

ゴム堰・SR堰の維持管理および長期性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：技術推進本部（先端技術）
先端材料資源研究センター
(iMaRRC)

研究担当者：藤野健一、梶田洋規、中島淳一
上野仁士、伊藤 圭
新田弘之、百武 壮、中村 崇

【要旨】

ゴム引布を利用したゴム引布製起伏堰（ゴム堰）とゴム袋体支持式鋼製起伏堰（SR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、いくつかの整備局では大型の堰にも利用されている。最近では設置後、20年以上経っ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、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、損傷があっても機能回復できないことが堰の機能を低下させ、事故のリスクも改善することができなくなっている。

本研究では、各施設の実態調査を踏まえ、ゴム引布の長期性能評価手法、効果的な損傷の点検・補修・運用方法について提案を行うものである。

キーワード：ゴム堰、SR堰、ゴム袋体、維持管理、状態監視、クリープ特性

1. はじめに

ゴム引布を利用したゴム堰とSR堰は、いずれもゴム袋体を有する堰であり、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などの利水用途として広く普及し、設計要領の整備などによって治水にまでその普及が進んでいる。特にゴム堰(写真-1.1)は、国内で約3,700箇所と広く普及している。一方、近年は設置後数十年経過しているものが増えており老朽化の進行が顕著なものも増えている。

ゴム引布は、ゴムと強度部材である繊維の重層複合材料であり、大型のゴム袋体を製造する場合、複数のゴム引布を接合して製造することが多い。各製造者により、袋体の製造方法や材料物性は一様ではない。このため、ゴム袋体の劣化や損傷は、製造者や製造方法毎に多少の違いがあり、また多様な使用環境にその特徴も異なり、それぞれに合わせた対応が必要となっている。しかし、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。

本研究では、各施設の実態調査を踏まえ、ゴム引

布の長期性能評価手法、効果的な損傷の点検・補修・運用方法について検討を行ったので報告する。



写真-1.1 ゴム堰全景写真

2. 実態調査

2.1 調査方法

ゴム堰の実態を把握するため、①施設設置状況、②設置規模、③用途、④構造と機能、⑤ゴム袋体の構成、⑥損傷事例に関する調査を行った。

調査方法としては関係業界団体へのヒアリング、国土交通省へのアンケート調査の他、不具合報告のあったゴム堰の一部に対しては、現地調査も行った。

2. 2 施設設置状況

ゴム堰は、平成 25 年 7 月時点、国内で約 3,700 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-2.1)。



図-2.1 ゴム堰設置年の推移

2. 3 設備規模

ゴム堰の設備規模を把握するため、国土交通省が管理しているゴム堰について、平成 26 年度時点の堰径間長及び堰高の門数分布を図-2.2 と図-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。

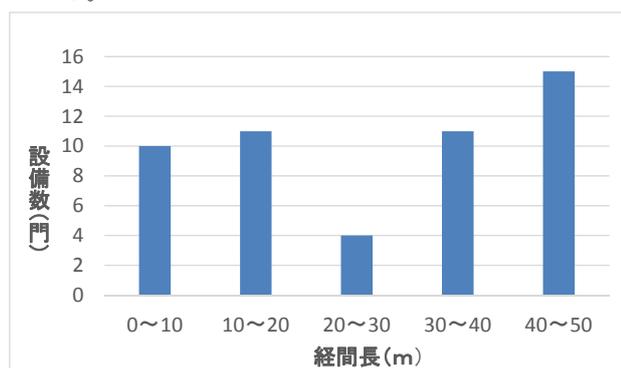


図-2.2 堰径間長の分布

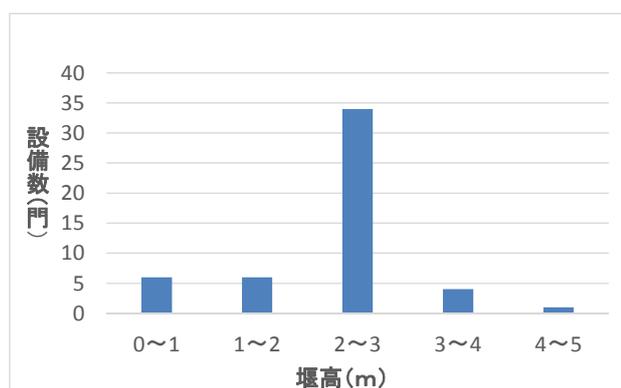


図-2.3 堰高の分布

2. 4 ゴム堰の用途

ゴム堰の大半の用途は農業灌漑であり、次いで防潮、発電、上下水道、浄化等の利水用である。また、治水用では河川流水管理、洪水調節、遊水池への河川水の貯留、排水機場の閉塞防止のためのガタ土堰

き止めなどの実績がある。

2. 5 ゴム堰の構造と機能

ゴム堰は、ゴム引布により製作された円筒状構造物（ゴム袋体）を河床のコンクリート基礎（床版）上及び紡錘状の両端面を堰柱壁に固定し水流を受け止める構造である(図-2.4)。袋体内部には媒体（空気が一般的であるが水の場合もある）を充填し膨らませ水圧に対抗している。媒体の注入又は排出により堰の起立及び倒伏が可能である。また、流れによる堰全体の振動防止の観点から、下流側上方中間部にフィンを装備する場合がある。大型の一部のものでは点検等のため袋体内部への進入が可能なものもある。なお、堰に向かって横断方向を径間方向、円筒面に沿う方向を周方向と呼ぶ。

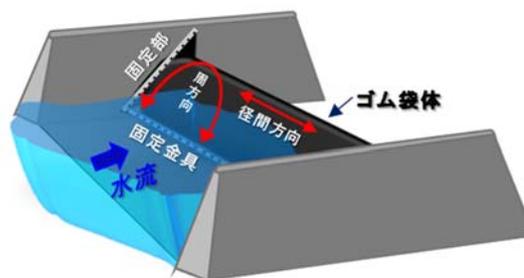


図-2.4 ゴム堰の模式図

2. 6 ゴム袋体の構成

ゴム袋体(図-2.5)はゴム引布から作られる。ゴム引布の外層材は当初、CR(クロロプレンゴム)であったが、平成以降は耐候性に優れたEPDM(エチレン・プロピレン・ジエンゴム)が主流となっている。一方、内層材にはナイロン製の補強繊維(織布又は帆布とも呼ぶ)が使用される。これらを複合積層構造とし熱と圧力による化学反応(熱加硫処理)で、一体成型したものがゴム引布である。なお、ゴム引布の強度は、ゴムではなく補強繊維に大きく依存している。製造設備の制約の関係で、堰の規模によりゴム袋体には接合部が発生する(図-2.6)。

接合部は織布又はゴム引布単位の継目であり、強度的な不連続点となる。そこで、ゴム引布全体の強度を担保するため、この弱点を補完する積層数で製造される。また、この接合部は堰により、横断方向や周方向のものがある。ゴム袋体は、河川の流れの中にあり越流時は相応の水流、水圧、土砂流入に曝される。一方、非越流時には露出面が太陽熱や紫外線を浴びるなどの外的環境負荷を受ける。また、内圧の変化や起伏・倒伏などによる繰返し応力を長期的に受けることになり、ゴム袋体への負担は大きい。

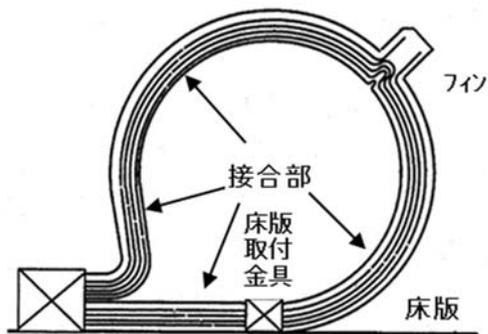


図-2.5 ゴム袋体断面図

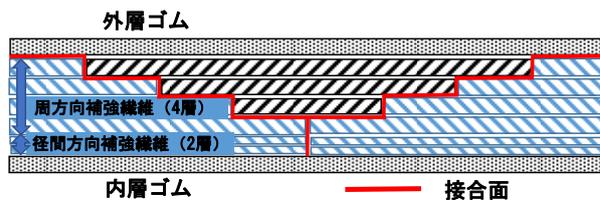


図-2.6 ゴム引布接合部の例

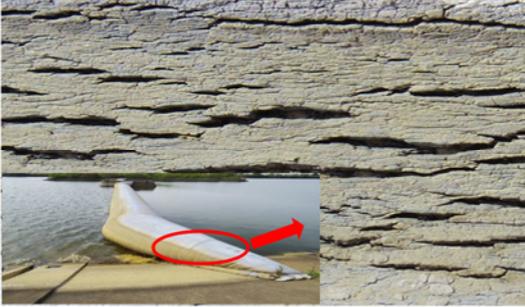
2.7 損傷事例

過去におけるゴム袋体を主体とする特徴的な損傷事例について、損傷分類、発生時期、損傷状況、発生原因を表-2.1 のとおり整理、分類した。

表-2.1 ゴム袋体損傷分類と発生原因

<p>①損傷分類 袋体破裂</p> <p>②発生時期 設置後 1 か月程度</p> <p>③損傷状況 破裂は、堰中央部付近で周方向に 1.7m、接合部に沿った径間方向に 4.8mに渡り発生。</p> <p>④発生原因 使用したゴム袋体織布強度は、200N/mmであり、堰高(3m)相当の材料強度(300N/mm)を有していないことが原因と考えられる。</p>	
<p>①損傷分類 袋体空気漏れ</p> <p>②発生時期 設置後 4 年程度</p> <p>③損傷状況 倒伏時に床版にある床版取付金具と袋体との接触面が貫通して、空気漏れが発生。</p> <p>④発生原因 金具には衝撃痕がみられたことからゴム袋体が突出金具と転石等の間に挟まり、その衝撃で貫通したと考えられる。</p>	
<p>①損傷分類 袋体丘状膨れ</p> <p>②発生時期 設置後20年程度</p> <p>③損傷状況 堰中央部右岸寄りのフィン上下流面に約3.9m(上流側2.5m、下流側1.4m) 径間方向に約4mの範囲に及ぶ膨れが発生。</p> <p>④発生原因 調査では袋体内部への泥水の浸潤も確認されており、過酷な現場条件下における長年の使用により損傷が致命的なレベルで内部に広がったものと考えられる。</p>	

<p>①損傷分類 袋体損耗</p> <p>②発生時期 設置後15年程度</p> <p>③損傷状況 外層ゴム全域に打痕が分布し、損耗が激しく部分的なゴムの欠損や内部層まで達する破損もみられる。</p> <p>④発生原因 現場は山岳地帯上流部であり、土砂や鋭利かつ大型の転石の流入が多い現場特性が、その要因である。</p>	
<p>①損傷分類 袋体接合部内面剥離</p> <p>②発生時期 設置後17年程度</p> <p>③損傷状況 堰中央堤頂部付近の接合部において内層ゴムと補強繊維間に複数層に及ぶ剥離が発生。この剥離は径間方向に2mの規模で広がっていた。</p> <p>④発生原因 本現場は常時越流ではないため通常以上の紫外線や太陽熱に曝される環境であるが、剥離は内部から進行し広範囲に及んでいることから、熱劣化による接合部強度低下以外の原因も想定される。</p>	
<p>①損傷分類 袋体接合部浅層亀裂</p> <p>②発生時期 設置後23年程度</p> <p>③損傷状況 堰中央部右岸寄り上流側上部接合部に補強繊維まで達する径間方向の亀裂が発生。亀裂は長さ250mm、幅5mm、深さ10mm程度。</p> <p>④発生原因 亀裂の位置から流下物衝突による影響が濃厚であるが、老朽化による接合部の接合力低下の影響も否めない。</p>	
<p>①損傷分類 袋体接合部表層亀裂</p> <p>②発生時期 設置後17年程度</p> <p>③損傷状況 外層ゴム接合部全般に補強繊維まで達しない数十箇所の表層亀裂が発生。亀裂は最大で、径間方向500mm、深さ10mm程度。</p> <p>④発生原因 使用ゴムは耐候性のあるEPDMであるが、本現場は常時越流ではないため通常以上の紫外線や太陽熱に曝される環境であり、この環境が接合部の接合力低下を誘発し、亀裂に発展したと考えられる。</p>	

<p>①損傷分類 袋体凸状膨れ</p> <p>②発生時期 設置後18年程度</p> <p>③損傷状況 堰端部フィン上流側上面に径間方向1.5m、周方向0.75m、高さ0.1mの凸状膨れが発生。</p> <p>④発生原因 老朽化やフィン部の繰返し応力により外層ゴムと補強繊維の接着力が低下し、境界面に剥離が発生。この空間に内圧の作用による空気が進入し、成長して凸状膨れになったものと考えられる。</p>	
<p>①損傷分類 袋体接触摩耗</p> <p>②発生時期 設置後19年程度</p> <p>③損傷状況 堰左岸側の下部袋体に年輪状の摩耗痕が発生。傷は袋体を貫通する場合もあり、早期発見が重要。</p> <p>④発生原因 袋体表面がコンクリート部と直接擦れることで発生</p>	
<p>①損傷分類 袋体ひび割れ</p> <p>②発生時期 設置後26年程度</p> <p>③損傷状況 折れじわ部にひび割れが発生。進行すると内部補強繊維まで達する場合がある。</p> <p>④発生原因 厳しい野外環境下での長期使用による老朽化と応力集中がその要因である。</p>	
<p>①損傷分類 袋体表面剥離</p> <p>②発生時期 設置後26年程度</p> <p>③損傷状況 表層ゴムが劣化により剥がれ落ち、ささくれ状態となる。ゴムの硬化（ゴム硬度90以上）が認められる。</p> <p>④発生原因 厳しい野外環境下での長期使用による老朽化がその要因である。</p>	
<p>①損傷分類 床板取付金具空気漏れ</p> <p>②発生時期 設置後3か月程度</p> <p>③損傷状況 右岸側堰下流側底部水中5箇所から気泡が発生。堰の内部圧力低下をセンサが感知し、昇圧のため給気装置稼働回数が増加。</p> <p>④発生原因 施工時の金具固定ボルトの締付け不良やシールの不備が原因である。</p>	

3. ゴム引布の長期性能評価

3.1 ゴム袋体の損傷形態の分類

図-3.1 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。本研究では、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。

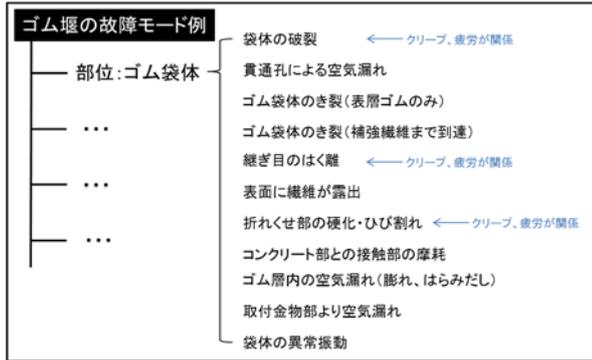


図-3.1 ゴム袋体の故障モード例

3.2 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するとする線形累積損傷則に基づく方法がある。

$$\phi_c + \phi_f = \int \frac{dt}{t_f} + \sum \frac{N}{N_f} = 1 \quad (1)$$

クリープ損傷はクリープ損傷寿命 t_r 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-3.2 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

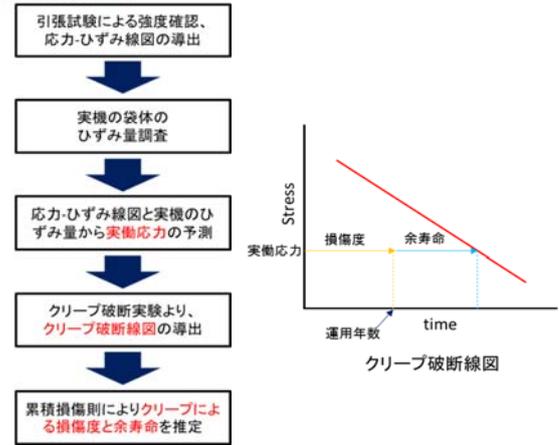


図-3.2 余寿命予測手法のフロー

3.3 ゴム袋体ひずみ量現地調査

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 3ply+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、図-3.3 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-3.4 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。



図-3.3 袋体内表面、変位量測定マーキング

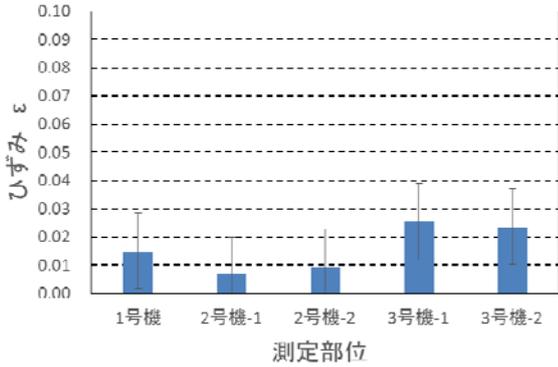


図-3.4 袋体内表面、変位量測定結果

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 22.1 m、堰高 2.1 m、ナイロン織布層数 3ply、ゴム引布の設計強度 421 N/mm、袋体メーカー：B 社であった。図-3.5、図-3.6 に袋体のひずみ測定箇所について示す。表-3.1 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-3.7 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圧力は 0.28 kg/cm² であった。

4) 外部表面のひずみ測定結果

表-3.1 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 1052.5 N/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、参考文献⁷⁾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-3.1 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-3.2 で示した余寿命予測手法を検討する。

表-3.1 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

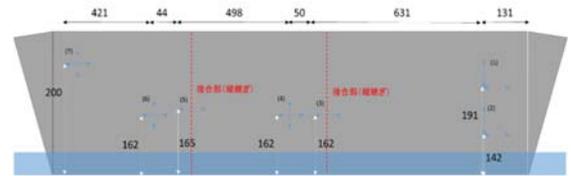


図-3.5 ゴム袋体外表面変位量測定時のマーキング

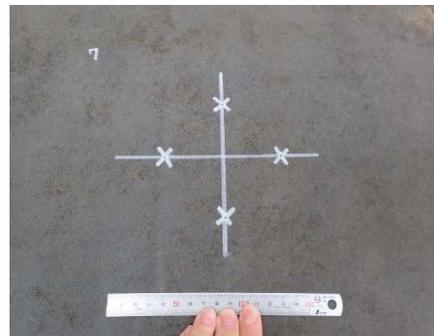


図-3.6 袋体外表面、変位量測定マーキング

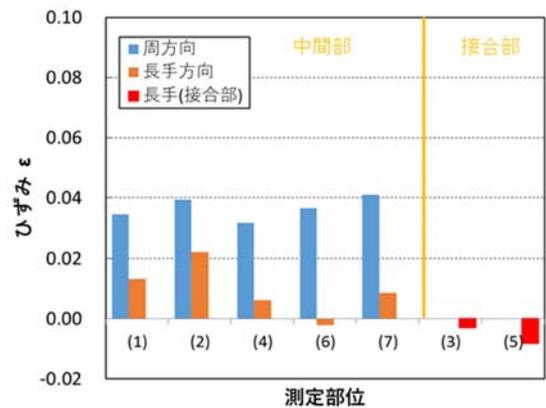


図-3.7 外部表面のひずみ量比較

表一3.2 引張試験の試験条件と結果一覧

部位	試験荷重方向	乾燥/水	含水率 (質量分率)%	設計強度 N/mm	引張強度 N/mm	引張強度/ 基準強度	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	-	-
"		WET	2.86		476.8	0.95	33.5	0.90	0.86
接合部2		Dry	-		538.2	1.08	25.5	-	-
"		WET	2.88		487.3	0.97	23.1	0.91	0.91
接合部3		Dry	-		551.0	1.10	27.4	-	-
"		WET	3.01		565.1	1.13	22.3	1.03	0.82
接合部4		Dry	-		610.6	1.22	26.8	-	-
"		WET	2.76		531.7	1.06	24.2	0.87	0.90
中間部 継あり1		Dry	-		614.6	1.23	27.5	-	-
"		WET	2.19		547.8	1.10	23.4	0.89	0.85
中間部 継あり2		Dry	-		556.0	1.11	22.9	-	-
"		WET	2.89		513.0	1.03	21.9	0.92	0.95
中間部 継なし	袋体 長手方向	Dry	-	579.7	1.16	27.3	-	-	
"		WET	2.31	513.8	1.03	25.7	0.89	0.94	

3. 4 ゴム引布の静的強度特性

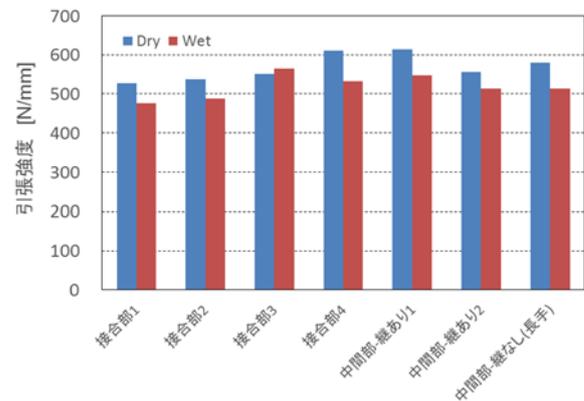
1) 静的強度試験

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つ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。

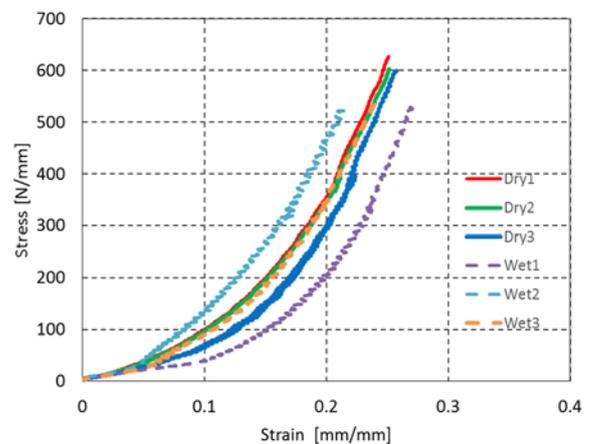
2) 静的強度試験結果

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。表一3.2 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。

図一3.8 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 3.2 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、文献²⁾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



図一3.8 引張強度の結果比較



図一3.9 応力ひずみ線図(接合部 4)

あつた。

図一3.9 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。

3. 5 ゴム引布のクリープ特性

1) クリープ破断試験

式(1)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。図-3.10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。

2) クリープの破断モード

図-3.11に実施したクリープ試験で見られた破



図-3.10 クリープ破断試験片

壊モードを示す。図-3.11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。図-3.11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。

3) クリープ破断試験結果

図-3.12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



図-3.11 クリープ破断のモード
(左:繊維破断型、右:せん断はく離型)

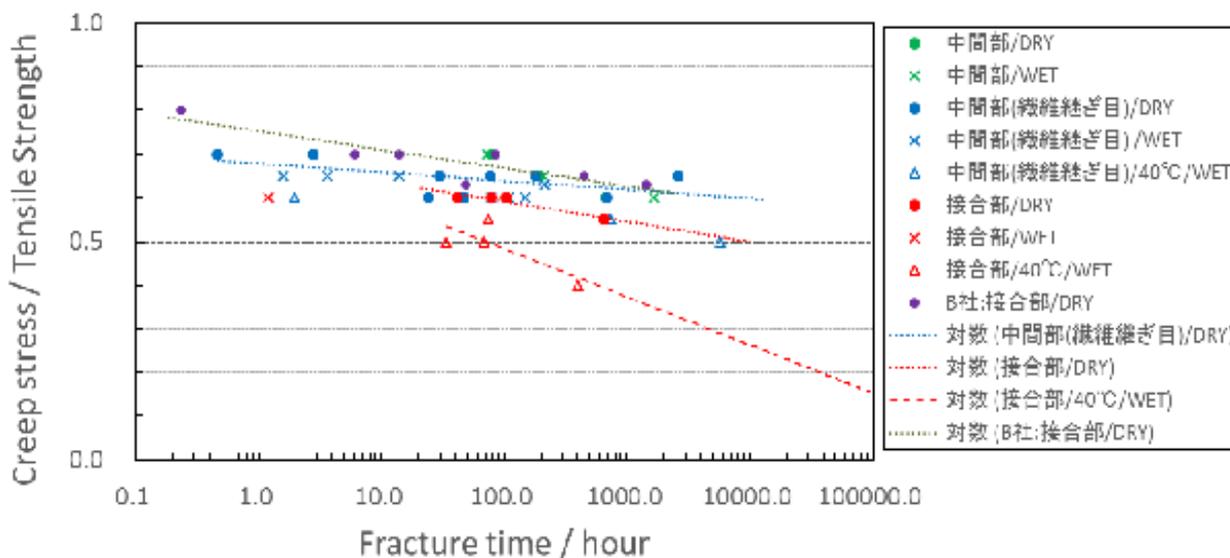


図-3.12 クリープ破断線図

(「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-3.12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(赤丸)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オーダー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製と同時に、ゴムと繊維の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(1)のクリープ項の精度を高める必要がある。

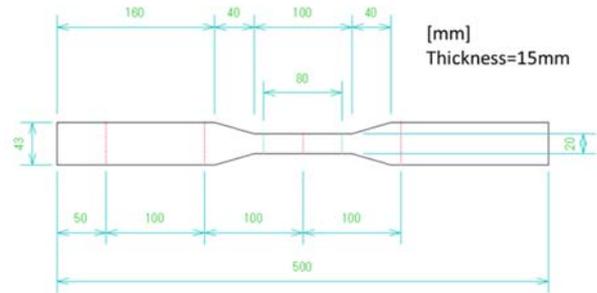


図-3.13 ダンベル形状試験片寸法

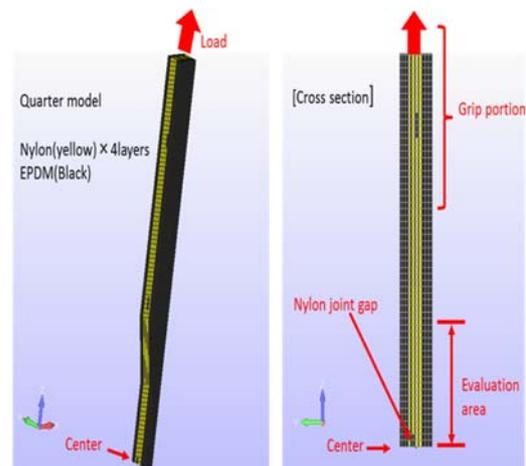


図-3.14 接合部を有すゴム引布 FEM モデル

3.6 有限要素法によるゴム引布の内部応力解析

1) 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-3.13に示すダンベル形状のクリープ破断試験用の試験片形状を用いた。今回、構成的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-3.14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³⁾から、温度 20°Cで、

PA : $E=570 \text{ MPa}$ 、 $\nu=0.40$ 、 $T_s=169 \text{ MPa}$ / EPDM : $E=11.0 \text{ MPa}$ 、 $\nu=0.49$ 、 $T_s=11.4 \text{ MPa}$ 、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プ破断試験と同様としている。

図-3.15 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。右図に示すように、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-3.16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。

図-3.17 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-3.17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载荷実験・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-3.17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。それらを踏まえうえで、下記に示す複合材の内部応力解析を実施した。

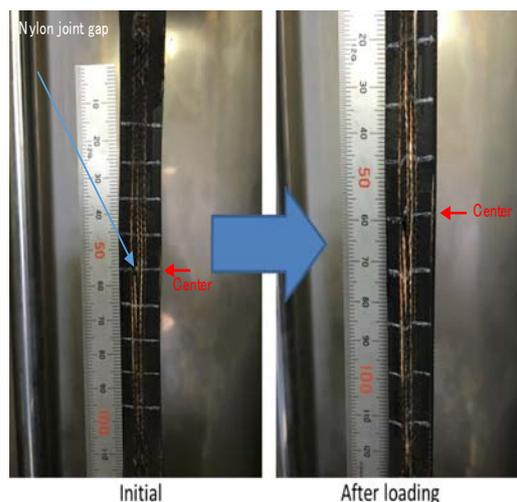


図-3.15 FEMモデリングのための引張/クリープ試験

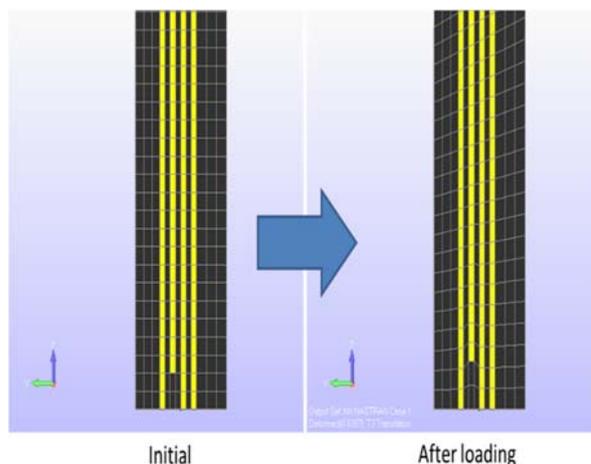


図-3.16 FEMモデルのコリレーション結果

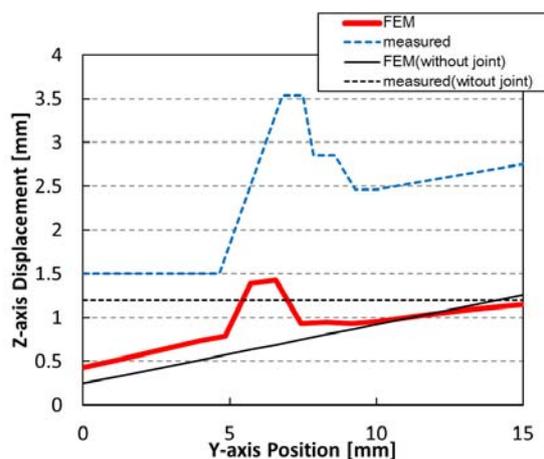


図-3.17 実験とFEMによる内部変形量比較結果

2) 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-3.18~図-3.20 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-3.18 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-3.19 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。この荷重条件化ではゴムに発生した応力はゴムの単軸引張り破断強度の 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-3.20 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³⁾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。

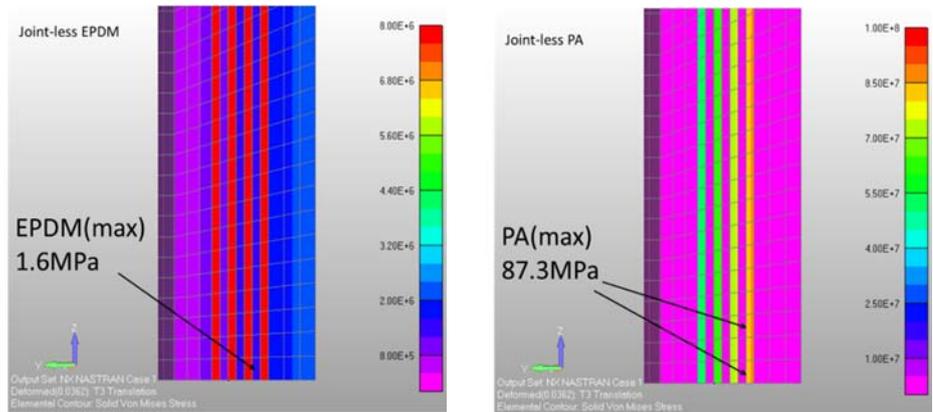


図-3.18 内部応力解析結果（室温、繊維連続部）

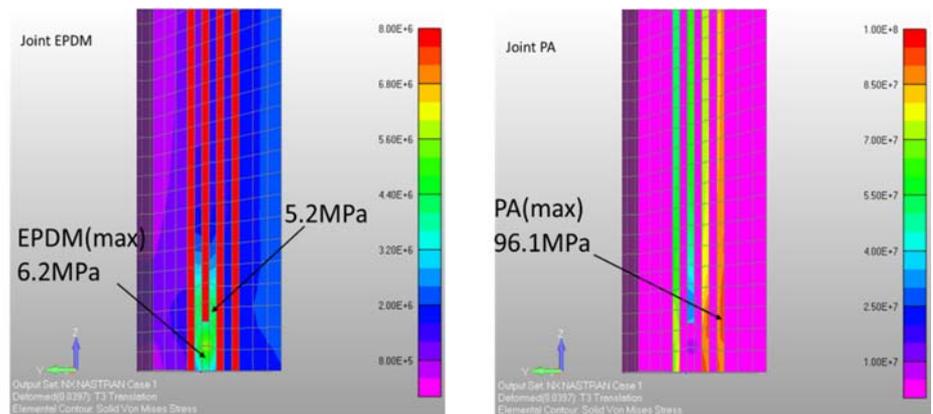


図-3.19 内部応力解析結果（室温、接合部）

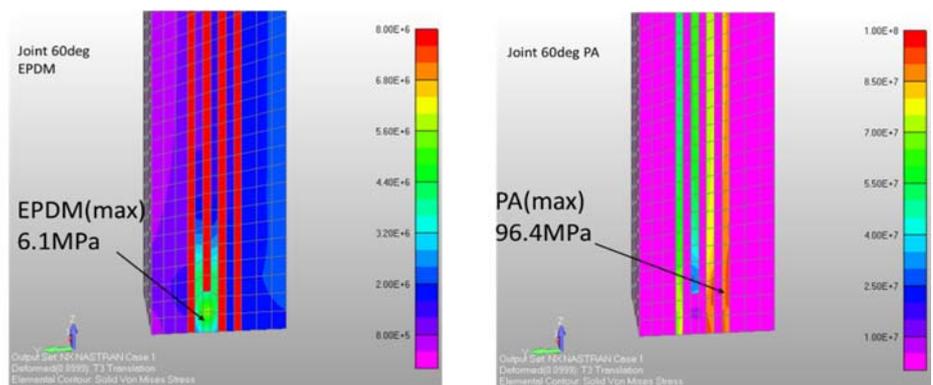


図-3.20 内部応力解析結果（60°C、接合部）

3) 内部応力の実機に及ぼす影響についての考察

図-3.18～図-3.20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-3.21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の引張り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り試験結果はTs=500 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。これは接部付近でゴムにせん断等で応力集中が生じ、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。

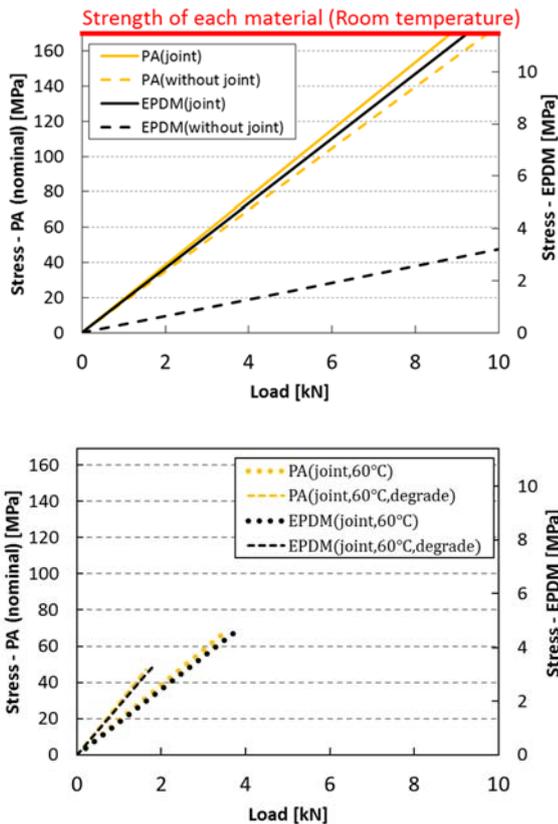


図-3.21 中間部と接合部の最大応力の比較および高温時・劣化時の応力予測

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り強度の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⁵⁾。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加えたFEMモデルの構築が有効と考えられる。

4) 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。

3.7 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-3.3に示す。

表-3.3 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°C	○
EPDM	非ジエンゴム	○	◎	150°C	◎

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

a) 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^{4,5)}。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。

b) 方法・材料

材料表面やゴム引き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-3.4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

て赤外分光法によって化学構造を分析した。

表-3.4 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



図-3.22 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図-3.22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層を図のように切出し、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ゴムの切出しした。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。



図-3.23 EPDM試験片の切出し例

c) 結果

CRの結果を図-3.24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。

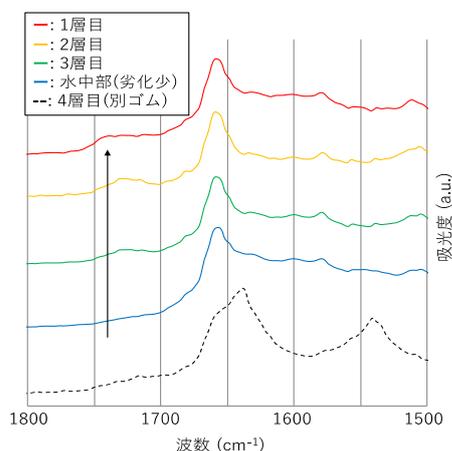


図-3.24 CRの赤外分光スペクトル例

続いて EPDM の結果を図-3.25 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-3.23 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⁵⁾ などには該当しないため、添加剤の可能性もある。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。

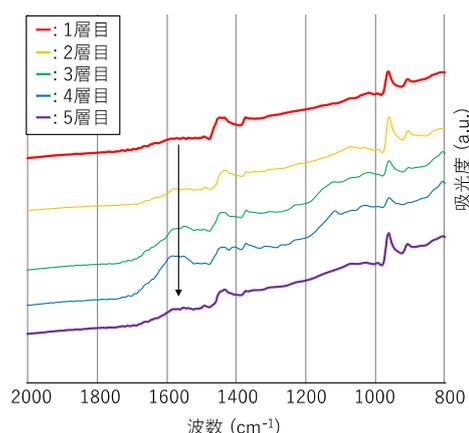


図-3.25 EPDMの赤外分光スペクトル例

3) 赤外分光分析結果まとめ

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関連についての分析が今後の課題である。

4. 設備の点検・補修方法

4.1 点検方法

1) 注意すべき損傷の点検

ゴム袋体を主体とする損傷実態調査の結果から放置しておくとも重大な損傷に発展しがちな損傷には、接合部に発生した亀裂や剥離があり、外層ゴム（内層ゴムの場合もある）から補強繊維達すると強度不足につながることから、この診断を適正に行うことが重要となる。

この状況が発生するケースとして袋体接合部層亀裂及び袋体ひび割れがある。この点検方法として外層ゴムに発生した亀裂やひび割れが深さ方向の補強繊維まで達しているかをノギスのデプスパーやデプスゲージで計測し、その深さが使用ゴム引布の補強繊維深さに達していた場合（傷の方向が必ず

しも垂直ではなく斜めとなるので注意が必要) 又は直接繊維層が目視で確認できる場合は該当となる。同様のケースに袋体接合部内面剥離がある。このケースでは人間が堰内部に入り、内層ゴム剥離の状況を上記同様の方法で確認する。剥離の進行が著しく、剥離が直線的ではなく屈曲しゲージによる測定が困難な場合は、先端部の細い(5mm 程度)工業用内視鏡(先端部に照明装備を有しているもの)の使用も試みる。ただし、予め人間が堰内部に入れる構造となっている堰は数が少なく、このような場合はゴム袋体の取り付け部を外して開くなどの方法を考える。

もう一つの要注意ケースとして袋体の膨れがある。このケースは、外層ゴムと補強繊維が剥離し、その空間に内層の空気が接合面を通過して進入し、膨らんでいる状況と考えられる。一旦、空気道のできた接合面は、内圧の作用で更に広がる可能性がある。

点検の方法として、外層ゴムの凸状膨れのケースでは、膨らみを外観で確認の上、その位置や大きさ(範囲、高さ)を記録し、症状の進行を把握するため定期的な計測・記録による傾向管理を行う。位置や範囲の記録に際し、ゴムでも消え難いマーカーチョークで現物に直接印を付けるとよい。

また、丘状膨れの場合は膨らみの高さが低く、外観での範囲特定が難しいことがある。その場合は点検ハンマによる打音により、範囲を特定する。点検者が変わると判定が一定とならない恐れがあるので、同一人物で行うことが望ましい。何れもフィン取付根元付近に発生することが多いので、この場所は要注意である。特に、進行が早まる場合は、速やかな表層ゴム切取調査を行い、内部の状況確認を行う必要がある。なお、以上のケースは程度にもよるが全て補修対象とすべきである。

2) 内部剥離検知手法の検討

前項では注意すべき損傷の点検について記載したが、この他に外観では影響範囲の特定が困難な膨れのケースや堰内部でなければ把握できない内層からの内部剥離のケースがある。これらの把握が最重要でありながら、未だ十分な点検手法が確立されていない状況にある。そこで、新たな検知手法を試行し、その適用可能性を調査した。

a) 赤外線サーモグラフィ

赤外線サーモグラフィは、物体から放射される赤外線を検知し、リアルタイムかつ非接触で面的に対象物の温度分布を簡易に計測・記録できる。使用したサーモグラフィの外観を写真-4.1 に、

主要諸元を表-4.1 に示す。



写真-4.1 赤外線サーモグラフィ

表-4.1 主要諸元

項目	仕様
熱画像画素数	160×240ピクセル
温度分解能	0.05℃以下
赤外線測定波長	8~14μm
測定精度	±2℃
測定範囲	-30℃~100℃

検討方法は、過去に凸状膨れを起こし、ゴム層のはく離が分かっている箇所を選定して、表面に水を散布して、正常な部分とはく離を起こした部分の温度差が生じるかどうかを確認することで行った。測定は日中に行い、測定開始時点の気温27.5℃、表面温度は45.0℃であった。

本装置によるゴム袋体凸状膨れ熱画像計測事例の可視画像を写真-4.2 に、熱画像を写真-4.3 に示す。

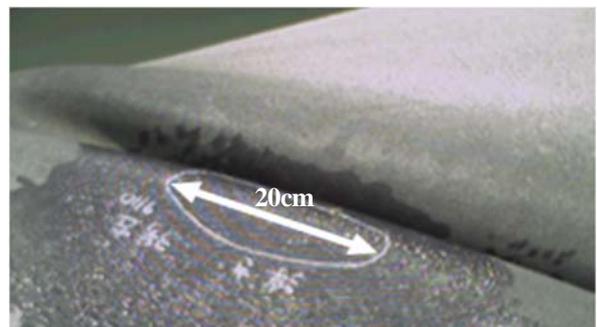


写真-4.2 ゴム袋体膨れ部の可視画像

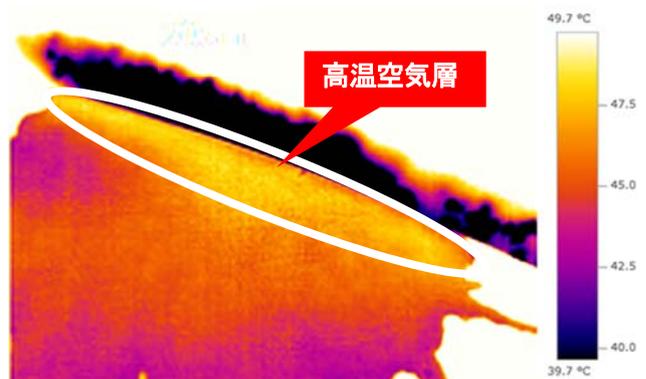


写真-4.3 ゴム袋体膨れ部の熱画像

水を散布すると、気化熱の作用で、空隙が生じている剥離部と空隙のない正常部に温度差が生じ、内部空隙有無の判定がある程度可能であることを確認した。但し、本手法は現場の気温、湿度、天候状況と水分散布量のバランスや計測タイミングにより適正な判定ができないことがあり、課題である。

b) 打音解析装置

タイル剥離やコンクリート損傷の検知に対象物への打撃反射音を利用して診断する検査装置がある。この装置が材料特性の異なるゴム袋体へ転用できないか検討した。

タイルなどの材料に比較し、ゴムのような材料は反射音の周波数が低く減衰も大きい。このためゴム材料にも適用できるように調整した打音解析装置を試作した(写真-4.4、表-4.2)。この装置の適用性を確認するため、積層ゴム内部の異なる位置に人工的にはく離箇所を設けたゴム袋体内部剥離モデル(試験供試体 写真-3.5)を用いて剥離層位置判別実験を行った。

図-4.1 に示すように、打音によるマイク集音時間波形の特徴(ピーク値の差異)から、剥離層の位置判定がある程度可能であることを確認している。但し、打音部(内部に打棒と集音マイクを装備)の対象物への当て方により、出力波形が異なる場合があり波形データの再現性、信頼性に改善の予知がある。



写真-4.4 打音解析装置

表-4.2 打音解析装置主要諸元

項目	仕様
集音方式	防水型コンデンサマイク方式
周波数特性	50Hz~20kHz
打撃方式	円筒型電動ハンマ打撃方式
処理機能	音圧信号A/D変換処理



写真-4.5 試験供試体 (ゴム袋体剥離再現モデル)

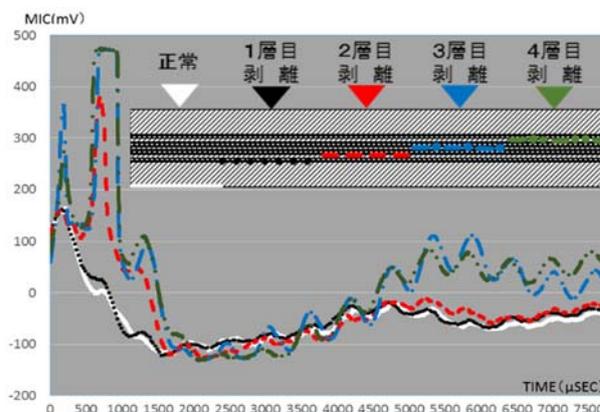


図-4.1 打音マイク集音時間波形

3) 状態監視保全の提案

ゴム堰における損傷等の殆どはゴム袋体に起因するものである。ゴム袋体は様々な環境の下で長年に渡り使用されると劣化が進行して、当初の品質が低下する。品質の低下は、製造方法や設置環境、使用状況などにより異なり、一様に決められるものではない。損傷や剥離が補強繊維まで及ぶとゴム堰の強度そのものに影響し、致命的なレベルに発展する可能性がある。一方、その場合の現場補修について、強度回復は見込めず、その進行を止める又は遅延させるためのものである。従って、初期段階において異常を早期発見し、速やかに補修することで、補強繊維への波及を食い止めることが肝心である。このためには、状態監視保全が有効である。状態監視保全は、常時稼働の大型プラントに多く導入されていて、機械状態の常時監視によるリアルタイムな保全スタイルであり、異常発見が遅延なく行える。状態監視保全は、設備規模にもよるが、一般に応分の手間と費用を要するが、ここではゴム堰に適用すべき状態監視手法を提案する。

a) 袋体接合部標点管理

ゴム袋体の損傷は、接合部に発生した場合、深刻な破損に発展するものも少なくない。この点を踏まえ接合部の異常をいち早く察知するための簡易手法として標点管理を提案する。

標点管理はゴム袋体の表面にマーカーを設置し、マーカー間の間隔（長さ）を定期的に計測して接合部の変化を把握するものである。マーカーは、縦継ぎ、横継ぎなどの接合方法を踏まえ、接合部毎に接合部を隔てた位置に設置するものとし、ゴム袋体に悪影響のないものとする。また、標点間の寸法計測は誤差を防ぐため一定条件（内部圧力、外気温など）下で行うものとする。標点マーカー設置方法を図-4.2に示す。

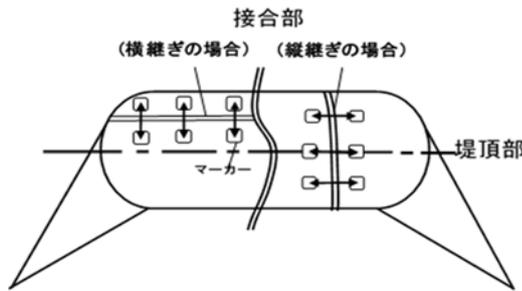


図-4.2 標点マーカー設置方法

b) 袋体損耗レベル標本管理

土砂流入が多く、ゴム袋体の損耗が著しい現場での袋体全体の損耗レベル管理は、幾つかの損耗監視エリアを標本として設定し、これらを全体の代表として管理する手法が有効と考えられる。

監視エリアは上流部の左岸側、中央部、右岸側を基本とするが、特に損耗度に偏りがある場合は、損耗度の高いエリアを重点に設定する(図-4.3)。

設定エリア枠は、袋体の規模にもよるが1m四方程度を想定し、その中に20cm程度の格子を設け格子単位で損耗レベルや分布を監視する。損耗レベルは、ゴム袋体の形態により異なり、形態に応じた損耗管理基準の設定が必要となるが、レベル設定は補強繊維に達するまでを基本とする。なお、表-4.3に損耗管理基準設定例を、図-4.4に損耗度数分布図の作成例を示す。

c) 袋体品質の傾向管理

ゴム袋体は長年の使用により劣化が進行し当初の品質の低下は避けられない。また、品質低下は、製造方法や設置環境、使用状況などにより異なり、一様に決められないことは前述のとおりである。以上のことから、対象のゴム堰で使用しているゴム引布が当該設置環境においてどの程度の品質低

下がみられるかを把握するためには、同様の材料供試体を設置現場に暴露し、その材料を使用した定期的な性状評価試験を行うことが有効である。この評価結果を傾向管理することで、現物の品質の低下傾向が予測できる。性状評価は、基本的には引張強度が考えられるが、接合部の剥離を意識した剪断剥離試験や引剥がし試験が重要である。暴露供試体は標準部と接合部の2種類を用意するものとし、太陽光やオゾンの影響による劣化を想定した気中暴露(写真-4.6)、水分浸透による劣化を想定した浸水暴露(写真-4.7)の2パターンを基本とする。供試体の暴露は、堰を設置した時点から開始すべきであり、堰の更新(40年)まで継続できる量をストックしておくことが望ましい。

表-4.3 摩耗管理基準設定例

損耗レベル	損耗の状態	損耗レベル判定値
○	表面凹凸加工部が残留	深さ1mm未満
△3	表面凹凸加工部が剥離	深さ1mm程度
△2	外層ゴム厚の1/2未満	深さ1mm以上3mm未満
△1	外層ゴム厚の1/2以上	3mm以上、6mm未満
x	補強繊維に到達	6mm以上

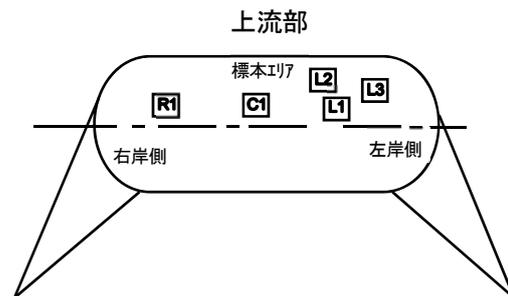


図-4.3 損耗監視エリア設定例

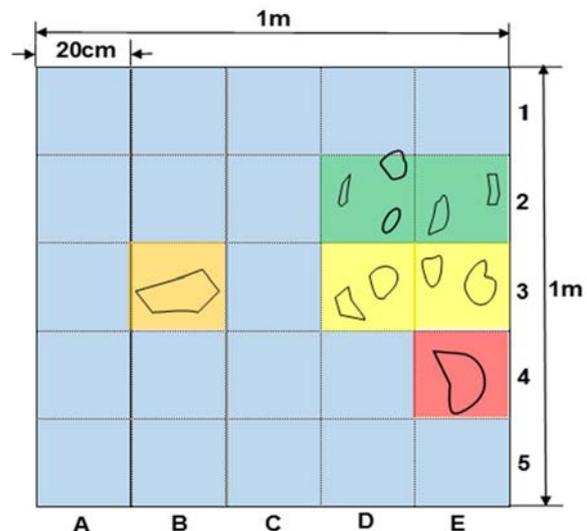


図-4.4 損耗度数分布図

評価試験の実施タイミングは、これまでの損傷の実績から設置年、10年目、以降5年毎を基本とするが、特段の異常が生じた場合は都度行うものとする。また、特に夏季において越流の割合が低く、袋体堤頂部が気中に絶えず露出し、かつ気温の高い地域の堰については、袋体の表面温度や気温を測定し、傾向管理することが望ましい。南部の地域では袋体表面温度が70℃に達する事例もあり、極端な温度上昇がゴム性状に与える影響は無視できないレベルとなる。



写真-4.6 気中暴露事例



写真-4.7 浸水暴露事例

d) 稼働状況の傾向管理

ゴム堰の方が一のトラブルに備え、日頃から堰の稼働状況を把握し、記録しておく必要がある。稼働履歴は異常の原因特定や予防に重要な役割を果たすことから、以下の主な管理項目に基づき月報等を作成の上、年報として整理しておくことよい。

- ・越流状況（各号機の日数）
- ・倒伏状況（各号機の日数）
- ・堰内圧状況（各号機の圧力値 kg/mm²、Pa）
- ・給気装置稼働状況（起動回数、稼働時間）

越流状況では、袋体が気中環境と浸水環境のどちらの影響が大きいかの傾向が把握できる。倒伏状況では、その頻度により、袋体折り畳みによる繰返し応力負担の度合いが推定できる他、各号機の頻度の偏りが把握できる。堰内圧や給気装置稼

働状況から空気漏れなどの異常兆候が推定可能となる。

4) 点検し易いゴム堰設備の提案

ゴム袋体の維持管理では、損傷等異常の早期発見と補修等の速やかな措置が重要であるが、そのためには細やかな点検が必要不可欠である。しかし、現状のゴム堰は必ずしも点検し易い設備とは言えない面があることから、点検者の安全確保の観点も踏まえ装備すべき施設構造、機能について提案する。提案の中には、当初の設計段階から考慮しておくべきものや設置後でも対応が可能なものがあるので、現場の状況を踏まえ可能な限り対応することが望ましい。

a) 堤内への点検進入が可能な構造

大型の一部のものでは既に人の進入が可能な施設は設置されており、実績もあるが多くのものは未対応となっている。これまでのゴム袋体損傷の実績から、内層ゴムからの剥離事例が致命的なレベルとなり、堰の更新に至ったケースを踏まえると堰内部の内層ゴムの点検は必要であり、人の進入が可能な堰高規模となる堰については、設計段階で考慮すべきである。堰内への進入は、堰の岸部に点検坑を有するタイプや施設建屋階段より進入できるものもある。点検口は点検機材（堤頂部点検のための脚立など）の搬入が可能なスペースを確保する必要がある。点検者の進入は堰側面堰柱部に設置される調圧室からとなり、点検者が進入する場合は徐々に堰内の圧力まで高め、退去時は徐々に地上の気圧まで減圧する必要があるので、保安上この設備は必須となる。

b) 堤頂部親綱留具の設置

ゴム袋体の点検では、袋体堤頂部に点検者が載って行すが、その際は転落防止のため径間方向に親綱を張る必要がある。多くの設備には堰両端に親綱を留めるための金具等がないことから、堰柱等への留具や支柱の設置を実施すべきである。

c) 堤頂部滑止め措置

袋体の点検については保安上、堤頂部の滑止めは必要である。一部のゴムメーカーのものではラフト加工により滑止め機能を有しているものもあるが、その他には余りみられないことから、点検者が歩く最小限のエリアだけでも同様の措置又は、類似機能の追加装備を検討すべきである。

d) 堤頂部昇降器具の装備

袋体の点検では、堰柱から下方の堰堤頂部に渡

る必要があるが、その際、点検者は点検器具を抱え、落差のある急傾斜のボルト留具伝いに降りていく必要があり、転落の危険を伴うことから、この箇所に転落防止のための手摺りや足掛け、歩板など何らかの装備を検討すべきである。なお、装備は設置型、着脱型のどちらでも構わない。

4. 2 補修方法

ゴム袋体に損傷等が発生した場合は補修を検討するが、補修は異常の早期発見、早期対応が基本である。現場補修では、設置当初と同等の品質まで回復させることは難しく、進行の停止又は遅延効果による延命化が目標となる。また、現場での補修作業では施工管理が重要であり、不十分な場合は、不良施工を招き短期間で再剥離するなどの事例も発生していることから、施工管理を怠らないことが品質確保の肝となる。

1) 補修開始のタイミング

異常の早期発見、早期補修の基本を踏まえ、損耗等の補修は表-4.3△2に相当するレベルに達した場合、補修の検討を行うべきである。この時点で進行予防策を講じておけば、補強繊維まで達するケースを大幅に抑えられる。

2) 補修工法

補修は予防補修を基本とするが、老朽化や厳しい現場条件などにより損傷が急激に進行する場合もあるので、損傷の程度に応じ適切な工法を選択し、速やかに補修するべきである。但し、確実な補修を行うためには堰周りをドライ状態（土のう等で川を堰き止め流域から堰を隔離）にする必要があり、稼働シーズン中には困難な場合もあることから、その場合は当面の応急対策を検討する。また、補強繊維まで達するような場合は、工法を選択を誤ると致命的なレベルまで進行する恐れがあるので、慎重な検討が必要である。なお、表-4.4 に補修工法と適用損傷について整理した事例を示す。

3) 現場補修の施工・品質管理

現場補修において、施工・品質管理は重要であり、特にパッチ当て作業では、これを怠ると再剥離の要因となるので、これを徹底すべきである。また、以降の施工上のトラブルへの対処のため施工・品質管理記録は保管しておく必要がある。現場補修は、大きくは応急対策と恒久対策に分かれる。応急対策はシーズン中などのため堰倒伏が困難な場合で、堰が起立状態かつ一定水位における作業の想定が必要となる。恒久対策は、可能な限りドライ状態を確保し、

足場などを設置するなど一定期間の作業ができる環境を確保する。なお、下記の項目について、施工・品質管理を行い、管理簿や写真で記録を残すものとする。

① 施工環境

天候、気温、湿度、堰の起伏、内圧

② 使用材料

使用ゴム種類、寸法、数量、接着剤の種類・量

③ 使用機材

サンダー（砥石#）、赤外線ヒータ、圧着用ローラ、締結具

④ 施工管理簿

施工工程、作業時間、作業者、材料温度トルク実測値（締結器具の場合）

⑤ 工程・品質管理写真

損傷部の状況

（位置、影響範囲、大きさ、深さ）

使用材料・使用機材の状況

（現物、寸法、数量）

損傷部の清掃状況、低温時防寒養生

目荒らし等表面処理、角落等端部処理状況

接着剤塗布、乾燥状況

補修材料貼付状況（位置、重ね合わせ）

施工温度管理状況、圧着ローラー掛け

4) 補修履歴

補修履歴は、以降のゴム堰の補修計画や維持管理に有用で、万が一補修上のトラブルが発生した場合にも過去の検証が可能となる。

また、過去の補修実績を反映した維持管理計画の作成が可能となる。

4. 3 更新

更新は基本的に以下の場合が適用対象と考えられる。

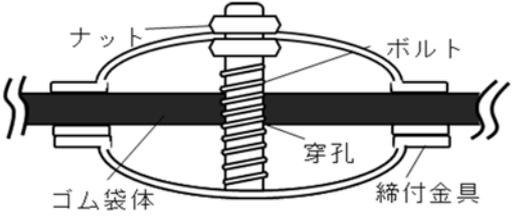
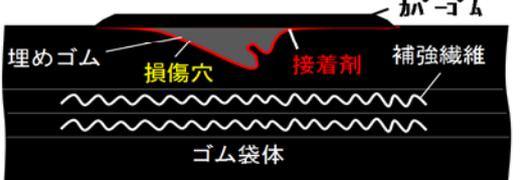
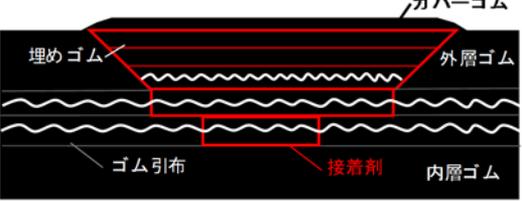
①補修が困難で堰としての機能を満足できない。

②補修の方がコスト的に不利となる。

③補修の信頼性が十分担保できない。

ゴム袋体の強度は 40 年程度の耐久性を有しているとしているが、その施設の現場環境、使用条件等によりゴム袋体へのダメージは異なり、耐久年数満了前の更新事例もあるので、堰の状態を十分把握の上、総合的かつ慎重に検討すべきである。

表-4.4 補修工法と適用損傷

<p>①補修工法 閉塞補修</p> <p>②適用損傷 袋体空気漏れ</p> <p>③補修手順・留意点</p> <p>比較的袋体が薄いタイプに应急対策として適用する。この補修には貝殻栓と呼ばれる挟込金具を使用し、袋体外側から傷口の大きさに適合する金具で締結処理する。</p>	
<p>①補修工法 被覆補修</p> <p>②適用損傷 袋体損耗、袋体接合部表層亀裂 袋体接触摩耗</p> <p>③補修手順・留意点</p> <p>損傷深さが補強繊維まで達しない全般的な損傷に適用する。損傷箇所に凹状の傷がある場合は、凹部に接着剤を塗布し、埋めゴムを充填しておく。損傷部はその範囲全体をカバーゴムで覆うが、その際、双方の接着面を十分目荒らしし、適切な接着剤を双方に適量塗布の上、乾燥後、余裕代を確保したカバーゴムを損傷部に被せ、ローラー等で空気を追い出しながら丁寧に圧着する。なお、カバーゴムと接着剤は、母材との相性を十分考慮の上、選定する。また、影響範囲が広範に渡る場合は、パッチを適度に分割（余り大きいとと剥がれ易い）して、同様の作業を繰り返す。</p>	
<p>①補修工法 更生補修</p> <p>②適用損傷 袋体丘状膨れ、袋体凸状膨れ 袋体接合部浅層亀裂</p> <p>③補修手順・留意点</p> <p>損傷深さが補強繊維まで達した場合の全般的な損傷に適用する。先ず、損傷・剥離部の影響範囲外周の適正部に掛かる範囲までカットして、除外すべき影響範囲を完全に排除する。被覆補修同様の手順により補修を行うが、剥離層が何層にも及ぶ場合は、その層分の処理を行う。外層部についても厚さ分の埋めゴムを行い、最後に全体をカバーゴムで覆う。なお、現場作業は、自然加硫を基本とする。本来、熱加硫の方が接着力が高いが、補強繊維への水分の浸潤が懸念されるなど現場施工では熱加硫に求められる施工条件が担保できない恐れがあるので、控えるべきである。</p>	
<p>①補修工法 粘着補修</p> <p>②適用損傷 袋体接合部内面剥離</p> <p>③補修手順・留意点</p> <p>接合部剥離が延長方向、深さ方向共に拡大し、更生補修が困難な場合に実施する。テープ状の未加硫ゴムを剥離面亀裂の延長方向に沿って上から直接貼付ける工法。この工法は内面剥離隙間への空気進入を防ぎ、剥離進行防止を目的とする。一方、テープを定期的に剥がすことで、剥離の進行チェックが可能となる。この方法はあくまでも更新までの暫定措置であり、強度的回復を期待するものではない。</p>	
<p>①補修工法 固定部漏気補修</p> <p>②適用損傷 床版取付金具空気漏れ</p> <p>③補修手順・留意点</p> <p>固定部の漏気は固定部の締結力不足、シールの不具合が原因であるので、これらの改善を図るものである。締結力不足は、ナットの増締めを行うが、規定の締結力確保のほか、締結の順番、締結タイミングや間隔がメーカーにより異なるので留意すること。シールの不具合は、シールパッキン厚さのアップ、コーキング剤の塗布、機密シートの追加などで対応する。</p>	

5. 設備の効果的な運用方法

5. 1 運用方法

ゴム堰は、長期間の使用により老朽化して品質が低下することは避けられない。また、現場補修による袋体全体の機能回復は困難であり、部分補修による局所的な劣化進行の停止や遅延を行える程度である。

近年、老朽化が顕著なゴム堰には、様々な損傷等の異常が多く発生しているが、更新が必要となっても直ぐには調達できないことから、危機回避措置として運用面での袋体保護を真剣に行うべき時期にきている。取組みの基本スタンスとして、「袋体に優しい運用」を心掛け、設備の劣化遅延（延命化）を目指す必要がある。

1) 内圧の低減

ゴム袋体への損傷等重大な欠陥やその補修時など内圧がゴム袋体に悪影響を及ぼすケースでは、緊急避難措置として規定の内圧をVノッチ（写真-5.1）が発生しない程度まで下げるといった選択枝も想定しておく必要がある。但し、取水等堰としての機能確保が最優先されるべきである。

希に流れによる堰の異常振動（写真-5.2）が発生する場合がある。フィンはこの現象の発生を抑制する目的で設置されるが、装備があっても現象が発生するケースがみられる。また、最近ではこのフィン部は折返し構造がネックとなり、剥離などの異常を引起すケースも確認されており、デメリットとなる恐れもある。この異常振動は、ゴム袋体に対し強度的なダメージを与えることとなるので、早期に内圧低減策を試行する。この措置により振動低減効果がみられる場合は、当面の間、その状態で暫定運用を行う。通常、流れは絶えず変化するので、異常振動が長期間継続することは考え難いので、タイミングを見計らって昇圧し、振動の状況を見ながら通常圧力に戻す措置をとる。なお、この方策では根本原因を排除していないので、断続的に発生することは否めない。そこで、発生頻度が高く問題となる場合は恒久対策を検討する。



写真-5.1 Vノッチ発生状況



写真-5.2 流れによる異常振動

2) 倒伏頻度の各号機分散化

倒伏頻度が比較的高く、複数門の設置がある堰は、倒伏号機の頻度の偏りを平準化し、頻度の分散化を図ることで、袋体折畳みによる繰り返し応力の負担軽減が期待できるので、堰の施設管理規程に抵触しない範囲内での運用を検討すべきである。

3) 堆積土砂の排除

土砂流入の多い設置現場では、特に定期的な土砂排除作業を行う必要がある。これを怠ると土砂が堰側面に堆積し、堰外面を圧迫することで局所的な荷重による想定外の張力が発生し、その結果ゴムの劣化を助長する可能性がある（写真-5.3）。



写真-5.3 流入土砂堆積による変形（堰内部）

土砂排除は、堰の起立、倒伏動作を繰り返すこと（＝フラッシュ操作）で、ある程度可能であるが、袋体の負担となることや必ずしも十分な排除が期待できないこと、土砂堆積量が多く流速が十分でない場合には倒伏したゴム袋体の上に土砂が堆積してしまい起立不可能となる場合もあることから、重機による土砂排除を検討すべきである。この場合は、作業機による袋体の損傷を招く恐れがあるので、目印の設置や誘導者を置くなど接触を防ぐ措置を徹底する必要がある。なお、堰設置当初から想定重機の搬入路の整備を検討しておくべきである。

4) 重大故障発生時の危機管理

日頃から保守点検を行っていても、老朽化の進行が突発的かつ重大な故障を引起す可能性を高めるので、万が一を想定した危機管理が益々重要となる。

例えば、複数門の堰のうちの1門が突然破断し機能停止した場合、いかなる措置を取るべきかについて、日頃からシミュレーションしておく必要がある。シミュレーションは、関係者への連絡体制や下流への影響、出水時の操作方法などを想定すべきである。

5. 2 長期運用に資する提案

袋体に優しい運用に心掛け、設備の劣化遅延（延命化）方策について検討してきたが、設備設置後の現場運用では限界もあることから、設計の段階で対応しておくべき点について提案する。

1) 接合部

袋体において、接合部は強度的な弱点となる可能性が高いことから箇所や延長を極力少なくすべきである。継ぎ方については、損傷等発生の実績から径間方向の横継ぎではなく周方向の縦継ぎが望ましい。接合部の位置は、両端の屈曲部（写真－5.4）以外の位置が望ましい。屈曲部は変形による応力集中が発生し、弱点となる接合部と重なると強度低下を助長することになるので、避けるべきである。

2) 袋体保護

袋体両端の屈曲部は、応力集中と繰り返し応力による負担を強いられることから、材料強化のため、補強材を組入れておくことが望ましい。

ゴム袋体の切断面がむき出しの場合、そこから降雨や流水が浸潤し、補強繊維の劣化を招く恐れがあることから、この切断面を防水保護剤で完全に被覆することで延命化を図ることが望ましい

（写真－5.5、5.6）。



写真－5.4 堰両端屈曲部



写真－5.5 ゴム袋体切断面（防水保護材なし）



写真－5.6 ゴム袋体切断面（防水保護材あり）

6. まとめ

本研究では、各施設の実態調査を踏まえ、ゴム引布の長期性能評価手法、効果的な損傷の点検・補修・運用方法について検討を行い、以下の現状分析結果を得ると共に、新たな提案を行った。

- 1) ゴム堰の老朽化に伴うトラブルの大半は、ゴム袋体の損傷等であり、特に補強繊維に達する損傷や接合部剥離では致命的な欠陥に進展する恐れがあるので、このレベルでは早期補修を実施する必要がある。点検は以上の損傷等の進行レベルの見極めが重要となるが、それ以前に予防保全（早期発見、早期補修）による損傷等の進行阻止を最優先とする。
- 2) 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、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。接合部のゴムに大きな応力集中が確認され、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。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。

- 3) 供用中の CR 製と EPDM 製ゴム堰のゴム部に対して赤外分光分析を用いた経年劣化の解析を検討した。両者とも熱や紫外線などに対する耐久性は高いが、供用開始から 28 年が経過した CR には劣化の兆候が示された。
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減少が劣化の診断に寄与できる可能性がある。
促進劣化と供用中のゴムについて上記の相関について詳細に分析することが耐久性評価を高度化するために必要である。
- 4) 致命的な欠陥に進展する恐れのある内部剥離は、外観検査が困難で、かつ対応する検査装置もない状況である。非破壊の損傷検知装置が求められていることから、赤外線サーモグラフィ、打音解析装置による適応性を調査した結果、検知可能であることを確認した。実用化に向けてはいくつかの課題があるので、更なる取組みが必要である。
- 5) ゴム堰の実態調査により損傷種別分類を実施し、この結果に基づく点検手法や損傷評価手法、損傷度に応じた適用すべき補修方法、現場補修時の施工管理・品質管理項目などについて提案を行った。

- 6) ゴム堰の維持管理には、状態監視保全の活用が有効であることから、ゴム堰特有の監視項目について提案を行った。施設運用では堰の延命化に貢献するゴム袋体に優しい運用を心掛け取組むべきであり、その具体的手法について提案を行った。

参考文献

- 1) ゴム引布製起伏堰の改良に関する研究報告書、日本河川協会、1978.3
- 2) 繊維便覧第 3 版、繊維学会、P921、2004
- 3) 坪井正行他、” 温度変化が各種ジオメンブレンの引張り特性に与える影響”、ジオシンセティックス技術情報(1998.11)、pp18.
- 4) 仲山和海、大武義人ら：高分子材料の劣化と寿命予測、61-69、S&T 出版、2009
- 5) 山田隆男、奥本忠興、河村知男、大谷肇、拓殖新: T-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、13、190-195、2001

MAINTENANCE AND LONG-TERM PERFORMANCE EVALUATION FOR RUBBER GATE AND STEEL RUBBER GATE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2014-2016

Research Team : Advanced Technology Research Team

Materials and Resources Research Group

Author : FUJINO Ken-ichi, KAJITA Hiroki, NAKAJIMA Jun-ichi, UENO Hitoshi, ITO Kei,
NITTA Hiroyuki, HYAKUTAKE Tsuyoshi, NAKAMURA Takashi

Abstract : Rubber gate and Steel Rubber gate made of rubber coated fabrics, collectively referred to as inflatable gate, are in widespread use for agriculture and flood control because they are considered easier and cheaper to install and maintenance than steel flame weir. Problems in equipment aging of them, for example over 20 years old, are increasing lately. However, methods for performance evaluation, maintenance and repairing for the inflatable gates are not established in practice. In this research, (1) actual damage and degradation of the inflatable gates were organized by various factors, (2) conventional inspection and repairing method were grasped by damage scale, and (3) materials analyses of field sample of rubber coated fabrics with creep test and infrared spectroscopy were conducted, in accord with a survey of actual condition for the gates with age. Methods of maintenance for more efficient actual inspection, repairing, and operational procedures and long-term performance evaluation of rubber coated fabrics and were proposed.

Key words : Rubber gates, Steel Rubber gate, Rubber coated fabrics, Maintenance, Condition monitoring, Creep characteristics