

FRP を用いたハイブリッドトラス橋の静的および動的特性に関する基礎的研究

A foundational study on static and dynamic characteristics of hybrid material truss bridge with FRP

井林康*, 渡辺正俊**, 齋藤明幸***, 鈴木基行****

Kou Ibayashi, Masatoshi Watanabe, Akiyuki Saito, Motoyuki Suzuki

*博士（工学），長岡工業高等専門学校助教授，環境都市工学科(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

**東北大学大学院博士前期課程，工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06)

***長岡工業高等専門学校専攻科，環境都市工学専攻(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

****工博，東北大学大学院教授，工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06)

In recent years, fiber reinforced plastics (FRP) has drawn attention as a new construction material over the world and the evaluation by dynamic analysis for bridge designs has been taken up. In this study, as for the hybrid material structure combined the FRP with current material, static characteristic were calculated by static analysis with finite element method, and dynamic characteristic were examined by dynamic analysis when a real-seismic wave was inputted. As a result, as for the hybrid material structure, possibility of efficiency for cost convert weight could be seen when the combined materials was properly placed. The advantage of vibration characteristics, such as dumping, could be confirmed comparing with the single material when the combined materials were applied.

Key Words: fiber reinforced plastics (FRP), pedestrian bridge, seismic design, static analysis, dynamic analysis

キーワード：繊維強化プラスチック (FRP)，歩道橋，耐震設計，静的解析，動的解析

1. 序論

大規模な土木構造物を力学的かつ経済的に合理的な設計をするためには，初期計画段階でその形態や工法についての検討と平行し，建設素材の選択や複数の素材を複合的に使用することの可能性，更に，そうした力学的合理性の追求が建設コストにどの程度影響するか等について十分な調査を行う必要がある。

建設素材の選択に関しては近年，繊維強化プラ

スチック(Fiber Reinforced Plastics:以下FRP)が注目されてきている。従来，FRP構造材料の開発研究は，ハンドレーアップ成型FRP部材について，航空・船舶・機械の分野で先駆的に行われ実用化され，建設構造分野では，RC構造の鉄筋代替としてのFRPロッドの研究が盛んになってきている。一方，連続引拔成型FRPの箱形・H型・パイプ形状などの形状を構造部材として採用するための研究も，1990年初頭以降主として米国で行われてきている。FRPの主な特性には，軽量かつ高

強度、高耐食性など多くの力学的長所があるが、その反面、素材単価が鋼材に比べ非常に高価なため、鋼材の代替として利用するには今のところ強度的には十分可能であるが、経済的には未だ困難な面が残されている。

しかし既に英国では、1993年に全長113mの連続引抜成型FRP製の斜張橋であるアバフェルデイ橋¹⁾が完成しており、我が国でも、2000年に連続引抜成型FRP 形材で歩道橋である伊計平良川線ロードパーク連絡橋²⁾が施工された。

このように高強度材料を用いた構造物が建設されるようになってきた背景には、高強度材料を組み合わせることで、これまでの普通強度材料を用いた場合と比べて断面の大幅な縮小が可能になることが挙げられる。さらに、断面の縮小に伴い自重の軽減、利用空間の拡大、付帯設備の軽減等が期待でき、経済的な優位性がもたらされると考えられる。しかし、断面の縮小は同時に部材の持つ剛性を減少させ、変形の増大を引き起こし、また、材料は高強度になるに従いその破壊が脆性的になる傾向がある。そのため、これらの特性を最大限に生かし、また、その弱点を補う設計を行うためにはその材料特性や耐力について十分に把握しておくことが急務であると言える。

歩道橋の設計を考えた場合、直接人間が歩いたり立ち止まったりする歩道橋の性格上、その使用に関しての快適性、すなわち振動使用性の検討は非常に重要な設計項目の一つである。歩道橋の振動使用性は、およそ20年前に問題提起され、我が国のみならず各国で多くの研究がなされており、その結果、各種の照査法または基準等が提案されている。我が国においては、昭和54年に立体横断施設技術基準・同解説が制定され、この基準において歩道橋の低次の固有振動数が2Hz前後(1.5～2.3Hz)にならないように指示されている³⁾。

また昨今、橋梁システムの合理化の要求が高まっており、技術革新は新規建設だけに留まらず、既設橋梁の補修・補強の維持管理においても要求

Table.1 Setting values of each material

	SS400	GFRP	CFRP
Tensile strength (N/mm ²)	157	126	686
Compressive strength (N/mm ²)	124	100	545
Poisson's ratio	0.3	0.26	0.26
Young's modulus (N/mm ²)	206	25.5	156
Unit weight (tf/m ³)	9.03	2.19	2.19
Cost ratio :C _i	1	7	26.8
Damping constant	0.02	0.03	0.03

される。また近い将来、設計法が性能照査型設計法に移行するが、それによれば設計の自由度は非常に大きくなり、さらなる構造革新が進むことは必至であるため、新材料の活用が大きな支配的要因になることもが予想される。その一つとして、FRP の活用が考えられる。

そこで本研究では、この FRP を従来から使用されている鋼材と組み合わせて使用した場合のコスト換算重量と固有振動数、単位長重量について静的 FEM 解析による検討を行った。また、FRP は鋼材に比して剛性がかなり小さく、過大な応答振動が発生する可能性が懸念される⁴⁾ことと、1995 年の兵庫県南部地震を契機に、耐震設計において動的応答解析による設計の検証が重要視されてきていることから、動的 FEM 解析によって応答加速度及び応答変位についての検討も行い、経済的、動力学的に優れたハイブリッドトラスの考案を行うことを目的とした。

2. 解析モデル

2.1 対象素材と解析対象構造

本研究では、鋼材 SS400、ガラス繊維プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastics:以下 GFRP)、炭素繊維プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics:以下 CFRP)の3素材を解析の対象とした。Table.1 に各素材の設定値を示す。C_iは SS400 に対するコスト換算比で、本来は運搬・施工法等も考慮して設定されるべきであるが、今回は素材単価の状況を考慮し、SS400 に対する比として設定

した。素材重量は、構造部材相互を結合する副資材重量を考慮し、実際の素材重量の 1.15 倍とした。著者らがこれまで行ってきた研究⁵⁾⁶⁾では CFRP のヤング率を 118, コスト換算比 C_i を 65 としていたが、その後の調査により、ヤング率の向上, コストの低下がみられたため、今回の解析は C_i を 26.8, ヤング率を 156 と設定値を変更して解析を行った。

解析対象構造モデルは、歩道橋に用いる程度のトラス構造⁷⁾とし、中央領域と梁端領域からなる Fig.1 のような 8 変数のプラットトラス構造とした。トラスは等価な連続梁とみなしたときの曲げモーメントを上下弦材のみで負担するとモデル化する。同様に、そのせん断力については、全て鉛直材と斜材で負担するとみなす。接点接合部はピン接合としてモデル化した。パラメータはスパンを L , スパン梁成比を $D(=L/h)$ とした。中央領域の割合を示す領域パラメータ k は 0.5 とし、弦材と斜材のなす角度 θ は 45° とした。また、各部材断面は、中央点からの距離が $kL/2$ を境として、中央領域と梁端領域の 2 種類で構成され各々の領域では同一部材断面積 A_i であるとする。即ち、この領域パラメータ k に対して、梁の中央の領域では、上弦材の A_1 , 下弦材の A_2 , 鉛直材の A_3 , 斜材の A_4 , 梁端領域では、それぞれ上弦材 A_5 , 下弦材 A_6 , 鉛直材 A_7 , 斜材 A_8 の合計 8 個が、本課題の最適設計するときの変数である。また、桁行方向は $S=2\text{m}$ とした。なお今回の検討では、各部材の配置をどのようにするかを検討のみを行っており、それぞれの部材接合部を具体的にどのような接合方法にするかの検討は行っていない。

2.2 素材配置構

素材の配置構成については Fig.2 の(a), (b)に示す 2 種類とする。従来は中央領域と梁端領域で使用する素材を使い分けた場合について解析・検討を行っていたが、既往の研究結果から上下弦材にかかる応力が大きく、また曲げを弦材で負担していることから、今回新たに弦材と斜材で使用する素材を使

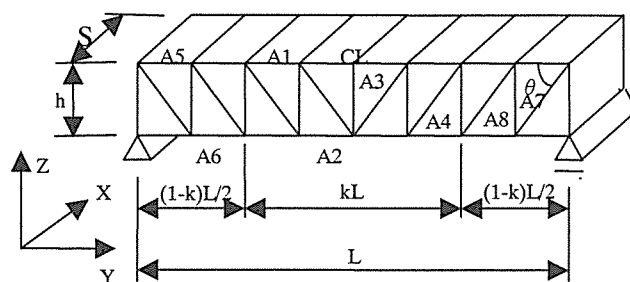
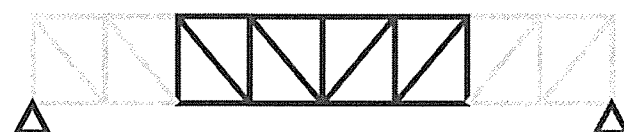


Fig.1 Detail of Target structural model



(a) Series A :

Separate materials into central and edge member



(b) Series B :

Separate materials into chord and web member

Fig.2 Arrangement of materials

い分けた場合について解析・検討を行った。以降、中央領域と梁端領域で使用する素材を使い分けるものをシリーズ A(Fig.2(a)), 弦材と斜材で使用する素材を使い分けるものをシリーズ B(Fig.2(b))と呼ぶこととする。また、コストの比較に用いるために SS400 単一構造についてもコスト換算重量の算定のみ解析を行った。

コストの比較に関しては、各素材の単位面積あたりの使用量を鋼材 SS400 の重量に置き換えたコスト換算重量 $F^7)$ を用い、次式で定義する。

$$F = \sum C_i \rho_i A_i / S$$

尚, C_i はコスト換算比, ρ_i は素材密度, A_i は部材断面積とした。

3. 解析手法

3.1 静的解析

解析手法は、まず各々の部材で使用する素材を

Table.2 Section area of each member (L=50m) (cm²)

		Central member				Edge member			
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Series A Central:CFRP Edge:SS400	D=20	2.37	1.87	0.23	0.25	7.90	6.25	2.16	2.42
	D=40	4.93	3.90	0.23	0.26	16.62	13.15	2.32	2.59
Series B Chord:SS400 Web:CFRP	D=20	11.69	9.21	0.27	0.30	8.70	6.89	0.52	0.59
	D=40	28.25	22.36	0.33	0.37	21.05	16.66	0.63	0.71

選定し、それらを組み合わせたときの最適部材寸法を応力制約条件下で決定する。この際、スパン L、スパン梁成比 D のうち片方のパラメータを予め設定し、1 個を連続的に広い範囲で変化させる。続いて、得られたデータから有限要素解析を行い、固有振動数および単位長重量の検討、およびコスト換算重量 F から種々の素材のコストに関する相対的な比較を行った。

また、既往の研究結果において SS400 と比べ曲げ剛性が小さくなる FRP は、たわみが大きくなる結果が得られており、ハイブリッド構造での解析ではたわみ制限 DLMT を導入した。たわみ制限 DLMT は、支間中央のたわみをスパンに対して一定の割合の範囲内に収めるように設定したものであり、例えば、DLMT=0.01 とあるものは、「支間中央部のたわみ $\leq L/100$ 」ということを示す。道路橋示方書によるトラス橋のたわみ制限は L/600 であるが、歩道橋に対する制限はないため、本研究では暫定的に L/100 と設定し解析を行った。

3.2 動的解析

動的解析は、スパン梁成比（トラス高さ）による影響を把握するために、L=50m, k=0.5, $\theta=45^\circ$ DLMT=0.01 と一定とし、D は 20 と 40 で Newmark の β 法を用いて解析を行った。既往の研究から FRP をスパン全体にわたって単一の素材を使用した場合の応答加速度ならびに応答変位は、SS400 単一の場合に比べて過大な応答が生ずることがわかっている⁶⁾。そこで今回の解析対象の素材配置は、ハイブリッド構造とした場合の地震応答性能を把握するために SS400 単一と素材配置シリーズ A（中央領域 CFRP、梁端領域

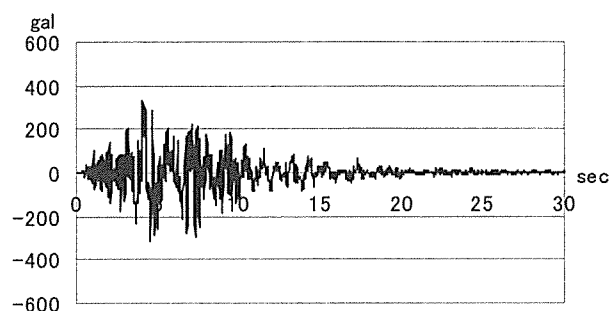


Fig.3 Inputted strong-motion waveform

SS400) のハイブリッドトラスで解析を行った。解析に用いた地震波データは、兵庫県南部地震神戸海洋気象台、UD 方向、30 秒間で、入力加速度波形を Fig.3 に示す⁸⁾。最大加速度は地震動開始から 4.10 秒後の 332gal である。検討項目は、応答加速度および応答変位とし、応答地点ならびに応答方向は支間中央点下部の節点での上下方向である。

4. 解析結果

4.1 静的解析結果

Table.2 に L=50m でのシリーズ A（中央領域 CFRP、梁端領域 SS400）とシリーズ B（弦材 SS400、斜材 CFRP）でのそれぞれ D=20 と D=40 における各部材の断面積を示す。腹材である A3, A4, A7, A8 および CFRP を使用している部材については非常に小さい値となっているが、これは自重のみを考慮して解析を行い、応力制約条件下にて断面積を算出したため、トラスを形成できる最小限の値であるためであり、現段階では歩道橋として非現実的な値となっている。D の違いに関する断面積の変化は、D が 2 倍（トラス高さが 1/2）になると、上下弦材の断面積は 2~2.5 倍程度になっ

ていることがわかるが、鉛直材、斜材に関しては、大きな変化はみられない。

Fig.4 は素材の配置の違いによる D=20 におけるコスト換算重量の比較である。シリーズ B (弦材 SS400, 斜材 CFRP) はシリーズ A (中央領域 CFRP, 梁端領域 SS400) より、各々のスパンにおいて 30~37% のコストの低減が可能であり、SS400 を単一で用いた場合と比較しても同程度であり、長スパンになるに従い FRP の使用が優位になると思われるが、いずれのスパンにおいても SS400 単一を下回るものではなく、素材単価の高さの影響が見て取れる。

次に、各々の解析パターンにおける固有振動数を Table.3 に、単位長重量を Table.4 に示す。固有振動数については全てのパターンにおいて 0.24~0.96Hz と 1Hz 以下となっており、歩行との共振が予想される 1.5~2.3Hz の振動数帯からは外れていることがわかる。しかし、地震による影響に関しては、地震動の卓越周期が 0.1~2.5sec (0.4~10Hz) と広い周期帯に渡っていることを考えると地震動の影響に関しての検討が必要と思われる。また、単位長重量に関しては、単位長重量が概ね 1.5tf/m 以下においては歩調と共振した場合、歩行者が振動を感じる可能性があるため、解析・検討を行った。この結果からシリーズ A (中央領域 CFRP, 梁端領域 SS400) の D=20 においては 1.5tf/m 以下となっているものもあった。それ以外では 2.0tf/m 以上となっており、もし共振した場合でも十分な使用性を有すると考えられる。しかし、シリーズ B (弦材 SS400, 斜材 CFRP) の素材配置ではシリーズ A (中央領域 CFRP, 梁端領域 SS400) と比較し、単位長重量が非常に大きくなったため、FRP の軽量という長所を生かすことのできない素材配置であるといえる。

4.2 動的解析結果

(1) 応答加速度

Fig.5 は SS400 単一、L=50m、D=20 での応答加速度の結果である。最大応答加速度は地震動開始から 4.7 秒後の 479gal である。これは入力地震波

Cost convert weight (kgf/m)

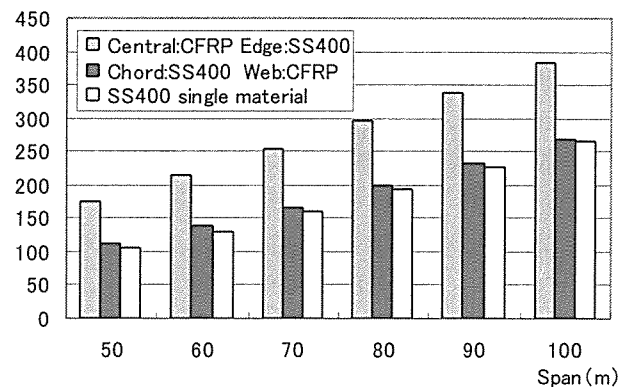


Fig.4 Cost convert weight of each pattern (D=20)

Table.3 Characteristic frequency of each pattern (Hz)

L(m)	Series A		Series B	
	Central:CFRP	Edge:SS400	Chord:SS400	Web:CFRP
	D=20	D=40	D=20	D=40
50	0.628	0.428	0.952	0.797
60	0.573	0.382	0.868	0.727
70	0.530	0.341	0.804	0.672
80	0.495	0.308	0.752	0.628
90	0.466	0.277	0.708	0.592
100	0.442	0.248	0.672	0.561

Table.4 Weight per unit length of each pattern(tf/m)

L(m)	Series A		Series B	
	Central:CFRP	Edge:SS400	Chord:SS400	Web:CFRP
	D=20	D=40	D=20	D=40
50	1.24	2.22	5.60	6.58
60	1.30	2.63	5.77	7.10
70	1.37	3.27	5.96	7.74
80	1.44	3.99	6.16	8.51
90	1.51	4.96	6.38	9.49
100	1.59	6.34	6.61	10.76

の最大加速度発生直後で大きさは 1.4 倍強である。Fig.6 は中央領域に GFRP、梁端領域に SS400 を配したシリーズ A における L=50m、D=20 での応答加速度の結果である。最大応答加速度は地震動開始から 7.34 秒後の 511gal であり、これは入力地震波の最大加速度発生から約 3 秒後で、大きさは 1.5 倍強の応答が記録された。また、Fig.5、Fig.6 と同様な波形となっており、最大応答加速度は FRP を部分的 (中央領域) に使用したシリーズ A の方が 7% 程度大きい。地震動開始から 7.3 秒以降の減衰をみてみると、12 秒付近でほぼ同程

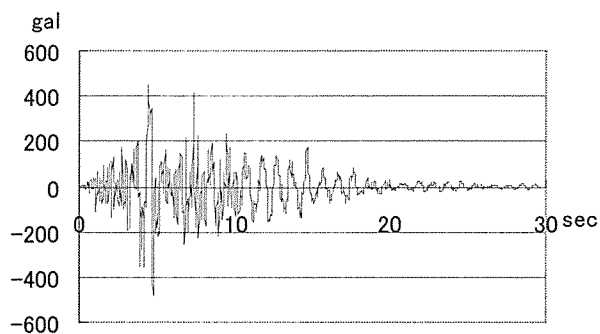


Fig.5 Response acceleration

(SS400 single material, L=50m, D=20)

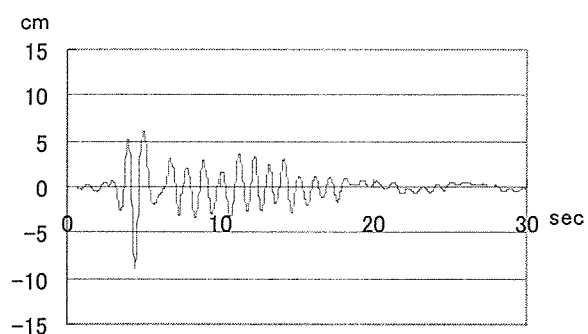


Fig.9 Response displacement

(SS400 single material, L=50m, D=20)

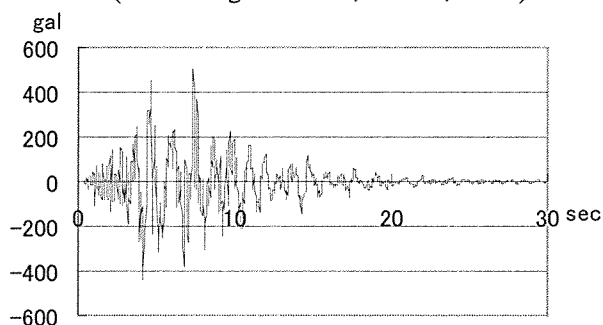


Fig.6 Response acceleration

(Series A, L=50m, D=20)

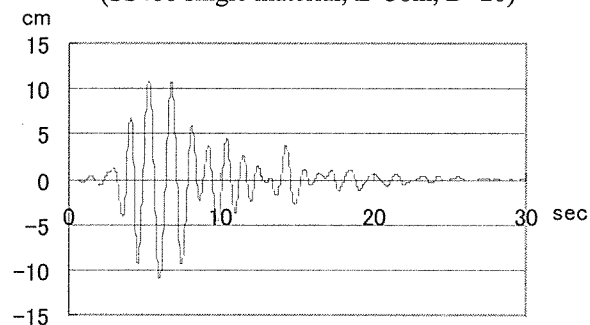


Fig.10 Response displacement

(Series A, L=50m, D=20)

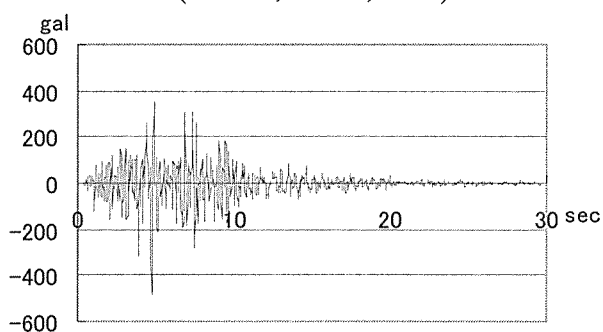


Fig.7 Response acceleration

(SS400 single material, L=50m, D=40)

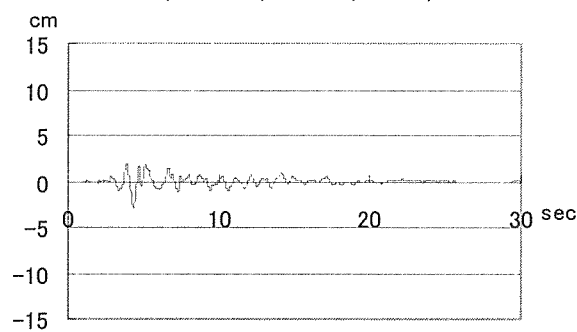


Fig.11 Response displacement

(SS400 single material, L=50m, D=40)

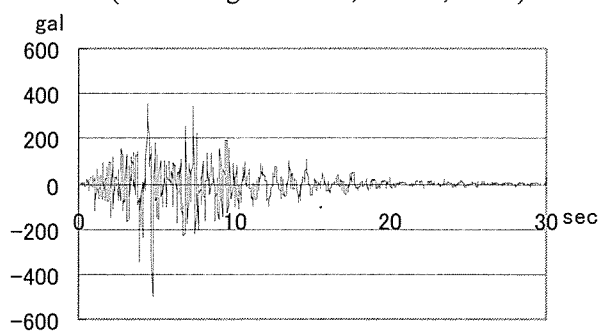


Fig.8 Response acceleration

(Series A, L=50m, D=40)

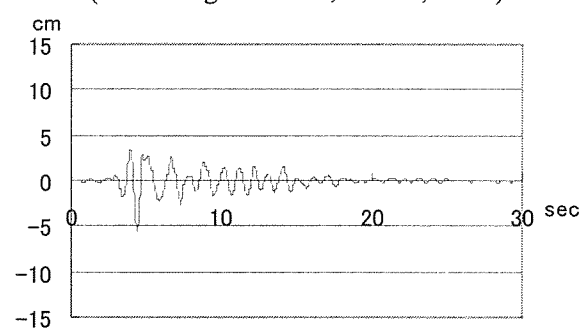


Fig.12 Response displacement

(Series A, L=50m, D=40)

度となっており、ハイブリッド構造とした Fig.6 の方は減衰が大きいことがわかる。

Fig.7 は Fig.5 と同じく SS400 単一における L=50m, D=40 での応答加速度であるが、最大応答加速度は地震動開始から 4.68 秒後の 485gal で

あった。これは SS400 単一の D=20 の場合とほぼ等しいことがわかる。また、最大応答発生時刻は入力地震波の最大加速度発生直後で、大きさは 1.5 倍弱である。Fig.8 は Fig.6 と同じく中央領域に GFRP、梁端領域に SS400 を配したシリーズ A

における $L=50\text{m}$, $D=40$ での応答加速度の結果である。最大応答加速度は 4.7 秒後の 502gal であり、 $D=20$ の場合とほぼ等しく、入力地震波の 1.5 倍強での応答であったが、発生時刻は入力地震波の最大加速度発生直後であった。Fig.7, Fig.8 に関しても $D=20$ の場合と同様に使用素材による違いは顕著に見られず、FRP を使用したハイブリッド構造の方が最大応答値は大きいことがわかる。

(2) 応答変位

Fig.9 は SS400 単一、 $L=50\text{m}$, $D=20$ での応答変位の結果である。最大応答変位は地震動開始から 4.46 秒後の 8.67cm であり、地震動の最大加速度発生直後であった。しかし、大きな変位を記録したのはこの一度だけであり、その後は 3cm 程度の小さな揺れがしばらく続いた後、収束している。Fig.10 は中央領域に GFRP、梁端領域に SS400 を配したシリーズ A における $L=50\text{m}$, $D=20$ での応答変位の結果である。最大応答変位は地震動開始から 5.98 秒後の 11cm、入力地震波の最大加速度発生から約 1.9 秒後であった。Fig.9 とは異なり、10cm 程度の大きい変位が 5 回ほど記録されていることがわかる。しかし、応答加速度と同様に地震動開始から 8 秒付近以降の減衰は大きく、12 秒付近では SS400 単一の応答変位とほぼ同程度となっている。Fig.9 および Fig.10 から、応答加速度の場合と同じく、FRP を用いたハイブリッド構造では、SS400 単一の場合と比べ、過大な応答変位が生じることが確認された。

Fig.11 は SS400 単一、 $L=50\text{m}$, $D=40$ での応答変位の結果である。最大応答変位は地震動開始から 4.36 秒後の 3.06cm であり、Fig.9 の $D=20$ の場合と比べ、約 $1/3$ と非常に小さい値となった。また、最大応答発生時刻は入力地震波の最大加速度発生直後であるが、その後は 1~2cm 程度と小さい揺れが続いている。Fig.12 は中央領域に GFRP、梁端領域に SS400 を配したシリーズ A における $L=50\text{m}$, $D=40$ での応答変位の結果である。最大応答変位は地震動開始から 4.4 秒後の 5.5cm

であり、 $D=20$ の半分となった。これは入力地震波の最大加速度発生直後である。Fig.11 の SS400 単一の場合と比べると最大値で 1.8 倍程度となっているが、波形状は同様となっており、また絶対値が小さいため、大きな差はないといえる。Fig.11 および Fig.12 から、 $D=20$ の場合と比べ、応答値は格段に小さくなった。また、FRP を用いた場合の応答値は SS400 単一に比べ、大きくなることが確認できる。

スパン梁成比 D が大きくなる、すなわちトラス高さが低くなると応答振動も大きくなることが予想されたが、応答加速度に関しては $D=20$ と 40 でほぼ同程度となり、応答変位に関しては $D=40$ では $D=20$ のおよそ $1/3 \sim 1/2$ と予想に反する結果となった。

以上より、ハイブリッド構造とした場合は SS400 単一の場合と比べ、応答振動が大きくなることが確認された。これは、FRP は鋼材に比して剛性が非常に小さいためであり、より適切な部材配置の検討、また CFRP にした場合についても検討する必要があると思われる。しかし、地震動開始から 10 秒程度で SS400 単一の場合と同程度となっている点を考慮すると、減衰性能に関しては優位な点が見られる。

5. 総論

本研究では、人の歩調との共振を考慮し、固有振動数ならびに単位長重量の検討、およびコスト換算重量に関する解析を行った。また、実地震波を入力した地震応答解析によって、応答加速度および応答変位に関する検討を試みた。その結果以下のような結論が得られた。

- 1) コストに関しては中央領域と梁端領域で素材を使い分けるより、弦材に SS400、腹材に FRP で使用素材を使い分ける方がコストの低減を図ることが出来る。
- 2) 固有振動数の検討では全ての解析パターンにおいて 1Hz 以下であり、歩行との共振が

予想される 1.5～2.3Hz の振動数帯から外れている。

- 3) 単位長重量に関しては概ね 2.0tf/m 以上となり、人間の歩調と共振した場合でも、十分な使用性を有すると思われるが、シリーズ B の素材配置の場合、単位長重量が過大となり、FRP の長所である軽量性が生かされない。
- 4) 応答加速度に関する検討は、応答加速度はスパン梁成比 D の大小にあまり影響はない。
- 5) 応答変位に関する検討は、スパン梁成比 D の値が大きい（トラス高さが低い）方が最大応答変位は小さい。
- 6) ハイブリッド構造とした場合の動的振動特性は、SS400 単一の場合と比べ、FRP の剛性が小さいため、過大な地震応答が生じることが確認されたが、減衰性能に優れているため、地震動開始から 10 秒前後においては大きな差はない。

今回の解析は静的解析においては、中央領域と梁端領域で使用素材を使い分けるシリーズ A と弦材と腹材で使用素材を使い分けるシリーズ B による解析を行い、素材配置の違いによる検討を行ったが、動的解析においては、シリーズ A のみによる解析・検討であったため、シリーズ B における解析・検討を行うことも重要である。また、構造部材としての実用化を考慮すると、部材断面の形状の検討や、接合部に関する検討も必要と思われ、これらの重要な項目に関しては、今後の検討課題となってくるであろう。

参考文献

- 1) Harvery, W.J. : A reinforced plastic footbridge, Aberfeldy, U.K., Structural Engineering International, IABSE pp.229-232, 1993.
- 2) 土木学会；FRP 橋梁－技術とその展望－，2003.
- 3) 小幡卓司，林川俊郎，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，471/I-24，pp.217-231，1996.

- 4) 山田聖志，近田純生；FRP 剛接トラス歩道橋の振動特性，土木学会論文集，738/I-64，pp.67-74，2003.7.
- 5) 渡邊正俊，木村道生，井林康；FRP を用いたハイブリッドトラス橋の最適設計，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，I-342，pp.684-685，2002.
- 6) 渡邊正俊，井林康，橋本雅行，松縄有希；FRP を用いたハイブリッドトラスに関する基礎的研究，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，I-525，pp.1049-1050，2003.
- 7) 山田聖志，中野はつ子，最上公彦，油川真広；応力制約条件下で最適設計された大スパントラス構造の変形と振動特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.931-932，1998.
- 8) 建設省土木研究所；土木構造物における加速度強震記録 (No.21)，土木研究所彙報，Vol.64，1995.