

# 膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究

## ー引張破断試験時におけるクランプ定着部の伸長特性ー

中村栄作\*

河端昌也\*\*

金 熙均\*\*\*

### 梗 概

膜構造の形状安定のためには、膜面を張力状態に保つことが必要である。ゆえに施工時の張力導入、および張力再導入については計画上及び維持管理上において十分考慮すべきである。定着部とは膜面に張力を導入するための機能と、鉄骨などの境界構造へ応力を伝達する機能をもつ重要な部分である。そこで本研究は定着部を含めた膜構造の応力状態と応力伝達機構を解明し、膜構造の経時変化を把握することを目的とする。本報は前報に続き、ボルト孔をあけないアルミクランプ定着部試験体について引張破断実験を行い、試験体全体の変形量だけでなく、膜材料部分およびクランプ部の変形量を個別に計測することにより、バランスの取れた評価を行う。これにより、エッジロープの違いや、糸方向の違いが変形や破断荷重に及ぼす影響を検討する。

### 1. はじめに

膜構造が形状の安定を保つためには、膜面が張力状態であることが必要である。従って膜面を安定した初期張力状態に保つための張力導入および張力管理が重要である。また、膜材料は粘弾性体であるコーティング樹脂の材料特性が主な要因となっており、クリープおよびリラクセーション（応力緩和）を生じる。これらを適切に対処することは張力管理上極めて重要である。

一方、膜構造においては、膜材料等の部分で外力を受け、それを他の構造（鉄骨支柱等）に伝達する。この応力伝達を受ける部分が定着部であり、鉄骨等の境界構造へ応力を伝達する機能と膜面に張力を導入するための機能をもつ重要な部分である。しかしながら、定着部や溶着部は表立った研究報告があまりなされていない部分である。膜材料A種（四フッ化エチレン樹脂コーテッドガラス繊維織布）を用いる場合の定着部は、膜材料に孔をあけてボルトとプレートで固定する方式と、膜材料に孔をあけないクランプによる方式が一般的である。本報では、クランプ定着を対象とする。

母材等と比べると定着部や溶着部で生じる変形量は微小であり、膜面全体に及ぼす影響は無視できる程度である場合も考えられる。しかし、膜構造の適切な張力管理を行うためには、母材だけでなく、定着部、溶着部を含めた全体的な評価を行うことが望ましい。本研究では、これまであまり解明されていない定着部や溶着部について、定量的な評価を行うことを目的としている。

前報<sup>1)</sup>では、その第1段階として、母材、溶着部およびクランプ定着部の1軸伸長特性を、破断荷重の1/4を上限荷重とする1軸引張試験と簡単なモデルを用いた解析によって検討した。クランプ定着部は、膜材料の母材部分と溶着部分、エッジとクランプ金物の接触部分（図2）で構成される（図1）。そこで、あらかじめ膜材料の1軸引張試験を行い、得られたデータをもとに膜材料の母材、溶着部についてそれぞれ引張剛性を算定し、クランプ定着部の膜材料

部分について簡略モデル化による解析を行い、膜部分の伸びを算出した。そして、クランプ定着部の1軸引張試験結果から膜部分の伸びを差し引いたものをクランプ部の変形量として扱いクランプ部の定量評価を行った。また、試験には膜材料A種を用いた。

本報では前報の結果をふまえて、膜材料が破断するまで1軸引張試験を行い、破断荷重レベルでのクランプ定着部の伸長特性を検討する。前報では許容応力度以下の比較的低荷重域での定着部の挙動を評価したが、本報では高荷重域で定着部の変形がどの程度進行するのか、また、エッジロープの硬さの違いによる影響や、クランプ定着が膜材料の破断強度に及ぼす影響などを評価する。

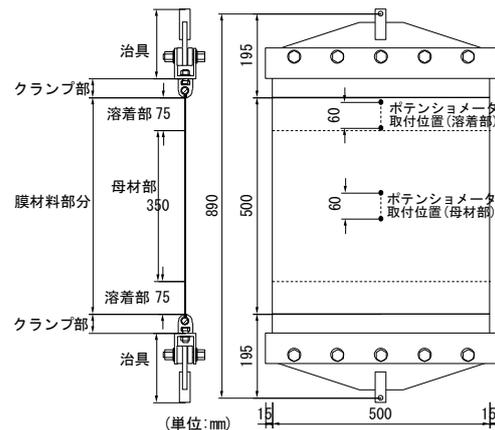


図1 定着部引張試験体の形状

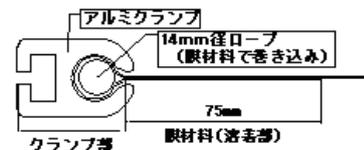


図2 クランプ部詳細図

\* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 大学院生

\*\* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 助教授 博士（工学）

\*\*\* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 大学院生

## 2. 定着部引張破断実験

### 2.1 実験の概要

実験は2000kN アムスラー試験機を用いて行う。試験体の形状は図1、2に示すとおりであり、種類については表1に示す。試験体は膜材料部分と、クランプ部、さらにそれらを試験機に固定する治具からなる。膜材料は全体の大きさが500×500 (mm) で、350 mm幅の母材部と上下75mm幅の溶着部からなる。膜材料の上下端部はアルミクランプ内部でロープを巻き込んで折り返され、75mmの幅で熱溶着される。

ロープは、編みこみ方が強い硬ロープと、編みこみ方が弱い軟ロープの2種類を用意する。これは、加力時において、ロープの断面変形が、膜材料エッジのクランプ金物からの抜け出し量(クランプ部変形量)に影響する可能性が考えられるため、ロープの硬さの違いがクランプ部変形量に及ぼす影響を評価するためである。

荷重速度は50mm/minとする。前報では、設計上の許容応力度に近い荷重レベルである30N/mmを上限として、これを均等に分割した4段階の荷重を設定し、荷重ゼロから各段階まで荷重および除荷を3サイクルずつ繰り返す繰返加力によって実験を行った。これは、膜材料の1軸引張ではタテ糸とヨコ糸のクリンプ交換や糸の緩みの影響により、荷重-伸び曲線が強い非線形性を示し、特に低荷重域でその傾向が顕著に見られる<sup>2)</sup>ため、上限を30N/mmとすることで低荷重域での伸長特性を詳しく検討するためである。高荷重域では、荷重-伸び曲線はほぼ直線状になる。これは、クリンプ交換や糸の緩みが無くなり、ガラス繊維織糸の剛性のみが効くためと考えられる。また一方で、クランプ部でも荷重荷重の増加に伴い、エッジの更なる抜け出しが生じると考えられる。そこで、本実験では高荷重域での膜材料部分およびクランプ部分の伸びを詳しく計測するために、30N/mmを4段階に区分した繰返加力に加え、荷重レベル60N/mm、90N/mm時においても更に3サイクルずつ、計6段階に区分した繰返加力を行い、その後破断するまで荷重した。なお、本実験では除荷時の膜材料の弛みをなくし、常に膜材料に張力が働いている状態を保持するために、除荷時は荷重1N/mmを下限とした。所定の荷重値に達した時および荷重1N/mmに戻した時点では、試験機を10秒間固定して一定のひずみ状態を保持した。前報では保持時間を30秒としていたが、これはCCDカメラの操作を行うためであり、本実験ではCCDカメラは用いず、また保持時間の長さが結果に与える影響は無いことを確認したため、実験効率を考慮して10秒とする。

計測方法としては、試験体全体の変形量とは別に、図1に示すように、膜材料の母材部と溶着部にそれぞれポテンシオメータを取り付け、母材部と溶着部の変形量をそれぞれ計測する。膜材料部分の変形量の計測に関して、前報ではCCDカメラによる3次元画像解析を用いたが、計測作業に手間がかかり過ぎる事、手間の量に見合ったほどの精度の高い結果が得られなかったことなどを考慮し、本実験ではポテンシオメータを用いることとした。なお、ポテンシオメータは膜材料の破断時における衝撃で落下するのを防ぐため、荷重90N/mmまでの加力後、試験体から取り外す。

クランプ部の変形量については、前報では全体の変形量から、解析で算出した膜材料部分の変形量を差し引くことにより、間接的に算出した。しかし、この方法ではクランプ部の変形量が解析結果に

依存しており、算出結果と実際の変形量との比較確認を行うことが出来ない。また、全体から膜材料部分を差し引いた値には、治具のズレ等不明確な要素が含まれており、厳密にエッジ部分の抜け出し量を評価するには十分とは言えない。そこで、本実験では直接的にクランプ部の変形量を計測するために、図3、4に示すように膜材料のクランプ際部分に標点を取り、レーザー変位計を用いることによりクランプ部の変形量を計測する。また、レーザー変位計による計測とは別に、膜材料のクランプ際部分にペンでマーキングしていくことにより、各荷重載荷時の抜け出し量を断続的に計測する。ペンでマーキングするのは、加力前の無負荷時、7.5N/mm時、30N/mm時、60N/mm時、および90N/mm時である。破断後は、試験体全体が破断の衝撃により大変形を起こし、荷重も除荷されてしまうため、正確な計測結果が得られないと判断し、破断後のマーキングによる計測は行わない。

また、試行実験として、硬ロープエッジの試験体を用いて引張破断実験を行った。試行実験では、荷重速度50mm/minで30N/mmまでの加力を3サイクル行い、その後膜材料が破断するまで加力した。計測は試験体全体の変形量とポテンシオメータによる膜材料部分の変形量のみについて行い、クランプ部分のレーザー変位計およびマーキングによる計測は行わない。ポテンシオメータによる計測は30N/mmまでとする。試行実験は破断荷重の確認と試験機の動作確認を目的に行ったため、試験条件は本実験とは異なるが、参考として試行実験結果を本実験の結果とともに示す。

表1 試験体の種類

	種類	試験体(膜部)形状 幅×長さ	試験体数		荷重速度
			タテ	ヨコ	
試行	硬ロープ	500mm×500mm	2	1	50mm/min
本実験	硬ロープ	500mm×500mm	1	2	50mm/min
	軟ロープ	500mm×500mm	3	3	50mm/min

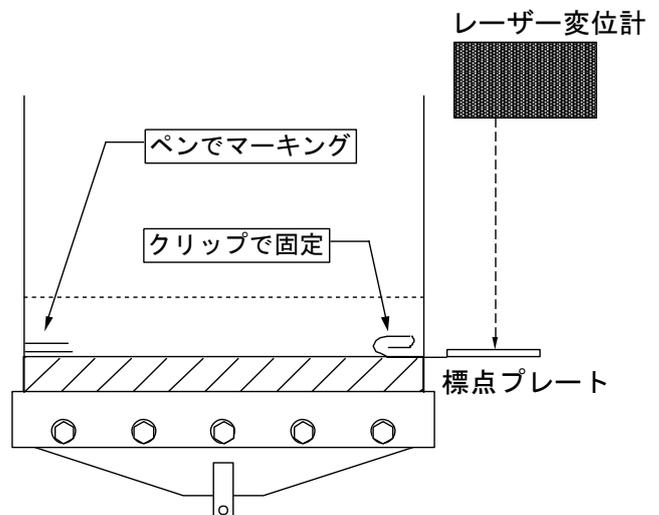


図3 クランプ際部分の計測方法



図4 レーザー変位計測の様子

## 2.2 定着部試験体の1軸伸長特性

図5に定着部試験体(本実験軟ロープエッジ)の1軸伸長曲線の1例を示す。縦軸は単位幅あたりの引張力を表し、横軸はひずみ度を表す。ひずみ度は、試験機上端のクロスヘッド変位を試験体の初期長さ500mmで除した数値である。実験開始時は膜材料に張力がかかっておらず、膜材料が弛んだ状態にある。そのため、膜材料がピンと張った状態になるまでは、荷重ゼロの状態ではひずみだけが增加する。よって、各試験体のひずみ量を正しく比較するために、膜材料に荷重がかかり始めた時点での試験体のひずみがゼロとなるように原点をそろえる。

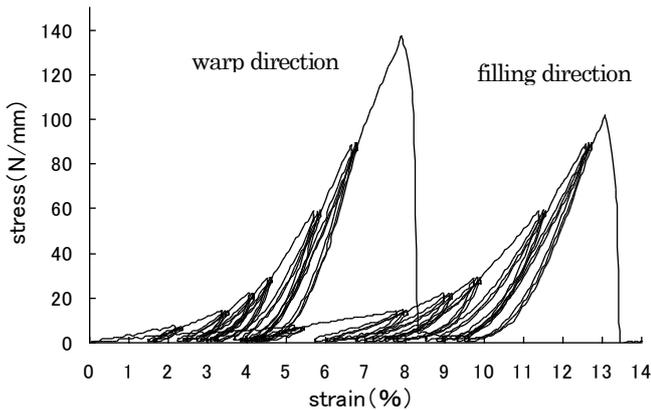


図5 定着部試験体の1軸伸長曲線

図6に定着部試験体全ての1軸伸長曲線を示す。図5同様、縦軸は単位幅あたりの引張力、横軸はひずみ度を表し、膜材料に荷重がかかり始めた時点でのひずみ量がゼロとなるように原点をそろえる。なお、グラフを見やすくするために、繰返加力を行った部分に関しては、各段階の第1サイクル載荷時曲線を繋いだものを表す。各段階の切り替わり点では一部に不連続なデータが見られるが、これは繰返加力による残留ひずみの影響を含んでいるためである。実線は硬ロープエッジの試験結果で、太線が本実験の結果、細線は試行実験の結果を示す。破線は軟ロープエッジの試験結果である。

硬ロープエッジについて試行実験(細線)と本実験(太線)の結

果を比較すると、タテ糸方向では多少の違いがあるが、ヨコ糸方向では良く一致している。試験体数が少ないため、はっきりとは判断できないが、加力方法の違いが伸長特性に与える影響は少ないとみて良い。破断強度に関しては、タテ糸方向が約140N/mmであるのに対し、ヨコ糸方向は約110N/mmで、タテ糸方向に比べて低い値を示すことがわかる。ただし、膜材料A種の引張強さがタテ150N/mm、ヨコ120N/mm程度であることを考慮すると、クランプ定着が膜材料の強度に及ぼす影響はさほど大きくないと言える。ロープエッジの硬さの違いは、タテ糸方向では各試験結果にばらつきがあり、はっきりとした傾向はみられないが、ヨコ糸方向については、軟ロープエッジの試験体に若干のばらつきはあるものの、硬ロープエッジ(実線)と軟ロープエッジ(破線)のひずみには大きな違いがみられる。ロープエッジの硬さの違いは破断荷重にはほとんど影響しないが、ひずみ度には大きく影響し、硬ロープエッジの方がひずみは少ない傾向にあるといえよう。各伸長曲線を比較すると、高荷重域では全て近い勾配を示していることから、ロープエッジの違いは40N/mm付近までの低荷重域で特に顕著に表れていることがわかる。

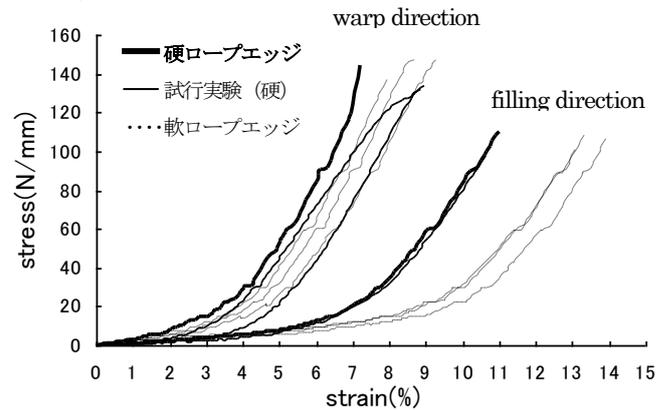


図6 定着部全試験体の1軸伸長曲線

## 2.3 膜材料部分の1軸伸長特性

図7、8はポテンシオメータの計測による膜材料部分の1軸伸長曲線を示す。図7は硬ロープエッジ試験体の結果、図8は軟ロープエッジ試験体の結果で、それぞれ縦軸は単位幅あたりの引張力を表し、横軸はひずみ度を表す。ひずみ度は、ポテンシオメータ変位をポテンシオメータの初期取り付け間隔60mmで除した数値である。膜材料に張力がかかり始めた時点でのひずみ量がゼロとなるように原点をそろえる。グラフ内の実線は溶着部、点線は母材部の伸長曲線を表す。図6同様、各段階の第1サイクル載荷時曲線を繋いだもので、各段階の切り替わり点にみられる不連続なデータは繰返加力による残留ひずみの影響である。

硬ロープエッジ試験体については、タテ糸方向はばらつきが少ないが、ヨコ糸方向はばらつきが大きい。これは、ヨコ糸方向の試験体のうち、本実験で用いた試験体1体、および試行実験で用いた試験体は、この実験を行う以前に一度30N/mmまで加力を受けた履歴があり、膜材料のクリンプ交換および糸の緩みが解消されていたことが影響して、本来よりも生じるひずみが少なくなったためと思われる。一方、軟ロープエッジ試験体はタテ糸方向、ヨコ糸方向ともにばらつきが少なく良く一致している。

硬ロープエッジ試験体のうち载荷履歴のある試験体の結果を除いて、各試験結果の 90N/mm 時におけるひずみ度を比較すると、硬ロープエッジ、軟ロープエッジともに、タテ糸方向は母材が約 4%、溶着部が約 3.5% で、ヨコ糸方向は母材が約 11.5%、溶着部が約 9% であることがわかる。よって、エッジロープの硬さの違いは、膜材料部分の伸長特性にはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

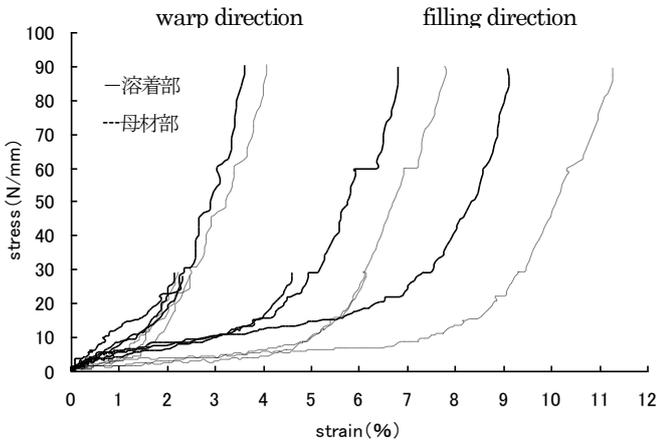


図7 膜材料部分の1軸伸長曲線 (硬ロープエッジ)

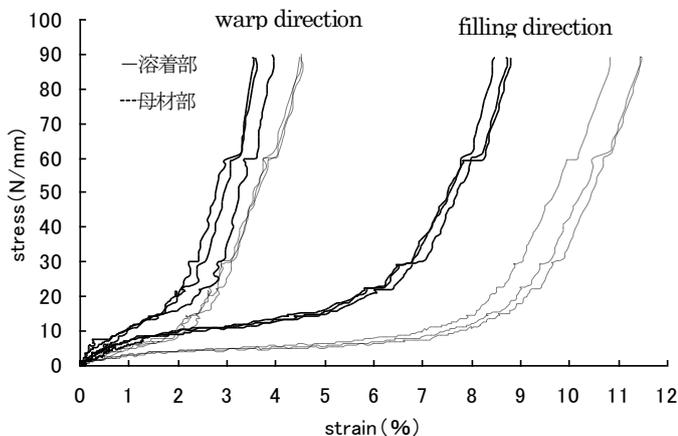


図8 膜材料部分の1軸伸長曲線 (軟ロープエッジ)

## 2.4 クランプ部の変形量

図9、10はレーザー変位計の計測とマーキングによるクランプ部の変形量を示し、図9がタテ糸方向、図10がヨコ糸方向の試験結果である。縦軸は試験体にかかる単位幅あたりの引張力、横軸はクランプ部の変形量を表す。レーザー変位計とマーキングの結果には5mm程度の開きが見られる。この原因としては、レーザー変位計の結果にはクランプ部の変形量の他に、载荷中に生じる治具のズレや、標点取り付け位置とクランプ際との間の膜材料分の伸びが含まれていることが考えられる。このような要因も含め、レーザー変位計の結果には若干のばらつきが生じるが、連続的なデータが得られる利点もある。図11は実験結果の1例で、試験体全体の变形量とクランプ部の变形量との関係を表したものであるが、試験体の载荷

サイクルと同様にクランプ部の伸び縮みが繰り返されていることがわかる。载荷時と除荷時の経路が異なり、また、载荷と除荷の繰り返しの従ひひずみが増加していることから、クランプ内部でロープを巻き込んでいる膜材料部分の粘性と残留ひずみの影響が、クランプ部の伸長曲線に影響していると言える。図9、10より、多少のばらつきはあるものの、硬ロープよりも軟ロープの試験体の方がクランプ部の変形は大きい傾向が見られ、その差はロープの変形量の違いであるといえよう。一方、膜材料の糸方向の違いはクランプ部の変形量にはさほど影響が無いといえる。これは、クランプ内の膜材料の長さは4、5cm程度で、糸方向の違いが生じてもわずかであることが原因と考えられる。クランプ部の変形は30N/mmまでの低荷重域で大きく生じるが、高荷重域でも载荷にともない変形が進んでいるといえる。また、一度载荷を受けた定着部には膜面同様、残留ひずみが残る可能性があり、注意が必要といえよう。

図12、13は膜材料部分とクランプ部の変形量の合計値と、定着部試験体全体の变形量(実線)との比較を示す。図12はタテ糸方向、図13はヨコ糸方向の伸長曲線である。膜材料部分の変形量は、母材部と溶着部について、それぞれポテンショメータによるひずみ度に部材長さ(母材部350mm、溶着部150mm)を乗じて変形量を算出し、それぞれの変形量を足して求める。クランプ部の変形量は、上下2箇所のクランプ部の変形量が同じであると仮定し、レーザー変位計による計測値およびマーキングによる計測値をそれぞれ2倍して求める。合計値は、膜材料部分の変形量とレーザー変位計によるクランプ部の変形量を足したものの(点線)と、7.5N/mm、30N/mm、60N/mmおよび90N/mm時の膜材料部分の変形量とマーキングによるクランプ部の変形量を足したものの(●、○)の2種類を示す。縦軸は単位幅あたりの引張力、横軸は変形量である。

レーザー変位計による合計値は全体の変形量よりも10mm程度大きな変形量を示しているが、マーキングによる合計値は全体の変形量とほぼ一致していることがわかる。よって、マーキング計測によるクランプ部の変形量はほぼ正確であるといえ、荷重レベル90N/mm時におけるクランプ部の変形量は、硬ロープの場合5~6mm程度、軟ロープの場合6~8mm程度であるといえよう。

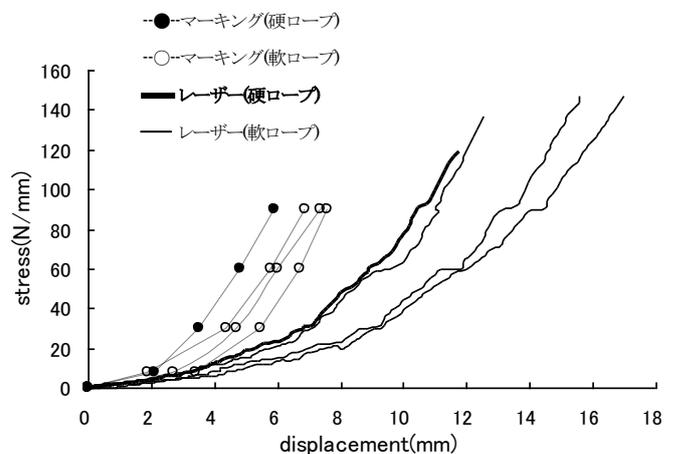


図9 クランプ部の変形量(タテ糸方向)

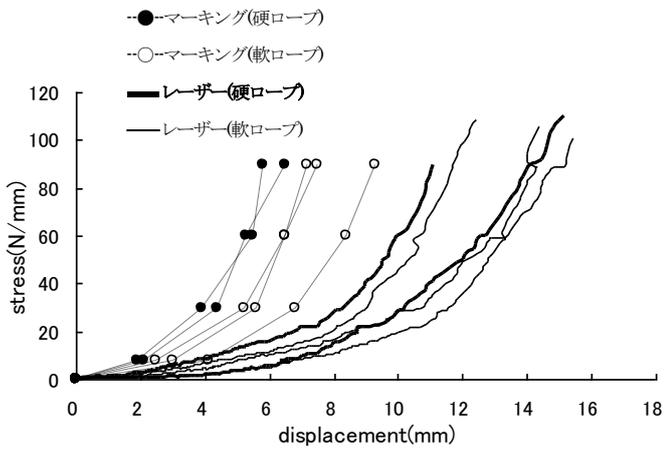


図 10 クランプ部の変形量 (ヨコ糸方向)

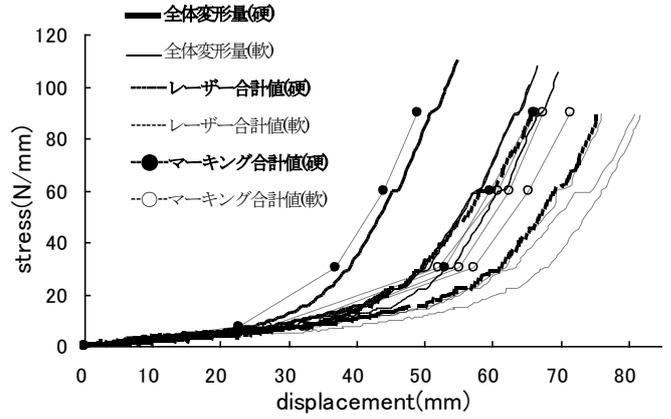


図 13 各部変形量の和と試験体全体の変形量との比較 (ヨコ糸方向)

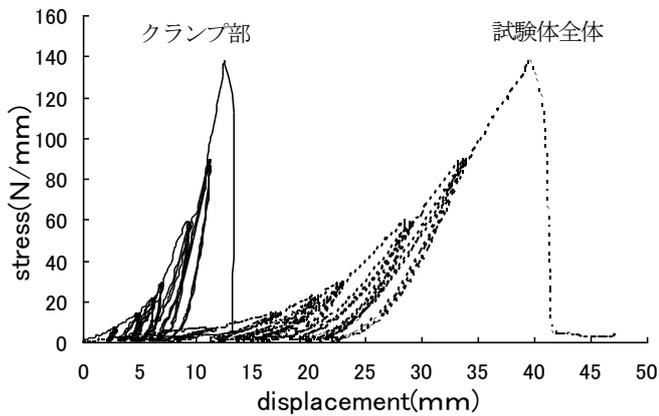


図 11 試験体全体とクランプ部の伸長曲線

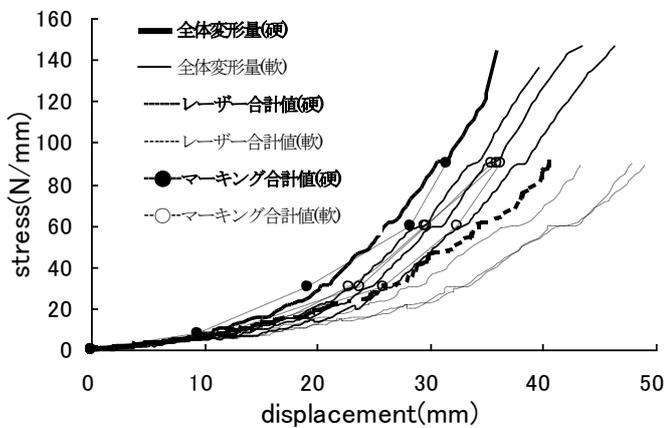


図 12 各部変形量の和と試験体全体の変形量との比較 (タテ糸方向)

## 2. 5 膜材料の破断形状

図 14、15 はタテ糸方向、ヨコ糸方向試験体それぞれの、破断時における破断形状の 1 例を示す。他の試験体も同様の破断形状を示した。ヨコ糸方向試験体は加力直交方向に直線的に破断しているのに対し、タテ糸方向試験体では、母材中央部分で複雑な曲線状に破断する傾向が見られる。タテ糸方向試験体の破断部分を見ると、加力方向の糸 (タテ糸) は切れているが、加力直交方向の糸 (ヨコ糸) は切れずに多方向に引っ張られていることがわかる。膜材料は、タテ糸方向とヨコ糸方向では単位長さあたりの織糸の本数が異なり、タテ糸方向の方が密に織糸が通っている。また、膜材料の製作上、タテ糸に比べ、ヨコ糸はより多く波打つ構造になっており、このような織糸の構造の違いが破断形状の違いに表れたのではないかと推測される。また、破断位置に関しては、タテ糸方向試験体は全て図 14 に示すような膜材料中央部分で破断しているのに対し、ヨコ糸方向試験体は、1 体のみ膜材料中央部で破断するものがあつたが、それ以外は全て図 15 に示すように溶着際で破断していた。溶着部は母材部に比べ剛性が高く、また、加力直交方向の縮みも母材部に比べて少ない。そのため、溶着際に応力が集中したと考えられる。

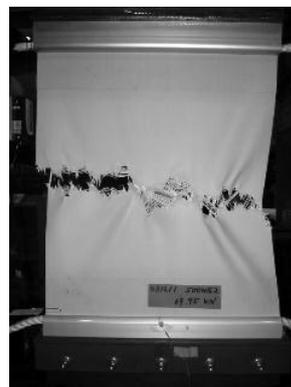


図 14 試験体の破断形状 (タテ糸方向)



図 15 試験体の破断形状 (ヨコ糸方向)

### 3. まとめ

本研究では定着部を含めた膜構造の応力状態と応力伝達機構を解明し、膜構造の経時変化を把握することを目的とし、高荷重域での挙動、および破断状態を検証するため、前報に引き続き、クランプ定着試験体の引張実験を行った。

アルミクランプを用いた定着方法では、定着による膜材料の強度低下はさほど大きくないことが明らかとなった。これはアルミクランプの構造上、膜材料には均等に引張力が伝わりやすく、また、ボルト定着のように膜材料にボルト孔を開ける等の剛性低下要因が少ないためといえるだろう。しかし、糸方向によっては溶着際で破断する機会が多いことから、定着部では想定耐力より低い荷重で破断する可能性も考えられ、定着部の耐力決定を行う際には注意が必要であろう。

ロープエッジの硬さの違いや、加力方法の違い、および载荷履歴の有無は、変形量に違いが表れたが、破断荷重には違いが見られなかった。これは、糸のクリンプ交換や緩みの影響を含む低荷重域とは違い、高荷重域では糸の緩みなどが全て解消され、ガラス繊維織糸の剛性のみが効いているためであると考えられる。

クランプ部の変形量は糸方向に関わらず、90N/mmの応力時で5～8mm程度、ロープの硬さによる違いは1、2mm程度であった。低荷重域で大きく変形するが、高荷重域でも変形は進行し続け、一度载荷を受けた定着部には残留ひずみが生じることが明らかとなった。

### 謝辞

実験の実施にあたっては太陽工業(株)斎藤嘉仁氏にご協力と貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝を表します。

### 参考文献

- 1) 河端昌也、金熙均、中村栄作：膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究—溶着部およびクランプ定着部の伸長特性—、膜構造研究論文集2002、2002年12月
- 2) 石井一夫：膜構造用膜材料概説、膜構造研究論文集92、1992

---

## Study on stress transition mechanism of clamping part of membrane structures

- uniaxial tensile characteristics of clamping part in conducting tensile fractured test -

Eisaku Nakamura\*

Masaya Nakamura\*\*

Heekyun Kim\*\*\*

### SYNOPSIS

For form stability of membrane structures, membrane material is required to be in tension. Therefore, in planning and maintenance management, the engineer should consider enough about introduction of stress during construction and re-introduction of stress after completion. Clamping part is an important portion with the function for introducing tension into membrane materials, and the function to transmit stress to boundary structures, such as steel frames. Then, the purpose of this research is to clarify stress condition and stress transfer mechanism including clamping part of membrane structures, and to grasp the changing tendency of membrane structures with the passage of time. In this research, following previous one, we perform well-balanced evaluation by conducting tensile fractured tests of clamping part's specimens, and by measuring individually the amount of displacement of not only overall specimen's length but membrane material and clamping part. Thereby, we consider the influence the difference in the hardness of edge rope and the difference in the direction of thread affect modification and fracture load.

---

\* Graduate Student, Graduate School of Engineering, Yokohama National University

\*\* Dr.-Eng. Associate Prof., Faculty of Engineering, Yokohama National University

\*\*\* Graduate Student, Graduate School of Engineering, Yokohama National University