

膜材料の剪断剛性について

西川 薫^{*1}

萱島 誠^{*2}

概 概

樹脂コーティング織布である膜材料は一般に直交する糸方向に異なる引張剛性を持ち、これら引張剛性に比べ低い剪断剛性を有している。また、その応力-歪関係は特殊な非線形性を示している。本研究では、膜材料の特殊性を考慮した新たな剪断剛性試験法を提示し、これにより求めた膜材の剪断剛性についての特性及び数値解析への適用の可能性について述べる。

1. はじめに

現在汎用されている膜材料は、織布の表裏面を樹脂コーティングした柔軟な繊維強化複合材料といえる。この複合材料において織糸は主として膜材の強度特性を、コーティングは主として防水性・耐久性等の物理的及び化学的特性を分担しているが、相互に影響し合い複雑な力学的性状を示している。

特に剪断変形においては、コーティングを施していない基布は織糸間の摩擦を考慮しなければ斜め方向のずれ変形に対して抵抗力が発生することはなく、コーティング樹脂の存在により生ずるものと考えられる。

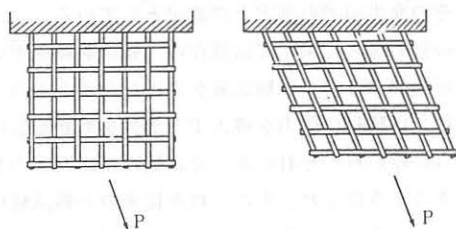


図1-1 織布のねじり変形(コーティングのない場合)

即ち、樹脂コーティング布では織糸交点において摩擦による若干の抵抗が生ずるものの、その値は小さく、主にコーティング樹脂そのものの剛性、及び織糸間に充填されたコーティング樹脂と織糸との相互作用(図

1-2)により、膜材の剪断変形に対する抵抗が生じている。

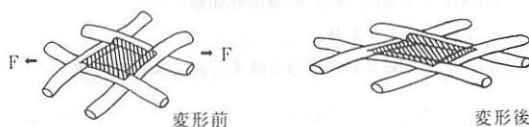


図1-2 剪断変形に対する樹脂と織糸の相互作用
織糸間に充填されたコーティング樹脂

従来の膜材の剪断剛性を測定する方法には、広巾の膜材を斜方向の引張試験を行ない定量化する方法(文献-5 etc.)と、シリンダー状にして加圧し、二軸引張を与え乍らねじり試験を行なって定量化する方法(文献-1, 2, 3, 4 etc.)があるが、何れも膜面の応力比のコントロール等に問題を残している。他方、正方形パネルの外周を剛なフレームで囲み、斜方向に変形させて剛性を測定する方法(文献-6, 7 etc.)が一般材料に使用されているが、膜材の場合初期張力が与えられない為すぐにシワが発生し、定量化しにくいという問題がある。

膜材料を弾性体として扱う現在の解析法では、この剪断剛性値を他の弾性値、引張弾性、ポアソン比に対し独立したものとして採用することになるが、より実状に近い値を簡便に得る方法が望まれている。

*1 大成建設㈱ 工学博士

*2 横浜国立大学 大学院生

2. これまでの試験法

2.1 斜引張試験

縦糸と45度方向を成す試験片を採取し、引張試験の結果から縦弾性係数を求め、剪断弾性係数を算出する。この方法はFRP材の剪断剛性を求める方法として文献-5によって提案されているもので、これを膜材に適用してみたものである。

縦糸と45度方向を成す方向の縦弾性係数 (E_{45}) はクランプ間の距離 (L) によって異なり、 L が試験幅を超えると引張方向に対して45度にある縦糸は、本来膜構造膜面内で発生するものとは異なった挙動を示すと考えられる。また剪断剛性を独立に求めるのではなく、引張剛性、ポアソン比を使って求めるので、これらの数値によって異なった値となる。

$$\frac{1}{G_{xy} \cdot t} = \frac{4}{E_{45} \cdot t} - \frac{1}{E_x \cdot t} - \frac{1}{E_y \cdot t} + \frac{2\nu_{yx}}{E_x \cdot t} \quad \dots\dots (1)$$

$E_x \cdot t$: x方向(縦)の縦弾性係数
 $E_y \cdot t$: y方向(横)の縦弾性係数
 ν_{yx} : ポアソン比
 E_{45} : x軸と45度方向を成す方向の縦弾性係数

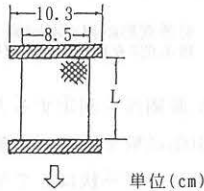


図2-1 斜引張試験

2.2 シリンダーねじり試験

文献-1などに示される方法で膜材を半径 R 、長さ L のシリンダー形状に作製する。これに内圧を与え乍ら軸方向に引張力 F を作用させ、膜材に適当な初期張力周方向 T_c 、軸方向 T_s を同時に与える。更に一端にねじり角 θ_L を与えた時のねじりモーメント M_L を測定し、下記の式で剪断剛性を算出している。

$$G_{xy} \cdot t = \frac{L M_L}{2 \pi R^3 \theta_L} \quad \dots\dots (2)$$

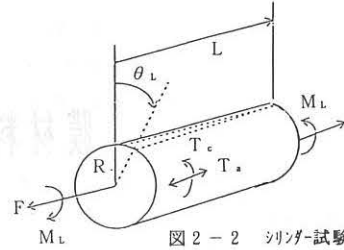


図2-2 シリンダー試験機

この他織布では織糸のずれ方向荷重による斜交の度合いの測定例(文献-6 etc.)もあるが、コーティング織布での測定は上記2種類のようなものである。

これまで日本においてもシリンダーによる試験機が作られ、膜材料測定用として使用されている。

3. 本剪断試験法

3.1 試験法の概要

本試験法は、合板の剪断弾性率測定に用いられる方法(ASTM D-805)や文献-8に示された方法などを応用して、膜材の測定に適するように改良した試験法で簡単な器具による、実情に合った正確な測定を行なうことを目的としている。

この剪断試験法は、二軸張力状態の膜材を正方形フレームに各辺に糸方向を合わせて固定し、これを斜方向に変形させてその変形量と変形に要する力から剪断剛性を導こうとするものである。原理的には、膜面の初期張力が剪断剛性に寄与しない試験方法であり、シリンダーねじり試験では、 $G_{xy} = N_0$ という見掛け剪断力が作用するが、ここではそれはない。また糸方向45度引張試験では原理的に膜面のリンクリング(局部的なしわ座屈現象)後の測定となるが、本試験方法では計算上その発生前での測定との測定としている。

膜材の張力導入に関しては既存の二軸試験機を用いる事も可能であるが、試験装置が大掛かりである為、本測定法では膜材に張力を導入する治具を剪断変形用フレームに組み込み、それによって試験片に初期張力を導入できるようにした。更にこれを従来の一軸試験機と組み合わせる事により簡便に膜材料の剪断剛性の値を測定できるようにしている。

本試験機では張力導入はボルトの締込みによって行なわれ、導入力の変化はバネの変形量から換算する。

回転拘束治具は一軸引張試験機のクランプが回転する場合に必要なものである。これはチャック用プレートをつなぐ形で取付けられ、互いの加力方向が同一直線上になるようにするものである。

一軸引張試験機は、引張速度が設定できる試験機を用いる。本試験では島津オートグラフAG-2000Aを使用した。

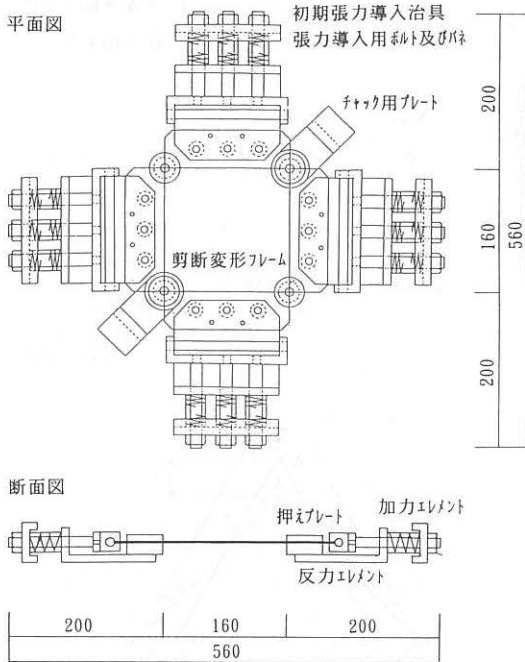


図3-1 膜材料剪断剛性試験機 単位(mm)

3.2 膜材料試験体

今回の一連の試験では、汎用されている膜材の中から、4ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材2種(A1, A2)と、塩化ビニルコーティング合成繊維膜材2種(C1, C2)を選択し用いた。(付表1~4)

試験体は各種類5体ずつ図3-2に示すような形状に製作し、内各種類2体ずつを初期張力の時間変化測定試験に、残りを剪断試験に用いた。

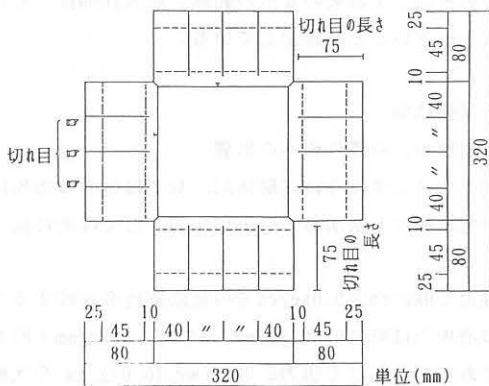


図3-2 試験体完成図

3.3 試験手順

- ①試験体の端部4辺に鋼棒を通し剪断変形試験機の加力エレメントに装着する。
- ②加力エレメントのボルトを締込み、所定の張力を縦横両方向に導入する。
- ③剪断変形フレームのボルトを締め、押えプレートによって試験体を4辺共しっかりとフレームに固定し張力を維持する。
- ④張力の維持を確認し各辺の張力導入治具を取外す。
- ⑤チャック用プレートを一軸引張試験機の上下チャックで緊結し、剪断変形フレームを一軸引張試験機に固定する。
- ⑥各パラメータを設定し引張試験を行なう。

註) 尚、本試験は変位制御(変位設定値により繰返し或いは終了を決定)で行なう。荷重は荷重計より測定する。

4. 剪断剛性試験

4.1 試験条件

本試験では試験体膜材料の剪断剛性の値を求めると共に、以下の基本的な4項目のパラメータを採り上げ、その剪断剛性値への影響を検討した(表4-1)。膜張力は試験機に試験体を取付ける際に導入する初期張力で、縦糸方向:横糸方向の比は等しくした。尚、各試験は室温 20 ± 2 ℃の環境下で行なった。

項目	設定条件		
膜張力 (kg/cm)	1.0	3.0	5.0
引張速度 (cm/min.)	0.5	1.0	2.0
最大変位量 (cm)	0.5	1.0	1.5
荷重繰返回数(サイクル)	3	10	—

表4-1 試験条件の種類

4.2 荷重-変位曲線と剪断剛性の評価

2回目以降の荷重においてP- δ 曲線の再現性は良く、曲線は荷重・除荷の初めで急勾配となるが、その後は緩やかに直線的であり全体的には防錘形をしている。この傾向は片側・両側荷重共に見られるが、両側荷重の方が著しい。また、4ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜に比べると塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜の方が全体的に勾配は緩いが、荷重・除荷時の勾配変化が大きくなるのが特徴的である。

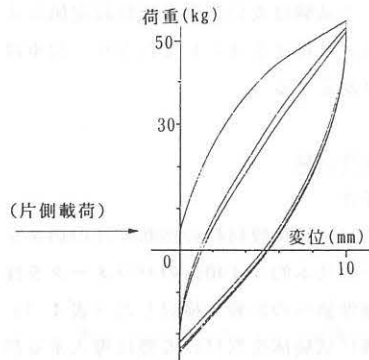
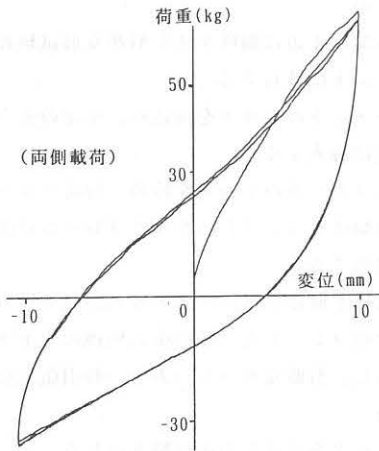


図4-1 4-ビニルエチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材の荷重-変位曲線(A2)

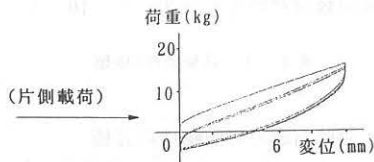
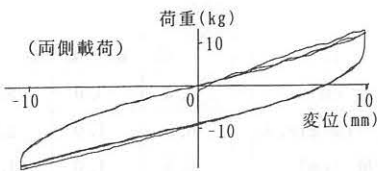


図4-2 塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜材の荷重-変位曲線(C1)

このように荷重-変位関係は非線形性を示すため、剛性についての評価は一義的にはできないが、本研究では片側載荷での最大荷重時と最小荷重時を結ぶ割線勾配により剪断剛性値を算出した。即ちフレームの変形そのものによる非線形性を無視することとすれば、図4-3を参照して剪断剛性； G_t 、剪断応力； N_{xy} 、剪断歪； γ を用いて(3)、(4)式のように表す。

$$N_{xy} = \frac{F}{\sqrt{2}L} \quad \dots\dots (3)$$

$$\gamma = 2\alpha = 2 \left\{ \pi/4 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{L^2 - (\delta + L/\sqrt{2})^2}}{\delta + L/\sqrt{2}} \right\}$$

$$G_t = \frac{N_{xy}}{\gamma} = \frac{F}{2\sqrt{2}L \cdot \alpha}$$

$$= \frac{F}{2\sqrt{2}L \cdot \left\{ \pi/4 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{L^2 - (\delta + L/\sqrt{2})^2}}{\delta + L/\sqrt{2}} \right\}}$$

..... (4)

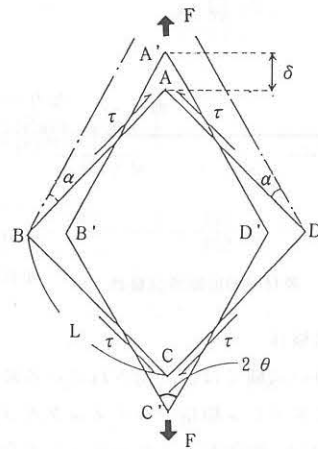


図4-3 Fとδの関係

なお、フレームの変形による剛性値に対する非線形性の影響は、本試験の変形の範囲、最大10mm程度では数%と小さいことを確認している。

5. 試験結果

5.1 初期張力の剛性値への影響

図5-1に示すように試験体A1、A2では張力の増加に伴い剪断剛性も増加しているが、C1、C2では逆に減少している。

張力3.0kg/cmと5.0kg/cmでの剪断剛性を比較すると、その増加分はA1で0.391kg/mm、A2で0.323kg/mmと約9%であるが、同じく張力5.0kg/cmと10.0kg/cmを比較すると、その増分はA1で0.714kg/mm、A2で1.052kg/mm 25.6%も増加している。

張力増加に伴うこのような剪断剛性の増大の原因として織糸交点の摩擦が考えられるが、表5-1に示すように、織糸のみの場合の張力5.0kg/cmから10.0kg/cmへの増加に伴う剪断剛性の増加は0.2kg/mm程度であり、若干の増加は認められるものの今回の試験と比較するとかなり小さく、糸の摩擦以外の何らかの抵抗要素が働いて、このような剛性の増加が生じたのではないかと思われる。

4ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材はコーティング材としてガラスビーズを含み、これが樹脂と共に糸間に入り込む“ディッピング”によるコーティングであり、糸に作用する張力によってずれ変形を拘束するように働いているものとも考えられる。

一方、塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜材は柔らかく可塑性の強いコーティングであり、ビーズは含まないため初期張力の影響を受けにくいと考えられる。張力1.0~5.0kg/cmの一般の初期張力レベルでの剪断剛性の変化率は10%前後であり大きな変化はない。

回数	張力	5.0(kg/cm)	10.0(kg/cm)
1	サイクル	0.238	0.371
2	〃	0.279	0.407
3	〃	0.169	0.388
4	〃	0.160	0.376
5	〃	0.160	0.367

表5-1 基布(織糸のみの場合)の剪断剛性 … 単位(kg/mm)

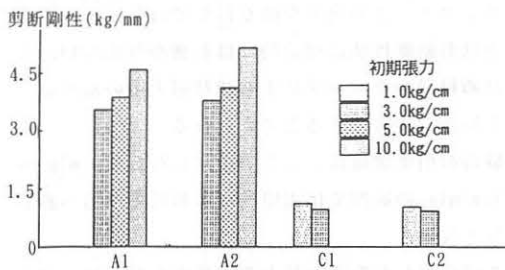


図5-1 初期張力による剪断剛性への影響

5.2 最大変位量による剪断剛性への影響

最大変位量による剪断剛性の変化を図5-2に示す。最大変位量5.0mmでの剪断剛性値が大きな値となっているが、これは本試験の荷重-変位曲線の特性と剪断剛性の評価法によると考えられる。すなわち、同曲線は変位の増大により剛性が低くなる事を示し(上に凸な曲線)、最大変位量5.0mmの場合の剛性算出に用いた勾配①は最大変位量10.0mmの場合のP-δ曲線における

図5-3の②にあたり、最大変位量10.0mmでの勾配の採り方③と比較して勾配が急であるため剪断剛性も大きく評価されている訳である。つまり試験結果そのものは全く一致しており、最大変位による剪断剛性への影響はないものといえる。

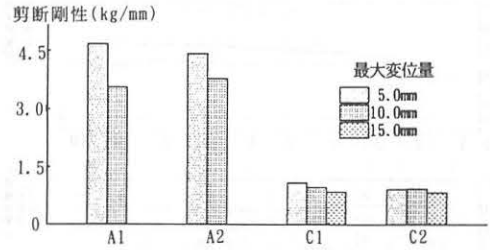


図5-2 最大変位量による剪断剛性値への影響

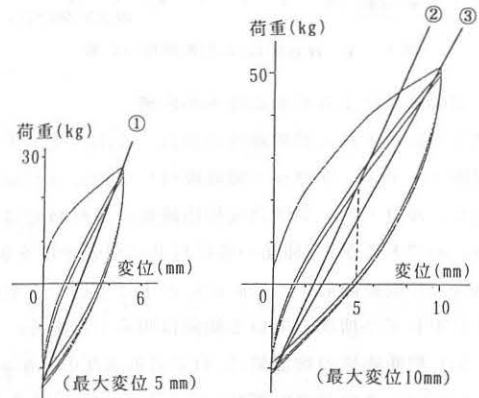


図5-3 荷重-変位曲線に於ける勾配の採り方

5.3 荷重繰返回数による剪断剛性への影響

4種類の膜材について各3枚ずつ、計12枚の試験体について荷重繰返回数を10サイクルにして試験を行なったところ、C1の2枚とC2の1枚の計3枚を除いた9枚の試験体の剪断剛性値は若干の増加傾向を示し、前記の3枚は若干の減少傾向を示した。

3枚の試験体共に剪断剛性の増加傾向を示したA1でその増加量を1サイクル目と10サイクル目とで比較してみると0.012kg/mm~0.052kg/mmとその値は極めて小さく、同同じくA2でも0.008kg/mm~0.075kg/mmとなっている。これらより、この2種類の4ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材における剪断剛性の変化率は約2%未満であり、荷重繰返回数による剪断剛性への影響は少ないものといえる。

試験体によって剪断剛性の増加傾向と減少傾向の両方を示したC1とC2について見ると、C1での増加量は最大で0.023kg/mm、減少量も最大で0.019kg/mm、C2では

増加量最大0.056kg/mm, 減少量最大0.008kg/mmと何れも小さな値となっており、この塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜材料2種類についても荷重繰返回数による剪断剛性への影響は少ないといえる。

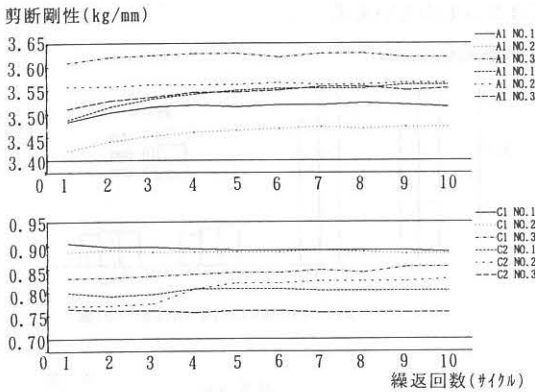


図5-4 繰返回数による剪断剛性への影響

5.4 引張速度による剪断剛性への影響

図5-5に示す様に剪断剛性の値は、4ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材料で約3.5kg/mm, 塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維の膜材料では約1.0kg/mmであるが、4種類の膜材料共に引張速度を0.5cm/min., 1.0cm/min., 2.0cm/min.と上げていくと剪断剛性も少しずつ増加している傾向は明らかである。

しかし剪断剛性の増加量は、A1で引張速度0.5cm/min.と1.0cm/min.との差で0.074kg/mm, 1.0cm/min.と2.0cm/min.との差で0.049kg/mmと小さな値となっている。他の膜材料も全く同じ傾向を示し、引張速度を変化させても剪断剛性の変化率は、最大でも約20%である。

つまり本試験における引張速度の範囲(0.5cm/min.~2.0cm/min.)内では、速度の変化は剪断剛性値に大きな影響を及ぼさないといえる。

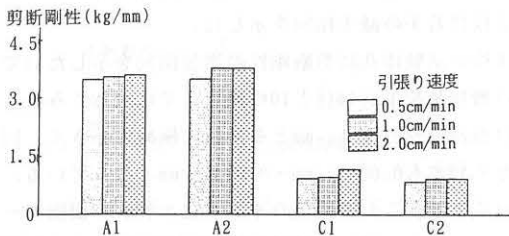


図5-5 引張速度による剪断剛性への影響

5.5 他試験法による結果との比較

これまでの剪断剛性測定結果を表5-2に示すが、これらの試験結果は初期張力及び剪断応力の状態が異なる

為、このままの値での比較はできない。シリンダー試験では剪断応力がかなり低い領域での接線剛性の測定であり、45度法では初期張力0の場合の剪断剛性を採用していると考えられる。本試験法における荷重-変位曲線から各試験法の条件を考慮に入れて算定したところ、大きな差のない値を導くことができたことから、本試験法はこれまでの各試験法を包含するものと考えられる。

材料	試験法	剪断剛性	試験条件	本試験法による推定値
A1	45度法	57kg/cm	試験片幅 8.50cm チャック間長さ 5.25cm E _w =1444kg/cm E _r =155kg/cm ν _w =0.94 ν _r =0.10 とし算出	54.8 kg/cm
	シリンダー法	99kg/cm	シリンダー半径 13.5cm 長さ 82.5cm 内圧 0.1kg/cm ² ねじり角 1° 剪断応力 0.284kg/cm	92.7 kg/cm
A2	45度法	33kg/cm	試験片幅 16cm チャック間長さ 16cm その他不明	—
	シリンダー法	86kg/cm	シリンダー半径 13.5cm 長さ 82.5cm 内圧 0.0473kg/cm ² ねじり角 1° 剪断応力 0.244kg/cm	81.0 kg/cm

表5-2 剪断剛性の測定例との比較

6. まとめ

膜材料の剪断剛性の試験方法について、実情に即した測定が本試験方法によって可能であることが確認された。なお膜材料の剪断剛性値の評価に関して、次のような結果が得られた。

- (1)初期張力の導入は膜材の緩みを取り、ずれ変形に伴うリンクリングの発生を防ぐ目的で行なうが、この張力は剪断剛性値に理論的には影響を与えない。このため材料のクリープによる初期張力量の減少は、ある範囲で許容できると考えられる。
- (2)試験時の引張速度は、ここで設定した0.5cm/min.~2.0cm/min.の範囲では実用的には剪断剛性値へ影響を与えない。
- (3)ここで設定した範囲の最大変位量の変動では、得られる荷重-変位曲線に影響は見られない。
- (4)繰返载荷については、最初の1サイクル目は膜材料に緩みがある為この曲線は採用できない。2サイクル目以降は剪断剛性値に与える影響は僅かであり、3サイクルの繰返载荷後の剪断剛性値とすれば、値は安定したものとなる。
- (5)従来の膜材料剪断剛性試験法による場合の剪断剛性値も、本試験方法の中で位置付けることができ、従来の試験方法を何ら妨げるものではない。

(6)試験結果より得られる非線形曲線を用いて行なう剪断剛性値の評価を一義的に行なうことは難しい。しかし、荷重に対し刻々と変化する接線境界剛性値をそのまま解析に適用することは、現段階では実用上困難であり、線形化せざるを得ない。このため、剪断剛性値の使用目的に応じ、何れの曲線を用いて評価するかを決定することが必要である。また、膜構造解析のための値として、膜面の計算上のリンクリグ発生点での変位を最大変位とした範囲内で、試験結果として得られた曲線の線形化をすることになる。

本研究は(株)日本膜構造協会1990年度の研究の一環としてなされたものであり、詳細内容については同協会の「膜材料の剪断剛性試験法 開発報告書」(横浜国立大学 石井一夫研究室)としてまとめられている。

付表-1 (4-エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材)

試験体名	A1
一般名	4-エチレン樹脂-ガラス繊維織物
繊維素材	ガラス
コーティング材	4-エチレン樹脂
繊維織物重量	500±50 g/m ²
コーティング材重量	800±80 g/m ²
質量	1330 g/m ²
厚さ	0.8±0.1 mm
密度(本/2.5cm)	縦:25 横:19
孤弧度	0.4 %
斜行度	0.6 %
引張の基準強度	縦:450 kg/3cm 横:360 kg/3cm
破断伸び率	縦:3~10 % 横:6~15 %
引裂強度	縦:30 kg 横:30 kg
接合部強度(常温)	縦:450 kg/3cm 横:360 kg/3cm
" (60℃)	縦:425 kg/3cm 横:360 kg/3cm

付表-2 (4-エチレン樹脂コーティングガラス繊維膜材)

試験体名	A2
一般名	4-エチレン樹脂-ガラス繊維織物
繊維素材	ガラス
コーティング材	4-エチレン樹脂
繊維織物重量	490 g/m ²
コーティング材重量	810±81 g/m ²
質量	1215 g/m ²
厚さ	0.8±0.1 mm
密度(本/2.5cm)	縦:26 横:19
孤弧度	0.5 %
斜行度	0.9 %
引張の基準強度	縦:450 kg/3cm 横:360 kg/3cm
破断伸び率	縦:10 %以下 横:15 %以下
引裂強度	縦:30 kg 横:30 kg
接合部強度(常温)	縦:450 kg/3cm 横:360 kg/3cm
" (60℃)	縦:430 kg/3cm 横:340 kg/3cm

付表-3 (塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜材)

試験体名	C1
一般名	P.V.C. - PET布
繊維素材	ポリエステル FY
コーティング材	P.V.C.
繊維織物重量	210±50 g/m ²
コーティング材重量	630±60 g/m ²
質量	841.4 g/m ²
厚さ	0.65±0.05 mm
密度(本/2.5cm)	縦:25 横:25
孤弧度	4.3 %
斜行度	0.7 %
引張の基準強度	縦:150 kg/3cm 横:150 kg/3cm
破断伸び率	縦:25 %以下 横:35 %以下
引裂強度	縦:17 kg以上 横:18 kg以上
接合部強度(常温)	縦:150 kg/3cm 横:150 kg/3cm
" (60℃)	縦:120 kg/3cm 横:120 kg/3cm

付表-4 (塩化ビニルコーティング合成樹脂繊維膜材)

試験体名	C2
一般名	P.V.C. - ポリエステル布
繊維素材	ポリエステル
コーティング材	P.V.C.
繊維織物重量	145±15 g/m ²
コーティング材重量	860±80 g/m ²
質量	1004.7 g/m ²
厚さ	0.86±0.1 mm
密度(本/2.5cm)	縦:22 横:21
孤弧度	2.0 %
斜行度	0.6 %
引張の基準強度	縦:145 kg/3cm 横:140 kg/3cm
破断伸び率	縦:25 %以下 横:30 %以下
引裂強度	縦:10 kg 横:30 kg
接合部強度(常温)	縦:120 kg/3cm 横:120 kg/3cm
" (60℃)	縦:90 kg/3cm 横:90 kg/3cm

参 考 文 献

- 1) G.W.Zender, J.W.Deaton, "The Stiffness Properties of Stressed Fabrics as obtained from Model Tests", NASA Technical Note D-755, 1960.
- 2) R.W.Leonard, "On the Shear Stiffness of Fabrics", Jour.of the Aerospace Science, March, 1962.
- 3) L.B.Keen, "Technology update on Tethered Aerostat Materials Development", Jour. Coated Fabrics, Vol.5, July, 1975
- 4) 南宏和, 本林信哉, "コーティング平織物の剪断特性", 日本複合材料学会誌, Vol.9. No.4, 1983
- 5) 林 毅「直交異方性板の弾性係数と剛性について」旧日本航空学会誌 8/1941

- 6) B. Morner, T. E. Olofsson, "Measurement of the Shearing Properties of Fabrics", Textile Research Jour. Aug., 1957.
- 7) ASTM Desibnation D 805-63, 合板の剪断試験法
- 8) Moriya. K., ; An Analysis of the Tension Field after Wrinkling in Flat Membrane Structures, IASS Sym. Tokyo 1971.
- 9) 石徳秀一他「膜材料の力学的特性を一軸引張試験から決定する方法について」, 膜構造研究論文集 '90 (日本膜構造協会)
- 10) 「膜材料A-2のシラダ-試験結果」C社報告書, 1983

On the Shear Stiffness of Resin-Coated Fabrics

Kaoru NISHIKAWA¹

Kazuo ISHII²,

Makoto KAYASHIMA³

Synopsis

The membrane material of textile fabrics coated with resin, in general, has two kind of tension stiffness in the orthogonal thread directions, and the shear stiffness which is lower than tension stiffness. Its stress-strain relationships have the unique nonlinear characteristics.

In this study, a new test method of a shear stiffness in consideration of the stress-strain relationship peculiar to this resin-coated fabrics is established. In conclusion, this report explains the characteristics of the shear stiffness of the material pursued by this test method and possibility to adapt it to the numerical analysis.

¹ : Chief Engineer, Taisei Corporation, Dr.Eng.

² : Professor, Faculty of Engineering, Yokohama National University, Dr.Eng

³ : Student of Master course, Yokohama National University