## ジオメンブレンの貯水池表面遮水工法への合理的な適用法

### 農林水産省農業工学研究所 長束 勇

貯水池表面遮水工法に使用されるジオメンブレン(GM)の性能は、遮水システムとして構築され 運用される具体的現場条件において調べ、評価することが重要である。そこで、大規模にGMが導入 された三つのケーススタディにおいて、それぞれに共通する、あるいは個々の特徴的な技術的課題に ついて室内モデル実験を行い、その結果の評価を通じてGMの合理的な適用法を論じた。A調整池(北 海道)はGMの寒冷地貯水池への適用事例でありGMの力学的物性値の温度依存性が、B調整池(愛 知県)はGMの高水深貯水池への適用事例でありGM厚さの選定基準となる耐水圧性の評価法が、C 調整池(沖縄県)は高温高湿地域に位置する貯水池であり現場接着部の力学的安定性に現場気象条件 が与える影響評価が、主要な検討課題であった。さらに、GMの耐久性評価は共通した検討課題であ り、30年間供用している実験池からの試料採取によりGMの実材令の経年劣化特性を明らかにした。 キーワード:ジオメンブレン、貯水池表面遮水工法、温度依存性、耐水圧、経年劣化

# Reasonable Application Methods of Geomembranes to the Surface Lining System of Reservoirs

### I.Natsuka : National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF

It is important to examine the performance of Geomembranes (GMs) used for the surface lining system of reservoirs in the actual site condition constructed as a water-proof system, and to evaluate it under the operated condition. In this paper, each technical problem of the following three case studies into which GMs were used on a large scale was discussed. A regulating reservoir in Hokkaido was a case where GMs were applied to the reservoir in the cold region, and it was a main subject to clarify the temperature dependency of dynamic physical properties of GMs. B regulating reservoir in Aichi Pref. was a case where GMs were applied to the reservoir of high depth, and it was a main subject to evaluate the water-proof pressure of GMs to select thickness. C regulating reservoir in Okinawa Pref. was a reservoir located in the high temperature high humidity region, and it was a main subject to evaluate the influence which the site weather condition gave to dynamic stability of the site bonding parts of GMs. In addition, the durability evaluation of GMs was a common subject, and the deterioration characteristic of passing year of the real ageing of GMs was clarified by the sample collection from the test pond which had been used for 30 years.

Key words: Geomembranes, Surface lining system of reservoirs, Temperature dependency, Waterproof pressure, Passing year's deterioration

# ジオメンブレンの貯水池表面遮水工法への合理的な適用法

### 農林水産省農業工学研究所 長束 勇

## 1. 貯水池表面遮水工法における技術的課題

貯水池表面遮水工法に利用する GM の性能は、構成される遮水システム総体として評価されるべき である。従って、遮水システムが構築され運用される具体的現場条件下において、その性能を調べ評 価することが重要である。A 調整池(北海道、GM による全面表面遮水、満水面積 72,000m<sup>2</sup>、最大水深 12m)は、GM の寒冷地貯水池への適用事例であり、低温環境下における力学的特性の低下が小さい寒 冷地での利用に適した GM を選定することが課題であった。B 調整池(愛知県、貯水池斜面部:アスフ アルトフェーシング、池底部:GM による表面遮水、満水面積 343,000m<sup>2</sup>、最大水深 23m)は、GM の 高水深貯水池への適用事例であり、敷設下地条件に左右される GM の耐水圧性と GM 厚さの関係を究 明し、適切な GM 厚さを決定することが検討課題であった。また、C 調整池(沖縄県、GM による全面 表面遮水、満水面積 46,000m<sup>2</sup>、最大水深 23m)は、A 調整池の対極にある高温高湿地域に位置する貯水 池であり、現地気象条件が GM 現場接着部の力学的安定性に与える影響を解明し、力学的安定性を確 保できる施工法を確立することが課題であった。さらに、これら貯水池に共通する課題は、表面遮水 工法に用いられた GM の経年劣化を極力抑え、耐久性を高めるための方策を検討することであった。

2. GM の寒冷地貯水池への適用事例 – 寒冷地での利用に適した GM の選定 –

2.1 比較検討供試体と実験条件 A 調整池は、近傍地点の気象観測気温月報(比布:1979~1988 年)に よると、最低気温は-31.4℃、毎年-25℃以下になる寒冷地に位置する条件下で、GM が大規模に使 用された事例である。GM 種別の選定に先立ち、EPDM 系、HDPE 系、TPE 系、PVC 系の GM に関す る技術資料をメーカー各社から収集した。その結果、GM の温度特性に関する資料は各社共に低温側 は-20℃までであり、現地で経験するさらに低温時の資料は不十分であった。また、メーカーから示 された評価物性値は、JIS などに基づく素材毎に異なる試験方法の下で実施された結果であったこと から、材料選択を行う上で必要な異種材料間の直接的な性能比較は困難であった。そこで、上記 4 種、 各々2 製品(EPDM 系: A, B、HDPE 系: C, D、TPE 系: E, F、PVC 系: H, I)の GM を比較供試体と して、同一の実験条件で引張試験を行い、力学的物性値(引張強さ  $T_B$ 、切断時伸び  $E_B$ 、300% 引張時の 応力 M300)の温度特性を比較検討した。同一実験条件とは、GM 厚さは 1.5mm、試験片形状はダンベル 3 号、サンプリング方向は長手方向、引張速度は 500mm/min である。検討温度範囲は、低温側は極低 温の-40℃、高温側は曝露状態で使用される黒色系 GM の夏場の表面温度とされる+60℃である。

2.2 各 GM の力学的物性値の温度依存性 図-1~4 は、各供試体の実験温度 60, 20, 0, -15, -25, -40℃における引張試験結果の代表例を示したものである。なお、HDPE 系 GM の C と D、TPE 系 GM の E と F は、各々よく似た温度特性を示したことから、供試体 C、供試体 F の結果のみを示した。

図-1 に示した EPDM 系 GM は、温度低下に伴い  $T_B$  は大きくなるが、温度低下に比例するように  $E_B$  は小さく、 M300 は大きくなる。20 $\mathbb{C}$ では引張応力は伸びにほぼ比例しているが、低温になるにつれそ

の関係が崩れ、-40℃においては引張応力が降伏応力に近 づくまで伸びが小さく、その後一気に伸びて破断する。す なわち、EPDM 系 GM の特長である伸びに関する特性は、 低温になるにつれ著しく低下する。

図-2 に示した HDPE 系 GM は、低温になるに従い、T<sub>B</sub>は より大きくなり、-40℃の時のT<sub>R</sub>は 50MPa 程度と、20℃時 の概ね2 倍である。降伏時伸びは温度低下に伴い小さくな る傾向にあるが、-40℃においても 10%程度はある。また、 E<sub>B</sub>は、温度低下に伴い急速に小さくなり、-40℃では100% 以下となる。ここで、HDPE 系 GM の物性値  $E_B$ の取り扱い については、注意が必要である。一般には、HDPE 系 GM の 場合も、ゴム状弾性を有する GM と同様に、基本物性値と して E<sub>B</sub>が表示される。しかし、この E<sub>B</sub>は、貯水池の設計に おいては意味を持たない値である。すなわち、図-2のよう に、HDPE 系 GM はいずれの温度でも伸びの初期で降伏を生 じ、その後は、ほぼ一定の応力(TRの 60%前後)で、伸びる 箇所が次々に移動する形で伸びる(ネッキング現象)。この現 象を起こした以降の GM の物性は、初期の物性とは全く異 なり、外力の増加に対して無抵抗である。従って、貯水池 での設計においては、降伏点を迎えるまでの引張応力と伸 びの関係を用いて検討すべきであり、降伏点以降の引張応 カや伸びは、ゴム状弾性を有する GM の場合とは異なった 取り扱いをすべきである。こうした不適切な EBの取り扱い の原因は、GM に関する試験方法の不備によるものである。

TPE 系 GM は、EPDM とポリオレフィン(エチレンの同族 体)系樹脂をブレンドしたブロック共重合体である。メーカ ーサイドや国際学会の分類<sup>1)</sup>では、EPDM 系 GM とされる。 しかし、図-5 に 20℃における応力-伸び曲線を示すように、 HDPE 系 GM と EPDM 系 GM の応力-伸び曲線を合成したよ うな形状であり、明らかに降伏点が存在する。また、その 温度特性は、図-3 に示したように、 $T_B$ は HDPE 系 GM と同



様の温度依存性を、 $E_B$ は HDPE 系 GM と EPDM 系 GM との中間的な温度依存性を示す。これは、TPE 系 GM の材料素材であるポリオレフィン系樹脂と EPDM の力学的特性が合成された結果である。従って、土木用遮水材料として使用する利用者側にとっては、配合素材からみた分類よりも、力学的特性からみた分類の方が利用上の誤解を防止できることから、TPE 系 GM は EPDM 系 GM とは分類せずに、別途に合成ゴム・合成樹脂複合系 GM と、分類上位置付けされるのが適切である。

図-4 に示した軟質 PVC 系 GM(H)の力学的物性値の温度依存性は非常に大きい。実験温度-15℃に おいては、伸び 30%程度以降は、引張応力のわずかな増加で容易に伸び、150%程度の伸びで破断に 至る。さらに、-25℃以下になると、応力-伸び曲線は、TPE 系 GM のそれに似ており、明瞭な降伏点 が現れる。一方、高弾性軟質 PVC 系 GM(I)については、-25℃程度まではゴム状弾性が不十分ながら も残っており、-40℃においても 200%程度の伸びは確保される。PVC 系 GM の使用に際しては、使 用環境条件に十分配慮し、所要の性能を備えた製品選定を行うことが重要である。

2.3 寒冷地用 EPDM 系 GM の試作 一般に、遮水材に要求される物性としては、強度のみならず伸びが重要となる。これは、広範囲なライニングにおいては GM 自体の伸縮や不同沈下で変形が生じるため、それに対応できる物性として伸びが必要となるからである。伸びを十分に有する材料では伸びにより応力の分散が図られるが、伸びが少なく引張強度の高い材料では部分的な応力集中を生じ、GM 相互の接着強度やコンクリート構造物などとの端末固定部強度もそれだけ大きな強度が要求されるこ

とになる。上述したように、市販されている何れの GM も 力学的物性値の温度依存性が大きいが、EPDM 系 GM は、 配合設計段階での工夫により使用目的に応じて基本特性を ある程度改良できる材料である。そこでメーカーに協力を 依頼し、市販品 GM の基本原料構成を元として、ゴム分、 加硫剤、オイル分、充填剤の比率および加硫条件の調整に より寒冷地用の GM の配合設計を試みた。表-1 は、その改

図-6 に試作した寒冷地用 GM の各実験温度 における引張試験結果の代表例を、市販品 GM に対比して示す。20℃での引張特性が市 販品 GM と変わらないにも拘わらず、低温時 のしなやかさが大きく改善され、応力-伸び関 係も線形性が維持できている。また、 $E_B$ も一 40℃であっても 450%を確保できている。試 作目的に合致した寒冷地用 GM が開発できた といえる。A 調整池においては、この寒冷地 用 GM が採用された。

良の検討過程を整理して示したものである。



図-6 EPDM 系寒冷地用 GM の引張試験結果

表-1 EPDM系 GM 改良の経緯(配合設計の検討)

名称	改良の方針	配合設計の変更	実験結果
改良型	<ul> <li>市販品に</li> <li>比べ、弾性</li> <li>度を向上さ</li> <li>せる</li> </ul>	・ゴム分の増量(50%増し) ・加硫剤の増量(従来型の2 倍)	<ul> <li>○ 低温物性変化特性を大きく改善</li> <li>加熱労化性が大きい</li> <li>● 加硫酸のブルームが発生</li> <li>● 加工性の低下</li> </ul>
再改良型	・熱劣化特 性を向上さ せる	・加減済の調整(従来型の15 倍) ・カーボン量の減 ・オイル量の増	<ul> <li>○ 低温物性変化特性を改善</li> <li>○ 加熱労化特性の向上</li> <li>○ 加筋剤のブルーム発生解消</li> <li>○ 加工性良好</li> <li>△ 常温時を含め引脱強さ増大 (硬い)</li> </ul>
寒冷地型	・而実性、基 盤追随性を 向上させる	・ボリマー成分の配合変更 (プロビレンの増量) ・加防剤量は再改良型と同様	<ul> <li>○ 低温時を含めしなやかさを大きく改善</li> <li>○ 低温物性変化特性良好</li> <li>● 加熱労化性が大きい(加硫不足)</li> <li>● 加工性の低下</li> </ul>
新寒 冷地 型	・ <b>熱劣化特</b> 性、加工性 を向上させ る	・加滞期の延長(20%増し) ・若干のカーボン量の増、オ イル量の減など、配合を一部 修正	<ul> <li>(広温時のしなやかさを改善)</li> <li>(広温物性変化特性良好)</li> <li>熱労化特性の向上</li> <li>加工性の向上</li> </ul>

3. GM の高水深貯水池への適用事例 – 敷設下地条件による耐水圧性からの GM 厚さの決定 –

3.1 GM の基盤局部凹部における引張破断 貯水池表面遮水材料としての GM は、材料特性上、遮水 のみを担うよう構造設計が行われる。すなわち、水圧、土圧などの外力には、基盤材や構造材で対抗 するよう設計を行うことが原則とされる。しかし、実際の施工においては、大別して、①長大斜面に 敷設された場合の自重などによる平面内一次元引張、②敷設基盤の陥没などによる広がりのある三次 元引張、③基盤の局部凹凸部での突き抜けまたは貫入による二次元・三次元引張、の三つのケースの 引張力を受け、それが耐力以上に大きいと引張破断を起こす。①については、JIS において試験法が 確立されており、②については、GRIが研究機関として貴重な試 験法の提案を行っている<sup>2)</sup>。③に関しては、凸部については、工 事施工中の過失による破断が問題となることが多いことから、従 前より種々の試験法によってその評価が行われている<sup>3)</sup>。しかし、 凹部については、一部の研究者によってその危険性が指摘され、 試験法が提案されている<sup>4)</sup>が、その破断メカニズムを詳細に検討 した事例は報告されていない。

3.2各種基盤上に敷設された EPDM系 GMの耐水圧実験結果 表 -2 は、溝幅、鋼球径、砕石径を種々変えたモデル基盤上に、厚 さ1,1.5,2mm の EPDM系 GM(T<sub>B</sub>:約 10MPa、E<sub>B</sub>:約 520%)を敷設して 行った耐水圧実験結果である。この実験における破断は、全て、基盤の 局部凹部への貫入部の先端で生じている。これは、水圧が上昇するにつ れ GM は空隙の底に向かって順次伸びながら変形するが、空隙に貫入し 空隙壁に接した部分については、接した直後以降は壁との摩擦力により 変形が拘束され、未だ壁に接しない部分が、その後の伸びの多くを担う 結果であると考えられる(写真-1参照)。換言すれば、空隙に貫入した GM には、その伸びる領域が順次縮減することにより伸びが加速される箇所 が出現し、ごく特定箇所が破断に至る伸び率に達するものと考えられる。 こうした伸びに関する現象を説明できる理論モデルを、応力に関する現 象を説明する理論モデルと合わせて構築することが、局部凹部における 引張破断現象を解明するためには必要である。

3.3 伸びる領域が順次縮減するモデル 図-7 は、GM が引張されていく 際、ある一定長さ以上の端部は伸びた段階で伸びを拘束され、次の引張 段階では伸びに貢献しない場合を想定した伸びる領域が順次縮減する一 次元モデルを模式的に表したものである。第 I 段階では、xoの長さの GM

が引張された結果、 $b_1$ だけ伸びたものとする。その引張状態で、長さ $x_0$ を越える $b_1$ の長さの端部だけ をその長さで固定し、以降の引張段階では $b_1$ 部分は伸びに貢献しないものとする。従って、もし引張 力が解放されると GM は元の状態に戻るが、伸びに貢献する部分は $y_1$ だけ短くなり $x_1$ となっているこ とになる。ここで、 $x_0:b_1 = x_1:y_1$ 、また、 $x_1 = x_0 - y_1$ であるから、 $y_1 = x_0b_1/(x_0 + b_1)$ である。一方、この引張 段階での伸び率を $r_1$ とすると、 $b_1 = x_0r_1$ であるから、

y<sub>1</sub> = (r<sub>1</sub>/(1+r<sub>1</sub>))x<sub>0</sub>と表せる。また、x<sub>1</sub> = (1/(1+r<sub>1</sub>))x<sub>0</sub>、r<sub>1</sub> = b<sub>1</sub>/x<sub>0</sub>である。以降、同様に、第Ⅱ段階、第Ⅲ段階を経て、第n段階のy<sub>n</sub>、x<sub>n</sub>、r<sub>n</sub>を導出すると、

$$y_n = \frac{(r_n - r_{n-1})}{(1 + r_{n-1})(1 + r_n)} x_0 , \quad x_n = \frac{1}{1 + r_n} x_0 ,$$
$$r_n = \frac{b_1}{x_0} + \dots + \frac{b_n}{x_0} \left(1 + \frac{b_1}{x_0}\right) \left(1 + \frac{b_2}{x_0}\right) \dots \left(1 + \frac{b_{n-1}}{x_0}\right)$$



写真-1 砕石上に敷設された GM の水圧負荷時の状況

表-2 EPDM 系 GM の耐水圧実験結果

•			単位:MPa		
	GM 厚さ(mm)				
	1	15	2		
) ) ) )					
12	0.7	0.9	1.25		
10	0.9	0.9	15		
8	0.9	1.35	1.65		
6	1	1.75	2.45		
5	13	2	265		
4	1.65	24	29以上		
3	3 2.1		29以上		
2	2.9	29以上	29以上		
鋼球径(	þmm)				
43	0.9	1.7	2.03		
40	0.9	1.77	2.23		
35	0.9	1.9	2.3		
30	1.03	2.03	2.43		
25	1.57	23	2.83		
20	21	29以上	29以上		
12	25	29以上	2.9以上		
10	29以上	29以上	2.9以上		
8	2.9以上	2.9以上	2.9以上		
碎石					
\$-40	0.37	0.83	0.9		
S-30	0.43	0.9	0.9		
S-25	0.57	0.9	0.97		
S-20	0.63	0.9	1.17		
S-15	0.9	15	1.97		
S-10	0.9	25	2.7		
C-40	1.1	21	2.73上		
M-40	2.5	2.9	2.9以上		

S: 単粒砕石、C: クラッシャーラン、M: 粒調砕石

 第1段階
 ×0

 第1段階
 ×0

 第1段階
 ×1

 第1段階
 ×2

 第1股階
 ×2

 第1股階
 ×2

 第1股階
 ×2

 第1股間
 ×2

 第1股間
 ×2

 第10日
 ×3

 第10日

となる。ここで、 $b_1 = b_2 = b_3 = \dots = b_n = b$ 、 $r = b/x_0$ とすると、 r,=(1+r)<sup>n</sup>-1と表せる。すなわち、一定長さ以上の端部は伸 びた段階で伸びを拘束され伸びる領域が順次縮減する場合 には、伸びに貢献する部分の伸び率は、1+rに近い加速度で 大きくなる。

一方、図-8は、円形の GM を全方向(二次元)に引張し た際、円のある一定幅の外周は伸びた段階で伸びを拘束され、次の引張段階では伸びに貢献しない場 合を想定したモデルを模式的に表したものである。第Ⅰ段階で、半径 x<sub>0</sub>、面積 x<sub>0</sub>の円形の GM を二次 元に引張した結果、半径が<sub>b</sub>、面積が B<sub>1</sub>だけ、伸びて大きくなったものとする。その引張状態で元の 半径 x<sub>0</sub>を越える幅 h の外周だけをその引張状態で固定し、以降の引張段階では幅 h の外周部分は伸び には貢献しないものとする。従って、もし引張力を解放すると元の状態に戻るが、伸びに貢献する部 分は、幅 $y_1$ 、面積 $y_1$ だけ小さくなり、半径 $x_1$ 、面積 $x_1$ となっていることになる。この段階の GM の一 次元伸び率を $r_1$ とすると、 $r_1 = b_1/x_0$ 、 $x_1 = (1/(1+r_1))x_0$ 、 $y_1 = (r_1/(1+r_1))x_0$ であり、GMの二次元伸び率 $_{2r_1}$ は、  $_{2r_{1}} = B_{1}/X_{0} = 2r_{1} + r_{1}^{2}$ と表せる。また、 $X_{1} = \frac{1}{(1+r_{1})^{2}}x_{0}^{2}\pi$ 、 $Y_{1} = \frac{2r_{1} + r_{1}^{2}}{(1+r_{1})^{2}}x_{0}^{2}\pi$ である。以降、第Ⅱ段階、第Ⅲ段階、

第 n段階と、順次引張していくこととして、  $b_1 = b_2 = b_3 = \dots = b_n = b$ 、  $r = b/x_0$ とすると、第 n段階での二次 元伸び率 $_{2r_n}$ は、 $_{2r_n} = (2r + r^2)(1 + r)^{2(n-1)}$ と表せる。すなわち、一定の外周幅は伸びた段階で伸びを拘束さ れ伸びる領域が順次縮減する場合には、伸びに貢献する面積の伸び率は、<sub>(1+r)</sub>2の加速度で大きくなる。

3.4 二次元・三次元局部引張破断モデル 一定の大きさ(L) の溝や空隙の上に敷設された GM が水圧を受けた場合、貫 入深(δ)がδ<L/2の時は、図-9、図-10のように円弧状や球 冠状に変形するものと仮定する。また、δ≥L/2の時は、図 -11 のように半円形や半球の底を保持しつつ、溝や空隙の下 方に向かって順次伸びながら変形するものと仮定する。その 際、溝や空隙の壁に接する部分は、接した以降はさらに伸ば されることはなく、接する直前の伸び状態が保持されるもの とする。このような仮定の下では、3.3の計算結果が利用で

表-3 局部引張破断モデルの解

		δ < L / 2 の時	δ≥L/2 の時
	ひずみ	$\frac{R\theta}{L} = 1$	$\frac{\pi}{2}e^{\frac{2l}{L}}-1$
	応力	$\frac{Rp}{d}$	$\frac{(L/2)p}{d}$
三次元	ひずみ	$\frac{8R\delta}{L^2} - 1$	$2e^{\frac{4I}{L}}-1$
	応力	$\frac{(L^2+4\delta^2)p}{4Ld\sin(\theta/2)}$	$\frac{(L/2)p}{d}$

きる。表-3は、溝の直上の凹部に位置する部分のみが局所的に伸ばされる現象について、想定される ケース毎に GM に発生するひずみ量と応力の大きさを求めたものである。

3.5 局部引張破断モデルの解による実験結果の検討 表-3の解を用いて、表-2に示した実験結果に



図-9 溝上の GM の変形と力の釣り合い



図-10 空隙上の GM の変形と力の釣り合い







図-8 二次元引張領域順次縮減モデル模式図

おける溝、鋼球空隙への破断時貫入深、貫入底半円形部分の破断 時引張応力σを試算すると、表-4、表-5のとおりである。ただし、 貫入深は、GMのE<sub>B</sub>を520%と仮定して求めている。また、σの 値は、αをオリジナルGMの厚さとして求めている。なお、鋼球 モデルの検討では次のような仮定をおいた。先ず、貫入深が鋼球 の半径となるまでは、鋼球の直上に位置したGMが鋼球面との摩 擦力の影響を受けず、一様に伸ばされながら鋼球の上半球に密着 するものとする。その後、鋼球間の隙間を通って鋼球の赤道より さらに下に貫入していく際には、鋼球に密着していない部分(3鋼 球間に形成された最小空隙直上に位置していた部分)のみが、鋼 球面との摩擦力で拘束を受けながら局部的に引張されていくも のとする。また、最小空隙の大きさは、3つの球が接した際に形 成される最小空隙に内接する円の大きさとし、擬似的に鋼球の下 半球の空隙はこの円の大きさを持つ円柱とする。

試算結果より、溝や鋼球の空隙に貫入した GM が壁との摩擦力 で変形が拘束される場合には、次のことが示唆される。① *E*<sup>B</sup> が 520%程度ある時、摩擦力による拘束を受けず一様に伸びるので あれば貫入深が溝幅の 2.8 倍程度になるまで計算上破断しないこ とになるが、摩擦力による拘束を受ける場合は貫入深が溝幅の

### 表-4 実験結果の検討(溝の場合)

溝幅	壁ご接する	貫入深	局的破坏时限応力		
(mm)	長さ(mm)	(mm)			
L	I	I+(L/2)	1mm	1.5mm	2mm
12	8.24	14.24	4.20	3.60	3.75
10	6.86	11.86	4.50	3.00	3.75
8	5.49	9.49	3.60	3.60	3.30
6	4.12	7.12	3.00	3.50	3.68
5	3.43	5.93	3.25	3.33	3.31
4	2.75	4.75	3.30	3.20	
3	2.06	3.56	3.15	2.75	
2	1.37	2.37	2.90		

表-5 実験結果の検討(鋼球の場合)

前时	空隙 内接円	赤道以深 球壁に接	貫入深	局部破坏时限成为		<b>退</b> 応力
(mm)	直径 (mm)	する長さ (mm)	(mm)	(MPa)		-
φ	L	I	Φ/2+I +(L/2)	1 mm	1.5 mm	2 mm
43	6.7	0.94	25.8	3.0	3.8	3.4
40	6.2	0.88	24.0	2.8	3.7	3.5
35	5.4	0.77	21.0	2.4	3.4	3.1
30	4.7	0.66	18.0	24	3.1	2.8
25	3.9	0.55	15.0	3.0	3.0	2.7
20	3.1	0.44	12.0	3.3		
12	1.9	0.26	72	23		
10	1.6	0.22	6.0			
8	1.2	0.18	4.8			

1.2 倍程度でも破断に至る可能性がある。また、球間の空隙では、貫入深が球の半径の 1.2 倍程度でも 破断に至る可能性がある。②二次元局部引張を受ける場合の引張強さを、GM の耐水圧性能として評価すると、一次元引張試験での引張強さ(*T<sub>B</sub>*)である約 10MPa の 1/2 以下になる可能性がある。三次元局部引張を受ける場合は、*T<sub>B</sub>* の 1/3 程度以下になる可能性がある。③表-2 に示したように溝幅や粒径が小さいほど耐水圧は大きいが、GM の局部引張破断時に結果として期待できる引張応力(公称応力) は溝幅や空隙が小さいほど小さくなる傾向にある。これは、溝幅や空隙が小さいほど摩擦力による拘束が強くなることを反映した結果と考えられる。

3.6 EPDM 系 GM 物性値の引張速度依存性 貯水池に敷設された GM が引張力を受ける原因となる 水圧の負荷速度は極めて緩慢である。農業用貯水池の場合の試験湛水における水深の増加速度は 1m/day 程度である。図-12 は、厚さ 1.5mm の EPDM 系 GM を実験温度 20℃の条件下で、JIS による引

張速度 500mm/min を基準として、 0.025mm/min まで、 10 水 準に引張速度を変化させた場合の実験結果である。  $T_B$ と引 張速度 $\omega$ の間には  $T_B = 8.67 + 0.835 \times \ln(\omega), R^2 = 0.950$ 、  $E_B$ と $\omega$ の間には  $E_B = 471 + 21.2 \times \ln(\omega), R^2 = 0.873$  と、  $T_B$ 、  $E_B$ 共に引 張速度と非常に強い対数相関があり、引張速度依存性が大 きいことが明らかである。そこで、よく知られた粘弾性挙 動の力学的モデルであるマックスウェル-トムソンモデル、



 $\sigma = E\omega t + \tau (H - E) (1 - e^{-t/\tau}) \omega$   $E : 永久弾性係数, H : 瞬間弾性係数, \tau : 緩和時間 に、各引張速度水準での実験結果を当てはめてみると、各パラメータと引張速度の間には、$ 

 $E = 1.97 + 0.0863 \times \ln(\omega), R^2 = 0.987,$   $\tau = 64.9\omega^{-1.02}, R^2 = 0.987$ の関係がある。一方、Hは、引張速度にほぼ無関係で、10MPa 前後の値である。この結果から、E は 引張速度と極めて強い対数相関が、 $\tau$ は引張速度の逆数に極めて強い相関があることが明らかであり、 任意の水準の引張速度における GM 物性値を推定することが可能である。

3.7 EPDM 系 GM の耐水圧性の評価 溝や鋼球のモデル基 盤上に敷設した EPDM 系 GM の耐水圧実験結果(表-2)は、 0MPa から 2.9MPa に水圧を昇圧するまでに約 68 時間(途中 の 0.3MPa で 16 時間、0.9MPa で約 23 時間の水圧保持期間 を設定)を要していることから、引張速度依存性の影響を受 けていることが想定される。そこで、3.6 の結果を利用して 耐水圧実験での引張速度依存性を考慮した T<sub>B</sub>を算出し、表



図-13 GM 厚さと溝幅・内接円直径の比に対する応力低下

-4、表-5に示した局部破断時引張破断応力との差を求めた。この応力差が、引張速度依存性を考慮し ても、なおかつ残る局部引張による応力低下量であると考えられる。図-13は、応力の低下率(応力低 下量を引張速度依存性を考慮した T<sub>B</sub>で除した百分率)を、GMの厚さと溝幅の比(d/L)または GMの厚 さと鋼球の赤道間に内接する円の直径との比(d/D)をパラメータとして整理したものである。図中 で△や▲で表示したデータは、○や●で表示したデータよりも応力の低下率が大きい。これら別傾向 を示すデータ(△、▲)はすべて、水圧 0.9MPa 程度で破断を起こしたケースである。すなわち、前述し た 0.9MPa の水圧保持期間、若しくはその直後に破断を起こしたケースである。水圧保持期間中に生 じたクリープ現象の影響を強く受けた結果と考えられる。こうしたクリープ現象の影響を強く受けた データを分離すれば、d/Lや d/Dが大きいほど応力低下率は大きくなるという明確な相関が見られる。 もし局部引張が発生していなければこうした相関関係はなく、GMのT<sub>B</sub>に応じた耐水圧性を示すはず である。すなわち、種々の基盤上に敷設した GM の耐水圧性を評価する上においては、T<sub>B</sub>のみに着目 した力学モデルのみで評価するべきではなく、局部引張を評価できる伸びに関する力学モデルの導入 が合わせて必要であることを実験結果からも明らかにできた。また、局部引張による応力低下率が 10%以下になるのは、溝モデルの場合は d/Lが 0.1 程度以下、鋼球モデルの場合は d/Dが 0.2 程度以下 の時である。従って、現実的に局部引張破断を検討すべき対象となる空隙の大きさは GM 厚さの 5~ 10倍以下であるが、そのような空隙の発生は通常の敷設基盤状況では必ず起こり得ることから、常に 局部引張破断を前提とした検討が必要である。なお、B調整池では、表-3に示した砕石基盤上の実験 結果を用いて、貯水池の水深と基盤材料の種類に応じた厚さの選定が行われた。

4. 高温多湿地域での GM 施工事例 – 施工時の気象条件が現場接着部の力学的安定性に及ぼす影響 –

EPDM 系 GM の現場施工可能日数を規定する高湿度条件がボンド接着強さに与える影響については、 沖縄地方のように高温高湿地域においては、特に重要な検討課題となる。そこで、試験片作製時の温 度条件、湿度条件を変化させた剥離実験を実施した。接着剤は、ブチルゴム系 2 液反応硬化型である。 実験は、JIS K 6854 に規定された T 形剥離試験に準じて行った。図-14 は、温度を 10~35℃の間を 5℃ 刻みに、湿度を 65~95%の間を 10%刻みに変化させた実験結果 を示したものである。試験片作製時の温度が 25℃以上、かつ湿 度が 85%以上になると、T 形剥離試験、せん断剥離試験ともに接 着強さが低下する傾向が見られる。そこで、この接着強さの相違 の要因と考えられる試験片作製時のオープンタイムにおける塗 布面の結露状況をみると、今回設定した 10~35℃環境条件下で は湿度 85%以上の場合には全て結露が発生しており、接着強さ の低下と結露の発生に強い因果関係がうかがえる。また、剥離試 験時の試験片剥離状況をみると、結露の発生した T 形剥離試験片



の剥離はほとんど接着面層間で起きていることから、接着面層間に残留した水分が GM 相互の架橋を 阻害し、二枚の GM の接着面の一体化が不十分であったと考えられる。

この結露現象は、次のように説明できる。すなわち、オープンタイムにボンド成分の気化に伴う気 化熱により、接着面の温度低下が生じ、その時の湿度が高いと接着面に結露が生じる。一般に、湿潤 空気が圧力一定のもとに冷されるときは相対湿度は大きくなり、遂には水蒸気が飽和して凝結を起し 水滴を生じる。温度<sub>t</sub>(における相対湿度 U、蒸気圧 e、飽和蒸気圧 H<sub>f</sub>の関係式(log U = log e - log H<sub>f</sub>) に、Goff-Gratchの実験結果による H<sub>f</sub> とtの関係を導入すれば、温度<sub>t</sub>(における露点を求めることがで きる。これによれば、気化熱による温度低下が 3℃以上であれば、湿度 85%以上の条件下では、すべ て結露を生じていたことになる。以上のことを沖縄における施工現場の気象条件にあてはめた場合、 現場接着部の接着強さの不安定性が危惧された。仮に、ボンドの気化熱による温度低下量が 4~5℃あ るとすれば、湿度 75%でも結露を生じ、施工可能期間がかなり制限されることになった。こうした室 内実験結果を踏まえ、C 調整池の施工現場では、現場での接着箇所を最小限にとどめ、現場での接着 が必要な場合は全て高湿度の影響を受けないテープ接着<sup>5</sup>に変更された。

### 5. GM の力学的物性値の経年変化調査事例 – 耐久性を高めるための設計法と貯水池運用計画 –

屋外で使用される GM の耐久性評価は、通常、促進劣化試験の結果に基づくものである <sup>6</sup>。促進劣 化試験は、ある条件下での劣化予測はできるが、GM を用いた貯水池遮水工法を設計する際に現場か

ら求められる GM の耐久性評価については、屋外曝露試 験の結果が不可欠である。農業工学研究所の IIR 系 GM(IIR 75%, EPDM 25%)を用いた実験池(容量約 40m<sup>3</sup>、 GM 施工面積約 48m<sup>2</sup>)は、1997 年、敷設後 30 年を経過し た。そこで、できるだけ連続して引張試験用試験片が採 れるよう位置を選定し、帯状の試料を採取した。ただし、 過去の数次の試料採取により採取箇所は限定されたもの になった。また、実験池の日常の変動水位幅は約 40cm であり、満水位時の水深は約 80cm である。

採取した試料から、引張試験用試験片を連続して打ち 抜いた。図-15は、実験池の低水位(L.W.L.)を基準線とし



て、南北各斜面の斜距離上に位置する試験片の引張試験結果を示したものである。この結果を総括的にみると、池底から法肩に向かって $_{M50}$ は大きく、 $_{E_B}$ は小さく、 $_{T_B}$ はやや大きくなっており、劣化の程度が法肩に向かうほど大きくなる傾向が認められる。しかし、池底の $_{T_B}$ 、 $_{E_B}$ は、敷設時点の値( $_{T_B}$ :9.9MPa、 $_{E_B}$ :520%)をほぼ維持しており、常に水中に没する部分の GM の劣化は、ほとんど認められない。図-16 は、15,30 年経過時点での水面下、喫水線付近、水面上といった試験片採取位置毎の各物性値の、敷設時点の初期物性値に対する百分率を物性保持率として



示したものである。 M300 は、経過年数とともに単調に増大している。採 図-16 物性値の経年変化 (IIR 系 GM) 取位置による物性変化の相違は顕著であり、水面下く喫水線付近く水面上の順に大きくなっている。 また、水面下の値は、15 年経過以降、ほぼ横這いであるにも拘わらず、水面上の値は増大しているこ とから、その差が開く傾向が経過年数とともに明確になってきている。水面上の GM の劣化が徐々に 進み硬化するのに対し、水面下の劣化は小さいことを示している。 E<sub>B</sub> についても、経過年数とともに 単調に減少している。しかし、その経年変化速度は緩慢になってきており、30 年経過時点でも 85~90% の物性保持率を示している。 T<sub>B</sub> については、30 年経過後の物性保持率が、水面上は 106%、喫水線付 近以深は 94~98%と、その採取位置による物性保持率の傾向に相違が見られる。この T<sub>B</sub> の物性保持率 は、 M300 と E<sub>B</sub> の物性保持率の積との相関が高く、 M300 と E<sub>B</sub> の物性保持率により推定が可能である。

以上の結果から、GM の劣化の程度は、常に水没する池底部、日射熱や紫外線などの影響を直接受ける斜面部の特定部分といった敷設される位置によって大きな差異があることが明らかになった。常に水没する部分の耐用年数は、現在、一般に建設工事費や経済性の比較・検討に採用されている 20~30年よりも十分長い。従って、設計段階で GM の劣化の進行を織り込んだ配慮、例えば、劣化が比較的早く進行する可能性のある喫水線付近の GM は当初から補強をしておく、あるいは遮水機能上問題となった段階でその部分のみ更新を行う、といった方針を採用すれば、経済性はさらに高まるといえる。また、貯水池の運用管理において、可能な限り、貯水位を高めに維持することが、貯水池表面遮水工法に用いた GM の耐久性を高めることに有益である。

### 6. 結びにかえて

本論は、農業用貯水池での利用の多い EPDM 系 GM に関する技術的課題を検討・整理することを目 的として、農業工学研究所報告第 38 号「貯水池表面遮水工法に関する研究」(長束、1999)の一部を書 き改めたものである。本論に示した実験結果や理論式導出の詳細は、この報告を参照されたい。

### 参考文献

- 1) 例えば、国際ジオシンセティックス学会日本支部:ジオメンブレン技術概説-設計と施工-, p.4, 1995
- 2) Geosynthetic Research Institute : Three Dimensional Geomembrane Tension Test, GRI Test Method GM4, pp.1-10, 1989
- 3) 例えば、三木博史他:ジオメンブレンの突き破り抵抗に関する考察,土木学会第46回年次学術講演会,pp.766-767,1991 鈴木実他:ジオメンブレンの耐貫通性能の評価法、国際ジオテキスタイル学会日本支部第2回ジオメンブレンセミナー,pp.8-14,1995
   4) 中島賢二郎他:高水深下で使用するゴムシートの試験法,水と土,第70号,91-98,1987
- 5) 長束勇他: 合成ゴムシートの遮水性能-農業用貯水池への適用を目的として-,防水ジャーナル, 228 号, pp.57-58, 1990
- 6) Bernhard, C., Girard, H. & Gousse, F. : Laboratory and in situ Studies on the Durability of Geomembranes, Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 1149-1152, 1995