

ISSN1000-4750
《工程力学》增刊 CODEN GOLIEB
CN11-2595/O₃

第五屆 全國結構工程學術會議 論文集

第二卷

PROCEEDINGS OF THE FIFTH NATIONAL CONFERENCE ON
STRUCTURAL ENGINEERING
Vol.2

ISSN 1000-4750



中国 海南
HAINAN, CHINA
11.25 ~ 12.02, 1996

9 771000 475006

ISSN1000-4750
《工程力学》增刊 CODEN GOLIEB
CN11-2595/O₃

工程力学

ENGINEERING MECHANICS

增刊
1996

中国力学学会主办
中国力学学会《工程力学》期刊社
清华大学出版社

CODEN GOLIEB 为美国国际刊名代码中心授予的国际刊名代码

第二卷目录

三、钢筋混凝土与试验

郑作樵 林少玲 鄢 飞	配筋钢纤维混凝土扁梁正截面强度及有限元分析001
张 誉 蒋利学	基于碳化机理的砼碳化深度实用数学模型.....009
时旭东 过镇海	高温下钢筋砼框架的破坏特征及破坏机构研究014
陆洲导 朱伯龙	用有限元法分析预测混凝土梁的耐火性能019
李爱群 程文襄 曹正良 丁大钧	新型低剪力墙的非线性有限元与耗能分析024
蔡 昊 覃维祖 刘西拉	冻融循环作用下混凝土力学性能的损失029
薛伟辰 汪基伟 周 氏	现代组合结构的研究与应用034
徐道远 符晓陵 朱为玄	混凝土系列K判据及其临界曲面038
赵仁孝 马世英	白光散斑法用于混凝土结构变形检验044
时旭东 李华东 过镇海	三面受热钢筋砼受压柱的极限承载力研究049
谢狄敏 钱在兹	高温(明火)作用后混凝土强度与变形试验研究054
赵仁孝 马世英	用现代光测技术检测砖石结构破坏过程059
金贤玉 吴 慧 钱在兹	混凝土受温后的电镜及X衍射观测064
孟祥良 马奎祥 何广民	SFRC矩形截面构件截面延性系数的简化计算方法探讨069
申冬建 李停驰 王志洪	钢筋砼等肢L形截面双向偏心受压柱的理论研究075
彭晓东 秦晓桐	自动光弹仪数据自动采集与处理系统的开发与完善 ..080
姜绍飞 张界夫 刘之洋	外包钢轴压短柱的试验研究084
姜绍飞 刘之洋	基于神经网络的外包钢混凝土受弯构件的研究089
李小红 沈玉根 程 超	高温(火灾)后预应力混凝土受弯构件的抗裂度及强度 092
陈卓英 熊进纲 虞锦晖	红石填充墙钢筋混凝土框架结构抗侧性能 有限元非线性分析098
邱祖华	加筋土结构受力机理实验研究103
高小旺 李 荷 肖 伟 王金妹	底部两层框架抗震墙砖房第三层与第二层侧移 刚度比的合理取值108
王 菁 孟 钢 刘启山	底部两层框架抗震墙砖房中第二层框架梁 承担竖向荷载的合理取值113
王 菁 肖 伟 孟 钢 王金妹	SRC梁极限受剪承载力计算118
高小旺	砼结构裂缝宽度控制的名义拉应力法123
崔钦淑	无粘结预应力平板一柱结构节点抗冲切承载能力 设计计算方法的研究127
曹大富 许元健	
曹大富 姜庭鲤	

熊进刚 陈卓英 张伯君	R.C.板式楼梯踏步对梯段板刚度和变形影响的初步探讨	131
郭子雄	钢筋砼低矮抗震墙受剪承载力实用计算	135
邓志恒 童启明	无粘结部分预应力砼受弯构件刚度的试验研究	139
邓志恒 陆春阳	钢筋砼连续叠合梁内力重分布及调幅的研究	144
沈毅群	砖混楼梯抗震构造问题初探	149
罗冬梅 郑昭明 夏少波 李光霞	非局部非弹性损伤本构模型在混凝土材料中的应用 ..	152
闫月梅 郭秉山 李建峰	多层砖房考虑构造柱和圈梁作用的震害预测方法	157
周克荣 肖小松 周跃华	混凝土抗折强度尺寸效应的分形研究	161
曾庆响 何高勋 虞锦晖	混凝土双向受弯构件的抗剪强度	166
龚尚龙 周志祥 江炳章	无粘结力筋效应问题研究	171
黄 侨 冷西晨 郑一峰 傅金科	预弯预应力砼梁的试验研究	176
廖 莎 易伟建	预应力砼叠合框架受力性能的试验研究	181
孙伟民 袁发顺	砖砌体承重纵墙非线性分析	187
熊德炎 龚国芝 伏羲淑 吴汉民	钢衬钢筋混凝土压力管道平面结构模型温度荷载试验研究	192
杨学堂 杨 耀	混合结构房屋中墙梁设计的几个问题	197
宋春燕 金明伟	KJPJ6钢筋砼框架微机FORTRAN程序及其应用	201
陈俊塘 姚静翔 陈晓红	钢筋混凝土柱构件TN胶粘钢加固方法的试验研究 ...	205
苏恒强 蔡 健 邓天宁 李国雄	工程结构表面涂层残余应力的测量	211
黄少许	砌体结构房屋伸缩缝设置问题的评述	214
李朝弟 王克鹏 吴强胜 张如一	两层双跨叠合框架受力性能试验研究	218
肖亚明	火灾损伤混凝土受弯构件截面温度场及剩余承载力	
陈振富 黄赛超	力的计算方法	223
王孔藩 郭孔屏	钢筋砼板柱节点的抗冲切及抗弯强度研究	228
马云昌 吕西林	高强砼局部承压强度计算	233
胡敏云 高渠清	无粘结部分预应力混凝土连续梁极限承载能力	
阎兴华 刘承瑞 何渐渐	非线性分析	239
胡惠荣 朱顺先 朱伯龙	加大截面加固混凝土偏心受压柱的非线性全过程分析	244
陈本沛 林雨生	煤矸石混凝土轴心受拉构件的试验研究	251
李中立 曹祖同 吴 戈 许云跃	钢筋混凝土异型柱框架节点试验研究	256
薛 琳 王 荣	应用边界元法确定围岩粘弹性位移的新方法	261
袁润卫 王 宏	现浇框架结构荷载试验检测	266
俞建荣 丁礼华 顾文钧 韩世莲	受弯混凝土结构的疲劳损伤特性	271

四、动力与稳定

严宗达 蔡宗熙 崔玉红 吕建业	弹性圆薄板受迫振动的混沌判据	276
方鄂华 高赞明 谭晓明	安装有粘弹性阻尼器的框架的试验和数值分析	280
张善元 雷建平 程国强	薄壁钢管经受侧向撞击实验研究和理论分析	284
赵 鸣 张 誉 张 嵩	钢筋砼防撞护栏在汽车冲撞下的动力响应	289
刘春华 秦 权	基于随机有限元的框架结构可靠度分析	295
葛起宏 李桂青 钟 珞 孟吉复	三峡工程厂房坝段动力有限元分析	300
陈清军 翁大根 朱合华	确定桩承高层建筑有效地震动输入的一种改进模型 ..	305
沈成康 卢文达 叶谋仁 翁智远	复杂墙板结构在集中冲击荷载下的动力分析	310
丁红丽 徐秉业	具有初始缺陷钢衬壳的热后屈曲分析	316
苑希民 何玉敖 崔广涛	结构动力的反分析方法研究	321
顾祥林 张 誉	横墙纵框多层大开间住宅结构模型振动台试验研究 ..	326
龙志飞 岑 松 匡文起 龙驭球	厚薄板振动分析的通用矩形单元	332
方鄂华 高赞明 谭晓明	粘弹性材料动力特性的试验与模拟	336
谭晓明 高赞明 高自友 方鄂华	梁柱节点粘弹性阻尼器的结构减振研究	341
黄纲华 何 穷	回转对称结构半解析有限元法动力分析	345
张铜生 栗 广 陆 兢	钢筋混凝土结构空间弹塑性地震反应分析	350
赵 雷 陈 虬	不确定性结构非线性动力分析的增量随机有限元法 ..	353
葛起宏 孟吉复 杜幼平 李桂青	三峡工程厂房坝段抗震试验研究	358
魏德敏 王德禹	非弹性拱冲击响应实验研究与理论分析	364
宋金峰 于承新 崔义明 何玉敖	结构在多态混合控制下双向水平与扭转耦合振动 响应的试验研究	369
王新平 胡 伟	九层组合砌体房屋抗震性能分析	375
杨如曙	非均匀温度场弹性杆临界荷载一级渐近解	381
何蕴龙 陆述远	混凝土重力坝随机地震动力响应分析	384
刘 航 蓝宗建 刘 凡 王中华	底层框架多层砖房弹塑性动力分析	390
曲淑英	组合结构的杆系化计算	396
张海龙	三峡库区新津口大桥的稳定计算	400
吴 晓 肖伟跃 龚善初	轴压下弹性支承连续叠层梁固有横振	404
乔天民 秦冬棋 董子华 冯光太	九层点式设剪力墙的组合结构砖房抗震性能分析	407
宋绍常	索网结构抗震可靠度的时程分析方法	413
张新培 曹策慧	影响框支剪力墙结构抗震性能的几个因素	418
刘爱民 周德源	BEM—FEM耦联分析加劲板简谐受迫振动	423
金康宁	高层建筑结构动力稳定性分析中自振周期的简化计算 ..	429
刘建新	求解干扰力下板动力响应的空—时半解析法	433
彭建设 张敬宇 杨 杰		

毕 佳 严松源 唐德高	接地爆炸条件下RC柱壳动力响应的研究.....	436
姜劲枫 王柏生	预应力梁、板弯曲振动固有频率的研究	439
罗杏春 范家参	横向水平地震时双墙面加筋土墙的地震反应	444
顾 萍 沈桂平	斜拉桥带肋钢箱梁的局部失稳分析	448
贺尔铭 陈新海	可消除控制溢出的柔性结构建模新方法	453
王益槐 任勇生 熊诗波	干摩擦阻尼及其在工程结构被动减振设计中 的应用研究	457
任勇生 刁 朴	具有摩擦支承边界的非线性板、梁结构 的阻尼特性分析	468
严 慧 张明山	输电铁塔的几何非线性动力响应分析	474
马建勋 王用琪	钢筋混凝土筒仓非线性动力计算理论的研究	480
王园园 丁春林	地震荷载下剪力墙—地基耦合体系的响应分析	484
刘新宇 张尚根 郭志昆	后浇式牛腿承载能力试验研究	489
沈小璞 陈荣毅 沈鹏程	基于状态空间理论的结构动力响应解法	492
刘恭忍 何金胜 王克成	框架结构“人控塑性铰”减震效应研究	497
刘金喜 冯文杰 姜稚清	离散支承矩形板的自由振动	502
张昀青 武秀丽 姜稚清	轨枕板各向异性厚板模型的自由振动	506
王焕定 张 英 朱本全 王 伟	用高阶单步法作结构非线性地震响应 及瞬时振动控制	511
张永山	T字钢轴心压杆稳定承载力研究	516
曹平周	P— Δ 效应对框架节点抗震性能影响的研究	521
秦新刚 徐 明	板片体系壳形结构非线性稳定的简化分析	525
杨 琦 赵惠麟 马 军 赵才其	环向加肋旋转壳动力敏度分析的广义样条环域法	531
李 彪	长期风荷载作用下冷却塔失效分析的数学模型	536
王新堂 王命平 杨晓明	桥头跳车对桥梁振动影响的研究	541
王新堂 马爱萍	钻井液及井壁对石油钻柱振动的影响分析	546
陈彦江 王永平 傅金科	结构层间力学参数识别方法研究	549
屈 展 徐健学	反射波法动测桩的频响问题	554
陈 隽 李 杰	任意变截面杆件拉伸与弯曲的稳态振动	559
陈振富 熊智彪 董水英	非线性Galerkin方法在梁的非线性动力学 性态分析中的应用	564
周欣竹	结构振动状态空间实现的平衡模态削减	569
张新华 徐健学	料石结构房屋动力特性的分析与研究	575
刘栋栋	越秀大厦模型模拟地震振动台试验研究	580
施养杭	影响结构地震反应破坏耗能比的因素分析	585
晏 华 胡质理 施卫星 萨林德		
胡炼坚 何健璋		
黄宗明 孙 勇 白绍良		

王福明 樊文欣	某型坦克发动机叶片振动特性分析	590
李 宾 张忠发	杆件结构非线性动力分析的多刚体方法	594
杨 旭	结构动力优化设计的最大熵方法	598
杨树标 贾剑辉 王建新	框架摩擦支撑结构减震性能试验研究	602
李宏男 张 玲	利用调液阻尼器的高层建筑减震研究	607
吴柏生	两端弹性支承铰支杆的后屈曲分析	612
覃 正 陈绍汀	国外SAR天线的发展	617
覃 正 陈绍汀	大型空间结构的柔性效应	621
张新培 曹策慧	随机结构特征值和特征向量统计特性的研究	626
秦福华 童岳生 梁兴文 易文宗	框支连续墙梁抗震性能试验研究	631
彭兴黔	刚性块轴向冲击有限长弹性杆的屈曲问题	636
崔光育 施永长	夹层结构的抗震分析及设计优化	641
朱本全 李 暄	考虑弯曲变形影响时子结构拟动力试验方法的研究 ..	646
邸 元 袁明武 肖建庄	多层结构基础隔震动力反应分析的简化	650

配筋钢纤维混凝土扁梁正截面强度及有限元分析

郑作樵

林少玲

鄢 飞

(福州大学土建系,福州 350002)

(福州市抗震办,福州 350002)

(福州大学土建系)

提 要 本文通过 10 根配筋钢纤维砼梁的试验,深入探讨了钢纤维砼扁梁的受力性能,分析了梁正截面破坏机理,指出在扁梁中掺入适量钢纤维后,使梁的整体刚度提高,挠度减小,开裂荷载及极限荷载均有较大提高。并通过分析提出了正截面强度计算公式。本文还对钢纤维砼扁梁进行了有限元非线性分析,计算结果与试验结果吻合良好。

关键词: 钢纤维砼;扁梁;正截面强度;有限元分析

一、前言

扁梁由于梁高小,使建筑物层高降低而获得明显的综合经济效益,近年来在高层建筑中得到广泛应用,由于扁梁随着梁高降低,梁的裂缝和挠度难以控制。无粘结预应力技术的出现使钢筋砼扁梁的一些缺点得到有效的克服,然而,无粘结预应力结构需要较高的专门技术和材料,在计算理论上也还存在一些值得进一步探讨的课题。

钢纤维砼是新近发展起来的一种性能优良的新型复合材料,由于钢纤维阻滞基体砼裂缝的开展,使抗拉、抗弯、抗剪强度较普通砼有较大的提高,其裂后韧性也得到较大的改善。在普通钢筋砼扁梁中掺入适量钢纤维,使其在砼中承受部分拉应力,阻碍砼内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发展,起到部分预应力砼相类似的作用,而无需施加预应力的全套工艺和专门技术要求,简化施工程序,缩短工期,不失为一种有效途径。

目前,国内外在许多工程中使用框架扁梁结构,然而选择这种结构的理由居多从经济角度出发,对扁梁受力性能进行研究的甚少,本文通过 10 根构件试验,并进行了有限元分析,力图了解钢纤维砼扁梁正截面破坏机理,开裂荷载和极限荷载的增强效果。裂缝和挠度的改善(另文)。对钢纤维砼梁的研究及应用做一点尝试。

二、试验情况

(一)试件设计

选定梁长为 2200mm,净跨 2000mm,10 根试验梁分 A、B 两组,梁高 100mm,梁宽分别为 200mm 及 300mm,在每组中有五种不同钢纤维含量,分别为 0%,1.0%,1.2%,1.5%,1.8%。

本实验只讨论加筋钢纤维砼扁梁的正截面破坏机理,在配筋计算时,依照现有钢纤维砼设计规程(CECS38:92),在剪弯区配足箍筋以防斜截面破坏。

试验梁的尺寸及配筋见图 1。详细截面尺寸及截面纵筋见表 1。梁截面砼及钢筋力学指标见表 2。

表 1 试验梁截面尺寸及截面纵筋

梁号	梁截面尺寸						截面纵筋		
	梁长 L (mm)	净跨 L ₀ (mm)	梁高 h (mm)	梁宽 b (mm)	砼保护层 C(mm)	有效高度 h ₀ (mm)	直径 (mm)	数量 (根)	面积 A _s (mm ²)
LA ₁	2200	2000	100	200	20	75	10	4	260.2
LA ₂	2200	2000	100	200	20	75	10	4	260.2
LA ₃	2200	2000	100	200	20	75	10	4	260.2
LA ₄	2200	2000	100	200	20	75	10	4	260.2
LA ₅	2200	2000	100	200	20	75	10	4	260.2
LB ₁	2200	2000	100	300	20	75	10	6	390.3
LB ₂	2200	2000	100	300	20	75	10	6	390.3
LB ₃	2200	2000	100	300	20	75	10	6	390.3
LB ₄	2200	2000	100	300	20	75	10	6	390.3
LB ₅	2200	2000	100	300	20	75	10	6	390.3

表 2, 试验梁截面砼及钢筋力学指标

梁号	混凝土力学指标					钢筋力学指标		
	钢纤维含量 V _f (%)	立方强度 f _{cu} (MPa)	棱柱强度 f _c (MPa)	轴拉强度 f _t (MPa)	弹模 E _c CX10 ⁴ MPa	屈服强度 f _y (MPa)	极限强度 f _u (MPa)	弹模 E _s (×10 ⁴ MPa)
LA ₁	0	33.5	26.8	2.11	3.67	342	440	2.16
LA ₂	1.0	34.0	28.5	2.26	3.80	342	440	2.16
LA ₃	1.2	34.8	29.5	2.42	3.92	342	440	2.16
LA ₄	1.5	35.1	30.1	2.58	4.02	342	440	2.16
LA ₅	1.8	35.9	30.4	2.83	4.11	342	440	2.16
LB ₁	0	33.5	26.8	2.11	3.67	342	440	2.16
LB ₂	1.0	34.0	28.5	2.26	3.80	342	440	2.16
LB ₃	1.2	34.8	29.5	2.42	3.92	342	440	2.16
LB ₄	1.5	35.1	30.1	2.58	4.02	342	440	2.16
LB ₅	1.8	35.9	30.4	2.83	4.11	342	440	2.16

(二) 材料选择及配合比

1. 钢纤维: 浙江省杭州东岳钢纤维厂异形钢纤维, 规格 0.35×0.6×25mm.
2. 水泥: 福建顺昌福建 525[#] 普通硅酸盐水泥 (52.1MPa), 各项性能符合国家标准.

3. 粗骨料为 5~15mm 连续级配卵石, 细骨料为闽江中砂, 普通自来水。

钢纤维砼配合比(重量比)

水泥:砂:石:水为 1:2.3:2.81:0.51。

(三) 试验装置

试验在承力架上进行, 加载采用分配梁实现两点对称集中荷载作用, 挠度用 5cm 位移计量测, 在纯弯段内梁截面上贴有砼应变计, 型号 SZ320—100AA, 100×4, 钢筋上埋有钢筋应变片, 型号 B×120—10AA, 10×2, 加载装置示意图如图 2。

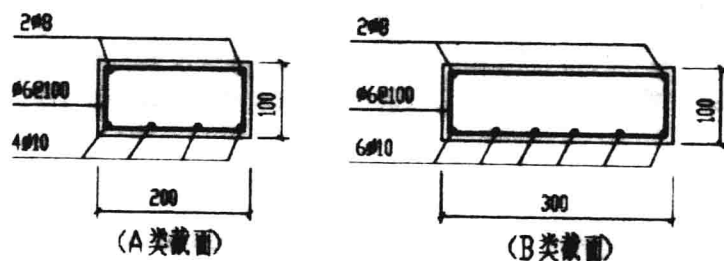


Fig. 1. A. B 类截面配筋 单位: mm

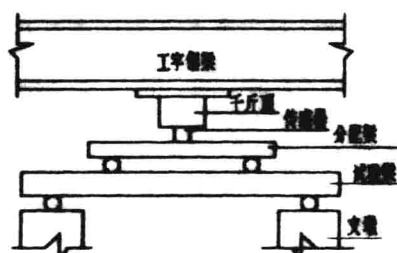


Fig. 2. 试验装置示意图

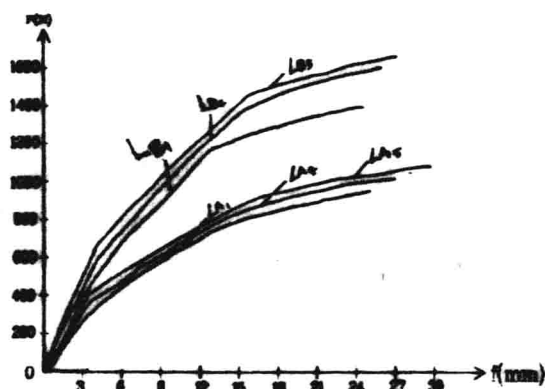


Fig. 3 试验梁实测荷载—跨中挠度曲线

三、试验结果与分析

(一) 正截面破坏特性

配筋钢纤维砼扁梁与普通砼扁梁的正截面破坏过程相似(见图 3), 由图可以看出, 扁梁的受力过程大致可分为三个阶段; 在加载初期因荷载较小, 砼未开裂, 梁处于弹性阶段工作, 荷载与挠度成线性关系, 当受拉区边缘的砼应变达到其极限拉应变时, 拉区砼开裂, 构件刚度降低, $P-f$ 曲线出现第一个转折, 梁进入第二阶段。随着荷载增大, 开裂处钢筋的应力及应度随之增大, 裂缝宽度相应增大, 但中和轴位置并没有显著上升, 一旦钢筋应力达到屈服, 梁的受力将发生质的变化, 此时梁进入第三阶段—屈服阶段。

钢筋屈服后, 压区砼尚未压坏, 荷载仍能有所增长, 但钢筋应力仍保持 f_y , 应变继续增

长,裂缝显著开展,中和轴迅速上移,挠度急剧增大, $P-f$ 曲线斜率变得非常平缓,随着钢筋与砼粘结破坏形成一条临界裂缝,迅速向梁顶发展,最后因砼压区达到极限压应变而破坏,破坏时压区砼具有良好的完整性。

不过,配筋钢纤维砼扁梁,因钢纤维的掺入在以下两点与普通砼扁梁存在区别:

a. 裂缝出现后,普通砼扁梁开裂截面受拉区砼退出工作,它所负担的拉力将全部传给钢筋,使开裂截面钢筋应变有明显的增大(突变),而对配筋钢纤维砼扁梁,开裂截面砼并不是退出工作,而是因裂缝间钢纤维与砼基体粘结力的存在使它与钢筋共同承担拉力,所以钢筋应变突变的程度明显减小,钢纤维掺入越多,突变越小。

b. 扁梁在掺入钢纤维后延性提高,并且随着钢纤维掺入量的增多,延性愈好,梁的延性是指钢筋屈服后继续变形的能力,它可以通过 $P-f$ (荷载—跨中挠度) 曲线得以反映。

(二) 变形

1. 挠度

在扁梁中掺入钢纤维后,由于钢纤维增强了砼的受拉作用,降低了受拉钢筋的工作应力从而提高了钢纤维砼梁的整体刚度,则在同级荷载作用下,挠度变小,并且钢纤维掺入越多,挠度会越小,这个结论可以从图 3 的荷载—跨中挠度曲线中直观表示,沿任一高度做一平行 f 轴的平行线,与不同曲线的交点表示同一荷载下不同的挠度值,可以判断出同类截面不同钢纤维含量的试验梁,挠度随钢纤维含量的增加而减小。

2. 裂缝

试验中观察到,10 根试验梁裂缝产生,扩展过程基本一致,裂缝首先在集中荷载作用线附近出现,随着荷载增加,裂缝的数量迅速增加并向上延伸,当进入使用阶段后(荷载约为极限荷载的 30—70%),裂缝向上延伸缓慢,在纯弯段内,在 50~70% 的极限荷载时,几乎看不到裂缝延伸,随着荷载进一步增加,主要裂缝的宽度明显增大,而向上延伸则很小,说明这时中和轴变化不大,当荷载接近或超过 80% 的极限荷载时,其中几条主要裂缝向上延伸增快,梁最后因压区砼压碎而破坏。

扁梁在掺入钢纤维后,它约束着砼中微细裂纹的产生与扩展,尤其当荷载增大,裂缝有一定宽度时,钢纤维的影响效果更为明显。

(三) 正截面开裂荷载

梁受纯弯作用时,拉区边缘砼首先达到抗拉强度,由于沿截面高度存在着应变梯度,拉区各层纤维间存在着相互约束的作用,因此边缘纤维没有立即发生断裂出现裂纹,而是在拉区一段范围内发生塑性变形,因此可以看出,扁梁因掺入钢纤维而提高了开裂荷载,并且随掺入量的增多而增大。表 3 列出实测开裂荷载值并进行比较。

(四) 正截面极限荷载

配筋钢纤维砼扁梁内钢纤维,在极限状态时,其破坏形态是从砼基体内拔出,而不是被拉断,由此产生的摩阻粘结力引起的能量耗散提高了梁的抗弯强度,实测数据表明,扁梁掺钢纤维后极限承载能力提高的幅度与规程提供的普通钢纤维砼梁理论计算提高的幅度相近现行钢纤维砼规程(CECS 38: 92)正截面强度计算如下:

现今 $As' = 0$, $a_s = 25$, 根据钢纤维砼结构设计与施工规程, 取 $f_{fcm} = f_{cm} \cdot f_{fc} = f_c \cdot f_{ftb}$
 $= f_c \beta_{fb} \lambda_f$.

λ_f — 钢纤维含量特征参数 $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 当 $\lambda_f > 1.2$ 时取 $\lambda_f = 1.2$

ρ_f — 钢纤维体积率

l_f — 钢纤维长度 d_f — 钢纤维直径

β_f — 钢纤维对受拉区钢纤维砼抗拉能力的影响系数。钢纤维砼强度等级在 CF20~CF40 时, 取 1.30

受压区高度 x 按下式计算

$$f_{cm}bx = f_y A_s - f_y' A_s' + f_{ftb}bx_t \quad (1)$$

$$x_t = h - 1.25x$$

还有: $x \leq \zeta_b h_0$.

$$M_{fu} = f_{fcm}bx(h_0 - x/2) + f_y' A_s'(h_0 - a_s') - f_{ftb}bx_t(x_t/2 - a_s) \quad (2)$$

我们所用钢纤维为 $0.35 \times 0.6 \times 25\text{mm}$ 。

砼标号为 C35, 则钢纤维砼为 CF35。

钢纤维换算直径为 0.517mm , 长径比 48.4。

根据以上公式算出试验梁理论极限荷载, 并与实测值进行比较, 比较结果列于表 3。

表 3. 试验梁实测开裂荷载, 极限荷载及计算极限荷载

梁号	钢纤维 含量 V_f (%)	实 测 值				计 算 值		$P_u/P'u$
		开裂荷载 P_c (KN)	极限荷载 P_u (KN)	开裂荷载 提高幅度 α_1 (%)	极限荷载 提高幅度 α_2 (%)	极限荷载 $P'u$ (KN)	极限荷载 提高幅度 α_2' (%)	
LA ₁	0	1.28	8.76	0	0	8.53	0	1.026
LA ₂	1.0	1.71	10.10	33	15	10.05	18	1.005
LA ₃	1.2	1.96	10.70	53	22	10.58	24	1.011
LA ₄	1.5	2.02	11.20	57	28	11.08	30	1.010
LA ₅	1.8	2.14	11.80	67	34	11.56	35	1.020
LB ₁	0	1.90	12.90	0	0	12.79	0	1.008
LB ₂	1.0	2.45	15.20	28	18	15.07	18	1.008
LB ₃	1.2	2.81	16.00	47	24	15.80	24	1.012
LB ₄	1.5	3.01	16.70	58	29	16.60	30	1.006
LB ₅	1.8	3.16	17.60	66	36	17.34	35	1.015

从表 3 看出,采用现行钢纤维砼规程(CECS 38:92)正截面强度计算公式,计算配筋钢纤维砼扁梁是可行的,与普通钢筋砼扁梁相比,开裂荷载提高 1.33 到 1.67 倍(随钢纤维掺入量的增加而提高),极限荷载提高 1.15 至 1.36 倍。

四、配筋钢纤维砼扁梁有限元分析

有限单元法是伴随着电子计算机出现而产生的一种数值计算方法,目前已在许多领域应用^[1]。本文对配筋钢纤维砼扁梁进行平面应力问题有限元非线性分析,取得相当满意的结果。可见,有限元法对于钢纤维砼扁梁这种不同材料组成的构件同样有效,但有待进一步研究,完整。

(一)单元划分

钢纤维砼是一种新型的复合材料,钢纤维在砼基体中随机乱向分布,所以在单元划分时,把它看成一种材料,并采用平面三角形单元。钢筋采用一维线性单元,考虑到钢筋与钢纤维砼之间粘结良好,所以不在钢筋与砼之间另设联结单元。受计算机内存限制,划分单元时不考虑受拉区保护层砼,并适当在纯弯区加密,这样,扁梁钢纤维砼部分共划分 312 个单元,受拉钢筋与架立筋各划分成 52 个单元,箍筋划分成 42 个单元,划分后共有 212 个结点,单元划分详见图 4。

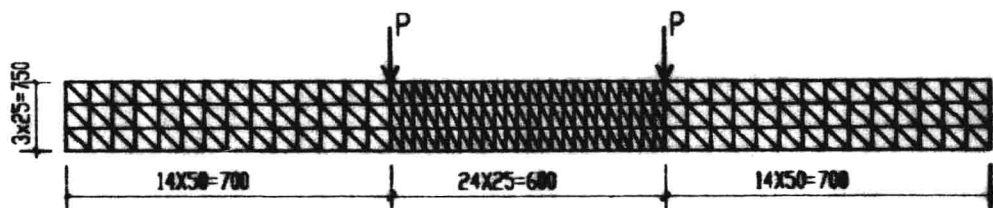


Fig. 4 扁梁单元划分

(二)钢纤维砼应力应变曲线

1. 钢纤维砼单轴抗压应力—应变曲线如图 5,曲线方程复杂,为了便于计算,仍取用普通砼应力—应变曲线^[1],计算结果表明这种处理是合理的。

σ_0, ϵ_0 —峰值应力,峰值应变

上升段曲线:

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + [E_0/E_s - 2]\epsilon/\epsilon_0 + (\epsilon/\epsilon_0)^2}$$

E_0 —原点切线模量

E_0 —峰值应力点割线模量

$\epsilon_0 \approx 0.002$

$\epsilon_u \approx 0.033$

下降段为一线段

2. 钢纤维砼单轴拉伸应力—应变曲线^[2]如图 6

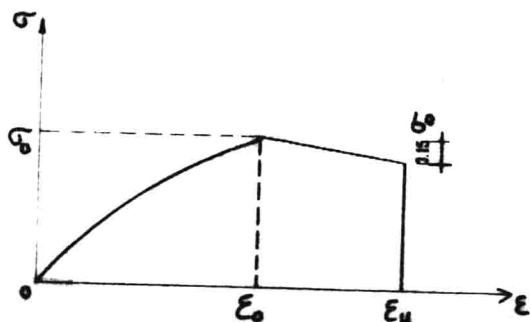


Fig. 5. 普通混凝土单轴抗压应力—应变曲线^[2]

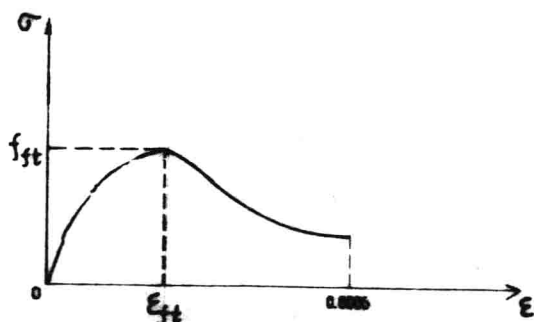


Fig. 6. 钢纤维混凝土单轴抗压应力—应变曲线^[2]

ϵ_{ft} —钢纤维砼拉伸峰值应变

f_{ft} —钢纤维砼拉伸峰值应力

$$\epsilon_{ft} = \epsilon_{so} + 0.96V_f l/d \times 10^{-4}$$

$$f_{ft} = f_t + 0.92V_f l/d$$

f_t —基体抗拉强度, 单位 MPa.

ϵ_{so} 素砼拉伸峰值应变 取 $X = \epsilon/\epsilon_{ft}$, $Y = \sigma/f_{ft}$

则上升段表达式: $Y = AX + (3-2A)X^2 + (A-2)X^3$

$$A = 1.4 \frac{f_t(\epsilon_{so} + 0.96V_f \frac{l}{d} \times 10^{-4})}{\epsilon_{so}(f_t + 0.92V_f \frac{l}{d})}$$

下降段表达式: $Y = \frac{X}{\alpha(X-1)^\beta + X}$

$$\alpha = 0.418e^{0.632f_t} - 0.446e^{0.826V_f l/d}$$

$$\beta = 1.7$$

$f_t < 1.5\text{MPa}$ 时, 取 $f_t = 1.5\text{MPa}$

$f_t > 3\text{MPa}$ 时, $f_t = 3\text{MPa}$

$V_f l/d > 1$ 时 $V_f l/d = 1$

根据有关文献^[3], 取极限拉伸应变为 0.0005

(三) 程序框图(见后页)

(四) 计算结果与实验结果比较(见后页)

五、结 论

1. 钢纤维砼扁梁正截面破坏(适筋)与普通钢筋砼梁相似, 也是先钢筋屈服后压区砼压碎而宣告破坏。

2. 在同级荷载作用下, 钢纤维砼扁梁最大裂缝宽度与跨中挠度随钢纤维掺入量的增加

而减小。

3. 钢纤维砼扁梁与普通砼扁梁相比, 开裂荷载显著增长, 且钢纤维含量越多, 增长越多。

4. 钢纤维砼扁梁因掺入钢纤维极限荷载有所增长, 现行钢纤维砼规程 (CECS 38:92) 正截面强度计算公式用于计算配筋钢纤维砼扁梁是可行的。

5. 本文对钢纤维砼扁梁所进行的非线性有限元分析, 计算结果与试验结果良好吻合, 说明可行, 有效, 但有待进一步研究。

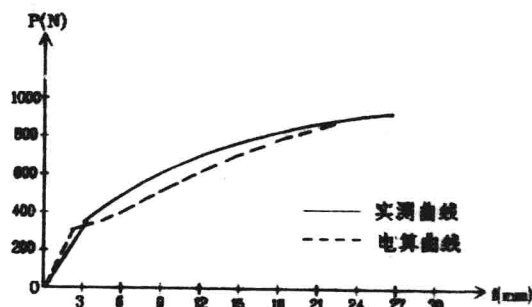
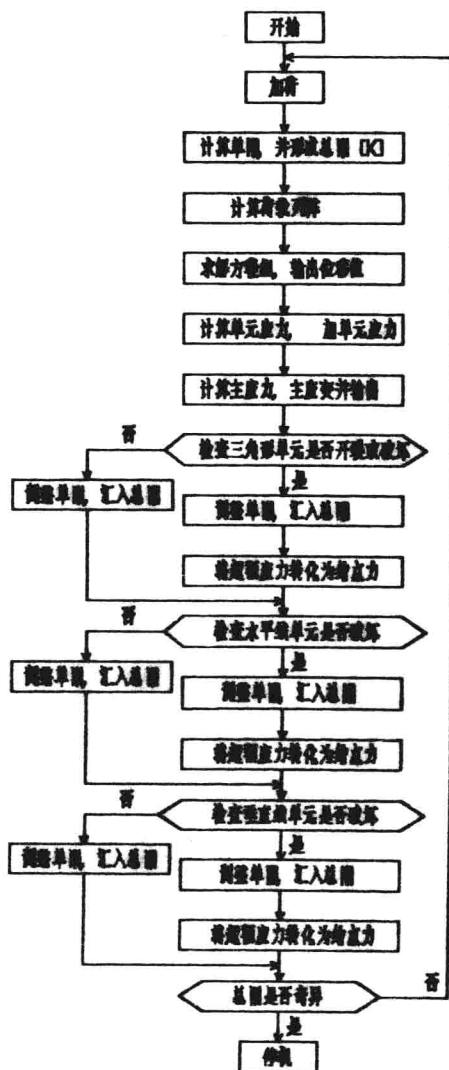


Fig. 7 梁 LA4 荷载—跨中挠度曲线

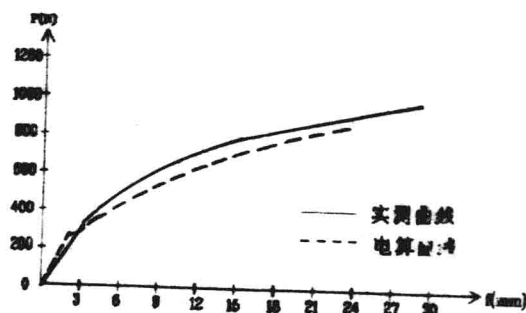


Fig. 8 梁 LA5 荷载—跨中挠度曲线

参 考 文 献

- (1) 朱伯龙、董振祥, 钢筋砼非线性分析, 同济大学出版社, 1985. 1.
- (2) 高丹盈, 钢纤维砼及其配筋构件力学性能的实验研究, 大连理工大学博士论文, 1989. 5.
- (3) 程铁生等, 钢纤维混凝土抗拉性能的研究, 钢纤维砼结构设计与施工规程专题研究报告. 1990. 11. 大连

基于碳化机理的砼碳化深度实用数学模型^①

张 誉 蒋利学

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘要 本文基于砼碳化机理, 建立了水灰比、水泥用量等砼碳化主要影响因素与理论模型中有效扩散系数 D_e 及单位体积砼的 CO_2 吸收量 m_0 之间的定量关系, 推导得出一个有充分理论基础的砼碳化深度实用数学模型。经用试验结果验证表明, 本建立的数学模型合理、准确、实用。

关键词 碳化机理, 砼碳化深度, 数学模型

一、引言

在一般大气环境暴露条件下, 砼碳化是导致钢筋脱钝锈蚀的重要前提, 因此, 建立一个合理准确的砼碳化深度数学模型, 是研究钢筋锈蚀程度、预测结构使用寿命的关键。

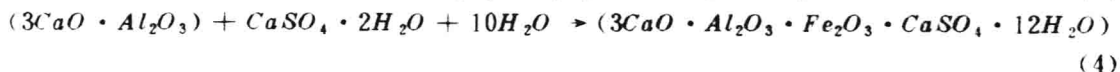
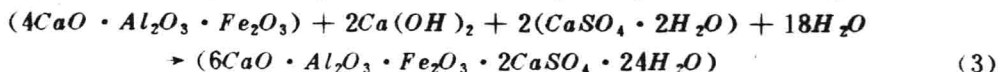
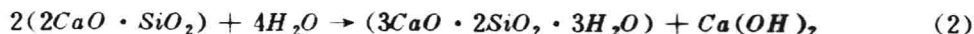
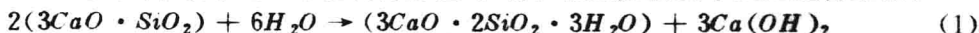
从 60 年代起, 国内外提出了很多种砼碳化数学模型^[1]。这些模型存在的主要问题是: 理论模型不够实用, 实验模型缺乏足够的理论依据。因此, 这两类模型均不够理想。

本文试图从一个新的角度出发, 通过寻找各种影响碳化的因素与理论模型中的中间参数之间的定量关系来建立新的模型。这样的模型, 既有充分的理论依据, 又便于应用。文中利用一些学者的实验数据对本模型进行了验证, 符合程度比较理想, 文中并就模型的适用范围进行了讨论。

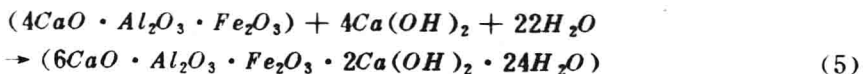
二、砼的水化与碳化

(一) 砼的水化过程

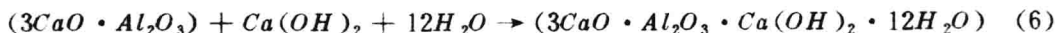
普通波特兰水泥砼中水泥熟料的主要矿物成分有硅酸三钙($3CaO \cdot SiO_2$, 简称为 C_3S)、硅酸二钙($2CaO \cdot SiO_2$, 简称为 C_2S)、铁铝酸四钙($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, 简称为 C_4AF) 和铝酸三钙($3CaO \cdot Al_2O_3$, 简称为 C_3A)。在石膏存在时, 各矿物成分按如下反应进行水化:



当石膏消耗完后, C_4AF 与 C_3A 按如下反应进行水化:



① 国家攀登计划(B)资助课题



(二) 砵的碳化过程

砵水化过程中产生的可碳化物质有氢氧化钙($Ca(OH)_2$, 简称为 CH)、水化硅酸钙($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$, 简称为 CSH), 未水化的硅酸三钙和硅酸二钙也发生碳化。大气环境中的 CO_2 扩散进入砵后与上述四种物质分别按如下反应进行碳化:



三、砵碳化的理论模型

(一) 基本假定

1、 CO_2 在砵孔隙中的扩散遵守 Fick 第一扩散定律

$$N_{CO_2} = D_e^* \frac{d[CO_2]}{dx} \quad (11)$$

式中, N_{CO_2} 是 CO_2 的扩散速度 ($mol/m^2 \cdot s$); D_e^* 是 CO_2 在已碳化砵孔隙中的有效扩散系数 (m^2/s); $[CO_2]$ 是 CO_2 的摩尔浓度 (mol/m^3); x 是砵的深度 (m)。

2、 CO_2 从砵表面向砵内部扩散, 其浓度呈线性降低, 如图 1 所示。

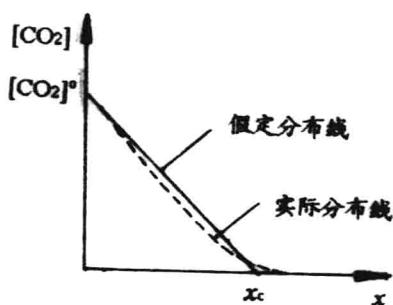


图1 CO_2 浓度分布假定

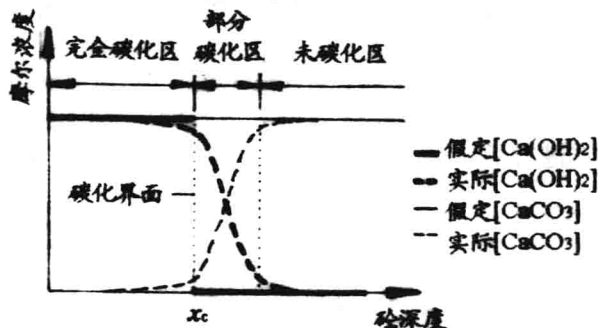


图2 碳化界面的划分

3、忽略部分碳化区内砵的碳化影响, 即假定存在一个碳化界面, 界面两侧物质的摩尔浓度为常量, 如图 2 所示。

(二) 理论模型的推导

根据以上假定, 在 dt 时间内由孔隙扩散进入砵内部的 CO_2 , 会被 dx 长度范围内砵中的可碳化物质所吸收, 则

$$m_0 \cdot dx_c = N_{CO_2} dt \quad (12)$$

经简单推导可得到砵碳化深度的理论公式为

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_e^*[CO_2]^0}{m_0}t} \quad (13)$$

式中, x_c 为完全碳化的深度; t 为碳化的时间 (s)。