	実強度	設計 強度比 (%)	実強度 低下率 (%)
継部	左下	①	2.51	3.69	1.47	3.65	145.4	1.0
		②				3.71	147.8	-0.5
		③				3.80	151.3	-2.9
一般部	左上	①				3.38	134.6	8.4
		②				3.37	134.2	8.6
		③						
継部	右下	①				3.53	140.6	4.3
		②				3.58	142.6	2.9
		③				3.55	141.4	3.7
	右上	①				3.37	134.2	8.6
		②				3.90	155.3	-5.6
		③				3.70	147.4	-0.2

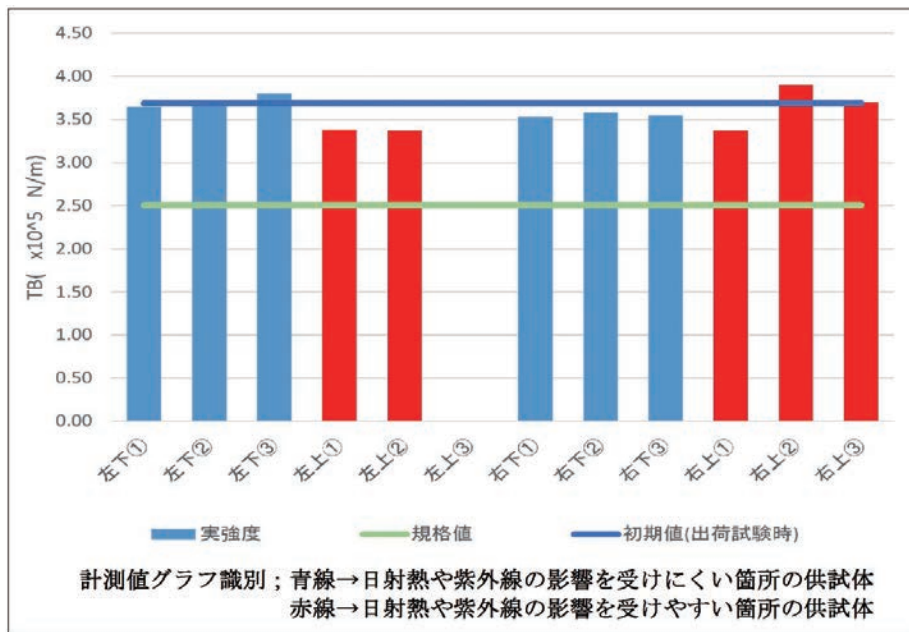


図 2.2.17 引張強さの計測値（規格値、工場出荷時との比較）（径間方向）

引張強さの平均値を、建設当時の初期値と対比すると表 2.2.9 のようになり、円周方向は初期値の 84%、径間方向は初期値の 92%の強度保持率である。

経年的強度保持率の計測値を『ゴム引布製起伏堰技術基準(案)』¹⁾の図 1.11 のデータと併せてプロットすると図 2.2.18 のとおりであり、当該ゴム堰のゴム引布強度保持率は既往データと同等以上と評価される。

表 2.2.9 ゴム引布の引張強さ

織布の繊維方向	初期値	試験結果	
	強度 (N/cm)	強度 (N/cm)	保持率 (%)
円周方向 (平均値)	5,820	4,910	84
径間方向 (平均値)	3,694	3,381	92

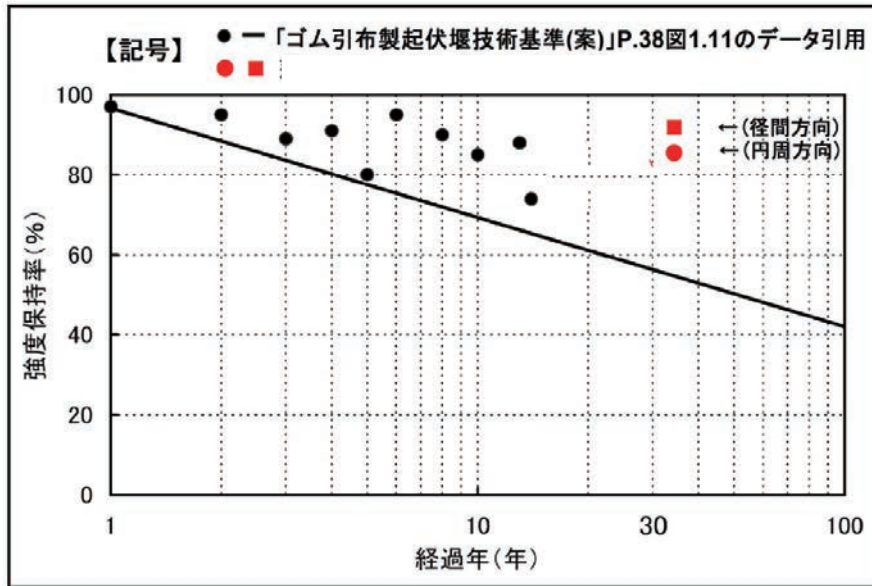


図 2.2.18 ゴム引布の強度保持率(●:当該ゴム堰の測定値,円周方向, ■:径間方向)

また、当該ゴム堰のゴム引布円周方向の計算張力、設計張力及び安全率は表 2.2.10 のとおりである。材料試験の結果では、ゴム引布引張強さの安全率は、基準値(4.5 以上)を満足していた。ただし、補強繊維が破断している箇所の安全率を除いている。

表 2.2.10 ゴム引布の計算張力、設計張力及び安全率

現在の引張強さ	計算張力	応力集中係数	設計張力	安全率
N/cm	N/cm		N/cm	
4,910	471	1.75	824	6.0

本堰のゴム袋体はクリープ劣化が進行し、法部で補強繊維が破断していたため、技術基準(案)に記載されたクリープ破断係数(図 2.1.7)を引用し、ゴム袋体劣化部の強度安全率を計算した。

$$S = S_0 \times \alpha \times \beta \times \gamma$$

ここで、 S ; 現在の材料強度安全率

S_0 ; 製造時の材料強度安全率(8.9)

(設計計算書の数値を引用)

α ; 現在の強度保持率(0.84)

β ; クリープ破断係数

(1/2.53 → 図 2.1.7 参照)

γ ; 補強繊維の有効数=1/3

(3層のうち2層が破断)

したがって、材料強度安全率 S は、

$$S = 8.9 \times 0.84 \times 1/2.53 \times 1/3 = 0.98 < 1.0$$

なお、この安全率は、ゴム袋体法部の折れジワ部において、織布の繊維破断が発生している箇所の数値を示すものであり、ゴム袋体全体の安全率を示すものではない。

②ゴムと織布の接着力

ゴム袋体円周方向の供試体による接着力の計測値を、表 2.2.11、図 2.2.19 に示す。

表 2.2.11 接着力の計測結果（円周方向）

初期条件 設計接着力 5.88 x 10 ³ N/m 以上 当初接着力 12.25 x 10 ³ N/m 設計耐水性 3.92 x 10 ³ N/m 以上 N = 3			接着力 : x 10 ³ N/m					
			規格値	製造時		今回測定強度		
				実強度	設計強度比	実強度	設計強度比 (%)	実強度低下率 (%)
一般部	左下	①	5.88	12.25	2.08	5.91	100.5	51.7
		②				7.21	122.6	41.1
		③				7.24	123.1	40.8
	左上	①				6.64	112.9	45.7
		②				7.34	124.8	40.0
		③				7.41	126.0	39.5
	右下	①				7.35	125.0	40.0
		②				6.46	109.8	47.2
		③				6.00	102.0	51.0
	右上	①				6.85	116.4	44.0
		②				7.37	125.3	39.8
		③				7.15	121.5	41.6

※ 耐水性 70℃温水 x 4日(出荷時試験) : 11.17 x 10³ N/m

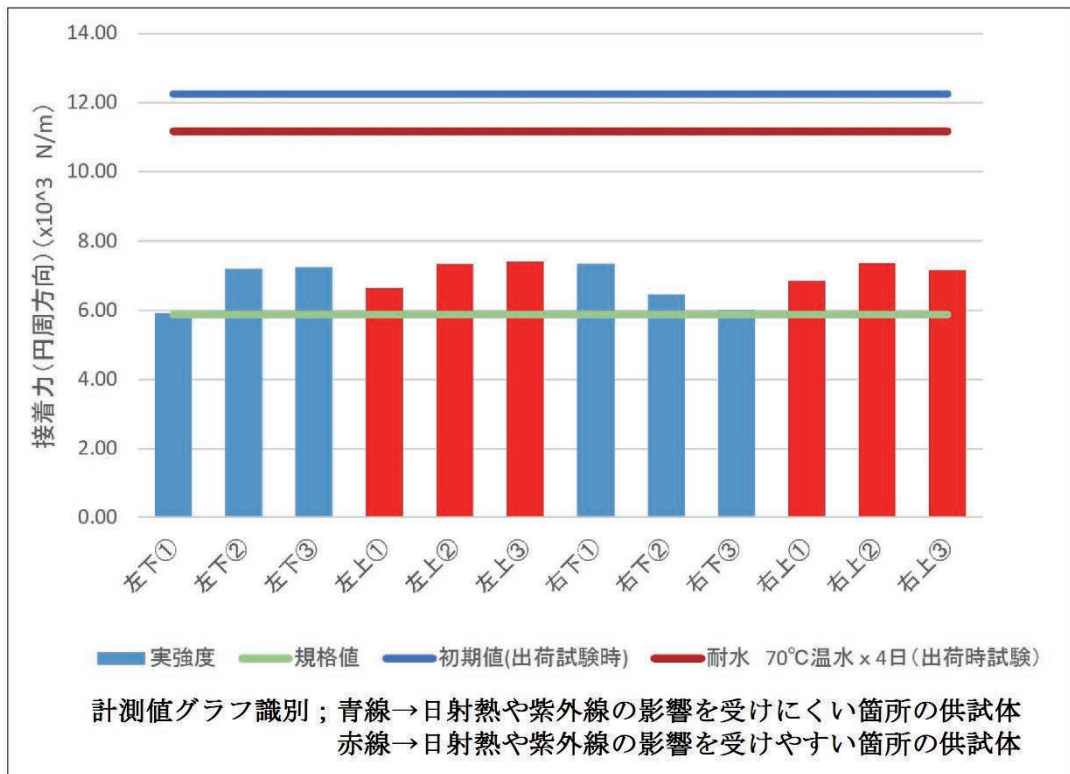


図 2.2.19 接着力の計測値（規格値、工場出荷時との比較）（円周方向）

ゴム袋体径間方向の供試体による接着力の計測値を、表 2.2.12、図 2.2.20 に示す。

表 2.2.12 接着力の計測結果（径間方向）

初期条件 設計接着力 5.88 x 10 ³ N/m 以上 当初接着力 10.29 x 10 ³ N/m 設計耐水性 3.92 x 10 ³ N/m 以上 N = 3			接着力 : x 10 ³ N/m					
			規格値	製造時		今回測定強度		
				実強度	設計強度比	実強度	設計強度比 (%)	実強度降下率 (%)
一般部	左下	①	5.88	10.29	1.75	6.36	108.1	38.1
		②				6.43	109.3	37.5
		③				7.24	123.1	29.6
	左上	①				6.99	118.8	32.0
		②				6.87	116.8	33.2
		③				6.16	104.7	40.1
	右下	①				6.74	114.6	34.4
		②				6.21	105.6	39.6
		③				5.83	99.1	43.3
	右上	①				8.74	148.6	15.0
		②				6.68	113.6	35.0
		③				7.22	122.7	29.8

※ 耐水性 70℃温水 x 4日(出荷時試験) : 9.11 x 10³ N/m

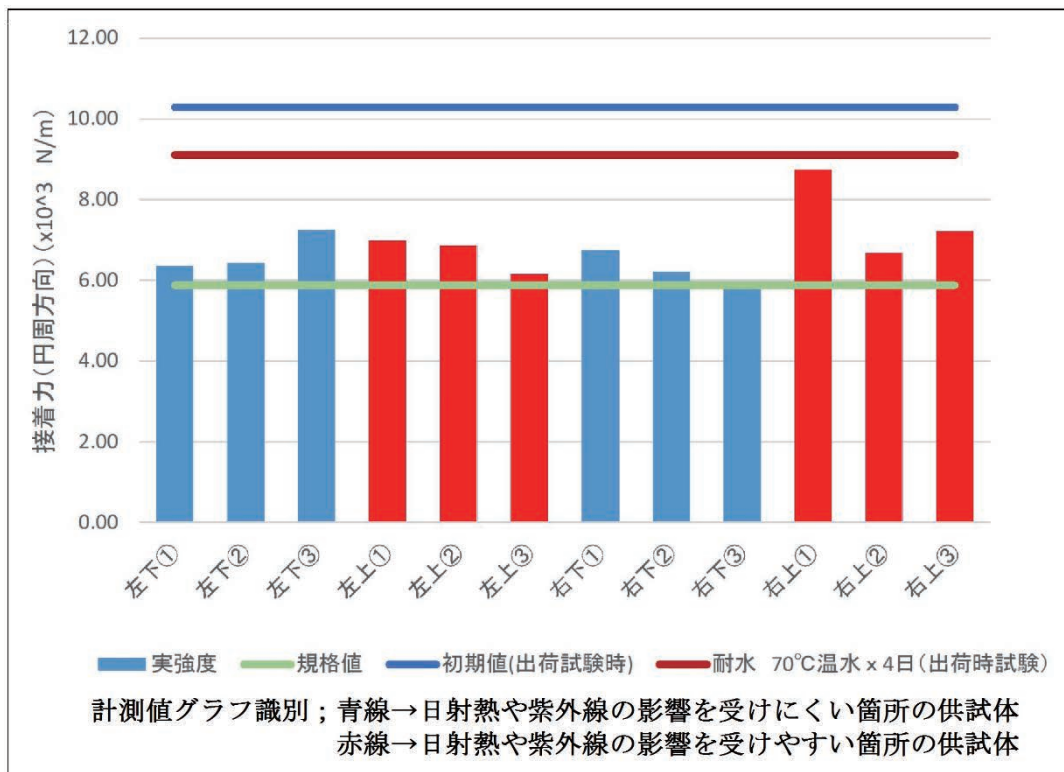


図 2.2.20 接着力の計測値（規格値、向上出荷時との比較）（円周方向）

接着力の平均値を、建設当時の初期値と対比すると表 2.1.13 のようになり、円周方向は初期値の 58%、径間方向は初期値の 55%の強度保持率であった。

表 2.2.13 ゴム引布の接着力

織布の繊維方向	初期値	試験結果	
	強度 (N/cm)	強度 (N/cm)	保持率 (%)
円周方向 (平均値)	114	66.1	58
径間方向 (平均値)	114	62.6	55

経年的強度保持率の計測値を(一社)ダム・堰施設技術協会のゴム堰・SR 堰部会で作成した図にプロットすると図 2.2.21 のとおりであり、当該ゴム堰のゴム引布接着力保持率は既往データと同等程度と評価された。なお、図 2.2.21 に示した調査データは、ゴム袋体の材料仕様(ゴム材質 ; CR ゴム / ゴム厚 ; 5.5mm / ゴム引布接合方向 ; 径間方向)が同一のものである。

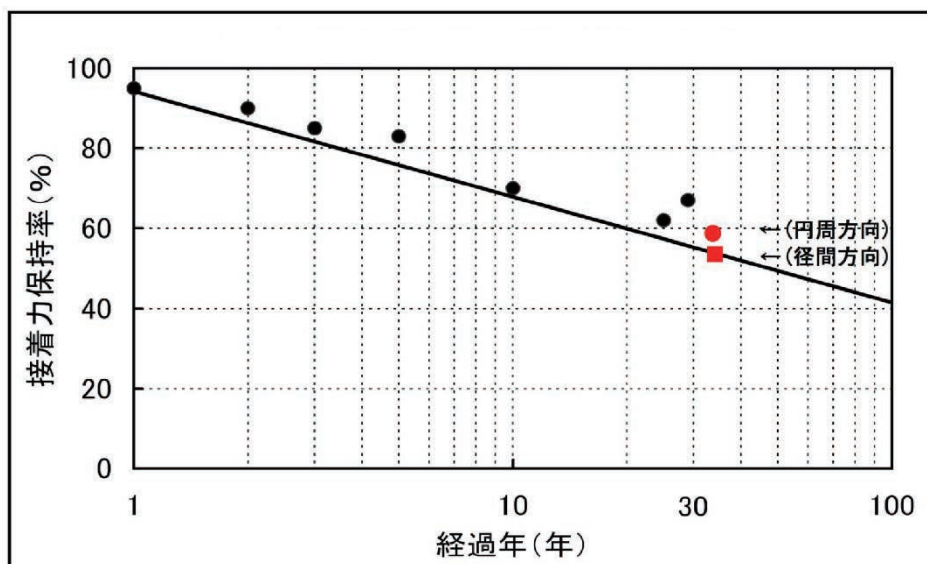


図 2.2.21 ゴム引布の接着力保持率(● : 当該ゴム堰の測定値, 円周方向, ■ : 径間方向)

③外層ゴムの硬度

本堰に使用されているゴム袋体材料{ゴムの材質(CR)、厚さ(5.5mm)}は、屋外暴露時間の経過とともに、外層ゴムの硬度が上昇する傾向がある。また、既往実施例では、製造時の硬度(65)が上昇して【90】を超過すると、ゴムのひび割れが増大し、ゴム袋体の法部湾曲部では、ゴム引布の接合部がはく離する場合があることが確認されている。なお、これらの劣化症状が発現したゴム堰は、実績では、ほぼ全数、更新されている。平成 29 年 12 月に計測した外層ゴムの硬度計測結果を図 2.2.22 に示す。硬度の平均は【90】上回っていることを確認した。また、外層ゴムおよび内層ゴムの硬度の結果を表 2.2.14 に示す。

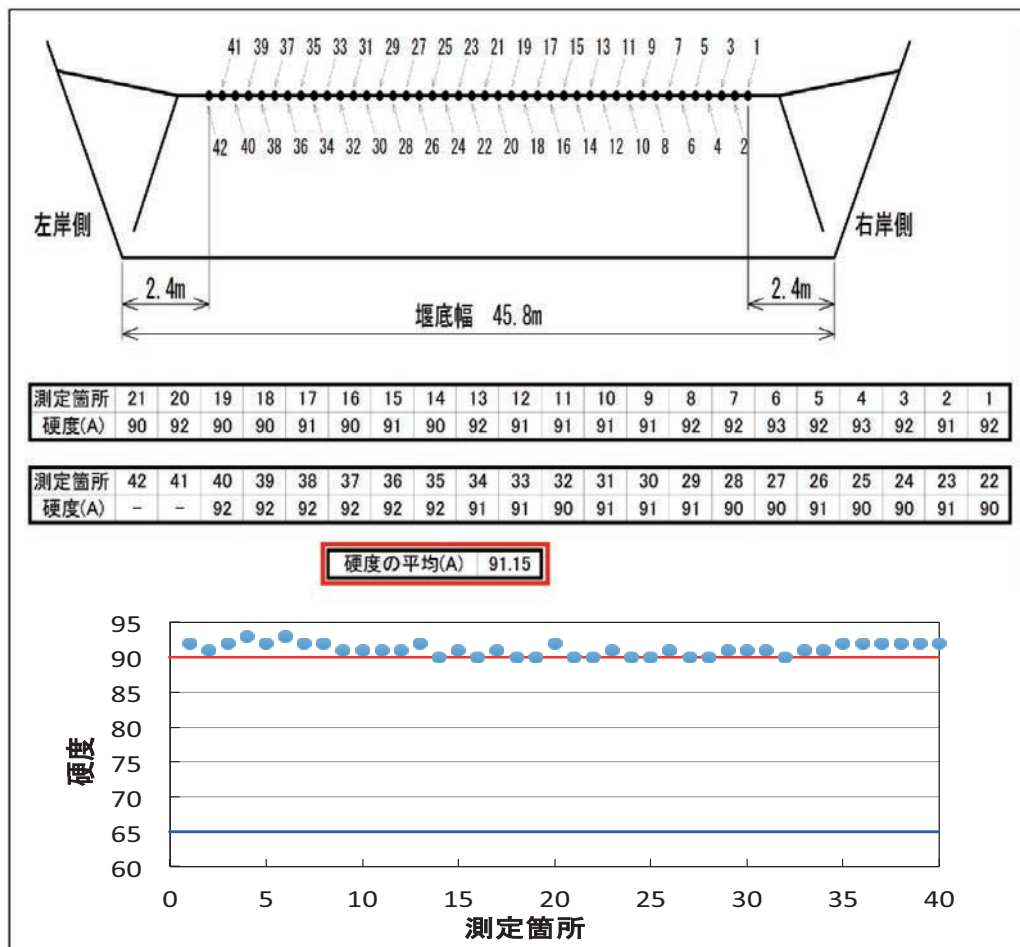


図 2.2.22 外層ゴムの硬度計測結果 (平成 29 年 12 月)【製造時硬度—線、更新指標—線】

表 2.2.14 硬度測定結果

計測位置	外層ゴム面(灰色ハイパロンゴム)		内層ゴム面(黒色クロップレングム)	
	最小値～最大値	平均値	最小値～最大値	平均値
①法部の頂部	84.4～85.6	85	88.4～90.6	90
②河床端部近傍	84.1～84.6	84	93.1～94.8	94
③中央部の堰頂部	90～93(40点)	91		

5) まとめ

現地採取供試体による材料試験の結果を総括すると、以下のとおりである。

- ① 引張強さは、初期値(建設時)の 84%(円周方向)、92%(径間方向)に低下していた。なお、材料試験の結果では、設計張力に対する安全率は 6.0 であるが、補強繊維の破断状況やクリープによる強度低下を考慮すると張力が作用しているゴム袋体の材料安全率は、1.0 未満であった。

- ② ゴムと織布の接着力は、初期値の 58%(円周方向)、55%(径間方向)に低下していた。ただし、実測値は、66.1 N/cm(円周方向)、62.6 N/cm(径間方向)であり、技術基準(案)に示された初期物性規格値(58.8 N/cm)を上回っていた。なお、接着力保持率は、(一社)ダム・堰施設技術協会の調査データと比較し、同等程度と評価された。
- ③ 試験片は、ゴムの劣化主要因である日射熱の影響を受けやすい両岸法部の頂部と日射熱の影響を受けにくい両岸河床端部近傍から採取したが、表 2.2.15 のとおり、引張強さ及び接着力ともに外的環境の影響による有意差は認められなかった。
- ④ ゴムの劣化指標の一つであるゴム硬度について試験片の外層ゴム面と内層ゴム面を計測した結果、内層ゴム面の硬度が外層ゴム面より約 10%高い数値を示した。これは、外的環境よりもそれぞれのゴムの耐候性の違いによる差異と考えられる。

表 2.2.15 引張強さ及び接着力の外的環境による影響

試験片採取位置	引張強さ(N/mm)		接着力(N/mm)	
	最小値～最大値	平均値	最小値～最大値	平均値
①法部の頂部	338～600	464	6.67～7.55	7.1
②河床端部近傍	356～543	441	6.26～6.79	6.6

(2) ゴム硬度に関する知見

ゴム堰は1964年以降、53年間で約3,900基の建設実績があり、ゴム袋体の仕様は①ゴムの材質(CR系及びEP系)、②ゴム袋体の総厚さ(～8mm及び10mm～)、③ゴム引布の接合方向(堰軸方向及び周方向)などで分類される((一社)ダム・堰施設技術協会調べ)。保守管理している約1,800基のゴム堰のうち、主にCR系のゴム袋体を対象として、外層ゴムの硬度とゴム袋体の劣化の関係について調査し結果を示す。

1) 調査対象のゴム袋体仕様

- ①ゴムの材質・・・CR系(外層ゴムはCSM/CR配合ゴム)
- ②ゴム袋体の総厚さ・・・～6mm
- ③ゴム引布の接合方向・・・周方向
- ④建設時期・・・1965年～1996年(全約1,400基/建設後経過年数;52年～21年)

2) 調査したゴム堰の諸元と外層ゴムの硬度

表 2.2.16 調査したゴム堰の諸元と外層ゴムの硬度

No.	堰名	用途	膨張媒体	堰高	河床幅	径間数	竣工年	調査年	経過年数	デュロメータ硬度(A)			
										最小	平均	最大	測定数
1	A堰	防潮	空気	2.54m	36.84m	2門	1987	1997	10	70	72	74	33
2014								27	84	86	88	66	
2015								28	85	87	89	66	
4	B堰	灌漑	空気	0.60m	21.4m	1門	1986	2006	20	74	76	78	6
5	C堰	水力発電	水	2.00m	39.0m	1門	1979	2000	21	72	74	76	7
6								2005	26	74	78	81	10
7	D堰	灌漑	空気	1.25m	15.5m	1門	1978	2003	25	78	79	81	5
8	E堰	防潮	空気	2.78m	32.25m 35.75m	2門	1979	2008	29	85	91	93	58
9								2013	34	84	91	95	74
10	F堰	灌漑	空気	1.50m	22.0m	1門	1977	2007	30	86	88	90	6
11	G堰	灌漑	空気	1.10m	6.5m	1門	1977	2007	30	85	89	90	6
12	H堰	灌漑	空気	1.85m	35.0m	1門	1977	2006	29	80	81	83	10
13	I堰	灌漑	空気	1.60m	30.0m	1門	1980	1998	18	76	77	80	8
14	J堰	灌漑	空気	1.50m	22.0m	1門	1975	1998	23	77	80	81	6
15	K堰	水力発電	水	0.90m	9.62m	1門	1981	2000	19	66	70	72	8
16	L堰	水力発電	空気	1.50m	22.0m	1門	1975	2000	25	75	79	80	6
17	M堰	灌漑	空気	0.80m	10.0m	1門	1980	2011	31	83	90	95	8
18	N堰	灌漑	空気	1.50m	15.0m	1門	1975	2012	37	84	85	87	4
19	O堰	灌漑	空気	1.50m	15.5m	1門	1974	2012	38	84	86	90	3
20	P堰	灌漑	空気	1.20m	32.0m	1門	1980	2012	32	78	80	82	5
21	Q堰	灌漑	空気	1.00m	30.24m	1門	1978	2013	35	80	83	90	33
22	R堰	ガタ止め	空気	2.70m	45.8m	1門	1985	2013	28	86	89	90	42
23	S堰	灌漑	空気	1.00m	7.4m	1門	1988	2013	25	70	75	82	9
24	T堰	灌漑	空気	1.00m	7.4m	1門	1990	2013	23	70	73	80	9
25	U堰	灌漑	空気	1.15m	5.4m	1門	1987	2014	27	82	87	95	9
26	V堰	灌漑	空気	1.60m	51.0m	1門	1989	2014	25	81	86	93	54
27	W堰	灌漑	空気	1.60m	46.7m	1門	1990	2014	24	81	86	90	50
28	X堰	灌漑	空気	1.90m	23.6m	1門	1987	2014	27	80	82	86	8
29	Y堰	防潮	空気	1.80m	21.4m	1門	1981	2014	33	89	92	94	5
30	Z堰	防潮	空気	1.30m	50.5m	1門	1987	2014	27	70	78	87	5
31	AA堰	ガタ止め	空気	2.70m	45.8m	1門	1985	2017	32	90	90	90	42
32	AB堰	水力発電	水	2.00m	39.0m	1門	1979	2017	38	75	79	81	10
33	AC堰	灌漑	空気	1.30m	24.9m	1門	1987	2017	30	81	85	88	10
34	AD堰	灌漑	空気	1.20m	34.0m	1門	1995	2017	22	75	78	80	10
35	AE堰	灌漑	空気	1.97m	33.0m	1門	1974	2017	43	90	91	91	5
36	AF堰	灌漑	空気	2.50m	4.5m	1門	1969	2017	48	90	92	92	5
37	AG堰	灌漑	空気	1.70m	17.6m	1門	1969	2017	48	89	90	90	2

3) 外層ゴムの硬度と経過年数および更新実績の関係

ダム・堰施設技術協会にて調査した「外層ゴムの硬度～経過年数の関係及び袋体更新実績」を図 2.2.23 示す。また、写真 2.2.13、写真 2.2.14 に建設後 32 年、37 年経過したゴム袋体の劣化状況を示す。データ及びゴム袋体の劣化現象から得られた知見は、以下のとおりである。

- ① 外層ゴムの硬度と経過年数には相関があり、ゴム硬度は経過年数とともに上昇している。
- ② ゴムの硬度が【90】に到達するような経年となると、外層ゴム劣化でクラックなどが発生しやすく、ゴムと布との接着力も低下してくるので、ゴム引布のこすれや転石等の衝撃で補強繊維の露出が拡大し、ゴム袋体の気密・水密性に影響を及ぼす事象が生じた。
- ③ 水膨張式のゴム堰(図中、水式ゴム堰)のゴム袋体は、空気膨張式に比べ、ゴム硬度の上昇が緩やかであり、ゴムの亀裂有無などの目視調査の結果と併せても、劣化の進行は遅い傾向にあった。
- ④ 常時水中にあるゴム袋体の劣化の進行は遅い（ゴム硬度の上昇勾配は緩やか）。
- ⑤ 設置後 30 年以上経過し、ゴム硬度が【90】を超えたゴム袋体は、ほぼ全数更新されている。

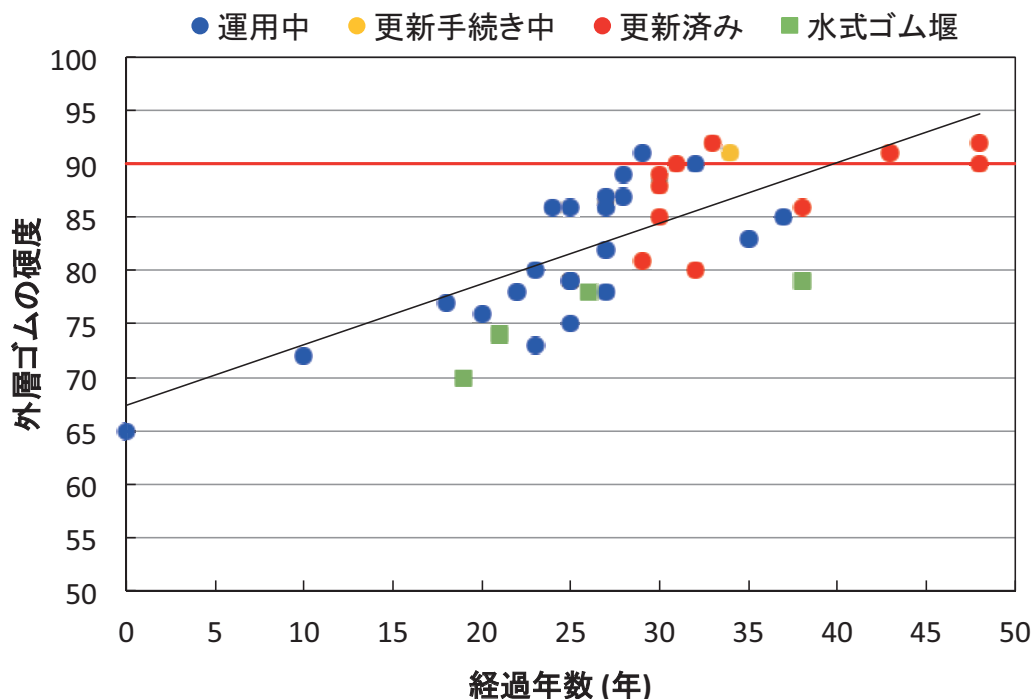


図 2.2.23 外層ゴムの硬度と経過年数

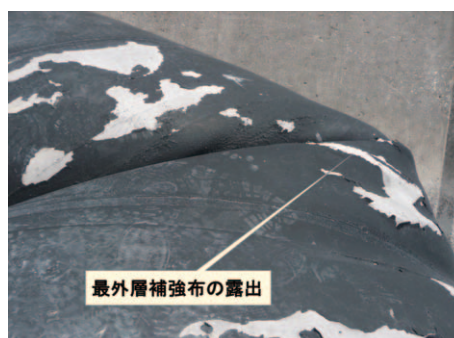


写真 2.2.13 ゴム引布積層間はく離(32年経過) 写真 2.2.14 最外層織布の露出拡大(37年経過)

なお、他地点で同様な劣化症状が生じた施設で実施された延命処置では、写真 2.2.15～写真 2.2.16 に示すとおり、短時間で補修済箇所にゴム引布のはく離現象が生じていることなどから、補修では長期的な対応ができないと判断された。



写真 2.2.15 延命補修事例

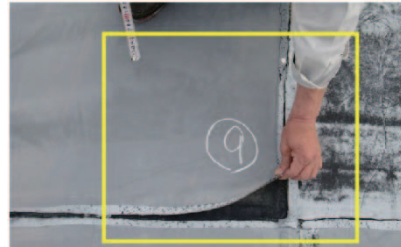


写真 2.2.16 同左(補修材の剥がれ)

ゴムは日射熱やオゾン、紫外線などで劣化が進行するが、運用方法や環境条件の他、水膨張式ゴム堰が空気膨張式に比べて劣化の進行が緩やかであることなどから、ゴムの自然劣化は、日射熱の影響が大きいと推察される。また、各用途のゴム堰(防潮、灌漑、水力発電、水道)について、30年以上経過したゴム袋体の劣化傾向を調査するために端部から採取した試験片で計測した結果では、a)引張強さ、b)ゴム/織布の接着力ともに、基準書の規格値を上回っているが、撤去したゴム袋体から採取した試験片では、ゴム/織布の接着力が著しく低下している。このことから、ゴム袋体の劣化は流下する土砂や礫の衝撃、繰返し応力の作用なども影響していると推察される。

なお、ゴム硬度の他に、摩耗量、ゴム引布接合部のはく離(>接合幅)、ゴム袋体屈曲部の亀裂深さなどを『劣化傾向管理』のデータとし、更新提案の判断基準としている。

4) まとめ

CR系のゴム袋体を対象として、外層ゴムの硬度とゴム袋体の劣化の関係について検証した。外層ゴムの硬度と経過年数には相関があり、ゴム硬度は経過年数とともに上昇していた。また、ゴム硬度90を超えたゴム堰は、補強繊維の露出やゴム引布の層間はく離などの損傷が顕在化しており、設置後30年以上経過している場合には、ほぼ全数更新されていた。水膨張式ゴム堰と空気膨張式を比較すると、水膨張式の方が劣化の進行が緩やかであり、ゴムの自然劣化に対して日射熱の影響が大きいことが推察された。

2. 2. 8 大型供試体のクリープ試験例

(1) 試験の目的

ゴム堰袋体に後加工継手部がある場合、継手部が弱点と考えられることから継手部のクリープ特性を検証し、本体部袋体ゴムの差異を検証する。

(2) 試験体の形状と物性

試験体採集位置は図 2.2.24 に示す。また、試験体は後加工継手が径間方向にあるものと、周長方向にある二種類とした。

① 継手径間方向・試験体 A

- ・ 300N/mm \times (2+1)プライ(たて糸が周長方向)

引張強さ：規格値 470N/mm、実強度 585N/mm

- ・ 幅 25mm \times 長さ 1100mm の短冊形
- ・ 据付時に出た端部法面部余材から径間方向に継ぎ手部(300mm)を含む 9 本採取

② 継手周長方向・試験体 B

- ・ 200N/mm \times (3+1)プライ (よこ糸が周長方向)

引張強さ：規格値 500N/mm、製造時強度 606N/mm

(使用後のゴム引布であったため、試験時の実強度は 467N/mm)

- ・ 幅 25mm \times 長さ 1100mm の短冊形
- ・ 撤去袋体の張力のかかっていない底部より周長方向に継ぎ手部(300mm)を含む 8 本採取

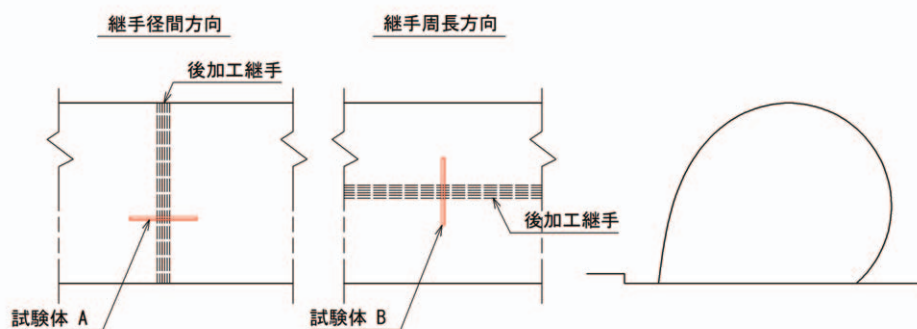


図 2.2.24 試験体採取位置

試験体織布の方向と有効繊維数について、両試験体とも、経糸(たていと)と緯糸(よこいと)が 1 本ごとに交互に浮き沈みして交錯する平織り構造であるが、使用する方向は異なり使用繊維の太さと打ち込み本数は異なる。

試験片は幅 25mm で切り取るが、切り取り寸法の誤差と繊維方向の不整により、9 本~12 本である繊維の内 1~2 本は連続せず途中で途切れていることが多かった。このように全繊維が有効には働いていないため有効断面幅を 0.9 として検討した。

(3) 試験方法

試験には、試験体を吊り下げるビーム、試験体に載荷するウェイト、載荷時間計測用タイマー及び、ビーム押し上げ用ジャッキとフレームにて構成する専用試験機を製作し使用した。試験状況を写真 2.2.17 に示す。

床上のウェイトに試験体の下部を固定し、試験体の上部を可動ビームに固定した状態でジャッキにて可動ビームを上昇させて載荷した。試験体が破断するまでの時間をタイマーにて計測した。なお、100 時間を超えた場合は日単位で計測した。



写真 2.2.17 試験状況

(4) 試験結果

結果は荷重を破断荷重との比で表現し、時間は日に換算して片対数グラフにプロットし近似直線を引き、この近似直線に平行で計測値の下限を通る直線をクリープ特性直線とした。

ゴム引布製起伏堰技術基準(案)¹⁾に袋体の安全率を決めた根拠として示されている同基準(案)P36～38 に準じて 30 年経過時点の強度低下を算出しクリープ特性を確認した。

①試験 A：継手径間方向 300N/mm×(2+1)プライ

試験体 9 体すべて織布突き合わせ 3 ヶ所のうち第 1 層または第 3 層織布突き合わせ部にて繊維が破断した。破断状況は写真 2.2.18 に示す。



白線 3 箇所が織布突き合わせ接合位置
写真 2.2.18 破断状況

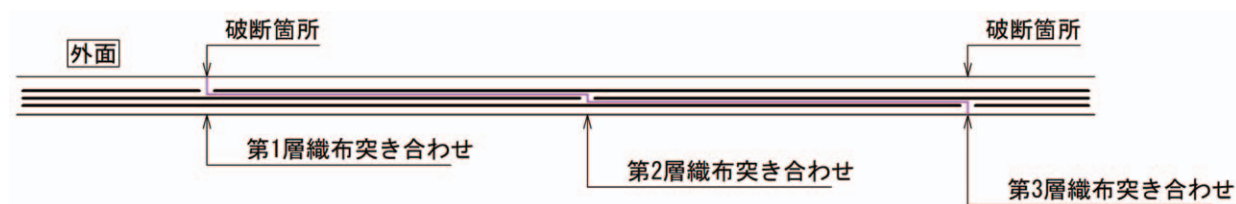


図 2.2.25 後施工継手断面図

図 2.2. 26 は時間軸を片対数とするグラフにプロットし近似直線を求め、近似直線と平行で下限値を通る線をクリープ破断直線としたものである。なお、X 軸「張力／破断荷重」は別途引張り試験機にて計測した径間方向初期袋体強度（585N/mm）を 100%とした。

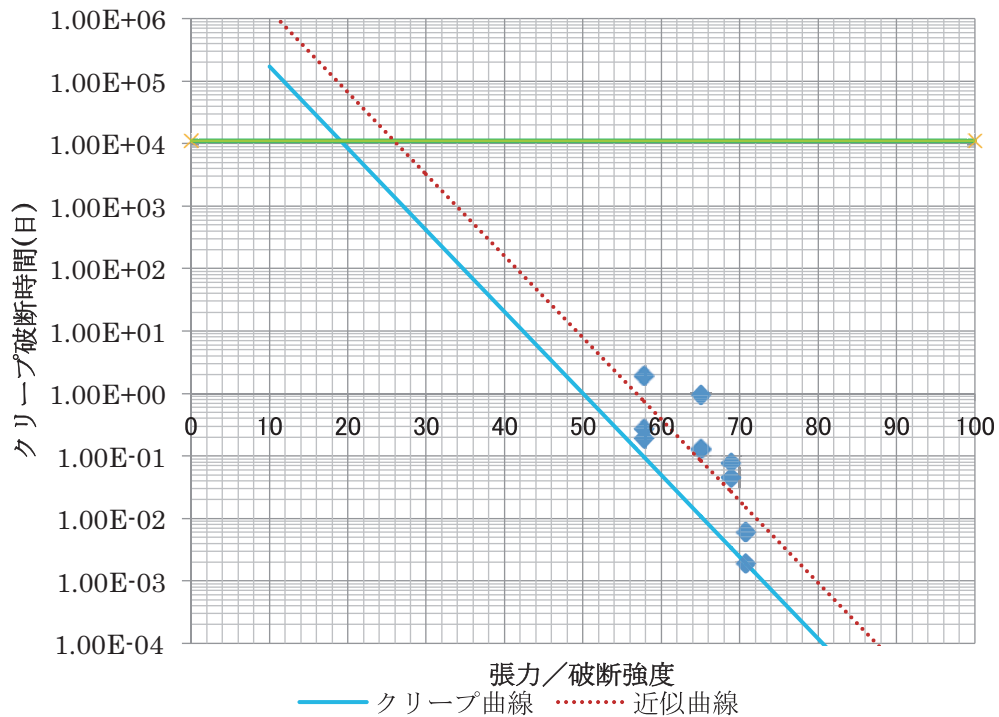


図 2.2.26 試験体 A クリープ特性

②試験 B：継手周長方向 200N/mm×(3+1)プライ

試験体 8 体すべて繊維突き合わせ部とは無関係に試験体中央部で繊維が破断していた。写真 2.2.19 は破断時の試験体全体と破断面を示す。



写真 2.2.19 破断状況

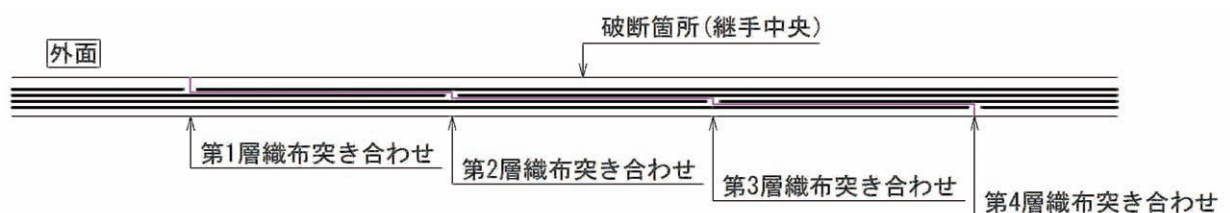


図 2.2.27 後施工継手断面図

図 2.2.28 は時間軸を片対数とするグラフにプロットし近似直線を求め、近似直線と平行で下限値を通る線をクリープ破断直線としたものである。なお、X 軸「張力/破断荷重」は別途引張試験機にて計測した周長方向初期袋体強度（467N/mm）を 100%とする。

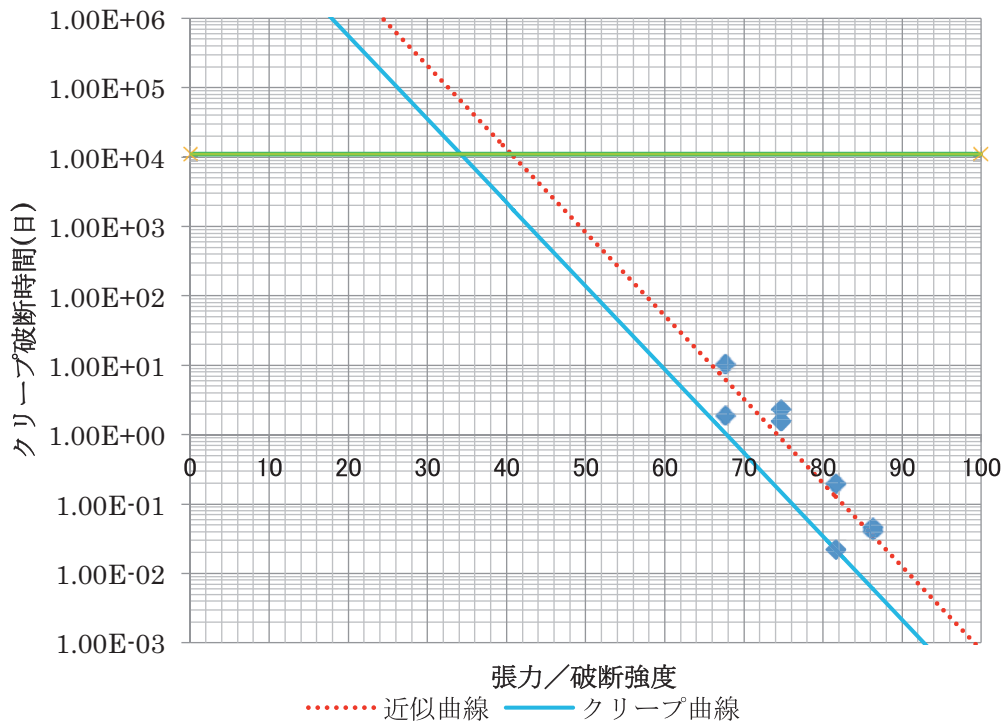


図 2.2.28 試験体 B クリープ特性

(5) 考察

① 試験体 A

図 2.2.28 より、クリープ破断直線と Y=10957 日(30 年)と交差する張力/破断強度 : X =19.1%とした場合、クリープを考慮した係数は

$$1/f_1=0.191$$

また、30 年の経年的強度低下を考慮した係数は

$$1/f_2=0.58$$

したがって、30 年経過を考慮した破断荷重は

$$585/(f_1 \cdot f_2)=64.8\text{N/mm}$$

径間方向ゴム引布強度が T=470N/mm とした場合使用可能な径間方向張力は

$$T/(F_s \cdot f)=470/(4.5 \times 1.75)=59.7 \text{ N/mm} \leq 64.8\text{N/mm}$$

F_s : 安全率 4.5

f : 応力集中係数 1.75

したがって、継手部クリープ特性は径間方向ゴム引布強度より求まる使用最大値(60.4 N/mm)以上あり問題ない。

なお、この時の周長方向張力は径間方向の 3/2 であることから、周長方向張力は

$$59.7 \times 3/2=89.6\text{N/mm} \text{ となる。}$$

②試験体 B

破断箇所が試験体中央となったのは織布接合部が 300mm(ピッチ 100mm)で 4 箇所と密にあるために接合部が一体化され、突合せ箇所では織布数少なくなる影響が出なかったためと考えられる。

図.2.2.30 より、クリープ破断直線と $Y=10957$ 日(30 年)と交差する張力/破断強度： $X=34.2\%$ とした場合、クリープを考慮した係数は

$$1/f_1=0.342$$

30 年の経年的強度低下を考慮した係数は

$$1/f_2=0.58$$

したがって、30 年経過を考慮した破断荷重は

$$467/(f_1 \cdot f_2)=92.6\text{N/mm}$$

周長方向ゴム引布強度が $T=500\text{N/mm}$ とした場合の使用可能な周長方向張力は

$$T/(F_s \cdot f)=500/(4.5 \times 1.75)=63.5 \text{ N/mm} \leq 92.6\text{N/mm}$$

F_s : 安全率 4.5

f : 応力集中係数 1.75

したがって、継手部クリープ特性は周長方向ゴム引布強度より求まる使用最大値(64.2N/mm)以上あり問題ない。

以上の結果より、試験体 A および B の性能はゴム引布製起伏堰技術基準(案)¹⁾を満足しているが、2 月から 6 月にかけて屋内で実施したもので温度に関して考慮していない。実機においては夏場ゴム表面が高温になることから強度低下が見込まれ、後施工継手箇所において安全率 F_s に余裕があるとは言い難い。

(6)まとめ

後施工継手部分のクリープ特性を検証した結果、後施工継手箇所においては長期に渡り強度を保つことに余裕が少ない結果となった。袋体の選定は継手の方向と初期強度にて行うことになるが、十分に余裕を見た継手強度で対応することが必要となる。特に、周長方向に継手がある場合や、常時張力がかかる防潮堰等の場合は注意が必要である。

2. 2. 9 オゾン劣化試験例

(1) 背景および試験の目的

ゴム引布製起伏堰のゴム袋体における外層ゴムは、屋外使用においてはオゾンによる経年的なひび割れ(オゾンクラック)は避けられない現象である。一方で、強度部材である織布を外的ダメージから保護する重要な役割を担っている。関連基準図書においては、ゴム袋体の外層ゴム厚について、十分な耐久性を有する厚さとするのが謳われているが、製造上の規格値はなく、経年による外層ゴム表面のひび割れにより、織布が露出しているゴム堰も多い。

特に昭和50年代までの普及期に製造された当初のゴム袋体の外層ゴム厚は、1~2mm程度までのものも多く、局部的に大きな応力を受ける法尻部を中心に、織布まで到達したオゾンクラックと見られる無数のひび割れや、熱による硬化や接着力の低下が加わり外層カバーゴムがはく離したゴム袋体も散見される。



写真 2.2.20 カバーゴムのオゾンによるひび割れ



写真 2.2.21 深さ方向に進行したひび割れ



写真 2.2.22 カバーゴムのオゾンによるひび割れ



写真 2.2.23 織布破断したゴム袋体



写真2.2.24 局部応力を受けたカバーゴムのひび割れ 写真2.2.25 カバーゴムがはく離し、織布露出したゴム袋体

現在現場で屋外供用されているゴム引布性起伏堰向けのゴム種は、耐オゾン性を考慮した CR 系および EPDM 系ゴムが多い。耐オゾン性については EPDM 系が CR 系よりも一般的には優れているが、CR 系ゴムも添加剤付与やブレンド配合や老化防止剤、パラフィン、ワックス等の添加剤により、必要十分な耐オゾン性の機能を持たせることは可能である。また、EPDM 系ゴムにおいても、動的な応力を受ける場合にはひび割れが発生することもある。NR 系ゴムや SBR 系ゴムは分子構造上、二重結合を多く持ち、これがオゾンと結合しやすい(二重結合を破壊する)特徴を持つことから、比較的オゾンの影響を受けやすい⁵⁾⁶⁾。

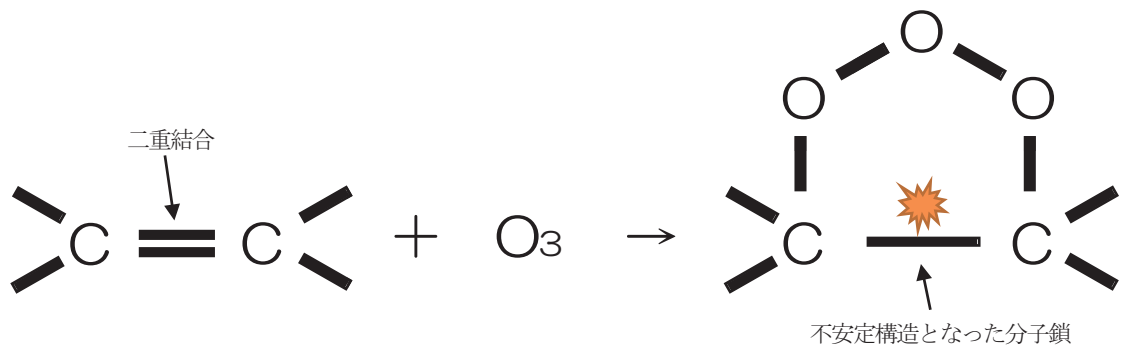


図 2.2.29 オゾン劣化の概念

切れるとクラックとして表出する

一般に、低伸長と高伸長のひび割れの進展について比べると、後者のほうがクラック数は多いが、応力が分散するため、深さ方向への進展速度は遅いと言われる⁹⁾。よって、例えば5%伸長では深く大きなクラックが数個生じるが、100%伸長では浅い小さなクラックが無数にでき、主観的には悪い状態に思われるが、内部材料の保護機能という観点からは優れていると言える。

おおよそ30~40年程度の自然劣化におけるオゾンクラックによるひび割れは、深さ方向へ進行することを想定し、進展速度を抑えることを考慮して設計されることが望ましく、上述のような観点から製品の使用環境に適した配合のゴム種を適用することが求められる。ゴム袋体においては、ひび割れが織布に達しない外層カバーゴム厚さを設定することで、強度部材である織布を保護するという機能を全うすることができる。

以上の背景から、ここでは各種ゴム配合の特徴を考慮し、ゴム種や配合によってオゾンクラックの発生時間が大きく異なること、オゾンクラックが経時的に深さ方向に進行することを試験により確認することを目的とする。

(2) 試験片の諸元と材料諸元

以下に本試験に用いるゴム種および試験片の諸元を示す。

- ・ゴム種 : ①NR系ゴム(NR+SBRで、NRを多く含む配合、老化防止剤入り)
②SBR系ゴム(NR+SBRで、SBRを多く含む配合、老化防止剤入り)
③EPDM系ゴム(EPDMを最も多く含む配合、老化防止剤入り)
- ・試験片形状 : ダンベル状 1号形(JIS K 6251による)
- ・試験片厚さ : 3mm

ゴム種の選定について、①および②は屋内使用等、高い耐オゾン性が要求されない配合、③はゴム堰袋体等屋外で使用され、耐候性を含めた高い耐オゾン性が要求される配合として選定した。一般的に SBR に EPDM を 30%以上ブレンドすることにより、飛躍的に耐オゾン性が向上することが知られている¹⁰⁾。

また、試験片厚さは JIS K 6259-1 においては 2mm と規定されているが、本試験は表面クラックが発生するまでの時間、クラックの進行の確認を目的とすることから通常よりも厚く設定した。

(3) 試験方法

試験方法は、JIS K 6259-1 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム -耐オゾン性の求め方- 第 1 部:静的オゾン劣化試験及び動的オゾン劣化試験に基づき以下のとおりとした。

- ・試験温度 : 40℃
- ・オゾン濃度 : 50±5pphm
- ・引張伸長 : 表 2.2.17～2.2.19 参照
- ・試験時間 : ①クラック発生まで
②クラック進行時間ごと



写真 2.2.26 試験機:オゾンエージングテスター



写真 2.2.27 試験片

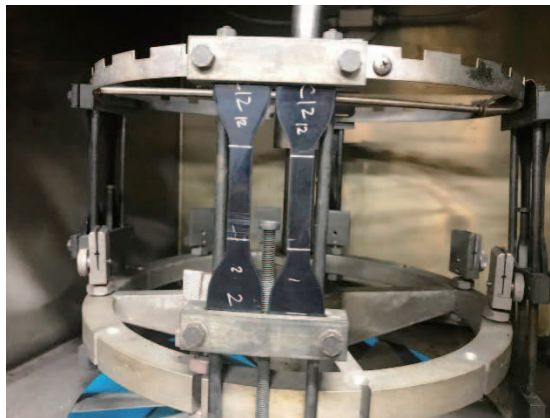


写真 2.2.28 試験状況

(4) 結果と考察

ゴム種別の試験について、結果を以下に示す。

表 2.2.17 ①NR 系ゴムの伸長変化によるクラック発生時間

伸長 (%)	クラック発生時間						
	2h	4h	8h	24h	48h	72h	96h
0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
20	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
30	NC	NC	NC	NC	×		
38	NC	NC	×				
40	NC	×					

NC : クラックなし, × : クラック発生

表 2.2.18 ②SBR 系ゴムの伸長変化によるクラック発生時間

伸長 (%)	クラック発生時間						
	2h	4h	8h	24h	48h	72h	96h
0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
7	NC	NC	NC	NC	×		
10	NC	NC	NC	×			
20	NC	×					

NC : クラックなし, × : クラック発生

表 2.2.19 ③EPDM 系ゴムの伸長変化によるクラック発生時間

伸長 (%)	クラック発生時間						
	24h	48h	72h	96h	120h	360h	456h
0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
5	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
20	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
50	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC : クラックなし, × : クラック発生

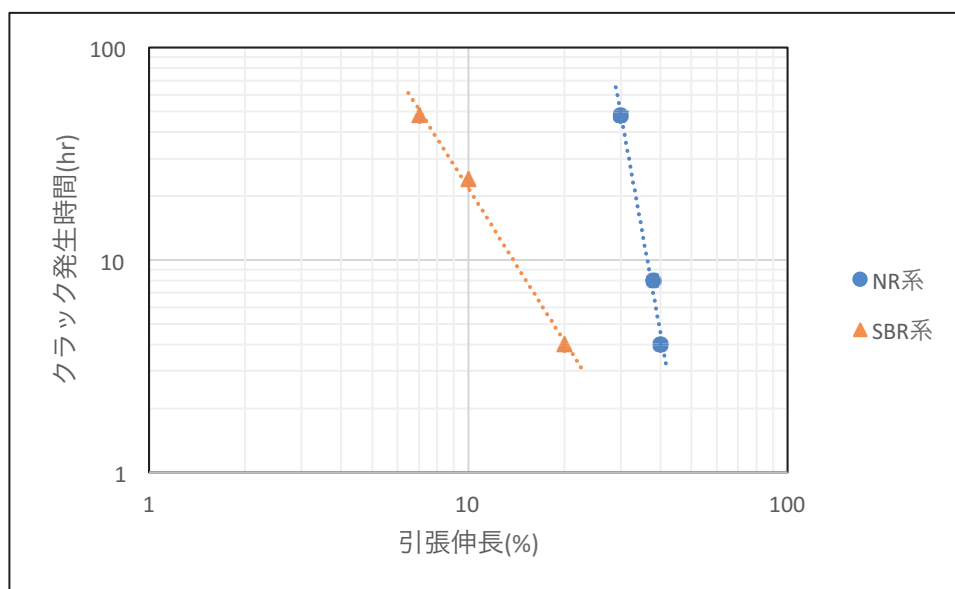


図 2.2.30 伸長とクラック発生時間の関係

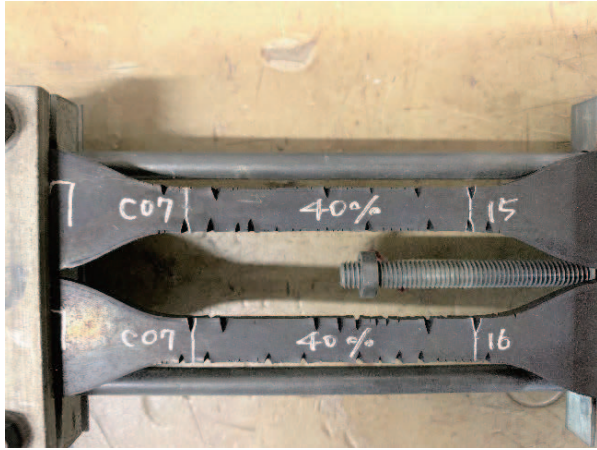


写真 2.2.29 クラック発生状況(① : 40%伸長 72h)



写真 2.2.30 クラック発生状況(② : 20%伸長 48h)

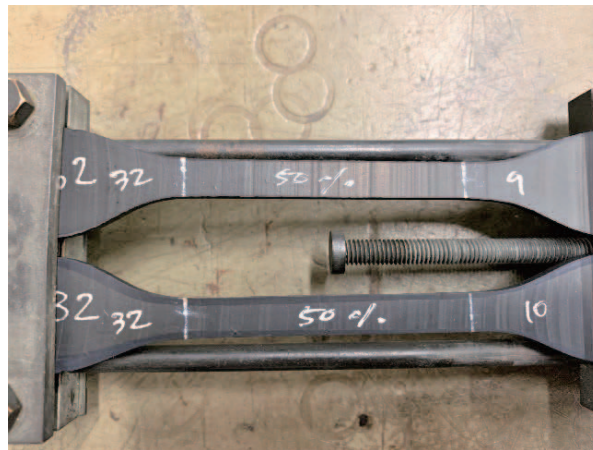


写真 2.2.31 クラック発生状況(③ : 50%伸長 456h)

表 2.2.17～2.2.19 および図 2.2.30 に示すとおり、ゴム種および伸長によりクラック発生時間には大きな差があることがわかる。一方で、ゴム堰向けの耐候性を考慮した EPDM 系のゴムでは、今回の試験では 456 時間後においてもクラックの発生を確認することができなかった。このことから、ゴム配合により様々な要求品質に応じた特性を出すことが可能であることがわかる。

以下に経時的にクラックが成長することを確認する。また、深さ方向にはクラックの数が多いほど浅くなることを確認する。

①クラックの成長：NR系

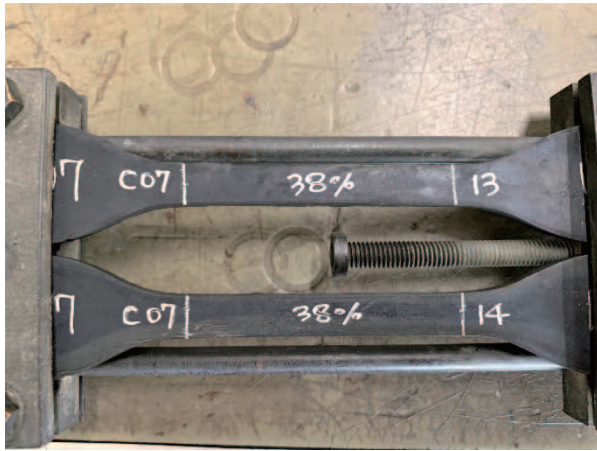


写真 2.2.32 クラック発生状況(① : 38%伸長 2h)

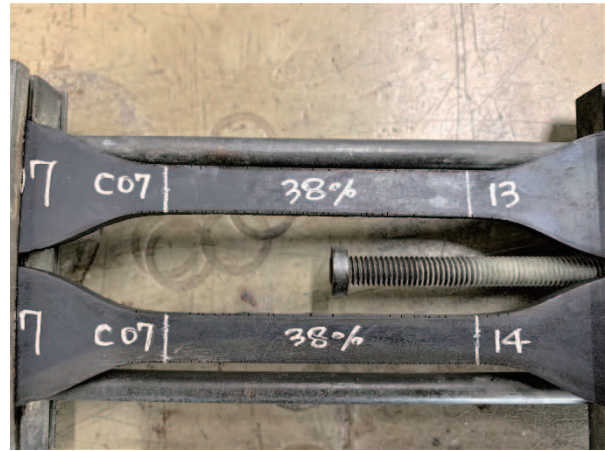


写真 2.2.33 クラック発生状況(① : 38%伸長 8h)

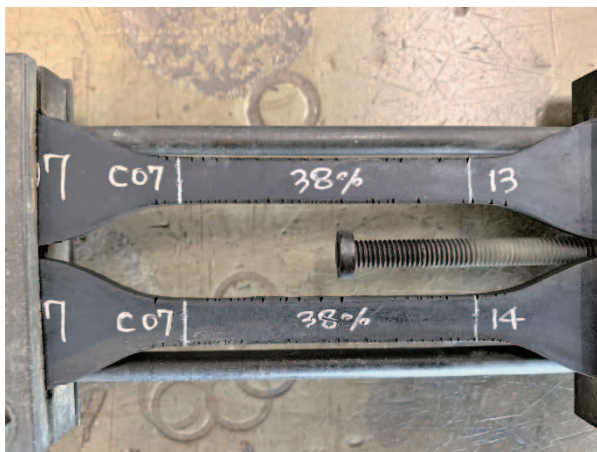


写真 2.2.34 クラック発生状況(① : 38%伸長 24h)

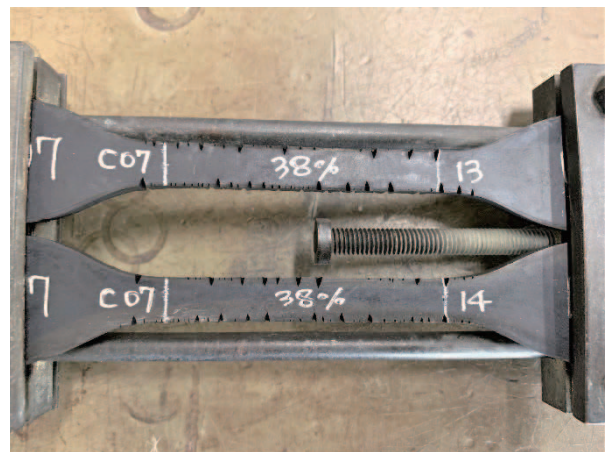


写真 2.2.35 クラック発生状況(① : 38%伸長 48h)

NR系のゴムは写真 2.2.32~2.2.35 に示すように、試験片側面にクラックが入り出し、当初発生したクラックから数量が増えることなく成長する傾向を示した。

②クラックの成長：SBR系

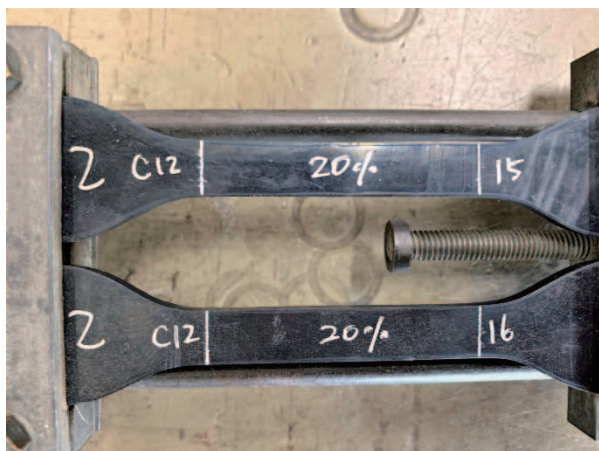


写真 2.2.36 クラック発生状況(②：20%伸長 2h)

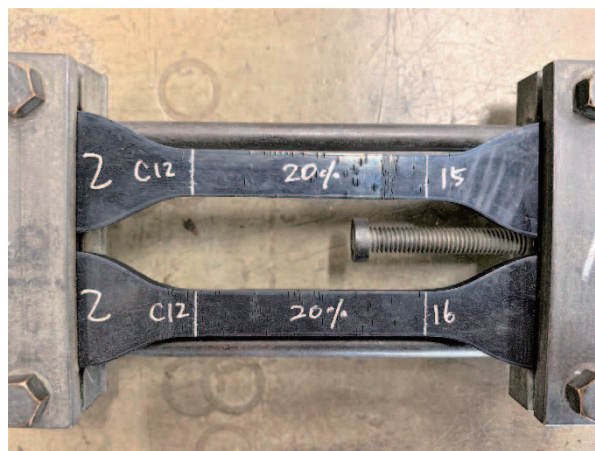


写真 2.2.37 クラック発生状況(②：20%伸長 8h)

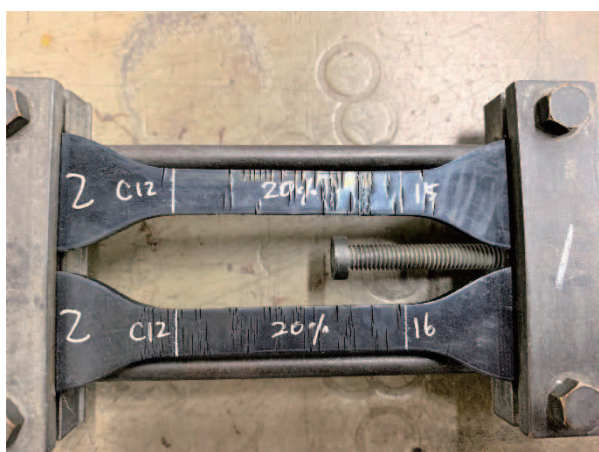


写真 2.2.38 クラック発生状況(②：20%伸長 24h)



写真 2.2.39 クラック発生状況(②：20%伸長 48h)

SBR系ゴムは写真 2.2.36~2.2.39 に示すように、試験片中央部にクラックが入り出し、試験中にも表面クラックが新たに発生し、成長する傾向を示した。

クラックの数はNR系のほうが少なく、少ない分応力が集中して亀裂が促進される傾向を示す。次に試験片を、クラック発生部分を中心に縦方向にカットし、クラックの深さを観察した。

NR系ゴムとSBR系ゴムでクラックの深さを観察できる試験片を抽出、測定したところ、表 2.2.20 の結果を得た。観察方法は、試験片のクラック発生部分を縦方向にカットし、断面のクラック深さを測定し、最も大きい値を表中のクラック深さとした。

表 2.2.20 各試験片のクラック深さ

	伸長(%)	時間(hr)	クラック深さ(mm)	平面クラック数
①NR 系	38	216	2.0	少数
	40	72	1.5	少数
②SBR 系	10	48	1.0	数個
	20	72	1.2	多数
	50	72	0.8	無数

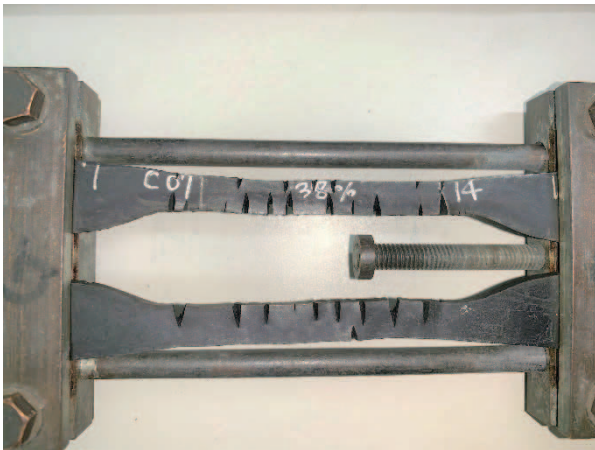


写真 2.2.40 カットした試験片(① : 38%伸長 216h)

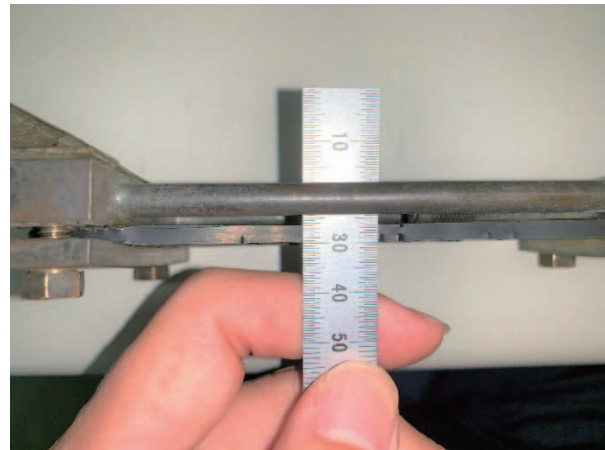


写真 2.2.41 クラック深さ(① : 38%伸長 216h)

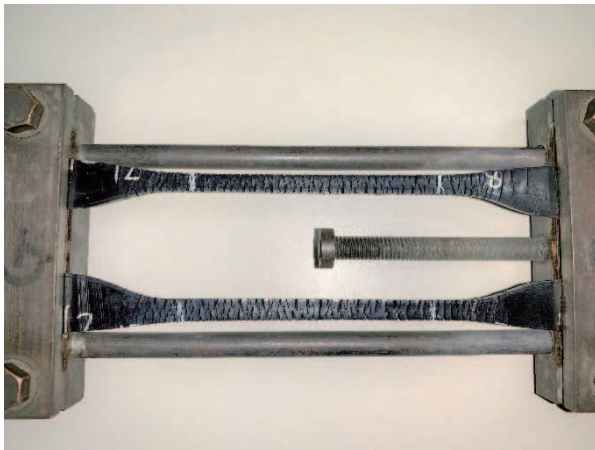


写真 2.2.42 カットした試験片(② : 50%伸長 72h)

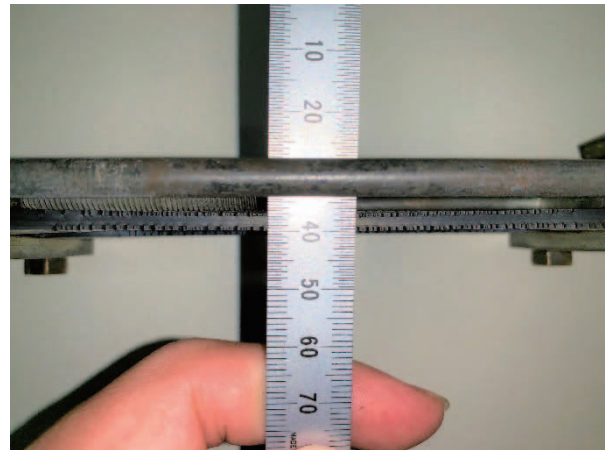


写真 2.2.43 クラック深さ(② : 50%伸長 72h)

伸長も時間も異なることから、一概に比較することは難しいが、ある程度表面のクラックが表出した試験片については、ゴム配合によりクラックの発生数や深さが異なること、平面的なクラックが多いほうが深さは浅くなる傾向を確認できた。

(5)まとめ

ここでは、ゴムのクラック発生の原理や、ゴム配合によりクラック発生数やサイズ、範囲、深さが異なることを紹介した。ゴム種の選定においては、製品の使われ方を考慮した上で、どの程度の耐オゾン性を期待するのか考慮した上で、ゴムの厚みを決定することが求められる。特にゴム堰袋体については、局部的に容易に交換できるようなサイズではないことから、寿命を全うするよう、より慎重な選定が求められる。本節では、EPDM系のゴム配合が、オゾンに対して有効なゴム種であることが示された。

ゴムのひび割れがどの程度製品(特に強度部材である織布)に影響を及ぼすかは、クラックそのもののサイズや範囲以外に、その深さやゴムの厚み、ゴム硬度、経年、製造方法、応力状態等の観点から判断する必要があり、特にゴム配合が各社異なるという観点からは、メーカーの判断は重要となる。

ゴム製品は要求される性能が各種設備により異なるため、その配合も多種多様となる。今回の評価結果は、一メーカーの配合によるゴムを使用しており、例えば同じEPDM系のゴムであっても同様の結果を保証するものではない。

2. 3 経年劣化および損傷と性能評価方法のまとめ

本章ではゴム堰の劣化や損傷要因について整理し、現場の損傷事例を紹介した。設置年数が古く、経過年数が40年近いものは老朽化が進んでいた。また、劣化・損傷ともに転石や流下物の影響により摩耗しているものが多かった。これらの要因に対しては、外層ゴムの厚さを厚くすることが求められるが、ゴム堰に損傷を与え得る物を事前に取り除くことも望ましい。損傷したゴム堰に対して、補修用ゴムを貼り付けて補修・修繕が進められている。一方で、更新せざるを得ない状態まで損傷が進んでいるものも少なくない。更新するほど損傷が進む前の早期発見はもちろん、適切な補修材料や補修方法が必要と考えられる。後者については、次章で詳細な検討結果を報告する。

ゴム袋体の破断やひび割れなどは、ゴム袋体のクリープや疲労強度が関係しているものとされる。そのため、本章では静的引張強度試験やクリープ試験を行い、性状試験を評価した。

引張試験については、現場から採取した供試体での試験も実施しており、技術基準案¹⁾に準拠した安全性評価も行った。ゴム引布の引張強度は乾燥時と比べて湿潤時の方が強度低下しており、また、弾性域での破断が見られた。

クリープ特性を評価するために、ゴム引布の供試体での試験だけでなく、継手部分のククリープ特性を見られるように大型供試体による試験も実施した。ゴム袋体のクリープ特性は、継手方向によらず技術基準を満足する値が得られることが明らかとなった。ただし、ゴム引布のクリープ試験から、水環境中でのクリープ強度低下が示唆されており、乾燥/湿潤条件や温度条件がクリープ特性に影響を及ぼすものと考えられる。

ゴムの硬化を誘発する日射などの影響を検証するため、オゾン劣化試験や赤外分光分析を行った。ゴムの種類やゴム伸長によって、オゾン劣化に伴うクラック発生数や深さに違いが生じることが明らかとなった。また、平面的にクラックが多いほうが浅くなる傾向が確認された。ゴム堰の化学的な劣化を調べるため、長期供用されたゴム堰から試験片を切り出し、赤外分光分析を行った。その結果、明確な劣化傾向は見られなかった。

したがって、化学構造上の劣化が生じなくても、物理的な劣化が生じる可能性が高く、先に示した物理的な強度特性を把握することが重要と考えられる。また強度特性の結果から、乾燥/湿潤条件や試験温度がゴム袋体の強度特性に及ぼす影響が大きいことが示された。これらの試験条件下での破壊メカニズムのより詳細な検討が求められるところである。

3章 損傷に適した診断および補修法の開発

3. 1 破損部の診断方法

3. 1. 1 現行の損傷把握手法

河川の流水制御等を行うため、ゴム引布製のゴム袋体を扉体とし、給気、抜気により扉体倒伏が容易なゴム引布製起伏堰は、農業用の灌漑を初めとし利水・治水用途として全国に広く普及している。ゴム堰の多くは、老朽化の進行が顕著となっており、様々な損傷が発生しているが、中でも接合部内面はく離は堰の強度に影響する事態に発展する恐れがある。しかし、内面はく離は目視による外観での判別は困難で、構成素材であるゴム引布はゴムとナイロン等繊維の複合材料ということや密着型のはく離ということもあり、超音波やX線による方法でもその検知は難しい。また、はく離検知は設備を運用しながら行う必要があり、非破壊である必要がある。維持管理の現場におけるゴム袋体損傷等の点検は、非破壊による外側からの目視確認が基本となる。内部膨れの場合、点検ハンマーによる打音検査で膨れ範囲を調査しているケースもあるが、担当者により差異が生じており正確な範囲特定は困難な状況である。また、接合部などの内面はく離は外側からの目視確認が困難であり、外側から非破壊で簡易に損傷の検知ができる手法の開発が求められている。

3. 1. 2 赤外線サーモグラフィーによる試行

赤外線サーモグラフィーは、赤外線カメラのうち、赤外線放射エネルギーを見かけの温度に変換し、その分布を画像表示する装置で、最近では可搬性・操作性の向上、低廉化、デジタル化が進み機械の異常診断などに使われている。特徴として、測定対象物表面の僅かな温度差 (0.1℃) が検知可能であり、非接触による非破壊測定ができるので対象物へのダメージがない。今回、この特徴を利用し、ゴム袋体の内面はく離が検知できないか現場調査を行っている。

(1) 対象設備

対象設備は、1998年に設置された国土交通省直轄管理の治水用ゴム堰で、約18年経過の3門の内の1門の端部に設備管理者が表層面に浮きを確認したため、内面はく離の検知ターゲットとしたものである。表層面の浮き現象は、何らかの要因で内層面との接合部がはく離し、その空間に袋体内部のエアが漏れだし浮いたものであり、そのエリアは確実に内面はく離が発生していることが想定される。

(2) 使用機器

現場調査に使用した赤外線サーモグラフィーの装置仕様は表3.1.1のとおりである。本装置は、コンパクトで安価な可搬タイプで、取り扱いも容易であり、設備管理者による測定も十分可能である。

表 3.1.1 装置仕様

項目	仕様	外観(写真)
画素数	160×120ピクセル	
視野角	32°	
温度分解能(+30℃時)	0.05℃ 以下	
赤外線測定波長	8~14μm	
測定精度	±2℃ (-20~+100℃時)	
測定範囲	レンジ1: -30~+100℃ レンジ2: 0~+350℃	

(3) 現場調査結果

ゴム袋体表層面の浮き部を直接、赤外線サーモグラフィーで撮影しても浮き部の判別ができなかったことから、表層面に霧吹きによる水分散布を行い、気化熱の作用を利用することで、エア層のある内面はく離部と正常部間で温度差異が生じ、はく離エリアの検知が可能となったものである。その時の可視画像を写真3.1.1に、赤外線サーモグラフィーによるはく離想定エリア検知画像を写真3.1.2に示す。撮影は日中に行い、撮影開始時点の気温は27.5℃、表面温度は39.7℃であった。このことは、はく離部内部には空気層が形成されているのに対し、周囲はゴム層であることから気化熱による温度差異が発生することで、赤外線サーモグラフィーの特徴である温度分解能の高さにより可能となったと考えられる。但し、本調査では気温やゴム袋体の温度、天候(日射量)、霧吹きの散布量や水分温度等のバランスにより、はく離エリアの特定可否が大きく左右され、かつ安定した条件の特定も困難であったため、現段階では実用レベルには至っていない状況となっている。

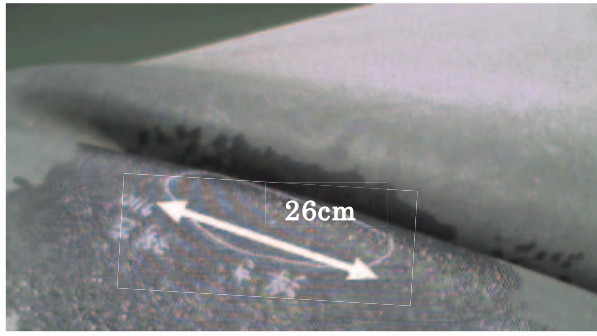


写真 3.1.1 内面はく離部表層可視画像

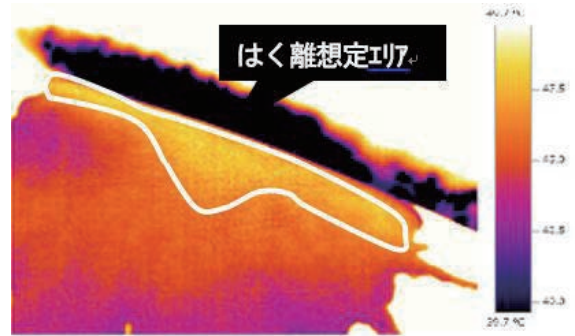


写真 3.1.2 内面はく離部表層熱画像

3. 1. 3 非破壊打音解析装置による試行

(1) 非破壊打音解析装置の開発

本装置は、タイルはく離やコンクリート空洞探査に使用される打音検査装置を改良し、柔軟な材質であるゴムに適用できるように低周波向けにカスタマイズしたもので、打撃・集音部、計測部、電源部、解析部(PC)で構成される(写真3.1.3)。測定は打撃・集音部を測定対象物に直接当て、PC画面上の打撃タブをクリックすることで、ソレノイドが作動し、棒状ハンマによる打撃が開始される。対象物の打撃反射音はコンデンサマイクに集音され、電圧出力応答時間波形(CSVファイル)としてPCに表示・記録される。また、マイク底部反響音の影響や測定対象への打撃・集音部の人による当て方の相違から測定値がバラツキ安定しない状況がみられたため、マイク位置の見直しや持ち手を追加している。



写真3.1.3 非破壊打音解析装置

(2) ゴム引布内面はく離供試体による打音測定調査

現地調査の前段として、開発装置の内面はく離検知性能確認のため、ゴム袋体の素材であるゴム引布の内面はく離を再現したはく離供試体を作成しており、その構造図を図3.1.1に示す。はく離供試体は、1m×1m×20mmの大きさで、現物と同じ材料、材質、製法で製作され、正常部、1層目～4層目の各はく離を再現している。なお、はく離供試体による打音測定状況を写真3.1.4に、打音測定結果を図3.1.2に示す。横軸は打音後の経過時間、縦軸は打音による集音マイク出力電圧を示している。打音測定結果から、正常部とはく離部では波形の特徴が異なる他、はく離部が表層に近いほどピーク値が高い傾向を示している。

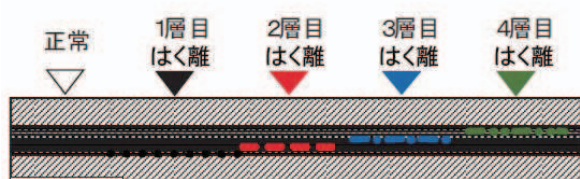


図3.1.1 はく離供試体構造図



写真3.1.4 打音測定状況

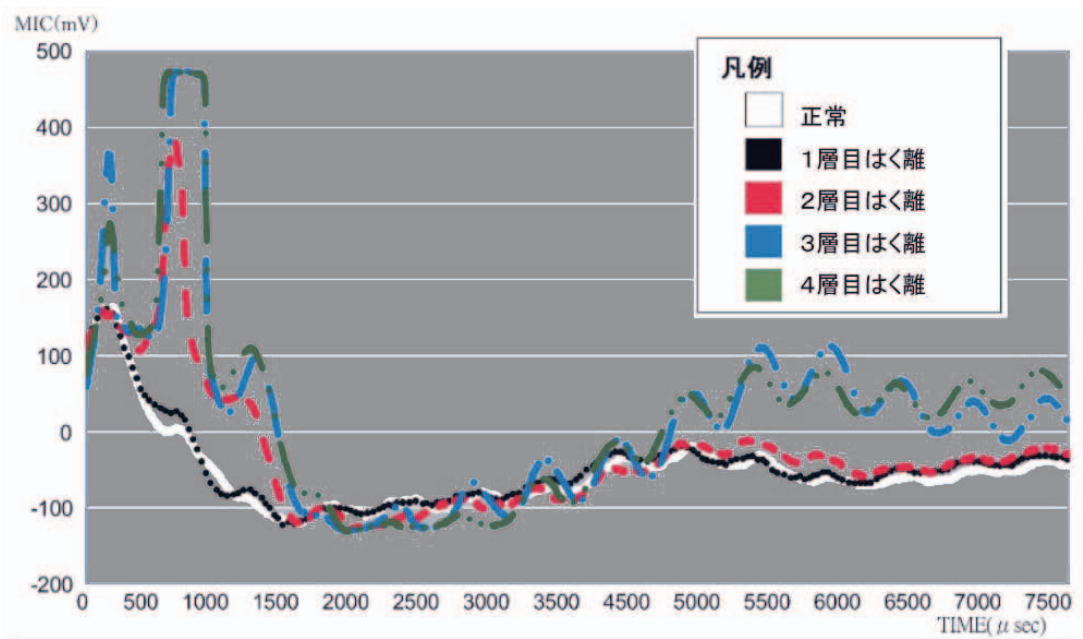


図 3.1.2 打音測定結果

(3) 実物による現場実証調査

本装置の実物による内面はく離検知機能を検証するため、国土交通省直轄管理のゴム堰内部側面（写真 3.1.5）に発生している既知の内面はく離部（写真 3.1.6）とゴム堰上部（写真 3.1.7）に発生している既知の内面はく離エリア（写真 3.1.8）の代表的な2つのケースについて打音測定（写真 3.1.9, 写真 3.1.9）を実施したものである。堰内部側面に発生している内面はく離部の測定箇所について、上部①、②、③、下部⑦、⑧、⑨がはく離なしの正常部、中間部の④、⑤、⑥がはく離箇所となっており、その測定結果を図 3.1.3 に示す。測定結果から正常部と内部はく離部の時系列出力波形は双方で特徴が異なっており、はく離箇所の検知が可能である。



写真 3.1.5 ゴム堰内部状況



写真 3.1.6 内部側面内面はく離部外観



写真 3.1.7 ゴム堰上部外観

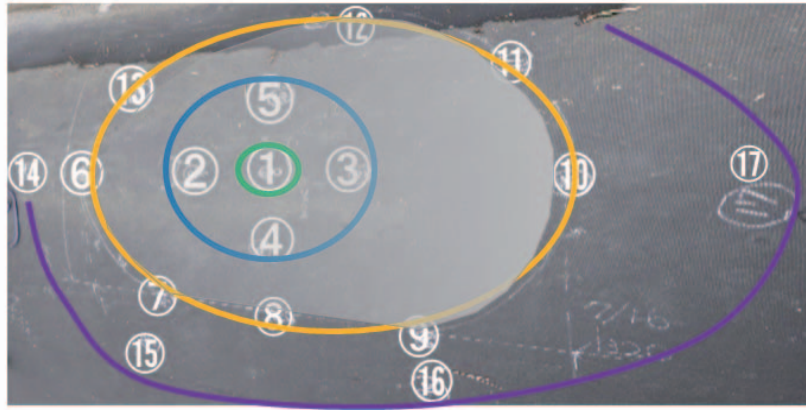


写真 3.1.8 ゴム堰上部内面はく離部外観 (灰色着色部が内面はく離箇所)



写真 3.1.9 ゴム堰上部打音測定状況



写真 3.1.10 ゴム堰内部側面打音測定状況

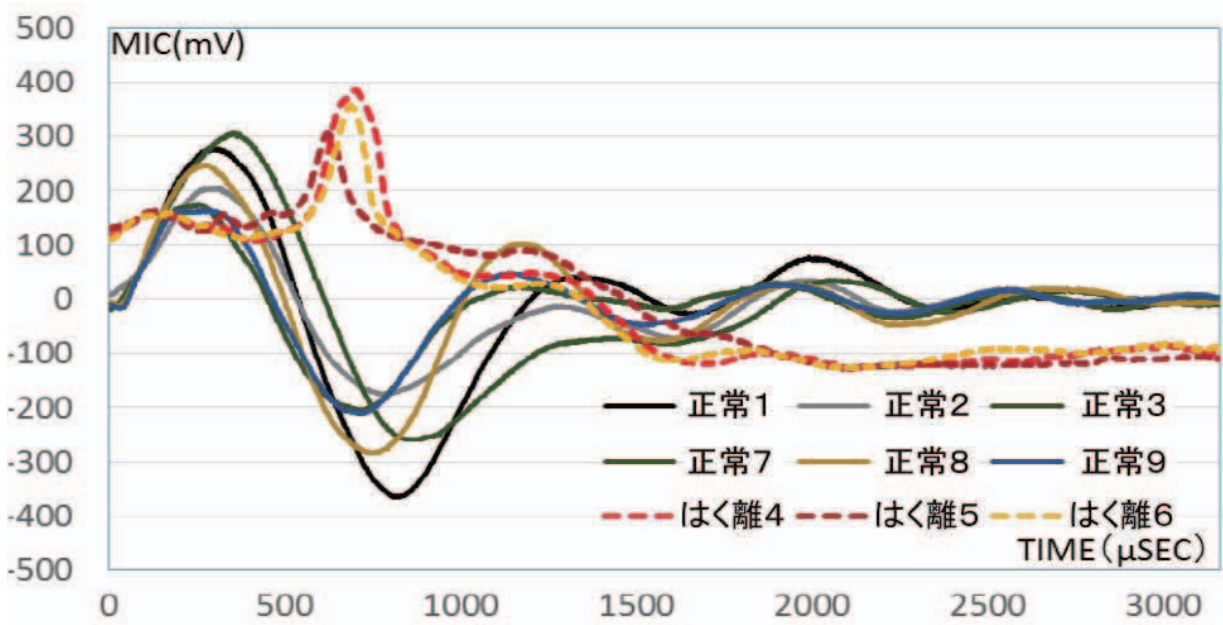


図 3.1.3 堰内部側面における正常部・内面はく離部の打音測定結果

堰上部に発生している表層部の内面はく離における測定箇所について、①～⑤は内面はく離部、⑥～⑬がはく離境界部、⑭～⑰が正常部となっており、その測定結果を図 3.1.4 に示す。測定結果では、打音による集音マイク出力波形に双方で特徴的な違いは認められず、内部はく離の検知は困難となっている。

以上の測定結果では打音によるマイク集音出力波形の特徴の違いによるはく離判別が困難であったことから、新たな取組みとしてAI手法を試すこととしたものである。AI手法の試行に当っては、先ほどのはく離検知が困難であったマイク集音出力 CSV データを使用し、一般的なクラスタリングにより解析したものである。2次元による結果を図 3.1.5 に、3次元による結果を図 3.1.6 に示す。双方とも正常部とはく離部でエリア区分が可能であり、はく離検知ができる可能性が期待できる結果となっている。今後は、実物による様々なはく離データを収集し、はく離検知実績を積み重ね検証する中で、実用化の可能性を見出していく必要がある。

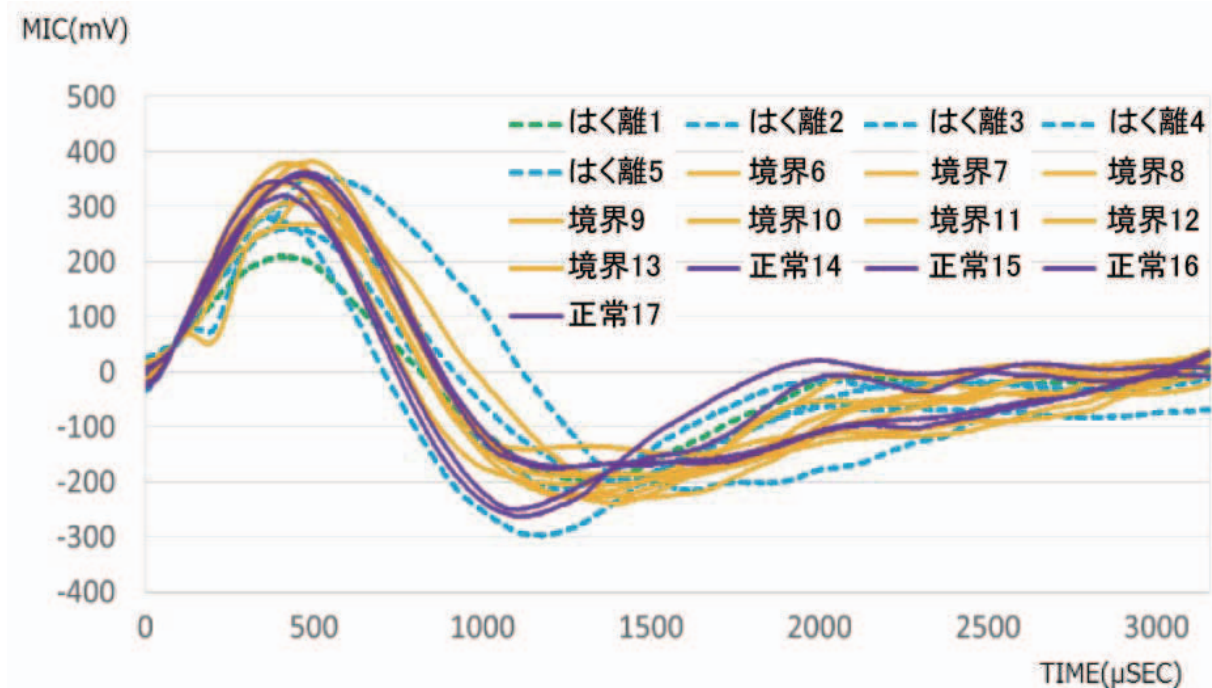


図 3.1.4 堰上部表層における正常部・内面はく離部の打音測定結果

(4) まとめ

ゴム袋体の接合部内面はく離は、堰の強度を損なう重大な事象であり、それを外観から把握する技術について、サーモグラフィーによる手法と打音解析による方法の2通りを検討した。いずれの方法もはく離の確実な把握までは至っていないが、打音解析についてはAIの活用により把握精度向上・実用化の可能性のあるものとする。

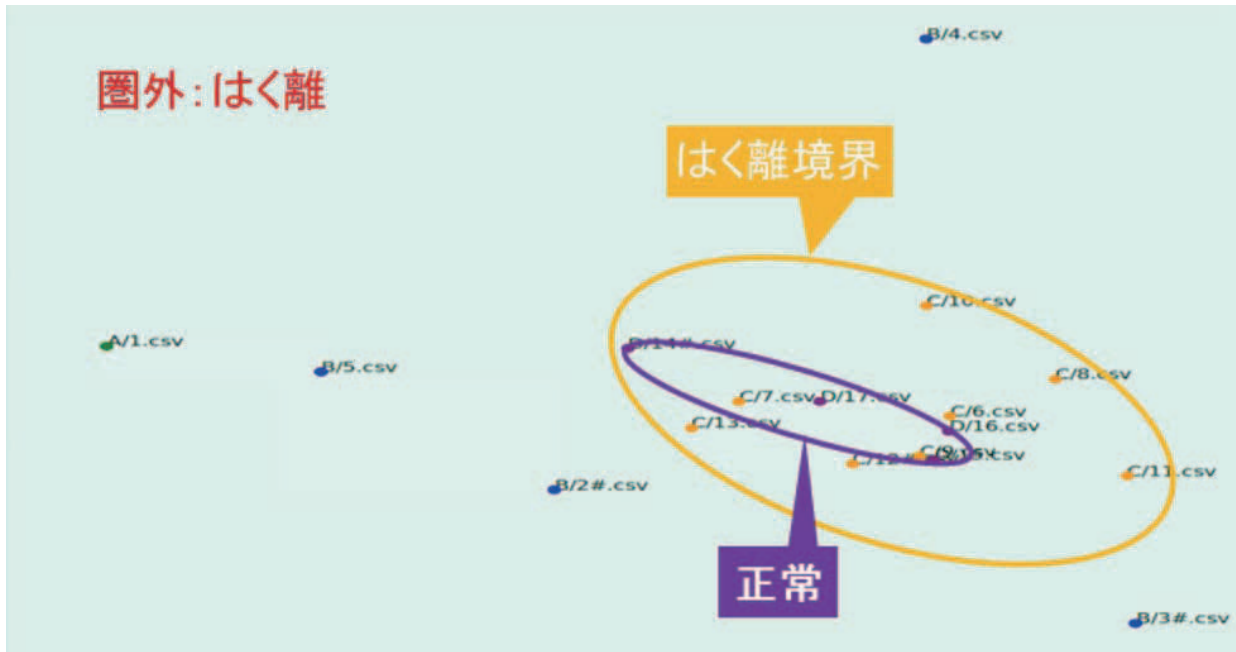


図 3.1.5 2次元クラスタリングによる解析結果

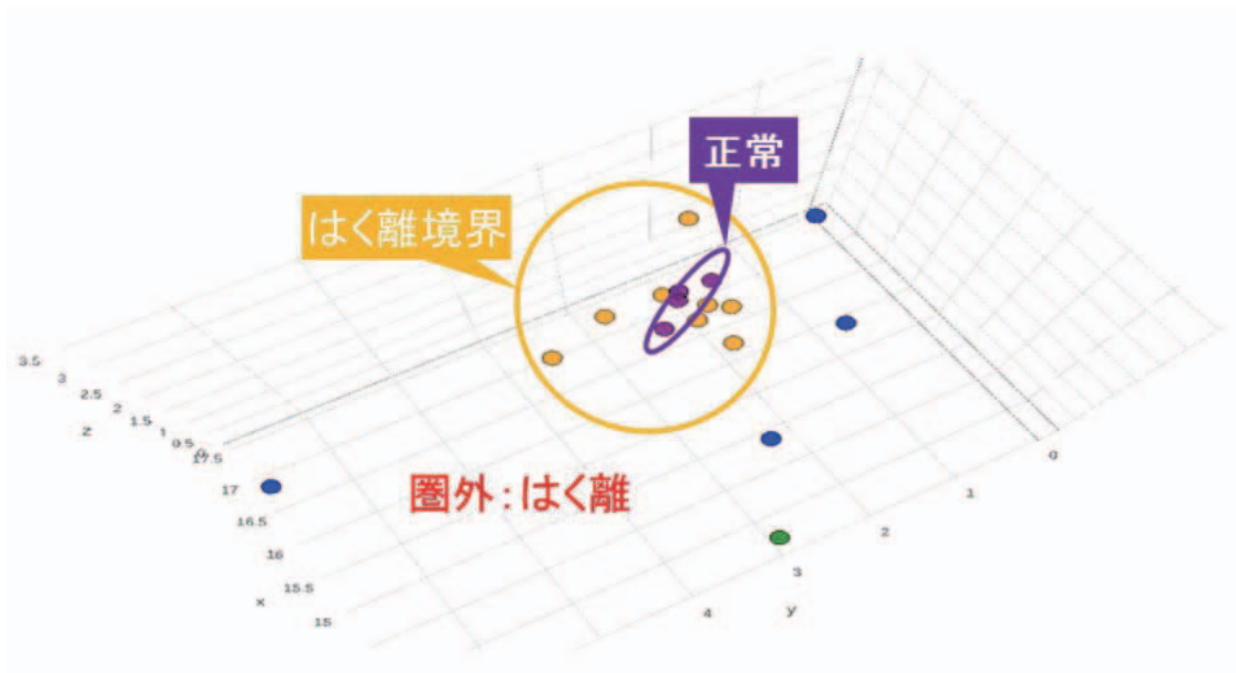


図 3.1.6.3 次元クラスタリングによる解析結果

3. 2 補修方法および補修材の検討

3. 2. 1 補修方法・材料・前処理方法の分類

ゴム袋体の一般的な補修方法は以下の現場施工である。起立した状態の袋体ゴム表面を研磨する、あるいは、表層ゴムを剥がして織布を露出させ、薄い柔軟な CR 系ゴムを密着させて前処理とする。次に自然加硫型と呼ばれる常温で架橋反応するペースト状の CR 系ゴム溶液接着剤で当てゴムを貼り、ローラやハンマーによって密着させる。この補修方法の要領¹¹⁾はあるが、袋体メーカーごとに使用するゴムの材質、厚みや袋体の構造が異なることから、各ゴム堰(あるいは袋体)メーカーの補修マニュアルが存在し、実技を含む講習を実施しているメーカーもある。そこで、補修法と耐久性に関する技術資料として、各メーカーが実施している補修方法や評価方法を取りまとめた。

3. 2. 2 ゴム引布接着における研磨仕様、接着後養生時間の影響

(1) 概要

ゴム袋体を補修する際には接着面の研磨が必要になる。研磨仕様によって接着性が異なることが経験的に分かっていることから、研磨用のディスクサンダーの種類を変えて、接着性能を評価し、補修に最適な研磨仕様の検討を行った。

(2) 試験方法

研磨用のディスクサンダー3種類により接着面を処理した。接着剤には自然加硫接着剤を用いた。供試体の概略図を図3.2.3に示す。今回は1プライのEPDM系の補修用ゴム引布(A社製)を使って3プライのEPDM系の母体ゴム引布(B社製)を補修するような組合せとなっている。

接着後の養生期間は3期間(1.5h、24h、168h)とし、長期耐久性を評価するために、温水(70℃)に浸漬(0、6、14、29日)した後はく離試験を実施した。条件等をまとめると表3.2.2のとおりであり、36種類の供試体(N=3)で試験を実施した。

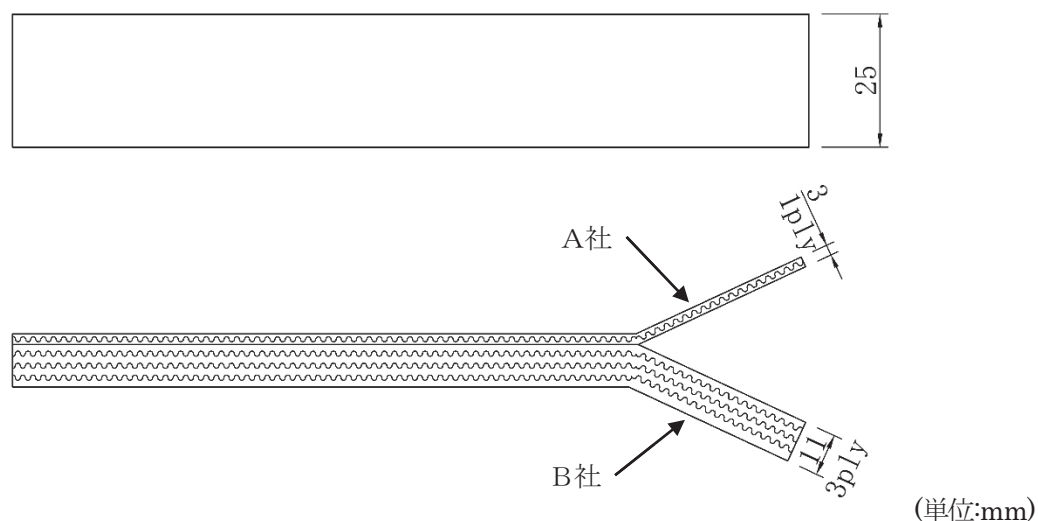


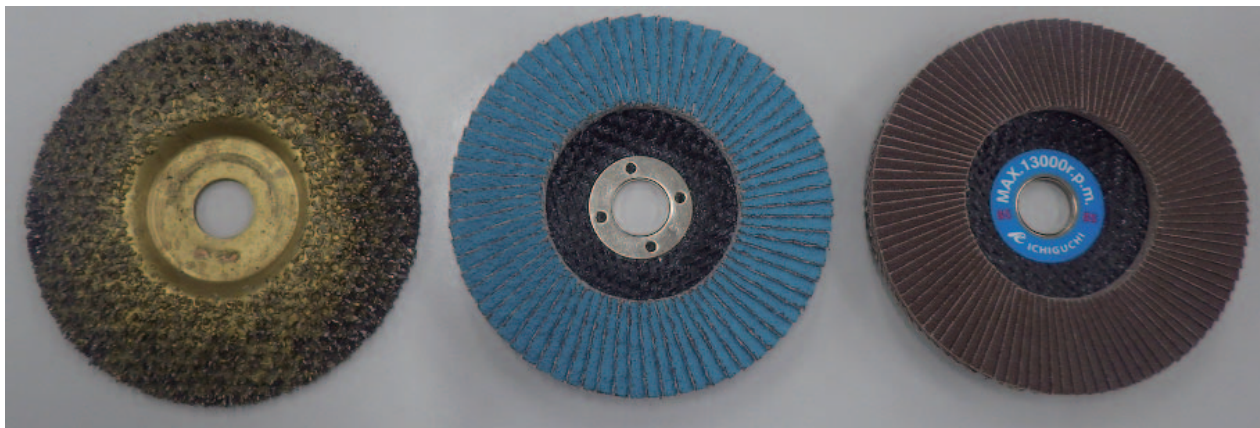
図 3.2.3 供試体概略図

表 3.2.2 供試体

接着面研磨用 ディスクサンダー	自然加硫接着剤専用ディスクサンダー、研磨用ディスクサンダー#40、研磨用ディスクサンダー#100
接着後養生期間	0日(1.5h)、1日(24h)、7日(168h)
浸漬期間(70℃)	0日、6日、14日、29日
接着剤	自然加硫接着剤

※ 供試体は、条件を合わせるために同時期に同一作業者で作製
また、供試体は接着後にローラ掛けとハンマ打撃(ゴム堰の補修を想定)を行っている。

使用した研磨用ディスクサンダーを写真 3.2.2 に、また研磨後のゴム表面の様子を写真 3.2.3 に示す。



自然加硫接着剤専用ディスクサンダー

#40

#100

写真 3.2.2 研磨用ディスクサンダー



自然加硫接着剤専用ディスクサンダー

#40

#100

写真 3.2.3 研磨後表面

研磨したゴムの表面は、レーザー顕微鏡での観察を行った。レーザー顕微鏡を写真 3.2.4 に示す。

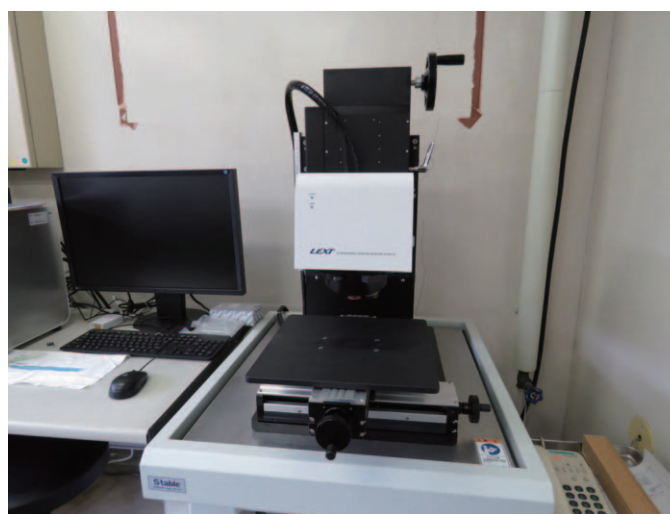


写真 3.2.4 レーザー顕微鏡

接着後の供試体を写真 3.2.5 に示す。これらの供試体を所定の養生期間をとったのち、写真 3.2.6 に示す水槽の中で所定の期間浸漬した。浸漬後、万能試験機を用いて接着面のはく離試験を行って評価した(写真 3.2.7、写真 3.2.8)。

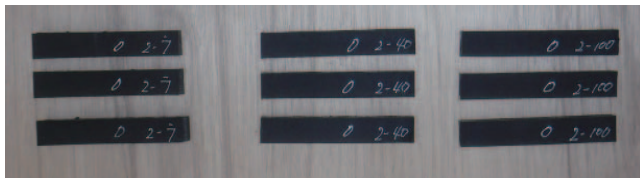


写真 3.2.5 試験前供試体

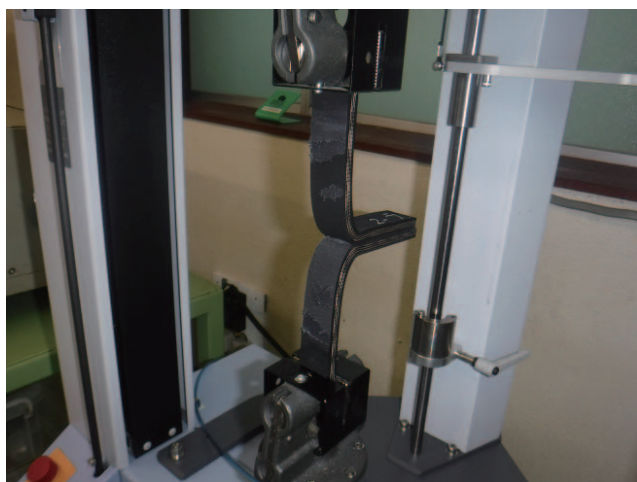


写真 3.2.7 はく離試験状況



写真 3.2.6 浸漬状況



写真 3.2.8 試験後供試体

(3) 試験結果

まず3種類のディスクサンダーでゴム表面を研磨したときの形状をレーザー顕微鏡で計測した。結果を図 3.2.4～図 3.2.6 に示す。図 3.2.4 に示すように自然加硫接着剤専用ディスクサンダーで研磨した場合は、表面はかなり粗く大きな凹凸が見られた。これに対して図 3.2.5 および図 3.2.6 に示す。#40、#100 で研磨した場合は、細かい凹凸であり、特に#100 は細かく多くの凹凸が見られた。粗さの計測結果を表 3.2.3 に示す。 R_z は最大高さ、 R_a は算術平均粗さ、 R_{zjs} は十点平均粗さである。いずれの指標でも自然加硫接着剤用ディスクサンダーの値が大きく研磨面が粗いことが分かる。

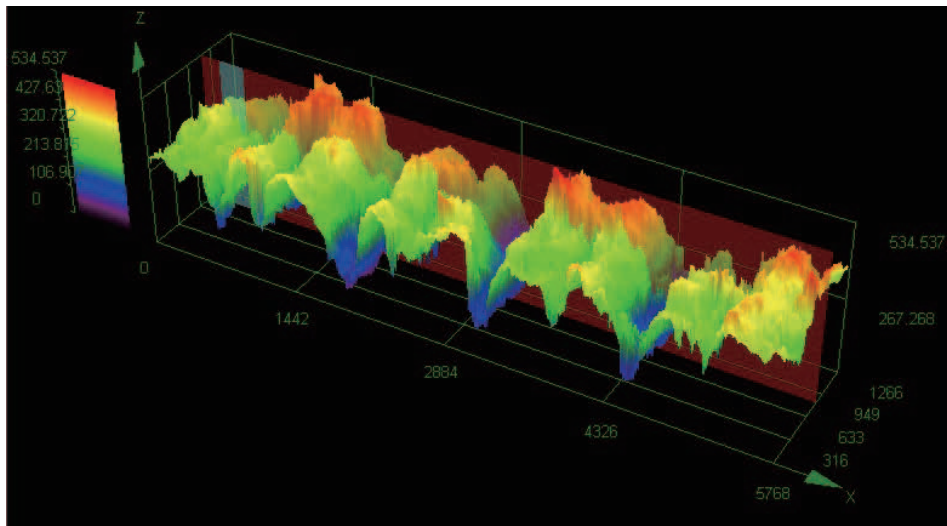


図 3.2.4 自然加硫接着剤専用ディスクサンダーで研磨後のゴム表面形状

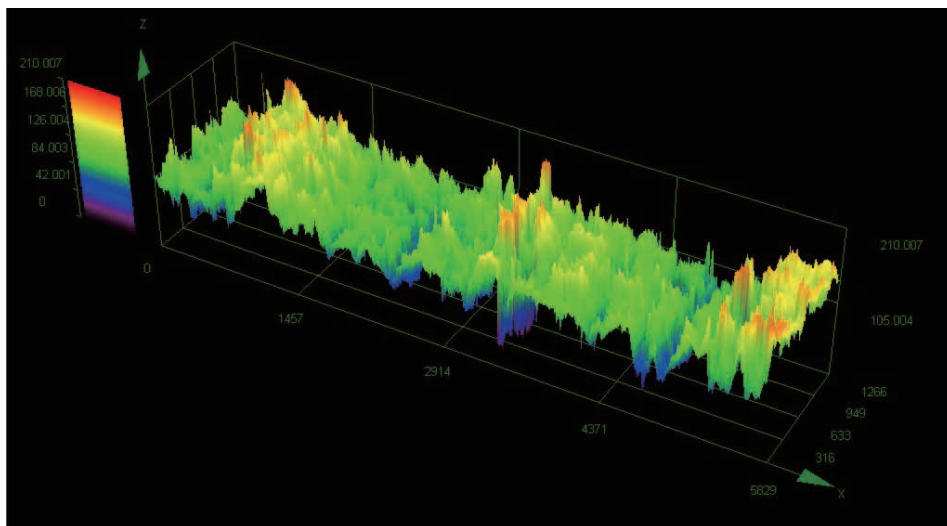


図 3.2.5 #40 で研磨後のゴム表面形状

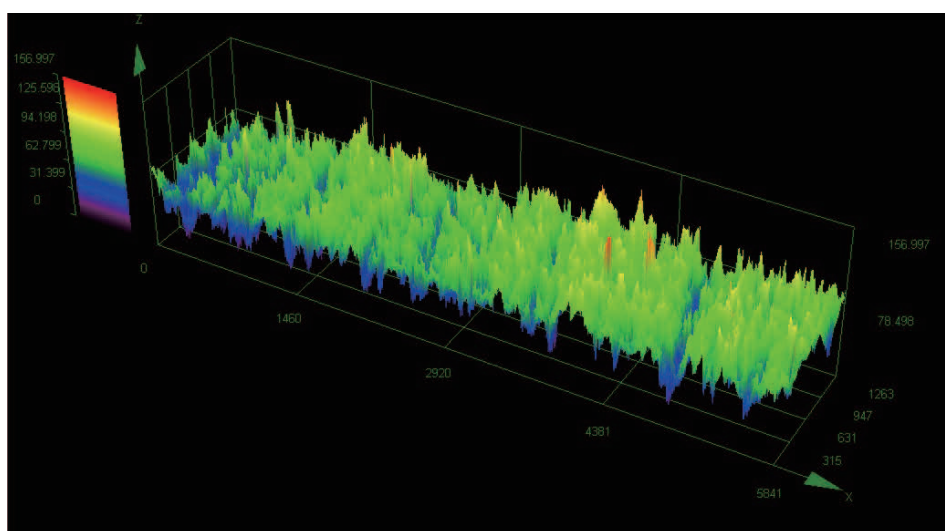


図 3.2.6 #100 で研磨後のゴム表面形状

表 3.2.3 粗さ計測結果 (7 line 計測結果の平均値)

	自然加硫接着剤専用 ディスクサンダー			研磨用ディスクサンダー #40			研磨用ディスクサンダー #100		
	R _z (μm)	R _a (μm)	R _{zjis} (μm)	R _z (μm)	R _a (μm)	R _{zjis} (μm)	R _z (μm)	R _a (μm)	R _{zjis} (μm)
平均値	416.35	70.95	303.46	151.08	21.50	116.87	108.21	12.08	89.73
σ	28.55	11.90	25.78	15.03	1.22	4.61	8.92	0.46	2.81

はく離試験の結果について、表 3.2.4 および図 3.2.7 に示す。各研磨仕様とも浸漬 0 (初期値) では同程度であったが、浸漬時間が長くなるにつれ接着力が増す傾向が見られた。この傾向は浸漬によるものではなく、接着後の時間が長くなるにつれ加硫が進行したことによるものと考えられる。新規のゴム引布の接着力を 5N/mm として目標値にした場合、接着後の養生時間が 24h 以上であればいずれのディスクサンダーにおいても概ね目標値以上の接着強度が得られることが分かった。

今回比較した中では#100 が最も高い接着力が得られた。一方、自然加硫接着剤専用ディスクサンダーはゴム材の研磨用に販売されているものであるが、今回比較したものの中では最も小さい接着強度であった。

表 3.2.4 はく離試験一覧表

単位 N/mm

研磨仕様	接着後養生時間 [時間]	浸漬時間 [日]			
		0	6	14	29
自然加硫接着剤 専用ディスク サンダー	0 (1.5)	3.2	3.8	4.3	4.9
	24	2.7	4.8	5.7	6.0
	168	2.6	7.4	10.1	7.6
研磨用ディスク サンダー#40	0 (1.5)	2.7	3.3	3.0	4.4
	24	2.7	4.8	5.0	9.1
	168	2.6	5.7	7.3	11.2*
研磨用ディスク サンダー#100	0 (1.5)	2.4	4.1	6.1	6.8
	24	2.5	5.2	8.3	12.3*
	168	2.4	6.1	10.4	14.6*

*はく離強さの最大値が、試験機の測定限界値以上

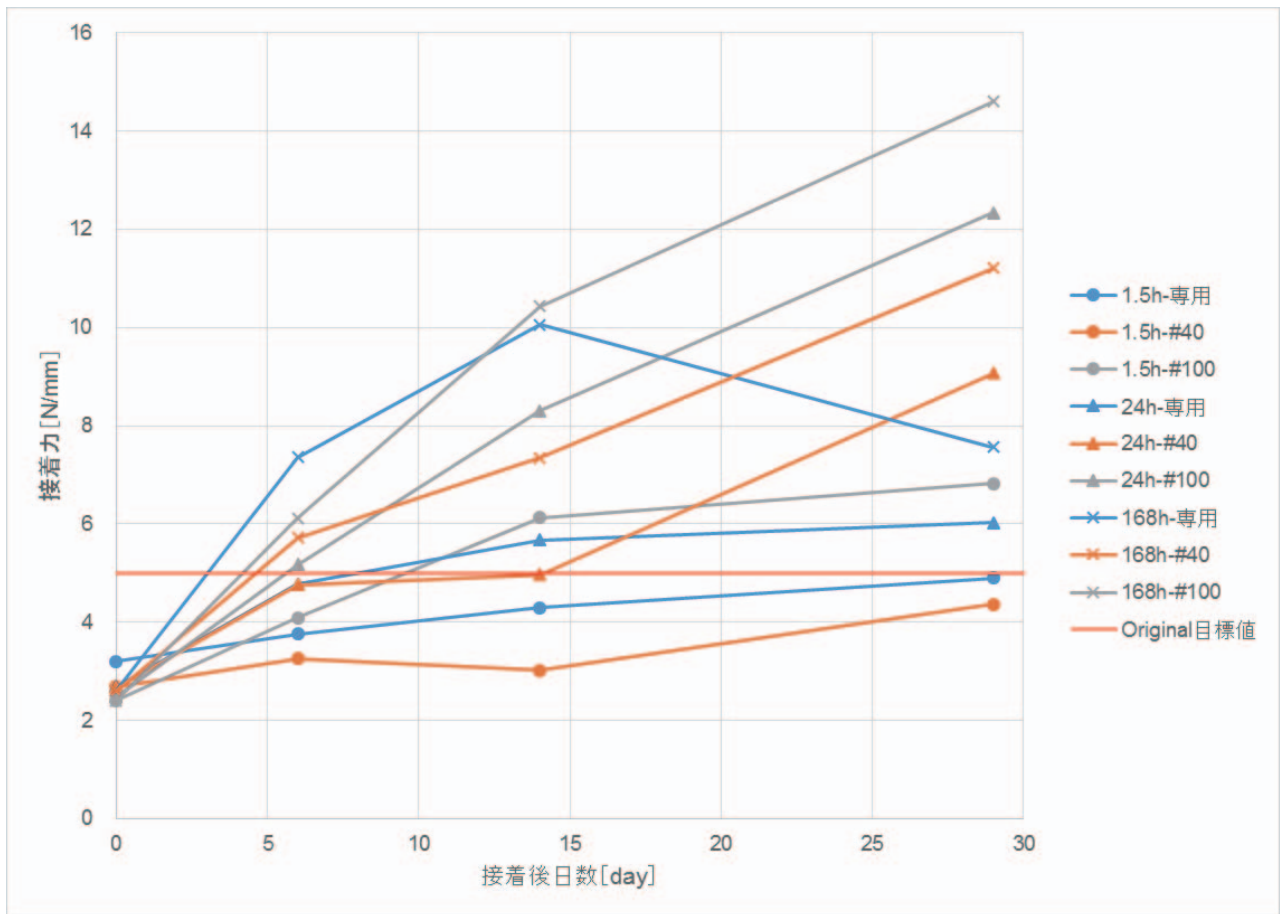


図 3.2.7 はく離試験結果

*専用：自然加硫接着剤専用ディスクサンダー

(4)まとめ

ゴム堰の補修に適した研磨仕様の検討を行なった結果、以下のことが分かった。

- 1) 自然加硫接着剤用ディスクサンダーの研磨面は非常に粗く、次いで#40、#100の順で研磨面が細かくなった。
- 2) どの研磨仕様でも養生0日の接着強度に違いがなかったが、浸漬期間が長くなる（接着後の時間が長くなり加硫が進行する）につれ強度が増した。
- 3) 接着力 5N/mm を目標値にした場合、養生時間を 24h 以上とれば、いずれのディスクサンダーにおいても概ね目標値以上の接着強度が得られた。
- 4) 今回比較した中では#100 が最も接着強度が高くなった。

これらの結果を受け、今後の補修の現場においては、以下のようにするとよいと考えられた。

- 接着剤に自然加硫接着剤を用いる場合、#100の研磨用ディスクサンダーは高い接着強度が得られたが、実用上、目詰まりが早いという問題があり、施工性という点では#40より劣る可能性がある。そのため、

接着強度と施工性を考慮して、研磨仕様（研磨用ディスクサンダーの粒度）は#40～#100の間での使用が適していると考えられる。

- 自然加硫接着剤専用ディスクサンダーによる研磨は、研磨面が粗く接着後に圧着することで大きな接着力を得ることができるため、一般的にコンベヤベルト接着時の研磨（平面部の研磨で施工姿勢が安定している）に用いられている。ゴム堰の場合、起立時の補修が多く接着後に圧着することは困難であり、研磨面も平面ではなく施工姿勢はコンベヤベルトの研磨に比べて劣る。また、母材のゴム厚はコンベヤベルトよりも比較的薄いため、劣化が進行した母材の研磨に使用する場合には注意が必要である。
- 養生時間については、24H以上（自然加硫接着剤推奨値）とすることが望ましい。しかし、現場状況等により、接着完了後24H以内に接着部が水没または濡れる場合も考えられるため、その場合は接着箇所が濡れないような養生を極力行うとともに、改めて指触・ハンマ打撃等で接着面の浮き・はく離がないことを確認する必要がある。

3. 2. 3 補修方法別の接着強さ評価

(1) 試験条件

本節にて、ゴム引布のゴム表面に対する当てゴム補修法を模した試験片を用いて、以下の3つの条件での補修性能を評価した。

- ①補修の初期値：室内環境で施工した試験片の接着強度
- ②長期耐久性：同試験片の70℃水中暴露による促進劣化を経たあとの接着強度
- ③温度依存性：同試験片を恒温槽の中で一連の温度下で試験したときの接着強度

(2) はく離試験方法

試験片は、写真3.2.8左に示すようにゴム引布と補修材(当てゴム)を接着し、短冊状試験片(幅25mm, 接着長さ100mm以上)を作製した。接着方法は施工会社が作成した補修マニュアル通りに実施するものとし、接着界面はゴム表面とした。接着力の評価は写真3.2.8右に示すような180°接着強度試験(JIS K 6256-1)により行った。



写真 3.2.8 接着強度試験

(3) 接着強度の初期値

施工方法の効果を確認するため、研磨の有無、接着後のハンマーおよびローラ処理の有無についても条件とした。はく離試験の結果を図3.2.6に示す。国土交通省の基準(案)⁷⁾ではゴム引布の初期検査として、熱加硫した織布とゴムの接着力が5.88 N/mm以上であることを規定している。補修の際の接着力は規定されていないが、材料と施工方法の組み合わせによっては、自然加硫型であってもこれと同等の接着力が得られた。ゴム用接着剤はCR系ゴムの溶液であり、EPDM同士の接着力は弱く、当てゴムもしくは本体ゴムのどちらかにCR系が用いられる場合に接着力が高い傾向にあった。

以上から、補修には研磨が必須であり、接着面にはCRを用いることが有効であると示された。

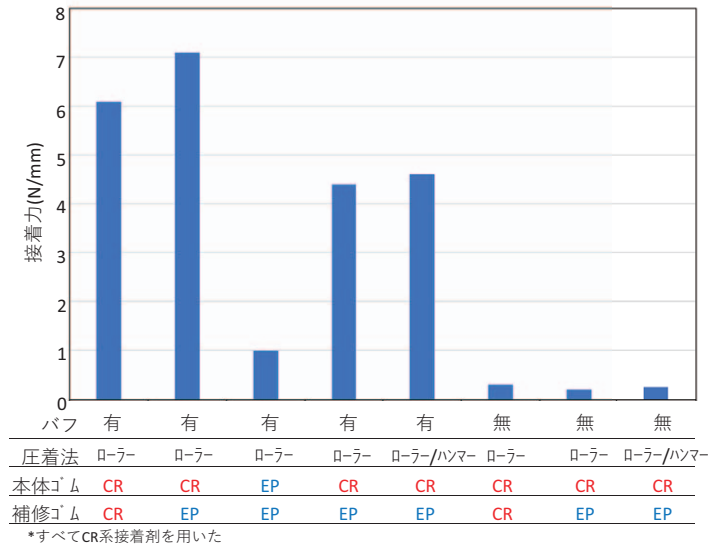


図 3.2.6 ゴム表面への当てゴム補修の接着力

(4) 接着力の長期耐久性試験

初期値を踏まえ、国交省が管理するゴム堰の補修実態より、研磨、ローラー圧着による補修方法を選定し、これらの方法によって試験片を作製した。試験片の諸元について表 3.2.4 に示す。試験片を 70℃の温水中暴露に供し、促進劣化を経て接着力試験をした結果を図 3.2.7 に示す。

表 3.2.4 長期耐久性試験用試験片

No.	本体ゴム 主成分	当てゴム 主成分	接着剤*
1	EP	CR	I
2	EP	CR	III
3	EP	EP	II

*全てCR系接着剤

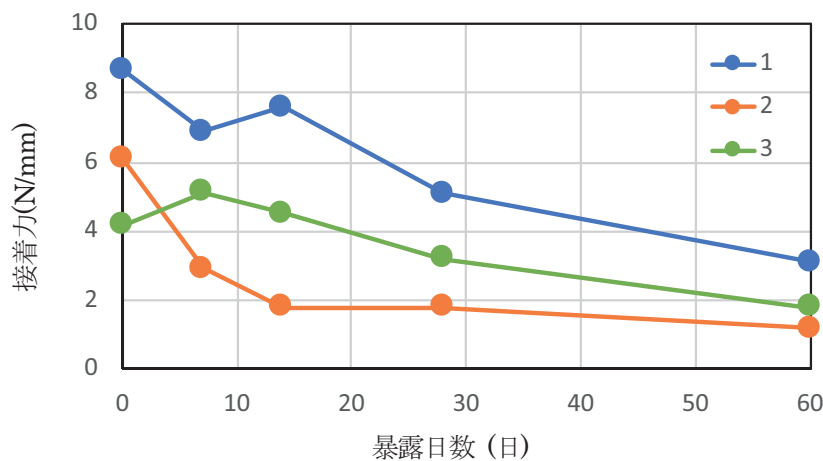


図 3.2.7 促進後のはく離試験結果

アレニウスの式から 70°C 温水暴露 1 年は平均水温環境 15°C とした場合、45 年の促進効果があることが算出できる。また、既報では 70°C 温水促進 250 日でゴム引布の接着強度が 55-63% に低下することが報告されている⁵⁾。28 日では 3 年半程度の促進効果であるが、接着強度基準初期値 5.88 N/mm を保つ試験片もあり、現場補修の耐久性の目安となると考えられる。補修法について網羅的に促進試験を実施することで自然加硫型の接着強度の低下を考慮し、接着強度の目標値として整理することが有効である。

(5) 接着力の温度依存性

EPDM 本体に対して CR 当てゴムを接着する組み合わせで試験片を作製し、恒温槽の中で一連の温度条件 (20°C、40°C、60°C、80°C) におけるはく離試験を実施した。結果を図 3.2.8 に示す。

接着力は温度上昇とともに低下していき、初期の接着力から 80°C までに 6 分の 1 程度になった。夏のゴム袋体(黒色の場合)の表面温度は 70°C 程度まで上昇するため越流しないゴム堰の補修では温度上昇による接着力の低下を考慮し、補修現場環境を把握した上で、用いる補修材で十分な接着力が得られるか予備試験を実施する必要がある。

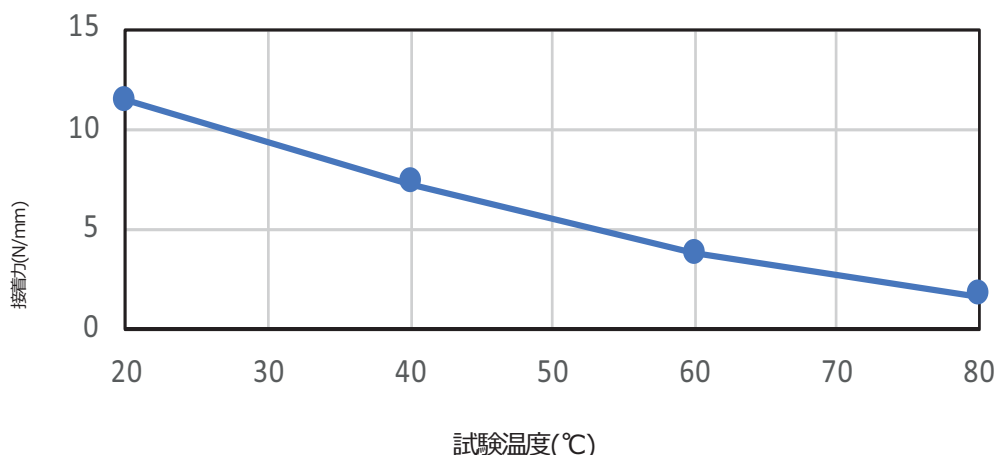


図 3.2.8 高温下でのはく離試験結果

(6) まとめ

今回、ゴム堰の補修技術の高度化の取り組みについて紹介した。本研究の成果を以下にまとめる。

- ① 前処理を適切に行い、CR 系材料を使用することによって接着強度が向上した。
- ② 促進劣化試験によって接着強度の低下を追跡した。補修方法の選定には、劣化による接着力の低下を考慮する必要があることが示された。
- ③ 接着力の温度依存性は顕著で、高温となる環境では予備試験が必要であることが示された。

3. 2. 4 耐熱・耐水の接着試験

(1) 試験の目的

ゴム堰の補修，補強においては、経年劣化を想定した接着力の確保が要求される。ゴム堰の補修は、環境条件から、現場で熱加硫補修を行うことが品質確保の観点から比較的困難であることが多いため、常温補修材料を用いて処置することが一般的である。

また、損傷の状態や製品の仕様は製品ごとに異なり、特に転石等で局部的に損傷を受けているものは、製品の厚みが周辺と大きく異なるものもあり(局部的に陥没しているイメージ)、補修材を面的に貼付けることが困難となる状況もある。その場合、損傷部周辺を研磨し傾斜をつけるか、凹みのある部分に局部的に自然(常温)加硫クッションゴムを貼り(埋め込み)、均一面を作り、その上から補修材を貼る。

補修後の供用期間および耐久性については、補修によりゴム袋体の信頼性が確保できている状態であれば供用を続けることができるが、決められた補修材料がないこと、ゴム配合により最適な補修材料が異なること、環境条件により刺激が異なること等から、明確な耐久性を示すことはできない。

そこで、本節では、補修後の長期の供用を想定し、供用中の主な刺激条件である非越流部分における熱、および越流部分における河川水による接着剤の劣化を想定した接着性能の評価を行うことを目的とする。

(2) 試験片の諸元と材料諸元

材料はすべて同一社製とし、以下のとおりである。

試験片寸法	: 幅 25mm×長さ 150mm
母材	: EPDM 系ゴム
貼合せ材	: カバーゴム EPDM 系ゴム 塗布ゴム(接着ゴム) SBR 系ゴム
織布	: ナイロン
接着剤	: CR 系
クッションゴム	: CR 系

また、試験片は、幅 25mm×長さ 150mm とし、接着面ごと、クッションゴムあり/なしで以下のとおり作成した。

①-1	クッションゴムあり	ゴム-ゴム	②-1	クッションゴムなし	ゴム-ゴム
①-2	クッションゴムあり	ゴム-織布	②-2	クッションゴムなし	ゴム-織布
①-3	クッションゴムあり	織布-織布	②-3	クッションゴムなし	織布-織布



写真 3.2.9 試験片

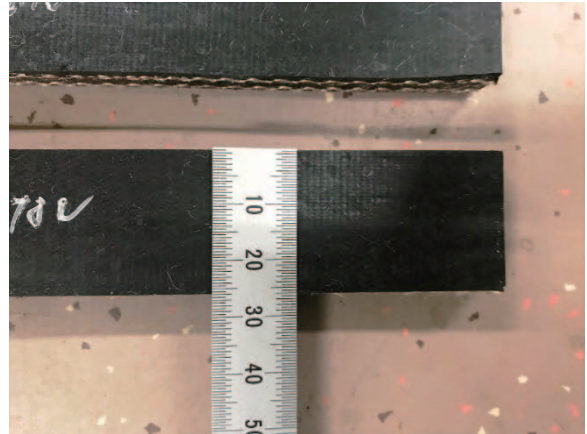


写真 3.2.10 試験片

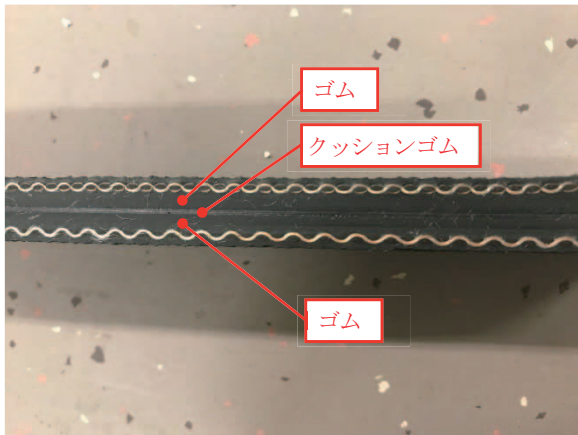


写真 3.2.11 クッションゴムあり ゴム-ゴム断面

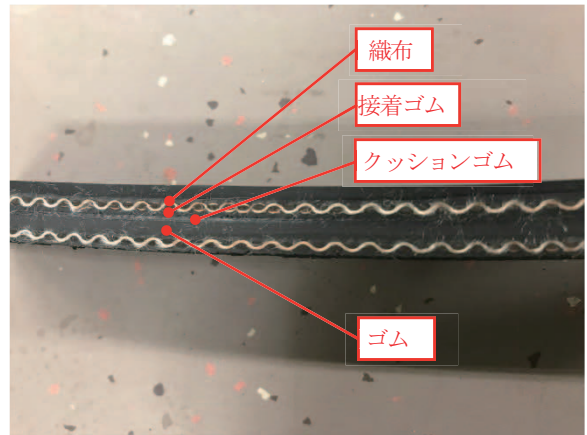


写真 3.2.12 クッションゴムあり ゴム-織布断面

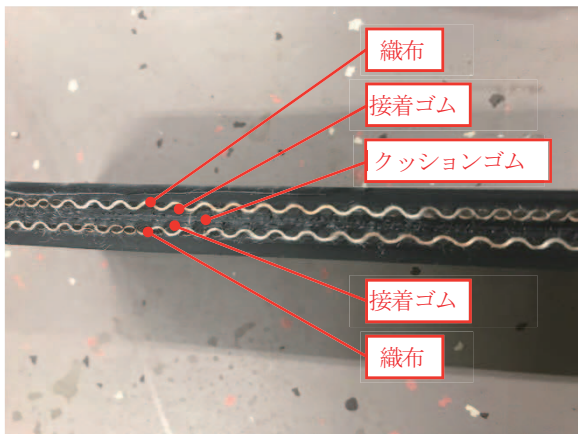


写真 3.2.13 クッションゴムあり 織布-織布断面

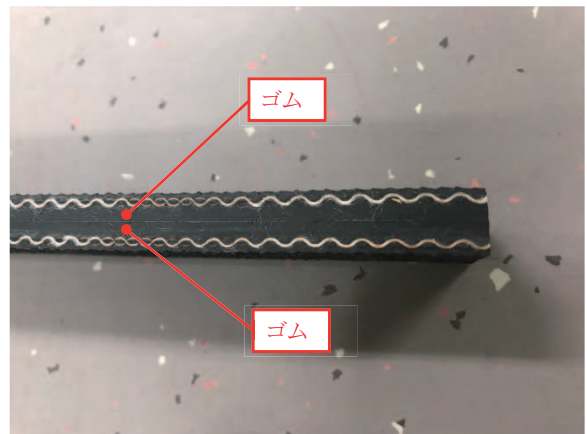


写真 3.2.14 クッションゴムなし ゴム-ゴム断面

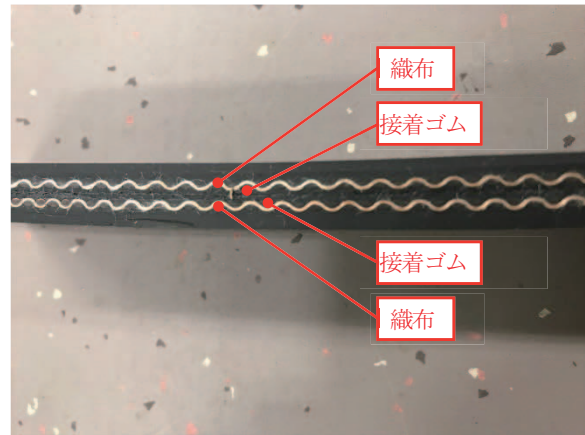
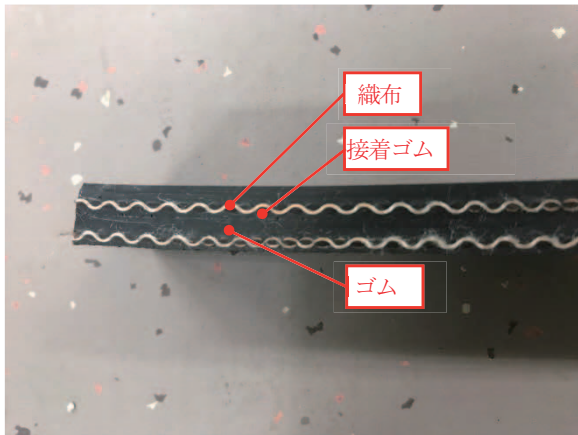


写真 3.2.15 クッションゴムなし ゴム-織布断面

写真 3.2.16 クッションゴムなし 織布-織布断面

また、上記写真 3.2.11～3.2.16 の断面と、はく離試験時の接着界面を模式的に表すと以下のとおりとなる。

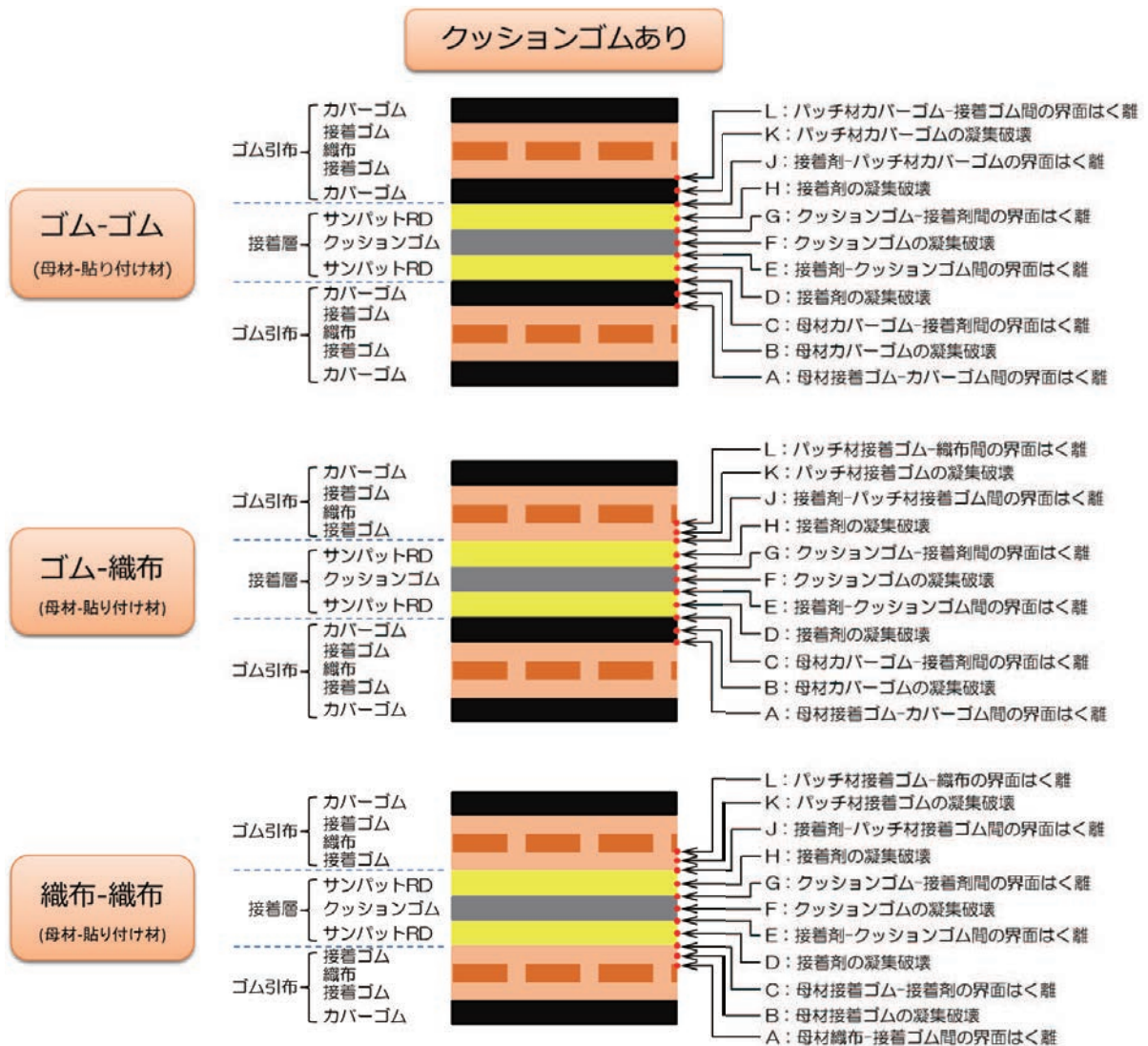


図 3.2.9 接着断面およびはく離界面(クッションゴムあり)

クッションゴムなし

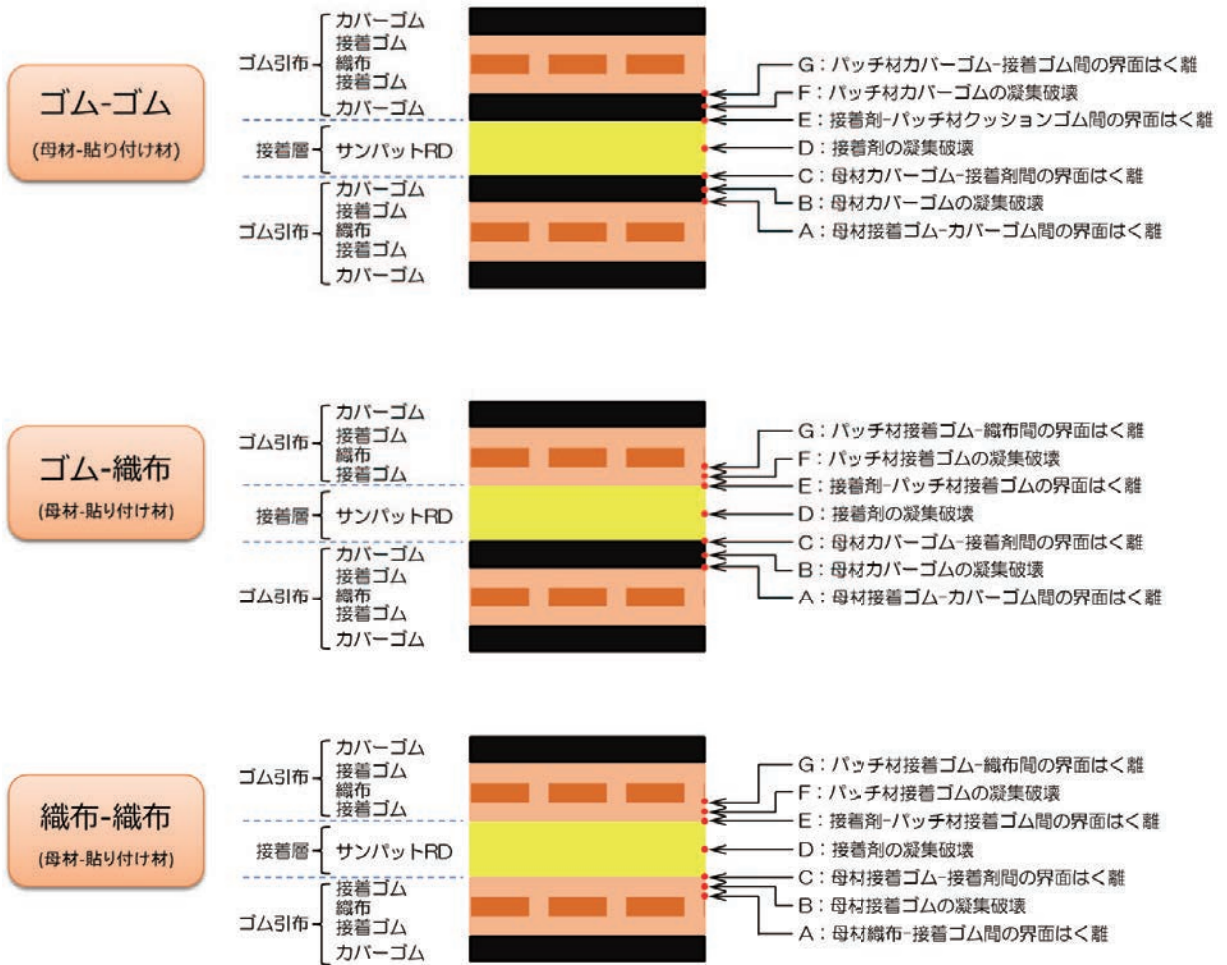


図 3.2.10 接着断面およびはく離界面(クッションゴムなし)

(3) 作業方法および試験方法

作業方法は以下のとおりとする。

- ① 母材および貼付け材表面を研磨
- ② 母材に接着剤を1回塗布, 貼付け材に接着剤を2回塗布
- ③ ローラーおよびゴムハンマーにて十分に面圧をかける

試験方法は以下を適用する。

測定方法：JIS K 6256-1 布と加硫ゴムの剥離試験 引張速度 50mm/min

耐熱条件：JIS K 6257 空気加熱老化試験(ノーマルオープン法) 試験温度 70℃

耐水条件：JIS K 6258 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-耐液性の求め方 浸漬温度 70℃

なお、熱老化時間、浸漬時間については、初期・7日・14日・28日・60日・120日・180日・240日・300日・360日とした。

(4) 結果および考察

1) 各種性状の結果

評価結果を表 3.2.5～表 3.2.8 にまとめた。

表 3.2.5 CR 系接着剤 接着性能(耐熱老化性, クッションゴムあり) 単位 : N/mm

期間	No.	母材-補修材								
		ゴム-ゴム			ゴム-織布			織布-織布		
		接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値
初期	1	1.6	Ⓗ	2.0	3.4	Ⓓ	3.0	10.6	Ⓕ	11.3
	2	1.8	Ⓓ		3.4	Ⓓ		11.0	Ⓕ	
	3	2.6	Ⓗ		2.2	Ⓓ		12.4	Ⓕ	
7 日	1	3.2	Ⓗ	2.9	4.4	E	5.3	11.8	G	11.9
	2	2.8	Ⓗ		5.2	E		11.8	G	
	3	2.8	Ⓗ		6.2	E		12.0	G	
14 日	1	3.8	C	3.7	2.0	Ⓓ	2.2	11.0	E	10.1
	2	10.8→4.6	E→C		2.0	Ⓓ		9.4	E,Ⓕ	
	3	10.2→2.8	E→C		2.6	Ⓓ		10.0	E,Ⓕ	
28 日	1	9.6	E	7.9	1.6	C	5.2	10.6	Ⓓ	8.8
	2	4.6	E→C		10.6	Ⓓ		6.2	Ⓓ	
	3	9.6	E		3.4	C		9.6	Ⓓ	
60 日	1	4.8	C	6.4	3.2	C	5.7	6.0	E,G	5.7
	2	9.0	Ⓓ,E		8.8	Ⓓ,E		5.8	G	
	3	5.4	C,Ⓓ		5.2	C,Ⓓ		5.2	G	
120 日	1	7.4	C,E	8.1	9.0	E	8.6	8.2	E	7.9
	2	8.6	E		7.4	C		7.4	E	
	3	8.4	E		9.4	E		8.0	E	
180 日	1	6.8	Ⓕ	4.9	8.0	Ⓓ	7.8	7.0	Ⓕ	6.9
	2	3.6	Ⓕ		7.0	Ⓓ		7.2	Ⓕ	
	3	4.2	Ⓕ		8.4	Ⓓ		6.6	Ⓓ,Ⓕ	
240 日	1	6.0	Ⓕ	5.7	6.0	Ⓓ,Ⓕ	4.3	3.2	Ⓕ	3.3
	2	6.0	Ⓕ		4.8→3.0	Ⓓ		3.4→4.8	Ⓕ,Ⓖ	
	3	5.0	E,Ⓕ		6.2→3.8	Ⓓ,Ⓕ		3.4	F	
300 日	1	3.2	F	2.9	2.0	Ⓓ	2.3	2.2	Ⓗ	2.5
	2	2.4	K		2.4	J		3.0	J	
	3	3.0	Ⓑ		2.6	Ⓑ		2.4	Ⓗ	
360 日	1	2.8→2.0	Ⓑ,Ⓓ	1.9	2.0	J	2.1	1.8	J	2.3
	2	2.0	Ⓑ		2.0	J		2.4	C	
	3	1.6	Ⓑ		2.2	J		2.6	J	

※1 接着力が大きく移行するものは『→』にて併記するが、値は小さいほうを採用した。

※2 表面性状が移行するものは『→』で、均等に分布するものは『,』にて表記した。

※3 表面性状の○表記は凝集破壊となったものを示す(図 3.2.9 参照)。

表 3.2.6 CR系接着剤 接着性能(耐熱老化性, クッションゴムなし) 単位: N/mm

期間	No.	母材-補修材								
		ゴム-ゴム			ゴム-織布			織布-織布		
		接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値
初期	1	2.6	E	2.4	2.6	Ⓓ	3.7	11.0	E	10.9
	2	1.8	C		4.0	Ⓓ		11.2	E	
	3	2.8	C		4.4	Ⓓ		10.4	Ⓓ	
7日	1	3.0	Ⓓ	3.5	3.6	Ⓓ	4.1	7.4	Ⓓ	6.8
	2	3.2	Ⓓ		4.0	Ⓓ		4.2	Ⓓ	
	3	4.4	Ⓓ		4.8	Ⓓ		8.8	Ⓓ	
14日	1	2.4	E	2.7	2.8	C	2.5	6.2	Ⓓ	6.3
	2	2.8	E		2.4	C		6.4	Ⓓ	
	3	3.0	E		2.4	C		6.4	Ⓓ	
28日	1	3.6	E	3.3	3.4	C	2.9	4.0	Ⓓ	5.9
	2	3.0	E		3.0	C		7.6	Ⓓ	
	3	3.2	Ⓓ		2.2	C		6.2	Ⓓ	
60日	1	4.8	Ⓓ	3.3	4.6	C,Ⓓ	3.3	5.4	Ⓓ	4.9
	2	2.4	Ⓓ		2.6	C		5.4	Ⓓ	
	3	2.6	Ⓓ		2.6	C		3.8	Ⓓ	
120日	1	6.0	C,E	5.9	6.4	Ⓓ	6.3	6.4	Ⓓ	6.1
	2	6.4	Ⓓ		5.6	Ⓓ		5.8	Ⓓ	
	3	5.2	Ⓓ		6.8	Ⓓ		6.0	Ⓓ	
180日	1	7.4	A,Ⓓ	7.3	5.2	Ⓓ	5.8	5.0	Ⓓ	4.7
	2	6.8	C,Ⓓ		6.2	Ⓓ		4.8	Ⓓ	
	3	7.6	A,C,Ⓓ		6.0	Ⓓ		4.2	Ⓓ	
240日	1	6.6	Ⓕ	5.0	4.6	E	4.7	4.6	Ⓓ	4.6
	2	4.4	A,Ⓕ		4.8	Ⓓ		5.0	Ⓓ	
	3	6.6→4.0	A,Ⓕ		4.8	Ⓓ		4.2	Ⓓ	
300日	1	2.8	E	3.0	3.6	C,E	3.5	3.0	E	3.3
	2	2.8	C		3.4	C		3.8	E	
	3	3.4	Ⓓ		3.6	C,E		3.0	E	
360日	1	2.2	E	2.3	2.0	Ⓕ	2.2	2.8	E	2.6
	2	2.2	E		2.8	Ⓕ,E		2.0	C	
	3	2.4	E		1.8	Ⓕ		3.0	E	

- ※1 接着力が大きく移行するものは『→』にて併記するが、値は小さいほうを採用した。
 ※2 表面性状が移行するものは『→』で、均等に分布するものは『,』にて表記した。
 ※3 表面性状の○表記は凝集破壊となったものを示す(図 3.2.10 参照)。

表 3.2.7 CR系接着剤 接着性能(耐水性, クッションゴムあり)

単位 : N/mm

期間	No.	母材-補修材								
		ゴム-ゴム			ゴム-織布			織布-織布		
		接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値
初期	1	1.6	Ⓗ	2.0	3.4	Ⓓ	3.0	10.6	Ⓕ	11.3
	2	1.8	Ⓓ		3.4	Ⓓ		11.0	Ⓕ	
	3	2.6	Ⓗ		2.2	Ⓓ		12.4	Ⓕ	
7日	1	1.8	G	2.3	5.2	Ⓓ	5.4	10.8	Ⓕ	10.8
	2	2.2	G		6.0	C		10.6	Ⓕ	
	3	2.8	G		5.0	C		11.0	Ⓕ	
14日	1	3.2	C	3.6	3.0	C	2.9	6.8	Ⓓ	9.3
	2	4.0	C		2.8	C		10.0	Ⓓ	
	3	3.5	C		3.0	C		11.2	Ⓓ	
28日	1	2.7	G	2.6	1.8	Ⓓ	2.0	11.0	Ⓓ	8.1
	2	2.6	G		2.1	Ⓓ		5.4	Ⓓ	
	3	2.4	C		2.2	Ⓓ		7.8	Ⓓ	
60日	1	2.8	C	3.5	3.0	C	3.2	9.4	Ⓓ	10.1
	2	3.0	C		3.6	C,Ⓓ		10.0	Ⓓ	
	3	4.8	C		3.0	C		10.8	Ⓓ	
120日	1	4.2	C	4.0	2.2	C	2.6	7.2	Ⓓ	8.7
	2	4.2	C		3.4	C		9.4	Ⓓ	
	3	3.6	C		2.2	C		9.4	Ⓓ	
180日	1	3.8	C	4.1	2.2	C	2.7	8.8	Ⓕ	8.5
	2	4.4	C		2.8	C		8.2	Ⓕ	
	3	4.2	C		3.2	C		8.6	Ⓕ	
240日	1	2.4	C	2.9	2.2	C	2.4	5.0	Ⓕ	5.2
	2	2.8	C		3.0	C		5.4	Ⓕ	
	3	3.6	C		2.0	C		5.2	Ⓕ	
300日	1	4.0	C	3.6	2.2	C	2.3	5.6	Ⓕ	5.5
	2	4.0	C		2.2	C		5.2	Ⓕ	
	3	2.8	C		2.4	C		5.6	Ⓕ	
360日	1	2.6	C,E	3.3	2.0	C	2.7	3.4	Ⓕ	3.7
	2	3.4	C,E		3.0	Ⓕ		4.0	Ⓕ	
	3	3.8	C,E		3.2	Ⓕ		3.8	Ⓕ	

※1 接着力が大きく移行するものは『→』にて併記するが、値は小さいほうを採用した。

※2 表面性状が移行するものは『→』で、均等に分布するものは『,』にて表記した。

※3 表面性状の○表記は凝集破壊となったものを示す(図 3.2.9 参照)。

表 3.2.8 CR 系接着剤 接着性能(耐水性, クッションゴムなし) 単位 : N/mm

期間	No.	母材-補修材								
		ゴム-ゴム			ゴム-織布			織布-織布		
		接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値	接着力	表面性状	平均値
初期	1	2.6	E	2.4	2.6	Ⓓ	3.7	11.0	E	10.9
	2	1.8	C		4.0	Ⓓ		11.2	E	
	3	2.8	C		4.4	Ⓓ		10.4	Ⓓ	
7日	1	3.2	E	3.6	4.8	Ⓓ	4.3	10.6	E	10.6
	2	4.2	C		4.0	Ⓓ		10.2	E	
	3	3.4	C		4.0	Ⓓ		11.0	E	
14日	1	3.1	E	2.9	2.4	C	2.2	8.0	Ⓓ	6.9
	2	2.0	E		2.4	C		6.2	Ⓓ	
	3	3.7	C		1.8	C		6.6	Ⓓ	
28日	1	2.2	E	2.8	1.4	C	1.6	5.6	E	5.1
	2	2.8	C,E		1.6	C		6.0	E	
	3	3.4	C		1.7	C		3.6	E	
60日	1	3.4	C,Ⓓ	3.1	1.5	C	1.5	5.8	Ⓓ	6.1
	2	3.0	C		1.4	C		6.2	Ⓓ	
	3	3.0	C		1.5	C		6.4	Ⓓ	
120日	1	3.2	C	3.6	1.4	C	1.4	6.2	Ⓓ	5.1
	2	4.0	C,E		1.4	C		4.8	Ⓓ	
	3	3.6	C		1.4	C		4.4	Ⓓ	
180日	1	4.0	C,E	3.9	1.3	C	1.7	5.8	Ⓓ	6.1
	2	4.0	Ⓓ		2.2	C		6.0	Ⓓ	
	3	3.6	D,E		1.6	C		6.6	Ⓓ	
240日	1	2.8	C,Ⓓ	2.8	1.6	C	1.7	2.0	Ⓓ	2.3
	2	3.4	Ⓓ		1.8	C		2.4	Ⓓ	
	3	2.2	Ⓓ		1.8	C		2.6	Ⓓ	
300日	1	3.2	C	3.2	2.2	C	2.1	2.8	Ⓓ	3.0
	2	3.2	C,Ⓓ		2.0	C		3.4	Ⓓ,E	
	3	3.2	C,Ⓓ,E		2.0	C		2.8	E	
360日	1	3.0	C	2.7	1.8	C	1.8	2.6	Ⓓ	2.3
	2	2.6	C,E		1.8	C		2.4	Ⓓ	
	3	2.4	C		1.8	C		2.0	Ⓓ	

- ※1 接着力が大きく移行するものは『→』にて併記するが、値は小さいほうを採用した。
- ※2 表面性状が移行するものは『→』で、均等に分布するものは『,』にて表記した。
- ※3 表面性状の○表記は凝集破壊となったものを示す(図 3.2.10 参照)。

次に、表 3.2.5～3.2.8 の結果を耐熱老化性(クッションゴムあり/なし)と耐水性(クッションゴムあり/なし)に分けた結果をそれぞれ図 3.2.11～3.2.16 に示す。なお、表 3.2.9 および表 3.2.10 は平均値であるが、補修作業は大半が手足業であり、結果、個々のデータもバラツキが大きいため近似線にて傾向を把握することとした。

表 3.2.9 CR 系接着剤 接着性能(耐熱老化性)

(単位 : N/mm)

母材-補修材		熱老化時間(day)									
		1	7	14	28	60	120	180	240	300	360
ゴム-ゴム	クッションあり	2.0	2.9	3.8	7.9	6.4	8.1	4.9	5.7	2.9	1.9
	クッションなし	2.4	3.5	2.7	3.3	3.3	5.9	7.3	5.0	3.0	2.3
ゴム-織布	クッションあり	3.0	5.3	2.2	5.2	5.7	8.6	7.8	4.3	2.3	2.1
	クッションなし	3.7	4.1	2.5	2.9	3.3	6.3	5.8	4.7	3.5	2.2
織布-織布	クッションあり	11.3	11.9	10.1	8.8	5.7	7.9	6.9	3.3	2.5	2.3
	クッションなし	10.9	6.8	6.3	5.9	4.9	6.1	4.7	4.6	3.3	2.6

※表 3.2.5, 3.2.6 の結果より平均値を抜粋

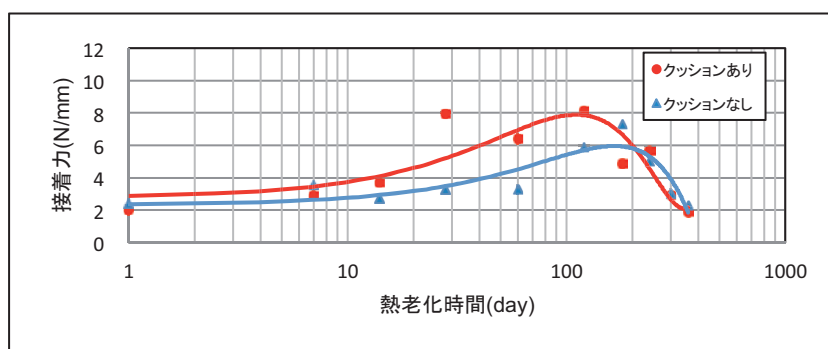


図 3.2.11 CR 系接着剤 接着性能(耐熱老化性, ゴム-ゴム)

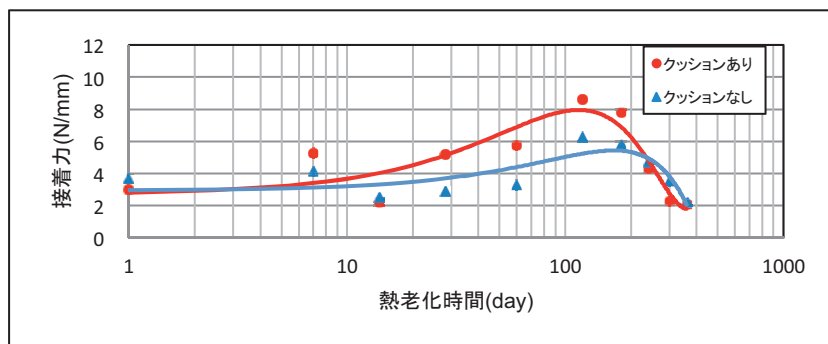


図 3.2.12 CR 系接着剤 接着性能(耐熱老化性, ゴム-織布)

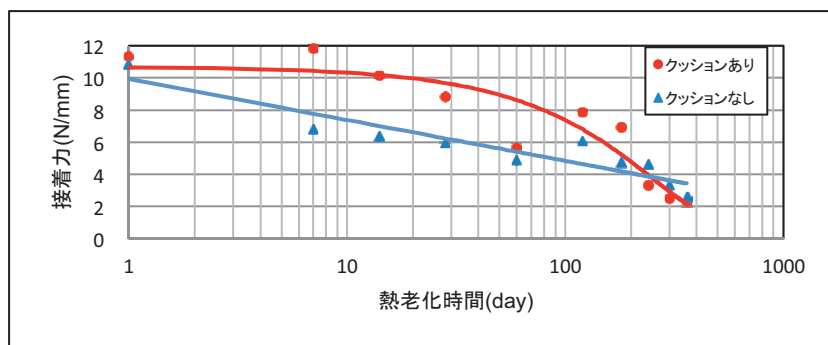


図 3.2.13 CR 系接着剤 接着性能(耐熱老化性, 織布-織布)

表 3.2.10 CR 系接着剤 接着性能(耐水性)

単位 : N/mm

母材-補修材		浸漬時間(day)									
		1	7	14	28	60	120	180	240	300	360
ゴム-ゴム	クッションあり	2.0	2.3	3.6	2.6	3.5	4.0	4.1	2.9	3.6	3.3
	クッションなし	2.4	3.6	2.9	2.8	3.1	3.6	3.9	2.8	3.2	2.7
ゴム-織布	クッションあり	3.0	5.4	2.9	2.0	3.2	2.6	2.7	2.4	2.3	2.7
	クッションなし	3.7	4.3	2.2	1.6	1.5	1.4	1.7	1.7	2.1	1.8
織布-織布	クッションあり	11.3	10.8	9.3	8.1	10.1	8.7	8.5	5.2	5.5	3.7
	クッションなし	10.9	10.6	6.9	5.1	6.1	5.1	6.1	2.3	3.0	2.3

※表 3.2.7, 3.2.8 の結果より平均値を抜粋

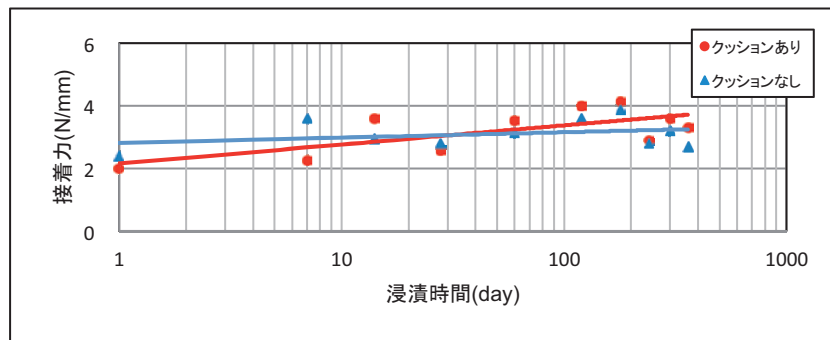


図 3.2.14 CR 系接着剤 接着性能(耐水性, ゴム-ゴム)

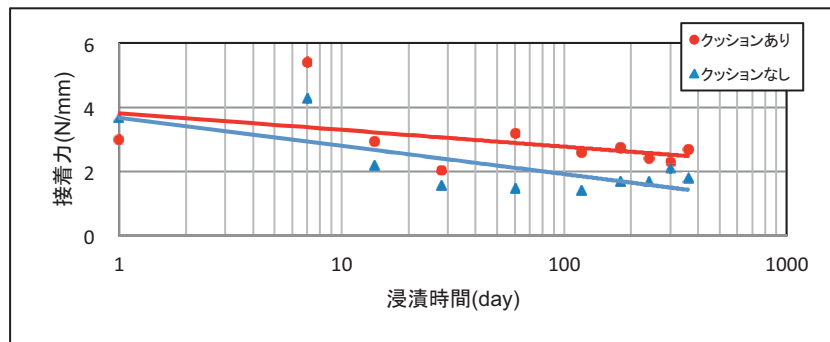


図 3.2.15 CR 系接着剤 接着性能(耐水性, ゴム-織布)

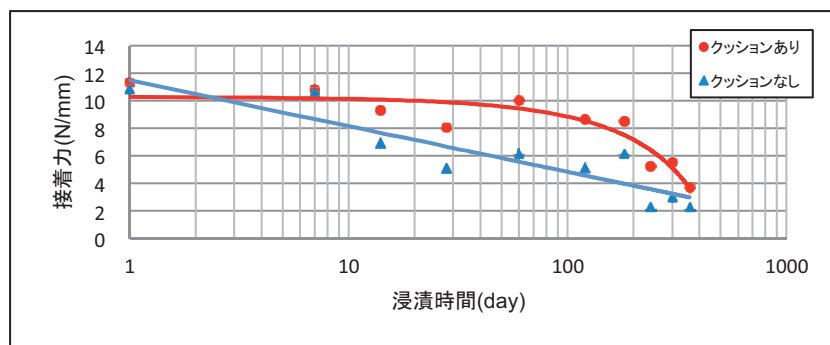


図 3.2.16 CR 系接着剤 接着性能(耐水性, 織布-織布)

2) クッションゴムの効果

耐熱性、耐水性ともにクッションゴムありのデータが総じて高い値を示すが、クッションゴムなしの値が特段に低くもなく傾向は一致している。現場における補修作業においては、クッションゴムを入れることにより、接着剤塗布および乾燥時間が発生するため、工数が2倍以上に増加することが見込まれることから、補修の効果としてはクッションゴムを入れる経済性メリットは大きくないと考えられる。

一方で、クッションゴムの接着性能が十分に確認できたことから、クッションゴムは凹凸の激しい面の平滑化には有効に利用することが可能であると判断できる。

3) 表面性状

はく離界面の表面性状について、はく離面の両面に同一材料が付着しているものを凝集破壊、片面のみに付着しているものを界面はく離と分類した。その結果、接着力の高いものが凝集破壊となる傾向は認められるものの、相対的に接着力の低いものでも凝集破壊となるものもあった。また、当初想定していた試験時間の長いものほど界面剥離する傾向も顕著には認められなかった。

はく離界面の表面性状はアンカー効果、化学的結合力、分子間力が大きな要素なるが¹²⁾、その他にも接着剤の塗布厚さや乾燥状態、母材の研磨状態等も影響を与えと考えられるため、手作業によるばらつきの大いサンプルを使用する本試験では、確実な傾向を掴むことは困難であると考えられる。



写真 3.2.17 凝集破壊の例

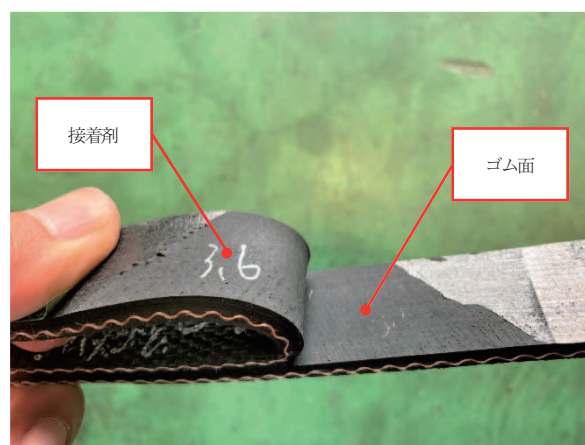


写真 3.2.18 界面はく離の例

4) 耐熱老化性

接着面がゴム-ゴム、ゴム-織布、織布-織布すべてにおいて、長期間の供用に耐えうる耐久性を保持できていると考えられる。現在、ゴム堰の補修工事における接着力の規格値はないが、最も接着力の低いゴム-ゴム面においても長期的に 2.0N/mm 程度以上を保持している。

ゴム-ゴム、ゴム-織布は、熱老化期間 28 日辺りから接着力が上昇傾向となるが、これはオープン熱によりゴムの架橋(加硫)反応が進むためであると考えられる。この現象についてはすべてのゴムにおいて現れるものではなく、ゴム配合や製造方法(加硫時間)に因るものであると推定される。

5) 耐水性

接着面がゴム-ゴム、ゴム-織布、織布-織布すべてにおいて、長期間の供用に耐えうる耐久性を保持できていると考えられる。ゴム-ゴム面、ゴム-織布面については大きな落ち込みなく、2.0～4.0N/mm 程度の水準を維持していた。

(5)まとめ

概ね、補修後の供用に長期にわたって耐えうる接着力を保持していると判断できるが、本評価は試験室における刺激のない環境での試験片を使用しているため、現実の河川環境による大きな転石や流下物、また近年のゲリラ豪雨等による想定を超えた洪水等による刺激は考慮されていない。

本試験では、織布-織布による接着力が、初期強度が最も高い値を示している。上述したように、接着は様々な要素が合わさって成立している状態であり、織布面を出すことにより繊維の凹凸によるアンカー効果や接着面積の増加、接着ゴムとの相性等が起因すると考えられる。

現実の河川環境においては、流下物の衝撃によって補修材の端面がはく離することをきっかけとして補修材の寿命を全うできない事例も多いため、端面を傾斜状にする、補修材のカドを落とす等の施工上の工夫も必要になってくる。

以上より、新設時はもちろん、補修後においても定期的な点検による維持管理を欠かすことはできない。

3. 2. 5 補修箇所の耐圧試験

ゴム堰袋体が転石による圧潰や人為的な破壊行為によって損傷することがある。この場合の修理としてパッチ当て補修が一般的に行われているが、経年劣化による耐久性についての知見が無いため確実な施工上把握しておく必要がある。

(1) 試験体の形状と物性

実際のゴム堰に使用する袋体ゴム (t10.5mm×2 プライ) に長さ 100mm の貫通傷を付けた後パッチ修理を行う。試験体は表 3.2.11 の 3 タイプとする。また、表 3.2.12 に試験体の引張強度、図 3.2.17 に試験体の構造を示す。

表 3.2.11 試験体の分類

	サンプル①	サンプル②	サンプル③
母材の熱老化	無し	無し	有り
母材サイズ	□ 1200 mm	□ 1200 mm	□ 1200 mm
カバーゴム	□ 400 mm	□ 580 mm	□ 580 mm
補修材 a (帆布 1 枚、カバーゴムと一体)	□ 300 mm	□ 420 mm	□ 420 mm
補修材 b (帆布 1 枚)	□ 200 mm	□ 260 mm	□ 260 mm

表 3.2.12 試験体の引張強度

試験方向・部位		規格値 N/mm	実強度 N/mm			
			1	2	3	平均値
縦方向	一般部	352	695	678	675	683
	継手部	235	314	316	314	315

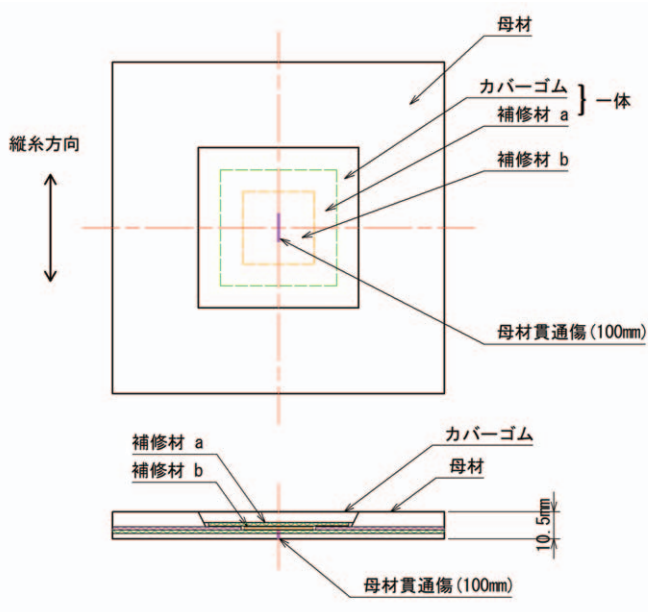


図 3.2.17 試験体の構造

(2) 試験体施工方法

各貼合わせ面に市販の常温接着剤を塗布（2回塗布）して貼合わせ、ハンドローラとハンマーにて圧着する。貼付けたカバーゴム表面の4辺について、はみ出したゴムを切除後平坦に研磨仕上げした。

また、熱老化試験は熱老化処理した母材をパッチ修理する方式とする。熱老化の条件は、下記の通りである。

熱老化の仕様 設定温度：100℃

加温時間：96 時間

(3) 補修強度の算出方法

円筒形圧力タンクの上面に試験体ゴムを固定し、タンクに注水して加圧する。試験体ゴムは均一な応力を受けるよう球面状に変形する。完全な球面と仮定すれば球面高さの測定で球面の曲率、及び伸び率が計算できる。図 3.2.18 に試験体ゴムの断面を示す。

袋体張力は曲率半径と内圧から計算する。

$$T = R \cdot P \quad \dots\dots\dots (1)$$

T : 張力 kN/m

R : 曲率半径 m

P : 内圧 MPa

式(2)と式(3)において R が等しくなる α を求めて曲率半径 R を決める。

$$R = h / (1 - \cos\alpha) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D = 2R \cdot \sin\alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L = 2R \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

h : 高さ mm

D : 直径 900 mm

α : 頂角

L : 円弧長さ mm

伸び率 ε は式(5)にて計算する。

$$\varepsilon = (L - D) / D \quad \dots\dots\dots (5)$$

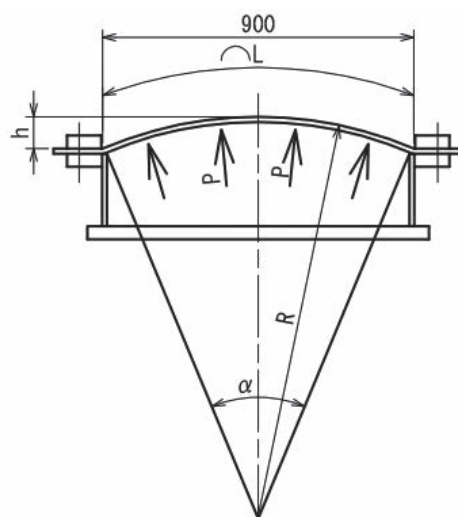


図 3.2.18 断面図

(4) 試験方法

試験装置の概要を下記に示す。また、試験装置を図 3.2.19 に試験装置を示す(加圧タンクは 3 台、表示は 1 台分を示す)。

水圧テストポンプ : 3.5MPa×7 リットル/mini、(株)キョーワ製 KY-40A×1 台

加圧タンク : 900A 鋼管(10K フランジ付)、0.13m³×3 台

ゴム押え金具 : 900A×10K フランジ×3 台

圧力計 : 0~5.0MPa、(株)クローネ製 KDM30-MW 無線出力×3 台
 圧力トランスミッター : 0~5.0MPa、長野計器(株)製 KH15-J7×3 台
 制御盤 : 1 台

試験方法は下記の手順で行った。

- a) 試験体ゴム板に φ33 ボルト貫通穴を明け、リング状の押え金具と M30 ボルトにて加圧タンクに締付固定する。
- b) 加圧タンク内にテストポンプにて設定圧力まで注水する。試験体ゴムは徐々に伸びることで圧力低下を起こすため、圧力を保持する自動運転を行う。なお、圧力上昇時の減圧操作は頻度が少ない為設けない。
- c) 適時、圧力と頂点高さを読み取り、式(1)に示す計算にて張力を求める。
- d) 気密機能が失われる(一気に破裂するか漏水が大きくなり加圧が間に合わなくなる)までの経過時間を破断時間とする。時間と圧力は圧力計からの無線出力の記録を用い、平均圧力を $\Sigma(\text{サンプリング時間} \times \text{記録圧力}) / (\text{経過時間})$ にて求める。頂点高さは直近の計測値とする。なお、2400 時間を経過した時点で終了し破断時間とする。

試験状況を写真 3.2.19 に、気密機能が失われた状態(補修部剥がれ)を写真 3.2.20 に示す。全てのサンプルにおいて、写真のような剥がれが確認された。

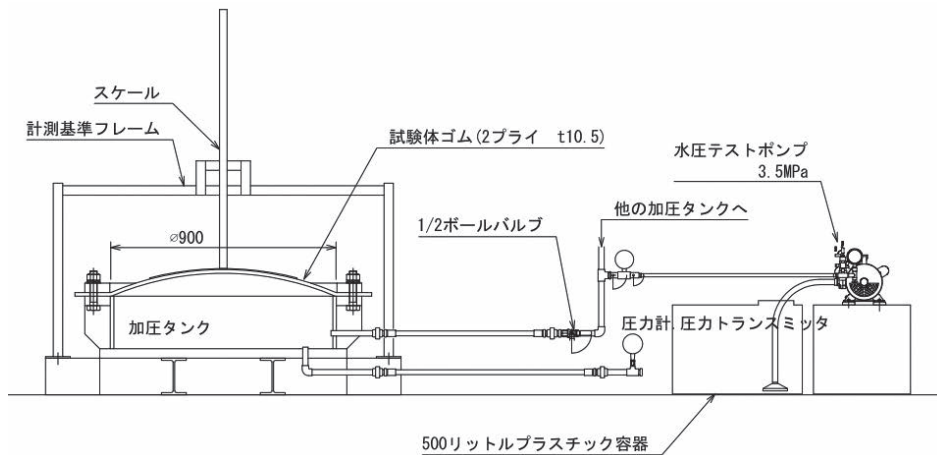


図 3.2.19 試験装置の概要



写真 3.2.19 試験状況



写真 3.2.20 補修部剥がれの状態

(5) 試験結果

1) 無補修袋体の強度試験結果

別途用意したパッチ当て補修を行っていない試験体を 0.70MPa まで加圧し 19 時間後、破裂するまで再度加圧した。

強度と伸び率は式(1)により求め S-S 曲線を求める。結果を図 3.2.20、図 3.2.21 に示す。破断強度 410N/mm となり、以降の試験張力の基準とする。

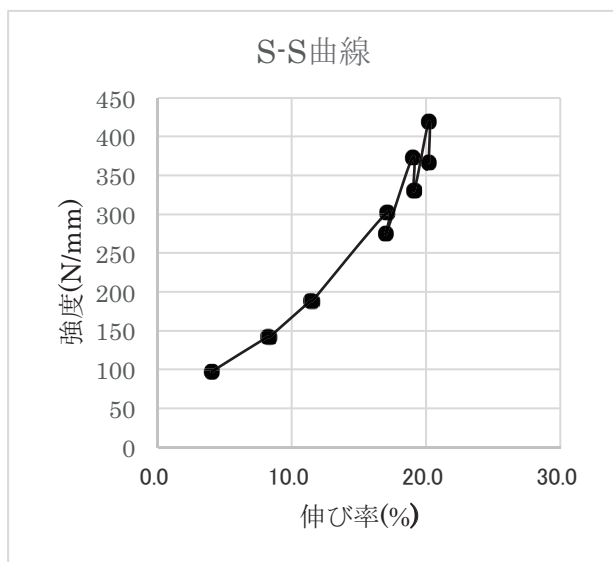


図 3.2.20 予備加圧 S-S 曲線

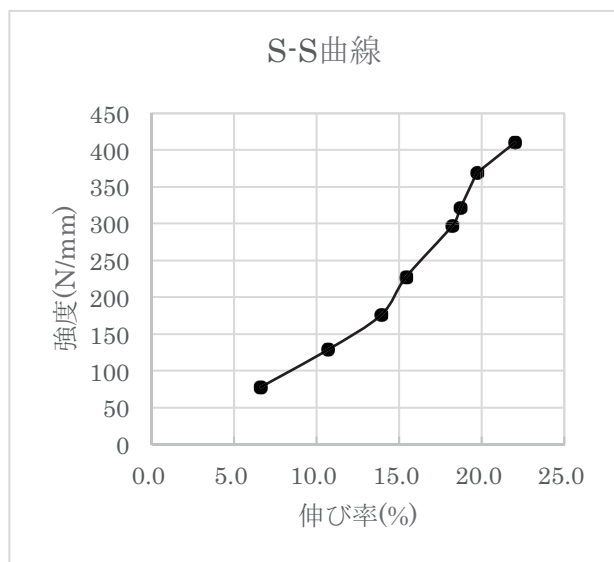


図 3.2.21 無補修袋体 S-S 曲線

2) クリープ特性試験結果

サンプル①パッチ寸法 400×400

気温の影響は無いものとして冬季計測データも有効とする。結果を図 3.2.22 に示す。

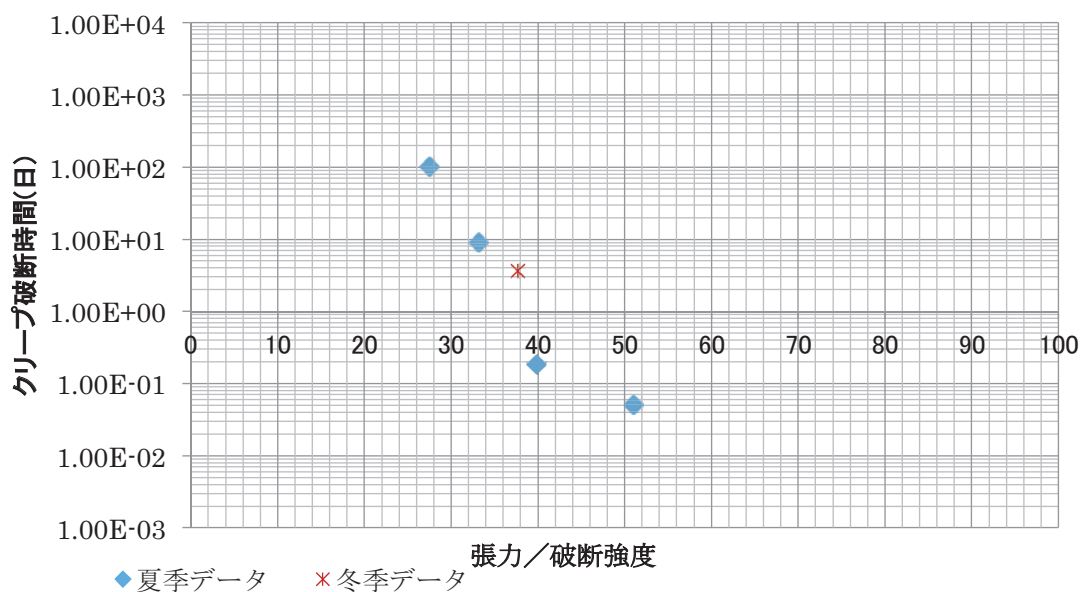


図 3.2.22 サンプル①

サンプル②パッチ寸法 580×580 標準品

張力 24.2%データは破裂の兆候なく途中打ち切りにつき無効とする。結果を図 3.2.23 に示す。

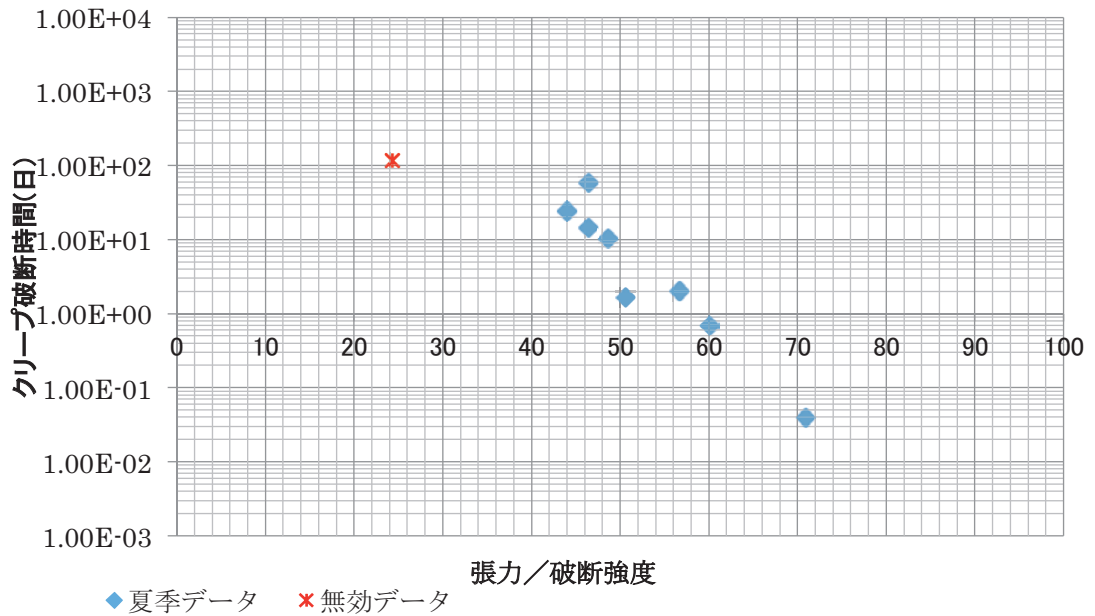


図 3.2.23 サンプル②

サンプル③パッチ寸法 580×580 母材熱老化

冬季計測データは明らかに強度が増加しており無効とする。結果を図 3.2.24 に示す。

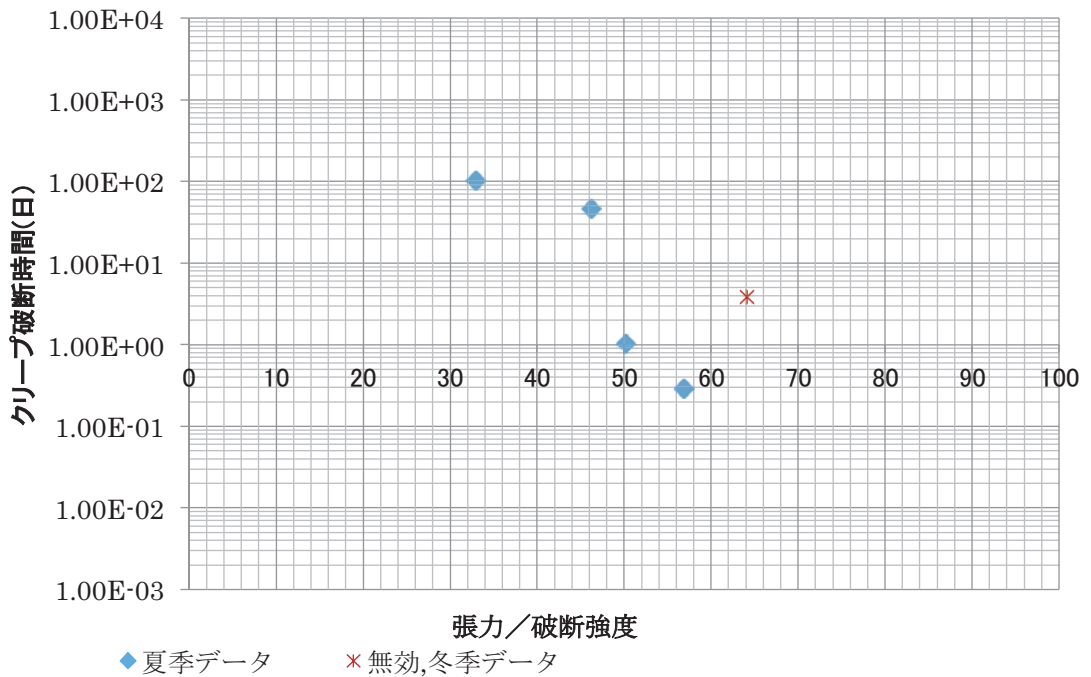


図 3.2.24 サンプル③

3) クリープ特性を考慮した係数 f_1 の推定

サンプル①、②、③毎に最少二乗法にて近似直線を求め最小値を通る近似直線に平行な直線をクリープ破断線とする。図 3.2.25 にサンプル毎のクリープ破断特性図を示す。なお、破断時間軸を対数にて縦軸(単位：日)、引張強さに対する割合(単位：%)を横軸とした。

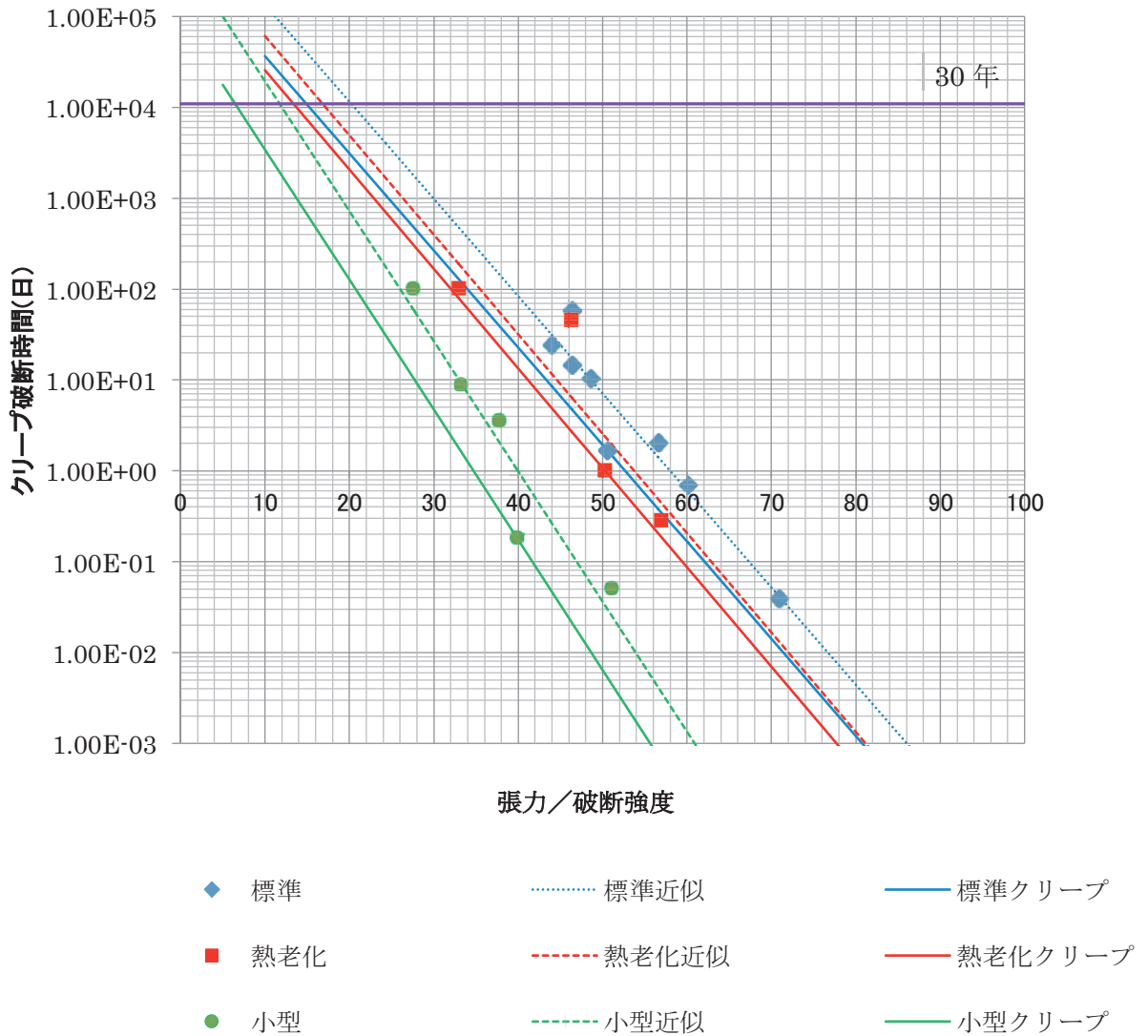


図 3.2.25 クリープ破断特性図

近似式に表すと下記となる。なお、係数 f_1 はクリープ破断線と設定する経過時間との交点 X 値とした。

サンプル①小型	$y=0.17674 \times 519267 \times e^{-0.32946X}$
サンプル②標準	$y=0.27084 \times 1582906 \times e^{-0.24624X}$
サンプル③熱老化	$y=0.42072 \times 756294 \times e^{-0.25193X}$

(6) 考察

本試験にて求めたクリープ破断特性は「ゴム引布製起伏堰技術基準(案)」¹⁾に準じてクリープ特性係数 f_1 とし、強度保持係数 f_2 を加味してパッチ補修の強度を検討する。同基準(案)¹⁾P38 図 1.11 の強度保持係数 f_2 を図 3.2.26 に示す。

ここで、 f_1 f_2 を考慮した使用可能張力を推定する。使用可能年数を 30 年(10957 日)、と仮定して、 $F_s = f_1 \cdot f_2$ を求める。

許容張力 $F_s = f_1 \cdot f_2 \cdot F$

F : 初期袋体強度 410kN/m

この時の堰高は次式で表す。

$$Hr = \sqrt{\frac{F_s}{9.81 \times K}}$$

$K=0.57$ (二列固定で貯水状態と仮定)

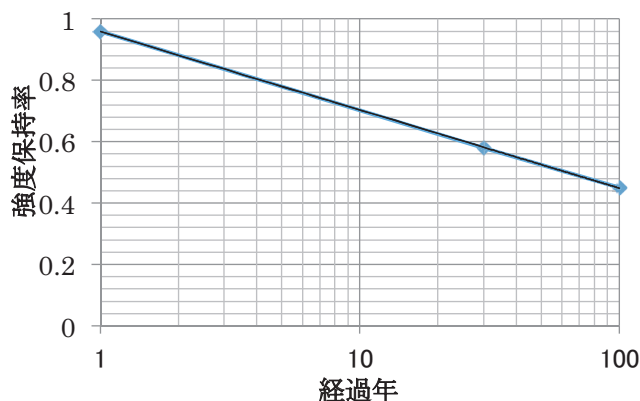


図 3.2.26 強度保持率

30 年使用可能な袋体作用張力と堰高を求め、表 3.2.13 に示す。常時直射日光にさらされる袋体は熱老化した袋体ゴムに相当すると見なせば、補修強度のクリープ特性が悪化しているサンプル③の特性を重視することになる。

表 3.2.13 補修強度と堰高

試験体	f_1	f_2	張力 F_s (N/mm)	堰高 Hr (m)
サンプル①パッチ寸法 400×400	0.064	0.58	15.2	1.6
サンプル②パッチ寸法 580×580	0.149	0.58	35.4	2.4
サンプル③パッチ寸法 580×580 老化	0.134	0.58	31.9	2.3

(7) まとめ

2 プライの袋体をパッチ当て修理する場合は堰高 2.3m 以内が望ましい。この堰高は 2 プライの使用領域にほぼ等しく、このパッチ当て補修は妥当と考える。

堰高 1.5m 以下の場合はパッチ寸法を 400×400mm と小さくすることができる。

3. 2. 6 塗料型補修材の性能評価

(1) 塗料型補修材の概要

ゴム袋体保護用塗料を検討するうえで、以下の3種類の塗料について各性状試験を実施した。

① ゴム系塗料 A

用 途；空気式防舷材の化粧用として塗布されている塗料。

塗料色；グレー、ホワイト

② ゴム系塗料 B

用 途；マンションやビルなど建築物を長期に亘って漏水から守るために施工されている防水シート（ゴム製）を、紫外線やオゾン等からの劣化防止用として塗布されている塗料。

塗料色；シルバー、グレー、シルバークレー、グリーン、レッド

③ アクリルウレタン系塗料

用 途；装飾用

塗料色；グレー、ホワイト

※アンダーラインは本試験で使用した塗料色

(2) 表面温度および暴露による変色検証

1) 母材色による表面温度差について

ゴム堰用ゴムサンプル（灰色と黒色）について屋外暴露（日射環境）によるゴム表面の温度変化計測を実施した。計測結果は全ての計測時間において黒色の温度が高く、最大約8℃高い値であった。



写真 3.2.21 屋外暴露試験状況

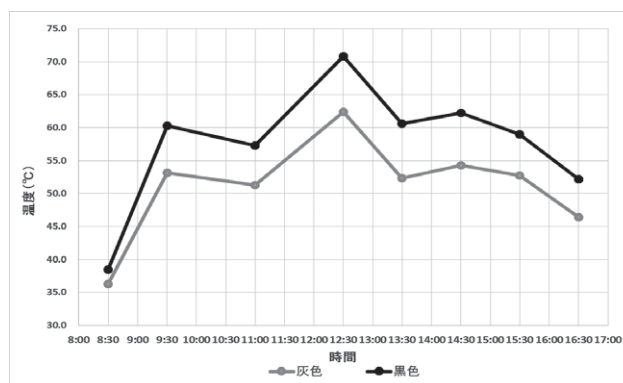


図 3.2.26 計測結果（屋外暴露試験）

2) 暴露試験による変色

塗料を塗布した供試体について暴露試験を実施した。その結果、ゴム系塗料（A,B）において、母材が EPDM100%では変色がなかった反面、母材が EPDM+NR では変色した。この原因は、EPDM+NR に配合されている老化防止剤に塗料が反応したためである。なお、アクリルウレタン系塗料のゴムは変色しなかった。



ゴム系塗料 A
(左：オリジナル 右：暴露サンプル)



ゴム系塗料 B
写真 3.2.22 暴露試験



アクリルウレタン系塗料
※実機にて暴露試験中

(3) プーリ屈曲性能試験

1) 試験概要

塗料を塗布した供試体（幅 200mm）をエンドレスに接続し、φ236mm および φ216mm のプーリ径の試験機に取付け、10,000 回のプーリ屈曲試験を実施した。

2) 試験条件

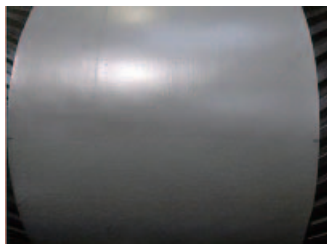
- ・ 供 試 体 幅 : 200mm
- ・ プ ー リ 径 : ヘッドプーリ φ236mm
テールプーリ φ216mm
- ・ 試験片走行速度 : 66.9m/min
- ・ プーリ屈曲回数 : 10,000 回



写真 3.2.23 プーリ屈曲試験機

3) 試験結果

試験の結果、3 種類の塗料全てにおいて塗膜のはく離や浮き、割れは見られなかった。



ゴム系塗料 A



ゴム系塗料 B
写真 3.2.24 試験前



アクリルウレタン系塗料



ゴム系塗料 A



ゴム系塗料 B
写真 3.2.25 試験後 (10,000 回)



アクリルウレタン系塗料

(4) スコット式屈曲試験

1) 試験概要

プーリ屈曲試験の供試体から幅 25mm の供試体を切り出し、φ31.7mm のプーリ径の試験機に取付け、10,000 回のスコット式屈曲試験を実施した。

2) 試験条件

- ・ 供 試 体 幅 : 25mm
- ・ プ ー リ 径 : φ31.7mm
- ・ プーリ巻付角度 : 165°
- ・ 荷 重 : 445N
- ・ プーリ屈曲回数 : 10,000 回



写真 3.2.26 スコット式屈曲試験機

3) 試験結果

試験の結果、ゴム系塗料 (A,B) では屈曲回数 100 回で複数の割れが発生した一方、アクリルウレタン系塗料は、屈曲回数 2,000 回で 1ヶ所の割れが発生したのみであった。



ゴム系塗料 A

ゴム系塗料 B

アクリルウレタン系塗料

写真 3.2.27 試験前



ゴム系塗料 A

ゴム系塗料 B

アクリルウレタン系塗料

写真 3.2.28 試験後 (10,000 回)

(5) 摩耗試験 (テーバー摩耗試験)

1) 試験概要

塗料厚が 3mm 以上の供試体を作成し、耐摩耗試験を実施した。試験の結果は以下のとおりである。

2) 試験条件

- ・ ゴム袋体 外層ゴム 耐摩耗性に同じ
- ・ JIS K 6264-2 11 テーバー摩耗試験
- ・ 試験条件：研磨といし H18
- ・ 荷 重：9.8N



写真 3.2.29 テーバー摩耗試験機

3) 試験結果

① ゴム系塗料 A

結果；摩耗量 N3 の平均 0.377mL (N1 ; 0.445mL、 N2 ; 0.371mL、 N3 ; 0.315mL)

※基準値；0.5mL 以下

② ゴム系塗料 B

結果；供試体に粘性があり試験不可

③ アクリルウレタン系塗料

結果；ゴム系塗料 B に比べ粘性が少ないものの試験不可



写真 3.2.30 試験前



写真 3.2.31 試験後

※左からゴム系塗料 A、ゴム系塗料 B、
アクリルウレタン系塗料

※ゴム系塗料 B および、アクリルウレタン系
塗料は、粘性があり試験不可

(6) まとめ

ゴム堰に使用されているゴム材料は、日射熱や紫外線などの影響を受けて老化が進行し、ひび割れなどの老化症状が発現すると云われている。

したがって、ゴム表面を塗料により被覆することでオゾンによる酸化老化を抑制し、更に白系の塗装色とすることでゴムの表面温度を下げるのが可能なため、熱による化学変化で進行するゴムの老化抑制が期待できるものとする。

アクリルウレタン系塗料は、暴露試験により変色しないことや屈曲性能試験で母材ゴムとの付着性に優れた塗料であることが確認できたため、潮止堰などの非越流堰や、法面（屈曲部）等の非接水部の老化抑制に適するものとする。

ただし、耐摩耗性についてはアクリルウレタン系塗料よりゴム系塗料 B の方が優れているため、転石等による摩耗の影響を受けやすいゴム堰倒伏時の下流端（2 つ折れ部）等の保護を目的とした場合については、ゴム系塗料 A が適するものとする。

以上により、ゴム袋体保護塗料は使用目的、塗布する場所等によってアクリルウレタン系塗料とゴム系塗料を使い分けることが望ましいものとする。

3.2.7 塗料型補修材のフィールド評価

ゴムの劣化要因であるオゾンや日射熱の影響を抑制するため、ゴム袋体表面に白色系塗料を塗布する方法は、1965年頃には採用されていたが、塗装膜厚は50 μ m程度と薄く、ゴム袋体同士の擦れや流下土砂により磨滅するという課題があった。そこで、ゴムの老化対策としての役割に加えてゴム袋体表面の摩耗を抑制する役割を併せもつ塗料の適用について検討を行ったので、以下にその成果を報告する。

(1) 塗料の選定条件

塗料は、新たに配合したものではなく、市販されている塗料のなかから、次の特性を考慮して選定した。

- ①乾燥後の硬さ・・・ゴム袋体の変形に追随する柔軟性を有すること。
- ②耐水・耐海水性・・・河川水や海水により劣化しないこと。(10年間)
- ③耐候性・・・オゾンや日射熱などにて劣化しないこと。(10年間)
- ④色調・防汚性・・・色調は白色系とし、防汚性能に優れていること。
- ⑤耐摩耗性・・・摩耗性能に優れていること。摩耗量<0.5mL (JIS K 6264)

(2) アクリルウレタン系塗料

使用したアクリルウレタン系塗料は、2液型樹脂塗料で極軟質の塗膜を形成し、耐水性、耐薬品性、耐汚染性に優れている。市販品であり、入手が容易な品を用いた。

(3) 塗料塗布面の下地処理

塗料を塗布するゴム袋体の下地処理について、次の3条件にてゴム袋体と塗料の接着力を比較評価した。

- ①無処理 (ウエスで表面清掃のみ)
- ②研磨処理 (#40のサンドペーパーにてゴム袋体表面を研磨; 補修布貼合わせと同条件)
- ③ショットブラスト((1)結晶質石灰岩(粒径1.5mm)/ (2)珪砂6号(粒径0.3mm)を使用)

下地処理別の塗料の接着力は、表3.2.14のとおり。なお、接着力は相対評価とし、無処理を【1】として評価した。この結果、塗料塗布面の下地は、研磨処理が有効であることが確認された。また、塗料接着力評価試験状況を写真3.2.32～写真3.2.33に示す。

表 3.2.14 下地処理別の塗料の接着力 (相対評価)

	無処理	研磨	ショットブラスト
接着力(相対評価)	1	2	1.9

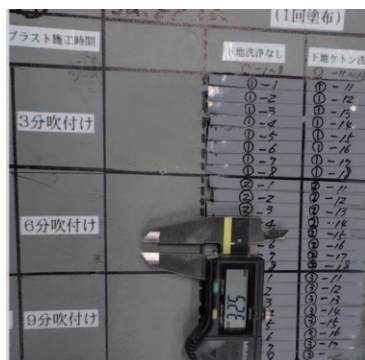


写真 3.2.32 塗料接着サンプル



写真 3.2.33 接着力試験状況

(4) 塗料の評価

1) 摩耗抑制評価

摩耗によるゴム表面の劣化抑制を目的としてフィールド評価を行った。写真 3.2.34 に示すとおり、ゴム袋体表面に塗布した塗料は 2 年経過しても磨滅することなく、摩耗抑制の効果を発揮していることを確認した。

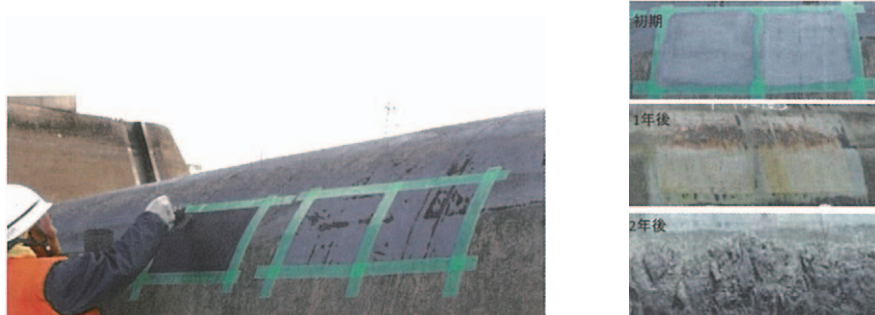


写真 3.2.34 摩耗抑制を目的とした塗料のフィールド評価

2) オゾン、日射熱等による劣化の抑制評価

建設後 40 年経過し、ゴム袋体表面の亀裂が進行しているゴム堰のゴム袋体表面に塗布し、塗料の剥がれや亀裂の発生有無を評価した。写真 3.2.35 にフィールド評価中の写真を示す。なお、塗料塗布後 2 ヶ年が経過し、塗料の剥がれや亀裂の発生がないことを確認した。

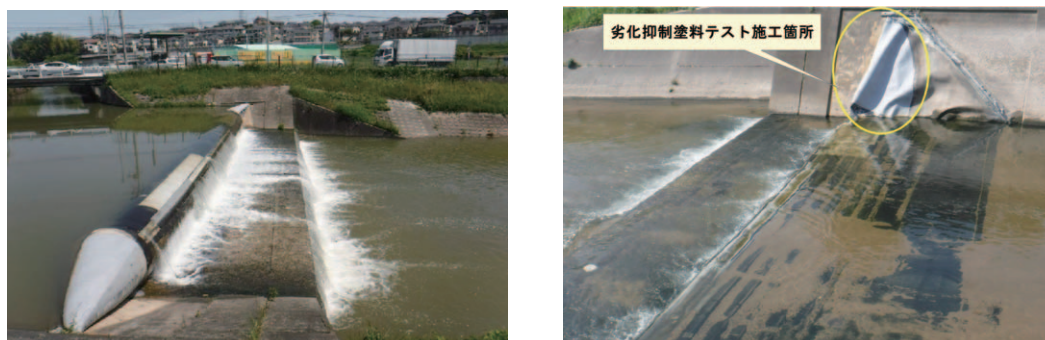


写真 3.2.35 ゴム袋体の老化抑制塗料のフィールド評価状況

(5) まとめ

ゴム袋体表面の摩耗抑制効果を検討するため、アクリルウレタン系塗料のフィールド評価を行った。塗料を塗布する際には、下地処理として研磨処理を行うことが有効だった。また、供用中のゴム袋体に塗料を塗布したところ、塗料の剥がれや亀裂の発生はなく、摩耗抑制効果も発揮していることを確認した。今後も引き続き経過観察を行い、長期耐候性を検証することが必要である。

3. 3 適切な診断方法および補修方法のまとめ

本章では非破壊によるゴム堰の破断状態の診断手法の検討結果をまとめた。目視による外観調査では調べることの難しい内部の剥離を赤外線サーモグラフィにより診断を試みた。ゴム堰内外の温度差を検知することで、剥離部を把握することが可能であった。ただし、安定した状態の測定をするための試験条件の確立が必要など、課題が残されている。また、内面剥離に対して、非破壊打音検査による診断も行った。室内の測定では、打音測定から得られる集音マイク出力電圧によりはく離部と非はく離部を見分けることが可能であった。なお、実際のゴム堰で検証する場合には、AI手法を取り入れることが有効であった。そのため、打音検査の精度向上のために、さらなるデータ集積が必要である。

破断したゴム堰を補修するにあたり、適切な補修方法や補修材料を検証した。その結果、前処理を適切に行うことを前提で、長期的な接着強度を保持することができることが明らかとなった。ただし、事前に劣化による接着強度の低下を適切に把握した上で補修方法を選定する必要がある。補修箇所の耐圧試験から、耐圧性能を満足させるためには、堰高に対して適切なパッチ寸法を決定することが望ましいことがわかった。また、本章では塗料型補修材として、アクリルウレタン系の補修材に着目し、性状試験や実堰への施工によるフィールド評価を行った。2年以上経過した現在でも、摩耗した様子は見られなかった。

現場で行える非破壊の診断技術や、適切な補修方法、補修材料は、ゴム堰の維持管理において欠かせないものである。本章で示した技術や材料が活用されること、また、活用事例が増えて、現場でのフィードバックを経て改良が進むことで、診断・補修技術が発展することが期待される。

4章 応力分布の解析方法の開発

4. 1 袋体全体モデルの応力解析

4. 1. 1 概要

ゴム堰に用いられるゴム袋体は設置時に密閉され、内圧によってチューブ状に膨張変形することで機能するが、設置時に河川断面形状に合わせて金具等で設置されるため、その変形は一様でない。このため、ゴム袋体には応力集中の生じる部分があり、疲労破壊・劣化破壊を引き起こす際にはその応力集中部分が起点となる可能性が高い。

ゴム袋体を膨張変形させた際の最大応力集中発生部分は、河床部コーナー付近の立上り部分とされているが、長期的に使用した場合、様々な要因で異なる応力集中部分から破壊を引き起こす可能性がある。そこで、有限要素法によってゴム袋体に生じる各応力集中部分の確認を行い、破壊の起点となり得る構造的弱点を把握する。

4. 1. 2 袋体全体モデルによる応力解析

ゴム袋体の応力分布を確認するために、袋体全体モデルを構築した。表 4.1.1 に袋体全体モデル解析手法を示す。袋体は1枚のシート状であることから、要素タイプはソリッド (3次元) 要素ではなくシェル (2次元) 要素の複合体を用いた。シェル要素の超弾性体に厚みを定義してゴムをモデル化し、内部に単軸補強材を縦横に細かく配列することで補強布をモデル化した。

また、解析モデルの妥当性を確認するために、ゴム堰実験機を模して解析を行った。表 4.1.2 にゴム堰実験機仕様を示す。

表 4.1.1 袋体全体モデル解析手法

使用ソフト	Abaqus	
要素タイプ	シェル (2次元) 要素-複合材	
材料モデル	ゴム	超弾性体
	補強布	単軸補強材

表 4.1.2 ゴム堰実験機仕様

サイズ	堰高 0.55m×河床幅 3.0m×袋体厚さ 10.5mm×2ply
金具固定方法	1列
法勾配	1:1



写真 4.1.1 ゴム堰実験機写真

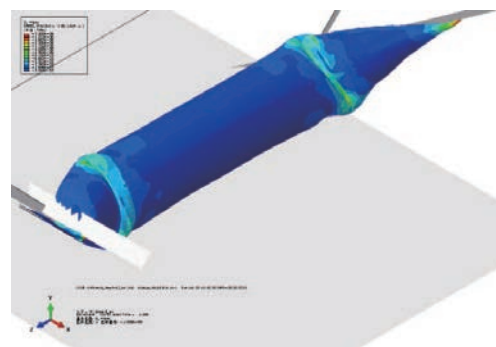


図 4.1.1 ゴム堰実験機の解析結果

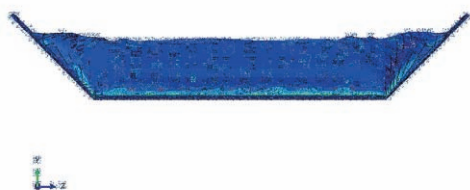


図 4.1.2 上流側から見た
ゴム堰実験機の解析結果



図 4.1.3 下流側から見た
ゴム堰実験機の解析結果

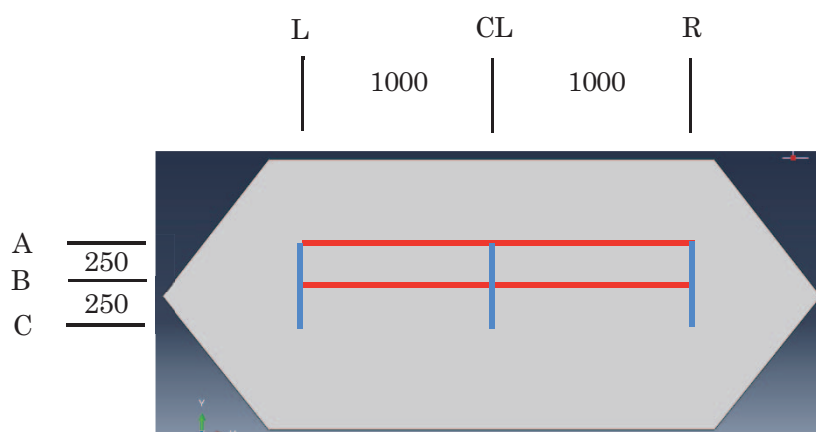


図 4.1.4 標線の展開時位置関係

写真 4.1.1 にゴム堰実験機写真を、図 4.1.1、4.1.2、4.1.3 にゴム堰実験機の解析結果を示す。また、図 4.1.4 に標線の展開時位置関係を示す。ゴム堰実験機の倒伏時に標線を入れ、起立時（水位＝満水位）のひずみ量を測定し、解析結果と比較することで妥当性の確認を行った。

表 4.1.3 堰高方向ひずみ量の比較

標線位置		実験機測定値	FEM 解析結果
		起立時（水位＝満水位） ひずみ (%)	起立時（水位＝満水位） ひずみ (%)
L	A-B 間	3.6	3.6
	B-C 間	4.4	3.5
CL	A-B 間	3.6	2.8
	B-C 間	4.8	3.4
R	A-B 間	3.6	2.3
	B-C 間	5.6	4.9

表 4.1.4 河床幅方向ひずみ量の比較

標線位置		実験機測定値	FEM 解析結果
		起立時（水位＝満水位） ひずみ（%）	起立時（水位＝満水位） ひずみ（%）
A	CL-L 間	0.30	-0.01
	CL-R 間	0.40	0.02
B	CL-L 間	0.20	0.19
	CL-R 間	0.10	0.15

表 4.1.3 に堰高方向ひずみ量の比較を、表 4.1.4 に河床幅方向ひずみ量の比較を示す。実験機による測定値と比較し、本 FEM モデルはやや剛な特性を示したが、結果は概ね一致した。また、ゴム堰構造においては、堰高方向ひずみが支配的であることが確認できる。

表 4.1.5 袋体全体モデルによる応力集中解析結果

モデル	発生箇所	発生範囲	応力集中係数
全体モデル	右岸上流側 河床部取付金具付近	河床部コーナーから 0~40mm 間	1.81

表 4.1.5 に袋体全体モデルによる応力集中解析結果を示す。応力集中係数とは、ゴム堰起立時に中央付近の胴長部に生じる応力を 1 とした時の係数である。全体モデルの最大応力集中発生箇所は、河床部取付金具付近で右岸側河床部コーナーから 0~40mm の位置、応力集中係数は 1.81 であり、現行の応力集中係数の設計値である 1.75 とほぼ一致した。

また、その他に法尻の折れジワ頂点付近においても応力集中を確認した。しかし、今回構築した袋体全体モデルはシェル（2 次元）要素を用いているため、折れジワ頂点のような特に大きな変形を生じる部分の解析精度は低く、実現象と異なる応力集中が発生している可能性がある。よって、法尻付近の折れジワ頂点のみを解析精度の高いソリッド（3 次元）要素にてモデル化し、応力解析を実施した。



写真 4.1.2 法尻の折れジワ頂点

4. 1. 3 袋体局所モデルによる応力解析

折れジワ頂点は、空気圧・静水圧・側壁側ゴム袋体の押上げ等の様々な外力により、角度の緩やかな円錐のような変形を生じる。実物の形状から、変形を下記のように定めて変形の模擬再現を行い、その際の応力集中を確認した（写真 4.1.3）。

- ①四つ折れ状の変形、且つ中央部付近に凸部が生じていること
- ②頂角が約 135°であること



写真 4.1.3 法尻の折れジワ頂角=135°（ゴムによる模擬再現）

表 4.1.6 に袋体局所モデル解析手法を示す。全体モデルと異なり、計算コストは高いが高精度なソリッド（3次元）要素を使用している。また、補強布を単軸補強材ではなく異方性弾性体でモデル化し、より実物に近いモデルの構築を行った。

表 4.1.6 袋体局所モデル解析手法

使用ソフト	Abaqus	
要素タイプ	ソリッド（3次元）要素	
材料モデル	ゴム	超弾性
	補強布	異方性弾性

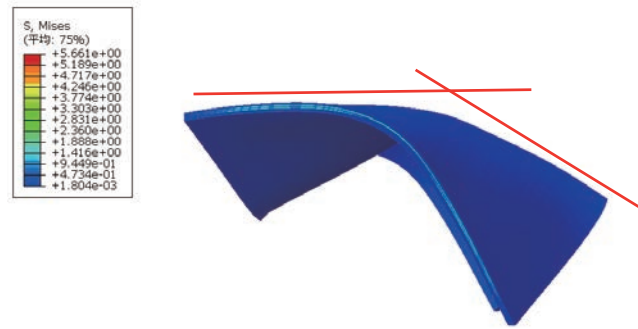


図 4.1.5 袋体局所モデルの解析結果（折れジワ頂角）

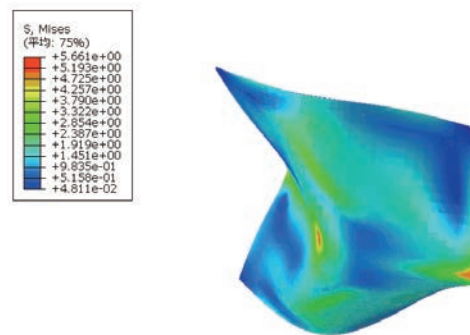


図 4.1.6 袋体局所モデルの解析結果（補強布表示）

表 4.1.7 応力集中係数の比較

モデル	発生箇所	発生範囲	応力集中係数
全体モデル	右岸上流側 河床部取付金具付近	河床部コーナーから 0~40mm 間	1.81
局所モデル	法尻の折れジワ頂点	折れジワ頂点中心部	1.26

図 4.1.5 および図 4.1.6 に袋体局所モデルの解析結果を示す。また、表 4.1.7 に応力集中係数の比較を示す。局所モデルでは、折れジワ頂点中心部で 1.26 の応力集中係数を示した。全体モデルで得た河床部コーナー付近の応力集中係数 1.81 より低い値を示したことから、折れジワ頂点に生じる応力は空気圧・静水圧によるものが支配的で、異常な応力集中の発生は無いと判断した。

ただし、応力集中の発生は認められるため、劣化の症状によっては破壊の起点となる可能性を示唆した。

4. 1. 4 袋体全体モデルの応力解析のまとめ

- ① 膨張変形したゴム堰の内部応力を把握するため、有限要素法モデルを構築し、実験値と比較することでその妥当性を確認した。
- ② 解析を行った結果、河床部コーナー付近に応力集中係数 1.81 の応力集中が確認された。これは現行の設計値と概ね一致している。また、法尻付近の折れジワ頂点にも応力集中係数 1.26 の応力集中が確認された。
- ③ 本解析では異常な応力集中は確認されなかったが、折れジワ頂点は通常外気に接している場合が多く、クリープ、太陽光による熱老化などが生じると破壊の起点の要因となることが示唆された。

4. 2 有限要素法によるゴム引布の内部応力解析

4. 2. 1 概要

ゴム堰の損傷要因のうち、構造材であるゴム引布に関する破壊モードにはいくつかある。そのうち、強度部材の繊維に継ぎ目を有するゴム引布接合部の内部応力に着目し、実機のゴム引布接合部に生じた前例がある繊維間のゴム部がせん断的に破壊するはく離型破壊の発生原因について検討した。

まず、FEM 解析のための材料モデル化を行い、次いで接合部の内部応力を解析した。最後に、実機での運転条件を考慮した考察を行った。

4. 2. 2 FEMのための材料モデル化と検証解析

ゴム引布の内部応力を確認するため、有限要素法の材料モデルの構築を行った。後述する実験結果との比較解析のため、形状モデルは図 4.2.1 に示すダンベル形状のクリーブ破断試験用の試験片形状を用いた。今回、構成式に複雑なモデルは用いず、複合材の応力場等の概要を把握するための初期解析として線形弾性解析を行った。図 4.2.2 に接合部を有すゴム引布の FEM モデル形状を示す。応力の分析は試験片中心付近の評価区間内で行った。繊維 (PA : ポリアミド、ナイロン) とゴム (EPDM : エチレンプロピレンジエンゴム) の物性は上述の実験値と文献値⁹⁾から、温度 20°C で、PA : E=570 MPa、 $\nu=0.40$ 、 $T_s=169$ MPa / EPDM : E=11.0 MPa、 $\nu=0.49$ 、 $T_s=11.4$ MPa、とした。荷重は試験片の破断強度の 50% 応力となるよう長手方向に 5 kN 相当の力を与え、拘束条件は単軸のクリーブ破断試験と同様としている。

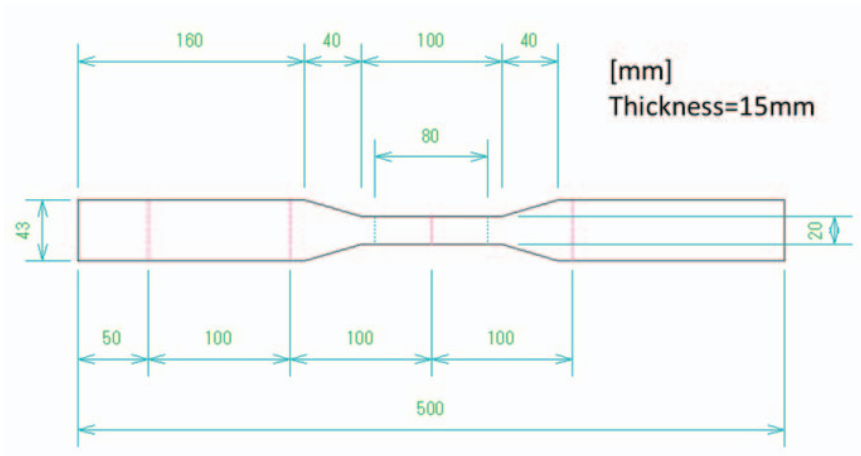


図 4.2.1 ダンベル形状試験片寸法

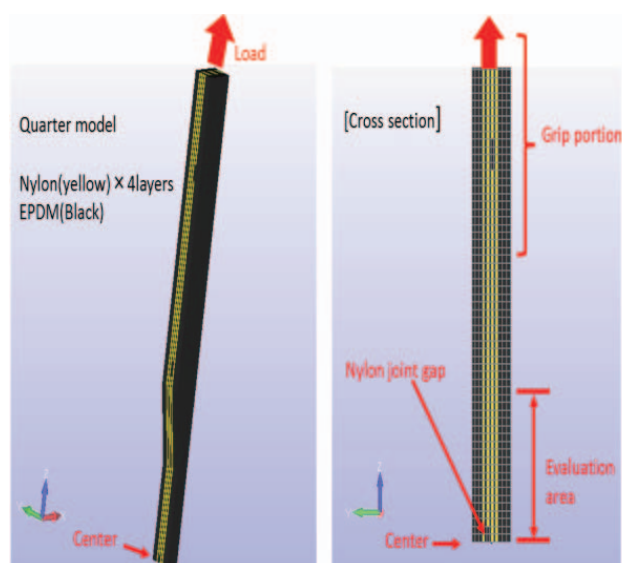


図 4.2.2 接合部を有するゴム引布 FEM モデル

写真 4.2.1 に比較用に実施した接合部を有すクリープ試験片を用いたゴム引布断面の変形確認実験の様子を示す。試験片には変位確認のため初期値 10mm 間隔で白線のマーキングを行った。荷重は解析と同様に 5 kN とした。右写真に示すように、接合部の繊維に継ぎ目があるゴム引布は、载荷後にゴムと繊維が一樣に伸びるのではなく各変位量に差があり、そのためゴムの一部に大きなせん断変形が生じていることがわかる。この部分には大きな応力集中が生じると予想される。図 4.2.3 に FEM 解析結果を示す。ここでは、実験と同様に、载荷後のゴムと繊維の異なる変位量のため繊維継ぎ目付近の繊維間ゴムに大きなせん断変形が生じた。

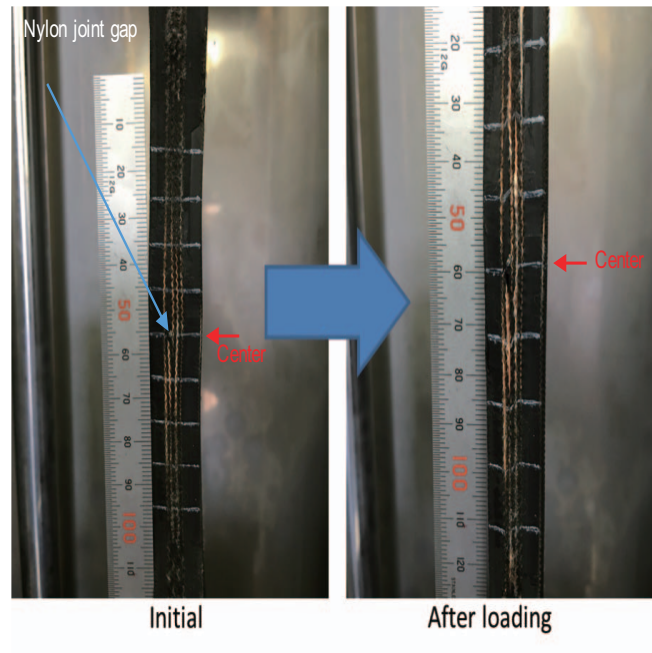


写真 4.2.1 FEM モデリングのための
引張/クリープ試験

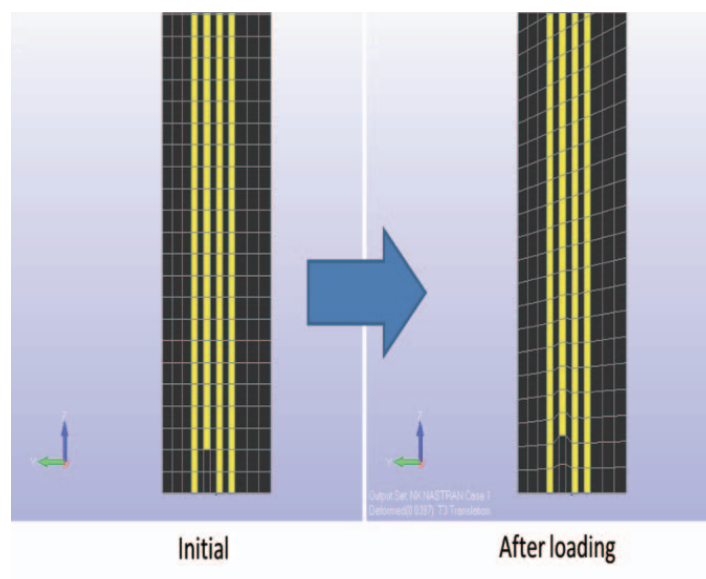


図 4.2.3 FEM モデルのコリレーション結果

図 4.2.4 に実験と解析の部材変位量の比較を示す。実験と解析のそれぞれの変位量は中心から軸方向 6 mm の位置・ノードから算出し、方向は引張り荷重方向が正である。これより、FEM の変位量は実験値より小さいことがわかる。Y 軸位置 5~7 mm は左から二本目の継ぎ目がある繊維を示すが、波形のピーク部の高さからこの部位で、FEM はせん断変位量約 1 mm である。それに対し実験は 2 mm と解析の約 2 倍の変形が確認された。この比較検証より、今回検証を行った荷重条件下では、本 FEM モデルは実機よりやや剛な特性を示すことがわかった。図 4.2.4 には比較のため行った繊維継ぎ目のないゴム引布を用いた同様の荷重実験・解析の結果も示している。解析結果（黒実線）は、設計上の荷重軸が中心軸より紙面左方向に若干ずれているため、モーメントが発生し変位が右上がりとなっている。しかし、横軸 15 mm の端部では実験結果と解析結果の変位はほぼ一致し、これより同一荷重での試験片と FEM モデルの繊維の剛性は概ね同じと考える。そのため、図 4.2.4 の接合部での実験と解析との変位量の差異は、ゴムのモデル化の精度に拠るところが大きいと考える。しかし、ゴム引布の変形傾向は今回のモデルはよく表している。それらを踏まえたうえで、下記に示す複合材の内部応力解析を実施した。

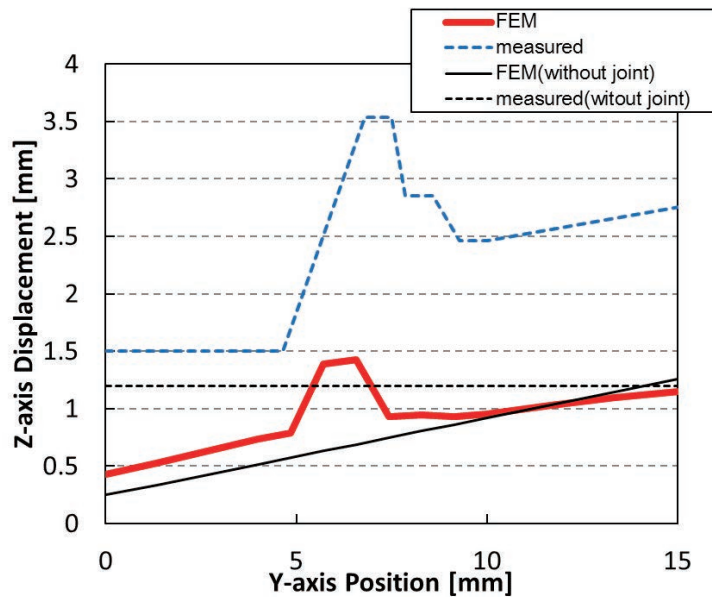


図 4.2.4 実験と FEM による内部変形量比較結果

4. 2. 3 FEM 解析結果と内部応力

これまでにモデル化した FEM プログラムを用いて、ゴム引布接合部に生じる応力集中の確認のための応力解析を行った。図 4.2.5～図 4.2.7 に解析結果を示す。解析条件は前述の検証解析と同様で、荷重は軸方向に 5 kN である。各図、左図がゴムの応力分布を右図が繊維の応力分布を明示している。

図 4.2.5 は接合部のない繊維の連続した部位である。これより、部材はほぼ一様に変形していることがわかる。図 4.2.6 は接合部の解析結果である。これより、継ぎ目付近のゴムに大きな応力が発生していることがわかる。繊維間の変形量の差よりゴムに大きなせん断が生じ、それが要因となり応力集中が生じている。この荷重条件下ではゴムに発生した応力はゴムの単軸引張破断強度の 11 MPa を超えていないが、荷重増加、クリープ、部材の強度低下などが生じると繊維間のゴムは弱点箇所となりせん断はく離型破壊が生じる要因となることが示唆された。図 4.2.7 は温度を 60°C としたときの解析結果である。60°C の材料特性は、文献値⁵⁾ から、PA : E=228 MPa、 $\nu=0.40$ 、 $T_s=68$ MPa / EPDM : E=4.3 MPa、 $\nu=0.40$ 、 $T_s=4.7$ MPa、である。この場合、ゴムと繊維とも応力の最大値は引張破断強度を超えている。これより、ゴム引布は高温での扱いに注意が必要と考えられる。なお、今回の荷重条件は実機での負荷より大きい。そのため、実際のゴム堰で生じうる 60°C の部材温度ですぐに構造物が破断するものではないが、クリープや劣化が生じた際の部材強度と安全性について以下に考察する。

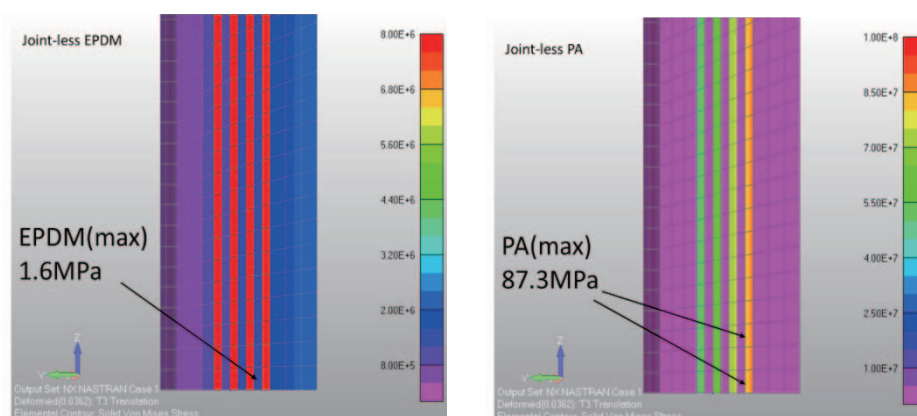


図 4.2.5 内部応力解析結果（室温、繊維連続部）

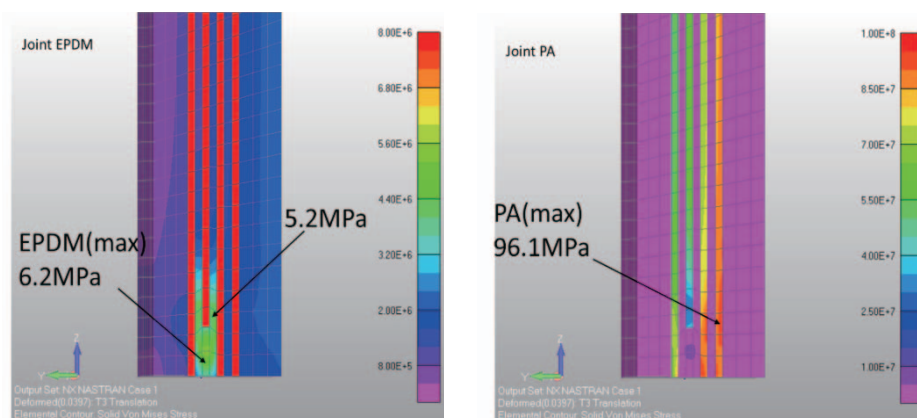


図 4.2.6 内部応力解析結果（室温、接合部）

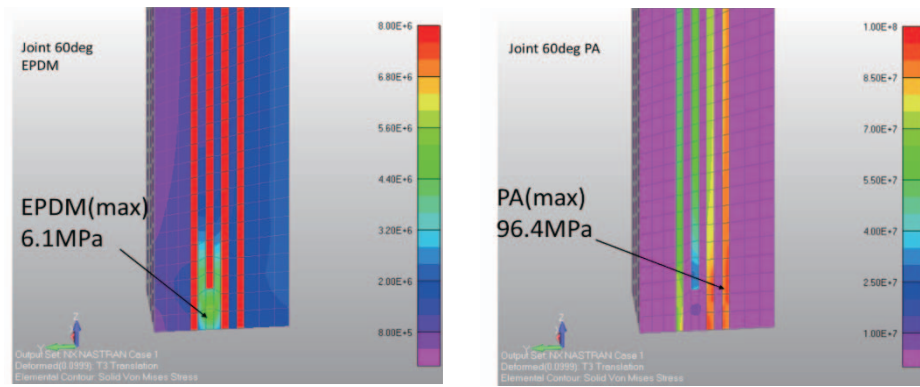


図 4.2.7 内部応力解析結果 (60°C、接合部)

4. 2. 4 内部応力の実機に及ぼす影響についての考察

図 4.2.5～図 4.2.7 の結果をもとに、それぞれの条件下で荷重を変えた場合の内部応力の最大値を図 4.2.8 にまとめる。上図は室温での内部応力分析結果で、上辺は PA および EPDM の引張破断強度を示している。接合部のない材料（破線）では荷重を上げた際に明確に繊維が先に破断することが予想される。また、対象とした試験片の引張試験結果は $T_s=500 \text{ N/mm}$ で、荷重換算で約 10 kN であり、この分析結果の繊維破断荷重とよく一致する。そのため、開発した解析モデルは繊維挙動についてよく表していると考えられる。接合部がある材料（実線）は、ゴムと繊維の直線の傾きがほぼ同じとなっている。これは接合部付近でゴムにせん断等応力集中が生じ、公応力に比べ内部応力がかなり高くなることを示唆している。そのため、負荷を大きくした際にゴムと繊維のどちらが先に破断するかの明確な違いがないことを示している。下図は、さらに高温にした際の材料挙動を示す。ゴム堰実機の実働荷重は単軸引張強度の 10%程度以下であることが現場調査により予測されている。それは今回の場合荷重 1 kN 以下に相当する。高温の温度 60°C の場合、破断強度が下がる。さらにクリープと経年劣化などを仮定し、強度 30%減・クリープ変形 50%を加えた条件（degrade と表記）の場合、破壊荷重が実働荷重域に近づく傾向が示唆された。

ゴム堰の破壊にはクリープの寄与も大きく、その内部応力の把握が必要で、そのためには、ひずみエネルギー密度関数を用いた構成式での超弾性モデルやクリープを加えた FEM モデルの構築が有効と考える。

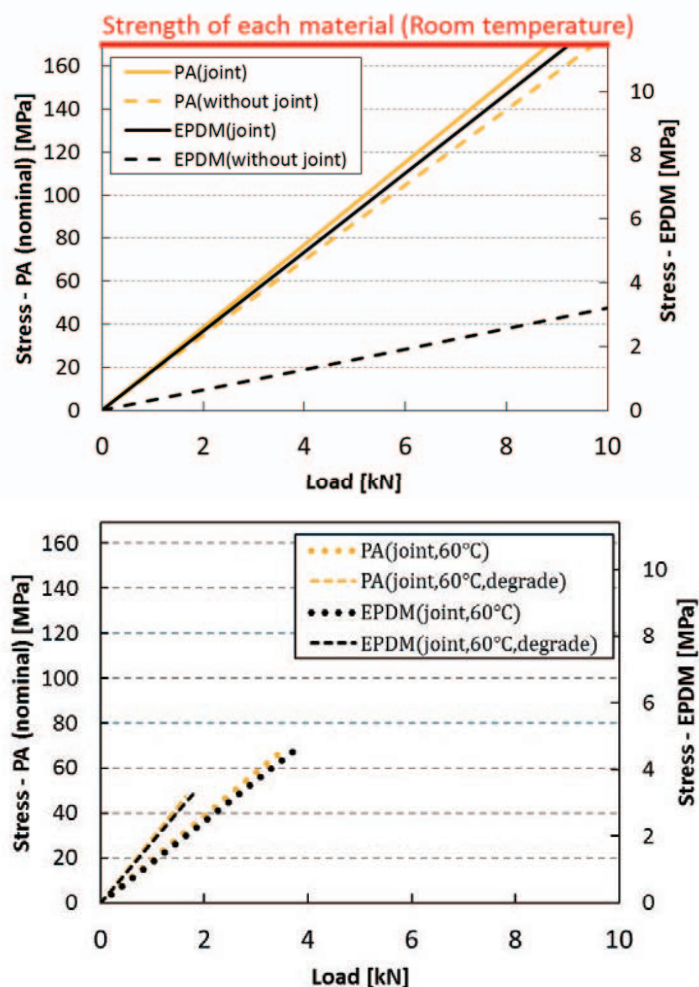


図 4.2.8 中間部と接合部の最大応力の比較および高温時・劣化時の応力予測

4. 2. 5 有限要素法による内部応力解析のまとめ

ゴム堰用ゴム引布の内部応力解析モデルを構築し解析を行い、ゴム引布の破壊モードと健全性を検討した結果、下記の知見が得られた。

- ① 複合材であるゴム引布の内部応力を把握するため、線形解析モデルによる FEM プログラムを構築した。実験との比較検証解析の結果、開発した FEM モデルは剛性が高く出るものの、部材の応力場・変形の傾向を示すことができた。
- ② 上記 FEM モデルを用い解析を行った結果、接合部のゴムに大きな応力集中が確認された。この応力集中の発生は、ゴム引布のせん断はく離型破壊の要因となると考える。
- ③ 温度が上昇しクリープや経年劣化が加わった際に、繊維だけでなくゴムの破壊の可能性も高くなることが示唆された。詳細分析については、FEM モデリングの深度化と材料特性把握のための材料実験が必要である。

5章 まとめ

第1章では、ゴム堰の概要として、ゴム堰設置数の推移やゴム袋体の変遷についてまとめ、本研究の位置付けを記した。

第2章では、国内におけるゴム堰の経年劣化の実例を挙げ、様々な要因で劣化および損傷していることを明示した。また、ゴム袋体やゴム引布の物理的かつ化学的性状試験を各種実施した。その結果、ゴム引布の引張強度については、乾燥時と比べて湿潤時の方が強度低下しており、また弾性域での破断が見られた。また、クリープ特性については、水環境中でのクリープ強度低下が示唆されており、乾燥/湿潤条件や温度条件がクリープ特性に影響を及ぼすことが示唆された。ゴムの硬化を誘発する日射などの影響について、オゾン劣化試験からオゾン劣化に伴うクラック発生数や深さに違いが生じることが明らかとなった。また、平面的にクラックが多いほうが浅くなる傾向が確認された。ただし、赤外分光分析の結果から、分子レベルでの明確な劣化傾向は見られなかった。これらの性状試験から、化学構造上の劣化が生じなくても、物理的な劣化が生じる可能性が高く、乾燥/湿潤条件や試験温度がゴム袋体の強度特性に及ぼす影響を把握することが重要であることが示された。

第3章では、損傷に適した補修方法の開発のため、損傷部の診断方法、特に、目視での診断が難しい内部剥離の検知について検証した。損傷部の非破壊検査として、打音測定ではなく離部と非はく離部を見分けることが可能であった。ただし、実際のゴム堰で検証する場合には、AI手法を取り入れることが有効であった。次に、現場の補修方法としてカバーゴムなどの接着に着目し、その接着力の評価のための各種試験方法や塗料型補修材についてまとめた。前処理を適切に行うことで、長期的な接着強度を保持することができることが明らかとなった。ただし、事前に劣化による接着強度の低下を適切に把握した上で、補修方法を選定する必要がある。塗料型補修材として、アクリルウレタン系の補修材の性状試験や実堰への施工によるフィールド評価を行ったところ、2年以上経過した現在でも、耐摩耗性を有することが明らかとなった。

第4章では、解析的手法の代表格である有限要素法（FEM）により、マクロ及びミクロの観点から袋体の内部応力分布がゴム堰全体に及ぼす影響について考察した。ゴム袋体全体モデルの応力解析により、河床部コーナー付近での応力集中が確認された。また、法尻付近の折れジワ頂点にも応力集中が確認された。折れジワ頂点は通常外気に接している場合が多く、クリープ、太陽光による熱老化などが生じると破壊の起点の要因となることが示唆された。一方、ゴム引布の内部応力解析からは、接合部においてゴムに大きな応力集中が発生することが確認された。この応力集中の発生は、ゴム引布のせん断はく離型破壊の要因となると考えられる。また、温度が上昇しクリープや経年劣化が加わった際に、繊維だけでなくゴムの破壊の可能性も高くなることが示唆された。

ゴム引布製起伏堰は、これまでの堰では主要部材として用いられなかった「ゴム」を主体とした設備であり、劣化損傷や耐久性に関する知見が乏しく、補修方法や寿命判断についてこれまで多くの管理者が苦慮してきた。

本研究により、特にゴム堰の補修方法や耐久性について大きな知見を得られた。診断方法など現場実装にはまだ至らない研究もあるが、ゴム引布製起伏堰の維持管理の向上に向けて、本研究成果が大きく寄与すると確信する。

参考文献

- 1) 財団法人国土開発技術研究センター：ゴム引布製起伏堰技術基準(案)、p.36～39、2000
- 2) 財団法人国土開発技術研究センター：ゴム引布製起伏堰及び鋼製起伏堰（ゴム袋体支持式）のゴム袋体に関する技術資料、2016
- 3) 日本河川協会：ゴム引布製起伏堰の改良に関する研究報告書、1978.3
- 4) 繊維学会：繊維便覧第3版、p.921、2004
- 5) 大武義人、仲山和海ら：高分子材料の劣化と寿命予測、p.61-69、S&T 出版、2009
- 6) 山田隆男、奥本忠興、河村知男、大谷肇、拓殖新：FT-IR および熱分解 GC/MS による硫黄加硫したエチレン-プロピレン-ジエンゴム(EPDM)の熱劣化挙動の解析、マテリアルライフ学会誌、Vol.13、No.4、p.190-195、2001
- 7) 国土交通省：ゴム袋体をゲート又は起伏装置に用いる堰のゴム袋体に関する基準(案)、2015
- 8) 秋葉光雄、林茂吉：ゴム・エラストマーの劣化と寿命予測、(株)ラバーダイジェスト社、2000
- 9) 高野良孝：加硫ゴムのオゾン劣化概論、日本ゴム協会誌、第40巻 第4号、p.248-260、1967
- 10) 高野良孝：ブレンドゴムの物性、日本ゴム協会誌、第44巻 第10号、p.822-833、1971
- 11) ダム堰施設技術協会：ゴム引布製起伏堰点検・整備要領(案)、2006
<http://dam777.ec-net.jp/book/syoseki/gomu5.htm> (第5章 ゴム袋体補修要領)
- 12) 竹本喜一、三刀基郷：接着の科学、(株)講談社、1997

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No. 511 March 2020

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754