

実構造物における膜パネルのリラクゼーション計測

坪田 張二^{*1}
日下 彰宏^{*2}
石田 雅利^{*3}
工藤 邦昭^{*3}
瀬戸 裕^{*4}

梗概

膜材料はリラクゼーションが避けられないため、恒久膜構造物では、その対策として膜張力を再導入する機構が設けられるのが一般的である。しかし、実構造物におけるリラクゼーションについては、実測データが少なく精度良く予測することが困難なため、こうした張力再導入機構の設計や再導入時期などは経験や勘に頼っているのが現状である。本研究では、リラクゼーションを予測する際の基礎データを蓄積し今後の設計資料の一助とするため実構造物に対して定期的に膜張力を計測した。計測対象は、1998年に熊本県に竣工した陸上競技場に設置された押さえケーブル付テンション膜構造の膜屋根パネルである。計測項目は、膜張力のほか、膜ひずみ、押さえケーブル張力で、膜展張、ケーブル張力導入時など主要な作業時と、膜屋根パネル完成直後、完成45日後、完成1年後に実施した。計測結果として、竣工1年で膜張力は縦糸(warp)方向が約80%、横糸(fill)方向が約90%に減少した。また膜張力の低下は膜材料のリラクゼーションの他に、押さえケーブル張力の低下やそれに伴う膜形状の変化なども一因として考えられる。

1. はじめに

膜材料は経時変化により膜張力が低下するリラクゼーションが避けられない。こうしたリラクゼーションに関する研究としては、これまでに南ら¹⁾による1軸あるいは2軸応力状態での室内実験、また加藤ら²⁾による織構造格子モデルを用いて構成則を定式化した数値シミュレーションなどが行われてきた。しかしながら、実際の膜構造物の、とくに使用期間全体にわたる比較的長期間のリラクゼーションについては、実測データが非常に乏しく実状はよくわかっていない。そのため恒久膜構造物では、一般的にリラクゼーション対策として膜張力を再導入する機構が設けられているものの、リラクゼーションを精度よく予測することが難しいため、これら張力再導入機構の設計や張力再導入時期などは経験や勘に頼らざるを得ないのが現状である。そこで本研究では、膜構造物をより合理的に設計、施工、管理するため、実構造物におけるリラクゼーションの基礎資料を蓄積すべく、熊本県に建設された陸上競技場の膜屋根パネルを対象に膜張力などを計測した。膜材料のリラクゼーションの継続期間がよくわかっていないため、十分な計測期間を定めることは難しいが、ここでは、これまでに蓄積した建設途中から膜屋根竣工1年経過までの計測結果を、基礎データとしてまとめて報告する。

2. 計測内容

2.1 計測対象

計測対象とした構造物は、熊本県熊本市に1998年に竣工した熊本県民総合運動公園陸上競技場³⁾(以下、熊本陸上競技場と記載)で、図1に示すようにメイン、サブそれぞれのスタンドに膜屋根が架けられている。膜屋根形状は図2に示すように、鉄骨骨組にA種膜材料である四フック化エチレンコーティングガラス繊維膜を張り押さえケーブルを配したテンション膜パネル27枚で構成される。計測はメインスタンド側の膜屋根パネルのうち対称性をもつ中央の膜パネルを対象とした。

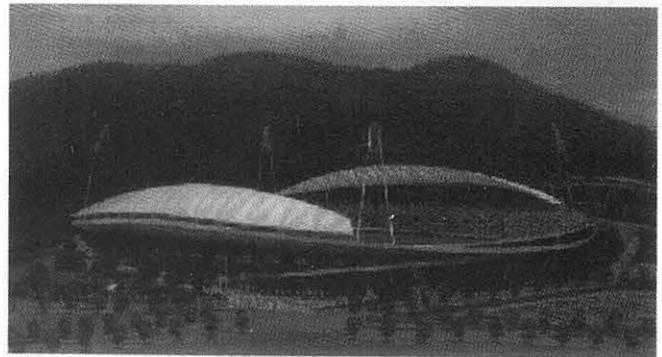


図1 熊本県民総合運動公園陸上競技場

*1. 鹿島建設(株)技術研究所・工博 *2. 同・技術研究所 *3. 同・情報システム部 *4. 同・設計/エンジニアリング本部

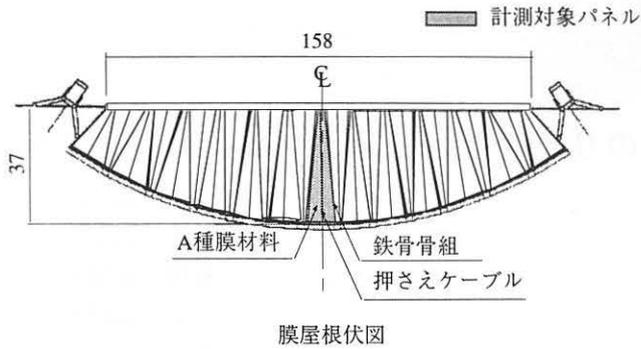


図2 膜屋根形状

2.2 計測時期

膜工事は、膜の展張、押さえケーブル設置、ケーブル張力導入の順で行い、完成まで数日から数週間の時間がかかるため、施工中にも膜材料はリラクゼーションが生じている。リラクゼーションは、とくに展張やケーブル張力導入など膜材に新たな張力が導入された直後に著しいので、これを考慮して、実際の施工では、膜を展張したあと数日間放置して、膜に比較的大きなリラクゼーションを経験させてから再び設計膜張力まで膜張力を導入することが多い。

本研究で対象とする使用期間を含めた長期的な膜張力を予測するには、その基準となる竣工直後の膜張力を評価するために施工中のリラクゼーションも精度よく計測しておくことが重要である。そこで本計測では、膜展張、ケーブル張力導入など施工の主要段階を含め、竣工直後、膜工事竣工45日後、同1年後に計測を実施した。

2.3 計測方法

計測項目は、膜張力、膜ひずみ、押さえケーブル張力とした。膜張力は、吸引型の膜張力計測器⁴⁾により計測した。この計測原理を図3に模式的に示す。すなわち膜面に伏せられた容器内を減圧すると、容器底面で囲まれた膜面には等分布面外力が作用し、面外変形 δ が生じる。面外変形 δ は膜張力 T に依存するから、このとき容器内の中央部の面外変位 δ を計測し、文献4で得られている同材料の変位 δ と膜張力 T の関係に照合することで膜張力を推定する。材

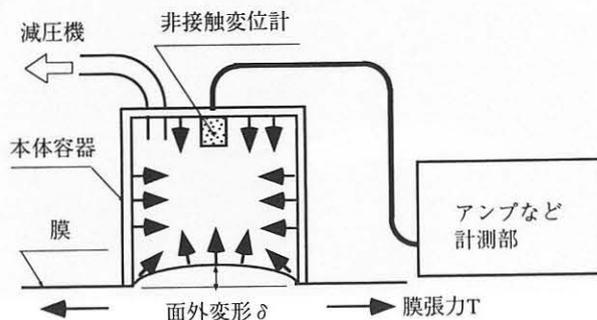


図3 膜張力計測原理

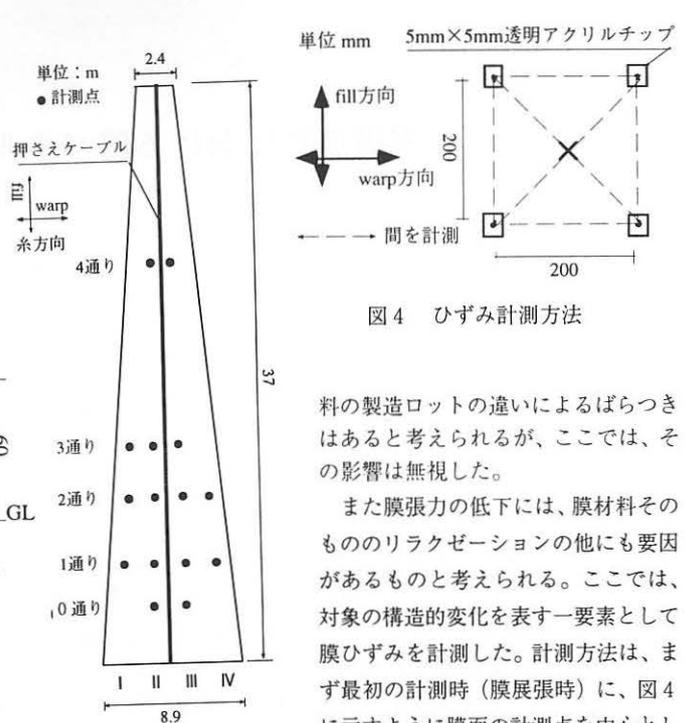


図4 ひずみ計測方法

図5 計測位置

料の製造ロットの違いによるばらつきはあると考えられるが、ここでは、その影響は無視した。また膜張力の低下には、膜材料そのもののリラクゼーションの他にも要因があるものと考えられる。ここでは、対象の構造的変化を表す一要素として膜ひずみを計測した。計測方法は、まず最初の計測時(膜展張時)に、図4に示すように膜面の計測点を中心とした1辺20cmの正方形の4隅の位置に5mm角のアクリル製マーカーを貼付する。以後の計測ではマーカー間の距離をノギスで計測して、その変化量をひずみとした。その際、縦糸(warp)方向、横糸(fill)方向、せん断方向のひずみをそれぞれ ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{xy} で表し、 ϵ_x はwarp方向の2つの辺長の変化の平均、 ϵ_y はfill方向の2つの辺長の変化の平均とした。また ϵ_{xy} は4つのwarp方向、fill方向、対角方向の組み合わせから求めたせん断変形角の平均とした。

図5に膜張力と膜ひずみの計測箇所を示す。竣工後の計測では、足場設置上の問題などにより計測を省略した箇所もある。また膜張力と膜ひずみは原則として同一位置で計測した。

押さえケーブルの張力は、張力導入時に張力導入に用いた油圧ジャッキの油圧ゲージ値をもとに押さえケーブル張力を算定して記録した。

3. 計測結果

膜張力の計測結果を表1にまとめる。

膜屋根の施工中計測は、膜展張後(展張後約1カ月経過)の1997年8月26日、押さえケーブル張力導入直前の9月30日、押さえケーブル張力導入直後の10月6日に実施した。なお8月26日時点では、押さえケーブルは設置されておらず、9月30日時点では押さえケーブルが仮止めされていた。

膜屋根竣工(押さえケーブル張力導入)以後の膜張力は、膜屋根竣工45日経過後の11月20日、約1年経過後の1998年9月12日に計測した。なお45日経過後の計測は、0~2通り、1年経過後の計測は、0通り及び1通りの計測とした。

竣工時の平均膜張力は、warp方向387kgf/m、fill方向374kgf/mで、設計膜張力300kgf/mに対し、やや高めの数値であるが、今後のリラクゼーションを考慮すれば、適正な施工ができているといえる。

表1 膜張力計測値一覧

位置	計測日	1997				1998
		8/26	9/30	10/6	11/20	9/12
		施工中		竣工	45日後	1年後
	押さえケーブル張力	0*	2.8*	5.5*	-	-
0-II	warp	241	-	378	367	288
	fill	351	-	399	390	363
0-III	warp	287	-	388	362	300
	fill	367	-	400	383	362
1-I	warp	249	279	378	379	-
	fill	274	359	382	385	-
1-II	warp	211	251	366	362	300
	fill	311	368	393	382	359
1-III	warp	186	248	369	365	291
	fill	287	366	389	364	360
1-IV	warp	322	276	372	362	-
	fill	272	382	388	392	-
2-I	warp	195	250	377	362	-
	fill	259	356	379	378	-
2-II	warp	184	238	358	357	-
	fill	290	363	379	376	-
2-III	warp	172	184	357	369	-
	fill	280	367	389	385	-
2-IV	warp	210	266	378	350	-
	fill	280	361	386	382	-
3-I	warp	193	264	375	-	-
	fill	274	295	378	-	-
3-II	warp	177	208	360	-	-
	fill	275	362	380	-	-
3-III	warp	205	219	382	-	-
	fill	270	358	388	-	-
4-II	warp	188	255	381	-	-
	fill	258	357	383	-	-
4-III	warp	199	282	388	-	-
	fill	279	364	393	-	-

*を付した押さえケーブル張力の単位は (tf)
その他の値は膜張力を表し、単位は (kgf/m)

また1通り及び2通りについて、ひずみ計測結果を表2に示す。
計測誤差や計測位置によるばらつきがあるが、押さえケーブル張力に導入する過程で、一部を除きとくにwarp方向のひずみが増加している。また竣工後は、わずかにひずみが戻る傾向がみられる。

4. 考察

4.1 膜張力の変化

各計測値を1997年10月6日の膜張力、すなわち竣工時の膜張力で除して無次元化し、それらの各計測時点における平均値を糸方向別に求めた。これらを表3に示す。表3から、竣工から1年間で膜張力はwarp方向、fill方向、それぞれ79%、91%に低下し、warpがfillよりも張力低下が大きかったことがわかる。

一方、本膜パネルは図4に示したように細長であること、長辺方向に押さえケーブルが配され、短辺方向にwarpを用いていることから、押さえケーブル張力が膜張力に与える影響はwarpの方が大きいと考えられる。このことは表3において、押さえケーブルが仮止め状態の2.8tfから竣工時の5.5tfまで導入される過程、すなわち押さえケーブルに比較的大きな張力が導入されている場合に確認すること

表2 ひずみ計測値一覧

位置	計測日	1997				1998
		9/30	10/6	11/20	9/12	
		施工中		竣工	45日後	1年後
	押さえケーブル張力	2.8*	5.5*	-	-	
1-I	ϵ_x	-0.21	-0.10	-	-	
	ϵ_y	0.00	0.08	-	-	
	ϵ_{xy}	0.17	-0.15	-	-	
1-II	ϵ_x	0.13	-	0.14	0.14	
	ϵ_y	-0.06	-	0.13	0.13	
	ϵ_{xy}	-0.19	-	0.00	-0.21	
1-III	ϵ_x	0.06	0.34	0.24	0.24	
	ϵ_y	0.05	-0.17	0.08	0.08	
	ϵ_{xy}	-0.08	-0.13	0.00	0.04	
1-IV	ϵ_x	0.46	0.53	0.48	0.48	
	ϵ_y	0.02	0.01	-0.06	0.05	
	ϵ_{xy}	0.01	0.01	0.00	0.00	
2-I	ϵ_x	0.00	0.02	-	-	
	ϵ_y	0.01	-0.05	-	-	
	ϵ_{xy}	0.01	-0.02	-	-	
2-II	ϵ_x	0.07	0.18	0.09	-	
	ϵ_y	0.08	-0.02	-0.09	-	
	ϵ_{xy}	0.01	-0.25	0.00	-	
2-III	ϵ_x	0.11	0.27	0.17	-	
	ϵ_y	-0.02	0.06	0.15	-	
	ϵ_{xy}	-0.09	-0.05	-0.04	-	
2-IV	ϵ_x	-0.07	0.68	0.31	-	
	ϵ_y	0.18	0.08	-	-	
	ϵ_{xy}	0.02	-0.01	-	-	

数値は膜展張時(1997/8/26)からのひずみ変化量を表す。
 ϵ_x :warp方向ひずみ ϵ_y :fill方向ひずみ ϵ_{xy} :せん断方向ひずみ
*を付した押さえケーブル張力の単位は (tf)
その他の値はひずみ変化量を表し、単位は (%)

ができる。また表2のひずみ変化をみると、竣工後にわずかながらwarp方向のひずみが減少する傾向がうかがえる。測定点数が少ないことから推測の域を出ないものの、ここでの糸方向による膜張力の低下速度の違いは、押さえケーブルの張力変化などを原因とする膜ひずみの変化を伴う膜張力の低下が影響していると考えられる。

表3 無次元化した膜張力の平均値

計測日	1997				1998
	8/26	9/30	10/6	11/20	9/12
	施工中		竣工	45日後	1年後
押さえケーブル張力	0	2.8	5.5	-	-
warp	0.57	0.66	1.00	0.98	0.79
fill	0.74	0.93	1.00	0.98	0.91

押さえケーブル張力の単位:tf

4.2 膜張力分布の変化

膜張力分布のばらつきをみるため、各計測で得た膜張力について、糸方向ごとに標準偏差を平均値で割った変動係数を表4に示す。

表4からわかるように、膜展張作業など施工途中での膜張力のばらつきは比較的大きいが、ケーブル張力が導入され完成形に近づくと膜張力のばらつきが小さくなる。また竣工後、時間の経過によってもなつて膜パネル内で応力が分配され、膜張力が均一化する。

表4 膜張力の変動係数一覧

計測日	1997				1998
	8/26	9/30	10/6	11/20	9/12
	施工中		竣工	45日後	1年後
押さえケーブル張力	0	2.8	5.5	—	—
warp	0.193	0.113	0.026	0.020	0.018
fill	0.105	0.054	0.018	0.020	0.004

押さえケーブル張力の単位：tf

5. まとめ

さまざまな膜構造物のリラクゼーションを予測する際の検討資料の一助とする基礎データ収集を目的に、熊本に建設された陸上競技場における膜屋根パネルの膜張力などを、施工時から膜屋根竣工後1年にわたり定期的に計測した。得られた計測結果及び知見を以下にまとめる。

- 1) 竣工1年で膜張力はwarp方向が約80%、fill方向が約90%に減少した。
- 2) 竣工後は膜張力のばらつきは小さく、さらに時間の経過とともに均一に近づく。
- 3) 熊本陸上競技場の膜張力の低下は、膜材料のリラクゼーションの他に、押さえケーブル張力の低下なども一因として考えられる。したがって、今後さまざまな構造物の膜張力の低下を予測する際には、膜材料のリラクゼーションに加え、対象構造物の構造的特徴を考慮する必要があると考えられる。

6. 謝辞

本計測にあたり京都大学工学研究科上谷教授、大崎助教授には、御助言を、また両研究室の学生の皆様には御協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 南宏和、豊田宏、瀬川信哉：膜構造用材料であるコーデッド平織物の1軸・2軸応力状態での応力緩和とクリープの特性、日本建築学会構造系論文集、pp.1-pp.9、第408号、1990年2月。
- 2) 加藤史郎、南宏和、吉野達矢、並田忠政：粘性特性を考慮した織構造格子モデルによる構成方程式—クリープ及び応力緩和試験の数値シミュレーション—：膜構造研究論文集 '96、No.10、pp.29-pp.43、1996年12月。
- 3) 原克巳、鶴岡邦夫、五十子幸樹：プレストレス吊り構造の設計（その1）構造設計概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、pp.813—pp.814、1997年9月。
- 4) 佐々木直也、坪田張二：膜張力計測システムの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.2695—2696、1993年9月。

Measurement of relaxation of membrane on an actual structure

Haruji Tsubota^{*1}, Akihiro Kusaka^{*2}, Masatoshi Ishida^{*3},
Kuniaki Kudo^{*3}, Yutaka Seto^{*4}

SYNOPSIS

Membrane material has a significant relaxation characteristic. Therefore, in general, permanent membrane structures are required to install special devices for reintroducing membrane tensile stress. However, enough data to estimate the relaxation characteristic are not available. As the result, it is very difficult to prescribe the specification of such devices and the time for re-tensioning. Therefore, it is very important to accumulate actual data of the relaxation characteristic for developing the rational design and maintenance method of membrane structures. From this background, this paper presents the measured relaxation data of an actual membrane structure. The measurements were carried out on one roof membrane panel of Kumamoto stadium completed at Kumamoto city in 1998. The measured membrane panel was surrounded by steel frames and has a bracing cable. Membrane stresses, strains and cable force were measured at main processes of construction, at just after, at 45 days after and one year after completion.

From the measured results, the membrane stress decreased to 80% in warp direction, 90% in fill direction at one year after completion. Furthermore, it is considered that the decrease of membrane stress is caused not only by relaxation of membrane material itself, but also the change of boundary conditions such as cable tension.

*1 Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng. Kajima Corp., *2 Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp.

*3 Intelligent systems department, Kajima Corp. *4 A/E, Kajima Corp.