

膜構造建築物の信頼性に関する研究（その2）

（膜材料の破壊力学的考察）

小松 清^{*1}

石井 一夫^{*2}

梗 概

現在、膜構造建築物の大規模化、多様化に伴い構造破壊の予測、防止、検証をするための工学的手法の確立が望まれている。しかし、この分野は、膜構造が恒久的な建築物として利用されるようになってからまだ歴史が浅いということからそれらを論ずる際に必要とされる十分なデータがないのが現状である。本報は、このことをふまえ膜構造建築物を構成する主要なる構造材料である膜材料の破壊性状に関しミクロ、マクロの両面からの研究したもので、膜材料の破損に関する診断のための基礎データが得られたことも特色の一つと言える。

1. まえがき

膜構造は、歴史的に数千年とRC造やS造等の建築工法と比較し非常に古いものであり、また世界のいたる所で使用されてきている。その長い歴史において膜構造の構造安全性は、他の建築工法と比較しても優れていることが実証されている。

近年、特にこの優れた構造安全性と、さらには軽くて高強度で耐久性の高い膜材料の開発により構造物も数千㎡から数万㎡のものが建設が可能となっており、人の経験だけは構造物の安全性の把握は困難なほど大規模化、多様化してきている。

このことから構造破壊の予測、防止、検証のための工学的手法の確立が望まれてきている。

膜構造建築物の破壊についての研究は、対象とする構造のスケールが、原子、分子レベルから実際の構造物まで広い範囲わたっており、また、膜材料の種類も近年増加してきていること等からかなり多くのデータの蓄積が必要とされる。（図-1）

構造物が、“なんらかの原因”で破壊した時、あらかじめ整理されたデータを利用することにより、原因

を究明することが出来れば、その原因に対応した処置を取ることが可能となる。また、それらの破壊原因のデータを膜材の製作、加工、そして構造物の設計、施工段階にフィードバックすることにより、より信頼性の高い構造物を設計することが出来る。

本稿は、破壊性状を体系的に論じるためにミクロ的そしてマクロ的なもの、さらには人の目ではとらえられない高速な現象をもとえられるため、近年性能向上、が著しい電子顕微鏡、高速度カメラ、レーザー技術を利用し、いくつかの破壊原因についての膜材料の破壊性状を、図-1(b)、(c)のスケールでの一軸方向引張による結果について報告している。

なお、今回は前述のごとく基礎的データを報告することを主眼にしているための、破壊力学に関する数式モデルと計算機による解析手法等は、割愛している。

試験は以下の膜材料（参考文献2）と同仕様を使用した。

- 1) ガラス繊維織物
- 2) 四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布

*1 太陽工業(株) 膜構造建築物技術室課長 横浜国立大学工学部建設学科博士課程

*2 横浜国立大学工学部建設学科教授

- 3) 塩化ビニールコーティングガラス繊維布
- 4) 塩化ビニールコーティングポリエステル繊維布

2. 膜面(材)の破壊原因

膜面(材)の破壊原因として一般に以下の事項が考えられる。

- ① 雪、または、雨水のボンディングにより設計荷重以上の荷重が加わった場合の破壊。
- ② 膜面にき裂があり、それからの設計荷重以下、または、それ以上の荷重による破壊。
- ③ 人為的にナイフ等での破壊。
- ④ 飛来物による衝撃荷重による破壊。
- ⑤ 施工時の風等によるバタツキによる衝撃荷重による破壊。
- ⑥ 膜材の接合強度不足による接合部分からの破壊。繰り返し荷重による疲労破壊。
- ⑦ 設計計画上の欠陥により膜面と支持構造、又は、他の設置物との接触による摩耗破壊。
- ⑧ 薬品等により膜材が化学的に侵食されることによる破壊。
- ⑨ 火災などによる高温状態での溶融による破壊。
- ⑩ 耐候性劣化による強度低下による寿命破壊。
- ⑪ その他

上記の①-⑩の内、発生確率が高いと思われるものとして、①、②、⑤、⑥、⑦等があり、また③の人為的なものが特異なケースとして考えられる。

これらの内、本報で取り上げているのは、①と②それ

に引張られて破断するものとの比較するために行った特異なケースの③である。

膜材料は、実際の構造物においては一般に2軸引張状態となる。しかし、破断性状がタテ、ヨコの引張力の大小により変化し複雑となることが想定されるため、二軸引張の1つである1軸引張状態の破断性状について行ったものである。

3. 膜材料の破断力学

現在、膜構造の応力・変形解析は、膜面を小さい膜面(三角形、四角形)の集合として解析する方法とある本数の膜材繊維を1本に束ねたものを1つの線要素としてみても解析する方法の2つが主としてある。

図-2、3は、膜面を三角形要素で分割し、解析したもので、2種類の欠損を有する膜材試験片の変形、及び応力分布を表している。これは、静的な弾性解析でありこれを破壊力学的な様々なファクターを厳密に考慮すると膜材料の繊維の幾何学的な大変形を考慮した弾性破壊解析が必要となる。この解析で難しい点は、膜材料の負荷荷重の大きさにより、膜材料繊維とコーティング材とが一体に挙動したり、また、別々に挙動したりするために構造のモデル化が複雑となることである。図-4と図-5はそれぞれ図-2の(a)部と図-3の(b)部の拡大図で、斜線部に最も大きな応力が生じている。図-6と7は欠損の形状による応力集中度を表したもので、欠損先端部の応力は、他と比較し、2倍以上の値を示している。

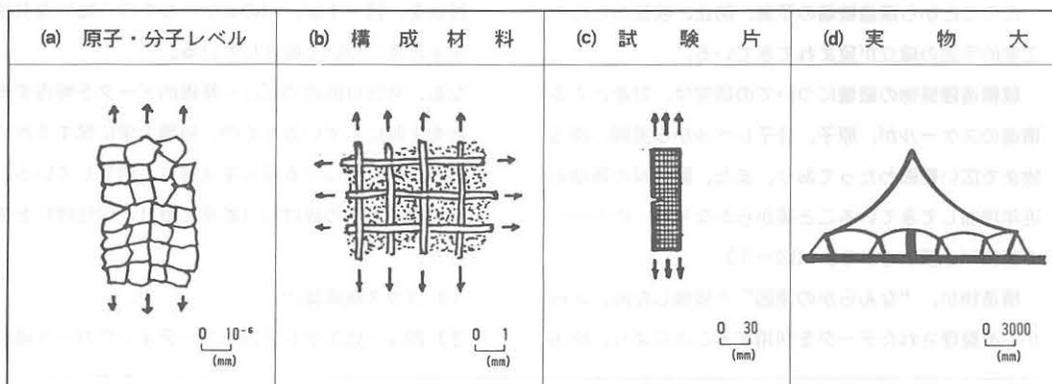


図-1 膜構造建築物の破壊研究モデルの大きさ

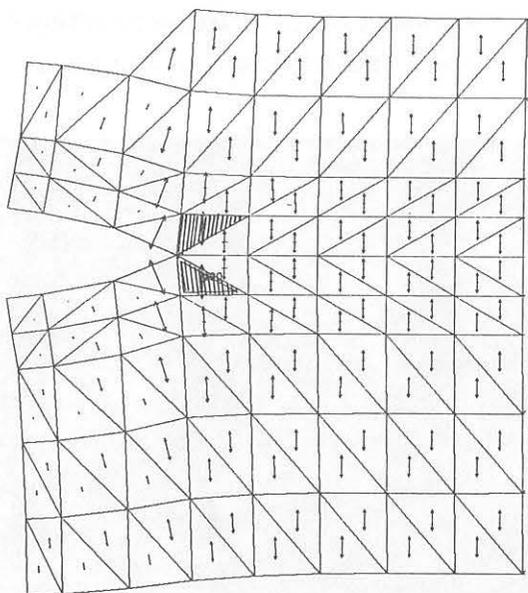


図-4 図-2の(a)部の拡大図

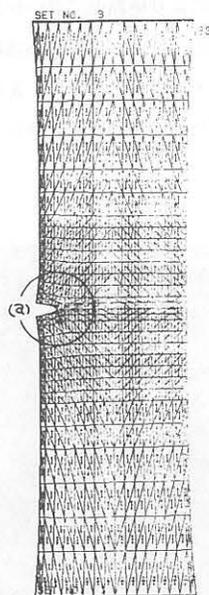


図-2 変形、応力分布図
(側部に欠損)

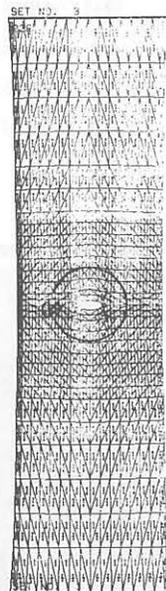


図-3 変形、応力分布図
(中心に欠損)

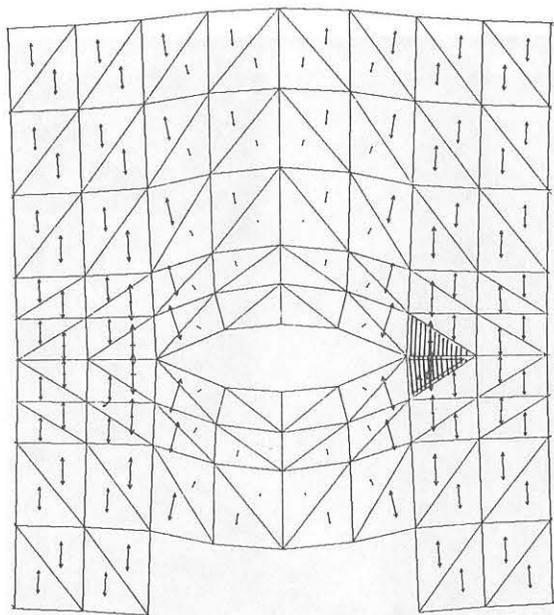


図-5 図-3の(b)部の拡大図

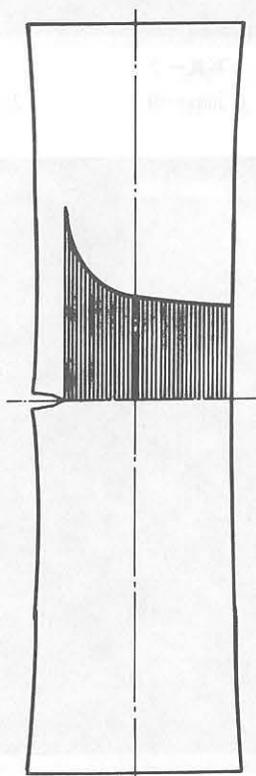


図-6 応力集中分布図

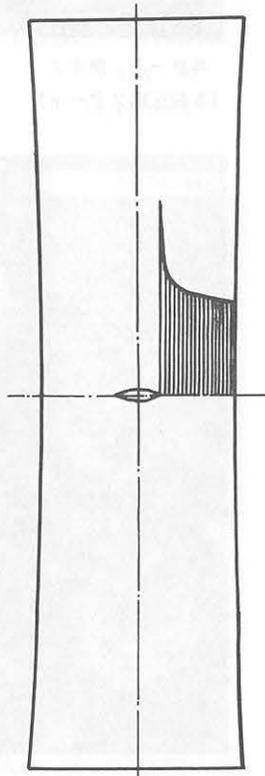


図-7 応力集中分布図

4. 高速度カメラによる破断性状の確認

膜材の破断スピードの差により破断面に違いが出てくるかどうかを確認すること、さらには動的破壊解析に必要とされる破断スピード v とその長さ l 、また、各荷重下の変形量を求めるために高速度カメラによる撮影を試みた。

4.1 無キズの膜材の破断現象

写真-1から10は、キズのないA種膜材のき裂伝播を表しており、き裂発生後約12.3msecの間の現象である。無キズの場合のき裂伝播の特徴は、キズがあるものより高速であることと、破壊ラインが水平の糸方向に対し、約 60° 程度の角度で生じることである。

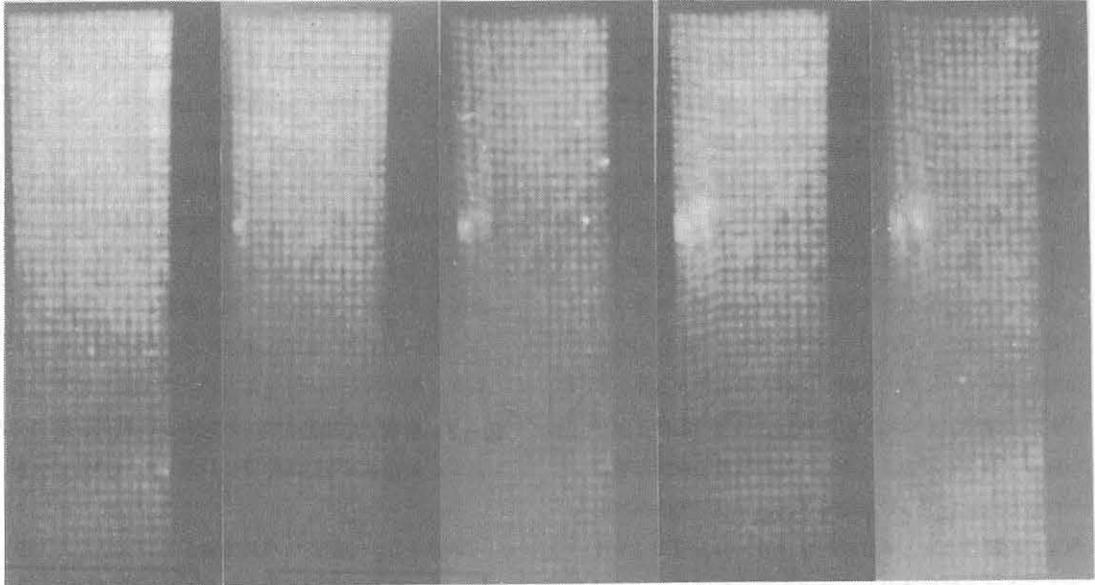


写真-1 無キズ
(き裂伝播スタート)

写真-2
1.36msec後

写真-3
2.72msec後

写真-4
4.08msec後

写真-5
5.44msec後

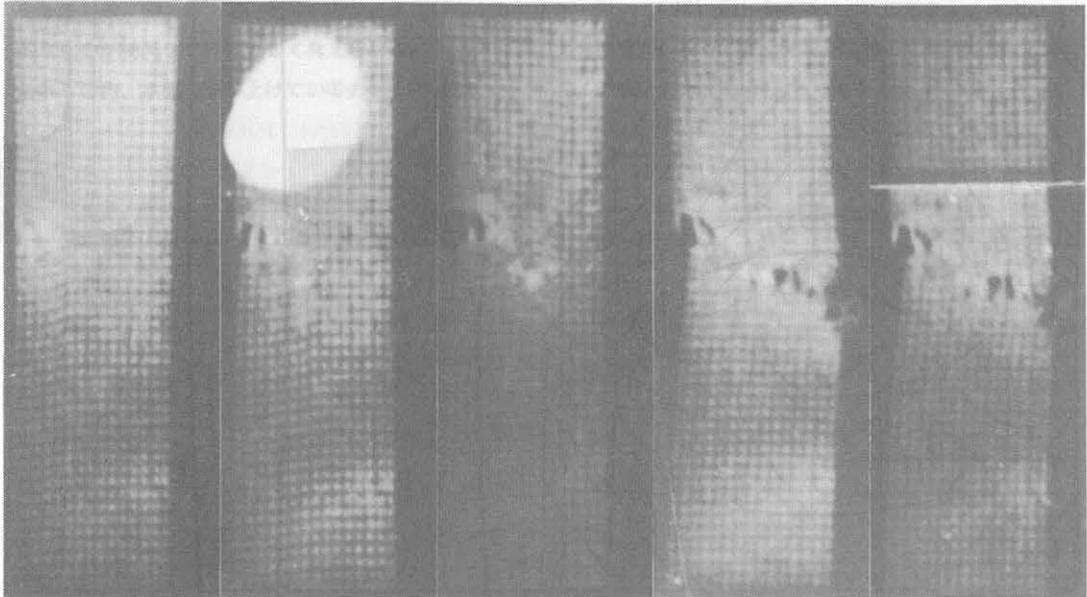


写真-6
6.8msec後

写真-7
8.16msec後

写真-8
9.52msec後

写真-9
10.88msec後

写真-10
12.3msec後

4.2 1回折り膜材の破断現象

写真-11から20はA種膜材を1回だけ60° kgの力で3秒間折った場合のき裂伝播を表しており、き裂発生後、約43.75msecの間の現象である。特徴としては、破断ラインが折り曲げたラインと一致することで、この現象は折り曲げ角度が45°を越えるとこの傾向はな

くなる。これは、ガラス繊維が折られるというよりねじられるだけで、それほど大きなダメージが生じないため、無キズのものと同じような破壊性状を示すと考えられる。き裂伝播時の角度は、大きくなったり小さくなったりのくり返しで変化することが見られる。

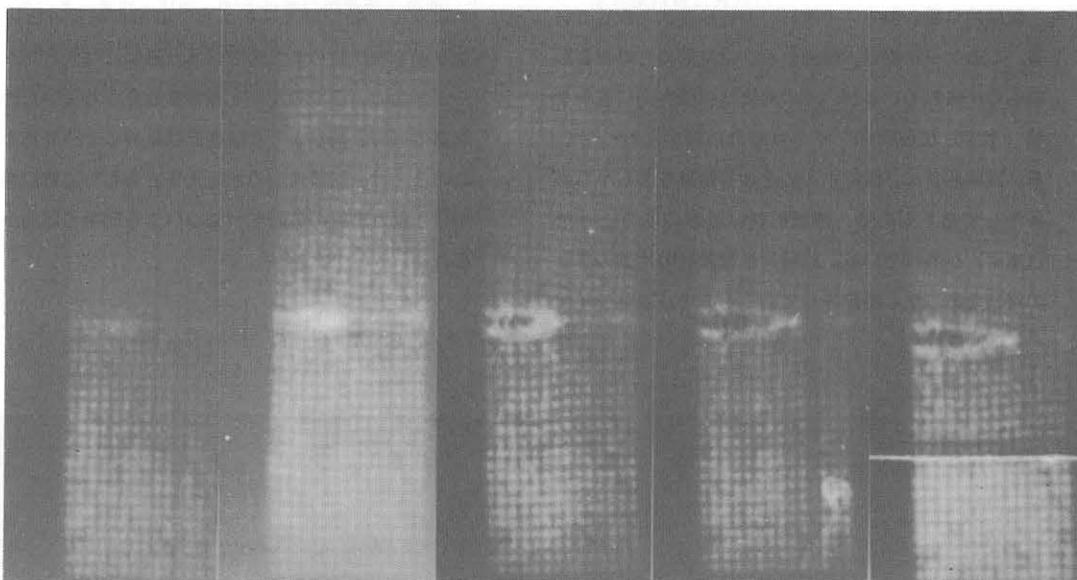


写真-11 1回折り
(き裂伝播スタート)

写真-12
4.38msec後

写真-13
9.72msec後

写真-14
14.58msec後

写真-15
19.44msec後

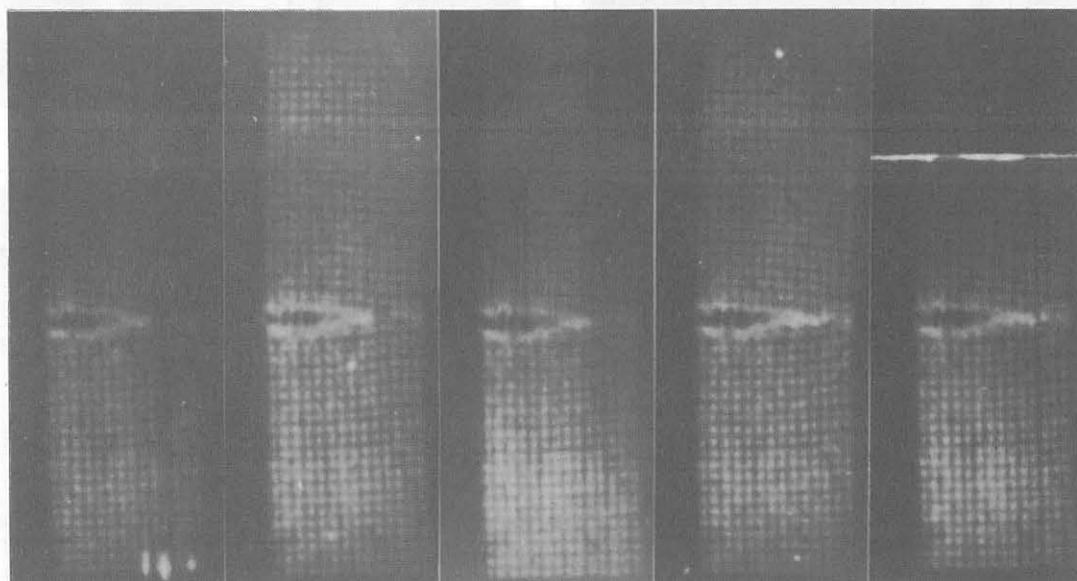


写真-16
24.31msec後

写真-17
29.17msec後

写真-18
34.03msec後

写真-19
38.89msec後

写真-20
43.75msec後

5. 膜材破断形状

表-2は、四ふっ化エチレン樹脂コーティングされたガラス繊維布破断形状を膜材料の損傷の形状別にまとめたものである。膜材料の破断モードについては、橋本⁽¹⁾らにより報告されているが、本稿においてはさらに、折り曲げを含めたものについて実施したのでいくつか新しいものについてのみ述べる。

試験片C種の無キズの膜材料の破断形状を表している。このケースでは、破断ラインはV形のものでZ形のもので表れているが、その角度は引張方向に直角な軸（水平）から約60°でそれぞれ破断が進行している。試験片Dは、膜材中心の2本の繊維をあらかじめ破断してあるもので、破断形状はZ形のもので一形（水平）が表れている。試験片Eは膜材の片側の2本の繊維をあらかじめ破断してあるもので、破断ライン

はZ形でその角度は約24°となっている。

試験片FからHは、膜材が強制的に折られた場合の破断形状を表したもので、折り角度45°以外はほとんどすべて折り曲げたラインで破断している。

45°折りの破断ラインは、無傷のものと同様にV形とZ形が表れる。このことは論文⁽²⁾にのべられているように、45°以上になると、繊維には折れというよりねじれが生じるためそれほど繊維には大きなダメージがないようで強度低下もあまり見られないため、無傷のものと同じような破断形状とあるようである。このことは、試験片Iのある大きさをもつ芯棒に巻きつけられた膜材の破断形状についても同様の傾向がみられる。

表-1 膜材半破断試験一覧表

(単位：m/m)

	C		D		E		F		
	無傷	破断形状	縦方向糸 真中2本欠	破断形状	縦方向糸 端2本欠	破断形状	真中180°1回折	破断形状	
試験片形状									
		平均破断角度約 60°		平均破断角度約 12°		平均破断角度約 24°		平均破断角度約 0°	
	G		H				I		
	真中180°2回折	破断形状	θ° 1回折	破断形状				真中 ϕ 1回折り	破断形状
試験片形状									
		平均破断角度約 0°	$\theta^\circ = 7.5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	平均破断角度約 7.5°	平均破断角度約 15°	平均破断角度約 30°	平均破断角度約 45°	平均破断角度約 36°	

膜材料のき裂伝播速度と膜材料の主構造材である繊維の破断面形状との相関関係の有無を確認する為に電子顕微鏡により写真撮影を行った。

表-1の試験片C（無キズ、四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布）における破断形状は写真-21(a)、(b)のごとく破断開始点と終了点との差はほとんどなく、繊維方向に対し直角に近い面で破断している。写真-21(a)、(b)との差は破断面の表面に少し違いがあるが、それが開始点と終了点との違いであるということまでは断定できない。

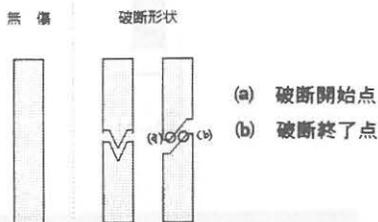


図-8

写真-22(a)、写真-22(b)は、膜材料B種（塩化ビニールコーティングガラス繊維布、無キズ）のガラス繊維の破断面を表している。

本試験片は、四ふっ化エチレン樹脂と異なりかなり柔らかい塩化ビニールでコーティングされたガラス繊維布であるため、破断ラインは、試験片C（無キズ）と異なり約 20° 以内となっている。また破断面には大きな差は見られない。

破断形状

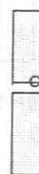


図-9

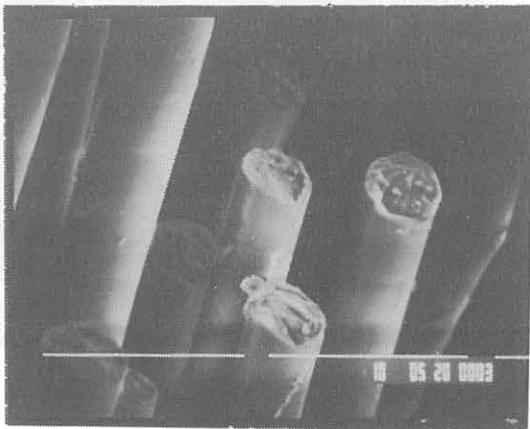


写真-21(a)

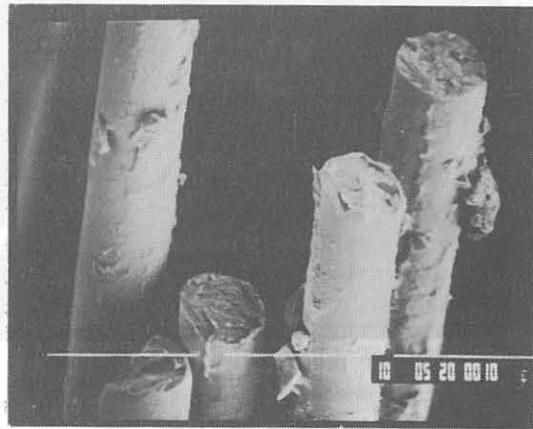


写真-22(a)

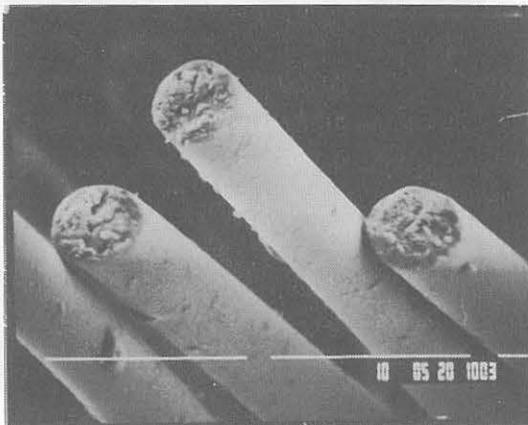


写真-21(b)

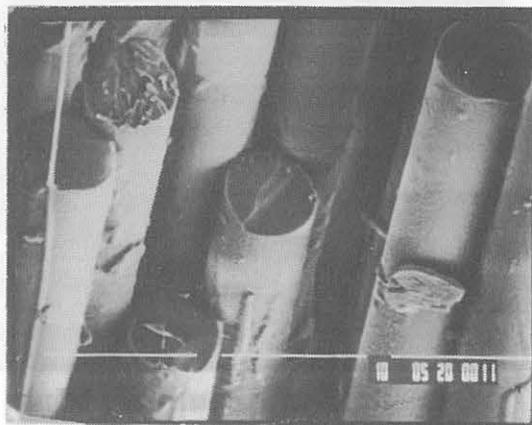


写真-22(b)

写真-23、24は、図-10の○印の部分の繊維の破断面である。この破断面形状は、前述の試験片Cと異なり破断面には凸凹がほとんどないのが特徴で、引張りにより破断したものでなく、ナイフ等の鋭利なものにより人為的に破断したものである。

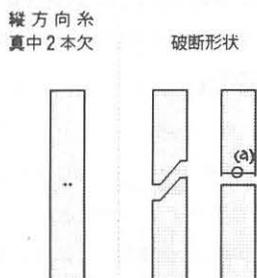


図-10

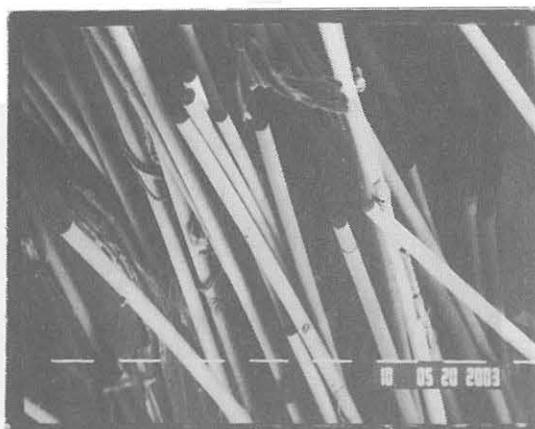


写真-23 図-10、(a)部の繊維 (×700)

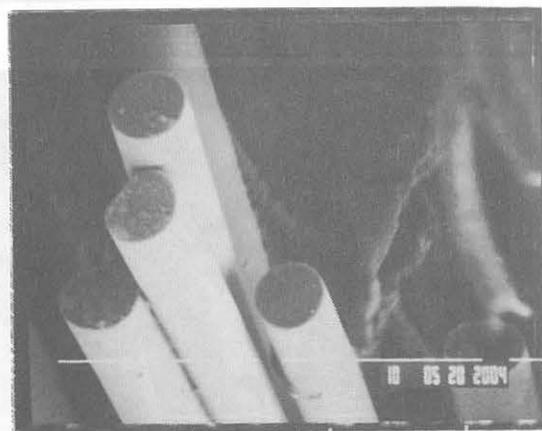


写真-24 図-10、(a)部の繊維破断面 (×3700)

写真-25、26は、コーティングされていないガラス繊維布の引張破断による破断面で、繊維長手方向に対し、角度をもった面となっている。

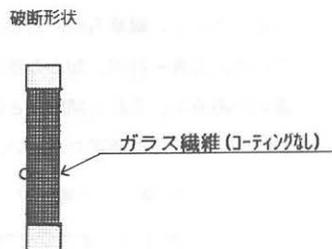


図-11

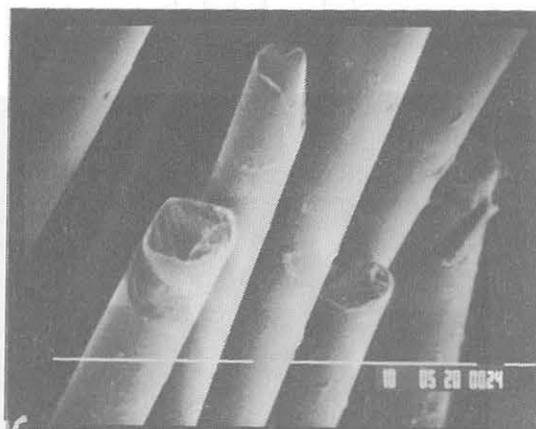


写真-25 コーティングされていない
ガラス繊維布 (×3700)

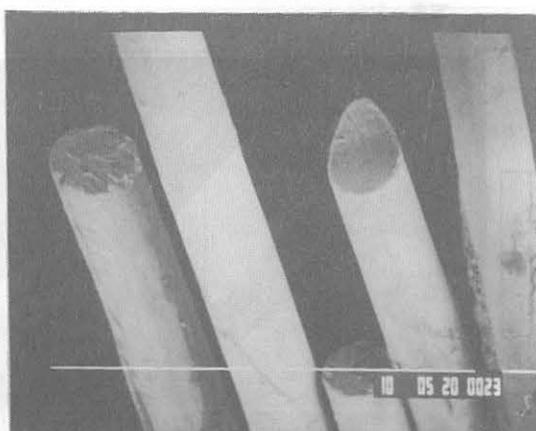


写真-26 コーティングされていない
ガラス繊維布 (×3700)

写真-27(a)、(b)は、塩化ビニルコーティングされたポリエステル繊維（膜材料C種）の破断面である。

ポリエステルは、ガラス繊維と異なり破断時に発生する熱により溶けてしまい、キノコ型の形状となっている。このことから、繊維の歪エネルギーが急激な収縮により熱エネルギーに変わることがわかる。

膜材料C種の破断ラインは、膜材料A種と比較しほとんど角度がなく、ほぼ水平に破断している。

これは、コーティング材料の硬度がかなり影響していることがわかる。

破断形状

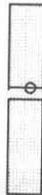


図-12

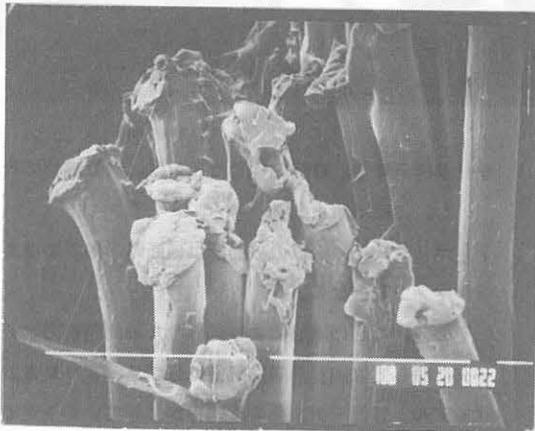


写真-27(a)

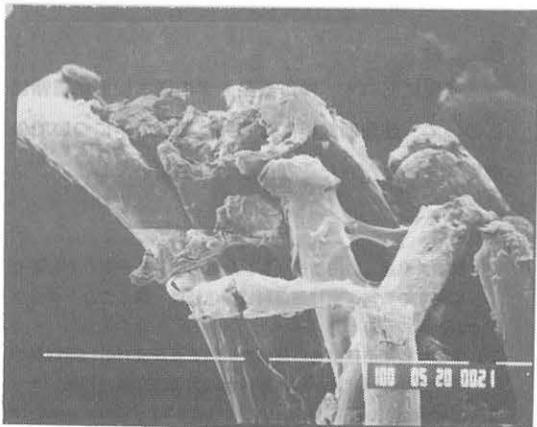
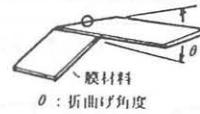


写真-27(b)

写真-28は、1回折りされたコーティングされていないガラス繊維布の繊維先端を表している。また、写真-29は、四ふっ化エチレン樹脂コーティングされたガラス繊維布で、1回折られたものを引張試験したもので、両方とも破断面は同じような形状となっている。ただ、異なる点はコーティングされたものの破断面は1本1本方向がほぼそろっているのに対し、コーティングされていないものの方向は、様々ばらついていることである。



折曲げ荷重及び時間：60kg、3秒

図-13

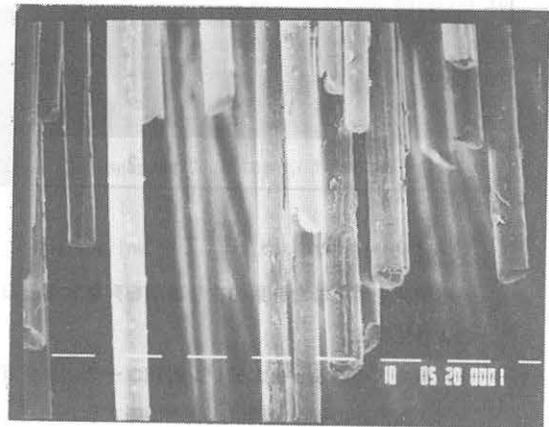


写真-28 コーティングされていないガラス繊維布の折り曲げられた破断面

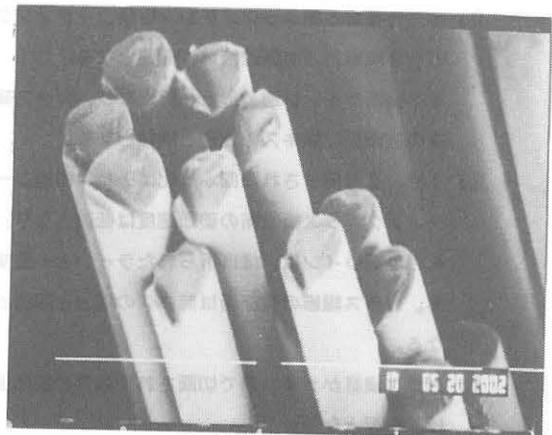


写真-29 四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の折り曲げられた破断面

表-2 膜材料繊維破断面

	コーティングしていないガラス繊維		四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布		塩化ビニールコーティングポリエステル繊維布
破断側面概略図					
破断表面写真					
	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	

	塩化ビニールコーティングガラス繊維布		鋭利なナイフによるガラス繊維の破断面	強制的に折られたガラス繊維
破断側面概略図				
破断表面写真				
	Type-1	Type-2		

5. 結 論

本研究で得られた結果の主な事項を列挙すると以下のようになる。

- 1) 無キズの四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の破断速度は、高速破断する。その破断ラインは、V形とZ形となる。ガラス繊維の破断面は、ほぼ平坦になる。
- 2) キズを有する四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の破断速度は、低速となる。その破断ラインは逆Z形と一形となり、ガラス繊維の破断面は無キズの場合と同様となる。
- 3) 1回、2回折りされた四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の破断速度は低速となり、その破断ラインは、ほぼ折られたラインと一致する。ガラス繊維の破断面は無キズの場合と同様となる。
- 4) ガラス繊維がナイフ等で切断された場合の破断面は、平面となる。
- 5) コーティングの有無にかかわらず、ガラス繊維布が折られた場合の破断面はV形となる。

6) 膜材料B種、C種の破断ラインは、引張繊維に対し、ほぼ直角となる。

7) ポリエステル繊維の破断面は破断時の熱で溶けてキノコ形となる。

その他、今回の試験により得られた動的破壊力学データに関しては破壊力学的評価に基づき、より良き数式モデル、解析モデルを今後明らかにしていく予定である。

謝 辞

本研究において、神戸商船大学の橋本教授に信頼性について、西岡助教授には(動的)破壊力学についての御指導をいただいたことに心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 橋本、鳥居、豊田；テフロン膜材の破断モードとその寿命に関する考察、第19回日科技連信頼性・安全性シンポジウム、平成元年6月
- 2) 小松；膜構造建築物の信頼性に関する研究(初1)(膜材料の破壊性状の研究)、財団法人日本膜構造協会論文集、1988
- 3) B. Lomas, J. W. S. Hearle ; Failure of fibers used in Rubber, Rubber World (USA), 1987
- 4) 西岡・S. U. Atluri ; 動的破壊力学問題の有限要素法シミュレーション、日本機械学会誌、第85巻、第759号

Study on Reliability of Structures of Membrane Construction (No. 2)

(Study on membrane materials in terms of breaking dynamics)

KIYOSI KOMATSU *1

KAZUO ISHII *2

Outline

Calls are mounting for the establishment of breaking dynamics design for the prevention of structural breaking amid the growing scale and diversification of structures of membrane construction.

However, it is only recently that membrane construction have been put into practical use for durable structures.

Therefore, data are not sufficient for the evaluation of soundness of overall structures, making it necessary to continue a steady study on membrane structure.

This study is designed to analyze breaking phenomena of membrane materials, a main building material for structures of membrane construction, through experimental and theoretical methods on the basis of breaking dynamics technique.

*1 Engineer, Taiyo Kogyo Corporation / Doctoral course, Engineering Department, Yokohama National University

*2 Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Yokohama National University