

CFRP 製ロードバイクフレームの最適設計

1. 諸言

優れた材料特性を持つ CFRP は、近年では盛んにロードバイクフレームの材料として使われるようになってきている。CFRP の採用により、従来フレームとして使われてきたスチールやアルミ合金に比べて格段にフレーム設計の自由度と調整範囲を高めることが可能になった。その一方で、強い異方性を持つ CFRP フレームを経験的に最適化するのには難しく、近年では数値解析ソフトウェアによる最適化が行われることも多くなりつつある。しかしこのような最適化では、3D モデルを用いることが多く、形状を大きく変更する概念設計の段階では非常に使いにくい。

そこで本研究では CFRP 製ロードバイクフレームの概念設計におけるシンプルで、扱いやすい最適化手法の構築を目指して、はりモデルをベースとする手法を考案した。

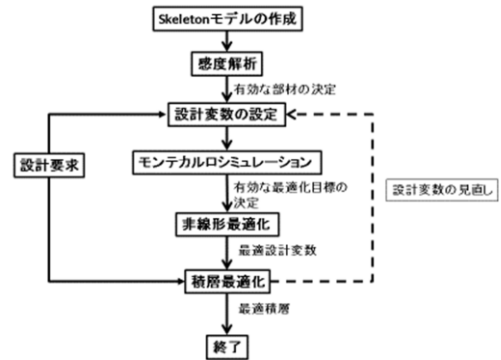


Fig.1 Optimal design scheme of road bike frame

2. 最適化手法

2.1 最適化スキーム

本研究で提案する最適化スキームを図 1 に示す。ロードバイクフレームをはりで表現し、本研究では、これを skeleton モデルと呼ぶ。skeleton モデルの作成後、フレーム全体の剛性に影響の大きい変数を調べるために感度解析を行い、設計変数を決定する。これにモンテカルロ法を用いて、設計変数範囲内で乱数によるサンプリングを行い、有効な最適化目標を決定する。さらに、非線形最適化を行い、最適設計変数（最適解）を求める。そして、これを満たす最適な積層構成を求める。なお、本研究では最適設計変数の決定までを行った。

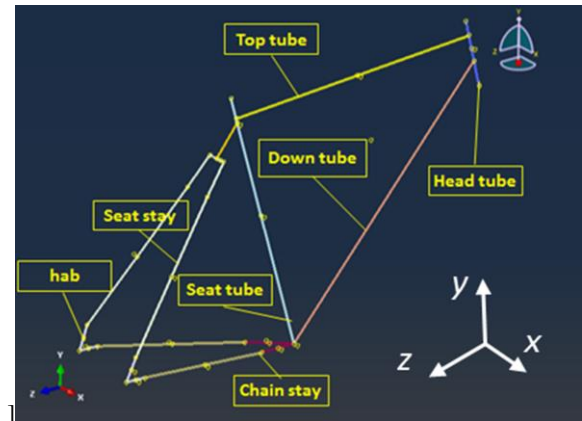


Fig.2 Skeleton model of road bike frame

2.2 Skeleton モデル

本研究では、実際のロードバイクフレームのデータから、skeleton モデルを作成した。その各パーツ名称を図 2 に示す。負荷条件

本研究では、図 3(a)~(d)に示す 4 種類の負荷条件を考慮した。図 3(a)は縦への曲げ、(b)は横への曲げ、(c)は引張、(d)はねじりに相当する。

2.3 感度解析および設計変数の設定

各パーツの厚みを半分にした時の剛性変化率を図 4 に示す。図より、top, down, seat tube の 3 パーツの感度が大きいことが分かった。また図 5 より本研究で考慮する積層構成では、縦剛性 E_1 と横剛性 G_{12} の関係は 1 本の曲線で表すことが出来ることが分かる。よって、top, down, seat tube の各パーツの厚み t と縦剛性 E_1 の合計 6 個の設計変数を用いて最適化を行う。表 1 に、本研究で用いた設計変数の範囲を示す。

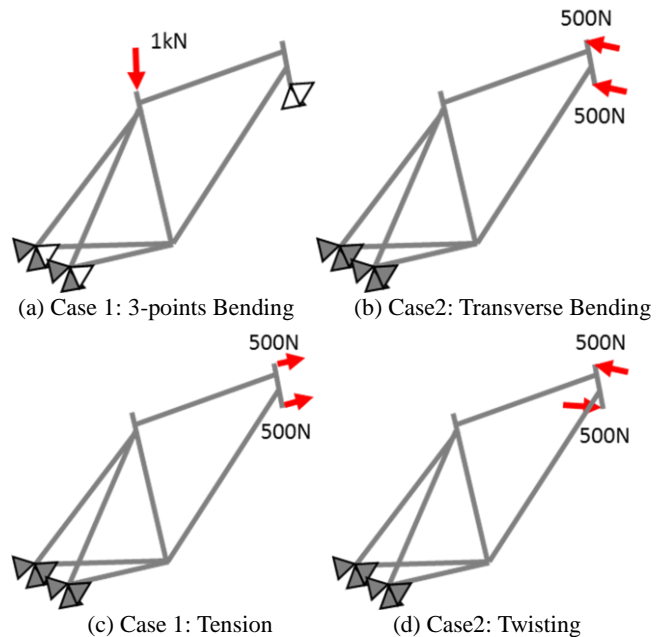


Fig.3 Four load and boundary conditions

Table.1 Details of Design variable range

		Min.	Max.
Top tube	厚み	0.6	1.4
	E_1	94	120
Down tube	厚み	0.6	1.4
	E_1	91	120
Seat tube	厚み	0.6	3
	E_1	130	89

3. 最適化結果および考察

3.1 モンテカルロシミュレーション

設計変数の範囲で乱数を振り、モンテカルロシミュレーションを行った。図6(a)~(d)に、得られた質量と無次元ひずみエネルギーの関係を図中緑点で示す。ここで、無次元ひずみエネルギーとは、各負荷条件でのひずみエネルギーをオリジナル形状の値(図中赤点)で無次元化したものである。また、図中には、非線形最適化の解を黒点で示されている。

条件1, 2, 4では重量1.4~1.8kgに分布しているので、重量5%減もしくは10%増を目標とすることができる。またひずみエネルギーにおいては20%減にすることが出来る。また条件3のひずみエネルギーはほとんど変化しないので、本研究では考慮しなくてよい。よってひずみエネルギー20%減、重量目標値をオリジナルの95%から110%の値を最適解の目標値とする。

3.2 非線形最適化

本研究では、応答曲面法を用いて非線形最適化を行った。まず、中心複合計画を用いてサンプリング点を求め、FEM解析によりその点の重量およびひずみエネルギーを計算する。そして、得られた値から2次の応答曲面を作成した。

目的関数をそれぞれの負荷条件でのひずみエネルギー、制約条件を重量目標値(90-110%)として、ひずみエネルギー最小化(剛性最大化)を行った。なお、計算にはMathematicaの大域的最適化(Nelder-Mead法)を用いた。図6(a)~(d)に、得られた最適解を黒点で示す。

条件1はほぼ下限値が得られており、最適化が上手くいった。しかし一部で下限値ではない値が見られたため、応答曲面の精度がほかの条件よりも悪いと考えられる。最適解の厚みとE1はtop tube ≒ down tube < seat tubeであり、厚みを減少させ、E1を増加させることで最適値が得られる。

条件2については、厚みがtop tube < down tube < seat tube、剛性がdown tube < top tube < seat tubeであり、厚みを減少させ、剛性を増加させることで最適値が得られる。よって、条件1と2では、パーツによる影響度が若干異なるものの、設計方針としてはよく似ていることが分かる。

一方で条件4は厚みがtop tube ≒ seat tube < down tubeとなったが、目標重量値100%を超えるとtop tube < down tube < seat tubeと途中で変化する。剛性では最適化をはずした解を除けばseat tube < top tube ≒ down tubeとなった、E1の値を変えても最適値は得られない。つまり条件4は条件1, 2と設計方針は全く異なっており、厚みを減少させ、E1を増加させることで最適値が得られる。

3.3 最適解の選択

最適解の傾向より条件4で最適化すると条件1に対する剛性が大きく低下する。条件1, 2での最適解は最適値を外した解を除いて、6個存在する。その中から全ての負荷条件に対して1番剛性が高い解を本研究の最適解とした。表1に最適解の詳細を示す。この最適解により条件1では17%、条件2では20%、条件4では32%の剛性上昇が期待できる。しかし重量は10%増加となってしまった。

Table.2 Details of optimal solution

	厚み(mm)	E1(GPa)	G12(GPa)	重量(kg)	wight ratio
top tube	1.40	98.0	15.3	1.77	1.1
down tube	1.40	95.7	15.7		
seat tube	2.74	110.5	24.0		

4. 結言

はりモデルに対し、フレームの変更を行わず、FEM解析と

応答局面法を用いた最適化手法を構築することができた。また重視する負荷条件での最適化により、従来モデルに比べて10%の重量の増加だが、その欠点以上のフレーム縦剛性と横剛性の上昇を得られた。

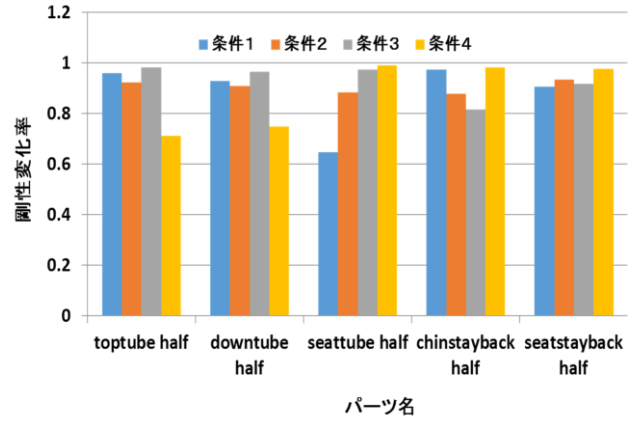


Fig.4 Sensitivity analysis of frame stiffness

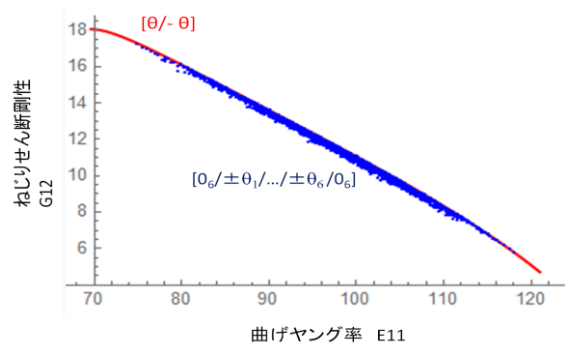


Fig.5 Relationship between E1 and G12 of CFRP

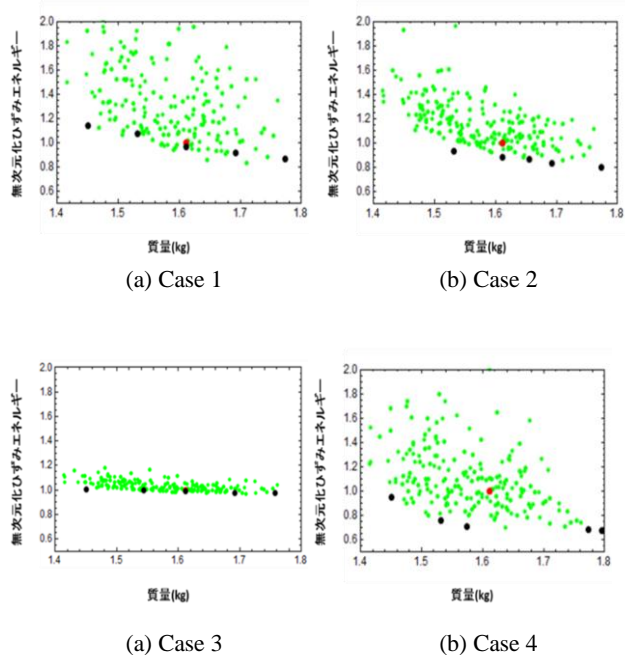


Fig.6 Relationship between mass obtained and dimensionless strain energy