

济南轨道交通1号线和2号线下穿高铁工程对邻近桥梁变形和振动的影响^{*}

谭生永

(中国铁路济南局集团有限公司, 250100, 济南//高级工程师)

摘 要 为探究盾构施工过程中高铁桥墩的变形特征,以济南轨道交通1号线和2号线4条隧道下穿京沪高铁同一跨桥梁工程为例,开展了现场墩顶位移监测试验,并对2号线地铁隧道盾构掘进施工过程中邻近高铁墩顶的位移数据进行了分析。通过有限元法研究了隔离桩、隧道位置和地铁列车运行等不同工况下,下穿邻近高铁桥梁承台的竖向振动位移、振动加速度及其最大值的分布规律。研究结果表明:隔离桩的施工满足相关规范对盾构隧道施工期高铁桥墩位移的要求;1号线和2号线左线列车运行引起的高铁承台竖向振动位移均较大,建议对其采取轨道减振措施;隧道距离隔离桩顶部或底部越近,隧道引起的高铁承台振动位移越大。

关键词 城市轨道交通; 高铁工程; 桥梁变形和振动

中图分类号 TU433; U211.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.05.012

Influence of Ji'nan Rail Transit Line 1 and Line 2 Under-passing High-speed Railway Engineering on Adjacent Bridge Deformation and Vibration

TAN Shengyong

Abstract To study the characteristics of high-speed railway bridge pier deformation that occurs in shield tunnel construction, taking the engineering of four tunnels on Ji'nan Rail Transit Line 1 and Line 2 under-passing a bridge with the same span of Beijing-Shanghai High-speed Railway as example, field monitoring test of pier top displacement is carried out and the displacement data of adjacent high-speed railway pier top during Line 2 metro tunnel shield excavation is analyzed. Under different working conditions of isolation pile, tunnel position and metro train operation, the distribution law of pile cap vertical vibration displacement, vibration acceleration and their maximum values of the under-passed adjacent high-speed railway bridge is studied through finite element method. Research results show that the construction of isolation piles could meet

the requirements in relevant specifications for the displacement of high-speed railway pier in shield tunnel construction period; the vertical vibration displacement of high-speed railway pile cap caused by the left line train operation on Line 1 and Line 2 is large, it is recommended to take rail vibration reduction measures; the closer the tunnel is to the isolation pile top or bottom, the greater the high-speed railway pile cap vibration displacement will be induced by the tunnel.

Key words urban rail transit; high-speed railway; bridge deformation and vibration

Author's address China Railway Jinan Bureau Group Co., Ltd., 250100, Ji'nan, China

近年来,城市轨道交通与高速铁路交叉、穿越的情况越来越多,因此分析地铁隧道下穿铁路,特别是对高速铁路产生的影响并提出合理的施工优化措施是十分必要的。目前,已有较多学者针对隧道下穿桥梁工程进行了相关研究,其研究方法主要分为现场试验和数值模拟。文献[1]通过现场实测数据研究了钻孔灌注桩、高压旋喷桩及盾构上下行线近接高铁桥梁桩基引起的高铁桩基变形及变位。文献[2]以广州地铁22号线下穿机电山庄立交桥施工为例,基于有限元软件对下穿立交桥的施工进行静力模拟分析。文献[3]通过建立结构-高铁桥墩基础-土体有限元模型,研究了盾构施工过程中高铁桥墩的变形特征。

济南轨道交通1号线和2号线(以下简称“1号线”“2号线”)4条隧道下穿京沪高铁同一跨桥梁。1号线和2号线左右线4条隧道在埋深近30 m的地下呈上下叠落布置,1号线右线与2号线左线两条隧道的上下净距仅有4 m,是我国首个多重复杂工况下对运营高铁线路的下穿施工工程。当城市轨道交通通车运营后,势必会对高速铁路的桥梁桩

^{*} 国家自然科学基金项目(51778485)

基产生一定的影响。本文通过现场实测分析了盾构掘进施工过程中邻近高铁墩顶位移的情况,通过有限元法研究了隔离桩、隧道位置和地铁列车运行等不同工况下引起的高铁承台竖向振动位移和加速度的大小及其最大值的分布规律,评估城市轨道交通运营对高铁桥梁承台的振动影响,并在此基础上提出合理的城市轨道交通减振降噪措施和建议。本研究可为类似隧道下穿高速铁路桥梁工程提供技术参考。

1 工程概况

1 号线和 2 号线的 4 条隧道均由京沪高铁高架

桥 104 号与 105 号桥墩间下穿京沪高铁高架桥桩。104 号桥墩桩长 45.0 m,105 号桥墩桩长 42.0 m,桩端两墩墩高均为 6.5 m。1 号线左、右线盾构下穿段隧道覆土厚度分别为 28.354 m 和 19.218 m,隧道左线距离 104 号桥墩桩基最小净距为 10.45 m,右线距离 105 号桥墩桩基最小净距为 10.84 m。2 号线左、右线盾构下穿段隧道覆土厚度均为 7.570 m,隧道左线距离 104 号桥墩桩基最小净距为 15.81 m,右线距离 105 号桥墩桩基最小净距为 18.79 m。两条线路的隧道外径为 6.4 m,内径为 5.8 m,管片衬砌厚为 0.3 m。1 号线和 2 号线下穿京沪高铁示意图如图 1 所示^[4]。

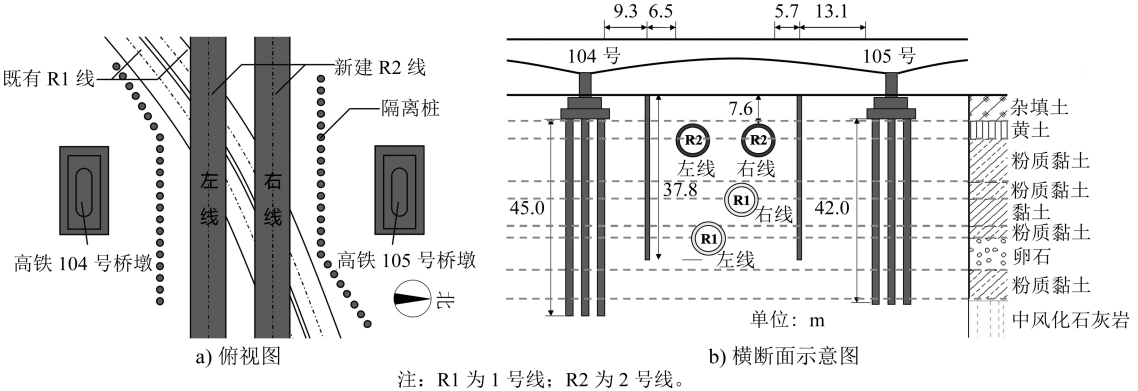


图 1 1 号线和 2 号线下穿京沪高铁示意图^[4]

Fig. 1 Diagram of Line 1 and Line 2 under-passing Beijing-Shanghai High-speed Railway^[4]

2 现场监测

盾构隧道开挖会引起周边土层位移的变化,进而对邻近桥梁桩基及桥墩产生一定的影响,还会影响铁路轨面的平顺性,因此需要在施工过程中对施工影响范围内的桥墩位移情况进行监控测量。本文对 1 号线和 2 号线地铁隧道的盾构掘进过程开展了现场监测,通过分析现场监测数据明确施工各阶段对高铁桥墩的扰动。

根据 TB 10182—2017《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》,受到下穿工程影响的高速铁路桥在不限速的情况下应满足规定的位移限值(见表 1),墩顶位移应根据下穿工程各阶段的工况确定。

通过计算监测结果的波动周期可知,影响墩顶位移的主要因素为现场温度。采用文献^[4]的滤波降噪方法对 103 号(位于 104 号桥墩左侧)、105 号和 106 号(位于 105 号桥墩右侧)桥墩墩顶的位移数据进行处理。不同日期下,103 号—106 号桥墩的墩顶位移如图 2 所示,其墩顶最大位移统计表如表 2 所

表 1 受下穿工程影响的高速铁路桥墩顶位移限值

Tab. 1 Displacement limit of high-speed railway bridge pier top influenced by under-passing engineering

轨道类型	墩顶位移/mm		
	横向水平	纵向水平	竖向
有砟轨道	3	3	3
无砟轨道	2	2	2

示。由图 2 和表 2 可知:在邻近下穿位置的桥墩中,距离盾构隧道最近的 104 号桥墩受盾构掘进施工影响最大,其次是 105 号桥墩,103 号与 106 号桥墩受其影响较小,各墩顶位移均能满足规范要求;隧道开挖过程中,两侧的 104 号与 105 号桥墩顺桥向位移方向相反,均指向盾构隧道方向。

3 地铁列车运行状态下的高铁桥梁振动分析

3.1 有限元建模

基于有限元软件 ADINA 建立二维地层-隧道下穿桥梁结构模型。各土层、高铁桥承台、隔离桩、盾构管片和盾构隧道道床板均假设为线弹性材料,

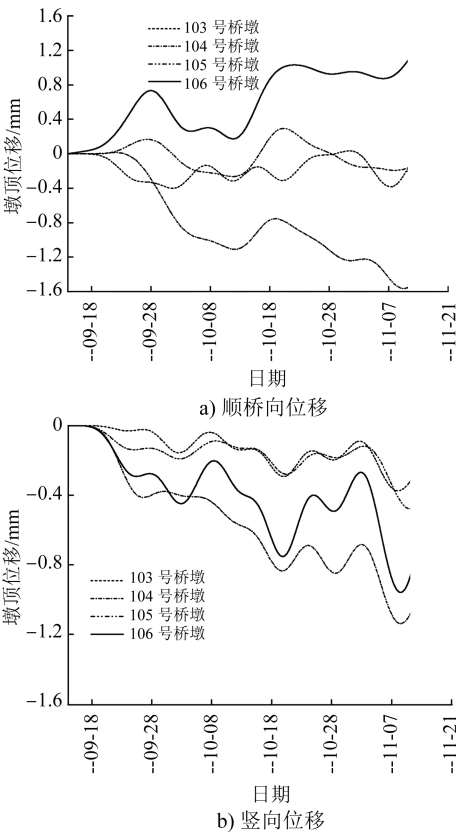


图2 不同日期下 103 号—106 号桥墩的墩顶位移
Fig.2 Pier top displacement of 103 # - 106 # piers on different dates

表 2 邻近高铁桥墩顶的最大位移统计表
Tab.2 Maximum displacement statistics of adjacent high-speed railway bridge pier top

桥墩号	桥墩顶最大位移/mm	
	顺桥向	竖向
103 号	0.40	0.37
104 号	1.56	1.14
105 号	1.10	0.96
106 号	0.31	0.48

采用弹性本构模型并用实体单元进行模拟,高铁桥桩基础用梁单元进行模拟,采用弹性本构模型。

根据设计方案及动力学计算要求,设定模型尺寸为 240 m(宽)×60 m(高),模型顶面为自由边界,模型侧边界约束转动和水平位移,模型底部边界约束转动、水平位移和竖向位移,计算时考虑自重应力场。采用 C3D4 单元进行模拟,单元尺寸为 0.3 m(宽)×0.3 m(高),远离结构部分土层网格尺寸可放大为 1.0 m(宽)×0.3 m(高)。模型土层从上至下划分为 9 层,各结构单元之间不考虑相对滑移而采用共节点的刚性接触,模型共包括 99 417 个实体单元

和 876 个梁单元。模型网格划分示意图如图 3 所示,模型各计算参数如表 3 所示。

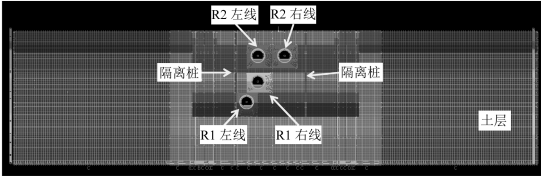


图3 模型网格划分示意图
Fig.3 Diagram of model mesh generation

表 3 模型各计算参数 Tab.3 Model calculation parameters						
名称	厚度/m	天然密度/(kg/m ³)	动弹性模量/MPa	动泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	5.900	1 900	99	0.432	36	18
⑦黄土	4.100	1 910	172	0.421	43	23
⑧粉质黏土	9.800	1 940	262	0.411	47	22
⑩粉质黏土	3.800	1 920	606	0.420	50	24
⑩ ₄ 黏土	6.200	1 940	650	0.390	76	25
⑪粉质黏土	2.700	1 940	1 068	0.421	52	24
⑪ ₁ 卵石	7.300	2 120	1 768	0.409	0	40
⑫粉质黏土	7.200	1 940	920	0.410	61	25
⑮ ₂ 中风化石灰岩	13.000	2 000	2 500	0.300	1	40
高铁桥承台	6.000	2 500	40 000	0.200		
高铁桩基础	42.000	2 500	40 000	0.200		
盾构管片	0.300	2 500	45 000	0.200		
盾构隧道道床板	0.260	2 500	40 000	0.200		
隔离桩	37.756	2 500	40 000	0.200		

为模拟弹性波在土体中传播时的能量耗散状态,土体阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型,Rayleigh 阻尼系数 α 取为 0.375, β 取为 0.000 047 5。所施加的地铁激励荷载时程图如图 4 所示。为保证用有限元法在时域内求解波动问题的计算稳定性,时间步长取为 0.005 s,时间步为 1 600 步,计算时间总计 8 s。

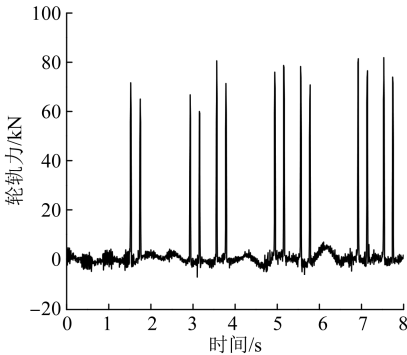


图4 地铁激励荷载时程图
Fig.4 Time-history diagram of metro excitation load

3.2 计算工况

在地铁隧道下穿高速铁路桥工程中,施作隔离桩是目前该类型工程中较为有效且普遍的减振方法。为了研究隔离桩和实际地铁列车运行对高铁桥承台的振动影响,主要分析了 10 种工况,如表 4 所示。

表 4 工况设置情况
Tab. 4 Setting of working conditions

工况编号	工况描述
1	1 号线左线运营,两侧均无隔离桩
2	1 号线双线运营,两侧均无隔离桩
3	2 号线双线运营、1 号线右线运营,两侧均无隔离桩
4	1 号线双线运营、2 号线左线运营,两侧均无隔离桩
5	1 号线双线运营、2 号线双线运营,两侧均无隔离桩
6	1 号线左线运营,两侧均有隔离桩
7	1 号线双线运营,两侧均有隔离桩
8	2 号线双线运营、1 号线右线运营,两侧均有隔离桩
9	1 号线双线运营、2 号线左线运营,两侧均有隔离桩
10	1 号线双线运营、2 号线双线运营,两侧均有隔离桩

3.3 计算结果

各工况下 104 号和 105 号高铁承台的最大竖向振动位移如表 5 所示。由表 5 可知:①隧道距离隔离桩顶部或底部越近,隧道引起的高铁承台振动位移越大;②当 1 号线左线列车运行时,其引起的高铁承台竖向振动位移有所增大,导致隔离桩产生反隔振效果,说明 1 号线左线对高铁承台的振动影响较大。因此,建议对 1 号线左线采取轨道减振措施。③当 2 号线左线列车运行时,其引起的高铁承台竖向振动位移有所增大,导致隔离桩产生反隔振效果,说明 2 号线左线对高铁承台的振动影响较大。因此,建议对 2 号线左线采取轨道减振措施。综上所述,隧道距离隔离桩顶部或底部越近,隧道引起的高铁承台振动位移越大,建议增加隔离桩桩长。

表 5 各工况下 104 号和 105 号高铁承台的最大竖向振动位移
Tab. 5 Maximum vertical vibration displacement of 104# and 105# high-speed railway pile cap under each working condition

工况编号	最大竖向振动位移/mm	
	104 号高铁承台	105 号高铁承台
1	0.018	0.013
2	0.039	0.039
3	0.075	0.072
4	0.057	0.056
5	0.082	0.084
6	0.024	0.024
7	0.047	0.038
8	0.061	0.049
9	0.063	0.059
10	0.074	0.062

基于上述分析,以工况 6 为例,对增加承台左侧隔离桩桩长的情况进行加算。在不同隔离桩桩长条件下,104 号承台竖向振动位移如图 5 所示。由图 5 可知:增加左侧隔离桩桩长能够减少 104 号承台的竖向振动位移;当所增加的隔离桩桩长超过 1 m 后,设置隔离桩对于承台的减振效果不明显。基于上述计算结果,本文选取的隔离桩桩长为 38.8 m。

由于篇幅有限,本文仅对由部分地铁列车运行引起的高铁承台竖向振动位移和加速度进行分析。高铁承台的竖向振动位移及竖向振动加速度时程图如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,随着运营线路的增加,高铁承台的竖向振动位移也随之增大,在 1 号线左线及双线列车运行时,由地铁列车运行引起的 104 号承台的竖向振动位移稍大于 105 号承台的竖向振动位移,随着 2 号线线路的开通,105 号承台的竖向振动位移大于 104 号承台的竖向振动位移。由图 7 可知,随着开通运营线路数的增加,高铁承台的竖向振动加速度逐渐增大,当仅有 1 号线双线列车运行时,其加速度为 $-0.187\sim0.205\text{ m/s}^2$,当 1 号线双线和 2 号线双线列车运行时,其值为 $-0.260\sim0.278\text{ m/s}^2$ 。

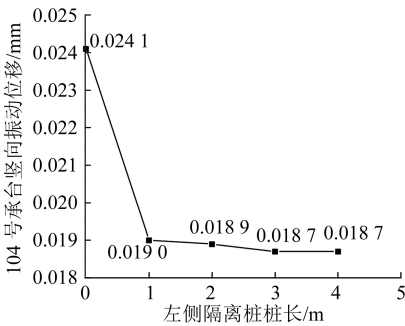


图 5 在不同隔离桩桩长条件下的 104 号承台竖向振动位移
Fig. 5 Vertical vibration displacement of 104# pile cap under different isolation pile length conditions

4 结语

以济南轨道交通 1 号线和 2 号线 4 条隧道下穿京沪高铁同一跨桥梁工程为例,开展了现场监测试验,并对 2 号线地铁隧道盾构掘进施工过程中的邻近高铁墩顶的位移数据进行了分析。主要获得以下结论:

- 1) 在邻近下穿位置的桥墩中,距离盾构隧道最近的 104 号桥墩受盾构掘进施工影响最大,其次是 105 号桥墩,103 号与 106 号桥墩受其影响较小,各

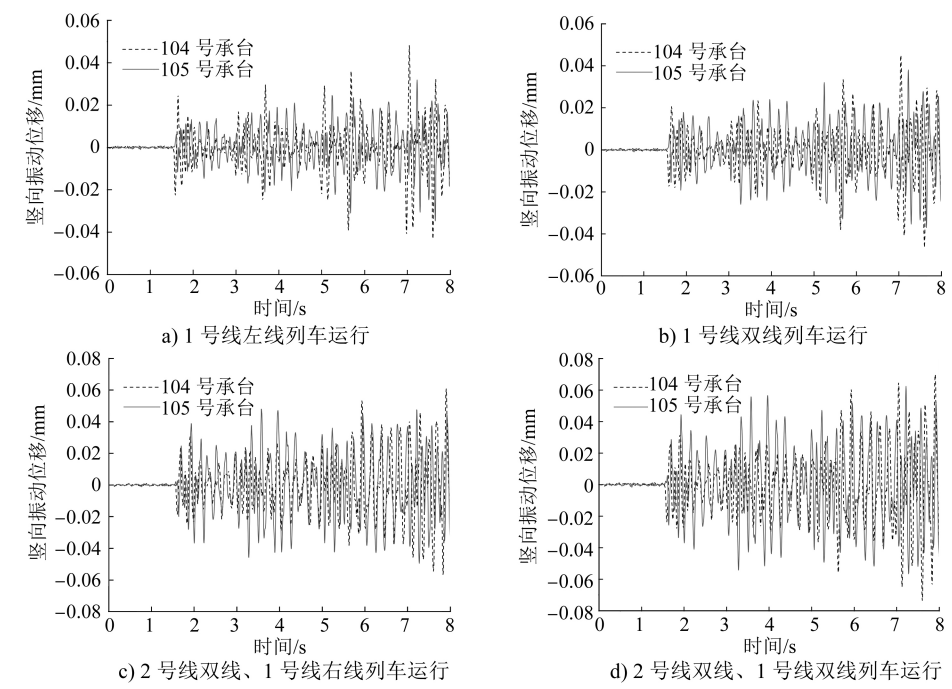


图 6 高铁承台竖向振动位移时程图

Fig. 6 Time-history diagram of high-speed railway bridge pile cap vertical vibration displacement

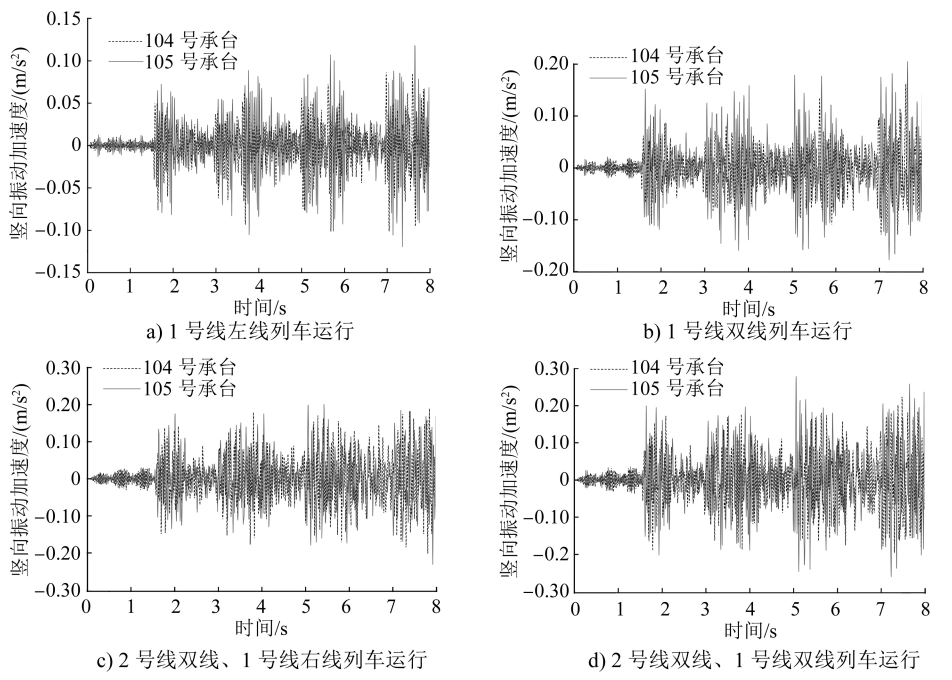


图 7 高铁承台竖向振动加速度时程图

Fig. 7 Time-history diagram of high-speed railway bridge pile cap vertical vibration acceleration

墩顶位移均能满足规范要求;隧道开挖过程中,两侧的 104 号与 105 号桥墩顺桥向位移方向相反,均指向盾构隧道方向。

2) 当 1 号线和 2 号线左线列车运行时,其引起的高铁承台竖向振动位移增大,甚至导致隔离桩产

生反隔振效果,建议对 1 号线和 2 号线左线采取轨道减振措施。

3) 隧道距离隔离桩顶部或底部越近,隧道引起的高铁承台振动位移越大,建议增加隔离桩桩长。

(下转第 75 页)

变差、抗压强度有所降低且稳定性能变差。

参考文献

- [1] 蒋硕忠. 建筑防水材料的重要成员: 化学灌浆材料[J]. 中国建筑防水, 2005, 22(6): 7.
JIANG Shuozhong. One of building waterproof materials—chemical grouting materials[J]. China Building Waterproofing, 2005(6): 7.
- [2] 尹润平, 朱玉雪. 中国建材总院科技在行动: 低粘注浆材料在混凝土中的应用[J]. 中国建材, 2018, 67(6): 120.
YIN Runping, ZHU Yuxue. Applications of low-viscous grouting material in concrete[J]. China Building Materials, 2018, 67(6): 120.
- [3] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 398.
SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 398.
- [4] WANG R, GAO P, TIAN M, et al. Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 655.
- [5] 石丹丹, 张怡博. 泡沫混凝土特性及其应用现状[J]. 居舍, 2020(35): 25.
SHI Dandan, ZHANG Yibo. Characteristics and application status of foamed concrete[J]. Jushe, 2020(35): 25.
- [6] 刘继胜. 憎水剂改性低密度泡沫混凝土及其物理力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(4): 154.
LIU Jisheng. Study of water repellent modified low-density foamed concrete and its physical mechanical properties[J]. New Building Materials, 2020, 47(4): 154.
- [7] ZHU H, CHEN L, XU J, et al. Experimental study on per-

formance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116993.

- [8] 张磊, 张静, 张颖, 等. 生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 589.
ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological based foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 589.
- [9] 何娟, 高愷, 宋学锋, 等. 发泡剂的发泡性能及其应用于碱矿渣水泥的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9): 2995.
HE Juan, GAO Qie, SONG Xuefeng, et al. Study on the foaming property of foaming agent and its application to the mechanical properties of alkali-activated slag cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2995.
- [10] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Influence of filler type on the properties of foam concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(5): 475.
- [11] KORAT L, DUCMAN V. The influence of the stabilizing agent SDS on porosity development in alkali-activated fly-ash based foams[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80: 168.
- [12] 佟建楠, 张素敏. 新型泡沫混凝土发泡剂的制备与研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(9): 140.
TONG Jiannan, ZHANG Sumin. Preparation and research of a novel foamed concrete foaming agent[J]. New Building Materials, 2018, 45(9): 140.
- [13] ZHAO J, DENG Y, GAO P, et al. Pore structure, morphology, and strength of self-compacting foam material backfilled behind the underground pipe-wall of Yellow River[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(24): 5724.

(收稿日期: 2020-12-03)

(上接第 69 页)

当所增加的隔离桩桩长超过 1 m 后, 施作隔离桩对高铁承台的减振效果不明显。

4) 在行车最不利情况(1 号线和 2 号线 4 条隧道同时有列车通过)下, 由地铁列车运行引起的承台竖向位移最大值为 0.074 mm, 竖向振动加速度最大值为 0.278 m/s²。

参考文献

- [1] 李雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 235.
LI Xue, ZHOU Shunhua, WANG Peixin, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 235.

- [2] 吴颖宁. 盾构隧道近距离下穿城市立交桥施工安全性分析[J]. 铁道建筑技术, 2020(12): 124.
WU Yingning. Analysis on the construction safety of shield tunnel crossing underneath urban overpass with short distance[J]. Railway Construction Technology, 2020(12): 124.
- [3] 郭波. 盾构隧道下穿高速铁路桥梁施工影响数值分析[J]. 铁道建筑技术, 2019(7): 105.
GUO Bo. Numerical analysis on impact of shield tunnel under-crossing high-speed rail bridge[J]. Railway Construction Technology, 2019(7): 105.
- [4] SHAN Y, CHENG G H, GU X Q, et al. Optimization of design parameters of displacement isolation piles constructed between a high-speed railway bridge and a double-line metro tunnel: from the view point of vibration isolation effect[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 140: 104460.

(收稿日期: 2021-12-06)