

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0055-04

钢筋聚丙烯纤维混凝土深梁受弯承载力试验研究

付 敏, 夏冬桃, 颜 帅, 朱 峰

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为研究聚丙烯纤维对高性能混凝土深梁受弯性能的影响,采用三分点加载方式对不同聚丙烯纤维掺量(掺量分别为 0、0.055%、0.11%、0.165%)的混凝土深梁的受弯性能进行对比试验研究,分析聚丙烯纤维对深梁工作性能和破坏形态、混凝土应变、深梁挠度及纵筋应变的影响。研究表明:聚丙烯纤维体积掺量为 0.11%时可使试件裂后变形能力得到很大改善,其混凝土弯拉应变超过 2000 $\mu\epsilon$,屈服荷载提高 30%~50%,受弯过程具备明显的纤维强化阶段,聚丙烯纤维的强化作用在纵筋屈服后充分发挥,极限受弯承载力提高 58%。当聚丙烯纤维掺量为 0.055%或 0.165%时,对高性能混凝土深梁的受弯性能影响不明显。本文提出了钢筋聚丙烯纤维混凝土深梁的正截面受弯承载力计算公式,计算值与试验值吻合较好。

[关键词] 聚丙烯纤维;深梁;抗裂;受弯承载力

[中图分类号] TU312 [文献标识码] A

合成纤维作为一种加筋材料,可用于提高混凝土的抗疲劳、抗冲击以及延性等性能,能有效阻止裂缝扩展,改善混凝土的变形性能,混凝土裂缝扩展时,需消耗能量来克服纤维对裂缝的阻裂作用^[1-7]。在高层建筑结构的发展中,具备承载力高、自重小、抗裂性能好的转换梁必不可少,在混凝土中掺加合成纤维可提高转换梁的使用性能^[8-9],如重庆金厦苑大厦的转换层结构混凝土中掺加聚丙烯纤维,使高强混凝土的抗裂性及延性得到提高,克服了高强混凝土的脆性^[10];《纤维混凝土结构技术规程》(CECS38:2004)^[11]中,补充了关于合成纤维混凝土设计和施工的内容,而聚丙烯纤维混凝土构件的有关设计内容尚未有相关规定。由于聚丙烯纤维的弹性模量较低,但其断裂伸长率远大于混凝土的断裂伸长率,聚丙烯纤维可有效提高混凝土裂后承载能力^[12-14]。研究聚丙烯纤维对深受弯构件工作性能和破坏形态的影响,发展相关计算理论和公式,为进一步完善行业规范提供参考依据,且具有极大的理论意义和工程应用价值。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验梁的强度设计等级为 C45,水胶比为 0.3,砂率 40%,粉煤灰掺量 20%;选用的材料包括:42.5

级普通硅酸盐水泥,Ⅰ级粉煤灰,细骨料细度模数为 2.68,粒径为 10~15 mm 的粗骨料,减水率为 12%的 FDN 减水剂,钢筋等级均为 HPB335 级,聚丙烯纤维的基本性能见表 1。

表 1 聚丙烯纤维的基本性能

纤维类型	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	规格/ mm	抗拉强度/ MPa	拉伸极限/ %	弹性模量/ MPa
束状单丝	0.91	19	276	15	3793

本试验共设计三种不同聚丙烯纤维掺量的 HPC 深梁,聚丙烯纤维的掺量分别为 0.165%、0.11%、0.055%(深梁依次编号为 DBP-1、DBP-2、DBP-3)和不掺纤维对照组深梁(深梁编号 DBC-1)。所有深梁截面尺寸均为 600 mm×180 mm,跨度 1200 mm,支座中心离深梁外边缘 120 mm。依据文献^[15]的配筋要求,在梁底受拉区配置纵向受力钢筋 $\Phi 3@12$,纵筋配筋率 ρ 为 0.327%,小于弯剪界限破坏配筋率 $\rho_{bm} = 0.775\%$;仅在纯剪区配置水平和竖向分布筋 $\Phi 10@100$,以保证深梁具有足够的抗剪能力。

1.2 试验加载与测量

试件两端简支于支座上,试件加载装置见图 1。试验加载方式为三分点对称集中力加载,采用分级加载的方式进行,先以每级 20 kN 荷载,达到 90% F_{cr} 后,取每级 5 kN 荷载;跨中截面混凝土开裂后,

[收稿日期] 2019—07—09

[基金项目] 国家自然科学基金(51108164)

[第一作者] 付 敏(1995—),女,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为纤维混凝土理论及应用

[通信作者] 夏冬桃(1975—),女,湖北蕲春人,湖北工业大学教授,研究方向为纤维混凝土理论及应用

再取每级 20 kN 荷载,直至试件破坏。

测量内容包括:1)纯弯段混凝土截面应变,沿梁高共布置七个应变片;2)纵向钢筋应变,纯弯段纵筋预埋三个应变片;3)挠度,在深梁支座及跨中放置位移计进行量测;4)各级荷载下的裂缝高度。试件测点布置见图 2。

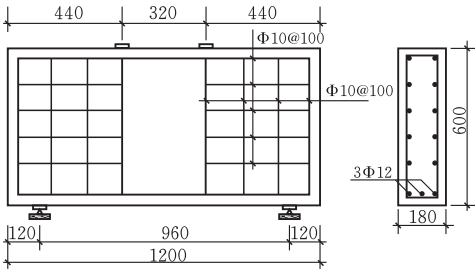


图 1 深梁配筋构造及加载



图 2 深梁跨中截面的应变片布置

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

试验测得的聚丙烯纤维混凝土深梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载见表 2。

表 2 试件特征荷载

深梁	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
DBC-1	120	200	240
DBP-1	140	180	260
DBP-2	138	320	380
DBP-3	120	200	260

聚丙烯纤维掺量为 0.055% 和 0.165% 时,对深梁的极限荷载均仅提高约 8.3%;而 0.11% 的聚丙烯纤维掺量对极限荷载提高 58%。分析认为:聚丙烯纤维掺量为 0.055% 时,由于掺量太低,聚丙烯纤维对深梁的增强作用不明显;掺量为 0.165% 时,聚丙烯纤维又无法均匀分布在高性能混凝土中,影响了聚丙烯纤维的增强作用的发挥;聚丙烯纤维体积掺量为 0.11% 时,聚丙烯纤维均匀分布在混凝土中,对混凝土的增强作用发挥到最佳效果,使深梁的极限荷载得到最大限度地提高。

2.2 试验结果讨论与分析

聚丙烯纤维混凝土深梁的整个受力过程,根据截面应力和荷载-挠度曲线可分为四个阶段:弹性受力阶段、带裂缝工作阶段、聚丙烯纤维增强阶段和

破坏阶段,试件荷载-挠度曲线见图 3。

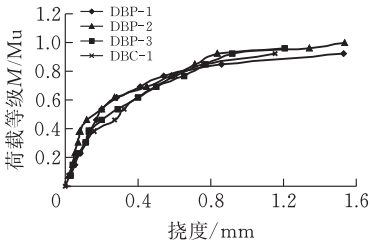


图 3 荷载-挠度曲线

试件各阶段的受力变形分析:

1)第Ⅰ受力阶段:弹性受力阶段

当聚丙烯纤维掺量为 0.055% 时,截面中部的受拉区和受压区混凝土的应变近似于直线分布,中和轴位于深梁中心轴线上,深梁顶部和底部一定范围的混凝土均为受拉状态;当聚丙烯纤维掺量为 0.11% 时,截面中部的受拉区和受压区混凝土的应力分布也近似于直线分布,但中和轴上升至深梁截面中心轴线以上约 1/6 h 高度处,随着荷载增加,深梁中心轴线以下受拉区混凝土的拉应变增加不明显;当聚丙烯纤维掺量为 0.165% 时,截面混凝土应变分布非常复杂,出现多个中和轴现象,不符合平截面假定。第Ⅰ阶段,荷载-挠度曲线呈直线,受拉钢筋的应变与其周围同一水平处混凝土的应变相等,应力 σ_s 为 20~50 N/mm²,且与聚丙烯纤维体积掺量基本成反比,该值略高于普通深梁在Ⅰ阶段末时的 σ_s (20~30 N/mm²)。

2)第Ⅱ受力阶段:带裂缝工作阶段

当达到初裂荷载时,将在跨中截面或弯剪交界截面出现首条竖向微裂缝,荷载-挠度曲线出现首个拐点,标志着进入带裂缝工作的第Ⅱ阶段。开裂后,由于聚丙烯纤维混凝土与钢筋之间的黏结作用以及裂缝间纤维的桥接效应,使得裂缝的发展变得缓慢。同级荷载下的最大裂缝宽度随聚丙烯纤维体积掺量的增强而减小,进而表现出纤维混凝土深梁整体刚度比普通深梁明显提高。直到荷载增加至弯剪交界处截面或支座截面斜裂缝的出现,纵向受力钢筋达到屈服强度,深梁的屈服荷载比普通深梁的屈服荷载提高 30%~50%。第Ⅱ阶段,聚丙烯纤维混凝土的拉应变增加速率较快,跨中截面混凝土应变不符合平截面假定。如图 4 所示深梁中心线以上混凝土最大拉应变可达到 2200 $\mu\epsilon$,深梁中心线以下混凝土最大拉应变则达到 8500 $\mu\epsilon$,最大拉应变发生在 DBP-3 深梁的中心线以下 1/3 h 处。

3)第Ⅲ受力阶段:聚丙烯纤维强化阶段

当纵向受拉钢筋达到屈服强度时,荷载-挠度曲线出现第二个拐点,受压区混凝土应变较小,荷载持续增加,深梁进入第Ⅲ阶段。继续增加荷载,聚丙烯

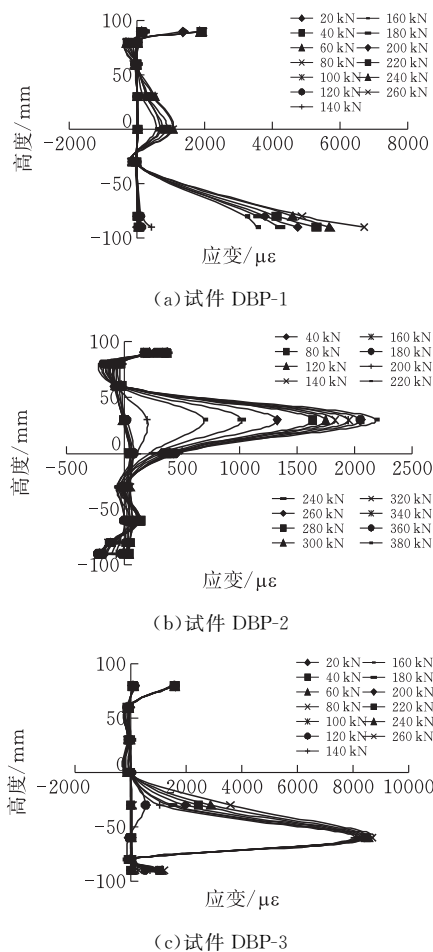


图 4 深梁跨中截面的混凝土应变

烯纤维的强化作用发挥,弯剪交界截面处的斜裂缝扩展。当裂缝高度与挠度急剧增加,深梁达到聚丙烯纤维强化的极限状态,该状态称为第Ⅲa阶段,该阶段可作为聚丙烯纤维混凝土深梁正截面承载能力的计算依据。

4)第Ⅳ受力阶段:破坏阶段

当加载到弯剪交界截面或支座截面斜裂缝迅速延伸扩展至深梁顶部集中荷载作用点附近成为主要裂缝时,从裂缝处可见聚丙烯纤维被拉断,深梁的跨中挠度快速率增长,深梁发生弯曲破坏,掺纤维试件极限荷载时的挠度小于普通深梁。试件破坏形态见图 5。



图 5 试件 DBP-3 弯曲破坏裂缝图

2.3 纵筋荷载-应变曲线

各试件纵筋荷载-应变曲线见图 6。由图 6 可见,从加荷至出现裂缝前,纵筋应变较小,荷载主要由混凝土承担,荷载-应变曲线呈线性关系。试件

DBP-1 与 DBP-3 开裂前纵筋瞬时应变约为 $250\ \mu\epsilon$,跨中出现垂直裂缝后,由于开裂截面处混凝土将开裂前承担的拉力传给钢筋,纵筋应变快速增长至纵筋屈服,达到承载能力极限状态时纵筋应变约为 $2200\ \mu\epsilon$ 左右。试件 DBP-2 开裂前纵筋瞬时应变约为 $200\ \mu\epsilon$,初裂后纵筋应变随着荷载的增加缓慢增长,深梁的受弯承载力持续增加,表明试件开裂后聚丙烯纤维承担的拉力逐渐增加,当支座处出现斜裂缝迅速延伸至 $3/4\ h$ 高,纵筋屈服后应变增加缓慢,至深梁达到承载能力极限状态时,纵筋应变不超过 $2000\ \mu\epsilon$ 。且在Ⅲa 阶段时的纵筋应变较其屈服应变增加 20% 。

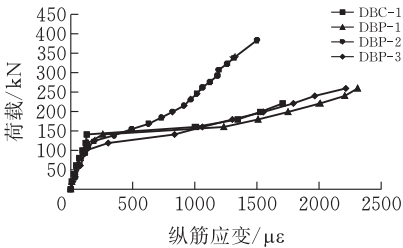


图 6 纵筋荷载-应变曲线

3 正截面受弯承载力计算方法探讨

3.1 正截面受弯承载力计算分析

深梁属于弹性力学中的平面问题,根据一般混凝土受弯构件的受弯承载力计算原理来计算钢筋混凝土深梁的受弯承载力比较困难。对于深梁的受弯承载力计算,可行的办法是根据实测结果来统计分析深梁内力臂修正系数。因此根据深梁与普通受弯构件的正截面受力性能不同的特点,考虑相对受压区高度 ξ 和跨高比 l_0/h 两因素,规范中给出了包括深梁和短梁在内与一般混凝土受弯构件相衔接的深受弯构件正截面受弯承载力计算公式。而计算聚丙烯纤维混凝土深梁的正截面受弯承载力应按照规范中普通混凝土深梁的正截面受弯承载力公式计算后再考虑纤维的增强作用。

3.2 正截面受弯承载力计算的理论与假定

《纤维混凝土结构技术规程》(CECS38—2004)^[11]中未对钢筋聚丙烯纤维混凝土结构的基本设计原则作有关规定,导致目前多数研究认定钢筋聚丙烯纤维混凝土结构其基本设计原则与普通混凝土结构大体相同。与高弹模纤维混凝土相比,低弹模纤维混凝土受弯开裂后,不但后抗弯能力有提高,且一定纤维含量的纤维混凝土抗弯承载力在开裂后近似为定值,同时剩余弯曲开裂强度可用于低弹性模量纤维增强混凝土构件的抗弯承载力的计算^[16]。假设试件的抗弯承载力由两部分线性叠加:一部分是不考虑纤维存在钢筋混凝土所承担的抗弯承载力

$M_{rc}^{[15]}$;另一部分是不考虑钢筋存在由聚丙烯纤维混凝土承担的剩余弯矩 M_p 。

故低弹模纤维混凝土深梁的正截面抗弯承载力计算公式为:

$$M_u = M_{rc} + M_p$$

式中: M_p 为不考虑钢筋存在由聚丙烯纤维混凝土承担的剩余弯矩,内力臂系数取 1, $M_p = \sigma_p b h^2 / 6$, 其中: σ_p 为剩余弯曲强度,该值根据参考文献[17]可得出,其大小与聚丙烯纤维掺量有关。

文中提出的公式计算深梁的受弯承载力 M_u 与试验测得受弯承载力 M_{u0} 进行比较,结果见表 3。从表 3 中可看出,受弯承载力计算值与试验结果较吻合。其中,试验值与计算值之比的平均值为 1.358,变异系数为 0.267。考虑到实测的深梁极限荷载是屈服荷载的 120%~150%,按公式计算聚丙烯纤维高性能混凝土深梁的受弯承载力较为合理。

表 3 试件抗弯承载力计算值与试验值对比 kN·m

深梁编号	M_{u0}	M_{rc}	M_p	M_u	M_{u0}/M_u
DBC-1	65	47.08	0	0	—
DBP-1	57.6	47.08	11.02	58.10	0.991
DBP-2	102.4	47.08	7.99	55.07	1.852
DBP-3	64	47.08	4.86	51.94	1.232

4 结论

1)聚丙烯纤维可以作为结构材料用于提高混凝土深梁的抗弯性能,聚丙烯纤维掺量 0.11%能明显提高混凝土裂后的承载能力,并使其裂后变形能力得到很大改善,聚丙烯纤维混凝土的最大拉应变可达 8500 $\mu\epsilon$,并使深梁屈服荷载提高 30%~50%。

2)0.11%聚丙烯纤维掺量的深梁受弯过程具有明显的纤维强化阶段,聚丙烯纤维的强化作用在纵向钢筋屈服后充分发挥,聚丙烯纤维混凝土深梁的极限受弯承载力提高 58%。

3)可采用剩余弯曲强度理论来探讨聚丙烯纤维混凝土对深梁抗弯性能的增强作用,认为钢筋聚丙烯纤维混凝土的抗弯承载力由两部分线性叠加:一部分是不考虑纤维存在钢筋混凝土所承担的抗弯承载力 M_{rc} ;另一部分是不考虑钢筋存在由聚丙烯纤维混凝土承担的剩余弯矩 M_p 。

4)当聚丙烯纤维掺量为 0.055%时,纤维发挥作用不明显;聚丙烯纤维掺量为 0.165%时,在混凝土基体中易结团,对高性能混凝土深梁的受弯性能影响不明显。

韧性试验[J].建筑科学与工程学报,2013,30(1):19-24.

[2] Mitsui K, Kojima M, Yonezawa T,etal. Development of 150—200 N/mm² high strength concrete with hybrid fiber and application to a building strucrcture[J]. J-STAGE Journals, 2010, 16(32): 21-26.

[3] 梁宁慧,钟杨,刘新荣.多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗弯韧性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2783-2789.

[4] Caggiano A, Gambarelli S, Martinelli E,etal. Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 1035-1043.

[5] Eethar T D, Ramli M. High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres[J].Construction and Building Materials, 2011,25(5): 2240-2247.

[6] 梁宁慧.多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能试验和拉压损伤本构模型研究[D].重庆:重庆大学,2014.

[7] 邓明科,孙宏哲,梁兴文,等.延性纤维混凝土抗压与抗弯性能试验研究[J].工业建筑,2014(10): 107-112, 116.

[8] 刘胜兵,徐礼华.混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能[J].土木工程学报,2013,46(3):29-39.

[9] 夏冬桃,徐世烺,夏广政.钢/聚丙烯混杂纤维对 HPC 深梁受弯性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(2):313-316.

[10] 陆守稳,王新文.杜拉纤维在高转换层结构 C50 高强混凝土中的应用[J].建筑经济, 2001(5):47-48.

[11] 中国工程建设标准化协会标准. 纤维混凝土结构技术规程(CECS 38: 2004)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

[12] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力—应变关系研究[J].土木工程学报, 2014,47(7):35-45.

[13] Liang N,Dai J,Liu X. Study on tensile damage constitutive model for multi-scale polypropylene fiber concrete[J].Advances in Materials Science and Engineering,2016(7):1-6.

[14] 梁宁慧,钟杨,刘新荣.多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗弯韧性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2783-2789.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范(GB50010—2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.

[16] 黄承逵,戴建国.聚丙烯纤维混凝土的剩余弯曲强度[J].工业技术,2004.

[17] 戴建国,宋玉普,赵国藩.低弹性模量纤维混凝土剩余弯曲强度的力学意义[J].混凝土与水泥制品,1999(1): 33-36.

[1] 邓宗才,师亚军,曹炜.聚烯炔粗合成纤维混凝土抗弯