

斜拉桥主梁损伤对车激索力响应的影响研究

彭沉彬, 李延强

(石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043)

摘要:以斜拉桥的损伤识别为目的,提出了一种索力比指标,研究了斜拉桥在车辆荷载激励下,主梁发生损伤时斜拉索索力比指标的变化规律。以实验室独塔斜拉桥试验模型为研究对象,基于 ANSYS 建立其空间板壳有限元模型,以单元刚度的折减模拟主梁损伤,对主梁在不同位置损伤、不同程度损伤两类工况下,车辆荷载激励下斜拉索的索力比指标变化进行了数值仿真。结果表明:车辆荷载激励下,斜拉索的索力比指标与主梁的损伤位置和损伤程度存在一定的对应关系。为后续基于车辆荷载激励下的索力响应指标识别斜拉桥损伤方法的研究提供了重要的参考,具有一定的理论意义。

关键词:斜拉桥;损伤识别;索力比指标;车桥耦合

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0011-06

0 引言

斜拉桥结构由于其优美的造型、较大的跨越能力和优良的经济性能而在我国广泛应用。斜拉桥主要由主梁、索塔、斜拉索三部分组成,其中,索塔与桥面主梁的联系与支承都是依靠斜拉索来实现,因此,斜拉索是斜拉桥最重要的结构构件。掌握了斜拉索索力的大小和分布,可以基本了解全桥结构的线形变化和受力分布。而由于荷载、环境等因素,斜拉桥主梁在运营期间必然会发生损伤,当主梁发生损伤时,力的重新分配将导致斜拉索的索力产生相应的变化,因此,了解斜拉桥主梁的损伤对斜拉索索力的影响可以反过来由索力的变化推断出主梁可能的损伤及其位置。虽然针对斜拉桥的损伤识别已成为研究热点^[1-3],其中基于索力指标进行斜拉桥损伤识别是目前研究的重点^[4-7],而这些方法均是基于静力状态下索力指标的变化进行损伤识别,目前基于环境振动(车激振动)的损伤识别方法因其干扰小、所需传感器数量少等优点受到越来越多的关注^[8-9],而对于斜拉桥在损伤状态下受车辆荷载激励时的索力响应分析尚未见相关报道。基于此,本文对斜拉桥在损伤状态时车辆荷载激励下斜拉索的索力响应展开研究,提出了索力比指标,并探讨了主梁不同损伤位置、不同损伤程度对索力比指标的影响规律,为后续的基于车激索力响应的斜拉桥损伤识别提供理论指导意义。

1 损伤状态下的车激索力响应

斜拉桥与车辆的车桥耦合动力分析模型如图 1 所示。

根据车桥耦合理论,斜拉桥与车辆的耦合振动方程可以写为

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & 0 \\ 0 & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bv} \\ C_{cb} & C_{cv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{X}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{cb} \\ K_{cb} & K_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ X_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_b \\ F_v \end{Bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2014-06-23 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.04.03

作者简介:彭沉彬(1989-),男,硕士研究生,主要从事桥梁损伤识别研究。E-mail:383678428@qq.com

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2012210061);河北省教育厅重点项目(ZH2012068);国家自然科学基金项目(50778116)

彭沉彬,李延强.斜拉桥主梁损伤对车激索力响应的影响研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):11-15,52.

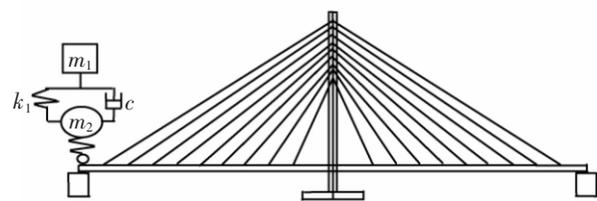


图 1 汽车-斜拉桥动力系统模型

式中, M 、 C 、 K 分别表示质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X 分别为节点加速度、速度和位移列向量; F 为等效节点力列向量; 下标 v 和 b 分别表示车辆和桥梁。

通常认为, 桥梁的损伤只影响结构的刚度而对桥梁的质量没有影响, 因此定义损伤因子 α_i 为第 i 个单元刚度改变的百分比^[8], 其损伤前后的刚度为

$$\{k\}_{i,d}^e = \{k\}_{i,0}^e (1 - \alpha_i) \quad (0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, $\{k\}_{i,0}^e$ 是桥梁损伤之前 i 单元的原始单元刚度, $\{k\}_{i,d}^e$ 是桥梁损伤之后 i 单元的单元刚度。

则损伤后的车桥耦合振动方程为

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & 0 \\ 0 & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bv} \\ C_{vb} & C_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{X}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb,d} & K_{cb} \\ K_{cb} & K_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ X_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_b \\ F_v \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中, $K_{bb,d}$ 是桥梁损伤后的结构刚度矩阵。

求解方程(3), 可得到车辆荷载激励下, 斜拉桥主梁的动力响应。

斜拉索通常采用只受拉的杆单元模拟, 杆单元的内力与局部坐标系位移之间的关系为

$$\begin{Bmatrix} F_i^e \\ F_j^e \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^e \\ u_j^e \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中, F_i^e 和 F_j^e 分别为斜拉索单元 e 两端的杆端力; EA 和 L 分别为单元抗拉刚度和长度; u_i^e 和 u_j^e 分别为单元坐标系下单元两端节点 i 和 j 的轴向位移。

根据变形协调条件, 将(3)式求解得到的主梁与斜拉索连接处的节点动力响应代入式(4)求解, 即可得到车辆荷载激励下斜拉索的索力响应。

2 索力比指标

当斜拉桥主梁的第 i 位置发生损伤时, 则斜拉索的索力时程响应发生相应的改变, 损伤后第 j 根斜拉索的索力响应为 $F_{j,i}$, 相对于未损伤时的索力 $F_{j,0}$ 的比值为 $F_{j,i}/F_{j,0}$, 取索力时程比值的平均值表征主梁损伤对斜拉索索力响应的的影响参数 $\lambda_{j,i}$, 称之为第 j 根斜拉索的索力响应对 i 位置损伤的索力比指标, 如式(5)所示

$$\lambda_{j,i} = \frac{\sum F_{j,i}/F_{j,0}}{T_n} \quad (5)$$

式中, $\lambda_{j,i}$ 为第 j 根斜拉索的索力响应对 i 位置损伤的索力比指标; T_n 为采样点个数。

3 数值算例

以实验室模型斜拉桥为研究对象, 实验室模型桥如图 2 所示。

为了研究斜拉桥主梁损伤对车激索力响应的影响, 采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立实验室模型斜拉桥的三维有限元板壳模型, 如图 3 所示。



图 2 斜拉桥实验室模型图

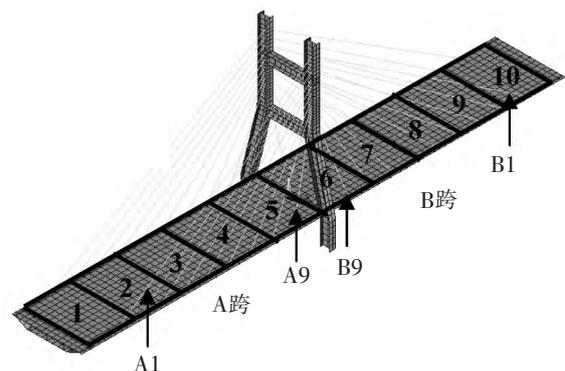


图 3 斜拉桥有限元模型图

为使有限元模型能充分反映模型斜拉桥结构的实际状态,结合模型斜拉桥静载试验数据,选取斜拉索张力与主梁位移 2 项作为修正目标,基于静力测试数据的参数型修正法,对初始板壳有限元模型进行修正^[10-12]。本文对斜拉桥主梁损伤识别的数值模拟均建立在修正后的有限元模型基础之上。根据对称性,取一侧 18 根斜拉索的索力响应进行研究,斜拉索从两端向主塔的编号分别为 A1~A9,B1~B9。其中,按照斜拉索的长度,取 A1~A3、B1~B3 为长斜拉索,A4~A6、B4~B6 为中长斜拉索,A7~A9、B7~B9 为短斜拉索。

车辆采用四轮汽车模型,为模拟真实汽车受力情况,考虑了前后车轴以及悬挂刚度和悬挂阻尼,以及下部轮胎的刚度。汽车的参数:上部质量 $m_1=5\text{ kg}$,下部质量 $m_2=4\text{ kg}$,悬挂刚度 $k_1=1\times 10^4\text{ kN/m}$,悬挂阻尼 $c=500\text{ N/(m}\cdot\text{s)}$,轮胎的弹簧刚度 $k_2=1.5\times 10^4\text{ kN/m}$ 。车辆有限元模型如图 4 所示。耦合后的车桥模型如图 5 所示。

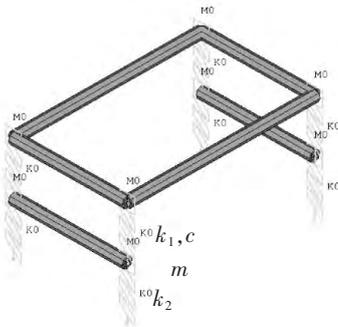


图 4 车辆有限元模型

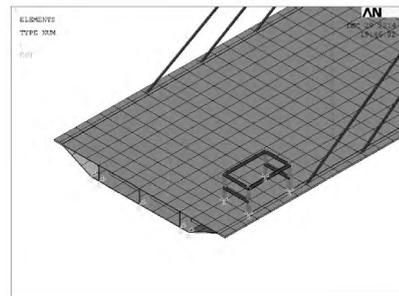


图 5 车桥耦合的有限元模型图

3.1 主梁损伤位置对索力比指标的影响分析

将斜拉桥主梁顶板的 960 个单元分为 10 个损伤区域,如图 3 所示,每个区域包含 96 个单元,纵桥向 8 行,横桥向 12 列,将这一个区域看作是一个损伤位置,分别对不同的损伤位置假设发生不同程度的损伤,探讨车激索力响应与斜拉桥主梁损伤之间的关系。

当 10 个损伤位置分别发生损伤程度为 30% 的损伤时,汽车以 80 km/h 的速度匀速通过斜拉桥,研究斜拉索的索力比指标与损伤位置的关系,限于篇幅,仅给出长斜拉索 A1、B1,中长斜拉索 A5、B5,短斜拉索 A9、B9 的索力比指标与损伤位置的关系如图 6~图 8 所示。

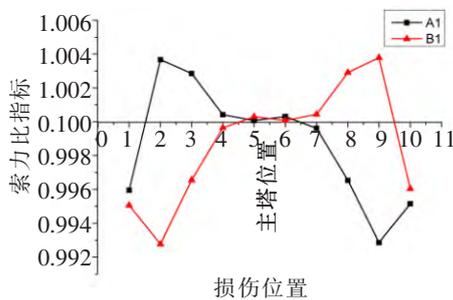


图 6 A1 和 B1 索力比指标与损伤位置的关系

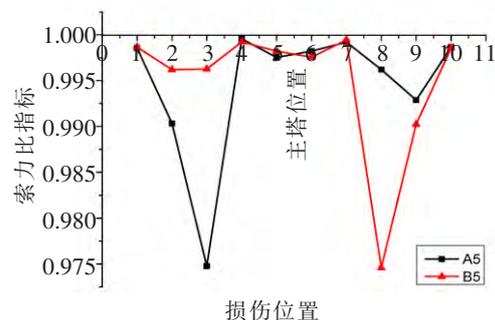


图 7 A5 和 B5 索力比指标与损伤位置的关系

从图 6 中可以看出,长斜拉索 A1 和 B1 的索力比指标随着损伤位置从边跨支座往主塔移动,索力比指标先升高,再减小。其中,位置 4 到位置 7 的损伤对斜拉索 A1 和 B1 的索力比指标影响较小。图 7 中,中长斜拉索 A5 和 B5 的索力比指标随着损伤位置从边支座往主塔移动,索力比指标先减小,到斜拉索与主梁锚固处索力比指标最小,然后再升高,靠近主塔位置时变化较为平滑。其中,斜拉索 A5 与主梁锚固的位置 3 发生损伤时,斜拉索 A5 的索力比指标最小,斜拉索 B5 与主梁锚固的位置 8 发生损伤时,斜拉索 B5 的索力比指标最小。图 8 中,短斜拉索 A9 和 B9 的索力比指标随着损伤位置从边支座向主塔移动时,其索力比指标先增加再减小。其中,斜拉索 A9 与主梁锚固的位置 5 发生损伤时,斜拉索 B9 的索力比指

标最小,斜拉索 B9 与主梁锚固的位置 6 发生损伤时,斜拉索 A9 的索力比指标最小。由此可知,在车辆荷载激励下,斜拉索索力比指标与主梁损伤位置存在一定的对应关系,关于主塔对称的各斜拉索索力比指标随损伤位置的变化规律相同,主梁损伤位置与斜拉索锚固位置相近时,对斜拉索的索力比指标影响较大。

3.2 主梁损伤程度对索力比指标的影响分析

分别对主梁的 10 个损伤位置进行损伤仿真模拟,并分别选取损伤程度为 1%、5%、10%、15%、20%、30%、50% 7 种损伤程度进行研究。

以斜拉索 A1 锚固的位置 1、斜拉索 A5 锚固的位置 3、以及斜拉索 A9 锚固的位置 5 为例,探讨损伤程度对索力比指标的影响。其中,斜拉索 A1 锚固的位置 1 损伤时,不同斜拉索的索力比指标与损伤程度之间的关系如图 9 所示。

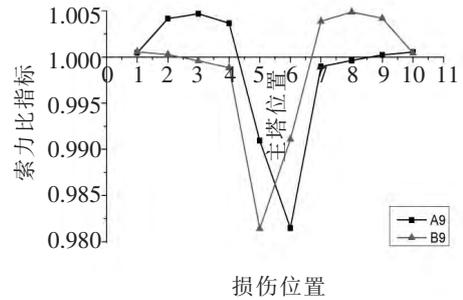


图 8 A9 和 B9 索力比指标与损伤位置的关系

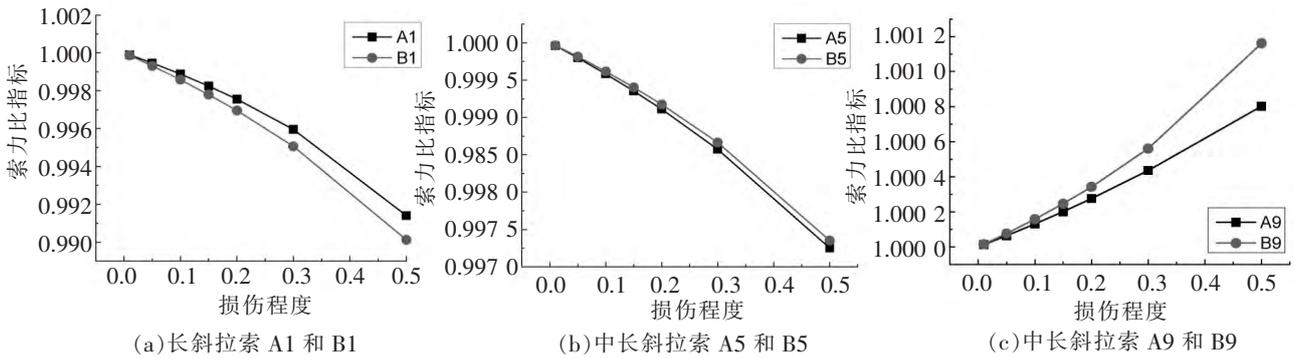


图 9 位置 1(A1 锚固处)损伤时索力比指标与损伤程度的关系

从图 9 中可以看出,位置 1 发生损伤时,长斜拉索 A1 和 B1 及中长斜拉索 A5 和 B5 的索力比指标随损伤程度的增加而减小;而短斜拉索 A9 和 B9 的索力比指标随损伤程度的增加而增加。

斜拉索 A5 锚固的位置 3 损伤时,不同斜拉索的索力比指标与损伤程度之间的关系如图 10 所示。

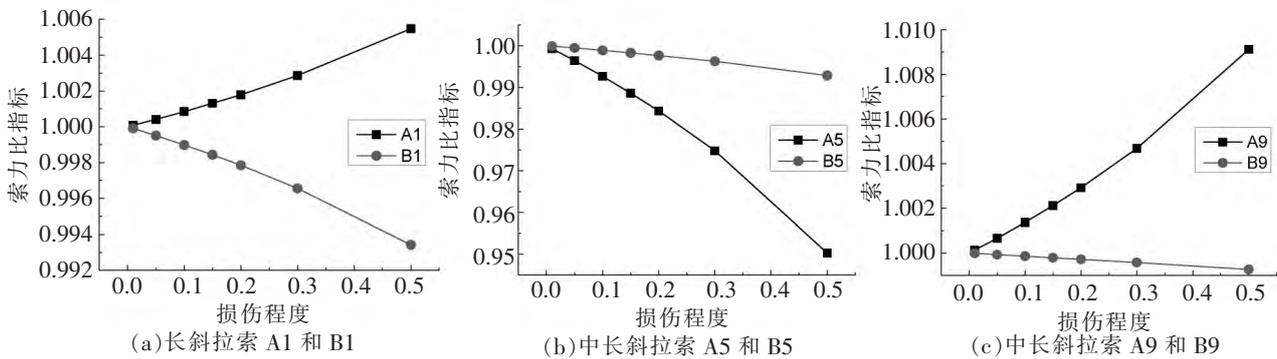


图 10 位置 3(A5 锚固处)损伤时索力比指标与损伤程度的关系

从图 10(a)可以看出,当位置 3 发生损伤时,位于 A 跨的长斜拉索 A1 的索力指标随损伤程度的增加而增加,而关于主塔对称的斜拉索 B1 的索力比指标却随损伤程度的增加而减小;图 10(b)中,中长斜拉索 A5 和 B5 的索力比指标都随损伤程度的增加而减小;图 10(c)中,短斜拉索 A9 和 B9 的索力比指标随损伤程度的变化规律与长斜拉索相同,位于 A 跨的斜拉索 A9 的索力比指标随损伤程度的增加而增加,B 跨的斜拉索 B9 的索力比指标却随损伤程度的增加而减小。

斜拉索 A9 锚固的位置 5 损伤时,不同斜拉索的索力比指标与损伤程度之间的关系如图 11 所示。

从图 11(a)可以看出,当位置 5 发生损伤时,长斜拉索 A1 和 B1 的索力比指标都随损伤程度的增加而

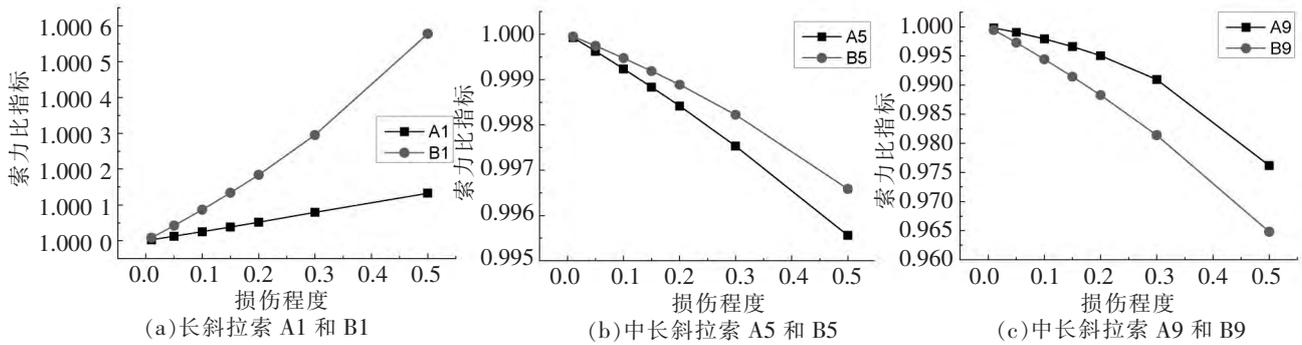


图 11 位置 5(A9 锚固处)损伤时索力比指标与损伤程度的关系

增加;图 11(b)和(c)中,中长斜拉索 A5 和 B5 与短斜拉索 A9 和 B9 的索力比指标变化规律相同,都随损伤程度的增加而减小。

同时对图 9(a)、图 10(b)和图 11(c)可发现:当斜拉索与主梁锚固的位置发生损伤时,该斜拉索的索力比指标随损伤程度的增加而减小。

综上可知,斜拉索的索力比指标对主梁的损伤程度敏感;不同斜拉索的索力比指标变化规律随损伤程度的增加而呈单调性。

4 结论

通过数值分析,对损伤前后斜拉桥受汽车荷载的索力变化行为进行了统计分析,得到以下结论:

(1)斜拉索的索力比指标对主梁的损伤位置敏感,关于主塔对称的斜拉索的索力比指标随损伤位置的变化规律相同,斜拉索与主梁锚固的位置发生损伤比其余位置发生损伤对该斜拉索的索力比指标影响大。

(2)斜拉索的索力比指标对主梁的损伤程度敏感,不同斜拉索的索力比指标随主梁损伤程度的增加均呈现单调性变化规律。其中当主梁损伤位置在主梁与斜拉索锚固点附近时,该斜拉索的索力比指标随损伤程度的增加而减小。

综上,车辆荷载激励下,斜拉索的索力比指标与主梁的损伤位置和损伤程度关系密切,本文的研究为探讨基于车激索力响应识别斜拉桥损伤方法提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1]谢峻,江见鲸,韩大建,等. 大跨度斜拉桥损伤识别的三步法[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 53-56.
- [2]张刚刚,王春生,徐岳. 基于径向基函数神经网络的斜拉桥损伤识别[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(1): 49-53.
- [3]曾欣,徐赵东. 基于分布式应变模态残差统计趋势的大跨斜拉桥损伤识别策略[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 78-81.
- [4]孙宗光,伍雪南,苏健. 基于斜拉索张力测定的斜拉桥健康诊断[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 70-75.
- [5]华旭刚. 基于索力变化的斜拉桥主梁损伤识别研究方法[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(10): 789-796.
- [6]淡丹辉,赵一鸣,杨通,等. 基于群索索力相异测度的斜拉桥健康状态评估[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(6): 826-832.
- [7]李延强,赵世英,杜彦良. 基于最敏感斜拉索张力指标的斜拉桥主梁损伤识别方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(2): 20-25.
- [8]卜建清,王树栋,罗韶湘. 由车激响应识别桥梁损伤的灵敏度方法[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7): 80-84.
- [9]战家旺,夏禾,陈上有,等. 基于车激响应和灵敏度分析的桥梁结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 38-44.
- [10]李延强,杜彦良. 面向损伤识别的独塔斜拉桥模型的设计与分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2012, 25(3): 6-9.

(下转第 52 页)

Numerical Analysis of Deep Foundation Pit Deformation Considering Coupled Hydromechanical Effects

Sun Erxiao, Zhao Yucheng

(Traffic Engineering School, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A large number of pit accidents show that failing in controlling groundwater is one of the important causes of the accidents. Combining with an engineering background, with the large-scale finite element software Midas-GTS, this paper mainly discusses the deformations by considering rainfall and excavation of foundation pit, including the distribution of Seepage field around the pit, ground subsidence around the pit, the deflection of piles and the uplift of excavation face. The results show that the design of foundation pit is safer when considering coupled hydromechanical effects.

Key words: Coupled hydromechanical effects; precipitation excavation; deformation

(上接第 15 页)

[11]李延强,杜彦良,符强. 基于实测索力的模型斜拉桥有限元模型修正研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 91-95.

[12]李延强,赵世英. 斜拉桥结构模型试验索力测试方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2013, 26(4): 7-10.

Research on the Influence of Girder Damage of Cable-stayed Bridge to Cable Force Responses Under the Action of Moving Vehicle Load

Peng Chenbin, Li Yanqiang

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to detect the damage of the cable-stayed bridge, the cable force ratio index is presented in this paper. The cable force ratio indexes are studied while the main girder of cable-stayed bridge is damaged under the action of moving vehicle load. Taking a single-tower cable-stayed bridge test model as research object, a space plate shell finite element model is established by ANSYS. The damage of main girder is simulated by the stiffness reduction. Numerical simulation is done to research the change of cable force ratio index when the girder has different damage locations and different damage extent under vehicle excitation. It is shown that the cable force ratio index is closely connection with damage location and extent of girder when the vehicle load across the bridge. The research presented in this paper provides some theoretical reference for damage detection based on cable force response index under vehicle load excitation.

Key words: cable-stayed bridge; damage detection; cable force ratio index; vehicle-bridge coupling effect