

部分空間法に基づくシステム同定による 橋全体系の減衰特性の推定

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）
E-mail: ishii-y92ta@mlit.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 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）
E-mail: yagist@newjec.co.jp

³正会員 株式会社ニュージェック 研究開発グループ（〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目 3-20）
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

⁴正会員 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）
E-mail: sakaguchi.go@ark-info-sys.co.jp

⁵正会員 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）
E-mail: masuda-h92ta@mlit.go.jp

⁶正会員 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（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1）
E-mail: kataoka-s92rc@mlit.go.jp

減衰特性は構造物の設計計算をする上で重要なパラメータである。本研究では、橋全体系の連続挙動観測記録より、微弱な地震による観測記録と常時振動の記録を用いて橋全体系の固有周期と減衰特性を算出した。固有周期と減衰特性の算出には、部分空間法に基づくシステム同定を用いた。本研究は、橋全体系の振動特性を算出する手法の開発を目的とし、橋の多点観測記録を対象として部分空間法の適用可能性を検証した。本研究の対象橋の橋全体系のモード減衰は、部分空間法に基づくシステム同定により、 $h=0.5\%\sim 2\%$ と評価された。

Key Words: system identification, subspace method, entire highway bridge system, natural period, damping characteristics

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、動的解析では応答値に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いない。そのため、設定値の検証が不十分であることが考えられる。また、実地震時の記録や

実測記録を用いた橋の減衰特性の算出事例^{例えは 23)}はあるものの、事例は限られており、橋の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、橋全体系の挙動観測を目的として、一つの橋に地震計を密に配置し、加速度を多点で連続観測している⁴⁾。橋全体系の挙動をきめ細やかに観測することで、橋全体系の振動特性や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固有周期と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

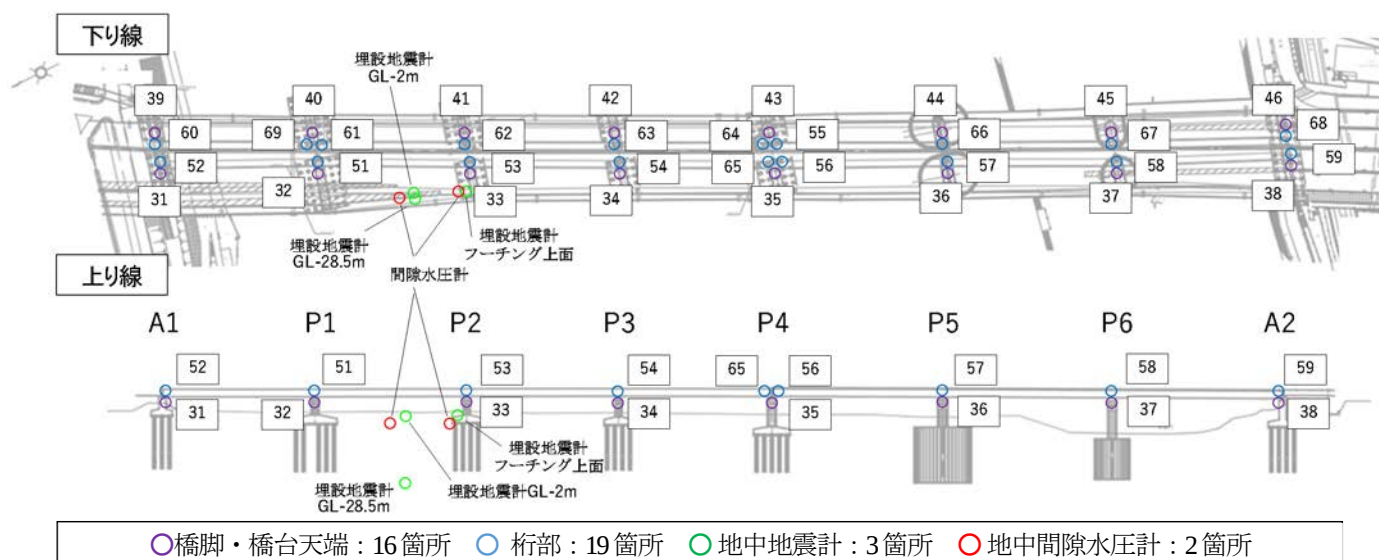


図-1 橋の観測点 (図中の番号はセンサーID)

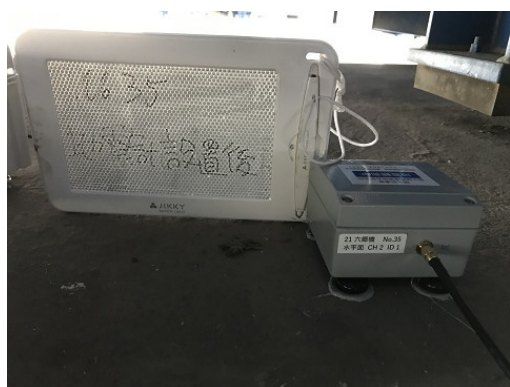


図-2 地震計の設置例

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

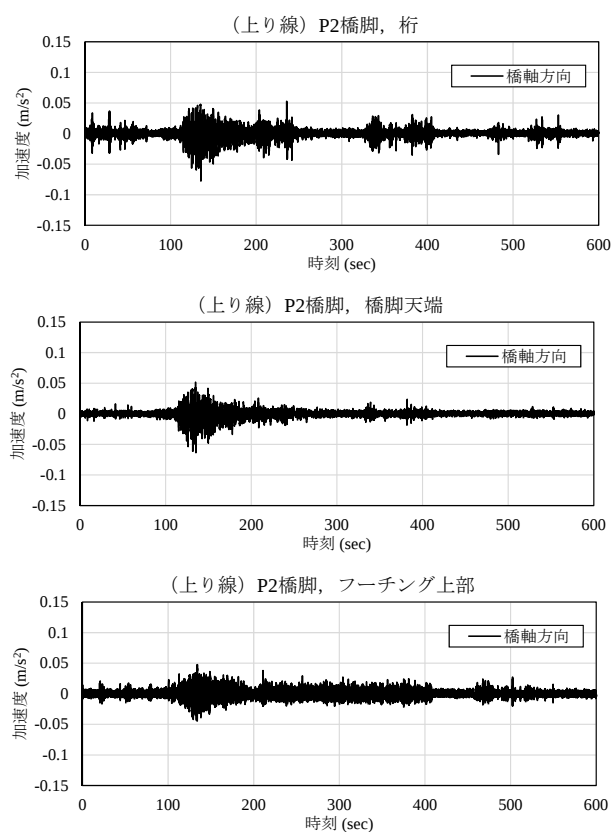


図-3 観測記録の例

的解析で得られる応答と比較した。

なお、観測記録から橋全体系の減衰特性を算出手法には、システム同定手法の一つである部分空間法⁹⁾を用いた。部分空間法に基づくシステム同定は、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振動特性を算出することができるため、ヘルスマモニタリング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。そのため、本研究では、橋全体系の減衰特性等の振動特性を算出手法の開発を目的とし、橋の多点観測記録を対象として部分空間法の適用可能性を検証した。

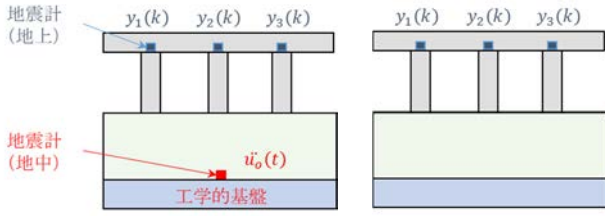


図-4 部分空間法に適用する地震計の配置例
(左側：MOESP法，右側：SSI-COV法)

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⁹⁾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 分ごろに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。

3. 部分空間法に基づくシステム同定を用いた橋全体系の固有周期と減衰特性の算出

(1) 部分空間法に基づくシステム同定

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振動特性（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、全体系の振動特性を算出することができると考えられる。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⁹⁾、本研究の対象橋のように同期の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⁹⁾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⁹⁾、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⁹⁾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_i とモード減衰 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。

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

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

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

ここに、 $[A], [B], [C], [D]$: システム行列

$\{x(t)\}$: 状態ベクトル

$\ddot{u}_o(t)$: 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 $\ddot{u}_o(t)$ 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 $\ddot{u}_o(t)$ を除いた(5)式と(6)式で表される。

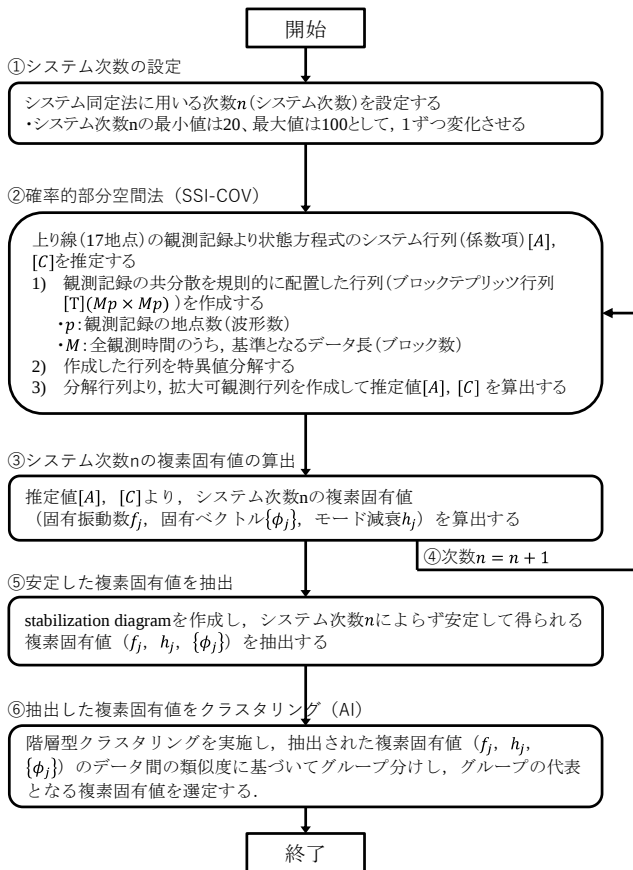


図-5 部分空間法を用いた固有周期と振動特性算出フロー (SSI-COV の例)

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

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

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

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) 部分空間法による固有周期と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。

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・橋台上部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)		700 (28.00sec)	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）			

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 に基づく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_i , モード減衰 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⁹⁾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固有周期と減衰特性の評価

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, 複素固有値 λ_i (固有振動数 f_i , モード減衰 h_i) 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手法 (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 CASE3 および CASE4 を設定した。CASE4

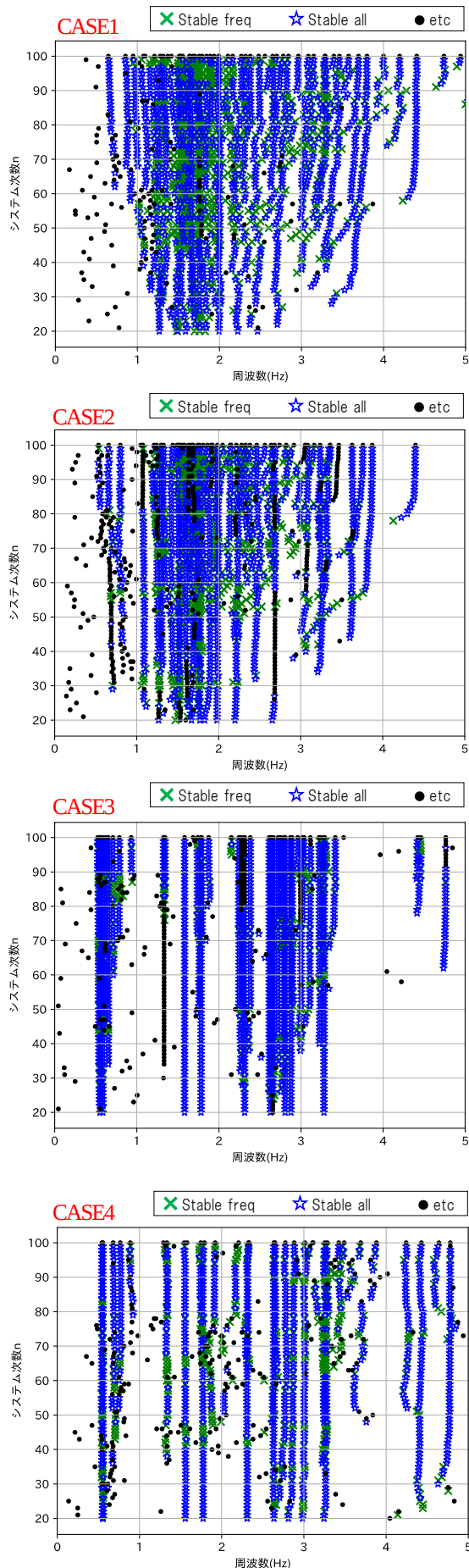


図-6 stabilization diagram

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

のブロック数 M は着目する振動数として 1.0Hz の波長を基準とし、その長さの 4~5 倍程度となるように $M=110$ として設定した。CASE3 はその約 7 倍の $M=700$ とした。

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⁹⁾。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 は、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。

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、信頼性の高

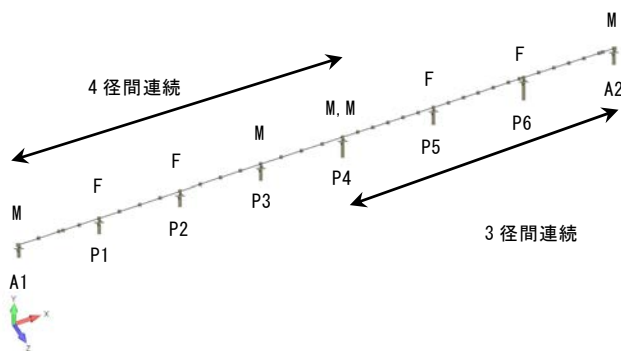


図-7 解析モデル

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。CASE3も同様に、低周波数側と3Hz付近の周波数の複素固有値を確認することが困難である。一方、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、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、ブロック数 M を大きくしない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、 $h=0.5\% \sim 2\%$ と評価された。

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³⁾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

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	Ty	Tx	Ty
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

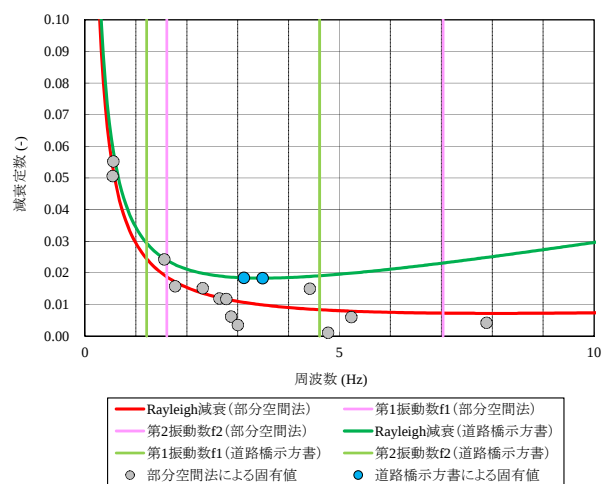


図-8 設定した Rayleigh 減衰

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ェル形式であり、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

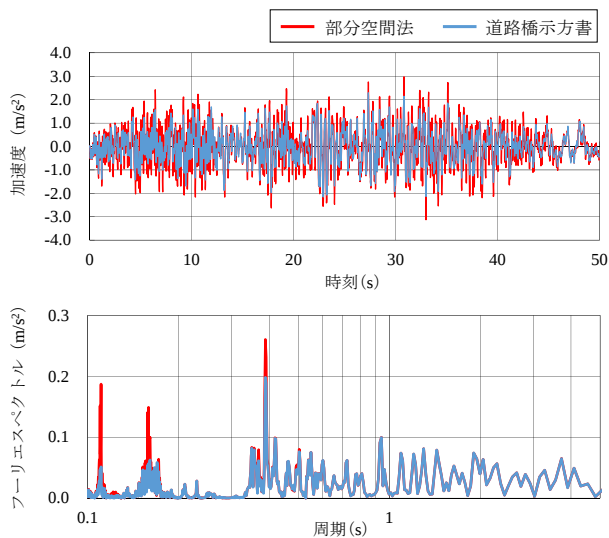


図-9 P1 橋脚天端解析結果
(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

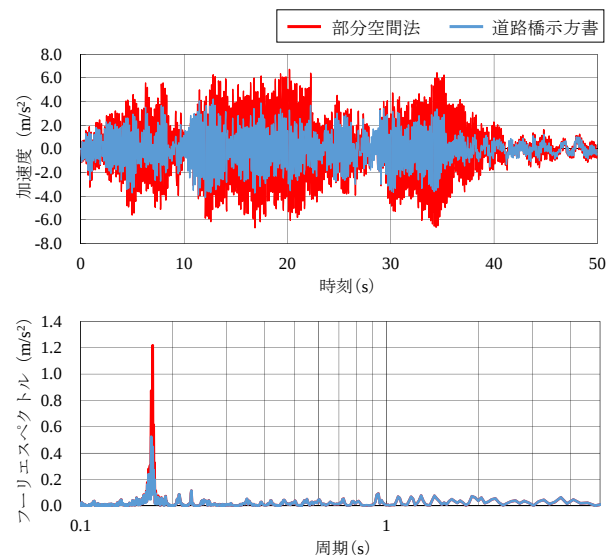


図-11 P3 橋脚天端解析結果
(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

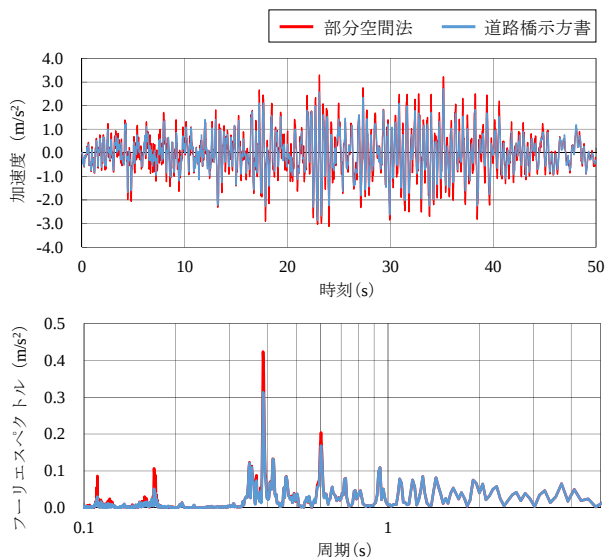


図-10 P2 橋脚天端解析結果
(上段：加速度波形，下段：フーリエスペクトル)

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⁹⁾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。解析モデルの固有値解析結果を表-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 f_j ，モード減衰 h_i ）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⁹⁾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 （固有振動数 f_j ，モード減衰 h_i ）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 減衰は、道路橋示方書⁹⁾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、道路橋示方書⁹⁾に基づいて設定された減衰特性より、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、固有周期と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。これにより、以下の知見が得られた。

- 弱い入力値を用いる OrdinaryMOESP 法や、システム同定に用いるサンプル数（データ数）が少ない場合の SSI-COV 法は、同定された複素固有値が明瞭でなかった。一方、サンプル数 N を多くした SSI-COV 法は、複素固有値を明瞭に判断することができた。
- SSI-COV 法のブロック数 M を極端に多くした場合も同様に、同定された複素固有値は明瞭でなかった。一方、着目する振動数として 1.0Hz の波長を基準とし、その長さの 4~5 倍程度となるように $M=110$ として設定したところ、複素固有値を明瞭に判断することができた。
- 橋のような振動の入力ベクトルが明瞭でない構造物に部分空間法に基づくシステム同定を適用する場合、サンプル数 M を多くし、適切なブロック数を設定した SSI-COV 法が減衰特性を同定する手法として適していると考えられる。
- 部分空間法に基づくシステム同定の SSI-COV 法で評価された対象橋の橋全体系のモード減衰は、道路橋示方書に示される減衰特性より小さい $h=0.5\% \sim 2\%$ であった。

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。

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, I_476-I_484, 2019.
- 3) 和田 一範，坂井 公俊，室野 剛隆：実測に基づく鉄道高架橋の減衰定数の特性把握と低減箇所への簡易抽出法，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），vol. 74, No.1, 1-12, 2018
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) M.Verhaegen and P.Dewilde : Subspace model identification Part 1. The output-errorstate-space model identification class of algorithm, Int. J. Control, Vol. 56, No. 5, 1992, pp.1187-1210.
- 7) B. Peeters : System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- 8) 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.

ESTIMATION THE DAMPING CHARACTERISTICS OF THE ENTIRE HIGHWAY BRIDGE SYSTEM BY SYSTEM IDENTIFICATION BASED ON THE SUBSPACE METHOD

Yosuke ISHII, Satoru Yagi, Masayuki YAMADA, Go SAKAGUCHI,
Hitoshi MASUDA and Shojiro KATAOKA

The damping characteristic is an important parameter in the design calculation of the structure. In this study, the natural period and damping characteristics of the entire bridge system were calculated from the continuous behavior observation records of the entire bridge system using the observation records of weak earthquakes and the records of constant vibration. System identification based on the subspace method was used to calculate the natural period and damping characteristics. The purpose of this study was to develop a method for calculating the vibration characteristics of the entire bridge system, and verified the applicability of the subspace method for multipoint observation records of bridges. The mode attenuation of the entire bridge system of the target bridge in this study was evaluated as $h = 0.5\%$ to 2% by system identification based on the subspace method.