

ダム施工時の防雨用吊膜屋根の対風挙動

Wind-Induced Motions of Rain Shelter Suspended Membrane Roof for Dam Construction

木村吉郎^{*}、藤野陽三^{**}、手塚寛之^{***}、横沢和夫^{****}、太田匡司^{*****}

Kichiro KIMURA, Yozo FUJINO, Hiroyuki TEZUKA, Kazuo YOKOZAWA and Masanori OHTA

^{*}Ph. D. 東京大学講師 工学系研究科土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

^{**}Ph. D. 東京大学教授 工学系研究科土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

^{***}建設省九州地方建設局 鹿児島国道工事事務所 (〒890 鹿児島県鹿児島市下伊敷1-52-2)

^{****}工博 前田建設工業(株)技術研究所 土木構造研究室長 (〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

^{*****}東京大学大学院生 工学系研究科土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

The suspended membrane roof designed as a rain shelter for dam constructions to reduce the construction period is studied. The roof consists of two parallel cables and a membrane roof spanning the cables. The advantage of the roof is that it can easily be moved according to the height and location of the construction. However, because of the extreme lightness of the structure, wind effects are thought to be considerable. In this study, wind tunnel experiment was conducted to clarify the wind-induced motions of the suspended roof. Divergence was found to be critical and the critical wind speed was 22m/s. Under the blowing up wind that is expected at the dam site, the critical wind speed decreased. Simple analysis that considered the static equilibrium of the aerodynamic moment and restoring force due to gravity was conducted to estimate the critical wind speed. The result agrees reasonably well with the experiment. Comparison of the results and the on-site wind characteristics measurement revealed a small possibility of the occurrence of divergence. As a countermeasure, folding the membrane to a narrow strip was found to be effective.

Key Words: wind effects, divergence, suspended membrane roof, dam construction

1. はじめに

ビルディングや橋梁と同じように、ダム建設においても雨による施工停止を防ぐ方法の開発が望まれている。特にフィルダムでは、雨水によりコア材の含水比が高くなると、それが乾くまで数日間盛立ての施工が出来なくなるため、防雨設備の必要性が高い。

こうした背景のもと、本研究で扱う吊膜屋根は、ダム建設における防雨を目的として考案された。具体的には長方形の防雨用膜を2本の並列ケーブルで吊り、ダム堤体上部に張り渡したものである(図-1)。この吊膜屋根には、盛立て施工を行っている位置に合わせて膜をケーブルのスパン方向に移動することができ、またケーブルのサグを調節することによりダム天端の高さに応じて膜の高さが変えられる利点がある。しかし一方、軽量かつフレキシブルな構造であるため、強風下での対風挙動、とくにダイバージェンス、フラッターなどの不安定挙動が懸念される。建築構造としての膜屋根の対風挙動については研究が行われており、例えば最近の文献として1)、2)が挙げられるが、本研究で対象とする張り渡したケーブルによって両端を支えられている吊膜屋根構造をあつかった研究は見られない。

本研究の目的は、この吊膜屋根の対風挙動ならびに安定化対策を、3次元弾性模型を用いた風洞実験によって明らかにすることである。

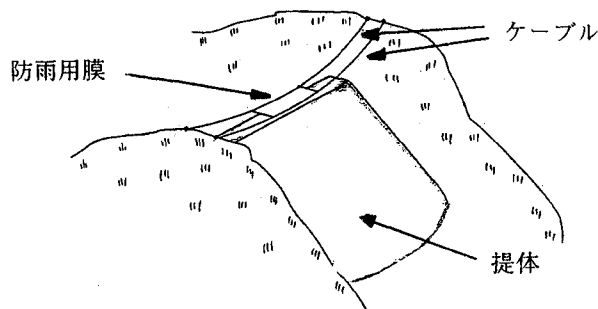


図-1 防雨用吊膜屋根

なお、本吊膜屋根を使用するにあたっては防雨膜上に貯まる雨水の処理が必要となるが、これは膜中央部数カ所に設けた排水孔からホースを通じて行うことで可能と考えている。また、有風時には雨の降り込みが予想されるが、防雨用膜の高さをダム天端ぎりぎりまで下げることで、降り込み量は最小限に抑えられると考えている。

2. 風洞実験

2.1 実験模型

想定している吊膜屋根および3次元弾性模型の諸元を表-1に示す。模型は風洞測定部(幅16m×高さ1.9m)の大きさを考え、縮尺1/40とした。

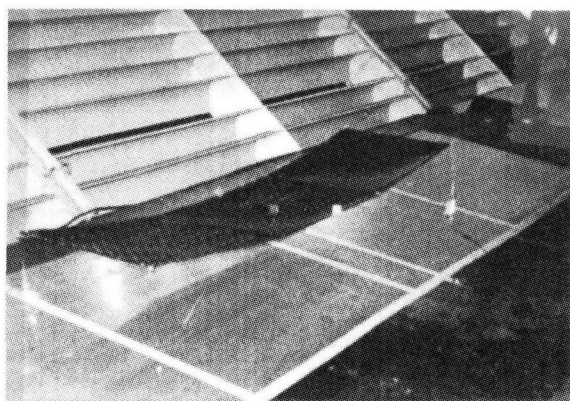
表－１ 吊膜屋根の諸元

	想定した吊膜屋根	模型
スパン長	500 m	12.5 m
ケーブル間隔	25 m	0.625 m
膜スパン方向長さ	100 m	2.5 m
ケーブル質量	20 kg/m	12.5 g/m
膜質量	10 kg/m ²	250 g/m ²

模型の吊膜としてはビニールシート（傘の生地）を用いており、その弾性パラメータは相似されていない。しかし後述のように膜そのものの振動はクリティカルではないこと、膜の弾性変形は小さいことから、本質的に重要な現象は用いた模型により再現されていると考えている。なお吊膜の質量は、直径5mmの鉛玉を55mmピッチで接着することにより相似させた。

模型のケーブルには直径0.3mmのワイヤーを用いており、その剛性は所要値よりもやや大きい。しかし、その誤差が吊膜屋根構造全体の挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。なお、ケーブルの質量は、外径4mm、長さ25mmの銅管を100mmピッチで取り付けることにより相似させた。

また並列ケーブルの間隔を保つために、吊膜のスパン方向の両端および3等分点に、計4本のスペーサー（バルサ材製、幅30mm、高さ5mm、長さ625mm、質量16g/本）を取り付けた。



図－２ 風洞実験模型

2.2 実験方法

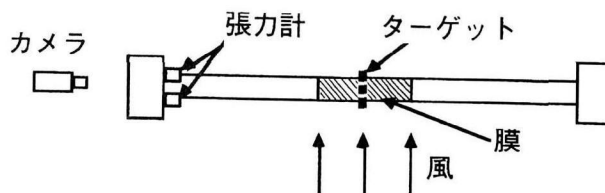
測定項目は、膜の変位、そしてケーブルの設計という点から重要なケーブル張力とした。吊膜の変位はビデオカメラによる非接触変位計測システム（エムテック・カラーマルチカメラトラッカーMVA-2040）を用い、ターゲットは膜のスパン方向中央位置の上流端、中央、下流端の3箇所に設置した。張力はケーブル端部に取り付けた張力計によって測定した（図－３）。

ダム天端部に吊膜屋根が設置されるので、吹き上げの風、すなわち気流が正の傾斜角をもつ場合の挙動も検討

した。傾斜角は風洞床面に傾斜板を設置して作成し、傾斜板の角度は、0°、3°、および6°とした。実際の気流の傾斜角をxプローブを用いた熱線風速計によって測定したところ、吊膜の位置（高さ30cm）におけるそれぞれの傾斜板の角度に対応する値は、-0.3°、2.5°、および6.7°であった。これらの傾斜角をもつ気流を、以下ではそれぞれ「0°、3°、および6°の傾斜角の気流」と呼ぶことにする。

なお防雨用吊膜屋根は、ダム天端部の高さまたは施工位置に応じて、ケーブルのサグ比や膜のスパン方向位置を変化させることとなる。これらの影響をみるために、1/8.5および1/11の2種類のサグ比について実験を行い、またサグ比1/8.5の場合については膜をスパン方向（主流直角方向）に70cmずらした位置に設置したケースについても実験を行った。吊膜屋根の実際の運用にあたってはさらに大きな範囲でサグ比を変化させる必要があるが、本実験では膜に作用する風洞内の気流条件があまり変化しない範囲を考慮して、上記2種類のサグ比について検討した。

現地のダム天端部での風速は、空間的に非一様で時間的に変動する極めて複雑な特性をもつものと考えられる。しかし、本研究では吊膜屋根の基本的な対風挙動を明らかにするという立場から、実験で用いる気流は一樣流とした。

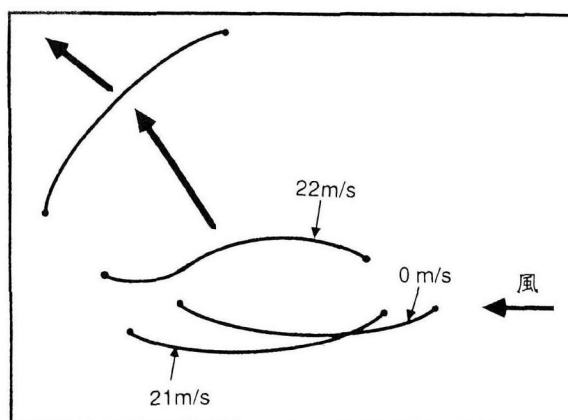


図－３ 測定概念図（平面図）

3. 実験結果

3.1 膜の変位

サグ比1/8.5、傾斜角0°、吊膜設置位置中央のケースについて、風速の増加にともなう吊形式膜屋根の変位の経緯と変形の様子を図4に示す。風速の増加とともに



図－４ 吊膜断面の風による変位

表－2 ダイバージェンス発現風速およびケーブル最大張力（実物換算値）

サグ比	膜のスパン 方向位置	傾斜角	ダイバージェンス 発生風速 (m/s)	最大張力 (tf)	
				上流側ケーブル	下流側ケーブル
1/8.5	中央	0°	22	71.7	81.1
〃	〃	3°	15	53.4	53.7
〃	〃	6°	13	44.3	45.2
〃	70cm移動	0°	19	51.4	67.8
〃	〃	6°	14	49.9	56.6
1/11	中央	0°	20	68.9	100.6
〃	〃	6°	14	62.2	70.5

膜は吹き流され、下向揚力により膜は下方に緊張する。風速があるレベルを越える（実風速換算で22m/sのとき）と、膜が風上側からゆっくりと上方に変形しはじめ、全体的な形状が上に凸の状態に近づくとともに、膜全体のねじれ（回転）変形が急激に進み、風のように浮き上がった状態となる。後述のようにこのときケーブル張力は著しく大きくなるので、吊形式膜屋根の限界状態はこのダイバージェンスが発生する風速ということになる。

吹き上げの傾斜角（3° および6°）の場合にも、風速の増加とともに膜は下流側に吹き流されるが、膜が下方に緊張することはない。膜の形状変化とともにダイバージェンスへ移行するのは傾斜角0°の場合と同様である。

なお、これらのいずれのケースにおいても吊膜の振動はほとんど見られなかった。

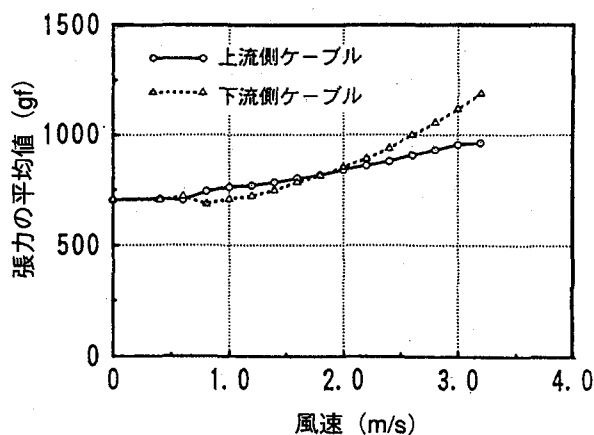
表－2に、各ケースに対するダイバージェンスの発生風速（実風速換算値）を示す。ダイバージェンス発現風速は、サグ比および膜のスパン方向位置によってはあまり変化せず、傾斜角0°のとき19～22m/s、3°で15m/s、6°で13～14m/sであった。

3.2 ケーブル張力

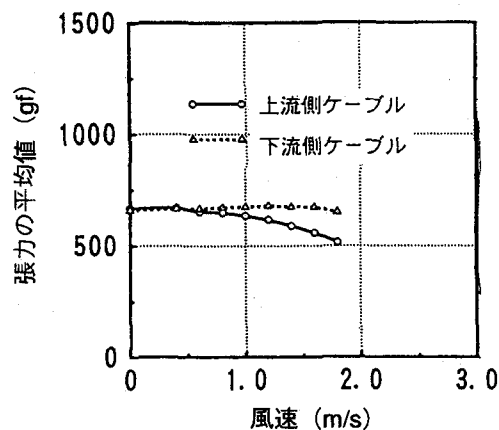
サグ比1/8.5、吊膜設置位置中央、傾斜角0° および6°のケースについて、風速の増加にともなうケーブルの張力の平均値の変化を図－5に示す。傾斜角0°の場合（図－5(a)）は上述のようにダイバージェンス発現までは膜が下方に緊張するのでケーブルの張力が風速とともに増加する。また、膜の下流側がより下方に変位するため、下流側ケーブルのほうが上流側ケーブルよりも張力が大きくなっていく。一方傾斜角6°の場合（図－5(b)）には、膜は逆に若干上方へ変位するために、ケーブルの張力はほとんど変化しないか（下流側ケーブル）、少し減少している（上流側ケーブル）。

ケーブル張力のr.m.s.も求めたが、振動が発生しなかったことに対応して、ダイバージェンス発生風速まではどちらのケーブルとも、2.5tf（傾斜角0°）または0.8tf（傾斜角6°）以下であり、小さかった。

表－2には、各ケースにおけるケーブル張力の最大値も示してある。これらはダイバージェンスが発現する前までの測定データの中の最大値であり、ダイバージェン



(a) 傾斜角0°



(b) 傾斜角6°

図－5 ケーブル張力の平均値の風速による変化
（サグ比1/8.5、吊膜設置位置中央、模型実験値）

ス発現時の瞬間的な張力は測定されていない。しかし、ダイバージェンス発現時には、模型のケーブルが破断してしまう現象が何度か生じたため、かなり大きな張力が作用するものと推測される。

4. ダイバージェンス発生風速の予測

風洞実験における吊膜の挙動をみると、下流側ケーブルを中心軸とした膜全体のねじれ変位が大きくなってダ

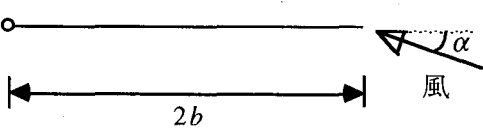
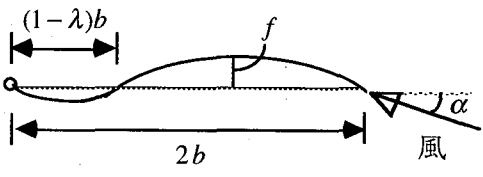
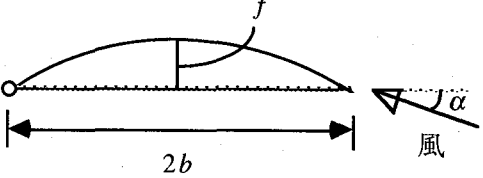
	断面図	断面形状	C_m : 後縁回りの 空力モーメント係数
平板		直線	$C_m = \frac{3}{2} \pi \alpha$
反転キャンバー		三次曲線	$C_m = \frac{3}{2} \pi \left(\alpha - \frac{1}{4} k b^2 + \frac{2}{3} \lambda k b^2 \right)$ $\left(k = \frac{27f}{2b^3(9\lambda - \lambda^3 + (3 + \lambda^2)^{1.5})} \right)$
全面キャンバー		二次曲線	$C_m = \frac{3}{2} \pi \left(\alpha + \frac{2f}{3b} \right)$

図-6 膜の断面形状の仮定

イバージェンスが生じている。そこで、重力による復元力がつくる下流側ケーブル周りのモーメントに対して、空力モーメントが反対符号で大きさが等しくなる風速をもってダイバージェンスの発生風速の予測を行った。

膜の断面形状としては、平板、反転キャンバー、全面キャンバー（図-6）を仮定した。図には、計算に用いた、薄翼理論に基づく空力係数³⁾も示した。空力モーメント係数は気流傾斜角によって異なる値となるので、予測されるダイバージェンス発生風速も気流傾斜角の関数となる。なお、全面キャンバーに対するキャンバー量 f については、後述する膜の4隅に風洞床から補助ケーブルをつけたケースにおいて、風速の増加とともにダイバージェンスに対応して膜が上に凸の状態になった直後の測定値として $f=0.047\text{m}$ を用いた。また反転キャンバーに対応するダイバージェンス発生直前の膜の形状は、下に凸の状態から上に凸の状態へ時々刻々連続的に変化していくものであるが、代表値として、回転変形が急激に大きくなる直前の実験値、 $f=0.035\text{m}$ 、 $\lambda=0.5$ を用いた。

図-7に予測値を実験結果と比較して示す。実験値は、全面キャンバーを仮定したときと平板を仮定したときに得られる予測値の中間の値となっている。反転キャンバーを仮定したとき得られる予測値は、 λ などの取り方によって異なるが、これも平板と全面キャンバーを仮定したときの予測値の間の値となる。

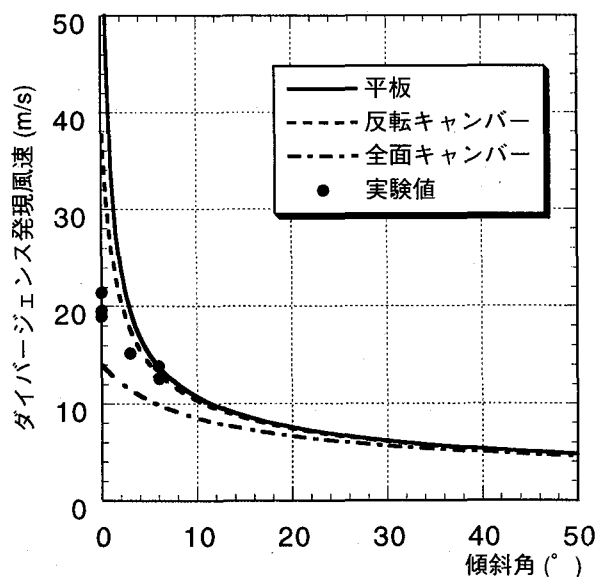


図-7 傾斜角とダイバージェンス発生風速の関係

5. ダイバージェンスの発生可能性と安定化対策

5.1 風環境からみた発生可能性

ダムサイトでの風環境を知る目的で、強風で知られるあるダム建設現場のダム天端中央の下流側端付近において風速を3成分ギル型風速計により計測した。1994年11月～12月のデータを、評価時間3秒として風速と迎角の関係でまとめたのが図-8である。低い風速では非常に

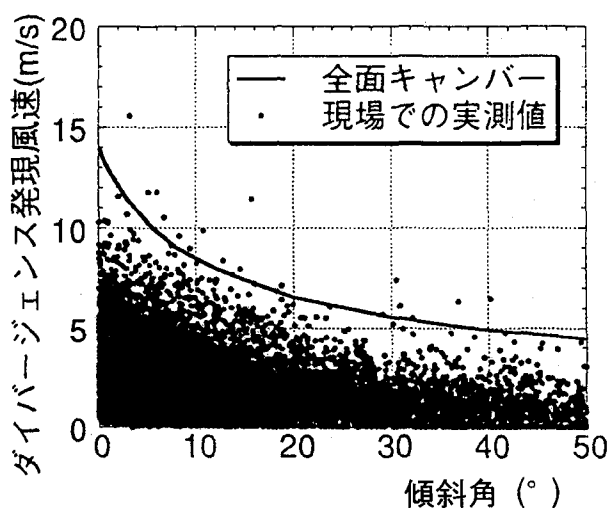


図-8 傾斜角と風速の関係

大きな迎角になりうるが、風速が10m/sを越えるような強風では迎角は概して小さくなっている。なお評価時間は、ダイバージェンス発現に要する時間に基づいて決定すべきものであるが、風洞実験においてその時間の測定は行っていない。ただし、現地における時間3秒は風洞実験では約0.5秒に対応しており、ダイバージェンス発

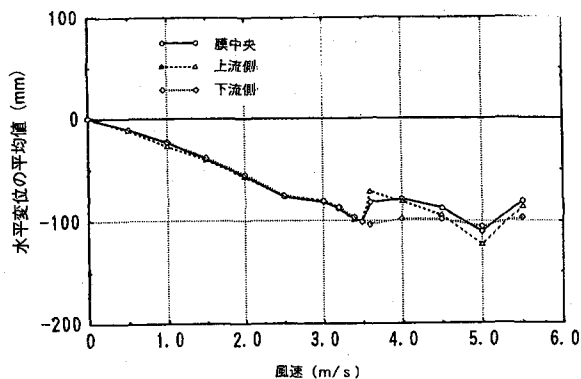
現に要する時間はほぼこれ以上と考えている。

図-8には併せて、全面キャンバーを仮定した安全側の解析値を示している。ダイバージェンスの起こる頻度はそれほど大きくないことがわかる。

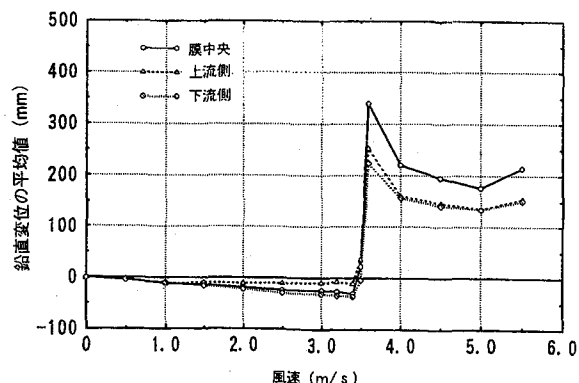
しかし、ダイバージェンスがひとたび生ずれば、ケーブルの破断につながる可能性が大きく、何らかの安定化対策を考えておく必要性は高いと考えられるので、次節において検討を行う。

5.2 安定化対策

まず、模型吊膜の4隅に風洞床から鉛直に補助ケーブルをつけて反力をとったケースに対して実験を行った。サグ比1/8.5、傾斜角0°、吊膜設置位置中央のケースについて、水平・鉛直変位の平均値を図-9に、r.m.s.を図-10に、それぞれ示す。このようにアンカーを設けることにより、高風速(図において実験風速3.6m/s以上)において膜が上に凸の状態になっても、ダイバージェンスの発現は防がれる。図-10をみると、ダイバージェンス発現直前の3.5m/sにおいて鉛直変位のr.m.s.だけが特異的に大きくなっているが、これは膜面のゆっくりとした上下振動であった。風速3.6m/sにおいてダイバージェンスが発現するとこの振動は一旦おさまるが、さらに風速が高くなると、膜面のフラッターが発現している。このように、1) 膜面のフラッターが発生すること、また、

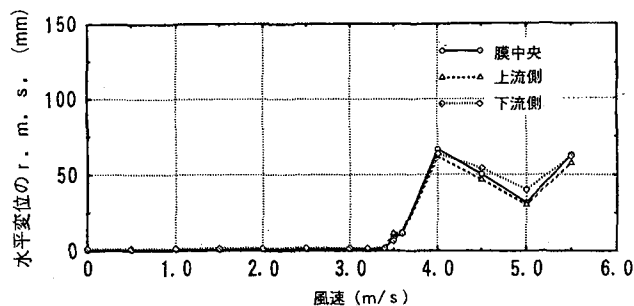


(a) 水平変位

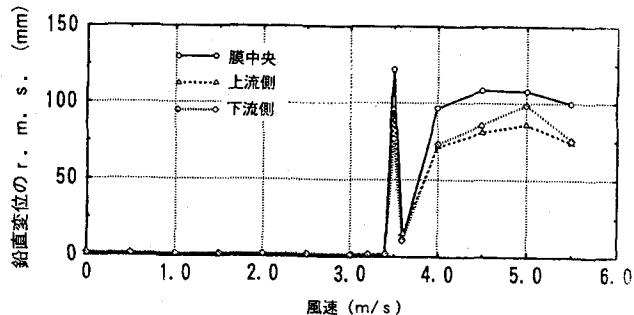


(b) 鉛直変位

図-9 4隅に補助ケーブルをつけた場合の膜の変位の平均値(模型実験値)



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位

図-10 4隅に補助ケーブルをつけた場合の膜の変位のr.m.s.(模型実験値)

2) 張力の測定結果によると、補助ケーブルに作用する張力の最大値が、主ケーブルの1/3～1/2程度と大きく、反力をとるのが現場では難しい、といった問題があることがわかった。

次に、吊膜の隅に重りをつける方法を試みた。実物換算で1個4.8tの重りを上流側の2隅にそれぞれつけたところ、サグ比1/11、傾斜角 0° 、吊膜設置位置中央のケースにおいて、ダイバージェンス発現風速が29m/sと改善された。しかし、同じ重りを4隅にそれぞれつけたところ、ダイバージェンス発現風速は23m/sとなり、あまり有効ではなかった。これは、上流側2隅に重りをつけた場合には、膜のねじれ変位によって迎角が負になる効果があるが、4隅に重りをつけるとこのような効果がなくなるためと考えられる。ただし、4隅に重りをつけたことによる復元力の増加から予想される発現風速は26m/sであり、実験結果とは一致しておらず、この原因についてはさらに検討が必要である。いずれにせよ、前もって風向を予測して上流側に重りをつけておく、という対策は、実際には適用が難しいと考えられる。

さらに、膜の上下流両側に補助翼をつけたケースを試みた。傾斜角 0° の場合には発現風速が30m/sを越え、効果が大きかったが、傾斜角が 6° になると発現風速は16m/sと低くなるため、これも適用が難しいことがわかった。

結局、有効であったのは、膜の位置で2本の主ケーブルをスパン方向にわたって一体化し、膜を重ねて小さく折りたたむ方式であった。折りたたむ場合でも、4つ折り（膜は主ケーブルの下に $25\text{m}/4=6.3\text{m}$ 垂れ下がる）では風により全体が大きく振動してしまうため、8つ折り（3.1m垂れ下がる）にする必要があった（図-11）。この方式は、強風が予想される場合には防雨をあきらめる、というものである。

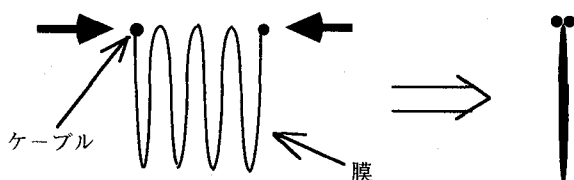


図-11 膜の折りたたみ（断面図）

6. まとめ

ダム施工時の防雨を目的とした吊形式膜屋根の対風挙動の風洞実験による検討を行ない、ダイバージェンスが最もクリティカルな現象であること、その限界風速はある程度予測可能であることを示した。安定化対策についても検討を行ったが、補助ケーブルを用いて反力をとった場合の挙動は複雑であった。強風時にケーブルに過大な張力が作用するのを防ぐためには、膜を折りたたんでしまうことが有効であることがわかった。

本システムは架設時のみに用いること、強風が予想される場合にはあらかじめ膜屋根をたたんでおくことができることなどを考えると、実際のダム現場に用いた場合の、ダイバージェンス発生確率は高くなく、何らかの安定化対策が見出せば、採用可能と考えられる。しかし、簡便な安定化策を見出すこと、強風の予測に基づいた吊屋根の運用計画の立て方など、安全なシステムとして確立するためには課題も多い。

謝辞

本研究を行うにあたり、日本大学・野村卓史助教授、九州産業大学・吉村健教授、京都大学防災研究所・奥田泰雄助手、東京大学生産技術研究所・半谷裕彦教授、太陽工業・小田憲史氏、田波徹行氏から貴重なご助言を頂きました。また本研究の一部は、能村膜財団からの補助を受けて実施されました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫：一様流中に懸垂した膜のフラッターの近似解析、日本風工学会誌、No. 64、pp. 29-38、1995.
- 2) 三宅昭春、吉村健：吊膜屋根の空力弾性振動に関する基礎的研究、第2報・渦放出と励振発生の関係について、日本建築学会構造系論文報告集、第438号、pp. 39-48、1992.
- 3) 牧野光雄：航空力学の基礎、産業図書、1980.

(1995年9月18日受付)