

光ファイバーセンサー内蔵による FRP 橋梁のインテリジェント化の提案

Proposal of Intelligent FRP Bridge by Applying Internal Optical Fiber Sensor

大島 俊之* 三上 修一** M. S. ラーマン*** ジャック・レスコ****

Toshiyuki OSHIMA Shuichi MIKAMI M. S. RAHMAN Jack LESKO

ABSTRACT Intelligent FRP Bridge applying optical fiber sensor is a promising bridge structure and data given through this intelligent system is well used for maintenance management. Some application ideas of optical fiber sensor to bridge structure are shown. Optical fiber sensor can be placed into FRP member in pultrusion process as internal intelligent sensor.

Keywords : 光ファイバー、インテリジェントブリッジ、モニタリング
Optical fiber, intelligent bridge, monitoring

1. まえがき

橋梁の維持管理技術の向上は、今日社会基盤施設（インフラ）の維持保全の中で重要な位置を占めており、近年技術開発が盛んである。橋梁の維持管理の技術は大別して検査・点検・診断の技術と補修・補強・寿命の延命化技術に分類できる。前者の検査・点検・診断の技術は人間ドックなどの人体に対する検査・診断技術に対比でき、検査結果の精度および信頼性が重要な因子である。一方、後者の補修・補強技術は人体に対する手術・移植などに対比でき、機能を再び向上させて、寿命を長引かせる技術である。いずれの場合も構造体に対する精度良い診断データに基づいて正確な判断ができることになる。

しかるに、橋梁の場合は通常床版のクラックの発生や主桁の疲労亀裂の発生などの主要部材

に発生する損傷によってただちに致命的な崩壊に至る場合は少なく、一般に損傷は小さい範囲で補強・補修されることが多い。また、橋梁の点検作業は建設省の点検要領に基づいて目視によって定期的な点検を実施しているが、労務量および人件費などの経費として大きなコストを要しているとともに、点検員が重要な損傷を見逃したり、発見できなかった例も生じている。

このような状況から、21世紀の社会基盤施設としての橋梁が、安全で信頼性のある構造として維持管理されていくためには、新しい技術を組み込んで、活用していくことが技術開発の重要な課題である。

このような背景から、本論文では最近の光ファイバーセンサーによるひずみの計測技術と FRP 材料による橋梁製作技術とを融合させて、橋梁本体が光ファイバーセンサーを内蔵して遠隔にいても橋体の健全性が評価できるシステムを想定して、その実現の可能性について考察した結果を報告するものである。

2. 橋梁の健全度モニタリングの現状と課題

文献^{[4],[5]}で述べているように、2030年には我が国の橋梁の約半数が橋令50年を有するようになると言われている。これは1965年（昭和

*工博 北見工業大学 工学部 土木開発工学科 教授 (〒090-8507 北見市公園町 165)

**博(工学) 北見工業大学 工学部 土木開発工学科 助教授 (〒090-8507 北見市公園町 165)

***博(工学) マニトバ大学 ISIS センター 博士研究員 (Canada R3T5V6, Winnipeg, Manitoba)

****Ph.D バージニア工科大学 応用力学科 助教授 (U.S.A. VA24061 Blacksburg, Virginia)

40 年) ~1975 年 (昭和 50 年) にかけての日本の高度経済成長期に全国的な国土整備に伴って、橋梁建設が集中しているためである。したがって、老朽化する多くの橋梁の維持管理を効率的に信頼性の高い手段で実施できる技術開発を進めることが今後ますます重要になってくるものと予想され、この橋梁の健全度モニタリング分野の研究の進展が期待されている。したがって、既設の橋梁の一部、たとえば床版などを FRP 構造で置換するような工法をとる場合に、その構造の一部をインテリジェント化して、橋梁全体の健全度モニタリングを実施できれば有効なシステムとなることが期待できる。

1989 年の冷戦時代の終焉以後、従来戦略的に研究開発されてきた構造物のモニタリングに関する技術が、この 10 年で民生用へかなり技術移転され、各方面に急速に応用され始めており、現在では構造物健全度モニタリング (Structural Health Monitoring) として橋梁診断などへの応用技術としても技術開発されており、目覚ましい発展を示している。

この光ファイバーや圧電アクチュエータを応用した計測技術に関する研究は従来主として航空、宇宙関連分野で活発であったが、最近はこれをインフラとしての社会基盤施設の維持管理技術に応用する研究が活発である。特に構造物の振動状態を高精度で遠隔地から計測することによって、局所的な損傷や欠陥を検出する構造同定 (Structural Identification) の技術を土木、建築などの分野に技術移転する研究が急激に増加している。このような動向から Intelligent な FRP 構造を橋梁に応用するための研究が社会的に要請されている。

3. 光ファイバー内蔵 FRP 部材の検討

佐鳥ら^[3]は FRP 部材に内蔵する細径光ファイバーを製作し、実用化のための試験を実施している。通常の光ファイバーセンサーは直径 $125\mu\text{m}$ 程度であるが、コア径 $8.5\mu\text{m}$ 、クラッド径 $40\mu\text{m}$ にポリイミドコーティングして、最終的に外径 $52\mu\text{m}$ の細径光ファイバーを製作し、物理的強度試験を実施して通常の $125\mu\text{m}$ 光ファイバーと同等の結果となったことを報告している。さらに、この細径ファイバーに FBG (Fiber Bragg Grating) を形成して通常の FBG と同様の結果を得ている。

一方、FRP 材料に用いる繊維の直径はガラス繊維 $10\sim 20\mu\text{m}$ 、炭素繊維 $5\sim 10\mu\text{m}$ 、sick は $150\mu\text{m}$ 程度であり、通常の GFRP や CFRP の内部に組み込む場合には製作上の工夫が必要である。

また、部材として形成する過程では、各層間に光ファイバーを組み込むことが可能であるが局所的な変形挙動に注意が必要となる。バージニア工科大学の Lesko 教授ら^[7]は光ファイバーセンサーを FRP 部材の内部や部材継ぎ目 (隅角部) に配置した計測を実施している。(図 1、図 2 参照)

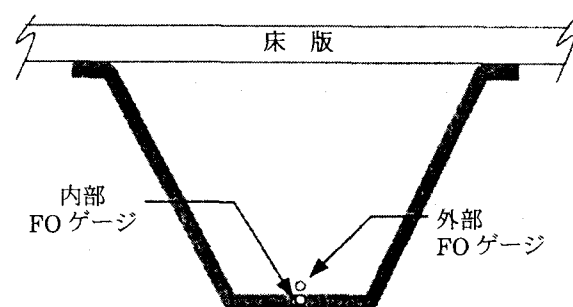


図1 箱桁のセンサー配置

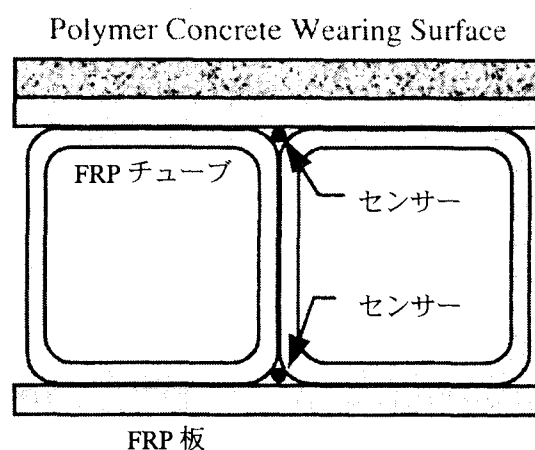


図2 引抜き成型 FRP 床組構造

4. PC ケーブルへの応用^{[1], [9]}

FRP を PC 緊張材として活用する分野はすでに設計・施工指針(案)が作成されており、実用化が図られている。また、斜張橋の主ケーブルとして FRP 緊張材を用いる例も見られるようになっており、徐々に応用範囲が広がっている。表 1 には FRP ケーブルと鋼棒との比較を文献^[19]から引用して示しているが、今後の技術開発が期待できる。このような PC ケーブルをプ

表1 FRP ケーブルと鋼棒の比較^[19]

FRP ケーブル の種類 線材の 性能比較			CFRP		PC 鋼線	
			より線	ロッド	より線	鋼棒
					SWPR7A	SBPR 95/100
線材 構成	呼び径	mm	12.5	8	9.3	9.3
	マトリックス		エポキシ樹脂		—	—
	繊維含有率	%	64	65	—	—
	重量	N/m	1.4801	0.785	3.972	5.10
引張 特性	引張強度	N/mm ²	1873	1540	1716	1079
	弾性係数	N/mm ²	137298	147105	196140	196140
	リラクゼーション	%	3.5(30年)	3.7(30年)	3.0	1.5

ルトルージョン（引抜成形）によって製作する際に、光ファイバーセンサーを同時に引き抜くことが出来れば、ケーブル自身がセンサーを内蔵する構造体とすることができ、ケーブル張力管理などに有効である。実際に斜張橋ケーブルの素線間に光ファイバーを内蔵させて張力管理を実施した例^[20]も見られるが、ケーブル自身の温度変化が大きく、さらに研究開発の必要性があると思われる。光ファイバーセンサーを引抜成形した場合においても、温度補償に対するシステムを組み込むことが精度向上のために必要である。

5. まとめ

著者らは最近 PC 橋のより線に FBG センサーを設置して、歪ゲージセンサーとともに PC 緊張力の経時的モニタリングを実施している。しかし、光ファイバーセンサーの設置状況、リラクゼーションの影響など未解明の理由により、コンクリート打設、緊張力導入後1ヶ月後には FBG センサーによる PC 緊張力の値はかなり減少した。

光ファイバーセンサーを FRP 構造体に内蔵させるための実用化の提案は以上に述べたように様々な課題を解決する必要性を提起する結果となった。

【参考文献】

- [1] (社)日本鋼構造協会：新素材の構造部材への適用調査，T S S C テクニカルレポート，No. 23，1993
- [2] (社)日本機械学会編：知的複合材料と知的適応構造物，新技術融合シリーズ：第2巻，養賢堂発行，1996
- [3] (財)次世代金属・複合材料研究開発協会：第1回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集，1999
- [4] 土木学会：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
- [5] 土木学会橋梁振動モニタリング研究小委員会：Intelligent Bridge Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会論文集、構造工学技術シリーズ No.12，1999.11
- [6] 大島俊之・三上修一・山崎智之：橋梁振動のモニタリングによる Intelligent Bridge の提案，橋梁交通振動コロキウム論文集，Part B，pp.221-226，1995.11
- [7] J.J.Lesko，P.C.Furrow：Advanced Monitoring Techniques for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Highway Bridge Structures, Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring 公開講演会論文集，pp.57-65，1999.11
- [8] T.Ohima, M.S.Rahman, S.Mikami, et al.：Application of smart materials and systems to long-term bridge health monitoring, Nondestructive Evaluation of Highways, Cltillities, and Pipelines, Proc.of SPIE Vol.3995，2000
- [9] R.Maaskant, et al.：Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring,

- Cement and Concrete Composites, No.19,
pp.21-33, 1997
- [10] (社)強化プラスチック協会：FRP ポケットブック，平成9年3月
 - [11] (社)強化プラスチック協会：FRP 入門(新版)，平成12年4月
 - [12] (社)強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，平成6年9月
 - [13] J.R.Vinson, R.L.Sierakowski：複合材料の構造力学，福田，野村，武田訳，日刊工業新聞社，昭和62年12月
 - [14] 日本複合材料学会編：複合材料ハンドブック，日刊工業新聞社，1989.11
 - [15] A.A.Mufti：Technical Report, Canada/Japan Workshop on Structural Health Monitoring of Bridge Decks, ISIS Canada, 2000.8
 - [16] 建設省土木研究所化学研究室他：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(I)－一次構造部材としての FRP の適用事例調査－，共同研究報告書 No.210，平成10年10月
 - [17] C.T.Herakovich：Mechanics of Fibrous Composites, John Wiley & Sons, Inc., 1998
 - [18] J.Holnicki-Szulc, J.Robellar：Smart Structures, Requirements and Potential Applications in Mechanical and Civil Engineering, NATO Science Series, 1999
 - [19] 建設省土木研究所化学研究室：繊維強化構造材料の歩道橋への利用可能性の検討，土木研究所資料第3291号，平成6年11月
 - [20] 亀井、福本、松下、古田、中井：温度を考慮した斜張橋架設精度管理法とケーブル温度測定の一提案，構造工学論文集，Vol40A, pp.1203-1214, 1994.3