

团 体 标 准

T/CCTAS XX—202X

铁路无砟轨道道床混凝土抗裂技术规程

Technical specification for crack control of railway ballastless track concrete

征求意见稿

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前言	错误! 未定义书签。
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 抗裂性设计	2
5 材料	2
5.1 原材料	3
5.2 配合比	4
6 施工	4
6.1 混凝土生产与运输	4
6.2 混凝土浇筑	5
6.3 混凝土养护	6
6.4 抗裂性监测	6
7 验收	6
附录 A（规范性）混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法	8
附录 B（规范性）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）混凝土 56d 变形测试方法	17
附录 D（规范性）粉煤灰流动度比测试方法	18
附录 E（规范性）干燥收缩降低率测试方法	19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

铁路无砟轨道道床混凝土抗裂技术规程

1 范围

本文件规定了铁路无砟轨道道床混凝土抗裂性设计、材料、施工、验收。

本文件适用于高速铁路、普速铁路、市域铁路、城市轨道交通无砟轨道道床现浇混凝土收缩裂缝的控制。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

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 17671 水泥胶砂强度检验方法（ISO法）

GB/T 23439 混凝土膨胀剂

GB/T 39701 粉煤灰中铵离子含量的限量及检验方法

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 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

GB/T 51028 大体积混凝土温度测控技术规范

JC/T 603 水泥胶砂干缩试验方法

JC/T 2608 混凝土水化温升抑制剂

JC/T 60018 现浇混凝土养护技术规范

JGJ 63 混凝土用水标准

TB/T 3275 铁路混凝土

TB 10424 铁路混凝土工程施工质量验收标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

开裂风险系数 cracking risk coefficient

任意时刻混凝土温度收缩、自收缩和干燥收缩引起的拉应力与抗拉强度的比值。

3.2

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。

3.3

混凝土 56d 变形 deformation of concrete at 56 days

以混凝土初凝为零点，恒温恒湿密封养护 7 d 后转入恒温恒湿（箱）室养护至 56 d 总的变形值。

3.4

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。

3.5

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。

3.6

干燥收缩降低率 reduction ratio of drying shrinkage

规定龄期内，基准砂浆和受检砂浆干燥收缩之差与基准砂浆干燥收缩的比值，以百分率表示。

4 抗裂性设计

4.1

宜采取抹面及养护等措施抑制塑性阶段混凝土裂缝，塑性阶段的养护应符合 JC/T 60018 的规定。

4.2

4.2.1 无砟轨道道床混凝土凝结硬化后的抗裂性设计应符合下列规定：

- a) 应在初步设计及施工图设计阶段进行抗裂性设计，开裂风险系数不应大于 0.70；
- b) 混凝土室内试验抗裂性能指标包括 7 d 绝热温升、1 d 绝热温升与 7d 绝热温升比值、7 d 自生体积变形、混凝土 56 d 变形；
- c) 实体结构混凝土抗裂性指标包括入模温度、温升值。

4.2.2 无砟轨道道床混凝土凝结硬化后抗裂性能指标控制值的提出应符合下列规定：

- a) 具备计算条件时，应按附录A计算得出；
- b) 不具备计算条件时，可按表 1 选取。

表 1 无砟轨道道床混凝土抗裂性能控制指标

日均气温℃	入模温度℃	温升值℃	7d绝热温升℃	绝热温升1d与7d的比值%	7d自生体积变形×10 ⁻⁶	混凝土56d变形×10 ⁻⁶
≥10	≤日均气温+5，且≤30	≤15	≤47	≤50	≥+200	≥-50
<10	5~15					
注 1： a) 本表适用于相对湿度≥50%的工况； b) 混凝土 1 d 绝热温升与 7 d 绝热温升比值计算按本规程附录 B 执行； c) 混凝土 7 d 自生体积变形和 56d 变形测试应按本规程附录 C 执行。 注 2： 变形“+”表示膨胀，“-”表示收缩。						

5 材料

5.1 原材料

5.1.1 水泥应符合下列规定：

- a) 宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其比表面积应为 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ ~ $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，熟料中 C_3A 含量不应大于 8.0%，碱含量不宜大于 0.60%；
- b) 当选用42.5强度等级水泥时，3 d水化热不宜大于250 kJ/kg，7d水化热不宜大于280 kJ/kg；当选用52.5强度等级水泥时，7d水化热不宜大于300 kJ/kg；
- c) 其他性能应符合TB/T 3275的规定。

5.1.2 粉煤灰应符合下列规定：

- a) 应采用 II 级及以上粉煤灰，需水量比不宜大于 100%，烧失量不宜大于 5.0%；
- b) 粉煤灰流动度比不宜小于95%，其测试方法应按本规程附录D执行；
- c) 铵离子含量不应大于210 mg/kg，其测试方法应符合GB/T 39701的规定；
- d) 其他性能应符合TB/T 3275的规定。

5.1.3 矿渣粉应符合下列规定：

- a) 宜采用 S95 级矿渣粉，比表面积 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ ~ $450 \text{ m}^2/\text{kg}$ ；
- b) 其他性能应符合TB/T 3275的规定。

5.1.4 细骨料应符合下列规定：

- a) 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区中砂，含泥量不应大于 2.5%，泥块含量不应大于0.5%；
- b) 不应具有潜在碱骨料反应活性；
- c) 其他性能应符合TB/T 3275的规定。

5.1.5 粗骨料应符合下列规定：

- a) 应选用级配合理、粒型良好、质地坚固、线膨胀系数小的洁净碎石，松散堆积空隙率不宜大于 43%；
- b) 不应具有潜在碱骨料反应活性；
- c) 其他性能应符合TB/T 3275的规定。

5.1.6 减水剂宜选用聚羧酸高性能减水剂，收缩率比不宜大于 100%，其他性能应符合 TB/T 3275 的规定。

5.1.7 温控膨胀抗裂剂应符合表 2 的规定，当对凝结时间有特殊要求时，指标由供需双方协商确定。

表 2 温控膨胀抗裂剂技术要求

项目		技术要求	检验方法
细度	比表面积 m^2/kg	≥ 250	按 GB/T 23439 检验
	1.18 mm 方孔筛筛余%	≤ 0.5	
含水率%		≤ 1.0	
凝结时间 min		—	
干燥收缩降低率%	28d	≥ 50	按附录 E 检验
	56d	≥ 40	
限制膨胀率%	20 °C水中 7 d	≥ 0.050	按 GB/T 23439 检验
	20 °C空气中 21d	≥ 0.000	
水化热降低率%	24 h	≥ 30	按 JC/T 2608 检验
	7 d	≤ 15	
抗压强度 MPa	7 d	≥ 22.5	按 GB/T 23439 检验
	28 d	≥ 42.5	

5.1.8 拌合水应符合 TB/T 3275 的规定。

5.2 配合比

5.2.1 无砟轨道道床混凝土配合比设计应以降低混凝土温升和收缩为目标，除遵循低胶凝材料及水泥用量、低水胶比的原则外，尚应符合以下规定：

- a) 最大胶凝材料用量限值不宜超过 450 kg/m^3 ，宜单掺20%~40%粉煤灰；
- b) 水胶比不宜大于0.45；
- c) 砂率宜为35%~42%；
- d) 温控膨胀抗裂剂的掺量应通过试验确定；

e) 道床斗送施工时，混凝土入模坍落度不应大于140 mm；泵送施工时，混凝土入模坍落度不应大于180 mm。

5.2.2 混凝土中碱含量不应大于 3.0 kg/m^3 ，总三氧化硫不应大于胶凝材料总量的4.0%，钢筋混凝土的氯离子含量不应大于0.1%。

5.2.3 配合比调整应符合下列规定：

a) 混凝土施工前，应根据粗、细骨料的实际含水率调整拌合物设计配合比的用水量，确定混凝土的施工配合比；

b) 混凝土施工过程中，当施工工艺及环境条件未发生明显变化，原材料的品质在合格的基础上发生波动时，可对混凝土减水剂掺量、粗骨料的分级比例，砂率进行适当调整，调整后的混凝土拌合物性能应符合设计或施工要求；

c) 混凝土施工过程中，当原材料品质、施工工艺等发生较大变化时，应重新对混凝土配合比进行设计。

5.2.4 混凝土绝热温升、自生体积变形、56 d变形等技术参数应通过测试满足抗裂性设计指标的要求。

6 施工

6.1 混凝土生产与运输

6.1.1 混凝土生产与运输能力应满足道床混凝土浇筑速度及凝结时间需求，混凝土质量应满足道床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。

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

6.1.3 水泥进场温度不宜大于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

6.1.4 混凝土搅拌时间不宜少于120 s，掺温控膨胀抗裂剂的混凝土以及采取片冰替代部分拌合用水时，宜适当延长搅拌时间，不宜少于150 s。

6.1.5 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。

6.1.6 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。

6.1.7 炎热气候施工时，为满足混凝土入模温度控制要求，可采取的措施有：

- a) 骨料提前进场，堆场采取遮阳等措施；
- b) 使用制冷水或冰水等低温水拌制混凝土；
- c) 对混凝土运输设备进行遮阳、隔热、保温、降温；
- d) 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；
- e) 采用片冰部分替代拌合水、风冷骨料等措施。

6.1.8 冬季施工时，应保证混凝土出机温度不低于 10℃，入模温度不低于 5.0℃。

6.1.9 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；
- d) 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。

6.1.10 运输混凝土过程中，应尽量减少混凝土的转运次数和运输时间。混凝土从加水拌和到入模的最长时间，应由试验室根据混凝土初凝时间及施工天气确定。

6.1.11 当卸料前混凝土坍落度损失较大不能满足施工要求时，不得加水，可在运输车罐内加入适量的与原配合比相同成分的减水剂；减水剂掺入后采取快档旋转搅拌罐进行搅拌，达到要求的工作性能后再浇筑；减水剂掺量和搅拌时间应有经试验确定的预案。

6.2 混凝土浇筑

6.2.1 轨排精确调整和固定完毕，验收合格后，应及时浇筑道床混凝土。

6.2.2 混凝土浇筑前，对浇筑道床板范围内的支承层或底座及轨枕洒水润湿，不得有积水，将模板内的杂物清理干净。

6.2.3 检查混凝土送料单，核对混凝土配合比，确认混凝土强度等级，检查混凝土运输时间，测试混凝土坍落度，满足设计要求方可进行浇筑施工。

6.2.4 道床混凝土浇筑应符合下列规定：

- a) 道床混凝土优先采用斗送施工，特殊地段必要时采用泵送，浇筑宜连续进行，不宜出现长时间的间歇；
- b) 混凝土入模时，下料口距混凝土浇筑面的高度不宜超过1 m，宜正对上层钢筋网中间空隙，严禁直接冲击轨排、轨枕与钢筋；
- c) 道床混凝土浇筑宜按“之”字形浇筑顺序进行均匀布料。混凝土应从轨枕一侧经轨枕底部慢流至另一侧，以便排出轨枕底下的空气；
- d) 不应通过加水方式调整混凝土工作性能；
- e) 混凝土入模温度与轨枕、钢筋、模板等介质间的温差不应大于15℃；
- f) 浇筑过程应及时监测轨排几何形位的变化和绝缘卡是否脱落，发现问题及时调整。

6.2.5 道床混凝土振捣应符合下列规定：

- a) 应采用振捣棒进行振捣，插点位置应均匀，不漏振、欠振及过振，应加强轨枕四周及底部位置混凝土振捣，确保混凝土填充密实；
- b) 振捣棒与模板的距离不应大于振捣棒作用半径的50%；振捣插点间距不应大于振捣棒的作用半径的1.4倍；
- c) 振捣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；
- d) 宜采用二次振捣工艺，对轨枕四周及底部混凝土进行振捣加强，排除新旧混凝土界面之间的气泡及水泡；
- e) 捣固过程中应避免振捣棒碰撞工具轨、螺杆调节器、轨枕及道床板钢筋。

6.2.6 混凝土入模温度不满足设计要求时，不应浇筑入模。

6.2.7 道床混凝土浇筑、振捣完成后，应及时修整、抹平裸露的混凝土面，混凝土抹面工序不少于3次，初凝前进行抹面压光，抹面时应采用原浆抹面压光，严禁洒水，注意加强对轨枕四周、排架横梁下方，钢轨下方等部位的操作。

6.2.8 道床混凝土初凝后，应及时松开螺杆调节器、扣件和钢轨连接的夹具，释放应力。具体松开螺杆调节器和扣件等的时机应根据施工条件经工艺试验提前确定。

6.3 混凝土养护

6.3.1 道床混凝土凝结硬化前应对裸露的表面采用保湿养护措施，凝结硬化后采取保温保湿养护措施。

6.3.2 道床混凝土拆模时，混凝土应具有足够的强度以确保其表面和棱角不受损伤或塌陷，且混凝土的强度不应低于 5 MPa，大风或气温急剧变化时不宜拆除模板。

6.3.3 高温、大风、干燥天气浇筑混凝土时，宜在作业面采取遮阳、挡风、喷雾等措施，道床混凝土浇筑完成后，凝结前，可采用喷雾、喷洒水分蒸发抑制剂、养护剂或轨排框架上覆盖等一种或多种保湿养护措施，凝结后，可采用覆盖养护措施。

6.3.4 混凝土养护水温与混凝土表面温度之差不应大于 15 °C，拆除保温保湿养护措施时，混凝土中心温度与环境温度之差不应超过 15 °C。

6.3.5 当日环境最低温度低于 5.0 °C 时，应采取覆盖养护。

6.3.6 道床混凝土浇筑完毕后的保温保湿养护时间应满足表 3 的规定。

表3 混凝土保温保湿的最短养护时间

日平均气温 °C	养护时间 d		
	大气潮湿（相对湿度≥50%） 无风，无阳光直射	大气干燥（相对湿度≥20%，且 <50%）有风，或阳光直射	大气极端干燥（相对湿度<20%） 大风，大温差
≥5，<10	14	21	45
≥10，<20	10	14	35
≥20	7	10	28

6.3.7 气温骤降时，未达 100%设计强度的道床混凝土应进行表面保温。

6.4 抗裂性监测

6.4.1 道床混凝土施工过程中应监测混凝土入模温度、最高温升及环境温度等参数，必要时宜监测混凝土应变。

6.4.2 传感器的布置不宜干扰现场作业，宜采用自动采集，数据无线传输至终端，实时在线查看的监测系统，应符合 GB/T 51028 的规定。

6.4.3 宜利用现场实际监测数据开展温度场和应力的分析，并和混凝土抗裂性设计要求对比，必要时调整抗裂技术措施。

6.4.4 温度监测传感器应符合下列规定：

a) 灵敏度 0.25 °C，精度 ±0.5 °C，测量范围：-30 °C~125 °C；

b) 传感器采集频率：自浇筑开始 7d 内采集频率不宜少于 1h 一次，7d 之后及长期监测采集频率不宜少于 1 次/6h。

6.4.5 应变监测传感器应符合下列规定：

a) 量程：±1500 με，灵敏度：1 με；

b) 应变监测频率宜与温度监测点同频率；

6.4.6 道床混凝土的抗裂性监测，每 1km 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 验收

7.1

原材料及混凝土质量的验收应符合TB 10424、GB 50204等的规定。

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100 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 28 d 干燥收缩降低率、20 °C 水中 7 d 限制膨胀率、24 h 水化热降低率。

7.3

应在浇筑地点抽样检查掺温控膨胀抗裂混凝土7 d自生体积变形和56 d变形，并应符合下列规定：

- a) 检查数量：每5 km相同配合比的混凝土应至少制作7 d自生体积变形和56 d变形检查试件1组，不足5 km时也应制作试件1组；
- b) 检查方法：按附录C执行。

7.4

混凝土入模温度验收应符合下列规定：

- a) 检查数量：每辆搅拌车不少于1次；
- b) 检查方法：插入式温度计。

7.5

道床混凝土裂缝控制效果验收应符合下列规定：

- a) 检查数量：全数检查；
- b) 检查方法：观察和尺量；
- c) 检查时间：达到混凝土强度评定龄期时、或约定的时间；
- d) 表面裂缝宽度：不大于0.15 mm。

附录 A

(规范性)

混凝土收缩裂缝开裂风险控制设计方法

A.1 总体设计

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。

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、保温养护等措施。

A.2 混凝土水化放热

A.2.1 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式 (A.2.1-1) 和 (A.2.1-2) 计算：

$$T_a(t_a) = T_{a,\max} (1 - e^{-mt_a}) = \alpha_{\max} \frac{WQ}{C_c \rho} (1 - e^{-mt_a}) \dots \dots \dots \text{(A.2.1-1)}$$

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q} \dots \dots \dots \text{(A.2.1-2)}$$

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 (°C)；

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 (°C)；

m ——与水泥品种、浇筑温度等有关的经验系数，单位为每日 (d^{-1})，C30~C40 混凝土可取 $0.8 d^{-1} \sim 1.0 d^{-1}$ ，C50~C60 混凝土可取 $1.0 d^{-1} \sim 1.5 d^{-1}$ ；

α_{\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/m^3)；

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 ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$)，无试验数据时，可取 $0.92 kJ/(kg \cdot ^\circ C) \sim 1.0 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

ρ ——混凝土密度，单位为千克每立方米 (kg/m^3)；

$\alpha(t)$ —— 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)。

A.2.2 当已知混凝土组成时，胶凝材料放热总量可按式 (A.2.2) 计算：

$$Q = Q_C P_C + k_1 \cdot 461 \cdot P_{SL} + k_2 \cdot 210 \cdot P_{FA} \dots\dots\dots (A.2.2)$$

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.2.2-1 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.2.2-2 选取。

表 A.2.2-1 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.2.2-2 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

A. 2. 3 当未知混凝土组成时, $T_{a,max}$ 可按表 A.2.3 选取:

表 A.2.3 不同强度等级混凝土的 $T_{a,max}$ 取值

混凝土强度等级	C30~C40
$T_{a,max}$ (°C)	40~50

A. 2. 4 α_{max} 可按式 (A.2.4) 计算, 当计算结果大于 1 时取 1:

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \cdot w/b}{0.194 + w/b} + 0.50 \cdot P_{FA} + 0.30 \cdot P_{SL} \leq 1 \dots\dots\dots (A.2.4)$$

式中:

w/b ——混凝土水胶比。

A. 3 混凝土温度场

A. 3. 1 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 $T(x, y, z, t)$, 须满足式 (A.3.1-1) ~ 式 (A.3.1-4) 给出的热传导方程和边界条件。

$$\rho C_c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_a(t_{a,eq}) \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \frac{T_a(t_{a,eq}) + T_{a0} - T(t)}{[T_{a0} + T_a(t_{a,eq}) + 273] \cdot [T(t) + 273]} \right] \dots\dots\dots (A.3.1-1)$$

$$q_a [T_a(t_{a,eq})] = C_m \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{t=t_{a,eq}} \dots\dots\dots (A.3.1-2)$$

$$t_{a,eq} = \frac{1}{r} \cdot \ln \left[1 - \frac{a(t)}{a_{\max}} \right] \dots\dots\dots (A.3.1-3)$$

$$E_a = \left[(k_{Ea,FA} + k_{Ea,SL}) - 1 \right] \cdot E_C \dots\dots\dots (A.3.1-4)$$

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.3.1-4) 计算;
- T_{a0} ——绝热温升测试时的入模温度, 单位为摄氏度 (°C);
- 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.3.1-1 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 A3.1-2 选取。

表 A.3.1-1 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.3.1-2 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.3.2 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:

a) 第一类边界条件 C1: 混凝土表面温度是时间的已知函数, 可表示为式 (A.3.2-1):

$$T(t) = f(t) \dots\dots\dots (A.3.2-1)$$

b) 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, 可表示为式 (A.3.2-2):

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = f(t) \dots \dots \dots (A.3.2-2)$$

式中：

n ——表面法线方向。

若表面是绝热的，则可以表示为式 (A.3.2-3)：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = 0 \dots \dots \dots (A.3.2-3)$$

c) 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，可表示为式 (A.3.2-4)：

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \beta (T - T_a) \dots \dots \dots (A.3.2-4)$$

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。

d) 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，可表示为式 (A.3.2-5)：

$$\left. \begin{array}{l} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (A.3.2-5)$$

A.3.3 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 GB 50496 进行选取。

A.4 混凝土强度、弹性模量

A.4.1 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) 可按式 (A.4.1-1) 表示：

$$f_M(\alpha(t)) = f_{M\infty} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^a \dots \dots \dots (A.4.1-1)$$

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，可按式 (A.4.1-2)~式 (A.4.1-4) 计算；

α ——指数常数，无试验测试值时，计算抗拉强度可取 1.0，计算弹性模量可取 0.5；

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。

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \dots \dots \dots (A.4.1-2)$$

$$\begin{cases} f_{cm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} & f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ f_{cm} = 2.12 \ln(1 + 0.1(f_{ck} + \Delta f)) & f_{ck} > 50\text{MPa} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{A.4.1-3})$$

$$E_{cm} = 4734 f_{cm}^{0.5} \dots\dots\dots (\text{A.4.1-4})$$

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_{ctm} ——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

A.5.1 温度变形可按式 (A.5.1) 表示:

$$\varepsilon_T = \beta_T \cdot \Delta T \dots\dots\dots (\text{A.5.1})$$

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 $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT ——温差, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)。

A.6 混凝土收缩变形

A.6.1 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。

a) 混凝土的自收缩可按经验公式 (A.6.1-1) 计算:

$$\varepsilon_{as} = f(t) \varepsilon_{as\infty} = f[\alpha(t)] \varepsilon_{as28} \dots\dots\dots (\text{A.6.1-1})$$

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 $(10f_{ck} - 200) \times 10^{-6}$ 。

b) 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, 按式 (A.6.1-2) ~ 式 (A.6.1-8) 计算:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_d) = -\varepsilon_{sh\infty} k_h S(t) \dots\dots\dots (\text{A.6.1-2})$$

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & h \leq 0.98 \\ -0.2 & h = 1 \\ \text{线性内插} & 0.98 \leq h \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (\text{A.6.1-3})$$

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}}, \tau_{sh} = k_t(k_s D)^2 \dots\dots\dots (\text{A.6.1-4})$$

$$D = \frac{2v}{s}, k_t = 8.5t_d^{-0.08} f_{cm}^{-0.025} \dots\dots\dots (\text{A.6.1-5})$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \dots\dots\dots (\text{A.6.1-6})$$

$$E(t) = E(28) \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (\text{A.6.1-7})$$

$$\varepsilon_{s\infty} = -a_1 a_2 \left[1.9 \times 10^{-2} w^{2.1} f_c'^{-0.28} + 270 \right] \dots\dots\dots (\text{A.6.1-8})$$

式中:

- $\varepsilon_{sh\infty}$ ——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 $E(28) = E_{cm}$;
- α_1 、 α_2 ——水泥品种、养护条件相关系数, 可分别按表 A.6.1-1、表 A.6.1-2 选取;
- w ——用水量, 单位为千克每立方米 (kg/m^3)。

表 A.6.1-1 水泥品种相关系数

普通水泥	中、低热水泥	早强水泥
1.0	0.85	1.1

表 A.6.1-2 养护条件相关系数

蒸汽养护	密封或防干燥的自然养护	水中或相对湿度 100%
0.75	1.2	1.0

A.7 混凝土徐变

A.7.1 混凝土的早期徐变性能宜通过试验确定, 无试验数据时, 徐变函数可按式 (A.7.1-1) ~ 式 (A.7.1-14) 进行计算:

$$J(t, t_0) = q_1 + C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0, t_d) \dots\dots\dots (\text{A.7.1-1})$$

$$q_1 = 1 / E_0 \dots\dots\dots (\text{A.7.1-2})$$

$$C_0(t, t_0) = q_2 Q(t, t_0) + q_3 \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \ln(t / t_0) \dots\dots\dots (A.7.1-3)$$

$$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} c^{0.5} f_{cm28}^{-0.9} \dots\dots\dots (A.7.1-4)$$

$$q_3 = 0.29(w / c)^4 q_2 \dots\dots\dots (A.7.1-5)$$

$$q_4 = 20.3 \times 10^{-6} (a_A / c)^{-0.7} \dots\dots\dots (A.7.1-6)$$

$$Q(t, t_0) = Q_f(t_0) \left[1 + \left(\frac{Q_f(t_0)}{Z(t, t_0)} \right)^{r(t_0)} \right]^{-1/r(t_0)} \dots\dots\dots (A.7.1-7)$$

$$Q_f(t_0) = [0.086(t_0)^{2/9} + 1.21(t_0)^{4/9}]^{-1} \dots\dots\dots (A.7.1-8)$$

$$Z(t, t_0) = (t_0)^{-m} \ln[1 + (t - t_0)^n] \dots\dots\dots (A.7.1-9)$$

$$r(t_0) = 1.7(t_0)^{0.12} + 8 \dots\dots\dots (A.7.1-10)$$

$$C_d(t, t_0, t_d) = q_5 [\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t_0)\}]^{1/2} \dots\dots\dots (A.7.1-11)$$

$$q_5 = 0.757 f_{cm28}^{-1} \varepsilon_{sh\infty} \times 10^6 \dots\dots\dots (A.7.1-12)$$

$$H(t) = 1 - (1 - h)S(t - t_d) \dots\dots\dots (A.7.1-13)$$

$$H(t_0) = 1 - (1 - h)S(t_0 - t_d) \dots\dots\dots (A.7.1-14)$$

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

A.8.1 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。

A.8.2 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。

a) 用有限元增量求解混凝土应力的整体平衡方程可用式（A.8.2-1）表示：

$$[k]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} - \{\Delta F_C\} - \{\Delta F_T\} - \{\Delta F_G\} \dots\dots\dots (A.8.2-1)$$

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。

b) 相应的应力增量为

$$\{\Delta\sigma_n\} = [\bar{D}]\left(\{\Delta\varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta_n^G\}\right) \dots\dots\dots (\text{A.8.2-2})$$

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；
- $\Delta\varepsilon_n^T$ ——温度应变增量；
- Δ_n^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

A.9.1 开裂风险系数 η 按式 (A.9.1) 计算：

$$\eta = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)} \dots\dots\dots (\text{A.9.1})$$

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)

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 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 绝热温升比值按式 (B.2) 计算：

$$\varphi = \frac{\theta_{t+1} - \theta_0}{\theta_{t+7} - \theta_0} \times 100\% \dots\dots\dots (B.2)$$

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)

混凝土 56d 变形测试方法

C. 1

混凝土 56 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 56 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 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 56 d 变形（49d 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 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±2）℃ 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、28d、35d、42d、49d。

C. 4

混凝土变形（收缩率或膨胀率）试验结果和处理按 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 56 d 变形按式（C.5）计算：

$$\varepsilon_{56} = \varepsilon_{As,7} + \varepsilon_{Ds,49} \dots \dots \dots (C.5)$$

式中：

ε_{56} ——混凝土 56 d 变形；

$\varepsilon_{As,7}$ ——混凝土 7 d 自生体积变形；

$\varepsilon_{Ds,49}$ ——混凝土 49 d 干燥变形。

附录 D

(规范性)

粉煤灰流动度比测试方法

D.1 试验步骤

D.1.1 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，参照 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 ；

D.1.2 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 粉煤灰流动度比计算

D.2.1 粉煤灰流动度比按式 (D.2.1) 计算：

$$\chi = \frac{D_1}{D_0} \times 100\% \dots\dots\dots (D.2.1)$$

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)

干燥收缩降低率测试方法

E.1 砂浆材料和配合比

水泥应符合 GB 8076 的规定，砂应符合 GB/T 17671 的规定，水应符合 JGJ63 的规定，砂浆配合比应符合表 E.1 的规定。

表 E.1 干燥收缩降低率试验材料及用量

试件	水泥	温控膨胀抗裂剂	砂	水
基准砂浆	675±2.0	0	1350.0±5.0	270.0±1.0
受检砂浆	607.5±2.0	67.5±0.2	1350.0±5.0	270.0±1.0

E.2 试验室温度和湿度

试验室温度和湿度应按 JC/T 603 执行。

E.3 试件成型

试件成型应按 JC/T 603 执行。

E.4 试件养护、存放和测量

E.4.1 试件自加水时算起，养护 24h±2h 后脱模，用湿布擦除试件表面水分和钉头上的污垢，用比长仪测定初始读数 (L_0)。

E.4.2 立即将试件移入干燥养护箱养护，试件的养护应符合 JC/T603 的规定。

E.4.3 从试件放入干缩养护箱时记 27d (即从成型时算起 28d)、55d (即从成型时算起 56d)，取出测量试件长度 (L_{28} 、 L_{56})。

E.5 干燥收缩计算

干燥收缩按下式计算，计算至 0.001%。

$$S_t = \frac{(L_0 - L_{28})}{250} \times 100\% \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

S_t —— t 龄期时的干燥收缩，%；

L_0 ——初始测量读数，单位为毫米 (mm)；

L_{28} ——28d 龄期时的测量读数，单位为毫米 (mm)；

L_{56} ——56d 时的测量读数，单位为毫米 (mm)；

250 ——试件有效程度，单位为毫米 (mm)。

E.6 干燥收缩降低率计算

干燥收缩降低率按下式计算，计算至 0.1%。

$$\Delta_t = \frac{(S_{rt} - S_{et})}{S_{rt}} \times 100\% \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

- Δ_t —— t 龄期时的干燥收缩降低率, %;
- S_{rt} ——基准浆体干燥收缩, %;
- S_{et} ——受检浆体干燥收缩, %。

