

明挖法地下装配式结构接缝防水技术探讨

黄明利¹, 杨泽¹, 谭忠盛¹, 王文正²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市政建设集团有限责任公司第三工程处, 北京 100176)

摘要: 装配式结构与传统的现浇结构相比具有节能、环保、节省模具、工期较短等特点, 已在地上建筑中获得了飞速发展。由于地下环境复杂, 地下装配式结构接头部位的防水处理成为难题, 因此, 地下装配式结构近几年在我国才刚刚起步。本文在分析地下装配式结构的接头形式和防水技术现状的基础上, 提出了应用环氧灌浆料对预制装配式结构接头进行灌封, 通过试验研究了环氧灌浆料本身及其黏接混凝土的力学性能。同时还针对明挖法修建的技术特点, 介绍了基坑肥槽预拌固化土回填技术, 阐述了预拌固化土对地下工程结构防水的作用, 研究成果可供类似工程参考。

关键词: 预制装配式结构; 地下结构接缝; 环氧灌浆料; 预拌固化土; 防水技术

中图分类号: TU501 **文献标识码:** A

Waterproofing Technology for Underground Fabricated Structure Joints Based on the Open Cut Method

Huang Mingli¹, Yang Ze¹, Tan Zhongsheng¹, Wang Wenzheng²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Municipal Construction Co., Ltd. Third Agency, Beijing 100176, China)

Abstract: Compared with traditional cast-in-place structures, fabricated structures have the characteristics of saving energy, protecting the environment, eliminating mold, and short construction times. Fabricated structures have been developed rapidly in above-ground buildings. However, the use of underground fabricated structures in China has only recently begun. Owing to the complexity of the underground environment, waterproofing underground fabricated structure joints remains a problem. In this paper, based on an analysis of the joints of an underground fabricated building and of the current state of waterproofing technology, we propose the use of an epoxy grouting material, which is used to pot the prefabricated structure joint, and study the mechanical properties of the epoxy grouting material and its bonded concrete. At the same time, we introduce backfilling technology for prefabricated solidified soil in the foundation pit, and expound the effect of the prefabricated solidified soil on the waterproofing of the underground engineering structures. The research results are good references for similar engineering projects.

Keywords: prefabricated structures; underground structure joint; epoxy grouting material; prefabricated solidified soil; waterproofing technology

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2017-11-30

通讯作者: 黄明利, 北京交通大学, 教授, 研究方向为隧道及地下工程施工力学与环境影响控制技术; E-mail: huang_mingli@126.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市地下空间开发规划战略研究”(2015-XZ-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

随着我国城市化进程的不断加速，城市用地紧张以及路面交通拥堵等问题越来越突出，大力发展和利用城市地下空间是解决以上问题的有效途径。与此同时，伴随着建筑工业化的兴起，预制装配式结构的应用前景也变得越来越好，预制装配式结构是以预制构件为主要受力构件，经过装配连接而成的混凝土结构。与传统的现浇建筑相比，预制装配式建筑有很多优势，采用预制装配式建筑不仅节能、环保，而且工期短、成本低。我国地上装配式结构已经获得了飞速的发展，但是地下装配式结构才刚刚起步。结构接头是预制装配式结构的薄弱部位，地上装配式结构在结构接头处仅需要解决连接强度的问题；地下装配式结构在接头处不仅需要解决连接强度的问题，而且还需要保证接头处的防水性能。

二、地下装配式结构的接头形式

为了解决地下装配式结构的防水问题，首先需要对现有的装配式结构接头形式进行了解，地下装配式结构宜采用预应力连接、机械连接、焊接连接，榫槽式连接或承插式连接 [1]。

预应力连接是对预留的钢筋或者钢丝进行预应力张拉，然后再将物件连接起来的连接方式 [2]。预应力连接节点耗能较小，并且残余变形、损伤以及强度损失也较小。预应力连接在施工现场不再使用后浇混凝土，转而采用新型的预应力筋直接进行构件的拼装。

机械连接是将接头部位预留的孔洞或预埋的螺母用螺栓连接，机械连接方便快捷，但是普通的螺栓连接也存在很多问题，如在长期动荷载作用下螺栓容易松动，螺栓孔径及孔位易出现偏差，螺栓孔的存在会削弱构件截面的力学性能，接头的维修及

更换不便等。预应力连接和机械连接均不能保证结构的整体稳定性和防水效果。

焊接连接指的是用砂浆或混凝土做保护层将构件接头部位预埋的钢板或者型钢用锚固件焊接，高温的作用会使钢材材质变脆，同时焊接过程中产生的残余应力会使结构发生脆性破坏，这些因素都会影响结构的机械性能；但是焊接连接也有其优点，如无需进行现场湿作业、节省养护时间、缩短工期等。

榫槽式连接能够有效地提高接头部位抵抗弯矩的能力，而且这种连接方式变形量小，连接部位整体性能优越（见图 1）。焊接连接和榫槽式连接虽然整体稳定性和防水效果都能保证，但用这两种方法连接的接缝处都要用无机材料灌注，无机材料凝结硬化受温度限制，在低温地区不适用，且其黏接强度不高 [3]。

承插式连接适用于施工场地条件较差或易发生不均匀沉降的地区，承插式连接的柔性接头连接一般采用弹性密封橡胶圈和遇水膨胀橡胶圈的组合或复合形式（见图 2）。

三、地下装配式结构的防水技术

预制装配式结构在装配过程中会产生大量的拼装接缝 [4]，这些接缝的存在既影响了结构的整体稳定性，同时也给结构的防水性能带来了隐患。如果接缝处处理不当，未能在接缝处形成可靠的防水保护层，将有可能导致工程事故。目前，现浇混凝土施工常用的防水材料并不能满足地下装配式结构接缝处理的施工要求。

预制装配式地下建筑的防水技术有预制混凝土箱涵和叠合板式混凝土结构体系两种 [5]。预制混凝土箱涵主要在城市的地下综合管廊中应用较多；叠合板式混凝土结构体系防水包括外贴防水构造、普通防水构造和局部增强防水构造。

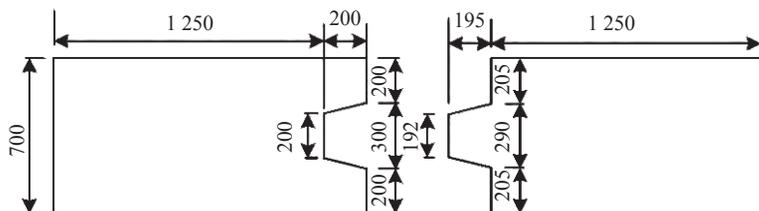


图 1 榫槽式连接（单位：mm）

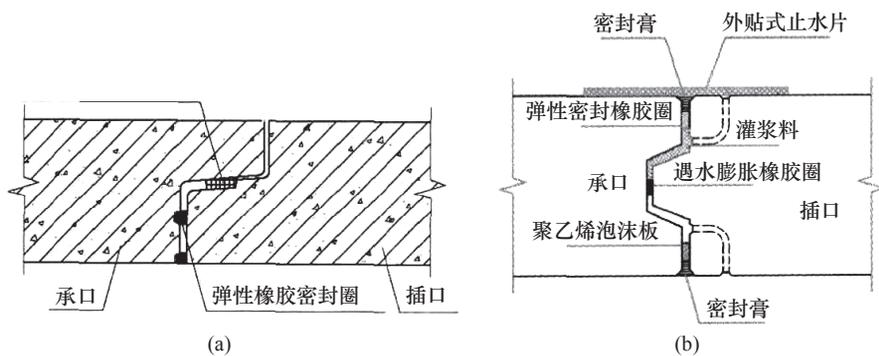


图2 承插式连接

(一) 预制混凝土箱涵

预制混凝土箱涵是一种箱型构筑物，采用钢筋混凝土制成，有施工快的特点，非常适合用于地下工程的施工。预制混凝土箱涵的连接方式主要分为带纵向锁紧装置连接和无约束锁紧装置连接两类，相邻的箱涵间往往采用遇水膨胀橡胶圈或者密封橡胶圈等进行防水处理，如图3所示。

(二) 叠合板式混凝土结构体系

叠合板式混凝土结构体系由叠合墙板和叠合楼板以及现浇混凝土层共同构成。叠合墙板是一种一体化墙体，它是由内外两层预制板及中间的格构钢筋安装完成后在两层板之间浇筑混凝土形成的。

图4所示是叠合墙板接缝的普通防水构造，这种构造方式是在接缝处放置钢筋笼，然后再浇筑混凝土一次成型。这种构造的防水效果非常好，叠

合墙板接缝的普通防水构造适用于无承压水地层。

图5所示为叠合墙板接缝的外贴防水构造，这种构造先是在叠合墙接缝处涂抹防水砂浆，然后再外贴防水卷材。由于预制构件的防水性能优异，可与防水卷材构成一个封闭空间，从而构成第一道防水层，内部预制墙板和中间现浇混凝土层可以构成第二道防水层，接缝处暗柱的存在提高了地下结构整体的防水效果。该结构可用于有地下承压水并且地质情况良好的地下工程。

图6所示为叠合墙板接缝的局部增强防水构造。该构造将接缝处设计为防水的薄弱部位，以预制墙板和防水砂浆构成第一道防水层，当接头处发生相对运动时，防水砂浆会产生破坏，同时形成漏水点，由于在现浇混凝土层接缝处设置有钢板固定的水平和垂直止水带，止水带和现浇混



图3 预制混凝土箱涵

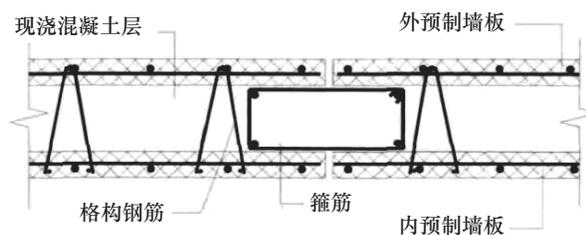


图4 普通防水构造 [5]

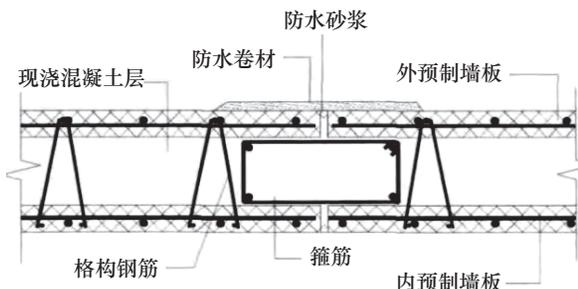


图5 外贴防水构造 [5]

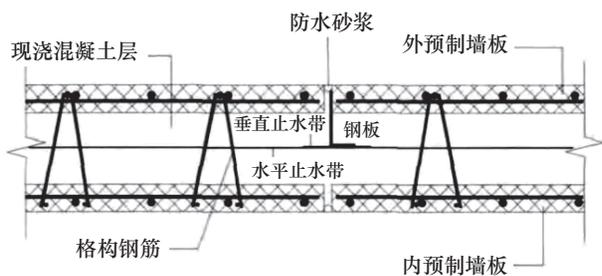


图6 局部增强防水构造 [5]

凝土形成了第二道连续防水层，该构造适用于有地下承压水存在且易产生不均匀沉降的地层。

四、环氧灌浆料的力学特性研究

在分析地下装配式建筑的接头形式和防水技术现状的基础上，本文提出了应用环氧灌浆料对预制装配式结构的接头进行灌注的方法，通过试验研究环氧灌浆料本身及其黏接混凝土的力学性能，来验证环氧灌浆料在预制装配式结构中的适用性。

(一) 灌浆料选型研究

环氧灌浆料由注浆材料改性而来，注浆材料可分为非化学浆和化学浆两大类，由于非化学浆如水泥浆和黏土浆等黏接混凝土后的黏接强度较低，不适合在本项目中应用；而如果采用改性水泥基材料，则有必要进行前期试验，研究其是否适用于本工程。

水泥基材料造价低廉，可以降低工程造价。改性水泥浆主要存在如下缺点：①水泥浆液容易产生离析，灌注过程中容易产生结块而堵塞管道；②水泥浆液黏接混凝土的抗剪强度大概为混凝土抗剪强度的1/3，黏接抗剪强度不足；③水泥浆液黏接混凝土的抗拉强度远小于混凝土的抗拉强度，黏接抗拉强度不足。所以，水泥浆液不适合应用在本工程中。

化学注浆材料的主要类型和性能如表1所示，由表1可知，水玻璃、丙烯酰胺类、脲醛树脂类、木质素类、聚氨酯类注浆材料的单轴抗压强度均可能小于C50（50 MPa）混凝土的单轴抗压强度，因此不宜在本项目中使用，丙烯酸酯盐类由于其比重为0.94左右，黏度仅为水的2/3，加入骨料后很容易产生沉淀，不宜进行添加骨料的改性，所以也不适合应用在本项目中，下面对环氧树脂类浆液进行改良研究。

本试验中的环氧树脂基液采用JGN-G型低温灌注建筑结构胶。由于纯环氧树脂具有收缩大、压缩弹性模量小、造价高等缺点，因此可通过添加石英粉改良环氧树脂浆液的配方，并进行物理、力学和可注性试验，以确定环氧树脂的最优配方。

通过大量的室内试验确定了在不同的浆料配比情况下改性环氧树脂的物理、力学性能。物理性能指标主要包括：密度、黏度、固化时间、收缩性、渗透性等；力学性能指标主要包括：抗压强度与弹性模量、混凝土剪切强度、混凝土正拉黏结强度等。

表1 化学注浆材料的主要类型和性能一览表

类型	主要分类	初始黏度 / ($\times 10^{-3}$ Pa·s)	凝胶时间	单轴抗压强度 / ($\times 10^5$ Pa)
水玻璃类	碱性水玻璃浆液	1~100	瞬时~数小时	2~40
	非碱性水玻璃浆液	1~100	瞬时~数小时	2~40
丙烯酰胺类	丙烯酰胺浆液	1.2	数秒~数小时	3~8
	水泥-丙烯酰胺	1.2	数秒~数小时	3~8
脲醛树脂类	脲醛树脂	1.3~6.0	几分钟~几十分钟	30~100
	改性脲醛树脂	1.3~6.0	几分钟~几十分钟	30~100
木质素类	铬木素、硫木素、木铵	2~5	几分钟~几十分钟	2~128
环氧树脂类	糠叉丙酮环氧树脂	6~100	几小时	400~1000
	低黏度环氧树脂	6~100	几小时	400~1000
丙烯酸酯盐类	甲基丙烯酸酯类	<10	几分钟~几小时	750~850
	丙烯酸盐类	<10	几分钟~几小时	750~850
聚氨酯类	聚氨酯预聚体类	12~161	几分钟~几小时	1~120
	异氰酸酯类	12~161	几分钟~几小时	1~120

(二) 试验介绍

通过设计黏接抗剪试验和黏接抗拉试验, 研究环氧灌浆料本身及其黏接混凝土在不同石英粉掺量和掺入不同粒径石英粉时的力学性能, 试验采用的基液为环氧树脂, 掺入的石英粉粒径分别为 $16.71\ \mu\text{m}$ 、 $18.49\ \mu\text{m}$ 、 $21\ \mu\text{m}$ 、 $26.26\ \mu\text{m}$ 、 $34.24\ \mu\text{m}$, 环氧树脂量与石英粉掺量的比值分别为 1:0、1:0.2、1:0.3、1:0.4、1:0.5、1:0.6、1:0.8、1:1, 试验温度设置为 $13\sim 14^\circ\text{C}$ 。

黏接抗剪强度的测定如图 7 所示, 试验加载采用力控, 加载速度为 $0.2\ \text{kN/s}$; 黏接抗拉强度的测定采用两块 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 的 C50 混凝土试块黏接而成, 试验加载采用位移控制, 加载速度为 $2\ \text{mm/min}$ (见图 8)。

同时为研究环氧灌浆料在预制装配式结构中的适用性, 我们以榫槽式接头为例, 设计了榫槽式接头足尺试验。足尺试验加载简图如图 9 所示, 试验对榫槽式接头进行了简化, 试验试件由分别带有榫和槽的两个长方体钢筋混凝土块组成, 中间榫槽处预留 $5\ \text{mm}$ 灌注环氧灌浆料。试验由千斤顶在试件

一端施加轴力用于模拟覆土荷载, 榫槽处弯矩由与榫槽等距离的两个大小相等的力来施加, 试验加载采用力控。

(三) 试验结果及分析

不同石英粉掺量条件下环氧灌浆料本身的抗压强度如图 10 所示。从图 10 可以看出, 环氧灌

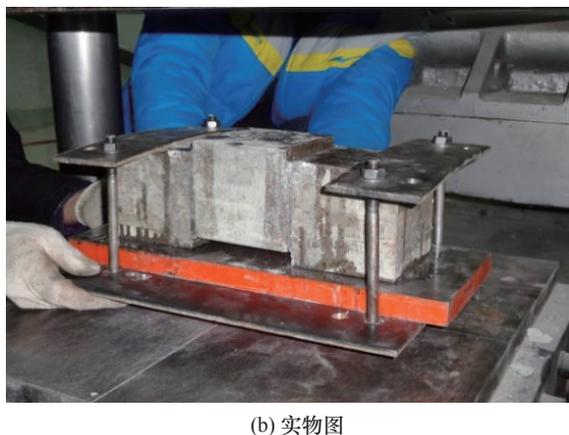
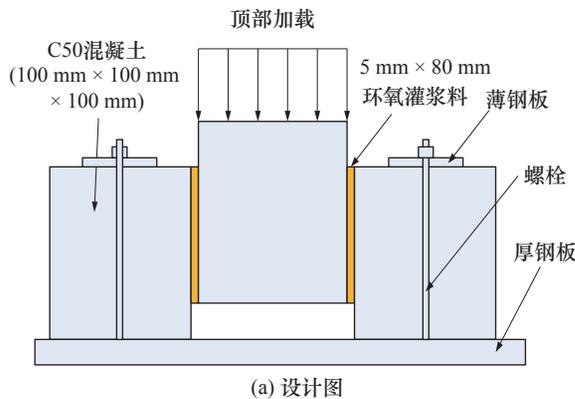


图 7 黏接抗剪强度试件图

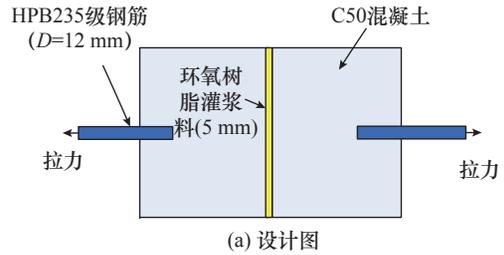


图 8 黏接抗拉强度试件图

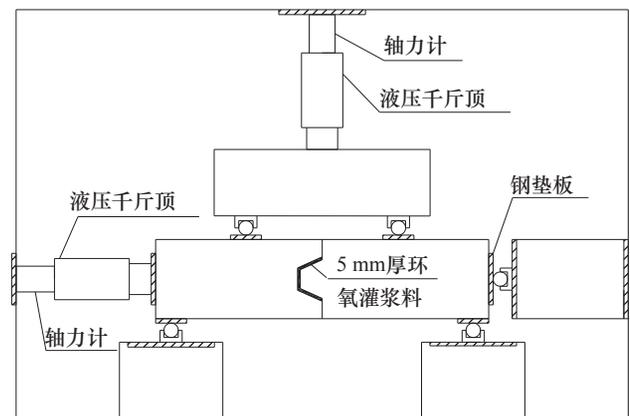


图 9 足尺试验加载简图

浆料的抗压强度均能超过 C50 混凝土的抗压强度 (50 MPa), 环氧树脂量与石英粉掺量的比值为 1:0.6~1:0.8 时, 抗压强度增长缓慢, 此时抗压强度已接近最大值, 石英粉掺量不同时, 环氧灌浆料本身弹性模量的试验结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出, 环氧灌浆料的弹性模量随着石英粉添加量的增加先逐渐增加, 后逐渐减小, 在 1: 0.5~1: 0.7 区间接近最大值。石英粉的弹性模量比环氧树脂的弹性模量大很多, 所以在加入石英粉后, 能够很好地提高环氧树脂的弹性模量。在加入一定量的石英粉填料后, 石英粉能与环氧树脂界面很好地结合, 从而抵制了环氧树脂裂纹的扩展, 超过这一范围, 石英粉的作用变小 [6]。石英粉掺量不同时, 环氧灌浆料黏接混凝土的抗剪强度如图 12 所示。

从图 12 可知, 当环氧树脂量与石英粉掺量的比值小于 1:0.5 时, 抗剪强度随着石英粉掺量的增

加而增大; 当比值为 1:0.5 时, 抗剪强度达到最大值 18 MPa, 比纯环氧树脂 (11.2 MPa) 的抗剪强度提高了 60.7%; 当比值大于 1:0.5 时, 抗剪强度逐步下降。这是由于石英粉掺量较少时, 石英粉颗粒均匀地分布在环氧树脂的基体中, 这时石英粉填料有利于降低胶黏剂体系的收缩作用, 从而降低胶黏剂固化过程中的残余应力 [7], 增加石英粉掺量会使得环氧树脂的抗剪性能提高, 但是在石英粉掺量超过一定值时, 石英粉填料产生的应力场由于相互交叠作用会导致胶黏剂的黏接性能和抗剪性能下降 [8]。当石英粉粒径不同时, 环氧灌浆料黏接混凝土的抗剪强度如图 13 所示。

从图 13 可知, 随着石英粉粒径 (D50) 的增大, 环氧灌浆料粘接混凝土的抗剪强度先逐渐增大, 在石英粉粒径 (D50) 为 21 μm 时达到最大值 24 MPa, 之后逐渐减小。这是因为当石英粉粒径 (D50) 不超过 21 μm 时, 在环氧灌浆料灌入试件后, 随着

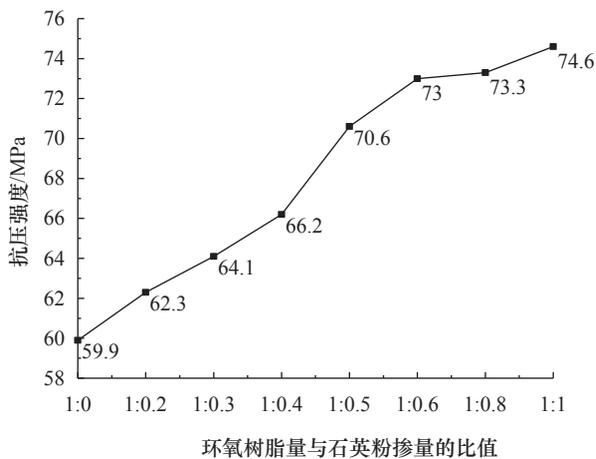


图 10 石英粉掺量对抗压强度的影响曲线

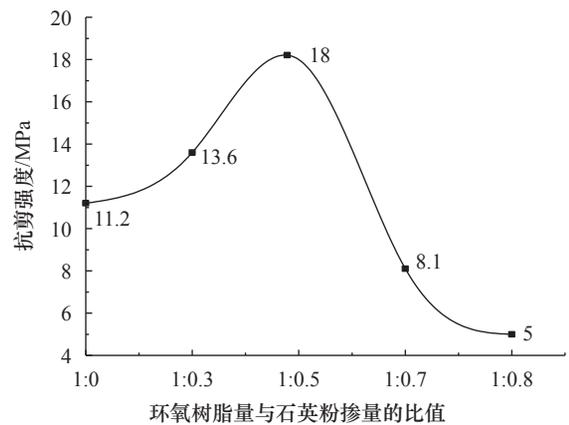


图 12 石英粉掺量对抗剪强度的影响曲线

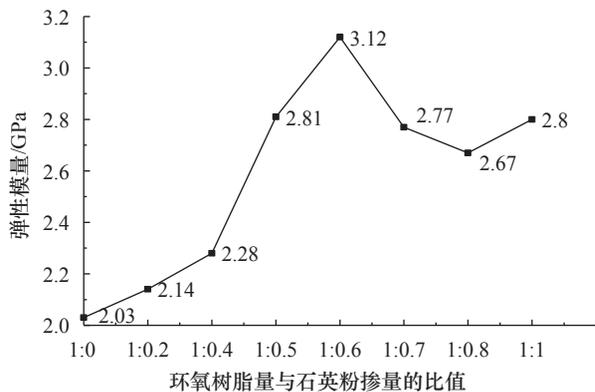


图 11 石英粉掺量对弹性模量的影响曲线

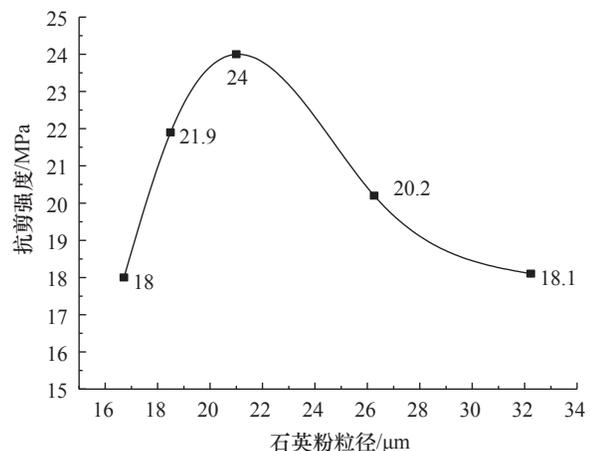


图 13 不同石英粉粒径的抗剪强度情况

石英粉粒径(D50)的增大,与混凝土接触的石英粉总面积减小,这使得更多的环氧树脂可以渗入混凝土内部,增大抗剪强度,同时环氧树脂本身与混凝土接触面的增大也会增大抗剪强度。当石英粉粒径(D50)超过21 μm时,在环氧灌浆料固化过程中,石英粉出现沉淀,使得部分环氧灌浆料与混凝土的接触面失去抗剪强度,从而降低总的抗剪强度。由此得出石英粉的粒径(D50)应该在18~25 μm范围内能起到较好的效果,石英粉掺量不同时,环氧灌浆料黏接混凝土的抗拉强度如表2所示。

从表2数据可以看出,环氧灌浆料黏接混凝土试件受拉时黏接面的抗拉强度远大于混凝土本身的抗拉强度,试件的破坏起因于混凝土被拉坏;试件抗拉强度的大小取决于混凝土抗拉强度的大小,与石英粉掺量及粒径关系不大。

足尺试验试件普遍的破坏形态如图14所示,由图14可以看出,足尺试验试件破坏不是沿着榫槽破坏,而是沿着钢筋与混凝土的接触面,破坏时榫头上的混凝土被剥离,说明环氧灌浆料用于黏接榫槽式接头是安全的。

为了得到试件在不同轴力下足尺试验的抗弯承载力,制定了三个试件破坏依据:一为接缝一侧张开量为3 mm,此时对应的弯矩值为 M_1 ;二为裂缝稳定开展阶段末期,此时对应的弯矩值为 M_2 ;三为榫槽处钢筋应力同时减小,此时对应的弯矩值为 M_3 。三种情况下取弯矩最小值作为此轴力下的抗弯承载力值,不同轴力下抗弯承载力结果如表3所示。

环氧树脂量与石英粉掺量的比值	抗拉强度			平均值
	第一组	第二组	第三组	
1:0	2.53	2.88	2.96	2.79
1:0.5	2.52	2.79	2.84	2.72
1:0.8	2.66	2.73	2.81	2.73



图14 足尺试验破坏形态

表3 不同轴力下抗弯承载力结果表

轴力工况/kN	M_1 /MPa	M_2 /MPa	M_3 /MPa	承载力/kN
0	—	87.5	—	87.5
500	230	250	—	230
1000	335	326	330	326
1600	471	470	480	470
2000	593	500	550	500

五、明挖基坑肥槽预拌流态固化土回填技术

为了提高地下装配式结构的防水效果,除了改善装配式接头的防水性能以外,还可以在地下结构外围构筑止水帷幕,从源头上防止地下水对地下结构的侵蚀作用。

预拌流态固化土的抗渗性能优于原位土体,在基坑施工可以使用由钻孔灌注桩和预拌流态固化土地下连续墙组成的复合结构,从而改善地下装配式建筑的防水效果。

同时某些地下工程中的基坑肥槽回填工程具有工作面狭小的特点,如果采用传统的原位土回填方法,无法使用大型机械作业,也无法将回填土体压实,对此类工程采用预拌固化土进行回填不失为很好的途径,预拌固化土密实性好、强度高、流动性强、抗渗性能好、压缩性低,有利于改善基槽回填的不均匀性等特点。

使用预拌固化土对明挖基坑肥槽进行回填后,可以有效地避免地下水对装配式结构的侵蚀作用,这对装配式地下建筑的防水十分有利。

预拌流态固化土由土、水泥、粉煤灰、砂和适量的水拌和而成,拌合后的坍落度为80~200 mm,强度达到0.5~10 MPa,水泥可由固化剂替代,拌合时根据土质和设计要求加入外加剂,当预拌流态固化土所用土料为砂土时,在拌合过程中无需再另外加入砂,如果预拌流态固化土所用土料不是砂土时,在拌合过程中要另外加入砂。预拌固化土的制备和拌和系统如图15所示。

预拌固化土浇筑设备应符合下列规定:①搅拌、浇筑设备的生产能力和设备性能应满足连续作业要求;②搅拌设备应具备固化剂、水、土等材料的配料和计量功能;③搅拌设备的计量偏差规定见表4。

浇注前应将固化剂、外加剂与水先行搅拌成固



图 15 预拌固化土的制备和拌和系统



图 16 预拌固化土回填

表 4 搅拌设备的计量偏差 %

原材料	计量偏差
固化剂、水	±2
土	±3
外加剂	±1

化剂浆液，混合料应使用专门机械搅拌，搅拌时间不少于 2 min，以和易性、流动性满足要求为准。固化土可采用罐车运输，采用泵送或溜槽浇筑，固化土搅拌至浇筑完成时间不应超过 3 h，固化土宜采用分层分块方式进行浇筑，浇筑作业应对称进行，浇筑高差不宜大于 1 m，首次浇筑不宜超过 0.5 m，上层浇筑作业应在下层终凝后进行。

当在大雨或持续小雨天气进行预拌固化土浇筑施工时，要在预拌固化土浇筑后立即进行覆盖养护直至填筑体硬化，在养护期间禁止机械和行人通行。在完成顶层浇筑后，应立即在填筑体表面覆盖塑料薄膜或土工布进行保湿养护，养护时间至少为 7 天。图 16 为预拌固化土回填施工图，预拌固化土与原状土体相比，抗渗性能较好，可以作为阻水带，对地下结构的防水十分有利，图 17 为预拌固化土回填 12 h 后的效果图。

六、结语

(1) 综合考虑石英粉掺量对环氧灌浆料本身抗压强度和弹性模量的影响，确定了环氧树脂量与石英粉掺量的最佳比值为 1:0.5~1:0.8。因为在此区间内，随着环氧灌浆料含有的石英粉掺量的增加，其抗压强度已接近最大值并且增量不大，且在此区



图 17 预拌固化土回填效果图

间内弹性模量的值都接近最大值。

(2) 综合考虑石英粉掺量对低温环氧灌浆料黏接混凝土的抗剪强度及工程造价的影响，同时保证榫槽式接头能充分发挥其作用，确定了环氧树脂量与石英粉掺量的最佳比值为 1:0.3~1:0.7。

(3) 综合考虑石英粉粒径对低温环氧灌浆料黏接混凝土的抗剪强度的影响，得出石英粉的粒径(D50)应该在 18~25 μm 范围内，此粒径范围内能得到较好的效果。

(4) 环氧灌浆料黏接混凝土的抗拉强度取决于混凝土的抗拉强度，与环氧灌浆料中石英粉的掺量及粒径大小关系不大。

(5) 足尺试验表明，用环氧灌浆料黏接榫槽式接头，接头处的力学性能有保证，可满足工程需要。

(6) 使用预拌固化土进行地下工程的基槽回填

有利于改善基槽回填的不均匀性,同时,预拌固化土的抗渗性能优于原位土体,这对地下建筑的防水十分有利。

参考文献

- [1] 周健民. 综合管廊变形缝接头的设计形式及适用性分析 [J]. 特种结构, 2016, 33(2): 60–65.
Zhou J M. Design form and applicability analysis for deformation seam and joint of municipal tunnel [J]. Special Structures, 2016, 33(2): 60–65.
- [2] 叶娟. 预制装配式混凝土结构节点连接性能分析 [J]. 科技风, 2015 (15): 155.
Ye J. Performance analysis of joints in prefabricated concrete structures [J]. Technology Wind, 2015 (15): 155.
- [3] 王明年, 李志业, 魏龙海. 隧道及地下铁道预制化技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
Wang M N, Li Z Y, Wei L H. Prefabrication of tunnels and subway [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
- [4] 张春, 许剑. 装配式建筑缝隙处理施工技术 [J]. 建筑施工, 2017, 39(6): 807–809.
Zhang C, Xu J. Construction technology for joint treatment of prefabricated building [J]. Building Constrecton, 2017, 39(6): 807–809.
- [5] 樊骅, 汪力. 预制装配式混凝土建筑防水技术 [J]. 住宅科技, 2016 (3): 20–23.
Fan H, Wang L. Waterproof technology of precast concrete buildings [J]. Housing Science, 2016 (3): 20–23.
- [6] 游敏, 曹平, 魏晓红, 等. SiO₂对环氧胶层弹性模量和泊松比的影响 [J]. 中国胶粘剂, 2006, 15(3): 12–14.
You M, Cao P, Wei X H, et al. Effect of SiO₂ filler on the elastic modulus and Poisson's ratio of epoxy layer [J]. China Adhesives, 2006, 15(3): 12–14.
- [7] 袁金颖, 潘才元. 环氧树脂固化时体积收缩内应力的本质及消除途径 [J]. 化学与粘合, 1998(4): 234–240.
Yuan J Y, Pan C Y. The essence and removing methods of interal stress due to volume shrinkage during kesin curing period [J]. Chemistry and Adhesion, 1998(4): 234–240.
- [8] 黎学东, 陈鸣才, 黄玉惠. 塑料的刚性填料增韧 [J]. 广州化学, 1996(3): 7–14.
Li X D, Chen M C, Huang Y H. Plastic toughened by rigid filler [J]. Guangzhou Chemistry, 1996(3): 7–14.