

客专耐久性混凝土的技术要求和施工要点

摘要: 客运专线对混凝土施工和耐久性混凝土的性能提出了很高的要求, 在新的设计暂行规定、验收标准、施工指南中都对耐久性混凝土的技术要求有明确的规定; 施工中尤其要重视原材料的选择和混凝土搅拌、灌注等工艺上与传统混凝土的区别, 要重点把握施工要点。

关键词: 客运专线 混凝土 耐久性 施工技术

1 耐久性混凝土的技术要点

混凝土结构耐久性是指在预定作用和预期的维护与使用条件下, 结构及其部件能在预定的期限内维持其所需的最低性能要求的能力。设计人员依据足够安全度或保证率的目标使用年限作为结构耐久性设计目标值。在耐久性混凝土配合比设计中, 用于配制混凝土的水泥与粉煤灰、矿渣粉和硅灰等活性矿物掺和料的胶凝材料总量(混凝土中的总碱含量)和水胶比是控制的关键因素。混凝土在 60 V 直流恒压作用下 6 h 内通过混凝土的电通量, 以及钢筋的混凝土保护层最小厚度是判断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可能性的指标之一。

1. 1 基本技术要求

(1)铁路混凝土结构耐久性设计应包括以下内容: 结构及主要可更换部件的设计使用年限; 结构所处的环境类别及其作用等级; 结构耐久性要求的混凝土原材料品质、配合比参数限值以及耐久性指标要求; 结构耐久性要求的构造措施(包括钢筋的混凝土保护层厚度); 与结构耐久性有关的主要施工控制要求; 严重腐蚀环境条件下采取的附加防腐蚀措施; 与结构耐久性有关的跟踪检测要求; 与结构耐久性有关的养护维修要求。

(2)铁路混凝土结构设计使用年限级别可根据设计使用年限按下

表进行划分：一级：100年；二级：60年；三级：30年。新建铁路客运专线均按100年要求进行设计。

(3)铁路混凝土结构所处环境类别分为碳化环境等级分为：T1、T2、T3级；氯盐环境等级分为：u、L1、L2、L3级；化学侵蚀环境等级分为：H1、H2、H3、H4级；冻融破坏环境等级分为：D1、D2、D3级；环境等级分为：M1、M2、M3级。

1.2 混凝土耐久性指标

混凝土的耐久性指标一般是指混凝土的抗裂性、护筋性、耐蚀性、抗冻性、耐磨性及抗碱—骨料反应性等。具体的混凝土耐久性指标应根据结构的设计使用年限、所处的环境类别及作用等级等确定。混凝土的耐久性一般要求其电通量应满足表1的规定；对混凝土应进行抗裂性对比试验；钢筋的混凝土保护层厚度除遵守现行铁路工程有关专业标准的规定外，离混凝土表面最近的普通钢筋(主筋、箍筋和分布筋)的混凝土保护层厚度 c (钢筋外缘至混凝土表面的距离)应不小于表2规定的最小厚度 c_{\min} 与混凝土保护层厚度施工允许偏差负值 Δ 之和；骨料的碱—硅酸反应砂浆棒膨胀率或碱—碳酸盐反应岩石柱膨胀率应小于0.10%；当骨料的碱—硅酸反应砂浆棒膨胀率在0.10%—0.20%时，混凝土中的碱含量应满足表3的规定；当骨料的砂浆棒膨胀率在0.20%—0.30%时，还应在混凝土中掺加具有明显抑制效能的矿物掺和料和外加剂，并经试验证明抑制有效。氯盐环境下的钢筋混凝土结构还应满足下表4的规定；化学侵蚀环境下的混凝土结构，混凝土的耐久性除应满足1.3.2条的规定外，还应满足表5的规定；冻融破坏环境下的混凝土结构应满足表6的规定。磨蚀环境下的混凝土结构还应进行混凝土耐磨性对比试验。

表1 混凝土的电通量

表1 混凝土的电通量

设计使用年限级别	一(100年)	二(60年)	三(30年)
电通量(56d), C			
< C30	< 2000	< 2500	< 2500
C30 ~ C45	< 1500	< 2000	< 2000
≥ C50	< 1000	< 1500	< 1500

表2 普通钢筋的混凝土保护层最小厚度 C_{\min}/mm

结构类别	设计使用年限	碳化环境			氯盐环境			磨蚀环境			冻融破坏环境				化学侵蚀环境			
		T1	T2	T3	L1	L2	L3	M1	M2	M3	D1	D2	D3	D4	H1	H2	H3	H4
桥梁涵洞	100年	35	35	45	45	50	60	35	40	45	35	45	50	60	35	45	50	60
隧道衬砌	100年	35	35	40	40	45	55	—	—	—	35	40	45	55	30	40	45	55
路基支挡	60年	20	20	30	30	40	50	25	25	35	25	30	40	50	25	30	40	50
	100年	30	30	40	40	45	55	30	35	40	30	40	45	55	30	40	45	55

表3 混凝土最大碱含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

使用年限级别	一(100年)	二(60年)	三(30年)
环境条件			
干燥环境	3.5	3.5	3.5
潮湿环境	3.0	3.0	3.0
含碱环境	*	3.0	3.0

表4 氯盐环境下混凝土的电通量

设计使用年限级别	一(100年)	二(60年)	三(30年)
环境作用等级	L1	L2、L3	L1
电通量(56d), C	< 1000	< 800	< 1500

表5 化学侵蚀环境下混凝土的电通量

设计使用年限级别	一(100年)	二(60年)	三(30年)
环境作用等级	H1、H2	H3、H4	H1、H2
电通量(56d), C	< 1200	< 1000	< 1500

表6 冻融破坏环境下混凝土的抗冻性

设计使用年限级别	一(100年)	二(60年)	三(30年)
环境作用等级	D1、D2、D3、D4	D1、D2、D3、D4	D1、D2、D3、D4
抗冻等级(56d)	≥ F300	≥ F250	≥ F200

1.3 混凝土配合比一般规定 C30 及以下混凝土的胶凝材料总量

不宜高于 $400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ，C35—C40混凝土不宜高于 $450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ，C50及以上混凝土不宜高于 $500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 。混凝土中宜适量掺加符合技术要求的粉煤灰、矿渣粉或硅灰等矿物掺和料，不同矿物掺和料的掺量应根据混凝土的施工环境条件特点、拌和物性能、力学性能以及耐久性要求通过试验确定；一般情况下，矿物掺和料掺量不宜小于胶凝材料总量的20%。当混凝土中粉煤灰掺量大于30%时，混凝土的水胶比不宜大于0.45；预应力混凝土以及处于冻融环境中的混凝土的粉煤灰的掺量不宜大于30%。混凝土中宜适量掺加能提高混凝土耐久性能的外加剂，宜选用多功能复合外加剂。不同环境条件下钢筋混凝土结构的混凝土最大水胶比、最小胶凝材料用量应满足表7的规定。不同环境条件下素混凝土结构的混凝土最大水胶比、最小胶凝材料用量应满足表8的规定。当化学侵蚀介质为硫酸盐时，除了配合比参数应满足表7、8的规定外，硫酸盐侵蚀环境下混凝土的胶凝材料的组成还应满足表9的规定，胶凝材料的抗蚀系数应不小于0.8。

表 7 混凝土的最大水胶比和最小胶凝材料用量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别					
		—(100 年)		二(60 年)		三(30 年)	
碳化环境	T1	0.55	280	0.60	260	0.65	260
	T2	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	T3	0.45	320	0.50	300	0.50	300
氯盐环境	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
化学侵蚀环境	H1	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	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
冻融破坏环境	D1	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	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
磨蚀环境	M1	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	M2	0.45	320	0.45	300	0.50	300
	M3	0.40	340	0.45	320	0.45	320

表8 混凝土的最大水胶比和最小胶凝材料用量/kg·m⁻³

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别					
		一(100年)		二(60年)		三(30年)	
碳化环境	T1,T2,T3	0.60	280	0.65	260	0.65	260
氯盐环境	L1,L2,L3	0.60	280	0.65	260	0.65	260
化学侵蚀环境	H1	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	H2	*	*	0.50	300	0.50	300
	H3	*	*	*	*	*	*
	H4	*	*	*	*	*	*
冻融破坏环境	D1	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	D2	*	*	0.50	300	0.50	300
	D3	*	*	*	*	*	*
	D4	*	*	*	*	*	*
磨蚀环境	M1	0.55	280	0.60	260	0.65	260
	M2	0.50	300	0.55	280	0.60	260
	M3	*	*	0.50	300	0.50	300

注：“*”号表示不宜采用素混凝土结构。

表9 硫酸盐侵蚀环境下混凝土胶凝材料的要求

环境作用等级	水泥品种	水泥熟料中的C ₃ A含量/(%)	粉煤灰或矿渣粉的掺量/(%)	最小胶凝材料用量/kg·m ⁻³
H1	普通硅酸盐水泥	≤8	≥20	300
	中抗硫酸盐硅酸盐水泥	≤5	/	300
H2	普通硅酸盐水泥	≤8	≥25	330
	中抗硫酸盐硅酸盐水泥	≤5	≥20	300
	高抗硫酸盐硅酸盐水泥	≤3	/	300
H3,H4	普通硅酸盐水泥	≤6	≥30	360
	中抗硫酸盐硅酸盐水泥	≤5	≥25	360
	高抗硫酸盐硅酸盐水泥	≤3	≥20	360

2 耐久性混凝土施工要点

2.1 耐久性混凝土材料的选用水泥应满足以下要求：一般应采用品质稳定的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，其强度等级宜为42.5；硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥中的C₃A含量一般不宜超过8%，水泥细度(比表面积)不超过350m²/kg，游离氧化钙不超过1.5%。为改善混凝土的抗裂性，水泥的含碱量(按Na₂O

当量计)不宜超过水泥质量的 0.6%，或混凝土内的总含碱量(包括所有原材料)应不超过 $3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。骨料应满足以下要求：质地均匀坚固、粒形和级配良好、吸水率低、空隙率小(粗骨料的松散堆积密度一般应大于 $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，空隙率应小于 40%；对不同细度模数的沙子，控制 5 mm、0.63 mm 和 0.16 mm 筛的累计筛余量分别为 0~5%、40%~70%和 $\geq 90\%$)；粗骨料的压碎指标不大于 7%，吸水率不大于 2%，针片状颗粒不宜超过 5%。用于高抗冻混凝土的粗骨料吸水率不宜大于 1%；处于冻融循环下的混凝土，宜进行骨料的坚固性试验，坚固性试验的失重率应小于 5%(细骨料)和 8%(粗骨料)；对于可能处于干湿交替、冻融循环下的混凝土，粗、细骨料中的含泥量应分别低于 0.7%和 1%；粗、细骨料中的水溶性氯化物折合氯离子含量均不应超过骨料质量的 0.02%；氯盐环境作用下的混凝土，不宜采用抗渗透性较差的岩质(如花岗岩、砂岩)作为粗、细骨料；粗骨料的最大公称粒径不宜超过 25 mm，且不应超过保护层厚的 $2/3$ ；衬砌结构采用钢筋混凝土时应严禁使用海砂；使用骨料前应了解当地供应的骨料有无潜在活性，对于地下水发育的隧道工程，使用的骨料应通过专门的验证。化学外加剂应符合以下要求：各种外加剂应有厂商提供的推荐掺量与相应减水率、主要成分(包括复配组分)的化学名称、氯离子含量、含碱量以及施工中必要的注意事项(如超量或欠量使用时的有害影响、掺和方法 and 成功的使用证明等)；当混合使用高效减水剂、引气剂、缓凝剂、膨胀剂、阻锈剂及其他防腐剂时，应事先专门测定它们之间的相容性；外加剂的氯离子含量不得大于混凝土中胶凝材料总重的 0.02%，高效减水剂中的硫酸钠含量不宜大于减水剂干重的 15%；氯化钙不应作为混凝土的外加剂使用；各种阻锈剂的长期有效性需经检验，一般不使用亚硝酸

钠类阻锈剂。拌和用水应符合现行标准的有关规定：配筋混凝土不得采用海水作为拌和水；当混凝土可能处于氯盐腐蚀性环境时，混凝土拌和用水中得氯离子含量不宜大于 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。矿物掺和料必须品质合格、来料均匀、来源固定，掺和料的掺量应根据设计对混凝土各龄期强度、混凝土的工作性和耐久性以及施工条件和工作特点(如环境气温、混凝土拌和物温度、构件尺寸等)而定；矿物掺和料中不应含有放射性物质、可溶性(包括可升华而释放的)有毒物质或对混凝土性质有害的物质，并应有相应的检验证明和生产厂家出具的产品检验合格证书；矿物掺和料宜使用两种或两种以上的掺和料复合而成的磨细矿物掺和料。

2. 2 耐久性混凝土配合比设计硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥宜与矿物掺和料一起使用。硫酸盐等化学腐蚀介质作用下的混凝土不宜单独使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥作为胶凝材料，应在硅酸盐水泥中加入大掺量的矿物掺和料。对于硫酸盐环境所需使用硅酸盐类的抗硫酸盐水泥，也需掺有矿物掺和料。在极其严重的硫酸盐腐蚀环境下则不能使用硅酸盐类水泥，而应代之以其他类型的水泥并通过试验验证。氯盐环境下的配筋混凝土应采用较大掺量矿物掺和料的低水胶比混凝土，单掺粉煤灰时的掺量不宜小于 25%(如有抗冻性要求时，粉煤灰掺量不宜大于 30%)；单掺磨细矿渣时的掺量不宜小于 50%，且宜复合使用粉煤灰加硅灰、粉煤灰加矿渣或两种以上的矿物掺和料。

2. 3 耐久性混凝土的施工耐久性混凝土施工过程中施工单位、监理单位应各自委派专人负责记录混凝土运送到工地的时间和出机坍落度、浇筑时间和浇筑时的坍落度、浇筑时洞内温度与混凝土浇筑温度、浇筑段长度、浇筑高度的控制以及养护方式、养护过程，包括

养护开始时间、养护中的衬砌表面温度与降温速率、拆模时间与拆模时洞内温度等。耐久性混凝土的早期强度，在不掺缓凝剂的情况下，要求12小时抗压强度不大于6 MPa或24小时不大于10 MPa。耐久性混凝土施工过程中如果出现裂缝，要记录裂缝出现的时间、部位、尺寸和处理等情况。拆模后应对渗漏水部位进行衬砌内注浆，并对渗水部位混凝土裂纹进行处理，对0.2 mm以下的细小裂纹，采取密封剂封闭裂纹；对于裂纹宽度大于0.2 mm的裂缝，采用压注注缝胶修补。必要时对裂缝部位混凝土表面实行涂膜封闭。钢筋保护层及钢筋的定位宜采用工程塑料制作的保护层定位夹或定型生产的纤维砂浆块。当使用细石混凝土垫块定位保护层厚度时，垫块的尺寸和形状宜为工字形或锥形，垫块的强度应高于衬砌结构本体强度，水胶比不大于0.4；衬砌结构两侧面和底面的垫块应至少4个/m，绑扎垫块和钢筋的铁丝头不得伸入保护层内。耐久性混凝土的搅拌宜采用卧轴式、行星式或逆流式搅拌机并严格控制搅拌时间。混凝土的入模温度应视洞内温度而调整，混凝土的入模温度应控制在25℃以下。施工过程中要估计混凝土温度与拉应力的变化，提出混凝土温度的控制值，并在施工养护过程中实际测定关键截面的中部点温度和离表面约5 cm深处的表层温度(包括仰拱和底板)，实行严格的温度控制。衬砌结构任一截面在任一时间内的内部最高温度与表层温度之差一般不大于20℃，新浇筑混凝土与上一区段衬砌混凝土或围岩之间的温差不大于20%，洒于混凝土表面的养护水温度低于混凝土表面温度的差值不大于15℃，混凝土的降温速率最大不宜超过3℃·d⁻¹。混凝土泵送的坍落度不宜过大以避免离析或泌水。如发现坍落度不足，不得擅自加水，应当在技术人员的指导下用追加减水剂的方法解决。插入式振动棒需变换其在混凝土中的位置时，应竖向缓慢拔出，不得在混

凝土浇筑仓内平拖。泵送下料口应及时移动，不得用插入式振动棒平拖驱赶下料口处堆积的拌和物将其推向远处。混凝土强度应达到 8.0 MPa 以上方能拆模。耐久性混凝土洒水养护时间不得少于 14 d，整个养护期内不得间断。当采用养护剂养护时，养护剂应符合《水泥混凝土养护剂》(JC 901)规定。

参考文献

- [1]《铁路混凝土工程施工质量验收补充标准》铁建设函[2005]160号. 北京：中国铁道出版社出版，2005.
- [2]《铁路隧道工程质量检验评定标准》TB 10417---98. 北京：中国铁道出版社出版，1998.
- [3]《铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定》铁建设函[2005]157号. 北京：中国铁道出版社出版，2005.
- [4]《铁路混凝土与砌体工程施工质量验收标准》(TB 10424—2003). 北京：中国铁道出版社出版. 2003.