

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.028

# 型钢-混凝土组合旋挖支护桩性能

曾 朕<sup>1</sup>, 陈阁琳<sup>2</sup>, 罗顺康<sup>1</sup>, 薛艺鹏<sup>1</sup>, 赵少楠<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆一建建设集团有限公司, 重庆 400053)

**摘要:**型钢-混凝土组合支护桩(劲性桩)是一种在混凝土灌注桩中配置型钢的支护桩体。旋挖钻孔灌注桩是一种被誉为“绿色施工工艺”的桩体施工工艺。将二者有机结合起来,不仅极大提高施工效率,因内置型钢,桩身承载能力也得到加强,在确保基坑开挖时基坑稳定问题的同时也符合绿色环保、产业化施工。本文为研究型钢混凝土组合桩的受力性能,对3个试件分别进行了拟静力试验,考察了劲性桩的承载力、变形能力,并采用ABAQUS软件对3个试件进行了非线性有限元数值分析,分析结果与试验值对比符合程度较好。再对型钢-混凝土组合桩与旋挖成桩工艺的组合效果以及其施工流程简要描述,结合二者分析其施工技术与应用并得出其具有良好的社会和经济适用性,可参考利用于相应基坑支护工程中。

**关键词:**型钢-混凝土桩;旋挖桩;基坑支护;拟静力试验

**中图分类号:**TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0148-06

## Experimental study on rotary drilling of steel reinforced concrete support piles in foundation pits

Zeng Zhen<sup>1</sup>, Chen Gelin<sup>2</sup>, Luo Shunkang<sup>1</sup>, Xue Yipeng<sup>1</sup>, Zhao Shaonan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing First Construction Group Co Ltd, Chongqing 400053, P. R. China)

**Abstract:** Steel reinforced concrete supporting pile (referred to stiff pile) is a kind of concrete pile configured with steel. Rotary drilling pile is honored as a Green Construction Technology. The organic combination of the two, not only greatly improves the efficiency of construction, but also strengthens the pile bearing capacity for the shape steel encased with. This way of construction, ensuring foundation pit stability in excavation, conforms to the green environmental protection and industrialization at the same time. Quasi-static tests were performed on 3 specimens to study the structural behavior of reinforced concrete pile with infill shape steel. Overall behaviors of the SRCSP such as bearing capacity, deformation capacity and ductility were inspected. The finite element analysis was conducted to simulate the load-deformation curves of the three specimens. The simulated and experimental results agree very well. Then this paper briefly describes the combined effect and construction process of the combination of SRCSP and rotating drill construction process. By analyzing the construction technology and application, good social and economic applicability is concluded, so the construction methods can be used in the corresponding foundation pit project for reference.

**Key words:** steel reinforced concrete pile; rotary drilling pile; foundation pit support; quasi-static test

收稿日期:2015-11-10

基金项目:重庆市建设科技计划(20140006)

作者简介:曾朕(1991-),女,主要从事建筑结构与防灾研究,(E-mail)1249428011@qq.com。

随着我国城市化水平提高,对地下空间广泛高效的利用已成为解决城市人口、资源、环境三大危机和实施城市可持续发展的重要途径。目前,包括城市地下轨道交通枢纽和人防工程等大型公共基础设施在内的各类用途的地下空间已在我国城市建设中得到与日俱增的普遍应用,使得对地下工程,特别是深基坑工程的研究显得尤为迫切<sup>[1]</sup>。由于城市建设用地的局限性、周边环境的严峻性以及基坑在开挖和围护过程中的复杂性和不确定性,基坑工程成为一个极具挑战性、高风险性、高难度的岩土工程技术热点问题。进行深基坑开挖时必须采取支护措施以确保周围建筑物的安全及基坑稳定<sup>[2-3]</sup>。因此,合理选择支护方案是施工的关键<sup>[4-6]</sup>。

由于旋挖桩施工技术具有施工效率和施工精度高、钻孔速度快、良好的环保性和适用于大多数地质情况等优点,被誉为“绿色施工工艺”。广泛应用于铁路、公路桥梁、市政建设、高层建筑等地基基础钻孔灌注桩工程<sup>[7]</sup>,在基坑支护及有特殊环境要求(特别是环保要求)施工作业中有着广泛地应用前景<sup>[8]</sup>。同时以在工厂预制好的型钢代替钢筋笼,既避免了繁琐的钢筋笼制作工序,也更加符合建筑工业化,同时与普通钢筋混凝土桩相比,型钢混凝土桩的承载力和延性有了明显提升<sup>[9-10]</sup>。

因此,相比于普通的配置钢筋笼的挖孔灌注桩,型钢-混凝土组合旋挖桩具有更加显著的优越性<sup>[11-12]</sup>。将其应用于深基坑开挖支护工程中,能够解决基坑工程中更多热点与难点问题。基坑工程问题随着我国城市建设的迅猛发展而出现,为了提高对地下空间广泛高效的利用,相关研究人员进行了大量的研究和技术探讨,提出解决一系列基坑问题的办法和意见,取得了不少科研成果,尽量使基坑问题危害降到最低范围之内,同时提高对地下空间的利用。

白国良等<sup>[13-14]</sup>做了“型钢钢筋混凝土原理与设计”课题,提出型钢混凝土与普通钢筋混凝土结构相比,有更好的承载能力和变形能力,抗震性能更优越。

宫全美等<sup>[15]</sup>通过室内静力模型试验,得到了劲性桩围护结构侧向土压力以及地面影响范围随开挖深度的变化规律:侧向土压力的影响范围的变化快慢随开挖深度的变化而变化。

盛桂琳、鲍鹏等<sup>[16-17]</sup>用有限元程序 ANSYS 对劲性搅拌桩单桩的工作性状进行了分析研究,表明

劲性搅拌桩的荷载主要由桩侧摩阻力承担,传至桩端的荷载所占比例很小。进一步与同等条件下的混凝土单桩的对比研究发现,表明在一定条件下可以替代钢筋混凝土桩使用。

单明、舒昭然<sup>[18]</sup>通过对某工程抗压旋挖桩的静载荷试验、井径测试、桩身内力以及桩身完整性实测,对超长桩的竖向抗压荷载传递机理进行了研究。

国外对于型钢混凝土结构的研究起步较早,其设计理论及设计方法也相对完善<sup>[19-20]</sup>。国内在这方面的研究还处于发展阶段,许多问题需要深入研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

由于实际工程中型钢混凝土支护桩的跨高比一般较大,变形往往成为设计的控制条件;另外,型钢的保护层较厚对边缘混凝土约束较弱,如果外层钢筋配置不合理,有可能裂缝开展较大。因此,研究型钢混凝土桩在正常使用极限状态下的变形问题具有重要的现实意义。试验中设计了3根几何尺寸相同的桩体,通过拟静力试验比较型钢混凝土支护桩与钢筋混凝土支护桩的力学性能和破坏模式。试件编号分别为 SRCSP-1, SRCSP-2, RCSP-3。SRCSP-1 和 SRCSP-2 两个试件均有两根相对放置于受拉区和受压区的槽钢形成的组合型钢,但配筋方式不同;RCSP-3 作为对比试验的钢筋混凝土桩)。三个试件以控制相同含钢量来分别配置型钢和钢筋。各试件尺寸及配筋图如图 1~3 所示。

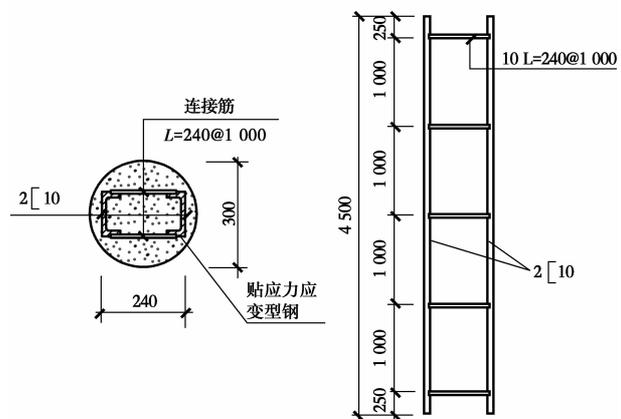


图 1 SRCSP-1 尺寸及配筋图

所有试件中,槽钢和边缘构件箍筋采用 HPB300 级钢,其余钢筋均采用 HRB335 级钢。混凝土强度等级为 C25。

浇筑试件前按照试验要求,贴好钢筋和型钢上

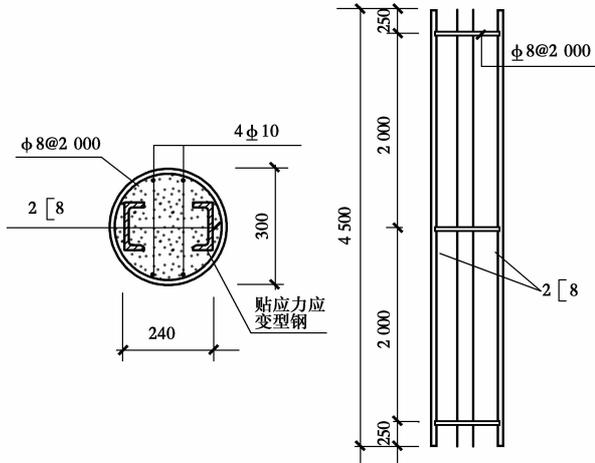


图 2 SRCSP-2 尺寸及配筋图

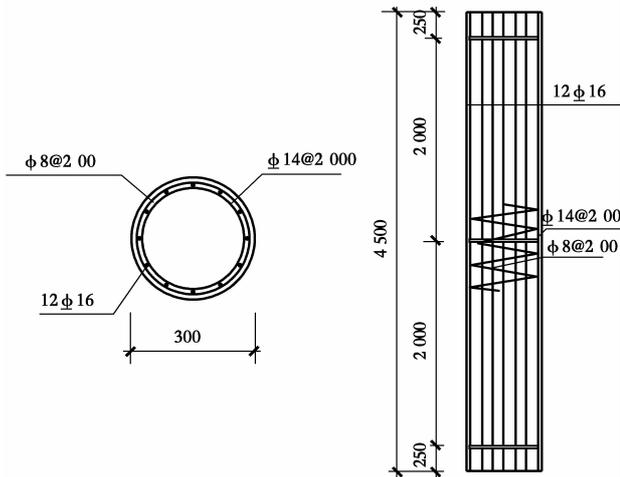


图 3 RCSP-3 尺寸及配筋图

的应变片,以测试应变分布情况。要做好绝缘防潮处理,防止在浇筑工程中被浇注器械损坏。

### 1.2 加载方法与测试内容

在实验室将 2 根型钢混凝土支护桩和 1 根钢筋混凝土对比支护桩分别进行荷载作用下的破坏性试验。试验在 500 kN 反力架下进行,跨中由一台 50 t 油压千斤顶进行加载。荷载通过千斤顶下放置的钢垫板传递到混凝土上,避免局部压碎。千斤顶底座接荷载传感器,两端支座支承在半圆柱的单向铰上。

试件安装就位后,调试试验设备,检查测量装置是否正常。然后在试验开始前,首先对试验构件进行预加载,预加载完成后开始采用分级加载方法施加荷载。试件破坏前用荷载值控制加载速度,每次加载间隔时间为 15 min 左右。在试件破坏后用位移控制加载进度,测得构件位移。在受弯加载后期,受拉区的钢筋或型钢屈服,受压区的混凝土被压碎,

桩无法稳定地承受施加于其上的荷载,即可认为试验桩正截面受弯失效破坏。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

观察各级荷载作用下桩身裂缝的开展、型钢和桩内钢筋应变分布与发展、桩身挠度和极限荷载,比较普通钢筋混凝土支护桩和型钢混凝土支护桩的抗弯、抗剪承载力、裂缝宽度及挠度大小。

型钢混凝土支护桩在外荷载作用下受力过程和普通钢筋混凝土支护桩一样,分为弹性、弹塑性和破坏三个阶段。并且两者破坏形态相似,极限承载能力的丧失是以受压区混凝土压碎为标志。型钢混凝土桩有较好的后期变形能力,当承载力达到峰值后,型钢以上的混凝土已压碎崩落,而型钢内的混凝土型钢的包围下所形成的混凝土核心相对完好;型钢还能有效的约束斜裂缝的发展。



图 4 SRCSP-1 裂缝图



图 5 SRCSP-2 裂缝图



图 6 RCSP-3 裂缝图

## 2.2 试验分析

2.2.1 荷载-挠度关系 三个试件的荷载-挠度曲线如图 7 所示。型钢混凝土桩屈服后,挠度曲线有较长的平稳阶段,表明型钢混凝土桩具有相当大的变形能力,这是钢筋混凝土桩所不及的。由于型钢本身具有较大的刚度和较好的塑性性能,同时型钢对混凝土具有的约束作用使混凝土的变形能力得到提高,并且,混凝土对型钢的约束作用避免了型钢的局部屈曲现象的发生。

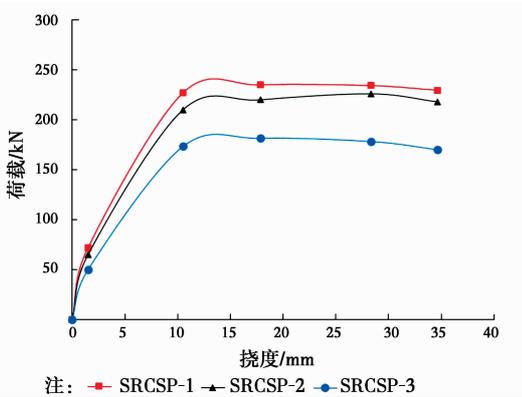


图 7 试件荷载-挠度曲线对比图

通过试验表明,与钢筋混凝土桩相比,型钢混凝土桩的荷载变形曲线不因受拉区混凝土的开裂而在荷载-挠度曲线上出现明显的转折点。这是因为裂缝开展到下部型钢水平处,收到刚度较大的型钢的约束。同时由于荷载-挠度曲线无明显转折,型钢混凝土桩在试用阶段刚度降低较少。

## 3 有限元分析

### 3.1 有限元建模

采用有限元分析软件 ABAQUS 对试件进行数值模拟,进一步验证试验结果所反映的规律。有限元模型中采用混凝土损失塑性模型,通过严格的网格划分与求解控制,得到的数值模拟计算结果与静力试验结果吻合良好。

### 3.2 求解结果分析

3.2.1 支护桩应力图 在荷载作用下,三种支护桩模型的应力图如图 8 所示。

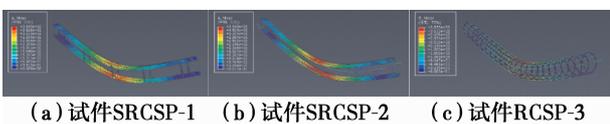


图 8 试件极限点的 von Mises 应力云图

通过应力云图可以看到,不同配筋形式的构件力的传递路线是不一样的。型钢上应力分布比较复杂,但是破坏时仅在跨中受拉区型钢达到屈服应力。可见构件中的型钢不仅贡献其本身承载能力,更多的是与混凝土协同工作。钢筋混凝土支护桩在跨中位置有明显的应力集中,从跨中到端部应力逐渐减小。

3.2.2 挠度对比 通过对构件挠度的对比:混凝土构件配置了型钢,整体刚度为钢筋混凝土部分的刚度、型钢部分的刚度、被型钢约束的混凝土刚心部分的刚度之和,比配置了钢筋的构件具有更好的整体刚度,在相同荷载的作用下,挠度变形减少了 30% 以上,并在以后的持续变形中,具有很好的延性。

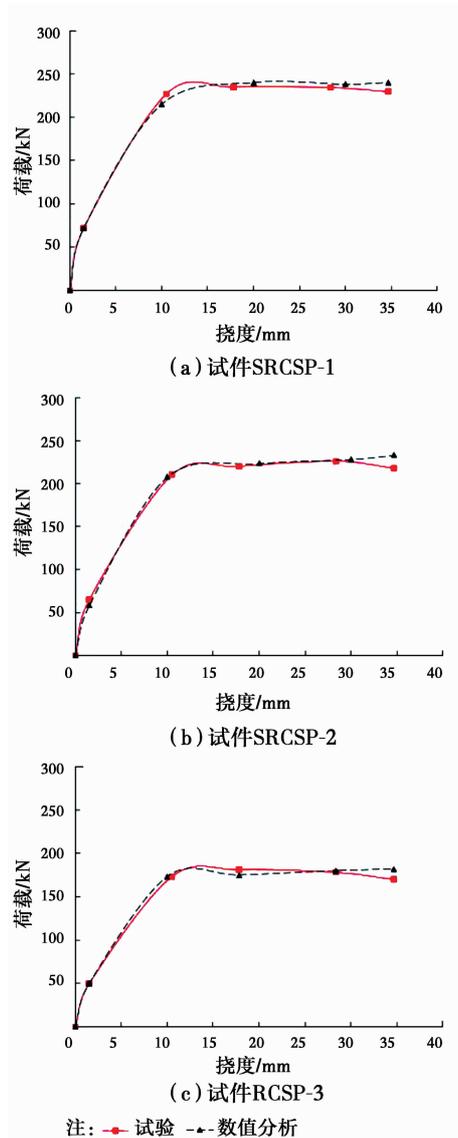


图 9 有限元分析与实验结果对比

### 4 综合分析结论

通过试验和有限元分析验证了型钢混凝土桩的外包混凝土对其中的型钢起到约束作用,可以防止型钢的局部屈曲,充分发挥钢材的强度。外包混凝土还可以保护型钢,增加结构的耐久性和耐火性。另外,与钢筋混凝土结构相比,配置的型钢使得构件的承载力和刚度得到很大提高,同时,型钢混凝土结构具有良好的延性及耗能能力,是一种抗震性能很好的结构,特别适用于地震区。

同时该桩型与旋挖施工工艺配合施工,具有更加显著的优越性。旋挖钻机(如图 10:1-套管、2-旋挖钻机)是一种适合建筑基础工程中成孔作业的施工机械。主要适于砂土、粘性土、粉质土等土层施工,在灌注桩、连续墙、基础加固等多种地基基础施工中得到广泛应用。旋挖桩机施工自动化程度高、成孔速度快、质量高,并且其环保特点突出,施工现场干净。其施工工艺流程如图 11。旋挖桩机作为一种新型的钻孔灌注桩施工机械,在建筑行业是一个大的飞跃,其使用价值应受到人们的重视。

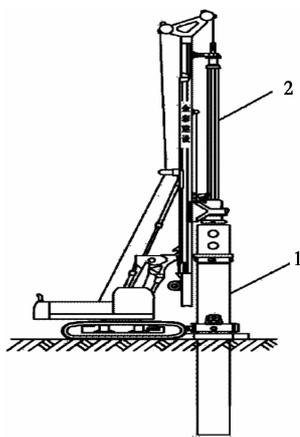


图 10 旋挖钻机大样图

文中建议的型钢混凝土旋挖桩作为主要的基坑支护体,以在工厂预制好的型钢代替钢筋笼,以旋挖桩代替矩形截面人工挖孔桩将是更为高效和经济的基坑支护手段,具有显著的优越性:第一,旋挖桩为干孔作业,无泥浆排放,利于环保,噪音干扰小;第二,采用旋挖桩内置型钢,由于型钢构件可以在工厂预制加工,通过工地拼接取代人工现场绑扎钢筋,极大的节省工期,减少了能耗和碳排放,降低人工费和管理费,符合建筑工业化、制造业化的趋势,是符合可持续发展的绿色施工;第三,和传统的配置钢筋(笼)的灌注桩相比,因型钢截面具有更大的抗弯刚

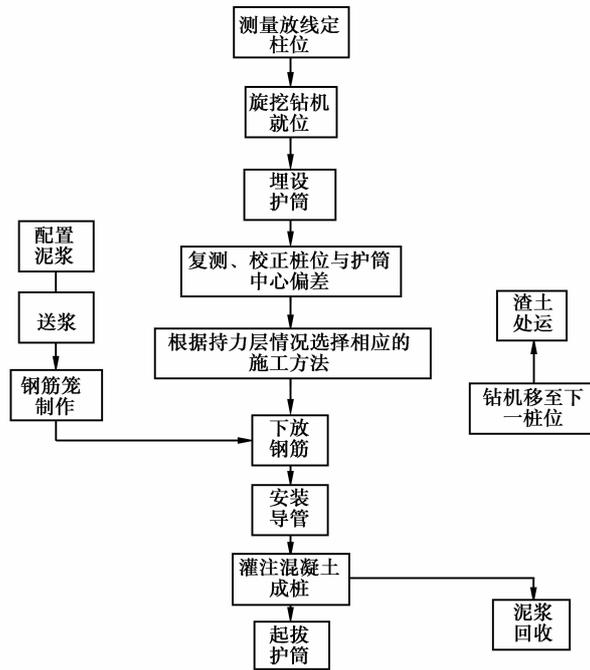


图 11 旋挖钻机施工工艺流程图

度从而提高桩身抗推刚度和承载力,相同情况下可以有效控制支护结构顶部水平位移,或增加基坑支护深度;同时,在旋挖桩内部配置的型钢骨架本身就是一个刚度强大的结构体系,浇筑混凝土前型钢可以承受自重,确保骨架的垂直度和混凝土保护层厚度,浇筑混凝土时因其自重较大又可以有效防止骨架上浮。

目前,国内对于内置型钢混凝土旋挖桩在基坑支护工程的应用还缺乏规范等理论依据的支持,也基本没有相应的研究成果见诸报道。除了铁路边坡支护工程偶有应用外,在实际民用建筑工程中尚未进行大规模的应用。因此,本文对其做了一个粗浅的研究,建议可针对实际工程情况,用于相应的基坑支护工程中。

#### 参考文献:

[1] 龚晓南,高有潮. 深基坑设计施工手册[M]. 北京:中国建筑业出版社,1998.

[2] YB9258—97 建筑基坑工程技术规范[S]. 北京:冶金工业出版社,1998.

[3] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑业出版社,1999.

[4] 朱光宇,丁毅,刘功勋. 沈阳市某深基坑支护改扩建实例分析[J]. 岩土工程学报,2010, 32(Sup2):367-370.

[5] 潘健,周森. 陈家祠广场地下空间基坑围护工程设计[J]. 岩土工程学报,2011, 33(Sup1):135-140.

- [6] 钱勤. 建设工程基坑围护结构类型和工程实例[J]. 住宅科技, 2012(6):52-54.
- [7] 林凯鑫, 秦桂婵. 某深基坑旋挖灌注支护桩施工技术[J]. 广东土木与建筑, 2009(2):48-52.
- [8] 李成芳, 熊启东, 孔凡林. 旋挖成孔灌注桩在松散高填方地基中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6):1266-1269.
- [9] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 杨勇, 郭子雄, 聂建国, 等. 型钢混凝土结构 ANSYS 数值模拟技术研究[J]. 工程力学, 2006, 23(4):79-85.
- [11] 陈燕, 何夕平, 商林. 劲性桩加预应力锚杆支护结构在深基坑工程中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3):125-130.
- [12] 葛桂琼. 型钢混凝土桩在基坑支护工程中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [13] 白国良, 秦福华. 型钢钢筋混凝土原理与设计[M]. 上海: 科技技术出版社, 2000.
- [14] 白晓红, 白国良. 新型钢-混凝土组合结构的应用与展望[J]. 工业建筑, 2006, 36(Sup1):521-527.
- [15] 宫全美, 王炳龙, 周顺华, 等. 劲性桩围护结构侧向土压力的室内试验研究[J]. 地下空间, 2002, 22(2):153-156.
- [16] 盛桂林, 鲍鹏, 孔德志. 劲性搅拌桩复合地基非线性有限元分析[J]. 结构工程师, 2005, 21(3):56-59.
- [17] 鲍鹏, 姜忻良, 盛桂林. 劲性搅拌桩复合地基承载性能静动力分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1):63-68.
- [18] 单明, 舒昭然, 刘忠昌. 恒隆市府广场大直径旋挖桩承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(Sup1):595-599.
- [19] Roeder C W. Composite and mixed construction [M]. New York: ASCE, 1984.
- [20] Johnson R P. Composite structures of steel and concrete, Volume 1 [M]. 2nd Ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1995.

(编辑 罗 敏)