

扬州市职业大学

毕业设计说明书

题目：再生微粉混凝土基本性能及应用研究

学 院： 土木工程学院

专 业： 建筑工程技术

班 级： 建筑 1305

姓 名： 董毓庆

学 号： 130501509

指导教师： 蒋业浩

完成时间： 2016年5月

摘 要

课题主要对再生混凝土微粉作为矿物掺合料取代部分水泥配制混凝土，研究其对混凝土相关性能的影响，主要包括混凝土的和易性及力学性能，根据观察和测定混凝土的性能变化，在不影响正常使用的基础上，来确定再生混凝土微粉的合适掺量。

课题主要研究在水胶比不变的情况下，用再生混凝土微粉作为矿物掺合料，以10%、20%及30%的取代率等量取代水泥，测试再生微粉混凝土的和易性及不同养护龄期下的立方体抗压强度，为再生混凝土微粉的应用提供基础研究数据。

关键词：再生混凝土微粉；和易性；抗压强度

ABSTRACT

The main task of the research is to replace the cement concrete with the recycled concrete powder as the mineral admixture, Study on the influence of concrete related properties. Mainly including the workability and mechanical properties of concrete, according to the observation and measurement of the performance of concrete, on the basis of not affecting the normal use, To determine the appropriate content of recycled concrete powder.

Topic Main research that in the case of constant water binder ratio using recycled concrete powder as mineral admixture, replace cement with 10%, 20% and 30% replacement rate, test on the workability of recycled fine powder concrete and the cube compressive strength under different curing age. Basic research data are provided for the application of recycled concrete micro powder.

Key words: Recycled Concrete Powder ; Workability ; The Compressive Strength

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论.....	1
1.1 再生骨料混凝土概述.....	1
1.2 本文的研究内容.....	1
2 试验方案设计.....	2
2.1 试验原材料.....	2
2.1.1 水泥.....	2
2.1.2 粉煤灰.....	2
2.1.3 细骨料——砂.....	2
2.1.4 粗骨料——石子.....	5
2.1.5 水.....	6
2.1.6 减水剂.....	6
2.1.7 再生混凝土微粉.....	6
2.2 试验方案设计.....	8
3 试验过程及结果.....	10
3.1 再生微粉混凝土和易性测试.....	10
3.1.1 试验过程.....	10
3.1.2 试验结果.....	11
3.2 再生微粉混凝土强度试验.....	13
3.2.1 混凝土试块的制作及养护.....	13
3.2.2 混凝土立方体抗压强度测试.....	15
3.2.3 试验结果及分析.....	15
4 结论与展望.....	22
4.1 结论.....	22
4.2 展望.....	22
参考文献.....	23
附录.....	24
致谢.....	42

1 绪论

1.1 再生骨料混凝土概述

建筑行业关乎到民生之本，尤其在人口密集的国家，建筑行业毫无疑问是一大重要的领域，自然涉及到庞大建筑材料。其中混凝土在建筑行业中的使用占的比重以及应用的范围较大，因此，是建筑行业的主要建筑材料之一，且近些年建设速度不断加快，也直接带动建筑行业迅速发展，因此混凝土的用量也随之增加。建设时间过久，破旧建筑的不断拆除更直接产生了一大批的建筑混凝土垃圾，加上不断加速发展的城市化进度，大量新的建筑如雨后春笋般建设起来，在新建筑建设过程中，也会产生建筑垃圾。建筑垃圾越来越多，对环境和资源带来了负面影响，因为传统的建筑垃圾处理方法是将被建筑垃圾运往郊外填埋或堆砌。建筑垃圾中，有 30%-40%的成分是混凝土垃圾，呈偏碱性，其碱性元素会流进土壤中，对周围环境造成污染，包括土质，水源，也间接影响人们的健康。如果将这些混凝土垃圾合理充分利用起来，不仅可以改善环境，还可以节省大量资源。

目前解决混凝土垃圾的主要方法是将其破碎，然后经筛分后形成粒径不同的再生骨料，因为混凝土是一种强度较高的人造石材，经破碎后的再生骨料在性能上能够满足建筑工程的相关要求，然后再用再生骨料生产相应的建材产品，如再生骨料混凝土。这项技术已经成熟，各地还相继出台了再生骨料混凝土规范。为混凝土垃圾的循环利用提供了技术保障。

1.2 本文的研究内容

本课题的研究对象微粉是混凝土垃圾在破碎过程中，根据破碎工艺除产生不同粒径的再生骨料外，经吸尘器吸出的粒径小于 0.16mm 的细小粉尘颗粒，其主要成分包括水泥石、砂石粉体颗粒，水泥石化学成分之一为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，砂石粉体颗粒主要成分为 SiO_2 ，因其颗粒细小，所以具备一定的活性，故称这些混凝土垃圾粉体为再生混凝土微粉。另外，这些细小粉尘不经处理，容易对大气造成污染。

本课题将再生混凝土微粉作为取代水泥和粉煤灰的掺合料掺入混凝土中，研究其对混凝土基本性能的影响。设计以下研究方向：

保持基本条件不变（石子、砂、水、减水剂及试验环境），用再生混凝土微粉代替部分水泥，研究其对普通混凝土性能的影响；

保持基本条件不变（石子、砂、水、减水剂及试验环境），用再生混凝土微粉代替部分粉煤灰，研究其对粉煤灰混凝土性能的影响。

2 试验方案设计

2.1 试验原材料

2.1.1 水泥

水泥在普通混凝土中主要起到胶凝作用，能够把砂石骨料胶结成一个整体，本课题使用水泥强度等级为 42.5MPa，普通硅酸盐水泥，代号为 P·O，由扬州亚东水泥有限公司所生产。经扬州华正建筑工程质量检测有限公司检测，课题使用水泥体积安定性雷氏夹法检测合格；水泥标准稠度用水量为 27.8%；比较面积为 3800cm²/g；初凝时间为 206min，大于规范规定的 45min，符合要求；终凝时间为 347min，小于规范小区的 600min，符合要求；水泥胶砂强度见表 2-1，符合要求。

表 2-1 水泥胶砂强度测定表

检测项目	检测结果					
	龄期	单个试件抗折强度值 (MPa)	抗折强度值 (MPa)	单个试件抗压强度值 (MPa)		抗压强度 (MPa)
强度	3d	5.4	5.4	28.6	28.3	28.6
		5.3		28.3	27.8	
		5.4		30.0	28.8	
	28d	8.2	8.2	51.0	50.3	50.2
		8.1		47.9	49.7	
		8.4		51.1	51.0	

2.1.2 粉煤灰

粉煤灰颗粒细小，表明光滑圆润，是混凝土主要掺合料之一。本课题采用粉煤灰等级为 II 级，经检测该 II 级该粉煤灰烧失量为 2.7%，细度为 15.7%，需水量比为 102%，含水率为 0.2%，均符合国家相关标准规定的要求（国家标准规定 II 级该粉煤灰烧失量 ≤ 8%，细度 ≤ 25%，需水量比 ≤ 105%，含水率 ≤ 1%）。

2.1.3 细骨料——砂

本课题采用的砂属于天然砂，产源为河砂，产地为江西，其中含泥的比重占 1.6%，泥块比重占 0.3%，符合行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》

JGJ52-2006 关于若配制 C30 混凝土砂的含泥量要 $\leq 3.0\%$ ，泥块的含量要 $\leq 1.0\%$ 的规定要求。

根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52-2006 的规定采用筛分法测试了砂的粗细程度及颗粒级配，具体操作过程为：

将需要烘干的砂放入 DHG 型恒温干燥箱中进行烘干，直到将砂烘干至恒重，如图 2-1 所示。



图 2-1 恒温干燥箱

以 500g 砂为一组作为试样砂，放入标准砂石筛中筛分。（标准砂石筛孔径从上往下依次为 4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm），如图 2-2 所示。



图 2-2 (a) 称量砂试样

图 2-2 (b) 标准砂石筛

将标准砂石筛轻轻放到震击式标准振筛机（见图 2-3）上，振动时间为 10min，振动结束缓慢取下，然后将砂石筛逐层取下来，用手筛到盘中称量。



图 2-3 振筛机



图 2-4 各层筛称量后的砂

称量各层筛砂的筛余量，见图 2-4，分别整理计算各层的分计筛余和累计筛余，结果见表 2-2、表 2-3。根据累计筛余计算细度模数 M_x 。

表 2-2 砂筛分析结果

筛孔尺寸 (mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	<0.15
筛余量 (g)	14	34	50	111	216	59	16
分计筛余 (%)	2.4	6.8	10.0	22.2	43.2	11.8	3.2
累计筛余 (%)	2.4	9.2	19.2	41.4	84.6	96.4	99.6

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} = \frac{(9.2 + 19.2 + 41.4 + 84.6 + 96.4) - 5 \times 2.4}{100 - 2.4} = 2.45$$

表 2-3 砂筛分析结果

筛孔尺寸 (mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	<0.15
筛余量 (g)	14	33	51	110	219	61	10
分计筛余 (%)	2.8	6.6	10.2	22.0	43.8	12.2	2.0
累计筛余 (%)	2.8	9.4	19.6	41.6	85.4	97.6	99.6

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} = \frac{(9.4 + 19.6 + 41.6 + 85.4 + 97.6) - 5 \times 2.8}{100 - 2.8} = 2.46$$

评定粗细程度

$$M_x = \frac{2.45 + 2.46}{2} = 2.455 \approx 2.5$$

根据相关规定，砂的粗细程度根据细度模数分为粗砂（ $M_x=3.1\sim 3.7$ ）、中砂（ $M_x=2.3\sim 3.0$ ）和细砂（ $M_x=1.6\sim 2.2$ ）三类。本试验用砂 $M_x=2.5$ 介于 $2.3\sim 3.0$ 之间，属于中砂。

评定砂的颗粒级配

《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52-2006 的规定，计算两次累计筛余的平均值，并根据《数值修约规则与极限数值的表示和判定》（GB/T8170-2008）的规定将计算数值修约至 1%，结果见 2-4。

表 2-4 砂累计筛余平均值

筛孔尺寸(mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	<0.15
累计筛余 (%)	2	9	19	42	85	97	100

将砂的累计筛余与标准规定的级配区（如表 2-5 所示）进行比较，可以判定本试验用砂级配区位于 II 区，级配良好。

表 2-5 砂的颗粒级配区

累计筛余(%) 筛孔尺寸	I 区	II 区	III 区
4.75mm	10~0	10~0	10~0
2.36mm	35~5	25~0	15~0
1.18mm	65~35	50~10	25~0
0.6mm	85~71	70~41	40~16
0.3mm	95~80	92~70	85~55
0.15mm	100~90	100~90	100~90

2.1.4 粗骨料——石子

粗骨料在混凝土中起到骨架的作用，有卵石和碎石两种，卵石混凝土和易性较好，碎石混凝土强度较高。本课题采用的粗骨料为碎石，产地安徽，颗粒级配为连续粒级，

最大粒径 30mm，含泥量 0.7%，泥块含量 0.2%，符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52-2006 规定 C30 混凝土含泥量 $\leq 1.0\%$ ，泥块含量 $\leq 0.5\%$ 的要求。

2.1.5 水

混凝土用水有拌合用水和养护用水，均应符合《混凝土用水标准》JGJ63-2006 的规定，本课题混凝土拌合及养护用水采用自来水，符合要求。

2.1.6 减水剂

减水剂是现代混凝土不可缺少的外加剂，使用减水剂，在保持混凝土坍落度不变的情况下可以减少用水量，从而使水胶比降低，能够提高混凝土的强度；若保持水胶比不变，可以提高混凝土的坍落度值，使混凝土获得较好的流动性，满足施工要求，特别是泵送混凝土对于坍落度的要求。

根据减水效能，减水剂的种类有普通减水剂，高效减水剂、高性能减水剂。本课题采用的减水剂为聚羧酸高效减水剂，型号为 SBT-100，由江苏苏博特新材料股份有限公司生产，经检测其含固量为 10.63%，PH 值为 7.64，密度为 1.027g/cm³，减水率为 19%，《混凝土外加剂》GB8076-2008 规定高效减水剂的相关指标分别为含固量 $11.10\% \times (1 \pm 10\%)$ ，PH 值 8.5 ± 1.5 ，密度 $1.02 \pm 0.02\text{g/cm}^3$ ，减水率 $\geq 14\%$ 。课题使用减水剂符合要求。

2.1.7 再生混凝土微粉

本课题所使用的再生混凝土微粉由扬州惠民再生资源有限公司生产再生骨料时产生的，再生骨料生产工艺流程见图 2-5。将大块废弃混凝土机械破碎成直径小于 500mm 的物料块，运至给料口；通过振动给料机输送至颚式破碎机进行破碎；通过传送皮带送进振动筛进行分级筛选，得到 0-5mm 细骨料，5-15mm 粗骨料及 15-30mm 粗骨料；在此过程中，通过大型除尘设备（见图 2-6）将粒径 $< 0.16\text{mm}$ 的微粉吸出，如图 2-7 所示。

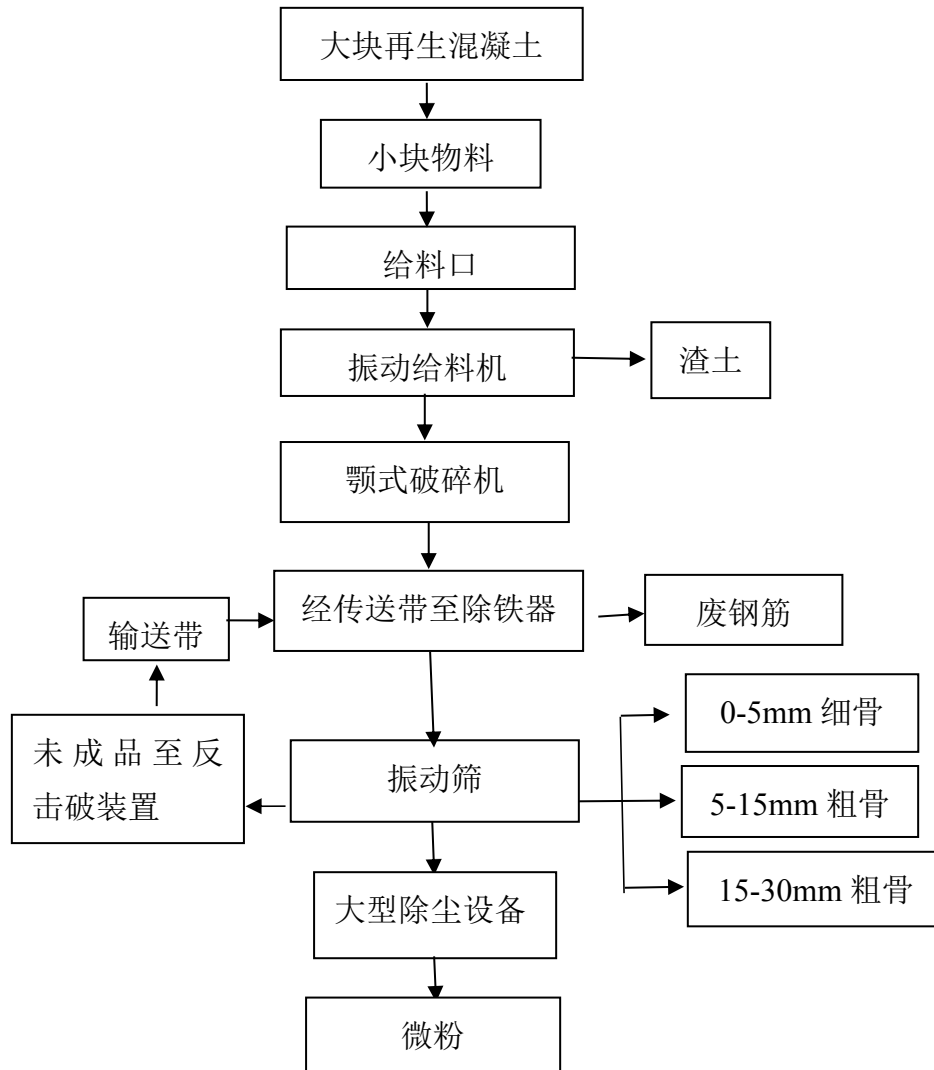


图 2-5 再生骨料生产工艺流程



图 2-6 大型除尘设备

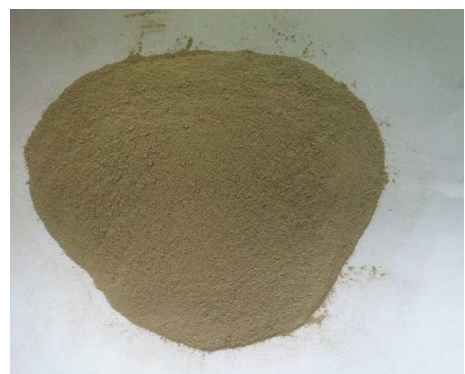


图 2-7 再生混凝土微粉

经检测其化学成分见表 2-6，再生混凝土微粉中含有较多的 SiO_2 ，因为再生混凝土微粉中的砂石粉末较多。再生混凝土微粉的比表面积为 $2020\text{cm}^2/\text{g}$ ， $45\ \mu\text{m}$ 方孔筛

筛余百分率为 51.1%，说明再生混凝土微粉的颗粒较粗，从而其活性较弱。图 2-8 为再生混凝土微粉与普通硅酸盐水泥对比图，可以看出再生混凝土微粉颜色较浅。

表 2-6 废弃混凝土微粉化学成分（%）

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	其余
43.1	32.6	10.7	5.6	2.5	1.5	1.5	0.9	0.9	0.7

2.2 试验方案设计

方案设计用再生混凝土微粉作为掺合料以不同取代率取代水泥和粉煤灰配制再生微粉混凝土，研究在不同取代率下再生微粉混凝土的和易性及抗压强度，用以确定再生混凝土微粉作为矿物掺合料用于配制混凝土的可行性及其掺量。

混凝土和易性和立方体抗压强度是混凝土两个重要指标。和易性即混凝土的工作性能，包括流动性、黏聚性、保水性三项指标，通过对流动性定量测定，辅以观察保水性和黏聚性可以判断混凝土拌合物的工作性能（也即和易性）是否易于各施工工序的操作，如搅拌、运输、浇筑、振捣等，同时还能判断混凝土质量是否均匀，成型是否密实；混凝土立方体抗压强度是混凝土重要的力学性能指标，混凝土标准立方体试件是边长为 150mm 的立方体，本课题采用的混凝土立方体试件边长为 100mm，为非标准试件，需乘以 0.95 的换算系数换算成标准立方体抗压强度，立方体试件拆模后需进行标准养护（20±2℃，相对湿度 95%以上），本课题混凝土试件放入惠民再生资源有限公司标准养护进行养护，龄期取 3d、7d 和 28d，强度符合要求的混凝土测试了 56d 的抗压强度，从而全面分析再生微粉混凝土的性能。

以 C30 混凝土为基础，方案设计以 10%、20%、30%三个取代率从三个方向来研究再生混凝土微粉对混凝土性能的影响：

（1）普通水泥混凝土（编号为 A00，胶凝材料为水泥）中，用再生混凝土微粉等量取代水泥，研究再生混凝土微粉对普通混凝土性能的影响；

（2）粉煤灰混凝土中（编号为 B00，胶凝材料为水泥、粉煤灰），用再生混凝土微粉等量取代水泥，研究再生混凝土微粉对粉煤灰混凝土性能的影响；

（3）粉煤灰混凝土（编号为 D00，胶凝材料为水泥、粉煤灰）中，用再生混凝土微粉取代率取代粉煤灰，研究再生混凝土微粉对普通粉煤灰混凝土性能的影响。混凝土配合比见表 2-7。

表 2-7 混凝土配合比 (/m³)

编号	RR (%)	C (kg)	RCP (kg)	F (kg)	S (kg)	G (kg)	MG (kg)	WRA (%)	W (kg)
A00	0	350	0	0	779	485	591	1.2	185
A10	10	315	35	0	779	485	591	1.2	185
A20	20	280	70	0	779	485	591	1.2	185
A30	30	245	105	0	779	485	591	1.2	185
B00	0	290	0	60	779	485	591	1.2	185
B10	10	261	29	60	779	485	591	1.2	185
B20	20	232	58	60	779	485	591	1.2	185
B30	30	203	87	60	779	485	591	1.2	185
D10	10	290	6	54	779	485	591	1.2	185
D20	20	290	12	48	779	485	591	1.2	185
D30	30	290	18	42	779	485	591	1.2	185

注：各符号代表含义 RR-取代率；C-水泥；RC-再生混凝土微粉；F-粉煤灰；S-砂；G-石子；MG-瓜子片；WRA-减水剂；W-水。

3 试验过程及结果

3.1 再生微粉混凝土和易性测试

3.1.1 试验过程

混凝土和易性包括流动性、保水性和粘聚性三个指标，检测方法采用坍落度法，流动性以坍落度值评定，观察保水性和黏聚性，按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T 50080-2002）规定的方法测定。具体过程为：

（1）润湿与混凝土及混凝土材料接触的用具。包括底板（本实验室采用钢板）、坍落度筒、捣棒（如图 3-1 所示），铁锹、抹子等，底板和坍落度筒内壁不能有明水。底板放在坚实的水平地面上，然后两脚踩住坍落度筒两边的脚踏板，以确保在试验过程中，坍落度筒的位置保持固定。



图 3-1 混凝土坍落度筒

（2）装料、振捣。混凝土拌合物搅拌完成后，用铲子将第一层混凝土拌合物装入坍落度筒中，用捣棒由内向外，螺旋式插捣混凝土拌合物 25 次，插捣后的厚度约为筒高的 1/3，插捣点在插捣面上均匀分布；然后装第二层、第三层混凝土，插捣方法及厚度与第一层相同，插捣时，捣棒插透本层，插捣完成后，将多余的混凝土刮去，用抹子抹平，清除坍落度筒底部的混凝土。垂直匀速提起坍落度筒，时间控制在 5s~10s。

（3）测量混凝土坍落度。混凝土拌合物坍落度= $H-h$ ，单位为 mm。其中 H 为坍落度筒的高度，h 为提筒后混凝土的高度。

（4）观察粘聚性和保水性。测量好坍落度后，用捣棒轻轻敲打混凝土的侧面，

11 组混凝土锥体逐渐均匀下沉，粘聚性良好；各组混凝土拌合物无骨料外露，有 7 组底部无稀浆析出，4 组有少量的稀浆析出，说明各组混凝土保水性良好。

混凝土拌合物和易性试验过程见图 3-2。



图 3-2 再生微粉混凝土坍落度试验过

3.1.2 试验结果

混凝土用粗骨料颗粒级配应为连续级级，本课题混凝土粗骨料级配采用两种 15-30mm 和 5-15mm 即配合比表中的石子和瓜子片，以保证混凝土用粗骨料为连续级级。再生微粉混凝土拌合物和易性测试结果见表 3-1 所示。

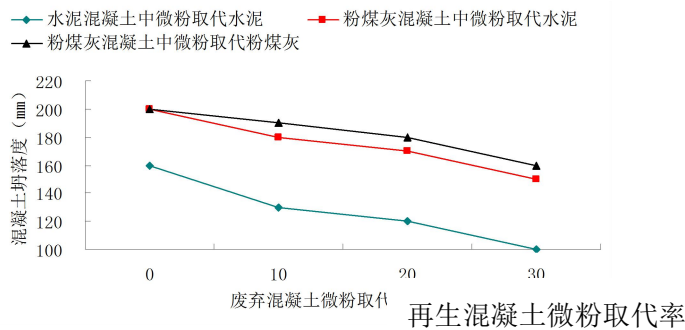
表 3-1 混凝土坍落度测试结果

编号	RR (%)	C (kg)	RCP (kg)	F (kg)	坍落度 (mm)	保水性	粘聚性
A00	0	350	0	0	160	良好	良好
A10	10	315	35	0	130	良好	良好
A20	20	280	70	0	120	良好	良好
A30	30	245	105	0	100	良好	良好
B00	0	290	0	60	200	良好	良好

B10	10	261	29	60	180	良好	良好
B20	20	232	58	60	170	良好	良好
B30	30	203	87	60	150	良好	良好
D10	10	290	6	54	190	良好	良好
D20	20	290	12	48	180	良好	良好
D30	30	290	18	42	160	良好	良好

注：个符号代表含义 RR-取代率；C-水泥；RC-再生混凝土微粉；F-粉煤灰。

根据表 3-1，可以做如图 3-3 所示，再生混凝土微粉和易性与再生混凝土微粉掺量的关系曲线。



由表 3-1 及图 3-3 不同取代率下再生微粉混凝土坍落度变化

(1) A 编号混凝土中有再生混凝土微粉和水泥两种胶凝材料，混凝土的坍落度随着再生混凝土微粉掺量的增加而降低，因为再生混凝土微粉含有较多的砂石粉末，且孔隙率较大，具有一定的吸水性，在用水量一定的条件下，降低了混凝土的坍落度值；

(2) B 编号混凝土中，有再生混凝土微粉、水泥和粉煤灰三种胶凝材料，再生混凝土微粉以 10%、20%及 30%取代率取代水泥，混凝土拌合物流动性同样随着再生混凝土微粉掺量的增加而降低。但混凝土拌合物流动性明显高于 A 组，说明粉煤灰增加了混凝土的流动性，因为粉煤灰颗粒细小且圆润，在混凝土拌合物中能够起到一定的滚珠作用，减小了混凝土组成材料之间的摩擦力，从而增大了混凝土拌合物的流动性，同时还能够改善黏聚性和保水性；

(3) D 编号混凝土中，与 B 编号同样有再生混凝土微粉、水泥和粉煤灰三种胶凝材料，再生混凝土微粉以 10%、20%和 30%的取代率取代粉煤灰，混凝土流动性随着再生混凝土微粉掺量的增加而降低。混凝土流动性高于相同取代率的 A 组

与 B 组，因为 D 组混凝土中掺入的再生混凝土微粉相对较少，粉煤灰的掺入，使得混凝土拌合物流动性提高。

综上所述，再生混凝土微粉的掺入将降低混凝土拌合物的流动性，要获得同坍落度的混凝土拌合物，需增加用水量或增加减水剂的用量；粉煤灰可以改善混凝土拌合物的流动性、保水性和黏聚性，因此粉煤灰也是混凝土最常见的矿物掺合料之一。

3.2 再生微粉混凝土强度试验

3.2.1 混凝土试块的制作及养护

本课题混凝土试块采用边长为 100mm 的立方体，为非标准试件，试验方法按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2002）进行，具体试验步骤为：

（1）称量混凝土各组成材料用量，将材料进行搅拌，搅拌完成后再用铁锹来回拌合 3 次。

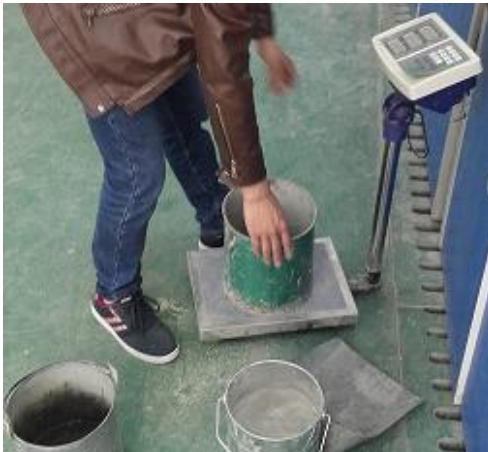
（2）将拌合好的混凝土拌合物一次性装入试模中，用抹刀插捣混凝土，插捣时抹刀沿着试模的内壁进行，并使插捣完毕后的混凝土拌合物高出试模。

（3）将装好混凝土的试模放置在混凝土振实台上，试模附着在振动台上，以使试模在振动时不跳动，振动 20s，混凝土表面出浆后马上关闭振实台，防止过振。

（4）将振好后的试模从振实台上取下，放在水平地面上静置 2 昼夜，因为混凝土中掺入了再生混凝土微粉，延缓了混凝土的初凝时间，实验室温度为 $20^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$ 符合规范要求（规范规定的温度为 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。

（5）静置好后，进行拆模并对混凝土试块进行编号，将混凝土试块放入标准养护室进行养护，直至试验龄期，标准养护室温度 $19\sim 21^{\circ}\text{C}$ 、湿度 95%，符合规范要求（规范规定的温度为 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 95%以上）。

混凝土试块制作及养护过程见图 3-4 所示。



(a) 称量混凝土组成材料



(b) 混凝土装模



(c) 振实台振实



(d) 混凝土试块静置



(c) 混凝土标准养护室



(c) 拆模后的试块养护

图 3-4 混凝土试块制作养护过程

3.2.2 混凝土立方体抗压强度测试

混凝土在标准养护室养护至设计龄期时，进行混凝土抗压强度测试，具体测试步骤为：

（1）从养护室取出待测试块，将试块表面的水分擦拭干净，马上进行抗压强度测试，测试前，需将压力机上下承压板擦干净

（2）将试块安放在试验机的下承压板上，使混凝土试块侧面受压，且试块的中心与下承压板中心在一条直线上，调整球座，使上承压板与试块均衡接触，如图 3-5 所示。

（3）启动压力试验机，设计混凝土强度等级为 30MPa，加载速度为每秒钟 0.5~0.8MPa，加载时保持匀速加载。当压力机加载速度数显示屏上的加载显示为 0 时，说明混凝土试块达到最大承载力，此时打开回油阀，关闭送油阀停止加载，如图 3-6 所示。记录承载力数显示屏上的数值，即为试块的最大承载力。

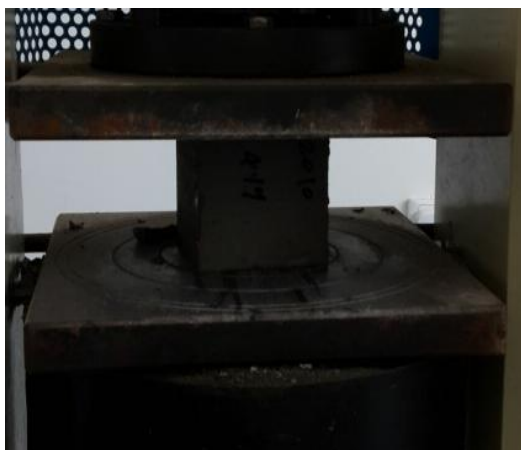


图 3-5 安放在上下承压板的试块



图 3-6 混凝土试块压力测试

3.2.3 试验结果及分析

（1）混凝土抗压强度计算

按公式 3-1 计算混凝土立方体抗压强度

$$f_{cc} = k \frac{F}{A} \quad (3-1)$$

式中 f_{cc} ——混凝土立方体抗压强度（MPa）；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件承压面积（mm²）；

k ——试件尺寸换算系数，见表 3-2。

表 3-2 混凝土试件不同尺寸的强度换算系数

试件尺寸 (mm)	100×100×100	150×150×150	200×200×200
换算系数	0.95	1.00	1.05

(2) 立方体抗压强度代表值的确定步骤为:

①计算单个试块的立方体抗压强度值。

②分别求出最大值和最小值与中间值的差值占中间值的百分率。

③进行强度代表值确定,若所得两个百分率均小于 15%,则代表值取三个测值的平均值;若两个百分率中其中一个大于 15%,另外一个小于 15%,则代表值取中间值;若两个百分率值均大于 15%,则此组试块无代表值。

本文编号 A10,标准养护 28 天的混凝土抗压强度为例,介绍混凝土强度计算及评定过程,其他组强度计算及评定过程见附录。

经测试得到编号 A10 组试块抗压破坏荷载分别为 317.2kN、339.5kN、315.1kN,

1) 计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=k*(P/A)$

$$f_{cu1} = \frac{317.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 30.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{339.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 32.3(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{315.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 29.9(MPa)$$

2) 与中间值比较

$$\frac{32.3 - 30.1}{30.1} \times 100\% = 7.3\% < 15\% \quad \frac{30.1 - 29.9}{30.1} \times 100\% = 0.01\% < 15\%$$

3) 结论:取平均值作为代表值,即

$$f_{cu} = \frac{f_{cu1} + f_{cu2} + f_{cu3}}{3} = \frac{29.9 + 32.3 + 30.1}{3} = 30.8(MPa)$$

(3) 混凝土抗压强度测试结果

混凝土 3d、7d、28d 的立方体抗压强度结果见表 3-3。

表 3-3 混凝土试块抗压强度测试结果

编号	RR (%)	C (kg)	RCP (kg)	F (kg)	抗压强度 (MPa)			28d 活性指数(%)
					3d	7d	28d	
A00	0	350	0	0	14.5	25.4	43.3	100
A10	10	315	35	0	16.9	21.7	30.8	71
A20	20	280	70	0	17.4	25.6	35.8	83
A30	30	245	105	0	19.9	26.6	31.0	72
B00	0	290	0	60	15.9	26.9	36.2	100
B10	10	261	29	60	17.3	23.6	36.7	102
B20	20	232	58	60	13.5	18.6	26.7	74
B30	30	203	87	60	11.1	15.9	25.2	70
D00	0	290	0	60	15.9	26.9	36.2	100
D10	10	290	6	54	18.0	24.1	34.3	95
D20	20	290	12	48	20.6	27.5	35.0	97
D30	30	290	18	42	16.0	20.8	26.4	73

注：D00 与 B00 是同一粉煤灰混凝土配合比。

(4) 测试结论分析

根据表 3-3，可以得到再生混凝土微粉以 10%、20%、30% 的取代率分别取代水泥混凝土中的水泥，粉煤灰混凝土中的水泥和粉煤灰对混凝土不同龄期抗压强度的影响见图 3-7，图 3-8 及图 3-9，28d 活性指数见图 3-10。

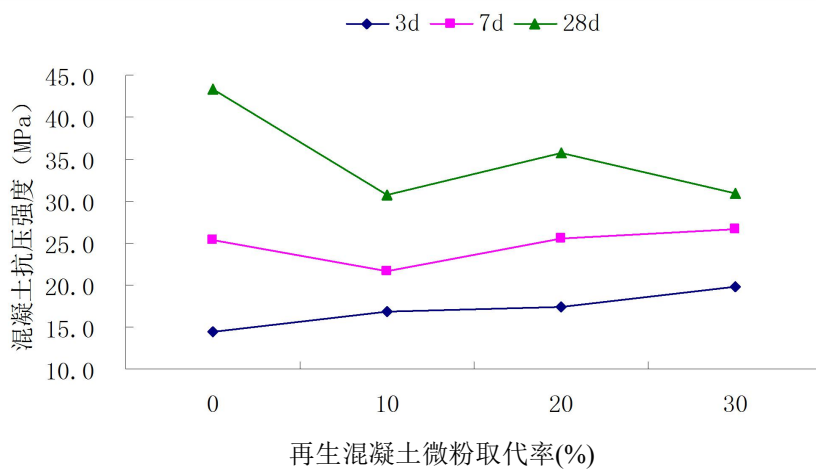


图 3-7 再生混凝土微粉对水泥混凝土各龄期强度的影响

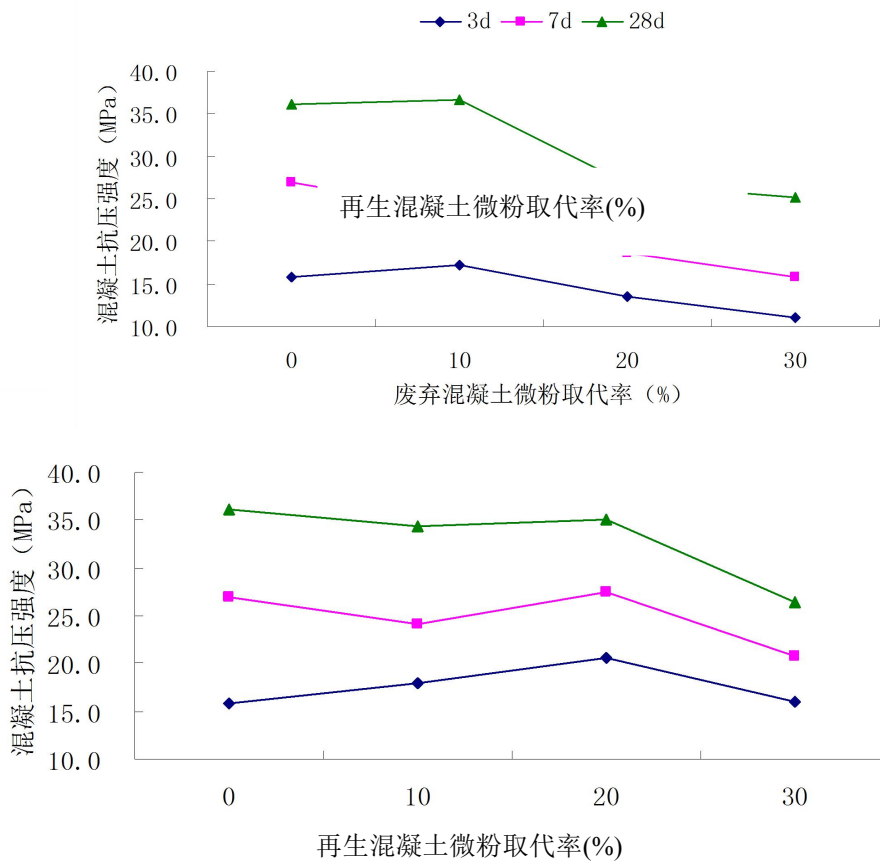


图 3-9 再生混凝土微粉取代粉煤灰对粉煤灰混凝土各龄期强度的影响

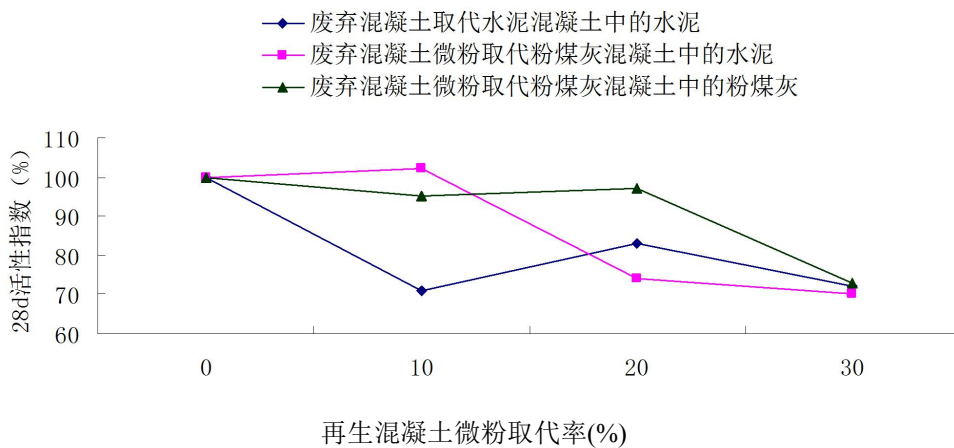


图 3-10 活性指数

通过对表 3-3 及图 3-7~图 3-10 进行分析可以得到以下结论：

- 1) 混凝土的立方体抗压强度随着养护龄期的延长而增大，再生混凝土微粉取代水泥，使得混凝土强度降低；

2) 对于普通水泥混凝土, 当再生混凝土微粉的取代率为 20% 时, 28 天抗压强度比未掺加再生混凝土微粉低 7.5MPa, 但较取代 10% 时强度提高 5MPa。

3) 对于粉煤灰混凝土, 再生混凝土微粉取代 10% 水泥时, 28 天的立方体抗压强度较未掺加再生混凝土微粉时强度还提高了 0.5MPa, 活性指数为 102%, 提高了 2%。再生混凝土取代粉煤灰时, 强度降低较小, 当取代率为 20% 时, 强度较 10% 取代率略有提高, 提高了 0.7MPa

4) 对活性指数进行分析:

当取代率为 10% 时, 再生混凝土微粉取代水泥对粉煤灰混凝土强度有促进作用, 活性指数达到 102%, 提高了 2%。取代粉煤灰的混凝土强的活性指数为 95%, 而取代水泥混凝土中的水泥, 混凝土强度活性指数只有 71%;

当取代率为 20% 时, 再生混凝土微粉取代粉煤灰混凝土中的粉煤灰配制的混凝土强度的活性指数最大, 为 97%。取代粉煤灰混凝土中的水泥配制的混凝土强度指数最小, 为 74%。取代水泥混凝土中的水泥配制的混凝土强度活性指数为 83%;

当取代率为 30% 时, 混凝土强度活性指数均降低至 70% 左右, 取代水泥混凝土中的水泥配制的混凝土强度为 31MPa, 能够达到 C30 强度等级的要求。而粉煤灰混凝土中, 再生混凝土微粉取代水泥或是粉煤灰, 混凝土的强度均降低至 30MPa 以下, 不能满足强度等级的要求。

综上所述可知:

再生混凝土微粉会使混凝土强度降低。20% 取代率下, 再生混凝土微粉取代水泥和粉煤灰对水泥混凝土和粉煤灰混凝土的强度有促进作用; 10% 取代率下, 再生混凝土微粉取代水泥对粉煤灰混凝土抗压强度有促进作用; 分析原因可能混凝土中水泥的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与再生混凝土微粉中的细小 SiO_2 发生了二次水化反应, 重新生成了硅酸凝胶 C-S-H, 填充了混凝土中的孔隙, 使混凝土密实度提高, 进而对混凝土强度有促进作用。

2) 普通水泥混凝土中, 再生混凝土微粉取代率不宜高于 30%, ; 粉煤灰混凝土中, 再生混凝土取代水泥取代率不宜高于 10%, 取代粉煤灰取代率可以达到 20%。

(5) 再生微分混凝土 56d 强度。

取混凝土编号 A30, B10, D20, 其取代率分别为 30%、10% 和 20%, 标准养护为 56 天的混凝土进行抗压强度测试。

试验得到混凝土 A30 抗压破坏荷载分别为 304.8kN、273.6kN、287.8kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$1) \quad f_{cu1} = \frac{304.8 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 29.0(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{333.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 31.7(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{315.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 29.9(MPa)$$

2) 与中间值比较

$$\frac{29.9 - 29.0}{29.9} \times 100\% = 3.0\% < 15\% \quad \frac{31.7 - 29.9}{29.9} \times 100\% = 6.0\% < 15\%$$

3) 结论：取平均值作为代表值，即 30.2MPa。

试验得到混凝土 B10 抗压破坏荷载分别为 412.3kN、398.1kN、278.9kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$1) \quad f_{cu1} = \frac{412.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 39.2(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{398.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.8(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{370.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.6(MPa)$$

2) 与中间值比较

$$\frac{39.2 - 37.8}{37.8} \times 100\% = 3.7\% < 15\% \quad \frac{37.8 - 35.6}{37.8} \times 100\% = 5.8\% < 15\%$$

3) 结论：取平均值作为代表值，即 37.4MPa。

试验得到混凝土 D20 抗压破坏荷载分别为 407.7kN、369.9kN、396.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$1) \quad f_{cu1} = \frac{407.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 38.7(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{369.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{396.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.7(\text{MPa})$$

2) 与中间值比较

$$\frac{38.7-37.7}{37.7} \times 100\% = 2.7\% < 15\% \quad \frac{37.7-35.1}{37.7} \times 100\% = 6.9\% < 15\%$$

3) 结论：取平均值作为代表值，即 37.2MPa。

混凝土 A30, B10, D20, 56d 标准养护条件下抗压强度分别为：30.2MPa、27.4MPa、37.2MPa。见表 3-4。

表 3-4 混凝土试块抗压强度测试结果

编号	抗压强度			
	3d	7d	28d	56d
A30	19.9	26.9	31.0	30.2
B10	17.3	23.6	36.7	37.4
D20	20.6	27.5	35.0	37.2

由上表可知得出以下结论：

(1) 编号 A30 普通水泥混凝土，随着养护期从 3 天到 28 天的延长，其混凝土的强度逐渐增加，但随着养护期到 56 天时，强度反而降低了 0.8MPa。再生混凝土微粉用于普通水泥混凝土中，养护龄期以 28 天为宜。

(2) 编号 B10 混凝土中，再生微粉混凝土强度随着养护龄期的延长而增大，前 28 天强度增加较快，28 天至 56 天，强度缓慢增长 1.9%，说明再生混凝土微粉取代水泥时，养护龄期以 28 天为宜。

(3) 编号 D20 中，再生微粉混凝土强度随着养护龄期的延长而增大，前 28 天强度增加较快，28 天至 56 天，强度增长 6.3%，增长趋势比较明显，可以适当增加再生微粉混凝土的养护时间。

4 结论与展望

4.1 结论

（1）再生混凝土微粉成分复杂，含有的化学元素较多，且颗粒较细但比水泥和粉煤灰颗粒粗，使用时应增加用水量或减水剂用量。

（2）再生混凝土微粉坍落度随着微粉掺量的增加而降低，保水性和粘聚性良好。

（3）再生混凝土微粉取代粉煤灰或水泥会影响混凝土的强度，将混凝土强度有所降低；对于普通水泥混凝土，再生混凝土微粉取代水泥在 30%以内，其混凝土强度仍能满足要求；对于粉煤灰混凝土，再生混凝土微粉取代水泥的取代率应控制在 10%以内，取代粉煤灰的取代率可以提高至 20%。

4.2 展望

我国再生混凝土微粉的研究与应用工作还处于实验室研究阶段，再生混凝土微粉的基本性能研究、研究方法及研究结论存在一定的差异，因为再生混凝土微粉来源于废弃混凝土，本身现代混凝土配制时除基本组成材料外还添加了各种外加剂和掺合料，另一方面混凝土经过若干年的使用，其成分与周围环境介质可能发生了某些反应。

对于再生混凝土微粉的应用还需进行进一步的研究与论证，鉴于本课题对再生混凝土微粉的研究，课题组认为还需从以下两个方面研究：

（1）本课题研究的再生混凝土微粉是再生骨料生产时经吸尘器吸出的粉末颗粒，颗粒较水泥和粉煤灰粗，后期研究可以考虑对再生混凝土微粉进行再加工，使粉末粒径更小，以增加其活性。

（2）由于时间、科研条件等的限制，本课题只对混凝土的基本性能即和易性和立方体抗压强度进行了试验。后期可以研究再生微粉混凝土的其他性能，从而为其应用于工程提供更全面的数据。

参考文献

- [1] 吕雪源. 再生微粉的基本性能及应用[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009
- [2] 邓裕华. 工程建设项目施工中的混凝土质量控制[J]. 建材与装饰, 2007 (08)
- [3] 靳萍. 普通混凝土拌合物性能检测[J]. 黑龙江科技信息, 2010 (11)
- [4] 马鹏. 复合型掺合料高性能混凝土抗碳化性能的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012
- [5] 林志伟, 孙可伟, 刘日鑫. 建筑垃圾在混凝土中的再利用研究[J]. 科技资讯, 2006
- [6] 张明林.. 最新混凝土工程应用新技术规范与施工质量强制性条文实施手册 (3—1) [M], 2003 (11) 吉林电子出版社
- [7] 孙岩. 再生混凝土微粉/水泥基透水性复合材料的试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011
- [8] 柯志勤, 殷大伟, 唐孝进. 微粉在混凝土中的应用[J]. 城市建设理论研究, 2014
- [9] 程显强.. 混凝土再生微粉的研究现状及应用[J]. 低温建筑技术, 2009
- [10] 黄滔. 再生混凝土再生利用技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009
- [11] 李建勇, 马雪英, 尚百雨等. 建筑废弃物再生微粉在混凝土中应用的试验研究[J]. 江西建材, 2014 (12)
- [12] 陈机构, 许献忠. 再生微粉混凝土抗压强度和抗碳化性能试验分析[J]. 科学时代, 2013 (19)
- [13] 吴姝娴, 谈海涛, 左俊卿. 再生微粉对混凝土强度的影响研究[J]. 山西建筑, 2011
- [14] 张李黎. 再生混凝土材料性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009
- [15] 田春芳, 田杰芳. 不同替代率再生混凝土的力学性能[J]. 河北联合大学学报: 自然科学版, 2013 (4)
- [16] 张会芝, 郑建岚. 再生混凝土抗压强度及工作性能的影响因素分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2012(4)
- [17] 刘志刚. 利用再生混凝土配制再生砂浆及其和易性和强度的研究[硕士学位论文D]. 新疆: 新疆大学, 2014
- [18] 刘志伟, 刘春梅, 马大勇. 再生混凝土实验研究与应用[J]. 商品混凝土, 2008(6)

[19] 仝小芳, 杨鼎宜, 王欣等. 粉煤灰再生混凝土基本性能研究[J]. 混凝土, 2014(7)

附录

混凝土 3d、7d、28d 的立方体抗压强度代表值计算书:

混凝土 A00: 标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 151.7kN、171.9kN、135.0kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{151.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 14.4(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{171.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 16.3(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{135.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 12.8(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{14.4 - 12.8}{14.4} \times 100\% = 11.1\% < 15\% \quad \frac{16.3 - 14.4}{14.4} \times 100\% = 13.2\% < 15\%$$

(3) 结论: 取平均值作为代表值, 即 14.5MPa。

此组混凝土强度代表值为 14.5MPa。

混凝土 A00: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 272.6kN、282.9kN、246.3kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{272.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 25.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{282.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.9(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{246.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 23.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{26.9 - 25.9}{25.9} \times 100\% = 3.9\% < 15\% \quad \frac{25.9 - 23.4}{25.9} \times 100\% = 9.7\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 25.4MPa。

此组混凝土强度代表值为 25.4MPa。

混凝土 A00:标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分

别为 440.4kN、461.0kN、466.3kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{440.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 41.8(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{461.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 43.8(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{466.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 44.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{43.8 - 41.8}{43.8} \times 100\% = 4.6\% < 15\% \quad \frac{44.3 - 43.8}{43.8} \times 100\% = 1.1\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 43.3MPa。

此组混凝土强度代表值为 43.3MPa。

混凝土 A10:标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 171.9kN、178.9kN、183.2kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{171.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 16.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{178.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{183.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{17.0-16.3}{17.0} \times 100\% = 4.1\% < 15\% \quad \frac{17.4-17.0}{17.0} \times 100\% = 2.4\% < 15\%$$

(3) 结论: 取平均值作为代表值, 即 16.9MPa。

此组混凝土强度代表值为 16.9MPa。

混凝土 A10:标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 232.9kN、227.2kN、223.9kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{232.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 22.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{227.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 21.6(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{223.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 21.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{22.1-21.6}{21.6} \times 100\% = 2.3\% < 15\% \quad \frac{21.6-21.3}{21.6} \times 100\% = 1.4\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 21.7MPa。

此组混凝土强度代表值为 21.7MPa。

混凝土 A10:标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 332.9kN、327.2kN、312.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{332.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 31.6(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{327.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 31.1(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{312.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 29.7(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{31.1 - 29.7}{31.1} \times 100\% = 4.5\% < 15\% \quad \frac{31.6 - 31.1}{31.1} \times 100\% = 1.6\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 30.8MPa。

此组混凝土强度代表值为 30.8MPa。

混凝土 A20:标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 185.1kN、181.8kN、182.7kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{185.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.6(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{181.8 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.3(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{182.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{17.6-17.4}{17.4} \times 100\% = 1.1\% < 15\% \quad \frac{17.4-17.3}{17.4} \times 100\% = 0.01\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 17.4MPa。

此组混凝土强度代表值为 17.4MPa。

混凝土 A20：标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 273.4kN、262.8kN、272.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{273.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.0(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{262.8 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 25.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{272.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.0(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{26.0-26.0}{26.0} \times 100\% = 0\% < 15\% \quad \frac{26.0-25.0}{26.0} \times 100\% = 3.8\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 25.6MPa。

此组混凝土强度代表值为 25.6MPa。

混凝土 A20：标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 371.6kN、383.1kN、374.5kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{371.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{383.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 36.4(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{374.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.6(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{36.4 - 35.6}{35.6} \times 100\% = 2.2\% < 15\% \quad \frac{35.6 - 35.3}{35.6} \times 100\% = 0.01\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 35.8MPa。

此组混凝土强度代表值为 35.8MPa。

混凝土 A30: 标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 206.5kN、212.4kN、208.7kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{206.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 19.6(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{212.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.2(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{208.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 19.8(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{20.2 - 19.8}{19.8} \times 100\% = 2.0\% < 15\% \quad \frac{19.8 - 19.6}{19.8} \times 100\% = 1.0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 19.9MPa。

此组混凝土强度代表值为 19.9MPa。

混凝土 A30: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 283.5kN、278.3kN、277.0kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{283.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{278.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.4(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{277.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{26.9 - 26.4}{26.4} \times 100\% = 1.9\% < 15\% \quad \frac{26.4 - 26.3}{26.4} \times 100\% = 0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 26.6MPa。

此组混凝土强度代表值为 26.6MPa。

混凝土 A30：标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 321.6kN、389.1kN、326.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{321.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 30.6(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{389.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{326.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 31.0(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{37.0 - 31.0}{31.0} \times 100\% = 19.4\% > 15\% \quad \frac{31.0 - 30.6}{11.5} \times 100\% = 1.6\% < 15\%$$

(3) 结论：取中间值作为代表值，即 31.0MPa。

此组混凝土强度代表值为 31.0MPa。

混凝土 B00：标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 171.6kN、169.6kN、161.1kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{171.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 16.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{169.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 16.1(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{161.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 15.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{16.1-15.3}{16.1} \times 100\% = 5.0\% < 15\% \quad \frac{16.3-16.1}{16.1} \times 100\% = 1.2\% < 15\%$$

(3) 结论：取中间值作为代表值，即 15.9MPa。

此组混凝土强度代表值为 15.9MPa。

混凝土 B00: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 261.6kN、289.6kN、297.9kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{261.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 24.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{289.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 27.5(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{297.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 28.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{27.5-24.9}{27.5} \times 100\% = 9.5\% < 15\% \quad \frac{28.3-27.5}{27.5} \times 100\% = 2.9\% < 15\%$$

(3) 结论：取中间值作为代表值，即 26.9MPa。

此组混凝土强度代表值为 26.9MPa。

混凝土 B00: 标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 321.6kN、389.1kN、326.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{371.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{389.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{382.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 36.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{37.0 - 36.3}{36.3} \times 100\% = 1.9\% < 15\% \quad \frac{36.3 - 35.3}{36.3} \times 100\% = 2.8\% < 15\%$$

(3) 结论：取中间值作为代表值，即 36.2MPa。

此组混凝土强度代表值为 36.2MPa。

混凝土 B10: 标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 182.0kN、179.3kN、185.0kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{182.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{179.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{185.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.6(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{17.6 - 17.3}{17.3} \times 100\% = 1.7\% < 15\% \quad \frac{17.3 - 17.0}{17.3} \times 100\% = 1.7\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 17.3MPa。

此组混凝土强度代表值为 17.3MPa。

混凝土 B10: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别

为 243.1kN、244.0kN、259.4kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{243.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 23.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{244.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 23.2(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{259.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 24.6(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{23.2 - 23.1}{23.2} \times 100\% = 6.0\% < 15\% \quad \frac{23.2 - 23.1}{23.2} \times 100\% = 0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 23.6MPa。

此组混凝土强度代表值为 23.6MPa。

混凝土 B10: 标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分

别为 376.9kN、394.5kN、396.4kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{376.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 34.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{394.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.5(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{396.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.3(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{37.5 - 37.3}{37.3} \times 100\% = 0.01\% < 15\% \quad \frac{37.3 - 34.9}{37.3} \times 100\% = 6.4\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 36.7MPa。

此组混凝土强度代表值为 36.7MPa。

混凝土 B20:标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 151.7kN、134.6kN、141.0kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{151.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 14.4(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{134.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 12.8(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{141.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 13.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{14.4 - 13.4}{13.4} \times 100\% = 7.5\% < 15\% \quad \frac{13.4 - 12.8}{13.4} \times 100\% = 5.2\% < 15\%$$

(3) 结论: 取平均值作为代表值, 即 13.5MPa。

此组混凝土强度代表值为 13.5MPa。

混凝土 B20:标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 186.1kN、192.3kN、208.4kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{186.1 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.7(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{192.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 18.3(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{208.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 19.8(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{19.8 - 18.3}{18.3} \times 100\% = 8.2\% < 15\% \quad \frac{18.3 - 17.7}{18.3} \times 100\% = 3.3\% < 15\%$$

(3) 结论: 取平均值作为代表值, 即 18.6MPa。

此组混凝土强度代表值为 18.6MPa。

混凝土 B20:标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 277.2kN、293.5kN、273.3kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{277.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.3(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{293.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 27.9(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{273.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.0(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{27.9 - 26.3}{26.3} \times 100\% = 6.1\% < 15\% \quad \frac{26.3 - 26.0}{26.3} \times 100\% = 1.1\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 26.7MPa。

此组混凝土强度代表值为 26.7MPa。

混凝土 B30:标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 112.3kN、119.7kN、117.6kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{112.3 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 10.7(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{119.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 11.4(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{117.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 11.2(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{11.4 - 11.2}{11.2} \times 100\% = 1.8\% < 15\% \quad \frac{11.2 - 10.7}{11.2} \times 100\% = 4.5\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 11.1MPa。

此组混凝土强度代表值为 11.1MPa。

混凝土 B30：标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 180.4kN、155.6kN、165.7kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{180.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{155.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 14.8(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{165.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 15.7(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{17.1-15.7}{15.7} \times 100\% = 12.7\% < 15\% \quad \frac{15.7-14.8}{15.7} \times 100\% = 5.7\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 15.9MPa。

此组混凝土强度代表值为 15.9MPa。

混凝土 B30：标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 260.7kN、268.9kN、267.4kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{260.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 24.8(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{268.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 25.5(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{267.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 25.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{25.5-25.4}{25.4} \times 100\% = 0\% < 15\% \quad \frac{25.4-24.8}{25.4} \times 100\% = 2.4\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 25.2MPa。

此组混凝土强度代表值为 25.2MPa。

混凝土 D10: 标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 199.2kN、179.6kN、189.7kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{199.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 18.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{179.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 17.1(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{189.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 18.0(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{18.9-18.0}{18.0} \times 100\% = 5.0\% < 15\% \quad \frac{18.0-17.1}{18.0} \times 100\% = 5.0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 18.0MPa。

此组混凝土强度代表值为 18.0MPa。

混凝土 D10: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 254.6kN、258.7kN、248.2kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{254.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 24.2(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{258.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 24.6(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{248.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 23.6(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{24.6 - 24.2}{24.2} \times 100\% = 1.7\% < 15\% \quad \frac{24.2 - 23.6}{24.2} \times 100\% = 2.5\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 24.1MPa。

此组混凝土强度代表值为 24.1MPa。

混凝土 D10: 标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 344.6kN、368.7kN、371.0kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu} = P/A$

$$f_{cu1} = \frac{344.6 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 32.7(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{368.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.0(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{371.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 35.2(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{35.2 - 35.0}{35.0} \times 100\% = 0.01\% < 15\% \quad \frac{35.0 - 32.7}{35.0} \times 100\% = 6.6\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 34.3MPa。

此组混凝土强度代表值为 34.3MPa。

混凝土 D20: 标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别

为 220.4kN、216.2kN、215.7kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{220.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.9(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{216.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.5(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{215.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.5(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{20.9 - 20.5}{20.5} \times 100\% = 2.0\% < 15\% \quad \frac{20.5 - 20.5}{20.5} \times 100\% = 0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 20.6MPa。

此组混凝土强度代表值为 20.6MPa。

混凝土 D20: 标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 289.0kN、297.0kN、281.4kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{289.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 27.5(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{297.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 28.2(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{281.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.7(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{28.2 - 27.5}{27.5} \times 100\% = 2.5\% < 15\% \quad \frac{27.5 - 26.7}{27.5} \times 100\% = 2.9\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 27.5MPa。

此组混凝土强度代表值为 27.5MPa。

混凝土 D20:标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 357.5kN、349.2kN、399.4kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{357.5 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 34.0(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{349.2 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 33.2(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{399.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 37.9(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{37.9 - 34.0}{34.0} \times 100\% = 11.5\% < 15\% \quad \frac{34.0 - 33.2}{34.0} \times 100\% = 2.4\% < 15\%$$

(3) 结论: 取平均值作为代表值, 即 35.0MPa。

此组混凝土强度代表值为 35.0MPa。

混凝土 D30:标准养护 3 天的混凝土进行抗压强度测试, 得到其抗压破坏荷载分别为 173.0kN、164.0kN、167.8kN, 计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{173.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 16.4(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{164.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 15.6(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{167.8 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 15.9(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{16.4 - 15.9}{15.9} \times 100\% = 3.1\% < 15\% \quad \frac{15.9 - 15.6}{15.9} \times 100\% = 1.9\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 16.0MPa。

此组混凝土强度代表值为 16.0MPa。

混凝土 D30:标准养护 7 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 216.8kN、216.7kN、223.4kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{216.8 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.6(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{216.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 20.6(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{223.4 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 21.2(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{21.2 - 20.6}{20.6} \times 100\% = 2.9\% < 15\% \quad \frac{20.6 - 20.6}{20.6} \times 100\% = 0\% < 15\%$$

(3) 结论：取平均值作为代表值，即 20.8MPa。

此组混凝土强度代表值为 20.8MPa。

混凝土 D30:标准养护 28 天的混凝土进行抗压强度测试，得到其抗压破坏荷载分别为 263.7kN、348.9kN、278.0kN，计算该组混凝土抗压强度代表值。

计算单块试件抗压强度 $f_{cu}=P/A$

$$f_{cu1} = \frac{263.7 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 25.1(MPa)$$

$$f_{cu2} = \frac{348.9 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 33.1(MPa)$$

$$f_{cu3} = \frac{278.0 \times 1000}{100^2} * 0.95 = 26.4(MPa)$$

(2) 与中间值比较

$$\frac{33.1-26.4}{26.4} \times 100\% = 26.4\% > 15\% \quad \frac{26.4-25.1}{26.4} \times 100\% = 4.9\% < 15\%$$

(3) 结论：取中间值作为代表值，即 26.4MPa。

此组混凝土强度代表值为 26.4MPa。

致 谢

为期几个月的试验和研究工作终于将落下帷幕了，研究的过程虽然有时枯燥，但很充实，有我们团队四个人一同配合，相互协作，尤其身边还有指导老师蒋业浩的耐心指导。从实验最开始的材料准备，到后来实验的顺利进行，以及实验过程中容易忽视细节的及时提醒，到最后实验的顺利完成和论文的整理都离不开蒋老师的悉心指导。在整个研究过程中，感受到蒋老师的严谨的治学态度，渊博的知识，潜移默化中让我受益良多。在此，我向我的指导老师蒋业浩表示由衷地感谢。同时感谢团队其他指导老师王欣、姜艳艳、许飞及姚荣老师在毕业设计期间给予的帮助。

三年的学习生涯即将落幕，有太多值得留恋的人和事，这也正是我丰富充实的大学生活的美好拼图。这次毕业设计是对我的大学三年专业知识的全面检验，也是一次让我的理论知识和动手实践结合难得的机会。回首即将结束的三年大学学习和生活，有学校领导的关照，有任课老师的淳淳教导，有班级同学的一同学习，共同进步，有舍友的生活互助，让我的大学生活弥足珍贵。因为他们的支持和帮助，让我有足够的勇气和信心去面对和战胜学习，生活中所遇到的困难。在此，我要向他们表示由衷的谢意！这三年，谢谢你们！