



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Civil Engineering Materials

土木工程材料

· 平台课课程群 ·

主编 杨 杨 钱晓倩
主审 张亚梅



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

土木工程材料

主编 杨 杨 钱晓倩
主审 张亚梅



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/杨杨,钱晓倩主编. —武汉:武汉大学出版社,2014.6
高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材
ISBN 978-7-307-12642-8

I. 土… II. ①杨… ②钱… III. 土木工程—建筑材料—高等学校—教材 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 316754 号

责任编辑:郭芳 蔡巍

责任校对:方竞男

装帧设计:吴极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:23.25 字数:747千字

版次:2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷

ISBN 978-7-307-12642-8 定价:43.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方志 叶列平 何若全 沙爱民 范峰 周铁军 魏庆朝

委员:王辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉

周云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高波

委员:丁克伟 丁建国 马昆林 王成 王湛 王媛 王薇

王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒

王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方俊

龙广成 申爱国 付钢 付厚利 白晓红 冯鹏 曲成平

吕平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅

刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁皓 许伟 许程洁 许婷华

阮波 杜咏 李波 李斌 李东平 李远富 李炎锋

李耀庄 杨杨 杨志勇 杨淑娟 吴昊 吴明 吴轶

吴涛 何亚伯 何旭辉 余锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全

张红 张纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元

张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰

胡世阳 侯建国 姜清辉 娄平 袁广林 桂国庆 贾连光

夏元友 夏军武 钱晓倩 高飞 高玮 郭东军 唐柏鉴

黄华 黄声享 曹平周 康明 阎奇武 董军 蒋刚

韩峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾珂 雷宏刚

廖莎 廖海黎 缪宇宁 黎冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王睿 白立华 曲生伟 蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。


本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

 本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录 www.stmpress.cn 下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

群支木好编出

(本其画学为技技)

王:周国良

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。


2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“高等教学改革土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前 言

本书以高等学校土木工程专业指导委员会编写的《土木工程材料教学大纲》为依据进行编写,系统地讲述了常用土木工程材料的基本组成及结构、生产工艺、技术性质、应用、材料实验等基本理论及应用技术。通过对本书的学习,读者可了解主要土木工程材料的性质、用途、制备和使用方法以及检测和质量控制方法,材料性质与材料组成和结构的关系以及性能改善的途径,材料与设计参数及施工措施选择的相互关系,能针对不同工程的要求合理选用材料。

本书由浙江工业大学杨杨和浙江大学钱晓倩担任主编;浙江大学孟涛和浙江工业大学孔德玉担任副主编;浙江科技学院张云莲,浙江工业大学叶青和施韬,浙江华威建材集团有限公司王章夫担任参编。浙江大学硕士研究生孟睿覃、王梦华、杨潮军参与了部分图片制作和文字录入等工作。

具体编写分工为:杨杨(前言、第4章),钱晓倩(第6章),孟涛(第3章、第7章、第9章、第11章),孔德玉(第1章、第2章),张云莲(第10章),叶青(第5章),施韬(第8章),王章夫(经典案例)。

本书采用国家与行业最新技术标准和规范,并介绍了相关材料最新研究进展和发展方向,应用性强、适用面宽,可作为土木工程相关专业的教学用书,也可供土木工程设计、施工、科研、工程管理和监理人员学习参考。

由于土木工程材料科学和技术发展很快,新材料、新工艺、新标准层出不穷,书中难免有不当、有待商榷、甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014年3月

浙江理工大学土木工程专业

目 录

1 土木工程材料的基本性质	(1)	2.4 镁质胶凝材料	(32)
1.1 材料的物理性质	(2)	2.4.1 镁质胶凝材料的生产	(32)
1.1.1 材料的体积组成	(2)	2.4.2 菱苦土	(32)
1.1.2 材料与密度有关的物理参数	(2)	2.4.3 氯氧镁水泥	(33)
1.1.3 材料与孔隙有关的物理参数	(5)	知识归纳	(33)
1.1.4 材料与空隙有关的物理参数	(6)	独立思考	(33)
1.1.5 材料与水有关的性质	(6)	参考文献	(33)
1.1.6 材料与热有关的性质	(9)		
1.1.7 材料与火有关的性质	(11)	3 水泥	(34)
1.1.8 材料与声音有关的性质	(11)	3.1 通用硅酸盐水泥	(35)
1.2 材料的力学性质	(12)	3.1.1 硅酸盐水泥熟料的原材料与生产	
1.2.1 材料的强度及强度等级	(12)	工艺	(35)
1.2.2 材料的弹性与塑性	(15)	3.1.2 水泥混合材料	(35)
1.2.3 材料的脆性与韧性	(16)	3.1.3 通用硅酸盐水泥的定义与	
1.2.4 材料的硬度与耐磨性	(16)	分类	(36)
1.3 材料的耐久性	(17)	3.2 通用硅酸盐水泥的水化	(37)
1.4 材料的组成与结构	(18)	3.2.1 硅酸盐水泥熟料的水化	(37)
1.4.1 材料的组成	(18)	3.2.2 活性混合材料的辅助胶凝	
1.4.2 材料的结构	(18)	作用	(40)
知识归纳	(21)	3.2.3 硅酸盐水泥的凝结与硬化	
独立思考	(22)	机理	(40)
参考文献	(22)	3.2.4 硬化水泥浆体的微结构	(41)
		3.2.5 影响水泥水化、凝结与硬化的主要	
		因素	(42)
2 气硬性胶凝材料	(23)	3.3 硬化水泥石的化学腐蚀与防护	(44)
2.1 石灰	(24)	3.3.1 常见的化学腐蚀作用	(44)
2.1.1 石灰的生产与分类	(24)	3.3.2 硬化水泥石的防腐措施	(45)
2.1.2 石灰的水化、凝结与硬化	(24)	3.4 通用硅酸盐水泥的技术指标与	
2.1.3 石灰的性质、技术要求和		要求	(45)
应用	(25)	3.4.1 细度	(46)
2.2 石膏	(27)	3.4.2 标准稠度用水量	(46)
2.2.1 石膏的生产与分类	(27)	3.4.3 凝结时间	(46)
2.2.2 建筑石膏的水化与硬化	(28)	3.4.4 体积安定性	(46)
2.2.3 建筑石膏的性质和技术要求	(29)	3.4.5 强度与强度等级	(47)
2.2.4 建筑石膏的应用和储运	(30)	3.4.6 碱含量	(48)
2.3 水玻璃	(30)	3.4.7 水化热	(48)
2.3.1 水玻璃的生产	(31)	3.5 通用硅酸盐水泥的特性与选用	(48)
2.3.2 水玻璃的性质	(31)	3.6 其他品种水泥	(51)
2.3.3 水玻璃的应用	(31)		

3.6.1 特性硅酸盐水泥	(51)	准备	(116)
3.6.2 特种水泥	(53)	4.8.3 混凝土配合比设计中的三个 基本参数	(116)
3.6.3 专用水泥	(56)	4.8.4 混凝土配合比设计步骤	(117)
知识归纳	(58)	4.9 有特殊要求的混凝土及其配合比 设计	(125)
独立思考	(58)	4.9.1 预拌(泵送)混凝土	(125)
参考文献	(58)	4.9.2 高强混凝土	(125)
4 混凝土	(60)	4.9.3 抗渗混凝土	(126)
4.1 概述	(61)	4.9.4 抗冻混凝土	(128)
4.2 混凝土的组成材料	(62)	4.9.5 自密实混凝土	(128)
4.2.1 胶凝材料	(62)	4.10 轻混凝土	(132)
4.2.2 骨料	(67)	4.10.1 轻骨料混凝土	(132)
4.2.3 水	(76)	4.10.2 多孔混凝土	(133)
4.2.4 化学外加剂	(76)	4.10.3 大孔混凝土	(134)
4.3 混凝土拌和物的和易性	(84)	4.11 其他混凝土	(134)
4.3.1 和易性的概念	(84)	4.11.1 道路混凝土	(134)
4.3.2 和易性的测定方法	(85)	4.11.2 喷射混凝土	(135)
4.3.3 流动性(坍落度)的选择	(86)	4.11.3 水下混凝土	(135)
4.3.4 影响拌和物和易性的因素	(87)	4.11.4 纤维增强混凝土	(135)
4.3.5 混凝土拌和物和易性的改善 措施	(90)	4.11.5 聚合物混凝土	(136)
4.4 硬化混凝土的强度	(90)	4.11.6 防辐射混凝土	(137)
4.4.1 混凝土的受压破坏过程	(90)	4.11.7 再生骨料混凝土	(137)
4.4.2 混凝土的强度指标	(91)	知识归纳	(138)
4.4.3 影响混凝土强度的因素	(93)	独立思考	(138)
4.4.4 提高混凝土强度的措施	(98)	参考文献	(139)
4.5 混凝土的变形性能	(98)	5 建筑砂浆	(140)
4.5.1 在非荷载作用下的变形	(98)	5.1 砌筑砂浆	(141)
4.5.2 荷载作用下的变形	(101)	5.1.1 砌筑砂浆的组成材料	(141)
4.6 混凝土的耐久性	(102)	5.1.2 砌筑砂浆的技术性能	(142)
4.6.1 混凝土材料本身的耐久性 问题	(102)	5.1.3 砌筑砂浆的配合比	(146)
4.6.2 与钢筋锈蚀相关的耐久性 问题	(109)	5.2 抹面砂浆	(150)
4.6.3 提高混凝土耐久性的措施	(111)	5.2.1 普通抹面砂浆	(150)
4.7 混凝土的质量控制与评定	(113)	5.2.2 防水砂浆	(151)
4.7.1 混凝土的质量波动	(113)	5.2.3 装饰砂浆	(151)
4.7.2 混凝土强度的波动规律——正态 分布	(113)	5.3 预拌砂浆	(152)
4.7.3 强度波动的统计计算	(114)	5.3.1 预拌砂浆所用原材料	(152)
4.7.4 混凝土强度合格评定	(115)	5.3.2 预拌湿砂浆	(153)
4.8 普通混凝土的配合比设计	(116)	5.3.3 预拌干砂浆	(153)
4.8.1 混凝土配合比设计的基本 要求	(116)	5.4 特种砂浆	(154)
4.8.2 混凝土配合比设计前的资料 准备	(116)	5.4.1 绝热砂浆	(154)
		5.4.2 吸声砂浆	(155)
		5.4.3 耐酸砂浆	(155)
		5.4.4 防射线砂浆	(155)

5.4.5 膨胀砂浆	(155)	7.1 钢材的冶炼与分类	(210)
5.4.6 自流平砂浆	(155)	7.1.1 钢材的冶炼	(210)
5.4.7 聚合物砂浆	(155)	7.1.2 钢材的分类	(210)
5.4.8 水泥乳化沥青砂浆	(156)	7.2 钢材的技术性质	(212)
知识归纳	(156)	7.2.1 力学性能	(212)
独立思考	(157)	7.2.2 工艺性能	(216)
参考文献	(157)	7.3 钢材的冷加工与热处理	(217)
6 沥青与沥青混合料	(158)	7.3.1 钢材的冷加工及时效处理	(217)
6.1 石油沥青	(159)	7.3.2 钢材的热处理	(218)
6.1.1 石油沥青的组分	(159)	7.4 钢材组织和化学成分对钢材性能的 影响	(219)
6.1.2 石油沥青的结构	(160)	7.4.1 钢材的基本组织对钢材性能的 影响	(219)
6.1.3 石油沥青的技术性质	(161)	7.4.2 钢材的化学成分对钢材性能的 影响	(221)
6.1.4 石油沥青的技术标准与 选用	(162)	7.5 土木工程常用钢材与技术要求	(222)
6.1.5 沥青的掺配	(165)	7.5.1 土木工程中主要钢种	(222)
6.2 矿质混合料	(166)	7.5.2 钢筋混凝土结构用钢	(227)
6.2.1 矿质混合料的品种及分类	(166)	7.5.3 钢结构用钢	(231)
6.2.2 矿质混合料的级配理论	(170)	7.6 钢材的防护	(231)
6.2.3 矿质混合料的组成设计 方法	(173)	7.6.1 钢材的腐蚀	(231)
6.3 沥青混合料的结构形成原理	(179)	7.6.2 钢材的防火	(232)
6.3.1 沥青混合料的定义与分类	(179)	知识归纳	(233)
6.3.2 沥青混合料的组成与结构	(180)	独立思考	(234)
6.3.3 沥青混合料的强度形成 原理	(181)	参考文献	(234)
6.3.4 影响沥青混合料抗剪强度的 因素	(182)	8 墙体与屋面材料	(235)
6.4 沥青混合料的技术性质和技术 标准	(187)	8.1 墙体材料	(236)
6.4.1 沥青混合料的技术性质	(187)	8.1.1 砌墙砖	(236)
6.4.2 热拌沥青混合料的技术 标准	(189)	8.1.2 砌块	(242)
6.5 热拌沥青混合料配合比设计	(191)	8.1.3 墙用板材	(244)
6.5.1 矿料配合比设计	(191)	8.2 屋面材料	(245)
6.5.2 确定沥青混合料的最佳沥青 用量	(193)	8.2.1 钢丝网水泥波瓦	(245)
6.6 其他沥青与沥青混合料	(201)	8.2.2 玻璃钢波形瓦	(245)
6.6.1 其他沥青材料	(201)	8.2.3 聚氯乙烯波纹瓦	(245)
6.6.2 其他沥青混合料	(203)	8.2.4 彩色混凝土平瓦	(245)
知识归纳	(206)	8.2.5 彩色油毡(沥青)瓦	(245)
独立思考	(207)	8.2.6 琉璃瓦	(246)
参考文献	(208)	知识归纳	(246)
7 建筑钢材	(209)	独立思考	(246)
		参考文献	(246)
		9 建筑功能材料	(247)
		9.1 防水材料	(248)
		9.1.1 防水卷材	(248)

9.1.2 防水涂料	(251)	10.7 金属装饰材料	(308)
9.1.3 胶黏剂	(256)	10.7.1 铝及铝合金装饰材料	(308)
9.1.4 密封材料	(260)	10.7.2 装饰用钢材	(311)
9.1.5 刚性防水材料	(263)	10.7.3 其他金属装饰材料	(312)
9.2 保温隔热材料	(266)	知识归纳	(312)
9.2.1 保温隔热材料的作用原理	(266)	独立思考	(313)
9.2.2 影响材料保温隔热性能的主要 因素	(268)	参考文献	(313)
9.2.3 常用保温隔热材料	(269)	11 土木工程材料实验	(314)
9.2.4 保温隔热材料的选用及基本 要求	(271)	11.1 材料基本性能实验	(315)
9.2.5 常用保温隔热材料的技术 性能	(272)	11.1.1 密度实验	(315)
9.3 吸声与隔声材料	(273)	11.1.2 表观密度实验	(316)
9.3.1 吸声材料	(273)	11.1.3 毛体积密度实验	(316)
9.3.2 隔声材料	(276)	11.1.4 堆积密度实验	(317)
知识归纳	(277)	11.2 水泥实验	(318)
独立思考	(277)	11.2.1 水泥实验的一般规定	(318)
参考文献	(278)	11.2.2 水泥细度实验	(318)
10 建筑装饰材料	(279)	11.2.3 水泥标准稠度用水量的 测定	(320)
10.1 装饰石材	(280)	11.2.4 水泥净浆凝结时间的测定	(321)
10.1.1 天然石材	(280)	11.2.5 水泥胶砂流动度实验	(322)
10.1.2 人造石材	(284)	11.2.6 水泥体积安定性实验	(323)
10.2 木材	(285)	11.2.7 水泥胶砂强度实验	(324)
10.2.1 木材的分类和构造	(285)	11.3 砂石材料实验	(325)
10.2.2 木材的主要性质	(287)	11.3.1 砂石材料的取样方法	(325)
10.2.3 木材的防护	(291)	11.3.2 砂石表观密度实验	(326)
10.2.4 木材的应用	(291)	11.3.3 砂石材料筛分析实验	(327)
10.3 建筑玻璃	(294)	11.3.4 砂石材料的强度实验(压碎 指标法)	(329)
10.3.1 玻璃的基本知识	(294)	11.3.5 砂石材料快速碱-硅酸反应性 实验	(331)
10.3.2 玻璃制品	(295)	11.4 混凝土实验	(332)
10.4 建筑陶瓷	(298)	11.4.1 混凝土拌和物实验室拌和 方法	(333)
10.4.1 陶瓷制品的分类	(298)	11.4.2 混凝土和易性实验	(333)
10.4.2 陶瓷制品的表面装饰	(299)	11.4.3 混凝土立方体抗压强度 实验	(335)
10.4.3 建筑陶瓷制品的技术性能	(299)	11.4.4 混凝土劈裂抗拉强度实验	(335)
10.4.4 常用建筑陶瓷制品	(299)	11.4.5 混凝土抗折强度实验	(336)
10.5 建筑装饰塑料	(301)	11.4.6 混凝土耐久性实验	(337)
10.5.1 塑料的组成与分类	(301)	11.5 砂浆实验	(339)
10.5.2 常用塑料品种	(302)	11.5.1 砂浆的拌和方法	(339)
10.5.3 塑料装饰制品	(303)	11.5.2 砂浆稠度实验	(340)
10.5.4 其他塑料装饰材料	(304)	11.5.3 砂浆分层度测试	(340)
10.6 建筑装饰涂料	(305)	11.5.4 砂浆抗压强度实验	(341)
10.6.1 建筑装饰涂料的组成	(305)		
10.6.2 建筑装饰涂料的分类	(305)		

11.5.5 砂浆拉伸黏结强度测试	(341)	11.8.2 钢筋冷弯实验	(351)
11.6 沥青实验	(343)	11.9 烧结砖与砌块实验	(352)
11.6.1 针入度实验	(343)	11.9.1 烧结多孔砖的强度实验	(352)
11.6.2 延度实验	(344)	11.9.2 加气混凝土砌块抗压强度 实验	(353)
11.6.3 软化点实验(环球法)	(345)	11.10 混凝土无损与半破损检测	(354)
11.7 沥青混合料实验	(346)	11.10.1 回弹法检测混凝土强度	(354)
11.7.1 沥青混合料的搅拌与成型 ...	(346)	11.10.2 超声回弹法检测混凝土 强度	(355)
11.7.2 沥青混合料的马歇尔稳定度 实验	(347)	11.10.3 取芯法检测混凝土强度	(356)
11.7.3 车辙实验	(348)	11.10.4 超声法检测混凝土均匀性和 缺陷	(357)
11.8 钢材实验	(350)		
11.8.1 钢材拉伸实验	(350)		

1

土木工程材料的基本性质

课前导读

□ 内容提要

本章主要介绍土木工程材料的物理性质、力学性质、耐久性等基本参数和基本概念，并介绍了土木工程材料的物质组成、微观结构、宏观构造及其与材料性质之间的关系。

□ 能力要求

通过本章的学习，学生应熟练掌握土木工程材料基本物理参数的计算方法，掌握材料与水、热等有关基本物理性质的相关概念，了解材料组成、结构与构造之间的关系，能够根据材料组成、结构和构造推断材料基本特性的变化规律。



图 1.1.1 材料的基本物理参数测试示意图

图 1.1.2 材料的基本物理参数测试示意图

图 1.1.1 材料的基本物理参数测试示意图

图 1.1.2 材料的基本物理参数测试示意图

图 1.1.1 材料的基本物理参数测试示意图

1.1 材料的物理性质

1.1.1 材料的体积组成

在土木工程常用材料中,绝大多数材料的表面和内部均含有孔隙(pore,图 1-1)。材料中的孔隙多少和孔隙特征对材料性质影响很大。根据孔隙与外界是否连通的特性,可将材料孔隙分为与外界连通的开口孔隙(open pore)和与外界隔绝的闭口孔隙(closed pore);按孔隙尺寸大小,可将材料孔隙分为大孔隙(macro-pore)、毛细孔隙(micro-pore or capillary pore)和纳米孔隙(nano-pore)三种。

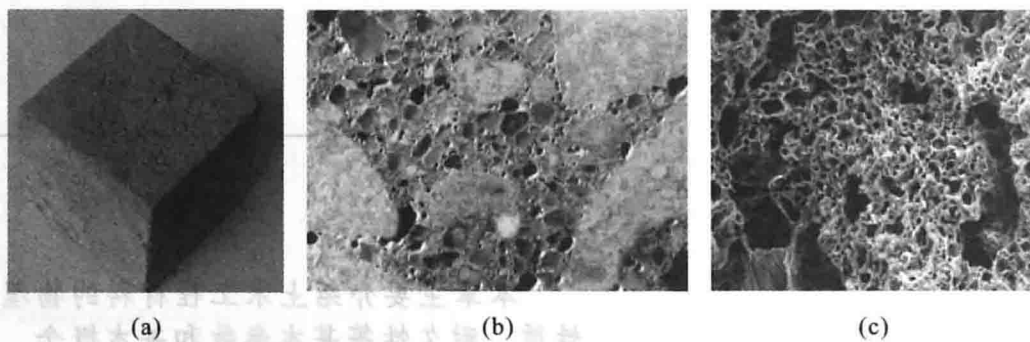


图 1-1 材料中的孔隙

(a)混凝土表面的孔隙;(b)混凝土内部的孔隙;(c)轻骨料内部的孔隙

对于开口孔隙,大孔隙中水分和溶液易于渗入,但不易被充满;纳米孔隙中水分和溶液易于渗入,但不易在其中流动;而介于两者之间的毛细孔隙,水分和溶液既易于渗入,又易于被充满,故对材料的抗渗性、抗冻性和抗侵蚀性均有不利影响。

由于闭口孔隙中水分和溶液不易侵入,故闭口孔隙的存在对材料的抗渗性、抗冻性和抗侵蚀性无不利影响,反而具有改善材料保温性和耐久性等作用。

将材料中开口孔隙和闭口孔隙的体积分别记为 V_o 和 V_c ,则材料的孔隙体积 $V_p = V_o + V_c$ 。若将材料中实物质的体积记为 V_s ,则材料的总体积(一般将该体积称为材料的毛体积) $V_0 = V_s + V_o + V_c$;另外将材料中实物质的体积和闭口孔隙体积之和称为材料的表观体积(apparent volume),记为 V_a 。对于散粒状材料,如砂石材料、水泥等,当颗粒堆积在一起时,颗粒之间存在大量空隙(void),其空隙体积记为 V_v 。含孔材料颗粒的堆积体积组成如图 1-2 所示,其堆积总体积用 V_0' 表示。

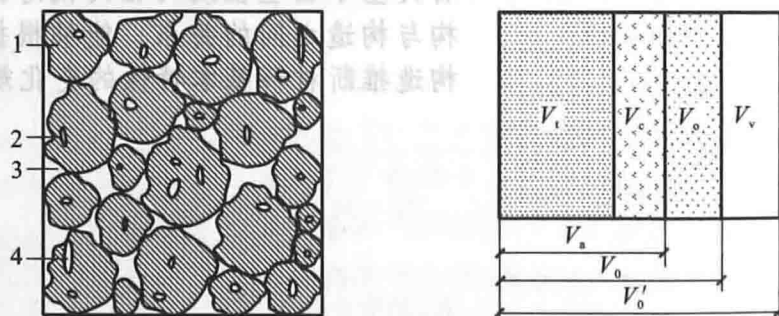


图 1-2 含孔材料堆积状态与体积组成示意图

1—固体物质;2—闭口孔隙;3—空隙;4—开口孔隙

1.1.2 材料与密度有关的物理参数

1.1.2.1 真实密度

材料在绝对密实状态下单位体积的质量称为材料的真实密度(density)。用公式表示为:

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad (1-1)$$

式中 ρ_t ——密度, g/cm^3 ;

m ——材料在干燥状态下的质量, g ;

V_t ——干燥材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

在土木工程材料中,绝大多数材料均含有一定数量的孔隙,如混凝土、砖、泡沫玻璃等。测定含孔无机材料真实密度时,为消除材料内部闭口孔隙对所测真实体积的影响,需将材料磨成细粉(一般要求全部通过 0.20mm 方孔筛),干燥后,用密度瓶或李氏瓶通过排水(液)法测定其真实体积,选用的液体与被测材料之间应无化学反应或溶解现象。材料磨得愈细,测得的真实密度值愈精确。

对于完全密实材料,如玻璃、钢、铁、单矿物等,若外形规则,则可直接通过测量其几何尺寸来计算其真实体积,外形不规则可用排水(液)法进行测定。

1.1.2.2 表观密度

材料单位表观体积的质量称为材料的表观密度(apparent density)。用公式表示为:

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad (1-2)$$

式中 ρ_a ——表观密度, g/cm^3 ;

m ——材料在干燥状态下的质量, g ;

V_a ——干燥材料包括闭口孔隙体积在内的体积, $V_a = V_t + V_c, \text{cm}^3$ 。

材料的表观体积通常采用排水(液)法进行测定。对于散粒状材料,可采用容量瓶法进行测定。将一定质量(m_0)的散粒状材料加入装有半瓶冷开水的容量瓶中,通过摇晃驱赶出其中的气泡,静置 24h,待吸水饱和后,加入水至规定刻度,称量包含散粒状材料、水和容量瓶在内的总质量 m_2 ,然后将容量瓶倒空,再加水至规定刻度后,称量包含水和容量瓶在内的总质量 m_1 ,则可计算得到材料的表观密度,如式(1-3)所示。

$$\rho_a = \frac{m_0}{\frac{m_0 + m_1 - m_2}{\rho_w}} = \frac{m_0 \cdot \rho_w}{m_0 + m_1 - m_2} \quad (1-3)$$

式中 m_0 ——散粒状材料的质量, g ;

m_2 ——加水至规定刻度后包含散粒状材料、水和容量瓶在内的总质量, g ;

m_1 ——倒空再加水至规定刻度后包含水和容量瓶在内的总质量, g ;

ρ_w ——水的密度,在常温下约为 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ 。

工程上砂、碎石等散粒状材料的表观密度即采用容量瓶法进行测定。

对于块状材料,表观密度可采用静水称量法进行测定。首先称量得到块状材料在空气中的干燥质量(m_0),然后将材料置于水中,吸水饱和后,采用专用的静水天平称量得到块状材料在水中的质量(m_2),则可根据材料所受的浮力与上述质量之间的关系计算材料的表观体积,进一步计算得到材料的表观密度,如式(1-4)所示。

$$\rho_a = \frac{m_0}{V_t + V_c} = \frac{m_0}{\frac{m_0 - m_2}{\rho_w}} = \frac{m_0 \cdot \rho_w}{m_0 - m_2} \quad (1-4)$$

式中 ρ_w ——水的密度,在常温下约为 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$;

m_0 ——块状材料在空气中的干燥质量, g ;

m_2 ——块状材料在水中的质量, g 。

1.1.2.3 毛体积密度

材料在自然状态下单位毛体积的质量称为材料的毛体积密度(gross volume density)。用公式表示为:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1-5)$$

式中 ρ_0 ——材料的毛体积密度, g/cm^3 ;

m ——材料的干燥质量, g ;

V_0 ——材料的毛体积, cm^3 。

材料的毛体积是指包含材料内部实物质、开口孔隙和闭口孔隙三者体积在内的毛体积。对于外形规则的材料,可采用直接测量其几何尺寸的方法来计算其毛体积;对于开口孔隙尺寸较小的外形不规则材料,可用静水称量法进行测定。对于开口孔隙尺寸较大的外形不规则的材料,可采用封蜡法将表面大孔封闭,然后采用静水称量法测定材料毛体积。

静水称量法测定材料毛体积时,首先称量得到块状材料在空气中的干燥质量(m_0),然后将材料置于水中,吸水饱和后,采用专用的静水天平称量得到块状材料在水中的质量(m_2),然后将吸水饱和的材料取出,采用干毛巾将材料表面擦干,称量得到材料的饱和面干状态(内部吸水饱和,表面干燥状态)下的质量(m_1),则可根据材料所受的浮力与上述质量之间的关系计算材料的表观体积,并计算得到材料的表观密度,如式(1-6)所示。

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} = \frac{m_0}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_w}} = \frac{m_0 \cdot \rho_w}{m_1 - m_2} \quad (1-6)$$

式中 ρ_w ——水的密度,在常温下约为 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$;

m_0 ——块状材料在空气中的干燥质量, g ;

m_2 ——块状材料在水中的质量, g ;

m_1 ——材料在饱和面干状态下的质量, g 。

上述测得的材料在烘干状态下的体积密度称为干体积密度。实际上,材料在自然状态下的体积密度大小与其含水情况有关,当材料含水率变化时,其质量和体积均有所变化。因此测定材料体积密度时,需同时测定其含水率,并予以注明。

1.1.2.4 堆积密度

散粒状材料在自然堆积状态下单位体积的质量称为堆积密度(bulk density)。用公式表示为:

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0} \quad (1-7)$$

式中 ρ'_0 ——散粒材料的堆积密度, kg/m^3 ;

m ——散粒材料的质量,一般以干燥状态为准,若材料含水时必须注明含水情况, kg ;

V'_0 ——散粒材料在自然堆积状态下的体积, $V'_0 = V_t + V_c + V_0 + V_v = V_{\text{筒}}, \text{m}^3$ 。

散粒材料在自然堆积状态下的体积是指既含有颗粒内部的孔隙,又含有颗粒之间空隙在内的总体积。散粒材料的体积可用已标定容积的容量筒($V_{\text{筒}}$)进行测定。测定时材料未经振实而呈自然堆积状态时,测得的堆积密度称为松堆积密度;按照规定方法进行振实后测得的堆积密度称为紧密堆积密度。

大多数材料均或多或少含有一些孔隙,故一般干燥材料的 ρ_t (真实密度) $>$ ρ_a (表观密度) $>$ ρ_0 (体积密度) $>$ ρ'_0 (堆积密度)。

在土木工程中,计算材料用量、构件自重、配料、材料堆放的体积或面积以及计算材料的孔隙率和空隙率等参数时,需用到材料的密度、表观密度、体积密度和堆积密度。常用土木工程材料的密度、表观密度、毛体积密度和堆积密度等见表 1-1。

表 1-1 常用土木工程材料的密度、表观密度、毛体积密度和堆积密度

材料名称	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	表观密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	毛体积密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	堆积密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
钢	7.85	—	7850	—
花岗岩	2.60~2.90	—	2500~2800	—
石灰岩	2.50~2.80	—	2400~2750	—
石灰岩碎石	2.50~2.80	—	2450~2780	1350~1650
砂	2.50~2.80	2450~2780	—	1350~1650
黏土	2.50~2.70	—	—	1600~1800

续表

材料名称	密度/(g·cm ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	毛体积密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)
水泥	2.80~3.20	—	—	1200~1300
烧结普通砖	2.50~2.70	—	1600~1900	—
烧结多孔砖	2.50~2.70	—	800~1480	—
红松木	1.55	—	380~700	—
泡沫塑料	—	—	20~50	—
普通混凝土	2.50~2.60	—	2100~2600	—

1.1.3 材料与孔隙有关的物理参数

1.1.3.1 孔隙率

材料内部孔隙体积占总体积的百分率称为材料的孔隙率(porosity, P),材料内部开口和闭口孔隙体积分别占总体积的百分率称为材料的开口孔隙率(P_o)和闭口孔隙率(P_c),可用公式分别表示如下:

$$P = \frac{V_p}{V_0} \times 100\% = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_t}\right) \times 100\% \quad (1-8)$$

$$P_o = \frac{V_o}{V_0} \times 100\% = \frac{V_0 - V_a}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}\right) \times 100\% \quad (1-9)$$

$$P_c = P - P_o \quad (1-10)$$

式中 V_o ——材料开口孔隙的体积, m³;

V_p ——材料孔隙的总体积, m³;

V_t ——材料中物质的真实体积, m³;

V_0 ——材料总体积, m³;

ρ_0 ——材料的毛体积密度, kg/m³;

ρ_a ——材料的表观密度, kg/m³;

ρ_t ——材料的真实密度, kg/m³。

材料孔隙率的大小直接反映材料的密实程度,孔隙率越小,密实度越大,材料强度越大。孔隙率相同的材料,它们的孔隙特征(如开口或封闭、大小、分布以及连通性)可以不同。因此,孔隙率及其孔隙特征与材料的许多重要性质(如强度、吸水性、抗渗性、抗冻性和导热性等)密切相关。一般而言,孔隙率较小且连通开口孔隙较少的材料,其吸水性较小、强度较高、抗渗性与抗冻性较好。

1.1.3.2 密实度

固体物质的体积占总体积的百分率称为密实度(D),反映材料体积内被固体物质所填充的程度。用公式表示为:

$$D = \frac{V_t}{V_0} \times 100\% = \frac{\rho_0}{\rho_t} \times 100\% \quad (1-11)$$

孔隙率与密实度的关系为:

$$P + D = 1 \quad (1-12)$$

式中 P ——材料的孔隙率;

其他参数含义同前。