

大连湾海底隧道主体混凝土性能的对比研究

孙竹

(中交第一航务工程局有限公司)

摘 要: 文章介绍了大连湾海底隧道的工程概况和主要特点, 对比了该工程与港珠澳大桥隧道工程在环境、主体混凝土性能和原材料方面的主要区别, 针对大连湾海底隧道项目混凝土优质原材缺少、冻融问题严峻的特点, 通过对比试验对大连湾海底隧道工程主体混凝土进行研究, 得到了适用于此工程的原材选择和混凝土初步配合比, 以小比尺现场试验方式验证了实体混凝土的强度、抗裂、耐久等关键性能, 检测结果满足设计预期, 为类似跨海通道项目提供借鉴。

关键词: 大连湾; 沉管隧道; 混凝土; 机制砂

0 引言

大连湾海底隧道工程是继港珠澳大桥隧道工程之后又一条跨海沉管隧道工程, 同时也是我国北方地区的首条大型跨海沉管隧道, 虽然隧道主体结构 and 主要施工工艺相类似, 但因其所处的地理位置、独特的自然环境和施工条件所限, 大连湾海底隧道工程相较于港珠澳大桥沉管隧道, 使用的混凝土有其显著的特点和难点, 一些关键技术及质量控制标准存在明显差异。如大连地区冬夏温差大, 全年最高温与最低温相差 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻融

环境属于 II-D 类(严重), 周边地区优质河砂紧缺等, 上述问题急需解决。

1 工程概况

1.1 工程位置

大连湾海底隧道建设工程起始于大连湾北岸梭鱼湾规划 20 号路, 向南下穿大连湾海域, 在南岸大连港 3、4 号码头之间港池登陆。道路等级为城市快速路, 双向六车道规模, 道路主线设计速度为 60 km/h 。

工程地理位置见图 1。



图 1 工程地理位置图

1.2 隧道主线结构

主线包括南北两岸接线段及沉管隧道段，全长 5 098 m，其中沉管隧道长 3 035 m、明挖暗埋隧道长 1 472 m、敞开段长 250 m、接线道路长 341 m。沉管隧道由 18 节管节组成，包括 1 节 135 m、12 节 180 m 直线管节，各分 6/8 个节段，

每个节段长约 22.5 m，混凝土方量约 2 700 m³；5 节 148 m 曲线管节，各分 7 个节段，单个节段长约 21 m，混凝土方量约 2 600 m³。管节为两孔一管廊结构，采用全断面一次性整体浇筑，管节标准横断面见图 2，这种大体积混凝土对其强度、抗裂、耐久性等质量控制要求较高。

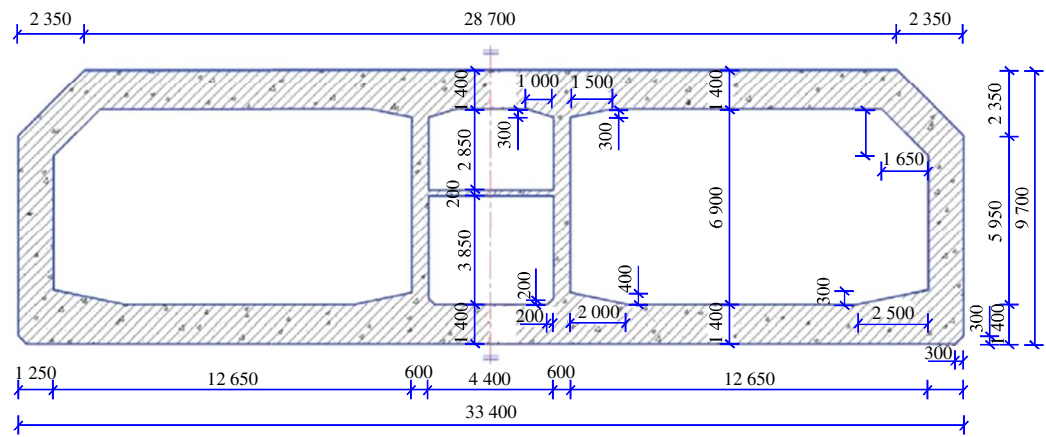


图 2 管节标准横断面图(mm)

1.3 气象条件

大连地区属于北温带季风气候区，并具有海洋影响的特点，雨量集中，冬季寒冷，夏季炎热，八月最热，一月最冷。年平均温度 10.2 ℃，极端最高温度 35.3 ℃，极端最低温度-21.1 ℃；年平均总降水量 658.7 mm，日最大降雨量 171.1 mm；全年平均风速 5.2 m/s，30 a 一遇最大风速 31.0 m/s，全年最多风向 N，频率 15%；最大积雪厚度 37 cm；年平均雷暴日数为 20.3 d，最多年雷暴日数为 30 d；年平均台风次数 1.5 次，台风出现月份为 6—9 月。

2 与港珠澳大桥隧道工程的差异

为了研究大连湾海底隧道主体混凝土性能，本文与港珠澳大桥隧道工程进行对比，根据两个项目的环境差异和设计要求，在港珠澳大桥隧道混凝土设计的基础上进行优化改进。

2.1 环境差异

大连湾海底隧道建设工程所处环境与港珠澳大桥在海洋氯化物环境与化学腐蚀环境方面作用等级相同，不同的是大连湾海底隧道建设工程地处北方海洋环境，极端最低温度达-21.1 ℃，冻融环境属于Ⅱ-D类(严重)，对混凝土抗冻和耐久性性能要求极高。两个工程环境作用类别与作用等

级对比见表 1。

表 1 环境类别和等级对比

工程名称	环境作用类别与作用等级		
	冻融环境 (Ⅱ)	海洋氯化物 环境(Ⅲ)	化学腐蚀环 境(V)
大连湾海底隧道建设工程	Ⅱ-D	Ⅲ-D,E	V-D
港珠澳大桥岛隧工程	—	Ⅲ-D,E	V-D

2.2 混凝土性能差异

主体结构的设计使用年限为 100 a，按照 120 a 使用年限的指标要求进行混凝土配合比设计，采用高耐久性海工钢筋混凝土，此外由于受冬季低温影响，混凝土耐久性能较港珠澳大桥隧道工程主体混凝土增加了抗冻性的相关要求，具体性能要求见表 2。

2.3 原材料差异

通过对工程周边地区天然砂源进行调研，由于受多方面因素影响，大连市场的优质砂源，特别是天然河砂非常紧缺，远不及港珠澳大桥工程使用的河砂质量，没有可稳定持续供应的河砂料源，细骨料由机制砂替代河砂。

表2 主体混凝土耐久性能要求

强度等级		≥C45(28 d 龄期) ≥C50(56 d 龄期)
混凝土抗渗等级		P8~P12
构件受力情况的估计		存在受拉区,裂缝宽度≤0.2 mm
防腐方案		1. 高性能混凝土; 2. 沉管段、岸边段全包防水设计
胶凝材料控制	胶凝材料类型	低水化热 P0、P I 或 P II 型水泥+ 优质粉煤灰(≥Ⅱ级灰)+矿渣微粉 (≥S95)等超细矿物掺和料
	胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)	380~480
	水胶比	≤0.34
混凝土氯离子扩散系数(以 RCM 法检测)/(m ² ·s ⁻¹)		≤6.5×10 ⁻¹² (28 d 龄期) ≤4.5×10 ⁻¹² (56 d 龄期)
快速碳化深度/cm		≤2
碱含量/(kg·m ⁻³)		≤3
氯离子含量/%		≤0.08
三氧化硫含量/%		≤4
混凝土抗冻耐久性指数 DF/%		80
冻害临界强度		不应小于设计强度等级值的 70%
含气量/%		≤7

综上,针对工程所处北方低温的环境特点和由此提出的混凝土性能要求,考虑大连及周边地区优质河砂紧缺的实际情况,开展了机制砂配制高耐久性海工混凝土的相关研究试验和验证工作。

3 机制砂混凝土的研究

3.1 总体思路

机制砂中含有石粉是其显著特征,选用石粉含量为 5%、7%、9%、11%、13% 五种比例的机制砂,按与河砂相同的配合比拌制混凝土,按照单一变量条件进行各主要性能指标的比对试验,初步判定机制砂能否用于大连湾海底隧道工程的主体混凝土中。根据试验结果,参考港珠澳大桥沉管混凝土配合比设计及“大连湾海底隧道建设工程北方寒冷地区沉管隧道耐久性专题研究”的相关成果,考虑实用性和经济性,提出满足设计要求的机制砂混凝土配合比,并进行模型试验验证研究结果。

3.2 机制砂技术指标

研究选用的机制砂为社会机制砂生产线采用干法工艺生产的产品,母岩为石灰岩,技术指标满足Ⅱ区中砂和设计文件中细骨料要求,石粉含量不大于 10%,亚甲蓝(MB)值十分稳定,随着石粉含量的增加略有增加,样本中最大值为 0.50,机制砂中≤0.075 mm 颗粒为非泥性颗粒,棱角性

与中等质量河砂接近。

3.3 机制砂混凝土的工作性

由于机制砂中含有石粉,混凝土粉状材料总量从常规的水泥、矿粉、粉煤灰,变为水泥、矿粉、粉煤灰和石粉,混凝土的浆体由胶凝材料、石粉、水和含气组成,浆体体积计算要考虑石粉及含气体积。经试验,浆体比例<30%,混凝土包裹性和流动性差,尤其泵送后流动性明显下降;浆体比例在 30%~35%,黏聚性和流动性良好,泵送后流动性损失不大;浆体比例大于 35%,混凝土流动性好,但振捣易出现浮浆。粉煤灰与矿粉占水泥比例的改变,对新拌混凝土性能无显著影响。同配比的机制砂混凝土和河砂混凝土的初凝时间无明显变化,受环境温度影响较大。

相对于等量河砂而言,机制砂混凝土粉料群的比表面积增大,机制砂的吸水率也高于河砂,使得粉料相应的需水量大大提高,进而影响混凝土整体用水量。试验表明,随着石粉含量增加,减水剂和引气剂用量也需相应增加才能保证混凝土的坍落度和含气量基本一致,在较低用水量的情况下,需注意减水剂的临界用量。

3.4 机制砂混凝土的强度

经试验验证,用机制砂配置的混凝土强度较用等量河砂配置的混凝土强度无明显变化,均能够满足设计强度要求,不同胶凝材料体系的机制砂混凝土早期抗压强度随着水泥比例的增加而增大。

3.5 机制砂混凝土的抗裂性能

机制砂混凝土劈裂抗拉强度增长主因是龄期,相同龄期,石粉含量在 9%~13% 范围内,劈裂抗拉强度随石粉含量增加略有提高,超过 13% 含量的劈裂抗拉强度则有所降低。

早期诱导抗裂试验结果表明,随着石粉含量的增高,诱导开裂面积增大,混凝土的抗裂性能有降低风险,但这一趋势和混凝土的单方用水量有密切联系,由于机制砂吸水性较强,应注意单方用水过少和石粉含量增高带来的开裂风险。

经混凝土收缩率试验测定,机制砂混凝土收缩率随龄期和石粉含量的增长而增大,56 d 龄期内收缩率增长较为迅速,石粉含量达到 13% 及以上时 90 d 收缩率超过 300×10⁻⁶。

3.6 机制砂混凝土的耐久性能

机制砂混凝土的抗冻性采用快冻法试验,试

验介质选用工程所处海域海水，同时进行了河砂混凝土对比试验。试验结果表明各组机制砂混凝土抗冻耐久性指数 DF 均大于 80%，最小值 90%，最小值 98%，河砂混凝土的 DF 值为 94%，石粉含量在 5%~13% 范围内的抗冻试验结果无显著差异。试块进行至 600 循环，均可达到 600 循环等级标准，质量损失和动弹结果的最低值均出现在河砂试块中，分别为 3.53% 和 79%，整组机制砂混凝土抗冻融性能优于河砂混凝土。

进行的抗渗试验结果显示机制砂混凝土抗渗等级均>P14，渗水高度最大值为 28 mm，最低值为 7 mm。在试验条件下，抗渗试验结果未见与石粉含量的变化有趋势变化。

进行了机制砂混凝土 28 d、56 d、90 d 龄期的电通量试验，从同水胶比、同配合比、不同石粉含量的机制砂混凝土的电通量试验结果可以看出，电通量的变化趋势主要取决于混凝土的龄期，与石粉掺量的变化无显著相关性。机制砂混凝土 56 d 龄期的电通量均低于 1 000 C，抗氯离子渗透性能均满足要求。

用 RCM 法检测的氯离子扩散结果可以看出，氯离子扩散的变化主要取决于混凝土的龄期，试验结果满足设计技术要求。具体数据见表 3。

对 7%、9%、11% 石粉含量的机制砂混凝土进行了 KS90 和 KS150 的抗硫酸盐侵蚀试验。机

表 3 混凝土氯离子扩散系数统计表(以 RCM 法检测)

龄期/d	混凝土氯离子扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	最大值	最小值
28	3.7×10^{-12}	2.5×10^{-12}
56	2.3×10^{-12}	1.3×10^{-12}
90	1.9×10^{-12}	1.0×10^{-12}

制砂混凝土在 90 次硫酸盐溶液干湿循环后抗压强度耐蚀系数(限值为 75%)最低值 91.2%，最大值 103.5%；150 次湿循环后抗压强度耐蚀系数(限值为 75%)，最低值 84.8%，最大值 99.2%，满足要求。

3.7 模型验证试验

在上述研究和试验结果基础上，最终选定了 2 组初步优化配合比(见表 4)，在不同入模温度、养护方式和温控措施组合下，进行沉管隧道混凝土小尺寸模型试验，用来验证机制砂高性能混凝土的技术可行性和产品质量，小尺寸模型分为“L”形和“⊥”形 2 种模型，如图 3 所示。

表 4 初步优化机制砂配合比

配合比编号	胶凝材料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水胶比	水泥/%	粉煤灰/%	矿渣粉/%	机制砂/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	碎石/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1 号	420	0.34	70	15	15	744	1 151
2 号	420	0.33	55	15	30	744	1 151



(a) L 形模型



(b) ⊥ 形模型

图 3 缩尺模型示意图

模型试验的过程和结果表明，机制砂混凝土的工作性能良好，各主要性能指标经测定均满足设计要求，具体数据结果见表 5。

4 研究结论

1) 机制砂可以代替天然砂作为细骨料配制高

耐久性的沉管混凝土，机制砂的石粉含量宜控制在 7%~8%。

2) 使用机制砂配置的高耐久性海工混凝土，其工作性、强度、抗裂性、耐久性等方面的性能能够满足大连湾海底隧道建设工程的设计使用要

表 5 模型试验混凝土主要性能指标

配合比 编号	抗压强度/MPa				氯离子扩散系数/(10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)		28 d 抗水压 渗透等级	7 d 绝热 温升/℃	90 d 干燥收 缩(10 ⁻⁶)	碱含量/ (kg·m ⁻³)	氯离子 含量/%	SO ₃ 含量/ %	耐久性 指数
	3 d	7 d	28 d	56 d	28 d	56 d							
1 号	28.7	41.7	58.2	62.5	3.5	2.3	P14	44.8	282	2.66	0.02	0.8	合格
2 号	25.4	40.3	56.5	61.7	3.7	2.1	P14	45.0	290	2.71	0.02	0.8	合格

求。

3) 考虑到夏季混凝土的入模温度对混凝土最高温度及温差值影响较大,通过现场试验确定,25℃入模温度下采用有效的温控和养护措施,可满足抗裂要求。

4) 夏季施工采取加冰降温 and 循环冷却水管等措施对于降低大体积混凝土的温差效果明显,内部最高温度降低近 10℃,施工时可根据工况采取不同应对措施。

5) 冬季混凝土的入模温度不能低于 5℃,并应采用蒸汽养护,带模养护期间混凝土内部温度与表面温度差、表面温度与暖棚温度之差均不应超过 20℃。

5 结语

大连湾海底隧道建设工程因受其独特的自然气候环境和原材料的限制,相较港珠澳大桥高耐

久混凝土而言,对混凝土的性能和原材料提出了新要求和新课,特别是机制砂的研究和应用,对今后我国北方沉管隧道的建设和机制砂的使用具有参考价值。

参考文献:

[1] 上海市隧道工程轨道交通设计研究院.大连湾海底隧道建设工程施工图设计:沉管隧道结构施工图[R].上海:上海市隧道工程轨道交通设计研究院,2019.

[2] 大连湾海底隧道有限公司.大连湾海底隧道建设工程施工及质量验收标准[S].大连:大连湾海底隧道有限公司,2019.

[3] JTS 275—2000,海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].

[4] JGJ 52—2006,普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S].

[5] 大连信德建设工程检测有限公司.大连湾海底隧道建设工程北方寒冷地区沉管隧道耐久性专题研究报告[R].大连:大连信德建设工程检测有限公司,2017.

[6] 王迎飞,李超,宋雪峰.沉管混凝土抗裂性能温度应力试验评价及配合比优选[J].水运工程,2014(9):37-42.