

日本における橋梁振動モニタリング研究の経緯と今後の展望

History and Future Development of Bridge Vibration Monitoring Research in Japan

大島 俊之*

Toshiyuki Oshima

*工博，北見工業大学教授，工学部社会環境工学科（〒090-8507 北海道北見市公園町165）

This paper describes the recent history of bridge vibration monitoring research in the structural engineering of JSCE and extends the forecast of future development in this structural health monitoring field. Task committee on bridge vibration monitoring worked four years from 1996 to 2000 and published a book of “Guidelines for bridge vibration monitoring” from JSCE in 2000. This new area of structural health monitoring is rapidly expanding in the world and smart systems and materials are newly developing. Young researchers and engineers should understand this new development and utilize them in civil engineering.

Key Words: Structural Health Monitoring, Vibration-based Monitoring, ISO

キーワード：構造健全度モニタリング，振動解析モニタリング，ISO

1. 橋梁振動モニタリング研究小委員会活動の経緯

土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会（委員長：大島俊之）は1996年5月から2000年4月までの4年間活動した。当時は橋梁振動の的確な把握、橋梁の健全性・使用性確保、損傷同定などを、橋梁の短期的または長期的モニタリングによって評価するための調査研究活動を推進することを目的として、構造工学委員会（委員長（当時）：渡邊英一京大教授）の小委員会として設置されたものである。

この設立の経緯は、当時金沢大学梶川康男教授を委員長とする橋梁交通振動研究小委員会が構造工学委員会の中で1992年から1996の期間活動していたので、その後継の委員会として設立されたものである。

これより以前の1981年からの10年間程度は学会の委員会活動としてではなく、若い研究者の情報交換の場として、毎年の土木学会の年次学術講演会や、金沢大学における橋梁振動コロキウムなどが活動の中心であった。この意味で当時の小堀為雄、梶川康男、本田秀行先生らの金沢大学関係のリーダーシップがなければ、その後の発展はなかったものと考えている。写真－1は1981年の広島における土木学会全国大会の際に最初に開催した研究者仲間の懇親会の様子である。



写真－1 第1回橋梁振動研究会懇親会
（広島、1981年、前列左から本田、梶川、大島、稚山、後列左から林川、岡林、川谷、加藤）

その後、これらの橋梁振動関係の自主的な研究者グループの成果として、技報堂出版から「橋梁振動の計測と解析」を出版したが、この過程で初期のメンバーのほかフジエンジニアリングの杵本正信氏、東京都立大学（現東京首都大学）の前田研一氏、川田工業（現近畿大学）の米田昌弘氏、総合技術コンサルタントの久保雅邦氏（1992年逝去）らの貢献が大きかった。⁹⁾

1.1 橋梁振動モニタリング研究小委員会活動

委員会は 40 年程度の規模の人数で、当時の構造工学委員会における委員会としては規模が大きく、大学や高専の研究者のほか、重工関係や設計コンサルタント、研究所、公団などの関係者が参加しており、産学官の交流や情報交換の場として、活発であった。また、1980 年から 1990 年の後半にかけての 20 年近くの期間は本州四国連絡橋の建設や技術検討が活発だった時期であり、本委員会の委員の方々の中にはこれらの実務に関係された方々もおられて、委員会活動における話題提供は活発であった。1997 年 10 月には金沢大学において「橋梁振動コロキウム」を開催した。この時の発表テーマは

(1) 橋梁振動の計測・解析、(2) 橋梁の健全度診断、(3) 使用性評価、(4) モニタリング技術、(5) 損傷・構造同定、(6) 橋梁の減衰評価、(7) 下部工・基礎の振動特性、(8) 橋梁環境振動、(9) 橋梁振動の制振・制御 などであった。

また、委員会の幹事の方々には中島章典、阿部雅人、岩本政巳、小幡卓司、田中信治、角本周、坂野昌弘、西星匡博の方々であった。

当時の委員会の様々な企画に対して、小堀為雄先生、倉西茂先生、中井博先生、阿部英彦先生などが時々参加していただいていたことを記憶している。



写真－2 橋梁振動研究会の架橋工事見学（1990 年）

1.2 「橋梁振動モニタリングのガイドライン」出版⁸⁾

4 年間の委員会活動の最初の 2 年間の活動の成果を構造工学委員会に報告するとともに、さらに 2 年間延長して委員会活動の成果を土木学会から出版することを主たる目的として、さらに 2 年間の活動の延長を承認していただいた。前述したように、当時の委員会活動の中では橋梁振動の計測と解析に関する技術情報が多く収集され、これらの技術情報を成果としてまとめるには絶好の時期であったと思われる。委員の方々には非常に協力



写真－3 委員会の本四架橋見学会（1998 年）

的に対応していただいて、それぞれの得意分野を原稿としてまとめていただいた。出版は 2000 年 10 月に実現できたが、この出版原稿を最終的に仕上げていただいたのは宇都宮大学の中島章典教授であった。中島先生の貢献がなければ出版はさらに遅れていたものと思われる。この出版の時代的な意義は、この出版の後、世界的に、特にアメリカなどにおいて構造健全度モニタリングの研究内容が土木や建築の分野の他、広く工学分野において進展しだし、今日のこの分野の隆盛をもたらしていることを考えると、この出版は委員会活動の大きな成果と言える。

その後、これらの委員会活動は中島章典教授を委員長とする「橋梁振動モニタリングとその標準化研究小委員会」に引き継がれ、委員会活動の成果として 2006 年に「モニタリングによる橋梁の性能評価指針（案）」が土木学会から出版されており、この分野としては一定の成果をあげているものと考えられる。¹⁰⁾

2. ISO における活動

委員会活動と ISO 関係活動とのかかわりは、1996 年に橋梁振動モニタリングの委員会活動が開始されて間もないころ、前田研一先生から、早稲田大学の依田照彦先生の意向として機械学会からの要請に対して土木学会から ISO TC108（機械振動と衝撃）の分野に貢献することが期待された。当時委員会活動を開始したことでもあり、私が委員としてとりあえず参加することにしたが、参加して判ったことは、ヨーロッパにおいて橋梁振動計測に関する ISO 基準を作成する案件がイタリアの代表者から提案されており、この ISO 基準作成委員会構成に対して長大橋建設が盛んな日本から委員を出してほしいとの意向が背景にあった。

最初の参加は 1997 年（平成 9 年）のベルリン（ドイツ）における会議への参加であったが、その後の審議を

経て ISO 14963⁴⁾となる原稿素案がすでに提出されていた。その後、1998年(パリ)、1999年(デンマーク)、2000年(チェコ)、2001年(ベルリン、ドイツ)、2002年(ミンデン、アメリカ)などの会議に参加したが、中島章典先生や当時三菱重工におられた綱淵純氏、宮森保紀先生などにも参加していただいたこともある。

ISO 基準の制定過程は大変長く、最初の会議で提案者が基準草案を提出し、それに対する意見と修正の過程が2年近く続くが、その間草案は WD(Working Group Draft), CD (Committee Draft), DIS (Draft for ISO), FDIS(Final Draft for ISO) と格上げされ、最終的にメンバー国の批准を経て制定される。

これらの ISO 会議の過程で橋梁振動に関する基準は TC108/SC2/WG3 において集中的に議論され、前述の ISO14963 は最終的に2003年にISO基準として制定された。また、これらの審議の過程で、橋梁振動の計測結果を評価する基準作成の必要性が議論され、この素案は日本から提案することとなった。当時は前述の「橋梁振動モニタリングのガイドライン」が出版された直後でもあり、日本からのISO基準草案はこの出版物を基本として、そのエッセンスを英文にして提出した。素案に対して各国から様々な意見があり、それらに対してそれぞれ対応し、最終的に2004年にISO18649⁵⁾として制定された。

これらのISO基準は5年ごとに見直しサイクルが適用されるが、現在まで最初の基準が変更なく機能しているが、日本の橋梁建設技術を背景とした、我が国からの世界に対する貢献となっている。

特に低開発国においては新しい橋梁を建設する場合に、あらためて同じような実験を実施しなくても、ISO基準を準用して対応できる点がISO制定の効果である。

6)

3. ISHMII の活動⁷⁾

ISHMII(International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure) は本部をカナダのマニトバ大学に置く、土木構造物の健全度モニタリングに関する国際的な組織であり、2004年にAftab Mufti教授(マニトバ大学)を初代会長として設立され、現在は2代目の会長としてFarhad Ansari教授(シカゴ大学)が就任している。日本からは主要なメンバーとして藤野陽三教授(東大)、呉智深教授(茨城大学)、古田均教授(関西大)、宮本文穂教授(山口大)と大島が参加している。組織のホームページには以下に示すような、組織の目的が述べられている。

The objectives of the Society are to:

- Provide a focal point for international sharing of knowledge and experience

- Promote collaboration to maximize the benefit of the international research and development effort
- Foster international harmonization of SHM design and application standards
- Further the acceptance of SHM to establish Performance based codes
- Encourage owners to build intelligent infrastructures(II) that last more than 100 years
- Disseminate results of research and experiences gained from the practice of structural health monitoring through the society's official journal of Civil Structural Health Monitoring (JCSHM)

<http://www.ishiii.org>

上の最後の項目にもあるように、今年度より Springer から Journal of Civil Structural Health Monitoring という国際雑誌が発刊された。この雑誌は ISHMII が Springer 社と1年ぐらい時間をかけて交渉し、インパクトファクターの高い雑誌を目指して今後雑誌として育てていくこととしている。

<https://www.editorialmanager.com/cshml/>

ホームページからの投稿が簡単に行えるシステムになっているので是非積極的に投稿していただきたい。日本からは大島が Associate Editor になっている。(図—1)



図—1 国際雑誌 (J C S H M) の表紙

この組織では、この他、これまでに4回の国際会議を開催しており、それらは SHMII'1 (東京, 2003)、SHMII'2 (Shenzhen, 中国, 2005)、SHMII'3 (カナダ、バンクーバー, 2007)、SHMII'4 (チューリッヒ、スイス, 2009) である。今年はメキシコの Cancun で SHMII'5 が12月に開催されることになっている。

<http://www.shmii.unam.mx>

4. 局部加振法による微小欠陥検出に関する最近の研究

北見工業大学の構造物維持管理研究グループが最近実施している局部加振法を用いた構造物の微小欠陥検出に関する研究成果を紹介する。本研究の内容は本コロキウム的一般発表に

「坪川良太、大島俊之、山崎智之、三上修一、宮森保紀：積層圧電アクチュエータによる局部加振法を用いた実橋梁の損傷評価に関する研究」

として論文が掲載されているので詳しくはそちらを参照していただきたい。1)、2)、3)

本研究では構造物のモード解析を基本としつつ、微小欠陥が高次のモードに大きく反応する性質を活用して、実際に精度よく微小欠陥を判定するシステムを開発し、特許を取得している。高次振動数で構造物表面を局部的に加振できる圧電式のアクチュエータを用いて加振するとともに、加速度計の計測範囲をアレー配置して、微小欠陥の位置を特定できるようにシステムを構築している。アクチュエータによる局部加振は連続的に周波数が増加する Sweep 加振法を用いており、欠陥のサイズや位置に応じて大きく反応する周波数帯が解析に活用できるようになっている。また、アクチュエータはコンクリート構造物に対しても固定して加振できるように工夫されており、その成果が発表されている。2)

欠陥同定システムでは計測波形の P S D をもとに欠陥の有無が P S D の変化に現れる性質を解析的に計算して、欠陥の位置やサイズの影響を特定している。

今後の課題は、計測システムの大きさをダウンサイジングするとともに、無線センサーの活用により経費を縮小できるように改良することである。

5. 構造健全度モニタリング研究に関する今後の展望

構造健全度モニタリングに関する研究の動向は、前述の国際的な組織の会議や雑誌のほか、スタンフォード大学主催の SHM 関係の会議、SPIE の会議、WCSCM の会議などにおいて構造健全度診断やモニタリング、振動制御、新しい診断システムの開発に関する研究成果などが最近では毎年公表されている。また最近の話題としてはアジアにおいて、韓国の KAIST や中国の大連理工大学を中心とするグループなどが活発に活動している。

今後の動向としては、Smart Material や Smart System と呼ばれる新しい研究成果が次々と発表されているし、Wireless Sensor を応用する研究も急速な発展をもたらしているので、構造健全度モニタリングの分野は 21 世紀には新しい製品開発の進展とともに大きく進展するも

のと予想される。我が国においても先進各国の動向に連動して研究開発が進展することを期待したい。

謝辞

本稿を終わるにあたって、これまでお世話になった多くの方々に心からのお礼を申し上げたい。著者が土木学会における研究活動を続けてこられたのは、これらの恩師や先輩の先生、多くの仲間の方々の関係があったからできたことであつたと振り返ることができる。心から感謝申し上げている。

また、最後にこのような研究の歴史を振り返る機会を与えていただいた深田幸史先生など関係の方々にも感謝申し上げて、終わりとしたい。

参考文献

- 1) Oshima, T., Mikami, S., Miyamori, Y., Fabijanska, M., and Beskhyroun, S. : Detection of Small Damage of Secondary Structure on a Real Composite Steel Bridge using Local Excitation Method(LEM), The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Tecnology (ANCRiSST 2011), Dalian, China, July, 2011.
- 2) Mikami, S., Beskhyroun, S., Yamazaki, T., and Oshima, T. : Damage detection in concrete structures using tunable piezoelectric actuators, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. 10, pp. 77-88, August, 2007.
- 3) Beskhyroun, S., Oshima, T., Mikami, S. and Tsubota, Y. : Structural Damage Identification Algorithm Based on Changes in Power Spectral Density, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.8, pp.73- 84, 2005.
- 4) ISO 14963(2003): Mechanical vibration and shock – Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts, 2003.
- 5) ISO 18649(2004): Mechanical vibration and shock – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges, 2004.
- 6) ISO 13822(2001): Bases for design of structures – Assessment of existing structures, 2001.
- 7) ISHMII(International Society for Structural Health Monotoring of Intelligent Infrastructure) : Journal of Civil Structural Health Monitoring, Springer.
- 8) 土木学会編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、構造工学シリーズ 10、2000.
- 9) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技法同出版、1993.
- 10) 土木学会編：モニタリングによる橋梁の性能評価指針（案）、構造工学シリーズ 16、2006.