

聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土板抗弯性能试验研究

朱江¹, 赵国藩^{*1}, 李士恩²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 广东工业大学 建设学院, 广东 广州 510006)

摘要: 对 67 组共 201 块聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板进行了抗弯性能试验, 研究了无配筋和有配筋聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板在不同开裂状态下的抗弯性能及其影响因素, 建立了供设计应用的无配筋和有配筋聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板抗弯承载力计算公式. 试验结果表明, 聚丙烯纤维的最佳掺率是 0.07%; 聚丙烯纤维的掺入延缓了薄板的开裂过程, 提高了薄板的抗裂性能; 钢丝网对提高聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板抗弯承载力起主要作用; 聚丙烯纤维与钢丝网的复合, 能起到显著的增强效果, 有效地提高薄板的抗弯承载力和抗裂性能.

关键词: 聚丙烯纤维; 钢丝网混凝土; 抗弯; 薄板; 承载力

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A

0 引言

聚丙烯纤维混凝土以其优良的物理力学性能在土木、水利、建筑各个专业领域内得到了逐步推广和应用. 聚丙烯纤维的掺入, 改善了混凝土的脆性破坏特性, 减少了混凝土早期塑性收缩裂缝, 提高了混凝土的耐久性、韧性及抗冲击性能^[1,2], 但聚丙烯纤维混凝土抗弯性能不高, 因而不适宜用于承受较大荷载的薄壁结构物. 而应用钢丝网增强的混凝土受弯构件, 在荷载作用下具有充分变形的能力, 在弯曲破坏时, 呈类似钢结构塑性变形的性能^[3]. 与普通混凝土相比, 钢丝网细粒混凝土的主要优点是配筋分散性好和骨料粒径小, 因此具有更好的抗裂性、抗渗性与韧性^[4], 被广泛应用于水利建筑工程和船坞制造等. 钢丝网细粒混凝土构件的保护层厚度要求不大于 10 mm, 最佳为 3 mm, 过厚的保护层会迅速降低受弯构件的初裂强度^[5]. 为了克服这一不利因素, 将聚丙烯纤维与钢丝网复合构成聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土(polypropylene fiber reinforced ferroconcrete, PFOC), 其构件的保护层就有很高的抗开裂能力. PFOC 是将聚丙烯纤维混凝土与钢丝网细粒混凝土两者复合, 取长补短, 发挥优势, 构成一种

理想的高强复合材料. 因此, 对于 PFOC 薄板抗弯性能的研究具有重要的意义.

本文对 67 组共 201 块 PFOC 薄板进行抗弯试验, 研究无配筋和有配筋 PFOC 薄板在不同开裂状态下的抗弯性能及其影响因素, 建立供设计应用的无配筋和有配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算公式.

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥为 425 号普通硅酸盐水泥; 细骨料为中粗砂, 细粒混凝土的含砂率为 44%, 砂混凝土的含砂率为 100%; 粗骨料为粒径不大于 15 mm 的花岗岩细石料; 减水剂为广州鲁班防水公司的 G-3 早强高效减水剂, 掺量为水泥用量的 0.3%; 钢丝网为广州万通制网厂生产的编织方格网, 网眼尺寸为 10 mm×10 mm; 单丝直径为 0.9 mm, 单丝抗拉强度为 1 078 MPa; 受力钢筋为直径 $\phi 6$ 和 $\phi 8$ 的冷拔钢筋; 聚丙烯纤维采用美国希尔兄弟化工有限公司生产的杜拉纤维, 直径 15D($d=0.048$ mm), 长度 $l=19.05$ mm, $l/d=394$, 相对密度为 0.91, 单丝抗拉强度为 492 MPa.

1.2 试件设计

无配筋板试件的尺寸为长 $l=1\ 100\text{ mm}$ ，宽 $b=200\text{ mm}$ ，厚 $h=20、40、60\text{ mm}$ ，计算跨度 $l_0=900\text{ mm}$ 。有配筋板试件的尺寸为长 $l=1\ 100\text{ mm}$ ，宽 $b=200\text{ mm}$ ，厚 $h=40、60\text{ mm}$ ，计算跨度 $l_0=900\text{ mm}$ 及长 $l=1\ 500\text{ mm}$ ，宽 $b=250\text{ mm}$ ，厚 $h=80\text{ mm}$ ，计算跨度 $l_0=1\ 200\text{ mm}$ 两类。各类抗弯板试件尺寸见图1(a)。

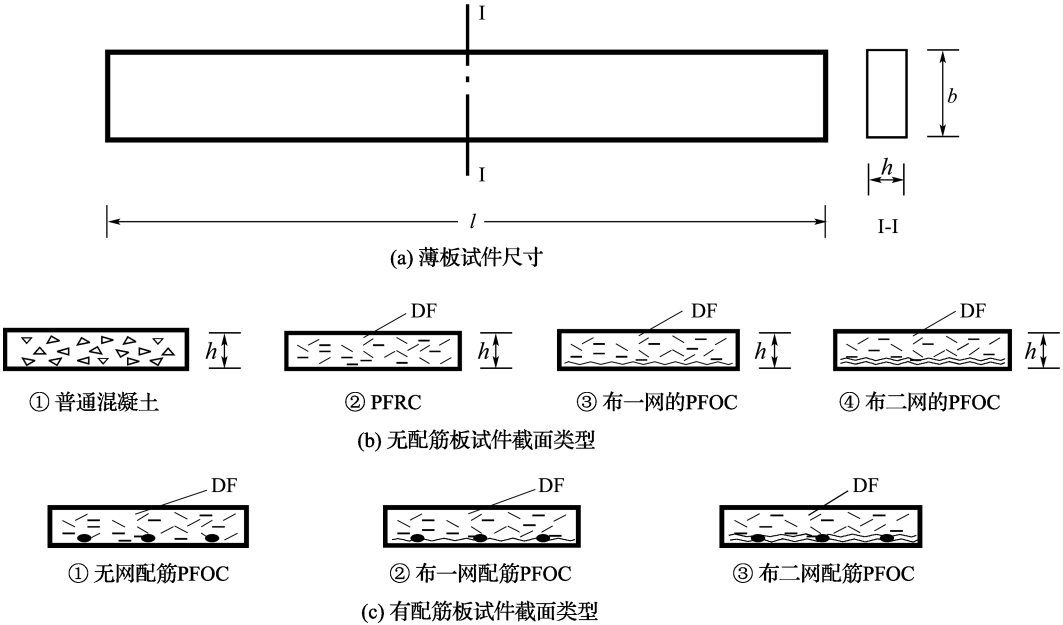
无配筋板聚丙烯纤维的体积掺率 $\rho_f(\%)$ 为0、0.05、0.07、0.10、0.12、0.15共6种，有配筋板聚丙烯纤维的体积掺率 ρ_f 均为0.1%；钢丝网布置分为0层、1层、2层3种；有配筋板的钢筋采用光面钢筋和带肋钢筋两种，当板厚为40 mm和60 mm时钢筋网有 $\phi 6-150\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 、 $\phi 6-100\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 和 $\phi 8-150\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 三种，当板厚为80 mm时钢筋网有 $\phi 6-100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 和

$\phi 6-200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 两种。

无配筋板试件尺寸、截面类型及不同材料的复合计有4大类共35种，见图1(b)。有配筋板试件尺寸、截面类型及不同材料的复合计有3大类共32种，见图1(c)。无配筋薄板抗弯试件共制作了35组，计105件；有配筋薄板抗弯试件共制作了32组，共96件。

1.3 试验装置及试验方法

试验所采用的仪器装置有反力架、压力环、千斤顶、位移传感器。薄板抗弯试验利用反弯加载原理，以便于观察薄板弯曲时每个阶段受弯面的裂缝宽度，加载图式如图2所示，其中板长为1 100 mm的薄板抗弯试验在小反力架上进行($a=300\text{ mm}$ ， $l_0=900\text{ mm}$)，板长为1 500 mm的有筋薄板抗弯试验则在大反力架上进行($a=400\text{ mm}$ ， $l_0=1\ 200\text{ mm}$)。



注：PFRC 指聚丙烯纤维混凝土，PFOC 指聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土，DF 指杜拉纤维(Durafiber)

图1 薄板类型

Fig. 1 Types of thin slabs

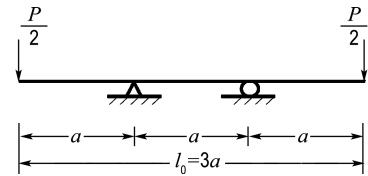


图2 薄板抗弯试验加载简图

Fig. 2 Loading sketch map of bending slab

2 PFOC 薄板抗弯性能影响因素

聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板抗弯性能

的影响因素主要有聚丙烯纤维的掺量、钢丝网的层数以及聚丙烯纤维与钢丝网的复合。

2.1 聚丙烯纤维掺量对薄板抗弯性能的影响

对无配筋板聚丙烯纤维的体积掺率 $\rho_f(\%)$ 分别为0、0.05、0.07、0.10、0.12、0.15时，钢丝网布置为0层时的45块板、1层时的30块板及2层时的30块板实测了板的抗弯承载力。对试验结果进行回归分析，得到了薄板抗弯承载力与聚丙烯纤维体积掺率的关系曲线，如图3所示。

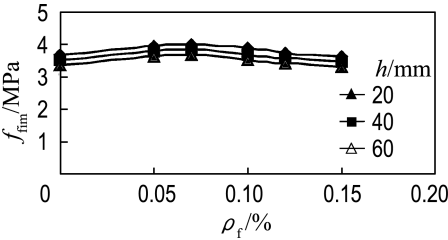


图 3 薄板抗弯承载力与聚丙烯纤维体积掺率的关系

Fig. 3 Curves of bending capacity versus volume fraction of polypropylene fiber

从图 3 中可以看到,不同厚度的细粒混凝土薄板的抗弯承载力均在 $\rho_f = 0.07\%$ 处达到最大值,因此可以认为聚丙烯纤维的最佳体积掺率为 0.07% 。另外,从图 3 中还可看到,薄板的抗弯承载力与聚丙烯纤维掺率的关系曲线变化平缓,说明聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力的增强作用在不同掺率下差别不大。在图 4 中,对聚丙烯纤维在厚度为 20 mm 且具有不同钢丝网层数的薄板的抗弯承载力的增强作用进行了分析比较,得到聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力的增强作用约为 7% 左右。通过对试验中不同厚度薄板的抗弯承载力分析亦可得到,聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力的增强作用在 10% 以内。因此,在实际应用中聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力的增强作用可以忽略。

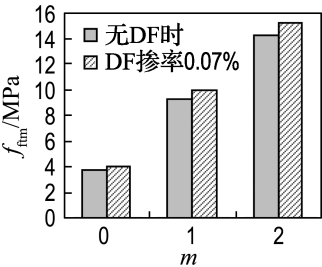


图 4 聚丙烯纤维对板抗弯承载力增强作用比较

Fig. 4 Comparison of strengthening effect of polypropylene fiber

虽然聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力的增强作用有限,但其主要作用在于提高薄板的抗初裂强度,改善细粒混凝土的脆性破坏特性,减少混凝土早期塑性收缩裂缝,并且聚丙烯纤维与钢丝网结合可减缓裂缝开裂速度,减小裂缝宽度。

2.2 钢丝网层数对薄板抗弯性能的影响

细钢丝编织的钢丝网由于是经纬向分布,在平面内两个方向上的增强作用有效率达到 100% ,钢丝网在混凝土薄板中的增强作用相当于细钢筋的分散配筋原理,因此它非常适合用于增强薄板结构的静、动力抗弯性能^[6]。钢丝网的层数

是影响薄板抗弯承载力的一个重要因素,在相同的聚丙烯纤维掺率和板厚的情况下,随着钢丝网层数的增加,薄板的抗弯承载力显著增大,如对图 4 中聚丙烯纤维掺率为 0.07% 的厚 20 mm 薄板的抗弯承载力比较可见,布置有钢丝网的薄板的抗弯承载力是无网薄板的 $2.5\sim3.8$ 倍,而布置 2 层钢丝网的薄板的抗弯承载力为布置 1 层钢丝网的 1.5 倍,这主要是钢丝网在混凝土中的分散配筋增强作用所致。因此,钢丝网对提高细粒混凝土薄板抗弯承载力起主要的增强作用。

2.3 聚丙烯纤维与钢丝网复合对薄板抗弯性能的影响

在没有铺钢丝网的聚丙烯纤维混凝土薄板抗弯试验中,当所加荷载超过板的初裂阶段后,薄板挠度值增长的速度加快,这是由于聚丙烯纤维与混凝土两者的弹性模量相差较大,聚丙烯纤维的增强作用趋于零。为了减缓这种增长速度,用钢丝网与聚丙烯纤维进行复合构成 PFOC,可有效地延缓聚丙烯纤维的变形速度,使聚丙烯纤维与钢丝网同步变形。从 PFOC 薄板的抗弯试验可以看到,板的挠度增长速度明显减缓,这是聚丙烯纤维与钢丝网的复合增强作用所致。

在进行配筋 PFOC 薄板的抗弯试验过程中可以看到,有钢丝网和聚丙烯纤维复合的配筋 PFOC 板具有很强的变形能力,其极限延伸率大大超过同类钢筋混凝土板,且板愈薄其变形能力愈大,具有类似钢结构的特点。这是由于板愈薄,材料的匀质性愈显著,呈现出钢材的特点。此外,由于所配的钢筋网及相当于分散配筋的钢丝网,使受拉区混凝土的弹塑性变形得到充分发展,也大大提高了受拉区混凝土的极限延伸率。在抗弯试验过程中还可以观察到,在不同的开裂阶段,配筋 PFOC 板开裂过程稳定,其裂缝分布均匀,且随着钢丝网横向丝的间距成密向分布,并且在薄板弯曲破坏前其裂缝宽度一般都小于 0.2 mm ,这充分说明了钢丝网和聚丙烯纤维复合的抗裂增强作用。

此外,聚丙烯纤维在混凝土振捣时可以有效地钻过钢丝网 $10\text{ mm}\times10\text{ mm}$ 的网眼,从而对钢丝网的保护层起到提高抗裂、防锈和水密等作用。因此,聚丙烯纤维与钢丝网在细粒混凝土中是一种十分理想的复合。

3 有无配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算

3.1 PFOC 薄板抗弯承载力计算

聚丙烯纤维与钢丝网的复合有效地提高了细

粒混凝土的抗裂性能和抗弯强度,因此在进行 PFOC 薄板抗弯试验时分为裂缝宽度为 0.1 mm 和破坏两个阶段测试. 根据上述聚丙烯纤维对薄板抗弯承载力影响的分析可知,聚丙烯纤维的最佳掺率为 0.07%. 对 PFOC 薄板抗弯试验在聚丙烯纤维掺率为 0.07% 时的各类试验数值进行分析,得出薄板(布置 1 层或 2 层钢丝网)在裂缝宽度为 0.1 mm 和破坏两个阶段的抗弯承载力回归方程:

$$f_{tm} = 2.5\sigma_c(\lambda_m - 0.072h) \tag{1}$$

式中: f_{tm} 为 PFOC 薄板抗弯承载力 (MPa); σ_c 为普通混凝土的弯曲抗拉强度试验值 (MPa); λ_m 为系数,见表 1; h 为薄板的厚度 (cm,板厚不宜大于 7 cm).

表 1 系数 λ_m

Tab. 1 Coefficient λ_m

状态	λ_m	
	$m=1$	$m=2$
裂缝宽度 0.1 mm	1.07	1.56
破坏	1.27	1.85

注: m 为钢丝网的层数, $\rho_f=0.07\%$

3.2 配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算

在配筋 PFOC 薄板抗弯试验的基础上,采用数理统计的分析方法,对试验结果进行整理分析,得出在各个不同开裂阶段(裂缝宽度为 0.1、0.2 mm 和破坏阶段)配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算公式. 由于聚丙烯纤维与钢丝网的复合能有效地提高混凝土的抗裂性能,在分析配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算公式中同时考虑板的开裂状态,由此可以得出根据不同使用条件(裂缝宽度)要求下的抗弯承载力计算公式.

3.2.1 配筋 PFOC 薄板承载弯矩 配筋 PFOC 薄板的承载弯矩为

$$M_c = A_{sm} f_y h_0 \tag{2}$$

式中: M_c 为配筋 PFOC 抗弯试验板的原材料承载弯矩; A_{sm} 为受力钢筋和钢丝网纵向钢丝的截面面积之和 (mm²); h_0 为板截面有效高度 (mm); f_y 为钢材抗拉强度设计值 (MPa),在本试验中 $f_y=340$ MPa.

3.2.2 配筋 PFOC 薄板试验弯矩 配筋 PFOC 薄板在抗弯试验中按不同的开裂阶段,将裂缝分为宽度 0.1、0.2 mm 和破坏 3 个阶段测取数据. 根据试验中各开裂阶段的荷载,通过跨中弯矩的计算可得实际的试验弯矩:

$$M_t = Pa/2 \tag{3}$$

式中: M_t 为配筋 PFOC 薄板试验弯矩; P 为试验荷载 (kN),取试验开裂阶段(裂缝宽度为 0.1、0.2 mm 和破坏阶段)时的荷载值; a 的取值见图 2.

3.2.3 配筋 PFOC 薄板承载弯矩与试验弯矩关系 进行弯曲试验的板厚有 40、60 和 80 mm 三大类,每一类板又可根据配筋形式和是否铺钢丝网等分为含网配肋型钢筋 PFOC 板、含网配光面钢筋 PFOC 板、无网配肋型钢筋 PFOC 板、无网配光面钢筋 PFOC 板 4 种.

对厚度为 40 mm 的 42 块配筋 PFOC 板、厚度为 60 mm 的 36 块配筋 PFOC 板和厚度为 80 mm 的 18 块配筋 PFOC 板,在试验开裂阶段(裂缝宽度为 0.1、0.2 mm 和破坏阶段)时的承载弯矩和试验弯矩进行统计分析,舍弃可疑值后可得到各开裂阶段薄板承载弯矩 M_c 和试验弯矩 M_t 的关系式为

$$M_t = A + BM_c = (-\gamma - 0.0457h) + 2.14A_{sm} f_y h_0 \tag{4}$$

3.2.4 配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算 当外力弯矩 $M=$ 试验弯矩 M_t 时,式(4)为

$$M = -\gamma - 0.0457h + 2.14A_{sm} f_y h_0 \tag{5}$$

式中:系数 γ 的大小与钢筋外形、钢丝网层数有关,可写为 $\gamma=\eta a_m$; η 为考虑钢筋外形系数,当选用肋型钢筋时 $\eta=1$,当选用光面钢筋时 $\eta=1.44$; a_m 为考虑钢丝网层数影响的系数,取值见表 2.

表 2 系数 a_m

Tab. 2 Coefficient a_m

状态	a_m	
	$m=0$	$m=1$
裂缝宽度 0.1 mm	1.049	0.896
裂缝宽度 0.2 mm	0.674	0.534
破坏	0.637	0.390

注: $\rho_f=0.10\%$

配筋 PFOC 薄板截面钢材面积 A_{sm} 包含了受力钢筋截面面积 A_s 和钢丝网纵向钢丝截面面积 A_m 两部分,即 $A_{sm}=A_s+A_m$. 整理式(5)得受力钢筋的截面面积

$$A_s = \frac{M_s}{2.14 f_y h_0} - A_m \tag{6}$$

式中 M_s 为设计弯矩,按式(7) 计算:

$$M_s = M + \eta a_m + 0.0457h \tag{7}$$

考虑采用不同种类受力筋时钢筋抗拉强度设计值的修正,得到加筋 PFOC 薄板的配筋计算公式:

$$A_s = \frac{M_s}{k_s f_y h_0} - A_m \tag{8}$$

式中: k_s 为修正系数,当受力钢筋采用 HPB235 和 HRB335 时, $k_s = 2.14$,当受力钢筋采用 HRB400 时, $k_s = 1.80$; A_m 为钢丝网纵向钢丝截面积,当铺一层网时, $A_m = 63.6 \text{ mm}^2$,无网时 $A_m = 0$; M_s 的计算见式(7).

4 结 论

- (1) 聚丙烯纤维对 PFOC 薄板抗弯性能的增强作用均在其体积掺率为 0.07% 时达到最大值,因此聚丙烯纤维最佳掺率是 0.07%.
- (2) 钢丝网对提高 PFOC 薄板抗弯承载力起主要的增强作用.
- (3) 聚丙烯纤维延缓了 PFOC 薄板的开裂,提高了薄板的抗裂性能. PFOC 板的厚度越薄,聚丙烯纤维对细粒混凝土抗弯性能的增强作用越大.
- (4) 聚丙烯纤维与钢丝网在细粒混凝土中是理想的复合. 聚丙烯纤维与钢丝网的复合能较大幅度地提高 PFOC 薄板的抗弯承载力和抗裂性能,其中抗弯承载力的提高主要是钢丝网的作用,而聚丙烯纤维与钢丝网的复合使得 PFOC 薄板具有充分变形的能力,裂缝开展的过程稳定,且裂缝呈多而细的横向分布状态.
- (5) 建立了无配筋和有配筋 PFOC 薄板抗弯承载力计算公式. 所建立的计算公式形式简单,便

于实际工程的应用.
(6) 本研究对聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土这一新型高强复合材料在建筑工程和道路与桥梁工程中的应用提供了一定的参考依据.

参考文献:

[1] 戴建国,黄承逵. 网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,1999(4):35-38

[2] SHEN Rong-xi,HILL M L,TIAN Yong-xing. Crack-arresting effect of polypropylene monofilament fiber at small dosage in concrete [C] // **Proceedings of the International Conference on Fiber Reinforced Concrete.** Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1997:27-33

[3] 李士恩,郭汨汨,黄文森. 钢丝网混凝土桥梁工程[J]. 公路,1993(10):10-16

[4] EL DEBS M K, NAAMAN A E. Bending behavior of mortar reinforced with steel meshes and polymeric fibers [J]. **Cement and Concrete Composites**, 1995, 17:327-338

[5] 熊光晶. 保护层的质和量与镀锌焊接钢丝网水泥的耐久性[J]. 水利学报,1997(7):41-45

[6] 禹智涛,李士恩. 聚丙烯纤维增强钢丝网混凝土薄板力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(4):35-37

Experimental research on flexural behavior of PFOC slabs

ZHU Jiang¹, ZHAO Guo-fan^{*1}, LI Shi-en²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A total of 201 specimens of polypropylene fiber reinforced ferroconcrete (PFOC) divided into 67 groups are investigated in the flexural test. The effects on the flexural behavior of polypropylene fiber reinforced ferroconcrete slabs with and without steel bars in different stages of cracks are analyzed. Based on the experimental data, the formula for calculating the bending capacity of polypropylene fiber reinforced ferroconcrete slabs with and without steel bars is also proposed. Test results show that the best volume fraction of polypropylene fiber in the slabs is 0.07% and the polypropylene fibers in the slabs leave the cracking and improve the crack resistance performance of concrete. Steel wire meshes in the slabs have the main influences on the bending capacity of polypropylene fiber reinforced ferroconcrete slabs. The bending capacity and the crack resistance performance of polypropylene fiber reinforced ferroconcrete slabs are greatly improved by the composites of polypropylene fiber and steel wire mesh.

Key words: polypropylene fiber; ferroconcrete; bending; thin slab; capacity