

含沙铁路道碴弹性模量和沉降量的试验研究

季顺迎¹, 苏 勇¹, 严 颖²

(1 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023
2 大连交通大学 土木与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 为研究有碴道床在不同含沙率下的力学行为, 研制了准静态压缩试验装置, 并通过循环加卸载方式确定了不同含沙量下沙-石混合体的弹性模量和沉降量, 分析了细沙对铁路道碴弹性模量和沉降量的影响。以上研究不仅对分析风沙区有碴道床的力学行为具有一定的应用价值, 同时, 对研究不同类型颗粒介质在不同配比下的力学行为转化规律也具有参考意义。

关键词: 道碴; 含沙量; 沙石混合体; 弹性模量; 沉降量

中图分类号: U 213.7+2 文献标志码: A 文章编号: 1672-7029(2011)02-0047-06

Experimental studies on elastic modulus and settlement of railway ballasts with sand

Ji Shun-yi¹, SU Yong¹, YAN Ying²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China
2 Dalian Jiaotong University, School of Civil and Safety Engineering, Dalian 116028, China)

Abstract A quasi-static compression test was developed in order to investigate the mechanical behavior of ballasts with different sand contents. The elastic modulus and settlement were investigated under cyclic loading of sand-ballast mixtures and the influence of the sand was analyzed. These researches provide reference for the mechanical behavior transformation rule of different particles under different mixture ration.

Key words ballasts; sand content; sand-ballast mixture; elastic modulus; settlement

在有碴轨道结构中,道床是线路结构中最薄弱的环节,已成为制约列车高速、重载运行的重要因素^[1]。有碴道床的主要功能是承受来自轨枕的荷载,保持轨道的稳定性,具有均匀而足够的弹性,以保证道床的平顺性^[2]。然而,在列车往复载荷作用下,道碴碎石会重新排列,同时也会受压破碎粉化并发生沉降^[3-4]。在道碴沉降过程中,道床结构的弹性会逐渐降低,还会导致轨道的不平顺性,影响行车的平稳性和安全性^[3-6]。我国是世界上沙漠面积最大的国家之一,在风沙地区修建的铁路总长

度超过了 5 000 km^[7]。风沙地区修建的铁路,道床积沙是十分普遍的现象^[8-9]。在恶劣的风沙环境下,细小沙粒贯入道碴空隙,引起道床密实度的增加和有效弹性的降低,直至道床失去弹性,形成道床板结,进而引起轨枕及钢轨的不均匀抬高,增加了轨道的不平顺幅度^[10-11]。在有碴道床的动力特性研究中,为确定道床在不同条件下的变形模量、累积变形等力学特性进行了一系列的试验^[2,4,12-17]。然而,针对风沙区铁路道碴在细沙贯入条件下的力学行为的研究目前还尚未开展,对不

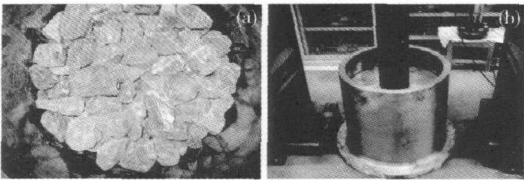
* 收稿日期: 2010-05-20
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB731502); 国家自然科学基金资助项目(50808027); 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金资助项目(200708)
作者简介: 季顺迎(1972-),男,河北武邑人,副教授,从事颗粒介质力学及工程应用研究

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同细沙含量下有碴道床的宏观弹性模量和沉降量的研究也亟待解决。此外,细沙和碎石道碴均属典型的颗粒介质,其在颗粒粒径、几何形态和力学性能方面均有很大差异。通过细观力学、理论分析、数值方法和力学试验等不同研究方法,人们系统地研究了单一颗粒材料的弹性模量^[18-19]。然而,对于2种不同颗粒材料混合体的力学行为研究开展的还不太充分。为此,本文通过准静态压缩试验研究含沙有碴道床的弹性模量和沉降特性,并对沙石混合体在不同配比下的弹性模量和沉降量进行试验测试,从而为颗粒介质的基本力学行为研究提供有益的参考依据。

1 试验装置和试验方案

试验中道碴碎石选用真实的铁路碎石,如图1(a)所示。道碴颗粒粒径在33.4~58.5 mm之间,其均值为45.2 mm。细沙选用粒径在0.25~0.50 mm之间。针对选用道碴的粒径大小,并考虑采用电子万能试验机对弹性模量测试的加载特点,设计了如图1(b)所示的试验装置。该装置主要由筒体、底盘和顶盖3部分构成,均为厚度2 cm的碳钢材料。筒体内径为30 cm,上部压盘直径略小于筒体内壁,为29.5 cm,以避免与筒体内壁的摩擦。筒体底盘直径大于筒体,为40 cm,以增强试验装置的稳定性。为了减小试验中筒体侧壁与试验材料的摩擦,对筒体内壁进行了抛光处理。



(a) 道碴颗粒材料; (b) 试验装置

图1 铁路道碴弹性模量和沉降量试验的道碴颗粒材料及试验装置

Fig 1 Ballasts and experimental apparatus for elastic modulus and settlement measurements

试验主要对含沙铁路道碴颗粒的弹性模量进行测试,不考虑颗粒受压破碎性能。为避免道碴颗粒的破碎,试验中将最大作用荷载设定为50 kN。为减小加载速率的影响,采用准静态加载方式,将加卸载速率设为50 kN/min,试验机压头直接作用在顶盖上,为保证加载的稳定性,将道碴碎石均匀放置于筒体中,同时在顶部铺平,并与顶盖充分

接触,使用水平仪校正顶盖水平度。每次试验试样装样高度保持为20 cm,从而保证试验中随机放置的道碴碎石在5层以上,以获得有效的宏观弹性模量。为消除细沙和道碴颗粒在试验初始稀疏排列的影响,通过循环加卸载的方式使试样达到稳定后测试其弹性模量。试验中没有完全卸载,而将最小作用力设为1 kN,从而保障上顶盖与试样在加卸载过程中充分接触,以获得稳定的试验数据,并通过数据采集系统记录下循环加卸载过程的力-位移曲线。

2 弹性模量的确定方法

通过作用力-位移曲线可以确定含沙铁路道碴试样的应力-应变关系曲线,并由此确定试样的弹性模量。尽管试验中为减弱筒体侧壁对试样的影响,对筒体内壁进行了磨光处理,但侧壁的摩擦力不能完全消除。若试样的法向应力为 σ_z ,则试样对侧壁的径向应力为:

$$\sigma_r = k_0 \sigma_z \tag{1}$$

式中: σ_r 为试样径向应力; k_0 为试样竖直法向应力向径向应力的传递系数。如果沙石混合体的内摩擦角为 φ ,忽略其黏接力,则应力传递系数 $k_0 = 1 - \sin \varphi$ ^[20]。通过动三轴试验测得道碴颗粒的内摩擦角在48°~53°之间^[16]。考虑含沙铁路道碴的内摩擦角要略低于纯道碴材料,这里取其内摩擦角 $\varphi = 46^\circ$, $k_0 = 0.28$ 。

若试样与筒体内壁的摩擦因数为 μ ,不存在黏接力,则依据Mohr-Coulomb摩擦定律,试样与筒体内壁间的剪切应力为:

$$\tau = \mu \sigma_r \tag{2}$$

式中: τ 为试样与筒体内壁的剪切应力。由于对筒体内壁进行了磨光处理,取碎石和细沙与光滑不锈钢表面的摩擦因数 $\mu = 0.15$ 。由此,试样的有效法向应力应在其名义法向应力的基础上考虑侧壁摩擦力的影响,可按下式确定:

$$\sigma_z = \left(1 - \frac{2k_0\mu h_0}{r}\right) \sigma \tag{3}$$

式中: h_0 为试样的初始高度; r 为试样半径; σ 为名义法向应力,并且有 $\sigma = \frac{P}{A}$ 。这里 P 为作用在试样上的荷载, A 为试样的承载面积。

试样在加载过程中受刚性侧壁的约束,为具有轴对称的平面应变状态,有如下关系:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{M_e} [\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)] \tag{4}$$

式中: σ_θ 为环向应力, 这里取 $\sigma_\theta = \sigma_r$; ν 为泊松比, 本文取 $\nu = 0.3$ 。 ε_z 为法向线应变, 可通过试样的竖向压缩量 u 与其初始高度 h_0 的比值来确定, 即 $\varepsilon_z = \frac{u}{h_0}$ 。 由此, 试样的弹性模量为:

$$M_e = (1 - \frac{2k_0\mu h_0}{r})(1 - 2\nu k_0) \frac{h_0}{u} \frac{P}{A} \tag{5}$$

这样, 通过对循环加卸载过程中试样作用力 P 和位移 u 的测试, 由 (5) 式即可确定含沙道碴试样的弹性模量。

3 含沙道碴材料的弹性模量和沉降量

采用以上试验装置和弹性模量的确定方法对含沙道碴材料的弹性模量和沉降量进行测试, 并在此基础上研究细沙 - 道碴混合体的力学性质随含沙量的变化趋势。

3.1 道碴碎石在循环加载下弹性模量和沉降量的测定

对于试样高度 $h_0 = 20\text{ cm}$ 的铁路道碴材料, 对其在 $1 \sim 50\text{ kN}$ 范围内进行 50 次循环加卸载过程, 测得的作用力 P 与位移 u 关系曲线如图 2 所示。从图 2 可见: 在第 1 次加载过程中, 由于道碴的初始疏松排列, 其力 - 位移曲线的斜率较小, 表明其初始弹性模量较低; 在随后的循环加卸载过程中, 每个过程中的位移不断减小, 表明其斜率不断增加。将第 10、30 和 50 次的加载过程中力 - 位移曲线绘于图 3, 发现它们呈现良好的线性关系, 由此可确定相应的弹性模量。

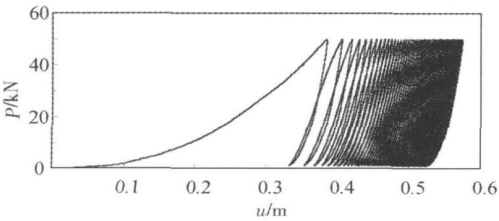


图 2 道碴 50 次循环加卸载过程中的作用力与位移曲线

Fig. 2 Force - displacement curve of ballasts under 50 cycles of loading and unloading process

依据 (5) 式对每个加卸载过程中加载阶段的弹性模量进行确定, 得到有效弹性模量如图 4 所示。从图 4 可以看出: 在前 5 个循环中, 弹性模量有一个明显的增长趋势, 但在第 10 个循环以后弹性

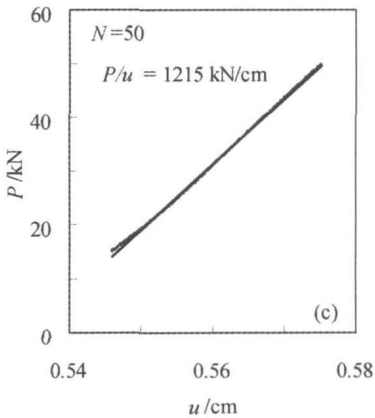
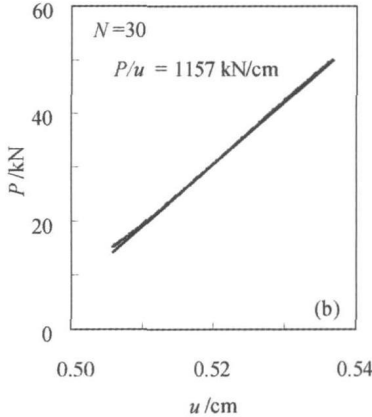
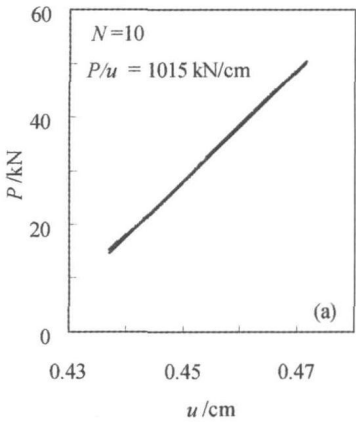


图 3 道碴加载过程中力与位移的对应关系及其线性拟合

Fig. 3 Relationship between force and displacement and its linear fitting of ballasts in the loading process

模量增长比较平缓。为了缩短试验时间, 每组试验进行 10 次循环加卸载, 并将第 10 次的测量结果作为铁路道碴的弹性模量。

此外, 在以上 50 个循环加卸载过程中, 确定试样的沉降量, 试验结果如图 4 所示。结果表明: 第 1 次循环具有最大的沉降量; 在随后的加卸载过程中, 道碴颗粒的进一步密实排列使整体沉降量缓慢平稳增加。

道碴颗粒弹性模量的动三轴试验结果表明: 弹

性模量与载荷作用次数呈幂次关系^[2]。从图 4所示的试验结果可以看出弹性模量也具有相似的函数关系, 其拟合关系式可表述为:

$$M_e = M_0 N^{k_M}, u = u_0 N^{k_u} \tag{6}$$

式中: M_0 , k_M , u_0 和 k_u 均为拟合参数。本文依据试验结果拟合后得到 $M_0 = 197.5 \text{ MPa}$, $k_M = 0.102$, $u_0 = 0.36 \text{ mm}$, $k_u = 0.12$ 。拟合曲线及试验结果相当吻合, 如图 4所示。

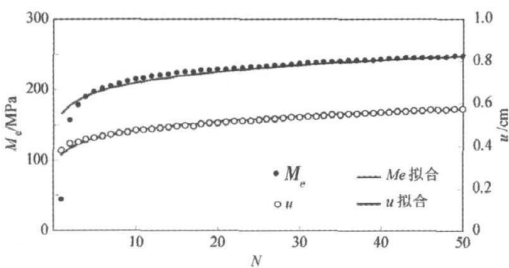


图 4 道碴 50次循环加载过程中的弹性模量和沉降量的变化趋势及拟合曲线

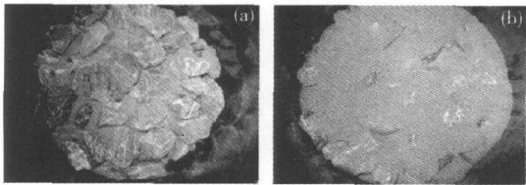
Fig 4 Elastic modulus and settlement trend and the fitting curves of ballasts under 50 cycles of loading-unloading

3 2 细沙对铁路道碴弹性模量和沉降量的影响

为研究风沙区细沙贯入对铁路有碴道床整体弹性的影响, 对不同含沙量条件下铁路道碴的弹性模量进行了测试。这里引入含沙量指标:

$$\lambda = \frac{M_s}{M_s + M_B} \tag{7}$$

式中: λ 为含沙量指标; M_s 为细沙质量; M_B 为道碴碎石质量。 $\lambda = 0$ 表示为不含沙的纯道碴碎石。含沙量分别为 5.2% 和 33.6% 条件下的道碴试样如图 5所示。试验中的试样高度保持为 20 cm, 通过在道碴碎石试样空隙中放置不同质量的细沙颗粒获得不同的含沙量指标。



含沙量 λ : (a) 5.2%; (b) 33.6%

图 5 不同含沙量下的铁路道碴试样

Fig 5 Sand-ballast mixture with different sand contents

此外, 不同含沙率下试样的有效密度如图 6所示。从图 6可以看出: 当含沙率小于 34% 时, 随着道碴碎石中细沙含量的增加, 试样的有效密度逐渐

增加; 当含沙率达到 34% 时达到最大值, 此时, 细沙完全充满道碴孔隙; 当含沙率大于 34% 时, 沙石混合体的有效密度逐渐降低, 并在含沙率达到 100% 时达到最小值。

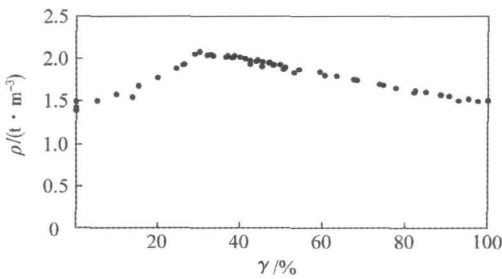


图 6 试样有效密度随含沙量变化的曲线

Fig 6 Effective density of sand-ballast mixture with different sand contents

3.3 不同含沙量下细沙-道碴混合体的弹性模量和沉降量

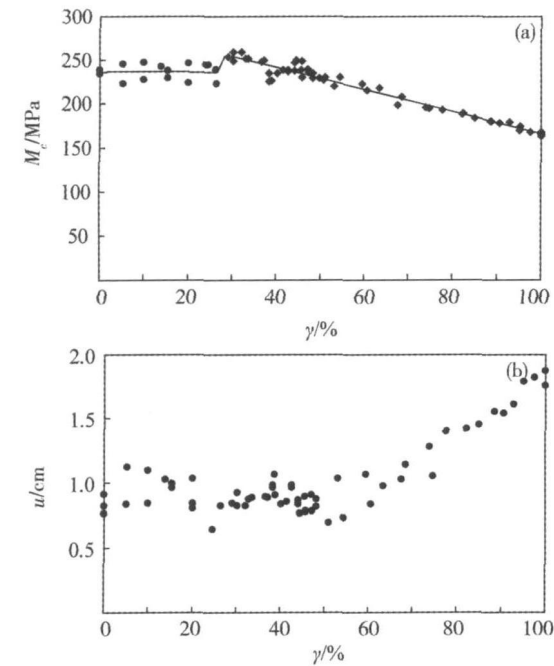
在试验过程中, 细沙占主导时碎石尽量均匀分布在沙粒中, 碎石占主导时细沙主要用来填充碎石颗粒间的空隙。由此获得含沙量由 0% 向 100% 过渡的全过程, 测得的弹性模量和沉降量如图 7所示。

弹性模量随不同含沙量的变化如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看出弹性模量在不同含沙率下主要表现出 2 种变化趋势: 当含沙量 λ 低于 34% 时, 含沙道碴碎石颗粒的弹性模量 E 随细沙的增加而略有增大, 但基本保持为一个常量, 为 240 MPa。当含沙量在 34% 左右时, 弹性模量随含沙量的增加有一个小的跳跃, 达到 260 MPa。当含沙量大于 34% 时, 随着细沙含量的增加, 弹性模量呈线性降低, 在纯沙时达到最小值 162 MPa。

道碴沉降量随不同含沙量的变化如图 7(b)所示。为克服试样初始排列的疏松程度而导致的沉降量差异, 将第 2 次加载后的试样高度设为参考值, 由此确定第 10 次加载后的试样沉降量。从图 7(b)可以看出: 在低含沙量下即 $\lambda < 50\%$ 时, 沉降量有较大的波动, 但其均值相对稳定。也就是说, 细沙贯入对道碴整体弹性模量影响不大。但在高含沙量下, 即 $\lambda > 50\%$ 时, 沉降量随着细沙比例的增加而大体呈线性增长, 并在纯细沙条件下有最大值。

尽管试验得到的弹性模量和沉降量都体现了含沙量的影响, 且影响趋势基本一致, 即在低含沙量下它们均保持稳定, 而在高含沙量下均与细沙比例呈线性降低或线性增长, 然而, 它们发生趋势转

变的特征含沙量却有很大的不同, 分别是 34% 和 50%。这种差异产生的原因还需要从试验方法和力学机理方进行进一步探讨。



(a) 弹性模量随含沙量变化曲线; (b) 沉降量随含沙量变化曲线
图 7 不同含沙量下沙石混合体的弹性模量和沉降量的测试结果

Fig 7 Elastic modulus and settlement of ballast-sand mixture with different sand contents

3 4 试验结果分析

铁路道碴和细沙是两种典型的具有不同力学性质的颗粒材料。首先它们在粒径上存在 2 个数量级的差别, 其均值分别为 40 mm 和 0.4 mm。此外, 这 2 种材料在细观弹性模量上也有很大的不同。因此, 这 2 种颗粒介质在不同比例混合下的弹性模量和沉降量可以通过细观尺度下的定性分析, 并通过颗粒物质力链的分布特性进行解释。

在含沙量 λ 低于特征含沙量 34% 时, 这时的沙石混合体主要以细沙在道碴颗粒空隙间的贯入为主。试样内的应力主要通过道碴颗粒间形成的力链进行传递。由于道碴碎石的粒径较大, 刚度较强, 碎石间形成的力链比较显著。而细沙颗粒之间, 以及细沙与道碴颗粒之间不能形成连续的力链, 不能进行有效的应力传递。当含沙量变化时, 占主导地位的道碴碎石间力链变化不大, 由此导致试验测得的弹性模量相对比较稳定, 如图 7(a) 所示。

当特征含沙量为 34% 左右时, 碎石颗粒间的空隙已基本由细沙填满, 这时, 碎石颗粒间的应力会有一部分通过细沙颗粒进行传递。但由于细沙颗

粒的刚度较小, 其能够传递的应力比较微弱, 碎石间的力链仍然是主要的应力传递途径。由此会导致含沙道碴试样的弹性模量在含沙量为 34% 时有小幅度增大。然而, 此时的沉降量还主要由道碴之间的力链来控制, 其变化还尚不明显。

当含沙量大于 34% 时, 部分碎石颗粒会因含沙量的增加而不能直接接触, 需通过细沙颗粒间的相互作用进行碎石颗粒间的应力传递。含沙量越大, 细沙颗粒间的力链越密集, 碎石间的力链会不断消失。在这个过程中, 试样的弹性模量逐渐由碎石主导向细沙颗粒主导过渡, 从而造成弹性模量随含沙量的增加而迅速降低, 并在含沙量 λ 趋于 100% 时达到最小值。

沙石混合体的沉降量主要由两方面原因产生: 一是碎石和细沙颗粒在加卸载过程中的重新排列及其密实化过程, 二是颗粒本身在加载过程中的弹性变形。在本试验中第 2 种原因可以忽略。因为这里的沉降量是第 10 次与第 1 次加载过程中试样沉降量的差值, 这时颗粒本身弹性变形的原因可以抵消。在高含沙量下, 大量的细沙颗粒在加卸载作用下更容易发生重新密实排列。特别是当含沙量高于 50% 时, 碎石悬浮于细沙介质中, 这时的沉降量会更为显著, 并会随含沙量的增加而增长, 从而表现出如图 7(b) 所示的特性。

由此可见: 含沙道碴弹性模量和沉降量主要与其内部力链的分布形式和强度有关。碎石颗粒间的强力链和细沙颗粒间的弱力链是导致其弹性模量和沉降量发生转化的主要因素。

4 结论与展望

(1) 为测试铁路道床在不同含沙率下的弹性模量沉降量, 自行设计了准静态试验装置, 制定了相应的试验方案。

(2) 铁路道碴的弹性模量受含沙率的影响非常显著。当含沙率小于 34% 时, 铁路道碴的弹性模量随含沙率的增加而略有增长; 当含沙率大于 34% 时, 弹性模量随着含沙率的增加呈线性降低。

(3) 在不同的含沙率下, 道碴试样沉降量具有和弹性模量相似的变化规律。当含沙率低于 50% 时, 沉降量基本保持稳定; 当含沙率大于 50% 时, 沉降量随含沙率的增加而呈线性增长。

(4) 进一步开展含沙有碴道床动力特性的道碴箱试验, 并采用离散单元方法进行数值分析, 可更全面地理解细沙贯入条件下有碴道床的整体弹

性和沉降量的变化规律。

致谢: 本文试验方案得到大连理工大学工程力学系毕祥军副教授和刘增利高级工程师的指导, 孙珊珊和王安良博士研究生参加了部分试验工作, 在此深表谢意。

参考文献:

[1] 赵国堂. 高速铁路无碴轨道结构 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006
ZHAO Guo tang Ballastless track structure of high - speed railway [M]. Beijing China Railway Press 2006

[2] 王 红. 道碴弹性与累积变形的试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2001 22(6): 106- 110
WANG Hong Test and study on ballast elasticity and accumulated deformation [J]. China Railway Science 2001, 22(6): 106- 110

[3] 雷晓燕. 高速列车对道碴的动力响应 [J]. 铁道学报, 1997, 19(1): 114- 121
LEI Xiaoyan Dynamic response of high - speed train on ballast [J]. Journal of the China Railway Society 1997, 19(1): 114- 121

[4] 胡仁伟, 王 红, 赵国堂. 道碴动三轴试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2001 22(2): 101- 106
HU Renwei WANG Hong ZHAO Guo tang Study on dynamic triaxial test and accumulated deformation of ballast [J]. China Railway Science 2001, 22(2): 101- 106

[5] Lobo - Guerrero S and Vallejo L E. Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading [J]. Granular Matter 2006(8): 195- 204

[6] 高建敏, 翟婉明, 徐 涌. 有碴轨道下沉变形参数影响分析 [J]. 交通运输工程学报, 2007 7(4): 15- 20
GAO Jianmin ZHAIWanming, XU Yong Analysis of parameters effects on settlement of ballasted track [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2007, 7(4): 15- 20

[7] 李肖伦. 我国铁路沙害的防治 [J]. 中国铁路, 2004 (11): 28- 30
LIXiaolen Prevention of sand disaster for chinese railways [J]. Chinese Railway 2004(11): 28- 30

[8] 钱征宇. 中国沙漠铁路的风沙危害及其防治技术 [J]. 中国铁路, 2003(10): 24- 26
QIAN Zhengyu The wind - sand damage and its prevention and control technology for chinese desert railway [J]. Chinese Railway 2003(10): 24- 26

[9] 净文常, 李小红. 沙漠地区铁路路基沙害及选线设计 [J]. 路基工程, 1999(3): 52- 55
JING Wenchang LIXiaohong Sand disaster of railway subgrade and railway line design in disert regions [J]. Subgrade Engineering 1999(3): 52- 55

[10] 徐 峰. 铁路沙害整治及其研究方向 [J]. 中国沙漠, 1994, 14(2): 69- 74

XU Feng Control and research direction of railway sand disaster [J]. Chinese Desert 1994, 14(2): 69- 74

[11] 薛增利. 沙漠地区铁路沙害及路基防护工程设计 [J]. 路基工程, 2001(2): 18- 20
XUE Zeng-li Sand disaster and protective construction design of subgrade engineering of railway in disert regions [J]. Subgrade Engineering 2001(2): 18- 20

[12] 马伟斌, 史存林, 张千里, 等. 循环载荷作用下基床力学特性对道床影响的动态模型试验研究 [J]. 铁道学报, 2006 28(4): 102- 108
MA Weibin SHI Cunlin, ZHANG Qianli et al Dynamic model experimental study on effects of mechanical properties of railway subgrade beds on ballast beds under cyclic loading [J]. Journal of the China Railway Society 2006, 28(4): 102- 108

[13] 张向民, 陈秀方, 曾志平. 青藏铁路道床质量状态参数试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(3): 64- 67.
ZHANG Xiangmin, CHEN Xiufang ZENG Zhiping Experimental study on the quality state parameter of ballast in Qinghai- Tibet railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering 2007, 4(3): 64- 67.

[14] Indranata R, Ionescu D, Christie H D. Shear behavior of railway ballast based on large - scale triaxial tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 1998, 124(5): 439- 449

[15] 翟婉明, 林建辉, 王开云. 铁路道床振动的理论模拟与试验研究 [J]. 振动工程学报, 2003, 16(4): 404- 408
ZHAIWanming LIN Jianhui WANG Kaiyun Theoretical simulation and field experiment on vibration of railway ballast [J]. Journal of Vibration Engineering 2003, 16(4): 404- 408

[16] Suker A S J, Selig E T, Frenkel R. Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6): 771- 782

[17] Lin W L. Mechanics of railway ballast behaviour [D]. University of Nottingham, 2004

[18] Liao C L, Chan T C, Suker A S J et al Pressure - dependent elastic moduli of granular assemblies [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 2000(24): 265- 279.

[19] Agnol J Roux J N. On the elastic moduli of three - dimensional assemblies of spheres Characterization and modeling of fluctuations in the particle displacement and rotation [J]. International Journal of Solids and Structures 2008(45): 1101- 1123

[20] 刘增荣, 刘春原, 梁 波. 土力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2005
LIU Zengrong LIU Chunyuan, LIANG Bo Soil mechanics [M]. Shanghai Tongji University Press 2005