

C100 高强大体积混凝土配合比设计及施工温控技术

唐曾智¹, 向晓峰¹, 郭 东¹, 柳宸宇²

(1. 海军研究院, 北京 100070; 2. 中建交通建设集团有限公司, 北京 100040)

摘要:随着混凝土向高性能、高强度方向发展,C100 高强大体积混凝土已经逐渐应用于超高层建筑、大跨度桥梁等重点工程领域,而在地下工程中使用 C100 高强大体积混凝土较少,相关的施工技术研究有限。本文以某地下工程综合应用 C100 高强大体积混凝土为研究对象,从工程施工环境着手,重点研究 C100 高强大体积混凝土配合比设计及施工温控技术。从配合比设计入手,通过数值模拟计算分析 C100 高强大体积混凝土温度场变化情况,采取施工工艺优化、内部冷却水降温、跳仓浇筑、表面保温隔热、冬季施工控制、智能测温及养护等温度控制技术。结果表明:在满足高强度指标前提下,该技术基本解决了大断面高强大体积混凝土施工中的水化热温升控制以及水化热温升引起的温度裂缝问题,达到了设计要求,确保了工程施工质量。

关键词:C100; 高强度大体积混凝土; 配合比; 温度控制技术

中图分类号:TU755

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)07-0056-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.07.093

Mix proportion design of C100 high-strength and large-volume concrete and construction temperature control technology

TANG Zengzhi¹, XIANG Xiaofeng¹, GUO Dong¹, LIU Chenyu²

(1. PLA Naval Research Academy, Beijing 100070, China; 2. China Construction

Communications Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: With the development of concrete in the direction of high performance and high strength, C100 high-strength and large-volume concrete has been gradually applied to such key engineering fields as super high-rise buildings and long-span bridges, while C100 high-strength and large-volume concrete is rarely used in underground engineering, and the related construction technology research is limited. The comprehensive application of C100 high-strength and large-volume concrete in an underground project is taken as the research object, and the design of C100 high-strength & large-volume concrete mix proportion and construction temperature control technology are studied from the engineering construction environment. Starting from the mix proportion design, the temperature field change of C100 high-strength and large-volume concrete is analyzed through numerical simulation, and such the temperature control technologies as construction process optimization, internal cooling water cooling, sequence pouring, surface insulation, winter construction control, intelligent temperature measurement and maintenance are adopted; Under the premise of satisfying the high-strength index, the control of hydration heat temperature rise and the temperature crack caused by hydration heat rise in the construction of large-section high-strength and large-volume concrete are basically solved, the design requirements are met and the construction quality of the project is ensured.

Key words: C100; high-strength and large-volume concrete; mix proportion; temperature control technology

地下工程目前主要采用普通混凝土结构,当采用普通混凝土时,一方面存在脆性大、抗拉强

收稿日期: 2023-12-30

作者简介: 唐曾智(1990—),男,工程师,从事地下工程设计与科研工作。

度低、抗侵蚀能力差、易开裂、功能单一等不足,施工质量难以保证;另一方面增加了工程的施工周期,提高了经济成本。高强混凝土具有耐久性好、强度高、变形小的性能优势^[1-2],将其应用于地下工程,不仅可以进一步推动地下工程坚固化、堡垒化,提升抗打击能力,减小地下工程结构尺寸,而且能够在确保地下工程使用功能的同时有效降低经济成本。

高强大体积混凝土配合比及其温度控制是施工过程重点关注的问题。高强大体积混凝土施工温度控制难度大,易因温度控制效果不佳而产生温度裂缝,导致结构的使用性和安全性受影响^[3]。李静等^[4]通过优化配合比,合理温控技术手段,使得 C80 大体积高强混凝土成功应用于超高层建筑中;于洪亮^[5]以某热带海岛工程为例,探讨了大体积 C100 高强混凝土原材料和配合比的选用、施工过程中的质量控制;王谦等^[6]配制的 C60 ~ C75 高强高性能混凝土,成功应用于煤矿井壁施工过程。然而,C100 高强大体积混凝土在地下工程中的应用较少,配合比设计和相关的施工温控技术研究有限。本文以某地下工程为例,通过开展高强度大体积混凝土配合比设计及现场温控技术相关研究,为地下工程高强度大体积混凝土施工提供一点参考。

1 工程概况

某地下工程位于我国北方地区,设计采用 C100 高强混凝土,地下主体结构长度为 80 m,宽度为 28 m,结构厚度为 2.15 m,浇筑方量为 4 816 m³,属于高强度大体积混凝土结构。工程施工季节为冬季,对混凝土的配合比设计、浇筑养护、施工质量、施工工期等提出了较高要求。工程一次性浇筑方量较大,在满足 C100 强度要求的条件下,防止大体积混凝土因温差过大而产生温度裂缝,是工程施工质量控制的重点和难点。

2 试验原料与设计

为保障混凝土符合强度指标要求,混凝土的水泥用量有最低限制;而大体积混凝土施工时,为满足低水化热、高流动性、低黏度等要求,应尽量减

少水泥用量。同时,工程所处北方滨海地区,冬季大风天气频繁,导致混凝土拌和水分蒸发量大且蒸发速率快,进而影响混凝土工作性能;再者,由于工程配筋密集,粗骨料粒径不宜过大,易影响混凝土强度等级。综上,工程配合比设计难度大。

2.1 试验材料

(1) 水泥。参考《高强混凝土应用技术规范》^[7]相关规定,配置 C80 以上强度等级的混凝土时,水泥 28 d 胶砂强度不宜低于 50 MPa。比选型号分别为 P·I52.5 和 P·O52.5 的水泥,具体强度指标如表 1 所示。最终选用具有早期强度高、凝结硬化快、耐磨性好、耐冻性好、水化热高、干缩性小等优点的中联 P·I52.5 水泥^[8]。

(2) 矿物掺和料。主要选用硅灰和微珠粉煤灰掺和料。硅灰可有效提高混凝土抗压、抗折、抗渗、防腐、抗冲击和耐磨性能,使混凝土具有保水、防离析、泌水、大幅降低混凝土泵送阻力等较好的工作性能^[9]。微珠粉煤灰掺和料可以增加混凝土的性能,提升混凝土流动性的同时,还能降低超高强度混凝土的黏性,提高混凝土的抗压性能^[10]。

(3) 骨料。粗骨料选用玄武岩,碎石粒级范围为 5 ~ 16 mm 和 5 ~ 10 mm,压碎值不大于 6.0%,岩石抗压强度不小于 130 MPa,针片状质量分数为 2.0%,石粉质量分数为 0.4%;细骨料选用级配良好河砂,细度模数为 2.9,表观密度为 2 650 kg/m³;含泥量为 0.8%,泥块质量分数为 0%。

(4) 外加剂。主要选用聚羧酸高性能减水剂,其具备较强吸附分散能力,对混凝土原材料的适应性较广,具有减水率高、保塑性能好、高增强等优点,尤其适用于高流态、高保坍、超高强等特殊混凝土工程^[11]。

(5) 水。浇筑用水选用不含有害杂质,不影响水泥正常凝结硬化的市政自来水。

2.2 配合比设计

在制备混凝土时,设计 4 组配合比,具体材料组成如表 2 所示。经配合比设计及试配工作,各组配合比和易性及强度如表 3 所示。基于多次试配的基础上,经综合分析,选择坍落度较大、和易性良好、强度有保障、工作性能好、综合成本较低的第二组配合比为工程 C100 混凝土配合比。

表 1 水泥早期强度 MPa

水泥型号	标准养护						拆模后 80 ℃ 蒸养	
	抗折强度			抗压强度			抗折强度	抗压强度
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d		
P·I52.5	6.3	7.1	9.0	29	39	58	6.0	40.0
P·O52.5	5.3	6.7	8.5	26	35	54	5.4	35.3

表 2 C100 混凝土配合比材料组成

编号	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	微珠粉煤灰 (kg·m ⁻³)	硅灰/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)		外加剂/ (kg·m ⁻³)
						5 ~ 16 mm	5 ~ 10 mm	
1	103	480	120	50	610	800	375	16.9
2	103	480	120	50	610	800	375	15.6
3	103	512	100	50	642	841	397	17.9
4	103	465	135	40	580	805	410	16.9

表 3 C100 混凝土各组配合比的和易性及强度

编号	坍落度/mm	保水性	黏聚性	抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
1	210	良好	良好	65.0	87.0	105.9
2	220	良好	良好	73.5	92.3	103.3
3	230	良好	良好	69.4	99.8	118.2
4	200	一般	一般	85.6	94.7	108.5

3 温控技术

大体积混凝土因结构尺寸大，且混凝土一次性浇筑体量大，相对于普通混凝土其凝结硬化过程产生水化热更大，更易使混凝土开裂，影响工程质量^[12]。研究表明，避免大体积混凝土产生温度裂缝的前提是确保混凝土在浇筑后凝结硬化过程中温度变化的协调性^[13]。大体积混凝土凝结硬化时内部的最高温升，通常由 3 个因素所决定：混凝土的入模温度，胶凝材料水化反应放热引起的绝热温升，混凝土的散热量^[14]。因此，选择合适的温控技术是消除或减少高强大体积混凝土内外温度梯度应力，满足施工质量要求的关键。

3.1 计算分析

为更好掌握 C100 高强大体积混凝土温度变化情况，采用有限元软件 ANSYS 对混凝土中部与表面 50 mm 处温度变化进行分析。参考类似工程经验，将混凝土入模温度设定为 16 ℃，并作为热物理场的计算初始值。模拟 3 种不同布设冷却水管条件下的混凝土温度变化曲线，结果如图 1 所示。其中工况 1 为未设冷却水管；工况 2 为在混凝土

中间设置一层冷却水管，管径为 30 mm，水管间距为 400 mm；工况 3 为在混凝土上下 1/3 高度处布设两层冷却水管，管径为 30 mm，水管间距为 400 mm。

由图 1 可知：C100 混凝土水泥用量大，早期水化放热量大，在不设冷却水管条件下最高温度可达 105 ℃，易产生温度裂缝；当布设一层冷却水管时，中部温度最高温度超过 85 ℃，存在延迟钙矾石反应现象，可能会出现胀裂破坏；当布设两层冷却水管时，中部最高温度降低至 76 ℃，但冬季施工仍存在开裂的可能。

针对高强大体积混凝土降温效果不佳情况，采取一系列措施：增大冷却水管管径至 40 mm，减小冷却水管间距为 350 mm，调节冷却水流速，提高冷却水管导热效率，优化施工顺序，合理选择浇筑时间，控制混凝土入模温度。经优化调整后，混凝土温度变化曲线情况如图 2 所示。由图 2 可知：混凝土中部最高温度已降至 70 ℃ 以下，有效避免了延迟钙矾石反应造成的结构开裂；同时，混凝土里表温差控制在 20 ℃ 以内，高强大体积混凝土温控效果得到有效改善。

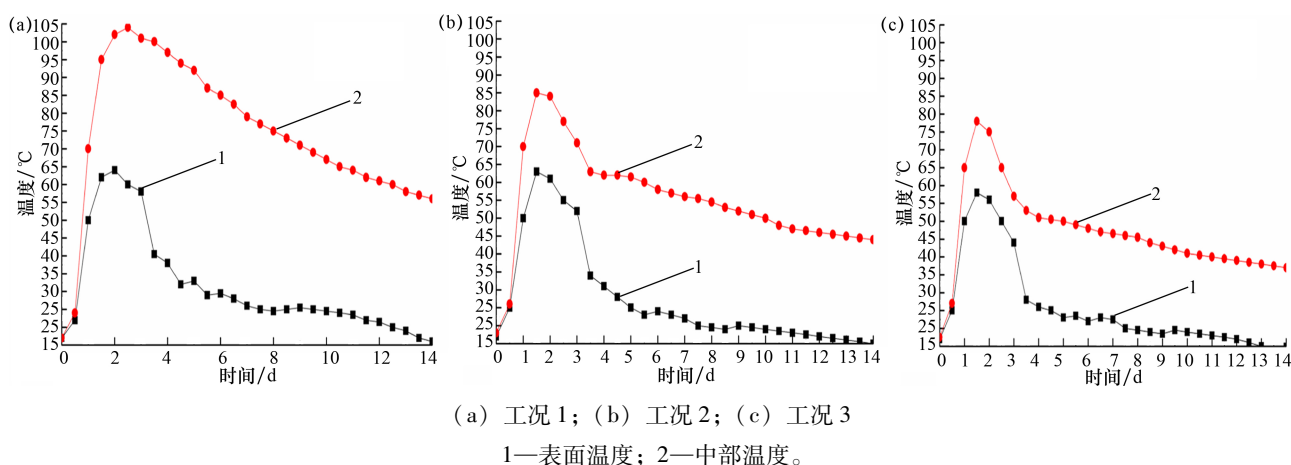


图 1 不同布设冷却水管条件下的混凝土温度变化曲线

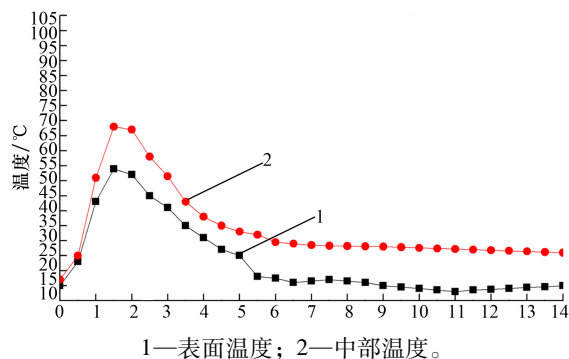


图 2 优化调整后温度变化曲线

3.2 试验验证

为验证优化调整温度控制技术的可靠性,开展现场试验。制作 $2.15\text{ m} \times 2.15\text{ m} \times 2.15\text{ m}$ 的立方体试验块,冷却水管采用 DN40 的无规共聚聚丙烯 (polypropylene random, PP-R) 管,双层水平方向布置(图 3),并通过智能控制系统调控水流速度,实时调整温度。浇筑后的试验块温控变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知:试验块内部最高温度小于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,内表温差小于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,各点温度

变化具有一定协调性,水化热温度得到了有效控制,符合高强大体积混凝土施工质量要求。

3.3 工程措施

针对 C100 高强大体积混凝土施工质量要求高,基于冬季施工环境,为确保施工质量,从原材料选择、施工工艺优化、整体连续浇筑、混凝土内部冷却降温、测温控温等方面入手,具体工程措施如下。

(1) 原材料控制。按照配合比设计参数,严格把关原材料进场质量,严格控制水胶比,定期测算材料含水量,并根据材料含水量调整搅拌机加水量,确保水胶比的精确性,提升混凝土工作性能。

(2) 施工工艺优化。根据工程特点,提前做好场地平整,确保施工道路畅通。针对大体积混凝土侧向压力大、侧模支撑难度高等难点,采用定型钢侧模,并在侧模上设置监控点位;侧模支撑采用阶梯型盘扣钢管结构,确保侧模牢靠稳定。混凝土表面设置抗裂钢筋网,防止裂缝的产生。

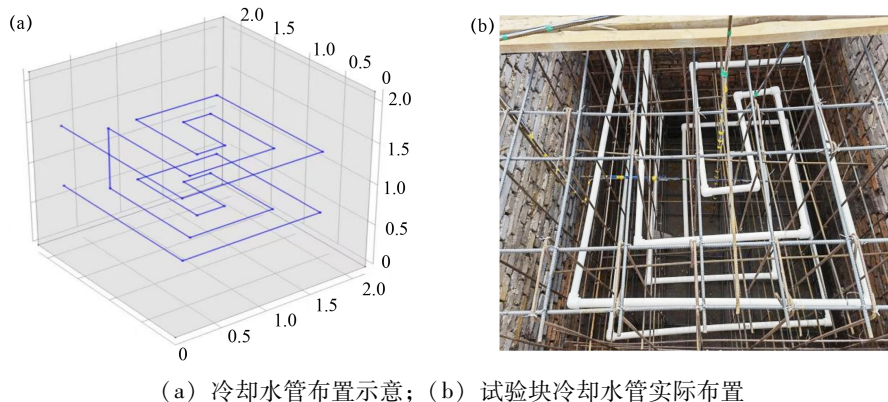
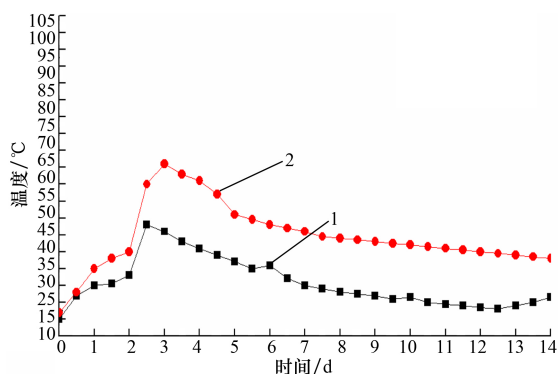


图 3 试验块预埋冷却水管布置



1—表面温度；2—中部温度。

图 4 试验块温控变化曲线

(3) 冷却水循环。布设两层三回路冷却水管，每层冷却水管平面成“弓”字型；将上下两层水管进出水口交错布置，并在进水管位置增设增压泵、水表，根据温控技术要求调整冷却水温度及流速；将冷却水管与相临近的钢筋网绑扎牢固，以避免混凝土浇筑时冷却水管移位，影响降温效果。

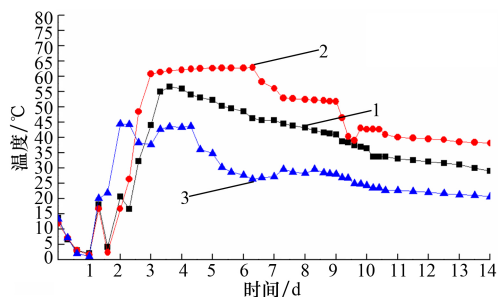
(4) 跳仓浇筑。将工程划分为 3 个施工仓段，要求每仓段一次浇筑成型；设置两组人员交替施工，先进行结构中间仓段施工，间隔 7 d 后再进行两侧仓段施工，以降低施工初期温差，有效控制温度应力。

(5) 加强振捣。采用大功率振捣棒振捣，及时排出混凝土内部的水泡、气泡，提高混凝土的密实度；合理设置振捣间距，增加振捣频率，提高更换振捣棒位置频率，以避免过振产生离析现象。

(6) 保温措施。混凝土浇筑完后及时采取保温措施，以防止混凝土拌和物冻结、凝结过缓；根据天气情况调整原材料入模温度；采用棉被覆盖保温养护，在内部降温的同时，确保混凝土表面保温隔热效果。

4 施工效果

工程于 2022 年底完成浇筑工作，并通过验收。施工完的典型断面混凝土的温度变化情况如图 5 所示，同条件养护试块强度变化情况如图 6 所示。由图 5、6 可知：C100 高强大体积混凝土施工温差控制合理，温度变化协调，强度满足要求。浇筑完混凝土外观效果如图 7 所示。由图 7 可知：施工完混凝土外观质量好、表面平整、密实、无温度裂缝，观感质量满足要求。



1—上表面温度；2—中部温度；3—下表面温度。

图 5 典型断面温度变化曲线

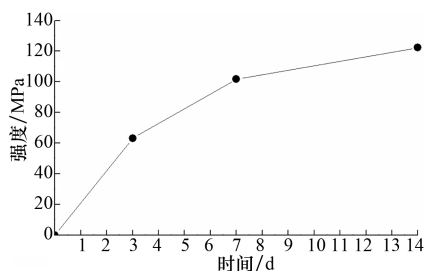
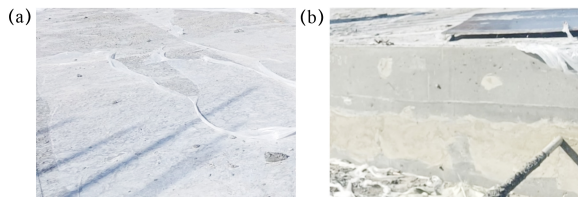


图 6 高强混凝土强度变化曲线



(a) 平面；(b) 侧面

图 7 浇筑完混凝土外观效果

5 结 语

文章以某地下工程为例，着重研究了 C100 高强大体混凝土配合比设计及施工温控技术。在配合比设计中，适当掺加微珠，降低水泥用量，在保证强度指标的同时满足大体积施工要求。在温控技术研究中，通过数值模拟计算分析 C100 高强大体混凝土温度场变化情况，优化冷却水管布置，并试验验证优化方案的可行性；在施工过程中，把控施工材料质量，加强对混凝土水胶比、入模温度、振捣管理及施工现场管理，优化施工工艺参数，综合采用跳仓法、内部降温、表面保温隔热等一系列温度控制技术，较好地解决了高强大体混凝土施工温控技术的难点，确保了施工质量。

参考文献：

- [1] 朱效荣,李迁. C100 高性能混凝土的研究与应用[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,2005.

- [2] 樊小燕. C60 高强泵送混凝土在超高层建筑中的应用[J]. 工程建设,2017(4):71-73.
- [3] 张超明. 特大断面隧道高性能大体积高强度混凝土配合比设计及施工温控技术[D]. 成都:西南石油大学,2019.
- [4] 李静,张海军. 超高层建筑大体积 C80 高强混凝土的应用[J]. 施工技术,2015(12):14-16.
- [5] 于洪亮. 浅谈热带气候下 C100 大体积混凝土的施工技术[J]. 江西建材,2021(5):94-97.
- [6] 王谦,鲁统卫,郭蕾. 高强高性能混凝土在冻结井筒筑壁施工中的应用[J]. 建井技术,2013,34(1):4-7.
- [7] 高强混凝土应用技术规程:JGJ/T 281—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [8] 王天政,麦晓文,赵书震,等. C100 高性能混凝土在建井工程中的应用[J]. 中州煤炭,2015(12):75-77;116.
- [9] 李清富,孙振华,张海洋. 粉煤灰和硅粉对混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土,2011(5):77-79.
- [10] 袁启涛,唐玉超,罗作球,等. C70 微珠自密实混凝土性能研究及作用机理分析[J]. 混凝土,2014(11):118-123.
- [11] 欧阳东. 混凝土矿物减水理论与 C100 超高性能混凝土[J]. 建筑技术,2001(1):24-26.
- [12] 孙晓虎,齐剑,张军. 大体积混凝土裂缝控制技术在工程中的应用[J]. 混凝土,2008(8):105-108.
- [13] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [14] 王涌. 大体积混凝土结构抗裂设计和评价[D]. 苏州:苏州科技大学,2017.

(上接第 50 页)

(2)在浅埋暗挖上跨施工中,当新隧道的开挖距离超过 35 m 时,对上跨既有隧道衬砌结构的横向位移影响较小。这表明在制定施工方案时,应考虑保持一定的安全距离,以减少对既有结构的影响。

(3)在新隧道开挖过程中,既有隧道衬砌结构的拱底、左拱腰和右拱腰的应力均会经历先下降后趋于稳定的变化。拱底的应力在整个开挖过程中变化不大,拱顶的应力变化也较小,且保持在较低水平。

(4)为了确保既有隧道的安全,建议在新隧道开挖过程中对既有隧道的一侧进行加固,有助于防止由于新隧道开挖造成的不可逆损害。

参考文献:

- [1] 熊家全. 地铁隧道浅埋暗挖施工对既有桥桩的影响分析[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [2] 石熊,张家生,刘宝琛. 大断面浅埋偏压暗挖通道 CRD 法施工工序研究[J]. 现代暗挖通道技术,2015,52(3):193-199.
- [3] 陈朝阳,高新强,熊华涛. 浅埋黄土隧道洞身穿越岩土分界受力变形特征[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S1):270-277.
- [4] 苗学云,范世鸿,米维军,等. 黄土塬区浅埋暗挖隧道慢坡段施工期围岩变形特征分析[J]. 铁道建筑,2020,60(7):51-54.
- [5] 闫少峰. 易塌地层浅埋暗挖通道小间距下穿既有管线的施工方法研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2022.
- [6] 李鹏,李洋,高毅,等. 基于“CC 工法”的顶管暗挖通道施工地表变形规律分析与研究[J]. 暗挖通道建设,2019,39(11):1838-1847.
- [7] 莫坤. 黄土场地双连拱地铁隧道浅埋暗挖施工对邻近既有隧道衬砌结构的影响[D]. 西安:长安大学,2022.
- [8] 许有俊,秦浩斌,李文博,等. 浅埋暗挖隧道近距离平行上跨对既有盾构隧道的变形影响分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(3):118-127.
- [9] 白鹏程. 超浅埋暗挖大跨隧道下穿既有隧道的沉降控制技术[J]. 现代隧道技术,2020,57(3):175-181.
- [10] 张学进. 淤泥质土浅埋暗挖隧道下穿既有管线影响研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(7):77-83.
- [11] 杜贵新,蒲松,叶来宾,等. 高速铁路浅埋暗挖隧道近距离上穿既有地铁隧道风险控制研究[J]. 铁道勘察,2021,47(6):86-91.
- [12] 孙长军,张顶立. CRD 法暗挖隧道下穿既有有线施工沉降控制技术[J]. 市政技术,2015,33(2):97-101.
- [13] 王岩. 基于 MJS 工法地铁近接施工对既有隧道的影响研究[D]. 西安:西安科技大学,2020.