

モンテカルロ法を利用した織物強度の簡易予測

開発技術部 太田 幸一、藤田 浩文

1. 緒 言

炭素繊維やアラミド系繊維に代表される高強度高弾性率繊維は、汎用繊維に比べ強度・弾性率等が高いため、産業資材で強度が必要とされる用途に幅広く使用されており、産地においても同繊維を使用した製品の生産が行われるようになっている。これらの織物を生産する場合、従来の素材より比較的高価であるので、必要となる強度を発現させるためには、適切な織物設計を行う必要がある。織物の強度設計には様々な要因が含まれており、正確な予測値を求めるのは難しい。強度以外の特性も含めて、コンピュータによる織物設計方法が検討されているが^{1),2)}、設計のために大量のパラメータが必要となるため、設計システムの規模が大きく、中小企業の現場では使用しづらい面が多いため、経験則により強度を予測しているのが現状である。

一般に、普通の構造を持つ織物の強さは、経験則からその引張方向にある糸の積算強さの85～125%にあるといわれている³⁾。織物の組織や密度などの影響により、積算強さ以上の強度となる場合があるが、通常は積算強さ以下の値を示すことが多い。織物の引張強度を積算強さの95%として求めている織物CADシステムも存在する⁴⁾。一方、引張方向の糸に注目すると、糸の引張強度の変動率が大きいと、引揃糸や織物の強度低下が大きくなるという実験結果が得られている^{3),4),5)}。このことから、糸の強度分布から織物の強度が予測できると考えられる。

そこで、乱数を使用して糸の強度分布を擬似的に作成し、その分布から織物強度の計算を行う簡易計算ソフトウェアを試作し評価を行った。

2. 簡易強度予測プログラム

2.1 原 理

通常、織物中に存在する引張方向の糸は、強力および破断伸度が一定ではなく、ある範囲に正規分布しているものと考えられる。また、引張試験では織物中の糸はすべて同じ伸度となり、織物自身の伸度と等しい。このため、伸張状態下では最も弱い糸から順に破断していくものと予想される。このとき、引張方向の糸と直行する交錯糸の影響を無視すれば、糸の破断に伴い単糸1本あたりの負荷荷重 S は、 S/n から $S/(n-1)$ 、 $S/(n-2)$...と大きくなっていくため、織物は単糸の平均強力 s を本数倍した値 ns よりも低い値で切断することになる。そこで、あらかじめ糸の強伸度分布を測定しておき、モンテカルロ法⁶⁾と呼ばれる手法でその測定結果を基に乱数を使用して糸の強力および伸度分布を作成し、上記の過程の処理を行えば織物の強度を予測することが可能と考えられる。

ここで、いくつかのアルゴリズムが考えられるが、糸の破断強度分布のみを乱数から生成した場合（荷重乱数法）と、糸の破断強度分布と破断伸度分布の両方を乱数から生成した場合（荷重－伸度乱数法）の2種類について検討を行った。

2.2 荷重乱数法

引張方向の糸の構成本数を n 、織物引張荷重を S 、破断せずに残存している糸の本数を i ($0 \leq i \leq n$) とする。単糸強力分布 $A(k)$ ($1 \leq k \leq n$) は、あらかじめ測定で求めておいた単糸強力平均値 μ と単糸強力標準偏差 σ より、 n 個の正規分布乱数 $N[\mu, \sigma]$ を使用して求めることができる。このとき、伸張時における織物の荷重はすべての糸に等分されると仮定すると、引張荷重 S における糸1本当たりの負荷荷重 f は $f = S/i$ で表すことができる。最も強度の低い糸から順に破断していくので、 $A(k) \leq f$ となった本数が破断本数となり、 $A(k) > f$ となった本数が残存本数 j となる。 $i = n$

から計算を開始し、 $j=i$ または $j=0$ となるまで i に j を代入し直し計算を繰り返す。 $j=i$ で計算が終了すれば荷重 S では織物は完全に破断することではなく、 $j=0$ で計算が終了すれば織物は荷重 s で完全に破断するものと予測できる。荷重乱数法によるモンテカルロシミュレーションのアルゴリズムを図1に示す。

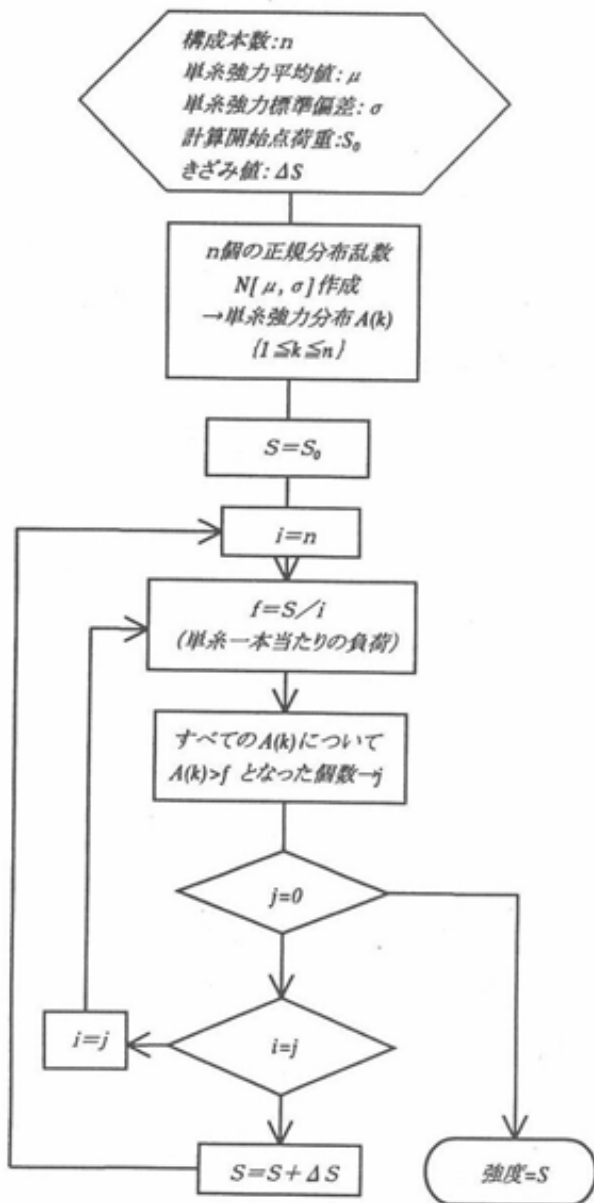


図1 荷重乱数法のアルゴリズム

2.3 強度変動率の影響

荷重乱数法による計算で、糸の引張強度の変動率が大きいと、引揃糸や織物の強度低下が大きくなるという現象が再現できるかどうか確認の計算を行った。シミュレーションの条件は $n=160$,

$\mu_s = 28\text{N}$ [273gf] とし、 σ_s を 4, 8, 12, 16% として計算した。シミュレーション計算結果と Peirce の実験結果¹⁴⁾ との比較を行った。結果を図2に示す。Peirce の実験結果はシミュレーション結果の誤差範囲内に存在しているので、荷重乱数法によるシミュレーションは変動係数による影響をうまく説明していることが確認できた。

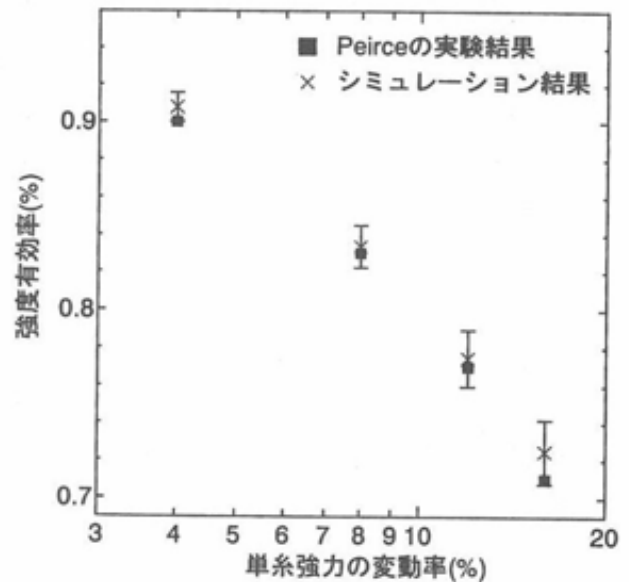


図2 変動率の影響

2.4 荷重-伸度乱数法

荷重乱数法では糸の破断強度にのみ分布があるとした。この場合、織物を伸度 ε まで伸張した時には、織物中の糸の伸度 ε_y は織物自身の伸度 ε と等しくなるので、織物中の糸の応力-ひずみ曲線は全て同じであるという条件になってしまい、あまり現実的ではない条件となってしまう。そこで、単糸伸度平均値 μ_s と単糸伸度標準偏差 σ_s をあらかじめ求め、 $N[\mu_s, \sigma_s]$ とは独立した n 個の正規分布乱数 $N[\mu_s, \sigma_s]$ を作成し、これより単糸伸度分布 $B(k)$ ($1 \leq k \leq n$) を生成するように改良する。これにより、織物中の糸の応力-ひずみ曲線はすべて異なることとなる。

3 実験方法

3.1 試料

実験に使用した糸を表1に示す。これらの糸を用い、小幅レピア織機 (平野工機(株)製 ES-10) で引

張強度試験布の製織を行った。試織した試験布の製織規格を表2に示す。タテ・ヨコとも21本/2.54cmの密度とし、組織は平織とした。タテ糸は試料Aを使用し、ヨコ糸に試料A～Dの4種類を使用した。

3.2 引張強度測定

3.2.1 単糸の引張強度測定

表1の糸について、JIS L 1013 (フィラメント糸) およびL 1095で紡績糸引張強度試験を行い、単糸引張強さ、伸び率および初期引張抵抗度を測定した。試験条件を表4に示す。

3.2.2 織物の引張強度測定

JIS L 1096 A法 (ラベルドストリップ法) でアラミド織物の引張強度試験を行った。試験片幅は3cm (試験片幅内の糸本数約25本) とした。試験条件を表5に示す。

また、測定結果より、強度有効率 η を次式で求めた。

$$\eta = \frac{S}{ns}$$

ここで、 S は織物の強力、 n は糸数、 s は糸1本の平均強力を表す。

3.3 強度予測計算

糸の強度分布より織物の強度予測を荷重乱数法および荷重-伸度乱数法で行う予測プログラムをMicrosoft Visual C++ 5.0およびMicrosoft Visual Basic 5.0により作成し、3.2.1の測定結果を用いて強度計算を行った。計算条件は織物の試験条件と同様とし、25回の計算結果についての平均値を計算予測値とした。

表1 試料糸

試料	素材	形態	線密度 (tex)
A	アラミド繊維	マルチ	110 {1000d}
B	(帝人製テクノーラ)	フィラメント	22 {200d}
C	Si-Ti-C-O系繊維	マルチ	198 {1800d}
	(宇部興産製アラミド繊維)	フィラメント	
D	綿	スパン	59.054×3 {10s/3}

表2 試織織物規格

項目	条件
たて糸総本数	248本
密度 たて	21本/2.54cm
密度 よこ	21本/2.54cm
おさ通幅	28.7cm {11.30in}
引込 地	1本
引込 耳	2本
素材 たて	試料A
素材 よこ	試料A～D
組織	平織

表3 単糸引張強度試験条件

項目	条件
測定機器	(株)オリエンテック製 テンシロンRTC-1250A
試験条件	定速伸張形
つかみ間隔	20cm
引張速度	20cm/min

表4 織物引張強度試験条件

項目	条件
測定機器	(株)島津製作所製 オートグラフAG-1000B型 (株)オリエンテック製 テンシロンRTC-1250A (試料Dのみ)
試験条件	定速伸張形
試験片幅	3cm (重目織物での試験)
つかみ間隔	20cm
引張速度	20cm/min

4. 結 果

単糸引張強度の測定結果を表6に、織物引張強度の実測値結果とシミュレーションによる予測値を表7に示す。

シミュレーションによる予測値については、荷重乱数法、荷重-伸度乱数法ともに同様な値を示しており、アルゴリズムによる大きな違いは確認できなかった。

織物引張強度の実測値結果とシミュレーションによる予測値を比較すると、綿糸 (試料D) については予測値と実測値がほぼ一致しており、シミュレーションプログラムが正常に動作しているこ

表5 単糸引張強度

試料	引張強さ		伸び率		初期引張抵抗度	
	平均(N)	CV %	平均(%)	CV %	平均(N/tex)	CV %
A	243.22	2.3786	5.5943	3.0995	51.702	2.6919
B	53.588	3.9815	5.1647	3.0222	55.297	4.4653
C	142.93	6.1167	1.7137	6.0030	54.462	2.2094
D	25.665	6.3327	9.2283	7.7136	0.8691	26.602

表6 織物引張強度

試料	実測値			予測値			
	引張強さ (N)	η (%)	伸び率 (%)	荷重乱数法		荷重-伸度乱数法	
				引張強さ (N)	η (%)	引張強さ (N)	η (%)
A タテ	3885.7	63.904	7.9625	5787.88	95.399	5676.41	93.562
A ヨコ	3235.4	53.209	7.6678				
B	1035.9	77.323	5.6747	1229.69	91.788	1260.09	94.058
C	1452.2	41.133	2.0026	3089.41	87.506	3149.40	88.138
D	566.73	88.327	27.063	569.151	88.705	548.976	85.560

表7 製織後の単糸強伸度と織物強度予測値

試料	製織後単糸強伸度				織物引張強さ (N)			
	引張強さ		伸び率		初期引張 抵抗度 (N/tex)	予測値		
	平均 (N)	CV %	平均 (%)	CV %		実測値	荷重 乱数法	荷重伸度 乱数法
A タテ	171.52	26.509	4.3860	17.615	49.351	3885.7	2844.96	2763.73
A ヨコ	182.37	14.836	4.2483	14.020	50.118	3235.4	3533.67	3247.24

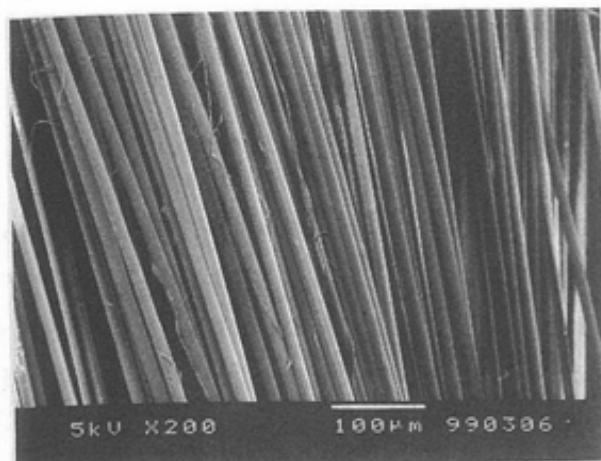
とが確認できた。一方、アラミド繊維（試料A、B）およびチラノ繊維（試料C）ではシミュレーションによる予測結果より実測値が非常に低い値で観測された。

5. 考 察

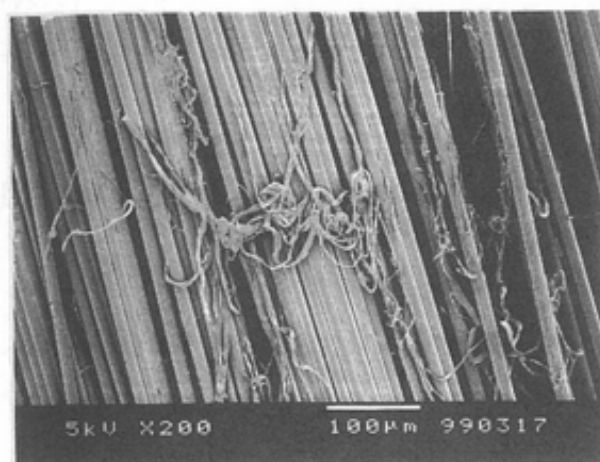
綿糸の結果から、モンテカルロ法を用いた糸の強度分布からの織物の強度予測は強度予測の簡便な方法として有効であると考えられる。しかし、アラミド繊維およびチラノ繊維では、実測値がモンテカルロ法による予測値に比べ非常に低い値となり、強度有効率 η も低い値となった。これは経験則でいわれている範囲よりも低下している。このアラミド繊維の強度低下現象はメーカー側のカタログ値でも確認することができ、試料Aとほぼ同等規格のサンプル（110tex {1000D}、平織、18本/2.54cm）で約3700N/3cm（カタログ値で

は320kgf/2.54cm）、強度有効率 $\eta \approx 58\%$ となっているのに対し、同条件の予測計算値では約4800N/3cmとなっている。これらの予測以上の強度低下は、綿糸ではほとんど低下が見られないこと、アラミド繊維、チラノ繊維ともに比較的摩耗や屈曲に弱いことなどから考えると、製織時に摩耗などにより糸の強度が低下したためと予想される。

そこで、試料Aのアラミド繊維について、製織後の布中の糸を布から引き抜き、電子顕微鏡で観察し製織前の糸と比較を行った。両者の電子顕微鏡写真を図3に示す。その結果、製織後の糸では、非常に多くの損傷が観察された。これらの損傷は引張破断とは異なり、フィラメントの表面が削られたと思われるものが絡みついていることから、織機の部材との摩耗により損傷が発生したものと考えられる。



(a) 製織前



(b) 製織後

図3 製織によるアラミド糸の損傷

また、試料Aの製織後の布から引き抜いた糸に対し、単糸と同条件で引張強力の測定を行い、製織前の糸の強力との比較を行うとともに、製織後の糸の強力分布からシミュレーションにより強度予測を行った。測定および計算結果を表8に示す。製織後の糸は強度・伸度ともに低下しており、変動係数が増加していた。一方、初期引張抵抗度には大幅な変化が見られないことから、フィラメント自身の物性にはさほど変化がないと考えられ、製織後の糸強度低下は、織機の部材との摩擦により糸表層のフィラメントが損傷、破断し、引張強度の保持に寄与しなくなったために発生したものと考えられる。

また、製織後の糸の強度分布から織物の強度を

予測計算させた結果は、製織前の糸の強度分布から求めた値に比べ実測値に近づいていることから、アラミド繊維の製織時に強度低下が発生する素材については、製織における強度低下を考慮した上で強度予測を行う必要があると考えられる。

6. まとめ

あらかじめ測定した糸の引張強伸度分布を基に、コンピュータ上で乱数を使用して織物中の糸の破断強力分布および破断伸度分布を作成し、モンテカルロ法により織物の引張強度を計算する簡易強度計算プログラムを作成した。その結果、糸の引張強度のばらつきに起因する、織物の強度が引張方向の糸の積算強さより小さくなる現象を考慮した強度計算が可能であることが確認された。また、アラミド繊維織物について、引張強度の実測値とシミュレーションによる強度予測値とを比較したところ、製織時における織機の部材との摩擦により、シミュレーションによる予測値より大きな強度低下が発生することがわかり、このような摩擦の影響を受けやすい糸については、製織による糸の強度低下を考慮した強度予測が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、アラミド繊維をご提供くださいました帝人(株)テクノーラ事業部 橋高様に厚くお礼申し上げます。

文 献

1. 松尾；繊維機械学会誌, 52, P174 (1999)
2. Dastoor et.al.; *J. Text. Inst.*, 85, 110 (1994)
3. 日本繊維機械学会編；基礎繊維工学 [Ⅲ], 63 (1970)
4. Peirce；*J. Text. Inst.*, 21, T377 (1930)
5. 鈴木、松井；情報 (三河繊維研究資料), 133, 15 (1961)
6. 石川；Cによるシミュレーションプログラミング, ソフトバンク (1994)
7. テクノーラカタログ, 帝人