Development of Flexible Dry Suit Material for Endure the Penetration of the Rubble

BAO Limin^{*}, HORIUCHI Koki, SAKAGUCHI Akio, WAKATSUKI Kaoru, MORIKAWA Hideaki

Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

Received 8 April 2017; accepted for publication 23 August 2017

Abstract

When tsunami comes, emergency service workers usually have to wear a dry suit to rescue lives that are drifting and struggling in the tsunami. Therefore, rubble-resistant dry suit materials are in high demand. In this paper, in order to improve the penetration resistance of the dry suit materials, we attempted to introduce fiber which as a reinforcement into CR rubber. Effectiveness has been confirmed by evaluating penetration resistance and flexibility. Based on this method, we also developed a new hybrid structure with high penetration resistance against rubble.

Key Words : Flexible textile, Penetration, Dry suit material, Soft composite

柔軟性を考慮したガレキの突き刺しに強い ドライスーツ材料の開発

鮑力民^{*}, 堀内皇貴, 坂口明男, 若月薫, 森川英明

信州大学繊維学部

1. まえがき

水の浸入や体温低下から人体を保護するドライスーツは、主にマリンスポーツや水難救助の際に着用されている。ドライスーツには優れた耐候性及び柔軟性、高保温性能などが求められるため、素材は発泡クロロプレンゴム（Chloroprene rubber, 以下 CR）が多く採用されている。2011 年 3 月に発生した東日本大震災時の津波災害において、救助隊員はドライスーツを着用し、津波で漂流している多くの人命を救助した。一方で津波により堆積したガレキには釘やガラス片、金属片といった鋭利な物体が数多く含まれていたことから、これら突起物がドライスーツを突き刺し貫通して、隊員が受傷するだけでなく、冷たい水が浸透して体温を低下させることで、救助に大きな支障が生じた。消防庁のレポートにおいても「がれき等が堆積した場所や浸水地域内など、活動困難な状況下での長時間に至る活動となることから、身体を防護する装備、資機材等に配慮する必要」[1] が現場隊員より要望されてい

る。現在の素材である CR は耐突き刺し性能が低いため、救助隊員の装着するドライスーツ材料では耐候性、柔軟性、保温性能を維持しながら、耐ガレキ突き刺し性能の向上も必要である。

ゴムの突き刺し性能と関連する力学特性に関する研究は、過去にも多くある。池田ら [2] は EPDM（合成ゴム）や HDPE（高密度ポリエチレン）などの貫通抵抗性能を測定し比較した。HDPE の性能が相対的に優れていたが顕著な差は認められなかった。N. Rattanasom ら [3] は天然ゴム（NR）にカーボンブラックやシリカナノ粒子を充填して、その力学特性を検討した。充填により材料の強度は向上したものの、材料の破断伸長が小さくなったため、貫通抵抗性能の大幅な向上には至っていない。川西ら [4] はミシン針がフィルムを貫通する際の貫通力を調べ、テフロンフィルムが NR よりわずかながら大きな貫通抵抗を有することを示した。一方、防刃服材料の耐突き刺し性能の向上に関する成果も数多く報告されている。著者ら [5] はテキスタイル材料の防刃性能を向

^{*} 連絡先：信州大学繊維学部 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1
E-mail : baolimin@shinshu-u.ac.jp, Tel : +81-268-215423

上するため、織物のカバーファクタを大きくすることや織物にエラストマを含浸させて糸を固定する方法を検討した。また繊維がランダムかつ密に配置した不織布構造を防刃材料として提案し、その優位性を確認した [6]。さらに著者ら [7] はテキスタイル防刃材料に微細粒子を含浸したエラストマを充填することにより、粒子による摩擦抵抗を向上し、ヤーンが動きづらくなることで防刃性能が向上することを明らかにした。

本研究ではこれまでの研究成果をふまえ、ドライスーツの耐突き刺し性能を向上させるために、ドライスーツ材料である CR を繊維強化材で強化することを試み、突き刺し性能と柔軟性の二点を評価することでその有効性を確認する。さらにそれらを取り入れたガレキに強いハイブリット構造体の検討・開発を行う。

2. 新材料の提案・作成と性能評価方法

現在流通しているドライスーツは厚さ 5 mm の CR を主な材料として製造されている。その突き刺し性能を向上するため、文献 [5-7] の結果を参考にしてアラミド繊維不織布に CR を含浸させ、ドライスーツ材料とすることを提案する。CR の含浸により、水の浸入の防止、耐候性、耐オゾン性の向上も図られている。本研究ではケブラー繊維で構成された不織布 (KE202, DU PONT-TORAY CO. Ltd.) を使用した。目付は 209g/m²、繊維の太さは 15dtex、厚さは約 1.5mm である。CR はマリンスポーツ製品に向けて生産されており、ドライスーツにも利用されているゴムスポンジ (#21, ダイワボウプロダクト (株), Specific gravity:0.2g/cm³, Hardness(JIS): 24) を用いた。含浸用の CR は加硫・発泡を行う前の液状物を使用した。まずケブラー不織布をアセトンで洗浄、乾燥し、さらに接着性を向上させるため、コロナ放電表面改質装置 (コロナマスター PS-1M, 信光電気計装 (株)) を用いて不織布の表面処理を行った。

Fig.1 に試料作製の概要を示す。加硫前の CR を室温にてトルエン (純度 99.5 % 和光純薬工業 (株)) に溶解させる。この CR 溶液をハンドレイアップ法によりケブラー不織布に含浸させた後、真空乾燥機を用いてトルエンを揮発させ

Fig. 1 Procedure of molding AFRR.

Fig. 2 Image of AFRR cross section (20 wt%).

た (120℃, 30min)。CR を含浸させたケブラー不織布を金型に入れ、ホットプレスを用いて加硫と成形 (160℃, 20min) を行い、ケブラー繊維強化ゴム (AFRR) とした。AFRR の厚さは 0.4mm である。CR 含浸量は試料の 9, 13, 20, 39, 60wt% で、CR 体積含有率に換算すると 3.8, 6.3, 8.2, 20.3, 57.0% になる。Fig.2 に CR 含浸量 20wt% の AFRR の切断面 SEM 写真を示す。CR は均一に含浸しているが、CR とケブラー繊維の接着性はまだ改善の余地があると考えられる。

材料の耐突き刺し性能評価方法として JIS T 8051 [8] があるが、突き刺し用の試験錘の先端が棒状であり、実際の着用現場におけるガレキの中の鋭利物 (たとえば釘など) の先端形状と異なっている [9]。突き刺しでは、細い釘ほど貫通しやすいと、ガレキ中に露出している釘の長さやドライスーツ材料厚さを総合的に考慮して、袴田ら [9] は鉄丸釘 N38 (Fig.3) を試験錘がサンプルを貫通した際、電気信号で知らせる突き刺し評価装置を開発した。また活動現場における救助隊員の踏み入れ速度は平均 10,000 mm/min 程度で、JIS T 8051 の 100mm/min より非常に速い。本研究では、袴田らの装置を発展させて Fig.3 のような高速突き刺し評価装置を作製した。エアシリンダの先端に釘 N38 を取り付け、エアシリンダを押し出してサンプルと衝突させた。衝突時のワーク速度は 10,000 mm/min とした。今までの装置と同様に衝突・貫通時の最大荷重と貫通エネルギーをサンプルの防刃性能の評価指標とした [5-7]。各サンプルの評価実験は 10 回ずつ行った。

Fig. 3 Processed nail (N38).

Fig. 4 Schematic of current evaluation equipment.

また、ドライスーツの柔軟性を評価するため、純曲げ試験機 (KESFB2-L, Kato tech Co. Ltd.) を用いて純曲げ試験を行い、曲率 0.1~0.3 の区間における曲げ剛性を求めた。実験は各 6 回ずつ行った。

3. AFRR の突き刺し性能と曲げ特性

作製した AFRR の突き刺し性能評価結果の一部を、Fig.5 に示す。突き刺し時の変位 - 荷重曲線で、× は試験用釘が試料を貫通した点である。AFRR と CR サンプルの厚さはそれぞれ 0.4mm と 5mm である。Fig.5 に示したように CR に強化材としてケブラー繊維を複合化することにより、耐突き刺し特性は CR 単体に比べ大幅に向上し、特に AFRR (CR 含浸

Fig. 5 Load-Displacement curve of CR and AFRR.

Fig. 6 Relationship between penetration energy of AFRR and CR Impregnation (Volume fraction (%)).

Fig. 7 Flexural rigidity of AFRR.

量 :9wt%) の最大荷重は CR 単体の 8 倍に向上した。このことにより AFRR の有効性を確認した。Fig.6 に AFRR における CR 体積含有率と突き刺し貫通エネルギーに関する実験結果を示す。既報より耐突き刺しの性能はサンプルの厚さとほぼ比例していることが報告されているので、比較するために CR の結果を 0.4mm 厚さのものに換算した。その結果、貫通エネルギーは、CR 単体 (0.003J) と比べて、ケブラー繊維を導入することで大幅に向上した。また CR の体積含有量が少なくなると、貫通エネルギーが高くなり、3.8% では CR 単体の 77 倍となった。

AFRR サンプルの曲げ剛性を Fig.7 に示す。横軸に示す CR の体積含有率が高くなると、試料内の不織布繊維の移動が困難となるため曲げ剛性が大きくなり、結果として柔軟性を失っていく。本実験においては最小 CR 体積含有率 (3.8%) の AFRR でも、CR の 800 倍になった。一方、CR の体積含有率が小さくなると、ドライスーツ材料として重要な水の浸入を防ぐ機能の低下が懸念される。

4. AFRR/CR ハイブリットドライスーツ構造

CR をケブラー不織布で強化することで、耐突き刺し性能は大幅に向上したが、一方で柔軟性は大幅に悪化した。この問題を改善するため、Fig.8 のようなハイブリット構造を提

Fig. 8 CR/AFRR hybrid structure.

Fig. 9 Penetration energy of hybrid structure.
CR/AFRR: CR side is impact surface, AFRR/CR:
AFRR side is impact surface.

Fig. 10 Flexural rigidity of hybrid structure.
CR/AFRR: CR side is tensile side, AFRR/CR:
AFRR side is tensile side in bending test.

案した。試作した AFRR (CR 体積含有率: 3.8%, 厚さ: 0.4mm) と発泡した CR をゴム用接着剤 (G17, コニシ株式会社) で接着した。AFRR を CR で挟んだ構造体 (CR/AFRR/CR) と、AFRR と CR と片面接着した構造体 (CR/AFRR) を作製した。

試作したサンプルに対し、突き刺し性能を調べた結果の一例を Fig.9 に示す。CR/AFRR では突き刺し面は CR 側で、AFRR/CR では突き刺し面は AFRR 側である。図に示したように、層構造化したサンプルは CR 単体より高い耐突き刺し性能を示し、特に CR/AFRR/CR は、CR 単体の 7.8 倍と最もよい耐突き刺し性能を示した。これは、ケブラー繊維強化ゴムがよい耐突き刺し性能を有するものと考えられる。

ハイブリット構造体の柔軟性と関連している曲げ剛性の結果を Fig.10 に示す。CR/AFRR は引張り面を CR 側とし、AFRR/CR は引張り面を AFRR 側とした。AFRR と CR とのハイブリットにより、その曲げ剛性は CR 単体より大きくなった。複合材料のハイブリット理論 [10] の通り、硬い AFRR を曲げ中立面に設置したものが最も小さい曲げ剛性になり、CR のおよそ 2.4 倍になっている。構造をハイブリット化さ

せることにより、高耐突き刺し性と低曲げ剛性の両立が可能になることが明らかになった。

5. まとめ

柔軟且つ高い耐突き刺し性能を持つドライスーツ材料を目指し、CR に強化材としてケブラー不織布を導入して AFRR を成形し、その効果を確認した。AFRR の耐突き刺し性能は CR 単体より大幅に向上したが、その曲げ剛性も顕著に上昇した。中立面に AFRR を配置した AFRR/CR ハイブリット構造では、高耐突き刺し性能に対して曲げ剛性の上昇は抑制されるため、救助隊員のドライスーツ材料として適切だと考える。今後は、脚底部が釘を踏み込む突き刺しに対応する材料について、さらなる検討の必要性が考えられる。

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業 (26289005, 16K14113, 15H01789) の補助を受けた。また CR ゴムを提供して頂いたダイワボウプログレス (株) に謝意を表す。

References

- [1] Fire and Disaster Management Agency (2013) "Higashinihon daishinsai ni okeru tsunamisagai ni taisuru shouboukatsudou no arikata kenkyukai houkokusho", 64-111
- [2] Ikeda H, Imaizumi S, Hishiya J, Miyaji H, Yoshinao T (2000) Geosynth Eng J, **15**, 112-119
- [3] Rattanasom N, Saowapark T, Deeprasertkul C (2007), Polym Test, **26**, 369-377
- [4] Kawanishi S, Yuge O, Morishita T (1991) J Jpn Res Assoc Text End-Use, **32**, 534-541
- [5] Souma S, Bingo T, Morikawa H, Bao L (2011) Proceedings of the 2nd Asian Protective Clothing Conference, 13-15
- [6] Bao L, Sato S, Morikawa H, Soma S (2016) J Text Eng, **62**, 37-42
- [7] Bao L, Sato S, Wang Y, Wakatsuki K, Morikawa H (2017) J Text Eng, **63**, 43-48
- [8] JIS T8051 (2010) Protective clothing-Mechanical properties-Determination of resistance to puncture
- [9] Hakamada Y (2015) Development of new evaluation equipment for dry suit with high puncture resistance, Shinshu University Graduation Thesis
- [10] Ben G (2001) "Composite Material Application Dictionary", pp39-49, Industrial Research Center of Japan