

敷設基盤の凍上に対する ジオメンブレンの追随特性

長束 勇¹・渡嘉敷 勝²・森 充広³・岸 智⁴・大里一雄⁵・沼尾一徳⁶・佐藤敦史⁷

ジオメンブレン (GM) を用いた貯水池表面遮水工法に関する設計基準では、気象条件や地質条件によりGMの敷設基盤が大きく変形する可能性がある場合は、十分な敷設基盤処理対策をとることとされている。しかし、敷設基盤の変形に対するGMの追随特性を解明し、損傷に対する安全性が確認できれば、敷設基盤処理対策を軽減し、遮水システム全体の設計の合理化が図れる可能性がある。そこで、標高800mの高地寒冷地域に位置する貯水池のGM表面遮水施工事例を取り上げ、現地で想定されている敷設基盤の凍上現象に対するGMの追随特性に関する室内試験を行った。その結果、EPDM系GMを用いれば、一般に採用されている凍結深に見合った深さまでの敷設基盤の砕石等による置き換えは必要なく、施工上必要な厚さでできることが明らかになった。

キーワード：ジオメンブレン，表面遮水工法，凍上，追随特性，地すべり

1. はじめに

農水分野における土木用遮水材（ジオメンブレン，以降「GM」と略記する）を用いた貯水池表面遮水工法は，平成12年2月農林水産省構造改善局建設部長制定の土地改良設計指針「ため池整備」および平成13年3月農林水産大臣答申の土地改良事業計画設計基準「ダム」に記載され，現場技術者への普及が図られる段階となっている。さらに，設計指針や設計基準への記載時に想定された気象条件や地質条件よりも著しく不利な条件下にある農業用貯水池築造現場への適用や，地すべり防止対策として実施される地すべり冠頭部凹地に位置する農業用貯水池の浸透防止工への適用など，その適用範囲の拡大の試みもみられる。本来，設計指針や設計基準は，標準的な立地条件の下での表面遮水工法の設計の基本を示したものであり，特に，気象・地質条件によってGMの敷設基盤が大きく変形する可能性のある場合には，十分な敷設基盤処理対策をとることとされている。しかし，GMを用いた表面遮水工法による遮水システムの構築においては，敷設基盤処理対策が占める工事費の割合が大きいことから，敷設基盤の変形に対するGMの追随特性を解明し，損傷に対する安全性を確認することによって，遮水システム全体の設計の合理化を図る技術開発の意義は大きい。

本論では，関東農政局長野西部農地保全事業所管内の標高800mの高地寒冷地域で施工される芦沼池表面遮水工法をケーススタディとして取り上げ，現地で想定されている敷設基盤の凍上現象に対するGMの追随特性を室内実験により検討した結果を報告する。

2. 芦沼池浸透防止工の概要

(1) 浸透防止工の必要性

芦沼池は，長野県更級郡大岡村日方区域にある面積約2.3ha，貯水量約3万m³の農業用ため池であり，上池と下池の2つに分かれている。これらの池は，幅1,000m，長さ1,700m，深さ150mの「日方大規模地すべりブロック」の冠頭部から側方部に位置しており，ため池からの地下浸透水が大規模地すべりブロックや下方の浅部二次，三次地すべりの誘因のひとつとなっていると考えられていた。そこで，地すべりの抜本的な安定化のためには，ため池からの浸透を防止することが有効であると指摘されていた。しかし，これらの地下水浸透が定量的にどの程度のものであり，地すべりに対してどの程度影響を与えているかについては，不明な点が多い状況にあった。

そこで，芦沼池近傍の地下水流動に関する各種調査・

¹正会員，独立行政法人 農業工学研究所 造構部 施設機能研究室，室長（〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6）

²，独立行政法人 農業工学研究所 造構部 施設機能研究室，主任研究官（〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6）

³，独立行政法人 農業工学研究所 造構部 施設機能研究室，研究員（〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6）

⁴，北陸農政局 農村計画部 資源課，地質官（〒920-8566 石川県金沢市広坂2-2-60）

⁵，関東農政局 整備部 農地整備課，課長補佐（〒330-9722 埼玉県さいたま市北袋町1-21-2）

⁶，関東農政局 利根川水系土地改良調査管理事務所 管理課 企画調整係，係長（〒277-0831 千葉県柏市根戸471-65）

⁷，関東農政局 長野西部農地保全事業所 調査課 試験係，係長（〒380-0955 長野県長野市大字安茂里3602-1）

解析が行われ、次の①から⑥の結果から、芦沼池下池における浸透防止工の施工が下流側の地すべり防止に有効であることが明らかにされた。

- ① 芦沼池近傍の帯水層は砂礫質谷底堆積物や凝灰角礫岩などであり、高透水性である。
- ② 芦沼池下池から下流に向けて、動水勾配の急激な低下がみられる。
- ③ 芦沼池近傍は広域的にはキャップ・ウォーター型（上方地下水型）の地下水流動系にあり、地すべり多発地帯に地下水が供給されている（図-1を参照）。
- ④ 芦沼池下池近傍の地下水水質（電気伝導度およびブロン濃度）には、基盤中の地下水と表流水が混合した形跡が認められる。また、地下水浸透が活発なため、地表からの成分が付加された形跡も認められ、これらの特徴的な地下水が流動している“芦沼地下水脈”を想定することができる。
- ⑤ 芦沼池下池ではヘドロの堆積が少なく、透水係数が 10^3 cm/sec のオーダのやや透水性の高い部分が池敷に認められる。
- ⑥ 水収支解析の結果、芦沼池から日量減水深換算で11.7mm程度の地下水浸透量が見積もられる。

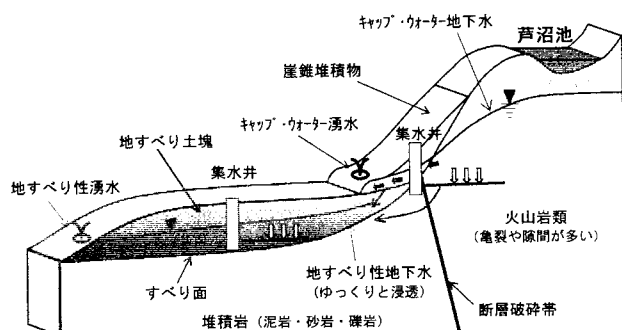


図-1 キャップウォーターと地すべり概念図

(2) 浸透防止工の工法選定とその技術的課題

芦沼池下池の浸透防止工法の選定においては、利水関係の調整上必要な現況貯水量および現況水位の維持、工事費の縮減や周辺環境への配慮のための現況施設（堤体、取水・排水施設）や現場発生材の有効利用、さらには、非灌漑期である冬季施工を勘案して、貯水池全面表面遮水工法が採用された。

また、表面遮水工法における遮水材料の選定に当たっては、合成ゴム系、合成樹脂系、合成ゴム・合成樹脂複合系、アスファルト系、ベントナイト系、コンクリート系の遮水材料が比較検討された。その結果、芦沼池下池に求められる遮水材料の条件、すなわち、遮水材料自体の遮水性、遮水材料相互接合部およびコンクリート構造物との接合部における水密性、 $-15^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対する物性の安定性、最大水深 3.2m に対する耐水圧性、冬季施工における施工性、維持管理の容易性、経済性と施工実績の各条件を満たす EPDM 系 GM が採用さ

れた。

さらに、EPDM 系 GM による貯水池全面表面遮水工法を採用するに当たっても、一層の設計の合理化が検討されることになった。すなわち、芦沼池は高地寒冷地域に位置し、本地域における凍結深は 70cm と推定されていることから、設計基準などによれば、凍結深に見合った 70cm 深さまで GM の敷設基盤を碎石などにより置き換える必要があることになるが、低温においても柔軟性を維持できる材料である EPDM 系 GM が用いられることから、基盤の凍結による凍上にも GM が追従できる安全性が確認できれば、碎石などによる置き換え深を減じ設計の合理化が図れるのではないかと技術的課題が提起された。

そこで、現地で想定される GM 敷設基盤の凍上現象に対する GM の追従特性を室内実験により検討し、その安全性を確認することになった。

3. 敷設基盤の凍上に対する GM 追従特性実験

(1) 実験方法

敷設基盤の凍結による凍上に対して GM が安全に追従できるか否かを確認するためには、現地での凍上現象を試験室内で再現し、その凍上する基盤上に敷設された GM が構造物との接合などにより端部を拘束される条件の下で GM の追従性を調べる必要がある。そこで、GM を敷設しない供試土層のみの凍上実験を予備実験として実施して、実験の手順、方法を確定した後、敷設された GM の相対する 2 辺を拘束した場合の追従性実験（以降、2 方向拘束実験という）および 4 辺全てを拘束した場合の追従性実験（以降、4 方向拘束実験という）を行った。

a) 室内試験装置

凍上試験には、未だ定められた試験法や試験装置はない¹⁾。そこで、これまでに紹介された凍上試験に関する報告を参考として、低温恒温試験室に設置した鋼製の試験容器（L:1m×B:1m×H:0.5m）を発泡スチロールで取り囲み、試験室の気中温度がマイナスの条件下で土層表面から順次凍結させることができる室内試験装置を試作した（図-2）。この試験装置は、土層下端から常に毛細管現象による給水が可能となる給水タンクを備えており、自然凍上（開式凍上）が再現できるよう工夫した。

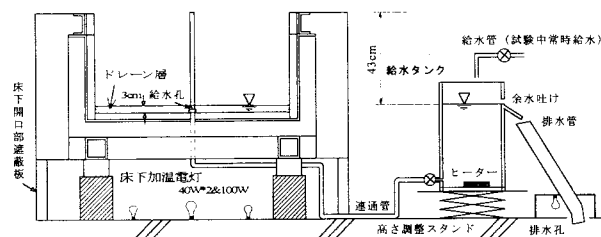


図-2 試作した室内試験装置

b) 供試土層の作製方法

芦沼池に隣接した畑の耕土を剥ぎ取り、敷設基盤となる現地土の不攪乱試料（φ:75mm×H:150mm, 3 試料）を採取した。この試料の密度は 1.74g/cm^3 、含水比は 35.2% であった。そこで、攪乱された供試土によって作製する供試土層も、不攪乱土の含水比状態において同等の密度が得られるよう、締め固めエネルギーを決定し、供試土層を作製した。

c) 試験の具体的手順、方法

i) 試験容器の断熱方法 予備実験の開始 72 時間経過後、供試土層全体の温度がマイナスとなり、試験容器の壁外側と底外側を発泡スチロール 20cm 厚で被覆断熱した試験装置では、上面から下層へと順次凍結させることはできないことが判明した。そこで、予備実験を一旦中断し、底部断熱構造の改造を行った。改造後の構造は、図-2 に示したように、底外側の発泡スチロールを取り外し、壁外側の発泡スチロールと床面までの開口部を 5cm 厚さの発泡スチロール板で覆い外気を遮断するとともに、供試土層が上から順次凍結していくように底部を僅かに加温できるようにした。加温は裸電球 3 個で行い、電球の ON-OFF で試験状況に応じて温度調節できるようにした。

ii) 凍上時の水の供給方法 凍上が地下水の供給を受け続けながら発達するという現地の状況（開式凍上）を再現できるよう、水供給層（ドレーン層）として供試土層底部に 5mm 粒径の碎石を 3cm 厚さで敷き詰め、その碎石の天端高さに給水タンクの水位を合わせ、凍結面へ向かう水分が毛細管現象により常時供給されるようにした。そのため、給水タンクには試験室外部から水を常時供給し、オーバーフローした水は排水される構造とした。なお、給水タンク内には観賞魚用ヒーターを入れ、また給水管や排水管は電熱線を巻き付けて、凍結を防止した。

iii) 試験室の気中温度の設定 凍上試験条件の試験温度は、参考文献²⁾によれば、 -4°C （日本道路協会）、 -6°C （日本道路公団、北海道開発局、フランス）、 -17°C （イギリス）など、様々な設定が見られる。予備実験においては試験室の気中温度を 4°C に設定し実験を開始したが、供試土層が 40cm と極めて厚い（日本道路協会：3cm、日本道路公団：12.5cm、北海道開発局 5cm、フランス 7cm、イギリス 10cm）ことから試験の長期化が必至となった。そこで、予備実験の途中から凍結促進のため、現地の冬季温度を勘案して -10°C に再設定した。なお、2 方向拘束実験および 4 方向拘束実験では、実験期間を通じて、 -10°C 設定を基本とした。

iv) 計測項目とその方法 試験室内の環境温度、供試土層の土中温度は全て、熱電対を用いて計測した。計測位置は図-3 に示すとおりであり、試験室内の環境温度は、給水タンク水中、試験室気中（2 箇所）、試験容器床下気中（3 箇所）、排水孔水中の計 7 箇所、供試土層の土中温度は、四方および中央の 5 地点の鉛直方向 6 箇所（詳細位置は図-4 参照）、合計 37 箇

所を 30 分間隔で測定した。

供試土層表面変位量は、予備実験では 10cm メッシュの交点に 15cm の直定規を立て、レベル測量により計 100 カ所を、試験開始初期は 1 日 1 回、以降は 2～3 日間隔で計測した。しかし、予備試験により局部変位は生じず変位速度も緩慢であることが確認できたことから、2 方向拘束実験および 4 方向拘束実験では、GM 表面上方に 20cm 間隔で張った水糸の交点（25 箇所）と GM 表面

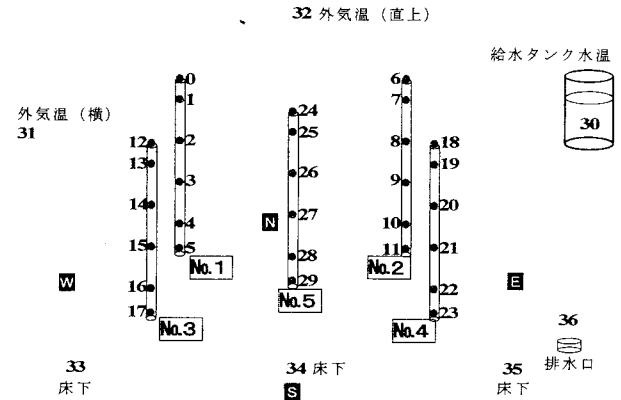


図-3 熱電対による温度計測位置

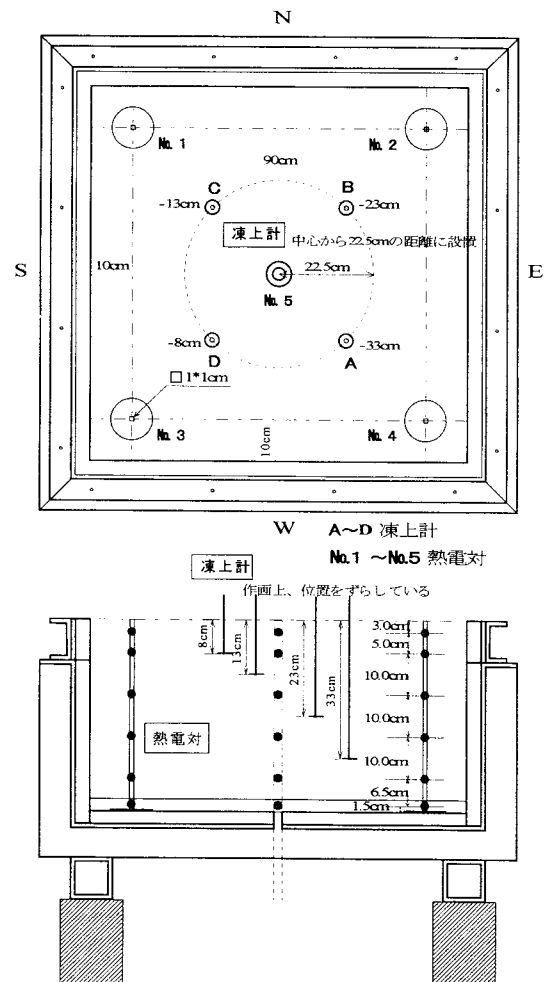


図-4 供試土層中の深度別凍上量計測位置

との間隔を直定規で直読した。また、計測間隔は隔日を基本とした。

供試土層中の深度別凍上量は、図-4 に示したように、土層作製時に深度 33cm, 23cm, 13cm, 8cm の位置に、試作した凍上計を埋設し計測した。凍上計は、φ5cm, 厚さ 0.5cm の塩ビ製の円盤中央に φ0.5cm 長さ 50cm の丸棒を固定したものである。計測は表面変位量の計測時に合わせて行い、凍上計の上端に直定規を立ててレベル測量した読み値と、初期設置時の読み値の差を深度別凍上量とした。

(2) 実験結果

a) 供試土層表面変位量

供試土層表面高さの経時変化を、図-5 に示す。いずれの実験においても、実験開始後 4 日 (96hr) 前後までに 20~30mm の急激な変位を示した。これは土層自体の凍上ではなく、土層表面に発達した霜柱である。

予備試験では GM が敷設されていないため、その後、霜柱の消失と土層の凍上が並行して進行した結果、一旦減少と横這い状態が 14 日 (336hr) 後まで続いた。以降は、一定の速さ (1.5mm/day) で凍上し、39 日 (936hr) 後にピークを迎えた。変位量は、計測点全データ (100 データ) から側壁に接する外周データ (36 データ) を除くと、平均値 56mm, 最大値 67mm であった。外周データの平均値は、全データの平均値に比べ、僅かに 2.4mm 低い値であった。従って、試験容器の壁面拘束の影響は、比較的小さいと考えられる。

2 方向拘束実験では、土層表面に発達した霜柱により急激に持ち上がった以降は一定の速さ (1.8mm/day) で凍上し、ピークの 125 日 (3,000hr) 後には最大 247mm (供試土層面中央付近)、最小 176mm (供試土層面隅部)、平均 228mm の変位量を記録した。また、4 方向拘束実験では、108 日 (2,592hr) 後まで一定の速さ (1.4mm/day) で凍上し、最大 134mm (供試土層面中央付近)、最小 93mm (供試土層面隅部)、平均 127mm の変位量を記録した。図-6 は 4 方向拘束実験のピーク時における表面変位量の分布を示したものである。予備実験の結果を踏まえると、GM の端部拘束による影響を

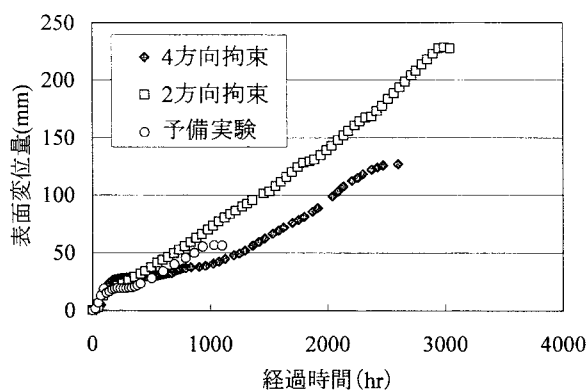


図-5 供試土層表面変位量 (平均値)

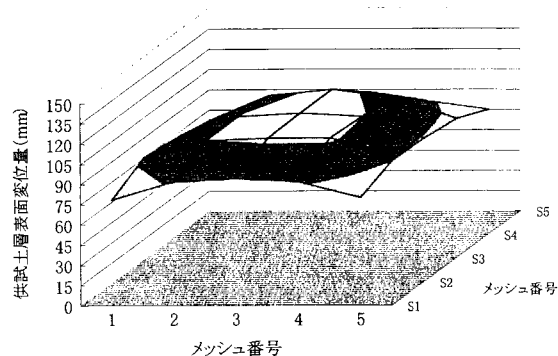


図-6 供試土層表面変位量分布 (4 方向拘束実験)

強く受けていることがうかがえる。

なお、長期間にわたる実験となったため試験室内の環境温度の設定が不安定になった期間があること、試験容器の容積が大きいため供試土層が必ずしも均質で同一には作製できていないことなどから、各実験間の表面変位量の差を直接的には比較できないが、その差を生じた理由は次のことが想定される。①予備実験では、碎石を GM で覆うことにより形成される土層表面と GM 間の密閉された空気層 (断熱層) が存在しないため、同様の試験室環境温度であっても相対的に供試土層中の温度勾配が大きくなった。従って、断熱層がある場合に比べ、毛細管現象による水の供給量が少ないうちに比較的速く供試土層全体が凍結し、凍上による表面変位量が小さくなった。②2 方向拘束実験の場合は GM が線的引張状態に、4 方向拘束実験の場合は GM が面的引張状態になった。この場合、面的引張状態の方が拘束力はより大きくなるため、4 方向拘束実験の場合の方が凍上による表面変位量が小さくなった。

②の理由について、S.Timoshenko の内圧を受ける薄肉容器の理論式³⁾

$$\sigma d = p L/2$$

ここで、 σ : 拘束された直近端部 (半円形部分) の GM の引張応力、 d : GM の厚さ、 p : 内圧、 $L/2$: 半円形部分の半径)

が成立するものと仮定して、今回の実験における変形量がピーク時の GM 端部の内圧 p (拘束力) を試算してみると、次のとおりである。

(2 方向拘束実験の場合)

σ : 4MPa (-10℃, 伸び率 80%の時の引張応力)

$L/2$: 176mm (供試土層面隅部の表面変位量)

d : 1.5mm (実験使用材料厚さ)

ただし、 σ の値は、4. (1) に後述するように、直近端部の伸び率は 80%である、伸び率 80%の時の引張応力を後に示す図-11 の GM の引張試験結果から推定することによって値である。

$$\therefore p = 0.034 \text{ MPa}$$

(4 方向拘束実験の場合)

σ : 7MPa (-10℃, 伸び率 200%の時の引張応力)

L/2 : 93mm (供試土層面隅部の表面変位量)

d : 1.5mm (実験使用材料厚さ)

ただし、 σ の値は、表面変位量が 176mm の時の伸び率が 80%とした時に表面変位量が 93mm の時の伸び率 (線的引張伸び率) を按分により算定する (42%)、面的引張伸び率 (線的引張伸び率 0.42+1 の 2 乗) を求める (202%)、面的引張伸び率 202%の時の引張応力を図-11 から推定する、ことによった値である。

$\therefore p=0.11\text{MPa}$

b) 供試土層中の深度別凍上量

深度別凍上計の動きを、図-7 に示す。全ての凍上計は、上方への動きを始めるまでに一旦下方に動いている。これは、霜柱の発達、若しくは上位の土層の凍上の発達に必要な水分が、下位の土層から供給された結果生じたものと考えられる。下方に動いた後に上方への動きを始めた時点が、埋設地点に凍結面が達した時点と考えられる。

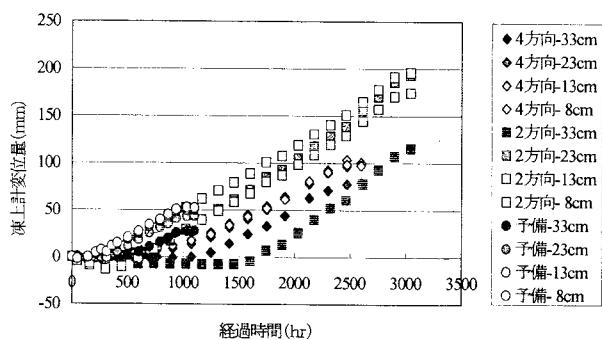


図-7 深度別凍上計の動き

図-8 は、供試土層が面的に一樣に凍上したと仮定して、図-7 に示した予備実験における深度別凍上計の動きをもとに各土層の凍上量を試算し、その変化を示したものである。ここで各土層とは、各々上下二つの凍上計の埋設深度間に位置する土層であり、各土層の凍上量とは、二つの凍上計の下位の凍上計の変位量から上位の凍上計の変位量を差し引いた値である。

供試土層作製時の各土層厚は、上位から順に 5cm, 10cm, 10cm, 10cm であることから、この試算によれば、各土層の凍上量は、順に 2.5mm, 8.5mm, 15.5mm, 28.0mm となり、凍上率 (凍上量と凍土の凍結前の厚さ

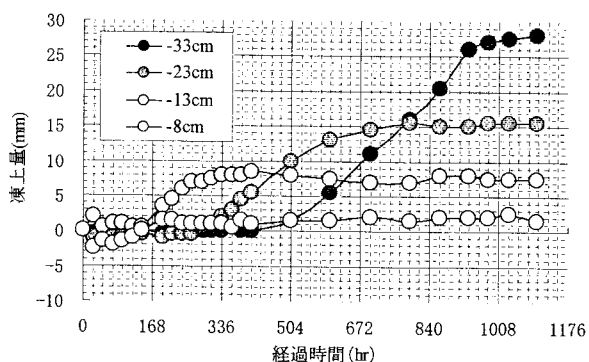


図-8 深度別凍上量変化の試算 (予備実験)

との比率) は、順に 5%, 8.5%, 15.5%, 28%である。すなわち、下層ほど大きく、また、直上層の概ね 2 倍の値となっている。同様に 2 方向拘束実験、4 方向拘束実験の場合の最下層の土層の凍上率を試算すると、115%, 80%と非常に大きな値である。図-9 に示すように、この試算結果は、最下層の土層で最も大きくアイスレンズの発達が見られること、図-10 に示すように、実験後の供試土層の含水比が下層ほど大きいこと、と一致する。

ただし、以上の試算は、凍上計の埋設位置が平面的には異なることに起因する部分的な凍上現象の差異を考慮していないため、比較的大きな誤差を含むとの前提で解釈されるべきである。すなわち、比較的一様な凍上現



図-9 発達したアイスレンズ (4方向拘束実験)

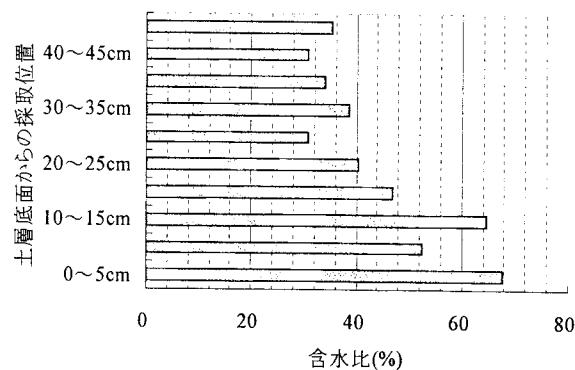


図-10 実験後の供試土層の含水比分布 (4方向拘束実験)

象が観察された予備実験においても、4 箇所の凍上計設置位置近傍の供試土層表面変位量は絶対量として 10mm 程度の差違があったにもかかわらず、供試土層が面的に一樣に凍上したとの仮定を前提としているからである。

(3) 凍上実験の評価

a) 凍結指数

当地区の凍結指数（日平均気温の 0°C 以下の値を積算した値）は $260^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ であり、この値に基づいて凍結深を 70cm と算出している⁴⁾。

今回の実験における凍結指数は、予備実験： $349^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 、2 方向拘束実験： $1,057^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 、4 方向拘束実験： $1,138^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ であり、十分な凍結指数を確保している。供試土層厚 40cm を凍結させるためにこれほど大きな凍結指数が必要であった理由は、①供試土層を上から順次凍結させるために試験容器底部を僅かではあるが加温した、②2 方向拘束実験、4 方向拘束実験では供試土層の上に 3cm 厚さの碎石を敷き詰め、さらにその上に GM を敷設する試験条件としたため、密閉された空気層が断熱層の役割を果たした、ことが考えられる。②の理由については、芦沼池浸透防止工の碎石敷設基盤の最小厚さは 20cm としており、現地ではさらに大きな断熱効果が期待できることから、想定されている凍結指数の下での凍結深はかなり小さくなるものと考えられる。

b) 凍上量

本実験で行った開式凍上における凍上量は、未凍土中を凍結面まで移動する水の量に依存し、移動し得る距離は、ほぼ土中における水の毛細管上昇高に等しい⁵⁾。未凍土の毛細管上昇高よりも地下水位が深ければ、その地下水は補給源にならない。そこで、今回の各実験後に供試土層の含水比の垂直分布を調べたところ、全ての実験において、表層から 20cm までの間の供試土は、試験前の含水比より低い、若しくは若干高い程度であった。また、この間には、アイスレンズの発達はほとんど見られなかった。従って、現地においては開式凍上になるといっても、地下水位が 20cm 以深であれば、想定されている凍結指数の下では、一定量以上の凍上は起こらないと考えられる。

いま、今回の各実験について、凍結指数が $260^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 時点の凍上量を見てみると、全て 40～50mm の範囲内である。従って、この凍上量より十分大きな凍上を起こした（2 方向拘束実験：平均 228mm、4 方向拘束実験：平均 127mm）条件下での GM の追従性確認実験は、その安全性を評価するに十分であると考えられる。

4. GM 追従性の評価

(1) 低温時における GM の基本物性

図-11 は、高精度多目的材料試験機（インストロン 5567）を使用して、現地で採用された EPDM 系 GM の

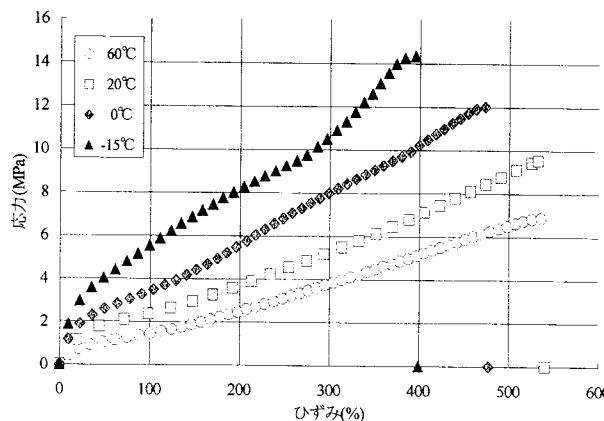


図-11 GMの引張試験結果

60, 20, 0, -15°C における引張試験結果を示したものである。GM は、環境温度に応じて引張特性が変化し、低温になるに従って徐々に、切断時伸びは小さくなり、引張強さは大きくなる。しかし、EPDM 系 GM の優れた特性であるゴム弾性は、 -15°C の温度においても維持されている。

図-12 は、2 方向拘束実験における実験終了直後の GM の変形状況を示したものである。拘束された直近部が部分的に大きく伸ばされているが、GM の破裂などの現象は試験期間を通じて観察されなかった。また、図-13 は、試験開始前に 50mm 間隔でマーキングしておいた格子間の伸び縮み量を測定して求めた各メッシュの変形面積増加率（面的引張伸び率）を示したものである。拘束された直近部（端部から 10～15cm の範囲）のみが部分的に大きな増加率を示しており、その増加率から算定した伸び率は最大 80%である。この値は、図-10 に示した引張試験結果から読みとれば、 -15°C における伸び能力（切断時伸び）の約 1/5 である。最大変形部分においても、伸び能力にまだ十分な余裕があることが確認できる。

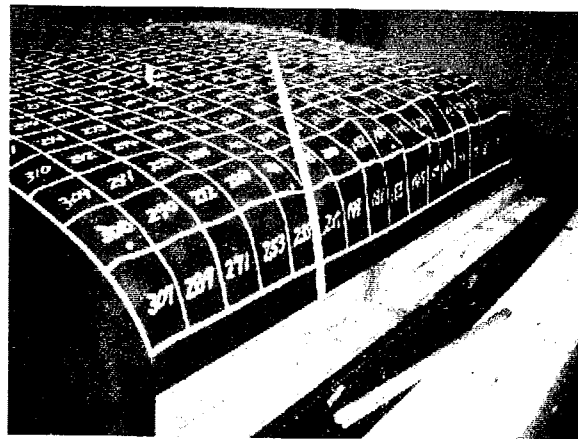


図-12 2方向拘束におけるGMの変形状況

(2) 凍上時における追従性

ある広がりを持つGMが引張され、未だ十分な伸び余力を有する引張状態であると考えられる場合であっても、

表-1 凍上試験前後の GM の物性比較

物性値		オリジナル		2 方向拘束試験後		4 方向拘束試験後	
		長手方向	幅方向	幅方向	保持率	長手方向	保持率
引張強さ (MPa)	最大	10.1	9.0	9.6	—	9.7	—
	最小	9.5	8.9	8.5	96%	9.2	97%
	平均	9.8	8.9	8.9	100%	9.4	96%
切断時伸び (%)	最大	547	550	547	—	559	—
	最小	522	538	487	91%	511	98%
	平均	534	544	511	94%	531	99%

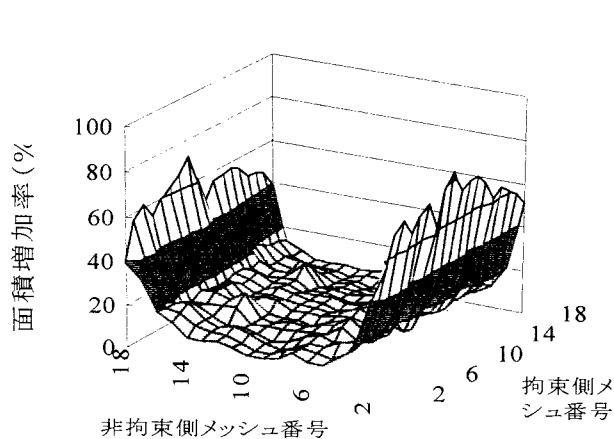


図-13 2 方向拘束における GM の変形面積増加率

GM にごく局所的な過度の引張状態が発生し、GM が損傷を受けている可能性も考えられる。今回の試験における GM の敷設基盤は砕石であり、石礫の頂部に接する GM 部分は局所的に損傷を受けている可能性が考えられる。

そこで、図-14 に 2 方向拘束実験の例を示したように、凍上実験終了後、GM から引張試験用の供試体を帯状に連続して打ち抜き、その物性変化の有無を調べた。この検査方法は、筆者らのこれまでの多くのケースにおいて、GM に何らかの損傷などが生じていた場合、発見できるという経験^⑥に基づいて実施したものである。

表-1 は、凍上実験前後の GM の物性を比較して示したものである。全供試体の最小値を比較対象としても、引張強さの保持率は 96% 以上、切断時伸びの保持率は 91% 以上である。本引張試験は凍上実験が終わった直後に実施しており、長期間引張状態にあった直後の GM にはクリープ変形の影響が残っている、すなわち、

“EPDM 系 GM は、応力から解放されれば瞬時に元に戻る完全なゴム弾性体ではなく、僅かであるが塑性変形が残る弾塑性体である。このような GM のクリープ変形は時間の経過とともにほとんど解消されるものであるが、長期間引張状態にあった直後に供試体を打ち抜けば、伸ばされた状態の GM から供試体を打ち抜くことになり、結果として、引張強さ、切断時伸びの試験結果はともに

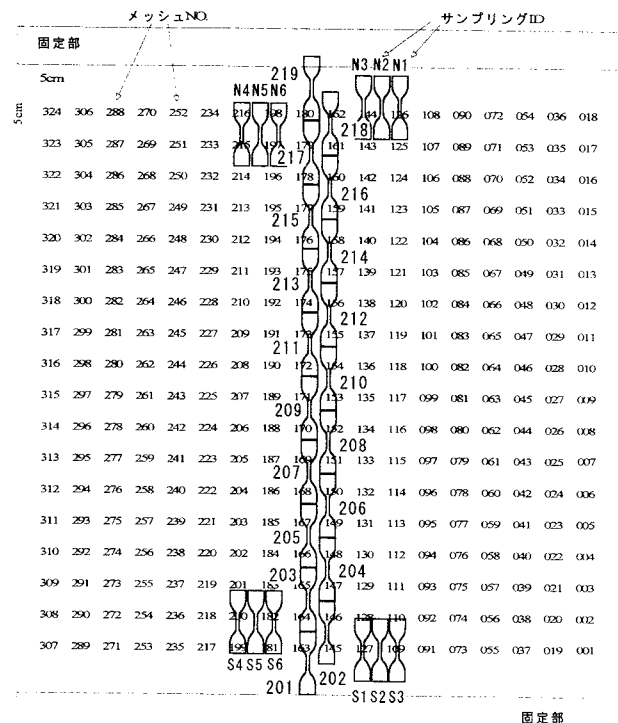


図-14 2 方向拘束凍上試験後の引張試験用供試体採取位置

小さく出る。”ことを考慮すれば、全く損傷などは受けていないと考えられる。

5. まとめ

標高800mの高地寒冷地域に位置する貯水池の表面遮水工法に用いられるEPDM系GMの敷設基盤凍上現象に対する追従特性を調べるため、室内試験装置を試作して実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 環境温度が-10℃における現地土の開式凍上量は、現地で想定される凍結指数(260℃・days)の下では、GMを敷設した場合も敷設しない場合もほぼ同量の40～50mmであった。
- ② 設計凍結深70cmのうち、下層40cmを未置換とし、この40cm厚さの土層を開式凍上させながら完全に

凍結させるには、GMを敷設した条件下では、敷設しない条件下の約3倍凍結指数が必要であった。これは、3cm厚さの碎石層を土層直上に設けたことにより土層表面とGM間に密閉された空気層が形成され、断熱層の役割を果たした結果である。現地では20cm厚さの碎石層が基盤上に設けられるため、より大きな断熱効果が期待できる。

- ③ 凍上する基盤上に敷設されたGMは、拘束される直近部（端部から10～15cmの範囲）のみが部分的に大きく引張された。しかし、その伸び率は、敷設されたGMの1辺が拘束される場合は最大80%程度、隣り合う2辺が拘束される場合は最大200%程度と試算され、GMの伸び能力の1/2以下である。
- ④ 敷設されたGMの1辺が拘束される場合よりも、隣り合う2辺が拘束される場合の方が、凍上量は少なかった。これは、2辺が拘束される場合の方がGMによる拘束力が強く働く結果である。1辺が拘束される場合は0.034MPa、2辺が拘束される場合は0.11MPaが、凍上土層に対して働くと試算された。
- ⑤ 碎石基盤上に敷設されたGMは凍上現象により石礫の頂部で局部的に損傷を受けることが危惧されたが、実験後に実施した確認試験では、損傷は全く見あたらなかった。

これらの知見から、EPDM系GMは、敷設基盤の凍結による凍上にも追従できることが確認でき、一般的には凍結深に見合った深さまで敷設基盤を碎石等により置き換える必要があるとされる敷設基盤処理対策費の縮減が

可能であることが明らかになった。

なお、事例として取り上げた芦沼池では、貯水位を高め維持すれば、表面遮水工法に用いられたGMの耐久性を高めることに有益である上に、凍上の発生自体を抑えられることに鑑み、貯水管理のあり方が検討されている。

謝辞：本報告は、関東農政局長野西部農地保全事業所からの依頼研究による成果である。研究を進めるに当たって貴重な資料の提供、有意義な助言をして頂いた事業所の関係各位に謝意を表します。また、実験を行うに当たり、(株)テイコクの方々にご尽力を頂いた。ここに記し、感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 地盤工学会 土の凍上試験方法検討委員会：土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム発表論文集，2001. .
- 2) 土質工学会：土の凍結—その制御と応用—，p.34，1982.
- 3) S.Timoshenko：材料力学，下巻，片岡健次郎，北島顕正訳，コロナ社，pp.109-111，1955.
- 4) 関東農政局長野西部農地保全事業所：平成11年度長野西部農地保全事業日方区域実施設計その3業務報告書，p. 221，1999.
- 5) 土質工学会：土の凍結—その理論と実際—，p.7，1994.
- 6) 長束勇：貯水池表面遮水工法に関する研究—主としてジオメンブレンの利用に関して—，農業工学研究所報告，No.38，pp.58-59，1999.

Flexibility of Geomembranes against Foundation Ground Deformation Caused by Frost Heaving

Isamu NATSUKA, Masaru TOKASHIKI, Mitsuhiro MORI,
Satoru KISHI, Kazuo OOSATO, Kazunori NUMAO, Atsushi SATOU

National design standards concerning geomembrane surface linings for dam and reservoirs demand appropriate countermeasures against predicted deformation in foundation ground due to climatic and geologic conditions. However, the ratio of cost for countermeasures compared to the entire construction cost is generally large. Therefore, it is necessary to elucidate the flexibility of geomembranes to foundation ground deformations in order to make the countermeasure low-cost. In this paper, the flexibility of geomembranes to foundation ground deformations caused by frost heaving was examined in the laboratory. The results confirmed that EPDM geomembranes don't require replacement of ground soil to the depth of frost penetration with the generally adopted method of macadam.

Key words : geomembrane, surface linings for dam and reservoirs, frost heaving, flexibility of geomembranes to foundation ground deformations, landslide