

朝霧暴露試験場におけるGFRPモデル車道橋の力学特性

Mechanical characteristics of model bridge made of GFRP at the Asagiri disclosing test field

大野 一昭* 佐々木巖** 深田 幸史*** 張 惟敦**** 徳光 卓*****
Kazuaki OHNO Iwao SASAKI Saiji FUKADA Iton CHOU Suguru TOKUMITU

ABSTRACT This paper describes the results of the static and dynamic loading tests carried out in order to grasp the mechanical characteristics of the model bridge constructed at the Asagiri test field. A vehicle whose weight is 1.8tf was used as a imposed load at the static loading test. Deflection and strain of the bridge were measured. They agreed approximately with the calculation based on the frame analysis, which confirms that the design method is relevant. The predominant frequency and the damping factor by dynamic loading test were also measured, by which the dynamic characteristics of the bridge were obtained.

Key Words : GFRP, トラス橋, 静的載荷試験, 動的載荷試験

Grass Fiber Reinforced Plastic, truss bridge, static loading test, dynamic loading test

1. はじめに

GFRPモデル車道橋(以下,モデル橋と言う)の力学的特性を確認する目的で静的載荷試験および動的載荷試験を実施した。静的載荷試験は,上載荷重として重量約1.8tfの車両を用いてモデル橋の変形および各種部材のひずみを測定した。また,動的載荷試験では人間による衝撃加振法により振動特性(振動数,モード減衰定数,振動モード)を把握した。それぞれの試験について試験方法,試験結果および考察を以下に示す。

2. 静的載荷試験

2.1 試験概要

モデル橋の静的載荷試験は,モデル橋の力学的特性を確認すると共に,設計検討結果を確認するために実施した。試験方法としては,上載荷重として重量約1.8tfの車両を用いてモデル橋の変形

*佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究部門
(〒103-8639東京都中央区日本橋本町4-12-20)
**建設省土木研究所化学研究室
(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
***金沢大学助手 工学部建設工学科
(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)
****石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所
(〒135-8322 東京都江東区豊洲3-1-15)
***** (株)富士ビークス 技術本部開発課
(〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神2-12-1)

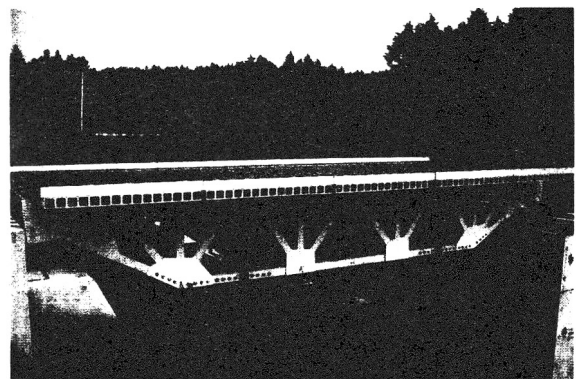


写真-1 GFRPモデル橋

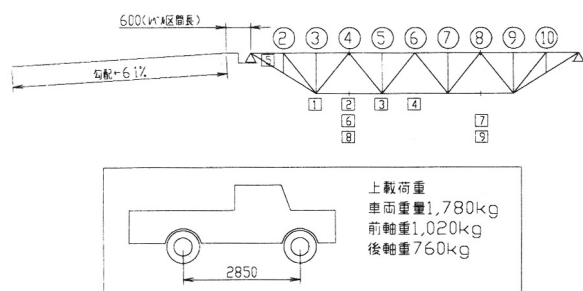
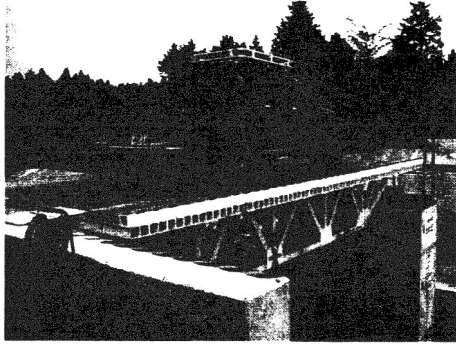


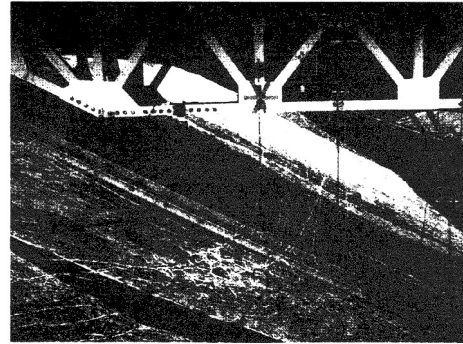
図-2.1 静的載荷試験概要図

および各種部材のひずみを測定した。静的載荷試験概要図を図-2.1に示す。なお,丸で囲った数字は車両前輪載荷位置を,四角で囲った数字は変位計測位置を示している。

以下に,試験方法および試験結果をまとめ,さ



(a) 荷重状況



(b) 計測状況

図-2.2 試験実施状況

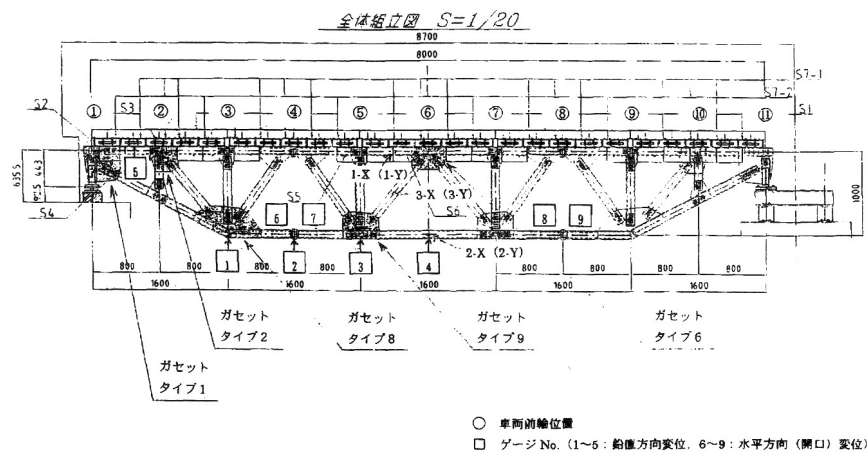


図-2.3 変位およびひずみ計測位置

らにモデル橋を一樣断面な梁と見なして静的試験結果からモデル橋の剛性を求め、これを用いて一樣断面梁の鉛直振動の卓越振動数を計算した。この計算結果と次章での卓越振動数の計測結果を比較し、静的荷重試験結果の考察を行った。

2.2 試験方法

試験実施状況を図-2.2に示す。上図に示すように、静的荷重試験には土木研究所所有の車両を用い、上り勾配6.1%側から進入した。図-2.3に変位およびひずみ計測位置を示しており、図中の丸および四角で囲った数字は図-2.1と対応させている。変位計測位置1～4は下弦材の鉛直方向変位計測位置、5は床版中央部での鉛直方向変位計測位置、6～9は下弦材の左右ブロック（モジュール）間引張ボルト接合部における水平方向変位（開口変位）計測位置を表している。なお、引張ボルト接合部における開口変位の計測には、クリップゲージを用いた。ひずみ計測については、図-2.3に示している5種類のカセットプレート（タイプ1、タイプ2、タイプ6、タイプ

8、タイプ9）において主ひずみとその方向を計測している。また、同図中、1-X (1-Y) ～3-X (3-Y) で示している代表的な上弦材、下弦材および斜材の材軸方向ひずみと材軸直角方向ひずみを計測している。計測にはゲージ長さ10mmの二軸ひずみゲージ（株）共和電業製、KFG-10-120D16-11L30M3S）を使用した。

荷重方法としては、図-2.1に示すように車両前輪位置が②～⑩に位置するように車両を前進および後退させた。それぞれの位置において変位計測およびひずみ計測を行った。実験値としては、車両前進時と後退時の平均値で表している。

2.3 試験結果および考察

静的荷重試験により得られた変位、ひずみおよび継目変位結果を表-2.1～2.3に示す。

表-2.1, 2.2から、変位およびひずみともに静的荷重試験結果と設計計算結果とは良い傾向で一致していることがわかる。また、表-2.3より、下弦材の左右ブロック（モジュール）間引張ボルト接合部に

表－２．１ 変位計測結果

載荷位置 (前輪)	変位計算値 (mm)				変位実験値 (mm)			
	ゲージ No. 1	ゲージ No. 2	ゲージ No. 3	ゲージ No. 4	ゲージ No. 1	ゲージ No. 2	ゲージ No. 3	ゲージ No. 4
②	0.443	0.454	0.461	0.429	0.433	0.395	0.420	0.383
③	0.642	0.720	0.742	0.707	0.620	0.618	0.645	0.610
④	0.723	0.901	0.998	0.965	0.703	0.815	0.958	0.913
⑤	0.870	1.131	1.311	1.289	0.870	1.063	1.300	1.260
⑥	1.116	1.398	1.599	1.630	1.075	1.268	1.515	1.543
⑦	1.136	1.453	1.681	1.774	1.108	1.333	1.560	1.650
⑧	1.056	1.409	1.674	1.759	0.960	1.268	1.598	1.648
⑨	0.949	1.248	1.506	1.593	0.830	1.100	1.395	1.458
⑩	0.714	0.987	1.202	1.322	0.663	0.900	1.135	1.240

表－２．２ ひずみ計測結果

載荷位置 (前輪)	ひずみ計算値 (μm/m)			ひずみ実験値 (μm/m)		
	1-X (上弦材)	2-X (下弦材)	3-X (斜材)	1-X (上弦材)	2-X (下弦材)	3-X (斜材)
②	-21	18	5	-15	15	6
③	-42	35	11	-33	33	10
④	-63	53	16	-54	48	15
⑤	-90	76	22	-76	71	24
⑥	-93	106	-21	-76	100	-30
⑦	-94	103	-12	-83	97	-8
⑧	-97	98	-1	-93	95	0
⑨	-89	95	-11	-2	92	-10
⑩	-61	79	-27	-68	77	-30

表－２．３ 継目変位計測結果

載荷位置 (前輪)	継目変位実験値 (mm)			
	ゲージ No. 6	ゲージ No. 7	ゲージ No. 8	ゲージ No. 9
⑤	0.000	0.000	0.001	0.000
⑥	0.000	0.000	0.002	0.000
⑦	0.000	0.000	0.003	0.000
⑧	0.001	0.000	0.002	0.000
⑨	0.000	0.000	0.001	0.000
⑩	0.000	0.000	0.001	0.000

おける水平方向変位（開口変位）は無く，試作したモデル橋は構造上問題無いと言える。

以上のことから，変位およびひずみともに静的載荷試験結果と設計計算結果とは良い傾向で一致していることがわかった。そこで，次にモデル橋を一樣断面の梁と見なして静的載荷試験結果からトラス橋の剛性を求め，これを用いて一樣断面梁の鉛直振動の卓越振動数を計算する。そして，この計算結果と次章での卓越振動数計測結果と比較し，静的載荷試験結果の妥当性を検証することを試みた。

一般に，一樣断面梁の鉛直振動の卓越振動数 f は次式で表すことができる。ここで， EI は梁の曲げ剛性， m は重量， L は橋長， λ は端部支持条件によって変わる定数で，単純支持と単純支持との組合せの

場合，一次卓越振動数 f_1 に対する λ は $\lambda_1 = \pi$ となる。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2.1)$$

また，上式中の曲げ剛性値 EI を，静的載荷試験から得られた鉛直方向変位を利用して求めることとする。モデル橋端部の支持条件を単純支持と単純支持との組合せであると見なし，前輪が⑥上のときに変位計測位置 4（四角で囲った数字 4）で計測された鉛直方向変位（1.543mm）を使用すると，一樣断面梁のたわみ計算式の重ねあわせから， EI は次のように求まる。

$$EI = 9.254 \times 10^3 \text{ ton} \cdot \text{m}^2 \quad (2.2)$$

いま，式（2.1）中の $m = 3.904 \text{ ton}$ （実測値）， $L = 8 \text{ m}$ であるので，これらの値を使用すると，一次卓越振動数 f_1 は次のように計算される。

$$f_1 = 9.56 \text{ Hz} \quad (2.3)$$

一方，卓越振動数の実測値は次章の結果から， $f_1 = 10.8 \text{ Hz}$ となる。これらの結果を比較すると，静的載荷試験結果から推定して求めた卓越振動数と動的載荷試験により得られた卓越振動数とはほぼ一致することがわかる。したがって，今回の静的載荷試験結果は妥当なものであると言える。

3. 動的載荷試験

3. 1 試験概要

FRP 橋は，発生応力に比べてたわみが大きく，さらに鋼材などと比較してもわかるようになりに軽量であることから，疲労限界，使用限界を検討しておく必要がある。そこで，動的載荷試験による振動特性（振動数，モード減衰定数，振動モード）を把握することにした。

特に FRP の減衰特性においては，鋼材，コンクリートと比較するとかなり異なる性質を有していると考えられる。一般的な FRP の減衰特性としては，「FRP のように繊維とマトリックスとの接着面に界面を有する材料では，界面でのエネルギー吸収のために優れた振動減衰性を有する」。また，振動数範囲 50～300Hz に対しての減衰特性として，「振動数負荷応力の増大に伴い減衰特性は増大する」ことが知られている。¹⁾ これらの結果は，部材としての減衰特性であるが，全体構造としてのモード減衰がどのようなものとなるのかについては疑問が残る。

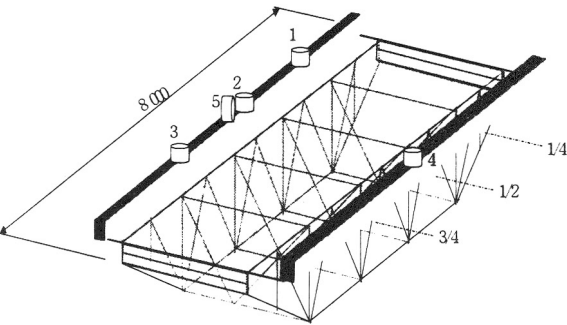
そこで，今回の試験で計測した振動数範囲は，日常の使用レベルである 0～50Hz と低振動数範囲ではあるが，部材としての減衰特性ではなく，構造全体

としての振動特性（振動数，モード減衰定数，振動モード）の測定を主目的とした。

3. 2 実験方法

(1) 実験概要

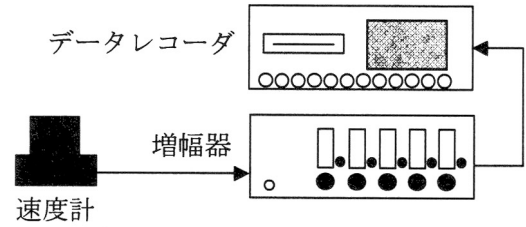
実験では，計測器としてサーボ型速度計（東京測振(株)製・VSE-15，計測周波数0.1～70Hz）を用いた（写真－2参照）．今回，たわみ1次～3次，水平1次，ねじれ1次振動を計測できるように，測点の配置を図－3.1のようにした．測定概要図を図－3.2に示す．データの測定は，橋面上に設置したサーボ型速度計から増幅器を通して，デジタルデータレコーダーに測定波形を記録した．なお，計測では，サンプリング周波数100Hz，スペクトルのデータ数4096個とした．



図－3. 1 測点配置図



写真－2 サーボ型速度計



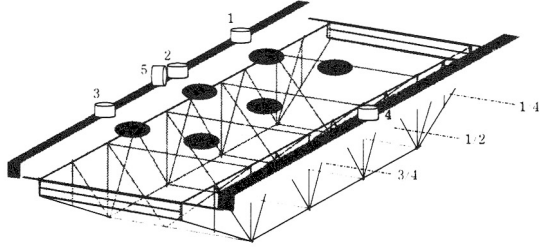
図－3. 2 測定概要図



図－3. 3 衝撃加振実験（たわみ振動）



図－3. 4 衝撃加振実験（ねじれ振動）



図－3. 5 衝撃加振位置

(2) 実験内容

FRP 橋は，橋全体の質量が小さいために，人間の飛び降りによる衝撃力によって各卓越振動数を把握することができる．そこで，本実験では，1人が高さ約40cm ほどの椅子から飛び降りる衝撃加振実験²⁾（図－3.3参照）を行った．また，ねじれ振動および水平振動を卓越させるの衝撃加振は，地覆側に飛び降りることで衝撃力を与えた（図－3.4参照）．衝撃加振点は，図－3.5に示すように6箇所で行い，各加振点で2回ずつ行った．

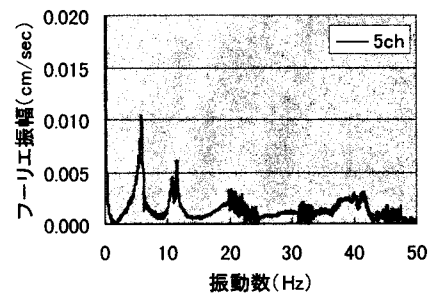
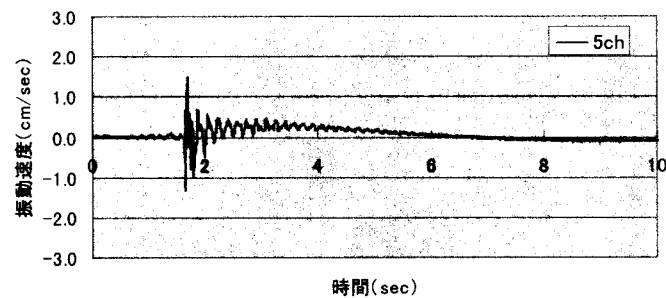
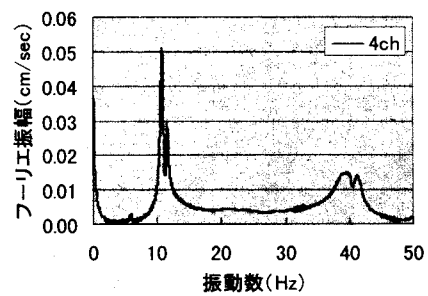
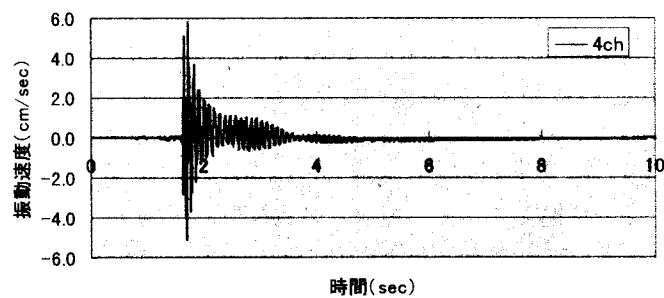
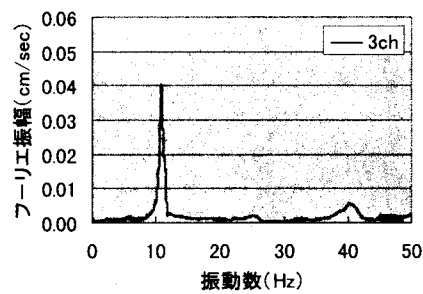
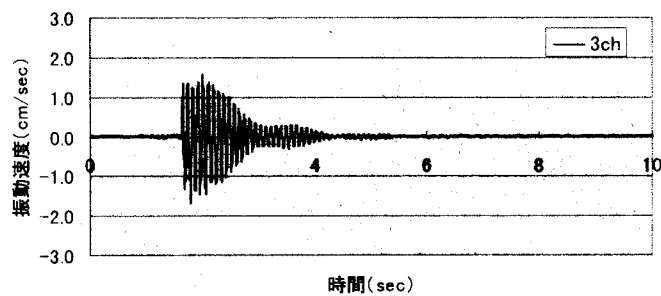
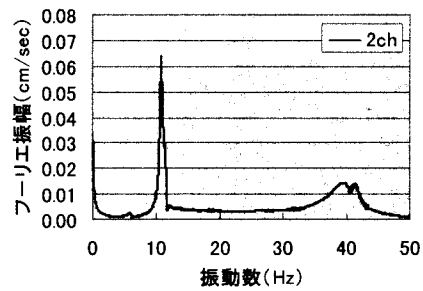
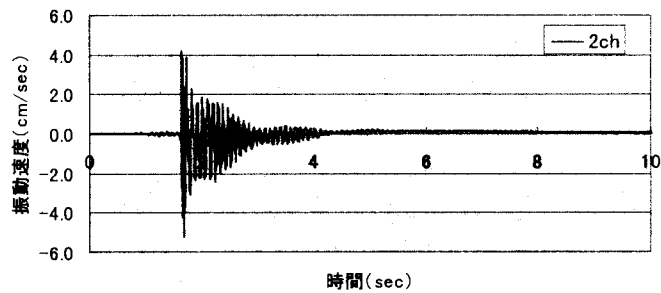
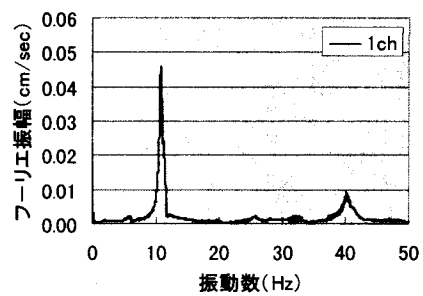
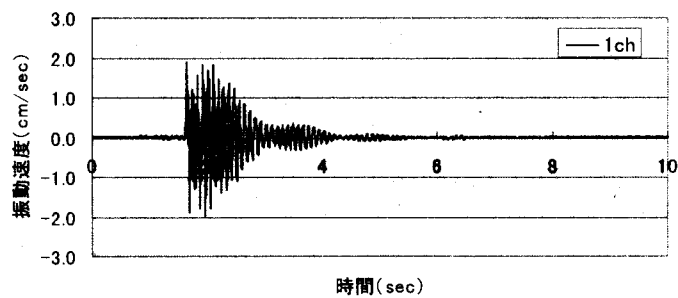


図-3. 6 速度応答波形とそのスペクトル図 (支間長1/2点幅員中央に衝撃加振)

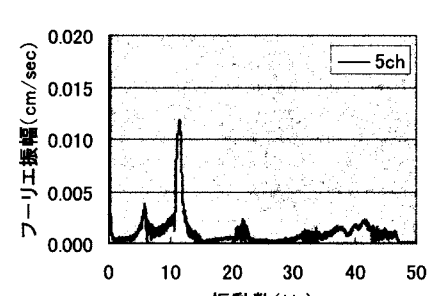
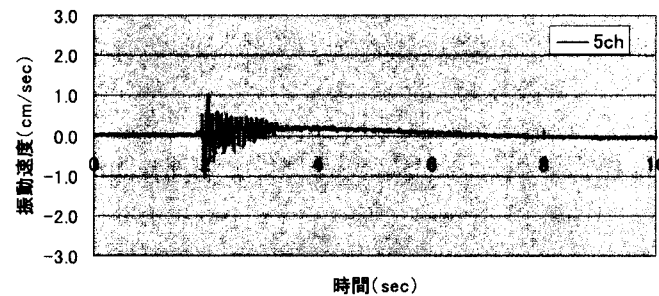
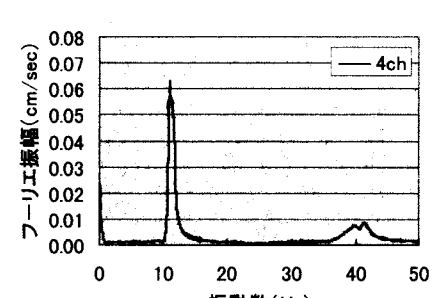
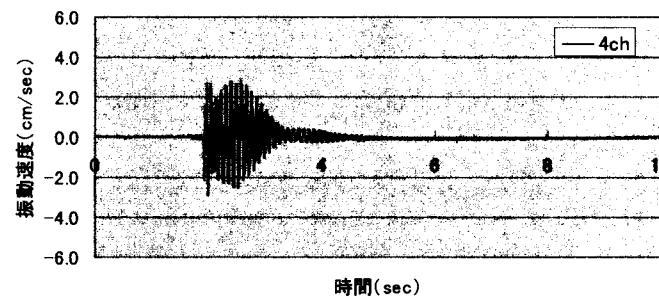
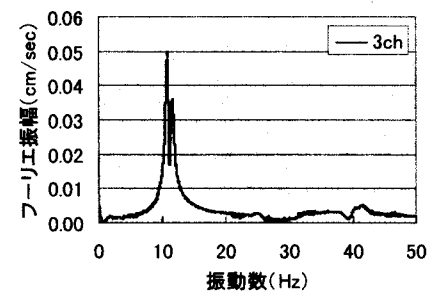
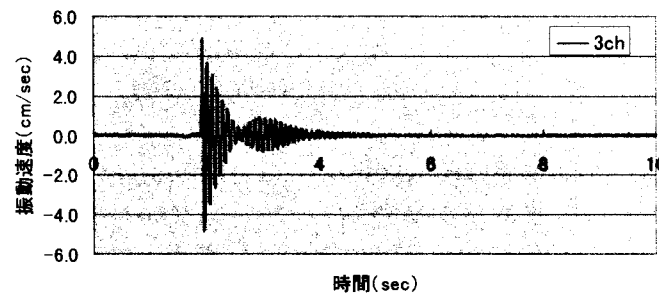
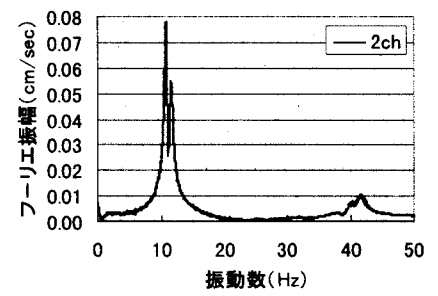
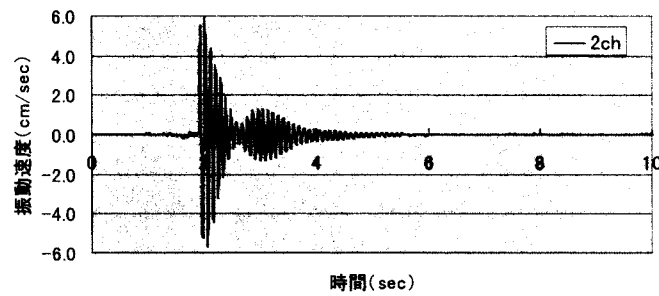
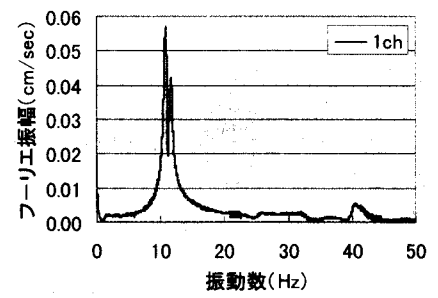
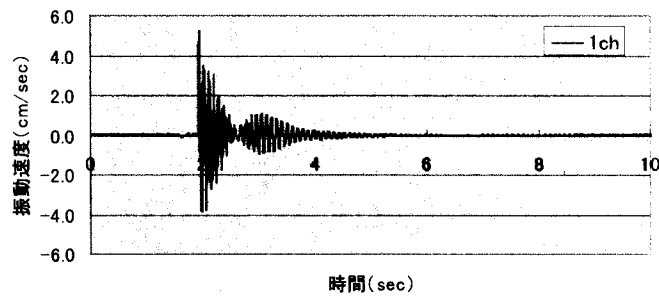


図-3. 7 速度応答波形とそのスペクトル図 (支間長1/2点地覆側に衝撃加振)

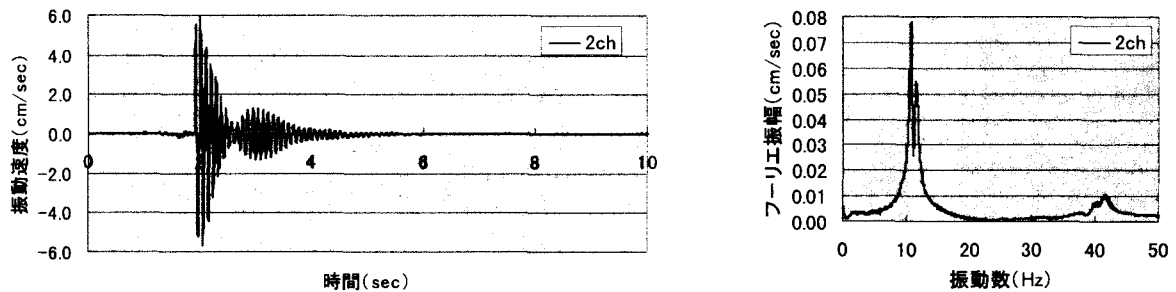
3. 3 実験結果

(1) 卓越振動数

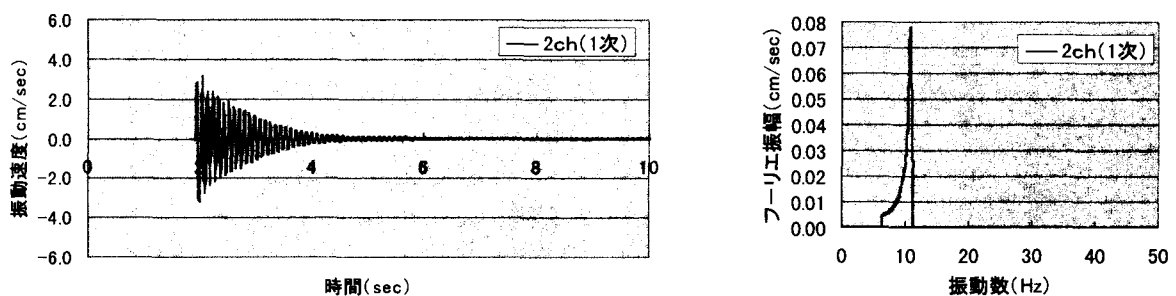
図-3.6に支間長1/2点幅員中央に衝撃加振した時の各測点で得られた速度応答波形とそのスペクトル図を示す。チャンネル番号は、測点配置図の図-3.1と対応している。また、図-3.7に支間長1/2点(測点2側)地覆側に衝撃加振した時の各測点で得られた速度応答波形とそのスペクトル図を示す。

(2) 減衰特性

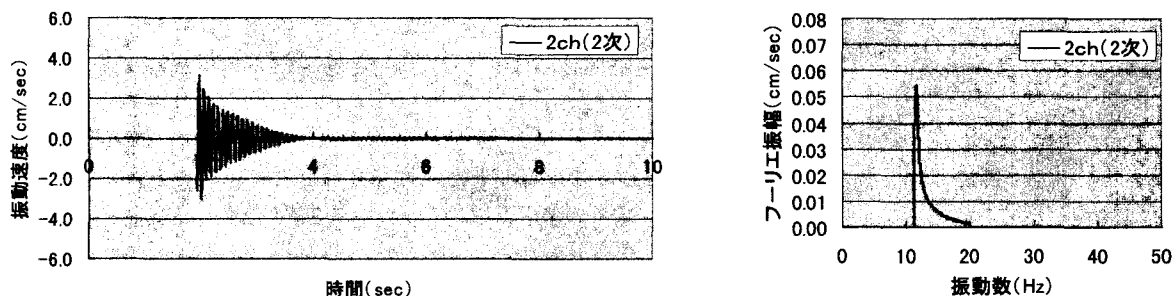
衝撃加振実験から得られた自由減衰波形部分を用いて減衰定数を求めた。しかし、実際には、衝撃加振後の自由減衰波形は、様々な振動モードが混在した波形なので、フィルター処理を施し、波形から直接読みとる方法³⁾によって減衰定数を求めた。その一例として、図-3.8(a)に支間長1/2点(測点2側)地覆側に衝撃加振した時の支間長1/2点(測点2)



(a) 生の速度応答波形とそのスペクトル図



(b) 1次振動数10.8Hzを抽出するため6.3Hz~11.14Hzのバンドパスフィルター処理を施した速度応答波形とそのスペクトル図



(c) 2次振動数11.6Hzを抽出するため11.14Hz~20.0Hzのバンドパスフィルター処理を施した速度応答波形とそのスペクトル図

図-3.8 支間長1/2点地覆側に衝撃加振した時の速度応答波形とそのスペクトル図

で得られた生の速度応答波形とそのスペクトル図を示す。これに対して、1次のたわみ振動数10.8Hzを抽出するため6.3Hz～11.14Hzのバンドパスフィルター処理を施した速度応答波形とそのスペクトル図を図-3.8 (b) に示す。さらに、1次のねじれ振動数11.6Hzを抽出するため11.14Hz～20.0Hzのバンドパスフィルター処理を施した速度応答波形とそのスペクトル図を図-3.8 (c) に示す。そして、この図-3.8 (b) , (c) のようにバンドパスフィルターにより振動モード別の分離をした速度波形から減衰定数を直接読みとることにする。

(3) まとめと考察

以上から、実験において確認できた卓越振動数と減衰定数を表-3.1に示す。

表-3.1 卓越振動数と減衰定数

振動モード	卓越振動数 (Hz)	減衰定数
水平振動	5.9	0.030～0.040
たわみ1次振動	10.8	0.014～0.017
ねじれ1次振動	11.6	0.014～0.024

1) 卓越振動数

鉛直振動において大きく卓越していた10.8Hzについては、クロススペクトル処理により各測点の位相を調べたところ、各測点ではすべて同位相となっていたことから、たわみ振動と考えられる。

また、図-3.7に示した支間長1/2点(測点2側)地覆側に衝撃加振した時の速度応答波形とそのスペクトル図からは、近接した振動数が存在したときに生じるうなり(beat)現象がみられた。この振動数は、スペクトル解析から10.8Hz、11.6Hzと確認された。この11.6Hzの振動については、クロススペクトル処理により、各測点の位相を調べたところ、支間中央測点2、4において逆位相となっていたことから、ねじれ振動と考えられる。

次に、水平振動において5.9Hzに大きな卓越が確認できた。これは水平振動と考えられる。また、クロススペクトル処理により各測点の位相を調べたところ、ねじれ振動と同じように支間中央の測点2、4において逆位相となっていた。

さらに、高次の振動数について40Hz付近に卓越が見られたが、振動数にばらつきがあり、位相関係を正確に調べることができなかった。局所的な振動モードかたわみの2次振動と考えられる。

2) 減衰定数

1/2, 1/4幅員中央での衝撃加振による各測点のスペクトルは、たわみ1次振動が大きく卓越し、ねじれ1次振動がその卓越に隠れたスペクトルとなっており、たわみ1次とねじれ1次振動を分離することが困難であった。しかし、1/2, 1/4偏心による衝撃加振では、それぞれを分離することができた。表-3.1の減衰定数は、1/2, 1/4偏心による衝撃加振の結果を示した。

なお、測定データの中には、衝撃加振によりFRPの部材を局部的に加振したため、加振された点においては、エネルギー吸収が大きく、減衰定数が大きくなっていた。そのため、各測点間での減衰定数のばらつきが大きかったために、表-3.1では範囲で記述した。

4. おわりに

朝霧暴露試験場に架設したGFRPモデル橋の力学特性を確認する目的で静的載荷試験および動的載荷試験を実施した。静的載荷試験では、上載荷重として重量1.8tfの車両を用いて、各種変形およびひずみを測定した結果、実測値は設計計算値とほぼ同様の値であることを確認し、構造的に問題ないことが明らかになった。また、動的載荷試験では、振動特性として卓越振動数および減衰定数を把握することができた。

なお、本研究は建設省公募型共同研究「繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究」の一環として行われたものである。関係各位に感謝の意を表する。

【参考文献】

- [1] (社)強化プラスチック協会：FRP入門，p.112，2000.4
- [2] 梶川康男，深田宰史，吉川裕晃：単径間PC吊床版歩道橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.44A，pp.811-817，1998.3
- [3] 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.
- [4] 建設省土木研究所他：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(Ⅱ)，2000.3
- [5] 鈴木統他：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橋梁シンポジウム，2001.1