引用格式　赵炳震,韩一博,李鹏飞,等. 带拱形加劲弦的双层钢桁梁桥竖向承载性能分析[J]. 工业建筑,2025,55(1):52-57. ZHAO B Z, HAN Y B,LI P F, et al. Analysis of the Vertical Bearing Performance of a Double-Layer Steel Truss Bridge with Arched Stiffening Chords [J]. Industrial Construction,2025,55(1):52-57 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG24082604

带拱形加劲弦的双层钢桁梁桥竖向承载性能分析*

赵炳震[1]　韩一博[3]　李鹏飞[1]　李　阳[1]　陈志华[3,4]　王　俊[2]　刘红波[3,4,5]　王天松[2]　刘　洋[3,4]

(1.陕西建工集团股份有限公司, 西安　710003; 2.陕西华山路桥集团有限公司, 西安　710026;
3.天津大学建筑工程学院, 天津　300072;4.天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津　300072;
5.河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸　056000)

摘　要　依托西安地铁 10 号线跨渭河公轨合建大桥实际工程,采用 ABAQUS 有限元分析软件对安装拱形加劲弦的双层钢桁梁桥受力性能展开研究。首先,依据缩尺模型试验,选取了中间 3 跨带拱形加劲弦段,考虑边界条件建立了拱形加劲弦双层钢桁梁桥有限元分析模型,对其开展了竖向加载模拟,将有限元模拟结果与已完成的缩尺模型试验结果进行对比,结果显示弹性阶段下荷载-位移曲线、荷载-应变曲线均吻合良好且处于弹性,验证了模拟方法的可靠性。最后基于验证后的有限元模型开展了参数化分析,研究了拱形加劲弦竖杆布置数量及方式等关键参数对双层钢桁梁桥竖向承载性能影响规律。结果表明:调整加劲弦竖杆布置形式后,中间跨及边跨跨中位移、支座上方腹杆应变变化不明显,而支座处上弦杆应力略有增加,最高处加劲弦杆应力明显增加。加劲弦弦杆下每个节点上方布置 1 根竖杆的方式虽然增加一定用钢量,但能够对结构挠曲变形、杆件应变控制起到有利作用,并且造型均匀美观,因此建议维持此种方案。

关键词　拱形加劲弦;双层钢桁梁桥;数值模拟;参数化分析;设计建议

Analysis of the Vertical Bearing Performance of a Double-Layer Steel Truss Bridge with Arched Stiffening Chords

ZHAO Bingzhen[1]　HAN Yibo[3]　LI Pengfei[1]　LI Yang[1]　CHEN Zhihua[3,4]　WANG Jun[2]
LIU Hongbo[3,4,5]　WANG Tiansong[2]　LIU Yang[3,4]

(1. *Shaanxi Construction Engineering Group Corporation Limited*, *Xi'an* 710003, *China*;2. *Shaanxi Huashan Road and Bridge Group Corporation Limited*, *Xi'an* 710026, *China*;3. *School of Civil Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 4. *Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 5. *School of Civil Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056000, *China*)

Abstract: Based on the actual project of the Xi'an Metro Line 10 combined road-rail bridge crossing the Weihe River,the mechanical properties of a double-layer steel truss bridge with arched stiffening chords were investigated by using the ABAQUS finite element analysis software, a model focusing on the middle three spans with arched stiffening chords was established considering boundary conditions. Vertical load simulations were compared with the results from scaled model tests. The comparisons showed that the load-displacement and load-strain curves in the elastic stage matched well, confirming the reliability of the simulation method. A parametric analysis was then conducted to examine the effects of the number and arrangement of vertical rods on the vertical bearing performance of the bridge. The results indicated that adjusting the vertical rod arrangement had minimal impact on mid-span displacements and web member strains above the supports, but slightly increased the stress in the top chord at the supports and significantly increased stress in the stiffening chord members at the highest point. Arranging one vertical rod above each joint under the stiffening chord increased the steel consumption, but it could effectively control the structural deformation and member strain, and provide a uniform and aesthetically pleasing design. This arrangement is therefore recommended.

Keywords: arched stiffening chord; double-layer steel truss bridge; numerical simulation; parametric analysis; design recommendations

*陕西省交通厅科研项目(24-54K);陕西省住房和城乡建设厅科技计划项目(2023-K21)。

第一作者:赵炳震,高级工程师,博士,主要从事钢结构领域的研究。

电子信箱:harvestzbz@ tju. edu. cn

收稿日期:2024-08-26

© 2025 工业建筑

0　引　言

随着城市化进程的不断加快,我国交通运输系统规模不断扩大,建造水平得到了显著提升。作为现代交通的重要组成部分,桥梁建造能够显著提高交通流动性、增强区域连通性、提升出行效率。此外,桥梁建造能够有效解决复杂地貌跨越问题,是交通运输发展的重要组成部分[1-3]。然而,桥梁失效不但会阻碍经济发展,甚至会导致人员伤亡。据统计,1974—2014 年,国内外共计发生桥梁事故 614 起,其中 90%以上为桥梁垮塌或出现严重损伤。事件调查指出,桥梁事故的重要原因之一是源于桥梁设计存在缺陷或对设计理论认识不足[4-5]。桥梁结构设计为桥梁的安全运行提供基础保障,而桥梁结构受力性能为桥梁结构安全设计提供技术支撑。

为揭示桥梁受力性能和变形机理,国内外学者通过试验和有限元分析手段对各类桥梁开展受力性能分析。刘自明[6]提出计算机模拟和实物模拟可以相互补充而不能互相取代,二者紧密结合才可推动桥梁技术的不断发展。刘爱荣等[7]通过对中山一桥进行缩尺模型试验,研究了其力学行为,并运用有限元分析验证了模型试验的可靠性,证明了该桥设计是安全合理的。张俊平等[8]同样通过缩尺模型试验研究了受力复杂的蝴蝶拱桥的力学行为,并建立空间板壳有限元模型对该模型桥梁进行理论分析,验证了其可靠性,提出了设计施工建议。裴阳[9]对 1∶5 的双层钢桁连续梁桥变高度节段模型进行了受力特性分析,并通过空间板梁法的建模方式进行计算分析,验证了建模方法的可行性及模型试验结果的准确性。张国刚[10]采用不同方法建立了斜拉桥初始有限元模型并进行了动力分析,提出了改进的模型修正技术,修正后的有限元模型可以较全面准确地反映斜拉桥模型的固有动力特性,为斜拉桥有限元建模与模型修正提供了参考。上述研究均表明试验及有限元手段能够对桥梁的受力性能进行模拟和分析,从而有效避免了认识不足所造成的设计缺陷。尤其是采用有限元分析,不但能够降低分析成本,还能够更深入了解分析构造合理性及设计经济性。

随着对建筑美学与结构性能的追求日益提升,新型桥梁构造层出不穷。其中双层钢桁梁桥因构造简单、施工便捷以及受力性能好等优势被广泛得到应用,成为桥梁发展的不可或缺的组成部分[11-12]。在桁架梁桥上增加拱形加劲弦,既能作为美学装饰又可与桁架结构协同受力。但由于对该新型构造形式理论认识的不足,对于上部安装拱形钢结构双层钢桁梁桥的性能试验及有限元研究尚未深入展开,限制了该结构形式在实际工程中的推广与应用。因此,对该结构形式开展力学性能研究,对于推动拱形加劲弦双层钢桁梁桥的设计应用具有重要意义。

本文依托跨渭河公轨合建大桥项目,对新型拱形加劲弦双层钢桁梁桥开展缩尺模型试验和有限元分析,详细介绍了缩尺模型的构件设计和试验细节。随后,采用 ABAQUS 有限元软件对试验模型进行模拟,对带拱形加劲弦双层钢桁梁结构受力情况进行参数分析,研究分析改变拱形加劲弦竖杆布置形式的结构受力、变形等力学特征,探究此拱形加劲弦结构在静力荷载下的受力状态及传力机理,相关结果能够为今后类似的双层钢桁梁桥设计提供参考。

1　工程及试验概况

跨渭河公轨合建大桥(图 1)是西安地铁 10 号线一期的控制性工程,是中国西北地区首座公轨两用桥,结构为上下双层,上层布置六车道公路,下层布置四线公路、两线地铁,全桥九跨一联长。桥梁全长 1 412 m,为主跨 300 m 的上加劲双层钢桁连续梁桥,桥跨尺寸为(124+132+132+168+300+168+132+132+124)m,桥跨布置如图 2 所示。



图 1　跨渭河公轨合建桥示意

Fig. 1　A schematic diagram of the Wei River Bridge with Integrated Rail and Road Structure

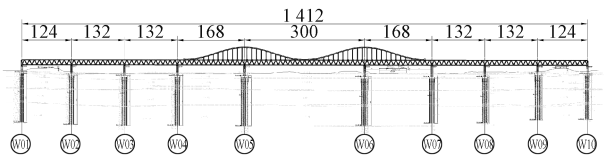


图 2　跨渭河公轨合建大桥桥跨　m

Fig. 2　The bridge span arrangement of the Wei River Bridge with Integrated Rail and Road Structure

钢桁梁主桁架中心间距 30.5 m,三角形桁架。桁高 12 m,加劲弦高 32 m,全桥共 117 个节间,标准节间距 12 m。为适应跨度布置,边跨两个节间长度

调整为 13.5 m。上、下层桥面均为正交异性钢板的板桁组合结构整体桥面,横断面结构示意如图 3 所示。主梁采用双向顶推施工,顶推方式采用“常规步履机+滑块”。

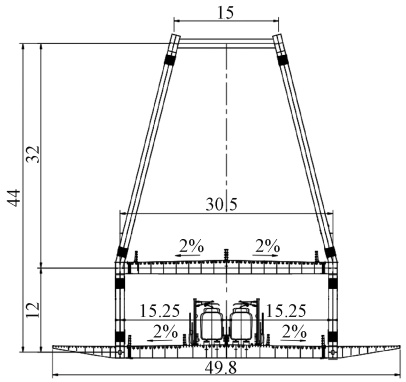


图 3 渭河桥横断面结构示意 m

Fig. 3 A schematic diagram of cross-section of the Wei River Bridge

上加劲弦采用提篮拱设计,拱脚处系统线宽度 30.5 m,拱顶宽度 15 m,拱顶系统线距离渭河桥加劲弦上弦系统线高度 32 m。拱弦整体采用箱型截面,主要由加劲弦杆、竖杆、装饰段及横撑组成。施工方式采用从拱脚到拱顶先后安装加劲弦竖杆及加劲弦弦杆,最终在拱顶设置两根合龙段,采用合龙段及顶落梁的方式合龙。

为探究带拱形加劲弦双层钢桁梁结构受力性能,根据实际工程情况,综合考虑试验目的、天津大学结构实验室的场地条件、模型制作加工难易程度及加载装置设备,对跨渭河公轨合建大桥(168+300+168)m 中间 3 跨带拱形加劲弦部分进行缩尺试验。缩尺比例为 1∶30,缩尺后模型整体长 21.8 m,主桁架中心间距宽 1.047 m,上下两层桁高 0.4 m,各节间距 0.4 m,上层拱结构向内倾斜 76.4°,倾斜后高度 1.067 m,下部结构和实际位置一致,均设置 8 个支座,三跨布置为(5.6+10+5.6)m。

2 有限元模型建立

ABAQUS 是一款广泛应用于工程领域的有限元分析软件,具备强大的计算能力,能够处理各种复杂的工程问题。本文将在试验研究基础上,使用 ABAQUS 软件来进行精确的模拟和分析,见图 4。



图 4 试验模型与有限元模型

Fig. 4 Experimental model and finite element model

模型中上下弦杆、腹杆、横梁、拱形加劲弦采用三结点二次空间梁单元(B32)模拟,上下钢桥面板采用八结点曲面厚壳单元(S8R)模拟。所有结构采用 Q235 钢,按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》[13] 进行材性试验,得到各杆件材料特性值。在缩尺模型中杆件间均采用焊接且焊缝处未出现损伤破坏,因此本模型中杆件间采用 tie 连接以保证杆件间协同变形。有限元模型结构的截面形式与实际试验模型一致,弦杆、腹杆、横梁采用空心方钢管,实际结构截面尺寸见表 1。试验中上层加劲弦采用方钢管两侧点焊 3 mm 钢片的形式来满足其结构样式相似于实际工程,但有限元模型对其进行了简化,因为根据外贴钢片厚度点焊形式无法完全与加劲弦杆共同承力,故对方钢管两侧壁厚加厚 1.5 mm。试验过程中构件未出现平面外屈曲,因此将试验中支座简化为 8 个垂直约束,约束位置与试验设计相对应。

表 1 各截面尺寸

Table 1 Section dimensions mm

上下弦杆	箱型腹杆、拱间横撑	其余腹杆、横梁	拱形结构	竖杆 1	竖杆 2	竖杆 3
30×40×3	30×30×2.5	20×30×2	25×40×2	25×25×1.5	25×25×2.2	25×25×3

3 弹性阶段模型分析

通过有限元软件及预加载分析得到杆件整体结构的受力较大的杆件(中间支墩上方腹杆 FG-5、支座上方弦杆 SX-4、边跨 WY-1、中间跨 WY-3、加劲弦顶部弦杆 QG-4),如图 5 所示。因此本文主要通过分析上述 5 种关键杆件对称位置处的平均值来得到结构的静力学性能。

图 6 为结构全跨加载下的 Mises 应力云图。可见,在桁架阶段,各工况下应力主要分布于中间支座上方腹杆位置,两端及中间应力较小,最大应力发生在支座上方腹杆位置(FG-5),与试验结果一致,拱形加劲弦竖杆应力较小,加劲弦杆应力略大于竖杆,

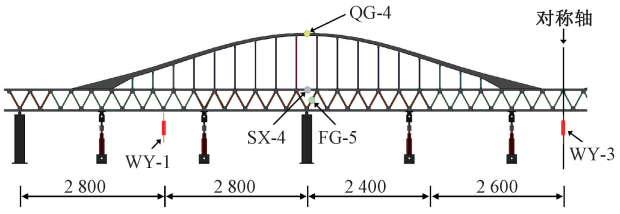


图 5　关键杆件示意　mm

Fig. 5　A schematic diagram of key rods

但明显小于支座上方桁架结构处应力。



图 6　有限元模拟结构受力云图

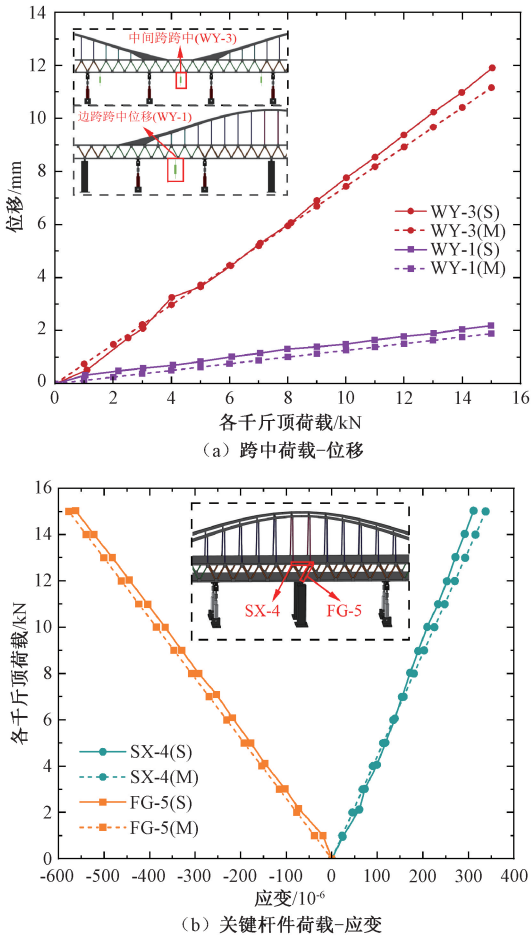
Fig. 6　Mises stress contour of the structure

各荷载变化数据如图 7 所示，图中实线为试验数据，短划线为有限元模拟数据。可以看出：数据都呈直线均匀增长，说明在此工况下结构始终处于弹性阶段，通过手打泵同步控制千斤顶施加竖向拉力的方案可行；各有限元数据与实际试验数据吻合较好，最大误差绝大多数情况下不超过 10%，说明该有限元模型能较好地模拟拱形加劲弦双层钢桁架结构；试验与有限元数据有一定的误差，是由于加劲弦结构全部为焊接，整体结构刚度提高幅度小于有限元结构，且试验采用手打泵接分油阀控制千斤顶拉力，无法完全保证千斤顶拉力同步且均匀，如图 7(a)中试验数据位移在 4 kN 时突然上升，可能是由于手动泵控制千斤顶施加荷载过程中结构发生微小震动，而位移计未及时回弹导致。

此外，通过对比分析可知，位移的有限元数据略小于试验数据，而杆件应变的有限元数据略大于试验数据，这是由于试验各连接处采用焊接连接，焊接点多且分布密集，会产生一定的初始缺陷，降低整体刚度，因此有限元结构刚度略大于实际结构刚度，从而导致跨中位移较小，杆件应变略大。

4　参数分析

为探究上部加劲弦形式对双层钢桁架结构竖向静力性能的影响，对加劲弦竖杆布置形式进行调整：将竖杆由上弦杆每个节点上方布置调整为每隔 1 个节点布置 1 根竖杆以及除中间及最外侧竖杆外每隔两个节点布置 1 根，竖杆尺寸及材料属性不改变；去除加劲弦拱顶处两端横撑杆，仅保留中间两根竖杆上方横撑杆。如图 8、图 9 所示，方案 2 为拆除 1/4 对称位置处第二、第四、第六、第八根竖杆，方案 3 为拆除 1/4 对称位置处第二、第四、第五、第七、第八根竖杆。



（a）跨中荷载-位移

（b）关键杆件荷载-应变

图 7　关键数据随荷载变化

Fig. 7　Variations of key data with load



图 8　方案 2 模型

Fig. 8　The model of scheme Ⅱ



图 9　方案 3 模型

Fig. 9　The model of scheme Ⅲ

表 2 为主要数据在最大荷载(15 kN)下加劲弦竖杆调整前后对比情况。可知：拆除 4 根竖杆的方案 2 与原方案相比，在各工况下，中间跨跨中位移略微增加，边跨跨中位移降低极小基本无变化，支座上方腹杆应力无明显变化，支座处上弦杆应力稍有降低，降低幅度在 5%左右，最高处加劲弦杆应力增加较为明显，在左右半跨加载下增长 7.7%，在全跨和前后半跨加载下增长 13%左右；拆除 5 根竖杆的方

表 2 各方案不同工况下关键数据对比

Table 2 Comparisons of key data under different conditions for each scheme

方案	中间跨跨中位移/mm			边跨跨中位移/mm			支座上方腹杆应力/MPa			支座处上弦杆应力/MPa			最高处加劲弦杆应力/MPa		
	全跨加载	左右半跨加载	前后半跨加载	全跨加载	左右半跨加载	前后半跨加载	全跨加载	左右半跨加载	前后半跨加载	全跨加载	左右半跨加载	前后半跨加载	全跨加载	左右半跨加载	前后半跨加载
方案 1	11.16	6.32	8.17	1.89	2.57	2.73	118.41	91.74	109.98	69.21	56.07	68.58	74.20	45.34	57.20
方案 2	11.36	6.42	8.30	1.87	2.56	2.72	118.41	91.69	110.14	65.86	53.24	66.35	86.06	49.12	65.75
方案 3	11.89	6.65	8.60	1.82	2.54	2.71	118.20	91.56	109.94	69.62	56.95	70.84	117.37	65.17	87.76
方案 2 数据变化/%	+1.76	+1.59	+1.57	−1.07	−0.39	−0.37	0.00	−0.05	+0.15	−5.09	−5.32	−3.36	+13.78	+7.70	+13.00
方案 3 数据变化/%	+6.14	+4.99	+5.00	−3.85	−1.18	−0.74	−0.18	−0.20	−0.04	+0.59	+1.55	+3.19	+36.78	+30.43	+34.82

案 3 与原方案相比,在各工况下,中间跨跨中位移略有增加,边跨跨中位移在全跨加载下,支座上方腹杆应力无明显变化,支座处上弦杆应力略微增加,最高处加劲弦杆应力明显增加,各工况下幅度均大于 30%。图 10、图 11 分别为方案 2、方案 3 结构应力云图,可以看出结构受力状态基本一致;从表 2 可见方案 3 中拱顶处应力增加。



图 10 方案 2 应力云图

Fig. 10 Stress contour of scheme Ⅱ



图 11 方案 3 应力云图

Fig. 11 Stress contour of scheme Ⅲ

图 12 为 3 个方案在各工况下的最高处加劲弦杆应力图。可以看出:方案 3 和方案 2 比原方案应力均有增加,这是由于竖杆能传递部分加劲弦杆受力至桁架结构上,摘除竖杆后缺少了部分传递路径,导致拱顶处加劲弦应力增加;方案 3 增长幅度远大于方案 2,是由于方案 3 减少竖杆后,跨中竖向位移明显增长,拱顶处受拉应力明显增加,此外拱顶处两侧竖杆布置间距增加,由竖杆分担的弦杆拉力减少。因此,当竖杆减少时,传力路径减少,加劲弦杆应力增加,竖杆减小越多,加劲弦杆应力增长越多。

综上所述,在竖向荷载作用下,当减少加劲弦竖杆时,中间跨跨中挠度略有增加,边跨跨中位移、支座上方腹杆、支座上方弦杆基本无变化,最高处加劲弦杆应力增长明显,因此,方案 1 每个节点上方布置 1 根竖杆的方式虽然增加一定用钢量,但是能够对结构挠曲变形、杆件应变控制起到有利作用,并且造型均匀美观。

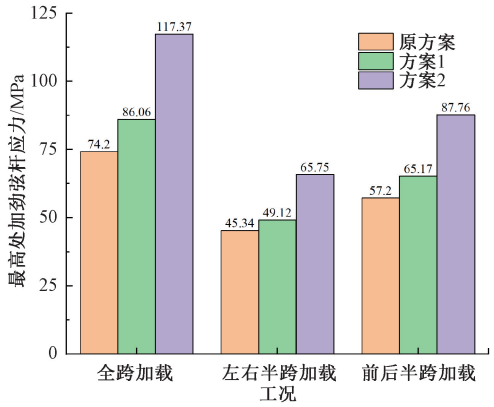


图 12 加劲弦杆应力

Fig. 12 Stresses of stiffening chord members

5 结 论

本文依据跨渭河公轨合建大桥缩尺模型试验完成了此缩尺结构的有限元模型分析,并通过与试验数据对比验证了有限元模型的可靠性,同时进行了调整竖杆布置的参数分析,得出以下结论:

1)利用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型,分析得到的弹性阶段关键数据的荷载-位移曲线、荷载-应变曲线与试验结果吻合程度较好,误差在 10%以内,验证了有限元模拟的可靠性。

2)通过调整竖杆布置形式,中间跨及边跨跨中位移、支座上方腹杆应变无特别明显变化,支座处上弦杆应力略微增加。最高处加劲弦杆应力明显增加,方案 2 在左右半跨加载下增长 7.7%,在全跨和前后半跨加载下增长 13%左右,方案 3 在各工况下增长幅度均大于 30%。拱形加劲弦下竖杆减小越多,加劲弦杆应力增长越明显。

3)每个节点上方布置一根竖杆的方式能够对结构挠曲变形、杆件应变控制起到一定有利作用,且造型均匀美观,但用钢量较大。上部加劲弦结构在整体结构中受力较小,因此建议在维持原结构形式

基础上控制其用钢量。

参　考　文　献

[1] 周先雁,王解军. 桥梁工程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.

[2] BARROS B, CONDE B, CABALEIRO M, et al. Design and testing of a decision tree algorithm for early failure detection in steel truss bridges[J]. Engineering Structures, 2023,289,116243.

[3] 肖杰. 大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂施工控制及温度效应研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

[4] 刘美铭. 桥梁事故分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[5] 刘斐. 近期桥梁安全事故深度调查与分析[D]. 长沙:中南大学,2014.

[6] 刘自明. 桥梁结构模型试验研究[J]. 桥梁建设, 1999(4):1-7.

[7] 刘爱荣,张俊平,赵新生,等. 中山一桥模型试验及理论分析[J]. 中国公路学报,2005(3):75-79,83.

[8] 张俊平,刘爱荣,李永河,等. 蝴蝶拱桥的模型试验与理论研究[J]. 桥梁建设,2007(2):15-17.

[9] 裴阳. 双层钢桁连续梁桥变高度段模型静力试验研究[D]. 福州:福州大学,2020.

[10] 张国刚. 混凝土斜拉桥的模态参数识别与模型修正[D]. 长沙:湖南大学,2013.

[11] 许兆军,侯文葳,张玉玲. 公铁两用桥在我国的应用前景[J]. 铁道建筑,2000(12):16-19.

[12] 雷俊卿,黄祖慰,桂成中,等. 公铁两用大桥现状与可持续发展趋势分析[J]. 钢结构,2016,31(11):1-4,37.

[13] 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.