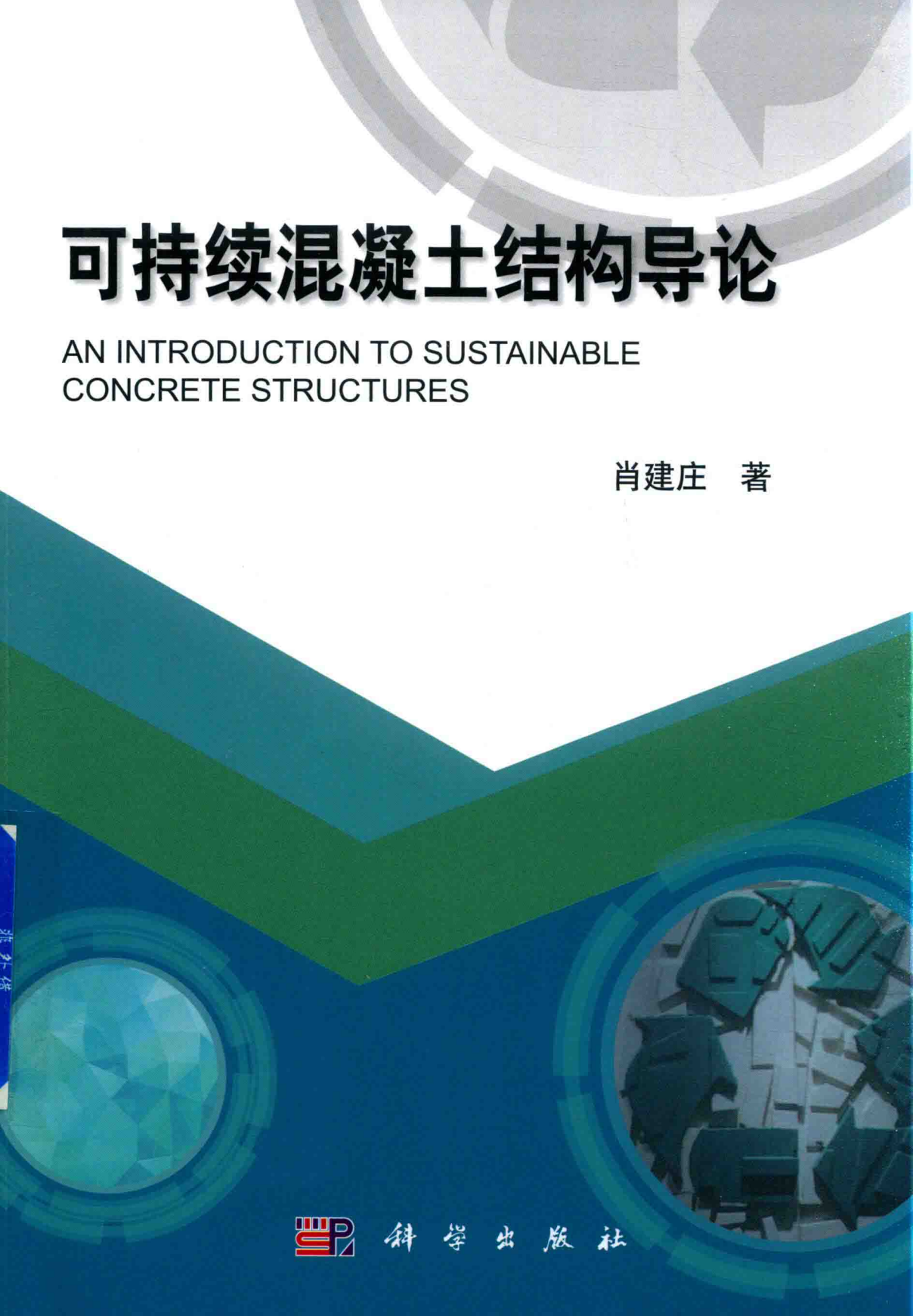




可持续混凝土结构导论

AN INTRODUCTION TO SUSTAINABLE
CONCRETE STRUCTURES

肖建庄 著



科学出版社

可持续混凝土结构导论

AN INTRODUCTION TO SUSTAINABLE
CONCRETE STRUCTURES

肖建庄 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

可持续发展已经成为世界范围的共识,混凝土结构可持续性设计与施工将是今后国际混凝土学术界与工程界的热点与前沿。本书结合作者在混凝土结构方向近 20 年的科研实践与思考,开展了混凝土结构减量化、混凝土结构再利用、混凝土结构再生循环等方面的原理阐述和关键技术分析工作,并在此基础上,提出了混凝土结构可持续性设计的基本原则和方法。全书分为 10 章,第 1 章概述土木工程发展的历史及混凝土结构对环境的负面影响;第 2 章从对混凝土结构生命周期的回顾中引出可持续土木工程的基本概念;第 3~6 章则分别从混凝土结构生命周期的各个阶段提出减量化、再利用以及循环再生等关键技术路径与优选方案;第 7~8 章分析可持续混凝土结构的生态环境效益和社会经济效益;第 9 章阐述混凝土结构可持续性设计与评价方法;第 10 章介绍未来可持续混凝土结构发展的新方向。

本书可供从事混凝土结构研究的科研、设计和施工管理等技术人员参考,也可作为高等院校土木工程类专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可持续混凝土结构导论/肖建庄著. —北京:科学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-03-054361-5

I. ①可… II. ①肖… III. ①混凝土结构-可持续性发展-研究
IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 216469 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 21 3/4

字数: 496 400

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

近 100 年来,混凝土结构的快速发展与广泛应用,对人类社会的发展和现代化进程做出了巨大的贡献。据统计,2015 年我国商品混凝土用量已达 16 亿 m^3 、砂石骨料需求量超过 120 亿 t,消耗量已经跃居世界第一。考虑资源、能源和生态发展的要求,混凝土结构必须创新,以应对下一个 100 年的需求 and 应用,而可持续混凝土结构将是必然选择。因此,实现可持续混凝土结构的设计与施工是当今土木工程领域的关键科学和重大技术问题。

在国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金、国家科技部、国家教育部以及上海市科委等科研项目的资助下,以混凝土结构的生命周期过程为对象,本书作者紧紧围绕混凝土结构的生态环境效益和社会经济效益,结合多年来的基础科研及国内外文献的梳理与深入分析,利用减量化(Reduce)、再利用(Reuse)和再生循环(Recycle)的“3R”一般性规律,开展了混凝土结构减量化、混凝土结构再利用、混凝土结构循环再生等方面的原理阐述、关键技术分析和方法探讨。在此基础上,本书作者又提出了可持续性设计的新概念,力图建立混凝土结构可持续性设计的基本原则和方法,并对今后可持续混凝土材料和结构的发展趋势进行预测和展望。

本书共分为 10 章,第 1 章阐述混凝土结构发展的历史以及混凝土结构对环境的负面影响,提出了可持续性设计的重要性;第 2 章从对混凝土结构生命周期的剖析中引出可持续土木工程的基本概念;第 3~6 章则分别从混凝土结构生命周期的各个阶段提出可持续混凝土结构的减量化、再利用以及循环再生等关键技术路径与优选方案;第 7~8 章分析混凝土结构碳足迹以及可持续混凝土结构的生态环境效益和社会经济效益,并通过案例分析介绍了可持续混凝土结构所具有的优势;第 9 章阐述混凝土结构可持续性设计方法和原则,讨论了建筑结构进行可持续性评价的思路,并对比分析了我国与国外有关可持续性评价标准和法律法规;第 10 章介绍当前土木工程的发展前沿,为未来可持续混凝土结构发展阐明了方向。

由于作者认识水平和理论分析的能力有限,书中难免有所不足甚至谬误之处,敬请读者批评指正。

肖建庄

2015 年中秋初稿、2016 年仲夏二稿、

2016 年国庆三稿于同济园

Summary of the Book

It is well known that the sustainable development has become a worldwide consensus. The sustainable design and construction for concrete structures will be a popular hot topic and frontiers concerned by both the academics and engineers in the coming future.

Combined with the author's practice and scientific research on concrete structures in the past 20 years, this book describes the principle and key technology about reducing, reusing and recycling along with other aspects of concrete structures. On basis of these research studies and engineering practice, this book also presents the basic principle and methodology about the sustainability design of concrete structures.

The whole book is classified into ten Chapters. Chapter 1 summarizes the history of civil engineering development and the negative impact of concrete structures on the environment. Chapter 2 introduces the basic concept of sustainable civil engineering from the point view of the life cycle of concrete structures. Chapter 3 to Chapter 6 proposes the key technology and optimization scheme to reduce, reuse and recycle along with other aspects of the concrete structures from each stage of the concrete structure's life cycle respectively. Chapter 7 and Chapter 8 put forward analyses on the ecological, environmental and economic benefits of sustainable concrete structures. Chapter 9 describes the sustainable design method and principle of concrete structures. Chapter 10 recommends some new directions in the development of sustainable concrete structures in the future.

This book can be used as a scientific research and teaching reference book for teachers and students majored in civil engineering. It can also be referenced in the work of scientific research, design and construction management of concrete structures for civil engineers.

目 录

前言

Summary of the Book

第 1 章 绪论	1
1.1 可持续土木工程的概念	1
1.1.1 土木工程的概念	1
1.1.2 可持续的定义与原则	2
1.1.3 可持续土木工程的基本原则	3
1.2 混凝土结构与工业文明	4
1.2.1 工业文明发展历史	4
1.2.2 混凝土材料发展历史	5
1.2.3 混凝土结构发展历史	6
1.2.4 混凝土结构发展与工业文明发展的关系	8
1.3 混凝土结构对人类文明的贡献	9
1.3.1 建筑工程	9
1.3.2 桥梁工程	10
1.3.3 道路与隧道工程	12
1.3.4 海洋工程	13
1.3.5 市政基础设施	14
1.4 混凝土结构对生态环境的负面影响	17
1.4.1 混凝土原材料对环境的影响	17
1.4.2 混凝土结构对环境的影响	19
1.4.3 混凝土结构可持续性设计的必要性	20
1.5 本书的主要内容	20
1.5.1 本书的目的	20
1.5.2 本书的内容	21
1.5.3 各章节之间的逻辑关系	21
参考文献	22
第 2 章 混凝土结构生命周期概览	23
2.1 混凝土结构设计方法回顾	23
2.1.1 安全性设计	23

2.1.2	适用性设计	23
2.1.3	耐久性设计	24
2.1.4	传统结构设计方法存在的问题	25
2.2	生命周期设计回顾	25
2.2.1	生命周期设计的发展历史	25
2.2.2	工业产品生命周期设计历史	27
2.2.3	混凝土结构的生命周期设计可行性分析	28
2.3	混凝土结构设计拓展	29
2.3.1	骨料的来源、生产与加工	29
2.3.2	水泥的生产	30
2.3.3	混凝土的制备与养护	30
2.3.4	混凝土结构的改造与再用	31
2.3.5	混凝土结构的拆除与再生	32
2.3.6	闭合型生命周期框图	32
2.4	生命周期与可持续性的关系	33
2.4.1	混凝土结构可持续性的定义	33
2.4.2	在生命周期框架下考察混凝土结构可持续性	35
2.4.3	在可持续性的要求下审视混凝土结构生命周期	35
2.4.4	新一代的设计方法——可持续性设计	36
2.5	本章小结	37
	参考文献	38
第3章	混凝土结构减量设计与防灾	39
3.1	混凝土结构原材料减量化	39
3.1.1	混凝土材料的本地化	39
3.1.2	混凝土材料的高性能化	40
3.1.3	钢筋材料的高性能化	42
3.1.4	其他新型材料的应用	44
3.1.5	广义的减量化	48
3.2	混凝土结构选型	49
3.2.1	充分利用混凝土受压的结构	49
3.2.2	钢-混凝土组合结构	51
3.3	混凝土结构的抗震	52
3.3.1	混凝土结构抗震概念设计	53
3.3.2	混凝土结构抗震计算设计	56
3.3.3	混凝土结构抗震构造设计	56
3.4	混凝土结构的抗火	57

3.4.1	混凝土结构的防火设计	58
3.4.2	混凝土结构的抗火设计	59
3.4.3	混凝土结构的合理消防	61
3.4.4	混凝土结构的其他灾害	63
3.5	混凝土结构的耐久性提升	65
3.5.1	混凝土结构长寿命是最大的减量化	65
3.5.2	混凝土结构耐久性材料优选	67
3.5.3	混凝土结构耐久性设计优化	68
3.6	本章小结	71
	参考文献	71
第4章	混凝土结构改造与再用	73
4.1	混凝土结构的加固与改造	73
4.1.1	混凝土结构的加固与改造原则	74
4.1.2	混凝土结构的加固与改造典型方法	76
4.2	混凝土结构的修复	80
4.2.1	混凝土结构的主要修复方法	80
4.2.2	混凝土的微生物自修复方法	86
4.2.3	混凝土结构的再碱化技术	87
4.3	混凝土结构的维护	88
4.3.1	混凝土结构的阴极保护	88
4.3.2	混凝土结构的涂层保护	92
4.4	混凝土结构拆除构件的再利用	94
4.4.1	基于再利用的混凝土构件拆除方法	95
4.4.2	混凝土结构拆除构件的再利用评价	97
4.4.3	混凝土结构拆除后再利用案例分析	99
4.5	本章小结	105
	参考文献	105
第5章	混凝土结构拆除与再生	109
5.1	混凝土结构的拆除	109
5.1.1	混凝土结构爆破拆除	109
5.1.2	混凝土结构机械拆除	110
5.1.3	混凝土结构拆解分析	112
5.2	废混凝土的回收	113
5.2.1	建筑废物的组成	113

5.2.2 废混凝土的分类与回收标准	113
5.3 废混凝土的破碎	114
5.3.1 移动式破碎	114
5.3.2 固定式破碎	115
5.4 再生原料	116
5.4.1 再生粗骨料	116
5.4.2 再生细骨料	118
5.4.3 再生粉体	121
5.5 再生混凝土	122
5.5.1 再生混凝土制备	123
5.5.2 再生混凝土力学性能	125
5.5.3 再生混凝土耐久性能	128
5.5.4 再生混凝土的动力与阻尼特性	131
5.6 再生混凝土结构	133
5.6.1 再生混凝土基本构件	133
5.6.2 再生混凝土框架结构	137
5.6.3 典型再生混凝土工程	139
5.7 本章小结	141
参考文献	141
第 6 章 混凝土结构绿色建筑	147
6.1 绿色混凝土	147
6.1.1 自密实混凝土	148
6.1.2 清水混凝土	153
6.1.3 环保型混凝土	155
6.1.4 自感知混凝土	161
6.2 混凝土结构的预制与装配	163
6.2.1 混凝土预制构件	163
6.2.2 预制构件的运输与吊装	167
6.2.3 混凝土预制构件的装配连接	170
6.3 施工信息化与工业化	172
6.3.1 信息化与 BIM 的应用	172
6.3.2 工业化	180
6.3.3 自动化	183
6.4 本章小结	191
参考文献	191

第 7 章 混凝土结构碳足迹	194
7.1 碳足迹与碳标签	194
7.1.1 碳足迹	194
7.1.2 碳标签	195
7.2 CO ₂ 减排	196
7.2.1 减少水泥熟料的使用	196
7.2.2 再生骨料的应用	201
7.2.3 结构改造与构件再利用	202
7.3 CO ₂ 吸收	206
7.3.1 混凝土碳化与 CO ₂ 吸收	206
7.3.2 基于 CO ₂ 吸收效率的结构选型	212
7.3.3 再生混凝土应用的生态优势	214
7.4 混凝土结构外围护	216
7.4.1 外墙保温	217
7.4.2 屋顶保温	218
7.4.3 屋顶绿化与垂直绿化	219
7.5 本章小结	220
参考文献	221
第 8 章 可持续混凝土结构效益分析	224
8.1 社会效益分析	224
8.1.1 混凝土结构的初始阶段	225
8.1.2 混凝土结构的发展与成熟阶段	225
8.1.3 混凝土结构的可持续发展阶段	226
8.2 环境与生态效益分析	227
8.2.1 混凝土结构生命周期评价	228
8.2.2 可持续混凝土结构生命周期评价——以再生混凝土结构为例	230
8.3 经济效益分析	236
8.3.1 混凝土结构的生命周期成本	236
8.3.2 可持续混凝土结构的生命周期成本——以装配式混凝土结构为例	238
8.4 本章小结	244
参考文献	245
第 9 章 混凝土结构可持续性设计与评价方法	247
9.1 可持续性设计方法与原则	247

9.1.1 减量化 (Reduce)	248
9.1.2 再利用 (Reuse)	249
9.1.3 再生循环 (Recycle)	251
9.1.4 再生修复 (Regeneration)	252
9.1.5 可恢复 (Resilience)	253
9.2 混凝土结构可持续性设计	254
9.2.1 设计流程	254
9.2.2 设计要点	256
9.2.3 基于 CO ₂ 排放的混凝土结构可持续性设计	257
9.2.4 基于 CO ₂ 排放的可持续性设计案例	259
9.3 可持续性评价	264
9.3.1 结构性能评价	264
9.3.2 生态环境评价	266
9.3.3 经济效能评价	267
9.3.4 可持续性评价	269
9.4 可持续性设计主体、人员与平台	271
9.4.1 设计人员的素养	271
9.4.2 设计平台	273
9.5 可持续性设计的法律法规与评价标准	278
9.5.1 国外可持续性评价体系	278
9.5.2 国内可持续性评价体系与法律法规	280
9.6 本章小结	284
参考文献	284
第 10 章 可持续混凝土结构未来发展	287
10.1 新材料	287
10.1.1 海水海砂	288
10.1.2 纤维增强复合材料 (FRP)	292
10.1.3 高性能再生混凝土	295
10.1.4 非传统水泥基混凝土	299
10.1.5 吸能混凝土	301
10.2 新结构	305
10.2.1 仿生结构	305
10.2.2 可移动结构	310
10.2.3 自复位结构	314
10.2.4 组合混凝土结构	316

10.3 新施工	318
10.3.1 可拆装结构	318
10.3.2 模块式结构	321
10.3.3 3D 打印结构	324
10.4 本章小结	329
参考文献	330
致谢	332

第1章 绪 论

土木工程是人类文明发展的重要载体和标志。在工业革命之前，土木工程所采用的原材料主要包括土、木、石等天然材料，这些材料可以从大自然中获取，也可以有序地回归到大自然中去，因此对环境产生的负面影响很小。纵观中国五千年的历史，人类建造了大量的建筑物，但这些并未影响到现在人类的生存和发展。

随着人类工业革命的兴起，混凝土结构越来越广泛地被运用于生活和生产建设中。与此同时，与混凝土有关的环境问题也日益突出：水泥生产消耗大量能源，造成环境污染；骨料的开采与运输破坏生态环境；废混凝土的填埋浪费资源……这些问题若不能得到妥善处理，必将危及当代人甚至后代人的生存！因此，实现混凝土结构的可持续发展是当今土木工程的关键问题之一。

本章阐述了土木工程的概念以及可持续发展的定义与原则，并从中引出了可持续土木工程的概念和原则，阐明了可持续发展的宗旨。同时，介绍了混凝土结构的发展历史及其对人类文明的贡献和对环境的负面影响，说明了混凝土结构可持续性设计的必要性。最后梳理了本书各章节之间的逻辑关系。

1.1 可持续土木工程的概念

1.1.1 土木工程的概念

土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术^[1]。建造工程设施的物质基础是土地、建筑材料、建筑设备和施工机具。借助于这些物质条件，经济而便捷地建成既能满足人们使用功能和审美要求，又能安全承受各种荷载的工程设施，是土木工程学科的出发点和归宿。

土木工程的目的是形成人类生产或生活所需要的、功能良好且舒适美观的空间和通道。它既是人类对物质方面的需要，也是人类对精神方面的需求。随着社会的发展，工程结构越来越大型化、复杂化，超高层建筑、特大型桥梁、巨型大坝、复杂的地铁系统不断涌现，这不仅满足了人们的生活需求，同时也演变为社会实力和繁荣程度的象征。

土木工程需要解决的首要问题是如何保证工程的安全性,使结构能够抵抗各种自然或人为的作用力。任何一个工程结构都要承受自身重量,以及使用荷载、风荷载和温度变化等作用。在地震区,土木工程结构还应考虑承受地震作用。此外,风灾和洪水等自然灾害以及爆炸、振动等人为作用对土木工程的影响也不能忽视。

土木工程是一个系统工程,涉及许多方面的知识和技术,是运用多种工程技术进行勘测、设计和施工的成果。土木工程随着社会科学技术和管理水平而发展,是技术、经济、艺术统一的历史足迹与见证。影响土木工程的因素繁多,这使得土木工程对实践和理论的依赖性均很强。

1.1.2 可持续的定义与原则

可持续发展是一种注重长远发展的经济增长模式,指既满足当代人的需求,又不损害后代人满足其需求的发展,是科学发展观的基本要求之一。

可持续发展的概念最初于 1972 年在斯德哥尔摩 (Stockholm) 举行的“联合国人类环境研讨会”上正式讨论,会议中提出将“发展”由“单纯的经济增长”引申为“经济增长中的数量与质量的改善”,提醒人们关注人类与资源环境之间的问题^[2]。可持续发展的正式定义是在 1987 年由“世界环境及发展委员会”所发表的《布伦特兰报告书》中提出的:可持续发展是既满足当代人的需求,又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展。2005 年,“世界社会发展首脑会议”确定可持续发展目标为经济发展、社会发展和环境保护的统一^[3]。

可持续发展包含三大基本原则,分别为公平性原则、持续性原则和共同性原则。

公平性原则指的是本代人之间的公平、代际间的公平和资源分配与利用的公平。可持续发展是一种机会、利益均等的发展,它既包括同代内区际间的均衡发展,即一个地区的发展不应以损害其他地区的发展为代价;也包括代际间的均衡发展,即既满足当代人的需要,又不损害后代的发展能力。该原则认为人类各代都处在同一生存空间,他们对这一空间中的自然资源和社会财富拥有同等享用权和同等的生存权。

持续性原则指的是人类经济和社会的发展不能超越资源和环境的承载能力,即在满足需要的同时必须有限制因素,发展的概念中一定包含着制约的因素。因此,在满足人类需要的过程中,必然有限制因素的存在。目前,人类发展的主要限制因素有人口数量、环境、资源,以及当前技术状况和社会组织对环境满足眼前和将来需要的能力限制。其中,最主要的限制因素是人类赖以生存的物质基础——自然资源与环境。因此,持续性原则的核心是人类的经济和社会发展不能超越资源与环境的承载能力,从而真正将人类的当前利益与长远

利益有机结合。

共同性原则指的是各国可持续发展的模式虽然不同,但公平性和持续性原则是共同的。地球的整体性和相互依存性决定全球必须联合起来,认知人类的共同家园。可持续发展是超越文化与历史的障碍来看待全球问题的。只有全人类共同努力,才能将人类的局部利益与整体利益结合起来,从而实现可持续发展的总目标。

从上述可持续发展的概念原则可以看到,对土木工程来说,结合现代科技走可持续发展道路,是其研究与发展中必定面临的重要问题。

1.1.3 可持续土木工程的基本原则

传统的土木工程一直沿用高投入、高污染、低效益的生产模式,对自然资源造成了极大的浪费,并且给环境带来了不利的影响。因此,土木工程领域的可持续发展受到越来越多的关注。不同学者和研究机构对土木工程领域的可持续发展作出了各自相应的阐述。

(1) 联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)认为土木工程可持续是“将环境、社会经济和文化因素考虑在内,以实现可持续发展的途径。具体而言,它涉及工程建设设计和管理、原料和工程性能、能源和资源消耗等多个问题”。

(2) 瑞士的豪瑞可持续建筑基金会(Holcim Foundation for Sustainable Construction)则推行“三重底线”理论。该理论主张,要实现长期可持续发展,首先必须达到经济发展、环境保护和社会责任三个方面的平衡发展。基于这个理念,提出了具有创新变革及可移植性、符合道德标准及社会平等、保证生态质量和资源效率、产生经济效益和可适应性、体现文脉呼应和美学概念这五项土木工程可持续的评选指标。

(3) 1994年召开的第一届工程建设可持续国际会议上,Charles J.Kibert教授提出了“工程建设可持续”的六个主要原则:资源消耗最小化;资源再利用最大化;使用可再生、再循环的资源;保护自然环境;创造无毒害的环境;在所创造的建设环境中追求质量。

因此,综合可持续发展的基本原则,本书认为可持续的土木工程应满足减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再生循环(Recycle)、再生修复(Regeneration)和可恢复(Resilience)的“5R”原则。

减量化原则,要求用较少的原料和能源投入来达到既定的生产目的或消费目的,从经济活动的源头就注意节约资源和减少污染。土木工程领域中减量化原则的应用主要指的是在设计、建造的源头上减少对天然资源的消耗以及建筑废物的产生等,主要手段包括绿色设计与施工、绿色材料的应用等。

再利用原则,要求构件或者材料能够以初始的形式被再次使用。土木工程领域中再利用原则的应用,主要指的是建筑结构在服役期满或者需要拆除的时候,其结构构件可以得到再次利用的机会,实现其二次生命。

再生循环原则,要求生产出来的物品在完成其使用功能后能重新变成可以利用的资源,而不是不可循环的废物。土木工程领域中再生循环原则的应用,主要是实现建筑废物的再生循环利用。

再生修复原则,是指针对建筑结构的构件开裂、剥落、破损、缺失等问题进行修复甚至自我修复过程,使建筑结构的构件能够保持原有的性能,同时不影响结构的整体性,从而延长结构的使用寿命。

可恢复原则,是指通过保护、恢复或者改善和修复基本结构和功能等合适的方式,灾害对结构的影响能够被预测、吸收、适应或者恢复,便于再利用和提高其应对自然和人为灾害的能力。

目前在工程界较为熟知的是包含减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再生循环(Recycle)的“3R”原则。

1.2 混凝土结构与工业文明

1.2.1 工业文明发展历史

工业文明是指工业社会文明,即未来学家 Alvin Toffler 所言的第二次浪潮文明,是以工业化为重要标志、机械化大生产占主导地位的一种现代社会文明状态,有学者把它分为以下五个阶段。

(1) 16 世纪初到 18 世纪工业革命前,工业文明首先在西欧兴起。

(2) 工业革命开始以后到 19 世纪末,人类真正进入工业社会,同时工业文明从西欧扩散到全球。

(3) 20 世纪上半期,工业文明全面到来,社会出现了巨大的震荡,人类也进行了调整和探索。

(4) 第二次世界大战后到 20 世纪 70 年代初,人类吸取了上一阶段的经验教训,工业文明顺利推进。

(5) 20 世纪 70 年代以来,工业文明深入发展。

迄今为止,工业文明是最富活力和创造性的文明。相对于农业社会僵化的等级划分和低下的生产效率,工业文明以其规模化、创新性等优势为人类创造了大量的财富,但同时也加剧了对地球资源的消耗以及对环境的污染。因此,21 世纪的后工业化时代将必然向追求可持续发展的循环经济、生态经济的高科技经济模式发展。