

膜構造建築物の信頼性に関する研究 (その1)

(膜材料の破壊性状の研究)

小 松 清

梗 概

膜材料の破壊過程の現象を実験的にとらえることは、あまり行われていない。そこで、本研究は高速ビデオを利用し、膜材料の製造、加工、施工時に発生が予想される様々な傷を想定し、それぞれの破壊過程での破壊速度(引裂伝播)、変形量、引張強度等の実験結果からこれらの破壊現象を把握し、膜構造建築物の構造材としての信頼性向上のため、さらには、より性能の高い膜材料開発のための方策について論じている。

1. まえがき

今日、膜構造建築物は水平投影面積で、30,000㎡以上の大規模なものが世界的に建設されている。膜構造方式による大架構技術はかなり実績が積み重ね急速な進歩を見ている。一方、その構造物の構造安全性に関する信頼性研究はまだ十分に行われていないと言えない。従ってまだ未解明の問題が多くあり今日増えつつある膜構造専門家の研究が広く期待されている。

膜構造建築物の信頼性研究において出発点となるのは膜材料そのものの信頼性を明らかにすることで、それは、最終的に構造物全体の信頼性について論ずる為の基礎データとなる。

著者は、まず膜材料の破壊性状を従来行っていた破断後の結果のみで膜材料の性状を論ずるのではなく破壊時、及び、それに到る過程をも把握することで膜材料の性状をより明確にすることを試みた。

膜構造建築物の膜材料の外荷重による破断で主なものには、以下のようなものがある。

- 1) 膜面に積った雪や雨水等の静的荷重によるもの
- 2) 膜面の風圧力のような動的荷重によるもの

3) 雪、雨水等により膜材の限界強度¹⁾にある膜面に飛落物等が衝撃荷重として加わることによるもの
前述1)、2)の状況は引張試験機により徐々に荷重を載荷することで再現できる。また、3)の状況は膜材料にあらかじめある大きさの張力を加えておき、ナイフや弾丸のようなもので膜材に瞬時に欠損(キズ)を加えることで起こすことができる。

通常、膜材料の強度試験においては、破断が瞬時に起こるので肉眼ではとらえにくいこともありその性状についてはほとんど知られていない。本研究においては、膜材料の引裂伝播に関するN.J. Abbott, J. Skelton¹⁾による研究により60kg/3cm程度の比較的強度の低い膜材料でも引裂伝播速度が200m/secという高い値が報告されていることや大規模膜構造建築物で使用される膜材料がその5倍から8倍の強度(300kg/3cm~480kg/3cm)であることを考慮した結果、破断速度測定と破断性状の確認には以下の装置を用いることにした。

- a) 低速破断用：高速度ビデオ
- b) 高速破断用：レーザー光線をシャッターとして利用する高速度カメラ

2. 試験方法

一連の試験片は全て巾30m/m, チャック間隔が100m/mで行った。

JIS の試験におけるチャック間隔は、200m/mであるが高速度ビデオ、及び、高速度カメラの破断開始トリガーをレーザー光線通過により検知する方法においてはチャック間隔が大きいと破断位置が、それだけ大きくバラツクため、写真撮影が困難となる。

このことから、クランプ間隔を100m/mとし、一連の試験を行った。

本試験では、8種類の予想される膜材料のキズについての破断スピード、引張強度、伸びを測定した。

1軸引張と2軸引張における引張強度を比較した場合、1軸引張は2軸引張よりも低くなることが知られ

ている。(文献-2)

本実験では、2軸引張状態の特異なケースである1軸引張での試験結果(実際より低い値となる)で膜材料の性状を評価、検討することにした。

写真-1 ガラス糸 (B150 4/2)

写真-2 ガラス繊維布 (コーティング無し)

写真-3 四ふっ化エチレン樹脂コーティング繊維布に欠損(キズ)を入れたもの

写真-4 変形性状把握のためにタテ糸及び、ヨコ糸方向それぞれで1本おきに、コーティング表面に格子を描いたもの

写真-5 変形性状把握のためにタテ、ヨコ2mm格子をコーティング表面に描いたもの

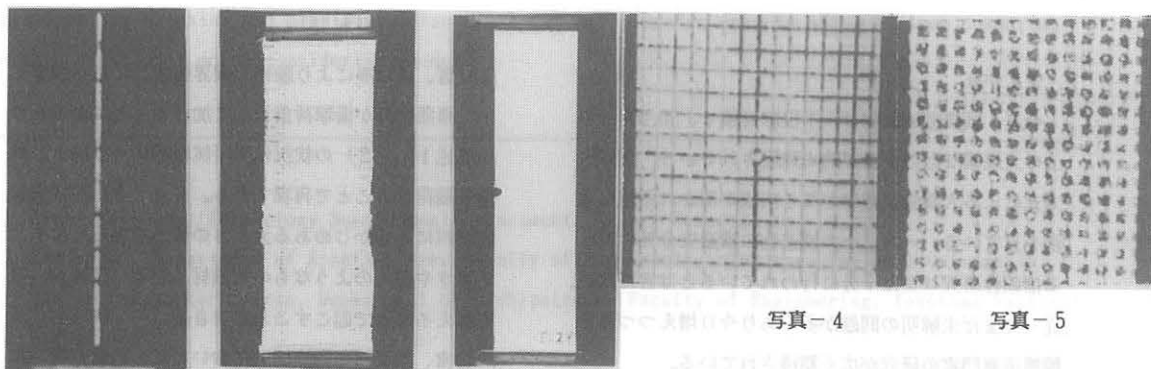


写真-1

写真-2

写真-3

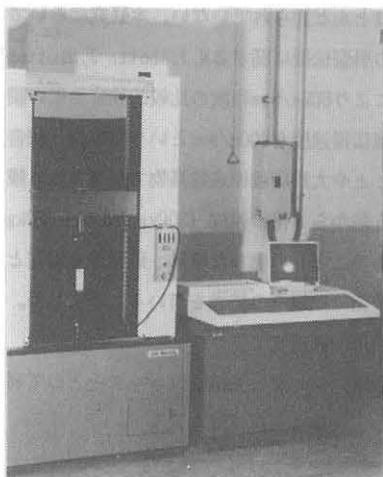


写真-6



写真-7

— 低速破断測定用装置 —

写真-6: 膜材料引張試験装置

(横浜国立大学工学部石井研究室所有)

写真-7: 高速度ビデオ

(株式会社ナック所有)

— 高速破断測定用装置 —

写真-8: 引張試験装置

写真-9: 超高速度カメラ

写真-10: レーザー装置

(写真-8~10 神戸商船大学西岡研究室所有)

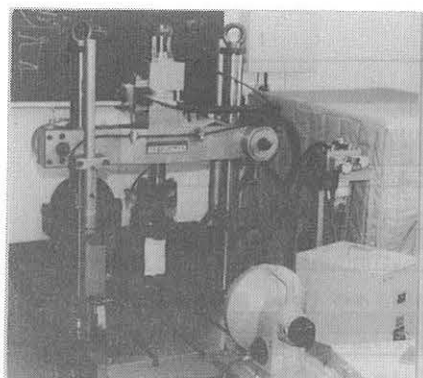


写真-8

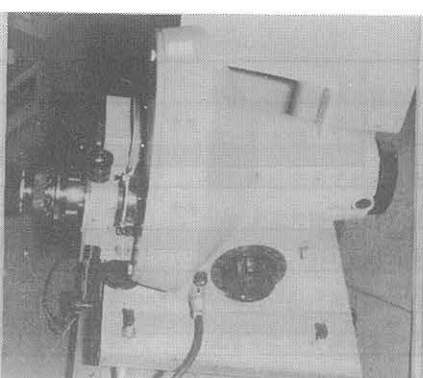


写真-9

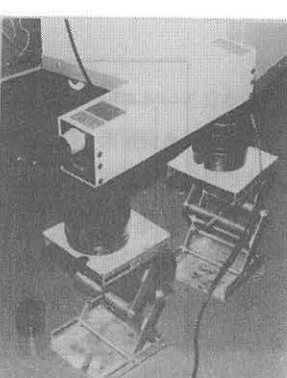


写真-10

3. 試験材料

材料を試験材料として選んだ。

現在、膜構造建築物の主構造材料として使用されている膜材料には主に以下のものがある。

表-2

A. 四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布

B. 合成樹脂コーティングガラス繊維布

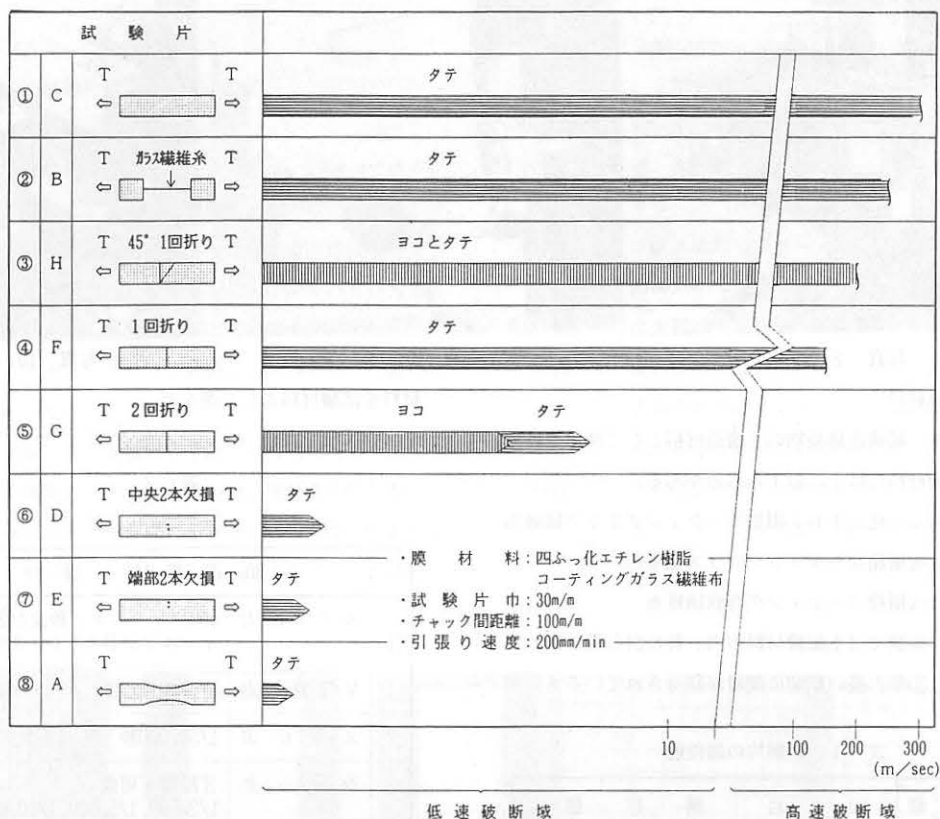
C. 合成樹脂コーティング合成繊維布

今回の実験では上記膜材料の内、特に耐久性に優れ、20年、30年と長い期間の使用が期待されているAの膜

表-1 試験片の諸性能

種 類	項 目	測 定 値
単 糸	糸材料	ガラスECB150 4/2
繊維布	糸材料	ガラスECB150 4/2
	密 度	タテ 31 (本/3cm)
		ヨコ 21 (本/3cm)
	織物構造	平 織
コーテ ィング	質量 (g/m ²)	1215
	厚さ (mm)	0.8
	密 度	タテ 31 (本/3cm)
		ヨコ 21 (本/3cm)
織物	コーティン グ材	四ふっ化エチレン樹脂 コーティングガラス 繊維布
	織糸材料	ガラスECB150 4/2
	織物構造	平 織

高 速 度 ビ デ オ		
1	カメラ出力	400フィールド/秒及び200フ ィールド/秒(スイッチ切替)
	V T R 出力	NTSC方式(60フィールド/秒)
2	ス ト ロ ボ	1/50,000秒 200W(ランプ入力)
3	シ ャ ッ タ	3段階・可変 1/2,500、1/5,000、1/10,000秒
高 速 度 カ メ ラ		
1	撮影速度 n_f	200~35,000コマ/秒連続可 変
2	コ マ 間 隔 $t_i = 1/n_f$	28.6 μ s/コマ~5ms/コマ
3	撮影コマ数 N_f	224コマ コマ寸法: 7.4mm×10.4mm (16mm映画の寸法)
4	仕様フィルム	35mm巾フィルム 長さ約860.4mm
5	撮影時間 t_p	$N_f/n_f = N_f \times t_i$: 6.4ms~1.12 秒
6	1コマ当たりの 露出時間 t_e	付属品のエントランス、エグ ジットダイヤモンドストップ を交換することにより、コマ 間隔 t_i の1/9.25、1/19.0、 1/38.1の3通りが可変。 n_f が、35,000コマ/秒で0.75、 1.5、3.0 μ 秒



図一 1 膜材料の引裂伝播速度

試験片として欠損（キズ）の無いものや有るもの等様々な膜材料で実験した結果、膜材料の引張強度、破断速度は膜材料引張状態や欠損（キズ）の有無により大きく異なることが明らかになった。

図一 1 は様々な状態の膜材料の引裂伝播速度の概略を表したものである。この伝播速度は金属の場合と異なり、複合繊維材料である膜材料においては、材質以外に製造方法やその品質管理状態によっても異なるためその値は一定としないが、大きな傾向はとらえることができる。膜材料の破断を破断速度で分類すると比

較的速度の小さいものと、それを超える高速のものとは分けられる。この高速伝播現象をとらえるためには、前述の b) の高速度カメラ（高速度ビデオの約100 以上のスピード）のような高速のものが必要となる。

本研究報告書(その1)では高速度ビデオで確認できる低速伝播と高速伝播にいたる直前までの膜材料の力学的性状について述べ、高速度破断(写真-11)についての報告は、研究報告書(その2)で行うことを予定している。

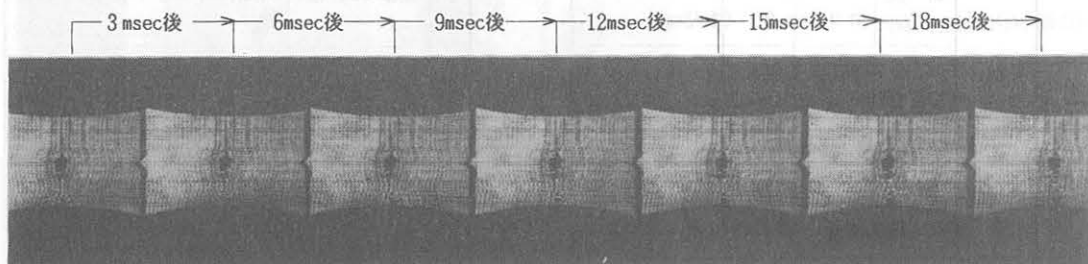


写真-11 高速度カメラによる引裂伝播写真

4. 膜材料の引裂伝播速度

図-1に示すように①～④の試験片は高速伝播し、高速度ビデオでは破断性状を確認することは、困難であった。それに対し、⑤～⑧の試験片に関しては、比較的伝播スピードが低い結果が出た。

低速伝播する欠損（キズ）のある膜材料は主に、欠損部から膜材料の引張強度より低い引張力（約70～80％）で引裂かれ徐々に引裂伝播していく。

試験片⑥と⑦との比較により欠損部が膜材料端部にある方が中央にあるよりいくらか低い引張力で破断する。また、試験片⑧は、破断位置が試験片の中間部になるように工夫したもので、破断はこの狭い部分で発生する。このタイプは、応力集中の分布からみても膜材中心部から破断することなく端部のどちらか一方の側から引裂により破断する為、引張強度は欠損（キズ）のないものの約80％程度となる。

低速伝播する⑤～⑧の試験片グループと高速破断する①～④のグループとの試験片の差は、前者は欠損（キズ）が後者より大きいことが言える。これは特に試験

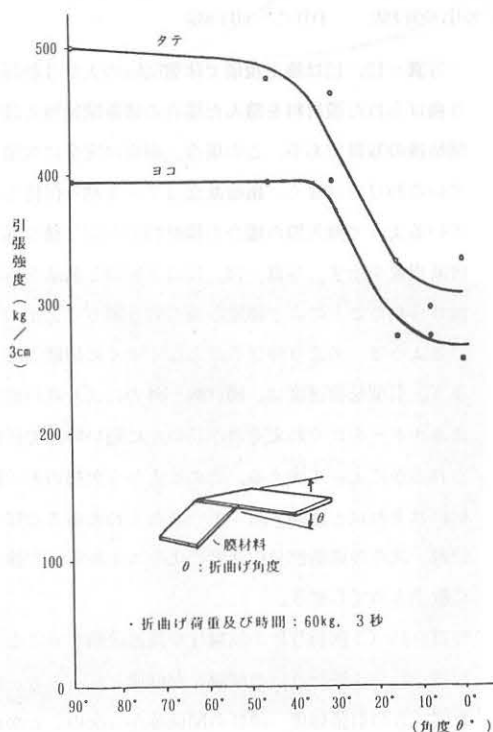


図-2 折曲げ角度別強度-伸び曲線

片③、④、⑤の3種類の引張強度比較において分かる。

図-2と図-3は膜材料が加工時、運搬時そして施工時に発生するであろう折曲げ角度や梱包用芯材の大小による欠損（キズ）を想定して行った結果である。

図-2は、折曲げ回数が1回（荷重60kg, 3秒）の時の折曲げ角度により強度低下（欠損の度合い）が異なることを表している。

特に、折曲げ角度が40°以下になると強度低下が顕著に見られる。また、1回折りと2回折りの強度低下（欠損度合い）は図-4で明らかなようになりかなり大き

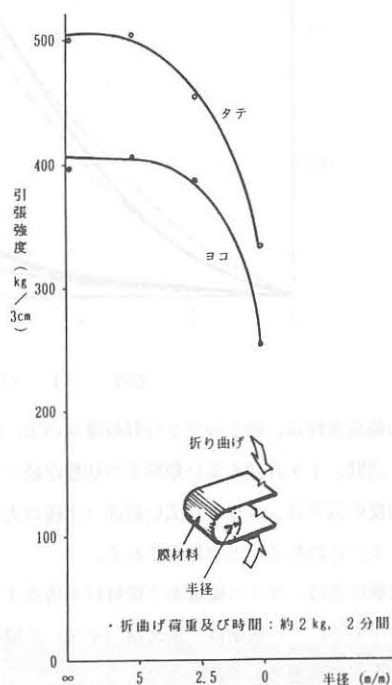


図-3 折曲げ半径別強度-伸び曲線

く、2回折りは無欠損（キズ）の強度の半分以下になってしまう。また、このように同じ個所を2回折り曲げるような状況は、現実には加工時、運搬時、施工時をとおしても意識的に折らない限り発生しないと思われるが、実際のフィールドデータによる調査を行わないと明確には述べられない。

図-3は、梱包形態による膜材料の強度低下を表した図で、芯材の直径が約10m/m（半径5m/m）以下になると数分間その状態で膜材料を放置しただけでも強度低下があることがわかる。

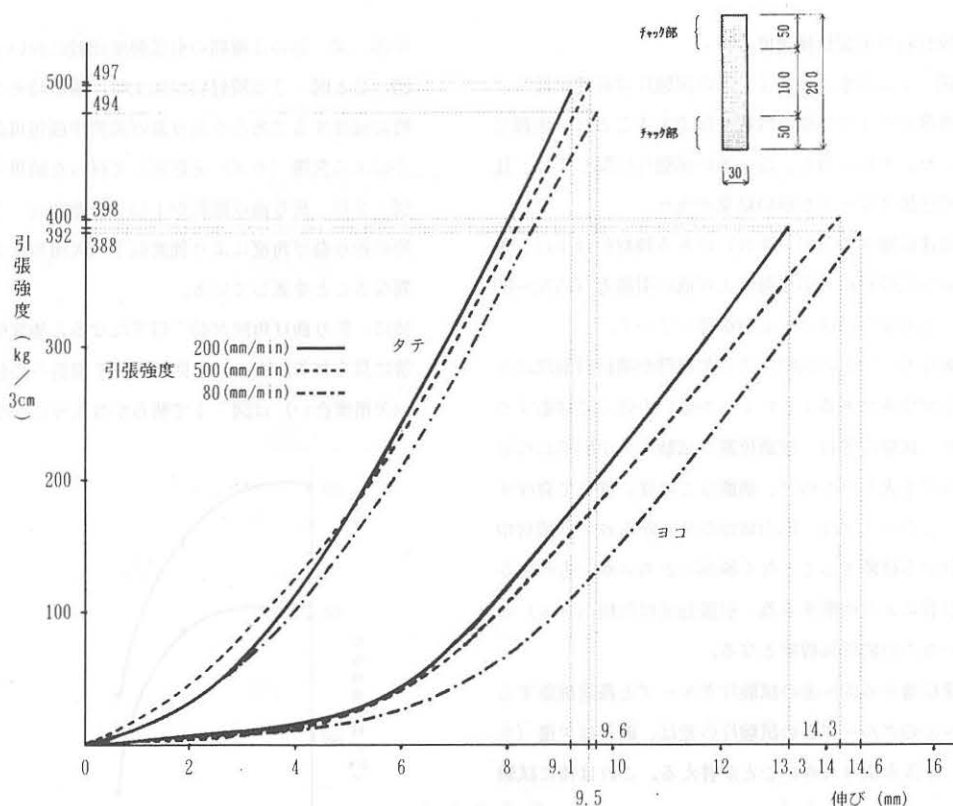


図-4 引張速度別強度-伸び曲線

この載荷条件は、約2kgで2分間程度なので、時間的に1週間、1ヶ月間を長い期間その状態が続いた場合の強度の低下は、もう少し広い範囲（半径の大きいものまで）にわたることが想定される。

試験片②は、ガラス繊維糸で膜材料を構成する基本要素である。この破断は、無欠損（キズ）の膜材料と同じように高速である。

試験片①引裂伝播の確認は高速度カメラにより行われるが引裂伝播開始位置、及び、終点は安定しないためかなりの回数写真撮影を行わないと確認することは難しい。

図-5は、今回の載荷速度を決定する為に行った試験で、載荷速度が引張強度や伸びにどの程度影響を与えるかを知ることが出来る。

これらの結果から、載荷速度が80mm/min～500mm/minの間では引張強度、及び、伸びにそれほど大きな影響を与えないことがわかる。本試験の載荷速度を200mm/minで行った。

写真-12、13は施工現場で体重60kgの人が3秒間折り曲げられた膜材料を踏んだ場合の破断開始時と破断開始後の写真である。この場合、繊維は完全に欠損しているわけではなく、繊維断面は7～8割り保持されているようで無欠損の場合の膜材料①と同じ様な高速破断現象を示す。写真-14、15は2回同じ箇所を折り曲げられたことにより繊維断面の約5割りは欠損しているようで、あまり伸びることなくすぐに破断してしまう。引裂伝播速度は、膜材料が外力により高い運動エネルギーをたくわえそれが、いかに短い時間で放出されるかによって決まる。このことから欠損のある膜材料はそれほど運動エネルギーをたくわえることなく破れ、又その破断部分の変形によりエネルギーが徐々に放出されてしまう。

写真-13（1回折り）の試験片が高速破断すること、写真-15（2回折り）の試験片が低速となること、また図-5の引張強度-伸びの関係等から次のことがわかる。

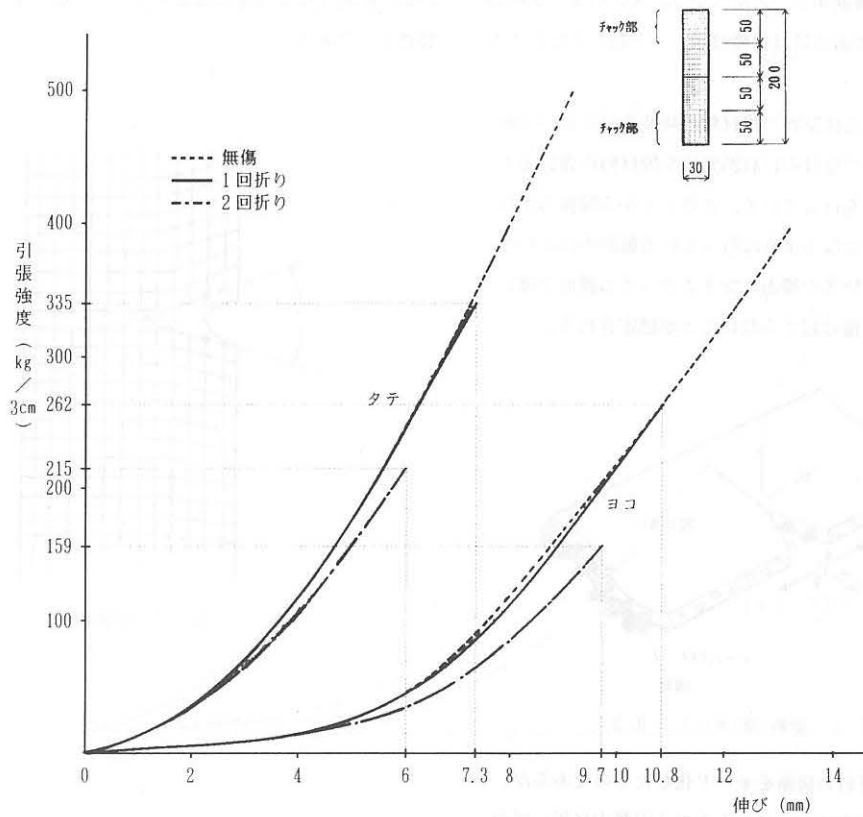


図-5 1回折り, 2回折り 強度-伸び曲線

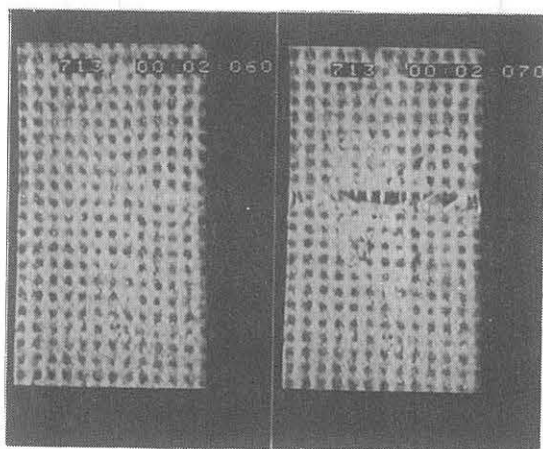


写真-12 引裂伝播開始
(1回折り)

写真-13 引裂伝播後
(1回折り)

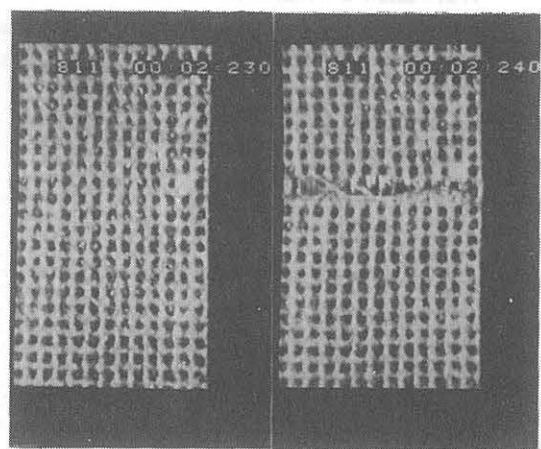


写真-14 引裂伝播前
(2回折り)

写真-15 引裂伝播後
(2回折り)

本試験片の膜材料は無キズのものの引張強度の35~40%以上の張力になると低速伝播し、さらに50~60%以上の張力が加わるとわずかな欠損（キズ）でも瞬時に高速破断することがわかる。又、引張力が約30~35%以下である時は伝播はほとんど起こらないことがわかった。

現在、膜構造建築物の膜材料の強度設計において短期荷重において母材の1/4(25%)を膜材料の許容応力度とし、設計を行っている。このことから膜張力が母材の25%以下になるように行っている範囲内においては鋭利な飛来物等が膜面に突きさしても膜面全体にわたる引裂伝播は起こらないことが想定される。

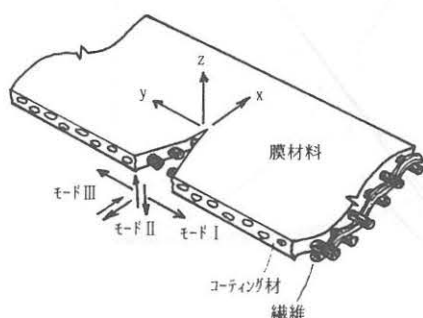


図-6 破断(壊)モードⅠ,Ⅱ,Ⅲ

図-6は材料の破断をモード化したものであるが、膜材料は曲げ剛性が、ほとんどなく引張力に対してのみ抵抗できるものであるから、モードⅠの引張破断が支配的となる。

片側の繊維が2本欠損している試験片において引張伝播開始から終了までの引裂先端部の開角(図-8)を測定し、その大小によりその部分に生じる引張張力の大小の比較をすることを試みた。

引裂部開角は、伝播開始時は約64°で、試験片の約1/4まではほぼ60°以上を保っているが1/4以上の伝播が進むと開角は急に小さくなり、1/2伝播が進むと45°程度となり、さらにその値は減少し、破断直前では約35°程度となる。

このことから、開角と引裂伝播速度は伝播初期、中期、そして末期と反比例するように変化することがわかる。引裂伝播前までは膜材料は弾性変形し欠損部の開角は少しずつ増大するが、いったん伝播がはじまると欠損

部が大きく開かれ膜材料にたくわえられた運動エネルギーが徐々に放出される。

本試験片⑦(図-1参考)のような低速伝播するものは、伝播速度が高速伝播と異なり、一定しないのが特徴としてある。

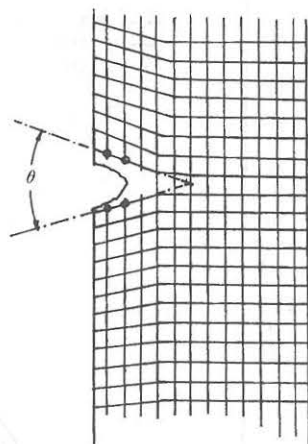


図-7 引裂部開角

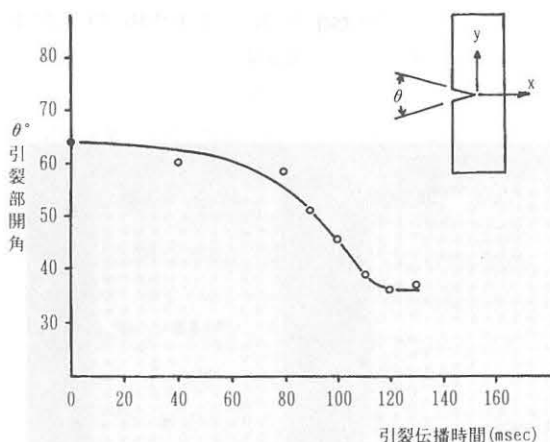


図-8 引裂部開角の変化

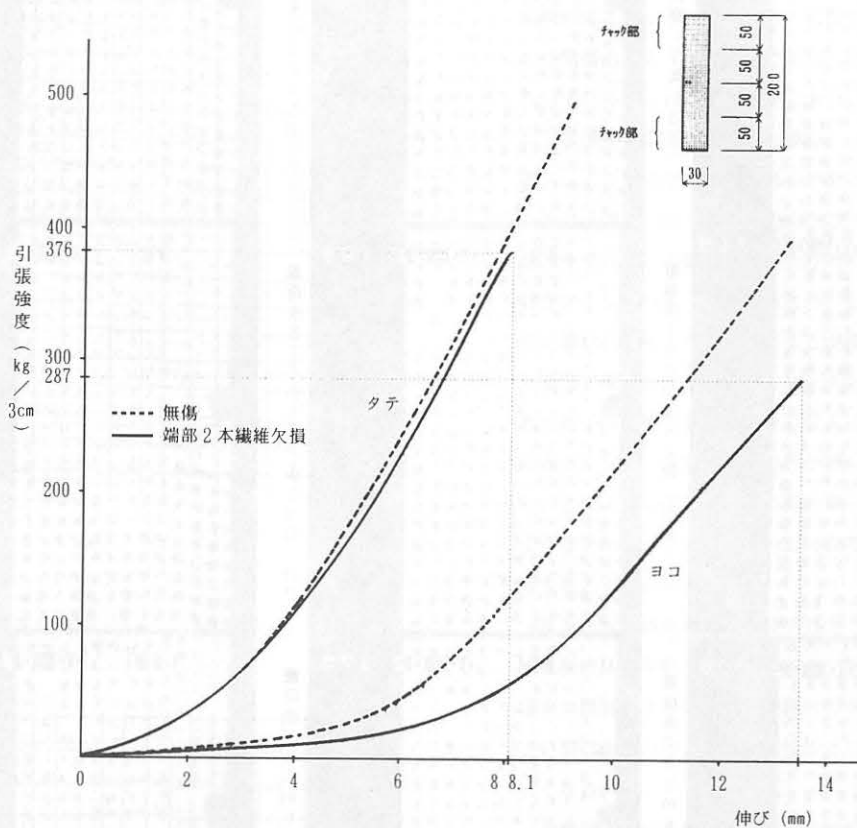


図-9 端部2本繊維欠損 強度-伸び曲線

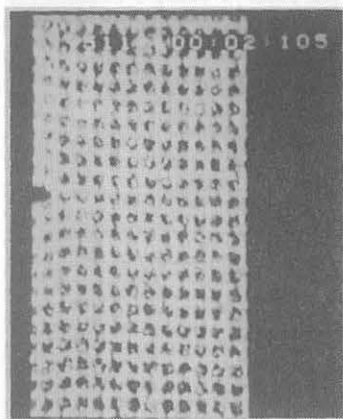


写真-16 引裂伝播前

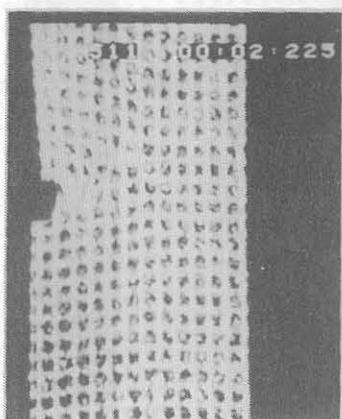


写真-17 引裂伝播進行中

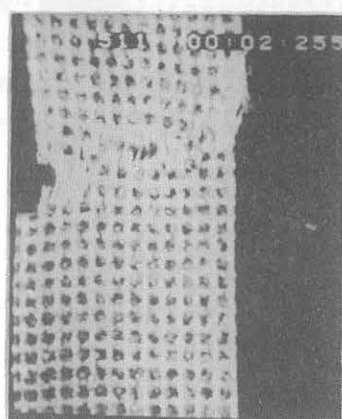
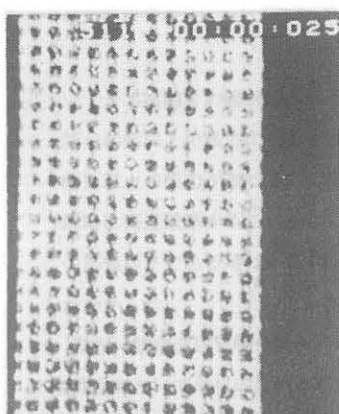
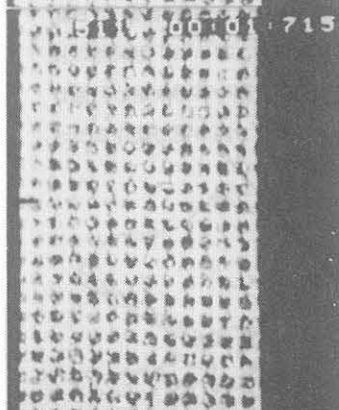


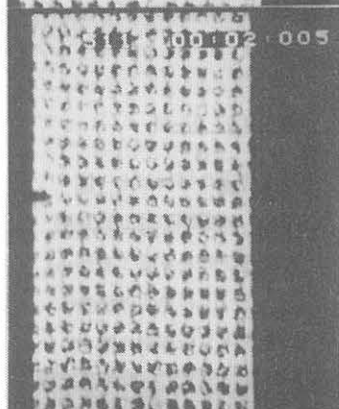
写真-18 引裂伝播終了



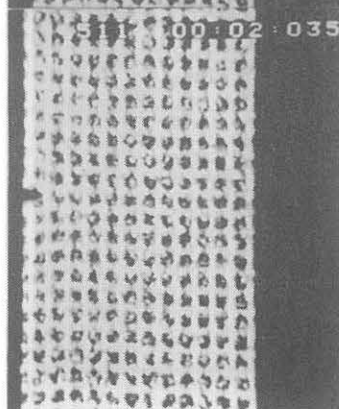
無荷重状態 (写真-19)



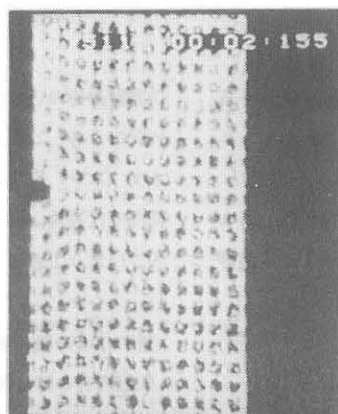
載荷後160 msec 後 (写真-20)



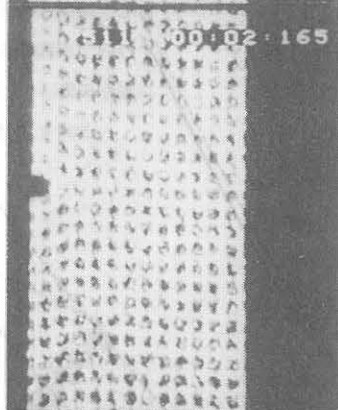
載荷後700 msec 後 (写真-21)



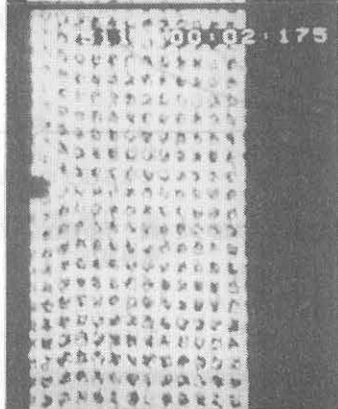
載荷後750 msec 後 (写真-22)



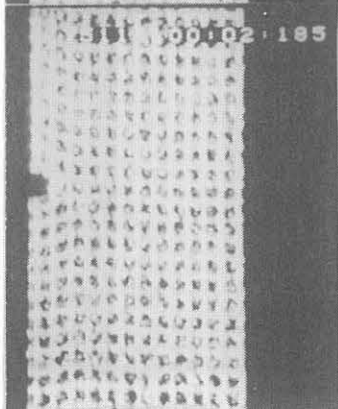
載荷後800 msec 後 (写真-23)



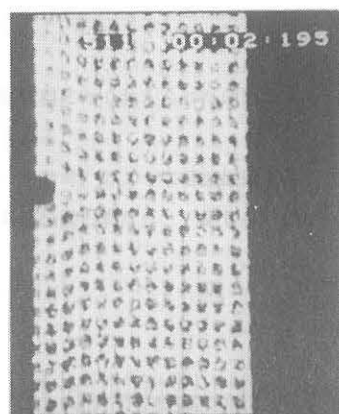
載荷後850 msec 後 (写真-24)



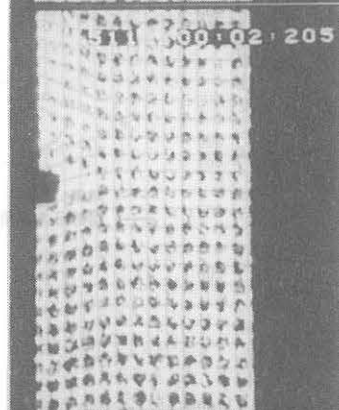
載荷後900 msec 後 (写真-25)



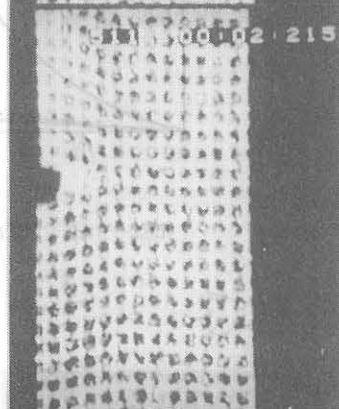
(写真-26)
載荷後950 msec 後 (弾性限界)



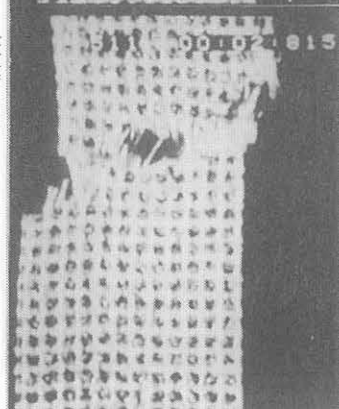
(写真-27)
載荷後960 msec 後 (引裂伝播開始)



(写真-28)
載荷後980 msec 後 (引裂伝播進行中)



(写真-29)
載荷後990 msec 後 (引裂伝播進行中)



(写真-30)
載荷後1 s 後 (引裂伝播後)

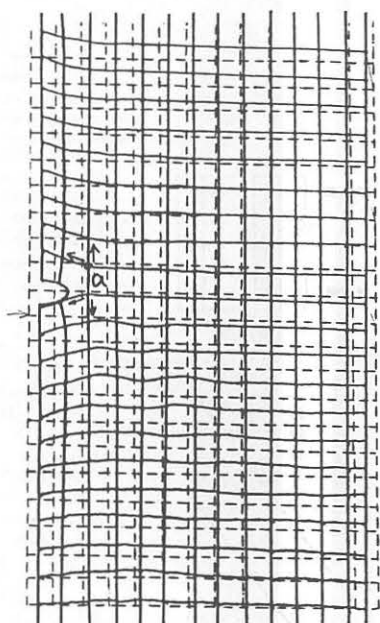


図-10 - - - - - 変形前
 — 変形後

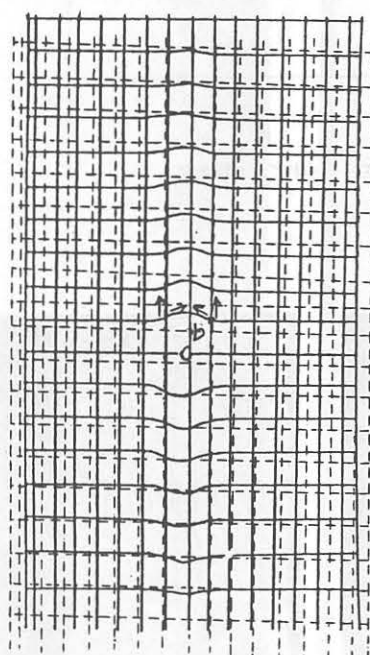


図-11 - - - - - 変形前
 — 変形後

これは、中央2本のガラス繊維が破損しているタテ糸方向の試験片で、膜材表面にはタテ糸、ヨコ糸方向とも1本おきに格子が描いてある。

膜材料にこのような欠損がある場合は、引張強度において無傷のもの、タテ方向で79%、ヨコ方向で80%となっている。これは、繊維が2本少ないと考えた場合の引張強度と単純に比較した場合、タテ方向で約20%低下、よこ方向で約16%の低下がある。

これは、図-11のb点に示すように欠損部に最も近い張力を受けている繊維は斜め上方向にもコーティング材をかえして引張られているため、引張応力は欠損部から離れた繊維よりも大きいことが推測される。また欠損部で変形が大きい所は、コーティング表面に描かれた格子間距離が著しく大きくなるほか、さらに変形が大きくなると表面の格子の色が薄くなり不鮮明となる。このような欠損部周りの応力集中により、前述のようなタテ、ヨコ方向で16~20%程度低い引張力で破断することがわかる。

写真-31は繊維の破断直前のもので、これまでは繊維は弾性体の挙動を示しているが、写真-32の引裂伝播中の膜材料においては破断繊維の本数が増加するに従い開口面積の増大により弾性体としての挙動は示さなくなる。

欠損部を有する膜材料の理論的解析は今回まで多く行われてきているが、写真-34~45に見られるような変形から破断までの膜材料の応力場における力学的挙動をふまえての検討はされていないようである。

本研究報告書(その1)においては膜材料の力学的性状を実験的に分析するにとどめているが、(その2)においては、高速破断現象も含めた実験及び理論的検証も含めたものを報告する予定である。

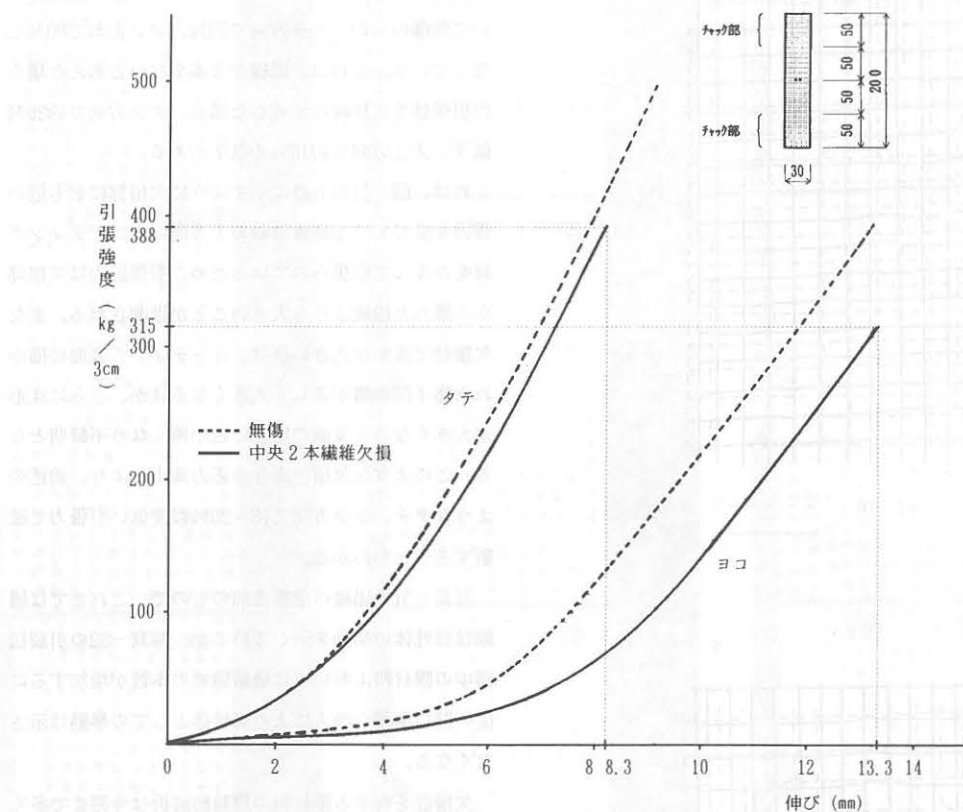


図-12 中央2本繊維欠損 強度-伸び曲線

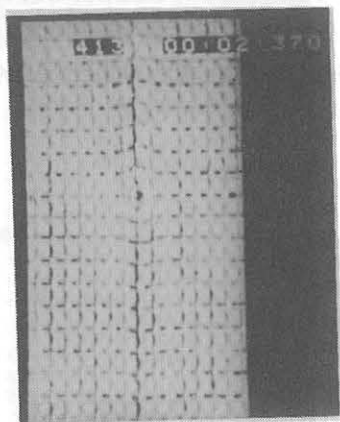


写真-31 引裂伝播前

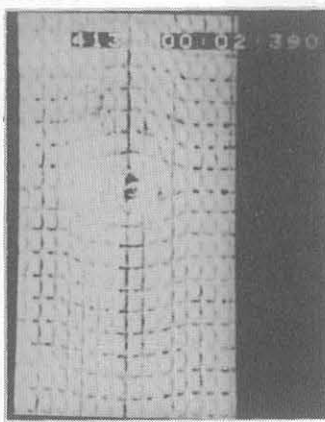


写真-32 引裂伝播進行中

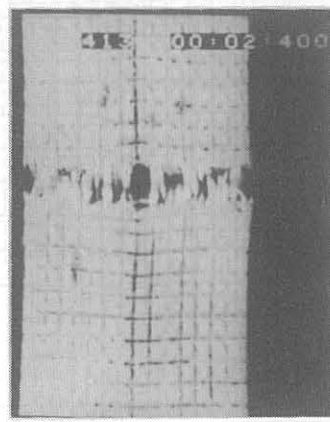
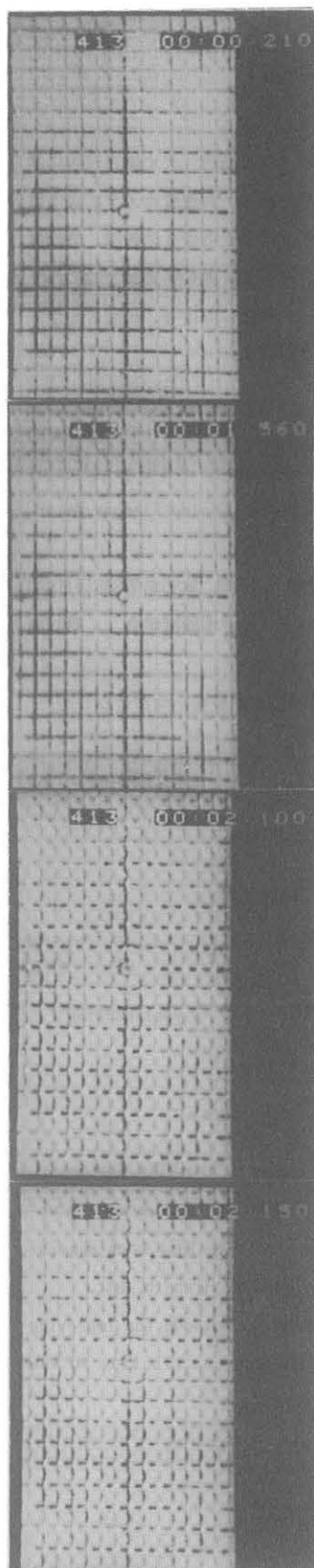


写真-33 引裂伝播終了

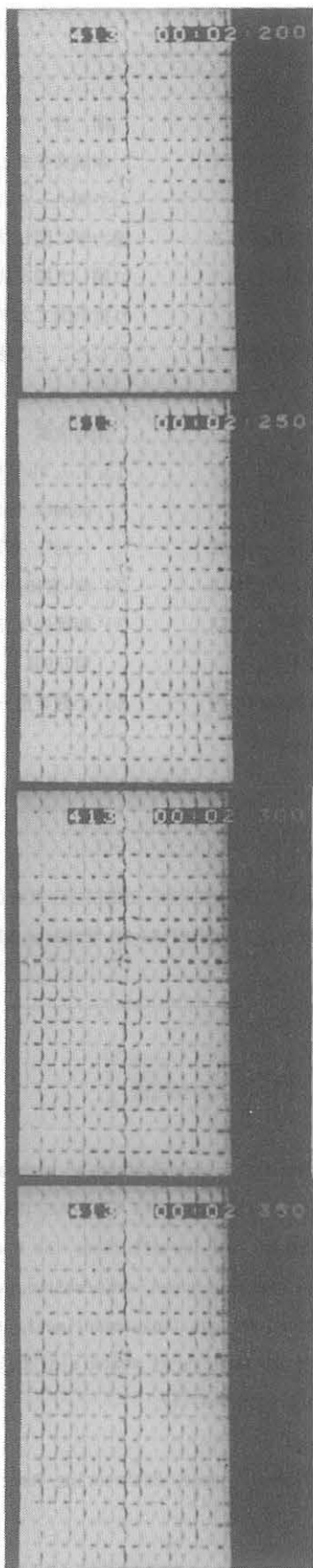


無荷重状態 (写真—34)

載荷後345 msec 後 (写真—35)

載荷後635 msec 後 (写真—36)

載荷後665 msec 後 (写真—37)

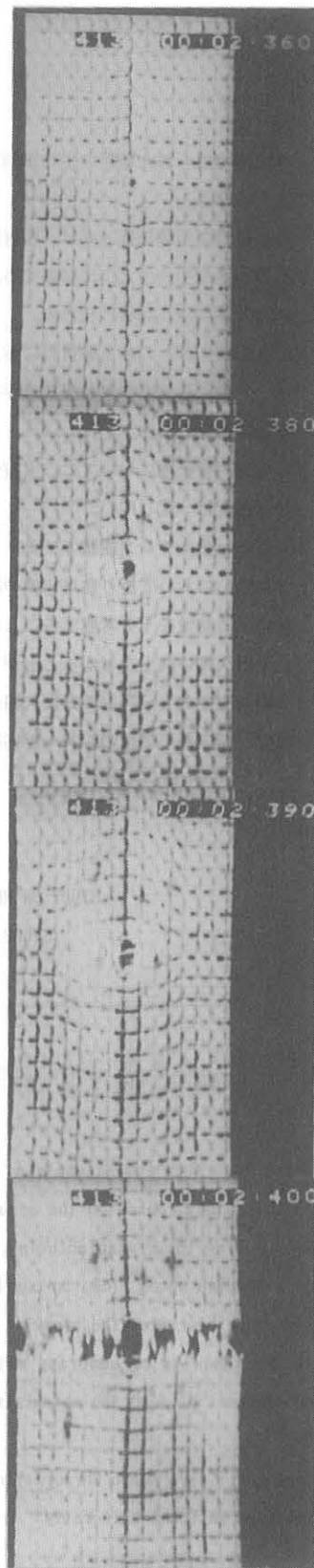


載荷後785 msec 後 (写真—38)

載荷後795 msec 後 (写真—39)

載荷後805 msec 後 (写真—40)

載荷後815 msec 後 (写真—41)



載荷後825 msec 後 (写真—42)

載荷後835 msec 後 (写真—43)

載荷後845 msec 後 (写真—44)

載荷後1445 msec 後 (写真—45)

5. 結 論

本実験で得られた結果の主な事柄を列挙すると以下のようになる。

- 1) 膜材料の引張伝播速度は、膜材料内に保持される運動エネルギーの大小に関係する。引張強度の大小により特に差が顕著に現れる。
- 2) 欠損（キズ）のある膜材料における引裂伝播速度は、その引張強度により異なるが、多くは10m/sec以下の低速となる。
- 3) 低速引裂伝播においては、引裂先端部開角、及び伝播速度は一定しない。
- 4) 四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布の取扱いにおいて折り曲げ角度や梱包時の曲げ半径等による特性を十分考慮することにより強度低下防止や耐久性の向上をはかることが可能である。
- 5) 繊維布中の5～10%の糸に欠損がある膜材料の強度は、無欠損の場合の約20～25%低下する。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり高速ビデオ撮影技術に関して磯ナックの石井清一氏に、高速度カメラによる破壊力学に関し神戸商船大学の西岡俊久助教授、信頼性に関して橋本武教授、そして、膜材料実験全般にわたり横浜国立大学石井一夫教授の御指導、御助言を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) N.J. Abbott, J. Skelton : "A Collection of papers from Journal of Coated Fibrous Materials", 1973
- 2) 南 宏和, 中原義雄 : 材料, 第30巻第335号(1980)
- 3) 西岡俊久, S.N. Atluri : 日本機械学会, 第85巻第759号
- 4) 小野寺良一 : 材料強度学要論, マグロウヒル

STUDY ON RELIABILITY OF MEMBRANE STRUCTURE BUILDINGS (PART I) (STUDY ON BREAKING PROPERTIES OF MEMBRANE MATERIALS)

Kiyosi KOMATSU

SYNOPSIS

There have been few attempts at experimental clarification of membrane materials' breaking processes. In this study, based on the assumption of various types of flaws that could develop in membrane materials during their manufacturing, processing and installation, the breaking processes have been examined with high-speed video to confirm the breaking speed, deformation extent, tensile strength, etc. The study clarifies the breaking processes through those experiments and describes methods for improving the reliability of membrane materials as structural members of buildings, thus contributing to the development of membrane materials with higher quality.

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