

超弾性体をマトリクスとする土木用複合材の強度特性に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 29～令和 1
担当チーム：材料資源研究グループ
研究担当者：新田 弘之、川島 陽子

【要旨】

本研究は、超弾性体をマトリクスとする土木用複合材として、大変形時のゴム引布の内部応力を把握するために、解析モデルの構築と引張および屈曲時の内部応力の解析を行った。その結果、温度をパラメータとした引張試験の結果との比較から、ゴム引布の変形に対する応力状態の解析精度を向上させた。また、屈曲状態での内部応力やひずみの分布を数値解析により把握した。

キーワード：ゴム引布、引張特性、大変形、内部応力、数値解析

1. はじめに

ゴムのような超弾性体をマトリクスとする土木用複合材にはゴム引布（繊維強化ゴム）があり、ゴム堰、SR 堰などに使用されている。ゴム引布製構造物は施工や維持管理の容易さから、広く普及している。しかし、設置からすでに数十年経過しており、老朽化による劣化の進行が著しくなっている。ゴム引布製構造物の長寿命化および維持管理手法の高度化が求められており、この実現にはゴム引布の破壊形態や破壊のメカニズム、実際に生じる内部応力を把握する必要がある、しかし、実験だけでは内部応力を明らかにできず、大変形に対応する解析も困難である。

そこで本研究では、ゴム引布の解析モデルを構築し、温度をパラメータとした引張試験の結果から材料定数を求めることで、数値解析の精度向上を目指した。また、構築した解析モデルに基づき、引張や屈曲時におけるゴム引布に作用する内部応力を数値解析により把握した。

2. 大変形時のゴム引布の内部応力の把握

2. 1 概要

ゴム引布の大変形時の内部応力を把握するため、数値解析を行った。数値解析を行うにあたっては、ゴム引布のような複合材料の FEM 解析の事例がほとんどないことから、まず、解析モデルの構築を行った。続いて、構築した解析モデルを用いて、実際のゴム引布と同様の接合部を模擬した材料モデルについて、引張時に発生する応力やひずみを解析した。

2. 2 ゴム引布解析モデルの構築

2. 2. 1 材料物性とモデル化

ゴム堰用ゴム引布の構成材料として、ゴム材料にはエチレンプロピレンジエンゴム(EPDM)、層状強化材にはナイロン織布（以下、織布）を用いた。解析にあたり、ゴムは非線形挙動を示すため、Mooney-Rivlin モデルを採用した。一方、織布には線形モデルを採用した。また、それぞれの材料定数は引張試験(23℃、40℃、60℃)により求めた。

2. 2. 2 解析モデルの検証

ゴムおよび織布の引張試験の結果を図-1 および図-2 に示す。試験温度の増加に伴い、ゴムのステイフネスは減少した。また、引張強度や伸長は 40℃および 60℃で顕著な減少が見られた。一方、織布は温度による違いはほとんど見られなかった。

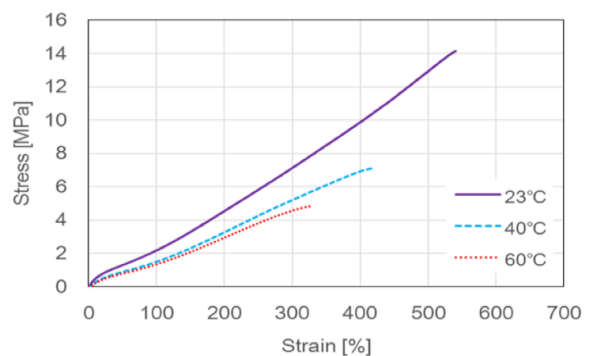


図-1 ゴムの引張試験結果

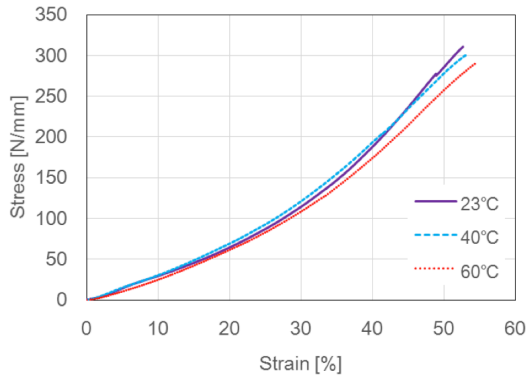


図-2 織布の引張試験結果

引張試験から求めた材料定数として、表-1 に Mooney-Rivlin モデルの 9 つのパラメータを、表-2 に織布の材料定数としてヤング率およびポアソン比を示す。ゴムの場合、図-1 の結果に対してモデルをフィッティングして、材料定数を算出した。一方、織布については、図-2 の結果に対して最小二乗法により算出した。

表-3 に実験結果と解析結果の比較を示す。ゴムの解析結果と実験結果はよく一致した。一方、織布の解析結果は、実験結果よりも 20~30%低く、解析モデルでは、実際よりもやや硬くなる結果となった。このことから、織布の等方性と粘性を考慮したモデルが必要であると考えられた。

2. 3 引張時の内部応力の解析

2. 3. 1 ゴム材料モデル

数値解析にあたり、図-3 の材料モデルを構築した。長さ 550mm、幅 10mm とし、内部に 4 層のナイロン織布層を設けた。また、織布層には接合部を模擬するために、8mm 長の不連続部(図中“Gap”)を設けた。

表-1 ゴムの材料定数

	23°C [MPa]	40°C [MPa]	60°C [MPa]
C_{10}	5.88×10^{-1}	3.46×10^{-1}	2.60×10^{-1}
C_{01}	4.71×10^{-2}	1.85×10^{-2}	4.03×10^{-2}
C_{20}	1.36×10^{-2}	1.61×10^{-2}	2.30×10^{-2}
C_{11}	1.19×10^{-3}	3.42×10^{-3}	-1.29×10^{-3}
C_{02}	-1.78×10^{-4}	-5.46×10^{-4}	-4.12×10^{-4}
C_{30}	-1.29×10^{-4}	-2.83×10^{-4}	-6.30×10^{-4}
C_{21}	-1.45×10^{-5}	1.06×10^{-5}	2.70×10^{-4}
C_{12}	3.58×10^{-6}	9.07×10^{-6}	-1.50×10^{-5}
C_{03}	-6.79×10^{-8}	-2.15×10^{-7}	5.20×10^{-7}

表-2 織布の材料定数

	23°C	40°C	60°C
ヤング[MPa]	225.7	223.2	198.5
ポアソン比	0.4		

表-3 解析結果の検証

	実験結果との誤差 (%)		
	23°C	40°C	60°C
ゴム	-7.6	+4.4	-3.3
織布	-21.4	-29.1	-21.4

2. 3. 2 解析結果

ゴムの数値解析の結果として、Gap1 近傍の応力分布およびひずみ分布を、それぞれ図-4 および図-5 に示す。図-4 の応力分布図より、温度によらず応力は接合部周辺に集中することがわかった。また、図-5 より、最大ひずみは高温時の方が常温時の 1.6 倍程度大きかった。このことから、高温下での引張試験におけるスティフネスの減少が、ゴムの大変形に起因していたことが示された。

織布の解析結果を図-6 および図-7 に示す。ゴムと同様に、接合部部分に応力が集中していた。また、

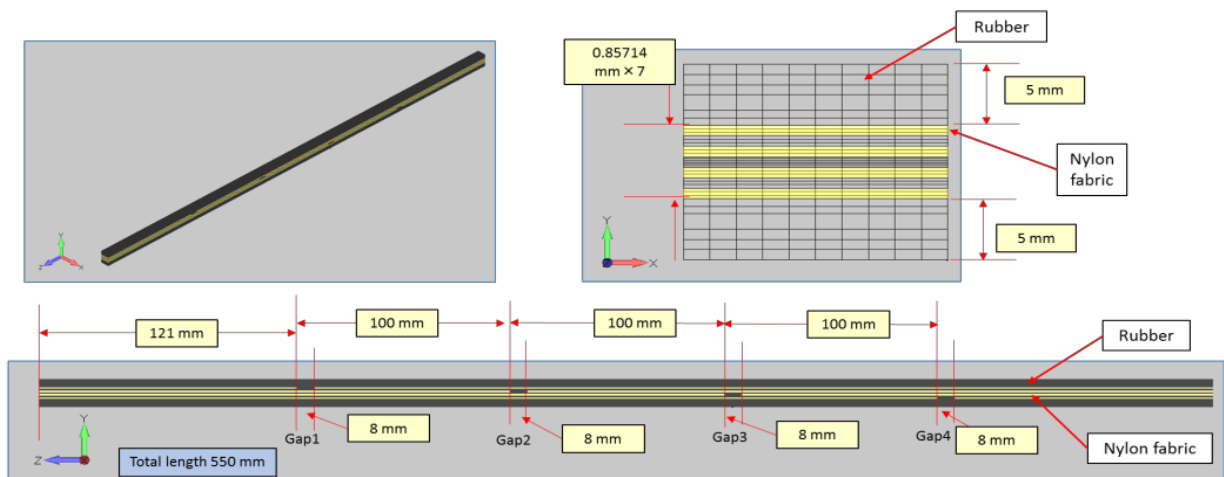


図-3 材料モデル

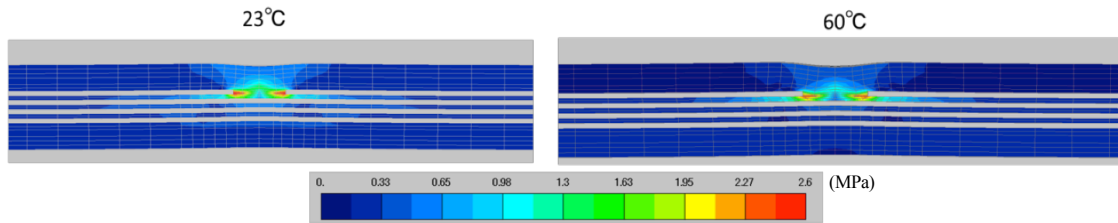


図-4 ゴムの応力分布

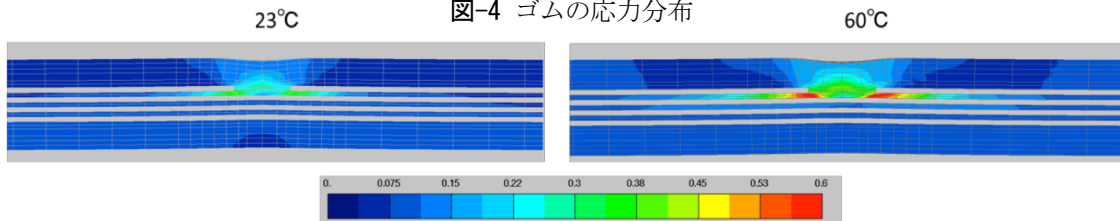


図-5 ゴムのひずみ分布

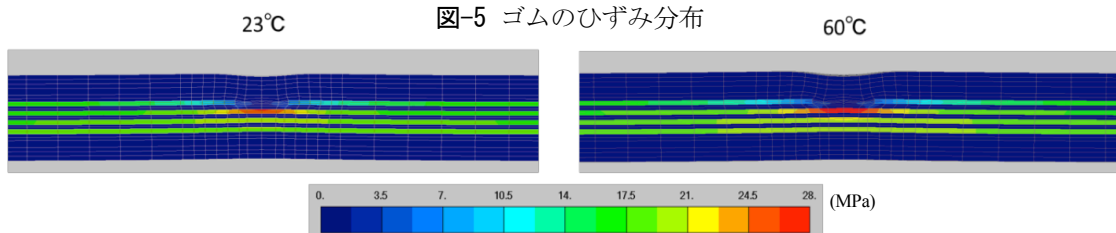


図-6 織布の応力分布

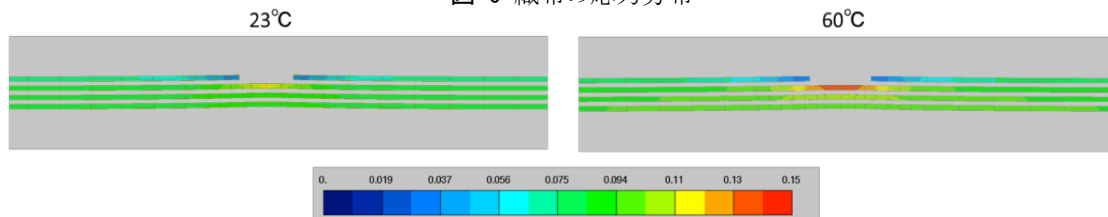


図-7 織布のひずみ分布

高温時のひずみは、常温時の1.2倍となった。

以上より、ゴム引布は接合部部分に応力が集中し、大変形することが示された。この挙動は、特に高温時に顕著だった。

3. 屈曲時のゴム引布の内部応力解析

3.1 概要

ゴム堰は、起立時に堰の左右端部に折れしわ部ができ、また、倒伏時にはゴム袋体が2つ折riになるため、ゴム引布が長期的に屈曲した状態になる。屈曲した状態では、局部的に応力が発生すると考えられるため、屈曲時のゴム引布の内部応力について解析した。

3.2 材料物性と解析モデル

図-3の材料モデルを用いて、180度屈曲時におけるゴム引布の内部応力を解析した。ここでは、2.2.2の結果を受け、ゴムはMooney-Rivlinモデル、織布は変形様式に応じた非線形モデルを採用した。つまり、織布の場合は、引張か圧縮が作用する箇所に応じて、異方性、等方性を考慮して適切な材料定数を

適用した。ゴムのMooney-Rivlinの材料定数 C_{10} 、 C_{01} 及び D を表-4に、ゴム引布の材料定数を表-5および表-6に示す。なお、縦弾性率、横弾性率およびポアソン比をそれぞれ E_i 、 G_i および ν_{ij} で表し、添字の i や j は数値解析における座標軸を表すものである。それぞれの材料定数を算出する上での留意点は、下記の通りである。

- 材料定数は、ゴムおよび織布の単軸引張試験結果および純せん断試験結果に基づき、算出した。
- 繊維方向の縦弾性率 E_1 は引張試験結果に最小二乗法を適用し、ポアソン比 ν_{12} および ν_{13} は一般的な樹脂の値とした。
- 繊維と垂直方向はゴムの特性が支配的と仮定した。そのため、ゴムの縦弾性率 E_2 、 E_3 は非圧縮性を仮定した場合、 $E_2=E_3=4(1+\nu_{23})(C_{10}+C_{01})$ という関係となる。また、ポアソン比 ν_{23} は一般的なゴムの値とした。
- 繊維の横弾性率 G_{12} 、 G_{13} は $G_{12}=E_1/(2(1+\nu_{12}))$ により導出した。

表-4 ゴムの材料定数

C_{10}	C_{01}	D
MPa		
0.5213	-0.02	0.00313

表-5 ゴム引布の材料定数 (圧縮、等方性)

E_1	ν_{12}
MPa	-
2.988	0.4

表-6 ゴム引布の材料定数 (引張、異方性)

E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
GPa			-			GPa		
225.7	2.988	2.988	0.4	0.49	80.61	80.61	1.038	

- ・ ゴムの横弾性率 G_{23} はゴムの完全非圧縮性を仮定し、 $E=3G$ より導出した。

3. 3 解析結果

解析結果として、屈曲時のミーゼス応力分布および公称ひずみ分布を、それぞれ図-8および図-9に示す。図-8より、ゴム引布を屈曲すると、接合部のある織布層とその外側の層に応力分布が見られ、特に外側の織布層で応力が大きくなっていった。一方、図-9より、屈曲部で全体的にひずみが発生しており、特に圧縮が作用している内側のゴム部分でひずみが最も大きくなっていった。また、ゴムと比べて織布に生じるひずみは小さいが、接合部の内側で織布層のひずみが大きくなるのがわかった。したがって、引張と圧縮を考慮した材料モデルを構築することで、大変形時の内部応力の分布を把握することができた。

4. まとめ

本研究から得られた知見を、以下にまとめた。

- 1) ゴムの温度依存性を考慮した解析モデルを構築した。ゴムの場合、Mooney-Rivlin モデルの解析結果と実験結果が一致した。一方、織布の応力解析には等方性と粘性を考慮したモデルが必要であると考えられた。
- 2) 高温時にはひずみが大きくなり、特にゴム引布は接合部部分に応力が集中し、大変形することが示された。
- 3) 屈曲状態でのゴム引布の数値解析を行い、内部応力の状態を把握し、屈曲部の内側のゴムのひずみが最大になり、接合部の内側で織布のひずみも大きくなるのがわかった。

参考文献

- 1) T. Nakamura and H. Nitta: Analytical study of Internal Phenomena of Inflatable Flexible Membrane Dams in High temperature Environments, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, No.7, 2018

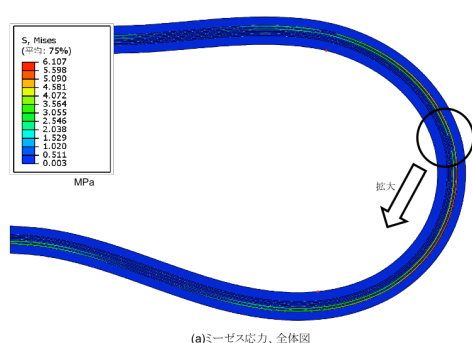


図-8 屈曲部分のミーゼス応力

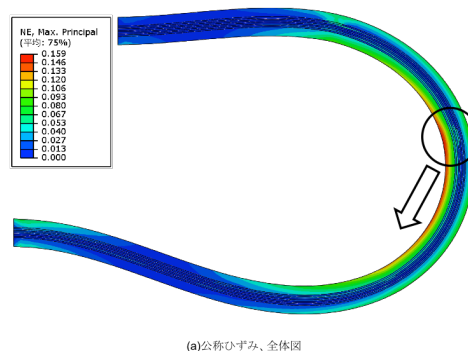


図-9 屈曲部分の公称ひずみ