

(7-6) 廃棄物処分場における膨潤性止水材の劣化促進試験とアレニウスの法則に基づく耐久性予測

稲積真哉¹・磯田隆行¹・若月 正²・川端秀雄²

¹京都大学・²日本化学塗料

1. はじめに

現在、環境意識の高まりにより廃棄物のリサイクルや再資源化は推進されており、廃棄物排出量は年々減少傾向にあるものの、廃棄物処分場の新規建設が困難な事情も重なり、廃棄物処分場の残余容量は減少の一途を辿っている。よって、廃棄物処分場の残余容量の減少は、我が国において解決しなければならない急務の課題である。従来、山間谷地部に比較的小規模な内陸廃棄物処分場が建設されていたが、近隣住民から建設に関して反対の意見が挙がる、また環境規制が強化されたことから、生態系や水源を保護するため、山間谷地部の内陸廃棄物処分場は建設されなくなっている¹⁾。このような状況下、新規廃棄物処分場として大規模な海面廃棄物処分場(写真1参照)の建設が増えている。環境省の調査によると、平成21年度の最終処分場新規供用開始容量において海面廃棄物処分場は全体の約26%を占めており、海面廃棄物処分場が重要な役割を果たすようになってきている²⁾。

海面廃棄物処分場もこれまでの廃棄物処分場が抱えていた環境問題を無視はできず、むしろ海水域に面しているため廃棄物由来の汚染水が漏出しないことを確認しなければならない。そこで、海面廃棄物処分場における廃棄物埋立護岸(側面遮水工)として、埋立処分を行う空間を確保すると同時に汚染水の漏出を抑制するために、鋼製遮水壁が広く用いられている。ここで、鋼製遮水壁の構造として、継手箇所における汚染水漏出のリスクが高いという問題点が挙げられる。そのため、様々な継手がこれまで開発され、また継手箇所の空隙をモルタルや膨潤性止水材等で充填することで透水係数の低下が図られている³⁾。一方、海面廃棄物処分場は数十年の長期にわたって供用されるものであるのに対し、汚染水の漏出は抑えられているが半永久的な封じ込めが達成されているのか把握できていない現状にある。よって、海面廃棄物処分場にて用いられる鋼製遮水壁においては、供用開始直後のみでなく数十年先まで見据えた長期的な遮水性能を評価する必要がある。

本研究では、鋼製遮水壁の遮水性能において重要な要素である継手充填材(遮水処理材)に着目し、継手充填材(遮水処理材)の耐久性を評価する。具体的には、継手充填材(遮水処理材)として近年幅広く用いられている膨潤性止水材に関して、膨潤膜(膨潤した膨潤性止水材膜)の劣化促進試験を実施するとともに、得られた結果およびアレニウスの法則に基づいた膨潤性止水材の耐久性を予測している。

2. 海面廃棄物処分場、鋼製遮水壁および膨潤性止水材の概要

2.1 海面廃棄物処分場

廃棄物処分場とは、我々が生活する上で排出する廃棄物を貯蔵し、居住環境を維持するための社会基盤構造物である。一方、近年の環境意識の高まりから3Rが促進され、廃棄物の最終処分量は年々減少傾向にある。しかしながら、廃棄物処分場(特に内陸廃棄物処分場)の新規建設は困難であり、結果的に残余容量の逼迫が問題となっている。このような現状において、海面廃棄物処分場(写真1参照)の建設が急ピッチに進められている²⁾。

廃棄物処分場には、安定型処分場、管理型処分場および遮断型処分場の大きく3種類に区別できる。これらの廃棄物処分場の違いは、廃棄される廃棄物の環境に与える影響度によって区分される。安定型処分場では、環境に影響を与えない廃プラスチック等が埋立処分される。管理型処分場では、有害物質を含んでいる廃棄物ではあるが自然分解できるレベルの廃棄物が処分される。この際、地下水や水域に有害物質が漏出しないように、集水設備ならびに遮水設備等が必要となる。また、遮断型処分場では、高濃度の有害物質を含んだ廃棄物が処分されるため、有害物質が漏出されないように完全に外部と遮断されている。上記の内、海面廃棄物処分場は主として管理型処分場に位置している。そのため、海面廃棄物処分場には有害物質を含んだ廃棄物が廃棄されるため、海面廃棄物処分場から漏水が発生した際には有害物質も同時に漏出し、周辺海域の環境に多大な影響を与える危険性がある⁴⁾。そこで、海面廃棄物処分場では、漏水を防ぐために側面と底面に遮水工を施すことで遮水・遮蔽性能を高める必要がある。

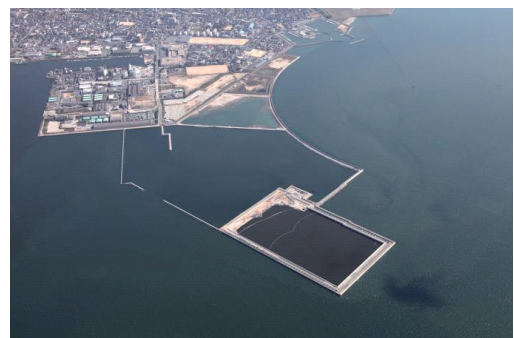


写真1 海面型廃棄物処分場の全景

Evaluation of Durability on Water-Swelling Materials based on Accelerated Deterioration Tests and Arrhenius Laws
Shinya Inazumi¹, Takayuki Isoda¹, Tadashi Wakatsuki² and Hideo Kawabata²
(¹Kyoto University, ²Nippon Chemical Paint Co., Ltd.)

2.2 鋼製遮水壁

廃棄物処分場において、廃棄物由来汚染水の地下水や水域への流出を防ぐために、側面および底面に遮水工が施される⁵⁾。なお、廃棄物処分場の底面は不透水性地盤もしくは遮水シート工等で遮水性を高める場合が多い。海面廃棄物処分場は立地条件からわかるように、海域に汚染水が漏出しないよう側面遮水工の建設に注意を払わなければならない。そこで、海面廃棄物処分場では側面遮水工として図1に示すような鋼製遮水壁が用いられる⁶⁾。鋼製遮水壁とは、鋼製部材を継手によって嵌合しつつ連続的に打設する構造物である(写真2参照)。鋼製部材自体は、従来から構造物の基礎や土留め壁として用いられており、その遮水性能は非常に高く、不透水として扱える。しかしながら、鋼製遮水壁は継手部分を有するため、当該継手部分から水の漏出が考えられる。すなわち、鋼製遮水壁の遮水性能は、継手部分の遮水性能に大きく影響される。そのため、様々な形状の継手部分は、鋼製遮水壁の遮水性能向上を目的として考案されてきた³⁾。同時に、様々な形状の継手は、低透水性の袋詰めモルタルや膨潤性止水材を継手内部空間に充填することで内部空間に生じる空隙を塞いでおり、これらの処理は「継手の遮水処理」と呼ばれている。

2.3 膨潤性止水材

本研究では鋼製遮水壁の継手部分に用いられる充填材(遮水処理材)として、膨潤性止水材に着目している。ここで、膨潤性止水材は熱可塑性エラストマーを母材に、高吸水性ポリマー、充填材および溶剤を配合した流動性を有する止水材(シート状もしくは液状)であり、膨潤膜(膨潤した膨潤性止水材膜)から抽出される水は特定有害物質について地下水環境基準を満たしている。膨潤性止水材は、予め鋼製部材の継手内部に塗布・接着して用いられる。膨潤性止水材は自然乾燥させると弾性の固い膜を形成するが、鋼製遮水壁打設後に水や土中水を取り込み膨潤し、結果的に継手内部の間隙を塞ぐ(写真3参照)。これによって、継手部分は遮水性能の向上が図られる。また、膨潤性止水材はモルタル等と比較して十分な柔軟性を有しているため、鋼製遮水壁の弾性や変形追随性をも向上できる。なお、膨潤性止水材については、様々な条件下での室内・現場試験が行われており、充填材(遮水処理材)としての特性・性能が定量的に評価されている。例えば、水頭差が40m以下であれば、膨潤性止水材を塗布した継手は遮水工基準($k_c \leq 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)を達成できる^{7), 8)}。さらに、膨潤性止水材の経時特性についても膨潤膜強度を指標として言及されている^{9), 10), 11)}。なお、膨潤膜強度とは水により膨潤した膨潤性止水材膜の強度を表しており、これは耐水圧(遮水性能)等に大きく影響を及ぼす。一例として膨潤性止水材の膨潤膜強度は、浸漬水温20°Cの淡水において1年間で約7.2Nから0.8Nまで低下するものの、1年経過以降は一定値(0.8N)を保持することが確認されている^{9), 10), 11)}。この要因として、浸漬養生開始から1年以内は膨潤性止水材に含有される高吸水性ポリマーの溶解が進行傾向にあるものの、1年経過以降は高吸水性ポリマーの溶解が終了に向かうことが考えられている。なお、高吸水性ポリマーの溶解程度は、膨潤性止水材が浸漬される水質、特に水温の影響を大きく受ける。換言すれば、膨潤性止水材における膨潤膜強度の経時変化は浸漬水温の調節によって促進させることができ、これが本研究における膨潤膜劣化促進試験実施の動機として位置付けられる。なお、本研究において「膨潤性止水材の劣化」は、「膨潤性止水材の組成成分である高吸水性ポリマーの溶解に伴う膨潤膜強度の低下」と同義に扱っている。

3. 膨潤性止水材の膨潤膜劣化促進試験

3.1 概要

海面廃棄物処分場は有害物質を含有し得る廃棄物が廃棄処分されるため、長期的に有害物質が分解されるまで、もしくは半永久的に有害物質を封じ込めるため、適正に管理されなければならない。よって、海面廃棄物処分場の側面遮水工として用いられる鋼製遮水壁は、長期的・半永久的に汚染水が漏出しないよう、遮水性能を確保・維持する必要がある。

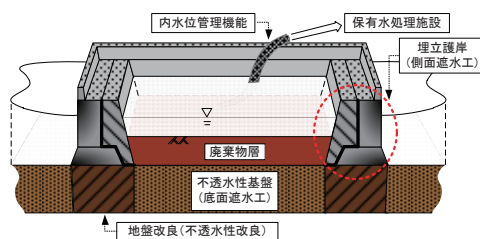


図1 海面型廃棄物場における遮水工の概略



写真2 鋼管矢板遮水壁



写真3 膨潤性止水材の膨潤前(左)と膨潤後(右)

る。しかしながら、鋼製遮水壁は供用開始直後において遮水工基準を満たす遮水性能を保持しているものの、数十年後においても当該遮水性能を保持している保証、さらに適切な維持補修の計画がない状態で用いられている現状にある。よって、本研究では鋼製遮水壁の継手に充填される膨潤性止水材に着目し、膨潤性止水材の劣化を考慮した上、長期的な耐久性を評価している。ただし、膨潤性止水材は本来長期間にわたって用いられるため、オンサイトにおける耐久性・耐用年数の調査は膨大な時間を要する。そこで、短期間に膨潤性止水材の長期的な耐久性(長期的な遮水性能)の評価を試みる目的で、膨潤性止水材を高温水に浸漬させ、膨潤性止水材の劣化を促進させる膨潤膜劣化促進試験を実施している。

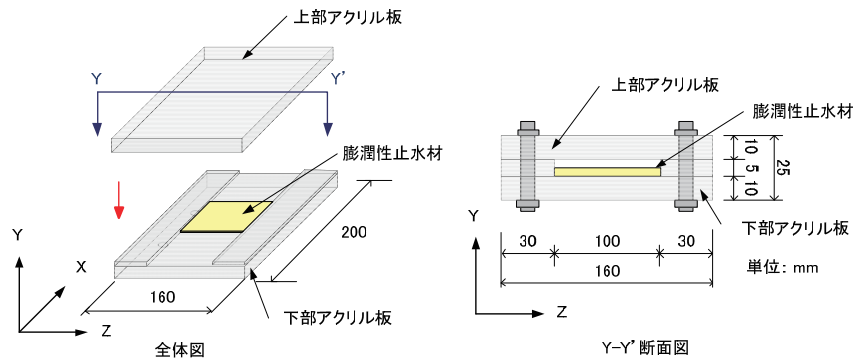


図2 膨潤膜劣化促進試験における試験サンプルの概略

3.2 試験方法

本研究では海面廃棄物処分場において遮水材として適用された膨潤性止水材の劣化を考慮するため、膨潤性止水材を高温水に浸漬させ、且つその条件における膨潤膜の強度特性を測定する膨潤膜劣化促進試験を実施している。なお、膨潤膜強度を測定する機器には島津製作所製 EZTEST-500N (進入弾性治具: $\phi 3\text{mm}$) を用いている。

試験方法は以下のとおりである。

- (1) 80×80mm の試験片 (膨潤性止水材) を準備する。
- (2) 上部および下部アクリル板に t2mm の膨潤性止水材を貼り付ける。
- (3) 上部および下部アクリル板をボルトで留め、劣化促進試験サンプルとする (図2 参照)。
- (4) 試験サンプルを淡水 (浸漬水温: 20°C, 40°C, 60°C および 80°C) で満たされた水槽にて浸漬させる。
- (5) 一定期間後、試験サンプルを水槽から取り出し、膨潤性止水材の中心、中心から 15mm および 30mm 離れた位置 (測点) の膨潤膜強度を合計 9 点測定する (図3 参照)。
- (6) 膨潤膜強度測定後、試験サンプルを再び水槽に戻し浸漬させる。
- (7) (5) および (6) を繰り返す。

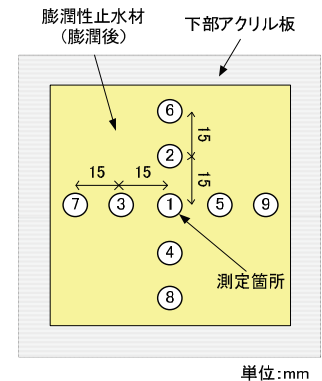


図3 膨潤膜強度の測定箇所

3.3 結果と考察

図4は、浸漬水温 20°C, 40°C, 60°C および 80°C の淡水に浸漬した膨潤性止水材の各測点 (No.1, 2, 3, 6, 7) における膨潤膜強度と浸漬養生日数の関係を示している。ここで、浸漬養生前 (膨潤前) における膨潤性止水材の膜強度は 6.9N である。これより、全ての浸漬水温の場合で、いずれの測点においても浸漬養生日数の経過に伴って膨潤膜強度が低下する傾向が認められる。また、中心測点から 30mm 位置の測点 (No.6, No.7) では、浸漬水温に応じて他の測点と比べ早期 (例えば、浸漬水温 40°C では 16 日経過後) に膨潤膜強度の測定が不可能であった。一方、浸漬養生日数の経過とともに、いずれの浸漬水温において中心測点 (No.1) の膨潤膜強度が最も大きくなる傾向にある。換言すれば、中心測点 (No.1) に比べて、中心から 15mm 位置の測点 (No.2, No.3)、さらに中心から 30mm 位置の測点 (No.6, No.7) の膨潤膜強度の低下は浸漬水温の上昇にも応じつつ、より早期に進行する。このように周辺部から中心部へと劣化が進行する原因には、水と膨潤性止水材の接触を挙げることができる。すなわち、先ず膨潤性止水材の周辺部 (No.6, No.7) において水と接触・膨潤が発生するため、中心部 (No.1, No.2, No.3) の膨潤膜強度は当該周辺部と比較して大きい。同時に、周辺部 (No.6, No.7) では膨潤性止水材の組成成分である高吸水性ポリマーの溶解も進行する結果、当該周辺部から膨潤膜強度の低下が進行する^{9), 10), 11)}。ただし、膨潤性止水材の周辺部が先に膨潤する結果、中心部への水の浸入が困難になる。

図5は、浸漬水温 20°C, 40°C, 60°C および 80°C の浸漬条件における膨潤性止水材の中心測点 (No.1) の膨潤膜強度と浸漬養生日数の関係を示している。これより、膨潤性止水材の膨潤膜強度の低下傾向は浸漬水温の上昇に伴い著しくなる。したがって、膨潤性止水材の劣化は、浸漬水温の上昇に伴い促進されることが考えられる。なお、この傾向はいずれの測点の膨潤膜強度においても確認している (図4 参照)。よって、常温 (浸漬水温: 20°C) であれば、浸漬養生

日数の経過とともに膨潤膜強度は1N程度の一定値で安定しており、高吸水性ポリマーの溶解もそれ以上に進行していない（平衡に至っている）と判断できる。一方、浸漬水温の上昇に伴い、膨潤膜強度の低下は早期に生じており、すなわち、高吸水性ポリマーの溶解が促進されている。

2.3節のとおり、既往研究^{9), 10), 11)}では浸漬水温 20°Cにて浸漬養生を開始した膨潤性止水材は、1年経過以降、6年経過した現時点においても膨潤膜強度 0.8N 程度、ならびに透水係数 1×10^{-9} cm/s オーダーを伴う一定の強度と遮水性能を維持していることが実証されており、膨潤性止水材の組成成分である高吸水性ポリマーの溶解は1年程度で終了に向かうことが明らかになっている。同時に、既往研究^{8), 9), 10)}では膨潤性止水材における高吸水性ポリマーの溶解と、膨潤膜強度ならびに透水係数との関連性についても言及している。よって、膨潤性止水材は周辺部から膨潤することで、中心部において劣化の進行が遅く、且つ劣化が進行した場合にも周辺部と同様、長期的には一定の膨潤膜強度ならびに透水係数を保持し続けることが予測できる。ただし、膨潤性止水材の劣化において浸漬水温の管理は重要である。

4. アレニウスの法則に基づく膨潤性止水材の耐久性予測

4.1 概要

膨潤性止水材の耐久性（長期的な遮水性能）・耐用年数を、オンサイトにおいて調査することは膨大な時間を要する。そこで、本研究では膨潤性止水材を水温の異なる淡水に浸漬させることで膨潤膜劣化促進試験を行い、遮水性能に大きく関与する膨潤膜強度の経時特性を検討しており、浸漬水温の上昇に伴う膨潤膜強度の経時的低下傾向が著しいことを明らかにしている。よって、膨潤性止水材の劣化と浸漬水温には関連性を有しており、高分子材料等の温度変化に弱い物質の長期耐久性予測において一般的に用いられているアレニウスの法則¹²⁾が成立すると考えられる。そこで、アレニウスの法則¹²⁾に基づく膨潤性止水材の耐久性予測を行っている。

4.2 アレニウスの法則

アレニウスの法則¹²⁾とは、劣化によって生じる反応速度が絶対温度に反比例する式(1)で表される。これは、材料の温度が高いほど早く変化が進む「反応速度論」に則っている。

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで、 K ：反応速度、 A ：定数（頻度因数）、 E_a ：見かけの活性化エネルギー（kJ/mol）、 R ：気体定数、 T ：絶対温度（K）である。

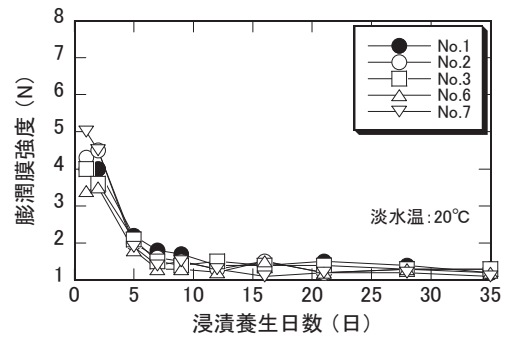
また、反応速度と耐用年数の関係は逆数で表すことができるため、耐用年数は以下の式(2)で表される。

$$L = \frac{1}{K} = \frac{1}{A} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

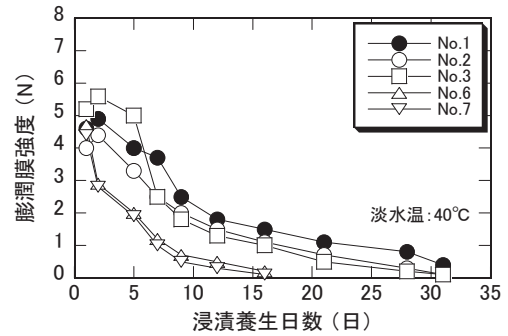
ここで、 L ：耐用年数（year）である。

式(2)の両辺について自然対数をとると、式(3)となる。

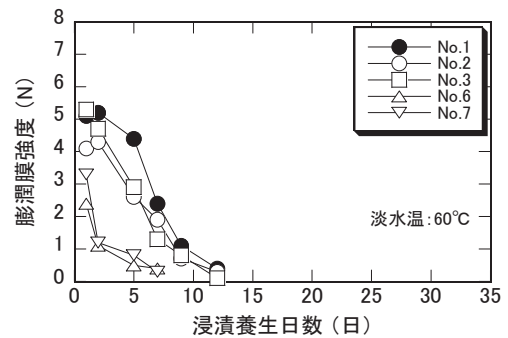
$$\ln L = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln \frac{1}{A} \quad (3)$$



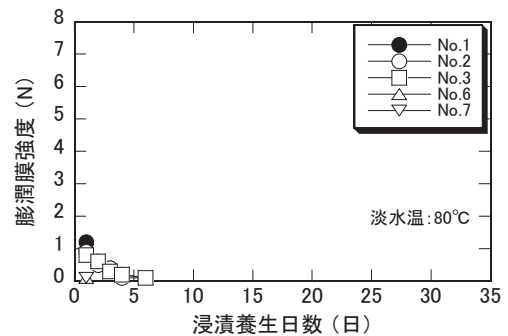
(a) 浸漬水温：20°C



(b) 浸漬水温：40°C



(c) 浸漬水温：60°C



(d) 浸漬水温：80°C

図4 各測点・各浸漬水温における膨潤性止水材の養生日数と膨潤膜強度の関係

式(3)において、 E_a/R および $1/A$ は定数となり、 $\ln t$ と $1/T$ において直線関係が得られるため、温度と耐用年数との関連が推定できると考えられる。

4.3 膨潤性止水材の耐久性予測

本研究では、材料に固有である頻度因数 (A) や活性化エネルギー (E_a) に関するデータを取得する試験を実施しておらず、上記の式(3)から耐用年数を計算できない。そこで、後述のとおり膨潤性止水材が想定し得る能力を發揮できなくなる時点を経年数として決定し、浸漬水温を 40°C 、 60°C および 80°C にして得られた膨潤膜劣化促進試験結果から浸漬水温が常温 (20°C) の際の膨潤性止水材の耐用年数を予測する。具体的には、浸漬水温が高温状態の際の試験結果から耐用年数を算出し、 $1/T - \ln t$ 平面にプロットする。さらに、プロットした点から式(3)のように自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係を表す近似直線を求める。さらに、得られた近似直線から浸漬水温 20°C の際の耐用年数を決定する。本研究では膨潤性止水材の耐用年数を算出する際、膨潤膜強度が 0.8N を下回る時点で当初の遮水性能が維持できなくなる、すなわち浸漬養生開始から膨潤膜強度が 0.8N となる期間を経年数として予測している。これは、作用圧 0.5MPa の場合、膨潤性止水材の膨潤膜強度が 0.8N 前後でも遮水性能を維持できる既往知見^{9), 10), 11)}に基づいている。この前提を踏まえ、浸漬水温が 40°C 、 60°C および 80°C で実施した膨潤膜劣化促進試験の結果から、膨潤膜強度 0.8N の際の自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係を表した近似直線を作成する。

表1は、膨潤性止水材の膨潤膜劣化促進試験において、比較的中心部の測点 (No.1~5) から得られた膨潤膜強度の経時特性から求めた近似直線の傾き (E_a/R) および切片 ($\ln 1/A$) の最大値、中央値および最小値を表している。元来、材料に固有である頻度因数 (A) や活性化エネルギー (E_a) は定数であるため、耐用年数を計算する近似直線はほぼ同一であることが望ましい。しかしながら、本研究において実施した膨潤性止水材の膨潤膜劣化促進試験では、表1で示すように非常に幅を持った結果が得られる。この要因として、膨潤性止水材の膨潤膜劣化促進試験における測定誤差、ならびに膨潤性止水材の劣化は必ずしも一様の速度で生じないことが挙げられる。したがって、本研究では傾き (E_a/R) および切片 ($\ln 1/A$) に関して、表1における中央値を用いて近似直線を作成している(図6参照)。ここで、膨潤性止水材の耐用年数とは膨潤性止水材が当初の遮水性能を維持できる期間である。膨潤性止水材は膨潤することで継手内部の間隙を充填し遮水を行うが、周辺部の劣化が進行したとしても中心部が膨潤することで遮水性能を維持することが可能である。よって、膨潤性止水材の耐用年数を予測する際には中心部の劣化傾向に着目すべきであり、近似直線の作成には周辺部の測点 (No.6~9) の結果は除外している。さらに、得られた近似直線に常温 (浸漬水温: 20°C) を代入すると、膨潤性止水材の耐用年数は約 27 年と算出・予測される。これは、膨潤性止水材は浸漬養生開始から 1 年経過以降において劣化がそれ以上進行しない結果^{9), 10), 11)}と一致していると考えられる。よって、膨潤性止水材は数十年のスパンで用いられる海面廃棄物処分場の遮水工 (遮水材) として十分活用できる結果である。同時に、膨潤性止水材は高吸水性ポリマー、充填材および溶剤等の組成比を変化させ、膨潤膜強度を増大させることが可能である^{9), 10), 11)}。よって、より長期的な耐久性を保持する膨潤性止水材の改良は可能である。

5. おわりに

本研究では、海面廃棄物処分場・鋼製遮水壁の遮水性能において重要な要素である継手充填材 (遮水処理材) に着目し、継手充填材 (遮水処理材) の耐久性を評価した。具体的には継手充填材 (遮水処理材) として近年幅広く用いられている膨潤性止水材に関して、各浸漬水温の条件下における膨潤膜劣化促進試験を実施するとともに、得られた結果およびアレニウスの法則に基づいた膨潤性止水材の耐久性を予測した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 膨潤膜劣化促進試験において、膨潤性止水材の中心測点に比べて、中心から 15mm 位置の測点、さらに中心から 30mm

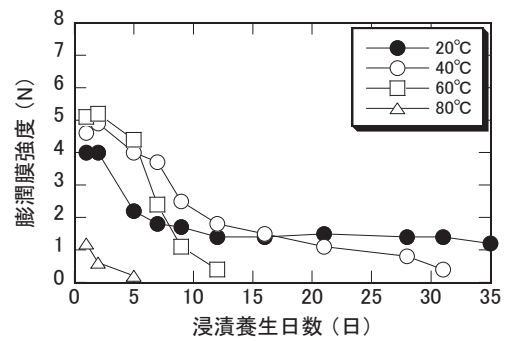


図5 測点 No.1・各浸漬水温における膨潤性止水材の養生日数と膨潤膜強度の関係

表1 近似直線における傾きおよび切片の最小値・中央値・最大値

	最小値	中央値	最大値
傾き (E_a/R)	6560.7	7542.0	7746.6
切片 ($\ln 1/A$)	-22.615	-16.532	-7.460

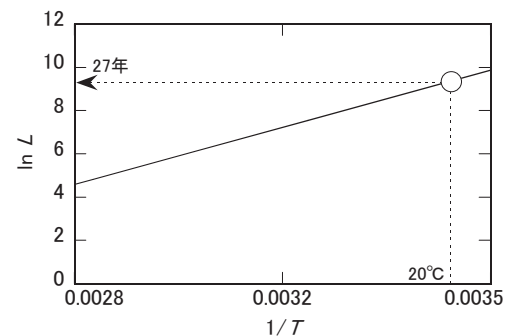


図6 膨潤膜強度が 0.8N における自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係

位置の測点の膨潤膜強度の低下は浸漬水温の上昇にも応じつつ、より早期に進行する。周辺部から中心部へと膨潤膜強度の低下が進行する原因には水と膨潤性止水材の接触を挙げることができ、先ず膨潤性止水材の周辺部において水と接触・膨潤が発生するため、中心部の膨潤膜強度は当該周辺部と比較して大きい。

- (2) 膨潤膜劣化促進試験において、膨潤性止水材の膨潤膜強度の低下傾向は、いずれの測点においても浸漬水温の上昇に伴って著しくなり、膨潤性止水材の劣化は浸漬水温の上昇に伴い促進される。
- (3) 膨潤膜劣化促進試験において、浸漬水温が 20°C であれば、浸漬養生日数の経過とともに膨潤性止水材の膨潤膜強度は 1N 程度の一定値で安定しており、高吸水性ポリマーの溶解もそれ以上に進行していない。一方、浸漬水温の上昇に伴い、膨潤膜強度の低下は早期に生じ、高吸水性ポリマーの溶解が促進されている。
- (4) 膨潤膜劣化促進試験において、膨潤性止水材は周辺部から膨潤することで中心部において劣化の進行が遅く、且つ劣化が進行した場合にも周辺部と同様、長期的には一定の膨潤膜強度を保持し続けることが予測できる。ただし、膨潤性止水材の劣化において浸漬水温の管理は重要である。
- (5) 膨潤膜劣化促進試験の結果に対してアレニウスの法則を適用した場合、膨潤性止水材の耐用年数は約 27 年と算出される。これは、浸漬養生開始から 1 年経過以降において膨潤性止水材の膨潤膜強度の低下が進行しない既往の結果と一致している。よって、膨潤性止水材は数十年のスパンで用いられる海面廃棄物処分場の遮水工（遮水材）として十分活用できると考えられる。ただし、耐用年数以降に関しては膨潤性止水材の維持補修が必要になると考えられる。具体的には、シート状の膨潤性止水材の劣化箇所に液状の膨潤性止水材を再注入する等が考えられるが、維持補修に関しては今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 瀬尾 清, 古市 徹, 高橋富男: 産業廃棄物処理施設の住民合意と公共関与の課題, 第 4 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 廃棄物学会, pp.68-83, 1993.
- 2) 環境省: 平成 22 年度事業産業廃棄物行政組織等調査報告書 (平成 21 年度実績), 環境省, 2011.
- 3) 木下雅敬, 沖 健, 岩倉 肇, 麻生川学, 野路正浩, 島崎肇一, 吉野久能: 鋼管矢板継手の遮水性能評価実験, 第 36 回地盤工学研究発表会発表論文集, 地盤工学会, pp.2535-2536, 2001.
- 4) 吉田喜久雄: 化学物質の暴露・リスク評価における数理モデルの役割と課題, 資源と環境, 資源環境技術総合研究所, Vol.9, No.4, 2000.
- 5) 小田勝也: 海面処分場跡地利用にあたっての技術開発の現状と課題, 廃棄物研究財団だより, 廃棄物研究財団, No.67, 2006.
- 6) 嘉門雅史, 乾 徹: 管理型廃棄物処分場の地盤工学的問題と対策, 土木学会論文集, 土木学会, No.701, pp.1-15, 2002.
- 7) 稲積真哉, 木村 亮, 山村和弘, 西山嘉一, 嘉門雅史: 連結鋼管矢板による鉛直遮水壁の施工技術, 材料, 日本材料学会, Vol.54, No.11, pp.1105-1110, 2005.
- 8) 稲積真哉, 若月 正, 小林賢勝, 木村 亮: 廃棄物処分場の遮水処理剤へ適用される膨潤性止水材の膨潤・強度特性, 環境工学研究論文集, 土木学会, Vol.44, pp.463-469, 2007.
- 9) 稲積真哉, 木村 亮, 角田敏光: 鋼管矢板継手の内部空間を活用した遮水浄化促進技術に関する解析的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), 土木学会, Vol.67, No.2, pp.216-227, 2011.
- 10) Inazumi, S., Wakatsuki, T., Kobayashi, M. and Kimura, M.: Material properties of water swelling material used as water cut-off treatment material at waste landfill sites, Journal of Material Cycles and Waste Management, Springer, JSMCWM, Vol.12, No.1, pp.50-56, 2010.
- 11) Inazumi, S., Kimura, M., Kakuda, T. and Kobayashi, M.: Water cut-off performance of H-jointed steel pipe sheet piles with H-H joints attaching water-swelling materials, Soils and Foundations, JGS, Vol.51, No.6, pp.1019-1035, 2011.
- 12) 大塚正博, 塩治幸男, 小林 亨, 小泉 淳: シールド工用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について, 土木学会論文集, 土木学会, No.651, pp.61-79, 2000.