



Introduzione al Monitoraggio Strutturale



Raimondo Betti, Marcello Morgantini¹

Rosario Ceravolo, Cecilia Surace, Marica Pecorelli, Gaetano Miraglia, Erica Lenticchia²

¹: Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, USA

²: Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italia



Spring School on "Structural Health Monitoring of Architectural Heritage"

15 – 16 Giugno 2017



Traffico giornaliero autovetture sui 4 East River Bridges: 485,313

- **Brooklyn Bridge: 125,021**
- **Manhattan Bridge: 71,936**
- **Queensboro Bridge: 180,162**
- **Williamsburg Bridge: 108,194**



Nome	Anno di costruzione
Brooklyn Bridge	1883
Williamsburg Bridge	1903
Manhattan Bridge	1907
Bear Mountain Bridge	1924
Mid Hudson Bridge	1930
G. Washington Bridge	1931
Triborough Bridge	1936
Bronx Whitestone Bridge	1939
Throgs Neck Bridge	1961
Verrazzano Bridge	1964

Traffico giornaliero autovetture sul George Washington Bridge: 289,059

- Ingegneri ed architetti devono affrontare un “nuovo” problema:

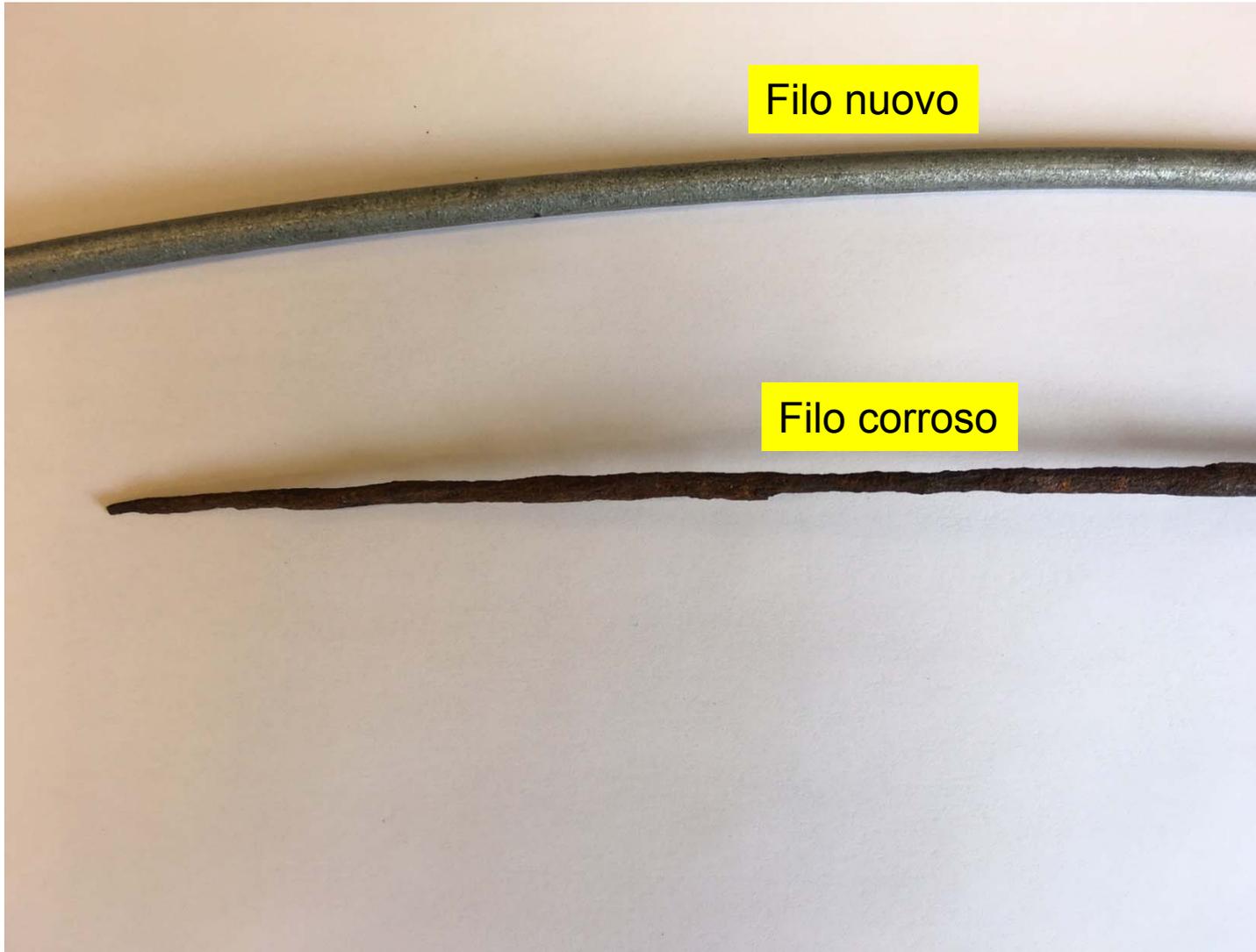
Edifici, ponti, strade, acquedotti, etc. (infrastrutture) stanno “invecchiando” e si stanno avvicinando alla loro “vita di progetto” .

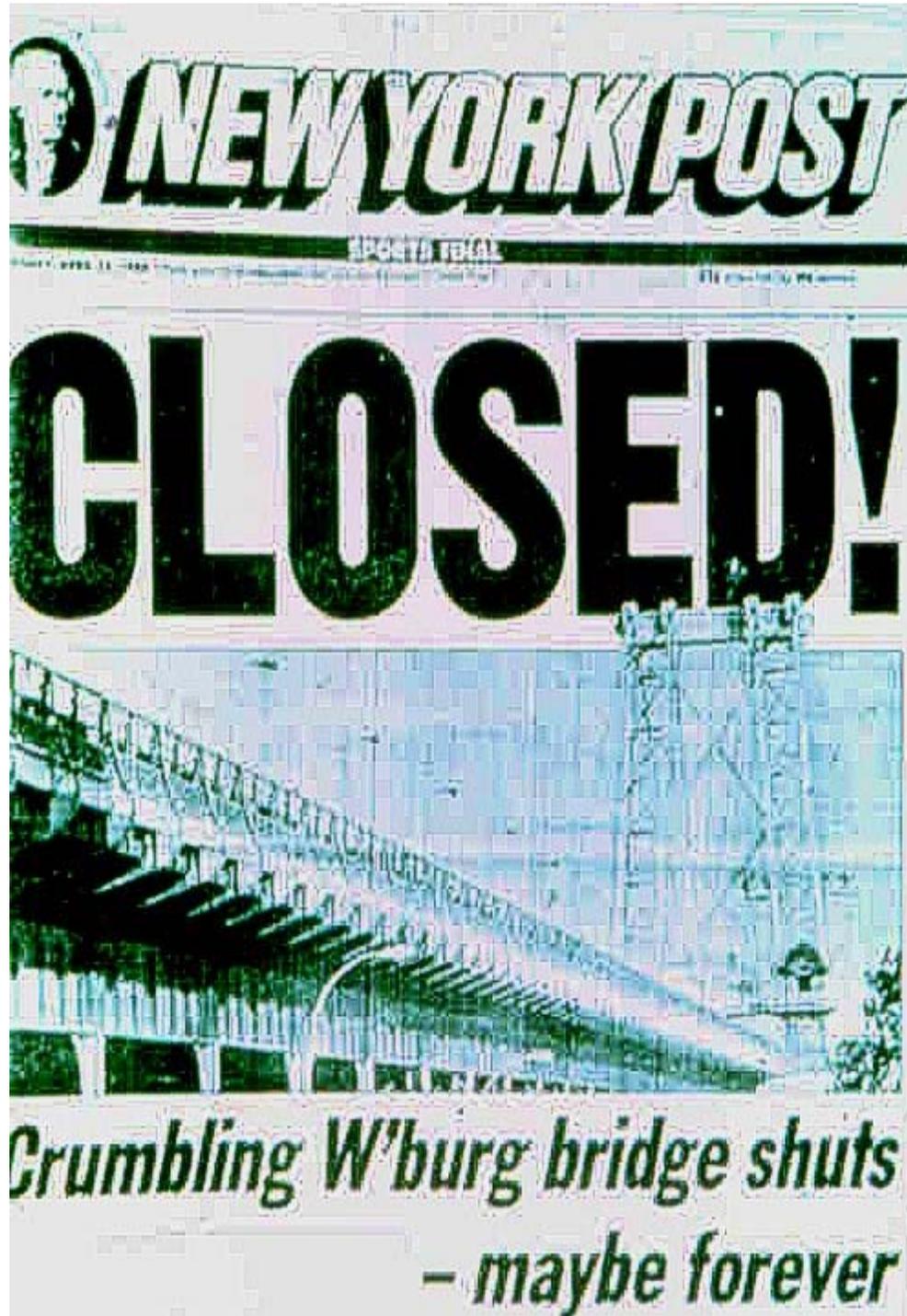
- A maggior ragione, i beni culturali ed architettonici.
- Queste strutture e beni non possono essere facilmente rimpiazzati e devono essere sempre mantenute in servizio.
- Necessita' di avere tecniche e tecnologie che aiutino ingegneri ed architetti a capire:
 - quello che e' lo stato attuale della struttura,
 - quando si manifesta un danno,
 - come meglio programmare l' eventuale ristrutturazione, ottimizzando le risorse economiche.
- Importante anche nell' uso di nuovi materiali con comportamenti a lungo termine ancora sconosciuti.

Per il caso di un cavo principale di un ponte sospeso, pensiamo di avere questo



..... quando in realta' abbiamo questo!...





.... e poi succede questo!

15 Aprile 1984!

Williamsburg Bridge:

- costruito nel 1903
- 108,194 automobili al giorno
- 4 cavi principali
- Ciascun cavo ha 7,696 fili.

.... da qui
il bisogno di pianificare
MEGLIO
la manutenzione.

Come pianificare la manutenzione

- E' necessario determinare il livello di danno appena possibile, sia per ragioni di sicurezza che per ragioni di costo (esempio, dopo un terremoto).
- Differenti strategie per la riabilitazione:
 - **Run-to-failure**: La struttura rimane in funzione fino a quando una componente cede e viene rimpiazzata. Usata inizialmente per i ponti di NYC.
 - **Time-based maintenance**: le componenti critiche vengono rimpiazzate dopo un periodo di tempo stabilito a priori, indipendentemente dallo stato della componente. Tipico dell' industria automobilistica ed aeronautica.
 - **Condition-based maintenance**: le componenti strutturali vengono rimpiazzate in base alla loro condizione. Ci deve essere un sistema che consente di monitorare la struttura in generale e le singole componenti. Questo sistema puo' essere:
 - L' ispettore che conduce il sopralluogo,
 - Un sistema di sensori (per esempio accelerometri, estensometri, etc) che forniscono misurazioni della risposta strutturale che devono essere interpretate dall' ingegnere.
- E' in quest' ottica che si colloca una strategia di Structural Health Monitoring.

Structural Health Monitoring (SHM)

- Con il termine “Structural Health Monitoring” (in italiano “Monitoraggio della Salute della Strutture”) si intende l’implementazione di una strategia per determinare il livello di danno presente in una struttura.
- Questa strategia comporta:
 - Il monitoraggio della risposta della struttura durante diversi periodi di tempo,
 - L’analisi di questi dati per estrarne delle caratteristiche che sono sensibili al danno,
 - L’analisi statistica di queste caratteristiche per stabilire, con una certa probabilità, lo stato attuale della struttura.
- Una strategia SHM può funzionare:
 - A lungo termine: campagne di monitoraggio periodiche possono aiutare a capire se e quali cambiamenti sono avvenuti nel tempo.
 - A breve termine: dopo un evento di una certa rilevanza (per esempio un terremoto), l’analisi dei dati può aiutare a capire se ci sono stati dei danni (non visibili ad occhio nudo) alla struttura.

Un po' di storia: l' alba dello SHM

Crolli di ponti

- Una pietra miliare in SHM e' il cedimento del Silver Bridge (1967), Pt. Pleasant, V.W., 46 morti.
- Frattura di una singola barra nella catena dovuta ad una fessura di 2.5 mm.



www.pointpleasantwv.org

In risposta, il Congresso USA istituì il programma di ispezione obbligatoria dei ponti.



www.freewebs.com

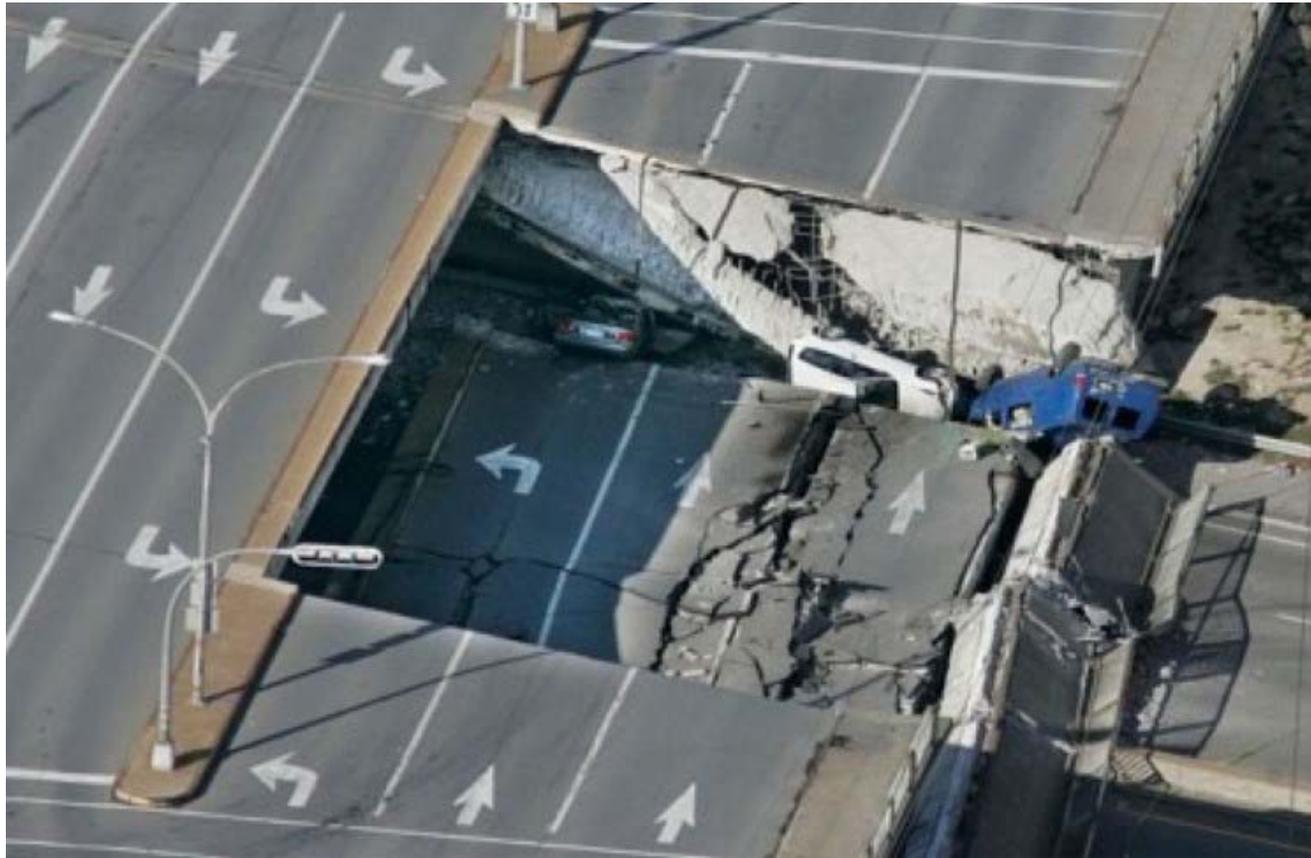
Un po' di storia di crolli di ponti

- Crollo del Mianus Bridge (I-95, Greenwich, CT): 1983, 3 morti.
- Corrosione dell' assemblaggio cerniera-pendolo che sosteneva l' impalcato.



Un po' di storia di crolli di ponti

- Crollo del sovrappassaggio De la Concorde (Montreal, Canada): 2006, 5 morti.
- Armature male posizionate e calcestruzzo di bassa qualità'

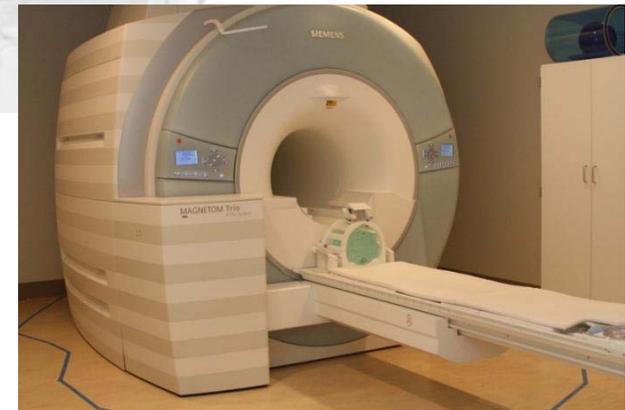
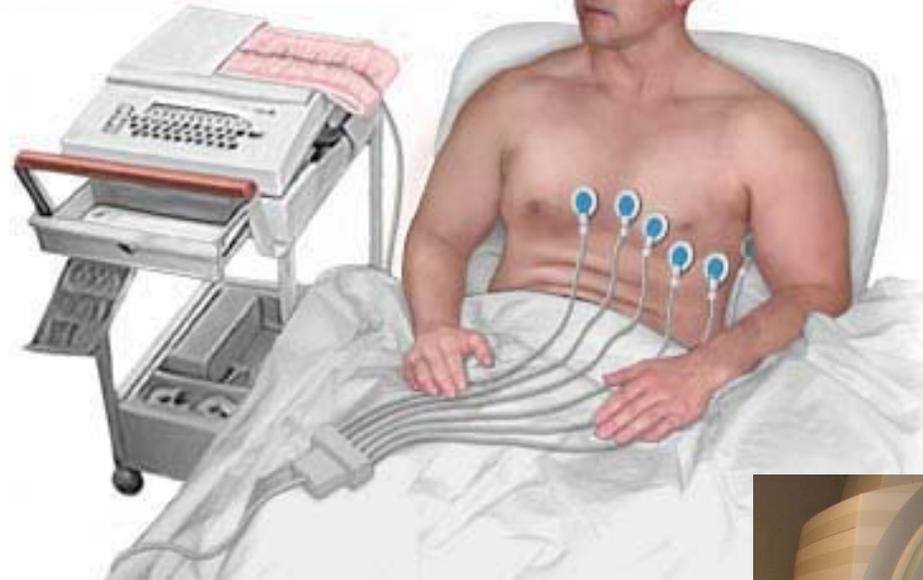
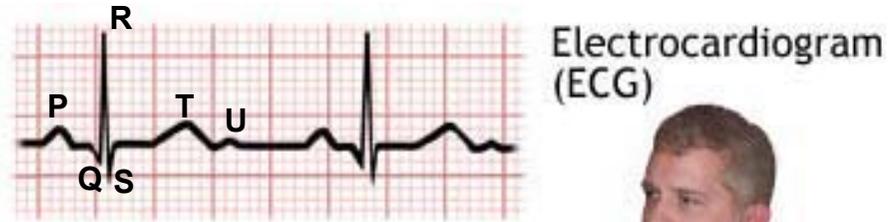


Un po' di storia di crolli di ponti

- Crollo del I-35 Bridge (Minneapolis): 2007, 13 morti.
- Una serie di fattori:
 - Gusset plates sotto dimensionati
 - Aumento del carico permanente del 20% rispetto al carico di progetto
 - Appoggi bloccati.



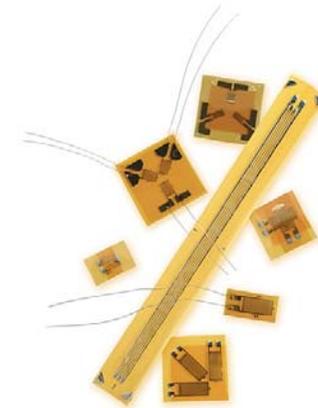
Structural Health Monitoring = Human Health Monitoring



Structural (Bridge) Health Monitoring

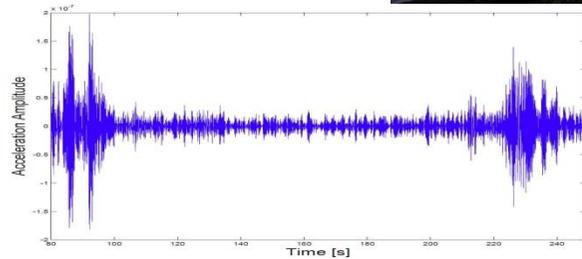


www.conphoto.net



Strain gauges

www.omega.nl



Accelerometers

buildipedia.com



Wireless temperature and RH sensor

www.phaseivengr.com



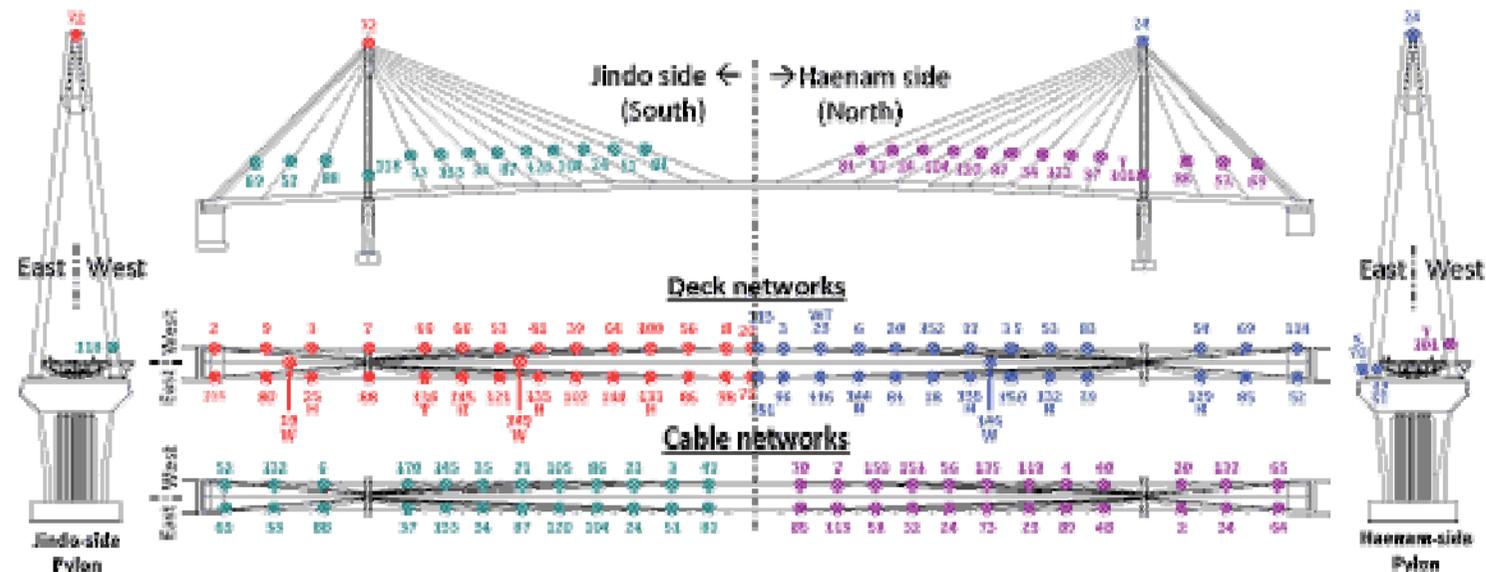
Fiber optic sensors

www.ecocexhibition.com

Un ponte moderno: Jindo Bridge (S. Korea - 2005)



- 113 Wireless Smart Sensor nodes
- 659 channels of data



- ⊗ : Jindo Deck network (single hop)
- ⊗ : Jindo Cable network (multi hop)
- ⊗ : Haenam Deck network (single hop)
- ⊗ : Haenam Cable network (single hop)

W : Anemometer (SHM-DAQ)
T : Temperature

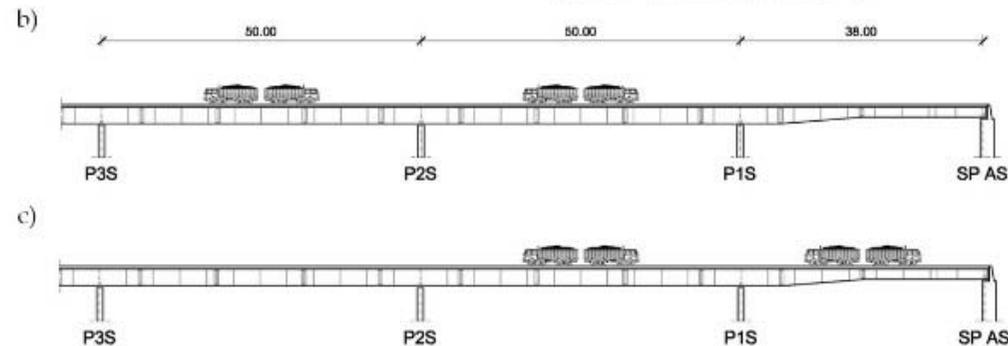
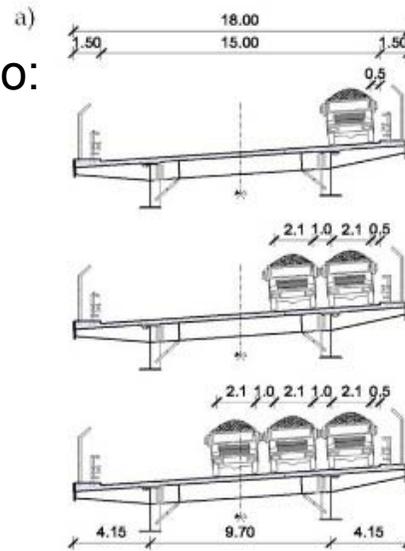
WT : Wind Turbine power
H : High-sensitivity (SHM-H)

S : Strain sensor (SHM-S1)
ST : Strain + Temp correction (SHM-S2)

Cosa monitoriamo: Deformazione statica sotto carico

Sistema di monitoraggio:

- estensimetri
- termometri
- inclinometri
- GPS



Cosa monitoriamo:
La risposta dinamica all' azione
ambientale
(Madre Natura fa il test!)

-) Si usa la risposta dinamica della struttura (misura degli spostamenti, velocità e/o accelerazioni) indotte o da eventi naturali (terremoti, vento) o dall' uomo (traffico).
-) Sistema di monitoraggio:
 - accelerometri
 - estensimetri
 - termometri
 - GPS



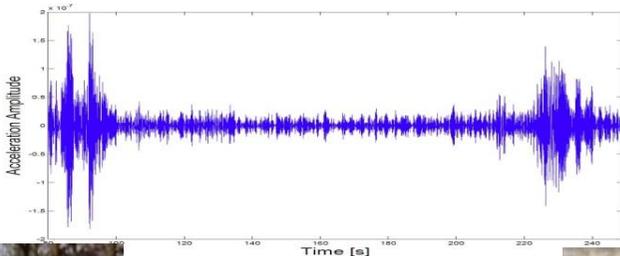
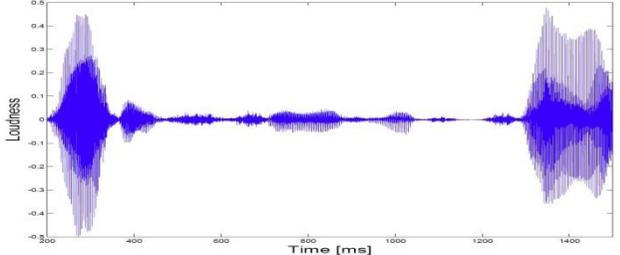
ゴールデンゲート橋
(1937年完成)





SHM usando misurazioni delle vibrazioni

In essenza: da una misurazione, si estraggono delle caratteristiche del segnale e si cerca di individuarne la tendenza (cambio o no?)

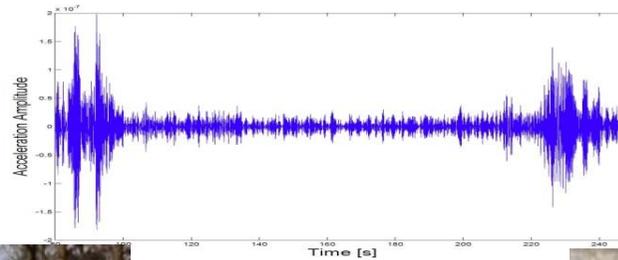
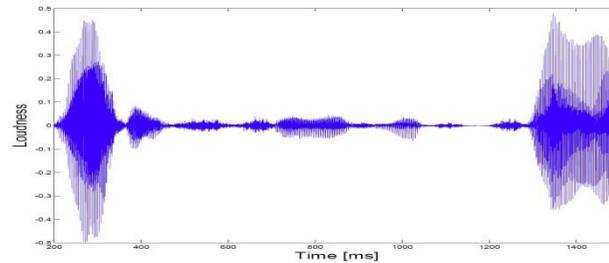


E' QUESTO
O
QUESTO?



SHM usando misurazioni delle vibrazioni

In essenza: da una misurazione, si estraggono delle caratteristiche del segnale e si cerca di individuarne la tendenza (cambio o no?)



E' QUESTO
O
QUESTO?



Il concetto di Danno

- Per “Danno”, si intende un cambio (intenzionale o non) delle proprietà dei materiali e/o delle caratteristiche geometriche di una struttura che influenzano negativamente la performance presente e future della struttura.
- Tipi di danno:
 - Fessurazione: Riduzione di rigidità



Il concetto di Danno

- Per “Danno”, si intende un cambio (intenzionale o non) delle proprietà dei materiali e/o delle caratteristiche geometriche di una struttura che influenzano negativamente la performance presente e future della struttura.
- Tipi di danno:
 - Fessurazione: Riduzione di rigidezza
 - Erosione delle Fondazioni: Cambio delle condizioni al contorno



Il concetto di Danno

- Per “Danno”, si intende un cambio (intenzionale o non) delle proprietà dei materiali e/o delle caratteristiche geometriche di una struttura che influenzano negativamente la performance presente e future della struttura.
- Tipi di danno:
 - Fessurazione: Riduzione di rigidità
 - Erosione delle Fondazioni: Cambio delle condizioni al contorno
 - Allentamento delle Bullonature: Cambio della connettività e dello smorzamento



SHM usando misurazioni delle vibrazioni

- Per “Danno”, si intende un cambio (intenzionale o non) delle proprietà dei materiali e/o delle caratteristiche geometriche di una struttura che influenzano negativamente la performance presente e future della struttura.
- Tipi di danno:
 - Fessurazione: Riduzione di rigidità
 - Erosione delle Fondazioni: Cambio delle condizioni al contorno
 - Allentamento delle Bullonature: Cambio della connettività e dello smorzamento
 - etc.
- La presenza del danno induce delle variazioni delle caratteristiche dinamiche della struttura: idealmente, misurando la risposta dinamica della struttura, dovremmo essere in grado di identificare il danno.

Pattern Recognition

- Il concetto di Danno NON ha senso senza un confronto tra due stati differenti della stessa struttura, uno dei quali rappresenta lo stato NON-Danneggiato.
- Questa struttura e' danneggiata o no?



Per rispondere,
avete usato un
processo di
**Pattern
Recognition**

In SHM, Pattern Recognition risolve il problema di capire se la risposta misurata e' stata generata dalla struttura integra o da quella danneggiata.

C'e' molta matematica dietro tutto questo

$$\boxed{\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{\Phi}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \end{aligned}} \quad \boxed{\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{aligned}}$$

$$\mathcal{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathcal{L}\dot{\mathbf{q}}(t) \cdot \left[\begin{array}{l} \mathbf{x}(k+1) = \hat{\mathbf{\Phi}}\mathbf{x}(k) + \hat{\mathbf{\Gamma}}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{array} \right] \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{v}(k) \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} \mathbf{w}(s)^T \quad \mathbf{v}(s)^T \end{array} \right] \end{array} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{\mathbf{w}\mathbf{w}} & \mathbf{R}_{\mathbf{w}\mathbf{v}} \\ \mathbf{R}_{\mathbf{w}\mathbf{v}}^T & \mathbf{R}_{\mathbf{v}\mathbf{v}} \end{pmatrix} \delta(k-s)$$

$$\mathbf{H}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}\mathbf{\Gamma} & \hat{\mathbf{\Phi}} = (\mathbf{\Phi} + \mathbf{R}\mathbf{C}) \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Gamma} & \hat{\mathbf{\Gamma}} = [(\mathbf{\Gamma} + \mathbf{R}\mathbf{D}) \quad (-\mathbf{R})] \\ \vdots & \\ \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{j-1}\mathbf{\Gamma} & \end{bmatrix} \quad \boxed{\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned}}$$

$$\mathbf{H}(1) = \tilde{\mathbf{O}}\mathbf{\Phi}\tilde{\mathbf{C}} \quad \mathbf{H}(k) = \tilde{\mathbf{O}}\mathbf{\Phi}^k\tilde{\mathbf{C}} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i+1|i+j} \\ \mathbf{Y}_{i|i+j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{X}_{i|i+j-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{W}} \\ \hat{\mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} = \mathbf{U}_1\mathbf{S}\mathbf{V}_1^T = \tilde{\mathbf{O}}\tilde{\mathbf{C}}$$

$$\boxed{\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t)} \quad \mathbf{M} = [\mathbf{D} \quad \mathbf{C}\mathbf{\Gamma} \quad \mathbf{C}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Gamma} \quad \dots \quad \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{l-2}\mathbf{\Gamma}]$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{E}[\mathbf{y}(k)\mathbf{y}(k)^T]^{-1/2}\mathbf{y}(k) \quad \tilde{\mathbf{y}}_i^+ = \mathbf{E}[\mathbf{y}_i^+\mathbf{y}_i^{+T}]^{-1/2}\mathbf{y}_i^+$$

$$\boxed{(\mathbf{C}\mathbf{T})(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{\Phi}\mathbf{T})^j(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{\Gamma}) = \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^j\mathbf{\Gamma}}$$

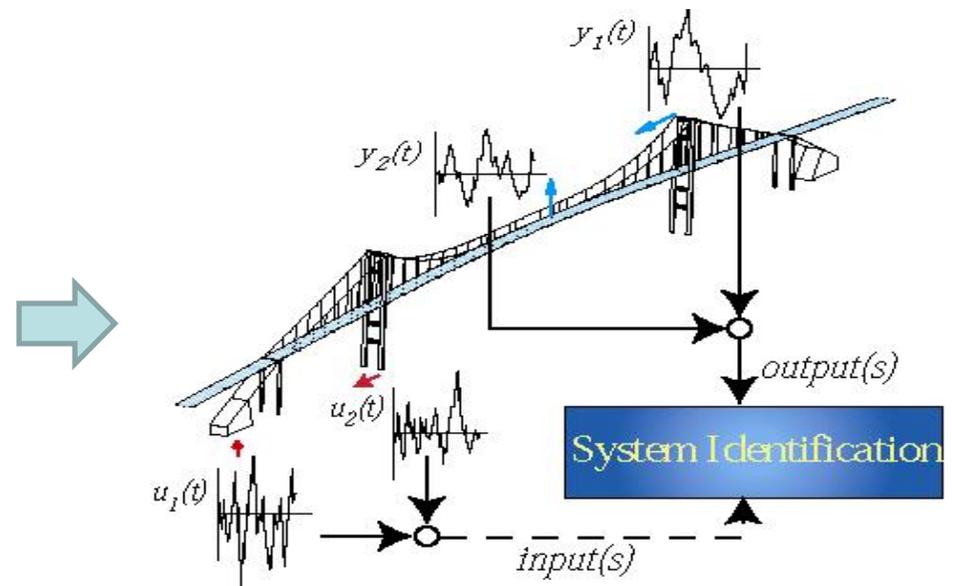
$$\boxed{\mathbf{Y}_{m \times l} \approx \hat{\mathbf{M}}_{m \times ((r+m)p+r)} \mathbf{V}_{((r+m)p+r) \times l}}$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_i^- = \mathbf{E}[\mathbf{y}_i^-\mathbf{y}_i^{-T}]^{-1/2}\mathbf{y}_i^- \quad \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^k\mathbf{x}(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \mathbf{C}\mathbf{\Phi}^{(k-1-j)}\mathbf{\Gamma}\mathbf{u}(j) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_i^+ = [\tilde{\mathbf{y}}(i)^T \quad \tilde{\mathbf{y}}(i+1)^T \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{y}}(i+r)^T]^T$$

Identificazione di Modelli

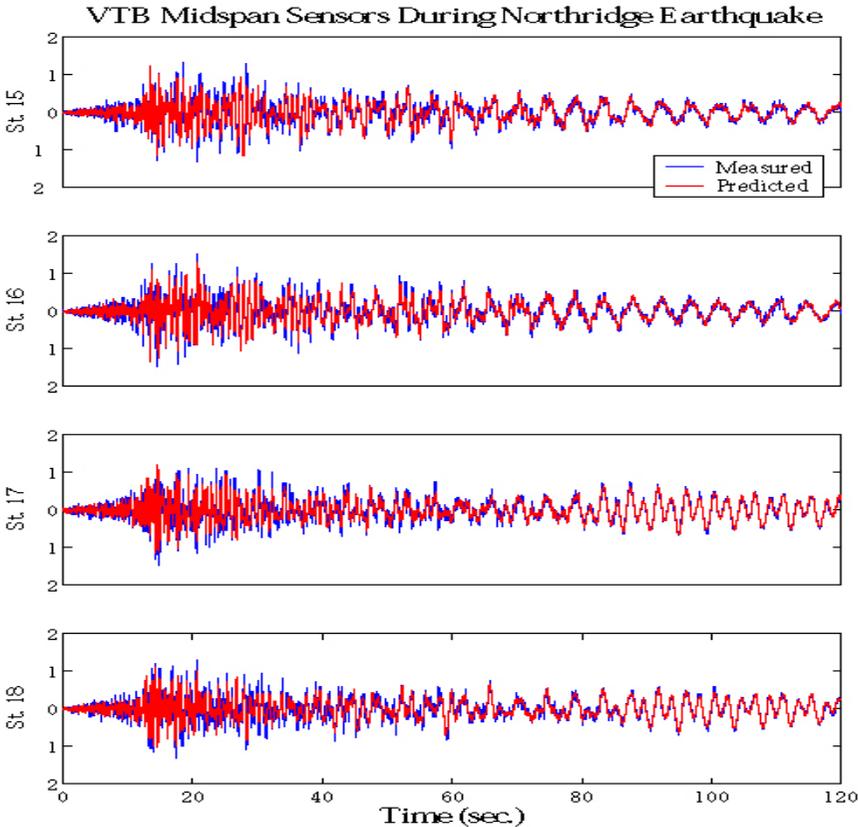
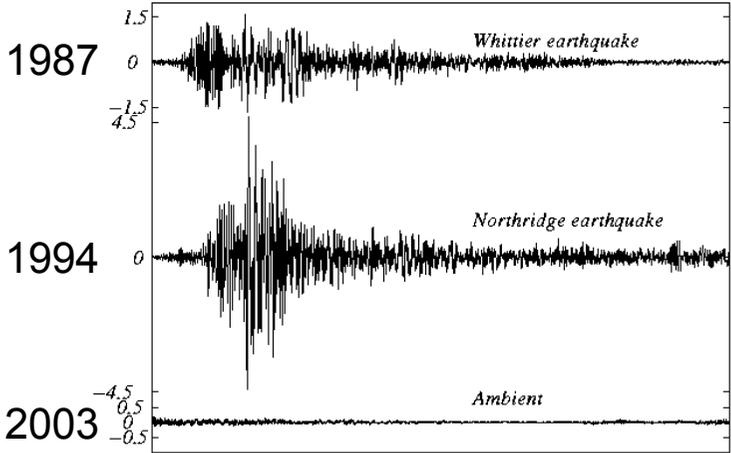
- Identificazione di parametri modali:
 - Frequenze proprie, smorzamenti, forme modali
- Identificazione di parametri fisici:
 - Matrice delle masse, degli smorzamenti e delle rigidzze
- Identificazione di modelli a “scatola nera”:
 - Le matrici identificate non hanno un chiaro significato ma producono un buon rapporto input-output.
 - Possono essere usati per valutare I parametri modali.



Vincent-Thomas bridge (Los Angeles, CA)



Input: accelerazioni alla base in 10 punti differenti
Output: accelerazioni dell' impalcato e delle torri



Accelerazioni (m/sec^2) misurate alla stazione 15 (verticali)

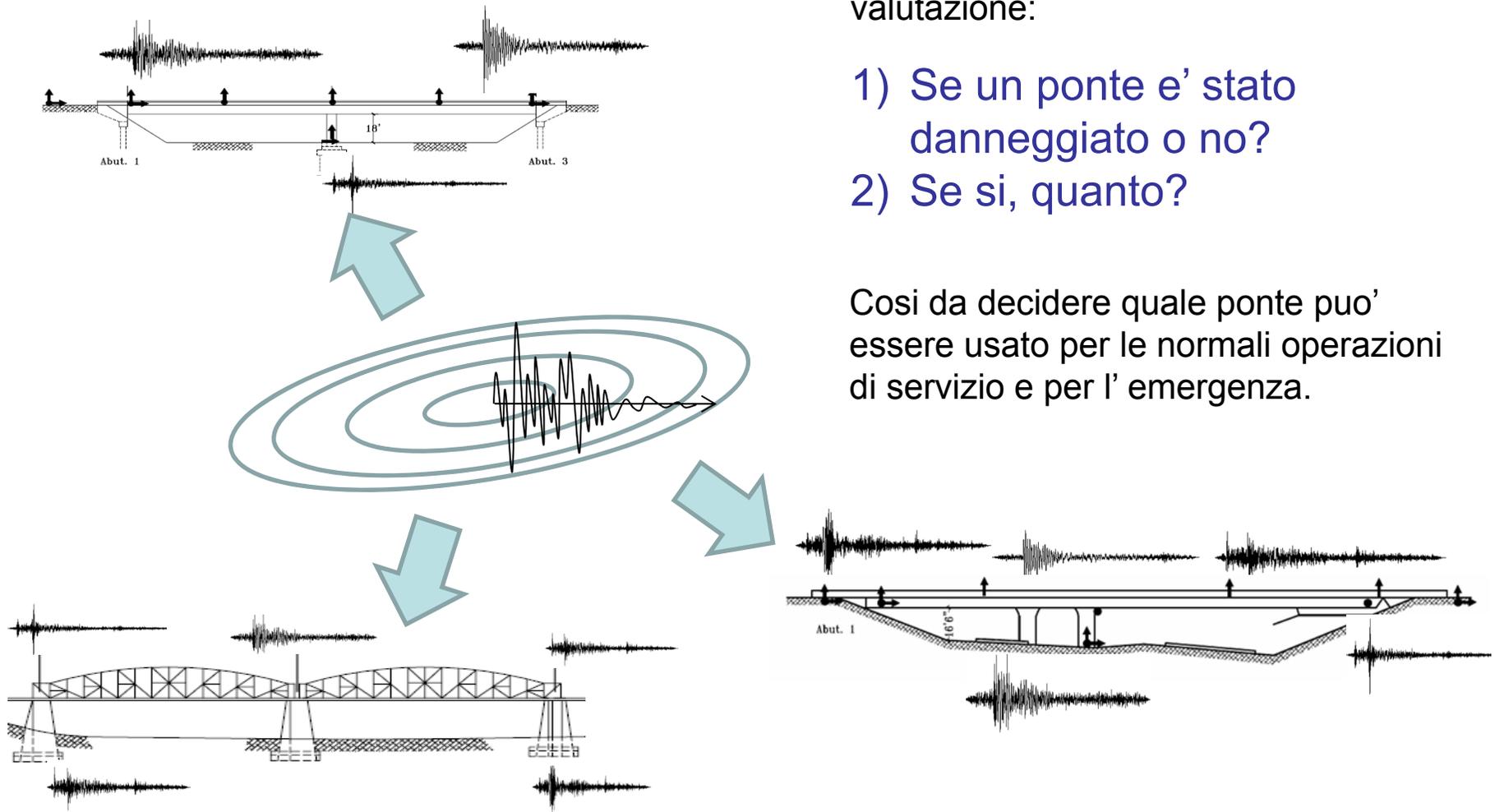
Lus, Betti and Longman, *EESD*, (1999) (2002)

Sistema di ponti autostradali in CA

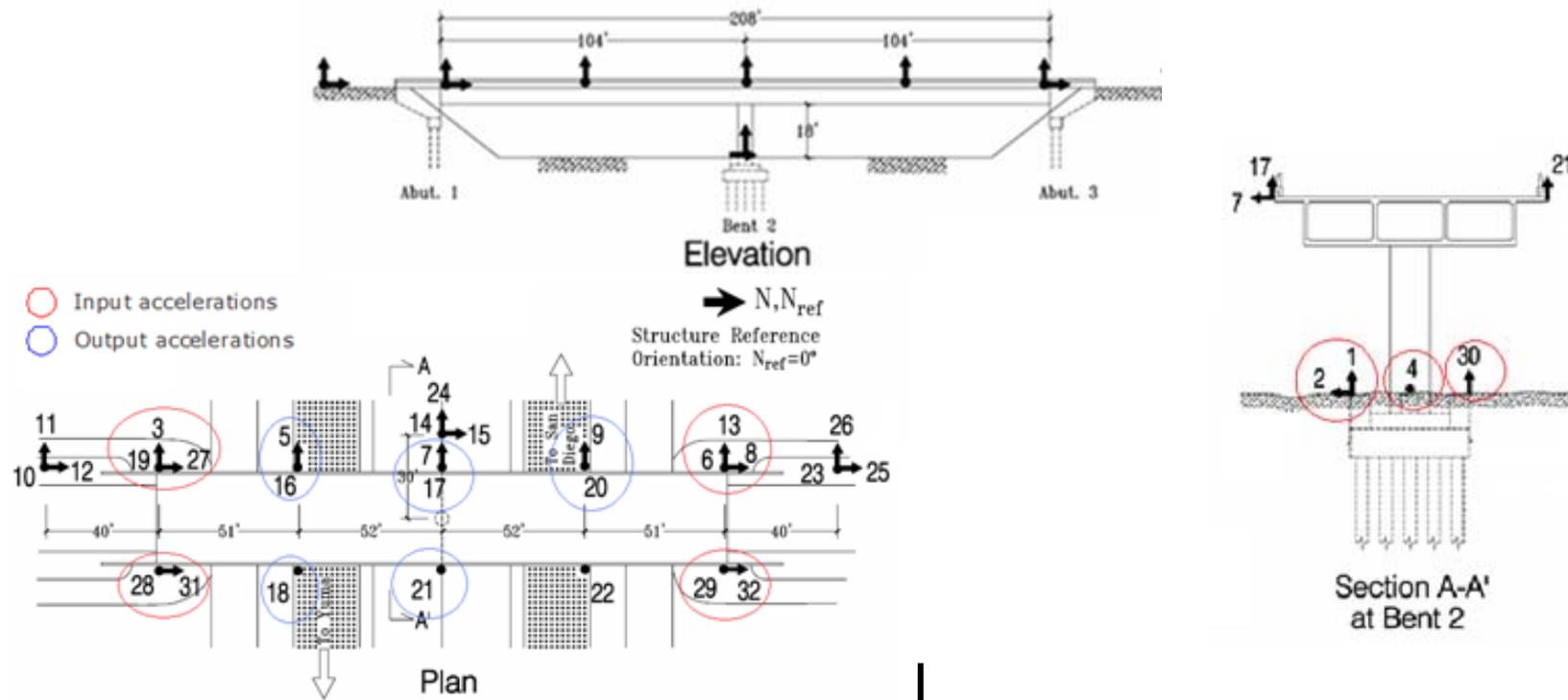
Dopo un terremoto:
e' possibile avere una rapida
valutazione:

- 1) Se un ponte e' stato danneggiato o no?
- 2) Se si, quanto?

Così da decidere quale ponte può
essere usato per le normali operazioni
di servizio e per l'emergenza.



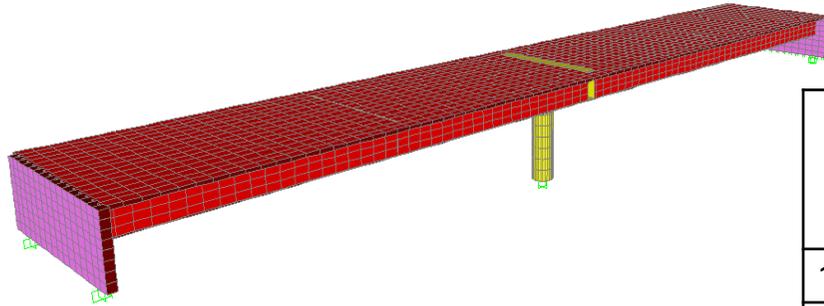
El Centro - Hwy 8 /Meloland Overpass



Earthquake	Horizontal Apk (g)	
	Ground	Structure
Cerro Prieto (February 8 th 2008)	0.020	0.058
Cerro Prieto-Event 1 (February 11 th 2008)	0.012	0.035
Cerro Prieto-Event 2 (February 11 th 2008)	0.014	0.042
Calexico (November 20 th 2008)	0.017	0.027
Calexico (December 27 th 2008)	0.006	0.020

El Centro – Hwy 8 /Meloland Overpass

Raffinare il modello FEM usando i parametri identificati.



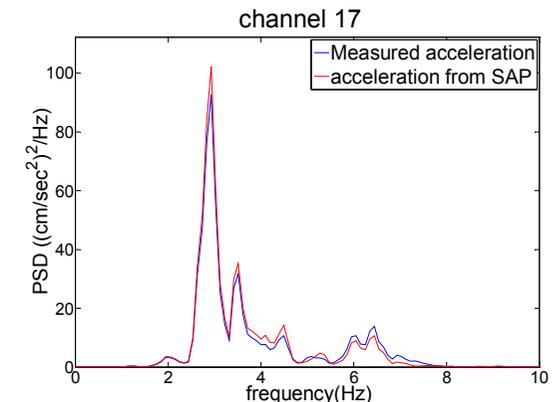
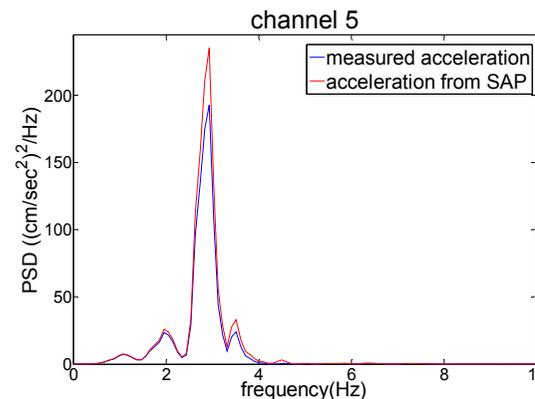
Software: SAP2000 v12.0.2

Elementi Finite:

- Colonna centrale e pulvino: elemento frame (24 elementi)
- Trave scatolare e supporti laterali: elemento piastra (3,776 elementi)

Mode	Frequencies (Hz)	
	Identified with OKID	Calculated with FEM
1 : Vert. anti-symm	3.36 – 3.46	3.43
2 : Transverse	3.83 – 3.91	3.90
3 : Vert. symmetric	4.68 – 4.84	4.73
5 : First torsional	7.01 – 7.05	7.28
7 : Second torsional	8.87 – 9.52	9.48
10 : Third torsional	14.07 – 14.28	13.98

Metodologia di Updating: Algoritmi Genetici



Conclusioni

- Il monitoraggio delle condizioni strutturali diventera' uno strumento essenziale nel lavoro degli ingegneri ed architetti futuri.
- Aiutera' a migliorare la manutenzione e la conservazione di infrastrutture e beni culturali che sono insostituibili, estendendone la loro vita di servizio.
- Sistemi di monitoraggio diventeranno parte integrale della fase di progetto.
- Con il passar del tempo, i sensori saranno sempre piu' accurati, di piccole dimensioni ed economici.
- Le procedure e tecnologie saranno piu' automatizzate, piu' rapide e meno invasive.