

IoT 균열계를 활용한 구조물의 손상 진단 연구

Study of Structure Damage Diagnosis using IoT-Based Crack measurement

정도영¹

Do-Young Jung¹

요 약

관리자의 입장에서 콘크리트 구조물 혹은 건축물의 상태를 파악하는 것은 안전관리 측면에서나 향후 유지보수 계획을 수립하는데 매우 중요하다. 재래식 센서와 데이터로거로 구성된 기존의 모니터링 방식은 두 가지의 한계점이 있다. 운영 방법이나 비용 측면에서 매우 비효율 적인 것과 변형률을 측정하기 때문에 실질적인 상태를 알 수 없고, 간접적으로 판단 할 수 밖에 없는 부분이다 이에 본 연구에서는 IoT 균열계를 활용하여 구조물 이력 데이터를 취득할 수 있는 프레임워크를 구축하고 개발된 IoT 디바이스를 실제 현장에 적용하여 계측결과를 분석하였다. 분석 결과, 연구결과에 기반하여, IoT 균열계의 현장적용을 위해서는 다음 사항을 고려해야 한다. 우선, LTE 통신 음영지역 문제, LTE 라우터-WiFi 방식의 배터리 소모량 문제, Sensor range($\pm 5\text{mm}$)의 부족 가능성, 센서측과 대기온도 분리 측정 필요성, 현장 보호 방법 마련이다. LTE 통신과 관련된 부분은 통신망 구축으로 해결가능할 것이나, 배터리 소모량의 경우 전용 전선 연결 또는 대용량 배터리 개발이 이루어져야 하기 때문에 자체 기술력 외에도 외부 기술연계 및 협력이 필요한 상황이다.

핵심어 : 구조물, 손상, IoT, 균열계, 실증실험

Abstract

Understanding the condition of concrete structures or buildings from the manager's point of view is very important in terms of safety management and in establishing future maintenance plans. The existing monitoring method consisting of conventional sensors and data loggers has two limitations. It is very inefficient in terms of operation method and cost, and since it measures the strain, the actual state cannot be known and can only be judged indirectly. The measurement results were analyzed by building the work and applying the developed IoT device to the actual field. Based on the analysis results and research results, the following should be considered for the field application of the IoT crack system. First, the LTE communication shadow area problem, the battery consumption problem of the LTE router-WiFi method, the possibility of a shortage of the sensor range ($\pm 5\text{mm}$), the need to measure the sensor side and the air temperature separately, and prepare a site protection method. The part related to LTE communication can be solved by establishing a communication network, but in the case of battery consumption, it is necessary to connect a dedicated wire or develop a large-capacity.

Keyword : Structural, Damage, IoT, Crack measurement, Empirical experiment

¹ Department of Highway and Transportation Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Principal Researcher]

e-mail: jdy@kict.re.kr

* 본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원사업 “중소형 건물의 녹색 건축 활성화를 위한 50% 비용 절감형 스마트 IoT-에너지관리 & 서비스 플랫폼 개발(22TBIP-C160754-02)”의 연구개발비지원에 의해 수행되었습니다.

Received(October 21, 2022), Review Result(1st: November 10, 2022), Accepted(December 12, 2022), Published(December 31, 2022)

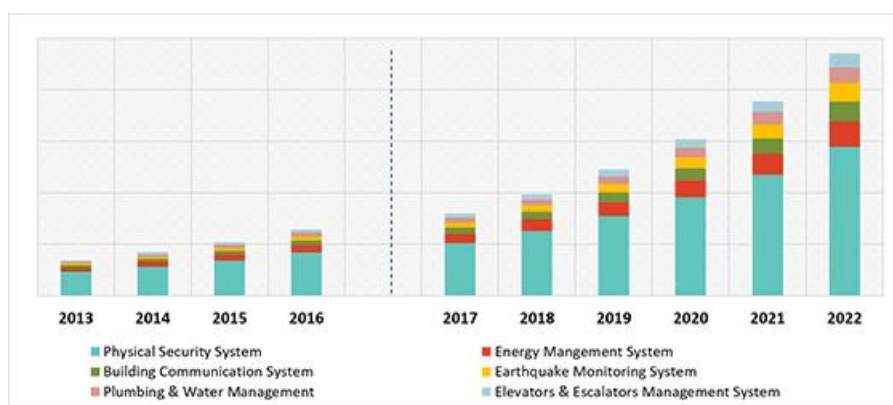


© 2022 The Authors. Published by NCIS.

This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

1. 서론

관리자의 입장에서 콘크리트 구조물 혹은 건축물의 상태를 파악하는 것은 안전관리 측면에서나 향후 유지보수 계획을 수립하는데 매우 중요하다. 재래식 센서와 데이터로거로 구성된 기존의 모니터링 방식은 두 가지의 한계점이 있다. 운영 방법이나 비용 측면에서 매우 비효율적인 것과 변형률을 측정하기 때문에 실질적인 상태를 알 수 없고, 간접적으로 판단 할 수 밖에 없는 부분이다 [1]. 현재 구조물의 노후화 대형화에 따라 콘크리트 구조물 또는 시설물의 유지관리와 모니터링 수요가 지속적으로 증가중이다. [그림 1]과 같이 IoT 기반의 구조물 모니터링 시장은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.



[그림 1] IoT구조물 모니터링 시장 전망

[Fig. 1] Forecast of IoT structure monitoring market

대형화 노후화에 따른 안전과 정책적인 요구 등 다양한 시장 수요를 만족시키기 위해서 유지관리를 지원할 수 있는 효율적인 모니터링 기술 개발이 시급한 상태이다. 대표적인 콘크리트 구조물인 도로 구조물은 매우 긴 구조물이기 때문에 센서 네트워크를 구성하여 계측하기엔 매우 비효율적이다. 그러나 교량 터널과 같은 구조물을 포함하고 사면, 포장 등 다양한 토목구조물을 포함하고 있기 때문에 모니터링 중요도는 매우 높다. 또한 도로 구조물 중에서도 포장구조물은 계측기를 통한 모니터링을 하지 않고 조사를 통해 파손을 발견한 후에 유지관리하고 있다. 이런 방법은 효율성이나 안전성에 매우 불리하다. 따라서 효율적인 수집 방법과 길게 분포하고 있는 구조물에 적용할 수 있는 센서 네트워크의 대안으로 IoT 기술이 적합하다. 반면에 중소규모의 콘크리트 시설물의 경우에는 IoT 기반의 기술이 모니터링 시스템에 대한 비용부담을 절감하게 하여 접근성을 높일 수 있다.

대형화 노후화에 따른 안전과 정책적인 요구 등 다양한 시장 수요를 만족시키기 위해서 유지관리를 지원할 수 있는 효율적인 모니터링 기술 개발이 시급한 상태이다. 대표적인 콘크리트 구조물인 도로 구조물은 매우 긴 구조물이기 때문에 센서 네트워크를 구성하여 계측하기엔 매우 비효율적이다. 그러나 교량 터널과 같은 구조물을 포함하고 사면, 포장 등 다양한 토목구조물을 포함하고 있기 때문에 모니터링 중요도는 매우 높다. 또한 도로 구조물 중에서도 포장구조물은 계측기를 통한 모니터링을 하지 않고 조사를 통해 파손을 발견한 후에 유지관리하고 있다. 이런 방법은 효율성이나 안전성에 매우 불리하다. 따라서 효율적인 수집 방법과 길게 분포하고 있는 구조물에 적용할 수 있는 센서 네트워크의 대안으로 IoT 기술이 적합하다. 반면에 중소규모의 콘크리트 시설물의 경우에는 IoT 기반의 기술이 모니터링 시스템에 대한 비용부담을 절감하게 하여 접근성을 높일 수 있다.

중소규모의 콘크리트 시설물은 관리측면에서 균열은 매우 중요한 정보이다. 처음에 균열을 발견하는 것도 중요하지만, 발견된 균열이 구조적인 영향하에 있다면 지속적으로 추적관리 하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 두 점의 변위(Displacement)를 측정할 수 있는 센서(inductive 방식의 LVDT, 진동현상식, 저항식)가 마련 되어있어 균열폭의 변화를 측정할 수 있다. 이는 환경의 변화가 제한적인 실내에서는 매우 우수한 성능을 발휘하기 때문에 활용성이 높다. 하지만 기존의 데이터로거를 활용한 데이터수집 방법은 발전하는 BIM 이나 디지털트윈에 적용하기에는 매우 불편하다. 따라서 본 연구에서는 IoT 균열계를 활용하여 구조물 이력 데이터를 취득할 수 있는 프레임워크를 구축하고 개발된 IoT 디바이스를 실제 현장에 적용하여 계측결과를 분석하였다.

2. 구조물 손상 진단 문헌 고찰

구조물 손상 진단과 관련하여, 지난 20년 동안 개발된 새로운 감지 기술이 적용되어 오고 있다. 포장 및 철근 구조물의 경우 구조물 내부로의 접근이 어렵다는 특징이 있어, 센서 및 무선기술을 접목하려는 시도가 많다. MEMS(Micro Electro Mechanical System)이라 명명되는 센서의 소형화도 연구되고 있다 [2].

중국에서는 구조물에 대한 80개 이상의 구조물을 대상으로 SHM(Structure Health Monitoring) 시스템을 구축하고 있다 [3]. 해당 SHM 시스템에서 관찰된 데이터는 구조물의 서비스 가능성, 안전성 및 지속 가능성을 평가하는 데 활용할 수 있다.

관측된 데이터를 이용하여 구조물의 매개변수 식별, 손상 감지, 모델 업데이트, 안전성 평가 및 지속 가능성 평가에 많은 연구가 이루어졌다. 손상 감지 알고리즘을 사용하여 SHM 시스템에서 관찰된 데이터를 기반으로 토목 구조물의 매개변수를 식별하였다 [4].

수집된 데이터를 이용하여 진동기반 손상감지 연구도 진행되었는데, 장경간 아치교에서 관찰된

데이터를 기반으로 다변수 통계 분석 기술을 사용하여 손상을 감지하는 응용 프로그램도 연구되었다 [5]. 다양한 기술을 사용하여 감지되는 모니터링 데이터는 기존 기술 대비 데이터의 정확도 및 신뢰도가 높고, 구조물의 손상 심각도 평가 및 상태 평가에 활용될 수 있으며, 실제 모니터링 데이터를 활용한 구조물 손상 식별 연구도 진행되고 있는 상황이다 [6].

현대 정보 통신 시스템, 신호 처리 기술, 인터넷 연계기술은 SHM 시스템의 응용 및 개선을 크게 발전시키고 있는 상황이다. 우리나라에서도 구조물 손상진단을 위해서는 시스템 구축을 비롯하여 시스템의 정확도 향상, 정확한 데이터 샘플링 등이 연구가 필요한 상황이다.

2. 구조물 손상 진단을 위한 IoT 균열계 적용 방법

2.1 IoT 균열계의 프레임워크 수립

본 연구에서 제안하는 IoT 균열계의 프레임워크는 균열의 변화를 계측하여 취득, 데이터를 전송, 빅데이터 플랫폼에 저장 및 분석할 수 있어야 한다. 프레임워크는 다음 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다. 이 프로토타입에서는 건축물에 발생한 균열 정보를 자동 취득하기 위해, ESP8266 기반의 NodeMCU에 PI형 변위계를 연결한다. ESP8266 칩셋은 TCP/IP 스택을 지원하는 Wi-Fi 기능을 포함하는 마이크로컨트롤러이다. 무선 게이트웨이 즉 Wi-Fi 공유기가 잘 구성되어 있는 실내에서 활용하는 사물인터넷 디바이스 용도로 적당하다. [그림 2]는 IoT균열추적의 프레임 워크를 표현한 것이다.



[그림 2] IoT 균열추적의 프레임워크

[Fig. 2] Framework of IoT crack tracking

2.2 IoT 균열계측 디바이스 개발

ESP8266기반의 NodeMCU에 온습도 센서와 아날로그-디지털 컨버터를 연결하였다. NodeMCU는 마이크로컨트롤러에 WiFi 기능이 포함되어 있기 때문에 매우 활용도가 높은 모듈이다. 사물인터넷 디바이스를 구성하는 센서 모듈은 아래 표와 같다. 온습도 센서로는 DHT22 모듈을 사용하였다. 온

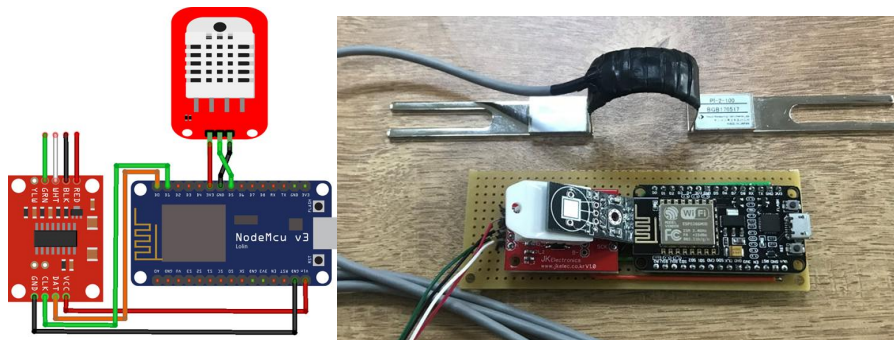
도의 경우 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 범위를 0.1°C 단위로 측정할 수 있고 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 갖는다. 상대습도는 $0\sim 100\%$ 의 범위를 0.1% 단위로 측정하고 $\pm 2\%$ 의 정밀도를 갖는다. 휘트스톤브리지 회로가 갖추어진 Pt형 변위계의 신호를 수집하기 위해 HX711 ADC를 사용하였다. 이는 24bits의 해상도를 가지고 있어서 $\pm 5\text{mm}$ 혹은 $\pm 2\text{mm}$ 의 Range의 변위계를 사용하는데 문제없는 정밀도이다.

마이크로컨트롤러에 설치된 소프트웨어는 각 모듈을 활용하기 위한 라이브러리를 최대한 활용하여 단순하게 구성하였다. 활용된 라이브러리는 아래 표에 열거하였다. 온습도 센서와 ADC 그리고 마이크로컨트롤러에 와이파이 모듈은 라이브러리가 정의되어 있고, 데이터를 Thingspeak 플랫폼으로 전송하기 위한 라이브러리를 활용하였다. [표 1]은 IoT 균열계측 디바이스의 활용된 라이브러리이며, [그림 3]과 같이 제작하였다.

[표 1] 마이크로컨트롤러 소프트웨어에 활용된 라이브러리

[Table 1] Experimental Scenario Setup

목적	라이브러리
Temperature and humidity module	DHT.h
WiFi module	ESP8266WiFi.h
	WiFiClient.h
Web API	ThingSpeak.h
Analog-digital converter module	HX711.h



[그림 3] IoT 균열계측 디바이스

[Fig. 3] IoT crack measurement device

3. 현장실험 결과

3.1 현장실험 개요

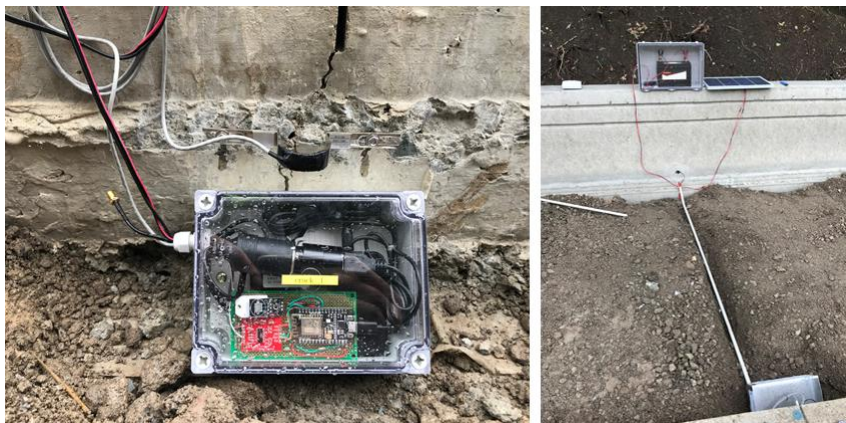
JCP(Jointed Concrete Pavement)는 IoT 균열계를 적용하기에 가장 적합한 구조물 중 하나이다. 시

공성과 내구성 등 다양한 장점으로 인해 고속도로에 설치되고 있다. JCP의 특징은 무작위로 발생하는 건조수축을 방지하기 위해 6m 간격으로 줄눈을 설치하여 예상가능한 균열을 유도하는 부분이다. 6m마다 설치된 균열은 온도 일교차 및 연교차 등의 환경하중에 따라 수축 및 팽창거동한다. 최근 혹서기에 블로우업 파손이 발생하여 줄눈에 대한 관심이 증가하고 있다. 블로우업은 과도한 팽창에 의해 포장구조물이 수직방향으로 솟아오른 파손인데 기존에 초기 건조수축만을 고려했던 줄눈시공에 대한 재검토가 필요하게 되었다. 이뿐만 아니라 최적 줄눈간격, 줄눈 유도시기 등 아직도 명확하게 규명되지 않은 부분이 있다.



[그림 4] 변위계 설치 방법

[Fig. 4] Installation method of displacement meter



[그림 5] IoT 균열계측 디바이스 현장설치 모습

[Fig. 5] Field installation of IoT crack measurement device

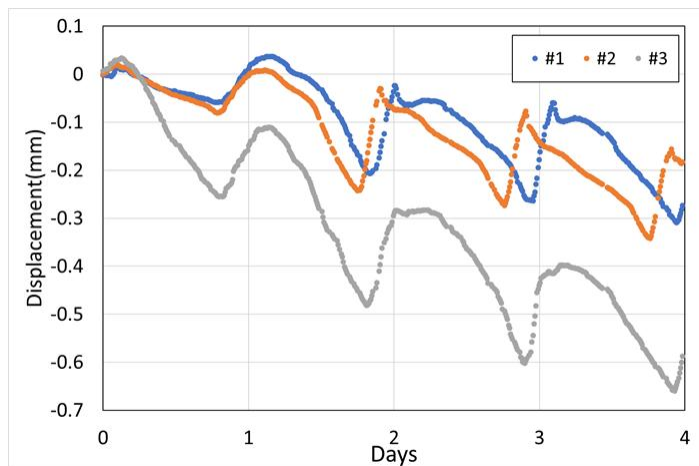
JCP의 줄눈 거동을 이해하기 위해서는 초기부터 폭염기간을 포함하는 장기공용기간 동안의 데이터가 기본이 되어야 한다. 하지만 현재는 현장조사나 데이터로거를 활용한 제한적인 기간의 데

이터, DEMEC(DEmountable Mechanical Strain Gauge, 분리형 변형률계)에서 얻은 데이터가 전부이다. 줄눈폭의 변화를 효율적으로 계측할 수 있다면 장기간 데이터를 모니터링 한다면 JCP의 수명을 늘릴 수 있는 최적의 줄눈 간격을 제시할 수 있고, 블로우업 문제를 사전에 발견할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 IoT 균열계 기술을 적용한다면 경제적이고 지속가능한 데이터 수집방법을 마련하여 JCP의 균열 거동을 Early Age부터 장기간 측정할 수 있을 것이다.

현장시험설치는 한국도로공사의 울산-밀양 고속도로 9공구에서 진행되었다. 그림의 노선에서 울산 울주군 삼동면 작동리 산 235-1 인근 터널 시점인 성토부에 설치하였다. 3개 이상 연속해서 균열이 유도된 구간을 설정하여 설치하였다. [그림 4], [그림5]는 고속도에 변위계를 설치한 현장사진으로 설치방법에 대해 설명하고 있다.

3.2 1차 현장설치 및 데이터 수집 결과

총 3개의 IoT 균열계측 디바이스를 6일간 설치하여 데이터를 수집하였다. 설치 결과 다음 [그림 6]과 같이 일교차에 의한 균열 폭의 변화와 초기 건조수축에 의해 폭이 넓어지는 거동이 계측되었다. 디바이스3(#3)이 설치된 균열은 시간이 지남에 따라 균열의 폭이 증가하였으며, 해당구간은 디바이스 1(#1)과 디바이스 2(#2) 대비 폭속이 큰 지점임을 알 수 있었다. [그림 6]은 1차 현장결과를 나타내는 그래프이다.



[그림 6] 1차 현장설치의 데이터 수집 결과

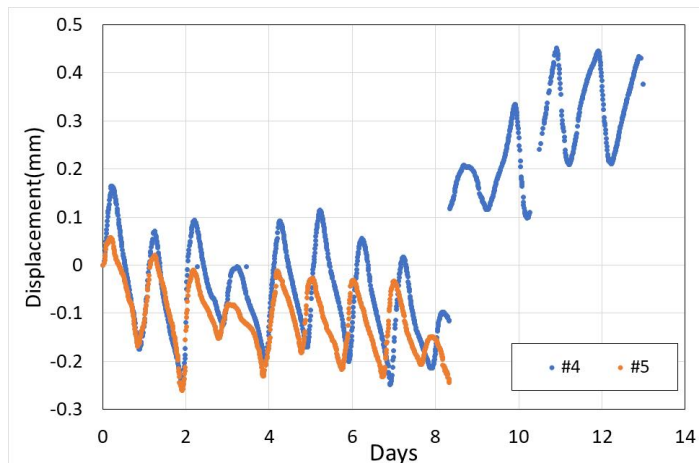
[Fig. 6] Data collection results of the 1st field installation

장기간의 데이터를 수집하고자 하였으나 수집 후 5일째 및 6일째 부터는 모든 신호가 유실되었다. 현장 점검결과 길어깨 공정 중에 케이블 손상이 원인으로 밝혀졌고, 2차 설치 때는 주름관으로

보호방식을 개선하도록 하였다.

3.3 2차 현장설치 및 데이터 수집 결과

2차 현장설치 구간의 1차와 비교해 4일이상 장기간 수집되었으나 결국에는 데이터 수집이 종료되었다. 디바이스 5(#5) 센서의 신호가 유실된 시점에 디바이스 4(#4) 센서의 신호에서도 큰 노이즈가 발생한 것으로 보아 현장 상황에 따른 영향이 있었을 것으로 판단된다. [그림 7]은 1차 현장결과를 나타내는 그래프이다.



[그림 7] 2차 현장설치의 데이터 수집 결과

[Fig. 7] Data collection results of the 2nd field installation

4. 결론

구조물 모니터링 분야는 디지털트윈 등 새로운 기술수요와 정책에 따라 구조물 자체의 모니터링 수요도 발생 할 것으로 예상된다. 실제 교량, 포장 등의 콘크리트 도로 시설물의 모니터링 수요가 있으나 광범위한 구조물에 대한 모니터링을 수행하기에 알맞은 기술이 제공되지 않고 있다. 또한 건축물의 모니터링 시장도 확대될 예정이다. 3종 시설물의 경우 정책에 따라 안전진단 및 모니터링이 의무화 될 예정이다. 그 규모는 건축물 5,879건, 공동주택 1,914건, 그 외 3,965건 으로 매우 크다.

IoT 기반 구조물의 예방적 손상 진단 기술은 새로운 건설 패러다임 선도를 통해 건설산업의 혁신 성장에 기여할 것이다. 또한, IoT, 딥러닝, 플랫폼 등 미래지향적인 키워드를 설정하여 건설산업의 신성장 동력을 창출할 것이며, 구조물 및 시설물의 손상을 예방하고 진단할 수 있는 기술을 개

발하여 건설산업의 혁신 생태계를 조성할 수 있다. 본 연구에서는 IoT 균열계를 활용하여 구조물 이력 데이터를 취득할 수 있는 프레임워크를 구축하고 개발된 IoT 디바이스를 실제 현장에 적용하여 계측결과를 분석하였다. 분석 결과, IoT 균열계의 현장적용을 위해서는 다음 사항을 고려해야 한다. 우선, LTE 통신 음영지역 문제, LTE라우터-WiFi 방식의 배터리 소모량 문제, Sensor range($\pm 5\text{mm}$)의 부족 가능성, 센서측과 대기온도 분리 측정 필요성, 현장 보호 방법 마련이다.

LTE 통신과 관련된 부분은 통신망 구축으로 해결가능할 것이나, 배터리 소모량의 경우 전용 전선 연결 또는 대용량 배터리 개발이 이루어져야하기 때문에 자체기술력 외에도 외부 기술연계 및 협력이 필요한 상황이다.

References

- [1] Z. Chen, X. Zhou, X. Wang, L. Dong, Y. Qian, "Deployment of a smart structural health monitoring system for long-span arch bridges: A review and a case study", *Sensors*, vol. 17, no. 9, September 2017, pp. 1-21, doi: 10.3390/s17092151.
- [2] D. L. Mascarenas, M. D. Todd, G. Park, C. R. Farrar, "Development of an impedance-based wireless sensor node for structural health monitoring", *Smart Materials and Structures*, vol. 16 no. 6, pp. 2137-2145, October 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/016.
- [3] H. N. Li, D. S. Li, L. Ren, T. H. Yi, Z. G. Jia, K. P. Li, "Structural health monitoring of innovative civil engineering structures in Mainland China", *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 3, no. 1, March 2016, pp. 1-32, doi: 10.12989/smm.2016.3.1.001.
- [4] C. Rainieri, G. Fabbrocino, "Development and validation of an automated operational modal analysis algorithm for vibration-based monitoring and tensile load estimation", *KMechanical Systems and Signal Processing*, vol. 60, no. 61, August 2015, pp. 512-534, doi: 10.1016/j.ymssp.2015.01.019.
- [5] G. Comanducci, F. Magalhaes, A. Cunha, "On vibration-based damage detection by multivariate statistical techniques: Application to a long-span arch bridge", *Structural Health Monitoring*, vol. 15, no. 5, August 2016, pp. 505-524, doi: 10.1177/1475921716650630.
- [6] J. Li, J. Deng, W. Xie, "Damage detection with streamlined structural health monitoring data", *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 8832-8851, doi: 10.3390/s150408832.