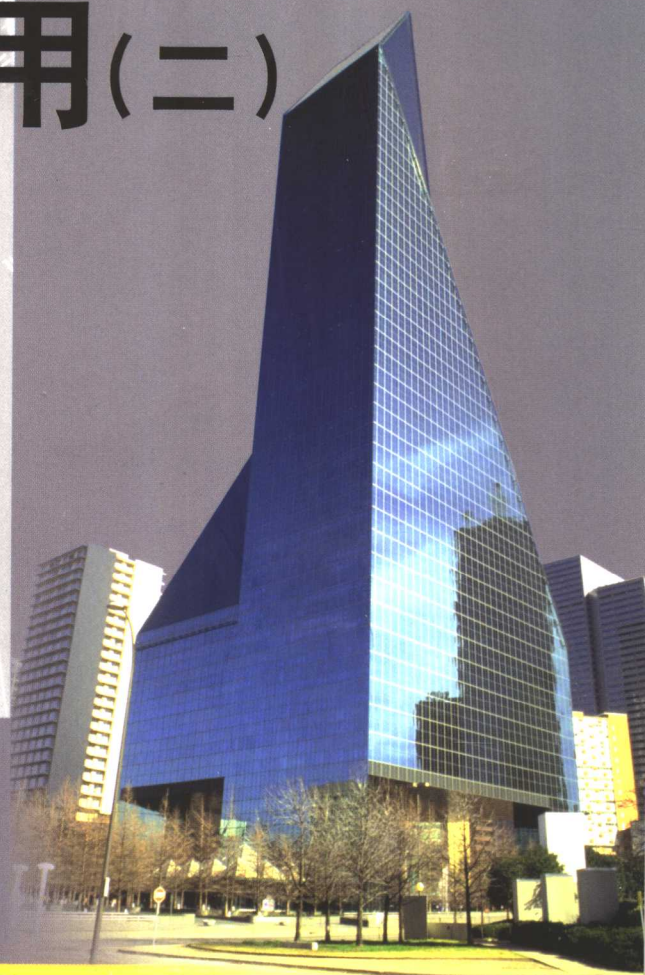


土木工程 科学技术研究 与工程应用(二)

主编 于广明 张明义 王 燕



TUMU GONGCHENG
KEXUE JISHU YANJIU
YU GONGCHENG YINGYONG

中国建材工业出版社

TU-53/44

:2

2007

土木工程科学技术 研究与工程应用(二)

于广明 张明义 王 燕 主编



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程科学技术研究与工程应用. 2/于广明, 张明义, 王燕主编.
—北京: 中国建材工业出版社, 2007. 10
ISBN 978-7-80227-345-0

I. 土… II. ①于… ②张… ③王… III. 土木工程—文集 IV. TU-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 142385 号

内 容 简 介

本书是青岛理工大学“土木工程论坛”论文集锦, 内容包括建筑结构与地下结构、岩土工程、道路与桥梁、材料科学、施工技术及其他。它既研讨了土木工程科学的发展现状, 又展望了土木工程科学的未来, 充分体现了该校土木工程的研究特色及最新的研究成果。

土木工程科学技术研究与工程应用(二)

于广明 张明义 王 燕 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 17.75

字 数: 423 千字

版 次: 2007 年 10 月第 1 版

印 次: 2007 年 10 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-345-0

定 价: 33.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

土木工程是一个古老的学科。远古时代,人们就开始修筑简陋的房舍、道路、桥梁,以满足简单的生活和生产需要。人类改造自然的历史充分展示了人类的聪明才智和土木工程领域的成就。21 世纪是一个日新月异的时代,人类进入了经济全球化和知识经济的时代,社会发展突飞猛进。土木工程是向人类提供各类工程设施的学科,面临着巨大的机遇和挑战。21 世纪的人类必将更加深入地把握建造科学规律,从而创造美好家园。

在土木工程学科日新月异的飞速发展时期,青岛理工大学曾于 2004 年 4 月举办了第一届土木工程论坛,经过 3 年多的积累和认真筹备,又于 2007 年举办了第二届土木工程论坛,继续研讨土木工程学科的发展现状,展望土木工程科学的未来。论坛共录用论文 43 篇。本次论坛的一大特点为:论文中大多数是依托国家 973、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家外国专家局国际合作、国家计划委员会研究专项、科技部研究计划、建设部研究计划、山东省科技计划、山东省自然科学基金、山东省优秀青年科学家奖励基金、青岛市科技计划等重要项目和横向课题完成的,充分体现了我校土木工程学科的研究特色以及最新的研究成果;本届论坛的另一个特点是在上一届吸收本科生参加交流的基础上,还较大范围地吸收本科生参加到科学研究、现场调查、科学实验和论文撰写等环节中,为本科生参加工程实践环节架起了桥梁,初步实现了本科生的教学和科研互动。

青岛理工大学是一所以工科为主,以土建类专业为特色,理、工、经、文、法多学科共同发展的高等理工科院校。学院始建于 1953 年,半个世纪以来,本着“严谨、勤奋、求实、创新”的优良校风,积极探索,勤奋耕耘,取得了可喜的成就。特别是土木工程学科具有较强的研究力量,现有教授 24 人,副教授 27 人,获得博士学位的人员 36 人,有博士生导师资格的 9 人,逐步形成了一只既面向科学前沿,又面向社会需求的,具有刻苦钻研、锐意创新精神的,充满朝气的土木工程研究群体。

此次论坛的承办单位——青岛理工大学土木工程学院,充分利用学校资源,发挥土木学科优势,通过努力将论坛办为具有创新意识和影响力的学术会议,并以此为契机,坚持不懈,使论坛成为土木工程科研工作者互相交流、团结协作、成果集成、构建大土木学科以及学生参加工程实践、投身科技创新的平台。本次论坛既是对过去工作的一个全面总结,又是展望未来的一个良好开端。

本届论坛得到了青岛理工大学领导和中国建材工业出版社领导的大力支持,得到了中国工程院院士、清华大学陈肇元教授的指导,在此表示衷心感谢和崇高敬意!同时,感谢广大土木科研工作者的积极响应和踊跃投稿;感谢祝英杰教授、曲成平博士的认真审阅及所付出的辛勤劳动!

编者

2007 年秋于青岛

目 录

第一部分 建筑结构与地下结构

500MPa 级钢筋混凝土梁的试验研究	王命平	张自琮	刘 伟	耿树江(3)		
混凝土破裂过程渗流 - 应力 - 损伤耦合模型研究	于广明	孟 丹	臧晓光	(10)		
消能支撑抗震加固的实用设计方法研究	隋杰英	江 博	范成滨	杜 朝(17)		
渤海某平台磁流变半主动隔振冰激振动控制研究	张纪刚	付瑛琪	单礼会	(25)		
复杂环境下某 158m 高混凝土烟囱双向三折爆破拆除研究	苗吉军	刘延春	王俊富	孙更强	范学臣(31)	
青岛地区钢筋混凝土结构的历史及其耐久性调查			范 宏	赵铁军	(37)	
补偿收缩混凝土在混凝土结构裂缝控制中的应用及存在的问题		陈 良	王 琰	张洲朋	(45)	
PKPM 应用过程建立结构概念的分析研究		左言华	周 怡	臧晓光	(50)	
青岛某双塔楼健康检测与加固研究	王会豹	李 媛	王金涛	吉乾坤	于广明	李文博(55)
胶州湾海底隧道二次衬砌混凝土的环境分析及耐久性设计		刘 伟	王命平	赵铁军	张曙光	(62)
外墙外保温与基层墙体连接的试验研究	王业中	王命平	于晓静	刘君昌		(70)
钢结构防火保护新技术——硬硅钙板钢结构防火研究			施季如	李 军		(78)
论小偏心受压试验柱的局压破坏			韩芳云	苗吉军		(83)

第二部分 岩土工程

静压桩沉桩阻力模拟计算的系列方法	张明义	(91)			
基于 GIS 的青岛市海岸带可持续发展协调性分析与评价	贺可强	陈淑奎	郭 栋	(102)	
基坑位移预测的动态 BP-Cauchy 模型及其应用研究	左红伟	张军舰	(112)		
应用 BP 人工神经网络进行锚杆承载力智能预测	张立伟	时 伟	李瑞军	孙 瑜	(123)
地下洞室围岩稳定性分析及失稳判据	臧晓光	周 怡	赵系江	(128)	
旋喷桩止水帷幕在临海高透水性层中的应用	宋晓滨	章 伟	(133)		
与地面环境协调的城市隧道开挖问题分析	高 建	刘明松	于广明	张明平	(136)

第三部分 道路与桥梁

降低桥头路堤工后沉降的施工工艺研究

..... 王俊刚 马培建 李 冲 于晓龙 冯治林(145)

某服役 15 年桥梁混凝土碳化与氯离子侵蚀状况研究

..... 姜福香 王玉田 赵铁军 苏 卿(151)

公路预应力混凝土弯梁桥荷载试验研究 王玉田 姜福香 岳渠德 万小梅(157)

第四部分 材料科学

耐海水腐蚀混凝土的配制技术研究 迟培云 李保华(167)

有机硅防水剂对 SHCC 抗渗性能的影响 田 砾 丁 铸 朱亚光 臧晓光(173)

增钙液态渣微晶玻璃的制备 姜玉丹 张 麟 李秋义(178)

复合溶液腐蚀下混凝土氯离子扩散系数演化机理 金祖权 孙 伟 赵铁军(183)

内掺防水砂浆湿扩散过程的试验研究 张 鹏 赵铁军 吉乾坤 Wittmann F H(191)

对建筑结构耐久性有重要意义的新型纤维混凝土的认识

..... 李亮亮 姚继超 高 嵩(197)

聚丙烯纤维补偿收缩混凝土性能试验研究及应用

..... 刘仍光 陈 良 方 燕 张洲朋(201)

荷载作用下混凝土碳化性能的试验研究 张磊蕾 刘旭东 卜东朝 万小梅(206)

第五部分 施工技术

EPS 板薄抹灰外墙外保温系统施工研究 许婷华 陈静茹 田 砾(217)

对政府投资工程应用代建制模式的探讨 陈静茹 胡滨波 赵喜江(223)

浅谈施工索赔报告的编制 杨松森 叶德英 刘建胜(228)

建筑工程施工现场安全防护用具技术研究 慕小强 王 鹏 王 燕(233)

砖砌体构造柱施工方法改进 荆凡凯 刘秀丽(238)

建筑节能法律的现状及发展前景 赵振新 许婷华(242)

超高层建筑检测的施工组织 马 剑 臧晓光 张秀亮 祝英杰(248)

浅述英国工程招标方式 陈建强 赵金环(253)

我国工程监理行业存在的问题及其对策 周 飞 许婷华(257)

第六部分 其 他

再论“变形极坐标法及其应用” 郭宗河 张 巍 郑进凤(265)

土木工程专业毕业生就业状况及前景分析 宋 玲 高 洁 赵 鑫(268)

确立制度权威,增强高校学生德育工作实效 张继清(272)

第一部分

建筑结构与地下结构

500MPa 级钢筋混凝土梁的试验研究

王命平¹ 张自琮¹ 刘伟¹ 耿树江²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛, 266033; 2. 中冶集团建筑研究总院, 北京, 100088)

【摘要】通过对 5 根 500MPa 级钢筋混凝土梁及 HRB335、HRB400 级钢筋混凝土简支梁各 1 根的对比试验, 观察了试件的裂缝、挠度、承载力及破坏形态。对试验结果研究分析表明, 500MPa 级钢筋混凝土梁正截面符合平截面假定; 实测挠度符合要求, 但大于计算挠度; 实测裂缝宽度较大, 但小于计算裂缝宽度。

【关键词】500MPa 级钢筋; 简支混凝土梁; 裂缝; 挠度

我国通过控制轧制和轧后冷却工艺制度, 利用普通碳素钢的化学成分, 可以得到内部组织细小均匀的新一代钢材, 其优点是强度得到提高, 韧性得以改善, 并能保证性能, 节省了微合金元素, 从而降低了成本, 故 400MPa、500MPa 级钢筋线材的强度价格比优越^[1]。现在国外 500MPa 级强度钢筋在建筑行业已开始应用, 因此进行 500MPa 级钢筋混凝土梁的试验, 研究这种钢筋与混凝土共同工作的性能及梁承载力、裂缝及刚度的变化就很有必要。

试件共有 7 根钢筋混凝土简支梁, 其中 5 根梁的受力钢筋为 500MPa 级钢筋, 另 2 根梁的受力钢筋分别为 HRB335 及 HRB400 级钢筋, 本文通过对试验结果的分析, 研究了其裂缝、挠度及承载力的变化规律。

1 试验方案

1.1 加载方案

本次试验所用加载设备如图 1 所示, 在测试过程中钢筋与混凝土的应变测试采用 CM-1A-32 型数字静态应变仪, 主加载设备采用 500t 压力实验机, 支座及加荷处垫块为宽 100mm、厚 25mm 的钢板。具体试验情况见图 2。

按照分级加荷制度进行梁的受弯试验, 同时在每级荷载稳定后测定每级荷载作用下构件的挠度、裂缝以及钢筋和混凝土的应变。

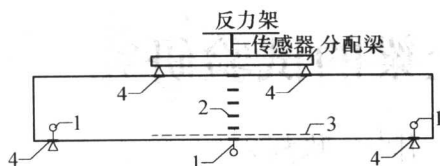


图1 加载示意图

1—百分表；2—混凝土应变片；
3—钢筋应变片；4—钢板垫块



图2 试验情况

1.2 试件设计

试件为简支梁受弯构件，各梁的尺寸、配筋见表1及图3。

表1 试件尺寸、混凝土强度及配筋参数

试件编号	b (mm)	h (mm)	C (mm)	h_0 (mm)	A_{sl}	A_{sv}	A_s	纵筋配筋率 ρ (%)	实测混凝土强度 f_{cu}^s (MPa)
L1	200	500	25	467	2 Φ 10	2 Φ 10@120	2 Φ 16	0.43	27.1
L2	200	500	25	467	2 Φ 10	2 Φ 10@120	3 Φ 16	0.65	27.1
L3	200	500	25	462.5	2 Φ 10	2 Φ 10@120	3 Φ 25	1.59	27.1
L4	200	500	40	447.5	2 Φ 10	2 Φ 10@120	2 Φ 25	1.10	27.1
L5	200	400	25	367	2 Φ 10	2 Φ 8@100	2 Φ 16	0.55	27.1
L6	200	400	25	367	2 Φ 10	2 Φ 10@100	3 Φ 16	0.82	27.1
L7	200	500	25	467	2 Φ 8	2 Φ 8@120	3 Φ 16	0.65	27.1

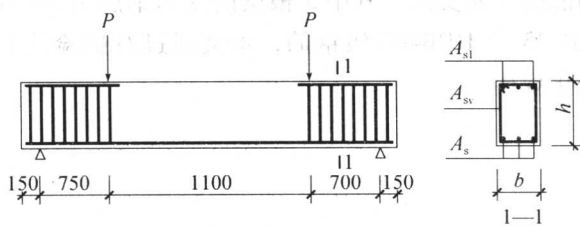


图3 构件配筋图

本次试验所用500MPa级钢筋为广州双菱钢铁工业有限公司产品，构件所用各种钢筋实测强度及设计强度参数见表2。

表2 钢筋强度参数

钢筋种类	符号	f_y^s (MPa)	σ_b^s (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_y (MPa)
HRB335	Φ	355	546	335	300
HRB400	Φ	—	645	400	360
500MPa级带肋碳素钢筋	Φ	515	660	500	420

注：依据文献[2]将表中500MPa级钢筋设计强度暂取为 $f_y=420\text{MPa}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态及挠度、裂缝发展特点

(1) 试件 L1、L2、L4、L5、L6、L7 均为正截面适筋梁破坏, 图 4 为其中一根 L2 梁的裂缝图, 图 5 为所有梁的弯矩-挠度曲线。

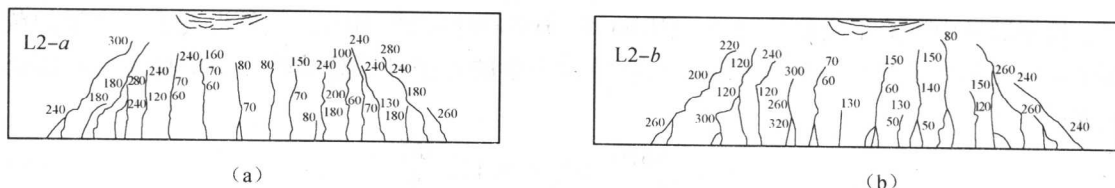


图 4 构件 L2 裂缝图

适筋梁构件破坏的变形特点, 根据图 5 可以分为以下几个受力阶段:

①开裂前阶段: 开始加荷时, 弯矩很小, 截面尚未开裂; 随着荷载的增大, 在临近开裂时构件表现了一定的塑性性能, 从挠度曲线看, 挠度有增长加快的趋势, 构件处于即将开裂阶段。

②带裂缝工作阶段: 当跨中弯矩达到一定值时, 在构件纯弯段或加载点对应的梁底附近出现一条或多条垂直裂缝, 裂缝宽度尚小, 与受拉钢筋的轴线垂直相交, 并且裂缝一旦出现即有一定的高度, 一般可达截面的 $1/3$ 或者更高。此时弯矩-挠度曲线出现第一个转折点, 钢筋应力较开裂前明显增大, 从混凝土应变看, 随着荷载的增大, 中和轴明显上升。此阶段虽然弯矩-挠度曲线为曲线段, 但总的变形较为稳定。随着弯矩的继续增大, 已有裂缝缓慢地增宽, 并向上延伸, 隔一定间距会相继出现新裂缝, 钢筋和混凝土应变继续增大, 中和轴位置稳定地上升, 挠度也进一步发展, 但这些变化均很稳定, 裂缝发展处于稳定时期, 构件处于带裂缝工作阶段, 且受力性能稳定。

③随着荷载的继续增大, 当钢筋应变增大到进入流塑阶段时, 裂缝发展很快, 继续加荷, 钢筋应力不变但应变增大, 受压区混凝土的应变增大, 最后受拉裂缝中的一条突然明显增宽, 并往上升, 进一步加荷发现, 构件并不马上破坏, 受压区水平裂缝增多且与受拉主裂缝相汇, 受压区形成一个三角形破坏区, 混凝土被压酥剥落, 梁的承载力下降很快而不能继续承载, 但挠度仍未达到挠度限值。

500MPa 级钢筋混凝土梁的受力过程, 从图 5 可看出其变形特点与普通的 HRB335、HRB400 级钢筋混凝土梁 L6、L7 的变形特点基本相同。

(2) 试件 L3 为斜截面剪切破坏。开始加载时, 弯矩很小, 截面并未开裂, 随着荷载的加大, 当达到一定数值时, L3 首先在跨中纯弯段出现裂缝, 裂缝与钢筋轴线垂直相交, 并自梁底向上延伸; 继续加载, 在加载点和支座间会出现裂缝, 裂缝在梁底与纵筋轴线垂直相交, 并沿斜向向上延伸为弯剪斜缝, 继续加载会在距支座约 h_0 处的截面高度中央出现约 45°

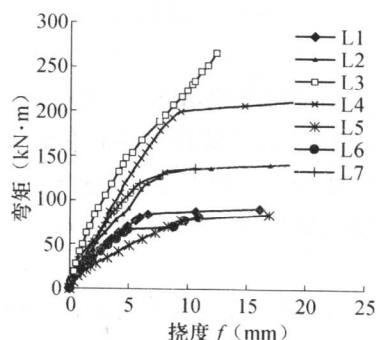


图 5 弯矩-挠度曲线

的腹剪斜裂缝；当荷载达到一定值时，纯弯段内的受弯垂直裂缝延伸停滞，弯剪斜裂缝继续向上延伸，直到加载板底，梁端侧面也出现水平裂缝；再继续加载，加载板附近的截面顶部受压区混凝土及临界斜裂缝上方的混凝土被压碎破坏，主要呈剪压破坏形态。

从图 5 可看出，剪切破坏的 L3 变形呈脆性破坏，无明显的转折点。

2.2 试件挠度的计算分析

根据试验中混凝土应变的测量，HRB335、HRB400 及 500MPa 级钢筋混凝土简支梁的截面平均应变基本上符合平截面假定，根据结构力学的方法可计算试验梁跨中挠度的计算公式为：

$$f = \frac{1679}{15000B} M l_0^2 \approx 0.112 \frac{M l_0^2}{B} \quad (1)$$

式中 M ——跨中弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

l_0 ——计算跨度， m ；

B ——试件的刚度， $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

短期荷载作用下，试件刚度为短期刚度 B_s ，按照《混凝土结构设计规范》^[3] 进行计算；本次试验取按荷载效应的准永久组合计算的弯矩 m_q 等于按荷载效应的标准组合计算的弯矩 m_k 的 80%，因为受压钢筋为 0，故考虑荷载长期对挠度增大影响系数 θ 等于 2.0，从而可求得长期刚度 B 与短期刚度 B_s 的关系为：

$$B_s = 1.8B \quad (2)$$

正常使用荷载约为设计荷载的 80%，钢筋应力则近似取为 $0.85f_y$ ，并取对应的弯矩为：

$$M_s = 0.87h_0A_s \cdot (0.85f_y) \quad (3)$$

根据式 (1)、(2)、(3) 可以计算长期挠度 f ，并与实测挠度 f_s^* 及推算长期挠度 f_l^* 列入表 3。

表 3 构件短期挠度计算

构件 编号	M_k ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	f_s^* (mm)	f_l^* (mm)	f_s^* (mm)	f_l^* (mm)	f_l^*/f_s^*
L1	58.31	3.763	6.773	2.656	4.781	1.42
L2	87.46	4.782	8.607	3.076	5.537	1.55
L3	211.59	9.088	16.358	4.639	8.350	1.96
L4	136.49	5.498	9.896	4.075	7.335	1.35
L5	45.82	4.622	8.320	3.538	6.368	1.31
L6	49.09	3.274	5.893	2.842	5.116	1.15
L7	74.96	3.187	5.737	2.496	4.493	1.28

按照《混凝土结构设计规范》^[3] 的要求可知对本次试验而言，各构件的挠度限值均为 $l_0/200 = 12.5\text{mm}$ ，由表 3 可知各构件推算长期挠度值小于挠度限值，表明 500MPa 级钢筋混凝土梁符合《混凝土结构设计规范》^[3] 对挠度限值的要求。

对比表 3 中 L1 与 L5, 两者配筋相同, 后者梁高要小, 挠度也大, 规律和普通钢筋混凝土梁相似。

从表 3 可见实测推算长期挠度 f_1^s 与计算长期挠度 f_1^c 的比值: 对于 HRB335 级钢筋混凝土梁 L6 为 1.15, 对于 HRB400 级钢筋混凝土梁 L7 为 1.28, 对于 500MPa 级钢筋混凝土梁 L1、L2、L4、L5 的平均值为 $\mu = 1.41$; 钢筋强度越高则比值越大, 即钢筋强度越高则与混凝土的粘结锚固性能要下降, 从而导致构件实际刚度要小于理论计算值, 建议将 500MPa 级钢筋混凝土梁的计算挠度乘以扩大系数^[4]。但真正工程中的实际结构变形要小于基于试验室研究计算公式的结果, 所以还应考虑实际工程中构件的支座约束、双向作用、拱效应和非结构层的影响^[5]。

2.3 试件裂缝间距及裂缝宽度的计算分析

正常使用荷载约为设计荷载的 80%, 同前面一样钢筋应力近似取为 $0.85f_y$, 可求得相应的实测平均裂缝间距 l_{cr}^m , 计算平均裂缝间距 l_{cr}^c , 实测最大裂缝宽度 w_{max}^s , 推算长期最大裂缝宽度 w_{max}^l ($=1.5w_{max}^s$), 计算长期最大裂缝宽度 w_{max}^c 。构件裂缝间距和裂缝宽度的计算分别见表 4、表 5。

表 4 构件裂缝间距计算

构件 编号	试验荷载 (kN·m)	统计裂 缝条数	实测 $l_{cr,min}^s$ (mm)	实测 $l_{cr,max}^s$ (mm)	实测 $l_{cr,m}^s$ (mm)	$\frac{l_{cr,max}^s}{l_{cr,min}^s}$	计算 $l_{cr,m}^c$ (mm)	$\frac{l_{cr,m}^s}{l_{cr,m}^c}$
L1	58.31	6	95	232	163.3	2.44	175.5	0.93
L2	87.46	7	118	170	147.9	1.44	153.6	0.96
L4	136.49	7	112	246	164.6	2.20	177.8	0.93
L5	45.82	8	76	232	150.9	3.46	174.9	0.86
L6	49.09	7	123	232	157.8	1.89	132.4	1.19
L7	74.96	6	85	204	160	2.40	153.6	1.04

表 5 构件裂缝宽度计算

构件编号	试验 荷载 (kN·m)	实测短期 最大裂缝 w_{max}^{ss} (mm)	推算长期 最大裂缝 w_{max}^{sl} (mm)	计算长期 最大裂缝 w_{max}^c (mm)	$\frac{w_{max}^{sl}}{w_{max}^c}$
L1	58.31	0.26	0.39	0.43	0.91
L2	87.46	0.23	0.345	0.42	0.82
L4	136.49	0.34	0.51	0.59	0.86
L5	45.82	0.20	0.33	0.43	0.70
L6	49.09	0.12	0.18	0.25	0.72
L7	74.96	0.18	0.27	0.33	0.82

从表 4 的统计结果看, 裂缝间距因其影响因素较多, 构件的实测裂缝间距其离散性较大, 同一构件纯弯段内裂缝间距最大值与最小值之比 $l_{cr,max}^s/l_{cr,min}^s$ 均在 1 以上, 最大可达

3.46, 最小亦有 1.44。500MPa 级带肋碳素钢筋混凝土受弯构件的 $l_{cr,max}^s/l_{cr,min}^s$ 平均值为 $\mu = 2.385$, 变异系数为 $\delta = 0.3496$ 。

从表 4 可以看出同一构件纯弯段内裂缝平均间距的实测值与理论计算值符合较好, 500MPa 级钢筋混凝土受弯构件的 $l_{cr,m}^s/l_{cr,m}^c$ 比值的平均值为 $\mu = 0.92$, 变异系数 $\delta = 0.0461$ 。这说明, 现行规范中关于裂缝平均间距计算的相关规定能很好地适用于 500MPa 级钢筋混凝土受弯构件。

从表 5 可知各试验构件的推算长期最大裂缝与计算长期最大裂缝的 w_{max}^s/w_{max}^c 比值为: 对于 HRB335 级钢筋混凝土梁 L6 为 0.72; 对于 HRB400 级钢筋混凝土梁 L7 为 0.82; 对于 500MPa 级钢筋混凝土梁 L1、L2、L4、L5 的平均值为 $\mu = 0.8225$, 变异系数 $\delta = 0.1089$ 。这说明, 现行规范中关于裂缝宽度计算的相关规定能很好地适用于 500MPa 级钢筋混凝土受弯构件, 且用规范公式进行计算时其结果是偏于安全的。从表 5 还不难看出, 随着钢筋强度的增加, 构件的裂缝宽度也相应加大, 500MPa 级钢筋混凝土简支梁的计算长期最大裂缝宽度 w_{max}^c 值相对较大, 这是由于随着钢筋强度的加大, 正常使用状态时钢筋应力也加大, 从而导致裂缝宽度也相应加大, 但提高混凝土强度等级可减小裂缝宽度^[6]。

因 L4 的混凝土保护层厚度为 $c = 40\text{mm}$, 大于其他梁的混凝土保护层厚度, 故 L4 的 w_{max}^s 值明显比其余梁大, 这和普通钢筋混凝土受弯构件的规律是一致的。文献 [7] 从混凝土结构耐久性的角度出发, 提出如对裂缝的表面宽度并无外观上的特殊要求, 则当保护层实际厚度超过 30mm 时, 可将厚度取为 30mm, 代入《混凝土结构设计规范》^[3] 计算公式, 用以确定表面横向裂缝宽度的计算值。

试验是纯简支受力状态, 而实际构件端部受到约束, 并且梁面受到板约束, 且连续梁的跨中支座开裂后形成拱作用, 跨中挠度及最大裂缝宽度将大大减小, 如何根据实际受力状态计算梁的真正裂缝宽度还应进一步研究。采用高强钢筋后, 裂缝控制将取代承载力成为控制设计的主要因素, 从而影响其应用, 而目前试验室研究的裂缝控制验算结果与工程实际相差较大, 因此有必要对裂缝宽度验算方法加以修正。

2.4 试件承载力计算分析

(1) 正截面受弯承载力分析

对于 L1、L2、L4、L5、L6、L7 的试验可得出极限弯矩 M_u^s , 利用钢筋实测屈服强度 f_y^s , 并通过《混凝土结构设计规范》^[3] 计算出梁的极限弯矩 M_u , 结果列入表 6。

表 6 试件极限弯矩计算

构件编号	实测极限弯矩 M_u^s (kN·m)	计算极限 M_u (kN·m)	M_u^s/M_u
L1	93.8	91.5	1.03
L2	146	133.3	1.10
L4	214	195.3	1.10
L5	94.4	70.8	1.33
L6	92.4	73	1.27
L7	159.6	120.2	1.33

从表 6 可见, M_u^s 与 M_u 的比值平均为 1.19, 说明 500MPa 级带肋碳素钢筋混凝土梁正截面的强度可以采用《混凝土结构设计规范》^[3] 的相关公式计算。

(2) 斜截面受剪承载力分析

取 $f_y^s = 515\text{MPa}$ 作为钢筋强度, 根据《混凝土结构设计规范》^[3] 可计算得 L3 弯曲破坏的相应剪力 $V_u^s = 401.45\text{kN}$ 及剪切破坏的极限剪力 $V_u = 468.97\text{kN}$, 理论上应发生弯曲破坏, 而实际上 L3 是剪切破坏, 实测极限剪力 $V_u^s = 380\text{kN}$, 这说明 500MPa 级带肋碳素钢筋作为箍筋时, 强度不能充分发挥。

3 结 论

通过对试验结果的研究分析, 500MPa 级钢筋用于钢筋混凝土梁有如下结论:

(1) 作为受力主筋强度能充分利用, 正截面符合平截面假定, 可采用《混凝土结构设计规范》^[3] 相关公式计算极限弯矩。

(2) 作为箍筋强度不能充分利用。

(3) 挠度的实测值满足《混凝土结构设计规范》^[3] 限值要求, 但实测值大于计算值, 计算值宜乘以增大系数。

(4) 受弯梁的计算长期最大裂缝宽度较大, 应进一步研究梁端约束及拱传力对裂缝宽度计算的影响。

参 考 文 献

- [1] 刘相华, 陆匠心, 张丕君等. 400-500MPa 级碳素钢先进工业化制造技术 [J]. 中国有色金属学报, 14 卷专辑 1, 2004 (5): 207 ~ 210.
- [2] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 级钢筋粘结锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2004, 34 (12): 67 ~ 69.
- [3] 混凝土结构设计规范 GB 50010—2002.
- [4] 李美云, 范参良. HRB400 级钢筋混凝土构件变形的试验分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (3): 27 ~ 29.
- [5] 徐有邻, 王晓锋, 刘刚等. 混凝土结构理论发展及规范修订的建议 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28 (1): 1 ~ 6.
- [6] 刘仲波, 王海龙, 钟铭等. 高强钢筋混凝土梁的静载裂缝宽度试验研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2003 (3): 32 ~ 35.
- [7] 陈肇元, 廉慧珍, 李克非. 混凝土结构耐久性设计与施工指南 CCES01-2004 (2005 年修订版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 22 ~ 23.

混凝土破裂过程渗流 - 应力 - 损伤耦合模型研究

于广明 孟 丹 臧晓光

(青岛理工大学土木工程学院, 青岛, 266033)

【摘 要】通过弹性模量和强度等力学性质的弱化和渗透系数、水压力的提高, 描述单元的损伤和破坏后的渗流 - 应力 - 损伤耦合作用机制, 研究断裂的局部化以及裂纹萌生、扩张乃至渐进破坏的全过程, 在经典 Biot 渗流力学基本方程的基础上, 提出了复杂应力作用下混凝土损伤演化过程渗流 - 应力 - 损伤耦合方程。

【关键词】混凝土; 渗流 - 应力 - 损伤; 断裂; 耦合方程

1 引 言

自中华人民共和国成立以来, 我国兴建了大量的混凝土工程, 在混凝土大坝和水工混凝土结构中, 渗流是不可避免的安全隐患, 同时由于初始损伤的存在, 导致结构的不安全因素大大增加。1959 年 12 月 2 日, 法国 Malpasset 拱坝在初次蓄水时即发生了全坝溃决, 这是典型的渗流 - 应力耦合作用所造成的工程事故例子。因此, 研究混凝土结构渗流 - 应力 - 损伤耦合作用机制, 具有非常重要的意义。

2 混凝土的渗透性分析

混凝土的渗透性是指气体、液体或离子通过混凝土的难易程度^[2]。由于混凝土固有的多孔性, 在内外压力差的情况下, 必然存在液体或气体从高压处向低压处迁移渗透的现象^[3]。这与混凝土的抗冻性有着密切的关系, 一般来说, 抗渗性好的混凝土其耐久性也好。混凝土的渗透性主要取决于水泥石的孔结构和集料的性能。水泥石和集料都含有各种大小的孔隙和裂缝, 所以孔隙率是影响渗透性的主要原因之一。不仅如此, 混凝土的渗透性在一定程度上还取决于混凝土的孔结构 (表 1)。

表 1^[3] 混凝土的孔结构特性

序 号	孔隙和缺陷类型		形成原因	典型尺寸	体积百分比 (%)	开孔性
1	大孔洞、缺陷		由于浇捣或振捣不密实	1 ~ 50cm	0 ~ 5	开放的
2	气 孔	自然	搅拌、浇筑和振捣时不可避免的	0.1 ~ 5mm	1 ~ 3	大部分闭孔
		引入	掺入专用外加剂人工引入	5 ~ 25 μ m	3 ~ 10	大部分闭孔

续表

序 号	孔隙和缺陷类型		形成原因	典型尺寸	体积百分比 (%)	开孔性
3	微孔、毛细孔		水分蒸发形成	1 ~ 50μm	10 ~ 15	大部分开孔
4	水平裂缝		混凝土拌合物内的离析造成	0.1 ~ 1mm	1 ~ 2	大部分开孔
5	内泌水孔隙		位于集料和钢筋下部, 由于水泥砂浆离析、泌水所造成的	0.01 ~ 0.1mm	0.1 ~ 1	大部分开孔
6	微裂	温度	温度梯度	1 ~ 20mm	0 ~ 1	开放的
		收缩	温度梯度	1 ~ 5mm	0 ~ 0.1	开放的
7	凝胶孔		水化和化学收缩	300 ~ 30000μm	0.5 ~ 1.0	大部分闭孔

3 渗流 - 应力 - 损伤耦合

3.1 渗流 - 应力耦合

众所周知, 混凝土是由水泥, 粗、细集料, 各类掺合料组成的多相复合材料, 在形成之初, 混凝土内部就具有微孔洞、微裂隙等初始缺陷。混凝土内部的初始损伤(裂缝)的存在, 破坏了混凝土的整体性, 极大地影响着混凝土的变形特征和强度特征。如果这些初始损伤形成连通的孔隙, 在水压的作用下, 水的渗流以渗透应力作用于混凝土, 影响混凝土中应力场的分布, 同时混凝土应力场的改变往往使裂隙产生变形, 影响裂隙的渗透性能, 所以渗流场随着裂隙渗透性的变化而重新分布, 这种互相影响称为渗流 - 应力耦合^[4]。

Biot 的耦合理论适合多孔介质, 孔隙变化量和渗透率的关系方程、有效应力原理是这个理论的基本框架。孔隙变化量是影响渗透率和孔隙水压的关键指标, 所以渗流 - 应力耦合问题确切地说是渗流 - 孔隙变化或介质应变耦合问题。考虑到多裂隙的固体与裂隙流体之间的相互作用即使是在弹性状态下也十分复杂, 所以渗流 - 应力耦合概念是这一相互作用机制物理描述的某种简化的提法。

混凝土中大量裂隙的分布, 导致混凝土渗透性的非均匀性和各向异性。毋庸置疑, 裂隙介质的渗流 - 应力耦合问题要比孔隙介质复杂得多, 混凝土的渗流耦合理论借助了岩体的耦合理论, 同时这种理论又是建立在多孔介质耦合理论原理的基础上, 侧重对裂隙网络几何形态的描述, 同样需要建立渗透率 - 应力 - 应变耦合方程以及裂隙渗流有效应力方程。

3.2 渗流 - 损伤耦合

随着对渗流耦合问题认识程度的加深, 人们逐渐认识到损伤破坏、裂纹扩展对渗流 - 应力耦合作用的影响十分显著, 主要表现为^[4]:

(1) 损伤对渗流过程的影响: 即微裂纹萌生、连接、扩展和贯通过程中渗透率演化规律及其力学机制问题。由于扩展中裂纹的渗流特性与初始裂隙的渗流特性有着明显的差异, 我们必须同时考虑初始缺陷和损伤演化对混凝土渗透系数数量值的突变, 它决定破裂过程中水的复杂(不规则的)渗流路径的选择, 所以影响渗流场空间变化。