

城市轨道交通高架线路曲线段异常噪声综合治理*

刘宇航¹ 周昌盛¹ 刘锦辉² 周华龙¹ 陈 赛¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都; 2. 深圳市地铁集团有限公司, 518026, 深圳)

摘 要 [目的]城市轨道交通运行过程中的振动噪声问题逐渐突显,尤其高架线路噪声影响范围更广,成为了居民投诉的热点,有必要对城市轨道交通高架线路的异常噪声进行综合治理研究,尤其是缓解“曲线啸叫”噪声带来的扰民问题。[方法]以深圳某地铁高架线路曲线段出现的异常振动噪声为依托,分别进行了现场情况调查与环境噪声测试,并实施了针对性治理措施。依据治理前后以及不同工况下的现场测试结果,对比分析得到不同措施实施前后的治理效果。[结果及结论]轨顶涂覆装置对总的轮轨噪声水平影响较小,但能有效抑制啸叫噪声;钢轨打磨后消除了曲线段短波波磨,对于降低轮轨噪声具有十分显著的效果;行车速度优化对于缓解轮轨噪声具有一定效果,且能避免出现钢轨侧磨;通过不同治理措施的综合应用,轨旁噪声峰值降低7.4 dB(A),噪声等效值降低5.9 dB(A);居民楼处监测到的过车噪声较背景噪声的峰值降低至0.5 dB(A),噪声等效值降低至0.3 dB(A),治理措施的降噪效果显著,地铁噪声对环境贡献量已较低,且“曲线啸叫”噪声不再出现。

关键词 城市轨道交通; 高架线路; 曲线段; 异常噪声; 综合治理

中图分类号 TB533+.2:U233

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.017

Comprehensive Treatment of Curved Section Abnormal Noise for Elevated Urban Rail Transit Line

LIU Yuhang¹, ZHOU Changsheng¹, LIU jinhui², ZHOU Hualong¹, CHEN Sai¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China; 2. Shenzhen Metro Group Co., Ltd., 518026, Shenzhen, China)

Abstract [Objective] Problems of vibration and noise during the urban rail transit operation are becoming increasingly prominent. In particular, the wider impact range of elevated line noise has become a hot spot of resident complaints. Therefore, it is necessary to conduct comprehensive treatment research on the abnormal noise from urban rail transit elevated lines to alleviate the disturbance to the residents mainly caused

by the "curve squeaking" noise. [Method] Based on the abnormal vibration and noise occurring in the curved section of an elevated metro line in Shenzhen, on-site investigation and environment noise tests are carried out respectively, corresponding treatment measures are implemented. According to the on-site test results before and after the treatment as well as under different working conditions, the noise control effects are obtained through comparative analysis of the results before and after the implementation of different measures. [Result & Conclusion] The rail top coating device has little influence on the overall wheel-rail noise level, but can effectively suppress the squealing noise. Grinding steel rail has significant effect on reducing wheel-rail noise, and the short-wave corrugation in the curved section is eliminated. Optimizing the train driving speed has certain effect on lessening wheel-rail noise, and can avoid the occurrence of rail side wear. Through the comprehensive application of different treatment measures, the peak value of the track-side noise is reduced by 7.4 dB(A), and the equivalent noise value is reduced by 5.9 dB(A). The peak value of the train passing noise detected at residential buildings is reduced to 0.5 dB(A) compared with the background noise, and the equivalent noise value is reduced to 0.3 dB(A). The treatment measures show a remarkable noise reduction effect in that the metro noise contributes little to the environment and the curve squealing noise no longer appears.

Key words urban rail transit; elevated line; curved section; abnormal noise; comprehensive treatment

城市轨道交通高架线路噪声问题日益突出,尤其是在穿越人口稠密区域时,成为居民投诉的热点。高架线路噪声主要包括桥梁结构噪声和轮轨噪声。对于桥梁结构噪声,一般可采用包括弹性扣件、梯形轨道及浮置板轨道等在内的隔离振动且防止其向桥梁传递的方法^[1-3];另外针对已建成运营的高架线路桥梁结构噪声问题,也有采用TMD(调谐质量阻尼器)技术进行控制的案例^[4]。相较于桥

* 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KSNQ233038)

梁结构噪声,轮轨噪声的控制方法通常是在噪声传播路径上设置声屏障^[5]以及采取道床吸声板^[6];此外还可结合现场条件制定针对性治理措施,从轮轨噪声源头,采用车轮镟修、钢轨打磨及安装减振接头等方法增加轮轨平顺度,以对异常噪声进行控制;在曲线段线路钢轨上涂覆各类润滑剂以抑制车辆啸叫噪声^[7]。本文针对深圳某地铁高架线路曲线段噪声异常问题进行了现场调研,制定了治理方案,并对不同方案进行了现场测试,相关经验和结论可为治理城市轨道交通异常噪声,尤其是啸叫噪声提供有益借鉴。

1 现场情况调查

1.1 工程条件

深圳某地铁线路在列车途经某住宅小区环境敏感点时噪声较大,并伴有明显的咣咣声及刺耳的啸叫声,严重影响了该小区居民的生活起居。环境敏感点位于高架正线及出入段线交汇处,其中:出入段线双线为普通有缝线路,正线双线为无缝线路且线间距逐步加大,最终与出入段线形成四线交汇,交汇处为半封闭声屏障。正线依据敏感点的相对方位又可分为远轨线路和近轨线路,其中近轨线路距4栋住宅区最近处约42 m。深圳某地铁线路噪声异常段与环境敏感点的线位关系如图1所示。



图1 深圳某地铁线路噪声异常段与环境敏感点的线位关系

Fig.1 Line location relationship between abnormal noise segment and environmentally sensitive point on a Shenzhen metro line

该噪声异常段长约200 m,均位于正线 $R=450$ m(R 为曲线半径)的曲线段内,设计速度为70 km/h,设有超高105 mm,线路坡度为16‰~17‰。为控制列车轮轨噪声,沿曲线段敷设了半封闭式声

屏障和轨道吸音板;为减小桥梁结构振动,采用了隔振垫浮置板道床;为缓解轮轨摩擦,在曲线段起点处安装了钢轨涂油器。深圳某地铁线路正线的轨道设计信息见表1。轨道现场照片如图2所示。

表1 正线的轨道设计信息

Tab.1 Track design information of the main line

项目	说明
钢轨	60 kg/m,U75V 钢轨
扣件	DT-Ⅲ型小阻力扣件
道床	隔振垫浮置板道床
降噪措施	吸音板、半封闭声屏障
辅助设备	钢轨涂油器

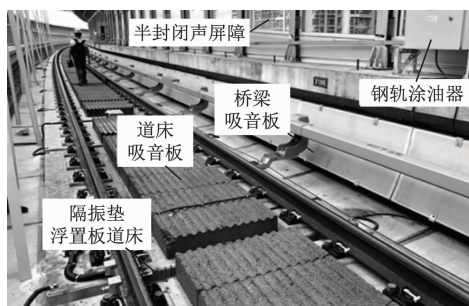


图2 轨道现场照片

Fig.2 Pictures of the on-site rail

1.2 环境敏感点噪声

对环境敏感点处的噪声进行了现场监测,监测位置选取在投诉较为严重的4栋居民楼处,测试点位分别设置在不同楼层的相同方位,测试内容包括全天的过车噪声和背景噪声。环境敏感点处噪声测试结果如表2所示。由表2可见:随着楼层的增加,噪声水平亦增大;车辆通过时位于32楼层的噪声峰值达94.1 dB(A),较背景噪声高出近11.0 dB(A),已严重扰民。经对现场噪声情况调查,可初步判断地铁引起的突出噪声主要包括以下三种:

表2 环境敏感点处噪声测试结果

Tab.2 Noise test results at environmentally sensitive points

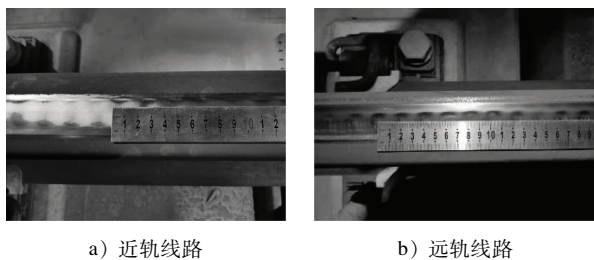
监测点位	$L_{Aeq}/dB(A)$		$L_{max}/dB(A)$	
	过车噪声	背景噪声	过车噪声	背景噪声
2楼	59.1	58.4	78.6	77.1
8楼	61.2	59.5	80.2	78.3
16楼	65.3	62.3	90.3	80.2
32楼	71.2	64.6	94.1	81.1

注: L_{Aeq} 为噪声等效值; L_{max} 为噪声峰值。

轮轨的正常滚动噪声,出入段线钢轨接缝处的冲击噪声,以及过曲线段线路时的啸叫噪声。

1.3 钢轨状态调查

为了解现场情况,对轨行区钢轨状态进行调查,根据调查结果制定措施并进行针对性治理。调查发现,在啸叫噪声频发的里程附近存在波长为20~25 mm的短波波磨。近、远轨线路曲线段钢轨波磨照片如图3所示。为了降低列车噪声,运营部门在该曲线段实施了临时降速措施,导致过超高增大,因此近、远轨线路均出现了钢轨光带向曲线段内侧偏移的现象。现场曲线段内、外轨光带照片,见图4。由图4可见:曲线段内股钢轨光带宽33 mm,外股钢轨光带宽17 mm。

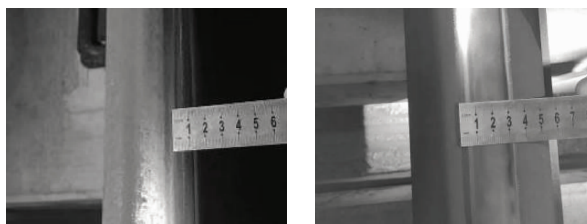


a) 近轨线路

b) 远轨线路

图3 近、远轨线路曲线段钢轨波磨照片

Fig. 3 Pictures of rail corrugation on the curved sections near and far from the rail



a) 曲线段外轨

b) 曲线段内轨

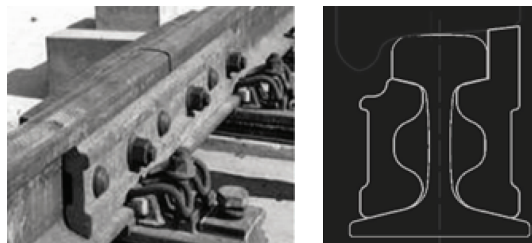
图4 曲线段内、外轨光带照片

Fig. 4 Pictures of the light bands on the inner and outer rails in the curved section

2 异常噪声综合治理措施研究

2.1 减振接头更换

由于环境敏感点位于正线及出入段线交汇处,因此地铁引起的突出噪声包括通过出入段线轨缝的冲击噪声。为对冲击噪声进行针对性治理,将出入段线轨缝处普通接头更换为减振接头,安装效果如图5所示。经现场检验,该措施有效抑制了过轨缝时的哐哒撞击声。



a) 现场安装图

b) 断面示意图

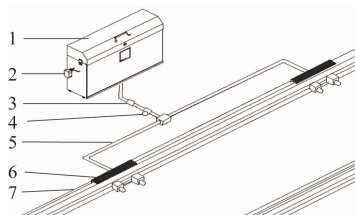
图5 减振接头安装效果

Fig. 5 Installation effect of damping joints

2.2 轨顶涂覆装置安装

润滑和摩擦改进剂是缓解啸叫的有效措施,其旨在改变摩擦因数随着滑动速度的增加而下降的特性,使摩擦因数随着滑动速度的增加保持不变或有所增大^[8]。现场试验结果分析表明^[9],摩擦改进剂应用于钢轨顶部可有效降低啸叫噪声。因此,在曲线段起点处实施了安装轨顶涂覆装置的治理措施。

轨顶涂覆装置是在钢轨顶面涂覆摩擦调节剂,将车轮踏面和钢轨顶面之间的摩擦系数调节到可以满足列车牵引和制动要求,达到改善轮轨关系,抑制波磨产生及发展的目的。轨顶涂覆装置安装于缓圆点前20 m附近的缓和曲线上。轨顶涂覆装置组成示意如图6所示。



注:1—感应器;2—控制器、储剂罐、电机、柱塞泵、油管;3、4、5—绝缘棒;6、7—涂覆板。

图6 轨顶涂覆装置组成示意图

Fig. 6 Composition diagram of rail top coating device

2.3 钢轨打磨

钢轨波磨会引起轮轨振动异常并放大噪声,由现场调查结果可知在噪声异常区段存在波长为20~25 mm的短波波磨,因此噪声治理方案的关键是消除钢轨波磨。钢轨打磨是目前减缓钢轨波磨最为普遍、有效的措施。依据现场钢轨波磨情况,对该曲线段内外股钢轨均采取钢轨打磨的治理措施。

2.4 行车速度优化

列车通过曲线段产生的噪声与行车速度 v 直接

相关。依据线路条件: $R=450\text{ m}$,曲线超高 $h=105\text{ mm}$,由 $h=11.8\text{ v}^2/R$,可反算出 $v=63\text{ km/h}$ 。在异常噪声产生后,运营部门对列车通过曲线段时的速度临时降为 52 km/h ,由于降速而导致过超高增大,在现场也观察到了钢轨侧磨现象。为探究既能匹配线路条件又能有效降低噪声的最佳通过速度,有必要开展行车速度优化试验,对比选取最优的过曲线段速度方案。依据线路条件,选取了4种行车速度方案,每种方案运行时间为2个工作日,同时对列车通过曲线段时产生的噪声水平进行监测。行车速度优化试验方案如表3所示。

表3 行车速度优化试验方案

Tab.3 Driving speed optimization test plan

方案	行车速度/ (km/h)	未被平衡 超高/mm	持续时间/ 工作日
方案一	52	34(过超高)	2
方案二	57	21(过超高)	2
方案三	62	6(欠超高)	2
方案四	67	13(欠超高)	2

3 噪声测试方案及治理效果分析

3.1 噪声测试方案

为全面掌握轨顶涂覆装置安装、钢轨打磨及行车速度优化三种不同措施的独立效果和综合效果,根据实施顺序制定了以下6测试方案,如表4所示。

表4 不同方案下的噪声测试方案

Tab.4 Noise test plans under different schemes

方案	轨顶涂覆 装置安装	钢轨打磨	运行速度 优化	行车速度/ (km/h)
方案一	×	×	×	52
方案二	√	×	×	52
方案三	√	√	×	52
方案四	√	√	√	57
方案五	√	√	√	62
方案六	√	√	√	67

注:√表示采用该措施;×表示未采用该措施。

上述噪声测试方案均需分别在轨旁和居民楼处进行测试,为了确保数据的有效性,在早、中、晚不同时间段至少选取1h进行连续测试。在对轨旁噪声进行测试时,传感器布置在啸叫频发且波磨较为严重的曲线断面,收集连续监测时间内所有列车通过时间噪声数据。在对居民楼进行噪声监测时,

选择距离上述曲线最近的4栋。监测楼高分别取2楼、8楼、16楼及32楼,传感器布置在不同楼层的相同方位走廊窗户外1m处;收集连续监测时间段所有过车时间内的噪声数据,以及过车时间外的噪声数据,依据GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 测量方法》分别得到过车噪声和背景噪声。

3.2 轨旁噪声测试结果分析

依据不同噪声测试方案得到轨旁噪声监测结果,在同一行车速度下分别对比轨顶涂覆装置安装、钢轨打磨措施实施前后的治理效果。噪声测试方案一—方案三的噪声频谱对比如图7所示。在安装轨顶涂覆装置及对钢轨打磨后开展行车速度优化措施,即对比不同行车速度下的噪声水平。方案三—方案六的噪声频谱对比如图8所示。

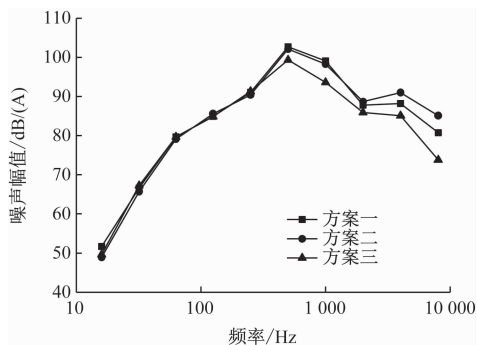


图7 方案一—方案三的噪声频谱对比

Fig.7 Noise spectrum comparison under Scheme 1 to 3

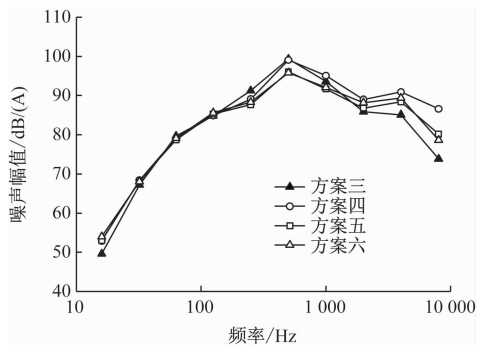


图8 方案三—方案六的噪声频谱对比

Fig.8 Noise spectrum comparison under Scheme 3 to 6

由图7的测试结果可知:方案二相较于方案一增加了轨顶涂覆装置,2 000 Hz 以内的噪声幅值水平变化不大,2 000 Hz 以上的高频噪声幅值明显下降,可见轨顶涂覆装置虽然对总的噪声水平影响较小,但能有效抑制高频啸叫噪声。方案三新增了钢

轨打磨措施,500 Hz 及以上的中高频噪声幅值均有明显下降。由本文第 1.3 节钢轨状态调查可知,噪声异常的曲线段存在波长为 20 ~ 25 mm 的短波波磨,在轮轨作用下引起异常的中高频噪声。因此,增加钢轨打磨措施后提高了钢轨表面平顺度,能较好地抑制噪声。

由图 8 的测试结果可知:随着行车速度变化,315 Hz 及以上的中高频噪声幅值均有明显影响,并且在一定范围内随着行车速度的增加噪声值反而下降。由本文第 1.1 节可知,噪声异常曲线段的超高匹配行车速度为 63 km/h,发现越接近该行车速度,列车噪声值越低。

在分别进行轨顶涂覆装置安装、钢轨打磨及行车速度优化的治理措施后,得到各方案下列车通过时轨行区的噪声等效值及其峰值,如表 5 所示。

表 5 各方案下轨行区的噪声监测水平
Tab. 5 Noise monitoring level in the track area under each scheme

方案	噪声等效值/dB(A)	噪声峰值/dB(A)
方案一	104.8	122.7
方案二	104.3	121.6
方案三	101.3	117.5
方案四	101.8	120.3
方案五	98.9	115.3
方案六	99.0	117.1

由表 5 可知:通过对比方案一和方案二,采用轨顶涂覆装置后,轨旁噪声峰值降低了 1.1 dB(A),噪声等效值降低了 0.5 dB(A),可见该措施对噪声峰值降低有一定效果,而对总的噪声水平影响有限;通过对比方案二和方案三,钢轨打磨后,轨旁噪声峰值降低 4.1 dB(A),噪声等效值降低 3.0 dB(A),可见该措施对噪声水平有显著的降低效果;通过对比方案三—方案六可知,方案五整体噪声值最低,噪声峰值降低 2.4 dB(A),噪声等效值降低 2.2 dB(A),可见由于曲线超高的限制,存在最优行车通过速度;通过对比方案一和方案五,先后采取轨顶涂覆安装、钢轨打磨及速度优化措施后,轨旁噪声峰值降低 7.4 dB(A),噪声等效值降低 5.9 dB(A)。

3.3 居民楼噪声测试结果分析

不同治理措施对轮轨噪声的抑制效果可通过

轨旁噪声测试结果进行对比研究,但对居民楼处的实际影响效果还需进一步测试分析。依据噪声测试方案分别得到了居民楼处的全天过车噪声水平,详见表 6。

由表 6 可知:行车速度为 62 km/h 时降噪效果最佳(即方案五),这也与轨旁噪声的分析结论一致。该方案下过车噪声与背景噪声等效值之差 ΔL_{Aeq} 和过车噪声与背景噪声峰值之差 ΔL_{max} 分别为 0.3 dB(A) 和 0.5 dB(A),可见此时相较于环境噪声,地铁噪声贡献量已较低,且各楼层测点满足 GB 3096—2008《声环境质量标准》的要求:“4a 类的环境噪声限值为昼间 70 dB(A)、夜间 55 dB(A),且最大声级不得高于限值 15 dB(A)。”特别是在居民 4 栋 32 楼处的噪声等效值由 71.2 dB(A) 降至 62.4 dB(A),降幅达 8.8 dB(A),噪声峰值由 94.1 dB(A) 降至 79.5 dB(A),降幅达 14.6 dB(A),且“曲线啸叫”噪声不再出现,噪声治理效果尤其显著,居民生活得到极大改善。

4 结语

1) 轨顶涂覆装置对总的轮轨噪声水平影响较小,但能有效抑制啸叫噪声。采用轨顶涂覆装置后,轨旁噪声峰值降低 1.1 dB(A),噪声等效值降低 0.5 dB(A)。

2) 钢轨打磨提高了钢轨表面平顺度,显著降低了异常轮轨噪声,轨旁噪声峰值降低 4.1 dB(A),噪声等效值降低 3.0 dB(A)。

3) 行车速度优化对于缓解轮轨噪声具有一定效果,且能避免出现钢轨侧磨,优化后轨旁噪声峰值降低 2.4 dB(A),噪声等效值降低 2.2 dB(A)。

4) 通过不同治理措施的综合应用,地铁轮轨噪声得到有效抑制,轨旁噪声峰值降低 7.4 dB(A),噪声等效值降低 5.9 dB(A);居民楼处监测到的过车噪声较背景噪声峰值降低至 0.5 dB(A),噪声等效值降低至 0.3 dB(A),地铁噪声对环境贡献量已处于较低水平。

5) 建议针对地铁高架线路,尤其是容易引发啸叫噪声曲线段,最好在建设规划期间对沿线环境敏感点进行避让,并同时考虑对远期规划地块进行减振降噪的加强设计,以降低后期投诉整改风险。

表 6 不同方案下居民楼处的噪声水平

Tab.6 Noise levels at residential buildings under each scheme

单位: dB(A)

方案	监测点位	不同类型噪声下的 L_{Aeq}		ΔL_{Aeq}	不同类型噪声下的 L_{max}		ΔL_{max}
		过车噪声	背景噪声		过车噪声	背景噪声	
方案一	2 楼	59.1	58.4	0.7	78.6	77.1	1.5
	8 楼	61.2	59.5	1.7	80.2	78.3	1.9
	16 楼	65.3	62.3	3.0	90.3	80.2	10.1
	32 楼	71.2	64.6	6.6	94.1	81.1	13.0
	平均值	64.2	61.2	3.0	85.8	79.2	6.6
方案二	2 楼	59.8	56.8	3.0	80.4	77.3	3.1
	8 楼	62.2	61.8	0.4	82.8	78.7	4.1
	16 楼	65.1	60.2	4.9	84.6	80.9	3.7
	32 楼	65.3	63.1	2.2	86.9	81.3	5.6
	平均值	63.1	60.5	2.6	83.7	79.6	4.1
方案三 (52 km/h)	2 楼	58.8	58.6	0.2	81.3	78.3	3.0
	8 楼	61.8	60.8	1.0	81.8	79.7	2.1
	16 楼	64.3	61.2	3.1	84.6	78.9	5.7
	32 楼	64.3	62.1	2.2	81.9	79.3	2.6
	平均值	62.3	60.7	1.6	82.4	79.1	3.4
方案四 (57 km/h)	2 楼	60.5	59.8	0.7	80.5	80.1	0.4
	8 楼	61.1	60.3	0.8	81.1	79.9	1.2
	16 楼	64.4	62.1	2.3	83.5	81.1	2.4
	32 楼	63.7	61.8	1.9	80.6	78.4	2.2
	平均值	62.4	61.0	1.4	81.4	79.9	1.6
方案五 (62 km/h)	2 楼	59.4	59.2	0.2	78.7	78.4	0.3
	8 楼	61.1	60.8	0.3	80.5	79.9	0.6
	16 楼	63.1	62.6	0.5	80.5	80.0	0.5
	32 楼	62.4	62.3	0.1	79.5	79.0	0.5
	平均值	61.5	61.2	0.3	79.8	79.3	0.5
方案六 (67 km/h)	2 楼	60.3	60.1	0.2	80.8	80.3	0.5
	8 楼	63.3	63.1	0.2	81.8	81.3	0.5
	16 楼	62.9	62.3	0.6	81.7	80.2	1.5
	32 楼	61.7	61.2	0.5	81.1	80.3	0.8
	平均值	62.1	61.7	0.4	81.4	80.5	0.9

参考文献

- [1] 雷晓燕, 张新亚, 罗锐. 高架轨道桥梁结构振动与噪声预测方法及控制研究进展[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 150.
LEI Xiaoyan, ZHANG Xinya, LUO Kun. Research progress on prediction methods and control of vibration and noise of elevated track bridge structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 150.
- [2] 邓玉姝, 夏禾, 善田康雄, 等. 城市轨道交通梯形轨枕轨道高架桥梁试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 49.
DENG Yushu, XIA He, INOUE Hiromi, et al. Experimental study of ladder track on a rail transit elevated bridge[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 49.
- [3] 杨文茂, 辛涛, 周华龙, 等. U 型梁上减振垫浮置板轨道系统动力分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(2): 44.
YANG Wenmao, XIN Tao, ZHOU Hualong, et al. Dynamic analysis of damping mat floating track system on U-beam[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 44.
- [4] 刘兴龙, 尹学军, 孔祥斐, 等. 控制城市轨道高架桥梁结构噪声的试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(2): 140.
LIU Xinglong, YIN Xuejun, KONG Xiangfei, et al. Experimental study on structure-borne noise control for urban metro viaducts[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(2): 140.
- [5] 王之龙. 城市轨道交通噪声控制技术研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(9): 87.
WANG Zhilong. Research on noise control technology of urban rail transit[J]. Environment and Development, 2018, 30(9): 87.
- [6] 朱万旭, 张瑞东, 刘玮, 等. 既有地铁轨道噪声过大的原因分析及对策[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 138.
ZHU Wanxu, ZHANG Ruidong, LIU Wei, et al. Cause analysis and countermeasures of excessive noise in existing metro track[J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 138.
- [7] 赵悦, 何远鹏, 韩健, 等. 有轨电车曲线啸叫噪声试验分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 133.

(下转第 107 页)

规律如图10所示。由图10可知,极限支护压力随着内摩擦角增大呈非线性地减小,最终趋于同一值。内摩擦角对极限支护压力的影响主要体现在两个方面:一方面,土拱高度随着内摩擦角的增大而减小,因此上部土重减小;另一方面,随着内摩擦角的增大,破坏面上的摩擦力增大,导致极限支护压力减小。

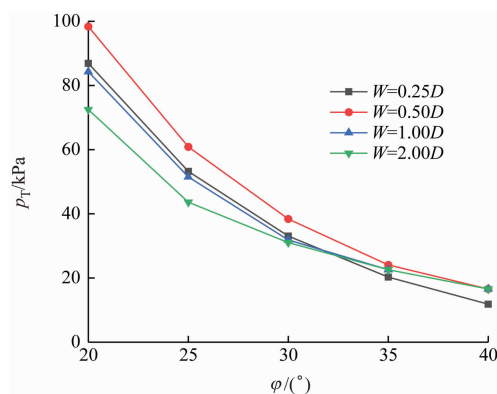


图10 土体内摩擦角对极限支护压力影响

Fig. 10 Influence of internal friction angle on limit support pressure

5 结论

1) 小净距双线隧道施工时,在掌子面的前上方会形成联合土拱,联合土拱的高度随着净距的增大而增大,但是存在极限高度。由于联合土拱的影响,极限支护压力会增加。

2) 提出了极小净距隧道和小净距隧道的联合土拱模式。基于楔形体模型提出了联合土拱+楔形体的组合破坏模式,并采用极限平衡理论得到了双线盾构隧道开挖面极限支护压力的解析解。

3) 极限支护压力随着净距的增大先增大后减小,当净距超过 $2.0D$ 时,破坏模式与单洞隧道破坏模式相同。极限支护压力随着洞径的增大呈线性增大,随着内摩擦角的增大呈非线性减小。

参考文献

- [1] DENG H, CAO P, LIU Y, et al. Numerical analysis of ground settlement patterns resulting from tunnel excavation in composite strata[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5479.
- [2] CHEN R P, LI J, KONG L G, et al. Experimental study on face instability of shield tunnel in sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33: 12.
- [3] LI P, WEI Y, ZHANG M, et al. Influence of non-associated flow rule on passive face instability for shallow shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104202.
- [4] CHEN R P, TANG L J, YIN X S, et al. An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(5): 683.
- [5] LI P, ZOU H, WANG F, et al. An analytical mechanism of limit support pressure on cutting face for deep tunnels in the sand[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 103372.
- [6] 晏莉, 吕超慧, 喻少华, 等. 近邻双孔隧道围岩联合压力拱试验与数值分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3): 103.
YAN Li, LYU Chaohui, YU Shaohua, et al. Test and numerical analysis on combined pressure arch of surrounding rock in adjacent twin tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 103.
- [7] 李鹏飞, 王帆. 深埋非对称小间距隧道围岩压力计算方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(4): 612.
LI Pengfei, WANG Fan. Calculation method of loosening pressure for deep-buried and non-symmetry closely-spaced tunnels[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(4): 612.
- [8] 王闯, 封坤, 戴志成, 等. 富水地层双线小净距土压平衡盾构开挖面稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 112.
WANG Chuang, FENG Kun, DAI Zhicheng, et al. Study on the excavation face stability of small interval double-line earth pressure balance shield tunnel in water-rich stratum[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 112.

· 收稿日期:2024-04-15 修回日期:2024-08-03 出版日期:2025-01-10

Received:2024-04-15 Revised:2024-08-03 Published:2025-01-10

· 通信作者:高琪,高级工程师,3134432501@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第102页)

ZHAO Yue, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Measurements and analyses of curve squeal caused by tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 133.

- [8] MATSUMOTO A, SATO Y, ONO H, et al. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model[J]. Foreign Rolling Stock, 2004, 253(1/2): 199.

- [9] EADIE D T, SANTORO M. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction[J]. Journal of

Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 747.

· 收稿日期:2022-08-10 修回日期:2022-11-02 出版日期:2025-01-10

Received:2022-08-10 Revised:2022-11-02 Published:2025-01-10

· 通信作者:刘宇航,工程师,632562648@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license