

4. 振動計測による無補剛吊橋の動的構造特性と振動使用性

4-1. 研究の背景と目的

比較的規模の大きな歩道橋の設計では、振動使用性がしばしば問題となるため、これまでに多くの研究が行われている。例えば、ロンドンのミレニアムブリッジでは、開通後間もなく、歩行によって励起される水平振動が問題となって、制振対策が講じられている^{1),2)}。また、近年、欧州を中心に振動使用性のガイドラインが策定されている^{3)~5)}。これは、共用時の状態を歩行者密度で分類して、簡便にモデル化された荷重作用と評価式によって歩道橋の応答加速度を算定し、加速度振幅レベルに応じて振動使用性を評価するものである⁶⁾。加速度振幅レベルの限界値は、鉛直方向および水平方向の振動に対して与えられている。

一方、無補剛吊橋では、高次モードの水平振動が振動使用性に影響することが指摘されている^{7)~9)}。したがって、構造物の振動特性を十分に把握しておくだけでなく、適切な限界値が必要であり、照査のためのデータを収集しておく必要がある。

そこで本研究では、一般的な無補剛吊橋の歩道橋を対象に、歩行条件（歩調など）をパラメータとした振動計測を行って、振動発生メカニズムの把握、および、振動使用性を評価するための設計データの蓄積を目的としたものであり、以下の検討を行う。

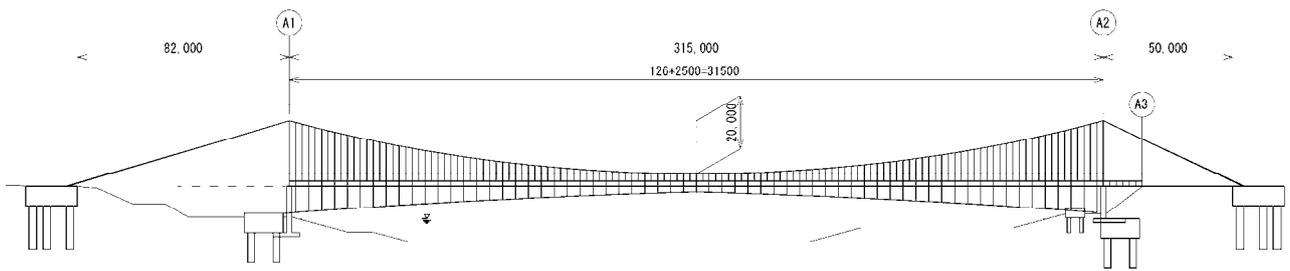
- (1) 常時微動計測による橋梁の基本的な振動特性の把握
- (2) 歩行時における橋梁の振動特性の検討と振動使用性の評価
- (3) ケーブル加振によるケーブル部材の振動特性の把握

4-2. 対象橋梁の概要

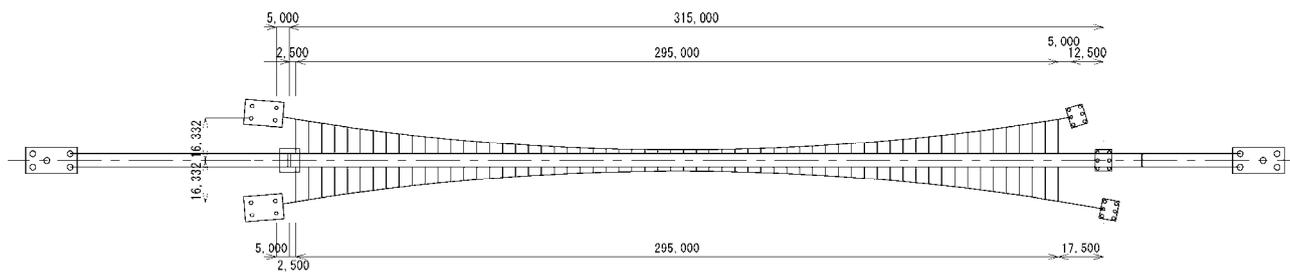
対象橋梁は、神奈川県愛甲郡清川村の宮ヶ瀬湖に架かる「水の郷大つり橋」である。本橋の設計条件を表 4-1 に、一般図を図 4-1 に、それぞれ示す。1995（平成 7）年 3 月に竣工し、計測時点では、竣工後、約 17 年経過していた。図 4-2 に、本橋の全景を示す。経年劣化によって、木床版に部分的な損傷が見られるものの、構造物としては良好な状態であった。

表 4-1 水の郷大つり橋の設計条件

形式	無補剛吊橋
支間	315.000 m
幅員	1.700 m
活荷重（等分布）	床組に対して 300 kgf/m ² 主構に対して 200 kgf/m ²
風荷重（風上側のみ）	450 kgf/m ²
設計水平震度（kh）	0.200
床版	木床版
塔形式	鋼製ロッキングタワー
サグ比	1/16
耐風索	有
縦断勾配	1.000 % 放物線
横断勾配	水平
適用基準	小規模吊橋指針 ¹⁰⁾ 道路橋示方書 ¹¹⁾



a) 側面図



b) 平面図

图 4-1 上部構造一般図

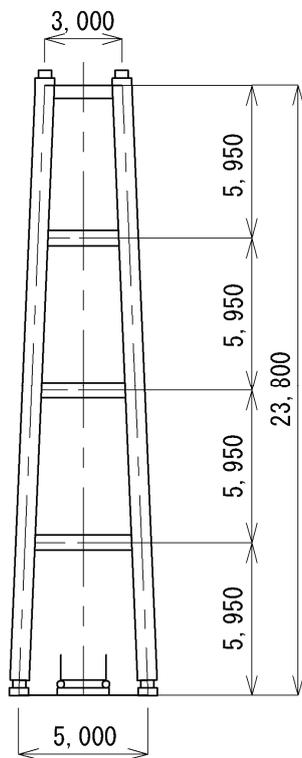


图 4-2 主塔断面図

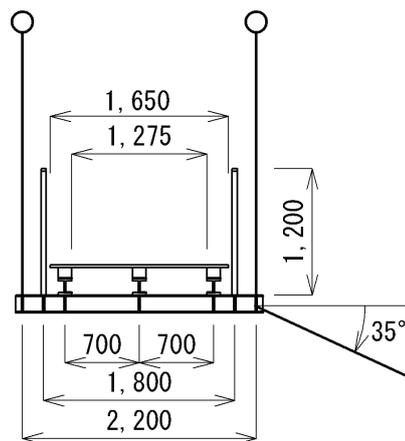


图 4-3 桁断面図



図 4-4 対象橋梁の全景

4-3. 計測・解析の方法

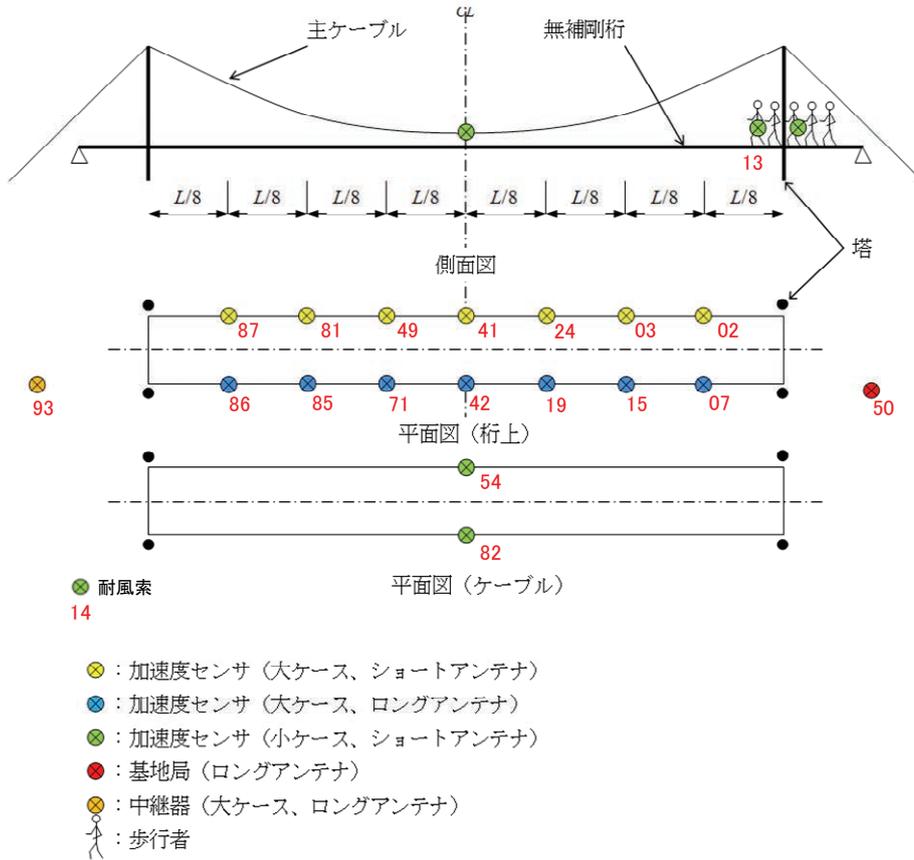
(1) 振動計測の方法と実施

① 計測機器と設置位置

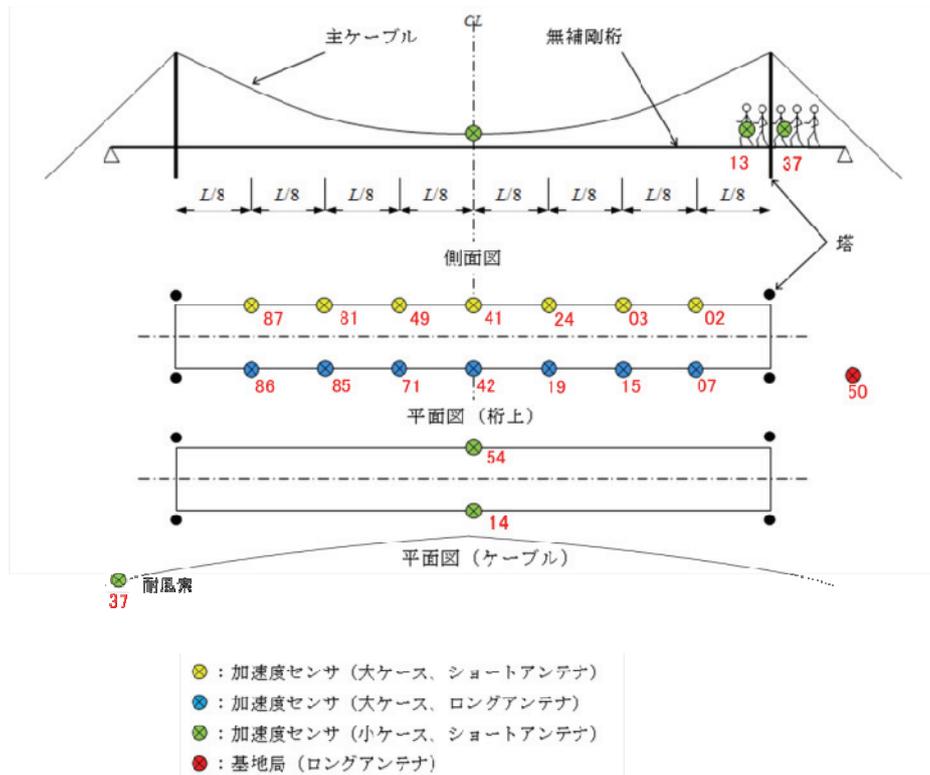
計測機器は、歩道橋の規模（支間長 315m）が比較的大きいこと、また、見通しがよいことから、最近、開発された無線センサ^{13),14)}を利用することとした。このセンサは、MEMS とよばれる圧電型の加速度センサであり、1つの装置で、X、Y、Z方向の加速度を同時計測できるものである。ここでは、無線センサ1基を設置する点を「Node（ノード）」とよぶこととする。各センサは、CPUを登載した小型コンピュータであり、加速度データの収集や無線通信によるデータ転送などを行うことができる。

計測機器の設置位置については、同規模の無補剛吊橋を対象に過去に実施された振動計測の結果⁸⁾、本橋の予備計測（同年6月27日に実施）の結果、および、後述する骨組構造モデルによる固有振動解析の結果を参考に決定し、ノードの点数は、桁の橋面部に主塔間の8分割点（8点×両サイド＝14点）、ケーブル部は中間部の主ケーブルの橋梁中間点に2点（1点×両サイド）、耐風索に1点とする。

歩行者については、隊列（10名）のうち2名にノードを1基ずつ（計2点）設置した。振動計測は、後述するように、2回（2012年9月29日（土）、10月27日（土））実施した。図4-5に、それぞれの計測日のノード設置位置（計20基）を示す。



a) 第1回目 (9月29日)



b) 第2回目 (10月27日)

図 4-5 機器の設置位置とノード番号



a) 橋面上

b) 主ケーブル

c) 耐風索



d) 歩行者



e) 基地局

図 4-6 各部位へのセンサの設置状況と計測の基地局

②計測方法

振動計測は、a)～d)の手順で行った。

a) 計測機器の設定

計測機器の設定については、予備計測において、分解能 0.2gal であれば、十分に常時微動から振動モードが推定できること、また、測定範囲 $\pm 2G$ により歩行者の振動がレンジオーバーしないことが確認されたため、表 4-2 に示すように、計測機器を設定した。また、サンプリング周波数は、対象とする周波数範囲が 2Hz 以下であったことから、その 20 倍以上ある 50Hz に設定し、計測時間は、歩行者が対象橋梁を渡り切る時間が 6 分以内であったため、6 分と設定した。

表 4-2 計測機器の設定値

設定項目	数値
分解能	0.20gal
測定範囲	$\pm 2G$
サンプリング周波数	50Hz
計測時間/回	6 分間

b) 常時微動計測

常時微動計測については、一般歩行者の通行による影響（揺れによる計測不備）を考慮し、4 回/日実施するものとする。

c) 歩行時計測

歩行時計測については、予備計測結果を基に、歩行方法を変えた3パターンの計測（表4-3）を行うものとする。なお、歩行パーティは10人/パーティとし、パターンBおよびCについては、パーティ全員が隊列を組み、メトロノームを用いて一定の歩調に合わせて歩行するものとする。なお、歩行前に体重計測を行った結果、平均体重は70kg/人であった。

表4-3 歩行時計測パターン

歩行パターン	歩行条件	加振振動数 (Hz)
A	ランダム歩行	ランダム
B	歩調 104 歩/分	0.87
C	歩調 80 歩/分	0.67

d) ケーブル加振計測

主索および耐風索については、ロープを対象ケーブルに巻き付けて、人力によってケーブルの固有周期に同調した強制加振を行って、ケーブルの減衰自由振動の加速度波形を計測した。

③計測の作業と実施状況

振動計測は、天候が安定し、日中の温度変化が比較的小さい秋季に2日間（2012年9月29日（土）、10月27日（土））実施した。計測回数は、第1回目に17回、第2回目に13回であった。

計測作業は、供用中に実施することから、一般の通行者が少ないと想定される午前中に常時微動計測を実施した。その後、歩行パターンを変えながら振動計測を行い、日没までには、撤収が完了する工程であった。計測状況を表4-4に示す。また、各振動計測の状況は、以下の通りである。なお、気温は、第1回目では、ほぼ30℃で一定であった。また、第2回目では、15～20℃の範囲であった。

表4-4 計測状況と計測諸元

a) 第1回目（2012年9月29日（土））

ケースNo.	計測ケース	回目	計測時刻	計測時間[分]	歩行時間	歩行周波数[Hz]	有効なデータ
1	常時微動	1	9:27	3	—	—	
2		2	9:40	3	—	—	
3		3	9:56	3	—	—	
4		4	10:15	3	—	—	
5	歩行	1	10:39	6	4分01秒	自由	○
6		2	11:24	6	4分55秒	自由	○
7		3	12:01	6	4分48秒	自由	
8		4	13:49	6	5分18秒	0.87	○
9		5	14:23	6	4分50秒	0.87	
10		6	14:47	6	5分16秒	0.67	
11		7	15:10	6	中断	0.67	○
12		8	15:33	6	6分以上	0.67	
13		9	15:56	6	6分02秒	0.67	
14		10	16:21	6	5分04秒	0.87	
15		11	16:47	6	6分00秒	0.67	
16	主ケーブル	1	17:17	3	—	—	○
17	耐風索	1	17:49	3	—	—	○

b) 第2回目 (2012年10月27日 (土))

ケースNo.	計測ケース	回目	計測時刻	計測時間[分]	歩行時間	歩行周波数[Hz]	有効なデータ
1	常時微動	1	8:15	6	—	—	
2		2	8:42	6	—	—	
3		3	9:10	6	—	—	
4		4	9:43	6	—	—	○
5	歩行	1	10:28	6	4分48秒	自由	○
6		2	10:58	6	5分18秒	自由	
7		3	11:48	6	5分33秒	自由	○
8		4	13:11	6	6分以上	0.67	○
9		5	13:54	6	6分以上	0.67	
10		6	14:38	6	5分37秒	0.87	○
11		7	15:06	6	5分37秒	0.87	
12		8	15:35	6	5分13秒	0.87	○
13		9	16:03	6	6分以上	0.67	○

a) 常時微動計測

常時微動計測については、両日ともに、一般の歩行者や機材運搬等の影響により、橋梁の静止状態が十分ではなかったため、常時微動に有効な計測データは、第2回目の1回のみであった。

b) 歩行時計測

歩行時計測については、第1回目では、11ケースの計測データを収集したが、そのうち、歩行者用ノードのデータ収集は、4ケースであった。また、第2回目では、一般歩行者が計測機器と接触する等のトラブルが数回あったものの、歩行時の9ケースを収集することができ、そのうち有効なデータは、6ケースであった。歩行時の状況を図4-7に示す。なお、1回の計測時間は約6分であり、計測回数も十分であったが、各ノードでデータが蓄積されるため、そのデータを無線で転送するのに時間を要した。また、データ転送のトラブルで全てのノードのデータが回収できなかった場合があった。これは、第2回目において、改善されたが、今後の課題であるといえた。



a) アプローチ部から進入状況



b) 橋面上での歩行状況

図4-7 歩行による加振状況

c) ケーブル加振計測

ケーブル加振計測については、主索、耐風索ともに第1回目に実施し、各1ケースのデータを収集している。ケーブル加振の状況を図4-8に示す。



a) 主索



b) 耐風索

図4-8 人力によるケーブルの加振状況

④計測結果による固有振動数、振動モードの評価手法

固有振動数、振動モードは、構造同定の一手法である Eigensystem Realization Algorithm¹⁵⁾ (以下、ERAとよぶ) により推定する。

(2) 解析方法と解析結果

①骨組構造解析モデルと解析条件

吊索(ハンガー)の定着間隔で節点を設け、H形鋼の桁(3主桁)および横桁をはり要素で、主索、吊索、耐風索をトラス要素でモデル化した。各部位の断面諸元を表4-5に、また、各部位の死荷重と設計時の活荷重、風荷重を表4-6にそれぞれ示す。さらに、これらの解析条件に基づいて作成した立体骨組構造解析モデルを図4-9に示す。耐風索の傾斜角度は、水平軸から35°とした。なお、本解析モデルでは、縦断勾配(1%放物線)は考慮しなかった。

②解析条件

この立体骨組構造解析モデルに対して、死荷重を各節点の集中質量に変換し、60次までの固有振動解析を行って、固有振動数、固有モードを算定した。なお、横構は、構造部材としてはモデル化せず、荷重および質量としてのみ考慮した。

表4-5 各部位の断面諸元

部材	断面積 A (m ²)	ねじり定 数 J (m ⁴)	断面2次モーメント		弾性係数 E (kN/m ²)	せん断弾性係数 G (kN/m ²)
			Iz (m ⁴)	Iy (m ⁴)		
桁(縦桁)	9.09E-03	2.12E-07	3.24E-05	2.54E-05	2.00E+08	7.70E+07
横桁	3.77E-03	7.75E-08	2.94E-06	4.05E-05	2.00E+08	7.70E+07
主ケーブル	8.33E-03	—	—	—	1.40E+08	—
ハンガー	4.87E-05	—	—	—	1.40E+08	—
耐風索	4.78E-03	—	—	—	1.40E+08	—

表 4-6 各部位の死荷重と設計時の活荷重、風荷重

荷重	部位	値	単位	備考
死荷重	桁	3.796	kN/m	
	床版	0.453	kN/m	
	地覆	0.098	kN/m	
	枕木	0.294	kN/m	
	縦桁	0.706	kN/m	
	横桁	0.287	kN/m	
	横構	0.822	kN/m	
	高欄	0.686	kN/m	
	その他	0.451	kN/m	
	主索	0.678	kN/m	片側当たり
	吊索	0.154	kN/m	片側当たり
	主索ケーブルバンド	0.339	kN	1箇所当たり
	耐風索	0.682	kN/m	片側当たり
	支索	0.055	kN/m	片側当たり
	耐風索ケーブルバンド	0.254	kN	1箇所当たり
活荷重		3.0	kN/m	
風荷重		4.5	kN/m ²	

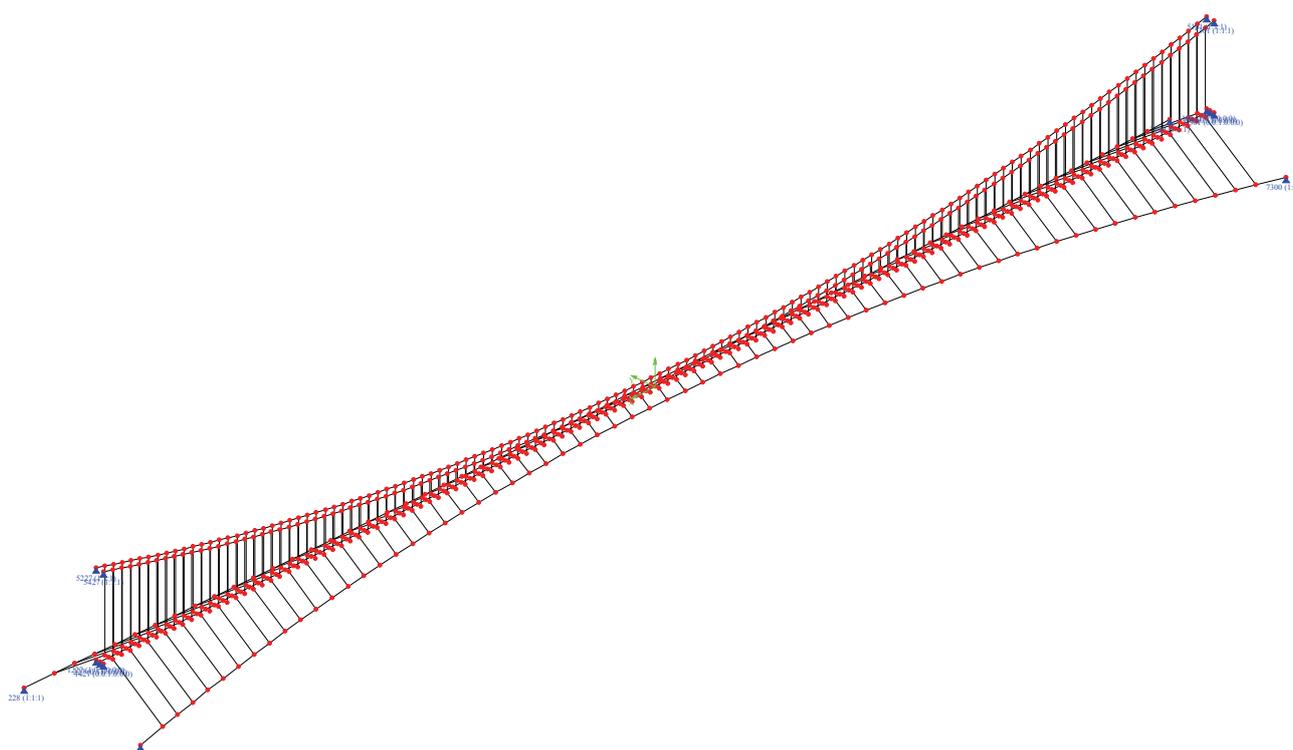


図 4-9 立体骨組構造解析モデル

③固有振動解析結果

固有振動解析結果の一部として、表 4-7 に、60 次までの固有振動数、固有周期および主な固有モードを示す。全体的な傾向として、水平方向の振動モードが低次に現れる傾向にあり、水平方向の剛性が小さいといえる。60 次で 1.4Hz 程度であり、幾つかの部材が連成するモードが近接して多数現れていることもわかる。

表 4-7 固有振動解析結果

a) 1~32 次

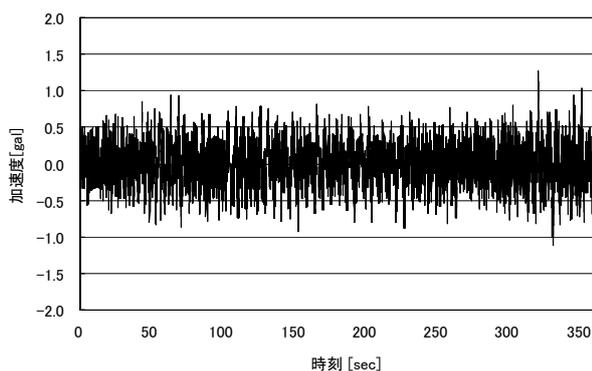
次数	f(Hz)	T(sec)	固有モード	面外モード	面内モード
1	0.188	5.31	水平たわみ逆対称1次		
2	0.192	5.20	水平たわみ対称1次		
3	0.226	4.43			
4	0.240	4.16			
5	0.256	3.91	面内たわみ逆対称1次		
6	0.276	3.62			
7	0.277	3.60	水平たわみ逆対称2次		
8	0.291	3.43			
9	0.299	3.35			
10	0.345	2.90	水平たわみ対称2次		
11	0.356	2.81	面内たわみ対称2次		
12	0.384	2.61	水平たわみ逆対称3次		
13	0.388	2.58			
14	0.401	2.49			
15	0.447	2.24	水平たわみ対称3次		
16	0.478	2.09	水平たわみ逆対称4次		
17	0.483	2.07			
18	0.486	2.06			
19	0.509	1.96			
20	0.514	1.95	面内たわみ対称3次		
21	0.529	1.89	面内たわみ逆対称2次		
22	0.536	1.87	ねじり逆対称1次		
23	0.547	1.83	水平たわみ対称4次		
24	0.571	1.75	水平たわみ逆対称5次		
25	0.573	1.75			
26	0.582	1.72			
27	0.598	1.67			
28	0.598	1.67			
29	0.604	1.66			
30	0.656	1.53	水平たわみ対称5次		
31	0.661	1.51			
32	0.669	1.49	面内たわみ対称4次		

b) 33~60 次

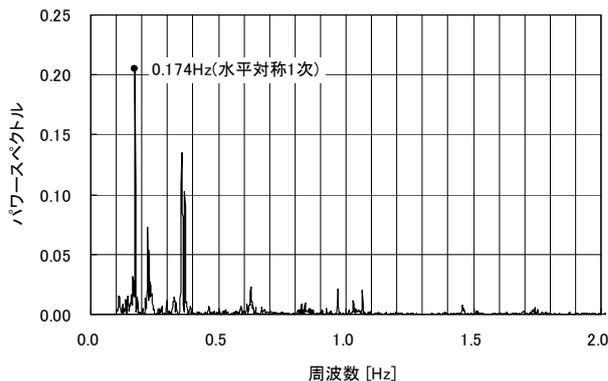
次数	f(Hz)	T(sec)	固有モード	面外モード	面内モード
33	0.683	1.46	ねじり対称2次		
34	0.701	1.43			
35	0.702	1.42			
36	0.754	1.33	水平たわみ逆対称6次		
37	0.768	1.30	水平たわみ対称6次		
38	0.783	1.28	面内たわみ逆対称3次		
39	0.817	1.22			
40	0.817	1.22			
41	0.827	1.21	主索水平対称2次		
42	0.855	1.17	主索スウェイ対称2次		
43	0.857	1.17	水平たわみ逆対称7次		
44	0.887	1.13	水平たわみ対称7次		
45	0.903	1.11			
46	0.913	1.09	面内たわみ対称5次		
47	0.920	1.09			
48	0.920	1.09			
49	0.921	1.09			
50	0.971	1.03	水平たわみ逆対称8次		
51	1.013	0.99	水平たわみ対称8次		
52	1.015	0.98			
53	1.023	0.98			
54	1.036	0.97	面内たわみ逆対称4次		
55	1.037	0.96			
56	1.037	0.96			
57	1.096	0.91	水平たわみ逆対称9次		
58	1.138	0.88			
59	1.138	0.88			
60	1.143	0.88	水平たわみ対称9次		

4-4. 常時微動計測による振動特性の検討

常時微動計測における橋面 $L/4$ 点の加速度波形およびパワースペクトルを図 4-10 に示す。常時微動計測結果は、表 4-4 b) に示した、第 2 回目のケース No.4 であり、着目点 ($L/4$ 点) は、振動モードとして最も顕著な点である。なお、計測時には、風は小さく、外的な影響はほとんどないと考えられる。

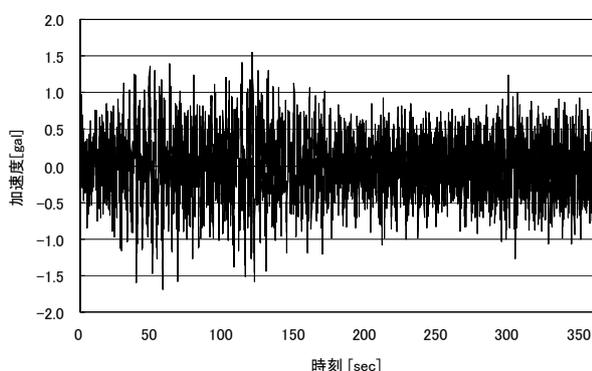


a) 加速度波形

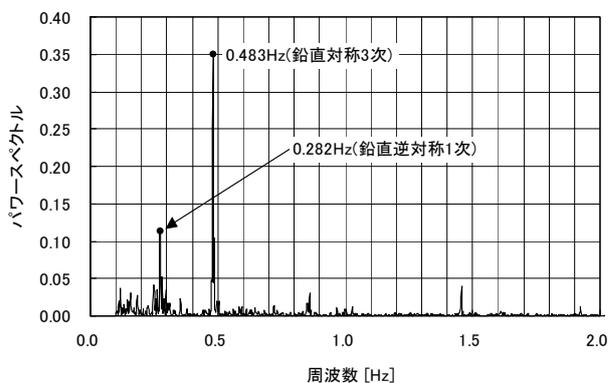


b) パワースペクトル

図 4-10 橋面 L/4 点 (Node 03) における水平方向の加速度波形とパワースペクトル



a) 加速度波形

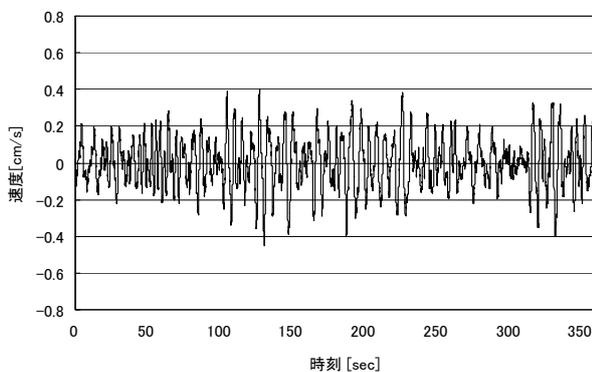


b) パワースペクトル

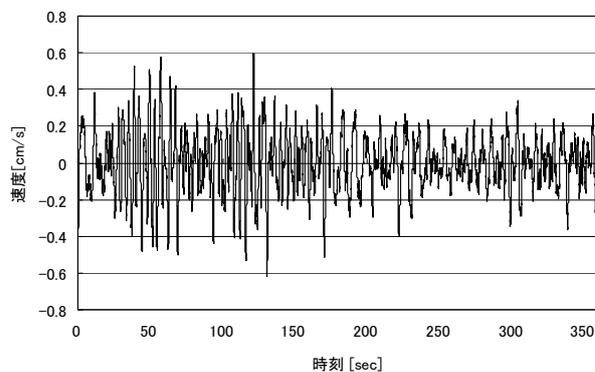
図 4-11 橋面 L/4 点 (Node 03) における鉛直方向の加速度波形とパワースペクトル

これらの図より、常時微動観測で得られた加速度は、鉛直、水平ともに ± 1.5 gal 程度であり、小さいことがわかる。また、そのパワースペクトルより、 0.5 Hz 以下の周波数が卓越していること、また、固有振動解析結果から予測されたように、水平方向の周波数が小さい傾向にあることも確かめられる。

また、これらの加速度波形を、1 回積分することで速度波形を、2 回積分することで変位波形を計算した。橋面 L/4 点における速度波形、変位波形を、図 4-12、図 4-13 にそれぞれ示す。これらの図より、速度、変位ともに、水平方向が大きいこと、また、速度は ± 0.6 cm/s、変位は ± 0.4 cm の範囲で推移していることがわかる。

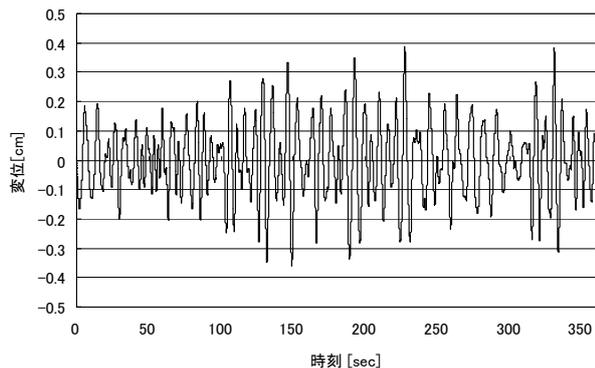


a) 水平方向

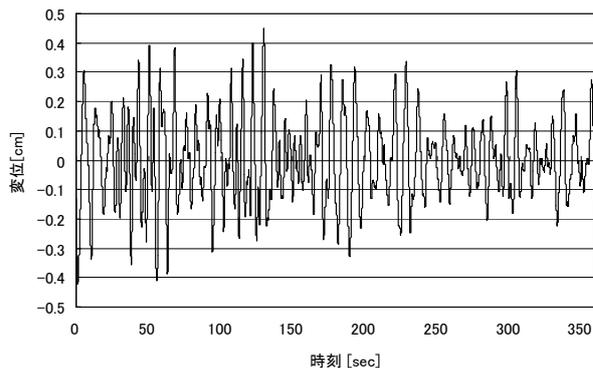


b) 鉛直方向

図 4-12 橋面 L/4 点 (Node 03) における速度波形



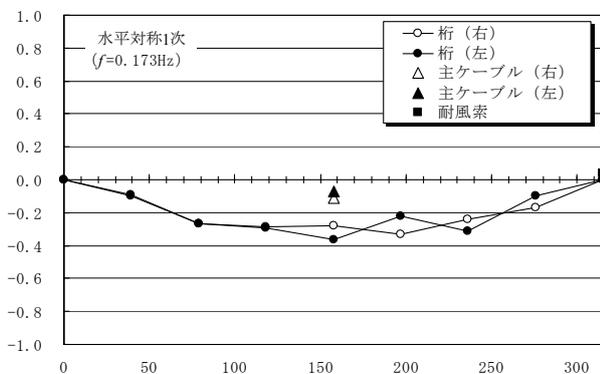
a) 水平方向



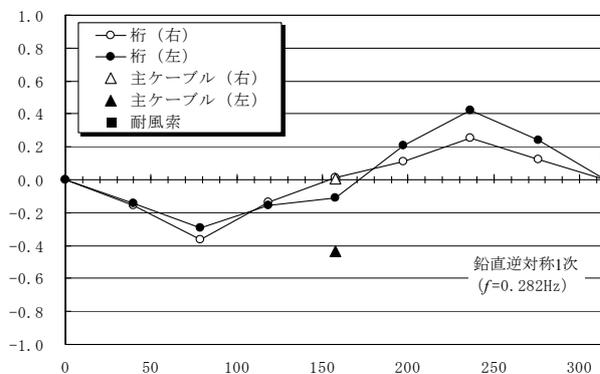
b) 鉛直方向

図 4-13 橋面 L/4 点 (Node 03) における変位波形

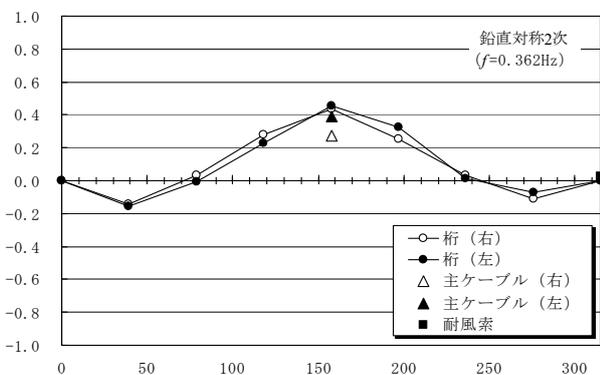
さらに、常時微動計測データより、卓越する固有振動数に対する振動モードの推定を行った。推定は、前述したように、ERA による。図 4-14 に、常時微動から推定した 4 つの振動モードを示す。図 4-14 の a) は水平成分であり、b)~d) は鉛直成分をグラフ化したものである。さらに、図 4-15 に、そのモードに対応する、固有振動解析結果の振動モードを示す。まず、推定できた振動モードは、a) 水平対称 1 次モード、b) 鉛直逆対称 1 次モード、c) 鉛直対称 2 次モードおよび d) 鉛直逆対称 1 次モードの 4 つの振動モードである。橋面上における左右のノードのモードはほとんど同じであり、構造全体として、水平、垂直方向の振動において一体となって挙動していること、また、図 4-15 の各モードとよい一致を示すことがわかる。



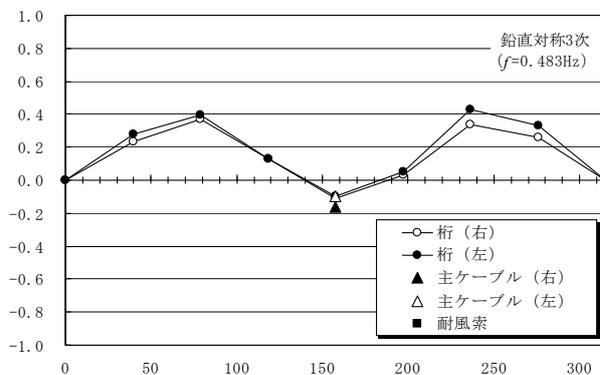
a) 水平対称 1 次モード



b) 鉛直逆対称 1 次モード



c) 鉛直対称 2 次モード



d) 鉛直逆対称 3 次モード

図 4-14 常時微動から推定された固有振動モードと固有振動数

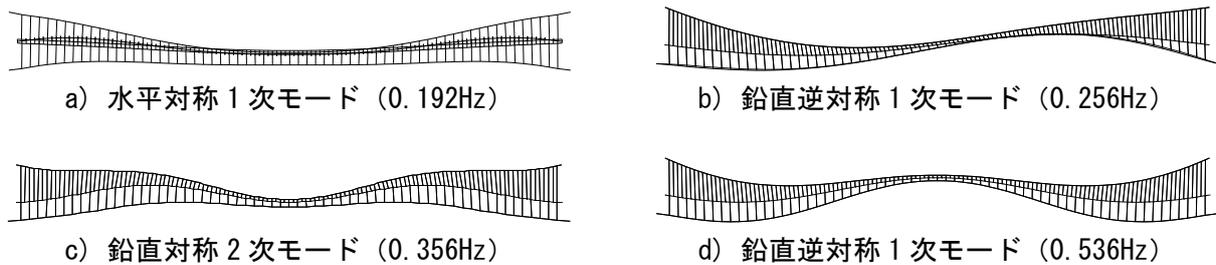


図 4-15 固有振動解析による固有振動モードと固有振動数

表 4-8 に、各振動モードにおける固有振動数の計測結果と解析結果の比較を示す。表より、水平対称 1 次モードでは解析結果が高めに、鉛直逆対称 1 次モードでは計測結果が高めに評価されたものの、おおむね±10%の精度で推定されることが確かめられた。

表 4-8 各振動モードにおける固有振動数の計測結果と解析結果の比較

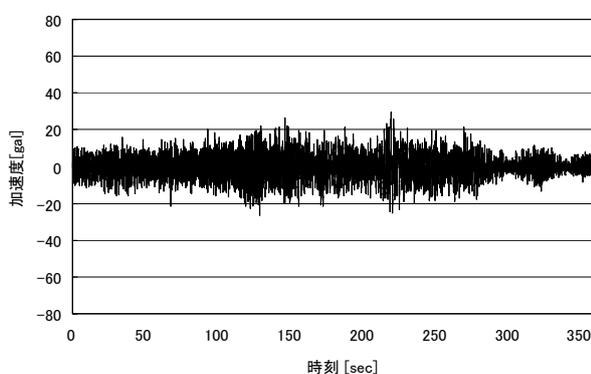
固有振動数 [Hz]		固有振動数の比 計測値／解析値	振動モード
計測結果	解析結果		
0.173	0.192	0.90	水平対称 1 次
0.282	0.256	1.10	鉛直逆対称 1 次
0.362	0.356	1.02	鉛直対称 2 次
0.483	0.514	0.94	鉛直対称 3 次

4-5. 歩行者外力による動的構造特性の検討と振動使用性の評価

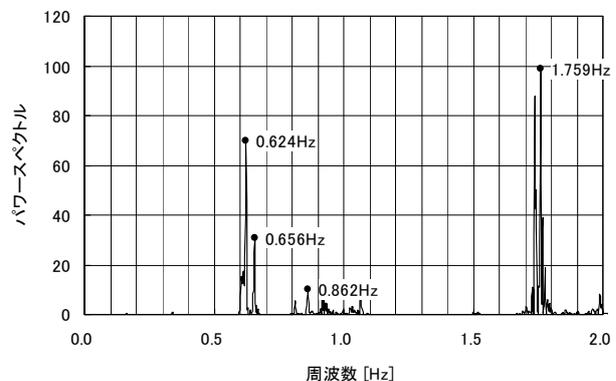
(1) 歩行パターン A

歩行パターン A は、歩行パーティがランダムに歩行するものであり、表 4-4 より、合計 4 ケースのデータが収集された。代表的なケース（表 4-4 a）、ケース No.5) の分析結果を以下に示す。

計測結果の一部として、図 4-16～図 4-17 に、橋面 L/4 点 (Node 3) における水平および鉛直方向の加速度波形とパワースペクトルをそれぞれ示す。これらの図より、1Hz 以下の卓越振動数は、水平で 0.624Hz、鉛直で 0.616Hz となり、近接していた。また、加速度振幅は、鉛直方向の方が若干大きいことがわかる。なお、水平方向の卓越振動数は、0.656Hz、0.862Hz など、複数あることもわかる。

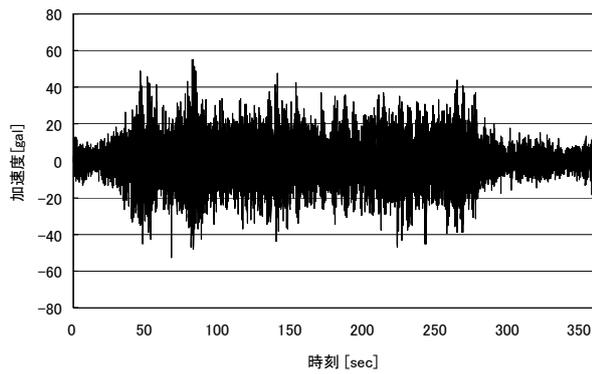


a) 加速度波形

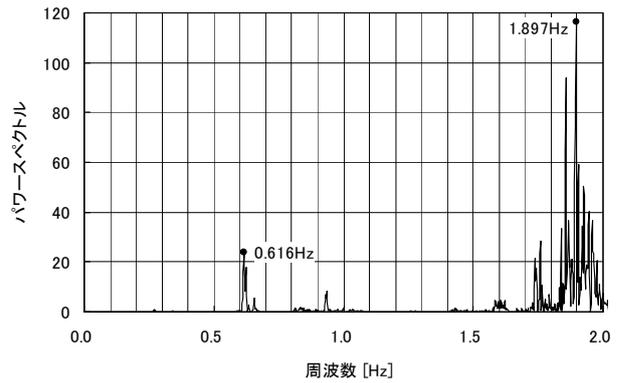


b) パワースペクトル

図 4-16 橋面 L/4 点 (Node 3) における水平方向の加速度波形とパワースペクトル



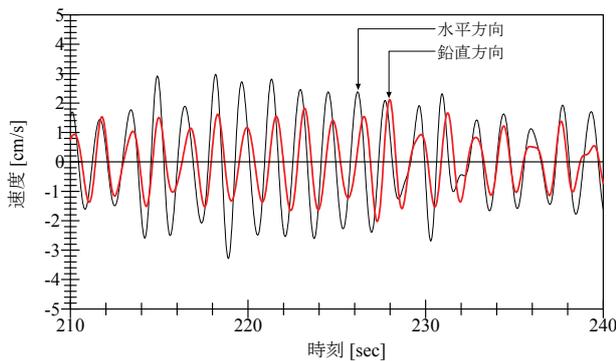
a) 加加速度波形



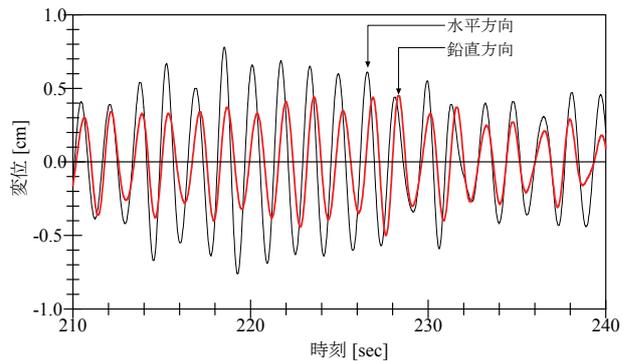
b) パワースペクトル

図 4-17 橋面 L/4 点 (Node 3) における鉛直方向の加加速度波形とパワースペクトル

次に、橋面 L/4 点 (Node 3) における加加速度波形を 1 回積分して速度を、2 回積分して変位を算定した。その結果を図 4-18 に示す。これらの図より、水平方向の振動がやや大きく、速度振幅は $\pm 3\text{cm/s}$ 、変位振幅は $\pm 0.8\text{cm}$ であり、振幅は小さいことがわかる。これらの波形の振動数は、前述した 0.6Hz 程度であり、水平方向の振動数がやや高いことも波形の推移から確認できる。



a) 速度波形



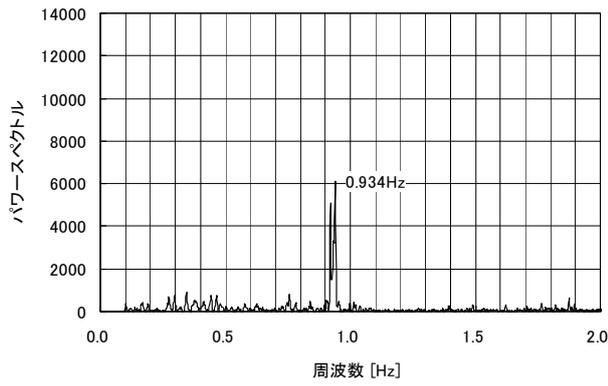
b) 変位波形

図 4-18 橋面 L/4 点 (Node 3) における速度波形と変位波形

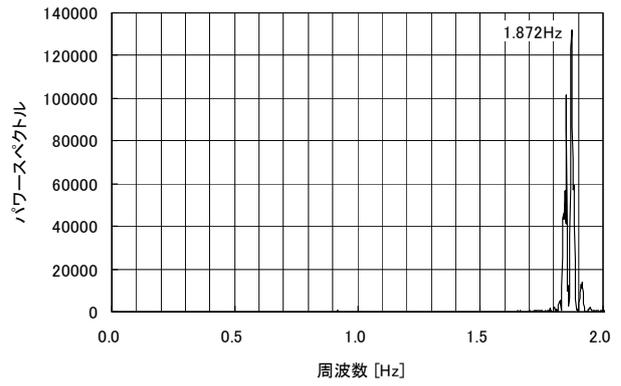
歩行者に設置したセンサ (Node 13) の加加速度波形のパワースペクトルを図 4-19 に示す。図より、卓越周波数は、水平で 0.934Hz、鉛直で 1.872Hz であり、鉛直振動数は水平振動数のほぼ 2 倍になる。さらに、図 4-20、図 4-21 に、歩行者に設置されたセンサの加加速度波形、速度波形および変位波形をそれぞれ示す。これらの図より、全ての波形で振幅は、鉛直成分が大きいこと、また、歩行者の変位振幅は、水平、鉛直ともに 2~3cm 程度であることがわかる。これは、通常の歩行時に相当するものである。

図 4-22 に、歩行者と桁 (L/4 点) の変位波形を示す。前述したように、桁の変位振幅は小さく、桁と歩行者の振動数も大きく異なり、両者の位相にも周期性がみられないことから、同調は生じていないと判断された。

なお、歩行者のデータは、1 名のみであるが、図 4-16、図 4-17、図 4-19 より、桁の振動数は、1.7~1.9Hz 付近で卓越しており、歩行者全体の鉛直振動数はこの範囲にあると判断され、歩行者の加速度センサの卓越振動数 (1.87Hz) とほぼ一致することもわかる。

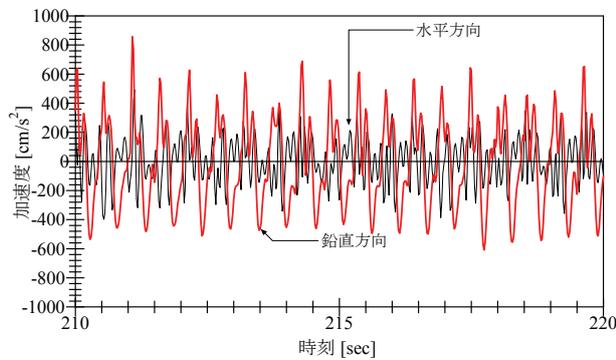


a) 水平方向

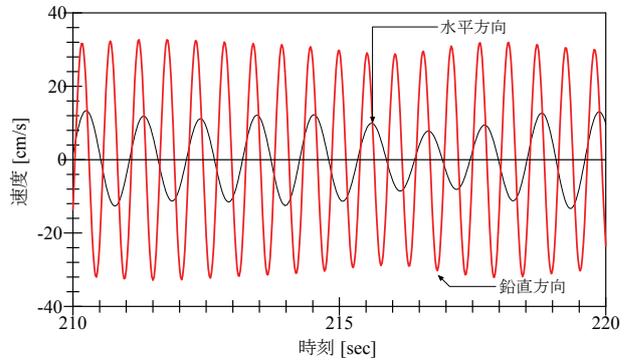


b) 鉛直方向

図 4-19 歩行者 (Node 13) の加速度波形のパワースペクトル



a) 加速度波形



b) 速度波形

図 4-20 歩行者 (Node 13) の加速度波形と速度波形

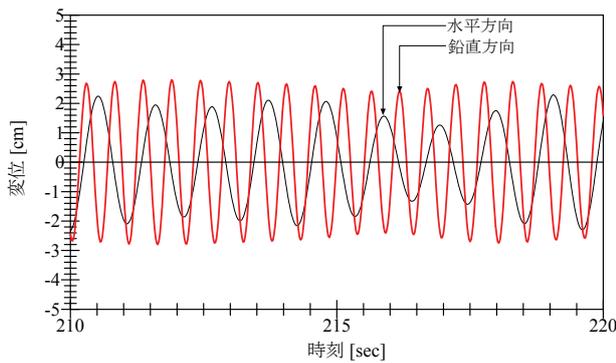


図 4-21 歩行者 (Node 13) の変位波形

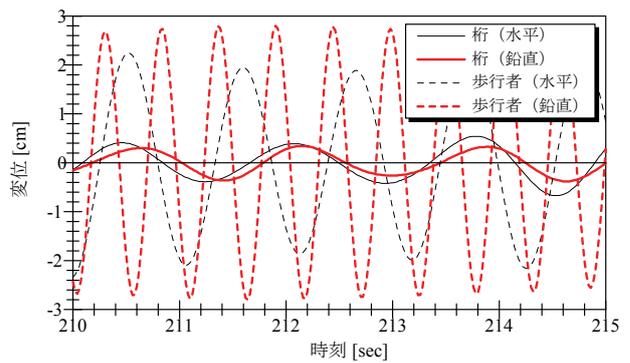
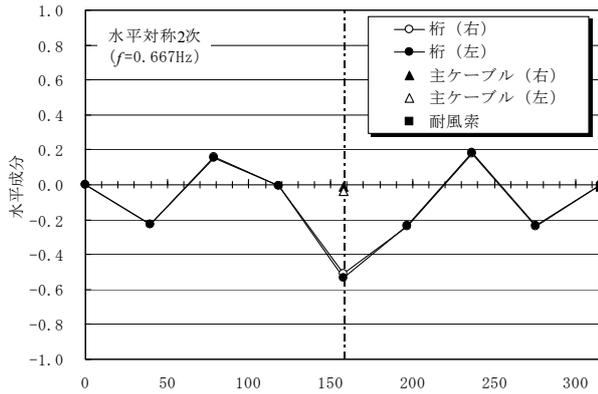
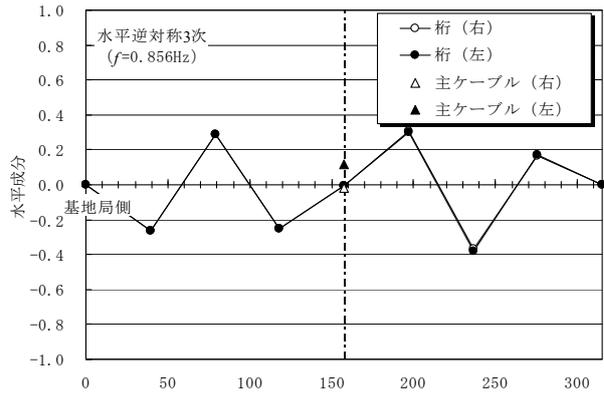


図 4-22 歩行者と桁 (L/4 点) の変位波形

さらに、歩行パターン A の各ノードの計測データから、卓越する固有振動数に対する振動モードの推定を行った。推定は、前述したように、ERA によった。図 4-19 に、推定された 2 つの振動モードと固有振動数を示す。図より、それぞれ、水平対称 2 次モード (0.667Hz)、水平逆対称 3 次モード (0.856Hz) と推定された。なお、桁は、鉛直方向にも変位していたが、ここでは、鉛直方向のモードについては特定できなかった。この 2 つの振動モードと固有振動数は、次の歩行パターン B、C において、強制加振する上で参考とした。



a) 水平対称 2 次モード



b) 水平逆対称 3 次モード

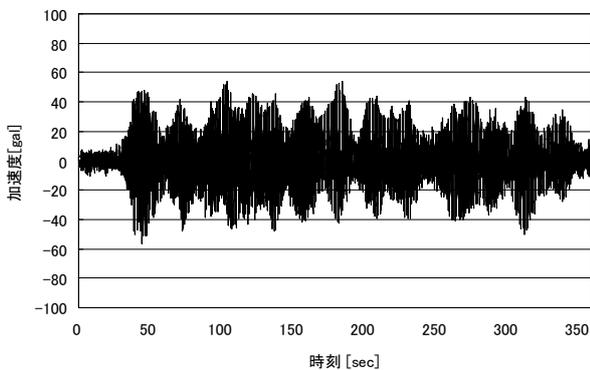
図 4-23 歩行パターン A から推定した振動モード

以上のことから、本橋の場合、10 名程度の集団となってもランダムな歩行では、有害な振動は生じないことが確かめられた。

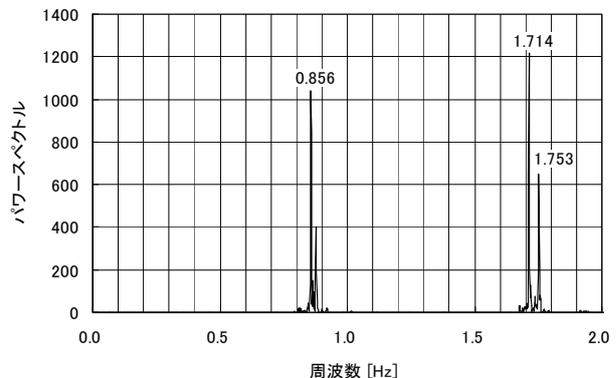
(2) 歩行パターン B

歩行パターン B は、歩行パーティが一定の歩調（104 歩／分）で歩行するものであり、表 4-4 より、合計 3 ケースのデータが収集された。代表的なケース（表 4-4 b）ケース No.12）の分析結果を以下に示す。

計測結果の一部として、図 4-24～図 4-25 に、橋面 $L/4$ 点（Node 3）における水平および鉛直方向の加速度波形とパワースペクトルをそれぞれ示す。これらの図より、卓越振動数は、水平で 0.856Hz、鉛直で 0.862Hz であり、ほぼ同じであることがわかる。また、加速度振幅は鉛直方向が若干大きい。卓越振動数のパワースペクトルから、水平振動の方が支配的であることもわかる。後述するように、これは水平逆対称 3 次モードに対応していた。歩行者による加振周波数は、0.87Hz であるため、これによって、水平逆対称 3 次モードが励起されたものといえた。

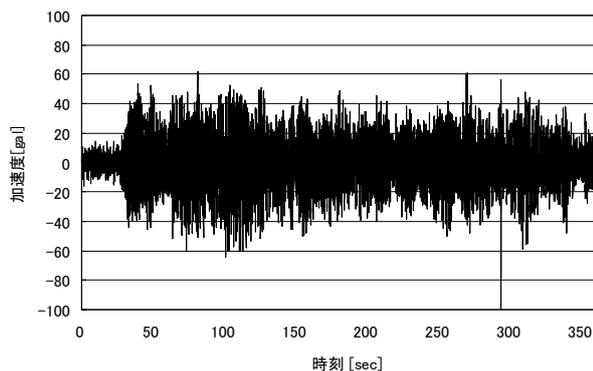


a) 加速度波形

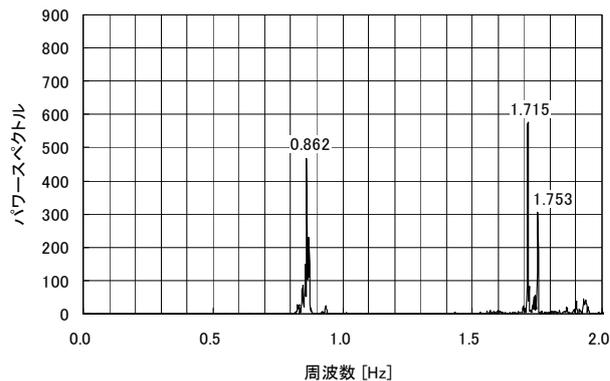


b) パワースペクトル

図 4-24 橋面 $L/4$ 点（Node 3）における水平方向の加速度波形とパワースペクトル



a) 加速度波形

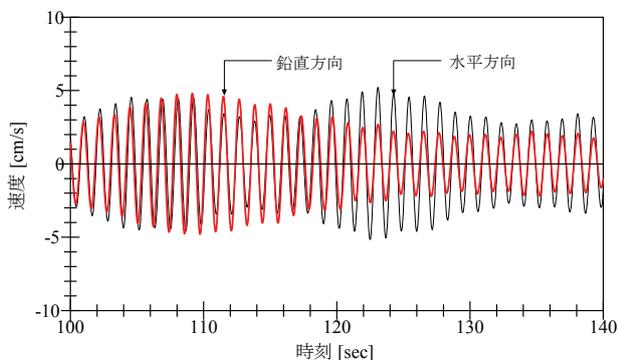


b) パワースペクトル

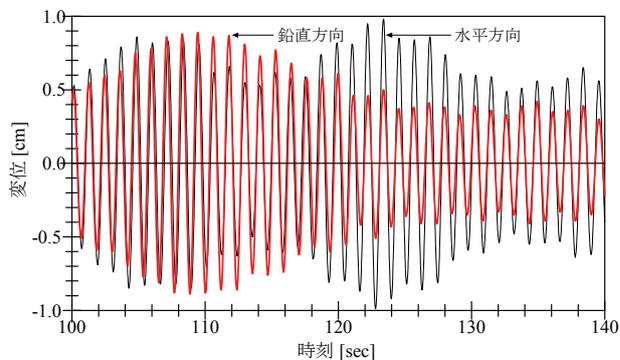
図 4-25 橋面 L/4 点 (Node 3) における鉛直方向の加速度波形とパワースペクトル

次に、橋面 L/4 点 (Node 3) における加速度波形を 1 回積分して速度波形を、2 回積分して変位波形を算定した。その結果を図 4-26 に示す。水平方向の振動がやや大きく、速度振幅は $\pm 5\text{cm/s}$ 、変位振幅は $\pm 1\text{cm}$ であり、振幅は小さいことがわかる。また、波形の振動数は、前述したように 0.86Hz 程度であり、水平と鉛直の振動は同位相であることもわかる。さらに、図 4-26 に示すように、うなりのような振動の挙動は、水平と鉛直の振動数が近接していることによるものと考えられた。

歩行者に設置したセンサ (Node 13) の加速度波形、速度波形および変位波形を、図 4-27、図 4-28 にそれぞれ示す。これらの図より、鉛直方向の振動数が高いことから、変位振幅は水平方向が大きく、歩行者の変位振幅は、水平で $\pm 5\text{cm}$ 程度であることがわかる。

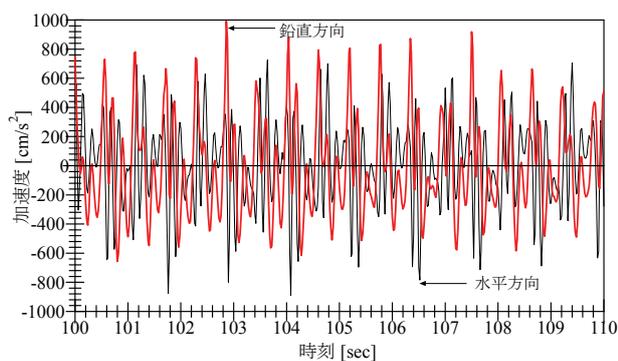


a) 速度波形

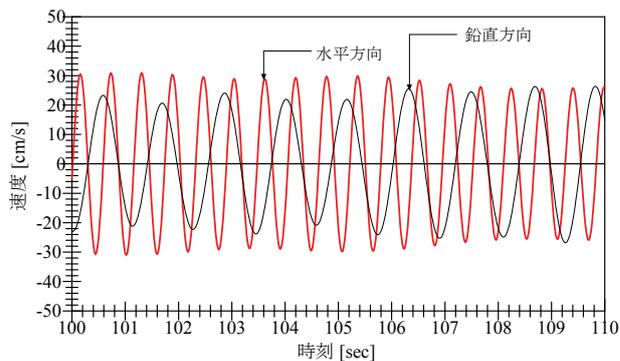


b) 変位波形

図 4-26 橋面 L/4 点 (Node 3) における速度波形と変位波形



a) 加速度波形



b) 速度波形

図 4-27 歩行者 (Node 13) の加速度波形と速度波形

図 4-29 に、歩行者と桁 (L/4 点) の変位波形を示す。歩行者の水平変位波形と桁 (L/4 点) の水平変位波形は、ちょうど逆位相で推移しており、同調していることが確かめられた。なお、図を略したが、図 4-26 b) より、桁の鉛直変位も同調している。これらのことから、歩行者の水平挙動によって、歩道吊橋が励起されたと推測された。

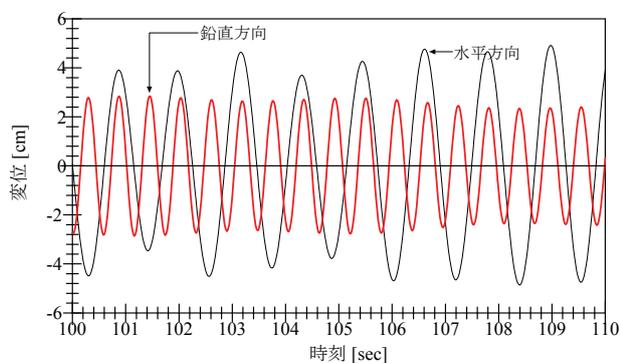


図 4-28 歩行者 (Node 13) の変位波形

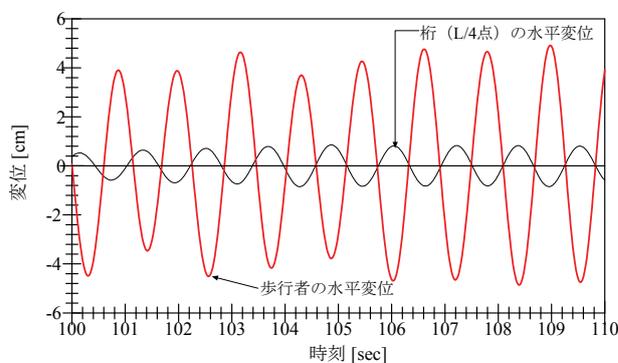


図 4-29 歩行者と桁 (L/4 点) の変位波形

さらに、歩行パターン B の計測データより、卓越する固有振動数に対する振動モードの推定を行った。推定は、前述したように、ERA によった。図 4-30 に、推定された振動モードを示す。図より、水平逆対称 3 次モード (0.856Hz) であることがわかる。なお、桁は、鉛直方向にも変位していたが、鉛直方向のモードについては特定できなかった。同じ振動数で挙動していたことから、連成振動である可能性も想定された。

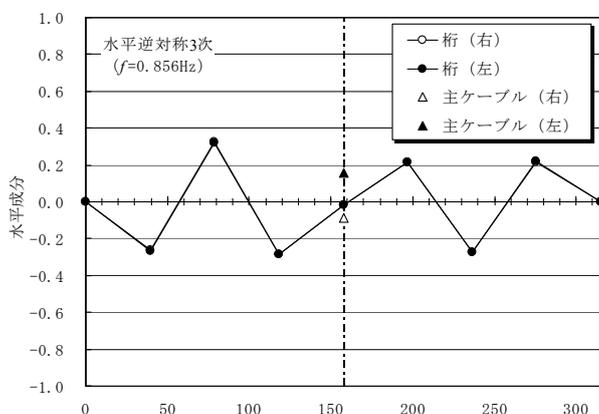


図 4-30 歩行パターン B から推定した水平逆対称 3 次モード

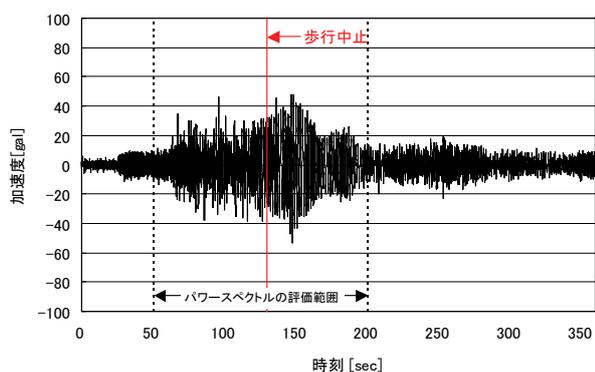
以上のことから、水平逆対称 3 次モードの固有振動数である 0.86Hz 付近で、歩行によって強制加振を行ったが、歩道吊橋は共振したものの、振幅は小さく、振動使用性で問題となるレベルではないことが確かめられた。

(3) 歩行パターン C

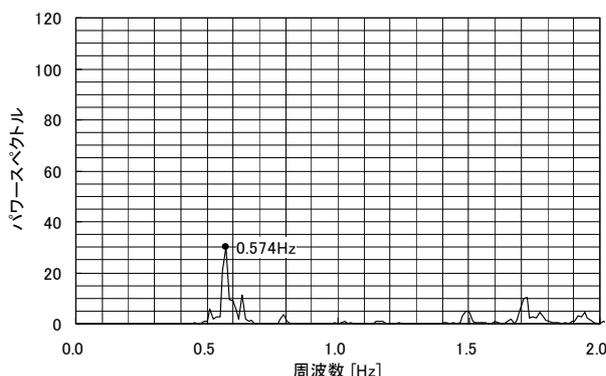
歩行パターン C は、歩行パーティが一定の歩調 (80 歩/分) で歩行するものであり、表 4-4 より、合計 3 ケースのデータが収集された。これらの計測結果のうち、1 ケースでは、歩行による強制加振によって、歩行者が不安を感じる、限界付近まで振幅を増幅することができた。その計測データは、表 4-4 a)

のケース No.11 であり、振幅が増大して、不安を感じた時点（開始から約 130 秒経過後）で、加振を一時中止した。

計測結果の一部として、図 4-31～図 4-32 に、橋面 L/4 点（Node 15）における水平および鉛直方向の加速度波形とパワースペクトルをそれぞれ示す。これらの図より、水平、鉛直ともにほぼ同じ振動数（0.58Hz）が卓越すること、また、加速度振幅は鉛直方向の方が若干大きいことがわかる。これは、後述するように、ねじり逆対称 1 次モードに対応していた。

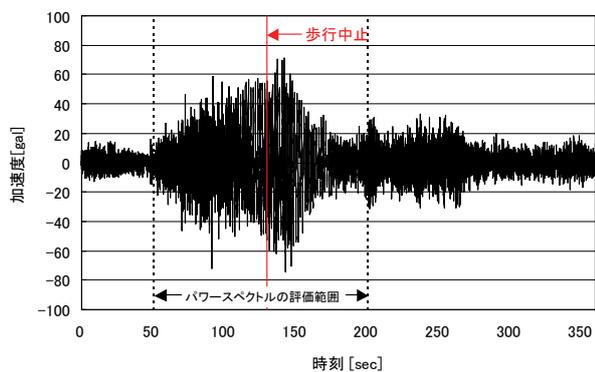


a) 加速度波形

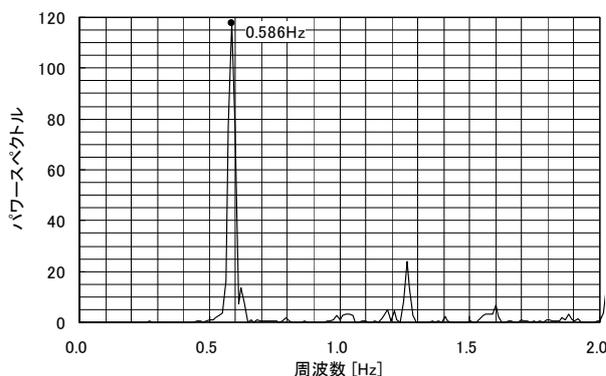


b) パワースペクトル

図 4-31 橋面 L/4 点（Node 15）における水平方向の加速度波形とパワースペクトル



a) 加速度波形



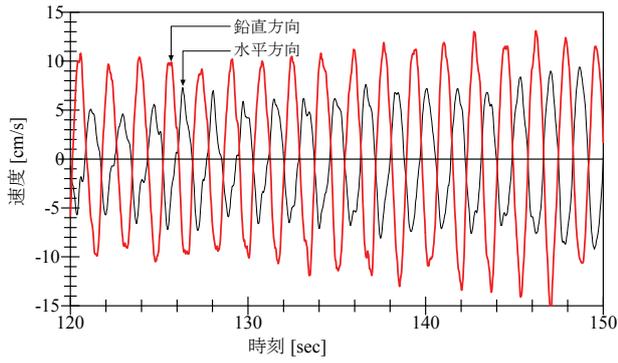
b) パワースペクトル

図 4-32 桁 L/4 点（Node 15）における鉛直方向の加速度波形とパワースペクトル

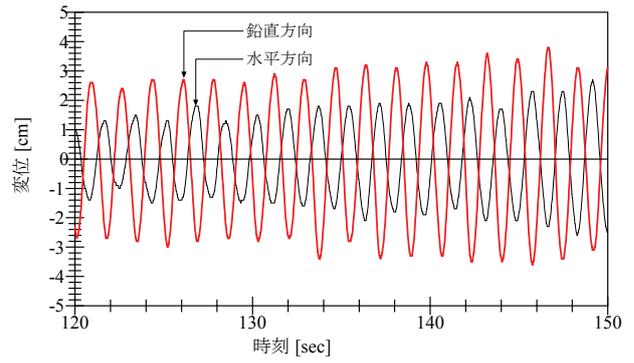
次に、桁 L/4 点（Node 15）における加速度波形を、1 回積分することで速度波形を、2 回積分することで変位波形を計算した。桁 L/4 点における速度波形、変位波形を、図 4-33 にそれぞれ示す。これらの図より、速度、変位ともに、鉛直方向が大きいことがわかり、最も大きな振幅は、速度で $\pm 15\text{cm/s}$ 、変位で $\pm 3.5\text{cm}$ となった。

歩行者に設置したセンサ（Node 13）の加速度波形、速度波形および変位波形を、図 4-34、図 4-35 にそれぞれ示す。これらの図より、変位振幅は水平方向が極めて大きく、歩行者の変位振幅は、水平で $\pm 28\text{cm}$ 程度であることがわかる。

図 4-36 に、歩行者と桁（L/4 点）の変位波形を示す。歩行者の水平変位波形と桁（L/4 点）の水平変位波形は、ちょうど逆位相で推移しており、同調していることが確かめられた。これらのことから、歩行者の水平挙動によって、歩道吊橋が大きく励起されたものと推測された。

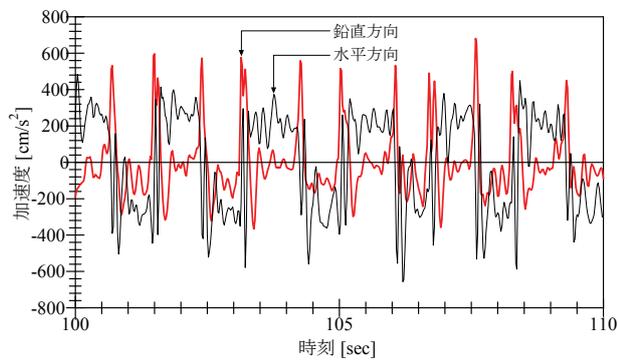


a) 速度波形

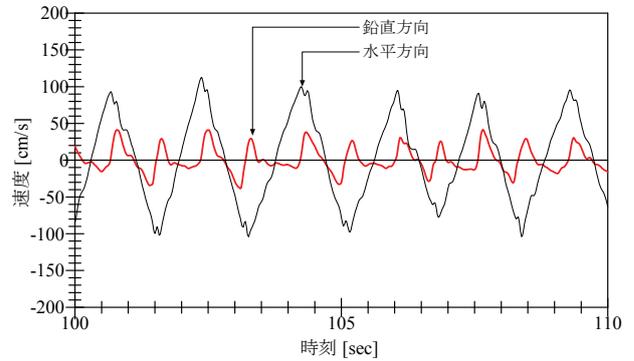


b) 変位波形

図 4-33 桁 L/4 点 (Node 15) における速度波形と変位波形



a) 加速度波形



b) 速度波形

図 4-34 歩行者 (Node 13) の加速度波形と速度波形

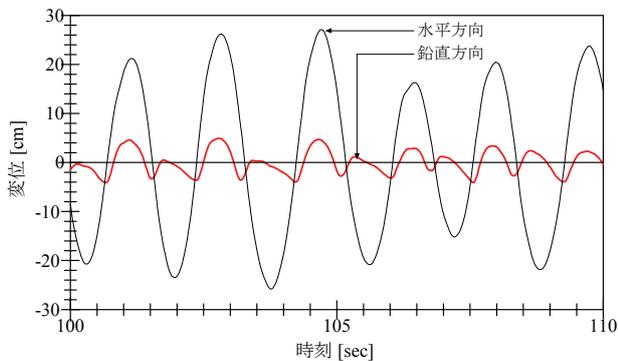


図 4-35 歩行者 (Node 13) の変位波形

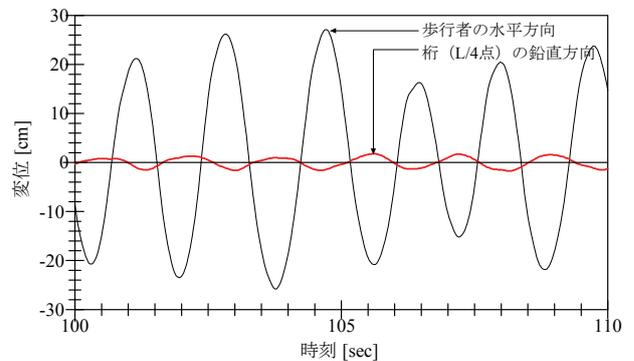


図 4-36 歩行者と桁 (L/4 点) の変位波形の比較

さらに、歩行パターン C の計測データより、卓越する固有振動数に対する振動モードの推定を行った。推定は、ERA によった。図 4-37 に推定された振動モードを、また、図 4-38 に固有振動解析による固有振動モードを、それぞれ示す。図より、ねじり逆対称 1 次モード (0.585Hz) であることがわかり、解析結果による固有振動数もほぼ同程度であることが確かめられた。図 4-33 b)からは、桁は水平方向にも変位していたが、振動モードは特定できなかった。固有振動数はほぼ同じであることから、この水平成分についても連成振動の影響が考えられた。本橋では耐風索が設置されており、ねじり振動に伴って、水平方向にも変位することも考えられる。

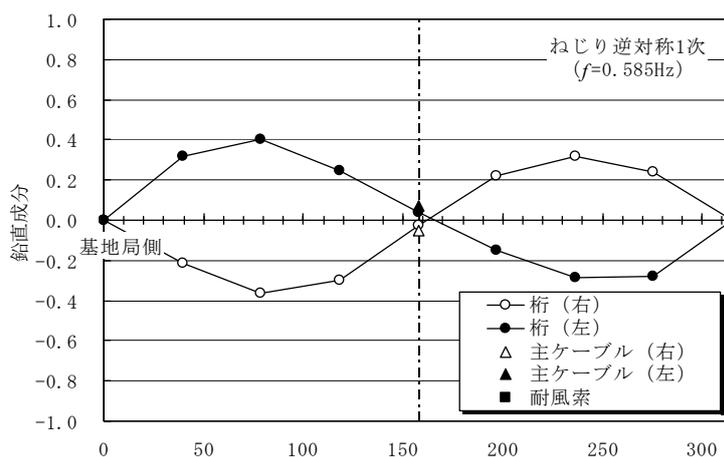


図 4-37 推定されたねじり逆対称 1 次モード



図 4-38 固有振動解析による固有振動モード (0.536Hz)

以上のことから、ねじり逆対称 1 次モードの固有振動数である 0.56Hz 付近で、歩行によって強制加振を行ったところ、歩道吊橋は大きく共振し、その振動によって不安を感じるほどであった。

(4) 振動使用性の評価

表 4-9 に、各歩行パターンの加振条件と計測された桁の最大応答値を比較して示す。応答値は、加速度、速度、変位について、水平方向、鉛直方向の 2 方向について整理してまとめた。全ての歩行パターンで、水平方向と鉛直方向で、卓越周波数がほぼ同じであること、また、2 方向で応答があることから、両者の連成モードであると判断された。

表 4-9 各歩行パターンの加振条件と計測された最大応答値の比較

歩行パターン	A	B	C
加振方法	ランダム	強制加振	強制加振
歩行者による加振周波数 (Hz)	1.7~1.9	0.86	0.50
歩行者の最大水平変位振幅 (cm)	2	5	28
桁の水平方向の卓越周波数 (Hz)	0.624	0.856	0.574
桁の鉛直方向の卓越周波数 (Hz)	0.616	0.862	0.586
桁の最大水平加速度振幅 (cm/sec ²)	20	50	50
桁の最大鉛直加速度振幅 (cm/sec ²)	50	55	70
桁の最大水平速度振幅 (cm/sec)	3	5	9
桁の最大鉛直速度振幅 (cm/sec)	2	5	15
桁の最大水平変位振幅 (cm)	0.8	1	2.5
桁の最大鉛直変位振幅 (cm)	0.5	0.9	3.5

歩行パターン A、B は水平方向が、また、歩行パターン C は鉛直方向が支配的であることがわかる。歩行パターン C については、前述した通り、ねじり逆対称 1 次モードであった。

さらに、振動使用性については、歩道橋の設計ガイドラインによると、水平方向振動に対する規定であるが、加速度振幅の限界値^{3),6)}は、100cm/sec²となっている。この限界値は、種々のガイドラインにおいて推奨値が異なるが、水平方向の固有振動数が 0.5~1.1Hz に対して、ロッキングを生じないための安全側の値となっている。

この限界値に対して、それぞれの固有振動数を考慮して、速度、変位の限界値を算定すれば、表 4-10 のようになる。表 4-9 の最大応答値と比較すると、全ての歩行パターンにおいて、限界値以下に収まっていることがわかる。しかしながら、歩行パターン C においては、実際には、不安に感じるほどの振動現象であった。特に、歩行パターン C は、ねじり逆対称 1 次モードであり、水平方向振動に関する限界値を適用することは、適切ではないと考えられる。桁がねじり振動する場合、歩行者は、左右で上下動を感じることから、振幅が小さい場合であっても、より敏感に振動を感じるものと推察される。したがって、ねじり振動に対しても適切な限界値を決定する必要があるといえた。なお、本実験による振動使用性の評価からは、ねじり振動に関する加速度の限界値は、50cm/sec² (0.5m/sec²) 程度であるといえ、水平方向よりも小さくなると考えられる。

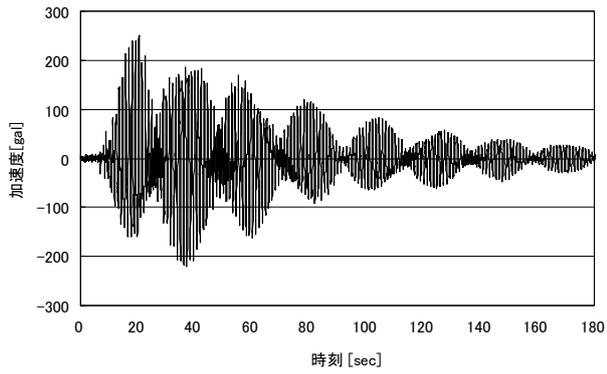
表 4-10 欧州ガイドラインに基づく振動使用性の限界値^{3),6)}

歩行パターン	A	B	C
桁の水平方向の卓越振動数 (Hz)	0.624	0.856	0.574
桁の最大水平加速度振幅 (cm/sec ²)	100	100	100
桁の最大水平速度振幅 (cm/sec)	26	19	28
桁の最大水平変位振幅 (cm)	7	3	8

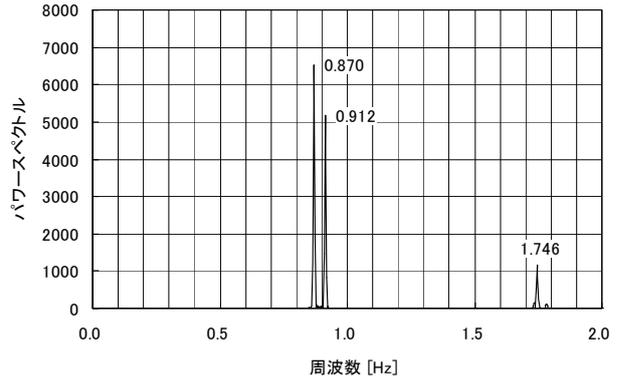
4-6. ケーブル加振による振動特性の検討

(1) 主索の振動特性

支間中央部における左右の主索 (Node 54、82) の水平方向の加速度波形とパワースペクトルを、図 4-39、図 4-40 に、それぞれ示す。左右の主索で固有振動数が同じであり、うなりのような加速度波形となっていることがわかる。また、図を略したが、鉛直方向の加速度はほとんど生じていなかった。さらに、図 4-41 に、水平方向の加速度波形を両方で重ねて示す。図より、左右の主索は逆位相で振動していたが、固有振動数は、0.870Hz と 0.912Hz と近接していることから、分離して考察することとした。

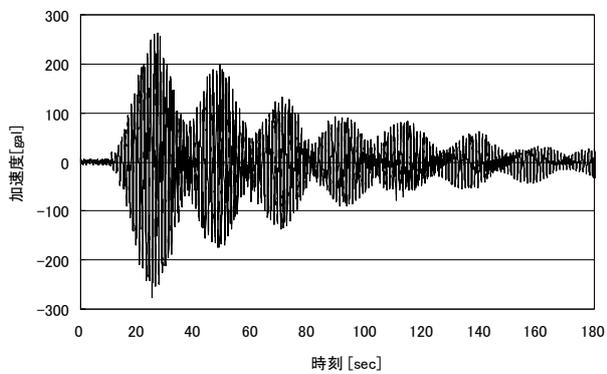


a) 加速度波形

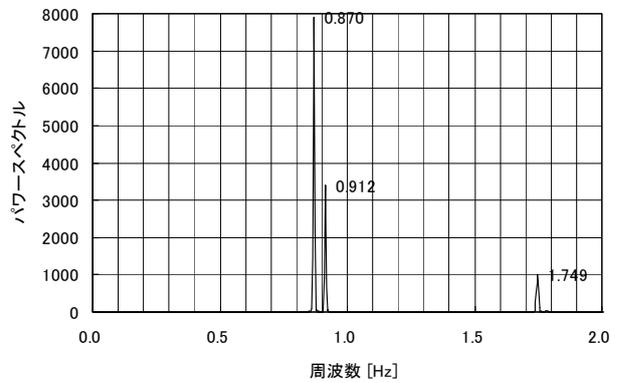


b) パワースペクトル

図 4-39 主索 (Node 54) の水平方向の加速度波形とパワースペクトル

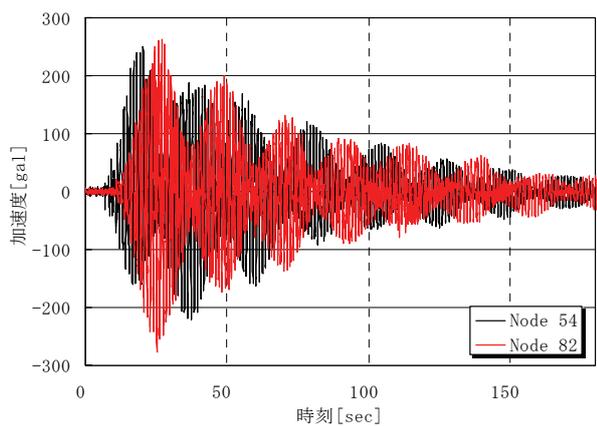


a) 加速度波形

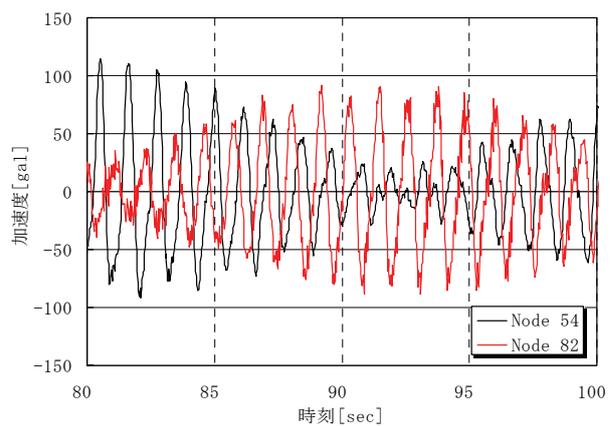


b) パワースペクトル

図 4-40 主索 (Node 82) の水平方向の加速度波形とパワースペクトル



a) 全体



b) 詳細 (時刻 : 80~100sec)

図 4-41 主索の Node 82 と 54 の水平方向の加速度波形の比較

図 4-42 に、それぞれの固有振動数に対して、バンドパスフィルタによって、抽出した水平振動波形を示す。まず、図 4-42 a)より、固有振動数が 0.870Hz では、左右の主索は、逆位相で振動していることが

わかる。これに対して、図 4-42 b)より、固有振動数が 0.870Hz では、左右の主索は、同位相で振動していることがわかる。主索には、支間中央部以外に、加速度センサがないため、詳しいモードの分析はできないが、これらの振動特性と固有振動数から、表 4-7 の解析結果を参照すれば、41 次 (0.827Hz)、42 次 (0.855Hz) の固有振動モードと推定された。図 4-43 に、固有振動解析結果から推定した固有振動モードと固有振動数をそれぞれ示す。解析結果の固有振動数は、計測結果の値より若干低い、概ね一致していることがわかる。

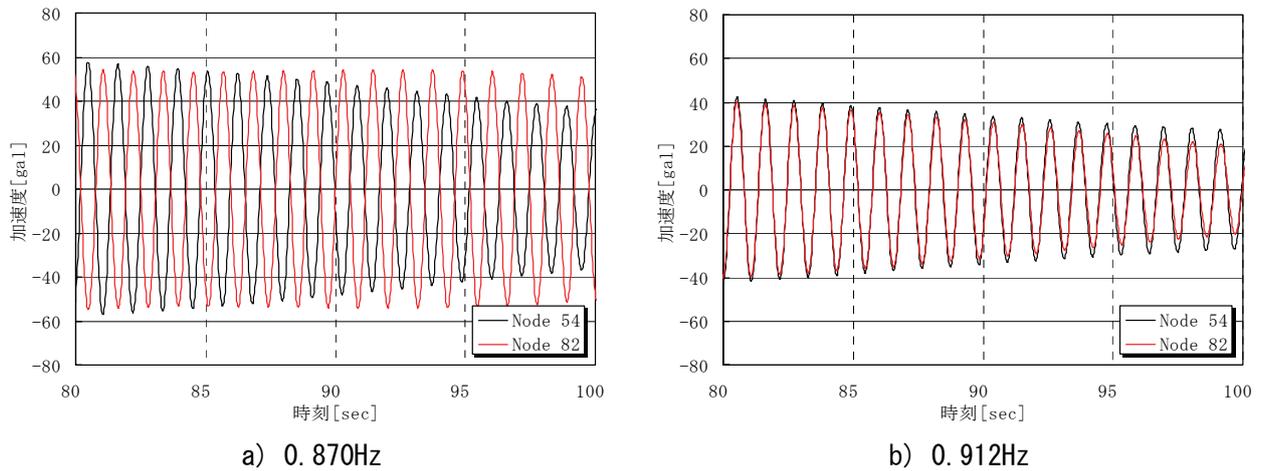


図 4-42 フィルタ処理によって分離した各固有振動数の水平方向の加速度波形

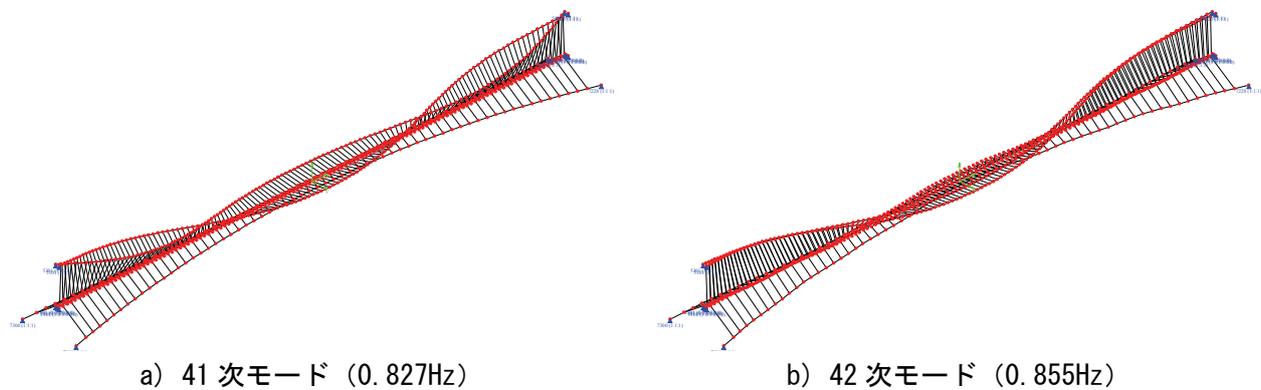
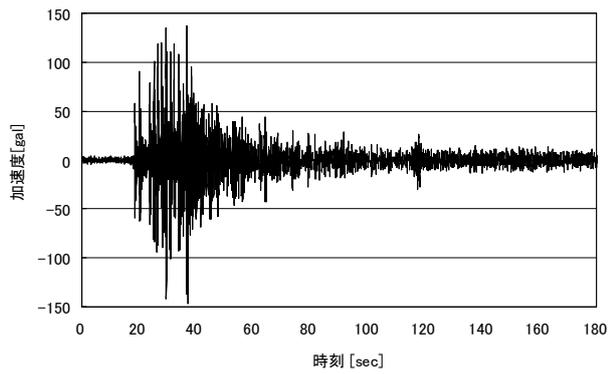


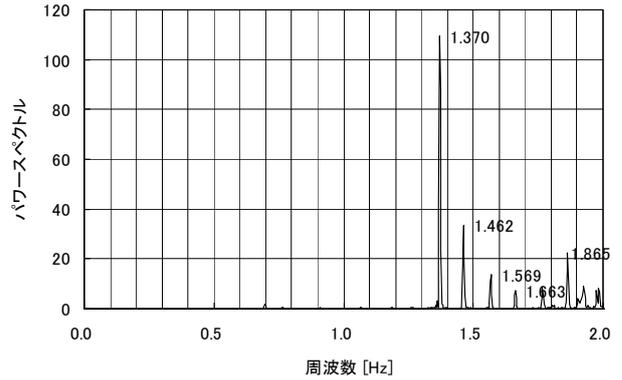
図 4-43 固有振動解析結果から推定した固有振動モードと固有振動数

(2) 耐風索の振動特性

定着部付近の耐風索に設置した加速度センサ (Node 14) の鉛直方向の加速度波形とパワースペクトルを、図 4-44 に示す。図を略したが、橋軸直角方向も同様に振動していたが、鉛直方向の振幅が大きかった。図より、卓越する固有振動数は複数存在し、これらは高次モードと考えられた。そこで、固有振動数 1.370Hz、1.462Hz 付近でバンドパスフィルタ処理を行って、それらの加速度波形を比較することとした。図 4-45、図 4-46 に、加速度波形、リサージュ図をそれぞれ示す。両者ともに、位相を生じずに、良好な減衰自由振動波形が得られているが、若干のうなりが生じていることもわかる。これは主索と同様に、左右のケーブルで同じ固有振動数となるためと考えられる。

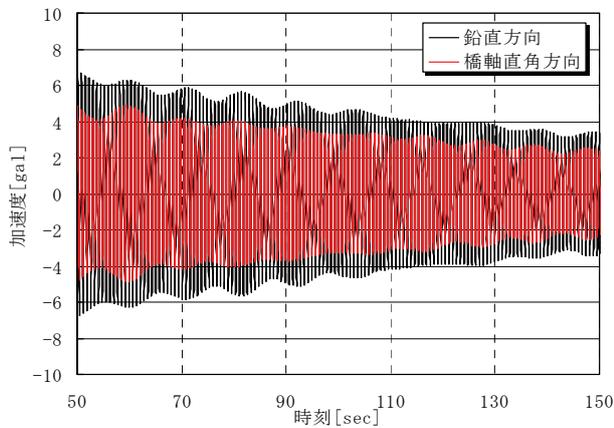


a) 加速度波形

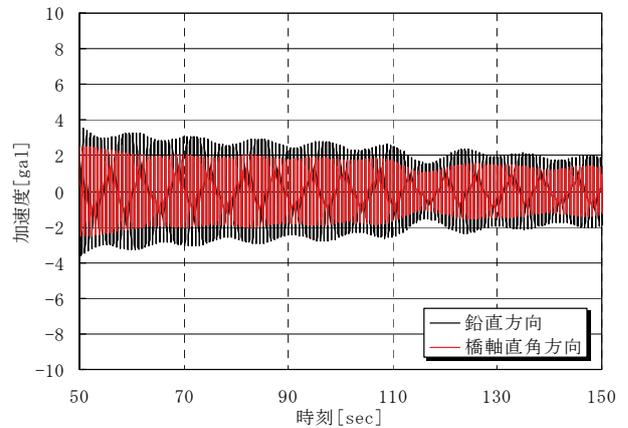


b) パワースペクトル

図 4-44 耐風索 (Node 14) における鉛直方向の加速度波形とパワースペクトル

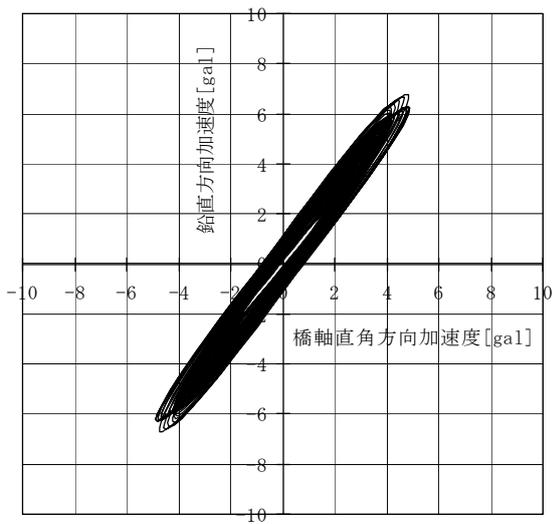


a) 1.370Hz

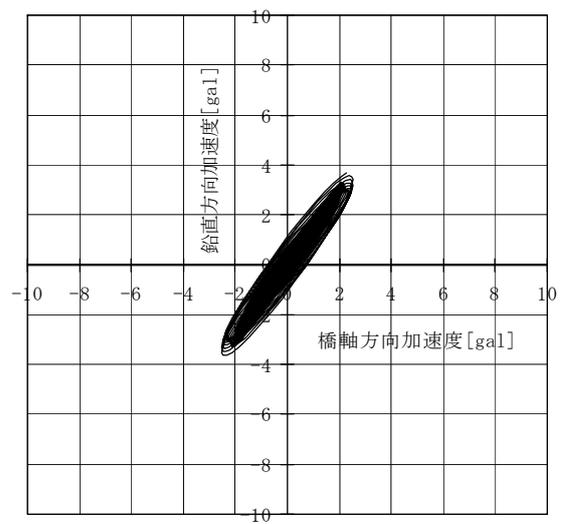


b) 1.462Hz

図 4-45 各固有振動数でバンドパスフィルタによって分離した加速度波形の比較



a) 1.370Hz



b) 1.462Hz

図 4-46 各固有振動数でバンドパスフィルタによって分離した加速度のリサージュ図 (50~150sec)

これらの減衰自由振動波形から包絡線を求め、その傾きから対数減衰率を算定した¹⁶⁾。その結果、1.370Hzの固有振動モードの対数減衰率は0.005、1.462Hzでは0.004であった。得られた耐風索の固有振動数は、表4-7に示した固有振動解析結果では60次以上となることから、今後、より高次の解析を実施して、固有振動モードの推定を行う予定である。

4-7. まとめ

本研究は、無補剛吊橋の実橋を対象に、歩調などの歩行条件をパラメータとした振動計測を行って、歩道吊橋の動的構造特性を把握するとともに、振動使用性の評価を試みたものである。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本橋では、歩行によって励起される振動モードは、ねじり逆対称1次モード、水平対称2次モードおよび水平対称3次モードであった。無補剛吊橋では、高次の水平振動モードが歩行によって卓越することが知られているが、本実験の結果、歩行によってねじり振動モードが共振し、励起される場合があることがわかった。
- (2) ねじり振動モードに対して、不安に感じる加速度の限界値は、本実験による振動使用性の評価からは、 0.5m/sec^2 程度であるといえ、水平振動モードの限界値よりも低くなる可能性があることが確かめられた。これは、桁がねじり振動する場合、歩行者は、左右で上下動を感じることから、振幅が小さい場合であっても、より敏感に振動を感じることに由来するものと推察された。
- (3) 常時微動計測によって、4つの振動モードが特定でき、固有振動解析による固有振動数と10%以内で推定することができた。また、これらの振動モードの振動数は、0.5Hz以下であり、歩行時には影響はなかった。
- (4) ケーブルの加振実験によって、主索、耐風索の減衰自由振動特性を検討した。その結果、計測された主索の振動モードは、水平振動モードと推定され、解析結果よりも測定結果の方が振動数は高かった。一方、耐風索については、振動モードは特定できなかったが、良好な減衰自由振動波形が得られ、対数減衰率を推定することができた。

ねじり振動に関する振動使用性の評価は、データの蓄積が少なく、十分に明らかにされていないため、適切な限界値の設定や設計法を確立するために、今後、さらに詳細な分析を行って検討を進めていく予定である。本研究の一部については、概要¹⁷⁾を投稿中である。

参考文献

- 1) Dallard, P., Fitzpatrick, T., Flint, A., Bourva, S. and Low, A.: The London Millennium Footbridge, The Structural Engineer, Vol.79, No.22, 17–35, 2001.
- 2) Dallard, P., Fitzpatrick, T., Flint, A., Low, A., Smith, R., Willford, M., and Roche, M.: London Millennium Bridge: Pedestrian-induced lateral vibration, Journal of Bridge Engineering, Nov. / Dec., pp.412–417, 2001.
- 3) Setra: Technical guide Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, 2006.10 < <http://www.setra.equipement.gouv.fr/Technical-guides.html> >
- 4) Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of footbridges, Guideline

< <http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/download.php> >

- 5) C. Butz et al.: Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges, Research fund for coal and steel (final report), 2008.
< <http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2003/SYNPEX/SYNPEX.html> >
- 6) 土木学会編：歩道橋設計のガイドライン、構造工学シリーズ 21、pp.51-66、2011.1
- 7) Shunichi Nakamura: Model for lateral excitation of footbridges by synchronous walking, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.130, No.1, pp.32-37, 2004.1
- 8) 川崎俊次、中村俊一、大野克紀：歩行者により生じた吊橋の水平振動計測、土木学会論文集、No.777/VI-65、pp.97-107、2004.12
- 9) 川崎俊次、中村俊一：歩行者により励起される橋桁の水平応答値の推定法、構造工学論文集、Vol.54A、pp.626-633、2008.3
- 10) 日本道路協会編：小規模吊橋指針・同解説、1984.4
- 11) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、2012.3
- 12) 日本道路協会編：立体横断施設技術基準・同解説、1979.1
- 13) 牛田満士、長山智則、藤野陽三：スマートセンサを用いた多点同期振動計測のためのマルチホップ通信システムの開発、第 65 回土木学会年次学術講演会概要集、I-425、2010.9
- 14) 漆島亮彦、長山智則、藤野陽三、宮下剛、吉岡勉、家入正隆：スマートセンサによる橋梁振動の多点計測と詳細分析～耐震補強前後の比較を通して～、第 66 回土木学会年次学術講演会講演集、2011.9
- 15) Juang, J.N. and Pappa, R.S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and modal reduction, Journal of Guidance, control, and Dynamics, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.
- 16) 中村一史、中川康治、田島遼、前田研一、張治成、謝旭、榎本剛、牛島健一：炭素繊維複合材ケーブルの減衰自由振動特性に関する基礎的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.58A、pp.207-215、2012.3
- 17) Shunichi Nakamura and Hitoshi Nakamura: Serviceability Limit States of Lateral Vibration of Footbridges Induced by Pedestrians Estimated by Field Measurements, The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hong Kong, 9-11 December 2013. (投稿中)

