

橋梁の多点挙動観測記録を用いた 減衰特性の算出に関する基礎的研究

石井 洋輔¹・八木 悟²・山田 雅行³・坂口 剛⁴
増田 仁⁵・片岡 正次郎⁶

¹正会員 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²正会員 修（工）株式会社ニュージェック DX推進グループ（〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3-20）

³正会員 博（工）株式会社ニュージェック 研究開発グループ（同上）

⁴正会員 博（工）株式会社アーク情報システム 計算技術開発部（〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2）

⁵正会員 修（工）国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

⁶正会員 博（工）国土技術政策総合研究所道路構造物管理システム研究官（同上）

1. はじめに

構造物に地震動等の外力が作用する際、構造物の振動特性の影響で応答が減衰する特性があることが知られている。この考え方は、構造物の設計計算に考慮されており、動的解析では減衰特性の値が大きく影響するなど、減衰特性は構造物の設計計算をする上で非常に重要なパラメータである。

道路橋示方書¹⁾に示される減衰特性は、既往実験結果に基づいて設計に用いる減衰定数が示されており、実橋を対象にした地震観測記録を用いた減衰特性の算出結果は直接反映されておらず、設定値の検証が不十分であることが考えられる。また、実地震時の記録を用いた減衰特性の算出事例²⁾はあるものの、事例は限られており、減衰特性の設定値の検証を行うには十分な知見が蓄積されていないことが考えられる。

国土技術政策総合研究所では、橋全体系を対象にした連続挙動観測³⁾を実施している。橋全体系の挙動をきめ細やかに観測することで、橋全体系の地震応答特性を高精度に把握できることが期待できる。

本研究は、観測した橋全体系の挙動記録のうち、微弱な地震記録と常時記録を用いて橋全体系の減衰特性を算出した。算出した減衰特性を橋の動的解析に考慮し、道路橋示方書¹⁾で示される減衰定数を用いた動的解析で得られる応答と比較した。

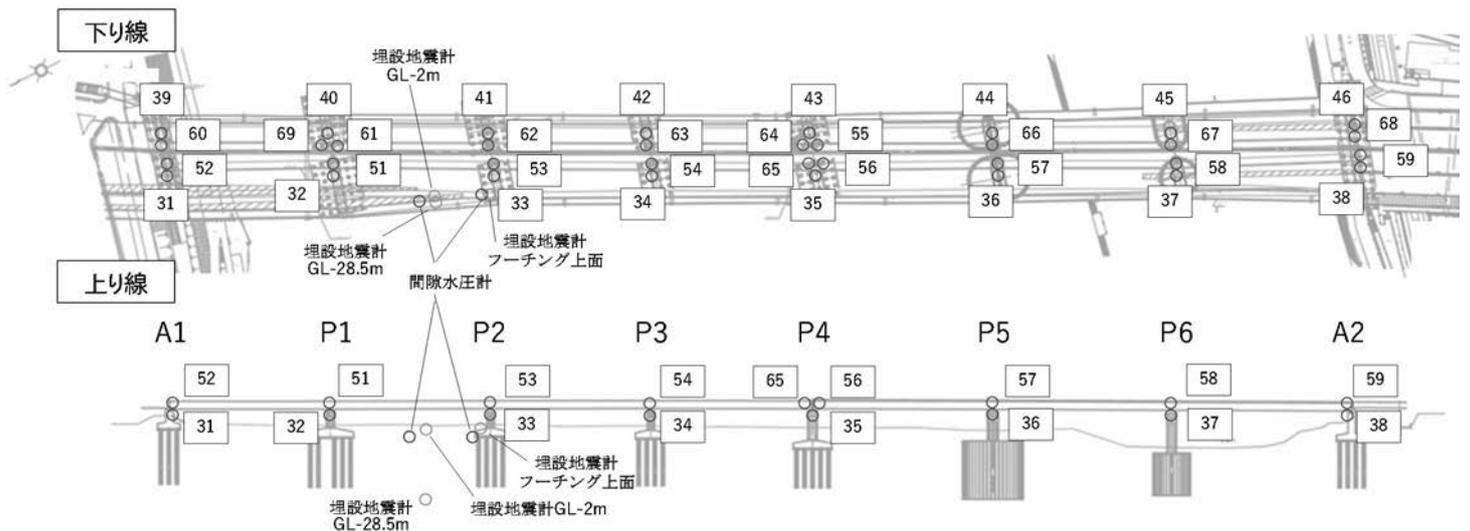
なお、観測記録から減衰特性の算出する手法には、システム同定手法の一つである部分空間法⁴⁾を用い

た。部分空間法は、挙動の連続観測記録から構造物の時々刻々の振動モード等の応答特性を算出することができるため、ヘルスマonitoringの分野に活用が期待されている手法である。また、部分空間法は、算出に地震時挙動と常時挙動の両方を用いることが可能であり、連続観測記録を用いて構造物の減衰特性を算出することができるため、本研究では、橋の多点観測記録への部分空間法の適用可能性を検証した。

2. 対象橋の多点挙動観測状況

本研究の対象橋は、橋長443.65mの4径間連続鋼非合成箱桁+3径間連続鋼非合成箱桁であり、道路橋示方書¹⁾の地盤種別でⅢ種地盤に分類される地盤上に架設されている。対象橋の地震計の設置状況を図-1に示す。対象橋では、上下線で挙動観測を実施しているが、本研究は上り線のみを対象とした。上り線には、地中の地震計も含めて合計20個の地震計が設置されており、橋全体系の挙動を連続観測している。対象橋の地震計の設置例を図-2に示し、観測に用いている地震計の性能を表-1に示す。

対象橋で観測された記録の例を図-3に示す。図-3は、2021年5月1日10時27分ごろ発生した宮城県沖を震源とする地震（最大震度5弱）を観測した記録であり、主要動と思われる揺れが100～200秒付近で観測されている。



○橋脚・橋台天端：16箇所 ○桁部：19箇所 ○地中地震計：3箇所 ○地中間隙水圧計：2箇所

図-1 橋の観測点 (図中の番号はセンサーID)



図-2 地震計の設置例

表-1 地震計の性能

センサー種別	加速度計
計測レンジ	$\pm 10 \text{ m/s}^2$
感度	1 mm/s^2 以下
計測軸	3軸 (水平2方向, 上下1方向)
動作温度	$-10 \sim 40^\circ\text{C}$ で動作可能なもの
防水性能	IP65 以上の性能を有するもの
重さ	1kg 以下

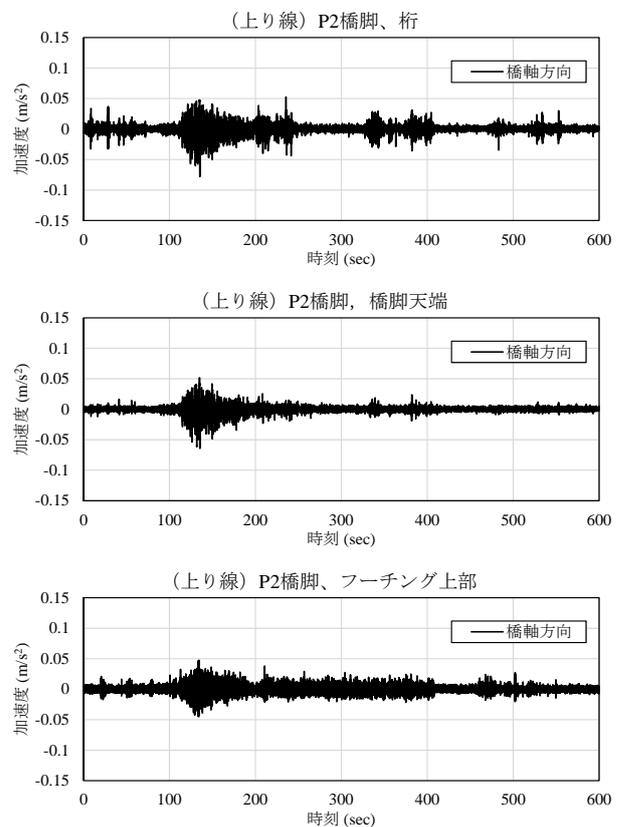


図-3 観測記録の例

3. 部分空間法を用いた減衰特性の算出

(1) 部分空間法

部分空間法はシステム同定手法の一つであり、インパルス応答や差分方程式といった入出力表現を介さずに、観測データの入力信号 $\{u_k\}$ と出力信号 $\{y_k\}$ から直接的に状態方程式と出力方程式のシステム行列を求める手法である。同定したシステム行列より、 i 次の複素固有値 λ_i (固有振動数 f_i , モード減衰 h_i)

と固有ベクトル $\{\psi_i\}$ を求めることができるため、観測データから構造物の応答特性 (固有振動数 f_i とモード減衰 h_i) を推定することが可能である。本研究では、構造物全体系の挙動データを用いるため、全体系の応答特性を算出することができると思われる。また、部分空間法は、多入出力系に適用可能な同定法であり^{5),6)}、本研究の対象橋のように同期の

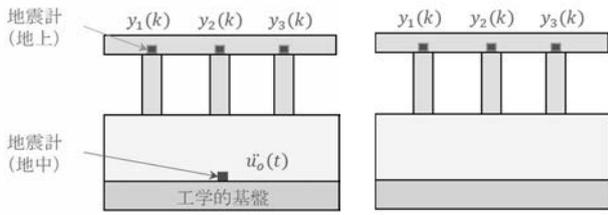


図-4 部分空間法に適用する地震計の配置例
(左側：MOESP法，右側：SSI-COV法)

取れた複数の信号からシステム同定を行うことに適していると考えられる。

部分空間法は，入力ベクトル $\{u_k\}$ と出力ベクトル $\{y_k\}$ を用いてシステム行列を推定する入出力ありの同定手法⁶⁾と，出力ベクトル $\{y_k\}$ のみからシステム行列を推定する同定手法⁷⁾という2種類の手法がある。本研究の対象橋には，対象橋の入力値と考えられる工学的基盤やフーチング部の観測記録が得られているため，両方の手法を適用することが可能である。また，入出力を用いた同定手法は地震動などが構造物に作用する場合に活用されており³⁾，出力のみの同定手法は，風や交通振動や常時微動などの荷重が明らかでない場合に活用されている⁷⁾。本研究の対象橋は，地震時を含め加速度を連続で記録しているため，両方の観測記録を適用することができる。

そこで，本研究では，入出力を用いた同定法の一つであるOrdinary MOESP法⁶⁾と，出力のみの同定法の一つであるSSI-COV法⁷⁾による部分空間法を用いて，橋系全体の複素固有値である固有振動数 f_j と減衰定数 h_i を同定した。

a) 入出力を用いた同定法 (Ordinary MOESP法)

図-4の左側に，入出力を用いた同定法 (Ordinary MOESP法) に用いる地震計の配置例を示す。本研究では，フーチング部の観測記録を入力値として部分空間法に適用した。強制加振を受ける質点系の運動方程式(1)式は，状態方程式(2)式と出力方程式(3)式で表される。

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{u}_0(t) \quad (1)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \cdot \{x(t)\} + [B] \cdot \ddot{u}_0(t) + \{w(t)\} \quad (2)$$

$$\{y(t)\} = [C] \cdot \{x(t)\} + [D] \cdot \ddot{u}_0(t) + \{v(t)\} \quad (3)$$

ここに， $[A], [B], [C], [D]$ ：システム行列

$\{x(t)\}$ ：状態ベクトル

$\ddot{u}_0(t)$ ：入力ベクトル

$\{y(t)\}$ ：出力ベクトル

$\{w(t)\}$ ：プロセスノイズ

$\{v(t)\}$ ：観測ノイズ

式(1)の運動方程式の未知量である変位 $z(t)$ や速度 $\dot{z}(t)$ は $\{x(t)\}$ に，また，入力値とする観測記録は入力ベクトルとして $\ddot{u}_0(t)$ に，出力値とする観測記録は出力ベクトルとして $\{y(t)\}$ で表現される。

本研究で用いる入出力を用いた同定法 (Ordinary MOESP法) は，この式(1)~(3)をもとに実施した。

b) 出力のみの同定手法 (SSI-COV法)

図-4の右側に出力のみの同定手法 (SSI-COV法) に用いる地震計の配置例を示す。出力のみの同定手法 (SSI-COV法) の運動方程式は(4)式となり，状態方程式は入出力ありの同定法 (Ordinary MOESP法) の状態方程式から入力ベクトル $\ddot{u}_0(t)$ を除いた(5)式と(6)式で表される。

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = 0 \quad (4)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \cdot \{x(t)\} + \{w(t)\} \quad (5)$$

$$\{y(t)\} = [C] \cdot \{x(t)\} + \{v(t)\} \quad (6)$$

ここに， $[A], [C]$ ：システム行列

$\{x(t)\}$ ：状態ベクトル

$\{y(t)\}$ ：出力ベクトル

$\{w(t)\}$ ：プロセスノイズ

$\{v(t)\}$ ：観測ノイズ

式(4)の運動方程式の未知量である変位 $z(t)$ や速度 $\dot{z}(t)$ は $\{x(t)\}$ に，また，出力値とする観測記録は出力ベクトルとして $\{y(t)\}$ で表現される。

本研究に用いる出力のみの同定手法 (SSI-COV法) は，この式(4)~(6)をもとに実施した。なお，出力のみの同定手法 (SSI-COV法) では，入力値はホワイトノイズと仮定してシステム同定を行っている。

c) 部分空間法による減衰特性算出フロー

本研究で実施した部分空間法を用いた減衰特性の算出フローを図-5に示す。初めにシステム次数 n を設定し，各観測点で観測された記録に対して部分空間法を用いて推定値を求め，推定値ごとの複素固有値 λ_i を抽出した。次に，算出された複素固有値に対して $stabilization\ diagram$ を作成し，システム次数 n によらず相関性の高い固有値 (安定極) を抽出した。最後に，相関性の高い複素固有値の集合に対して，階層型クラスタリングにより複素固有値間の類似度に基づいたグループ分けを実施し，グループの代表となる複素固有値 λ_i (固有振動数 f_j ，モード減衰

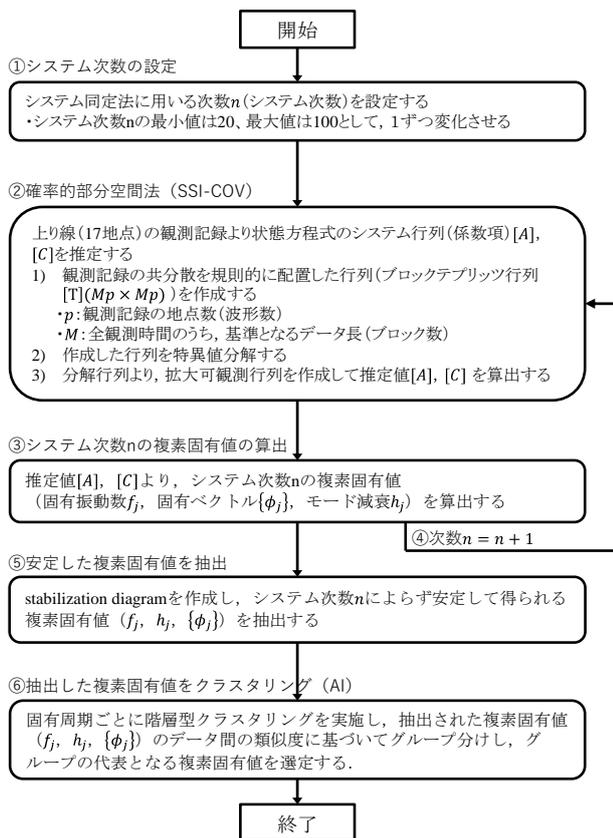


図-5 部分空間法を用いた応答特性算出フロー (SSI-COV の例)

表-2 部分空間法の検討ケース

分類	項目	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
システム同定 ①~④	手法	MOESP法	SSI-COV法		
	時間間隔 Δt	0.04 s			
	入力点数	P2橋脚1箇所	なし		
	出力点数	橋脚・橋上部8箇所、桁部9箇所、合計17箇所			
	波形長さ	2021/05/01 10:28:30:00~13:30:00:00 (90 s間)		2021/05/01 10:31:30:00~10:36:59:59 (330 s間)	
	サンプル数 N	2250 (90sec)		8250 (330sec)	
	ブロック数 M	118 (4.72sec)	150 (6.00sec)	110 (4.80sec)	
複素固有値抽出 ⑤	システム次数 最大値 n_{max}	100			
	システム次数 最小値 n_{min}	20			
クラスタリング ⑥	手法	階層型クラスタリング (群平均法)			

h_i) を選定した。

なお、部分空間法により、システム次数 n を変化させて得られた複素固有値には、ノイズ等の影響に起因した固有値が含まれる。この固有値を除去する

方法として、本研究では、Magalhãesら⁷⁾が提案した *stabilization diagram* と階層型クラスタリングによる方法を用いて、ノイズ等に起因した複素固有値の除去を実施した。

(2) 部分空間法を用いた減衰特性の評価

本研究で実施した部分空間法の検討ケースを表-2に示す。本研究では、図-3に例示した観測記録より、微弱な地震記録と交通振動等を観測している常時記録を抽出し、減衰特性（モード減衰）を評価した。本研究では、17地点の観測記録を出力ベクトルとして用いた。解析ケースは、入出力を用いた同定法（Ordinary MOESP法）と出力のみの同定手法（SSI-COV法）を両方の適用可能性を確認するため、地震動の観測データを用いたCASE1とCASE2を設定した。また、常時の観測記録による出力のみの同定手法（SSI-COV法）のCASE3を設定した。さらに、出力のみの同定手法（SSI-COV法）で、観測データ長であるブロック数 M による複素固有値の影響を確認するため、ブロック数 M を変化させたCASE4を設定した。

本研究の検討ケースに対し、部分空間法で同定された複素固有値の *stabilization diagram* を図-6に示す。図-6の凡例は、システム次数 n を $n=20$ から100まで変化させた場合に、「連続する複素固有値間の固有振動数と固有ベクトルの相関がある場合は星（☆）」、「固有振動数のみ相関がある場合は×」、「両者に相関は存在しないが計算結果で与えられた固有振動数を丸（●）」で示している。*stabilization diagram* では、明確に低いシステム次数から高いシステム次数 n までの縦に伸びる星（☆）が確認できた場合、物理的に意味のある固有値と考えられている⁷⁾。これにより、信頼性の高い複素固有値を特定することが可能であると考えられる。

図-6より、地震時の観測データを対象とした入出力を用いたCASE1と出力のみのCASE2、常時記録の観測データを対象とした出力のみのCASE3とCASE4は、それぞれ概ね類似した *stabilization diagram* を示している。これは、システム同定に用いた記録が同値なため、それぞれが類似した結果となったことが考えられる。CASE1とCASE2に有意な差がみられなかった理由として、CASE1に用いた入力値の信号が微弱で、入力値の周波数特性が同定結果にあまり反映されなかったことが考えられる。なお、CASE3とCASE4に有意な差は見られなかった。

また、CASE1とCASE2で同定された複素固有値は、低周波数側に複数の固有値が近接しており、信頼性

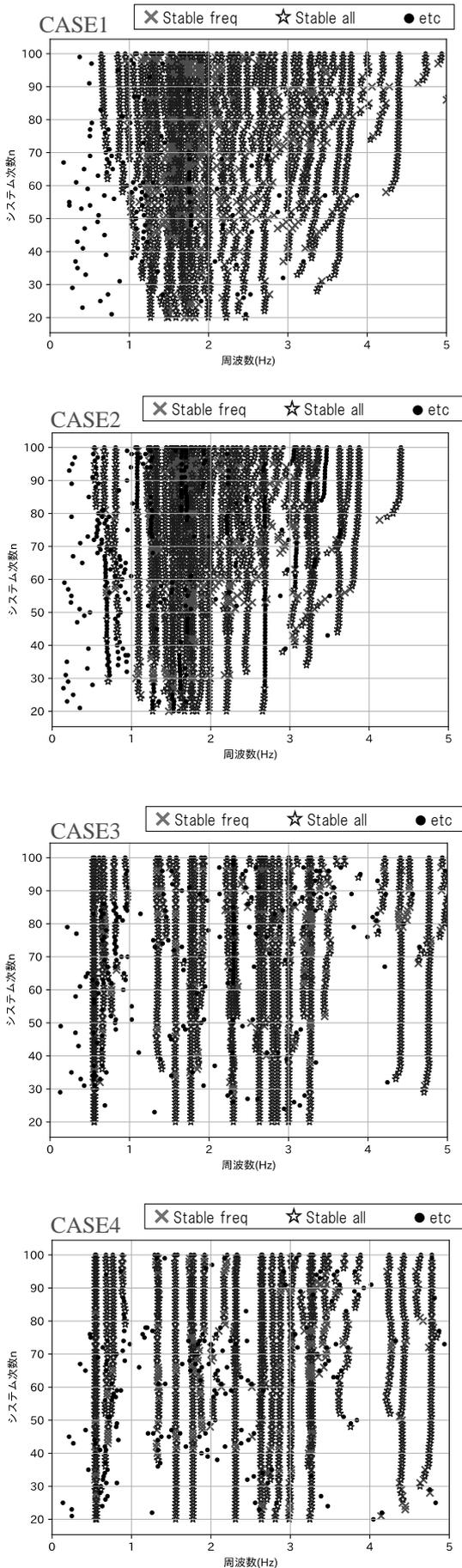


図-6 stabilization diagram

表-3 固有振動数とモード減衰の算出結果

モード次数	固有振動数		モード減衰		モード形状		データ数
	f_{mean} (Hz)	f_{std} (Hz)	h_{mean} (%)	h_{std} (%)	MAC _{mean} (%)	MAC _{std} (%)	
1	0.5434	0.0020	5.0644	0.4657	98.85	1.17	52
2	0.5555	0.0018	5.5267	0.6268	97.25	1.35	47
3	0.5588	0.0017	8.5078	0.6766	98.72	0.99	11
4	0.6886	0.0051	8.4074	1.5741	98.99	0.88	31
5	0.7708	0.0019	4.8801	0.1905	99.59	0.41	31
6	0.8997	0.0155	12.8670	2.2188	99.12	0.89	12
7	1.3329	0.0050	1.9686	0.4658	96.94	2.27	25
8	1.3392	0.0053	4.1841	0.3063	96.72	3.03	17
9	1.5571	0.0040	2.4246	0.3200	97.46	1.51	67
10	1.7412	0.0038	1.8482	0.2027	99.16	1.02	14
11	1.7720	0.0045	1.5751	0.4595	93.79	3.95	62
12	1.9128	0.0023	1.9436	0.2049	99.21	0.86	18
13	2.1669	0.0018	0.6357	0.0778	99.30	0.28	10
14	2.3114	0.0063	1.5187	0.3940	98.07	1.78	94
15	2.6397	0.0122	1.1903	0.5306	95.23	5.02	104
16	2.6852	0.0529	2.1411	0.8693	93.80	1.61	19
17	2.7770	0.0085	1.1775	0.2316	97.75	1.69	50
18	2.8707	0.0092	0.6206	0.4576	95.30	3.88	51
19	3.0037	0.0070	0.3534	0.2286	94.46	5.78	49
20	3.2400	0.0093	1.2488	0.1516	94.87	2.45	12
21	3.2417	0.0027	0.6041	0.0380	99.32	1.47	15
22	3.2693	0.0079	0.9757	0.0627	95.38	4.77	37
23	3.2849	0.0095	1.0376	0.2343	95.52	3.83	11
24	3.6692	0.0498	2.6477	0.6102	95.00	3.41	22
25	4.2469	0.0166	1.3512	0.4389	96.94	1.41	39
26	4.4163	0.0150	1.5012	0.3779	96.37	2.76	66
27	4.6006	0.0151	2.0274	0.2206	98.44	0.76	15
28	4.7762	0.0044	0.1099	0.0545	97.63	1.58	50
29	5.2299	0.0029	0.6007	0.1392	99.60	0.40	65
30	6.0738	0.0091	0.6841	0.1358	98.10	0.90	13
31	7.8872	0.0023	0.4239	0.0622	99.71	0.29	60
32	9.1472	0.0329	0.6007	0.1012	96.91	1.30	18
33	9.5800	0.0103	0.4750	0.0512	97.50	2.60	43
34	9.7554	0.0179	0.4052	0.0825	95.52	4.68	40
35	10.2514	0.0287	0.7365	0.1289	96.07	3.53	22
36	10.5089	0.0370	0.5247	0.1267	95.78	1.59	16
37	11.2776	0.0271	0.3534	0.1330	98.61	1.58	39

の高い複素固有値が存在する周波数を確認することが困難である。一方、CASE3とCASE4で同定された複素固有値は、それぞれが近接しておらず、信頼性の高い複素固有値が存在する周波数が明瞭に確認できる。これにより、部分空間法は、サンプル数Nの短い観測記録ではなく、CASE3やCASE4のようにサンプル数Nを多く抽出できる長時間の記録を用いることが適していると考えられる。

なお、CASE1は、P2橋脚のフーチング上部の観測記録を入力値としているが、橋はそれぞれの橋脚ごとで入力値が異なる可能性があり、同定結果に影響があると考えられる。また、橋全体系を対象にした部分空間法で入力値を用いる場合は、常時記録（交通振動等）の影響を受けない振幅の大きな地震記録を用いることで入力の影響を考慮することができると考えられる。

以上より、CASE1～4の同定結果を踏まえ、本研究では、CASE4の同定結果を用いて、対象橋の固有振動数とモード減衰を算出した。算出した固有振動数とモード減衰を表-3に示す。表-3より、本研究の対象橋は、比較的低次の固有振動数が多数存在することが考えられ、モード減衰hとしては、h=0.5%～2%と評価された。

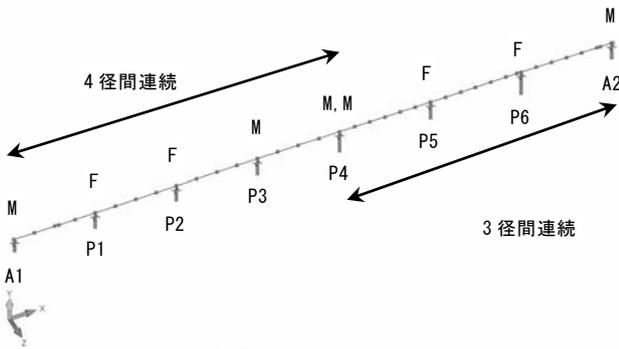


図-7 解析モデル

4. 減衰特性の違いによる感度分析

部分空間法で評価された橋全体系のモード減衰の感度の確認を目的として、対象橋の橋全体系モデルを作成し、道路橋示方書¹⁾に示されるレベル1地震動(1-III)を用いて地震応答解析を行った。部分空間法で算出された減衰特性と道路橋示方書で示される減衰特性を適用した場合での応答を比較した。

(1) 解析モデル

対象橋の上部構造、横梁、橋脚柱部、フーチングを線形のはり要素に換算した橋全体系の解析モデルを作成した。解析モデル図を図-7に示す。支承部は施工記録を基に、P1橋脚、P2橋脚、P5橋脚およびP6橋脚を固定条件として、それ以外の橋脚は橋軸方向に可動条件、橋軸直角方向には固定条件として設定した。基礎は場所打ち杭と鋼管ウエル形式であり、基礎ばね(地盤ばね)でモデル化した。なお、地震応答解析では、レベル1地震動を入力するため、橋脚等の非線形特性は解析モデルに考慮していない。

作成した解析モデルを用いて、道路橋示方書¹⁾で示される減衰定数 h (上部構造：鋼材の減衰定数 $h=2\%$ 、下部構造：コンクリート橋脚の減衰定数 $h=2\%$)より、ひずみエネルギー比例型のモード減衰を求めることを目的に、フーチング下端を固定条件とした固有値解析を行った。解析モデルの固有解析結果を表-4に示す。

(2) 解析モデルの減衰特性の設定

部分空間法の減衰特性(モード減衰)は、同定されたCASE4の複素固有値(固有振動数, モード減衰)に対して、同定精度が高いと推定された表-3のハッチング部の結果を用いた。また、道路橋示方書¹⁾の減衰定数を基に設定した解析モデルの固有値解析の結果は、有効質量が大きい複素固有値 λ_i (固有振動

表-4 固有値解析による固有周期の算出結果

次数	固有周期 (Hz)	固有周期 (秒)	累計有効質量比(%)		有効質量(tonf/G)	
			Tx	Tv	Tx	Tv
1	1.338	0.7476	1	2	218	489
2	1.398	0.7151	1	3	52	334
3	1.434	0.6974	1	3	160	69
4	1.857	0.5384	3	4	479	240
5	2.072	0.4826	3	15	31	3344
6	2.155	0.4640	4	18	245	1045
7	2.762	0.3620	4	30	6	3501
8	3.121	0.3204	20	30	4955	5
9	3.488	0.2867	38	30	5435	3
10	4.946	0.2022	42	30	946	3
11	5.256	0.1903	42	30	107	68
12	5.310	0.1883	43	30	219	44
13	5.985	0.1671	43	30	24	0
14	6.110	0.1637	43	30	48	21
15	6.554	0.1526	43	30	64	1
16	7.327	0.1365	43	30	80	18
17	7.483	0.1336	44	30	68	0
18	8.014	0.1248	47	30	1025	0
19	9.925	0.1008	47	30	1	3
20	10.703	0.0934	47	30	4	2
21	10.943	0.0914	47	30	79	3
22	11.356	0.0881	47	31	2	278
23	11.479	0.0871	47	34	0	847
24	12.636	0.0791	47	35	39	181
25	12.960	0.0772	50	35	715	0
26	13.263	0.0754	50	35	23	28
27	13.786	0.0725	50	36	33	212
28	13.954	0.0717	50	36	165	0
29	15.356	0.0651	51	36	27	1
30	17.313	0.0578	51	36	4	26
31	18.150	0.0551	51	36	21	11
32	18.518	0.0540	51	36	32	0
33	18.649	0.0536	51	36	0	18
34	22.107	0.0452	51	36	41	116
35	23.027	0.0434	52	37	202	98
36	23.429	0.0427	53	37	393	0
37	23.921	0.0418	55	37	750	0

表-5 設定した Rayleigh 減衰の値

	部分空間法	道路橋示方書
第1基準振動数[Hz](1次モード)	1.6104	1.2136
第1基準振動数に対する減衰定数[-]	0.0187	0.0294
第2基準振動数[Hz](2次モード)	7.0334	4.6079
第2基準振動数に対する減衰定数[-]	0.0073	0.0191

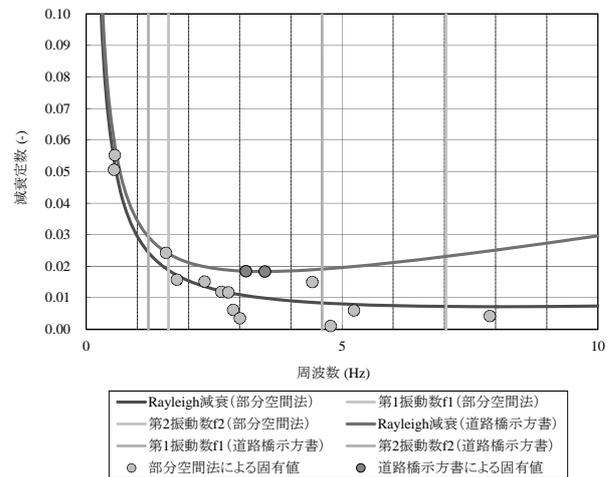


図-8 設定した Rayleigh 減衰

数, モード減衰)を抽出した。それぞれの複素固有値に対し、最小二乗法によるRayleigh減衰のパラメータ設定を行った。それぞれ、設定したRayleigh減衰を表-5および図-8に示す。

図-8より、部分空間法より設定されたRayleigh減

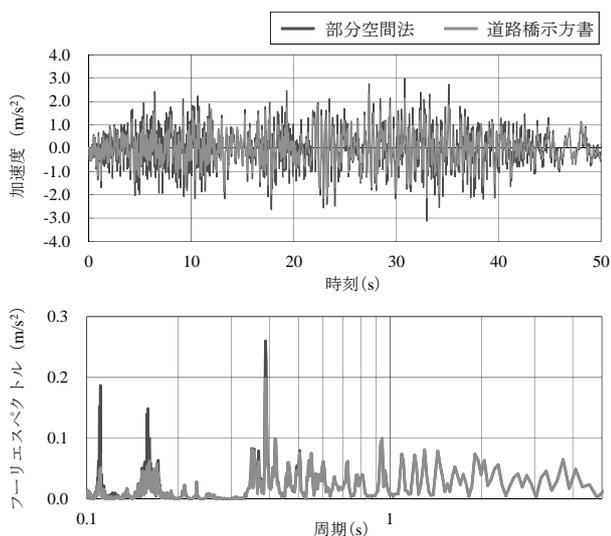


図-9 P1 橋脚天端解析結果

(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

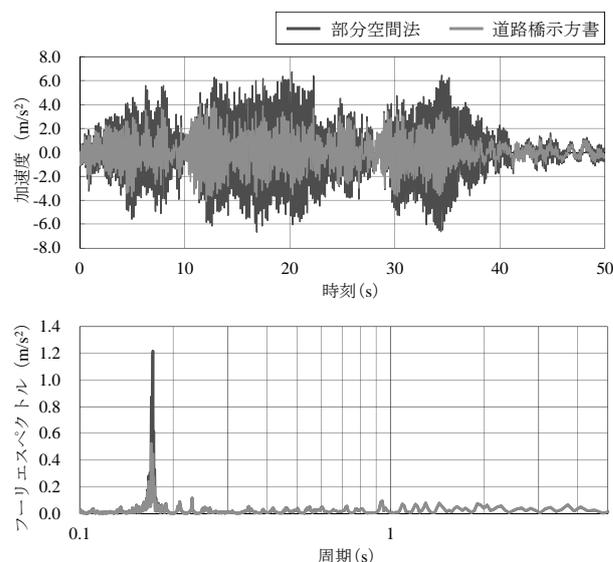


図-11 P3 橋脚天端解析結果

(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

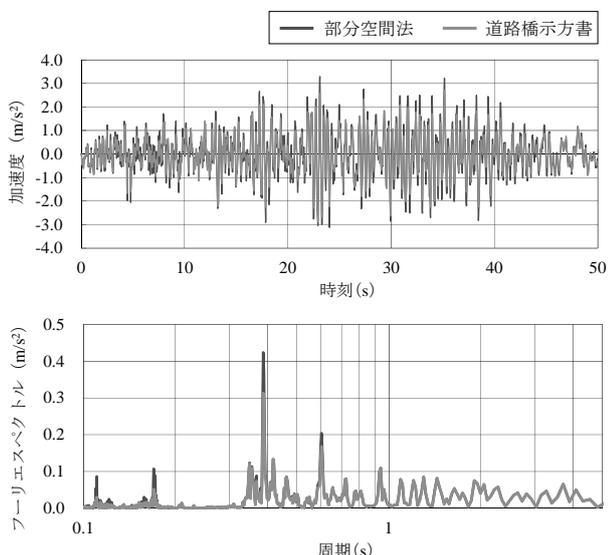


図-10 P2 橋脚天端解析結果

(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

衰は、道路橋示方書¹⁾で規定される減衰特性を用いた場合より小さい減衰特性であった。特に3Hz以上の周波数帯域では部分空間法により設定された減衰が小さくなっている。部分空間法によって同定された減衰特性は、表-2に示した入力パラメータや観測データ等の影響を受けている可能性があり、今後観測されるデータや同定結果など詳細な分析が必要である。

(3) 地震応答解析の結果

減衰特性の設定を変化させたモデルのP1橋脚、P2橋脚、P3橋脚天端の解析結果の加速度波形とフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ図-9、図-10、図-11に示す。

これらの図より、部分空間法で評価された減衰特性を用いた解析結果の方が、それぞれの橋脚の応答が大きく評価された。

また、これらの図より、P1橋脚とP2橋脚のフーリエスペクトルは、0.1秒、0.15秒、0.40秒付近に卓越したピーク振幅を持つ類似した応答値となった。P3橋脚は、0.2秒付近が卓越する等、P1橋脚やP2橋脚と異なる特性を示している。これは、支承部を自由条件で設定した影響であることが考えられる。

また、部分空間法で設定されたRayleigh減衰は、1Hz以上の高周波数側で、固有値解析のRayleigh減衰よりも小さくなる。そのため、時刻歴の加速度振幅も短周期が大きくなる結果となった。

5. まとめ

本研究では、橋全体系の挙動観測記録を用いて部分空間法を適用し、減衰特性を評価することで橋の多点観測記録への適用可能性を検証した。また、部分空間法で評価された橋の減衰特性は、道路橋示方書に示される減衰特性より小さめに評価された。

今後、別の形式の橋で観測された記録に部分空間法を適用することや、部分空間法のパラメータを変化させるなどの感度分析を実施し、適用性や算出結果を検証する。

なお、部分空間法で同定された複素固有値の信頼性をさらに確保するためには、同定結果と入出力のパワースペクトルのピーク振幅（周波数）の対比や、固有モードの対比など、より詳細な検討が必要であ

ると考えられる。

また、部分空間法は構造物の全体系の減衰特性を算出する手法であり、構造部材ごとの固有振動特性を推定することには適していない。2017年に改定された道路橋示方書では、道路橋の設計に限界状態設計法が取り入れられ⁸⁾、橋に求める共通的な性能が部材単位で明確になった。性能照査による設計合理化の観点から、動的解析で評価される地震応答を部材ごとに検証しておくことが重要であると考えられるため、構造部材の減衰特性等を算出する手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 2) 服部匡洋，大石秀雄，加藤祥久，中村真貴，馬越一也，篠原聖二：長大トラス橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.75, No.4（地震工学論文集第38巻），I_476-I_484, 2019.
- 3) 石井洋輔，山田雅行，羽田浩二，荒木正之，増田仁，片岡正次郎：地盤－橋全体系の強震モニタリングシステムの構築へ向けた技術検証，日本地震工学会・大会-2020 梗概集，2020.12
- 4) 肥田剛典，永野正行：部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第701号，932-932, 2014.
- 5) M.Verhaegen and P.Dewilde：Subspace model identification Part 1. The output-error/state-space model identification class of algorithm, Int. J. Control, Vol. 56, No. 5, 1992, pp.1187-1210.
- 6) B. Peeters：System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- 7) F. Magalhães, A. Cunha, E. Caetano：Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.23, pp.316-329, 2009.
- 8) 国土交通省：「橋，高架の道路等の技術基準」（道路橋示方書）の改定について，
https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000862.html（2021年6月25日閲覧）