

DOI: 10.7672/sgjs2025110019

下穿既有地铁的新建盾构隧道壁后注浆 浆液配合比研究

吴俊^{1,2}, 陈志强^{1,2}, 简兴超^{1,2}, 李明晋^{1,2}

(1. 中建三局基础设施建设投资有限公司, 湖北 武汉 430073; 2. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430064)

[摘要] 为解决富水砂卵石地层盾构机下穿既有地铁引起的沉降问题, 依托成都轨道交通 27 号线一期工程, 开展富水砂卵石地层盾构隧道壁后注浆充填材料配合比与性能试验研究。为满足注浆浆液的高流动性和不包裹盾体的慢凝固特性要求, 采用正交试验研究不同配合比下注浆浆液的工程特性, 确定具有高流动性、低泌水率和慢凝固时间的最优配合比, 并将其应用于实际工程中, 最大地层沉降控制在 6mm 内, 适用于上述地层条件。

[关键词] 盾构; 隧道; 注浆; 配合比; 试验

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0019-05

Research on Mixture Ratio of Grouting Slurry Behind Wall of New Shield Tunnel Under Crossing Existing Subway

WU Jun^{1,2}, CHEN Zhiqiang^{1,2}, JIAN Xingchao^{1,2}, LI Mingjin^{1,2}

(1. China Construction Third Engineering Bureau Infrastructure Construction Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China; 2. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: To solve the settlement problem caused by shield machine undercrossing the existing subway in water-rich sandy pebble stratum, based on Phase-I Project of Chengdu Rail Transit Line 27, the mixture ratio and performance tests of grouting filling material behind shield tunnel wall in water-rich sandy pebble stratum are carried out. To meet the requirements of high fluidity of grouting slurry and slow solidification characteristics of unencapsulated shields, the engineering characteristics of grouting slurry under different mixture ratios were studied by orthogonal tests. The optimal mixture ratio of grouting slurry with high fluidity, low bleeding rate, and slow setting time was determined and was applied to practical engineering. And the maximum ground settlement is controlled within 6mm, which is suitable for the above formation conditions.

Keywords: shields; tunnels; grouting; material ratio; experiments

0 引言

在盾构掘进过程中, 土体会产生扰动变形, 上覆既有线路会产生变形和沉降, 壁后注浆控制变形为常用的应对手段, 相关研究包括新型注浆材料、高效复合注浆材料、废弃物改良浆液配合比及惰性浆液研究等^[1-8]。目前国内外学者对富水砂卵石地层壁后注浆做了大量研究, 依据地层特点可把注浆难点概括为以下几类: 卵石地层易发生突涌水及溃砂事故, 故浆液的加固效果需满足工程要求。富水

砂卵石的可注性差, 难以保证注浆扩散, 故对注浆材料的渗透扩散性有较高要求。受地表及周围建(构)筑物的影响, 地层易变形, 因此需保证安全开挖的前提下严格控制地层变形, 使浆液尽量渗透扩散并加固^[9], 由此看出, 注浆材料对工程加固起关键性作用。针对注浆改善地层情况, Xu 等^[10]对考虑地层裂缝处地下隧道施工过程进行数值模拟, 考虑裂缝特性和地应力状态下, 模拟隧道地层注浆加固和隧道开挖。Youn 等^[11]总结不同配合比注浆浆液的脱水固结过程, 依据测试注浆砂浆的固结过程、工作性能、固结性能、抗剪强度的变化确定了影响砂浆工作性能的主要参数。林文书等^[12]通过分

析不同性质的盾构泥砂对同步注浆材料性能的影响,发现最优黏粒含量和含砂量,应用该同步注浆材料取得了良好的效果。富水砂卵石地层灾害率受注浆材料的影响和制约,需制备考虑富水砂卵石地层特点且满足注浆要求及浆液性能等多方面的注浆材料,以实现对该特殊地层的加固要求^[13]。而现阶段针对在富水砂卵石地层的注浆材料及现场应用的研究比较单一,并且针对在富水砂卵石地层下穿既有地铁的新建盾构隧道壁后注浆研究较少。

基于此,采用正交试验法,以硅酸盐水泥、粉煤灰、钠基膨润土、细河砂为原料,通过室内试验测试不同配合比下的浆液性能。结合现场注浆试验评估新建盾构隧道下穿既有地铁时壁后注浆的有效性。

1 工程背景

成都轨道交通 27 号线一期工程洞子口站—沙河源站区间为盾构法施工,左线起止桩号为 ZDK26+331.803—ZDK27+034.310,短链 11.942m,长 690.565m,右线起止桩号为 YDK26+331.803—YDK27+034.310,长 702.507m。线路从洞子口站沿中环路向西敷设,下穿既有 5 号线区间后接入沙河源站,中环洞子口路为双向 8 车道,隧道平面布置如图 1 所示。本区间隧道共有 2 组曲线,最小曲线半径为 450m,线间距为 13~17m。顶部覆土约 11.1m,岩土层自上而下主要为第四系全新统冲积层粉质黏土、黏质粉土、细砂、中砂及卵石;下伏基岩为白垩系上统灌口组泥岩。该区间 5 号线和 27 号线分别穿越稍密卵石和中密卵石地层。

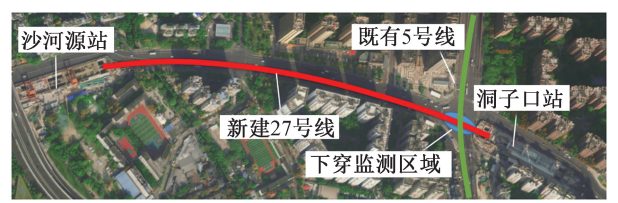


图 1 隧道平面布置
Fig.1 Tunnel layout

2 试验方案

2.1 原材料

采用 P · O 42.5R 水泥。钠基膨润土水分 11.4%、过筛率 99%、吸水率 344%。粉煤灰为 F 类Ⅱ级粉煤灰,细度 25.6%、需水量比为 96%、烧失量为 3.31%、强度活性指数为 86%。水为自来水,pH 值为 7.2。

2.2 正交试验设计

为获取适合富水砂卵石地层盾构隧道转弯段

壁后注浆浆液材料的最优配合比,根据凝结时间、泌水率、稠度、分层度、密度 5 个评价指标,设置 L9(3⁴)正交数组进行试验,其中 L 为正交表的标记,9 为正交表的行数,3 为各因子的水平,4 为正交表的列数。以 4 个因素开展试验,L9(3⁴)正交试验表设计试验如表 1 所示。水胶比为水与水泥加粉煤灰的质量比;胶砂比为水泥加粉煤灰与砂的质量比;膨水比为膨润土与水的质量比;粉灰比为粉煤灰与水泥的质量比。

表 1 浆液试验设计
Table 1 Slurry test design

编号	水胶比	胶砂比	膨水比	粉灰比
dx1	0.65	0.30	0.15	6.5
dx2	0.65	0.35	0.25	6.7
dx3	0.65	0.40	0.20	6.9
dx4	0.75	0.30	0.20	6.9
dx5	0.75	0.35	0.25	6.5
dx6	0.75	0.40	0.15	6.7
dx7	0.85	0.30	0.20	6.7
dx8	0.85	0.35	0.15	6.9
dx9	0.85	0.40	0.25	6.5

3 结果与分析

3.1 试验结果与极差分析

富水砂卵石地层盾构隧道转弯段壁后注浆浆液材料配合比正交试验结果如表 2 所示。编号 dx1 的试验组无法搅拌成具有流动性的浆液,不具备可泵性,仅作试验参考。根据注浆材料正交试验结果,对密度、稠度、分层度、泌水率、凝结时间 5 项评价指标进行极差分析。依据计算结果判断影响因素的重要程度,极差数值越大,表明该因素对试验结果的影响越大。因此,设置横坐标为各因素水平,纵坐标为各因素极差均值,做出极差均值主效应图,如图 2 所示。浆液密度主要受水胶比影响,其次为粉灰比,而胶砂比和膨水比的影响较相似且较小。浆液稠度的影响情况为水胶比略高于膨水比,胶砂比和粉灰比影响较弱。泌水率受水胶比、胶砂比、膨水比、粉灰比的影响程度依次增加。凝结时间的影响情况为水胶比最大,粉灰比其次,且均大于平均水平,膨水比较低,胶砂比最小。浆液分层度影响最明显的为粉灰比,胶砂比对浆液分层度的影响最小。上述结果可看出,水胶比和粉灰比对浆液的影响最明显。水泥和粉煤灰是本文浆液中的胶凝材料,通过水化反应生成胶凝产物,与细集料黏结形成坚固的凝固体。因此,结合试验情况,通过改变水、水泥和粉煤灰掺量的比值,确定满足富水砂卵石地层需要的最优浆液配合比。

表 2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

编号	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	稠度/ mm	分层度/ m	泌水率/ %	凝结 时间/min
dx1	—	—	—	—	—
dx2	2.10	101.00	6.70	1.225 0	7.00
dx3	2.11	96.00	13.80	1.650 0	9.83
dx4	2.13	103.80	18.30	1.237 5	11.17
dx5	2.13	106.00	8.10	0.200 0	10.25
dx6	2.10	95.00	9.30	1.074 1	8.60
dx7	2.14	109.00	15.50	0.575 0	13.17
dx8	2.15	102.40	23.40	1.457 8	15.00
dx9	2.09	116.00	12.00	0.292 7	8.46

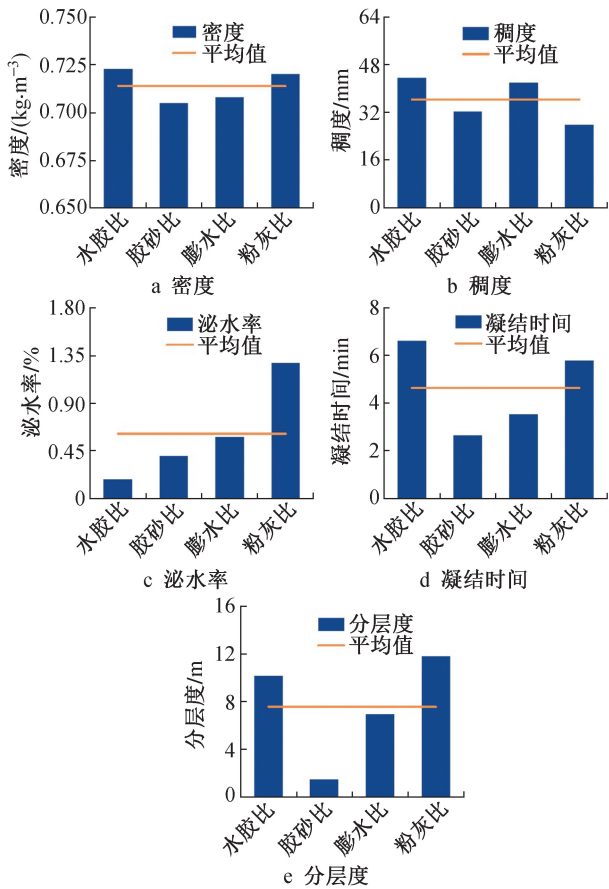


图 2 极差均值分析

Fig. 2 Range mean analysis

3.2 综合平衡法分析

3.2.1 浆液密度

密度随水胶比、胶砂比、膨水比、粉灰比 4 个因素的变化如图 3 所示。由图 3 可知,水胶比增大,密度逐渐增大,主要原因在于水和水泥发生水化反应,颗粒体积增大,且颗粒间的间隙变小。增加水可促使水与水泥充分反应,浆体凝结,密度增大。膨水比逐渐增加,密度逐渐减小,其原因在于水和膨润土的增加,导致浆液流动性变大,颗粒之间的空隙随之增大,密度变小。随着胶砂比增大,浆液

密度逐渐减小。这是由于胶颗粒数量增加,砂颗粒数量减小,而砂的密度大于胶的密度,砂含量减少使得整体的密实度相对减小,故浆液的密度也会随之减小。随着粉灰比的增大,浆液的密度随之增大,这是由于水泥和粉煤灰同时作为胶凝材料,掺入剂量增加,使黏结力增加,导致胶砂颗粒之间的间隙减小,浆液密度增大。

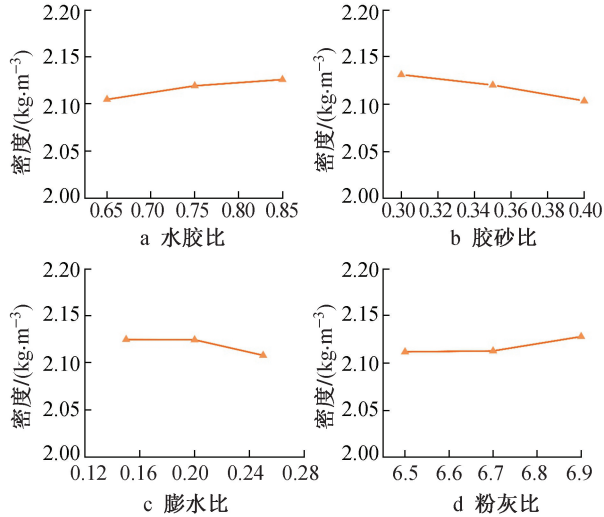


图 3 各因素对密度均值的影响

Fig. 3 Influence of various factors on the mean value of density

结合极差分析,以密度为评价指标,选择密度较大的配合比,以满足浆液分离性的要求。最佳配合比为水胶比 0.85、胶砂比 0.35、膨水比 0.2、粉灰比 6.9。

3.2.2 浆液稠度

浆液稠度随水胶比、胶砂比、膨水比、粉灰比 4 个因素的变化如图 4 所示。由图 4 可知,浆液的稠度随水胶比的增大而增大,本质上是水掺量增加,浆液被稀释,并且水具有流动性,使浆液中的固体物质分散得更均匀,导致浆液流动性增大。当膨水比增大,浆液的稠度也随之增加,只是增加的幅度不如水胶比对浆液稠度的影响大,膨水比的影响较特殊,是通过改变水和固体物质的溶解度和相互作用来实现的。适量情况下会增大浆液稠度,过多会降低稠度。在本文试验配合比的情况下,膨水比增大起正向作用。胶砂比增大,稠度减小,原因在于胶凝材料水化反应后对浆液的骨料砂粒包裹性增强,材料间的凝结效果显著改善,故浆液的稠度逐渐降低。粉灰比增大,稠度降低,即膨润土和粉煤灰掺入比例增大、水泥掺入比例减小,浆液的流动度和稠度呈减小趋势,这是因为本试验使用的是二级粉煤灰,水泥的磨圆度比粉煤灰更好,且粒度更细且均匀,而钠基

膨润土相比水泥有较低的毛细管压力和孔隙度,因此膨润土和粉煤灰掺量增加可以减弱浆液的流动性,该试验结论与文献[14]的结论相同。

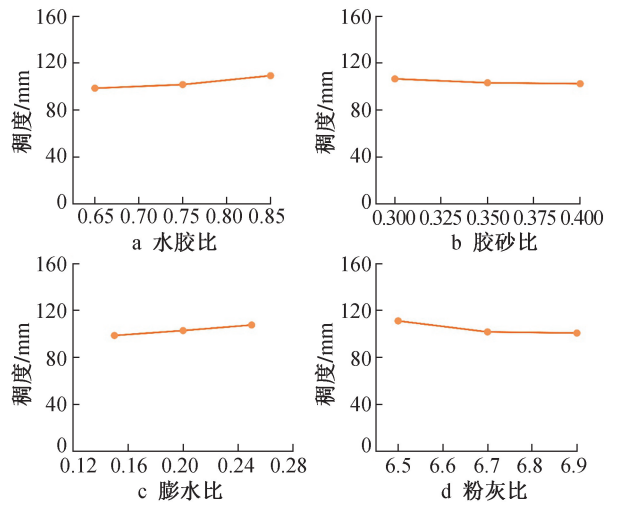


图 4 各因素对稠度均值的影响
Fig. 4 Influence of various factors on the mean consistency

水胶比的极差最大,可见水胶比对浆液稠度的影响最大。考虑工程上注浆的可泵性,以浆液的稠度作为评价指标,因此最佳组合配合比是水胶比 0.85、胶砂比 0.35、膨水比 0.25、粉灰比 6.7。

3.2.3 浆液泌水率

当测定浆液发生泌水,浆液稠度和密度发生变化,由此导致浆液在注浆时的稠度、密度等参数发生时空分布不均的情况^[15]。泌水率随水胶比、胶砂比、膨水比、粉灰比 4 个因素的变化如图 5 所示。由图 5 可知,当水胶比逐渐增大时,浆液泌水率逐渐减小,这是由浆液的浆凝材料及其他条件共同确定的。浆液的水化反应不断消耗游离水,使泌水率降低。浆液随着膨水比增大,钠基膨润土增加,导致浆液的含水率降低,浆液变稠,泌水率相应的逐渐减小。胶砂比、粉灰比对浆液泌水率的影响趋势相同,均呈现上升趋势。随着胶砂比增大,泌水率变化趋势比较平稳,即胶砂比的变化对浆液泌水影响不大。这是因为浆液中加入的骨料砂粒吸水能力降低了浆液固液分离的能力,故泌水率趋于稳定。粉灰比对泌水率影响最大,粉煤灰含量增加,胶凝材料含量减少,对水的消耗降低,并且二级粉煤灰颗粒光滑导致锁水效果不强。

粉灰比对浆液泌水率影响最大,粉煤灰的掺量增大,导致泌水率增大,相反胶砂比对浆液泌水率的影响最小。当泌水率作为评价指标时,在本试验条件下尽量降低泌水率,因此最佳配合比是水胶比 0.85、胶砂比 0.3、膨水比 0.25、粉灰比 6.5。

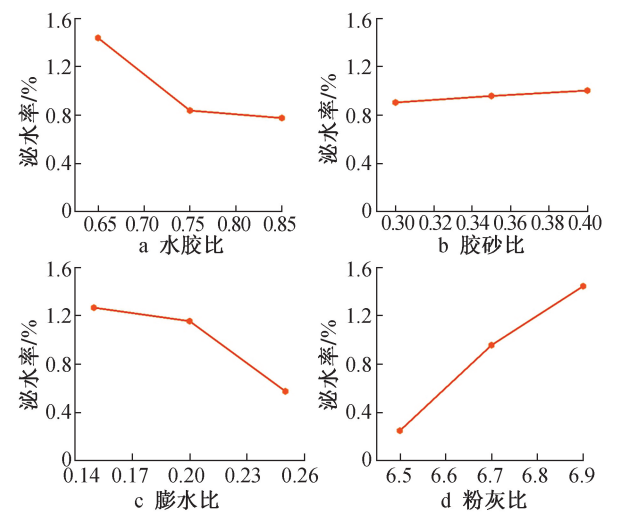


图 5 各因素对泌水率均值的影响
Fig. 5 Influence of various factors on mean bleeding rate

3.2.4 浆液凝结时间

凝结时间随水胶比、胶砂比、膨水比、粉灰比 4 个因素的变化如图 6 所示。由图 6 可知,随着水胶比和粉灰比掺量增大,浆液凝结时间总体上呈增加趋势,其原因在于浆液的含水量增大,胶凝材料在没有增加的情况下,砂浆的水分较多,水泥颗粒间的距离变大,使其反应速度减慢,故其凝结时间延长。粉煤灰对浆液凝结时间具有相同影响,粉煤灰作为胶凝材料,其凝结效果低于水泥,并且粉灰比主要通过影响混合物的稠度和稳定性来影响凝结时间,增加粉灰比可以增加混合物的稠度,使其更稳定,从而降低水分蒸发和化学反应的速度,导致凝结时间延长。胶砂比含量增大,浆液中的胶凝材料增多,水化反应速率变快,加快了浆液的凝结速率,凝结时间变短。

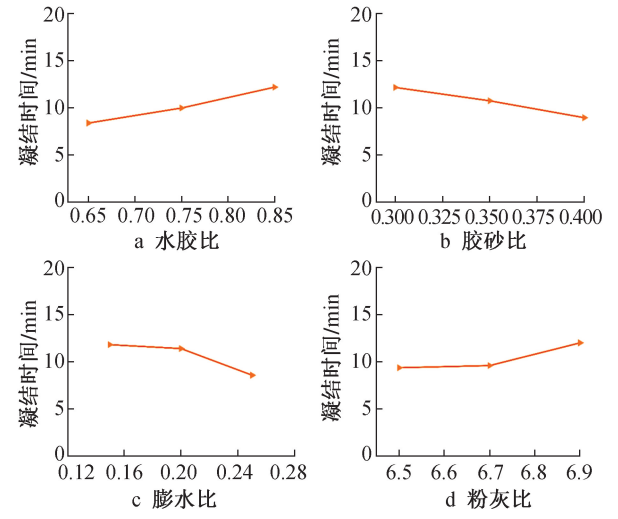


图 6 各因素对凝结时间均值的影响
Fig. 6 Influence of various factors on the mean setting time

当凝结时间作为评价指标,水胶比对凝结时间的影响最大。当需要充分考虑施工时间和浆液凝结时间所需的时间间隙时,要求凝结时间不宜太慢或太快,因此最佳配合比是水胶比 0.85、胶砂比 0.35、膨水比 0.25、粉灰比 6.7。

4 注浆效果检验

为验证注浆效果,对成都轨道交通 27 号线一期工程洞子口站至沙河源站进行注浆测试,选取高流动度、低泌水率、慢凝结时间的最优配合比,即水胶比 0.85、胶砂比 0.3、膨水比 0.15、粉灰比 6.5。通过在既有 5 号线沿线设置监测断面,以检验和判断注浆浆液配合比的有效性。通过室内配合比试验得出数据,进行极差分析和单因素分析后,选取最适合的浆液配合比,结合现场注浆效果,得出 5 号线受影响区域的最大沉降量<6mm,抑制地层沉降效果显著,施工期的地表最大沉降控制在 6mm 内,累计沉降均满足沉降<20mm 的控制要求^[16],说明本文浆液配合比预防地层沉降效果明显。

5 结语

- 1)通过正交试验研究富水砂卵石地层盾构隧道壁后注浆浆液材料配合比及性能,揭示了影响浆液性能的参数主要为水胶比和粉灰比。
- 2)水胶比对注浆浆液的工程性能影响最明显,可通过调控水胶比满足不同的工程需求。
- 3)将本研究浆液运用到富水砂卵石地层中,通过提前注浆的方式,利用浆液的高流动性和低泌水率,慢凝固效果对地层的渗透效果明显。
- 4)提出了浆液最优配合比参数为水胶比 0.85、胶砂比 0.3、膨水比 0.15、粉灰比 6.5,通过现场工程应用并监测沉降情况,监测数据表明该组配合比能够满足现场提前注浆各项要求,依据监测数据,施工期间盾构机下穿既有地铁引起的累计沉降均<6mm,满足扰动和沉降控制要求。

参考文献:

[1] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望 [J]. 西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.
HE C,FENG K,FANG Y. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2015,50(1):97-109.

[2] FANG Q, DU J M, LI J Y, et al. Settlement characteristics of large-diameter shield excavation below existing subway in close vicinity[J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (3): 882-897.

[3] 叶飞,王斌,韩鑫,等. 盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J]. 中国公路学报,2020,33(12):92-104.
YE F,WANG B,HAN X, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism[J]. China journal of

highway and transport,2020,33(12):92-104.

[4] 张箭,金俊杰,丰土根,等. 土压平衡盾构渣土浆液配比优化研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(4):748-757.
ZHANG J,JIN J J,FENG T G, et al. Optimization of mixture ratio of muck grout by earth pressure balance shield machine [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45 (4): 748-757.

[5] 李书进,刘源涛,厉见芬,等. 盾构废弃泥沙再生制备高性能注浆材料的试验研究[J]. 材料导报,2021,35(S2):275-278.
LI S J,LIU Y T,LI J F, et al. Experimental study on preparation of high performance grouting material from waste sand of shield tunnel construction [J]. Materials reports, 2021, 35 (S2): 275-278.

[6] 万泽恩,李树忱,赵一民,等. 富水地层盾构隧道同步注浆惰性充填材料配比与试验研究[J]. 土木工程学报,2021,54(7):123-132.
WAN Z E,LI S C,ZHAO Y M, et al. Experimental study on mix proportion of inert filling materials for synchronous grouting of shield tunnel in water-rich strata [J]. China civil engineering journal,2021,54(7):123-132.

[7] 沙飞,李术才,刘人太,等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(7):1420-1433.
SHA F,LI S C,LIU R T, et al. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout(EMCG) for water-rich sand strata[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(7):1420-1433.

[8] 田焜. 高性能盾构隧道同步注浆材料的研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
TIAN K. Study and application on high property grouting material used in synchronous grouting of shield tunnelling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2007.

[9] 原钰斐. 富水砂卵石地层膨润土基注浆材料试验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
YUAN Y F. The study of bentonite-based grouting formulation in water-rich sand and gravel stratum[D]. Beijing:China University of Geosciences,2018.

[10] XU X Y, WU Z J, WENG L, et al. Numerical investigation of geostress influence on the grouting reinforcement effectiveness of tunnel surrounding rock mass in fault fracture zones[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2024, 16 (1): 81-101.

[11] YOUN B Y, BREITENBÜCHER R. Influencing parameters of the grout mix on the properties of annular gap grouts in mechanized tunneling [J]. Tunnelling and underground space technology, 2014, 43:290-299.

[12] 林文书,王红喜,彭碧辉,等. 不同地层盾构泥砂对制备同步注浆材料性能影响研究[J]. 隧道建设, 2013, 33 (9): 715-719.
LIN W S,WANG H X,PENG B H, et al. A study on producing synchronous grouting materials using muck collected in shield tunneling in different strata [J]. Tunnel construction, 2013, 33 (9):715-719.

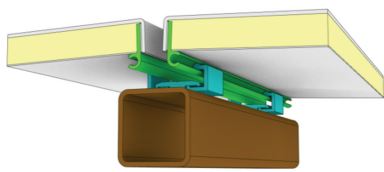


图 11 蜂窝板可调节转接件节点模型

Fig. 11 Cellular panel adjustable adapter node model

了塔冠全部的双曲面面板,形成了深化设计阶段优化异形幕墙面板的解决方案。基于 Rhino 和 GH 平台建立异形幕墙表皮模型,通过分析表皮模型的曲率划分面板类型,在 GH 中编写程序并运用遗传算法工具 Galapagos 优化双曲面板,降低了曲面幕墙的建造成本,提高了工程效益。

参考文献:

[1] 阙红军. BIM 技术在高层建筑双曲面玻璃幕墙设计中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修,2023(7):60-62.
QUE H J. Application of BIM technology in the design of hyperbolic glass curtain walls for high-rise buildings [J]. Interior architecture of China,2023(7):60-62.

[2] 周肖飞,张世豪,唐干,等. 埃及新首都 CBD 标志塔外幕墙工程 BIM 技术应用研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2020,12(2):44-49.
ZHOU X F,ZHANG S H,TANG G,et al. Study on application of BIM technology in outer curtain wall project of CBD tower in new capital of Egypt [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture,2020,12(2):44-49.

[3] 汪永平,蒋鸿鸽,蒋洁菲,等. 双曲钛锌板屋面深化设计方法 [J]. 施工技术,2020,49(16):51-54,69.
WANG Y P,JIANG H H,JIANG J F,et al. The deepening design method of titanium-zinc hyperbolic panel roof [J]. Construction technology,2020,49(16):51-54,69.

[4] 应俊. BIM 技术在复杂异形超高层幕墙项目中的应用——以武汉长江航运中心为例 [J]. 工程建设与设计,2022(15):148-150.
YING J. Application of BIM technology in complex special-shaped super high-rise curtain wall project—taking Wuhan Yangtze River shipping center as an example [J]. Construction & design for engineering,2022(15):148-150.

[5] 杨英豪. 济青高铁红岛站主站房外立面实现关键技术研究 [D]. 济南:山东建筑大学,2019.
YANG Y H. Key technology research on the facade of the main station building of Hongdao railway station in Jiqing high-speed railway [D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2019.

[6] 汪海英. BIM 工具选择系统框架研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2015.
WANG H Y. Research on the framework of BIM tools selection system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2015.

[7] 邹贻权,黄浩洲,夏绪勇,等. 成本导向下基于遗传算法的曲面幕墙设计优化 [J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(10):2049-2056.
ZOU Y Q,HUANG H Z,XIA X Y,et al. Design optimization of curved curtain wall based on genetic algorithm under cost orientation [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science),2022,56(10):2049-2056.

[8] 殷刚,魏铭江. 一种曲面铝板的现场成型技术探讨 [J]. 建筑机械,2022(5):110-113.
YIN G,WEI M J. Discussion on field forming technology of a curved aluminum plate [J]. Construction machinery,2022(5):110-113.

[9] EVINS R. A review of computational optimization methods applied to sustainable building design [J]. Renewable and sustainable energy reviews,2013,22:230-245.

(上接第 23 页)

[13] SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass [J]. Construction and building materials,2018,161:282-291.

[14] ZHAO Y,LIANG N X,CHEN H,et al. Preparation and properties of sintering red mud unburned road brick using orthogonal experiments [J]. Construction and building materials,2020,238:117739.

[15] 苗贺朝,王海,王晓东,等. 粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究 [J]. 煤炭科学技术,2022,50(9):230-239.

MIAO H C, WANG H, WANG X D, et al. Study on ratio optimization and performance test of fly ash-based impermeable grouting materials [J]. Coal science and technology,2022,50(9):230-239.

[16] 王晓晨,刘人太,杨为民,等. 考虑水泥浆液析水作用的水平裂隙注浆扩散机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(5):1005-1017.
WANG X C, LIU R T, YANG W M, et al. Study on grouting mechanism of horizontal fractures considering the bleeding of cement slurry [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(5):1005-1017.