

文章编号:0451-0712(2006)03-0096-09

中图分类号:U445.57

文献标识码:B

海工高性能混凝土的配制与施工

唐斌华, 谭 涛, 朱建顺

(路桥华东工程有限公司 上海市 200135)

摘 要: 主要从海工高性能混凝土的配制、裂缝的防治、大体积混凝土施工、蒸汽养生等方面进行总结,供同行参考。

关键词: 海上桥梁; 高性能混凝土; 耐久性能; 裂缝防治; 大体积混凝土; 蒸汽养生

海上桥梁由于地处海水环境中,当海水中的 Cl^- 渗透到混凝土中的钢筋表面时,就会破坏钢筋表层钝化膜,导致钢筋锈蚀和结构破坏。为满足耐久性要求,采用海工高性能混凝土,其特性除强度和拌和物的和易性必须满足设计和施工要求外,还应根据构件的具体使用条件和环境,具备所需要的防止钢筋锈蚀的性能及抗冻性与抗渗性。

通过深入分析混凝土劣化机理和控制耐久性因素,科学地选择组成材料和进行混凝土配合比设计,再通过生产、浇捣和养护,以达到有效地防止 Cl^- 渗透,延长结构工作寿命的目的。海工高性能混凝土与普通混凝土相比除强度与和易性两项质量指标外,还明确提出并规定了耐久性指标即采用 Cl^- 扩散系数(D_a)与电通量(C)两项指标衡量混凝土的抗 Cl^- 渗透性。

1 海工高性能混凝土耐久性指标试验

混凝土在海水中预防腐蚀的关键是具有抗 Cl^- 渗透能力,其途径通常采用降低水灰比和掺入优质矿物掺合料的方法来提高混凝土的密实度。掺入矿物掺合料的目的是通过火山灰反应效应降低基体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 C-S-H 中的 Ca^{+2} 离子,使基体变得密实。衡量混凝土耐久性指标多采用 90 d Cl^- 扩散系数(D_a)与 28 d 电通量(C)等两项指标。

1.1 耐久性指标与试验方法

其试验方法主要参考 ASTM C1202 标准:混凝土电通量值以标准养护 28 d 试件在 6 V 恒压电流下 6 h 通过混凝土试件的电量确定。混凝土 Cl^- 扩散系

数以标准养护 28 d 的试件,在试验温度为 20 °C 时,浸泡于 NaCl 浓度为 3% 的水溶液中 90 d 时的 Cl^- 表面扩散系数 D_a 确定,耐久性指标见表 1。

表 1 混凝土电通量值与 Cl^- 扩散系数指标

混凝土构件类型	环境分区	电通量 C	Cl^- 渗透系数 D_a m^2/s
桩	水位变动区或水下区	$\leq 2\ 000$	$\leq 3.0 \times 10^{-12}$
承台	水位变动区	$\leq 1\ 000$	$\leq 1.5 \times 10^{-12}$ (套箱) $\leq 2.0 \times 10^{-12}$ (内芯)
箱梁	大气区	$\leq 1\ 000$	$\leq 1.5 \times 10^{-12}$
墩柱	大气区或浪溅区	$\leq 1\ 000$	$\leq 1.5 \times 10^{-12}$

注:以上指标参考《东海大桥高性能海工混凝土技术要求》。

1.2 试验用原材料

水泥采用低碱 PO42.5(R) 与 PI52.5(R) 水泥,掺合料采用 II 级粉煤灰与 S95 级磨细高炉矿渣,减水剂采用聚羧酸盐类高效减水剂。碎石采用粒径为 5~25 mm 的舟山石料,砂采用福建省闽江产的中砂。

1.3 试验方法与试验结果

影响混凝土密实度的因素主要有水灰比、单位用水量,单位水泥用量及掺合料的品质与掺量及粗细骨料的级配情况。水灰比影响孔隙率的多少,因此影响导电量和抗 Cl^- 渗透性,水灰比越大,孔隙率越高,混凝土越不密实,电通量指标值越大。但水灰比过小影响混凝土的和易性,混凝土粘稠不利于施工。掺合料的掺入比例与掺合料种类及品质,影响混凝土的抗 Cl^- 渗透性。采用高标号低碱硅酸盐水泥,降低单位水泥用量,提高掺合料用量,其主要目的是降

低混凝土中富余的Ca(OH)₂。Ca(OH)₂一般以板状晶体的形式存在,其强度较低,抗渗透能力差。试验室根据以上试验原则,部分试验结果见表2。电通量与水泥比、掺合料的关系见图1所示。

表 2 部分试验结果汇总

编号	胶凝材料/kg				用水量 kg	水灰比 W/C	电通量/C	Cl ⁻ 扩散系数 × 10 ⁻¹² m ² /S
	水泥	I 级粉煤灰	矿粉	硅粉				
1	430(PO42.5)	90			170	0.33	1 801	
2	336(PI52.5)	144			174	0.36	2 364	
3	336(PI52.5)	144			152	0.32	1 557	
4	220(PO42.5)	100	140(S95)		195	0.42	1 520	1.85
5	140(PI52.5)	185	140(S95)		150	0.32	850	1.41
6	160(PI52.5)	140	160(S95)		152	0.33	960	1.27
7	288(PI52.5)	168		15	152	0.32	988	
8	312(PI52.5)	143		25	162	0.34	1 146	
9	312(PI52.5)	143		25	152	0.32	696	
10	240(PI52.5)	77	144(S95)	12	165	0.35	1329	

注:表中试验坍落度均在12~18 cm之间,和易性良好,强度等级为C50。

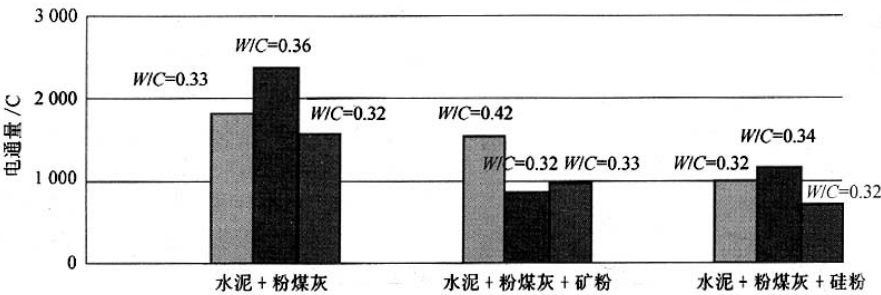


图 1 电通量与水泥比、掺合料的关系

1.4 试验总结

从试验结果来看,粉煤灰的掺入对改善电通量值贡献较大。双掺即掺入粉煤灰与矿粉优于单掺,硅粉的掺入能改善电通量指标。有资料表明矿粉的掺量少于胶凝材料的30%时,对降低混凝土的导电量不明显。

水胶比对电通量影响明显,水胶比越小,电通值越小。有资料表明高性能混凝土的水胶比宜控制在0.35以下,总胶凝材料宜大于400 kg/m³。水胶比越小,混凝土中富余的自由水越少,相应的孔隙率就低,混凝土就越密实。

选用优质干净、级配良好的骨料也很重要,一般细集料含泥量不大于2%,细度模数在2.6~2.9之间较合适,粗骨料含泥量不宜大于1%,粒径不宜大于25 mm,采用连续级配。集料中的含泥量将影响混凝土的强度与密实度。

2 专用掺合料在东海大桥中的应用

东海大桥采用海工高性能混凝土专用掺合料配制混凝土,这种做法可降低海上运输成本,最大可能地发挥掺合料的效能,提高混凝土的密实度。高性能海工混凝土专用掺合料是以高炉矿渣(微粉)、粉煤灰、硅灰等活性矿物掺合料按一定比例复合并深加工而成。根据其组分不同及应用技术特点,在东海大桥的应用中将掺合料分为I型和II型。I型和II型的区别是II型中掺有一定量的硅粉,其矿物掺合料的比例也有一定的区别。

水泥矿物组成见表3,I型掺合料化学成分见表4,高性能海工混凝土专用掺合料技术要求及混凝土配合比见表5和表6。

3 海工高性能混凝土施工与质量控制

3.1 施工与质量控制

表 3 水泥矿物组成

矿物成分/%				化学成分/%					
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	其他
59.5	18.1	7.6	10.49	21.96	5.07	3.45	65.25	2.21	

表 4 I 型掺合料化学成分 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	其他
35~39	20.4	3.6	32	6.0	

表 5 高性能海工混凝土专用掺合料技术要求

项 目	指 标	
	I 型专用掺合料	II 型专用掺合料
密度/(g/cm ³)	≥2.8	≥2.7
比表面积/(m ² /kg)	≥450	≥600
流动度比/%	≥105	≥100
活性指数 %	1 d	≥35
	7 d	≥75
	28 d	≥95

表 6 东海大桥高性能混凝土部分配合比汇总

项 目	承台	墩柱	箱梁	箱梁合拢段
胶凝材料用量/(kg/m ³)	420	440	460	427+53(膨)
掺合料种类和用量/(kg/m ³)	I 型	II 型	I 型	I 型
	294	264	276	171
水胶比	0.35	0.35	0.33	0.34
7 d 强度/MPa	33.1	36.1	36.7	62.3
28 d 强度/MPa	50.4	54.4	58.8	68.0
28 d 弹性模量/(×10 ⁴ MPa)			4.0	
电通量/(C)	841	699	886	798
Cl ⁻ 扩散系数/(×10 ⁻¹² m/s ²)	1.26	1.18	1.18	1.10

注:采用 PI52.5(R)水泥。

3.1.1 防止 Cl⁻引入新拌混凝土中

对原材料中的 Cl⁻含量做出严格的限制。拌和物总 Cl⁻含量小于 0.06%(占胶凝材料质量百分比)。防止构造物被 Cl⁻污染,尽量采用岸上预制,达到龄期后安装。采用淡水养生,到达规定强度后拆模。

3.1.2 控制进场原材料质量

确保每批进场原材料符合要求,重点是混凝土减水剂与胶凝材料的适应性。

3.1.3 混凝土拌制与浇注

海工高性能混凝土较普通混凝土拌制延长约 40 s,注意施工用水是否与理论用水相符。

混凝土浇注过程中采用薄层连续浇捣,每层厚度不超过 30 cm。及时排出泌水,采用强力振捣。

3.1.4 防止混凝土离析、板结

海工高性能混凝土由于水泥用量较低,单位用

水量较少等原因,对用水量极为敏感,从而容易出现离析现象,在施工过程中应严格加以控制,否则将影响混凝土的质量。离析的主要表现形式为:刚拌制出机的混凝土气泡明显增多,用铁锹翻动时能听到明显的气泡破裂声音,骨料与胶凝材料分离,且混凝土的两边或上层浮出一层黑色或黄色物质,静置一段时间后,用铁锹铲动困难,较为严重的粘在地上或其他物体上,导致泵送管堵塞,在灌孔时,混凝土粘在料斗或导管上,导致混凝土无法下到孔底,从而形成断桩。

导致混凝土离析的原因很多,有原材料的原因,有配合比原因,也有在拌制过程中设备误差的原因,因此应具体问题具体分析。一般查找原因宜采取排除法,如在浇注混凝土时发现混凝土离析,可采用同样的原材料,在试验室按相同配合比进行试拌,如未发现离析,应重点检查拌和设备的计量,如试验室也发现离析应重点分析材料与配合比的原因。砂子过粗也会影响混凝土离析,一般高性能混凝土用砂除细度模数在 2.6 左右较为适宜外,0.315 mm 处筛的通过量也很重要,一般要求大于 15%,最好在 20% 左右。水泥用量较少将导致混凝土和易性、稳定性较差,这主要是由于目前市面上的减水剂主要是针对于水泥的物理与化学特性而研制,减水剂对掺合料也有一定的分散作用(即减水),但掺合料物理与化学性能由于生产工艺等原因,表现得不稳定,因而混凝土也容易出现离析,这就是平时施工中有时混凝土离析,有时不离析的一个重要原因。防止产生此现象的一个主要方法是每批掺合料与减水剂到场后均应做适应性试验,如发现适应性不好,或退材料或通知厂家改善其性能,在施工中碰到轻微的离析,可采取在保证水灰比不变的情况下适当调整外加剂的掺量。另外碎石的级配也影响混凝土离析,单级配或级配不合理的碎石容易使混凝土离析。

机械原因导致的混凝土离析,拌和设备最容易出现密封性不好,出现渗漏现象,使水与外加剂的实际用量多于理论用量,因此,拌和设备应定期自行标定,有怀疑时也要进行标定。另外输送泵输送罐的紧密性也会导致混凝土离析,由于高性能混凝土粘度较大,输送罐的 S 阀磨损较大,一般 3 000~5 000 m³ 要换一次罐,否则会由于输送罐磨损将冷却水吸进泵管中,导致混凝土离析。

3.1.5 防止混凝土泌水

混凝土泌水与混凝土离析原因较相近,一般混凝土离析必然会导致混凝土泌水,但混凝土泌水不

一定混凝土就会离析,混凝土泌水有材料的原因,也有配合比的原因,此处重点讲述胶凝材料自身的原因。混凝土泌水一般不影响混凝土的内在质量,但会影响混凝土的外在质量,其主要表现是结构出现砂线,泌水严重的表面砂全露在外面,形成麻面,没有光洁度。如果胶凝材料自身泌水,解决起来较为麻烦,防止的方法主要就是更换胶凝材料。水泥泌水在国家标准上没有明确要求,根据经验,采用0.5的水灰比拌制净浆,静置一段时间后最大泌水率大于5%即认为该水泥泌水较大。另外的一个方法可采用锥形瓶,将水灰比为0.5的胶体装入其中进行观察,一般泌水较为严重的,从玻璃瓶外能明显观察到其泌水的情况。其表现形式为:开始泌水时,水一般是杂乱无章地从低部向上渗透,时间稍长后,汇聚在一块,形成毛细管道向上渗透,慢慢地将此处水泥浆带走,形成我们平时所说的砂线,如发现其表面砂线非常多,且表面清水很多,可说明其泌水较为严重。矿粉不利于控制泌水,粉煤灰有利于控制泌水,如泌水较为严重时,可适当调整二者的比例。

3.1.6 防止混凝土过于粘稠

高性能混凝土主要由于用水量较低,采用高效减水剂强力分散,且胶凝材料用量较大,导致混凝土较为粘稠,主要缺点是不利于混凝土泵送。防止的主要方法为在保证耐久性指标的前提下,适当加大水胶比,或加大单位用水量,适当降低减水剂的掺量。

3.1.7 海工高性能混凝土的裂缝控制

海工高性能混凝土有效的裂缝控制是施工与应用中需要重点注意的,同时也是区别于普通混凝土施工的重点所在。难点主要表现在高性能混凝土对精细化施工要求高,在不符合要求的条件下,更容易开裂。另外海工高性能混凝土对裂缝自身的要求更严,比如在裂缝的宽度、深度等方面较普通混凝土要求更严,如果产生了裂缝,就失去了其耐久性的意义。产生裂缝的原因很多,有混凝土自身的原因,同时也有施工中的原因,重点还在科学防治。

防止裂缝产生的方法有合理选材与优化配合比设计及后期施工预防。由于要实现海工高性能混凝土耐久性的目的,除尽可能地发挥非活性材料粉煤灰的作用外,还需要采用其他活性材料如矿粉、硅粉、复活型掺合料。试验与应用资料表明粉煤灰能明显提高混凝土的密实度,降低混凝土的水化热,减少收缩,因此在配合比设计的时候最大可能地发挥粉煤灰的作用。但是如果只用单一粉煤灰,在强度与耐

久性指标等方面还有不能满足要求的方面,多采用双掺技术,即粉煤灰与矿粉同时掺入,必要时还需掺入硅粉。矿粉与硅粉的掺入是否有利于裂缝控制尚存在争议,但应用表明,掺硅粉与大掺量矿粉的混凝土较未掺或掺量较少的混凝土在裂缝控制方面要难些。

海工高性能混凝土不论采用何种配合比,施工过程中要特别注意养生,否则可能会导致混凝土收缩与温度裂缝。养生的整体原则是保温保湿。保湿养生分为早期养生与后期养生两个阶段。混凝土浇注完成至混凝土终凝此阶段为早期养生,此阶段极容易由于前期失水产生干缩裂缝,该裂缝深度较浅,但宽度较宽(在0.2~1 mm),分布没有规则,虽然裂缝未达钢筋处,但仍会影响混凝土的耐久性。预防的方法可在混凝土浇注完成后采取喷雾养生,即采用喷雾器向混凝土表面喷雾,无外观要求的可在混凝土的表面覆盖塑料薄膜保湿养生。如发现混凝土表面出现塑性收缩裂缝,用抹子将其拍打闭合。混凝土终凝后立即盖上湿土工布,在湿土工布上盖塑料布保湿养生,有条件可采取蓄水养生的办法(冬季施工除外)。模板拆除后,采取喷养生液与保湿养生相结合的办法进行养生,即模板拆除后立即喷上养生液,围上湿土工布再在其外包裹塑料布,养生期不短于15 d。

当内外温差、降温速率、截面温度梯度过大时均有可能导致温度裂缝。混凝土浇注完成后在混凝土表面覆盖保温层保温,在模板外喷保温材料保温,埋设温度传感器监测温度,薄壁结构内外温差小于15℃,大体积内外温差小于25℃。当混凝土温度与气温温差小于上述温度时,拆除模板,在其外包裹土工布保温,为防降温过快在气温骤降时不要拆模板。

3.2 施工总结与探讨

(1)海工高性能混凝土在密实度方面具有普通混凝土无可比拟的优越性,大掺量引进矿物掺合料,降低水泥用量,配合使用高性能高效减水剂,采用低水胶比能明显提高混凝土的密实度,尤其是采用专用复合掺合料效果更为明显。试验与应用结果表明,将电通指标控制在1 000 C以下,无须采用新材料,利用现有的材料进行合理的配合比是能满足要求的。

(2)在施工过程中根据结构工程所处海水环境中的具体条件,合理地确定耐久性指标即电通量与 Cl^- 扩散系数值,不能盲目地追求其低值,有资料表明电通量值在1 000 C以下时, Cl^- 渗透性是非常低的,如果将指标值定的过高,在试验与施工过程中为了满足这一要求,可能会引进一些不利于施工与裂

缝控制的因素。另外还可以选择合理的龄期作为耐久性指标的规定值,比如可放宽到56 d或90 d。不同的结构部位,不同的施工方法可采用不同的耐久性指标。总之确定工程耐久性指标时,要综合考虑其他耐久性条件。

(3)根据近几年的海工高性能混凝土的应用,在裂缝防治方面要困难于普通混凝土,在施工过程中应引起足够重视,但只要采用科学合理的施工方法是完全可以预防的。施工前对其性能做出全面的了解,根据其性能制定出合理的温控措施与养护方法,除大体积混凝土外薄壁结构也需要进行温控。

(4)海工高性能混凝土在和易性方面表现出相对粘稠,容易离析、泌水等缺点。但只要采用合理的配比与施工方法是可以解决与预防的,颗珠山大桥塔柱高105 m,采用一级泵送,顺利地完成了施工,保证了质量。

(5)采用复合掺合料,由于其品种较为单一,比例固定,在施工过程中不太利于不同结构部位对混凝土不同的技术要求。

4 海工高性能大体积混凝土施工与温控措施

海工高性能大体积混凝土具有普通大体积混凝土与海工高性能混凝土的所有特点,在质量方面既要求不能出现有害裂缝的同时又要求具有高抗 Cl^- 渗透性,在海上施工难度较大,需科学合理地组织施工。以东海大桥颗珠山大桥主墩承台为例介绍施工方法与温控措施。

4.1 工程概况

颗珠山大桥主跨为332 m。采用双塔双索面叠合梁结构。东主墩单个承台长25 m,宽24 m,厚5.0 m,混凝土方量3 000 m^3 ,一次性浇注完成。

4.2 原材料及配合比

水泥采用52.5(R),掺合料采用粉煤灰与矿粉按一定比例经矿粉厂二次磨细而成(其化学成分及性能指标见表4与表5),减水剂采用聚羧酸盐高效减水剂,减水率在24%~28%之间,采用福建闽江中砂,碎石采用5~25 mm连续级配碎石。混凝土配合比及质量控制指标要求见表7。

表7 颗珠山大桥混凝土配合比及质量指标

配合比/(kg/m^3)						质 量 要 求		
52.5(R)水泥	掺合料	砂	石	减水剂	水	R_{28} 强度 MPa	电通量 C	Cl^- 扩散系数 m^2/s
126	294	770	1 063	4.62	147	50.4	841	1.26×10^{-2}

4.3 混凝土性能试验

4.3.1 水化热试验

加工3个尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的保温箱,外侧采用厚为3 mm的钢板,内侧用木板,中间填充10 cm厚的发泡聚胺脂保温材料,热量损失试验采用100 $^{\circ}\text{C}$ 沸腾水装满保温箱,12 h内每间隔1 h用温

度传感器测定温度,计算热量损失。热量损失系数为0.75。按上述配合比拌制混凝土装入保温箱中,测定入模温度,然后在混凝土的顶面立即喷厚为10 cm的发泡聚胺脂保温材料,在混凝土中间埋设温度传感器,测温数据见表8。

表8 绝热温升温度记录

时间/h	0	3	12	20	24	28	36	47	49	60	68	72	77	94
温度/ $^{\circ}\text{C}$	24	35	38	46	51	55	60	64	63	60	59	58	57	53
温升/ $^{\circ}\text{C}$	0	11	14	22	27	31	36	40	39	36	35	34	33	29

经过试验,在第47 h,混凝土的温度升至顶点,最高温升值为40 $^{\circ}\text{C}$,考虑保温箱的散热系数为0.75, $40/0.75=53\text{ }^{\circ}\text{C}$,预计绝热温升温度在53 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

4.3.2 弹性模量试验

按照试验规程进行试验,测定3 d、7 d、28 d弹性模量分别为 2.7×10^4 MPa、 3.5×10^4 MPa、 4.5×10^4 MPa。

4.3.3 收缩试验

(1)空气中成型1 d,水中养生2 d,在湿度为55%~65%,温度17~25 $^{\circ}\text{C}$ 的环境中养生,并测定其干缩值,试验结果见表9。

试验结果表明,水中养生时间较短,空气中的干缩率最大值为 7.4×10^{-4} 。

(2)空气中成型1 d,水中养生11 d,在湿度为55%~65%,温度为17~25 $^{\circ}\text{C}$ 的环境中养生,并测

表9 收缩试验结果(一)

龄期/d	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	16	20	21	22	23	24	25	28
干缩率 ($\times 10^{-4}$)	1.9	3.1	3.5	3.7	3.7	4.1	4.1	5.0	5.4	5.6	6.0	7.2	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4

定其干缩值,试验结果见表10。

表10 收缩试验结果(二)

龄期/d	13	14	19	20	21	22	28
干缩率/($\times 10^{-4}$)	0.6	1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

试验结果表明,水中养生11 d后,干缩率较小。

4.4 温度应力估算

4.4.1 计算混凝土内部的中心温度

采用下式计算混凝土内部的中心温度:

$$T_{\max} = T_j + T_{(r)} \cdot \xi$$

式中: ξ 为散热系数,本次浇注厚度为5 m,取散热系数 $\xi=0.9$; T_j 为入模温度,假设气温为20℃,入模温度为23℃; $T_{(r)}$ 为预计绝热温升温度,按前面计算取53℃。

$$T_{\max} = 23 + 53 \times 0.9 = 70.7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4.2 混凝土表面温度估算

混凝土表面温度指的是混凝土外表以内5 cm处的温度。

混凝土与模板、覆盖层之间的热传递,可假定为完全是热的传导。当混凝土与空气接触时,表面热量与混凝土表面温度 T_b 和气温 T_a 之差成正比。

$$H = h + 2h'$$

式中: H 为混凝土的计算厚度,m; h 为混凝土的实际厚度,m; h' 为混凝土的虚厚度,m。

$$h' = K \cdot \lambda / \beta$$

其中: λ 为混凝土的热导率,取2.33, W/m·K; β 为混凝土模板及保温层的传热系数, W/m²·K; K 为计算折减系数,取0.666。

β 按下式计算:

$$\beta = 1 / (\sum \delta_i / \lambda_i + 1 / \beta_a)$$

式中: δ_i 为各种保温材料的厚度,m,本工程假设不采取任保温措施; λ_i 为各种保温材料的热导率, W/m·K,具体取值可查表; β_a 为空气层传热系数,可取23 W/m²·K。

代入计算式:

$$H = 5.0 + 2 \times 0.666 \times 2.33 / 23 = 5.14 \text{ m}$$

$$T_{w(r)} = T_a + 4x(h-x)\Delta T_{(r)} / H$$

根据气象资料,4月份平均气温为23℃,假设最

低气温为17℃。第3 d混凝土温度达到峰值。

第3 d的表面温度 $T_{w(3)} = 17 + 4 \times 0.07 \times (5.0 - 0.07) \times (70.7 - 17) / 5.14 = 31.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

第3 d内外温差,如混凝土表面不采取保温措施,内外温差为70.7-31.4=39.3,远远超过规范要求(小于25℃)。

4.4.3 估算降温的温度应力

可用下式计算各龄期的最大拉应力:

$$\sigma_{(t)} = -\frac{\alpha}{1-\mu} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{\text{ch} \beta_i \cdot L/2}\right) E_i(t) \Delta T_i(t, \tau_i)$$

式中: $\sigma_{(t)}$ 为各龄期混凝土基础所承受的温度应力; $E_i(t)$ 为各龄期混凝土的弹性模量; α 为混凝土线膨胀系数, 1.0×10^{-5} ; ΔT_i 为各龄期综合温差,均以负值代入; μ 为泊松比,当基础为双向受力时取0.15; $H_i(t, \tau_i)$ 为各龄期混凝土松弛系数; L 为基础的长度;

$$\beta_i = \sqrt{\frac{c_x}{HE_{(T)}}};$$

其中: H 为承台第一层厚度,为5 000 mm; c_x 为总阻力系数(地基水平剪切刚度), N/mm³,此外 C_x 取 $100 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^3$ 。

降温速度越快,松弛系数越大,所产生的拉应力也越大,如拉应力超过混凝土的抗拉能力,会出现贯穿裂缝。本次计算按每天降温3℃计算,拉应力小于混凝土抗拉强度。

4.5 大体积混凝土施工方法

通过对海工高性能混凝土的各项试验,以及对承台大体积混凝土温度应力的估算,为避免承台大体积海工高性能混凝土产生裂缝,我们制定以下温控及养生目标:

内外温差小于25℃,即混凝土的核心温度与混凝土各个方向的温差均小于25℃;

平均降温速度小于3℃/d,即混凝土核心温度、表面温度降温均小于3℃/d;

养生相对湿度95%,即混凝土的表面要充分湿润,养生期不低于14 d。

4.5.1 保证混凝土的中心温度与表面温差小于25℃的方法

(1)降低混凝土的入模温度:混凝土搅拌前对碎石、砂洒水降温。

(2)降低混凝土的绝热温升:薄层连续浇注,即浇注每层厚度不超过30 cm。在承台内设冷却水管,冷却水管内径为3 cm 的白铁皮管,横向、竖向间距均为1.5 m。其冷却效果经估算能降低中心温度10℃左右。

(3)在混凝土表面的湿麻袋上,盖一层三色布,再在其上覆盖2~3层土工布,承台侧模外喷聚胺脂保温材料保温,经估算与施工实践,能将中心温度与混凝土表面温差控制在25℃以内。

4.5.2 保证混凝土的中心温度与侧面温差小于25℃的方法

在承台双壁套箱内侧钢模上喷厚为3 cm 的发泡聚胺脂保温材料,其保温效果经过试验发现模板的内侧即混凝土的表面温度与模板的外侧即气温温差在15℃以内,具有良好的保温效果。

喷涂方法是:采用组合聚胺醚和异氰酸酯(俗称A料和B料)按一定的比例使用聚胺脂发泡机与空压机将混合料喷在模板上,两种料经两根管混合后,在模板上瞬间发泡,形成多孔真空的泡沫。A料是由聚醚多元醇、泡沫稳定剂、发泡剂、复合催化剂配制而成;B料基本为进口,化学代号MDI。

4.5.3 保证降温速度小于3℃/d的方法

主要通过控制调节冷却水管的流量,以及进、出

水口的水温,调整混凝土表面的保温层的厚度,侧模外喷聚胺脂保温材料等方法来控制(注:混凝土的底部为厚2 m 的封底混凝土,理论上应有良好的保温效果)。

4.5.4 保证混凝土表面湿度在95%以上的方法

混凝土收浆完成后(接近终凝,人踩上去没有脚印),立即盖上湿麻袋,在这之前如发现干缩裂缝,反复将其收抹闭合。再在其上覆盖一层三色布进行保湿。专人定期养生,养生时如发现麻袋出现失水情况,将冷却水管出水口的热水适当地从混凝土的较高处浇在麻袋上,不间断检查麻袋的湿润状态。

4.5.5 温度监测

采用大体积混凝土电脑测温(有线)系统对温度进行监测,其组成包括用户计算机、计算机端监测软件、数据适配器、电源系统、数据及电源传输线,现场测温仪、传感器等。

根据监测的温度,及时对现场发出指令,确定保温层的厚度及调节冷却水管的流量及温度。将现场的温度控制在目标值之内。

4.6 温度监测结果

根据测点温度绘制的中心点表面温度曲线见图2所示,侧表面温度曲线见图3所示,混凝土中心温度与侧面温差曲线见图4所示。

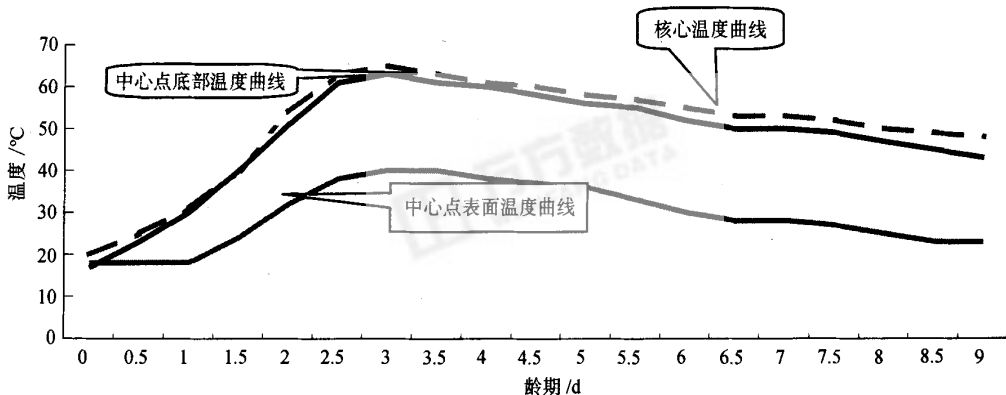


图2 中心测点温度曲线

从图2可看出,中心温度峰值为65℃,入模温度为18℃,温升值为47℃,与施工前的温升估计值48℃较为接近,内外温差基本控制在25℃内,降温速度控制在3℃/d内。9 d后的降温较为缓慢,降温速度在1~2℃/d,达到了预期效果。

从图3可看出,内外温差基本控制在25℃内,降温速度也控制在3℃/d内。混凝土侧面的温度指的

是靠内侧模板5 cm 处的温度。

从图4可看出,核心温度与侧面中心温度温差小于25℃。

4.7 施工总结与探讨

在承台大体积混凝土的施工中,由于采取了以上控制措施和施工技术,在混凝土的表面和侧面均未出现有害裂缝,达到了预期目的。

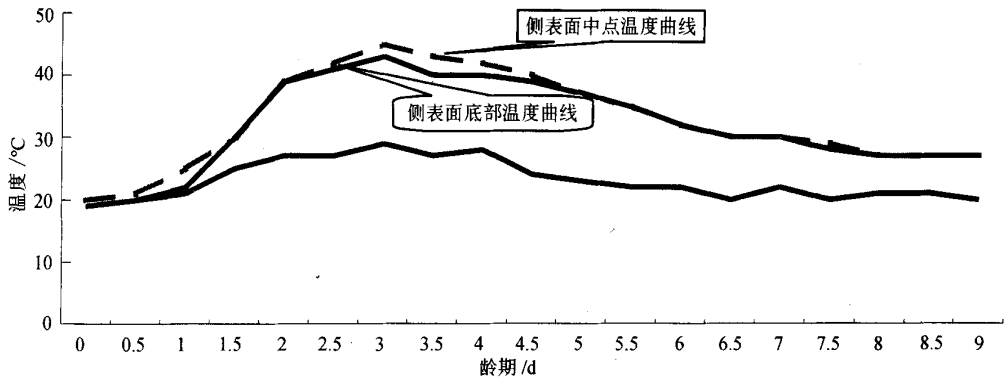


图3 侧表面温度曲线

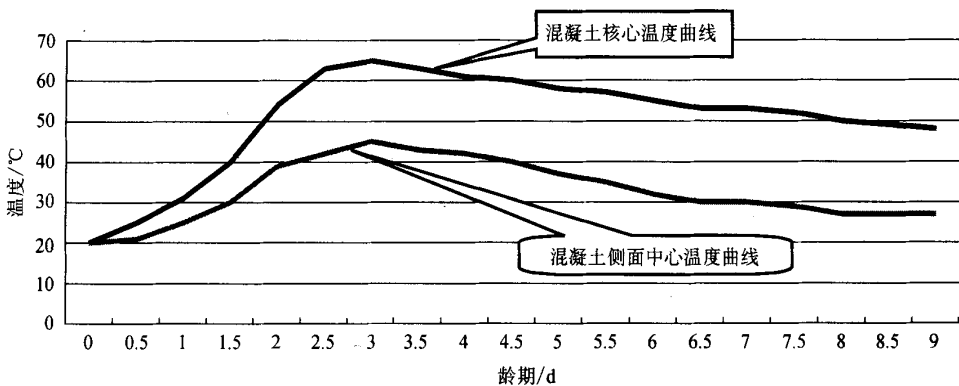


图4 混凝土中心温度与侧面温度曲线

在以后海洋环境的大体积混凝土施工中,还需注意以下几个问题。

(1)注意对内外温差与降温速度的控制,经温度应力估算,降温速度过快是产生贯穿裂缝的主要原因,因此在施工中应加以严格控制,控制方法是对承台的5个面注意保温,注意随时调整冷却水管的冷却效果。

(2)注意混凝土中心点的温度与混凝土侧面(内模内侧测点)的温差,实际混凝土的内外温差应该指的是混凝土的中心温度与混凝土所有面的温差,不是单纯的混凝土中心温度与表面温度的温差,本次施工在控制温差时,在模板的外侧喷保温材料,温控效果非常理想。

(3)注意加强保湿养生,从施工前的干缩试验可看出,海工高性能混凝土在养护不良的情况下收缩非常大,收缩产生的应力也是非常大的,本次施工始终让混凝土表面有0.5~1.0 cm高的养生水,养生水采用出水口的热水,勿采用冷水养生,否则会加快降温速度与加大内外温差。

(4)注意对混凝土早期收缩性裂缝的控制,在混凝土浇筑至终凝这一阶段,应加强早期保湿养生。

产生温度应力的主要原因是混凝土受到了约束,约束分为自约束和外约束。减少自约束的办法主要是控制温差即温度平衡,本次施工采取的方法主要针对自约束。减少外约束的方法可以在承台底部即与封底混凝土与承台结合部设滑动层。

5 海工高性能混凝土冬季蒸汽养生

5.1 概述

东海大桥Ⅶ标主桥颗珠山大桥东引桥箱梁采用移动模架施工,一次性浇注单幅50 m跨箱梁。施工正好赶上冬季施工,由于工期较为紧张,计划15 d左右施工一片箱梁,气温平均温度低于5℃以下共21 d,出现冰冻13 d。采用蒸汽养生是必要的。

5.2 施工

根据蒸汽养护所需要汽量,及用汽过程中的损耗,采用1台4 t蒸汽锅炉作为供汽设备。

在蒸汽养护时,箱梁表面用脚手搭设高为50 cm的支撑架,上铺隔热油布。蒸汽养生示意图5所示。

5.3 养护

5.3.1 蒸汽养护阶段划分

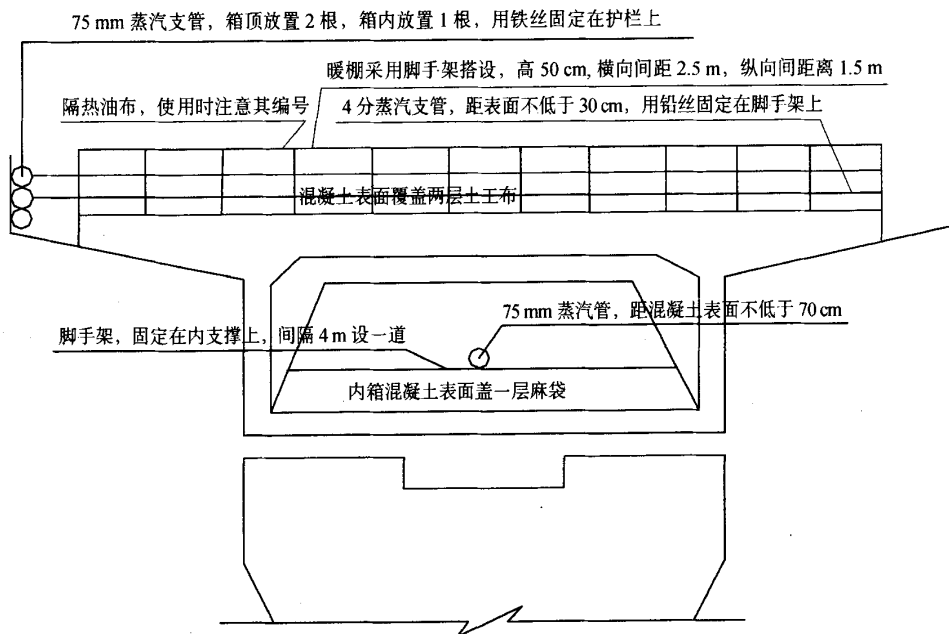


图5 蒸汽养生示意

(1)静养阶段:混凝土浇注完毕,静置3~6 h,在混凝土表面覆盖两层土工布,内箱表面用麻袋或土工布覆盖,将蒸汽支管与主管连接好,并将支管用铅丝绑扎在脚手架上,不能直接将支管放置在混凝土面上,至少离表面有30 cm高,箱内蒸汽管距混凝土表面不小于70 cm,在梁体表面搭设脚手架,在箱梁外围木格栅,外盖油布,待混凝土初凝后施放蒸汽。

(2)升温阶段:控制升温速度不大于5℃/h(根据规范,表面系数=表面积/全部体积 <6 ,构件蒸汽升温速度不大于10℃/h,50 m箱梁表面系数=5.73 <6 ,故升温速度取5℃/h),混凝土由初始温度上升至45℃,需要8~6 h,此阶段测温人员应注意观察温度的变化,升温较快的地方调整其支管阀门,控制蒸汽输入量。各部位温度要平稳上升。

(3)恒温阶段:保持温度在40~45℃之间,每降低5℃通一次蒸汽,使温度在40~45℃之间波动,恒温阶段控制时间在48 h \pm 12 h,接近张拉强度时停止供汽。在此阶段要求点与点之间、面与面之间的温差不超过15℃。

(4)降温阶段:降温速度要求不大于3℃/h,采取自然降温的方法,接近张拉强度后,停止供汽,让其自然降温,如果局部降温速度过快,可采用适当补充少部分蒸汽。此阶段的时间控制在15~20 h。待温度接近自然温度后,拆开油布,准备张拉。

一片梁的蒸汽养护控制在72 h左右。

张拉试件以同条件养护为准,试件放置在箱梁顶面的暖棚内。

5.4 施工总结

(1)采用蒸汽养生使箱梁在3~4 d内达到张拉强度要求,保证了工期,未出现有害温度裂缝,保证了质量。

(2)实际养护控制温度为箱顶30~35℃,箱内控制温度35~40℃,其主要原因是由于在此温度内强度能达到要求,温升值太高不利于裂缝控制。

(3)在养护过程加强温度监控,蒸汽出机温度为180℃,如控制不好,会导致温度过高出现裂缝,本次施工专人专职监控温度,海上风大,注意箱顶暖棚的稳固性,不能漏气,否则会出现温度不平衡也会导致产生裂缝。

(4)海工高性能混凝土冬季施工的重点就是要注意整体温度平衡,不能失水。

(5)本次施工中由于前期估计不足,采用4 t蒸汽锅炉偏大,实际上采用3 t蒸汽锅炉即可。以后施工可采用移动式蒸汽锅炉养生,可节省管道费用。

6 结语

本文的主要目的是将海工混凝土施工中积累的一些经验进行总结,对施工中碰到的一些问题做些探讨。由于水平有限,本文尚存在不足之处,望同行专家指正。