

铁道道碴的损伤诊断研究

林向晖 香港城市大学建筑系副教授

黄文达 港铁公司维修工程师

摘要:

本文报告使用现场混凝土轨枕的测量振动数据检测、定位,和定性铁道轨枕下道碴的损伤可行性研究。铁道有许多方法用监控轨道。但是,道碴损伤检测仍很大程度上依赖视觉检测和破坏性的核心测试。这项可行性研究只在铺设混凝土轨枕的典型平直道碴轨道上进行。在这个拟议的方法中,轨枕下的道碴被仿效弹性基础。道碴损伤被定义为道碴退化及道碴和积累的石粉胶结齐。当道碴损伤时,支承轨道的刚度会减小,而且现场轨枕的振动特性会有所改动。本文研究通过简单锤击试验监测相应轨枕的振动检测轨枕下道碴损伤状态的可能性。本文不仅提出了理论的发展,也提出数值核查。本文以通过使用电源线或光纤信号传输连续监测系统的未来发展问题的讨论结束。

关键字: 铁路道碴、混凝土轨枕、损伤检测、模态识别、锤击测试

1. 引言

无数高速铁路已在世界各地建成。大规模的铁路运输变得越来越重要,对国家的经济和社会发展起了重要的因素。最近,新铁路技术以惊人的速度发展。中国客运高速铁路实现了 350Kph 世界纪录,而且全年货运负荷超过 20000tonnes。在这沉重和重复的列车载重下道碴的损伤速度变得很快。一旦列车速度达到关键的列车速度,轨道振动幅度将大大增加,并导致铁路系统的安全问题。道碴轨道系统由钢轨和道碴道床组成,是

典型铁路轨道结构一种。上层建构包括钢轨及紧固在轨枕上的扣件,而在下层结构包括面碴、底碴和路基。松散和粗粒的道碴是支承钢轨及轨枕纵向、横向和垂向位移。此外,道碴可以把周期列车荷载平均分发到路基、提供振动的复原能力及便于维护。道碴大小尺寸是 50 毫米。服务多年的道碴大小会变 35 毫米。如果不安排更换次级道碴,它将会进一步破碎不少于 15 毫米的细石。这项研究中道碴损害被定义为道碴退化及道碴和积累的石粉胶结齐。道碴损害不只会令道碴减小,而且影响轨道捣固平水 (Selig & Waters 1997) 导致铁路不平顺。最终可以做三角坑,或高轨温下钢轨屈曲而增加脱轨的危机。在处理道碴退化的当前解决方案是进行清洁和更换。更换所有损伤道碴并不真正能改善道碴轨道质量,由于没有可靠的系统的轨道床评估。当轨道工务组收到列车车长或乘客会报告列车有异常振动时,轨道督察会到事发地点,用目检及他们的“直觉”找出问题。道碴损伤的检测方法可以分为破坏性和非破坏性,最受欢迎的破坏性方法之一是浅坑观察道碴状况。根据作者的经验此方法是主观的而不可以准确地确定问题所在。在过去几年四间非破坏性技术有地探测雷达 (GPR)、连续面波系统 (CSWS) 和轨道几何/架空线检查 (TOV)。用支承轨枕的道碴刚度取决于大小和捣固平水和道碴级别 (Kaewunruen & Remennikov 2007)。我们以前的研究也证明这个观点 (Lam et al. 2009; Lam et al. 2010) 道碴损伤诱导振动特性的原位轨枕可探测的变化。这篇文章的主要目标是在使用原位混凝土轨枕的振动特性在量化道碴的健康状况的可行性研究。轨道督察可以用快速实时道碴的损伤检测方法。

2. 道碴轨枕轨道系统的建模

在这项可行性研究中,轨枕仿照作为一条欧拉梁及放在轨枕上的两条钢轨被认为是两个弹性弹簧(弹簧常数 k_R)。道碴的影响是由一个弹性地基刚度 k_B 表示的。图 1 显示了模拟道碴轨枕轨道系统。轨枕由 24 个等

长度元素模拟沿轨枕截面属性的变化。将轨枕下道碴分为六个区域(见图 1)以作道碴损伤检测。在未损坏状态下的道碴,六个区域的刚度值被假定为相同的。

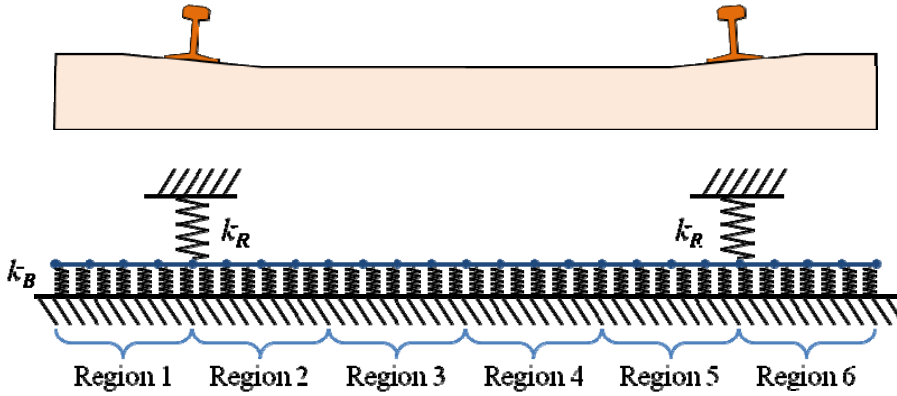


图 1: 道碴轨枕轨道系统

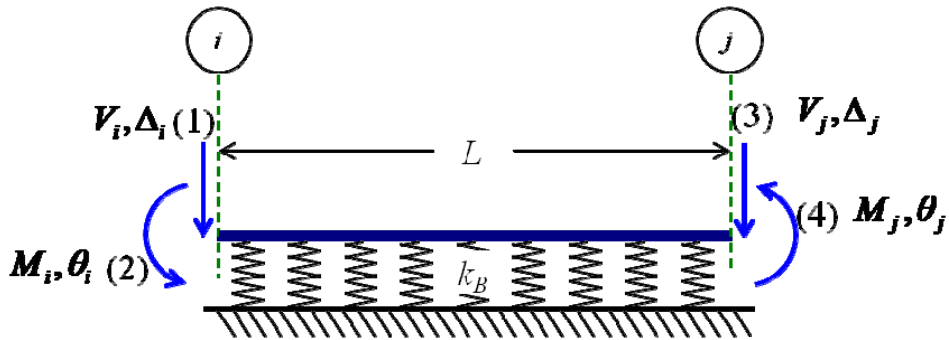


图 2: 弹性地基元素上的欧拉梁

表达一个弹性地基上的欧拉梁的单元刚度矩阵可以从很多文献中找到。在这项研究是借用 Krenk (2001 年) 文章中的算式。图 2 显示了用于模拟弹性地基元素上的欧拉梁

。起始节点是 i 和结束节点是 j 。有四个自由度,两个起始节点及两个结束节点。该元素的长度 L 和弹性地基刚度假定为 k_B 。可以将元素刚度 k 表示为 (Krenk 2001):

$$\mathbf{k} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12\psi_1 & -6\psi_3L & -12\psi_2 & -6\psi_4L \\ -6\psi_3L & 4\psi_5L^2 & 6\psi_4L & 2\psi_6L^2 \\ -12\psi_2 & 6\psi_4L & 12\psi_1 & 6\psi_3L \\ -6\psi_4L & 2\psi_6L^2 & 6\psi_3L & 4\psi_5L^2 \end{bmatrix}$$

E 和 I 分别弹性模量和面积的二次矩, $\psi_1 \dots \psi_6$ 的系数可以表示为:

$$\psi_1 = \frac{1}{3}(\lambda L)^2 \psi [\sinh(\lambda L) \cosh(\lambda L) + \sin(\lambda L) \cos(\lambda L)]$$

$$\psi_2 = \frac{1}{3}(\lambda L)^2 \psi [\sin(\lambda L) \cosh(\lambda L) + \sinh(\lambda L) \cos(\lambda L)]$$

$$\psi_3 = \frac{1}{3}(\lambda L) \psi [\sinh^2(\lambda L) + \sin^2(\lambda L)]$$

$$\psi_4 = \frac{2}{3}(\lambda L) \psi \sin(\lambda L) \sinh(\lambda L)$$

$$\psi_5 = \frac{1}{2} \psi [\sinh(\lambda L) \cosh(\lambda L) - \sin(\lambda L) \cos(\lambda L)]$$

$$\psi_6 = \psi [\sin(\lambda L) \cosh(\lambda L) - \sinh(\lambda L) \cos(\lambda L)]$$

$$\psi = \frac{\lambda L}{\sinh^2(\lambda L) - \sin^2(\lambda L)} \text{ 及 } \lambda = \left(\frac{k_B}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}$$

在这项研究中将用统一质量矩阵考虑动态的影响 (Paz & Leigh 2003):

$$\mathbf{m} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

ρ 和 A 是元素的密度和横截面积。因为所有元素的方向是相同的, 元素的坐标系统被选择与整体的坐标系统共线。所以没有转变的需要。经整合后, 可以获得系统刚度矩阵 K 和系统量矩阵 M 。道碴轨枕轨道系统的固有频率和振形可以解决特征值问题的计算。

3. 数值计算分析

利用混凝土轨枕的模态参数评估轨枕下道碴的健康状况的可能性将会进行了一系列的数值的案例研究。在这项研究中会采用香港典型的道碴轨枕轨道系统, 它由两条 UIC60 钢轨、预应力混凝土轨枕和花岗道碴岩组成。表 1 概述了道碴轨枕轨道系统的模型参数。模型参数的大部分来自混凝土轨枕制造商的规范。道碴及钢轨等效刚度数值是跟据文献中的数值 (Zhai et al. 2004)。

表 1: 案例研究中所用的模型参数。

模型参数 (单位)	数值
轨枕长度 L (mm)	2420
轨枕高度 h (mm)	210
轨枕阔度 b (mm)	280
等效弹性模量, E (N/m ²)	4.0×10^{10}
密度, ρ (kg/m ³)	2750
*道碴等效刚度 (N/m ²)	7.840×10^7
*钢轨等效刚度 (N/m)	2.059×10^{11}

*数值是跟据文献中的数值 (Zhai et al. 2004)。

未损坏的状态中的所有 24 区域道碴的等效刚度系数

被假定为相同 (见表 1)。左、右钢轨的等效刚度系

数也被假定为相同（见表 1 中的数字值）。

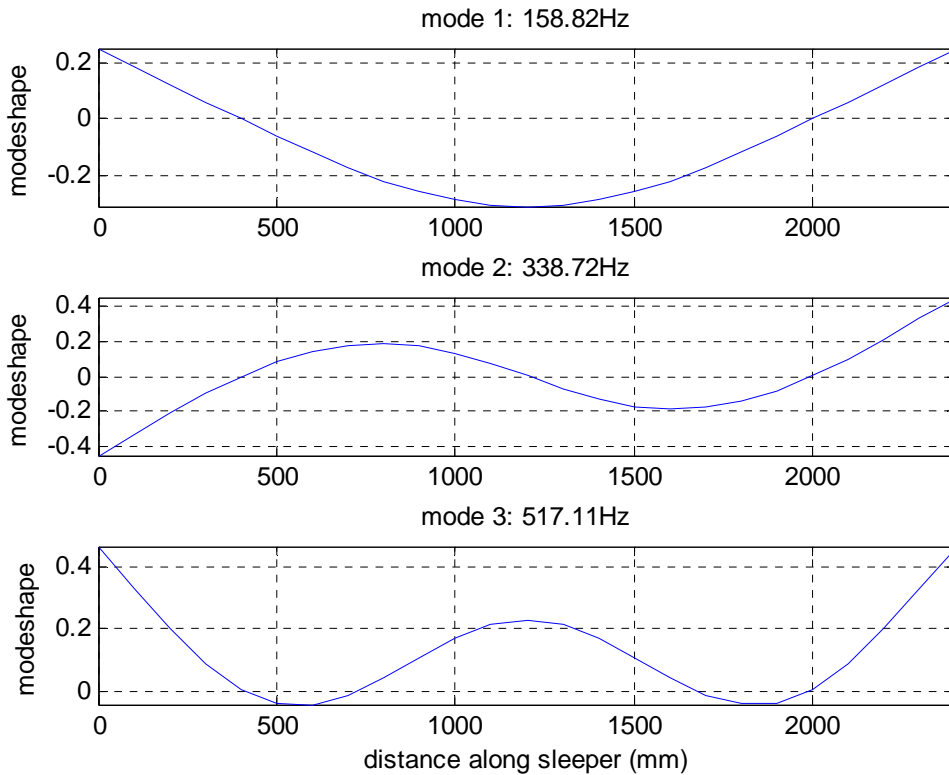


图 3： 模型预测前三个模式固有频率和振形

模型预测的固有频率与模态形状概述在图 3 中。因为要比较不同损伤情况下的模态形状，模态形状均须归一化，这样模态形状向量的长度等于团结。在实际用高精度冲击锤测试只能找出头三个弯曲的原位轨枕的模态形状。因此，仅前三个弯轨枕模态被用在这项研究。对原位轨枕道碴损伤的影响：

当混凝土轨枕下的道碴有损伤，道碴大小将会减小及捣固水平将会降低。这种现象可以用来模拟道碴对轨枕的刚度的减少。损伤道碴可导致轨枕下出现有空间，而

道碴对轨枕的刚度将会减至非常接近于零（接近 100% 刚度值减少）。在此数值的案例研究中，道碴损伤模拟刚度系数在相应区域减少了 90%。表 2 总结了五个模拟情况和相应的损伤定位程度。情况 1 是未损坏的道碴作为参考，用于研究道碴损伤对系统动态特性的影响。因为在钢轨底的道碴比其它位置的道碴更容易受由列车的应力轨枕所损坏。因此，情况 2, 3, 5 致力于研究这种情况。认为轨枕中底道碴损坏的情况 4 也被考虑研究的完整性。

2： 损伤情况下考虑在数值的情况研究

情况	损伤位置	钢度减少百分比					
		地区 1	地区 2	地区 3	地区 4	地区 5	地区 6
1	未损伤	0	0	0	0	0	0
2	轨枕右边	90%	90%	0	0	0	0
4	轨枕中间	0	0	90%	90%	0	0
5	轨枕右边	90%	90%	0	0	90%	90%

计算机模拟计算在不同的损坏情况下前三个模式的固有频率和模式形状。模型预测固有频率和相应的百分比减少，表 3 中概括模型预测在不同损坏情况下的固有频率及对应的减少百分率。从表中可清楚表示在不同损坏情况下的道碴会减少固有频率。一个重要的观察是在不同模式和不同的损坏情况下固有频率的百分比减少是不同的。换言之固有频率的变化并包含位置和道碴损伤的程度有关的信息。

情况 2 固有频率的变化是大 2%，模式 1（4.45%）和模式 2（2.1%）但模式 3（0.73%）是少于 1%。很明显在这种情况下在模式 1 和模式 2 较模式 3 对道碴的损伤更敏感。

必须指出固有频率是系统的全域属性。由于道碴轨枕轨道系统在这种情况下考虑其未损坏的状态的研究是

中心对称，在对称道碴损伤情况下固有振动频率变化也相同。因此，在左侧和右侧钢轨下的损伤道碴模式 1, 2 和 3 固有频率变化(即情况 2 和 3)也是相同的。

情况 4 的模式 1 是非常敏感 (18.84%) 而模式 2 和 3 都不是。情况 5 的模式 1 是最敏感的和模式 1 和 2 都不是敏感，和模式 3 是最不敏感的。很明显不同的模式会在不同的位置有不同的敏感性。图 4 绘制所有损伤情况的前三个模式固有频率的百分比变化。从图中可以看出不同的损伤情况下固有频率的减少存在不同模式。它是可以使用模式匹配方法 (Lam & Ng2008) 来检测道碴。用先进测量设备可量度轨枕的固有频率达到高度准确地不足 1% 的错误。因此，大于 1% 的百分比变化可被视为可检测。基于数值的情况研究的结果，它可以得出结论，可以通过解释原位轨枕的改变固有频率来检测道碴损伤。

表 3: 计算所有情况下的固有频率。

情况	模式 1-Hz (减少百分率)	模式 2-Hz (减少百分率)	模式 3-Hz (减少百分率)
1	158.82	338.72	517.11
2	151.76 (4.45%)	331.59 (2.10%)	513.31 (0.73%)
3	151.76 (4.45%)	331.59 (2.10%)	513.31 (0.73%)
4	128.9 (18.84%)	335.81 (0.86%)	513.81 (0.64%)
5	144.97 (8.72%)	324.26 (4.27%)	509.34 (1.5%)

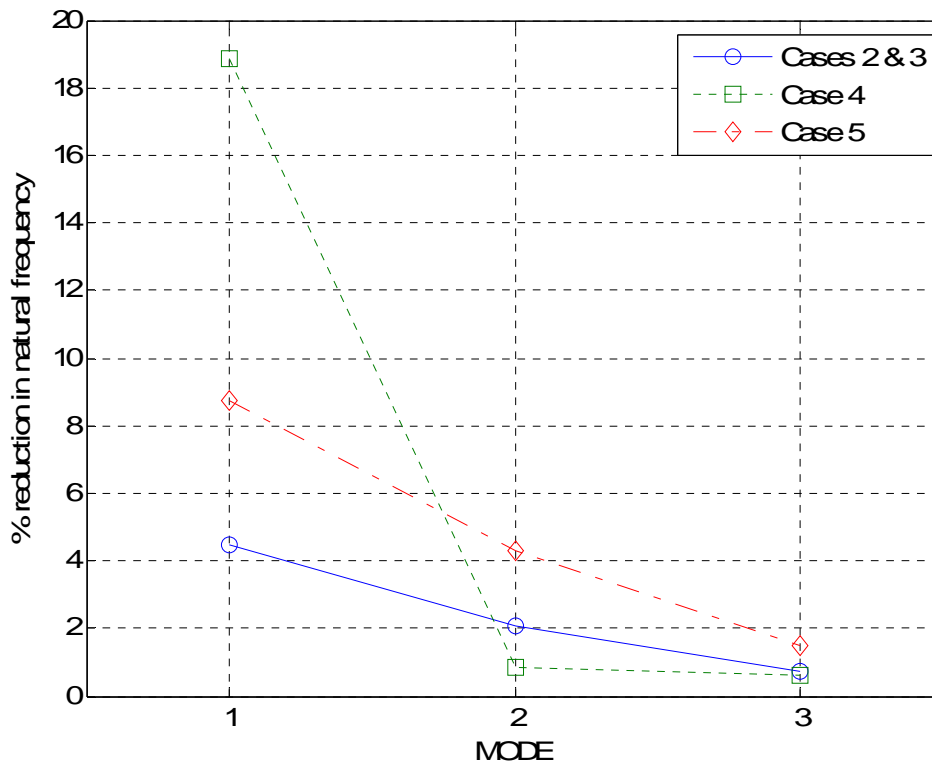
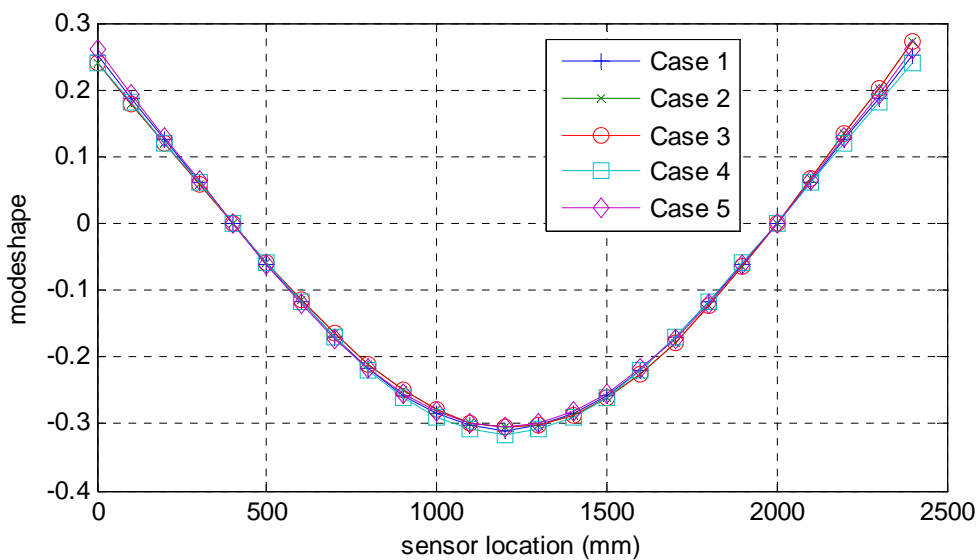


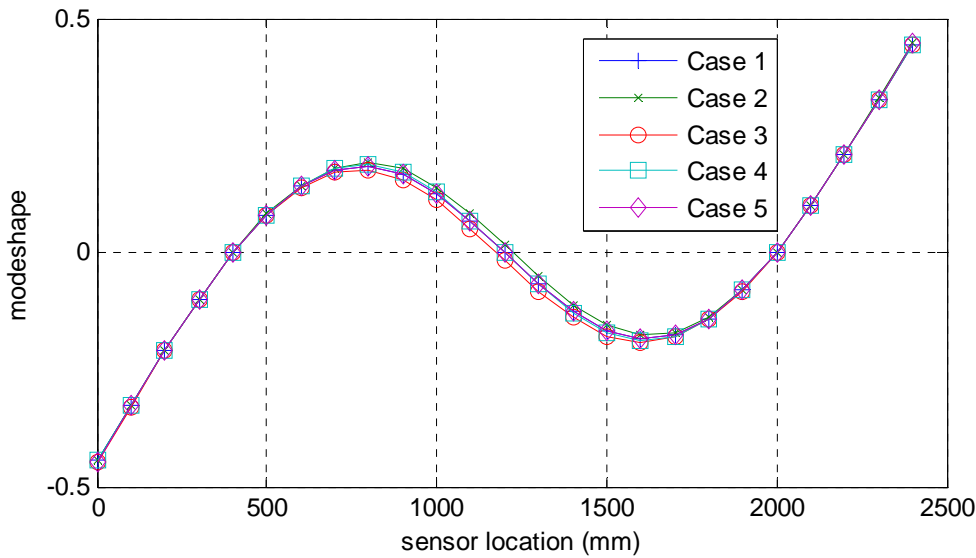
图 4： 通过解释原位轨枕的改变固有频率来检测道碴损伤

图 5 绘出所有情况下计算的前三个模态形状。从图中很明显表示前三个模态形状的损伤致模态形状变化是非常细的。 测量模态形状的惯常错误百分比是约 2%

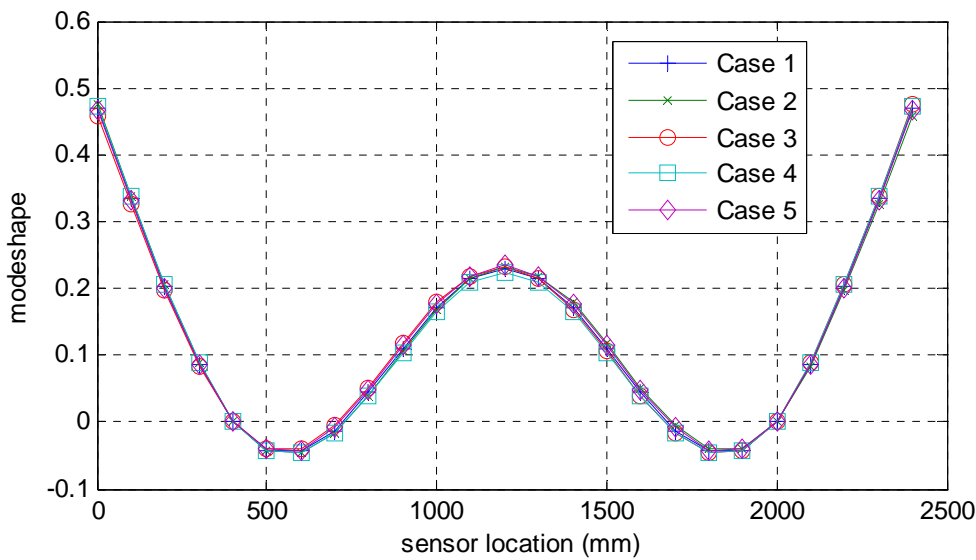
至 5%，并且因此，使用测量原位轨枕的模态形状来检测道碴损伤并不容易。 然而，测量的模态形状是识别模态非常重要的。



i) 模态 1



ii) 模态 2



iii) 模态 3

图 5: 在所有情况下的三种模式的计算的模态形状

4. 总结

本文报告铁道道碴损伤诊断的可行性研究。数值情况研究结果是非常令人鼓舞,显示原位轨枕的振动数据包含轨枕下的道碴有关的信息。换言之,它是可以通过现场轨枕的冲击锤试验确定道碴损伤。但是,这种方法可以应用在实际情况之前必须克服很多困难。首先,通常没有测量未损坏状态系统的轨枕振动。轨道督察只可以测量现场在损伤道碴上轨枕的动态的响应。请注意这是一个常见的问题在结构健康监测,一个可能的解决方案是为代表道碴轨枕轨道系统的未损伤的状态发展(分析或数值)的模型。这种方法的实现中

的另一个困难是不确定性问题。不同与航天和机械系统的结构系统,是道碴轨枕轨道系统的模型参数是较不确定的。处理不确定性问题应采用概率理论。此外,有很多因素影响振动特性如轨枕本身,损伤的原位轨枕缺陷和铁路垫损坏,和环境因素如温度和湿度。在实际的道碴损伤检测方法的发展必须考虑这些因素。不过,将来这种方法很容易扩展到连续监测系统。在所选的轨枕上安装传感器来跟踪系统。测量的信号可以通过通信线路的轨道上转移到控制中心。

5. 答谢

本文中介绍的工作由香港特别行政区的研究资助局资助支持 [项目号: 城大 115510]。

参考文献

Kaewunruen S and Remennikov AM (2007), Effect of improper ballast packing/tamping on dynamic behaviours of on-track railway concrete sleeper, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 7(1): 167-177.

Selig ET and Waters JM (1997), *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford.

Narayanan RM, Kumke CJ and Li D (2001), Railroad Track Substructure Monitoring Using Ground Penetrating Radar (GPR), *Rail International*, 32(1): 28-34.

Roberts R, Al-Qadi IL, Tutumluer E and Kathage A (2007), Ballast fouling assessment using 2 GHz horn antennas - GPR and ground truth comparison from 238 km of track, 9th International Railway Engineering Conference (London, UK, Jun. 2007). (Download: http://www.alphageofisica.com.br/gssi/gpr_2008/RailEng%202007_br.pdf)

Al-Qadi IL, Xie W and Roger R (2008), Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination, *NDT&E International*, 41: 441-447.

Burrow MPN, Chan AHC and Shein A (2007), Deflectometer-based analysis of ballasted railway tracks, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 160, July 2007, Issue GE3: 169-177.

Sitharam TG and Anbazhagan P (2006), Measurements of Dynamic Properties and Soil Profiling Using Multichannel Analysis of Surface Waves, Invited Keynote in 4th Karl Terzaghi Memorial Workshops, October07, 2006 at Madgaon, Goa, P-6.

Sutton JA and Snelling K (1998), Assessment of Ground Improvement Using the Continuous

Surface Wave Method, *Proceedings of the 4th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society*, Barcelona, 14-17th September 1998.

Moxhay AL, Tinsley RD and Redgers JD (2008), The prediction of ground settlement from continuous surface wave data, *Ground Engineering magazine*, July 2008, pp 34-37.

Krenk S (2001), *Mechanics and Analysis of Beams, Columns and Cables - A Modern Introduction to the Classic Theories*, Second Edition, Springer.

Zhai WM, Wang KY and Lin JH (2004), Modelling and experiment of railway ballast vibration, *Journal of Sound and Vibration* 270(9): 673-683.

Paz M and Leigh W (2003), *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Fifth Edition, Springer.

Lam HF and Ng CT (2008a), The Selection of Pattern Features for Structural Damage Detection Using an Extended Bayesian ANN Algorithm, *Engineering Structures*, 30(10): 2762-2770.

Lam HF, Wong MT and Keefe RM (2010), Detection of Railway Ballast Damage by In-Situ Vibration Measurement of Concrete Sleepers, The 14th Annual Conference of HKSTAM 2009/2010 and The 7th Shanghai-Hong Kong Forum on Mechanics & Its Application, March 13, 2010, Hong Kong.

Lam HF, Wong MT# and Keefe RM (2009), Detection of Ballast Damage by In-situ Vibration Measurement of Sleepers, 2nd International Symposium on Computational Mechanics (ISCM II), 30 November 2009 - 3 December 2009, Hong Kong and Macau.