116 競泳用水着の異方性材料モデルと数値シミュレーションによる設計方法の提案

Anisotropic Material Modeling of Competitive Swimwear
and a Proposal of Design Method by Numerical Simulation

○学 田邊宙夢 (筑波大院) 学 永岡丈弥 (筑波大院)
島名孝次 (ミズノ) 大森一寛 (ミズノ) 正 松田昭博 (筑波大)

Hiromu TANABE, Graduate student, University of Tsukuba, tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki
Takeya NAGAOKA, Graduate student, University of Tsukuba, tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki
Takatsugu SHIMANA, Mizuno Corporation, Nanko-Kita 1-12-35, Suminoe-ku, Osaka
Kazuhiro OMORI, Mizuno Corporation, Nanko-Kita 1-12-35, Suminoe-ku, Osaka
Akihiro MATSUDA, University of Tsukuba, tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki

The purpose of this study is development of a new design method for competitive swimwear by numerical simulation. Biaxial tensile loading tests were conducted to obtain the mechanical characteristics of competitive swimwear. The fabrics of competitive swimwear consist of chemical fiber. From biaxial tensile loading test results, the fabric has orthotropy and the stiffness of the fabric shows the graph like the two polygonal lines along with the increase of stretch. An anisotropic hyperelastic model was applied to the reproduction of mechanical characteristics of swimwear. The anisotropic hyperelastic model in this paper is able to adjust the axial and shear stiffness individually. Finite element simulation of tensile loading tests was conducted to show the applicability of the anisotropic hyperelastic model to competitive swimwear. The results of the simulation showed good agreement with that of tensile loading test. It is important to design a pressure given by stretch of competitive swimwear from the two viewpoints, the exercise performance and the burden to the heart function. FE simulation of the pressure using a cylinder model was conducted to show the applicability of our design method to competitive swimwear. The results of the simulation showed good agreement with that of pressure test in a practical range of competitive swimwear.

Key Words: Swimwear, Anisotropic, Finite Element Method

1. 緒言

現在の競泳用水着は、高い伸張性を有した繊維で作られており、ゴム材料のような弾性挙動を示し、身体を強く締め付けることができる。それにより身体の振動を減らすことができるなどの理由から、流体抵抗が軽減され記録の短縮が可能となる。さらに、水着素材は伸長方向によって剛性が変化する異方性を示す。そのため、素材の張力や異方性を適切に配置することにより、泳ぐ姿勢をサポートしつつ、水泳の挙動に対して柔軟に伸縮することが可能であると考えられる。しかし、水着素材の力学的な特性についての工学的な検証はあまり行われていない。

運動性能と心臓への負担の二つの観点から、身体を締め付けるコンプレッション系ウェアの着圧を設計することは重要である。青木ら⁽¹⁾は、大腿部の加圧を 10mmHg から 20mmHg の範囲で行うことで、長時間の運動遂行に好影響をもたらす可能性を示唆した。また、青木ら⁽¹⁾は 40mmHg を超える加圧は運動を継続するためには好ましくないことを示した。そのため、競泳用水着の着圧を 20mmHg 以下に設計することは重要な設計条件である。

本研究の目的は、数値シミュレーションによる競泳用水着の新たな設計手法の開発である。そのためにまず、二軸引張試験を実施し競泳用水着の力学特性を評価した。次に、水着の力学特性を再現するために異方性超弾性モデルを導入した。異方性超弾性モデルの競泳用水着への適用性を評価するために、引張試験の有限要素解析を行った。また、円筒を用いた着圧の測定を行い、数値シミュレーションによる本設計手法の適用性を検討した。

2. 異方性超弾性モデル

異方性超弾性モデルは材料の力学特性をひずみエネルギー関数 W によって再現する。本研究では、次式で表される異方性超弾性モデルのひずみエネルギー関数を導入した⁽²⁾。

$$\begin{aligned}
 W = & C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + p(J - 1) \\
 & + \frac{1}{4} \left[\frac{C_l^1}{d_l^1} \left\{ (I_4^l)^{d_l^1} - 1 \right\} + \frac{C_k^1}{d_k^1} \left\{ (K_1^1)^{d_k^1} - 1 \right\} \right] \\
 & - \frac{1}{4} \left\{ (C_l^1 - C_k^1)(I_4^l - 1) + C_k^1 \ln(I_3) \right\} \\
 & + \frac{1}{4} \left[\frac{C_l^2}{d_l^2} \left\{ (I_4^l)^{d_l^2} - 1 \right\} + \frac{C_k^2}{d_k^2} \left\{ (K_1^2)^{d_k^2} - 1 \right\} \right] \\
 & - \frac{1}{4} \left\{ (C_l^2 - C_k^2)(I_4^l - 1) + C_k^2 \ln(I_3) \right\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $C_l^1, C_l^2, d_l^1, d_l^2, C_k^1, C_k^2, d_k^1, d_k^2$ は材料定数である。このモデルは繊維の伸長方向とせん断の剛性をそれぞれ調整可能である。また、 $\bar{I}_1, \bar{I}_2, I_3, I_4^l, I_4^k, K_1^1, K_1^2$ は、次の様な右 Cauchy-Green テンソル C に関する不変量である。

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 = \bar{C} : I &= I_3^{-1/3} C : I \\
 \bar{I}_2 = \left(\bar{C}^{-1} \det \bar{C} \right) : I &= \left(I_3^{1/3} C^{-1} \right) \det \left(I_3^{1/3} C \right) : I \\
 I_3 &= \det C \\
 I_4^l = C : M^1, \quad I_4^k = C : M^2 \\
 K_1^1 &= (I_3 C^{-1}) : M^1, \quad K_1^2 = (I_3 C^{-1}) : M^2
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 M^1 と M^2 はそれぞれ、 $M^1 = a \otimes a$ 、 $M^2 = b \otimes b$ と定義される構造テンソルである。ベクトル a と b はそれぞれ縦糸と横糸に平行な単位ベクトルである。

第 2 Piola-Kirchhoff 応力テンソル S は、ひずみエネルギー関数 W を右 Cauchy-Green テンソル C で偏微分することにより得られる。

$$C = F^t \cdot F \quad (3)$$

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (4)$$

なお、 F は初期時刻 $t_0 = 0$ での初期配置における物質点 X と、現時点 t での現在配置における物質点 x により、次の様に定義される変形勾配テンソルである。

$$F = \frac{\partial x}{\partial X} \quad (5)$$

3. 二軸引張試験

3.1 試験片と試験方法

競泳用水着の力学特性を評価するために二軸引張試験を行った。試験片の左右を固定し、上面に引張変形を与えた。試験片の寸法は、50mm 四方とし、厚さは 0.2mm である。縦糸と引張方向のなす角度を繊維配向角 θ と仮定した。異方性を考慮するために、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° の 7 種類の試験片で二軸引張試験を行った。なお、変位速度は 1mm/sec とした。

3.2 数値シミュレーション

異方性超弾性モデルの水着素材への適用性を示すために、二軸引張試験の有限要素解析を行った。左右を拘束し、上面に引張変形を与えた。

解析結果と実験結果の公称応力と公称伸びの関係を Fig. 1(a) と Fig. 1(b) に示す。Fig. 1(a) には繊維配向角 θ が 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、Fig. 1(b) には繊維配向角 θ が 45° 、 60° 、 75° 、 90° の結果を示す。全ての繊維配向角において、解析結果と実験結果は良い一致を示した。それにより、本解析モデルによって、競泳用水着の力学特性が再現可能であると言える。

Fig. 1 Comparison with biaxial tensile loading test and FE simulation by nominal stress

4. 着圧測定

4.1 試験片と試験方法

着圧を測定することは、競泳用水着の性能を評価するのに重要である。そのため、アクリルの円筒を用いて着圧を測定した。円筒の寸法は、太ももの円周に近い直径 150mm とした。3 種類の試験片を用いて測定を行った。試験片の幅は全て 150mm とし、円周は 150mm の円筒に装着した際に、公称伸びが 1.2、1.4、1.6 となるようにした。縦糸と円筒の長手方向のなす角度を繊維配向角 θ と仮定し、試験片の角度は全て 90° とした。

4.2 数値シミュレーション

数値シミュレーションによる本設計手法の適用性を評価するために、着圧測定の有限要素解析を行った。解析の円筒モデルを Fig. 2(a) に示す。加えて、解析と実験を比較するために、着圧試験の様子を Fig. 2(b) に示す。円筒モデルの幅は 150mm で、最終直径は 150mm である。内面に半径が拡大する方向に変形を与えた。圧力と公称伸びの関係を実験結果と共に Fig. 3 に示す。解析結果は公称伸び 1.4 から 1.6 の範囲で良い一致を示した。

Fig. 2 (a) FE simulation of radial extension (36×3×2 elements)
(b) Pressure test

Fig. 3 Comparison with experiment and FE simulation

5. 結言

競泳用水着の力学特性を再現できる異方性超弾性モデルと数値シミュレーションによる競泳用水着の設計手法を提案した。その結果、解析結果は実験結果と良い一致を示し、異方性材料モデルと本設計手法の適用性が示された。これらの数値シミュレーションをより高度化することにより、力学的根拠に基づく競泳用水着の設計を行うことが可能となる。

参考文献

- (1) 青木美枝, 吉澤正尹, 三澤利博, 浜田敏彦: スポーツウェアによる皮膚圧迫と運動パフォーマンスに関する基礎的研究, デザントスポーツ科学, Vol.17, pp.296-305, 1996.
- (2) 浅井光輝, 木村嘉之, 園田佳巨, 西本安志, 西野好生: 異方性粘性・超弾性体による織布強化ゴムの構成式モデリング, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.194-205, 2010.