DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250747

考虑标准活载提升及铺装厚度影响的在役空心板梁抗裂性能研究

朱森林[1],卞钢金[2],王　秒[3],程世涛[4]

(1.华设检测科技有限公司,江苏 南京 211135;2.上海合年丰建筑工程有限公司 上海市 201403;3.江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013;4.淮阴工学院 建筑工程学院,江苏 淮安 223003)

摘　要: 在高速公路改扩建工程中,由于现行公路桥梁设计规范中汽车荷载标准的提升,在役空心板梁的再利用问题亟待深入研究。为此,考虑空心板结构和顶面铺装层的实际协同工作效应,提出了一种考虑混凝土铺装面层有效厚度的空心板梁截面应力计算方法。以跨径为 10 m 的既有先张法预应力空心板梁为研究对象,系统分析了汽车荷载标准提升条件下,混凝土面层有效厚度变化对空心板截面下缘应力的影响规律。结果表明:标准中汽车荷载的提升会显著增加先张法预应力空心板梁跨中截面的下缘拉应力;随着混凝土面层有效厚度的增加,先张法预应力空心板梁截面下缘拉应力呈现递减趋势。基于上述研究成果,进一步提出了既有先张法预应力空心板梁桥在高速公路改扩建工程中的再利用建议。

关键词: 先张空心板梁;抗裂性能;汽车荷载标准;混凝土面层;下缘应力

中图分类号: U441;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0090-05

Research on Crack Resistance of In-Service Hollow Slab Beams Considering Impact of Standard Live Load and Pavement Thickness

ZHU Senlin[1], BIAN Gangjin[2], WANG Miao[3], CHENG Shitao[4]

(1. Huashe Detection Technology Co., Ltd., Nanjing 211189, China; 2. Shanghai Henianfeng Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 201403, China; 3. School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhengjiang 212013, China; 4. School of Architectural Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: In the reconstruction and expansion projects of expressways, due to the increase in the vehicle load standards in the current highway bridge design codes, the reuse of in-service hollow slab beams urgently needs in-depth research. Therefore, considering the actual synergistic working effect of the hollow slab structure and the top surface pavement layer, a calculation method for the section stress of hollow slab beams considering the effective thickness of the concrete pavement surface layer is proposed. Taking the existing pre-tensioned prestressed hollow slab beam with a span of 10 m as the research object, the influence law of the effective thickness variation of the concrete surface layer on the stress at the lower edge of the hollow slab section under the increasing condition of automotive load standard is systematically analyzed. The results show that the increase of vehicle load in the standard will significantly increase the tensile stress at the lower edge of the mid-span section of the prestressed hollow slab beam by the pre-tensioning method. With the increase of the effective thickness of the concrete surface layer, the tensile stress at the lower edge of the prestressed hollow slab beam section by the pre-tensioning method shows a decreasing trend. Based on the above research results, further suggestions are put forward for the reuse of existing pre-tensioned prestressed hollow slab beam bridges in the reconstruction and expansion projects of expressways.

Keywords: pre-tensioned hollow slab beam; crack resistance; vehicle load standard; concrete surface layer; lower edge stress

0　引　言

先张法预制空心板梁因具有建筑高度低、经济性好、施工便利等优势,自 20 世纪 70 年代以来,已成为我国公路及市政桥梁中常见的桥梁结构形式,空心板标准图的普及更是推动了先张空心板梁桥的广

收稿日期: 2025-07-24
基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZC20252163)
作者简介: 朱森林(1989—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计、施工、养护工作。

泛应用[1]。在结构工程领域,先张法预应力空心板梁桥的横向连接构造通常采用浅铰接或深铰接形式[2]。为提升空心板梁横向连接的整体性,通常在空心板顶面设置一层钢筋网,并通过一次性浇筑工艺完成板梁铰缝及桥面混凝土面层的施工(混凝土面层厚度一般设计为 10 cm),随后在混凝土面层上方铺设桥面沥青铺装层。从结构力学角度分析,混凝土面层可部分参与空心板梁的协同受力,其参与受力的厚度可定义为有效厚度,这一设计理念在桥梁结构优化中具有重要意义[3]。

在实际工程中,混凝土面层与梁体界面的结合性能受施工工艺质量显著影响,导致不同设计规范对有效厚度参数的设定存在明显差异。研究表明,保守设计方法通常忽略混凝土面层的协同工作效应,而多数设计机构基于界面黏结可靠性分析,采用经验性折减系数(典型取值为面层总厚度 70%)作为有效厚度设计依据。值得注意的是,对于梁高为 50 cm 的先张法预应力预制空心板梁桥,有效厚度参数的变化(0 ~ 10 cm)将导致截面惯性矩产生 12% ~ 18% 的波动,进而显著影响结构应力分布特征(弯矩重分布系数可达 1.15 ~ 1.25)[4]。这一现象揭示了界面协同工作效应对薄壁预制构件力学性能的敏感性特征,突显了精细化分析混凝土面层厚度在既有空心板梁桥承载力评估中的必要性[5-6]。

鉴于我国公路运输实际通行荷载的逐年增加,为有效提高公路桥梁的交通承载能力,自上世纪 80 年代以来,我国公路桥梁设计荷载标准已有三次提升[7],即 1989 版、2004 版和 2015 版《公路桥涵设计通用规范》,以下简称“89 规范”、“04 规范”和“15 规范”。此外,在长期服役环境及荷载下,一大批先张空心板梁桥已出现不同程度的结构老化、变形加大、开裂等病害[8],在当前汽车荷载标准下,评估既有先张空心板梁的抗裂性能,对于桥梁改扩建方案的决策十分重要[9]。

本文依托京沪高速公路江苏段改扩建工程,基于现行桥梁设计规范中汽车荷载标准的提升背景,以扬州市江都段唐庄北小桥 10 m 跨径先张法预应力空心板单梁为研究对象,系统开展了其抗裂性能评估研究。首先,基于不同设计规范的汽车荷载标准,计算了单梁跨中截面的弯矩响应;其次,考虑混凝土面层与空心板梁的协同工作效应,引入有效厚度参数,依据组合截面力学原理,建立了单梁跨中截面的应力分布计算模型;最后,通过对比分析单梁跨中截面下缘拉应力与混凝土抗拉强度限值,评估了空心板梁的抗裂性能,并提出了既有空心板梁在改扩建工程中的再利用建议。本研究将为高速公路改扩建工程中既有桥梁结构的性能评估与再利用提供了理论依据和工程参考。

2 工程概况

2.1 项目简介

京沪高速公路唐庄北小桥建于 1997 年,其上部结构采用 3×10 m 跨径的先张法预应力混凝土空心板梁,立面布置见图 1。横桥向由 13 片空心板梁组成,其中边板宽度为 99.5 cm,中板宽度为 99 cm,空心板梁高度统一为 40 cm。中板的计算跨径为 9.7 m,宽度为 0.99 m。中板及其面层的横截面尺寸及预应力钢束布置见图 2。结构材料方面,预制空心板、铰缝及整体化现浇层均采用 C40 混凝土。通过混凝土圆柱体标准试件轴心抗压试验得到实测抗压强度均值为 55.1 MPa;纵向普通钢筋屈服强度均值为 413.4 MPa;钢绞线屈服强度均值为 1 683.6 MPa。该桥的设计参数与构造细节为研究先张法预应力空心板梁的力学性能及抗裂性能提供了典型的工程案例。

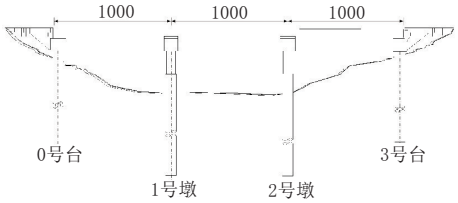

图 1 唐庄北小桥桥跨立面(单位:cm)

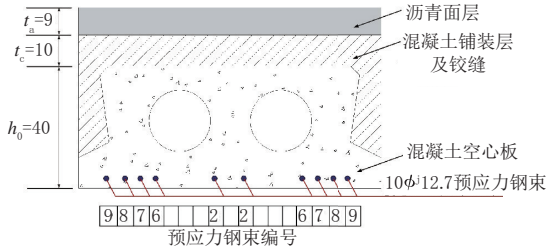

图 2 空心板及其面层(单位:cm)

2.2 三种汽车荷载标准下的结构内力

该桥设计时,依据荷载标准是“89 规范[9]”的汽-超 20,但在改扩建中,还需依据“04 规范[10]”和“15 规范[11]”,进行跨中截面最不利弯矩加载,图 3 给出了 3 种规范荷载的不同加载图示。

为得到空心板梁桥各单板的汽车荷载作用,这里按铰接板法计算桥梁跨中截面的横向分布系数,结果列于表 1。

由于 2 号板梁受力较大,取其作为研究对象,考虑横向分布及最不利加载布置后,由三种规范荷载

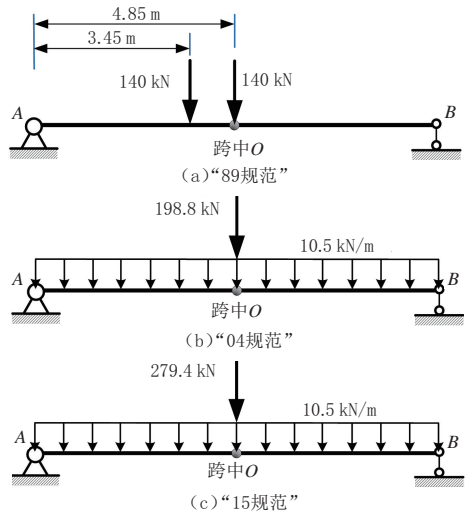

图3　不同荷载标准下空心板梁跨中弯矩的最不利加载示意

表1　各片空心板的跨中横向分布系数

梁号	1	2	3	4	5	6	7
横向分布系数	0.270	0.265	0.259	0.244	0.221	0.215	0.210

得到的跨中截面弯矩见表2。

表2　采用不同规范时2#空心板的跨中截面弯矩

桥梁规范	“89规范”	“04规范”	“15规范”
跨中截面弯矩/(kN·m)	155.13	162.47	214.27

此外，根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)，先张空心板梁的抗裂验算及分析，需要满足正常使用极限状态的要求，计算过程中的汽车荷载不计冲击作用[12]。

3　基于不同面层有效厚度的单板跨中截面应力计算方法

考虑到混凝土面层与空心板梁界面结合性能的变异性及其协同工作效应的不确定性，本研究基于组合截面力学原理，提出了一种考虑混凝土面层有效厚度变化的空心板梁跨中截面应力计算方法。该方法通过引入有效厚度参数，量化了混凝土面层参与结构整体受力的程度，从而能够更精确地反映空心板梁在实际荷载作用下的应力分布特征，为既有桥梁结构的抗裂性能评估提供了理论依据。图4展示了考虑不同施工阶段过程，先张空心板梁跨中截面下缘总应力计算原理。

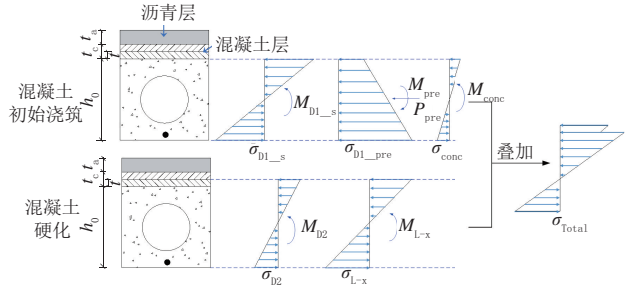

图4　空心板梁跨中截面下缘应力计算原理示意图

在混凝土面层浇筑后，分别考虑空心板梁自重、预应力作用以及面层混凝土自重，则空心板梁跨中截面的下缘应力分别为：

$$\begin{cases}\sigma_{D1\_s}=\dfrac{M_{D1\_s}}{W_0}\\ \sigma_{D1\_pre}=\dfrac{P_{pre}}{A_0}+\dfrac{M_{pre}}{W_0}\\ \sigma_{cons}=\dfrac{M_{conc}}{W_0}\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ_{D1_s}、σ_{D1_pre}、σ_{conc}分别为空心板自重、预应力作用、面层混凝土自重引起的空心板梁跨中截面下缘应力；W_0、A_0分别为空心板梁跨中截面抗弯惯性矩及面积；M_{D1_s}、M_{conc}分别为空心板和面层混凝土自重作用引起的弯矩；P_{pre}、M_{pre}分别为预应力作用下空心板截面产生的预加力和弯矩。

当面层混凝土硬化并与空心板梁上缘黏结后，设面层参与空心板共同受力的有效厚度为t。此时，由二期恒载(主要包括：沥青层及桥面附属设施重量)引起的空心板截面下缘应力为：

$$\sigma_{D2}=\frac{M_{D2}}{W_t}\tag{2}$$

式中：M_{D2}为二期恒载作用引起的空心板跨中截面弯矩；W_t为考虑面层混凝土有效厚度的空心板抗弯惯性矩。

由3种不同规范汽车荷载引起的空心板梁跨中截面下缘应力：

$$\sigma_{L-x}=\frac{M_{L-x}}{W_t}\tag{3}$$

式中：M_{L-x}为桥梁规范中汽车荷载引起的空心板跨中截面弯矩。

根据组合截面计算原理，考虑所有荷载作用时，空心板梁跨中截面下缘总应力为：

$$\sigma_{Total}=\sigma_{D1\_s}+\sigma_{D1\_pre}+\sigma_{conc}+\sigma_{D2}+\sigma_{L-x}\tag{4}$$

4　考虑不同荷载标准及混凝土面层有效厚度的空心板应力计算

根据唐庄北小桥的设计资料，其预应力钢束的张拉控制应力为1 339 MPa。依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》[12]的相关规定，本研究系统计算了先张法预应力空心板梁内各组钢绞线的预应力损失，具体计算结果详见表3。图5进一步展示了各组编号钢绞线的有效预应力分布及其预应

力损失的变化规律，为评估预应力效应对空心板梁力学性能的影响提供了定量依据。

表 3　先张空心板预应力损失计算应力　　单位：MPa

预应力损失类型	钢绞线编号				
	2#	6#	7#	8#	9#
锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩 σ_{l2}	21.9	24.7	41.5	19.6	30.0
预应力钢筋与台座之间的温差 σ_{l3}	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
混凝土的弹性压缩 σ_{l4}	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
预应力钢筋的应力松弛 σ_{l5}	142.6	141.3	133.4	143.7	138.8
混凝土的收缩和徐变 σ_{l6}	116.1	116.1	116.2	116.1	116.1

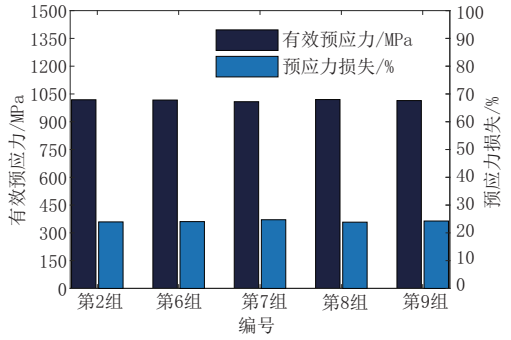

图 5　各组编号预应力钢束的有效预应力

根据图 5 的分析结果可知，在考虑预应力损失的影响下，各组预应力钢束的预应力损失率分布较为均匀，其值约为 24%；同时，各组预应力钢束的有效预应力水平趋于一致，均维持在 1 020 MPa 左右。在此基础上，综合考虑空心板自重、预应力效应以及面层混凝土自重的作用，计算得到了空心板跨中截面下缘应力的增量，具体计算结果见表 4。该结果为评估空心板梁在多重荷载作用下的应力响应及其抗裂性能提供了重要的数据支撑。

表 4　空心板自重、预应力作用及面层混凝土自重引起的空心板跨中截面下缘应力　　单位：MPa

荷载类型	空心板自重	预应力作用	面层混凝土自重
下缘应力增量	3.35（拉）	8.69（压）	1.16（拉）

表 5 为二期恒载引起的空心板跨中截面下缘应力增量随面层有效厚度的变化情况。

表 5　二期恒载引起的空心板梁跨中截面下缘拉应力　单位：MPa

t/mm	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ_{D2}	1.56	1.48	1.40	1.34	1.28	1.22	1.17	1.13	1.08	1.05	1.01

为探究混凝土面层有效厚度变化及汽车荷载标准提升对先张法预应力空心板梁中板跨中截面抗裂性能的影响，本研究分别依据三种不同设计规范中的汽车荷载标准，计算了空心板梁跨中截面下缘拉应力的分布特征，具体计算结果见表 6。该分析为评估既有桥梁结构在荷载标准提升背景下的抗裂性能退化规律提供了定量依据。

表 6　不同规范中汽车荷载引起的空心板梁跨中截面下缘拉应力　　单位：MPa

t/mm	“89 规范” σ_{L-89}	“04 规范” σ_{L-04}	σ_{L-04} 相对于 σ_{L-89} 的增量	“15 规范” σ_{L-15}	σ_{L-15} 相对于 σ_{L-89} 的增量
0	4.15	4.35	0.20	5.74	1.59
10	3.94	4.12	0.19	5.44	1.50
20	3.74	3.91	0.18	5.16	1.42
30	3.56	3.73	0.17	4.92	1.36
40	3.40	3.56	0.16	4.70	1.30
50	3.26	3.41	0.15	4.50	1.24
60	3.13	3.27	0.15	4.32	1.19
70	3.01	3.15	0.14	4.15	1.15
80	2.90	3.03	0.14	4.00	1.10
90	2.79	2.92	0.13	3.86	1.06
100	2.70	2.83	0.13	3.73	1.03

表 6 给出了不同汽车荷载标准下的空心板下缘拉应力变化，相比“89 规范”及“04 规范”，“15 规范”荷载引起的空心板下缘拉应力显著增加。此外，“15 规范”及“04 规范”荷载引起的空心板下缘拉应力分别最大超出“89 规范”约 38.3% 和 4.8%，并且两种规范超出“89 规范”的增量均随混凝土面层有效厚度的增大而减小。

图 6 给出了不同规范荷载作用下，空心板梁跨中截面下缘总应力随混凝土面层有效厚度的变化关系。图 6 中下缘应力以拉为正，以压为负。图中抗拉强度 2.6 MPa 是根据实际混凝土抗压强度换算得到。可以看出：（1）空心板梁跨中截面下缘拉应力与混凝土面层有效厚度呈显著负相关性，增大混凝土面层有效厚度可有效降低截面下缘拉应力水平，改善结构的抗裂性能；（2）在“89 规范”及“04 规范”荷载标准作用下，由于荷载水平相对较低，当混凝土面层有效厚度分别达到 67 mm 和 76 mm 时，空心板截面下缘应力状态由拉应力转变为压应力。然而，依据“15 规范”荷载标准，当有效厚度低于 15 mm 时，截面下缘拉应力已超过混凝土抗拉强度设计值；而且即使 100 mm 全厚混凝土面层参与受力，在现行荷载标准（15 规范）作用下，空心板截面下缘仍存在 0.85 MPa 的残余拉应力。

综上所述，汽车荷载标准的提升将显著增大空心板梁跨中截面下缘拉应力。而增大混凝土面层有效厚度，能够有效减小空心板截面下缘拉应力。此外，由于“89 规范”及“04 规范”荷载水平相对较低，空心板不会开裂，且当混凝土面层有效厚度超过一定水平时，空心板跨中截面下缘会出现压应力；而在“15 规范”荷载作用下，当面层有效厚度较低时，空心

板截面下缘将出现开裂。

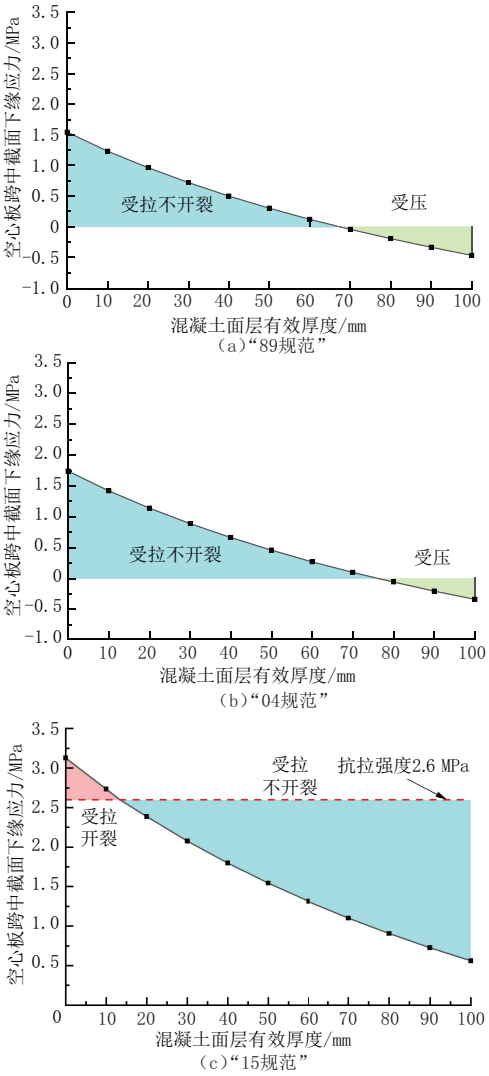

图6　空心板梁跨中截面下缘应力

5　在役空心板梁再利用建议

在实际桥梁工程改扩建中，空心板梁的再利用评估需要考虑多方面因素。除考虑规范更新、空心板梁混凝土面层有效厚度之外，还可考虑以下三个方面：

（1）通过现场检测获取空心板梁的裂缝分布特征及铰缝位移数据，结合桥梁竣工验收资料，系统考虑施工误差导致的混凝土面层几何尺寸变异及材料强度离散性，建立基于实测数据的精细化评估模型。

（2）在需要对大量空心板梁进行再利用评估时，可采用局部拆除法，选取具有代表性的先张法预应力空心板梁开展静载试验，通过试验研究混凝土面层有效厚度对梁体抗裂性能的影响规律，为整体评估提供科学依据。

（3）对于不具备拆除条件的先张法预应力空心板梁，可通过实桥荷载试验，结合有限元数值模拟与理论分析，对既有空心板梁桥的抗裂性能及承载能力进行综合评估，确保评估结果的准确性与可靠性。当无法进行荷载试验时，在结构力学性能分析中可保守假定：整体化层有效参与受力的厚度为其实际厚度的一半[13]。

6　结　语

鉴于桥梁汽车荷载标准的提升，空心板梁混凝土面层的有效厚度取值直接关系到既有桥梁的再利用问题。本文以某 10 m 先张空心板梁为例开展研究，主要结论如下：

（1）基于组合截面力学原理，提出了一种考虑混凝土面层有效厚度变化的空心板截面应力计算方法，通过引入有效厚度参数，量化了混凝土面层参与结构整体受力的程度，为空心板梁的精细化应力分析提供了理论依据。

（2）研究表明，汽车荷载标准的提升会显著增大空心板截面下缘拉应力，甚至可能导致截面下缘开裂；然而，结构抗裂计算中考虑混凝土面层有效厚度时，可有效降低截面下缘拉应力计算结果。

（3）基于研究成果，提出了高速公路改扩建工程中在役板梁桥的再利用评估建议，为后续类似工程中既有桥梁结构的性能评估与再利用提供了科学参考和实践指导。

参考文献：

[1] Xiao J L, Liu Y F, Feng L H, *et al*. 2025 Performance evaluation of existing reinforced concrete hollow-slab beams: Experiments and fibre beam element-based model updating[J]. Engineering Structures, 2025(326): 1-22.
[2] 黄宛昆，吴庆雄，王渠. 装配式空心板桥改进型铰缝结合面受力性能[J]. 交通运输工程学报，2022，22(6)：169-181.
[3] 陈林涛. 先张法预应力混凝土空心板梁施工工艺要点分析——以福建省省道S207线工程为例[J]. 四川水泥，2023(11)：174-176.
[4] 马思扬. 预制空心板梁桥新型铰缝构造的应用研究[D]. 福州：福州大学，2019.
[5] 何肖斌. 整体化铺装层加固空心板桥受力性能试验研究[J]. 南昌大学学报，2023，45(3)：268-274.
[6] SUN Xiugui, GONG Zhiquan, ZUO Yun, *et al*. Flexural behavior of the hollow slab girders strengthened with ultra-high performance concrete: Field full-scale experiment and analysis[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 1-18.
[7] 闫燕红，邓鸣，何立忠，等. 先张预应力混凝土板梁梁端横裂病害原因分析及处治对策研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2018，37(2)：15-23.
[8] 刘兆光，陶建利，吴先树. 改扩建项目既有桥梁利用及拼宽技术研究[J]. 公路，2020，65(9)：164-169.
[9] JTJ 021—89，公路桥涵设计通用规范[S].

（下转第 100 页）