

文章编号:1673-2049(2019)03-0028-09

# 超高性能混凝土板受弯承载能力及计算方法 试验研究

黄福云<sup>1,2</sup>, 陈汉伦<sup>1,2</sup>, 杨芳芳<sup>1,2</sup>, 林 潮<sup>1,2</sup>, 陈宝春<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**为推进超高性能混凝土(UHPC)板在中国实际工程中的应用,对无配筋的 UHPC 板和普通钢筋混凝土板进行了抗弯承载能力试验,分析了 UHPC 板的承载能力,并将其与同等级的钢筋混凝土板进行比较。结果表明:UHPC 板的破坏过程可分为弹性、屈服和破坏 3 个阶段,可将板的最大裂缝宽度达 0.1 mm 时的荷载视为 UHPC 板的裂缝荷载;UHPC 板的受弯破坏属于延性破坏,满足实际工程的需求;UHPC 板弹性极限荷载是同等级钢筋混凝土盖板的 220%,即 UHPC 板的抗裂能力强,在常规荷载作用下拥有更好的耐久性和适用性;普通钢筋混凝土板承载破坏时,同等级的 UHPC 板依然可以正常工作且有较大承载能力富余,在承载能力方面 UHPC 板完全可以替代普通钢筋混凝土板;同时,根据有限元参数分析结果,建议实际工程中 UHPC 板各参数按以下范围取值,钢纤维含量(质量分数)在 1.5%~2.5%之间,厚度在 30~50 mm 之间,材料等级在 U120~U160 之间;给出的计算无配筋 UHPC 板正截面受弯承载力简化计算公式具有较好的精度,可为工程实际与相关规范的制定提供一定参考。

**关键词:**超高性能混凝土;纤维混凝土板;受弯承载能力;参数分析

**中图分类号:**TU473

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Bending Capacity and Calculation Method of Ultra-high Performance Concrete Slab

HUANG Fu-yun<sup>1,2</sup>, CHEN Han-lun<sup>1,2</sup>, YANG Fang-fang<sup>1,2</sup>, LIN Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Bao-chun<sup>1,2</sup>

(1. Fujian Key Laboratory on Multi-disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering,

Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. College of Civil Engineering,

Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** To promote the practical application of ultra-high performance concrete (UHPC) slab in China, the bending bearing capacity of UHPC slab and ordinary reinforced concrete slab were tested, the bearing capacity of UHPC slab from several aspects was analyzed, and the results were compared with those of the same grade traditional one. The results indicate that the failure process of UHPC slab can be divided into elastic stage yield stage and failure stage, when the maximum crack is 0.1 mm, the load can be considered as the crack load. The bending failure process of UHPC slab is ductile failure, which meets the needs of practical engineering. The ultimate elastic load of UHPC slab is 220% of that of the same grade reinforced concrete slab,

收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51578161, U1305245);福州市科技支持计划产学研项目(2018-G-63)

作者简介:黄福云(1979-),男,江西丰城人,研究员,工学博士, E-mail: huangfuyun@fzu.edu.cn。

that is, the crack resistance and bearing capacity of UHPC slab are better than those of traditional one, and UHPC slab has better durability and applicability under the conventional load. The UHPC slab can still work normally when the ordinary reinforced concrete slab is destroyed, UHPC slab can completely replace the ordinary reinforced concrete slab in bearing capacity. The parameter analysis results from the finite element simulation indicate: it's better to control the content of steel fiber (mass fraction) between 1.5%-2.5%, the thickness is between 30-50 mm, the materials grade is between U120-U160. The simplified formula for calculating the bending bearing capacity of the UHPC slab has a good precision, which can provide a reference for the engineering practice and the relevant specifications.

**Key words:** ultra-high performance concrete; fiber concrete slab; bending bearing capacity; parametric analysis

## 0 引言

中国对公用设施的投入极大,板作为一种基建构件用处十分广泛。随着工程质量和工艺水平要求的不断提高,公用设施的高性能、精品化越来越受到建设、设计、监理和施工单位的重视。然而,传统的钢筋混凝土板(盖板、人行道板等)强度低、质量大、耐久性和抗腐蚀能力差、易损坏且安装检修不便,尤其在交通繁重地段的普通盖板往往需要频繁更换,这使得传统的盖板已不能满足中国现代化建设的需求。

超高性能混凝土(UHPC)强度高、韧性好、耐腐蚀性强,同时具有较好的流动性<sup>[1-3]</sup>。这些优异的力学性能可以弥补传统混凝土材料的不足,使用 UHPC 制备盖板能够很大程度地减小板的厚度,从而减轻构件质量,同时 UHPC 优异的流动性可以让板的外观精致规整<sup>[1]</sup>,给行人带来舒适的行走体验和极佳的外观视觉效果。

现有的研究表明,将 UHPC 板运用到实际工程中是完全可行的。2006 年青藏线试用了 UHPC 材料制备的人行道板<sup>[4]</sup>,这是中国首次使用 UHPC 材料制备盖板类的承载构件。此后,陆续有数段高速铁路(电缆)或客运专线使用了 UHPC 制备的人行道板、沟盖板和轨枕,且获得了不错的使用效果<sup>[5-8]</sup>。2008 年,赵曼等<sup>[9]</sup>针对实际工程的需要设计了格构型 UHPC 轨道板,并通过有限元对其力学性能进行了分析,研究表明此类轨道板是安全合理的。2013 年,黄旭毅等<sup>[10]</sup>通过自主开发的试验设备研究了 UHPC 盖板的承载力与抗裂性,研究表明 UHPC 盖板的受弯破坏过程可分为弹性、屈服和破坏 3 个阶段,且盖板的开裂荷载约为极限荷载的 80%。2014 年,Yang 等<sup>[11]</sup>对 3 种不同单元类型的 UHPC

轨道板进行了力学性能分析,研究表明 UHPC 轨道板满足承载力的要求,同时 UHPC 轨道板具有较高的技术经济优势。2015 年,Zheng 等<sup>[12]</sup>对一种新型预应力 UHPC 底板进行受弯承载研究,分析了该类型 UHPC 底板受弯破坏的裂缝特性和挠度变化情况,并给出了适用于该类底板的正截面承载力计算方法及裂缝宽度计算方法。2016 年,陈宏伟等<sup>[13]</sup>对未配普通钢筋的 UHPC 盖板进行了受弯承载力试验,研究表明 UHPC 盖板的受弯破坏属于延性破坏,盖板极限强度和韧性同时受到钢纤维掺量和分布状况的影响,并对盖板承载能力理论计算方法进行了分析,将盖板的承载极限强度转换为极限抗弯强度来求解。2017 年,Mahmood 等<sup>[14]</sup>对不同参数的空心 UHPC 盖板进行了抗弯力学性能试验,研究表明材料气泡直径与板厚比值等参数对该类盖板的承载力起较大影响。

由上述相关研究可知,铁道部门已将 UHPC 人行道板和轨枕板成功运用于实际工程,但研究大多仅停留在材料的配比、养护制度、耐久性和盖板的抗压性能上。近年来,对 UHPC 板受弯性能和承载能力的研究成为热点之一,但相关研究才刚起步,缺乏系统与深入的研究。此外,现有研究少有涉及 UHPC 板受弯承载力的理论计算方法,实际生产中只能依据经验或试验确定 UHPC 板的受弯承载力,严重阻碍了 UHPC 板类构件在中国的推广与应用。为此,本文进行了 2 块 UHPC 板和 1 块普通钢筋混凝土板的受弯承载试验。对 UHPC 板的破坏过程、变形特征和承载能力等进行研究,并将 UHPC 板和普通钢筋混凝土板进行了比较。同时,在试验研究的基础上结合 ABAQUS 对 UHPC 板的受弯承载能力进行参数分析,给出适用于工程实际的参数范围。最后,本文给出了计算无配筋 UHPC 板受弯承载力

的简化计算公式,可为工程实际与相关规范的制定提供一定参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计 3 个试件,其中试件 U-01 和 U-02 为无配筋的 UHPC 板,试件 C-03 为配有 8 $\phi$ 8 纵向受拉钢筋的普通 C40 钢筋混凝土板。各试件尺寸均为 1 100 mm $\times$ 800 mm $\times$ 50 mm。同时,在板的四边设直角边边长为 3 mm 的倒角以减缓尖端应力集中,并在板的顶部设有 3 mm 高的花纹以增大板表面的摩擦。在制备 UHPC 板时,为有效避免钢纤维的结团,提高板的力学性能,试验中采用“后掺法”的搅拌方式。按照预定的配合比称量好所需材料,先

将钢纤维与石英砂加入搅拌机搅拌 2 min,再加入硅灰与硅酸盐水泥搅拌 2 min,同时将减水剂加入水中搅拌均匀,最后将混合均匀的液体材料加入搅拌机以点动搅拌的方式搅拌 3 min。采用常温浇水的方式养护试件,在 24 h 内每隔 3 h 对试件浇 1 次水,防止 UHPC 收缩开裂,24 h 后拆模并用保湿布盖住,每隔 6 h 浇水 1 次,保证 UHPC 内部活性成分充分反应以达到预期性能。

1.2 材性实测

本试验根据《铁道电缆槽盖板和人行道步板 第 1 部分:活性粉末混凝土型》(Q/CR 2.1—2014)<sup>[15]</sup>中的有关规定对制备构件的试验材料进行了筛选。在选定好所需材料以后,优选了适合制备 UHPC 板的材料配合比,如表 1 所示。

表 1 混凝土材料配合比  
Tab.1 Proportion of Concrete

试件编号	骨料比例		减水剂质量 分数/%	胶凝材料比例		钢纤维质量 分数/%	水胶比	配筋率/%
	石英砂	碎石		硅灰	硅酸盐水泥			
U-01	1.200	0.000	2.5	0.300	1.000	1	0.180	0.00
U-02	1.200	0.000	2.5	0.300	1.000	2	0.180	0.00
C-03	1.009	2.346	0.0	1.000	0.000	0	0.342	1.36

钢纤维采用直径 2 mm、长度 13 mm 的圆直纤维,其实测抗拉强度为 3 055 MPa。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[16]</sup>和《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)<sup>[17]</sup>中的相关规定,本试验分别对 3 批材料的立方体抗压强度  $f_{cu}$ 、轴心抗拉强度  $f_t$ 、弹性模量  $E_c$  和坍落度进行测试,同时根据规范中的计算方法计算混凝土的轴心抗压强度  $f_c$ ,实测的材料力学性能指标见表 2。

表 2 材料力学性能

Tab.2 Mechanical Property of Material

试件编号	$f_{cu}$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E_c$ /GPa	坍落度/mm
U-01	90.65	63.81	3.20	3.92	161
U-02	132.84	93.51	4.39	4.31	170
C-03	36.62	25.63	1.32	3.22	120

1.3 试验方案

试验加载装置如图 1 所示,其中油压千斤顶最大压力为 20 t,将其倒挂于极限承载力为 50 t 的反力梁上,并在千斤顶下方设置压力环,通过压力环的应变读数显示油压千斤顶所施加的荷载。在压力环下部(试件上部)布置 1 块沿板短边方向放置的钢制垫块,并在垫块与试件接触的部分均匀地铺上细沙,以尽可能地使荷载均匀分配。在试件下部放置 2 块钢制垫块,2 垫块间的距离为 900 mm,即试件两边

分别在钢制垫块上搭接 100 mm,板的净跨径  $L_0$  为 900 mm。在试验板底部中心位置布置一个精度为 0.01 mm 的位移计 A 与一个混凝土应变片 A-1,具体位置如图 1(c)所示。

试验中首先进行预加载,以 0.5 kN 为量级增加荷载,以检查加载装置是否与试件接触紧密。之后进行正式加载,试件初裂前以 1.0 kN 为量级增加荷载,待荷载稳定后(至少持续 2 min)采集应变与挠度,并在荷载达到 5 kN 后开始测量并记录裂缝宽度。在荷载达到 15 kN(设计开裂荷载)时,继续以 1.0 kN 为量级增加荷载,待荷载稳定后(至少持续 3 min)采集应变、挠度与裂缝宽度,并开始记录裂缝形态。当板的承载力开始下降时,停止裂缝宽度的测量,以连续采集的方式采集应变与挠度。当试件的承载力下降至峰值荷载的 70% 以下时,可视为试件破坏。

2 试验结果分析

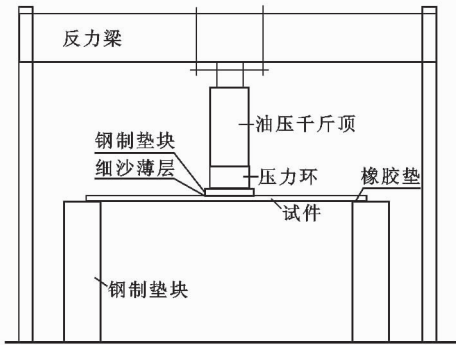
2.1 跨中挠度曲线及破坏形态

图 2 为试件 U-01, U-02, C-03 的荷载-挠度曲线。由图 2 可知, UHPC 板的破坏过程可以分为弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段:

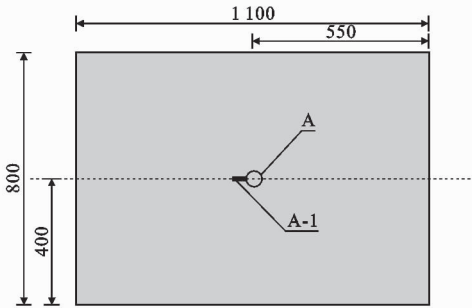
(1)OB 段为 UHPC 板的弹性阶段, B 点为弹性



(a) 加载现场



(b) 加载示意图



(c) 测点布置(单位:mm)

图 1 试验加载装置  
Fig. 1 Test Loading Device

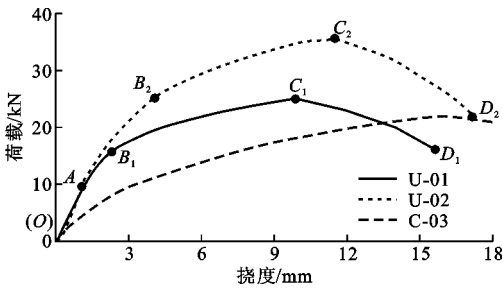


图 2 荷载-挠度曲线  
Fig. 2 Load-deflection Curves

极限点。在此阶段,板跨中挠度发展十分缓慢,整个荷载-挠度曲线上升较快。在弹性阶段内 A 点处,板底素混凝土层开裂,但混凝土-钢纤维基体尚未开裂,可继续承受截面受拉区的应力。虽然 A 点处曲线出现转折,UHPC 板仍处于弹性工作阶段。

试件 U-01,U-02,C-03 的弹性极限荷载分别为

16,25,10 kN,对应的跨中挠度分别为 2.6,4.3,2.8 mm。分析可知,试件 U-02 的弹性极限荷载相较试件 U-01 提升了 56%,对应的跨中挠度提升了 65%。因此,钢纤维含量的增加可以较大程度提升 UHPC 板的弹性工作范围。同时,试件 U-01,U-02 的弹性极限荷载为试件 C-03 的 160%和 250%。UHPC 板拥有更好的抗裂性能,使 UHPC 板在常规荷载的作用下有更好的耐久性和适用性,可以在一定程度上减少板的维护和更换。

(2)BC 段为 UHPC 板的屈服阶段,C 点为屈服极限点。在此阶段板开始产生塑性变形,挠度相较弹性阶段迅速增大,荷载-挠度曲线上升变缓。承受板受拉区应力的混凝土-钢纤维基体由于钢纤维的材料特性开始发生屈服,基体之间的黏结也逐渐遭到破坏。当荷载达到屈服极限荷载时,大部分受拉区混凝土和钢纤维之间的黏结遭到破坏,钢纤维逐渐从混凝土中拔出,受拉区应力由剩余黏结在一起的基体和钢纤维拔出混凝土时所受摩擦力承受。

试件 U-01,U-02,C-03 的屈服极限荷载分别为 25,35,21 kN,对应的跨中挠度分别为 10.1,11.8,15.5 mm。分析可知,试件 U-02 的屈服极限荷载相较试件 U-01 提升了 40%,对应的跨中挠度提升了 17%。因此,钢纤维含量的增加可以一定程度上增大 UHPC 板的极限承载力,但无法显著提高板的极限挠度。同时,UHPC 板的弹性极限荷载约占其屈服极限荷载的 70%,钢筋混凝土板为 45%。试件 U-01,U-02 的屈服极限荷载分别为试件 C-03 的 120%和 160%,当试件 C-03 达到承载极限时,试件 U-02 仍处于弹性阶段。因此,普通钢筋混凝土板承载破坏时,同等级的 UHPC 板依然可以正常工作且有较大承载能力富余,在承载能力方面 UHPC 板完全可以替代普通钢筋混凝土板。

(3)CD 段为 UHPC 板的破坏阶段。在此阶段,板的承载能力开始减小,荷载-挠度曲线开始缓慢下降,D 点处试件的承载力已下降至峰值荷载的 70%以下。在破坏阶段的整个过程中,钢纤维逐渐从混凝土中拔出,可以听到钢纤维从混凝土中拔出发出的噼啪声。

试件 U-01,U-02,C-03 均属于延性破坏。在 UHPC 板受弯过程中受拉区钢纤维-混凝土基体提供了很大拉应力,起到了一定的钢筋桥接作用,使 UHPC 板在达到弹性极限荷载进入屈服阶段后能产生较大的挠度不至脆断。普通钢筋混凝土板屈服时的跨中挠度为 UHPC 板的 130%,从实际使用上

来看两者相差不大,且 10 mm 以上的跨中挠度可由肉眼识别。因此,UHPC 板的延性完全满足实际工程中盖板的适用性要求。

## 2.2 板底裂缝发展

图 3 为试件 U-01,U-02,C-03 板底最大裂缝宽度变化曲线。

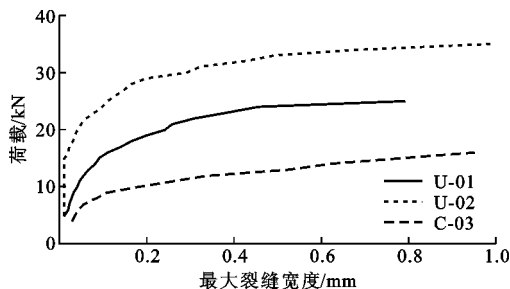


图 3 裂缝发展过程

Fig. 3 Fracture Development Process

由图 3 可知,试件 U-01,U-02,C-03 分别在荷载达到 16,8,4 kN 时出现了裂缝测宽仪可测得的裂缝(宽度大于 0.02 mm)。当荷载达到弹性极限时,UHPC 板底部的主裂缝扩大至肉眼可见。此时 UHPC 板的最大裂缝宽度约为 0.1 mm。因此,可将最大裂缝宽度为 0.1 mm 时的荷载视为 UHPC 板的裂缝荷载,并作为实际工程中判别 UHPC 板是否达到弹性极限状态的指标。同时,C-03 达到弹性极限荷载时对应的最大裂缝宽度为 0.18 mm,约为 UHPC 板的 200%,且相同荷载下 UHPC 板底的最大裂缝宽度远小于普通钢筋混凝土板,即钢纤维可以很好地限制板底裂缝的发展,UHPC 板拥有更好的抗裂能力。

当加载进入屈服阶段时,板底面开始对称地出现多道沿短边发展的新裂缝,最先贯穿板底面的主裂缝随着荷载的增大逐渐变宽。在屈服阶段的末期,板底面相互平行的竖向裂缝之间开始不规则地出现相互连接的斜裂缝。相较弹性阶段,屈服阶段的最大裂缝宽度增大较快。当荷载达到屈服极限值时,试件 U-01,U-02 的裂缝宽度分别达到了 0.8 mm 和 0.85 mm。由于板底裂缝发展迅速,故屈服阶段后停止测量裂缝宽度。

## 2.3 板底应变发展

图 4 为试件 U-01,U-02,C-03 的荷载-应变曲线。由图 4 可知,试件 U-01,U-02 的荷载-应变曲线在荷载为 8~16 kN 和 12~25 kN 范围内是不平滑的,此时仍处于弹性加载阶段。因为在该阶段荷载下,UHPC 板底部素混凝土逐渐开裂,导致应变发

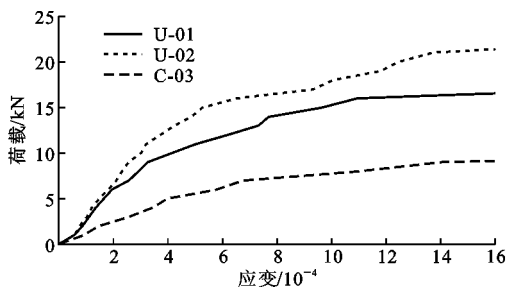


图 4 荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain Curves

生突变。

试件 U-01,U-02 出现宽度 0.02 mm 以上裂缝时对应的板底跨中应变约为  $5 \times 10^{-4}$ ,而试件 C-03 在此情况下的板底跨中应变约为  $2 \times 10^{-4}$ ,体现了 UHPC 板优良的抗裂性能。同时,普通钢筋混凝土板底跨中应变的发展速度很快,当荷载为 10 kN 时,试件 C-03 的板底跨中应变已达到  $2.215 \times 10^{-6}$ 。此时,试件 U-01,U-02 的板底跨中应变分别为  $405 \times 10^{-6}$  和  $334 \times 10^{-6}$ ,即钢纤维可以有效地限制裂缝的发展。进入塑性阶段以后,板底部裂缝迅速发展,跨中应变增大至超出应变片的有效量程。

## 3 有限元分析

### 3.1 有限元模型

为了进一步分析 UHPC 板的力学性能并给出适用于工程实际的参数范围,本文采用有限元分析程序 ABAQUS 对 UHPC 板的受弯破坏进行有限元模拟。模型中混凝土采用 C3D8R 单元,钢筋采用 TRUSS 单元,破坏准则选用摩尔-库仑准则。UHPC 板中的钢纤维是乱序分布的,模拟难度较大。UHPC 板在受弯承载过程中起主要作用的是沿板纵向分布的受拉区纤维。因此,可以忽略部分纤维的影响,将板的受拉区纤维进行等效<sup>[18]</sup>从而简化模型,提高运算效率。

本文首先通过文献[19]中提出的计算方法,计算 UHPC 板的受拉区单位面积内的钢纤维含量,并取纤维方向有效系数  $\eta = 0.4$ <sup>[20]</sup>,再采用“单元等效力筋法”将板的受拉区纤维进行等效<sup>[18]</sup>。同时,在混凝土单元和钢筋单元间设置 Combin14 单元模拟钢纤维与混凝土间的滑移。混凝土单元和钢筋单元的材料参数均取本文第 1.2 节中的实测值,本构关系采用 ABAQUS 自带本构。模型尺寸及加载方式均与试验相同,模型如图 5 所示。

### 3.2 有限元验证

图 6 为荷载-挠度曲线试验值与模拟值的比较。

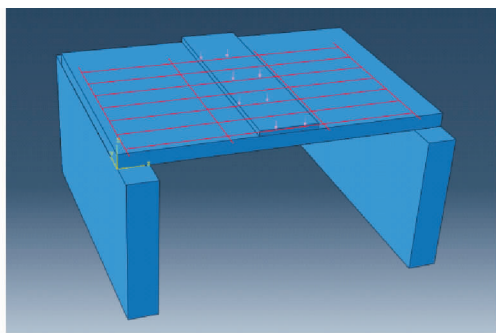


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model

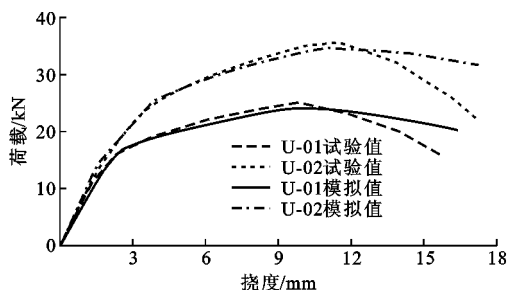


图 6 荷载-挠度曲线试验值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison of Load-deflection Curves Between Test and Simulation Values

由图 6 可知,在 UHPC 板弹性阶段与屈服阶段,模拟值与试验值较为接近,平均相对误差在 6% 左右。模型无法准确模拟板的破坏阶段,因为模型采用 Combin14 单元模拟钢筋与混凝土间的相对滑移与实际情况存在差异。Combin14 单元在模拟板的承载破坏过程中受拉区上移相对较慢,导致模拟得到的承载力下降段与试验值相差较大。若需准确模拟 UHPC 板的破坏阶段,应采用纤维-混凝土分离式计算模型,更准确地模拟纤维与混凝土间的滑移。

UHPC 板的受弯承载能力主要与其屈服极限状态有关。该模型可以较好反映 UHPC 板的弹性阶段与屈服阶段,可以用该模型分析板的受弯承载能力。

### 3.3 有限元参数分析

为进一步确定钢纤维含量、板厚度及材料强度等参数对 UHPC 板受弯承载能力的影响,采用第 3.1 节所述的有限元模型对 UHPC 板的受弯承载力进行参数分析。

#### 3.3.1 钢纤维用量

UHPC 板纤维含量过低可能使构件呈脆性破坏,纤维含量过高则不经济。因此,实际工程中 UHPC 板的纤维含量(质量分数)大多在 1%~3.5% 之间,故仅对该范围内的 UHPC 板进行分析。

各模型板的尺寸均为 1 100 mm×800 mm×50 mm,材料等级均为 U120 级,模拟结果见图 7。

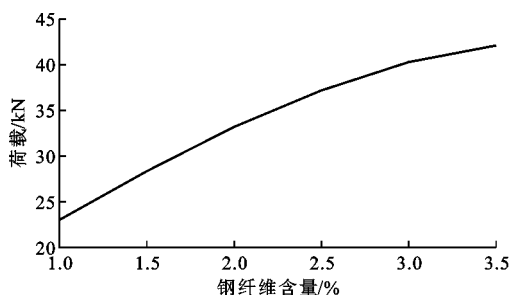


图 7 荷载-钢纤维含量关系曲线

Fig. 7 Load-steel Fiber Content Curve

由图 7 可知,UHPC 板的极限承载力与其钢纤维含量呈正比关系。钢纤维含量 2.5% 的 UHPC 板极限承载力为 37.5 kN,相较钢纤维含量 1.5% 时(28.5 kN)提高了 32%。钢纤维含量为 3.5% 时的极限承载力(42 kN)相较钢纤维含量 2.5% 时仅提高了 12%。这说明钢纤维含量对 UHPC 板承载能力的提升仅在一定范围内有较好效果。为了充分发挥钢纤维的力学性能,同时提高 UHPC 板的经济性,建议实际工程中 UHPC 板的钢纤维含量控制在 1.5%~2.5% 之间。

#### 3.3.2 板厚度

减少 UHPC 板的厚度可以降低材料用量从而大大降低板的造价,而板厚的减小会使其承载能力大幅下降。因此,实际工程中常用的板厚在 20~80 mm 之间,故仅对该范围内的 UHPC 板进行分析。各模型板的尺寸均为 1 100 mm×800 mm,钢纤维含量均为 2%,材料等级均为 U120 级,模拟结果如图 8 所示。由图 8 可知,UHPC 板的厚度对其承载能力有较大影响。50 mm 厚 UHPC 板的极限承载力为 34 kN,相较 30 mm 板(12 kN)提高了 185%,即板厚小于 50 mm 时,板厚的增加可以较大幅度地提升其承载力。70 mm 板厚极限承载力为 45 kN,相较 50 mm 板厚仅提高了 33%,即板厚大于 50 mm 时,厚度的增加对其承载力的增强效果逐渐减小。因此,若实际工程中没有尺寸限制,建议 UHPC 板厚控制在 30~50 mm 之间。

#### 3.3.3 UHPC 材料强度

在相同的纤维含量下提升 UHPC 材料的等级是降低 UHPC 板厚的较好途径。较高等级的 UHPC 材料虽然有更好的力学性能,但需要更好的施工技术与管理条件以防止 UHPC 板因较大的自收缩产生裂缝。因此,实际工程中,UHPC 板的材料等



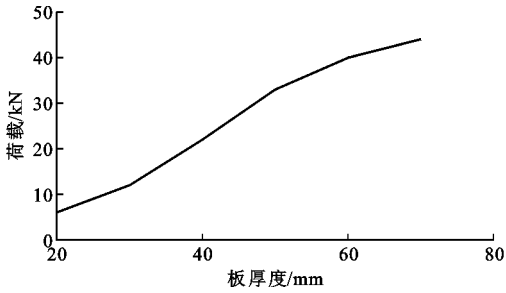


图 8 荷载-板厚度关系曲线

Fig. 8 Load-slab Thickness Curve

级往往不超过 U200，故仅对该范围内的 UHPC 板进行分析。各模型板的尺寸均为  $1\,100\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ，钢纤维含量均为 2%，模拟结果如图 9 所示。由图 9 可知，UHPC 材料等级的提升可以较大幅度地增大板的极限承载力。U200 级 UHPC 板的极限承载力为 58 kN，相较 U160 级的板 (48.5 kN) 提高了 20%。U140 级 (42 kN) 相较 U100 级 (28 kN) 提高了 50%，即 UHPC 等级大于 U160 时，材料等级的提升对板承载力的增强效果开始下降。因此，建议实际工程中采用 U120~U160 级材料制备 UHPC 板。

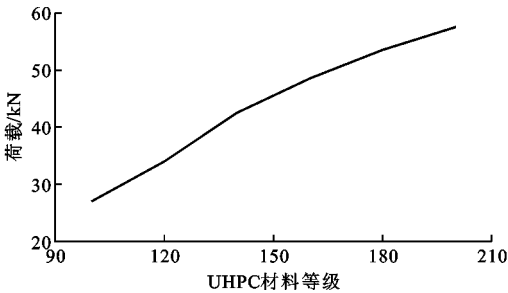


图 9 荷载-UHPC 材料等级关系曲线

Fig. 9 Load-UHPC Material Grade Curve

## 4 受弯承载力计算

### 4.1 简化计算方法概述

由于 UHPC 板中的钢纤维分布杂乱，计算时难以考虑纤维排列的问题。为简化计算，假定截面纤维应变到中性轴的距离呈线性关系，将 UHPC 板正截面受压区压应力分布简化为等效矩形应力图块，如图 10 所示，其中， $f_t$  为抗拉强度， $M$  为弯矩， $\lambda$  为安全系数， $x_n$ 、 $x$  分别为受压区应力  $f_c$ 、 $\alpha_1 f_c$  图块的高度， $h$  为板厚， $h_0$  为正截面有效计算高度， $a_0$  为板底部至钢纤维-混凝土基体的距离，由于  $a_0$  往往小于板厚的  $1/25$ ，故取  $h_0 = h$ ， $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  为应力图块的等效折减系数，根据等效前后的合力和合力矩大小相等的原则可以由式 (1)、(2)<sup>[21-22]</sup> 计算得到

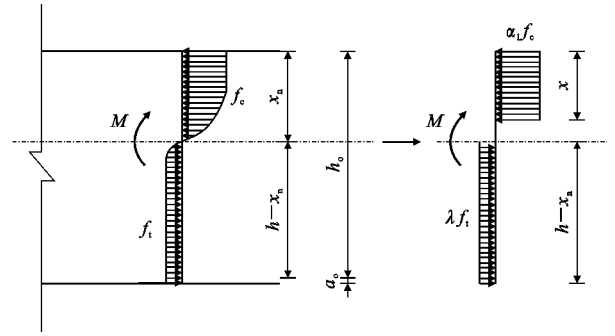


图 10 正截面受力示意图

Fig. 10 Force Diagram of Positive Cross Section

$$\alpha_1 = \frac{k_1}{2(1-k_2)} \quad (1)$$

$$\beta_1 = 2(1-k_2) \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{\int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma_c(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_{cu} f_c} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{\int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma_c(\epsilon) \epsilon d\epsilon}{k_1 f_c \epsilon_{cu}^2} \quad (4)$$

式中： $k_1$ 、 $k_2$  为应力-应变曲线系数； $\sigma_c$  为任一状态下 UHPC 材料应变  $\epsilon_c$  所对应的应力值； $\epsilon_{cu}$  为极限压应变，试件 U-01、U-02 的极限压应变分别为  $4\,150 \times 10^{-6}$  和  $4\,490 \times 10^{-6}$ 。

由式 (1) 和式 (2) 结合文献 [23] 中给出的 UHPC 本构关系，可以计算得到试件 U-01 的  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  分别为 0.95 和 0.77，试件 U-02 的  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  分别为 0.93 和 0.76。试件的受压区等效矩形应力图块的高度  $x$  可以通过式 (5) 即正截面合力的平衡来确定。矩形应力图块的应力值取混凝土轴心抗压实测值  $f_c$  的  $\alpha_1$  倍，受拉区的拉应力取 UHPC 的轴心抗拉强度设计值或实测值  $f_t$ 。 $f_c$  与  $f_t$  均可以通过《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)<sup>[17]</sup> 中的计算方法得到 (表 2)。UHPC 板的正截面拉压区总应力可按式 (5) 计算

$$F_{pu} = \alpha_1 f_c b x = F_{pr} = \lambda f_t b (h - \frac{x}{2}) \quad (5)$$

式中： $F_{pu}$  为正截面受压区总应力； $F_{pr}$  为受拉区总应力；考虑到 UHPC 板承载接近屈服阶段时，板底部的部分钢纤维-混凝土基体已经遭到破坏， $f_t$  需要乘以安全系数  $\lambda$  进行折减。

UHPC 板的受弯承载力可由中和轴处弯矩  $M$  表示，以式 (6) 计算

$$M = \alpha_1 f_c b x (h - \frac{x}{2}) = \lambda f_t b (h - \frac{x}{\beta_1}) (\frac{h - x/\beta_1}{2}) \quad (6)$$

## 4.2 安全系数分析

安全系数 $\lambda$ 的取值是计算 UHPC 板正截面受弯承载力的关键。安全系数 $\lambda$ 的不同取值对本简化计算方法计算结果的影响如图 11 所示,图 11 中纵坐标为承载力计算值 $F_{bc}$ 与实测值 $F_b$ 的比值, $F_{bc}$ 和 $F_b$ 分别由中和轴处弯矩反算得到。

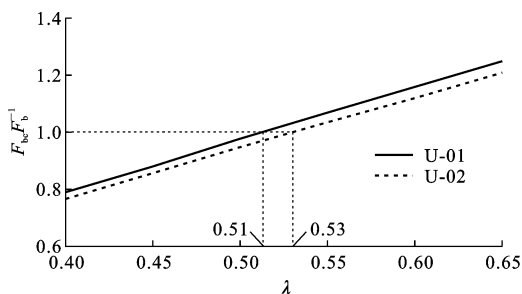


图 11  $\lambda$  取值

Fig. 11 Values of  $\lambda$

由图 11 可知,U-01,U-02 分别在 $\lambda$ 取 0.51 和 0.53 时承载力计算值等于实测值。因此,本简化公式取安全系数 $\lambda$ 为 0.50 进行 UHPC 板受弯承载力的计算。

## 4.3 算法准确性验证

图 12 汇总了 UHPC 板受弯承载力的理论计算结果、有限元计算值、本试验以及文献[13],[24]中的试验结果,其中, $F'_b$ 为有限元模拟结果,为本文简化计算公式计算结果。

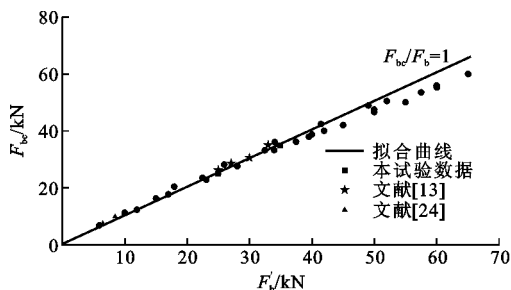


图 12 计算结果比较

Fig. 12 Comparison of Calculation Results

由图 12 可见,本研究给出的简化计算公式充分考虑了 UHPC 板混凝土-钢纤维基体的抗拉能力,简化公式的计算结果与真实结果相当。计算结果均在真实结果的 88%~110% 范围内, $F_{bc}/F'_b$  的均值为 0.93,方差为 0.005。同时,公式计算结果也与本试验与文献中的试验结果吻合良好。因此,本文给出的简化计算方法适用于无配筋 UHPC 板的承载力计算,可为工程实际与相关规范的制定提供一定参考。

## 5 结 语

(1)UHPC 板的破坏过程可分为弹性、屈服和破坏 3 个阶段,UHPC 板的受弯破坏属于延性破坏,满足实际工程的需求。

(2)UHPC 板弹性极限荷载是同等级钢筋混凝土盖板的 220%,即 UHPC 板在常规荷载作用下拥有更好的耐久性和适用性。普通钢筋混凝土板承载破坏时,同等级的 UHPC 板依然可以正常工作且有较大承载能力富余,在承载能力方面 UHPC 板完全可以替代普通钢筋混凝土板。

(3)板的受弯承载力与钢纤维含量、尺寸和材料等级相关。若无特殊需求,建议实际工程中 UHPC 板各参数按以下范围取值:钢纤维含量在 1.5%~2.5%之间,厚度在 30~50 mm 之间,材料等级在 U120~U160 之间。

(4)本文给出的 UHPC 板受弯承载能力简化计算公式具有较好的精度,可为工程实际与相关规范的制定提供一定参考。

## 参考文献:

### References:

- [1] 陈宝春,季 韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.  
CHEN Bao-chun,JI Tao,HUANG Qing-wei,et al. Review of Research on Ultra-high Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(3):1-24.
- [2] DE LARRARD F,SEDRAN T. Optimization of Ultra-high-performance Concrete by the Use of a Packing Model[J]. Cement and Concrete Research,1994,24(6):997-1009.
- [3] AYDIN S,BARADAN B. Engineering Properties of Reactive Powder Concrete Without Portland Cement [J]. ACI Materials Journal,2013,110(6):619-627.
- [4] 敖长江.铁路桥梁用活性粉末混凝土人行道板及支架的制造工艺技术[J].林业科技情报,2004,39(4):66-67,69.  
AO Chang-jiang. Produce Technique of Activated Dust Concrete Footpath Board and Bracket Used in Railway Bridge [J]. Journal of Forest Science and Technology Information,2004,39(4):66-67,69.
- [5] 王 谦,刘永彬,鲁统卫. RPC150 的性能及在高铁工程中的应用[J]. 低温建筑技术,2012,34(8):13-15.  
WANG Qian,LIU Yong-bin,LU Tong-wei. Performance and Application of RPC150 in HSR Engineering



- [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(8): 13-15.
- [6] 石磊. RPC130 活性粉末混凝土在石武客专铁路工程盖板生产中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2011(5): 134-135.
- SHI Lei. The Application of RPC130 in the Production of Railway Engineering Cover Plate in Shiwuke [J]. Railway Engineering, 2011(5): 134-135.
- [7] 李元, 王冬, 於定新. 早强型聚羧酸减水剂在客运专线 RPC(活性粉末混凝土)盖板工程中的应用[J]. 商品混凝土, 2011(5): 62-63.
- LI Yuan, WANG Dong, YU Ding-xin. The Application of Early Strength Polycarboxylic Acid Reducer in the Construction of the Passenger Dedicated Line RPC[J]. Ready-mixed Concrete, 2011(5): 62-63.
- [8] 常青. 严寒地区高速铁路 RPC-130 活性粉末混凝土材料应用[J]. 中国建材科技, 2014(1): 38-39, 47.
- CHANG Qing. High Speed Railway RPC-130 Reactive Powder Concrete Material Application[J]. China Building Materials Science & Technology, 2014(1): 38-39, 47.
- [9] 赵曼, 阎贵平, 郝文秀. 高速铁路 RPC 格构型轨道板的设计与仿真分析[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 64-68.
- ZHAO Man, YAN Gui-ping, HAO Wen-xiu. Simulation Analysis and Design of RPC Lattice Slab in High-speed Railway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(1): 64-68.
- [10] 黄旭毅, 吴伟. RPC 盖板承载力与抗裂性试验研究[J]. 云南水力发电, 2013, 29(3): 15-18.
- HUANG Xu-yi, WU Wei. The Test and Study of RPC Capping Plate Bearing Capacity and Crack Resistance[J]. Yunnan Water Power, 2013, 29(3): 15-18.
- [11] YANG J, WANG J S, PENG X. Design and Behavior of RPC Slab Track[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 587/588/589: 1100-1105.
- [12] ZHENG W, LU X, YING W. Flexural Behaviour of Precast, Prestressed Ribbed RPC Bottom Panels[J]. Open Civil Engineering Journal, 2015, 9(1): 98-106.
- [13] 陈宏伟, 郭敏, 赵宏志, 等. RPC 盖板抗弯承载力试验研究[J]. 特种结构, 2016, 33(5): 23-27.
- CHEN Hong-wei, GUO Min, ZHAO Hong-zhi, et al. Experimental Study on Flexural Behavior of RPC Cover Slabs[J]. Journal of Special Structures, 2016, 33(5): 23-27.
- [14] MAHMOOD M, DAWOOD M. Flexural Behavior of Continuous Bubbled Reinforced Reactive Powder Concrete Flat Slab[J]. Journal of Babylon University, 2017, 25(2): 504-505.
- [15] Q/CR 2.1—2014, 铁道电缆槽盖板和人行道步板 第 1 部分: 活性粉末混凝土型[S].
- Q/CR 2.1—2014, Railway Cable Trough Cover Plate and Sidewalk Step Plate — Part 1: Reactive Powder Concrete[S].
- [16] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [17] GB/T 31387—2015, 活性粉末混凝土[S].
- GB/T 31387—2015, Reactive Powder Concrete[S].
- [18] 邱继生. 钢纤维混凝土结构非线性有限元分析方法研究[J]. 混凝土, 2011(3): 17-20, 24.
- QIU Ji-sheng. Study on Nonlinear Finite Element Analysis of Steel Fiber Concrete Structure[J]. Concrete, 2011(3): 17-20, 24.
- [19] ALGUHI H A, ELSAIGH W A. Development of Tensile Stress-strain Relationship for High-strength Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2016, 10(2): 190-196.
- [20] 张军伟, 高丹盈, 朱海堂. 钢筋钢纤维混凝土牛腿抗裂性能有限元分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(4): 1-5.
- ZHANG Jun-wei, GAO Dan-ying, ZHU Hai-tang. Nonlinear Finite Element Analysis on Cracking-resistance Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete Corbels[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2009, 30(4): 1-5.
- [21] AFGC/SETRA 2013, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes[S].
- [22] Concrete Engineering Series 82, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)[S].
- [23] MANSUR M A, CHIN M S, WEE T H. Stress-strain Relationship of High-strength Fiber Concrete in Compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(1): 21-29.
- [24] 管品武, 唐国斌, 孟会英. 钢纤维混凝土沟盖板承载力试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(5): 49-51.
- GUAN Pin-wu, TANG Guo-bin, MENG Hui-ying. Study on Carrying Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete Trench Cover Plate[J]. China Concrete and Cement Products, 2006(5): 49-51.