

低水化热高抗裂机制砂海工混凝土 试验研究与应用

刘汝华¹, 孙淼¹, 施一春^{1,2}

(1. 宁波富邦公路工程建设有限公司, 浙江 宁波 315613;

2. 宁波富邦基础设施投资有限公司, 浙江 宁波 315613)

摘要: 为解决滨海滩涂围垦区暗埋隧道箱体结构狭长、体积大、底板侧墙和顶板厚度薄、难以布置冷却水管降温而导致温度应力大、结构易开裂及天然砂石资源短缺的问题, 试验通过原材料特性分析、配合比设计与优化、耐久性研究、混凝土结构开裂风险评估以及工程应用效果评价, 提出了一种低水化热高抗裂机制砂海工混凝土配制及应用关键技术。结果表明: 所配制混凝土不仅工作性、力学性能、体积稳定性和抗氯离子渗透性均满足施工及设计要求, 而且经验算评估, 隧道箱体按 20 m 分段浇筑施工时, 3 d、7 d 和 28 d 龄期的结构最小安全系数均大于 1.4, 控裂保障率高; 5 个节段侧墙的结构内部温度、内表温差和降温速率的峰值基本符合温控标准要求, 且裂缝分布密度低至 0.32 条/m, 平均裂缝宽度也均低于设计规范要求, 抗裂效果好。

关键词: 低水化热; 高抗裂; 机制砂; 海工混凝土

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2023)11-0050-06

doi:10.7640/zggwjs202311009

Experimental research and application of mechanized sand marine concrete with low hydration heat and high crack resistance

LIU Ru-hua¹, SUN Miao¹, SHI Yi-chun^{1,2}

(1. Ningbo Fubang Highway Engineering Construction Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315613, China;

2. Ningbo Fubang Infrastructure Investment Co Ltd., Ningbo, Zhejiang 315613, China)

Abstract: In order to solve the problems of long and narrow box structure, large volume, thin thickness of bottom side wall and top plate, difficulty in arrange cooling water pipe for cooling in the buried tunnel in coastal mudflat reclamation area, which lead to large temperature stress and easy cracking of the structure and shortage of natural sand and stone resources, a key technology for the formulation and application of low hydration and high crack resistance mechanism sand marine concrete has been proposed through the analysis of raw material characteristics, ratio design and optimization, durability research, risk assessment of concrete structure cracking, and evaluation of engineering application effects. The results show that the formulated concrete meets the construction and design requirements in terms of workability, mechanical properties, volumetric stability and resistance to chloride ion penetration. After checking calculation and evaluation, the minimum safety factor of the structure at the age of 3 d, 7 d and 28 d is greater than 1.4 when the tunnel box is constructed in 20 m sections, with a high guarantee rate of crack control; the peak values of the internal temperature, internal surface temperature difference, and cooling rate of the five section side walls basically meet the requirements of temperature control standards, and the distribution density of cracks is as low as 0.32 per meter. The average crack width is also lower than the design specification requirements, and the crack resistance effect is good.

Key words: low hydration heat; high crack resistance; mechanized sand; marine concrete

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-05-25

基金项目: 宁波市交通运输科技项目 (202112)

作者简介: 刘汝华 (1966—), 男, 浙江金华人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 桥梁与隧道施工技术。E-mail: 1020809513@qq.com

0 引言

近年来由于天然砂资源紧张、价格水涨船高^[1]。而机制砂资源丰富、经济性明显,我国在限制天然砂过度开采的同时,也积极促进机制砂的推广应用。因此,机制砂替代天然砂已成为必然趋势。刘晓凡等^[2]研究提出隧道洞渣石粉含量从 7.3%增至 18.6%,混凝土拌合物流动性降低超过 11.4%,3 d、28 d 抗压强度和 28 d 电通量均有提高。黄志刚等^[3]研究指出机制砂中的针片状含量及粒径的增大,混凝土的流动性、抗压强度和抗渗性能均降低,其对抗折强度的影响程度远大于抗压强度。傅蕾等^[4]研究发现,机制砂混凝土的收缩率比河砂的要高,并且随着混凝土的强度水平的提升,收缩率也会相应上升。于本田等^[5]在机制砂混凝土早期收缩、抗裂及力学性能测试中发现,添加 SAP 和 PVA 纤维可以有效地降低早期收缩,其中 SAP 的效果达到 93%,PVA 的纤维则有助于减少早期开裂,其中,添加 SAP 和 PVA 的混合物可以有效改善混凝土的力学特性,但是添加膨胀剂和减缩剂则会导致混凝土的力学特性下降。徐延等^[6]研究提出石粉含量在 10%左右,混凝土力学性能和抗氯离子渗透性较好,过多会使混凝土塑性开裂敏感性提高。张凌强等^[7]的研究表明,随着石粉含量的增加,混凝土的早期干缩会变得更加明显,

而当石粉含量达到 7%时,其干缩程度最高。郑晓冬等^[8]采用花岗岩洞渣生产的机制砂石骨料配制一种具有优良工作性、力学性能和耐久性的 T 梁用 C50 混凝土,其刚度、强度和抗裂性均达到了设计要求。孙胜伟^[9]研究指出 C30 机制砂混凝土的石粉含量宜在 10%~15%,C50 宜在 7%~10%,但在该范围内能提高 C30 混凝土耐久性,而对 C50 混凝土耐久性影响不大。

本文基于上述研究成果,结合宁波某明挖海底隧道项目特点,依据就近取材的原则,有效利用工程隧道洞渣制备机制砂,开展滨海围垦区暗埋隧道机制砂海工混凝土应用及裂缝控制技术研究,本项目为国内首次采用机制砂配制高性能大断面防裂暗埋箱体。通过配合比设计与优化、混凝土结构开裂风险评估和工程应用温度监控及抗裂效果评价,研究提出一种低水化热高抗裂机制砂海工混凝土配制及应用关键技术,解决在不依靠冷却水管降温的条件下机制砂混凝土自身水化热高、抗裂性低的问题,为机制砂混凝土的应用与发展提供重要支撑。

1 原材料

1.1 水泥

水泥为宁海强蛟海螺产的 P·II52.5 水泥,其主要性能见表 1。

表 1 水泥的主要性能

Table 1 Main performance of cement

项目	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	初凝时间/min	终凝时间/min	28 d 抗折强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	烧失量/%	Cl^{-1} 含量/%	SO_3 含量/%	碱含量/%
检测结果	340	149	201	8.7	57.0	2.79	0.034	2.64	0.54

1.2 矿物掺合料

粉煤灰为浙江某电厂产的 F 类 I 级粉煤灰,细度 7.1%,烧失量 3.0%;矿粉为张家港恒昌产的 S95 级矿粉,密度 2.9 g/cm^3 ,比表面积 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$,28 d 活性指数 97%。

1.3 集料

粗细集料均为本项目海底隧道洞渣自产的,粗集料为 5~25 mm 连续级配碎石,细集料为细度模数 2.8 的 II 区中砂,粗、细集料的主要性能如表 2 所示。

表 2 粗、细集料的主要性能

Table 2 Main performance of coarse and fine aggregates

集料	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率/%	针片状含量/%	压碎值/%	石粉含量/%	MB 值/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	含泥量/%	泥块含量/%	氯离子含量/%
粗集料	2 660	43.4	4.2	14.3	—	—	0.4	—	0.000 1
细集料	2 610	42.0	—	18.0	5.3	1.0	—	0.2	0.000 1

1.4 功能材料

减水剂为宁波某公司的复合型高性能减水剂,减水率为 26.2%;膨胀剂为宁波某公司的 HEA 型膨胀剂,膨胀剂的主要性能如表 3 所示。聚丙烯

纤维为无锡某公司生产的长度为 12 mm、当量直径为 $34.2 \mu\text{m}$ 的聚丙烯纤维;混凝土拌合用水采用洁净自来水,符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》的要求。

表 3 膨胀剂的主要性能

Table 3 Main performance of expansion agent

项目	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	MgO 含量/ %	凝结时间/ min		限制膨胀率/%		抗压强度/ MPa	
			初凝	终凝	7 d 水中	21 d 空气中	7 d	28 d
检测结果	200	2.0	196	327	0.042	-0.010	33.0	44.3

2 配合比设计

2.1 设计思路

隧道主体结构如图 1 所示, 为双向 6 车道箱

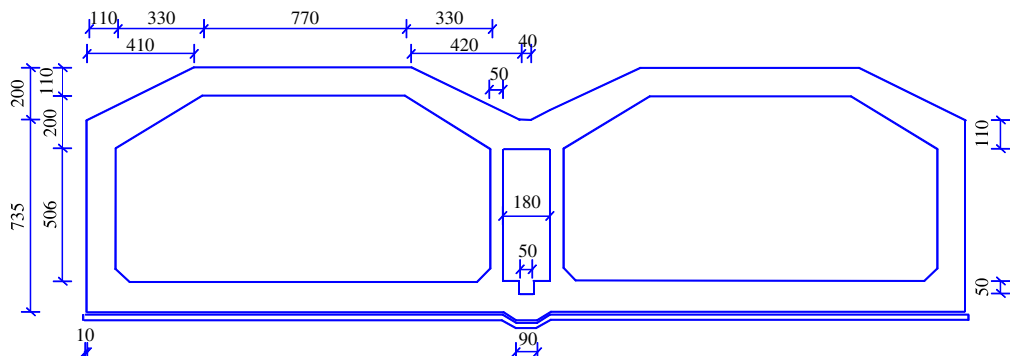


图 1 隧道箱体截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of tunnel box

针对该大体积混凝土结构, 在进行混凝土配合比设计时, 在保证混凝土施工性能和强度的同时, 尽可能使用大掺量矿物掺合料, 大幅降低胶凝材料的水化热, 尽量降低浆体比, 从而降低其水化热, 同时也有利于提高体积稳定性和抗裂性; 利用膨胀剂的微膨胀应力来抵消混凝土的收缩应力, 并适量添加聚丙烯纤维来增强其抗裂性。

2.2 基准配合比设计

以水胶比 0.34 的胶砂作为研究对象, 改变胶凝材料中水泥、矿粉、粉煤灰和膨胀剂的质量比例, 测试其 28 d 抗压强度、绝热温升^[2]依据 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》采用混凝土绝热温升测定仪(A-142)进行检测, 结果如表 4 所示。

表 4 不同胶凝体系胶砂强度和绝热温升测试结果

Table 4 Test results of mortar strength and adiabatic temperature rise of different gelling systems

编号	水泥:矿粉:粉煤灰:膨胀剂	28 d 抗压强度/MPa	绝热温升/°C
J0	0.9:0:0:0.1	79.3	74.3
J1	0.7:0.1:0.1:0.1	76.2	65.7
J2	0.65:0.15:0.1:0.1	75.7	60.4
J3	0.6:0.2:0.1:0.1	74.3	53.8
J4	0.55:0.2:0.15:0.1	73.1	49.8
J5	0.50:0.25:0.15:0.1	69.6	42.0

体设计, 其中暗埋箱体底板厚 1.2 m、侧墙厚 1.1 m、顶板厚 1.1 m, 属于狭长的大体积结构, 采取分段浇筑, 在老混凝土界面约束作用下易产生较大应力使混凝土开裂, 且结构内部无法布置冷却水管降温, 这对混凝土本身的抗裂性提出了更高要求。箱体结构混凝土设计为 C50 机制砂海工混凝土, 坍落度要求 (180 ± 20) mm, 28 d 抗压强度 ≥ 59.87 MPa, 84 d 氯离子扩散系数 $< 2.0 \times 10^{-12}$ m^2/s , 抗渗等级 $\geq \text{P10}$ 。

可以看出, 随着矿物掺合料比例的增加, 28 d 抗压强度逐渐降低, 绝热温升也在降低, 这主要是因为矿物掺合料的水化活性较水泥低, 其掺量越高, 水化程度越低, 水化热也越低, 但同时强度也会降低。因此, 兼顾考虑强度和绝热温升, 宜选择 J4 组即水泥:矿粉:粉煤灰:膨胀剂=0.55:0.2:0.15:0.1 的胶凝体系进行混凝土配合比设计。

基于上述研究结果, 选用 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》作为机制砂海工混凝土配合比的设计依据, 经理论计算与初步试验, 选取如表 5 所示的基准配合比。

表 5 基准配合比

Table 5 Base mix ratio

编号	水胶比	材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)								
		水	水泥	粉煤灰	矿粉	膨胀剂	砂	碎石	纤维	外加剂
D0	0.34	167	270	74	98	49	784	958	0.9	4.90

3 试验结果与讨论

根据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》和 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》, 对混凝土拌合物的坍落度、扩展度、表观密度和含气量进行测试, 并对其氯离子扩散系数和抗渗等级进行测试; 对混凝土结构开裂风险进行评估和温度监测, 均可参照 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》。

3.1 水胶比对混凝土性能的影响

试验在基准配合比的条件下, 保持浆体比为 34.5%, 砂率为 45%, 研究水胶比变化对混凝土性能的影响, 具体试验配合比如表 6 所示, 结果如表 7 所示。

表 6 不同水胶比试验配合比

Table 6 Different water-cement ratio test mix ratio

编号	水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)								
		水	水泥	粉煤灰	矿粉	膨胀剂	砂	碎石	纤维	外加剂
D0	0.34	167	270	74.0	98	49.0	784	958	0.9	4.90
D1	0.32	162	278	75.5	101	50.5	784	958	0.9	5.05
D2	0.36	172	263	72.1	96	47.9	784	958	0.9	4.79

表 7 不同水胶比混凝土性能

Table 7 Properties of concrete with different water-cement ratios

编号	工作性描述	坍落度/mm	扩展度/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	含气量/%	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
D0	流动性良好、包裹性欠佳	200	460	2 370	2.5	50.4	61.3
D1	流动性良好、包裹性欠佳	200	490	2 390	2.3	52.3	69.9
D2	流动性良好、包裹性欠佳	170	410	2 350	2.8	46.7	58.7

由表 7 分析可知, 不同水胶比的混凝土虽流动性良好但包裹性欠佳, 且水胶比为 0.36 时 28 d 抗压强度不足, 这主要是因为砂率偏低, 混凝土中砂浆量不足, 对碎石的包裹性差, 且水胶比增加, 混凝土密实度降低, 强度降低。因此, 在保证强度的前提下, 宜选择水胶比为 0.32。

3.2 砂率对混凝土性能的影响

试验在保持浆体比为 34.5% 和水胶比为 0.32 的条件下, 研究了砂率变化对混凝土性能的影响, 试验配合比如表 8, 结果见表 9。

由表 9 可知, 随着砂率的增加, 混凝土包裹性变好, 强度略有降低, 但也都符合设计要求, 这主要是因为砂率提高, 混凝土中砂浆量增多, 对碎石的包裹性好。因此, 考虑到强度的富余, 宜选择砂率为 48%。

表 8 不同砂率试验配合比

Table 8 Different sand rate test mix ratio

编号	砂率/%	材料用量/(kg·m ⁻³)								
		水	水泥	粉煤灰	矿粉	膨胀剂	砂	碎石	纤维	外加剂
D1	45	162	278	75.5	101	50.5	784	958	0.9	5.05
D3	48	162	278	75.5	101	50.5	836	906	0.9	5.05
D4	50	162	278	75.5	101	50.5	871	871	0.9	5.05

表 9 不同砂率混凝土性能

Table 9 Properties of concrete with different sand rates

编号	工作性描述	坍落度/mm	扩展度/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	含气量/%	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
D1	流动性良好、包裹性欠佳	200	490	2 390	2.3	52.3	69.9
D3	流动性良好、包裹性良好	200	530	2 370	3.0	50.4	68.3
D4	流动性良好、包裹性良好	200	500	2 360	3.4	50.1	67.9

3.3 浆体比对混凝土性能的影响

试验在保持砂率为 48% 和水胶比为 0.32 的条件下, 研究了浆体比变化对混凝土性能的影响, 具体试验配合比如表 10, 结果见表 11。

表 10 不同浆体比试验配合比

Table 10 Different slurry ratio test mix ratio

编号	浆体比/%	材料用量/(kg·m ⁻³)								
		水	水泥	粉煤灰	矿粉	膨胀剂	砂	碎石	纤维	外加剂
D3	34.5	162	278	75.5	101	50.5	836	906	0.9	5.05
D5	34.0	159	274	75.2	100	49.8	843	913	0.9	4.98
D6	33.0	154	264	72.0	96	48.0	858	930	0.9	4.80
D7	32.0	150	259	71.0	94	47.0	867	939	0.9	4.70

表 11 不同浆体比混凝土性能

Table 11 Properties of concrete with different slurry ratios

编号	工作性描述	坍落度/mm	扩展度/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	含气量/%	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
D3	流动性良好、包裹性良好	200	530	2 370	3.0	50.4	68.3
D5	流动性良好、包裹性良好	200	510	2 370	3.4	49.7	65.4
D6	流动性良好、包裹性良好	200	490	2 380	3.1	48.4	64.7
D7	流动性欠佳、包裹性良好	180	420	2 350	2.6	46.1	61.2

由表 11 可知, 浆体比的降低对混凝土流动性和包裹性影响不大, 但对其强度影响较大, 这主要是因为, 浆体比降低, 胶凝材料总量减少, 水化产物减少, 胶结性和密实度降低, 强度也随之降低, 但考虑到浆体比降低有利于混凝土体积稳定性提升和降低收缩, 因此, 宜选择浆体比为 33%。

3.4 耐久性研究

图 2 为 D6 组混凝土早期收缩形变量随龄期的变化曲线, 依据 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》中的(非接触法)测定混凝土的早期收缩(近年来, 由于水泥混凝土品种增多以及矿物掺合料、外加剂等的使用, 导致混凝土早期收缩明显增大, 采用接触法无法反应早龄期(3 d 之内)混凝土的体积变形性能, 而非接触法一般只用于混凝土的早龄期收缩测试)。可以看出, 随着混凝土龄期的增长, 1~7 d 的形变量增长幅度最大, 而 7~28 d 则先略有增长并基本保持不变后逐渐减少, 其中 7 d 形变量为 $175 \mu\epsilon$, 28 d 形变量为 $167 \mu\epsilon$, 差值仅 $8 \mu\epsilon$, 说明该配合比早期体积稳定性好。此外, 经检验, 该配合比 84 d 氯离子扩散系数为 $1.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 抗渗等级为 P12, 也都符合设计要求。综上, 优选 D6 组混凝土配合比为机制砂海工混凝土最优配合比。

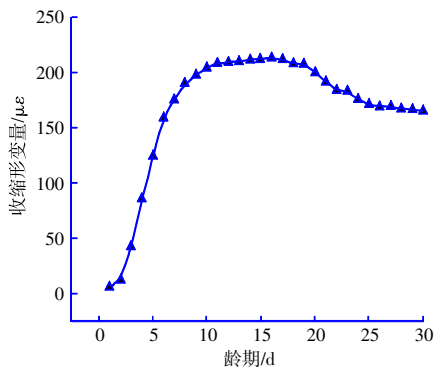


图 2 混凝土早期收缩形变量随龄期的变化曲线

Fig. 2 Concrete early shrinkage deformation curve with age

3.5 结构开裂风险评估

隧道箱体断面尺寸 $33.6 \text{ m} \times 9.35 \text{ m}$, 分为底板、侧墙、顶板三次浇筑, 根据实际施工情况, 取最不利工况隧道两端受约束(跳舱施工中间节段)工况进行计算。计算时取弹模为 $2.2 \times 10^4 \text{ MPa}$, 箱体侧面计算取表面散热系数 $50 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 垫层底部散热系数 $10 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; 温度及温度应力计算从混凝土浇筑开始, 模拟之后 28 d 的温度应力发展; 混凝土浇筑按最不利工况考虑, 浇筑温度按 35°C 计算, 环境温度按 $(30 \pm 3)^\circ\text{C}$ 计算。箱体标准长度按 15 m、20 m、25 m 三种工况分别计算。在以上设定条件下, 箱体内部最高温度约 73.3°C , 温峰出现时间约为浇筑后第 2~3 天。应力计算结果见表 12。

表 12 箱体温度应力场计算结果

Table 12 Calculation results of box temperature stress field

工况	最高温度/ $^\circ\text{C}$	3 d 应力/ MPa	7 d 应力/ MPa	28 d 应力/ MPa	抗裂安全系数			最小抗裂安全系数
					3 d	7 d	28 d	
15 m 工况	底板	72.4	1.85	2.29	3.52	1.48	1.83	1.41
	侧墙	67.7	1.75	2.43	3.19	1.57	1.72	1.55
	顶板	72.3	1.89	2.34	3.42	1.45	1.78	1.45
20 m 工况	底板	72.2	1.84	2.58	3.54	1.50	1.62	1.40
	侧墙	66.1	1.73	2.24	3.25	1.60	1.87	1.52
	顶板	73.3	1.86	2.54	3.57	1.47	1.65	1.39
25 m 工况	底板	72.2	1.87	2.44	3.71	1.47	1.72	1.33
	侧墙	66.1	1.74	2.34	3.39	1.58	1.78	1.46
	顶板	73.3	1.91	2.24	3.66	1.44	1.87	1.35

由表 12 可知, 不同工况下混凝土内部最高温度差异不大, 这主要是因为内部最高温度取决于结构最小厚度, 而各结构部位厚度基本相当; 各结构部位各龄期混凝土安全系数均大于 1.2, 但最小抗裂安全系数小于 1.4, 安全系数偏小; 综上, 按 15 m 分段浇筑工况计算, 各龄期结构最小安全系数均 >1.4 ; 20 m 分段底板侧墙最小安全系数 >1.4 , 顶板为 1.39, 与 1.4 接近, 控裂保障率接近 85%; 25 m 分段顶板、底板最小安全系数均 <1.4 , 控裂保障率不足。因此, 箱体施工宜选择 15 m 或 20 m 分段浇筑。

4 工程应用

4.1 试验段概况

选取 5 个节段的侧墙为试验段, 每节段长约 20 m, 全长约 100 m, 以 D6 组混凝土配合比作为试验对象, 对 5 个试验段的混凝土温度进行了实时监测, 监测结果见表 13, 总体上, 混凝土内部最高温度、内表温差和降温速率等基本符合温控标准要求。

表 13 5 节段侧墙温度监测结果

Table 13 5 section sidewall temperature monitoring results

指标	内部最高温度/ $^\circ\text{C}$	内表温差/ $^\circ\text{C}$	降温速率/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$
标准	≤ 65.0	≤ 25.0	早期 ≤ 3.0 , 后期 ≤ 2.0
1 节段峰值	65.8	19.0	2.8
2 节段峰值	65.7	24.2	3.3
3 节段峰值	66.4	22.2	3.1
4 节段峰值	65.5	19.4	2.6
5 节段峰值	64.8	23.0	2.3

4.2 抗裂效果评价

从混凝土浇筑起至结构成型 1 a 时间内, 对 1—5 节段侧墙温度裂缝产生及扩展情况进行全程

记录, 裂缝分布情况如表 14 所示。分析可知: 在 1—5 节段总长约 100 m 的范围内, 合计裂缝数量仅 32 条, 裂缝分布密度低至 0.32 条/m, 且平均裂缝宽度也均低于设计规范要求的不 ≤ 0.2 mm, 说明所配制的机制砂海工混凝土抗裂效果好。

表 14 侧墙温度裂缝分布情况

Table 14 Distribution of temperature cracks in sidewalls

竖向裂缝 位置	裂缝数量/条		平均裂缝宽 度/mm	裂缝分布密 度/(条·m ⁻¹)
	东侧墙	西侧墙		
1 节段	2	1	0.08	0.15
2 节段	3	3	0.14	0.30
3 节段	2	2	0.12	0.20
4 节段	5	6	0.12	0.55
5 节段	4	4	0.10	0.40
合计	16	16	0.12	0.32

5 结语

试验针对大体积隧道箱体结构内部无法布置冷却水管降温而导致温度应力大、结构易开裂的问题, 研究提出一种低水化热高抗裂机制砂海工混凝土配制及应用关键技术, 并得出以下结论:

1) 混凝土配合比的设计宜选择水胶比为 0.32, 砂率为 48%, 浆体比为 33%, 最优配合比为水泥 264 kg/m³、矿粉 72 kg/m³、粉煤灰 96 kg/m³、膨胀剂 48 kg/m³、砂 858 kg/m³、碎石 930 kg/m³、聚丙烯纤维 0.9 kg/m³、水 154 kg/m³、外加剂 4.8 kg/m³。

2) 所配制的混凝土不仅流动性和包裹性好, 强度符合设计要求, 而且 7 d 至 28 d 的形变量仅为 8 μm , 体积稳定性好; 84 d 氯离子扩散系数为 $1.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 也符合设计要求, 混凝土耐久性好。

3) 经结构开裂风险评估, 箱体施工宜选择 15 m 或 20 m 分段浇筑, 可确保最小安全系数均 > 1.4 , 控裂保障率高。

4) 经 1—5 节段侧墙试验段温度监控和抗开裂效果评价, 混凝土最大温升、内表温差和降温速率等基本符合温控标准要求, 且结构成型 1 a 时间内, 裂缝分布密度低至 0.32 条/m, 且平均裂缝宽度也均低于设计规范要求的不 ≤ 0.2 mm, 混凝土抗裂效果好。

参考文献:

[1] 中国建筑业协会混凝土分会. 2021 年我国部分省、市、自治区预拌混凝土产量统计表[J]. 混凝土, 2022(4): 192.
Concrete Branch of Construction Industry Association of China. Statistical table of ready-mixed concrete production in some provinces, cities and autonomous regions of China in 2021[J]. Con-

crete, 2022(4): 192.

- [2] 刘尧凡, 鲁凯, 樊强, 等. 隧道洞渣花岗岩机制砂中石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2022(12): 106-109.
LIU Xiao-fan, LU Kai, FAN Qiang, et al. Influence of stone powder content in granite machine-made sand of tunnel slag on concrete performance[J]. Concrete, 2022(12): 106-109.
- [3] 黄志刚, 徐志华, 李北星, 等. 机制砂片状颗粒对砂浆和混凝土性能与微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 1981-1989.
HUANG Zhi-gang, XU Zhi-hua, LI Bei-xing, et al. Effect of flake particles in mechanism sand on properties and microstructure of mortar and concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(6): 1981-1989.
- [4] 傅蕾, 张学民, 王立川, 等. 基于机制砂混凝土收缩试验的隧道衬砌环向开裂原因探讨[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2671-2678.
FU Lei, ZHANG Xue-min, WANG Li-chuan, et al. Discussion on circumferential cracking of tunnel lining based on shrinkage test of machine-made sand concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2671-2678.
- [5] 于本田, 陈延飞, 王焕, 等. 大掺量高吸附性石粉高强机制砂混凝土收缩开裂抑制试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2737-2746.
YU Ben-tian, CHEN Yan-fei, WANG Huan, et al. Experiment on control measures of shrinkage and cracking of high strength manufactured sand concrete containing a large amount of high absorbency stone powder[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2737-2746.
- [6] 徐延, 刘行, 李超, 等. 石粉对预制沉管机制砂混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(8): 41-44.
XU Yan, LIU Xing, LI Chao, et al. Influence of stone powder on the performance of sand concrete for precast immersed tube manufactured[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(8): 41-44.
- [7] 张凌强, 陈倩, 黄兴, 等. 石粉含量对 C50 花岗岩机制砂混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2154-2158, 2177.
ZHANG Ling-qiang, CHEN Qian, HUANG Xing, et al. Influence of stone powder content on performance of C50 granite manufactured sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2154-2158, 2177.
- [8] 郑晓冬, 管志涛, 李超, 等. 隧道花岗岩洞渣骨料在 C50 混凝土预制 T 梁中的应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(12): 40-44, 49.
ZHENG Xiao-dong, GUAN Zhi-tao, LI Chao, et al. Research on application of tunnel granite cave slag aggregate in C50 concrete precast T-beam[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(12): 40-44, 49.
- [9] 孙胜伟. 石粉含量对 C30 和 C50 机制砂混凝土性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 160-163.
SUN Sheng-wei. Effect of stone powder content on the performance of C30 and C50 machine-made sand concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 160-163.