

膜材の織布特性を考慮した縮小率の設定方法

小竹 達也*1
菊嶋 誠 *2
西川 薫 *3

梗 概

現在、膜材の縮小率は二軸引張試験結果により経験的に決められている。そのため建設後の膜材料のリラクゼーションあるいはクリープ現象により膜材の初期張力が低下し、膜張力を再導入する場合がある。

本報では、膜材料の粘弾性、織布特性を一軸試験結果を基にした織布モデルで捉え、これを基にリラクゼーション後にも初期張力を保存できるような膜材立体裁断時の縮小率の設定方法について述べ、また、その値を適用したモックアップについての解析及び観測についても報告する。

1. はじめに

1.1 研究の目的

現在、骨組膜構造物において建設後、数年のうちに膜材の初期張力が低下し、張力を再導入する場合がある。これは、膜材料のリラクゼーションあるいはクリープ現象により生じると考えられる。

そこで、その防止を目的に膜材パネルを縮小して製作し、これを展張して骨組に取り付けている。この立体裁断製作上の縮小の比率を縮小率と言うが、現況は二軸引張試験等をベースに経験的に決められており、必ずしも実態に合った値が設定できていない。

著者らは、これら一連の応力緩和の現象をコーティング材そのものの粘弾性的特性から生じるものと考え、これを織布と分離して歪み挙動を捉えることができる織布モデルを用いて縮小率の設定を試みた。

また、この設定方法に基づいた膜屋根の初期張力の変化を調べるため、実構造物のモックアップを製作し、この織布特性を考慮した要素による数値解析並びに張力測定を行った。

1.2 これまでの縮小率の設定方法

これまでの膜材の縮小率設定の例として、図-1に示すように使用膜材を二軸引張試験機でタテ・ヨコ糸方向に所定の応力比で3回引っ張り、この時の膜の応

力-歪み関係より設定する方法がある。すなわち、二軸引張試験結果から設計初期張力200kg/mでのタテ・ヨコの歪みを読み取り (A点での歪み)、この時の歪みを基に膜の縮小率を決めている。また、この歪みでの最初の載荷ステップに発生した応力 (B点での応力：施工時張力) が、施工限界張力を超えないことも設定条件としており、これを超えた場合には縮小率の調整を行っている。

しかし、二軸引張試験は時間・手間を要し、サンプル数が限られるためコーティング材のクリープ現象や膜材データのばらつきを十分に捉えきれない等の問題を持っている。

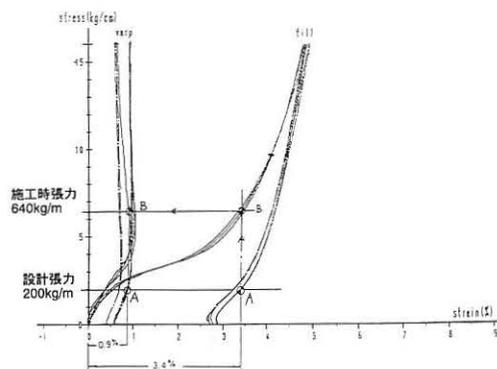


図-1 従来の縮小率の設定方法

*1 大成建設(株) *2 太陽工業(株) *3 大成建設(株)・工博

2. 膜材の材料特性

2.1 一軸及び二軸引張試験

本報では、試験の容易な一軸試験を基に織布モデルを構築し、膜材の織布特性を捉えることにしているが、その評価の確認の意味で並行して二軸試験を行っている。

一軸試験は、膜材ロッドの3つの位置からそれぞれタテ・ヨコのストリップ状の試験体3体を採用し、それに一軸の繰り返し载荷を行った。

また、各サンプリング位置近傍で二軸試験体を採用し、これに対し、1:0、1:2、1:1、2:1、0:1の5種の荷重比を実施した。荷重はコーティング材の粘弾性を考慮して同一荷重の3回の繰り返し载荷とし、荷重比の変更時には日本膜構造協会の文献³⁾に準じてクリンプ状態を整える目的で1:1の荷重比を1回行った。試験体寸法を図-2に、一軸試験結果の例を図-3に示す(二軸試験結果は図-11を参照)。

2.2 コーティング材の物性評価

膜材は織布をコーティング樹脂の複合材料であり、応力歪関係においてそれぞれが互いに影響し合うため、コーティング材のみの物性を膜材から分離して取

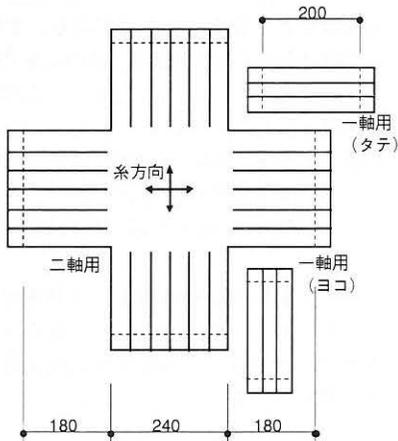


図-2 一軸及び二軸試験体寸法

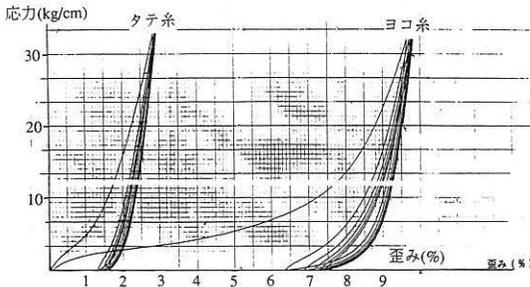
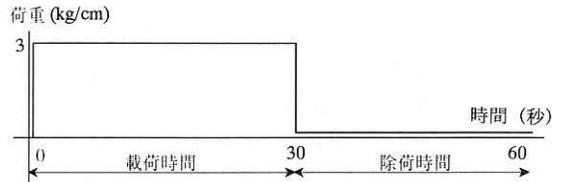


図-3 一軸引張試験結果

り出すことは一般には難しい。しかし、膜材の製作過程から生じる特性として、ヨコ糸方向は一般に織糸の緩みが大きい(図-3)。このため、歪レベルの低い段階ではコーティング材がほとんど応力負担をしていると考えられる。そこで、ヨコ糸方向の低歪状態の応力-歪関係をもってコーティング材の物性評価を行った。また、粘弾性が予測されるため、定荷重载荷と除荷における一連の歪の時刻歴変化を調べた。図-4、5に試験条件と結果を示すが、粘弾性性状を明らかに示している。

そこで、試験結果より図-6に示した $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c, t_k$ を読み取り、粘弾性常数を求めた。



・試験片：幅30mm、チャック間内法長さ200mm

図-4 膜材の粘弾性評価試験条件

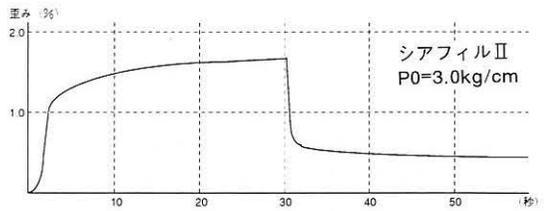
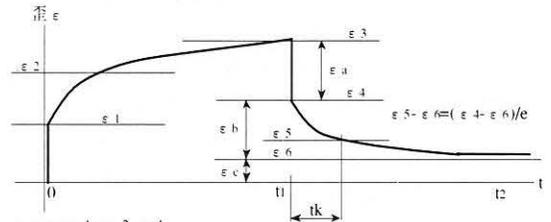
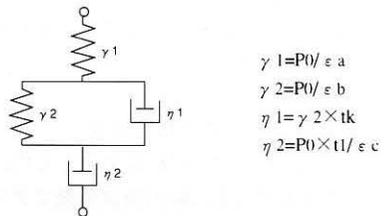


図-5 膜材の粘弾性評価試験結果



- ・ $\epsilon_a = \epsilon_1 = \epsilon_3 - \epsilon_4$
- ・ $\epsilon_b = \epsilon_2 - \epsilon_1 = \epsilon_4 - \epsilon_6$
- ・ $\epsilon_c = \epsilon_3 - \epsilon_2 = \epsilon_6$

図-6 粘弾性常数



- $\gamma_1 = P_0 / \epsilon_a$
- $\gamma_2 = P_0 / \epsilon_b$
- $\eta_1 = \gamma_2 \times t_k$
- $\eta_2 = P_0 \times t_1 / \epsilon_c$

図-7 リラクゼーションモデル

2.3 リラクゼーション解析

先に求めた粘弾性常数を用いて、コーティング材を図-7のような4要素の粘弾性モデルに置き換えた。このモデルを用いて、リラクゼーション解析を行った結果を図-8に示すが、存在応力が短時間に急激な降下を示している。また、図-9に緩和弾性率を示す。これも当然のことながら急激な減少が見られる。これらから、長期荷重下においてはコーティングの応力負担は著しく小さくなることが予測される。

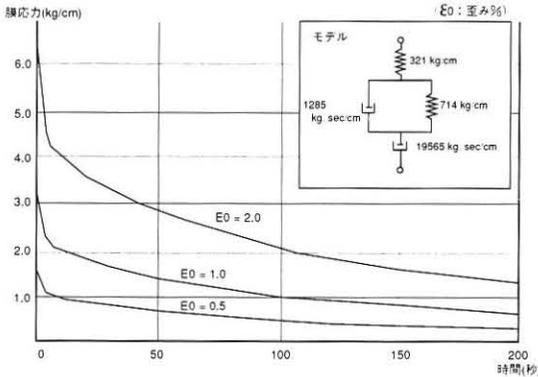


図-8 コーティング樹脂における E_0 下のリラクゼーション状況

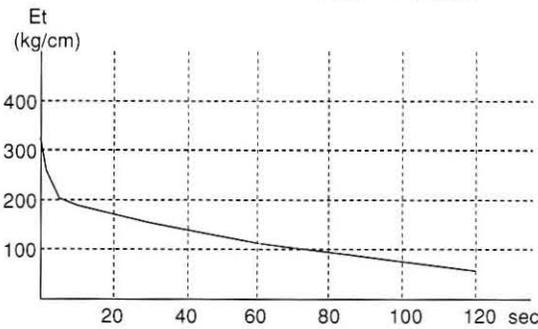


図-9 緩和弾性率

3. 織布モデルによる縮小率の設定方法

3.1 織布モデルの構成

膜材の計測並びに前記一軸試験結果等より、織布(織糸)モデルの諸常数を次のように設定した。

膜材名称：シアフィルⅡA

糸密度：タテ糸 20.8本/2.5cm

ヨコ糸 19.2本/2.5cm

初期伸び：タテ糸方向 0.015

ヨコ糸方向 0.058

糸厚さ：0.022 cm

糸剛性：500.0 kg/本

コーティング材：60.0 kg/cm

3.2 織布モデルによる二軸荷重シミュレーション

図-10に表わすような織糸を直線置換した織布モデル²⁾に対し先の織布モデル常数の値を代入し、二軸荷重下の応力-歪関係を算定した。結果を図-11に示すが、材料試験結果と近似しており、織布モデルが膜材の織布特性を良く表わしていることが判る。

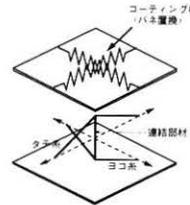


図-10 織布モデル(直線置換モデル)

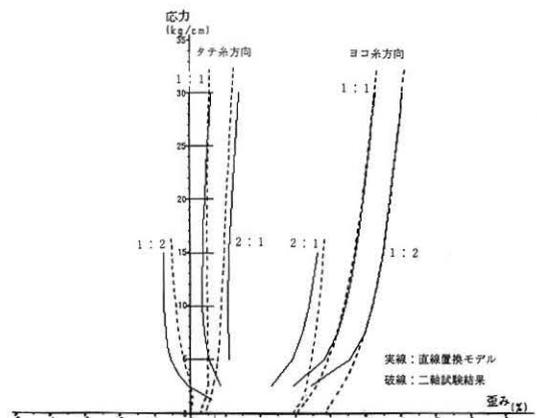


図-11 解析モデルの応力-歪み関係

3.3 膜材の縮小率の設定

先の織布モデル常数より想定した初期応力が膜材に生じるような膜材裁断加工時の縮小率を設定する。この際、長期荷重下においてはコーティング材の負担応力が著しく低下することが予測されるため、織布の応力状態をもって初期応力を評価した。図-12に今回想定した織布モデルによるクリンプ平衡図を示す。これ

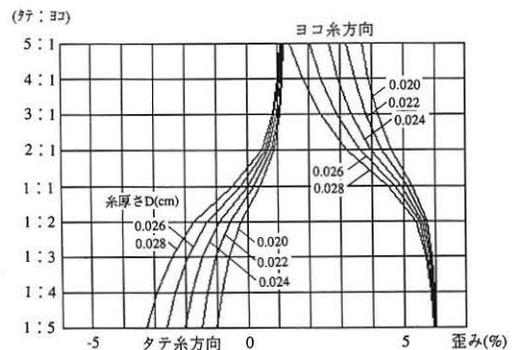


図-12 クリンプ平衡図

は、タテ糸とヨコ糸の応力比とクリンプ平衡状態時の各糸方向の歪みの関係を示したものであるが、これより膜パネル展張の際の施工性を考慮し、今回タテ・ヨコの応力比が2.5:1のクリンプ状態を想定し、縮小率をタテ糸方向0.5%、ヨコ糸方向4.0%とした。

3.4 初期張力解析

織糸モデルの応力-歪関係を基本にした織布要素とコーティング要素からなる有限要素法²⁾による初期張力解析を行った。解析は形状解析により設定された初期形状に対し、立体裁断時の縮少率に応じた初期部材長を要素に与えて行った。結果として今回設定した縮小率では、織布が両方向とも応力負担をしている状況がつかめた(図-13)。

ただし、今回はタテ・ヨコの応力比が2.5:1のクリンプ状態を想定したのだが、そのような結果になっていないのは、カタナリーロープ及び引き込みロッドの弾性変形により膜パネルの谷部が想定した位置まで引き込まれていないためタテ糸方向に想定した張力が入らなかったためであり、所定の位置まで引き込めばタテ・ヨコの応力比は2.5:1となる(図-14)。

また、膜応力は織布要素応力とコーティング要素応力の和で表わされるが、このコーティング要素の弾性常数は約120秒の緩和弾性率に相当し以後、弾性率は低下するためリラクゼーションが生じ、膜応力は織布の応力に近づくと考えられる。

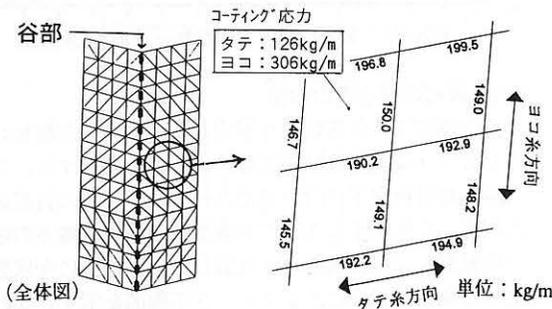


図-13 織布膜解析による織布の応力状況

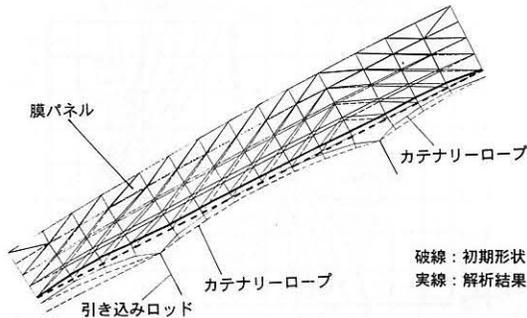


図-14 解析による膜パネル谷部引き込み状況

4. モックアップ試験体における実験報告

4.1 実験概要

- (1) 実験場所 北海道札幌市内
(仮称)札幌コミュニティドーム建設地
- (2) 日時 1995年12月21日~1996年4月2日
- (3) 試験体 本体建物のうち2スパン・2グリッド分を切り取った部分を対象にモックアップを行った。全体概要を図-15に示す。膜パネルは、実際の建物で使われる上・下弦材と、膜が連続的にあるものとみなした上下のV字の切り口を固定境界とした鉄骨とで膜の外周境界を形成した。

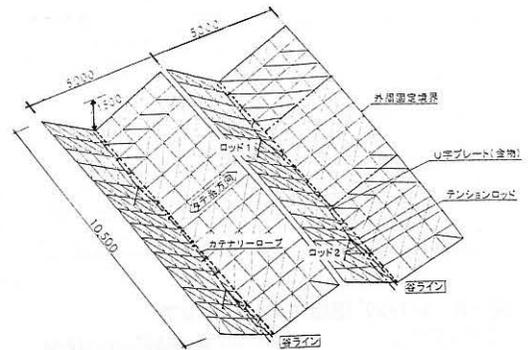


図-15 全体概要図

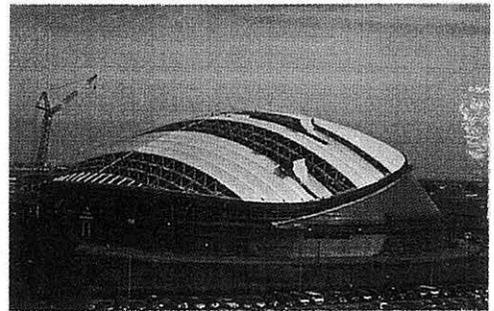


写真-1 ドーム全景(建設中)



写真-2 モックアップ試験体

実際には、この時点で、膜の谷部の寸法を測定したところ、中央付近で設計値まで約45mm引き込まれていないことがわかり、翌1996年1月16日に、再度、調整を行った。このとき、膜面上にプロットした標点間距離も、208mm（ヨコ糸4.0%相当）の設計寸法まで伸びている事を確認している。図-19,20に1/16から4/2までのロッド1、2のリラクゼーションの経過を示す。また、図-21は、解析結果から想定されるロッドと膜張力の関係より、ロッド張力値を膜張力値に換算したものである。2回目の張力導入直後のロッドの値は、No.1で1242kg、No.2で931kgを示していたものが、4/2の時点では、No.1で810kg、No.2で588kgまで低下していた。2回目の張力導入値から3ヶ月の間に膜張力は、約35%低下した。

4.3 考察

今回の実験では、膜展張後、'95/12/22~'96/1/16の間に外荷重（雪・風等）を受けており、2回目の張力導入の時点で、すでに膜にかなりのリラクゼーションが起こっていたことが予想される。図-19,20のグラフでもわかるように、ロッド張力が平行または、逆に上がっている箇所が多く見られるが、これは、図-22に示すように、膜面に雪が載ったとき、谷部中央が上側に変形して、膜を引き込んでいるロッド張力が増加するためである。実験期間中、膜面上に雪が、かなり頻りに載っていたものと思われる。本来、純粋に無荷重状態から初期張力導入を行った場合、初期張力導入時に発生する力は、今回の測定値よりも大きかったであろうし、リラクゼーションによる低下率も大きかったと推測される。

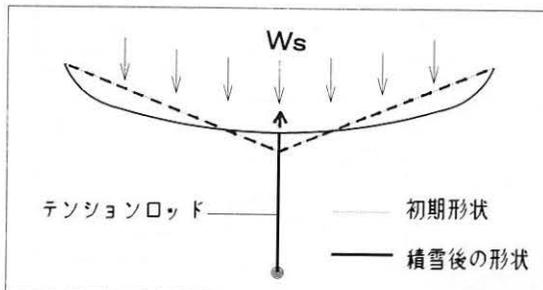


図-22 積雪荷重時の膜面性状

表-1にて、最終（4/2時点）での実験値と解析値との比較を行った。解析結果に対して、実験値が20%程小さい値を示している。これは、昨年度の冬、北海道は、記録的な豪雪に見舞われ、予想以上の負荷が膜にかかったためと思われる。それにもかかわらず、なお設計上、必要な膜応力を保持しており、リラクゼーションを踏まえた膜の縮小率は、適正な値であったと思われる。

表-1 実験値と解析値の比較

	ロッド No. 1	ロッド No. 2	膜張力
1996/1/16の実測値	1242 kg	931 kg	225 kg/m
1996/4/2の実測値 (張力保持率)	810 kg (65.2%)	588 kg (63.2%)	148 kg/m (65.8%)
解析値	950.0 kg	890.6 kg	190 kg/m
実測値/解析値*100	85.26%	66.03%	77.89%

5. まとめ

今回、一軸試験結果をもとにした織布モデルにより立体裁断時の縮小率を設定したが、初期張力解析およびモックアップ試験体による張力試験の結果、その妥当性を検証できた。一軸試験は二軸試験に比べ簡易に試験できることから、サンプル数を増やし、膜材の特性、バラツキをより実状に近い状態で捉えることが可能となり、今後の縮小率の設定に有効な方法であると言える。

今後の課題として、今回の手法による膜の縮小率を採用した場合に発生する大きな施工時張力に対して、膜材の粘弾性を考慮した張力導入機構や張力導入サイクル等、施工方法・管理について、工夫・見直しを行う必要がある。今後さらに、いま一步踏み込んだ検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 西川他「織布特性を考慮した膜材料の構造モデル」日本建築学会大会梗概集、1989
- 2) 西川他「織布特性を考慮した膜構造の非線形解析」日本建築学会大会梗概集、1990
- 3) 日本膜構造協会「設計用膜材料弾性常数試験法案」

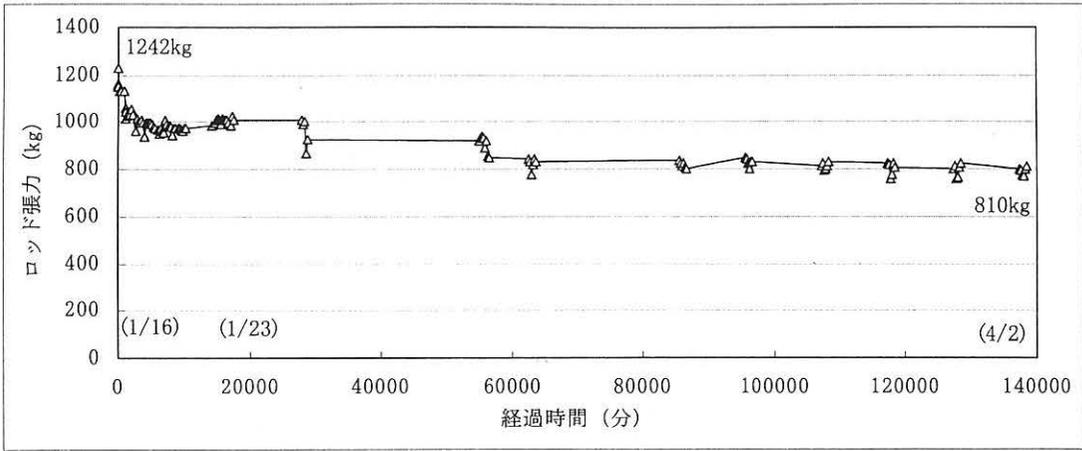


図-19 2回目の張力導入後のロッド1張力の経過

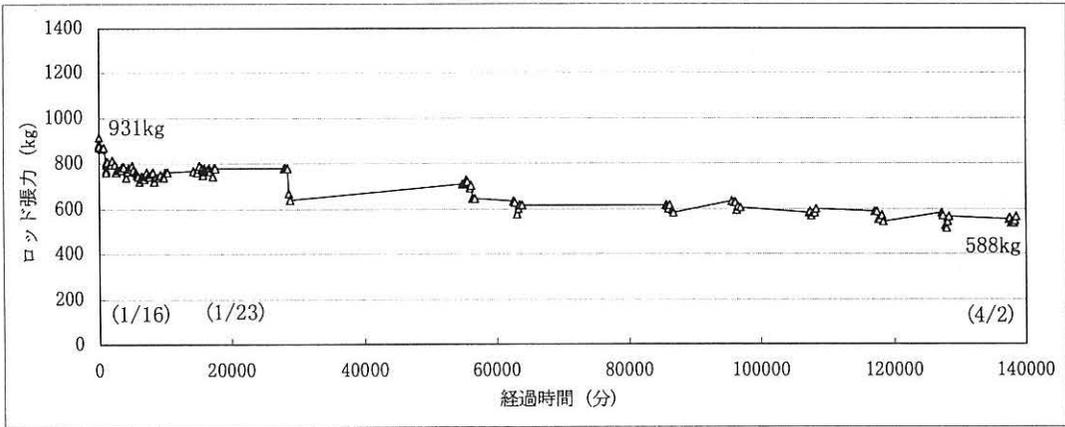


図-20 2回目の張力導入後のロッド2張力の経過

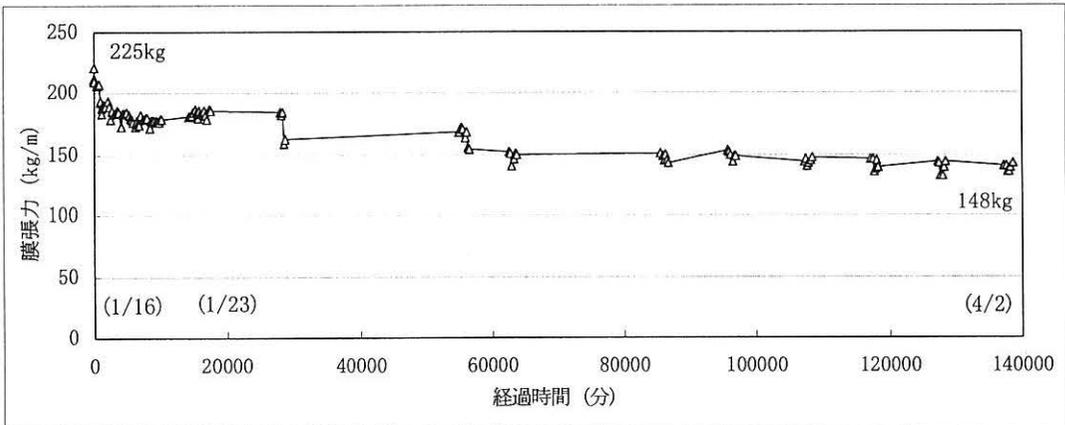


図-21 2回目の張力導入後の膜張力の経過

A STUDY ON COMPENSATION OF MEMBRANE MATERIAL
IN CONSIDERATION OF FABRIC CHARACTERISTICS

Tatsuya Kotake *1
Makoto Kikushima *2
Kaoru Nishikawa *3

SYNOPSIS

At present, a compensation in membrane materials is determined by the result of a biaxial loading test. So, there are some cases that re-tension on fabric is necessary for the relaxation of membrane materials after construction.

This paper deals with the method to set a compensation to keep the initial tension after the relaxation by means of grasping the visco-elasticity and the fabric characteristics by using a model of a membrane material on results of an uniaxial loading test, the analysis and the experiment about a mock-up test structure.

*1 Taisei Corporation.

*2 Taiyo-Kogyo Corporation.

*3 Taisei Corporation, Dr. Eng.