

中国工程建设标准化协会标准

高性能混凝土应用技术规程

Technical specification for application of high
performance concrete

CECS 207 : 2006

主编单位：清华大学老科技工作者协会
北京交通大学土建学院

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2006年11月1日

中国计划出版社

2006 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会(2002)建标协字第 12 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 2002 年第一批标准制、修订项目计划的通知》的要求,制定本规程。

本规程所指的高性能混凝土是具有混凝土结构所要求的各项力学性能,且具有高工作性、高耐久性和高体积稳定性的混凝土。

本规程是在广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准 and 国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上编制而成的。主要内容包括关于高性能混凝土的基本规定,原材料,配合比设计,施工及验收。

根据国家计委计标[1986]1649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求,现批准发布协会标准《高性能混凝土应用技术规程》,编号为 CECS 207:2006,推荐给工程建设设计、施工和使用单位采用。

本规程由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会 CECS/TC 5 归口管理,由清华大学老科技工作者协会(北京海淀区清华大学,邮编 100084)负责解释。在使用中如发现需要修改和补充之处,请将意见和资料径寄解释单位。

主 编 单 位: 清华大学老科技工作者协会
北京交通大学土建学院

参 编 单 位: 中建一局
中建三局
中国建筑科学研究院
中冶集团建筑研究总院

南京水利科学研究院
重庆交通大学
中国建筑材料科学研究院
辽宁省建设科学研究院
石家庄建工集团有限公司
山东恒建工程监理咨询有限公司
大连理工大学

主要起草人：冯乃谦 朋改非 石云兴 冷发光 郝挺宇
丁建彤 顾晴霞 邸小坛 杨德斌 王 玲
田 培 陈翠红 刘福生 张树河 牛全林
王立久

中国工程建设标准化协会
2006年10月8日

目 次

1	总 则	(1)
2	术 语	(2)
3	基本规定	(4)
4	原材料	(5)
4.1	水泥	(5)
4.2	骨料	(5)
4.3	矿物微细粉	(6)
4.4	化学外加剂	(6)
4.5	拌合用水	(7)
5	配合比设计	(8)
5.1	一般规定	(8)
5.2	高性能混凝土配合比设计	(8)
5.3	抗碳化耐久性设计	(8)
5.4	抗冻害耐久性设计	(9)
5.5	抗盐害耐久性设计	(10)
5.6	抗硫酸盐腐蚀耐久性设计	(11)
5.7	抑制碱-骨料反应有害膨胀	(12)
6	施工及验收	(14)
6.1	原材料管理	(14)
6.2	高性能混凝土拌制	(14)
6.3	工作性检验	(15)
6.4	高性能混凝土运输	(15)
6.5	高性能混凝土浇注	(16)
6.6	高性能混凝土养护	(17)

6.7 质量验收	(17)
附录 A 混凝土抗除冰盐冻融试验方法	(18)
附录 B 混凝土抗氯离子渗透性试验方法	(20)
附录 C 水泥和混凝土抗硫酸盐腐蚀检测方法	(23)
附录 D 碱含量计算方法	(25)
附录 E 砂浆棒法快速检测骨料碱活性	(26)
附录 F 骨料碱-碳酸盐反应活性试验方法 (混凝土柱法)	(28)
附录 G 矿物微细粉抑制碱-硅反应效果检测方法 (玻璃砂浆棒法)	(31)
本规程用词说明	(33)
附:条文说明	(35)

1 总 则

1.0.1 为了促进高性能混凝土在工程中合理应用,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保工程质量,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于普通混凝土结构;不适用于轻骨料混凝土、聚合物混凝土、沥青混凝土、水工大体积混凝土和有特殊要求的混凝土结构。

1.0.3 高性能混凝土应用于建设工程时,除执行本规程外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 高性能混凝土 high performance concrete

采用常规材料和工艺生产,具有混凝土结构所要求的各项力学性能,且具有高耐久性、高工作性和高体积稳定性的混凝土。

2.0.2 混凝土耐久性 durability of concrete

混凝土在所处工作环境下,长期抵抗内、外部劣化因素的作用,仍能维持其应有结构性能的能力。

2.0.3 劣化现象 degradation phenomenon

由内、外部劣化因素引起的混凝土结构性能随时间逐渐降低的现象。

2.0.4 外部劣化因素 external worsening factors

导致混凝土和混凝土结构性能降低的外部环境原因。

2.0.5 内部劣化因素 internal worsening factors

导致混凝土和混凝土结构性能降低的内在原因。

2.0.6 容许劣化状态 degradation allowance

随着混凝土结构性能降低而出现的劣化状态中,尚能满足结构正常使用要求的最低性能状况。

2.0.7 混凝土工作性 workability of concrete

混凝土适宜于施工操作、满足施工要求的性能的总称。

2.0.8 混凝土体积稳定性 volume stability of concrete

混凝土初凝后,能抵抗收缩或膨胀而保持原有体积的性能。

2.0.9 混凝土力学性能 mechanical properties of concrete

混凝土强度和受力变形性能的总称。

2.0.10 矿物微细粉 mineral micro-powders

平均粒径不大于 $10\mu\text{m}$ 、具有潜在水硬性或火山灰活性的矿物质粉体材料。

3 基本规定

3.0.1 高性能混凝土必须具有设计要求的强度等级,在设计使用年限内必须满足结构承载和正常使用功能要求。

3.0.2 高性能混凝土应针对混凝土结构所处环境和预定功能进行耐久性设计。应选用适当的水泥品种、矿物微细粉,以及适当的水胶比,并采用适当的化学外加剂。

3.0.3 处于多种劣化因素综合作用下的混凝土结构宜采用高性能混凝土。根据混凝土结构所处的环境条件,高性能混凝土应满足下列一种或几种技术要求:

- 1 水胶比不大于 0.38;
- 2 56d 龄期的 6h 总导电量小于 1000C;
- 3 300 次冻融循环后相对动弹性模量大于 80%;
- 4 胶凝材料抗硫酸盐腐蚀试验的试件 15 周膨胀率小于 0.4%,混凝土最大水胶比不大于 0.45;
- 5 混凝土中可溶性碱总含量小于 3.0kg/m³。

3.0.4 高性能混凝土在脱模后,宜以塑料薄膜覆盖,保持表面潮湿,进行保湿养护。

4 原 材 料

4.1 水 泥

4.1.1 在一般情况下,高性能混凝土不得采用立窑水泥。高性能混凝土采用的水泥必须符合下列现行国家标准的规定:

- 1 《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》GB 175;
- 2 《矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥》GB 1344;
- 3 《复合硅酸盐水泥》GB 12958;
- 4 《中热硅酸盐水泥 低热硅酸盐水泥 低热矿渣硅酸盐水泥》GB 200;
- 5 《抗硫酸盐硅酸盐水泥》GB 748。

4.2 骨 料

4.2.1 高性能混凝土采用的细骨料应选择质地坚硬、级配良好的中、粗河砂或人工砂。其性能指标应符合现行行业标准《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》JGJ 52 的规定。

4.2.2 配制 C60 以上强度等级高性能混凝土的粗骨料,应选用级配良好的碎石或碎卵石。岩石的抗压强度与混凝土的抗压强度之比不宜低于 1.5,或其压碎值 Q_a 宜小于 10%。

粗骨料的粒径不宜大于 25mm。宜采用 15~25mm 和 5~15mm 两级粗骨料配合。

粗骨料中针片状颗粒含量应小于 10%,且不得混入风化颗粒。粗骨料的性能指标应符合现行行业标准《普通混凝土用碎石和卵石质量标准及检验方法》JGJ 53 的规定。

4.2.3 在一般情况下,不宜采用碱活性骨料。当骨料中含有潜在

的碱活性成分时,必须按附录 D、附录 E 的规定检验骨料的碱活性,并采取预防危害的措施。

4.3 矿物微细粉

4.3.1 矿物微细粉宜采用硅粉、粉煤灰、磨细矿渣粉、天然沸石粉、偏高岭土粉以及其复合微细粉等。

4.3.2 所选用的矿物微细粉必须对混凝土和钢材无害。

4.3.3 所选用的矿物微细粉应符合下列标准的质量要求:

1 《粉煤灰混凝土应用技术规程》GBJ 146,宜选用 I 级粉煤灰;当采用 II 级粉煤灰时,应先通过试验证明能达到所要求的性能指标,方可采用:

2 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596;

3 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046;

4 《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736;

5 《混凝土与砂浆用天然沸石粉》JG/T 3048;

6 《天然沸石粉在混凝土和砂浆中应用技术规程》JGJ/112。

4.3.4 高性能混凝土中,矿物微细粉等量取代水泥的最大用量宜符合下列要求:

1 硅粉不大于 10%;粉煤灰不大于 30%;磨细矿渣粉不大于 40%;天然沸石粉不大于 10%;偏高岭土粉不大于 15%;复合微细粉不大于 40%。

2 当粉煤灰超量取代水泥时,超量值不宜大于 25%。

4.4 化学外加剂

4.4.1 高性能混凝土中采用的外加剂,必须符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的规定,并应对混凝土和钢材无害。所采用的减水剂宜为高效减水剂,其减水率不宜低于 20%。

4.5 拌合用水

4.5.1 高性能混凝土的拌合和养护用水,必须符合现行行业标准《混凝土拌合用水标准》JGJ 63 的规定。

5 配合比设计

5.1 一般规定

5.1.1 高性能混凝土的配合比设计应根据混凝土结构工程的要求,确保其施工要求的工作性,以及结构混凝土的强度和耐久性。

5.1.2 耐久性设计应针对混凝土结构所处外部环境中劣化因素的作用,使结构在设计使用年限内不超过容许劣化状态。

5.2 高性能混凝土配合比设计

5.2.1 高性能混凝土的试配强度应按下式确定:

$$f_{cu,o} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (5.2.1)$$

式中 $f_{cu,o}$ ——混凝土试配强度(MPa);

$f_{cu,k}$ ——混凝土强度标准值(MPa);

σ ——混凝土强度标准差,当无统计数据时,对商品混凝土可取 4.5MPa。

5.2.2 高性能混凝土的单方用水量不宜大于 175kg/m³;胶凝材料总量宜采用 450~600kg/m³,其中矿物微细粉用量不宜大于胶凝材料总量的 40%;宜采用较低的水胶比;砂率宜采用 37%~44%;高效减水剂掺量应根据坍落度要求确定。

5.3 抗碳化耐久性设计

5.3.1 高性能混凝土的水胶比宜按下式确定:

$$\frac{W}{B} \leq \frac{5.83c}{\alpha \times \sqrt{t}} + 38.3 \quad (5.3.1)$$

式中 $\frac{W}{B}$ ——水胶比(%);

- c ——钢筋的混凝土保护层厚度(cm)；
 α ——碳化区分系数，室外取 1.0，室内取 1.7；
 t ——设计使用年限(年)。

5.4 抗冻害耐久性设计

5.4.1 冻害地区可分为微冻地区、寒冷地区、严寒地区。应根据冻害设计外部劣化因素的强弱，按表 5.4.1 的规定确定水胶比的最大值。

表 5.4.1 不同冻害地区或盐冻地区混凝土水胶比最大值

外部劣化因素	水胶比(W/B)最大值
微冻地区	0.50
寒冷地区	0.45
严寒地区	0.40

5.4.2 高性能混凝土的抗冻性(冻融循环次数)可采用现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GBJ 82 规定的快冻法测定。应根据混凝土的冻融循环次数按下式确定混凝土的抗冻耐久性指数，并符合表 5.4.2 的要求：

$$K_m = \frac{PN}{300} \quad (5.4.2)$$

式中 K_m ——混凝土的抗冻耐久性指数；

N ——混凝土试件冻融试验进行至相对弹性模量等于 60%时的冻融循环次数；

P ——参数，取 0.6。

表 5.4.2 高性能混凝土的抗冻耐久性指数要求

混凝土结构所处环境条件	冻融循环次数	抗冻耐久性指数 K_m
严寒地区	≥ 300	≥ 0.8
寒冷地区	≥ 300	0.60~0.79
微冻地区	所要求的冻融循环次数	< 0.60

5.4.3 高性能混凝土抗冻性也可按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GBJ 82 规定的慢冻法测定。

5.4.4 受海水作用的海港工程混凝土的抗冻性测定时，应以工程所在地的海水代替普通水制作混凝土试件。当无海水时，可用

3.5%的氯化钠溶液代替海水,并按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GBJ 82 规定的快冻法测定。抗冻耐久性指数可按式(5.4.2)确定,并应符合表 5.4.2 的要求。

5.4.5 受除冰盐冻融作用的高速公路混凝土和钢筋混凝土桥梁混凝土,其抗冻性的测定可按附录 A 的规定进行。测定盐冻前后试件单位面积质量的差值后,可按下式评价混凝土的抗盐冻性能:

$$Q_s = \frac{M}{A} \quad (5.4.5)$$

式中 Q_s ——单位面积剥蚀量(g/m^2);

M ——试件的总剥蚀量(g);

A ——试件受冻面积(m^2);

设计时,应确保混凝土在工程要求的冻融循环次数内,满足 $Q_s \leq 1500\text{g}/\text{m}^2$ 的要求。

5.4.6 高性能混凝土的骨料除应满足第 4.2 节的规定外,其品质尚应符合表 5.4.6 的要求。

表 5.4.6 骨料的品质要求

混凝土结构 所处环境	细骨料		粗骨料	
	吸水率(%)	坚固性试验质量损失 (%)	吸水率(%)	坚固性试验质量损失 (%)
微冻地区	≤ 3.5	≤ 10	≤ 3.0	≤ 12
寒冷地区	≤ 3.0		≤ 2.0	
严寒地区				

5.4.7 对抗冻性混凝土宜采用引气剂或引气型减水剂。当水胶比小于 0.30 时,可不掺引气剂;当水胶比不小于 0.30 时,宜掺入引气剂。经过试验检定,高性能混凝土的含气量应达到 4%~5% 的要求。

5.5 抗盐害耐久性设计

5.5.1 抗盐害耐久性设计时,对海岸盐害地区,可根据盐害外部

劣化因素分为：准盐害环境地区（离海岸 250~1000m）；一般盐害环境地区（离海岸 50~250m）；重盐害环境地区（离海岸 50m 以内）。盐湖周边 250m 以内范围也属重盐害环境地区。

5.5.2 高性能混凝土中氯离子含量宜小于胶凝材料用量的 0.06%，并应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

5.5.3 在盐害地区，高耐久性混凝土的表面裂缝宽度宜小于 $c/30$ （ c —混凝土保护层厚度，mm）。

5.5.4 高性能混凝土抗氯离子渗透性、扩散性，应以 56d 龄期、6h 的总导电量(C)确定，其测定方法应符合附录 B 的规定。根据混凝土电导量和抗氯离子渗透性，可按表 5.5.4 进行混凝土定性分类。

表 5.5.4 根据混凝土导电量试验结果对混凝土的分类

6h 导电量(C)	氯离子渗透性	可采用的典型混凝土种类
2000~4000	中	中等水胶比(0.40~0.60)普通混凝土
1000~2000	低	低水胶比(<0.40)普通混凝土
500~1000	非常低	低水胶比(<0.38)含矿物微细粉混凝土
<500	可忽略不计	低水胶比(<0.30)含矿物微细粉混凝土

5.5.5 混凝土的水胶比应按混凝土结构所处环境条件采用(表 5.5.5)。

表 5.5.5 盐害环境中混凝土水胶比最大值

混凝土结构所处环境	水胶比最大值
准盐害环境地区	0.50
一般盐害环境地区	0.45
重盐害环境地区	0.40

5.6 抗硫酸盐腐蚀耐久性设计

5.6.1 抗硫酸盐腐蚀混凝土采用的水泥，其矿物组成应符合

C₃A 含量小于 5%、C₃S 含量小于 50% 的要求；其矿物微细粉应选用低钙粉煤灰、偏高岭土、矿渣、天然沸石粉或硅粉等。

5.6.2 胶凝材料的抗硫酸盐腐蚀性应按附录 C 规定的方法进行检测，并按表 5.6.2 评定。

表 5.6.2 胶砂膨胀率、抗蚀系数抗硫酸盐性能评定指标

试件膨胀率	抗蚀系数	抗硫酸盐等级	抗硫酸盐性能
>0.4%	<1.0	低	受腐蚀
0.4%~0.35%	1.0~1.1	中	耐腐蚀
0.34%~0.25%	1.2~1.3	高	抗腐蚀
≤0.25%	>1.4	很高	高抗腐蚀

注：检验结果如出现试件膨胀率与抗蚀系数不一致的情况，应以试件的膨胀率为准。

5.6.3 抗硫酸盐腐蚀混凝土的最大水胶比宜按表 5.6.3 确定。

表 5.6.3 抗硫酸盐腐蚀混凝土的最大水胶比

劣化环境条件	最大水胶比
水中或土中 SO ₄ ²⁻ 含量大于 0.2% 的环境	0.45
除环境中含有 SO ₄ ²⁻ 外，混凝土还采用含有 SO ₄ ²⁻ 的化学外加剂	0.40

5.7 抑制碱-骨料反应有害膨胀

5.7.1 混凝土结构或构件在设计使用期限内，不应因发生碱-骨料反应而导致开裂和强度下降。

5.7.2 为预防碱-硅反应破坏，混凝土中碱含量不宜超过表 5.7.2 的要求，碱含量的计算宜按附录 D 的规定进行。

表 5.7.2 预防碱-硅反应破坏的混凝土碱含量

环境条件	混凝土中最大碱含量(kg/m ³)		
	一般工程结构	重要工程结构	特殊工程结构
干燥环境	不限制	不限制	3.0
潮湿环境	3.5	3.0	2.1
含碱环境	3.0	采用非碱活性骨料	

5.7.3 检验骨料的碱活性，宜按附录 E 和附录 F 的规定进行。

5.7.4 当骨料含有碱-硅反应活性时,应掺入矿物微细粉,并宜采用玻璃砂浆棒法(附录 G)确定各种微细粉的掺量及其抑制碱-硅反应的效果。

当骨料中含有碱-碳酸盐反应活性时,应掺入粉煤灰、沸石与粉煤灰复合粉、沸石与矿渣复合粉或沸石与硅复合粉等,并宜采用小混凝土柱法确定其掺量(附录 F)和检验其抑制效果。

6 施工及验收

6.1 原材料管理

6.1.1 原材料应按本规程第4章的质量要求采用。宜在相对固定的、具有一定规模的供应网点采购。进场材料应经材料管理人员和质量管理人员取样检验合格,并办理交验手续后方可使用。

6.1.2 各种原材料应在固定的堆放地点存放、并有明确的标志,标明材料名称、品种、生产厂家和生产(或进场)日期,避免误用。粗、细骨料应堆放在具有排水功能的硬质地面上,存放时间不宜超过半年。

6.1.3 使用砂、粗骨料时,应准确测定因天气变化引起砂、粗骨料含水量的变化。对袋装粉状材料(水泥、微细粉和粉状高效减水剂)应注意防潮;对液体外加剂应注意防止沉淀和分层。

6.2 高性能混凝土拌制

6.2.1 高性能混凝土必须采用强制式搅拌机拌制。

6.2.2 原材料计量应准确,应严格按设计配合比称量,其允许偏差应符合下列规定(按重量计):

- 1 胶凝材料(水泥、微细粉等) $\pm 1\%$;
- 2 化学外加剂(高效减水剂或其他化学添加剂) $\pm 1\%$;
- 3 粗、细骨料 $\pm 2\%$;
- 4 拌合用水 $\pm 1\%$ 。

6.2.3 应严格测定粗、细骨料的含水率,宜每班抽测2次。使用露天堆放骨料时,应随时根据其含水量变化调整施工配合比。

6.2.4 化学外加剂可采用粉剂和液体外加剂。当采用液体外加剂时,应从混凝土用水量中扣除溶液中的水量;当采用粉剂时,应

适当延长搅拌时间,不宜少于 0.5min。

6.2.5 拌制第一盘混凝土时,可增加水泥和细骨料用量 10%,但保持水灰比不变。

6.2.6 原材料的投料顺序宜为:粗骨料、细骨料、水泥、微细粉投入(搅拌约 0.5min)→加入拌合水(搅拌约 1min)→加入减水剂(搅拌约 0.5min)→出料。当采用其他投料顺序时,应经试验确定其搅拌时间,保证搅拌均匀。

搅拌的最短时间尚应符合设备说明书的规定。从全部材料投完算起的搅拌时间不得少于 1min。搅拌 C50 以上强度等级的混凝土或采用引气剂、膨胀剂、防水剂和其他添加剂时,应相应延长搅拌时间。

6.3 工作性检验

6.3.1 搅拌成的高性能混凝土拌合物应立即检验其工作性,包括测定坍落度、扩展度、坍落度损失;观察有无分层、离析、泌水,评定均质性;有抗冻性要求的混凝土尚应测定含气量。

6.3.2 高性能混凝土拌合物出厂前,应检验其工作性,包括测定其坍落度、扩展度;观察有无分层、离析,测定坍落度经时损失等,经检验合格后方可出厂。

6.3.3 高性能混凝土拌合物运送到现场后,应在工程项目有关三方见证取样的条件下,测定其工作性,经检验合格后方可使用。

6.4 高性能混凝土运输

6.4.1 高性能混凝土从搅拌结束到施工现场使用不宜超过 120min。在运输过程中,严禁添加计量外用水。当高性能混凝土运输到施工现场时,应抽检坍落度,每 100m³ 混凝土应随机抽检 3~5 次,检测结果应作为施工现场混凝土拌合物质量评定的依据。

6.4.2 高性能混凝土应使用搅拌运输车运送,运输车装料前应将筒内的积水排净。

6.4.3 混凝土的运送时间应满足合同规定,合同未作规定时,宜按 90min 控制(当最高气温低于 25℃ 时,运送时间可延长 30min)。当需延长运送时间时,应采取经过试验验证的技术措施。

6.4.4 当确有必要调整混凝土的坍落度时,严禁向运输车內添加计量外用水,而必须在专职技术人员指导下,在卸料前加入外加剂,且加入后采用快速转动料筒搅拌。外加剂的数量和搅拌时间应经试验确定。

6.5 高性能混凝土浇注

6.5.1 高性能混凝土的浇注应采用泵送施工,高频振捣器振动成型。

6.5.2 混凝土泵送施工应符合现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10 的下列规定:

1 混凝土浇注时应加强施工组织和调度,混凝土的供应必须确保在规定的施工区段內连续浇注的需求量;

2 混凝土的自由倾落高度不宜超过 2m;在不出现分层离析的情况下,最大落料高度应控制在 4m 以内;

3 泵送混凝土应根据现场情况合理布管。在夏季高温时应采用湿草帘或湿麻袋覆盖降温,冬季施工时应采用保温材料覆盖;

4 混凝土搅拌后 120min 內应泵送完毕,如因运送时间不能满足要求或气候炎热,应采取经试验验证的技术措施,防止因坍落度损失影响泵送。

6.5.3 冬期浇注混凝土时应遵照现行行业标准《建筑工程冬期施工规程》JGJ 104 和现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的有关规定,制定冬期施工措施。在施工环境的最低气温高于-5℃ 时,可采取混凝土正温入模,加盖塑料薄膜和保温材料,做好保湿蓄热养护。在寒冷地区和严寒地区冬期施工,应按高性能混凝土的要求,经试验确定掺加外加剂的品种和数量。

6.5.4 浇注高性能混凝土应振捣密实,宜采用高频振捣器垂直点振。当混凝土较粘稠时,应加密振点分布。应特别注意二次振捣和二次振捣的时机,确保有效地消除塑性阶段产生的沉缩和表面收缩裂缝。

6.6 高性能混凝土养护

6.6.1 高性能混凝土必须加强保湿养护,特别是底板、楼面板等大面积混凝土浇注后,应立即用塑料薄膜严密覆盖。二次振捣和压抹表面时,可卷起覆盖物操作,然后及时覆盖,混凝土终凝后可用水养护。采用水养护时,水的温度应与混凝土的温度相适应,避免因温差过大而混凝土出现裂缝。保湿养护期不应少于14d。

6.6.2 当高性能混凝土中胶凝材料用量较大时,应采取覆盖保温养护措施。保温养护期间应控制混凝土内部温度不超过75℃;应采取措​​施确保混凝土内外温差不超过25℃。可通过控制入模温度控制混凝土结构内部最高温度,可通过保湿蓄热养护控制结构内外温差;还应防止混凝土表面温度因环境影响(如暴晒、气温骤降等)而发生剧烈变化。

6.7 质量验收

6.7.1 混凝土质量应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

6.7.2 混凝土结构工程的施工质量验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

6.7.3 混凝土强度检验评定应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GBJ 107 的规定。

附录 A 混凝土抗除冰盐冻融试验方法

A.0.1 试验目的

检验混凝土在除冰盐作用下,抵抗冻融剥蚀的能力。

A.0.2 试验方法

1 试件

按工程采用的混凝土配合比,浇注成型 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试件 2 组共 6 个;24h 脱模,水中养护 6d,然后转移到温度 20°C 、相对湿度 65% 的试验箱内养护至 28d 龄期,测定抗压强度;并将 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 试件切成 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的半立方体,周边用橡胶铝箔或环氧树脂密封。

2 试验装置

抗除冰盐冻融试验应采用图 A.0.2 所示的装置。

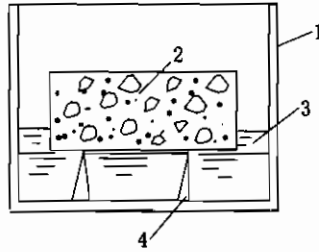


图 A.0.2 除冰盐冻融试验装置

1—不锈钢溶液箱 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 200\text{mm}$,安置试件后用塑料盖盖上;

2—混凝土试件 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 75\text{mm}$;

3—3%NaCl 溶液,浸入试件 1.5cm; 4—支架

3 试验

试件达到 28d 龄期时,将试件放入试验装置(图 A.0.2),并倒

入 3%NaCl 溶液,浸渍试件 1.5cm。试验溶液被混凝土吸附 7d 后,开始进行试验。因此,冻融开始时龄期为 35d。

将安放好试件的试验装置放入冰箱中,在 -20℃ 温度下冻 12h,然后在 20℃ 温度下融 12h,完成一次冻融循环。

A.0.3 抗除冰盐剥蚀程序评定

混凝土抗盐冻性以单位面积的剥蚀量 Q_s (kg/m²) 定量评价。可按下列式计算:

$$Q_s = M/A \quad (\text{A.0.3})$$

式中 M ——经 28 次盐冻循环后,试件的累计剥蚀量(g);

A ——混凝土试件受盐冻面积(m²)。

经 28 次冻融循环后,试件的质量损失应小于 1500g/m²,相应的剥落层厚度应小于 0.6cm。

附录 B 混凝土抗氯离子渗透性试验方法

B.0.1 试验目的

通过测定通过混凝土试件的电量,评价混凝土抵抗氯离子渗透的能力。

B.0.2 试件制作

1 根据施工配合比或设计研究的配合比配制混凝土试件,尺寸 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 或 $\phi 100\times 200\text{mm}$ 。经分别标养 28d、56d 或 90d;加工成 $\phi 100\times 50\text{mm}$ 的试件,一组 3 块。用 $\phi 100\times 200\text{mm}$ 的试件,将两端各切去 2.0cm,然后切成 $\phi 100\times 50\text{mm}$ 的试件 3 块。

2 对结构工程中的混凝土,可通过现场取芯,制成试件。

B.0.3 试验步骤

1 将 $\phi 100\times 200\text{mm}$ 的试件,在 80°C 下烘干 3~5h,然后将圆柱面用热蜡或密封胶封好。

2 将封好的试件放入 1000mL 烧杯中,然后一起放入真空干燥器中。干燥器一端与负压泵连接,另一端与冷却的开水连接。打开负压泵抽真空 3h,然后将冷却的开水(减少空气含量)抽入干燥器皿,直至淹没试件。对试件进行真空饱水,1h 后关闭负压泵,在负压下饱水 $18\pm 2\text{h}$ 。

3 将饱水试件取出,放入有机玻璃模具中(图 B.0.3-1、B.0.3-2),两端溶液池中分别加入 3%NaCl 和 0.3N NaOH 溶液。接通 60V 直流电源,正极连接 NaOH 溶液,负极连通 NaCl 溶液。

采用直流电量法检测混凝土抗氯离子渗透性。利用 6h 内通过混凝土试件的电量评价其抗氯离子渗透等级。试验仪器见图

B. 0. 3-2。

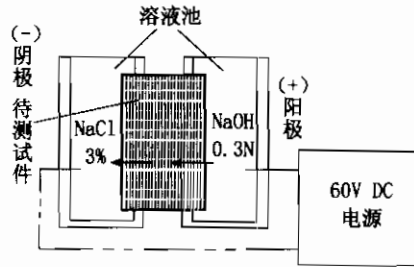


图 B. 0. 3-1 导电量检测试验示意

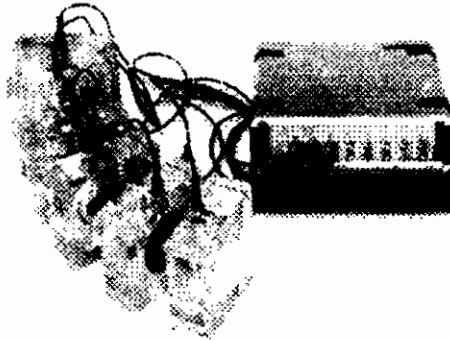


图 B. 0. 3-2 NEL-PER 混凝土渗透性电测仪

4 试件开始通电时,测量初始电流,以后每 0.5h 测量一次,共测 6h。根据各次的电流测得值按下式计算 6h 通过试件的总电量 $Q(C)$:

$$Q=900 \times (I_0 + 2I_1 + 2I_2 + 2I_3 + \dots + 2I_{11} + I_{12}) \quad (B. 0. 3)$$

式中 $I_0 \sim I_{12}$ 是 6h 内不同时间检测的电流(A)。

注: NEL-PER 混凝土渗透性电测仪,可直接得出 6h 的测试结果。

B. 0. 4 抗氯离子渗透性评估

根据 6h 导电量的测试结果,按表 B. 0. 4 评价混凝土抗氯离

子渗透性等级。

表 B.0.4 根据通过的电量定性评价混凝土 Cl^- 渗透性级别

6h 总导电量(C)	Cl^- 渗透性级别	典型混凝土种类
>4000	高	水胶比>0.60 的普通混凝土
>2000~4000	中	中等水胶比 0.50~0.60 的普通混凝土
>1000~2000	低	低水胶比 0.40~0.50 的普通混凝土
100~1000	非常低	低水胶比 0.38 的含矿物微细粉混凝土
<100	可忽略不计	低水胶比<0.30 的含矿物微细粉混凝土

附录 C 水泥和混凝土抗硫酸盐腐蚀检测方法

C.0.1 试验目的

1 检验水泥和胶凝材料抗硫酸盐腐蚀性能,评价其抗硫酸盐腐蚀性能是否合格。

2 根据选用的胶凝材料配制混凝土,确定相应的水灰(胶)比,确保混凝土具有所需的抗硫酸盐腐蚀性能。

C.0.2 试验方法

1 检测水泥和胶凝材料抗硫酸盐腐蚀性能采用砂浆棒法。

2 试件尺寸和制作

砂浆棒试件尺寸 25mm×25mm×285mm。

砂浆棒制作时,使用 0.25~0.5mm 的细砂、水胶比 0.485、胶砂比 1:2.5,在胶砂搅拌机中拌和均匀后,放入两端安放好测头的 25mm×25mm×285mm 的三联试模中,然后振捣成型。共制作测长试件 6 条,同时还制作 70.7mm×70.7mm×70.7mm 试件 9 块。

3 试件养护

将成型好的测长试件和立方体试件放入 35±3℃ 的养护箱,养护 24h 后脱模,然后将试件放入饱和的 Ca(OH)₂ 溶液中养护,3d 后将 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体试件进行抗压试验,强度达到 20MPa 后,将 3 条 25mm×25mm×285mm 的测长试件和 3 块 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体试件放入 5% Na₂SO₄ 溶液中浸泡,剩余试件均放入水中养护。Na₂SO₄ 溶液和水的温度均为 23±2℃。

4 测长

测长试件浸入 5%Na₂SO₄ 溶液前,测定初始长度。浸入 5%

Na₂SO₄ 溶液后,前四周,每隔一周测长一次,15 周时测定和计算试件的膨胀率。

C.0.3 抗硫酸盐腐蚀性能的评估

浸泡在 5%Na₂SO₄ 溶液中 15 周时,如 6 条试件膨胀率的平均值小于 0.4%,则该种砂浆试件的水泥或胶凝材料的抗硫酸盐腐蚀性能合格。

15 周时,水中和硫酸钠溶液中浸渍的立方体试件,两者的抗压强度比应大于 1.0,可作为参考指标。

C.0.4 混凝土的抗硫酸盐腐蚀

1 可按第 C.0.3 条选择的水泥或胶凝材料配制抗硫酸盐混凝土。

2 抗硫酸盐腐蚀混凝土的最大水灰(胶)比应符合表 C.0.4 的规定。

表 C.0.4 抗硫酸盐腐蚀混凝土的最大水灰(胶)比

劣化环境	最大水灰(胶)比
水中或土中 SO ₄ ²⁻ 含量大于 0.2% 的环境	0.45
除环境中含有 SO ₄ ²⁻ 外,混凝土还采用含有 SO ₄ ²⁻ 的化学外加剂	0.40

附录 D 碱含量计算方法

D.0.1 试验目的

配制混凝土时,计算水泥、矿物质微细粉和化学外加剂所带进的碱中,能参与碱-骨料反应的有效碱,控制混凝土中总碱量小于 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。

D.0.2 试验方法

1 水泥和矿物质微细粉的碱含量,按国家标准《水泥化学分析方法》GB/T 176—1996 进行检验。

2 化学外加剂的碱含量,按国家标准《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077—2000 进行检验。

3 混凝土组成材料中的有效碱含量按下列规定计算:

- 1) 水泥中所含的碱均为有效碱含量;
- 2) 粉煤灰中碱含量的 20% 为有效碱含量;
- 3) 矿渣微细粉中碱含量的 50% 为有效碱含量;
- 4) 硅粉中碱含量的 50% 为有效碱含量;
- 5) 天然沸石中的碱含量均为非有效碱含量;
- 6) 化学外加剂所带入的碱均为有效碱含量。

D.0.3 评价

混凝土中有效碱的总含量可按下式计算:

$$A_{10t} = A_1 + A_2 + A_3 \quad (\text{D.0.3})$$

式中 A_{10t} ——混凝土中的有效碱总含量;

A_1 ——水泥带入的有效碱含量;

A_2 ——矿物质微粉带入的有效碱含量;

A_3 ——化学外加剂带入的有效碱含量。

附录 E 砂浆棒法快速检测骨料碱活性

E.0.1 试验目的

1 如采用碱活性骨料配制混凝土,将引发碱-硅反应,产生有害的膨胀。本方法是快速测定骨料碱活性的试验方法,特别适用于碱-硅反应缓慢或只在反应后期才产生膨胀的骨料。

2 试件浸泡于 NaOH 溶液中,水泥的含碱量对测定的膨胀值可忽略不计。

E.0.2 取样和试件制备

1 骨料选取:将需要检测的骨料破碎成细骨料,并符合表 E.0.2规定的级配要求。

表 E.0.2 骨料的级配要求

筛孔尺寸		质量(%)
颗粒通过(mm)	颗粒残留(mm)	
4.75	2.36	10
2.36	1.18	25
1.18	0.60	25
0.60	0.30	25
0.30	0.15	15

2 水泥选取:选用符合国家标准中强度为 42.5 的硅酸盐水泥。使用前应剔除水泥中的结块。

3 试件制备:试验用砂浆干料应按 1 份水泥:2.25 份符合级配要求的细骨料来配制。

一次搅拌的砂浆干料量应为水泥 440g、细骨料 990g,水灰比 0.47,制备 25mm×25mm×285mm 的试件 3 个。

在完成一批砂浆搅拌后,应在不超过 20min15s 的时间内成型

试件。

将砂浆分成大致相等的 2 层填入模内,每层分别用捣棒捣实,并沿模具表面振捣,使试件均匀密实,然后用抹刀切除多余的砂浆。

E.0.3 试件养护和测量

将成型后的试件放入标准养护室中标养,24±2h 后脱模,测量初始长度,精确至 0.02mm。

将全部试件放入 80±2.0℃ 的水浴中。24h 后取出试件,应在 15±5s 内完成擦干和测长读数过程。

测完初长后,将试件浸泡在 80±1.0℃ 的 1N NaOH 溶液中。

试件在浸泡的 14d 内,至少测长 3 次。16d 时,测量三个试件的平均膨胀值(精确到 0.01%)作为该组材料在给定龄期的膨胀值。

E.0.4 评定标准

当砂浆棒试件 16d 膨胀率平均值小于 0.10% 时,评为非活性骨料;

当膨胀率为 0.10%~0.20% 时,评为潜在碱活性骨料;

当膨胀率大于 0.20% 时,评为碱-硅反应活性骨料。

附录 F 骨料碱-碳酸盐反应活性试验方法 (混凝土柱法)

F.0.1 试验目的

1 通过测定混凝土柱长度变化,确定混凝土中碱(钾与钠)与某些钙质石灰岩与白云灰岩中的白云岩骨料对碱-碳酸盐膨胀反应的敏感性。

2 当骨料试样通过岩相分析或岩石柱试验方法分析,确定骨料中含有潜在的有害碱-碳酸盐反应成分时,使用本方法具有特别的价值。

3 本方法的结果可作为判断碱-碳酸盐反应产生的膨胀是否应采取预防措施的依据。可通过对某些特定的水泥-矿物掺合料进行试验,作出相应的对策。

F.0.2 取样和试件制备

1 骨料选取:将需要检测的骨料破碎成粒径 4.75~9.5mm。

2 水泥选取:选用符合国家标准中强度为 42.5 的硅酸盐水泥,并将其碱含量(Na_2O)调至 1.5%。

3 试件制备:选用已备好的水泥和骨料,按水泥:骨料=1:1、水灰比=0.33;制备尺寸 40mm×40mm×160mm 的试件。一组 3 条试件使用的材料用量符合表 F.0.2 的规定。

表 F.0.2 一组试件各种材料的用量

材料	胶凝材料	骨料	水	备注
用量	1000g	1000g	330mL	用 NaOH 调整碱含量(Na_2O)达 1.5%

将计量好的材料放入水泥砂浆搅拌机中拌和均匀,然后分成大致相等的 2 层填入模内,每层分别用捣棒捣实,并沿试件表面振捣,使试件均匀密实,然后用抹刀切除多余的混凝土。

F.0.3 试件养护

将成型好的试件放入标准养护箱中标养。24h后脱模,测量初始长度 L_1 。放入温度为80℃的1N NaOH溶液中养护。

F.0.4 测长

在养护龄期1d、3d、7d、14d、21d和30d时分别测长;30d龄期时试件的长度为 L_2 。

F.0.5 结果计算和判定

1 根据测得的初长和终长,按下式计算膨胀率:

$$e=100(L_2-L_1)/(160-2b) \quad (\text{F.0.5})$$

式中 e ——试件膨胀率;

L_2 ——试件最终长度;

L_1 ——试件初始长度;

b ——测头埋入混凝土柱的长度。

取6个试件的平均膨胀率为该配合比的膨胀率。当膨胀率大于0.10%时,可判定为碳酸盐活性骨料。

2 结果正确性判断

当6个试件的膨胀率都大于0.10%时,或都小于0.08%时,可取平均膨胀率作为判定依据。

当6个试件的膨胀率在0.10%左右波动时,各试件的相对变形值不得超过平均值的15%,否则应重做试验。

F.0.6 矿物质掺合料抑制碱-碳酸盐反应(ACR)的效果

1 将试验中所用的水泥改为含有不同矿物质掺合料的胶凝材料,以NaOH调整胶凝材料中的碱含量为1.5%。

2 胶凝材料中能参与碱-骨料反应的有效碱含量,可按下列规定计算:

- 1) 水泥中所含的碱均为有效碱含量;
- 2) 粉煤灰中碱含量的20%为有效碱含量;
- 3) 矿渣中碱含量的50%为有效碱含量;
- 4) 硅粉中碱含量的50%为有效碱含量;

5)沸石粉中的碱含量均为非有效碱含量；

6)外加剂中所含的碱均为有效碱含量；

7)混凝土试件总碱量应为水泥带人的碱量+外加剂带人的碱量+掺合料中的有效碱量。

3 以配制的胶凝材料代替水泥,按表 E.0.2 规定的材料用量配制试件。其他步骤同水泥试件。

附录 G 矿物微细粉抑制碱-硅 反应效果检测方法 (玻璃砂浆棒法)

G.0.1 试验目的

检验不同矿物微细粉抑制碱-硅反应(ASR)的效果,选择优质的矿物微细粉抑制混凝土的碱-硅反应。

G.0.2 试验方法

1 以 10% 粒径 0.15~5.0mm 的高活性石英玻璃砂,等量取代标准砂作为骨料。

2 选取符合国家标准的 42.5 硅酸盐水泥,以 NaOH 加入水泥中,调整碱含量达到 $1.0 \pm 0.5\%$; NaOH 与 Na_2O 的质量转换关系是 $\text{NaOH}\% = \text{Na}_2\text{O}\% \times (2 \times 40/62) = 1.29\text{Na}_2\text{O}$ 。

3 选用不同的矿物微细粉取代部分水泥,按水胶比 0.47、胶骨比 1:2.25 制备 25mm×25mm×285mm 的试件 3 条。

4 将试件放入标养室中养护,24±3h 后脱模,测量初始长度,然后放入温度 38℃、相对湿度 100% 的养护箱中养护,并分别测定养护龄期 1d、3d、7d、10d 和 14d 时试件的长度。

G.0.3 评价标准

1 以砂浆棒 14d 膨胀率衡量各种矿物微细粉抑制 ASR 膨胀的效果。

2 为对比不同矿物微细粉对 ASR 的抑制效果,采用膨胀率的降低程度指标评价。降低程度越大,抑制效果越好。

试件膨胀率降低率可按下式计算:

$$e = (e_0 - e_s) / e_0 \quad (\text{G.0.3})$$

式中 e ——膨胀降低率;

e_0 ——基准试件的膨胀率;

e_s ——含掺合料试件的膨胀率。

当降低率大于 75% 时,可认为该矿物微细粉能够有效抑制碱-硅反应。

本规程用词说明

1 为了便于执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”;

反面词采用“不宜”。

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的:

正面词采用:“可”;

反面词采用:“不可”。

2 条文中指定应按其他有关标准执行时,写法为“应符合……要求(或规定)”或“应按……执行”。非必须按所指定标准执行时,写法为“可参照……执行”。

中国工程建设标准化协会标准
高性能混凝土应用技术规程

CECS 207 : 2006

条文说明

目 次

1	总 则	(39)
2	术 语	(40)
3	基本规定	(42)
4	原材料	(43)
4.2	骨料	(43)
4.3	矿物微细粉	(43)
4.4	化学外加剂	(43)
5	配合比设计	(44)
5.1	一般规定	(44)
5.2	高性能混凝土配合比设计	(44)
5.3	抗碳化耐久性设计	(45)
5.4	抗冻害耐久性设计	(46)
5.5	抗盐害耐久性设计	(47)
5.6	抗硫酸盐腐蚀耐久性设计	(49)
5.7	抑制碱-骨料反应有害膨胀	(51)
6	施工及验收	(53)

1 总 则

1.0.1、1.0.2 这两条主要对制定本规程的目的、适应范围以及与相应国家标准和行业标准的关系作了规定。高性能混凝土(HPC)应用技术规程的适用范围与普通混凝土(NC)和高强混凝土(HSC)基本相同,HPC的制备和施工方法在很多方面也与上述两种混凝土相同。所以,使用本规程时应注意与相关标准的衔接。

1.0.3 当遇与现行标准要求不符的情况,应在试验试配取得可靠数据的基础上,在采取可靠措施并能确保混凝土质量的条件下,研究协商解决。

2 术 语

2.0.1 高性能混凝土(HPC)应保证混凝土结构所要求的各项力学性能,且具有高耐久性、高工作性和高体积稳定性。要满足高性能混凝土的这些性能要求,关键是按照耐久性的要求设计混凝土。应根据混凝土结构所处的环境条件,考虑其外部和内部劣化因素和结构要求的使用年限,进行耐久性设计,保证结构在使用期限内的性能要求。在高性能混凝土的组成材料中,必须含有矿物微细粉和高效减水剂。

为了获得高耐久性的混凝土,在组成材料方面,HPC常含有硅粉和其他矿物微细粉,或同时含有2种以上这类材料,而普通混凝土中仅含一般的矿物质掺合料。其次,HPC粗骨料的粒径一般不大于25mm,以改善骨料与水泥的界面结构,提高界面强度。较小骨料颗粒的强度比大颗粒强度高,因为消除了岩石破碎时控制强度的最大裂隙。

矿物微细粉与高效减水剂双掺是HPC组成材料的最大特点。双掺能够最好地发挥微细粉在HPC中的填充效应,使HPC具有更好的流动性、强度和耐久性。

2.0.2 混凝土结构在所处工作环境下,长期抵抗外部劣化因素及内部劣化因素作用的能力。所处环境的外部劣化因素,如中性化(或碳化)、盐害、冻害以及硫酸盐腐蚀等。此外,还有由于胶凝材料含有一定数量的碱和碱活性骨料,所造成的碱-骨料反应的内部劣化因素作用,引起的劣化损伤与失效。混凝土的耐久性是混凝土结构在工作环境下,抵抗其中一种或多种外部劣化因素的作用,在结构设计使用的期限或维修管理期限内,不致损伤破坏,以至失

效。混凝土结构的耐久性,由混凝土的耐久性和钢筋的耐久性两部分组成。本规程所述的是有关混凝土耐久性方面。

2.0.4 使混凝土结构性能降低的外部环境作用有:大气中的 CO_2 、 SO_3 、 NO_x 等因素使混凝土产生中性化;海岸地区的氯化物侵入混凝土使钢筋锈蚀;寒冷地区使混凝土受冻融作用;盐碱地的酸碱使混凝土腐蚀等。

2.0.5 混凝土配制时,由各种材料带入了有害氯离子,当达到一定数量时会使钢筋锈蚀;混入的碱活性骨料,会引起碱-骨料反应;过高的水灰比,过大的单方混凝土用水量,混凝土的保护层厚度不够,以及混凝土浇注的缺陷等,均会构成混凝土的劣化内因。

2.0.10 矿物微细粉是平均粒径不大于 $10\mu\text{m}$ 的矿物粉体,如粉煤灰、矿渣、硅粉、偏高岭土以及天然沸石粉等。它们在 HPC 中起填充作用,可增大流化效应、强度效应和耐久性效应,是 HPC 不可缺少的组分。

3 基本规定

3.0.1 本条规定了 HPC 必须保证混凝土配合比设计所要求的强度等级,保证结构在所处环境条件下的耐久性,使结构在设计使用期内有足够的承载安全性和满足正常使用功能。

结构的使用期限是根据耐久性设计确定的,要保证混凝土结构物和混凝土在使用期限内有足够的性能。高性能混凝土能够提供结构设计所需要的强度等级和抵抗环境劣化作用的耐久性,这两方面是混凝土结构耐久性设计的基础。

4 原 材 料

4.2 骨 料

配制 HPC 时对原材料的要求与普通混凝土的要求差别不大。凡符合普通混凝土有关标准要求的原材料,基本上都能用来配制 HPC,不过 HPC 对原材料的要求更严格。例如,粗骨料的粒径不宜大于 25mm,并宜采用 10~25mm 和 5~10mm 两级配的粗骨料。对细骨料无附加的特殊要求。

4.3 矿物微细粉

本节对矿物微细粉的品种、质量要求、检测方法和适宜掺量作出了规定。HPC 的原材料中必须有矿物微细粉,这是一种改善混凝土结构构造、改善界面、提高性能的重要成分。但是,矿物微细粉掺量过大会影响混凝土的抗碳化性能和其他性能。例如,硅粉掺量如超过 10%混凝土拌合物的流动性很差,高效减水剂的添加量增大成本提高,而混凝土的性能改善不大。对于粉煤灰,在国内现行标准如《粉煤灰混凝土应用技术规范》GBJ 146 中规定,在钢筋混凝土中掺量不大于 30%;目前正在制订的《矿物掺合料应用技术规程》中建议,当 W/B 大于 0.40 时,在硅酸盐水泥混凝土中掺量不大于 40%,在普通硅酸盐水泥混凝土中掺量不大于 30%,与本规程规定的掺量一致。其他矿物微细粉掺量均与本规程的一致。偏高岭土超细粉是一种新型矿物微细粉,掺量不大于 15%是根据试验结果确定的。本节中规定的是最大掺量。

4.4 化学外加剂

化学外加剂主要是指高效减水剂。要求其减水率高,控制坍落度损失功能好,对混凝土耐久性无有害成分。

5 配合比设计

HPC 的配合比设计应满足：施工要求的工作性、结构要求的力学性能和混凝土结构在所处环境条件下要求的耐久性。

HPC 属高耐久性混凝土。参照日本有关规定，高耐久性混凝土单方用水量为 $175\text{kg}/\text{m}^3$ ；胶凝材料用量不大于 $600\text{kg}/\text{m}^3$ 。HPC 施工时要求的工作性包括：坍落度、坍落度流动值，坍落度损失以及流动快慢（反映结构粘度）。调节并保证 HPC 的工作性，除了正确选择水泥品种和水泥用量以外，矿物微细粉的品种和数量对工作性能影响也很大，性能优良的微细粉能增大 HPC 的流动性和降低拌合物的粘性。HPC 中掺入氨基磺酸系高效减水剂或聚羧酸高效减水剂能有效降低混凝土单方用水量，增大混凝土坍落度，并能控制混凝土坍落度损失；而萘系高效减水剂在减水率、控制坍落度损失及耐久性方面，均较前述两大类高效减水剂差一些。配制 HPC 宜优于选用氨基磺酸系或聚羧酸系高效减水剂。

5.1 一般规定

5.1.2 混凝土结构的外部劣化因素有一般的和特殊的两种。温度、湿度、太阳辐射热和混凝土中性化等为一般的外部劣化因素，是混凝土结构耐久性设计中必须考虑的。盐害、冻害、化学腐蚀（如硫酸盐腐蚀）等为特殊的外部劣化因素，应按混凝土结构所处环境条件考虑。

5.2 高性能混凝土配合比设计

5.2.1 本条规定，混凝土配合比的试配强度按公式 $f_{\text{cu},0} \geq f_{\text{cu},k} +$

1.645 σ 计算。即试配强度 $f_{cu,0}$ 不小于强度标准值加 1.645 σ (σ 为 HPC 的强度标准差)。

我国混凝土强度的配合比设计,均按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 执行。对强度标准值($f_{cu,k}$)保证率是 95%。

由于近年来对结构耐久性的要求越来越高,往往由于耐久性方面的要求,使混凝土抗压强度超过结构因素所需的值。例如英吉利海峡隧道衬里,按结构要求混凝土的强度设计值为 45MPa,由于设计寿命为 120 年,混凝土的平均抗压强度提高到 63MPa。又如青马大桥,原来混凝土桥墩的强度按结构设计要求 43MPa 足够了,但是按 ASTM C1202 测定混凝土的导电量达不到要求,后来在混凝土中加入了 8% 硅粉,导电量降到 1000C 以下,满足了要求。但与此同时,混凝土强度也提高到了 63MPa。

因此,对于重要结构除了按强度设计要求考虑混凝土的抗压强度外,还需要考虑耐久性要求,保证所需要的强度。

5.3 抗碳化耐久性设计

5.3.1 混凝土碳化是混凝土中性化的一个方面。实际上引起混凝土碱性降低的因素包括:

氢氧化钙与 CO_2 反应: $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

氢氧化钙与 SO_3 反应: $Ca(OH)_2 + SO_3 \rightarrow CaSO_4 + H_2O$

氢氧化钙与 NO_2 反应: $2Ca(OH)_2 + 4NO_2 \rightarrow Ca(NO_3)_2 + Ca(NO_2)_2 + 2H_2O$

混凝土中性化后,就失去了对钢筋的碱性保护。在氧气和水的作用下,钢筋就开始腐蚀。当混凝土的 pH 值低于 10 时,钢筋要发生锈蚀,所产生的铁锈使体积膨胀 2.5 倍,从而混凝土开裂,耐久性下降。

混凝土抗碳化耐久性设计,主要是根据式(5.3.1)计算:

$$W/B \leq \frac{5.83c}{\alpha \times \sqrt{t}} + 38.3 \quad (5.3.1)$$

由(5.3.1)式可知,如已知钢筋保护层厚度 c ,结构的使用年限 t ,以及结构所处环境(室内或室外),可以计算出混凝土所需的水胶比。如果混凝土的水胶比不大于 0.38,可不考虑混凝土结构的碳化问题。

公式(5.3.1)引自日本建筑学会“Recommendations for Design and Construction Practice of High Durable Concrete”(1991)。

5.4 抗冻害耐久性设计

5.4.1 混凝土在外部劣化因素作用下会产生冻害,其耐久性设计是根据混凝土结构所处环境条件,按每年冻融次数、最低温度和对混凝土作用的水分而确定的。

冻害,是外部水分渗入硬化混凝土的空隙中,受冻时体积膨胀,迫使未受冻结的孔溶液从结冰区向外迁移。孔溶液在可渗透的水泥浆体结构中移动,必须克服粘滞阻力,因而产生静水压力。当静水压力超过混凝土的抗拉强度时就会损伤混凝土、开裂、以至破坏。

这种冻害的发生和进行,主要与以下劣化因素有关:

(1)冻结时的最低温度和反复冻融次数;

(2)受冻融作用时混凝土的含水程度。混凝土含水程度越高,受冻害越大;相反,对某种干燥状态的混凝土,即使在受冻温度作用下,也不会发生冻害。

与冻害有关的设计劣化因素是每年的冻融次数。这与最低温度和渗透到混凝土中水分的环境条件有关,必须考虑到混凝土结构所处地区、布局、构件所处位置等。本条中把冻害外部劣化因素划分为三个地区:严寒地区,如西藏、东北、西北、华北,这些地域的冬季最低温度可达 -16°C 以下;寒冷地区,如安徽、山东、河南、湖北等地,冬季温度为 $-16\sim-10^{\circ}\text{C}$ 左右;微冻地区,如湖南、江西、贵州等地的一些山区,受冻害较轻微。不同地区对混凝土抗冻性

的选择不同。严寒地区混凝土抗冻性应选择冻融循环不小于 300 次、耐久性系数不小于 0.80；寒冷地区混凝土应根据设计要求的冻融循环次数选择耐久性系数在 0.60~0.80 之间；而微冻地区混凝土可选择耐久性系数小于 0.60。各类冻害地区的混凝土均应满足最大水胶比要求。

5.4.2 对水中冻融及盐水中冻融，混凝土均可用冻融循环次数及耐久性系数来评价其抗冻性耐久性系数与混凝土的水灰比、含气量及气泡间隔系数有关。 $W/B \leq 0.30$ 的 HPC 可以不掺引气剂。 $W/B > 0.30$ 的混凝土，应掺入引气剂，使混凝土中含气量达 4%~5%。而且在盐水中冻融比水中冻融的含气量要求高一个等级，也即含气量要达到 5%~6% 才能实现 300 次快速冻融循环。关于气泡间隔系数 $< 0.25\text{mm}$ ，在宏观上是难以确认的；如果引气剂质量好。在适当引气范围内，混凝土中的气泡间隔系数会在要求的范围内。

5.4.4 对受除冰盐冻融作用的混凝土可参考 DIN EN 12390-9 标准草案 CF/CDF 方法(RILEM)及 ASTM C 672 试验方法等进行混凝土抗除冰盐冻融试验。混凝土成型后 24h 脱模，水养 6d，然后转移到温度 20℃、相对湿度 65% 的试验箱中，测定龄期 28d、56d、90d 的结果。CDF 试验方法规定循环次数为 28 次剥蚀量 $1500\text{g}/\text{m}^2$ (相应剥蚀层厚 0.6mm)；此种混凝土具有抗除冰盐破坏的能力。混凝土抗除冰盐破坏同样取决于 W/C 、含气量，而且除硅粉外，其他矿物质微细粉应不掺或少掺，其数量 $< 10\%$ 。掺粉煤灰混凝土的抗除冰盐能力最差。混凝土的抗冻能力还与骨料的性能有关，因此本规程对粗、细骨料的吸水率作出了规定。

5.5 抗盐害耐久性设计

5.5.1 混凝土抗盐害的设计劣化因素与混凝土结构所处环境、到达混凝土结构表面的氯离子 Cl^- 浓度和混凝土结构接触的水中 Cl^- 浓度有关。

Cl⁻ 进入混凝土中有两种途径,一是未洗净的海砂和含有 Cl⁻ 的外加剂,用这些材料拌制混凝土时带进了 Cl⁻;另一种途径是海洋的水滴和海盐粒子,经风力运送粘附在混凝土结构表面,并渗透进入混凝土。本规程考虑的盐害外部劣化因素主要是后者,即从混凝土结构外表面渗透进入混凝土的 Cl⁻。

海洋水滴和海盐粒子被风吹送到混凝土表面的量与混凝土结构离海岸距离有关(图 1)。离海岸 100~200m 位置处的 Cl⁻ 浓度约为 0m 位置处的 1/5~1/10;离海岸超过 1500m 处可以不考虑海洋水滴和海盐粒子的影响。

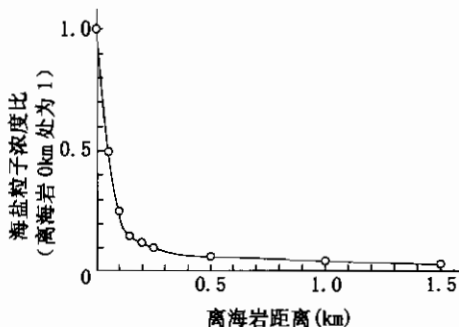


图 1 混凝土表面 Cl⁻ 浓度比离海岸距离的关系

根据混凝土结构离海岸距离,可分成准盐害环境地区、一般盐害环境地区和重盐害环境地区。处于重盐害环境地区(含海水中)的混凝土结构,受海水作用的严重程度,可分为 3 个部分(表 1)。浪溅和水位变动部位是盐害最严重的部位,混凝土的水胶比应小于 0.40 或在该部分采用预制钢筋混凝土模板,以提高抗 Cl⁻ 渗透性。

表 1 受海水作用混凝土划分

海水作用区分	结构部位
A	水位变动(潮汐)部位
B	海水下部位
C	浪溅部位

5.5.3 外部 Cl⁻ 向混凝土内部的扩散渗透与混凝土的裂缝宽度

有关,故应控制盐害地区混凝土的裂缝宽度。日本建筑学会高耐久性钢筋混凝土设计施工指南(草案)中规定裂缝宽度控制值为0.15mm,本规程规定为 $c/30$,因允许裂缝宽度与保护层厚度有关。

5.5.4 对工程进行混凝土抗盐害设计时,主要根据附录 B(出自 ASTM C1202)测定混凝土 56d 龄期的导电量。也就是说,根据混凝土的 W/C ,掺入一定品种、质量和数量的微细粉配制的混凝土试件,标养 56d 后,按附录 B 规定的方法测定 6h 的总导电量,再根据本规程表 5.5.4 评估混凝土的 Cl^- 渗透性,确定采用混凝土的种类。一般要求导电量小于 1000C;盐害较严重时,导电量小于 500C。抗盐害的耐久性设计,除考虑混凝土的导电量外,还需要一定混凝土保护厚度,故结构设计必须规定最小保护厚度。

5.5.5 表 5.5.5 中规定了水胶比最大值。其中,重盐害地区是指海港工程、海上混凝土结构工程(特别是混凝土结构处于浪溅区与干湿区的部位)、还有海岸边的混凝土结构工程;一般盐害地区是指离海岸 50~250m 的混凝土工程、围海造地上的混凝土工程和盐碱地上的混凝土工程;准盐害地区是指离海岸 250m 以外的近海工程。

对重盐害地区、一般盐害地区的混凝土结构,除了选用非常低导电量的混凝土和足够的保护层厚度外,混凝土中的钢筋还需采取防护措施,如环氧涂层钢筋,这样才能保证混凝土结构的使用年限不小于 50 年。

5.6 抗硫酸盐腐蚀耐久性设计

5.6.1~5.6.3 高性能混凝土的抗硫酸盐腐蚀性能,取决于水泥的品种、矿物微细粉的品种、数量和水胶比。

抗硫酸盐腐蚀的设计劣化因素,应根据混凝土结构和大气、土壤、水中含有酸性介质的浓度确定。许多国家在制定混凝土抗腐蚀标准时,都以 SO_4^{2-} 的含量作为判定混凝土将遭受硫酸盐腐蚀的程度。我国《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 的规定见表 2,

《磷酸一铵、磷酸二铵中水分的测定》GB/T 10209.3—2001 的规定见表 3。当水中 SO_4^{2-} 含量达 250~500mg/L 时,混凝土进入受腐蚀范围。

表 2 水中腐蚀性介质评价

水中腐蚀性介质	弱腐蚀	中等腐蚀	强腐蚀
SO_4^{2-} 含量(mg/L)	250~500	500~1500	>1500

表 3 环境水对混凝土侵蚀性判定

水中腐蚀性介质	地质条件	水中 pH	弱腐蚀	中等腐蚀	强腐蚀
SO_4^{2-} 含量(mg/L)	石膏地层	7.0~8.0	500~1000	1001~2000	>2000
	含盐地层	7.5~8.0	1000~2000	2001~4000	>4000

硫酸盐对混凝土的腐蚀,主要是由于 SO_4^{2-} 聚集到一定浓度后与水泥水化时生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化铝酸钙 C_3AH_6 产生反应,生成水化硫铝酸钙(钙矾石)。因其体积增大造成混凝土开裂,使混凝土结构的耐久性劣化。

混凝土的抗硫酸盐腐蚀取决于其中水泥的 C_3A 含量、混凝土的水灰比和矿物微细粉的品种、质量和数量,且与介质中 SO_4^{2-} 的浓度有关。

许多国家在制定硫酸盐侵蚀介质条件下选用水泥的控制标准时,均以 C_3A 含量多少来衡量。各国的抗硫酸盐水泥, C_3A 均不大于 5%。我国根据环境水的侵蚀程度,分别控制水泥中 C_3A 含量不大于 8%或 5%。

检验混凝土抗硫酸盐腐蚀性首先是检验所使用水泥(或胶凝材料)的抗硫酸盐性能。本规程参考 ASTM C 1012 检验水泥砂浆在 5% Na_2SO_4 溶液中浸泡 15 周后的膨胀率,如 6 个试件的平均膨胀值小于 0.4%,则认为该种水泥(或胶凝材料)的抗硫酸盐性能合格。然后,用这种水泥(或胶凝材料)配制混凝土,并根据混凝土结构所处环境条件,控制混凝土的最大水胶比,因为混凝土的抗硫酸盐腐蚀性能除与胶凝材料有关外,还与水胶比(W/B)有关。

5.7 抑制碱-骨料反应有害膨胀

5.7.1~5.7.4 混凝土的碱-骨料反应(AAR)与混凝土中的碱含量、碱活性骨料量和混凝土结构所处的环境湿度有关。

AAR可划分为碱-硅反应(ASR)和碱-碳酸盐反应(ACR)两种。在我国,这两种碱-骨料反应均存在。具有碱-硅反应活性的矿物质有蛋白石、火山玻璃、玉髓、石英、方晶石等;含活性硅质矿物岩石有辉石安山岩、燧石等。

作为ASR的设计劣化因素,应考虑混凝土中的碱含量,包括混凝土内部组成材料带进的碱离子浓度和从混凝土外部渗入的碱离子浓度。关于结构所处环境湿度,应考虑混凝土中的含水状态和从外部渗入混凝土中的水分。混凝土的内部固有碱,可按式计算:

$$R_c = \frac{Na_2O_{eq}(\%) \cdot C + 0.9 \cdot Cl^- + R_m}{100} \quad (1)$$

式中 R_c ——混凝土中含碱量(kg/m^3);

Na_2O_{eq} ——水泥中碱量(换算成 Na_2O)(%) ;

C ——单方混凝土中水泥用量(kg/m^3);

Cl^- ——混凝土中氯离子量(kg/m^3);

R_m ——化学外加剂和矿物微细粉所携带的碱量(kg/m^3),
按照附录D进行计算。

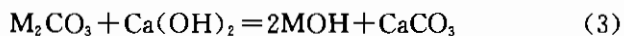
外部渗透进入混凝土中的碱量,受混凝土结构所处环境的影响。如海岸边或海港工程的混凝土结构物、冬天受除冰盐作用的混凝土结构物等,均有碱从外部渗入混凝土内的问题,需通过实地或模拟试验确定。

混凝土碱-骨料反应应以预防为主。也就是说,如检测出骨料中含有潜在的碱活性,则采用该骨料配制混凝土必须预防碱-骨料反应发生。目前,预防混凝土碱-骨料反应(包括ASR和ACR)均通过掺入矿物微细粉到混凝土中的方法,以抑制AAR的有害膨

胀。如粉煤灰、天然沸石粉和矿渣微细粉均能抑制 ASR；而粉煤灰、沸石-粉煤灰、沸石-矿渣、沸石-硅粉等微细粉，可抑制 ACR 的有害膨胀。

本规程提出了采用玻璃砂浆棒法检测各种矿物微细粉抑制 ASR 膨胀的效果。该方法以 10% 的粒径 0.15~5.0mm 的高活性石英玻璃砂，等量取代砂浆试件中的标准砂，配制砂浆棒试件，其他条件及测试方法均与 ASTM C 1260—94 相同。砂浆棒试件的制备方便，具体测试方法不变，但比较各种矿物微细粉抑制 ASR 的效果更为有效。

大量研究证明，ACR 是孔溶液中的碱(K^+ 、 Na^+)与骨料中的白云石 $[CaMg(CO_3)_2]$ 之间的反应。其反应方程式如下：



其中 M 代表 K^+ 、 Na^+ 或 Li^+ 。式(2)称去白云化反应；式(3)表示去白云化反应生成的 M_2CO_3 与水泥浆中 $Ca(OH)_2$ 反应，使碱再生，去白云化反应继续进行，直至碱活性白云石被消耗尽为止。

抑制 ACR 的有害膨胀需要用复合矿物微细粉，如天然沸石-粉煤灰、天然沸石-矿渣和天然沸石-硅粉复合的微细粉。单独的矿渣、天然沸石粉、硅粉均无法抑制 ACR 的有害膨胀。有一部分粉煤灰，当其掺量不小于 30% 时能抑制 ACR 有害膨胀，但不是所有粉煤灰均能抑制 ACR 膨胀，需经试验确定。

6 施工及验收

在这方面与普通混凝土相类似,但 HPC 有其不同的特点,如混凝土拌合物的水灰比小,结构粘度大,坍落度损失快,早期自收缩大等。

HPC 施工中要注意使其具有高流动性,坍落度不小于 20cm,且 1.0~1.5h 内基本上无坍落度损失;要注意早期养护,防止在塑性阶段就发生自收缩开裂。HPC 的湿养护时间要比普通混凝土长。

混凝土的运送时间是指从混凝土由搅拌机卸入运输车开始至运输车开始卸料为止。