



高强混凝土及其 组合结构

李惠 著



科学出版社

www.sciencep.com

高强混凝土及其组合结构

李 惠 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了高强混凝土及其组合结构的力学性能、结构分析、设计方法及工程应用的主要研究成果。第1~3章是高性能混凝土的制备工艺和配合比、基本物理力学性能和耐久性以及耐高温性能;第4章是高强混凝土基本构件的非线性分析与设计方法;第5~7章是竖向承重钢-混凝土组合构件及其分析与设计方法;第8章是水平向钢-混凝土组合构件和组合节点;第9、10章是钢-混凝土组合建筑结构和组合桥梁结构简介。

本书可供从事土木工程、水利工程和海洋结构工程的广大科技人员参考,可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高强混凝土及其组合结构/李惠著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-013737-X

I. 高… II. 李… III. 高强混凝土-混凝土结构 N. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第060826号

责任编辑:杨家福 杨 解 / 责任校对:朱光光

责任印制:吕春珏 / 封面设计:陈 敬

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>

新 华 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年7月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2004年7月第一次印刷 印张:21

印数:1-3 000 字数:394 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

高性能混凝土具有高强度和高耐久性等特点,是建造百年大计重大土木工程理想和重要结构材料;高强混凝土与钢材有机地巧妙结合,通过变形协调共同工作,充分发挥各自的优势,发展出完美的新型钢-混凝土组合结构体系,实现人们期望的结构性能目标。

钢-混凝土组合结构诞生于 19 世纪末期,但只有高强混凝土的出现,才使钢与混凝土得以完美的结合而形成高性能钢-混凝土组合结构体系。现代新型组合结构已经超越了传统组合结构的概念,拓展了传统组合结构的内涵,组合结构的形式更丰富,体型更复杂,性能也更高,它已经成为建造高层建筑和大跨度桥梁的理想结构体系,世界上已经建造和正在建造的最高的高层建筑、已经建造的最大跨度的斜拉桥均为钢-混凝土组合结构体系,这充分展示了钢-混凝土组合结构在高层建筑和大跨度桥梁建设中的重要作用和美好前景。

本书系统地总结和阐述了高强混凝土及其组合结构的力学性能、结构分析、设计方法及工程应用的主要研究成果,以及作者及其合作者相关的研究成果。全书包括绪论和 1~10 章。绪论较全面地综述了高强混凝土及其组合结构研究与应用的主要进展和发展趋势。第 1 章高强与高性能混凝土原材料与配合比,介绍了高性能混凝土和高强混凝土原材料的选择原则及其配合比。第 2 章高强与高性能混凝土的基本物理力学性能和耐久性,介绍了国内外高强混凝土的各种强度、弹性模量、应力应变本构关系模型、高性能混凝土的耐久性及其试验方法。第 3 章高性能混凝土的抗火性能与火灾后的修复策略,介绍了高性能混凝土高温爆裂及其机理和防治措施、高性能混凝土高温中和高温后的力学性能损伤与耐久性损伤及其评价方法。第 4 章高强混凝土结构基本构件的分析与设计方法,介绍了高强混凝土受弯构件受力全过程分析与设计方法、高强混凝土弯剪构件受力全过程分析与设计方法、高强混凝土压弯构件受力全过程分析与设计方法及抗震性能。第 5 章钢管高强混凝土柱分析与设计方法,介绍了钢管高强混凝土柱受力全过程分析方法、抗震性能及其参数对受力性能和抗震性能的影响规律、钢管高强混凝土柱设计方法。第 6 章钢骨高强混凝土柱分析与设计方法,介绍了钢骨高强混凝土柱受力全过程分析方法、抗震性能及其参数对受力性能和抗震性能的影响规律、钢骨高强混凝土柱设计方法。第 7 章高强混凝土叠合柱的分析与设计方法,介绍了高强混凝土叠合柱的概念、受力全过程分析方法、抗震性能、轴力重分配及轴压比限值和设计方法。第 8 章钢-混凝土组合梁和组合节点,介绍了钢-混凝土组合梁的形式和设计方法、组合节

点的形式及其抗震性能。第9章组合建筑结构,介绍了高层组合建筑结构体系的形式及其受力特点和抗震性能分析方法。第10章组合桥梁结构,介绍了组合桥梁的组合构件和组合桥梁结构形式、静动力和稳定性及抗震性能分析方法。

高强混凝土及其组合结构涉及材料学、力学、高层建筑、大跨桥梁、地震工程和风工程等多门学科,新材料、新技术和新型结构体系的发展为高层建筑和大跨桥梁的建造提供了技术支撑,而高层建筑和大跨桥梁的建造又促进了新型结构体系及其分析设计理论的发展。我国正在进行空前的大规模基础设施建设,高性能混凝土及其组合结构是我国城市及其基础设施建设的主要材料和结构形式,作者以期本书的出版对本学科领域的研究和应用以及对我国城市与基础设施的建设能尽微薄之力。

本书是在闫昕、刘金龙、王震宇、袁杰、兰成明和张亮泉等的部分合作和参与下完成的。作者对他们的合作表示衷心的感谢!

我国国家自然科学基金会、科技部、黑龙江省科技厅、同济大学、香港理工大学和辽宁省建筑设计研究院对作者的研究给予了大力资助,获得资助的有关项目有:国家自然科学基金项目——高强混凝土组合结构的抗震性能研究(59708010);国家科技部“十五”科技攻关项目和上海市重点学科建设合作项目——高性能混凝土住宅结构耐久性与抗灾性能研究(2002BA806B-4);黑龙江省科技厅资助的青年基金项目——高强混凝土叠合柱设计方法研究;香港理工大学资助项目——Spalling of High-strength Concrete under Fire “Quantification and Prevention”(A/C Code: A-PD50);辽宁省建筑设计研究院资助项目——高强混凝土叠合柱和叠合节点抗震性能研究。作者和参与本书撰写的合作者对上述项目的资助表示衷心的感谢!

在攻读博士和硕士学位期间与作者一道参与本书相关内容课题研究的有王震宇、闫昕、周文松、刘克敏、刘金龙、兰成明、李晓敏等,作者对他们为本书相关内容研究做出的贡献表示感谢!作者在与本书相关内容研究过程中,曾与同济大学李杰教授、香港理工大学黄玉龙博士和辽宁省建筑设计研究院林立岩设计大师共同合作,作者对他们表示衷心的感谢!作者在攻读硕士学位期间,开展了与本书内容相关的研究工作,对导师朱聘儒教授作者表示衷心的感谢!欧进萍院士对本书的撰写提出了宝贵的建议,并一直鼓励作者继续从事该学科领域的研究,作者亦对此表示衷心的感谢!

主要符号

A	构件截面面积
A_c	混凝土截面面积
A_{cc}	核心区混凝土净面积
A_{ce}	核心区有效约束混凝土面积
A_{co}	叠合柱核心材料(钢管混凝土或钢骨)截面面积
A_s, A'_s	拉、压钢筋截面面积
A_{sc}	钢管混凝土截面面积
A_{st}	钢管截面面积
A_{sr}	钢管截面面积
$A_{sv}(A_{sv1})$	箍筋(单肢箍筋)截面面积
a_s, a'_s	拉、压区钢筋中心距混凝土边缘距离
b	截面宽度
c	混凝土保护层厚度
D	圆形截面外直径
d	圆形截面内直径
d_s	纵筋直径
d_{sv}	箍筋直径
E_1, E_2, E_3	1、2、3 三个主应力方向的初始弹性模量
E_c	混凝土弹性模量
E_s	钢材弹性模量
E'_s	钢材应变强化模量
E_{sc}	钢管混凝土组合弹性模量
E_{sc}^M	钢管混凝土组合抗弯弹性模量
e_0	偏心距
f_c	混凝土轴心抗压强度
f'_c	混凝土圆柱体轴心抗压强度
f'_{cc}	约束混凝土抗压强度
f_{ck}	混凝土轴心抗压强度标准值
f_{co}	叠合柱核心材料(钢管混凝土或钢骨)屈服强度

f_{cr}	混凝土开裂强度
f_{cu}	混凝土立方体抗压强度
$f_{cu,k}$	混凝土立方体抗压强度标准值
f_s	钢材(钢管、钢骨)或碳纤维屈服强度
f_{sc}	钢管混凝土组合材料屈服强度(组合抗压强度)
$f_{sc,k}$	钢管混凝土组合抗压强度标准值
$f_{sv,y}$	箍筋屈服强度
f_t	混凝土轴拉强度
$f_{t,k}$	混凝土弯折强度
$f_{t,s}$	混凝土劈拉强度
f_y, f'_y	拉、压钢筋屈服强度
G_{sc}	钢管混凝土组合剪切弹性模量
G'_{sc}	钢管混凝土组合剪切强化模量
h	截面高度
h_0	截面有效高度
h_w	截面腹板高度
I	截面惯性矩
I_c	混凝土截面惯性矩
I_{sc}	钢管混凝土截面惯性矩
I_{sr}	钢骨截面惯性矩
I_{st}	钢管截面惯性矩
k_e	箍筋有效约束效应系数
k_s	约束混凝土强度提高系数
L	构件长度
L_0	构件计算长度
L_n	构件净长度
M_{cr}	构件开裂弯矩
M_0	纯弯构件极限弯矩
M_y	构件屈服弯矩
M_u	构件极限弯矩
m	叠合比
N_0	轴心拉、压承载力
N_E	欧拉临界力
N_u	偏心拉、压承载力
n	轴压比

P_y	构件屈服时水平力
P_u	水平力极值
s	箍筋中心线间距离
s'	箍筋间混凝土净距离
t	厚度
V_u	抗剪承载力
W_{sc}	钢管混凝土截面抵抗矩
W_{sr}	钢骨截面抵抗矩
x	等效矩形应力图混凝土受压区高度
x_b	等效矩形应力图界限受压区高度
x_c	曲线应力图形受压区高度
α_1	等效矩形应力图压应力系数
β_1	等效矩形应力图受压区高度系数
$\gamma(\gamma_p)$	(峰值)剪应变
$\gamma_{oct,p}$	混凝土八面体峰值剪应变
$\gamma_{oct,p}^{axial}$	单向轴压状态下混凝土八面体峰值剪应变
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	1、2、3 三个方向的主应变
$\epsilon_{1p}, \epsilon_{2p}, \epsilon_{3p}$	1、2、3 三个方向的峰值主应变
ϵ_c	混凝土压应变
ϵ_{c0}	混凝土峰值压应变
ϵ_{cc0}	约束混凝土峰值应变
ϵ_{cr}	混凝土开裂应变
ϵ_{cu}	混凝土极限压应变
$\epsilon_{oct,p}$	混凝土八面体峰值正应变
ϵ_r	径向应变
ϵ_s	钢材(钢筋、钢管、钢骨)或碳纤维拉应变
ϵ'_s	钢材(钢筋、钢管、钢骨)压应变
ϵ_{tu}	混凝土极限拉应变
ϵ_y	钢筋屈服应变
ζ	钢管混凝土套箍系数
η	偏心距增大系数
κ	钢管或钢骨混凝土含钢率
λ	剪跨比
λ_s	长细比
λ_v	配箍特征值

ν_c	混凝土泊松比
ξ	相对受压区高度
ξ_b	相对界限受压区高度
$\rho_s(\rho'_s)$	受拉(压)纵筋体积配筋率
ρ_{sv}	箍筋体积配箍率
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	1、2、3 三个方向的主应力
σ_c	混凝土压应力
σ_{c0}	混凝土峰值压应力
σ_{cc0}	约束混凝土峰值应力
σ_{oct}	混凝土八面体正应力
σ_p	与 σ_1 同轴的峰值应力
σ_r	径向约束应力
σ_s	钢材(钢筋、钢管、钢骨)或碳纤维拉应力
σ'_s	钢材(钢筋、钢管、钢骨)压应力
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	x, y 方向正应力及 $x-y$ 平面内剪应力
$\tau(\tau_p)$	(峰值)剪应力
τ_{oct}	混凝土八面体剪应力
$\tau_{oct, p}$	混凝土八面体峰值剪应力
φ	曲率
φ_y	屈服曲率
φ_u	极限曲率
ψ	稳定系数

目 录

前言

主要符号

绪论	1
第 1 章 高强与高性能混凝土原材料与配合比	18
1.1 水泥	18
1.1.1 水泥强度	18
1.1.2 水泥的流变性能	18
1.1.3 水泥用量和水灰比	19
1.2 集料	19
1.2.1 粗集料	19
1.2.2 细集料	20
1.3 矿物掺和料	21
1.3.1 硅灰	21
1.3.2 粉煤灰	21
1.3.3 高炉矿渣	22
1.3.4 F 矿粉	22
1.4 外加剂	23
1.4.1 高效减水剂	23
1.4.2 缓凝剂	24
1.4.3 引气剂	24
1.4.4 其他类外加剂	25
1.5 配合比设计	26
1.5.1 高强混凝土的配合比	26
1.5.2 高性能混凝土的配合比	28
1.5.3 高性能混凝土配合比示例	29
1.6 新拌混凝土的性能	31
1.6.1 工作性	31
1.6.2 可泵性	32

1.6.3	早期收缩与开裂	33
1.6.4	新拌混凝土的流变性	33
第2章	高强与高性能混凝土的基本物理力学性能和耐久性	35
2.1	基本力学性能	35
2.1.1	抗压强度	35
2.1.2	峰值应变和极限应变	38
2.1.3	弹性模量	39
2.1.4	横向变形系数	40
2.1.5	其他强度	40
2.2	力学本构关系模型	42
2.2.1	非约束高强混凝土力学本构关系模型	42
2.2.2	约束高强混凝土力学本构关系建模方法	47
2.2.3	约束高强混凝土力学本构关系模型	59
2.3	耐久性	66
2.3.1	抗渗性	66
2.3.2	抗冻性	68
2.3.3	碱集料反应	71
2.3.4	耐化学侵蚀	76
2.3.5	耐磨性	78
第3章	高性能混凝土的抗火性能与火灾后的修复策略	80
3.1	混凝土结构抗火试验方法	80
3.1.1	升温制度	80
3.1.2	力学性能试验方法	81
3.1.3	耐久性试验方法	81
3.2	受火中高性能混凝土的性能与损伤	81
3.2.1	高性能混凝土的火效应	82
3.2.2	高性能混凝土爆裂损伤	85
3.2.3	高性能混凝土力学性能的劣化	93
3.3	受火后高性能混凝土的损伤与修复策略	94
3.3.1	力学性能劣化	94
3.3.2	耐久性退化	97
3.3.3	受火后高性能混凝土的修复策略	99
第4章	高强混凝土结构基本构件的分析与设计方法	103
4.1	受弯构件	103
4.1.1	受力特点	103

4.1.2	单调加载下的全过程分析	105
4.1.3	滞回模型与抗震性能	115
4.1.4	设计方法	115
4.2	弯剪构件	118
4.2.1	受力特点	118
4.2.2	弯剪构件受力全过程的有限元分析方法	123
4.2.3	设计方法	136
4.3	压弯构件	141
4.3.1	受力特点	141
4.3.2	单调加载下压弯构件全过程分析	144
4.3.3	滞回模型与抗震性能	153
4.3.4	设计方法	157
第5章	钢管高强混凝土柱分析与设计方法	163
5.1	钢管高强混凝土柱受力性能概述	163
5.1.1	钢管混凝土柱研究与发展概述	163
5.1.2	钢管高强混凝土柱受力性能概述	164
5.2	钢管高强混凝土柱受力全过程分析	165
5.2.1	钢管高强混凝土的基本参数	165
5.2.2	钢管高强混凝土压弯构件全过程分析	166
5.3	钢管高强混凝土柱抗震性能与滞回模型	169
5.3.1	抗震性能	169
5.3.2	滞回模型	172
5.4	钢管高强混凝土柱设计方法	175
5.4.1	轴心受压极限承载力	175
5.4.2	压弯极限承载力	179
第6章	钢骨高强混凝土柱分析与设计方法	184
6.1	钢骨高强混凝土柱受力特点及全过程分析	184
6.1.1	轴心受压破坏形态与受力特点	184
6.1.2	压弯构件破坏形态与受力特点	185
6.1.3	压弯构件全过程分析	185
6.1.4	压弯构件特征点计算	187
6.2	钢骨高强混凝土柱抗震性能与滞回模型	189
6.2.1	抗震性能	189
6.2.2	滞回模型	191
6.3	钢骨高强混凝土柱设计方法	191

6.3.1	轴心受压极限承载力	191
6.3.2	压弯极限承载力	192
6.3.3	抗剪极限承载力	195
第7章	高强混凝土叠合柱的分析与设计方法	197
7.1	叠合柱的概念	197
7.1.1	概念	197
7.1.2	抗震机理	201
7.1.3	叠合柱参数	201
7.2	叠合柱受力全过程分析	203
7.2.1	数值分析方法	203
7.2.2	荷载-变形关系的影响因素	208
7.2.3	骨架曲线特征点计算方法	210
7.3	叠合柱的抗震性能与滞回模型	211
7.3.1	试件设计与加载制度	211
7.3.2	叠合柱滞回曲线与滞回模型	213
7.4	轴力重分配及轴压比限值	216
7.4.1	轴力重分配规律	217
7.4.2	最佳叠合方式	220
7.4.3	轴压比限值	221
7.5	设计方法	229
7.5.1	截面尺寸的初步设计	230
7.5.2	抗弯极限承载力设计方法	232
7.5.3	抗剪极限承载力设计方法	233
7.5.4	设计要求与构造措施	234
7.5.5	设计实例	236
第8章	钢-混凝土组合梁和组合节点	240
8.1	钢-混凝土组合梁与组合楼板	240
8.1.1	钢-混凝土组合梁和组合楼板的形式及工作机理	240
8.1.2	钢-混凝土组合梁的分析与设计方法	244
8.2	组合结构节点	246
8.2.1	钢管混凝土梁柱节点	246
8.2.2	钢骨混凝土梁柱节点	255
第9章	组合建筑结构	259
9.1	组合建筑结构体系及其分析设计理论发展概述	259
9.2	组合建筑结构体系及其受力特点	261

9.2.1	框架-核心筒组合结构体系	261
9.2.2	巨型组合结构体系	263
9.2.3	钢管混凝土和钢骨混凝土框架结构体系	264
9.3	组合高层建筑结构的抗震分析方法	265
9.3.1	静力弹塑性分析方法	265
9.3.2	动力弹塑性时程分析方法	271
第 10 章	组合桥梁结构	275
10.1	组合构件和组合桥梁结构体系	275
10.1.1	桥梁结构的组合构件	275
10.1.2	组合桥梁结构	282
10.2	组合桥梁结构静力分析方法	286
10.2.1	组合斜拉桥空间非线性有限元模型	287
10.2.2	组合斜拉桥静力与稳定性分析	291
10.3	组合桥梁结构动力分析方法	293
10.3.1	组合斜拉桥动力特性分析	293
10.3.2	组合斜拉桥地震反应分析	294
参考文献		297

CONTENTS

Preface

Main Symbols

Introduction 1

Chapter 1 Raw Materials and Mixture Ratio of High Strength and High

Performance Concrete 18

1.1 Cement 18

1.1.1 Strength of Cement 18

1.1.2 Rheological Properties of Cement 18

1.1.3 Water/Cement Ratio 19

1.2 Aggregates 19

1.2.1 Coarse Aggregates 19

1.2.2 Fine Aggregates 20

1.3 Mineral Components 21

1.3.1 Silica Fume 21

1.3.2 Fly Ash 21

1.3.3 Blast-furnace Cinder 22

1.3.4 F-breeze 22

1.4 Admixtures 23

1.4.1 Superplasticizer 23

1.4.2 Retarding Agent 24

1.4.3 Air-entraining Agent 24

1.4.4 Other Admixtures 25

1.5 Mixture Ratio Design 26

1.5.1 Mixture Ratio of High Strength Concrete 26

1.5.2 Mixture Ratio of High Performance Concrete 28

1.5.3 Example of Mixture Ratio of High Performance Concrete 29

1.6 Performance of Fresh Concrete 31

1.6.1 Working Performance 31

1.6.2 Pumpability 32

1.6.3 Shrink and Crack Performance at Early Stage 33

1. 6. 4	Rheological Properties of Fresh Concrete	33
Chapter 2	Mechanical Properties and Durability of High Strength and High Performance Concrete	35
2. 1	Fundamental Mechanical Properties	35
2. 1. 1	Compressive Strength	35
2. 1. 2	Peak Strain and Ultimate Strain	38
2. 1. 3	Elastic Modulus	39
2. 1. 4	Poisson Ratio	40
2. 1. 5	Other Strength	40
2. 2	Mechanical Constitutive Models	42
2. 2. 1	Mechanical Constitutive Models for Unconfined High Strength Concrete	42
2. 2. 2	Modelling Approaches of Mechanical Constitutive Models of Confined High Strength Concrete	47
2. 2. 3	Mechanical Constitutive Models for Confined High Strength Concrete	59
2. 3	Durability	66
2. 3. 1	Impermeability Property	66
2. 3. 2	Frostresisting Property	68
2. 3. 3	Alkali-aggregate Reaction	71
2. 3. 4	Chemical Resistant	76
2. 3. 5	Abradability Property	78
Chapter 3	Fire Resistance and Post-fire Repair Methods of High- performance Concrete	80
3. 1	Testing Methods for Fire Resistance of Concrete Structure	80
3. 1. 1	Heating Regimes	80
3. 1. 2	Testing Methods for Mechanical Properties	81
3. 1. 3	Testing Methods for Durability	81
3. 2	Performances and Damages of High-performance Concrete under Fire	81
3. 2. 1	Fire Effects of High-performance Concrete	82
3. 2. 2	Spalling of High-performance Concrete	85
3. 2. 3	Deterioration of Mechanical Properties of High-performance Concrete Post Fire	93

3.3	Damages and Repair Methods of High-performance Concrete	
	Post-fire	94
3.3.1	Deterioration of Mechanical Properties	94
3.3.2	Degradation of Durability	97
3.3.3	Repair Methods of High-performance Concrete Post-fire	99
Chapter 4	Analysis and Design Methods of Basic Members of Reinforced	
	High-strength Concrete Structures	103
4.1	Beams for Flexure	103
4.1.1	Fundamentals of Beam Behavior	103
4.1.2	Mechanical Analysis under Monotonic Loading	105
4.1.3	Seismic-resistant Behavior and Hysteretic Models	115
4.1.4	Strength Design of Beams for Moment	115
4.2	Beams for Shear and Diagonal Tension	118
4.2.1	Description of a Shear Failure in a Beam Reinforced for Moment	118
4.2.2	Finite Element Method for Mechanical Analysis of Beams for Shear and Flexure	123
4.2.3	Strength Design of Beams for Shear	136
4.3	Columns	141
4.3.1	Fundamentals of Column Behavior	141
4.3.2	Mechanical Analysis of Columns under Monotonic Loading	144
4.3.3	Seismic-resistant Behavior and Hysteretic Models	153
4.3.4	Strength Design of Columns	157
Chapter 5	Analysis and Design Methods of High-strength Concrete-filled	
	Steel Tubular Columns	163
5.1	Fundamentals of High-strength Concrete-filled Steel Tubular Columns	163
5.1.1	Overview	163
5.1.2	Fundamentals of High-strength Concrete-filled Steel Tubular Columns	164
5.2	Mechanical Analysis of High-strength Concrete-filled Steel Tubular Columns	165
5.2.1	Basic Parameters of High-strength Concrete-filled Steel Tube Columns	165
5.2.2	Mechanical Analysis of High-strength Concrete-filled Steel Tubular Columns	166