

# FRP剛接トラス歩道橋の振動特性

山田聖志<sup>1</sup>・近田純生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)  
E-mail:yamada@st.tutrp.tut.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 豊橋技術科学大学大学院前期課程 建設工学専攻 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)  
E-mail:chikada@st.tutrp.tut.ac.jp

本論文では、スパン30mクラスのFRP歩道橋の振動特性を明らかにすることを目的として、まず、ガラス繊維補強FRP形材を用いて断面算定を行い、その自由振動解析から、1次の非減衰自由振動モードは水平横方向変形の卓越するモードで、その振動数が歩行との共振周波数と近接していることを論じている。次に、単独歩行者モデルを用いた時刻歴応答解析を実施し、水平横方向の固有振動数に近い歩行振動数の歩行外力を入力した場合、水平横方向に大きな応答を生ずることを明らかにした。対応する振動モードでの軸歪エネルギーが卓越する部材のみをカーボン繊維形材にすることで、歩行による振動を小さく抑えることができることも示している。

**KeyWords** : fiber reinforced polymer, footbridge, pedestrian model, damped response analysis

## 1. はじめに

近年、1993年のアパフェルデイ橋<sup>1)</sup>や2000年の伊計平良川線ロードパーク連絡橋<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。鋼製歩道橋では、既往の研究成果をもとに、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<sup>4)</sup>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、まず、これまで著者等が実験的に静的力学特性を解明してきた連続引抜成形FRP形材<sup>5),6)</sup>を用いて断面算定を行い、非減衰自由振動解析を実施する。次に、単独歩行者モデルを用いた時刻歴減衰応答解析を実施し、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。更に、同一設計条件の下で試設計した鋼製歩

道橋についての応答性状との定量的な比較も行い、FRP歩道橋のように強度剛性比の大きな材料で構成された構造物の振動照査の要点について考察する。

## 2. 解析モデル

### (1) 断面算定のために設定した条件

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上路トラス橋とする。その上下弦材の長さ(l)は4m、斜材の長さ(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<sup>2</sup>、群衆荷重として文献2)を参考に3.43kN/m<sup>2</sup>を考慮している。

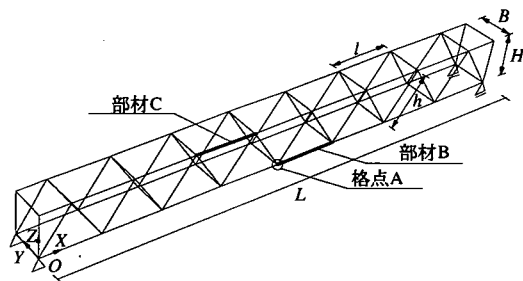


図-1 解析モデル

構造部材としては表-1に示す材料諸量を持つ連続引抜成形FRP形材を用いることとし、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。

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<sup>7)</sup>。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<sup>5)</sup>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<sup>4)</sup>。

## (2) 有限要素モデル

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<sup>8)</sup>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、トラス部材以外の床版・高欄・舗装等の荷重、群衆荷重については、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。なお、3~5章の動的解析においては、群衆荷重分は動的外力として扱う。よって、3章の非減衰自由振動解析では考慮していない。

## (3) 断面算定結果

前述の設計条件をもとにして決定した部材寸法は□-250×250×14であり、部材総重量は97kNである。表-2に静的応力解析の結果を示す。また、各部材の軸力、各格点のたわみを付録-1に示す。この結果から、応力ではなくたわみ制限により部材が決定していることがわかる。なお、部材端モーメントは高々約2kN・mであった。

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%)	34GPa	6.1GPa	441MPa

表-2 断面算定結果

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

本研究では後述するように、水平横方向の振動に特に注目しているため、水平横方向の風荷重についても検討を行っている。風荷重については、風上側部材の有効投影断面積について1.96kN/m<sup>2</sup>、風下側部材の有効投影断面積について0.98kN/m<sup>2</sup>を考慮して<sup>4)</sup>、静的応力解析を実施したところ、部材軸力の大きさは、いずれの部材も許容軸力の1/13以下であった。

## 3. 非減衰自由振動性状

### (1) 解析方法

FRP歩道橋モデル(以下Case-F)について、式(1)に示す自由振動方程式を用いて、非減衰自由振動解析を行う。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、文献9)で用いられているFRP床版の面内せん断剛性を参考として、その剛性をX形のブレースで置換した結果、□-300×300×16のFRP形材をブレース部材として採用することとした。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K_L]\{U\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[K_L]$ は線形剛性マトリクス、 $\{U\}$ は相対変位ベクトル、 $\{\ddot{U}\}$ は加速度ベクトルである。

### (2) 解析結果

表-3にCase-Fの非減衰自由振動解析結果を示す。固有振動数とその刺激係数の値から分かるように、水平横(Y)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。図-2は主な固有振動モードを示したものである。本構造モデルの1次固有振動モードは、全体的には水平横振動が卓越しているものである。しかしながら、より詳細に見ると、上弦材と下弦材の変形が異なっており、ねじれ成分も加わった変形となっている。こうした歩行との共振周波数に近い1次の固有振動モードに対して、各部材の軸歪エネルギー $U_m$ を式(2)を用いて求めたものを図-3に示す。

$$U_m = \sum_i \frac{N_i^2 l_i}{2E_i A_i} \quad (2)$$

ここで、 $N_i$ は部材軸力、 $l_i$ は部材長、 $E_i$ は縦弾性係数、 $A_i$ は部材断面積である。Y=0とY=Bの2構面とも全く同一であり、図-3中の数値は、最大軸歪エネ

ルギーで除した値で、表示のない部材はその比率の絶対値が5%以下であったので省略している。図より、先に述べたねじり成分によって上弦材の軸歪エネルギーが下弦材よりも著しく大きいことがわかる。尚、左右の歪エネルギー分布が多少異なるのは、ピンとローラーの境界条件の違いである。

一方、表-3中のCase-Sは鋼製歩道橋モデルを意味する。比較のため第2章で示した設計条件と同様に、床版、高欄、舗装等の重量として0.98kN/m<sup>2</sup>、群衆荷重3.43kN/m<sup>2</sup>を考慮して、許容応力度設計を行ったモデルである。たわみ制限については1/600とした。床版の剛性については、FRP歩道橋モデルと同様な床版を想定し、その面内せん断剛性を鋼材のX形ブレースで置換することとした。Case-Sでは、付録-2のようにたわみ制限ではなく許容応力によって部材断面寸法が決まっている。この場合においても水平横方向に大きな刺激係数を有する固有振動数が、歩行との共振周波数域に存在している。

表-3 固有振動数と刺激係数

モデル	次数 <i>i</i> と記号 <i>f<sub>i</sub></i>	固有振動数 <i>f</i> [Hz]	刺激係数		
			$\xi^X$	$\xi^Y$	$\xi^Z$
case-F	$f_1^Y$	2.35	0.00	1.58	0.00
	$f_2^Z$	4.30	-0.34	0.00	1.16
	$f_3^Y$	5.05	0.00	0.52	0.00
	$f_4^Y$	5.56	0.00	0.20	0.00
	$f_5^Y$	9.04	0.00	0.02	0.00
	$f_6^Y$	10.47	0.00	-0.33	0.00
	$f_7^X$	12.24	0.88	0.00	0.18
	$f_8^Y$	13.00	0.00	0.17	0.00
	$f_9^0$	14.29	0.00	-0.01	0.00
	$f_{10}^Y$	16.52	0.00	0.08	0.00
case-S	$f_1^Y$	1.69	0.00	1.44	0.00
	$f_2^Y$	3.52	0.00	-0.27	0.00
	$f_3^Y$	4.21	0.00	0.38	0.00
	$f_4^Z$	5.88	-0.32	0.00	1.17
	$f_5^Y$	6.21	0.00	0.06	0.00
	$f_6^Y$	6.50	0.00	0.04	0.00
	$f_7^0$	7.36	0.00	-0.01	0.00
	$f_8^Y$	8.03	0.00	-0.09	0.00
	$f_9^0$	8.77	0.00	0.00	0.00
	$f_{10}^Y$	9.28	0.00	-0.03	0.00

#### 4. 強制振動解析

##### (1) 歩行外力のモデル化

ここではFRP歩道橋モデルの振動特性を明らかにするために、歩行外力を入力する時刻歴応答解析を行う。荷重となる歩行者の人数については、文献10)から共振歩行1名の照査を行えば十分であるとされている。図-4, 5, 6に、既往の研究の歩行外力モデルを示している<sup>10)-13)</sup>。ここでは、 $\eta$ は歩行者の歩調、 $T^*$ は歩行外力モデルにおける歩行周期、 $f^* = 1/T^*$ はその歩調を表す。

図-4に示すWheelerの歩行外力モデルでは、実際に歩行者が歩行している歩調とモデル化された歩調は異なっているので、構造計算を行う上での扱いが不便である。図-5に示す梶川のモデルでは歩行者の体重は考慮されていない。そのため、本研究のように軽量な構造物を対象とする場合には、歩行者の体重を考慮する必要があると考えられる。図-6に示す小幡等の歩行外力モデルは、梶川の歩行外力パラメータを用い、余弦波でモデル化し、負の外力部分を除外したものである。尚、梶川の歩行外力モデルと小幡等の歩行外力モデルにおいては、歩行者と歩調と歩行外力モデルにおける歩調は一致する( $\eta = f^*$ )。

本研究では、有限要素解析に適用しやすいよう修正した歩行外力モデルとして、梶川の歩行外力パラメータを用い、図-7に示すように、歩行者の体重(0.7kN)を考慮し、余弦波でモデル化するとともに、

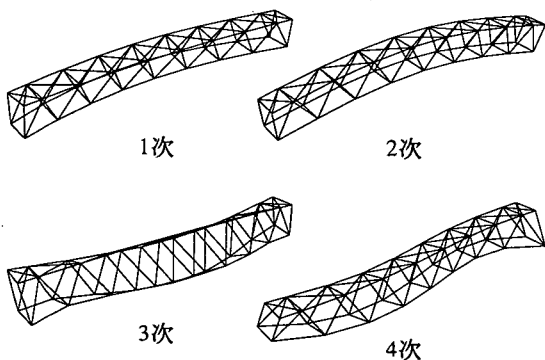
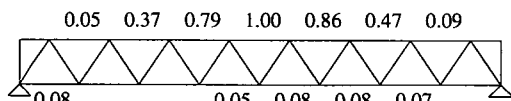


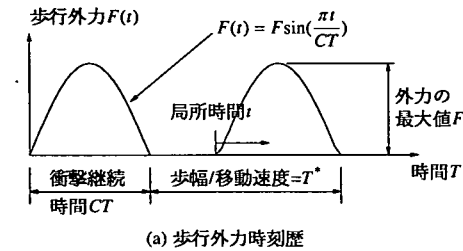
図-2 固有振動モード図(Case-F)



(数値の記入のない部材は5%以下)  
図-3 軸歪エネルギー分布図(Case-F)

負の外力部分を除外したものをを用いている。本研究の歩行外力モデルにおいても、歩行者の歩調と歩行外力モデルにおける歩調は一致する( $\eta = f^*$ )。

本研究では、次のような歩行者を想定して応答解析を行う。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、以下、本研究では各々を「中央歩行」、「主歩行」、「側歩行」と呼ぶことにする。



(a) 歩行外力時刻歴  
(b) 衝撃係数, 衝撃継続時間と歩調  
(c) 歩幅, 移動速度と歩調  
図-4 Wheelerの歩行外力<sup>11)</sup>

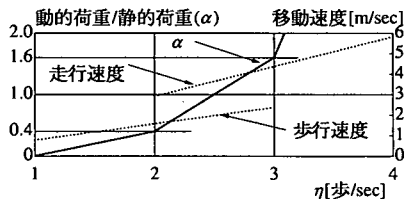


図-5 梶川の歩行外力<sup>12)</sup>

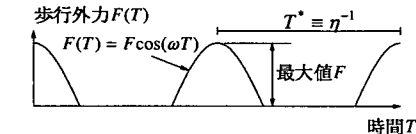


図-6 小幅等の歩行外力<sup>10)</sup>

(2) 応答解析法

数値解析法には、式(3)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。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K_L]\{U\} = -F(T)\{\beta(T)\} \quad (3)$$

式(3)の[C]はレーリー型の減衰マトリクスであり、減衰定数は3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%<sup>14)</sup>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。本研究では、歩行外力モデルの歩調f\*を歩行振動数と定義し、図-7に示す歩行外力を1.4-2.6Hzの範囲で入力する。具体的な例(f\*=1.58Hz, 2.12Hz, 2.46Hz)を図-8の実線として示す。図中の点線は、図-4のWheelerの方法によるもので、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。

(3) 解析結果

図-9は、Case-Fの水平横(Y)方向並びに鉛直(Z)方向に関して、細かく歩行振動数を変化させた結果である。各歩行振動数について得られた歩行者位置の

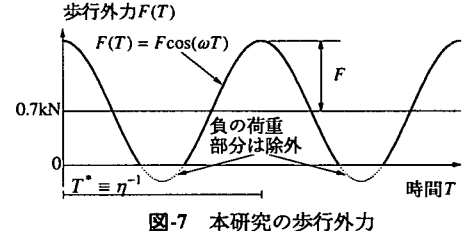
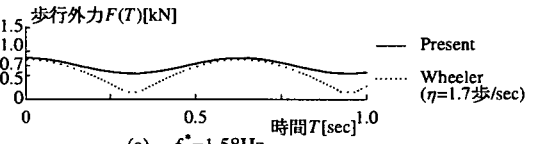
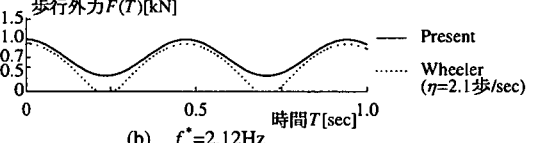


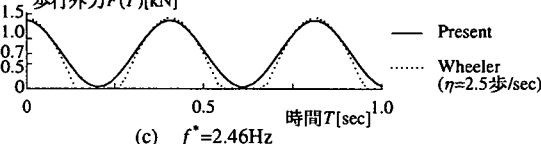
図-7 本研究の歩行外力



(a) f\* = 1.58Hz



(b) f\* = 2.12Hz



(c) f\* = 2.46Hz

図-8 入力歩行外力の例

応答速度で、式(3)の配分係数 $\beta(T)$ を用いることで格点の応答速度から計算した値である。縦軸は最大応答速度 $V_{max}$ 、横軸は歩行振動数 $f^*$ を示している。図中の点線は、文献(9)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(実効値で0.8cm/sec)のレベルを表示したものである。

図-9(a)は水平横方向についてであり、中央歩行( $Y=B/2$ )は応答速度が0であるので、主歩行( $Y=B/3$ )と側歩行( $Y=0$ )についてのみプロットしている。図-9(b)の鉛直方向については、中央歩行と側歩行の場合を例としている。主歩行については、中央歩行と側歩行の中間的な値となったので、図-9(b)では省略した。

図-9から、本研究の歩行外力による結果とWheelerの方法による結果とは、応答曲線のピークにわずかなずれがあるものの、総合的によく一致する結果であることがわかる。ねじれ成分を含む水平横方向卓越振動モードに対応する固有振動数の歩行外力を入力する場合に、最大応答速度のピークを有していることがわかる。その大きさは $f_1^Y$ と一致する側歩行の場合、水平横方向卓越振動モードで共振する歩行振動数入力時では、通常許容される応答速度1.13cm/secの約1.5倍となっている。

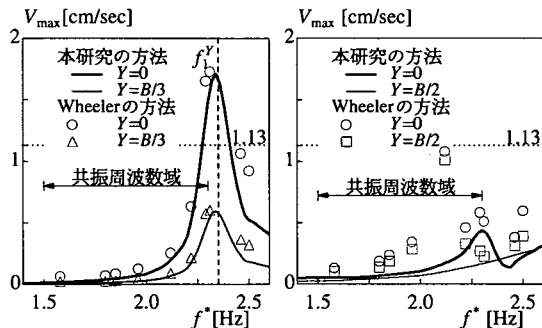


図-9 Case-Fの最大応答速度

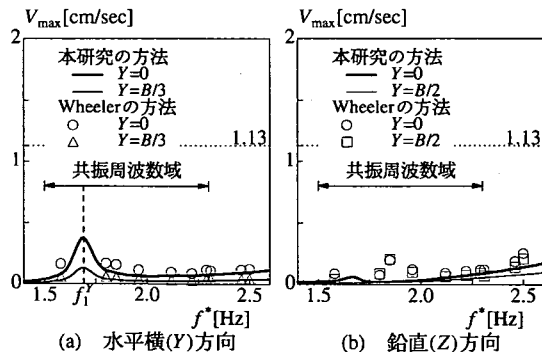


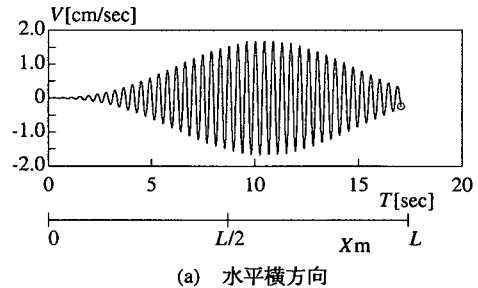
図-10 Case-Sの最大応答速度

Case-Fと同様な解析をCase-Sについて行った結果を図-10に示す。Case-Sでは歩行との共振が予想される周波数域に $f_1^Y$ が存在しているものの、FRP歩道橋モデルと比較して重量が大きいため、応答速度は1.13cm/secよりもかなり小さくなっている。

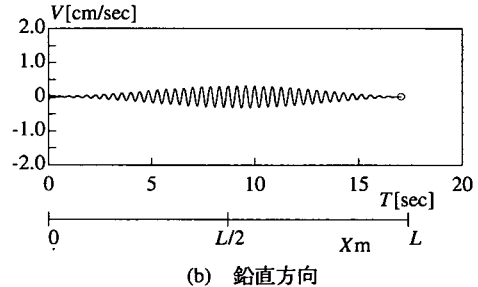
図-11に、Case-Fにおける側歩行時応答速度の時刻歴を示す。解析は、歩行者が橋を渡りおえる時点( $X=32m$ )となるまで行われている。歩行振動数2.35Hz時では、歩行者は、橋の中央付近で強い水平横振動を感じることを示している。

### 5. 水平横振動低減に関する検討

繊維補強複合材料であるFRP材は、補強繊維の種類を変更することにより、その部材剛性を高めることができる。本研究では、FRP材のこの特性に注目し、歩行との共振が予想される振動モードに対し、軸歪エネルギーが卓越する部材の剛性を高めることによって、水平横方向卓越振動モードの変形を抑制する可能性について考察する。すなわち、Case-Fにおいて歩行との共振周波数域に固有振動数が近接する1次振動モードに注目し、図-3で軸歪エネルギーが卓越した中央の上弦材の部材のみを、カーボン繊維に変更することを試みる。その際、変更



(a) 水平横方向



(b) 鉛直方向

図-11 Case-F時刻歴応答速度(2.35Hz)

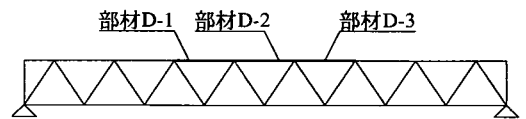


図-12 補強繊維を変更する部材(Case-F6)

表-4 固有振動数と刺激係数

モデル	次数 <i>i</i> と記号 <i>f<sub>i</sub></i>	固有振動数 <i>f</i> [Hz]	刺激係数		
			$\xi^X$	$\xi^Y$	$\xi^Z$
case-F6	$f_1^Y$	2.53	0.00	1.54	0.00
	$f_2^Z$	4.48	-0.37	0.00	1.14
	$f_3^Y$	5.13	0.00	-0.47	0.00
	$f_4^Y$	5.63	0.00	0.21	0.00
	$f_5^Y$	9.20	0.00	0.01	0.00
	$f_6^Y$	11.11	0.00	0.31	0.00
	$f_7^X$	12.55	0.81	0.00	0.19
	$f_8^Y$	13.18	0.00	0.19	0.00
	$f_9^0$	14.41	0.00	0.00	0.00
	$f_{10}^Y$	16.57	0.00	-0.07	0.00
case-F18	$f_1^Y$	2.64	0.00	1.54	0.00
	$f_2^Z$	4.58	-0.38	0.00	1.13
	$f_3^Y$	5.20	0.00	0.44	0.00
	$f_4^Y$	5.85	0.00	0.21	0.00
	$f_5^Y$	9.60	0.00	-0.02	0.00
	$f_6^Y$	11.19	0.00	-0.31	0.00
	$f_7^X$	12.84	0.78	0.00	0.19
	$f_8^Y$	13.64	0.00	-0.17	0.00
	$f_9^0$	14.46	0.00	-0.01	0.00
	$f_{10}^Y$	16.61	0.00	0.07	0.00

する部材の数やカーボン繊維の変更の割合等は任意であるが、本研究では、変更後のFRP形材の弾性係数が、変更前のその2倍となるように設定した。ここでは、図-12に示す部材D-1-D-3( $Y=0\text{m}$ ,  $Y=2.35\text{m}$ の両構面の6本)についてのみ補強繊維の一部をカーボン繊維とし、その弾性係数を2倍としたモデル(Case-F6)、また、上弦材の全て(18本)について補強繊維の一部をカーボン繊維とし、その弾性係数を2倍としたモデル(Case-F18)の結果について以下に論ずる。なお、このときのカーボン繊維とガラス繊維の体積含有率は、標準的なカーボン繊維の弾性係数192GPaを用いることとし、両者とも25%づつ(全体の繊維含有率は、Case-Fのときと同様の50%)とした。比重は、カーボン繊維を入れることで90%に減少し、接合部の補強材等の重量を考慮した値として2.3を採用した。

表-4に、Case-F6とCase-F18について式(1)を用いた非減衰自由振動解析結果を示す。いずれの場合も、水平横(Y)方向に大きな刺激係数を有する固有振動数は、歩行との共振が予想される1.5~2.3Hzの範囲よりも高周波数となっている。

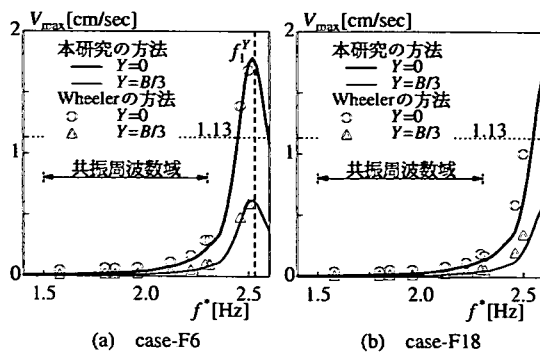


図-13 水平横(Y)方向最大応答速度

こうした固有振動数の増加には、カーボン繊維を使用することで、剛性が大きくなったことに加え、全体の重量が多少小さくなったことが寄与していると考えられる。

次に、式(3)を用いて歩行外力に対する時刻歴応答解析を行った結果について論ずる。図-13に最大応答速度を示す。いずれの場合も  $f_1^Y$  が歩行との共振が予想される周波数域より高周波数となったことに伴い、歩行との共振周波数1.5~2.3Hzの範囲の最大応答速度は、1.13cm/secより小さくなっている。

この結果から、歩行との共振が予想される振動モードの軸歪エネルギーが卓越する部材の剛性を高くすることで、歩行による水平横方向振動を低減できることがわかった。

## 6. 結論

本研究は、スパン30m級の歩道橋に対し、FRP材料を新たに適用する際に重要な、歩行時の振動特性について考察を行ったものである。結論を要約すると以下ようになる。

- (1) 市販の連続ガラス繊維引抜成形形材を利用する場合、応力ではなくたわみ制限によって部材断面が決定される傾向にあり、歩行との共振が予想される1.5~2.3Hzの近傍に水平横方向卓越振動モードの固有振動数を有する可能性がある。
- (2) 既往の研究のWheelerや梶川の歩行外力モデルを、有限要素解析に適用しやすいものに修正した外力モデルを用い、1%レーリー減衰を考慮した時刻歴応答解析を実施した。その結果、側歩行の場合、水平横方向卓越振動モードに共振する歩行振動数では、水平横方向の最大応答速度は、約1.7cm/secで通常許容される応答速度1.13cm/sec(実効値で0.8cm/sec)の約1.5倍に達することが明らかになった。こうしたねじれ成分を含む水平横方向振動成分は、歩行者の歩く位

置の水平横方向に対する偏心によるものである。すなわち、歩行者の踏力の水平横方向成分や歩行者の重心の移動の位相差等を考慮しなくとも、近年指摘されている水平横方向振動発生に関連する現象を生ずる可能性が明らかになった。こうした観点は、今後の軽量化された橋の使用性を検討する上での重要な課題になると考えられる。

- (3) 鋼製歩道橋モデルでは、歩行共振が予想される周波数域に水平横方向振動が卓越する固有振動モードを有しているにもかかわらず、FRP歩道橋モデルと比較して、重量が大きいためその最大応答速度は、通常許容される1.13cm/secより小さくなった。
- (4) FRP歩道橋の過大な振動を抑制するためには、その振動モードに寄与する部材の剛性を高めることが効果的である。FRPの場合、高剛性の繊維に変更することで、断面の寸法変化による重量の大幅な増大や接合部詳細の変更を避けることができる利点がある。本構造モデルでは、歩行との共振が予想される固有振動モードで、軸歪エネルギーが卓越する部材の補強繊維をガラス繊維からカーボン繊維に変更し、その部材剛性を高めることにより歩行振動数1.5~2.3Hzに対する歩行者位置の振動を最大応答速度で、1.13cm/sec以内に抑えることが可能である。

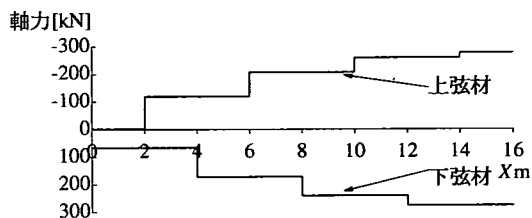
以上、本研究は特定の構造形式についての分析例にとどまってはいるが、FRPという新しい構造材料を用いる場合、これまでの鋼製や鉄筋コンクリート製の構造よりも、特に振動性に関して十分な検討が必要であることが示唆できたものと考えられる。FRP歩道橋の振動抑制にはダンパーの適切な配置も有効と考えられ、それらについては今後の課題とする。

### 付録-1 Case-Fの軸力図とたわみ分布図

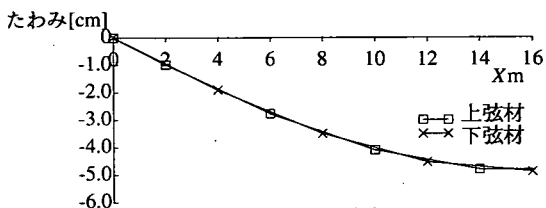
付図-1にFRP歩道橋モデルの軸力図とたわみ分布図を上弦材及び下弦材について示す。

### 付録-2 Case-Sの静的応力解析結果

第2章で述べたFRP歩道橋モデルと同様の設計条件を採用し、鋼製歩道橋モデルについて許容応力度設計を行う。決定した部材寸法は2C-150×75×9×12.5であり、部材総重量は159kNである。付表-1に静的応力解析を行った結果を示す。水平横(Y)方向振動に大きく寄与する床版の面内せん断剛性は、FRP歩



(a) 軸力図



(b) たわみ分布図

付図-1 Case-Fの軸力図とたわみ分布図

付表-1 Case-Sのたわみと軸力の最大値

最大たわみ[cm]	2.03 (5.33)
最大引張軸力[kN]	314 (941)
最大圧縮軸力[kN]	316 (414)

( )内は許容値

道橋と同様な床版を想定し、その剛性を鋼材のX型ブレースで置換した結果、□-100×100×9の鋼材をブレース部材として採用した。

### 参考文献

- 1) Harvey, W.J. : A reinforced plastic footbridge, Aberfeldy, U.K., *Structural Engineering International*, IABSE, pp.229-232, 1993.
- 2) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和男 : 沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.103-106, 2001.
- 3) Bishop, S.R. : Millennium Bridge re-opens, *Mathematics Today*, Vol.28, No.2, pp35-38, 2002.
- 4) 日本道路協会 : 立体横断施設技術基準・同解説, 1979.
- 5) 山田聖志, 小宮巖, 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.
- 6) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖 : 連続引抜成形FRP材の重ね継手接合部の引張力による破壊メカニズム, 土木学会第55回年次学術講演会論文集, 土木学会, 1-A205, pp.410-411, 2000.
- 7) 西崎到, 木嶋健, 明嵐政司 : 土木構造材料としてのFRP素材の安全率, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.35-40, 2001.

- 8) 山田聖志：屋根型円筒ラチス，シェル・単層ラチス構造の振動解析，日本建築学会，pp.95-117，1993.
- 9) 鈴木統，林耕四郎，大橋潤一，西崎到：朝霧暴露試験場におけるGFRPモデル車道橋の設計，第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集，pp.113-116，2001.
- 10) 小幡卓司，林川俊朗，佐藤浩一：人間の振動感覚に基づいた歩道橋の使用限界状態に関する研究，土木学会論文集，No.537，I-35，pp.217-231，1996.
- 11) Wheeler, J. E. : Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridges, *J.Structural Division*, ASCE, Vol.108, No.ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 12) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文集，No.325，pp.23-33，1982.
- 13) 大島俊之編：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000.
- 14) 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.

(2002.5.28 受付)

## PEDESTRIAN-INDUCED VIBRATION IN FRP TRUSS FOOTBRIDGES

Seishi YAMADA and Sumio CHIKADA

This paper describes the vibration characteristics of glass fiber reinforced polymer (FRP) footbridges having the rigid-jointed truss system with a span of 32 m. The force-time history of pedestrian in walking and jogging modes is arranged as a set of parameters suitable for finite element analytical modeling. Comparison with steel truss footbridges, the FRP ones are easy to vibrate in horizontal direction due to a 700 N test pedestrian model, but it would also be reduced by changing only a few specific members into carbon FRP shapes.