斜張橋ケーブル点検ロボットのフレーム構造に関する軽量化の検討

長崎大学　学生会員　○佐藤克飛　長崎大学大学院　正会員　中村聖三
長崎大学大学院　正会員　奥松俊博　長崎大学大学院　正会員　西川貴文
長崎大学　学生会員　辻寛貴

1. はじめに

国土交通省は 2014 年に，「5 年に 1 回の頻度で，2.0m 以上の全ての橋梁の全ての部材に対し近接目視等による点検を実施すること」を義務付けた．斜張橋の従来の点検方法は，高所作業車で近接目視点検を実施するか，ロープで主塔から降下し直接目視して点検を行うかの 2 通りがあるが，前者は高さ 30m 以上の場所では近接目視が困難であり，後者は時間とコストがかかるというデメリットがある．また，点検者の安全確保の観点でも問題がある．そこで，長崎大学では企業との共同研究により，プロペラ推進式ケーブル点検ロボット[1)]を開発した．本研究では，電池の持ちを良くすることで交換の手間を省略する，あるいは電池容量を小さくすることを目的として，機体フレーム構造の軽量化に関する検討を実施した．

2. 研究概要

本研究の対象となる機体は，2 種類の機体（旧機体（図 1）・新機体（図 2））である．本研究では，旧機体と新機体の有限要素解析を実施することで，旧機体と新機体の強度・剛性を比較し，新機体の強度・剛性が，旧機体の強度・剛性と同等以上であることを確認した上で，その条件を満足させながらさらに軽量化した機体を設計することを目標としている．

3. 解析概要

解析の流れとしては，まず 3D-CAD ソフト「Autodesk Inventor Professional 2019[2)]」（以後 Inventor）を使用して機体の 3D モデルを作成する．その後，有限要素解析ソフト「MSC Apex Harris Hawk SP1」（以後 Apex）を使用してメッシュ分割や境界条件の設定をして，鉛直変位とミーゼス応力を算出する． 解析結果に影響がないプロペラやローラーなどの部分は省略する．旧機体の解析モデルにおいては，全ての部分に 6 面体ソリッド要素を用いる．フレームのアーム部分の板厚 1.5[mm]を考慮して，メッシュサイズは 1.5[mm]とする．境界条件は図 3 で示すようにケーブルを取り囲む部分の四隅の変位をすべて固定し，プロペラの推進力の作用位置に鉛直上向きの荷重を作用させる．弾性範囲の挙動を把握できればよいため，本研究では簡略化のため 1 N の荷重を作用させる．材料はアルミニウムであり，弾性係数$E = 6.83 \times 10^4$[N/mm^2]，ポアソン比は 0.34 とする．荷重の大きさを変更した（例：図 3，4 の(1)を 2N に変更）解析も行う．これは 4 つのプロペラにかかる推進力の大きさは必ずしも一様ではないことを

図 1 ケーブル点検ロボット（旧機体）

図 2 ケーブル点検ロボット(新機体)

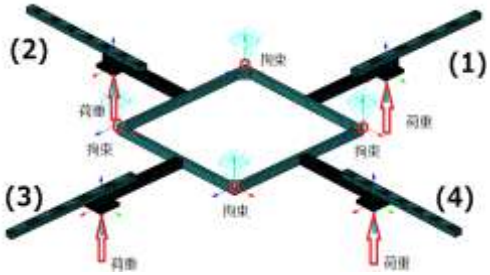

図 3 旧機体の境界条件

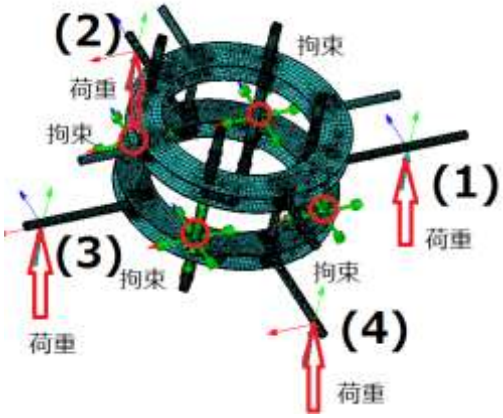

図 4 新機体の境界条件

想定し，変形モードによる強度・剛性の変化を確認するためである．新機体の解析においては，6面体ソリッド要素と4面体シェル要素を用い，荷重が作用する部分のメッシュの大きさを 3[mm]に設定する．材料はCFRP(炭素繊維強化プラスチック)であり，弾性係数$E = 6.00 \times 10^4$[N/mm^2]，ポアソン比は0.06とする．図4で示すようにアームとアームの中間部分のフレームを固定し，旧機体と同様プロペラの位置に荷重を作用させる．

4. 従来の機体の解析

表1に全てのアームに1Nが作用する場合と，荷重の大きさを変更した場合の鉛直方向の最大変位とミーゼス応力を示す．アームの先の部分が最大変位となり，アームの基部が最大応力となる．変位に関しては新機体の値が小さく，旧機体と比較して剛性が優れていることを確認した．応力に関しては荷重を変更した場合新機体が大きくなった．しかし，旧機体の材料がアルミニウムで，新機体の材料がCFRPであることやアームの基部から荷重作用位置までの距離が異なることから，強度が小さいと一概には言えない．

表1 各機体の変位と応力

機体	荷重条件	変位(mm)	応力(N/mm^2)
旧	全て 1N	0.191	1.52
	(1)が 2N	0.415	1.85
	(1), (2)が 2N	0.415	1.85
	(1), (3)が 2N	0.422	1.85
	(1), (2), (4)が 2N	0.411	1.85
新	全て 1N	0.066	1.11
	(1)が 2N	0.141	1.93
	(1), (2)が 2N	0.141	2.08
	(1), (3)が 2N	0.135	2.08
	(1), (2), (4)が 2N	0.138	2.08

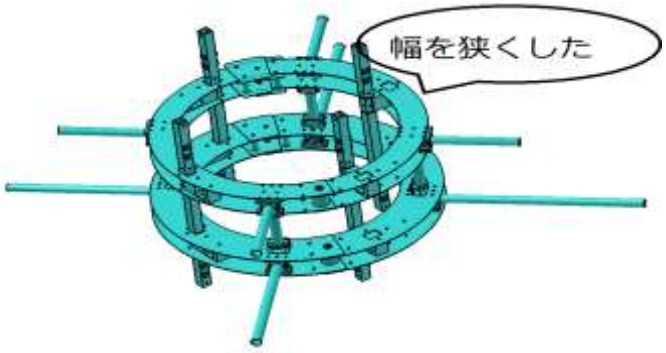

図5 上部フレーム幅を小さくした新機体

5. 軽量化の検討

新機体をベースに形状を変化させる 2 種類の軽量化案を考えた．案1は，アームの板厚を従来の2[mm]から1[mm]に薄くする方法，案2は上部のフレーム部分の幅を従来の 120[mm]から80[mm]にする(図5)方法である．両方法の解析を実施し，変位と応力を算出した．なお，CFRPの比重を1.6とすると，前者は41[g]，後者は113[g]軽量化できることになる．表2に結果を示す．どちらの案も変位に関しては旧機体より小さくなったが，案1では応力が旧機体より大きくなった．しかし，旧機体と新機体はアームの基部から荷重作用位置までの距離が違うのに加え，材料強度も異なることから，この結果だけで強度が劣っていると断言することはできない．一方，案2は応力も旧機体より小さくなったため，問題ないと考えられる．新機体フレームの総重量は1016[g]なので，軽量化した機体は903[g]となる．

表2 軽量化した機体の変位と応力

案	変位(mm)	応力(N/mm^2)
1	0.0957	1.74
2	0.0734	1.05

6. まとめ

本研究では軽量化の一案を示すことができたが，必ずしも十分な検討ができたとは言い難い．今後，実験により解析の妥当性を検証すること，他の軽量化案を模索すること等が課題である．

参考文献

1) 株式会社長大：斜張橋ケーブル点検ロボット VESPINAE, https://www.chodai.co.jp/vespinae/

2) 村木正芳ほか：Inventorによる3D-CAD入門，東京電機大学出版局，2018.