

ICS 91.040.01

CCS P 30

CAIEC

团 体 标 准

T/CAIEC 220—2026

建筑固废资源化预制装配式构件应 用技术规范

Technical code for application of prefabricated and assembled
components for resource utilization of construction solid
waste

2026-01-29 发布

2026-02-28 实施

中国国际工程咨询协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本规定	3
5 材料	4
6 再生混凝土配合比设计	7
7 预制构件生产与质量控制	9
8 构件类型与结构设计要求	13
9 连接与构造要求	15
10 施工安装与质量验收	20
11 环保与安全	22

前 言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由桂林理工大学提出。

本文件由中国国际工程咨询协会归口。

本文件起草单位：桂林理工大学、广西建工建筑工业化集团有限公司、广西平陆运河建设有限公司、中铁广州工程局集团有限公司、广西壮族自治区烟草公司柳州市公司、中国市政工程中南设计研究总院有限公司、中建三局集团有限公司、中铁十六局集团有限公司、中铁城建集团南昌建设有限公司、广西建工集团第二安装建设有限公司、长安大学、广西生态工程职业技术学院、广西水利电力职业技术学院、广西交科集团有限公司、广西交通职业技术学院。

本文件主要起草人：钱凯、于晓辉、李治、邓小芳、张敏、翁运昊、刘兵、何羽、覃健桂、蓝希、梁诗林、黄平、韦柳盛、吴秀英、甘杰中、陆玮、程耀飞、黎明镜、郑建安、赵冬冬、殷乐、胡牧、罗远辉、余地华、刘玮、劳南兴、杨文志、张海林、张鑫全、韦鸿梅、宁顺元、刘喜、李君鹏、胡海宁、张红日、李红明、魏炜、彭来。

建筑固废资源化预制装配式构件应用技术规范

1 范围

本文件规定了建筑固废资源化预制装配式构件应用的基本规定、材料、再生混凝土配合比设计、预制构件生产与质量控制、构件类型与结构设计要求、连接与构造要求、施工安装与质量验收、环保与安全。

本文件适用于抗震设防烈度为 8 度及以下的民用与工业建筑中再生混凝土预制构件的设计、生产与施工。特殊环境或高耐久性要求的工程，应通过专项技术论证后方可参照执行。

2 规范性引用文件

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

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
- GB/T 5223 预应力混凝土用钢丝
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 6067.1 起重机械安全规程 第 1 部分：总则
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 14683 硅酮和改性硅酮建筑密封胶
- GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB/T 18736 高强高性能混凝土用矿物外加剂
- GB/T 23445 聚合物水泥防水涂料
- GB/T 25176 混凝土和砂浆用再生细骨料
- GB/T 25177 混凝土用再生粗骨料
- GB/T 31962 污水排入城镇下水道水质标准
- GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)
- GB 50009 建筑结构荷载规范
- GB/T 50010 混凝土结构设计规范
- GB/T 50011 建筑抗震设计标准
- GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准

JG/T 398 钢筋连接用灌浆套筒
JG/T 408 钢筋连接用套筒灌浆料
JGJ 1 装配式混凝土结构技术规程
JGJ 18 钢筋焊接及验收规程
JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程
JGJ 63 混凝土用水标准
JGJ 107 钢筋机械连接技术规程
JGJ 130 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范
JGJ 144 外墙外保温工程技术标准
JGJ 256 钢筋锚固板应用技术规程
JT/T 1365 潜水作业现场急救方法与要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

再生粗骨料 recycled coarse aggregate

由建（构）筑废物中的混凝土、砂浆、石、砖瓦等加工而成，粒径大于 4.75 mm 的颗粒。

3.2

再生细骨料 recycled fine aggregate

由建（构）筑废物中的混凝土、砂浆、石、砖瓦等加工而成，粒径不大于 4.75 mm 的颗粒。

3.3

再生骨料 recycled aggregate

再生粗骨料与再生细骨料的统称。

3.4

再生骨料取代率 replacement ratio of recycled aggregate

再生骨料混凝土中，再生骨料质量占骨料总质量的百分比。

注：骨料总质量指再生骨料与天然骨料的质量之和。

3.5

再生混凝土 recycled aggregate concrete

以再生骨料部分或全部取代天然骨料配制而成的混凝土。

3.6

再生混凝土预制构件 recycled aggregate concrete precast component

在工厂或现场采用再生混凝土预先制作的装配式构件，包括结构构件和非结构构件。

3.7

结构构件 structural component

在结构中承受荷载并参与整体受力，对结构安全起关键作用的预制构件，如梁、柱、墙板、叠合楼板等。

3.8

非结构构件 non-structural component

主要起围护、分隔、装饰或设备承载等作用，不参与主体结构受力的预制构件，如外挂墙板、阳台栏板、路缘石、沟盖板等。

3.9

叠合构件 composite component

由预制再生混凝土底板（或墙板）与现场后浇混凝土共同形成的组合受力构件。

3.10

套筒灌浆连接 grouted sleeve connection

将钢筋插入预埋金属套筒内并灌注灌浆料，通过灌浆料硬化后形成的钢筋机械连接方式。

3.11

浆锚搭接连接 grouted lap splice connection

将钢筋伸入预留孔道内，通过灌浆料实现钢筋搭接传力的连接方式。

3.12

粗糙面 rough surface

预制构件结合面经拉毛、凿毛或缓凝剂冲洗等工艺形成的，用于提高新旧混凝土之间的粘结与抗剪性能的凹凸界面。

3.13

键槽 shear key

预制构件结合面预留的，用于增加接缝抗剪能力的凹槽或凸榫。

3.14

附加用水量 additional water content

为补偿再生骨料 1 h 吸水率而额外增加的拌合水量。

3.15

预湿饱和处理 pre-wetting saturation treatment

在搅拌前对再生骨料进行喷水湿润，使其处于饱和面干状态，以减少拌合过程中吸水量影响的工艺措施。

3.16

碳减排量 carbon reduction

与采用天然骨料相比，使用再生骨料减少的二氧化碳排放量，按单位体积构件计算（ $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$ ）。

4 基本规定

4.1 再生混凝土预制装配式构件的设计、生产、施工与验收，应符合国家现行有关标准的规定，并应满足本文件的技术要求。

4.2 构件应采用工厂化生产方式，具备完整的质量管理体系和可追溯机制，确保构件性能稳定、质量可控。

4.3 再生骨料的使用应经过试验验证，确保其对混凝土强度、耐久性、工作性等关键性能无显著不利影响。

4.4 构件连接方式应安全可靠，满足结构整体性、抗震性能及耐久性要求，优先采用钢筋套筒灌浆连接、钢筋浆锚搭接等成熟连接技术。

4.5 再生混凝土预制构件的生产与施工应建立全过程质量控制制度，包括原材料进场检验、配合比设计、生产过程监控、出厂检验、运输与安装验收等环节。

5 材料

5.1 再生粗骨料与细骨料

5.1.1 再生粗骨料应由建筑物或构筑物拆除过程中产生的废弃混凝土、砂浆、石、砖瓦等加工而成，粒径大于 4.75 mm，其性能应符合 GB/T 25177 的规定，并应满足下列要求：

- a) 颗粒级配：符合连续粒级或单粒级的规定，优先选 5 mm~31.5 mm 连续粒级；
- b) 微粉含量（<0.075 mm）：I 类 <1.0%，II 类 <2.0%，III 类 <3.0%；
- c) 泥块含量：I 类 <0.5%，II 类 <0.7%，III 类 <1.0%；
- d) 吸水率：I 类 <3.0%，II 类 <5.0%，III 类 <8.0%；
- e) 压碎指标：I 类 <12%，II 类 <20%，III 类 <30%；
- f) 针片状颗粒含量：<10%；
- g) 杂物含量（金属、塑料、木材、沥青等）：I、II 类、III 类 <1.0%；
- h) 坚固性（硫酸钠溶液法，质量损失）：I 类 <5%，II 类 <10%，III 类 <15%；
- i) 氯离子含量：用于配筋混凝土时 <0.06%，素混凝土时 <0.15%；
- j) 碱集料反应：经试验后试件无裂缝、酥裂或胶体外溢，膨胀率 <0.10%。

5.1.2 再生细骨料应由建筑废弃物中混凝土、砂浆、石、砖瓦等加工而成，粒径不大于 4.75 mm，其性能应符合 GB/T 25176 的规定，并应满足下列要求：

- a) 细度模数：宜为 2.3~3.0，按中砂使用；
- b) 微粉含量（<0.075 mm）：
 - 1) 亚甲基蓝值（MB 值）<1.40 或合格时：I 类 <5%，II 类 <7%，III 类 <10%；
 - 2) 亚甲基蓝值（MB 值）≥1.40 或不合格时：I 类 <1%，II 类 <3%，III 类 <5%；
- c) 泥块含量：I 类 <1.0%，II 类 <2.0%，III 类 <3.0%；
- d) 坚固性（质量损失）：I 类 <8%，II 类 <10%，III 类 <12%；
- e) 单级最大压碎指标：I 类 <20%，II 类 <25%，III 类 <30%；
- f) 表观密度：I 类 >2 500 kg/m³，II 类 >2 400 kg/m³，III 类 >2 300 kg/m³；
- g) 堆积密度：I 类 >1 450 kg/m³，II 类 >1 400 kg/m³，III 类 >1 350 kg/m³；
- h) 空隙率：I 类 <46%，II 类 <48%，III 类 <52%；
- i) 云母含量：<2.0%；
- j) 轻物质含量：<1.0%；
- k) 硫化物及硫酸盐（按 SO₃ 计）：<2.0%；
- l) 氯离子含量：用于配筋混凝土时 <0.06%，素混凝土时 <0.15%；
- m) 碱集料反应：无害；
- n) 需水量比（与天然砂对比）：
 - 1) 细砂：I 类 <135%，II 类 <155%，III 类 <180%；
 - 2) 中砂：I 类 <130%，II 类 <145%，III 类 <170%；
 - 3) 粗砂：I 类 <120%，II 类 <135%，III 类 <150%。
- o) 强度比（与天然砂对比）：

- 1) 细砂: I类 >80%, II类 >70%, III类 >60%;
- 2) 中砂: I类 >90%, II类 >85%, III类 >75%;
- 3) 粗砂: I类 >100%, II类 >95%, III类 >90%。

5.1.3 再生骨料进场时应按批次进行检验, 检验项目应包括颗粒级配、微粉含量、泥块含量、吸水率、压碎指标、杂物含量、氯离子含量等。同一厂家、同一类别、同一规格、同一批次的再生骨料, 每400 m³ 或 600 t 应作为一个检验批, 不足 400 m³ 或 600 t 的应按一批计。

5.1.4 再生骨料应按类别、规格分别堆放, 防止混杂、污染和碾压。堆放场地应硬化、排水良好, 并设有明显标识。运输过程中应采取覆盖措施, 防止粉尘飞扬和杂物混入。

5.2 水泥与矿物掺合料

5.2.1 水泥应选用符合 GB 175 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥, 强度等级应根据构件设计强度等级、使用环境及耐久性要求确定。不应使用过期、受潮、结块或品质不稳定的水泥。

5.2.2 矿物掺合料应选用符合以下要求的粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、硅灰等:

- a) 粉煤灰: 符合 GB/T 1596 的规定, 优先选用 I 级或 II 级粉煤灰;
- b) 粒化高炉矿渣粉: 符合 GB/T 18046 的规定, 优先选用 S95 级及以上;
- c) 硅灰: 符合 GB/T 18736 的规定, SiO₂ 含量 ≥85%, 比表面积 ≥15 m²/kg;
- d) 其他矿物掺合料: 通过试验验证其对混凝土性能无不利影响, 并符合相关现行标准。

5.2.3 矿物掺合料的掺量应根据混凝土强度等级、工作性、耐久性 & 环境条件通过试验确定。采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时, 钢筋混凝土中矿物掺合料最大掺量宜符合表 1 的规定。

表 1 钢筋混凝土中矿物掺合料最大掺量

单位为 %

矿物掺合料种类	水胶比	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥
粉煤灰	≤0.40	45	35
	>0.40	40	30
粒化高炉矿渣粉	≤0.40	65	55
	>0.40	55	45
钢渣粉	—	30	20
硅灰	—	10	10
复合掺合料	≤0.40	65	55
	>0.40	55	45

5.2.4 水泥与矿物掺合料进场时应附有出厂合格证、出厂检验报告及型式检验报告, 并按批进行取样复检, 复检项目应包括细度、需水量比、活性指数、烧失量、SO₃ 含量、氯离子含量等。

5.3 外加剂

5.3.1 外加剂应选用对再生骨料混凝土适应性良好、性能稳定、环保无污染的产品, 其性能应符合 GB 8076、GB 50119 的规定。

5.3.2 常用外加剂及其性能要求如下:

- a) 高效减水剂/聚羧酸系减水剂: 减水率 ≥25%, 含气量 ≤6.0%, 抗压强度比 ≥130%, 收缩率比 ≤110%;

- b) 引气剂：含气量控制在 3.0%~6.0%，气泡间距系数 $\leq 250 \mu\text{m}$ ，抗冻等级 $\geq \text{F200}$ ；
- c) 缓凝剂：初凝时间差 $\pm 1 \text{ h}$ ，终凝时间差 $\pm 1 \text{ h}$ ，抗压强度比 $\geq 90\%$ ；
- d) 早强剂抗压强度比 $\geq 130\%$ ，抗压强度比 $\geq 120\%$ ，抗压强度比 $\geq 105\%$ ；
- e) 膨胀剂：限制膨胀率（水） $\geq 0.025\%$ ，限制干缩率（空气中） $\leq 0.020\%$ ；
- f) 增稠剂/保水剂：通过试验确定掺量，确保混凝土不离析、不泌水，且不影响强度发展。

5.3.3 外加剂进场时应附有合格证、出厂检验报告及型式检验报告，并按批进行取样复检。复检项目应包括 pH 值、密度、含固量、减水率、含气量、氯离子含量、碱含量、水泥净浆流动度、混凝土性能对比试验等。

5.3.4 外加剂应密封贮存，防止日晒、雨淋、冰冻和污染。不同品种、不同厂家的外加剂应分别存放，不应混杂。液态外加剂应定期搅拌，防止沉淀。

5.4 钢筋与预埋件

5.4.1 钢筋应符合 GB 1499（所有部分）、GB/T 5223、GB/T 5224 的规定，其强度、延性、焊接性能、抗震性能等应满足设计要求。

5.4.2 钢筋进场时应附有质量证明书，并按批进行取样复检，复检项目应包括屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能、重量偏差、化学成分、晶粒度、反向弯曲（抗震钢筋）等。

5.4.3 钢筋连接用套筒、灌浆料、锚固板等应符合下列要求：

- a) 套筒：符合 JG/T 398 的规定，材质为优质碳素结构钢或球墨铸铁，内外表面光洁，无裂纹、锈蚀、毛刺等缺陷；
- b) 灌浆料：符合 JG/T 408 的规定，具有早强、高强、微膨胀、无收缩等性能，抗压强度 $\geq 85 \text{ MPa}$ （1 d）、 $\geq 100 \text{ MPa}$ （28 d），流动度 $\geq 300 \text{ mm}$ ，竖向膨胀率 0.02%~0.5%；
- c) 锚固板：符合 JGJ 256 的规定，材质为 Q235 或 Q345，焊接性能良好，表面平整，无裂纹、变形、锈蚀等缺陷。

5.4.4 螺纹套管、聚氯乙烯管（PVC 管）、金属线盒、塑料线盒、吊钉等预埋件应根据设计要求选用合适的材质和规格。预埋件加工应符合 GB 50204 的规定，外观质量不应有裂纹、变形、锈蚀等缺陷。

5.4.5 钢筋与预埋件应妥善存放，避免锈蚀、污染和损坏。露天存放时应采取防潮、防雨措施，并垫高离地至少 100 mm。

5.5 其他辅助材料

5.5.1 混凝土拌合用水应符合 JGJ 63 的规定，不应使用污水、海水、酸性水、含油污水等对混凝土性能有不利影响的水。

5.5.2 模具应采用高强度、高刚度、耐腐蚀、易脱模的材料制作，模具应具有足够的强度和刚度，表面应平整光滑，尺寸应准确，拼接应严密，不应漏浆。

5.5.3 养护介质应符合相关标准规定，对混凝土无腐蚀、无污染，不影响混凝土强度发展和耐久性。蒸汽养护用水应符合 JGJ 63 的规定。

5.5.4 隔离剂应选用对混凝土无腐蚀、无污染、不影响钢筋与混凝土粘结性能的产品。隔离剂应涂抹均匀，不应漏刷或堆积，且不应沾污钢筋和预埋件。

5.5.5 密封胶、防水涂料、保温材料、锚固胶等其他辅助材料应符合 GB/T 14683、GB/T 23445、JGJ 144 等的规定，其性能应满足设计要求和使用寿命。

5.5.6 所有辅助材料进场时应附有合格证、出厂检验报告及型式检验报告，并按批进行取样复检，复

检项目应根据材料种类和使用要求确定。

6 再生混凝土配合比设计

6.1 一般规定

6.1.1 再生混凝土配合比设计应满足结构设计强度、耐久性、工作性和施工性能要求，并应符合 JGJ 55、GB/T 50476 及本文件的相关规定。

6.1.2 配合比设计应基于原材料性能试验数据，通过试配、调整与验证确定，确保混凝土性能满足预制构件生产、运输、安装及使用全过程的要求。

6.1.3 再生骨料使用前应测定其吸水率、压碎指标、微粉含量、杂物含量等关键性能指标，并根据实测结果调整用水量与砂率。

6.1.4 再生混凝土配合比设计应明确区分结构构件与非结构构件，分别采用不同的设计参数与控制指标。

6.1.5 再生混凝土不应用于预应力混凝土构件。

6.1.6 配合比设计应记录完整试验数据，并形成技术档案，确保配合比的可追溯性与可复现性。

6.2 强度等级与耐久性要求

6.2.1 再生混凝土强度等级应根据构件类型、结构安全等级和使用环境确定，结构构件强度等级不宜低于 C30，非结构构件应不低于 C20。

6.2.2 再生混凝土强度标准差 σ 应根据再生骨料取代率、品质等级及试验数据统计确定。当无统计资料时，可按表 2 取值。

表 2 再生混凝土强度标准差推荐值

单位为兆帕

强度等级	C20	C25~C45	C50~C55
σ	4.5	5.5	6.5

6.2.3 再生混凝土的耐久性设计应符合以下要求：

- 抗冻等级：寒冷地区结构构件不低于 F100，非结构构件不低于 F50；
- 抗渗等级：地下结构、卫生间、阳台等潮湿环境构件不低于 P8；
- 抗碳化：结构构件碳化深度预测值不大于保护层厚度的 1/3；
- 氯离子渗透性：结构构件电通量不大于 1；
- 碱骨料反应：采用低碱水泥或经试验验证无碱-骨料反应风险。

6.2.4 对处于腐蚀环境中的构件，应通过试验验证再生混凝土的耐久性能，并采取相应的防护措施。

6.3 再生骨料取代率设计

6.3.1 再生骨料取代率应根据骨料品质等级、构件类型、强度等级及耐久性要求综合确定，取代率设计应符合表 3 的规定。

表 3 再生骨料取代率限值

构件类型	强度等级	再生粗骨料取代率	再生细骨料取代率
结构构件	≥C40	≤30% (I类)	≤20% (I/II类)
结构构件	C30~C35	≤50% (I/II类)	≤30% (I/II类)
结构构件	≤C25	≤50% (I/II类)	≤30% (I/II类)
非结构构件	≥C30	≤50% (I/II/III类)	≤50% (I/II类)
非结构构件	≤C25	≤70% (I~IV类)	≤50% (I~III类)

6.3.2 再生骨料取代率超过表 3 规定限值时, 应进行专项试验验证, 包括强度、耐久性、界面粘结性能等, 并经技术评审后方可使用。

6.3.3 再生粗骨料与再生细骨料不应同时取自同一批建筑废弃物, 除非经清洗、筛分、检测合格, 并分别堆放、标识。

6.3.4 再生骨料取代率设计应在配合比设计文件中明确标注, 并在生产过程中严格控制, 允许偏差为±2%。

6.4 水胶比与用水量控制

6.4.1 再生混凝土的水胶比应根据强度等级、耐久性要求、再生骨料吸水率及环境条件综合确定, 并应符合表 4 的规定。

表 4 再生混凝土最大水胶比限值

强度等级	最大水胶比 (W/B)
≥C40	0.36
C40	0.42
C30~C35	0.48
≤C25	0.55

6.4.2 再生混凝土用水量应由净用水量和附加用水量组成。净用水量根据水胶比与胶凝材料用量计算; 附加用水量根据再生粗骨吸水率按公式 (1) 计算:

$$W_{th} = \Delta m \times G \times \lambda_g \dots\dots\dots (1)$$

式中:

W_{th} ——附加用水量, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);

Δm ——再生粗骨吸水率, 单位为百分号 (%);

G ——再生粗骨料用量, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);

λ_g ——取代率。

6.4.3 当再生粗骨料采用预湿饱和处理时, 可不考虑附加用水量, 但应实测湿堆积密度并调整配合比。

6.4.4 再生混凝土的砂率应比同强度等级普通混凝土提高 2%~4%, 以改善工作性和包裹性, 具体应通过试配确定。

6.4.5 胶凝材料用量应符合 GB/T 50476 的规定, 结构构件不宜低于 $300 \text{ kg}/\text{m}^3$, 非结构构件不宜低于 $280 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

6.5 特殊性能混凝土设计

6.5.1 自密实再生混凝土

- 6.5.1.1 自密实再生混凝土用于钢筋密集、形状复杂或难以振捣的预制构件。
- 6.5.1.2 扩展度应控制在 600 mm~700 mm，扩展时间 $T_{500} \leq 8$ s，L 型箱通过率应不小于 90%。
- 6.5.1.3 再生粗骨料取代率不宜超过 20%，再生细骨料不宜使用。
- 6.5.1.4 应掺加高效减水剂与粘度改性剂，确保抗离析性与流动性。
- 6.5.1.5 水胶比不宜大于 0.42，砂率宜为 46%~52%。

6.5.2 抗冻再生混凝土

- 6.5.2.1 抗冻再生混凝土用于寒冷地区的阳台板、空调板、围墙等外露构件。
- 6.5.2.2 抗冻等级应不低于 F100，含气量控制在 4%~6%。
- 6.5.2.3 应掺加引气剂与矿物掺合料，提高抗冻性与抗渗性。
- 6.5.2.4 再生粗骨料取代率不宜超过 30%，不应使用 III 类再生骨料。
- 6.5.2.5 水胶比不宜大于 0.45，胶凝材料用量不宜低于 320 kg/m^3 。

6.5.3 抗渗再生混凝土

- 6.5.3.1 抗渗再生混凝土用于地下结构、水池、卫生间等潮湿环境。
- 6.5.3.2 抗渗等级应不低于 P8，电通量应不大于 1。
- 6.5.3.3 应掺加粉煤灰和矿渣粉复合制成的矿物掺合料，提高密实性。
- 6.5.3.4 再生粗骨料取代率不宜超过 30%，不应使用 III 类再生骨料。
- 6.5.3.5 水胶比不宜大于 0.45，砂率宜为 38%~44%。

6.5.4 早强再生混凝土

- 6.5.4.1 早强再生混凝土用于快速脱模、快速安装项目。
- 6.5.4.2 早强再生混凝土用于快速脱模、快速安装项目时，强度应达到设计强度的 70% 以上，且不低于 15 MPa。
- 6.5.4.3 可掺加早强剂、硅灰、硫铝酸盐水泥等。
- 6.5.4.4 再生骨料取代率不宜超过 20%，不应使用 III 类再生骨料。
- 6.5.4.5 水胶比不宜大于 0.42，养护温度宜控制在 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

7 预制构件生产与质量控制

7.1 生产工艺流程

7.1.1 预制构件应采用“工厂化、流水线、信息化”生产模式，并应形成二维码或芯片追溯链。工艺流程如下：

建筑废弃物→再生骨料加工与分级→原材料进场检验→配合比试配与验证→模具准备→钢筋加工与骨架制作→预埋件安装→混凝土搅拌（二次搅拌或预湿工艺）→自动化布料→振捣密实→表面整平与粗糙面/键槽成型→蒸汽养护或覆膜养护→脱模强度检验→脱模与构件标识→二次养护→外观与尺寸检验→结构性能抽检→贴码入库→出厂装运

7.1.2 关键工序应设置质量控制点（QCP），并应符合表 5 的规定。

表 5 关键质量控制点

序号	工序名称	控制参数	检测频次	记录方式
1	再生骨料上料	含水率、级配、杂质	每盘/每 100 m ³	自动称重+在线含水率仪
2	混凝土搅拌	出机扩展度/坍落度、温度、含气量	每 50 m ³ 一次	自动采集+手动复核
3	钢筋骨架入模	保护层厚度、套筒位置	每件	激光扫描+人工抽检
4	振捣密实	保护层厚度、套筒位置	连续	振动传感器+可编程逻辑控制器 (PLC) 记录
5	养护制度	升温/降温速率、恒温峰值、湿度	每 30 min	温湿度自动记录
6	脱模强度	回弹值 ≥ 20 MPa 或同条件试块 \geq 设计强度 75%	每班次首件	回弹仪+试块抗压

7.1.3 生产线应配置制造执行系统 (MES)，实现配合比下发、投料误差自动报警、养护曲线实时上传、质量数据云端备份，保存期限应不少于 10 年。

7.2 模具与设备要求

7.2.1 模具

模具应符合下列要求：

- 材质：周转 ≥ 200 次的构件采用 Q345 及以上钢材制作；异形或低周转构件可采用玻璃钢或高强度工程塑料，但刚度满足变形 $\leq L/1500$ ；
- 尺寸偏差：边长 ≤ 6 m 时 ± 1 mm；边长 > 6 m 时 ± 2 mm；对角线差 ≤ 2 mm；表面平整度 ≤ 1 mm/2m；
- 粗糙面/键槽：在底模或侧模一次成型，键槽深度误差 ± 0.5 mm，间距误差 ± 1 mm；粗糙面采用“缓凝剂+高压水射流”工艺，露骨料面积 $\geq 80\%$ ，凹凸深度 4 mm~6 mm；
- 脱模斜度：不小于 1° ；拼缝处设 ≥ 5 mm 的弹性密封条，防止漏浆；
- 模具编号并建立电子档案，记录使用次数、维修记录、变形监测数据。

7.2.2 主要设备

主要设备如下并应符合下列要求。

- 搅拌系统：强制式双卧轴搅拌机，额定容量 ≥ 1.5 m³，具备“二次搅拌（预湿骨料+净浆裹石）”功能；计量精度：胶凝材料 $\pm 1\%$ ，水 $\pm 1\%$ ，骨料 $\pm 2\%$ ，外加剂 $\pm 1\%$ 。
- 布料系统：行走式自动布料机，带称重传感器，布料速度 0 m/min~2 m/min 可调，下料口带防离析挡板。
- 振捣系统：
 - 墙板、楼板：高频低幅插入式振捣器 ($\varnothing 50$ mm, 12 000 rpm)+模台高频振动 (频率 50 Hz, 加速度 4 g~6 g)；
 - 梁柱：采用附着式平板振动器，振动时间 30 s~60 s，以“表面泛浆、气泡消失”为准。
- 养护系统：
 - 蒸汽养护窑：升温速率 ≤ 15 $^\circ\text{C}/\text{h}$ ，恒温 55 $^\circ\text{C} \pm 2$ $^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 90\%$ ；
 - 覆膜+太阳能养护：膜内温度 40 $^\circ\text{C} \pm 5$ $^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 85\%$ ；
 - 养护过程自动记录 T-t 曲线，偏差超过 ± 2 $^\circ\text{C}$ 时报警。

- e) 脱模设备：液压翻转台或真空吸盘吊具，脱模吸力/压力经计算确定，并设安全冗余 ≥ 1.5 倍构件自重。

7.3 混凝土搅拌与浇筑

7.3.1 搅拌工艺优先采用“预湿骨料+净浆裹石”二次搅拌，总搅拌时间应不小于 150 s，其中净浆搅拌应不小于 30 s，骨料裹浆应不小于 60 s，二次混合应不小于 60 s。

7.3.2 再生骨料上料前应按实测含水率自动扣水；若含水率大于 6%，应启用烘干冷却系统或降低砂率 2%。

7.3.3 出机混凝土性能指标如下：

- a) 坍落度：墙板 120 mm \pm 20 mm；梁柱 160 mm \pm 20 mm；
- b) 扩展度：自密实构件 650 mm \sim 750 mm；
- c) 含气量：抗冻构件 4.5% \pm 0.5%；
- d) 温度：5 $^{\circ}$ C \sim 30 $^{\circ}$ C；
- e) 初凝时间： \geq 4 h（常温），满足流水线节拍。

7.3.4 浇筑顺序如下：

- a) 先铺 20 mm 厚同配比砂浆垫底，再分层布料，单层厚度 \leq 300 mm；
- b) 门窗洞口、洞口下方对称布料，防止模具移位；
- c) 叠合面设“U”形或“梯形”粗糙面，深度 4 mm \sim 6 mm，间距 40 mm \sim 60 mm，一次成型。

7.3.5 布料完成后 3 min 内开始振捣，防止再生骨料下沉；振捣至表面均匀泛浆、气泡基本消失即可，不应过振。

7.4 振捣与表面处理

7.4.1 振捣设备参数见 7.2.2；振捣时间宜通过“电容式气泡监测传感器”实时判定，目标剩余气泡面积率应不大于 1%。

7.4.2 应采用“激光整平机+铝合金刮尺”组合对表面进行整平，平整度应不大于 2mm/2m；墙板外饰面采用“反打一次成型”工艺时，瓷砖或石材背面应涂刷界面剂，粘结强度应不小于 1.0 MPa。

7.4.3 脱模前采用线激光扫描仪对粗糙面、键槽进行全幅扫描，点云模型与设计模型偏差应不大于 1 mm；不合格面积应不大于 5%，否则修补后应进行二次扫描。

7.4.4 构件边缘、洞口四周应采用 $\varnothing 25$ mm 的高频小型振捣棒进行二次补振，防止蜂窝麻面。

7.5 养护

7.5.1 应根据实际情况选择养护方式：

- a) 蒸汽养护：适用于 \geq C40 或冬季生产；
- b) 覆膜+保温毡：适用于 C30 以下或常温；
- c) 太阳能+相变储能：适用于露天堆场，节能率 \geq 30%。

7.5.2 宜制定蒸汽养护制度：静停 1 h \sim 2 h (20 $^{\circ}$ C \pm 5 $^{\circ}$ C) \rightarrow 升温 2 h (\leq 15 $^{\circ}$ C/h) \rightarrow 恒温 6 h \sim 8 h (55 $^{\circ}$ C \pm 2 $^{\circ}$ C，相对湿度 \geq 90%) \rightarrow 降温 2 h (\leq 10 $^{\circ}$ C/h) \rightarrow 出窑温度与环境温差 \leq 20 $^{\circ}$ C。

7.5.3 养护过程应同步保留相同条件养护的标准养护试块各一组，用于脱模强度与 28 d 强度评定。

7.5.4 构件出窑后应立即转入二次养护区继续喷淋或覆膜保湿，时间应不少于 7 d；总养护周期应不少于 14 d（常温）。

7.6 脱模与堆放

7.6.1 脱模强度如下：

- a) 墙板、楼板： ≥ 20 MPa（回弹法或同条件试块）；
- b) 梁柱： ≥ 30 MPa；
- c) 非结构构件： ≥ 15 MPa。

7.6.2 脱模顺序：先拆侧模→再拆端模→最后脱底模。不准许暴力敲击，可采用“微震+真空吸盘”组合工艺。

7.6.3 堆放场地应硬化（C20 混凝土，厚度不小于 150 mm），设 1% 排水坡度；堆垛区域应设置“橡胶+枕木”组合垫块，垫块位置与吊点对应，悬臂长度应不大于 200 mm。

7.6.4 堆放层数与间隙如下：

- a) 墙板：立放 ≤ 2 层，倾角 $\geq 80^\circ$ ，层间设 100 mm 柔性垫块；
- b) 楼板：平放 ≤ 6 层，层间 4 点支撑，上下对齐；
- c) 梁柱：平放 ≤ 2 层，层间 3 点支撑，悬臂 $\leq L/10$ ；
- d) 非结构构件：可码垛 ≤ 1.5 m 高，四周设防护栏。

7.6.5 构件脱模后 24 h 内应完成唯一身份二维码或射频识别（RFID）芯片的植入，信息包括构件编号、生产时间、强度等级、再生骨料取代率、质检结果、碳足迹核算值。

7.7 质量检验与出厂验收

7.7.1 检验分类

7.7.1.1 出厂检验：每 100 m³ 或每班次为一检验批，项目见表 6。

7.7.1.2 型式检验：新产品、原材料或工艺变更、停产 6 个月以上恢复生产时，检验项目为出厂检验项目、表观密度、吸水率、氯离子扩散系数、连接套筒抗拉性能。

表 6 出厂检验项目与判定指标

序号	检验项目	抽样数量	判定依据	允许偏差/限值
1	外观质量	逐件	表 7	严重缺陷 0；一般缺陷 $\leq 5\%$
2	尺寸偏差	逐件	表 8	合格率 $\geq 90\%$
3	混凝土强度	每 100 m ³ 一组	GB/T 50107	均值 $\geq 1.15f_{cu,k}$ ，最小值 $\geq 0.95f_{cu,k}$
4	钢筋保护层	每批 5% 且 ≥ 3 件	GB 50204	+8 mm，-5 mm
5	粗糙面/键槽	每批 10%	扫描	深度误差 ± 1 mm，面积 \geq 设计值 95%
6	吸水率	每批 1 件	GB/T 25177	$\leq 8\%$ （结构）， $\leq 10\%$ （非结构）
7	氯离子含量	每批 1 组	JT/T 1365	$\leq 0.06\%$ （胶凝材料）

注： $f_{cu,k}$ 指再生混凝土立方体抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa）。

7.7.2 外观质量缺陷分类和判定

外观缺陷分类和判定标准见表 7。

表 7 外观缺陷分类和判定标准

缺陷	严重缺陷（不允许）	一般缺陷（允许修补）
露筋	主筋外露	箍筋或构造筋外露 ≤2 根
蜂窝	主筋部位蜂窝面积 ≥100 cm ²	非主筋部位蜂窝面积 ≤50 cm ²
孔洞	孔洞深度 ≥保护层	孔洞深度 < 保护层，直径 ≤10 mm
裂缝	贯穿裂缝、宽度 ≥0.2 mm	表面收缩裂缝宽度 <0.1 mm
缺棱掉角	影响安装或连接	不影响安装，可修补

7.7.3 尺寸允许偏差

预制构件尺寸允许偏差见表 8。

表 8 预制构件尺寸允许偏差

单位为毫米

项目	墙板	楼板	梁柱	检查方法
长度	±4	±4	±10	钢尺量两端
宽度	±3	±3	±5	钢尺量中部
厚度	±2	±3	±3	卡尺量
对角线差	5	5	8	钢尺量对角
表面平整度	3/2m	3/2m	4/2m	2 m 靠尺、塞尺
侧向弯曲	L/1 500	L/1 500	L/1 000	拉线、钢尺

7.7.4 判定与复验

7.7.4.1 若外观、尺寸不合格率不大于 10%，允许修补后二次验收。

7.7.4.2 若强度不合格，加倍取样复验，复验后仍不合格则该批降级或报废。

7.7.4.3 吸水率、氯离子任一不合格，该批不准用于结构构件，可降级为非结构使用。

7.7.4.4 出厂前应在构件侧面喷涂“绿色再生”标识，并附电子合格证，二维码扫码可查看碳减排量和质量参数。

8 构件类型与结构设计要求

8.1 叠合楼板

8.1.1 叠合楼板适用于居住建筑、公共建筑及工业建筑的楼盖系统，其设计应符合 GB/T 50010、JGJ 1 的相关规定。

8.1.2 叠合楼板应由预制底板与现浇叠合层组成，预制底板厚度应不小于 60 mm，叠合层厚度应不小于 40 mm；总厚度不宜小于 100 mm，且应满足管线预埋、钢筋布置及施工误差的要求。

8.1.3 再生骨料取代率应符合本文件 6.3 的规定，结构用叠合楼板中再生粗骨料取代率不宜超过 30%，再生细骨料取代率不宜超过 20%；非结构用楼板可放宽至 50%。

8.1.4 叠合楼板配筋应符合下列要求：

- a) 预制底板应配置双向受力钢筋，钢筋直径不宜小于 6 mm，间距不宜大于 200 mm；
- b) 叠合层内应设置负弯矩钢筋和分布钢筋，负弯矩钢筋应伸入支座并满足锚固长度要求；

c) 板端应设置构造钢筋，伸入支座长度不小于钢筋直径 d 的 10 倍且过支座中心线。

8.1.5 叠合楼板与支承梁、墙之间的连接应设置粗糙面或键槽，粗糙面凹凸深度应不小于 4 mm，键槽深度应不小于 15 mm，宽度宜为深度的 3~5 倍。

8.1.6 叠合楼板在再生骨料混凝土强度等级不低于 C30 时，可用于跨度不大的楼盖；跨度大时，应采用预应力混凝土预制板或设置桁架钢筋增强。

8.2 预制墙板

8.2.1 预制墙板适用于装配式剪力墙结构、框架-剪力墙结构中的内墙、外墙及电梯井墙等，设计应符合 JGJ 1、GB/T 50011 的规定。

8.2.2 墙板厚度应根据结构受力、保温、隔音及防火要求确定，结构用墙板厚度应不小于 160 mm，非结构墙板厚度应不小于 90 mm。

8.2.3 再生骨料取代率应符合下列规定：

- a) 结构墙板：再生粗骨料取代率不宜超过 30%，再生细骨料取代率不宜超过 20%；
- b) 非结构墙板：取代率可放宽至 50%，但不准许使用 III 类以下再生骨料。

8.2.4 墙板配筋应符合下列要求：

- a) 竖向和水平分布钢筋最小配筋率不小于 0.15%，钢筋直径不宜小于 6 mm，间距不宜大于 400 mm；
- b) 墙板边缘构件区域加密配筋，设置封闭箍筋，箍筋直径不小于 6 mm，间距不大于 200 mm；
- c) 门窗洞口周边设置加强钢筋，洞口四角配置斜向加强筋，直径不小于 6 mm。

8.2.5 墙板连接构造应符合下列规定：

- a) 上下层墙板竖向钢筋采用套筒灌浆连接或浆锚搭接连接，连接钢筋逐根对应；
- b) 墙板底部设置键槽和粗糙面，键槽深度不小于 15 mm，粗糙面面积不小于结合面面积的 80%；
- c) 墙板与楼板、梁的连接设置后浇带或圈梁，后浇带宽度不小于墙厚且不宜小于 200 mm。

8.3 预制楼梯与阳台

8.3.1 预制楼梯适用于各类装配式公共建筑和住宅建筑，设计应符合 GB 50009、GB/T 50010 的规定。

8.3.2 楼梯段板厚度应不小于 80 mm，宽度不宜小于 1 200 mm，踏步高度与宽度应符合建筑模数协调标准，并满足使用功能要求。

8.3.3 再生骨料取代率应符合下列规定：

- a) 结构用楼梯段板：再生粗骨料取代率不宜超过 30%，再生细骨料取代率不宜超过 20%；
- b) 非结构用楼梯平台、踏步板：取代率可放宽至 50%。

8.3.4 楼梯配筋应符合下列要求：

- a) 梯段板底配置通长纵向钢筋，板面宜配置通长钢筋；
- b) 楼梯两端支座处设置负弯矩钢筋，锚固长度不小于钢筋基本锚固长度 L_a ；
- c) 楼梯与支座之间采用铰接连接，一端设置固定铰，另一端设置滑动铰，滑动端采取防脱落措施。

8.3.5 阳台板设计应符合下列规定：

- a) 悬挑阳台板采用叠合构件或全预制构件，预制部分厚度不小于 60 mm；
- b) 阳台板负弯矩钢筋锚入室内楼板，锚固长度不小于 L_a ；
- c) 阳台板边缘设置翻边，高度不小于 100 mm，并配置构造钢筋。

8.4 预制梁与柱

8.4.1 预制梁、柱适用于框架结构、框架-剪力墙结构中的承重构件，设计应符合 GB/T 50010、JGJ 1 的规定。

8.4.2 梁、柱截面尺寸应符合下列要求：

- a) 矩形柱截面宽度不小于 300 mm，且不小于同方向梁宽的 1.5 倍；
- b) 梁截面高度不宜小于跨度的 1/15，宽度不宜小于 200 mm；
- c) 梁柱节点区设置后浇混凝土，后浇层厚度不小于 150 mm。

8.4.3 再生骨料取代率应符合下列规定：

- a) 结构梁、柱：再生粗骨料取代率不宜超过 30%，再生细骨料取代率不宜超过 20%；
- b) 预应力混凝土梁、柱不使用再生骨料。

8.4.4 梁柱配筋应符合下列要求：

- a) 纵向受力钢筋直径不宜小于 12 mm，箍筋直径不小于 6 mm；
- b) 梁端、柱端箍筋加密，加密区长度不小于 1.5 倍截面高度；
- c) 梁柱节点区配置附加箍筋，箍筋间距不大于 100 mm。

8.4.5 梁柱连接构造应符合下列规定：

- a) 柱底应设置键槽和粗糙面，键槽深度不小于 15 mm；
- b) 梁纵向钢筋锚入节点核心区，锚固长度不小于 L_a ；
- c) 梁柱连接处设置后浇段，后浇段长度满足钢筋连接施工要求。

8.5 非结构构件

8.5.1 非结构构件包括路缘石、沟盖板、围墙板、装饰挂板、空调板、女儿墙等，适用于市政、景观、围护及装饰工程。

8.5.2 非结构构件的设计应以满足使用功能、耐久性和外观质量为主，可不参与结构整体计算，但应满足安装、连接及构造要求。

8.5.3 再生骨料取代率可放宽至 70%，但不准许使用含有毒有害物质、放射性超标或受污染的再生骨料。

8.5.4 构件尺寸与配筋应符合下列规定：

- a) 路缘石、沟盖板等小型构件可采用 C25 再生混凝土，不配筋或配置构造钢筋；
- b) 装饰挂板、围墙板等宜采用 C30 再生混凝土，板厚不小于 80 mm，配置直径不小于 6 mm、间距不大于 200 mm 的钢筋网片；
- c) 空调板、女儿墙等悬挑构件采用 C30 以上再生混凝土，配置受力钢筋和负弯矩钢筋。

8.5.5 非结构构件表面应平整，不应有裂缝、蜂窝麻面，外观质量应符合本文件 7.7 的规定；装饰面应进行防护处理，防止污染、风化及冻融破坏。

8.5.6 非结构构件与主体结构连接应采用预埋件、螺栓或焊接等方式，连接件应进行防腐处理，连接节点应满足耐久性和安全要求。

9 连接与构造要求

9.1 钢筋连接方式

9.1.1 一般规定

- 9.1.1.1 钢筋连接应遵循“强连接、弱构件”原则，连接性能应不低于母材性能。
- 9.1.1.2 预制构件的钢筋连接应优先采用套筒灌浆连接、浆锚搭接连接；特殊部位可采用焊接或机械连接，但应通过试验验证。
- 9.1.1.3 连接区域混凝土强度等级应不低于构件本体，且应采取措施确保连接区域密实性、抗裂性与耐腐蚀性。
- 9.1.1.4 连接钢筋应采用热轧带肋钢筋，不应使用冷加工钢筋。

9.1.2 套筒灌浆连接

- 9.1.2.1 套筒灌浆连接用于竖向构件（柱、墙）纵筋、叠合梁纵筋、节点核心区主筋等关键受力部位。
- 9.1.2.2 套筒应符合下列要求：
- 符合 JG/T 398 的规定；
 - 材质为优质碳素结构钢或球墨铸铁，抗拉承载力不小于连接钢筋抗拉承载力标准值的 1.2 倍；
 - 套筒内壁设置环形凸肋或螺纹，增强咬合作用。
- 9.1.2.3 灌浆料应符合下列要求：
- 符合 JG/T 408 的规定；
 - 抗压强度 ≥ 85 MPa (28 d)，流动度 ≥ 300 mm (初始)，竖向膨胀率 0.02%~0.5%，氯离子含量 $\leq 0.03\%$ ；
 - 灌浆料与再生混凝土界面粘结强度 ≥ 3 MPa。
- 9.1.2.4 构造应符合下列要求：
- 套筒埋设位置偏差 ≤ 3 mm，套筒轴线与钢筋轴线偏差 $\leq 1^\circ$ ；
 - 套筒灌浆饱满，采用压浆法从下口注入，上口出浆后稳压 ≥ 30 s；
 - 灌浆施工环境温度为 $5^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ ，低温施工采取保温措施；
 - 灌浆后内不扰动连接钢筋。

9.1.3 浆锚搭接连接

- 9.1.3.1 浆锚搭接连接用于多层剪力墙、非结构构件、次要受力部位，不应用于一级抗震等级的框架柱、剪力墙边缘构件。
- 9.1.3.2 孔道构造应符合下列要求：
- 孔道直径 ≥ 1.2 倍钢筋直径 +20 mm，孔道长度 ≥ 1.2 倍抗震设计时基本锚固长度 L_{aE} ；
 - 孔道内壁设置螺旋箍筋或波纹肋，增强咬合与约束；
 - 孔道预留灌浆孔与排气孔，灌浆孔间距 ≤ 1.5 m。
- 9.1.3.3 灌浆材料应符合下列要求：
- 采用高强无收缩水泥基灌浆料，抗压强度 ≥ 60 MPa (28 d)，流动度 ≥ 260 mm (初始)；
 - 灌浆料与再生骨料混凝土界面粘结强度 ≥ 2.5 MPa。
- 9.1.3.4 搭接长度应符合下列要求：
- 搭接长度 $\geq 1.2L_{aE}$ ，且 ≥ 300 mm；
 - 搭接钢筋间距 ≥ 25 mm，且错开布置，同一截面搭接率 $\leq 50\%$ 。

9.1.4 焊接连接

- 9.1.4.1 焊接连接用于非结构构件、次要受力部位、临时连接或加固部位。

- 9.1.4.2 焊接材料应符合下列要求：
- a) 焊条符合 JGJ 18 的规定；
 - b) 焊缝强度不低于母材强度，焊缝质量等级不低于二级。
- 9.1.4.3 构造应符合下列要求：
- a) 焊接前清除钢筋表面浮锈、油污、再生骨料附着物；
 - b) 焊接长度：单面焊 $\geq 10d$ ，双面焊 $\geq 5d$ ；
 - c) 焊接接头错开布置，同一连接区段内焊接接头面积率 $\leq 50\%$ 。

9.1.5 注意事项

- 9.1.5.1 再生混凝土保护层厚度 ≥ 20 mm 时，焊接区域应采取隔热措施，防止混凝土烧伤。
- 9.1.5.2 焊接后应进行外观检查与无损检测（超声波或射线），抽检比例应不小于 10%。

9.2 构件接缝与界面处理

9.2.1 接缝分类与功能

接缝分类与功能见表 9。

表 9 接缝分类与功能

接缝类型	功能要求	适用部位
结构接缝	传递轴力、剪力、弯矩	柱-柱、墙-墙、梁-柱节点
构造接缝	控制收缩、温度变形	板-板、墙-板、非结构构件
防水接缝	防渗、防裂、防碳化	外墙板、阳台、卫生间

9.2.2 接缝界面处理

9.2.2.1 粗糙面处理

- 9.2.2.1.1 结构接缝界面应设置粗糙面，凹凸深度应不小于 6 mm，面积应不小于 80%。
- 9.2.2.1.2 非结构接缝界面凹凸深度应不小于 4 mm，面积应不小于 60%。
- 9.2.2.1.3 粗糙面可采用“缓凝剂+高压水射流”或“机械凿毛”工艺，不准许使用酸洗。

9.2.2.2 键槽设置

- 9.2.2.2.1 键槽深度应不小于 30 mm（预制梁端）或不小于 20 mm（预制剪力墙侧面），宽度应为深度的 3~5 倍，间距应等于宽度。
- 9.2.2.2.2 键槽应贯通截面或交错布置，端部斜面倾角应不大于 30° 。
- 9.2.2.2.3 键槽应在模具中一次成型，尺寸偏差为 ± 5 mm。

9.2.2.3 界面剂涂刷

- 9.2.2.3.1 后浇混凝土前，粗糙面应清除浮浆、粉尘，并洒水湿润。
- 9.2.2.3.2 可涂刷水泥基界面剂或界面砂浆，粘结强度应不小于 1.5 MPa。
- 9.2.2.3.3 不准许使用油性脱模剂污染界面。

9.2.3 接缝防水构造

9.2.3.1 外墙板水平缝

采用“高低缝+企口”构造，高差应不小于 15 mm，内置聚乙烯（PE）棒、双道密封胶；密封胶应为耐候性硅酮胶或聚氨酯胶，位移能力应不小于 $\pm 25\%$ 。

9.2.3.2 竖向缝

采用“平口+槽口”构造，槽口深度应不小于 20 mm，内设导水管；内侧应增设气密条，形成“气-水双道密封”系统。

9.2.3.3 阳台、卫生间

9.2.3.3.1 接缝处应设置防水反坎，高度应不小于 200 mm。

9.2.3.3.2 后浇层应掺防水剂，抗渗等级应不小于 P8。

9.3 节点构造与抗震设计要点

9.3.1 框架节点

9.3.1.1 梁-柱节点

9.3.1.1.1 节点核心区应设置封闭箍筋，箍筋直径应不小于 8 mm，间距应不大于 100 mm。

9.3.1.1.2 后浇层厚度应不小于 150 mm，混凝土强度应不小于 C35。

9.3.1.1.3 梁纵筋应锚入节点核心区，锚固长度应不小于 L_{aE} ，优先采用锚固板。

9.3.1.2 柱-柱连接

9.3.1.2.1 上下柱纵筋应采用套筒灌浆连接，套筒间距应不小于 300 mm。

9.3.1.2.2 柱底应设置键槽+粗糙面，键槽深度应不小于 30 mm。

9.3.1.2.3 柱底接缝厚度为 10 mm~20 mm，采用高强灌浆料填实。

9.3.2 剪力墙节点

9.3.2.1 墙-墙连接

9.3.2.1.1 边缘构件应全部后浇，设置封闭箍筋。

9.3.2.1.2 墙板水平缝应设置抗剪钢筋，直径应不小于 10 mm，间距应不小于 200 mm。

9.3.2.1.3 墙板竖向缝应设置后浇段，宽度应不小于墙厚且不小于 200 mm。

9.3.2.2 墙-板连接

9.3.2.2.1 墙顶应设置后浇圈梁或水平后浇带，高度应不小于 150 mm。

9.3.2.2.2 圈梁纵筋应不小于 4C12，箍筋间距应不大于 200 mm。

注：4C12 指 4 根直径为 12 mm 的二级钢筋（即 HRB335 级钢筋）。

9.3.2.2.3 墙板顶部应设置粗糙面+键槽，确保水平力传递。

9.3.3 抗震构造措施

9.3.3.1 强节点弱构件

9.3.3.1.1 节点承载力应不小于 1.2 倍构件承载力。

9.3.3.1.2 连接钢筋屈服承载力应不小于构件屈服承载力。

9.3.3.2 延性设计

连接区域应设置足够箍筋，体积配箍率应不小于 0.8%；应避免在节点区使用洛氏硬度大于 HRB500 的高强度钢筋。

9.3.3.3 防脱落措施

楼梯、阳台等悬挑构件应采用“固定+滑动”双支座；外墙板应设置不少于 2 个防脱落连接件，承载力应不小于 1.5 倍墙板自重。

9.4 粗糙面与键槽设置

9.4.1 粗糙面

粗糙面应符合表 10 的规定。

表 10 粗糙面要求

构件部位	凹凸深度/mm	面积占比	成型方式
叠合面（板-板）	≥4	≥80%	缓凝剂+水冲
墙-墙水平缝	≥6	≥80%	机械拉毛
墙-墙竖向缝	≥6	≥80%	模具一次成型
梁-柱节点	≥6	≥80%	模具刻槽

9.4.2 键槽

9.4.2.1 尺寸应符合下列要求：

- 深度：30 mm~50 mm；
- 宽度：深度的 3~5 倍；
- 间距：等于宽度；
- 端部斜角：≤30°。

9.4.2.2 布置方式应符合下列要求：

- 梁端：设 1~3 个贯通键槽；
- 柱底：设 4~6 个均布键槽；
- 墙板：设间距 200 mm~300 mm 键槽，交错布置。

9.4.2.3 质量控制应符合下列要求：

- 键槽尺寸偏差 ±3 mm；
- 采激光扫描全检，不合格率 ≤5%；
- 键槽内无浮浆、杂物，灌浆前湿润。

9.4.3 验收

按表 11 对粗糙面和键槽进行验收。

表 11 粗糙面和键槽验收

项目	检查方法	允许偏差	判定标准
粗糙面深度	钢尺、塞尺	≥4 mm (结构节点)、≥3 mm (非结构节点)	合格率≥90%
键槽深度	卡尺	±3 mm	合格率≥95%
键槽间距	钢尺	±5 mm	合格率≥90%
界面清洁度	目测	无浮浆、无杂物	100%

10 施工安装与质量验收

10.1 运输与堆放

10.1.1 构件运输前应制定专项运输方案，明确运输路线、车辆选型、固定方式、装卸顺序及成品保护措施。

10.1.2 运输车辆应满足构件尺寸、重量及道路限重要求，车厢应平整、清洁，并设有柔性垫层和防倾覆装置。

10.1.3 构件装车应遵循“重下轻上、大下小上”原则，支点位置应符合设计吊点，悬臂长度应不超过构件长度的 1/10。

10.1.4 墙板类构件宜采用立式运输，楼板、梁、楼梯等构件可采用平放运输，叠放层数应不超过 6 层，层间应设置柔性垫块，垫块位置应与吊点一致。

10.1.5 构件堆放场地应坚实、平整、排水良好，地面承载力应满足堆放要求，堆放区应设置明显标识，分类、分型号、分批次堆放。

10.1.6 堆放构件应设置稳固支撑，墙板类构件宜采用插放架或靠放架，靠放倾角应不小于 80°，并设置防倾倒措施。

10.1.7 构件在运输与堆放过程中应加强成品保护，防止碰撞、污染、开裂、掉角等现象，外露钢筋、套筒、预埋件应采取封堵或包裹措施。

10.2 安装准备与定位

10.2.1 构件安装前应完成图纸会审、技术交底、施工组织设计审批，并编制专项安装方案，明确安装顺序、临时固定措施、连接方式及质量控制要点。

10.2.2 安装前应复核基础或下层结构的轴线、标高、平整度及预留连接件位置，偏差应符合 GB 50204 的规定。

10.2.3 构件进场后应进行外观质量检查，核对型号、编号、出厂合格证及二维码信息，存在裂缝、缺棱掉角、钢筋外露等缺陷的构件不准许安装。

10.2.4 吊装设备应满足构件重量、吊装半径及作业环境要求，吊具应经计算确定，吊装钢丝绳水平夹角不宜小于 60°，不准许使用损坏或变形吊具。

10.2.5 构件吊装前应清除结合面浮浆、杂物，并洒水湿润；构件粗糙面应完整、无破损，键槽内不应有杂物堵塞。

10.2.6 构件吊装应采用慢起、稳升、缓放的操作方式，不应碰撞、急停、甩摆，吊装过程应设专人指挥，确保人员与构件安全。

10.3 临时固定与连接施工

10.3.1 构件吊装就位后应立即进行临时固定，临时支撑系统应具有足够的强度、刚度和稳定性，支撑点位置应合理，避免构件受力不均或变形。

10.3.2 墙板类构件临时支撑应不少于 2 道，支撑间距不宜大，支撑角度宜为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，楼板类构件应按设计要求设置临时支撑，支撑时间应不少于后浇层混凝土强度达到设计要求的 75%。

10.3.3 钢筋连接施工前应检查套筒、预留孔道、钢筋规格及位置，确保连接钢筋与套筒对中，偏差应不大于 3 mm，连接钢筋不应有油污、锈蚀或弯曲。

10.3.4 套筒灌浆连接施工应采用压浆法，从底部注浆口注入，顶部出浆口稳压后封闭，灌浆料应饱满、无气泡，灌浆过程应全程录像或拍照记录。

10.3.5 浆锚搭接连接孔道应清洁、湿润，灌浆料应分层灌注，确保密实，搭接长度应符合设计要求，钢筋插入深度应不小于设计值。

10.3.6 焊接或机械连接接头应按 JGJ 18、JGJ 107 执行，连接接头应进行外观检查，并按批次抽样进行力学性能检验。

10.4 后浇混凝土施工

10.4.1 后浇混凝土施工前应对结合面进行清理、湿润，并涂刷水泥浆或界面剂，确保新旧混凝土结合良好。

10.4.2 后浇混凝土应采用微膨胀混凝土或灌浆料，强度等级应不低于预制构件本体混凝土，且应具有良好的流动性、保水性和粘结性。

10.4.3 后浇混凝土应分层浇筑、振捣密实，振捣器不应碰撞预制构件，浇筑高度、顺序及间歇时间应符合施工方案要求。

10.4.4 后浇混凝土浇筑后应及时养护，养护时间应不少于 7 d，采用覆盖、洒水、喷涂养护剂等方式，防止早期开裂。

10.4.5 后浇混凝土强度达到设计要求的 75% 后方可拆除临时支撑，若采用灌浆料连接，应待灌浆料强度达到设计要求后方可进行后续施工。

10.5 质量验收与检验批划分

10.5.1 再生混凝土预制构件的安装质量验收应划分为检验批，按楼层、结构缝或施工段划分，每一检验批应包含完整的连接节点与后浇段。

10.5.2 检验批验收应包括主控项目和一般项目，主控项目包括构件型号、连接质量、后浇混凝土强度、钢筋连接性能等；一般项目包括构件位置、标高、垂直度、拼缝宽度、外观质量等。

10.5.3 构件安装尺寸允许偏差应符合表 12 的规定。

表 12 构件安装尺寸允许偏差

单位为毫米

项目	允许偏差	检查方法
轴线位置	5	钢尺测量
标高	± 5	水准仪
垂直度（层高）	5	经纬仪或垂线法
拼缝宽度	± 5	钢尺测量
表面平整度	3	靠尺+塞尺

10.5.4 构件连接质量应全数检查，套筒灌浆连接应检查灌浆饱满度、钢筋插入深度、灌浆料强度等，焊接连接应检查焊缝长度、外观质量、无损检测等。

10.5.5 后浇混凝土强度检验应按每 100 m³ 或每工作班留置一组试件，不足 100 m³ 也留置一组，试件应在现场同条件养护，28 d 抗压强度应符合设计要求。

10.6 实体检验与结构性能评估

10.6.1 工程完工后应进行实体检验，重点检查连接节点、后浇段、拼缝、外观质量、变形及裂缝情况，发现缺陷应及时修补并重新验收。

10.6.2 对关键构件或节点，可进行实体抽样检测，包括混凝土强度（回弹法、取芯法）、钢筋连接性能（拉拔试验）、拼缝密实度（超声波、红外热像）等。

10.6.3 对于重要工程或抗震设防烈度较高地区，应进行结构性能评估，包括整体变形、层间位移、节点刚度、连接可靠性等，必要时可进行静载或动载试验。

10.6.4 实体检验结果应形成书面报告，作为竣工验收依据之一，报告中应包括检测方法、检测数据、评估结论及整改建议。

10.6.5 对于检测中发现的不合格项，应制定专项整改方案，经设计、监理、施工三方确认后实施，整改后应重新检测直至合格。

11 环保与安全

11.1 生产过程中的环保控制

11.1.1 一般规定

建筑固废预制装配式构件的生产应贯彻“清洁生产、源头减排、过程控制、末端治理”的原则，建立环境保护管理体系，制定并实施环境管理计划，确保污染物排放符合国家及地方环保标准。

11.1.2 大气污染防治

11.1.2.1 粉尘控制

11.1.2.1.1 原材料堆场应全封闭或设置防风抑尘网，并配备自动喷淋系统，堆放高度应不超过围挡高度。

11.1.2.1.2 再生骨料破碎、筛分、输送工序应在封闭车间内进行，并配备布袋除尘器。

11.1.2.1.3 搅拌主机、粉料仓应设置强制式除尘系统，粉尘排放浓度应符合 GB 4915 的要求。

11.1.2.1.4 厂区道路应硬化并定期洒水清扫，出入口设置车辆冲洗设施，运输车辆应密闭运输，不准许带泥上路。

11.1.2.2 废气控制

11.1.2.2.1 蒸汽养护系统应采用清洁能源，不准许使用燃煤锅炉。

11.1.2.2.2 养护窑应设置废气收集与冷凝回收系统，减少挥发性有机物（VOCs）排放。

11.1.2.2.3 对焊接、切割等工序产生的烟尘应配置移动式烟尘净化器。

11.1.3 水污染防治

11.1.3.1 生产废水

11.1.3.1.1 搅拌设备、运输车、模具清洗废水应经沉淀池+压滤系统处理后循环使用，回用率应不低于 80%。

11.1.3.1.2 沉淀污泥应脱水后资源化利用，不准许随意倾倒。

11.1.3.1.3 厂区应设置雨水收集系统，初期雨水经沉淀处理后回用于喷淋降尘或混凝土养护。

11.1.3.2 生活污水

11.1.3.2.1 生活污水应经一体化生化处理设施处理，符合 GB/T 31962 要求后排入市政管网。

11.1.3.2.2 宜设置中水回用系统，用于绿化、冲厕、道路清洗等。

11.1.4 噪声污染控制

11.1.4.1 高噪声设备应设置隔声罩、减振基础；车间墙体应采用吸声材料。

11.1.4.2 厂区边界噪声应符合 GB 12348 的要求，昼间应不大于 60 dB (A)，夜间应不大于 50 dB (A)。

11.1.4.3 夜间生产应取得环保许可，并提前告知周边居民。

11.1.5 碳排放控制

11.1.5.1 应建立碳排放核算体系，按《温室气体排放核算方法与报告指南》计算单位产品碳排放量。

11.1.5.2 宜鼓励使用粉煤灰、矿渣粉等工业副产物替代水泥。

11.1.5.3 宜推广太阳能养护、地源热泵等低碳技术，减少化石能源消耗。

11.2 安全施工与职业健康

11.2.1 安全生产管理

11.2.1.1 企业应建立安全生产责任制，设置专职安全员，制定应急预案并每半年演练一次。

11.2.1.2 起重机械操作、焊接、电工等特种作业人员应持证上岗。

11.2.1.3 构件起吊重量时，应编制专项吊装方案，经总监理工程师审批后实施。

11.2.1.4 暴雨、大风（ ≥ 6 级）、高温（ ≥ 35 °C）等恶劣天气应停止露天吊装作业。

11.2.2 施工安全技术要求

11.2.2.1 吊装作业

11.2.2.1.1 吊具安全系数应不小于 4，钢丝绳报废标准应符合 GB/T 6067.1 的要求。

11.2.2.1.2 构件吊装应设置缆风绳，吊运路径下方设置警戒区，半径应不小于构件长度 1.5 倍。

11.2.2.1.3 墙板吊装应采用专用吊梁，吊点应不少于 4 个，吊索夹角应不小于 60° 。

11.2.2.2 高空作业

11.2.2.2.1 作业高度时，作业人员应佩戴安全带，设置工具防坠绳。

11.2.2.2.2 脚手架搭设应符合 JGJ 130 的规定，验收合格后方可使用。

11.2.2.2.3 楼层临边应设置高防护栏杆，底部应设不低于 180 mm 的挡脚板。

11.2.2.3 临时用电

11.2.2.3.1 配电系统应采用 TN-S 接零保护，三级配电、二级漏电保护，漏电动作电流应不大于 30 mA。

11.2.2.3.2 电缆架空高度应不小于 2.5 m，埋地深度应不小于 0.7 m，穿越道路时加设钢套管。

11.2.3 职业健康防护

- 11.2.3.1 搅拌、破碎岗位应佩戴 KN95 防尘口罩，车间粉尘浓度应不大于 2 mg/m^3 （呼吸性粉尘）。
- 11.2.3.2 噪声不小于 85 dB（A）的岗位应佩戴耳塞或耳罩，并每年进行听力检测。
- 11.2.3.3 接触脱模剂、外加剂时应穿戴防化手套、护目镜，设置局部通风系统。
- 11.2.3.4 夏季高温作业应调整作息时间，11:00~15:00 停止露天作业，提供含盐清凉饮料及防暑药品。

11.2.4 应急与急救

- 11.2.4.1 厂区应设置应急物资库，配备灭火器、急救箱。
- 11.2.4.2 每年应组织不少于 2 次应急演练。
- 11.2.4.3 发生职业伤害时，应立即启动应急预案，并在 1 h 内向当地住建部门报告。

11.3 废弃物管理与资源再利用

11.3.1 废弃物分类与收集

应建立“四分类”收集系统：

- a) 可回收类：废钢筋、废钢模、废木材、废塑料，设置专用堆放区，定期交由资质单位回收；
- b) 有害类：废脱模剂桶、废机油、废电池，设置危废暂存间，委托有资质单位处置；
- c) 一般固废：废混凝土渣、废砂浆，经破碎后作为再生骨料回用；
- d) 生活垃圾：设置封闭式垃圾桶，日产日清，交由环卫部门统一处理。

11.3.2 混凝土废弃物资源化利用

- 11.3.2.1 废混凝土块应经颚式破碎+磁选+筛分工艺，制备成再生粗、细骨料，回用率应不小于 90%。
- 11.3.2.2 再生骨料性能应符合本文件 5.1 要求，杂物含量应不大于 1%。
- 11.3.2.3 废混凝土中钢筋回收率应不小于 98%，经分拣后回炉再生。

11.3.3 废水污泥利用

- 11.3.3.1 沉淀池污泥经板框压滤后含水率应不大于 40%。
- 11.3.3.2 污泥中重金属含量应符合 GB 36600 的规定。

11.3.4 包装与模具废弃物管理

- 11.3.4.1 水泥、外加剂包装袋应集中收集，包装袋压块后交由再生塑料企业利用。
- 11.3.4.2 废钢模应修复再利用，无法修复的应回炉再生，不准许露天焚烧或填埋。
- 11.3.4.3 宜使用可循环塑料模具。

11.3.5 资源再利用目标

- 11.3.5.1 厂区固废综合利用率应不小于 95%，其中再生骨料自用率应不小于 60%。
- 11.3.5.2 每生产 1 m^3 再生混凝土构件，天然资源节约量应不小于 0.8 t，建筑垃圾减量化应不小于 0.6 t。
- 11.3.5.3 应建立资源再利用台账，每月统计废弃物产生量、回用量、处置量，并向环保部门报送。