



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI GUGLIELMO MARCONI

FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE APPLICATE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

DIAGNOSTICA E MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

Relatore:
Chiar.^{mo} Prof. ERNESTO
GRANDE

Candidato:
GIOVANNI DELLA MARTORA

Matr. N°: STA08010/LM23

ANNO ACCADEMICO

2017/2018

INDICE

Introduzione	3
Capitolo 1: Diagnostica e monitoraggio delle strutture	
Generalità.....	4
Stati fessurativi nelle strutture	8
Diagnostica non distruttiva.....	21
Sistemi di monitoraggio, dall'industria alle strutture nell'era della digitalizzazione.....	28
Capitolo 2: Monitoraggio delle strutture, degrado e comportamento meccanico	
Calcestruzzo per il monitoraggio delle strutture.....	39
Monitoraggio dinamico real time di edifici	48
Monitoraggio di vibrazioni indotte da traffico veicolare.....	56
Monitoraggio e controllo di edifici in costruzione.....	64
Monitoraggio geomatico terrestre e satellitare.....	75
Conclusioni	98
Bibliografia.....	100

ABSTRACT

Considerando l'età del costruito sarà sempre più diffuso lo studio dei fenomeni di degrado delle nostre strutture. Notevoli progressi sono stati fatti fino ad ora grazie allo sviluppo della sensoristica ed ai nuovi sistemi di gestione di dati. Il lavoro ha analizzato lo sviluppo delle più recenti tecniche e metodologie, grazie alle quali i monitoraggi sono divenuti sempre più precisi ed affidabili. È stato realizzato un focus sull'industria e su quanto il monitoraggio strutturale potrebbe assimilare. L'origine del monitoraggio è di carattere industriale. Ad oggi la sensoristica sviluppata in merito è di ampio spettro. Sensori induttivi e capacitivi, encoder, accelerometri e sensori di temperatura vengono utilizzati per monitorare le variabili di processo e l'efficienza degli impianti. Sistemi elettronici di input e output gestiscono i segnali e avvisano gli operatori in caso di guasto o di parametri fuori soglia. Gli avvisi possono essere gestiti anche per richiedere l'intervento di manutenzione ottimizzando quindi le fermate di produzione. Moltissimi sensori sono utilizzati per le strutture per le quali possiamo suddividere le tipologie di monitoraggio in statico, dinamico e geotecnico. La diagnostica strutturale ha lo scopo di indagare sulle proprietà e sulla qualità del materiale posto in opera nelle strutture. È anche in grado di dare informazioni sul grado di usura dei materiali che stanno svolgendo la loro funzione da diversi anni. Le tipologie di prove sono distinguibili in prove meccaniche e prove acustiche. Le indagini con queste metodologie sono volte a stabilire parametri in situ come la resistenza massima, lo stato di sollecitazione, la qualità del materiale da costruzione, eventuali fratture non visibili. Per applicazioni di grande estensione, il monitoraggio è in grado di dare una risposta parziale, dovuta al numero limitato di sensori

tradizionali da poter installare. Il calcestruzzo 'intelligente' è un materiale innovativo che permette di autodiagnosticare deformazioni impreviste tramite l'utilizzo di una rete di nanotubi di carbonio inseriti nella matrice cementizia. I nanotubi di carbonio sono impiegati per la realizzazione di materiali compositi intelligenti. Quando la quantità di nanoparticelle nel composito materiale sono correttamente disperse, il materiale diventa elettricamente conduttivo. In tale condizione, un carico di compressione esterno determina una maggiore interazione tra le particelle ed una maggiore conducibilità elettrica. Al contrario, una tensione di trazione provoca l'effetto opposto, con una conseguente diminuzione della conducibilità. Il monitoraggio sismico degli edifici presenti sul territorio nazionale deve essere considerato come un aspetto primario per la sicurezza delle persone. Inoltre, grazie al monitoraggio in continuo, anche i costi relativi all'emergenza sismica in Italia potranno essere abbattuti. Il sistema di monitoraggio 'real time' dello spostamento di interpiano consiste in un'asta vincolata tramite cerniere ai piani consecutivi dei quali si vuole conoscere lo spostamento relativo di interpiano, strumentata mediante 3 accelerometri biassiali. Il monitoraggio tramite telerilevamento è un'attività chiave per la valutazione delle condizioni di molte opere dell'ingegneria civile. In generale, l'interferometria SAR si è rivelata un ottimo strumento per gli ingegneri responsabili del monitoraggio strutturale, in quanto in grado di fornire informazioni sulle deformazioni superficiali del suolo e delle strutture, con precisione millimetrica e con buona risoluzione spaziale. È fondamentale l'utilizzo di sistemi di monitoraggio in continuo, in particolare su strutture come ponti e gallerie, nei quali, oltre qualsiasi ragione economica, la sicurezza e la funzionalità dell'opera devono essere

garantite nel corso di anni. Il presente elaborato ha esaminato in dettaglio, presentando anche alcuni casi di studio, la tematica del monitoraggio e la diagnostica strutturale. Sono emersi aspetti importanti, in continua evoluzione, che oggi devono necessariamente far parte del ciclo di vita di una struttura, dove il controllo mira a garantire la sicurezza degli utenti nonché a guidare il progettista verso interventi ottimali ed efficienti.

BIBLIOGRAFIA

Abdelfatah Kerrouche, W. H. O. Boyle, Tong Sun, K. T. V. Grattan, J. W. Schmidt, B. Taljsten, Enhanced FBG sensor-based system performance assessment for monitoring strain along a prestressed CFRP rod in structural monitoring, *Sensors and Actuators, A* 151, 132-137, 2009

Abu Al-Rub, R. K., Ashour, A.I., Tyson B. M., On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 35, 647-655, 2012

Ansari F., Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring, *Intell Mater SystStruct*, 18:879-89, 1998

Azhari F., Banthia N., Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing, *Cement and Concrete Composites*, 34, 866-73, 2012

Bibbee A. et al., Economic Effects of the 1999 Turkish Earthquakes: An Interim Report, OECD Economics Department Working Papers, No. 247, OECD Publishing, 2000

Brownjohn J. M. W., Structural health monitoring of civil infrastructure, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365, 589-622, 2007

Brunetti A., Scancelli S., Mazzanti P., Moretto S., L'Interferometria SAR Terrestre per il monitoraggio geotecnico e strutturale, n 56 rivista *Ingenio*, 2017

Bursi O.S., *Appunti delle lezioni di ingegneria sismica*

Merzbacher C. I., Kersey A. D., Friebele E. J., Fiber optic sensors in concrete structures: a review, *Smart Materials and Structures* 5, 196-208, 1996

Cao J., Chung D. D. L., Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research*, 34, 481-485, 2004

Çelebi M., Real-Time Seismic Monitoring of Structures: Data Handling and Case Studies, Ed. Sinan Akkar, PolatGülkan, and Torild van Eck. *Earthquake Data in Engineering Seismology* 14: 235-245, 2011

Chuah S., Pan Z., Sanjayan J. G., Wang C. M., Duan W. H., Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide, *Construction and Building Materials* 73, 113-124, 2014

Cicco S. R., Farinola G. M., Martinelli C., Naso F., Tiecco M., Pd-Promoted Homocoupling Reactions of Unsaturated Silanes in Aqueous Micelles. *European Journal of Organic Chemistry*, 12, 2275- 2279, 2010

Coppola L., Buoso A., Corazza F., Electrical properties of carbon nanotube cement composites for monitoring stress conditions in concrete structures. *Applied Mechanics and Materials*, 82, 118-123, 2011

D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., Porfiri M., Laflamme S., Electromechanical Modelling of New Nanocomposite Carbon Cement-based Sensors for Structural Health Monitoring, *Structural Health Monitoring*, 14(2), 137-147, 2014

D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., Il Calcestruzzo nanocomposito 'intelligente' per il monitoraggio delle costruzioni, n. 42 rivista *Ingenio*, 2016

Dolce M., Presentazione Conferenza ANIDIS 2013, Padova, 2013

Dongsheng Li, Zhi Zhou, Jinping Ou, Development and sensing properties study of FRPFBG smart stay cable for bridge health monitoring applications, *Measurement* 44, 722-729, 2011

Dunbar Paula K., Professor Roger G. Bilham, Professor Melinda J. Laituri, Earthquake Loss Estimation for India Based on Macroeconomic Indicators, *Risk Science and Sustainability, NATO Science Volume 112*, pp 163-180, 2003

Fu-Zhen Xuan, Hongwei Tang, Shan-Tung Tu, In situ monitoring on prestress losses in the reinforced structure with fiber-optic sensors, *Measurement* 42, 107-111, 2009

Porco G., Romano D., Morrone F., Structural health monitoring with fibre optic sensors: a studying case, APCNDT 2009, The 13th Asia-Pacific Conference on Destructive Testing, 8-13 Novembre 2009 Yokoama – Japan

Galao O., Baeza F. J., Zornoza E., Garcés P., Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture, *Cement and Concrete Composites*, 53, 162-169, 2014

Li H., Li D., Song G., Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering, *Engineering Structures* 26,1647-1657, 2004

Han B., Yu X., Ou J., Multifunctional and smart nanotube reinforced cement-based materials. In *Nanotechnology in Civil Infrastructure. A Paradigm shift*, Gipal Krishnan K., Birgisson B., Taylor P., Attoh-Okine N. Editors – Springer, 1-48, 2011

Han B., Guan H., Ou J., Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors, *Sensors and Actuators A*, 135, 360-369, 2007

Han B., Ou J., Embedded piezoresistive cement based stress/strain sensors, *Sensors and Actuators A*. 138, 294-298, 2007

Harms T., Sedigh S., Bastianini F., Structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks, *IEEE, Instrumentation & Measurement Magazine*, 13, 14-8, 2010

Mao J. H., Jin W. L., He Y., Cleland D. J. and Bai Y., A novel method of embedding distributed optical fiber sensors for structural health monitoring, *Smart Materials and Structures* 20, 125018 (9pp), 2011

Henault J. M., Quiertant M., Delepine-Lesoille S., Salin J., Moreau G., Taillade F., Benzarti K., Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system, *Construction and Building Materials* 37, 916-923, 2012

Konsta-Gdoutos M. S., Metexa Z. S, Shah S. P., Highly-dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials, *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1052-9, 2010

Li G. Y., Wang P. M., Zhao X., Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, 29, 377-382, 2007

Li H., Xiao H., Ou J., Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement based composites, *Cement and Concrete Composites*, 28, 824-828, 2006

Li H., Xiao H., Ou J., A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*, 34, 435-438, 2003

Lourie O., Wagner D. E., Buckling and collapse of embedded carbon nanotube, *Physical review Letter*, 1998

Materazzi A. L., Ubertini F., D'Alessandro A., Carbon nano tube cement-based transducers for dynamic sensing, *Cement and Concrete Composites*, 37, 2-11, 2013

Muto N., Yanagida H., Nakatsuji T., Sugita M., Ohtsuka Y., Arai Y., Design of intelligent materials with self-diagnosing function for preventing fatal fracture, *Smart Materials and Structures*, 1(4), 324-329, 1992

Page McAndrew T., Laurent P., Havel M., Roger C., Arkemagraphistrength® multi-walled carbon nanotubes, Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, *NSTI Nanotech, Nanotechnology*, 1, 47-50, 2008

Paulo Antunes, Humberto Varum, Paulo André, Optical FBG Sensors for Static Structural Health Monitoring, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, *Procedia Engineering* 14, 1564-1571, 2011

Porco G., Romano D., Valer Montero G. F., Monitoraggio e controllo di strutture in c.a. di nuova realizzazione: un caso studio con l'utilizzo della fibra ottica, n. 53 rivista *Ingenio*, 2017

Rainieri C., Pannunzio C., Fabbrocino G., Song Y., Shanov V., Schulz M. J., Analisi comparativa di nanocompositi a matrice cementizia per il monitoraggio strutturale, *Atti del Convegno AIMETA*, Torino, 17-20 Settembre 2013

Rodrigues C., Fèlix C., Lage A., Figueiras J., Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges, *Eng. Struct*, 32: 1993-2002, 2010

Shah S. P., Konsta-Gdoutos M. S., Metexa Z. S., Mondal P., Nanoscale Modification of Cementitious Materials, In: *Nanotechnology in Construction 3*, edited by Z. Bittnar et al, Springer, pp 125-130, 2009

Sihai W., Chung D. D. L., Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement, *Cement and Concrete Research*, 31, 141-147, 2001

Yeo T. L., Yuan Y., Boswell L. F., Sun T., Grattan K. T. V., Optical fibre sensors for the measurement of concrete sample properties following exposure to freeze/thaw test, *Sensors and Actuators A* 153, 166-170, 2009

Trapani D., A monitoring method for after-earthquake damage evaluation of buildings. Ph. D. thesis, Doctoral School in Engineering of Civil and Mechanical Structural Systems, University of Trento, 2015

Trapani D., Safequake: il sistema di monitoraggio sismico real time di edifici, n. 47 rivista *Ingenio*, 2016

Ubertini F., Laflamme S., Ceylan H., Materazzi A. L., Cerni G., Saleem H., D'Alessandro A., Corradini A., Novel Nanocomposite Technologies for Dynamic Monitoring of Structures: a Comparison between Cement-Based Embeddable and Soft Elastomeric Surface Sensors, *Smart Materials and Structures*, 23(4), 12pp, 2014

Ubertini F., Materazzi A. L., D'Alessandro A., Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nano tube cement-based sensors. *Engineering Structures*, 60, 265-275, 2014

Wen S., Chung D. D. L., Model of piezoresistivity in carbon fiber cement *Cement and Concrete Research*, 36, 1879-85, 2006

Djinovic Z., Tomic M., Gamauf C., Fiber-optic Interferometric Sensor of Magnetic Field for Structural Health Monitoring, *Proc. Eurosensors XXIV*, September 5-8, 2010, Linz, Austria. *Procedia Engineering* 5, 1103-1106, 2010