

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土木工程事故分析与处理

岳建伟 编著

TUMU GONGCHENG SHIGU
FENXI YU CHULI

中国建筑工业出版社

第 1 版 (910) 第 1 次印刷

中国工业出版社 北京 100045 宣武门大街 45 号

电话: (010) 63916300

网址: www.cip.com.cn

ISBN 7-112-11111-1

高校土木工程专业规划教材

土木工程事故分析与处理

岳建伟 编著

中国建筑工业出版社

北京 100045 宣武门大街 45 号

电话: (010) 63916300

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程事故分析与处理/岳建伟编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 6
高校土木工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-19341-7

I. ①土… II. ①岳… III. ①土木工程-工程质量事故-事故处理-高等学校-教材 IV. ①TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 075637 号

本书以土木工程事故的理论、原因、工程实例、加固方法和加固研究的思路进行编排, 材料性能和裂缝理论内容为工程实例学习奠定了基础, 工程实例中主要介绍混凝土结构、砌体结构、钢结构、地基与基础常见工程事故和缺陷, 对事故原因进行分析, 并通过加固方法和加固研究拓展了工程事故处理的思维方法。

书中共有七章, 内容包括绪论、结构材料的性能、结构裂缝的理论、混凝土结构工程事故分析与处理、砌体结构工程事故分析与处理、钢结构工程事故分析与处理、地基与基础工程事故分析与处理。书中介绍了诸多工程实例, 每章附有思考题。

本书可作为高等院校土木工程专业的教学用书, 亦可作为技能培训和提高在职技术人员业务素质的教材与参考书。

本书向授课教师赠送课件, 有需要者可发邮件至 niusong2008@163.com 或 yjwchn@126.com。

* * *

责任编辑: 牛松 冯江晓 吉万旺
责任校对: 陈晶晶 党蕾

高校土木工程专业规划教材 土木工程事故分析与处理

岳建伟 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21¼ 字数: 513 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 40.00 元 (赠送课件)

ISBN 978-7-112-19341-7

(28426)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

土木工程事故分析与处理是土木工程专业的一门重要课程,是培养学生逆向思考工程安全性的重要环节。目前社会上有一些关于土木工程事故处理的技术类书籍,但将该课程理论与工程实例相结合的教材甚少。本书按照“理论够用,重在实践”的原则进行编写,同时为培养学生解决问题的能力,满足培养应用型人才的目标,搜集了多个工程实例,并参照课程教学大纲及相关规范编写。

本书以土木工程本科生的相关课程为基础,按照土木工程事故的理论、原因、工程实例、加固方法和加固研究顺序进行编排。首先介绍了结构材料性能和裂缝理论知识,其次分别介绍常见混凝土结构工程、砌体结构工程、钢结构工程、地基与基础工程的事故原因和工程实例,提出了相关处理措施,并给出了各类工程的常用加固方法及原则。

本书内容包括:绪论、结构材料的性能、结构裂缝的理论、混凝土结构工程事故分析与处理、砌体结构工程事故分析与处理、钢结构工程事故分析与处理、地基与基础工程事故分析与处理。书中介绍了多个工程实例,每章附有思考题。

本书力求体现如下特色:

1. 系统性:教材内容涵盖结构的材料性能、裂缝的理论、工程实例分析及加固方法,避免了该课程仅讲工程案例,无理论支持的现象。
2. 实用性:教材内容深入浅出,并有相应的工程应用实例,图文并茂,以加深学生对事故过程的认识及理解,也有助于老师的讲解。

本书可作为高等院校土木工程专业的教学用书,亦可作为提高在职技术人员业务素质和技能培训的教材和参考书。

本书由河南大学岳建伟教授主编,郑州航空工业管理学院陈艳祥副教授任副主编。各章编写人员为:岳建伟(第一章),陈艳祥(第二章),孔庆梅,万海涛(第三章),赫中营(第四章),孔庆梅,万海涛(第五章),岳建伟、岳婷婷(第六章),王浩(第七章)。

本书在编写过程中查阅了较多的著作、论文、资料及图片,在此对相关作者表示由衷感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,希望读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 土木工程事故的定义	2
1.3 土木工程事故的分类	3
1.4 工程事故处理的原则	4
1.5 土木建筑工程事故处理的流程	4
思考题	7
第二章 结构材料的性能	8
2.1 混凝土材料的相关性能	8
2.2 砌体材料的相关性能	21
2.3 钢材的性能	30
思考题	36
第三章 结构裂缝的理论	37
3.1 混凝土结构微裂缝理论	37
3.2 荷载裂缝理论	40
3.3 约束变形裂缝理论	56
3.4 地基变形理论	71
3.5 结构裂缝的分类	76
思考题	79
第四章 混凝土结构工程事故分析与处理	80
4.1 混凝土工程质量控制要点	80
4.2 混凝土材料不合格造成的工程事故	88
4.3 结构设计原因造成的工程事故	98
4.4 施工违规造成的工程事故	102
4.5 使用及改建不当造成的工程事故	116
4.6 环境因素影响引起的工程事故	119
4.7 钢筋混凝土结构的加固	128
4.8 钢筋混凝土加固方法研究	149
思考题	160
第五章 砌体结构工程事故分析与处理	161
5.1 砌体结构质量控制要点	161
5.2 砌体材料不合格造成的工程事故	167
5.3 砌体结构设计原因造成的工程事故	168

5.4	砌体结构施工违规造成的工程事故	177
5.5	环境因素影响引起的砌体结构工程事故	179
5.6	砌体结构出现裂缝的原因分析和防止措施	188
5.7	砌体结构的加固	195
5.8	砌体结构的碳纤维加固技术研究	203
	思考题	218
第六章	钢结构工程事故分析与处理	219
6.1	钢结构质量控制要点	219
6.2	钢结构承载力不足造成的工程事故	222
6.3	钢结构失稳造成的工程事故	224
6.4	钢结构脆性断裂造成的工程事故	229
6.5	钢结构疲劳破坏造成的工程事故	232
6.6	钢结构锈蚀造成的工程事故	234
6.7	钢结构变形造成的工程事故	237
6.8	钢结构火灾造成的工程事故	241
6.9	钢结构的加固	243
6.10	钢结构的加固研究与案例	249
	思考题	258
第七章	地基与基础工程事故分析与处理	260
7.1	地基与基础质量控制要点	260
7.2	地基变形过大造成的工程事故	269
7.3	地基失稳造成的工程事故	285
7.4	基础工程缺陷造成的工程事故	288
7.5	基坑工程缺陷造成的工程事故	300
7.6	边坡滑动造成的工程事故	306
7.7	地基与基础的加固方法	309
7.8	地基的加固技术研究	314
	思考题	330
	参考文献	331

第一章 绪 论

1.1 概 述

据英国土木工程师学会、美国土木工程学会等权威学术团体提供的材料和我国仅有的一点工程史资料记载,学术界对工程事故的关注,虽然早在19世纪就已开始,至20世纪初已有零星记载,但这一时期的事故记录,仅存在于工程地质范畴——比如水坝基础和建筑物基础方面出现的问题。这类问题在很大程度上被视为人力难以抗拒的“自然灾害”。同时受“报喜不报忧”、“家丑不外扬”的传统意识制约,对上部结构,尤其是人为过失方面造成的事故报道和记录极少,工程事故分析这个课题,仍只有极少数的地质工程师和土木工程师偶尔问津,并未形成独立学科。将工程事故分析真正单独作为一个专门学科来研究,不论国内国外起步都较晚。从大学土木工程专业开设“工程事故分析”课程的记录看,该领域研究也是姗姗来迟。

进入21世纪后,我国城市发展进入一个崭新的阶段,城市的数量、规模和人口数量都有了飞速的发展。伴随着城市建设的加速,各种工程质量事故时有发生。从事故起因看,既有自然原因导致的,如唐山地震、汶川地震、玉树地震、洪水灾害、台风灾害、大雪灾害,也有人为原因造成的重大事故,像辽宁盘锦市燃气爆炸事故、石家庄特大爆炸案、广东九江大桥被撞垮塌;从破坏分类看,既有结构性破坏事故,如宁波招宝山大桥施工时的主梁断裂、上海闵行区莲花河畔景苑楼盘在建楼倒塌;又有土木建筑工程的耐久性事故,如建筑物梁柱的钢筋锈蚀、桥梁冻融破坏、栏杆严重破坏、高速公路严重损坏、机场跑道严重剥蚀事故等。

2009年我国相继出现了“楼歪歪”、“楼脆脆”等建筑质量问题,如2009年6月27日凌晨5时35分,上海闵行区莲花南路西侧、淀浦河南岸在建的“莲花河畔景苑”商品房小区工地内,发生一幢13层楼房向南整体倾倒事故(如图1-1所示)。



图1-1 上海闵行区莲花河畔景苑整体倾倒事故

上述灾难和事故的发生,究其根本原因是设计标准偏低。我国的相关房屋结构设计标准借鉴了二战后苏联的相关规范,这类设计标准在当时适应苏联战后迅速重建的需要,也符合新中国成立后的政治经济情况,在结构设计的安全性方面采用了最低标准。

可是,这个最低标准一直执行了50多年,也没有发生根本变化,直到《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012才对活荷载进行了一定调整。

随着我国城市化的快速发展，作为土木工程建设者，既肩负着重大而光荣的任务，也要面临着严重的挑战。大规模的工程建设，可为我国经济的迅速发展做出重大贡献；但面对可能发生的各种工程质量事故，要予以足够的重视，并采取相应的措施，减少财产损失，保障生命安全。

1.2 土木工程事故的定义

任何土木工程项目，几乎都要经历策划、规划、勘察、设计、施工和竣工验收等环节，最终提供给人们使用。而在实施的各个阶段，都可能造成质量事故，即使在建成后，使用不当或灾害也会造成工程事故。

简单地说，工程质量事故是指不符合规定的质量标准或设计要求，包括设计错误、材料不合格、施工方法错误、指挥不当造成的各种质量事故。

工程质量事故，按其后果可分为未遂事故（即通过班组自检、互检、隐蔽工程验收、预检和日常检查发现问题，经班组自行解决处理，未造成经济损失或工期延误者）和已遂事故（即已造成经济损失及不良后果者）；按其原因可分为指导责任事故和操作责任事故；按其情节及性质可分为一般事故和重大事故。

建筑物在建造和使用过程中，不可避免地会遇到质量低下的现象。轻则看到种种缺陷，重则发生各种破坏，甚至出现局部或整体倒塌的重大事件。建筑工程中的缺陷，是由人为的（勘察、设计、施工、使用）或自然的（地质、气候）原因使建筑物出现影响正常使用、承载力、耐久性、整体稳定性的种种不足的统称。它按照严重程度不同，又可分为三类：①轻微缺陷；②使用缺陷；③危及承载力缺陷。三类缺陷一旦有所发展，后果可能很严重，缺陷的发展是工程破坏。

建筑结构的破坏，是结构构件或构件截面在荷载、变形作用下承载和使用性能失效的人为协议标志。因此，结构构件或构件截面的受力和变形必须处于设计规范允许值和协议破坏标志的范围内。工程破坏本身是一种过程，是指结构构件从临近破坏到破坏，再由破坏到即将倒塌，进而倒塌的过程。

建筑结构的倒塌，是建筑结构在多种荷载和变形共同作用下稳定性和整体性完全丧失的表现。其中，若只有部分结构丧失稳定性和整体性的，称为局部倒塌；整个结构物丧失稳定性和整体性的，称为整体倒塌。倒塌具有突发性，是不可修复的，它的发生，一般都伴随着人员的伤亡和经济上的巨大损失。

建筑结构的缺陷和事故是两个不同概念，缺陷表现为具有影响正常使用、承载力、耐久性、完整性的种种隐藏的和显露的不足；事故表现为建筑结构局部或整体的临近破坏、破坏和倒塌；建筑结构的临近破坏、破坏和倒塌，统称质量事故，简称事故。但是，缺陷和事故又是同一类事物的两种程度不同的表现，缺陷往往是产生事故的直接或间接原因；而事故往往是缺陷的质变或经久不加处理的发展。

相对于土木工程正常的设计而言，把土木工程事故定义归纳为工程的“三个不正常、两个不满足”时的情况。

所谓“三个不正常”，按《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001的规定，凡出现不正常设计、不正常施工、不正常使用的情况，可以定义为工程事故。因为正常工

程,指的是必须在规范约定范围内,在规范强制性条文指导下,进行正常设计、正常施工、正常使用的工程。逾越了这一范畴,就必然形成工程事故。

所谓“两个不满足”,是指按建筑结构可靠度设计统一标准,工程结构必须满足以下两个条件:一是承载能力极限状态条件;二是正常使用极限状态条件。工程不能满足以上两个极限状态条件时,也必然形成事故。以上两个条件的不满足,也可以称为工程安全性与适用性两个条件的不满足。

1.3 土木工程事故的分类

当建筑结构不能满足适用性、安全可靠性和耐久性等要求时,称之为质量事故。小的质量事故,影响建筑物的使用性能和耐久性,造成浪费;严重的质量事故会使构件破坏,甚至引起房屋倒塌,导致人员伤亡和重大的财产损失。因此,建筑工程质量的好坏关系重大,必须十分重视。为了保证建筑工程质量,我国有关部门颁布了一系列规范、规程等法规性文件,对建筑工程勘察、设计、施工、验收和维修等各个建设阶段都有明确的质量保证要求。只要严格遵守这些规定,一般不会发生质量事故。新中国成立以来,特别是改革开放后,我国建筑业取得了迅速发展,建筑工程的质量基本上是好的。但是,建筑工程质量事故时有发生,严重的建筑物倒塌事故每年也有几十起,这不能不引起重视。

质量事故的分类方法很多。一般有以下一些分类方法:

(1) 按事故的严重程度分类。有重大事故或倒塌事故(如引起人员伤亡)、严重危及安全的事故(如墙体严重开裂、构件断裂等)、影响使用的事故(如房屋漏雨、变形过大、隔热隔声不好等)以及仅影响建筑外观的事故等。

(2) 按事故发生的阶段分类。有施工过程中发生的事故、使用过程中发生的事故和改建时或改建后引起的事故。

(3) 按事故发生的部位来分类。有地基基础事故、主体结构事故、装修工程事故等。

(4) 按结构类型分类。有砌体结构事故、混凝土结构事故、钢结构事故、木结构和组合结构事故等。

(5) 根据工程质量事故造成的人员伤亡或者直接经济损失,工程质量事故分为四个等级:

特别重大事故,是指造成30人以上死亡,或者100人以上重伤,或者1亿元以上直接经济损失的事故;

重大事故,是指造成10人以上30人以下死亡,或者50人以上100人以下重伤,或者5000万元以上1亿元以下直接经济损失的事故;

较大事故,是指造成3人以上10人以下死亡,或者10人以上50人以下重伤,或者1000万元以上5000万元以下直接经济损失的事故;

一般事故,是指造成3人以下死亡,或者10人以下重伤,或者1000万元以下直接经济损失的事故。

1.4 工程事故处理的原则

工程事故处理包括以下几个方面：

1.4.1 事故情况清楚

一般包括事故发生时间、事故情况描述、附有必要的图纸与说明、事故观测记录和发展变化规律等。

1.4.2 事故性质明确

主要应明确区分以下3个问题：

(1) 是结构性的还是一般性的问题。如建筑物裂缝是由承载力不足引起，还是地基不均匀沉降或温度、湿度变化所致；又如构件产生过大的变形，是结构刚度不足还是施工缺陷造成等。

(2) 是表面性的还是实质性的问题。如混凝土表面出现蜂窝麻面，就需要查清内部有无孔洞；对钢筋混凝土结构，还要查明钢筋锈蚀情况等。

(3) 区分事故处理的迫切程度。如事故不及时处理，建筑物会不会突然倒塌？是否需要采取防护措施，以免事故扩大恶化等。

1.4.3 事故原因分析准确和全面

如地基承载能力不足造成的事故，应查清原因（如地基土质不良、地下水位改变、出现侵蚀性环境、原地质勘察报告不准、发现新的地质构造施工工艺或组织管理不善等）；又如结构或构件承载力不足，应查明是设计截面太小，还是施工质量低劣，或是超载所致。

1.4.4 事故评价基本一致

对发生事故部分的建筑结构质量进行评估，主要包括建筑功能、结构安全、使用要求以及对施工的影响等评价。有关结构受力性能的评价，常用检测技术的各种方法，取得实测数据，结合工程实际构造等情况进行结构验算，有的还需要做荷载试验，确定结构实际性能。在进行上述工作时，要求各有关单位的评价基本上达到一致的认识。

1.4.5 处理目的、要求明确

常见处理目的要求有：达到设计要求，保证建筑物的安全；恢复外观；防渗堵漏；封闭保护；复位纠偏；减少荷载；结构补强；限制使用；拆除重建等。事故处理前，有关单位对处理的要求应基本统一，避免事后无法做出一致的结论。

1.4.6 事故处理所需资料齐全

包括有关施工图纸、施工原始资料（材料质量证明、各种施工记录、试块的试验报告、检查验收记录等）、事故调查报告、有关单位对事故处理的意见和要求等。

1.5 土木建筑工程事故处理的流程

建筑工程在设计、施工和使用过程中，不可避免地会出现各种问题，而工程质量事故是其中最为严重又较为常见的问题，它不仅涉及建筑物的安全与正常使用，而且关系到社会的稳定。事故发生后，尤其是重大事故、倒塌事故发生后，必须要进行调查、处理。对

于事故处理，由于涉及的专业和部门较多，正确处理显得尤为重要。事故的正确处理应遵循一定的程序和原则，以做到科学准确、经济合理，为各方接受。由建筑工人成长为国家领导人的李瑞环同志曾经指出：“凡属大事，都要慎重。第一要分析，方方面面地分析，把材料掰开了，揉碎了，分分类，排排队；第二要比较，逐类逐项比较，不同角度比较，多种方法比较；第三要综合，在分析比较基础上综合，从总体和发展上权衡，得出结论，产生方案；第四要反复，任何方案只要时间允许都要反复几次，反复听取意见，反复修改完善。但这一切的前提是要把情况搞全弄准。”土木工程事故处理，应突出把握好全面和辩证的分析。

事故处理一般按下列步骤进行：首先，进行事故调查，初步分析事故最可能发生的原因，并决定进一步调查及必要的检测项目；其次，根据调查及检测结果进行计算分析、邀请专家会商，同时听取事故相关单位的陈述或申辩；最后，撰写事故调查报告，送主管部门及报告有关单位。

1.5.1 事故调查

事故调查包括事故情况与性质，它涉及工程勘察、设计、施工各部门，并与使用条件和周边环境等各个方面有关。一般可分为初步调查、详细调查和补充调查。

初步调查主要是对工程事故情况、设计文件、施工企业资料、使用情况等方面进行调查分析，根据初步调查结果，判别事故的危害程度，确定是否需采取临时支护措施，以确保人民生命财产安全，并对事故提出初步处理意见。

详细调查是在初步调查的基础上，在必要时刻，进一步对设计文件进行计算复核与审查，检测施工行为是否符合设计文件要求，以及对建筑物进行专项观测与测量。

补充调查是在已有调查资料还不能满足工程事故分析处理时，需增加的项目。一般需做某些结构试验与补充测试，如工程地质补充勘察、结构、材料的性能补充检测、载荷试验等。

具体调查项目如下：

(1) 工程情况，即建筑物所在场地特征、建筑结构主要特征、事故发生时工程形象进度或使用情况。

(2) 事故情况调查，即发现事故的时间和经过、事故现况和实测数据、从发现到调查时的事故发展和变化情况、人员伤亡和经济损失、事故的严重性、是否危及结构安全、对事故采取临时处置等。

(3) 图纸资料检查。

(4) 其他资料检查，即建筑材料、成品和半成品的出厂合格证和试验报告；施工中的各项原始记录和检查验收记录（如施工日志、桩与基础工程、混凝土施工、预应力张拉、隐蔽工程验收记录等）；使用情况调查（对已交工的工程、调查用途、使用荷载条件的改变、环境条件等）。

(5) 设计情况调查，即设计单位资质情况、图纸是否齐全、构造是否合理、结构计算简图和计算方法以及结果是否正确。

(6) 地基基础情况调查，即地基实际情况、桩与基础构造尺寸和勘察报告、设计要求是否一致，必要时应开挖检查。

(7) 结构实际情况调查，即结构构件布置、结构构造、连接方式方法、构件状况和支

撑系统等。

(8) 施工情况调查,即施工方法和施工规范的执行情况、施工进度和速度、施工中有无停歇、施工荷载值的统计分析等。

(9) 建筑变形观测,即沉降观测记录、结构或构件变形观测记录等。

(10) 裂缝观测,即裂缝形状与分布特征及裂缝宽度、长度、深度以及裂缝的发展规律等。

必要时还要进行补充调查,补充调查往往需要补做某些试验、检验和测试工作。

1.5.2 原因分析

原因分析在完成事故调查的基础上,对事故的性质、类别、危害程度以及发生的原因进行分析,为事故处理提供必要的依据。原因分析时,往往会存在原因的多样性和综合性,要正确区别同类事故的各种不同原因,通过详细的计算与分析、鉴别出事故发生的主要原因。在综合原因分析中,除确定事故的主要原因外,应正确评估相关原因对工程质量事故的影响,以便采取切实有效的综合加固修复方法。

1.5.3 复核分析

复核分析是在一般调查及实际检测的基础上,选择有代表性的或初步判断有问题的构件进行复核计算。应注意按工程实际情况选取合理的计算简图,按构件材料的实际强度等级、断面的实际尺寸和结构实际所受荷载或外加变形作用,按有关标准、规程进行复核计算。这是评判事故的重要依据,必须认真进行。

1.5.4 专家会商

在调查、测试和分析的基础上,为避免偏差,可召开专家会商会议,对事故发生原因进行认真分析、讨论,然后做出结论。会商过程中专家应听取事故相关单位人员的申述与答辩,综合各方面意见后做出最后的结论。

1.5.5 调查报告

事故调查必须真实地反映事故的全部情况,要以事实为根据,以规范、规程为准绳,以科学分析为基础,以实事求是和公正无私的态度写好调查报告。报告一定要准确可靠、重点突出、抓住要害,让各方面专家信服。调查报告的内容一般应包括:

(1) 工程概况,即重点介绍与事故有关的工程情况,事故发生的时间、地点,事故现场的情况及采取的应急措施;与事故有关人员、单位情况、事故调查记录。

(2) 现场检测报告(如有模拟实验,还应有实验报告)。

(3) 复核分析,事故原因推断,明确事故责任。

(4) 对工程事故的处理建议。

(5) 必要的附录,如事故现场照片、录像、实测记录、专家会(协)商的记录、复核计算书、测试记录、试验原始数据及记录等。

1.5.6 调查后的处理

根据调查、分析后形成的报告,应提出对工程质量事故进行修复处理、加固处理或不做处理的建议。

经相关部门签字同意、确认工程质量事故不影响结构安全和正常使用的,可对事故不做处理。例如,经设计计算复核,原有承载能力有一定余量可满足安全使用要求,混凝土强度虽未达到设计值,但相差不多,预估混凝土后期强度能满足安全使用要求等。

工程质量事故不影响结构安全，但影响正常使用或结构耐久性的（如构件表层的蜂窝麻面、非结构性裂缝、墙面渗漏等），应进行修复处理。修复处理应委托专业施工单位进行。

工程质量事故影响结构安全时，必须进行结构加固补强，此时应委托有资质的单位进行结构检测鉴定和加固方案设计，并由有专业资质的单位进行施工。

按照规定的工程施工程序，对于建筑结构的加固设计与施工，宜进行施工图审查与施工过程监督和监理，以防止加固施工过程中再次出现质量事故带来负面影响。

思考题

- (1) 何为土木工程事故？
- (2) 土木工程事故是如何分类的？
- (3) 简述土木工程事故处理的原则。
- (4) 简述土木工程事故处理的流程。

第二章 结构材料的性能

2.1 混凝土材料的相关性能

2.1.1 混凝土组成

混凝土由粗细骨料、水泥、水及添加剂等组成，其中，水泥浆体占混凝土质量的20%~30%，砂石骨料约占70%。水泥浆在硬化前起润滑作用，使混凝土拌合物具有可塑性，在混凝土拌合物中，水泥浆填充砂孔隙，包裹砂粒，形成砂浆，砂浆又填充石子孔隙，包裹石子颗粒，形成混凝土浆体；在混凝土硬化后，水泥浆则起到胶结和填充作用。水泥浆多，混凝土拌合物流动性大，反之干（稠）；混凝土中水泥浆过多则混凝土水化温度升高，收缩大，抗侵蚀性不好，容易引起耐久性不良。粗细骨料主要起骨架作用，传递应力，给混凝土带来很大的技术优点，它比水泥浆具有更高的体积稳定性和更好的耐久性，可以有效减少收缩裂缝的产生和发展，降低水化热。在结硬过程中处于固相、液相和气相三相并存状态。

固相由粗骨料（碎石、砾石或轻骨料）、细骨料（砂）以及水泥水化后的水泥石组成。其中，水泥石有两种状态，一种是完全硬化的硬质晶格，另一种是尚未完全硬化的软质胶凝体，随着混凝土龄期的增长，软质胶凝体不断向硬质晶格转化，这种转化的过程，也就是混凝土结硬的过程。

液相为拌合用水以及各种液态添加剂，拌合用水大部分用于结硬过程中水泥的水化，多余的水分将逐渐蒸发。

气相在粗骨料、细骨料、水泥石的间隙以及多余的水分蒸发之后形成的孔隙中，其主要成分是正常环境空气中的氧和二氧化碳。

现代混凝土中除了以上组分外，还多加入化学外加剂与矿物掺合料。化学外加剂的品种很多，可以改善、调节混凝土的各种性能，而矿物掺合料则可以有效提高新拌混凝土的工作性和混凝土的耐久性，同时降低成本。

由上述组成可知，混凝土是一种非均质、多孔的与时间因素有关的建筑材料，这种组成特性决定了与裂缝有关的基本物理力学性能，如收缩、徐变、抗拉强度、抗压强度等。

2.1.2 混凝土的收缩

混凝土的收缩是混凝土在空气中非受力结硬时体积缩小的现象。引起混凝土体积收缩的原因很多。大体有两种：一种是由于湿度的变化，即干燥失水引起的，如水泥水化凝固结硬，颗粒沉降泌水和干燥蒸发等；另一种是混凝土碳化〔水泥胶体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 遇 CO_2 向 CaCO_3 转化〕引起的。因此，混凝土收缩实质上是混凝土凝固硬化过程中物理化学作用的结果。

1. 收缩的机理

混凝土中的水分按其与其周围介质结合的性状分为化学结合水、物理化学结合水和物理

力学结合水三种。

化学结合水是指以严格定量参与水泥水化的水，它使水泥浆变成软质胶凝体，进而转化为硬质晶格，最终形成完全硬化的水泥石，属于高强结合水。这种水不参加混凝土与外界湿度的交换作用。化学结合水与水泥一起在早期硬化过程中产生少量收缩，称为“硬化收缩”或自生收缩。

物理化学结合水以吸附薄膜的形式存在于混凝土中，起扩散及溶解水泥颗粒的作用。这种水在吸附结合过程中，形成分子间相互作用的内力场。因而具有溶解能力比普通水低、不导电、密度高等特性。吸附水的结合属中强结合，它较易引起水分蒸发，参加混凝土与外界环境湿度的交换作用。

物理力学结合水是混凝土水泥石各晶格间及粗、细毛细孔中的自由水（游离水），其含量不稳定，属低强结合，极易蒸发，它是一种积极参与外界环境湿度交换的水。当混凝土处于干燥环境时，首先是大孔隙及粗毛细孔中的自由水分，因物理力学结合遭到破坏而蒸发，这种失水并不引起收缩。但是，环境的干燥作用使毛细孔及微毛细孔中的水产生毛细压力，这种压力使水泥石产生压缩变形而收缩，即“毛细收缩”，是混凝土收缩变形的一部分。毛细水蒸发完后，进一步蒸发物理化学结合中的吸附水，首先蒸发晶格间的水分，然后蒸发分子层中的吸附水，这些水分的蒸发引起显著的水泥石压缩，产生“吸附收缩”，是收缩变形的主要部分。

在工程上，最常遇的是与湿度变化有关的毛细收缩和吸附收缩。混凝土的这种收缩源于水泥石的收缩。因此，水泥用量愈大，含水量愈高，水胶比愈大，收缩变形也就越大。混凝土水分蒸发引起收缩，增加水分又可以引起膨胀，即所谓“干缩湿胀”。

2. 收缩的影响因素

试验研究结果表明，混凝土的收缩除与水泥品种、水质及其用量和水胶比有关外，还与下列因素有关：如骨料的最大粒径及物理性质；浇捣和使用时所在环境的温、湿度及风速；构件截面周长与截面面积之比；添加剂的品种和性质。它们具体的影响如下。

(1) 水泥品种

在各种水泥中，与普通硅酸盐水泥相比，以矿渣水泥的收缩最大，快硬水泥次之，矾土水泥的收缩最小。但矿渣水泥的混凝土自生收缩是负值，即为膨胀变形，掺用粉煤灰的自生收缩也为负值，尽管其值不大（ $-0.4 \times 10^{-4} \sim -1.0 \times 10^{-4}$ ），但对混凝土的抗裂性是有益的。由于矿渣水泥混凝土及掺粉煤灰混凝土的自生膨胀变形是稳定的。特别对混凝土的早期防裂有利，值得推广应用。

(2) 水泥细度

混凝土收缩随水泥细度的增加而加大，每克水泥的表面面积（ cm^2/g ）为水泥的细度，若以 $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 为标准细度，水泥细度为 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 时，收缩变形约增加 140%，水泥细度为 $1500\text{cm}^2/\text{g}$ 时，收缩变形约减少 10%。

(3) 水胶比

混凝土收缩随水胶比的增加而加大，若以 0.4 为标准水胶比，当水胶比为 0.3 时，混凝土收缩可减少 15%；当水胶比为 0.6 时，混凝土收缩约增加 42%。

(4) 水泥浆量

混凝土收缩随水泥浆量（水泥用量）的增加而加大，以水泥浆质量在混凝土总质量中

占 20% 为标准, 当水泥浆量为 15% 时, 收缩值可减少 10%; 当水泥浆量为 30% 时, 混凝土收缩约增加 45%。

(5) 骨料类型

在砂岩、石灰岩、花岗岩中, 当用砂岩作骨料时混凝土收缩最大, 石英岩混凝土收缩最小, 若以石灰岩混凝土的收缩值为标准, 砂岩混凝土的收缩增加约 90%, 石英岩混凝土的收缩减小约 20%。

(6) 养护期

初期养护的时间愈短, 混凝土的收缩愈大, 以自然养护 7d 为标准, 自然养护 3d 混凝土收缩约增加 9%, 自然养护 14d 混凝土收缩约减少 7%, 蒸汽养护 7d 约减少混凝土收缩 10%, 蒸汽养护 14d 约减少混凝土收缩 16%。当初始养护期超过 14d, 混凝土收缩不再随养护期减小。

(7) 环境潮湿状态

环境愈干燥混凝土收缩愈大, 若以环境的相对湿度 $w=50\%$ 为标准, 当相对湿度为 25%, 混凝土收缩约增加 25%; 当相对湿度为 80%, 混凝土收缩约减少 30%。

(8) 构件截面周长与其所围面积之比

混凝土收缩与构件在大气中的暴露程度有关, 暴露度 r 为构件截面的周长 u (与大气接触的周边边长) 与其所围截面面积 A 之比, 即:

$$r = \frac{u}{A} \quad (2-1)$$

例如: 截面尺寸为 $250\text{mm} \times 800\text{mm}$ 的大梁, 其暴露度按式 (2-1) 算得 $r = (2 \times 250 + 2 \times 800) / (250 \times 800) = 0.0105\text{mm}^{-1}$; 截面尺寸为 $40\text{mm} \times 5000\text{mm}$ 的板块, 按式 (2-1) 算得 $r = (2 \times 40 + 2 \times 5000) / (40 \times 5000) = 0.0504\text{mm}^{-1}$ 。可见板块的暴露度比同样截面面积大梁的暴露度大 5 倍。因此, 板块的体积收缩将远大于大梁的体积收缩。由此可知, 大型屋面板的板面收缩远大于其肋部的收缩, 因而将在板面产生拉应力。当构件与土接触时, 计算暴露度 r 时, 周长 u 不包括构件与土壤接触的边长。

(9) 配筋率及模量比

在混凝土中配置钢筋对混凝土有两方面的影响: 一方面增加自约束应力, 对混凝土抗裂不利; 另一方面也可提高混凝土的极限拉伸应变值 (相当于减小混凝土的收缩变形), 对混凝土抗裂有利。工程实践经验表明, 在受力需要的配筋率较低的情况下, 如各种地下现浇钢筋混凝土结构及设备基础抵抗温度收缩的构造配筋率一般为 $0.15\% \sim 0.3\%$, 此时自约束应力很小, 可忽略不计, 且钢筋配置在面层内, 有利于防止表面裂缝, 对薄壁结构效果更为显著。然而当配筋率较高时, 例如配筋率高达 $5\% \sim 10\%$ 的轴心受拉构件, 约束应力较大, 有时可导致构件开裂。

在低配筋率的条件下, 构件的抗裂性随钢筋与混凝土抗拉刚度比 ($E_s A_s / E_c A_c$) 的提高而提高, 相当于减小混凝土收缩值。与无筋混凝土相比, 当 $E_s A_s / E_c A_c = 0.1$, 约减少 24%; 当 $E_s A_s / E_c A_c = 0.25$, 约减少 45%。

(10) 施工方法

混凝土施工方法的不同, 对混凝土的收缩也有影响。如机械浇捣比手工振捣密实性好, 相应混凝土收缩可减少 10% 左右; 蒸汽养护和经高压釜处理的混凝土比自然养护混

凝土收缩大为减少,前者可减少约 15%,后者可减少约 46%。

3. 混凝土收缩变形分类

混凝土的收缩变形分如下几种:

(1) 沉降收缩

由骨料下沉,多余的水分上升(泌水)引起。这种收缩发生在构件表面。

(2) 塑性收缩

由混凝土表面水分蒸发的速度大于泌水速度引起,它发生在混凝土浇筑后 4~15h 左右。此时,水泥水化反应很激烈,加之水分急剧蒸发引起收缩。同时,骨料与胶凝体之间,也产生不均匀沉降变形,它们都发生在混凝土终凝前的塑性阶段,故称为塑性收缩。

塑性收缩值较大,可达 1%左右,但也仅发生在构件的表面。这种收缩与环境的湿度、风速、气温及施工等因素有关。

(3) 碳化收缩

暴露在大气中的混凝土结构构件,混凝土中的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 化合产生 CaCO_3 ,混凝土因硬化而收缩。这种碳化收缩与混凝土的密实度、空气中的 CO_2 含量以及环境相对湿度有关。在 50%左右的湿度条件下碳化引起的收缩最大,当湿度为 25%以下和 100%时,碳化停止。碳化速度随 CO_2 浓度的增加而加快,随构件密实度增加而降低。

(4) 失水收缩(干缩)

混凝土的干缩是由于骨料和水泥石中,以及骨料和水泥石、钢筋与水泥石之间毛细孔和胶孔内水分蒸发的结果,它是一个非常复杂的物理化学过程。影响混凝土干缩的因素也很多。由于水分蒸发总是由表及里,故干缩变形总是存在一定的梯度:表面干缩变形大,内部干缩变形小,这与环境的温度、湿度、风速等气象条件有关。

因碳化、失水等因素引起的极限收缩值为 $(200\sim 400)\times 10^{-6}\text{m}$,当水泥用量很多,或骨料不好时,最高可达 $1000\times 10^{-6}\text{m}$,在混凝土标准状态下,采用的极限收缩值为 $324\times 10^{-6}\text{m}$,即每 1m 收缩 0.324mm。

4. 混凝土收缩值的估算

混凝土标准状态是指: P·O42.5 级普通水泥;标准磨细度(比表面积为 $2500\sim 3500\text{cm}^2/\text{g}$);骨料为花岗岩(碎石);水胶比为 0.4;水泥浆含量为 20%;混凝土振捣密实;自然硬化;试件截面尺寸为 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ (暴露度: $r=0.02\text{mm}^{-1}$);测定收缩前湿养 7d;环境空气相对湿度为 50%。

混凝土收缩的规律很难作出较为准确的定量分析。这里介绍一种标准状态极限收缩值(时间趋于无穷大的最终收缩值) $\epsilon_{\text{sh}(\infty)}^k$,对于其他非标准状态采用 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{10}$ 等系数进行修正的估算法。根据试验结果,混凝土收缩随时间变化的规律,建议用下面公式估算,即任意时刻的混凝土收缩值:

$$\zeta_{\text{sh}(\tau)} = \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{10} [1 - e^{-(0.2+\beta\tau)}] \epsilon_{\text{sh}(\infty)}^k \quad (2-2)$$

式中 $\epsilon_{\text{sh}(\infty)}^k$ ——标准状态下的混凝土的极限收缩值,可取为 $324\times 10^{-6}\text{m}$;

$\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{10}$ ——非标准状态下的混凝土收缩修正系数,见表 2-1~表 2-5;

τ ——混凝土龄期, d。

β ——经验系数,一般取 $\beta = 0.005$,养护较差时 $\beta = 0.015$ 。