

Monitoraggio e manutenzione delle linee ferroviarie mediante sistemi di diagnostica non invasivi

G. DE CANIO, G. FRARACCIO*, M. MONGELLI*, N. RANIERI*, A. COLUCCI*, F. DI BIAGIO*,*

*M. A. CAPONERO**, E. DI PALMA****

**ENEA C.R. Casaccia*

***ENEA C.R. FRASCATI*

**** ENEA C.R. Trisaia*

SOMMARIO

Obiettivo di questo articolo è quello di definire una metodologia alternativa di elevata affidabilità per il monitoraggio e la manutenzione delle infrastrutture ferroviarie.

In questo studio, il degrado dell'armamento e dell'infrastruttura civile viene valutato tramite analisi nel dominio del tempo e della frequenza delle funzioni di trasferimento tra il carico dinamico del treno e la risposta dell'armamento e/o dell'infrastruttura civile.

La corretta valutazione dei dati ottenuti in fase di monitoraggio ha delle notevoli ricadute sia sugli interventi di manutenzione in numero e costi, sia sulla stima della vita utile dei materiali impiegati anche ai fini dell'ottimizzazione degli stessi in fase di progettazione.

L'approccio illustrato prevede, per il monitoraggio delle infrastrutture significative, l'installazione in posizioni particolari di sensori tradizionali e sensori su fibra ottica.

I dati acquisiti sono analizzati tramite analisi SVD della matrice delle funzioni di trasferimento rotabile-armamento ed armamento/infrastruttura civile. Si definiscono in tal modo i valori di soglia per i segnali di warning, alert ed alarm.

Una verifica sperimentale sul mock-up di un'infrastruttura tecnologica ferroviaria è stata effettuata presso i laboratori dell'ENEA Trisaia nell'ambito del progetto SIMMI¹; l'individuazione delle sezioni più idonee al posizionamento dei sensori è stata effettuata tramite simulazione FEM.

Introduzione

La manutenzione delle linee ferroviarie è sempre stata oggetto di largo interesse in particolare negli ultimi anni con lo sviluppo di treni ad alta velocità. In prima analisi, la linea ferroviaria può essere considerata come una trave estremamente lunga, collegata generalmente tramite bullonatura a delle traversine di calcestruzzo o, in alcuni casi, di legno. Le traversine, disposte ad intervalli regolari, sono posizionate su uno strato di ballast. Nel corso del tempo possono presentarsi danni di diverso tipo sulla ferrovia: le proprietà del ballast possono decadere in alcuni punti, le connessioni tra il binario e le traversine possono essere danneggiate e/o completamente inefficaci.

¹ Sviluppo di tecnologie per la realizzazione di un Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Manutenzione di Infrastrutture ferroviarie – SIMMI D.M. 8/8/2000, n. 593, art. 5, co. 26 D.Lgs. N. 297/1999

Le tecniche di identificazione del danno attualmente impiegate si basano principalmente sull'ispezione visiva dell'intera rotaia, per questo motivo sono stati valutati negli ultimi anni nuovi approcci di carattere più scientifico. In questo articolo si propone l'utilizzo di una nuova tecnica per l'identificazione del danno delle rotaie ferroviarie. L'obiettivo principale è quello di stabilire il posizionamento di sensori in aree particolari come parti del tracciato in curva, ponti o in prossimità delle stazioni, ossia in tutte quelle zone in cui le sollecitazioni sono elevate. Al fine di validare questo approccio sono stati considerati un modello agli elementi finiti ed un modello sperimentale.

Dalla letteratura, il binario è rappresentato come una trave di Eulero-Bernoulli o di Timoshenko, vincolata a traversine disposte ad intervalli regolari [1]. In tale lavoro sono presentati i parametri fisici del modello ed è stimata la frequenza pinned-pinned, ossia la frequenza della parte di binario compresa tra due traversine consecutive, considerando i due estremi incastrati. In [2] e in [3] viene considerata la deformazione nel piano della sezione del binario. Utilizzando i parametri riportati, si stima che la sezione si deformi significativamente solo a frequenze superiori ai 1500 Hz. In [4] sono presentati i test su un modello sperimentale in scala reale condotti per stabilire le proprietà meccaniche del ballast ferroviario. I valori della rigidità e dello smorzamento sono stati opportunamente valutati tramite la definizione di un modello numerico. In [5] il modello numerico proposto è stato confrontato con i risultati di numerosi test condotti su una rotaia reale. Il modello proposto tiene in conto l'interazione tra il treno, la rotaia e il suolo su cui essa poggia. In [6] il modello proposto è costituito da strati successivi: diverse travi sono connesse da elementi visco-elastici. Un modello meno raffinato è stato proposto in [7] al fine di rappresentare il comportamento della sola rotaia. Il comportamento delle traversine e del ballast è rappresentato da molle e da elementi dissipativi viscosi. Un modello simile è stato presentato anche in [8]. In questo caso si considera un doppio strato di molle e di smorzatori, il primo per modellare le caratteristiche dell'accoppiamento rotaia-traversina, il secondo per modellare le proprietà del ballast.

Modello numerico

Per valutare le caratteristiche dinamiche del modello sperimentale, si è analizzato un modello numerico attraverso il codice di calcolo Nastran.

I modelli rispecchiano le prescrizioni italiane in materia; le traversine sono poste a 700mm le une dalle altre, lo scartamento tra i binari è di 1050mm, la sezione del binario rispetta le norme UNI 3141. la lunghezza totale del modello è di 8.60m, per un totale di 12 traversine.

Il modello numerico proposto è simile al modello descritto in [7]. Il modello considerato è piano. Una trave di Eulero-Bernoulli, dalla sezione adeguata, rappresenta la rotaia; le caratteristiche meccaniche delle traversine e del ballast sono modellate con un singolo strato di molle e smorzatori (Figura 1).

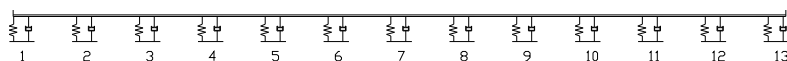


Figura 1 Modello agli elementi finiti

In questo lavoro si sono considerati diversi valori e le caratteristiche di tale modello sono state confrontate con i risultati ottenuti dalle prove sperimentali. I valori della rigidezza delle molle del coefficiente di smorzamento sono rispettivamente $K=70 \text{ MN/m}$ e $c=20 \text{ KNs/m}$

Analizzando il comportamento dinamico del modello, si riconosce un primo ordine di deformate modali che riguardano l'intera struttura aventi valori inferiori ai 150 Hz; ed un secondo ordine di modi riguardanti le singole porzioni di binario presenti tra due traversine consecutive. Questo secondo tipo di vibrazioni sono legate al comportamento pinned-pinned, la cui frequenza principale è stimata attorno agli 800Hz.

Modello sperimentale

Una applicazione della tecnica proposta, che verrà descritta in dettaglio nel paragrafo 4, è stata realizzata su di un modello sperimentale ricostruito in laboratorio.

Il modello rappresenta una porzione di rotaia di 8.60 m in scala reale, tale da rispettare tutte le prescrizioni della normativa italiana (Figura. 2).



Figura 2 Modello sperimentale



Figura 3 Sensori installati

Al fine di ottenere le caratteristiche dinamiche del modello sono stati utilizzati test ad impatto utilizzando un martello strumentato. La simulazione di un danneggiamento reale non è semplice. Variazioni delle proprietà del ballast, deterioramento delle connessioni tra binario, flangia e traversina sono frequenti. In questa campagna sperimentale il danneggiamento è stato simulato serrando i bulloni con un valore della coppia inferiore al valore prescritto dalle norme in punti noti. Sono stati considerati quattro diversi livelli di danneggiamento:

- Caso 1: struttura in configurazione iniziale
- Caso 2: danno alla traversina n° 7
- Caso 3: danno alle traversine n° 3 e 11
- Caso 4: danno alle traversine n° 3, 7 e 11.

Sono state misurate le accelerazioni in sei punti differenti (al centro delle campate 3-4, 5-6, 8-9, 10-11, 12-13 e sulla traversina n° 7). La numerazione seguita è la stessa riportata in Figura 1.

Identificazione del danno

L' identificazione dello stato di danno strutturale dell'infrastruttura ferroviaria si basa sui seguenti parametri strutturali che ne descrivono il comportamento dinamico: frequenze naturali della struttura, smorzamenti modali, forme modali, matrice di flessibilità ed indici di rigidezza.

La diagnosticabilità dello stato dei binari e delle flange d'attacco alle traversine nonché dello stato dell'infrastruttura civile dipende dalla misurabilità di questi parametri nel tempo.

Nel seguito si illustra una metodologia per definire un indice di diagnosticabilità dello stato di degrado ai fini della manutenzione basato sull'analisi dei segnali nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza tramite la Singular Value Decomposition (SVD) delle matrici dello stato del sistema.

L'identificazione del danno per il sistema considerato è da ritenersi un problema di identificazione ad input incognito.

Analisi nel dominio della frequenza tramite SVD della matrice delle funzioni di trasferimento

La tecnica utilizzata, la *Frequency Domain Decomposition*, descritta in [9, 7, 10, 11], è strettamente legata alle tecniche tradizionali nel dominio della frequenza. Attraverso tali tecniche è semplice ottenere buone approssimazioni delle frequenze del sistema. Tuttavia risulta più complicato ottenere le forme modali del sistema, in particolar modo nel caso di modi con frequenze molto vicine.

Il punto di partenza di tale tecnica è la definizione della *Power Spectral Density*. La PSD per gli m output registrati può essere scritta come:

$$G_{yy}(j\omega_i) = H(j\omega_i)G_{xx}H(j\omega_i)^H \quad (1)$$

dove H è la funzione di trasferimento degli output e con $G_{xx}(\omega_i)$ si indica la PSD dell'input incognito. Nel caso in cui tale input è con buona approssimazione un rumore bianco, si può dimostrare che $G_{yy}(\omega_i)$ non dipende dall'input, ma solo dalle caratteristiche del sistema.

La $G_{yy}(\omega_i)$ è poi decomposta attraverso una *Singular Value Decomposition*:

$$G_{yy}(\omega_i) = USU^T \quad (2)$$

dove $S_i = \text{diag}[s_{i1} \ s_{i2} \ \dots \ s_{im}]$ contiene i valori singolari alla frequenza ω_i ; $U_i = [u_{i1} \ u_{i2} \ \dots \ u_{im}]$ contiene i rispettivi vettori singolari.

Quando la frequenza ω_i è prossima al valore di una frequenza propria del sistema, ossia quando si è in prossimità di un picco nel grafico delle PSD del sistema, il primo valore singolare s_{i1} diventa predominante ed il rispettivo vettore singolare ($u_{i1} = \phi$) può essere scelto come una accurata approssimazione della forma modale.

Considerando diversi istanti t_a e t_b è possibile calcolare tali approssimazioni della forma modale (ϕ_a^T e ϕ_b^T). Utilizzando la *Modal Assurance Criterion* (MAC) per confrontare tali valori è possibile stabilire se in intervalli successive sono avvenute modifiche nelle forme modali del sistema.

$$MAC = \frac{(\phi_a^T \cdot \phi_b^T)^2}{(\phi_a^T \cdot \phi_a^T)(\phi_b^T \cdot \phi_b^T)} \quad (3)$$

Se il valore del MAC sarà prossimo ad 1 è possibile affermare che la struttura non ha subito danni rilevanti; valori più bassi permettono di stabilire che la struttura risulta danneggiata. Più basso è il valore del coefficiente MAC maggiore è il livello di danno.

Analisi nel dominio del tempo tramite SVD della matrice delle funzioni di covarianza dei segnali di strain

Analogo discorso può essere fatto con i segnali di strain nel dominio del tempo considerando le matrici di covarianza delle time history. In questo caso la matrice è simmetrica ed i vettori singolari sono proporzionali agli autovalori ed autovettori della matrice del tensore delle deformazioni.

Indicando con $X(z,t)$ e $Y(z,t)$ due stati del sistema ai punti di misura z monitorati in due istanti diversi t_0 e t_1 , le loro matrici di autocovarianza sono²:

$$\text{Se si proiettano i } C_{xx} = \langle X^T X \rangle^{1/2} \quad C_{yy} = \langle Y^T Y \rangle^{1/2} \quad (4)$$

vettori di stato $X(z,t)$ e $Y(z,t)$ sulle autofunzioni delle matrici di autocovarianza $p_k(z)$ e $q_k(z)$ si ottengono due coefficienti di espansione $a_k(t)$ e $b_k(t)$ che sono una misura della correlazione tra vettori di stato e le autofunzioni ortogonali al tempo t^3

$$\begin{aligned} a_k(t) &= p_k^T(z)X(z,t) \\ b_k(t) &= q_k^T(z)Y(z,t) \end{aligned} \quad (5)$$

Applicando un filtro che considera i primi K_r modi, si ottengono i vettori di stato "sintetici"

$$\begin{aligned} \tilde{X}(z,t) &= a_k(t)p_k^T(z) \\ \tilde{Y}(z,t) &= b_k(t)q_k^T(z) \end{aligned} \quad (6)$$

Con $k = 1, \dots, K_r$. Il valore di K_r è scelto in modo da avere un indice di *Varianza Spiegata* $ECF \geq 95\%$

La matrice di cross covarianza dei due vettori sintetici è:

$$C_{\tilde{x}\tilde{y}} = \langle \tilde{X}^T \tilde{Y} \rangle \quad (7)$$

La SVD di $C_{\tilde{x}\tilde{y}}$ Genera due vettori ortonormali U e V ed un insieme di valori singolari σ_j

$$\begin{aligned} a_j(t) &= U_j^T(z)\tilde{X}(z,t) \\ b_j(t) &= V_j^T(z)\tilde{Y}(z,t) \end{aligned} \quad (8)$$

che sono la max covarianza tra le proiezioni $a_j(t)$ del vettore $\tilde{X}(z,t)$ sul j^{mo} vettore singolare U_j e la proiezione $b_j(t)$ del vettore $\tilde{Y}(z,t)$ sul j^{mo} vettore singolare V_j

La covarianza tra $a_j(t)$ e $b_j(t)$ è:

$$\langle a_j(t), b_j(t) \rangle = U_j^T C_{\tilde{x}\tilde{y}} V_j = \sigma_j \quad (9)$$

La costruzione di un indice di predicibilità dello stato di guasto è ottenuta partendo dalle mappe di correlazione tra gli stati X e Y del sistema, definiti nel dominio del tempo (time history) e/o nel dominio della frequenza (funzioni di trasferimento).

Avendo definito il vettore di stato X =riferimento al tempo $t=t_0$ ed il vettore di stato Y =misura al tempo $t_n=t_0+nDt$ negli stessi punti z , le proprietà (5) e (9) consentono di definire le mappe *omogenee* di correlazione tra i vettori di stato \tilde{X}, \tilde{Y} ed i rispettivi coefficienti di espansione $a_j(t), b_j(t)$:

$$\begin{aligned} r_{xx}(z, j) &= \langle X(z,t), a_j(t) \rangle \\ r_{yy}(z, j) &= \langle Y(z,t), b_j(t) \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

Analogamente, le mappe *eterogenee* di correlazione sono i vettori di correlazione tra il vettore di stato di riferimento $X(z,t_0)$ ed i coefficienti di espansione del vettore di stato delle misure al tempo t_n

² Se le forzanti ai tempi t_0 e t_1 non sono identiche occorre fare un'analisi nel dominio della frequenza, in questo caso i vettori di stato sono le funzioni di trasferimento.

³ Nel dominio della frequenza i coefficienti di espansione sono funzione di ω e non di t

$$\begin{aligned} r_{xy}(z, j) &= \langle X(z, t), b_j(t) \rangle \\ r_{yx}(z, j) &= \langle Y(z, t), a_j(t) \rangle \end{aligned} \quad (11)$$

Le mappe di correlazione rappresentano “ *quanto bene lo stato Y è statisticamente predicabile in termini di coefficienti di espansione dello stato X*”. La predicibilità di Y da X si definisce con i seguenti step:

- Costruzione del vettore di riferimento sintetico \tilde{X} al tempo t_0 e dei coefficienti di espansione $a_j(t)$ tramite SVD dello stato del sistema⁴
- Costruzione del vettore di stato sintetico \tilde{Y} al tempo t_n e delle mappe di correlazione eterogenee $r_{\tilde{y}x}(z, t), r_{y\tilde{x}}(z, t)$
- Definizione della stima \hat{Y} di \tilde{Y} dai coefficienti di espansione di X:

$$\hat{Y}(z, t) = \sum_j^k a_j(t) r_{yx}(z, j) \quad (12)$$

$$\varepsilon(z, t) = \frac{\{(\tilde{Y}(z, t) - \hat{Y}(z, t))^2\}^{1/2}}{RMS(\tilde{Y}(z, t))} \quad (13)$$

- Calcolo dell'errore di predizione rispetto alla misura $Y(z, t)$

$$I_Y(z, t) = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \delta(z, t_i)}{N} \right\} \quad (14)$$

- Calcolo dell'indice di diagnosticità del danno

$I_Y(z, t)$ è un numero proporzionale alla somma delle $\delta(z, t)$, che possono assumere valori 0-1

$$\delta(z, t_i) = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se } \varepsilon(z, t) \leq 0.36 \\ 0, \text{ altrimenti} \end{array} \right\} \quad (15)$$

La procedura per il calcolo dell'indice di diagnosticabilità $I_Y(z, t)$ del vettore di stato delle misure al tempo t sarà validata nel corso delle prove di laboratorio e delle prove in sito.

Risultati

- Analisi nel dominio della frequenza

Utilizzando le registrazioni ottenute dai sei accelerometri installati sulla rotaia è possibile identificare le frequenze del sistema. Il modello numerico, considerato in precedenza, permette di stabilire che le frequenze identificate nell'intervallo 50-100 Hz sono relative al comportamento flessionale dell'intero binario. Un modo a circa 90 Hz è presente in tutte le configurazioni. Utilizzando la tecnica descritta nel paragrafo precedente è possibile calcolare una buona approssimazione della forma modale corrispondente. Per ciascuna configurazione il risultato ottenuto è mostrato in Figura 4.

Nella Tabella 1 sono riportati i valori del coefficiente MAC calcolato confrontando le configurazioni danneggiate con la configurazione iniziale, utilizzando l'equazione 3.

⁴ nel dominio del tempo e/o nel dominio della frequenza

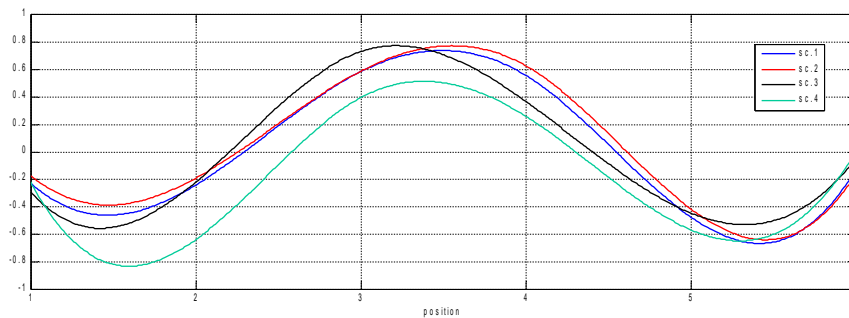


Figura 4 Forme modali relative ai diversi scenari di danno

Scenari di danno	MAC indici
Sc. 2	0,95
Sc. 3	0,92
Sc. 4	0,76

Tabella 1 Indici di MAC per diversi scenari di danno

- Analisi nel dominio del tempo

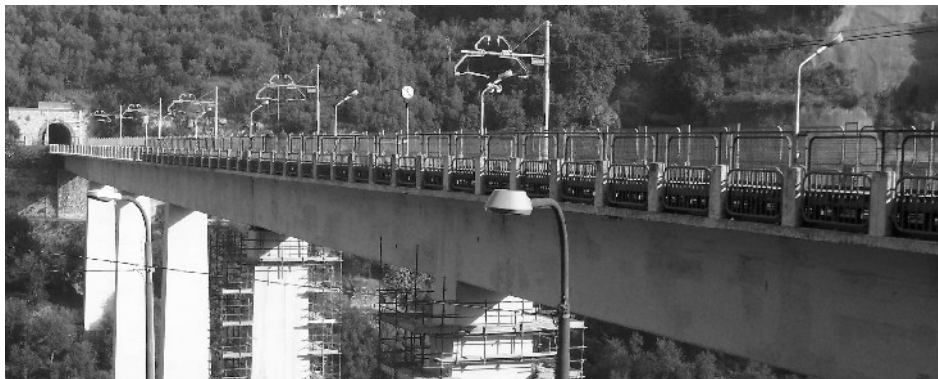


Figura 5 Viadotto ferroviario, Seiano (Napoli)

Nel calcolo

è stata considerata come configurazione di riferimento quella in cui tutti i bulloni sono serrati a 800 Nm, in queste condizioni è stata effettuata un'acquisizione al passaggio dei rulli . Con questa configurazione è stata effettuata l'acquisizione dei segnali provenienti dai vari sensori al passaggio dei rulli. L'indice di degrado è stato calcolato mettendo confrontando quattro casi test.

Caso Test	INDICE DI DEGRADO			
	1° canale	2° canale	3° canale	4° canale
Test 19	0.4322E+00	0.6240E+00	0.2573E+00	0.5038E+00
Test 22	0.1045E+00	0.2103E+00	0.1348E+00	0.4648E+00

Tabella 2- Calcolo dell'indice di degrado dai dati del monitoraggio con gli estensimetri

Caso Test	INDICE DI DEGRADO					
	1° canale	2° canale	3° canale	4° canale	5° canale	6° canale
Test 17	0.9898E+00	0.9638E+00	0.9994E+00	0.9995E+00	0.9370E+00	0.8706E+00
Test 25	0.9929E+00	0.9819E+00	0.1000E+01	0.1000E+01	0.9600E+00	0.8929E+00

Tabella 3 - Calcolo dell'indice di degrado dai dati del monitoraggio con gli accelerometri

I dati riportati in Tabella mostrano come l'indice di degrado nel caso degli estensimetri decresce all'aumentare del danno; infatti in accordo con la (14), l'indice aumenta al diminuire dello scarto tra i dati reali e quelli previsti (predicibilità dello stato Y a partire dallo stato X), ricavati a partire dalla matrice di correlazione dello stato di riferimento. Un comportamento anomalo si presenta invece nel caso dei dati provenienti dal monitoraggio con gli accelerometri; in tal caso, infatti, l'indice di degrado aumenta con l'aumentare dello scarto tra i dati reali e quelli previsti in disaccordo con la (1).

Conclusioni

Al fine di valutare l'insorgenza del danneggiamento su una linea ferroviaria è stata approntata una metodologia di analisi dei dati basata sulla Singular Value Decomposition. Tale approccio è stato testato su di un modello, realizzato presso i laboratori Enea, rappresentante in scala reale un segmento ferroviario di 8.60 metri di lunghezza.

Dopo aver strumentato opportunamente il modello, si è proceduto alla fase di acquisizione dati per diverse configurazioni che vedevano il modello soggetto a danneggiamento controllato. Il danneggiamento è stato realizzato allentando 3 bulloni ottenendo così 4 diverse risposte strutturali.

Analizzando i dati con il metodo SVD sono stati identificati le diverse forme modali (dominio della frequenza) e le mappe di correlazione canonica (dominio del tempo) nelle varie configurazioni di danno. Nel primo caso, Calcolando l'indice di MAC per le corrispondenti forme modali è stato possibile correlare il danneggiamento presente sull'infrastruttura tecnologica ferroviaria all'indice stesso.

Nel mese di giugno '07 sul viadotto di Seiano illustrato in Figura 5 (il cui modello ne rappresenta una porzione ricostruita in laboratorio) è stata compiuta una sperimentazione analoga a quella eseguita in laboratorio. Sono stati acquisiti diversi transiti di normale esercizio ferroviario in condizioni standard nonché in presenza di un danneggiamento controllato, il tutto nel rispetto della sicurezza e con la massima collaborazione del gruppo dirigenziale della Circumvesuviana.

Ringraziamenti

Si ringrazia la cortese collaborazione della Circumvesuviana grazie alla quale si è potuti accedere ed utilizzare a fini di ricerca una importante opera d'arte ferroviaria quale il viadotto di Seiano (NA).

Un sentito ringraziamento ai ricercatori ENEA, in particolare Gabriele Ciniglio per il coordinamento delle attività del progetto SIMMI, Massimiliano Baldini, Stefano Bonifazi, Gianni Fabrizi e Paolo Maci per il contributo significativo alle varie fasi della sperimentazione in campo ed in laboratorio.

Bibliografia

1. Hildebrand R.: "Vertical vibration attenuation in railway tracks: a wave approach" Journal of sound and vibration 247 pp.857-874 (2001)
2. Thompson D.J.: "Wheel-rail noise generation: rail vibration" Journal of sound and vibration 161 pp.421-446 (1993)
3. Gry L.: "Dynamic modelling of railway track based on wave propagation" Journal of sound and vibration 195 pp.477-505 (1996)
4. Zhai W.M., Wang K.Y., Lin J.H.: "Modelling and experiment of railway ballast vibration" Journal of sound and vibration 270 pp.673-683 (2004)
5. Lombaert G., Degrande G., Kogut J., Francosi S.: "The experimental validation of numerical model for the prediction of railway induced vibration" Journal of sound and vibration 297 pp.512-535 (2006)
6. Pfaffinger M.R., Dual J.: "Higher vibration tracks at their cut-off frequencies" Vehicle system dynamics 38 pp.433-1037 (2002)
7. Andersson C., Abrahamsson T.: "Simulation of interaction between a train in general motion and a track" Vehicle Dynamics 38 pp.433-455 (2002)
8. Baeza L., Roda A., Nielsen J.C.O.: "Railway/track interaction analysis using a modal substructuring approach", Journal of sound and vibration 293 pp.112-124 (2006)
9. Brincker R., Zhang L. and Andersen P.: "Modal Identification from Output-only Systems using Frequency Domain Decomposition", Smart Materials and structures, 10 pp. 441-445
10. Brincker R., Zhang, L. and Andersen P.: "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition", Proc. 18thInternational Modal Analysis
- 11 Garcia Marquez F.P., Schmid F., Collado J.C.: "A reliability approach to remote condition monitoring. A railway point case study", Reliability Engineering and system safety 80 pp.33-40 (2003)