

膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究

ーボルト定着部における膜材料の伸長および破断性状ー

金 熙均*
河端昌也**

梗概

膜構造は構造的安定性確保のために、膜面を張力状態に維持する必要がある。膜構造の定着部は、膜面に張力を導入する機能と、膜面が受ける応力を鉄骨などの境界構造へ伝達する機能を持つ重要な部分である。本研究では膜構造における定着部の定着方式が膜材料の破断性状や耐力に及ぼす影響について把握し、定着部を含めた膜構造の破断時の応力状態と応力伝達機構を解明することを目的とする。本報は、ボルト定着部試験体について1軸引張試験を行い、ボルト定着部の破断進行状況の把握やエッジロープおよびゴムの硬さ、またボルト締付トルクの違いをパラメータとして耐力評価を行う。これにより、定着部のボルト定着加工が膜材料の破断性状に及ぼす影響について検討する。

1. はじめに

膜構造は、膜面の初期張力を保持することで構造的安定性を確保しているため、膜面の張力導入および張力管理が重要である。膜材料は、織布の緩みおよびコーティング樹脂の粘性等の影響により、クリープやリラクセーション（応力緩和）が生じる。これらの性状を把握し適切に考慮することも張力管理上極めて重要である。また、台風時や積雪時の破損事例では、定着部付近で膜材料が破断している例がみられる。膜構造における定着部は膜面に張力を導入し、鉄骨などの境界構造に応力を伝達するなど重要な機能を有しているが、これまでこの部位に関する研究報告があまりなされていない。膜構造の破断性状や耐力を把握するために、膜材料の定着部における破断メカニズムや破断強度などの評価は重要である。

膜構造における定着部には様々なディテールがある。その中で PTFE 膜(四フッ化エチレン樹脂でコーティングされたガラス繊維織布で一般的に膜材料 A 種と呼ばれる)に用いられる定着部には、膜材料の端部を折り返して溶着し、折り返し部分には合成繊維ロープを挿入するエッジ加工を行い、エッジ部分をクランプで固定する方法と、膜材料の折り返し部分に一定間隔で孔をあけてボルトと金属プレートで固定する方法が一般的である。図1にはボルト定着とクランプ定着の一例を示す。定着部や溶着部で生じる変形量は母材に比べると微小であり、膜面全体に及ぼす影響は無視できる場合もある。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、定着部や溶着部を含めた全体的な評価を行うことが望ましい。

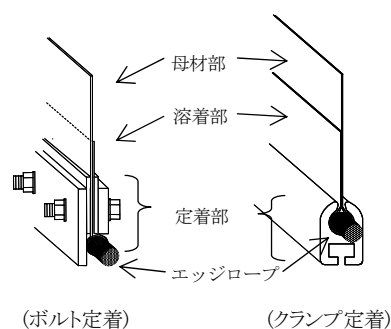


図1 一般的な定着部の詳細図

著者らは、これまでに母材、溶着部およびクランプ定着部の1軸伸長特性を、破断強度の1/4を上限強度とする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^{2,3)}。その結果をふまえて、クランプ定着部を破断強度まで1軸引張試験を行い、膜材料の母材部・溶着部・クランプ部の伸長特性とエッジロープの硬さの違いなどが膜材料の破断性状に及ぼす影響について検討した^{4,5)}。本報では、ボルト定着部の引張試験を行い破断の進行状況やエッジロープとゴムの硬さ、ボルト締付トルクの違いによる影響を検討し、ボルト定着加工が膜材料の破断性状に及ぼす影響について評価する。

* 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）

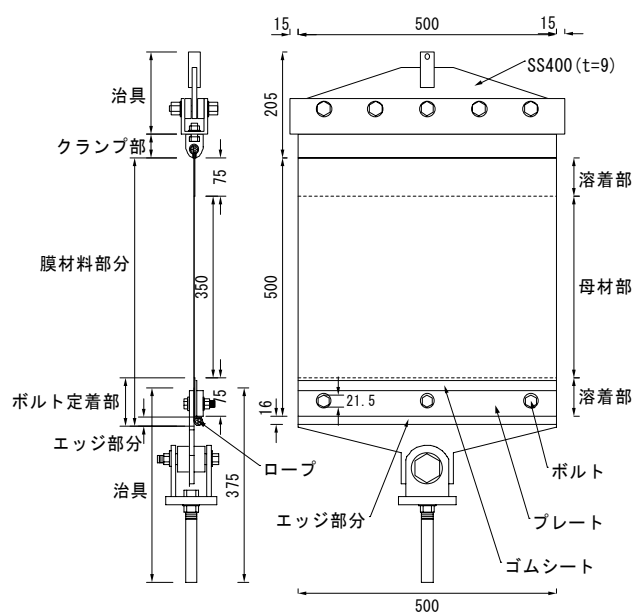


図2 ボルト定着部試験体の形状(単位:mm)

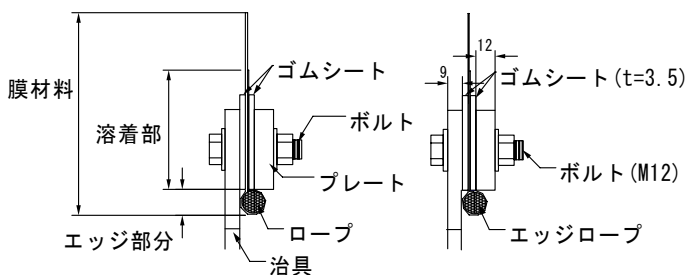
2. 定着部引張実験

2. 1 実験の概要

実験は 2000kN アムスラー型試験機を用いて 50mm/min の載荷速度で行う。試験体の形状は、図2と図3に示すとおりで、試験体種類は表1に示す。試験体は膜材料部分とボルト・プレート定着加工部、さらにそれらを試験機に固定する治具で構成される。膜材料は全体の大きさが 500mm×500mm で、350mm 幅の母材部と上下 75mm 幅の溶着部からなる。膜材料の上端部はボルト定着部よりも耐力の大きいことを確認したクランプで定着されており、下端部はロープを巻き込んで折り返し熱溶着された溶着部にボルトと金属プレートで定着されている。ボルト定着部は膜材料に直接孔をあけるため、孔の影響で膜材料の破断強度の低下や膜面への不均等な応力伝達などが予想される。また、膜材料を治具に押さえるプレートは、厚さ 12mm、幅 50mm のアルミフラットバーを用いる。

エッジロープは、図4に示すように呼称太さが 14mm である、密に編み込まれた特殊なロープ（以下、硬ロープとする）と、ビニロン製の JIS L2703 の三つ打ちロープ（以下、軟ロープとする）の 2 種類とする。なお、2 種類のロープは長期応力に対するつぶれ（断面形状の変化）の違いが予想されるが、ここでは短期応力に対する挙動を検討対象としている。ゴムは、D24.6/2/S の硬ゴムと D10.2/2/S の軟ゴムの 2 種類とする。D24.6/2/S と D10.2/2/S は、JIS K6253（加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法）によりデュロメータで測定した結果である。また、本研究では定着部に挟むゴムについて、図3に示すように、膜材料の片面に 1 枚を挟む方法を基準

として両面に 1 枚ずつ挟むゴム 2 枚の場合との比較を行う。一般には、ゴム 2 枚とするケースが多いが、ここではゴムの影響を検討するためにゴム 1 枚を中心に実験を行う。ボルト締付トルクは、H (8.8kN・cm)、M (5.9kN・cm)、L (2.9kN・cm) の 3 種類とする。これらは、加力時にボルト定着部において、エッジロープの硬さ・ゴムの硬さと枚数・締付トルクが、膜材料の抜け出し量や膜材料のエッジロープ部分が定着加工部分にめり込む量および形状等に影響する可能性が考えられ、それらの違いがボルト定着部の破断性状に及ぼす影響を評価するためである。



(ゴム1枚) (ゴム2枚)
図3 ボルト・プレート部詳細図(単位:mm)

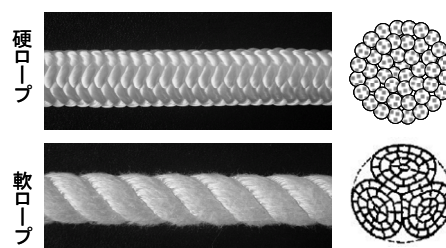


図4 エッジロープの詳細図

表1 試験体の種類

エッジ ロープ	ゴムの硬さ (ゴム枚数)	トルク (kN・cm)	糸 方向	荷重速度 (mm/min)	試験体数
硬	硬(1)	H(8.8)	タテ	50	各試験体 3体ずつ
硬	軟(1)	M(5.9)	・		
軟	硬(1)	L(2.9)	ヨコ		
硬	硬(2)	M(5.9)	タテ		

(試験体形状(膜材料部:幅×長さ)=500mm×500mm)

本研究では、既報²⁾と同様に 30kN/mまでを 4 段階に区分した繰返加力を行い、その後破断まで単純加力する。定着部位では、荷重の増加に伴いボルト定着部のボルト・プレート定着部分の膜材料の抜け出しが考えられる。また、除荷時の膜材料の緩みをなくし、常に膜材料に張力が生じている状態を保持するため、除荷時は荷重

1kN/mを下限とする。また、所定の荷重値に達した時および荷重 1kN/mに戻した時点の試験機は一定のひずみ状態を保持するために試験機固定保持時間を 10 秒間に設定する。

ボルト・プレート部については、加力前の無負荷時と 30kN/m 時および破断後（膜材料の一部に引裂を生じた状態）に膜材料のボルト・プレート際部分にペンで直接マーキングして、破断時の抜け出し量を計測する。また、実験中に動画撮影を行い膜材料の定着部からの抜け出しやボルトと膜材の接触などを行う。

2. 2 定着部試験体の 1 軸伸長特性

加力前のボルト定着部試験体は、図 5 の左のように膜材料が緩んで下端部の治具も傾いた状態であるが、試験体を加力すると図 5 の右のように膜材料は張力状態になり下部の初期緩みは解消され、膜材料が伸び始める。

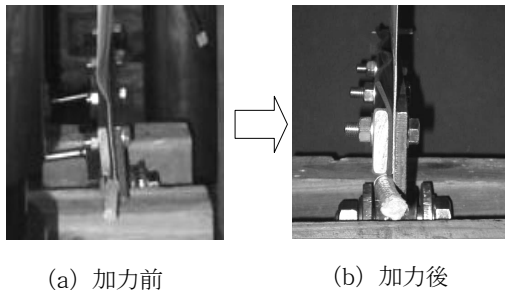


図5 下端部の初期緩み解消

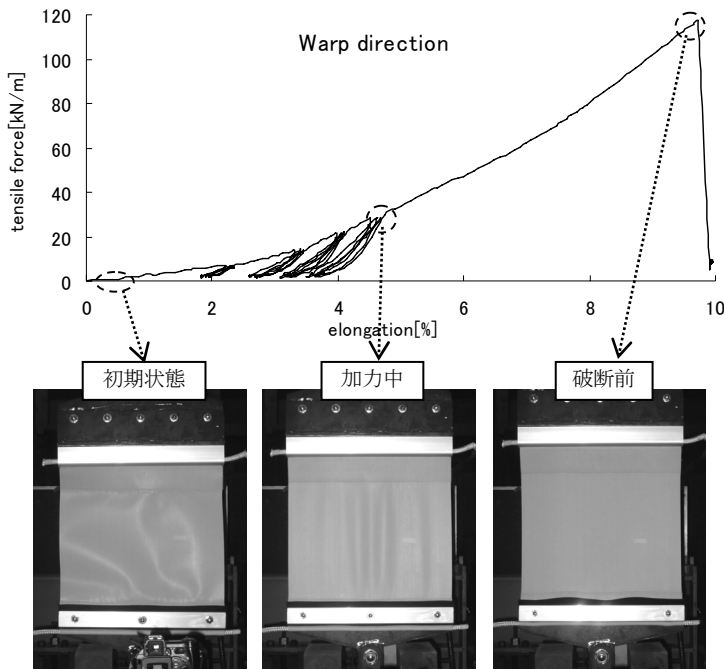


図6 試験体全体の変形図

図 6 は、ボルト定着部の伸長曲線の一例と試験体の加力中の変形図を示す。ボルト定着部の試験結果の伸長曲

線は、膜材料に荷重がかかり始めた時点の原点としているので、定着部の緩みや傾きは解消された後と考えてよい。30kN/m以下の張力ではしわの発生を伴いながら伸長し、30 kN/m以上では、しわがほとんどなくなる。その後は、加力直交方向にややくびれた形状となって膜材料が破断し荷重が急落する伸長曲線を表す。破断形状については後述する。図 7 は、ボルト定着部とクランプ定着部⁴⁾ 試験体の 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、横軸は加力方向の伸び率を表す。伸び率は、試験機上端のクロスヘッド変位を試験体の膜材料の初期長さ 500mm で除した数値で試験体全体の伸長特性を表している。図 7 のようにボルト定着部とクランプ定着部は荷重レベル 30kN/m を超える高荷重域で顕著な差を表す。

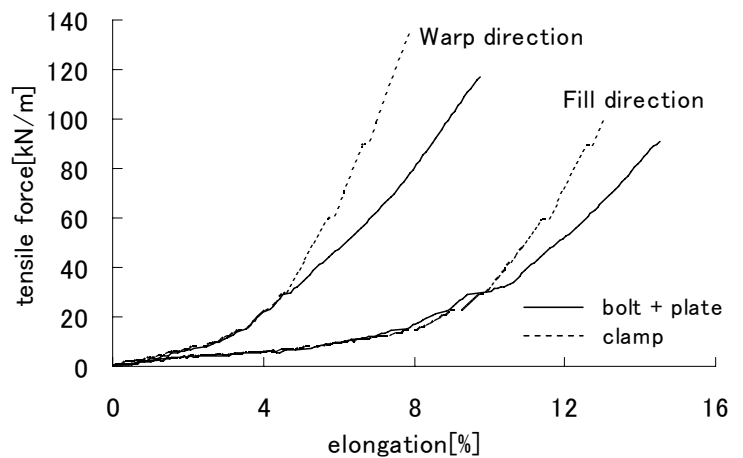


図 7 定着部試験体の 1 軸伸長曲線

2. 3 定着加工部における伸長特性

ボルト定着部は、膜材料の溶着部に孔を空けるため、これが破断性状に大きく影響を及ぼすと予想される。ボルト定着試験体を加力すると図 6 のような伸長変形のほかに、膜材料の定着部からの抜け出しが起きる。図 8 は、ボルト定着内部の孔付近の変形状態の予想図を示す。図 8 (a) のように初期状態のボルトは、長円形の孔の上部に位置する。その後、加力が始まるとボルトは孔の中間部分に位置し（同図 (b)）、膜材料のプレートからの抜け出しとエッジロープのプレート下部へのめり込みが発生する。つまり、定着部では加力によりエッジロープがプレートの側面に当たって断面が変形し、膜材料はボルト定着部のプレートから引張方向に抜け出す動きが生じる。さらに加力されると、エッジロープは断面がつぶれながらプレートと治具の間にめり込み、膜材料はプレートからさらに抜け出す現象が起きる。このときボルト間では後述のようにプレートの浮上りが生じる（同図 (c)）。その結果、ボルトが孔の縁に接触して、膜材料にめり込み、孔の両脇の膜材料に引裂が生じる現象が内部で進行していると推測される。

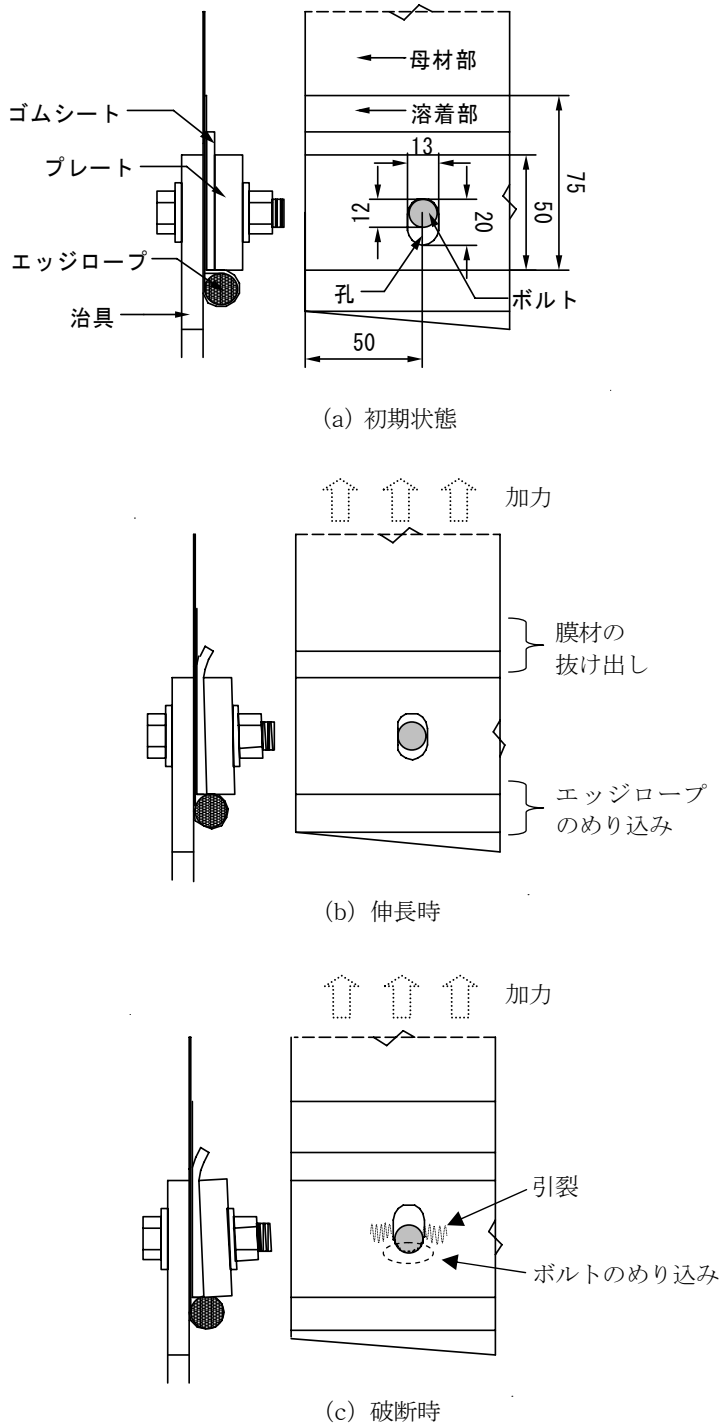


図8 定着内部の膜材の抜け出しとボルトのめり込み

図9は、ロープ軟・ゴム硬の場合の伸長曲線を示しており、許容応力範囲の繰返加力終了後の低荷重の時点から破断までの伸長曲線を示す。図中に示す膜材料の抜け出しは、伸長曲線の剛性が途中で下がる部分を判断基準とする。動画記録からも定着部から膜材料の抜け出しが確認された。図9によると、タテ糸方向とヨコ糸方向がともにトルクHとMでは、30kN/mを超えたあたりで抜け出し現象が見られる。しかし、トルクLでは最初の加

力時点で既に抜け出し現象が見られる。ロープ硬・ゴム硬とロープ硬・ゴム軟の場合もトルク強さに対して同様の伸長特性を示し、30kN/m付近で剛性の変化が見られた。

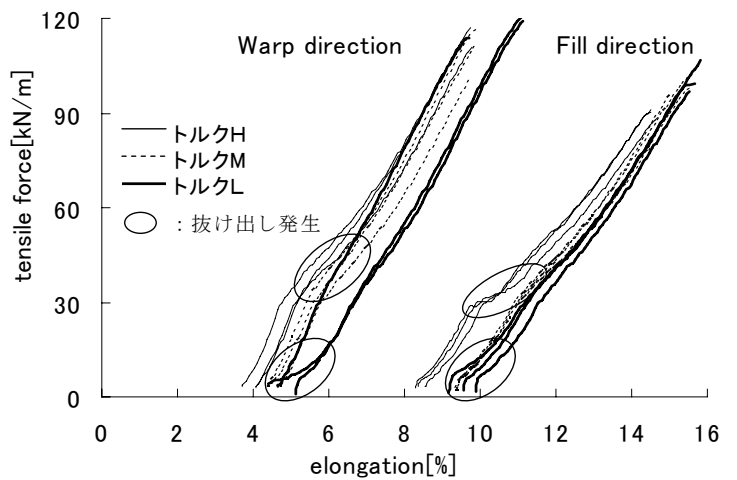


図9 ロープ軟・ゴム硬の試験体の伸長曲線

図11は、ボルト定着部の破断時における膜材料の抜け出し量を破断後（膜材料の一部に破断および引裂を生じ、荷重が低下した状態）に膜材料にマーキングした計測値で示す。図に示す各位置は、図10のように①破断部の反対側、②ボルト間、③中央ボルト、④ボルト間、⑤破断側に対応する。図11の結果からボルト定着における膜材料の抜け出しは、全試験体で破断部の反対側から破断側にかけて大きく生じており、タテ糸方向とヨコ糸方向ともにトルクLで最大抜け出し量を示している。破断後は荷重が低下しているため②と④の抜け出し量は小さいが、破断前は②と④で膜材の抜け出しが最大となっていた。位置による抜け出し量の差は、ロープ軟・ゴム硬の場合が他に比べて小さい傾向を示している。

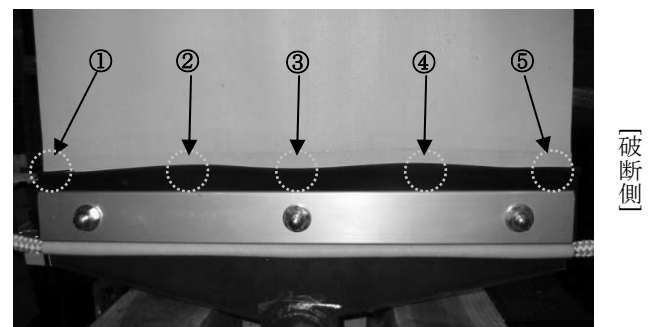


図10 測定位置

2. 4 ボルト締付トルクの破断性状への影響

ここでは、ボルト締付トルクが破断性状に及ぼす影響を(a)ロープ硬・ゴム硬、(b)ロープ硬・ゴム軟、(c)ロー

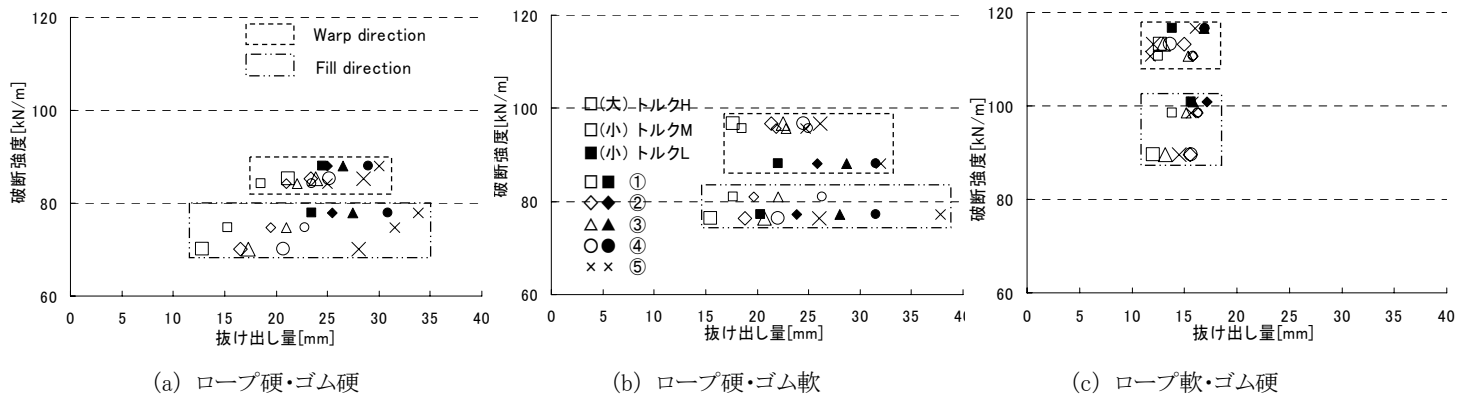


図11 膜材料の抜け出し量と破断強度の関係

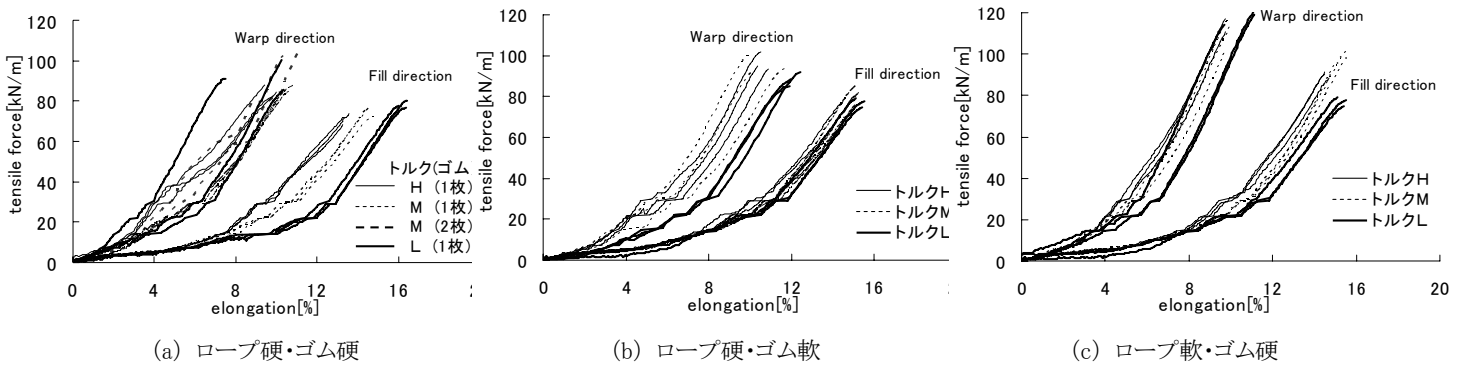


図12 ボルト締付トルクと伸長曲線の関係

プ軟・ゴム硬の場合について検討する。図12は、許容応力領域の3回繰返し加力の結果の First-Loading と、その以降の破断までの結果を包絡した伸長曲線を示す。

トルクによる影響は、低応力域の剛性に表れている。(b) ロープ硬・ゴム軟の場合と(c) ロープ軟・ゴム硬の場合は、タテ糸方向とヨコ糸方向ともに低応力域では、ボルト定着内部の摩擦力の影響によりトルク $L < M < H$ の順に高い剛性を示しており、高応力域ではその摩擦力の影響はほぼなくなりトルクによる剛性の差は生じないと判断できる。一方、(a) ロープ硬・ゴム硬の場合は、両糸方向ともに低応力域では、(b) ロープ硬・ゴム軟と(c) ロープ軟・ゴム硬のような剛性変化を示すが、高応力域ではトルク $H < M < L$ の順に高い剛性変化を示す。また、(a) ロープ硬・ゴム硬の場合で、ゴム2枚の方が低応力域ではゴム1枚より高い剛性を示すが、高応力域ではほぼ同じ剛性を示している。

ロープ硬・ゴム軟<ロープ軟・ゴム硬の順に破断強度が大きく表れている。

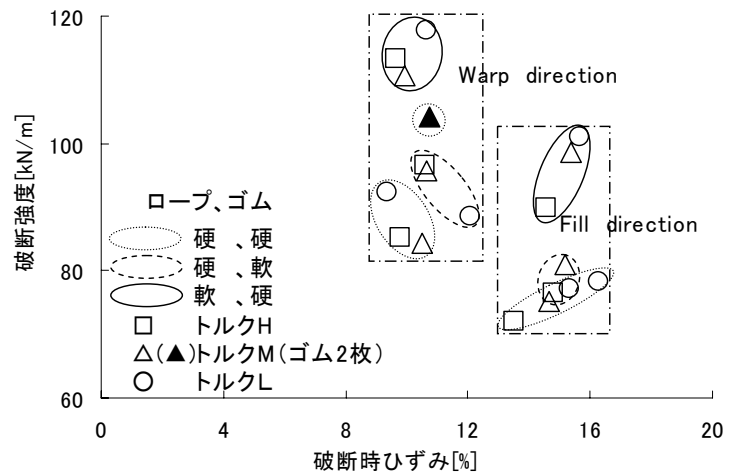


図13 破断強度と破断時ひずみの関係

2. 5 定着部における膜材料の破断強度と引張剛性

図13は、ボルト定着部の各試験体の破断強度の平均値を示している。定着部の破断強度は、ロープ軟・ゴム硬の場合でタテ糸方向が $110\text{kN/m} \sim 120\text{kN/m}$ 、ヨコ糸方向が $90\text{kN/m} \sim 100\text{kN/m}$ の最大破断強度を示しており、タテ糸方向とヨコ糸方向ともにロープ硬・ゴム硬<

また、ロープとゴムの硬さが破断強度に及ぼす影響については、同じ硬さのゴムでは、ロープ軟の場合が高い破断強度を示す。同じ硬さのロープでは、ゴム軟の場合で高い破断強度を示すが、トルクLの場合は逆にゴム硬の方が高い破断強度を示している。また、トルクが破断

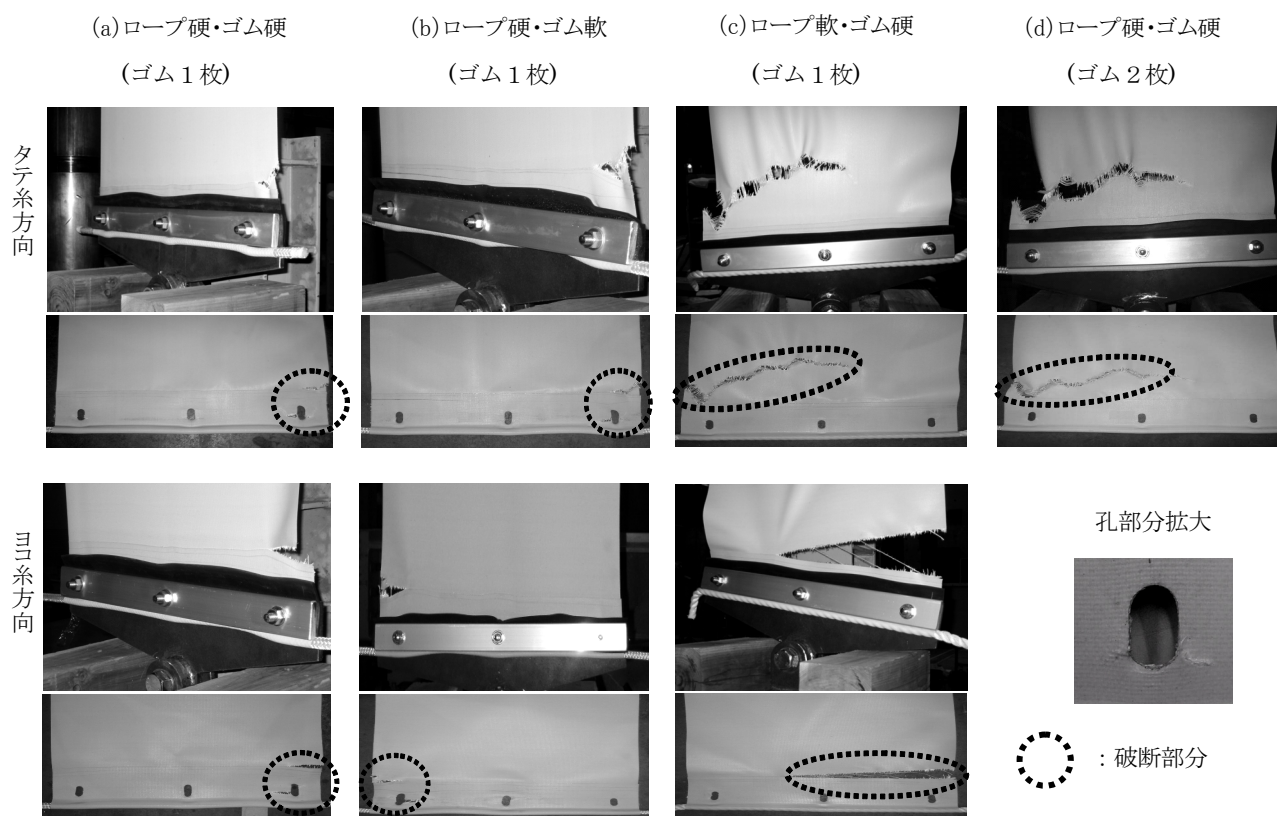


図14 ボルト定着試験体の破断形状

強度に及ぼす影響については、タテ糸方向とヨコ糸方向ともに大きな違いは見られなかった。本実験の範囲では、ボルト定着部の破断強度にはロープの硬さが最も大きな影響を及ぼすことがわかった。一方、破断時のひずみは、タテ糸方向とヨコ糸方向ともにトルクによる顕著な違いは見られない。

2. 6 ボルト定着部の破断形状

図14は、ボルト定着試験体の破断時の状況とエッジロープ部の変形、定着部周辺の膜材料の様子を示す。(a)ロープ硬・ゴム硬と(b)ロープ硬・ゴム軟は、類似した破断形状を示している。タテ糸方向では、膜材料の母材部と溶着部の際付近で引裂が発生し荷重が低下する性状を現しており、ヨコ糸方向では、ボルト孔で引裂が発生するとともに膜材料の母材部と溶着部の際に引裂が発生する性状を示している。(c)ロープ軟・ゴム硬のタテ糸方向は、膜材料の母材部と溶着部の際で縁から中央にかけて引裂が発生し、ヨコ糸方向では膜材料の母材部と溶着部の際で直線状の破断性状を示している。

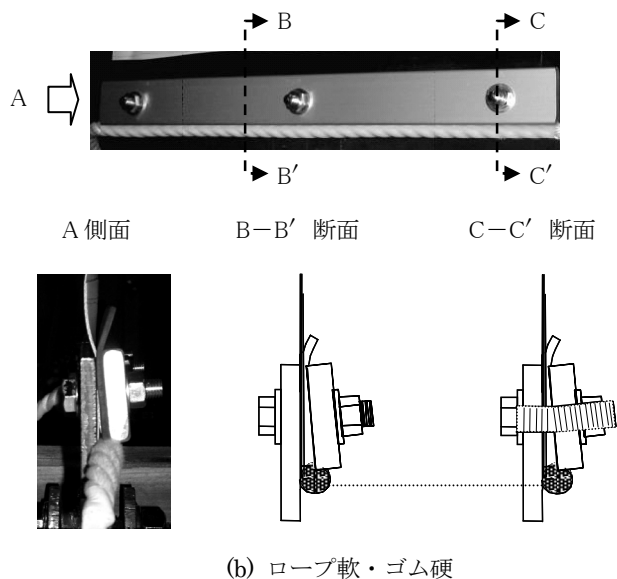
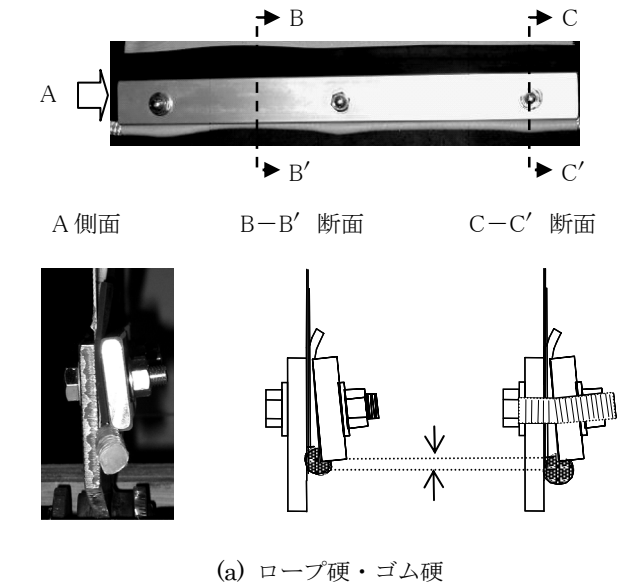
ゴムの硬さによる破断性状への影響はほとんどなく、タテ糸方向では膜材料の母材部と溶着部の際付近が破断する性状を示している。ヨコ糸方向では、ボルト孔周辺に引裂が発生し、さらに膜材料の母材部と溶着部の際が破断する性状を示している。一方、ロープの硬さによる

影響では、破断部の長さや破断場所の違いが見られる。一方、トルクによる破断性状への影響は、ほとんど見られなかった。

図15は、定着部におけるエッジロープのプレート下へのもぐり込みについて、ロープの硬さによる違いを示す。(a)ロープ硬・ゴム硬の場合は、ボルトとボルトの間でエッジロープのもぐり込みが顕著になり(正面から見るとエッジロープが屈曲線を示す)、膜材料の抜け出しとボルトへの接触が生じやすくなる。母材部と溶着部の際付近にも破断が発生する。一方、(b)ロープ軟・ゴム硬の場合は、エッジロープのプレートへのもぐり込みが定着部のボルト部とボルト間部で均等な性状を示す。エッジロープの均等なもぐり込みで抜け出しが生じにくい。その結果、硬いロープの方が低荷重で破断が発生する性状を示す。また、ロープ硬とロープ軟ともにロープがプレートと治具の間にめり込んでプレートを浮き上がらせる現象が起き、ボルトが曲がる性状を示す。

図14(d)のゴム2枚が挟まれた試験体の破断は、エッジロープのめり込みで同図(a)のようなボルト間とボルト部の大きなめり込み差は見られない。つまり(c)ロープ軟・ゴム硬のタテ糸方向の破断性状に類似した性状を示している。また、破断強度は、同じ条件のロープ硬・ゴム硬のゴム一枚の試験体より10kN/m程度高く現れている。ゴムが膜材料両面を挟んでいることで、エッ

ジロープのプレートへのめり込みがゴム 1 枚のような不均等なめり込みではなく均等にめり込むことによって、
(c) ロープ軟・ゴム硬の試験体に近い破断性状が現れたと考えられる。また、破断性状も、クランプ定着部の破断性状に類似した傾向を現している。



(A 側面:側面部、B-B' 断面:ボルト中間部、C-C' 断面:ボルト部)

図15 定着部におけるエッジロープのめり込み

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することを目的として、定着加工が膜材料の破断性状に及ぼす影響を検証するため、ボルト定着試験体の 1 軸引張実験を行った。その結果ボルト定着部では、エッジロープの硬さとゴムの枚数の違いが破断性

状に影響を与えることがわかった。硬ロープ（ゴム片面）では、エッジロープの不均等なめり込みによりボルトのめり込みと膜材の抜け出しで膜材料の孔部に引裂が発生し、これが破断強度低下の原因になる。軟ロープ（ゴム片面）では、均等なエッジロープのめり込みで膜材の孔部には破断がほとんど発生せず硬ロープ（ゴム片面）より高い破断強度が得られた。ゴム両面は、硬ロープ（ゴム片面）とは違って均等なエッジロープのめり込みで膜材の孔部には破断が発生せず高い破断強度を示した。

定着部を含めた膜材料の伸びは、低応力域で大きく、一度载荷を受けた試験体には残留ひずみが生じることがボルト定着部でも明らかとなった。本研究により、ボルト定着部の破断強度決定因子が定性的に把握され、ゴムの厚さ、プレートの厚さ、ボルトの間隔なども定着部耐力を与える可能性があり今後検討を行う。

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) 石井一夫: 膜構造用膜材料概説、膜構造研究論文集 92、1992
- 2) 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、pp29—33、2002.
- 3) 中村栄作、河端昌也: 膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究 —溶着部及びクランプ定着部の伸長特性—、日本建築学会学術講演概要集(東海)、pp947—948、2003.
- 4) 中村栄作、河端昌也、金熙均: 膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究 —引張破断試験時におけるクランプ定着部の伸長特性—、膜構造研究論文集、pp15—20、2003.
- 5) 中村栄作、河端昌也、金熙均: 膜構造の定着部における応力伝達機構に関する研究 その 1 引張破断試験時におけるクランプ定着部の伸長特性—、日本建築学会学術講演概要集(北海道)、pp903—904、2004.
- 6) 金熙均、河端昌也、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 その 2: 材料比線形解析、日本建築学会学術講演概要集(北海道)、pp905—906、2004.

Study on stress transition mechanism of clamping part of membrane structures

- tensile and fracture characteristics of membrane material in bolting part -

Heekyun Kim *)

Masaya kawabata**)

SYNOPSIS

The membrane structure should maintain the membrane materials in tension for structural stability guaranty. The anchoring part in the membrane structure is an important part. It has the function to introduce tension into membrane materials and function to transmit stress which membrane materials receives to boundary structure such as steel frames. In this paper, it grasps anchoring system of the anchoring part in the membrane structure concerning the fracturing characteristic condition of membrane structure, and the influence which is caused to yield it designates the stress state when breaking the membrane structure which includes the anchoring part and that stress transition mechanism is elucidated as purpose. This paper follows to previous paper, does 1 axial tensile test concerning the bolting part specimen, grasp of fracturing progress of the bolting part and the edge rope and hardness of the rubber, does the appraisal in addition with the difference of bolt tightening torque. As a result, the influence which the bolt anchoring exerts on the fracturing characteristics of the membrane material in the membrane structure anchoring part is examined.

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

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