

# ジオメンブレンを用いた遮水シートの強風時挙動と設計手法の評価

柏柳正之<sup>1</sup>・佐藤泰明<sup>2</sup>・瀧本純也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 電源開発(株) エンジニアリング事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 電源開発(株) 海水揚水実証試験所 (〒905-1299 沖縄県国頭村安波川瀬原1301-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 電源開発(株) ユンカン水力発電建設事務所 (リマ市、ペルー国)

海水揚水技術実証プラント上部調整池の堤体は表面遮水壁型フィルダムであり、その遮水構造は、合成ゴムシート(厚さ2mm)、保護マット、トランジション層からなる。堤体上流斜面上に設置されたシート上には、台風等の強風によって低圧領域が形成され、固定工間のシート膨らみが発生する。設計では、シートに要求される遮水性、変形性や施工性と共ニシート膨らみ現象を考慮して、シートの固定工構造、シート割付やそれらの諸元を設定している。本報告では、このようなシート膨らみ状況を現地観測に基づき述べ、さらにシート膨らみ高さの推定方法を示し、ここで適用したシートによる遮水構造設計の妥当性について検証する。

**キーワード：** ジオメンブレン，遮水シート，EPDM，強風時挙動，海水揚水発電

## 1. はじめに

海水揚水実証試験(実施主体：経済産業省，資源エネルギー庁，委託先：電源開発株式会社)は、海水揚水発電技術の実用化を目的として、沖縄本島北部において実施中である。海水揚水発電設備では、一般に、海岸沿いの急崖地上の平坦地に掘込式の調整池が設けられ、海水浸透防止の観点からその堤体形式は表面遮水壁型フィルダムとなる。このときの遮水材料としては、アスファルトコンクリートと防水シートなどのジオメンブレンが考えられる。

ジオメンブレンを遮水材料として適用した事例は、農業用，工業用などの貯水池で既に多くあるが、海水揚水技術実証試験プラント(以下実証プラントという)では、既存貯水池とは異なり、海水を貯留することから、その設計にあたっては次の点に留意した。

確実な遮水性確保のため、透水性のきわめて小さい材料を採用すること、揚水発電では調整池の水位が日々大きく変動するため、繰返し荷重にたいする遮水性を確保すること、経年劣化や海生生物等の影響にたいするメンテナンスや事故時の補修が容易にできること、万一、海水漏水が発生した場合でも、周辺環境への海水拡散を極力防ぐ構造とすることである。この結果、露出型の遮水シート(合成ゴム(EPDM))を用いた表面遮水工を採用し、シート

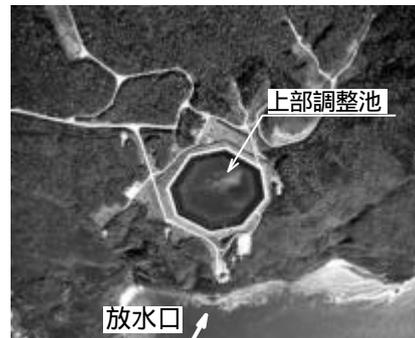


図-1 海水揚水実証プラント、上部調整池

表-1 実証プラント上部調整池諸元

項目	内容	
形式	掘込式	
	ゴムシート表面遮水壁(露出型)	
形状	八角形、貯水面積 46000m <sup>2</sup>	
規模	最大堤高	25m
	天端での周長	848m
	最大水深	22.8m
	満水位	152m
	低水位	132m
	堤体勾配 上流および下流 1:2.5	
遮水工	遮水シート	EPDM (厚さ2mm)
	遮水工面積	53,200m <sup>2</sup>
	保護マット	不織布 (目付量800g/m <sup>2</sup> )
	トランジション	C-20 (厚さ0.5m)

基盤やシート固定方法の構造設計，漏水検知および

復水システムの検討を行ってきた<sup>1), 2)</sup>。本稿においては、このうち特にシート固定方法の設計に関連して、強風時における遮水シートの膨らみ現象の実際と、その挙動推定方法について報告し、さらにこれらに関わる設計方法の妥当性の検証を行なう。

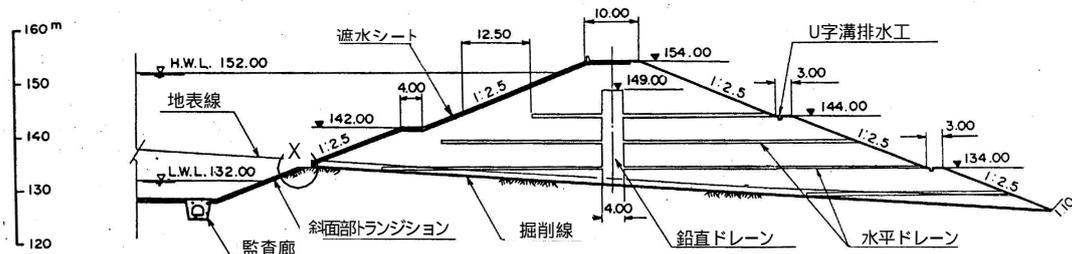
## 2. 実証プラントにおける遮水シートの設計

実証プラント上部調整池（以下上部調整池という）の現状及び諸元を、図-1および表-1に示す。

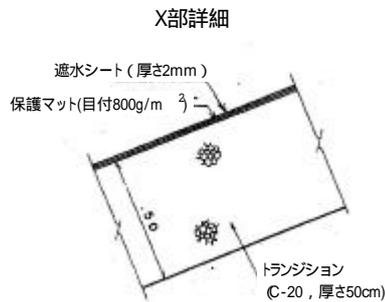
遮水構造として遮水シートを適用する際の要求仕

様は、遮水性、変形性、安定性および耐久性である。遮水シートの遮水性は不透水と考えて良く、シート自体が健全な状態であれば、通常の状態では遮水性が問題となることはない。上部調整池では、万一のシート破損に備えて、シート背面には漏水した海水を速やかに排水するための構造を、さらにこれを常に監視できるシステムを設置した。

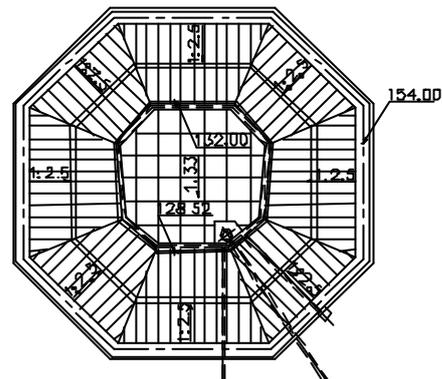
耐久性については、遮水形式と貯水池運用状況から、遮水シートが外部に暴露されているため、外部環境の影響を受けやすく、また防水シートには紫外線、オゾンや熱の影響による劣化が生じる。上部調整池の遮水シートとして採用したのは EPDM



a) 堤体標準断面



b) 遮水シート標準断面



c) シートおよび固定工レイアウト  
(堤体の貯水側のみを示す)

図-2 実証プラント、上部調整池

表-2 実証プラント上部調整池において  
考慮した遮水シート力学的要求性能

想定される変形状況	シートおよび引張応力に対する要求性能
2次元断面における強風時シート変形の極限状態として、半円形状を想定 (固定工間隔は8.5m)	57.1% 117.6 N/cm <sup>2</sup> (12 kgf/cm <sup>2</sup> )
湛水に伴う堤体変位	10 <sup>-2</sup> %オーダー
地震時堤体変形に伴うシート変形、2次元FEM解析により推定	数%
監査廊などのコンクリート構造物と隣接する基礎の不等沈下を想定、実証プラントにおける基礎状況から沈下量として10mmが得られ、さらに沈下幅として基礎材料粒径(20mm)程度とした。	100%
斜面部でのシート自重による引張、斜面上の摩擦を無視して評価。	1.5% 15.7N/cm <sup>2</sup> (1.6kgf/cm <sup>2</sup> )

表-3 EPDM シート特性

項目	JIS規定値	
引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	750N/cm <sup>2</sup> 以上	
破断時の伸び (%)	450%以上	
引裂強さ (kgf/m)	250N/cm以上	
温度依存性 (引張強さ比%)	30%以上	
加熱伸縮性状 (伸縮量mm) (試験片 300mmx30mm)	伸び	2mm以下
	縮み	4mm以下
アルカリ処理後の引張性能	引張強さ比%	80%以上、120%以下
	伸び比%	80%以上
加熱処理後の引張性能	引張強さ比%	80%以上、150%以下
	伸び比%	70%以上

( Ethylene-Propylene-Diene Terpolymers ) を用いた合成ゴムシートであり、これは成分としてイオウを含んでいる(加硫という)ことから、製品完成後においても分子間の架橋構造が発達しつづけ、このため剛性の増大と伸び率の低下が同時に発生することが知られている。したがって、遮水シートの耐久性評価においては、これら現象を事前に評価できる方法を確立し、必要な要求性能を満足する材料選定を行うべきである。

変形性と安定性は、遮水工構造設計の重要な要因である。上部調整池では、このような表面遮水壁型フィルダムにおいて考えられる変形モードとして表-2を想定し、各状態のシート伸び率や発生応力を算定した。これより、支配的な変形モードは本稿で詳述する強風時のシート膨らみに伴う変形と、基礎等の不等沈下に起因する局所的な変形である。安定性については、強風時のシート膨らみ時と堤体斜面上での安定を確保する必要がある。またシート敷設は基本的に人力施工となることから、施工能率の向上と現場施工によるシート間接着を極力設けないことによる遮水性の信頼性向上を目的として、工場接着によるシート幅広化が求められる。

実証プラント上部調整池のシート固定工設計においては、ここで述べたすべての事項を考慮して、以下のような方法を採用している。

- 1) 遮水工は、図-2 に示すように、遮水シート、保護マットおよびトランジションから構成する。トランジションは、海水漏水をすみやかに排水できる透水性を有するものとする。
- 2) 遮水シートの固定はコンクリート製固定工にて行い、また固定工内部にシートを巻き込む構造<sup>1)</sup>によってシート端部の遮水性を確保する。
- 3) 固定工諸元・およびシート幅は、強風時シート膨らみと施工性を考慮し、固定工は基本的に斜面軸方向に配置し、間隔 8.5m (調整池周方向)、固定工幅 50cm、高さ 50cm、重量 5480N/m とする。シートおよび固定工の割付を図-2 c) に示す。
- 4) 堤体勾配はシートの滑り安定に必要な勾配 (1:2.5) とする。堤体標準断面を図-2 a) に示す。
- 5) 遮水シートは、表-3 に示す特性を有するものとする。

### 3. 強風時の遮水シート挙動

#### (1) 遮水シートの膨らみと風速の関連

一般に、強風時には構造物背後に流れの剥離や乱れが生じて周辺圧力よりも低い圧力場が形成される。



図-3 強風時のシート膨らみ状況

撮影月日 : 1999年9月23日(台風18号)、撮影時の水位: EL149.42m(ダム天端154mより約4.5m下がり)、撮影時の風速: 瞬間最大風速は28m/s(10分間平均)、(写真撮影時は既に台風のピークは過ぎている。)

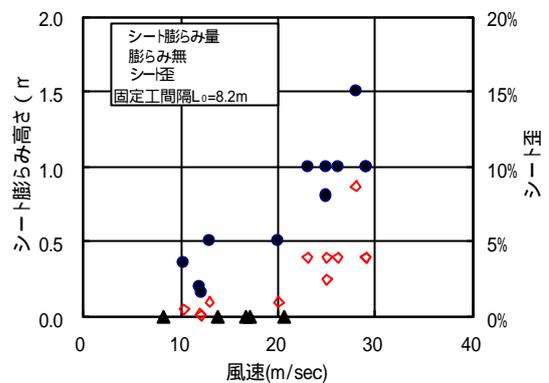


図-4 実証プラントにおける強風時シート挙動実績

上部調整池堤体斜面上においても同様な現象が発生することがあり、このとき遮水シートのような不透水ジオメンブレンによって表面遮水されている場合には、遮水シートに斜面上の圧力低下による浮上がり力が作用する。このため、特に風速が大きいときにはシート膨らみが発生し、結果としてシートの剥離、固定工の損傷、保護マットの移動、あるいはシート自体のしわ発生等による遮水工への悪影響が考えられる。

上部調整池で観測された強風時の遮水シート膨らみ事例を図-3に示す。このときの最大風速は28m/sec(10分間平均)であり、シート膨らみは目視(遠隔監視ビデオ(ITV)画像による)によって1m程度と推定された。同様の現象は台風襲来時の強風時毎に発生しており、そのときのシート膨らみ高さや風速の関係を図-4にまとめる。これより、上部調整池においては、シート膨らみは風速がおおよそ10m/sec以上で発生すること、またシート膨らみ高さや風速には明瞭な相関関係が認められることがわかる。さらに着目すべき点は、同じ風況条件でも膨

らみが発生する場合としない場合があることである。  
 (2) 強風時のシート膨らみ現象の分析

ここではシート膨らみと風特性の関係を分析する。一例として2002年9月の台風16号を取り上げる。シート膨らみが発生した際の、調整池近傍の風速、気圧測定結果を図-5に示す。図中、風速が15m/s～20m/s程度の4日17時および5日11時、15時にはシート膨らみが確認されている。このときのシート膨らみ高さは、画像より1.0m程度と推定された。気圧は、風速の変化とは逆位相で変動し、このときは最大50hPa(510kgf/m<sup>2</sup>)程度低下した。

遮水シートには、調整池の風上側でパラペット背後から池側斜面上において、風速変動に伴う低圧域が発生し、これが負圧としてシート面に作用する。また、シート背面には堤体材料を通じて外部の気圧変動が伝播するが、これには時間遅れが伴うため、シート上および背面での圧力差が発生するものと考えられる。シート膨らみの発生位置は、図-6に示すように、調整池の風上側に位置し、これは風向きの変動にあわせて移動しており、これはシート膨らみの要因として、風の影響が大きいことを示している。

一方、シート背面圧力は、トランジション層から監査廊内に導かれた閉塞環境の配管内で計測している。底部シート背面圧力では外部気圧に連動して最大40Pa(H14年、台風16号)の変動が測定されたが、斜面部シート背面圧力では数Pa程度の圧力変動は測定されているものの、外部気圧変動との相関はなく、むしろシート挙動に対応した変動を示している。これは底部シート背後の空気は、監査廊により閉塞されており、貯水を介した気圧変動に伴う圧力変動が直接伝播するのに対して、斜面上シートでは堤体を介して外部に解放されているため、シート背面に外部との差圧が発生しづらく、シート膨らみに与える影響は小さいものと考えられる。一方で図-3に示されるように、同じ風況条件でも膨らみが発生する場合としない場合があることや、シート膨らみが発生するためには、強風がある程度の時間継続することが条件となることが観測結果からわかっている。これらの観測事実は、シート膨らみのメカニズムとして風によってシート上に生ずる圧力降下が支配的であるものの、シート背面への堤体等からの空気供給が関連することが考えられる。

以上のように、実際のシート膨らみについては風による低圧場形成以外の要因も関連しているが、遮水工設計の観点からは膨らみ高さ、すなわちシート伸びの最大値が推定できれば十分であることから、以降の斜面シート膨らみ現象の検討においては、シート背面の圧力変動の影響は小さく、シート上の風

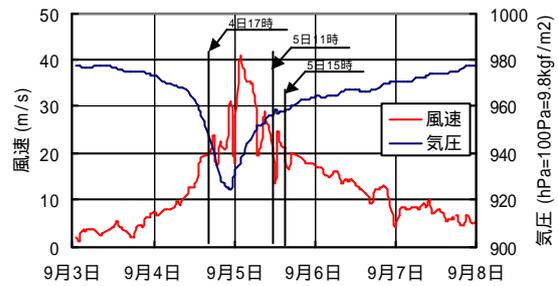


図-5 風速・気圧観測結果の一例  
 (2002年9月、台風16号)

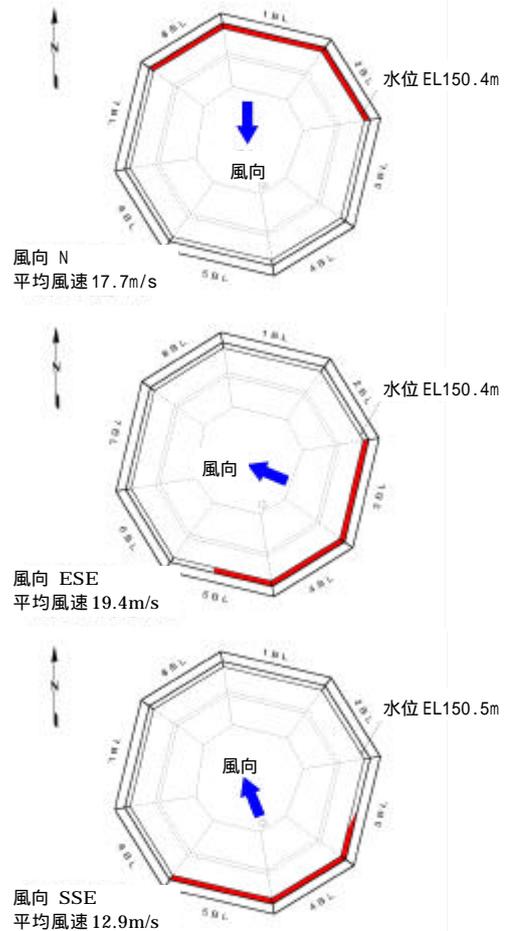


図-6 シート膨らみ分布(2002年、台風16号、ハッチング部が膨らみ発生ブロック)

速変動および低圧場(以下負圧という)形成によってのみシート膨らみが発生するものとする。

#### 4. シートに作用する負圧

強風時にシートに作用する負圧推定式は一般に(1)式のように示すことができる。

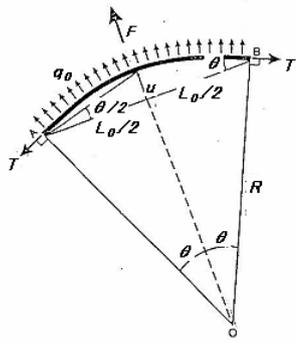


図-7 シート膨らみのモデル

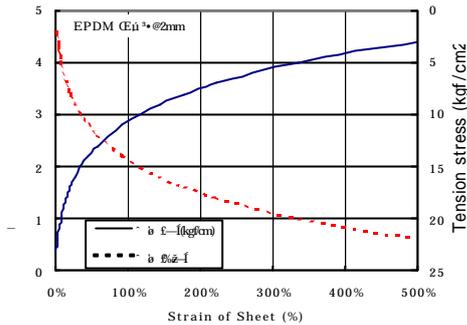


図-8 EPDM シートの応力歪関係

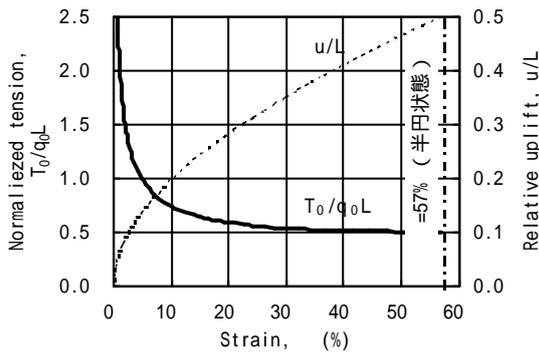


図-9 シートの変形特性

$$q_0 = \frac{g}{2g} \times cV^2 \quad (1)$$

ここに、

$q_0$  : シートに作用する負圧,  $\rho$  : 空気単位体積重量,  $g$  : 重力加速度,  $c$  : 風力係数,  $V$  : 風速

風力係数 ( $c$ ) は、対象とする構造物の形状や風の特長によって定まるパラメータであり、設計上の主要条件である。ここで風力係数を一般的に適応される 0.25 ~ 0.50 程度とし、式(1)を適用すると、シート自重に相当する  $2.5\text{N/m}^2$  程度の負圧が発生する風速は 8 ~ 12m/sec 程度となる。これは図-4 に示した現地観測結果と整合する。

実証プラント上部調整池形状と同様な斜面上の負圧を対象とした研究として、Giroud ら<sup>3)</sup> は風洞実験に基づき、斜面上での風力係数を 0.55 から 0.85 程

度を提案しており、斜面上部ではさらに大きな風力係数を採用すべきことを示した。また設計に用いる風力係数は、突風などの風特性を考慮して、模型実験などから定まる値に対してさらに安全側の値を採用すべきであることを指摘している。

## 5. シート膨らみ量の推定

2つの固定工(間隔  $L$ )にはさまれたシート断面(図-7 参照)を考える。シート変形状況は周辺の固定条件に依存するが、長形状の固定を考えるとこのアスペクト比が 2 以上(実証プラントでは斜面長 16.4m, 固定工間隔 8.2m)では長軸端の一部を除いてシートの変形は 2 次元であり<sup>1)</sup>、このような変形を解析対象とする。また既述のようにシート変形は、シート上の風速変動によって生ずる圧力低下のみによって生ずると仮定する。シートに作用する負圧 ( $q_0$ ) は式(1)で表され、これはシート 2 次元断面に様に作用する。このときシートに発生する引張力 ( $T_0$ ) とシート歪 ( $\epsilon$ ) 変形 ( $u$ ) の関係は式(2), (3) であり、またシートの膨らみ形状 ( $q_0, u$ ) は式(4) および (5) の通りである<sup>3)</sup>。

$$\frac{T_0}{q_0 L} = \frac{1}{2 \sin q_0} \quad (2)$$

$$e = \frac{2T_0}{q_0 L} \sin^{-1} \left[ \frac{q_0 L}{2T_0} \right] - 1 \quad (3)$$

$$q_0 = \sin^{-1} \left( \frac{q_0 L}{2T_0} \right) \quad (4)$$

$$\frac{u}{L} = \frac{1}{2} \tan \left( \frac{q_0}{2} \right) \quad (5)$$

すなわちシートの変形状態は、無次元パラメータ ( $T_0/q_0L_0$ ) により表すことができる。

一方、EPDM ゴムシートは歪に対して非線形な伸び性状を示すことから、これを引張力との関係で考慮しなければならない。EPDM シートでは式(6)のような関係が実験によって得られている。これを図-8 に示す。

$$T_0 = A \times E e = A \times (137 \times 1.17^{-5}) e \quad (6)$$

ここに、

$A$  : シート断面積,  $E$  : シート剛性

図-9 にシート変形挙動と前記無次元パラメータとの関係の一例を示した。これよりシート中央部の最大変位は固定スパンの 1/2 が最大(半円形状)であ

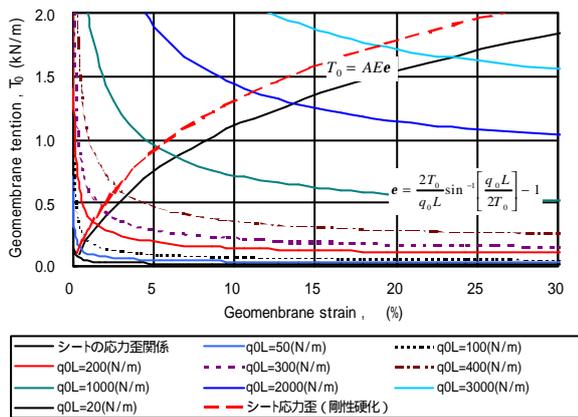


図-10 遮水シートふくらみ量の推定 (図式解法)

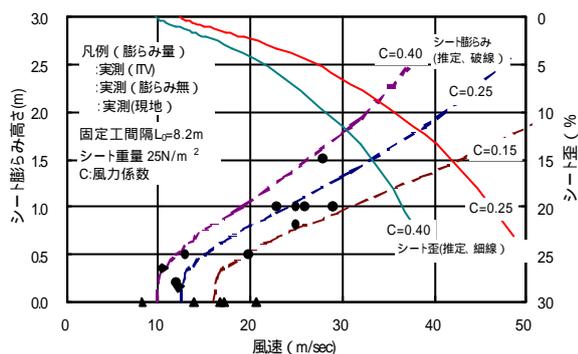


図-11 遮水シート膨らみ高さの推定

り、すなわちシート変形は半円形状に漸近し、このときのシート歪は57.1%となることわかる。

実際のシート変形状態は、式(3)および式(6)を同時に満足する歪によって規定されるが、シート伸び特性の非線形のため任意の風速に対するシート膨らみ高さを解析的に求めることが困難であるため、ここでは両式を図示することによって、これらの交点としてシート変形を定める。その方法を図-10に示す。まず式(3)より与えられた風速とシート間隔の積( $q_0L$ )をパラメータとしてシート歪とシート張力の関係を図示し、次にシート伸び特性を式(6)により図示する。求めるシート変形状態はこれら曲線の交点として定められる。

実証プラントのシート諸元(固定工間隔8.2m、シート単位面積あたり重量25N/m<sup>2</sup>)に対して求めたシート膨らみ推定量とシート膨らみ実測値との比較を図-11に示す。両者には良好な一致が認められ、風力係数は0.15~0.40程度の範囲である。

## 6. 結論

本報告では、遮水シートを用いた表面遮水壁型フィルダムの強風時シート膨らみ挙動について、実証

プラント上部調整池における現地観測結果や解析的手法による検討を行った。以下にそれらの結論を列記する。

- 1) 上部調整池のシート膨らみは、シート自重を上回るシート上の負圧が想定される風速10m/s程度以上で発生し、また風速とシート膨らみ量は良い相関関係を示す。
- 2) シート膨らみは風向に対して風下側の斜面上で発生するが、同じ風況条件でも膨らみが発生する場合としない場合がある。
- 3) これらの観測事実は、シート膨らみのメカニズムとして風によってシート上に生ずる低圧域が支配的であるものの、シート背面への堤体等からの空気供給が関連することを指摘できる。
- 4) 遮水工設計上重要なシート膨らみ高さの推定は、シート上の負圧を考慮した理論的な手法によって可能であるが、このとき負圧量を規定する風力係数が重要である。さらにこのような手法の適用に当たっては、シート伸び特性の非線形性や経年変化・劣化による特性の変化を考慮すべしである。
- 5) 風力係数については、上部調整池の諸元では、平均として0.25程度が適切であるものと評価される。シート膨らみ高さの検討では比較的長い時間スケールを考慮すべきであるが、一方で振動などを伴うシート挙動は、短期的な風速変動にも支配され、このため設計上のC値設定にあたっては、突風率などの短期的な現象についても配慮が必要である。
- 6) 実証プラントにおいては、遮水構造設計においてはシート膨らみが半円形状となる極限的な変形状態を考えているが、これは過大であると考えられる。今後の同種構造物の適用にあたっては、ここで示した手法と適切な設計風速の設定によって遮水工設計の合理化が可能である。

## 参考文献

- 1) 瀧本純也, 尾ノ井芳樹, 池口幸宏: 沖縄海水揚水発電技術実証試験パイロットプラント建設工事における上部調整池ゴムシート表面遮水工の設計・施工(その1 設計), 電力土木, No.260, pp60-69, 1995.11
- 2) 瀧本純也, 尾ノ井芳樹, 池口幸宏: 沖縄海水揚水発電技術実証試験パイロットプラント建設工事における上部調整池ゴムシート表面遮水工の設計・施工(その2 施工), 電力土木, No.264, pp1-8, 1996.7
- 3) J.P. Giroud, T. Pelte and R.J. Bathurst: Uplift of Geomembranes by Wind, Technical paper, Geosynthetics international 1995, Vol.2, No.6, pp.897-952