

I - B277 標本分布の一致性検定による振動特性の変動要因の判定

東京大学工学系研究科 学生員 ○貝戸清之
正会員 阿部雅人
フェロー 藤野陽三

1. はじめに

構造物の振動特性の変化を利用して、その損傷度を同定する手法は、理論的にも、実験的にも数多く、検討されており、橋梁の維持管理問題への適用が期待されている。しかしながら、実用化に際しては、振動特性、例えば振動数、減衰比、モード形等の変化が、1. 構造特性の変化に起因するものなのか、2. 統計誤差と見なせる範囲内にあるのか、という判定が難しく、障害の1つとなっている。そこで本研究では、複数の振動計測結果から同定された振動特性に対して、それぞれの振動特性が属する標本分布の一致性を検定することにより、上記の判定を可能とする一手法を提案する。

2. 判定手法

振動特性の同定において、通常1回の振動計測結果から得られる振動特性は、1つである。したがって、2回の振動計測結果から振動特性が同定されたとしても、2つの数値のみからでは先の変動要因を特定することは不可能である。そこで、同定された振動特性が属する標本分布に着目する。つまり、構造系の特性変化に起因する変動であれば、振動特性の標本分布にも変化が生ずる。反対に、標本分布が一致していれば、変動は同一標本分布内での統計誤差による可能性が大きいと判定できる。これより微小な振動特性の変化であってもその要因の判定が可能となる。しかしながら、当然、

I. 限られた振動計測から振動特性の標本分布をどのようにして求めるのか。

II. 振動特性の標本分布の一致性をどのようにして評価するのか。

という問題が生ずる。Iに関して、著者ら¹⁾は、1回の振動計測結果に対し、同定段階でBootstrap法²⁾を適用することで、振動特性の分布を算出する手法を示している。IIに関しては、2回の計測で得られたそれぞれの標本分布が同一であることが棄却される確率を算出する手法を提案する。以下に、振動特性の変動要因に対する一般的な判定手順を示す。

①2回の振動計測結果に対し、Bootstrap法による同定手法を適用し、振動特性の標本分布を求める¹⁾。

②標本分布について、階級ごとの振動特性の相対頻度を求める。

③図1に示す標本分布P1とP2に対し、その一致性の棄却確率は各階級の棄却確率の足し合わせであると仮定する。もし、標本分布P2が*i*で確率1となるようなデルタ関数であれば、確定論的な検定と等価である。この仮定のもとで、標本分布P2がP1と同一分布であることが棄却される確率は最終的に、

$$P = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=K}^n p_{1j}(x) \times p_{2i}(x) \right) \quad (1)$$

と表すことができる。式中、 p_1 、 p_2 はそれぞれの標本分布の確率密度、 n は階級総数である。

3. 振動計測結果への適用

(1) 常時微動計測：

図2は、東京大学工学部11号館の常時微動計測から同定した固有振動数の年間変動の時系列である。また、

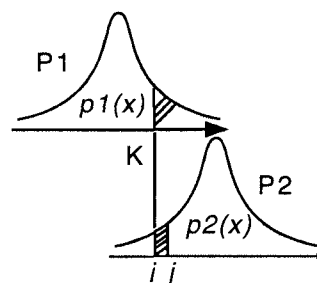


図1. 棄却確率算定法の概略

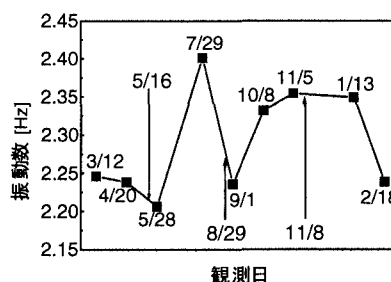


図2. 固有振動数の変動時系列

キーワード：振動特性変化、統計誤差、標本分布、検定、棄却確率

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL：03-3812-2111 (ext 6099), FAX：03-5689-7292

図中には振動計測期間内での震度3以上の地震の発生日を記した。なかでも8月28日に発生した地震は、東京で震度4を観測し、地震の前後では、固有振動数が約7%低下している。そこで、固有振動数の低下が損傷に起因しているのか、という判定に本手法を適用し、その有効性を検討した。図3には、一例として9月1日の振動計測結果に対して、Bootstrap法により算出した2000個の固有振動数の標本分布を示す。先の手順により、標本分布の同一性を検定すると、0.38の確率で同一分布に属することは棄却される。この結果より、7月29日から9月1日間の振動数の変動は、周辺の環境条件の変化による若干の構造特性の変化の影響があるものの、地震による損傷に起因しているとは考えにくい。したがって、構造特性の変化よりは、むしろ統計誤差の範囲であると判定できる。さらに表1には、同様の手順で算出した全振動計測結果に対する標本分布の同一性の棄却確率を示す。このことから年間を通していずれも棄却確率は低く、振動数の変動は、構造特性の変化に起因したものではなく、統計誤差の範囲である可能性が高いことが示唆できる。ちなみに、振動数と気温、平均風速、振動振幅との相関係数を算出したが、いずれも0.2以下で相関は低く、環境条件のなかで、振動数の変動の主要因を特定するには至らなかった。

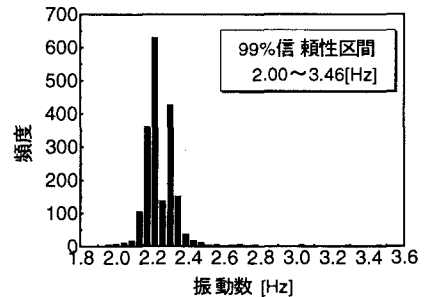


図3. 固有振動数の分布(9月1日計測)

表1. 標本分布の棄却確率

計測日	3/12-4/20	4/20-5/28	5/28-7/29	7/29-9/1	9/1-10/8	10/8-11/5	11/5-1/13	1/13-2/18
棄却確率	0.24	0.28	0.35	0.38	0.29	0.26	0.23	0.28

(2)地震時の振動計測記録：

表2は、山あげ大橋における2つの地震時の振動計測結果から同定した上部構造の固有振動数とその99%信頼性区間および最大変位である¹⁾。表に示すように、最大変位に差異がみられることから、構造系の非線形性により固有振動数に変動が現れたと考えられる。

表2. 動特性同定結果

発生日	固有振動数(Hz)		最大変位(mm)
1994年10月4日	同定値	2.34	1.02
	99%信頼性区間	2.29-2.45	
1996年2月17日	同定値	2.73	0.867
	99%信頼性区間	2.67-2.75	

先と同様の手順で、2つの標本分布の同一性の検定を行った。棄却確率は、0.99であり、この結果、両標本分布は同一分布に属しているという仮定は棄却される。今回の振動数の変動は、

損傷による変動ではないが、構造系の非線形性により構造特性が変化している点では、損傷が生ずる場合と同じ傾向を示している。したがって、本手法を損傷前後における振動特性の変動の判定に対しても適用することが可能であると考えられる。

4. まとめ

(1)振動特性の変化に及ぼす要因に関して、構造特性の変化に起因するものか、統計誤差と見なせる範囲内にあるのかを判定するために、振動特性の標本分布の一致性を検定する手法を提案した。

(2)常時微動時と地震時の振動計測結果から得られた固有振動数の変動に対し、本手法を適用し、その有効性を示した。

(3)今後は、震災前後や定期点検時における損傷の有無の判定に本手法を適用することが期待できる。

【謝辞】山あげ大橋における地震時の振動計測結果は、建設省土木研究所耐震研究室長の運上茂樹氏、栃木県土木部道路建設課橋梁係の戸田英次氏にご提供頂きました。ここに記して、感謝致します。

【参考文献】1) 貝戸, 阿部, 藤野: 不確定性を考慮した非比例減衰系の同定と構造物の性能評価への応用, 構造工学論文集 Vol.45A, pp701-712, 1999.3, 2) B.Efron, R.Tibshirani: An Introduction to the Bootstrap, Chapman and Hall, 1993,