

MONITORAGGIO CONTINUO DI GRANDI STRUTTURE

Autori: Eddy Dascotte ⁽¹⁾, Jacques Strobbe ⁽¹⁾, Ulf T. Tygesen ⁽²⁾

Traduzione e adattamento: Francesco Palloni, SmartCAE srl

APPLICAZIONE DEL DIGITAL TWIN ALLE GRANDI STRUTTURE

In questo primo articolo illustriamo un metodo ibrido numerico-sperimentale che permette di costruire il “digital twin” di una grande struttura per determinarne in tempo reale lo stato di salute.

L'obiettivo comune di tutti i sistemi di monitoraggio è quello di determinare l'accumulo della fatica nella struttura. Per raggiungere questo scopo è necessario considerare la storia di sollecitazione in ogni punto della struttura monitorata sotto l'azione delle reali condizioni di carico. Da una parte è possibile stimare le storie di carico soltanto con modelli computazionali, ma questa scelta soffre di molte incertezze legate alle caratteristiche del materiale e alle effettive condizioni di esercizio. Dall'altra parte, anche se è possibile rilevare sperimentalmente la storia delle sollecitazioni attraverso misure estensimetriche, possono esserci comunque dei problemi. Può accadere che le zone di concentrazione delle sollecitazioni e i giunti possano essere molto difficili, se non addirittura impossibili, da strumentare (si pensi ad esempio alla parte sommersa di una struttura off-shore). Inoltre gli estensimetri sono sensori fragili e hanno dimostrato di non essere affidabili per misurazioni di lungo periodo. Con l'approccio ibrido numerico-sperimentale proposto dagli autori è possibile ottenere lo stato di sollecitazione in ogni punto della struttura in maniera efficiente attraverso la combinazione di un modello ad elementi finiti e la misurazione degli spostamenti e degli stress in un numero limitato di punti selezionati. Infatti combinando la rappresentazione modale della struttura, ovvero deformazioni, stress, forze e momenti modali in tutti gli elementi della struttura, con la storia temporale misurata dai sensori, si possono determinare le sollecitazioni, le forze e i momenti in tutta la struttura utilizzando una procedura di espansione dinamica. Il successo di questo approccio dipende dalla validità del modello ad elementi finiti e dalla procedura di espansione dalla quale si stimano gli stress locali in tutta la struttura, ricombinando i risultati modali.

UN SISTEMA PER IL MONITORAGGIO CONTINUO DEGLI STRESS

Il sistema per il monitoraggio degli stress consiste di strumenti per l'analisi di pre-test, l'analisi modale operativa (Operational Modal Analysis), l'aggiornamento del modello ad elementi finiti (Model Updating), l'espansione modale e il recupero degli stress.

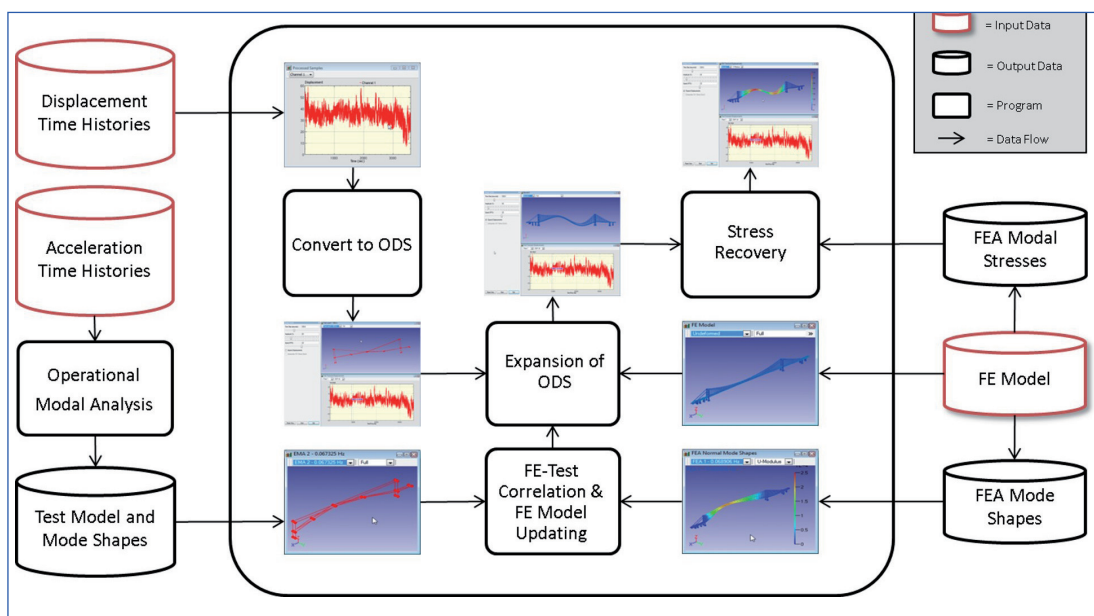
Analisi di pre-test

La fase del pre-test e la verifica del modello consiste nella simulazione del processo di monitoraggio continuo a scopo dimostrativo, per controllare la fattibilità e la riproducibilità del dato sotto le condizioni di misura assunte. La simulazione utilizza un modello ad elementi finiti con un carico dinamico realistico. Vengono calcolate le storie temporali di deformazione e stress in un numero di posizioni selezionate, che verranno successivamente utilizzate come 'dato sperimentale' fittizio. I punti selezionati corrispondono alle posizioni degli strumenti effettivamente utilizzati quali rispettivamente rilevatori GPS per gli spostamenti ed estensimetri per gli stress. La verifica della configurazione di monitoraggio può essere effettuata comparando la storia temporale delle forze e dei momenti ottenuti dal processo di espansione con i risultati di riferimento generati dalla simulazione.

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

⁽²⁾ Rambøll Oil and Gas, Denmark

Figura 1 – Flowchart del metodo ibrido numerico-sperimentale



Operational Modal Analysis

Il monitoraggio dinamico utilizza accelerometri e l'Operational Modal Analysis (OMA) per estrarre i parametri modali globali della struttura, tra cui frequenze di risonanza, forme modali e smorzamento modale. Questi parametri modali costituiscono le basi per le successive analisi dinamiche dei carichi operativi quali vento, onde, traffico e sisma. Attraverso di essi è possibile decidere un eventuale aggiornamento del modello o un suo affinamento. Inoltre queste misure costituiscono il dato di partenza per l'effettivo monitoraggio che consente di stimare lo stato di salute della struttura. È richiesto un alto livello di automatizzazione per eseguire l'analisi modale operativa in continuo, con un intervento umano minimo.

Aggiornamento del modello FEM

L'aggiornamento del modello FEM (Finite Element Model Updating) è un passo necessario per validare il modello ad elementi finiti e aggiustare le stime per quei parametri di input che sono incerti. Per aggiornare il modello FEM, l'analista ha bisogno di accedere ai parametri che definiscono il modello, e alle risposte che sono confrontare con i valori di riferimento determinati sperimentalmente. Una volta individuati parametri e risposte, il software di aggiornamento deve calcolare la sensibilità (definita come il tasso di variazione della risposta al variare del parametro) e stimare la variazione da applicare al parametro per ridurre globalmente le differenze tra ciò che viene calcolato rispetto a ciò che viene misurato. Per le grandi strutture i dati di riferimento sono in genere i parametri modali (frequenze, forme modali) ottenuti attraverso la OMA. La scelta dei parametri di aggiornamento è la chiave per aumentare la confidenza nel modello ad elementi finiti. I parametri di aggiornamento possono includere le proprietà del materiale, le proprietà geometriche equivalenti (spessore delle piastre, sezione delle travi, ...), rigidità dei giunti e dei vincoli. La loro disponibilità come parametro globale o locale dipende dal software ad elementi finiti che viene utilizzato. Se il software mette a disposizione altre funzioni avanzate quali matrici di massa e rigidità, o superelementi, si possono ottenere benefici nelle prestazioni di calcolo. In qualsiasi caso, comunque, occorre prevedere lo sviluppo di un programma interfaccia personalizzato per pilotare il codice di calcolo ad elementi finiti, proprietario o commerciale che sia. I parametri possono essere pertanto definiti riferendosi ai dati numerici all'interno del file di input per il solutore.

Espansione modale e recupero degli stress

L'insieme degli spostamenti misurati in un gruppo sparso e limitato di ricevitori GPS può essere espanso a tutti i nodi del modello ad elementi finiti utilizzando il modello aggiornato e un approccio di sovrapposizione modale. Le matrici di trasformazione che sono utilizzate per il processo di espansione degli spostamenti possono essere applicati anche per ottenere forze, momenti, allungamenti e stress in ogni punto della struttura. Questo è un processo molto efficiente che può essere eseguito in tempo reale utilizzando i dati storici GPS e che richiede sia una capacità di archiviazione (storage) limitata che uno sforzo computazionale minimo.

Consideriamo l'espressione seguente che mette in relazione le forze transitorie incognite di elemento con le forze modali di elemento:

$$\{ef(t)\} = \sum_{i=1}^{nmode} q_i(t) \{EF_i\} \quad (1)$$

dove $\{ef(t)\}$ è il vettore delle forze di elemento transitorie a un dato istante temporale t , $q_i(t)$ sono i fattori di partecipazione modale all'istante t , $\{EF_i\}$ è il vettore con le forze di elemento per il modo i e $nmode$ è il numero di modi da prendere in considerazione. Notiamo che le forze di elemento nell'Eq. (1) possono essere sostituite da qualsiasi tipo di dato modale che possiamo calcolare dal modello ad elementi finiti quali spostamenti, allungamenti o stress. Per ogni istante temporale t fornito, i fattori di partecipazione modale sono ottenuti risolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{bmatrix} U_{1,1} & \dots & U_{1,nmode} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ U_{nd,1} & \dots & U_{nd,nmode} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ \vdots \\ q_{nmode}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_{nd}(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

dove $\{u(t)\}$ sono gli spostamenti sperimentali misurati all'istante t , U_i sono gli spostamenti modali per il modo i e nd è il numero dello spostamento misurato.

La validità del processo dipende dal raffinamento del modello ad elementi finiti, dalla scelta appropriata della posizione dei sensori e da un numero sufficiente di forme modali. Inoltre il modello ad elementi finiti deve essere aggiornato continuamente per tenere in conto di ogni modifica strutturale durante la sua vita. Per considerare eventuali effetti non lineari della struttura possono essere utilizzate delle matrici di trasformazione differenti al variare dell'ampiezza degli spostamenti.

Per strutture veramente grandi come i ponti, l'uso dei ricevitori GPS ha dimostrato di essere un tipo di sensore pratico e accurato per costruire l'Eq. (2), ma si possono inserire nel sistema anche gli estensimetri. Nel caso in cui vengano introdotti sensori di tipo differente, occorre prevedere un criterio per la normalizzazione delle variabili. Il numero di forme modali necessario al processo di espansione può essere determinato preventivamente dall'analisi di pre-test, ma nei fatti è limitato a priori dai modi che possono essere realmente determinati attraverso l'analisi modale operativa. Se è necessario migliorare la qualità del processo di espansione è comunque possibile introdurre vettori addizionali come le deformate statiche. Dopo aver affrontato le fondamenta matematiche del metodo, nei prossimi articoli vedremo come questo approccio sia stato utilizzato con successo per il monitoraggio di due grandi strutture reali: un ponte strallato (lo Stonecutter Bridge a Hong Kong) e una piattaforma petrolifera off-shore (la piattaforma Valdemar nel Mare del Nord in Danimarca).

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.