



建筑垃圾制备绿色水工程 材料技术与装备研究

主编 陈建国 刘鲁强 黄旭升 陈春



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

建筑垃圾制备绿色水工程 材料技术与装备研究

主编 陈建国 刘鲁强 黄旭升 陈春



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

随着我国水利、交通、城市建设的快速发展,建筑垃圾日益增多,传统的处理方法是直接填埋或露天堆放,不但浪费了大量的资源,而且具有占用土地、污染环境、破坏土壤结构、造成地表沉降等危害。随着人们环保意识的不断提高,对建筑垃圾资源化的意识正在逐步增强,将绿色发展理念应用到工程施工中,合理利用建筑垃圾是解决原材料短缺和建筑垃圾围城的有效途径。因此,加强对建筑垃圾制备绿色水工程材料技术与装备的相关研究,能够保证建筑垃圾资源化的顺利进行,推动循环经济发展。本书主要内容包括:CA与L·SAC再生骨料植生混凝土制备及性能研究;聚合物改性再生骨料植生混凝土制备及其性能研究;再生大骨料水工混凝土配制技术及性能研究;改性再生大骨料混凝土制备技术与性能研究;再生骨料制砂机的研究及应用。

本书兼顾了理论研究与实际应用,可为水利水电工程领域的科研与工程技术人员提供参考,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑垃圾制备绿色水工程材料技术与装备研究 / 陈建国等主编. — 北京:中国水利水电出版社, 2020.12
ISBN 978-7-5170-9340-4

I. ①建… II. ①陈… III. ①建筑材料—水利工程—无污染技术—研究 IV. ①TU5

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第270934号

书 名	建筑垃圾制备绿色水工程材料技术与装备研究 JIANZHU LAJI ZHIBEI LÜSE SHUIGONGCHENG CAILIAO JISHU YU ZHUANGBEI YANJIU
作 者	主编 陈建国 刘鲁强 黄旭升 陈春
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 262千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主编单位：广西壮族自治区水利科学研究院

广西水工程材料与结构重点实验室

主 编：陈建国 刘鲁强 黄旭升 陈 春

副主编：郭晋川 周立新 王忠民 曾 宏

参 编：莫开生 闫志勇 黄祖华 樊日宏 黄小兵

吴光军 何保煜 黄卓杰 周脉席 蒋 涛

李若愚 余晓彬 周靖靖 陈德伟 吴侯萍

杜 念 梁晓宁 韦美富 熊 湾 邓锦南

前言

FOREWORD



近年来，我国城市化进程的加快使建筑垃圾的产量与日俱增，但建筑垃圾资源化处理率很低。因此，进行建筑垃圾生产绿色水工程材料技术与装备研发可以从装备与工艺上提高建筑垃圾处理的效率、降低能耗、提高骨料品质、节约水资源，而且可以研发适用于水工程中的高性能绿色再生材料，对于极大减少砂、石资源开采对环境的破坏及拓宽再生材料应用领域具有重要意义。

过去的近 10 年中，作者围绕建筑垃圾生产绿色水工程材料技术与装备研发进行不断探索。先后获得广西重点研发计划（桂科 AB17292083、桂科 AB18221093）、广西十百千人才专项资金资助项目的资助。针对广西建筑垃圾处理装备、再生骨料的提升工艺、资源化利用水平及领域等方面存在的问题，在已有技术水平的基础上发扬创新精神，开展再生细骨料高品质提升装备研究，研发滚碾式再生细骨料制砂机，提高再生细骨料品质与生产效率；研究再生粗骨料高品质提升工艺，提高再生粗骨料与砂浆界面过渡区强度，实现再生粗骨料高品质提升；研发以再生粗、细骨料为基础配制再生骨料植生混凝土、再生大骨料水工混凝土、改性再生大骨料混凝土等系列绿色水工程材料，实现绿色再生水工程材料在大中型水利枢纽工程、水库除险加固工程及流域河流生态治理与修复工程等水利工程中的广泛应用。

本书共 5 章，内容包括：CA 与 L·SAC 再生骨料植生混凝土制备及性能研究、聚合物改性再生骨料植生混凝土制备及其性能研究、再生大骨料水工混凝土配制技术及性能研究、改性再生大骨料混凝土制备技术与性能研究、再生骨料制砂机的研究及应用。本书兼顾了理论研究与实际应用，可为科研与工程技术人员提供参考。

感谢与作者一起参与建筑垃圾生产绿色水工程材料技术与装备研究并进行推广应用的同人们！感谢书中提及的相关工程为课题组提供了许多科研成果在重大工程中应用的机会！

由于作者水平有限，书中可能存在诸多不足甚至错误，恳请专家和读者批评指正。

作者

2020年8月于南宁



目录

CONTENTS

前言

第 1 章 CA 与 L·SAC 再生骨料植生混凝土制备及性能研究	1
1.1 原材料及试验方法	1
1.2 再生骨料植生混凝土配合比设计	8
1.3 再生骨料植生混凝土性能研究	14
1.4 植生试验	27
1.5 结论及展望	33
参考文献	35
第 2 章 聚合物改性再生骨料植生混凝土制备及其性能研究	37
2.1 原材料及试验方法	37
2.2 植生混凝土配合比设计及性能研究	44
2.3 聚合物改性再生骨料植生混凝土性能研究	53
2.4 植生试验	69
2.5 结论与展望	78
参考文献	79
第 3 章 再生大骨料水工混凝土配制技术及性能研究	82
3.1 试验原材料及试验方法	82
3.2 再生大骨料水工混凝土拌和物及力学性能研究	88
3.3 再生大骨料水工混凝土的耐久性能、长期性能及热学性能研究	99
3.4 再生大骨料水工混凝土的微观机理研究	109
3.5 结论与展望	113
参考文献	114

第4章 改性再生大骨料混凝土制备技术与性能研究

115

4.1 试验原材料及试验方法	115
4.2 再生大骨料改性试验研究	119
4.3 改性再生大骨料混凝土性能试验研究	123
4.4 改性再生骨料混凝土工程应用	139
4.5 结论与展望	143
参考文献	144

第5章 再生骨料制砂机的研究及应用

145

5.1 概述	145
5.2 设备情况	146
5.3 设备优势	150
5.4 检测指标	152
5.5 研究成果	156
5.6 工程运用	161
5.7 小结	162

第 1 章

CA 与 L·SAC 再生骨料植生混凝土 制备及性能研究

植生混凝土是一种多孔结构的生态混凝土。再生骨料植生混凝土是在植生混凝土的基础上，采用再生骨料作为粗骨料制备而成的，是一种资源节约、环境减负型生态混凝土，应用前景广阔。

本章选用铝酸盐水泥（CA）、低碱度硫铝酸盐水泥（L·SAC）和 20~40mm 的再生骨料，采用体积法设计再生骨料植生混凝土配合比，通过孔隙率、透水性能、抗压强度、孔隙溶液 pH 值、弹性模量等参数，研究再生骨料植生混凝土的性能，并进一步开展植生试验。

1.1 原材料及试验方法

植生混凝土的结构是无砂大孔型的，由胶凝材料、粗骨料和水等制成。该结构通过胶凝材料在粗骨料表面的包裹，形成一层均匀的浆体，对骨料进行点式黏结，从而形成具有连续大孔隙的整体。一方面，植生混凝土的特殊结构导致其强度不高，而户外的工作环境又使得它需要一定的强度和耐久性能；另一方面，能够适应植物生长的环境 pH 值与普通硅酸盐水泥植生混凝土相差较大。因此，针对满足植生混凝土的长期性能和植生性能，进行原材料种类、质量的优选十分必要。再生骨料植生混凝土试块如图 1.1 所示。

1.1.1 原材料

1. 胶凝材料

本章研究的再生骨料植生混凝土是不采用砂的多孔生态混凝土，其强度来源主要是骨料和黏结骨料的胶凝材料浆体。荷载作用时，黏结骨料的胶凝浆体首当其冲。

试验采用的水泥如下：强度等级 42.5

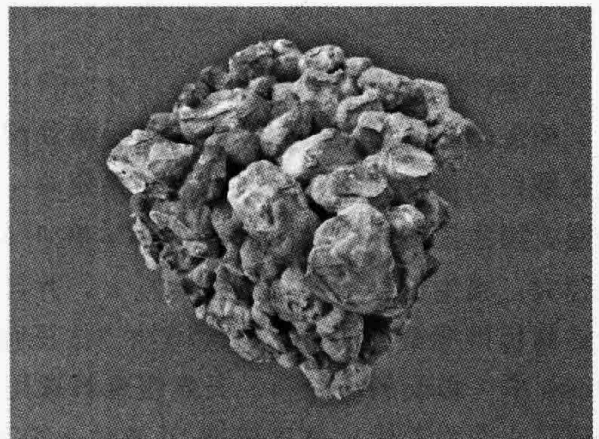


图 1.1 再生骨料植生混凝土试块

的海螺牌普通硅酸盐水泥 (P·O42.5), 其化学成分和技术指标均应满足 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》等相关规范及标准的有关规定; 强度等级 42.5 的云燕牌低碱度硫铝酸盐水泥 (L·SAC42.5), 其化学成分和技术指标均应满足 GB 20472—2006《硫铝酸盐水泥》等相关规范及标准的有关规定; 强度等级 50 的慧信牌铝酸盐水泥 (CA-50), 其化学成分和技术指标均应满足 GB/T 201—2015《铝酸盐水泥》等相关规范及标准的有关规定。胶凝材料的主要化学成分组成见表 1.1, 胶凝材料的主要物理性能见表 1.2, 胶凝材料微观扫描图如图 1.2 所示。

表 1.1 胶凝材料的主要化学成分组成 %

水泥品种	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	L. O. I	SO ₃
P·O42.5	65.52	22.45	4.49	4.13	1.47	1.09	0.94
L·SAC42.5	47.90	5.78	23.10	1.56	1.74	—	17.30
CA-50	34.42	6.70	51.68	2.19	—	—	—

表 1.2 胶凝材料的主要物理性能

水泥品种	比表面积 / (m ² /kg)	密度 / (g/cm ³)	标稠用水量 / %	凝结时间 / min		抗压强度 / MPa		抗折强度 / MPa	
				初凝	终凝	1d	7d	1d	7d
P·O42.5	368	3.10	25	185	240	9.6	34.5	1.9	6.1
L·SAC42.5	436	2.79	132	30	56	39.7	47	6.7	7.5
CA-50	425	3.20	150	99	124	62.4	71.7	8.0	8.9

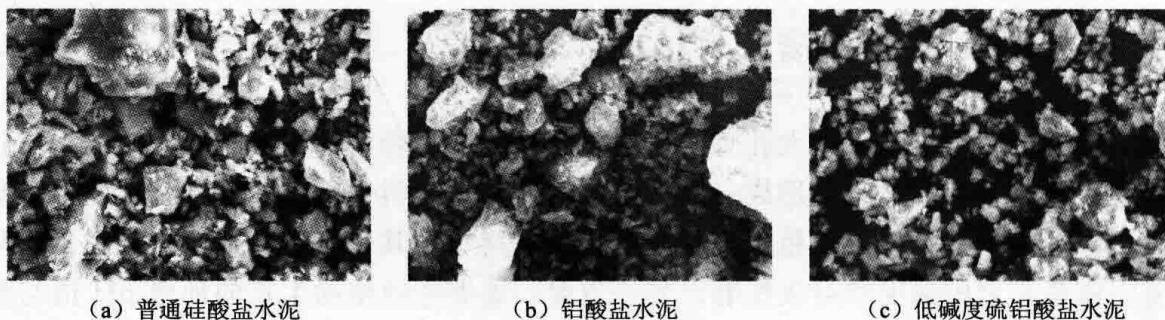


图 1.2 胶凝材料微观扫描图

2. 粗骨料

植生混凝土需要一定的孔隙满足植物根系生长需要, 而传统连续级配的石子不利于连通孔隙的形成, 所以植生混凝土宜采用单一级配的粗骨料进行配制。许多学者的研究表明, 植生混凝土 28d 抗压强度基本在 10MPa 左右^[1-4], 目标孔隙率相同时, 粗骨料粒径越大, 植生混凝土的抗压强度越大, 并且骨料粒径越大越有利于大孔隙的连通。因此, 为提高植生混凝土的大孔隙连通性、抗压强度及耐久性等性能, 本次试验采用粒径 20~40mm 单一级配的粗骨料。天然粗骨料选用石灰岩碎石, 再生粗骨料为废弃混凝土和少量废弃砖, 粗骨料性能测试依据 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》、JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》等规范的相关规定, 测试结果见表 1.3。

表 1.3 粗骨料物理性能指标

骨料	粒径/mm	表观密度/(kg/m ³)	紧密堆积密度/(kg/m ³)	紧密堆积孔隙率/%	含水率/%	吸水率/%	压碎指标
天然骨料	20~40	2690	1565	41.8	1.5	0.35	11
再生骨料	20~40	2350	1362	42.1	3.1	4.92	17.3

在骨料粒径 20~40mm 的条件下, 相比天然骨料, 再生骨料的表观密度、紧密堆积密度较小, 但两者的紧密堆积孔隙率相差较小, 这使得在配合比设计时, 若水灰比、目标孔隙率相同, 两种骨料的胶凝材料和水的用量相差不大, 在性能对比时更具可比性。再生骨料的含水率和吸水率均大于天然骨料, 原因主要是再生骨料表面均包裹一层砂浆, 砂浆的孔隙率远大于天然骨料。

3. 种植土

试验所用种植土为美乐牌通用型营养土, 主要成分为泥炭、椰糠椰壳、树皮和保水剂等。按固水质量比 1:10 进行浸泡, 2h 后, 悬浊液的 pH 值为 5.6。种植土养分含量见表 1.4。

表 1.4 种植土养分含量

养分	全氮 (N)	磷酐 (P ₂ O ₅)	氧化钾 (K ₂ O)
含量/%	0.68	0.27	0.36

1.1.2 试验方法

1. 净浆流动度

浆体流动性能测试参照 GB/T 2419—2016《水泥胶砂流动度测定方法》。在制备胶凝浆料时, 用湿棉布擦拭直接接触浆料的工具, 如跳桌台面、试验磨具内壁、插捣棒等。将试模放在跳桌的中央, 用湿棉布覆盖, 保持表面湿润; 将拌和好的胶凝浆体分两层装入试模内, 第一层装至截锥圆模高约 2/3 处, 插捣方式见图 1.3, 用捣棒均匀捣压 [图 1.3 (a)]; 然后, 装入第二层浆体, 约高出截锥圆模 20mm, 均匀捣压 [图 1.3 (b)]; 装模结束后, 用刮刀刮去超出试模高度的浆体, 取下试模并开启跳桌, 在 25s±1s 内完成 25 次跳动, 进行净浆流动度测定。

2. 吸水率

植生混凝土吸水率的大小能够在一定程度上反映其内部孔隙结构情况。一方面, 吸水率越大, 植生混凝土内部毛细孔越多, 抵抗寒冷气候冻融作用的能力越差, 是衡量植生混凝土抗冻性能的一个重要技术指标; 另一方面, 植生混凝土的吸水性能够长时间有效保持内部的水分, 有利于植物溶解营养物质, 供植物吸收。所以, 植生混凝土吸水率的测定具有重要的意义。

植生混凝土吸水率的测定参考 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》中粗骨料吸水率的试验方法进行, 具体步骤如下:

(1) 将植生混凝土试块置于水中浸泡, 并使水面至少超出试块上表面 20mm, 浸泡 24h 后, 取出并用拧干的湿毛巾擦干试块表面的液态水, 直至试块呈饱和面干状态, 称量

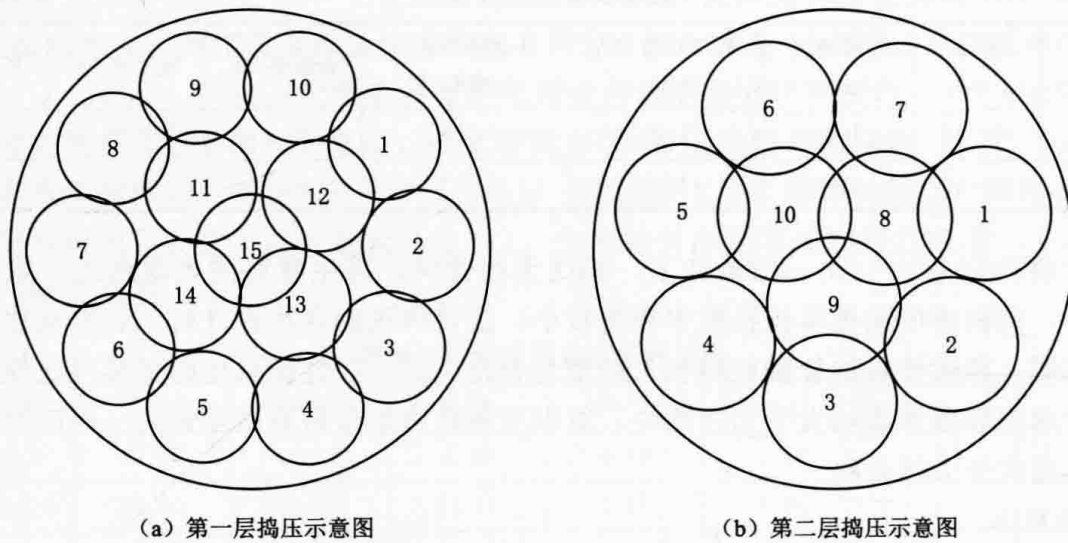


图 1.3 流动度测量插捣示意图

后记为 G_1 。

(2) 将试块置于 $100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重, 冷却后称取其质量记为 G_2 。

(3) 以干料为基准的植生混凝土吸水率按式 (1.1) 以 3 个试块的平均值进行计算:

$$a = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中 a ——以干料为基准的植生混凝土吸水率, %;

G_1 ——试块饱和面干质量, g;

G_2 ——试块的烘干质量, g。

3. 孔隙率

孔隙率是植生混凝土的一项关键性能。总孔隙率的大小决定植物生长时根系能否正常伸展。孔隙率越大, 植物根系向下伸展的空间越大, 植物的生长就越好。连通孔隙率的大小影响植生混凝土的透水性能, 有效的连通孔隙率越大, 能够渗透的水分越多, 植物能够吸收的水分和养料越多, 长势就越好。因此, 测定植生混凝土的孔隙率和连通孔隙率的大小能够更加有利于植物生长情况的分析。植生混凝土孔隙率测试没有相关规范可以参照, 可参考如下步骤^[5]:

(1) 成型 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的植生混凝土立方体试块, 成型 24h 后拆模, 并置于标准养护室进行养护。

(2) 养护龄期至 28d 时, 取出称取试块在空气中的质量 W_1 ; 然后烘干 24h 后称取试块在空气中的质量 W_2 ; 最后, 将试块置于水中浸泡 24h 后, 称取其在水中的质量 W_3 。

(3) 植生混凝土的总孔隙率和连通孔隙率分别按式 (1.2) 和式 (1.3) 以 3 个试件的平均值计算:

$$P_1 = \left(1 - \frac{W_2 - W_3}{\rho_w V}\right) \times 100\% \quad (1.2)$$

$$P_2 = \left(1 - \frac{W_1 - W_3}{\rho_w V}\right) \times 100\% \quad (1.3)$$

式中 P_1 、 P_2 ——总孔隙率和连通孔隙率，%；
 W_1 ——试块养护 24h 后在空气中的质量，g；
 W_2 ——试块烘干 24h 后在空气中的质量，g；
 W_3 ——试块浸泡 24h 后在水中的质量，g；
 ρ_w ——水的密度，g/cm³；
 V ——试块的外观体积，cm³。

4. 透水系数

透水系数是描述植生混凝土透水性能的一个重要参数。植生混凝土内部孔隙的大小、形态及分布决定其透水性能的好坏，有效孔隙越大、连通性越强，植生混凝土的透水性能则越好。因此，测定透水系数对评价植生混凝土的透水性能具有重要的参考意义。透水系数测定试验参照 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》等规范的相关规定进行，透水系数测试示意图如图 1.4^[6]所示。具体步骤如下^[7-8]：

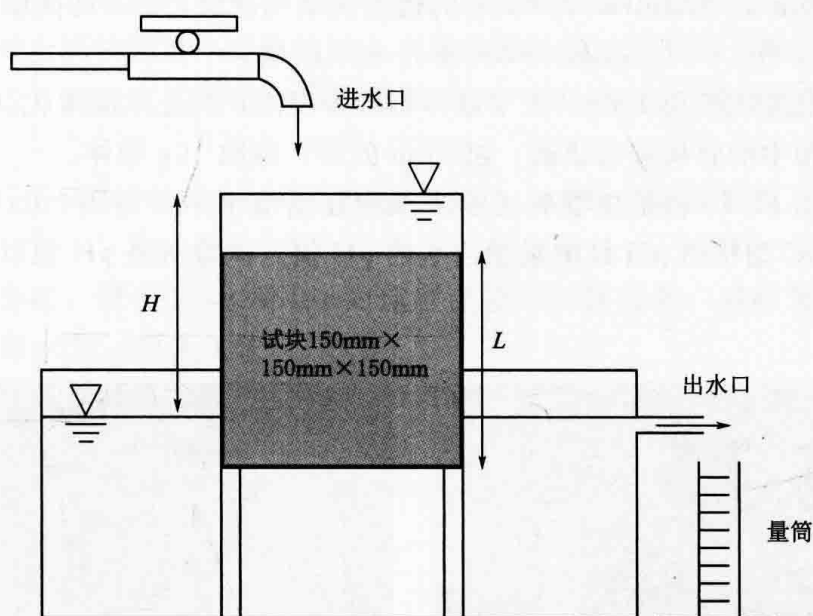


图 1.4 透水系数测试示意图

- (1) 成型 150mm×150mm×150mm 的植生混凝土立方体试块，成型 24h 后拆模，并置于标准养护室养护至 28d。
- (2) 将试块装入装置中，并保证四周密封。
- (3) 打开进水口使水流入装置中，待试块上部液面稳定后，开始透水系数的测定，记录水槽液面到试块上部液面的水头高度 H ，单位时间 Δt 内流经试块的水量 Q 。
- (4) 透水系数按式 (1.4) 以 3 个试件的平均值计算：

$$K = \frac{QL}{AH\Delta t} \quad (1.4)$$

式中 K ——植生混凝土透水系数，cm/s；
 Q —— Δt 时间内流经试块的水量，cm³；
 L ——试块的高度，cm；

A ——水流流经方向混凝土试块的面积, cm^2 ;

H ——水头高度, cm ;

Δt ——测试时间, s 。

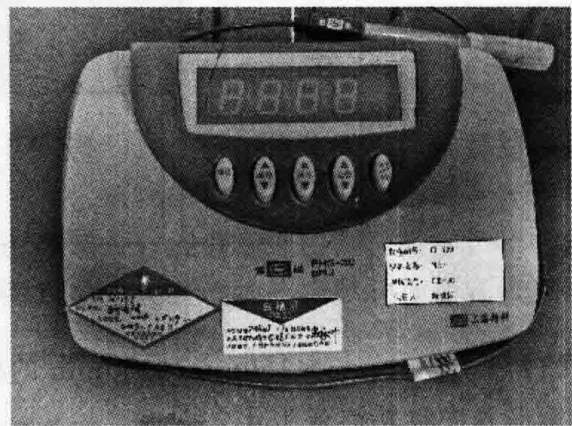
5. 孔隙溶液 pH 值

目前, 行业中常用的植生混凝土孔隙溶液 pH 值测试方法主要有孔隙水挤压法、原位萃取法和取出萃取法^[9]。其中, 孔隙水挤压法对测试设备的要求比较高, 并且挤压出孔隙溶液的量非常少, 获得的结果误差较大, 不适用于本试验。原位萃取法需要在混凝土表面钻孔, 不适用于植生混凝土。蒸馏水浸泡的方法能够溶解试块表面及浅层的碱性物质, 相比实际值, 所得 pH 值较小。因此, 综合国内外文献, 本章采用研磨法对植生混凝土内部 pH 值进行测定。为消除未水化颗粒对测试结果的影响, 植生混凝土碎块研磨成粉状前, 将碎块置于液体酒精中浸泡, 终止水化^[4,10]。测试仪器如图 1.5 所示。具体步骤如下:

- (1) 成型 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的植生混凝土试块, 24h 后拆模, 分组置于标准养护室养护至 3d、7d、14d、21d、28d、56d、90d 龄期。
- (2) 取植生混凝土碎块 100g, 置于液体酒精中浸泡, 终止水泥水化。
- (3) 取出酒精中的碎块进行研磨, 过 $6\mu\text{m}$ 的筛, 称取 10g 粉体。
- (4) 按固水比 1 : 10 将植生混凝土粉末浸泡在蒸馏水中并每隔 30min 摇匀一次, 2h 后, 采用 pHS-3C 型精密 pH 计测量桶内水的 pH 值, 试验所得 pH 值以 3 次测量的平均值为准。



(a) pH 缓冲剂



(b) pH 计

图 1.5 孔隙溶液 pH 值测试仪器

6. 抗压强度

抗压强度是植生混凝土主要的力学性能, 也是耐久等性能的评价基础。抗压强度越高的植生混凝土, 经受冲磨、冻融等作用后的残余抗压强度越高。因此, 抗压强度越高的植生混凝土越能够长时间地在恶劣环境下保水固土, 维护植物的生长。本章植生混凝土抗压强度试验采用上海新三思计量仪器制造有限公司生产的万能液压试验机, 并参考 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》进行。具体步骤如下:

- (1) 成型 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的植生混凝土立方体试块, 成型 24h 后拆模, 并置于标准养护室养护至相应龄期。
- (2) 将试块置于下压板的中心, 并保证上下压板的平行。
- (3) 以 $0.1 \sim 0.3\text{MPa/s}$ 的速度连续匀速地加压直至试件破坏。
- (4) 抗压强度按式 (1.5) 以 3 个试件的平均值计算:

$$f_{cc} = \frac{P}{A} \quad (1.5)$$

式中 f_{cc} ——抗压强度, MPa;

P ——破坏荷载, N;

A ——承压面积, mm^2 。

7. 弹性模量

本构关系为应力张量与相应应变张量的比值, 能够反映物质宏观性质的数学模型, 是混凝土材料一种重要、最具特征性的力学性质。通过测定植生混凝土的弹性模量可以获得本构关系, 从本质上反映强度—变形规律。本章弹性模量试验采用上海新三思计量仪器制造有限公司生产的万能液压试验机, 并参考 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》进行。具体步骤如下:

- (1) 成型 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的植生混凝土试块, 成型 24h 后拆模, 并置于标准养护室养护至 28d。
- (2) 开动压力机, 以 $0.1 \sim 0.3\text{MPa}$ 的速度连续均匀地加载, 进行预压, 最大压应力为预估破坏荷载的 40%, 反复 3 次。
- (3) 进行弹性模量试验, 同样以 $0.1 \sim 0.3\text{MPa}$ 的速度连续均匀地加载, 记录至少 6 个荷载下的变形值。
- (4) 弹性模量按式 (1.6) 以 3 个试件的平均值计算:

$$E_c = \frac{P_2 - P_1}{A} \frac{L}{\Delta L} \quad (1.6)$$

式中 E_c ——静力抗压弹性模量, MPa;

P_2 ——40%的极限破坏荷载, N;

P_1 ——0.5MPa 时的荷载值, N;

A ——试件的承压面积, mm^2 ;

L ——测量变形的标距, mm;

ΔL ——试件从 0.5MPa 加载到 40% 极限破坏荷载的变形值, mm。

8. 干燥收缩

植生混凝土的干燥收缩的评估指标主要是干缩率, 干缩率试验参考 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》进行, 具体步骤如下:

- (1) 成型 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 515\text{mm}$ 的试块, 成型 48h 后拆模。
- (2) 拆模后移至于干缩室并测量初始高度作为基准高度。
- (3) 将试件置于不吸水的硬质板上, 并连同硬质板一起置于干缩架上。
- (4) 自测定基准长度后开始计试件的干缩龄期 3d、7d、14d、28d、56d、90d, 每个

龄期测量一次试件的高度。

每个龄期下的干缩率按式(1.7)以3个试件的平均值计算:

$$\epsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0} \quad (1.7)$$

式中 ϵ_t —— t 天龄期的干缩率;

L_t —— t 天龄期时试件高度, mm;

L_0 ——试件基准高度, mm。

1.2 再生骨料植生混凝土配合比设计

1.2.1 目标性能

再生骨料植生混凝土配制时先设定目标孔隙率,按照胶凝浆体均匀包裹粗骨料表面的原理进行设计,然后通过体积法进行配合比计算。

(1) 孔隙率。植物生长需要一定的空间进行生根发芽。土壤中孔隙的占比一般为35%~65%,这使得植物能够通过根系的发展汲取水分和养料。对于植生混凝土来说,孔隙率越大越有利于植物的生长。然而,过大的孔隙率将导致植生混凝土抗压强度和抗风化能力的降低。所以,将植生混凝土的孔隙率设定在22%~35%较为适宜。

(2) 抗压强度。植生混凝土多用于城市绿化及河道护坡,需要一定的抗侵蚀能力。但是其所承受的荷载不多,因此其抗压强度要求不高。日本有规范规定,用于护岸的植生混凝土28d抗压强度不得低于10MPa。然而,多数相关试验表明,植生混凝土的28d抗压强度一般为9.0MPa左右,且基本能够满足工程使用。

1.2.2 配合比计算

目前为止,植生混凝土配合比计算方法还没有规范的统一要求。本章采用体积法进行植生混凝土的配合比计算。体积法认为组成植生混凝土的目标孔隙、胶凝材料、粗骨料等体积总和等于混凝土的总体积,表达式为

$$V_a + V_c + V_g = V \quad (1.8)$$

式中 V_a 、 V_c 、 V_g ——孔隙体积、胶凝材料体积和粗骨料体积。

具体计算步骤如下:

(1) 单位体积粗集料用量按式(1.9)计算:

$$W_g = \alpha \rho_g \quad (1.9)$$

式中 W_g ——粗集料的用量, kg;

α ——粗集料修正系数,取0.98;

ρ_g ——粗集料的紧密堆积密度, kg/m³。

(2) 胶凝材料用量计算。胶凝材料体积按式(1.10)计算:

$$V_J = 1 - \alpha(1 - P_g) - R_{\text{void}} \quad (1.10)$$

式中 V_J ——胶结浆体体积, L;

P_g ——粗集料紧密堆积空隙率, %;

R_{void} ——设计目标孔隙率, %。

则水泥用量可按照式 (1.11) 计算:

$$W_c = \frac{V_J}{R_{w/c} + 1} \rho_c \quad (1.11)$$

式中 W_c ——水泥用量, kg;

V_J ——胶结浆体体积, L;

$R_{w/c}$ ——水灰比;

ρ_c ——水泥的密度, kg/m³。

(3) 单位体积用水量按照式 (1.12) 计算:

$$W_w = W_c R_{w/c} \quad (1.12)$$

式中 W_w ——单位体积混凝土用水量, kg;

W_c ——水泥用量, kg;

$R_{w/c}$ ——水灰比。

1.2.3 试拌

1.2.3.1 搅拌工艺

传统混凝土的制备基本上是采用一次性给料法, 搅拌前将水泥、砂、石子、水及外加剂等一次性倒入搅拌设备进行拌和。一次性给料法虽然操作简单、快捷, 但是植生混凝土结构与普通混凝土结构相差较大, 一次性给料法容易产生“滚珠”现象, 投料操作不当还会导致浆体结成块, 往往无法将混凝土拌和均匀。研究发现, 采用预裹浆法的效果更好, 在拌和前先加入胶凝材料和部分水预润粗骨料, 再加入剩余的水进行搅拌, 这样获得的植生混凝土拌和物能够使浆体更加均匀地包裹在粗骨料的表面。

本章试验采用预裹浆法进行植生混凝土拌和, 通过调整粗骨料、胶凝材料和水顺序达到胶凝浆体均匀包裹粗骨料的效果, 拌和物如图 1.6 所示。具体步骤为: 首先向强制式单卧轴混凝土搅拌机投入全部的粗骨料、全部的胶凝材料和 40% 的水进行搅拌 30s, 使胶凝材料均匀地包裹在粗骨料表面; 然后加入剩余水搅拌 120s, 使浆体更加均匀充分地包裹在粗骨料的表面; 最后, 将拌和好的植生混凝土拌和物卸倒在湿润的铁板上, 进行装模。

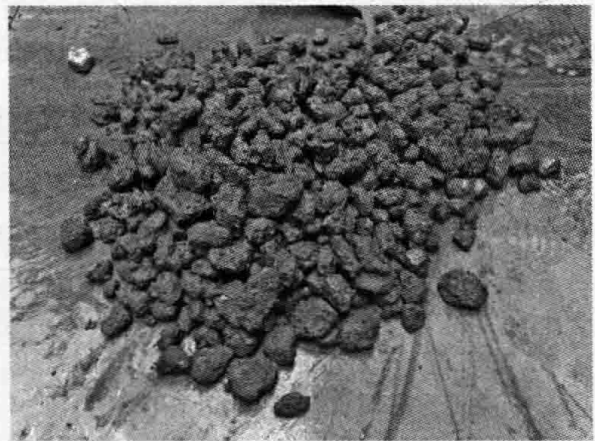


图 1.6 再生骨料植生混凝土拌和物

1.2.3.2 成型工艺

植生混凝土成型工艺的关键是使骨料通过胶凝浆体紧密黏结, 并保证中间的孔隙连通, 试模底不出现沉浆堵塞孔隙。因此, 控制胶凝材料的净浆流动度尤为重要。配制植生混凝土时, 一般控制净浆流动度为 150~200mm。当净浆流动度为 150~170mm 时, 浆体较稠, 此时应通过振动密实; 当流动度为 180~200mm, 浆体流动度较大, 此时宜通过插捣的方式使混凝土密实; 流动度为 170~180mm 时, 则可以结合两种方式综合选择。