

(5) 振動測定による既存構造物の診断調査

○ 加 藤 雅 史* 島 田 静 雄*

1 まえがき

近年、構造物の設計施工技術は飛躍的に進歩し、橋梁では今や1000mを越える長大橋も建設可能となっている。一方、供用中の既存構造物が老朽化し、安全性の懸念されるものも出始めており、また、省資源、省エネルギー化の面からも、既存構造物の維持管理が重要な問題となってきている。しかしながら、構造物の健全性・耐久性の診断方法、評価基準や、診断結果に基づく補修方法がまだ確立されておらず、これらに関するデータの蓄積、研究が必要である。

既存構造物の点検、診断には、日常的な点検から特別に実施される診断調査に至るまでの各段階があり、その方法も対象とする構造物により、また各段階により種々様々である。このような方法の1つとして、振動測定による方法が考えられる。構造物の現地振動測定は、橋梁を中心として古くから実施¹⁾されており、主として完成時に動的な設計条件の検証の目的で行われてきたが、健全度調査を目的とした研究も一部で行われている。^{2)~6)}

しかし、振動測定を既存構造物の診断調査の一方法として、広く実務に適用できるようにするためには、検討しなければならない問題点も多く残されている。振動測定の適用に関する問題は、次の3項目に大別される。

ⅰ) 振動データの測定・解析システムの確立

ⅱ) 得られた結果の評価判定基準の確立

ⅲ) 診断調査における振動測定法の位置づけと他方法による結果と組合せた総合的評価法の確立

本論では、橋梁を主対象として、上記3項目のうちⅰ)、ⅱ)を中心にその考え方、筆者らの方法および実測例を述べる。

2 振動測定・解析システム

2-1 基本方針

構造物の現地振動実験には種々の方法があり¹⁾、それぞれの方法には利点・欠点があって、構造物の種類・形状、推測される振動性状、現地の制約条件等を考慮して適切な方法を選択しなければならない。特に既存構造物の診断調査として実施する場合には、構造物を供用状態で調査しなければならないことが多く、これに伴う制約条件が方法の選択に大きな因子となる。また、測定対象とする振動の特性によって、データ解析の方法も異ってくることから、測定と解析は一貫したシステムとして考えなければならないのは当然のことである。

測定・解析システムは、最近のエレクトロニクス技術の驚異的な発展からも明らかなように、システムの構成要素の改良・改善が逐次行われると考えるならば、あまり固定的なものではなく、柔軟性

* 名古屋大学 工学部 土木工学科

のあるシステムであることが必要である。このような点を加味して、システムは次のような基本方針に立って考えるべきであろう。

- a) 供用中の構造物で調査できるように、特別な準備や起振装置を必要としない方法が望ましく、常時微動や、橋梁では車両走行時の不規則振動を測定の対象とする。
- b) 測定システムは、供用中の構造物、例えば橋梁で一般車両の通行中に調査することを考慮すると、できる限り簡易化し、軽装備で小人数によって短時間で作業できることが、調査の安全性の面からも望ましい。

また、現地で商用電源の得られないことも多く、測定機器はバッテリーによるDC電源で動作するものとし、省電力化をはかる。

- c) エレクトロニクスとりわけコンピュータ関連技術の発展は目ざましく、データ解析のハードウェアは改良・変更が考えられることから、測定データはこれに対応できるような形で記録、保存する。現段階では他の方法を併用するとしても、磁気テープに生データとしてのアナログデータを記録しておくことが望ましいと考えられる。
- d) データ解析システムは、通常用いる標準的手法と、必要に応じて使用する選択的手法に分けて考え、新しく開発した手法はその時点でシステムに組み込むような構成としておく。

このうち標準的手法は、大量データを短時間で処理できるように、できる限り省力化をはかる。

- e) 測定・解析システムは簡易化、省力化をはかるので、データの確認が十分できるように、各段階にモニタリング機能を付加し、作業の後もどりがないようにする。

2-2 測定・解析システム

前述した基本方針に立って、筆者らは通常現地でデータを記録し、これを持ち帰って解析する方法を用いている。これは現地での作業の簡易化、短時間化に重点を置いているためである。

測定は専用バッテリーを搭載した小型測定車を用い、測定機器は、振動ピックアップ、直流増幅器、計録器、シンクロスコープおよび付属コード類という最小構成である。振動ピックアップとしては、電源を必要としない動電型センサーを使用し、記録計は4チャンネルのデータレコーダを使用する。同時測定できる成分数はデータレコーダにより制限されるが、機器の数量や振動ピックアップの設置、チェック等の作業性の面から考えると、4チャンネル程度が適当と思われる。ただし、各機器とも予備を用意している。これは、現地作業という点からその取扱いの不注意による故障が起きやすく、重要なことである。橋梁で一般車両の通行中に測定している様子を Photo 1 に示す。

解析システムをデータの流れによって図示すると Fig. 1 のようである。このうち標準的手法としては Digital Analysis を用いる。Real-Time Analysis は現地で結果を得たい場合や標準的手法の処理過程で補助的に使用する選択的手法に位置づけている。標準的手法による手順は概略次のようである。



Photo 1 Measurement of the Bridge Vibration

- ① オシログラフへのデータの再生（以後の作業のモニタ用）

- ② 振動データのデジタル化
- ③ データファイルの作成、振動データ図作成
- ④ スペクトル解析（図および数値出力）
- ⑤ 振動特性値（固有振動数、減衰定数等）の推定

この手順において、一部手作業や判断を要するところもあるが、大部分は機械的に処理することができる。例えば、減衰定数の推定においては、ファイルされるパワースペクトル値を用いて、求めたいピークの振動数等を指定すればデータ処理上の誤差をも補正して、減衰定数の値が出力されるようになっている。

2-3 システムの将来方向

測定・解析システムの将来を考えると2つの方向性が考えられる。一方は測定と解析の分離型であり、他方は測定解析の一体型である。

第1の方向性は、現地作業の簡易化であり、ある程度の訓練を受けたものならば誰にでもできるようなシステムを目指すものである。例えば、

Photo 2 に示すようなハンディータイプのシステムは、機器も安価で、測定者1人で手軽に作業を行うことができる。これは市販のカセットレコーダに試作した特殊増幅器を取り付け、これに振動ピックアップを接続するだけのもので、乾電池で作動する。2成分の同時測定が可能であり、測定データは前述した解析システムによって処理できる。

第2の方向性は、現地での実時間解析を目指すものである。これは最近のマイコン技術の発展、普及によって、高精度の各種データ解析が可能となりつつある。一部製品化されつつあるが、現地制約条件を考慮すると、環境条件への適合、DC電源化等のハードウェアの改良、各種ソフトウェアの開発、データの他解析機器との互換性等、未解決の問題も多い。このため、現在筆者らも機器の試作のための検討を始めている。

第2の方向性には、現地で結果を得ながら測定ができるという点に最大の利点がある。しかし、一方で第1の方向性の目指す作業の簡易化、手軽さとは相反するところがあり、一概に一方を選択し難い現状にあると言えよう。したがって、構造物の種類と、診断調査における振動測定法の位置づけによって、使い分ける必要もあろう。

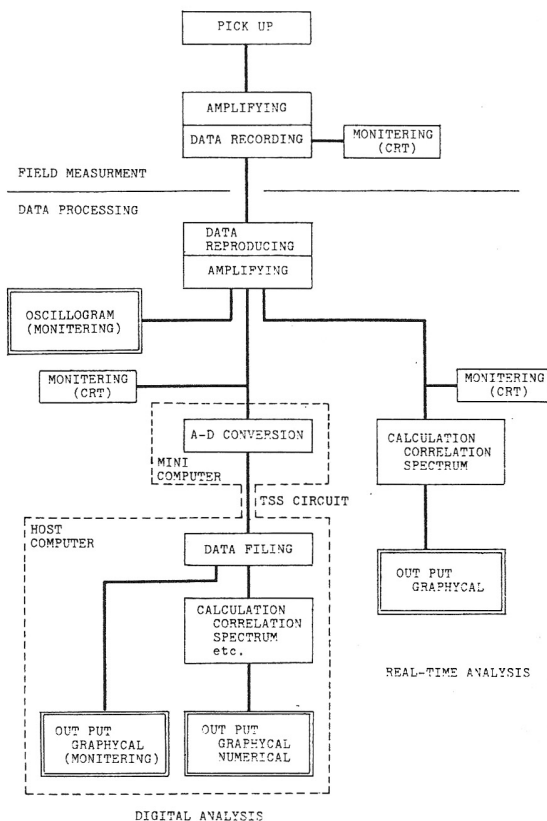


Fig. 1 Systems Flow on Data Processing

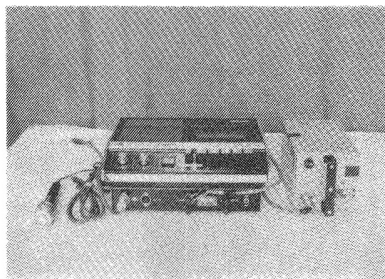


Photo 2 Portable Instruments for Field Measurement

3 評価判定基準の確立

3-1 構造物の変状と振動特性の変化

振動測定によって得られた結果から構造物の健全性を評価するためには、定性的のみならず定量的な判定基準を確立しなければならない。このためにはまず、構造物が欠陥の発生や老朽化によって、その振動性状にどの程度の変化を生じるかを把握しておく必要がある。

この目的で、川人³⁾はRC 模型梁を用い、クラックの発生状況と振動特性の関係を実験的に求めている。これによれば、クラックの増加に伴って固有振動数はかなり低下し、減衰定数はわずかに増大するという結果が得られている。

筆者らは、同様の目的で実在橋梁において、破壊過程における振動特性の変化を求める実験を実施した。実験対象のA 橋梁は、Fig.2 に示すようなPC 斜材付きπ 形ラーメン橋で、スパン中央での載荷による破壊に至るまでの載荷実験の際に、載荷の各段階ごとに除荷した状態での常時微動測定を行った。このA 橋梁は竣工後約5 年を経過しており、コンクリートのクリープ、乾燥収縮等は最終値に達していると考えられる。

振動測定は載荷実験前(1)および3 段階の載荷後(2)、(3)、(4)に実施したが、最終段階(4)の載荷は破壊直前の荷重状態であった。載荷前(1)と最終段階(4)の振動波形の一例をFig.3 に示すが、載荷前には滑らかであった波形が、最終段階にはノコギリ波的な滑らかさに欠ける波形を呈した。

測定データはスペクトル解析し、固有振動数、減衰定数を求めた。載荷実験では実験の都合上波壊には至らなかったが、実験値より推定された終局限界荷重で各段階の載荷荷重を除した載荷荷重比と、載荷前(1)の固有振動数で各段階の固有振動数を除した振動数比の関係を Fig.4 に示す。ここで、段階(1)は竣工後実験までの間の最大載荷荷重が明らかでないので、設計荷重までの載荷があったものとしてプロットした。Fig.4 より明らかなように、固有振動数は破壊に近づくにつれ加速度的に低下しており、段階(4)では、面内1 次振動数は約18%、面外1 次で約8%の低下がみられた。

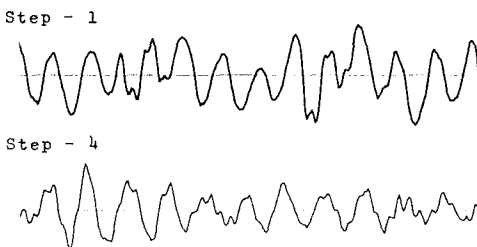


Fig. 3 Ambient Vibration Wave

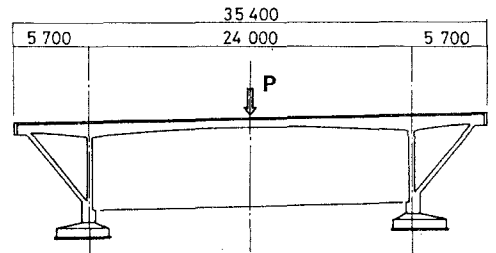


Fig. 2 A - Bridge

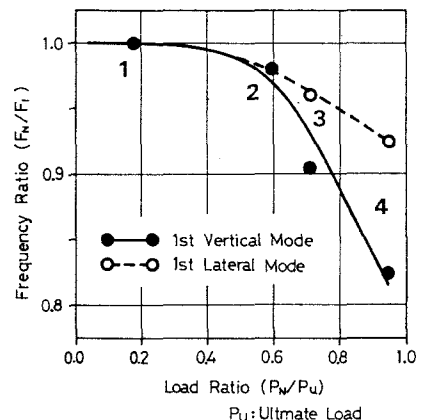


Fig. 4 Decrement of Natural Frequency under the Failure Process

一方、減衰定数については、面内 1 次振動において段階（1）で 0.01 であったものが段階（4）で 0.025 程度となり、面外 1 次は 0.01 程度でほとんど変化がみられなかった。傾向としては減衰定数は増大しているが、誤差等も考慮するとその変化はわずかであると言えよう。これは常時微動という微小振動を対象としたことにも一因があると考えられる。

3-2 供用期間中の橋梁の調査例

筆者らは、構造物が供用期間中にどのような振動性状の変化を示すかを知らるために、長期計画のもとに振動測定を実施している。ここでは約 10 年の期間において同一構造物で 2 度の振動調査を行ったもののうち、鋼橋の B、C、D 橋と PC 橋の E 橋について示す。これらは全て道路橋である。

構造物の振動性状は起振方法、測定方法、データ解析方法によって得られる結果が多少異ることがこれまでの各種実測によって示されている。このため、調査に際しては、2 度とも車両走行時の振動を同一システムによって測定した。また、第 1 回目の測定データはアナログデータとして磁気テープに保存しておいたので、2 度のデータを前述した解析システムによって処理した。なお、4 橋とも第 1 回目の測定は供用開始直前に実施したものである。

1) B 橋梁

B 橋は Fig. 5 に示すような鋼 4 径間連続箱桁橋である。この橋梁には第 2 回目の測定までの 11 年間に 6800 万台もの車両が通行しているが、舗装改良以外には特に補強等の工事は行われていない。測定結果の固有振動数と減衰定数を Table 1 に示す。第 1 回と第 2 回の結果を比較すると、固有振動数が 5 % 程度低下し、減衰定数が増大している。しかし、起振力が多少異なることや測定解析における誤差を考慮すると、この変化はわずかであると考えられ、振動波形等の分析結果を総合的に判断して、多小疲労してきているとも考えられるが、この時点では動的挙動の面からは特に欠陥があるとは思われない。

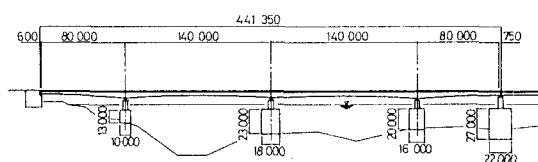


Fig. 5 B - Bridge

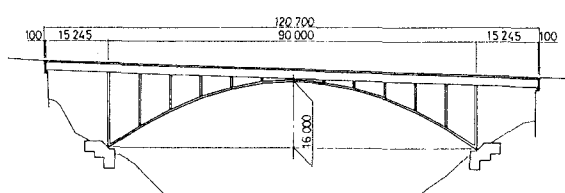


Fig. 6 C - Bridge

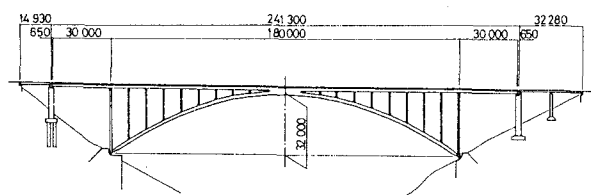


Fig. 7 D - Bridge

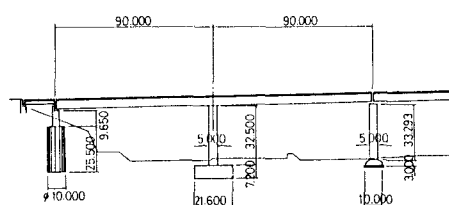


Fig. 8 E - Bridge

2) C 橋梁

C 橋は Fig. 6 に示すような鋼側径間連続逆ランガー桁橋で、第 2 回測定までの 11 年間に約 8800 万台の車両が通行している。そして、この期間中に主桁の間に補強縦桁の増設工事が行われている。測定結果は Table 1 に示すが、面外 1 次振動以外ほとんど変化はみられない。ただ縦桁増設によって床版の強度が高められ、これが全体系にも影響があったと考え、この効果分程度の疲労が打ち消されたとみることも

Table 1 Natural Frequency and Damping Constant

Bridge	Mode	Measurement No.1		Measurement No.2	
		Frequency (Hz)	Damping Constant	Frequency (Hz)	Damping Constant
B	1st Vertical	0.60	0.010	0.57	0.025
	2nd Vertical	1.00	—	0.94	0.027
	1st Lateral	1.64	0.013	1.59	0.021
C	1st Lateral	1.71	0.010	1.41	0.032
	1st Vertical	1.59	0.021	1.56	0.034
	2nd Vertical	1.97	0.020	2.04	0.039
	3rd Vertical	2.58	0.016	2.58	0.010
D	1st Vertical	0.47	—	0.47	—
	1st Lateral	0.76	0.021	0.74	0.018
	2nd Vertical	0.92	0.021	0.90	0.017
	2nd Lateral	1.66	0.016	1.50	0.015
E	1st Vertical	1.20	0.030	1.06	0.027
	1st Torsional	1.91	0.023	1.91	0.022
	2nd Vertical	2.34	0.007	2.25	0.007
	1st Lateral	2.30	—	2.27	0.014

できよう。また、この橋梁は非常によく揺れ、振幅が大きいくから床版のひびわれ等には十分注意していく必要がある。

3) D 橋梁

D 橋は Fig. 7 に示すような鋼側径間連続逆ローゼ桁橋で、C 橋と同程度の車両が通行している。また同様の縦桁増設が行われている。測定結果は Table 1 に示すようにほとんど変化はみられない。この橋梁は第 1 回測定時に縦断勾配の低い方へ橋梁がつつまむような現象が観測されたが、その後全体の構造系が安定したため第 2 回測定時にはこのような現象はみられなかった。ただ、この橋梁も C 橋と同様よく揺れるため、床版のひびわれ等には注意を払っていく必要がある。

4) E 橋梁

E 橋は Fig. 8 に示すような P C 2 径間連続箱桁ラーメン橋で、第 2 回測定までの 11 年間に C 橋と同程度の車両が通行している。この橋梁はコンクリート橋であることもあって、舗装改良以外には補修補強は行われていない。測定結果は Table 1 に示すが、面内固有振動数に 5 ～ 10 % の低下がみられる。この原因としては、起振力の違い、コンクリートのクリープ等、車両通行による剛性の低下等が考えられる。P C 橋梁でのデータは少く断定し難いが、多少なりとも剛性が低下してきていることは想像される。

3-3 今後の検討課題

これまで述べた実測例は断片的なものであり、評価判定基準を作成するにはまだまだ不十分で、さらにデータの蓄積が必要であるが、これら実測より得られた結果からも、次のような事項が課題としてあげられる。

まず構造物の健全度と振動性状の關係にどのような振動特性パラメータが有効なものであるかという点、次にそれぞれの振動特性パラメータをどのような構造物の特性値と関連づけ、その關係を定量化するかという検討が必要である。振動特性パラメータとしては種々考えられるが、Fig. 3 に示したような振動波形の形状そのものも一つとして考えられる。ただ、これに客観性を持たせるためには、

パターン認識の分野からの検討が要求される。また、波形の振幅も振動測定の際によく検討の対象とされているが、振動方向あるいは構造物上の位置によってどの程度の振幅が許容されるか、あるいはどの程度の相対的な振幅比を異常とみなすか等の定量化も必要であろう。一方、パラメータとしての固有振動数や減衰定数の変化は定性的にはほぼ明らかであるが、さらに誤差をも考慮した定量化が必要である。この際、例えばコンクリートの圧縮応力度やひびわれ、鋼材の応力度といった構造物の特性値と関連づけて、定量化をはかることも考えられる。ただ、減衰定数については構造物に相当の変状を生じない限り、単独で評価に用いることは無理なようである。

さらには基本的問題であるが、健全度にも構造物の部分的な問題から全体系としての問題まで種々あり、それぞれの健全度に決定的な影響を及ぼすと考えられる欠陥が振動性状にどの程度反映されるか、すなわちどのような系の健全度を評価しうるか、重要な課題である。この課題は診断調査における振動測定法の位置づけにも、大いに関係するものである。

また、具体的に診断調査を実施する場合に、過去の測定データがない構造物では類似構造物のデータ等をどのように用いて比較するかも問題となろう。

4 あとがき

以上、構造物の診断調査への振動測定の適用に関して、実測例および問題点、検討課題を述べた。今後さらに、現地実測をはじめ模型実験や数値解析等を通じて研究を進め、実務にひろく利用できるようにしたいと考えている。

本研究に際しては、多くの方々に実測に参加していただいている。また、関係機関の方々のご好意ご協力をいただいている。ここに感謝の意を表する次第である。なお、測定データの解析には名古屋大学大型計算機センターの FACOM M-200 を使用したことを付記する。

参考文献

- 1) 加藤・島田：橋梁の現地振動実験法、土木学会誌 66-2、1981年2月
- 2) 梶田 他：振動による橋りょう下部構造物の健全度判定、鉄道技術研究報告（施設編 167）、1964年1月
- 3) 川人：振動特性による橋梁の健全度調査法に関する研究、昭和48年度日本道路公団試験所報告、1974年11月
- 4) 中井 他：振動解析による橋梁健全度の評価法、日本道路公団第20回業務研究発表会論文集、1978年6月
- 5) 島田・加藤・山田：コンクリート構造物の老朽化と振動性状の変化、コンクリート工学 20-7、1982年7月
- 6) Shimada, Tanabe and Kato: Safty Inspection System of Existing Structure, IABSE Colloquium on Informatics in Structural Engineering, Bergamo ITALY, oct.1982

SAFETY INSPECTION OF EXISTING STRUCTURES
BY VIBRATIONAL MEASUREMENT

by Masafumi KATO* Shizuo SHIMADA*

Recently, the maintenance of existing structures becomes a very important problem, since the inspection method of structural soundness has not established yet. The vibrational measurement is becoming one of the safety inspection methods. But there are still many problems left to be investigated for being widely applied for the practical works.

These problems are classified into the following articles;

- 1) establishment of the measurement and data processing systems,
- 2) establishment of the standardized judgment for the obtained results,
- 3) how to apply the vibrational measurement for the practical testing method, and establishment of the synthetic evaluating method combined with other inspection methods.

The measurement and data processing system is limited by the field condition, therefore it is very important to choose the suitable method. In this paper, the author makes a brief comment on a fundamental policy, details and future trend of this system.

Secondly, this paper deals with the investigation on the relationship between the deterioration of bridges and their vibrational characteristics. The authors have carried out the vibrational measurements twice with about ten years interval at four existing bridges. Moreover, a vibrational test was carried out on a PC bridge during its failure test.

* Department of Civil Engineering, Nagoya University