

**第26届
全国结构工程学术会议
论文集**

第Ⅱ册

**PROCEEDINGS OF THE 26TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. II

主编：陆新征

**《工程力学》杂志社
2017.9**

CSTAM2017-P33

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集，属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部门随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在包头度过了它 25 岁生日后，今年在湖南长沙召开第 26 届全国结构工程学术会议。

湖南是我国中部的重要省份，山川秀美、人杰地灵，有着悠久的历史和文化。特别是近代以来，湖南曾国藩、左宗棠、毛泽东等名人辈出，对中国近现代史发展起到了重大的推动作用。

长沙位于湘江之滨，自秦设“长沙郡”以来，长沙一直是我国中部的重要政治、经济、交通和文化中心。京广铁路建成后，长沙更成为我国中部交通大动脉的关键枢纽。长沙在我国的文化教育领域一直占据着非常重要的地位，位于长沙的岳麓书院为中国古代四大书院之一，是世所罕见的“千年学府”。目前长沙拥有多所著名高等院校，特别是长沙的土木工程学科影响力在全国名列前茅。

今年会议的东道主中南大学 2000 年由原中南工业大学、长沙铁道学院、湖南医科大学合并组建而成，其最早溯源可追寻到 1903 年创办的湖南高等实业学堂和 1914 年创办的湘雅医学专门学校。学校学科门类齐全，是一所以工科和医学为特长，涵盖理学、文学、法学、经济学、管理学、哲学、教育学、历史学、艺术学，辐射军事学的综合研究型大学。中南大学有国家级创新平台 27 个，学校牵头和参与组建国家“2011 协同创新中心”（简称“2011 计划”）2 个，拥有“高等学校学科创新引智计划”（简称“111 计划”）6 个，国家重点实验室 3 个、国家工程研究中心 4 个、国家工程实验室 5 个、国家工程技术研究中心 2 个。先后入选国家“211 工程”、“985 工程建设高校”，“111 计划”、“2011 计划”，是一所在国内外具有重要影响的高等院校。

在中国力学学会结构工程专业委员会、中南大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 301 篇，分装为 3 卷，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰硕的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2017 年 9 月

第 26 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 301 篇，共计 1974 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 91 篇（共 650），包括特邀报告和三个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 钢筋混凝土结构、材料与构件；3. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；

第 II 册论文 105 篇（共 658 页），包括三个学科类别：4. 钢结构、材料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；

第 III 册论文 105 篇（共 666 页），包括三个学科类别：7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他。

第 26 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

4. 钢结构、材料与构件

圆钢管混凝土中钢-混凝土界面粘结强度影响因素分析	陈 兵 李 威 初金良 (001)
钢-混凝土组合梁部分塑性发展受弯承载力分析	杜德润 谷顺顺 许云龙 (005)
加劲肋加强 H 型钢弦杆-方支管 T 型节点滞回性能试验研究	郭新泽 高 飞 (011)
LYP100 钢材大应变下滞回性能	何 群 陈以一 田 海 (018)
异型网架结构分级优化方法及其工程应用	侯钢领 王晓东 邱继军 (026)
摇摆桁架-BRB-钢框架体系地震失效模式与抗震性能分析	贾明明 周 洲 吕大刚 杨 宁 (032)
装配式方钢管柱-桁架梁连接节点单调试验研究	李 普 程 欣 赵珍琲 (039)
钢框架柱失稳型连续性倒塌的鲁棒性分析	李六连 李国强 聂建国 李云贵 孙建运 (044)
Q345qC 钢材及其焊接接头低周疲劳性能研究	廖燕华 谢 旭 唐站站 (053)
一种简易可滑移耗能钢柱脚的本构关系研究	刘美香 段树金 谢小峰 (059)
输电铁塔主材节点初始刚度影响因素研究	刘圣西 江文强 安利强 葛永庆 (063)
防屈曲钢板剪力墙失效演化与耗能特征分析	刘逸凡 郝圣旺 (068)
大跨空间结构选型经济影响因素分析	牟在根 杨雨青 葛 鹏 张相勇 (075)
预制装配式 RCS 节点的有限元模拟与分析	潘志宏 司 启 江 鑫 周智彬 张义保 (083)
部分填充钢-混凝土组合柱双向压弯计算研究	宋世明 何雅雯 陈以一 (090)
低碳钢在反复荷载作用下的损伤及力学模拟	唐站站 谢 旭 诸葛翰卿 郭 悬 陈令坤 (097)
高强钢螺栓连接组合柱极限承载力有限元分析	吴 强 林旭川 吴开来 陈祎安 王宇航 (101)
组合式自平衡室外动力倒塌试验反力架设计	肖宇哲 李 易 陆新征 何浩祥 (108)
双钢板-混凝土组合结构研究进展	严加宝 王 哲 J.Y.Richard Liew (114)
考虑螺栓连接滑移影响的输电铁塔塔身结构分析	杨风利 (118)
利用入模温差检测钢管混凝土密实性的试验研究	杨鸿玉 刘卫东 危 鼎 王桂玲 沈 健 (125)
高强钢动态力学性能研究进展	叶嘉毅 蒋志刚 刘希月 (132)
复式钢管混凝土柱-钢梁节点抗弯承载力研究	张 磊 赵均海 吕美彤 姜志琳 (137)
开敞式悬挑建筑风荷载优化研究	张夏萍 李庆祥 张 敏 肖丹玲 黄啟明 (142)
FAST 圈梁支承结构性能理论与实验研究	赵保庆 王启明 李志恒 雷 政 (146)
基于物理理论滞回模型的空间桁架结构地震连续倒塌分析	郑华冬 樊 剑 李 乾 (151)
钢材破坏条件与极限分析法在钢结构中应用探索	郑颖人 王 乐 孔 亮 阿比尔的 (162)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

基于 ANSYS-UPFs 的邓肯张 E-B 模型开发.....	曾勇文 金 海 杨建培 (175)
牵引式滑坡模型的破坏机理及其验证	陈勋辉 黄耀英 武志刚 孔庆梅 林 莉 朱 敏 (180)
地下连续墙钢筋笼吊装仿真及优化	高绍武 漏家俊 艾国庆 黄秋亮 周雪莲 任鸿频 (186)
基于双剪统一强度理论应变模型的隧道结构稳定性分析.....	关少钰 白涌滔 (191)
翻砂涌水过程中沉井内壁受力模拟	洪 杰 魏 凯 张明金 杨绍林 (198)
石家庄地铁时光街站基坑开挖数值模拟	胡青华 刘淑红 李卫国 冯 策 (202)
基于荷载传递法的冻土地区钻孔灌注桩回冻中后期承载力计算.....	刘 秀 白家豪 冯德成 储江伟 (206)
基于 Pushover 方法的地下商业街结构地震易损性分析.....	龙祎雯 陈清军 (215)
柱形孔扩张问题的双剪统一解	吕美彤 赵均海 姜志琳 张 磊 (220)
基于 ABAQUS 强度折减法的抗滑桩加固边坡稳定性分析	马海春 郑翠玲 崔可锐 钱家忠 (227)
高铁隧道衬砌空洞缺陷的几何特征分析	任 仁 董 军 李东清 王永刚 (234)
基于 ABAQUS 的地下空间结构振动台试验数值模拟方法探究	任兰萌 陈清军 (238)
地下结构对车辆引发振动的减振效应实测分析	任晓崧 王显好 宗 刚 李广振 (243)
不同埋置深度软土地铁隧道的地震响应研究	任永强 周志光 (249)
地下结构地震反应分析中人工边界条件和地震波动输入方法对比研究.....	 谭 辉 刘晶波 王东洋 宝 鑫 李述涛 (260)
考虑场地-城市效应的区域震害模拟案例分析	田 源 陆新征 王 刚 许 镇 (265)
横穿既有线的深基坑围护结构受力变形特征分析.....	王 侦 肖志武 汪庆桃 卢志远 (271)
拱顶含空洞缺陷下高铁隧道衬砌的动力响应分析.....	王永刚 董 军 李东清 任 仁 王 超 (277)
考虑颗粒破碎的堆石料湿化变形特性离散元模拟.....	王蕴嘉 周梦佳 宋二祥 (281)
基于微结构元集合的结构材料模型	卫振海 王梦恕 张顶立 (286)
基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析.....	 温科伟 刘树亚 杨红坡 (294)
地铁车站 PBA 工法施工对邻近管线的影响.....	徐鸣阳 郭 超 赵俭斌 张玉龙 董 旭 (303)
岩石地基扩展基础钢筋及混凝土应力应变数值分析.....	颜復林 曾祥勇 张可刚 (308)
改进的 PHC 管桩与承台连接处桩端受力性能研究.....	杨志坚 雷岳强 李帼昌 王景明 (317)
上硬下软地基中自升式平台连续插桩模拟	殷齐麟 董 胜 (324)
基坑工程内支撑活络端结构革新性研究	张明聚 杨 萌 苑 媛 谢治天 (329)
洞室轴线与基坑边坡走向夹角对基坑稳定性的影响.....	朱 芮 王桂林 李 念 (335)
考虑侧阻与端阻影响的基桩水平承载力传递矩阵解.....	竺明星 龚维明 卢红前 王 磊 (343)

6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

某整体式桥台桥梁的设计与施工	陈 洪 薛俊青 Bruno Briseghella 吴庆雄 陈宝春 (356)
变轴力钢筋混凝土墩柱抗震性能研究	陈 嵘 雷俊卿 (362)
构件价格波动对高速铁路连续梁桥地震风险评估影响.....	陈源浚 蒋丽忠 魏 标 (369)

基于动载试验的公轨两用特大桥动力性能和行车舒适性研究.....	勾红叶 周 文 蒲黔辉 洪 或 (373)
一种考虑非线性接触关系的二维轮轨耦合单元模型.....	
.....	古 泉 李维泉 国 巍 刘永斗 蒋丽忠 余志武 (382)
考虑土-结构相互作用的整体式桥台斜交梁桥地震反应研究	谷 音 吴怀强 郭鸿翔 卓卫东 (393)
基于多浮体水弹性方法的海上浮桥典型工程应用研究.....	郭 飞 孙永岗 徐 进 李志富 (404)
浅基础桥梁在主震和余震序列作用下的倒塌概率研究.....	郭 悬 唐站站 池 沛 陈令坤 (409)
基于 Pushover 分析的高速铁路线路抗震性能评估.....	国 巍 胡 瑶 钱 晋 (414)
基于能量平衡的高速铁路桥梁摩擦摆隔震支座性能设计方法.....	
.....	黄 哲 国 巍 胡 瑶 Tony T.Y Yang (418)
基于压电陶瓷的预应力波纹管压浆密实性监测数值研究.....	蒋田勇 郑俊博 (424)
不同墩柱形式曲线桥主梁合理数值模拟方法研究.....	焦驰宇 胡 彪 刘陆宇 龙佩恒 (428)
深海重型设备浮力辅助安装模拟研究	焦春硕 王浩霖 董 胜 (438)
在役车行索道桥的运营现状及结构改进措施研究.....	景天虎 刘均利 莫时旭 王晓峰 (443)
不同激励作用下钢弹簧浮置板轨道减振效果研究.....	李林峰 马 蒙 刘维宁 杜林林 (450)
液体晃动动力学中的若干问题讨论	李遇春 欧亿鹏 (455)
基于实测波面数据的波浪力计算方法	梁春明 魏 凯 张家瑞 (460)
适用于福建省的太阳辐射模型建立	林健辉 薛俊青 Briseghella Bruno 陈宝春 (464)
基于 OpenSees 的车桥耦合竖向振动研究	刘汉云 余志武 国 巍 (470)
强地震下高速铁路桥上行车精细化模拟及行车安全性分析.....	国 巍 李君龙 刘汉云 (475)
锈蚀坑对吊杆高强钢丝疲劳寿命影响的数值分析.....	楼纪昂 马伟龙 彭 卫 (481)
合龙段温度场的分区时变温升速率计算方法	潘旦光 程 业 刘文军 马 骏 丁民涛 (487)
新型钢木混合梁力学性能试验研究	时国松 董 军 陈会芳 吕丽娟 (493)
山区悬臂人行观景桥梁结构风洞试验研究	苏 益 李明水 (497)
锚拉板式钢-混组合索塔锚固体体系粘结滑移性能试验研究	谭冬莲 秦凤江 (502)
基于损伤状态均匀荷载面曲率的简支梁损伤识别.....	唐盛华 苏彬建 周 楠 楚加庆 (507)
无缝桥面板式引板滑移材料摩阻系数试验研究	
.....	唐玉凤 薛俊青 张培权 Briseghella Bruno 陈宝春 (514)
高水头船闸阀门顶止水抗冲磨与变形特性试验	王 新 胡亚安 严秀俊 (520)
矩形容器内液体一阶晃动模态试验识别	王鹏翔 李遇春 王立时 (526)
坑角效应对紧邻建筑物变形性状的研究	王巍浩 董 军 时国松 (530)
曲线桥的刚体模型及地震碰撞响应分析	王玉梅 郭 迅 丁 堃 (535)
组合与叠合双重作用钢-砼连续梁负弯矩区滑移	王园园 段树金 牛润明 (544)
基于渐变参数并层等效反演的碾压混凝土坝流固耦合分析模型.....	魏博文 周方明 徐镇凯 (548)
基于不同代理模型的某自锚式悬索桥模型修正	夏志远 李爱群 李建慧 端茂军 (557)
斜拉索参数振动稳定性能量分析及实验验证	谢子洋 李遇春 吴南方 (563)
矩形悬臂梁浸入水中的湿频率试验值与数值解	杨晓军 李遇春 刘 哲 (568)
不同宽深裂缝条件下混凝土氯离子渗透试验研究.....	余建福 董 军 康春祥 (572)
基于 EMD 和马氏距离的斜拉桥主梁损伤识别方法.....	俞 鹏 王银辉 陈 闯 (577)

半开式桁架桥结构稳定性分析岳子翔 温庆杰 卓 涛 (583)

夏威夷 ALEUTIAN 海啸的 NEOWAVES 数值模拟翟金金 董 胜 (591)

车轮动荷载作用下模数式桥梁伸缩缝强度分析张 纬 丁 勇 王 博 杨 阳 俞丹波 (596)

山区钢桁梁悬索桥加劲梁合理安装方案研究张 兴 杜 斌 张玉涛 王 涛 (600)

基于移动质量的简支梁损伤识别方法研究张海宾 侯吉林 张青霞 潘 峰 (609)

射流簇底流消能旋涡区脉动压力特性研究张陆陈 王余杰 骆少泽 (614)

宽箱连续梁桥顶推过程滑道反力不均匀的改善措施研究.....赵凌志 占玉林 赵人达 (618)

钢拱架-混凝土组合拱桥施工阶段稳定性分析郑玉国 贺 浩 宋英梁 夏鸿翔 (624)

既有结构混凝土累积损伤原位评估方法钟 铭 (629)

运营环境作用对跨海大桥模态频率的影响研究周 毅 孙利民 谢谟文 (641)

基于条件数的虚拟质量优化布置与损伤识别方法.....周润芳 侯吉林 张青霞 潘 峰 (648)

建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析宗 刚 郑玉琴 任晓崧 张永红 (653)

圆钢管混凝土中钢-混凝土界面粘结强度影响因素分析

陈 兵¹, *李 威¹, 初金良²

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 丽水供电公司, 丽水 323000)

摘 要: 本文基于 353 个已发表的圆钢管混凝土中钢-混凝土界面粘结强度的实验数据, 探讨了钢管径厚比、长径比、内表面粗糙度、截面含钢率、混凝土强度和龄期等对界面粘结强度的影响。以往的实验结果表明, 钢管径厚比的减小和含钢率的增大能够增大界面的粘结强度; 随着混凝土强度的提高, 界面粘结强度有增高的趋势; 随着混凝土龄期和收缩量的增长, 界面粘结强度有所降低。本文还对现有的圆钢管混凝土界面粘结强度的计算公式进行了比较。

关键词: 圆钢管混凝土; 钢-混凝土界面; 推出试验; 粘结强度

ANALYSIS ON STEEL-CONCRETE BOND STRENGTH OF CIRCULAR CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS

CHEN Bing¹, LI Wei¹, CHU Jin-liang²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Lishui Power Supply Company, Lishui 323000, China)

Abstract: A total of 353 test results for the ultimate bond strength of circular concrete-filled steel tubular (CFST) columns are summerized and analyzed in this paper. The parameters discussed include the diameter-to-thickness ratio and the length-to-diameter ratio of the steel tube, the roughness of the inner surface of steel tube, the steel ratio of the cross section, the compressive strength and the age of the concrete. It is found that the ultimate bond strength of the steel-concrete interface increases with the decrease of the diameter-to-thickness ratio of the steel tube, the increase of the steel ratio. The bond strength also increases with the increase of concrete strength. The bond strength decreases with the increase of concrete age and concrete shrinkage. Comparisons are also made between test results and predicted results.

Key words: Circular concrete-filled steel tube; Steel-concrete interface; Push-out tests; Bond strength

在钢管混凝土结构中, 钢管与混凝土之间的共同工作依赖于钢-混凝土界面的粘结作用。只有粘结性能可靠, 才能保证两种材料的变形协调, 协同发挥作用。以往的研究结果表明, 影响钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间粘接强度的主要因素有钢管混凝土构件的截面形状、混凝土龄期和强度、钢管径厚比、长细比以及混凝土浇筑方式等^[1]。

不少学者对钢管混凝土柱钢-混凝土界面粘结性能进行了试验研究, 主要是采用推出试验(Pushout test)测量界面的粘结强度。界面推出试验装置示意图如图 1 所示, 图中参数 D 为钢管外径, t 为钢管厚度, L_e 为钢-混凝土界面的粘结长度。钢管和其核心混凝土接触界面的工作性能一方面取决于混凝土和钢管本身的粘接, 另一方面取决于钢管混凝土构件受力过程核心混凝土和其接触的钢管壁之间的摩擦, 且这种摩擦作用会随着钢管和混凝土之间相互作用的增加而增强^[1]。粘结强度的确定方法按 N/A 计算, 其中, N 为推出试验的极限荷载, A 为钢-混凝土界面的粘结面积, 计算公式为 $A=\pi(D-2t)L_e$ 。本研究收集了以往研究者的

作者简介: 陈兵(1994—), 男, 福建人, 本科生, 从事钢管混凝土结构研究;

*李威(1984—), 男, 福建人, 助理教授, 博士, 从事钢管混凝土结构研究(E-mail: iliwei@tsinghua.edu.cn).

试验数据,探讨了各参数对极限粘结强度的影响,并对比了现有的圆钢管混凝土柱钢-混凝土界面的粘结强度计算公式。

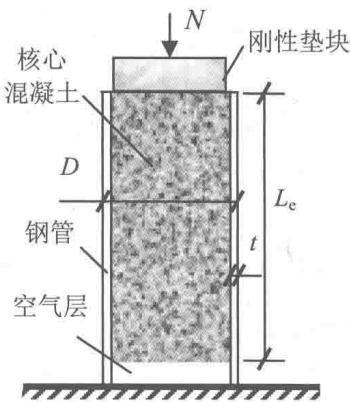


图1 钢管混凝土推出试验示意图

1 参数分析

表1汇总了收集到的353个圆钢管混凝土界面粘结强度试验数据。根据现有的试验研究结果,圆钢管混凝土界面粘结性能主要受钢管和混凝土性质的影响,影响参数包括钢管径厚比(D/t)、长径比(L_c/D , L_c 为粘结长度)和管壁粗糙度,截面含钢率($\alpha=A_s/A_c$, A_s 为截面钢管面积, A_c 为截面面积),以及混凝土强度、龄期和收缩程度。

表1 验证公式的数据来源

序号	参考文献	试件个数	主要参数	粘结强度/MPa
1	Radhika 和 Baskar ^[7]	15	矿物掺量, 界面长度, 钢管直径, 混凝土强度	1.78~2.42
2	Khodaie 和 Nahmat ^[11]	22	混凝土类型	0.15~2.11
3	Aly 等 ^[12]	14	加载方式, 混凝土强度	0.35~1.23
4	Shakir-Khalil ^[13]	12	界面长度, 混凝土养护方式	0.19~0.93
5	Xu 等 ^[14]	20	膨胀剂, 混凝土强度, 钢管尺寸	0.60~1.92
6	Qu 等 ^[15]	18	混凝土强度、龄期, 钢管长径比、径厚比	0.62~1.27
7	Viridi 和 Dowling ^[10]	91	混凝土龄期、强度、配比、振捣, 粘结长度, 钢管径厚比, 表面处理方式	0.27~2.97
8	柯晓军等 ^[16]	4	高强混凝土	1.69~1.88
9	刘永健等 ^[17]	20	混凝土强度, 界面长度, 截面尺寸, 界面处理	0.93~1.37
10	许开成等 ^[18]	4	钢管直径、长度、厚度	1.27~1.65
11	康希良等 ^[19]	9	长细比, 径厚比, 含钢率	0.80~1.52
12	薛立红和蔡绍怀 ^[5]	31	混凝土强度, 钢管表面状况, 混凝土养护条件, 界面长度	0.37~1.03
13	陈宗平等 ^[6]	13	再生骨料取代率, 混凝土强度, 长径比, 界面长度	1.11~1.79
14	丁庆军等 ^[4]	29	混凝土强度, 钢管表面状况, 混凝土养护条件, 界面长度	2.30~3.78
15	顾章川等 ^[20]	7	疲劳循环次数, 应力比	1.00~1.27
16	左工等 ^[21]	8	再生混凝土强度, 再生骨料取代率, 膨胀剂掺量	0.42~0.69
17	张春亮 ^[22]	16	自密实混凝土, 高温处理	1.69~1.88
18	何小平 ^[23]	14	荷载持续时间, 腐蚀	1.22~2.05
19	郑瑛英 ^[24]	6	膨胀剂掺量	0.43~1.08

1.1 钢管性质

多数学者的试验结果支持粘结强度随钢管径厚比增大而减小的结论^[2-4],如图2所示。钢管的径厚比越小,对核心混凝土的约束作用也越强,因此对粘结强度的提高越有利。同时,含钢率的增加也能增强钢管对混凝土的约束,其作用机理与径厚比基本一致。部分试验结果表明长径比与粘结强度的关系不大^[6];部分认为在一定范围内与粘结强度有关^[7,25],如图3所示。粘结强度受钢管表面状况影响显著。试验结果表明,钢管表面越粗糙,粘结强度越高。但目前试验中针对钢管表面粗糙度的测量结果较少。

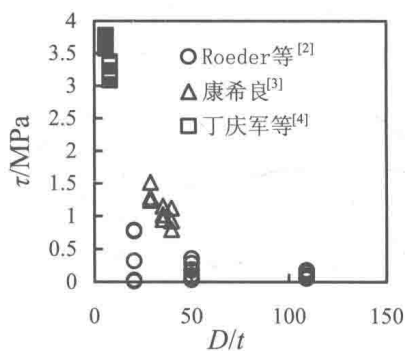


图2 不同径厚比对应的粘结强度

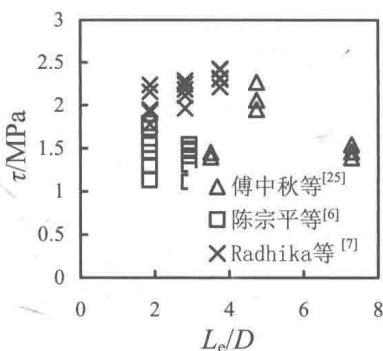


图3 不同长径比对应的粘结强度

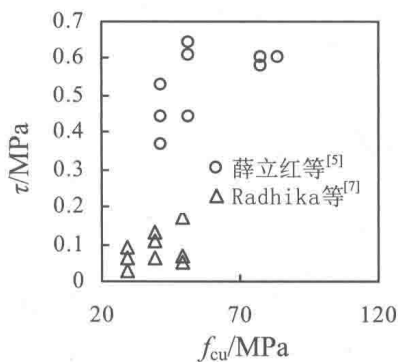


图4 不同混凝土强度对应的粘结强度

1.2 混凝土性质

化学胶结力作为粘结强度的一部分，主要与混凝土强度的大小有关。大部分学者的试验结果表明混凝土强度的提升能够提高界面的粘结强度，如图4所示。部分试验表明混凝土强度的提升作用比较小，是因为化学胶结力在粘结强度组成中占的比例较低。并且混凝土强度的提升幅度不够大，离散型强，导致化学胶结力没有明显的提高。混凝土龄期会带来强度和收缩量的改变。在养护前期(28天前)，混凝土的强度随龄期的增大明显，因而强度的影响起控制作用。到了后期，混凝土强度的发展基本稳定，混凝土的收缩影响开始增大。随着龄期的增长，混凝土收缩增大，粘结强度降低，Virdi和Dowling^[10]的试验结果证实了这个观点。在Tao等^[8]试验中，龄期为1165天对应的粘结强度只有龄期为31天对应的粘结强度的6.7%。

2 粘结强度计算公式

针对圆钢管混凝土柱钢-混凝土界面的粘结强度，已经有部分学者提出相应的计算公式。蔡绍怀和薛立红^[5]以混凝土的强度为单变量，Roeder等^[2]和Gourley等^[9]则以钢管径厚比为单变量，康希良^[3]则考虑了多个参数包括混凝土强度、径厚比、长径比、含钢率及约束效应系数($\theta = \alpha f_y / f_c$, f_y 和 f_c 分别为钢材屈服强度和混凝土轴心抗压强度)的影响。

针对目前收集到的有效的353个圆钢管混凝土粘结强度的数据(排除了火灾后、加抗剪件或采用特殊混凝土等构件的试验数据)，对这些公式进行验证，如图5所示。由图可见，当只考虑单参数的影响时，得到的粘结强度计算值与试验值往往差距很大，如图5(a)(b)(c)所示，说明控制粘结强度大小的影响参数不应该只有一个，而是由多参数共同控制。当考虑多个参数共同影响后，试验点的离散程度有所减小，如图5(d)所示。这也说明在粘结强度计算公式中需要充分考虑各个相关参数的影响。

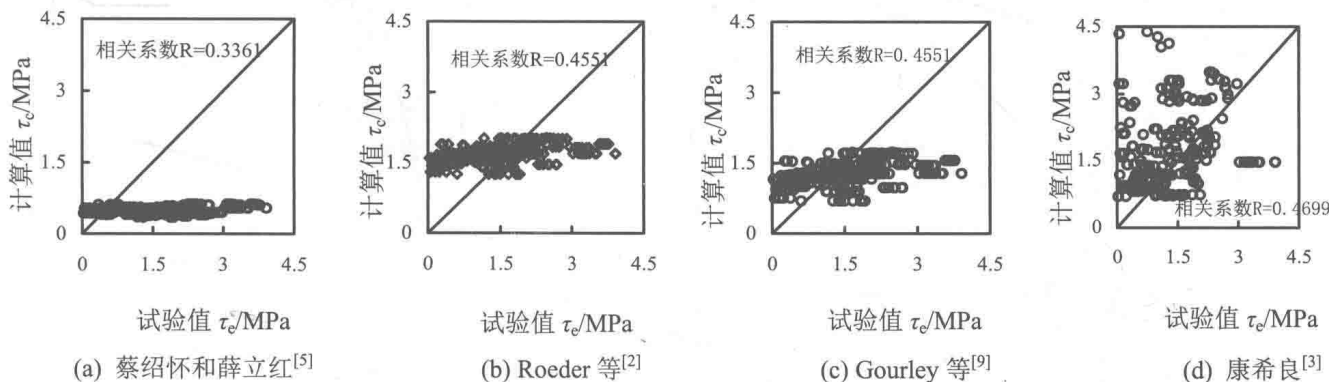


图5 粘结强度的试验值与现有公式计算值对比

3 结语

本文收集了353个圆钢管混凝土柱的推出试验，总结了相关参数对界面强度的影响规律。试验结果表明：钢管径厚比的减小和含钢率的增大能够增大界面的粘结强度；随着混凝土强度的提高，界面粘结强度有增高的趋势；随着混凝土龄期和收缩量的增长，界面粘结强度有所降低。对比了现有的圆钢管混凝土柱

钢-混凝土界面粘结强度计算公式,发现考虑多个参数共同作用时,拟合结果较只考虑的单个参数时有所改进。这也说明在粘结强度计算公式中需充分考虑各相关参数的影响。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] Roeder C W, et al. Composite Action in Concrete Filled Tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125: 477—484.
- [3] 康希良. 钢管混凝土组合力学性能及粘结滑移性能研究[D]. 西安建筑科技大学, 2008.
- [4] 丁庆军, 周孝军, 牟廷敏, 等. 钢纤维增韧微膨胀钢管混凝土界面粘结性能研究[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 809—813.
- [5] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J]. 建筑科学, 1996, 3: 22—28.
- [6] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报, 2013(3): 49—58.
- [7] Radhika K S, Baskar K. Bond stress characteristics on circular concrete filled steel tubular columns using mineral admixture metakaoline [J]. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2012, 3(1): 1—8.
- [8] Tao Z, Song T Y, Uy B, et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 81—93.
- [9] Gourley B C, Tort C, Hajjar J F, et al. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete-filled steel tube beam-columns [R]. Urbana, Illinois: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, 2008: 179—180.
- [10] Virdi K S, Dowling P J. Bond strength in concrete filled steel tubes [J]. IABSE Proceedings, P-33/80, 1980: 125—139.
- [11] Khodaie, Nahmat. Effect of the Concrete Strength on the Concrete-Steel Bond in Concrete Filled Steel Tubes [J]. Journal of the Persian Gulf, 2013, 7: 9—16.
- [12] Aly T, Elchalakani M, Thayalan P, et al. Incremental collapse threshold for pushout resistance of circular concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 11—18.
- [13] Shakir-Khalil H. Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections [J]. Structural Engineering, 1993, 71(13): 230—233.
- [14] Xu C, Huang C, Jiang D, et al. Push-out test of pre-stressing concrete filled circular steel tube columns by means of expansive cement [J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(1): 491—497.
- [15] Qu X S, Chen Z H, Nethercot D A, et al. Push-out tests and bond strength of rectangular CFST columns [J]. Steel and Composite Structures, 2015, 19(1): 21—41.
- [16] 柯晓军, 孙海洋, 陈宗平, 等. 钢管高强混凝土界面力学性能试验研究及黏结强度计算[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(s1): 401—406.
- [17] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报自然科学版, 2010, 35(1): 17—23.
- [18] 许开成, 毕丽苹, 陈梦成. 钢管混凝土界面黏结应力-滑移本构关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(s1): 407—412.
- [19] 康希良, 程耀芳, 涂昀, 等. 钢管混凝土粘结-滑移性能试验研究及数值分析[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 102—106.
- [20] 顾章川, 俞先江, 陈梦成, 等. 疲劳荷载后钢管混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(9): 127—130.
- [21] 左工, 王振波, 乔燕. 微膨胀再生混凝土粘结滑移试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(2): 5—9.
- [22] 张春亮. 高温后钢管混凝土的界面粘结性能试验研究[D]. 北方工业大学, 2014.
- [23] 何小平. 考虑徐变及界面腐蚀的圆钢管混凝土粘结性能试验研究[D]. 华东交通大学, 2013.
- [24] 郑瑛英. 微膨胀无机聚合物钢管混凝土界面粘结滑移性能研究[D]. 武汉理工大学, 2014.

钢-混凝土组合梁部分塑性发展受弯承载力分析

杜德润, *谷顺顺, 许云龙

(中国海洋大学工程学院, 山东, 青岛 266100)

摘 要: 通过考虑钢梁的部分塑性发展, 对钢-混凝土组合梁的受弯承载力进行分析, 并编制组合梁抗弯承载力的计算程序, 将所得计算结果与已有钢-混凝土组合梁抗弯强度表进行比较分析, 进一步验证了简化塑性理论计算组合梁承载力的合理性。

关键词: 钢-混凝土组合梁; 塑性; 应力分布; 受弯承载力; 计算程序

FLEXURAL CAPACITY ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH PARTIAL PLASTIC DEVELOPMENT

DU De-run, GU Shun-shun, XU Yun-long

(Engineering of College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: By considering the partial plastic development of the steel beam, this paper analyzes the flexural capacity of steel concrete composite beams. Then comparing the calculation results, coming from a calculation program of limit flexural capacity of composite beams, with the existing bending strength of steel and concrete composite beams table, and the final analysis results verifies the validity of the simplified plastic theory about calculating the bearing capacity of composite beam.

Keywords: steel-concrete composite beam; plasticity; the stress distribution; flexural capacity; the application

钢-混凝土组合梁是在土木工程中应用较为广泛的一类横向承重组合构件, 通过剪力连接件将钢梁和混凝土组合成整体共同受力, 这种梁既能充分发挥混凝土抗压强度高和钢材抗拉性能好的优势, 又能显著提高构件的刚度和稳定性^[1]。目前, 钢-混凝土组合梁的计算理论主要有两种, 一种是按弹性理论进行分析计算, 把组合梁截面换算成同一材料的截面, 再根据材料力学的一般方法进行计算; 另一种考虑截面的塑性变形发展, 按塑性理论进行分析计算, 由于弹性理论计算方法未考虑截面的塑性变形, 计算结果往往偏于保守, 塑性分析方法考虑了材料塑性变形发展带来的强度潜力, 用来计算构件的承载力更合理^[2]。在此基础上, 本文考虑钢梁的部分塑性发展, 对钢-混凝土组合梁的正截面受弯承载力进行了分析。

1 对简化塑性法的讨论

现行《钢结构设计规范》GB50017-2003^[3]中, 对于一般不直接承受动力荷载的钢-混凝土组合梁采用简化塑性理论进行设计。该方法假定钢梁的受压区为均匀受压, 受拉区为均匀受拉, 并分别达到塑性抗压及抗拉设计强度 f_y ; 塑性中和轴以上的钢筋混凝土为均匀受压, 其应力达到混凝土的抗压强度设计值 f_c ; 组合截面能全部进入塑性, 具有足够的转动能力^[4]。按照上述假定的塑性分析法是简化的塑性分析法。

简化塑性法以截面塑性全面发展为基础, 假定在计算承载力时截面上的应力分布为矩形。按照理论,

作者简介: 杜德润(1976—), 男, 山东人, 讲师, 博士生, 主要从事组合结构研究;

*谷顺顺(1993—), 男, 山东人, 硕士, 中国海洋大学, 钢-混凝土组合结构的研究(E-mail: gss1593571@163.com);

许云龙(1993—), 男, 湖北人, 硕士, 中国海洋大学, 砌体结构的加固研究。

截面发展到全塑性，组合梁形成塑性铰，此时曲率 Φ 无限大，对于纯弯或纯剪状态，截面应力分布接近为矩形，假定是合理的，但当弯矩和剪力都很大的截面进入全塑性时，中和轴附近的剪应力，必然会影响到屈服状态时的弯曲应力值，使其并不呈均匀分布，正应力只有在截面外边缘部分为矩形分布；另一方面，任何材料都受到极限应变的限制，超过了极限应变，材料就会被拉坏或压坏，所以在极限状态，曲率 Φ 不可能无限大^[5]。钢-混凝土组合梁的破坏一般是以混凝土压溃为标志，而一般混凝土的极限应变在 0.0033 左右，所以当混凝土达到极限应变被压坏时，组合梁的曲率 Φ 不会特别大^[6]。对于钢梁部分很强，混凝土部分相对较弱时尤其如此，现实中的组合梁经常出现混凝土被压坏，而钢梁部分仍处于弹性或者部分塑性的情况^[7]。这样简化塑性法计算的结果可能是偏于不安全的。为使设计更趋于合理，本文将对组合梁的塑性设计做进一步探讨。

2 考虑钢梁部分塑性发展的钢-混凝土组合梁抗弯承载力分析

在本文的塑性分析中，以组合梁混凝土外边缘的应变达到极限应变作为抗弯承载力极限状态，即当混凝土部分的外边缘达到极限应变 ε_{cu} 时组合梁弯曲破坏，此时钢梁的屈服高度为 μh 。

2.1 基本假定

对于混凝土翼板与钢梁完全剪切连接的组合梁，在确定截面抗弯承载力时，考虑截面塑性发展，采用以下假定：

- 1) 截面应变符合平截面假定；
- 2) 忽略混凝土的受拉作用；
- 3) 组合截面满足塑性设计条件，具有足够的局部和整体稳定性；
- 4) 忽略钢筋混凝土翼板内的钢筋作用；
- 5) 根据总压力数值和作用位置相同的等效原则，将受压区混凝土的曲线应力图转化成等效矩形应力图。

2.2 确定组合截面应力分布

组合梁达到极限承载力时，即混凝土外边缘达到极限应变，由平截面假定得组合梁截面上的应变分布如图 1(a)、图 1(b)。

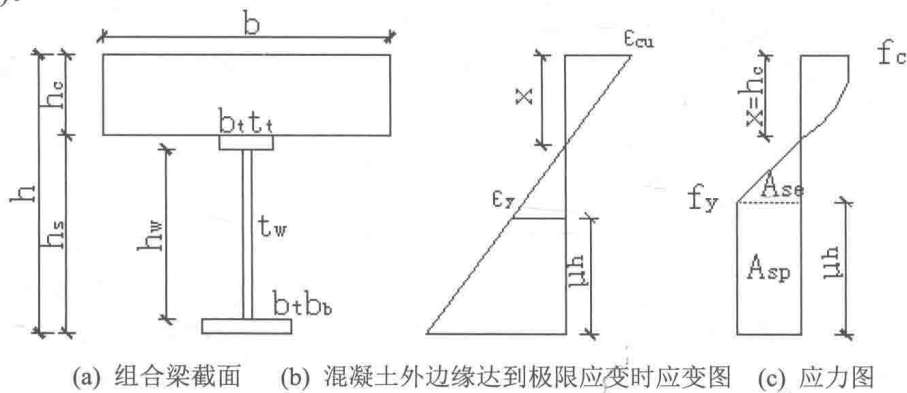


图 1 组合梁控制截面应变图

则：

$$x = \frac{(1 - \mu)h\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}}, \quad \mu \leq \frac{h_s}{h} \tag{1}$$

式中 μ 为钢梁塑性发展高度与截面高度的比值； ε_y 、 ε_{cu} 分别为钢梁屈服应变、混凝土极限压应变。其它符号见图 1(a)。

组合梁达到正截面抗弯承载力极限状态时，会出现两种受力情况，即塑性中和轴在混凝土翼板内和塑性中和轴在钢梁内。

此时，钢梁上翼缘外边缘的应变 ε'_s 为：

当中和轴位于混凝土翼板内时：

$$\varepsilon'_s = \frac{h_c - x}{x} \varepsilon_{cu} \quad (2)$$

当中和轴位于钢梁内时：

$$\varepsilon'_s = \frac{x - h_c}{x} \varepsilon_{cu} \quad (3)$$

钢梁上翼缘外边缘刚好达到屈服应变时，即 $\varepsilon'_s = \varepsilon_y$ ，对应有：

当中和轴位于混凝土翼板内时：

$$x = \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (4)$$

当中和轴位于钢梁内时：

$$x = \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y} \quad (5)$$

若 $x = h_c$ ，中和轴位于钢梁与混凝土的交界面，此时应力分布见图 1(c)。

由力的平衡：

$$\alpha_1 f_c b \beta_1 h_c = A_{sp} f_y + \int_{A_{se}} \sigma_s dA \quad (6)$$

1) 当 $\alpha_1 f_c b \beta_1 h_c \geq A_{sp} f_y + \int_{A_{se}} \sigma_s dA$ 时，中和轴位于混凝土翼板内，且 $x = \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y}$ 时钢梁刚好全屈服。

故， $0 < x \leq \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}}$ 时，钢梁全屈服，其极限状态时的应力分布见图 2。

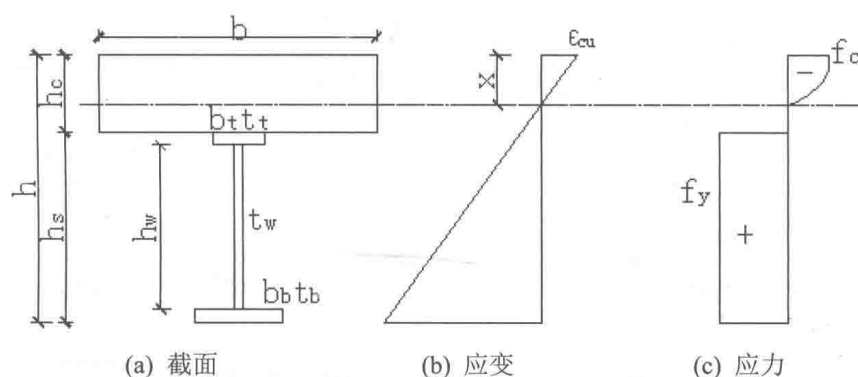


图 2 中和轴位于混凝土翼板内且钢梁全屈服时应力分布图

当 $\frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} < x \leq h_c$ 时，钢梁未全屈服，其极限状态时的应力分布见图 3。

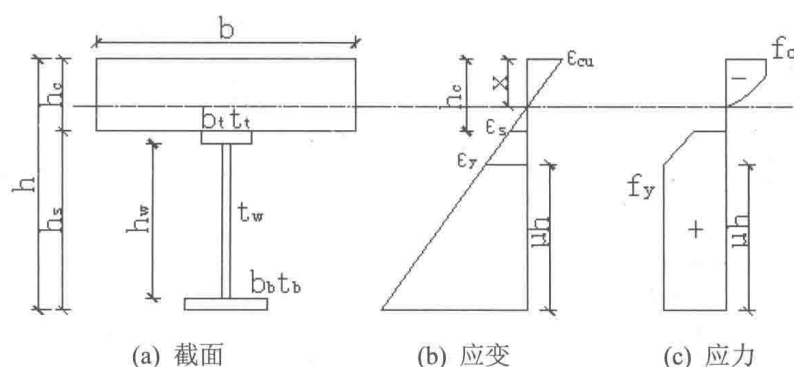


图 3 中和轴位于混凝土翼板内且钢梁未全屈服时应力分布图

2) 当 $\alpha_1 f_c b \beta_1 h_c < A_{sp} f_y + \int_{A_{se}} \sigma_s dA$ 时, 中和轴位于钢梁内, 且 $x = \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y}$ 时, 钢梁受压上翼缘外边缘刚好达到屈服强度 f_y 。故 $h_c < x \leq \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y}$, 受压钢梁上翼缘外边缘达不到屈服强度 f_y 。其极限状态时的应力分布见图 4。

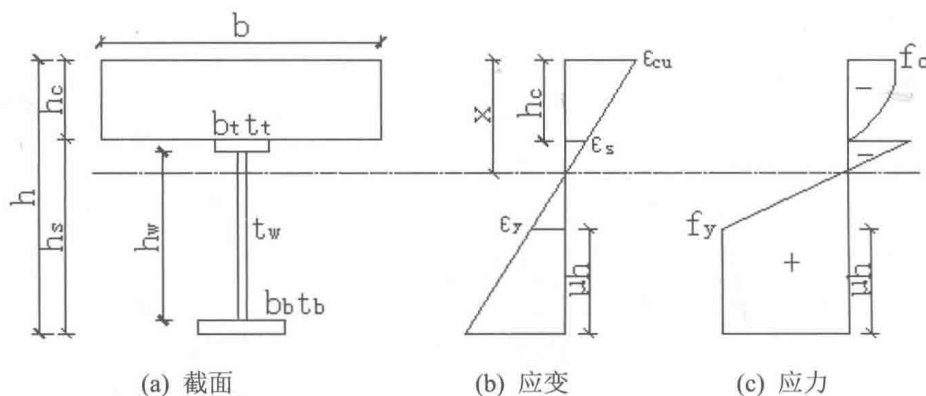


图 4 中和轴位于钢梁内且钢梁上翼缘外边缘达不到屈服强度 f_y 应力分布图

当 $x > \frac{h_c \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y}$ 时, 钢梁受压部分有一定的屈服, 其极限状态时的应力分布见图 5。

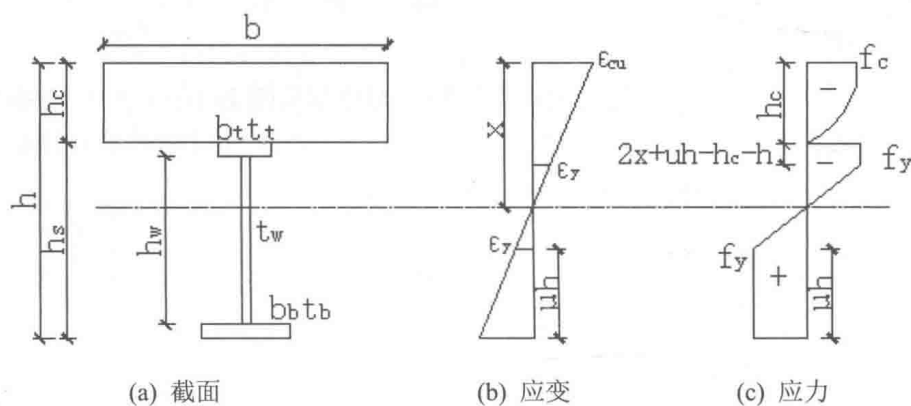


图 5 中和轴位于钢梁内且钢梁受压部分有一定的屈服时应力分布图

2.3 承载力的计算

在确定了组合梁截面上的正应力分布之后, 根据截面受压区高度 x 与钢梁屈服高度 μh 的关系、平衡条件 $\sum X = 0$ 以及力矩的平衡条件 $\sum M = 0$, 即可求出截面上的抗弯承载力 M_u 。

例如, 当中和轴位于钢梁内, 钢梁受压部分有一定的屈服且屈服高度超过上翼缘厚度时, 有:

$$\alpha_1 f_c b \beta_1 h_c + b_t t_t f_y + (2x + \mu h - h_c - h - t_t) t_w f_y = b_b t_b f_y + (\mu h - t_b) t_w f_y \quad (7)$$

对中和轴取矩有:

$$\begin{aligned} M \leq M_u = & \alpha_1 f_c b \beta_1 h_c \left(x - \frac{\beta_1 h_c}{2} \right) + b_t t_t f_y (x - h_c - t_t / 2) + (2x + \mu h - h_c - h - t_t) t_w f_y \times \\ & \left(h - x - \mu h + \frac{2x + \mu h - h_c - h - t_t}{2} \right) + \frac{2(h - x - \mu h)^2 t_w f_y}{3} + b_b t_b f_y \left(h - x - \frac{t_b}{2} \right) + \\ & (\mu h - t_b) t_w f_y \left(h - x - t_b - \frac{\mu h - t_b}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 组合梁承载力计算程序的编制

由于组合截面不规则, 截面上应力矩形分布区和线性变化区有多种可能, 因此一一给出 M_u 的表达式过于繁琐。为此, 本文编制了组合梁承载力计算程序, 编程框图如图 6 所示。

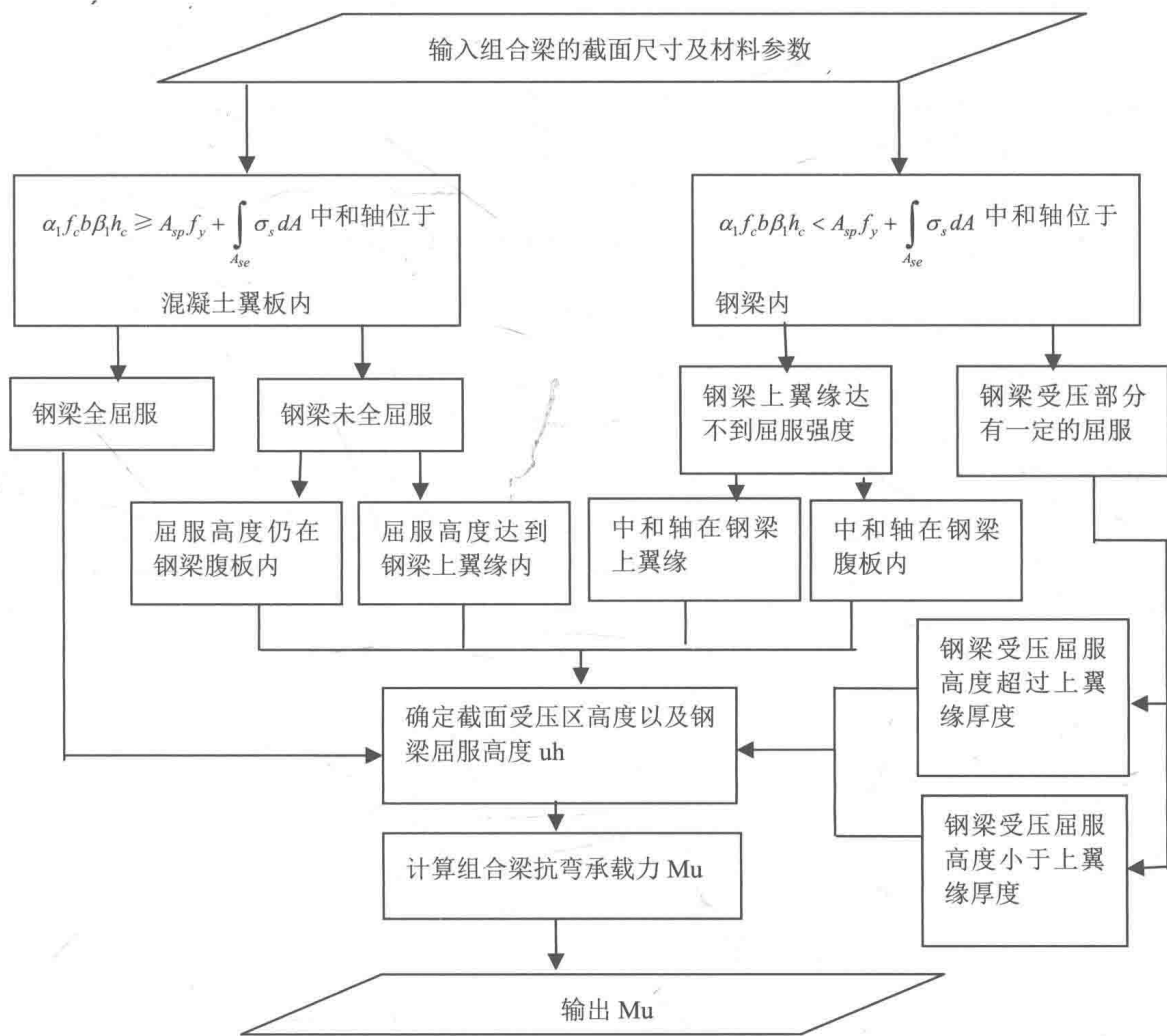


图 6 组合梁承载力计算程序框图

3 对比分析

将本文提出的考虑钢梁部分塑性发展的组合梁承载力计算方法所得结果，与文献[8]中组合梁抗弯强度表对比见表 1。由于文献[8]中钢材的强度设计值乘以折减系数 0.9，且 C30 混凝土取弯曲抗压强度设计值 $f_{cm}=16.5\text{ MPa}$ ，故按现行规范予以调整。

表 1 计算值与抗弯强度表对比表

截面参数/mm			表中弯矩(kN·m) 调整后弯矩(kN·m)		本文理论			误差
A	hc	be	M	M 调	x/mm	uh/mm	M/(kN·m)	
160×10,600×8,200×10	100	1200	623	671.74	110.76	576	665.88	0.0087
160×10,600×8,200×10	120	1500	669	726.81	99.04	614.2	722.1	0.0065
160×10,600×8,200×10	160	2100	749	820.74	75.17	全屈服	820.74	0
160×10,700×8,200×10	100	1200	766	827.8	126.58	656	820.45	0.0089
160×10,700×8,200×10	120	1500	818	888.73	104.73	705.6	881.99	0.0076
160×10,700×8,200×10	160	2100	907	993.95	82.33	全屈服	993.95	0
160×12,700×8,350×12	120	1500	1146	1241.03	127.97	675.2	1232.56	0.0068
160×10,800×8,250×10	140	1800	1118	1220.94	109.41	816	1220.62	0.0003
160×12,800×8,350×12	120	1500	1349	1462.34	142.93	755.2	1451.22	0.0076
160×12,800×8,350×12	140	1800	1418	1544.2	120.97	809.76	1535.05	0.0059

表中 x 表示截面受压区高度， uh 表示钢梁屈服高度。