



T/CECS XX-202X

中国工程建设标准化协会标准

钢壳沉管自密实高性能混凝土应用技术规程

Technical specification for the application of self-compacting high-performance concrete of steel
shell immersed tube

(征求意见稿)

中国建筑工业出版社

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2023 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2023〕10 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结各地实践经验，参考有关国内外标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 7 章。主要技术内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 原材料；5 自密实高性能混凝土性能；6 配合比；7 生产与施工；8 质量检验。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由保利长大工程有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中如有意见或建议，请将有关意见和资料寄送保利长大工程有限公司（广州市天河区广州大道中 942 号，邮政编码：510620），以供今后修订时参考。

主编单位：保利长大工程有限公司

中国建筑科学研究院有限公司

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	5
4 原材料技术要求	4
5 配合比	6
5.1 一般规定	6
5.2 配合比设计与计算	6
6 生产与施工	7
6.1 一般规定	7
6.2 拌制	7
6.3 运输	8
6.4 浇筑	9
7 质量检验	19
本规程用词说明	20
引用标准名录	21
条文说明	23

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Rules	5
4	Technical requirements for raw materials	4
5	Mix ratio	6
5.1	General requirements	6
5.2	Mechanical property	6
6	Production and construction	7
6.1	General requirements	7
6.2	Mix	7
6.3	Transportation	8
6.4	Pouring	9
7	Quality inspection and acceptance	19
	Explanation of wording in this specification	20
	List of quoted standards	21
	Addition: explanation of provisions	23

1 总 则

1.0.1 为规范自密实高性能混凝土在钢壳沉管中的应用，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于适用于钢壳沉管结构中自密实高性能混凝土的应用技术要求。

1.0.3 钢壳沉管自密实高性能混凝土的设计与施工，应充分考虑结构、原材料、生产、施工和环境等条件的差异。

1.0.4 钢壳沉管自密实高性能混凝土的原材料、配合比设计、生产与施工和质量检验除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 钢壳沉管 Steel-shell immersed tunnel

是由高强度钢材制作、内部浇筑高性能混凝土或者其他填充材料的空心管状结构。

2.1.2 钢壳沉管自密实高性能混凝土 Self-compacting high-performance concrete used in steel-shell immersed tunnel

用于填充沉管隧道钢壳管节隔仓并具有高流动性、高填充性、均匀性、高强度、高耐久性和低收缩徐变的自密实混凝土。

2.1.3 填充性 Filling ability

自密实高性能混凝土拌合物在自身重力作用下均匀、顺畅地流入模板内各个角落能完全填充模板空间的性能。

2.1.4 间隙通过性 Passing ability

自密实高性能混凝土拌合物均匀通过狭窄间隙的性能。

2.1.5 抗离析性 Filling ability

自密实高性能混凝土拌合物中各种组分保持均匀分散的性能。

2.1.6 坍落拓展度 slump-flow

自坍落度筒提起至混凝土拌合物停止流动后，测量坍落扩展面最大直径和与最大直径呈垂直方向的直径的平均值。

2.1.7 拓展时间 (T_{500}) Slump-flow time

用坍落度筒测量混凝土坍落拓展度时，自坍落度筒提起开始计时，至拌合物坍落拓展面直径达到 500mm 的时间。

2.1.8 V 型漏斗试验 V-funnel test

采用 V 型漏斗，检验自密实混凝土抗离析性能的一种试验方法。将混凝土拌合物装满 V 型漏斗，从开启出料口底盖开始计时，记录拌合物全部流出出料口所经历的时间 (s)。

2.1.9 L 型箱试验 L-box test

采用规定的 L 型箱，检测自密实混凝土拌合物通过刚进间隙，并自行填充

至箱内各个部位能力的一种试验方法。

2.1.10 离析率 Segregation percent

标准法筛析试验中，拌合物静置规定时间后，流过公称直径为 5mm 方孔筛的浆体质量与混凝土质量的比例。

2.2 符 号

$f_{\text{cu}, i}$ ——第 i 组的混凝土试件强度 (MPa) ;

$f_{\text{cu}, k}$ ——自密实高性能混凝土立方体抗压强度标准值 (MPa) ;

$f_{\text{cu}, 0}$ ——自密实高性能混凝土的配制强度 (MPa) ;

f_{ce} ——水泥的 28d 实测抗压强度 (MPa) ;

σ ——自密实高性能混凝土的强度标准差 (MPa) 。

3 基本规定

3.0.1 钢壳沉管自密实高性能混凝土应选用质量稳定的优质原材料，并应采取严格的施工过程质量控制措施。

3.0.2 自密实高性能混凝土拌合物性能除应满足自密实性能要求外，尚应满足凝结时间、粘聚性和保水性等要求。

3.0.3 钢壳沉管自密实高性能混凝土的工作性能应满足长时间性能保持和长距离泵送要求。

3.0.4 钢壳应合理设置工艺孔，并应采取措施提高混凝土在钢壳隔仓中的流动和填充效率。

3.0.5 钢壳沉管自密实高性能混凝土宜采用信息化技术和自动化装备实现生产过程控制。

4 原材料

4.0.1 配制自密实高性能混凝土宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，并应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定；当采用其他品种水泥时，其性能应符合国家现行有关标准的规定；不同水泥不得混合使用。

4.0.2 矿物掺合料应符合下列规定：

1 粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的有关规定，且不宜低于Ⅱ级；磨细粉煤灰应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 的有关规定。

2 粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的有关规定，且不宜低于 S95 级。

3 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 的有关规定。

4 复合掺合料应符合现行行业标准《混凝土用复合掺合料》JG/T 486 的有关规定。

4.0.3 粗骨料宜采用连续级配或 2 个及以上单粒径级配搭配使用，最大公称直径不宜大于 20mm；粗骨料的针片状颗粒含量、含泥量及泥块含量，应符合表 4.0.3 的规定，其他性能及试验方法应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的规定。

表 4.0.3 粗骨料的针片状颗粒含量、含泥量和泥块含量

项目	针片状颗粒含量	含泥量	泥块含量
指标（%）	≤8	≤1.0	≤0.5

4.0.4 细骨料宜采用级配区的中砂。天然砂的含泥量、泥块含量应符合表 4.0.4-1 的规定；机制砂的石粉含量应符合表 4.0.4-2 的规定。细骨料的其他性能及试验方法应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的规定。

表 4.0.4-1 天然砂的含泥量和泥块含量

项目	含泥量	泥块含量
指标 (%)	≤ 3.0	≤ 1.0

表 4.0.4-2 机制砂的石粉含量

项目		指标		
		$\geq C60$	C55~C30	$\leq C25$
石粉含量 (%)	MB<1.4	≤ 5.0	≤ 7.0	≤ 10.0
	MB ≥ 1.4	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 5.0

4.0.5 自密实高性能混凝土的拌合用水和养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的有关规定。

4.0.6 自密实高性能混凝土外加剂应符合下列规定：

- 1 减水剂宜采用聚羧酸系减水剂，其质量应符合现行行业标准《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223 的有关规定。
- 2 其他外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的有关规定；掺用增稠剂、絮凝剂等其他外加剂时，应通过充分试验进行验证，其性能应符合国家现行有关标准的规定。

5 自密实高性能混凝土性能

5.1 拌合物性能

5.1.1 自密实高性能混凝土应具有良好的粘聚性、保水性和流动性，不应离析或泌水。

5.1.2 自密实高性能混凝土的工作性能应满足工程设计和施工要求，对应技术要求应符合表 5.1.2 的规定。

表 5.1.2 自密实高性能混凝土拌合物工作性能的技术要求

工作性能	指标	技术要求
填充性	坍落拓展度 (mm)	600~700
	拓展时间 T_{500} (s)	2~5
间隙通过性	V 型漏斗通过时间 (s)	5~20
	L 型箱通过能力 (H_2/H_1)	≥ 0.8
抗离析性	离析率 (%)	≤ 15
	粗骨料振动离析率 (%)	≤ 10
其他	容重 (kg/m^3)	2300~2400
	含气量 (%)	≤ 4
	水溶性氯离子含量 (%)	≤ 0.3

5.1.3 自密实高性能混凝土的体积稳定性应符合表 5.1.3 的规定。

表 5.1.3 自密实高性能混凝土体积稳定性的技术要求

性能	指标	技术要求
体积稳定性	终凝前自身体积变形 (自拌合成型开始测试, %)	≥ -0.075
	90d 自生体积变形 (自终凝开始测试, %)	≥ -0.025

5.1.4 自密实高性能混凝土坍落度 1h 损失不宜大于 30mm。

5.1.5 自密实高性能混凝土拌合物试验方法应符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的有关规定。

5.2 硬化混凝土的性能

5.2.1 硬化混凝土力学性能、长期性能和耐久性能应满足设计要求和国家现行相关标准的规定。

6 混凝土配合比设计

6.1 一般规定

6.1.1 自密实高性能混凝土应根据钢壳沉管的结构形式、施工工艺以及环境因素进行配合比设计，并应在综合考虑自密实性能、抗压抗拉等强度、耐久性以及其他必要性能要求的基础上，计算初试配合比。经实验室试配、调整对不同胶凝材料用量进行优化，得出满足自密实性能要求的基准配合比，经强度、耐久度复核得到设计配合比。

6.1.2 配合比设计应采用工程实际使用的原材料；当原材料品种发生变化时，应重新进行配合比设计。

6.1.3 配合比设计宜采用绝对体积法。在进行配合比设计调整时，应考虑水胶比对设计强度的影响和水粉比对自密实性能的影响，水胶比宜小于 0.40，胶凝材料用量宜控制在 $450\text{kg/m}^3 \sim 600\text{kg/m}^3$ 。

6.1.3 自密实高性能混凝土宜采用增加粉体材料用量和选用优质高效减水剂或高能减水剂，改善浆体的粘聚性和流动性。

6.2 配合比设计

6.2.1 自密实高性能混凝土配合比设计应符合行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283。

6.2.2 钢壳沉管自密实高性能混凝土配合比设计应符合图 6.2.2 的流程。

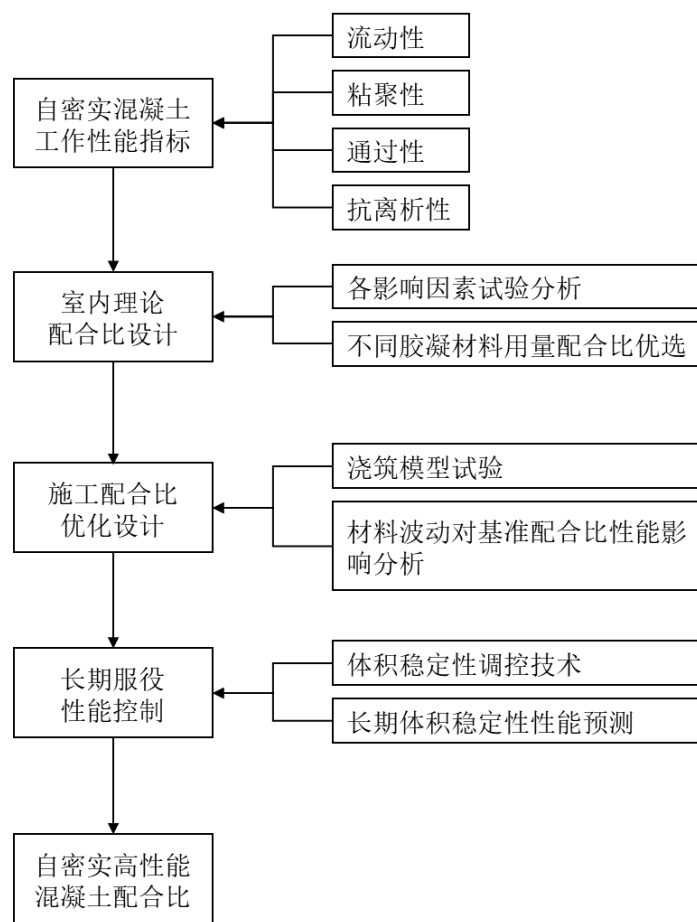


图 6.2.2 钢壳沉管自密实高性能混凝土配合比设计流程

6.2.3 自密实高性能混凝土初始配合比设计应符合下列规定：

1 配合比设计应确定拌合物中粗骨料体积、砂浆中砂的体积分数、水胶比、胶凝材用量、矿物掺合料的比例等参数。

2 粗骨料体积及质量的计算应符合下列规定：

1) 每立方米混凝土中粗骨料的体积 (V_g) 宜控制在 $0.30\text{m}^3 \sim 0.35\text{m}^3$ ；

2) 每立方米混凝土中粗骨料的质量 (m_g) 可按下式计算：

$$m_g = V_g \cdot \rho_g \quad (5.2.2-1)$$

式中： ρ_g ——粗骨料的表观密度 (kg/m^3)。

3 砂浆体积 (V_m) 可按下式计算：

$$V_m = 1 - V_g \quad (5.2.2-2)$$

式中： ρ_g ——粗骨料的表观密度 (kg/m^3)。

4 砂浆中砂的体积分数 (ϕ_s) 可取 $0.42 \sim 0.45$ 。

5 每立方米混凝土中砂的体积和质量可按下式计算：

$$V_s = V_m \cdot \Phi_s \quad (5.2.2-3)$$

$$m_s = V_s \cdot \rho_s \quad (5.2.2-4)$$

式中： ρ_s ——砂的表观密度（ kg/m^3 ）。

6 浆体体积（ V_p ）可按下式计算：

$$V_p = V_m - V_s \quad (5.2.2-5)$$

7 胶凝材料表观密度可根据矿物掺合料和水泥的相对含量及各自的表观密度确定，可按下式计算：

$$\rho_b = \frac{1}{\frac{\beta}{\rho_m} + \frac{1-\beta}{\rho_c}} \quad (5.2.2-6)$$

式中： ρ_m ——矿物掺合料的表观密度（ kg/m^3 ）；

ρ_c ——水泥的表观密度（ kg/m^3 ）；

β ——每立方米混凝土中矿物掺合料占胶凝材料的质量分数（%）；当采用两种或两种以上矿物掺合料时，可以 β_1 、 β_2 、 β_3 表示，并进行相应计算；根据自密实混凝土工作性、耐久性、温升控制等要求，合理选择胶凝材料中水泥、矿物掺合料类型，矿物掺合料占胶凝材料用量的质量分数 β 不宜小于 0.2。

8 自密实高性能混凝土配制强度（ $f_{cu,0}$ ）应按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定计算。

9 水胶比（ m_w/m_b ）应符合下列规定：

1) 当具备试验统计资料时，可根据工程所使用的原材料，通过建立的水胶比与自密实高性能混凝土抗压强度关系式来计算得到水胶比；

2) 当不具备上述试验统计资料时，水胶比可按下式计算：

$$m_w / m_b = \frac{0.42 f_{ce} (1 - \beta + \beta \cdot \gamma)}{f_{cu,0} + 1.2} \quad (5.2.1-7)$$

式中： m_b ——每立方米混凝土中胶凝材料的质量（ kg ）；

m_w ——每立方米混凝土中用水的质量（ kg ）；

f_{ce} ——水泥的 28d 实测抗压强度（MPa）；当水泥 28d 抗压强度未能进行

实测时，可采用水泥强度等级对应值乘以 1.1 得到的数值作为水泥抗压强度值；

γ ——矿物掺合料的胶凝系数；粉煤灰（ $\beta \leq 0.3$ ）可取 0.4、矿渣粉（ $\beta \leq 0.4$ ）可取 0.9。

10 每立方米混凝土中胶凝材料的质量（ m_b ）可根据混凝土中的浆体体积（ V_p ）、胶凝材料的表观密度（ ρ_b ）、水胶比（ m_w/m_b ）等参数确定，并可按下式计算：

$$m_b = \frac{(V_p - V_a)}{\left(\frac{1}{\rho_b} + \frac{m_w/m_b}{\rho_w} \right)} \quad (5.2.1-8)$$

式中： V_a ——每立方米混凝土中引入空气的体积（L），对于非引气型的自密实混凝土， V_a 可取 10L~20L；

ρ_w ——每立方米混凝土中拌合水的表观密度（ kg/m^3 ），取 1000kg/m^3 。

11 每立方米混凝土中用水的质量（ m_w ）应根据每立方米混凝土中胶凝材料质量（ m_b ）以及水胶比（ m_w/m_b ）确定，并可按下式计算：

$$m_w = m_b \cdot (m_w / m_b) \quad (5.2.1-9)$$

12 每立方米混凝土中水泥的质量（ m_c ）和矿物掺合料的质量（ m_m ）应根据每立方米混凝土中胶凝材料的质量（ m_b ）和胶凝材料中矿物掺合料的质量分数（ β ）确定，并可按下列公式计算：

$$m_m = m_b \cdot \beta \quad (5.2.1-10)$$

$$m_c = m_b - m_m \quad (5.2.1-11)$$

13 外加剂的品种和用量应根据试验确定，外加剂用量可按下式计算：

$$m_{ca} = m_b \cdot \alpha \quad (5.2.1-12)$$

式中： m_{ca} ——每立方米混凝土中外加剂的质量（kg）；

ρ_w ——每立方米混凝土中外加剂占胶凝材料总量的质量百分数（%）。

6.2.4 自密实高性能混凝土配合比的试配、调整与确定应符合下列规定：

1 混凝土试配时应采用工程实际使用的原材料，每盘混凝土的最小搅拌量不

宜小于 25L。

2 试配时，首先应进行试拌，先检查拌合物自密实性能必控指标，再检查拌合物自密实性能可选指标。当试拌得出的拌合物自密实性能不能满足要求时，应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下调整胶凝材料用量、外加剂用量或砂的体积分数等，直到符合要求为止。应根据试拌结果提出混凝土强度试验用的基准配合比。

3 混凝土强度试验时至少应采用三个不同的配合比。当采用不同的配合比时，其中一个应为本规程第 5.2.3 条中第 2 款确定的基准配合比，另外两个配合比的水胶比宜较基准配合比分别增加和减少 0.02；用水量与基准配合比相同，砂的体积分数可分别增加或减少 1%。

4 制作混凝土强度试验试件时，应验证拌合物自密实性能是否达到设计要求，并以该结果代表相应配合比的混凝土拌合物性能指标。

5 混凝土强度试验时每种配合比至少应制作一组试件，标准养护到 28d 或设计要求的龄期时试压，也可同时多制作几组试件，按《早期推定混凝土强度试验方法标准》JGJ/T 15 早期推定混凝土强度，用于配合比调整，但最终应满足标准养护 28d 或设计规定龄期的强度要求。如有耐久性要求时，还应检测相应的耐久性指标。

6 应根据试配结果对基准配合比进行调整，调整与确定应按《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定执行，确定的配合比即为设计配合比。

7 对于应用条件特殊的工程，宜采用确定的配合比进行模拟试验，以检验所设计的配合比是否满足工程应用条件。

7 生产与施工

7.1 一般规定

7.1.1 自密实高性能混凝土施工前应根据钢壳沉管的类型和特点、工程量、材料供应情况、施工条件和进度计划等确定施工方案，并对施工作业人员进行技术交底。

7.1.2 自密实高性能混凝土生产与施工包括自密实高性能混凝土的拌制、运输、浇筑和养护。

7.1.3 自密实高性能混凝土宜采用预拌混凝土生产方式。

7.1.4 预拌混凝土生产企业必须具有相应的资质等级证书，建立完善可行的规章制度，设置技术与质量管理机构，并配备具有技术合格的检测人员和试验设备齐全的试验室。

7.1.5 自密实高性能混凝土生产与施工的技术人员应经过专门技术训练并具有相关经验。

7.1.6 在自密实高性能混凝土生产过程中，应做好有关天气、生产和检验记录。

7.1.7 自密实高性能混凝土施工过程中应严格实施监理制度。

7.1.8 自密实高性能混凝土施工应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的相关规定。

7.2 生产

7.2.1 自密实高性能混凝土的生产包括计量和搅拌。

7.2.2 自密实高性能混凝土原材料的计量应按质量计，且计量允许偏差应符合表 7.2.1 的规定。

表 7.2.1 原材料计量允许偏差（%）

序号	原材料品种	胶凝材料	骨料	水	外加剂	掺合料
1	每盘计量允许偏差	±1	±2	±1	±1	±1
2	累计计量允许偏差	±1	±2	±1	±1	±1

注：1 现场搅拌时原材料计量允许偏差应满足每盘计量允许偏差要求；

2 累计计量允许偏差是指每一运输车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差，该项指标仅适用于采用计算机控制计量的搅拌站。

7.2.3 自密实高性能混凝土宜采用集中搅拌方式，生产过程应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902 的规定。

7.2.4 自密实高性能混凝土在搅拌机的搅拌时间不应少于 60s，并应比非自密实高性能混凝土适当延长。搅拌机应符合现行国家标准《混凝土搅拌机》GB/T 9412 的规定，宜采用强制式搅拌机。当采用其他搅拌设备时，应根据需要适当延长搅拌时间。

7.2.5 在生产过程中，每台班至少要检测一次骨料含水率，当骨料含水率有显著变化时，应增加测定次数，并依据检测见过及时调整用水量和其他材料量。

7.2.6 夏季高温施工时，生产自密实高性能混凝土原材料最高入机温度应符合表 7.2.6 的规定，必要时应对原材料采取温度控制措施。

表 7.2.6 原材料最高入机温度

原材料	最高入机温度（℃）
水泥	60
骨料	30
水	25
掺合料	60

7.2.7 冬季施工时，宜对拌合水、骨料进行加热，但拌合水温度不宜超过 60℃、骨料不宜超过 40℃，水泥、外加剂、掺合料不得直接加热。

7.2.8 泵送自密实高强度混凝土若使用轻粗骨料，宜在使用前对轻粗骨料采用浸水、洒水或加压预湿等措施处理。

7.3 运输

7.3.1 自密实高性能混凝土运输设备应符合下列要求：

1 运输设备在运送混凝土时，应能保持混凝土拌合物的均匀性，不应产生离析、分成和前后不均匀现象；

2 运输车应符合现行行业标准《混凝土搅拌运输车》JG/T 5094 的规定。当时共现场需要外加剂进行扩展调整时，应使混凝土得到充分搅拌，使其均匀一致。

7.3.2 运输车在接料前应将车内残留的混凝土清洗干净，并应将车内积水排尽。

7.3.3 运输车运输过程中，搅拌运输车的滚筒应保持运输转动，速度应控制在 3r/min~5r/min，运输过程中严禁向车内混凝土加水。

7.3.4 自密实高性能混凝土的运输时间不宜大于 120min。

7.3.5 自密实高性能混凝土的运输速度应保证施工的连续性。

7.4 浇筑

7.4.1 浇筑之前要检查管节内是否清洁，确保浇筑的混凝土应填充到管节内各个角落。

7.4.2 每批次混凝土进场后，须进行现场试验检测。

7.4.3 钢壳沉管管节的混凝土浇筑顺序为：中墙→边墙→底板→顶板→管面防锚层。

7.4.4 钢壳沉管管节每个 3m×3m 的标准隔仓，布置 1 个浇筑孔、8 个排气孔。浇筑时通过人工控制浇筑速率并辅以钢棒或小型振动器对排气孔以人工振捣方式排出舱内空气。从排气孔内排出 30cm 的浆液后，注浆质量满足要求。混凝土浇筑完成后，对浇筑孔和排气孔进行封焊。

7.4.5 自密实高性能混凝土浇筑过程应保持连续性，当因停泵时间过程，混凝土不能达到要求的工作性时，应及时清除泵和泵管中的混凝土，重新进行浇筑。

7.4.6 钢壳管节在夏季高温时段浇筑混凝土，可采取隔仓提前 1h 开盖自然通风，

或管面洒水的措施进行降温。高温施工时，自密实高性能混凝土入模温度不宜超过 35℃；冬季施工时，自密实高性能混凝土入模温度不宜低于 5℃。在降雨、降雪期间，不宜露天浇筑混凝土。

7.4.7 自密实高性能混凝土入模温度宜控制在 35℃ 以下；混凝土在入模温度基础上的绝热温升值不宜大于 50℃，混凝土的降温速率不宜大于 2.0℃/d。

7.4.8 自密实高性能混凝土在浇筑时，现场应有专人进行监控，当混凝土自密实性不能满足要求时，可加入适量与原配比相同成分的外加剂，外加剂掺入后搅拌运输车滚筒应快速旋转，外加剂掺量和旋转搅拌时间应通过时间验证。

7.4.9 大体积自密实高性能混凝土采用整体分层连续浇筑或推移式连续浇筑时，应缩短间歇时间，并应在前层混凝土初凝之前浇筑次层混凝土，同时减少分层浇筑的次数。

7.4.10 自密实高性能混凝土宜避开高温时段浇筑，以避免水分蒸发速率过快。

8 质量检验

8.0.1 自密实高性能混凝土质量检验包括混凝土拌合物工作性检验和硬化混凝土质量检验。

8.0.2 自密实高性能混凝土拌合物的检验项目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 的规定外，还应检验自密实性能，并应符合下列规定：

- 1 混凝土拌合物自密实性能检验指标应包括坍落扩展度和扩展时间；
- 2 出厂检验时，坍落扩展度和扩展时间应每 100m³ 相同配合比的混凝土至少检验 1 次；当一个台班相同配合比的混凝土不足 100m³ 时，检验不得少于 1 次；
- 3 交货时坍落扩展度和扩展时间检验批次应与强度检验批次一致；
- 4 实测坍落扩展度应符合设计要求，混凝土拌合物不得出现外沿泌浆和中心骨料堆积现象。

8.0.3 混凝土拌合物自密实性能的试验方法应符合现行行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 的规定，混凝土拌合物的其他性能试验方法应按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定执行。

8.0.4 硬化混凝土强度应满足设计要求，检验的试件应符合下列规定：

- 1 出厂检验试件间留置方法和数量应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902 的规定；
- 2 用于钢壳沉管工程的自密实高性能混凝土，应对其耐久性项目进行检验，其试件间留置方法和数量应符合现行行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193 的规定。

8.0.5 硬化混凝土试件成型方法应按现行行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 的规定执行。

8.0.6 硬化混凝土的力学性能试验方法应按照现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定执行。

8.0.7 硬化混凝土的长期性能和耐久性能试验方法应按照现行国家标准《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的规定执行。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对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，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
- 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046
- 《轻集料及其试验方法 第一部分：轻集料》 GB/T 17431.1
- 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
- 《混凝土结构过程施工规范》 GB 50666
- 《预拌混凝土》 GB/T 14902
- 《混凝土搅拌机》 GB/T 9412
- 《大体积混凝土施工规范》 GB 50496
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 GB/T 50080
- 《普通混凝土力学性能检验方法标准》 GB/T 50081
- 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082
- 《混凝土用复合掺合料》 JG/T 486
- 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》 JGJ 52
- 《混凝土用水标准》 JGJ 63
- 《轻骨料混凝土技术规程》 JGJ 51
- 《纤维混凝土应用技术规程》 JGJ/T 221
- 《自密实混凝土应用技术规程》 CECS 203
- 《自密实混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
- 《混凝土搅拌运输车》 JG/T 5094

《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CECS 01

《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193

中国工程建设标准化协会标准

钢壳沉管自密实高性能混凝土应用技术规程

T/CECS×××:××××

条文说明

目 次

1 总 则

1.0.1 随着海陆经济一体化发展的不断推进，湾区建设需求不断增多，水下隧道成为跨越航运繁忙水域的最佳选择。近年来，我国将钢壳混凝土沉管成功应用于世界级重大跨海交通工程，沉管法已成为水下隧道建设的主要工法。但尚无专门的钢壳沉管自密实高性能混凝土应用技术标准指导钢壳沉管自密实高性能混凝土的生产和应用，无法针对性指导钢壳沉管自密实高性能混凝土的应用。本条规定了编制本标准的目的是进一步规范并促进自密实高性能混凝土在钢壳沉管中应用技术的发展，在确保建设工程质量时，有统一的钢壳沉管自密实高性能混凝土技术规程作为依据，并做到技术先进、安全可靠、经济合理。

1.0.2 本条明确了规程的适用范围。

1.0.3~1.0.4 对于钢壳沉管自密实高性能混凝土的有关技术内容，本标准规定的以本标准为准，未做规定的应按国家现行相关标准执行。本规程为钢壳沉管自密实高性能混凝土的专项标准，需与国家现行基础标准形成互补。明确优先适用本规程，未规定部分遵循国标，既突出专项标准的技术针对性，又保障标准体系的完整性与协调性，避免技术冲突。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1~2.1.2 介绍钢壳沉管和钢壳沉管自密实高性能混凝土的特点。

2.1.3~2.1.5 介绍钢壳沉管自密实高性能混凝土的性能。

2.1.6 本条对坍落扩展度进行定义，最大直径与垂直直径的平均值既避免单一方向测量的偏差（如单侧受阻流动偏小），又通过扩展面直径直观量化流动性，为判断混凝土的填充性提供直观依据。

2.1.7 本条对拓展时间（ T_{500} ）进行定义。

2.1.8 本条根据欧洲标准《Testing Fresh Concrete - Part 9: Self-Compacting Concrete - V - Funnel Test》EN 12350-9 对 V 型漏斗试验进行定义。

2.1.9 本条根据欧洲标准《Testing Fresh Concrete - Part 10: Self-Compacting Concrete - L - Box Test》EN 12350-10 对 L 型箱试验进行定义。

2.1.10 本条根据欧洲自密实混凝土指南《The European Guide-lines for Self-Compacting Concrete— Specification, Production and Use》对离析率进行定义。

3 基本规定

3.0.1 钢壳沉管自密实高性能混凝土一次性浇筑、水下不可维修的特性，决定原材料质量与过程管控是关键：优质且稳定的原材料是混凝土性能达标的基础；同时，从搅拌计量、运输转速到浇筑速率，每个环节的严格管控，可避免人为操作失误引发的质量问题，双重保障混凝土最终性能。

3.0.2 自密实高性能混凝土的凝结时间需适配施工节奏，粘聚性差会导致混凝土分层离析，保水性差会引发表面泌水，降低表层强度与钢壳粘结力。本条补充凝结时间、粘聚性、保水性要求，是为确保混凝土全施工周期性能稳定，避免仅关注流动填充，忽视其他关键性能导致的工程缺陷。

3.0.3 长时间保持工作性能可确保自密实高性能混凝土到达现场后仍满足浇筑要求，避免因性能衰减导致填充不足；长距离泵送要求可防止混凝土在泵管内离析、堵管，保障施工连续性，两项要求共同适配钢壳沉管长距离运输+泵送的施工特点。

3.0.4 钢壳隔仓为封闭空间，工艺孔是混凝土填充密实的关键。浇筑孔需确保混凝土高效流入，避免局部堆积；排气孔需彻底排出仓内空气，防止空气滞留形成空鼓；同时，需通过优化孔位布局、控制浇筑速率等措施，提升混凝土流动效率，本条强调合理设置工艺孔+提升填充效率，是为从结构设计层面保障混凝土密实度。

3.0.5 钢壳沉管混凝土生产批量大，单节沉管需 $4000\text{m}^3 \sim 5000\text{m}^3$ ，质量要求高，人工管控易出现偏差。信息化技术（如生产数据实时上传、浇筑过程仓内高度监测）可实现全流程追溯，便于快速定位质量问题（如某批次强度不足可追溯至原材料计量）；自动化装备可减少人为操作误差，提升生产稳定性。本条推荐信息化+自动化，是为适配大规模、高精度的生产需求，降低质量风险。

4 原材料

4.0.1 优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，核心依据是其性能适配性。两类水泥矿物组成稳定，强度发展快，与聚羧酸系减水剂兼容性好，不易出现假凝、离析等问题，能满足高性能混凝土高强度、高流动性需求；当采用其他水泥（如矿渣水泥等）时，需验证其与外加剂的适应性、强度发展规律，避免性能波动；不同水泥混合使用会因水化速率、放热规律差异，导致混凝土凝结异常、强度降低，因此强调“不得混合使用”。

4.0.2 矿物掺合料的选用需兼顾性能提升与经济性，粉煤灰能通过“球形效应”改善混凝土流动性，降低水化热，若低于Ⅱ级，含碳量高会影响混凝土强度与抗渗性；磨细粉煤灰是为通过细化颗粒提升活性，适配更高耐久性要求。

S95 级粒化高炉矿渣粉活性指数高，可提升混凝土后期强度与抗氯离子渗透能力，适配海洋环境；S75 级矿渣粉活性不足，会导致混凝土强度增长缓慢，难以满足设计要求。

硅灰比表面积大，可填充水泥颗粒间隙，显著提升抗渗性；但掺量大于 8% 会增加混凝土粘度，需通过标准控制质量稳定性。

单一掺合料存在性能短板（如粉煤灰抗渗差、硅灰流动性差），复合掺合料（如粉煤灰+矿渣粉+硅灰）可实现优势互补，但需通过行业标准《混凝土用复合掺合料》JG/T 486 规范质量，避免成分不稳定导致混凝土性能波动。

4.0.3 粗骨料指标控制围绕适配钢壳沉管浇筑与受力展开，最大公称直径 $\leq 20\text{mm}$ ，是因隔仓钢筋间距通常为 $100\text{mm}\sim 200\text{mm}$ ，骨料粒径 $>20\text{mm}$ 易在钢筋间隙堵塞；连续级配或多单粒径搭配，可减少骨料空隙率，提升混凝土密实度；针片状颗粒含量 $\leq 8\%$ ，避免骨料相互咬合降低流动性；含泥量 $\leq 1.0\%$ 、泥块含量 $\leq 0.5\%$ ，防止泥土包裹骨料表面，削弱浆体与骨料粘结力，确保混凝土强度与耐久性。

4.0.4 细骨料的选用聚焦保障混凝土和易性与强度，中砂级配合理，既能提供足够流动性，又避免砂过细导致粘度增大；天然砂含泥量 $\leq 3.0\%$ 、泥块含量 $\leq 1.0\%$ ，防止杂质影响强度；机制砂石粉含量分级控制（MB 值区分粘土含量）：MB <1.4 时，石粉含粘土低，可改善混凝土流动性，允许较高含量（C60 $\leq 5.0\%$ ）；MB ≥ 1.4 时，石粉含粘土高，需严格限制（C60 $\leq 2.0\%$ ），避免混凝土离析或收缩增大。

4.0.5 拌合水与养护水需符合行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63，核心控制指标主要有氯离子含量 $\leq 200\text{mg/L}$ ，防止钢筋腐蚀（海洋环境需 $\leq 150\text{mg/L}$ ）；pH 值 $\geq$

6.5，避免酸性水影响水泥水化；不得含油污、有机物，防止削弱骨料与浆体粘结力。若混凝土用水不符合标准，会直接导致混凝土强度降低、耐久性失效，因此需严格遵循行业标准。

4.0.6 外加剂选用需适配自密实高性能混凝土需求，减水剂优先选聚羧酸系，因其减水率高、坍落度损失小、与水泥适应性好，能满足高流动性要求；萘系等传统减水剂减水率低、损失大，不推荐使用；其他外加剂（如增稠剂、絮凝剂等）需试验验证，因为不同外加剂与胶凝材料的兼容性差异大，需通过试拌确保混凝土性能达标，避免盲目添加引发质量问题。

5 自密实高性能混凝土性能

5.1 拌合物性能

5.1.1 钢壳沉管隔仓封闭、无振捣条件，混凝土需依靠自身性能完成密实浇筑，粘聚性防止混凝土在运输、浇筑过程中离析；良好的流动性确保混凝土流至仓角；保水性避免混凝土表面泌水导致表层强度低。若出现混凝土离析，骨料集中区强度不足；若混凝土泌水，会在钢壳与混凝土界面形成薄弱层，引发渗漏。本条明确不应离析或泌水，是为从源头避免因拌合物性能缺陷导致的结构隐患。

5.1.2 自密实高性能混凝土工作性能技术要求基于钢壳沉管工程实践，坍落拓展度 600mm~700mm，确保能填充 3m×3m 隔仓（流动半径需达 1.5m 以上）；拓展时间 T_{500} 试验时间 2s~5s，平衡流动速度与抗离析性，避免过快离析、过慢效率低。V 型漏斗试验时间 5s~20s，排除离析与流动性不足风险；L 型箱 H_2/H_1 不小于 0.8，确保通过钢筋间隙无堵塞（模拟隔仓配筋环境）。离析率不大于 15%、粗骨料振动离析率不大于 10%，防止浆体流失与骨料堆积，保障材料均匀性。容重 2300kg/m³~2400kg/m³，符合高性能混凝土密度要求（过低可能含气量过高，降强度）；含气量不大于 4%，含气量过高会使混凝土降低；水溶性氯离子含量不大于 0.3%，防止钢筋腐蚀，各项指标共同保障混凝土适配钢壳沉管施工与服役需求。

5.1.3 体积稳定性指标针对钢—混协同变形的需求设置，混凝土终凝前自身体积变形不小于-0.075%，防止混凝土塑性阶段收缩过大导致表面开裂；90d 自生体积变形不小于-0.025%，避免混凝土长期收缩与钢壳变形差过大，引发钢壳局部受拉或混凝土开裂。两项指标确保混凝土与钢壳长期变形协调，保障结构整体性。

5.1.4 自密实高性能混凝土从搅拌站到浇筑现场，需经历运输、现场检测，总时长约 1h。若混凝土坍落度 1h 损失大于 30mm，到达现场后坍落拓展度可能低于 600mm，无法满足填充要求，需额外添加外加剂调整，增加施工复杂度与质量风险。本条控制坍落度损失不大于 30mm，是为确保混凝土到场后仍具备合格的工作性能，保障浇筑效率与质量。

5.1.5 统一试验方法是确保数据可比的基础。不同检测机构若采用不同试验方法会导致数据偏差，影响配合比调整与质量评判。本条规定符合 GB/T 50080，可确保试验结果的通用性与准确性，为混凝土性能控制提供可靠数据支撑。

5.2 硬化混凝土的性能

5.2.1 硬化混凝土性能需满足承载+耐久的双重需求，力学性能直接决定结构承载能力；长期性能关乎结构长期稳定性，避免变形过大引发渗漏；耐久性能保障水下服役寿命。因不同工程设计要求差异，本条规定满足设计与国标，既明确最低标准，又为个性化需求预留空间。

6 混凝土配合比设计

6.1 一般规定

6.1.1 自密实高性能混凝土的配合比设计需遵循针对性+全性能覆盖逻辑，先根据结构隔仓尺寸、施工运输距离、环境腐蚀等级确定核心需求，再综合自密实性能、强度、耐久性计算初试配合比；实验室试配阶段，通过调整胶凝材料用量优化自密实性能，得出基准配合比；最后通过强度、耐久度复核，验证配合比是否满足全部要求，形成设计配合比，避免因单一性能优化导致其他性能不达标。

6.1.2 原材料是混凝土性能的基础，配合比设计需基于工程实际使用材料。若水泥或其他胶凝材料品牌更换，其与减水剂的适应性可能改变；若骨料级配调整，会影响混凝土流动性。本条要求原材料变化重新设计，是为避免因材料与配合比不匹配导致混凝土性能波动，确保配合比的实际适配性。

6.1.3 绝对体积法比质量法更适合高性能混凝土。高性能混凝土骨料、浆体体积精确，绝对体积法可避免因骨料表观密度波动导致的配合比偏差。水胶比 <0.40 ，是因水胶比 >0.40 会降低混凝土抗渗性与强度。胶凝材料 $450\text{kg/m}^3\sim 600\text{kg/m}^3$ ，是因为低于 450kg/m^3 时浆体不足，混凝土流动性差；高于 600kg/m^3 时水化热高，混凝土易产生温度裂缝，两项参数共同保障混凝土性能与施工安全性。

6.2 配合比设计

6.2.1 《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 是自密实混凝土的通用设计标准，涵盖配合比计算、试配流程等基础要求。本规程为钢壳沉管专项标准，需在通用标准基础上补充专项要求，因此本条明确符合行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283，既保障配合比设计的通用性，又为专项技术要求提供基础支撑，避免重复通用标准内容。

6.2.2 配合比设计流程图体现理论+试验+验证的全流程管控，先通过影响因素试验分析确定设计参数；再经室内理论计算、不同胶凝材料用量优选，得出初始配合比；随后通过浇筑模型试验（1:1 隔仓模拟）验证填充性；最后考虑材料波动、体积稳定性调控、长期性能预测，优化为施工配合比。流程图的核心是多轮验证，避免仅靠理论计算导致的工程适配性不足，确保配合比满足钢壳沉管复杂需求。

6.2.3 初始配合比计算参数设定基于混凝土性能与施工适配，粗骨料体积 $0.30\text{m}^3\sim$

0.35m³，低于 0.30m³ 时骨料不足，成本高；高于 0.35m³ 时浆体不足，流动性差；通过公式计算质量，确保骨料用量准确。

砂浆体积中砂体积分数取 0.42~0.45，低于 0.42 砂浆粘度低易离析，高于 0.45 砂浆粘度高流动性差，通过公式计算砂用量，平衡砂浆和易性。

浆体体积计算需要确保浆体足够包裹骨料、提供流动性；胶凝材料表观密度公式考虑矿物掺合料与水泥的密度差异，矿物掺合料占比 $\geq 20\%$ ，既提升耐久性，又降低水化热。

配制强度按 JGJ 55 计算，确保强度达标率；水胶比计算分有试验资料与无试验资料，公式中矿物掺合料胶凝系数基于大量试验总结（粉煤灰在 $\beta \leq 0.3$ 时活性低取 0.4，矿渣粉在 $\beta \leq 0.4$ 时活性高取 0.9），确保计算准确性。

胶凝材料质量、用水量通过浆体体积、水胶比等参数计算，确保浆体性能；水泥与矿物掺合料质量通过系数 β 分配，外加剂用量按胶凝材料质量百分数计算，全流程公式化计算可减少人为误差，保障配合比精度。

6.2.4 试配、调整与确定流程聚焦性能验证与优化，每盘混凝土最小搅拌量 $\geq 25\text{L}$ ，避免小批量搅拌导致的材料混合不均，确保试配结果贴近实际生产。

试拌先查必控指标（坍落拓展度、拓展时间 T_{500} 等），再查可选指标（离析率、V 型漏斗等），调整时保持水胶比不变，通过优化胶凝材料、外加剂用量或砂率，确保自密实性能达标，形成基准配合比。

三个混凝土配合比调整（水胶比 ± 0.02 、砂率 $\pm 1\%$ ），是为找到混凝土强度与流动性平衡的最优方案，避免单一配合比可能存在的混凝土性能短板。

强度试验时验证混凝土自密实性能，确保强度试件能代表实际混凝土性能；多制作试件用于早期强度推定，可提前调整配合比，缩短试配周期，但最终需以混凝土 28d 强度为准。

混凝土耐久性检测针对钢壳沉管水下服役需求，避免仅关注强度忽视耐久性；按 JGJ 55 调整基准配合比，确保强度与耐久性双达标。

特殊工程模拟试验（如异形仓、深水深仓），是为验证配合比在极端场景下的适配性，避免实际施工出现意外（如混凝土填充不满、泵送堵管等），确保工程质量万无一失。

7 生产与施工

7.1 一般规定

7.1.1 钢壳沉管混凝土施工复杂度高，需专项方案指导。根据沉管单孔/多孔类型、单节 $4000\text{m}^3 \sim 5000\text{m}^3$ 工程量确定搅拌、运输设备数量；结合材料供应、施工条件制定进度计划；明确浇筑顺序、排气孔处理等关键工艺。技术交底需至作业层，避免因操作不当导致质量问题，确保施工流程标准化。

7.1.2 混凝土生产与施工的拌制、运输、浇筑、养护四大环节环环相扣，拌制决定混凝土初始性能；运输影响性能保持；浇筑控制密实度；养护保障强度发展与耐久性。本条明确环节构成，是为强调全流程管控，避免因某一环节疏漏影响整体质量，形成闭环管理。

7.1.3 预拌混凝土相比现场搅拌优势显著，搅拌站具备自动化计量设备，确保配合比准确；专业试验室实时监测性能，质量稳定；可连续供应，满足大体积浇筑需求；减少现场粉尘、噪音污染。钢壳沉管混凝土用量大、性能要求高，预拌方式能最大程度保障质量稳定性。

7.1.4 预拌混凝土生产企业的资质与试验室能力是质量基础，资质等级证书确保企业具备相应生产能力；完善规章制度规范生产流程；技术与质量管理机构负责工艺优化与质量管控；合格检测人员与齐全设备保障试验数据准确，避免无资质、无检测企业导致的质量风险。

7.1.5 钢壳沉管混凝土技术要求特殊，如自密实性能检测、隔仓浇筑等，普通混凝土技术人员缺乏专项经验。普通混凝土技术人员需通过专门训练掌握自密实性能判断、浇筑孔封堵等工艺；具备应急处理能力。本条强调专业训练与经验，是为避免因人员技术不足导致施工失误，保障工艺落地准确性。

7.1.6 生产过程记录是质量追溯的关键。温度、降雨等天气记录关联施工环境影响；原材料用量、搅拌时间等生产记录可排查配合比偏差原因；混凝土进场性能、试件强度等检验记录为质量评判提供依据。完整记录便于后期质量问题溯源，符合工程质量终身责任制要求。

7.1.7 监理制度是施工质量的外部保障，监理需核查原材料合格证、监督计量精度、见证混凝土试件留置、旁站浇筑过程，避免施工单位偷工减料或违规操作。本条强调严格实施监理，是为通过第三方监督提升施工质量可靠性，降低工程风险。

7.1.8 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 是混凝土施工的通用标准，涵盖模板搭设、钢筋安装等基础要求。本规程聚焦钢壳沉管混凝土的专项工艺（如隔仓浇筑、排气孔设置等），需在通用规范基础上补充执行。因此本条明确符合《混凝土结构工程施工规范》GB 50666，既保障施工流程合规性，又突出专项工艺的技术针对性，避免与通用规范冲突。

7.2 生产

7.2.1 计量与搅拌是混凝土生产的核心环节，计量精度直接决定配合比准确性，搅拌均匀性影响混凝土性能。本条明确生产的两大构成，是为强调精准计量+充分搅拌的重要性，为后续性能控制奠定基础。

7.2.2 计量允许偏差设定基于材料对性能的影响程度，胶凝材料、水、外加剂用量少，偏差对性能影响大，因此允许偏差 $\pm 1\%$ ；骨料用量大，偏差影响相对较小，允许偏差 $\pm 2\%$ 。累计计量偏差针对计算机控制搅拌站，确保每车混凝土材料总量精准，避免多盘累积偏差导致性能波动。现场搅拌无累计计量条件，仅需满足每盘偏差，两项要求兼顾不同生产场景。

7.2.3 集中搅拌方式相比分散搅拌优势明显，便于原材料统一管理、工艺参数集中调控、质量集中检测，符合预拌混凝土生产模式。生产过程遵循国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902，可确保预拌混凝土的通用质量要求，与本规程专项要求形成互补，保障生产标准化。

7.2.4 自密实高性能混凝土组分复杂，需更长搅拌时间确保混合均匀。大于 60s 的搅拌时间可避免混凝土因搅拌不充分导致的性能不均；强制式搅拌机搅拌力度大，能有效打散材料团聚，适配自密实混凝土的搅拌需求；其他搅拌设备搅拌强度不足，需延长时间补偿，确保搅拌质量。

7.2.5 骨料含水率是影响混凝土配合比的关键变量，骨料含水率有变化若不及时调整，会导致水胶比波动，影响混凝土强度与抗渗性。本条规定每台班至少 1 次检测，变化显著时增加频次，是为通过动态调整用水量，确保实际配合比与设计一致，避免混凝土性能偏差。

7.2.6 夏季气温超过 35℃会导致混凝土入模温度过高，加速水泥水化。水泥温度大于 60℃易引发假凝；骨料温度大于 30℃、水温大于 25℃会提升拌合物初始温度，导致初凝时间缩短、早期收缩增大，增加开裂风险。本条设定原材料最高入机温

度，必要时采取遮阳、喷水、加冰等控温措施，是为将混凝土入模温度控制在 35℃ 以下，保障施工性能与后期强度发展。

7.2.7 冬季气温不大于 5℃ 时混凝土易受冻，拌合水、骨料加热可提升拌合物温度，避免水泥水化停滞；拌合水温度不大于 60℃，防止高温水与水泥直接接触引发假凝；骨料温度不大于 40℃，避免温度过高导致混凝土后期强度降低；水泥、外加剂、掺合料直接加热会破坏性能，因此明确禁止，通过科学加热保障冬季施工质量。

7.2.8 轻型粗骨料吸水率高，若不预湿，会在浇筑后吸收混凝土中的水分，导致拌合物流动性快速损失，影响填充性。还易造成混凝土内部缺水，强度降低。本条要求浸水、洒水或加压预湿，使骨料提前吸水饱和，避免浇筑后失水，保障混凝土性能稳定。

7.3 运输

7.3.1 运输设备需适配自密实混凝土特性，保持拌合物均匀性需搅拌运输车滚筒持续转动，防止骨料沉淀；若运输过程中出现离析，需通过快速转动重新混合。运输车符合《混凝土搅拌运输车》JG/T 5094，可确保设备性能达标；现场需调整外加剂时，需充分搅拌均匀，避免局部外加剂过量导致离析，保障混凝土到场性能。

7.3.2 运输车残留混凝土硬化后会与新混凝土混合形成硬块，导致浇筑后结构内部出现薄弱区；车内积水会稀释新混凝土，增大水胶比，降低混凝土强度。本条要求清洗干净、排尽积水，是为避免杂质影响新混凝土质量，确保运输环节无二次污染。

7.3.3 混凝土运输车滚筒转动速度是平衡混凝土防沉淀与保性能的重要指标，速度过慢易导致骨料沉淀；速度过快会增加混凝土粘度，降低流动性。运输过程加水会破坏配合比，导致强度降低、抗渗性下降，因此严禁加水；若流动性不足，需通过添加原配比外加剂调整，保障混凝土性能不变。

7.3.4 混凝土运输时间不大于 120min 基于混凝土性能保持极限，即使坍落度 1h 损失大于 30mm，超过 120min 后，混凝土可能进入初凝阶段，无法满足浇筑要求；若强行浇筑，会导致填充不密实、结构表面出现蜂窝麻面。本条控制运输时间，是为确保混凝土到场后仍具备合格工作性能，避免因超时导致质量缺陷。

7.3.5 混凝土运输速度需与浇筑速度匹配，若运输过慢，会导致浇筑间歇时间过长，

形成冷缝；若过快，会导致混凝土积压，造成浪费。本条强调保证施工连续性，是为通过合理调度混凝土运输车辆，确保混凝土浇筑过程无中断，提升施工效率与质量。

7.4 浇筑

7.4.1 钢壳管节内杂物会影响混凝土与钢壳的粘结力，导致界面出现缝隙。若混凝土未填充至各个角落，会形成空洞，降低结构承载能力。本条要求浇筑前检查清洁度、确保完全填充，是为从源头保障结构完整性与密封性，避免水下服役后出现渗漏或强度不足。

7.4.2 每批次混凝土进场后检测，是为及时排查性能波动。需检测坍落拓展度、扩展时间 T_{500} 、抗离析性等，若性能不达标，需调整或直接废弃，避免不合格混凝土用于浇筑，形成进场即检测、不合格不使用的质量管控关口。

7.4.3 浇筑顺序基于结构受力与填充效率设计，先浇筑中墙，确保其位置准确，避免后续浇筑偏移；再浇筑边墙，与中墙形成框架支撑顶板；后浇筑底板与顶板；最后浇筑管面防锚层。有序浇筑可避免结构受力不均导致的变形，同时确保各部位填充密实，无浇筑盲区。

7.4.4 钢壳沉管标准隔仓孔布置与浇筑控制是填充密实的关键，1个浇筑孔确保混凝土向四周均匀扩散；8个排气孔确保空气无死角排出；人工控制浇筑速率避免混凝土堆积导致空气无法排出；排气孔排出30cm浆液（无气泡），证明仓内已充满混凝土；封焊后需气密性检测，防止沉管下水后渗水，全流程控制确保隔仓填充密实、无渗漏风险。

7.4.5 浇筑连续性直接影响结构整体性，若停泵时间过长，混凝土可能在泵管内初凝，继续浇筑会导致堵管或形成冷缝；需及时清除泵管内混凝土，重新浇筑时用同配比砂浆润滑泵管，避免新混凝土与残留混凝土混合导致性能不均。本条强调保持连续、及时处理停泵，是为避免因施工中断导致结构缺陷，保障浇筑质量。

7.4.6 季节与天气对混凝土浇筑质量影响显著，夏季高温时段钢壳温度可达40℃以上，需提前开盖通风、管面洒水降温，控制入模温度不大于35℃，避免混凝土早期收缩开裂；冬季入模温度不小于5℃，防止混凝土受冻，可通过加热钢壳、覆盖保温被实现；雨雪天露天浇筑会导致混凝土含水率增加，降低强度，因此需停止浇筑，已浇筑部分覆盖防雨布，通过环境管控保障浇筑条件。

7.4.7 钢壳沉管的单节沉管 $4000\text{m}^3 \sim 5000\text{m}^3$ ，水化热高易导致温度裂缝。入模温度不大于 35°C ，降低初始温度基数；绝热温升值不大于 50°C ，通过优化配合比控制水化热；降温速率不大于 $2.0^\circ\text{C}/\text{d}$ ，通过覆盖保温被、预埋冷却水管缓慢降温，避免内外温差过大引发裂缝。三项指标共同构成大体积混凝土温控体系，保障结构无温度裂缝。

7.4.8 现场监控与应急调整是混凝土浇筑质量的最后保障，专人监控可实时发现混凝土离析、流动性不足等问题；仅允许添加原配比相同成分外加剂，避免引入新成分导致性能波动；外加剂掺量需通过试验验证，快速旋转搅拌确保混合均匀，避免局部外加剂过量导致离析，通过应急调整挽救性能偏差混凝土，减少浪费。

7.4.9 混凝土分层浇筑间歇时间控制是避免冷缝的关键，整体分层或推移式浇筑需在前层混凝土初凝前完成次层浇筑，缩短间歇时间可减少冷缝风险；减少分层次数，可降低冷缝数量，提升结构整体性。本条要求缩短间歇、减少分层，是为通过优化浇筑工艺，避免新旧混凝土粘结不良导致的渗漏与强度损失。

7.4.10 气温超过 35°C 时混凝土水分蒸发速率快，表面水分快速流失会导致表层混凝土收缩开裂，影响结构外观与耐久性；同时，水分蒸发会增加混凝土粘度，降低流动性，影响填充性。本条建议避开高温时段浇筑，是为通过时间选择减少环境对混凝土性能的负面影响，保障浇筑质量。

8 质量检验

8.0.1 混凝土质量检验需覆盖施工过程与最终性能，拌合物工作性检验确保施工能顺利进行，避免因流动性不足导致填充不密实；硬化混凝土质量检验评估最终性能是否满足设计要求，两者缺一不可。本条明确检验分类，是为形成过程管控+结果验证的全周期质量评价体系，避免仅关注结果而忽视过程导致的质量隐患。

8.0.2 自密实性能是钢壳沉管混凝土的核心特性，需额外检验。坍落扩展度与扩展时间是判断混凝土能否填充隔仓的关键指标，因此列为必检项目；出厂检验频率基于工程批量设定，确保覆盖所有批次；交货检验与强度检验批次一致，便于将自密实性能与强度关联分析；外观判断是直观排查离析的快速方法，与量化指标互补，形成双重检验保障。

8.0.3 统一试验方法是确保数据可比的基础，自密实性能试验遵循《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283，可与其他自密实混凝土工程数据对比；拌合物其他性能试验参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080，确保试验结果符合国标要求，避免因方法不同导致数据偏差，影响质量评判准确性，为混凝土性能控制提供可靠依据。

8.0.4 硬化混凝土强度与耐久性为结构安全的核心，强度检验遵循《预拌混凝土》GB/T 14902；钢壳沉管水下服役需重点关注耐久性，检验项目与频次遵循《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193，确保满足结构寿命要求；两类检验分别针对承载能力与长期服役能力，共同构成硬化混凝土质量评价体系，避免因单一性能达标导致的工程风险。

8.0.5 自密实混凝土无需振捣，试件成型方法需特殊规定。按《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 要求，仅需将混凝土倒入试模，轻轻敲击侧面排除气泡，避免人工振捣导致试件强度偏高。本条统一成型方法，可确保试件强度能真实反映结构混凝土强度，避免因成型方法不当导致的质量误判，为强度评价提供准确数据。

8.0.6 力学性能试验方法遵循《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081，可确保试验结果的通用性与准确性。统一方法便于不同检测机构数据对比，为强度评定提供可靠依据，保障结构承载安全。

8.0.7 长期性能与耐久性能试验方法遵循《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082，可确保试验结果科学合理。统一试验方法可避免因方法差异导

致的耐久性评价偏差，确保混凝土满足水下长期服役需求。