

文章编号: 1007-2993(2022)03-0238-05

盾构穿越长期降水区域引起地表沉降分析

王勇 盛志战 高素芳 胡高伟
(北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

【摘要】 成都轨道交通施工穿越的主要地层为砂卵石地层, 其间夹杂大量细小颗粒, 部分盾构需穿越长期降水的既有明挖区间, 施工过程中土体竖向位移较未降水区域显著不同。从长期降水区域土体结构、沉降机理、沉降控制方式及工程实例几个方面进行分析, 得出下列结论: (1) 基坑长期降水会导致砂卵石地层中细颗粒流失, 形成骨架-孔隙结构; (2) 注浆及改良注浆材料性质对盾构穿越长期降水导致细颗粒流失区域引起的土体竖向位移具有一定控制作用; (3) 未进入降水区域时盾尾脱出阶段造成的沉降占比最大, 进入降水区域后刀盘到达及盾构通过后土体固结沉降占比增大。结论经成都轨道交通十七号线明—九区间盾构工程验证, 研究成果可为后续类似工程提供一定的理论依据及借鉴。

【关键词】 地铁工程; 砂卵石地层; 降水; 注浆; 沉降控制

【中图分类号】 P 642

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.012

Analysis of Ground Settlement Caused by Shield Passing Through the Area of Long-term Precipitation

Wang Yong Sheng Zhizhan Gao Sufang Hu Gaowei
(BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

【Abstract】 The main stratum of Chengdu rail transit construction is sandy pebble stratum, which is mixed with a large number of fine particles. Some EPB tunnels need to cross the existing cut and cover stations with long-term precipitation. The vertical displacement of soil mass during construction is significantly different from that in the area without precipitation. Soil structure, settlement mechanism, settlement control mode and engineering examples in long-term precipitation area were analyzed, and conclusions are as following: (1) long-term precipitation of foundation pit will lead to the loss of fine particles in the sandy pebble stratum, forming a skeleton pore structure; (2) the properties of grouting and improved grouting materials have a significant control effect on the vertical displacement of soil caused by area of fine particle loss due to long-term precipitation; (3) the largest proportion of settlement is caused by the shield tail out stage when the precipitation area is not entered, the proportion of soil consolidation settlement and cutter arrival stage increases after entering the precipitation area. The conclusions have been verified by the shield engineering of Ming-Jiu section of Chengdu rail transit Line 17, and the research results can provide theoretical basis and reference value for similar projects.

【Key words】 subway engineering; sandy pebble stratum; precipitation; grouting; settlement control

0 引言

在中国城市化进程中, 各大城市均不断进行地铁线路的建设, 而盾构法因其施工速度快、受地形地貌影响条件小等优势被广泛应用于地铁施工过程中, 其中大部分地区盾构选型多选择土压平衡盾构, 目前国内已就盾构施工对周边环境的影响进行了大量的研究, 并取得了一定成果^[1-4]。

江华等^[5-6]采用理论推导及数值计算相结合的方法进行砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究, 得出刀盘结构形式及土体改良效果是影响地层适应性

及施工效率的主要因素。曲军彪^[7]研究了深基坑开挖降水对周围地表和建筑物沉降影响, 得出建构筑物所处不同地层对降水引起沉降的敏感性各不相同的结论。李潮^[8]对砂卵石地层土压平衡盾构关键参数进行研究, 分析了不同级配、不同漂石含量等因素对盾构施工的影响。

各位学者均提出了影响盾构施工的因素, 其中胡浩^[9]、胡冰冰等^[10]利用数值计算软件对不同降水深度对盾构隧道的应力及位移进行分析; 张明等^[11]对临近地铁区域降水对已建地铁结构产生的影响进

行系统研究;夏晨欢等^[12]针对地铁盾构进洞、出洞过程中采取降水从而达到盾构安全施工的目的;刘庆晨^[13]、胡 敏^[14]则着重研究临近地铁施工对既有地铁隧道的影响以及特定地层条件下盾构施工参数控制分析。但目前长期降水对盾构施工的影响仍较为模糊,本文以成都市轨道交通工程一土压平衡盾构区间为工程背景,着重研究盾构穿越长期降水区域对地表沉降的影响,拟为后续工程提供一定的理论基础与借鉴。

1 盾构穿越长期降水区域沉降研究

1.1 降水对周边环境的影响

降水对周边环境的影响的主要因素为降水深度、降水后的水压分布、围护结构的刚度、降水持续时间、周边建构筑物的基础特征情况。由于基坑降水与施工通常是同步进行的,故基坑降水导致的沉降与基坑开挖引起的卸荷作用导致的隆起共同叠加,成为最终的以降水区域为中心、降水影响范围为半径的沉降漏斗区域。此区域内土体及既有建构筑物的沉降会随着与降水区域距离的增加而减小,最终趋于稳定。

1.2 降水对地下土体的影响

目前常用的降水手段为管井降水,降水井井壁外侧会包裹密目网,防止土中细颗粒流入井口,保证抽水的含砂率在规定范围之内。但实际操作过程中包裹密目网与降水效果存在一定的矛盾关系,即包裹密目网在一定程度上阻止土中细小颗粒流失的同时阻挡了水流进入管井,造成抽水量达不到设计要求,而减少密目网的包裹则会导致砂卵石地层中细小颗粒随着抽水流失。所以,降水势必会导致土体中的细小颗粒流失,原状砂卵石地层中砂卵石与砂类相互作用形成的骨架-密实结构会随着细砂流失变成砂卵石单独作用的骨架结构,即由摩擦及黏聚力共同作用转变成单一摩擦作用的骨架结构,造成整体稳定性变差(见图1)。

1.3 盾构穿越长期降水区域对周边环境的影响

长期降水区域在未受到其他外力扰动情况下,由于孔隙水压力消散,土体中细小颗粒流失后砂卵石在一定范围内重新分布,形成承载拱。盾构即将通过此区域时,掌子面的压力波动会在一定程度上对已形成的承载拱进行扰动,迫使其进行重新分布达成新的稳定结构,随后刀盘切削、盾体与土体间的摩擦、盾尾间隙及地层损失使盾构上方土体产生竖向位移,随着埋深减小而衰减。

相对比未降水的区域,长期降水导致土体密实程度下降,因此其受到扰动后产生的竖向变形更大,

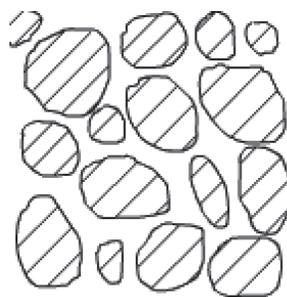


图1 骨架-孔隙结构示意图

由于孔隙中的填充物质流失,故受地层损失影响后,沉降发展得更为迅速及显著。盾构穿越过程中将导致影响范围内出现空洞,甚至出现局部土体下陷,仅残留地表硬化层部分土体,埋深较浅的管线下部完全失去支撑,成为悬空管线,一定程度上增大了施工的风险。

2 控制地表变形因素分析

与黏土结构不同,砂卵石地层,尤其是以骨架结构为主体的砂卵石地层,其结构受到破坏后向地表传递位移的过程十分迅速,故常规的渣土改良、控制盾构掘进参数等手段很难对因降水而导致地下土体级配改变引起的沉降起到控制作用,因此控制地表变形的因素要从细颗粒流失方面着手。

2.1 浅表注浆

首先,针对盾构上方地表进行浅表注浆,若该区域交通流量较小,也可考虑仅进行浅表注浆,视情况而定采取后续控制沉降方案。浅表注浆控制沉降的原理是在地表表层形成一定厚度的硬化层,若下方土体塌陷,则由此硬化层形成的板体结构继续承担地表传来的压力,为保护地表路面的第一道防线(见图2)。

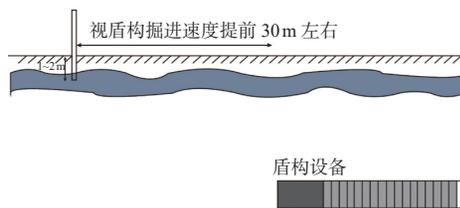


图2 浅表注浆示意图

浅表注浆应保证硬化层具有一定厚度,在承担地表荷载的同时确保埋深较浅的管线处于硬化层内,减少管线破裂导致管涌发生的可能性。其注浆时间应为盾构尚未进入影响区域即开始,保证其在盾构到达时已具备一定强度。由于降水导致砂卵石地层孔隙率增大,故此种情况较难通过注浆压力进行控制,因此可选择初凝速度较快、结实率较高的浆液进行第一轮注浆,后续采用流动性较好的浆液进行二次补充,确保浅表注浆的效果,具体注浆效果检查可考虑

采用局部探挖,观察注浆浆脉的情况判断。

2.2 盾构同步注浆

盾构同步注浆一直以来被作为对盾尾间隙填充的主要手段,但目前受限于注浆材料,大部分盾构仅能做到推进的同时进行注浆——时间上的同步。同步注浆浆液受限于凝结时间及注浆量等因素,无法完成对盾构超挖部分进行完全填充——空间上的同步。因此盾构通过此区域过程中需注意真正的同步注浆,即时间与空间的双重同步,并保证土仓压力与当前地质情况相匹配。此种情况下虽难以对刀盘扰动造成的沉降进行有效控制,但盾体处的同步注浆仍可将沉降占比最大的盾尾脱出阶段引起的沉降降低到可接受的范围内。此阶段的同步注浆应具备较快的初凝速度即较高的结石率,同时还应保持一定的触变性,其大部分特征应与非牛顿流体保持一致,其余应根据工程具体情况进行调整(见图3)。

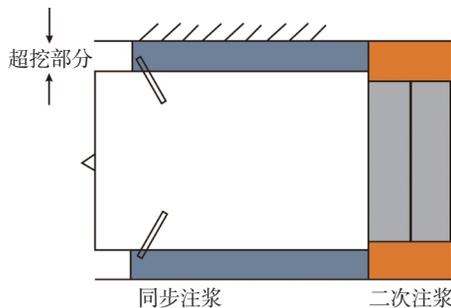


图3 同步注浆和二次注浆示意图

2.3 管片二次补浆

管片二次补浆可作为盾构同步注浆的补充手段,其主要作用为填补同步注浆未充填密实的壁后空隙。二次补浆应尽量靠近盾尾,但为了不使浆液击穿盾尾刷致使盾构密封破损,故需固定距离注入特定浆液在管片外部形成包裹状的止浆环,在止浆环间采取较大注浆压力,保证盾构管片壁后注浆的密实,此处可采用注浆量与注浆压力双重标准进行控制,若存在大量注浆仍无法达到注浆压力情况,应立即查明浆液是否击穿止浆环,确保未对盾构造成影响后继续注入一定浆液后停止注浆。

2.4 超前地质预报及钻孔注浆

超前地质预报及钻孔注浆为盾构通过后,已完成上述三种措施后的最终补救措施。其核心原理为,盾构已通过目标区域,刀盘转动及土体骨架结构破坏形成的土体竖向位移已大致传递至地表硬化层下部,此时可通过地质雷达、监测数据发展趋势及人工开挖探坑确定盾构沿线是否存在空洞,若存在空洞可根据实际情况,选择进行路面破碎回填土石方或进行钻

孔注浆来保证地上及地下既有建构筑物的稳定与安全(见图4)。

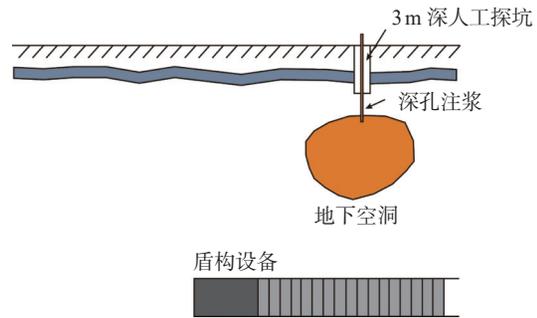


图4 深孔注浆示意图

3 实例验证

本文依托成都轨道交通17号线B标工程,根据实际工程中长期降水导致土层中配变化对盾构施工的影响,验证理论结果的准确性。

3.1 工程概况

明光站—九江北站盾构区间左线起始里程ZCK68+839.704,终点里程ZCK71+019.851,长度为2180.147 m,最小曲线半径为R-600 m,纵断面最大坡度28%;隧道断面形式采用圆形,刀盘开挖直径8634 mm,管片外径8300 mm,内径7500 mm,衬砌为装配式钢筋混凝土管片,管片厚400 mm、管片幅宽1500 mm(见图5)。

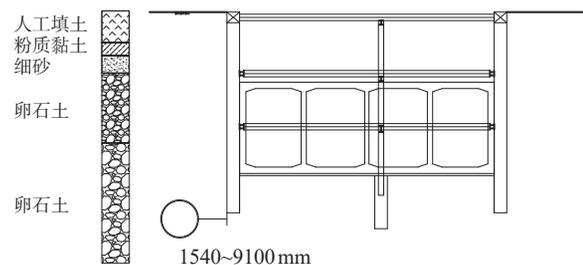


图5 盾构与明挖结构相对位置关系图

盾构区间约1 km范围位于明挖区间基坑两侧,明挖区间降水施工过程中,砂卵石地层中大量细颗粒流失,形成砂卵石骨架结构。此范围内盾构位于成新蒲快速路下。埋深24.0 m左右,盾构距明挖区间最小净距仅为1.54 m。盾构侧穿既有明挖结构区域的地质情况自上而下分别为人工填土、粉质黏土、细砂、卵石土,其中卵石土粒径随深度增大而增大,盾构全断面位于粒径60~200 mm的砂卵石土地层中,卵石土的间隙由中粗砂填充。基坑深17.5~26.2 m,地下水位位于基坑底板以下0.5 m左右,为潜水及裂隙水,无承压水层。施工顺序为先进行明挖施工,后进行盾构侧穿施工。地表沉降监测点沿盾构掘进方向保持监测点间距5 m沿线布设,每30 m设置一个监测断面。

明挖区间降水井布置如图 6 所示。



图 6 明挖区间降水井布置平面示意图

3.2 盾构进入长期降水区域对地表竖向位移的影响

明挖区间最先开始施工,目前主体结构均已施工完毕,总降水历时一年半。由于降水时间过长,在长期降水过程中,地层中细颗粒土体流失较为严重。盾构从未受到降水影响区域进入降水影响区域后,在保持盾构掘进参数及埋深不变情况下,施工引起的地表沉降迅速增大,且土体位移传递速度显著增加。施工引起的地表沉降最大可达 20~30 mm,已超过沉降控制值,故盾构暂停掘进,针对当前情况下盾构安全掘进进行分析,形成多角度、多手段同步注浆进行沉降控制。经对比分析不同阶段盾构沉降比例可以发现,盾构未进入长期降水区域表现出沉降占比与常规盾构掘进沉降占比接近,最大沉降阶段为吨位脱出后,其次为刀盘到达时与后期固结沉降。而盾构进入长期降水区后沉降占比较大阶段为刀盘到达时及后期固结沉降阶段。经分析应为细小颗粒流失后原本骨架无法在刀盘扰动情况下保持稳定,表现出更大的沉降变形,而后固结沉降阶段则是盾构通过后,在土体自重及地下水搬运作用下重新形成新的稳定体系,因此在这一阶段同样表现出较大的沉降变形(见图 7、图 8)。

3.3 采取控制措施后盾构推进对地表竖向位移的影响

施工单位对盾构尚未掘进区域首先进行人工开挖探坑进行地表浅表注浆,同时对同步注浆浆液进行试验改良,将浆液初凝时间由 6 h 改为 4 h,结实率提升。待地表浅表注浆结束后,盾构恢复掘进,浅表注浆范围随盾构掘进沿掘进方向前进,始终保持先于盾构刀盘前 30 m 左右。

盾构复推后,多方面注浆加固对控制地表竖向位移起到显著作用。盾构施工引起的竖向位移自 20 mm 变为 15 mm 内,且盾构通过并未表现出明显的固结沉降,经人工探挖及钻孔发现注浆效果良好,形成的浆脉饱满、密实,圆满地穿越了盾构穿越砂卵石地层细颗粒流失区域,最终成功抵达接收端(见图 9)。

经过多方面注浆加固后,盾构长期降水区域后其不同施工阶段沉降占比已向常规占比转化,最大沉

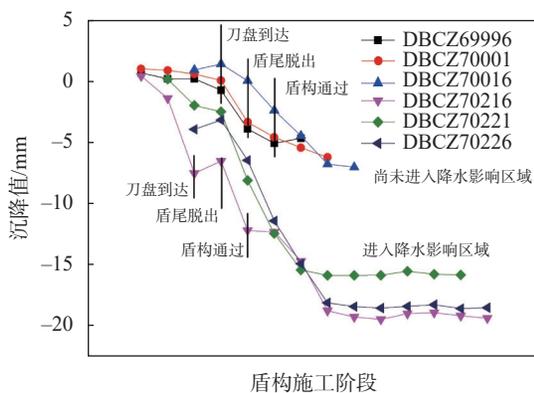
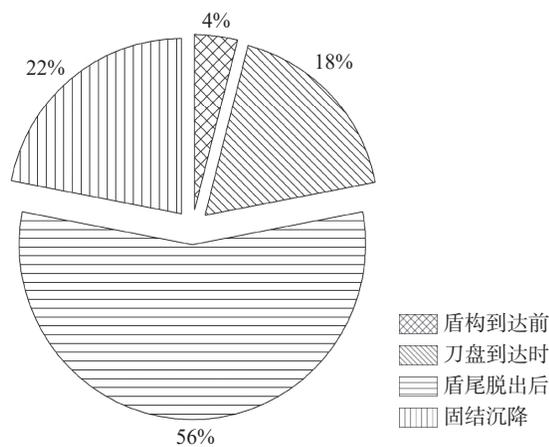
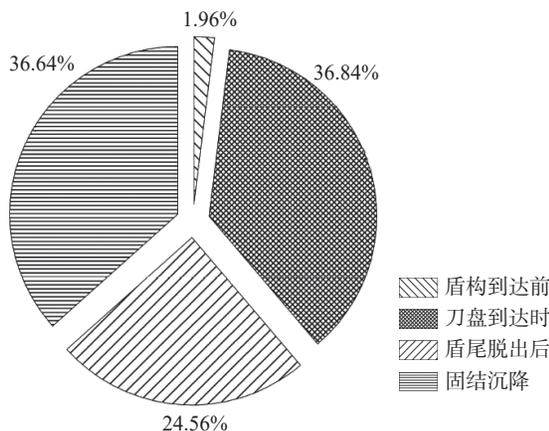


图 7 不同区域沉降时程曲线



(a) 盾构未进入降水影响区域



(b) 盾构进入降水影响区域

图 8 沉降占比示意图

降占比阶段为盾尾脱出阶段,此项数据可一定程度上表明注浆的有效性(见图 10)。

此外,在穿越既有明挖区间过程中,监测断面表现出的地表沉降曲线因明挖区间对土体位移具有一定的限制作用,从而表现出远离明挖区间部位地表沉降大,而靠近明挖区间部位地表沉降明显减小的趋势(见图 11)。

4 结论

(1) 基坑长期降水会导致砂卵石地层中细颗粒流

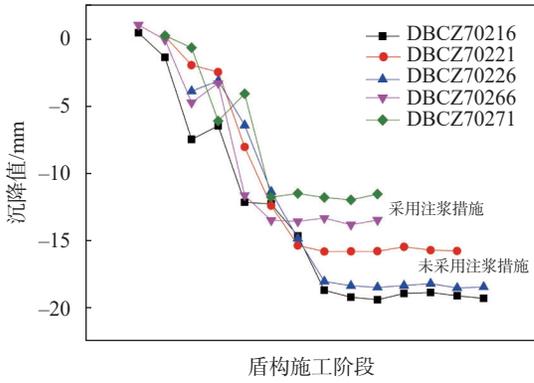
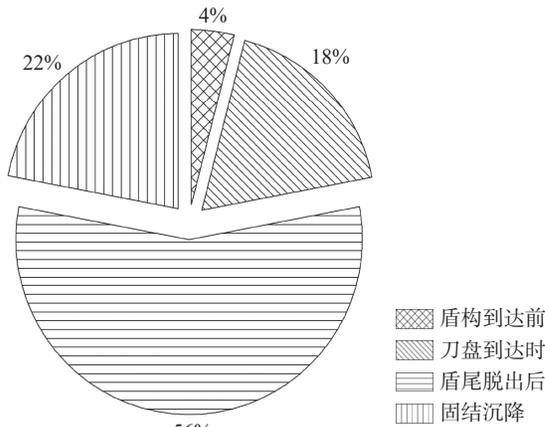
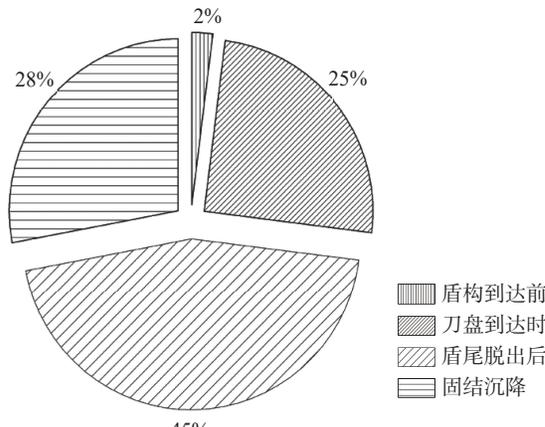


图9 注浆对地表沉降的影响



(a) 盾构未进入降水影响区域



(b) 盾构进入降水影响区域

图10 沉降占比示意图

失,形成骨架—孔隙结构。土体处于此种结构时,并不表现出较大的地表沉降,但受到盾构扰动后较未降水区域表现出土体竖向位移增大、竖向位移发展速度加快等情况。

(2)地表浅表注浆、钻孔深部注浆、改良同步注浆、优化同步注浆材料性质对盾构穿越长期降水导致细颗粒流失区域引起的土体竖向位移具有显著控制作用。

(3)未进入降水区域时,盾尾脱出阶段造成的沉

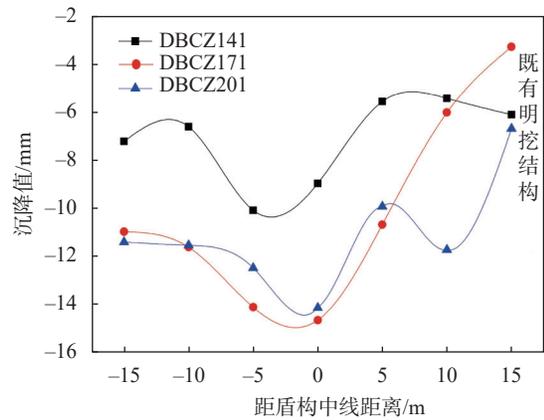


图11 既有明挖结构对土体位移作用

降占比最大,进入降水区域后,后期土体固结沉降占比增大,甚至超过盾尾脱出阶段引起沉降。

参考文献

[1] 郑刚,邓旭,刘庆晨.承压含水层减压降水对既有盾构隧道影响研究[J].岩土力学,2015,36(1):178-188.

[2] 胡绮琳.地下水对地铁工程影响及防治对策研究[D].广州:华南理工大学,2009.

[3] 黄震江,林尚连.盾构始发段管井降水土体加固技术[J].施工技术,2009,38(S2):273-275.

[4] 唐卓华,杨新安,徐前卫,等.富水砂层盾构脱困降水方案设计与效果分析[J].现代隧道技术,2016,53(4):172-178.

[5] 江华,张晋勋,江玉生.北京地铁砂卵石地层盾构推力组成及可控因素敏感性研究[J].现代隧道技术,2013,50(4):109-114.

[6] 江华.北京典型砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2012.

[7] 曲军彪.高压富水地层深基坑开挖降水及其对周围地表和建筑物沉降影响的研究[D].北京:北京交通大学,2007.

[8] 李潮.砂卵石地层土压平衡盾构关键参数计算模型研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.

[9] 胡浩.基坑降水对盾构隧道影响数值分析研究[J].中国水运(下半月),2014,14(6):329-332.

[10] 胡冰冰,路林海,李罡,等.富水砂卵石基坑封闭降水与回灌工程关键技术[J].都市轨道交通,2021,(3):92-97.

[11] 张明,梁天义.基坑降水对下卧地铁盾构隧道的影响[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2019,32(3):505-510.

[12] 夏晨欢,郑杰,吴初兴.井点降水在上海地区地铁盾构进、出洞施工中的应用[J].地下工程与隧道,2012,(2):38-41.

[13] 刘庆晨.邻近施工对天津既有地铁隧道的影响及保护研究[D].天津:天津大学,2013.

[14] 胡敏.砂卵石土物理力学特性及盾构施工响应的数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2014.