隧道压力拱理论及试验进展研究*

晏莉,喻少华,文胜

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:通过对隧道压力拱理论及试验进展的研究,基于弹塑性理论,根据研究手段不同将隧道 压力拱理论分为传统压力拱理论和动态压力拱理论,二者采用不同研究手段得到不同研究成果; 传统压力拱理论从围岩应力场出发,通过数值模拟展示围岩内部破坏区域及应力变化过程,但对 压力拱的内、外边界定义及拱体范围划分没有形成统一标准;动态压力拱理论从围岩位移场出发, 通过模型试验得到压力拱渐进性破坏过程的定性认识,渐进性破坏过程与实际隧道工程事故相 符,但破坏过程中应力变化规律无法与弹塑性应力场进行验证,仍有待研究;目前围岩压力拱模型 试验大多采用常规模型方案,相似材料的配比及力学参数存在差异,试验设备也未成体系,仍需进 行研究;透明土技术和 3D 打印技术在隧道工程中的成功应用对压力拱模型试验具有深远意义。

关键词: 隧道;压力拱理论;模型试验;相似材料 中图分类号:U451 **文献标志码:**A

文章编号:1671-2668(2021)02-0137-06

压力拱是隧道开挖后在一定条件下内部围岩通 过应力重分布或不均匀变形等自我调整的方式在隧 道周围形成的一种类似拱结构的围岩保护圈现象。 压力拱可使荷载传递路线发生偏移,这种现象虽无 法用肉眼观察,但该现象的存在正是围岩自稳能力 的体现。隧道围岩压力理论发展经历了古典压力理 论、散体压力理论和弹塑性形变压力理论3个阶段。 20世纪初出现古典压力理论,该理论把隧道上部全 部岩土体的重力当成作用在支护结构上的压力。20 世纪中期,随着开挖深度的增加,古典压力理论与实 际情况越来越不相符,于是出现了最早认识到岩土 体中存在压力拱效应的散体压力理论。对于浅埋隧 道,太沙基通过活动门试验证明了在砂土中存在压 力拱效应,他认为支护结构上的压力为上部土层重 力减去上部土层与邻近土层的摩擦力;对于深埋隧 道,俄国学者提出了自然平衡拱,认为支护结构上的 压力来自于围岩塌落拱区域内岩土体的重力。20 世纪后期,随着隧道施工工艺的进步及弹塑性理论 与数值软件的发展,围岩压力进入弹塑性解析解阶 段,其中具有代表性的有著名的芬纳公式和卡斯特 奈公式。随后,国内外学者基于弹塑性理论,通过数 值模拟与模型试验对压力拱进行了广泛研究,取得 了丰硕成果。根据研究方法的不同,可将围岩压力 拱理论分为传统压力拱理论和动态压力拱理论。该 文通过对隧道压力拱理论现状进行归纳总结,对比 当前围岩压力拱理论的联系和区别,为今后改进压 力拱研究方法提供方向。

1 隧道压力拱理论现状

1.1 传统压力拱理论

传统压力拱理论认为隧道一旦开挖完成后压力 拱的形态和位置就被确定而不再改变。基于该认 识,国内外众多学者以压力拱内、外边界及拱体范围 为出发点,对压力拱的形态和位置进行研究,通过应 力分析给出内、外边界的定义,在此基础上通过数值 模拟对压力拱的特性开展研究。

文献[1]最早对压力拱边界进行探讨,认为压力 拱内边界位于隧道拱顶,外边界是与隧道拱顶曲率 一致并通过隧道上部围岩中应力转变点的一条曲 线,压力拱内、外边界之间的范围即为拱体范围。

文献[8]对压力拱内、外边界进行定义,提出最 大主应力的最大值所对应的位置为压力拱内边界, 最小主应力值恢复到原岩应力处的位置为外边界, 并基于数值模拟方法得到了不同岩石中压力拱的形态和位置(见图 1),压力拱的形态即为隧洞周围由 内、外边界所包围的闭合式圆环。

文献[9]基于前人对压力拱形态的认识,根据弹 塑性理论将围岩划分为松动区、承载区、原岩区,其

^{*} **基金项目:** 国家自然科学基金项目(51408067);湖南省教育厅优秀青年项目(18B136);长沙理工大学桥梁与隧道工程重点 学科基金项目



中承载区即为压力拱范围(见图 2);同时提出将环 向应力增加至原岩应力水平处作为内边界,认为将 径向应力完全恢复到原岩应力位置定为外边界时, 外边界难以确定并会导致压力拱范围变大,因而提 出将原岩应力与径向应力做差值,当差值曲线驻点 前后斜率变化低于 10%时,该驻点处即为压力拱的 外边界。



图 2 围岩压力拱的范围

文献[10]对压力拱内、外边界确定方法进行改进,认为环向应力增加至与原岩应力水平处为压力 拱内边界,径向应力恢复到原岩应力的90%处为外 边界(见图3),并将数值模拟得到的应力数据与压 力拱内、外边界定义结合起来,得到压力拱演化规律 分为3个阶段:在围岩内部最先出现压力拱外边界; 随着开挖的进行,压力拱内边界逐渐形成;最后内、 外边界向围岩深处扩展并定形。

文献[11]基于简化模型,通过复变理论得到了 围岩二次应力场的弹性解,在弹性解的基础上结合



图 3 弹塑性围岩应力图

经典弹塑性理论与摩尔一库伦屈服准测,得到了围 岩二次应力场的解析解,并采用数值方法对其结果 进行验证,发现由解析解确定的围岩压力拱内、外边 界与数值计算结果相差很小,在一定意义上验证了 传统压力拱理论的正确性。

综上,传统围岩压力拱理论基于弹塑性应力场, 先对隧道围岩压力拱内、外边界及拱体范围作出定 义,通过数值模拟得到不同路径下内部围岩应力曲 线,再根据定义结合应力曲线确定不同路径下与内、 外边界相对应的点,最后将这些点进行曲线拟合确 定压力拱的形态和位置。采用该研究方法,可通过 改变隧道围岩影响因素的单值条件来研究隧道围岩 压力拱形态及位置的变化。但目前对围岩压力拱 内、外边界的定义及拱体范围划分没有统一标准,因 而由该方法得到的结论还需验证。

1.2 动态压力拱理论

动态围岩压力拱理论是基于模型试验提出的, 通过模型试验发现隧道开挖后压力拱的位置并不是 固定不变,而是在围岩的破坏过程中动态发展。根 据有无加载条件可将模型试验分为自重应力场条件 下隧道开挖模拟和加载条件下隧道开挖模拟,两种 方式得到的结果不同。另外,通过对模型试验隧道 开挖围岩中应力的监测,结合弹塑性应力场,可对压 力拱的演化规律、破坏机理进行分析。

1.2.1 自重条件下隧道开挖模拟研究

文献[12]基于对隧道塌方事故的分析,通过模型试验模拟自重应力场作用下毛洞的塌方破坏过程,得到了拱形塌方和塌穿型塌方两种围岩破坏模式,由此最早提出动态围岩压力拱理论(围岩渐进性破坏过程见图 4)。由于监测的应力数据变化很小,无法结合弹塑性应力场进行成拱机理分析,而地表沉降规律与真实隧道塌方过程相符。文献[13]还通过离散元软件对拱形塌方围岩破坏模式进行模拟,



图 4 开挖后隧道围岩渐进性破坏过程

数值模拟最终破坏形态与模型试验结果相差很小, 进一步论证了试验结果。

文献[14]通过模型试验对自重情况下围岩塌穿 型塌方的破坏模式进行模拟,监测从隧道开挖完成 到塌方完成这段时间内围岩应力的变化过程,将隧 道拱顶围岩环向应力大于原岩应力的区域定为压力 拱拱体范围,并以拱顶及拱腰环向应力明显增大作 为压力拱动态变化的标志,通过对试验数据的分析, 绘制出隧道开挖后压力拱的演化规律(见图 5),认 为压力拱随着围岩动态破坏而向围岩深处转移,压 力拱的位置在不断变化。



图 5 不同阶段压力拱位置(单位:m)

文献[15]基于试验结果,对压力拱演化规律进行总结分析,认为隧道开挖完成后,毛洞状态下隧洞最终会出现三类形态,分别为稳定的毛洞、拱形塌方(稳定的局部塌方)、塌穿型塌方,并将完整的塌穿型塌方过程划分为初始应力状态一隧道开挖一开始塌方一拱形塌方一塌穿型塌方。压力拱动态演变流程见图 6。

综上,通过自重应力场条件下模型试验,可得到



隧道开挖后毛洞最终会呈现 3 种形态,并可分析动态围岩压力拱的演化规律。但由于自重情况下围岩中应力很小,监测的应力数据无法完全与弹塑性应力场相匹配,无法通过试验量测的应力数据按照传统压力拱理论的分析方法对隧洞成拱机理进行分析(即由模型试验得到的应力数据与由数值模拟得到的应力数据不匹配)。因此,有学者通过加载(改变埋深)的方式对隧洞破坏机理进行细化探究。

1.2.2 加载条件下隧道开挖模拟研究

为研究隧道破坏机理,文献[16]在隧道开挖稳 定的情况下,针对黏性和砂性材料进行加载试验,发 现:对于黏性材料,毛洞在加载过程中表现出洞室两 侧剪切滑移而后拱顶塌方的破坏模式;对于砂性材 料,洞室先出现二次抛物线形塌落拱,然后拱脚向两 侧移动,塌落拱滑裂面与普氏压力拱相符。其试验 结果对拱形塌方破坏机理进行了细化和完善。 文献[17]通过加载方式对变埋深(25~60 m) 下隧道围岩渐进性破化机理进行模型试验,再现了 隧道开挖后毛洞形成稳定塌落拱的全过程,记录了 该过程中围岩应力场的变化情况。试验结果显示: 围岩破坏区是隧道塌落荷载的来源,不仅存在于拱 顶区域,在拱腰及拱底也局部存在;试验过程中测得 的隧道环向应力与弹塑性应力场环向应力相符(试 验数据与弹塑性应力场结合),呈现先升高后逐渐下 降的态势,采用传统压力拱理论分析方法将环向应 力的最大值定义为压力拱位置,根据试验数据对压 力拱进行了动态演化。

文献[18]通过加载方式对深理(埋深大于 60 m)隧道破坏机理进行模型试验,再现了隧道开挖后 毛洞形成稳定塌落拱的情况,但得到了不同的结果: 随着加载的进行,先在隧道拱腰处形成 V 形楔形体 剪切范围,而后剪切范围从拱腰延伸至拱顶,最终在 拱顶形成拱形塌落破坏模式。结合测量的应力数 据,通过定义环向应力大于原岩应力区域为压力拱 拱体范围及最大主应力方向转变处为压力拱位置, 将深埋隧道围岩受力区依次分为松动区一压力拱拱 体一原岩区,该分区结果与文献[10]的相同。

文献[19]采用有限元强度折减法,将模型试验 与数值模拟相结合研究隧洞破坏机理,发现浅埋拱 形隧洞破坏来自拱顶,深埋隧洞来自拱腰;埋深较小 时,矩形和拱形隧道均会出现浅埋压力拱;随着埋深 的增大,矩形隧道浅埋压力拱会逐渐消失,而后形成 深埋压力拱,但拱形隧道不会形成深埋压力拱,只是 围岩初始破坏区域从拱顶转至拱腰。

综上,若由模型试验监测的应力数值与弹塑性 应力场相符,则可基于传统围岩压力拱研究方法通 过监测应力值对压力拱成拱机理进行分析,此时,基 于弹塑性应力场,由数值模拟与模型试验两种研究 方法得到的结果可综合起来分析。但自重条件下隧 洞破坏过程连续且迅速,由于围岩中应力很小,测量 应力无法表现隧道的渐进性破坏过程。因此,有学 者通过加载的方式研究隧洞破坏机理,加载情况下 隧道破坏过程随着加载值的增加而渐进变化,该方 式能将隧道破坏过程进行细化。随着加载情况下 隧道破坏过程随着加载值的增加而渐进变化,该方 式能将隧道破坏过程进行细化。随着加载重的增 加,内部围岩应力增加,测量应力能表现隧道围岩压 力拱动态变化过程。但该测量应力是由加载压力增 大所导致,不是由于隧道开挖后围岩进行应力重分 布形成压力拱时围岩的应力,与实际工程不符,所以 二者得到的结果能否联系起来讨论有待商榷。

2 隧道压力拱模型试验现状

2.1 模型试验方案

模型试验是基于相似原理解决大型复杂工程问题的重要手段,是对特定工程问题进行缩尺再现的一种方法。由于隧道模型试验采用的是真实的实体,当它满足相似原理时,能化解理论上无法解答的矛盾,直观地再现隧道开挖后围岩的塌落情况及应力特征,得到的试验结果既可与数值模拟结果进行验证,也可发现新的力学现象,从而进一步推动理论与数值模拟的发展。目前隧道模型试验大致可分为常规模型试验、离心模型试验、透明土试验三类,3种试验方案各有其优缺点:

(1)常规模型试验装置加工和操作简单,对仪器设备的要求低,因而试验成本低,特别是大规模试验,因土颗粒尺寸效应及边界效应小,具有很大优势,故在压力拱研究中应用最多。

(2)离心试验可直接利用原状岩土体在模型中 重现原位应力场和应变场,较简洁地实现"全相似"。 但其对设备及精度要求严格,试验费用高昂,还需在 离心机运转的过程中模拟开挖,难度较大。

(3)透明土试验可开展非介入式人工模型试验,利用 PIV 技术展现岩土体内部的变形过程。前两种压力拱的模型试验均建立在平面应变模型的基础上,不能真实地展现土体内部的变形情况,而透明土试验能解决该问题。但透明土材料中含有孔隙流体,在压力拱研究中必须进行全封闭、全自动化操作,对设备的要求较高,且透明土对围岩的力学参数模拟相差太大,故透明土模型试验还不能很好地应用于围岩压力拱研究。

目前对围岩压力拱研究的模型试验大多采用常 规模型试验,离心试验与透明土试验的应用不够广 泛。透明土技术与 3D 打印技术的发展及 3D 打印 技术在隧道工程中的成功应用对压力拱模型试验方 案的选择具有重要意义。

2.2 试验相似材料

离心试验采用原状岩土体即可进行试验,但常 规模型试验与透明土试验必须根据相似原理配制相 似材料才可进行,相似材料的选择和配比对模型试 验的成败起着关键作用。

2.2.1 常规物理试验相似材料发展历程

大量试验表明,采用单一天然材料作为相似材 料与原岩力学参数相差太大,需采用几种天然材料

山国从 1070 年王

按照一定比例进行配制才能对围岩进行模拟。意大利等国最早对模型材料进行研究,把模型材料分为 两类:一类是以铅氧化物和石膏为主料、砂石为辅 料;另一类以重晶石粉为骨料、环氧树脂及甘油为黏 结剂。中国从 1970 年开始对隧道相似材料进行研 究,取得了很多成果,目前以河砂、重晶石粉为骨料 及洗洁精为黏结剂的配制方法使用较多,其中具有 代表性的成果见表 1。

表1 常规模型试验相似材料发展历程

年份	研究文献	主要材料	
			辅助材料
2002	文献[22]	砂、石膏和膨胀土	水泥
2007	文献[23]	Fe ₃ O ₄ 粉末、重晶 石粉和石英砂	黏结剂
2010	文献[24]	砂:石膏:水泥:滑石粉:水=	1:0.6:0.2:0.2:0.35(质量比)
2004,2013	文献[25-26]	重晶石、石英砂	凡士林
2014	文献[27]	铁粉、重晶石粉、石英砂	松香酒精溶液
2007,2010	文献[13]、[18]	重晶石、砂石膏、	丁喜 进大流 进计性
2015,2016	文献[15]、[28]		口育、优化被、优洁有
2018	文献[29]	石英砂、黏土	石膏、洗衣液、水

2.2.2 透明土材料发展历程

透明土材料由透明土颗粒和孔隙流体组成,透 明土颗粒与孔隙流体具有相同的折射率,光线通过 时不会发生折射现象,因而这种材料是透明的。采 用透明土材料,利用光学观测和图像采集及处理等 技术,可深入研究隧道围岩内部岩土体变形规律,从 而不再局限于平面应变模型,对开展隧道工程研究 具有重要意义。国内虽然在透明土材料方面的研究 起步较晚,但也取得了不少成果,其中具有代表性的 成果见表 2。

表 2 透明土材料发展历程

年份	研究文献	主要材料
2005	文献[30]	无定形的硅粉和矿物油等材料
2006	文献[31]	用熔融石英砂和具有相同折射率的孔隙液体合成透明砂土
2008	文献[32]	无定形硅粉、硅胶及卤水等材料
2011	文献[33]	熔融石英砂和一定浓度的溴化钙溶液
2014	文献[34]	熔融石英砂和折射率与之相匹配的孔隙流体(2种无机溶液和3种有机溶液)
2016	文献[35]	体积比为 2.5:1 的 15 号白矿油和正十二烷混合液与无定形硅石粉末
2018	文献[36]	以 Carbopol [©] Ultrez、NaOH 粉末和纯净水为原材料,碳纳米材料掺入作为示踪粒子

3 结论

(1)基于弹塑性理论,根据研究手段不同可将 隧道压力拱理论分为传统压力拱理论和动态压力拱 理论,二者采用不同研究手段得到不同研究成果。 传统围岩压力拱理论认为隧道一旦开挖完成其压力 拱位置和形态就被确定而不再改变;动态压力拱理 论认为压力拱位置并不是固定的,而是在围岩破坏 过程中动态发展。从研究现状来看,这两种理论的 观点并不全面或者说是相互补充,仍有待研究。

(2) 传统压力拱理论从应力场出发,采用数值 分析方法,其研究结果能展示围岩内部应力场,并能 与解析解应力场结合起来分析。但目前对围岩压力 拱内、外边界的定义及拱体范围划分没有统一标准, 因而由该方法得到的结论还有待验证。

(3) 围岩动态压力拱理论从位移场出发,通过 模型试验,对围岩压力拱的渐进性破坏过程有了一 个定性的认识,渐进性破坏过程与隧道工程塌方事 故相似,但破坏过程中应力变化规律无法与解析解 应力场进行验证。在进行模型试验时,自重与超载 试验条件下相似材料的配比不相同(但均属于 IV 级 围岩)则隧洞的破坏机理也不相同,仍有待研究。

(4)目前对围岩压力拱的模型试验大多数采用 缩尺模型试验,相似材料的配比及力学参数存在差 异,试验设备也未成体系,仍需深入研究。对透明土 材料及 3D 打印材料的研究将改变模型试验方案选 择,其研究进展对围岩压力拱研究乃至岩土工程试 验具有深远意义。

参考文献:

- [1] HUANG Ziping, EINAR Broch, LU Ming. Cavern roof stability-mechanism of arching and stabilization by rock bolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2002, 17(3):249-261.
- [2] SONG H W,ZHAO J,WANG C.Study on the concept and characteristics of stress rock arch around caverns [C].Proceedings of Underground Singapore 2003, Singapore, 2003.
- [3] 王文谦.大跨度隧道围岩压力拱效应研究[D].北京:北 京交通大学,2018.
- [4] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等.地下工程围岩稳定分析 [M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [5] 张云,殷宗泽.软土隧道土压力问题的研究综述[J].水 利水电科技进展,1999(5):23-26.
- [6] KASTNER H.隧道与坑道静力学[M].同济大学《隧道 与坑道静力学》翻译组,译.上海:上海科技出版社, 1980.
- [7] TALOBRE J.岩石力学[M].北京:中国工业出版社, 1965.
- [8] 梁晓丹,刘刚,赵坚.地下工程压力拱拱体的确定与成 拱分析[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(3): 314-317.
- [9] 刘灼.连拱隧道围岩压力机理研究[D].石家庄:石家庄 铁道大学,2014.
- [10] 台启民,张顶立,王剑晨,等.软弱破碎围岩高铁隧道 压力拱演化规律分析[J].北京交通大学学报,2015, 39(6):62-68.
- [11] 傅鹤林,张加兵,陈伟,等.深埋圆形毛洞隧道围岩压 力拱范围研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2018,45(7):117-124.
- [12] 汪成兵.软弱破碎隧道围岩渐进性破坏机理研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [13] 汪成兵.均质岩体中隧道围岩破坏过程的试验与数值 模拟[J].岩土力学,2012,33(1):103-108.
- [14] 叶飞,毛家骅,刘燕鹏,等.软弱破碎隧道围岩动态压 力拱效应模型试验[J].中国公路学报,2015,28(10): 76-82+104.
- [15] 叶飞,韩鑫,刘燕鹏,等.隧道压力拱动态演变机制及 规律分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):158 -166.
- [16] 房倩,张顶立,王毅远,等.圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3): 564-571.
- [17] 朱合华,黄锋,徐前卫.变埋深下软弱破碎隧道围岩渐

进性破坏试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报, 2010,29(6):1113-1122.

- [18] 李英杰,张顶立,宋义敏,等.软弱破碎深埋隧道围岩 渐进性破坏试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2012,31(6):1138-1147.
- [19] 郑颖人,徐浩,王成,等.隧洞破坏机理及深浅埋分界 标准[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(10):1851 -1856+1875.
- [20] 吴海科.隧道围岩压力拱力学特性研究[D].贵阳:贵 州大学,2017.
- [21] 陈永辉,齐昌广,王新泉,等.透明土及其在岩土工程 模型试验中的应用研究进展[J].水利水电科技进展, 2011,31(6):69-73.
- [22] 蒋树屏,黄伦海,宋从军.利用相似模拟方法研究公路 隧道施工力学形态[J].岩石力学与工程学报,2002, 21(5):662-666.
- [23] 赵瑜.深埋隧道围岩系统稳定性及非线性动力学特性研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [24] 郑颖人,王永甫.隧道稳定性分析与设计方法讲座之 一:隧道围岩压力理论进展与破坏机制研究[J].隧道 建设,2013,33(6):423-430.
- [25] 王戍平.破碎围岩隧道的模拟试验研究[D].杭州:浙 江大学,2004.
- [26] 李倩倩,张顶立,张成平,等.不同埋深下地铁隧道围 岩破坏的试验研究[J].现代隧道技术,2013,50(6): 85-93.
- [27] 陈子扬,赵其华,彭社琴,等.深卸荷成因机理物理模 拟试验相似材料研究[J].长江科学院院报,2014,31 (9):93-98+104.
- [28] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等.跨断层隧道围岩渐进性 破坏模型试验及数值模拟[J].岩石力学与工程学报, 2016,35(3):433-445.
- [29] 黄戡, 詹艳云, 马启昂,等.基于正交设计的Ⅳ, V级围 岩相似材料[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2018,15(1):92-97.
- [30] 佘跃心.基于透明介质和颗粒图像技术的土体变形测 量研究进展[J].勘察科学技术,2005(6):7-10.
- [31] 吴明喜.人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D].大 连:大连理工大学,2006.
- [32] 王秀华,宰金氓,蒋刚,等.用于透视土体内部变形的 透明材料的研究[J].常州工学院学报,2008,21(10): 270-273.
- [33] 孙吉主,肖文辉.基于透明土的盾构隧道模型试验设 计研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(5):108-112.
- [34] 李亮.透明土合成及物理力学特性研究[D].杭州:浙 (下转第 146 页)

综上,该工程电力隧道下穿长沙地铁3号线合 理的加固措施为穿越区地铁左右线两侧和中间富水 砂卵石地层加固区采取袖阀管竖向注浆加固方式, 正对地铁3号线左右线正下方富水砂卵石地层采取 斜向袖阀管注浆加固,穿越段加固区四周采用帷幕 注浆加固。

5 结论

(1)电力隧道直接下穿长沙地铁3号线时,地 铁竖向位移主要出现在电力隧道掘进方向的正上 方,掘进正上方位置对应管片竖向位移最大,远离电 力隧道两侧管片竖向位移逐渐减小。地铁3号线隧 道结构最大竖向位移为28.86 mm,远大于规范中不 超过5 mm的控制要求,会破坏地铁3号线隧道结 构,电力隧道不能直接下穿地铁3号线,对穿越段富 水砂卵石地层必须采取加固措施。

(2)隧道盾构下穿敏感建(构)筑物时,穿越段 富水砂卵石地层可采取袖阀管注浆加固或袖阀管注 浆加固和帷幕注浆加固相结合的措施。对于富水砂 卵石地层,这两种加固措施都会减小隧道盾构对地 表的扰动效应,可推广运用到其他敏感建(构)筑物 基础等加固。

(3)该工程电力隧道盾构下穿长沙地铁3号线 合理的加固控制措施为穿越区地铁左右线两侧和中 间富水砂卵石地层加固区采取袖阀管竖向注浆方 式,正对地铁3号线左右线正下方富水砂卵石地层 采取斜向袖阀管注浆加固,穿越段加固区四周采用 帷幕注浆加固。

参考文献:

- [1] 杨书江.富水砂卵石地层盾构法施工地表坍塌原因及 对策[J].都市快轨交通,2011(1):77-79.
- [2] 朱忠隆.软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J].岩 土力学,2001,22(1):56-59.
- [3] 邢雪生.大直径盾构江底掘进对土体的扰动及穿越岩 溶区风险控制[D].长沙:中南大学,2017.
- [4] 施成华,彭立敏.浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与

变形[J].中国铁道科学,2003,24(4):87-91.

- [5] PECK R B.Deep excavation and tunneling in soft ground[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969:225-325.
- [6] CLOUGH G W, SCHMIDT B.Design and performance of excavations and tunnels in soft clay [J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1981:569-634.
- [7] 张会刚,姜志玲,章玉伟.深圳地铁隧道邻接施工沉降数值模拟研究[J].铁道工程学报,2009(10):55-58+63.
- [8] 王非,缪林昌,黎春林.考虑施工过程的盾构隧道沉降 数值分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1): 2907-2914.
- [9] 姚海波,王梦恕,张顶立,等.盾构隧道下穿地面建筑物的安全评价与对策[J].岩土力学,2006,27(1):112-116.
- [10] 施成华,彭立敏,刘宝琛.浅埋隧道开挖对地表建筑物 的影响[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3310 -3316.
- [11] DING Zhi, WEI Xiang, ZHANG Tao, et al. Analysis and discussion on surface settlement induced by shield tuimel comtruction of adjacent sructure [J]. Disaster Advances, 2012, 5(4):1656-1660.
- [12] 姜忻良,赵志民,李园.天津地铁盾构施工对邻近工程 设施影响的动态模拟[J].天津大学学报,2006,39 (2):188-193.
- [13] 贺美德,刘军,乐贵平.盾构隧道近距离侧穿高层建筑 的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3): 603-608.
- [14] 丁祖德,彭立敏,施成华.地铁隧道穿越角度对地表建 筑物的影响分析[J].岩土力学,2011,32(11):3387-3392.
- [15] 黄启舒,孟庆生.公路隧道下穿既有桥梁的施工影响及 工程措施研究[J].公路与汽运,2019(5):144-146.

「36〕 孔纲强,周杨,刘汉龙,等.新型透明黏土制配及其物

理力学特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):

收稿日期:2020-03-16

(上接第142页)

江大学,2014.

[35] 宫全美,周俊宏,周顺华,等.透明土强度特性及模拟 黏性土的可行性试验[J].同济大学学报(自然科学 版),2016,44(6):853-860.

收稿日期:2020-07-23

2208-2214.