

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.039

# 黄土地区某地铁区间隧道设计难点分析与探讨

高 强,于文龙

(广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

**摘 要:** 以西安地铁五号线某区间隧道工程为例,对黄土地区地铁隧道设计中遇到的几个重难点问题进行了分析与探讨,提出了针对性的设计方案和处理措施,保证了隧道的安全顺利实施,得出以下结论供类似工程参考和借鉴:黄土地区地铁隧道设计应以车站及区间使用功能为前提,尽量绕避自重湿陷性黄土,对于隧道基底处理深度小于2 m的,采用洞内换填处理是合理可行的;地质条件较好、周边环境控制要求不高时,可取消隔离桩,并在先行隧道初支贯通后,即可进行后行隧道的施工;区间洞口位置的选择、边仰坡防护措施及洞门设计方案是合理可行的,可保证施工及后期运营安全,同时也满足城市景观的要求;桥隧过渡段采用桩板结构进行设计,可实现刚柔过渡,避免湿陷性黄土的影响,降低工后和差异沉降,满足行车平顺性的要求。

**关键词:** 区间隧道;湿陷性黄土;小净距隧道;洞口及边仰坡防护;桥隧过渡

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)03—0212—06

## Analysis and Discussion on the Difficulties in the Design of a Subway Tunnel in the Loess Region

GAO Qiang, YU Wenlong

(Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

**Abstract:** By taking the tunnel project of line five of Xi'an metro line as an example, several important and difficult problems encountered in the design of the subway tunnel in the loess area are analyzed and discussed. The specific design scheme and treatment measures are proposed to ensure the safe and smooth implementation of the tunnel, and the conclusions are as follows: 1) The design of the subway tunnel in the loess area should take the function of the station and the interval as the premise to avoid the self-weight collapsible loess as far as possible. It is reasonable and feasible to replace the tunnel foundation with the tunnel foundation treatment depth less than 2 m. 2) When the geological condition is good and the control requirements of surrounding environment are not high, the isolation piles is not necessary. After the initial tunnel passes through, the construction of the rear tunnel can be completed. 3) The selection of the location of the tunnel entrance, the protection measures of the side slope and the design scheme of the portal are reasonable and feasible, which can guarantee the safety of the construction and the later operation, and also meet the requirements of the city landscape. 4) The bridge and tunnel transition section is designed by the pile plate structure, which can realize the rigid and flexible transition, avoid the influence of collapsible loess, reduce the post and differential settlement, and meet the requirements of ride comfort.

**Keywords:** running tunnel; collapsible loess; small interval tunnel; protection of hole and side slope; bridge and tunnel transition

西安地铁五号线终点段月登阁站——三殿村站  
区间跨越灞河三级、一级阶地、河床、漫滩四种地貌

单元,地形起伏较大,存在多处陡坡,地面最大高差  
约36 m。区间采用隧道下穿灞河三级阶地后,以高

架方式上跨雁鸣湖和浐河,最终到达三殿村站。区间隧道遇到了自重湿陷性黄土、超小净距隧道、西安地铁第一座类山岭隧道洞门及桥隧过渡处理等一系列问题,给隧道的设计与施工带来较大挑战。

西安地区相关勘察、设计单位对地铁工程湿陷性黄土处理进行了一定的科研和分析<sup>[1-2]</sup>,提出了非自重湿陷性黄土处理的原则,并积累了一定的设计施工经验。但主要集中在明挖车站或区间的处理,针对暗挖隧道的研究还比较少见。

小净距隧道的施工风险较大,后行隧道施工时,先行隧道将受到明显的偏压影响<sup>[3-7]</sup>,设计施工过程中应采取措施降低后行隧道施工对先行隧道的影响,并减小隧道开挖与二衬施工的相互干扰,便于施工组织。

近年来公路、铁路山岭隧道设计了大量的洞门结构,相关单位也进行了一定的分析总结<sup>[8-11]</sup>。但地铁线路走向受前期城市总体规划、轨道交通线网规划、建设规划等因素的限制,一般均沿既有或规划道路下敷设,与公铁隧道有较大不同。这就需要土建设计单位基于线路设计条件,综合考虑地形、地质、周边环境、城市景观等多方面的因素,合理选择洞口位置和洞门型式,对边仰坡的防护和进洞措施提出针对性的设计。

桥梁和隧道两者基础型式不同,刚度差异较大,桥隧间短路基过渡段应采取合理的地基处理措施或

结构型式,实现刚柔过渡,减小工后沉降和差异沉降,确保行车平顺性<sup>[12-14]</sup>。

面对这些复杂设计问题,本文通过调研国内类似工程实例和经验,结合本区间设计边界条件,对黄土地区地铁隧道设计中遇到的几个主要重难点问题进行了总结、分析与探讨,提出了针对性的设计方案和处理措施,保证了隧道的安全顺利实施,同时降低了施工难度和工程造价。

## 1 工程概况

五号线月登阁站——三殿村站区间线路从月登阁站(地下站)出发后,沿规划月坛路向东行进,下穿芙蓉山庄后在浐河三级阶地边缘的陡坡穿出到达桥隧接口处,然后上跨雁鸣湖及浐河,最终到达三殿村站(高架站)。区间全长 1 037.246 m,其中下穿芙蓉山庄段采用矿山法施工,全长 524.871 m;上跨雁鸣湖及浐河段采用高架施工,全长 512.375 m。周边环境以月登阁村待拆迁民房、芙蓉山庄、雁鸣湖、浐河及部分市政道路为主。

区间隧道段设置施工竖井及横通道一处,在桥隧相接处设置隧道洞门一座,隧道洞门采用斜切式洞门。

根据现场征拆进展情况,月登阁站开工时间滞后,不能按时提供暗挖进洞条件。隧道分别从竖井横通道和桥隧接口处进洞施工。

区间平纵断面示意图详见图 1 和图 2。

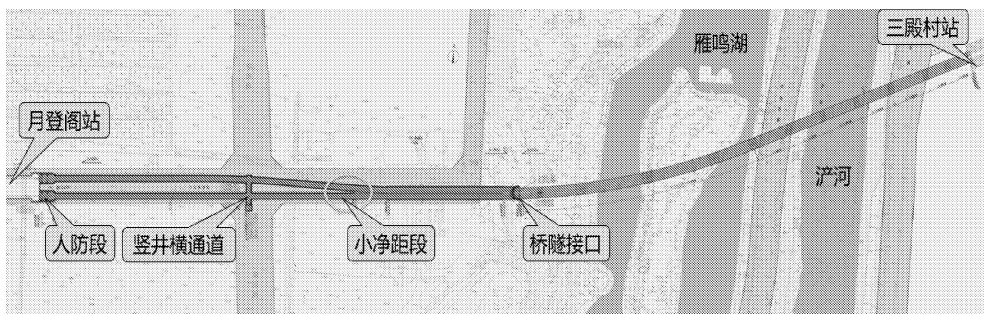


图 1 区间总平面示意图

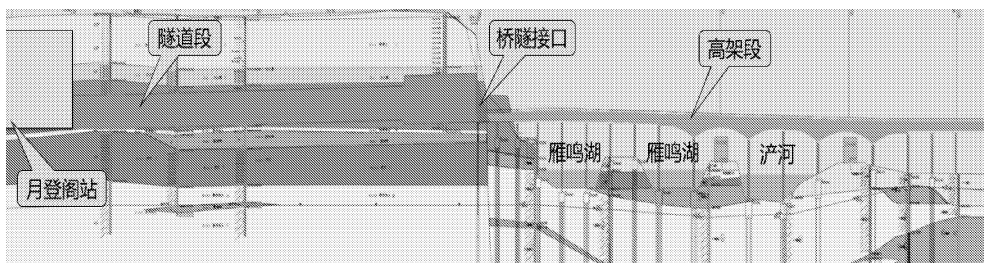


图 2 区间纵断面示意图

## 2 工程及水文地质条件

区间跨越泾河一、三级阶地、河床、漫滩四种地貌单元,地形起伏较大,存在多处陡坡,最大高差约 36 m,其中隧道段主要穿越泾河一、三级阶地。隧道沿线穿越的地层主要为人工填土;第四系上更新统风积黄土、残积古土壤;中更新统风积黄土,冲积粉质黏土、砂类土、碎石类土等。地下水主要为第四纪孔隙潜水,稳定水位埋深 37.60 m~39.00 m,在区间隧道底板标高下 15.2 m~18.5 m。沿线不良地质主要为人工填土和湿陷性黄土。场地为自重湿陷性场地,湿陷等级为Ⅳ级。根据洞深围岩工程地质条件、开挖后的稳定性状态、弹性纵波波速、地下水位等综合分析,总体隧道围岩分级为Ⅴ级。

## 3 设计重难点分析与探讨

### 3.1 湿陷性黄土处理

#### 3.1.1 处理原则

区间隧道所处场地为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级Ⅳ级(很严重),下限深度为地面以下约 20 m,区间结构局部位于自重湿陷性底界以上,需要进行地基处理。考虑到地铁工程的重要性,设计使用年限为 100 a 的区间隧道应为甲类建筑。

因目前没有针对隧道工程的湿陷性黄土处理规范,结合《湿陷性黄土地区建筑规范》<sup>[15]</sup>以及西安地铁既有研究及处理经验,提出湿陷性黄土地区隧道工程的处理原则为:

(1) 绕避原则。湿陷性黄土为区域性分布,通过调整地铁线路走向及埋深,使隧道避开自重湿陷性黄土层,在兼顾相邻地铁车站建筑功能的前期下,大幅降低隧道基底以下剩余湿陷量,从而降低处理深度和难度。

(2) 消除湿陷性原则。当湿陷性黄土分布范围和深度较大,无法完全绕避时,应采取地基处理的措施,消除隧道底以下黄土湿陷性。

① 根据西安地区地铁工程湿陷性黄土研究及处理经验,应消除隧道基底以下至自重湿陷性底界范围内黄土的湿陷性,处理深度可按处理后地基至自重湿陷性底界深度范围内剩余湿陷量不大于 20 mm 进行控制<sup>[16-17]</sup>。

② 城市地铁隧道一般穿行于既有道路下,受既有道路、建(构)筑物、地下管线等限制经常无法采用地面处理方式进行地基处理,以隧道洞内处理为主。

#### 3.1.2 隧道湿陷性黄土处理方案选择

地铁隧道工程具有开挖断面或分部开挖断面小、洞内作业空间狭小、抗扰动能力差等特点,在隧道内进行湿陷性黄土处理难度较大,一般采用暗挖换填、挤密桩、桩基础、化学注浆等方法。

暗挖换填法是通过适当加大隧道开挖断面,使隧道仰拱位于自重湿陷性底界以下或剩余湿陷量小于 20 mm,适用于仰拱距离自重湿陷性底界不大于 2 m 时。

挤密法是利用沉管、爆破、冲击、夯扩等方法,在湿陷性黄土地基中施做挤密填料孔,再用素土、灰土或水泥土分层回填夯实,以加固湿陷性黄土地基的方法。适用于处理地下水位以上 5 m~15 m 厚度范围的湿陷性黄土。

桩基础法是在隧道仰拱以下布置钢筋混凝土桩,以提高地基承载能力,避免湿陷性黄土的影响,适用于隧道断面相对较大,便于成桩时,受基底湿陷性黄土厚度限制较小。

化学注浆法一般是通过注浆管向湿陷性黄土地基中注入硅化浆液,填充湿陷性黄土孔隙,并与土形成凝结,从而消除湿陷性。一般用于加固地下水位以上的既有建筑物地基,处理深度为 2 m~5 m。

几种常用处理方式的比选如表 1 所示。

表 1 湿陷性黄土处理比选表

黄土处理方法	处理深度	处理难度	可靠性	施工速度	工程造价
暗挖换填法	浅	小	高	快	低
挤密桩法	较深	较大	较高	慢	较高
桩基础法	深	较小	高	较快	高
注浆法	较浅	大	低	慢	高

#### 3.1.3 本区间处理方案

月登阁站及前后区间均存在湿陷性黄土处理的问题,通过优化本区间线路埋深,调整月登阁站为地下三层站,可压低轨面线约 7 m 左右,月登阁站可不用进行地基处理,前后区间处理范围可大幅减小,仅部分隧道需要处理仰拱下 0.7 m~1.2 m 的湿陷性黄土,综合以上处理方案优缺点,推荐采用洞内换填法进行处理。洞内换填暗挖处理示意图如图 3 所示。

### 3.2 超小净距隧道

月登阁站为地下三层岛式车站,站台宽度 11 m,左右线间距 14 m,高架区间线间距 4.2 m,线路从月登阁车站出发后,需要并线接入高架区间,必然存在线间距不断变小的过程,隧道之间净距最小仅 1.0

m,属于超小净距隧道<sup>[18]</sup>。

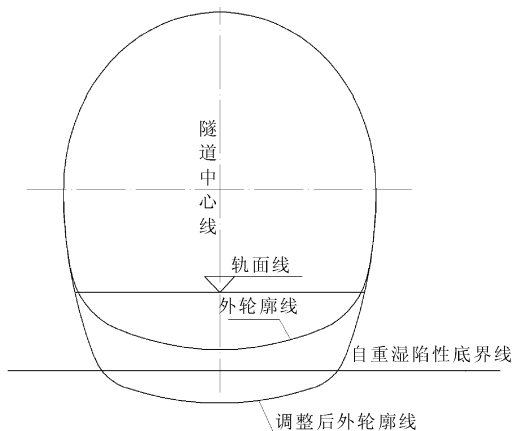


图 3 隧道洞内暗挖示意图

根据西安地区地铁设计施工经验,小净距隧道的处理一般采用两种方式,第一种为在两隧道之间设置隔离桩,减小后行隧道施工对先行隧道的影响,一般适用于地质条件差,隧道开挖断面大,周边环境变形控制要求较高,且地面具备隔离桩施工条件时;第二种为根据浅埋暗挖设计原理,加强先行隧道的支护刚度,并在先行隧道二衬施工完成后,再进行后行隧道的开挖施工,适用于周边环境变形控制要求较低,但地面场地条件较差,无法实施隔离桩时。按上述两种处理方式,本人参与设计的西安地铁四号线和机场线小净距区间隧道均已顺利施工完成,取得了较好的效果。

本区间围岩级别为 V 级,围岩稳定性较好,小净距段周边环境较为简单,无现状道路和地下管线,围岩变形控制要求较城市核心区低,但隧道上方为芙蓉山庄用地,地面施工条件差。为减小隧道开挖与小净距段二衬施工的相互干扰,便于施工组织,参考新奥法设计原理中充分利用围岩自承能力和允许初支发生一定变形的特点,提出了新的施工工序安排,即先行隧道初支闭合环一段长度后,再进行后行隧道的开挖施工,待左右线隧道初支均贯通后,再施做二衬。左右线隧道均采用台阶法开挖,采用大管棚和小导管注浆超前支护,并在先行隧道临近后行隧道侧曲墙段增设小导管对小净距段夹土体进行超前加固,增强初期支护刚度,初支厚度增大至 300 mm,纵向连接筋间距加密至 500 mm,及时进行初支背后注浆、加强监控量测,确保隧道施工安全。隧道衬砌断面开挖、支护参数详见图 4。

### 3.3 洞口及边仰坡防护设计

区间隧道主要跨越浐河一、三级阶地,地貌单元交界处存在高大陡坡,且陡坡上存在多处废弃窑洞,

现场图如图 5 所示。区间隧道从陡坡上穿出后,受地形条件限制,需要在桥隧接口处设置洞门一座,并需与高架区间进行衔接。设计过程中主要需要解决以下四个方面的问题。

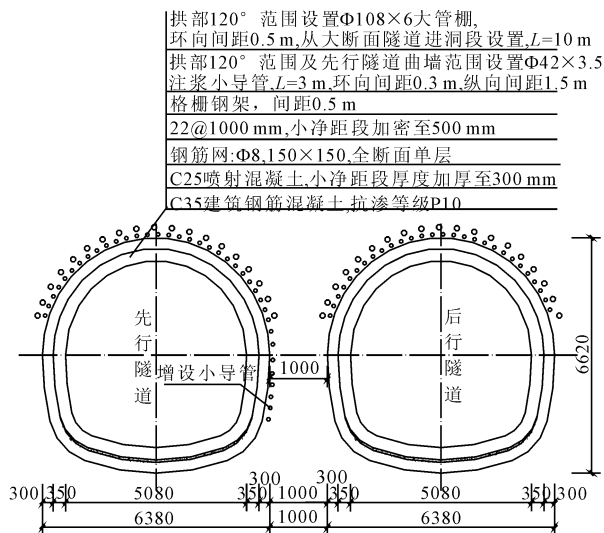


图 4 小净距隧道衬砌断面设计图(单位:mm)



图 5 地貌单元交界处陡坡及废弃窑洞

#### 3.3.1 洞口位置选择

地铁线路走向受前期城市总体规划、轨道交通线网规划、建设规划等因素的影响,与铁路、公路隧道有较大不同,不能大范围调整路线,一般均沿既有或规划道路下敷设。本区间沿规划月坛路敷设,隧道暗洞从地貌单元分界陡坡处穿出,陡坡上方临近芙蓉山庄用地边界,隧道洞口设置应避免侵入山庄用地,并应减少对原有坡面的破坏,不宜大范围开挖边仰坡。洞口位置综合考虑以上因素,通过设置 18 m 明洞向外延伸,实现了早进洞<sup>[14]</sup>,从而确保后期运营阶段的安全。

#### 3.3.2 边仰坡防护

根据现场实际地形,隧道暗洞位于废弃窑洞处,现场踏勘发现窑洞已发生局部坍塌,临空面直立边坡垂直裂隙发育,整体稳定性较差,采用贴壁进洞方式存在一定的安全风险,因此需在暗洞进洞前对临时边仰坡进行刷坡和防护,并对窑洞进行处理,确保暗洞进洞的安全。明洞施工完成后,需要对永久边

仰坡进行防护,确保后期运营安全。

(1) 成洞前临时边仰坡进行刷坡,并采用挂网+注浆锚管+喷射混凝土支护,确保了暗挖进洞安全。其中边坡及成洞面以上仰坡坡率 1:0.5,成洞面坡率 1:0.3;锚管采用  $\Phi 42$  mm 钢管,长度 3.5 m~5.0 m,浆液为水泥浆。

(2) 进洞前对成洞面及邻近废弃窑洞进行水泥砂浆回填,并对邻近直立边坡进行锚喷支护。

(3) 明洞施工完成后,需按相关规范要求,对明洞段进行回填处理,并需对回填边仰坡进行防护。本区间明洞段回填坡率 1:1.5,边坡防护采用拱形骨架+植草防护。

### 3.3.3 暗挖进洞措施

暗挖进洞前,在成洞面外侧设置套拱,并设置 20 m 长大管棚,暗洞进洞开挖采用双侧壁导坑法,并辅以超前小导管注浆,进洞施工加强对边仰坡及隧道自身的监测,确保了暗挖顺利进洞。

### 3.3.4 洞门型式选择

(1) 隧道洞门位于西安东三环以内,隧道上方为芙蓉山庄,下方临近雁鸣湖生态湿地公园,公园周边道路、建筑密集,因此洞门型式应考虑建筑景观及环境协调要求,力求结构简单、美观。

(2) 洞门基础位于黄土地层或者承载力较低的地区,在条件允许的情况下,应尽量采用斜切式或其他新型洞门结构。

综合考虑地质、边仰坡开挖及景观等要求,本区间洞门采用斜切式洞门。

## 3.4 隧道与桥梁过渡段设计

隧道洞门和桥梁 0 号墩之间距离约 22.375 m,属于桥隧间短路基过渡段。考虑到明洞基础位于天然地基上,桥梁为桩基础,两者之间基础型式不同,刚度差异较大,且路基下为湿陷性黄土地基,若采用常规的路基方式过渡则存在两次刚柔转换,不利于工后沉降和差异沉降的控制,严重时将影响行车平顺性。

本区间设计过程中为解决上述问题,采用了以下两种处理措施;

(1) 明洞段衬砌设置仰拱,并设置大拱脚,适当加厚衬砌厚度,增加明洞段整体刚度。同时对明洞仰拱以下 2 m 范围内地层进行三七灰土换填,提高明洞段的地基承载力,进行 2 m~3 m 后的换填处理。处理措施示意图如图 6 所示。

(2) 短路基段采用桩板结构进行设计,桩板结构的桩与承载板直接刚性连接,承载板上部通过基

床表层与轨道结构连接,可实现隧道和桥梁之间的刚柔过渡,同时避免湿陷性黄土的影响,降低工后和差异沉降。处理措施示意图如图 7 所示。

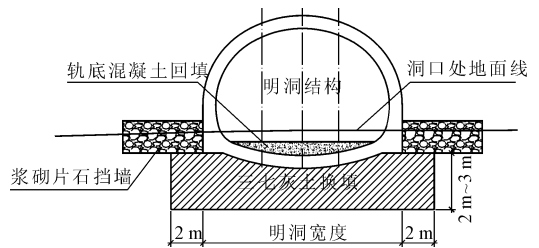


图 6 明洞断面及地基处理示意图

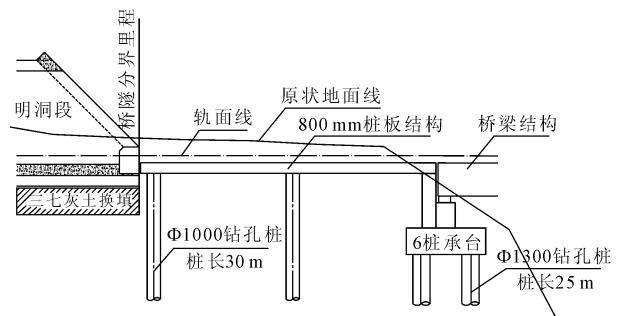


图 7 桥隧过渡段桩板结构布置图

## 4 施工效果及监测结论

本区间存在的几个重难点按照上述介绍的设计方案和处理措施进行设计,施工过程中严格按照设计图纸要求进行施工,目前区间暗挖段已顺利施工完成,整体施工效果良好。

根据规范及监测方案要求,本区间施工过程中对隧道地面沉降、拱顶下沉、水平收敛及邻近建筑物变形等各监测项目进行了连续监测。

施工期间自 2016 年 11 月 2 日开始进行监测,截止到 2018 年 3 月 31 日,小净距段地面沉降量最大为 16.38 mm,拱顶沉降最大为 21.32 mm,净空收敛最大为 5.43 mm。各监测项目变形控制指标满足设计和规范的要求,说明设计方案和措施是合理可行的,可对类似工程提供一定的参考价值。

## 5 结论建议

本文通过调研国内类似工程实例和设计施工经验,结合区间自身特点,对黄土地区地铁隧道设计中遇到的主要重难点进行了分析与探讨,提出了针对性的设计方案和处理措施,保证了隧道的安全顺利实施,得出以下结论以供参考:

(1) 黄土地区地铁隧道设计应以车站及区间使用功能为前提,尽量绕避自重湿陷性黄土,降低处理

的难度。对于隧道基底处理深度小于2 m的,采用洞内换填处理是合理可行的。

(2) 黄土地区三种小净距隧道处理方式均是可行的,设计过程中可根据区间隧道自身及周边环境特点选择合理的方式。建议在地质条件较好(V级围岩及以上)、周边环境控制要求不高时,取消隔离桩,在先行隧道初支贯通后,随即进行后行隧道的施工,可减小相互干扰,便于施工。

(3) 本区间综合考虑线路、地形、地质条件及运营要求等因素选择的洞口位置、边仰坡防护措施及洞门设计方案是合理可行的,可保证施工及后期运营安全,同时也满足城市景观的要求。

(4) 隧道洞门与桥梁之间短路基过渡段采用桩板结构进行设计,可实现隧道和桥梁之间的刚柔过渡,同时避免湿陷性黄土的影响,降低工后和差异沉降,可满足行车平顺性的要求。

建议:桥隧过渡段差异沉降计算难度较大,由于隧道开挖为卸载,基底不产生附加荷载,地基沉降量理论计算结果为零,但考虑到地铁工程为百年工程,实际工程中基底变形肯定会存在,故应加强运营过程中桥隧过渡段不均匀沉降的监测和运营养护,必要时需采取调整轨道扣件、调线调坡或注浆抬升等方式进行处理,确保运营平顺性和安全。

#### 参考文献:

- [1] 范寒光.西安地铁工程黄土的湿陷性评价及应对措施研究[D].西安:长安大学,2016.
- [2] 罗俊忠.西安地铁湿陷性黄土处理措施研究[J].铁道建筑技术,2013(4):8-12.
- [3] 地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工

业出版社,2013.

- [4] 范恒秀.小净距地铁盾构重叠隧道施工影响的三维有限元分析[J].隧道建设,2012,32(S1):1-7.
- [5] 黄竹纯.黄土地区小净距地铁隧道施工动态分析及二次衬砌优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [6] 刘丰铭.浅埋偏压小净距黄土隧道围岩稳定性研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [7] 宿钟鸣,申俊敏,薛晓辉.偏压小净距黄土隧道先行洞初支受力特性分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):130-134.
- [8] 彭刚.高速公路桥隧连接工程中隧道洞门标准施工技术[J].中国标准化,2017(14):190-191.
- [9] 张钦鹏.考虑边坡进洞高程的大断面黄土隧道洞口段动力响应特征研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.
- [10] 杨磊.公路隧道洞口美学设计及评价研究[D].西安:长安大学,2017.
- [11] 庞小冲,袁永新.复杂地形地质条件下隧道进洞方案研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):189-192.
- [12] 曾如财.城市复杂桥隧近接混合结构施工技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [13] 仝慧军.高速公路桥隧相接形式与施工方法研究[D].西安:长安大学,2014.
- [14] 赵利民.铁路客运专线路桥过渡段处置技术研究[D].长沙:中南大学,2006.
- [15] 湿陷性黄土地区建筑规范:GB 50025—2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [16] 罗章波.西安地铁穿越湿陷性黄土层处理原则与措施研究[J].隧道建设,2016,36(3):257-263.
- [17] 王立新,王俊,李储军.大厚度自重湿陷性黄土地层条件下复杂地铁隧道工程方案研究[J].现代隧道技术,2016,53(2):157-164.
- [18] 铁路隧道设计规范:TB 10003—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.

(上接第211页)

- [7] 陈婧,马震岳,刘志明,等.水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J].水力发电,2004,30(5):24-27.
- [8] 郭涛,张立翔,姚激.水轮机流道压力脉动诱发厂房振动分析[J].地震工程与工程振动,2011,31(6):136-140.
- [9] 秦亮,王正伟.水电站机组的类转频强水压脉动[J].清华大学学报,2008,48(2):215-218,223.
- [10] 侯攀,江波.藏木水电站脉动压力下厂房结构动力响应分析[J].水电站设计,2017,33(1):13-17,35.
- [11] 孙万泉,马震岳,赵凤遥.抽水蓄能电站振源特性分析研究[J].水电能源科学,2003,21(4):78-80.

- [12] 幸享林,陈建康,廖成刚,等.大型地下厂房结构振动反应分析[J].振动与冲击,2013,32(9):21-27.
- [13] 陈婧,马震岳,刘志明,等.三峡水电站主厂房振动分析[J].水力发电学报,2004,23(5):36-39.
- [14] 欧阳金惠,陈厚群,李德玉.三峡电站厂房结构振动计算与试验研究[J].水利学报,2005,36(4):484-490.
- [15] 吴娟,马震岳.水电站地下厂房楼板结构设计对振动特性的影响规律[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):177-181,191.
- [16] 王晓强,贾丽丽.水电站厂房设计中振动问题研究[J].水利科技与经济,2009,15(11):1023-1024.