FRP剛接トラス歩道橋の振動特性

豊橋技術科学大学　正会員　山田 聖志[*1)]
豊橋技術科学大学　学生会員　近田 純生[*1)]
豊橋技術科学大学　学生会員　中澤 博之[*1)]

1. はじめに

近年、1993年のアバフェルデイ橋や2000年の伊計平良川線ロードパーク連絡橋などFRP歩道橋の建設が注目されるようになった。また、鋼製ではあるが2000年 6月に竣工した英国のミレニアム歩道橋が、二日後に水平横方向振動が原因で閉鎖・修正を余儀なくされ、補修工事が行われた。鋼製歩道橋では、歩行による共振現象からくる不快を避けるためには、1.5～2.3Hz[1)] の間に鉛直方向振動モードの固有振動数をもたないように設計することが推奨されている。一方、新しい建設材料であるFRP部材は、高強度ではあるが、鋼材に比して剛性がかなり小さいため、それによって作られる構造物では過大な応答振動が発生する可能性が懸念され検討の必要がある。

本研究ではスパン30mクラスの歩道橋を対象として、連続引抜FRP形材を用いて断面算定を行い、 FRP歩道橋の基本的な立体振動特性、特に、水平横方向の振動成分の励起現象を明らかにする。

2. 解析モデル

解析モデルは断面形状が図1に示す支間長(L)32m、高さ(H)3m、幅(B)2.35m であり、同一部材で構成されたトラス橋とする。その上下弦材の長さ(l)は4m、トラス部材の長さ(h)は3.61mとする。設計荷重としては、トラス部材の自重の他に、床版、高欄、舗装等の重量として0.98kN/m^2 、群衆重量として3.43kN/m^2 を考慮している。

FRP部材は表1に示す部材諸量のものを用いることとし、その比重に対し、接合部の補強材等の重量を考慮して比重の割増しを行い、その値を2.5 としてトラス部材重量を算定することとした。

図1に示した解析モデルについて、ねじり剛性を考慮した梁要素による有限要素法を用い解析を行う。座標系の設定は、X軸を橋軸方向、Y軸を水平横方向、Z軸を鉛直方向にとっている。境界条件として、座標系の原点として選んだX=0点側の2点をピン支持、$X = L$の2点をX方向にのみ移動可能なローラー支持とした。また、部材重量については、各々半分ずつを対象格点に集中荷重として振り分ける。一方、トラス部材以外の荷重については、各格点の支配面積を考慮して、上弦の各格点に集中荷重として振り分けた。

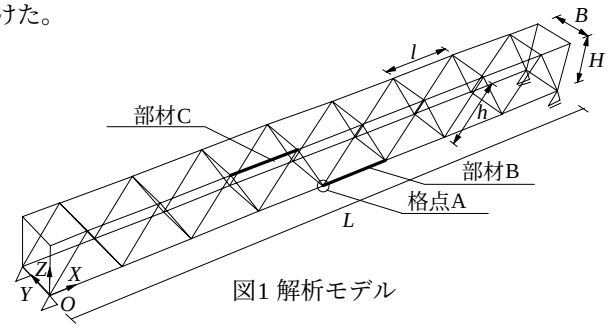


図1 解析モデル

表1　FRP部材諸量

補強繊維(体積含有率)	縦弾性係数	せん断弾性係数	引張強度
Eガラス(50%)	32GPa	6.1GPa	441MPa

3. 断面算定

断面算定には、FRP部材の許容軸力を定める必要があるが、現状ではそれに関する基準はない。そこで本研究では、一軸引張強度を基準として、その値を3.2で除した応力から許容引張軸力を定めることとした。一方、圧縮軸力に対しては、部材の弾性座屈(オイラー座屈)が先行しやすい[2)]ので、格点間の最大部材長lを座屈長さにとってオイラー座屈軸力を求め、それを3.2で除した値を許容圧縮軸力とした。また、たわみ制限については 1/600とした[1)]。

これらの条件のもと、断面算定を行った結果を表2に示す。

表2 断面算定結果

使用部材	□-250×250×14
最大たわみ[cm]	格点Aで4.89　(5.33)
最大引張軸力[kN]	部材Bで276　(1821)
最大圧縮軸力[kN]	部材Cで277　(807)

(　)内は許容値

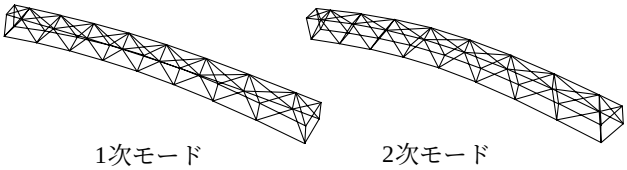
4. 非減衰自由振動性状

FRP歩道橋モデル(以下Case-F)について、非減衰自由振動解析を行った結果を表3、図2に示す。ここでは、群衆荷重は考慮していない。上弦材上に設置される床版の剛性は、水平横(Y)方向の振動抑制に寄与するが、本研究では、その効果をX形のブレースで置換することとし、ブレース部材はトラス部材と同一とした。また、1次モードの固有変位モードを正規化し、各部材の軸歪エネルギー比を求めたものを図3に示す。

これらの結果において、水平横方向に大きな刺激係数を有する固有振動数が、歩行との共振が予想される1.5～2.3Hzの近傍に存在していることが注目される。

表3 Case-F 固有振動数と刺激係数

次数	固有振動数 f[Hz]	刺激係数 ξ^X	ξ^Y	ξ^Z
f_1^Y	2.31	0.00	1.58	0.00
f_2^Z	4.24	0.34	0.00	1.17



1次モード　　2次モード

図2　固有モード図

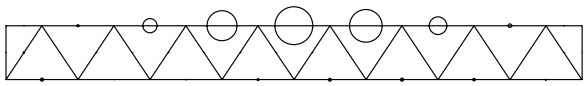


図3　軸歪エネルギー比分布図　1

キーワード：繊維補強ポリマ, 歩道橋, 歩行者モデル, 減衰応答解析
*1 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ケ丘1-1　TEL 0532-44-6849　FAX 0532-44-6831

5. 強制振動解析

FRP歩道橋の振動特性を明らかにするため、本研究では以下のような歩行外力に対する時刻歴応答解析を行った。歩行者は1名とし、X=0m (T=0sec)からX=32mまでを歩行するものとする。また、歩行者が歩く位置は、トラス上弦材上に置かれた床版の中央線上(Y=B/2)、中央線上から少しずらした線上(Y=B/3)、トラス構面上(Y=0)の3種類とした。入力する歩行外力は、梶川の方法[3)]のパラメータを用い作成した図4に示す歩行外力モデルとする。

数値解析法には、次式の運動方程式を用いた平均加速度法を用い、数値積分の時間刻みは0.02秒とした。

$$[\,M\,]\{\ddot{U}\}+[\,C\,]\{\dot{U}\}+[\,K_L\,]\{U\}=-F(T)\beta(T)$$

式中の$[\,C\,]$はレーリー型の減衰マトリクスであり、減衰定数は4章で求めた水平横方向並びに鉛直方向の最小振動モードに対して、それぞれ1%[4)]に設定した。また、$F(T)$は歩行外力、$\beta(T)$は歩行者の歩行位置により変化する各格点の格点集中荷重配分係数である。入力する歩行外力については、歩調1.5～2.5歩/sec の範囲で入力する。具体的な例を図5の実線として示す。図中の点線は、Wheelerの方法[3)]よるもので、両者には入力エネルギーの差が多少あるものの、ほぼ類似の外力モデルであるといえる。

本研究では比較のため、設計条件を同じにした鋼製歩道橋について、許容応力度設計により部材断面算定を行ったものをCase-Sとしている (使用部材2C-150×75×9×12.5)。一方、Case-Fにおいて軸歪エネルギー比が大きかった上弦材のFRP材の補強繊維の一部を、弾性係数の大きいカーボン繊維に変更し、上弦材の弾性係数を1.5倍、2.0倍としたCase-F1、Case-F2も同様に解析対象とした。

図6～8に、各歩調入力時の歩行者位置における最大応答速度を示す。図中の点線は文献4で歩道橋の使用性に問題がないとされている振動速度の最大値1.13cm/sec(実効値0.8cm/sec)のレベルを表示したものである。

これらの結果から、本研究の方法とWheelerの方法での結果はよく対応している。 Case-Fでは、f_1^Xが歩行との共振が予想される1.5～2.3Hz の近傍に存在しており、側歩行(Y=0)時の場合において、共振周波数に近い歩調では、応答速度は点線のレベルよりかなり大きくなっている。一方、Case-Sでは、歩行との共振が予想される周波数域にf_1^Xが存在しているものの、応答速度は小さい。Case-F1とCase-F2では、f_1^Xが歩行との共振が予想される周波数域よりも高周波数となったことにより、歩調1.5～2.3歩/secの最大応答速度は1.13cm/secより小さくすることができた。

6. おわりに

本研究では、FRP歩道橋について歩行外力を入力する強制振動解析を行った結果、以下のような結論を得た。

(1) FRP歩道橋では、水平横方向に大きな刺激係数を持つ固有振動数が、歩行との共振が予想される1.5～2.3Hz の近傍に存在し、歩行の際に水平横歩行に大きな応答を生ずる可能性がある。

(2) 上記(1)の対応策として、固有振動モードにおける軸歪エネルギーが卓越する部材の弾性係数を、補強繊維の変更などの方法で大きくすることにより、歩行との共振が予想される周波数領域の応答を低減することができる。

参考文献

1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, 1979.
2) 山田聖志, 小宮巌, 中澤博之：連続引抜成形FRP箱形断面部材の軸圧縮による破壊性状, 日本建築学会構造系論文集, No.518, pp.49-56, 1999.
3) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン, 2000.
4) 田中信治,加藤雅史：歩道橋設計時における振動使用性のチェック方法, 橋梁と基礎, pp.29-33, 11, 1995.

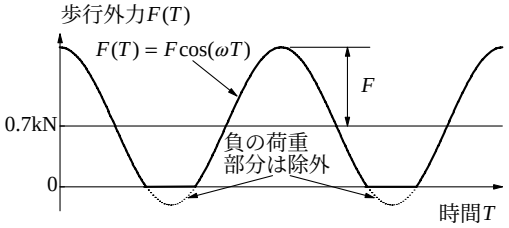


図4 本研究の歩行外力

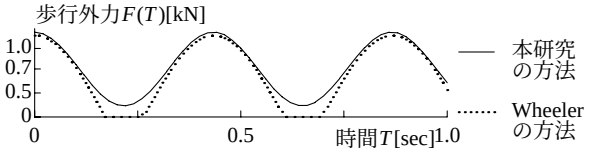
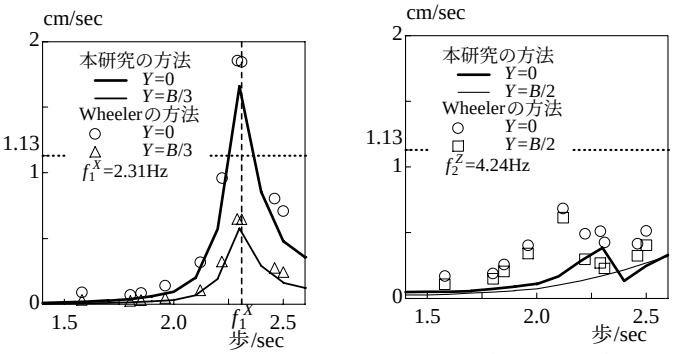
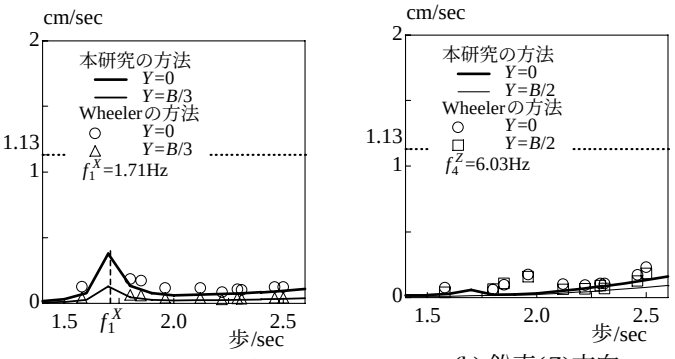


図5 入力歩行外力(2.31歩/sec)



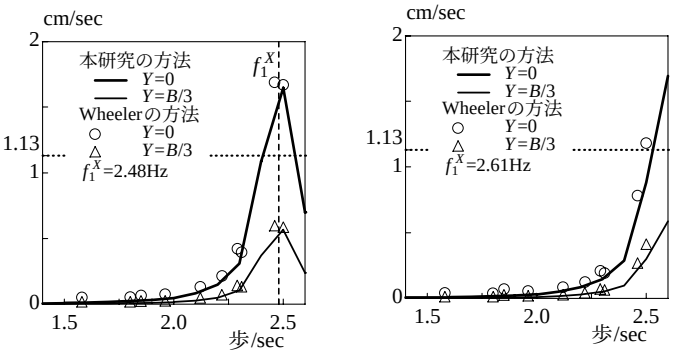
(a) 水平横(Y)方向 (b) 鉛直(Z)方向

図6 Case-Fの最大応答速度



(a) 水平横(Y)方向 (b) 鉛直(Z)方向

図7 Case-Sの最大応答速度



(a) Case-F1 (b) Case-F2

図8 水平横(Y)方向最大応答速度