

中华人民共和国行业标准

TB

TB 10XXX—2010

J XXX—2010

铁路混凝土结构耐久性设计规范

Code for durability design on concrete structure of railway

(报批稿)

2010—XX—XX 发布

2010—XX—XX 实施

中华人民共和国铁道部 发布

中华人民共和国行业标准

铁路混凝土结构耐久性设计规范

Code for durability design on concrete structure of railway

TB 10XXX—2010

J XXX—2010

主编单位：中国铁道科学研究院

批准部门：中华人民共和国铁道部

施行日期：2010 年 XX 月 XX 日

2010 年 · 北京

前 言

本规范是根据铁道部《2009 年铁路工程建设标准编制计划》(铁建设函[2009]34 号)的要求,在《铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定》基础上修订而成的。

本规范共分 9 章,主要内容包括:总则、术语、基本规定、环境、混凝土、裂缝控制、构造措施、防腐蚀强化措施和检查与维修,另有 3 个附录。

本次修订的主要内容有:

1. 细化了铁路混凝土结构耐久性设计应遵循的原则。
2. 补充了氯盐环境和磨蚀环境的条件特征;修改了化学侵蚀环境的条件特征,并将盐类结晶破坏环境单独列为一类环境;明确了环境水和环境土中侵蚀离子的检测方法。
3. 增加了评价氯盐环境下混凝土抗氯离子渗透性能的指标要求;增加了评价盐类结晶破坏环境下混凝土抗硫酸盐结晶破坏性能的指标要求;增加了冻融破坏环境下混凝土含气量和气泡间距系数的要求,细化了评价混凝土抗冻性的指标要求。
4. 增加了混凝土结构表面裂缝计算宽度限值要求。
5. 增加了桥涵、隧道、路基、无砟轨道和可更换小型构件的构造措施。

本规范以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

在执行本规范过程中,希望各单位结合工程实践,认真总结经验,积累资料。如发现需要修改和补充之处,请及时将意见和有关资料寄交中国铁道科学研究院(北京市海淀区大柳树路 2 号,邮政编码:100081),并抄送铁道部经济规划研究院(北京市海淀区羊坊店路甲 8 号,邮政编码:100038),以供今后修订时参考。

本规范由铁道部建设管理司负责解释。

本规范主编单位:中国铁道科学研究院。

本规范参编单位:清华大学、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、铁道第三勘察设计院集团有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁十二局集团有限公司。

本规范主要起草人员:谢永江、李化建、李克非、覃维祖、廉慧珍、朱长华、仲新华、谭盐宾、易忠来、黄直久、吴少海、魏永幸、王召祐、孙立、周成、郑长青、杜保军、冯仲伟、楼梁伟、王月华、刘竞、翁智财、郑新国、曾志、魏齐威。

本规范主要审查人员:安国栋、苏全利、米隆、吴明友、薛育秀、傅锋、杨梦蛟、乔健、江忠贵、伍林、倪光斌、薛吉岗、周诗广、刘华、钱树青、李启棣、李承根、钱振地、宿万、唐南生。

目 录

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	4
4	环境	5
4.1	一般规定	5
4.2	类别	5
4.3	作用等级	5
5	混凝土	9
5.1	原材料	9
5.2	配合比	16
5.3	抗压强度	19
5.4	耐久性	20
6	裂缝	23
6.1	计算宽度限值	23
6.2	施工控制	23
7	构造措施	25
7.1	一般规定	25
7.2	桥涵	25
7.3	隧道	26
7.4	路基	28
7.5	无砟轨道	29
7.6	可更换小型构件	29
8	防腐蚀强化措施	31
9	检查与维修	32

附录 A 水泥或胶凝材料抗硫酸盐侵蚀性能快速检测方法.....33

附录 B 矿物掺和料及外加剂抑制碱—骨料反应有效性检测方法.....35

附录 C 混凝土气泡间距系数检测方法（直线导线法）.....38

本规范用词说明.....41

条文说明.....42

1 总 则

1.0.1 为规范铁路混凝土结构耐久性设计，保证铁路混凝土结构在设计使用年限内满足使用要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于采用普通混凝土施工的铁路混凝土结构在碳化环境、氯盐环境、化学侵蚀环境、盐类结晶破坏环境、冻融破坏环境和磨蚀环境等常见环境作用下的耐久性设计。铁路混凝土结构在其他特殊环境作用下的耐久性设计，应事先通过专门的研究和论证。

1.0.3 本规范规定的耐久性设计要求是保证铁路混凝土结构达到设计使用年限的基本要求。必要时，可根据工程的实际情况和具体环境条件适当提高。

1.0.4 铁路混凝土结构耐久性设计应遵循的原则为：

- 1 耐久性设计应以结构具有足够承载能力和良好的抗裂性为前提。
- 2 耐久性设计应根据结构的设计使用年限、环境类别及作用等级进行。
- 3 耐久性设计应从方便施工和规避环境对结构的不利影响角度，合理布置结构的构造。
- 4 耐久性设计应对处于严重腐蚀环境下的混凝土结构提出可靠的防腐蚀强化措施。
- 5 耐久性设计应对结构在设计使用年限内的检查与维修提前做出规划，明确跟踪检查内容。
- 6 耐久性设计应充分考虑混凝土的收缩和徐变对预应力混凝土结构（如预应力梁、轨道板、轨枕、接触网支柱等）预应力（度）的影响。
- 7 耐久性设计采用新材料、新工艺和新方法时，应按国家和铁道部有关规定进行试验验证并审定通过后方可使用。

1.0.5 铁路混凝土结构耐久性设计除应执行本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 混凝土结构的耐久性 (durability of concrete structure)

在预定的作用和预期的使用与维护条件下,混凝土结构及构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。

2.0.2 设计使用年限 (design working life)

设计人员用以作为结构耐久性设计依据并具有足够安全度或保证率的目标使用年限。

2.0.3 胶凝材料 (cementitious material, or binder)

用于配制混凝土的水泥和矿物掺和料的总称。

2.0.4 水胶比 (water to binder ratio)

混凝土拌和物中总用水量与胶凝材料总量的质量比。

2.0.5 腐蚀 (deterioration)

材料与周围的环境因素发生物理、化学或电化学反应而受到的渐进性损伤与破坏。对钢材则称为锈蚀 (corrosion)。

2.0.6 胶凝材料抗蚀系数 (resistance coefficient to sulfate attack of binder)

水泥或胶凝材料的胶砂试体浸泡在一定浓度硫酸钠溶液中的抗折强度与浸泡在洁净水中同龄期胶砂试体的抗折强度之比,用于评价水泥或胶凝材料抵抗硫酸盐化学侵蚀的能力。

2.0.7 电通量 (passed electric charge)

在一定条件下通过混凝土规定截面积的电荷总量,用于评价混凝土抵抗水或离子等介质向内渗透的能力。

2.0.8 氯离子扩散系数 (chloride diffusion coefficient)

描述混凝土孔隙水中氯离子从高浓度区向低浓度区扩散过程的参数,用于评价混凝土抵抗氯离子侵蚀的能力。

2.0.9 混凝土抗冻等级 (resistance class to freezing-thawing of concrete)

用快冻法测得的最大冻融循环次数划分的混凝土抗冻性能的级别,用于评价混凝土抵抗冻融循环破坏的能力。

2.0.10 气泡间距 (air bubble spacing)

硬化混凝土中相邻气泡边缘之间距离的平均值。

2.0.11 抗硫酸盐结晶破坏等级 (resistance class to sulphate physical attack of concrete)

用抗硫酸盐侵蚀试验方法测得的最大干湿循环次数划分的混凝土抗腐蚀性能的级别,用于评价混凝土抵抗硫酸盐结晶破坏的能力。

2.0.12 钢筋的混凝土保护层最小厚度 (minimum concrete cover to reinforcement)

在一定环境条件下，为保证混凝土结构的耐久性，混凝土结构中从混凝土表面到最外层钢筋外缘所必需的最小距离。

2.0.13 防腐蚀强化措施 (enhanced protective measures)

在采取提高混凝土密实性和增加钢筋的混凝土保护层厚度等常规措施仍不足以保证混凝土结构耐久性的前提下需要进一步采取的其它防腐蚀措施。

2.0.14 维修 (maintenance)

为维持结构或其他构件在设计使用年限内所需功能而采取的各种经常性和周期性的技术与管理活动。

3 基本规定

3.0.1 铁路混凝土结构耐久性设计应包括以下内容：

- 1 混凝土结构及构件的设计使用年限；
- 2 混凝土结构的环境类别及环境作用等级；
- 3 混凝土结构用材料的性能及耐久性指标要求；
- 4 混凝土结构裂缝控制措施；
- 5 混凝土结构构造措施；
- 6 严重腐蚀环境下对混凝土结构采取的防腐蚀强化措施；
- 7 在设计使用年限内对混凝土结构采取的跟踪检查与维修要求。

3.0.2 铁路混凝土结构的设计使用年限应符合表 3.0.2 的规定。

表 3.0.2 铁路混凝土结构设计使用年限

设计使用年限级别	设计使用年限	适用范围示例
—	100 年	桥梁、涵洞、隧道等主体结构，路基支挡及承载结构，无砟轨道道床板、底座板
二	60 年	路基防护结构，200km/h 及以上铁路路基排水结构，接触网支柱等
三	30 年	其它铁路路基排水结构，电缆沟槽、防护砌块、栏杆等可更换小型构件

注：

1 无砟轨道轨道板、支承层设计使用年限至少为 60 年基础上，研究试验再创新实现与桥梁结构等寿命期。

2 有特殊要求的铁路混凝土结构的设计使用年限可结合实际情况确定。

3 铁路房屋建筑结构的设计使用年限按国家相关标准执行。

4 环 境

4.1 一般规定

4.1.1 铁路混凝土结构耐久性设计前，应对铁路沿线气候、水质、土质等环境条件进行勘察或调查，确定混凝土结构所处的环境类别及作用等级。

4.1.2 铁路混凝土结构处于多种环境共同作用下，应对结构所处的不同环境作用分别进行确定，所采取的耐久性技术措施应同时满足每种环境作用的要求。

4.1.3 同一铁路混凝土结构的同一部位所处的环境作用不同时，应根据具体情况对同一部位所处的环境类别及作用等级分别进行确定，并采取相应的耐久性技术措施。

4.2 类 别

4.2.1 铁路混凝土结构所处的常见环境按其对于混凝土材料和钢筋的腐蚀机理分为 6 类，并按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1 环境类别

环境类别	腐蚀机理
碳化环境	保护层混凝土碳化导致钢筋锈蚀
氯盐环境	氯盐渗入混凝土内部导致钢筋锈蚀
化学侵蚀环境	硫酸盐等化学物质与水泥水化产物发生化学反应导致混凝土损伤
盐类结晶破坏环境	硫酸盐等化学物质在混凝土孔中结晶膨胀导致混凝土损伤
冻融破坏环境	反复冻融作用导致混凝土损伤
磨蚀环境	风沙、河水或泥砂在混凝土表面高速流动导致混凝土表面损伤

4.3 作用等级

4.3.1 碳化环境的作用等级应按表 4.3.1 确定。

表 4.3.1 碳化环境的作用等级

环境作用等级	环境条件
T1	室内年平均相对湿度 < 60%
	长期在水下（不包括海水）或土中
T2	室内年平均相对湿度 60%
	室外环境
T3	处于水位变动区
	处于干湿交替区

注：

薄型结构的一侧干燥而另一侧湿润或饱水时，其干燥一侧混凝土的碳化作用等级应按 T3 考虑。

4.3.2 氯盐环境的作用等级应按表 4.3.2 确定。

表 4.3.2 氯盐环境的作用等级

环境作用等级	环境条件
L1	长期在海水、盐湖的水下或土中
	高于平均水位 15m 的海上大气区
	离涨潮岸线 100m ~ 300m 的陆上近海区
	水中氯离子浓度 100mg/L 且 500mg/L，并有干湿交替
	土中氯离子浓度 150mg/kg 且 750mg/kg，并有干湿交替
L2	平均水位 15m 以内（含 15m）的海上大气区
	离涨潮岸线 100m 以内（含 100m）的陆上近海区
	海水潮汐区和浪溅区（非炎热地区）
	水中氯离子浓度>500mg/L 且 5000mg/L，并有干湿交替
	土中氯离子浓度>750mg/kg 且 7500mg/kg，并有干湿交替
L3	海水潮汐区和浪溅区（炎热地区）
	盐渍土地区露出地表的毛细吸附区
	水中氯离子浓度>5000mg/L，并有干湿交替
	土中氯离子浓度>7500mg/kg，并有干湿交替

注：

1 氯离子浓度的测定方法应符合现行《铁路工程水质分析规程》(TB 10104)和《铁路工程岩土化学分析规程》(TB 10103)的规定。

2 炎热地区是指年平均气温高于 20 的地区。

4.3.3 化学侵蚀环境的作用等级应按表 4.3.3 确定。

表 4.3.3 化学侵蚀环境的作用等级

环境作用等级	环境条件					
	水中 SO_4^{2-} (mg/L)	强透水性土 中 SO_4^{2-} (水溶值， mg/kg)	弱透水性土 中 SO_4^{2-} (水溶值， mg/kg)	酸性水 (pH 值)	水中侵蚀性 CO_2 (mg/L)	水中 Mg^{2+} (mg/L)
H1	200	300	> 1500	6.5	15	300
	1000	1500	6000	5.5	40	1000
H2	> 1000	> 1500	> 6000	< 5.5	> 40	> 1000
	4000	6000	15000	4.5	100	3000
H3	> 4000	> 6000	> 15000	< 4.5	> 100	> 3000
	10000	15000		4.0		
H4	> 10000	> 15000	—	—	—	—
	20000	30000				

注：

1 强透水性土是指碎石土和砂土，弱透水性土是指粉土和黏性土。

2 当混凝土结构处于高硫酸盐含量（水中 SO_4^{2-} 含量大于 20000mg/L、土中 SO_4^{2-} 含量大于 30000mg/kg）的环境时，其耐久性技术措施应进行专门研究和论证。

3 当环境中存在酸雨时，按酸性水侵蚀考虑，但相应作用等级可降一级。

4 水和土中侵蚀性离子浓度的测定方法应符合现行行业标准《铁路工程水质分析规程》(TB 10104)和《铁路工程岩土化学分析规程》(TB 10103)的规定。

4.3.4 盐类结晶破坏环境的作用等级应按表 4.3.4 确定。

表 4.3.4 盐类结晶破坏环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	
	水中 SO_4^{2-} (mg/L)	土中 SO_4^{2-} (水溶值, mg/kg)
Y1	200, 500	300, 750
Y2	> 500, 2000	> 750, 3000
Y3	> 2000, 5000	> 3000, 7500
Y4	> 5000, 10000	> 7500, 15000

注：

1 对于盐渍土地区的混凝土结构，埋入土中的混凝土按遭受化学侵蚀环境作用考虑；当大气环境多风干燥时，露出地表的毛细吸附区内的混凝土按遭受盐类结晶破坏环境作用考虑。

2 对于一面接触含盐环境水（或土）而另一面临空且处于大气干燥或多风环境中的薄壁混凝土结构（如隧道衬砌），接触含盐环境水（或土）的混凝土按遭受化学侵蚀环境作用考虑，临空面的混凝土按遭受盐类结晶破坏环境作用考虑。

3 当混凝土结构处于高硫酸盐含量（环境水中 SO_4^{2-} 含量大于 10000mg/L 或环境土中 SO_4^{2-} 含量大于 15000mg/kg）的地区，其耐久性技术措施应进行专门研究和论证。

4 水和土中硫酸盐离子浓度的测定方法应符合现行行业标准《铁路工程水质分析规程》（TB 10104）和《铁路工程岩土化学分析规程》（TB 10103）的规定。

4.3.5 冻融破坏环境的作用等级应按表 4.3.5 确定。

表 4.3.5 冻融破坏环境的作用等级

环境作用等级	环境条件
D1	微冻条件，且混凝土频繁接触水
D2	微冻条件，且混凝土处于水位变动区
	严寒和寒冷条件，且混凝土频繁接触水
	微冻条件，且混凝土频繁接触含氯盐水体
D3	严寒和寒冷条件，且混凝土处于水位变动区
	微冻条件，且混凝土处于含氯盐水体的水位变动区
	严寒和寒冷条件，且混凝土频繁接触含氯盐水体
D4	严寒和寒冷条件，且混凝土处于含氯盐水体的水位变动区

注：

1 严寒条件、寒冷条件和微冻条件下年最冷月的平均气温 t 分别为： $t \leq -8$ ， $-8 < t \leq -3$ 和 $-3 < t \leq 2.5$ 。

2 含氯盐水体包括海水、含有氯盐的地下水或盐湖水等。

4.3.6 磨蚀环境的作用等级应按表 4.3.6 确定。

表 4.3.6 磨蚀环境的作用等级

环境作用等级	环境条件
M1	风力等级 7 级，且年累计刮风天数大于 90d 的风沙地区
M2	风力等级 9 级，且年累计刮风天数大于 90d 的风沙地区

	有强烈流冰撞击的河道（冰层水位线下 0.5m ~ 冰层水位线上 1.0m）
	汛期含砂量为 $200\text{ kg/m}^3 \sim 1000\text{ kg/m}^3$ 的河道
M3	风力等级 11 级，且年累计刮风天数大于 90d 的风沙地区
	汛期含砂量 $> 1000\text{ kg/m}^3$ 的河道
	西北戈壁荒漠区洪水期间夹杂大量粗颗粒砂石的河道

4.3.7 作用等级为 L3、H4、Y4、D4 和 M3 级的环境为严重腐蚀环境。

5 混凝土

5.1 原材料

5.1.1 非预应力钢筋（带肋、光圆钢筋及盘条）性能应符合设计要求和现行国家标准《钢筋混凝土用钢》（GB 1499）、《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》（GB13013）和《低碳钢热轧圆盘条》（GB/T701）的规定。

5.1.2 预应力钢绞线性能应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》（GB/T5224）的规定，预应力筋的性能应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》（GB/T 5223）、《混凝土预应力钢棒》（GB/T 5223.3）的规定。冷加工钢筋不宜作为预应力筋使用。

5.1.3 水泥宜为硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥，不宜使用早强水泥。C30 以下混凝土可采用粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的性能除应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》（GB175）的规定外，还应符合表 5.1.3 的规定。其他水泥的性能应符合现行《通用硅酸盐水泥》（GB175）的规定。

表 5.1.3 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的性能

序号	项目	技术要求
1	比表面积	300 m ² /kg ~ 350m ² /kg
2	游离 CaO 含量	1.0%
3	碱含量	0.80%
4	熟料中的 C ₃ A 含量	8.0%

注：

1 当骨料具有碱—硅酸反应活性时，水泥的碱含量不应超过 0.60%。C40 及以上混凝土用水泥的碱含量不宜超过 0.60%。

2 当混凝土结构所处环境为氯盐环境时，混凝土宜采用低 Cl⁻含量的水泥，不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

3 当混凝土结构所处环境为硫酸盐化学侵蚀环境时，混凝土应采用低 C₃A 含量的水泥，且胶凝材料的抗蚀系数（56d）不得小于 0.80。胶凝材料抗蚀系数按附录 A 进行检验。

5.1.4 矿物掺和料应为性能稳定的粉煤灰、磨细矿渣粉和硅灰。当使用其他新型矿物掺和料时，应按国家和铁道部有关规定进行试验验证并审定通过后方可使用。粉煤灰、磨细矿渣粉和硅灰的性能应分别符合表 5.1.4-1 ~ 表 5.1.4-3 的规定。

表 5.1.4-1 粉煤灰的性能

序号	项目	技术要求	
		C50 及以上混凝土	C50 以下混凝土
1	细度	12.0%	25.0%
2	需水量比	95%	105%
3	烧失量	5.0%	8.0%

4	Cl ⁻ 含量	0.02%
5	含水量	1.0%
6	SO ₃ 含量	3.0%
7	CaO含量	10%
8	游离 CaO 含量	1.0%

注：

当混凝土结构所处的环境为严重冻融破坏环境时，混凝土宜采用烧失量不大于 3.0%的粉煤灰。

表 5.1.4-2 磨细矿渣粉的性能

序号	项目	技术要求
1	密度	2.8g/cm ³
2	比表面积	350 m ² /kg ~ 500 m ² /kg
3	流动度比	95%
4	烧失量	3.0%
5	MgO 含量	14.0%
6	SO ₃ 含量	4.0%
7	Cl ⁻ 含量	0.06%
8	含水量	1.0%
9	7d 活性指数	75%
	28d 活性指数	95%

表 5.1.4-3 硅灰的性能

序号	项目	技术要求
1	烧失量	6%
2	比表面积	18000 m ² /kg
3	需水量比	125%
4	28d 活性指数	85%
5	Cl ⁻ 含量	0.02%
6	SiO ₂ 含量	85%
7	含水率	3.0%

5.1.5 细骨料应选用级配合理、质地坚固、吸水率低、空隙率小的洁净天然中粗河砂，也可选用专门机组生产的人工砂，不得使用海砂。细骨料的性能应符合表 5.1.5-1~表 5.1.5-3 的规定。

表 5.1.5-1 细骨料的性能

序号	项目		技术要求		
			< C30	C30 ~ C45	C50
1	颗粒级配		应符合表 5.1.5-2 的规定		
2	含泥量		3.0%	2.5%	2.0%
3	泥块含量		0.5%		
4	云母含量		0.5%		
5	轻物质含量		0.5%		
6	有机物含量		浅于标准色		
7	压碎指标（人工砂）		< 25%		
8	石粉含量（人工砂）	MB < 1.40	10.0%	7.0%	5.0%
		MB 1.40	5.0%	3.0%	2.0%
9	吸水率		2%（冻融破坏环境下≤1%）		
10	坚固性		8%		
11	硫化物及硫酸盐含量		0.5%		
12	Cl ⁻ 含量		0.02%		
13	碱活性		应符合表 5.1.5-3 的规定		

注：

- 1 当细骨料的含泥量超过上表规定时，应采用专用设备进行处理至符合要求。
- 2 冻融破坏环境下，细骨料的含泥量应不大于 2.0%。
- 3 当细骨料中含有颗粒状的硫酸盐或硫化物杂质时，应进行专门检验，确认能满足混凝土耐久性要求时，方能采用。

表 5.1.5-2 细骨料的颗粒级配范围

累积筛余，% 公称粒径，mm	级配区	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区
10.0		0	0	0
5.00		10 ~ 0	10 ~ 0	10 ~ 0
2.50		35 ~ 5	25 ~ 0	15 ~ 0
1.25		65 ~ 35	50 ~ 10	25 ~ 0
0.63		85 ~ 71	70 ~ 41	40 ~ 16
0.315		95 ~ 80	92 ~ 70	85 ~ 55
0.160		100 ~ 90	100 ~ 90	100 ~ 90

注：

除 5.00mm 和 0.63mm 筛档外，细骨料其他筛档的实际累计筛余百分率与本表相比允许稍有超出分界线，但超出总量不应大于 5%。

表 5.1.5-3 细骨料的碱活性

序号	快速砂浆棒膨胀率(ε_t)	使用要求
1	$\varepsilon_t < 0.20\%$	混凝土的碱含量应满足表 5.2.11 的规定。

2	$0.20\% \leq \varepsilon_t < 0.30\%$	不得在梁体、轨道板、轨枕、接触网支柱等预制构件中使用。 当用于其他混凝土结构时，混凝土的碱含量应满足表 5.2.11 的规定，且应对混凝土采取抑制碱—骨料反应的技术措施，并经试验证明抑制有效。
3	$\varepsilon_t \geq 0.30\%$	不得使用。

注：

1 碱活性应按现行行业标准《铁路混凝土用骨料碱活性试验方法 岩相法》(TB/T 2922.1) 和《铁路混凝土用骨料碱活性试验方法 快速砂浆棒法》(TB/T 2922.5) 进行检验。

2 碱—骨料反应抑制效能应按附录 B 进行检验。

5.1.6 粗骨料应选用粒形良好、质地坚固、线胀系数小的洁净碎石，无抗拉和抗疲劳要求的 C40 以下混凝土也可采用卵石。粗骨料应采用二级或多级级配骨料混配而成，粗骨料的性能应符合表 5.1.6-1~表 5.1.6-4 的规定。

表 5.1.6-1 粗骨料的性能

序号	项目	技术要求		
		< C30	C30 ~ C45	C50
1	颗粒级配	应符合表 5.1.6-2 的规定		
2	压碎指标值	应符合表 5.1.6-3 的规定		
3	针片状颗粒总含量	10%	8%	5%
4	含泥量	1.0%	1.0%	0.5%
5	泥块含量	0.2%		
6	岩石抗压强度	母岩抗压强度与混凝土强度等级之比不应小于 1.5		
7	吸水率	< 2% (冻融破坏环境下 < 1%)		
8	紧密空隙率	40%		
9	坚固性	8% (用于预应力混凝土结构时 5%)		
10	硫化物及硫酸盐含量	0.5%		
11	Cl ⁻ 含量	0.02%		
12	有机物含量 (卵石)	浅于标准色		
13	碱活性	应符合表 5.1.6-4 的规定		

注：

1 当粗骨料为碎石时，碎石的强度用岩石抗压强度表示。

2 施工过程中，粗骨料的强度可用压碎指标值进行控制。

表 5.1.6-2 碎石或卵石的颗粒级配范围

公称 粒径 (mm)	累积筛余，按质量 (%)								
	筛孔边长尺寸 (mm)								
	2.36	4.75	9.5	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53
5 ~ 10	95 ~ 100	80 ~ 100	0 ~ 15	0	-	-	-	-	-
5 ~ 16	95 ~ 100	85 ~ 100	30 ~ 60	0 ~ 10	0	-	-	-	-
5 ~ 20	95 ~ 100	90 ~ 100	40 ~ 80	-	0 ~ 10	0	-	-	-

5 ~ 25	95 ~ 100	90 ~ 100	-	30 ~ 70	-	0 ~ 5	0	-	-
5 ~ 31.5	95 ~ 100	90 ~ 100	70 ~ 90	-	15 ~ 45	-	0 ~ 5	0	-
5 ~ 40	-	95 ~ 100	70 ~ 90	-	30 ~ 65	-	-	0 ~ 5	0

注：

1 粗骨料的最大公称粒径不宜超过钢筋的混凝土保护层厚度的 $2/3$ （在严重腐蚀环境下不宜超过 $1/2$ ），且不得超过钢筋最小间距的 $3/4$ 。

2 配制强度等级 C50 及以上的混凝土时，粗骨料最大公称粒径不应大于 25mm。

表 5.1.6-3 粗骨料的压碎指标（%）

混凝土强度等级	< C30			C30		
岩石种类	沉积岩	变质岩或深成的火成岩	喷出的火成岩	沉积岩	变质岩或深成的火成岩	喷出的火成岩
碎石	16	20	30	10	12	13
卵石	16			12		

注：

沉积岩包括石灰岩、砂岩等，变质岩包括片麻岩、石英岩等，深成的火成岩包括花岗岩、正长岩、闪长岩和橄榄岩等，喷出的火成岩包括玄武岩和辉绿岩等。

表 5.1.6-4 粗骨料的碱活性

序号	快速砂浆棒膨胀率（ ε_t ）	使用要求
1	$\varepsilon_t < 0.20\%$	混凝土的碱含量应满足表 5.2.11 的规定。
2	$0.20\% \leq \varepsilon_t < 0.30\%$	不得在梁体、轨道板、轨枕、接触网支柱等预制构件中使用。 当用于其他混凝土结构时，混凝土的碱含量应满足表 5.2.11 的规定，且应对混凝土采取抑制碱—骨料反应的技术措施，并经试验证明抑制有效。
3	$\varepsilon_t \geq 0.30\%$	不得使用。

注

1 粗骨料的碱活性应按现行行业标准《铁路混凝土用骨料碱活性试验方法 岩相法》（TB/T 2922.1）和《铁路混凝土用骨料碱活性试验方法 快速砂浆棒法》（TB/T 2922.5）进行检验。

2 碱—骨料反应抑制效能试验应按附录 B 进行检验。

3 不得使用具有碱—碳酸盐反应活性的粗骨料。

5.1.7 外加剂应选用品质稳定且能明显提高混凝土耐久性能的产品。外加剂与水泥及矿物掺和料之间应具有良好的相容性，外加剂的匀质性应符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB8076）的规定。高效减水剂的性能应符合 5.1.7-1 的规定，聚羧酸系高性能减水剂的性能应符合表 5.1.7-2 的规定，引气剂的性能应符合表 5.1.7-3 的规定。当使用其他新型外加剂时，应按国家和铁道部有关规定进行试验验证并审定通过后方可使用。

表 5.1.7-1 高效减水剂的性能

序号	项目	技术要求	
		标准型	缓凝型

1	减水率		20%	
2	含气量		3.0%	
3	泌水率比		20%	
4	压力泌水率比（用于配制泵送混凝土时）		90%	
5	抗压强度比	1d	140%	/
		3d	130%	/
		7d	125%	125%
		28d	120%	120%
6	坍落度 1h 经时变化量（用于配制泵送混凝土时）		/	≤60mm
7	凝结时间之差	初凝	-90 ~ +120min	> +90min
		终凝		/
8	硫酸钠含量（按折固含量计）		10.0%	
9	Cl ⁻ 含量（按折固含量计）		0.6%	
10	碱含量（按折固含量计）		10%	
11	收缩率比		125%	

注：

现场抽检高效减水剂用水泥宜为工程用水泥。

表 5.1.7-2 聚羧酸系高性能减水剂的性能

序 号	项 目		技术要求		
			早强型	标准型	缓凝型
1	减水率		25%		
2	含气量		3.0%		
3	泌水率比		20%		
4	压力泌水率比（用于配制泵送混凝土时）		90%		
5	抗压强度比	1d	180%	170%	/
		3d	170%	160%	/
		7d	145%	150%	140%
		28d	130%	140%	130%
6	坍落度 1h 经时变化量（用于配制泵送混凝土时）		/	80mm	60mm
7	凝结时间之差	初凝	-90 ~ +90min	-90 ~ +120min	> +90min
		终凝			/
8	甲醛含量（按折固含量计）		0.05%		
9	硫酸钠含量（按折固含量计）		5.0%		
10	Cl ⁻ 含量（按折固含量计）		0.6%		
11	碱含量（按折固含量计）		10%		
12	收缩率比		110%		

注：

1 检验减水率、含气量、泌水率比、抗压强度比、凝结时间之差、收缩率比时，混凝土坍落度宜为 80mm±10mm。

2 现场抽检聚羧酸系高性能减水剂用水泥宜为工程用水泥。

表 5.1.7-3 引气剂的性能

序号	项目		技术要求
1	减水率		6%
2	含气量		3.0%
3	泌水率比		70%
4	1h 含气量经时变化		-1.5% ~ +1.5%
5	抗压强度比	3d	95%
		7d	95%
		28d	90%
6	凝结时间之差	终凝	-90min ~ +120min
		初凝	
7	收缩率比		125%
8	相对耐久性(200 次)		80%
9	28d 硬化体气泡间距系数		300 μ m

注：

气泡间距系数应按附录 C 进行检验。

5.1.8 拌和用水可采用饮用水,不得采用海水。当采用其他来源的水时,其性能应符合表 5.1.8 的规定。

表 5.1.8 拌和用水的性能

序号	项目	技术要求		
		预应力混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
1	pH 值	> 6.5	> 6.5	> 6.5
2	不溶物含量	< 2000mg/L	< 2000mg/L	< 5000mg/L
3	可溶物含量	< 2000mg/L	< 5000mg/L	< 10000mg/L
4	氯化物含量	< 500mg/L < 350mg/L(用钢丝或热处理的钢筋)	< 1000mg/L	< 3500mg/L
		< 200mg/L (混凝土处于氯盐环境下)		
5	硫酸盐含量	< 600mg/L	< 2000mg/L	< 2700mg/L
6	碱含量	< 1500mg/L	< 1500mg/L	< 1500mg/L
7	抗压强度比(28d)	90%		
8	凝结时间差	30min		

注：

对于钢筋的配筋率低于最小配筋率的混凝土结构,其混凝土拌合用水技术要求应与本表中的钢筋混凝土相同。

5.2 配合比

5.2.1 不同强度等级混凝土的胶凝材料用量宜满足表 5.2.1 的要求。

表 5.2.1 混凝土的胶凝材料最大用量限值 (kg/m³)

混凝土强度等级	成型方式	
	振动成型	自密实成型
< C30	360	/
C30~ C35	400	550
C40~C45	450	600
C50	480	/
> C50	500	/

5.2.2 不同环境下混凝土中矿物掺和料的掺量宜满足表 5.2.2 的要求。

表 5.2.2 不同环境下混凝土中矿物掺和料掺量范围 (%)

环境类别	矿物掺和料种类	水胶比	
		≤0.40	> 0.40
碳化环境	粉煤灰	≤40	≤30
	磨细矿渣粉	≤50	≤40
氯盐环境	粉煤灰	30~50	20~40
	磨细矿渣粉	40~60	30~50
化学侵蚀环境	粉煤灰	30~50	20~40
	磨细矿渣粉	40~60	30~50
盐类结晶破坏环境	粉煤灰	≤40	≤30
	磨细矿渣粉	≤50	≤40
冻融破坏环境	粉煤灰	≤30	≤20
	磨细矿渣粉	≤40	≤30
磨蚀环境	粉煤灰	≤30	≤20
	磨细矿渣粉	≤40	≤30

注：

1 本表规定的掺量是指单掺一种矿物掺和料时的适宜掺量范围。当采用多种矿物掺和料复合掺用时，不同矿物掺和料的掺量可参考本表并经过试验确定。

2 本表规定的矿物掺和料的掺量范围仅限于使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的混凝土。

3 对于预应力混凝土结构，粉煤灰的掺量不宜超过30%。

4 严重氯盐环境与化学侵蚀环境下，粉煤灰的掺量应大于 30%，或磨细矿渣粉的掺量大于 50%。

5.2.3 不同环境下，混凝土的含气量最低限值应满足表 5.2.3 的要求。

表 5.2.3 混凝土含气量最低限值要求

环境条件	冻融破坏环境			盐类结晶破坏环境	其他环境
	D1	D2、D3	D4	Y1、Y2、Y3、Y4	
含气量 (%)	4.0	5.0	6.0	4.0	2.0

注：

1 冻融破坏环境和盐类结晶破坏环境下,除新拌混凝土的含气量应满足本表规定外,硬化混凝土气泡间距系数应小于 $300\mu\text{m}$ 。气泡间距系数应按附录 C 进行检验。

2 本标准环境条件下,梁、轨道板混凝土的含气量应为 2.0%~4.0%。

5.2.4 碳化环境下,钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构的混凝土配合比参数应满足表 5.2.4 的要求,素混凝土结构的混凝土的最大水胶比不应超过 0.60,最小胶凝材料用量不应低于 $260\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 5.2.4 碳化环境下钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构的混凝土配合比参数限值

环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
T1	0.55	280	0.60	260	0.60	260
T2	0.50	300	0.55	280	0.55	280
T3	0.45	320	0.50	300	0.50	300

5.2.5 氯盐环境下,钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构的混凝土配合比参数应满足表 5.2.5 的要求,素混凝土结构的混凝土的最大水胶比不应超过 0.55,最小胶凝材料用量不应低于 $280\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 5.2.5 氯盐环境下钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构的混凝土配合比参数限值

环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
L1	0.45	320	0.50	300	0.50	300
L2	0.40	340	0.45	320	0.45	320
L3	0.36	360	0.40	340	0.40	340

5.2.6 化学侵蚀环境下,混凝土的配合比参数应满足表 5.2.6 的要求。

表 5.2.6 化学侵蚀环境下混凝土配合比参数限值

环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
H1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
H2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
H3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
H4	0.36	360	0.40	340	0.40	340

5.2.7 盐类结晶破坏环境下,混凝土的配合比参数应满足表 5.2.7 的要求。

表 5.2.7 盐类结晶破坏环境下混凝土配合比参数限值

环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
Y1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
Y2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
Y3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
Y4	0.36	360	0.40	340	0.40	340

5.2.8 冻融破坏环境下，混凝土的配合比参数应满足表 5.2.8 的要求。

表 5.2.8 冻融破坏环境下混凝土配合比参数限值

环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
D1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
D2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
D3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
D4	0.36	360	0.40	340	0.40	340

5.2.9 磨蚀环境下，混凝土的配合比参数应满足表 5.2.9 的要求。

表 5.2.9 磨蚀环境下混凝土配合比参数限值

环境类别	环境作用等级	100 年		60 年		30 年	
		最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)	最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
磨蚀环境	M1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	M2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	M3	0.40	340	0.45	320	0.45	320

5.2.10 不同环境下，混凝土的氯离子含量应满足表 5.2.10 的规定。

表 5.2.10 混凝土的氯离子含量最大值 (%)

项目	钢筋混凝土	预应力混凝土
氯离子含量	0.10	0.06

注：

- 1 氯离子含量是指混凝土中各种原材料的氯离子含量之和，以其与胶凝材料的重量比表示。
- 2 对于钢筋的配筋率低于最小配筋率的混凝土结构，其混凝土的氯离子含量要求应与本表中钢筋混凝土的要求相同。

5.2.11 不同环境下，混凝土的碱含量应满足表 5.2.11 的规定。

表 5.2.11 混凝土的碱含量最大值 (kg/m³)

设计使用年限		100 年	60 年	30 年
环境条件	干燥环境	3.5	3.5	3.5
	潮湿环境	3.0	3.0	3.5
	含碱环境	2.1	3.0	3.0

注：

1 混凝土的碱含量是指混凝土中各种原材料的碱含量之和。其中，矿物掺和料的碱含量以其所含可溶性碱量计算。粉煤灰的可溶性碱量取粉煤灰总碱量的1/6，磨细矿渣粉的可溶性碱量取磨细矿渣粉总碱量的1/2，硅灰的可溶性碱量取硅灰总碱量的1/2。

2 干燥环境是指不直接与水接触、年平均空气相对湿度长期不大于 75%的环境；潮湿环境是指长期处于水下或潮湿土中、干湿交替区、水位变化区以及年平均相对湿度大于 75%的环境；含碱环境是指与高含盐碱土体、海水、含碱工业废水或钠（钾）盐等直接接触的环境。干燥环境或潮湿环境与含碱环境交替作用时，均按含碱环境对待。

3 对于含碱环境中的混凝土结构，当其设计使用年限为100年时，除了混凝土的碱含量应满足本表要求外，还应使用非碱活性骨料；当其设计使用年限为60年、30年时，除了混凝土的碱含量应满足本表要求外，还应应对混凝土表面作防水、防碱涂层处理，否则应换用非碱活性骨料。

5.2.12 不同环境下，混凝土的三氧化硫含量不应超过胶凝材料总量的 4.0%。

5.3 抗压强度

5.3.1 不同环境下，桥梁灌注桩和隧道衬砌混凝土的抗压强度应满足表 5.3.1 的要求。

表 5.3.1 灌注桩、隧道衬砌用混凝土的最低抗压强度等级

环境类别	环境作用等级	灌注桩		隧道衬砌	
		钢筋混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
碳化环境	T1	C30	C30	C30	C30
	T2	C35	C30	C35	C30
	T3	C40	C30	C40	C30
氯盐环境	L1	C40	C35	C40	C35
	L2	C45	C35	C45	C35
	L3	C50	C35	C50	C35
化学侵蚀环境	H1	C35	C35	C35	C35
	H2	C40	C40	C40	C40
	H3	C45	C45	C45	C45
	H4	C45	C45	C45	C45
盐类结晶破坏环境	Y1	—	—	C35	C35
	Y2	—	—	C40	C40
	Y3	—	—	C45	C45
	Y4	—	—	C45	C45
冻融破坏环境	D1	—	—	C35	C35

	D2	—	—	C40	C40
	D3	—	—	C45	C45
	D4	—	—	C45	C45

注：

- 1 本表中的抗压强度等级是按混凝土在标准条件下制作并养护 56d 时的抗压强度值确定的。
- 2 本表所指灌注桩是指埋入土中或水中的桩体。

5.3.2 除桥梁灌注桩和隧道衬砌外，不同环境下混凝土的抗压强度应满足表 5.3.2 的要求。

表 5.3.2 混凝土最低抗压强度等级

环境类别	环境作用等级	设计使用年限					
		100 年		60 年		30 年	
		钢筋混凝土和 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土和 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土和 预应力混凝土	素混凝土
碳化环境	T1	C30	C30	C25	C25	C25	C25
	T2	C35	C30	C30	C25	C30	C25
	T3	C40	C30	C35	C25	C35	C25
氯盐环境	L1	C40	C35	C35	C30	C35	C30
	L2	C45	C35	C40	C30	C40	C30
	L3	C50	C35	C45	C30	C45	C30
化学侵蚀环境	H1	C35	C35	C30	C30	C30	C30
	H2	C40	*	C35	C35	C35	C35
	H3	C45	*	C40	*	C40	*
	H4	C50	*	C45	*	C45	*
盐类结晶破坏环境	Y1	C35	C35	C30	C30	C30	C30
	Y2	C40	*	C35	C35	C35	C35
	Y3	C45	*	C40	*	C40	*
	Y4	C50	*	C45	*	C45	*
冻融破坏环境	D1	C35	C35	C30	C30	C30	C30
	D2	C40	*	C35	C35	C35	C35
	D3	C45	*	C40	*	C40	*
	D4	C50	*	C45	*	C45	*
磨蚀环境	M1	C35	C35	C30	C30	C30	C30
	M2	C40	*	C35	C35	C35	C35
	M3	C45	*	C40	*	C40	*

注：

- 1 对于钢筋混凝土和素混凝土，本表中的抗压强度等级是按混凝土在标准条件下制作并养护 56d 时的抗压强度值确定的。
- 2 对于钢筋的配筋率低于最小配筋率的混凝土结构，其混凝土的最低抗压强度等级要求应与本表中钢筋混凝土的要求相同。
- 3 “*”表示不宜使用素混凝土。如果不得不使用素混凝土，混凝土的最低强度等级与钢筋混凝土一致，且应采取有效的防裂措施。
- 4 可更换小型构件的混凝土强度等级不应低于 C30。

5.4 耐久性

5.4.1 不同环境下，混凝土的耐久性评价项目应包括表 5.4.1 的内容。

表 5.4.1 混凝土的耐久性评价项目

环境类别	混凝土耐久性评价项目
碳化环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性
氯盐环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、氯离子扩散系数、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性
化学侵蚀环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、胶凝材料抗蚀系数、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性
盐类结晶破坏环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、抗盐类结晶干湿循环系数、含气量、气泡间距系数、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性
冻融破坏环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、抗冻等级、含气量、气泡间距系数、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性
磨蚀环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、耐磨性、抗裂性、护筋性、抗碱—骨料反应性

5.4.2 不同强度等级混凝土 56d 电通量应满足表 5.4.2 的要求。

表 5.4.2 不同强度等级混凝土的电通量(C)

混凝土强度等级	设计使用年限		
	100 年	60 年	30 年
<C30	<1500	<2000	<2500
C30 ~ C45	<1200	<1500	<2000
C50	<1000	<1200	<1500

注：

混凝土的电通量应按 GB/T 50082 规定的电通量法进行检验。

5.4.3 氯盐环境下，混凝土的抗氯离子渗透性能应满足表 5.4.3 的要求。

表 5.4.3 氯盐环境下混凝土抗氯离子渗透性能

评价指标	环境作用等级	设计使用年限	
		100 年	60 年
氯离子扩散系数 (56d) $D_{RCM} (\times 10^{-12} m^2/s)$	L1	7	10
	L2	5	8
	L3	3	4

注：

混凝土的氯离子扩散系数应按 GB/T 50082 规定的快速氯离子迁移系数法进行检验。

5.4.4 盐类结晶破坏环境下，混凝土的抗盐类结晶破坏性能应满足表 5.4.4 的要求。

表 5.4.4 盐类结晶破坏环境下混凝土抗硫酸盐结晶破坏性能

评价指标	环境作用等级	设计使用年限		
		100 年	60 年	30 年

抗硫酸盐结晶破坏等级 (56d)	Y1	KS90	KS60	KS60
	Y2	KS120	KS90	KS90
	Y3	KS150	KS120	KS120
	Y4	KS150	KS120	KS120

注：

混凝土的抗硫酸盐结晶干湿循环次数应按 GB/T 50082 规定的抗硫酸盐侵蚀试验方法进行检验。

5.4.5 冻融破坏环境下，混凝土的抗冻性能应满足表 5.4.5 的要求。

表 5.4.5 冻融破坏环境下混凝土抗冻性能指标

评价指标	环境作用等级	设计使用年限		
		100 年	60 年	30 年
抗冻等级 (56d)	D1	F300	F250	F200
	D2	F350	F300	F250
	D3	F400	F350	F300
	D4	F450	F400	F350

注：

混凝土的抗冻性应按 GB/T 50082 规定的快冻法进行检验。

5.4.6 磨蚀环境下，混凝土的耐磨性技术要求应通过专门的试验研究确定。

5.4.7 对于特别重要的铁路混凝土结构，混凝土的抗裂性、护筋性技术要求应通过专门的试验研究确定。

6 裂缝

6.1 计算宽度限值

6.1.1 铁路钢筋混凝土结构表面裂缝计算宽度（值）除应遵守现行铁路工程有关专业设计规范的相关要求外，还应符合表 6.1.1 的规定。

表 6.1.1 钢筋混凝土结构表面裂缝计算宽度限值（mm）

环境类别	环境等级	表面裂缝计算宽度最大限值
碳化环境	T1	0.2
	T2	0.2
	T3	0.2
氯盐环境	L1	0.2
	L2	0.2
	L3	0.15
化学侵蚀环境	H1	0.2
	H2	0.2
	H3	0.15
	H4	0.15
盐类结晶破坏环境	Y1	0.2
	Y2	0.2
	Y3	0.15
	Y4	0.15
冻融破坏环境	D1	0.2
	D2	0.2
	D3	0.15
	D4	0.15
磨蚀环境	M1	0.2
	M2	0.2
	M3	0.15

注：

当钢筋保护层实际厚度超过 30mm 时，可将钢筋保护层厚度的计算值取为 30mm。

6.2 施工控制

6.2.1 混凝土浇注期间，混凝土的入模温度不宜高于 30℃。冬期施工时，混凝土的入模混凝土不宜低于 5℃，且应对混凝土采取适当的保温养护措施。

6.2.2 混凝土浇注期间，混凝土与钢模、邻接的已硬化混凝土或岩土介质间的温度差不得大于 15℃。

6.2.3 混凝土养护期间，混凝土的芯部温度与表面温度、表面温度与环境温度之差均不应大于 20℃（梁体混凝土不得大于 15℃）。混凝土表面温度与养护水温度之差不得大于 15℃。

混凝土芯部的温度不宜超过 60℃，最大不得超过 65℃。

混凝土自然养护期间，混凝土浇筑完毕后的保温保湿养护最短时间应满足表 6.2.3 的规定。

表 6.2.3 混凝土保温保湿养护最短时间（d）

水胶比	大气潮湿(RH≥50%)， 无风，无阳光直射		大气干燥(20%≤RH<50%)， 有风，或阳光直射		大气极端干燥(RH<20%)， 大风，大温差	
	日平均气温 T(℃)	养护时间(d)	日平均气温 T(℃)	养护时间(d)	日平均气温 T (℃)	养护时间(d)
> 0.45	5≤T<10	21	5≤T<10	28	5≤T<10	56
	10≤T<20	14	10≤T<20	21	10≤T<20	45
	T≥20	10	T≥20	14	T≥20	35
0.45	5≤T<10	14	5≤T<10	21	5≤T<10	45
	10≤T<20	10	10≤T<20	14	10≤T<20	35
	T≥20	7	T≥20	10	T≥20	28

混凝土蒸汽养护期间，混凝土静停环境温度不应低于 5℃，静停时间宜为 4h～6h；蒸汽的升、降温速度不宜大于 10℃/h。预制梁蒸汽养护脱模后的保温保湿养护时间应不少于 14d。预制轨道板蒸汽养护脱模后的保温保湿养护时间应不少于 10d。

6.2.4 混凝土养护应包括一定的带模养护时间。带模养护期间，应对混凝土外露采取包裹、覆盖、喷淋洒水等保温保湿措施。

6.2.5 混凝土拆模时，混凝土芯部与表面、表面与环境之间的温差不得大于 20℃（梁体或轨道板的芯部混凝土与表面混凝土之间、表面混凝土与环境之间的温差不得大于 15℃；箱梁腹板内外侧混凝土之间的温差不得大于 15℃）。混凝土拆模强度应满足相关专业规范的要求。

6.2.6 预应力混凝土梁孔道灌浆宜在终张拉完成后 48h 以内进行。灌浆结束后，应保证管道内浆体 72h 内保持在 5℃以上。

7 构造措施

7.1 一般规定

7.1.1 混凝土结构的外形应简洁、平顺，混凝土表面的棱角宜做成圆角，并尽量避免采用突变构造。

7.1.2 混凝土结构受雨淋的表面或可能积水的表面宜做成斜面，尽量避免水、汽和腐蚀性介质在混凝土表面积聚。当混凝土结构表面不得不承受聚积水作用时，应在承水面设置可靠的防、排水措施。

7.1.3 混凝土结构的设计应便于施工时对混凝土的振捣和养护，混凝土结构的构造应有利于日后对其进行检查与维修。

7.1.4 混凝土结构的施工缝、伸缩缝等连接缝的设置应尽量避免最不利环境的作用，不得在结构缝处设置排水构造。

7.1.5 暴露于混凝土结构以外的连接件、紧固件或其他构件等与混凝土结构之间应设置可靠的连接方式，外露金属件表面应采取可靠的防腐蚀措施。

7.1.6 采用机械连接的钢筋连接套筒外缘至混凝土结构表面的混凝土厚度应不低于相同环境下钢筋的混凝土保护层厚度。

7.1.7 钢筋的混凝土保护层垫块和无砟轨道用绝缘卡的强度、密实度和耐久性应不低于结构本体混凝土的相应要求。

7.2 桥涵

7.2.1 桥涵混凝土结构钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.2.1 的规定。

表 7.2.1 桥涵混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度

环境类别	作用等级	保护层最小厚度 (mm)
碳化环境	T1	35
	T2	35
	T3	45
氯盐环境	L1	45
	L2	50
	L3	60
化学侵蚀环境	H1	40
	H2	45

	H3	50
	H4	60
盐类结晶破坏环境	Y1	40
	Y2	45
	Y3	50
	Y4	60
冻融破坏环境	D1	40
	D2	45
	D3	50
	D4	60
磨蚀环境	M1	35
	M2	40
	M3	45

注：

1 设有防水层和防护层的顶面钢筋的混凝土保护层最小厚度可适当减小，但不得小于 30mm。

2 当条件许可时，盐类结晶破坏环境和严重腐蚀环境下，桥涵混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度应适当增加。

3 桩基础钢筋的混凝土保护层最小厚度应在表 7.2.1 的基础上增加 30mm。

4 先张法预应力筋的混凝土保护层最小厚度应比普通钢筋至少大 10mm。

5 具有连续密封套管的后张预应力钢筋的混凝土保护层最小厚度应与普通钢筋相同，且不应小于孔道直径的 1/2。无密封套管（或导管、孔道管）的后张预应力钢筋的混凝土保护层最小厚度应比普通钢筋大 10mm。

6 后张预应力金属管外缘至混凝土表面的距离应不小于 1 倍管道直径（在结构的顶面和侧面）或 60mm（在结构底面）。

7.2.2 桥梁顶面应设置适宜的防水层及保护层，其表面宜设置不小于 2%的横向排水坡，相邻排水口间的集水面坡度应不小于 2%。

7.2.3 桥梁排水口下应设置可靠的排水管，排水管与梁体间应设置可靠的防渗漏水措施，排水管口不得直接将水排向下部混凝土结构的表面。

7.2.4 桥梁墩帽及桥台的排水面应设置不小于 3%的排水坡。

7.2.5 桥梁侧边翼缘下沿宜设置滴水槽、滴水沿或其他防止雨水流向混凝土侧面和底面的构造措施。桥梁端部应设置有效的防水措施，防止污水回流污染支座和梁端表面。

7.2.6 预应力混凝土梁在纵向宜按全预应力构件设计。当处于严重腐蚀环境时，预应力钢筋的应力幅应适当缩小。

7.2.7 预应力梁的封锚和封端内应设置足够的构造钢筋。封锚材料宜采用干硬性聚合物混凝土，封端材料应采用水胶比小、收缩率小的塑性混凝土。封锚及封端混凝土的强度应不低于梁本体混凝土。封端混凝土表面应采用防水涂料进行涂装处理。

7.2.8 暴露于桥梁主体结构以外的人行道钢支架、声屏障、接触网支柱、栏杆、底板进入

孔等结构或构件与主体结构的连接应可靠有效。连结部件表面应采取有效的防腐蚀措施。

7.2.9 桥梁墩身宜设置护面钢筋，墩身与梁体之间应设置更换支座的条件。

7.3 隧道

7.3.1 隧道混凝土结构钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.3.1 的规定。

表 7.3.1 隧道混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度

环境类别	作用等级	保护层最小厚度 (mm)
碳化环境	T1	35
	T2	35
	T3	40
氯盐环境	L1	40
	L2	45
	L3	55
化学侵蚀环境	H1	35
	H2	40
	H3	45
	H4	55
盐类结晶破坏环境	Y1	35
	Y2	40
	Y3	45
	Y4	55
冻融破坏环境	D1	35
	D2	40
	D3	45
	D4	55

注：

1 当隧道衬砌采用钢筋混凝土结构时，其迎水面钢筋的混凝土保护层最小厚度不应小于 50mm。

2 当条件许可时，盐类结晶破坏环境和严重腐蚀环境下，隧道混凝土结构钢筋的混凝土最小保护层厚度应适当增加。

7.3.2 隧道衬砌宜采用曲墙结构形式，衬砌表面应光滑平整。带仰拱衬砌的隧道边墙与仰拱应连接圆顺。

7.3.3 隧道拱墙、仰拱、设备洞室、辅助坑道、附属设施等的防排水设置应符合铁路隧道防排水设计规范的有关规定。

7.3.4 隧道防水混凝土结构的厚度应不小于 300mm。

7.3.5 当隧道衬砌采用素混凝土结构时，应对混凝土采取有效防裂措施。

7.3.6 隧道衬砌中的埋设件宜采用预埋或预留孔（槽）方式设置，连接部位应采取有效的密封和防渗漏处理措施，外露部件应采取有效的防腐蚀处理措施。

7.3.7 隧道地表水和地下水应按照完整统一的要求设置防排水系统。洞内排水系统与洞外

排水系统应合理顺接，洞口高端应设置横向盲沟，防止洞外雨水等流入隧道。

7.3.8 当隧道水沟内排水含腐蚀性介质时，应对水沟采取相应的防腐蚀措施。

7.3.9 隧道衬砌结构的施工缝、变形缝应按一级防水要求采取可靠的防水措施。

7.3.10 最冷月平均气温低于-5℃地区隧道的有水地段宜设置保温水沟、中心深埋沟或防寒泄水洞等。

7.4 路基

7.4.1 路基混凝土结构钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.4.1 的规定。

表 7.4.1 路基混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度（mm）

环境类别	作用等级	设计使用年限	
		100 年 (路基支挡及承载结构)	60 年 (路基排水结构及防护结构)
碳化环境	T1	30	25
	T2	35	30
	T3	40	35
氯盐环境	L1	40	35
	L2	45	40
	L3	55	50
化学侵蚀环境	H1	35	30
	H2	40	35
	H3	45	40
	H4	55	50
盐类结晶破坏环境	Y1	35	30
	Y2	40	35
	Y3	45	40
	Y4	55	50
冻融破坏环境	D1	35	30
	D2	40	35
	D3	45	40
	D4	55	50
磨蚀环境	M1	35	30
	M2	40	35
	M3	45	40

注：

当条件许可时，盐类结晶破坏环境和严重腐蚀环境下，路基混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度应适当增加。

7.4.2 路基支挡及承载结构的不同构件间相互连接时，应采取可靠的连接方式连接。

7.4.3 路基支挡及承载结构的混凝土宜采用大型模板一次浇注成型，尽量减少模板拼缝。

7.4.4 路基支挡结构的墙背应设置完善的排水体系。当路基支挡结构位于 L3、H4 和 Y4 环

境时，应对墙背增设深层泄水孔或设置隔水措施，加强地下水引排。

7.4.5 路基支挡结构处于 L3、H4 和 Y4 环境时，应对其锚杆（索）的锚固体采取防裂措施，并对锚杆（索）采取防腐蚀措施。

7.4.6 200km/h 及以上铁路路基的排水结构（排水沟、检查井、集水井、渗沟）应采用钢筋混凝土结构，预制构件应采用工厂化集中预制。排水结构的基底处理应进行专门设计，并设置找平层或垫层，基础底部的松软土或特殊土土层应采取换填等措施。排水结构接缝处砂浆的强度等级应不低于 M15。不同地基上的排水结构之间的连接处应设置沉降缝。

7.5 无砟轨道

7.5.1 无砟轨道混凝土结构钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.5.1 的规定。

表 7.5.1 无砟轨道混凝土结构钢筋的混凝土保护层最小厚度（mm）

环境类别	作用等级	轨道板	道床板	底座板
碳化环境	T2	35	35	35
	T3	45	45	45

注：

1 当条件许可时，除碳化环境外，其他环境下的无砟轨道混凝土结构钢筋的混凝土保护层的最小厚度应适当增加。

2 先张法预应力筋的混凝土保护层最小厚度应比普通钢筋至少大 10mm。

7.5.2 无砟轨道混凝土结构应设置可靠的防排水方式，新旧混凝土接合处应采取预防或减少混凝土裂缝的有效措施。

7.5.3 无砟轨道混凝土结构中采用的绝缘方式不应降低混凝土结构的耐久性。

7.5.4 无砟轨道混凝土结构除应满足抗压强度要求外，还应满足疲劳强度和裂缝控制等要求。

7.5.5 无砟轨道板预应力锚穴应采用牢固可靠的封锚材料封闭。

7.6 可更换小型构件

7.6.1 可更换小型构件的构造应便于制造、运输、安装与更换。

7.6.2 可更换小型构件钢筋的混凝土保护层厚度应符合表 7.6.2 的规定。

表 7.6.2 可更换小型构件钢筋的混凝土保护层最小厚度

环境类别	作用等级	保护层最小厚度（mm）
碳化环境	T1	15
	T2	20

	T3	25
氯盐环境	L1	20
	L2	25
	L3	30
化学侵蚀环境	H1	20
	H2	20
	H3	25
	H4	30
盐类结晶破坏环境	Y1	20
	Y2	20
	Y3	25
	Y4	30
冻融破坏环境	D1	20
	D2	20
	D3	25
	D4	30
磨蚀环境	M1	20
	M2	25
	M3	30

注：

当条件许可时，严重腐蚀环境作用下，小型构件钢筋的混凝土保护层最小厚度应适当增加。

8 防腐蚀强化措施

8.0.1 当混凝土结构处于严重腐蚀环境（L3、H4、Y4、D4、M3）条件时，应根据工程的具体情况，对混凝土结构采取一种或多种防腐蚀强化措施。

8.0.2 不同环境下混凝土结构的防腐蚀强化措施可按表 8.0.2 选择。

表 8.0.2 不同环境下混凝土的防腐蚀强化措施

强化措施 环境作用等级	外包钢板	表面涂层	表面浸渍	防水卷材	涂层钢筋	钢筋阴极保护	降低地下水位	换填土
L3								
H4								
Y4								
D4								
M3								

注：

1 “ ”表示在该环境条件下可以选择该项防腐蚀强化措施。

2 表面涂层包括防腐蚀涂层和防水涂层等。

8.0.3 当采用防腐蚀强化措施时，应明确防腐蚀强化措施所用主要材料的有效防护年限、性能指标及其检验方法。

9 检查与维修

9.0.1 铁路混凝土结构耐久性设计应充分考虑运营检查、维修的需要，并预设检查与维修的构造和设施。

9.0.2 铁路混凝土结构耐久性设计应对结构使用年限内的跟踪检查与维修做出规划，明确跟踪检查的内容。

9.0.3 对于无砟轨道的混凝土结构，应规划其动态检查的周期，明确计划维修和临时维修的内容。

9.0.4 对于严重腐蚀环境下的重要铁路混凝土结构，应在工程现场设置专供跟踪检查取样的构件，构件的尺寸、材料、配筋、成型、养护以及暴露环境条件等应与实际结构一致。必要时，可在有代表性的结构部位设置传感元件，监测结构耐久性的变化情况。

9.0.5 对于严重腐蚀环境下的重要铁路混凝土结构，应根据实测材料劣化数据和保护层厚度变化，对结构的剩余寿命作出评估；必要时，应对结构采取防腐蚀强化措施。

附录 A 水泥或胶凝材料抗硫酸盐侵蚀性能快速检测方法

A.0.1 本方法适用于快速评定水泥或胶凝材料抗硫酸盐侵蚀的性能。

A.0.2 本方法是通过测定浸泡在硫酸钠溶液中的水泥或胶凝材料的胶砂试体的抗折强度及浸泡在洁净饮用水中同龄期试体的抗折强度,计算抗蚀系数,以比较水泥或胶凝材料抗硫酸盐侵蚀的性能。

A.0.3 试验设备及材料应符合下列规定:

- 1 加压成型机:小型千斤顶压力机,最大荷重必须在 15kN 以上。
- 2 抗折机:小型电动抗折机,加荷速度 0.78N/s。
- 3 模型:能成型尺寸为 10mm×10mm×60mm 的胶砂试体的不锈钢制试模。
- 4 球形拌合锅:直径 200mm,高 70mm,厚度 1mm~2mm。
- 5 标准砂:质量应符合《水泥强度试验用标准砂》(GB178)的要求。
- 6 拌合水:蒸馏水。
- 7 养护水:饮用水。

A.0.4 实验室、原材料、养护箱、养护水和侵蚀液的温度和湿度应符合下列规定:

- 1 实验室温度为 17 ~ 25 ,相对湿度大于 50%,所用试验原材料温度应与试验室温度相同。
- 2 养护箱温度为 20 ±3 ,相对湿度大于 90%。
- 3 浸泡前养护水的温度为 50 ±1 。
- 4 浸泡水和浸泡液温度为 20 ±3 。

A.0.5 试验应按下列步骤进行:

1 试体成型。称取水泥或胶凝材料共 100g (工程水泥和矿物掺和料用量应按照配合比进行计算),标准砂 250g,加入球形拌合锅拌合均匀后,再加入 50g 蒸馏水,湿拌 3min 结束。将拌好的胶砂分别装入 6 个试模内。将带有模芯、模套的试模放到小型千斤顶压力机上加压到 7.8MPa 压力下保持 5s,然后取出试模,刮平,编号,放入养护箱养护 24h±2h,脱模。

2 试体的养护。将脱模后的试体放入 50 水中养护 7d。

3 试体的浸泡。将试体分成两组,一组 9 块放入 20 饮用水中养护,一组 9 块放入

3%的 Na_2SO_4 浸泡液中浸泡。试体在浸泡过程中，每天一次用 1N H_2SO_4 溶液滴定以中和试体在溶液中释放出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，边滴定边搅拌，以保持溶液的 pH 值在 7.0 左右。

试体在 Na_2SO_4 溶液中浸泡时，每条试体需对应应有 200mL 的浸泡液，液面至少高出试体顶面 10mm。为避免蒸发，容器必须加盖。

4 试体破型。试体在浸泡液中浸泡 56d，以及在饮用水中养护 56d 后，取出并用小型抗折机进行抗折试验。其中，试体支点跨距为 50mm，支撑圆柱直径 5mm，加荷速度控制在 0.78N/s。

破型前，须擦去试体表面的水和砂粒，清除支点圆柱表面粘着的杂物。试体放入抗折支点上时，应使侧面与圆柱接触。

A. 0.6 试验结果计算与处理应符合下列规定：

1 试体的极限抗折强度（MPa）系由破坏荷载乘以 0.075 得到，抗折强度计算到 0.01MPa。

2 剔去 9 块试体抗折强度的最大值和最小值，以其余 7 个试体抗折强度的平均值作为该组试体的抗折强度。

3 抗蚀系数以同龄期胶砂试体分别在浸泡液中浸泡 56d 和在饮用水中养护 56d 后的抗折强度之比表示，计算精确到 0.01。

A. 0.7 抗蚀系数大于 0.80 时，判定水泥或胶凝材料胶砂抗硫酸盐侵蚀性能合格。

附录 B 矿物掺和料及外加剂抑制碱—骨料反应有效性检测方法

B.0.1 本方法适用于评定矿物掺和料和外加剂抑制混凝土碱—硅酸反应的有效性。

B.0.2 本方法是将具有碱—硅酸反应活性的骨料与硅酸盐水泥、工程实际使用的矿物掺和料或外加剂制成砂浆试件，在 80 ± 2 、 1mol/L NaOH 溶液中养护 28d。若砂浆试件的长度膨胀率不大于 0.10%，则评定该矿物掺和料或外加剂抑制混凝土碱—硅酸反应有效。

B.0.3 试验设备及材料应符合下列规定：

1 比长仪：量程 275mm ~ 300mm，精度 0.01mm。

2 模型：试体尺寸为 25mm×25mm×280mm，试模由不锈钢材制成。

3 恒温水浴或烘箱：温度为 80 ± 2 。

4 硅酸盐水泥：42.5 级 P·Ⅱ 型硅酸盐水泥，碱含量为 0.80%。当试验水泥的碱含量小于 0.80% 时，应通过外加 NaOH（分析纯）的方式使水泥的碱含量达到 0.80%。

B.0.4 实验室温度和湿度应符合下列规定：

实验室温度为 20 ± 2 （特别说明确除外），相对湿度大于 50%。

B.0.5 试验应按照下列步骤进行：

1 试样的制备。对粗骨料，应将试样全部破碎至 5mm 以下；对细骨料，应先将大于 5mm 的部分试样破碎至 5mm 以下，然后与小于 5mm 的部分试样混合。

2 筛分。将制得的试样按表 B.0.5 的分级要求进行筛分，然后分级洗净，并在 105 ± 5 下烘干备用。

3 称料。将烘干的试样连同水泥、矿物掺和料和外加剂等置于 20 ± 2 环境中存放 24h 后，按骨灰比为 2.25:1 的比例进行称料（一组三个试件应称取试样 900g，水泥、矿物掺和料和外加剂共计 400g），其中矿物掺和料与外加剂的用量应参照工程配合比进行计算，试样的各级用量应按表 B.0.5 进行称取，用水量应以 10 次/6s 时砂浆流动度为 105mm ~ 120mm 为准试验确定。

表 B.0.5 试样级配表

筛孔尺寸 (mm)	5.0 ~ 2.5	2.5 ~ 1.25	1.25 ~ 0.63	0.63 ~ 0.315	0.315 ~ 0.16
分级质量 (%)	10	25	25	25	15
分级质量 (g)	90	225	225	225	135

4 搅拌。按 GB/T 17671 规定的程序搅拌砂浆。

5 成型。将砂浆分两层装入试模内，用小刀来回划匀胶砂（装入第二层砂浆时，划入深度应透过第一层砂浆的表面），然后用捣棒在试模内顺序往返各捣压 20 次。捣压完毕，将试件表面抹平、编号并标明测定方向。

每组试件按上述方法制作 3 条试件。

注：当工程中仅是粗骨料具有碱—硅酸反应活性时，只取粗骨料按上述要求成型一组试件；当工程中仅是细骨料具有碱—硅酸反应活性时，只取细骨料按上述要求成型一组试件；当工程用粗、细骨料均具有碱—硅酸反应活性时，应分别取粗、细骨料按上述要求成型二组试件。

6 静停。试件成型后，应将试件连同试模一起放入标准养护室养护 $24\text{h}\pm 2\text{h}$ 。

7 预养护。静停结束后，将试件拆模，并迅速将试件放入 80°C 的水中预养 $24\text{h}\pm 2\text{h}$ 。

8 养护与测长。测量经过预养护试件的初长，并迅速将试件放入 80°C 、 1mol 的 NaOH 养护液中进行养护（养护容器中试件养护液的体积与试件的体积比应为 4 : 1），分别在 3d、7d、14d、21d、28d 龄期时测量试件的长度。测量试件长度的过程（从养护液中取出起计）应控制在 15s 以内。每次测量时，应仔细观察试件表面的变化情况，包括变形、裂缝、表面沉积物或渗出物等。

B.0.6 试验结果计算与处理应符合下列规定：

1 试件长度膨胀率按下式计算：

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100 \quad (\text{B.0.6})$$

式中： ε_t ——试件在第 t 天龄期时的长度膨胀率，%，精确至 0.01%；

L_t ——试件在第 t 天龄期时的长度，mm；

L_0 ——试件的初长，mm；

Δ ——测头的长度，mm。

2 当单个试件的长度膨胀率与同组 3 个试件长度膨胀率的算术平均值之差符合下述两种情况之一的要求时，取 3 个试件长度膨胀率的算术平均值作为试件长度膨胀率：

当 3 个试件长度膨胀率的平均值小于或等于 0.05% 时，单个试件长度膨胀率与平均值之差的绝对值均小于 0.01%；

当平均值大于 0.05% 时，单个试件长度膨胀率与平均值之差均小于平均值的 20%。

3 当单个试件的长度膨胀率与 3 个试件长度膨胀率的算术平均值之差不符合上述要求时，去掉 3 个试件中的最小值，取剩余 2 个试件长度膨胀率的算术平均值作为该组试件

的长度膨胀率。

B.0.7 试验结果按下列要求评定：

若工程中仅是粗骨料具有碱—硅酸反应活性，且取该粗骨料按本方法测定的 28d 龄期试件长度膨胀率小于 0.10%，则将矿物掺和料或外加剂抑制混凝土碱—硅酸反应评定为有效。

若工程中仅是细骨料具有碱—硅酸反应活性，且取该细骨料按本方法测定的 28d 龄期试件长度膨胀率小于 0.10%，则将矿物掺和料或外加剂抑制混凝土碱—硅酸反应评定为有效。

若工程中粗、细骨料均具有碱—硅酸反应活性时，且分别取粗、细骨料按本方法测定的 28d 龄期试件长度膨胀率均小于 0.10%，则将矿物掺和料或外加剂抑制混凝土碱—硅酸反应评定为有效。

附录 c 硬化混凝土气泡间距系数检测方法(直线导线法)

C.0.1 本方法适用于检验混凝土的气泡参数，也适用于对引气剂品质进行评定。

C.0.2 本方法是在硬化混凝土中取任意直线，某一组分在此直线上所截取的线段长度总和与此直线全长的比值，即为该组分在混凝土中的体积含量。通过测定硬化混凝土中气泡的数量、体积含量，计算混凝土的气泡比表面积、含气量和气泡间距系数等。

C.0.3 试验设备应符合下列规定：

1 测量显微镜：具有目镜测微尺和物镜测微尺，放大倍数为 80~128 倍。目镜测微尺最小读数为 10 μ m。载物台能纵、横向移动，移动范围分别不小于 50mm 和 100mm。

2 显微镜照明灯：聚光型灯。

3 切片机、磨片机、抛光机。

C.0.4 试验数量应符合下列规定：

每组至少三个试件。每组试件的观测总面积和导线总长度应符合表 C.0.4 的规定。

表 C.0.4 最小观测总面积及最小导线总长度

骨料最大粒径 mm	最小观测总面积 mm ²	最小导线长度 mm
80	50000	3000
40	17000	2600
30	11000	2500
20	7000	2300
10	6000	1900

注：

如混凝土内骨料或大孔隙分布很不均匀，应适当增大观测面积。当在一个混凝土试样中取几个加工表面时，两加工表面的间距应大于骨料最大粒径的 1/2。

C.0.5 试验应按下列步骤进行：

1 从硬化混凝土试件上沿垂直于浇注面方向锯下试样后，洗刷干净，分别采用 400 号和 800 号金刚砂将试样观测面仔细研磨。每次磨完后应洗刷干净，再进行下次研磨。最后在抛光机转盘的呢料上涂刷氧化铬进行抛光，并再次洗刷干净后，在 105 \pm 5 的烘箱中烘干，然后置于显微镜下试测。当强光低入射角照射在观测面上时，若观测到表面除了气泡截面和骨料孔隙外，视域基本平整，气泡边缘清晰，并能测出尺寸为 10 μ m 的气泡截面，即可认为该观测截面已加工合格。

2 正式观测前，用物镜测微尺校准目镜测微尺刻度，并在观测面两端附贴导线间距

标志，使选定的导线长度均匀地分布在观测面范围内。调整观测面的位置，使十字丝的横线与导线重合，然后用目镜测微尺进行定量测量。从第一条导线起点开始观察，分别测量并记录视域中气泡个数及测微尺所截取的每个气泡的弦长刻度值。根据需要，也可增测气泡截面直径。第一条导线测试完后再按顺序对第二、三、四……条导线进行观测，直至测完规定的导线长度。

C.0.6 试验结果计算与处理应符合下列规定：

根据直线导线法观测的数据，按下列公式计算各参数：

- 1 气泡平均弦长按式 C.0.5-1 计算：

$$\bar{l} = \frac{\sum l}{N} \quad (\text{C.0.5-1})$$

- 2 气泡比表面积按式 C.0.5-2 计算：

$$a = \frac{4}{\bar{l}} \quad (\text{C.0.5-2})$$

- 3 气泡平均半径按式 C.0.5-3 计算：

$$r = \frac{3}{4} \bar{l} \quad (\text{C.0.5-3})$$

- 4 硬化混凝土中的空气含量按式 C.0.5-4 计算：

$$A = \frac{\sum l}{T} \quad (\text{C.0.5-4})$$

- 5 1000mm³ 混凝土气泡个数按式 C.0.5-5 计算：

$$n_v = \frac{3A}{4\pi r^3} \quad (\text{C.0.5-5})$$

- 6 每 cm 导线切割的气泡个数按式 C.0.5-6 计算：

$$n_l = \frac{N}{T} \quad (\text{C.0.5-6})$$

- 7 气泡间距系数按式 C.0.5-7、式 C.0.5-8 计算：

当混凝土中浆气比 P/A 大于 4.33 时：

$$\bar{L} = \frac{3A}{4n_l} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (\text{C.0.5-7})$$

当混凝土中浆气比 P/A 小于 4.33 时：

$$\bar{L} = \frac{P}{4n_l} \quad (\text{C.0.5-8})$$

式中： \bar{l} ——气泡平均弦长，cm；

$\sum l$ ——全导线所切割气泡弦长总和，cm；

N ——全导线所切割的气泡总个数；

a ——气泡比表面积， cm^2/cm^3 ；

r ——气泡平均半径，cm；

n_v —— 1cm^3 混凝土中的气泡个数；

A ——硬化混凝土中的空气含量（体积比）；

T ——全导线总长，cm；

P ——混凝土中水泥净浆含量（体积比，不包含空气含量）；

n_l ——平均每 1cm 导线切割的气泡个数；

\bar{L} ——气泡间距系数，cm；

计算结果取三位有效数字。

本规范用词说明

1 执行本规范规定条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

(1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

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”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做，采用“可”。

《铁路混凝土结构耐久性设计规范》

条文说明

本条文说明系对重点条文的编写依据、存在的问题以及在执行中应注意的事项等予以说明。为了减少篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

1.0.1 现行铁路工程各专业设计规范主要是对混凝土结构承载能力设计的相关问题做出规定，很少考虑由环境作用引起材料性能劣化对结构耐久性带来的影响。混凝土结构的耐久性不足，不仅会增加使用过程中的修理费用，影响工程的正常使用，而且会过早结束结构的使用年限，造成严重的资源浪费。规范铁路混凝土结构的耐久性设计，可确保铁路混凝土结构满足设计使用年限需要，有利于节约资源，符合国家可持续发展的战略。本规范的编制目标也即如此。

1.0.2 本条确定了本规范的适用范围。本条中所指的普通混凝土是与特殊混凝土相对而言的，本规范不涉及轻骨料混凝土、纤维混凝土、压蒸混凝土等特种混凝土。本规范仅考虑常见环境因素对结构的腐蚀作用，包括气候环境（温度、湿度、酸雨）与结构接触的土体或水体的腐蚀离子（硫酸盐、氯盐、碳酸、镁盐等）等的腐蚀作用。当铁路混凝土结构处于特殊环境作用时，如有机污水、微生物、辐射、泄漏电流、电磁作用以及极端恶劣自然环境等，其耐久性技术措施需要专门进行研究和论证。

1.0.3 环境作用下混凝土结构的耐久性问题十分复杂，存在很大的不确定性。本规范是在总结铁路混凝土结构耐久性已有经验的基础上提出的基本要求。为确保不同环境作用下铁路混凝土结构的耐久性，设计人员应结合实际工程的重要性、作用环境、施工条件以及实践经验等，进一步细化相应的技术要求。必要时，可适当提高相关技术要求。

1.0.4 铁路混凝土结构耐久性设计应涵盖结构选型、材料选择、构造设计、施工和运营管理各个阶段。合理的结构构造、合格的原材料、合理的混凝土配合比、可靠的施工过程质量控制及定期检查与维修是确保混凝土结构耐久性的主要因素，也是耐久性设计的基本原则。

本规范规定的材料、施工工艺和方法都是经过长期工程实践检验证明行之有效的。鼓励设计人员设计采用新材料、新工艺和新方法，但要经过试验论证，并要通过铁道部评审。

1.0.5 本条明确了本规范与其他相关标准规范的关系。不同铁路工程都有自身的特点，仅满足规范的最低要求，并不总能保证具体设计对象的安全性和耐久性。当不同技术标准规范对同一问题规定不同时，需要设计人员结合工程的具体情况酌情确定。技术规范或标准

不是法律文件，所有技术规范的规定决不能代替工程人员的专业分析判断能力，执行（或采用）单项或局部标准，并不免除设计单位及设计人员对整体工程和系统功能质量问题应承担的法律责任。

3.0.1 本条提出了铁路混凝土结构耐久性设计的主要内容。混凝土结构耐久性设计是一个系统工程，不仅要确定设计使用年限、判定结构所处环境类别，还要对混凝土材料、裂缝控制、构造措施、施工、混凝土防腐蚀强化措施以及检查与维修等提出与耐久性相关的要求。

3.0.2 为铁路工程设计对象明确规定设计使用年限，不仅是业主和用户的需要，也是结构设计走向更为经济合理的必要环节。以往铁路工程设计规范对混凝土结构没有明确的设计使用年限要求。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)对结构的设计使用年限分为两级：一级设计使用年限不低于 100 年，指城市快速路和主干道上的桥梁以及其他道路上的大型桥梁、隧道，重要的市政设施等；二级设计使用年限不低于 50 年，指城市次干道和一般道路上的中小型桥梁，一般市政设施。实际上，该规范中环境作用下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度是按照三个使用年限级别（100 年、50 年和 30 年）给出的。欧洲规范规定了桥梁等主要土木工程结构物的设计使用年限为 100 年。美国规定桥梁的设计使用年限为不小于 75 ~ 100 年。本规范参照上述规范主要内容，结合铁路工程实际情况，确定了铁路混凝土结构设计使用年限的三个级别，即 100 年、60 年和 30 年。表 3.0.2 中列举了不同设计使用年限级别的适用范围示例，供设计人员参考。轨道板、支承层等轨道结构的设计使用年限至少为 60 年，有条件的情况下应开展再创新试验研究，以实现与桥梁结构等寿命期。

有特殊要求的铁路工程，其设计使用年限可以由设计人员和业主根据工程实际情况具体确定。对于一些特别重要的铁路工程，由于对其修复十分困难，在采取特殊的工程技术及其监测措施后，其设计使用年限可以大于 100 年。对于一些厂区铁路、地方铁路以及铁路房屋建筑结构等，基于经济性和实用性考虑，其设计使用年限可以不受表 3.0.2 的限制。

4.1.1 铁路工程条状结构与露天服役环境等特点决定了其混凝土结构必然会经受外部气候和所接触土体与水体的腐蚀作用。为确定结构所处的环境类别及作用等级，在设计前应对工程沿途的水质、土质进行取样分析，并调研沿途城市或地区的历史气象资料。

4.1.2 混凝土结构所处环境的侵蚀因素往往不是单一的，提高混凝土抵抗不同侵蚀环境（如化学侵蚀、冻融循环破坏）作用所采取的技术措施也不相同。如当结构物处于硫酸盐腐蚀

和冻融破坏环境时，混凝土配合比设计应同时考虑采用抗硫酸盐硅酸盐水泥、掺加足量矿物掺和料和引气等技术措施。不同类别环境共同作用可能会加重对混凝土的腐蚀，也有可能减轻其中某种环境的作用。设计遇到多种环境同时作用时，对混凝土结构采取的耐久性技术措施应同时满足每种环境作用的要求。

4.1.3 同一个结构物的不同结构部位（如桥梁结构的基础、承台、墩台等）所处的环境类别和作用等级往往有所差别，其耐久性要求也应有所不同，甚至同一构件的不同部位，如墩台水位变动区和非水位变动区，其耐久性要求差别也可能很大，设计时应充分考虑到这些情况。

4.2.1 铁路工程所处的环境条件是结合我国历史气候信息资料与地质资料，参考欧洲设计规范、《岩土工程勘察规范》(GB50021)、《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476)进行分类的。环境作用下的混凝土劣化程度是与混凝土性能密切相关的，本规范中确定的环境作用等级，是以不同环境类别下需要满足特定组分要求的混凝土为前提的。根据铁路工程混凝土结构中钢筋锈蚀以及混凝土腐蚀机理，综合考虑设计的方便性，本规范将铁路混凝土环境类别分为碳化环境、氯盐环境、冻融破坏环境、化学侵蚀环境、盐类结晶破坏环境以及磨蚀环境六类，按其侵蚀的严重程度，分为 3~4 个环境作用等级。

4.3.1 在碳化锈蚀为主的环境条件下，混凝土的碳化主要受制于 CO_2 、 H_2O 和 O_2 的供给程度。当相对湿度较大时，特别是水位变动区和干湿交替部位，碳化锈蚀最容易发生；当相对湿度小于 60% 时，由于缺少水的参与，钢筋的锈蚀较难发生；当结构处于水下或土中时，由于缺少 CO_2 的有效补给，混凝土的碳化速度也会很缓慢。因此，根据环境湿度、结构所处部位干湿交替情况等，将碳化环境分为 T1、T2 和 T3 三个作用等级。本规范中所列环境中 T1 长期在水下，不包括海水，其原因是长期处于海水的作用等级应属于氯盐环境中的 L1。

4.3.2 在氯盐锈蚀为主的环境条件下，钢筋锈蚀速度与混凝土表面氯离子的浓度、温湿度的变化、空气中 O_2 供给的难易程度有关。根据距离海洋的距离以及途径地区土中或水中所含氯离子浓度，将氯盐环境分为 L1、L2 和 L3 三个作用等级。距离海洋的距离划分主要参考《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275)，土中或地下水中氯离子含量等级的划分主要参考《岩土工程勘察规范》(GB 50021)。长期处于海水下的混凝土，由于钢筋脱钝所需的氯离子浓度值在饱水条件下得到提高，同时缺乏 O_2 的有效供给，所以相对来说钢筋锈蚀的速度反而不大。在海水作用的潮汐区和浪溅区、盐湖地区或海边滩涂

区露出地表的毛细吸附区，钢筋锈蚀的发展速度最快，作用等级应该更高；另外，南方炎热地区温度高，氯离子扩散系数增大，钢筋锈蚀加剧，所以炎热气候应作为加剧钢筋锈蚀的因素考虑。

4.3.3 在化学侵蚀为主的环境条件下，混凝土腐蚀程度与环境水和土中侵蚀物质的种类和浓度、环境土的渗透性、环境温度以及混凝土表面干湿交替程度等有关。综合考虑这些因素，本条根据水和土环境中化学物质的不同浓度范围将环境作用分为 H1、H2、H3 和 H4 四个作用等级。本规范所涉及的腐蚀化学物质有硫酸盐、碳酸盐、酸和镁盐等。硫酸根离子包括水中和土中所含硫酸根离子，土中硫酸根离子的测试方法有酸溶法和水溶法，从硫酸盐对混凝土的侵蚀角度看，取用水溶值比较合理。本规范参照《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476）确定了土和水中不同作用等级相应的浓度。尽管将水中硫酸根离子浓度大于 10000mg/kg 和土中硫酸根离子浓度大于 15000mg/kg 列为 H4 作用等级，但由于缺少足够的数据积累和工程经验，对于处于高硫酸盐含量的混凝土结构，如水中硫酸根离子浓度大于 20000mg/kg 和土中硫酸根离子浓度大于 30000mg/kg，应作为特殊情况另行对待，其耐久性技术措施应经过专门研究和论证。关于海水环境对混凝土的影响，本规范主要考虑了其中氯离子对钢筋的锈蚀作用。至于海水中硫酸根离子的化学作用，虽然硫酸根离子浓度已达到了中度侵蚀的 2500mg/L 左右，但由于同时存在氯离子对硫酸盐侵蚀的缓减作用，有些规范将海水硫酸盐侵蚀程度降为轻度硫酸盐侵蚀。在挪威，天然海水中硫酸盐被认为对混凝土没有侵蚀性。

酸对混凝土的腐蚀作用主要是中和水泥水化产物中的氢氧化钙，不仅会降低混凝土的碱度，还会引起硬化体稳定性降低。当混凝土处于 pH 值小于 6 的环境中时，混凝土就有遭受酸腐蚀的可能。低水胶比高密实性的混凝土能够抵抗弱酸的腐蚀，但作为碱性体系的硅酸盐水泥混凝土则不能长期承受高浓度酸环境的作用。当混凝土结构处于 pH 值小于 4 的环境时，其耐久性技术措施必须经过专门试验论证。

在常见的硫酸盐中，对混凝土腐蚀严重程度的由强至弱的顺序为硫酸铵、硫酸镁、硫酸钠和硫酸钙。硫酸铵需要单独考虑铵离子对混凝土的腐蚀作用。硫酸镁也是一种自然界中较为常见的能对混凝土造成腐蚀的硫酸盐类，其对混凝土腐蚀为硫酸盐和镁盐的双重腐蚀。

4.3.4 在盐类结晶破坏为主的环境条件下，混凝土腐蚀程度与环境水和土中硫酸浓度、环境温度以及混凝土表面干湿交替程度等有关。与化学侵蚀破坏相比，盐类结晶破坏更加严

重，多发生在露出地表的毛细吸附区和隧道的衬砌部位，破坏很明显，要严加控制。基于不同的腐蚀原理以及不同的评价指标，本规范中将盐类结晶破坏环境作为独立的一种环境条件，按照硫酸根离子浓度的大小分为 Y1、Y2、Y3 和 Y4 四个作用等级。盐类结晶破坏作用等级的划分主要参考《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476) 中干旱、高寒地区硫酸盐环境作用等级。盐类结晶破坏与环境温度、日温差、相对湿度与风速有密切关系，设计中必须充分考虑这些因素。环境水和环境土中硫酸盐含量高的地区，混凝土结构埋入土中或水中的混凝土遭受化学侵蚀，而处于干燥、多风、日夜温差大环境条件下的混凝土结构，其露出地表或水面约 1m 以下的毛细吸附区的混凝土则遭受盐类结晶破坏；处于一面接触硫酸盐含量高的环境水或环境土，而另一面临空、且环境干燥、多风、日夜温差大的薄壁混凝土结构（如隧道衬砌），其临空面的混凝土则遭受盐类结晶破坏。

当混凝土结构处于高硫酸盐含量的结晶破坏环境时，如水中硫酸根离子浓度大于 10000mg/kg 和土中硫酸根离子浓度大于 15000mg/kg，其耐久性技术措施应经过专门研究和论证。

4.3.5 冻融破坏环境作用主要与环境的最低温度、混凝土饱水度和反复冻融循环次数有关。在相同条件下，含氯盐水体的冻融破坏作用更大。因此，本规范根据当地最冷月份的平均气温、饱水状况和水中是否含盐来划分作用等级，将冻融破坏环境分为 D1、D2、D3 和 D4 四个作用等级。《水工混凝土结构设计规范》(SL 191) 关于抗冻环境等级的划分，除考虑到最冷月份气温、饱水状态、是否含盐外，还考虑年冻融循环次数，将冻融循环次数划分成大于 100 次和小于 100 次；年冻融循环次数分别按一年内气温从 +3℃ 以上降低到 -3℃ 以下，然后回升到 +3℃ 以上的交替次数和一年中日平均气温低于 -3℃ 期间设计预定水位的涨落次数统计，并取其中的大值；另外，《水工混凝土结构设计规范》对气候划分等级标准也略有不同，严寒地区是指累积年最冷月平均气温低于或等于 -10℃ 的地区；寒冷地区是指累积年最冷月平均气温高于 -10℃、低于或等于 -3℃ 的地区；温和地区是指累积年最冷月平均气温高于 -3℃ 的地区。

4.3.6 在磨蚀破坏为主的环境条件下，混凝土结构物遭受磨蚀的程度主要与风或水中夹杂物的数量以及风速、水流速度有关。夹杂物越多，速度越快，磨蚀就越严重。根据铁路工程实际情况与经验，将磨蚀环境分为 M1、M2 和 M3 三个作用等级。我国是一个河流含砂量较多的国家，在众多河流中，年输砂量超过 1000 万吨的河流就有 60 多条，其他河流也存在不同程度的河砂运输现象。在流水及夹杂物的作用下，由于摩擦、切削、冲击等作

用,桥梁墩台的磨蚀破坏是不可避免的。气蚀是高速水流的方向和速度发生急剧变化时造成近靠速度变化处下游混凝土结构表面产生很大的压力降低,形成水气空穴,在混凝土表面产生一个局部的高能量冲击。另外,大风所夹带的夹杂物,对涵洞、桥梁也有不同程度的磨蚀,这种情况在我国西北地区经常发生。

4.3.7 当混凝土结构所处环境条件过于恶劣时,仅依靠混凝土材料自身的性能无法满足耐久性的要求,必须采取防腐蚀强化措施。本规范把这类环境(L3、H4、Y4、D4和M3)称为严重腐蚀环境。

5.1.3 混凝土原材料的国家或行业标准只是产品标准,是用来控制原材料的匀质性、无毒性和无害性的。质量符合国家标准或行业标准要求的原材料,未必能够符合混凝土工程的需要。因此,本规范结合铁路工程实际,从影响混凝土结构耐久性出发,提出了铁路混凝土用原材料的技术要求。

本条规定了铁路混凝土用水泥的技术要求。水泥颗粒过细,水泥熟料中 C_3A 含量过高,水泥的水化速度过快,水化热集中释放,导致混凝土收缩增大、抗裂性降低,对混凝土耐久性不利。因此,对水泥的比表面积及 C_3A 含量加以限制。《通用硅酸盐水泥》(GB175)中用比表面积来评价普通硅酸水泥的细度,规定了最小比表面积,本规范对硅酸盐水泥与普通硅酸盐水泥的比表面积的上限进行限制,规定为不大于 $350m^2/kg$,目的就是为了防止混凝土凝结硬化过程中,因内外温差过大造成开裂。水泥中的碱含量过高不仅容易引发混凝土的碱—骨料反应,而且增加混凝土的开裂倾向,因此,即使骨料的碱活性不高,也不宜采用碱含量过高的水泥。考虑到对混凝土入模温度的要求,本规范中虽然未对水泥入仓温度进行控制,但实际施工过程中仍应对水泥的入仓温度进行限制。

硫酸盐对混凝土的化学腐蚀是一个缓慢的过程,研究表明,大量对提高混凝土耐化学腐蚀作用的矿物掺和料在28d龄期时,还没有参与反应或没有完全开始反应,因而用胶凝材料28d抗蚀系数评价其耐蚀性能是不恰当的。根据大量工程应用经验和室内试验结果,本规范将胶凝材料抗蚀系数的龄期修改为56d。对于盐碱地、盐池等硫酸盐浓度含量较高的地区,仅仅依靠在混凝土中掺加矿物掺和料是难以解决耐腐蚀问题的,这种情况可采用特种胶凝材料,并应通过试验论证。

5.1.4 基于技术可行性和经济性,铁路混凝土工程中所用的矿物掺和料以磨细矿渣粉、粉煤灰为主,也可使用硅灰。在一些特殊场合,若必须使用新型矿物掺和料,如煅烧高岭土、沸石粉、碳酸盐类掺和料或硅质掺和料等,应由试验证明掺加这些矿物掺和料的混凝土耐

久性满足要求，并要通过铁道部评审。

粉煤灰的烧失量对混凝土的性能影响很大，应予以重点控制。采用烧失量大的粉煤灰配制的混凝土工作性差（坍落度损失大、不易捣实）、强度效应差（波特兰效应降低）以及耐久性差（封孔固化和致密效应降低）。另外，粉煤灰中未燃烧颗粒对外加剂具有很强的吸附作用（尤其对引气剂），因此，严重冻融环境下应严格控制粉煤灰中的烧失量，一般不宜大于 3.0%。硫酸根离子、CaO 与 C_3A 等发生反应会生成钙矾石，钙矾石体积膨胀会导致混凝土的破坏，因此硫酸盐侵蚀作用下，应选择氧化钙含量低的粉煤灰。

磨细矿渣粉越细，活性越高，用其配制混凝土的收缩也随之增加。从减少混凝土收缩开裂方面考虑，磨细矿渣粉的比表面积不宜超过 $500\text{m}^2/\text{kg}$ ，最好不超过 $450\text{m}^2/\text{kg}$ 。生产和销售磨细矿渣粉时，如果掺有石灰石粉，应当说明其掺量。

在水灰比不变的情况下，掺入硅灰可明显提高混凝土的强度、抗化学腐蚀性和耐磨性，但由于硅灰活性高，不利于减少温度变形，并且增大混凝土的自收缩，因此，当有特殊需要需使用硅灰时，硅灰宜与其他矿物掺和料同时掺用，且其掺量不宜过大，一般不超过胶凝材料的 8%。

5.1.5 采用专门机组生产的人工砂，具有很好的粒形，且因在磨制前已被清洗，故其含泥量较低，因此可以用来配制混凝土。山砂是由开挖山体浅层风化岩经筛选而得，含泥量高、风化严重，故不提倡使用。海砂中的有害物氯离子虽然可用淡水冲洗除去，但目前冲洗成本高，质量控制困难，因此，本规范中规定不得使用。砂的含石（粒径 $>5\text{mm}$ ）量不宜大于 5%，否则在混凝土试配时应扣除超出部分的石子，并计入粗骨料含量。

本条对细骨料的含泥量、泥块含量以及有害物质的含量提出了更高的要求。骨料的含泥量及其本身的抗冻性是影响混凝土抗冻性的关键，在冻融破坏环境下，应严格控制骨料中的含泥量及其吸水率。骨料的坚固性与有害物质含量对混凝土的耐久性影响较大，必须加以控制。

对于非碱活性骨料，即使其砂浆棒膨胀率小于 0.1%，但如果混凝土的碱含量太高，发生碱—骨料反应的可能性仍然很大，因此，当骨料的砂浆膨胀率小于 0.1% 时，也应对混凝土的最大碱含量进行控制。

人工砂中的石粉不同于粘土、泥块，少量石粉在混凝土中有调整和易性、提高混凝土韧性的有利作用。本规范对人工砂和混合砂的石粉含量的规定主要参考《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》（JGJ 52）。

5.1.6 一般说来，砂岩的晶粒嵌固程度不好，坚固性差，吸水率较高，不宜用来配制高耐久混凝土。卵石表面光滑，能够提高混凝土的工作性能，但卵石与浆体粘结力差，不适宜用于高强度等级的混凝土。但假若采用高效减水剂，降低混凝土的水胶比，卵石与胶凝材料界面的粘结力则显著增强，这时采用卵石制备的混凝土性能则可以满足要求。为充分利用有些地区丰富卵石资源，发挥卵石的特性，本条规定在 C40 以下混凝土中可以使用卵石。

粗骨料的粒形、级配和有害物质是影响混凝土耐久性的关键。粗骨料在运输和装卸过程中，其级配可能发生变化。为了确保粗骨料具有良好的级配，一个有效又可行的技术措施是采用多级配石，如采用二级配石或三级配石。使用过程中可通过对粗骨料实行分级采购、分级存贮、分级计量，配合比试配时再确定各级配石的具体用量，以使骨料具有尽可能小的空隙率，从而降低混凝土的胶凝材料用量。降低粗骨料空隙率的另一个有效措施是采用反击式、锤式破碎机生产类球形粒形的骨料，可以获取孔隙率更低的骨料产品。用这种骨料配制的混凝土，其工作性能可以得到进一步的改善。

骨料的有害物含量对混凝土的耐久性影响较大，必须加以控制。为确保有耐久性要求的混凝土的耐久性，本规范对粗骨料中有害物质含量的部分指标提出了较《建筑用卵石、碎石》（GB/T 14685）更高的要求。

5.1.7 掺外加剂是制备高性能混凝土的关键技术之一，外加剂的性能、匀质性和与水泥的相容性是成功配制高性能混凝土的基本条件。由于目前外加剂品种繁多，产品质量参差不齐，市场管理又比较混乱，选用时，一定要注意不同外加剂的使用功能及特点。外加剂不但要与基准水泥之间具有良好的相容性，还应与工程所用水泥及矿物掺和料之间具有良好的相容性。当使用新型外加剂时，必须经过试验论证并通过铁道部评审。

本规范规定减水剂的含气量不应大于 3.0%，其原因是目前部分减水剂生产厂家在生产减水剂过程中，未采用先消泡后引气的生成工艺，导致混凝土中引入了大量直径大且不稳定的劣质气泡，造成混凝土含气量经时损失大，不能保证混凝土抗冻性的要求，且混凝土表面气孔较多。若规定减水剂的含气量不大于 3.0%，则外加剂厂家在生产外加剂时必须采取适当的消泡措施消除产品中的大气泡，有利于提高混凝土的外观质量。至于配制引气混凝土，则可以在搅拌时根据需要掺入经检验符合质量要求的引气剂，则可以最大限度地保障混凝土的引气质量。为了减少由于收缩而引起的混凝土开裂，结合目前高效减水剂的生产技术水平，本规范中将高效减水剂的收缩率比规定为不大于 125%。

提高混凝土的耐久性，尤其是抗冻性，引气剂起到十分重要的作用。混凝土中掺入少量引气剂后，就能使每方混凝土中引入数千亿个微小气泡，使混凝土的工作性能和抗冻融性能大大提高。国内外大量研究表明，引气剂不仅能减少混凝土的用水量，降低泌水率，更重要的是混凝土引气后，水在拌和物中的悬浮状态更加稳定，可以改善骨料底部浆体泌水、沉陷等不良现象。因此适量引气是配制抗冻高性能混凝土的重要手段之一。引气剂所引气泡的直径及稳定性对混凝土的性能影响很大，因此，选择引气剂时，要检测引气混凝土的气泡间隔系数。研究表明，当混凝土中气泡间距系数小于 $300\ \mu\text{m}$ 时，混凝土抗冻性较高。

5.1.8 本规范主要参考行业标准《混凝土拌和用水》(JGJ63)对拌和水中有毒物含量和拌和水对混凝土凝结时间和强度的影响要求做出了具体规定。提出拌和水碱含量要求主要是为了控制混凝土的可溶性总碱含量。表 5.1.8 中的钢筋混凝土结构也包括配筋率低于最低配筋率的混凝土结构。

5.2.1 本规范按成型方式不同分别提出了单方混凝土胶凝材料的最大用量。水泥是混凝土中必要的胶凝组分，但当水泥用量过大时，不仅混凝土的水化放热增加，开裂趋势也随之增大，还会造成混凝土的泛浆分层，对混凝土耐久性反而不利，且会增加混凝土的成本。因此，在满足混凝土的力学性能要求的前提下，应尽可能降低混凝土中单方胶凝材料的用量。将 C50 混凝土的胶凝材料最大用量由 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 调整为 $480\text{kg}/\text{m}^3$ ，除了上述原因外，还因为目前铁路预制梁和现浇梁 C50 混凝土的胶凝材料用量大部分在 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 以下。

5.2.2 本条明确了不同环境条件下、不同水胶比混凝土矿物掺和料的掺量范围。特别指出的是，本表中所列矿物掺和料的掺量是指单掺一种矿物掺和料的掺量。当水胶比较大 (> 0.4) 时，矿物掺和料的掺量应减少；当水胶比较小 (≤ 0.4)，矿物掺和料掺量应增大，因此，本条按水胶比 0.4 为分界限，分别给出矿物掺和料的掺量。以矿渣和粉煤灰为代表的掺和料赋予混凝土高工作性能、高耐久性、高体积稳定性，已经达成共识，因此它们已经成为铁路混凝土的必要组分。考虑到矿物掺和料对混凝土力学性能的影响，在碳化环境、氯盐环境、冻融破坏环境、盐类结晶破坏环境以及磨蚀环境下，本规范对矿物掺和料掺量规定了最大值，在化学侵蚀与氯盐环境下，矿物掺和料能够大幅度地提高混凝土的抗蚀性，在混凝土制备时必须添加足够的矿物掺和料，因此本规范规定了矿物掺和料的最低掺量，要求在氯盐环境和化学侵蚀环境性的混凝土必须添加矿物掺和料。矿物掺和料的掺量限值主要参考美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318)与《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T

5.2.3 引气不仅可以提高混凝土的和抗冻性和抗盐类结晶破坏的性能，还能改善混凝土的拌合物性能，提高混凝土的稳定性。因此，本规范不仅规定了冻融破坏环境和盐类结晶破坏环境以及有抗冻要求的预应力混凝土的含气量要求，而且还规定了当条件许可或实际需要时，在其他环境条件下混凝土的最小含气量要求。气泡大小与气泡稳定性是评价引气剂的主要指标，本规范提出了采用气泡间距系数来控制引入到混凝土内部的气泡质量，从而确保混凝土中所引入的气泡微小、均匀、稳定。

5.2.4-5.2.9 配合比设计是确保混凝土耐久性最关键的环节，水胶比与最小胶凝材料用量限值在保证混凝土耐久性所需要的抗渗性与力学性能的重要技术参数。由于混凝土拌合时的用水量在其浇注成型后被水化结合的很少，大量游离水蒸发后造成混凝土中的薄弱环节，给混凝土的开裂和耐久性带来不利影响。因此，控制混凝土的水胶比是保证混凝土质量的重要环节。

碳化环境：混凝土的碳化，一方面与 CO_2 在混凝土中的扩散速度密切相关，其取决于混凝土的孔隙率和孔隙结构，即取决于混凝土的水胶比；另一方面还与混凝土吸收 CO_2 的能力有关，这主要取决于混凝土内 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的储备数量，而混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的数量是由胶凝材料中 CaO 的含量决定的。碳化环境下，当采用能够减水的矿物掺和料配制混凝土时，这种混凝土也具有较强的抗碳化能力，但对于水胶比较大的混凝土，矿物掺和料掺量不宜过大。

氯盐环境：海工工程实践表明，低水胶比的掺加矿物掺和料的混凝土比同水胶比的硅酸盐水泥混凝土具有更高的抗氯盐侵蚀性能，因此，氯盐环境下，不宜单独使用硅酸盐水泥作为胶凝材料。严重腐蚀的氯盐环境下，宜采用大掺量矿物掺和料混凝土（胶凝材料中含有较大比例的粉煤灰、磨细矿渣粉和硅灰等矿物掺和料，且需要采取较低的水胶比和特殊施工措施的混凝土），大掺量矿物掺和料混凝土应配合良好的养护和保护措施。除与冻融破坏环境耦合外，矿物掺和料的掺量宜在 40% 以上。

化学侵蚀环境：提高混凝土耐硫酸盐化学侵蚀的主要技术措施有三条，第一是选择耐硫酸盐性能良好的水泥，主要是水泥熟料矿物中 C_3A 的含量尽量少，如高抗硫水泥 C_3A 含量 3%，中抗硫水泥 C_3A 含量 5%；第二是掺加矿物掺和料，一般掺量不得少于 40%；第三是通过掺加高效减水剂，降低混凝土的单方用水量，提高混凝土抗渗性和强度。也有研究表明，引气能有效抑制或减缓混凝土在硫酸盐化学侵蚀和硫酸盐结晶作用引起的膨

胀,显著降低硫酸盐结晶造成的混凝土抗折强度降低及表面剥蚀。在硫酸盐较为富集的情况下,石灰石与硫酸盐在较低的温度下易产生碳硫硅钙石破坏,因此,在化学侵蚀环境下,不得使用石灰石作为掺和料。

盐类结晶破坏环境:干湿交替情况下,当水中的 SO_4^{2-} 浓度大于 200mg/L,或土中 SO_4^{2-} 浓度大于 1000mg/kg,地下水、土中的硫酸盐则可以渗入到混凝土的内部,并在一定条件下使得孔溶液中硫酸盐浓度不断积累。若硫酸盐浓度超过饱和浓度时,就会在孔中析出盐结晶,并产生很大的压力,导致混凝土破坏。在混凝土中适当引气,可以释放硫酸盐结晶造成的破坏压力。因此,盐类结晶破坏环境下,宜使用引气混凝土。

冻融破坏环境:多年来的工程实践表明,提高混凝土抗冻性的技术途径有两方面,其一是提高混凝土的密实度或强度;其二是适当引气。引气混凝土具有较高抗冻性的事实已被证实,但也有实践表明在严重冻融破坏环境下,高强度混凝土也没有发生破坏。考虑到引气不仅能够提高混凝土的抗冻性,而且能够改善混凝土的工作性能。本规范规定了冻融环境下混凝土的最低含气量要求。

磨蚀环境:混凝土的抗磨蚀性能主要取决于混凝土的强度、骨料的强度、硬度和韧性,因此,磨蚀环境下应对混凝土的原材料提出了特殊的要求,尤其是骨料和胶凝材料方面。ACI201.2R-08、欧洲标准和水工混凝土相关标准均对磨蚀环境下混凝土的原材料、矿物掺和料最大掺量限值、水胶比、最低强度等级和胶凝材料用量等予以规定。ACI 201.2R-08 建议,磨蚀环境下混凝土应采用较低的水胶比(小于 0.45),以便改善表面砂浆的强度和耐磨性。《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》(DL/T5207)规定抗磨蚀混凝土的水胶比应小于 0.4,宜掺加硅灰,且应同时掺加补偿早期收缩的膨胀剂或减缩剂。

本规范对磨蚀环境下混凝土的最大水胶比和最低胶凝材料用量的要求与国内外混凝土规范的规定基本相同,唯一不同的是,将低强度等级为 C25 的混凝土最低胶凝材料用量由 240kg/m^3 修改为 260kg/m^3 。

5.2.10 混凝土中氯离子含量是指混凝土中各种原材料带进混凝土的氯离子总量。当氯离子含量在钢筋周围达到某一临界值时,钢筋的钝化膜开始破坏,丧失对钢筋的保护作用,钢筋开始锈蚀。在氯盐环境下,环境中的氯离子会不断地渗入到混凝土内部,聚集到钢筋表面,导致钢筋锈蚀,因此,这就要求混凝土原材料中的氯离子含量应尽可能地小。对于预应力混凝土结构,由于预应力筋对氯盐腐蚀非常敏感,更容易发生腐蚀,应该更严格控制混凝土中氯离子含量。为保证混凝土的耐久性,本规范对钢筋混凝土和预应力混凝土的氯

离子含量限值分别提出要求,其中钢筋混凝土包括配筋率低于最低配筋率要求的混凝土结构。关于引起钢筋锈蚀的氯离子临界值,目前尚未有明确的量值,较为统一的认识是占胶凝材料质量的 0.35%-1%。也有规范是用每方混凝土中氯离子含量来限制,如日本土木学会编写的《混凝土标准规范》规定,对于一般钢筋混凝土和后张预应力混凝土,混凝土中氯离子总量应小于 0.6kg/m^3 ;对于耐久性要求特别高的钢筋混凝土和后张预应力混凝土,在可能发生盐害和电腐蚀的场合以及采用先张预应力混凝土的场合,混凝土中氯离子总量应小于 0.3kg/m^3 。日本《预拌混凝土》(JIS 5308)规定,在卸货地点,混凝土的氯离子含量必须小于 0.3kg/m^3 ;但在得到购货者同意时,可在 0.6kg/m^3 以下。美国《固定式离岸混凝土结构与施工指南》(ACI 357)规定:混凝土拌合物中可溶性氯离子总含量不得超过胶凝材料质量的 0.1%(钢筋混凝土)和 0.06%(预应力混凝土)。本规范对氯离子控制指标与 ACI 357 一致。

5.2.11 采用活性骨料进行混凝土生产时,必须采取技术措施降低碱—骨料反应发生的风险。措施之一是严格控制混凝土的总碱含量,措施之二是掺加矿物掺和料。对于活性较大(快速砂浆棒膨胀率在 0.10~0.30%)的骨料,可通过控制混凝土的总碱含量和掺加矿物掺和料两种措施降低风险;对于活性很大(快速砂浆棒膨胀率在 0.30%以上)的骨料,不得使用。

5.2.12 当混凝土中存在过量硫酸根离子(SO_3)时,硫酸根离子可与剩余的铝酸三钙(C_3A)和水发生反应,延迟生成体积膨胀的钙矾石,导致硬化混凝土开裂,这一反应也被称为内部硫酸盐腐蚀。防止钙矾石延迟生成的主要途径是降低养护温度,限制水泥中硫酸盐(SO_3)和 C_3A 含量,避免混凝土在使用阶段与水接触。为避免混凝土中内部硫酸盐腐蚀,本规范将混凝土中 SO_3 含量限制在胶凝材料的 4%以下。

5.3.1-5.3.2 本条所规定的强度等级为由耐久性所决定的最低强度等级。为了防止混凝土开裂,当强度等级高于 C40 时,不宜使用素混凝土。表 5.3.1 和表 5.3.2 中钢筋混凝土包括配筋率低于最低配筋率的混凝土结构。

考虑到桥梁灌注桩基础与隧道衬砌结构的特点及其施工工艺,将其最低强度等级单独列表。适当引气是有效提高混凝土抗冻性和抗盐类结晶破坏有利的技术措施,但随着含气量的增加,混凝土的强度呈现不同程度的降低。当采用引气混凝土时,虽然其强度等级降低一个等级,但同样能够保证混凝土的耐久性,因此,严重冻融破坏环境和盐类结晶破坏环境下,混凝土的最低强度等级可以降低一个等级,即在 D4 和 Y4 环境下,混凝土最低

强度等级可为 C45。在氯盐环境和化学侵蚀环境下，当混凝土中掺加足够量的矿物掺和料时（如磨细矿渣粉和粉煤灰），混凝土的抗氯离子渗透与抗化学侵蚀性能可较好地得以改善，因此在 L3 和 H4 环境下，除了规定混凝土的最低等级为 C45 外，还规定混凝土中必须掺加不少于 30%的粉煤灰或不少于 50%的磨细矿渣粉。

5.4.2 混凝土的密实性是其抵抗环境中水、气以及溶解于水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等有害物质侵入混凝土的第一道防线，并直接影响混凝土的抗渗、抗碳化、护筋、抗硫酸盐腐蚀、抗冻等耐久性能。传统上，人们采用混凝土抗高压水渗透的能力——抗渗标号来表示混凝土的密实性能。然而实践证明，抗渗标号比较适合于判定低强度等级混凝土的密实性，而对强度等级超过 C30 的混凝土，抗渗等级几乎都能达到 P20 及以上的水平，单靠抗渗标号已难以表征高强度等级混凝土的密实性能。从上世纪 80 年代开始，各国不断地研究各种新方法以评价混凝土抵抗外界各种有害离子侵蚀的能力，其中发展较快的方法是电通量法。本规范中将混凝土电通量作为评价混凝土抗渗性的一般要求，参照 ASTM C1202（说明表 5.4.2）规定了不同使用年限、不同环境作用等级的铁路混凝土的电通量。大量的试验研究数据和工程实例表明，掺加适量矿物掺和料且具有良好抗侵入性的 C30 以下混凝土的电通量值一般小于 1500C，C45 及以上混凝土的电通量值一般小于 1200C，C50 及以上混凝土的电通量值一般小于 800C。

说明表 5.4.2 氯离子在混凝土中渗透能力的等级划分（ASTM C1202）

通过电量 C（库仑）	氯离子渗透能力	混凝土类型
>4000	渗透能力强	W/C > 0.6 的普通混凝土
2000~4000	渗透能力中等	W/C 为 0.4 ~ 0.6 的普通混凝土
1000~2000	渗透能力低	W/C < 0.4 的普通混凝土
100~1000	渗透能力很低	改型乳液或硅灰混凝土
<100	不渗透	聚合物浸渍混凝土

5.4.3 氯盐环境下，混凝土的耐久性评价指标一般选择氯离子扩散系数，但存在不同的氯离子扩散系数测试方法。不同测试方法得到的扩散系数不尽相同，但各有其特定的用途。本规范选择基于 RCM 法测定的氯离子扩散系数作为评价混凝土在氯盐环境的耐久性指标，其原因有两方面，一是基于 RCM 法的氯离子扩散系数适用范围最广，能够客观反应不同种类混凝土中氯离子的渗透行为；二是氯离子扩散系数能够与设计使用寿命建立起联系，这为将来预测混凝土结构的使用寿命提供一条技术途径。氯离子扩散系数试验按《普

通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)中抗氯离子渗透试验快速离子迁移系数法(或称RCM法)进行,试件的养护龄期为56d。

5.4.4 盐类结晶破坏环境下如何评价混凝土抵抗硫酸盐结晶破坏性能,国内外做了大量的试验研究。混凝土在硫酸盐溶液中的干湿循环过程与混凝土结构毛细吸附区盐类结晶过程相似,能客观地反映混凝土在盐类结晶破坏环境下的腐蚀机理,且干湿循环能加速混凝土盐类结晶破坏,因此,本规范采用抗硫酸盐结晶干湿循环次数作为评价指标。研究表明能够经受150次以上抗硫酸盐干湿循环的混凝土,其抗硫酸盐结晶破坏能力很强,因此,本规范将KS150作为最严酷环境下耐久性的最高要求,其他环境下的耐久性要求依次递减。抗硫酸盐结晶干湿循环次数试验按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)中抗硫酸盐侵蚀试验方法进行,试件的养护龄期为56d。

5.4.5 混凝土的抗冻性可用多种指标表示,如标准试验条件下经反复冻融后混凝土试件的动弹模量损失、质量损失、长度增加或体积膨胀等。国内外多数标准都采用动弹模量损失率或同时考虑质量损失率来确定混凝土的抗冻级别,但所有这些指标都只能用来作为抗冻性能的相对比较,而不能与实际工程在某种环境条件下的使用年限预测相联系。现在国内外比较通用的是以美国ASTM C666标准试验方法为基础的快速冻融循环试验结果来对混凝土的抗冻性进行评定。这一标准将混凝土试件经300次快速冻融循环后的动弹模损失(即与初始动弹模的比值)作为混凝土抗冻耐久性指数DF。北美地区的抗冻混凝土标准规定,有抗冻要求的混凝土,其DF值需大于或等于60%。

我国现行国家标准用抗冻等级或抗冻标号作为混凝土抗冻性能指标。在水工、公路等规范中,定义快速冻融试验动弹模降到初始值的60%或质量损失到5%(两个条件中只要有一个先达到时)的循环次数为混凝土的抗冻等级。港口和水工规范也用抗冻等级表示混凝土的抗冻性能。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476)规定,不同环境条件下不同设计使用年限混凝土的抗冻性应满足说明表5.4.5的要求。

说明表 5.4.5 混凝土抗冻性的耐久性指数 DF (%)

设计使用 年限级别	一 (100 年)			二 (50 年)			三 (30 年)		
环境条件	高度 饱水	中度 饱水	盐或化 学腐蚀 下冻融	高度饱 水	中度 饱水	盐或化 学腐蚀 下冻融	高度 饱水	中度 饱水	盐或化 学腐蚀 下冻融
严寒地区	80	70	85	70	60	80	65	50	75
寒冷地区	70	60	80	60	50	70	60	45	65
微冻地区	60	60	70	50	45	60	50	40	55

其中，高度饱水是指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体，混凝土体内高度水饱和；中度饱水指冰冻前偶受雨水或潮湿，混凝土体内饱水程度不高；盐冻指接触海水、除冰盐或其他化学腐蚀物质下的冻融情况。严寒、寒冷和微冻地区的划分方法与本规范一致。将上表中的环境条件与本规范规定的环境条件进行对照，并将混凝土抗冻性的耐久性指数（DF）换算成冻融循环次数，可以发现，当结构的设计使用年限为 100 年时，不同冻融环境条件下混凝土的耐冻融循环次数均大于 300 次，最高达 425 次；当结构的设计使用年限为 50 年时，不同冻融环境条件下混凝土的耐冻融循环次数均大于 250 次，最高达 400 次；当结构的设计使用年限为 30 年时，不同冻融环境条件下混凝土的耐冻融循环次数均大于 200 次，最高达 375 次。本规范采用抗冻等级作为评定混凝土抗冻性的指标，所提出不同冻融环境条件下混凝土的抗冻性指标与《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476）基本相当。

5.4.6-5.4.7 混凝土抗裂性、护筋性和耐磨性尚缺少有效的评价指标，但对于混凝土的耐久性至关重要。因此，在混凝土配合比筛选时，要采用对比试验，比较不同配比混凝土的抗裂性、护筋性和耐磨性，从中筛选出最佳的配合比。对于特别重要的铁路混凝土工程，应开展专门的试验研究。

6.1.1 本条中所指的裂缝为荷载造成的横向裂缝，不包括收缩和温度等非荷载作用引起的裂缝。混凝土结构表面裂缝计算宽度限值主要参考了国家标准《混凝土结构设计规范》（GB50010）。控制非荷载因素引起的裂缝，应通过混凝土原材料的优选、配合比优化、精心的施工养护以及合理的构造措施等技术措施来实现。

6.2.1 降低入模温度对控制混凝土的裂缝非常重要，同样的混凝土，入模温度高的其温升值要比入模温度低的大许多。本规范规定混凝土的入模温度宜为 $5\sim30$ ，是从多年的工程实践经验中总结出来的。

为了避免混凝土早期受冻，冬期混凝土应具有一定的出机温度和入模温度。目前比较可靠的技术措施为，冬期施工混凝土的入模温度不宜低于 5 。当施工现场存在机械运输困难、运距较长等问题时，应适当提高混凝土的出机温度，以保证混凝土在运输过程中不致被冻坏。

在气温很高时，则应采取措施来降低混凝土的入模温度。夏期在降低入模温度的同时，还要冷却模板并避免混凝土表面暴晒。在高温下拌和、浇筑和养护会损害混凝土的质量和耐久性，过热会使混凝土坍落度损失过快，拌和物用水量增大。因此，夏期施工对混凝土

的最高入模温度和浇筑作业应有限制。美国垦务局规范建议，在炎热干旱气候条件下，混凝土的入模温度不宜大于 27℃，一般条件下入模温度应控制不大于 32℃，甚至规定在部分地区的酷热季节禁止浇筑混凝土。降低混凝土拌和物温度的主要措施有：用冷水或冰水拌合混凝土；冷却水泥温度；用冷却水喷洒、浸泡或冷风降低骨料温度；对搅拌和运输设备进行遮荫、隔热处理；夜间浇筑；预埋冷水管。

6.2.2 混凝土的收缩在浇筑早期最为明显，且随着龄期增长，混凝土的收缩率会逐渐减少。当新拌混凝土浇筑于已硬化的混凝土表面时，由于两种混凝土的收缩不能同步，新浇混凝土往往由于收缩受到硬化混凝土的限制而产生开裂，这种现象在两种混凝土温差过大时更为明显。因此，本规范规定混凝土的入模温度与钢模、邻接的已硬化混凝土或岩土介质间的温差不得大于 15℃。

6.2.3 混凝土养护期间，应对有代表性的结构进行温度监控，定时测定混凝土中心温度、表面温度以及环境的气温、相对湿度、风速等参数，并根据混凝土温度和环境的变化情况及时调整养护制度，严格控制混凝土的内外温差。控制混凝土的各种温差主要是为了防止过大温差会引起混凝土产生裂缝。在湿养护的同时，应该保证混凝土表面温度与内部温度和所接触的大气温度之间不出现过大的差异。采取保温和散热的综合措施，可以防止温降和温差过大。混凝土温度控制的原则是：升温不要太早和太高；降温不要太快；混凝土中心和表面之间、新老混凝土之间以及混凝土表面和大气之间的温差不要太大。温度控制的方法和制度要根据气温（季节）、混凝土内部温度、构件尺寸、约束情况、混凝土配合比等具体条件来确定。

规定了基于混凝土结构耐久性要求的混凝土保温保湿自然养护的最短时间。最为科学的方法是根据同条件下养护开始和养护结束时混凝土的强度比来确定混凝土的保温保湿养护时间，现场混凝土构件的养护方法和养护时间需要综合考虑混凝土强度等级、环境温湿度、风速、构件尺寸等。为方便起见，本规范分不同水胶比给出了不同温度、不同湿度、以及大风和大温差环境下混凝土的保湿保温养护最短时间。

6.2.4 混凝土掺加矿物掺和料后，早期的强度发展速度有所放慢，对温度和湿度的敏感程度增加，应特别注意带模养护，确保有足够的带模养护时间。混凝土带模养护期间，应采取带模包裹、浇水、喷淋洒水或通蒸汽等措施进行潮湿养护。为了保证顺利拆模，可在混凝土浇注 24h-48h 后略微松开模板，并继续浇水养护至拆模后。

6.2.5 拆模时，混凝土内部与表面的温差不能太大，否则过大的温差引气的温度应力极易

导致混凝土开裂。大风或气温急剧变化时不宜拆模。混凝土内部开始降温以前以及混凝土内部温度最高时不得拆模。拆除模板或撤除保温防护后,如表面温度骤降,混凝土就可能会产生龟裂。只有当混凝土任何部位的温度都处于逐渐下降状态时才能撤除保温防护。大体积混凝土不能降温过快,因为当混凝土内外存在温差时,表面骤冷的混凝土产生裂缝的可能性很大。

6.2.6 对预应力筋进行注浆防护对保证预应力混凝土结构的使用寿命具有重要意义。对一些预应力混凝土构件进行解体观察后发现,预应力构件破坏多源于端部预应力体系的锈蚀,而锈蚀与浆体的充盈和密实程度密切相关。因此,必须加强对混凝土预应力筋及其锚固体系的防护,而对于后张预应力结构而言,向张拉完成的预应力管道注水泥浆是一个有效的防护措施。不过水泥浆体的水化速度与温度有关,在负温条件下,水泥浆体的水化速度变缓或停滞,若此时浆体中的自由水结冰膨胀,就会在浆体中产生过大的膨胀应力,从而可能导致混凝土沿预应力方向产生裂缝。

7.1.1-7.1.5 主要是对混凝土结构的外形外观、排水、防水以及结构缝设置等做出规定,这些规定对于任何结构的设计都具有指导意义。

7.2.1 从耐久性的角度看,最外层的箍筋或分布筋应该最早受到侵蚀,箍筋的锈蚀可引起沿箍筋的环线裂缝,在箍筋的密布区域,还会发生保护层的成片剥落,所以在确定钢筋保护层的最小厚度时,应该充分考虑到最外侧的分布筋和箍筋的需要。设计人员在结构的施工图中应明确混凝土保护层厚度所指的钢筋对象(主筋、箍筋或分布筋)及保护层厚度的施工允差。鉴于主筋、箍筋和分布筋发生锈蚀的后果严重性有所不同,对于主筋的保护层最小厚度应有足够的保证。在目前的认识水平下,合理确定钢筋的保护层厚度尚不能完全依靠材料劣化模型的计算结果,主要还得依靠经验和工程判断。本规范所规定的保护层最小厚度,主要参考了国内外有关标准规范中的规定和研究成果,并通过分析比照确定,其中也结合了我国铁路工程的耐久性现状和国内外高速铁路无砟轨道工程的耐久性设计实例。

混凝土最小水胶比与混凝土保护层厚度有一定的对应关系,水胶比越小,混凝土密实度越高,其保护层厚度则可以适当降低。我国《混凝土结构设计规范》(GB50010)规定预应力筋的混凝土保护层最小厚度与普通钢筋相同,美国 AASHTO 规范也是如此。欧洲规范则要求预应力钢筋的混凝土保护层最小厚度在各种环境作用下都要比普通钢筋的混

混凝土保护层厚度大 10mm。预应力筋的锈蚀后果比较严重，如果没有护套或双重保护，其保护层厚度应该大于普通钢筋。

预应力钢筋的耐久性与不同的预应力体系有关，并在很大程度上受施工质量的影响，所以很难对预应力钢筋的混凝土保护层最小厚度提出统一的要求。在不良的环境条件下，预应力钢筋应采取双重或多道防护，除混凝土保护层外，还要有密封的护套或孔道管如高密度的塑料波纹孔道管或环氧涂层金属孔道管。对于处于氯盐环境且要求的使用年限较长的混凝土结构，还可同时采用环氧涂层预应力钢筋并在灌浆材料中加入阻锈剂。金属螺旋孔道管无密封功能，除干燥环境条件外不宜采用。无粘结预应力筋因防锈能力不甚确切，在严重腐蚀环境作用下很少采用。体外预应力钢筋便于检查和更换，是不良环境条件下比较好的一种预应力结构形式。

7.2.2~7.2.5 桥梁结构的耐久性最重要的方面是及时排水以及能够防水。这几个条文分别对桥面、墩顶、桥梁端部等的防、排水构造做出规定。在实际设计中，由于条件所限，桥涵有时需要下挖，桥涵下挖时如果不能及时排水，则对桥涵结构的耐久性会造成较大影响。

7.2.8 对于暴露在桥梁结构外的构件，一般应在设计时通过预埋构件来实现，从设计上应保证连接构件的长期可靠，同时还要保证主体构件的强度和耐久性要求。

7.2.9 目前铁路桥梁中采用的盆式橡胶支座和钢支座的使用年限均很难达到 100 年的使用年限；另外，在使用期间支座也需要维修和维护，因此，本条提出桥梁及墩台结构应具备更换支座的条件。

7.3.1 参照《地下工程防水技术规范》(GB 50108)第 4.1.7 条规定，确定迎水面钢筋保护层厚度不应小于 50mm。

7.3.3~7.3.10 本规范所指的隧道衬砌是指普通模筑衬砌，未包含预制管片及沉管衬砌。

7.4.1 U 型槽、挡土板等钢筋混凝土板式结构，其厚度应满足钢筋的混凝土保护层最小厚度的要求。

7.4.2 路基支挡结构构件间应可靠连接，如桩基托梁桩伸入托梁中的深度应不小于 5cm、桩板结构的桩应伸入托梁中的深度应不小于 10cm，桩板墙的挡土板不宜采用螺栓连接，而应采用内置式连接等。

7.5.1-7.5.6 本规范所指的无砟轨道结构主要是指目前应用相对成熟的板式无砟轨道、双块

式无砟轨道、岔区长枕埋入式无砟轨道和岔区板式无砟轨道。无砟轨道结构的耐久性设计包括无砟轨道的内在因素和外部环境两方面,主要应考虑以下几方面因素:材料的配合比、混凝土的劣化、钢筋的锈蚀、结构的疲劳强度、结构的裂缝宽度以及系统防排水等。无砟轨道应进行系统防排水设计,防止或降低水对混凝土耐久性的影响,严禁无砟轨道结构长期处于浸水环境中。设计时应充分考虑列车动荷载、温度荷载、混凝土的收缩徐变、线下基础的变形等因素对无砟轨道结构耐久性的影响。

8.0.1 在严重腐蚀环境下,仅靠提高混凝土保护层材料的质量与厚度,是无法保证混凝土结构在设计使用年限内安全服役的,必须采取一种或多种防腐蚀强化措施。

8.0.2 不同环境作用下混凝土劣化的机制是不同的,不同结构部位对混凝土防腐蚀强化措施的要求亦不相同,因此,设计时应根据工程实际情况来选择混凝土结构的防腐蚀强化措施。

8.0.3 目前防腐蚀强化措施种类繁多,也缺少统一的检测标准。选择防腐蚀强化措施时,应明确其材料的性能、检测方法及其有效防护年限。

9.0.1~9.0.5 检查与维修是结构耐久性设计的延续,也是确保铁路工程在设计使用年限内安全服役的关键因素之一。因此,在耐久性设计时,应根据铁路工程的重要性,明确混凝土结构的维修周期、维修内容以及维修方法。

影响混凝土结构耐久性的因素非常复杂,且有的因素不可预见。在设计阶段往往难以准确估计工程竣工后混凝土材料的实际质量以及所处环境的实际作用程度。要比较可靠地估计结构的使用年限,还必须依靠采用结构使用过程中的现场实测结果进行推断。对氯盐等严重环境作用下的结构,必须进行定期检测,力争早期发现问题,在钢筋尚未普遍锈蚀前及早采取补救措施。依靠目测发现顺筋开裂往往已为时过晚,需付出更大的代价。因此,应在设计阶段对混凝土结构的检测与维修做出明确规定。如规定在竣工后每隔1~2年连续几次测试保护层不同深度上的氯离子浓度分布,求出随时间变化的氯离子表观扩散系数,从而进一步估计可能的使用年限。

鉴于重要工程和处于严重腐蚀环境中混凝土结构可更换性与可修复性差的特点,在条件许可的情况下,可引入全寿命周期的设计理念,在设计阶段给出使用过程的详细监测规划。对于重要工程和处于严重腐蚀环境中的混凝土结构,除规定结构定期检测外,还应在设计中对结构的跟踪调查和检测内容(包括使用状态、环境条件、结构实体性能以及耐久

性状况)作出明确规定,并应根据实测的材料劣化数据和保护层厚度变化,对结构的剩余寿命作出评估,必要时,应及时采取防腐蚀强化措施。