

# 钢桥面超高性能混凝土铺装设计因素探讨

龚叶锋

上海城建数字产业集团有限公司

DOI:10.12238/btr.v7i2.4274

**[摘要]** 本文以极限承载力为指标,采用正交试验对超高性能混凝土作为钢桥面铺装时的设计因素进行了研究,得到了以下结论:采用初裂荷载作为评价指标时,UHPC厚度为极显著影响因素,粘结层为显著影响因素。采用弹性极限荷载作为评价指标时,且UHPC厚度为极显著影响因素,剪力钉为显著影响因素。采用破坏荷载评价时,各UHPC厚度,配筋率为显著影响因素。若使铺装的各阶段的设计极限承载力均达到最高,则设计因素的最优组合为:UHPC厚度80mm+3%配筋率+设置粘结层+设置剪力钉。

**[关键词]** 钢桥面铺装;超高性能混凝土;正交试验;设计因素

中图分类号:U416.217 文献标识码:A

## Research on design factors of ultra-high performance concrete pavement of steel bridge deck based on ultimate bearing capacity

Yefeng Gong

Shanghai Urban Construction Digital Industry Group Co., Ltd

**[Abstract]** Taking the ultimate bearing capacity as the index, the orthogonal test was used to study the ultra-high performance concrete as the design factor of steel bridge deck pavement, and the following conclusions were obtained: when the initial crack load was used as the evaluation index, the UHPC thickness was the most significant influencing factor, and the bond layer was the significant influencing factor. When the elastic ultimate load is used as the evaluation index, the UHPC thickness is the most significant influencing factor, and the shear nail is a significant influencing factor. When the failure load evaluation is adopted, the thickness and reinforcement ratio of each UHPC are the significant influencing factors. If the design ultimate bearing capacity of each stage of pavement reaches the highest, the optimal combination of design factors is as follows: UHPC thickness 80mm + 3% reinforcement ratio + setting the adhesive layer + setting the shear nail.

**[Key words]** Steel deck pavement; Ultra-high performance concrete; Orthogonal test; Design factors

### 引言

正交异性钢桥面板由于可以明显降低桥面板的自重,增加桥梁的跨径,改善结构的受力特性,成为众多桥梁的首选结构形式。但正交异性钢桥面板既要承担车轮荷载,又要分担主梁受力,其受力情况较为复杂。由于其结构复杂,纵横加劲肋交叉多,焊缝多,且直接承受车轮荷载作用,应力变化幅度较大,导致其上的钢桥面铺装经常发生各类病害<sup>[1]</sup>。

超高性能水泥混凝土(UHPC)一般是指抗压强度大于150MPa以上,同时具有超高韧性与耐久性的水泥混凝土材料<sup>[2]</sup>。UHPC通过在水泥基材料中加入钢纤维来改善水泥混凝土的材料性能,具有比其他水泥混凝土更强的耐久性与抗拉强度。UHPC的出现,为钢桥面刚性铺装的应用提供了一个新的机会。由于钢桥面铺装的变形比较大,普通的水泥混凝土很难满足这样的变形,而UHPC由于各项性能均远高于普通的水泥混凝土性能,可以在满

足钢桥面铺装性能要求的同时,以较薄的厚度进行铺装,从而不增加原有桥梁的承重。

UHPC在钢桥面铺装上应用时,通常需要考虑的设计因素有:铺装层厚度、剪力钉状态、粘结层状态、配筋率。目前针对这些设计因素尚未有统一的共识,基于此本文以极限承载力作为评价指标,采用小梁试验,以正交设计为试验基础对上述设计因素进行研究,以期得到最优的设计组合。

### 1 试验材料与试验方法

为了得到不同设计因素的最优组合,采用正交试验进行设计。以小梁试验为基础,采用极限承载力进行评价。

#### 1.1 试验材料

本文所用的超高强韧性水泥混凝土由上海某材料公司提供,其主要的原材料为水泥、硅灰、石英砂、活性填料、钢纤维、减水减缩剂、水组成。超高性能混凝土的材料基体配合比如表1

所示。钢纤维的体积掺量为2.5%，钢纤维的特征参数见表2。所使用的钢纤维、减水减缩剂如图1所示。

表1 超高性能混凝土基体配合比

原材料	水泥/kg	硅灰/kg	石英砂/kg	活性填料/kg	减水减缩剂/kg	水/kg
质量比	1	0.3	1.34	0.3	0.005	0.2



a 所使用的钢纤维



b 所使用的减水减缩剂

图1 钢纤维与减水减缩剂

表2钢纤维特征参数

指标	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/mm	长径比	密度/kg·m <sup>-3</sup>
结果	≥2500	≥200G	13	0.2	65	7850

### 1.2 试验方法

(1) 加载方法与加载模型。加载方法：采用室内复合梁五点加载模型。

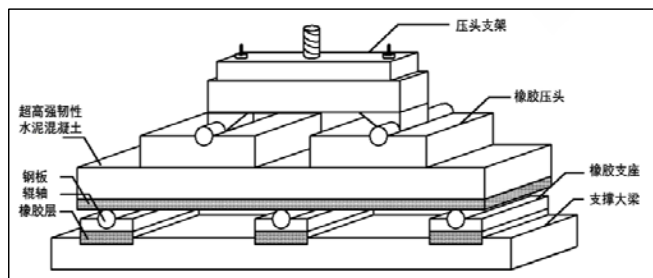


图2 五点弯曲加载试验方法

加载模型：加载模型如图2所示。

该试验模型的试件尺寸采用700mm×200mm，钢板厚度16mm。上部采用间距300mm的刚性辊轴(直径30mm)作用于两个橡胶压头上，橡胶压头尺寸为200mm×250mm，从而用以模拟单轴车辆荷载的双轮荷载作用。底部支座使用橡胶支座与刚性辊轴支座结合，尺寸为200×90mm，辊轴直径30mm。

(2) 试件参数设计。复合梁试件设计参数设定为长与宽为700×200mm，厚度分别为50cm、80cm，复合梁底部钢板厚16mm，钢板强度等级为Q235。层间粘结状态设置为无和有，设置粘结层时采用甲基丙烯酸树脂作为粘结层。剪力钉状态设置为无和有，设置剪力钉时，间距320mm、直径16mm、长45mm。配筋率为1%、3%，钢筋使用HRB400热轧带肋螺纹钢，直径10mm。在有剪力钉与配筋的情况下，剪力钉设置以及配筋方法(以配筋率3%为例)如图3所示。

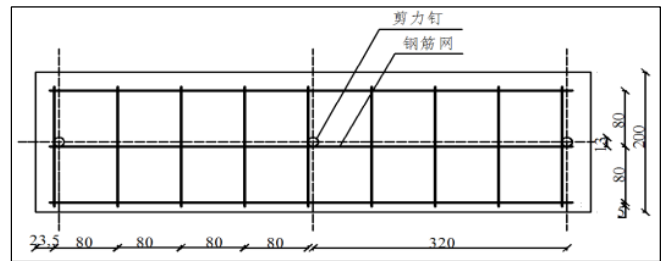


图3 复合梁的剪力钉与3%配筋率下的配筋设置方案(单位/mm)

(3) 试验方案设计。据前述讨论，影响复合梁试验的影响因素有：铺装层厚度、剪力钉、粘结层、配筋率。如果对这些因素以及水平逐一探讨进行全面搭配试验，则试验次数较多且不能很好的分析这四种因素之间的相互影响作用，而采用正交设计试验以及多指标分析是解决这个问题的一个行之有效的方法<sup>[3]</sup>。根据试验具有四个影响因素，两个水平，确定采用4因素2水平的正交试验设计表L8(24)进行试验设计，设计的试验方案如表3所示。

表3 根据正交试验所设计的试验方案

表头设计	粘结层状态	剪力钉状态	配筋率/%	铺装层厚度/mm
列号 试验号	1	2	3	4
1	有	无	3	50
2	有	有	1	50
3	有	无	3	80
4	有	有	1	80
5	无	有	3	50
6	无	无	1	80
7	无	有	3	80
8	无	无	1	50

(4) 试验仪器与设备。加载设备：极限加载使用液压伺服材料试验机进行(量程500kN)，疲劳加载使用大型MTS材料测试系统进行(量程100kN，最大加载频率20Hz)。

1.3 试验流程

在试件准备完毕后,采用MTS进行不同影响因素下的极限承载力试验,具体的流程如下:安放复合梁加载支座,调整支座水平,并确保底部大梁三个辊轴支座在同一水平面上,防止加载过程出现偏载状况。连接复合梁上各应变传感器接线,并接仪器调试,确认各传感器工作状态正常。安放加载压头及分载梁,需保证压头加载于复合梁中心位置防止偏载。在复合梁三分点、二分点各安置一个直线位移传感器,连接采集仪调试至正常工作状态。控制位移加载,预压复合梁至5kN并稳压2分钟,以消除支座位移、平衡各组件之间的接触,消除非荷载位移影响。开始采集各应变传感器应变值及直线位移传感器的挠度值,结合复合梁的状态进行分级加载,荷载每次增加5kN,期间借助裂缝观测仪检测裂缝产生及开展状况。

2 试验结果分析

根据正交试验设计的试验方案,分别采用直观分析、极差分析以及方差分析对这四个因素的主次关系、显著性以及最优组合进行分析,分析时采用的评价指标为小梁的初裂荷载、极限荷载以及破坏荷载。根据正交试验的设计方案,复合梁极限承载力试验的初裂荷载、极限荷载以及破坏荷载的结果如表4所示。

表4 复合梁极限承载力的试验结果

评价指标 试验编号	粘 结 层	剪 力 钉	配 筋 率/%	UHPC厚 度/mm	初裂荷 载/kN	弹性极限 荷载/kN	破坏荷载 /kN
1	有	无	3	50	95	170	280
2	有	有	1	50	105	190	250
3	有	无	3	80	175	250	390
4	有	有	1	80	190	330	380
5	无	有	3	50	90	200	300
6	无	无	1	80	130	220	260
7	无	有	3	80	140	300	420
8	无	无	1	50	80	150	220

注:对于粘结层1代表无,2代表有;对于剪力钉1代表无,2代表有;对于配筋率1代表1%,2代表3%;对于铺装层厚度,1代表50mm,2代表80mm。

分别采用初裂荷载、弹性极限荷载以及破坏荷载作为评价指标,对铺装层厚度、剪力钉状态、粘结层状态、配筋率等因素进行直观分析、极差分析与方差分析。

2.1 试验结果的直观分析

由试验结果可以看到,三个评价指标下,第四组试验结果初裂荷载与弹性极限荷载为最高,该组的设计组合为80mmUHPC+粘结层+剪力钉+1%配筋率。其次为第7组试验结果,该组的组合为80mmUHPC+无粘结层+剪力钉+3%配筋率,该组合为破坏荷载最高,弹性极限荷载第二高。根据这两组的结果不难看出,若采用80mmUHPC+粘结层+剪力钉+3%配筋率的设计组合,将会产生最大的极限承载力结果。但同时也会发现根据试验结果,直观分析很难观察到这几个设计因素的影响规律。

2.2 试验结果的极差分析

(1)以初裂荷载为评价指标的极差结果分析。分别对上述设计因素进行极差法的参数K、k以及R值进行计算,计算结果如表4所示。从表5的结果可知,采用初裂荷载评价时,各设计因素的R值大小为RUHPC厚度>R粘结层>R剪力钉>R配筋率,因此各设计因素的主次关系为UHPC厚度>粘结层>剪力钉>配筋率。

表5 以初裂荷载为评价指标的极差计算结果

影响因素 极差参数	粘 结 层 状 态	剪 力 钉 状 态	配 筋 率	UHPC厚 度
K1	440	480	505	370
K2	565	525	500	735
k1	110	120	126.5	92.5
k2	141.25	131.25	125	158.75
R	31.25	11.25	1.5	66.25

(2)以弹性极限荷载为评价指标的极差结果分析。分别对上述设计因素进行极差法的参数K、k以及R值进行计算,计算结果如表6所示。

表6 以弹性极限荷载为评价指标的极差计算结果

影响参数 极差参数	粘 结 层 状 态	剪 力 钉 状 态	配 筋 率	UHPC厚 度
K1	870	790	890	1460
K2	940	1020	920	1100
k1	217.5	197.5	222.5	275
k2	235	255	230	365
R	17.5	57.5	7.5	90

从表6的结果可知,采用弹性极限荷载评价时,各设计因素的R值大小为RUHPC厚度>R剪力钉>R粘结层>R配筋率,因此各设计因素的主次关系为UHPC厚度>剪力钉>粘结层>配筋率。

(3)以破坏荷载为评价指标的极差结果分析。分别对上述设计因素进行极差法的参数K、k以及R值进行计算,计算结果如表7所示。

表7 以破坏荷载为评价指标的极差计算结果

影响因素 极差参数	粘 结 层 状 态	剪 力 钉 状 态	配 筋 率	UHPC厚 度
K1	1200	1150	890	1390
K2	1300	1350	1390	1050
k1	300	287.5	222.5	347.5
k2	325	337.5	347.5	262.5
R	25	50	125	85

从表7的结果可知,采用破坏荷载评价时,各设计因素的R值大小为R配筋率>RUHPC厚度>R剪力钉>R粘结层,因此各设计因素的主次关系为配筋率>UHPC厚度>剪力钉>粘结层。

(4)极差结果的综合分析。根据极差三项指标下的评价结果可以看出:第一,UHPC厚度是影响复合梁的初裂荷载以及弹性极

表8 以初裂荷载为评价指标的方差分析计算结果

变异源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	10987.500a	4	2746.875	15.421	0.024
截距	126253.125	1	126253.125	708.789	0.000
粘结层状态	1953.125	1	1953.125	10.965	0.045
剪力钉状态	253.125	1	253.125	1.421	0.319
配筋率	3.125	1	3.125	0.018	0.903
UHPC 厚度	8778.125	1	8778.125	49.281	0.006
误差	534.375	3	178.125		
总计	137775.000	8			
校正的总计	11521.875	7			

a. R<sup>2</sup>=0.954, 调整后的 R<sup>2</sup>=0.892

表9 以弹性极限荷载为评价指标的方差分析计算结果

变异源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	26350.000a	4	6587.500	13.748	0.029
截距	409512.500	1	409512.500	854.635	0.000
粘结层状态	612.500	1	612.500	1.278	0.340
剪力钉状态	6612.500	1	6612.500	13.800	0.034
配筋率	112.500	1	112.500	0.235	0.661
UHPC 厚度	19012.500	1	19012.500	39.678	0.008
误差	1437.500	3	479.167		
总计	437300.000	8			
校正的总计	27787.500	7			

a. R<sup>2</sup>=0.948, 调整后的 R<sup>2</sup>=0.879

限荷载的最重要的设计因素,厚度越高,这两项指标值将越高。第二,配筋率是影响复合梁的破坏荷载的最重要的设计因素,配筋率越高,破坏荷载值越高。第三,粘结层是影响初裂荷载的次重要因素,设置粘结层将有利于提高复合梁的初裂荷载值。第四,剪力钉是影响弹性极限荷载的次重要因素,设置剪力钉将有助于提高复合梁的弹性极限荷载值。

### 2.3 试验结果的方差分析

对试验结果进行方差分析,从而评价各影响因素的显著性。

(1)以初裂荷载为评价指标的方差结果分析。以初裂荷载为评价指标,计算各列的偏差平方和、自由度,列出方差分析表并进行F检验,分析各影响因素的显著性,具体结果见表8。

由表8可知,所构建的方差分析模型的R<sup>2</sup>为0.954,调整后的R<sup>2</sup>为0.892。统计学上认为R<sup>2</sup>越接近于1,则方差模型对总体的拟合程度越高,这就说明所构建的模型对观测数据的总体拟合程度很好,因此分析的结果可信。此外,各因素的F检验结果与F检

验的概率值(Sig)代表了各因素对结果的影响显著性大小,一般以显著性水平0.05作为检验标准,若某因素的F检验概率值(Sig)小于0.05,则应拒绝零假设,认为该因素对结果的影响是显著的,同时若小于0.01,则认为该因素对结果的影响是极为显著的。反之若F检验的概率值(Sig)大于0.05,则说明该因素对结果的影响不显著。

根据对各因素的F检验结果以及各因素的F检验的概率值,可知F粘结层状态与FUHPC厚度的概率分别为0.045与0.006,这两个值均小于0.05,说明这两个因素对初裂荷载的影响是显著的。且FUHPC厚度的概率小于0.01,说明该因素的影响是极为显著的。另外F剪力钉状态与F配筋率的概率分别为0.319与0.903,说明这两个因素对初裂荷载的影响不显著。

(2)以弹性极限荷载为评价指标的方差结果分析。以弹性极限荷载为评价指标,计算各列的偏差平方和、自由度,列出方差分析表并进行F检验,分析各影响因素的显著性,具体结果见表5.8。

根据表9的结果可知,所构建的方差分析模型的R<sup>2</sup>为0.948,调整后的R<sup>2</sup>为0.879,因此说明构建的方差分析模型对总体的拟合程度很好,因此分析的结果可信。

F剪力钉状态与FUHPC厚度检验的概率值分别为0.034与0.008,这两个值均小于0.05,说明这两个因素对弹性极限荷载的影响是显著的。且FUHPC厚度的概率小于0.01,说明该因素的影响是极为显著的。另外F粘结层状态与F配筋率的概率分别为0.340与0.661,说明这两个因素对弹性极限荷载的影响不显著。

(3)以破坏荷载为评价指标的方差结果分析。以破坏荷载为评价指标,计算各列的偏差平方和、自由度,列出方差分析表并进行F检验,分析各影响因素的显著性,具体结果见表10。

根据表10的结果可知,所构建的方差分析模型的R<sup>2</sup>为0.935,调整后的R<sup>2</sup>为0.849,因此说明所构建的方差分析模型对总体的拟合程度很好,因此分析的结果可信。

F配筋率与FUHPC厚度检验的概率值分别为0.042与0.016,这两个值均小于0.05,说明这两个因素对破坏荷载的影响是显著的。另外F粘结层状态与F剪力钉状态的概率分别为0.308与0.092,说明这两个因素对破坏荷载的影响不显著。

(4)方差结果的综合分析。综合三项指标下的分析结果可以看出:第一,UHPC厚度是影响复合梁承载力的最显著因素;第二,粘结层与剪力钉是影响复合梁弹性阶段承载力的显著因素;第三,配筋率是影响复合梁韧性阶段承载力的显著因素。

#### 2.4不同设计因素的最优组合分析

结合直观分析结果、极差分析与方差分析结果可知,若使复合梁的各阶段的设计极限承载力均达到最高,则设计因素的最优

组合应为:UHPC厚度80mm+3%配筋率+设置粘结层+设置剪力钉。

### 3 结论

本文通过正交试验对钢桥面超高性能混凝土铺装的设计因素影响进行了试验,主要得到以下结论:

(1)采用初裂荷载作为评价指标时,各设计因素的主次关系为UHPC厚度>粘结层>剪力钉>配筋率,且UHPC厚度为极显著影响因素,粘结层为显著影响因素。

(2)采用弹性极限荷载作为评价指标时,各设计因素的主次关系为UHPC厚度>剪力钉>粘结层>配筋率,且UHPC厚度为极显著影响因素,剪力钉为显著影响因素。

(3)采用破坏荷载评价时,各设计因素的主次关系为配筋率>UHPC厚度>剪力钉>粘结层,且UHPC厚度,配筋率为显著影响因素。

(4)若使复合梁的各阶段的设计极限承载力均达到最高,则设计因素的最优组合为:UHPC厚度80mm+3%配筋率+设置粘结层+设置剪力钉。

#### [参考文献]

- [1]吴冲.现代钢桥[M].人民交通出版社,2006.
- [2]邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(23):33-43.
- [3]金良超.正交设计与多指标分析[M].北京:中国铁道出版社,1988.

#### 作者简介:

龚叶锋(1975--),男,汉族,上海闵行区人,本科,高级工程师,研究方向:基础设施建设。