



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Rail Transit—Article

## 区域性沉降对高速铁路基础设施影响的研究

康高亮

Bureau of Transport & Department of Track Maintenance, China Railway Corporation, Beijing 100844, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 5 May 2016

Revised form 19 August 2016

Accepted 8 September 2016

Available online 21 September 2016

#### 关键词

区域沉降

差异沉降

无砟轨道附加荷载

车辆-轨道动力学

### 摘要

本文对高速铁路线路基础沉降及差异沉降的主要影响因素进行了分析,提出局部地下水开采是影响线路差异沉降的直接诱因。通过对不同差异沉降量下无砟轨道附加荷载及高速行车过程中车辆、轨道和桥梁动力响应的研究,初步提出了运营期线路基础差异沉降控制标准。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 概述

截至2015年年底,中国高速铁路运营里程已超过 $1.9 \times 10^4$  km,位居世界第一。高速铁路“四纵四横”主骨架基本建成,并与其他铁路共同构成了快速客运网,基本覆盖了 $5 \times 10^5$ 人口以上的城市,在区域运输中发挥着重要作用。面对规模如此庞大的运营线路,高速铁路设备养护维修已经成为现阶段乃至今后长期所要面临的重点课题。原铁道部2013年公布的《铁路主要技术政策》[1]明确提出要“探索设备设施运用状态变化规律,完善检修体制,制定科学的检修标准,强化检修质量控制”,由此可见,当前我国高速铁路的发展已由大规模建设阶段逐渐步入运营管理与维护阶段,高速铁路研究与技术创新的主题也将随之由“设计与建造”转向“运营与维护”。

我国设计速度 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上的高速铁路主要采

用无砟轨道结构,高速铁路对轨道结构的要求是“高可靠性”“高稳定性”和“高平顺性”,因此对其下部基础的沉降尤其是不均匀沉降控制要求非常严格。为节约土地、控制沉降、跨越江河和既有交通网,我国高速铁路桥梁占线路总长的比例较高(如全长1318 km的京沪高铁桥梁占比80%以上)。《高速铁路设计规范》[2]规定,无砟轨道的桥梁墩台工后沉降量(铺轨后最终沉降量)不得大于20 mm、相邻墩台沉降量差不得大于5 mm,这既对工程施工质量提出了严格的要求,也给养护维修带来了巨大的挑战。

## 2. 差异沉降对高速铁路工务基础设施的影响

### 2.1. 地下水位变化对基础沉降的影响

高速铁路沿线途经各种复杂的气候、地质、水文等

E-mail address: [kg1710@sina.com](mailto:kg1710@sina.com)

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2016, 2(3): 374–379

引用本文: Gaoliang Kang. Influence and Control Strategy for Local Settlement for High-Speed Railway Infrastructure. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.014>

自然环境条件, 已开通运营的绝大部分高速铁路线路运营状况良好, 但也存在部分工点线路基础沉降超标。以华北地下水位下降显著的漏斗沉降区为例, 2009年12月至2012年9月某高速铁路一座桥梁的连续梁和相邻简支梁桥墩差异沉降最大值为54.6 mm, 总沉降量最大值达到243.5 mm(图1), 沉降速率为21.1 ~ 117 mm·a<sup>-1</sup>。

区域性和季节性地下水变化还造成了桥梁桩基基础出现沉浮变形。图2是西南地区某高速铁路一座桥梁墩台沉降与地下水位变化之间的关系曲线, 自2010年9月起连续3年的观测数据表明, 桥梁墩台呈雨季上升、旱季下沉的规律性变化, 地下水水位季节性变化幅度最大可达20 m, 桥墩的下沉量和上浮量分别达19.0 mm和38.6 mm。

区域性沉降造成高速铁路基础沉降量大、沉降速率

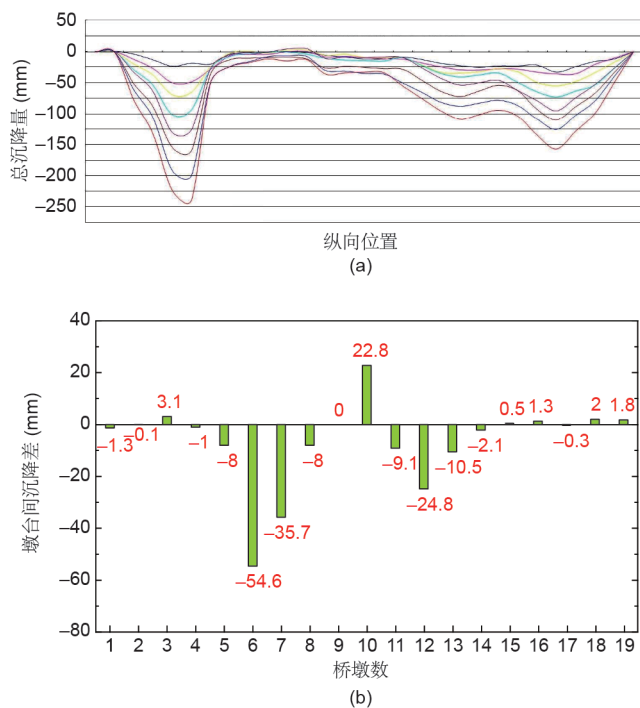


图1. 某高速铁路工点沉降曲线及差异沉降。(a)整体沉降分布; (b)墩台差异沉降分布。

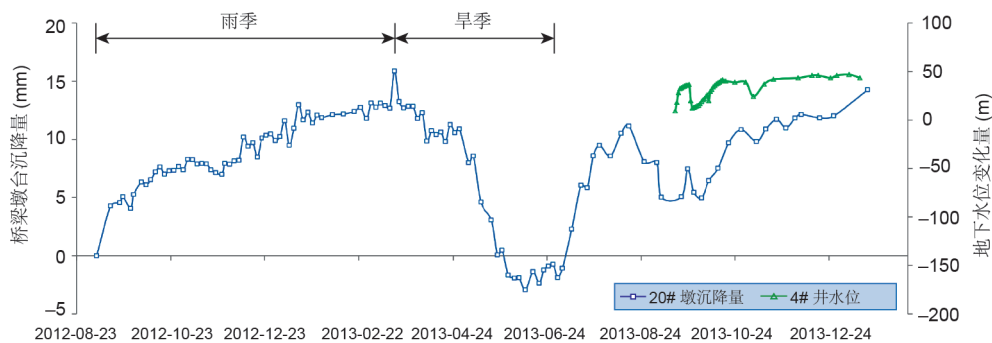


图2. 桥梁墩台沉降与地下水位变化关系曲线。

较大, 对高速铁路建设和运营的影响非常显著, 因此必须予以高度重视、深入研究。

### 2.1.1. 地下水位变化对高速铁路桥梁桩基基础差异沉降的影响

研究表明, 地下水位下降是导致区域性地面沉降的最直接原因[3-7]。在区域性沉降地段高速铁路工程沉降控制研究中, 传统思路是将地下水位变化与地面沉降的关系作为研究的重点, 再依据工程控制标准分析地面沉降对工程的影响, 提出的工程措施主要是在线路两侧一定范围内封井和限采地下水[8-9]。进一步研究认为, 地下水位、地层特性、桩基参数是影响基础差异沉降的重要因素[10-13]。

地下水位下降使得地基土体中静水压力减小, 在总应力不变的前提下, 土体的有效应力会增大, 从而使土体产生压缩沉降。代表不同地层特性的渗透系数是影响沉降的关键因素之一, 渗透系数 $K$ 越大, 浸润曲线越缓和。对于相同的地下水位下降, 随着渗透系数 $K$ 的增大, 影响半径 $R$ 逐渐增大。不同渗透系数(黏土—砂土)的影响半径随地下水位下降的关系如图3所示。

地下水位所处位置对桥梁桩基基础沉降也有着较大的影响。以位于河北省内沉降漏斗区的某高速铁路桥梁桩基基础沉降为例, 在相同地质条件(持力层为粉质黏土)和桩基参数(桩长45 m、桩径1 m)的情况下, 如地下水位位于桩底以下(不在桩基范围内), 层状均匀的下卧层产生的附加应力较为均匀, 对桩基区域的影响较小; 如地下水位位于桩基范围内(桩顶以下16 m), 桩基差异沉降变化趋势如图4所示, 可见, 地下水位每差1 m, 相应产生的差异沉降可达7.8 mm。

此外, 桩长、桩径、地基土特性等对桥梁桩基基础沉降也有较大的影响。因而在沉降区进行基础设计时, 应在详细的地质勘查的基础上, 综合考虑上述影响因

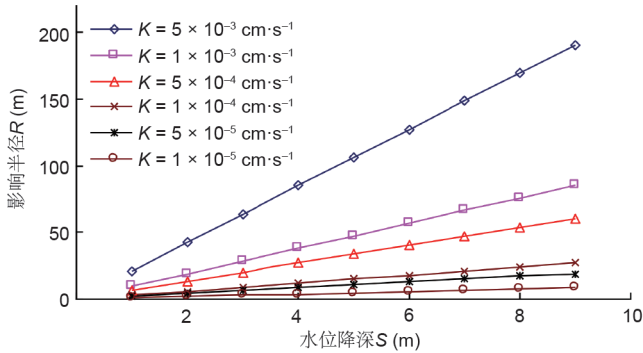


图3. 影响半径随地下水位下降的变化。

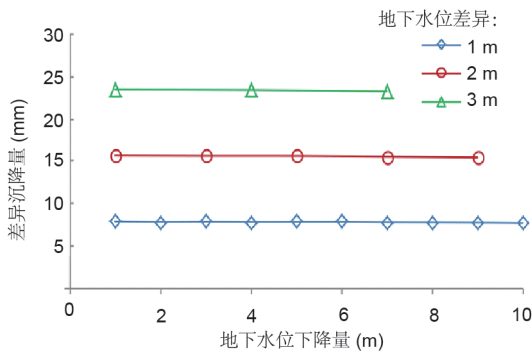


图4. 桩基范围内不同水位差引起的差异沉降。

素。建议在高速铁路经过沉降区、连续梁与简支梁相邻区、地层起伏变化等区域时，应针对基础型式进行专门设计，以降低差异沉降的影响。

### 2.1.2. 地下水位变化对高速铁路桩基路基差异沉降的影响

对于高速铁路桩基路基，抽取地下水所引起的地下水位局部下降是导致其沉降的最主要原因。铁路沿线用水可分为农业用水、工业用水和生活用水三类，一般情况下农业用水抽取的主要是浅层地下水，而生活和工业用水抽取的主要是深层地下水。以浅层地下水位为地面以下3 m、深层地下水位为地面以下100 m为例进行分析，抽取浅层地下水时产生的路基沉降量较小，但所产生的差异沉降较为明显，对线路的平顺性影响更大，如图5所示。

路基与抽水点之间的距离对路基沉降也有较大的影响，路基沉降沿线路纵向呈“下凹”形，即靠近抽水点的路基沉降较大，远离抽水点的路基沉降较小，抽水点与线路不同距离的路基沉降沿纵向的分布如图6所示。当距离为50 m时，路基顶面沉降为8.05 mm；当距离增大到200 m时，路基顶面沉降仅为2.54 mm，比前者减小了约68.4%。

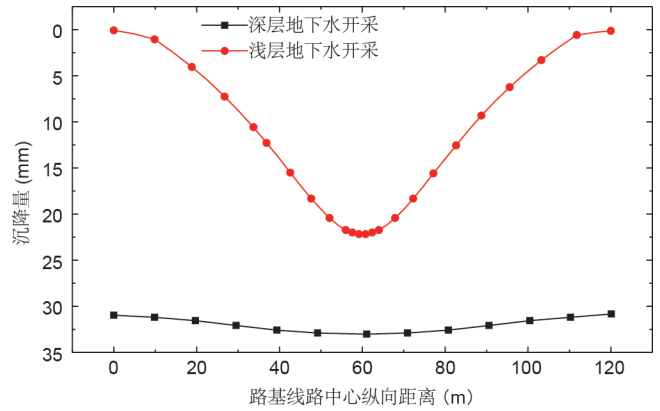


图5. 不同用水桩网路基纵向沉降分布。

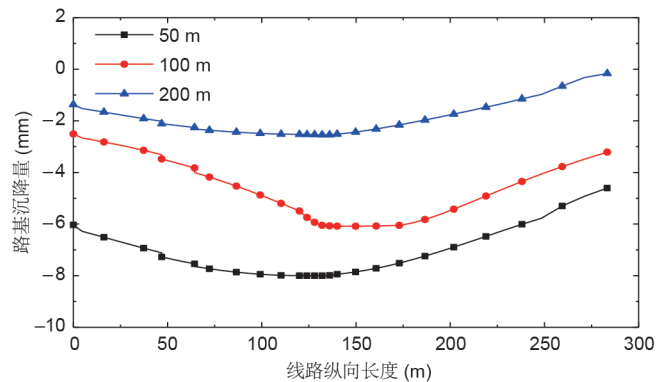


图6. 抽水点与线路不同距离时的路基纵向沉降分布。

### 2.2. 差异沉降对无砟轨道平顺性及附加荷载的影响

桥梁墩台差异沉降将导致桥上无砟轨道跟随变形，从而产生轨道长波高低不平顺。当沉降量较小时，轨道高低可用扣件进行调整，当沉降量大于扣件的允许调整范围时，则需采取设置竖曲线、顺坡、更换大调整量的特殊扣件、注浆抬升轨道板以及顶升桥梁支座等技术措施来进行整治(这些措施在我国北方某高速铁路线路已有成功的维修实践经验)。

以32 m简支箱梁桥上跨梁缝纵向连续的CRTS II型板式无砟轨道为例[14,15]，当桥梁产生如图7所示的不同量值沉降时，其轨面高程变化如图8所示。

分析结果表明，轨面高程变化与桥梁基础沉降变动有较强的跟随性和相关性，一般相差不大于1 mm，此差异主要由扣件拉压变形以及底座板与桥梁间的缝隙造成。现行《高速铁路无砟轨道线路维修规则》[16]规定的无砟轨道线路长波高低(1.5~120 m)动态容许偏差标准(实测动态偏差值与静态偏差值相差一般在1 mm以内)如下：I级7 mm，II级9 mm，III级12 mm(临时补修标准)，IV级15 mm(限速标准)。

CRTS II型板式无砟轨道结构纵向连续，跨越梁缝，

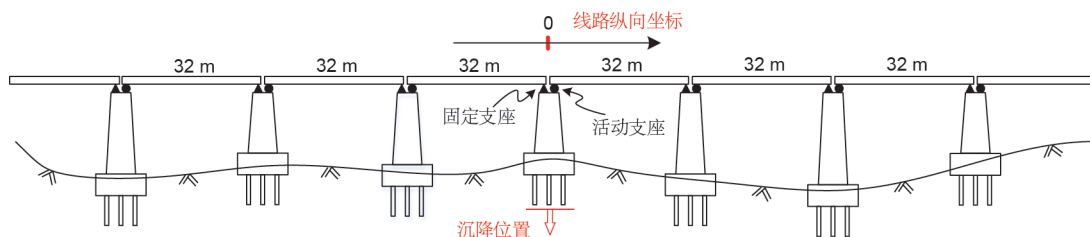


图7. 桥梁相邻墩台差异沉降示意图。

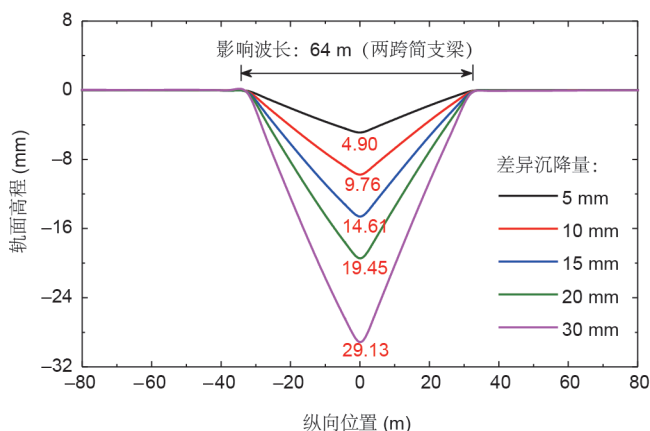


图8. 轨面高程变化示意图。

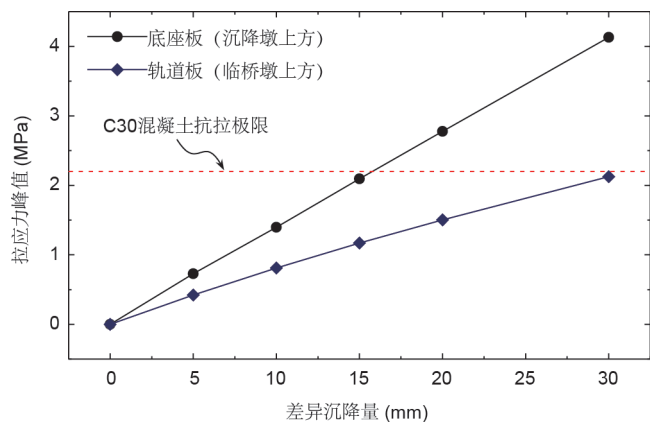


图10. 轨道板和底座板拉应力增长趋势。

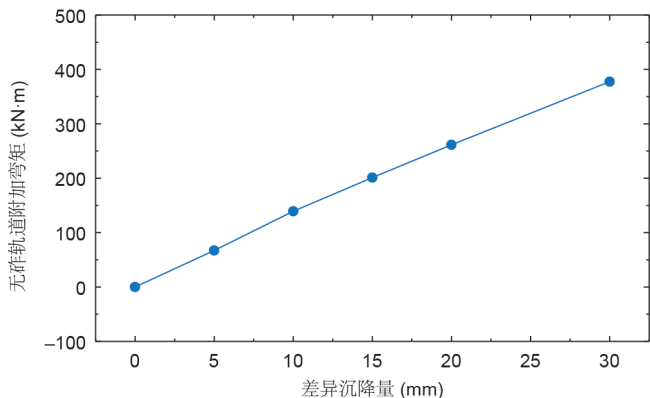


图9. 无砟轨道附加弯矩增长趋势。

桥梁的差异沉降会使梁缝处无砟轨道产生附加荷载，这种附加荷载在简支梁上尤为显著。若存在图7所示的桥梁墩台差异沉降，无砟轨道会产生如图9、图10所示的附加弯矩及轨道板和底座板拉应力。

分析结果表明，随着桥梁墩台差异沉降的递增，无砟轨道附加弯矩及轨道板和底座板的拉应力基本上呈线性增长态势；底座板拉应力在产生沉降的桥墩上方较大，而轨道板拉应力峰值则出现在相邻桥墩的上方；基础差异沉降每增加5 mm，会导致无砟轨道附加弯矩增大70 kN·m左右，轨道板上拉应力增加0.4 MPa左右，底座板上拉应力增加0.7 MPa左右；当差异沉降达到

15 mm时，底座板混凝土拉应力达到2.1 MPa，接近底座板C30级混凝土抗拉强度极限。

### 2.3. 差异沉降对行车动力性能的影响

墩台差异沉降导致轨面高低的变化以及纵连式无砟轨道与桥梁间的离缝，是影响高速铁路运行品质的重要原因之一。本文在分析墩台差异沉降所引起的动力响应时，重点考虑了上述两种因素的影响，并采用车辆-轨道-桥梁耦合动力分析方法[17-19]进行分析；轨面高低采用如图8所示的轨道高低不平顺，并叠加《高速铁路无砟轨道不平顺谱》[20]所建议的线路随机不平顺；无砟轨道与桥梁间的离缝采用非线性弹簧进行模拟。

以多跨32 m简支梁桥上CRTS II型板式无砟轨道为例，在不同差异沉降及行车速度的情况下，车体振动响应及安全性指标随差异沉降的变化规律如图11至图13所示。

分析结果表明，行车速度不同时桥梁基础差异沉降对车体垂向加速度、车辆平稳性指标及轮重减载率均有一定的影响，其中对车体垂向加速度的影响尤为显著。当行车速度为 $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、差异沉降在20 mm以上时，车体垂向加速度超过了规范规定的限值要求( $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )；

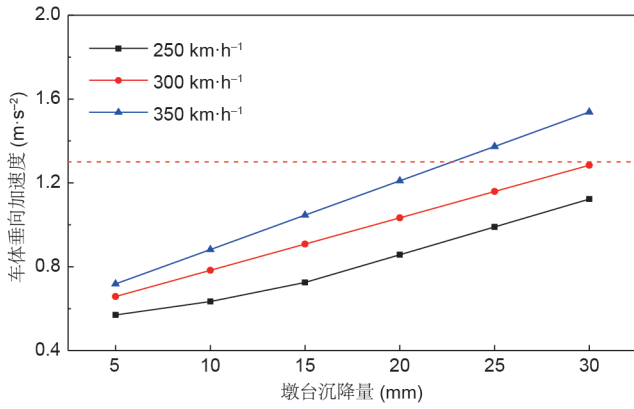


图11. 车体加速度与差异沉降的关系。

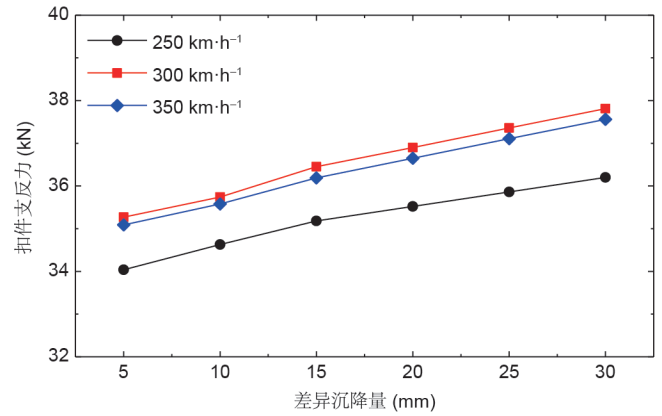


图14. 扣件支反力与差异沉降的关系。

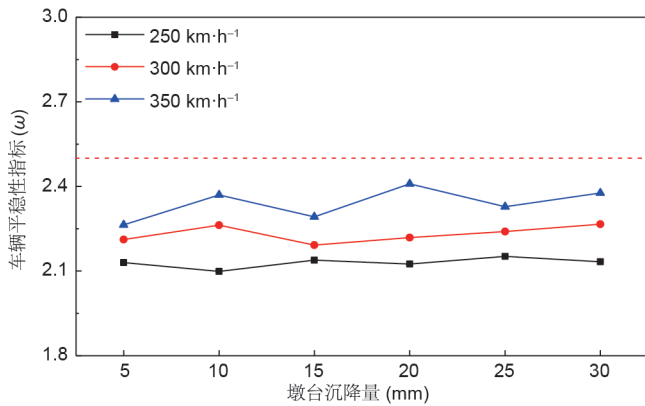


图12. 车辆平稳性与差异沉降的关系。

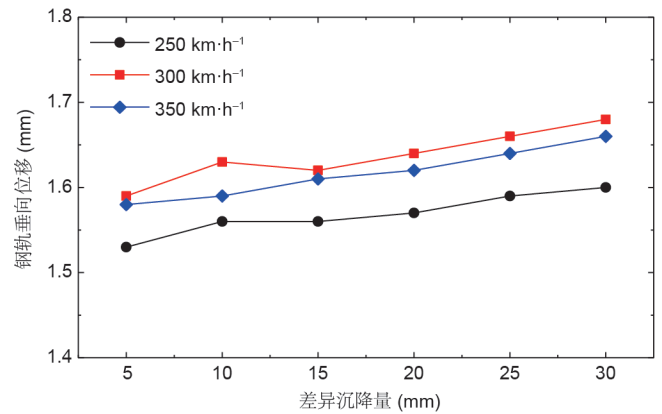


图15. 钢轨位移与差异沉降的关系。

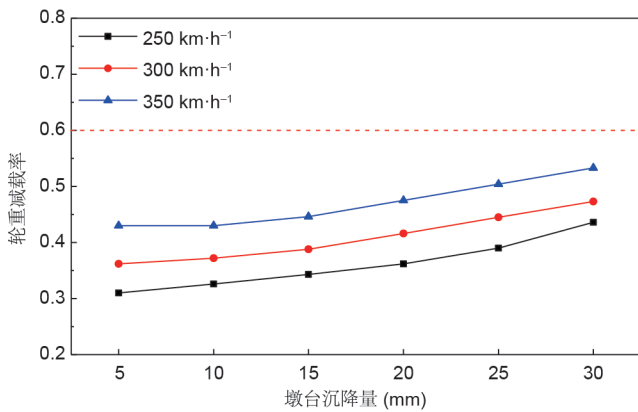


图13. 轮重减载率与差异沉降的关系。

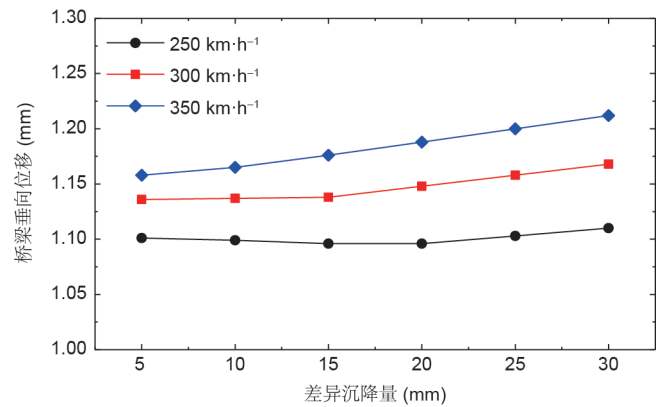


图16. 桥梁位移与差异沉降的关系。

当行车速度低于 $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 且差异沉降在 $30 \text{ mm}$ 以内时,车体垂向加速度、车辆平稳性指标及轮重减载率均未出现超限。

在不同差异沉降及行车速度下,轨道及桥梁振动响应随差异沉降的变化规律如图14至图16所示。

分析结果表明,差异沉降对桥梁及轨道的动力性能影响相对较小。在行车速度为 $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,若差异沉降由 $5 \text{ mm}$ 增加至 $30 \text{ mm}$ ,则沉降墩位置处的扣件支反力仅由 $35.09 \text{ kN}$ 增加至 $37.56 \text{ kN}$ ,增幅约7%;钢轨位

移仅由 $1.58 \text{ mm}$ 增加至 $1.66 \text{ mm}$ ,桥梁位移仅由 $1.16 \text{ mm}$ 增加至 $1.21 \text{ mm}$ ,这两项指标增幅均在5%以内。

总之,墩台差异沉降对高速铁路轨道和桥梁动力响应的影响较小,但对运行安全性和舒适性指标的影响较大。

### 3. 沉降控制策略

(1) 高速铁路沿线途经各种复杂的气候、地质、水

文等自然环境条件,区域性沉降对高速铁路线路的影响日益彰显,大面积开采地下水是主要原因之一。地下水位下降时,代表地层土质特性的渗透系数不同,对沉降的影响范围不同。对于渗透系数小于 $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的砂土而言,当地下水位下降分别为5 m和9 m时,影响范围可达106 m和191 m,直接影响到高速铁路线路的平顺性。对于高速铁路桩基路基,抽取地下水所引起的地下水位局部下降是导致其沉降的最主要原因。因此,在高速铁路建设和运营期间,应严格限制在线路两侧各200 m范围内开采地下水。国务院颁布的《铁路安全管理条例》已从法规层面做出了明文规定,目前国家相关部门正在组织修订《中华人民共和国铁路法》,拟从法律层面对铁路沿线开采地下水做出严格的规定。

(2) 桥梁桩基范围内地下水位变化引起的桩基基础差异沉降大于桩底以下地下水位变化。在桩基范围内地下水位变化相差1 m,桩基基础产生的差异沉降约7.8 mm。对于桩基路基而言,局部抽取浅层地下水产生的总沉降量小于抽取深层地下水,但所产生的差异沉降大于抽取深层地下水。因此,对于经过区域性沉降地区的高速铁路,在线下基础设计时就应考虑适当增加桩基长度,留有一定的冗余量。

(3) 桩长、桩径、地基土特性等对桥梁桩基基础沉降也有较大的影响。在沉降区进行基础设计时,应在详细地质勘察的基础上,综合考虑上述影响因素。建议在高速铁路经过沉降区、连续梁与简支梁相邻区、地层变化起伏等区域时,应针对基础型式进行专门设计,降低差异沉降的影响。

(4) 轨面高程变化与桥梁基础沉降变动有较强的跟随性和相关性,一般相差不大于1 mm,此差异主要由扣件拉压变形以及底座板与桥梁间的缝隙造成。因此仅从无砟轨道平顺性角度考虑,在运营期间应将桥梁相邻墩台差异沉降控制在15 mm以内。

(5) 以32 m简支梁桥上跨梁缝纵向连续的CRTS II型板式无砟轨道结构为例,墩台差异沉降会导致无砟轨道产生附加弯矩,发生沉降的桥墩上方的底座板受拉最为显著;当差异沉降超过15 mm,底座板拉应力将超过C30级混凝土极限抗拉强度。因此仅从保证无砟轨道结构受力和耐久性角度考虑,32 m简支梁相邻桥墩间差异沉降应控制在15 mm以内。

(6) 墩台差异沉降对高速列车运行品质的影响较大,而对线下结构动力响应的影响相对较小。以CRTS II型板式无砟轨道为例,当行车速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 且差异沉降在20 mm以上时,车体垂向加速度超过了规范规定

的限值要求;当行车速度低于 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 且差异沉降在30 mm以内时,车体垂向加速度、车辆平稳性指标及轮重减载率均未出现超限。因此仅从保证高速行车安全性和舒适性角度考虑,32 m简支梁相邻桥墩间差异沉降应控制在15 mm以内。

## 4. 结论

地下水位变化是导致高速铁路下部基础差异沉降的主要原因,高速铁路沿线抽取地下水将直接导致邻近线路的基础出现差异沉降;沉降区高速铁路线下基础的设计应考虑地层特点及地下水位变化,对桩长、桩径等进行针对性的设计。相邻桥墩间差异沉降会导致轨道结构产生附加荷载,动力指标也有所增加。本文的分析结果表明,在特殊困难条件下,高速铁路运营期间区域性沉降地区差异沉降的控制标准可较设计规范规定的限值适度放宽;应进一步研究、合理确定既能满足行车安全和轨道维护的要求,又能减少差异沉降整治的工作量和降低维护费用,特别是要针对不同桥梁类型、跨度及桥上无砟轨道结构形式等情况开展针对性的研究,以确定不同工况下运营期间的差异沉降控制标准。

## References

- [1] Major railway technology policies (Decree No. 34 of the Ministry of Railways of the People's Republic of China) (Jan 9, 2013). Chinese.
- [2] National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10621-2014 Code for design of high-speed railway. Beijing: China Railway Publishing House; 2014. Chinese.
- [3] Meng QS, Chen NY, Yang C. Research progress review of characters of marine soft clay in underground water fluctuating zone. Yangtze River 2011;42(4):29-32. Chinese.
- [4] Zhang Y, Xue YQ. Present situation and prospect on the mathematical model of land subsidence due to pumping. Chinese J Geol Hazard Control 2002;13(2):1-9. Chinese.
- [5] Xue YQ, Wu JC, Zhang Y, Ye SJ, Shi XQ, Wei ZX, et al. The Yangtze River Delta (south) local land settlement simulation. Sci Sinica Terrae 2008;38(4):477-92. Chinese.
- [6] Luo ZJ, Zhang YP, Liu JB, Liu JD. Three-dimensional numerical model for groundwater withdrawal and land subsidence in development zone along Yangtze River in Jiangsu Province. J Earth Sci Environ 2007;29(3):280-4. Chinese.
- [7] Moore WS. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by  $^{226}\text{Ra}$  enrichment. Nature 1996;380(6575):612-4.
- [8] Kezdi S. Bearing mechanism of piles. Geotechnique 1965;20(1):1-5. Japanese.
- [9] Zhang X, Li CW, Pan K. Effect of groundwater fluctuation on deformation characteristics of foundation soils. J North China Inst Water Conserv Hydroelec Power 2012;33(5):95-8. Chinese.
- [10] Xia LN, Miao YD, Liao CB. Three-dimensional numerical simulation of influences of ground subsidence on composite foundation. Rock Soil Mech 2012;33(4):1217-22. Chinese.
- [11] Wu B. Three-dimensional seepage-stress coupling analysis of bridge foundation behaviors induced by precipitation. Chinese J Rock Mech Eng 2009;28(S1):3277-81. Chinese.
- [12] Liu J, Yao HL, Hu ML, Lu Z, Yu DM, Chen FG. Study of moisture dynamic response and underground drainage test of subgrade model under water level fluctuation. Rock Soil Mech 2012;33(10):2917-22. Chinese.
- [13] Xiong J. Study on the influence of groundwater exploitation in the Tianjin area on the Beijing-Shanghai high-speed railway roadbed settlement [dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University; 2013. Chinese.
- [14] Chen P, Gao L, Ma MN. Limited value of subgrade settlement and its influence

- on mechanical characteristics of ballastless track in high-speed railway. *Constr Des Project* 2008;(5):63–6. Chinese.
- [15] Gao L, Zhao L, Qu C, Cai X. Analysis on design scheme of CRTSIII slab track structure on roadbed. *J Tongji Univ (Nat Sci Ed)* 2013;(6):848–55. Chinese.
- [16] Ministry of Railways of the People's Republic of China. TG/GW 115–2012 Regulation for ballastless track maintenance of high-speed railway line (trial implementation). Beijing: China Railway Publishing House; 2012. Chinese.
- [17] Zhai WM. Vehicle-track coupling dynamics. 3rd ed. Beijing: Science Press; 2007. Chinese.
- [18] Cai CB. Theory and application of train-track-bridge coupling vibration in high-speed railways [dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University; 2004. Chinese.
- [19] Song GH, Gao MM, Li GQ. Vehicle-bridge vertical system coupled vibration analysis under the uneven settlement of bridge pier and abutment. *China Railway Sci* 2010;31(2):29–33. Chinese.
- [20] National Railway Administration of the People's Republic of China. TB/T 3352–2014 Irregularity spectrum of high-speed railway ballastless track. Beijing: China Railway Publishing House; 2015. Chinese.