

福建省工程建设地方标准

DB J/ XXXXX—2012

建设部备案号：

自密实混凝土加固土木工程结构技术规程

Technical specification for strengthening civil structures

by Self-Compacting Concrete

(征求意见稿)

2012 - XX - XX 发布

2012 - XX - XX 实施

福建省住房和城乡建设厅发布

目 次

目次.....	I
前言.....	III
1 总则	1
2 术语、符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 自密实混凝土的原材料	7
3.1 一般规定.....	7
3.2 水泥.....	7
3.3 骨料.....	7
3.4 水.....	8
3.5 矿物掺合料.....	8
3.6 外加剂.....	8
4 自密实混凝土配合比设计规定	9
4.1 一般规定.....	9
4.2 混凝土配制强度的确定.....	10
4.3 自密实混凝土配合比设计的原则.....	10
4.4 配合比设计设计方法.....	11
4.5 配合比的试配、调整与确定.....	14
5 自密实混凝土的生产与施工	16
5.1 一般规定.....	16
5.2 自密实混凝土的生产.....	16
5.3 自密实混凝土的运输.....	17
5.4 自密实混凝土的浇筑.....	17
5.5 自密实混凝土的养护.....	18
6 自密实混凝土质量检验评定	19
6.1 一般规定.....	19
6.2 新拌自密实混凝土的质量控制.....	19
6.3 自密实混凝土强度的质量控制.....	20
6.4 自密实混凝土耐久性的质量控制.....	20
7 自密实混凝土加固结构工程的施工	21
7.1 一般规定.....	21
7.2 界面处理.....	21
7.3 钢筋混凝土板加固施工方法.....	22
7.4 钢筋混凝土梁加固施工方法.....	22
7.5 钢筋混凝土柱加固施工方法.....	23
7.6 墙体加固施工方法.....	23
7.7 拱桥加固施工方法.....	23

8 自密实混凝土加固钢筋混凝土结构设计方法	24
8.1 设计规定.....	24
8.2 受弯构件正截面加固计算.....	24
8.3 加固受弯构件斜截面承载力计算.....	26
8.4 加固受压构件正截面承载力计算.....	27
8.5 加固受压构件斜截面承载力计算.....	30
8.6 加固框架节点承载力承载力计算.....	30
8.7 构造规定.....	31
9 自密实混凝土加固结构质量验收	33
本规程用词说明.....	34
附录 A 自密实混凝土拌合物工作性检验方法.....	35
附录 B 自密实混凝土抗裂性能检测方法.....	41
条文说明	

前 言

为了规范自密实混凝土在加固工程中的应用，确保自密实混凝土加固工程的质量和安
全，特制定本规程。

福州大学对自密实混凝土的研究与应用进行了系统的工作，完成了国家自然科学基金、
福建省科技厅、福建省发改委、福建省建设厅等下达的多项重大科研项目，在自密实混凝土
材料的研制与配合比优化、自密实混凝土的力学性能、自密实混凝土的体积稳定性、自密实
混凝土加固构件受力性能等方面取得了系统的研究成果，同时将研究成果成功地应用于多个
省内外重要工程，积累了自密实混凝土生产、施工等方面的工程实践经验。

根据福建省住房和城乡建设厅闽建科[2011]28号文件“关于工程建设地方标准编制计划
项目《自密实混凝土加固土木工程结构技术规程》通知”的要求，主编单位与参编单位对福
州大学在自密实混凝土材料、加固结构及工程应用等方面取得的最新科研成果进行了认真总
结，并充分考虑了当前国家（行业）相关标准的最新编制信息和我省的相关规定，同时还参
考、借鉴了国外自密实混凝土的有关规程，完成了本规程的编写工作。本规程在广泛征求意
见、反复修改的基础上，最后经福建省住房和城乡建设厅组织专家审查定稿。

本标准主编单位：福州大学

本标准参编单位：

本标准主要起草人：

1 总则

1.1 为规范自密实混凝土加固结构工程设计方法，满足设计和施工要求，保证混凝土工程质量，质量检验评定有据可依，做到安全适用、经济合理、技术先进，制定本规程。

1.2 本规程适用于工业与民用建筑及一般构筑物采用增大截面法加固所进行的结构设计、自密实混凝土配合比设计、生产、施工。除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

1.3 加固工程采用的材料应符合设计要求。主要材料进入施工现场时，应具有中文标识的出厂合格证、产品出厂检验报告等质量证明文件。同时，监理工程师应做好检查验收、材料见证取样和送检工作。

1.4 应建立、健全施工质量的检验制度，严格工序管理，做好隐蔽工程的质量检查和记录。隐蔽工程在隐蔽前，施工单位应通知有关单位进行验收，并做好隐蔽工程验收记录。

1.5 加固施工的全过程应有可靠的安全措施：

1) 要制定严格的施工安全方案实行工程施工封闭管理，塔吊吊臂旋转范围须限制在施工作业区内。

2) 搭设防护通道，合理设置警示标志，提示和引导避让危险，确保人员的人身安全。

3) 在加固过程中，若发现结构、构件突然发生变形增大、裂缝扩展或条数增多等异常情况，应立即停工、采取支顶等有效安全措施并及时向监理工程师汇报和组织相关单位专题讨论处理措施；

4) 工作场地严禁烟火，并必须配备消防器材。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 自密实混凝土 self-compacting concrete

自密实混凝土是在较低水胶比条件下,通过复合高效外加剂,合理使用粉煤灰等矿物掺合料,优化混凝土集料的级配而配制出的具有良好的流动性、穿越钢筋能力、抵抗分离能力的新型材料。自密实混凝土在施工中仅靠自重就能填充到复杂模型的各个角落,而均匀自密实成型,同时硬化后具有优良的力学性能和耐久性能。

2.1.2 自密实混凝土的工作性 workability of fresh self-compacting concrete

新拌自密实混凝土工作性是流动性、粘聚性、保水性、穿越钢筋能力和坍落度经时损失的总称。

2.1.3 胶凝材料 binder

混凝土中水泥和矿物掺合料的总称。

2.1.4 胶凝材料用量 binder content

混凝土中水泥用量和矿物掺合料用量之和。

2.1.5 浆体体积 paste volume

单方混凝土中胶凝材料、外加剂与水所占的总体积。

2.1.6 水胶比 water-binder ratio

单方混凝土中的用水量与胶凝材料用量的质量之比。

2.1.7 浆骨比(体积): paste-aggregate (volume) ratio

单方混凝土中胶凝料、外加剂与水的体积与骨料总体积之比。

2.1.8 矿物掺合料掺量 percentage of mineral admixture

矿物掺合料用量占胶凝材料用量的质量百分比。

2.1.9 外加剂掺量 percentage of chemical admixture

外加剂用量相对于胶凝材料用量的质量百分比。

2.1.10 自密实混凝土的表观密度 unit weight of fresh self-compacting concrete

自密实混凝土拌合物的单位体积质量。

2.1.11 坍落扩展度 slump flow

用坍落度筒装满自密实混凝土,端部抹平,不需插捣,沿两个互相垂直方向测量水平面上混凝土坍落后直径大小的平均值。

2.1.12 中边差 slump difference between middle and border

用坍落度筒装满自密实混凝土,端部抹平,不需插捣,测量中部和边缘的坍落度差值。

2.1.13 L型仪流平度 performance of SCC flowing through L box

采用带钢筋网片L型流动仪测定自密实混凝土的流平程度。

2.1.14 J环试验 J ring test

采用J环与坍落度筒测定自密实混凝土的流平程度和穿越钢筋的能力。

2.1.15 自密实混凝土自生收缩 autogenous shrinkage of SCC

与外界无水分交换时,由于水泥水化消耗了内部水分,使混凝土内部相对湿度下降,所产生的体积收缩。

2.1.16 自密实混凝土干燥收缩 drying shrinkage of SCC

自密实混凝土在干燥空气中,混凝土中的水分逐渐蒸发,水泥石毛细孔和水泥凝胶体失去水分,使混凝土产生的体积收缩。

2.1.17 自密实混凝土体积稳定性 volume stability of SCC

自密实混凝土在无荷载作用下保持其体积不变的能力。

2.1.18 自密实混凝土抗裂性能 cracking-behaviors of SCC

在约束条件下,抵抗收缩应力导致自密实混凝土开裂的能力。

2.1.19 粗糙度 roughness

老混凝土表面的粗糙程度,用灌砂法测老混凝土表面平均灌砂深度。

2.1.20 刻槽密度 groove density

采用刻槽法对老混凝土表面进行处理时,评价老混凝土表面粗糙度的指标。

2.1.21 已有结构加固 strengthening of existing structures

对可靠性不足或业主要求提高可靠度的承重结构、构件及其相关部分采取增强、局部更换或调整其内力等措施,使具有现行设计规范及业主所要求的安全性、耐久性和适用性。

2.1.22 原构件 existing structure member

实施加固前的原有构件。

2.1.23 重要构件 important structure member

其自身失效将影响或危及承重结构体系整体工作的承重构件。

2.1.24 一般构件 general structure member

其自身失效为孤立事件,不影响承重结构体系整体工作的承重构件。

2.1.25 增大截面加固法 structure member strengthening with R.C

增大原构件截面面积或增配钢筋,以提高其承载力和刚度,或改变其自振频率的一种直接加固法。

2.1.26 二次受力 secondary load

在实际工程应用中,加固前结构(或构件)由于自重等初始荷载已经作用于原结构上,原结构(或构件)已有一定的初始应力应变,加固后新加固部分与原结构(或构件)存在应力、应变差值的现象。

2.2 符号

2.2.1 自密实混凝土配合比设计

- | | | |
|------------|----|----------------------|
| $f_{cu,0}$ | —— | 混凝土配制强度 (MPa); |
| $f_{cu,k}$ | —— | 混凝土立方体抗压强度标准值 (MPa); |
| $f_{cu,i}$ | —— | 第 i 组的试件强度 (MPa) |
| m_{fcu} | —— | n 组试件的强度平均值 (MPa) |

- f_b —— 胶凝材料 28d 抗压强度实测值 (MPa);
 $f_{ce,g}$ —— 水泥强度等级值 (MPa);
 m_{wa} —— 掺外加剂时每立方米混凝土中的用水量 (kg);
 m_{a0} —— 每立方米混凝土的骨料总质量 (kg);
 m_{bo} —— 计算配合比每立方米混凝土的胶凝材料用量 (kg);
 m_{co} —— 计算配合比每立方米混凝土的水泥用量 (kg);
 m_{FA0} —— 计算配合比每立方米混凝土的粉煤灰用量 (kg);
 m_{SG0} —— 计算配合比每立方米混凝土的矿渣用量 (kg);
 m_{SF0} —— 计算配合比每立方米混凝土的硅灰用量 (kg);
 m_{SP0} —— 计算配合比每立方米混凝土的外加剂用量 (kg);
 m_{go} —— 计算配合比每立方米混凝土的粗骨料用量 (kg);
 m_{g0} —— 计算配合比每立方米混凝土的粗骨料用量 (kg);
 m_{so} —— 计算配合比每立方米混凝土的细骨料用量 (kg);
 m_{wo} —— 计算配合比每立方米混凝土的用水量 (kg);
 m_c —— 每立方米混凝土的水泥用量 (kg);
 m_b —— 每立方米混凝土的胶凝材料用量 (kg);
 m_g —— 每立方米混凝土的粗骨料用量 (kg);
 m_s —— 每立方米混凝土的细骨料用量 (kg);
 m_w —— 每立方米混凝土的用水量 (kg);
 m_{cp} —— 每立方米混凝土拌合物的假定质量 (kg);
 p_c —— 水泥占胶凝材料的质量比;
 p_{FA} —— 粉煤灰占总胶凝材料的质量比;
 p_{SG} —— 矿渣占总胶凝材料的质量比;
 p_{SF} —— 硅灰占总胶凝材料的质量比;
 γ_f —— 矿物掺合料影响系数;
 β_s —— 砂率 (%);
 ρ_c —— 水泥密度 (kg/m^3);
 ρ_f —— 矿物掺合料密度 (kg/m^3);
 ρ_g —— 粗骨料的表观密度 (kg/m^3);
 ρ_s —— 细骨料的表观密度 (kg/m^3);
 ρ_{FA} —— 粉煤灰的密度 (kg/m^3);
 ρ_{SG} —— 矿渣的密度 (kg/m^3);
 ρ_{SF} —— 硅灰的密度 (kg/m^3);
 ρ_w —— 水的密度 (kg/m^3);
 a —— 混凝土的含气量百分数, 在不使用引气型外加剂时, a 可取为 1
 $\rho_{c,c}$ —— 混凝土拌合物表观密度计算值 (kg/m^3);
 $\rho_{c,t}$ —— 混凝土拌合物表观密度实测值 (kg/m^3);
 δ —— 混凝土配合比校正系数;

$V_{P/A}$	——	浆骨比；
$V_{P/T}$	——	单方混凝土中浆体体积；
$V_{A/T}$	——	单方混凝土中骨料体积；
W/B	——	水胶比；
σ	——	混凝土强度标准差 (MPa)；
n	——	试件组数。

2.2.2 抗裂性能指标

t_0	——	搅拌混凝土加水的时间 (min)；
t_1	——	混凝土平板或圆环试件裂缝出现的时间 (min)；
t_2	——	混凝土平板试件裂缝出现贯穿的时间 (min)；
T_1	——	混凝土平板或圆环试件初裂时间；
T_2	——	混凝土平板试件裂缝贯穿时间；
A	——	混凝土平板试件开裂面积 (mm^2)；
W_i	——	混凝土平板试件第 i 根裂缝的平均宽度 (mm)；
L_i	——	混凝土平板试件第 i 根裂缝的长度 (mm)；
N	——	混凝土平板试件总裂缝根数。

2.2.3 新老混凝土粘结锚固强度

ρ_h	——	老混凝土表面的刻槽密度；
n	——	刻槽个数；
e	——	每个槽的平均宽度 (mm)；
a	——	粘结面长度，沿此方向间隔刻槽 (mm)；
b	——	粘结面宽度，顺此方向间隔刻槽 (mm)；
h_s	——	刻槽平均深度 (mm)；
τ	——	新老混凝土界面粘结强度 (MPa)；
α_1	——	混凝土强度影响系数；
α_2	——	界面剂影响系数；
α_3	——	刻槽密度影响系数；
τ_p	——	为整体混凝土的纯剪强度设计值 (MPa)；
ρ_v	——	抗剪钢筋植筋率；
A_S	——	抗剪钢筋截面面积 (mm^2)；
S	——	粘结面面积 (mm^2)；
f_y	——	钢筋抗拉强度设计值 (MPa)。

2.2.4 加固结构承载力计算

2.2.4.1 材料性能

E_{S0}	——	原构件钢筋弹性模量；
E_S	——	新增钢筋弹性模量；

- f_{c0} —— 原构件混凝土轴心抗压强度设计值；
 f_{y0} 、 f'_{y0} —— 原钢筋的抗拉、抗压强度设计值；
 f_y 、 f'_y —— 新增钢筋抗拉、抗压强度设计值；

2.2.4.2 作用效应及承载力

- N —— 构件加固后轴向力设计值；
 M —— 构件加固后弯矩设计值；
 V —— 构件加固后剪力设计值；
 M_{0k} —— 加固前受弯构件验算截面上原作用的弯矩标准值；
 σ_s —— 新增纵向钢筋受拉应力；
 σ_{s0} —— 原构件纵向受拉钢筋或受压较小边钢筋的应力。

2.2.4.3 几何参数

- h_0 、 h_{01} —— 构件加固后和加固前的截面有效高度；
 h_w —— 构件截面的腹板高度；
 A_{s0} 、 A'_{s0} —— 原构件受拉区、受压区钢筋截面面积；
 A_s 、 A'_s —— 新增构件受拉区、受压区钢筋截面面积；

2.2.4.4 计算系数

- α_1 —— 受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值；
 β_c —— 混凝土强度影响系数；
 β_1 —— 矩形应力图受压区高度与中和轴高度的比值；
 α_c —— 新增混凝土强度利用系数；
 α_s —— 新增纵筋强度利用系数；
 α_{vs} —— 新增箍筋强度利用系数；
 η —— 增大系数或提高系数。

3 自密实混凝土的原材料

3.1 一般规定

3.1.1 自密实混凝土所使用的原材料应根据国家有关标准、规范进行取样、检验，检验结果必须符合要求。

3.1.2 自密实混凝土所使用的原材料尚应满足国家现行标准的有关要求。

3.1.3 自密实混凝土所使用的原材料品质宜根据工程所在地区的实际情况进行选择。

3.2 水泥

3.2.1 应选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥配制自密实混凝土，不宜采用早强型水泥。

3.2.2 水泥进场时应对其品种、级别、包装或散装仓号、出厂日期等进行检查，并应对其强度、安定性及其它必要的性能指标复验。其品种和强度等级必须符合设计和现行国家标准《混凝土结构加固设计范》GB 50367 的规定，其质量必须符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 和《快硬硅酸盐水泥》GB 199 等的要求。

严禁使用安定性不合格、含氯化物、过期和受潮水泥。

3.2.3 根据具体工程的特点以及设计、施工的要求选用合适的水泥品种和等级。应使用旋窑生产的质量稳定、合格的水泥。

3.3 骨料

3.3.1 细骨料应选用质地坚硬、级配良好的河砂。细骨料的细度模数宜为 2.6~3.0，其通过公称直径 315 μm 筛孔的颗粒含量不宜少于 15%；含泥量不应大于 1.0%，泥块含量不应大于 0.5%；

3.3.2 配制自密实混凝土的粗骨料应选用反击式破碎机生产的粒形饱满的碎石，宜采用连续级配。粗骨料最大公称粒径不宜大于 25.0mm，针片状颗粒含量不宜大于 5.0%；含泥量不应大于 0.5%，泥块含量不应大于 0.2%；

3.3.4 骨料的质量尚应符合《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》(JGJ52) 与《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》(JGJ53) 的规定。泵送自密实混凝土所用骨料尚应符合《混凝土泵送施工技术规程》(JGJ/T10) 中对粗、细骨料的要求。

根据自密实混凝土的强度要求，可以采用花岗岩、石灰岩等碎石。为了保证自密实混凝土的工作性，降低胶结料用量和砂率，宜采用反击式破碎机或锤击式破碎机破碎的粗骨料或采用二次回破的粗骨料。

应根据具体工程情况选择粗骨料的最大粒径。当配制对穿越钢筋能力要求不高的大体积自密实混凝土或钢管自密实混凝土时，粗骨料的最大粒径可以略大，但不宜超过 31.5mm；当配制对穿越钢筋能力要求比较高的自密实混凝土时，粗骨料最大粒径不应大于 2/3 倍的最小钢筋净距，也不应大于加固截面最小尺寸的 1/4，且不宜超过 25mm。

当采用泵送施工时，粗骨料的最大公称粒径与输送管径之比应符合表 3.3.4 的规定；

表 3.3.4 粗骨料的最大公称粒径与输送管径之比

粗骨料品种	泵送高度 (m)	粗骨料最大公称粒径与输送管径之比
碎石	< 50	≤1:3.0
	50 ~ 100	≤1:4.0
	> 100	≤1:5.0
卵石	< 50	≤1:2.5
	50 ~ 100	≤1:3.0
	> 100	≤1:4.0

3.4 水

3.4.1 拌制自密实混凝土宜采用饮用水；当采用其它水源时，水质应符合国家现行标准《混凝土拌合用水标准》JGJ 63 的规定。

3.5 矿物掺合料

3.5.1 配制自密实混凝土可选用粒化高炉矿渣粉、粉煤灰和硅灰等矿物掺合料。

3.5.2 配制高强自密实混凝土的粉煤灰宜选用 Ⅱ级粉煤灰，配制中等强度自密实混凝土的粉煤灰应选用 Ⅲ级以上（含 Ⅲ级）的粉煤灰。

粉煤灰质量应符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB1596）的规定。

3.5.3 配制自密实混凝土的磨细矿渣应符合下列质量要求：

比表面积宜大于 4000cm²/g；

需水量比不宜大于 105%；

烧失量不宜大于 5%；

同时尚应符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T18046）的有关规定。

3.5.4 当使用其它品种矿物掺合料时，应对其可能影响混凝土性能的指标进行试验，确认符合混凝土质量要求时方可使用。

3.6 外加剂

3.6.1 配制自密实混凝土的外加剂，混凝土中掺用的外加剂（不包括阻锈剂）的质量及应用技术应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076、《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 和有关环境保护的要求。不得使用含有氯化物或亚硝酸盐的外加剂。

3.6.2 配制自密实混凝土所采用的高效减水剂其减水率不宜低于 25%。

4 自密实混凝土配合比设计规定

4.1 一般规定

4.1.1 自密实混凝土配合比设计应满足拌合物工作性能、力学性能和耐久性的设计要求。为了提高自密实混凝土的体积稳定性,配合比设计应遵循满足自密实混凝土工作性前提下的最大密实度原则,最大程度地降低浆骨比。

4.1.2 混凝土力学性能和耐久性的试验方法应分别符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081和《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082的规定。

4.1.3 新拌自密实混凝土拌合物工作性要求,包括流动性、粘聚性、保水性、穿越钢筋能力以及坍落度经时损失。自密实混凝土拌合物工作性检验方法见附录 A。

4.1.4 自密实混凝土的体积稳定性,可参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082)和附录 B 进行混凝土收缩变形和收缩开裂性能试验,试验结果应满足相关的指标要求。

4.1.5 为了保证自密实混凝土的体积稳定性,无引气的自密实混凝土其湿容重不宜低于 2350kg/m^3 。

4.1.6 对于有预防混凝土碱骨料反应设计要求的工程,混凝土中最大碱含量不应大于 3.0kg/m^3 ,并宜掺用适量粉煤灰等矿物掺合料;对于矿物掺合料碱含量,粉煤灰碱含量可取实测值的 $1/6$,粒化高炉矿渣粉碱含量可取实测值的 $1/2$ 。

4.1.7 混凝土拌合物中水溶性氯离子最大含量应符合表 4.1.7 的要求。混凝土拌合物中水溶性氯离子含量应按照现行行业标准《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270 中混凝土拌合物中氯离子含量的快速测定方法进行测定。

表 4.1.7 混凝土拌合物中水溶性氯离子最大含量

环境条件	水溶性氯离子最大含量(%,水泥用量的质量百分比)		
	钢筋混凝土	预应力混凝土	素混凝土
干燥环境	0.3	0.06	1.0
潮湿但不含氯离子的环境	0.2		
潮湿而含有氯离子的环境、盐渍土环境	0.1		
除冰盐等侵蚀性物质的腐蚀环境	0.06		

4.1.8 自密实混凝土配合比设计与试配时所用的原材料应与生产时一致,并根据原材料、具体工程对自密实混凝土工作性和强度等技术性能的要求,进行配合比的估算、试配、调整和确定。

4.1.9 自密实混凝土生产过程中,应根据反馈的混凝土质量动态信息及时调整配合比,做好记录,并应做好开盘鉴定工作。

4.2 混凝土配制强度的确定

4.2.1 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，配制强度应按下列式计算：

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (4.2.1-1)$$

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，取设计混凝土强度等级值 (MPa)；

σ ——混凝土强度标准差 (MPa)。

2. 当设计强度等级大于或等于 C60 时，配制强度应按下列式计算：

$$f_{cu,0} \geq 1.15f_{cu,k} \quad (4.2.1-2)$$

4.2.2 混凝土强度标准差应按照下列规定确定：

1. 当具有近 1 个月 ~ 3 个月的同一品种、同一强度等级混凝土的强度资料时，其混凝土强度标准差 σ 应按下列式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - nm_{fcu}^2}{n-1}} \quad (4.2.2)$$

式中 $f_{cu,i}$ ——第 i 组的试件强度 (MPa)；

m_{fcu} —— n 组试件的强度平均值 (MPa)；

n ——试件组数， n 值应大于或者等于 30。

对于强度等级不大于 C30 的混凝土：当 σ 计算值不小于 3.0MPa 时，应按照计算结果取值；当 σ 计算值小于 3.0MPa 时， σ 应取 3.0MPa。对于强度等级大于 C30 且不大于 C60 的混凝土：当 σ 计算值不小于 4.0MPa 时，应按照计算结果取值；当 σ 计算值小于 4.0MPa 时， σ 应取 4.0MPa。

2. 当没有近期的同一品种、同一强度等级混凝土强度资料时，其强度标准差 σ 可按表 4.2.2 取值。

表 4.2.2 标准差 σ 值 (MPa)

混凝土强度标准值	≤C20	C25~C45	C50~C55
σ	4.0	5.0	6.0

4.3 自密实混凝土配合比设计的原则

4.3.1 自密实混凝土的配合比设计宜采用体积法，按具体工程提供的混凝土技术要求、施工方案中加固截面的尺寸、钢筋的净距选择原材料和配合比。

4.3.2 根据粗骨料最大粒径、粒形、级配选择自密实混凝土试配时初选的浆骨比。根据浆骨比分别得到 1m^3 混凝土拌和物浆体体积和骨料体积。

4.3.3 按自密实混凝土的强度等级确定掺合料种类、掺量和水胶比，从而计算出浆体中跟成分的用量；按工作性要求及浆体体积选择砂率，根据骨料体积和砂率计算出粗、细骨料用量。

4.3.4 调整水胶比时，保持浆体体积不变。

4.3.5 按以上步骤确定初步配合比后，通过选择合适的外加剂，用高效减水剂掺量调整拌和物的工作性，以满足自密实要求。

4.4 配合比设计设计方法

4.4.1 自密实混凝土配合比设计宜按下列步骤进行：首先根据加固截面的最小尺寸、钢筋净距选择粗骨料的最大粒径，根据粗骨料最大粒径确定混凝土的浆骨比（或单方混凝土浆体体积用量），进而确定浆体体积与骨料体积，根据自密实混凝土强度等级确定水胶比、水泥用量，掺合料种类和掺量，选择砂率并确定骨料用量。加固用的自密实混凝土胶凝材料用量宜在 $450 \text{ kg/m}^3 \sim 550 \text{ kg/m}^3$ 之间，且不应超过 600 kg/m^3 ，水泥用量不宜大于 500 kg/m^3 。矿物掺合料掺量宜在 20% ~ 40% 之间。

4.4.2 选择浆骨(体积)比和最低水泥用量

单方自密实混凝土的浆体体积可按表 4.4.2 选择。当粗骨料粒形饱满、级配较好时，可按下限取值；反之可取较高值。根据选择的浆骨比 $V_{P/A}$ 计算单方自密实混凝土中的浆体体积 $V_{P/T}$ 与骨料体积 $V_{A/T}$ 。

表 4.4.2 自密实混凝土浆骨比

粗骨料最大粒径	浆骨体积比 $V_{P/A}$	与浆骨比对应的浆体体积 $V_{P/T}$
20~25	0.429~0.515	0.30~0.34
15~20	0.471~0.538	0.32~0.36
10~15	0.515~0.613	0.34~0.38

$$V_{P/T} = \frac{V_{P/A}}{1 + V_{P/A}} \quad (4.4.2-1)$$

$$V_{A/T} = 1 - V_{P/T} - 0.01\alpha \quad (4.4.2-1)$$

式中 $V_{P/A}$ ——浆骨比；

$V_{P/T}$ ——单方混凝土中浆体体积；

$V_{A/T}$ ——单方混凝土中骨料体积；

α ——混凝土的含气量百分数，在不使用引气型外加剂时， α 可取为 1。

4.4.3 确定掺合料种类与掺量：

根据工程所处的环境条件、混凝土强度等级、工作性要求等选择胶凝材料中的掺合料的种类与掺量。当混凝土强度等级较高，或钢筋净距或加固截面较小时，应优先选择需水量比小于 1 的优质粉煤灰；在不能保证充分湿养护的情况下，可以适当降低粉煤灰掺量；日平均气温较低时，应降低粉煤灰掺量。粉煤灰掺量不宜低于 20%，最大掺量不宜高于 50%。

矿渣不宜单掺，可与粉煤灰复掺使用。复掺时矿渣的掺量不宜高于矿物掺合料总量的 50%。

配制 C60 以上的自密实混凝土可以掺加适量硅灰，硅灰掺量不宜超过 10%。

4.4.4 确定外加剂掺量 p_{SP}

自密实混凝土的外加剂可以采用一种或多种外加剂复合而成。高效减水剂、引气剂、膨胀剂等的性能应符合《混凝土外加剂》(GB/T8076)、《混凝土泵送剂》(JC473)及《混凝土膨胀剂》(JC476)的有关规定。自密实混凝土外加剂的品种和掺量,应根据具体工程对混凝土工作性的要求由试验确定。

4.4.5 确定水胶比

自密实混凝土的水胶比可以根据混凝土的强度等级和粉煤灰掺量进行选择。如表 4.4.5 所示。

表 4.4.5 自密实混凝土水胶比选择

强度等级 \ 粉煤灰掺量	15%	25%	35%	45%
C30 ~ C40 (含 C40)	-	-	0.34~0.36	0.32~0.34
C40 ~ C50 (含 C50)	-	0.34~0.36	0.32~0.34	0.30~0.32
C50 ~ C60 (含 C60)	0.28~0.30	0.30~0.32	0.30~0.32	0.28~0.30
C60 以上 (不含 C60)	0.28~0.30	0.26~0.28	<0.26	-

4.4.6 计算浆体材料中各成分的用量

根据浆体体积、掺合料掺量、水胶比,计算水泥、掺合料、水的用量。

1. 胶凝材料总量 m_{bo}

每立方米混凝土的水泥用量 (m_{co}) 应按下式计算:

$$\frac{p_c \cdot m_{bo}}{\rho_c} + \frac{p_{FA} \cdot m_{bo}}{\rho_{FA}} + \frac{p_{SG} \cdot m_{bo}}{\rho_{SG}} + \frac{p_{SF} \cdot m_{bo}}{\rho_{SF}} + \frac{(W/B) \cdot m_{bo}}{\rho_w} = V_{P/A} \quad (4.4.6-1)$$

式中 m_{bo} ——胶凝材料总质量, (kg/m^3);

p_c ——水泥占胶凝材料的质量比;

p_{FA} ——粉煤灰占总胶凝材料的质量比;

p_{SG} ——矿渣占总胶凝材料的质量比;

p_{SF} ——硅灰占总胶凝材料的质量比;

W/B ——水胶比;

ρ_c ——水泥密度 (kg/m^3), 应按《水泥密度测定方法》GB/T 208 测定, 也可取 $2900 \text{ kg}/\text{m}^3 \sim 3100 \text{ kg}/\text{m}^3$;

ρ_{FA} ——分别为粉煤灰的密度 (kg/m^3), 可按《水泥密度测定方法》GB/T 208 测定;

ρ_{SG} ——分别为矿渣的密度 (kg/m^3), 可按《水泥密度测定方法》GB/T 208 测定;

ρ_{SF} ——分别为硅灰的密度 (kg/m^3), 可按《水泥密度测定方法》GB/T 208 测定;

ρ_w ——水的密度 (kg/m³), 可取 1000 kg/m³。

2 各种胶凝材料的用量

$$m_{c0} = p_c \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-2)$$

$$m_{FA0} = p_{FA} \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-3)$$

$$m_{SG0} = p_{SG} \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-4)$$

$$m_{SF0} = p_{SF} \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-5)$$

3 用水量

$$m_{w0} = (W/B) \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-6)$$

4 外加剂用量

$$m_{SP0} = p_{SP} \cdot m_{bo} \quad (4.4.6-7)$$

式中：

m_{c0} ——水泥用量, (kg/m³);

m_{FA0} ——粉煤灰用量, (kg/m³);

m_{SG0} ——矿渣用量, (kg/m³);

m_{SF0} ——硅灰用量, (kg/m³);

m_{SP0} ——外加剂用量, (kg/m³)

4.4.7 选择砂率 β_s

自密实混凝土的砂率宜在 45%~50%之间, 当所选择的浆骨比较小、单方混凝土用水量较高时, 宜选取较大的砂率, 反之则宜选取较小的砂率。

4.4.8 计算骨料总质量

$$\frac{(1-\beta_s) \cdot m_{a0}}{\rho_g} + \frac{\beta_s \cdot m_{a0}}{\rho_s} = V_{A/T} \quad (4.4.8)$$

式中 m_{a0} ——每立方米混凝土的骨料总质量;

ρ_g ——粗骨料的表观密度 (kg/m³), 应按现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52 测定;

ρ_s ——细骨料的表观密度 (kg/m³), 应按现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52 测定;

4.4.9 计算粗、细骨料用量

粗骨料用量:

$$m_{g0} = (1-\beta_s) \cdot m_{a0} \quad (4.4.9-1)$$

细骨料用量:

$$m_{g0} = \beta_s \cdot m_{a0} \quad (4.4.9-2)$$

式中 m_{g0} ——每立方米混凝土的粗骨料用量 (kg);

m_{s0} ——每立方米混凝土的细骨料用量 (kg);

β_s ——砂率 (%);

4.5 配合比的试配、调整与确定

4.5.1 混凝土试配应采用强制式搅拌机, 搅拌机应符合《混凝土试验用搅拌机》JG 244 的规定, 并宜与施工采用的搅拌方法相同。

4.5.2 试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/T50080 的规定。

4.5.3 每盘混凝土试配的最小搅拌量应符合表 6.1.3 的规定, 并不应小于搅拌机额定搅拌量的 1/4。

表 4.5.3 混凝土试配的最小搅拌量

粗骨料最大公称粒径 (mm)	最小搅拌的拌合物量 (L)
31.5	20
40.0	25

4.5.4 应在计算配合比的基础上进行试拌。宜在水胶比不变的原则下调整浆骨比、胶凝材料用量比例、外加剂用量和砂率等, 直到混凝土拌合物性能符合设计和施工要求, 然后提出试拌配合比。

4.5.5 配合比的调整可参考以下方法进行:

1. 当拌和物表面粗糙, 流动性不好时, 可进一步检查粗骨料粒形, 砂的细度模数、含泥量。调整骨料级配。仍不奏效时可适当增加拌和物中的浆体成分, 如增加矿物掺合料的用量, 或者提高砂率。

2. 当拌和物出现泌水、离析现象时, 可采取以下措施:

优化骨料的级配、选用针片状含量少、粒形较好的粗骨料;

适当提高砂率, 或降低砂的细度模数;

调整高效减水剂的品种或掺量;

改变矿物掺合料的品种或掺量, 适当增大优质粉煤灰的比例、降低用水量;

采用与混凝土拌和物体系相容性好、对混凝土硬化后性能无不利影响的增稠剂。

3. 当拌和物有较明显的板结、粘滞现象时, 可采取以下措施:

优化粗骨料的级配, 选用粒形饱满的粗骨料;

适当提高砂的细度模数;

适当加大用水量, 提高水胶比;

适当增大拌和物中胶凝材料的用量;

掺加适量的引气剂。

4. 当拌和物粘稠、流动性好、表面骨料较少时, 可采取以下措施:

保持浆体材料和骨料内部的比例不变，进一步降低浆骨比，提高骨料用量。

4.5.6 应在试拌配合比的基础上，进行混凝土强度试验，并应符合下列规定：

1. 应至少采用三个不同的配合比。当采用三个不同的配合比时，其中一个应为本规程第 4.5.5 条确定的试拌配合比，另外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，用水量应与试拌配合比相同，砂率可分别增加和减少 1%。

2. 进行混凝土强度试验时，应继续保持拌合物性能符合设计和施工要求，并检验其坍落度、L 形仪流动度或 J 环流动度，粘聚性、保水性及表观密度等，作为相应配合比的混凝土拌合物性能指标。

3. 进行混凝土强度试验时，每种配合比至少应制作一组试件，标准养护到 28d 或设计强度要求的龄期时试压；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/T15 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。

4.5.7 配合比应按以下规定进行校正：

1. 应根据本规程第 4.5.6 条调整后的配合比按下式计算混凝土拌合物的表观密度计算值 $\rho_{c,c}$ ：

$$\rho_{c,c} = m_c + m_f + m_g + m_s + m_w \quad (4.5.7-1)$$

2. 应按下式计算混凝土配合比校正系数 δ ：

$$\delta = \frac{\rho_{c,t}}{\rho_{c,c}} \quad (4.5.7-2)$$

式中 $\rho_{c,t}$ ——混凝土拌合物表观密度实测值 (kg/m^3)；

$\rho_{c,c}$ ——混凝土拌合物表观密度计算值 (kg/m^3)。

3. 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，按本规程第 6.2.1 条调整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 。

4.5.8 配合比调整后，应测定拌合物水溶性氯离子含量，并应对设计要求的混凝土耐久性能进行试验，符合设计规定的氯离子含量和耐久性能要求的配合比方可确定为设计配合比。

4.5.9 生产单位可根据常用材料设计出常用的混凝土配合比备用，并应在使用过程中予以验证或调整。遇有下列情况之一时，应重新进行配合比设计：

1. 对混凝土性能有特殊要求时；
2. 水泥外加剂或矿物掺合料品种质量有显著变化时；
3. 该配合比的混凝土生产间断半年以上时。

5 自密实混凝土的生产与施工

5.1 一般规定

5.1.1 自密实混凝土的生产与施工包括自密实混凝土的拌制、运输、浇筑、养护等。

5.1.2 自密实混凝土宜采用预拌混凝土生产方式，预拌混凝土生产企业必须具有相应的资质等级证书。

5.1.3 当用量较少时，在符合有关规定的情况下可以采用现场搅拌的自密实混凝土。

5.1.4 自密实混凝土生产和施工中的质量管理至关重要，其技术人员应熟悉自密实混凝土的相关技术要求。

5.1.5 自密实混凝土生产应做好开盘鉴定工作。在生产过程中，应根据反馈的混凝土质量动态信息及时调整配合比，并做好有关天气记录、生产记录、检验记录。

5.2 自密实混凝土的生产

5.2.1 生产设备

当采用预拌混凝土生产方式时，其搅拌机应符合《混凝土搅拌机技术条件》(GB9142)的规定；当工地现场拌制时，搅拌机应优先采用强制式搅拌机，严禁人工搅拌。

5.2.2 计量

1. 原材料应按质量计量，水和外加剂溶液可按体积计量。各种原材料要求计量准确，原材料的计量允许偏差为：水泥 $\pm 1\%$ ，掺合料 $\pm 1\%$ ，粗、细骨料 $\pm 2\%$ ，水 $\pm 0.5\%$ ，外加剂 $\pm 0.5\%$ 。

2. 必须准确控制自密实混凝土的用水量。砂、石中的含水量应及时测定，并按测定值调整配合比中的用水量和砂、石用量。对每工作班生产的第一盘自密实混凝土，在控制过程中要给予特别注意。在自密实混凝土生产中，不需要调整配合比的砂、石含水率波动范围宜小于 0.5% 。

3. 当现场拌制自密实混凝土时，必须对搅拌机加水装置进行校核。若不满足要求，应采用精度足够的称重设备对第一盘混凝土的用水量进行标定，在以后生产中根据标定的体积加水。

5.2.3 投料顺序

根据实际情况选择合适的投料顺序。建议采用以下投料顺序：在砂、石中喷淋占总用水量 40% 的水，搅拌 30 秒；加水泥、掺合料和剩余的水，搅拌 30 秒；加外加剂，搅拌大于 60 秒。

5.2.4 搅拌

1. 搅拌第一盘自密实混凝土时，按照预先设定的加料顺序投料，根据在搅拌机观察口目测的混凝土工作性情况，及时调整配合比。但严禁在拌合物出机后加水。

2. 搅拌的最短时间应符合设备说明书的规定，同时应满足混凝土拌合料搅拌均匀的最短时间。自密实混凝土的搅拌时间宜为 $2\sim 3$ 分钟，采用自落式搅拌机应适当延长搅拌时间。

3. 自密实混凝土开盘鉴定的指标，除应满足福建省工程建设地方标准《预拌混凝土生产施工技术规范》(DBJ13 - 43) 有关要求外，尚应满足自密实混凝土的工作性要求，包括坍落度、坍落扩展度、L 型仪流平度等，同时宜对自密实混凝土的表观密度进行测试，要求自密实混凝土的表观密度在正常范围内。

5.3 自密实混凝土的运输

5.3.1 长距离运输自密实混凝土拌合物应使用混凝土搅拌车，短距离运输可利用现场的一般运送设备。装料前装料口应保持清洁，筒体内保证干净潮湿不得有积水、积浆。

5.3.2 自密实混凝土的运输应事先根据浇筑量、生产能力、途中时间和浇筑能力制定合理的运输计划，使运输过程尽可能顺畅，缩短停留时间，以保证施工现场泵送、浇筑的连续进行，确保自密实混凝土的分送和浇筑在混凝土工作性保持期内完成。

5.3.3 在装料及运输过程中，应保持运输车滚筒按 3 ~ 6r/min 低速转动，保持混凝土拌合物的均匀性，不产生分层、离析现象。

5.3.4 如果运输时间较长，外加剂可采用后掺法。在到达浇筑地点后，根据配合比设计方案再加入外加剂后快速搅拌至混凝土达到预定的工作性。

5.3.5 严禁在运输和等待卸料过程中加水。

5.4 自密实混凝土的浇筑

5.4.1 应根据自密实混凝土的特点制定混凝土工程施工方案，做好单位工程施工组织设计，并要求有关人员掌握操作要领。

5.4.2 在浇筑自密实混凝土前，应确认模板和钢筋按照设计要求进行布置，模板情况良好。当混凝土模板的高度超过 2.5m 时，应考虑混凝土对侧模的流体静压力作用，并以此设计模板的承载力。

5.4.3 在自密实混凝土入模前，应有专人负责确认其工作性符合工程要求，并确认混凝土没有离析现象。

5.4.4 为使自密实混凝土在浇筑过程中不出现离析现象，应控制混凝土的浇筑距离。在没有密集钢筋、预埋件等情况下，自密实混凝土浇筑点间的水平距离不宜大于 10m；垂直自由下落的距离不宜大于 5m，宜采用导管法浇筑。

5.4.5 对于密集配筋的混凝土构件，垂直自由下落的最大距离为 2 ~ 3m，宜采用导管法浇筑。浇筑过程中可在模板外部适当敲击。

5.4.6 对于自密实钢管混凝土，可以采用顶升法和自由下落法进行施工，当混凝土自由下落的高度超过 5 米时，宜采用顶升法。

5.4.7 对于钢筋混凝土加固工程，可以用泵送或人工浇筑的方法施工。当地狭小或浇注口很小时，可以用小桶向浇注口倾倒自密实混凝土，但应保证施工组织连贯、紧凑，浇注口间距不宜大于 2m。

5.5 自密实混凝土的养护

5.5.1 自密实混凝土浇筑完毕后，应按施工技术方案及时采取有效的养护措施，并应符合下列规定：

在浇筑完毕后应及时对混凝土加以覆盖并在混凝土表面收水后立即进行浇水养护。

5.5.2 自密实混凝土宜在 14d 内持续保水或保湿养护，保湿养护时间不得少于 7d；混凝土养护用水的水质应与拌制用水相同；采用塑料布覆盖养护的混凝土，其敞露的全部表面应覆盖严密，并应保持塑料布内表面有凝结水。

5.5.3 自密实混凝土强度达到 1.2 MPa 前及浇筑完毕后一定时间内(日平均气温低于 15℃ 时，为 96 小时以内；日平均气温高于 15℃ 时，为 48 小时以内)，不得在其上踩踏、堆载或安装模板及支架。

5.5.4 模板拆除应满足现行国家施工标准、规范的规定及设计要求，支撑拆除尚应考虑已浇楼（屋）面板自密实混凝土强度的可能承载力和实际挠度变形要求。

5.5.5 对大体积混凝土应设专项施工方案，进行温差控制和养护措施。

6 自密实混凝土质量检验评定

6.1 一般规定

6.1.1 为了保证自密实混凝土工程的质量，除了应控制好自密实混凝土的工作性外，必须使自密实混凝土的强度和耐久性符合工程质量的要求。

6.1.2 新拌自密实混凝土的工作性必须同时具备良好的流动性、粘聚性、保水性与穿越钢筋能力。根据不同工程的需求，对自密实混凝土的流动性、穿越钢筋能力可以有不同的要求。

6.2 新拌自密实混凝土的质量控制

6.2.1 新拌自密实混凝土工作性的检验方法

1. 对自密实混凝土拌合物工作性的检测包括：流动性、保水性、粘聚性、穿越钢筋的能力。

2. 自密实混凝土拌合物流动性由坍落度和坍落扩展度检测，试验方法应符合附录 A.1 的规定。

3. 自密实混凝土拌合物穿越钢筋能力由 L 型仪或 J 环检测，试验方法应分别符合附录 A.2 或附录 A.3 的规定。

4. 自密实混凝土拌合物保水性、粘聚性由稳定筛方法检测试验检测，试验方法应分别符合附录 A.4 的规定。

5. 坍落度经时损失用于检测自密实混凝土工作性的经时稳定性。试验方法应符合附录 A.5 的规定。

6.2.2 自密实混凝土工作性检测方法选择可参照表 6.2.2。

6.2.3 自密实混凝土拌合物工作性检测指标见表 6.2.3。

表 6.2.2 自密实混凝土工作性检测方法选择

	坍落度、 坍落扩展度	L 形仪	J 环	稳定筛	目测粘聚性、保 水性、匀质性	坍落度 经时损 失
加固平板	√	-	√	-	√	√
加固梁	√	√		-	√	√
加固柱	√	√		√	√	√
加固墙体	√		√	√	√	√
加固钢筋密集的小构 件	√	√	-	-	√	√
加固截面最小尺寸大 于 300mm	√	-	√	-	√	√

表 6.2.3 自密实混凝土拌合物工作性检测方法与指标要求

序号	检测指标	指标要求		
1	坍落度	$\geq 250\text{mm}$		
2	坍落扩展度 (SF)	级	$650\text{mm} \leq SF \leq 750\text{mm}$	
		级	$550\text{mm} \leq SF < 650\text{mm}$	
3	L 型仪 (H_2/H_1)	级	钢筋净距 40mm	$H_2/H_1 \geq 0.8$
		级	钢筋净距 60mm	
4	J 环	级	$0 \leq (d-j) \leq 25\text{mm}$	
		级	$25 < (d-j) \leq 50\text{mm}$	
5	稳定筛	级、级	一般构件	$5\% \leq r \leq 15\%$
			浇高度大于 2m 的竖向构件	$0\% \leq r \leq 5\%$
6	坍落度经时损失	$\leq 15\text{mm}$		
7	坍落扩展度经时损失	级	$\leq 100\text{mm}$	
		级	$\leq 50\text{mm}$	

注：1.对于密集配筋构件或厚度小于 100mm 的混凝土加固工程，采用自密实混凝土施工时，拌合物工作性指标应按表中的 级指标要求；

2.其余构件可按表中的 级指标要求。

6.3 自密实混凝土强度的质量控制

6.3.1 自密实混凝土的强度试块宜采用 150×150×150 mm 的立方体试块，立方体的钢模尺寸必须准确、平整，为了避免钢模底部截留空气，可以用灰刀沿钢模边缘进行插捣。

自密实混凝土的强度按照普通混凝土的要求进行控制。

6.4 自密实混凝土耐久性的质量控制

6.4.1 自密实混凝土的长期性能和耐久性应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T50082) 进行检测，其性能应满足设计要求。

6.4.2 当结构物对自密实混凝土的收缩、徐变性能有较高要求时，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标准》(GB/T50082) 进行自密实混凝土收缩、徐变性能检测，其性能应满足设计要求。其中自密实混凝土自生收缩应按非接触式法进行检测，并保证试件具有有效可靠的密封性能；自密实混凝土干燥收缩宜采用接触式法进行检测。

6.4.3 当结构物对非荷载作用下混凝土的抗裂性能有较高要求时，宜采用圆环法或平板诱导开裂法对自密实混凝土的抗裂性能进行测试，以保证自密实混凝土的抗裂性能符合工程要求。圆环法与平板诱导开裂法应分别符合附录 B1 和 B2 的规定。

7 自密实混凝土加固结构工程的施工

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于钢筋混凝土构件增大截面加固工程的施工过程控制。

7.1.2 混凝土构件增大截面工程的施工，应按下列程序进行：

- 1 清理、修整原结构、构件；
- 2 安装新增钢筋（包括种植箍筋）并与原钢筋、箍筋连接；
- 3 界面处理；
- 4 安装模板；
- 5 浇筑混凝土；
- 6 养护及拆模；
- 7 施工质量检验。

7.1.3 浇筑混凝土前，应对下列项目按隐蔽工程要求进行验收：

- 1 界面处理及涂刷结构界面胶（剂）的质量；
- 2 新增钢筋（包括植筋）的品种、规格、数量和位置；
- 3 新增钢筋或植筋与原构件钢筋的连接构造及焊接质量；
- 4 植筋质量；
- 5 预埋件的规格、位置。

7.1.4 混凝土构件增大截面的施工，可根据实际情况和条件选用人工或泵送进行自密实混凝土浇筑。模板架设、钢筋加工、焊接和安装等均应按国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204技术规程执行。

7.2 界面处理

7.2.1 增大截面法进行原构件加固，需对原构件混凝土界面（粘合面）进行处理，并达到一定的粗糙度，以确保新老混凝土的粘结性能。原构件混凝土界面可采用凿毛、刻槽、植筋及两种以上处理方法组合等物理处理方法，或物理处理方法结合界面剂方法进行处理。

7.2.2 进行凿毛处理时，可用花锤打毛或砂轮机或高压水射流打毛。

花锤打毛：宜用 1.5~2.5kg 的尖头凿石花锤，在混凝土粘合面上凿出麻点，形成点深约 3mm、点数为 600~800 点/m² 的均匀分布；也可凿成点深 4~5mm、间距约 30mm 的梅花形分布。

砂轮机或高压水射流打毛：宜采用输出功率 340W 的粗砂轮机，在混凝土粘合面上打出方向垂直于构件轴线、纹深为 3~4mm、间距约 50mm 的横向纹路。

7.2.3 进行刻槽法处理时，在坚实混凝土粘合面上凿出方向垂直于构件表面、槽深为老混凝土最大骨料粒径的 1/4~1/2、槽宽为老混凝土最大骨料粒径的 1~1.5 倍，刻槽密度按式(7.2.3)进行计算，刻槽密度不宜大于 4。

$$\rho_h = \frac{nebh_s}{ab} \quad (7.2.3)$$

式中 n ——刻槽个数；

e ——每个槽的平均宽度 mm；

a ——粘结面长度，沿此方向间隔刻槽 mm；

b ——粘结面宽度，顺此方向间隔刻槽 mm；

h_s ——刻槽平均深度 mm。

7.2.4 采用植筋处理时，应符合《混凝土结构加固设计规范》GB50367、《混凝土结构加固改造构造图》及《混凝土结构加固构造》GJBT-1074 等相关规范规定的要求。

7.2.5 在凿毛或刻槽处理完毕之后，应用钢丝刷等工具清除原构件混凝土表面松动的骨料、砂砾、浮渣和粉尘，并用清洁的压力水冲洗干净。若采用喷射混凝土加固，宜用压缩空气和水交替冲洗干净。

7.2.6 原构件钢筋的外露部分在除锈时，若发现锈蚀已导致其截面削弱严重，尚应通知设计单位，并按设计补充图纸进行补筋。

7.3 钢筋混凝土板加固施工方法

7.3.1 钢筋混凝土板的加固施工过程为：原板面钢筋检测、钻（凿）浇注孔和排气孔、板底界面处理、新增钢筋施工、板底支设模板、漏斗法浇注自密实混凝土、养护等。

7.3.2 若采用钻浇注孔的方法，需事先对已有钢筋混凝土板进行钢筋检测定位，钻孔时应避开钢筋和水电管线。钻孔直径以不小于 100mm 为宜。若已有板钢筋较为密集，应采用凿孔的方法，凿除浇注孔以及排气孔处混凝土，但不应伤及已有板钢筋。凿孔直径以 100~200mm 为宜。排气孔直径不宜大于 50mm。

7.3.3 浇注孔的布置应根据加固板的形状、尺寸，以及板的加固厚度确定。孔距可取 1.5m~2m。排气孔兼有观察自密实混凝土浇筑情况的作用，应布置在不易浇筑到的部位。

7.3.4 自密实混凝土浇筑可以采用漏斗法。漏斗宜采用 V 形，内表面光滑有利于混凝土浇筑，漏斗高度不宜小于 500mm。可设置金属支架以固定漏斗。

7.3.5 自密实混凝土浇筑过程中，应通过排气孔检查浇筑高度。

7.3.6 浇筑完毕后，可将漏斗加满，保持 1h 以上，当有混凝土从排气孔冒出时，应及时予以填塞。

7.4 钢筋混凝土梁加固施工方法

7.4.1 钢筋混凝土梁加固施工过程包括：凿浇注口、原构件界面处理、新增钢筋施工、支设模板、浇注自密实混凝土、养护等。

7.4.2 当同时对梁侧面和底面进行加固时，宜从顶部楼板上沿梁两侧凿出浇注口，从浇注口向下浇筑自密实混凝土。当仅对梁底进行加固时，可将梁底一侧模板封闭，在另外一侧设浇筑口，进行自密实混凝土的浇筑。

7.4.3 浇注口的宽度宜与加固截面同宽，长度可取 200mm。浇注口的分布根据加固梁的长度和增大截面尺寸确定，一般浇注口的间距不大于 2m。

7.5 钢筋混凝土柱加固施工方法

7.5.1 自密实混凝土加固混凝土柱施工过程包括：凿浇注口、原构件界面处理、新增钢筋施工、支设模板、浇注自密实混凝土、养护等。

7.5.2 宜从上层楼板沿柱周边凿出浇注口，从浇注口向下浇筑自密实混凝土进行施工。

7.5.3 浇注口的宽度与加厚部分等宽，长度可取 200mm 左右。圆形截面柱至少应设 3 个浇注口，矩形柱各边设至少一个浇注口。

7.5.4 当柱高度超过 4m 时，宜分两段进行自密实混凝土的浇筑。

7.5.5 应确保模板设计合理、支撑牢靠，浇筑过程中加强柱底模板的检查，避免漏浆或爆模。

7.6 墙体加固施工方法

7.6.1 墙体加固施工过程包括：在顶部板上凿浇注口、原墙面界面处理、新增钢筋施工、支设墙模板、浇筑自密实混凝土、养护等。

7.6.2 宜从上层楼板沿柱周边凿出浇注口，从浇注口向下浇筑自密实混凝土进行施工。

7.6.3 浇注口的宽度与加厚部分等宽，长度可取 200mm 左右。浇注口的间距可取 2m。

7.6.4 应确保模板设计合理、支撑牢靠，浇筑过程中加强墙底模板的检查，避免漏浆或爆模。

7.6.5 浇筑过程中，注意检查混凝土浇筑到位情况。

7.7 拱桥加固施工方法

7.7.1 自密实混凝土加固拱桥施工过程包括：原拱桥底面界面处理、新增钢筋施工、支设套拱模板、浇注自密实混凝土、养护等。

7.7.2 支模板时在桥套拱的两侧加长 200~300mm，并将边模增高，作为浇筑自密实混凝土的浇筑口。当桥拱较长、混凝土浇筑体积较大时，可将泵管伸入到模板内部进行浇筑。

7.7.3 随着混凝土浇筑面上升，及时封闭浇筑面以下部分的侧模。

7.7.4 应确保模板设计合理、支撑牢靠，浇筑过程中加强墙底模板的检查，避免漏浆或爆模。

7.7.5 浇筑过程中，注意检查混凝土浇筑到位情况。

8 自密实混凝土加固钢筋混凝土结构设计方法

8.1 设计规定

- 8.1.1 本方法适用于钢筋混凝土受弯和受压及框架节点的加固。
- 8.1.2 采用本方法时，按现场检测结果确定的原构件混凝土强度等级不应低于 C10。
- 8.1.3 当被加固构件界面处理及其粘结质量符合本规范要求时，可按整体截面计算。
- 8.1.4 采用增大截面加固混凝土结构构件时，其正截面承载力应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的基本假定进行计算。

8.2 受弯构件正截面加固计算

- 8.2.1 采用增大截面加固受弯构件时，应根据原结构构造和受力的实际情况，选用在受压区或受拉区增设现浇钢筋混凝土外加层的加固方式。
- 8.2.2 当仅在受压区加固受弯构件时，其承载力、抗裂度、钢筋应力、裂缝宽度及挠度的计算和验算，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 关于叠合式受弯构件的规定进行。若验算结果表明，仅需增设混凝土叠合层即可满足承载力要求时，也应按构造要求配置受压钢筋和分布钢筋。
- 8.2.3 当在受拉区加固矩形截面受弯构件时(图 8.2.3)，考虑二次受力条件下加固其正截面受弯承载力应按下列公式确定：

$$M = \alpha_s f_y (h_0 - \frac{x}{2}) + f_{y0} A_{s0} (h_{01} - \frac{x}{2}) + f'_{y0} A'_{y0} (\frac{x}{2} - a') \quad (8.2.3-1)$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = f_{y0} A_{s0} + \alpha_s f_y A_s - f'_{y0} A'_{s0} \quad (8.2.3-2)$$

$$2a' \leq x \leq \xi_b h_0 \quad (8.2.3-3)$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{500 f_y} \sqrt{1 - \beta} \quad (8.2.3-4)$$

$$\beta = S / R \quad (8.2.3-5)$$

式中 M —— 构件加固后弯矩设计值；

α_s —— 新增纵筋利用系数，考虑梁在实际加固工程中为二次受力，根据 (8.3.3-4) 式确定，且当 $\alpha_s > 0.9$ 时，取 $\alpha_s = 0.9$ ；

E_s —— 为新增纵筋弹性模量；

β —— 为受弯构件初始受力水平；

S —— 加固前结构上的作用效应；

R —— 加固前结构的抗力；

f_y —— 新增纵筋的抗拉强度设计值；

- A_s ——新增受拉钢筋的截面面积；
 h_0 、 h_{01} ——构件加固后和加固前的截面有效高度；
 x ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度，简称混凝土受压区高度；
 f_{y0} 、 f'_{y0} ——原钢筋的抗拉、抗压强度设计值；
 A_{s0} 、 A'_{s0} ——原受拉钢筋和受压钢筋的截面面积；
 a' ——纵向受压钢筋合力点至混凝土受压区边缘的距离；
 α_1 ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值；当混凝土强度等级不超过 C50 时，取 $\alpha_1=1.0$ ；当混凝土强度等级为 C80 时，取 $\alpha_1=0.94$ ；其间按线性内插法确定；
 f_{c0} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值；
 b ——矩形截面宽度；
 ζ_b ——构件增大截面加固后的相对界限受压区高度，按本规程 8.2.4 条的规定计算。

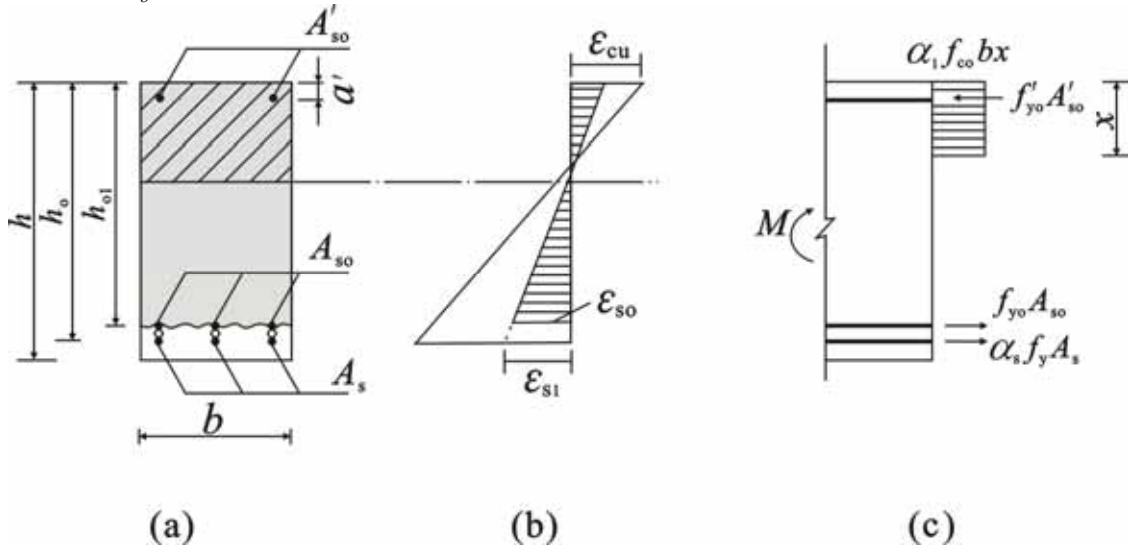


图 8.2.3 受弯构件加固计算

8.2.4 受弯构件增大截面加固后的相对界限受压区高度 ζ_b ，应按下列公式确定：

$$\zeta_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{\alpha_s f_y}{\varepsilon_{cu} E_s} + \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{cu}}} \quad (8.2.4-1)$$

$$\varepsilon_{s1} = \left(1.6 \frac{h_0}{h_{01}} - 0.6\right) \varepsilon_{s0} \quad (8.2.4-2)$$

$$\varepsilon_{s0} = \frac{M_{0k}}{0.87 h_{01} A_{s0} E_{s0}} \quad (8.2.4-3)$$

式中 β_1 ——计算系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时， β_1 值取为 0.8；当混凝土强度等级为 C80 时， β_1 值取为 0.74，其间按线性内插法确定；

ε_{cu} ——混凝土极限压应变，取为 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$

ε_{s1} ——新增纵筋位置处，按平截面假设确定的初始应变值；当新增主筋与原主筋的连

接采用短钢筋焊接时，可近似取 $h_{01} = h_0$ ， $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s0}$ ；

M_{0k} ——加固前受弯构件验算截面上原作用的弯矩标准值；

ε_{s0} ——加固前，在初始弯矩 M_{0k} 作用下原受拉钢筋的应变值。

8.2.5 当按公式 (8.2.3-1) 及 (8.2.3-2) 算得的加固后混凝土受压区高度 x 与加固前截面有效高度 h_{01} 之比 x/h_{01} 大于原截面相对界限受压区高度 ε_{b0} 时，应考虑原纵向受拉钢筋应力 σ_{s0} 尚达不到 f_{y0} 的情况。此时，应将上述两公式中的 f_{y0} 改为 σ_{s0} ，并重新进行验算。验算时， σ_{s0} 值可按式确定：

$$\sigma_{s0} = \left(\frac{0.8h_{01}}{x} - 1 \right) \varepsilon_{cu} E_s f_{y0} \quad (8.2.5)$$

若算得的 $\sigma_{s0} < f_{y0}$ ，则应按此验算结果确定加固钢筋用量；若算得的结果 $\sigma_{s0} \geq f_{y0}$ ，则表示原计算结果无需变动。

8.2.6 对翼缘位于受压区的 T 形截面受弯构件，其受拉区增设现浇配筋混凝土层的正截面受弯承载力，应按本规程第 8.2.3 条至第 8.2.5 条的计算原则和现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 关于 T 形截面受弯承载力的规定进行计算。

8.3 加固受弯构件斜截面承载力计算

8.3.1 受弯构件加固后的斜截面应符合下列条件：

当 $h_w/b \leq 4$ 时

$$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (8.3.1-1)$$

当 $h_w/b \geq 6$ 时

$$V \leq 0.20\beta_c f_c b h_0 \quad (8.3.1-2)$$

当 $4 < h_w/b < 6$ 时，按线性内插法确定。

式中 V ——构件加固后剪力设计值；

β_c ——混凝土强度影响系数；按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定值采用；

b ——矩形面的宽度或 T 形、I 形截面的腹板宽度；

h_w ——截面的腹板高度；对矩形截面，取有效高度；对 T 形截面，取有效高度减去翼缘高度；对 I 形截面，取腹板净高度。

8.3.2 采用增大截面法加固受弯构件时，考虑二次受力条件下加固其截面受剪承载力应符合

下列规定：

1. 当受拉区增设钢筋混凝土层，并采用 U 形箍与原箍筋逐个焊接时：

$$V \leq \alpha_{cv} [f_{t0} b h_{01} + \alpha_c f_t b (h_0 - h_{01})] + f_{yv0} \frac{A_{sv0}}{s_0} h_0 \quad (8.3.2-1)$$

2 当增设钢筋混凝土三面围套，并采用加锚式或胶锚式箍筋时：

$$V \leq \alpha_{cv} (f_{t0} b h_{01} + \alpha_c f_t A_c) + \alpha_{vs} f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + f_{y0} \frac{A_{sv0}}{s_0} h_{01} \quad (8.3.2-2)$$

$$\alpha_c = 2\sqrt{1 - \beta} + \beta - 1 \quad (8.3.2-3)$$

$$\alpha_{vs} = \frac{E_s}{500 f_y} \sqrt{1 - \beta} \quad (8.3.4-4)$$

式中 α_{cv} ——斜截面混凝土受剪承载力系数，对一般受弯构件取 0.7；对集中荷载作用下（包括作用有多种荷载，其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力的 75% 以上的情况）的独立梁，取 α_{cv} 为 $1.75/(\lambda+1)$ ， λ 为计算截面的剪跨比，可取 λ 等于 a/h_0 ，当 λ 小于 1.5 时，取 1.5；当 λ 大于 3 时，取 3； a 为集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离；

α_c ——新增混凝土强度利用系数，考虑梁在实际加固工程中为二次受力，根据式 (8.3.2-3) 确定，且当 $\alpha_c > 0.7$ 时，取 $\alpha_c = 0.7$ ；

β ——为受弯构件初始受力水平，计算同 (8.2.3-5) 式；

f_t 、 f_{t0} ——新、旧混凝土轴心抗拉强度设计值；

A_c ——三面围套新增混凝土截面面积；

α_{vs} ——新增箍筋强度利用系数，考虑柱在实际加固工程中为二次受力，根据式 (8.3.3-4) 确定，且当 $\alpha_{vs} > 0.9$ 时，取 $\alpha_{vs} = 0.9$ ；

f_{sv} 和 f_{sv0} ——新箍筋和原箍筋的抗拉强度设计值；

A_{sv} 及 A_{sv0} ——同一截面内新箍筋各肢截面面积之和及原箍筋各肢截面面积之和；

s 或 s_0 ——新增箍筋或原箍筋沿构件长度方向的间距。

8.4 加固受压构件正截面承载力计算

8.4.1 采用增大截面加固钢筋混凝土轴心受压构件（图 8.4.1）时，考虑二次受力条件下加固其正截面受压承载力应按下列式确定：

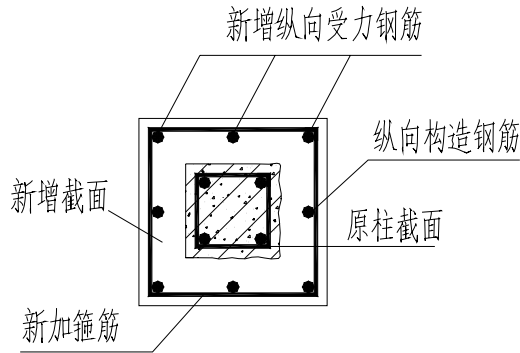


图 8.5.1 轴心受压构件增大截面加固

$$N=0.9\varphi(\gamma_{c0}f_{c0}A_{c0}+f'_{y0}A_{s0}+\alpha_c f_c A_c +\alpha_s f'_y A'_s) \quad (8.4.1-1)$$

式中 N —— 构件加固后的轴向压力设计值；

φ —— 构件稳定系数，根据加固后的截面尺寸，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定值采用；

γ_{c0} —— 考虑外包混凝土约束作用后内核混凝土的强度提高系数，取 1.1~1.3。

A_{c0} 和 A_c —— 构件加固前混凝土截面面积和加固后新增部分混凝土截面面积；

f'_y 、 f'_{y0} —— 新增纵向钢筋和原纵向钢筋的抗压强度设计值；

A'_s —— 新增纵向受压钢筋的截面面积；

α_c —— 新增混凝土强度利用系数，考虑柱在实际加固工程中为二次受力，根据式 (8.4.2-3) 确定，且当 $\alpha_c > 0.7$ 时，取 $\alpha_c = 0.7$ ；

α_s —— 新增纵筋强度利用系数，考虑柱在实际加固工程中为二次受力，根据式 (8.3.3-4) 确定，且当 $\alpha_s > 0.9$ 时，取 $\alpha_s = 0.9$ 。

8.4.2 采用增大截面加固钢筋混凝土偏心受压构件时，其矩形截面面积应按下列公式确定(图 8.4.2)：

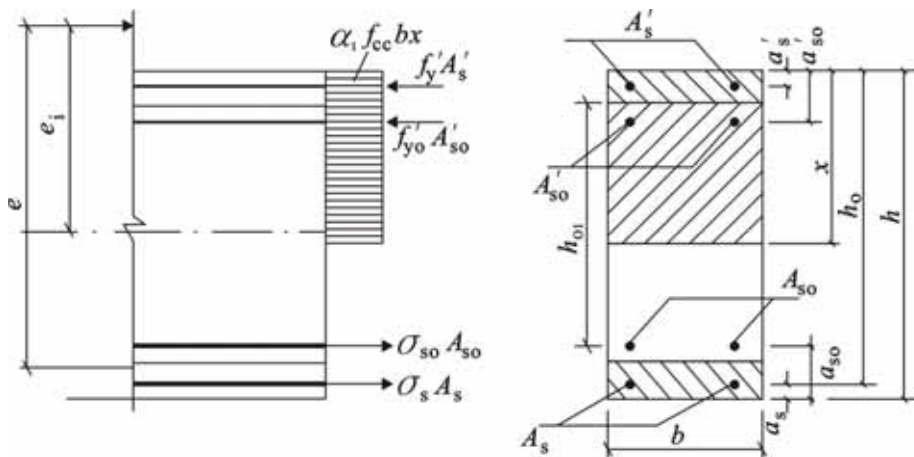


图 8.4.2 矩形截面偏心受压构件加固的计算

注：当为小偏心受压构件时，图中 σ_{s0} 可能变向

$$N \quad \alpha_1 f_{cc} b x + \alpha_s f_y A'_s + f'_{y0} A'_{s0} - \alpha_s \sigma_s A_s - \sigma_{s0} A_{s0} \quad (8.4.2-1)$$

$$Ne \quad \alpha_1 f_{cc} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + \alpha_s f_y A'_s (h_0 - a'_s) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a'_{s0}) - \sigma_{s0} A_{s0} (a_{s0} - a_s) \quad (8.4.2-2)$$

$$\sigma_{s0} = (\frac{0.8h_{01}}{x} - 1) E_{s0} \varepsilon_{cu} \quad f_{y0} \quad (8.4.2-3)$$

$$\sigma_s = (\frac{0.8h_0}{x} - 1) E_s \varepsilon_{cu} \quad f_y \quad (8.4.2-4)$$

式中 f_{cc} —— 新旧混凝土组合截面的混凝土轴心抗压强度设计值，可按

$$f_{cc} = \frac{1}{2} (f_{c0} + \alpha_c f_c) \text{ 确定；}$$

f_c 、 f_{c0} —— 分别为新旧混凝土轴向钢筋截面面积；

A'_{s0} —— 原构件受压较大边纵向钢筋截面面积；

e —— 偏心距，为轴向压力设计值 N 的作用点至新增受拉钢筋合力点的距离，按本节第 8.4.3 条确定；

α_s —— 新增纵筋强度利用系数，考虑柱在实际加固工程中为二次受力，根据式 (8.3.3-4) 确定，且当 $\alpha_s > 0.9$ 时，取 $\alpha_s = 0.9$ 。

a_{s0} —— 原构件受拉边或受压较小边纵向钢筋合力点到加固后截面近边的距离；

a'_{s0} —— 原构件受压较大边纵向钢筋合力点到加固后截面近边的距离；

a_s —— 受拉边或较小边新增纵向钢筋合力点至加固后截面近边的距离；

a'_s —— 受压较大边新增纵向钢筋合力点至加固后截面受压较大边缘的距离；

h_0 —— 受拉边或受压较小边新增纵向钢筋合力点至加固后截面受压较大边缘的距离；

h_{01} —— 原构件截面有效高度。

8.4.3 轴向压力作用点至纵向受拉钢筋的合力作用点的距离(偏心距) e ，应按下列规定确定：

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a \quad (8.4.3-1)$$

$$e_i = e_o + e_a$$

式中 e_i —— 初始偏心距；

a —— 纵向受拉钢筋的合力点至截面近边缘的距离；

e_o —— 轴向压力对截面重心的偏心距，取为 M/N 。当需要考虑二阶效应时， M 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 第 6.2.4 条规定 $C_m \eta_{ns} M_2$ ，乘以修正系数 ψ 确定。即取 M 为 $\psi C_m \eta_{ns} M_2$ ；

ψ —— 修正系数，当为对称形式加固时，取 ψ 为 1.2；当为非对称加固时，取 ψ 为 1.3；

e_a —— 附加偏心距，按偏心方向截面最大尺寸 h 确定；当 $h \leq 600\text{mm}$ 时，取 e_a 为 20mm；当 $h > 600\text{mm}$ 时，取 $e_a = h/30$ 。

8.5 加固受压构件斜截面承载力计算

8.5.1 采用增大截面加固钢筋混凝土轴心受压构件（图 8.5.1）时，考虑二次受力条件下加固其斜截面抗剪承载力应按下列式确定：

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1.0} f_{t0} b h_0 + \frac{1.75}{\lambda + 1.0} \alpha_c f_t b (h_{m0} - h_0) + 1.0 f_{yv0} \frac{A_{sv0}}{s_0} h_{m0} + 0.1N \quad (8.5.1)$$

式中 α_c ——新增混凝土强度利用系数，按(8.3.2-3)式计算，当 $\alpha_c > 0.7$ 时，取 $\alpha_c = 0.7$ ；

λ ——加固柱的计算剪跨比，当 $\lambda < 1$ 时，取 $\lambda = 1$ ；当 $\lambda > 2.5$ 时取 $\lambda = 2.5$ ；

f_{tk}, f_{t0k} ——新、旧混凝土轴心抗拉强度标准值；

A_{sv0} ——同一截面内原箍筋各肢截面面积之和；

h_0, b ——老混凝土截面有效高度和宽度；

h_{m0} ——新混凝土截面有效高度；

s_0 ——原箍筋沿构件长度方向的间距；

N ——初始轴向力。

8.6 加固框架节点承载力计算

8.6.1 采用增大截面加固钢筋混凝土框架节点时，考虑二次受力条件下加固节点受剪承载力可以采用下列公式：

$$V = V_u + \varphi V_c \quad (8.6.1-1)$$

$$V_u = \frac{1}{\gamma_{RE}} [1.1 \eta_j f_t b_j h_j + 0.05 \eta_j N \frac{b_j}{b_c} + \frac{f_{yv} A_{svj}}{s} (h_{b0} - a'_s)] \quad (8.6.1-2)$$

$$V_c = \frac{1}{\gamma_{RE}} [1.1 \alpha_c f'_t (b_{h0} h_{h0} - b_j h_j) + \alpha_{vs} \frac{f'_{yv} A'_{svj}}{s} (h'_{b0} - a'_s)] \quad (8.6.1-3)$$

式中 V ——加固节点受剪承载力

V_u ——原节点受剪承载力，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定计算；

φ ——加固构件截面组合系数，根据新旧混凝土浇筑结合的可靠程度取值，根据经验可取 0.5~0.98；

V_c ——新增钢筋混凝土受剪承载力；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定取值；

η_j ——正交梁对节点的约束影响系数，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值；

f'_i 、 f_i ——新、旧混凝土轴心抗拉强度设计值；
 b_j ——框架节点核心区的截面有效验算宽度，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值；
 h_j ——框架节点核心区的截面高度，可取验算方向的柱截面高度，即 $h_j=h_c$ ；
 N ——对应于考虑地震作用组合剪力设计值的节点上柱底部的轴向力设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定取值；
 b_c ——原柱截面宽度；
 f'_{yv} 、 f_{yv} ——新、旧箍筋抗拉强度设计值；
 A'_{svj} 、 A_{svj} ——核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向新、旧箍筋各自的有效面积；
 h'_{b0} 、 h_{b0} ——新、旧混凝土梁截面的有效高度，节点两侧梁截面高度不等时取平均值；
 a'_s ——梁纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离；
 α_c ——新增混凝土强度利用系数，按(8.3.2-3)式计算，且当 $\alpha_c > 0.7$ 时，取 $\alpha_c = 0.7$ ；
 α_{vs} ——新增箍筋强度利用系数，考虑柱在实际加固工程中为二次受力，根据式(8.3.3-4)确定，且当 $\alpha_{vs} > 0.9$ 时，取 $\alpha_{vs} = 0.9$ ；
 b_{h0} ——节点水平截面加固后的宽度；
 h_{h0} ——节点水平截面加固后的长度；

8.7 构造规定

8.7.1 新增混凝土层的最小厚度，板不应小于 40mm，梁、柱采用人工浇筑时，不应小于 60mm，采用喷射混凝土施工时，不应小于 50mm。

8.7.2 加固用的钢筋，应采用热轧钢筋。板的受力钢筋直径不应小于 8mm；梁的受力钢筋直径不应小于 12mm；柱的受力钢筋直径不应小于 14mm；加锚式箍筋直径不应小于 8mm；U 形箍直径应与原箍筋直径相同；分布筋直径不应小于 6mm。

8.7.3 新增受力钢筋与原受力钢筋的净间距不应小于 20mm，并应采用短筋或箍筋与原钢筋焊接；其构造应符合下列要求：

1. 当新增受力钢筋与原受力钢筋的连接采用短筋(图 8.8.3a)焊接时，短筋的直径不应小于 20mm，长度不应小于其直径的 5 倍，各短筋的中距不应大于 500mm。
2. 当截面受拉区一侧加固时，应设置 U 形箍筋(图 8.8.3b)。U 形箍筋应焊在原有箍筋上，单面焊缝长度应为箍筋直径的 10 倍，双面焊缝长度应为箍筋直径的 5 倍。
3. 当用混凝土围套加固时，应设置环形箍筋或加锚式箍筋(图 8.8.3d 或 c)。

注：当受构造条件限制必需采用植筋方式埋设 U 形箍(图 8.8.3c)时，应采用锚固专用的结构胶种植；不得采用自行配制的环氧树脂砂浆或其他水泥砂浆。

8.7.4 梁的新增纵向受力钢筋，其两端应可靠锚固；柱的新增纵向受力钢筋的下端应伸入基础并应满足锚固要求；上端应穿过楼板与上层柱脚连接或在屋面板处封顶锚固。

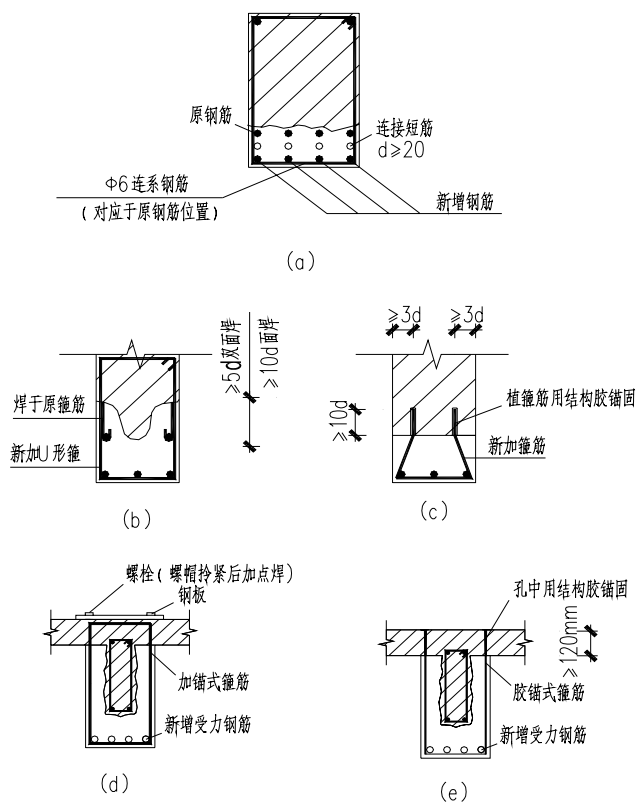


图 8.7.3 增大截面配置新增箍筋的连接构造

注：d 为箍筋直径

9 自密实混凝土加固结构质量验收

9.1 自密实混凝土加固结构质量验收同普通混凝土加固结构，应符合《建筑结构加固工程施工质量验收规范》(GB 50550) 中的规定。

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”。

附录 A 自密实混凝土拌合物工作性检验方法

A.1 坍落度筒法

本实验包括用坍落度筒测试自密实混凝土的坍落度、坍落扩展度和中边差三个指标，并观察混凝土的边缘是否有水泥浆或水份逸出以及是否板结。本试验方法用来评价自密实混凝土的流动性、和易性。

A.1.1 模具

本方法所用设备主要有：符合《混凝土坍落度仪》(JG3021)中有关技术要求规定的坍落度筒以及灰铲、抹刀、尺子等。

A.1.2 试验方法

1. 把坍落度筒放置在坚实的水平底板上，湿润坍落度筒及底板，在坍落度筒内壁和底板上应无明水。用脚踩住两边的脚踏板，坍落度筒在装料时应保持固定的位置。

2. 用灰铲把自密实混凝土装满坍落度筒，不需插捣。刮去多余的混凝土，并用抹刀抹平。清除坍落度筒周围底板上的混凝土，并用湿润的抹布擦干净。

3. 垂直平稳地提起坍落度筒，让混凝土在底板上扩展。坍落度筒的提起过程应在5-10秒内完成。

4. 提起坍落度筒后，测量筒与坍落后混凝土最高点之间的高度差，即为该混凝土拌合物的坍落度值；用钢尺测量混凝土扩展后最终的最大直径和最小直径，在这两个直径之差小于50mm的条件下，计算其算术平均值即为坍落扩展度值。混凝土拌合物的坍落度、坍落扩展度以毫米为单位，精确至5mm。

5. 在量测坍落扩展度后，观测混凝土最外边缘是否出现明显的水分或稀浆析出；再用灰铲将混凝土从地面铲起，观察混凝土是否板结。

A.1.3 坍落度筒试验结果的评价方法

只有当自密实混凝土的坍落度、坍落扩展度足够大，中边差足够小，混凝土外缘没有水分或稀浆逸出，并且混凝土没有板结时，才说明所配制的自密实混凝土具有足够的流动性，及良好的施工性能，且材料均匀稳定。不同工程采用的自密实混凝土，其坍落度、坍落扩展度值应符合本规程表6.2.3的要求。

A.2 L 型流动仪法

本试验方法主要用来评价自密实混凝土的穿越性，即穿越密集钢筋的能力。

A.2.1 L 型仪用硬质不吸水材料制成、由前槽(垂直)和后槽(水平)组成，具体外形尺寸见图 B.1.1。前槽与后槽之间有一活动门隔开。活动门前设有一垂直钢筋栅，钢筋栅由 3 根(或 2 根)长为 150mm 的 12 光圆钢筋组成，钢筋净间距为 40mm 或者 60mm。

A.2.2 工具：铲子、抹刀、秒表。

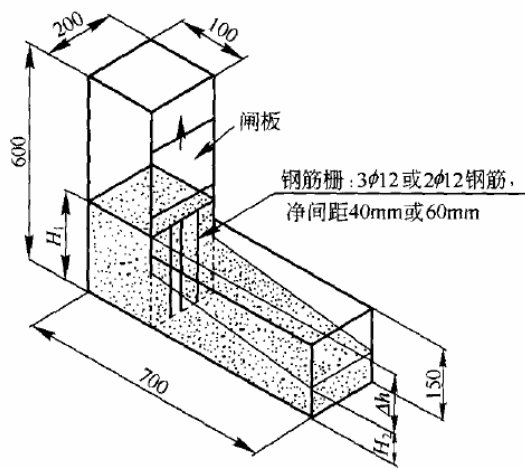
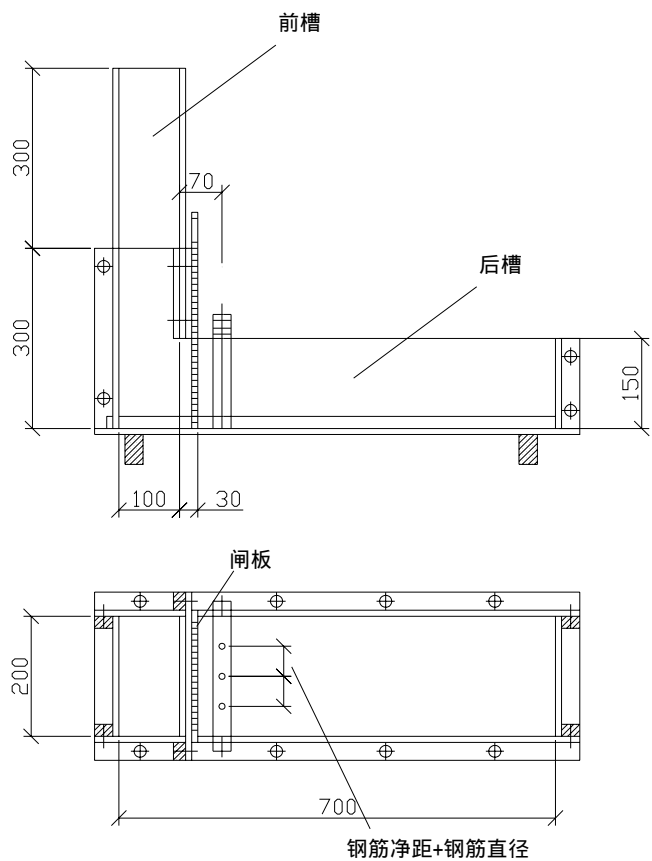


图 A.2.1 L 型仪

- A.2.3 将仪器水平放在地面上，保证活动门可以自由地开关。
- A.2.4 润湿仪器内表面，清除多余的水。
- A.2.5 用混凝土将 L 型仪前槽填满。
- A.2.6 静置 1min 后，迅速提起活动门使混凝土拌合物流进水平部分。
- A.3.7 混凝土拌合物停止流动后，测量并记录“ H_1 ”、“ H_2 ”。
- A.3.8 整个试验在 5min 内完成。

A.3 J 环试验方法

A.3.1 J 环方法主要用于测定自密实混凝土的穿越能力。用于混凝土骨料最大粒径不大于 25mm 的自密实混凝土。

A.3.2 由坍落度筒与 J 环共同组成，J 环由一个直径为 300mm，厚度为 25mm 的中空钢环，在垂直方向等距布置长 100mm，直径 16mm 的钢棒组成。具体构造及尺寸如图 A.3.2 所示。

A.3.3 在不吸水的水平面上，比如混凝土地面或基板上进行试验。

A.3.4 可以选择坍落度筒正立或倒立两种方法——弄湿坍落度筒并将其放置在工作面上或基板。

A.3.5 通过下式计算 J 环的流动度：

$$J \text{ 环扩展度 } j = (j_1 + j_2) / 2 \quad \text{A.3.5-1}$$

式中：

j ——J 环扩展度，mm；

j_1 ——J 环测试中混凝土扩展圆的最大尺寸，mm，精确到 5mm；

j_2 ——与 j_1 方向大致垂直的混凝土扩展圆尺寸 mm，精确到 5mm。

A.3.6 通过下式来计算坍落度：

$$\text{坍落扩展度 } d = (d_1 + d_2) / 2 \quad \text{A.3.5-6}$$

式中：

d ——坍落扩展度，mm；

d_1 ——坍落度测试中混凝土扩展圆的最大尺寸 mm，精确到 5mm；

d_2 ——与 d_1 方向大致垂直的混凝土扩展圆尺寸 mm，精确到 5mm。

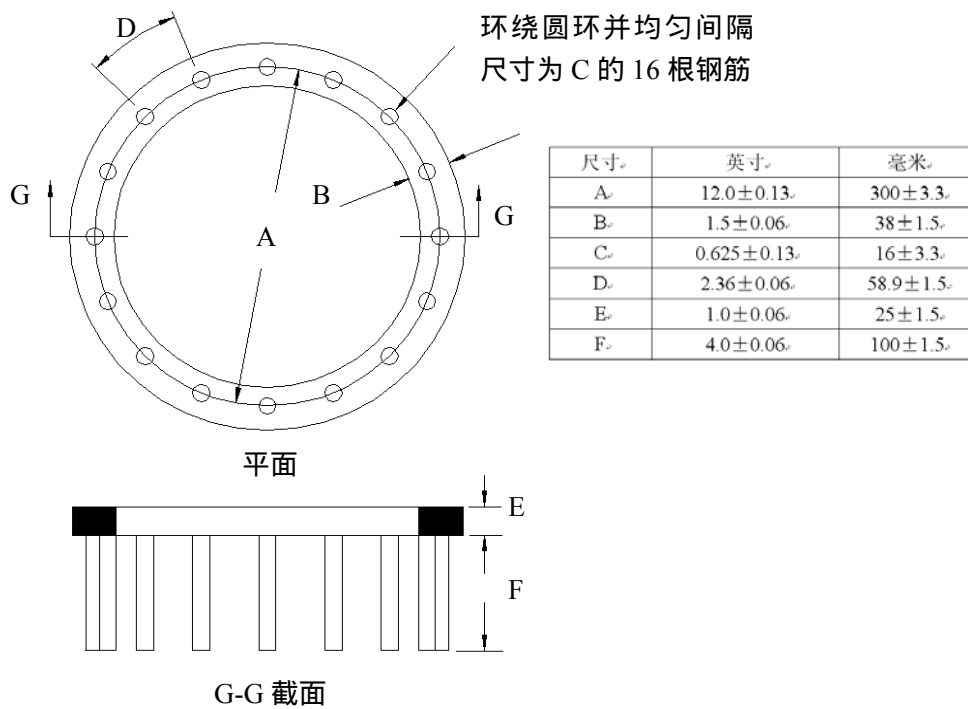
A.3.7 计算坍落度流动度与 J 环流动度的差值。该数值代表自密实混凝土的穿越钢筋能力。

A.3.8 通过表 A.3.8.1 判断阻塞程度

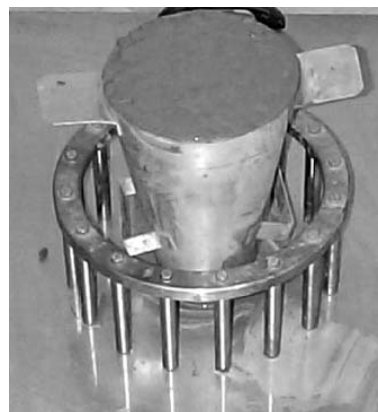
表 1 阻塞评价

坍落度与 J 环流动度的差别	阻塞程度
$0 \leq (d-j) \leq 25\text{mm}$	无明显阻塞
$25 < (d-j) \leq 50\text{mm}$	小到明显阻塞
$> 50\text{mm}$	明显到极端阻塞

A.3.9 报告内容包括：所采用的填充步骤（坍落度筒正立还是倒立）；坍落扩展度、J 环流动度及两者的差值。



J 环尺寸



坍落度筒正立/倒立两种方法



J 环流动度测试



J 环提起后混凝土的形态

图 A.3.2 J 环装置图

A.4 稳定筛试验

本试验方法通过把新拌自密实混凝土静置一段时间后,经过筛评价混凝土的抵抗离析的能力(新拌混凝土的稳定性)。

A.4.1 模具

本方法的主要设备包括带盖子的10升的容量筒、直径350mm,筛孔为5mm的带底盘的过滤筛。另外需要一个容量大于2升的容器,称量20kg,感量20g的天平以及秒表。

A.4.2 试验方法

1. 取10升混凝土样品,倒入容量筒中。
2. 盖好筒盖,静置15分钟,避免水分蒸发。
3. 称取过滤筛底盘的重量 m_1 ,观察并记录混凝土是否有泌水现象。
4. 将容量筒内顶部2升的混凝土试样倒入容器,称重 m_2 。
5. 在离过滤筛500mm处的高度,连续均匀地把容器中的混凝土全部倒入带底盘的过滤筛,之后称取该容器的重量 m_3 。
6. 计算倒入过滤筛的混凝土的重量 $M_1=m_2-m_3$ 。
7. 摇动过滤筛,过滤混凝土,并静置2分钟。
8. 取走过滤筛,称量底盘和混凝土的重量 m_4 ,计算通过筛孔的混凝土的重量 $M_2=m_4-m_1$ 。
9. 计算混凝土通过筛子的重量比例, $r=(M_2/M_1)\%$ 。

A.4.3 稳定筛试验结果的评价

1. 观察混凝土在容量筒中静置15分钟后是否有泌水现象。如果有,则该混凝土拌和物的稳定性不够好。
2. 对 r 值的分析:当 $0\% \leq r \leq 5\%$ 时,说明混凝土虽然能很好地抵抗分离但是过分粘聚,影响混凝土硬化后的表面观感;当 $5\% < r \leq 15\%$ 时,说明自密实混凝土具有很好的抵抗分离能力;当 $15\% < r \leq 30\%$ 时,说明混凝土有离析的趋势,抵抗分离能力不够好;当 $r > 30\%$ 时,则说明新拌混凝土不稳定,不能使用。

A.5 坍落度经时损失试验方法

A.5.1 坍落度、坍落扩展度经时损失主要测定自密实混凝土工作性的经时稳定性。

A.5.2 经时损失是在坍落度、坍落扩展度试验方法的基础上进行的,试验条件按与坍落度试验方法相同。本方法规定测定经过1h的坍落度损失为标准做法;如工程需要,也可参照此方法测定经过不同时间的经时损失。

A.5.3 坍落度、坍落扩展度经时损失为原坍落度、坍落扩展度与经过1h后的坍落度、坍落扩展度之差。若为负值,表示经过一段时间后,混凝土流动性反而有所增大。

附录 B 自密实混凝土抗裂性能检测方法

B.1 圆环法

B.1.1 仪器要求

1. 混凝土抗裂性能圆环法检测装置主要含内贴应变片的圆环试模和应变数据采集系统。圆环试模主要部件包括底座、侧模、芯模 和上盖(图 B.1.1)。芯模用厚度为 12.5mm 的钢制成,并具有一定的刚度,其他部件可采用钢或木板或有机玻璃等材料制成。抗裂试模成型的试件的外径为 $406 \pm 1\text{mm}$;内径为 $330 \pm 1\text{mm}$;高为 $152 \pm 1\text{mm}$ 。每个钢环在内环环向中部等间隔贴上电阻应变片组成 4 组全桥桥路。

2. 工具: 铲子、磨刀、振动台、时钟、裂缝观测仪、尺子

B.1.2 试验步骤

1. 按《普通混凝土力学性能试验方法》(GB 50083)中的有关规定,严格按被检混凝土配合比拌制被检混凝土拌合物(一次至少 20L),并记录加水时间 t_0 。

2. 将制成的混凝土拌合物用小铲分均匀装入抗裂试模内直至与试模平齐并刮平。

3. 将成型好的抗裂试模盖上上盖放入温度为 25 ± 2 的环境中,混凝土初凝后用硅胶或石蜡进行试件顶面密封处理,养护 24h 后脱模。

4. 脱模后的抗裂试件立即放入温度为 25 ± 2 、相对湿度 $(55 \pm 5)\%$ 的环境中,并在试件顶面涂上硅胶或浇上石蜡进行密封处理。并开始采集数据,每隔 1h 采集一次数据,记录钢环应变随时间的发展规律,直至混凝土环开裂即钢环应变突然下降或龄期为 28d。

B.1.3 试验结果计算

将所采集的 4 个钢环应变值平均即为钢环应变值。

B.1.4 抗裂性能的评价方法

混凝土抗裂性能的评价方法是依据混凝土环立面出现裂缝的间隔时间越长或钢环的应变越大,说明混凝土的抗裂性能越好。由于试验环境条件很难做到每次试验都一样,试件环立面裂缝出现的间隔时间和钢环应变也随环境条件的变化而变化。为消除试验环境条件的影响,应在同条件下同时试验各种混凝土的抗裂性能,提高试验的复演性。

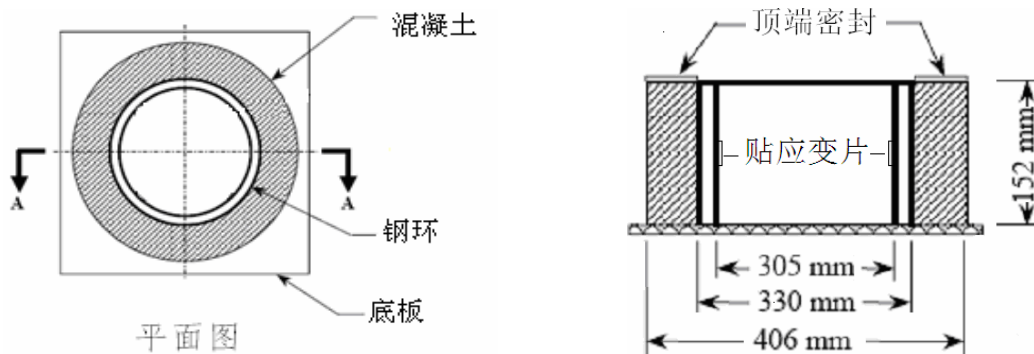


图 B.1.1 环形试验装置图

B.2 平板诱导开裂法

B.1.1 仪器要求

1. 自密实混凝土抗裂性能检测的主要仪器为平板诱导开裂试验装置，该装置主要是有钢材制成的，具体尺寸及结构见图 B.1.1。其中边框必须具有足够的刚度，以避免由于水泥基材料的收缩所产生的力引起边框变形，影响试验结果的准确性；隔板必须具有足够刚度、光滑平整并通过四个螺栓固定于平板的边框上，以免由于隔板的晃动而影响试验结果的可靠性；隔板与混凝土接触端应为圆弧型尖头，以免由于应力集中而影响试验结果的可靠性。并在底板上铺设有特氟纶与石蜡纸以尽量降低底板的摩擦约束。

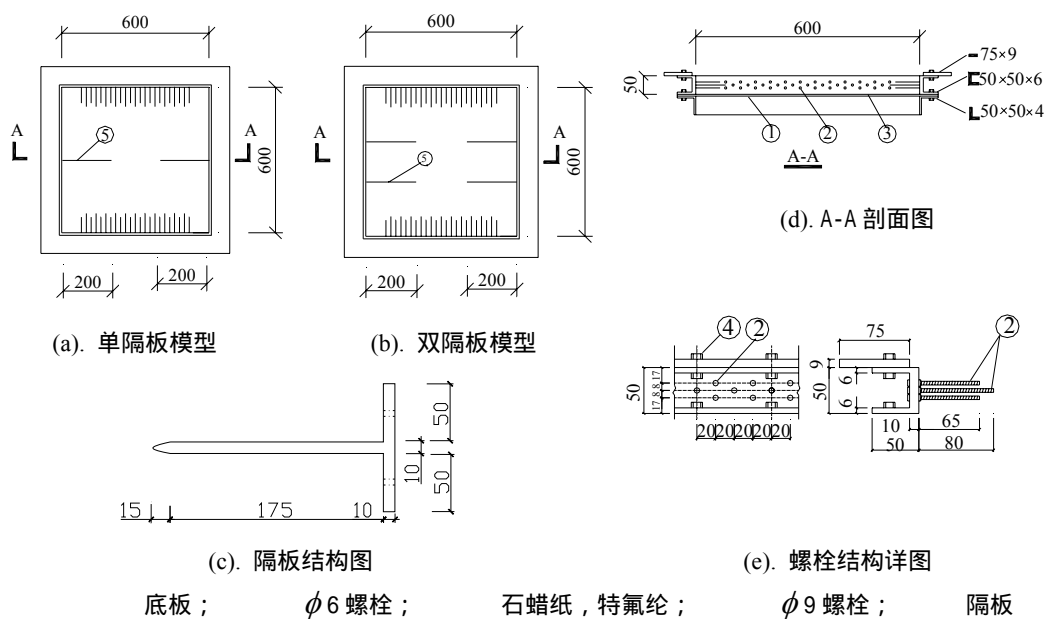


图 B.1.1 平板诱导开裂法试验装置（单位：mm）

2. 工具：铲子、磨刀、振动台、时钟、裂缝观测仪、尺子

B.1.2 试验步骤

1. 根据混凝土的强度等级选择平板模式，由于混凝土强度等级越高，混凝土越易于开裂，对高强混凝土宜采用双隔板模式，中低强混凝土宜采用单隔板模式。

2. 将滑动塑料薄膜铺放在水平平面上，再将模框放在塑料薄膜上，拧紧固定模框与隔板螺栓，并固定混凝土锚固螺栓。

3. 搅拌混凝土并记录开始加水的时间 t_0 ，将混凝土拌合物均匀地铺放在模框内抹平。然后放入环境温度为 25 ± 2 ，湿度为 $55 \pm 5\%$ 的室内。

4. 从混凝土浇注完之后 1h 开始每隔 20min 观测一次裂缝，直至隔板与混凝土之间出现缝隙开始每隔 10min 观测一次裂缝，直至裂缝出现，并记录裂缝出现的时间 t_1 。裂缝出现后每隔 20min 观测一次直至裂缝贯穿，并记录裂缝出现的时间 t_2 。在裂缝贯穿后每小时观测一次，两个小时每 2h 观测一次，直至龄期为 10h，然后观测 24h 的裂缝。每次观测的内容包括：最大裂缝宽度、平均裂缝宽度、裂缝长度、裂缝条数。

B.1.3 试验结果计算

诱导开裂法用于混凝土开裂性能测试，其评价指标主要有四个：混凝土初裂时间、裂缝贯穿时间、最大裂缝宽度和开裂面积。其中初裂时间、裂缝贯穿时间、开裂面积分别按下式计算：

$$T_1 = t_1 - t_0 \quad (\text{B.1.3-1})$$

$$T_2 = t_2 - t_0 \quad (\text{B.1.3-2})$$

$$A = \sum_i^N W_i \cdot L_i \quad (\text{B.1.3-3})$$

式中 T_1 ——混凝土初裂时间，min；
 T_2 ——混凝土裂缝贯穿时间，min；
 t_0 ——开始加水的时间，min；
 t_1 ——试件裂缝出现的时间，min；
 t_2 ——混凝土裂缝出现贯穿的时间，min；
 A ——开裂面积， mm^2 ；
 W_i ——第 i 根裂缝的平均宽度，mm；
 L_i ——第 i 根裂缝的长度，mm；
 N ——总裂缝根数。

B.1.4 抗裂性能的评价方法

对选定的几种混凝土在相同的环境条件下（同时成型、同一环境条件）比较开裂面积与最大裂缝宽度越小，混凝土初裂时间与裂缝贯穿时间越迟，抗裂性能越好，反之越差。并且在四个评价指标中开裂面积是主要指标。

福建省工程建设地方标准

自密实混凝土加固土木工程结构技术规程

Technical specification for strengthening civil structures

by Self-Compacting Concrete

(条文说明)

目 录

目 录	45
1 总则	46
3 自密实混凝土的原材料	47
3.1 一般规定	47
3.2 水泥	47
3.3 骨料	47
3.6 外加剂	48
4 自密实混凝土配合比设计规定	49
4.1 一般规定	49
4.2 混凝土配制强度的确定	50
4.3 自密实混凝土配合比设计的原则	50
4.4 配合比设计方法	50
4.5 配合比的试配、调整与确定	52
5 自密实混凝土的生产与施工	53
5.1 一般规定	53
5.2 自密实混凝土的生产	53
5.3 自密实混凝土的运输	54
5.4 自密实混凝土的浇筑	54
5.5 自密实混凝土的养护	55
6 自密实混凝土质量检验评定	56
6.1 一般规定	56
6.2 新拌自密实混凝土的质量控制	56
6.3 自密实混凝土强度的质量控制	57
6.4 自密实混凝土耐久性的质量控制	57
7 自密实混凝土加固结构工程的施工	61
7.1 一般规定	61
7.2 界面处理	61
7.3 结构加固施工方法	64
8 自密实混凝土加固钢筋混凝土结构设计方法	65
8.1 设计规定	65
8.2 加固受弯构件正截面承载力计算	65
8.3 加固受弯构件斜截面承载力计算	66
8.4 加固受压构件正截面承载力计算	67
8.5 加固受压构件斜截面承载力计算	68
8.6 加固框架节点承载力计算	68
8.7 构造规定	69
9 自密实混凝土加固结构质量验收	69

1 总则

1.1~1.5 所谓自密实混凝土是指拌合物具有良好的工作性,即使在密集配筋条件下,仅靠混凝土自重作用无需振捣便能均匀密实成型的高性能混凝土。自密实混凝土的主要优点有:

(1) 可用于难以浇注甚至无法浇注的结构,能解决传统混凝土施工中的漏振、过振以及钢筋密集难以振捣等问题,可保证钢筋、预埋件、预应力孔道的位置不因振捣而移位。

(2) 增加了结构设计的自由度。不需要振捣,可以浇注成形状复杂、薄壁和密集配筋的结构。

(3) 大幅降低工人劳动强度,节省人工数量。

(4) 有效地提高了混凝土的品质,具有良好的密实性、力学性能和耐久性。

(5) 降低环境噪声,改善工作环境。

(6) 能大量利用工业废料做矿物掺合料,有利于环境保护。

(7) 施工自动化程度高,能促进工业化的施工与管理。

(8) 节省电力能源。

(9) 有可能从整体上降低工程成本。

因此自密实混凝土技术在增大截面法加固工程中可发挥普通混凝土不可替代的作用,由于增大截面法加固尺寸较小且配筋密集,用普通混凝土难以浇捣密实,自密实混凝土所具有的高流动性和优异的钢筋穿越能力所带来的免振捣特性满足了增大截面法加固工程的施工需求,确保了加固质量。

本规程针对自密实混凝土的特性,从自密实混凝土的原材料选择、配合比设计、性能指标控制、生产与施工,以及自密实混凝土加固结构的设计、施工方法、质量验收等方面对自密实加固结构技术进行系统编写。

3 自密实混凝土的原材料

3.1 一般规定

3.1.1 ~ 3.1.3 原材料的质量直接影响自密实混凝土的质量,自密实混凝土对原材料的质量及稳定性有严格的要求,因此,必须对原材料进行预先控制。为加强对原材料生产供应厂家的质量监督,要求进场的水泥、矿物掺合料、外加剂必须备有与原材料实物一致的合格证和出厂检验报告以及产品当年的型式检验报告,骨料必须备有出厂检验报告,不使用质量不稳定的小水泥、小外加剂、小砂石料的产品。

3.2 水泥

3.2.1 ~ 3.2.2 配制自密实混凝土用的水泥强度等级一般可用 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。由于在一般的混合水泥中已加入一定数量或大量的活性与非活性矿物掺合料,而这些掺料的数量和质量并不一定符合配制自密实混凝土的要求,所以最好采用硅酸盐水泥。普通硅酸盐水泥的掺合料数量较少,用来配制自密实混凝土也较合适。

为了保证自密实混凝土在入模之前保持其工作性,配制自密实混凝土所用的水泥细度不宜太细。水泥中的 C_3A 含量较高时,外加高效减水剂的混凝土拌合物容易出现坍落度迅速损失的现象,因此水泥成分中 C_3A 含量宜较低。

3.2.3 水泥质量的波动对自密实混凝土最终质量的影响显著,因此本规程规定了自密实混凝土宜使用旋窑生产的质量合格的水泥,相对固定水泥生产厂家,能更好地熟悉水泥的性能,控制好自密实混凝土生产。

3.3 骨料

3.3.1 试验表明,使用中砂更容易满足自密实混凝土的工作性要求,砂的细度模数宜大于 2.5。集料的含泥量对自密实混凝土的工作性、强度都有较大影响,因此细骨料的含泥量不应大于 1.5%。

3.3.2 粗骨料的品种特别是粗骨料母体岩石的立方体抗压强度对自密实混凝土的抗压强度及弹性模量有重要作用,因此要求配制自密实混凝土的粗骨料宜采用质地坚硬、级配良好的碎石,其强度应满足《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》(JGJ53-92)的要求。

3.3.3 ~ 3.3.4 粗骨料针片状颗粒的含量和骨料级配状况直接影响混凝土拌合料的用水量和浆体含量,从而影响自密实混凝土拌合物的工作性和硬化后混凝土的力学性能,因此严格控制粗骨料的针片状含量,使用级配良好、颗粒形状饱满的骨料对自密实混凝土来说是至关重要的。

对于级配良好的粗骨料,最大粒径越大,粗骨料堆积后的比表面积就越小,因而能够节约水泥浆,对于强度和变形都有利。但是粗骨料的颗粒越大,颗粒本身的强度就越低,还会使自密实混凝土拌合物中的粗骨料容易下沉。因此,配制自密实混凝土的粗骨料最大

粒径一般不宜大于 25mm。

3.5 矿物掺合料

3.5.1 ~ 3.5.2 为了满足自密实混凝土工作性要求，同时尽量减少水泥用量，应在自密实混凝土中掺入矿物掺合料。粉煤灰活性效应、形态效应、微集料效应对自密实混凝土拌合物的工作性、硬化混凝土的力学性能都具有较好的作用，因此优先使用粉煤灰作为自密实混凝土的矿物掺合料。

由于自密实混凝土是在低水胶比情况下配制的，用于配制自密实混凝土的粉煤灰的含碳量越低越好，粉煤灰的需水量比越小对自密实混凝土的工作性越有利。

3.5.4 矿物掺合料的品种和掺量对自密实混凝土的工作性和硬化混凝土的力学性能都有重要影响，因此当使用粉煤灰、磨细矿渣之外的其它品种矿物掺合料时，应对其可能影响混凝土性能的指标进行试验，确认符合混凝土质量要求时方可使用。

3.6 外加剂

3.6.1 ~ 3.6.2 混凝土外加剂的品种繁多，对混凝土性能的影响很大。应根据实际工程对自密实混凝土的性能要求，施工工艺及气候条件，结合混凝土原材料性能、配合比以及对水泥的适应性等因素，通过试验确定复合外加剂的品种和掺量。

除了高效减水剂外，自密实混凝土可能还会用到其他外加剂。如引气剂、缓凝剂、增稠剂等。使用中均应选用与水泥的相容性好，坍落度损失小，符合规范要求的外加剂。当使用增稠剂时应应对混凝土强度发展规律等指标做必要的试验，在确保混凝土质量情况下使用。

多种外加剂复合时，应在使用前结合工程对自密实混凝土性能进行复试，应对混凝土拌合物的工作性、混凝土硬化后的力学性能等做必要的试验。

4 自密实混凝土配合比设计规定

4.1 一般规定

4.1.1 自密实混凝土配合比设计不仅仅应满足配制强度要求，还应注意其弹性模量在正常范围之内。自密实混凝土拌合物的工作性是其特点所在，也是配合比设计的难点。此外，各类混凝土配合比设计都应满足耐久性能的要求。强调混凝土配合比设计应满足耐久性能要求是必然趋势。

浆骨比是影响混凝土工作性的一个重要指标，同时也是影响混凝土体积稳定性的重要指标。浆骨比越大，混凝土工作性越好，但体积稳定性越差。当浆骨比小到一定程度时，达到自密实混凝土临界浆骨比，此时工作性和体积稳定性达到较好的平衡。

浆骨比主要取决于骨料的粒形、级配和骨料最大粒径。

4.1.2 自密实混凝土与普通混凝土的区别主要在于工作性，其硬化后的力学性能与普通混凝土差别不大，因此其硬化后力学性能和耐久性的试验方法可以参照普通混凝土相关的适用方法。

4.1.3 新拌自密实混凝土拌合物工作性要求与工作性检测方法与普通混凝土差别很大。要达到自密实的效果，在流动性和穿越钢筋能力上有更高的要求。此外，应注意控制自密实混凝土配制过程中的离析、泌水现象，确保拌合物的粘聚性和保水性。以免浇筑入模后分层离析，严重影响混凝土工程质量。

4.1.4 通常情况下，自密实混凝土的浆骨比较普通混凝土大，有可能引起相应的收缩开裂问题。根据工程的特点，当对收缩开裂性能要求较高时，应对收缩开裂性能进行试验检测。

4.1.5 湿容重跟混凝土的各种原材料比例、含气量等有关。当高效减水剂用量较大时，尤其是聚羧酸类减水剂，有可能导致混凝土含气量高，混凝土弹性模量偏低的问题。自密实混凝土其湿容重不宜低于 2350kg/m^3 。

4.1.6 本条参照《普通混凝土配合比设计规程》，条文说明如下：将混凝土中碱含量控制在 3.0kg/m^3 以内，并掺加适量粉煤灰和粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料，对预防混凝土碱骨料反应具有重要意义。混凝土中碱含量是测定的混凝土各原材料碱含量计算之和，而实测的粉煤灰和粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料碱含量并不是参与碱骨料反应的有效碱含量，对于矿物掺合料中有效碱含量，粉煤灰碱含量取实测值的 $1/6$ ，粒化高炉矿渣粉碱含量取实测值的 $1/2$ ，已经被混凝土工程界采纳。

4.1.7 本条参照《普通混凝土配合比设计规程》，条文说明如下：按环境条件影响氯离子引起钢锈的程度简明地分为四类，并规定了各类环境条件下的混凝土中氯离子最大含量。本规范采用测定混凝土拌合物中氯离子的方法，与测试硬化后混凝土中氯离子的方法相比，时间大大缩短，有利于配合比设计和控制。表 4.1.7 中的氯离子含量系相对混凝土中水泥用量的百分比，与控制氯离子相对混凝土中胶凝材料用量的百分比相比，偏于安全。

4.2 混凝土配制强度的确定

4.2.1 本条参照《普通混凝土配合比设计规程》，条文说明如下：混凝土配制强度对生产施工的混凝土强度应具有充分的保证率。对于强度等级小于 C60 的混凝土，实践证明传统的计算公式是合理的，因此仍然沿用传统的计算公式；对于强度等级不小于 C60 的混凝土，传统的计算公式已经不能满足要求，修订后采用公式 4.2.1-2，该公式已在《公路桥涵施工技术规范》JTJ041 中体现，并在公路桥涵和建筑工程等实际工程中得到检验。

4.2.2 本条参照《普通混凝土配合比设计规程》，条文说明如下：根据实际生产技术和大量调研，适当调高了按公式 4.2.2 计算的强度标准差取值，并给出表 4.2.2 的强度标准差取值，这些取值与目前实际控制水平的标准差比较，是偏于安全的，也与国际上提高安全性的总体趋势是一致的。

4.3 自密实混凝土配合比设计的原则

4.3.1 由于自密实混凝土组成材料复杂，其湿容重在 2300~2400kg/m³ 之间变化，采用质量法容易导致较大的误差。此外，本规程以浆骨体积比作为首选指标，因此用体积法进行自密实混凝土配合比设计更简便。

4.3.2 自密实混凝土无论强度高，其所要达到的工作性要求是相似的。最终决定主要材料用量的不是强度，而是工作性。决定工作性的主要指标是浆骨比、砂率、外加剂掺量。这三个指标确定后，再通过调整浆体内部的水胶比、水泥用量、掺合料种类和掺量来调整自密实混凝土的强度。因此本规程按照以上思路，以自密实混凝土工作性为主导进行配合比设计。

4.3.4 配制强度等级较高的自密实混凝土，胶凝材料中水泥用量相对应更高一些，水胶比更低。

4.4 配合比设计方法

4.4.1 自密实混凝土配合比设计宜按下列步骤进行：首先根据加固截面的最小尺寸、钢筋净距选择粗骨料的粒径，根据粗骨料最大粒径确定混凝土的浆骨比（或单方混凝土浆体体积用量），进而确定浆体体积与骨料体积，根据自密实混凝土强度等级确定水胶比、水泥用量，掺合料种类和掺量，选择砂率并确定骨料用量。加固用的自密实混凝土胶凝材料用量宜在 450 kg/m³ ~ 550 kg/m³ 之间，且不应超过 600 kg/m³，水泥用量不宜大于 500kg/m³。矿物掺合料掺量宜在 20% ~ 40% 之间。

本规程提供的步骤是根据 4.3 配合比设计原则提出的。体现了以工作性为切入点进行自密实混凝土配合比设计的方法。

加固用的自密实混凝土其特点是：粗骨料最大粒径一般在 25mm 以内，对工作性尤其是穿越钢筋的能力要求高，这一点要求浆体对骨料有良好的包裹与携带能力，因此决定了浆体材料用量的大致范围。但是应避免过量使用胶凝材料的问题。

自密实混凝土中较大的胶凝材料用量是出于工作性，而不是强度的要求，水泥用量高，不仅不利于节约，也不利于自密实混凝土的流动性和体积稳定性，应在满足强度的前提下

尽量降低水泥用量。

然而自密实混凝土水泥用量往往比同强度的普通混凝土略高，因为水泥在胶凝材料中起了水化交联形成网络包裹其他颗粒的作用。当胶凝材料中水泥用量过低时，有可能导致强度离散性大，或者使得混凝土抗拉强度比普通混凝土有较为明显的降低。因此矿物掺合料掺量不宜大于 50%。

4.4.2 在砂率相对固定的情况下，达到自密实工作性的浆骨比主要与粗骨料有关。应优选粒形饱满、级配合理、空隙率低的粗骨料，当粗骨料选定之后，浆骨比主要与最大粗骨料粒径有关。可以根据粗骨料最大粒径选择自密实混凝土的浆骨比。一旦浆骨比确定下来，混凝土中浆体体积和骨料体积就可以确定了。

表中给出的浆骨比是经验值，为了使得自密实混凝土有更好的体积稳定性，应尽量降低浆骨比。在选择时可以先选择中间值，试配时若工作性较好，可以适当降低浆骨比再试配，直到临界浆骨比。

4.4.3 优质粉煤灰用于自密实混凝土配制，不仅能替代水泥，而且能降低用水量，并提高自密实混凝土的流动性。因此当混凝土强度较高时，宜掺加需水量比小于 1 的粉煤灰，以降低水胶比，提高强度，保证工作性。粉煤灰有利于降低混凝土的自生收缩，当加固混凝土体积较大时，可以选取较高掺量的粉煤灰。但是当气温较低时，大掺量粉煤灰混凝土凝结缓慢，日平均气温低于 10℃ 时，会出现凝结时间超过 1d 的现象，为了避免异常凝结，可以适当降低粉煤灰掺量。

矿渣对自密实混凝土的工作性没有贡献，对强度的作用与水泥类似。单掺矿渣时，往往难以达到自密实的工作性要求，因此需要与粉煤灰复掺使用。

本课题组的研究表明，矿渣等量替代水泥使得混凝土自生收缩有较大幅度的增大，干燥收缩减小。

硅灰能显著提高混凝土强度，但是增大用水量，降低混凝土的工作性。较大的硅灰掺量不仅不经济，更不利于自密实混凝土的工作性，而且在很大程度上增大混凝土的自生收缩。因此应对其掺量进行限制。

4.4.4 当原材料比例确定以后，高效减水剂掺量成为决定工作性的最后因素。在试配时可以采取分次加入外加剂的方法，直到混凝土的工作性达到自密实混凝土的要求为止。

4.4.5 自密实混凝土的水胶比变化范围一般在 0.26~0.36 之间。一般认为，水泥完全水化的水灰比在 0.42 左右。当水灰比进一步降低时，不能水化的水泥其实充当了填充材料的作用，这部分水泥可以由掺合料替代，并不造成混凝土强度的损失。但当掺合料掺量较大时，其所替代的水泥有可能是本该水化的那部分。因此水胶比不仅与强度有关，而且与事先选定的粉煤灰掺量有关。

矿渣等量替代水泥时，其对工作性和强度的作用，可以视同等量的水泥。因此表格中并未将矿渣掺量作为参数。

4.4.7 自密实混凝土的砂率变化范围不大，一般在 45%~50%。与胶凝材料相比，砂率对体积稳定性的影响较小。因此事先确定较低的浆骨比，然后再通过砂率进一步调整自密实混凝土的工作性。

4.5 配合比的试配、调整与确定

4.5.1 本条提及的搅拌方法的内涵主要包括搅拌方式、投料方式和搅拌时间等。

4.5.2 本条规范了试配过程中试件成型的基本要求。

4.5.3 如果搅拌量太小,由于混凝土拌合物浆体粘锅因素影响和体量不足等原因,拌合物的代表性不足。

4.5.4 在试配过程中,首先是试拌,调整混凝土拌合物。在试拌调整过程中,在计算配合比的基础上,尽量保持水胶比不变,采用适当的胶凝材料用量,通过调整外加剂用量和砂率,使混凝土拌合物坍落度和工作性等性能满足施工要求,提出试拌配合比。

4.5.5 给出了依照经验调整自密实混凝土配合比以达到自密实工作性的方法。

4.5.6 调整好混凝土拌合物并形成试拌配合比后,即开始混凝土强度试验。无论是计算配合比还是试拌配合比,都不能保证混凝土配制强度是否满足要求,混凝土强度试验的目的是通过三个不同水胶比的配合比的比较,取得能够满足配制强度要求的、胶凝材料用量经济合理的配合比。由于混凝土强度试验是在混凝土拌合物调整适宜后进行,所以强度试验采用三个不同水胶比的配合比的混凝土拌合物性能应维持不变,即维持用水量不变,增加和减少胶凝材料用量,并相应减少和增加砂率,外加剂掺量也做减少和增加的微调。

4.5.7 混凝土配合比是指每立方米混凝土中各种材料的用量。在配合比计算、混凝土试配和配合比调整过程中,每立方米混凝土的各种材料混成的混凝土可能不足或超过 1 立方米,即通常所说的亏方或盈方,通过配合比校正,可使依据配合比计算的混凝土生产方量更为准确。配合比的校正是必不可少的,尤其对于材料较为复杂的自密实混凝土更加必要。未经调整的配合比往往会导致较大的误差。

4.5.8 在确定设计配合比前,对混凝土氯离子含量和耐久性能的试验验证是非常必要的。

4.5.9 备用的混凝土配合比在启用时,即便是条件类同,进行配合比验证试验是不可省略的。

5 自密实混凝土的生产与施工

5.1 一般规定

5.1.1 ~ 5.1.5 自密实混凝土的工程质量与生产和施工质量密切相关。生产与施工中的各种因素对自密实混凝土的质量影响都很敏感,因此自密实混凝土生产和施工的规范化对确保其工程质量至关重要。

由于自密实混凝土是一种新型的建筑材料,生产与施工单位的技术人员往往对自密实混凝土的技术要点了解不够,因此特别需要在自密实混凝土结构施工前,有关技术人员应事先熟悉自密实混凝土的相关技术要求,并在自密实混凝土的生产与施工中严格执行规程的规定。

5.2 自密实混凝土的生产

5.2.1 由于自密实混凝土原材料种类多,拌合物粘性较大,因此应优先使用剪切力大的强制式搅拌机,以节约拌制时间,使拌合物充分搅拌均匀。

目前现拌混凝土使用自落式搅拌机比较普遍,已有的工程实践表明,使用自落式搅拌机,适当延长搅拌时间,也可以生产出质量合格的自密实混凝土。因此,对于结构加固等混凝土用量较少的工程,在其它条件许可的情况下,可以使用自落式搅拌机。

5.2.2 计量

1. 试验表明,自密实混凝土的工作性对材料的计量精度比较敏感,计量精度偏差较大时,将严重影响自密实混凝土的工作性。因此本节规定的计量精度要求比普通混凝土严格。在生产自密实混凝土时,应比普通混凝土更重视材料的计量工作。尤其要注意校核现场搅拌混凝土的材料计量精度。

2. 由于自密实混凝土的水胶比低,高效减水剂用量较大,用水量的少量变化就会对其强度和工作性产生显著影响。因此,在生产过程中应对骨料含水率进行严格监控。当骨料露天堆放时,应根据外界气候的变化,及时测定骨料的含水率,并调整施工配合比。

3. 目前工地上常用的搅拌机的抽水计量设备常常无法满足自密实混凝土需要的计量精度,因此,在生产中应注意校核。

5.2.4 搅拌

1. 在搅拌自密实混凝土时,即使搅拌设备上装有先进的含水率测定及控制设施,操作人员仍应通过搅拌机观测口目测混凝土和易性情况,在其稠度发生可见波动时,及时加以调整;同时,搅拌第一盘自密实混凝土时,可以留 10%左右的水,根据在搅拌机观察口目测的混凝土和易性情况,决定最后的用水量,但用水量不应超过配合比的设计值。必要时可适当添加高效减水剂,严禁在拌合物出机后加水。

2. 自密实混凝土中掺入的外加剂和粉煤灰等活性细掺料在混凝土材料中的均匀性,对保证自密实混凝土强度和工作性等具有重要作用,因此在生产中应控制好混凝土搅拌时间。

3. 由于自密实混凝土质量对各种因素的影响较为敏感,因此应特别重视自密实混凝土

生产中的开盘鉴定，并根据开盘鉴定结果及时调整配合比。

5.3 自密实混凝土的运输

5.3.1 采用搅拌车长距离运送自密实混凝土拌合物，是为了防止自密实混凝土在运输过程中发生分层离析现象，确保自密实混凝土的质量。另外，搅拌车筒内积水、积浆不仅使自密实混凝土强度降低，而且影响其工作性。

5.3.2 由于自密实混凝土在浇筑的过程中没有振捣，仅靠自重成型，因此必须保证其在入模之前，仍具有优异的工作性，否则将影响混凝土工程质量，甚至造成严重的工程事故。缩短自密实混凝土从出机到入模的时间非常必要，在施工中务必作好施工组织工作，保证运输、施工过程的连续。

5.3.3 为防止混凝土在运输过程中分层离析，必须保持运输车滚筒慢速转动。

5.3.4 混凝土在运输过程或现场停置时间太长，将引起自密实混凝土的坍落度损失，使其工作性不满足工程要求。因此，对混凝土运输时间较长的工程，外加剂可采用后掺法，但必须根据试验结果确定其掺量，并保证混凝土拌合物搅拌均匀。

5.4 自密实混凝土的浇筑

5.4.2 由于自密实混凝土流动性较大，其对模板的侧压力比普通混凝土大，在模板设计时应充分考虑这一点，尤其是高度较大的竖向构件。对模板的侧压力应根据混凝土比重，按照流体力学的方法进行计算，并以此设计模板的承载力。

5.4.3 在自密实混凝土的生产、施工过程中，都应该有专人对自密实混凝土的质量进行控制。由于自密实混凝土是一种新型材料，施工单位的技术人员可能对自密实混凝土缺乏感性认识，同时自密实混凝土对各种因素变化都比较敏感，因此最好由经验丰富的配合比设计人员配合生产、施工单位作好自密实混凝土的质量控制工作，在确认混凝土工作性满足要求后进行浇筑。

5.4.4~5.4.6 为防止自密实混凝土在垂直浇筑中因高度过大产生离析现象，或被钢筋打散使混凝土不连续，应对自密实混凝土的自由下落高度进行限制。

当自密实混凝土的垂直浇筑高度过大时，可采用导管法，即用直通到底部的竖管浇筑自密实混凝土，在向上提管的过程中，管口始终埋在已经浇筑的自密实混凝土内部，也可采用串筒、溜槽等常规的施工方法。

自密实混凝土在水平方向的流动性是有限的，因此当混凝土工作面较大时，必须等距离地设置多个浇注点同时浇筑。在浇筑的过程中，使各个浇注口的进度一致，以保证浇注面的水平和模板受力均匀。

5.4.7 在加固工程中，加固截面尺寸往往很小，混凝土浇筑量少，同时混凝土与模板的接触面大、钢筋密集，因此，为了保证浇筑质量，自密实混凝土浇注口之间的间距不宜太大。

另外，加固工程往往工作面较小，采用人工施工，也容易影响施工进度。因此应事先作好施工组织工作，确保自密实混凝土在入模之前保持其工作性。

5.5 自密实混凝土的养护

5.5.1 ~ 5.5.4 由于自密实混凝土与普通混凝土相比，其表面泌水量少，甚至没有泌水，为了减少混凝土的水分散失和塑性开裂，应加强养护。混凝土的养护包括保持湿度与温度两个方面。在养护的过程中，除了保持混凝土的湿度外，应避免外部环境和混凝土内部的温差过大。

为减少自密实混凝土的非荷载裂缝，必须从混凝土入模开始就进行湿养护，采取喷洒养护剂、薄膜覆盖等措施。

由于加入大量矿物掺和料，自密实混凝土的强度发展规律与普通混凝土有所不同，表现在早期强度较低，后期强度增长率较大。应适当延长拆模时间；为了保证其后期强度增长过程中有足够的水分，应适当延长养护时间，因此本规程规定自密实混凝土的养护时间不低于14d。

6 自密实混凝土质量检验评定

6.1 一般规定

6.1.1 ~ 6.1.2 自密实混凝土生产单位及工程业主、监理、施工单位技术人员应对自密实混凝土技术性能要求有正确的认识。目前,采用高效减水剂配制出大流动性的混凝土并不难,但只有所配制的大流动性混凝土同时具有优异的抵抗分离能力、穿越钢筋能力,施工中才能保证其在自重作用下自密实成型。离析和缺乏稳定的混凝土不仅难以自密实成型,而且会在工程使用中造成困难甚至事故。

为了降低工程造价,针对具体工程的配筋情况,可提出不同的工作性能要求。

为了保证自密实混凝土工程的质量,除了控制好自密实混凝土的工作性外,必须使其强度符合工程要求,同时保证其耐久性符合有关标准的要求。

6.2 新拌自密实混凝土的质量控制

6.2.1 新拌自密实混凝土工作性的检验方法

目前,国内外对自密实混凝土工作性的检验还没有统一的方法。研究与应用表明,采用坍落度筒、带钢筋网片的 L 型流动仪、J 环、稳定筛测定自密实混凝土的工作性,可以较好地反映自密实混凝土的流动性、穿越钢筋能力、保水性和粘聚性。

采用坍落度筒法要测试以下内容:

坍落度;

坍落扩展度;

观察混凝土的边缘是否有水泥浆或水份逸出,以此判断自密实混凝土的抗离析能力;

观察混凝土是否板结。

只有当自密实混凝土的坍落度、坍落扩展度足够大,中边差足够小,混凝土外缘没有水泥浆或水分逸出,并且混凝土没有板结时,才说明所配制的自密实混凝土具有足够的流动性,和良好的施工性能,且材料比较均匀稳定。

采用 L 型流动仪法主要检测自密实混凝土穿越钢筋的能力,观察混凝土通过钢筋网片流出的情况。

只有当自密实混凝土穿过钢筋网片从竖箱向横梁流平,才说明所配制的自密实混凝土具有足够的穿越密集钢筋的能力。

采用稳定筛法主要检测自密实混凝土抵抗分离能力的情况。

J 环用于检测自密实混凝土的流动性、穿越钢筋能力。在穿越钢筋能力方面,J 环比 L 型仪更宽松,适用于检测自密实混凝土在平面内穿越钢筋的能力。

6.2.2 自密实混凝土工作性检验方法应根据工程具体情况确定。单构件加固体积较小时,以避免流动性和穿越钢筋能力不足为主;单构件加固体积较大,尤其是竖向尺寸较大时,以避免流动性不足和离析、泌水问题为主。

6.3 自密实混凝土强度的质量控制

6.3.1 由于自密实混凝土仅靠自重成型，试块尺寸过小则其强度离散性较大，且其尺寸效应的强度换算系数不明确，故立方体抗压强度试块尺寸宜采用 150mm×150mm×150mm 的立方体试块。

6.4 自密实混凝土耐久性的质量控制

6.4.1 硬化后的自密实混凝土与普通混凝土没有本质上的差异，其耐久性控制方法可参照普通混凝土相关方法执行

6.4.2 由于自密实混凝土胶凝材料用量较大、水胶比较低的特点，自密实混凝土的自生收缩值较普通混凝土大，占总收缩的比例亦较普通混凝土大。所以当结构对自密实混凝土的收缩要求较高时，宜同时检测自密实混凝土的自生收缩值与干燥收缩值。混凝土的自生收缩主要发生在早龄期，早龄期混凝土的自生收缩用接触式方法无法进行准确测量，应采用非接触式的方法进行测量。

6.4.3 目前，对于混凝土开裂性能的测试方法可分棱柱体法、环式限制收缩试验方法和平板式限制收缩试验方法。菱柱体法测试结果较为准确，但该实验仪器比较复杂而且造价高，不能对大量试件进行同步对比试验，同时只适用于实验室研究，难以作为混凝土生产和施工中质量检验的方法。传统的圆环法用于混凝土开裂性能测试存在裂缝出现的时间长且裂缝出现位置的随机性，混凝土刚刚出现裂缝时其裂缝非常细微，观测难度大。平板式限制收缩开裂试验方法主要两种：一种是四边约束平板，该方法用于测试混凝土的开裂性能时，构件裂缝形态为龟裂，裂缝的宽度与长度发展慢，特别是混凝土的裂缝出现时间很不好确定，且当混凝土掺有粉煤灰并出现少量泌水时使得混凝土表面浮着一层灰，很难确定到底是表面水分蒸发干燥引起的粉煤灰起皮还是混凝土开裂。总之这种方法观测难度大，工作量大，误差相对也大。另一种是采用弯起钢板诱导混凝土开裂的约束平板试验方法，可用于研究混凝土和砂浆塑性收缩和干燥收缩引起的裂缝，该方法主要优点是能够诱导裂缝的产生。该方法容易产生不均匀沉降影响测试的准确性。

福州大学提出一种不影响混凝土抗裂性能的诱导开裂法，即在带边框的矩形平板中加隔板。其中边框必须具有足够的刚度，以避免由于水泥基材料的收缩所产生的力引起边框变形，影响试验结果的准确性；隔板必须具有足够刚度、光滑平整并通过四个螺栓固定于平板的边框上，以免由于隔板的晃动而影响试验结果的可靠性；隔板与混凝土接触端应为圆弧型尖头，以免由于应力集中而影响试验结果的可靠性。由于加入隔板使该断面的面积小于其他断面，使该断面的水泥基材料所受的应力大于其他断面，从而引导、加速裂缝的发展，同时又不影响其水泥基材料浇注的均匀性即各个位置水泥基材料厚度及其骨料分布均匀。通过隔板的引导，平板的裂缝出现的时间早、裂缝位置相对固定、裂缝条数相对确定、裂缝宽度大且裂缝的发展速度快，缩短了观测时间，便于观测水泥基材料的初裂时间、裂缝宽度、长度，而且误差小，快速方便。从而在不改变水泥基材料的均匀性、保证测试结果具有足够精度的情况下，有效地缩短了水泥基材料抗裂性能的测试时间、避免了裂缝出现的随机性。解决了已有混凝土开裂性能测试方法所存在的一些缺陷对试验结果可靠性的影响，如弯起钢板约束

平板试验装置的混凝土材料不均匀性；四边约束平板法的混凝土裂缝出现位置的随机性、裂缝发展慢且细不易于观测；圆环法的裂缝出现位置的随机性和裂缝出现时间迟，裂缝难于观测等缺点。

通过 ABAQUS 6.4 计算分析各种试件的应力分布情况。模拟条件为成熟的混凝土，温度从 30 降到 20，采用四边形减缩单元计算各试件的温度应力分布情况。混凝土弹性模量为 38GPa，泊松比为 0.25，膨胀系数为 $9.8 \times 10^{-6}/$ 。单元划分和计算结果如图 6.4.3-1 所示。

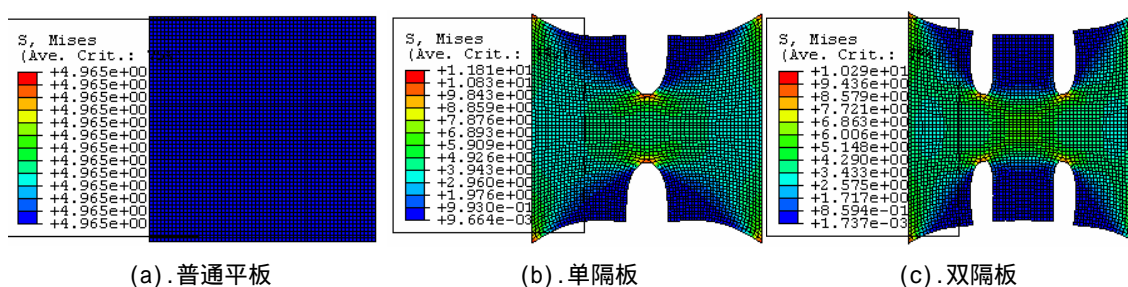


图 6.4.3-1 计算分析结果

从图 6.4.3-1 可以看出，传统的平板法在整个板中的应力是均匀分布，所以在试验的过程中，混凝土的裂缝是随机出现。而诱导开裂法构件在隔板尖端处应力较大。诱导开裂法构件在缺口处的应力较传统平板试件明显提高，单隔板模型缺口处应力最大值为 11.05MPa，较传统平板应力 4.97MPa 提高 122%，而双隔板模型缺口处应力最大值为 9.13MPa，较单隔板模型最大应力低 17%，较传统平板应力提高 84%。由此可见诱导开裂法可以有效的诱导混凝土开裂，提早裂缝出现的时间，提高裂缝发展速度，缩短观测时间，降低观测难度和试验工作量，降低试验误差，提高试验结果的可靠性，而且单隔板模型的开裂敏感性高于双隔板模型。

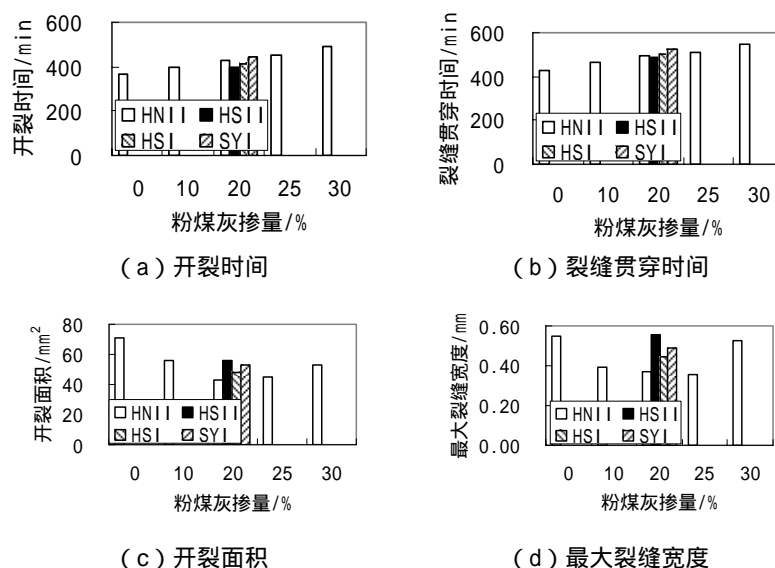


图 6.4.3-2 C30 混凝土开裂性能测试结果

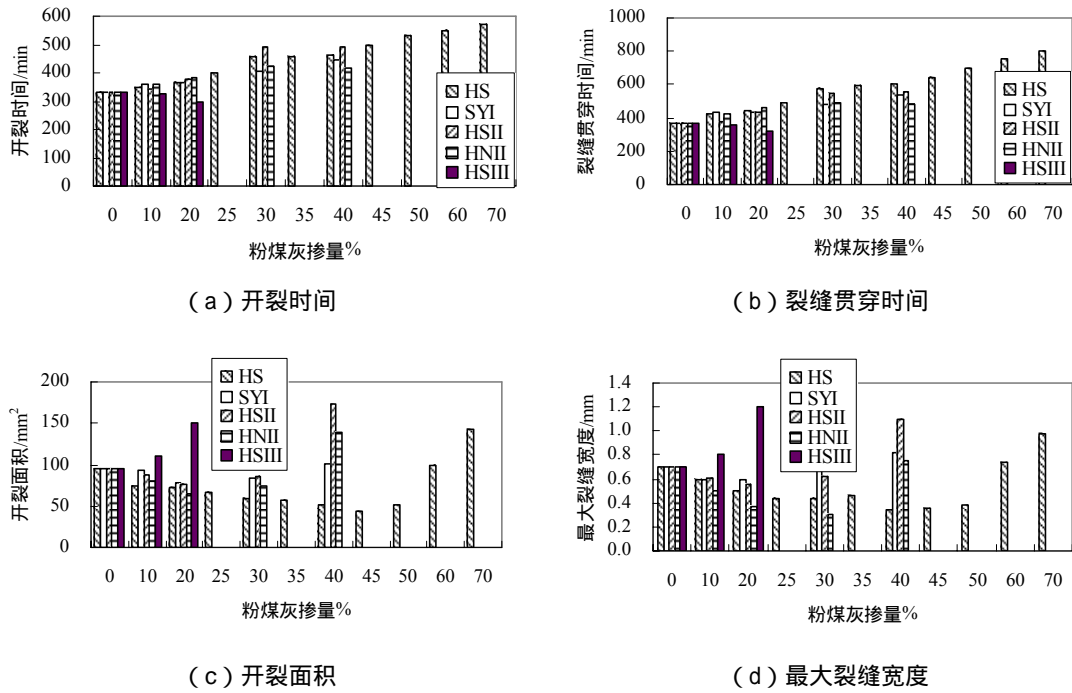


图 6.4.3-3 C40 混凝土开裂性能测试结果

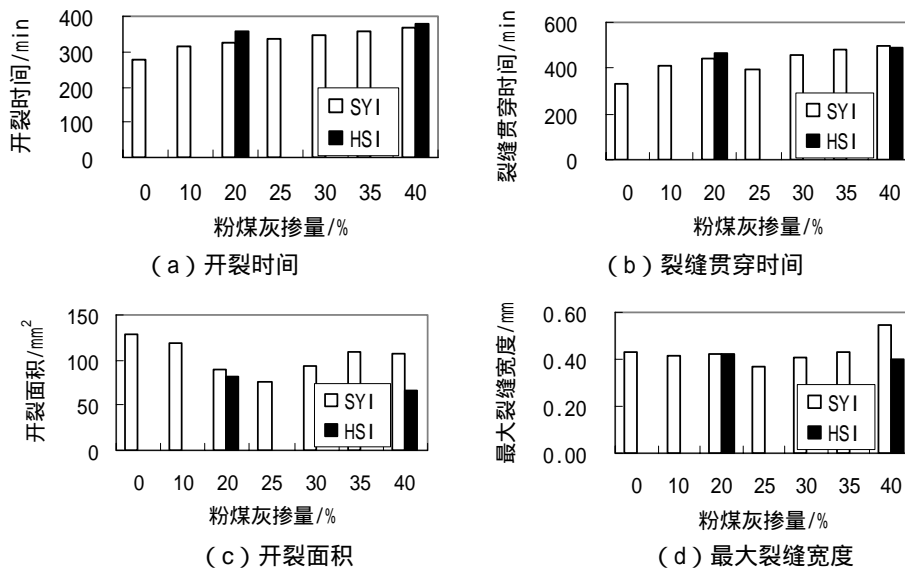


图 6.4.3-4 C50 混凝土开裂性能测试结果

以搅拌站提供的优化配合比为基准，进行粉煤灰品质与掺量对混凝土开裂性能的影响，其中 C30 与 C40 混凝土采用单隔板试件，C50 混凝土采用双隔板试件，测试结果见图 6.4.3-2-图 6.4.3-4。从测试结果可以看出混凝土的开裂时间随着粉煤灰掺量的增大与强度等级的降低而推迟，在 250min~600min 之间。C30 混凝土的开裂面积在 40 mm²~75mm² 之间；C40 混凝土的开裂面积在 40 mm²~150mm² 之间，C50 混凝土的开裂面积在 60 mm²~130mm² 之间。最大裂缝宽度随粉煤灰掺量的变化规律总体上与开裂面积基本一致，但其随机性相对大于开裂面积，在 0.3mm~1.2mm 之间。由于诱导开裂法应用于混凝土的抗裂性测试其评价指标为

开裂面积、最大裂缝宽度、开裂时间、裂缝贯穿时间等。尚未凝结的混凝土具有可塑性，混凝土收缩不会产生收缩应力。混凝土在凝结之后，失去可塑性，逐步致密具有强度，混凝土收缩在约束条件下会产生收缩应力，当收缩应力大于其抗拉强度就会导致混凝土开裂。混凝土的开裂面积反映了混凝土出现裂缝后其收缩与抵抗变形能力的平衡度，如果混凝土的收缩大而抵抗变形的能力小则其开裂面积就大，其能综合反映混凝土的抗裂性能为主要评价指标。混凝土的最大裂缝宽度的随机性较大，即在混凝土的开裂面积较低时，有可能局部宽度较大。以上试验与已有的试验研究均表明：混凝土的开裂时间与其初凝时间密切相关，也就是说混凝土裂缝出现的时间与其凝结过程有关。而混凝土的凝结过程与外加剂、胶结料和水胶比等密切相关，如混凝土的初凝时间随着粉煤灰掺量的提高而增长，相应其裂缝出现的时间就迟。裂缝贯穿时间与其开裂时间密切相关。以上的试验研究表明，该方法能有效评价混凝土的抗裂性能，应用该方法评价混凝土的抗裂性能应以混凝土的开裂面积为主要指标，以最大裂缝宽度和开裂时间和裂缝贯穿时间为辅助指标

传统的圆环法用于混凝土开裂性能测试存在裂缝出现的时间长且裂缝出现位置的随机性，混凝土刚刚出现裂缝时其裂缝非常细微，观测难度大。在内钢环内侧贴上应变片，通过采集内钢环的应变发展规律来监测混凝土环的开裂时间，实现了自动化数据采集。该方法应用于混凝土抗裂性能的试验研究，环境条件与混凝土入模温度对试验结果影响显著。

项目组通过对环境平均温度分别是 18.33 和 21.37 （相差 3.04 ），进行三组自密实混凝土抗裂性能对比试验研究，其开裂龄期从 76 d、47.1 d、67.1 d 降到 8.4 d、6.6 d、8.4 d，较高温度下开裂龄期大大缩短，其影响超过任何配合比参数的影响。但是尽管温度不同，不同配合比的试件的开裂顺序仍是一致的。

7 自密实混凝土加固结构工程的施工

7.1 一般规定

7.1.1 本条明确了本章的适用范围，但需要说明的是：对仅在受压区加厚的受弯构件而言，由于其设计、施工方法与叠合式受弯构件甚为相近，因而后者的经验也往往被混凝土构件增大截面加固工程所借鉴。这从原则上说虽是适宜的，然而应指出的是：混凝土增大截面有别于叠合构件；前者是二次设计、二次施工；而后者是一次设计、两次施工。因此，设计人员对前者的计算和构造，必然会作出一些专门考虑，而这些考虑需要通过正确的施工才能得到正确的体现。为此，在技术交底时，施工单位应着重了解设计人员在这方面有哪些专门要求，以便在做施工技术方案时考虑周全。

7.1.2 混凝土构件增大截面工程的施工程序与一般现浇混凝土相比增加了清理、修整原结构、构件，原钢筋与新增钢筋的连接以及原构件界面处理等工序。这些工序对保证新增截面与原截面的共同工作至关重要，但对习惯于新建工程的施工人员来说，却最容易忽视。因此，在施工技术方案的制订上，应着重强调对这三个工序的监督和施工质量检查。

7.1.3 考虑到本条所列的 5 个项目，在混凝土浇筑后无法检查其施工质量，故必须在浇筑混凝土前，按隐蔽工程的要求进行检查、验收。

7.1.4 为了避免国家现行标准规范之间的不必要重复与矛盾，本规范明确规定混凝土构件新增截面的施工，应分别按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 及有关规程执行；后者指的是中国工程建设标准化协会标准《自密性混凝土应用技术规程》CECS 203 的施工规定执行。

7.2 界面处理

7.2.1~ 7.2.3 界面处理的质量直接关系到增大截面部分与原构件之间的界面能否结合良好，加固后的结构、构件是否具有可靠的共同工作性能。故在结构加固工程中不能有任何疏漏和闪失。为此，本条就界面处理的最基本一环——原构件表面的糙化（打毛）处理工艺作出具体规定。同时，应指出的是：不论是否采用结构界面胶（剂），均不得省去本工序。

同时，国内外的试验研究也表明新老混凝土界面处理对于增大截面法加固工程的质量至关重要。

1. 在福州大学所进行的二次受力下自密实混凝土加固压弯构件试验研究过程中发现，老混凝土表面没有经过很好凿毛处理的构件，会发生新老混凝土界面脱开的破坏，新混凝土强度不能被充分利用。要使新老混凝土能够很好的共同工作，老混凝土表面处理要有一定粗糙度。

2. 为了研究界面对新老混凝土粘结性能的影响，福州大学制作了 10 组共 30 个推出式剪切试件研究对不同界面处理方式与混凝土强度等级对新老混凝土界面粘结性能的影响。主要影响因素：新浇自密实混凝土强度的影响，采用了 C30~C45 这 4 种强度；不同粗糙度的影响，分为自然光滑面、粗糙面 和粗糙面 三种情况，老混凝土表面粗糙度用灌砂法

测量平均灌砂深度，分别为 0、2.0mm 与 3.2mm；界面剂的影响，除了不涂刷界面剂的情况，还考虑在老混凝土粗糙处理后的表面涂刷同水胶比水泥净浆、粉煤灰水泥浆和掺 0.75% 纳米氧化硅的粉煤灰水泥浆这三种界面剂；并制作了 C40 强度的普通混凝土对比试件。试验中试件未特别注明的均为 C40 混凝土强度、2.0mm 粗糙度且不涂刷任何界面剂，试验结果见图 7.2.1-1。

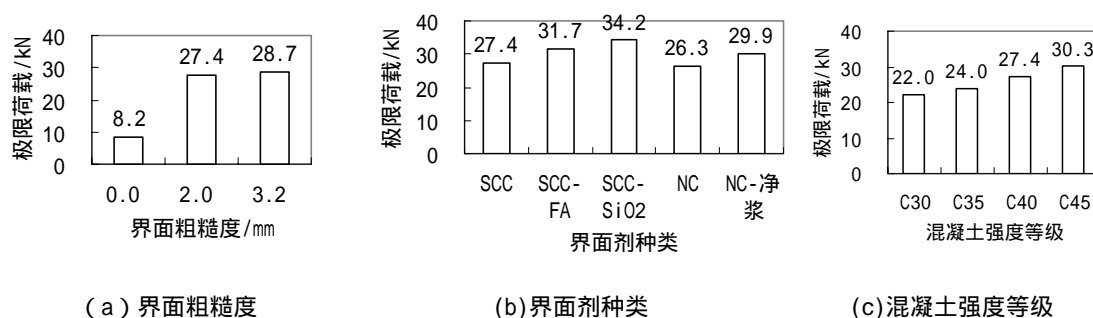


图 7.2.1-1 界面处理方式对自密实混凝土与老混凝土粘结强度的影响

试验研究表明：

1) 通过凿毛处理可以有效提高自密实混凝土与老混凝土界面的粘结强度，老混凝土表面的粗糙度为 2.0mm 与 3.2mm 分别是光滑面的 3.33 倍与 3.48 倍。

2) 自密实混凝土与老混凝土界面的粘结强度稍高于同强度等级的普通混凝土。

3) 界面剂对自密实混凝土与老混凝土界面的粘结强度提高幅值远较凿毛处理低，水泥净浆界面剂、粉煤灰水泥浆界面剂、0.75% 纳米氧化硅的粉煤灰水泥浆界面剂分别较相应的基准试件提高 14%、15% 和 25%。

4) 随着自密实混凝土强度等级的提高新老混凝土界面的粘结强度有所提高，但增幅不大。强度等级为 C45 的自密实混凝土粘结强度较强度等级为 C30 的自密实混凝土提高 38%。

3. 为了研究刻槽密度对自密实混凝土与老混凝土界面粘结性能的影响，福州大学通过 7 组 35 个粘结面积为 150mm × 300mm 山型试件进行刻槽密度与凿毛对新老混凝土界面粘结性能的影响，并与植筋构件（4-8）进行对比分析，试验结果见图 7.2.1-2。

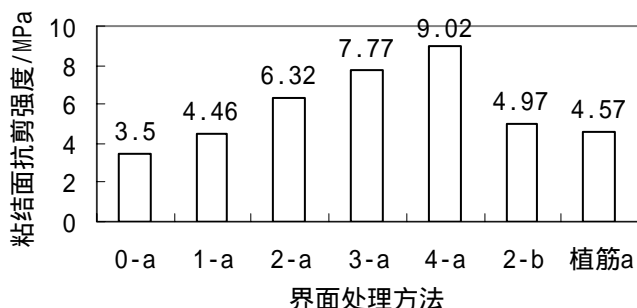


图 7.2.1-2 山型试件试验结果

注：横坐标中 0~4 表示刻槽密度，a 表示凿毛，b 表示未凿毛

试验研究表明：

- (1) 新老混凝土试件均破坏于粘结面处，可见无论是自密实混凝土还是普通混凝土粘结试件，其粘结面都是薄弱环节。
- (2) 新老混凝土界面的粘结抗剪强度随着刻槽密度的增大而增大，刻槽密度 0、1、2、3、4 的粘结抗剪强度分别较前一级提高了 27%、41.7%、22.9%和 16.1%。说明了刻槽密度对新老混凝土粘结面的抗剪强度有一定影响，但过度提高刻槽密度效果并不明显，也不经济。建议在实际工程中刻槽面积不要超过 40%。
- (3) 在刻槽的基础上对界面进行凿毛可进一步提高新老混凝土界面的粘结抗剪强度。刻槽密度为 2 时，凿毛试件的粘结抗剪强度较未凿毛试件高 27%。
- (4) 植筋也可以有效提高新老混凝土界面的粘结抗剪强度，与刻槽密度为 1 的试件基本相当，但植筋试件的破坏延性显著优于刻槽试件。当刻槽密度达到一定值后，刻槽试件的抗剪强度可与植筋试件相近，甚至有明显提高。因此，工程中可用刻槽法替代植筋法，此方法更具的经济性和可操作性，且不会产生耐久性问题。

4. 通过对以上的试验数据进行回归分析，可以得到当原构件界面的粗糙度在 2.0~2.4mm，自密实混凝土与老混凝土的粘结抗剪强度可按式 (7.2.1) 进行计算

$$\tau = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \tau_p \quad (7.2.1)$$

式中 α_1 ——混凝土强度影响系数，当自密实混凝土强度为 C25、C30 时， $\alpha_1 = 0.42$ ，当强度为 C35、C40 时， $\alpha_1 = 0.40$ ；

α_2 ——界面剂影响系数，当不涂刷界面剂时， $\alpha_2 = 1$ ；涂刷粉煤灰水泥净浆时， $\alpha_2 = 1.34$ ；涂刷掺 0.75% SiO₂ 的粉煤灰水泥浆时， $\alpha_2 = 1.42$ ；

α_3 ——刻槽密度影响系数，当刻槽密度为 1 时， $\alpha_3 = 2.89$ ；当刻槽密度为 2 时， $\alpha_3 = 3.473$ ；当刻槽密度为 3 时， $\alpha_3 = 4.056$ ；当刻槽密度为 4 时， $\alpha_3 = 4.639$ ；

τ_p ——整体混凝土的纯剪强度设计值 (MPa)， $\tau_p = 0.75(f_c f_t)^{0.5}$ ；

5. 国内外的试验研究也表明了，通过凿毛、刻槽、与植筋技术可以有效提高新老混凝土界面的粘结性能，且新老混凝土界面的粘结性能随着老混凝土表面的粗糙度的增大而增大，但当粗糙度达到一定值之后提高粗糙度对提高界面的粘结性能作用不显著。

7.2.4 福州大学通过试验研究表明，当原构件界面的粗糙度在 2.0~2.4mm 且植筋率为 0~0.7% 时，自密实混凝土与老混凝土的粘结抗剪强度可按式 (7.2.4) 进行计算

$$\tau = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \tau_p + 0.89 \rho_v f_y \quad (7.2.4)$$

式中 α_1 ——混凝土强度影响系数，当自密实混凝土强度为 C25、C30 时， $\alpha_1 = 0.42$ ，当强度为 C35、C40 时， $\alpha_1 = 0.40$ ；

α_2 ——界面剂影响系数，当不涂刷界面剂时， $\alpha_2 = 1$ ；涂刷粉煤灰水泥净浆时， $\alpha_2 = 1.34$ ；涂刷掺 0.75% SiO₂ 的粉煤灰水泥浆时， $\alpha_2 = 1.42$ ；

α_3 ——刻槽密度影响系数，当刻槽密度为 1 时， $\alpha_3 = 2.89$ ；当刻槽密度为 2 时， $\alpha_3 = 3.473$ ；当刻槽密度为 3 时， $\alpha_3 = 4.056$ ；当刻槽密度为 4 时， $\alpha_3 = 4.639$ ；

τ_p ——整体混凝土的纯剪强度设计值 (MPa)， $\tau_p = 0.75(f_c f_t)^{0.5}$ ；

ρ_v ——抗剪钢筋植筋率， $\rho_v = A_s / S$ ，其中 A_s 为抗剪钢筋截面面积，S 为粘结面

面积； f_y 为钢筋抗拉强度设计值（MPa）。

7.2.5 对处理完毕的原构件表面清理主要是为了保证新老混凝土之间粘结性能。这是因为原构件表面经机械打毛或凿槽后，虽曾经过一次清洗，但若施工作业人员稍有疏忽，仍有可能遗留一些影响新旧混凝土粘结强度的局部缺陷、损伤或污垢；倘若表面处理后未立即进入涂刷界面胶（剂）的工序，也可能出现新的污垢或其他问题。因此，在喷涂界面剂前尚应进行一次检查，以免给工程留下隐患。

7.2.6 原构件露筋（包括混凝土已有纵向裂缝处的钢筋）部分，应进行除锈和防锈处理。对锈蚀严重的钢筋，尚应会同设计单位进行补筋。至于除锈、补筋后是否还需进行防锈（阻锈）处理，可视实际情况而定。若设计单位认为有必要在补浇混凝土中掺加阻锈剂，则应执行现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 关于不得在新浇混凝土中采用亚硝酸盐类阻锈剂的规定。

7.3 结构加固施工方法

7.3~7.7 钢筋混凝土板、梁、柱，墙体，拱桥加固施工方法根据工程经验总结而成，作为参考。施工单位也可以根据工程具体情况采取适当的施工方法。施工过程中注意避免漏浆、爆模、混凝土不均匀、浇筑不到位等问题。必要的时候，可以用振捣棒靠在模板外侧引起震动，以利于混凝土达到各个复杂的角落，并排出多余的气泡。

8 自密实混凝土加固钢筋混凝土结构设计方法

8.1 设计规定

8.1.1 增大截面加固法，由于它具有工艺简单、使用经验丰富、受力可靠、加固费用低廉等优点，很容易为人们所接受；但它的固有缺点，如湿作业工作量大、养护期长、占用建筑空间较多等，也使得其应用受到限制。调查表明，其工程量主要集中在一般结构的梁、板、柱上，特别是中小城市的加固工程，往往以增大截面法为主。据此，认为这种方法的适用范围以定位在梁、板、柱为宜。

8.1.2 调查表明，在实际工程中虽曾遇到混凝土强度等级低达 C7.5 的梁、柱也在用增大截面法进行加固，但从其加固效果来看，新旧混凝土界面的粘结强度很难得到保证。若采用植入剪切—摩擦筋来改善结合面的粘结抗剪和抗拉能力，也会因基材强度过低而无法提供足够的锚固力，因此，作出了原构件的混凝土强度等级不应低于 C10 的规定，但应注意的是，此规定系根据上世纪 50 年代前期和 60 年代前期的工程质量情况作出的。这两个时期混凝土的特点是：即使强度很低，但截面内外施工质量都较均匀，其表层的抗拉强度 f_{tk} 一般均在 1.5MPa 以上，加固时较容易处理；50 年代后期以及 70 年代以来的混凝土，其施工质量远不如从前。因此，当遇到混凝土不仅强度等级低，而且密实性差，甚至还有蜂窝、空洞等缺陷时，不应直接采用增大截面法进行加固，而应先置换有局部缺陷或密实性太差的混凝土，然后再进行加固。

8.1.3 本规范关于增大截面加固法的构造规定，是以保证原构件与新增部分的结合面能可靠地传力、协同地工作为目的，因此，只要粘结质量合格，便可采用本条的基本假定。

8.1.4 采用增大截面加固法，由于受原构件应力、应变水平的影响，虽然不能简单地按现行设计规范 GB50010 进行计算，但该规范的基本假定具有普遍意义；仍应在加固计算中得到遵守。

8.2 加固受弯构件正截面承载力计算

8.2.1 本条给出了加固设计常用的截面增大形式，但应指出的是，在混凝土受压区增设现浇钢筋混凝土层的做法，主要用于楼板的加固。对梁而言，仅在楼层或屋面允许梁顶面突出时才能使用。因此，一般只能用于某些屋面梁、边梁和独立梁的加固：上部砌有墙体的梁虽然也可采用这种做法，但应考虑拆墙是否方便。

8.2.2 本规程增加了关于混凝土叠合层应按构造要求配置受压钢筋和分布钢筋的规定。其原因是为了提高新增混凝土层的安全性，同时也为了与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 新作出的“应在板的未配筋表面布置温度、收缩钢筋”的规定相协调。因为这一规定很重要，可以大大减少新增混凝土层发生温度、收缩应力引起的裂缝。

8.2.3 就理论分析而言，在截面受拉区增补主筋加固钢筋混凝土构件，其受力特征与加固施工是否卸载有关。当不卸载或部分卸载时，加固后的构件工作属二次受力性质，存在着应变滞后问题：当完全卸载时，加固后的构件工作虽属一次受力，但由于受二次施工的影响，其

截面仍然不如一次施工的新构件。在这种情况下,计算似乎应按不同模式进行。根据福州大学完成的二次受力加固梁试验结果,并结合梁的初始受力水平对加固梁承载力的影响分析,拟合了二次受力的公式(8.2.3-1),并且与国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB50367所给的公式相对比,对 α_s 的取值进行了定义。

按公式(8.2.3-1)对福州大学完成的8根二次受力加固梁进行计算,将试验结果与公式计算值列于表8.2.1中,见表8.2.1。

表 8.2.1 加固梁计算值与实验值对比表

构件编号	实测极限荷载 M_u /kN·m	理论计算极限荷载	
		M'_u /kN·m	M'_u/M_u
B1	122	116.39	0.954
B2	108	116.39	1.078
C1	115	118.12	1.027
C2	119	119.85	1.007
D1	112	116.39	1.039
D2	110	116.39	1.058
D3	114	116.39	1.021

从表 8.2.1 可知,实验值与计算值吻合的较好。按公式(8.3.2-1)计算的极限弯矩值与实验值相比,平均误差为 1.55%,变异系数为 0.0132。

8.2.4 由于加固后的受弯构件正截面承载力可以近似地按照一次受力构件计算,且试验也验证了新增主筋一般能够屈服,因而可写出其相对界限受压区高度 ζ_b 值如(8.2.4-1)式所示。

8.3 加固受弯构件斜截面承载力计算

8.3.1 对受剪截面限制条件的规定与现行设计规范 GB50010-2010 完全一致,而从增大截面构件的荷载试验过程来看,增大截面还有助于减缓斜裂缝宽度的发展,特别是围套法更为有利。因此引用 GB50010 的规定作为加固构件的受剪截面限制条件仍然是合适的。

8.3.2 本条的计算规定特点主要有三点:一是将新、旧混凝土的斜截面受剪承载力分开计算,并给出了具体公式;二是新、旧混凝土的抗拉强度设计值分别按原规范和现行设计规范的规定值取用;三是根据福州大学完成的二次受力加固梁试验结果,并结合梁的初始受力水平对加固梁抗剪承载力的影响分析,重新确定了混凝土强度利用系数的计算。根据试验结果,并结合梁的初始受力水平对加固梁承载力的影响分析,拟合了二次受力的公式(8.3.3-1),并且与国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB50367所给的公式相对比,对 α_{vs} 的取值进行了定义。表 8.3.2 给出了试验梁实测斜截面承载力与本文实用计算公式,以及有限元计算所得结果的比较。实用公式(8.3.2-2)计算结果与试验结果吻合较好,误差基本上都在 5%以内,均值为-3.9%,方差为 0.00085,可供加固设计时参考。

表 8.3.2 加固梁极限剪力计算值与试验值比较

编号	实测结果 V_u /kN	理论计算极限荷载	
		计算值 V'_u /kN	误差
RC3	280	272.16	-2.8%
RC4	275	261.68	-4.8%
RC5	237.5	241	1.5%
RC6	285	271.5	-4.7%
RC7	290	281.7	-2.8%
RC8	275	262.53	-4.5%
RC9	270	262.09	-2.9%

8.4 加固受压构件正截面承载力计算

8.4.1 根据福州大学完成的二次受力加固柱试验结果，并结合梁的初始受力水平对加固梁承载力的影响分析，拟合了二次受力的公式（8.5.1-1），将试验结果与公式计算值列于表 8.3.1 中，见表 8.3.1。

表 8.4.1 加固柱计算值与实验值对比表

构件编号	实测极限荷载 N_u /kN	理论计算极限荷载	
		N'_u /kN	N'_u/N_u
YJGZ	4367	3910	0.895
JGZ-1	3872	3479	0.899
JGZ	4155	3771	0.908
JGZ	3730	3304	0.886

实测值较理论值偏大，柱子作为结构的重要部位，其重要性优于梁，因此有一定的安全储备是比较合理的。

8.4.2 在(8.5.2-1)式中之所以未出现受压区混凝土强度利用系数 α_c 值，是因为该值已隐含在 f_{cc} 值中。

8.4.3 本规程修订组所做的加固偏压柱的电算分析和验证性试验结果表明，对被加固结构构件而言，现行设计规范 GB50010 规定的考虑二阶弯矩影响的偏心距增大系数 η 值，还需要引入修正系数 ψ_η 值才能与加固构件计算分析和试验结论相吻合，也才能保证受力的安全。为此，给出了 ψ_η 值的取值规定。

8.5 加固受压构件斜截面承载力计算

8.5.1 计算公式包含了剪跨比、初始轴向力、配箍率和混凝土强度等级的影响，其中箍筋抗力项含有剪跨比的影响，这主要是考虑随剪跨比的增加，箍筋应变减小，其对构件承载能力的贡献也相应的降低。

本公式针对柱双侧增大截面加固，对于围套加固，新增自密实混凝土横截面按实际截面套用公式。

表 8.5.1 加固柱计算值与实验值对比表

构件编号	实测极限荷载 V_s /kN	理论计算极限荷载	
		V_j /kN	V_j/V_s
JGZ-S1	121	123	0.98
JGZ-S2	130	138	0.93
JGZ-S3	173	165	1.04
JGZ-S4	116	119	0.972
JGZ-S5	126.9	135	0.939
JGZ-S6	176	162	1.08
JGZ-S7	155	150	1.03
JGZ-S8	172	176	0.97

根据式(8.5.1)计算得到加固柱承载力见表 8.5.1，试验值与计算值之比的均值为 0.96，误差基本上都在 5% 以内。可见，计算值与试验结果比较符合。该公式可供加固设计时参考。

8.6 加固框架节点承载力计算

8.6.1 新增混凝土强度利用系数 α_c 与新增箍筋强度利用系数 α_s 反应了节点在初始力作用下对节点承载力的影响，加固构件截面组合系数 φ 主要根据加固界面的处理方式确定，根据福州大学完成的 5 个考虑界面处理方式参数加固框架节点的试验数据，建议当仅采用凿毛或刻槽处理时， φ 不宜大于 0.7，而当采用刻槽加凿毛或植筋加凿毛作为界面处理方式时， φ 不宜大于 0.98。

同时按式(8.6.1)对东南大学完成的 3 个框架节点试验数据进行计算并与试验值进行对比，列于表 8.6.1 中：

表 8.6.1 自密实混凝土加固节点抗剪承载力计算值与实测值比较

试件编号	试验值/ kN	计算值/ kN	计算值/试验值
WJG	456.77	425.24	0.931
JG-1	739.57	640.60	0.866
JG-2	720.17	688.20	0.956

按式(8.6.1)计算所得理论值与试验值的比较结果如表 8.6.1 所示,可以看出,理论值与试验值吻合较好。

8.7 构造规定

8.7.1 ~ 8.7.4 这四条主要是根据结构加固工程的实践经验和有关的研究资料作出的规定;其目的是保证原构件与新增混凝土的可靠连接,使之能够协同工作,以保证力的可靠传递,从而收到良好的加固效果。

另外,应指出的是自行配制的纯环氧树脂砂浆或其他纯水泥砂浆,由于未经改性,很快便开始变脆,而且耐久性很差,故不应在承重结构中使用。

9 自密实混凝土加固结构质量验收

自密实混凝土加固结构是建筑结构加固工程中增大截面法加固的一种,其加固结构质量的验收要求与其他增大截面法加固一致。