|  |
| --- |
|  |

JC

ICS 91.100.30

CCS Q14

JC/T XXXX -20XX

中华人民共和国建材行业标准

3D打印混凝土免拆模板应用技术规范

**Technical Specifications for Application of Concrete 3D Printing Permanent Formwork**

（征求意见稿）

20××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

20××-××-××发布

目 录

[前  言 III](#_Toc216022267)

[1 总则 1](#_Toc216022268)

[2 术语 2](#_Toc216022269)

[3 基本规定 3](#_Toc216022270)

[4 材料 4](#_Toc216022271)

[4.1 一般规定 4](#_Toc216022272)

[4.2 打印混凝土原材料 4](#_Toc216022273)

[4.3 打印混凝土性能 5](#_Toc216022274)

[5 配合比设计 7](#_Toc216022275)

[5.1 一般规定 7](#_Toc216022276)

[5.2 配制强度的确定 7](#_Toc216022277)

[5.3 配合比设计参数 8](#_Toc216022278)

[5.4 打印混凝土配合比计算 9](#_Toc216022279)

[5.5 打印混凝土配合比试配、调整和确定 10](#_Toc216022280)

[6](#_Toc216022281) [模板设计 12](#_Toc216022281)

[6.1 一般规定 12](#_Toc216022282)

[6.2 设计 12](#_Toc216022283)

[6.3 技术要求 14](#_Toc216022284)

[7](#_Toc216022285) [设备 15](#_Toc216022285)

[7.1 打印设备 15](#_Toc216022286)

[7.2 其他设备 15](#_Toc216022287)

[8](#_Toc216022288) [施工 16](#_Toc216022288)

[8.1 一般规定 16](#_Toc216022289)

[8.2 施工工序 16](#_Toc216022290)

[8.3 原材料储存 16](#_Toc216022291)

[8.4 3D打印混凝土制备与输送 16](#_Toc216022292)

[8.5 模板打印 17](#_Toc216022293)

[8.6 模板养护 17](#_Toc216022294)

[8.7 混凝土浇筑 17](#_Toc216022295)

[8.8 混凝土养护和吊装 17](#_Toc216022296)

[9](#_Toc216022297) [检验和验收 19](#_Toc216022297)

[9.1 原材料质量检验 19](#_Toc216022298)

[9.2 3D打印混凝土性能检验 19](#_Toc216022299)

[9.3 3D打印混凝土免拆模板验收 19](#_Toc216022300)

[附录A 3D打印混凝土抗压强度及其折减率测试方法 21](#_Toc216022301)

[附录B 3D打印混凝土层间黏结强度和3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度测试方法 23](#_Toc216022302)

[本规范用词说明 25](#_Toc216022303)

[引用标准目录 26](#_Toc216022304)

[条 文 说 明 28](#_Toc216022305)

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。

本文件由中国建筑材料联合会提出。

本文件由建材工业综合标准化技术委员会归口。

本文件负责起草单位：

本文件参加起草单位：

本文件主要起草人：

1. 总则

**1.0.1** 为规范和促进3D打印混凝土免拆模板技术的应用，做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量，制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于现场原位打印和现场或工厂预制的3D打印混凝土免拆模板技术的材料、设备、模板和浇筑混凝土填充及质量检验。

**1.0.3** 3D打印混凝土免拆模板技术的应用，除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

1. 术语

**2.0.1** 3D打印混凝土 3D printed concrete

以水泥、骨料和水为主要原材料，根据需要加入矿物掺合料和外加剂等材料，按一定配合比拌合后，可通过3D打印挤出工艺均匀、稳定成型，且经养护硬化后具有强度的工程材料。

**2.0.2** 3D打印混凝土免拆模板 Concrete 3D printing permanent formwork

以3D打印混凝土为材料，通过3D打印技术制作的，与浇筑混凝土成为一体，不用拆除的模板。

**2.0.3** 装饰型3D打印混凝土免拆模板 Decorative Concrete 3D printing permanent formwork

3D打印混凝土仅作为模板使用，同时利用3D打印形成的特殊纹理、造型作为装饰，浇筑混凝土后无需拆除的3D打印混凝土模板。

**2.0.4** 结构型3D打印混凝土免拆模板 Structural Concrete 3D printing permanent formwork

需要结构荷载的免拆模板，浇筑混凝土后，模板及其内部混凝土将共同作为结构的一部分使用的3D打印混凝土模板。

1. 基本规定

**3.0.1** 3D打印混凝土免拆模板打印材料、设备应满足预制或现场施工工艺要求，且应符合安全和环保等相关要求。

**3.0.2** 3D打印混凝土免拆模板应符合模板的强度、刚度、稳定性的要求以及长期使用时的力学性能和耐久性要求。

**3.0.3** 3D打印混凝土免拆模板根据用途分为装饰型3D打印混凝土免拆模板、结构型3D打印混凝土免拆模板。

**3.0.4** 混凝土3D打印免拆模板结构设计在考虑3D打印混凝土各向异性特点的基础上参考《混凝土结构设计规范》GB 50010或《砌体结构设计规范》GB 50003。

**3.0.5** 打印施工人员应进行专业培训，宜进行试打印。

1. 材料
   1. 一般规定
      1. 用于3D打印混凝土免拆模板的3D打印混凝土等级不宜低于C30，混凝土的拌合物性能、力学性能、耐久性能和长期性能应满足设计和施工的要求。
      2. 用于3D打印混凝土免拆模板用钢筋应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋》GB1499.2和《钢筋混凝土用余热处理钢筋》GB13014的规定。
   2. 打印混凝土原材料
      1. 水泥应符合《通用硅酸盐水泥》GB 175的规定。选用硫铝酸盐水泥时，应符合《硫铝酸盐水泥》GB/T 20472的规定。选用铝酸盐水泥时，应符合《铝酸盐水泥》GB/T 201的规定。选用白水泥时，应符合《白色硅酸盐水泥》GB/T 2015。
      2. 细骨料宜选用级配Ⅱ区的中砂。天然砂的含泥量、泥块含量应符合表4.2.2-1的规定；人工砂的石粉含量应符合表4.2.2-2的规定。细骨料的其他性能及试验方法应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684的有关规定。

表4.2.2-1 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4.2.2-2 人工砂的石粉含量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | | 指标（%） |
| 石粉含量（%） | MB<1.4 | ≤7.0 |
| MB≥1.4 | ≤3.0 |

* + 1. 粗骨料宜选用粒形良好、质地坚固的碎石或卵石，且最大公称粒径不宜大于16mm。粗骨料占骨料的质量百分数不宜低于20%。粗骨料的含泥量和泥块含量应符合表4.2.3的规定，其他性能及试验方法应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685的有关规定。

表4.2.3 粗骨料的含泥量和泥块含量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 含泥量 | 泥块含量 |
| 指标（%） | ≤1.0 | ≤0.5 |

* + 1. 矿物掺合料可采用粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、钢渣粉和硅灰等，且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、《用于水泥、砂浆和混凝土的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046、《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690、《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》GB/T 20491以及《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003的有关规定。当采用其他矿物掺合料时，应通过试验验证。
    2. 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。
    3. 采用合成纤维时，纤维性能应符合现行国家标准《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》GB/T 21120的有关规定。
    4. 拌合水和养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的规定。
    5. 使用的其他材料应由试验确定，并应符合有关标准的规定。
    6. 使用3D打印混凝土预混料时，3D打印混凝土预混料应符合有关标准的规定。
  1. 打印混凝土性能
     1. 3D打印混凝土拌合物不应离析和泌水，凝结时间应满足可打印时间的要求。
     2. 新拌3D打印混凝土拌合物性能的凝结时间、可挤出性和支撑性宜符合表4.3.2的规定。

表4.3.2 新拌打印混凝土可打印性要求及检验方法

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | | 技术要求 | | 检验方法 |
| 骨料最大粒径/mm | |
| ≤5 | 5~16 |
| 流动性 | 流动度（mm） | 160~220 | -- | 《水泥胶砂流动度测定方法》GB/T 2419 |
| 坍落度（mm） | — | 80~150 | 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB 50080 |
| 凝结时间（min） | | ≤90 | | 《建筑砂浆基本性能试验方法》JGJ/T 70 |
| 可挤出性 | | 连续均匀、无堵塞、无明显拉裂 | | 观测 |
| 支撑性 | | 挤出后形态保持稳定且不倒塌 | | 观测 |

* + 1. 硬化3D打印混凝土的力学性能应符合设计要求，检验方法应符合国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081和本标准的规定。

表4.3.3 硬化打印混凝土性能技术要求及检验方法

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 技术要求 | | 检验方法 |
| 打印成型抗压强度 | 满足设计要求 | | 附录A |
| 打印强度折减率/% | ≤20 | |
| 层间劈裂抗拉强度  /MPa | C30 | 1.0 | 《3D打印水泥基材料界面结合强度试验方法》  JC/T 2850 |
| C40 | 1.5 |
| C50 | 2.5 |
| C60 | 3.5 |
| 层间粘结强度/MPa | ≥1.5 | | 附录B |

* + 1. 硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土的界面粘结力，检验方法应符合国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081和本标准的规定。

表4.3.4 硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土的界面粘结力技术要求及检验方法

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 技术要求 | 检验方法 |
| 硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土的界面粘结力 | 满足设计要求 | 附录B |

* + 1. 硬化3D打印混凝土耐久性能除应满足工程设计以及《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476的要求，检测方法应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GB/T 50082的规定。

1. 配合比设计
   1. 一般规定
      1. 3D打印混凝土应根据3D打印建筑的结构形式、施工工艺以及环境因素进行配合比设计，并在综合考虑混凝土的可打印性、强度、耐久性及其他性能的基础上优化配合比。
      2. 根据3D打印混凝土的凝结时间、工作性、力学性能以及耐久性能要求，可使用矿物掺合料替代胶凝材料中部分水泥，降低3D打印混凝土中的水泥用量，调节混凝土的可打印性，矿物掺合料的品种和掺量应通过试验确定。
      3. 3D打印混凝土中加入外加剂时，外加剂的品种和掺量应通过试验确定，同时，外加剂与胶凝材料的适应性应满足可打印性要求。
      4. 当采用3D打印混凝土预混料时，应按照预混料的使用说明配制3D打印混凝土。
   2. 配制强度的确定
      1. 混凝土立方体抗压强度标准值可根据3D打印混凝土立方体抗压强度标准值以及打印强度折减率按下式计算：

*f*cu,k=1/(1-*x*)*f*cu,k3D （5.2.2-1）

式中：*f*cu,k——混凝土立方体抗压强度标准值（MPa）;

*f*cu.k3D——3D打印混凝土立方体抗压强度标准值（MPa）;

*x*——3D打印抗压强度折减率（%）。

* + 1. 混凝土打印抗压强度折减率应根据3D打印工艺通过本规范附录A的测试方法试验确定，无法通过试验确定时可20%。
    2. 3D打印混凝土配制强度应按下列规定确定：

1. 当混凝土的设计强度等级小于C60时，配制强度应按下式确定：

*f*cu,0 ≥*f*cu,k+1.645σ （5.2.3-1）

式中：*f*cu,0——混凝土配制强度（MPa）；

*f*cu,k——混凝土立方体抗压强度标准值，这里取混凝土的设计强度等级值（MPa）；

σ——混凝土强度标准差（MPa）。

对于强度等级大于C30且小于C60的混凝土，当混凝土强度标准差计算值不小4.0MPa时，应按本规范公式（5.2.4）计算结果取值；当混凝土强度标准差计算值小于4.0MPa 时，应取4.0MPa。

1. 当混凝土的设计强度不小于C60时，配制强度应按下式确定：

*f*cu,0 >（1.15+*x*）*f*cu,k （5.2.3-2）

* + 1. 3D打印混凝土强度标准差应按下列规定确定：

1. 当具有3个月以内的同一品种、同一强度等级的3D打印混凝土强度资料，且试件组数不小于30组时，其混凝土强度标准差σ应按下式计算：

（5.2.4）

式中：σ——混凝土强度标准差（MPa）；

*f*cu,i——第i组的试件强度（MPa）；

mfcu——n组试件的强度平均值（MPa）；

n——试件的组数。

1. 当没有近期的同一品种、同一强度等级的混凝土强度资料时，混凝土强度标准差，可按表5.2.4取值。

**表5.2.4 强度标准差σ取值表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 强度标准差取值表 | C30~C45 | C50~C55 |
| σ（MPa） | 5.0 | 6.0 |

* 1. 配合比设计参数
     1. 3D打印混凝土配合比设计的水胶比根据混凝土的设计强度可按表5.3.1选取。

**表5.3.1 不同强度等级3D打印混凝土的水胶比范围**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | C30 | C40 | C50 | C60 |
| 水胶比 | 0.36~0.42 | 0.34~0.40 | 0.30~0.36 | 0.28~0.34 |

* + 1. 3D打印混凝土配合比设计的胶凝材料和骨料的用量应符合下列要求：

1. 3D打印混凝土配合比设计的胶凝材料和骨料的用量应符合下列要求: 根据胶凝材料种类和性质以及骨料的性能和品质进行选定，并保证设计 的混凝土性能符合3D打印施工工艺要求及结构设计要求。
2. 在3D打印混凝土中细骨料单位体积用量由单位体积的胶凝材料、单位 体积用水量以及打印混凝土的可打印性能确定。
3. 3D打印混凝土中粗骨料的用量由3D打印混凝土性能、3D打印混凝土 输送设备、3D打印头出料口宽度决定，具体用量由试验确定。
4. 胶凝材料与骨料用量体积比可按表5.3.2选取。

**表5.3.2 胶凝材料与骨料用量体积比**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | C30 | C40 | C50 | C60 |
| 胶凝材料/骨料(体积比) | 0.57~0.70 | 0.65~0.74 | 0.70~0.81 | 0.74~0.87 |

* + 1. 3D打印混凝土配合比设计中的矿物掺合料掺量可按表5.3.3-1选取，不同种类矿物掺合料的最大掺量宜符合表5.3.3-2的规定。

**表5.3.3-1 不同强度等级的3D打印混凝土中的矿物掺合料用量(wt%)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 强度等级 | C30 | C30~C40 | C40~C50 | C50~C60 | C60~C70 |
| 掺合料（%） | ≤50 | ≤40 | ≤30 | ≤20 | ≤10 |

**表5.3.3-2 不同种类矿物掺合料的最大掺量**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 矿物掺合料种类 | 最大掺量(%) | | | |
| 采用硅酸盐水泥时 | 采用普通硅酸盐水泥时 | 采用其他通用硅酸盐水泥时 | 采用非硅酸盐体系水泥时 |
| 粉煤灰 | 45 | 35 | 15 | 30 |
| 粒化高炉矿渣粉 | 50 | 45 | 20 | 30 |
| 钢渣粉 | 30 | 20 | 10 | 20 |
| 磷渣粉 | 30 | 20 | 10 | 20 |
| 硅灰 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 复合掺合料 | 50 | 45 | 20 | 30 |

注：**1** 采用其他通用硅酸盐水泥时，宜将水泥混合材掺量20%以上的混合材量计人矿物掺合料。

**2** 复合掺合料各组分的掺量不宜超过单掺时的最大掺量限值。

**3** 在混合使用两种或两种以上矿物掺合料时，矿物掺合料总掺量宜符合表中复合掺合料的规定限值。

* 1. 打印混凝土配合比计算
     1. 3D打印混凝土配合比设计宜按下列步骤进行：

1. 应根据按本规范第5.2.3条计算3D打印混凝土配制强度。
2. 根据本规范第5.3.1条选取3D打印混凝土的水胶比。
3. 每立方米3D打印混凝土中胶凝材料和骨料的体积比应按本规范第5.3.2条选择，按下式计算：

（5.4.1-2）

式中：Vb/Vs——胶凝材料和骨料的体积比；

mb——每立方米3D打印混凝土中胶凝材料的用量（kg）；

*ρb*——胶凝材料的表观密度（kg/m3）；

ms——每立方米3D打印混凝土中骨料的用量（kg）；

*ρs*——骨料的表观密度（kg/m3）。

1. 每立方米混凝土中用水的质量应根据每立方米混凝土中胶凝材料质量以及水胶比确定，按下式计算：

*m*w=*m*b·(*m*w/*m*b) (5.4.1-2)

式中：*m*w——每立方米3D打印混凝土中水的质量（kg）；

*m*w/*m*b——3D打印混凝土的水胶比。

1. 每立方米混凝土中矿物掺合料的掺量应根据本规范5.3.3条选择，按下列公式计算矿物掺合料用量和水泥用量；

*m*f=*m*b*β*f (5.4.1-3)

*m*c=*m*b−*m*f (5.4.1-4)

式中：*m*f——每立方米3D打印混凝土中矿物掺合料用量（kg）；

*m*b——每立方米3D打印混凝土中胶凝材料用量（kg）；

*β*f——矿物掺合料掺量（%）；

*m*c——每立方米3D打印混凝土中水泥用量（kg）。

1. 根据3D打印混凝土拌合物性能要求，选取外加剂种类并根据试验确定用量，并按下式计算：

*m*a=*m*b∙*α* (5.4.1-5)

式中：*m*a——每立方米3D打印混凝土中外加剂的质量（kg）；

*α*——每立方米3D打印混凝土中外加剂占胶凝材料总量的质量百分数（%）。

1. 3D打印混凝土的配合比可按下式进行计算：

*m*w+*m*b+*m*s+*m*a=*m*cp (5.4.1-6))

式中：*m*s——每立方米3D打印混凝土中骨料的质量（kg）；

*m*cp——每立方米3D打印混凝土拌合物的假定质量（kg），当含有粗骨料时，每立方米混凝土拌合物质量可取2350kg~2450kg；当不含粗骨料时，每立方米混凝土拌合物质量可取2150kg~2250kg。

1. 3D打印混凝土配合比设计中各材料用量应根据式(5.4.1-1)~式(5.4.1-6)联立方程组计算得出。
   1. 打印混凝土配合比试配、调整和确定
      1. 混凝土试配应采用强制式搅拌机进行搅拌，并应符合现行国家标准《混凝土搅拌机》GB/T 9142的有关规定，搅拌方法宜与打印施工采用的方法相同。
      2. 实验室成型条件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。
      3. 3D打印混凝土配合比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应小于20L。
      4. 3D打印混凝土试配时，按照计算配合比进行试拌，检查拌合物的可打印性和可打印时间。当拌合物可打印性和可打印时间不能满足要求时，通过调整外加剂和掺合料用量使混凝土拌合物性能符合设计和打印要求，然后修正计算配合比，提出混凝土强度试验用的试拌配合比。
      5. 在试拌配合比的基础进行混凝土配制强度试验，并应符合下列规定：
2. 应采用三个不同的配合比，其中一个应为本规范第5.5.4确定的试拌配合比，另两个配合比的水胶比宜较试拌配合比分别增加和减少0.02，通过适当调整用水量实现;
3. 进行混凝土强度试验时，拌合物性能应符合设计和打印施工的要求;
4. 进行混凝土强度试验时，每个配合比应至少制作一组试件，并标准养护到28d或设计规定龄期时试压。
   * 1. 根据本规范第5.5.5条混凝土强度试验结果，确定略大于配制强度对应的水胶比的配合比。
     2. 混凝土拌合物表观密度和配合比校正系数的计算应符合下列规定：
5. 配合比调整后的混凝土拌合物的表观密度应按下式计算：

*ρ*c,c=*m*w+*m*b+*m*s+*m*a (5.5.7-1)

式中：*ρ*c,c——混凝土拌合物的表观密度计算值（kg/m3）；

*m*w——每立方米3D打印混凝土中水的质量（kg）；

*m*b——每立方米3D打印混凝土中胶凝材料用量（kg）；

*m*s——每立方米3D打印混凝土中骨料的质量（kg）；

*m*a——每立方米3D打印混凝土中外加剂的质量（kg）。

1. 混凝土配合比校正系数应按下式计算:

*δ*=*ρ*c,c/*ρ*c,t (5.5.7-2)

式中：*δ*——混凝土配合比修正系数；

*ρ*c,t——混凝土拌合物的表观密度实测值（kg/m3）。

* + 1. 当混凝土拌合物表观密度实测值与计算值之差的绝对值不超过计算值的2%时，按本规范第5.5.6条确定的配合比可维持不变；当二者之差超过2%时，应将配合比中每项材料用量均乘以校正系数*δ*。
    2. 混凝土配合比的确定应符合下列规定：

1. 调整后的配合比应按本规范附录A测试方法中的规定进行制作3D打印混凝土试件，3D打印的试件至少应制作一组试件，并应标准养护到28d或设计规定龄期时试压；
2. 3D打印成型的混凝土试件的抗压强度在满足设计强度等级时，确定该配合比为3D打印混凝土的施工打印配合比；
3. 当3D打印成型的混凝土试件的抗压强度低于结构计的强度等级时，需要重新进行配合比设计；
4. 生产单位在遇到原材料品种和质量有显变化时，应重新进行配合比设计。
5. 模板设计
   1. 一般规定
      1. 3D打印混凝土免拆模板用于各类预制混凝土构件以及现浇混凝土墙、板、柱等的侧模。
      2. 3D打印混凝土免拆模板的设计应根据工程结构形式、荷载大小、施工设备和材料等条件进行，并应符合下列规定：
6. 应具有足够的承载能力、刚度和稳定性，应能可靠地承受浇筑混凝土的侧压力和施工过程中所产生的荷载。
7. 当验算3D打印混凝土免拆模板的抗倾覆稳定性时，应符合相应设计规范的规定。
   1. 设计
      1. 3D打印混凝土免拆模板设计应包括下列内容：
8. 根据施工工艺及工况确定其所承受的荷载；
9. 绘制模板设计图和模板受力验算书。
   * 1. 3D打印混凝土免拆模板恒荷载标准值为新浇混凝土作用于模板的侧压力标准值（G4k），可按下列公式计算，并取其中的较小值：

(6.2.2-1)

(6.2.2-2)

式中：——混凝土的重力密度（kN/m3）；

*V*——混凝土的浇筑速度（m/h）；

——新浇混凝土的初凝时间（h），可按试验确定；当缺乏试验资料时，可采用t=200/（T+15）（T为混凝土的入模温度℃）；

——外加剂影响修正系数；不掺外加剂时取1.0，掺具有缓凝作用的外加剂是取1.2；

——混凝土坍落度影响修正系数；当坍落度小于30mm时，取0.85；坍落度为50~90mm时，取1.00；坍落度为110~150mm 时，取1.15；

*H*——混凝土侧压力计算位置至新浇混凝土顶面的总高度（m）；混凝土侧压力的计算分布图如图5.2.2所示，图中：*h*=*F*/，*h*为有效压头高度。

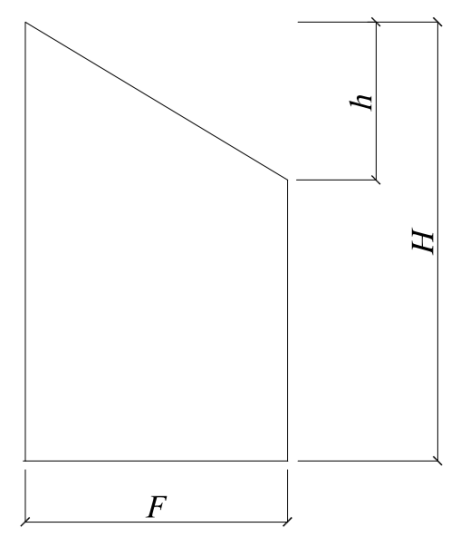


图 6.2.2 混凝土侧压力计算分布图形

* + 1. 3D打印混凝土免拆模板活荷载标准值应符合下列规定：

1. 振捣混凝土时产生的荷载标准值（Q2k），对于侧模作用可采用4kN/m2，且作用范围在新浇筑混凝土侧压力的有效压头高度之内。
2. 浇筑普通混凝土时，对垂直面模板产生的水平荷载标准值（Q3k），可按表5.2.3采用。浇筑轻质混凝土时，乘以其密度与普通混凝土密度之比。

表 6.2.3 倾倒混凝土时产生的水平荷载标准值（kN/m2）

|  |  |
| --- | --- |
| 向模板内供料方法 | 水平荷载 |
| 溜槽、串筒或导管 | 2 |
| 容量小于0.2 m3的运输器具 | 2 |
| 容量为0.2～0.8 m3的运输器具 | 4 |
| 容量大于0.8 m3的运输器具 | 6 |

注：作用范围在有效压头高度以内。

* + 1. 模板荷载设计值应符合下列规定：

1. 计算模板的强度、稳定性和连接强度时，应采用荷载设计值。
2. 计算正常使用极限状态的变形时，应采用荷载标准值。
3. 荷载分项系数应按表6.2.4采用。

表 6.2.4 荷载分项系数

|  |  |
| --- | --- |
| 荷载类别 | 分项系数*γ*i |
| 新浇筑混凝土对模板侧面的压力（G4k） | 一般情况应取1；  对结构的倾覆、滑移验算，应取0.9。 |
| 振捣混凝土时产生的荷载（Q2k） | 可变荷载的分项系数：  一般情况下应取1.4；  对标准值大于4kN/m2的活荷载应取1.3。 |
| 倾倒混凝土时产生的荷载（Q3k） |

* + 1. 模板荷载组合应符合下列规定：

1. 按极限状态设计时，其荷载组合应符合《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162的规定。
2. 对于正常使用极限状态应采用标准组合，并应符合《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162的规定。
3. 参与计算模板的各项荷载的标准值组合应符合表6.2.5的规定。

表 6.2.5 模板荷载效应组合的荷载类别

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | | 参与组合的荷载类别 | |
| 计算承载能力 | 验算挠度 |
| 1 | 梁、拱、柱（边长不大于300mm）、墙（厚度不大于100mm）的侧面模板 | G4k+Q2k | G4k |
| 2 | 柱（边长大于 300mm）、墙（厚度大  于100mm）的侧面模板 | G4k+Q3k | G4k |

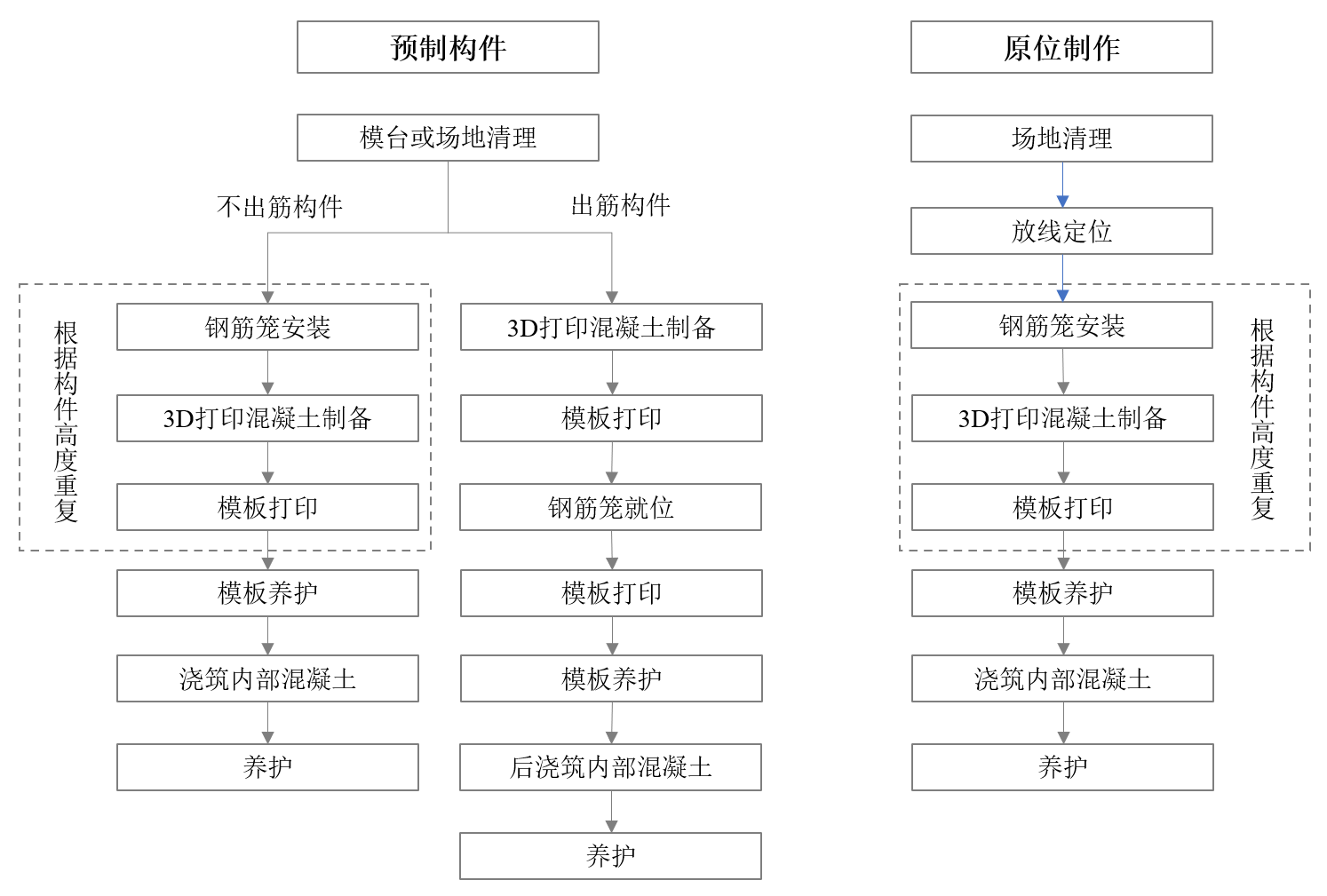
* + 1. 3D打印混凝土免拆模板内部应根据侧压力设置拉结筋。打印拉结混凝土时，水平间距不小于0.5个/m；设置拉结筋时，竖向每5层设置一根拉结筋，水平向拉结筋间距不小于0.5个/m。
    2. 结构型3D打印混凝土免拆模板，浇筑混凝土与模板界面粘结力应满足设计要求，当无设计要求时，宜不小于浇筑混凝土本身的设计抗拉强度。当界面粘结力不满足设计要求时，应设置连接钢筋增强界面抗拉强度。
  1. 技术要求
     1. 各类型3D打印混凝土免拆模板的技术要求见表6.3.1。

表 6.3.1 各类型3D打印混凝土免拆模板的技术要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 模板类型 | 荷载组合 | 混凝土强度 | 浇筑混凝土与模板界面粘结力 | 尺寸偏差 |
| 装饰型3D打印混凝土免拆模板 | 模板荷载 | 不低于C30 | 不要求 | ±5mm\* |
| 结构型3D打印混凝土免拆模板 | 结构荷载 | 3D打印混凝土打印强度不低于浇筑混凝土，或3D打印混凝土浇筑强度乘以折减系数后不低于浇筑混凝土 | 满足设计要求 | ±5mm\* |

注：\*统一按照打印条带凸起边缘。

1. 设备
   1. 打印设备
      1. 用于混凝土3D打印的设备包括搅拌设备、输料设备和3D打印设备。
      2. 3D打印混凝土搅拌设备应符合国家标准《混凝土搅拌机》GB/T9142的规定，宜采用强制式搅拌机。当采用其他类型的搅拌设备时，应根据打印和拌合需要适当延长搅拌时间。
      3. 搅拌设备选型时应根据输料设备输送量、输送管长度、打印头容积、打印头规格和打印速度确定搅拌设备容量。
      4. 所选用的输料设备，应对3D打印混凝土拌合物工作性无明显影响。
      5. 输料设备的输送量应具有可调节功能。
      6. 3D打印混凝土中无粗骨料时，输送设备宜采用螺杆泵形式；3D打印混凝土中有粗骨料时，输送设备宜采用活塞泵形式。
      7. 3D打印设备应包括打印硬件系统和打印软件系统。
      8. 打印硬件系统的技术要求应符合下列规定：
2. 具备在三维方向移动功能，能够按照设计的打印路径进行自动打印，满足打印要求。
3. 打印精度宜为±1mm。
4. 通过打印软件系统可控制打印头位置、打印速度、打印头出料流量。
   * 1. 打印软件系统的技术要求应符合下列规定：
5. 应具备打印路径编程功能，自动计算每层打印时间和总打印时间。
6. 应具备实时监测打印硬件系统中电气部件是否正常运行的功能，电气部件出现异常应能够自动停止并发出警报。
7. 宜具备打印过程模拟功能。
8. 宜具备打印偏差自动监测和提示功能。
9. 宜具备断点记忆，复位续打，缺陷报警等功能。
   * 1. 打印头出料口尺寸应根据打印宽度、挤出速率、打印速率等因素确定。
     2. 打印速率的选择应根据3D混凝土拌合物性能和打印设备技术参数确定，确定后通过试验进行验证，确保打印宽度和打印效果满足要求。
   1. 其他设备
      1. 当3D打印混凝土的生产应根据原材料的配置形式设置适合的计量设备，计量设备的要求符合国标《预拌混凝土》GB/T 14902的规定。
      2. 3D打印混凝土模板时，为了监控模板打印工作，宜架设视频监控设备，监控打印模板过程和输料系统。
10. 施工
    1. 一般规定
       1. 混凝土3D打印免拆模板施工前应根据工程结构特点、施工条件等编制切实可行的专项施工方案，并对施工作业人员进行技术交底。
       2. 打印设备的形式和尺寸应根据工程设计要求，结合场地条件、模板尺寸、施工经济性等因素确定。
       3. 打印前应制定应急供电、供水保障方案。
    2. 施工工序
       1. 混凝土3D打印免拆模板根据施工场景，施工工序分为预制构件和现场原位制作。
       2. 混凝土3D打印免拆模板一般施工工序见图8.2.2。



**图8.2.2 混凝土3D打印免拆模板一般施工工序**

* 1. 原材料储存
     1. 水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别储存，并应防止受潮。
     2. 骨料应按品种、规格分别堆放，并应采取遮雨防尘措施。
     3. 矿物掺合料应按品种、生产厂家分别储存，并应防止受潮。
     4. 外加剂应按品种、生产厂家分别储存。粉状外加剂应有防潮措施，液体外加剂储存在密闭容器中，并应防晒和防冻，使用前应搅拌均匀。
     5. 预混料应按品种、强度等级和生产厂家分别储存，并应防止受潮。
  2. 3D打印混凝土制备与输送
     1. 3D打印混凝土拌合物宜现场制备，并应严格按照要求的水料比称量用水量，搅拌时间不少于3min。当掺用纤维时，纤维应分批投入，并适当延长搅拌时间。
     2. 采用预拌混凝土时，混凝土拌合物宜根据可打印时间和打印进度分批制备，应保证连续供应。
     3. 将3D打印混凝土拌合物输送至打印头的输料设备选型应根据输送距离和输送高度确定。
  3. 模板打印
     1. 打印前，应根据3D打印混凝土拌合物性能和打印设备性能进行可行性试验确定打印工艺参数，打印工艺参数主要包括打印速率、打印高度、挤出速率等。
     2. 打印前应目测混凝土拌合物的性能，满足要求且不得发生泌水泌浆和离析现象。
     3. 混凝土3D打印施工过程中应进行实时监测，观察打印效果和打印设备运行状况，发现问题应立即调整或停止打印，问题解决后方可继续打印施工。
     4. 混凝土3D打印施工期间，应划出保护区域，禁止非专业人员或物品靠近打印模板。
     5. 打印过程中，上、下两层间隔时间不宜超过混凝土拌合物的凝结时间。
     6. 原位3D打印施工时，如遇高温、大风、雨、雪等恶劣天气，不宜进行打印。打印过程中因故暂停打印，继续打印时，应在界面处涂覆水泥基界面黏结剂后继续打印。
     7. 当暂停时间过长或混凝土不能满足可打印性要求时，应及时清除输送设备和打印头中的混凝土。
     8. 打印完成应及时清洗搅拌设备、输送设备和打印头。
  4. 模板养护
     1. 打印过程中，宜对已打印完成的未达到初凝的混凝土采取喷雾保湿措施，不应采用喷水保湿措施。
     2. 3D打印混凝土打印完成后，待混凝土凝结硬化后开始采用喷淋或洒水保湿养护，或覆盖养护膜，养护至满足下一步混凝土浇筑要求。
     3. 原位3D打印模板完成后，遇到风速较大的天气，应采取防风保水养护措施。
     4. 预制3D打印模板完成后，可根据需要选择自然养护或蒸汽养护。
  5. 混凝土浇筑
     1. 浇筑混凝土分为结构混凝土和保温填充轻质混凝土，结构混凝土的强度等级或保温填充轻质混凝土的保温性能和密度应符合设计要求。
     2. 混凝土浇筑前，应检查模板空腔内部，如有杂物应清理干净。
     3. 结构混凝土浇筑时，免拆模板的3D打印混凝土一般应终凝。
     4. 对于完成养护并长时间放置的3D打印混凝土免拆模板，在浇筑结构混凝土前，应在3D打印混凝土免拆模板外表面大量喷淋或洒水。
     5. 结构混凝土应采用分层浇筑的方法，分层厚度不宜大于500mm，并应严格控制分层浇筑的间歇时间，混凝土自由倾落高度不宜超过3m，否则需采用串筒、溜管等辅助措施。
     6. 结构混凝土的振捣符合《混凝土结构工程施工规范》GB50666的规定。
  6. 混凝土养护和吊装
     1. 原位施工混凝土浇筑完成后，采用自然养护。混凝土浇筑完成后，可直接向3D打印混凝土模板喷淋或洒水保湿养护，并应符合《混凝土结构工程施工规范》GB 50666和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。
     2. 预制构件混凝土浇筑完成后，可根据需要选择自然养护或蒸汽养护。采用自然养护时，要求同8.8.1。采用蒸汽养护时，应符合《工厂预制混凝土构件质量管理标准》JG/T 565的规定。
     3. 预制构件起吊时，强度应满足设计要求，且3D打印混凝土和建筑混凝土均应不小于15MPa。

1. 检验和验收
   1. 原材料质量检验
      1. 3D打印混凝土原材料或预混料进场时，应按规定批次验收型式检验报告、出厂检验报告或合格证等质量证明文件，外加剂产品还应具有使用说明书。
      2. 原材料或预混料进场后，应进行进场检验，检验项目和检验批量应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164的规定。
      3. 3D打印混凝土原材料的检验结果应符合本规范第4章的规定。
   2. 3D打印混凝土性能检验
      1. 3D打印混凝土拌合物性能检验应符合下列规定：
2. 打印前，应在打印地点对3D打印混凝土拌合物进行抽样检验；
3. 抽样检验内容应符合本规范表4.3.2的要求。
4. 同一工程、同一配合比、采用同一批次水泥或预混料和外加剂的3D打印混凝土凝结时间应至少检验1次。
   * 1. 硬化3D打印混凝土性能检验应符合下列规定：
5. 强度检验评定应符合国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107的规定；
6. 耐久性能检验评定应符合行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193的规定；
7. 混凝土长期性能如抗冻性能、抗水渗透性能、抗氯离子渗透性能和抗硫酸盐侵蚀性能检验方法按国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GB50082的规定进行检验。
   * 1. 硬化3D打印混凝土抗压强度的测定应符合本规范附录A的规定，检验结果应符合设计要求及本规范第4章的规定。
     2. 硬化3D打印混凝土层间劈裂强度和层间粘结强度的测定应符合本规范《3D打印水泥基材料界面结合强度试验方法》JC/T 2850和附录B的规定，检验结果应符合设计要求及本规范第4章的规定。
     3. 用于结构型3D打印混凝土永久模板的硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度的测定应符合本规范附录B的规定，检验结果应符合设计要求及本规范第4章的规定。
   1. 3D打印混凝土免拆模板验收
      1. 3D打印混凝土免拆模板过程中，应检查下列内容：
8. 打印的连续性；
9. 预埋件的规格数量及位置。
   * 1. 3D打印混凝土免拆模板的外观尺寸、内部腔体和打印条带的允许偏差和检验方法应符合表9.3.2中的规定。

表9.3.2 3D打印混凝土的打印条带和内部腔体的观允许偏差和检验方法

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 允许偏差/mm | 检验方法 |
| 1 | 总体长度 | ±5 | 尺量 |
| 2 | 总体高度 | +5, -2 | 尺量 |
| 3 | 总体厚度 | ±5 | 尺量 |
| 4 | 腔体厚度 | +5, -2 | 尺量 |
| 5 | 条带宽度 | ±5 | 尺量 |
| 6 | 每层打印厚度 | ±5 | 尺量 |
| 7 | 出筋长度（如有） | ±5 | 尺量 |

* + 1. 3D打印混凝土免拆模板浇筑混凝土后构件的允许偏差应符合表9.3.2中1-3和7（如有）的规定。
    2. 原位3D打印混凝土免拆模板、工厂或现场预制并浇筑混凝土的构件验收时，应提供下列文件：

1. 3D打印混凝土的抗压强度检测记录；
2. 3D打印混凝土免拆模板或构件的尺寸检查记录。

附录A 3D打印混凝土抗压强度及其折减率测试方法

**A.0.1**标准试件的制备及测试应符合下列规定:

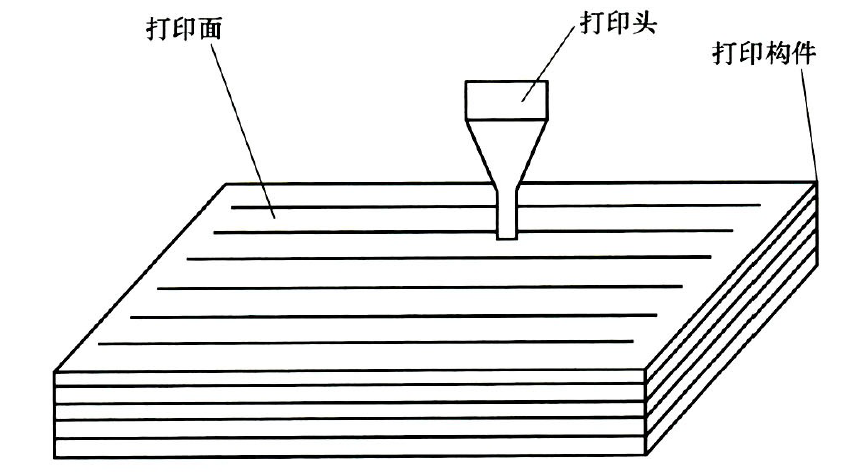
**1**试件配合比应与3D打印混凝土配合比相同。

**2**试件尺寸应为边长150mm的立方体。

**3**试件的成型、养护和测试应按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081的有关规定进行。

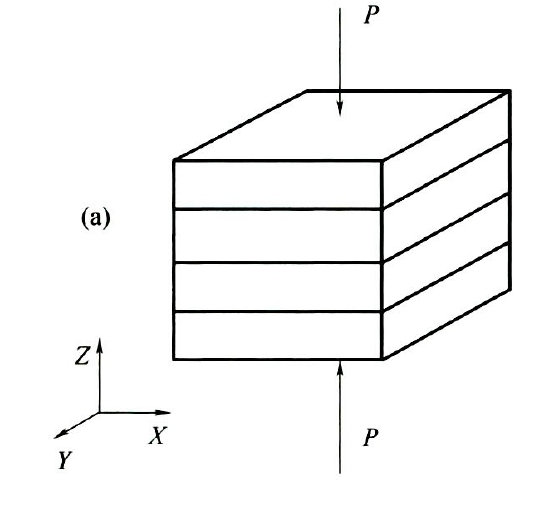
**A.0.2** 3D打印试件的制备及测试应符合下列规定**:**

**1**用3D打印设备按图A.0.2-1所示打印成型，且按打印头出料宽度50±5mm、单层高度10mm 的打印参数，打印成型的试件尺寸在高度和长度方向分别不应小于切割后试件尺寸的2倍，打印完成后应在室温下覆膜养护24h后移人标准养护室中养护。



图A.0.2-1 混凝土3D打印构件

**2**至少养护7d后，除打印试件底面外其余5面采取切割、打磨方式，制备成与标准成型试件尺寸相同的立方体试件，完成后在底面做好试件标记;切割试件要求表面平整、测试上下面平行度，尺寸误差l mm，切割过程如有掉角缺损，需用同配比打印材料修补完整(图A.0.2-2)。



图A.0.2-2 切割后3D打印试件

**3**每组至少制备6个试件，制备完成的试件放人标准养护室中。

**4**标准养护至28d的打印试件应按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081的规定进行测试，测试加载力方向应为打印成型面并垂直于底面。

**A.0.3** 抗压强度折减率的计算及确定应按下列方法进行:

**1**抗压强度折减率下式计算:

(A.0.3)

式中：X——打印强度折减率(%)

Rc1——3D打印试件抗压强度(MPa) ;

Rc2——标准试件抗压强度(MPa)。

**2**强度值Rc1的确定应符合下列规定:

**1)**将不少于6个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值(精确至0.1MPa);

**2)**若测值中的最大值或最小值中如有1个与6个试件测试的算术平均值的差值超过15%时，则把最大及最小值一并舍除，并用其余试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。

附录B 3D打印混凝土层间黏结强度和3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度测试方法

**B.0.1**试件按本规范附录B.0.2的方法制备。

**1**层间粘结强度，采用3D打印设备打印成型条形构件，且按打印头出料宽度50±5mm、单层高度10mm的打印层数不少于6层的构件，并在室温下覆膜养护24h后再移入标准养护室中养护。

**2**两种混凝土界面粘结强度，采用3D打印设备打印成型中空方形构件，打印要求同上，在室温下覆膜养护24h后，中间浇筑普通混凝土，浇筑混凝土硬化后，再移入标准养护室中养护。

**3**层间粘结强度构件应至少养护7d后取出切割截取长度为50mm，且打印层数为4层或6层的测试试件。两种混凝土界面粘结强度，浇筑混凝土应至少养护14d后，取出切割截取。

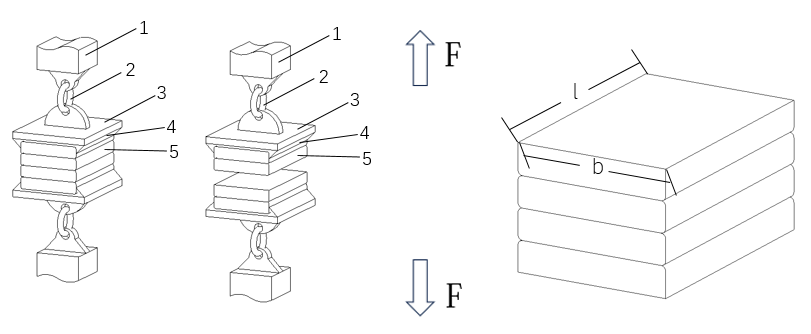
**B.0.2**试件的测试按下列步骤进行:

**1**在试件上下两面各放厚度10mm、边长60mm的方形钢板模具，在钢板侧面及试件侧面划出中心线，并用高强胶将钢板与试件按中心线位置对齐黏结牢固;高强胶可选用的改性丙烯酸酯AB胶或其他高强胶，剪切强度大于或等于20MPa。黏结胶固化24h后进行试验，如从钢板与试件胶结处拉开，此试件无效。

**2**将钢板与试验机夹具连接。

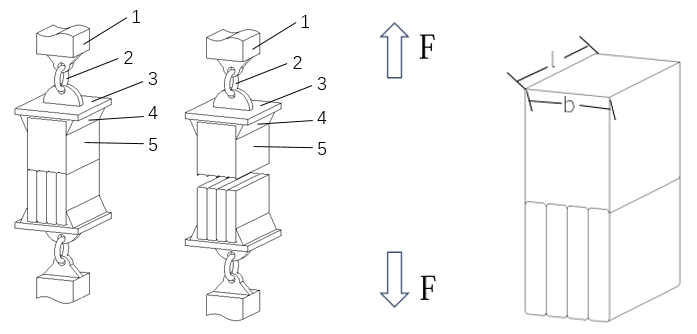
**3**试验机通过拉伸夹具将试件从打印层间拉开，得到破坏荷载（F）。

**4**测量破坏处的层间接触面边长的平均值宽度（b）和长度（l）;计算断裂接触面积（A），A=b×l。



图B.0.2-1 3D打印混凝土层间粘结强度测试示意图

1—铰链连接件；2—U形钢环；3—钢板模具；4—高强黏结胶；5—测试试件



图B.0.2-2 3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度测试示意图

1—铰链连接件；2—U形钢环；3—钢板模具；4—高强黏结胶；5—测试试件

**B.0.3**层间黏结强度结果的计算及确定应按下列方法进行:

**1**层间粘结强度按以下公式计算，结果精确到0.1MPa：

(C.0.3)

式中：*f*——混凝土劈裂强度（MPa）；

*F*——试件破坏荷载（N）；

*A*——层间接触面积（mm2），A=b×l。

**2**强度值的确定应符合下列规定:

**1)**将不少于6个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值（精确至0.1MPa）；

**2)**若测值中的最大值或最小值中如有1个与6个试件测试的算术平均值的差值超过15%时，则把最大及最小值一并舍除，并用其余试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值。

本规范用词说明

1为便于在执行本规范条文时区别对待，对于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条文中指明应按其它标准执行的写法为：“应符合......的规定”或“应 按......执行”。

引用标准目录

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | 《通用硅酸盐水泥》 | GB 175 |
| 2 | 《铝酸盐水泥》 | GB/T 201 |
| 3 | 《钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋》 | GB 1499.2 |
| 4 | 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 | GB/T 1596 |
| 5 | 《白色硅酸盐水泥》 | GB/T 2015 |
| 6 | 《水泥胶砂流动度测定方法》 | GB/T 2419 |
| 7 | 《混凝土外加剂》 | GB 8076 |
| 8 | 《混凝土搅拌机》 | GB/T 9142 |
| 9 | 《钢筋混凝土用余热处理钢筋》 | GB 13014 |
| 10 | 《建设用砂》 | GB/T 14684 |
| 11 | 《建设用卵石、碎石》 | GB/T 14685 |
| 12 | 《预拌混凝土》 | GB/T 14902 |
| 13 | 《用于水泥、砂浆和混凝土的粒化高炉矿渣粉》 | GB/T 18046 |
| 14 | 《硫铝酸盐水泥》 | GB/T 20472 |
| 15 | 《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》 | GB/T 20491 |
| 16 | 《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》 | GB/T 21120 |
| 17 | 《砂浆和混凝土用硅灰》 | GB/T 27690 |
| 18 | 《砌体结构设计规范》 | GB 50003 |
| 19 | 《混凝土结构设计规范》 | GB 50010 |
| 20 | 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 | GB/T 50080 |
| 21 | 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》 | GB/T 50082 |
| 22 | 《混凝土物理力学性能试验方法标准》 | GB/T 50081 |
| 23 | 《混凝土强度检验评定标准》 | GB/T 50107 |
| 24 | 《混凝土质量控制标准》 | GB 50164 |
| 25 | 《混凝土外加剂应用技术规范》 | GB 50119 |
| 26 | 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 | GB 50204 |
| 27 | 《混凝土结构耐久性设计标准》 | GB/T 50476 |
| 28 | 《混凝土结构工程施工规范》 | GB 50666 |
| 29 | 《矿物掺合料应用技术规范》 | GB/T 51003 |
| 30 | 《3D打印水泥基材料界面结合强度试验方法》 | JC/T 2850 |
| 31 | 《混凝土用水标准》 | JGJ 63 |
| 32 | 《建筑砂浆基本性能试验方法》 | JGJ/T 70 |
| 33 | 《建筑施工模板安全技术规范》 | JGJ 162 |
| 34 | 《混凝土耐久性检验评定标准》 | JGJ/T 193 |
| 35 | 《工厂预制混凝土构件质量管理标准》 | JG/T 565 |

附件

中华人民共和国建材行业标准

3D打印混凝土免拆模板应用技术规范

**JC/T \*\*\*\*\*-\*\*\*\***

**条 文 说 明**

**目 录**

[1 总则 3](#_Toc215946582)

[2 术语 4](#_Toc215946583)

[3 基本规定 5](#_Toc215946584)

[4 材料 6](#_Toc215946585)

[4.1 一般规定 6](#_Toc215946586)

[4.2 打印混凝土原材料 6](#_Toc215946587)

[4.3 打印混凝土性能 6](#_Toc215946588)

[5 配合比设计 7](#_Toc215946589)

[5.1 一般规定 7](#_Toc215946590)

[5.2 配制强度的确定 7](#_Toc215946591)

[5.3 配合比设计参数 7](#_Toc215946592)

[5.4 打印混凝土配合比计算 7](#_Toc215946593)

[6 模板设计 9](#_Toc215946594)

[6.1 一般规定 9](#_Toc215946595)

[6.2 设计 9](#_Toc215946596)

[6.3 分类和技术要求 9](#_Toc215946597)

[7 设备要求 10](#_Toc215946598)

[7.1 打印设备 10](#_Toc215946599)

[7.2 其他设备 10](#_Toc215946600)

[8 施工 11](#_Toc215946601)

[8.1 一般规定 11](#_Toc215946602)

[8.2 施工工序 11](#_Toc215946603)

[8.5 模板打印 11](#_Toc215946604)

[8.6 模板养护 12](#_Toc215946605)

[8.7 混凝土浇筑 12](#_Toc215946606)

[8.8 混凝土养护 12](#_Toc215946607)

[9 验收 13](#_Toc215946608)

[9.1 原材料质量检验 13](#_Toc215946609)

[9.2 3D打印混凝土性能检验 13](#_Toc215946610)

[9.3 3D打印混凝土免拆模板验收 13](#_Toc215946611)

[附录A 3D打印混凝土抗压强度及其折减率测试方法 14](#_Toc215946612)

[附录B 3D打印混凝土层间黏结强度和3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度测试方法 15](#_Toc215946613)

1. 总则

**1.0.1** 3D打印作为一种新型数字化建造工艺，近几年在国内外建筑领域发展迅速，采用混凝土进行打印建造的研究和应用尤为突出，其中3D打印混凝土作为模板使用时3D打印混凝土的重要应用方向。但在混凝土3D打印方面尚无统一的技术标准，致使3D打印混凝土免拆模板技术缺少指导性文件，不利于该项技术的发展和推广，为此制定本规范是非常必要的。

**1.0.2** 3D打印混凝土免拆模板根据应用场景分为原位打印模板和预制模板，其中预制模板又分为工厂预制和现场预制。

1. 术语

**2.0.2** 本条给出了3D打印混凝土免拆模板的定义，强调了与浇筑混凝土成为一体，不用拆除。

**2.0.3**、**2.0.4** 这两条定义了3D打印混凝土免拆模板的两种类型。

1. 基本规定

**3.0.3** 3D打印混凝土免拆模板根据用途进行分类。装饰型3D打印混凝土免拆模板，利用3D打印形成的效果作为装饰，模板内部架设钢筋浇筑混凝土，模板不参与建筑结构受力，主要用于建筑的墙和柱使用，应用起来相对简单，是目前较为常用的形式。结构型3D打印混凝土免拆模板，模板需要参与建筑结构受力，目前主要用于叠合板板的制作，也可用于建筑的墙和柱使用，其优点是充分利用了3D打印混凝土材料力学性能，整体上节省建材，但是应用相对复杂，需要保证D打印混凝土免拆模板与浇筑混凝土有较好的整体性。

**3.0.4** 目前3D打印混凝土尚无专门的设计规范，结构设计仍以参考《混凝土结构设计规范》GB 50010或《砌体结构设计规范》GB 50003的基本原则为主。

**3.0.5** 打印前应对打印过程中关键环节的人员进行模拟打印培训，使各环节人员明确各自职责和人员之间的相互关系，包括打印操作员、输料操作员、预埋件人员、打印协调员。打印操作员负责打印路径的输入，设备的启停控制；输料操作员负责设备的启停、辅助配料的添加；预埋件人员根据打印协调员的指令在相应位置布设连接钢筋、预埋构件；打印协调员负责协调材料的制备、输送，并对打印体进行巡视观察，发现问题及时通知打印、输料操作员，向预埋件人员发布布筋指令。

1. 材料
   1. 一般规定

4.1.1 由于3D打印混凝土没有经过振捣密实，混凝土强度有一定的折减，研究表明其折减不大于20%，因此，按照20%左右计算，C30混凝土实际强度等级约为24MPa。根据《混凝土结构设计规范》GB50010的规定，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C20。因此，规定了3D打印混凝土免拆模板的3D打印混凝土不宜低于C30。

* 1. 打印混凝土原材料

4.2.1 通常用于打印的混凝土可选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、白色硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铝酸盐水泥，本条对上述水泥进行了规定。实际研究中，也存在采用其他满足打印要求的胶凝材料，例如磷酸镁水泥、地聚物等，但由于其应用量极小，故本条没有列出。

4.2.2、4.2.3 由于3D打印施工工艺的特殊性，混凝土拌合物需要通过打印头挤出，因此，3D打印混凝土中骨料的最大粒径不宜过大，否则容易堵塞输料管和打印头，无论是配合比设计中是否有粗骨料，骨料的最大粒径应首先根据输料设备和打印头的尺寸和施工经验进行设计，并最终通过试验确定。

4.2.5 3D打印的混凝土根据混凝土的性能设计要求和所使用的原材料情况，可选用减水剂、早强剂、缓凝剂、增稠剂、消泡剂、引气剂、触变剂、减缩剂等功能型外加剂，质量应符合现行国家相关标准的规定。

4.2.6 3D打印混凝土中可以加入纤维提高混凝土的抗拉强度，减少裂纹产生，建议采用有机纤维，钢纤维有导致打印头堵塞的风险，加入钢纤维一定要通过多次试验确定掺量和拌合物的可施工性是否满足要求。

4.2.9 实际工程使用中，3D打印混凝土预混料是目前最为常见的使用形式。目前由于预混料尚无发布的国家标准和行业标准，因此本条只规定其符合有关标准的规定。

* 1. 打印混凝土性能

4.3.1 3D打印混凝土拌合物的凝结时间应根据具体工程项目、打印施工安排等综合因素来设计，可打印时间一般不大于拌合物初凝时间的80%。

4.3.2 流动性是3D打印混凝土拌合物重要的指标之一，流动性过小，拌合物很难被挤出，从而导致堵塞设备；流动度过大，很难满足支撑性要求。本条通过总结国内多种形式的3D打印混凝土拌合物特点，对拌合物的流动性提出了建议的取值范围。

4.3.3 本条中对于硬化后的3D打印混凝土力学性能的要求采用普通混凝土的相关规定。对于3D打印工艺产生的力学性能特点，如打印强度折减率和层间黏结强度，本条不仅提出了具体的性能指标要求，同时针对3D施工成型和标准方法成型产生的打印强度折减率以及打印施工完成后的成品层间黏结强度提出了具体检验方法。

4.3.4 对于部分3D打印混凝土免拆模板，模板本身作为混凝土结构的一部分，需要3D打印混凝土免拆模板与浇筑混凝土的界面有一定的粘结力。本条规定了硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土的界面粘结力应符合设计要求。

1. 配合比设计
   1. 一般规定

5.1.1 本条规定了3D打印混凝土配合比设计的基本要求。

5.1.2 3D打印混凝土凝结时间通常较短，水泥水化快，早期收缩大，可以使用矿物掺合料代替部分水泥，同时掺加掺合料也可以降低打印混凝土中的水泥用量，减少水化热和收缩率。但掺合料的掺入，也会影响拌合物的其他性能，如流动性、支撑性和可打印时间等，因此，掺合料的品种和掺量应经过试验来最终确定。

5.1.3 3D打印的混凝土根据混凝土的性能设计要求和所使用的原材料情况，可选用减水剂、早强剂、缓凝剂、增稠剂、消泡剂、引气剂、触变剂等功能型外加剂，外加剂的种类及产品应通过试验确定，尤其是外加剂与胶凝材料的适应性，当使用过程中更换外加剂的品牌或品种时，应提前进行适应性试验才能用于施工。

* 1. 配制强度的确定

由于3D打印施工工艺可能导致的混凝土强度折减，本节提出混凝土配制强度确定时，混凝土立方体抗压强度标准值应在结构设计强度基础上结合强度折减率进行计算，保证配制强度符合设计要求。通过对多种施工工艺的研究表明，3D打印强度折减率通常不超过20%,具体数值可通过试验测得。

* 1. 配合比设计参数

本节提出了3D打印混凝土配合比设计的参数。参数的范围是根据大量试验研究的基础上提出的，但因材料种类不同、功能不同和性质不同和施工工艺不同，本节的参数范围仅作为参考使用。

5.3.2 根据胶凝材料种类和性质以及骨料的性能和品质进行选定，并保证设计的混凝土性能符合3D打印施工工艺要求及结构设计要求。在3D打印混凝土中细骨料单位体积用量由单位体积的胶凝材料、单位体积用水量以及打印混凝土的可打印性能确定。3D打印混凝土中粗骨料的用量由3D打印混凝土性能、3D打印 混凝土输送设备、3D打印头出料口宽度决定，具体用量由试验确定。

* 1. 打印混凝土配合比计算

本节提出了3D打印混凝土的配合比设计方法。配合比依据三相图结合鲍罗米公式和最佳浆骨比的经验值进行设计（图1），为3D打印混凝土提供一个可借鉴的取值范围，在实际设计过程中取值若超出本范围，但打印混凝土的性能满足各项技术要求，材料配合比也是合理的。

根据配合比设计方法提供了计算公式，需要根据条文中步骤分别列出公式，最终通过解方程的形式来计算各材料用量。本节中提到的骨料的用量可以是粗、细骨料的总和，也可以仅为细骨料，当作为粗、细骨料的总和时，还应根据砂率分别计算出粗、细骨料的分别用量。

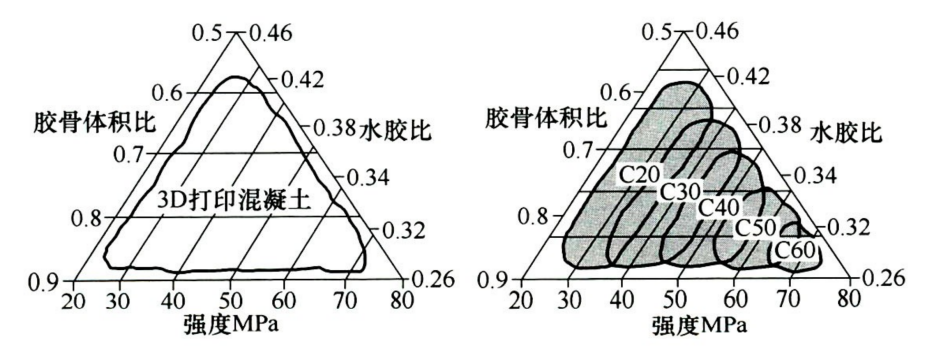


图1 配合比设计原理图

1. 模板设计

6.1 一般规定

6.1.1 3D打印混凝土免拆模板的优势是制作造型各异的侧模，底模平整即可满足要求，因此，底模一般采用平整地面，模台或者普通模板，而不采用3D打印混凝土。

6.1.2 3D打印混凝土免拆模板主要用于侧模，同时由于目前3D打印混凝土免拆模板作为外墙模板使用的高度有限，国内使用的高度多为1-2层的建筑，因此此处不考虑3D打印混凝土免拆模板和后浇混凝土的自重以及风荷载。

6.2 设计

6.2.2 由于3D打印混凝土免拆模板仅作为侧模使用，对照《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162，恒荷载标准值仅为新浇混凝土作用于模板的侧压力标准值（G4k），而不存在。模板及其支架自重标准值（G1k）、新浇筑混凝土自重标准值（G2k）、钢筋自重标准值（G3k）。

6.2.3 由于3D打印混凝土免拆模板仅作为侧模使用，对照《建筑施工模板安全技术规范》JGJ 162，可能的活荷载标准值为振捣混凝土时产生的荷载标准值（Q2k）和浇筑普通混凝土时，对垂直面模板产生的水平荷载标准值（Q3k），而不存在施工人员及设备荷载标准值（Q1k）

6.2.4 模板荷载设计值新浇筑混凝土对模板侧面的压力（G4k）的分项系数*γ*i，由于目前3D打印混凝土免拆模板的使用，其效应对结构没有不利影响，因此按照其效应对结构有利取值。

6.2.7 3D打印混凝土免拆模板作为混凝土主体结构的一部分使用时，免拆模板应与浇筑混凝土协同受力，为了保证整体性，浇筑混凝土与模板界面粘结力应满足设计要求。当界面粘结力不满足设计要求时，可以通过设置连接钢筋增强界面抗拉强度。

6.3 分类和技术要求

6.3.2 3D打印混凝土边缘多呈现出打印条纹，出于统一测量位置和方便测量的考虑，定为3D打印混凝土边缘尺寸按照打印条带凸起边缘。

1. 设备要求
   1. 打印设备

7.1.1 用于混凝土3D打印的设备包括搅拌设备、输料设备和3D打印设备，其中搅拌设备负责制备新拌3D打印混凝土，然后由输送设备(即泵送设备)输送至3D打印机即可打印施工。

7.1.2 用于打印的混凝土拌合物比普通混凝土拌合物的流动性小，制备时搅拌时间一般比普通混凝土延长2min~3min。

7.1.3 3D打印混凝土属于快硬性材料，宜采取用多少生产多少的原则，尽量避免已经制备完成的材料长时间等待的情况，应按照要求的打印速率计算输送量，根据输送量计算搅拌设备的公称容量。同时对于模板中配置的钢筋笼的高度选择长度适合的打印头。

7.1.4 采用压力输料设备时，输送后混凝土拌合物工作性通常会有所降低，但应对打印无影响。当通过设备前后的拌合物性能有离析无法满足打印，则需要重新调整配合比。

7.1.6 本条规定了输送设备的选型，输送设备的形式与骨料最大粒径有关，输送设备的功率与输送距离和输送高度有关，应通过试验来最终确定。

7.1.7 打印硬件系统是实施打印操作的主体，打印软件系统用于控制硬件系统，建议打印软件系统具有与多种图形设计软件的接口，方便快捷准确的实施打印施工。

7.1.8 本条具体规定了打印硬件系统的具体技术要求。打印硬件系统首先应具备安全性，对结构设计、用电安全等各方面均应满足相关的安全技术标准。

打印设备定位精度指通过打印软件控制给定信号移动后的实际位置与标准位置（理论位置）之间的差距（误差）。

打印头出料流量是指打印混凝土在单位时间内通过3D打印头挤出的混凝土的容积。

7.1.9 本条对打印软件系统提出具体的技术要求，同时对软件的技术要求具备安全技术功能，在打印过程中出现意外情况时，应能够报警并自动停止硬件系统。

* 1. 其他设备

7.2.1 当3D打印混凝土的生产采用粉料、骨料、外加剂、水等原材料直接配制混凝土时，各类原材料均应配备相应的计量设备。当3D打印混凝土的生产采用袋装预混料时，预混料之外涉及的材料，如水或外加剂应配备相应的计量设备。

7.2.2 3D打印混凝土模板的打印工作无需人工，为了方便控制端人员的操作，宜架设打印监控设备，同时由于打印材料采用取用多少生产多少的原则，输料系统的材料量亦需要监控，便于输料系统和搅拌系统的速度相协调。

1. 施工

8.1 一般规定

**8.1.1** 混凝土3D打印免拆模板与普通模板施工技术有很大区别，为了能更好地完成施工，同时就施工方案内容对施工作业人员进行技术交底。

**8.1.2** 目前用于混凝土3D打印设备形式众多，每种设备各有自己的特点，很难对设备提出一个统一的技术要求，同时混凝土3D打印免拆模板又可分为在工厂预制和现场原位打印，因此应根据实际打印需求进行设备的选择。

**8.1.3** 3D打印混凝土的凝结时间较短，在打印施工过程中，如果出现断电情况，对搅拌设备、输送设备和打印设备难以清理，可能造成设备的永久损坏，因此，应制订供电的保障方案。打印过程中如果在非施工节点停止，后期的修补较难，应尽可能地避免突然停止打印，有必要制订供水应急方案。

8.2 施工工序

**8.2.2** 混凝土3D打印免拆模板的工序，因打印场景和打印模板类型不同有所区别。目前，在工厂或现场预制的构件，对于柱、梁，可不用水平方向的连接，侧面无需出筋；对于墙，水平方向主要是通过企口进行构造连接，侧面亦无需出筋，其一般工序为先安装钢筋笼，之后围绕钢筋笼打印侧模。对于板，多为侧面出筋的形式，其一般工序为，先打印1-2层侧模，之后钢筋笼就位，接着继续打印侧模至设计高度。目前，在原位制作的模板，其工序与不出筋构件基本一致，主要区别是在打印前应准确放线定位。对于墙、柱等模板通常由于高度较高，钢筋笼无法直接架设至设计高度，同时打印设备也无法满足避开钢筋笼，打印较高高度的要求，目前通常的做法是安装一定高度的钢筋笼，然后打印至一定高度，待打印混凝土终凝，再架设钢筋笼，并重复上述工序，直至打印至模板的设计高度。

8.5 模板打印

**8.5.1** 本条规定了正式打印施工前应通过可行性试验确定打印工艺参数。

**8.5.2** 打印施工前对打印混凝土进行试拌并测试流动度等工作性，观察材料工作性能有无异常，无异常方可进行打印。

**8.5.3** 打印施工过程中有必要对打印效果、打印设备的运行情况等实时监测，打印效果包括打印过程中的中心线是否准确，打印宽度和打印高度等是否满足设计要求，打印设备运行情况是否有异常情况，以上情况对打印施工质量非常重要，如果发现问题，应及时采取措施。

**8.5.4** 本条规定了3D打印混凝土模板划出保护区域，防止非专业人员或物品进入对3D打印混凝土模板造成损坏或影响3D打印混凝土设备的工作。

**8.5.5** 本条规定了打印过程中上、下两层时间的时间间隔，避免出现打印层之间粘结缺陷。

**8.5.6** 本条规定了原位3D打印混凝土模板的施工环境。原位3D打印混凝土模板对环境要求较高，高温、大风、雨、雪等恶劣天气均可能对施工 过程中的打印建筑造成破坏。

**8.5.7、8.5.8** 无论是停机时间过长，还是打印完成后，均应及时清洗设备，避免混凝土硬化无法清洗，造成设备损坏。

8.6 模板养护

**8.6.1** 3D打印混凝土由于粉体材料用量较常规混凝土更多，为了防止混凝土开裂，打印完成后应及时喷雾保湿。

8.7 混凝土浇筑

**8.7.3** 3D打印混凝土的凝结速度较快。混凝土浇筑前，免拆模板的混凝土一般均已终凝，并已经达到一定的强度，但是对于叠合板构件来说，由于其侧模高度仅为60mm~80mm，侧压力非常小，如果浇筑的混凝土流动性较好，如自密实混凝土，无需通过振捣，或仅需在离侧模较远处进行轻微振捣时，即时3D打印混凝土没有终凝，亦可以进行混凝土浇筑。

**8.7.4** 3D打印混凝土免拆模板完成养护并长时间放置后，由于混凝土失水，模板内部处于干燥状态，此时直接浇筑混凝土，模板会大量吸收混凝土与模板接触的界面处的水分，造成两种混凝土的界面强度降低。

**8.7.5** 为了保证混凝土浇筑的质量，参考《混凝土结构工程施工规范》GB50666的规定，基础大体积混凝土结构浇筑，分层浇筑的厚度不宜超过500mm，同时为防止出现冷缝，应严格控制分层浇筑的间歇时间。混凝土浇筑倾落高度是指所浇筑结构的高度加上混凝土布料点距本次浇筑结构顶面的距离。混凝土浇筑离析现象的产生，与混凝土下料方式、最大粗骨料粒径以及混凝土倾落高度有最主要的关系。大量工程实践证明，泵送混凝土采用最大粒径不大于25mm的粗骨料，且混凝土最大倾落高度控制在6m以内时，混凝土不会发生离析，对于粗骨料粒径大于25mm的混凝土其倾落高度控制在3m以内时，混凝土不会发生离析。本条规定出于降低混凝土对于3D打印混凝土免拆模板的冲击以及使用的便捷，统一规定混凝土倾落高度控制在3m以内。

8.8 混凝土养护

**8.8.1** 混凝土早期塑性收缩和干燥收缩较大，易于造成混凝土开裂。混凝土养护是补充水分或降低失水速率，防止混凝土产生裂缝，确保达到混凝土各项力学性能指标的重要措施。采用3D打印混凝土免拆模板，免去拆模步骤，同时混凝土本身具有一定的保水性，因此可以再混凝土浇筑完成后，直接向3D打印混凝土模板喷淋或洒水保湿养护。

1. 验收

9.1 原材料质量检验

本节规定了3D打印混凝土原材料或预混料的质量检验。原材料进场时，应检查原材料或预混料的型式检验报告、出厂检验报告或合格证等质量证明文件的查验和留存；原材料或预混料进场后，应进行材料复检。

9.2 3D打印混凝土性能检验

**9.2.1** 规定了3D打印混凝土拌合性能的检验要求。

**9.2.2~9.2.4** 这三条规定了3D打印混凝土硬化后的性能检验要求。混凝土力学性能要求中打印强度折减率、层间黏结强度以及应符合本规范的试验方法和技术指标。

**9.2.5** 规定了对于结构型3D打印混凝土永久模板，应测定硬化3D打印混凝土与浇筑混凝土的粘结强度。

9.3 3D打印混凝土免拆模板验收

本条对3D打印混凝土免拆模板的验收提出了要求。对于原位打印的模板，作为模板进行验收。对于工厂或现场预制模板之后浇筑混凝土形成预制构件，可直接对构件进行验收代替模板验收。

附录A 3D打印混凝土抗压强度及其折减率测试方法

**A.0.1** 标准成型试件按照与普通混凝土成型方法制备及养护。

**A.0.2** 打印强度折减率是3D打印特殊工艺造成的强度损失，有必要进行测试，以确认施工工艺的可行性。3D打印施工的打印单层宽度通常不会很大，目前的3D打印材料中不含粗骨料的单层宽度约为50mm，含有粗骨料的单层宽度与普通混凝土墙体接近，约为200mm，因此，本规范分别规定了不含粗骨料和含有粗骨料的标准试件尺寸。

**A.0.3** 本条采用《普通混凝土力学性能试验方法标准»GB/T 50081进行试验。

附录B 3D打印混凝土层间黏结强度和3D打印混凝土与浇筑混凝土粘结强度测试方法

**B.0.2** 试件在测试过程中，破坏处应为试件本身，如果在试件上、下面与钢板的黏结处破坏，则认为本次试验无效，应重新进行试验。