

钢纤维增强混凝土悬臂梁 的试验研究^①

张宝善 孙增寿 厉勉^②

(土建系)

提 要: 本文根据 12 根不同掺量钢纤维增强悬臂梁及 3 根普通混凝土梁的试验结果, 初步分析了钢纤维增强后梁的受力特征及破坏过程。研究了钢纤维增强混凝土的开裂应变, 极限应变及裂缝的分布规律, 提出了钢纤维增强悬臂梁刚度及强度的计算方法。

关键词: 金属纤维, 悬臂梁, 强度, 研究

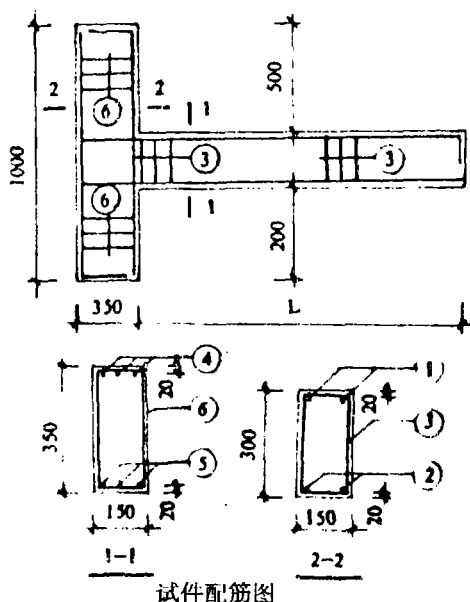
钢纤维增强混凝土是一种新型建筑材料, 国外六十年代已开始研究和应用, 我国七十年代也开始了这项工作。但是, 这些研究多限于钢纤维增强混凝土的材性方面, 应用也多在道路路面、机场跑道及建筑物加固等方面。至于房屋建筑工程中应用钢纤维增强混凝土的研究尚少, 其设计理论的研究更没有广泛开展。为了促进和推广钢纤维混凝土在房屋建筑工程中的应用, 建立较为可靠的计算理论和方法, 我们进行了钢纤维混凝土悬臂梁的试验研究。

1 试验概况简介

1.1 试件制作

本次试验研究共进行了 12 根钢纤维混凝土悬臂梁, 和 3 根普通混凝土悬臂梁的试验。

试验梁截面设计尺寸为 $150 \times 300 \text{mm}^2$, 悬臂梁长度分别为 1500、2100、2400、2700mm 四种情况, 相应跨高比为 5、7、8、9。试验中考虑的参变量有钢纤维掺量、混凝土强度、配筋率及跨高比四个因素。钢纤维采用“钢水甩出法”生产的钢纤维, 形状为扁平形, 规格为 $42 \times 0.187 \times 0.05 \text{mm}$ 折算细长比约为 65。全部试件在预制厂制作, 每批试件



①收到日期: 1988.10.28

②参加本项研究的还有郑州工学院霍达、佳木斯建筑设计院王志忠同志。

均取一组立方体试块和一组棱柱体试块,以确定素混凝土和钢纤维混凝土的强度。试件配筋及主要参数见图1和表1及表2。

表1 配筋情况

类型号	试件数量	①	②	③	④	⑤	⑥
L-1	5	2Φ22	2Φ12	Φ6@150	3Φ22	3Φ22	Φ8@150
L-2	5	2Φ18	2Φ12	Φ6@150	3Φ22	3Φ22	Φ8@150
L-3	5	2Φ24	2Φ12	Φ6@150	3Φ22	3Φ22	Φ8@150

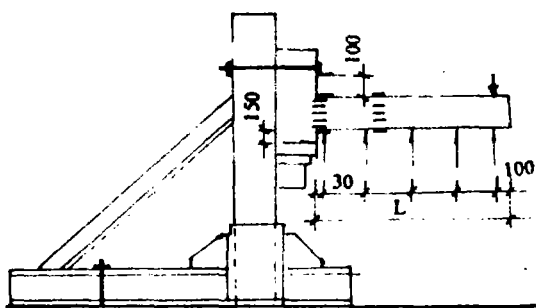


图2 试验装置图

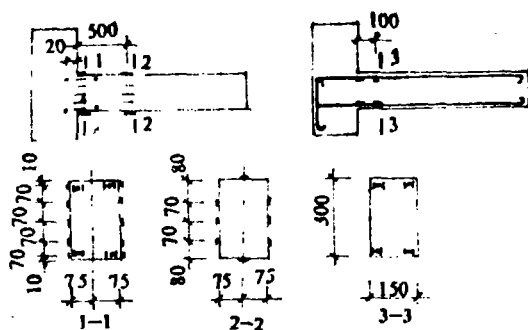


图3 应变片布置

1.2 试验方法

整个试验在试验台座上进行,利用夹具将悬臂梁固定于图2所示的固定支架上。并在距端部100mm处,利用加荷架、千斤顶及荷载传感器、X-Y函数仪记录荷载各级数值,并在梁下安装5块百分表以测定挠曲线的形状及各测点处的挠度值。并在悬臂梁立柱上下端安装百分表,以确定试验中由于装置本身引起的转角。量测钢筋和混凝土应变的应变片布置如图3所示。其中,1-1截面在悬臂梁根部,2-2截面距根部约500mm。为防止混凝土表面应变片的脱落失效,尚在相应位置布置有用于手持应变仪量测应变的脚标。

另外,试验中尚有专人进行裂缝的观察,以确定其发生、发展及分布情况,并对其宽度亦进行了观测和记录。

2 主要试验结果及分析

根据上述试验方法,我们对15根梁进行了试验,其主要试验结果如表2所示。

2.1 钢纤维混凝土梁的受力特征

12根钢纤维混凝土悬臂梁的试验全过程表明,梁的受力过程可以分为弹性阶段,塑性带裂缝工作阶段和破坏阶段。图4是试验梁的典型荷载—挠度曲线。可以看出,当荷载较小时,其曲线呈线性关系变化,梁根部最大弯矩截面处,受拉及受压应变也呈线性

变化, 随荷载之增加, 受拉边缘处应变首先呈非线性变化, 出现塑性变形, 最后产生裂缝, 此时, 钢纤维承受较大拉应力, 使微裂缝间仍存在拉应力。若继续增加荷载, 裂缝宽

表2 试件主要参数及试验结果

编号	截面尺寸 $b \times h$ (mm)	砼标号 R N/mm^2	钢纤维 掺量 $\mu\%$	配筋率 $\mu\%$	钢纤维 砼强度 N/mm^2	配筋 形式	悬臂 长度 (m)	开裂 荷载 (KN)	屈服 挠度 (mm)	极限 荷载 (KN)	极限 挠度 (mm)
CL-1-1	150×300	41.5	2	1.8	43.8	L-1	2.1	8.0	8.0	29.0	9.1
CL-1-2	151×310	30.4	2	1.26	32.4	L-2	1.5	10.0	5.6	26.5	8.1
CL-1-3	150×302	41.5	2	2.42	43.8	L-3	2.7	9.0	16.8	31.2	24.8
CL-2-1	151×310	37.3	1.5	1.8	37.8	L-1	1.5	14.0	7.2	40.1	8.2
CL-2-2	150×300	39.2	1.5	1.21	44.8	L-2	2.1	6.0	8.6	19.0	10.2
CL-2-3	152×310	35.1	1.5	2.15	37.5	L-3	2.4	8.5	11.4	35.0	21.2
CL-3-1	150×310	39.2	1.0	1.8	41.8	L-1	2.4	6.7	14.5	24.5	20.5
CL-3-2	149×305	28.3	1.0	1.26	28.8	L-2	1.5	7.0	7.6	26.5	9.05
CL-3-3	150×315	27.5	1.0	2.15	30.2	L-3	2.7	12.0	18.0	28.5	25.6
CL-4-1	149×300	28.4	0	1.8	/	L-1	2.1	8.0	8.6	26.0	15.2
CL-4-2	150×300	36.9	0	1.26	/	L-2	1.5	8.0	9.1	26.5	13.6
CL-4-3	151×302	37.4	0	2.15	/	L-3	2.4	8.6	11.1	28.2	17.6
CL-5-1	153×315	35.6	2	1.8	38.6	L-1	2.1	9.5	9.5	30.5	12.3
CL-5-2	152×310	41.0	1.5	1.26	43.9	L-2	1.5	10.0	9.0	30.0	11.9
CL-5-3	150×300	41.4	1	2.15	44.5	L-3	2.7	8.0	18.2	26.0	27.9

度加大, 向上发展, 部分钢纤维拔出或滑移而脱离工作, 使梁的挠度有较大增加, 曲线上出现第一个拐点 A, 所以, A 点以前梁的工作处于弹性阶段。此后随荷载之增加, 裂缝向上发展, 并产生新的裂缝, 受拉边应变继续增加。但是, 由于部分钢纤维的作用使裂缝间仍存在较大拉力。受压边混凝土的应变仍呈线性增加, 尚未出现塑性变形, 仅是应变增长速度加快, 于是, 荷载—挠度曲线上近似呈线性变化。如果, 荷载继续增加, 可见裂缝将加宽和向受压区发展, 受拉边的钢纤维逐步全部拔出, 拉区拉力中心向上移动, 压区压力中心亦向上移动, 受拉钢筋应力有较大增加, 使临界截面曲率有较大增加, 一旦受拉钢筋应力达到屈服强度, 裂缝宽度将迅速发展, 梁截面受压混凝土应变将有极大增加, 此时, 截面进入破坏阶段, 梁的荷载—挠度曲线上出现第二个拐点 B。在此之前, 由于拉区的塑性变形, 及压区混凝土的塑性性质, 使梁处于弹塑性工作阶段。

继续增加荷载, 梁工作进入破坏阶段。由于受拉钢筋进入屈服, 不能有效限制裂缝的发展, 裂缝将向受压区发展, 受压区高度减小, 受压钢纤维混凝土出现较明显的塑性变形, 沿受压边缘产生水平裂纹, 混凝土皱起, 受压钢筋早已屈服, 当受压边缘混凝土达到极限压应变时将皱折破坏, 此时梁达到极限抗压强度。但是由于钢纤维的存在, 它的破坏显示出约束混凝土的性质, 具有明显的塑性性质, 由最外层向内部逐层破坏, 有较长过程, 所以荷载—挠度曲线出现较明显的水平段, 其延性比较好, 承载力没有明显的降低, 如图 4 中 CD 段所示。

综上所述,可以看出钢纤维增强梁的受力过程和普通混凝土梁相类似。但是,由于钢纤维的作用,提高了梁的抗裂度,减小了梁的挠度,提高了梁的刚度,增强了混凝土的变形能力,增大了混凝土极限压应变数值,延性好。尽管开裂,但裂缝间存在钢纤维的拉力。从破坏形态看,仍以受压区混凝土达到极限压应变为破坏标志,以受拉区钢筋是否屈服而分为适筋梁和超筋梁,对少筋梁以开裂强度为界限。

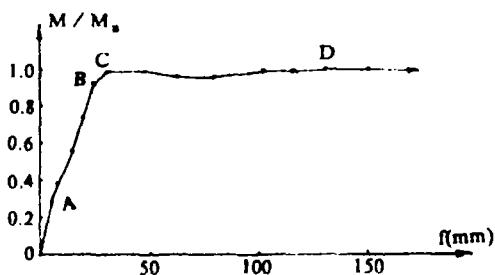


图4 试验梁典型的 $M/M_p \sim f_t$ 曲线

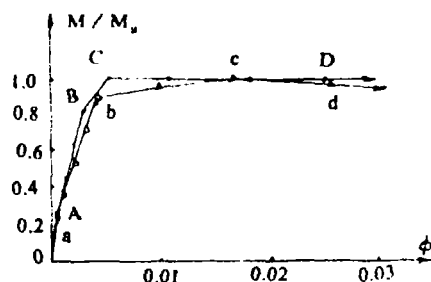


图5 试验梁典型的 $M/M_p \sim \Phi$ 曲线

2.2 钢纤维混凝土增强梁的 $M/M_p \sim \Phi$ 曲线

图5为试验梁的典型 $M/M_p \sim \Phi$ 曲线。各试验梁都具有类似特征。由图中可以看出,梁截面开裂前,梁处于弹性工作阶段,曲率 Φ 沿梁上为直线分布曲线,开裂时(A点)曲率为 Φ_p ,曲率大小主要取决于梁的开裂强度,配筋率和纤维含量。截面开裂后,由于拉区塑性变形,及裂缝的开展,曲率有较大增加,直到受拉钢筋屈服(图中B点)。当受拉钢筋屈服后,截面上裂缝较大,压区混凝土塑性变形集中发展,导致曲率 Φ 有突变,最后临界截面形成塑性铰,随着荷载增加而发生转动,所以 M 保持不变,曲率 Φ 一直增大,曲线出现水平段。这再一次证明了钢纤维极大地改变了混凝土的性质,使其具有较强的变形能力和良好的塑性。

2.3 截面应变规律

图6为试验梁破坏截面,破坏前各级荷载下测得的截面平均应变情况。从截面的变形曲线可以看出,受荷前的平面变形后仍保持为平面。但是,在受拉钢筋屈服后,受压区混凝土临近破坏时,由于变形集中,不易测得准确应变值,所以图中未绘出这一部分曲线。根据 $M/M_p \sim f$ 曲线与 $M/M_p \sim \Phi$ 曲线的比较,我们可以认为,平截面变形假定是适用的。

2.4 钢筋应变曲线

图7为试验中实测的各级荷载作用下钢筋应变 ϵ_s 的典型曲线。可以看出,截面开裂前,钢筋应变 ϵ_s 增量呈线性变化,截面开裂后,虽有增加,但较普通混凝土梁为小,突变不很明显,

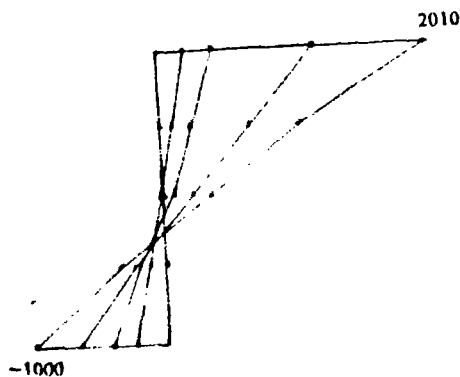


图6 临界截面应变图

仅当钢筋进入屈服后, 其应变才有明显的增加。这是由于截面开裂时, 虽然混凝土退出工作, 但由于钢纤维的作用, 仍承担部分拉力, 才减小了钢筋应变的增量。而且, 这种影响随钢纤维掺量的增大, 愈来愈不明显。可由图 8 所绘各种钢纤维掺量试验梁的实测曲线比较中看出。于是, 在计算钢纤维增强梁的开裂强度时, 绝对不能忽视钢纤维的影响。

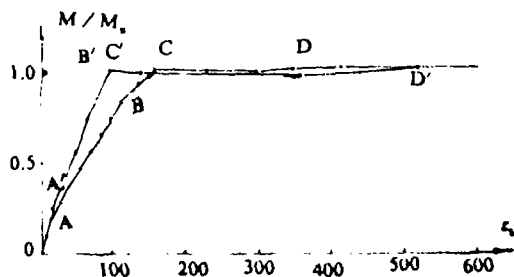


图 7 试验梁 $M/M_p \sim \epsilon_s$ 曲线

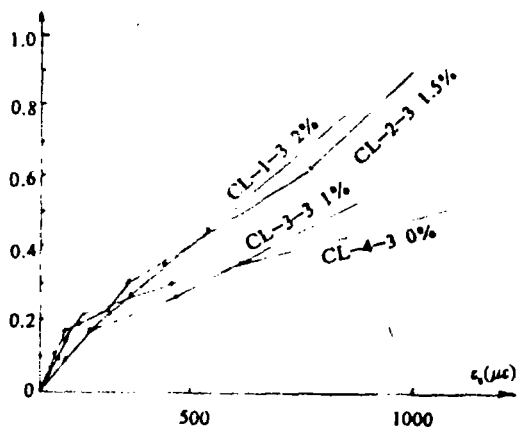


图 8 不同钢纤维掺量时 $M/M_p \sim \epsilon_s$ 曲线

2. 5 钢纤维对混凝土变形能力的影响

试验中实测各根梁开裂时的极限拉应变值绘于图 9 中。可以看出, 随钢纤维掺量之增加, 混凝土开裂时极限拉应变亦增大, 所以梁的开裂强度亦有增加。根据我们实测极限应变的数值, 经统计分析简化后可得到下列经验公式:

$$\epsilon_{cl} = (1 + 50u) \frac{R}{\nu E_h} \quad (1)$$

式中: u — 钢纤维掺量百分比;

R — 混凝土标号;

E_h — 混凝土弹性模量;

ν — 混凝土受拉时塑性特征系数, 取等于 0.5。

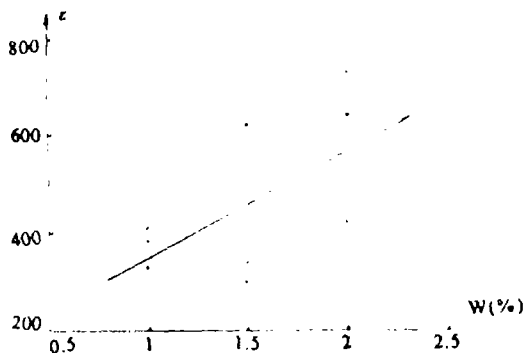


图 9 钢纤维掺量 u 与极限拉应变 ϵ_{cl} 关系

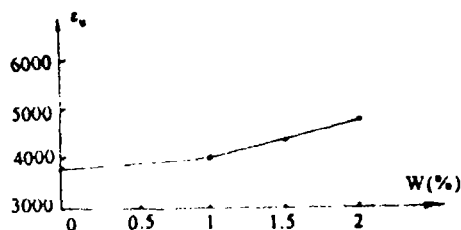


图 10 钢纤维掺量 u 与极限压应变 ϵ_u 关系

钢纤维增强混凝土的极限压应变亦有较大提高, 图 10 即为实测试验梁各纤维掺量时, 量得的极限压应变平均值与纤维掺量 u 的关系曲线。可以看出, 极限压应变 ε_u 亦随纤维掺量 u 的增大而增加。根据实测值经统计分析, 可得经验公式为:

$$\varepsilon_u = (1 + 37u) \times 0.0033 \quad (2)$$

3.6 裂缝开展情况及刚度

图 11 为实测试验梁破坏前裂缝开展及分布情况图。可以看到, 在钢纤维增强梁中, 由于钢纤维的有效作用, 不仅提高了梁的开裂强度, 而且, 裂缝发展比较缓慢, 分布比较密集, 距离小, 宽度亦小。特别是在钢筋屈服前, 使用阶段, 梁中裂缝都较小, 梁的裂缝中钢纤维仍能承担拉力, 限制了裂缝的发展。

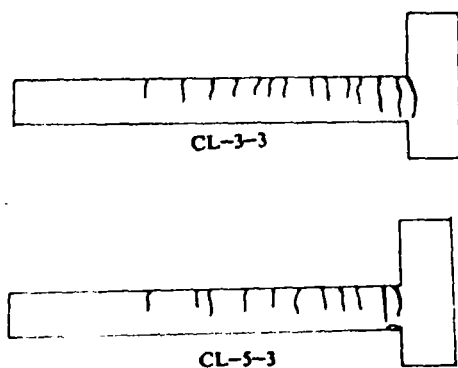


图 11 钢纤维掺量 u 与极限压应变 ε_u 关系

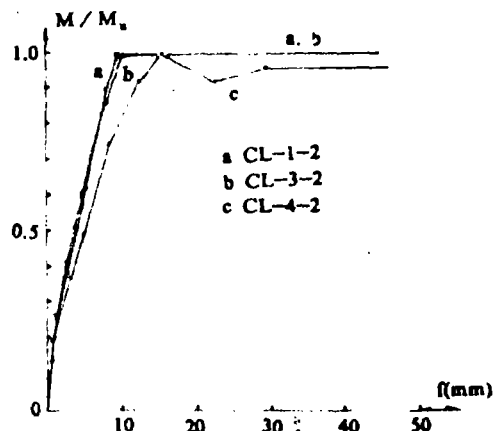


图 12 不同钢纤维掺下 $M/M_u \sim f$ 曲线

由图 12 中, 不同情况下梁的荷载—挠度曲线可以看出, 当钢纤维掺量 u 增大时, 梁的挠度相应的减小, 说明梁的刚度有所提高。比较不同跨高比的情况下实测值, 可以认为, 在跨高比不大于 7 时, 钢纤维的作用比较明显。

2.7 纤维混凝土的强度

表 1 中列出了纤维混凝土和未掺纤维时混凝土的强度值。比较表 1 中所列试验结果, 可以看出, 钢纤维掺入后, 提高了混凝土的强度, 其程度随纤维掺入量的多少而变化。因此, 在讨论和分析梁的强度时应考虑这一因素。由我们试验结果, 混凝土强度提高约为 10% 左右。

3 强度与刚度计算方法

3.1 正截面强度计算

3.1.1 基本假定

为了进行钢纤维增强混凝土梁正截面强度计算, 并考虑到钢纤维的作用, 我们做出如下假定:

①受压区混凝土的应力图形由钢纤维混凝土应力—应变曲线所决定, 并且假定是该

曲线已知, 其一般形式为 $\sigma_c = \sigma(\varepsilon)$, 其极限压应变值为 $\varepsilon_c = (1+37u) \times 0.0033$, 峰值应变 $\varepsilon_c = 0.002$.

②受拉区混凝土的拉应力为 σ_{cl} 受拉区应力图形为矩形, 其高度为 x_c , 与受压区高度相等。

③受拉钢筋的应力—应变曲线为完全弹塑性曲线。

3. 1. 2 计算公式

根据上述假定, 我们可以求出受压区混凝土的合力 F_c 为:

$$F_c = \int_0^x b\sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (3)$$

受拉混凝土的合力为:

$$F_{cl} = \sigma_{cl} bx \quad (4)$$

根据截面静力平衡, 可以得到:

$$F_c - \sigma_{cl} bx = R_s A_s - R'_s A'_s \quad (5)$$

$$KM \leq M_p = F_c(h_0 - \frac{1}{2}x) + R'_s A'_s(h_0 - a') - \sigma_{cl} bx(h_0 - 1.5x) \quad (6)$$

$$KM \leq M_p = R_s A_s(h_0 - \frac{1}{2}x) + R'_s A'_s(0.5x - a') + \sigma_{cl} bx^2 \quad (7)$$

适用条件: $x > 2a'$

上述计算公式, 可以用来进行全过程受力分析, 亦可以进行极限强度计算。

3. 2 刚度计算

根据试验结果的初步分析表明, 钢纤维增强混凝土梁的刚度有所提高, 与普通混凝土梁的不同, 主要表现在钢纤维的效用。它体现在提高了梁的开裂强度, 改变梁处于使用阶段时受压混凝土的性质。因此, 分析普通钢筋混凝土梁的刚度计算公式, 提出如下修正意见。

3. 2. 1 关于 η 的取值问题:

假定受压区混凝土的应力图形为三角形, 则合力中心距最外边缘为 $\frac{1}{3}x$ 。若按抛物线形考虑, 该数值为 $\frac{3}{8}x$, 二者之差约为 $\frac{1}{24}x$, 若取其平均值, 则得内力臂 η 值约为:

$$\eta = 0.90 \quad (8)$$

3. 2. 2 ψ 取值问题

由于钢纤维的存在, 梁的开裂强度 M_f 有所提高, 因而 ψ 减小, 提高了梁的刚度。根据前面分析, 梁开裂强度与钢纤维掺量有关, 于是我们提出如下计算公式:

$$\psi = 1.2[1 - \frac{(1+50u)M_f}{M}] \quad (9)$$

3. 2. 3 刚度计算公式

根据普通混凝土梁刚度计算公式, 代入上述 ψ 、 η 取值后, 可得钢纤维梁刚度计算公式如下:

$$B_d = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.1\psi + \frac{0.2 + 6n\mu}{1 + 2r'}} \quad (10)$$

式中:

ψ —— 按(9)式计算, 其余按普通钢筋混凝土梁采用。

按本式计算试验梁, 其刚度提高约在 5~10%, 与试验结果吻合较好, 可供参考。

4 结 论

根据本批钢纤维悬臂梁之试验, 我们可以得到如下几点认识:

4. 1 钢纤维增强混凝土可以提高混凝土的变形能力, 提高开裂强度、极限强度和刚度、延性。
4. 2 钢纤维掺入混凝土中可减小梁在使用阶段的裂缝宽度。减小裂缝间距。
4. 3 钢纤维掺入混凝土中, 可以改变混凝土的破坏性质, 使其破坏时显示足够的塑性。

参 考 文 献

- 【1】 滕智明. 钢筋混凝土基本构件. 清华大学出版社.
- 【2】 D.J.汉南特. 纤维水泥与纤维混凝土. 陆建业译.
- 【3】 樊承谋. 钢纤维混凝土应用技术.

Experiment Study of Steel Fiber Reinforced Concrete Cantilever Beams

Zhang Baoshan Sun Zhengshou Li Mian

Abstract: According to the experiment results of 12 Reinforced Concrete Cantilever Beams with different amount of Steel fiber and 3 Reinforced Concrete Cantilever Beams without Steel fiber. This paper analysis the characteristics and rupture process of these beams under loading. It also studies the cracking strain, regularity of limited strain and distribution of cracking, At last the caculation methods of rigid and strength are given.

Keywords: metal fiber, cantilever beam, strength, rcsearches