

ジオメンブレンを用いた表面遮水工法の設計施工上の留意点

農林水産省農業工学研究所 長束 勇

ダムやため池の遮水工法の一つである表面遮水工法には、様々な性能を持つジオメンブレン (GM) が導入されつつある。しかしながら、これら GM を用いた表面遮水工法は、開発されつつある材料に限らず、現場使用条件を与件とした的確な性能試験法、適正な設計法、確実な施工法、合理的な維持管理法が未確立である。そこで本論では、材料選定のあり方を検討する上で必要な GM の温度依存性や引張速度依存性、多様な現場敷設条件下での GM の接着・接合部の力学的安定性と水密性、繰り返し水圧負荷を受ける貯水池運用条件下での GM の耐水圧性、供用されている貯水池における GM の耐久性などを検討するため、室内試験や施工事例調査を実施し、それらを通じて得られた GM 表面遮水工法の設計施工上の留意点について述べる。

キーワード：ジオメンブレン，表面遮水工法，温度依存性，引張速度，耐水圧，経年劣化

Short Review on Design and Construction of Surface Lining System Using Geomembranes for Dam and Reservoirs

Isamu NATSUKA : National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF

Surface lining system is one of the water-proof methods for dam and reservoirs. Recently, some new Geomembranes (GMs) with various performances have been introduced into this system. However, the methods of performance tests, design and construction for the commercial GMs have not been established yet as well as those of the newly developed GMs. Then, the following technical subjects are discussed in this paper:

- The physical properties of GMs which depend on the temperature and the tractive speed.
- The influence of weather condition on dynamic stabilities and watertightness at bonding parts of GMs.
- The evaluation method of the water-proof pressure of GMs.
- The durability of GMs based on the results of the outdoors exposure deterioration tests.

Key words: Geomembranes, Surface lining system, Temperature dependency, Tractive speed, Water-proof pressure, Passing year's deterioration

ジオメンブレンを用いた表面遮水工法の設計施工上の留意点

農林水産省農業工学研究所 長束 勇

1. はじめに

貯水池の新設や改修においては、立地条件、経済性、工期の制約、環境問題などを背景として、多様な遮水工法が採用されている。その中の一工法である表面遮水工法は、廃棄物処分場分野における遮水工法の技術革新が反映され、様々な性能を持つ高分子系、無機系のジオメンブレン（GM）を用いた遮水技術が導入されつつある。しかしながら、これらの GM を用いた表面遮水工法は、開発されつつある材料に限らず、現場使用条件を与件とした的確な性能試験法、適正な設計法、確実な施工法、合理的な維持管理法が未確立であり、表面遮水工総体としての安全かつ経済的な設計・施工・維持管理方法の確立が求められている。

本論では、材料選定のあり方を検討する上で必要な GM の温度依存性や引張速度依存性、多様な現場敷設条件下での GM の接着・接合部の力学的安定性と水密性、繰り返し水圧負荷を受ける貯水池運用条件下での GM の耐水圧性、供用されている貯水池における GM の耐久性などを検討するため、室内試験や施工事例調査を実施し、それらを通じて得られた GM 表面遮水工法の設計施工上の留意点について述べる。

2. GM の力学的特性に関する留意点

2.1 技術的課題の所在

貯水池表面遮水工法に使用される GM には、大別すると合成ゴム系、合成樹脂系、アスファルト系、ベントナイト系、およびこれらの複合系のものがある¹⁾。また、各系においても最近の新材料開発の成果を反映して多様な GM が利用できる状況となっており、材料選択の幅が広がってきている。ところが、メーカーによって示される GM の評価物性値は、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試験結果によるものであることから、現場技術者が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となっている。その上、メーカーから提示される評価物性値は、常温（20～23℃）、かつ比較的高速度で実施された引張試験結果で代表される場合が多いことから、貯水池表面遮水工法用 GM の材料選定データとしては必ずしも十分ではなく、次の点に注意が必要である。

①貯水池表面遮水工法用 GM は曝露状態で使用される場合が多く、その国内における使用環境気温は -30～+35℃と幅が広い。さらに、北海道では -30℃以下になることも珍しいことではない一方で、黒色系 GM の夏場の表面温度は、沖縄地方に限らずとも 60℃以上になる²⁾。これに対し、GM の主な材料素材である合成高分子材料は、通常感温性が高く使用環境温度の変化により非常に大きな物性変化を起こすことから、温度依存性に留意しておく必要がある。

②一般に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、試験湛水時における水深の増加速度は 1m/day 程度である。従って、特に粘弾性を有する GM の水圧負荷による引

張破断の可能性を検討する場合には、例えば JIS A 6008 の試験法に準拠した引張速度 500mm/min よりもかなり低速度な試験条件下での力学的物性値が必要である。

こうしたことから、貯水池表面遮水工法用 GM の材料選定に当たっては、GM の力学的物性の温度依存性や引張速度依存性が設計上想定する許容値内であるのかどうかを性能試験データに基づいて検討しておくことが重要である。すなわち、各種 GM の力学的物性の温度依存性や引張速度依存性を的確に把握しておくことが、GM を用いた安全で合理的な表面遮水工を設計する場合の出発点となる。

2.2 力学的物性の温度依存性

2.2.1 各種 GM の温度依存性

力学的物性の温度依存性を検討するに際しては、強度のみならず、伸びに留意すべきである。これは、広範囲な敷設においては GM 自体の伸縮や基盤の不同沈下によって変形が生じるため、それに対応できる物性として伸びが必要であるからである。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・接合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。図-1～4 は、詳細は既に報告³⁾したエチレンプロピレンゴム (EPDM) 系 GM の市販品と寒冷地用試作品、ポリ塩化ビニル樹脂 (PVC) 系 GM の軟質と高弾性、高密度ポリエチレン樹脂 (HDPE) 系 GM、熱可塑性エラストマー (TPE) 系 GM の 4 系 6 製品の試験温度 60, 20, 0, -15, -25, -40℃における応力-伸び曲線を示したものである。また、図-5 は、アスファルト系のアスファルトパネル (AS パネル) の各試験温度における引張強さ (T_B) を示したものである。これらの結果から、GM の力学的物性の温度依存性に関して、次の点に留意する必要がある。

- ① EPDM 系 GM 市販品は、常温においては引張応力が伸びにほぼ比例するゴム状弾性を示すが、低温になるに従いその比例関係が崩れる。すなわち、EPDM 系 GM の特徴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。ただし、その配合設計を工夫することにより、 T_B 、切断時伸び (E_B) といった基本物性を変更できることのみならず、物性の温度依存性を改善することが可能である。試作事例のように、改良限界はあるものの、-40℃という極寒冷状況においても応力と伸びの線形関係がほぼ維持できる寒冷地用の GM の開発も可能である。
- ② PVC 系 GM は、配合される助剤によって物性値が大きく変えられる材料である。軟質と高弾性では力学的特性が著しく異なる。両者共に、常温ではゴム状弾性を示すが、軟質は 0℃以下、高弾性は -15℃

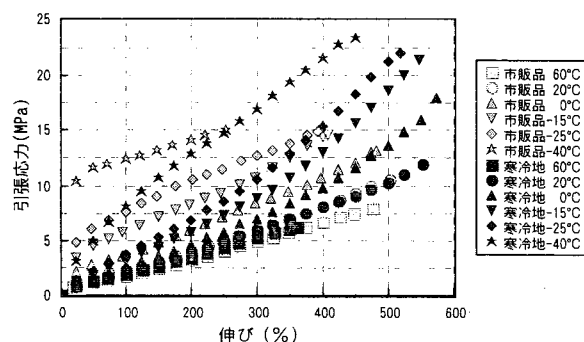


図-1 EPDM 系 GM の温度依存性

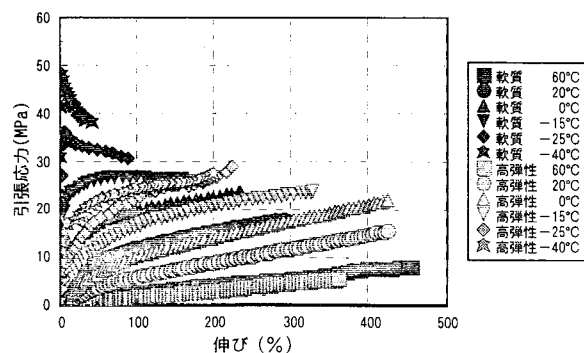


図-2 PVC 系 GM の温度依存性

以下の温度条件下で応力－伸び関係の線形性が崩れ、さらに軟質は -15°C 以下では降伏点が見れる。使用環境条件に応じた所要の性能を備えた製品選定が重要である。

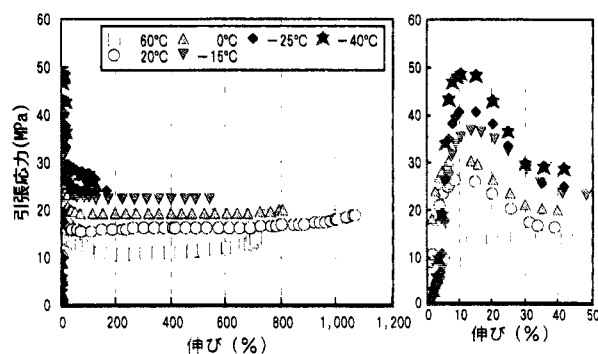
③ HDPE 系 GM は、常温における T_B が EPDM 系 GM の 3 倍程度と強靱であり、低温になるとますます T_B が大きくなる。しかし、いずれの温度においても伸び初期（伸び 5～10%）に降伏を起こし、降伏した後は外力の増加に対してほぼ無抵抗である。従って、降伏を起こすまでの物性値に基づいた設計を行うべきである。

④ TPE 系 GM は、HDPE 系 GM と EPDM 系 GM を力学的に合成した応力－伸び関係を示す。常温より低温側になると HDPE 系型の温度特性が卓抜するようになり、明確に降伏点が見れる。また、この降伏点は低温になるにつれ、より伸びの小さな段階で出現し弾性領域が小さくなる。TPE 系 GM を EPDM 系 GM の一種とした分類例が見られる⁴⁾が、EPDM 系 GM とは力学的特性が著しく異なることに注意が必要である。

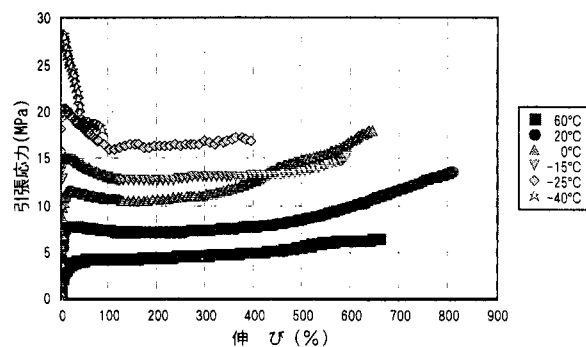
⑤ AS パネルは、常温より高温側になると T_B の低下が大きく、 60°C での T_B は常温時の 1/3 程度である。AS パネルの劣化防止対策として採用されているアルミペイントなどの特殊塗装は、高温側の T_B の低下対策としても有効である。

2.2.2 温度依存性に関する具体的な検討事例

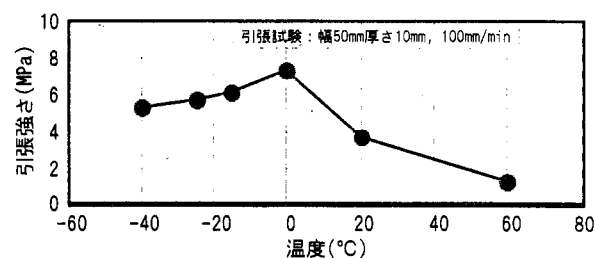
以上述べた GM の力学的物性の温度依存性が具体的に検討課題となる事例は、貯水池喫水線付近における挙動である。すなわち、土中に敷設された状況で供用される廃棄物処分場の GM は気温による温度変化の影響が緩和されるのに対し、貯水池表面遮水材として用いられ水面上に露出する部分の GM は直接気温や日射熱の影響を受けることから、水面上と水面下の温度の相違に起因する部分的な引張状態が発生する。この引張状態は二つのケースが考えられ、水面下の GM 温度が水温に維持されるのに対し、水面上の GM 温度が高温状態になる夏季の状況と低温状態になる冬季の状況である。そこで、夏季の GM 温度を水面下 20°C ・水面上 60°C 、冬季の GM 温度を水面下 0°C ・水面上 -15°C として、喫水線付近に生じる各種 GM の物性の相違を検討すると、表－1 のとおりである。表中で、各記号の前に添えた数字は温度を表し、例えば $_{20}T_B$ は 20°C における引張強さ、 $_{20}E_B$ は 20°C における切断時伸びである。また、 $_{20}E_B$ ($_{60}T_B$) は 20°C において 60°C の時の引張強さ ($_{60}T_B$) なる応力値を示す



図－3 HDPE 系 GM の温度依存性



図－4 TPE 系 GM の温度依存性



図－5 AS パネル引張強さの温度依存性

表－１ 各 GM の喫水線付近の物性状況

GM の種別 物性値 種別	夏季の状況				冬季の状況			
	${}_{20}T_B$ MPa	${}_{20}E_B$ %	${}_{60}T_B / {}_{20}T_B$	${}_{20}E_B ({}_{60}T_B)$ %	${}_0T_B$ MPa	${}_0E_B$ %	${}_0T_B / {}_{-15}T_B$	${}_{-15}E_B ({}_0T_B)$ %
HDPE 系	26.4	9.3	0.60	2.7	30.5	7.8	0.83	7.7
TPE 系	8.3	26.6	0.52	5.8	11.6	22.4	0.76	2.9
PVC 系軟質	17.9	295	0.44	38	23.5	235	0.88	16
PVC 系高弾性	15.6	425	0.35	85	22.0	425	0.93	240
EPDM 系市販品	10.5	505	0.75	390	13.2	485	0.90	370
EPDM 系寒冷地	11.9	555	0.52	320	18.0	575	0.85	490

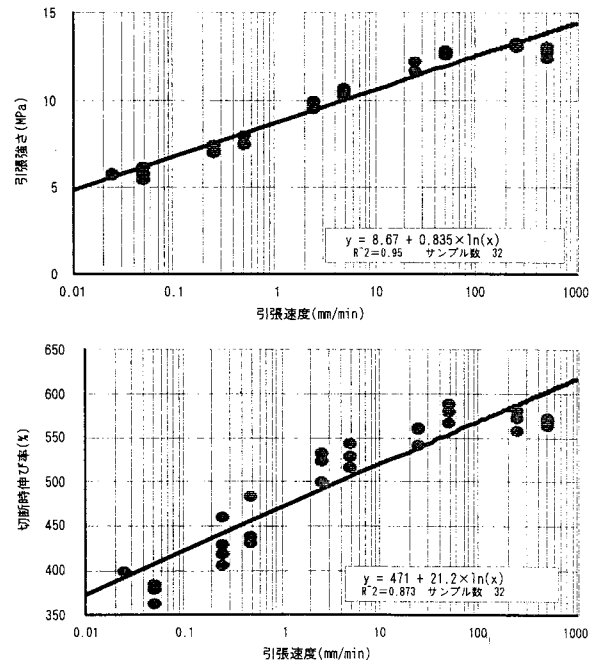
時の伸びを、 ${}_{-15}E_B ({}_0T_B)$ は -15°C において 0°C の時の引張強さ (${}_0T_B$) なる応力値を示す時の伸びを表示している。ただし、降伏を生じる材料については、降伏時における引張応力、降伏を起こすまでの伸びを用いている。

喫水線上下における T_B の相違度合い (${}_{60}T_B / {}_{20}T_B$, ${}_0T_B / {}_{-15}T_B$) は、比較対象としたすべての GM において冬季より夏季の方が大きい。特に、PVC 系 GM は、水面上の T_B が水面下の $1/3$ 程度となる。また、HDPE 系、TPE 系、PVC 系の GM は、水面下部分の GM に期待できる伸びである ${}_{20}E_B ({}_{60}T_B)$ が数%～数 10%と小さいことから、材料自体の強さで変形に対応することとなる。さらに、TPE 系については他の GM に比較して ${}_{60}T_B$ が小さい (4.3MPa) ことから、設計において特に注意を要する。一方、冬季においては、 ${}_0T_B / {}_{-15}T_B$ はいずれの GM も 0.75 以上であることから水面の上下における T_B の相違度合いは小さい。しかし、TPE 系の ${}_{-15}E_B ({}_0T_B)$ は ${}_0E_B$ の $1/10$ 程度の 2.9%と非常に小さいため、喫水線より下の GM に局部的な伸びを生じる可能性が高い。さらに、その喫水線より下の伸び能力自体も 22.4%と小さいことから、こうした状況の生じる可能性のある条件下での使用は避けるべきである。このように、合成樹脂系、合成ゴム・合成樹脂複合系の GM は総じて温度依存性が大きいため、貯水池表面遮水材としてこれらの GM を用いる場合は、その現場状況に即した検討が必要である。

2.3 力学的物性の引張速度依存性

2.3.1 EPDM 系 GM の引張速度依存性

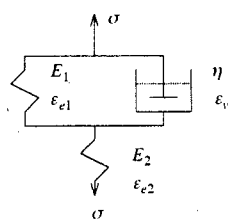
図－6 は、農業用貯水池での表面遮水工法用 GM として使用例の多い EPDM 系 GM の T_B , E_B の引張速度依存性を調べた試験結果である。 T_B , E_B 共に引張速度と非常に強い対数相関があり、引張速度依存性が大きいことが明らかである。引張速度が EPDM 系 GM の引張物性値に影響を及ぼす要因については、EPDM 系 GM が粘弾性変形を生じる材料であることで説明される。この粘弾性挙動は、よく



注) 供試体形状: ダンベル 3 号、GM 厚さ: 1.5mm、試験温度: 20°C 、引張速度: 0.025～500mm/min の 10 水準

図－6 EPDM 系 GM の引張強さおよび切断時伸びの引張速度依存性

知られた弾性要素「ばね」と粘性要素「ピストン」を用いた力学的モデルによって定性的に表すことができる。これらの最も簡単な組み合わせモデルは、「ばね」と「ピストン」の直列組み合わせであるマックスウェルモデルと、並列組み合わせであるフォークトモデルである。マックスウェルモデルでは、変形速度は「ばね」の変形速度と「ピストン」の変



$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{e1} &= \varepsilon_v \\ \sigma_v + \sigma_{e1} &= \sigma_{e2} = \sigma \\ \varepsilon_{e1} + \varepsilon_{e2} &= \varepsilon \\ \sigma_v &= \eta \dot{\varepsilon}_v \\ \sigma_{e1} &= E_1 \varepsilon_{e1} \\ \sigma_{e2} &= E_2 \varepsilon_{e2} \end{aligned} \right\} (1)$$

図-7 マックスウェル-トムソンモデル

形速度の和になり、粘弾性体の一定伸長時における応力の時間的減少、つまり応力緩和を表現できる。一方、フォークトモデルでは、応力は「ばね」の応力と「ピストン」の応力の総和となり、一定応力を与えた時のひずみの変化、すなわちクリープ現象を表現できる。ところが EPDM 系 GM では、応力緩和後も化学結合による網目鎖濃度に対応する応力を残すことから応力は最終的にゼロとはならず、マックスウェルモデルでは EPDM 系 GM の応力緩和現象を適切には表現できない。また、フォークトモデルでは、クリープ試験開始時の応力の初期負荷状況を表現できない。Stepanov Ruben Dmitriewitch によれば、こうした挙動は弾性要素 2 個と粘性要素 1 個を組み合わせたマックスウェル-トムソンモデル（図-7）を導入すれば比較的簡単に表現できるとしている⁵⁾。この場合の系の挙動は、明らかに(1)の関係式を満足しなくてはならない。(1)の関係式から、(2)の方程式が得られる。

$$\sigma + \tau \dot{\sigma} = E\varepsilon + \tau H \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

$$H = E_2, \quad \tau = \eta / (E_1 + E_2), \quad E = E_1 E_2 / (E_1 + E_2) \quad (3)$$

ここで、パラメータ H は瞬間弾性係数、 E は永久弾性係数、 τ は緩和時間または遅延時間を表す。

一定応力負荷の場合、(2)式において $\dot{\sigma} = 0$ とし、初期条件として粘性要素のひずみがゼロである状態を考えて解を求めると、次式のとおりである。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \sigma \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E} \right) e^{-Et/H\tau} \quad (4)$$

ひずみ一定の場合は、(2)式において $\dot{\varepsilon} = 0$ とし、初期応力 $\sigma = \sigma_0$ という条件で解くと、次式となる。

$$\sigma = E\varepsilon_0 + (\sigma_0 - E\varepsilon_0) e^{-t/\tau} \quad (5)$$

図-8、9 は、引張速度依存性を調べた試験に使用した EPDM 系 GM を用いて、クリープ試験および応力緩和試験を行った結果を、(4)、(5)のモデル式に当てはめた場合の解析結果と併せて示したものである。クリープ試験は、初期ひずみが 500mm/min 時の E_B (570%) の 25%、40%程度になることを目標に応力を 2.35MPa (初期ひずみ：1.41)、4.55MPa (初期ひずみ：2.27) とし、7 日間継続した。なお、応力 4.55MPa のケースでは、試験開始 66.3 時間後にひずみ 3.22 の段階で破断に至っている。応力緩和試験は、初期応力が 500mm/min 時の T_B (13MPa) の 2/3、1/3 程度となることを目標に初期応力を 8.7MPa、4.6MPa とし、7 日間継続した。応力緩和試験の場合も、初期応力 8.7MPa のケースは試験開始 4.1 時間後に破断している。試験値と解析値を比較すると、(4)式のクリープモデル式は、ごく初期を除けば EPDM 系 GM のクリープ現象を表現する上で概ね妥当なモデル式である。また、(5)の応力緩和モデル式も、試験途上で破断に至るような応力の大きい場合や試験初期ではその適合性が落ちるものの、応力緩和現象を説明する上においては概ね妥当なモデル式である。両試験が

ら得られた EPDM 系 GM の各パラメータは、図中に示したとおりである。

一方、図-6 に示したように、低速度引張とした引張速度 0.5mm/min 以下の各速度では、7MPa 程度以下の引張応力で全て破断している。特に、引張速度が 0.025mm/min になると、 T_B や E_B はクリープ試験や応力緩和試験において破断を起こした場合の値に近くなっている。このことは、ある低速度で徐々に引張を受け続ける場合には、クリープ現象や応力緩和の影響が大きいことを意味している。従って、土木用遮水材として使用されている EPDM 系 GM の場合には、地震時など急激な引張力を受ける場合の検討に際しては、JIS で規定された引張速度に基づく試験結果をもとにその安全性を評価することは妥当であるが、貯水压などによる緩慢な引張力を受ける場合の安全性評価は、クリープ現象や応力緩和の影響も含めて計測できる引張速度で試験を実施した結果に基づくべきである。

次に、(2)式のマックスウェル・トムソンモデルの方程式において、いま $\varepsilon = \omega t$ とおくと、方程式は次のように書き直せる。ここに、 ω は一定引張速度 $\dot{\varepsilon} = \omega = \text{const}$ である。

$$\sigma + \tau \dot{\sigma} = E\omega t + H\tau\omega \quad (6)$$

これを初期応力 σ_0 という条件で解くと、

$$\sigma = E\omega t + \sigma_0 e^{-t/\tau} + \tau(H-E)(1 - e^{-t/\tau})\omega \quad (7)$$

となる。自然的初期条件の時は $\sigma_0 = 0$ とおけるから、

$$\sigma = E\omega t + \tau(H-E)(1 - e^{-t/\tau})\omega \quad (8)$$

である。この(8)式に図-6 に示した各引張速度水準での試験結果を当てはめ、それぞれの水準における各パラメータを求めてみると、図-10~12 のとおりである。

E は引張速度と極めて強い対数相関があり、 τ と引張速度は極めて強い負の両対数相関がある。引張速度 0.025mm/min における E は、1.7MPa 以下であり、前述したクリープ試験や応力緩和試験における E (1.1~1.4MPa) との整合性もよくとれている。一方、 H は、引張速度にほぼ無関係で変動幅も大きい。また、その値もクリープ試験の結果が 1.3~1.6MPa であるのに比べ、10MPa 前後と大きな値となってい

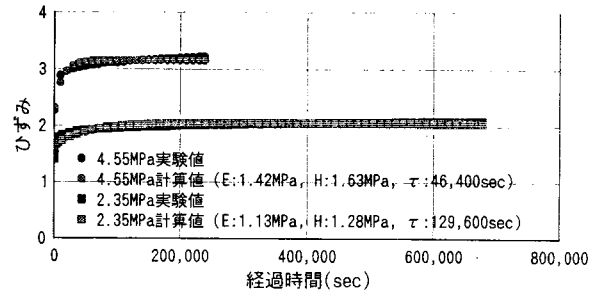


図-8 クリープ試験結果

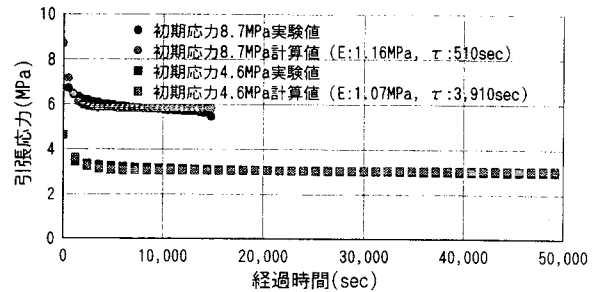


図-9 応力緩和試験試験結果 (試験初期のみ表示)

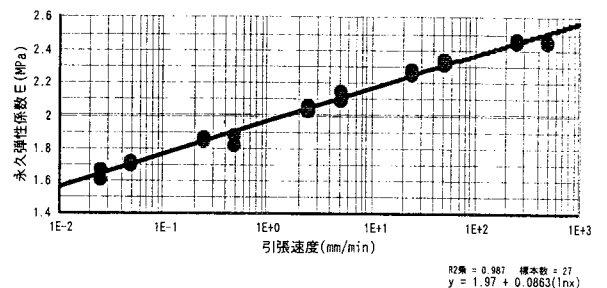


図-10 永久弾性係数と引張速度

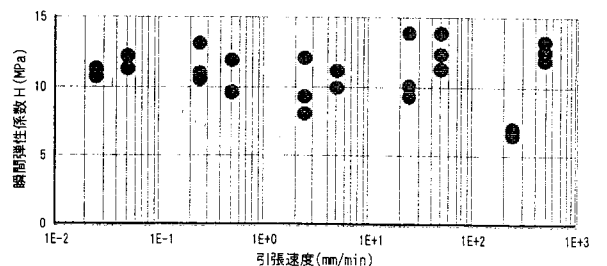


図-11 瞬間弾性係数と引張速度

る。これについては、例えば JIS K 7115 において「瞬間ひずみの測定は困難であるので、負荷後少したった時間（例えば 1 分）のクリープひずみで代用する」とされているように、前述したクリープ試験では負荷後ある時間経った以降を検討対象区間としていることに起因するものと考えられる。

2.3.2 AS パネルの引張速度依存性

図-13 は、AS パネルの T_B の引張速度依存性を調べた結果である。100mm/min 時に対する 500 mm/min 時の T_B は 1.3 倍であり、パネルに急激に作用する外力には大きな引張強さを発揮するが、0.05mm/min という極めて緩慢な外力に対しては 100mm/min 時の約 40%と引張強さは小さくなる。これは AS パネルの粘弾性が現れた結果であり、AS パネルについても引張速度依存性が大きいことに留意すべきである。

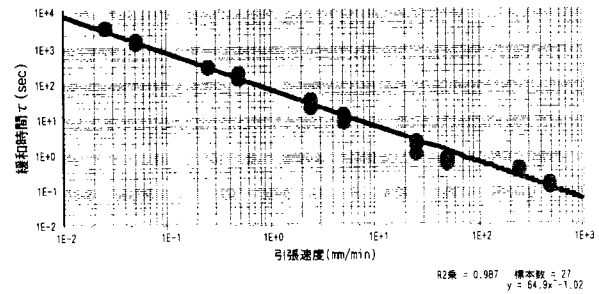
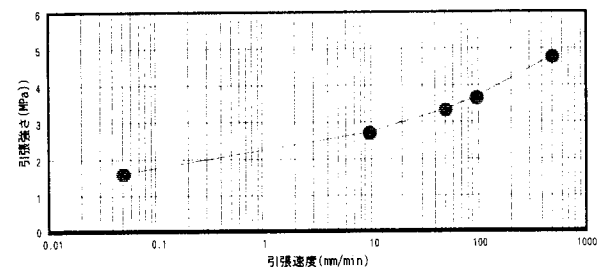


図-12 緩和時間と引張速度



注) 供試体形状：幅 50mm×厚さ 10mm、試験温度：20℃、
引張速度：0.05～500mm/min の 5 水準

図-13 AS パネル引張強さの引張速度依存性

3. GM の接着・接合部の力学的安定性と水密性の確保に関する留意点

3.1 技術的課題の所在

合成ゴム系の GM は、工場製品として通常、幅 1～1.2m×長さ 10m を単位として製造出荷される。GM の割付け計画が作成されている場合は、拡幅といった所要の調整を工場で行った上で施工現場に搬入されるが、それでも GM の最大幅は 8m 程度である。従って、貯水池の遮水材として使用するにあたっては、多かれ少なかれ、施工現場での GM 相互の接着・接合の必要性が生じる。また、取水設備などコンクリート構造物との接合の必要性も生じる。この合成ゴム系の GM のうち EPDM 系 GM の接着・接合については、貯水池分野の 30 年以上の施工経験を通して、メーカーサイドとの協力のもとに改良がなされてきている。ところで、大水深下で EPDM 系 GM を使用する場合、高水圧下におかれるが故に GM の接着・接合部の力学的安定性や水密性が、より大きな設計・施工上の技術課題となる。特に、施工時の環境条件が GM の接着・接合部の力学的安定性や水密性に与える影響度合いの把握については、安全性と施工性に関わる重要な課題である。

GM 相互の接着・接合は、EPDM 系 GM に限らず、他のどの種の GM についても必ず発生するが、その接着・接合方法は、大別して熱硬化性 GM と熱可塑性 GM の種別により大きく異なる。熱硬化性 GM を代表する EPDM 系 GM は主として接着剤により GM 相互を架橋（共加硫）させて接着するのに対し、熱可塑性 GM である HDPE 系 GM や TPE 系 GM は主として加熱して GM 相互を融着（溶融）させる溶接である。通常、溶接は、施工時の環境条件の影響を制御し易く、GM 相互が溶融して一体化すれば、接合部の強度や水密性が問題となることは少ない⁶⁾。

そこで、本論においては、EPDM 系 GM を中心として、現場接着作業時の気象条件が接着部の力学

的安定性に及ぼす影響,工場接着・接合部直近部 GM が工場での処理過程で物性変化を起こす可能性,異種素材 GM の接合の方法,工場接着部を有する GM がさらに現場接着される場合の三枚重ね合わせ部の繰り返し水圧負荷時の水密性度合いなどについて検討した結果を述べる。

3.2 施工時の気象条件が EPDM 系 GM の接着部の力学的安定性に及ぼす影響

3.2.1 EPDM 系 GM 相互の接着

EPDM 系 GM の現場施工可能日数を規定する高湿度条件が接着部の力学的安定性に与える影響を検討した。接着方法は、ボンド（ブチルゴム系 2 液反応硬化型）接着とテープ（ブチルゴム系自然加硫型粘着テープ）接着の 2 種類である。試験は、「JIS K 6854 接着剤の剥離接着強さ試験方法」に規定された T 形剥離試験に準じて行った。この試験では、試験片を接着端部から順次剥離させるため、現場において通常発生する剥離面でのせん断剥離状況を再現していない。しかし、剥離接着強さ（部分最大剥離荷重の平均を試験片の幅で除した値をいう。以降、接着強さと称する。）のみならず、接着部における剥離の状況、特に部分的な接着のムラなどが詳細に観察できることから、一般に採用されている。また、この試験から求められる接着強さはせん断剥離試験結果に比べて小さな値を示すため、接着強さの評価法としては安全側の試験方法である。

図-14 は、温度を 20℃として、湿度を 65、80、95%に変化させた条件下でボンド接着、テープ接着した供試体から採取した試験片の T 形剥離試験結果の一例を示したものである（各ケースともに 5 試験片実施しているが、そのうちの 1 番目と 2 番目の試験片の記録を示した）。この試験記録のように、

ボンド接着の場合は、剥離中に剥離荷重の変動が見られ、特に湿度 95%の条件で接着した場合には、その変動が激しい。これに比べ、テープ接着の場合は剥離状況が安定しており、接着強さに対する湿度の影響をほとんど受けていない。また、接着強さもテープ接着の方がやや大きい。従って、接着の際の湿度に影響されないテープ接着の方が安定した接着力が得られるが、現場での施工条件を考えれば、すべてテープ接着を採用することには無理がある。

この施工時の湿度条件がボンド接着強さに与える影響についての詳細は既に報告³⁾したとおりであり、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ことが原因である。すなわち、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となる結果である。

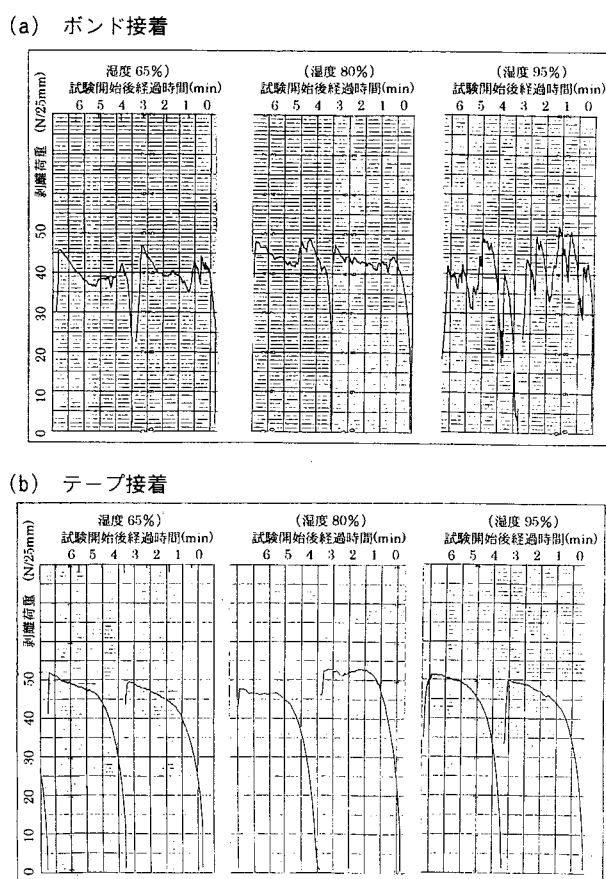


図-14 ペンレコードによる T 形剥離試験の記録例

3.2.2 EPDM系GMとコンクリートの接着

EPDM系GMのコンクリートとの接着強さは、コンクリート接着面のレイタンス処理と、接着性を上げるために塗布されるプライマーの含浸度合いに大きく影響される⁷⁾。特に施工時の温度が低い場合には、含浸時間（乾燥時間）の設定が課題となる。そこで、接着作業時の温度が5℃の条件下において、塗布されたプライマーの乾燥時間が接着強さに及ぼす影響を「JIS K 6854 接着剤の剥離接着強さ試験方法」に規定された180°剥離試験に準じて検討した。

180°剥離試験から得られた接着強さの経時変化とGMの剥離状況を表-2に示す。この結果から、プライマーの乾燥温度が5℃の場合、乾燥時間、養生日数、養生温度に拘わらず全てコンクリートとプライマー間で界面剥離を起こしていることがわかる。また、乾燥時間を2時間とっても、その養生温度が5℃であれば、14日後の接着強さは23N/25mmである。一般に、施工現場における品質管理規格値は、25N/25mm程度とされる⁸⁾ことから、5℃の温度条件下で確実な接着強さを得るには、プライマーの乾燥に4～5時間が必要である。従って、養生温度および養生日数の増加による接着強さの増加は期待できるが、乾燥時間を確保することに対する現場の制約を考慮すれば、EPDM系GMとコンクリートの接着作業は気温5℃以下では行うべきではない。

3.3 工場接着時の物性変化と異種GMの接合

3.3.1 EPDM系GMの工場接着時の物性変化

現場での接着作業を減じるため、現場搬入GMは工場において原反GMの接着による拡幅が行われている。その方法は、EPDM系GMの場合、接着強さの安定性および接着作業の効率性の確保の観点から、キュアテープ（未加硫ゴム系定型接着テープ）をGMとGMの間に挟み加熱圧着して接着するのが一般的である。図-15は、ある現場に搬入予定の拡幅されたGMから工場接着部を横断して一つのライン上を連続サンプリングした試験片の引張試験例である。サンプリングNo.4～6が工場接着部であり、No.1～3およびNo.7～17が1枚部分である（ただし、No.4～6の工場接着部については、引張試験を行うに必要な適切な掴み長さが確保できないため試験不能であった）。これをみると接着直近部であるNo.2, 3および7, 8, 9が変質し、接着時の影響を受けていない原反GM部分に比べ T_B は最大15%の低下、 E_B は最大18%の低下、M300（300%引張時の応力）は最大15%の増加を示していることがわかる。また、他の接着直近部では T_B が45%、 E_B

表-2 EPDM系GMとコンクリートの接着強さの経時変化と剥離状況

単位：N/25mm

プライマー 乾燥条件		養生 日数	養生温度（℃）			
温度 （℃）	時間 （hr）	時間 （日）	5		20	
			接着 強さ	剝離 状況	接着 強さ	剝離 状況
5	2.0	14	23	S/A	28	S/A
		25	28	S/A	35	S/A
5	3.5	14	28	S/A	38	S/A
		25	37	S/A	47	S/A
5	5.0	14	33	S/A	45	S/A
		25	45	S/A	55	S/A
20	2.0	14	55	S/A	75	S
		25	67	S/A	75	S

注）S/A：界面剥離，S：GM破断

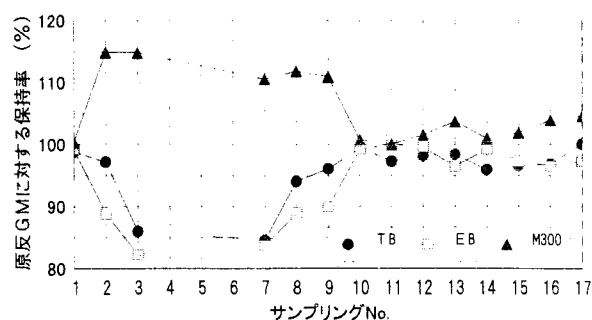


図-15 EPDM系GM工場接着直近部の引張試験例

が 35%の低下といった大きな物性変化が生じている試験結果もあった。以上のことから、適切な管理による工場接着が行われない場合には EPDM 系 GM は硬くなり伸び能力が低下する上に引張強さも低下するという、ある意味での熱老化現象が現れる。

3.3.2 TPE 系 GM の工場接合時の物性変化

TPE 系 GM についても EPDM 系 GM と同様に、工場接合加熱部および加熱周辺部には過度の物性変化が生じることが懸念される。そこで、工場接合時の物性変化の程度を調べるための試験を行った。図-16 は、加熱部および加熱直近部の力学的物性値（降伏点伸び率、降伏点引張強さ、 T_B 、 E_B ）の、加熱の影響を受けていない部分（原反 GM）に対する保持率を示したものである。ここで、凡例に示した「全体加熱」とは工場での加熱接合を模して加熱した部分（加熱幅 26cm）の中央部から、「加熱直近」とは加熱幅から外れる直近部から、「全体直端 2 回」とは 1 回目、2 回目とも直接加熱されるがいずれの回も加熱幅内の最端部から、それぞれ打ち抜きサンプリングした試験片の結果を示している。この結果から、加熱により比較的大きな物性変化を示す物性値は降伏点伸び率であり、加熱によって 5～20%の減少を示すことがわかる。これは TPE 系 GM は EPDM とポリオレフィン系樹脂のブロック共重合体であり、EPDM が降伏点までの特性を大きく支配することから、EPDM の加熱劣化現象が現れた結果と考えられる。また、加熱による影響をより強く受ける部分は加熱幅内の最端部であり、加熱幅を外れる直近部も影響を受けることがわかる。図に示した結果では工場接合による保持率の変化は最大 20%程度以内であるが、TPE は熱可塑性樹脂を多量に含有していることから軟化条件を大きく越えるような過度の加温、加圧は GM の物性を変化させるのみならず、GM 厚さを薄くする可能性もあり、慎重な接合管理が必要である。

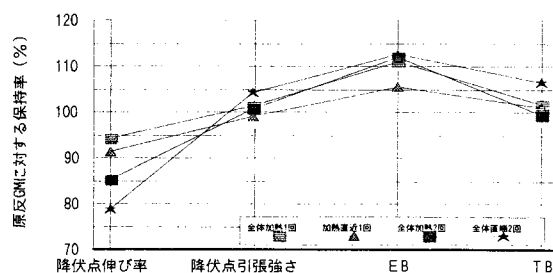


図-16 TPE 系 GM 工場接着直近部の引張試験例

3.3.3 EPDM 系 GM と TPE 系 GM の接合

ここでは、M 調整池における表面遮水工法を設計する上で課題となった、EPDM 系 GM と TPE 系 GM の接合問題を取り上げる。M 調整池では初期湛水後は常に調整池底面が水没する供用条件から池底面に敷設される GM はほぼ定温状態に置かれ、温度変化による物性変化に配慮する必要がない。そこで斜面部は EPDM 系 GM が採用されたが、池底面部には価格的に優位な TPE 系 GM が採用されることになった。この両者を接合する上で考慮すべき GM の主な相違点⁹⁾を整理すると、表-3 のとおりである。そこで TPE 系 GM に配合されている EPDM 成分（30%程度）に期待し、両 GM の接合を通常の EPDM 系 GM 相互の接着に使用されている接着テープを用いて試みた。しかし、定荷重の吊り下げに

表-3 EPDM 系 GM と TPE 系 GM の主な相違点

項目	EPDM 系 GM	TPE 系 GM
材質	・エチレン・プロピレンゴムを主原料 ・主原料は架橋ゴムのため、軟化温度はない。	・オレフィン系熱可塑性樹脂を主原料 ・主原料の軟化温度は約 120℃
応力・伸び特性	・弾性を示し、応力と伸びがほぼ比例的である。張力を除けば元に戻る。	・降伏点を越えると塑性を示す。初期剛性が高い。
接合方法	・ボンドまたはテープにより接着 ・主として共加硫による接着	・熱風による熱融着により接合 ・主として相溶解による溶接
線膨張係数 (°C)	4.0×10^{-5}	22.5×10^{-5}

よるせん断剥離試験の結果では両者の剛性の相違に起因して EPDM 系 GM 側の接着端部に応力集中を生じ、粘弾性体である接着テープ層がクリープ現象を起こすことにより徐々に破壊され剥離することが明らかになった。このように材質の異なる EPDM 系 GM と TPE 系 GM の接着テープによる接合は一般的には困難であるが、一つの手段として両者の中間材質のテープ（EPDM 分を含む未加硫で融点が高いキュアテープ）を挟み加熱加圧して、半強制的に接合する方法が考えられる。この場合の接着・接合は、加熱加圧の温度、時間、圧力の条件が互いに関連するものと考えられ、条件設定の如何によって、EPDM 系 GM－キュアテープ－TPE 系 GM の間の接着・接合構造は、次のケースが想定される。

a. EPDM 系 GM－キュアテープ ①キュアテープが加熱加圧により加硫する段階で、EPDM 系 GM に含まれる遊離硫黄分が共加硫し接着する。②キュアテープには EPDM 系 GM と同一のポリマーが配合され相溶性がよいので、加熱加温により熱融着する。

b. TPE 系 GM－キュアテープ ①キュアテープが加硫する段階で、キュアテープの EPDM 成分と TPE 系 GM の EPDM 成分が共加硫し接着する。②キュアテープのポリマー成分と TPE 系 GM のポリマー成分が熱により相溶化し、熱融着する。

そこで、これらの接着・接合構造を調べるため、EPDM 系 GM と TPE 系 GM, EPDM 系 GM 相互、TPE 系 GM 相互を各々キュアテープで接着・接合した試験片の引張せん断剥離試験を 20, 80, 120℃ で実施した。なお、接着・接合条件は、温度については TPE 系 GM が軟化する下限温度である 120℃、加熱加圧時間はキュアテープが十分軟化し、かつ TPE 系 GM が軟化を開始する直前の時間である 35min とした。加圧圧力は 0.5MPa である。表-4 に示す試験結果によると、EPDM 系 GM 相互の接着・接合構造は、試験温度が高くなっても接着材内破断、もしくは GM 破断を起こしていることから、主として共加硫による接着と考えられる。TPE 系 GM 相互、EPDM 系 GM と TPE 系 GM の接着・接合構造は、TPE 系 GM が軟化する温度よりも低い 80℃ 以下においてはいずれもキュアテープと TPE 系 GM との間で界面剥離を起こしていることから共加硫している可能性は小さく、主として相溶化による熱融着による接合と考えられる。このことは、EPDM 系 GM と TPE 系 GM のキュアテープを介した接着・接合構造は主として、一方で加硫、他方で熱融着により形成されるため、両者の接合作業は本試験片作製時のように極めて限定された条件下で実施する必要があることを意味している。そこで、現場に敷設される EPDM 系 GM と TPE 系 GM の接合方法は、工場において、片側が EPDM 系 GM、もう一方が TPE 系 GM である帯状の GM を製作し、この帯状の GM を橋渡し役（ブリッジ）として接合する方法を採用することにした。また、帯状の GM における TPE 系 GM は、表面軟化による厚さの減少に対処するため、池底に敷設される TPE 系 GM より 0.5mm 厚い 2mm のものを使用することにした。

表-4 キュアテープを用いた接着部のせん断接着強さおよび剥離状況

	試験時の温度 20℃		試験時の温度 80℃		試験時の温度 120℃	
	接着強さ	剥離状況	接着強さ	剥離状況	接着強さ	剥離状況
EPDM / EPDM	320	ストロークオーバー	130	テープ内破断	113	EPDM 破断
EPDM / TPE	175	テープ/TPE 界面	82	テープ/TPE 界面	7	TPE 破断
TPE / TPE	350	テープ/TPE 界面	114	テープ/TPE 界面	7	TPE 破断

N/25mm

3.4 工場接着部を有する EPDM 系 GM の現場接着部の繰り返し水圧負荷時の水密性

一般に GM 自体の透水性は非常に小さいことから、GM の水密性は接着部における止水性に左右される。ただし、柔軟な EPDM 系 GM のポアソン比は 0.49 と追随性が高く密着しやすいことから、通常の基盤上に敷設された水圧下での接着部の止水性は高い。しかし、段差やシワが接着部を横断する状況では、水みちが発生する可能性がある⁷⁾。そこで、図-17 上に示す工場接着部を有する EPDM 系 GM が施工現場で接着された供試体（三枚重ね合わせ部）の繰り返し水圧負荷時の水密性について検討した。

表-5 は、単粒砕石 (S-20) 基盤材上に目付量 400 g/m² または 800g/m² の不織布を敷き、その上に三枚重ね合わせ供試体を敷設した場合の水密性試験結果である。試験には $\phi 500\text{mm}$ の圧力容器を用い、0～0.3MPa の水圧を所定回数繰り返し負荷している。ケース A および B については、その後、2.9MPa まで昇圧して、漏水の有無を確認している。表中の水みち進捗長は図-18 に示した水みち確認法による試験後の観察結果であり、供試体敷設タイプは図-17 に示した(a)、(b)のタイプである。A、B、C いずれのケースにおいても、接着部からの漏水は発生して

いない。しかし、供試体敷設タイプによって接着部の水みち進捗長が明らかに異なり、(a)タイプは(b)タイプに比べ長い。また、その進捗状況も(a)タイプの場合は工場接着部直下の現場接着部分のみで深く鋭角に水みちが成長しているのに対し、(b)タイプの場合は場所が特定されず広角に浅く分散してい

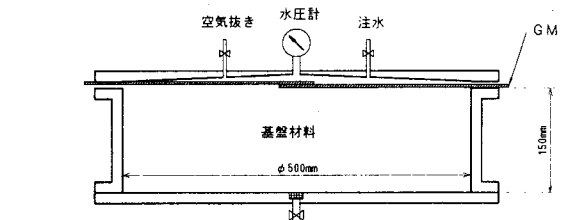
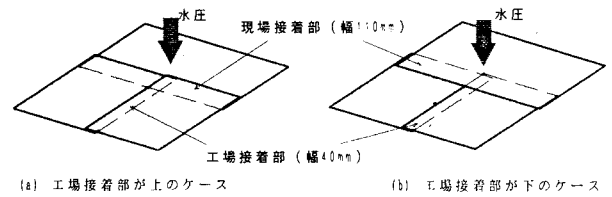


図-17 工場接着部を有する EPDM 系 GM の現場接着模式図および水密性試験装置

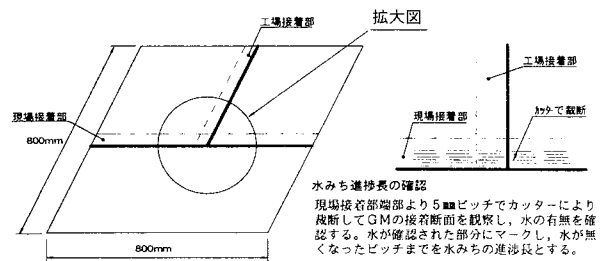


図-18 水みち確認法

表-5 工場接着部を有する EPDM 系 GM 接着部の繰り返し水圧負荷時の水密性試験結果

試験 ケース	供試体 No.	供試体敷設 タイプ	不織布目付量 (g/m ²)	繰返回数 (回)	繰返サイクル (回/min)	負荷水圧 (MPa)	水みち進捗長 (mm)	不織布突破 箇所数
A	1	(b)タイプ	400	852	1/10	0.3 (2.9)	11	13
	2	(a)タイプ					94	15
	3	(a)タイプ					80	20
B	1	(a)タイプ	800	1,490	1/10	0.3 (2.9)	108	0
	2	(b)タイプ					24	2
	3	(a)タイプ					64	0
C	1	(b)タイプ	800	15,000	1/2	0.3	漏水	0
	2	(b)タイプ					35	0
	3	(b)タイプ					60	0

- ・ ケース C の No.1 の漏水は、圧力容器の蓋締め付けに起因する接着部の機械的剥離によるものである。
- ・ 不織布突破箇所数とは、基盤の砕石が不織布を突き破っていることが試験後確認された箇所数である。

ることが観察された。これは水圧を受け基盤凹部に GM が貫入する際、(a)タイプの場合は、2 枚が接着された工場接着部分に比べ直下の 1 枚 GM 部分の方が容易に伸びることにより剥離作用が働き徐々に剥離が進行するのに対し、(b)タイプの場合は、上の 1 枚 GM が工場接着部に支えられ接着面に剥離作用が働きにくい、という敷設状況の相違による結果と考えられる。一方、(b)タイプであっても繰り返し水圧負荷が頻繁になされると、重ねられた GM 上下の基盤凹部への貫入時における曲率が相違するため接着部にせん断力が働き、水みちの若干の進捗は避けられないことがわかる。ただし、農業用貯水池においては、供用年数を 50 年、年間の貯水池利用回転数を 10 回としても繰り返し水圧負荷は 500 回程度であることから、工場接着部を有する GM 相互の接着方法を(b)タイプとすれば十分に水密性は確保できるものと考えられる。

4. GM の耐水圧性評価に関する留意点

4.1 技術的課題の所在

GM を貯水池の表面遮水材として利用する場合、GM 厚さの選定基準となる耐水圧性を評価する必要がある。筆者は既報^{1),3)}において、現場で多用されている粘弾性を有する GM (EPDM 系 GM) の試験法とその結果の評価に関する検討結果を報告した。すなわち、①農業工学研究所において実施している GM の耐水圧試験法を紹介し、この試験法による碎石の種類や粒径、溝幅や鋼球径を種々変えたモデル基盤上に敷設された GM の耐水圧試験結果から、耐水圧性を支配する基盤局部凹部における GM の引張破断は、水圧を負荷すると基盤空隙部の壁との摩擦力によって GM の伸びる領域が順次縮減されることにより起こる現象であること、②この局部引張破断が生じるメカニズムは提案した二次元・三次元局部引張破断モデルを用いれば理論的に考察することが可能であり、GM の物性値に基づいて引張破断を起こす条件が明らかにできること、③粘弾性を有する GM は水圧負荷中にクリープを生じることから、耐水圧性の評価に当たっては GM の引張速度依存性を考慮する必要があること、④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 倍以下であり、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うることから、常に局部引張破断を前提とした検討が必要であること、を明らかにした。そこで本論においては、上記検討結果を踏まえて、現場条件下において繰り返し水圧負荷を受ける場合や EPDM 系 GM 以外の GM の耐水圧性試験結果を報告し、耐水圧性評価における留意点を述べる。

4.2 繰り返し水圧負荷を受ける場合の EPDM 系 GM および TPE 系 GM の耐水圧性

M 調整池現場条件下における EPDM 系 GM および TPE 系 GM の耐水圧性を把握するため、大型压力容器 (L3,000mm×W1,500mm)、中型压力容器 (φ500mm) 内に現場条件をモデル化した試験供試体を作製し、調整池の供用条件を踏まえた水圧負荷条件のもとで耐水圧試験を実施した。試験に用いた資材は、表－6 のとおりであり、試験条件は GM の種別、基盤材の種別、緩衝材の有無および種別、水圧負荷方法の種別を現場条件に合わせて組み合わ

表－6 試験用資材

資材	種別	規格等
GM	EPDM 系 GM	厚さ 1.5mm
	TPE 系 GM	厚さ 1.5mm
基盤材	S-40	現地使用材を搬送
	ポーラスコンクリート	現地骨材・現地配合で作製
	砂	鬼怒川産
緩衝材	目付量 400g/m ² 不織布	ポリエステル短繊維
	目付量 200g/m ² 不織布	ポリエステル長繊維

せた。なお、繰り返し負荷については、0～0.15MPa または 0～0.3MPa を大型圧力容器試験では 1hr/サイクル、中型圧力容器試験では 10min/サイクルで漏水が発生しない限り 100 回以上継続した。また耐水圧試験後、試験済み供試体からサンプリングを行い、引張試験により試験前後の GM の物性変化を調べた。耐水圧試験各ケースの結果を表－7 に示す。

基盤材が S-40 の場合の耐水圧については、次のとおりである。①昇圧負荷時の耐水圧は、EPDM 系 GM は 0.5MPa、TPE 系 GM は 0.3MPa である。この EPDM 系 GM の結果は、小型圧力容器による試験値⁶⁾の 0.8MPa よりも小さい。この要因は、本試験における試験対象供試体面積が小型圧力容器（φ150mm）による場合に比べ非常に大きいことから、

砕石間に形成される空隙が発生確率的に大きくなったことによるものである。この試験規模が大きくなると耐水圧試験結果が小さくなることについては、三木らも報告している⁶⁾。②繰り返し負荷時の耐水圧は昇圧負荷時より小さくなり、共に 0.15MPa 以下である。GM にクリープ現象の影響を受けた局部引張破断が生じることによる結果である。③EPDM 系 GM の破断は基盤砕石によって形成される凹部で発生するのに対し、TPE 系 GM の破断は砕石の頂部または転石による凸部で発生する。局部引張破断現象は、GM の引張特性、特に伸びに関する特性により局部破断の形態が異なる。

緩衝材の耐水圧性向上効果は、TPE 系 GM よりも EPDM 系 GM の方が大きい。EPDM 系 GM の破断は凹部で発生することから、その凹部を緩衝材が穴埋め緩和するためである。TPE 系 GM の場合は砕石の頂部などの凸部による GM の突き破りを緩衝材が緩和する効果はあるが、緩衝材自体が水圧により薄くなったり、突き破り破断してしまうとその緩衝効果が消失するためである。

基盤材がポーラスコンクリートの場合の EPDM 系 GM の昇圧負荷時の耐水圧は 2.5MPa 程度あるが、繰り返し負荷であると 0～0.3MPa で破断する場合もある（繰り返し回数 150 回程度）。破断箇所は、ポーラスコンクリートの比較的大きな凹部（ケース 11 の場合は深さ 12mm、径 10mm 程度）である。ポーラスコンクリート上に GM を敷設する際には、事前にポーラスコンクリート表面の状況をよく調査し、比較的大きな凹部は修正しておくことが重要である。

一方、表－8 は、EPDM 系 GM の耐水圧試験後の引張試験結果である。ケース 5、7、9 の T_B と E_B が相対的に低下している。繰り返し水圧負荷を受けることにより、局部的に伸ばされる影響が試験後にも残る結果である。特にケース 5、9 では、特定のサンプルの T_B と E_B が著しく低下しており、破断に至らないまでもクリープなどによりゴム弾性が低下している部分が潜在することを示唆している。また、表－9 は、TPE 系 GM の耐水圧試験後の引張試験結果である。水圧繰り返し回数が少ないにも拘わらず、ケース 4 の T_B と E_B がかなり低下している。さらにケース 2、4、8 では、特定のサンプルの E_B が著しく低下しており、0.3MPa 程度の水圧であっても機械的損傷を受ける部分が発生すること

表－7 耐水圧試験結果

緩衝材	試験方法	結果	ケース
EPDM系GM・大型圧力容器・S-40基盤			
無し	昇圧負荷	0.5MPaで漏水発生	1
	繰返負荷 0～0.3MPa	4回で漏水発生	3
	繰返負荷 0～0.15MPa	50回で漏水発生	5
400g/m ²	繰返負荷 0～0.3MPa	112回以上に耐圧	7
200g/m ²	繰返負荷 0～0.3MPa	140回以上に耐圧	9
TPE系GM・大型圧力容器・S-40基盤			
無し	昇圧負荷	0.3MPaで漏水発生	2
	繰返負荷 0～0.3MPa	13回で漏水発生	4
	繰返負荷 0～0.15MPa	1回で漏水発生	6
400g/m ²	繰返負荷 0～0.3MPa	260回以上に耐圧	8
200g/m ²	繰返負荷 0～0.3MPa	35回で漏水発生	10
EPDM系GM・中型圧力容器・ポーラスコンクリート基盤			
無し	昇圧負荷	2/3：2.9MPaに耐圧 1/3：2.5MPaで漏水発生	11
	繰返負荷 0～0.3MPa	2/3：540回以上に耐圧 1/3：150回で漏水発生	11
400g/m ²	繰返負荷 0～0.3MPa	3/3：544回以上に耐圧	12

表－８ 大型耐水圧実験後の引張試験結果（サンプル 20 個の平均値，EPDM 系 GM）

ケース	引張強さ MPa	切断時伸び %	M50 MPa	M100 MPa	M200 MPa	M300 MPa	水圧条件 MPa	不織布	水圧負荷条件
1	13.1	631	1.4	2.0	3.5	5.3	0.5	なし	昇圧
3	13.0	595	1.3	2.0	3.7	5.6	0～0.3	なし	4 回
5	12.5 (4.0)	563 (215)	1.4 (1.4)	2.0 (2.0)	3.8 (3.8)	5.7	0～0.15 (特定のサンプルの結果)	なし	50回
7	12.8	577	1.4	2.0	3.7	5.7	0～0.3	400g/cm ²	112回
9	12.4 (7.3)	571 (407)	1.4 (1.4)	2.0 (1.9)	3.7 (3.5)	5.6 (5.3)	0～0.3 (特定のサンプルの結果)	200g/cm ²	140回

表－９ 大型耐水圧実験後の引張試験結果（サンプル 20 個の平均値，TPE 系 GM）

ケース	引張強さ MPa	切断時伸び %	M50 MPa	M100 MPa	M200 MPa	M300 MPa	水圧条件 MPa	不織布	水圧負荷条件
2	13.9 (12.0)	719 (604)	8.5 (8.4)	8.1 (8.1)	8.1 (8.0)	8.4 (8.3)	0.3 (特定のサンプルの結果)	なし	昇圧
4	12.0 (9.4)	671 (611)	8.1 (7.7)	7.8 (7.1)	7.7 (7.0)	8.0 (7.3)	0～0.3 (特定のサンプルの結果)	なし	13回
6	13.5	732	8.2	8.0	8.0	8.3	0～0.15	なし	1 回
8	14.1 (10.1)	766 (484)	8.6 (8.5)	8.3 (8.2)	8.3 (8.3)	8.5 (8.6)	0～0.3 (特定のサンプルの結果)	400g/cm ²	260回
10	13.6	769	8.6	8.2	8.2	8.4	0～0.3	200g/cm ²	35回

を意味している。

4.3 HDPE 系 GM の砕石上および段差発生部上での耐水圧性

厚さ 1.5mm の HDPE 系 GM の S-40 基盤上や垂直段差 20mm 上の耐水圧性は、昇圧負荷条件では最低でも 1.5MPa 程度あり、同じ厚さの EPDM 系 GM や TPE 系 GM に比較して 3～5 倍程度大きい。ただし、S-40 基盤上で繰り返し負荷を受けると、0.9MPa でも破断する場合がある。また垂直段差 20mm 上でも、0.9MPa の繰り返し負荷 12 回を行った後、その水圧状態で継続負荷すると、7 日目にピンホールを生じたケースが観察された。基盤凸部で降伏点以上の伸び率に局部的に伸ばされた部分が存在すると降伏点以降はごく僅かな応力の増加によって容易に伸ばされるため、破断（ピンホール）に至るためである。

この HDPE 系 GM の耐水圧性を向上させる手段として、GM と基盤の間に適切な目付量の不織布を挿入することの効果は大きい。水圧負荷後の不織布の破損状況を考慮して目付量 800g/m² の不織布を挿入した耐水圧試験結果では、いずれのケースも漏水は観測されなかった。

4.4 AS パネルの砕石上での耐水圧試験

基盤条件を C-40、S-20、S-40 の 3 種の砕石に変化させ、厚さ 10mm の AS パネルの耐水圧試験を行った結果、S-40 のケースのみ最高水圧 0.9MPa を負荷した約 10～150min 後に漏水が確認された。しかし、試験終了後に供試体を観察すると AS パネルに明確な破断箇所は見られず、AS パネル上面は S-40 の起伏に追随し、背面では S-40 の凹部にアスファルトが密着して貫入していた。従って、この漏水は AS パネルの破断によって生じたものではなく、アスファルトの凹部空隙への貫入に伴い局部的に薄くなった部分からの透水によるものであると考えられる。確実な遮水性能を得るには、AS パネルの場合も適切な基盤処理が必要である。

5. GMの耐久性評価に関する留意点

5.1 技術的課題の所在

屋外で使用される GM の劣化の主因は気象条件である。一般に GM の耐久性を評価する時に耐候性 (Weatherability) という言葉が用いられるのは、この理由による。GM の耐久性は改善されてきたといわれている。しかし、そ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¹⁰⁾。すなわち、長年供用されてきた貯水池から試験片を採取して GM の耐久性が調べられているわけではない。建築分野の合成高分子系防水材料に関して、その耐久性評価と劣化予測について研究を行った田中の報告¹¹⁾においても、「屋外曝露と等価となる促進劣化試験条件の設定は困難であり、材料毎、製品毎、さらには劣化の尺度によっても異なる」、「ほとんどの劣化試験は熱との複合劣化試験になっており、材料の温度をどのように設定するかによって変質劣化の様相は大幅に変化する」と指摘している。従って、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。こうした中で、米国において施工実績のある非加硫ゴム系のクロロスルホン化ポリエチレン (CSPE) 系 GM や PVC 系 GM については、長期実材令の物性変化に関する興味ある報告¹²⁾がなされているが、何れも 20~30 年とされている想定耐用年数以下の約 15 年経過時点までである。また、1948 年に Dakin, T.W. が提案した化学反応速度論を発展させて GM の劣化現象を説明しようとする試み¹³⁾がみられるが、曝露による劣化現象は熱、紫外線、オゾンなどの複合作用の結果であり、かつ、これらの作用は日変化、季節変化が大きいことから必ずしも実用的な理論には至っていない。

そこで本論では、国内の農業用貯水池の表面遮水材として PVC 系 GM とともに多く使用されている合成ゴム系 GM や AS パネルなどについて、その実材令の試験結果をもとに GM の力学的物性の経年変化特性を考察する。

5.2 EPDM 系 GM の物性の経時変化特性

5.2.1 製造後の経時物性変化

M調整池の表面遮水材に使用された EPDM 系 GM については、施工管理の一環として概ね 5,000m² 施工毎に計 4 回、GM の現場サンプリングが行われ、この GM から採取した試験片の引張試験が実施されている。また、メーカーサイドも現場に持ち込む GM の性能を確認するため、出荷時において引張試験を実施している。そこで、現場でサンプリングされた GM の製造番号から出荷時の引張試験結果を検索し両者を比較したところ、GM の性能を示す応力-伸び曲線はほぼ同様に安定しているが、各回ともに現場でサンプリングした GM から採取した試験片の T_b 試験値が工場出荷時の試験値よりも大きな値を示した。こうした結果は、①引張試験を行うまでの製造後の経過日数の相違、すなわち、ポリマーの結晶化や遊離硫黄加硫の促進など製造後の GM 自体の経時的な物性変化、②現場に敷設された以降サンプリングまでの間の曝露による物性変化、の二つに起因すると考えられた。

そこで、まず、①の要因に関して検討するため、製造直後から一定経過時間毎に供試体から採取した試験片の引張試験を行い、GM の物性の経時変化を調べた。試験に用いた供試体は、H 社製の EPDM 系市販品 GM (EPDM 70%・IIR 30%、幅 1m×長さ 10m) から中央部分を幅方向 50cm×長手方向 150cm の大きさにサンプリングしたものであり、光や温度変化の影響をできるだけ受けにくいよう製造

直後から恒温恒湿状態（温度 20℃，湿度 65％）に保たれた暗室に保存した。ただし，工場から農業工学研究所まで 1 時間を要する移送中は，保温箱に入れ 20℃を保持した。物性の経時変化を調べるための引張試験は，製造後 30 分，2，4，8，14 時間，1，2，3，7，9，21 日，3 ヶ月，2 年に実施し，製造後 30 分の引張試験のみ H 社試験室に依頼した。なお，試験片数は各経過時間毎に 5 本とし，試験結果は 5 本の平均値を採用した。サンプリングした供試体からの試験片の採取は，幅方向に 5 本詰めて並べて打ち抜いて行った。すなわち，各経過時間毎の試験片の採取は，GM そのものの不均一性が試験結果に与える影響を最小限とするため，製造中に品質の差が生じる可能性が小さいと言われている GM の長手方向に順次行った。

経過時間毎の引張試験から得られた各物性値を製造 24 時間後における引張試験から得られた値で除した物性変化度（ T_{Bt}/T_{B24h} ， E_{Bt}/E_{B24h} ， $M300_t/M300_{24h}$ ， $M100_t/M100_{24h}$ ）で示すと，図-19 のとおりである。試験結果から次の傾向が読み取れる。 T_B は，試験を行った期間を通じて最大 2％程度の変動はあるものの概ね一定値を示す。これに対し E_B は，製造直後 30 分から製造後 24 時間までの間に 5％程度逡減した後，変動はあるもののほぼ一定値に落ち着く。また引張応力（ $M300$ ， $M100$ ）は，製造直後 30 分から製造後 24 時間までの間に $M300$ は 10％程度， $M100$ は 20％程度逡増した後，変動はあるもののほぼ一定値に落ち着く。この試験結果から，EPDM 系 GM の物性変化を評価する際に必要となる初期物性値は，製造後 GM 自体に経時物性変化があることを考慮し，製造後 24 時間以上を経て物性が安定した以降の試験値を採用すべきである。

5.2.2 野外曝露による物性変化

前項で想定した②の要因を検討する目的で，上述した製造後の経時的な物性変化を調べる試験と合わせて，野外曝露した GM の物性変化を調べる試験を行った。曝露は製造後 2 日間恒温恒湿室で養生した GM を木枠に仮止めし，農業工学研究所実験棟屋上

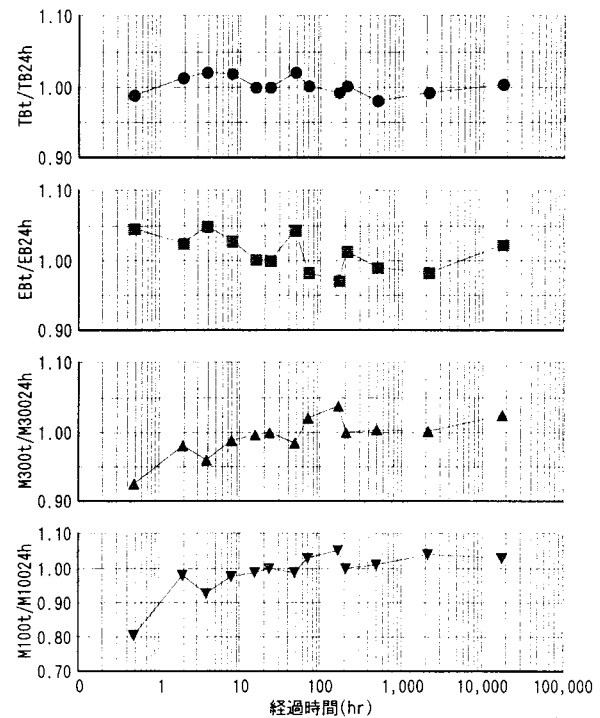


図-19 EPDM 系 GM の製造後の物性経時変化

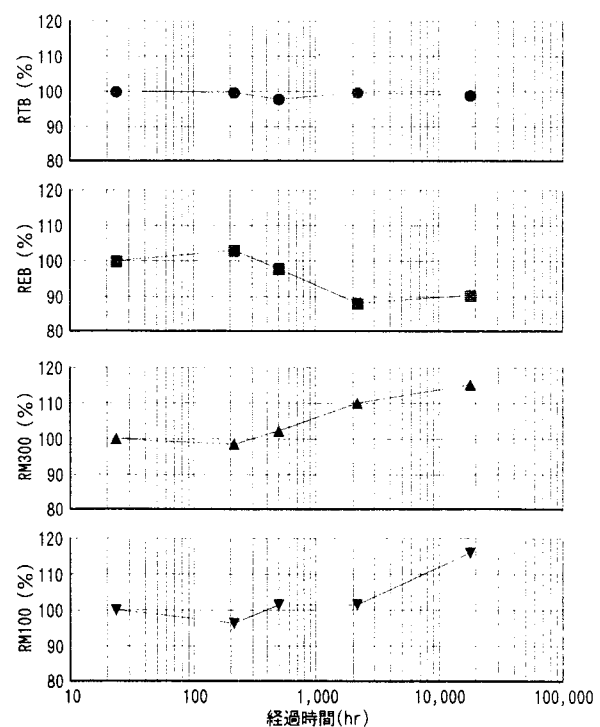


図-20 EPDM 系 GM の野外曝露後の物性保持率

の側壁に南面して立てかけ放置する方法をとった。

曝露 7 日（製造後 9 日）以降の経過時間毎の各物性値（ T_B 、 E_B 、 $M300$ 、 $M100$ ）の製造 24 時間後における値に対する百分率（物性保持率、それぞれ RT_B 、 RE_B 、 $RM300$ 、 $RM100$ と表示する）を示すと、図-20 のとおりである。この図から、 T_B を除く物性値に曝露の影響が明確に生じていることがわかる。 E_B は、曝露 3 カ月（2,184 時間）までに 10% 程度低下している。しかし、その後の低下の進行は見られない。 $M300$ 、 $M100$ は曝露時間とともに次第に大きくなっており、2 年（17,976 時間）経過時点で 15% 程度の増となっている。従って、EPDM 系 GM の場合、曝露されることによって物性値に顕著な変化が現れるのは伸びに関する物性値、すなわち、 E_B や $M300$ 、 $M100$ であり、EPDM 系 GM は曝露されることによって硬化する。また、その程度は 2 年経過時点で 10～15% 程度である。

5.2.3 物性変化の評価指標

一般に、材料劣化の尺度として“強さ”が指標に採用される場合が多い。EPDM 系 GM の場合も T_B を指標として、その初期物性値に対する保持率を用いて劣化の程度を論じた現場技術者からの報告も見られる。しかし、GM の劣化が進行した場合、“強さ”に変化が現れるのみならず、硬化して引張応力が高まり、伸び能力が低下する。従って、前節の例のように、GM が硬化して剛性（ $M300$ 、 $M100$ ）が大きくなれば、たとえ伸び能力を示す E_B が低下しても T_B はほとんど変化がないとして試験値は示されることもある。

そこで T_B の評価指標としての妥当性を検討するため、M 調整池で現場サンプリングされた GM から採取した試験片の引張試験結果を用い、3 つの基本物性値の保持率（ RT_B 、 $RM300$ 、 RE_B ）の関係を調べてみると、図-21 に示すとおりである。ただし、この図には、現場搬入直前に別途研究所に持ち込んだ GM の引張試験結果（5 個）も合わせてプロットしている。また、横軸の単位は、 $RM300$ 、 RE_B の % 表示前の比を乗じ、それを % 表示したものである。図中に RT_B と（ $RM300 \times RE_B$ ）の回帰分析結果を合わせて示したように、決定係数（ R^2 、相関係数の 2 乗）は 0.806 であり高い相関関係があることがわかる。なお、 RT_B と $RM300$ 、 RT_B と RE_B の間の R^2 は、それぞれ 0.104、0.133 であり相関関係が全く認められなかった。すなわち、 RT_B は $RM300$ や RE_B のそれぞれ単独とは無相関であるが、それらの積（エネルギーのアナロジー）で説明される可能性を示唆している。従って、EPDM 系 GM の場合、 T_B を劣化の指標として用いることには注意を要し、 T_B が保持されていても GM に劣化は起きていないと判断すべきではない。また、劣化の指標としては、 T_B よりも引張応力（たとえば、 $M300$ ）や E_B を用いる方が適切である。なお最近、米国の ASTM において、上述した（ $RM300 \times RE_B$ ）の $RM300$ を RT_B に置き換えた（ $RT_B \times RE_B$ ）の値（percent retained fractional strain energy）を劣化の判定指標とする動きがみられる¹⁴⁾。

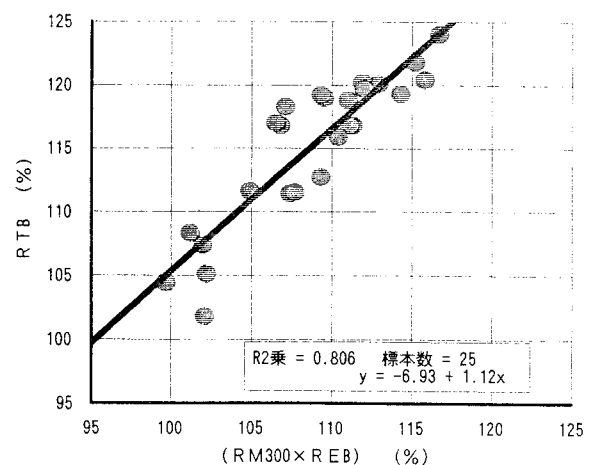


図-21 EPDM系市販品 GM の RT_B と $RM300 \times RE_B$ の関係
(A 調整池からのサンプリングによる)

5.3 30年を経過した IIR 系 GM の物性変化特性

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 40m³, GM 施工面積約 48m²) は, 1967 年 12 月, 当時の農業土木試験場 (1988 年, 農業工学研究所に改組) が所在した平塚市内に設置されたものを, 試験場の移転に伴い, 1977 年 10 月に筑波学園都市の当研究所内に移設したものである。この IIR 系 GM 実験池は, 現存する合成ゴム系 GM を用いた貯水池としては日本最古のものであるといわれている¹⁵⁾。主要な設置目的は, 合成ゴム系 GM の長期耐久性を調べることであり, 過去に 6.5, 10, 15, 20 年経過時点で実験池からサンプリングが行われ, 引張試験, 引裂試験などが実施されている。この 20 年経過時点までの試験結果は, 当研究所の研究成果として広く一般に公表されており⁷⁾, 農業用貯水池のみならず, 厚生省所管の廃棄物最終処分場などの遮水用 GM の設計における貴重なデータとして活用されている。

1997 年, 本実験池の GM は敷設後 30 年を経過した。筆者は既報³⁾において, その設置後 30 年間の実材令の経年変化特性を報告した。その概要は, 次のとおりである。①各物性値の劣化特性については, M_{300} は単調に増大, E_B は単調に減少, T_B は M_{300} と E_B の物性保持率の積によりほぼ説明される。②GM 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。③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 年よりも十分長く, 貯水池表面遮水材としての機能に何ら支障を生じていない。④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時点でその部分のみ更新を行う, という方針を採用すれば, 経済性はさらに高まる。⑤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。

5.4 EPDM 系 GM の各貯水池からのサンプリング

GM による表面遮水工法を採用して貯水池を築造した農業農村整備事業関係国営事務(業)所の協力により現地サンプリングを行い, 実材令の GM の経年物性変化状況を調べた。これら貯水池で表面遮水工法に用いられた EPDM 系 GM は, すべて EPDM 100%であった。サンプリング実施箇所数は, 落水中で池底部からのサンプリングが可能な貯水池 3 ヶ所 (昭和 53~54 年施工 A 局 A 調整池, 平成元年施工 B 局 B 調整池, 平成 3 年施工 C 局 C 調整池試験池) であり, 試験は引張試験および引裂試験である。この試験値と施工当時の初期物性試験値を比較し, 経年物性変化状況を調べた。なお, C 調整池試験池は, GM 敷設面積 514m² のうち北側半分が EPDM 系 GM, 南側半分が TPE 系 GM で施工されており, 法高 1.1m, 法勾配 1:3 である。満水位時の水深は 0.9m 程度であり, かんがい期は水位 0.65~0.9m 間を, 非かんがい期は水位 0.3~0.65m 間を変動する。この両 GM については, 東側法面と西側法面を天端法肩から池底まで帯状にサンプリングを行い, 帯方向に沿って連続して打ち抜いた供試体による引張試験を実施した (TPE 系 GM については後述する)。

表-10 は, サンプリングを実施した 3 貯水池と前節で述べた農工研実験池の長手方向・水中底部供試体の引張・引裂試験結果を対比して示したものである。ただし, B 調整池については, 施工時期によって搬入された GM の初期物性値が異なりサンプリングした GM が何時期の GM であるか特定で

表－10 経年物性変化状況（長手方向・水中底部試料）

	経過年数 年	M300 (MPa)		引張強さ (MPa)		切断時伸び (%)		引裂強さ (N/cm)	
		初期値	経年値	初期値	経年値	初期値	経年値	初期値	経年値
農工研実験池	10	5.0	5.6 (112)	9.9	10.7(108)	520	505(97)	300	310(103)
	15		5.8 (116)		9.8 (99)		475(91)		320(107)
	30		5.9 (118)		9.4 (95)		470(90)		290(97)
A調整池	15	4.7	6.8 (145)	10.3	11.0 (107)	530	495(93)	310	400(129)
B調整池 (Min) (Max)	5	6.6	8.9 (135)	11.4	12.0 (105)	523	416(80)	410	430(105)
		5.5	(162)	9.8	(122)	557	(75)	360	(119)
C調整池試験東側 西側	3	5.5	6.9 (125)	9.3	10.6 (114)	510	470(92)	380	400(105)
			7.4 (135)		11.0 (118)		454(89)		400(105)

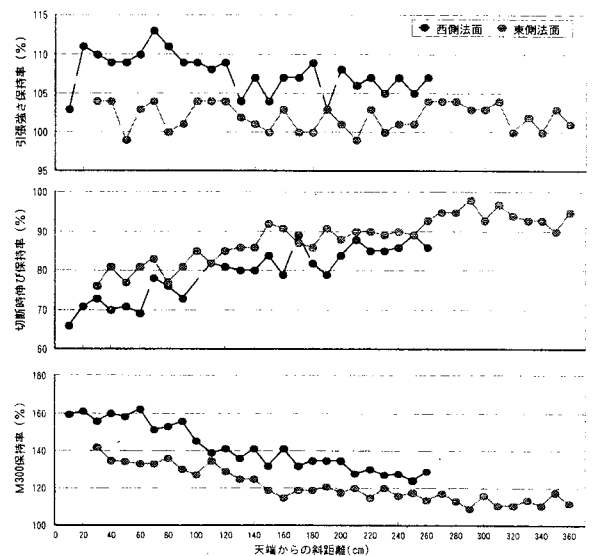
・（ ）書き内の数値は、保持率（＝経年値/初期物性値）である。

きないため、物性変化が起こった可能性のある最大値，最小値として示した。3 貯水池共に伸びに関する性能（ $M300$ ， E_B ）が低下してきている傾向にあるものの，強さに関する性能（ T_B ，引裂強さ）が低下する段階までには至っていない。

① 15 年間覆土下にあった A 調整池の GM は， E_B が 7% 低下しているものの， T_B ， $M300$ ，引裂強さは増大している。特に， $M300$ と引裂強さの増大が著しい。敷設されていた環境条件を考慮すると，熱や紫外線による影響を受けない GM の経時物性変化特性を示しているものと考えられる。

② B 調整池は施工が多年度に跨り，かつ，施工中も現場条件に則した GM の物性改良がなされ供試体の初期物性値が特定できないことから，必ずしも劣化が通常に比べ早いとは明言できない。しかし，GM 敷設後初期湛水までの曝露期間が長かったことの影響が大きいと推測され，貯水を開始する前の段階で物性変化がかなり進んでいた可能性が高いと考えられる。

③ 図－22 は，C 調整池試験池の東側法面および西側法面からのサンプリングの引張試験結果を，その施工当時の初期物性試験値に対する T_B ， E_B ， $M300$ の保持率で示したものである。この連続サンプリングの結果をみると，池底から法肩に向けて徐々に物性変化が大きくなっている。何れの位置を対比しても西側の方が東側に比べて，より物性変化が大きい。このことは，従来から言われている熱や紫外線によって劣化が促進されるということを裏付ける結果となっている。



注) 天端からの斜距離が，60cm 付近：満水位，140cm 付近：かんがい期低水位，240cm 付近：非かんがい期低水位である。

図－22 C 調整池試験池からのサンプリング結果（EPDM 系 GM）

5.5 TPE 系 GM の試験池からのサンプリング

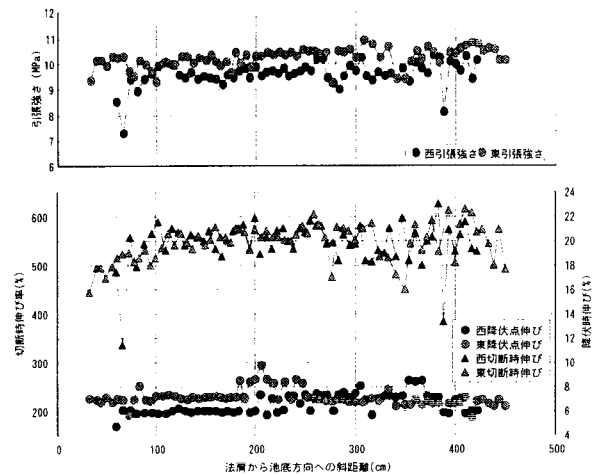
C 調整池試験池の TPE 系 GM の試験結果を，図－23 に示す。この GM の敷設時の物性値は，引張強さ 9.9MPa，切断時伸び 570%である。この初期物性値に比較して，引張強さについては西側法面の満水面より上で著しい低下が見られる。また，東側法面では強度が全体に増しているのに対し，西

側法面では強度低下が見られる。伸びに関する性能については、両法面共にかんがい期低水位より上で切断時伸びの著しい低下が見られる。降伏時伸びについては初期値が測定されていないので物性変化度を特定できないが、西側法面の非かんがい期低水位より上で低下が起こっていると推測される。総じて、日射熱と紫外線などを多く受ける部位の劣化が進んでいる傾向にある。

5.6 18年を経過した実験池からのASパネルのサンプリング

農工研のASパネルを使用した実験池は、1978年1月に施工されたものである。施工後18年を経過した1996年1月、図-24に示す位置（北側斜面、北側池底、南側斜面、南側池底）より試料を採取し、その採取位置の相違による諸物性値の差異を調べる試験を行った。試験項目は、回収アスファルトの軟化点、針入度、ASパネルの密度、吸水率、引張強さ、透水係数である。

① 北側斜面からサンプリングした厚さ約15mmの試料を厚さ方向に概ね3等分に切断し、上層、中



注) 天端からの斜距離が、60cm 付近：満水位、140cm 付近：かんがい期低水位、240cm 付近：非かんがい期低水位である。

図-23 C調整池試験池からのサンプリング結果 (TPE系GM)

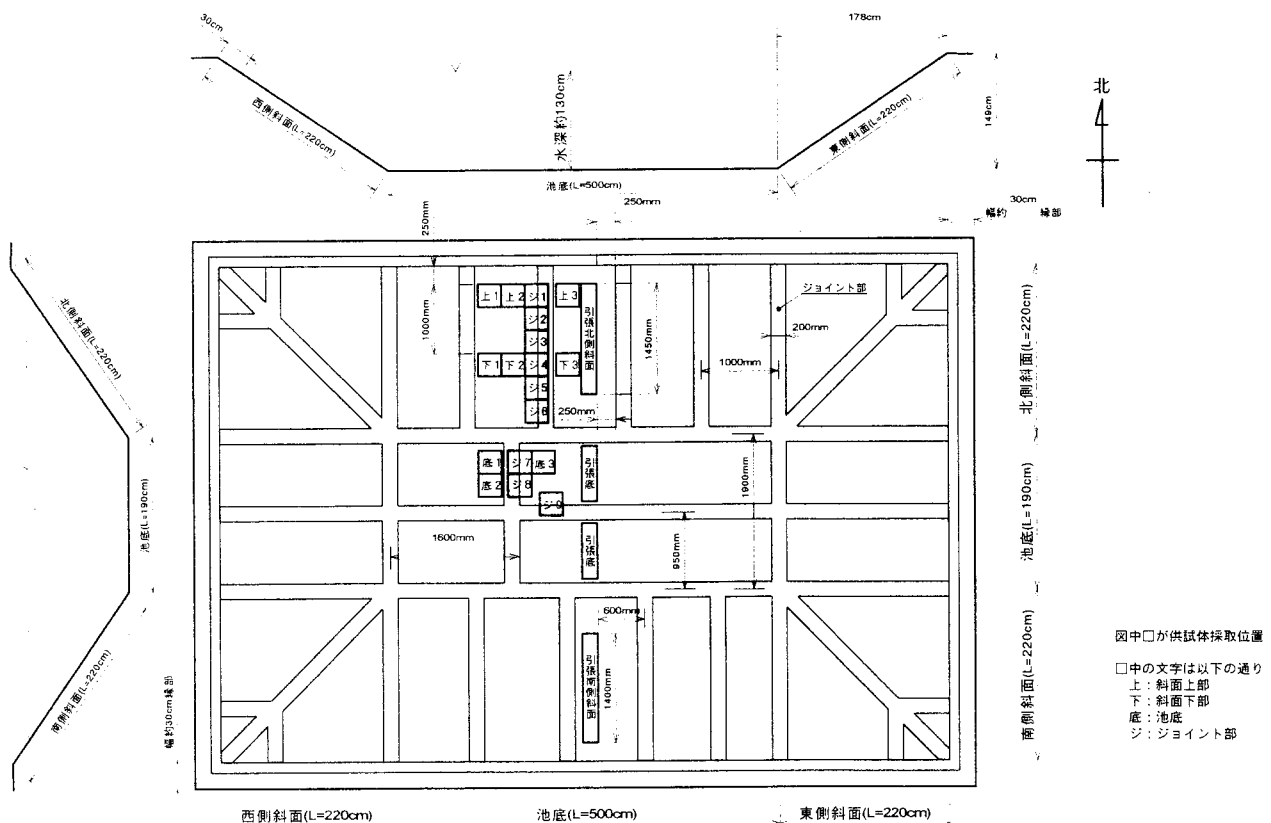


図-24 ASパネル実験池からのサンプリング位置図

層、下層に分け、回収アスファルトの軟化点および針入度を測定した。供試体は各層別の試料毎にトリクロロエチレンにて溶解させ、遠心分離器を使用してフィラー、繊維を沈殿させ、アスファルトを回収（アブソン法）し抽出した。軟化点試験結果を図-25に、針入度試験結果を図-26に示す。斜面上部や池底部に比較し、斜面上部は明らかに軟化点が高く針入度が小さい。また、いずれの試料採取位置においてもASパネル層断面内において物性の差が見られ、中層部の軟化点が低く針入度が大きい。ASパネル層断面の観察においても上下のごく表層部以外は極めて新鮮なアスファルトであった。アスファルト混合物は経年曝露されると軟化点は高くなり針入度は小さくなる¹⁶⁾ことから、ASパネルの経年劣化は数10cm以深の水中では緩慢で、かつASパネル層の上下のごく表層部のみが促進されると推定される。

② 密度および吸水率は北側斜面上部、下部、池底部の各3供試体について、粗骨材の比重及び吸水率試験方法(JIS A 1110)に準拠して測定した。密度試験結果および吸水率試験結果を図-27に示す。ASパネルの密度は、斜面の上方ほど大きい。また、その吸水率は斜面上部が斜面下部や池底部に比べ明らかに小さい。この結果については、斜面上のアスファルト混合物は長期の自重クリープにより空隙率が低下すると報告されている¹⁶⁾ことから、日射熱の影響をより大きく受け自重クリープが起こりやすい位置ほど密度は大きく吸水率は小さくなると考えられる。

③ 引張試験は南北斜面（上方から、上段、中上段、中下段、下段に区分）および池底からL300×W50の大きさに切り出した供試体を用いて、引張速度100 mm/min、試験温度20℃の条件下で実施した。引張試験結果を図-28に示す。斜面の上方ほど引張強さが大きい結果となっており、斜面上部の引張強さは池底部の1.7倍である。曝露の影響をより強く受け針入度が小さく密度が大きくなるほ

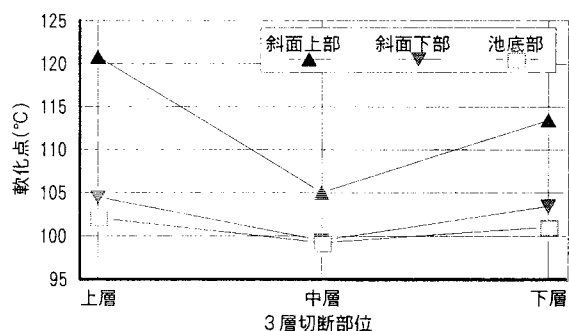


図-25 試料採取位置と軟化点

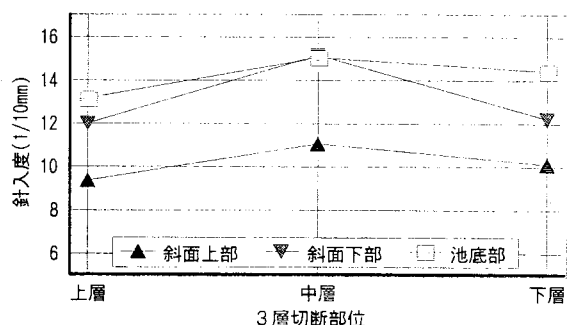


図-26 試料採取位置と密度・吸水率

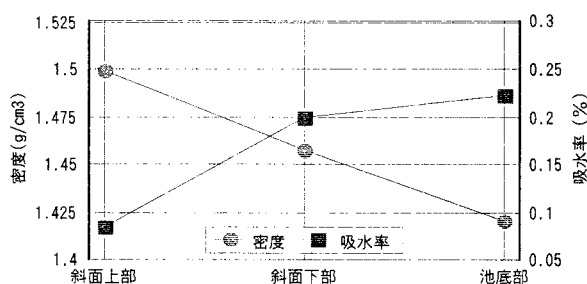


図-27 試料採取位置と針入度

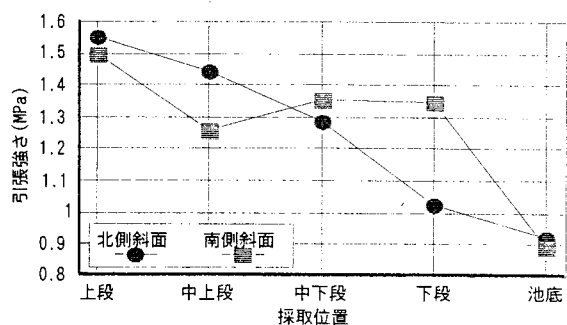


図-28 引張試験結果(100mm/min, 20℃)

ど、すなわち硬く緻密になるほど引張強さが増大するものと考えられる。なお、表－11 は、引張試験に先立ち、採取位置毎の供試体厚さを計測した結果である。一般に、AS パネルは基盤の不陸に対し粘性により追随するとされる。斜面からのサンプリング時においても基盤の凹部では AS パネル厚さが厚くなり、その直上では薄くなっているのが確認できた。特に南面する北斜面では、こうした現象が顕著であった。表に示した結果においても、供試体厚さの標準偏差にその現象が端的に現れている。従って、施工時における過度の不陸は AS パネルに局所的な厚さの増減を発生させる危険性がある。

④ 透水係数は $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-10}$ cm/s の範囲であり、斜面上方ほど小さくなる傾向が見られた。これは密度や吸水率の変化度合いに示される空隙率の増減傾向と一致しており、自重クリープなどによる AS パネル層の緻密化の影響が現れているものと考えられる。

6. 事故調査例

事例 1：ストレスクラックによる破裂

①調査地区：韓国江原道原州市

②使用場所：廃棄物処分場

③使用種別：HDPE 系 GM

④発生状況：工事完了後、最初の冬の寒さ（ $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ ）で GM が一気に収縮して裂け、風に煽られ裂け目が進行した。

⑤発生原因：設計段階での低温下におけるストレスクラック発生への検討が不十分で、現地気象条件を踏まえた材料選定がなされていない。また、余裕代の与え方など、施工仕様上の不備も指摘されている。

事例 2：亀裂の発生

①調査地区：インドネシア

②使用場所：貯水池

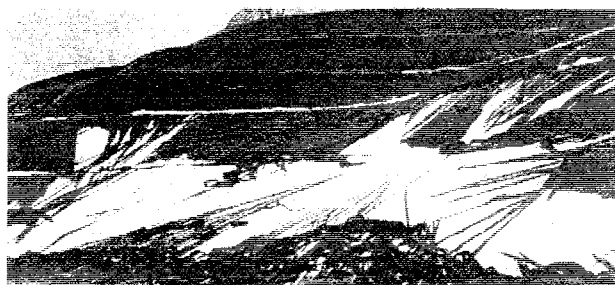
③使用種別：TPE 系 GM

④発生状況：施工 3.5 年後、主として熱融着によるジョイント部近傍（写真右上）に亀裂が頻発した。

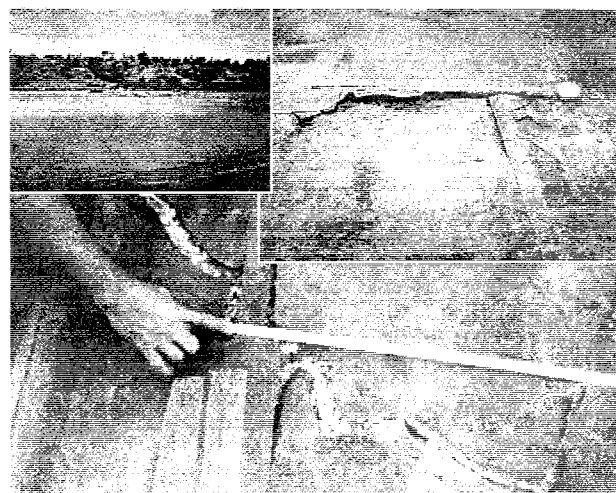
⑤発生原因：GM 表面温度が約 70°C の状況下で紫外線による劣化が促進されたことが主因であり、特にジョイント部近傍での亀裂の頻発は、引張初期応力が大きく降伏点を持つ GM では接合部のキワに応力集中が生じやすい¹⁷⁾ことに起因するものである。

表－11 引張試験用供試体厚さ計測結果

	最大値	最小値	中央値	平均値	標準偏差
北側斜面	18.1	11.1	14.4	14.4	1.31
北側池底	15.8	13.2	14.0	14.1	0.55
南側斜面	15.1	13.0	13.9	14.0	0.55
南側池底	14.7	12.6	13.6	13.6	0.50



写真－1 ストレス
クラッキング



写真－2 紫外線による亀裂の発生

事例 3：固定工の不備

- ①調査地区：四国
- ②使用場所：廃棄物処分場
- ③使用種別：HDPE 系 GM
- ④発生状況：施工 1 年後，小段および法肩固定用の U 字溝が浮き上がった。
- ⑤発生原因：保護層の土荷重による GM の下方への引張力や GM の温度による伸縮力に比して，U 字溝が軽量で固定荷重不足であったことが原因である。



写真-3 固定用U字溝の浮き上がり

事例 4：空気抜き工の不備

- ①調査地区：北海道
- ②使用場所：廃棄物処分場，貯水池
- ③使用種別：EPDM 系 GM
- ④発生状況：写真上は廃棄物処分場，写真下は貯水池で発生。両者共に GM 敷設区域の上流位置で GM が半球状に膨れ上がった。
- ⑤発生原因：GM 敷設基盤に施工される空気抜き工の不備によるものである。空気抜きドレーンの勾配が小さく，基盤の若干の不陸若しくは不同沈下で排気不能となり，空気が集積された。特に，ガス発生が懸念させる基礎基盤では注意が必要である。

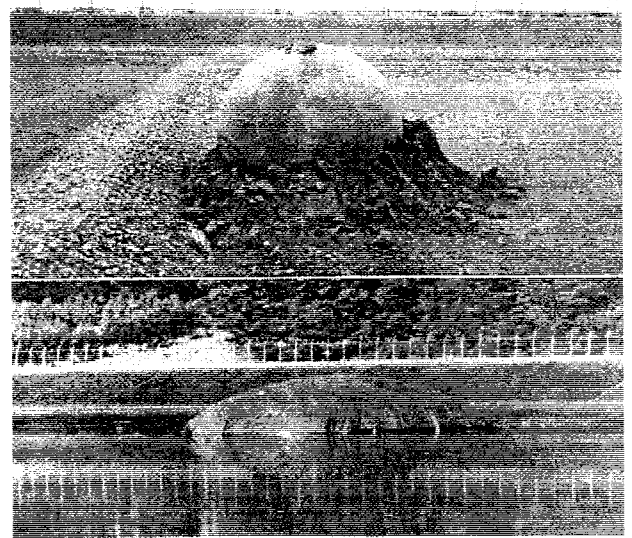


写真-4 GMの膨れ

事例 5：排水ドレーン工の不備

- ①調査地区：四国
- ②使用場所：貯水池
- ③使用種別：AS パネル
- ④発生状況：法面下部に AS パネル接合部のズレおよび孕みが発生した。
- ⑤発生原因：貯水池の法面隅角部基盤が三辺をコンクリート構造物で縁切りされていたため，地山湧水の排水が不能となり背圧を生じた。夏季に貯水池内の水位が低下した際，高温状態で長時間の引張力が作用したため，接合部にズレ，下部に孕みが発生した。写真下のように，隣接ブロックの排水ドレーンを延長して対処した。

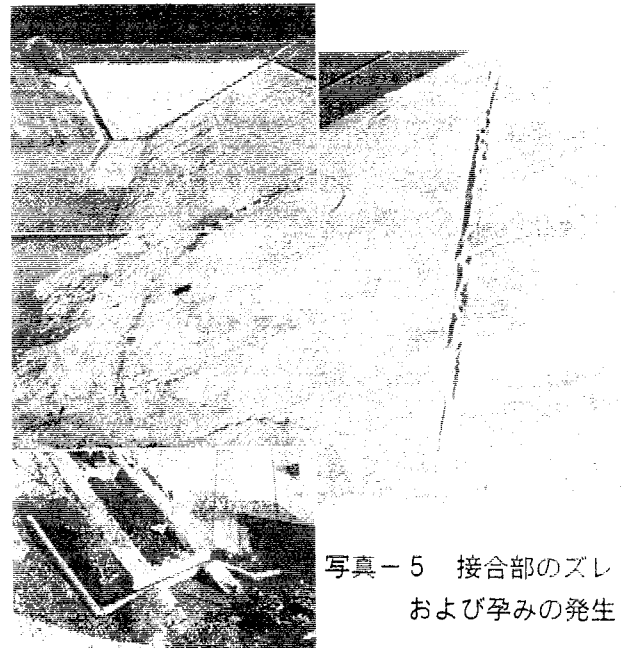
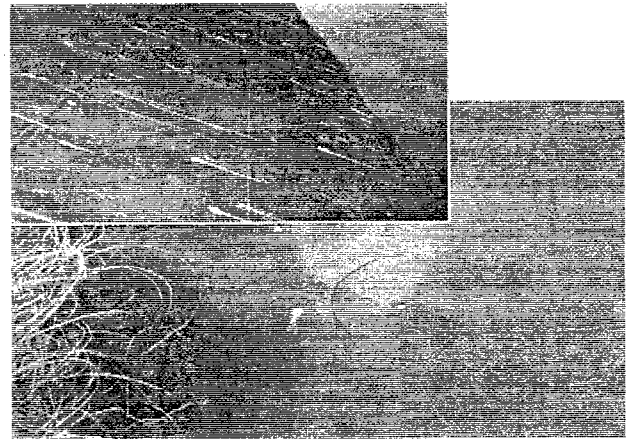


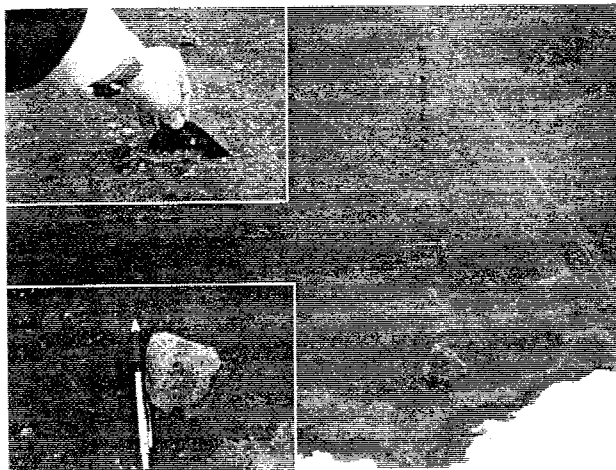
写真-5 接合部のズレ
および孕みの発生

事例 6：鳥害

- ①調査地区：山陰
- ②使用場所：貯水池
- ③使用種別：EPDM 系 GM
- ④発生状況：水際 GM に穿孔された外傷が発生した。
- ⑤発生原因：GM 表面に鳥の足跡と糞が認められ、外傷の形状から漁獲した鳥の嘴により穿孔されたものと判断される。なお、隣接した繊維補強 GM 部では損傷は発生していない。



写真－6 鳥の嘴で穿孔された GM



写真－7 融雪期における転石による損傷

事例 7：融雪期における転石による損傷

- ①調査地区：北海道
- ②使用場所：貯水池
- ③使用種別：EPDM 系 GM
- ④発生状況：融雪とともに法面に GM を爪で引っ掻いたような外傷が発生した。
- ⑤発生原因：砂利舗装であった貯水池天端道路から飛散した転石を GM 上に放置したまま降雪を迎えたため、翌春の融雪期に積雪荷重を受けながらズレ落ちる転石により GM が損傷を受けた。

事例 8：兵庫県南部地震によるため池の被災

- ①調査地区：淡路島（北淡町）
- ②使用場所：貯水池（ため池）
- ③使用種別：EPDM 系 GM
- ④被災状況：地震により生じた断層が写真左上のようにため池（理田池）を横断し、堤体および GM 基盤に亀裂が発生した。
- ⑤敷設 GM の状況：写真右上のようにため池取り付け道路には大きな亀裂と段差が発生し、ため池堤体部に設置されている余水吐（コンクリート構造物）には亀裂が発生した。その延長線上の GM を剥いだところ、写真下のように敷設基盤にも大きな亀裂が発生していたが、GM には損傷が全く見られなかった。



写真－9 亀裂の発生状況

7. おわりに

GM の地盤工学分野における様々な用途での利用・普及には、ここ十数年来、目覚ましいものがある。次々に開発される新しい材料を用いた技術・工法の健全な発展を図るためには、設計・施工法の研究開発と並行して、材料試験法の確立・標準化が不可欠である。同時に、社会の信頼に応えられる GM を用いた施設建設のためには、本論で紹介した事事例が端的に示すように、GM を使用する現場条件を踏まえた十分な検討が重要であり、豊かな経験に基づく細部技術の確立、マニュアル化が必要である。本拙論が、安全かつ経済的な貯水池表面遮水工法の設計・施工・維持管理法確立の一助になれば幸いである。

なお、本論をまとめるにあたり、地盤工学会ジオシンセティックス試験方法標準化委員会委員の加納 光氏のご協力を戴いた。記して深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 長束 勇：農水分野における GM 利用の現状と試験方法，地盤工学会ジオメンブレン利用の現状と試験方法講演論文・資料集，pp. 39-59，1997
- 2) 田中享二：合成高分子防水材料の耐候性の評価と予測，ウレタン建材，20，p. 30，1996
- 3) 長束 勇：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，ジオシンセティックス論文集，第 14 巻，pp.370-379，1999
- 4) 例えば，合成高分子ルーフィング工業会：シート防水マニュアル（加硫ゴム系），加硫ゴム部会，p. 8，1993，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委員会：ジオメンブレン技術概説－設計と施工－，p. 4，1995
- 5) 佐藤常三訳：Stepanov Ruben Dmitriewitch ポリマー力学序論，数理科学 6，pp. 90-91，数理科学 7，pp. 78-82，数理科学 8，pp. 72-75，1970
- 6) 三木博史・林 義之：国内におけるジオメンブレンの現状，国際ジオテキスタイル学会日本支部ジオメンブレン技術委員会，第 1 回ジオメンブレン技術に関するセミナー，pp.28-46，1994
- 7) 長束 勇・中島賢二郎・鶴丸雄二郎：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，通巻 228 号，pp.56-67，1990
- 8) 例えば，豊川総合用水農業水利事務所：万場調整池技術誌，東海農政局，p.3-153，1997
- 9) 山下晋三：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会，p.13，1995
- 10) 例えば，参考文献 5)や 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 , pp.1149-1152, 1995
- 11) 田中享二：合成高分子防水材料の耐候性/評価と予測，建材試験情報，pp.6-17，1997
- 12) 例えば，Well,L.W. :Successful Performance of a CSPE Cover on Water Reservoir,Geosynthetics '95, pp.585-594, 1995, Young,E.B.J & Kovach,C.A. : Study of the Durability of a PVC Geomembrane-Lined Pond Without Soil Cover, Geosynthetics '95, pp.907-919, 1995
- 13) 例えば，一色節也：耐熱老化性，日本ゴム協会会誌 38.10, 102-115, 1965, 田中享二：合成高分子防水材料および防水層の耐候性，第 2 回日本・韓国建築材料ジョイントシンポジウム論文集，pp.1-14, 1996
- 14) American Society for Testing and Materials : 1998 Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.04, p.198, 1998
- 15) 近藤三樹郎：わが国の施工事例 農業用貯水池・調整池，ジオメンブレン技術概説－設計と施工，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委員会，p.102, 1995
- 16) 伊藤隆彦・茨木龍雄・佐藤 治・宮川 真・秀島好昭：表面遮水壁用アスファルト混合物の耐久性，農業土木学会論文集 182, p270, 1996
- 17) 加納 光・上ノ山悦治：各種しゃ水シートの伸び特性に与える表面傷および接合部の影響，廃棄物学会第 7 回研究発表会講演論文集 II，pp.699-700, 1996