

MONITORAGGIO CONTINUO DELLE GRANDI STRUTTURE

Autori: EDDY DASCOTTE⁽¹⁾, JACQUES STROBBE⁽¹⁾, ULF T. TYGESEN⁽²⁾

Traduzione e adattamento: FRANCESCO PALLONI, SmartCAE srl

IL CASO DI STUDIO DELLO STONECUTTERS BRIDGE A HONG KONG



⁽¹⁾ Dynamic Design Solutions (DDS) NV, Belgium

⁽²⁾ Rambøll Oil and Gas, Denmark

Lo Stonecutters Bridge di Hong Kong è un ponte strallato, con due torri collocate nel retroporto del congestionato porto per container Kwau Chung, frequentato dalle navi portacontainer più grandi del mondo. Possiede una campata principale di 1018 metri attraverso il canale Rambler e una lunghezza complessiva di circa 1.6 km. Si trova posizionato a 73.5 metri sopra il livello del canale di navigazione. Il ponte è supportato da due torri di cemento e acciaio alte 290 metri. È largo 53 metri e la sua sezione è formata da due scatolati continui collegati tra loro attraverso travi. Al momento in cui gli autori hanno scritto l'articolo, lo Stonecutters era il secondo ponte strallato al mondo per lunghezza, e uno dei due soli ponti strallati con una campata di oltre 1 km.

Il dipartimento delle autostrade di Hong Kong ha sviluppato un sistema per il monitoraggio dell'integrità strutturale e del vento (Wind And Structural Health Monitoring System, WASHMS) per tenere sotto controllo le prestazioni strutturali dello Stonecutters Bridge al fine di decidere tempestivamente il blocco della struttura nel caso in cui un evento porti al superamento dei limiti di servizio. A questo scopo è stata realizzata una matrice di oltre 1,700 sensori, che sono stati installati durante la costruzione della struttura. Questi includono sensori per rilevare l'integrità strutturale e sensori ambientali in grado di misurare deformazioni, allungamenti, accelerazioni, temperatura e condizioni di vento (Figura 1). Tutto ciò rende probabilmente lo Stonecutters Bridge il ponte più strumentato al mondo. I requisiti di sicurezza hanno focalizzato l'attenzione sul monitoraggio delle vibrazioni, rilevando sia i livelli di accelerazione che le deformazioni misurate mediante ricevitori GPS. I segnali di accelerazione sono utilizzati primariamente per l'Operational Modal Analysis (OMA) usata per ottenere i valori di riferimento con cui validare e aggiornare i modelli ad elementi finiti del ponte. Gli spostamenti misurati e i modelli ad elementi finiti aggiornati sono utilizzati all'interno di una procedura ibrida che consente di calcolare allungamenti, stress, forze e momento in ogni punto del ponte. Il monitoraggio delle vibrazioni, combinato con il sistema di valutazione dell'integrità strutturale e della fatica, contribuisce alla sicurezza consentendo una migliore pianificazione delle ispezioni e dei lavori di manutenzione.

Dal 2011 è operativo un sistema personalizzato di trattamento e analisi dei dati, sviluppato da DDS utilizzando la piattaforma FEMtools Framework (www.femtools.com). Il sistema è costituito dai seguenti componenti: (a) Operational Modal Analysis delle storie temporali delle accelerazioni. L'estrazione modale è automatizzata e utilizzata per il model updating e il monitoraggio dei parametri modali. (b) Monitoraggio degli spostamenti rilevati dai ricevitori GPS. Gli spostamenti vengono utilizzati come input per il recupero degli stress in tutti i punti della struttura utilizzando il modello ad elementi finiti del ponte. Gli stress sono utilizzati per il monitoraggio dell'accumulo di fatica. (c) Correlazione tra stress, forze e momenti con le condizioni ambientali (vento, temperatura).

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

L'estrazione dei parametri modali è fatta utilizzando due metodi OMA consolidati per applicazioni industriali: (i) Stochastic Subspace Identification (SSI) utilizzando un software esterno stand-alone e (ii) Polyreference Least Squares Complex Frequency-Domain Estimator (pLSCF) che è integrato nel software di monitoraggio WASHMS dello Stonecutters Bridge. I confronti hanno rilevato un'alta similitudine nei risultati ottenuti con questi due differenti metodi OMA, che hanno permesso di validare l'affidabilità delle forme modali ottenute. Entrambi i metodi producono diagrammi di stabilizzazione molto chiari, pertanto sono adatti all'automatizzazione del processo di selezione dei poli. La procedura OMA basata su pLSCF integrata nel framework è più adatta dell'altra per l'intera automatizzazione del processo in quanto permette un flusso di dati più semplice tra la lettura delle accelerazioni e lo strumento che post-processa le forme modali.

Sul campo è stata studiata l'influenza della lunghezza delle registrazioni e si è visto che, in un giorno con forte vento, con una registrazione di 3 ore si ottiene lo stesso numero di forme modali che si ottengono con 1 ora di registrazione. Effettuando la media dei segnali che vengono acquisiti a entrambe le estremità del ponte aumenta la possibilità di catturare più forme modali. Il monitoraggio su lunghi periodi ha anche insegnato che le forme modali rimangono molto stabili durante il giorno, mentre lo smorzamento modale varia significativamente nelle ore di punta del traffico.

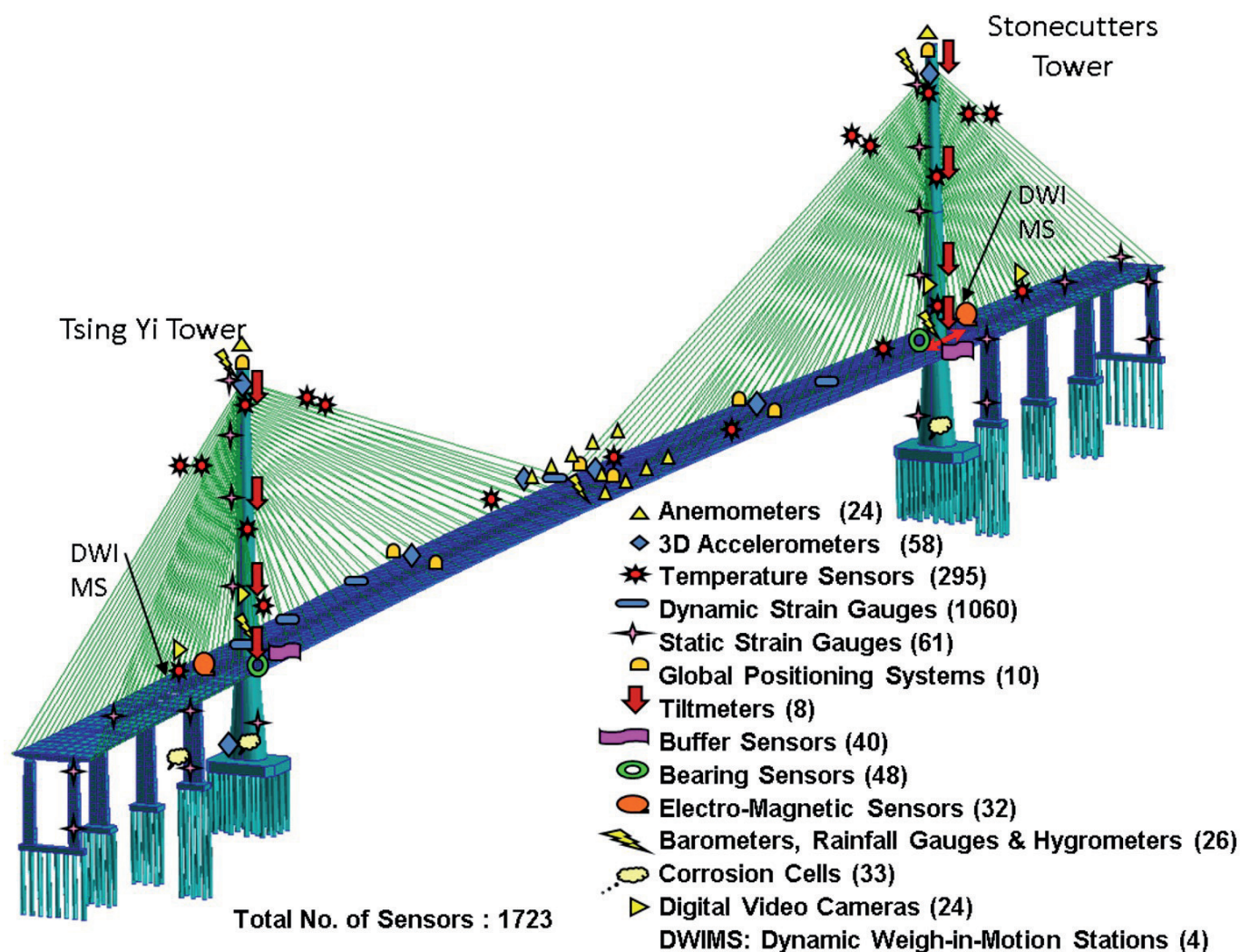


Figura 1 - Layout del Sistema di sensori sullo Stonecutters Bridge

RECUPERO DEGLI STRESS E VALUTAZIONE DELLA FATICA

È stata realizzata una routine personalizzata che recupera gli spostamenti rilevati da 8 ricevitori GPS, precedentemente archiviati in un database SQL, per poi trasferirli a un programma per il monitoraggio delle deformazioni e degli stress (Figura 2). Il sistema GPS converte il segnale grezzo (latitudine, longitudine e altezza) in spostamenti del sensore espressi nel sistema di coordinate del ponte, prima di archivarle nel database SQL. I GPS sono posizionati al vertice delle torri e su entrambi i fianchi del ponte a una campata di 1/4, 1/2 e 3/4. Gli spostamenti misurati dal GPS (Leica) hanno una precisione degli spostamenti di ± 2 cm. Questo si ottiene utilizzando un segnale per compensare l'errore emesso da un trasmettitore di riferimento posizionato a terra del quale è nota la posizione esatta. La frequenza di campionamento è di 20 Hz. Le condizioni atmosferiche a Hong Kong sono in genere adatte per il funzionamento corretto del sistema GPS. Ad ogni modo le prestazioni del sistema possono essere influenzate negativamente dal passaggio di nubi dense. Durante il periodo di messa a punto del sistema si è osservato che il segnale GPS talvolta mostra un comportamento spurio oppure diventa temporaneamente non disponibile. Diventa quindi imperativo un trattamento del segnale appropriato per condizionare i dati (es. rimozione dei valori anormali, interpolazione delle misurazioni mancanti, ...).

La conoscenza degli stress derivanti dalla reale deformazione del ponte durante la sua vita in servizio è essenziale perché costituisce l'input per la procedura di monitoraggio dell'accumulo di fatica. Ciò permetterà di valutare la vita residua della struttura, che è stata progettata per una durata di 120 anni. Inoltre, le informazioni sulle condizioni di carico reali che gravano sul ponte vengono utilizzate come principale supporto per prendere le decisioni in merito alle ispezioni e agli intervalli di manutenzione.

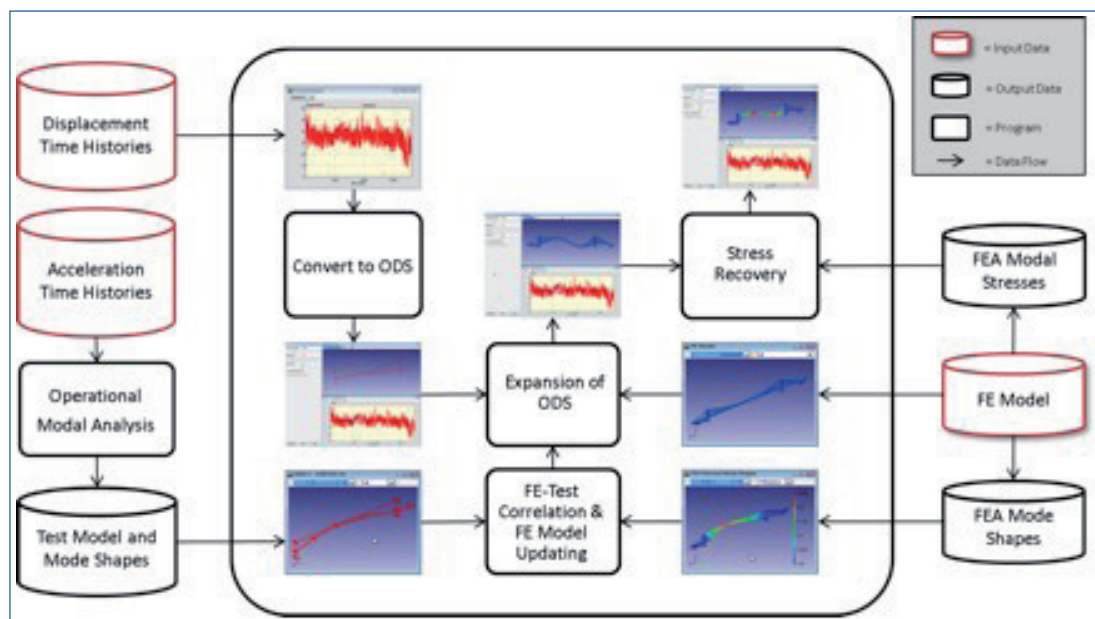


Figura 2 - Post-processing di spostamenti, accelerazioni e stress

Anche se è possibile calcolare gli stress utilizzando alcuni modelli ad elementi finiti validati del ponte, utilizzando le informazioni ottenute dai sensori del WASHMS (specificamente vento, temperatura, traffico, sismica) unite a un approccio statistico e probabilistico, il sistema GPS per il recupero degli stress fornisce un'alternativa che permette di registrare e monitorare le deformazioni del ponte in continuo. Questo è particolarmente utile per gestire situazioni incidentali quali la collisione di un vascello o condizioni estreme di carico transitorio come durante i tifoni o i terremoti. I dati di stress e strain ottenuti dal processo di recupero possono essere utilizzati come un'alternativa alla registrazione degli allungamenti usando gli estensimetri. Durante la vita di servizio, gli allungamenti registrati rimangono la principale fonte di informazioni per il monitoraggio della fatica, che vengono post-processati utilizzando il conteggio del rainflow e la regola di Miner. Inoltre gli allungamenti sperimentali servono come riferimento per la validazione e la calibrazione del modello ad elementi finiti. Le economie che possono essere realizzate con l'approccio basato su GPS sono comunque significative e quindi ci si aspetta che, col tempo, mano a mano che crescerà la confidenza a la robustezza di questo approccio, verrà rivalutata la possibilità di eseguire registrazioni in continuo degli strain.

CORRELAZIONE CON VENTO E TEMPERATURA

I ponti strallati come lo Stonecutters Bridge sono soggetti a condizioni ambientali variabili come temperatura e vento. Questi effetti ambientali inducono cambiamenti nelle deformazioni e nelle proprietà modali che possono mascherare le modifiche provocate da un danno strutturale. Per ovviare a questo inconveniente sono stati realizzati altri sistemi di lettura per recuperare dati ambientali registrati nel database centrale. Questi dati includono velocità, direzione, spettro del vento, temperatura lungo posizioni differenti lungo il ponte. Questi segnali vengono utilizzati per correlare i parametri modali, gli spostamenti massimi del ponte e delle torri, le forze e i momenti alla base delle torri. L'elaborazione dei risultati produce grafici a dispersione e istogrammi, calcolando varie quantità statistiche o eseguendo analisi di regressione. Questa operazione aiuta gli ingegneri del ponte ad accrescere la loro conoscenza sulla variabilità dei parametri di monitoraggio, che sono utilizzati dal sistema di classificazione e valutazione dell'integrità della struttura.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

E. Dascotte, J. Strobbe, U. Tygesen, **Continuous Stress Monitoring of Large Structures**. Presented at the 5th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), May 2013, Guimaraes, Portugal.