

(58) FRP橋梁の最適構造形態に関する 初期検討

野中 秀一¹・藤井 久矢²

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪交通基盤事業部（〒730-0854 広島市中区大手町1
丁目1番地 広島商中日生ビル8F）
E-mail: shuuichi.nonaka@os.pacific.co.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 九州交通基盤事業部（〒812-0011 福岡市博多区博多駅
前2丁目19番地24号 大博センタービル4F）
E-mail: hisaya.fujii@os.pacific.co.jp

本研究は、FRPを主構造とした橋梁について、位相最適化手法を用いた構造解析を実施し、部材を適切に配置することで、従来の構造形式と比較して合理的な構造形態を創出することを目的としている。検討にあたっては、主部材をGFRP引抜成形材として幅員2.0m・橋長20.0mの歩道橋を対象とし、これまでFRP橋として多くの実績を有するポニーラス形式での通常設計手法と比較検証した。

検討の結果、部材の総使用量を同一とし、部材配置の最適化を行うことで導出された最適構造では、ポニーラス形式に比べ、たわみ量が38%まで低減できることが確認された。この結果は、鋼などの他構造部材と比較し、材料単価が高く、たわみ性能に劣るFRPの材料特性の短所を補うことができ、FRPの構造部材としての適用範囲を広げる大きな可能性を示していると言える。

Key Words : Topology design, Optimum design, Optimum analysis, FRP ,foot bridge

1. はじめに

本稿は、近年の構造解析技術の向上による橋梁の新たな構造形態の可能性について、初期検討を行うことを目的とする。現在、橋梁計画における形態検討の段階では、一般に桁橋・アーチ橋・斜長橋・吊橋など既存の「橋梁形式」による検討（形式設計）が行われている。これは、一般的な架橋条件下だけでなく、景観性を重視する場合などの橋梁の形態による影響が大きい条件下においても同様である。

近年、ヨーロッパでは、これまでの“Typology Design”（形式設計）の枠にとらわれず、自由な発想から、構造的な形態美、経済性に優れた橋梁が計画されている（写真-1, 2）。これらの橋梁を設計したLaurent Ney氏は、橋梁形態の決定段階への“Topolosy Design”の適用を提案¹⁾しており、構造的・経済性だけでなく、意匠・架橋位置の“context”などを総合的に考慮した形態設計により、斬新かつ諸要求を満たす橋梁を多く生み出している。

一方、建築分野では、一部の作品（写真-3）において、最適構造解析を形態検討の初期段階で活用する“Topolosy Design”が試みられている。本稿では、この最適構造解析手法を橋梁設計における形態検討へ適応することによる効果を検討するものである。

本稿では主構造部材としてGFRP材料を用いた橋梁を対象として検討を行った。主部材に用いたGFRPは、鋼・コンクリートと比較し、軽量かつ高強度であり、材料加工の自由度も高い一方、単位体積あたりの材料費が高く、断面剛性は低く、構造最適化の適用による効果が高い材料であるためである。また、検討対象には、複雑な構造への適応性が高いだけでなく、これまでも新技術の積極的な活用が図られてきた歩道橋を対象とした。

2. FRP橋梁の問題点と解決策の提案

(1) FRP橋梁の現状と課題

近年、「FRP歩道橋設計指針²⁾」が発行され、「歩道橋の設計ガイドライン³⁾」や「Detail Practice Pedestrian Bridge⁴⁾」においても構造材料としてFRPが挙げられるなど、FRP材料の橋梁分野への採用に向けた指針の整備が進められている。一方、FRPを主構造部材として用いた橋梁形式は、多くの実績を有する欧米などの海外も含め、一部の斜長橋・吊橋やアーチ橋を除き、橋長20m未満のポニーラス構造の歩道橋（写真-4）がほとんどであり、限られた架橋条件下での適用に限定されている。また、これらの指針等において、設計時に橋梁のたわみ量が、

構造決定に大きな影響を及ぼすことが共通の課題として挙げられている。

(2) FRP 橋梁の問題点

FRPの主構造部材としての普及が進んでいない要因として2つの点が考えられる。1点目は、「橋梁の全体たわみ量が設計に与える影響が大きく、長支間への適応が難しくなる点」である。そして、2点目は、「FRPの部材あたりの材料単価が高い点」である。これらの問題点は、FRP橋梁で採用されている橋梁形式と、比較的部材単価が低いGFRPなどのFRPの部材剛性が他の構造材料と比較して低いことによる影響が大きいと考えられる。

現在、FRPは梁要素としての部材特性のため、鋼材料で用いられている橋梁形式および設計手法が採用されることがほとんどである。鋼部材を用いた橋梁の設計では、鋼材料は部材強度に対して剛性が比較的大きい(図-1)ため、設計においては部材強度が設計に与える影響が支配的になるのが一般的である。

一方、FRP材料を鋼部材の特性に適するように開発されてきた橋梁形式に適用した場合、FRPは部材強度に対して剛性が低いために、橋梁の全体たわみ量が設計において支配的となる。このため、長支間への適応が難しくなるだけでなく、強度面において非効率的な部材配置になり経済性の低下につながっていると考えられる。

(3) 解決策の提案

本稿では、FRPの材料特性に合った、橋梁形態を最適構造解析により創出することで、合理的なFRP橋梁の計画・設計を行うことを提案する。本稿では、構造最適化手法に、構造系全体のひずみ量を最小化することで最適構造を導く、位相最適化手法を採用した。この手法は、構造全体の変形量、つまり、たわみ量に着目した最適化手法であり、全体たわみ量による設計への影響が大きい、FRPを主構造部材とする橋梁への適合性の高い手法である。この手法によって、橋梁形態を創出することで、各部材を効率良く配置し、全体剛性を向上(たわみ量を低減)させること構造形態の提

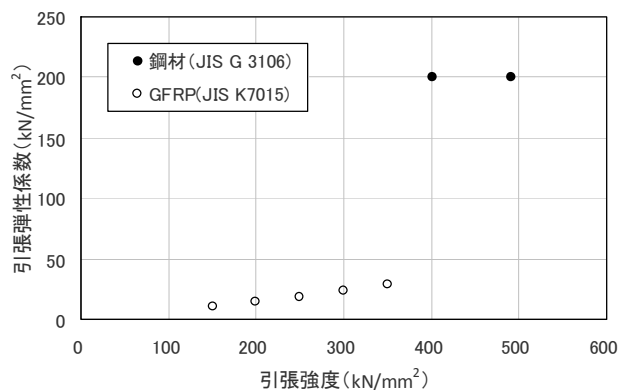


図-1 引張強度-弾性係数関係図



写真-1 橋梁での適用事例(その 1)



写真-2 橋梁での適用事例(その 2)



写真-3 建築分野での適用事例



Middlebury Run Park Bridge
(歩道橋の設計ガイドライン³⁾より抜粋)



写真-4 ポニートラス構造の FRP 歩道橋

案を目指した。

3. 最適構造解析

(1) 概要

構造最適化理論は、1988年に Bendose and Kikuchi⁵⁾によって、与条件下において最適な形を連続体上で求める方法が発表された。国内においても、藤井ら⁶⁾により建築デザイン分野における、最適構造の研究がなされ、「建築デザインと最適構造⁶⁾」では、位相最適化手法を用いた構造最適化プログラム（OTO-2D）が発表された。本稿では、最適構造の検討に上記のプログラムを用い、検討を行った。

(2) 最適構造解析

最適構造解析は、まず、設計範囲内に検討背景となる基本構造を作成し、基本構造に荷重を作用させる。そして、その際の構造体全体のひずみエネルギーの総和を目的関数とし、全体体積の制約のなかで、各部材の断面積を変化させることで、全体のひずみエネルギーが最小となるよう繰り返し計算を行うものである。つまり、荷重分担率の低い部材の断面を減少させ、分担率の高い部材の断面を増加させていく作業を繰り返し行うことで、限られた材料で構造的に優れる形態を導出する手法である。

4. 最適構造解析を用いた最適形式の導出

(1) 検討条件

検討条件一覧表を表-1に示す。支間長は、ポニートラス形式での最大支間と同等の20m、幅員は2.5mとした。使用するFRPの材料特性を表-2に示す。FRP材にはCFRP・AFRP等比べて経済性に優れ、ポニートラス形式としての実績を多く有するGFRPを採用した。本検討で用いた基本構造図を図-2に示す。検討範囲は、鋼箱桁を適用した場合の桁下高（桁高スパン比1/20）である“橋面+1.0m”から、ポニートラス形式の桁高の2倍である“橋面+3.5m”とした。また、最大部材長は施工時の輸送を考慮し12.0mとした。

(2) 最適構造解析

最適構造解析の結果を基に得られた構造形態のモデル図を図-3に示す。得られた構造形態は、上部は「アーチ構造」と「吊構造」、下部は上部と一体となった「吊構造」と「桁構造」を複合した構造であることがわかる。

5. 導出された最適構造形態の検討

(1) 構造的な検討

ポニートラス構造（図-4）および、最適構造により得られた「提案構造（図-3）」それぞれにおいて、

表-1 検討条件一覧表

橋長 (m)	20.0
幅員 (m)	2.5
設計活荷重 (kN/m ²)	3.5

表-2 使用材料一覧表

FRP材料	GFRP
弾性係数 (kN/mm ²)	19.6
引張・圧縮強度 (N/mm ²)	245.0
部材形状 (mm)	C-125-60-7

表-3 検討結果一覧表

構造形態	総体積 (m ³)	最大たわみ量 (mm)
ポニートラス構造	0.227 (1.00)	367.0 (1.00)
提案構造	0.236 (1.04)	139.6 (0.38)

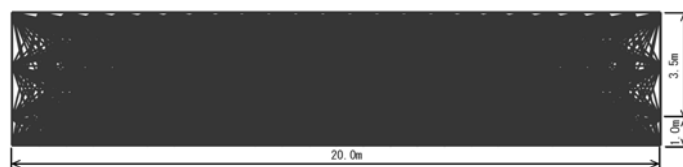


図-2 基本構造図

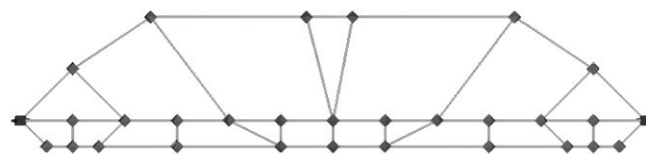


図-3 提案構造（最適構造解析結果）モデル図



図-4 ポニートラス構造モデル図

静的FEM解析を行い、構造的な検討を行った。検討には、Forum8社“FRAME 3D version 5.01.00”を使用した。

検討結果を表-3に示す。これより、提案構造では、ポニートラス構造と同等の材料総量（総体積）で、最大たわみ量を38%まで低減できることが確認され、最適構造検討により得られた形態が構造的に優れることが確認された。

(2) 最適構造形態の考察

導出された最適構造の妥当性と構造的な機能について考察を行う。

Michellらの研究⁷⁾により、図-5上図に示されるような両端をピン支持され、中央に鉛直荷重が作用する形態形成問題において、図-5下図のような形態が得られることが知られている。本稿で得られた構造は、荷重の載荷条件が1点載荷でなく、等分布載荷であるなどの違いは有るものの、上部構造の形態は

Michellのものと類似した，上部のアーチ構造とその弦方向への部材という共通点を有している．一方，下部では異なった形態となっている．これは，桁下高さを実構造としての制約を考慮して制限したためであり，制限を無くした場合に，上部と同様な構造が創出されることが，Michellの形態から想定できる．その場合に得られる構造は，構造合理性に優れることで知られるレンティキュラートラス（レンズトラス）構造であることから，本検討の実構造物への発展の可能性がうかがえる．

6. 今後の課題

本稿では，最もたわみ量の大きくなる等分布荷重時による構造性の向上を検討を実施した．一方，地震時の挙動・風荷重などの条件を考慮しておらず，実用にあたっては，これらの荷重条件を踏まえた，構造形態の照査や，それらの要素を含めた最適構造の検討が求められる．

7. 結論

本稿初期検討で得られた知見を以下にまとめる．

- FRPの材料特性に着目することで，アーチ構造・吊構造・桁構造を複合した新たな構造形態が創出された．
- 創出された構造形態は，FRP橋梁で多く用いられているポニートラス構造と比較して，最大たわみ量が38%に低減され，高い構造性を有することが分かった．
- 位相最適化手法を活用した橋梁形態の創出により，FRPの材料特性である強度に比して剛性が低いという課題を解決する可能性が検証された．
- FRP橋梁の設計において，全体たわみ量が支配的となる特性と，構造全体の剛性の最適化に着目した位相最適化手法の適応性の高さが確認された．

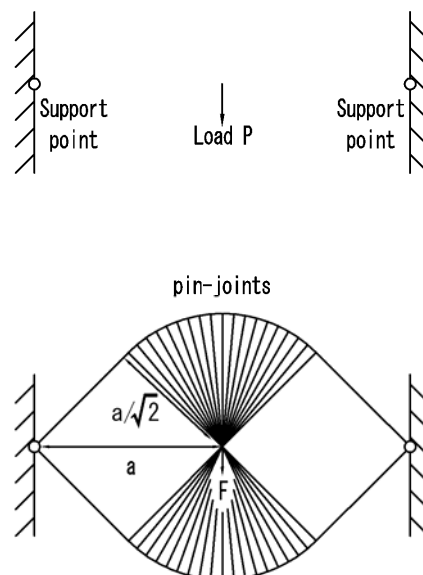


図-5 Michellによる構造最適化問題⁷⁾

謝辞

本研究にあたって，FRP橋梁の事例および使用材料の諸数値の提供にご協力いただいた，日本FRP（株）様に御礼申し上げます．

参考文献

- 1) Laurent Ney : Shaping Forces, 2008.
- 2) 土木学会：FRP 歩道橋設計指針，2011.
- 3) 土木学会：歩道橋の設計ガイドライン，2011.
- 4) Andeas Keil : Detail Practice Pedestrian Bridges, 2013.
- 5) Bendoe,M.P. and Kikuchi,N : Generating Optimal Topologies in Structural Design using a homogenization Method, 1988
- 6) 藤井大地著：建築デザインと最適構造 qwrf, 2008.
- 7) A.G.Michell,The limitsof economy of material in framed structures,Phil.Mag.

FUNDAMENTAL APPROACH FOR OPTIMUM SHAPE OF FRP BRIDGE

Shuichi NONAKA and Hisaya FUJII

This fundamental approach is aimed to find the optimum shape of FRP bridges. Because of highly adaptation for prperties of FRP, topology analysis is used to find the new and optimum shape for FRP bridges. The model case is a FRP footbridge which has 20.0m of span, and 2.0m of width. The new shape brought by Topology analysis has high stiffness than ponytrass bridge model made by the same amount of material; the max deformation of the new shape is the 38% of ponytrass's one. This new way to find a optimum shape of FRP bridges will bring more chances of using FRP to main beam, by deccleasening the problems in using FRP, high cost and big deformation.