

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 3947-2020

明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝控制 技术规程

Technical specification for shrinkage crack control of cut and cover tunnel concrete

2020-12-15 发布

2020-01-15 实施

江苏省市场监督管理局 发布

目 次

前 言II

1 范围1

2 规范性引用文件1

3 术语和符号1

 3.1 术语2

 3.2 符号2

4 设计3

 4.1 一般要求3

 4.2 抗裂性设计3

5 材料3

 5.1 原材料3

 5.2 配合比4

 5.3 生产与运输5

6 施工6

 6.1 一般规定6

 6.2 模板工程6

 6.3 混凝土浇筑6

 6.4 混凝土养护7

 6.5 工程监测7

7 检验与验收7

附录 A （规范性附录） 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法8

附录 B （规范性附录） 混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值测试方法16

附录 C （规范性附录） 混凝土 28 d 变形测试方法17

附录 D （规范性附录） 粉煤灰流动度比测试方法18

附录 E （规范性附录） 水化热降低率测试方法19

本规程用词说明21

条文说明22

前 言

本规程按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本规程由江苏省交通运输厅提出并归口。

本规程起草单位：江苏省交通工程建设局、江苏省建筑科学研究院有限公司、中设设计集团股份有限公司、中交第三航务工程局有限公司、中国中铁四局集团有限公司、江苏东南工程咨询有限公司。

本规程主要起草人：蒋振雄、缪玉玲、夏文俊、王峻、刘加平、周欣、田倩、唐风华、王海啸、李明、王育江、徐文、姚婷、王帅、万秀贵、卞桂荣、廉云亮、胡怀秋、刘毅、董樑。

明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝控制技术规程

1 范围

- 1.1 本规程适用于明挖现浇隧道混凝土的收缩裂缝控制设计、材料、施工、检验与验收。
- 1.2 本规程适用于江苏省境内明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝的控制。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用的文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB 8076 混凝土外加剂

GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法

GB/T 12959 水泥水化热测定方法

GB/T 14684 建设用砂

GB/T 14685 建设用卵石、碎石

GB/T 14902 预拌混凝土

GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉

GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

GB 50164 混凝土质量控制标准

GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

GB 50496 大体积混凝土施工标准

GB 50666 混凝土结构工程施工规范

JG/T 477 混凝土塑性阶段水分蒸发抑制剂

JG/T 568 高性能混凝土用骨料

JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准

JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程

JGJ 63 混凝土用水标准

JGJ/T 104 建筑工程冬期施工规程

JGJ/T 328 预拌混凝土绿色生产及管理技术规程

JTG/T F 50 公路桥涵施工技术规范

T/CECS 10082 混凝土用钙镁复合膨胀剂

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1 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。

3.1.2 开裂风险系数 cracking risk coefficient

由混凝土收缩引起的拉应力和混凝土抗拉强度的比值。

3.1.3 入模温度 temperature of mixture placing to mold

混凝土拌合物浇筑入模时的温度。

3.1.4 里表温差 temperature difference of core 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。

3.1.5 断面加权平均温度 thickness weighted mean temperature

根据测试点位各温度测点代表区段长度占厚度权值，对各测点温度进行加权平均得到的值。

3.1.6 降温速率 descending speed of temperature

散热条件下，混凝土浇筑体内部温度达到温升峰值后，24 h 内断面加权平均温度下降值。

3.1.7 绝热温升 adiabatic temperature rise

混凝土浇筑体处于绝热状态条件下，其内部某一时刻温升值。

3.1.8 混凝土28 d变形 deformation at 28 days of concrete

以混凝土初凝为基准值恒温恒湿密封养护 7 d 后转入恒温恒湿（箱）室养护至 28 d 总的变形值。

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

兼有降低混凝土温升、补偿混凝土收缩功能的外加剂。

3.1.10 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。

3.1.11 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。

3.1.12 水分蒸发抑制剂 evaporation retardants

一种喷洒于已成型尚处于塑性阶段的水泥净浆、水泥砂浆或混凝土表面，形成单分子膜，能有效抑制其表面水分蒸发的材料。

3.2 符号

- η ——开裂风险系数；
- T_d ——连续5 d室外日平均气温；
- L ——分段浇筑长度；
- T_0 ——混凝土入模温度；
- T ——混凝土温升峰值；
- ΔT ——里表温差；
- R_T ——降温速率；
- θ ——混凝土绝热温升；
- φ ——混凝土1 d绝热温升与7 d绝热温升比值；
- $\varepsilon_{As,7}$ ——混凝土7 d自生体积变形；

ε_{28} ——混凝土28 d变形。

4 设计

4.1 一般要求

- 4.1.1 应根据结构所处的环境类别、作用等级和结构设计使用年限，选用适当的水泥品种、矿物掺合料及水胶比，并采用适当的化学外加剂制备混凝土。
- 4.1.2 应在满足工程建设需要的工作性能、力学性能、耐久性能基础上对混凝土进行抗裂性设计。
- 4.1.3 应根据底板、侧墙和顶板等具体结构形式分别进行抗裂性设计，控制混凝土开裂风险系数不大于0.70。
- 4.1.4 应从温度与收缩变形两方面共同控制混凝土的收缩裂缝。

4.2 抗裂性设计

- 4.2.1 混凝土凝结硬化之后的抗裂性能指标应按附录A计算得出，当不具备试验参数且符合下列要求时，抗裂性能指标可按表4.2.1选取。
- a) 厚度不超过 2.0 m、混凝土强度等级不超过 C45；
 - b) 结构基础置于非岩石类地基上；
 - c) 相邻结构如侧墙与底板、顶板与侧墙之间的浇筑龄期差超过 10 d。

表 4.2.1 混凝土抗裂性能指标

结构部位	$T_d/(^{\circ}\text{C})$	$L(\text{m})$	$T_0/(^{\circ}\text{C})$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T/(^{\circ}\text{C})$	$R_T/(^{\circ}\text{C}/\text{d})$	$\theta/(^{\circ}\text{C})$	$\varphi/(\%)$	$\varepsilon_{As,7}/(\times 10^{-6})$	$\varepsilon_{28}/(\times 10^{-6})$
底板	≤ 5	≤ 30.0	5~15	≤ 35	≤ 15	≤ 3.0	≤ 50	/	≥ -100	≥ -250
	> 5		$\leq T_d+10$, 且 ≤ 30							
侧墙/ 顶板	≤ 5	≤ 20.0	5~15					≤ 50	$\geq +200$	$\geq +50$
	> 5		$\leq T_d+10$, 且 ≤ 28							
注1：混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值计算按附录 B 执行； 注2：7 d 自生体积变形和 28 d 变形测试按附录 C 执行； 注3：变形“+”表示膨胀，“-”表示收缩； 注4：“/”表示可以不作技术要求。										

- 4.2.2 在使用温控膨胀抗裂剂、纤维等抗裂性提升功能材料或冷却水管的措施时宜满足表 4.2.2 的要求。

表 4.2.2 抗裂性提升功能材料或措施

结构部位	温控膨胀抗裂剂	纤维	冷却水管
底板	Δ	Δ	—
侧墙	$\circ$	—	Δ
顶板	$\circ$	Δ	Δ
注： $\circ$ 宜采用； Δ 可采用；—一般不采用。			

5 材料

5.1 原材料

5.1.1 水泥

- 水泥选择及其性能应符合下列规定：
- a) 宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其性能应符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定，

比表面积不宜大于 $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，碱含量不宜超过 0.60%， C_3A 含量不宜超过 8%。当采用其他品种时，其性能应符合国家现行有关标准的规定；

- b) 水泥进场温度不宜高于 60°C ；
- c) 不同强度等级、品种的水泥严禁混合存放、使用。当对水泥质量有怀疑（如受潮等）或存放时间超过 3 个月，应重新取样检验，合格后方可使用。

5.1.2 粉煤灰

应采用Ⅱ级及以上粉煤灰，其性能应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596的有关规定，粉煤灰流动度比不宜小于95%，其测试方法按附录D执行。

5.1.3 矿渣粉

应采用S95级及以上矿渣粉，其性能应符合《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046的有关规定，比表面积不宜超过 $450 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

5.1.4 细骨料

宜优先选用洁净的天然Ⅱ区中砂，不得使用海砂、山砂及风化严重的多孔砂，其性能应符合《建设用砂》GB/T 14684、《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52的有关规定，含泥量不宜超过 2.0%，泥块含量不宜超过 1.0%。当使用机制砂时，其性能应符合《高性能混凝土用骨料》JG/T 568的有关规定。

5.1.5 粗骨料

应选用洁净的碎石，其性能应符合《建设用卵石、碎石》GB/T 14685、《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52的有关规定，松散堆积空隙率不宜超过45%。

5.1.6 减水剂

宜优先选用聚羧酸高性能减水剂，其性能应符合《混凝土外加剂》GB 8076 的有关规定，收缩率比不宜大于 100%。

5.1.7 纤维

纤维性能应符合《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》GB/T 21120 的有关规定。

5.1.8 温控膨胀抗裂剂

温控膨胀抗裂剂性能应符合下列规定：

- a) 20°C 水中 7 d 限制膨胀率应不小于 0.035%，转空气中 21 d 限制膨胀率应不小于-0.010%，在 60°C 水中 28 d 与 3 d 限制膨胀率之差应不小于 0.015%，且不大于 0.060%。限制膨胀率测试按《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082 执行；
- b) 24 h 水化热降低率应不小于 30%，7 d 水化热降低率应不大于 15%，水化热降低率测试按附录 E 执行。

5.1.9 水

混凝土用水应符合《混凝土用水标准》JGJ 63 的有关规定。

5.2 配合比

5.2.1 混凝土配合比设计应符合《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定。

5.2.2 混凝土配合比设计宜遵循低用水量、低水泥用量、适当水胶比、最大堆积密度的原则，应满足混凝土工作性能、力学性能、耐久性能和抗裂性能要求。

5.2.3 用于底板和顶板结构的混凝土拌合物坍落度宜为 $(200\pm 20) \text{ mm}$ ，用于侧墙结构的混凝土拌合物坍落度宜为 $(180\pm 20) \text{ mm}$ 。

5.2.4 混凝土的最大水胶比、胶凝材料用量宜符合表 5.2.1 的规定。

表 5.2.1 不同强度等级混凝土最大水胶比、胶凝材料用量范围限值

混凝土强度等级	最大水胶比	胶凝材料用量范围(kg/m ³)
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

5.2.5 侧墙结构混凝土宜单掺 20%~35%粉煤灰；其余部位可双掺粉煤灰和矿渣粉，掺量宜为 30%~50%。

5.2.6 砂率宜为 38%~45%。

5.2.7 混凝土碱含量不应超过 3.0 kg/m³。

5.3 生产与运输

5.3.1 混凝土生产与运输能力应满足混凝土浇筑工艺要求，预拌混凝土质量应符合《预拌混凝土》GB/T 14902、《混凝土质量控制标准》GB 50164 和《预拌混凝土绿色生产及管理技术规程》JGJ/T 328 的规定。

5.3.2 对同时供应同一工程分项的预拌混凝土，胶凝材料 and 外加剂、配合比应一致，生产工艺和质量控制水平应基本相同。

5.3.3 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、细骨料和拌合用水的称量，严禁估算骨料含水率，应按料线上料。

5.3.4 开机后应测试初始拌合的前 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。

5.3.5 炎热气候施工时，为满足混凝土入模温度控制要求：

a) 应采取：

- 1) 骨料提前进场，堆场采取遮阳等措施；
- 2) 在当日 18:00 至次日 06:00 的低温时段施工；
- 3) 对混凝土运输设备进行遮阳、隔热、降温；
- 4) 混凝土从运输到输送入模的延续时间不超过 60 min。

b) 宜采取：

- 1) 对粗骨料进行喷淋降温处理；
- 2) 使用地下水、制冷水或冰水等低温水拌制混凝土。

c) 可采取：

- 1) 片冰替代部分拌合用水；
- 2) 风冷骨料、液氮冷却混凝土拌合物。

5.3.6 冬期施工时，混凝土入模温度控制措施按《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104 执行。

5.3.7 掺矿物掺合料、温控膨胀抗裂剂、纤维的混凝土及采取片冰替代部分拌合用水时，宜适当延长搅拌时间。

5.3.8 运输过程中当坍落度损失或离析严重，经采取措施无法恢复混凝土拌合物工作性能时，不得浇筑入模。

5.3.9 采用混凝土搅拌运输车运输混凝土时，应符合下列规定：

- a) 接料前，搅拌运输车应排净罐内积水；
- b) 在运输途中及等候卸料时，应保持搅拌运输车罐体正常转速，不得停转；
- c) 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。

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。

6.2 模板工程

6.2.1 新浇筑的混凝土作用于模板的最大侧压力标准值应采用混凝土实测凝结时间进行计算选取。

6.2.2 对后浇带或跳仓法留置的竖向施工缝，宜采用钢板网、铁丝网或快易收口网等材料支挡；后浇带竖向支架系统宜与其他部位分开。

6.2.3 侧墙结构厚度不超过 1.5 m 时宜采用钢模板。

6.2.4 混凝土浇筑前应检查模板支撑的稳定性和接缝的密合情况，保证模板在混凝土浇筑过程中不失稳、不跑模和不漏浆。

6.3 混凝土浇筑

6.3.1 混凝土结构工程施工应符合《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、《混凝土质量控制标准》GB 50164 和《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F 50 有关规定。

6.3.2 浇筑混凝土前，应清除模板内以及垫层上的杂物、积水，表面干燥的地基土、垫层、木模板应浇水湿润。

6.3.3 为防止混凝土离析，自高处向模板内倾卸混凝土时，应符合下列规定：

- a) 从高处直接倾卸时，在不发生离析的情况下，其自由倾落高度不宜超过 2 m；
- b) 当不满足上述要求时，应采用串筒、溜管或振动溜管等辅助设备；
- c) 在串筒出料口下面，混凝土堆积高度不宜超过 1 m，并严禁用振动棒分摊混凝土。

6.3.4 混凝土浇筑过程应分层进行，每层浇筑厚度不宜超过 300 mm，上层混凝土应在下层混凝土初凝之前浇筑完毕。

6.3.5 运输和浇筑过程中，严禁通过向拌合物中加水方式调整其性能。

6.3.6 振动棒振捣混凝土应符合下列规定：

- a) 应按分层浇筑厚度分别进行振捣，振动棒的前端应插入前一层混凝土中，插入深度不应小于 50 mm；
- b) 振动棒应垂直于混凝土表面并快插慢拔均匀振捣，当混凝土表面无明显塌陷、有水泥浆出现、不再冒气泡时，可结束该部位振捣；
- c) 振动棒与模板的距离不应大于振动棒作用半径的 0.5 倍，振捣插点间距不应大于振动棒的作用半径的 1.4 倍。

6.3.7 混凝土浇筑应保证混凝土的均匀性和密实性。混凝土宜一次性连续浇筑，当不能一次连续浇筑时，可留设施工缝或后浇带分块浇筑。

6.3.8 底板、顶板混凝土应在终凝前对浇筑面进行二次抹面，消除终凝前失水引起的表面裂缝。

6.3.9 混凝土入模温度不满足抗裂性能指标要求时，不应浇筑入模。

6.3.10 大体积混凝土结构工程施工应满足《大体积混凝土施工标准》GB 50496 的有关规定。

6.3.11 跳仓法施工时，跳仓的最大分块尺寸应根据抗裂性计算后确定，跳仓间隔施工的时间不宜小于 7 d。

6.3.12 当埋设冷却水管时，符合下列规定：

- a) 宜采用内径为 25 mm~50 mm 的金属或塑料管，单根水管累计长度不应超过 200 m，水管间

距 0.5 m~1.5 m;

- b) 当采用铁管时宜采取套丝连接的水管接头工艺;
- c) 进出水口宜集中布置,宜对每个管路进行单独编号,并设置独立控制系统;
- d) 宜采取措施稳固冷却水管,混凝土浇筑时,确保冷却水管不发生移位;
- e) 混凝土浇筑前冷却水管应进行压水试验,管道系统不得漏水;
- f) 混凝土覆盖冷却水管后开始通水冷却,冷却水的温度与混凝土内部温度之差不超过 25 °C,根据混凝土温度调整通水速率与时间,温升阶段冷却水流速不小于 0.6 m/s;
- g) 通水结束后,冷却水管应及时进行压浆封堵,压浆材料应采用不低于混凝土强度等级的微膨胀砂浆或净浆。

6.4 混凝土养护

6.4.1 高温、干燥、大风天气浇筑混凝土时,宜在作业面采取遮阳、挡风、喷雾措施。底板和顶板结构在混凝土浇筑完毕初凝前,宜喷雾或喷水分蒸发抑制剂养护,不应进行洒水、蓄水、覆盖等养护,水分蒸发抑制剂性能应符合《混凝土塑性阶段水分蒸发抑制剂》JG/T 477 的有关规定。混凝土终凝后,可采取蓄水、覆盖等养护措施。

6.4.2 混凝土拆模时间应根据混凝土的强度和温度进行确定。墙体结构宜在混凝土达到温峰后的 1 d 内拆模,随后立即采取外保温措施,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。

6.4.3 混凝土养护水的温度与混凝土表面温度之差不宜超过 15 °C,混凝土里表温差及降温速率按表 4.2.1 或计算结果执行。

6.4.4 混凝土保温保湿养护不宜少于 14 d。

6.4.5 气温骤降时,龄期低于 28 d 的混凝土应进行表面保温。

6.4.6 当日最低气温低于 5 °C 时,不应采用洒水养护。

6.5 工程监测

6.5.1 混凝土浇筑体内监测点的布置,应反映出混凝土浇注体内最高温升、里表温差、降温速率及环境温度,布置方式应符合《大体积混凝土施工标准》GB 50496 的有关规定。

6.5.2 底板、侧墙、顶板等主体结构混凝土的工程监测,每 100 m 宜不少于 1 次。当材料、施工季节、结构尺寸等发生变化时,应重新监测。

7 检验与验收

7.1 混凝土原材料、拌合物性能及硬化混凝土性能的检验与验收应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定。

7.2 温控膨胀抗裂剂的验收应符合下列规定:

- a) 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;
- b) 检查产品合格证、有效的型式检验报告、出厂检验报告;
- c) 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。

7.3 侧墙、顶板混凝土应在浇筑地点分别抽样检测混凝土 7 d 自生体积变形,每 100 m 宜不少于 1 次,当材料、施工季节等发生变化时,应重新抽样。

7.4 宜采用插入式测温元件测试每辆搅拌车混凝土入模温度,并做好记录。

附录 A

(规范性附录)

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 明挖现浇隧道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 混凝土水化放热

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式计算：

$$T_a(t_a) = T_{a,\max}(1 - e^{-m t_a}) = \alpha_{\max} \frac{WQ}{C_c \rho} (1 - e^{-m t_a}) \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$T_a(t_a)$ ——混凝土龄期 t_a 时的绝热温升，单位为摄氏度（℃）；

t_a ——绝热温升测试龄期，单位为日（d）；

$T_{a,\max}$ ——最大绝热温升值，单位为摄氏度（℃）；

m ——与水泥品种、浇筑温度等有关经验系数，单位为每日（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；

$\alpha_{\max}$ ——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，单位为千克每立方米（kg/m³）；

Q ——胶凝材料放热总量，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

C_c ——混凝土的比热容，单位为千焦每千克摄氏度（kJ/（kg·℃）），无试验数据时，可取 0.92 kJ/（kg·℃）~1.0 kJ/（kg·℃）；

ρ ——混凝土密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

$\alpha(t)$ —— t 时刻胶凝材料的水化程度；

t ——时间，单位为日（d）；

$Q(t)$ —— t 时刻胶凝材料放热量，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

当已知混凝土组成时，胶凝材料放热总量可按式计算：

$$Q = Q_C P_C + k_1 \cdot 461 \cdot P_{SL} + k_2 \cdot 210 \cdot P_{FA} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

Q_C ——水泥放热总量，单位为千焦每千克（kJ/kg），无试验数据时，可按表 A.1 选

取；

P_C 、 P_{SL} 、 P_{FA} ——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.2 选取。

表 A.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.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

当未知混凝土组成时， $T_{a,max}$ 可按表 A.3 选取：

表 A.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

α_{max} 可按式计算，当计算结果大于 1 时取 1：

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \cdot w/b}{0.194 + w/b} + 0.50 \cdot P_{FA} + 0.30 \cdot P_{SL} \leq 1 \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

w/b ——混凝土水胶比。

A.3 混凝土温度场计算

温度对水化放热速率影响较大，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 $T(x, y, z, t)$ 需满足下列热传导方程和边界条件。

$$\rho C_c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_a(t_{a,eq}) \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \frac{T_a(t_{a,eq}) + T_{a0} - T(t)}{[T_{a0} + T_a(t_{a,eq}) + 273] \cdot [T(t) + 273]} \right] \dots\dots\dots (A.5)$$

$$q_a [T_a(t_{a,eq})] = C_m \frac{dQ}{dt} \Big|_{t=t_{a,eq}} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$t_{a,eq} = -\frac{1}{r} \cdot \ln \left[1 - \frac{a(t)}{a_{max}} \right] \dots\dots\dots (A.7)$$

$$E_a = \left[(k_{Ea,FA} + k_{Ea,SL}) - 1 \right] \cdot E_C \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

- λ ——混凝土导热系数，单位为瓦每米开尔文（W/（m·K）），无试验数据时，简化计算时可取 2.5 W/（m·K）；
- q_a ——水化放热速率，单位为瓦每立方米（W/m³）；
- $t_{a,eq}$ ——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，单位为日（d）；
- E_a ——混凝土中胶凝材料水化反应活化能，单位为焦耳每摩尔（J/mol），无试验数据时可取 30000 J/mol~40000 J/mol，有配合比参数时，可按式（A.8）计算；
- T_{a0} ——绝热温升测试时的入模温度，单位为摄氏度（℃）；
- R ——普适气体常数，单位为焦耳每摩尔开尔文（J/（mol·K）），取 8.315 J/（mol·K）；
- C_m ——单位体积胶凝材料用量，单位千克每立方米（kg/m³）；
- $k_{Ea,FA}$ 、 $k_{Ea,SL}$ ——粉煤灰、矿渣粉对活化能的影响系数，可按表 A.4 选取，必要时进行插值计算；
- E_C ——水泥水化活化能，单位为焦耳每摩尔（J/mol），无试验数据时可按表 A.5 选取。

表 A.4 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.5 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

在混凝土浇筑块温度计算过程中，初始温度即为浇筑温度。边界条件可通过以下四种方式给出：
第一类边界条件 C1：混凝土表面温度是时间的已知函数，即

$$T(t) = f(t) \cdots \cdots \cdots (A.9)$$

第二类边界条件 C2：混凝土表面的热流量是时间的已知函数，即

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = f(t) \cdots \cdots \cdots (A.10)$$

式中：

n ——表面法线方向。

若表面是绝热的，则有：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = 0 \cdots \cdots \cdots (A.11)$$

第三类边界条件 C3: 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 T_a 之差成正比, 即

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \beta (T - T_a) \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

β ——放热系数, 单位为千焦每平方米小时摄氏度 ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$)。

当放热系数 β 趋于无限时, $T=T_a$, 即转化为第一类边界条件。当放热系数 $\beta=0$ 时, $\partial T/\partial n=0$, 转化为绝热条件。

第四类边界条件 C4: 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

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 \\ \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) &= \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.13)$$

混凝土表面覆盖模板或采取保温措施时, 表面放热系数可按《大体积混凝土施工标准》GB50496 进行选取。

A.4 混凝土强度、弹性模量

水化程度为 $\alpha(t)$ 的混凝土力学性能 $f_M(\alpha(t))$ (强度或弹性模量) 以下式表示:

$$f_M(\alpha(t)) = f_{M\infty} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^a \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

$f_{M\infty}$ ——强度或弹性模量平均值, 单位为兆帕 (MPa), 无试验数据时, 可按 A.15~A.17 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。

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \dots\dots\dots (A.15)$$

$$\begin{cases} f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} & f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + 0.1(f_{ck} + \Delta f)) & f_{ck} > 50\text{MPa} \end{cases} \dots\dots\dots (A.16)$$

$$E_{cm} = 4734 f_{cm}^{0.5} \dots\dots\dots (A.17)$$

式中:

f_{cm} ——抗压强度平均值, 单位为兆帕 (MPa);

f_{ck} ——抗压强度设计值, 单位为兆帕 (MPa);

f_{cm} ——抗拉强度平均值，单位为兆帕（MPa）；

E_{cm} ——弹性模量平均值，单位为兆帕（MPa）。

A.5 混凝土温度变形

温度变形以下式表示：

$$\varepsilon_T = \beta_T \cdot \Delta T \cdots \cdots \cdots (A.18)$$

式中：

ε_T ——温度变形；

β_T ——线膨胀系数，单位为每摄氏度（ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ），无试验数据时，简化计算时可取 $1.0 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

ΔT ——温差，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

A.6 混凝土收缩变形

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。对于早期带模及需要养护的混凝土结构计算过程中宜在早期采取自收缩变形进行计算。

混凝土的自收缩可按如下经验公式计算：

$$\varepsilon_{as} = f(t) \varepsilon_{as\infty} = f[\alpha(t)] \varepsilon_{as28} \cdots \cdots \cdots (A.19)$$

式中：

ε_{as} ——自收缩变形；

$f(t)$ ——时间相关函数，无试验数据时，可取 $f(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5})$ ；

$f[\alpha(t)]$ ——水化程度相关函数；

ε_{as28} ——28 d 自收缩变形，无试验数据时，可取 $(10f_{ck} - 200) \times 10^{-6}$ 。

结构混凝土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，计算方法如下：

$$\varepsilon_{sh}(t, t_d) = -\varepsilon_{sh\infty} k_h S(t) \cdots \cdots \cdots (A.20)$$

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & h \leq 0.98 \\ -0.2 & h = 1 \\ \text{线性内插} & 0.98 \leq h \leq 1 \end{cases} \cdots \cdots \cdots (A.21)$$

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}, \tau_{sh} = k_t (k_s D)^2 \cdots \cdots \cdots (A.22)$$

$$D = \frac{2v}{S}, k_t = 8.5 t_d^{-0.08} f_{cm}^{-0.025} \cdots \cdots \cdots (A.23)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \cdots \cdots \cdots (A.24)$$

$$E(t) = E(28) \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right)^{0.5} \cdots \cdots \cdots (A.25)$$

$$\varepsilon_{s\infty} = -a_1 a_2 \left[1.9 \times 10^{-2} w^{2.1} f_c'^{-0.28} + 270 \right] \cdots \cdots \cdots (A.26)$$

$$a_1 = \begin{cases} 1 & \text{普通水泥} \\ 0.85 & \text{中、低热水泥} \\ 1.1 & \text{早强水泥} \end{cases} \quad a_2 = \begin{cases} 0.75 & \text{蒸汽养护} \\ 1.2 & \text{密封或防干燥的自然养护} \\ 1.0 & \text{水中或者相对湿度100\%} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (\text{A.27})$$

式中:

- ε_{sfc0} ——混凝土干燥收缩终值;
 k_h ——湿度影响系数;
 h ——相对湿度;
 $S(t)$ ——时间函数;
 τ_{sh} ——尺寸影响系数;
 k_t ——系数;
 k_s ——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, 单位为厘米 (cm), 对应板即为实际厚度;
 t_d ——开始干燥时间, 单位为日 (d);
 $E(28)$ ——混凝土 28 d 的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa), 以 28 d 强度作为设计依据时, 可取 $E(28)=E_{cm}$;
 w ——用水量, 单位为千克每立方米 (kg/m^3)。

A.7 混凝土徐变

混凝土的早期徐变性能宜通过试验确定, 无试验数据时, 徐变函数可采取下式进行计算:

$$J(t, t_0) = q_1 + C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0, t_d) \quad \dots\dots\dots (\text{A.28})$$

$$q_1 = 1 / E_0 \quad \dots\dots\dots (\text{A.29})$$

$$C_0(t, t_0) = q_2 Q(t, t_0) + q_3 \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \ln(t / t_0) \quad \dots\dots\dots (\text{A.30})$$

$$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} c^{0.5} f_{cm28}^{-0.9} \quad \dots\dots\dots (\text{A.31})$$

$$q_3 = 0.29(w / c)^4 q_2 \quad \dots\dots\dots (\text{A.32})$$

$$q_4 = 20.3 \times 10^{-6} (a_d / c)^{-0.7} \quad \dots\dots\dots (\text{A.33})$$

$$Q(t, t_0) = Q_f(t_0) \left[1 + \left(\frac{Q_f(t_0)}{Z(t, t_0)} \right)^{r(t_0)} \right]^{-1/r(t_0)} \quad \dots\dots\dots (\text{A.34})$$

$$Q_f(t_0) = \left[0.086(t_0)^{2/9} + 1.21(t_0)^{4/9} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (\text{A.35})$$

$$Z(t, t_0) = (t_0)^{-m} \ln[1 + (t - t_0)^n] \quad \dots\dots\dots (\text{A.36})$$

$$r(t_0) = 1.7(t_0)^{0.12} + 8 \quad \dots\dots\dots (\text{A.37})$$

$$C_d(t, t_0, t_d) = q_5 \left[\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t_0)\} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (\text{A.38})$$

$$q_5 = 0.757 f_{cm28}^{-1} \left| \varepsilon_{sh\infty} \times 10^6 \right|^{-0.6} \dots\dots\dots (A.39)$$

$$H(t) = 1 - (1 - h)S(t - t_d) \dots\dots\dots (A.40)$$

$$H(t_0) = 1 - (1 - h)S(t_0 - t_d) \dots\dots\dots (A.41)$$

式中:

- $J(t, t_0)$ ——徐变函数;
 t_0 ——开始持荷时间, 单位为日(d);
 q_1 ——瞬时弹性变形系数;
 $C_0(t, t_0)$ ——基本徐变柔度函数;
 $C_d(t, t_0, t_d)$ ——干燥徐变柔度, 单位为每兆帕(MPa⁻¹);
 E_0 ——混凝土加载时的弹性模量, 单位为兆帕(MPa);
 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 ——实验数据拟合的经验系数;
 a_A/c ——骨料质量与胶凝材料质量之比;
 $H(t)$ ——相对湿度函数。

A.8 混凝土收缩应力

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。收缩应力计算宜采取有限元法进行, 将温度场和收缩变形计算成果和边界条件, 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。

用有限元增量求解混凝土应力的整体平衡方程如下:

$$[k]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\}\{\Delta F_C\}\{\Delta F_T\}\{\Delta F_G\} \dots\dots\dots (A.42)$$

式中:

- $[k]$ ——刚度矩阵;
 $\{\Delta\delta\}$ ——节点位移增量阵列;
 $\{\Delta F\}$ ——节点荷载增量阵列;
 $\{\Delta F_C\}$ ——混凝土徐变引起的节点荷载增量;
 $\{\Delta F_T\}$ ——混凝土温度变形引起的节点荷载增量;
 $\{\Delta F_G\}$ ——混凝土自生体积变形、干燥收缩变形引起的节点荷载增量。

相应的应力增量为

$$\{\Delta\sigma_n\} = [\bar{D}]\left(\{\Delta\varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta\varepsilon_n^G\}\right) \dots\dots\dots (A.43)$$

式中:

- $[\bar{D}]$ ——等效弹性矩阵;
 $\Delta\varepsilon_n$ ——应变增量;
 η_n ——徐变应变增量;

$\Delta\varepsilon_s^T$ ——温度应变增量；

$\Delta\varepsilon_s^G$ ——自生体积变形、干燥收缩变形应变增量。

A.9 混凝土开裂风险系数

开裂风险系数 η 按下式计算：

$$\eta = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)} \dots\dots\dots (A.44)$$

式中：

$\sigma(t)$ —— t 时刻混凝土内部最大拉应力，单位为兆帕（MPa）；

$f_t(t)$ —— t 时刻混凝土抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

附录 B

(规范性附录)

混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值测试方法

B.1 混凝土绝热温升测试按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 执行。

B.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近接 3.0 °C 的时间为准，并记录此时的绝热温升值 θ_0 ，则混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值计算如下：

$$\varphi = \frac{\theta_{t+1} - \theta_0}{\theta_{t+7} - \theta_0} \times 100\% \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- φ ——混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值，%；
- θ_{t+1} ——以 t 为起点之后 1 d 混凝土绝热温升，单位为摄氏度（°C）；
- t ——绝热温升达到 3.0 °C 的时间，或大于且最近接 3.0 °C 的时间，单位为日（d）；
- θ_0 —— t 时绝热温升，单位为摄氏度（°C）；
- θ_{t+7} ——以 t 为起点之后 7 d 混凝土绝热温升，单位为摄氏度（°C）。

附录 C
(规范性附录)
混凝土 28 d 变形测试方法

C.1 混凝土 28 d 变形是以混凝土初凝为基准值恒温密封养护 7 d 后转入恒温恒湿（箱）室养护至 28 d 总的变形值。

C.2 初凝至恒温密封养护 7 d 条件下的变形（7 d 自生体积变形）测试按《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082 中的非接触法收缩试验执行，并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。

C.3 试件由密封养护转入恒温恒湿（箱）室养护至 28 d 变形（21 d 干燥变形）按照以下方法进行：

a) 试件成型、试验设备、测试环境按《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082 中的接触法收缩试验执行；

b) 试件成型完毕后，应立即采取塑料薄膜作密封处理，并移至温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 养护室养护，其后带模养护至 7 d；

c) 拆模后，立即将试件移入恒温恒湿（箱）室测试其初始长度，并至少按照下列规定时间间隔测量其变形读数：1 d、3 d、7 d、14 d、21 d。

C.4 混凝土变形（收缩率或膨胀率）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 中的收缩试验执行。混凝土膨胀时变形为正值，收缩时为负值。

C.5 混凝土 28 d 变形按照下式计算：

$$\varepsilon_{28} = \varepsilon_{As,7} + \varepsilon_{Ds,21} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

- ε_{28} ——混凝土 28 d 变形；
 $\varepsilon_{As,7}$ ——混凝土 7 d 自生体积变形；
 $\varepsilon_{Ds,21}$ ——混凝土 21 d 干燥变形。

附录 D
(规范性附录)
粉煤灰流动度比测试方法

D.1 粉煤灰流动度比测试方法包括下述步骤：

- a) 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，参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077 水泥净浆流动度试验，控制基准浆体流动度为 (220 ± 10) mm，记录减水剂用量 m ；
- b) 取相同水泥 210 g，受检粉煤灰 90 g，水 87 g，相同减水剂 m ，按 GB/T 8077 测试水泥与受检粉煤灰的受检浆体流动度。

D.2 粉煤灰流动度比

粉煤灰流动度比按下式计算：

$$\chi = \frac{D_1}{D_0} \times 100\% \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

- χ ——粉煤灰流动度比，%；
 D_0 ——基准浆体流动度，单位为毫米（mm）；
 D_1 ——受检浆体流动度，单位为毫米（mm）。

附录 E
(规范性附录)
水化热降低率测试方法

E.1 砂浆材料和配合比

水泥应符合《混凝土外加剂》GB 8076 的规定，砂和水应符合《水泥水化热测定方法》GB/T 12959 直接法（代用法）的规定，砂浆配合比符合以下规定：

- a) 水泥和砂的质量比为 1:3；
- b) 水灰比为 0.4；
- c) 掺加温控膨胀抗裂剂的砂浆为受检砂浆，其掺量采用生产厂家推荐值。

E.2 仪器设备

符合《水泥水化热测定方法》GB/T 12959 直接法（代用法）的规定。

E.3 试验条件

成型试验室温度应保持在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度不低于 50%；试验期间水槽内的水温应保持在 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。应用于日均气温大于 25°C 炎热气候的产品检测时，宜将砂浆初始温度控制在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，试验期间水槽内的水温设置为 $(30 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ，或由供需双方商定。

E.4 试验步骤

E.4.1 热量计热容量的计算，热量计散热常数的测定，热量计散热常数的计算，热量计散热常数的规定应符合 GB/T 12959 直接法（代用法）的规定。

E.4.2 水泥水化热测定

除以下步骤，其它均应符合《水泥水化热测定方法》GB/T 12959 直接法（代用法）的规定：

- a) 试验砂浆水灰比为 0.4；
- b) 温度采集间隔时间不超过 10 min；
- c) 总热容量、水泥水化热的结果计算，水泥质量和水质量按照实际质量进行计算，计算结果保留至 0.1 J/g。

E.4.3 以水化热达到 30.0 J/g 的时间 t_0 作为时间起点，如果测试点中没有 30.0 J/g，则以水化热大于且最接近 30.0 J/g 的时间为准，并记录此时的热量值为 Q_{t_0} ，则 24 h 水化热按下列公式计算：

$$Q_{24} = Q_{t_0+24} - Q_{t_0} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- Q_{24} ——24 h 时水化热，单位为焦耳每克 (J/g)；
- t_0 ——水化热达到 30.0 J/g，或大于且最接近 30.0 J/g 时的时间，单位为小时 (h)；
- Q_{t_0+24} ——以 t_0 为起点之后的 24 h 时水化热，单位为焦耳每克 (J/g)；
- Q_{t_0} —— t_0 时水化热，单位为焦耳每克 (J/g)。

E.4.4 7 d 水化热按《水泥水化热测定方法》GB/T 12959 的直接法（代用法）执行。

E.5 水化热降低率按下列公式计算：

$$R_Q = \left(1 - \frac{Q_t}{Q_c}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (E.2)$$

式中：

DB/T XXXX—XXXX

R_Q ——水化热降低率，%；

Q_t ——受检砂浆水化放热量，单位为焦耳每克（J/g）；

Q_c ——基准砂浆水化放热量，单位为焦耳每克（J/g）。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对于要求严格不同的用词、用语说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样不可的用词：
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用词
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，首先应这样做的用词
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 本规程中指明应按其他相关标准和规范执行的写法为“应按……执行”或“应符合……的规定”。

DB/T XXXX—XXXX

江苏省地方标准

明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝控制技术规程

DB /T XXXX-XXXX

条文说明

目 次

1 范围	24
3 术语和符号	25
4 设计	26
4.1 一般要求	26
4.2 抗裂性设计	26
5 材料	27
5.1 原材料	27
5.2 配合比	28
5.3 生产与运输	28
6 施工	30
6.1 一般规定	30
6.2 模板工程	30
6.3 混凝土浇筑	30
6.4 混凝土养护	30
6.5 工程监测	31
7 检验与验收	32
附录 A 混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法	33
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	34
附录 D 粉煤灰流动度比测试方法	35
附录 E 水化热降低率测试方法	36

1 范围

1.1 尽管我国在明挖现浇隧道结构工程建设中积累了不少经验，但其抗裂、防渗仍存在大量亟待解决的问题。相关工程调研结果表明，明挖现浇结构混凝土施工期内的收缩变形造成的开裂数量占裂缝总量的 80%以上，特别是现浇隧道主体结构混凝土受大截面、大体量、超长结构形式及施工工艺等因素的影响，极易在施工期就出现由于温度、收缩及约束等原因而产生的贯穿性收缩裂缝。因此，控制混凝土的收缩裂缝是保障现浇隧道混凝土工程质量与安全的关键。编制本规程的目的是为明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝控制相关的设计、材料、施工、检验与收缩提供技术指导，抑制混凝土开裂，保障与提升明挖现浇隧道工程建设质量。明挖现浇隧道混凝土收缩裂缝控制综合性强、牵涉面广，既有设计方面的内容（如结构形式、分段长度等），有原材料方面的内容（如水泥、骨料、功能材料等），还有施工技术和质量控制方面的内容（如入模温度、养护、现场管理），需要设计、施工、材料、管理等各环节闭环控制才能实现混凝土收缩裂缝的有效控制。

3 术语和符号

3.1.2 基于应力准则，抑制收缩裂缝的关键在于控制收缩引起的拉应力不超过混凝土的抗拉强度。以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的开裂风险。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，则可以抑制混凝土收缩引起的裂缝。

3.1.3 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。

3.1.9 现代混凝土开裂问题尤其是早期开裂问题较为突出，在早期温降收缩和自收缩相互叠加，是引起大体积、超长薄壁结构混凝土和高强混凝土开裂的主要原因，新型抗裂材料不仅需要补偿混凝土的收缩，还需降低混凝土的温升及温降收缩。

3.1.10 粉煤灰作为一种优质的掺合料在江苏省混凝土行业得到了较为广泛的应用，但随着煤炭资源的减少，以及市场竞争的加剧，粉煤灰的品质波动增大。工程实践发现，一些粉煤灰各项指标满足现行规范要求的情况下，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。因此，控制粉煤灰品质对保障混凝土工程质量至关重要。结合现行标准规范、国内外文献材料及工程实践，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。

4 设计

4.1 一般要求

4.1.3 底板、侧墙、顶板等结构混凝土开裂风险不同，为满足抗裂性要求所采取措施也存在差异，因此，应根据具体结构形式与工程特点，针对不同结构分别进行抗裂性设计。基于应力准则，抑制收缩裂缝的关键在于控制收缩引起的拉应力不超过混凝土的抗拉强度。本规程提出的开裂风险系数参考了 Mills R H 等研究工作、水工大体积混凝土领域提出的抗裂安全系数、日本 JCI 指南中提出的温度裂缝指数等相关成果。当 $\eta > 1.0$ 时，结构混凝土一定会开裂，考虑材料性能波动，认为 $0.70 < \eta \leq 1.0$ 时混凝土存在较大的开裂风险， $\eta \leq 0.70$ 时混凝土基本不会开裂。近年在明挖现浇隧道、城市轨道交通工程地下车站、地下空间及桥梁等工程实践结果表明，控制 η 不超过 0.70，可以有效解决实际工程的收缩裂缝。

4.1.4 研究与工程实践表明，混凝土温度收缩与自收缩是导致明挖现浇隧道混凝土出现收缩裂缝的主要原因，通过降低混凝土入模温度、设置冷却水管等措施来控制混凝土的温度或通过掺加膨胀剂来控制混凝土收缩变形并不能有效抑制混凝土的开裂。从混凝土出现收缩裂缝的主要矛盾出发，通过同时控制温度与收缩变形指标，采用温度场与变形历程双重调控技术可控制混凝土开裂风险系数不超过 0.70，进而避免混凝土出现贯穿性收缩裂缝。

4.2 抗裂性设计

4.2.1 考虑到塑性裂缝一般可通过喷洒水分蒸发抑制剂、及时覆盖和二次抹面等措施避免或消除，且塑性裂缝一般为浅层裂缝，因此，本规程给出了凝结硬化之后混凝土收缩裂缝设计方法与控制指标。根据附录 A 可以计算明挖现浇隧道底板、侧墙、顶板等不同结构混凝土收缩引起的开裂风险系数，从而提出抗裂性控制指标。考虑到进行抗裂性专项设计相对复杂，当不具备试验参数时，根据已有考虑强度等级、施工季节、模板条件等数百种工况的计算结果，结合江苏省内明挖现浇隧道及类似工程实践经验，满足表中所提的技术指标时，则可将开裂风险系数控制在 0.70 以下。现代混凝土早期水化放热速率快、放热量集中，导致混凝土温升值高，温降收缩大，因此，对开裂风险相对较高的结构如侧墙、顶板混凝土，提出“混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值”，即通过调控混凝土早期放热历程来有效降低结构温升，提高抗裂性。除此之外，考虑到明挖现浇隧道结构混凝土早期一般采取带模、覆膜养护方式，养护时间一般要求为 7 d~14 d，因此提出了 7 d 自生体积变形指标，以便和实际工程接近。江苏省相关工程实践统计结果表明，除炎热气候（一般为 6~9 月份）施工时需要进一步采取如片冰替代拌合用水等严格温控措施外，其余时间施工时，一般通过控制水泥进厂温度、骨料提前进场并遮阳、利用温度较低时段施工等常规措施基本可满足表 4.2.1 关于入模温度的要求。

4.2.2 为满足抗裂性要求，可能要采用合适的抗裂性提升功能材料或措施对混凝土的抗裂性能进行保障，相关技术组合方案是在众多工程案例总结的基础上得出。

5 材料

5.1 原材料

5.1.1 大量研究及工程实践统计结果表明,随着比表面积、碱含量、 C_3A 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、 C_3A 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)不宜超过 $350\text{ m}^2/\text{kg}$,《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 $300\text{ m}^2/\text{kg}\sim 350\text{ m}^2/\text{kg}$,《通用硅酸盐水泥》GB 175-2007 规定硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的比表面积不小于 $300\text{ m}^2/\text{kg}$,2020 年颁布实施的新版《通用硅酸盐水泥》GB 175 则规定硅酸盐水泥的比表面积不低于 $300\text{ m}^2/\text{kg}$ 、但不大于 $400\text{ m}^2/\text{kg}$,普通硅酸盐水泥 $45\text{ }\mu\text{m}$ 方孔筛筛余不小于 5%,当有特殊要求时,由买卖双方商议解决。

近年来对来自江苏省在建的隧道、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 $340\text{ m}^2/\text{kg}\sim 390\text{ m}^2/\text{kg}$ 。其中,隧道、桥梁等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超过 $350\text{ m}^2/\text{kg}$ 的水泥,而大量的市政、房建等普通工程所用的市售水泥比表面积则普遍超过 $350\text{ m}^2/\text{kg}$ 。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 $350\text{ m}^2/\text{kg}$,不应大于 $380\text{ m}^2/\text{kg}$ 。

《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 $60\text{ }^\circ\text{C}$,《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 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 。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高于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 。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。

5.1.3 过细的矿渣粉不利于控制混凝土水化温升和防裂,其比表面积一般不宜大于 $450\text{ m}^2/\text{kg}$ 。

5.1.5 降低粗骨料松散堆积空隙率可以减少填充空隙所需要的浆体量,有助于降低混凝土温升,提高抗裂性。宜采用两种及以上单粒级骨料掺配来进一步降低松散堆积空隙率。

5.1.6 通过使用减水剂降低了混凝土水胶比,提高了密实性,但同时也在一定程度上导致了混凝土毛细管负压增大,收缩驱动力增加,因此宜对减水剂的收缩率比进行限制,保障工程混凝土结构的抗裂性能。当使用引气剂时,其性能应符合《混凝土外加剂》GB 8076 的有关规定。

5.1.8 已有研究及工程实践结果表明,混凝土温度收缩及自收缩是导致明挖现浇隧道混凝土出现收缩开裂的主要原因,对于开裂风险高的侧墙、顶板等结构,仅通过补偿混凝土收缩变形可能无法满足抗裂性要求。温控膨胀抗裂剂可由氧化钙类、硫铝酸钙-氧化钙类、钙镁复合类膨胀源和水化热调控材料复合而成,不仅具有较强的补偿收缩效果,同时可以降低结构温升。温控膨胀抗裂剂一方面具有较高的膨胀性能;另一方面,可以调控水化放热历程,在散热条件下,降低结构温升。就水化热降低率指标而言,指定24 h水化热降低率,主要由于该时间段为水泥水化速率最快的阶段,同时可以排除使用缓凝剂通过延长凝结时间达到降低早期放热量的情况;7 d指标主要是评价功能材料对水泥总放热量的影响,如果总放热量降低幅度过大,可能对混凝土长期性能带来负面影响。该项技术是近年来发展出的一项新技术,已在江苏省内一些明挖现浇隧道中取得了良好的应用效果。由于《混凝土膨胀剂》GB/T 23439-2017 并未给出 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 水中28 d与3 d限制膨胀率之差测试方法,且温控膨胀抗裂剂相关的限制膨胀率测试方法

在《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082中均有所涉及。因此，本规程规定温控膨胀抗裂剂的限制膨胀率测试按《混凝土用钙镁复合膨胀剂》T/CECS 10082执行。

5.2 配合比

5.2.2 从提升抗裂性能角度考虑，明挖现浇隧道混凝土配合比设计在满足《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的基础上，宜遵循低胶凝材料用量、低水泥用量、适当水胶比、最大堆积密度的原则，以进一步降低混凝土温升和收缩。在遵循上述原则的同时，除满足力学性能、耐久性能和抗裂性能外，还应充分考虑混凝土工作性能要求，如低胶凝材料用量可能会导致混凝土浆体量不足，混凝土难以泵送施工，如对外观质量要求较高的结构，可适当增加浆体量，如顶板等因拆模对早期强度要求高的结构，可通过试验适当提高水泥用量。

5.2.3 由于聚羧酸高性能减水剂的大量应用，提高了混凝土的可泵性，考虑到明挖现浇隧道结构混凝土一般配筋较密，且结构尺寸较大，结合工程实践及施工需要，为保证振捣质量，本规程建议底板、顶板结构混凝土坍落度为 (200 ± 20) mm，侧墙结构混凝土坍落度为 (180 ± 20) mm。

5.2.5 使用矿物掺合料的目的之一是降低水泥用量，进而降低胶凝材料的水化热总量及放热速率。矿物掺合料掺量的增加，可能会影响混凝土力学性能及其他性能。因此，其掺量宜控制在一定范围内。掺加矿渣粉会细化混凝土孔径，有助于提高混凝土密实性，但同时会增大混凝土自干燥收缩，而掺入粉煤灰则会减小收缩。此外，监测结果表明，矿渣粉在较低掺量时，对结构混凝土温升速率和温升值影响有限，且降低温升的效果显著低于相同掺量的粉煤灰。因此，本规程建议对于开裂风险高的侧墙结构混凝土，宜单掺 20%~35%粉煤灰，其余部位可双掺粉煤灰和矿渣粉，掺量宜 30%~50%。根据《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55-2011，在没有特殊规定的情况下，混凝土强度试件在 28 d 龄期进行抗压试验，实际工程也普遍采用 28 d 龄期的强度作为配合比设计依据。对明挖现浇隧道工程而言，宜采用 60 d 或 90 d 龄期的强度作为混凝土配合比设计依据，以减少混凝土中水泥和胶凝材料用量，提高掺合料的用量，降低混凝土的绝热温升和收缩变形，提高混凝土的抗裂性。

5.3 生产与运输

5.3.3 混凝土拌合用水量对混凝土性能影响大，为保证混凝土拌合用水量准确，在生产前应测试粗、细骨料含水率，并及时调整拌合用水称量，禁止估算骨料含水率，原则上应保证生产过程中粗、细骨料的均匀性。为进一步提高拌合用水量的准确性，应严格按料线准确上料。为实时监测混凝土生产过程中骨料含水率的波动情况，宜在搅拌站骨料传送带上安装含水率测定仪进行及时反馈调整。

5.3.4 混凝土拌合物的坍落度、温度等是混凝土生产时的关键控制指标，因此，开机后应测试初始拌合的前2~3盘新拌混凝土性能，如不符合要求应及时处理调整。

5.3.5 混凝土入模温度控制是一项系统工程，涉及到原材料、生产、运输、浇筑等过程，由于明挖现浇隧道不同结构部位混凝土开裂风险不同，为满足抗裂性要求所采取的技术措施也存在差异。因此，在经济合理、便于实现的情况下，可对混凝土入模温度进行针对性控制。

利用温度较低时段施工、避免混凝土运输时间及在现场停留时间过长是炎热气候施工时控制入模温度的基本措施。对江苏省而言，统计结果表明，炎热气候温度较低时段一般为当日 18:00 至次日 06:00，当混凝土从运输到输送入模的延续时间超过 60 min 后，罐车内的混凝土温度会显著升高。为方便指导实际工程，本规程明确了炎热气候施工时的温度较低时段及混凝土从运输到输送入模的时间。当混凝土从运输到输送入模的延续时间超过 60 min 时，应检测混凝土的入模温度及工作性能，如满足要求时方可继续浇筑。

5.3.7 为保证混凝土匀质性及片冰充分融化，宜延长混凝土搅拌时间，尤其是当片冰用量较高时（一般超过 50 kg/m^3 ），混凝土搅拌时间宜不少于150 s，具体时间可经试验确定。

5.3.8 搅拌罐车卸料困难或混凝土坍落度损失过大情况时有发生，较多情况是现场施工组织不力，不能及时浇筑混凝土导致压车，这时可向罐车内掺加适量减水剂并搅拌均匀以改善拌合物稠度，但是应经试验确定。如不能恢复拌合物工作性能时，不得浇筑入模。

5.3.9 大量工程实践经验表明，接料前搅拌罐车内通常有积水，若不提前排净罐内积水，则会增大罐内混凝土实际水胶比。运输、等候卸料保持罐体正常转速以及卸料之前采用快档旋转搅拌的目的是将拌合物搅拌均匀，有利于泵送施工。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 混凝土施工前，宜结合工程进展情况进行抗裂性验算，以便更好的指导实施方案的编制。

6.2 模板工程

6.2.1 《混凝土结构工程施工规范》GB50666-2011规定采用内部振捣器时，对于新浇筑的混凝土作用于模板的最大侧压力标准值计算所采用的混凝土初凝时间，可按实测确定，当缺乏试验资料时可根据公式计算。对于明挖现浇隧道工程，考虑到掺加的温控膨胀抗裂剂具有调控混凝土水化历程的作用，本规程规定新浇筑的混凝土作用于模板的最大侧压力标准值应采用混凝土实测凝结时间进行计算选取。

6.2.3 钢模板散热优于木模板，有利于降低混凝土温升值，但当混凝土厚度超过1.5 m 时，这种优势不再明显。

6.3 混凝土浇筑

6.3.5 运输和浇筑过程中向混凝土拌合物中加水会严重影响混凝土力学性能、长期性能、耐久性能和抗裂性能，对混凝土工程质量危害极大，必须严格禁止。

6.3.9 混凝土入模温度是裂缝控制方案的关键指标，当不满足控制要求时，不应继续浇筑入模。

6.3.12 考虑到采取片冰替代拌合用水来降低入模温度的措施通常在商品混凝土公司中难以实现，因此，当入模温度难以满足抗裂性设计要求时，可在混凝土中埋设冷却水管。

6.4 混凝土养护

6.4.1 暴露于环境中的现浇混凝土在初凝前容易出现塑性裂缝，在该阶段混凝土尚未形成强度，不应采取蓄水、喷淋、覆盖等会对混凝土表面造成危害的养护方法，宜采取喷雾养护或喷洒水分蒸发抑制剂等方法进行养护。混凝土表面初凝后终凝前进行二次抹压，可以使部分塑性裂缝闭合，同时减少表面起皮、结壳等现象对长期性能的影响。

6.4.2 混凝土拆模时间应首先满足拆模强度要求，带模养护可在一定程度上减小混凝土里表温差，降低降温速率，减少混凝土表层水分散失，有利于提高混凝土抗裂性，但拆模时间过晚会影响模板周转，降低施工效率。在满足里表温差及降温速率的要求时，实际工程可根据结构特点与实践经验自行确定养护方式及拆模时间。当常规措施难以满足抗裂性要求时，对于侧墙结构，一般在达到温峰后混凝土强度已满足承载力要求，考虑到侧墙开裂风险较高、模板保温效果有限，本规程则建议在侧墙混凝土达到温峰后的1 d内拆模，拆模后立即在墙体暴露于空气中的外立面表面贴覆保温、保湿养护材料，当混凝土中心温度与环境温度之差不超过15℃时，再拆除养护材料。跨度较大的顶板结构对拆模强度要求高，拆模时间一般较长，可在模板表面进一步覆盖、喷涂保温材料，条件允许时，可遮挡两端隧洞口，在确保安全的情况下于隧洞内增设鼓风机、热源等设备。

6.4.4 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666-2011及《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011规定对于采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥配制的混凝土，养护时间不得少于7 d，对于掺加缓凝剂的混凝土以及大掺量矿物掺合料混凝土，养护时间不得少于14 d；《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018规定养护持续时间不宜少于14 d；《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T 178-2009 规

定养护期不得少于14 d。本规程根据现行国家标准规范的有关要求、明挖现浇隧道混凝土配合比特点及工程实践，规定混凝土保温保湿养护不宜少于14 d。

6.4.5 明挖现浇隧道一般为大体积混凝土，且混凝土配合比通常采用大掺量矿物掺合料或复掺矿物掺合料与功能材料，混凝土早期强度发展速率较普通混凝土慢，为避免气温骤降可能造成的冷击裂缝，对龄期低于28 d的混凝土应进行表面保温。

6.5 工程监测

6.5.1 明挖现浇隧道混凝土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。多数混凝土工程具有对称轴线，如实际工程不对称，可根据经验及理论计算结果选择有代表性的测点。如工程需要进行应变测试时，宜在混凝土浇筑体中心沿约束最大方向布置应变计，也可在应力集中处布置应变计。当混凝土出现开裂时，如裂缝在应变计附近，变形曲线会出现跳点，据此可判断裂缝位置及开裂时间。

6.5.2 工程监测对明挖现浇隧道混凝土裂缝控制较为重要，一方面，工程监测可用于指导信息化施工，另外一方面，工程监测结果可作为混凝土裂缝控制效果的评价依据。本规程建议对底板、侧墙、顶板等主体结构混凝土的工程监测，每100 m宜不少于1次。当材料、施工季节、结构尺寸等发生变化时，应重新监测，并做好记录。

7 检验与验收

7.1 混凝土原材料、拌合物性能及硬化混凝土的性能检验与验收按现行国家标准规范执行，对于混凝土裂缝控制效果的评价宜从全过程质量控制和实体混凝土是否出现贯穿性收缩裂缝及其引起的渗漏两个方面进行。

7.3 将用于浇筑开裂风险高的侧墙、顶板结构的新拌混凝土纳入验收要求有助于规范侧墙、顶板结构混凝土的生产，保证实体结构质量。从技术可行、便于操作的角度考虑，本规程建议在混凝土浇筑地点抽样检测混凝土7 d自生体积变形。考虑到工程规模、侧墙与顶板结构尺寸等差异，建议检测频率每100 m宜不少于1次，当材料、施工季节发生变化时，应重新抽样。

7.4 入模温度是反应混凝土裂缝控制成套技术方案落地的实施情况，是新拌混凝土现场检验与验收的重要指标之一。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，宜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 引起收缩裂缝的混凝土各类收缩本质上可归结为湿度和温度变化引起的收缩变形。因此，收缩裂缝设计指标应以温度指标和湿度引起的收缩变形指标为准。

A.2 绝热温升计算公式参照了《大体积混凝土施工标准》GB 50496，根据现代混凝土特点，对部分参数的取值进行了调整。在计算过程中，引入水化程度概念，主要考虑到已有的单一因素、标准条件下测试的混凝土材料性能和工程实际之间差异较大，结构混凝土处于环境温度、湿度、外界约束多因素耦合环境。通过水化度方法，实现不同结构及环境下具有不同时间依赖性的性能发展规律模拟，转变为标准条件下性能演变规律分析，最终实现材料至结构层次的抗裂性能评估。

A.3 实体结构处于半绝热状态，温度场计算需要考虑温度和水化的耦合，因此在温度场的计算中通过引入了活化能，从而实现实体结构中温度和水化交互作用的定量评估。

A.4 如 A.1 所述，本附录核心在于“通过水化度方法，实现不同结构及环境下具有不同时间依赖性的性能发展规律模拟”，因此借鉴目前大量文献研究成果并结合前期工程实践，采取了弹性模量、抗拉强度和水化程度关系模型。

A.6~A.7 目前尚未形成混凝土自收缩预测方面成熟标准或规范。所提出的自收缩和时间的关系参考了 fib 2010 规范。同时本规程只给出了 28 d 自收缩取值，主要考虑到实际工程中一般养护 7 d~14 d，其后以干燥收缩为主。通过自收缩和干燥收缩组合，可以实现混凝土收缩全过程计算。混凝土的干燥收缩、徐变选用 B3 模型，主要基于该模型应用较为广泛，且 ACI 209.2R-08 表明该模型预测值和实测值吻合相对较好。

A.8 原则上收缩应力计算应采取有限元法进行，将环境条件、结构尺寸、约束条件等变为边界条件，通过计算机进行仿真计算。

A.9 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程》JTS 202 提出控制安全系数 ≥ 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。

附录 B 混凝土 1d 绝热温升与 7d 绝热温升比值测试方法

B.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，以其中能够反应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。统计了明挖现浇隧道常用的 C30、C35、C40 等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 $2.0\sim 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。因此，本规程将 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为绝热温升历程比值的“零点”，如果绝热温升曲线上没有 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，则以绝热温升大于且最接近 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间为准，并以此来计算混凝土 1d 绝热温升与 7d 绝热温升比值。

附录 D 粉煤灰流动度比测试方法

D.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，结合现浇隧道混凝土配合比设计及实践经验，本规程规定粉煤灰掺量为30%。

附录 E 水化热降低率测试方法

E.1 本规程所提出的测试方法和国家标准《水泥水化热测定方法》GB/T 12959-2008直接法（代用法）测试相比，对试样的配合比进行了修改。GB/T 12959-2008直接法（代用法）中水灰比以标准稠度用水再额外增加5%用水，考虑到水灰比是影响水化的一个关键因素，为了排除水灰比对水化过程的影响，本规程将水胶比设为0.4。一方面，参照了GB/T 12959-2008溶解热法的水胶比，另一方面，该水胶比可以有效减少水泥浆体自干燥效应对水化热测试结果的影响，有利于对功能材料作用效果进行测定。

E.3 温度是影响水化速率一个重要因素，温度越高，水化速率越快。一般情况下，温度每上升10℃，水泥早期水化速率基本要提高一倍，即在水泥水化早期，放出等量的水化热，温度每升高10℃，所需要的时间将减少一半。在工程应用中，实际的环境温度和混凝土浇筑温度均可能与试验室标准条件相差较大，特别是炎热条件下，高温会加速水泥水化，导致混凝土温升增大，增加混凝土结构温度开裂风险，因此表征高温条件下温控膨胀抗裂剂对水泥水化的调控能力，更利于指导工程施工和控制混凝土质量。另外，《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016 在规定绝热温升测试方法时也指出：为更符合工程实际情况，对拌合物浇筑温度有特殊要求时，可按照要求控制拌合物初始温度进行试验。因此在炎热气候应用的产品检测时，为了更好的符合工程实际情况，宜采用更高的初始温度及环境温度。《建筑气候区划标准》GB 50178中关于炎热气候一般以日均气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 为标准。因此，本规程对试验条件进行了补充，建议应用于日均气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 炎热气候的产品检测时，宜将砂浆初始温度控制在 $(30 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，试验期间水槽内的水温设置为 $(30 \pm 0.1)^{\circ}\text{C}$ ，或也可由供需双方根据工程实际条件，商定检测条件。

E.4.3 温控膨胀抗裂剂降低混凝土温升的功能是通过对水泥水化速率调控来实现的，在确定采用直接法测试基础上，为了准确评价温控膨胀抗裂剂对水泥水化速率的调控性能及其与传统缓凝剂的区别，需要着重考察快速反应期这段时间的水化速率或水化放热量，即诱导期结束后温控膨胀抗裂剂对水泥水化的影响。为体现温控膨胀抗裂剂对水泥水化快速反应期速率以及对总热量的影响，本规程设定了两个水化热降低率指标：24 h 水化热降低率和 7 d 水化热降低率，分别评价温控膨胀抗裂剂对水泥水化快速反应期和对后期水化程度的影响。测试水化快速反应期这段时间的水化速率或水化放热量，需要确定其起始“零点”，即诱导期结束的时间点。直接法水化热测试的过程中砂浆体系温度不恒定，因此恒温条件下测试得到的凝结时间与直接法所测试的试样凝结时间无法对应，即无法确定直接法试件的凝结时间。研究表明，在改变水灰比、水泥种类、凝结时间的情况下，利用微量热方法测试的恒温条件净浆、砂浆达到初凝时刻的放热量基本不超过 30.0 J/g。因此，本规程将 30.0 J/g 作为水泥水化快速反应期起始的“零点”，如果累积热量曲线上没有 30.0 J/g 时，则以放热量大于且最接近 30.0 J/g 的时间为准，并以此作为水化快速反应期放热量初值。