

水中潜行浮上式貯水槽天蓋の 挙動安定化に関する検討

長束 勇¹・石村英明²・渡嘉敷 勝³・森 充広⁴・宮田哲郎⁵

ジオメンブレンを用いた水中浮上式天蓋の開発において残された技術的課題である天蓋挙動の安定化について、室内モデル実験により検討した。その結果、降雨の集中により天蓋保護水が増量して貯水容量が減少する課題については、貯水と天蓋保護水に天蓋の重さに見合った水頭差が生じる現象と天蓋保護水が増量すると天蓋が沈降する現象に着目して考案した無動力自動排水システムが有効であることが明らかになった。また、天蓋ジオメンブレンの保護のため水中に完全に潜行して浮上させ、かつ貯水容量の減少を最小化するため天蓋保護水深をできるだけ一様とする天蓋の形状制御については、天蓋に適切な重量の錘を配置する、若しくは適切な重量を持ったジオメンブレンを使用する、ことで対処できる見通しが得られた。

キーワード：貯水槽、ジオメンブレン、浮上式天蓋、維持管理、無動力自動排水システム

1. はじめに

前報¹⁾では、ジオメンブレン（以降、GM と略記する）を用いた農業用貯水槽の浮上式天蓋の開発を目的として検討した、水面浮上式天蓋および水中浮上式天蓋の供用時挙動に関する室内試験結果などを報告した。これらの試験結果を踏まえ、開発した形態の一つである水中浮上式天蓋について実証試験を行ったところ、従来の天蓋架設に比較して、施工性、経済性の面で優れていることが明らかになった。しかしながら、この水中浮上式天蓋については、①降雨の集中により天蓋を保護している水（以降、天蓋保護水と呼称する）が増量すれば天蓋がより深く沈降し貯水容量を減少させるため、天蓋保護水の余剰水を無動力で自動排水するシステムの開発が必要であること、②水中浮上式といえども部分的には水面浮上式となる場合があり、完全に水中に潜行して浮上させるように、また、貯水容量の減少を最小化するためには、できるだけ天蓋保護水の水深が一様となるように、天蓋形状を制御する工夫が必要であること、といった技術的課題が残された。そこで、本報では、これらの二つの課題解決を目的として行った天蓋の水中における挙動安定化に関する室内実験結果を報告する。

2. 水中浮上式天蓋の特長と技術的課題

(1) これまでに開発した天蓋の特長

水中浮上式天蓋は、柔軟性、不透水性および軽量性に優れる GM を天蓋材料として使用し、天蓋の大部分が水中に潜行して浮上することによって貯水の水位変動に追従できる構造となっている（図-1）。これらの材料および構造の採用により、貯水へのゴミの侵入遮断、アオコ増殖抑制のための遮光、貯水槽にほとんど負荷をかけない構造、材料および施工の低コスト化、設置する天蓋の耐久性の確保、の5点を満足できる。特に、水中に潜行して浮上させる構造を採用した理由は、次の各事項を考慮した結果である。

- ① 温度変化、紫外線、オゾンなどに曝される外部環境条件下では、GMの劣化の進行速度が水面上と水面下で著しく異なる。水面下のGMは、30年を経ても劣化はほとんど認められず、耐久性が確保できる²⁾。
- ② 寒冷地域に位置する貯水槽で、冬期の水利用により

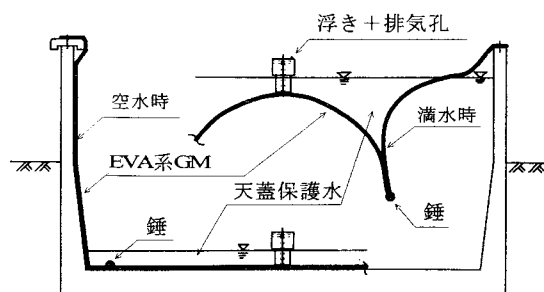


図-1 水中浮上式天蓋の構造

¹正会員、(独) 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非会員、(独) 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）

³非会員、(独) 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）

⁴地盤工学会会員(独) 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）

⁵非会員、宮田技術士事務所、所長（〒111-0051東京都台東区蔵前3-17-3）

水位変動がある場合、凍結時においても結氷厚さ以上の深さの水面下に天蓋が位置すれば、貯水槽側壁に固着せず可動できる。

③ 強風による天蓋の片寄せ、破裂や、投石による損傷を防止できる。

(2) 残された技術的課題

水中浮上式天蓋技術を確立する上での実用上の課題は、次の各事項が挙げられた。

① 側壁天端から天蓋保護水までのGMが常時大気に露曝される構造であるため、この部分の劣化対策が必要である。

② 供用されている規模の貯水槽に適用する場合、天蓋の側壁部と底部を合わせた総面積や総重量が大きくなりハンドリングが悪くなることから、小運搬や敷設における施工性の向上対策が必要である。

③ 貯水槽の清掃などの維持管理を容易とするため、天蓋の一時撤去が容易である構造に改良する必要がある。

④ 降雨の集中により天蓋保護水量が増加すれば、天蓋がより沈降し貯水容量が減少するため、天蓋保護水の余剰水を排水する工夫が必要である。

⑤ 浮きを付設する天蓋中央部の天蓋保護水深は必ずしも十分には確保できない場合があり、完全に水中に潜行して浮上させるように、また、貯水容量の減少を最小化するためには、できるだけ天蓋保護水の水深が一樣となるように、安定して水中に潜行して浮上させる工夫が必要である。

これらの技術的課題のうち、①、②、③については、以下の方策を講じることにより対処できた。

①については、常時大気に曝露される貯水槽側壁天端から天蓋保護水までの部分を、農業用貯水池の分野で長期使用の実績がある EPDM 系 GM を天蓋 GM の上に重ねて二重張り構造とした。なお、二重張りとしたことで、両 GM 間に密閉された空気層が保持され、この空気層が断熱層の役割を果たし、試験施工においては、 -12°C 程度の外気温環境下でも側壁部への天蓋 GM の固着を防止できるという副次的効果も得られた。

②の設置時の労力軽減と③の貯水槽清掃時の一時撤去の容易性確保については、天蓋の側壁部と底部を分割し、ファスナーにより着脱可能な構造とした。

しかしながら、④および⑤については、工夫すべき技術的課題として残されていた。

3. 天蓋保護水自動排水制御システムの検討

(1) 考案したシステムの概要

水中浮上式天蓋においては、図-2に示すように、天蓋GMに開孔部を設け、天蓋保護水の余剰水を排水する排水口を設けていた。しかし、水中における天蓋の形状は、貯水量と天蓋保護水量のバランス如何によって変化するため、天蓋保護水の余剰水を確実に排水する機能は

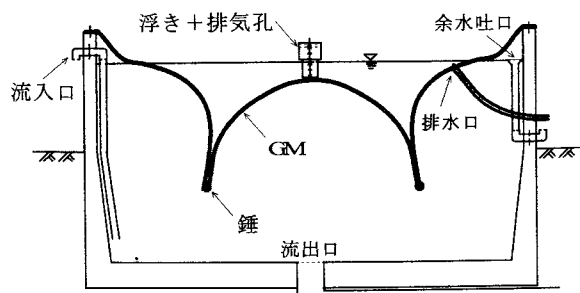
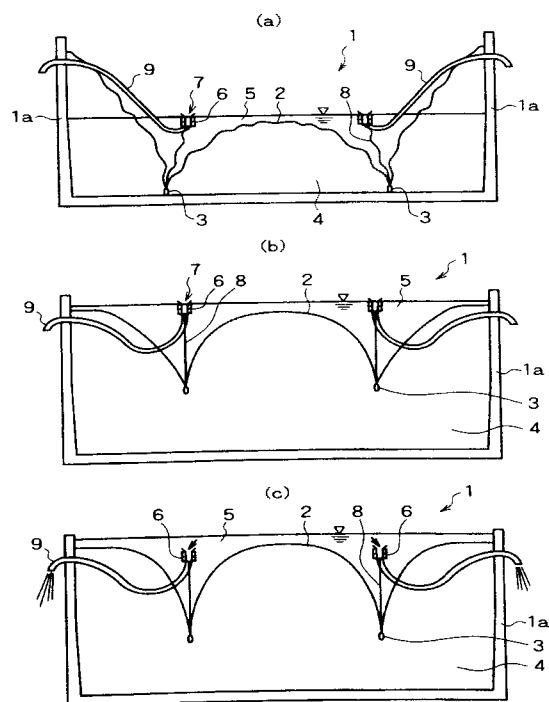


図-2 水中浮上式における天蓋保護水の余剰水排水構造

有しないことが、実証試験において明らかになった。そこで、天蓋保護水量の安定化のために、小型の水中ポンプを設置することにしたが、維持管理上の問題から、この無動力の自動排水化が望まれた。

そこで、図-3に概要を示した天蓋保護水の余剰水自動排水制御システムを考案した³。本システムは、(a)の所定量の天蓋保護水の水面上に浮かんだフロート（上面に排水口が開いている）と天蓋GMに付設した重錘を繋ぐ連結材に引っ張り力が発生していない状態である注水過程を経て、通常、(b)のフロートが連結材を介して重錘を吊り上げバランスする貯水の満水状態になり、その後、(c)の降雨により天蓋保護水に余剰水が生じた時には重錘が沈降することから、連結されたフロートが水没し、排水口から余剰水が排水される、というものである。

このシステムの原理は、天蓋保護水と貯水は完全に



1:貯水槽本体、1a:側壁、2:天蓋、3:重錘、4:貯水、5:天蓋保護水、6:フロート、7:排水口、8:連結材、9:排水用ホース

図-3 天蓋保護水自動排水制御システムの概要

分離されていることから、風呂に洗面器を浮かべた状態の例と同様である。流体中にある物体の受ける浮力の大きさは、その物体が押し退けた流体の重さに等しい（アルキメデスの原理）ことから、洗面器はその重さに見合う水量分だけ沈んで浮かぶ。洗面器に注水すると、その水量に見合うだけ沈んで浮かぶ。したがって、洗面器に必要な以上の水量が注水されればそれを吐くように、洗面器の所定の高さの位置に排水孔を設けておけば、自動排水されることになる。ここで、洗面器の重さに相当するのが、天蓋 GM と重錘の合算の重さである。このことは、GM の種別や厚さ、重錘の材質や形状は、本システムの本質的な制約条件とはならないことを意味する。

また、天蓋 GM の表裏に作用する力の釣り合いをとるため、常に天蓋保護水と貯水には、貯水側の方が大きい水頭差を生じることになる（付録参照）。この水頭差が、天蓋 GM の形状安定に有効に働く（以降、形状安定効果と呼称する）と期待される。すなわち、GM 背面（貯水側）には面に垂直な方向の水頭差に見合う力が常に働くことになるため、天蓋を形成する一部となっている重錘により下方に牽引され向き合った部分（以降、V 字形部分と呼称する）は、その V 字の間隔を閉じる方向に動くと考えられる。その結果、天蓋全体の力の釣り合いがとれる形状となって安定すると考えられる。

(2) 天蓋形状形成の要因に関するモデル実験

a) 実験装置の概要

考案した天蓋保護水の余剰水自動排水制御システムの稼働を確認するための実験は、天蓋形状が安定した状態で行う必要がある。そこで、天蓋形状を形成する要因と考えられる重錘重量、貯水位、天蓋保護水量を変化させた状態における天蓋形状を調べるモデル実験を行った。実験装置の概要は図-4、実験に使用した資材の概要は表-1 のとおりである。天蓋は、直径 239cm の円形底面 GM と高さ 78cm の側壁面 GM を接合して作製し、排気口付きの浮体は円形底面 GM の中心部に、重錘は円形

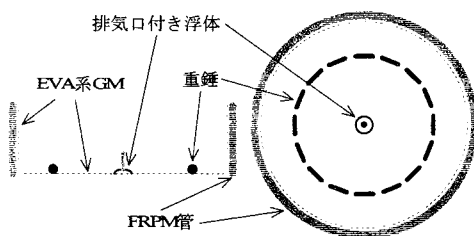


図-4 モデル実験装置の概要（重錘16個の場合）

表-1 モデル実験使用資材

資材	仕様
水槽	FRPM管製、内径239cm、高さ78cm、厚さ4cm
浮体	発泡スチロール製、重量0.69N、体積770cm ³
重錘	鉄製、質量10.99N個、体積171cm ³ 個
GM	EVA系、厚さ0.057cm、比重0.812

底面 GM の半径 80cm の円周上に取り付けた。

b) 重錘重量の相違

図-5は、半径 80cm の円周の対角線上に、各ケース重錘 4 個、8 個、16 個を配置し、天蓋保護水量 225cm³（貯水深換算 5cm）を被せた条件において、貯水深 60cm（以降、満水位と呼ぶ）まで貯水を注水した状態における天蓋形状を比較したものである。なお、貯水深換算で 5cm とした天蓋保護水量は、実用規模の貯水槽の貯水深を 240cm 程度に想定し、その場合、20cm 程度の保護水深が必要との判断から、貯水深に対する相似比を考慮して設定した。

重錘の重量が増えるにしたがって、V 字形部分の間隔が狭くなり、満水位までに注入可能な貯水量が増量していることが分かる。因みに、貯水と天蓋保護水の水頭差は、満水位状態において、4 個：約 0.3cm、8 個：約 0.4cm、16 個：約 0.6cm であった。なお、天蓋保護水を被せることによる貯水容量の減少を少なくすること、重錘 4 個や 8 個の条件においては浮体部の GM が水面上に露出していることから、以降の検討においては、重錘を 16 個として実験を進めることにした。

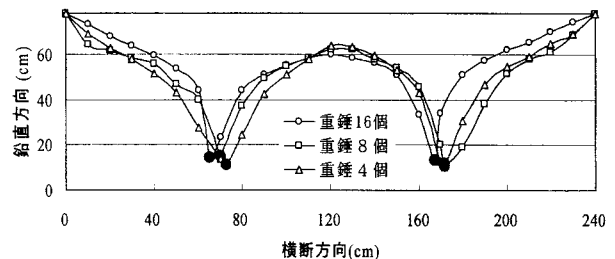


図-5 重錘重量の相違による天蓋形状の変化

c) 貯水位の変動

図-6は、重錘 16 個、天蓋保護水量 225cm³ を被せた条件において、貯水の水位が 10cm から満水位までの注水過程における天蓋形状の変化を示したものである。貯水の注水によって天蓋が浮上し、重錘が底面を離れた以降は、安定した天蓋形状を形成している。なお、同条件で実施した、貯水の水位を満水位から 10cm に下げる排水過程においても、注水過程と全く同様の天蓋形状の変化を示した。

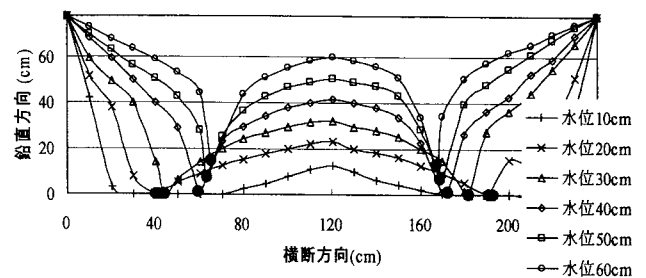


図-6 貯水位の変動による天蓋形状の変化

d) 天蓋保護水量の変動

図-7は、重錘 16 個、貯水が満水位の条件において、

天蓋保護水量をゼロから 300cm^3 まで変動させた場合の天蓋形状の変化を示したものである。天蓋保護水量が増量するにしたがって、天蓋の中央部の断面形状は長方形型から楕円形型に変化している。また、天蓋保護水量が 150cm^3 より多くなると、天蓋の中心部に付設した浮体部も水中に潜行浮上している。

図-8 は、天蓋保護水量の増量過程における重錘の動きを示したものである。浮体部が水中潜行浮上に移行した以降は、重錘の側壁方向（水平方向）への移動は極めて僅かであるが、底部方向（鉛直方向）については、天蓋保護水量の増量にほぼ比例して、重錘が沈降している。

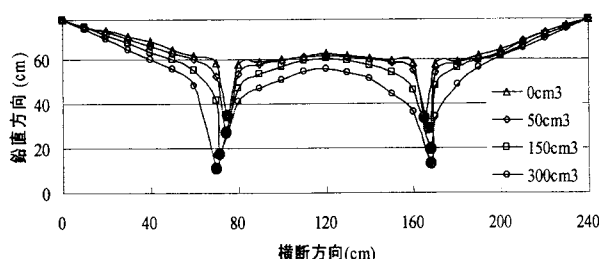


図-7 天蓋保護水量の変動による天蓋形状の変化

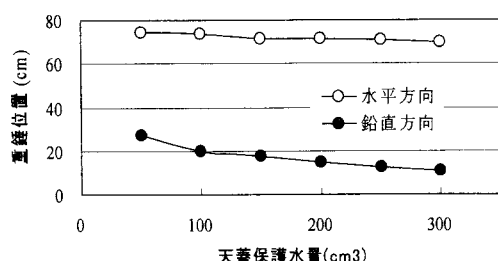


図-8 天蓋保護水の増量過程における重錘位置

(3) 自動排水制御システムの稼働実験

天蓋形状形成に関するモデル実験の結果、本実験装置では、重錘を 16 個とし、天蓋保護水量が $150\sim 300\text{cm}^3$ の範囲であれば、満水位状態において、①天蓋の形状は安定する、②浮体部は水中に潜行浮上する、③重錘は天蓋保護水量の増減に応じて鉛直方向に沈降・上昇する、ことが明らかになった。そこで、図-9 に示したように、重錘に連結した天蓋保護余剰水排水フロートを取り付け、自動排水制御システムの稼働実験を行った。

稼働実験は、満水位状態において天蓋保護水量 225cm^3 を被せ、①余剰水注水前の天蓋形状を計測する、②余剰水排水フロートに接続した排水管の弁を閉じて、余剰水 225cm^3 を注水し、天蓋の形状を計測する、③排水弁を開き、排水量を計測する、④排水後の天蓋形状を計測する、という手順で、3 回繰り返した。

図-10 は、実験前、余剰水注水後、実験後の天蓋形状を示したものである。実験後の天蓋形状は、実験前形状にほぼ完全に復帰している。また、排水量は、1 回目： 223cm^3 、2 回目： 219cm^3 、3 回目： 224cm^3 と計測され、ほぼ余剰水注水量 225cm^3 に一致している。なお、図-

11 は、余剰水注水時および排水時の重錘の鉛直方向の位置を示したものである。注水時、排水時ともに天蓋保護余剰水量の増減量にほぼ比例して、重錘が沈降、浮上している。

以上の実験結果から、考案した天蓋保護水の余剰水自動排水制御システムは、十分に稼働することが確認できた。

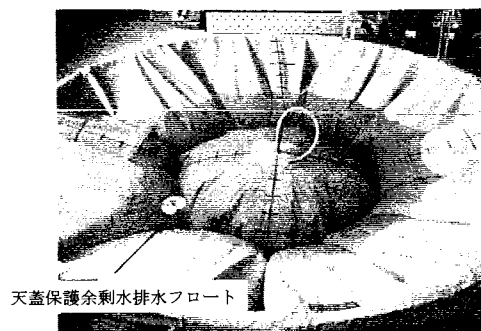


図-9 自動排水制御システムの稼働実験状況

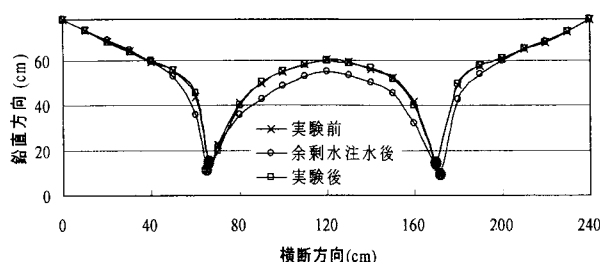


図-10 天蓋保護余剰水注水前後の天蓋形状

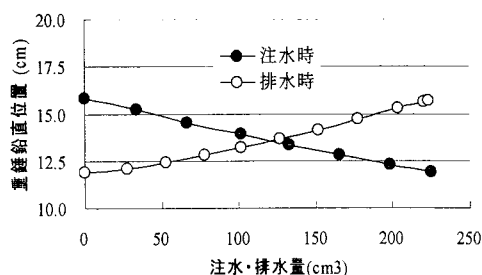


図-11 余剰水の注水・排水過程における重錘位置

4. 天蓋の挙動安定化のための形状制御

(1) 形状制御実験の概要

これまでに開発した水中浮上式天蓋は、天蓋上に保護水を被せることから、貯水容量の減少は避けられない。また、浮きを付設する天蓋中央部の天蓋保護水深は必ずしも十分には確保できない場合がある。そこで、天蓋形状形成の要因に関するモデル実験の結果を踏まえ、天蓋を完全に水中に潜行して浮上させ、かつ、できるだけ天蓋保護水の水深を一樣として貯水容量の減少を最小化するための形状安定化制御方策を検討した。

モデル実験結果から、①重錘重量を含む天蓋の総重量

が大きいほど、貯水と天蓋保護水の水頭差が大きくなり水頭差による形状安定効果が期待でき、かつ、V字形部分が閉じて貯水容量の減少を少なくできる可能性が高いこと、②モデル実験では重錘の付設位置を円形底面 GM の半径 80cm 上としたが、重錘の付設位置を側壁に近づける方が貯水容量の減少を少なくできる可能性が高いこと、③中央部の天蓋断面形状を楕円形型から長方形型に制御する方が天蓋保護水の水深を一樣とでき、貯水容量の減少を少なくできる可能性が高いこと、が示唆された。

そこで、①については、天蓋の材質を比重 0.812 の EVA 系 GM から、比重 1.24 の EPDM 系 GM に変更した。②については、重錘を底面とのクリアランスを確保できる位置（底面から約 15cm の高さ）に、側壁から吊す方法に変更した。また、重錘 1 個あたりの重量を 9.81N、総個数を 32 個に変更した。③については、天蓋中央部の断面形状を長方形型に制御するために、厚さ 0.23cm、比重 7.8 の鉄製の円形およびドーナツ型のプレート錘（円形：外径 60cm、ドーナツ型：外径 80～180cm、円周幅 20cm）を順次組み合わせて、天蓋上に置くことにした。なお、浮体は、浮力を減じるため、重量 0.20N、体積 220cm³ の発泡スチロール製に変更した。

(2) 形状制御実験結果

図-12 は、天蓋保護水量を 225cm³ とした条件の下で、種々の組み合わせでプレート錘を置いた実験ケース 9 事例のうち、4 事例の天蓋形状を示したものである。実験結果から、ケース sub-007、sub-008 のように、天蓋円形部のほぼ全面が等荷重となるように載荷することによって、天蓋保護水の水深をほぼ一樣とする水中潜行

を達成でき、貯水容量の減少の最小化を図れることが分かる。このことは、天蓋円形部の単位面積当たりの重量を増量して調整する工夫、例えば、天蓋円形部はラス（金網）入り GM を使用するなどの方策が有効であることを意味すると考えられる。

なお、図-13 は、実験ケース 9 事例における天蓋円形 GM の水中重量、重錘重量の 1/2（側壁が概ね 1/2 を負担している）、プレート錘重量、浮体浮力（マイナス重量）を合算した重さを天蓋保護水の水面面積で除した値（付録の長方形断面形状における水頭差 h_0 の推定値）と、各実験ケースにおける貯水と天蓋保護水の水頭差（実験値）を比較して示したものである。合算重さが小さい範囲では実験値が推定値を下回っているケースがあるが、これは天蓋の一部が水中潜行していないケースである。天蓋が完全に水中潜行している範囲では、実験値は推定値と一致しており、付録の式(7)が成立していると考えられる。

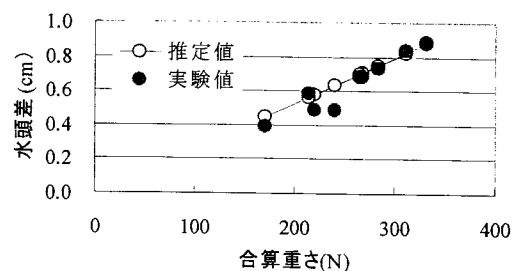


図-13 天蓋の合算の重さと水頭差

5. 結論

前報で報告した GM を用いた水中浮上式天蓋の開発において残された技術的課題である天蓋挙動の安定化について、室内モデル実験により検討した。その結果は、以下のとおりである。

- ① 降雨の集中により天蓋保護水が増量して貯水容量が減少する課題については、貯水と天蓋保護水に天蓋の重さに見合った水頭差が生じる現象と天蓋保護水が増量すると天蓋が沈降する現象に着目して考案した無動力自動排水システムが有効である。
- ② 天蓋ジオメンブレンの保護のため水中に完全に潜行して浮上させ、かつ貯水容量の減少を最小化するため天蓋保護水深をできるだけ一樣とする天蓋の形状制御については、天蓋に適切な重量の錘を配置する、若しくは適切な重量を持ったジオメンブレンを使用することで対処できる。

謝辞：本論は、独立行政法人農業工学研究所と民間 4 社（宮田技術士事務所、(株)会津工建社、シバタ工業(株)、三ツ星ベルト(株)）が共同研究を実施している成果の一部をとりまとめたものである。また、室内実験は、(株)テイコクの協力を得た。関係各位に謝意を表する。

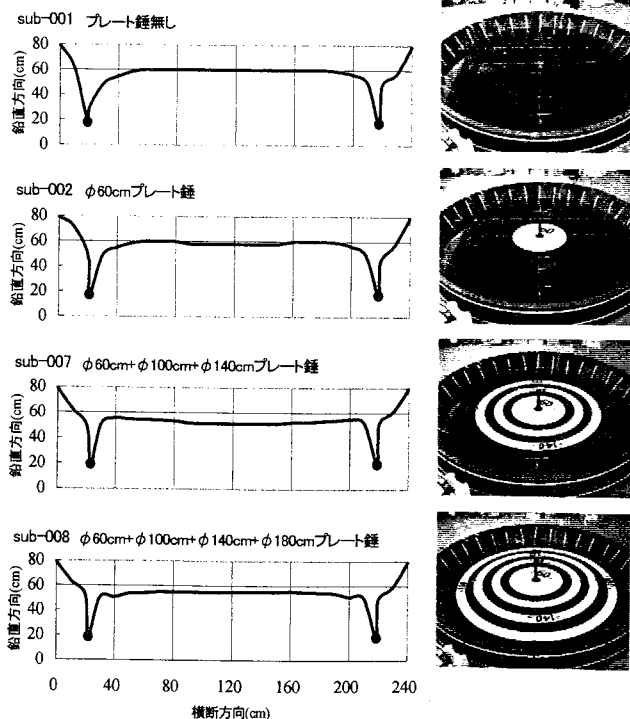


図-12 天蓋形状制御実験結果の事例

付録 水頭差による形状安定効果

天蓋の形状が図-付録1のような長方形断面形状で近似できる場合、(a)の空水時において天蓋が自重でバランスしている状態では、天蓋の重さは浮力に等しい。したがって、水の密度を ρ とし、天蓋の重さを W_1 （単位奥行き当たり、以下、同様）とすると、

$$W_1 = \rho b h_1 \quad (1)$$

次に、(b)のように W_2 の重さの天蓋保護水を注水後、天蓋が $h_1 + h_2$ の深さまで沈降して安定したとすると、

$$W_1 + W_2 = \rho b (h_1 + h_2) \quad (2)$$

また、天蓋保護水の重さ W_2 は、水深を h_3 とすると、

$$W_2 = \rho b h_3 \quad (3)$$

式(1)および式(3)を式(2)に代入すると、

$$\rho b h_1 + \rho b h_3 = \rho b (h_1 + h_2) \quad (4)$$

ゆえに、

$$h_3 = h_2 \quad (5)$$

一方、注水後の貯水と天蓋保護水の水頭差 h_d は、

$$h_d = (h_1 + h_2) - h_3 \quad (6)$$

であるから、式(5)を代入して、

$$h_d = h_1 \quad (7)$$

すなわち、天蓋保護水を注入後も h_1 だけ、天蓋保護水の水頭よりも貯水の水頭の方が大きい。

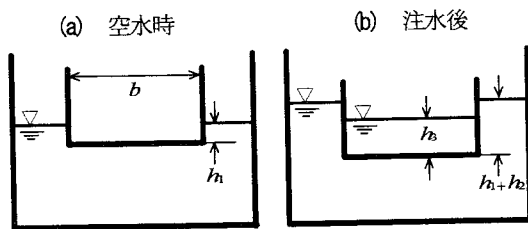


図-付録1 長方形断面形状の場合

次に、天蓋の形状が図-付録2のような三角形断面形状で近似できる場合には、(a)の空水時において天蓋の重さ(W_1)は浮力に等しいことから、

$$W_1 = \frac{1}{2} \rho h_1 (2h_1 \tan \theta) = \rho h_1^2 \tan \theta \quad (8)$$

その後、(b)のように W_2 の重さの天蓋保護水を注水したことにより、天蓋が $h_1 + h_2$ の深さまで沈降して安定したとすると、

$$W_1 + W_2 = \frac{1}{2} \rho (h_1 + h_2) \{2(h_1 + h_2)\} \tan \theta = \rho (h_1 + h_2)^2 \tan \theta \quad (9)$$

また、天蓋保護水の重さ W_2 は、水深を h_3 とすると、

$$W_2 = \frac{1}{2} \rho h_3 (2h_3 \tan \theta) = \rho h_3^2 \tan \theta \quad (10)$$

式(8)、(10)を式(9)に代入すると

$$\rho h_1^2 \tan \theta + \rho h_3^2 \tan \theta = \rho (h_1 + h_2)^2 \tan \theta \quad (11)$$

ここで、 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, $\tan \theta \neq 0$ であるので、

$$\{(h_1 + h_2) + h_3\} \{(h_1 + h_2) - h_3\} = h_1^2 \quad (12)$$

式(12)においては、 $h_1 > 0$, $h_2 > 0$, $h_3 > 0$ であるので、注水後の貯水と天蓋保護水の水頭差 h_d は、常に

$$h_d = \{(h_1 + h_2) - h_3\} > 0 \quad (13)$$

となる。すなわち、貯水の水頭が天蓋保護水の水頭よりも常に大きくなることを意味する。

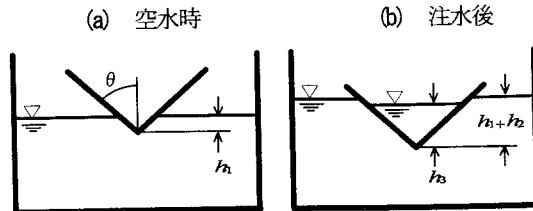


図-付録2 三角形断面形状の場合

水中潜行浮上式天蓋は、上記の長方形断面形状と三角形断面形状が合成された形状に近似できると考えられる。したがって、上記結果から、常に天蓋保護水と貯水の間には、貯水側の方が大きい水頭差が生じることが明らかであり、この水頭差が天蓋の形状を安定させる効果があると考えられる。

参考文献

- 1) 直江次男, 長束勇, 藤本直也, 宮田哲郎, 森充広, 渡嘉敷勝: ジオメンブレンを用いた農業用貯水槽浮上式天蓋の開発, ジオシンセティックス論文集, Vol. 16, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, 2001.
- 2) 長束勇: 合成ゴム系ジオメンブレンの力学的物性値の経年変化特性, 農業土木学会誌, Vol. 68, No. 1, 2000.
- 3) 長束勇, 室井藤夫, 宮田哲郎: 天蓋保護水制御機構を有する貯水槽, 特願2002-187363, 2002.

Control of Submerged Floating Geomembrane Canopy System for Farm Ponds

Isamu NATSUKA, Hideaki ISHIMURA, Masaru TOKASHIKI,
Mitsuhiro MORI and Tetsuo MIYATA

Two techniques for controlling submerged floating geomembrane canopy systems for farm ponds were examined by laboratory model experiments. The first technique was to drain the excessive protection water, which is caused by the inflow of rainwater and reduces the farm pond water capacity, using an automatic drainage system without power supply. The drainage system composed of the floating drain hole and its positioning coupling string in the protection water showed the sufficient drainage performance. The second technique was to prevent the canopy from rising to the water surface by arranging weights on it. The results showed that the adequate adjustment of weights and its position was able to keep the canopy submerged in the uniform depth.

Keywords: Farm Pond, Geomembrane, Floating Canopy System, Maintenance, Automatic Drainage System without Power Supply