

すい ど ち

水土の知

2025 04
Vol.93 / No.04

小特集 農村を安全に支えるには



農業農村工学会誌 Water, Land and Environmental Engineering



SINCE 1929

公益社団法人 農業農村工学会

The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering

コンクリート水路の止水工法の耐候性についての一考察

Study on Weatherproof of Seals Used for Concrete Channels

鈴木 健 史* 石 塚 誠* 佐 藤 勇 樹* 濱 上 邦 彦**
 (SUZUKI Takefumi) (ISHIZUKA Makoto) (SATO Yuki) (HAMAGAMI Kunihiro)
 山 本 清 仁** 金 山 素 平*** 倉 島 栄 一****
 (YAMAMOTO Kiyohito) (KANAYAMA Motohei) (KURASHIMA Eiichi)

I. はじめに

コンクリート製の水路の目地とともに施工される止水工は、施工の容易さに加えて長期にわたる構造物の変位への追従性を保ち、漏水防止機能が維持されることが期待される。しかし資材メーカーが示す情報は止水材料の基本的な物性のみで、耐久性に関わる詳細については不明なことが多く、止水工法を選択するための情報は限られている。

干拓地である秋田県大潟村では、二次圧密が慢性的に継続し水路の漏水防止は営農の一部となっているとともに、盛土上に施工された水路では今後の10年間で0.5 m前後の緩慢な地盤沈下が予想されており、用排水路の不同沈下にとまなう水路勾配の逆転が懸念されている¹⁾。また、北海道胆振東部地震ではダム本体から末端の用排水路にいたるまで、急激かつ広範囲な被害が生じている²⁾。さらに最近の取水施設の老朽化にとまなう大規模な漏水は、農業用水のみならず、社会経済や市民生活に多大な影響をもたらすものとの認識が高まっている。農業用水路に限れば、少なくとも灌漑期間中の予期できない災害や慢性的な地盤の変形に対して、構造物の力学的性能の向上や変位動態への追従を可能とし、できるだけ漏水を抑え、末端にいたるまで安定した送水機能を維持することが求められる。

本報では、このような背景のもとで、施工時のみならず営農段階の補修にも容易に使用できる止水工法を題材として取り上げ、施工された状態をほぼ再現した供試体を作製して、3年間にわたり耐候性に関わる暴露試験を秋田県大潟村で実施した結果について報告する。

II. 水路の止水工法と試験方法

1. 止水工法とシール材の引張試験情報

本報の試験に用いた止水工法は、開水路の目地被覆工法の中のシート貼付方式に位置付けられ³⁾、シート

としてポリエチレン系のシール材、貼付媒体としてエポキシ系の硬化材を用いた方法である⁴⁾。写真-1は大潟村において潤辺が5 mのコンクリート用水路の目地部3カ所にこの止水工法を試験的に適用したもので、施工部は潤辺に沿って白い帯状をなしている。図-1は施工部の断面を模式的に示したものである。シール材の幅は100 mm、接着部は片側42.5 mmで帯状の施工幅は目地をはさんで165 mmとなる。止水工法の順序は、施工面を洗浄し乾燥させた後に、施工面を平滑にする成型機能と接着機能をあわせて持つ硬化材を左官で1~2 mmの厚さに塗布し、厚さ1 mmのポリエチレン製のゴム様態のシール材を接着した後に、接着部とその周辺に硬化材を左官で厚さ



写真-1 コンクリート用水路目地部への施工例

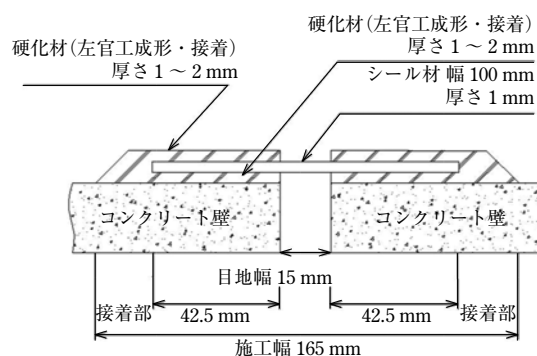


図-1 止水工の断面と構成

*第一建設工業(株), **岩手大学農学部

九州大学大学院農学研究院, *岩手大学名誉教授



開水路, 止水工法, 大気暴露試験, 紫外線, 引張試験, 単純せん断試験

1~2 mm の厚さに塗布することによる成型からなる。

表-1 はシール材の引張強度と切断時の伸びに関する試験結果⁴⁾であり、本報で提案する試験を評価するひとつの参照値となるものである。なお、DIN はドイツ規格協会 Deutsches Institut für Normung の略称である。DIN53504 の引張試験⁵⁾の供試体のダンベル形状は S3、試験速度は 200 mm/min であり、JIS K 6251 のダンベル 7 号の引張試験⁶⁾と同等と考えられる。

表-1 止水シール材の引張試験の試験結果

	試験規格	試験値
引張強度	DIN53504	6 MPa 以上
切断時の伸び		400% 以上

2. 試験方法

土木資材の耐候性試験には自然条件下で試料を曝^{さら}す大気暴露試験と、室内の試験槽内で太陽光などの条件を制御して試料を曝^{さら}す促進耐候性試験に大別される。促進耐候性試験は短期間で試験を実施できるが、試料の大きさに制約があるため、施工された状態に近い供試体を主題とした本報では、大気暴露試験を選択した。

(1) 供試体の大気暴露試験と地上気象観測 供試体の作製に当たっては写真-1、図-1 の実態に準拠した。その部材構成は 300 mm × 300 mm、厚さ 33 mm、細骨材最大粒径 5 mm のモルタル平板（太平洋プレコン工業社製：NS-01 普通平板）を 100 mm × 100 mm に切断したモルタル平板 2 枚を水路のコンクリート部材に見立て、板の間に 15 mm の目地間隔を設け、幅 100 mm、厚さ 1 mm のシール材を硬化剤とともに施工したもので、施工幅は 165 mm である。モルタル部材のシール施工部にはダイヤモンドカップを装着したディスクグラインダーで下地処置を施した。一連の供試体作製の手順は前述の施工例と同様である。

後述の力学的試験のために、供試体のつかみ具を作製した。図-2 は、供試体をつかみ具に装着したものである。つかみ具の材質は厚さ 1.6 mm の鋼板で、M16 取付けボルトによって供試体を固定するもので、(一財)秋田県建設・工業技術センターでの小型卓上試験機（島津製作所製：EZ Test EZ-L）による力学的試験を前提にしたものである。

図-3 は大潟村に設けた暴露試験場の位置を同村の灌漑と排水のあらましとともに示したものである。八郎潟調整池とこれに接続する東西の承水路が同村の行政界となり、調整池に流入する馬場目川を主な用水源としている。東西と南北に交差する幹線排水路で水路網と承水路を結合し、機械排水によって水田灌漑を制

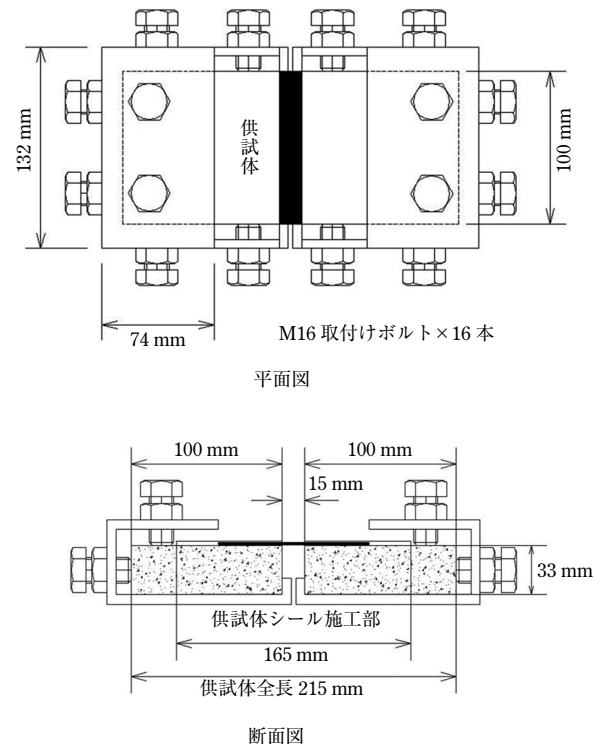


図-2 供試体と力学的試験用つかみ具

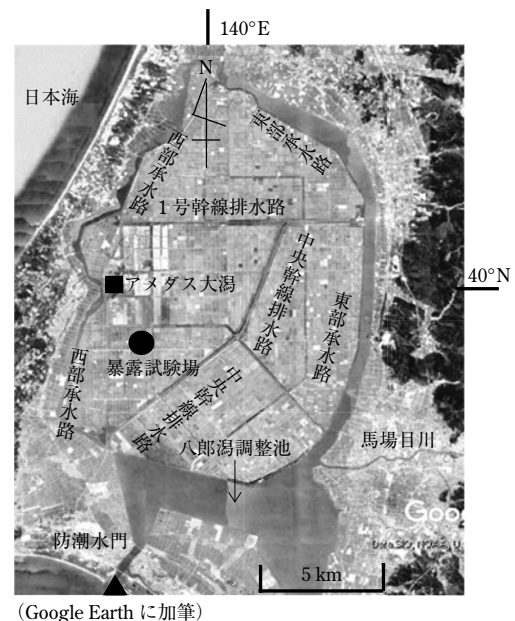


図-3 大潟村と暴露試験露場の位置

御している。村内には北緯 40°と東経 140°線の交差点があり、東北地方日本海側の気候的な指標となり得る。西側に住居と公共施設などからなる区域があり、その南端付近の大潟村土地改良区の敷地内に暴露試験場を設けた。試験場のすぐ北側にアメダス大潟がある。

試験場において写真-2 のように、真南向きで傾斜 30°のコンクリートパネル製の暴露棚を設けて、供試体を設置した。設置した供試体の数は後述の力学的試

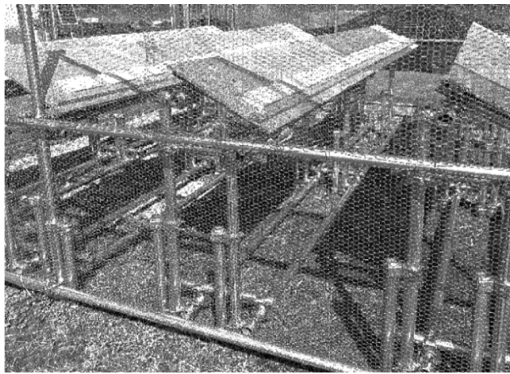


写真-2 供試体の暴露

表-2 観測要素とセンサーの型式

観測要素	センサーの型式
気温・湿度	Vaisala 社製 HMP155
風向・風速	Young 社製 YG5103
水平面日射・反射日射	Hukseflux 社製 NR01
水平面紫外線 A, B 領域 (波長範囲 280~400 nm)	Kipp&Zonen 社製 CUV5
傾斜面紫外線 A, B 領域 (波長範囲 280~400 nm)	Pread 社製 PCU-01D
降水量	Ikeda 社製 RT-5

験にあわせ、予備を含めて 26 個とした。試験場で測定した地上気象要素をセンサーの型式とともに表-2 に示した。雨量計は地表付近、温度湿度センサーは地上 1.5 m に設置し、その他のセンサーは高さ 2 m に組んだパイプ枠に取り付けた。なお、日射量、反射日射量センサーは水平に取り付けた。各気象データは 10 秒ごとに測定して 30 分ごとの平均値を記録した。これらは大気暴露試験ハンドブック⁷⁾に準拠したものであるが、ゴムやプラスチックのぬれ時間については規格化された測定センサーが存在しないため、気温 0℃ 以上で相対湿度 80% をぬれ状態と判断する方法⁷⁾を準用した。

これらの供試体の暴露試験と地上気象観測期間は 2021 年 3 月 24 日から 3 年間とし、暴露した供試体は 1 年ごとに、後述する力学的試験に供した。なお、表-2 に示すように紫外線については 2023 年 5 月 11 日から 1 年間、暴露棚と同じ傾斜角と方位にセンサーを設置して水平面との差を確認した。

(2) 力学的試験 供試体作製後の暴露前および暴露後、1 年ごとに供試体を取り出し、力学的試験を行った。国内外で公開されているゴム材料の多様な条件での材料試験データはきわめて希少であることが認識されており⁸⁾、力学的試験は実際に起こり得る複雑な変化を想定し、力の方向を、水路の延長方向に作用してシール材に引張応力を生ずる方向（以下、「試験 X」という）および、施工部の段違いの変形によってシー

ル材にせん断応力が生ずる方向（以下、「試験 Y」という）の 2 種類とした。図-4 はこれらの試験の最中で、力の方向とシール材の伸びを模式的に示したものである。なお、図-4 における試験前の供試体のシール材の長さ l_0 は 15 mm、断面積は 100 mm^2 である。

試験 X の伸びは、力の方向の伸びを Δl_x として $\Delta l_x/l_0 \times 100$ によって表すことにする。試験 Y は変形の方法が異なり、単純せん断試験⁸⁾に相当し、せん断による伸びは、力の方向の伸びを Δl_y として $\Delta l_y/l_0 \times 100$ で表した。

暴露前に一般的な引張試験に近い試験 X を行い、初期値とした。なお、試験速度は供試体の切断時の揺動による試験機の誤作動を避けるため、試行錯誤の結果、10 mm/min とした。

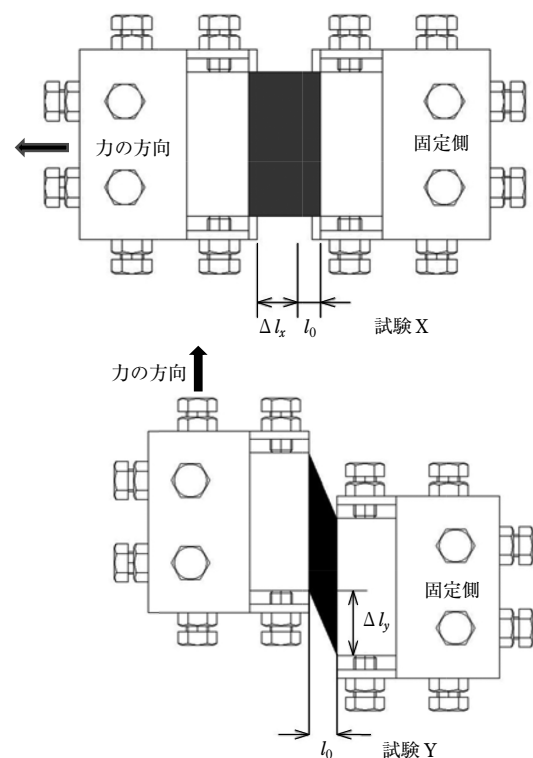


図-4 試験 X と試験 Y の力の方向とシール材の伸び

III. 試験結果と考察

1. 地上気象測定結果

表-3 は対象期間の地上気象測定結果の年平均値、積算値などを示したものである。止水工法の耐候性と個別の気象要素との関連を直接的に論ずることは困難であるが、暴露試験に添付すべき項目⁷⁾に準拠しつつ、その書式を簡略化したものである。試験地では供試体が積雪に覆われることがある。積雪面における日射量に対する反射日射量の割合であるアルベド（反射率）は、おおむね 0.5 以上であるので⁹⁾、アルベドが 0.5

表-3 対象年の地上気象要素

対象年*	気温 (℃)	相対湿度 (%)	風速 (m/s)	最多風向 (出現率%)	日射量 (MJ/m ²)	紫外線量 (MJ/m ²) (アルベド0.5未満 の日の紫外線量)	降水量 (mm)	ぬれ時間 (h) (出現率%)
2021~2022年	12.2	80	0.8	西 (14)	4,631	259 (227)	1,509.0	4,271 (24)
2022~2023年	12.4	80	0.8	西 (12)	4,522	245 (228)	1,548.5	4,241 (24)
2023~2024年	13.2	82	0.7	西 (11)	4,483	249 (232)	1,905.5	4,853 (28)

*各対象年は3月24日から翌年の3月23日まで

以上であった日を除外した場合の紫外線量をあわせて示した。国内の地上気象観測点で長野県軽井沢の年平均相対湿度の平年値が最も高く80%であり¹⁰⁾、大潟村はこれと同等である。このことは水田と水面が広く分布し、蒸発散フラックスが大きいことが一因と考えられる。風速センサーの設置高がアメダスの10mに比べて低いため、風向は、いずれも西成分が卓越するものの、アメダスの風速平年値¹¹⁾2.7m/sとの差は大きい。高い湿度を反映して、ぬれ時間の出現率は25%前後である。なお、雨量計が積雪の影響を受けると考えられる12~3月の降水量はアメダスのデータ¹¹⁾を用いて年間値を求めている。年間の日射量に紫外線量が占める割合は5.5%前後である。アルベドを指標として試験期間における積雪日を除外した紫外線量は687 MJ/m²である。

目地被覆工法の耐候性は紫外線による劣化によって評価される。開水路の目地に施工されるシート材が1年間に受ける紫外線量は、灌漑期間中には水中にあること、開水路の側壁は一般的に直立していること、さらに立木などの影響があるので、水平面が受ける紫外線量の11.1%とされ、この条件下で期待されるシート材の耐用年数を20年間としている³⁾。この見地から3年間の試験期間は妥当なものと考えられる。

同じ条件下でシート材が受ける20年間の紫外線量はオープンフレームカーボンアークランプを用いた室内耐候試験^{12), 13)}において1,200時間の暴露に相当するとされている³⁾。この試験に用いる光源の紫外線のみ放射強度を80 W/m²とすると¹⁴⁾、1,200時間の紫外線量は346 MJ/m²となり、この面からも試験期間中の紫外線量は妥当であると考えられる。

なお、表-2に示すように水平面と傾斜面の紫外線を比較したところ、2023年5月11日から翌年の5月10日までの1年間の水平面紫外線量259 MJ/m²に対して暴露棚と同じ方位、傾斜面では265 MJ/m²であった。両者の差はわずかであり、紫外線の散乱が大きく影響していると考えられる。

高分子の劣化過程のひとつとして、2重結合の炭素鎖から、熱や紫外線のエネルギーを媒介として、酸素と結合してカルボニル基が生成され、炭素鎖が切断さ

れることがあげられる¹⁵⁾。さらにカルボニル基が親水性のために、カビの発生により止水材の接着部の剥離が促進されることに起因する事故や、加水分解による分子量の低下によって材料が崩壊することが指摘されている¹⁶⁾。

図-5は2021年3月から2024年2月までの紫外線量とぬれ時間の月合計値を示したものである。両者は、おおむね同期して変化し、高分子材料の劣化要因から見て、大潟村は、暴露試験地として好適な条件を備えているといえる。

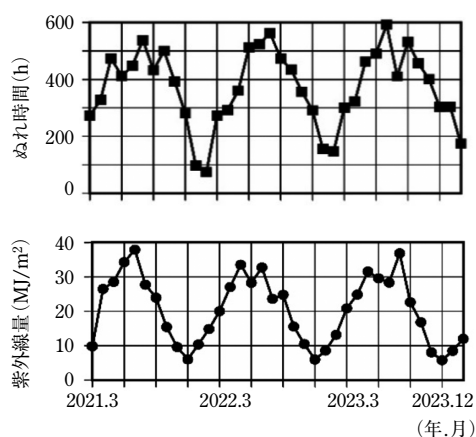


図-5 紫外線量とぬれ時間の推移

2. 力学的試験と経年劣化の検証

JISではゴムの物理試験を温暖地で行う場合、試験室の標準温度は23℃±2℃、標準湿度を相対湿度50%±10%としている¹⁷⁾。一方、DINは試験室温として定義し、同じく23℃±2℃としているが、条件によっては他の温度も選択が可能としている⁵⁾。力学的試験を実施する秋田市の3月の平均気温の平年値は4℃であり¹⁰⁾、実験室温度を23℃とすることが困難であるが見込まれたので、本報では、20℃±2℃を実験室温の目標と設定したが、後述の1年経過後の供試体の試験は、室温17℃で実施した。相対湿度はいずれも50%±10%であった。

なお、目地被覆工法には耐候性ととも、品質規格値として、ひび割れ、膨れ、剥がれがないことが要求されているが³⁾、予備を含めた供試体にこのような変

化は認められなかった。

(1) 初期値 表-4 は供試体作製後に、試験Xを行い、その結果を示したものである。供試体の数は後述の経年変化とともに3個である。所定の伸びは推奨されている300%とし⁶⁾、そのときの引張応力をあわせて示した。この結果から、施工状態の供試体の基本的な引張試験の性質は表-1で示したダンベル型供試体を対象とした値の範囲内にあると判断できる。

表-4 引張試験の初期値

引張強さ (MPa)	切断時の伸び (%)	伸び300%の 引張応力(MPa)
6.53	700	5.23
6.27	640	5.06
6.10	560	5.26

(2) 試験値の経年変化 試験Xおよび試験Yについて暴露開始から1年ごとの試験の結果を3個の供試体について、それぞれ表-5、6に示した。いずれの試験もシール部の切断の場合と接着部の硬化剤とシール材間の剥がれの場合が混在するので、剥がれの場合は*印を記し、切断、剥がれのいずれの場合も、そのときの応力を試験Xは引張強さ、試験Yではせん断強さとした。同表では、1年ごとの供試体の引張強さ、またはせん断強さの順で①、②、③を付与して供試体の番号とした。それ以降の項目は番号を付された供試体についての値である。図-6と図-7は同じく1年ごとの試験において試験Xの引張強さ、試験Yのせん断強さが中央値を示した番号②の供試体についての応力伸び曲線である。

試験Xの引張強さと、伸び300%における応力は初期値よりも大きいのが、この一因としてゴムの引張強さに、不可避免的に内在する不分散や欠陥¹⁸⁾が影響している可能性があげられる。その一方で、経年的な変化

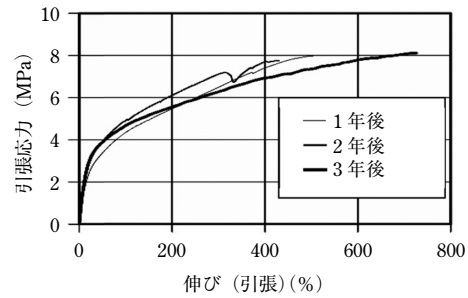


図-6 試験Xの経年ごとの引張応力と伸び

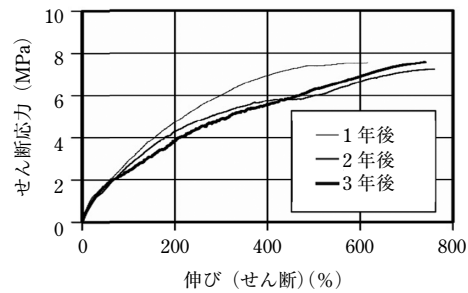


図-7 試験Yの経年ごとのせん断応力と伸び

は認められない。切断または剥がれ時の伸びは、1年経過後と2年経過後で初期値より小さくなるものの、3年経過後では大きくなり、一定の傾向は認められない。2年経過後の2つの供試体では、不明瞭ながら降伏点がみられるが、降伏点の応力と引張強さとの差は小さい。

試験Yでは、せん断強さの経年的な変化は認められない。所定の伸びを同様に300%とし、そのせん断応力の経年変化を比較すると、やや低下傾向もあるが、その差はわずかである。また、1年経過後、2年経過後に降伏点が認められるが、それ以降の応力の変化は小さい。図-6、7から判断する限り、試験Xは伸び100%付近で伸びに対する応力の勾配が変化するが、試験Yではこのような勾配の変化は少ない。この差を

表-5 試験Xの経年変化

経過年	引張強さ (MPa)			切断／剥がれ の伸び (%)			伸び300%における 引張応力 (MPa)			降伏点引張応力 (MPa)			降伏点伸び (%)		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
1年	8.65	8.00	*7.84	540	520	480	6.89	6.49	6.74	—	—	—	—	—	—
2年	*8.81	7.76	7.38	520	430	530	7.68	7.11	5.95	8.55	7.18	—	430	320	—
3年	8.83	8.12	7.70	680	730	670	6.52	6.28	5.69	—	—	—	—	—	—

引張強さの*マークは剥がれたケース

表-6 試験Yの経年変化

経過年	せん断強さ (MPa)			切断／剥がれ の伸び (%)			伸び300%における せん断応力 (MPa)			降伏点せん断 応力 (MPa)			降伏点伸び (%)		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
1年	*7.60	7.56	7.16	750	620	630	5.03	6.01	5.56	—	—	—	—	—	—
2年	7.29	*7.24	*7.18	720	760	780	4.58	5.16	4.98	—	5.81	5.98	—	440	450
3年	7.58	*7.58	*7.52	740	760	730	4.90	4.55	4.68	—	—	—	—	—	—

せん断強さの*マークは剥がれたケース

定量的に論ずることは困難であるが、試験時のシール材の^{ねじ}振れの形状の違いに起因するものと推測される。

これらの結果から、試験X、試験Yのいずれにおいても、一定の傾向を持つような経年劣化は認められない。また、ひび割れ、膨れ、剥がれも認められず、紫外線による耐候性に関してはシート貼付方式に期待される20年間に於いて機能を維持できるものと期待できる。

IV. おわりに

開水路の施工時や補修に用いられる目地被覆のための、シート貼付方式に分類されるひとつの止水工法を題材とし、施工状態に近い供試体を作製し、干拓地である秋田県大潟村において3年間にわたる大気暴露試験を実施した。目地被覆工法の耐候性は紫外線によって評価されるが、試験期間の紫外線量は止水工法の耐候性に期待される20年間に於いて十分であることが示された。1年ごとに、引張試験とせん断試験を行った結果、経年的な劣化は認められず、外観的にも変化はなく、当該の止水工法は、その効果が期待される20年に対して十分な紫外線に対する耐候性を持つことが示された。

謝辞 本試験の実施に当たり、大潟村土地改良区のご厚意によって暴露試験と観測露場を設けた。また試験計画策定や観測では、秋田県立大学生物資源科学部の永吉武志先生にご協力をいただいた。(一財)秋田県建設・工業技術センターには力学的試験のご指導、ご助言をいただいた。記して感謝いたします。

引用文献

- 高橋長仁, 柿崎壮太, 高橋李衣, 金山素平: 八郎潟粘土の圧密変形特性と水利構造物の沈下予測, 農業農村工学会論文集 313, pp. II_77~II_84 (2021)
- 松岡宗太郎, 川口清美, 小野尚二, 武下和幸: 平成30年北海道胆振東部地震での農業水利施設の被災概要, 水土の知 88(2), pp. 33~38 (2020)
- 農林水産省農村振興局整備部設計課: 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路編】(2023), <https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/kaisuiro-1.pdf> (参照2023年11月1日)
- Sto Cretec: Technisches Merkblatt StoSeal D 100 (2020)
- DIN: DIN53504 Testing of rubber-determination of tensile strength at break, tensile stress at yield, elongation at break and stress values in a tensile test (2017)
- 日本産業規格: JIS K 6251 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方 (2023)
- (財)日本ウエザリングテストセンター: 大気暴露試験ハンドブック (2007), <http://www.jwtc.or.jp/gijutsu/01.pdf> (参照2023年9月1日)
- 吉田純司: ゴムの実挙動とそのモデル化 [I], Mechanical CAE NEWS 8, pp. 26~32 (2013)
- 近藤純正, 沼田洋一, 山崎 剛: 積雪面アルベードのパラメータ化, 雪氷 50(4), pp. 216~224 (1988)
- 国立天文台: 理科年表 令和5年 第96冊 机上版, pp. 226~227, 丸善出版 (2023)
- 気象庁: 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php> (参照2024年4月10日)
- 日本工業規格: JIS K 7350-4 プラスチック—実験室光源による暴露試験方法—第4部: オープンフレームカーボンアークランプ (2008)
- 日本工業規格: JIS B 7753 サンシャインカーボンアーク灯式の耐光性試験機及び耐候性試験機 (2007)
- (財)日本ウエザリングテストセンター: 促進暴露試験ハンドブック (2009), <http://www.jwtc.or.jp/gijutsu/07.pdf> (参照2023年9月1日)
- 岩田多加志: 高分子材料の品質劣化の解析技術, 技術ノート こべるにくす 8(15), コベルコ科研, pp. 11~12 (1999)
- 大武義人: 腐食と劣化 (6) 合成樹脂 (ゴム・プラスチック) の劣化評価・分析手法, 空気調和・衛生工学 80(1), pp. 69~75 (2006)
- 日本工業規格: JIS K 6250 ゴム—物理試験方法通則 (2019)
- 角田克彦, 森下善広: ゴムの破壊の基礎知識, 日本ゴム協会誌 94(4), pp. 142~149 (2021)

[2024.10.22.受理]

正会員: 鈴木健史, 佐藤勇樹, 濱上邦彦, 山本清仁, 金山素平, 倉島栄一