A-TS03-13-2

Simulation Integrated Material Test

正 吉川 暢宏 (東大生研)

Nobuhiro YOSHIKAWA, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo

Conventional material test has been developed within the framework of continuum mechanics, so that, the validity of the test is questionable for the material of heterogeneity and discontinuity, such as composite materials. Numerical simulation, represented by the finite element method, has been established to analyze mechanical behavior of structures, and seems to utilized to compensate disability of material test based on the continuum mechanics. The necessity of this kind of compensation should be enhanced since many advanced materials are manufactured by combination and composition of intelligent materials. Two examples of the compensation by numerical simulation are presented in this study. One is a material test using X-ray computed tomography (CT) images to evaluate mechanical behavior of heterogeneous material. The other is a finite element to analyze mechanical behavior of fibers in textile.

Key Words : Material Test, Finite Element Method, X-ray CT Image, Textile Composite

1. 緒 言

既往の力学的材料試験の枠組みは、連続体力学に基づいて おり、巨視的に連続体とみなせた金属材料に対する実績を積 むことで、工学的および工業的信頼を得てきた.一方、FRP に代表されるように、先進的な高機能材料は、均一とみなせ るバルクとして製造されることの方がまれで、異種の高機能 材料を複合化することで、新たな機能の発現を目指すことが 多い.そのような複合化された材料の強度評価に関しては、 連続体力学の範疇を外れて合理性を確保する必要があるた め、既往の方法論の延長では適切な解決策が得られないと思 われる.

材料試験の有用性は、実機に比して非常に小さい試験片を 用いても実機の破壊に関わる信頼性評価が行えることにあ る.ただし、この有用性を生かせるのは、実機の信頼性評価 が、それを構成する最小単位部材の信頼性評価の積み重ねで 行い得る場合で、かつその最小単位部材が均質とみなせて、 試験片で生じる力学状況が、力学的境界条件さえ合致させ得 れば、最小単位部材のいずれの場所でも起こり得る場合に限 られる、複合材料とはその名のとおり異種材料を非連続なま ま一体化した材料であり、連続体の仮定が成立しないことは 一見して明らかである.ただし、複合化するそれぞれの材料 を単独で扱えば、連続体とみなし得るわけであるから、それ ら連続体により構成される構造物として複合材料を捕らえ ることで、あくまでも連続体力学の枠組みで強度評価を行い 得るとの理論も成立するようにも思える.

しかしながら、現状の力学的材料試験で扱い得るスケール は、金属材料を連続体とみなせるスケールにとどまっており、 複合材料の構成材料を連続体とみなせるほどの、より小さい スケールでの強度に関わる方法論については十分な検討が 行われているとは言い難い.既往の材料試験方法論において は、破壊を応力、ひずみ、ひずみエネルギといった連続体力 学量に基づき記述しようとしているが、その方法論が材料を 連続体とみなし得ないミクロなスケールでの破壊に対して 適用できるのか否か.繊維強化複合材にみられるように、材 料を複合化する場合、その基本単位とみなせる微視的構造が 周期的に繰り返されることが多いが、その周期性により生じ る特有の力学場を適切にモデルに反映した上で,材料評価手 法を考察するべきではないか.このような疑問に対して回答 するためには,数理的な解析に基づく検討のみでは不可能で あり,有限要素法に代表される数値的解析,いわゆるシミュ レーション技術を融合した実験方法論が必要である.本稿で は,そのようなシミュレーション融合の材料試験を必要とす る例として,X線CTを用いた非均質材料内部の力学挙動を 評価する手法と,新たな有限要素開発による平繊テキスタイ ル材料の強度解析手法を示す.

2. X線CTを用いた内部変位場の計測

テキスタイル複合材料や生体の強度に関する有効な信頼 性解析を行うためには、材料内部の不均質性を適切にモデル 化する必要がある、材料の占有率のみをモデル化することを 目的として、無負荷時のX線CT画像より有限要素モデルを 構築する手法が考案されている「」、モデル化の精度を上げ るとの観点からは、不均質材料の微視的な力学挙動に関する モデル化が必要である。そのためには、力学的負荷を加えた 状態でCT画像を得て、そこから力学モデルを構築する必要 がある、このような問題意識に基づいて、X線CT装置と材 料試験機から成る新試験システムを試作し、不均質材料のモ デル化に対する有効性を検証中である。

2・1 試験システム 負荷を与えた状態での試験片断層画像を得るため、非常に安直ではあるが、既往の材料試験機と 産業用X線CT装置を組み合わせた試験システムを試作した. その概略図を図1に示す.

2・1・1 X線 CT 装置 一般に産業用 X線 CT 装置では、 X線管 (X-ray bulb)および X線検出器 (Image intensifier)の間 に試料を置く回転ステージ (Turn table)を配し、試料を 360 回転させる間に X線透視画像を集積し,再構成することによ って CT 画像を得る.本試験システムでは,試料を把持して 負荷を与えるチャック部が回転ステージを兼ねており,撮像 時の回転制御の精度と負荷状態保持の精度を両立させるた め工夫がこらされている.

CT 画像の撮像範囲は、X 線管、X 線検出器と試料との相対 位置により決まり、本試験システムでは、X 線管とX 線検出 器両方を移動させて、撮像範囲を調整できるようになってい

日本機械学会 [No.02・11] 材料力学部門 2002 年春のシンポジウム 第2部 講演論文集-21 世紀の研究戦略- ['02・3.9,東京]

る. CT 画像の解像度は,最大 3600 である X 線透視画像取り 込み数に依存して決定され、当然のことながら、時間をかけ て取り込み数を多くすればするほど、解像度は高くなる.ま た X 線管の焦点は 4 μ m であり、出力範囲は電圧で 30 から 225 kV 、電流で 10 から 1000 μ A となっている.

2・1・2 材料試験装置 材料試験装置は、ねじ式の静的 試験機である。回転ステージの機能を付加するため、上下の チャックが同調して負荷軸を中心に回転する機構が設けら れている。この回転機構によって、試験片に最大 10 kN の荷 重を与えた状態を保持しつつ、試験片を回転させて CT 撮像 ができる。また、材料試験機自体を垂直方向に最大 20 mm 昇 降でき、負荷軸方向に関して最小 4 µm 間隔で試験片の CT 画像を連続撮像できる。



Fig. 1 Schematic view of experimental system

2・2 画像処理

2・2・1 X線 CT 画像 X線 CT により得られる画像フ アイルは、8 ビットグレースケールのビットマップ形式のフ アイル (以降 BMP ファイル) である. BMP ファイルでは、 画像の濃淡を1 画素につき0から255 までの整数値で表して おり、X線透過量が少ない所ほど白く示され、画素値は255 に近づく. 画像サイズは512×512 画素または1024×1024 画 素から選択でき、最高分解能は1 画素につき4 μ m 程度とな っている.

2・2・2 三次元ボクセルモデル 微小間隔にて連続撮像した CT 画像に撮像間隔分の厚みを持たせ,負荷軸方向に 積層することで三次元ボクセルモデルを作製する.ただし本 研究では個々のボクセルを立方体とするため,CT 画像間隔 と画素一辺の長さが等しくなるようにする.そのため,三次 元ボクセルモデルを構築する前に,原画像の数画素四方につ いて画素値の平均化を行い,この修正した画像を元に三次元 ボクセルモデル化する.

2・3 撮像例 内部が不均一な材料として,八つ打ちロ ープを採用し,X線CTを撮像した例を示す.八つ打ちロ ブの呼称太さは10 mm,リードが3.0 mm,長さは1.5 mで ある.材料試験機には専用の治具を介して巻きつけしろ 0.6 mで取り付けた.X線照射条件は電圧85 kV,電流50 µAで あった.初期状態でもロープがたわまないようにするため, 引張り荷重1.0 Nを与えており,50 Nの引張り荷重を与えた 状態を負荷状態とした.初期状態と負荷状態の双方で撮像し た,X線CT画像の一例を図2に示す.画像サイズは1024 ×1024 画素であり,1 画素は約0.015×0.015 mmに対応して いる.内部の状態が明瞭に観察できており,初期状態におい て見られた内部の空隙が,負荷状態では無くなっている様子 がわかる.

本例では CT 画像間隔を 0.20 mm に設定し, 試験片表面に

取り付けた上下の評点間隔約 17 mm について撮像を行った. CT 画像は,初期状態において 88 枚,負荷状態において 93 枚を得た.これらの CT 原画像を 100×100 画素に変換し, 図 3 に示す三次元ボクセルモデルを作製した.



(a) Initial state (1.0 N) (b) Loaded state (50 N) Fig. 2 X-ray CT image of eight-strand rope



(a) Initial state (1.0 N)



(b) Loaded state (50 N) Fig. 3 Three-dimensional voxel model of eight-strand rope

2・4 変位場同定のための逆問題構成 この負荷前後の ボクセルモデルを比較することにより,非均質な物体内部の 変位場を計測するのが目下の課題である.その手順を図4に 示す.負荷前の撮像により得られた物質固定座標 X におけ るピクセル値を P_i(X)とし,負荷時の変形状態におけるビク セル値を空間固定座標 x で表したものを P_i(x)とする.変形 による変位場を表す座標変換を式(1)で仮定する.

$$\boldsymbol{x}^* = \mathbf{D}(\boldsymbol{X}) \tag{1}$$

この座標変換により生成される仮想的なボクセルモデルと 負荷状態におけるボクセルモデルを比較し、個々の点での画 素値を比較して、その誤差を最小化する逆問題を構成する. この逆問題を解くためには、誤差最小化の最適化アルゴリ ズムを適用するが、画素値が整数であり、座標変換を1ボク セル単位で行うため、式(1)の座標変換も離散値により定義さ れる離散関数となる.そのため遺伝的アルゴリズムに代表さ れる離散最適化手法の適用が必要となる.



Fig. 4 Inverse problem to identify displacement field

3. 平織テキスタイル材料の有限要素モデル

有限要素法は連続体力学に基礎を置くため、繊維強化複合 材料との整合性が低い.すなわち、個々の繊維まで有限要素 離散化しようとすれば非現実的な解析コストを要し、部材単 位で連続体とみなせば強度解析に必要な局所的力学状態を 評価し得ない.この不整合性の問題は、繊維を織って形成さ れるテキスタイル材料の解析において特に顕在化する.その 対処方法として、これまではいわゆる複合則が有効であると されてきた¹²¹.しかしながら、その複合則では、平織布の 強度評価を糸のスケールで行うことは難しかった.そこで、 糸レベルでの力学挙動を均質化的に組み込んだ二次元有限 要素を開発した.その概要と平織布の解析例を通じた有効性 の一端を示す.

3.1 有限要素定式化

3・1・1 変形様式の設定 平織布の緯糸と経糸双方とも、 無負荷状態では断面が直交二軸対称性を有するものとし、一 方を横対称軸、他方を縦対称軸と呼ぶこととする。また、横 対称軸と縦対称軸の交点を連ねて形成される曲線を中心線 と呼ぶ、織り目は、一本の糸の横対称軸が常に織り面に平行 となるように、また縦対称軸が縦中立面と呼ぶ平面内に存在 するように、均一に形成されるものとする。緯糸と縫糸の縦 中立面は直交し、織り目は密で隙間およびたるみは無いもの とする。糸の摩擦および曲げ剛性は無視し得るとし、また縫 糸と緯糸の交錯線上、すなわち両糸断面の縦対称軸が一致す る線上では、緯糸と経糸間ですべりが発生しないとする。縫 糸と緯糸の材質は同じで、異方性線形弾性体としてモデル化 できるとする。

| 平織布の変形様式を、ずれ変形と伸展変形および糸自身の

伸縮変形の三種類に限定する⁽³⁾.模式的にそれらの変形を 描くと図 5 となる.(a)が無負荷状態とすると,(b)がずれ変 形,(c)が伸展変形である.



3・1・2 うねり係数 緯糸に関わる量を添字 1 にて、 経糸のそれを 2 にて表すものとする、糸のうねり高さ、すな わち糸の中心線が形成する波の振幅の 2 倍を h_i にて表す、ま た、その波長をうねり波長と呼ぶ、糸の中心厚さ、すなわち 交錯線上の糸の厚さを d_i にて表す、 $h_i \ge d_i$ の間には、変形 の前後に関わらず式(2)の関係が成立する ³

$$h_1 + h_2 = d_1 + d_2 \tag{2}$$

うねり高さ h_i は伸展変形、つまり緯糸と経糸の相対変位に より増減するのに対し、中心厚さ d_i の変動は糸の弾性変形に よる。そのため d_i の変動は十分小さいとみなし得るので、 d_i を定数として扱う。さらに無次元パラメータ μ ($0 \le \mu \le 1$) を導入して、うねり高さを式(3)および式(4)で表すものとす る、

$$n_1 = \mu(d_1 + d_2) \tag{3}$$

$$h_2 = (1 - \mu)(d_1 + d_2) \tag{4}$$

このµをうねり係数と呼び,変位の一成分として扱うことで、 うねりの状態を有限要素解析に取り込む。

3・1・3 応力-ひずみ関係 緯糸と経糸に隙間が無く, 図 5(b)に示したずれ変形時に交錯線上ですべりが発生しないとの仮定より,糸断面の横対称軸方向の圧縮ひずみを算出 する. このひずみをずれ圧縮ひずみと呼ぶ.

図 5(c)に示した伸展変形により生じる横対称軸方向の圧縮 ひずみを,交錯線間で糸が真直であるとの仮定より算出する. このひずみをうねり圧縮ひずみと呼ぶ.以上のずれおよびう ねり圧縮ひずみを合算して,糸の横圧縮ひずみとする.横圧 縮ひずみとそれに対応する横圧縮応力については,一般的方 法と異なり圧縮方向を正とする.

糸の中心線方向に生じる伸びひずみを軸引張ひずみと呼び、交錯線間で糸が真直であるとの仮定より、ずれ変形および伸展変形を考慮して算出する.うねり係数µはうねり圧縮 ひずみと軸引張ひずみの算出に用いられる.

以上の横圧縮ひずみおよび軸引張りひずみと応力の間に、 線形弾性体の構成則を与える、これら糸のひずみを算出する には、変位勾配のみならずうねり係数も必要であるので、う ねり係数を節点変位ベクトルの一成分として扱う「.

3・1・4 仮想仕事の原理 上述のひずみは、変位勾配 およびうねり係数に関して非線形であり、いわゆる幾何学的 非線形問題を形成する。そこで、変位勾配およびうねり係数 に関して、逐次線形化して解を得るものとする。すなわち、 現在値の周りでひずみを変位勾配およびうねり係数の増分 に関して二次近似し、増分型の仮想仕事の原理 を適用し て、速度形の剛性方程式を得る。

3・2 数値計算例 提示した有限要素を用いて,縦100 mm 横200 mmの矩形平織布の下端を固定し,上端に鉛直上

向き一様強制変位 u を与えた場合の、糸の応力集中を解析する。糸のヤング率とボアソン比は、中心線方向について $E_t = 10.0$ GPa および $v_t = 0.3$ と設定し、それに直交する方向について $E_c = 1.0$ GPa および $v_c = 0.03$ と設定する。また糸の断面積を 0.04 mm²,中心厚さを 0.10 mm,うねり波長を 1.40 mm と設定する。うねり高さを緯糸経糸ともに 0.10 mm とする。

緯糸が水平方向より反時計回りに、0、 $\pi/12$, $\pi/6$, $\pi/4$,傾いた4ケースについて解析を行った. 解析により得 られた、荷重 - 変位関係を図6に示す. 図の縦軸は試験片上 端に生じる節点反力を単位長さあたりに換算した公称応力 であり、図の横軸は上端変位を試験片全長で除した公称ひず みである.

緯糸傾き角π/6の場合について、うねり係数の分布評価の 一例を図7に示す.また固定端(試験片下端)付近での応力 評価を行った例を図8に示す.図中の添字1および2は緯糸 および経糸の違いを表し、1および c は糸の中心線方向およ び横対称軸方向の違いを表す.糸の両端が試験片の上下端に ある部分とそれ以外の部分で、糸の伸展状態が大きく異なる と思われるが、その状況が図7のうねり係数分布から読み取 れる.また、図8からは、下端の左端では緯糸に、右端では 経糸に局所的応力集中が生じている様子がわかる.これは、 平織材料の単軸引張試験では試験片端のつかみ部から破断 が進むとの事実に合致する.

平織材料の強度試験に関しては、このような試験片内部で 起こる局所的な応力集中に対する認識が十分でないため、適 切な試験方法が未だ考案できていない、今後、その試験方法 を検討していく場合には、提案した有限要素によるシミュレ ーションを用いて、局所的な状況を明かにすることで、適切 な手法考案に大いに益するものと思われる.



Fig. 6 Nonlinear load-displacement relationship



Fig. 7 Distribution of crimp parameter



Fig. 8 Stress Concentration around clamped end

4. 結 言

新たな機能を発現する、不均質な新材料の強度評価を的確 に行うためには、有限要素法に代表される数値シミュレーシ ョン手法を積極的に利用する必要性があると思われる。その 例として、X線CTを用いた不均質材料内部の変位場測定方 法と、平織材料の有限要素を利用した強度評価方法について 述べた.いずれも未だ検討中の課題であり、まとまった結論 が得られてはいないが、問題を提起するとの意図で敢えて拙 文を寄稿させて頂いた.

文 献

- (1) Hollister, S. J. and Kikuchi, N., Biotechnology and Bioengineering, **43**, (1994), pp. 586-596.
- (2) Naik, N. K., Woven Fabric Composites, Technomic Publishing Company, (1994).
- (3) Haas, R, Contribution to the construction of envelope, NACA Report, 16, Part 1, (1917), pp.155-250.
- (4) 桑水流理・吉川暢宏, 日本材料学会第 29 回 FRP シンポ ジウム講演論文集, (2000), pp.221-224.
- (5) 久田俊明,野口裕久:非線形有限要素法の基礎と応用, 培風館, (1995).