UDC

中国土木工程学会标准

P T/CCES X－20XX

隧道二次衬砌混凝土控裂施工技术规程

Technical specification for construction technology of secondary lining concrete crack controlling in tunnel

（征求意见稿）

2024–XX–XX 发布 2025–XX–XX 实施

中国土木工程学会 发布

**中国土木工程学会标准**

隧道二次衬砌混凝土控裂施工技术规程

Technical specification for construction technology of secondary lining concrete crack controlling in tunnel

**T/CCES X－20XX**

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：202X年X月X日

20XX 北 京

前 言

本规程是根据中国土木工程学会《关于发布<2023年中国土木工程学会标准立项计划>的通知》（中土学标〔2023〕9号）的要求，由中铁隧道局集团有限会同有关单位编制完成。

在本规程编制过程中，编制组广泛调查研究和总结了国内外隧道工程二次衬砌混凝土施工经验，参考了国内外有关标准，并在广泛征求意见基础上，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，最后经审查定稿。

本规程的主要技术内容是：总则，术语、符号及参考标准，基本规定，抗裂性设计，材料，施工，检验。

请注意本规程的某些内容可能涉及专利。本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国土木工程学会学术与标准工作委员会负责管理，由中铁隧道局集团有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有修改意见或建议，请寄送中铁隧道局集团有限公司（地址：广东省广州市南沙区工业四路2号；邮政编码：511458；电子邮箱：394343652@qq.com）。

本规程主编单位：中铁隧道局集团有限公司

本规程参编单位：中铁隧道勘察设计研究院有限公司

广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室

东南大学

江苏苏博特新材料股份有限公司

西南交通大学

华南理工大学

成都天佑智隧科技有限公司

本规程主要起草人员： 杨朝帅，王 华，刘永胜，王育江，林春刚，冯欢欢，仇文革，刘庭金，尹健昊，李 明 ，谢 彪，高存成，牛富生，王百泉，贺雄飞，徐海廷，张丹枫，尚 伟，李 荆，郑若泓，李达强，卫心怡

本规程主要审查人员：

目 次

[1 总则 1](#_Toc22717)

[2 术语、符号及参考标准 2](#_Toc32115)

[2.1 术语 2](#_Toc26194)

[2.2 符号 3](#_Toc13923)

[2.3 参考标准 6](#_Toc14098)

[3 基本规定 8](#_Toc28560)

[4 抗裂性设计 9](#_Toc12004)

[4.1 参考标准 9](#_Toc11567)

[4.2 混凝土抗裂性设计 9](#_Toc22890)

[5 材料 11](#_Toc2963)

[5.1 一般规定 11](#_Toc3071)

[5.2 原材料 11](#_Toc21429)

[5.3 混凝土配合比 13](#_Toc14487)

[5.4 混凝土生产 14](#_Toc20753)

[5.5 混凝土运输 15](#_Toc176)

[6 施工 16](#_Toc23387)

[6.1 一般规定 16](#_Toc20659)

[6.2 混凝土浇筑 16](#_Toc23249)

[6.3 混凝土养护 17](#_Toc20341)

[6.4 抗裂性监测 18](#_Toc1084)

[7 检验 19](#_Toc2751)

[附录A 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法 20](#_Toc12766)

[附录B 混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试方法 29](#_Toc20733)

[附录C 混凝土自生体积变形测试方法 30](#_Toc10457)

[附录D 粉煤灰流动度比测试方法 31](#_Toc27018)

[附录E 混凝土拌合物出机温度计算方法 32](#_Toc22234)

[附录F 混凝土膨胀性能快速试验方法 33](#_Toc10288)

[附录G 现场小构件试验方法 34](#_Toc12811)

[本规程用词说明 37](#_Toc32212)

[条文说明 39](#_Toc30101)

Contents

[1 General provisions 1](#_Toc435778383)

[2 Terms, symbols and reference standards 2](#_Toc435778384)

[2.1 Terms 2](#_Toc435778385)

[2.2 Symbols 3](#_Toc435778386)

[2.3 Reference Standards 6](#_Toc435778386)

[3 Basic Requirements 8](#_Toc2079)

[4 Crack Resistance Design 9](#_Toc13870)

[4.1 Reference Standards 9](#_Toc15835)

[4.2 Crack Resistance Design of Concrete 9](#_Toc10107)

[5 Material 1](#_Toc1553)1

[5.1 General Requirements 1](#_Toc32669)1

[5.2 Raw Material 1](#_Toc23551)1

[5.3 Concrete Mix Proportion 1](#_Toc4340)3

[5.4 Concrete Production 1](#_Toc25658)4

[5.5 Concrete Transportation 1](#_Toc25259)5

[6 Construction 16](#_Toc21115)

[6.1 General Requirements 16](#_Toc1488)

[6.2 Concrete Pouring 16](#_Toc22255)

[6.3 Concrete Curing 17](#_Toc2026)

[6.4 Crack Resistance Monitoring 18](#_Toc5861)

[7 Test 19](#_Toc5986)

[Appendix A Design Method for Risk Control of Concrete Shrinkage Cracks 2](#_Toc5136)0

[Appendix B Test Method for the Ratio of 1-d Adiabatic Temperature](#_Toc20555)

[Rise to 7-d Adiabatic Temperature Rise of concrete 2](#_Toc20555)9

[Appendix C Test Method for Self Generated Volume Deformation of Concrete 3](#_Toc16055)0

[Appendix D Test Method for Flowability Ratio of Fly Ash 31](#_Toc7240)

[Appendix E Calculation Method for Outlet Temperature of Concrete Mixtures 3](#_Toc4746)2

[Appendix F Rapid Testing Method for Concrete Expansion Performance 3](#_Toc9876)3

[Appendix G Field Test Methods for Small Components 3](#_Toc23284)4

[Explanation for Wording in the Specification 37](#_Toc11656)

[Explanation of Provisions 39](#_Toc25376)

# 1 总 则

**1.0.1** 为提高山岭隧道复合式衬砌混凝土结构耐久性和防水效果，规范二次衬砌混凝土结构抗裂设计、材料、生产、运输、施工、检验，实现混凝土抗裂性可设计、可控制、可检验，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于铁路、公路等山岭隧道二次衬砌结构混凝土施工期收缩裂缝的控制。

**1.0.3** 山岭隧道二次衬砌混凝土裂缝控制除应符合本规程的规定外，尚应符合国家、行业、地方及企业等现行有关标准的规定。

**2 术语、符号及参考标准**

**2.1 术语**

**2.1.1** 混凝土抗裂性设计 crack resistance design of concrete

考虑混凝土结构、材料和环境耦合因素，计算由于混凝土温度和收缩引起的开裂风险，并通过优化相关参数，直至其达到目标阈值的过程。

**2.1.2** 收缩应力 shrinkage stress

混凝土收缩变形受到约束时，在混凝土内部产生的应力。

**2.1.3** 开裂风险系数 cracking risk coefficient

由混凝土收缩拉应力和混凝土抗拉强度的比值。

**2.1.4** 里表温差 temperature difference of center and surface

混凝土浇筑体内最高温度与外表面内50 mm处的温度之差。

**2.1.5** 7d内平均降温速率 average descending speed of temperature during 7 days

散热条件下，混凝土浇筑体芯部温度达到温升峰值后，7 d内平均温度下降值。

**2.1.6** 入模温度 temperature of mixture placing to mold

混凝土拌合物浇筑入模时的温度。

**2.1.7** 绝热温升 adiabatic temperature rise

混凝土浇筑体处于绝热状态，内部某一时刻温升值。

**2.1.8** 自生体积变形autogenous deformation

混凝土在恒温绝湿条件下，仅仅由于胶凝材料的水化作用引起的体积变形。

**2.1.9** 温控膨胀抗裂剂temperature controlling and shrinkage-compensating crack-resistance agent

兼有降低混凝土温升、补偿混凝土收缩的外加剂。

**2.1.10** 粉煤灰流动度比 fluidity ratio of fly ash

相同减水剂掺量下，受检浆体与基准浆体流动度的比值，以百分率表示。

**2.1.11** 水化热降低率 reduction ratio of heat of hydration

规定龄期内，基准砂浆和受检砂浆水化热之差与基准砂浆水化热的比值，以百分率表示。

**2.1.12** 复合式衬砌 composite lining

容许围岩产生一定的变形，而又充分发挥围岩自承载能力的一种衬砌。一般由初期支护、防水层和二次衬砌组合而成。

**2.2 符 号**

|  |  |
| --- | --- |
| *aA/c* | ——骨料质量与胶凝材料质量之比； |
| *C0(t,t0)* | ——基本徐变柔度函数； |
| *Cc* | ——混凝土的比热容（kJ/（kg∙°C）），无试验数据时，可取 0.92 kJ/（kg∙°C）~1.0 kJ/（kg∙°C）； |
| *Cd(t,t0,td)* | ——干燥徐变柔度（MPa-1）； |
| *Cm* | ——单位体积胶凝材料用量（kg/m3）； |
| *D* | ——有效厚度，对应板即为实际厚度； |
| *D0* | ——基准浆体流动度（mm）； |
| *D1* | ——受检浆体流动度（mm）； |
|  | ——等效弹性矩阵； |
| *E*0 | ——混凝土加载时的弹性模量（MPa）； |
| *E*(28) | ——混凝土28 d的弹性模量（MPa），以28 d强度作为设计依据时，可取*E*(28)*=Ecm*； |
| *EC* | ——水泥水化活化能，无试验数据时可按表A.3.2-2选取； |
| *Ecm* | ——弹性模量平均值（MPa）。 |
| *Eα* | ——混凝土中胶凝材料水化反应活化能（J/mol），无试验数据时可取30000 J/mol~40000 J/mol； |
| *fcm* | ——抗压强度平均值（MPa）； |
| *fck* | ——抗压强度设计值（MPa）； |
| *fctm* | ——抗拉强度平均值（MPa）； |
| *f*M∞ | ——强度或弹性模量平均值（MPa），无试验数据时，可按A.3.4-2~A.3.4-4计算； |
| *f*(*t*) | ——时间相关函数，无试验数据时，可取*f*(*α*(*t*))=1-exp(-0.2*t*0.5)； |
| *ft*(*t*) | ——*t*时刻混凝土抗拉强度（MPa）； |
| *f*[*α*(*t*)] | ——水化程度相关函数； |
| *H(t)* | ——相对湿度函数； |
| *h* | ——相对湿度； |
| *J*(*t*,*t*0) | ——徐变函数； |
| *k*1、*k*2 | ——水化放热相关系数，可按表A.3.1-2选取； |
| *kEa,FA、kEa, SL* | ——粉煤灰、矿渣粉对活化能的影响系数，可按表A.3.2-1选取，必要时进行插值计算； |
| *kh* | ——湿度影响系数； |
| [*k*] | ——刚度矩阵； |
| *L* | ——PVC管模具长度（mm）； |
| *L0* | ——初凝时千分表初始读数（mm）； |
| *Lt* | ——*t*时刻千分表读数（mm）； |
| *m* | ——与水泥品种、浇筑温度等有关的经验系数（d-1），C30~C40混凝土可取0.8 d-1~1.0 d-1，C50~C60混凝土可取1.0 d-1~1.5 d-1； |
| *n* | ——表面法线方向； |
| *Pc、PSL*、*PFA* | ——水泥、矿渣粉、粉煤灰的掺量（%）； |
| *Q* | ——胶凝材料放热总量（kJ/kg）； |
| *Q(t)* | ——*t*时刻胶凝材料放热量（kJ/kg）； |
| *QC* | ——水泥放热总量（kJ/kg），无试验数据时，可按表A.3.1-1选取； |
| *q*1 | ——瞬时弹性变形系数； |
| *q*2、*q*3、*q*4、*q*5 | ——实验数据拟合的经验系数； |
| *qa* | ——水化放热速率（w/m3）； |
| R | ——普适气体常数（J/（mol·K）），取8.315 J/（mol·K）； |
| *S*(*t*) | ——时间函数； |
| *T* | ——混凝土出机温度（°C）； |
| *Ta0* | ——绝热温升测试时的入模温度（°C）； |
| *T*a,max | ——最大绝热温升值（°C）； |
| *Ta(t)* | ——*t*时绝热温升（°C）； |
| *Ta(t+1)* | ——以*t*为起点之后1 d混凝土绝热温升（°C）； |
| *Ta(t+7)* | ——以*t*为起点之后7 d混凝土绝热温升（°C）； |
| *T*a(*t*a) | ——混凝土龄期*ta*时的绝热温升（°C）； |
| *Tc、Tm* | ——水泥、矿物掺合料等粉料的入机温度（°C）； |
| *Tg、Ts* | ——粗骨料、细骨料的入机温度（°C）； |
| *Tw、Tice* | ——拌合水、冰的入机温度（°C），冰的入机温度低于0 °C时，*Tice*应取负值； |
| *t* | ——时间（d）； |
| *t* | ——绝热温升达到3.0 °C的时间，或大于且最接近3.0 °C的时间（d）； |
| *t0* | ——开始持荷时间（d）； |
| *ta* | ——绝热温升测试龄期（d）； |
| *ta,eq* | ——实际工程中时间*t*相对于绝热温升测试过程中的等效龄期（d）； |
| *t*d | ——开始干燥时间（d）； |
| *W* | ——每立方米混凝土胶凝材料用量（kg/m3）； |
| *Wc、Wm* | ——水泥、矿物掺合料重量（kg）； |
| *Wg、Ws* | ——粗骨料、细骨料干重量（kg）； |
| *Ww、Wice* | ——拌合水、冰重量（kg），当混凝土不加冰时，*Wice*=0； |
| *Wwg、Wws* | ——粗骨料、细骨料中所含水重量（kg）； |
| *w* | ——用水量（kg/m3）。 |
| *w/b* | ——混凝土水胶比； |
| *α* | ——指数常数，无试验测试值时，弹性模量可取0.5，抗拉强度可取1.0； |
| *α*0 | ——初始水化程度，无试验数据时，C30~C40可取0.15~0.20，C50~C60可取0.10~0.15，C60以上可取0.05~0.10。 |
| *αmax* | ——胶凝材料的最大水化程度； |
| *α(t)* | ——*t*时刻胶凝材料的水化程度； |
| *β* | ——放热系数（kJ/（m2·h·°C））； |
| *β*T | ——线膨胀系数（°C-1），无试验数据时，简化计算取1.0×10-5 °C-1； |
| *ΔL* | ——采用石蜡密封混凝土前混凝土液面距离PVC管顶部距离（mm）； |
| △*T* | ——温差（°C）； |
|  | ——温度应变增量； |
|  | ——自生体积变形、干燥收缩变形应变增量； |
| *△εn* | ——应变增量； |
| {△*F*} | ——节点荷载增量阵列； |
| {△*Fc*} | ——混凝土徐变引起的节点荷载增量； |
| {△*FT*} | ——混凝土温度变形引起的节点荷载增量； |
| {△*FG*} | ——混凝土自生体积变形、干燥收缩变形引起的节点荷载增量。 |
| {△*δ*} | ——节点位移增量阵列； |
| *ε* | ——混凝土自生体积变形，精确至1.0×10-6； |
| *ε*T | ——温度变形； |
| *εas* | ——自收缩变形； |
| *εas28* | ——28 d自收缩变形，无试验数据时，可取(10*fck*-200)×10-6； |
|  | ——混凝土干燥收缩终值； |
|  | ——徐变应变增量； |
| *λ* | ——混凝土导热系数（w/（m·K）），无试验数据时，简化计算时可取2.5 w/（m·K）； |
| *ρ* | ——混凝土密度（kg/m3）； |
| *σ*(*t*) | ——*t*时刻混凝土内部最大拉应力（MPa）； |
| *τsh* | ——尺寸影响系数； |
| *φ* | ——混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值（%）； |
| *χ* | ——粉煤灰流动度比（%）。 |

**2.3 参考标准**

1 《混凝土结构设计规范》 GB 50010

2 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 GB/T 50080

3 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082

4 《混凝土质量控制标准》 GB 50164

5 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204

6 《混凝土结构耐久性设计标准》 GB/T 50476

7 《大体积混凝土温度测控技术规范》 GB/T 51028

8 《通用硅酸盐水泥》 GB 175

9 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596

10 《混凝土外加剂》 GB 8076

11 《混凝土外加剂匀质性试验方法》 GB/T 8077

12 《建设用砂》 GB/T 14684

13 《建设用卵石、碎石》 GB/T 14685

14 《预拌混凝土》 GB/T 14902

15 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046

16 《粉煤灰中铵离子含量的限量及检验方法》 GB/T 39701

17 《硅酸盐水泥熟料矿相X射线衍射分析方法》 GB/T 40407

18 《混凝土水化温升抑制剂》 JC/T 2608

19 《高性能混凝土用骨料》 JG/T 568

20 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55

21 《混凝土用水标准》 JGJ 63

22 《建筑工程冬期施工规程》 JGJ/T 104

23 《公路隧道施工技术规范》 JTG/T 3660

24 《铁路混凝土工程施工质量验收标准》 TB 10424

**3 基 本 规 定**

**3.0.1** 二次衬砌混凝土结构应在初步设计及施工图设计阶段进行抗裂性专项设计。

**3.0.2** 建设单位可参照本规程规定，在工程招标文件中明确实现二次衬砌收缩裂缝控制目标的相关要求。

**3.0.3** 厚度大于50 cm的二次衬砌宜按大体积混凝土有关规定执行。

**3.0.4** 二次衬砌结构施工前，施工单位宜对开裂风险系数进行验算，以最终确定混凝土入模温度、分段浇筑长度、里表温差及降温速率等控制指标，制定相应的技术措施。

**3.0.5** 二次衬砌混凝土应在围岩和初期支护变形基本稳定且初期支护验收合格后施作，特殊环境隧道二次衬砌施作时机应满足相关标准规范的要求。

**3.0.6** 本规程的工作流程，可参照图3.0.6的步骤执行。

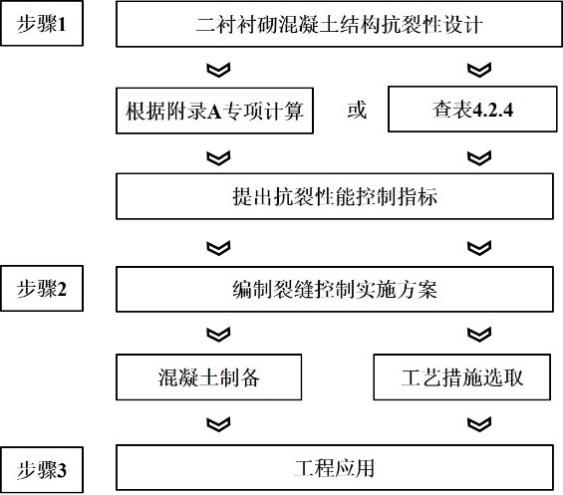


图3.0.6 本规程工作流程

**4 抗裂性设计**

**4.1 参考标准**

**4.1.1** 混凝土结构抗裂性设计，应满足工作性能、力学性能、耐久性能等要求。

**4.1.2** 根据混凝土裂缝控制预期目标提出混凝土抗裂性设计指标时，应符合下列规定：

**1** 当要求混凝土不开裂保证率≥95%时，应控制开裂风险系数≤0.70；

**2** 当要求混凝土少开裂时，可控制开裂风险系数＞0.70且＜1.0。

**4.2 混凝土抗裂性设计**

**4.2.1** 混凝土的抗裂性设计指标包括混凝土材料抗裂性能指标和混凝土结构抗裂性能控制指标。

**4.2.2** 混凝土材料抗裂性能指标应包括下列内容：

**1** 7 d绝热温升；

**2** 1 d绝热温升与7 d绝热温升比值；

**3** 7 d和28 d自生体积变形。

**4.2.3**  混凝土结构抗裂性能控制指标应包括下列内容：

**1** 入模温度；

**2** 分段浇筑长度；

**3** 里表温差；

**4** 7d内平均降温速率。

**4.2.4**  混凝土抗裂性设计指标的确定应符合下列规定：

**1** 当具备试验条件时，混凝土抗裂性设计指标根据开裂风险系数控制目标按附录A计算得出；

**2** 当不具备试验条件时，为控制开裂风险系数≤0.70，混凝土材料抗裂性能指标可按表4.2.4-1中A类选取，混凝土结构抗裂性能控制指标可按表4.2.4-2选取；

**3** 当不具备试验条件时，为控制开裂风险系数＞0.70且＜1.0，混凝土材料抗裂性能指标可按表4.2.4-1中B类选取，混凝土结构抗裂性能控制指标可按表4.2.4-2选取。

**表4.2.4-1 混凝土材料抗裂性能指标**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 混凝土材料类别 | 7d绝热温升  (°C) | 1d绝热温升与7d绝热温升比值 (%) | 7 d自生体积变形(×10-6) | 28 d自生体积变形 (×10-6) |
| A类 | ≤50 | ≤50 | ≥+200 | ≥+100 |
| B类 | ≤50 | / | / | ≥-150 |

**表4.2.4-2 混凝土结构抗裂性能控制指标**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 控制要求 | | |
| 隧洞内平均气温 (°C) | ≥25 | 10~25 | <10 |
| 入模温度 (°C) | 宜≤30，应≤35 | ≤隧洞内平均气温+10且≤30 | 5~20 |
| 分段浇筑长度 (m) | ≤12 | | |
| 里表温差 (°C) | ≤15 | | |
| 7d内平均降温速率 (°C/d) | ≤3.0 | | |

注**：**1 表4.2.4适用于强度等级不超过C40、厚度不超过50 cm的二次衬砌结构；

2 混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试按附录B执行；

3 自生体积变形测试按附录C执行；

4 自生体积变形“+”表示膨胀，“-”表示收缩。

**5 材 料**

**5.1 一般规定**

**5.1.1**  所选用的原材料应符合国家现行有关标准的规定，且性能稳定。此外，应考虑环境条件的影响，使配制的混凝土满足设计要求的工作性能、力学性能、耐久性能等要求。

**5.1.2** 原材料进场与贮存应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902和《混凝土质量控制标准》GB 50164、现行行业标准《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424和《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660等相关标准规范的规定，进场原材料应坚持先检验、后使用的原则，且应按规定提供质量证明材料，严禁使用不合格原材料。

**5.1.3** 混凝土生产及运输能力应满足混凝土浇筑工艺要求及相关标准规范的规定，并应满足施工工艺对坍落度损失、入模坍落度、入模温度等的技术要求。

**5.1.4** 在混凝土配合比使用过程中，应根据混凝土质量的动态信息及时调整。

**5.2 原材料**

**5.2.1**  水泥的使用应符合下列规定：

**1** 水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175的规定，不宜使用早强水泥，当采用其他品种时，其性能指标应符合国家现行有关标准的规定；

**2** 宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥，铝酸三钙含量不宜大于8.0 %，比表面积宜为300 m2/kg~350 m2/kg，且不应大于380 m2/kg，碱含量不宜大于0.60%；

**3** 水泥进场温度不宜大于60 °C；

**4** 水泥存储不宜超过90 d，对存储超过90 d的水泥，应重新进行检验，并按复验的结果使用；

**5** 严禁使用有结块的水泥，严禁混用不同品牌和不同强度等级的水泥。

**5.2.2** 粉煤灰的性能应符合下列规定：

**1**  粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 F类II级及以上的规定，需水量比不宜大于100%，烧失量不宜大于8.0%，三氧化硫含量不应大于3.0%；

**2** 粉煤灰流动度比不宜小于95%，其测试方法按附录D执行；

**3** 粉煤灰铵离子含量的限量及检验方法应符合现行国家标准《粉煤灰中铵离子含量的限量及检验方法》GB/T 39701的规定。

**5.2.3** 矿渣粉的性能应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046的规定，宜采用S95级矿渣粉，比表面积不应小于400 m2/kg，不宜大于450 m2/kg。

**5.2.4** 细骨料的性能应符合下列规定：

**1** 宜优先选用级配合理、质地坚固、吸水率低、空隙率小的洁净天然II区河砂，其性能应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684的规定，含泥量不宜大于2.0%，泥块含量不应大于1.0%；

**2** 配制泵送混凝土用砂300 μm筛孔的颗粒通过量不宜少于15%；

**3** 当使用机制砂时，其性能应符合现行行业标准《高性能混凝土用骨料》JG/T 568的规定。

**5.2.5** 粗骨料的性能应符合下列规定：

**1** 应选用级配合理、粒形良好、质地坚固、线膨胀系数小的洁净碎石，其性能应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685的规定，泥粉含量不应大于1.5%，泥块含量不应大于0.2%；

**2** 粗骨料最大公称粒径不宜大于31.5 mm，宜采用连续级配或两种及以上单粒级掺配组成连续级配，松散堆积空隙率不宜大于43%。

**5.2.6** 不得选用有碱活性的骨料。当骨料存在潜在的碱-硅酸反应危害时，应采取能抑制碱-硅酸反应的有效措施；当骨料存在潜在的碱-碳酸盐反应危害时，严禁用作混凝土骨料。

**5.2.7** 宜优先选用聚羧酸系高性能减水剂，其性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119的规定，收缩率比不宜大于100%。

**5.2.8** 温控膨胀抗裂剂的性能应符合表5.2.8的规定：

**表5.2.8 温控膨胀抗裂剂性能指标**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | | 性能指标 | |
| Ⅰ | Ⅱ |
| 细度 | 比表面积/(m2/kg) | ≥250 | |
| 1.18 mm方孔筛筛余/% | ≤0.5 | |
| 含水率/% | | ≤1.0 | |
| 凝结时间/min | | —— | |
| 水化热降低率/% | 24 h | ≥30 | |
| 7 d | ≤15 | |
| 限制膨胀率/% | 20 ℃水中7 d | ≥0.035 | ≥0.050 |
| 20 ℃空气中21d | ≥-0.010 | ≥0.000 |
| 60 °C水中28 d与3 d之差 | ≥0.015，≤0.060 | |
| 抗压强度/MPa | 7 d | ≥22.5 | |
| 28 d | ≥42.5 | |

注：1 水化热降低率测试按现行行业标准《混凝土水化温升抑制剂》JC/T 2608执行，掺加温控膨胀抗裂剂的砂浆为受检砂浆，温控膨胀抗裂剂取代部分水泥，其掺量为10%；

2 细度、含水率、限制膨胀率、抗压强度测试按现行团体标准《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082执行；

3 当用户对凝结时间有特殊要求时，指标由供需双方协商确定。

**5.2.****9** 混凝土用水的性能应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的规定。

**5.3 混凝土配合比**

**5.3.1** 混凝土配合比设计应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55和现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476的规定，遵循低用水量、低水泥用量、适当水胶比的原则。

**5.3.2** 宜单掺20%~35%的粉煤灰。

**5.3.3** 温控膨胀抗裂剂掺量应根据开裂风险系数控制目标及试验确定，掺量宜为8%~10%。

**5.3.4** 混凝土最大水胶比、胶凝材料用量宜符合表5.3.3的规定。

**表5.3.3 不同强度等级混凝土最大水胶比、胶凝材料用量**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 凝胶材料用范围/(kg/m3) |
| C30 | 0.45 | 320~380 |
| C35 | 0.45 | 350~400 |
| C40 | 0.43 | 380~440 |
| C45 | 0.40 | 400~450 |
| C50 | 0.36 | 420~480 |

**5.3.5** 混凝土坍落度应根据运输距离、浇筑部位、浇筑工艺、振捣方式、自然环境等因素综合确定，入模坍落度应符合下列规定：

**1** 边墙及拱下部坍落度宜为160 mm~200 mm；

**2** 拱顶部坍落度宜为180 mm~220 mm。

**5.3.6** 隧道二次衬砌拱部及钢筋密集区域等混凝土填充困难的部位宜采用中高流动性混凝土，混凝土性能应符合下列规定：

**1** 边墙坍落度宜为160 mm~200 mm，扩展度不小于450 mm；

**2**  拱部坍落度宜为180 mm~220 mm，扩展度不小于500 mm，扩展时间2 s~8 s。

**5.3.7** 遇有下列情况之一时，应重新进行配合比设计：

**1** 当混凝土性能指标有变化或有其他特殊要求时；

**2** 当原材料品质发生显著改变时；

**3** 同一配合比的混凝土生产间断三个月以上时。

**5.4 混凝土生产**

**5.4.1** 混凝土拌和设备应配有自动称量设备，应按配合比准确称量，每盘混凝土拌和料计量偏差不应大于表5.4.1规定的范围，每班检查不应少于1次。

**表5.4.1 混凝土原材料计量允许偏差（按质量计，%）**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 原材料品种 | 胶凝材料 | 骨料 | 水 | 外加剂 |
| 每盘计量允许偏差 | ±2 | ±3 | ±1 | ±1 |
| 累计允许偏差 | ±1 | ±2 | ±1 | ±1 |

**5.4.2** 对同时供应同一分项工程的预拌混凝土，胶凝材料、外加剂和配合比应一致，制备工艺和质量控制水平应基本相同。

**5.4.3** 开盘前应检查砂、石的质量情况，核实使用原材料与配合比通知单是否相符，数量是否足够并有20%的富余量。

**5.4.****4** 对于原材料计量，应根据粗、细骨料含水率的变化，及时调整粗、细骨料和拌合水的称量，不应估算骨料含水率，应严格按料线准确上料。

**5.4.5** 混凝土的搅拌时间应根据配合比和搅拌设备情况通过试验确定，最短时间不应少于60 s，当掺加温控膨胀抗裂剂、采取片冰替代部分拌合水及冬期生产混凝土时，应适当延长搅拌时间。

**5.4.6** 开机后应测定初始拌合的前2~3盘混凝土拌合物的坍落度、温度等参数，如不符合要求，应立即分析情况处理，直至拌合物性能符合要求方能持续生产。

**5.4.7** 混凝土生产前应检测原材料的温度，根据附录E计算混凝土的出机温度。

**5.4.8** 夏季施工时，为满足混凝土入模温度控制要求，可采取下列一种或多种措施：

**1** 骨料提前进场，采用遮阳、堆高或喷淋等措施；

**2** 使用地下水、制冷水或冰水等低温水拌制混凝土；

**3** 对混凝土运输设备进行遮阳、隔热、降温；

**4** 缩短混凝土运输时间，混凝土从运输到输送入模的延续时间不宜大于60 min；

**5** 采用片冰替代拌合水、风冷骨料等措施。

**5.4.9** 冬期施工时，混凝土入模温度控制措施应按现行行业标准《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104执行。

**5.4.10** 当施工工艺和环境条件未发生明显变化，原材料的品质在合格基础上发生波动时，可对混凝土外加剂用量、骨料掺配比例、砂率进行适当调整，调整后混凝土的拌合物性能应与理论配合比一致。

**5.5 混凝土运输**

**5.5.1** 混凝土运输应采用混凝土搅拌运输车，运输车在运输时应能保证混凝土拌合物均匀并不产生分层、离析。对于寒冷、严寒或炎热的天气情况，搅拌运输车的搅拌罐应有保温或隔热措施。

**5.5.2** 搅拌运输车在装料前应将搅拌罐内积水排尽，装料后严禁向搅拌罐内的混凝土拌合物中加水。

**5.5.3** 在运输途中及等候卸料时，应保持搅拌运输车搅拌罐正常转速，不得停转，卸料前，搅拌运输车罐体宜快速旋转搅拌20 s以上后再卸料。

**5.5.4** 卸料前混凝土坍落度出现损失不能满足施工要求时，可在搅拌运输车罐内加入适量的与原配合比相同成分的减水剂；减水剂掺入后应采取快档旋转搅拌罐进行搅拌，并应达到要求的工作性能后再泵送或浇筑；减水剂掺量和搅拌时间应有经试验确定的预案。

**6 施 工**

**6.1 一般规定**

**6.1.1**  应在施工前进行抗裂性验算后再制定专项施工方案，做好技术交底。

**6.1.2** 混凝土搅拌站、运输车、输送泵、衬砌台车、振捣机具等应按规定进行调试，运转正常，满足现场施工需要。

**6.1.3** 拱墙混凝土应采用泵送，左右对称、分层连续浇筑，一次成型，封顶混凝土最后两个运输单元混凝土不得出现间隔。

**6.1.4** 浇筑封顶阶段应根据混凝土浇筑量，并通过观察孔观察、浇筑压力监测情况等综合判定拱顶浇筑饱满度，由技术人员负责确定浇筑结束时机。

**6.2 混凝土浇筑**

**6.2.1** 混凝土浇筑前应符合下列规定：

**1**  根据进度要求合理布置施工机具，确保连续均匀供料；

**2** 对泵车、输送管进行润管，润管料不宜用于浇筑，待润管料排尽后再进行混凝土浇筑作业；

**3** 检查混凝土送料单和运输时间，核对混凝土配合比，测试混凝土坍落度、扩展度、含气量和温度等指标。

**6.2.2** 混凝土浇筑时应符合下列规定：

**1** 宜采用泵送带压入模，拱顶浇筑口可采用45°~60°倾角；

**2** 混凝土在泵管内停滞时间不应超过45 min；

**3** 应左右对称分层连续浇筑，分层松铺厚度不宜大于40 cm，浇筑速度和左右混凝土浇筑高度差不得超过模板设计预定值，边墙混凝土每小时浇筑高度宜为1 m~2 m；

**4** 浇筑时应严格管理边墙浇筑高度，减少拱部混凝土浇筑工作量，避免拱部混凝土浇筑量过大，在起拱线附近或封顶处形成冷缝；

**5** 拱顶混凝土应由已衬砌段向另一端按顺序依次浇筑；

**6** 振捣顺序应紧随浇筑进程逐层进行，不得采用振捣棒在模板内赶送混凝土；

**7** 采用插入式振捣棒振捣混凝土时，振捣棒的移动间距不应大于其作用半径的1.5倍，且插入下层混凝土内的深度宜为5 cm~10cm，并避免碰撞钢筋、模板、预埋件等。振捣完毕后，应竖向缓慢拔出，不得在浇筑仓内平拖；

**8** 混凝土浇筑振捣过程中应有专人观察，防止跑模和漏浆现象发生，拱部封顶时应适当减缓泵送速度，通过观察孔检查浇筑情况。

**6.3 混凝土养护**

**6.3.1** 混凝土拆模时间应根据强度和温度要求，拆模或拆除外保温措施时混凝土中心温度与环境温度之差不宜超过15 °C。

**6.3.2** 混凝土养护可选取以下一种或多种养护方法：

**1** 带模养护；

**2** 表面喷淋、洒水养护；

**3** 养护剂养护；

**4** 覆盖养护。

**6.3.3** 混凝土养护不得使用已污染或对混凝土有腐蚀作用的水源，养护用水不得低于拌和用水标准。

**6.3.4** 采取喷淋、洒水养护时，应符合下列规定：

**1** 养护水的温度与混凝土表面温度之差不宜超过15 °C；

**2** 应保证混凝土表面始终处于湿润状态，避免出现干湿循环现象；

**3** 当隧洞内环境温度低于5°C时，不得对混凝土表面进行洒水养护。

**6.3.5** 采取覆盖养护时，应符合下列规定：

**1**  覆盖物可由一种或多种材料组成，使得覆盖物具有保湿、保温作用；

**2** 塑料薄膜应紧贴混凝土裸露表面，塑料薄膜内应保持有凝结水；

**3** 覆盖物应严密，覆盖物的层数应根据里表温差、降温速率等指标确定；

**6.3.6** 混凝土养护时间不少于14 d。

**6.3.7** 采用养护台车养护时，相关要求可按现行企业标准《铁路隧道衬砌施工技术规范》Q/CR 9250-2020执行。

**6.4 抗裂性监测**

**6.4.1** 混凝土施工过程中应监测混凝土入模温度、内部温度和环境温度等参数，必要时宜监测混凝土应变。

**6.4.2**  测位和测点的布置应能全面准确地反映混凝土温度和应变的变化情况。

**6.4.3** 测试元件的选择应符合下列规定：

**1** 25 °C环境下，测温误差不应大于0.3 °C；

**2** 应变测试元件测试分辨率不应大于 1 με。

**6.4.4** 温度的监测应符合下列规定：

**1** 在浇筑体中心布置温度监测点；

**2** 在浇筑体中心沿厚度方向布置表面测点。

**6.4.5** 应变测点根据实际需要确定，在拱墙中心处布置应变测点时，应符合下列规定：

**1** 沿分段长度方向布置应变测点；

**2** 沿厚度方向布置应变测点。

**6.4.6** 测试元件的安装和保护应符合下列规定：

**1** 安装前测试元件应进行水下1 m浸泡试验，并达到24 h不损坏的要求；

**2** 测试元件固定应牢固，并与结构钢筋及固定架金属体等金属绝缘；

**3** 测试元件引出线宜集中布置，沿走线方向予以标识并加以保护；

**4** 测试元件周围应采取保护措施，下料和振捣时不得直接冲击和触及测试元件及其引出线。

**6.4.7** 宜选用具有自动采集、可实时在线查看数据的监测系统，并应满足现行国家标准《大体积混凝土温度测控技术规范》GB/T 51028的规定。自浇筑开始7 d内的采集频率不宜少于每小时1次，8 d~14 d内的采集频率不宜少于每2小时1次，15 d及之后的长期监测采集频率不宜少于每12小时1次。

**6.4.8** 当混凝土最高温度与环境最低温度之差连续3 d小于20 °C时，可停止温度监测，且监测时间不宜少于14 d。

**7 检 验**

**7.0.1** 检验应包括原材料质量和混凝土质量的检验。

**7.0.2** 原材料及混凝土质量的检验应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204和行业、地方及企业等现行有关标准的规定。

**7.0.3** 水泥的细度、铝酸三钙和碱含量、进场温度及水化热等应符合本规程的规定，铝酸三钙含量测试应按现行国家标准《硅酸盐水泥熟料矿相X射线衍射分析方法》GB/T 40407执行。

**7.0.4** 粉煤灰的流动度比应符合本规程的规定，其测试方法应按附录D执行。

**7.0.5** 混凝土绝热温升应符合本规程的规定，绝热温升测试应按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080执行，1 d绝热温升与7 d绝热温比值测试方法应按附录B执行。

**7.0.6** 混凝土自生体积变形应符合本规程的规定，自生体积变形测试应按附录C执行，以混凝土初凝为零点。

**7.0.7** 掺温控膨胀抗裂剂混凝土的检验，应符合下列规定：

**1** 同一生产厂家、同一类型、同一编号且连续进场的温控膨胀抗裂剂，以不超过200 t为一批；

**2** 每一检验批取样量不应少于10 kg，检测20 °C水中7 d限制膨胀率、24 h水化热降低率；

**3** 宜在浇筑地点检测混凝土的膨胀性能，测试方法应按附录F执行。

**7.0.8** 每辆搅拌车混凝土入模温度宜采用插入式测温元件测试。

**7.0.9** 优选温控膨胀抗裂剂或混凝土配合比时，可参照附录G开展现场小构件试验。

**7.0.10** 混凝土裂缝控制效果的检验宜符合下列规定：

**1** 按开裂风险系数≤0.70控制时，混凝土结构表面的裂缝宽度不应大于0.15 mm，一次性浇筑的单元结构表面宽度为0.10 mm~0.15 mm的裂缝不超过2条；

**2** 按开裂风险系数＞0.7且＜1.0控制时，混凝土结构表面裂缝宽度应满足《混凝土结构设计规范》GB 50010和《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476等相关标准规范的规定，裂缝宽度不应大于0.20 mm。

# 附录A 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法

**A.1** 总体设计原则

**A.1.1** 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计计算所用参数宜通过试验确定，无试验数据时，可按推荐参数取值。

**A.1.2** 混凝土收缩裂缝设计应包括混凝土收缩控制、温度控制、施工措施。收缩变形宜以自生体积变形、干燥收缩等参数明确；温度控制指标宜以入模温度、里表温差、混凝土温升等参数明确；施工措施宜通过计算确定分段浇筑长度。

**A.1.3** 计算出的开裂风险系数超过0.70时，宜采取调整混凝土绝热温升值、混凝土产生膨胀变形减少甚至抑制收缩、降低入模温度、保温养护、减少分段浇筑长度等措施。

**A.2** 原则上开裂风险系数计算应采取有限元法进行，将环境条件、结构尺寸、约束条件等作为边界条件，通过计算机进行仿真计算，也可通过回归模型公式估算。

**A.3** 有限元计算方法

**A.3.1** 混凝土水化放热计算应符合下列规定：

**1** 混凝土水化历程及绝热温升宜根据混凝土实际配合比通过试验确定，无试验数据时，混凝土绝热温升可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.1-1） |
| （A.3.1-2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *T*a(*t*a) | ——混凝土龄期*ta*时的绝热温升（°C）； |
| *ta* | ——绝热温升测试龄期（d）； |
| *T*a,max | ——最大绝热温升值（°C）； |
| *m* | ——与水泥品种、浇筑温度等有关的经验系数（d-1），C30~C40混凝土可取0.8 d-1~1.0 d-1，C50~C60混凝土可取1.0 d-1~1.5 d-1； |
| *αmax* | ——胶凝材料的最大水化程度； |
| *W* | ——每立方米混凝土胶凝材料用量（kg/m3）； |
| *Q* | ——胶凝材料放热总量（kJ/kg）； |
| *Cc* | ——混凝土的比热容（kJ/（kg∙°C）），无试验数据时，可取 0.92 kJ/（kg∙°C）~1.0 kJ/（kg∙°C）； |
| *ρ* | ——混凝土密度（kg/m3）； |
| *α(t)* | ——*t*时刻胶凝材料的水化程度； |
| *t* | ——时间（d）； |
| *Q(t)* | ——*t*时刻胶凝材料放热量（kJ/kg）。 |

**2** 当已知混凝土组成时，胶凝材料放热总量可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.1-3） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *QC* | ——水泥放热总量（kJ/kg），无试验数据时，可按表A.3.1-1选取； |
| *Pc、PSL*、*PFA* | ——水泥、矿渣粉、粉煤灰的掺量（%）； |
| *k*1、*k*2 | ——水化放热相关系数，可按表A.3.1-2选取。 |

**表A.3.1-1 水泥水化放热总量（kJ/kg）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 水泥品种 | 水泥强度等级 | |
| 42.5 | 52.5 |
| 硅酸盐水泥 | 430 | 465 |
| 普通硅酸盐水泥 | 365 | 420 |

**表A.3.1-2 不同掺量掺合料调整系数**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 掺量 | 0 | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% |
| 矿渣粉(*k*1) | 0 | 0.9 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 粉煤灰(*k*2) | 0 | 0.5 | 0.45 | 0.42 | 0.4 | 0.35 |

**3** 当未知混凝土组成时，*T*a,max可按表A.3.1-3选取：

**表A.3.1-3 不同强度等级混凝土的*T*a,max取值**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 混凝土强度等级 | C30~C40 | C50~C60 |
| *T*a,max（°C） | 40~50 | 55 |

4 *αmax*可按下式计算，当计算结果大于1时取1：

|  |
| --- |
| （A.3-4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *w/b* | ——混凝土水胶比。 |

**A.3.2** 结构温度场计算过程中应考虑温度对水化放热的影响，对于各向同性的具有内部热源的固体的瞬态温度场T(x, y, z, *t*)，应满足下式热传导方程：

|  |
| --- |
| （A.3.2-1） |
| （A.3.2-2） |
| （A.3.2-3） |
| （ A.3.2-4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *λ* | ——混凝土导热系数（w/（m·K）），无试验数据时，简化计算时可取2.5 w/（m·K）； |
| *qa* | ——水化放热速率（w/m3）； |
| *ta,eq* | ——实际工程中时间*t*相对于绝热温升测试过程中的等效龄期（d）； |
| *Eα* | ——混凝土中胶凝材料水化反应活化能（J/mol），无试验数据时可取30000 J/mol~40000 J/mol； |
| *Ta0* | ——绝热温升测试时的入模温度（°C）； |
| R | ——普适气体常数（J/（mol·K）），取8.315 J/（mol·K）； |
| *Cm* | ——单位体积胶凝材料用量（kg/m3）； |
| *kEa,FA、kEa, SL* | ——粉煤灰、矿渣粉对活化能的影响系数，可按表A.3.2-1选取，必要时进行插值计算； |
| *EC* | ——水泥水化活化能，无试验数据时可按表A.3.2-2选取。 |

**表A.3.2-1 粉煤灰及矿渣粉掺量对活化能影响系数**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 掺量 | 0 | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% |
| 矿渣粉 | 1 | 1.04 | 1.08 | 1.12 | 1.16 | 1.2 |
| 粉煤灰 | 1 | 0.95~1.0 | | | | |

**表A.3.2-2 水泥水化反应活化能*E*C（J/mol）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 水泥品种 | 水泥强度等级 | |
| 42.5 | 52.5 |
| 硅酸盐水泥 | 42000 | 43000 |
| 普通硅酸盐水泥 | 38000 | 40000 |

**A.3.3** 在混凝土浇筑块温度计算过程中，初始温度即为浇筑温度，边界条件可按下式计算：

**1**  混凝土表面温度是时间的已知函数，即

|  |
| --- |
| *T(t )*= *f(t)* （A.3.3-1） |

**2** 混凝土表面的热流量是时间的已知函数，即

|  |
| --- |
| （A.3.3-2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *n* | ——表面法线方向。 |

**3** 混凝土表面是绝热的，即

|  |
| --- |
| （A.3.3-3） |

**4** 当混凝土与空气接触时，表面热流量与混凝土表面温度*T*和气温*Ta*之差成正比，即

|  |
| --- |
| （A.3.3-4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *β* | ——放热系数（kJ/（m2·h·°C））。 |

**5** 当两种不同的固体接触时，如接触良好，则在接触面上温度和热流量都是连续的，即

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.3.3-5） |

**6** 混凝土表面覆盖模板或采取保温措施时，放热系数可按现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB50496选取。

**A.3.4** 水化程度为*α*(*t*)的混凝土力学性能*f*M(*α*(*t*))（强度或弹性模量）可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.4-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *f*M∞ | ——强度或弹性模量平均值（MPa），无试验数据时，可按A.3.4-2~A.3.4-4计算； |
| *α* | ——指数常数，无试验测试值时，弹性模量可取0.5，抗拉强度可取1.0； |
| *α*0 | ——初始水化程度，无试验数据时，C30~C40可取0.15~0.20，C50~C60可取0.10~0.15，C60以上可取0.05~0.10。 |

|  |
| --- |
| （A.3.4-2） |
| （A.3.4-3） |
| （A.3.4-4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *fcm* | ——抗压强度平均值（MPa）； |
| *fck* | ——抗压强度设计值（MPa）； |
| *fctm* | ——抗拉强度平均值（MPa）； |
| *Ecm* | ——弹性模量平均值（MPa）。 |

**A.3.5** 温度变形可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.5-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *ε*T | ——温度变形； |
| *β*T | ——线膨胀系数（°C-1），无试验数据时，简化计算取1.0×10-5 °C-1； |
| △*T* | ——温差（°C）。 |

**A.3.6** 相对湿度变化引起的变形包括密封条件下自收缩、水分蒸发引起的干燥收缩变形，变形计算时应符合下列规定：

**1**  对于早期带模及需要养护的混凝土结构，宜在早期采取自收缩变形进行计算，计算公式如下：

|  |
| --- |
| （A.3.6-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *εas* | ——自收缩变形； |
| *f*(*t*) | ——时间相关函数，无试验数据时，可取*f*(*α*(*t*))=1-exp(-0.2*t*0.5)； |
| *f*[*α*(*t*)] | ——水化程度相关函数； |
| *εas28* | ——28 d自收缩变形，无试验数据时，可取(10*fck*-200)×10-6。 |

**2** 混凝土结构表面覆盖模板或早期需要进行养护，暴露于环境中时性能相对稳定，计算干燥收缩时，可不考虑温度影响，计算公式如下：

|  |
| --- |
| （A.3.6-2） |
| （A.3.6-3） |
| （A.3.6-4） |
| （A.3.6-5） |
| （A.3.6-6） |
| （A.3.6-7） |
| （A.3.6-8） |
| （A.3.6-9） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——混凝土干燥收缩终值； |
| *kh* | ——湿度影响系数； |
| *h* | ——相对湿度； |
| *S*(*t*) | ——时间函数； |
| *τsh* | ——尺寸影响系数； |
| *kt* | ——系数； |
| *ks* | ——截面形状因子，板取为1.0，圆柱取为1.15，正方形棱柱体取为1.25，球体取为1.3，立方体取为1.55； |
| *D* | ——有效厚度，对应板即为实际厚度； |
| *t*d | ——开始干燥时间（d）； |
| *E*(28) | ——混凝土28 d的弹性模量（MPa），以28 d强度作为设计依据时，可取*E*(28)*=Ecm*； |
| *w* | ——用水量（kg/m3）。 |

**A.3.7** 混凝土的早期徐变性能宜通过试验确定，无试验数据时，徐变函数可按下式计算:

|  |
| --- |
| （A.3.7-1） |
| （A.3.7-2） |
| （A.3.7-3） |
| （A.3.7-4） |
| （A.3.7-5） |
| *q4*=20.3×10-6(*aA/c*)-0.7 （A.3.7-6） |
| （A.3.7-7） |
| （A.3.7-8） |
| （A.3.7-9） |
| （A.3.7-10） |
| （A.3.7-11） |
| （A.3.7-12） |
| （A.3.7-13） |
| （A.3.7-14） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *J*(*t*,*t*0) | ——徐变函数； |
| *t0* | ——开始持荷时间（d）； |
| *q*1 | ——瞬时弹性变形系数； |
| *C0(t,t0)* | ——基本徐变柔度函数； |
| *Cd(t,t0,td)* | ——干燥徐变柔度（MPa-1）； |
| *E*0 | ——混凝土加载时的弹性模量（MPa）； |
| *q*2、*q*3、*q*4、*q*5 | ——实验数据拟合的经验系数； |
| *aA/c* | ——骨料质量与胶凝材料质量之比； |
| *H(t)* | ——相对湿度函数。 |

**A.3.8** 混凝土的收缩在约束作用下导致混凝土产生收缩应力。约束包括内约束和外约束两类，内约束由混凝土自身内外收缩不均引起，里表温差、湿度梯度均导致收缩梯度的产生；外约束主要由结构形式、施工浇筑先后顺序所引起。收缩应力计算时应符合下列规定：

**1** 收缩应力计算宜采取有限元法进行，将温度场和收缩变形计算结果和边界条件，根据程序要求输入相应数据后，由计算机进行计算。为判定综合效应，可将各项最不利因素相互叠加，进行有限元仿真计算；

**2** 用有限元增量求解混凝土应力可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.8-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| [*k*] | ——刚度矩阵； |
| {△*δ*} | ——节点位移增量阵列； |
| {△*F*} | ——节点荷载增量阵列； |
| {△*Fc*} | ——混凝土徐变引起的节点荷载增量； |
| {△*FT*} | ——混凝土温度变形引起的节点荷载增量； |
| {△*FG*} | ——混凝土自生体积变形、干燥收缩变形引起的节点荷载增量。 |

**3**  应力增量可按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.8-2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——等效弹性矩阵； |
| *△εn* | ——应变增量； |
|  | ——徐变应变增量； |
|  | ——温度应变增量； |
|  | ——自生体积变形、干燥收缩变形应变增量。 |

**A.3.9** 开裂风险系数*η*应按下式计算：

|  |
| --- |
| （A.3.9-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *σ*(*t*) | ——*t*时刻混凝土内部最大拉应力（MPa）； |
| *ft*(*t*) | ——*t*时刻混凝土抗拉强度（MPa）。 |

# 附录B 混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试方法

**B.0.1** 混凝土绝热温升测试应按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080执行。

**B.0.2** 以绝热温升达到3.0 °C的时间*t*为零点，如果测试中没有3.0 °C，则以绝热温升大于且最接近3.0 °C的时间为准，并记录此时的绝热温升值*Ta(t)*，则混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值按下式计算：

|  |
| --- |
| （B.0.2-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *φ* | ——混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值（%）； |
| *Ta(t+1)* | ——以*t*为起点之后1 d混凝土绝热温升（°C）； |
| *t* | ——绝热温升达到3.0 °C的时间，或大于且最接近3.0 °C的时间（d）； |
| *Ta(t)* | ——*t*时绝热温升（°C）； |
| *Ta(t+7)* | ——以*t*为起点之后7 d混凝土绝热温升（°C）。 |

# 附录C 混凝土自生体积变形测试方法

**C.0.1** 混凝土自生体积变形测试方法可按《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082规定的非接触法执行。

**C.0.2** 当工程现场不具备《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082规定的收缩变形测试仪器时，混凝土自生体积变形测试应符合下列规定：

**1** 将直径为100 mm规格的PVC管切割成若干长度约为420 mm的PVC管模具，并采用配套底座将其底部密封；

**2** 制备混凝土，利用PVC管模具成型混凝土试件，使得混凝土液面距离PVC管顶部距离约20 mm左右，采用塑料薄膜密封试件顶部，待试件静置2 h~3 h后放入尺寸宜为M20 mm×35 mm的螺栓（螺纹通长）的铜头，之后再次用塑料薄膜密封试件，每个配合比成型不少于3个试件，同步测试混凝土凝结时间；

**3** 提前加热石蜡，混凝土接近初凝时揭开塑料薄膜，记录混凝土液面距离PVC管模具顶端的距离，之后采用石蜡密封试件顶部，注意将铜头顶部露出，之后将试件移入温度为（20±2）°C养护室（房间），放置在带有千分表的铁架台上，千分表至少能达到±0.001mm的测量精度。混凝土初凝时开始读数，之后至少按照下列规定的时间间隔测试其变形读数：1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、21 d、28 d。

**4** 混凝土自生体积变形试验结果和处理按《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082规定的收缩试验执行。混凝土膨胀时变形为正值，收缩时为负值。

**5** 混凝土自生体积变形按下式计算：

|  |
| --- |
| （C.0.2-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *ε* | ——混凝土自生体积变形，精确至1.0×10-6； |
| *Lt* | ——*t*时刻千分表读数（mm）； |
| *L0* | ——初凝时千分表初始读数（mm）； |
| *L* | ——PVC管模具长度（mm）； |
| *ΔL* | ——采用石蜡密封混凝土前混凝土液面距离PVC管顶部距离（mm）。 |

# 附录D 粉煤灰流动度比测试方法

**D.0.1** 粉煤灰流动度比测试方法包括下述步骤：

**1** 取基准水泥或实际工程所指定的水泥300 g，水87 g，采用实际工程所指定的减水剂，调整掺量，控制基准浆体的流动度为210 mm~230 mm，记录减水剂用量*m*，流动度测试应符合现行国家标准《混凝土外加剂匀质性试验方法》 GB/T 8077的规定；

**2** 取相同水泥210 g，受检粉煤灰90 g，水87 g，相同减水剂用量*m*，测试受检浆体的流动度。

**D.0.2** 粉煤灰流动度比

粉煤灰流动度比按下式计算：

|  |
| --- |
| （D.0.2-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *χ* | ——粉煤灰流动度比（%）； |
| *D0* | ——基准浆体流动度（mm）； |
| *D1* | ——受检浆体流动度（mm）。 |

# 附录E 混凝土拌合物出机温度计算方法

**E.0.1** 混凝土拌合物出机温度可按下式计算：

|  |
| --- |
| （E.0.1-1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *T* | ——混凝土出机温度（°C）； |
| *Tg、Ts* | ——粗骨料、细骨料的入机温度（°C）； |
| *Tc、Tm* | ——水泥、矿物掺合料等粉料的入机温度（°C）； |
| *Tw、Tice* | ——拌合水、冰的入机温度（°C），冰的入机温度低于0 °C时，*Tice*应取负值； |
| *Wg、Ws* | ——粗骨料、细骨料干重量（kg）； |
| *Wc、Wm* | ——水泥、矿物掺合料重量（kg）； |
| *Ww、Wice* | ——拌合水、冰重量（kg），当混凝土不加冰时，*Wice*=0； |
| *Wwg、Wws* | ——粗骨料、细骨料中所含水重量（kg）。 |

# 附录F 混凝土膨胀性能快速试验方法

**F.0.1** 在工程现场取搅拌好的掺温控膨胀抗裂剂的混凝土，将约400 mL的混凝土装入容积为500 mL的玻璃烧杯中，用竹筷轻轻插捣密实，并用塑料薄膜封好烧杯口。

**F.0.2** 待混凝土终凝后，揭开塑料薄膜，向烧杯中注满清水，再用塑料薄膜密封烧杯。

**F.0.3** 每次浇筑成型的烧杯试件数量不应少于3个，宜在浇筑的开始时段、中间时段以及临近结束时段分别成型不少于1个烧杯试件。

**F.0.4** 每个烧杯试件应单独编号，观察并记录烧杯出现裂缝的时间。

# 附录G 现场小构件试验方法

**G.0.1** 小构件模具的制作，应符合下列规定：

**1** 采用厚度为1.5 cm~2.0 cm规格的木质模板，加工制作尺寸为1.0 m（长）×1.0 m（宽）×1.2 m（高）的模具；

**2** 模具内可不配筋，或设置少量构造钢筋，用于固定监测元件；

**3** 应采用可靠措施对模具进行加固，防止浇筑混凝土时出现涨模；

**4** 在同一地点进行试验采用的模板规格应一致，内部配筋情况应相同。

**G.0.2**  小构件的监测，应符合下列规定：

**1** 在距离构件底部0.5 m高度平面中心，沿水平方向布置具备监测温度和变形的监测元件；

**2** 在距离构件底部0.5 m高度层面上，在距离某个侧表面5 cm处布置温度元件；

**3** 在构件附近设置环境温度计；

**4** 其他测位可根据需要布置；

**5** 监测元件的选择及数据的采集按本规程6.4节执行。

**G.0.3**  小构件混凝土的浇筑，应符合下列规定：

**1** 混凝土配合比应根据工程现场拟用或在用的配合比确定，用于评价不同厂家抗裂剂性能时，混凝土配合比参数应相同，抗裂剂确定后，用于优选混凝土配合比时，配合比参数可根据实际情况调整确定；

**2** 混凝土的生产按本规程5.4节执行，混凝土的运输按本规程5.5节执行，混凝土浇筑方式根据现场工艺需要确定，可采用自卸或泵送浇筑；

**3** 当混凝土液面距离模具顶部约0.2 m时停止浇筑，抹面后采取覆盖养护；

**4** 小构件浇筑时，应同步成型至少包括3 d、7 d、28 d龄期的同条件养护及标准条件养护试件。

**G.0.4** 小构件混凝土试验数据的处理及评价，应符合下列规定：

**1** 同步成型的混凝土同条件养护及标准条件养护试件强度应满足设计要求；

**2** 混凝土温度监测数据处理时，应至少得到入模温度、最高温度、最大温升值、中心点温降3 d平均降温速率，里表温差，在相同入模温度条件下，优先以最大温升值作为温度比选指标；

**3** 混凝土变形监测数据处理时，对相同测点温度数据进行一次微分求导，据此判断混凝土温度开始显著升高的时刻，并以此时刻作为变形零点，此时通常温升值在2 °C ~ 3 °C，进而获得温升阶段最大膨胀变形及对应的单位温升膨胀变形，温降阶段混凝土从最高温度降低至入模温度过程中的温降收缩变形及对应的单位温降收缩变形。优先以单位温升膨胀变形、单位温降收缩变形作为变形比选指标。

# 本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1） 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2） 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3） 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

4） 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

**中国土木工程学会标准**

**隧道二次衬砌混凝土控裂施工技术规程**

T/CCES X－2024

条 文 说 明

**制订说明**

《隧道二次衬砌混凝土控裂施工技术规程》T/CCES X－2024，经中国土木工程学会2023年12月28日以中土学标[2023]9号函文批准发布。

本规程制订过程中，编制组进行了国内大量衬砌开裂的运营隧道现状调查研究，总结了我国隧道工程施工技术领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规、技术标准，通过试验混凝土自收缩、水化放热等室内试验，结合现场应用情况，取得了混凝土抗裂性控制相关的重要技术参数。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，本规程编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

**目 次**

[**1 总则 43**](#_Toc13698)

[**2 术语 44**](#_Toc31492)

[**3 基本规定 45**](#_Toc14800)

[**4 抗裂性设计 46**](#_Toc32742)

[**4.1 参考标准 46**](#_Toc21729)

[**4.2 混凝土抗裂性设计 46**](#_Toc5164)

[**5 材料 48**](#_Toc16330)

[**5.2 原材料 48**](#_Toc21477)

[**5.3 混凝土配合比 49**](#_Toc6241)

[**5.4 混凝土生产 50**](#_Toc14192)

[**6 施工 51**](#_Toc2028)

[**6.4 抗裂性监测 51**](#_Toc29682)

[**7 检验 52**](#_Toc9246)

[**附录A 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法 53**](#_Toc20690)

[**附录B 混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试方法 54**](#_Toc1344)

[**附录D 粉煤灰流动度比测试方法 55**](#_Toc8644)

[**附录F 混凝土膨胀性能快速试验方法 56**](#_Toc8833)

# 1 总 则

**1.0.3** 本规程适用于由混凝土水化引起的温度和收缩变形导致的开裂，不考虑围岩应力等荷载作用导致的开裂。

# 2 术 语

**2.0.1** 混凝土结构方面包括结构形式、尺寸等参数，混凝土材料性能方面包括配合比、强度、自生体积变形、绝热温升等参数，环境方面包括施工季节、环境温度等参数。当计算的开裂风险超过预期阈值时，可优化结构、材料等方面的参数，并在施工方面采取措施，如优化配合比、掺加抗裂性提升功能材料、减少分段长度、控制入模温度、保温保湿养护等，直至开裂风险达到预期阈值后得到相应的控制指标，该过程即为混凝土结构抗裂性设计。

**2.0.2** 胶凝材料水化一方面会引起混凝土材料本身产生收缩变形，另一方面还会引起放热，当放热速率快于散热速率时，就会产生温度收缩，本规程所述的收缩变形包括上述两个方面。

**2.0.3** 基于应力准则，抑制混凝土结构收缩裂缝的关键在于控制收缩拉应力不大于混凝土的抗拉强度。以任意时刻收缩拉应力与抗拉强度比值定义开裂风险系数，可以较为直观的评估混凝土结构的开裂风险。

**2.0.6** 混凝土入模温度是指最终浇筑入模时的温度、运输、泵送等过程可能会导致混凝土温度升高，因此，应注意入模温度测试地点。

**2.0.10** 大量工程实践发现，一些粉煤灰在各项指标满足规范要求的情况下，对混凝土流动性能影响仍较大，主要表现为达到相同工作性能时混凝土用水量增加或减水剂掺量提高，一般借助扫描电镜可以发现该类型的粉煤灰球形颗粒较少，不规则颗粒较多，且表面结构多呈疏松多孔状。显然，该类型粉煤灰不仅丧失了“滚珠减水”的形态效应，还会吸附减水剂，对混凝土工作性能及抗裂性能不利。结合现行标准规范、国内外文献资料及工程实践，本规程提出粉煤灰流动度比控制指标及测试方法，在不具备观察粉煤灰微观形貌的条件下，通过该指标可以评估所使用的粉煤灰是否会对混凝土流动性产生不利影响，有利于加强对粉煤灰的质量控制，保证混凝土质量。

# 3 基 本 规 定

**3.0.1** 抗裂性专项设计应及早在设计阶段进行，这样有助于统一思想、统筹安排，闭环控制。

# 4 抗裂性设计

**4.1 参考标准**

**4.1.2** 考虑到原材料、施工质量波动等因素的影响，结合已有的研究成果及工程实践，将开裂风险系数控制在一定阈值以下，则可以抑制混凝土结构收缩引起的裂缝。当开裂风险系数＞1.0时，混凝土必定开裂，当开裂风险系数在0.70~1.0时，混凝土存在开裂的可能，当开裂风险系数≤0.70时，混凝土不开裂保证率≥95%，具体可根据工程建设需求确定，当控制开裂风险系数越低时，所需要采取的措施也越多，相应的成本投入也越高。如对于富水区段，当混凝土抗裂防渗要求高时，开裂风险系数可按照不大于0.70来控制。

**4.2 混凝土抗裂性设计**

**4.2.1** 混凝土材料抗裂性能指标是指实验室测试得到的绝热温升、自生体积变形等性能指标，混凝土结构抗裂性能控制指标是指入模温度、分段浇筑长度、最高温度、里表温差、7 d内平均降温速率等施工现场控制指标。

**4.2.4** 表4.2.4适用于强度等级不超过C40、厚度不超过50 cm的二次衬砌混凝土结构，相关的指标是在室内系统研究、理论评估和工程实践基础上提出。当强度等级在C40以上、厚度超过50 cm时，可根据具体工况条件和实测的混凝土性能参数，利用附录A计算混凝土开裂风险，进而提出控制指标。其中，混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试按附录B执行，自生体积变形测试按附录C执行；自生体积变形“+”表示膨胀，“-”表示收缩。

关于入模温度控制要求，《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424-2018和《铁路隧道衬砌施工技术规程》Q/CR 9250-2020规定混凝土入模温度不宜高于30 °C，冬期施工时，入模温度不应低于5 °C。《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660-2020规定混凝土入模温度应控制在5 °C~32 °C。《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018规定混凝土入模温度宜控制在5 °C ~30°C。《混凝土结构工程施工规范》GB 50666-2011和《混凝土质量控制标准》GB5 0164-2011规定夏季施工混凝土入模温度不应高于35 °C。研究及工程实践结果表明，二次衬砌混凝土开裂的主要原因是混凝土水化引起早期收缩以及温度峰值与环境温度存在差值，后期的干燥收缩等作用会导致裂缝进一步扩展。因此，减小混凝土收缩、降低温度峰值和环境温度差值是抑制开裂的主要思路。考虑到温度峰值除了和混凝土配合比有关外，还和入模温度、环境温度及散热条件有关，现行标准规范只给出了温度上、下限值控制要求，且隧洞内、外的环境温度有时候相差较大，可能无法执行或达不到抗裂的要求。考虑到炎热气候施工时（隧洞内平均环境温度＞25 °C），部分地区即便夜间施工，入模温度也普遍在35 °C左右，甚至达到40 °C，为了降低入模温度至30 °C，有效的措施是向每方混凝土中掺加40 kg~60 kg厚度约1 mm~2.5 mm鳞片状的冰屑来替代拌合水，这需要专门的设备，对于一般的工程较难实现。因此，本规程在研究和工程实践的基础上，结合相关标准规范，在保证裂缝控制效果的前提下，将入模温度控制要求与隧洞内环境温度联系起来，同时规定炎热气候施工时，混凝土入模温度宜≤30 °C、应≤35 °C。

关于里表温差和降温速率要求，《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424-2018规定芯部温度与表面温度之差不宜大于20 °C，《大体积混凝土施工标准》GB50496-2018规定里表温差不宜大于25 °C，降温速率不宜大于2.0 °C/d。考虑到二次衬砌结构厚度相对较小，若里表温差以20 °C或25 °C来控制则过于宽松，降温速率以2.0°C/d来控制则过于严格、甚至难以实现。本规程在研究和工程实践的基础上，结合相关标准规范，在保证裂缝控制效果的前提下，规定里表温差≤15 °C，同时提出了7 d内平均降温速率指标，并控制其不大于3.0 °C/d。

# 5 材 料

**5.2 原材料**

**5.2.1**  随着比表面积、碱含量、C3A含量的增加，水泥早期放热速率也急剧增加，放热量总量增大且放热集中，进而加剧了混凝土结构早期开裂问题。因此，就水泥而言，在满足其他要求的基础上，从抗裂性角度出发宜采用品质稳定、水化热低、收缩小的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，控制水泥的比表面积、碱含量、C3A含量。《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES 01-2004规定为改善混凝土的体积稳定性和抗裂性，硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的细度（比表面积）不宜大于350 m2/kg，《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424-2018规定水泥比表面积技术要求为300 m2/kg~350 m2/kg，《通用硅酸盐水泥》GB 175-2007规定硅酸盐水泥和普通硅酸水泥的比表面积不小于300 m2/kg。

近年来对隧道、桥梁、市政、房建等工程及水泥生产厂家的水泥调研结果表明，水泥的比表面积主要为340 m2/kg ~390 m2/kg。其中，重点工程可通过优选或向水泥生产厂家定制获得比表面积不大于350 m2/kg的水泥，而大量市售水泥比表面积则普遍大于350 m2/kg。在充分考虑工程建设现状及裂缝控制需求的基础上，本规程规定水泥的比表面积不宜大于350 m2/kg，不应大于380 m2/kg。

《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011规定用于生产混凝土的水泥温度不宜高于60 °C，《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018规定水泥在搅拌站的入机温度不宜高于60 °C。考虑到监测混凝土生产时的水泥温度存在一定难度，本规程则在工程实践的基础上规定水泥进场温度不宜大于60 °C。当水泥进场温度偏高时，应采取必要措施使得混凝土入模温度满足控制要求。

**5.2.2** 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596-2017规定F类I级粉煤灰需水量比≤95%，F类II级粉煤灰需水量比≤105%，本规程在F类II级粉煤灰的基础上，适当提高了对需水量比的要求。

**5.2.3** 过细的矿渣粉不利于控制混凝土水化温升和收缩，对裂缝控制不利，因此宜优选比表面积≤450 m2/kg的矿渣粉，考虑到现行标准规范规定S95级矿渣粉比表面积≥400 m2/kg、S105级矿渣粉比表面积≥500 m2/kg，而通常S95级矿渣粉已能满足二次衬砌混凝土配合比需求，因此，本规程规定宜采用95级矿渣粉，不再考虑S105级矿渣粉。

**5.2.8** 温控膨胀抗裂剂由水化温升抑制材料和钙镁复合膨胀材料组成，具备降低温升、补偿混凝土收缩的作用，是一种新型抗裂功能材料，近年来在隧道、桥梁、轨道交通等重大工程中得到了推广应用，有效提高了混凝土抗裂性能。水化温升抑制材料相关的标准为现行行业标准《混凝土水化温升抑制剂》JC/T 2608-2021，钙镁复合膨胀材料相关的标准为现行团体标准《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082-2020，目前尚无直接规定温控膨胀抗裂剂国家、行业或团体标准。因此，表5.2.8中水化热降低率测试按现行行业标准《混凝土水化温升抑制剂》JC/T 2608执行，掺加温控膨胀抗裂剂的砂浆为受检砂浆，温控膨胀抗裂剂取代部分水泥，其掺量为10%；细度、含水率、限制膨胀率、抗压强度测试按现行团体标准《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082执行。当用户对凝结时间有特殊要求时，指标由供需双方协商确定。

**5.3 混凝土配合比**

**5.3.5** 《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011 规定混凝土拌合物应在满足施工要求的前提下，尽可能采用较小的坍落度，泵送混凝土拌合物坍落度设计值不宜大于180 mm，《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018也规定混凝土拌合物的坍落度不宜大于180 mm。由于二次衬砌结构特殊，且振捣困难，在密封空间内浇筑混凝土时，面临难以填充密实的问题，需要采用中高流动性混凝土。《铁路隧道衬砌施工技术规程》Q/CR 9250-2020规定仰拱混凝土坍落度不宜大于140 mm，边墙及拱下部坍落度宜为160 mm~200 mm，拱顶部混凝土坍落度宜为180 m~220 mm。可以看出，一些工程实践和相关标准也鼓励适当提高混凝土的流动性能来提高混凝土浇筑密实程度。大量的现场跟踪结果表明，向混凝土中加水的概率随着混凝土入模坍落度减小而增大。考虑到聚羧酸高性能减水剂的大量应用提高了混凝土的可泵性，在不增加用水量的情况下就能提高混凝土坍落度。为了避免向混凝土加水，同时提高二次衬砌混凝土密实性，本规程根据工程实践及隧道衬砌施工相关标准，提出了二次衬砌混凝土入模坍落度控制要求。实际执行时，应考虑泵送等过程中的坍落度损失，不宜直接采用到场混凝土坍落度作为入模坍落度，当测试入模坍落度存在困难时，可先测试泵送前后混凝土坍落度损失，然后得出入泵前坍落度控制要求。

工程应用时，为了统一边墙及拱下部以及拱顶部混凝土配合比，可将混凝土坍落度控制在180 mm~200 mm，如确实需要提高拱顶部混凝土坍落度，可适当提高外加剂掺量进行调整，但配合比应经过室内试验及相关验证确定。

**5.4 混凝土生产**

**5.4.5** 《预拌混凝土》GB/T 14902-2012规定对于采用搅拌运输车运送混凝土的情况，混凝土在搅拌机中的搅拌时间应满足设备说明书的要求，并且不应少于30 s（从全部材料投完算起），在制备特制品或掺用引气剂、膨胀剂和粉状外加剂的混凝土时，应适当延长搅拌时间。《混凝土结构工程施工规范》GB 50666-2011和《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011规定采用强制式搅拌机制备坍落度不小于100 mm的混凝土时，最短搅拌时间60 s，当能保证搅拌均匀时可适当搅拌时间。《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660-2020规定衬砌混凝土应采用强制式混凝土搅拌机，搅拌时间不应小于60 s，含有粉煤灰等掺合料时，搅拌时间不应小于120 s。《铁路隧道衬砌施工技术规程》Q/CR 9250-2020规定混凝土搅拌最短时间不宜小于120 s，纤维混凝土及冬期混凝土均应适当延长。结合相关标准要求及实际工程混凝土生产实践，本规程规定混凝土搅拌最短时间不应少于60 s，具体应根据实际情况确定，当掺加抗裂剂或片冰时，应适当延长搅拌时间。

**5.4.8** 《预拌混凝土》GB/T 14902-2012规定预拌混凝土从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料时的运输时间不宜大于90 min，如需延长运送时间，则应用采取相应的有效技术措施，并应通过试验验证。《混凝土结构工程施工规范》GB 50666-2011规定掺外加剂的混凝土，在气温≤25 °C时，延续时间不宜大于150 min，气温＞25 °C时，延续时间不宜大于120 min。《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011规定混凝土拌合物从搅拌机卸出至施工现场接收的时间间隔不宜大于90 min。大量工程实践统计结果表明，夏季施工时，混凝土温度会随着搅拌运输车运输过程及现场等待时间的延长而升高，一方面会提高入模温度，对裂缝控制不利，同时较高温度及较长的运输时间可能会引起混凝土工作性能损失。因此，本规程规定夏季施工时，应合理安排施工组织，缩短混凝土运输时间，从运输到输送入模的延续时间不宜大于60 min，其他季节施工时，应符合现行相关标准的规定。

**5.4.10** 即便是同一批次进场的合格原材料，其性能指标也可能存在波动，如骨料的粒径和级配和含水率、粉煤灰的需水量比，连续生产时，还面临不同批次材料的切换使用，再比如夏季施工和冬季施工时，还需要根据需求调整混凝土凝结时间。因此，实际生产时需要根据材料变化情况调整生产配合比。所调整的参数包括生产用水量、外加剂用量、骨料掺配比例、砂率等，进而保证混凝土工作性能的同时，生产配合比与理论配合比一致，并满足工程需要。然而，这种调整应建立在材料合格的基础上，同时调整的余地应受控，调整的过程应被记录、被允许，否则应重新设计配合比。《混凝土质量控制标准》GB50164-2011规定在混凝土配合比使用规程中，应根据混凝土质量的动态信息及时调整，其对应的条文说明是在混凝土配合比使用过程中，现场会出现各种情况，需要对混凝土配合比进行适当调整，比如因气候或施工情况变化可能影响混凝土质量，则需要适当调整混凝土配合比。在工程实践的基础上，参照《铁路隧道衬砌施工技术规程》Q/CR 9250-2020提出本条技术要求。

# 6 施 工

**6.4 抗裂性监测**

**6.4.7** 二次衬砌混凝土结构施工需要在监测数据指导下进行，以便及时调整技术措施。近年来混凝土无线监测系统发展迅速，操作简便，数据可自动采集、实时监测和查看，考虑到手动方式测量效率较低，可能造成数据遗漏及误差，本规程建议采用无线监测系统。隧道内可能会出现无信号导致数据无法及时发射至后台的情况，此时可直接在采集仪上将数据导出。

**6.4.8** 《大体积混凝土温度测控技术规范》GB/T 51028-2015规定当混凝土的降温速率和表里温差满足规范要求下限值，且混凝土最高温度与环境最低温度之差连续3 d小于25 °C时可停止温度监测。本标准根据二次衬砌混凝土结构特点，结合工程实践，参照提出了停止温度监测的要求，当过程中发现监测结果异常时应采取相应的措施，如增加保温层厚度等。

# 7 检 验

**7.0.7** 温控膨胀抗裂剂是提高混凝土抗裂性能、保障裂缝控制效果的关键功能材料，为加强对温控膨胀抗裂剂使用情况的管理，从技术可行、便于操作、不明显增加成本的角度出发，本规程规定在工程现场应参照附录F开展混凝土膨胀性能快速试验。

**7.0.8** 入模温度是反应混凝土结构裂缝控制成套技术方案落地的实施情况，是混凝土拌合物现场检验的重要指标之一。水银温度计测试结果准确，但易碎不便操作，非接触式如红外测温元件操作简单，但准确性易受环境温度影响。在工程实践的基础上，本规程建议采用插入式热电偶类测温元件测试混凝土入模温度，且使用前应采用水银温度计校准。为保证所浇筑的混凝土入模温度全部受控，应测试每辆搅拌车的混凝土入模温度。当入模温度测试存在困难时，可测试混凝土从罐车倾卸至泵车被泵送前的入泵温度，则入模温度可认为是入泵温度与混凝土泵送前后温度变化值之和，混凝土泵送前后温度变化值可经现场试验确定。

# 附录A 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法

**A.1.1** 开裂风险系数用于评价混凝土产生裂缝的可能性。针对大体积混凝土，一般以混凝土温控抗裂安全系数（劈裂抗拉强度和拉应力比值）作为控制裂缝的依据，如《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》JTS/T 202-1-2022提出控制普通钢筋混凝土结构安全系数≥1.4；我国水工混凝土领域，一般抗裂安全系数控制在1.5~2.0范围内；本规程采取开裂风险系数（拉应力和抗拉强度比值）作为裂缝控制依据。本质上上述指标均是以应力准则作为抗裂性评价依据。本规程提出0.70作为开裂风险系数控制指标，一方面结合已有文献研究结果，另一方面，工程实践表明，采取该值作为控制依据，可以较好地预测实际工程开裂情况。

**A.1.2** 考虑实际工程结构、材料、环境等因素，可计算得到实体结构的温度场、应力场及开裂风险系数，该过程即为评估。当开裂风险未达到控制目标（如开裂风险系数＞0.70）时，可继续调整结构、材料等因素，并结合一定施工措施，如优化配合比、掺加抗裂性提升功能材料、控制入模温度等，直至开裂风险达到预期目标后得到相应的控制指标，该过程即为设计。

# 附录B 混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值测试方法

**B.0.2** 实体结构混凝土温升受混凝土绝热温升值及其发展历程的影响，在一定的散热条件下，当绝热温升值相同时，早期绝热温升发展速率越慢，则实体结构混凝土温升值越低，越有利于减少温降收缩。因此，除了控制混凝土绝热温升值外，本规程还提出了绝热温升历程控制指标。如果以试验开始测试时为零点，则无法避免缓凝剂对绝热温升历程比值的影响。一般而言，混凝土凝结后水化反应处于加速期，而凝结前水化放热量又较小，因此，以凝结时间作为零点比较合适。但处于绝热状态的混凝土凝结时间与标准条件下混凝土凝结时间不同，且等同绝热状态下的混凝土凝结时间难以测试。考虑到混凝土早期绝热温升发展速率在一定程度上可以反映出胶凝材料水化反应速率，因此，直接利用早期绝热温升发展特性，以其中能够反映胶凝材料水化反应由诱导期向加速期过渡的特征点作为零点同样具有可行性。统计了二次衬砌常用的C30和C35混凝土绝热温升测试结果，结果表明，混凝土早期绝热温升曲线存在由缓慢发展向快速发展的特征区域，通过将绝热温升曲线一次微分求导，则可在微分曲线上明显得出早期绝热温升速率开始快速发展的特征点，且特征点对应的绝热温升值集中在2.0~3.0 °C左右。因此，本规程将3.0 °C作为绝热温升历程比值的“零点”，如果绝热温升曲线上没有3.0 °C时，则以绝热温升大于且最接近3.0 °C的时间为准，并以此来计算混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值。

# 附录D 粉煤灰流动度比测试方法

**D.0.1** 为规范粉煤灰流动比测试方法，考虑具体工程减水剂的差异性，本规程在参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077-2012的基础上，采用基准水泥或实际工程所指定的水泥、实际工程所指定的减水剂进行试验。进行流动度比试验时，若粉煤灰掺量过少，不易反映粉煤灰真实品质情况，结合室内研究及工程实践，本规程规定粉煤灰掺量为30%。

# 附录F 混凝土膨胀性能快速试验方法

**F.0.1~F.0.4** 一些工程实践发现，由于存放温控膨胀抗裂剂的储罐清理不干净或生产时误用配合比导致实体结构出现开裂渗漏的现象时有发生，考虑到难以对掺加温控膨胀抗裂剂后的每块二次衬砌混凝土进行抗裂性监测，本规程在参照现行相关标准及工程实践的基础上，提出了混凝土膨胀性能快速试验方法，该方法虽然不能及时辨别混凝土中是否掺加了温控膨胀抗裂剂，但可以为实体结构混凝土性能检验提供支撑。对于普通混凝土，烧杯不会开裂，掺加温控膨胀抗裂剂后，烧杯通常在5 d~15 d出现裂缝。