

1. はじめに

全ての物体には、それ自体が持っている振動に関する固有のモードがあり、同一の周波数的影響を受けると共振振動を引き起こします。楽器や子供の頃に遊んだ糸電話などこの共振を利用したものです。人間の胸から腹部は、縦方向で4~8Hzあたりに、また横方向には1~2Hzあたりに固有値を持っていることが判明している¹⁾ようです。声楽家達は体型や骨格といった身体全体からステージの固有値までの共振を利用しているといえ、その苦勞が俵ばれるというものです。

一昨年度より、高専の大屋研究室とともに”宍道湖大橋の固有値の計測“をテーマに分科会として取り組んだのは、振動と言うより震動という長い周期の部分、“ガタガタ”、“ユラユラ”、“ユッサユッサ”という地震の震動が構造物に大きな影響を与えるところについてです。

本文では、宍道湖大橋の測定結果と数値解析の概算値に加えて、今年度取り組んだ鋼ゲルバ-鋸桁橋である松江大橋と新大橋、鋼連続箱桁橋であるくびき大橋の計測結果について報告します。

2. 固有値の解析

阪神大震災以降の橋脚設計²⁾では、その耐震設計に当たって、“地震時保有水平耐力法”を定めました。静的に荷重を載荷した際のたわみ曲線を一次モード(支配的な振動)形状として、地震動に対してその応答に配慮して設計するというものです。橋脚の終局時の耐力を相手に照査するため、非常に厳しいものとなりますが、この方法では先の複雑な共振現象を把握することは出来ません。やって来るいろいろな周期を持つ震動波の影響は、その対象(構造)物のもつ固有値を見ておくことが欠かせないものになります。

固有値の解析は、運動方程式(下式)の右辺の外力をゼロとする事により算出できます。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P$$

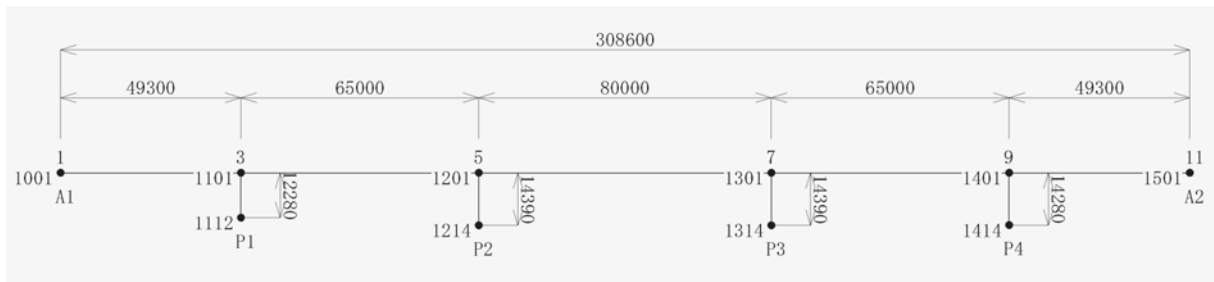
解析コードTDAPにより求めた宍道湖大橋の概算値を以下に、モデル図と固有値のモード図を次ページに掲載します。

【宍道湖大橋の固有値の概算値】

モードの次数	振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数 (橋軸)	刺激係数 (鉛直)
1	0.589	1.698	25.911	0.000
2	1.180	0.848	0.000	4.076
3	1.844	0.542	0.000	-0.003
4	2.030	0.493	0.000	9.477
5	3.066	0.326	0.000	0.621
6	3.083	0.324	0.000	14.971
7	4.139	0.242	-6.666	0.000
8	5.151	0.194	-6.834	0.000
9	5.535	0.181	-6.877	0.000
10	6.046	0.165	-6.253	0.000

表中、右欄の刺激係数はたくさんある振動モードの内、そのモードが全体にどれほどの影響を占めるかを表しています。図表のとおり、1次と7次モード以降は水平方向、2次から6次モードは鉛直面内方向の振動モードになります。特に1次モードは、ゴム支承のバネとしての

固有値と思われます。このクラスの橋梁では非常に長い周期になっているのが特徴的です。ただし、これらは速報版で、今後入力データの精査を加える必要があります。



【宍道湖大橋の解析モデル】

< 1次 > 固有周期 = 1.698(sec)



< 2次 > 固有周期 = 0.848(sec)



< 3次 > 固有周期 = 0.542(sec)



< 4次 > 固有周期 = 0.493(sec)



【解析結果】

1次から4次までのモード図

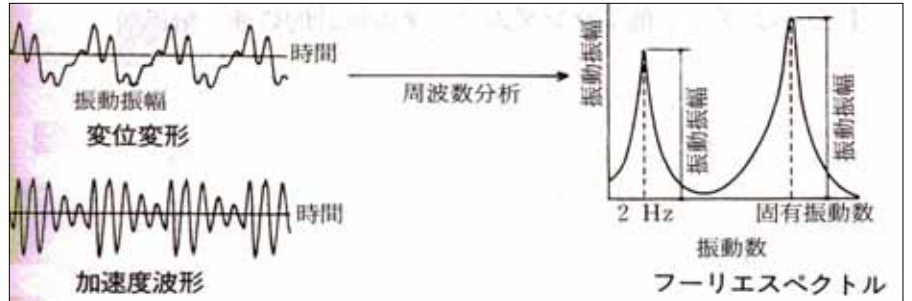
3. 計測方法と結果

常時微動から固有値を求めるため、速度計を橋梁歩道上に設置して計測を行いました。

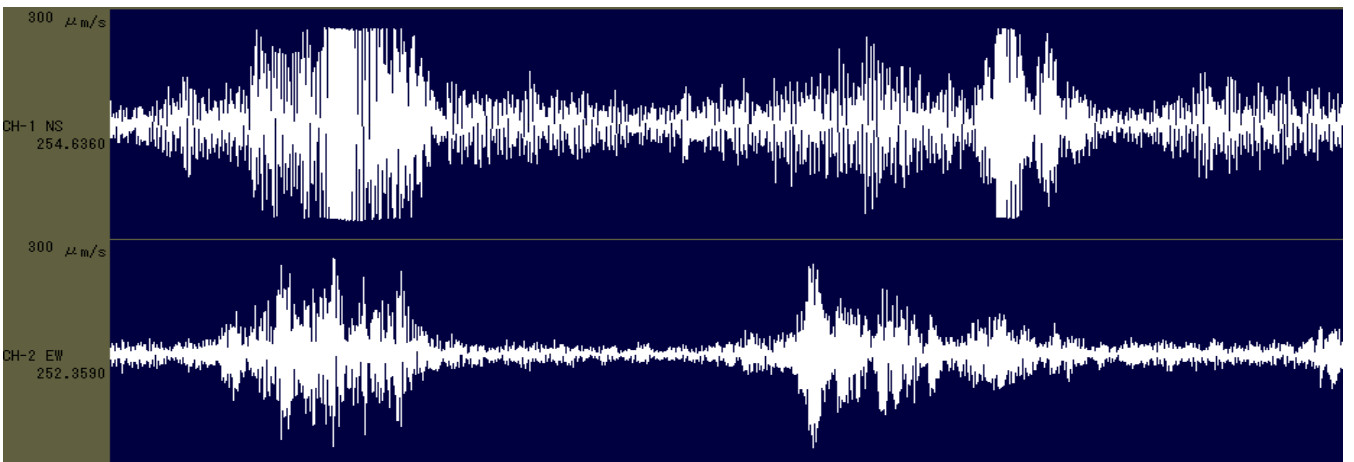
固有周期の推定は、この速度データを高速フーリエ変換(FFT)により、フーリエ・スペクトルへ変換し、卓越する成分を採用することによって求めます。



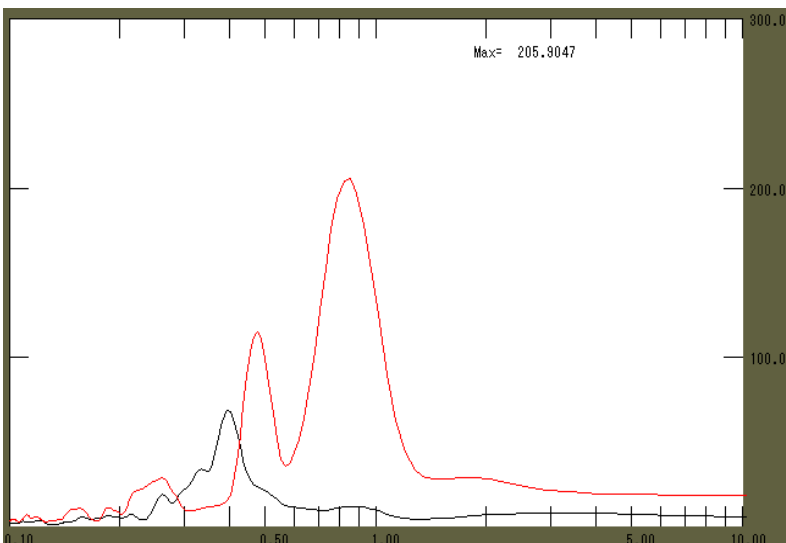
【速度計】



計測結果は、速度計のレンジに対し上下方向は速度が大きく振り切れてしまい、正常なデータを得ることができませんでした。水平2方向の速度を計測し、得られた速度時刻歴波形を下図に示します。



【計測された速度波形】

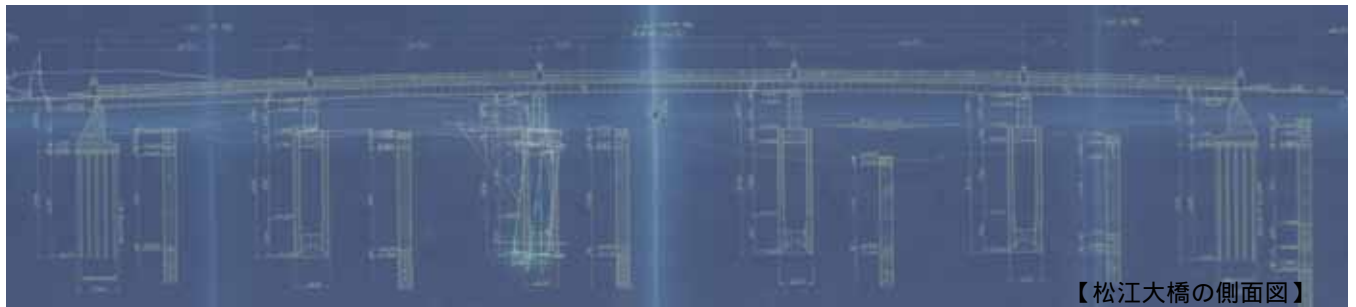


【宍道湖大橋のフーリエ・スペクトル】

得られたスペクトルから宍道湖大橋の固有周期を読み取ると、橋軸方向の固有周期は約 0.4 秒、橋軸直角方向の固有周期は約 0.9 秒となりました(左図)。

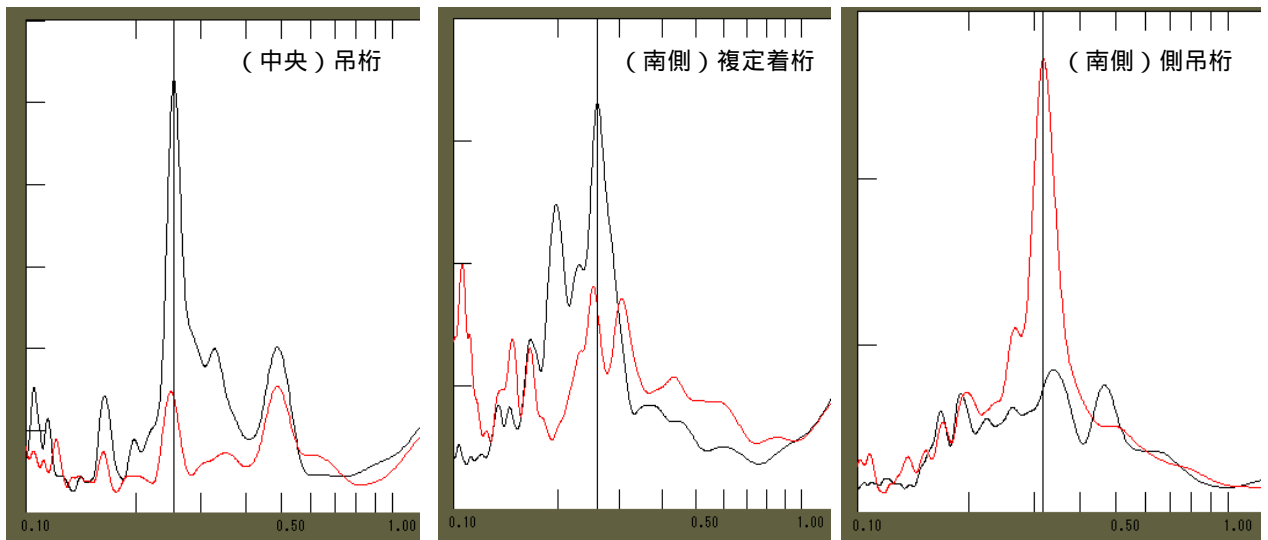
常時微動には、地盤、基礎構造、橋脚・上部構造などの個々の固有値成分を含んだものになっているはずで、今回は卓越振動のみに注目しています。これらの各成分への分解は今後のテーマです。

4. 松江大橋と新大橋の測定結果



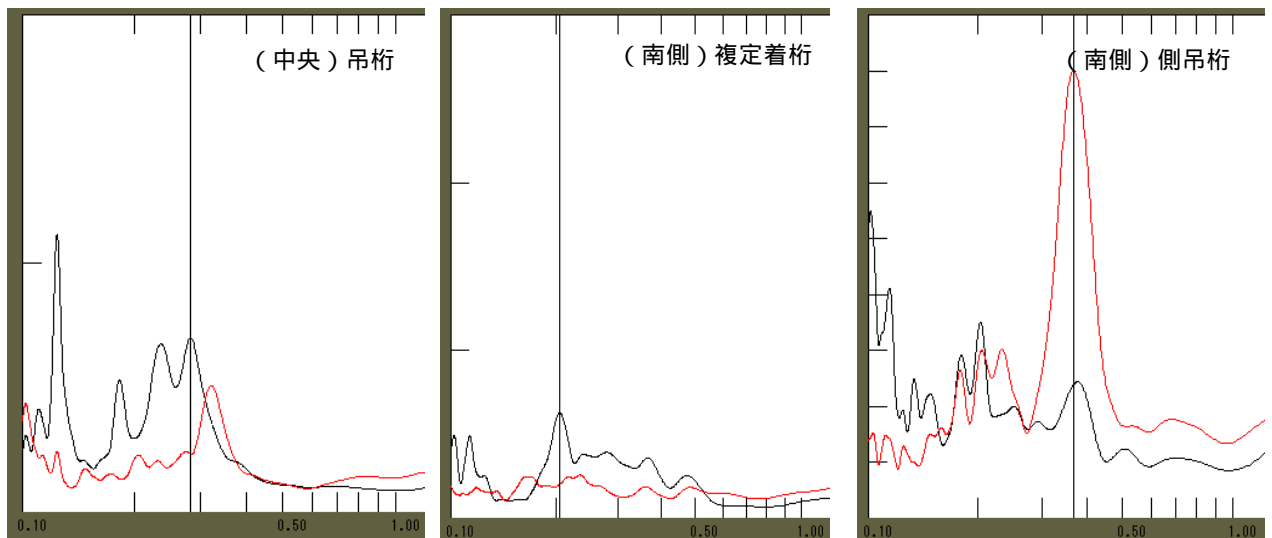
【松江大橋の計測結果】

計測ポイント 支間長(m)	(北詰)側吊桁 20.0	(北側)複定着桁 5.0+27.0+5.0	(中央)吊桁 20.0	(南側)複定着桁 5.0+27.0+5.0	(南詰)側吊桁 20.0
固有値(sec)	0.30	0.28	0.25	0.26	0.32



【新大橋の計測結果】

計測ポイント 支間長(m)	(北詰)側吊桁 18.0	(北側)複定着桁 7.0+29.0+7.0	(中央)吊桁 18.0	(南側)複定着桁 7.0+29.0+7.0	(南詰)側吊桁 18.0
固有値(sec)	0.32	0.31	0.29	0.20	0.34



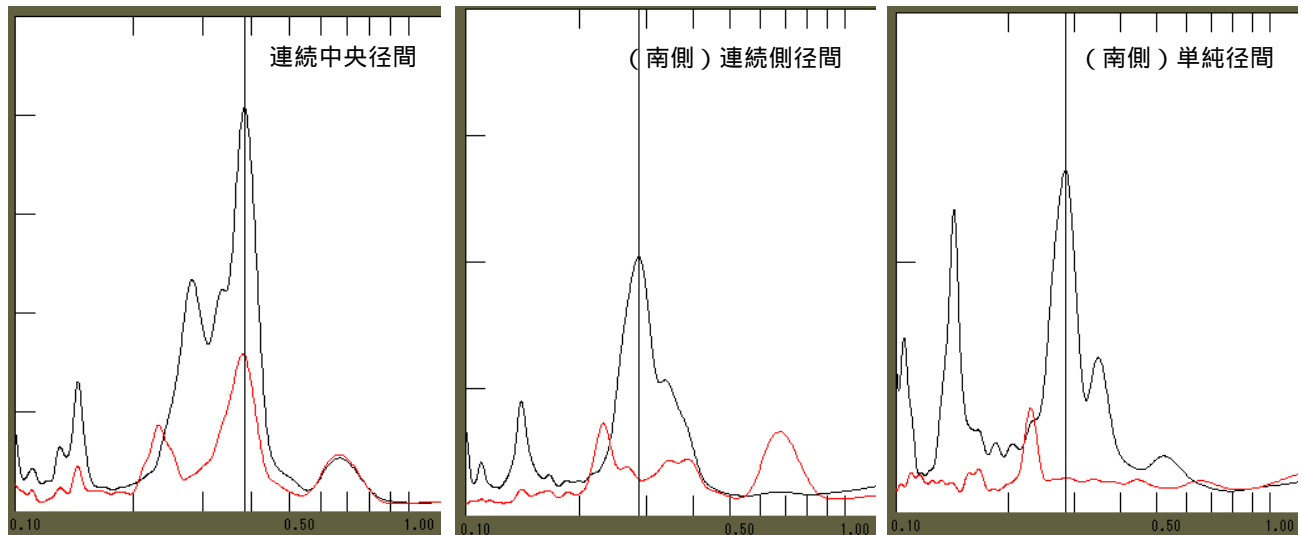
松江大橋と新大橋はともに、2 径間目と 4 径間目に、左右へ両片持ち梁を突き出した複定着桁が配置され、1・3・5 径間は、吊桁と称する単純桁が載ったゲルバー構造の鋼鈹桁です。

固有値スペクトルからは、2 橋とも概ね 0.3 秒程度の固有値が支配的であると言えます。たくさんの山をもっており、径間毎の構造形式に見合った少なくとも 5 つの代表値がある。さらに、先の宍道湖大橋の結果と同様に、それ以外の下部構造や地盤の固有値、通行車両の固有値が含まれているであろうと考えられます。これらの影響は解析的なアプローチによって、測定結果と照合しながら解明していくことが必要です。

5 . くにびき大橋の測定結果

【くにびき大橋の計測結果】

計測ポイント 支間長(m)	3径間連続箱桁 中央径間 70.0	(南側) 3 径間 連続箱桁側径間 54.0	(南側) 単純合成鈹桁 45.0
固有値(sec)	0.38	0.29	0.28



くにびき大橋は、全体 5 径間の内、前後の起終点径間部は単純活荷重合成箱桁、中央 3 径間部は連続箱桁の構成となっています。ゲルバー橋梁よりすっきりした（山の数の少ない）上図からは、連続桁の中央径間を支配する 0.4 秒程度の値と、側径間を支配する 0.3 秒程度の山が見られます。また 3 枚の図に共通して、やや周期の長い 0.7 秒と短周期の 0.15 秒程度のピークがあります。周期の長短から見て、前者はゴム支承・後者は揺れやすいいずれかの下部構造の影響か？と見えます。適切な計測が行えているか...検証とともに、構造解析が必要になります。

6 . おわりに

固有値解析は宍道湖大橋について行いましたが、上部工骨組の剛度データが荒いこと、基礎工部分の影響を考慮していないことなど、データの与え方に不十分さがあり、もう少し練る必要があります。一方、今後行う予定であるゲルバー橋の解析に当たっては、ゲルバーヒンジの取り扱い方で、常時微動レベルでは可動支承が機能していない可能性があるかもしれないことに留意が必要です。

現場計測に当たっては、全体像（複数の固有値）を的確に把握するのに、計測ポイントの選

定に配慮が必要なことが、今回の計測を通じて分かりました。

分科会発足の時点での「常時微動を計測してみる」の目標は、こころざし高く、次の内容を掲げていました。

構造物や地盤の動的挙動の推定
橋脚の洗掘などによる異常の把握
計測技術の把握と数値処理の実際を学ぶ

二つ目の“異常の把握”を実現するためには、今回までのデータをベースに、時系列データの収集と解析が必要と思われます。当面は一つ目・三つ目の目標に対し、今後の分科会のテーマ候補を以下に列挙し、報告の締めくくりとします。

1) 現場計測 【地盤、橋脚、上部工の固有値の同定・取り出し】

特に、計測地点周辺の地盤の固有値を把握すること。後述する地震波の伝播特性を理解する上でも、採れた速度記録を解析する上でも必要になります。

2) 解析 【宍道湖大橋解析モデルの精度アップ、ゲルバー桁橋の固有値解析】

現場を伴わないので、手分けをしてやってみることが出来る。今時の技術者にはこのくらいは出来るようにならねばと思われます。

3) 地震波の伝播特性 【道示波の適正化】

耐震設計（動的応答解析）に当たっての入力地震動は、これまでに観測された強震記録データから、プレート境界に生じる海洋性の大規模な地震と内陸直下型の地震に区分し、さらに地盤種別ごとに与えることになっています²⁾。本文では、応答を知るための固有値について着目してきましたが、もう一方で、入力する地震動（荷重）がそのロケーションにふさわしいものであるか、先の示方書に規定される入力地震動でこと足りるか、違う形にならないかを知っておくことも重要と思われます。“ロケーションにふさわしい入力地震動の作成”は究極のテーマでしょう。そこまで行かなくとも、出雲部や石見部がどのような震動の伝搬経路になっているか、卓越する周期成分はどのようなものになるのか、手強い大きな相手ですが、向かってみたいところです。

本報文の現場計測部分の執筆に当たり、松江高専卒業研究報告書を引用させて頂きました。松江高専大屋先生と持田君へ、また快く速度計を貸与いただいた、河原先生へ紙面を借りてお礼申し上げます。

【参考文献】

- ¹⁾ヘルツ工業「ナノテク時代の振動対策技術資料」<http://www.herz-f.co.jp/siryoku/pdf/herz01.pdf>
- ²⁾道路橋示方書・同解説 平成14年3月・新・地震動のスペクトル解析入門 大崎順彦
- 最新耐震構造解析 柴田明徳
- 鋼橋の応力頻度測定と疲労寿命の推定に関する研究 持田和彦・大屋誠 平成14年度松江工業高等専門学校卒業研究報告書