



沉管混凝土抗裂性能温度应力试验评价 及配合比优选*

王迎飞, 李 超, 宋雪峰

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 通过温度应力试验, 研究不同配合比的温度变化规律、体积变形性能以及应力发展规律, 分析胶凝材料用量、水泥所占比例、浆体比率等因素对混凝土抗裂性能的影响。分别采用断裂温差、温度收缩系数以及抗裂安全系数 3 种不同的抗裂性能指标对混凝土抗裂性能进行评价, 优选出具有最优抗裂性能的配合比用于港珠澳大桥沉管预制施工。

关键词: 沉管混凝土; 温度应力试验; 断裂温差; 温度收缩系数; 抗裂安全系数; 抗裂性

中图分类号: U 214.1*8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0037-06

Evaluation of crack resistance and optimization mix proportion for immersed tube concrete based on temperature stress testing

WANG Ying-fei, LI Chao, SONG Xue-feng

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on temperature stress testing, we study the temperature variation, volume deformation properties and stress of different mix proportion, and analyze the effect of the amount of cement, cement proportion, slurry ratio on the crack resistance of concrete. Using the temperature difference of fracture, temperature shrinkage coefficient and cracking safety coefficient, we evaluate the crack resistance of concrete and choose the mix proportion with the best anti-cracking performance, which is applied to the construction of immersed tube precasting in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge project.

Keywords: immersed tube concrete; temperature stress testing; temperature difference of fracture; temperature shrinkage coefficient; cracking safety coefficient; crack resistance

大体积混凝土结构在约束作用下产生的温度应力常常是导致混凝土结构早期出现裂缝的主要因素^[1]。通过试验研究并选择在温度应力作用下具有良好抗裂性能的混凝土配合比, 对于控制大体积混凝土结构早期裂缝具有重要的现实意义。温度应力试验机是 20 世纪 60 年代出现, 并于近年得到极大发展的混凝土抗裂性能测试装置^[2]。温度应力试验机通过测试温度与约束作用下混凝土的变形行为和力学性质, 对混凝土抗裂性能进

行评价, 是迄今在混凝土开裂敏感性评价上最有效的试验设备和研究方法^[3-5]。

港珠澳大桥沉管隧道是体积庞大、结构形式与施工工艺复杂的大体积混凝土结构, 特别容易因温度、收缩原因在预制阶段就出现危害性裂缝, 严重威胁沉管结构的整体耐久性及使用寿命^[6]。为提高港珠澳大桥沉管结构抗裂性能, 有必要针对结构及预制施工特点, 通过温度应力试验评价沉管混凝土抗裂性能, 优选出满足沉管混凝土工

收稿日期: 2014-02-12

*基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAG07B04)

作者简介: 王迎飞 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事混凝土结构耐久性技术研究。

作性能、力学性能以及耐久性能要求,并具有良好的抗裂性能的配合比。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

试验采用的水泥为华润水泥(平南)P·II 42.5 硅酸盐水泥,粉煤灰为谏壁电厂 I 级粉煤灰,矿粉为唐山盾石 S95 级矿渣粉,粗集料为新会白水带 5~20 mm 连续级配无碱活性花岗岩碎石,细集料为广东西江细度模数为 2.6~2.9 的无碱活性河砂,减水剂为江苏博特 PCA-I 型缓凝型聚羧酸高性能减水剂。

1.2 温度应力测试方法

约束条件为试验所用 HYPY-II 混凝土温度应力试验机提供的 100% 全约束,试验环境温度控制在 $(22.5 \pm 2.5) ^\circ\text{C}$,混凝土入模温度控制在 $20 \sim 25 ^\circ\text{C}$ 。混凝土浇筑成型后,按照绝热模式运行,在绝热条件下混凝土试件温度逐步升高,当达到最高温峰后保温 $(72.0 \pm 1.0) \text{ h}$,然后按照

$(2.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率进行急速冷却,直至试件断裂。

2 沉管混凝土配合比

港珠澳大桥预制沉管混凝土采用泵送进行全断面浇筑要求坍落度为 200~220 mm、坍落扩展度为 400~450 mm,其结构安全、拆模与顶推施工要求混凝土 28 d 强度等级为 C45、56 d 强度等级为 C50,120 a 设计使用寿命要求氯离子扩散系数 28 d 不大于 $6.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、56 d 不大于 $4.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,抵抗 40 m 深水压要求混凝土抗渗等级大于 P12。

根据沉管混凝土性能要求,利用大掺量矿物掺合料胶凝材料体系配制沉管混凝土,选择出同时满足工作性能、力学性能、耐久性能要求的 4 组配合比(表 1 和表 2)。4 组配合比的其它性能均满足要求,须针对抗裂性能,通过温度应力试验,从温度、体积变形以及应力等方面深入研究各组配合比的抗裂性能,从中优选出具有最优抗裂性能的配合比用于港珠澳大桥沉管预制施工。

表 1 沉管混凝土配合比

编号	胶凝材料/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水胶比	水泥/%	粉煤灰/%	矿渣粉/%	砂率/%	外加剂/%	砂率/%	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1 [#]	420	0.35	40	25	35	43	1.0	42	2 395
2 [#]	420	0.35	45	25	30	43	1.0	43	2 395
3 [#]	420	0.35	50	20	30	43	1.0	42	2 400
4 [#]	450	0.33	35	25	40	42	1.0	41	2 390

表 2 沉管混凝土性能

编号	坍落度/mm	扩展度/mm	抗压强度/MPa			氯离子扩散系数/ $(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		抗水压渗透等级
			3 d	28 d	56 d	28 d	56 d	28 d
1 [#]	210	440	26.4	57.1	61.8	5.0	2.2	> P12
2 [#]	215	440	28.8	59.9	65.3	4.7	2.5	> P12
3 [#]	220	450	33.8	55.5	62.4	4.5	2.7	> P12
4 [#]	200	420	24.8	55.6	63.2	4.1	2.9	> P12

3 试验结果

3.1 温度变化规律

在绝热条件下测得各组混凝土试件的温度变化规律如图 1 所示,在温度应力试验过程中,各组试件均经历了升温、保温及降温 3 个不同的阶段。1[#]、2[#]与 4[#]三组配合比的温度变化规律比较相似,在混凝土浇筑入模后,混凝土试件温度逐

渐上升,并在 51~59 h 龄期达到最高温度,保温阶段 3 组试件温度变化曲线基本重合在一起,经历 72 h 保温养护后,混凝土试件开始急速冷却,并在 152~157 h 龄期试件断裂,受配合比组分影响各组试件的断裂温度有所不同。3[#]配合比水泥在胶凝材料中所占比例为 50%,在 4 组配合比中水泥用量最多,升温阶段水化速率明显快

于其它3组混凝土,在33.4 h就达到最高温度,保温72 h后,试件冷却,在接近130 h时试件断裂,断裂时间早于其它3组配合比,断裂温度高于其它3组。

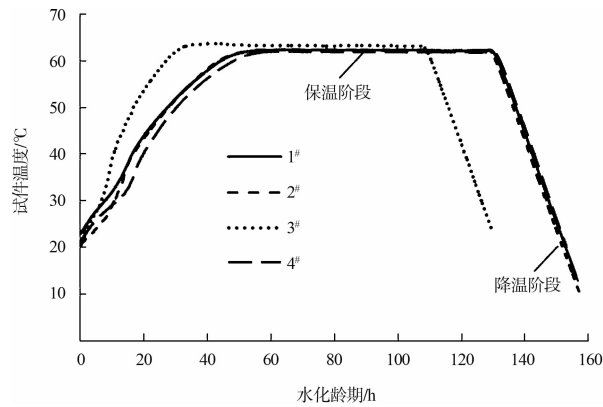


图1 混凝土温度变化规律

温度应力试验过程中测得各组混凝土试件的温度指标如表3所示。在入模温度较接近的条件下,混凝土试件的最高温度、最高温度出现时间、绝热温升、断裂温度、断裂时间以及断裂温差等指标均与混凝土抗裂性能相关。对于胶凝材料用量相同的混凝土,最高温度、绝热温升由混凝土胶凝材料中水泥所占比例决定,水泥比例越高,混凝土最高温度、绝热温升越大,出现最高温度的时间越早(图2),水泥用量越大,其绝热温升也就越大。虽然4#配合比胶凝材料用量比前3组配合比多 30 kg/m^3 ,但其水泥在胶凝材料中所占比例为35%,水泥用量是4组配合比中最低的,受水化速率影响,最高温度出现时间晚于其它3组配合比,绝热温升介于1#与2#配合比之间。

表3 混凝土温度指标

编号	入模温度/℃	最高温度/℃	最高温度出现时间/h	绝热温升/℃	断裂温度 ^① /℃	断裂时间/h	断裂温差 ^② /℃
1#	23.1	62.4	55.18	39.3	13.0	156.71	49.4
2#	20.9	62.4	51.48	41.5	10.6	157.02	51.8
3#	20.5	63.7	33.40	43.2	23.3	129.77	40.4
4#	21.5	62.0	58.58	40.5	20.7	152.75	41.3

注:①断裂温度:温度应力试验过程中,急速冷却降温直至试件断裂时对应的温度;

②断裂温差:温度应力试验降温过程中试件最高温度与断裂温度之差。

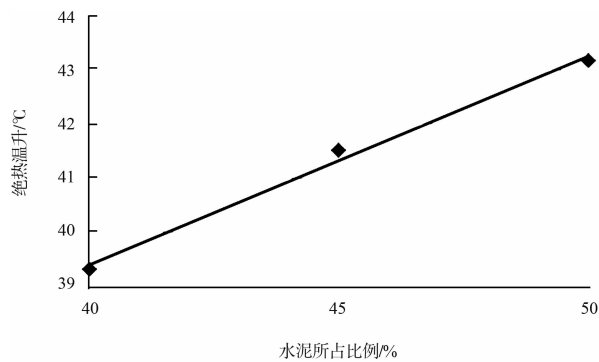


图2 绝热温升与水泥所占比例的关系

断裂温差是评价混凝土抗裂性能的关键性温度指标:断裂温差越大,混凝土抗裂性能越强。断裂温差与水泥所占比例关系如图3所示,1#、2#与3#这3组胶凝材料用量、水胶比相同,胶凝材料组成不同的配合比,断裂温差与绝热温升变化规律有所不同,断裂温差与水泥所占比例无线性

关系,水泥所占比例从40%增大至45%,断裂温差增大,在45%附近达到最高值,并出现拐点,然后随着水泥比例增加,断裂温差急速降低至40℃附近。4#配合比受胶凝材料用量影响,虽然其水泥用量最低,绝热温升也介于1#与2#之间,但其断裂温差小于1#与2#,与3#配合比较为接近,并略高于3#配合比。

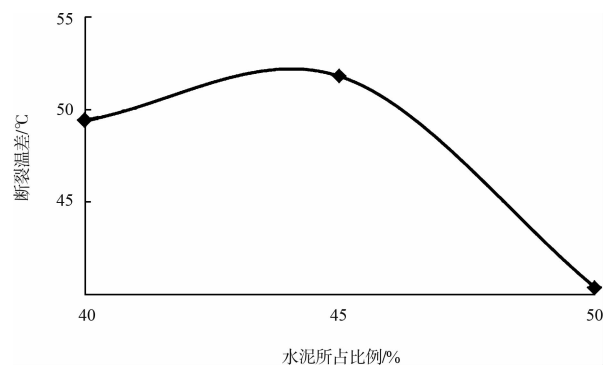


图3 断裂温差与水泥所占比例的关系

通过对混凝土断裂温差的分析可以发现,并不是水泥在胶凝材料用量中所占比例越低,混凝土的抗裂性能就越强。只有水泥比例合适的混凝土抗裂性能才好,2[#]配合比的水泥比例为45%,是水泥比例最合适的配合比,其断裂温差最大,抗裂性能最强。

3.2 体积变形规律

温度应力试验过程中测得全约束条件下混凝土试件的累计变形如图4所示。受胶凝材料水化进程影响,各组混凝土试件的体积变形均经历了升温膨胀、保温稳定、降温收缩,直至试件断裂的过程。约束试件的累计变形为自由变形与徐变之和,自由变形是与约束试件相同温度变化规律条件下无约束试件的温度变形与自身变形之和^[7]。温度应力试验混凝土试件膨胀受压应力作用,收缩受拉应力作用,徐变可抵消混凝土试件的部分膨胀或收缩。4组配合比累计体积变形呈3种变化趋势,1[#]与2[#]的体积变形趋势基本一致,受浆体比率影响,1[#]配合比在升温阶段的最大体积变形略大于2[#]配合比,保温阶段的体积变形与降温阶段的体积收缩量也略高一点。3[#]配合比胶凝材料用量与前两种配合比一样,且浆体比率更小,但其水泥用量远大于前两种配合比,胶凝材料水化速率明显更快,达到温峰的时间更早,混凝土开始急速冷却的时间也更早,相对于前2种配合比,其累计体积变形曲线整体向前移动了20 h。3[#]配合比的浆体比率最低,但受水泥快速水化作用影响,

其升温阶段最大体积变形、保温阶段体积变形以及降温阶段体积变形均介于1[#]与2[#]配合比之间。4[#]配合比的浆体比率最高,胶凝材料浆体是混凝土体积变形的主要因素,其升温阶段的体积膨胀、保温阶段与降温阶段的收缩明显大于其它3组配合比。

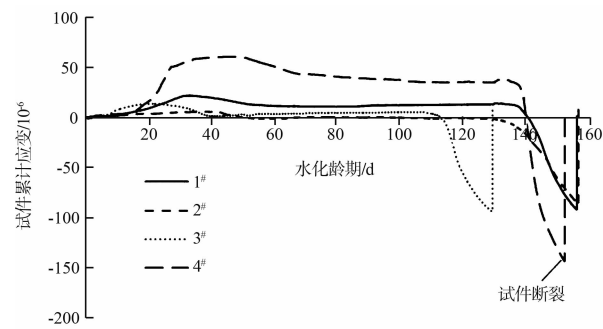


图4 混凝土体积变形规律

各组混凝土的体积变形指标如表4所示。温度收缩系数是评价约束混凝土试件在降温阶段受徐变影响的体积稳定性指标,温度收缩系数越小,混凝土体积温度稳定性越高,抗裂性也就越强。降温阶段,混凝土体积收缩,约束试件产生拉应力,拉应力引起的拉伸徐变可抵消混凝土部分的体积收缩,有利于提高混凝土的温度稳定性。混凝土温度收缩系数受浆体比率影响,但与浆体比率之间并无线性关系。2[#]配合比在升温阶段的体积变形最小,在保温阶段以及降温阶段的收缩最小,虽然其浆体比率并不是最低的,但其温度收缩系数是最小的,其温度稳定性最好。

表4 混凝土体积变形指标

编号	升温阶段最大体积 变形/ 10^{-6}	升温阶段最大体积 变形出现时间/h	保温阶段体积 变形/ 10^{-6}	降温阶段体积 变形/ 10^{-6}	温度收缩系数 ^① / $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	浆体比率 ^② /%
1 [#]	21.7	33.75	-1.2	-105.5	2.13	31.77
2 [#]	5.4	32.42	-0.3	-87.4	1.69	31.44
3 [#]	13.6	23.02	-6.0	-98.8	2.45	31.03
4 [#]	60.4	47.83	-14.7	-180.6	4.38	33.47

注:①温度收缩系数:温度应力试验降温过程中,受约束试件在降温阶段体积变形与断裂温差之商的绝对值;

②浆体比率:混凝土中胶凝材料、拌合水、外加剂以及含气量占混凝土单位体积的比率。

3.3 应力变化规律

全约束条件混凝土硬化过程中因温度与收缩产生的应力变化规律如图 5 所示。温升阶段, 混凝土膨胀试件受压应力作用, 并随温度升高而逐渐增大, 在温峰附近达到最大压应力。恒温阶段, 虽然混凝土无温度变形, 但胶凝材料的水化在继续进行, 在混凝土自收缩作用下, 压应力逐渐降低。降温阶段, 压应力迅速降低, 出现拉应力, 并随温度降低而逐渐增强, 当拉应力达到混凝土抗拉强度时, 试件断裂, 断裂应力即为混凝土的轴心抗拉强度。各组混凝土的应力变化规律与其受约束条件下的体积变形规律基本一致, 1[#]与 2[#]配合比在升温阶段体积膨胀较小, 混凝土受到的约束压应力也相对较小, 且压应力在保温阶段降至零点附近, 在降温阶段, 试件迅速转变为受拉状态, 拉应力随温度降低而增强。3[#]配合比最大压应力高于前两组配合比, 保温过程中压应力降低幅度略大, 在保温结束前的压应力略高一点, 开始降温后, 试件由受压转变为受拉状态。4[#]配合比温升过程的膨胀远大于前 3 组配合比, 其最大压应力也是最高的, 虽然保温过程中压应力降低了很多, 但在保温结束时, 其仍受到较大压应力的作用, 降温开始后, 压应力迅速降低, 直至试件由受压状态转变为受拉状态, 拉应力随温度降低而迅速增强。

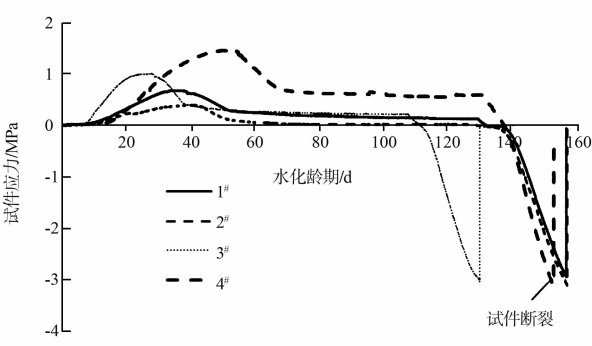


图 5 混凝土应力变化规律

各组混凝土的应力指标如表 5 所示。抗裂安全系数等于混凝土轴心抗拉强度与环境温度应力之商, 是评价混凝土抗裂性能的核心指标, 沉管混凝土的抗裂安全系数应不低于 1.15。1[#]与 2[#]配合比环境温度应力、环境温度应力出现时间、断裂应力、断裂时间以及抗裂安全系数均十分接近, 不过 2[#]配合比的断裂应力也即混凝土轴心抗拉强度略高, 因此 2[#]配合比的抗裂安全系数稍大一点, 混凝土抗裂能力也更强。3[#]配合比在试件温度降至环境温度时, 混凝土试件即断裂, 其抗裂安全系数最小, 4 组配合比中抗裂能力最弱。4[#]配合比环境温度应力出现时间以及断裂时间均明显晚于 3[#]配合比, 其抗裂安全系数略高于 4[#], 但明显低于 1[#]与 2[#]配合比。

表 5 混凝土应力指标

编号	环境温度应力 ^① /MPa	环境温度应力出现时间/h	断裂应力 ^② /MPa	轴心抗拉强度/MPa	断裂时间/h	抗裂安全系数 ^③
1 [#]	-2.12	150.08	-2.95	2.95	156.71	1.39
2 [#]	-2.10	149.05	-3.12	3.12	157.02	1.49
3 [#]	-3.03	128.85	-3.03	3.03	129.77	1.00
4 [#]	-2.92	150.42	-3.09	3.09	152.75	1.06

注: ①环境温度应力: 港珠澳大桥沉管预制厂区年平均温度 23 ℃, 在温度应力试验降温过程中混凝土试件降温至 23 ℃时产生的应力即为环境温度应力;
②断裂应力: 混凝土试件断裂时的拉伸应力值, 其绝对值即为混凝土轴心抗拉强度;
③抗裂安全系数 = 断裂应力/环境温度应力。

3.4 配合比优选

从温度性能、体积变形性能以及应力对 4 组配合比抗裂性能进行了对比分析, 如表 6 所示。断裂温差、温度收缩系数以及抗裂安全系数评价混凝土抗裂性能的 3 个指标, 在评价 4 组混凝土抗

裂性能上略有差异。对于 1[#]与 2[#]配合比的抗裂性能, 3 个评价指标评价结果高度一致, 2[#]配合比是抗裂性能最好的配合比, 1[#]次之。1[#]配合比与 2[#]相比, 水泥用量更低, 其绝热温升更低, 但受水泥比例以及水化程度影响, 其轴心抗拉强度也低

于 2[#]，在全约束条件下，2 组配合比降至环境温度的应力基本一致，但由于 1[#] 配合比的轴心抗拉强度明显低一些，因此在温度与收缩应力作用下的抗裂安全系数小于 2[#]，1[#] 配合比的抗裂性能也稍差。3[#] 与 4[#] 配合比，在断裂温差以及抗裂安全系数的评价方面是一致的，在温度收缩系数方面则有所不同。

表 6 混凝土抗裂性能对比

性能指标	评价指标	抗裂性能对比	抗裂性能最优配合比
温度性能	断裂温差	2 [#] > 1 [#] > 4 [#] > 3 [#]	
体积变形性能	温度收缩系数	2 [#] > 1 [#] > 3 [#] > 4 [#]	2 [#]
应力	抗裂安全系数	2 [#] > 1 [#] > 4 [#] > 3 [#]	

采用 3 种不同类型的抗裂性能评价指标，2[#] 配合比的抗裂性能均为最优。约束作用下产生的温度-收缩应力是港珠澳大桥沉管开裂的主要风险因素，为确保沉管混凝土在施工阶段不出现危害性裂缝，选择工作性能、力学性能、耐久性能满足沉管混凝土性能要求，并在温度应力试验测试中具有最佳抗裂性能的 2[#] 配合比为沉管预制施工用配合比。

4 结论

1) 在温度应力试验过程中，混凝土试件均经历了升温、保温及降温 3 个不同的阶段，温升阶段受压应力作用，降温阶段受拉应力作用，胶凝材料用量及水泥在胶凝材料中所占比例影响着混凝土的温度变化规律与应力变化规律，胶凝材料用量低且水泥比例合适混凝土的断裂温差大、抗

裂安全系数高，抗裂性好。

2) 受胶凝材料水化进程影响，全约束试件体积变形均经历了升温膨胀、保温稳定、降温收缩的过程，混凝土试件受约束应力作用产生徐变，可抵消混凝土试件的部分膨胀或收缩，混凝土温度收缩系数受浆体比率影响，但与浆体比率之间并无线性关系。

3) 通过断裂温差、温度收缩系数以及抗裂安全系数 3 个指标评价，优选出具有最优抗裂性能的配合比用于沉管预制施工。

参考文献：

[1] 王迎飞. 海工高抗裂混凝土制备及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 130-144.

[2] 李士伟, 李超, 王迎飞. 基于温度应力试验机的混凝土控裂技术研究现状[J]. 水运工程, 2010(10): 35-39.

[3] 林志海, 覃维祖. 温度应力试验机与温度应力实验[C]// 杭州: 第八届全国混凝土耐久性学术交流会论文集, 2012: 51-62.

[4] 陈波, 孙伟. 基于温度-应力试验的混凝土抗裂性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1 124-1 131.

[5] 胡曙光, 陈静, 周志峰. 约束可调式单轴温度-应力试验机控制系统[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 55-57.

[6] 李超, 王胜年, 王迎飞, 等. 港珠澳大桥全断面浇筑沉管裂缝控制技术[J]. 施工技术, 2012, 41(22): 5-8.

[7] 张涛, 覃维祖. 混凝土早期徐变对开裂敏感性的影响[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 89-92.

(本文编辑 郭雪珍)

著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。