

新型装配式方钢桥受力性能研究

邢心魁^{1,2,3}, 党浩³, 刘顺³, 朱万旭^{1,2,3}, 覃荷瑛^{1,2,3}

(1. 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室;
3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院)

摘要:引进一种主体构件为方钢管的新型装配式方钢板桥,研究其受力性能,为其在中国推广应用提供参考。通过有限元模型分析不同开孔间距、孔径对方钢管受力性能的影响,总结出一般开孔规律;在此基础上用同尺寸无孔和孔径为100 mm的4孔方钢管做静力荷载试验,验证了开孔方案的合理性;拼装5根同尺寸开孔方钢管为方钢试验桥面板,在简支条件下做静力荷载试验,测得每根方钢管的跨中挠度。研究表明:方钢管腹板开孔不宜在跨中且宜距跨中一定距离,同时孔径不宜超过腹板高度的1/2;新型装配式方钢桥整体具有良好的荷载分配性能及变形能力,整体极限承载力大约为单根方钢管极限承载力的叠加。

关键词:方钢桥;开孔规律;静力荷载试验;荷载分配性能

装配式钢桥优点显著,被广泛应用于桥梁建造中。国外先后有贝雷桥、200型钢梁,梅贝快速架桥系统等,有“321”、CD型、ZB-200型装配式公路钢桥等。主体构件为方钢管的新型装配式方钢桥在日本已有研究应用,中国却鲜有。该文介绍这种方钢桥,通过模拟和试验研究其受力性能,以实现在中国中小跨度桥梁的建造中推广使用。

1 方钢桥简介

1.1 基本构造

新型装配式方钢桥多用于斜交角 60° 以上,跨径不大于16 m的桥梁建造中。其基本构件(图1)有:①方钢管;②混凝土填充料;③横向连接栓孔;④横向连接圆钢管;⑤隔板;⑥混凝土灌注孔;⑦连接孔;⑧沥青铺装层;⑨混凝土调平层。

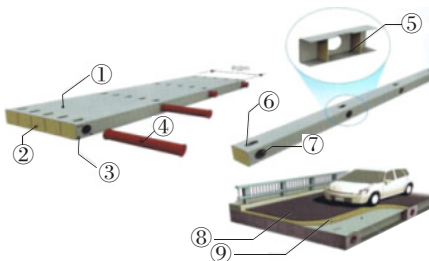


图1 方钢桥基本结构

1.2 拼装流程

方钢桥拼装流程:预制方钢管→指定位置开孔→用横向连接圆钢管拼装方钢管→相邻方钢管用螺栓锁紧→插竖向钢筋固定横向圆钢管→重复操作得指定宽度桥面板→通过灌注孔浇筑混凝土→铺装桥面→方钢桥制作完毕。

2 开孔方钢管力学性能研究

2.1 研究对象选取

查阅相关研究资料,结合研究现状,选取截面形式如图2所示, $b \times h = 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,厚 $t = 12 \text{ mm}$ 的Q345方钢管为研究对象。

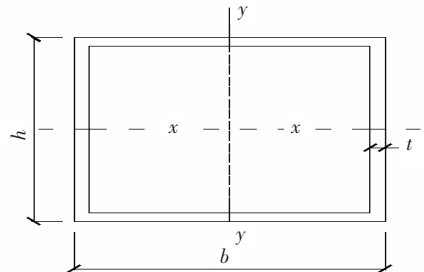


图2 截面简图

2.2 研究目的及方案

影响方钢管承载力的主因有:孔型、孔径和孔间距

等。该文先用有限元软件建模分析跨中受集中荷载、两端简支、腹板以不同方案开孔的方钢管的极限承载力,比选出较佳的开孔方案;再做无孔和开孔方钢管静力荷载试验,验证方案的合理性;总结一般开孔规律,给出方钢管开孔建议。

2.3 模拟分析

2.3.1 参数选取

方钢管截面如图 1 所示,净跨度 $L=6\,000\text{ mm}$ 。开孔尺寸见表 1。如图 2 当端部有孔时,约束位于构件两端圆孔圆心正下方。当端部无孔时,约束位于构件端部正下方。参考相关文献[20]和 JGJ 99—2015《高层民用钢结构技术规程》孔端距取固定值 120 mm,因孔径变化方钢管实际长度会有微小变化。

2.3.2 边界条件和加载方式

模型简支梁边界位移,构成滑动铰支座如图 4 所示;在模型跨中上表面划分出一个 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 的加载区域,将集中荷载转化为加载区域上的面荷载施加。

表 1 开孔尺寸			
孔数/孔	端距(D)/mm	间距(J)/mm	孔径(R)/mm
1	—	—	—
2	120	6 000	—
3	120	3 000	50、100、
4	120	2 000	150、200
5	120	1 500	—
6	120	1 200	—

注:D、J、R 见图 3。

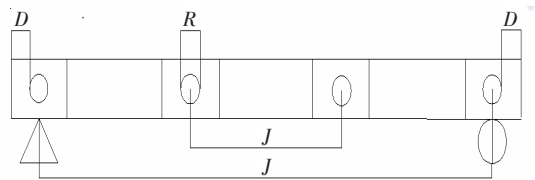


图 3 孔间距示意图

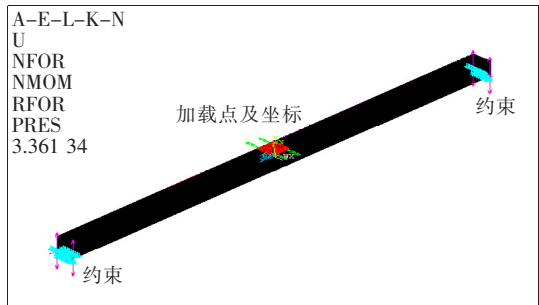


图 4 模型示意图

2.3.3 参数取值

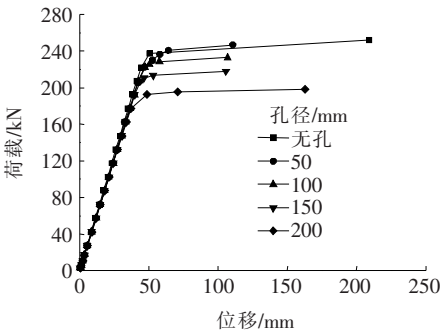
模型开孔参数按表 1 取值,在分析某一参数影响时,模型的其他参数保持不变。对同尺寸无孔构件也进行相同条件的模拟。

2.3.4 结果分析

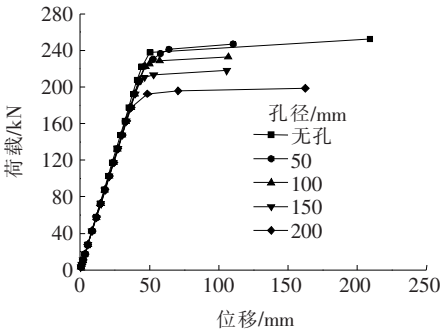
该文约定当荷载增加很小,位移迅速增加,呈非线性增长;荷载一位移关系曲线明显转折时,则认为梁截面破坏,转折点对应的荷载定义为极限承载力,相应的位移为极限位移。根据有限元模拟结果分析,孔数和孔径对方钢管极限承载力影响规律如下:

(1) 奇数孔时,孔径和孔数的影响

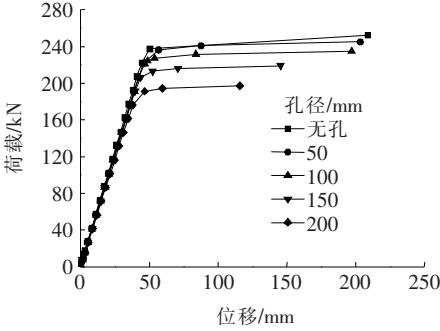
① 如图 5 所示,当孔数一定时,随着孔径增大其极限承载力降低,孔径越大下降越多,如开设 3 孔时不同孔径下具体降幅如表 2 所示。



(a) 1 孔



(b) 3 孔



(c) 5 孔

图 5 不同孔数时各孔径下荷载一位移曲线

表2 开3孔时各孔径下极限承载力降幅

孔径/ mm	孔径/腹 板高度	极限承载力/ kN	最终降幅/ %
0	0	252.375	0
50	1/5	246.825	2.1
100	2/5	232.875	7.7
150	3/5	217.875	13.7
200	4/5	198.375	21.4

② 如图6所示,当奇数孔($N=1、3、5$ 孔)孔径不变时,随着孔数增多其极限承载力基本不变。

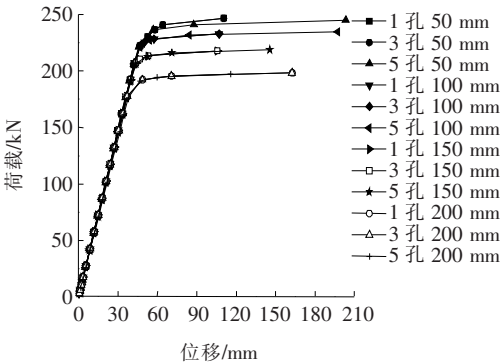


图6 奇数孔时各孔径下荷载-位移曲线

③ 开奇数孔时,跨中必有一孔,内力最大的跨中截面加以孔洞的削弱,必为控制截面,最终发生破坏,其他部位均不会成为控制截面。

④ 由表2可知:当孔径超过腹板高度1/2时,极限承载力明显大幅下降;由图5(c)可知:当孔径不变时,极限承载力基本不变。此时跨中孔径大小是影响极限承载力的首要因素,而孔数的影响则可忽略不计。

(2) 偶数孔时,孔径和孔数的影响

如图7所示,开偶数孔($N=2、4、6$ 孔)时,跨中无孔。孔位处截面削弱,当开孔位置距跨中较远且孔径较小孔数不多时,孔位处不会成为控制截面,破坏截面仍在跨中,开孔对方钢管极限承载力基本无影响。当

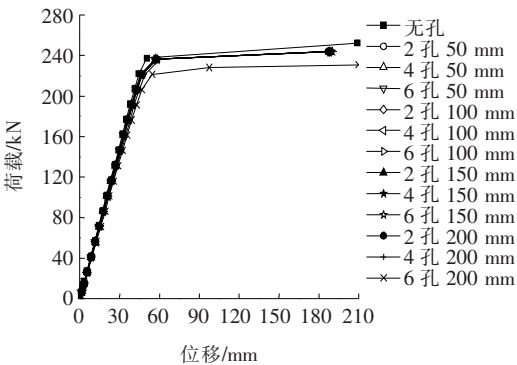


图7 偶数孔时各孔径下荷载-位移曲线

开孔距跨中较近且孔径较大时,孔洞附近成为控制截面,致使其极限承载力小于无孔方钢管。如开设6个直径200mm的孔时,其极限承载力下降8.5%左右。

2.4 方案比选

在24种开孔方案中,根据模拟分析,否定了开奇数孔的12种方案和偶数孔下150mm和200mm孔径的6种方案以及6孔50mm和100mm孔径2种方案;单根开孔方钢管要在孔洞中插入横向连接圆钢管拼接成桥面板,为保证横向连接的抗剪强度和整体稳定性,孔径在合理范围内要尽量大,孔间距控制在适当值,故剔除2孔50mm孔径和4孔50mm孔径的孔径最小方案和2孔100mm孔径的孔间距最大方案。最终选取4孔100mm孔径为较佳方案。

2.5 试验验证

2.5.1 试验简介

① 选取同尺寸的开4孔100mm孔径和无孔方钢管做静力荷载试验。观察变形记录荷载-位移曲线,分析孔洞对方钢管极限承载力的影响。确定最佳开孔方案;② 如图8所示在支座上方、1/4处及跨中布置5个千分表测量挠度。DH3818静态应变测试仪测量应变。③ 加载:先按10kN/级预加载至50kN后卸载,重复3次,每级稳定3min。观察各仪器的工作情况,正常后正式加载。按10kN/级加载至100kN后,按5kN/级加载至破坏。无孔方钢梁及4孔方钢梁破坏见图9~11。

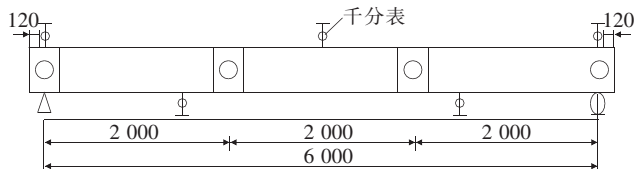


图8 千分表布置图(单位:mm)

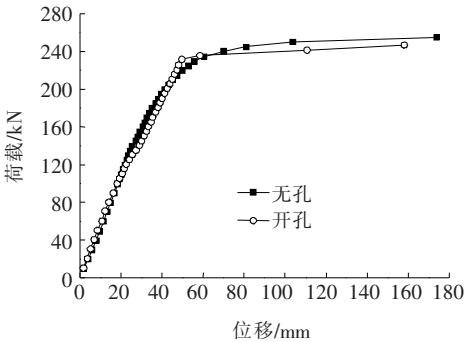


图9 无孔和开孔钢梁试验结果

2.5.2 试验结果

由图9~11可知:① 加载初期方钢管处于弹性工作阶段,跨中荷载-位移曲线呈线性增加,腹板应变值

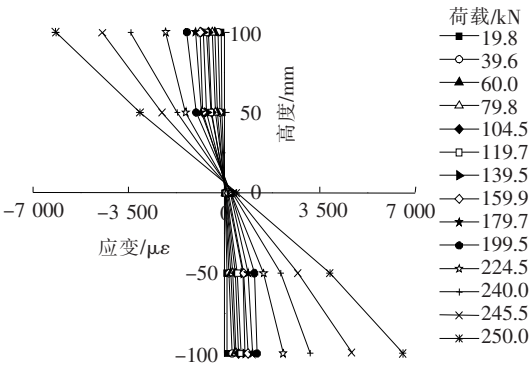


图 10 无孔钢梁腹板应变分布

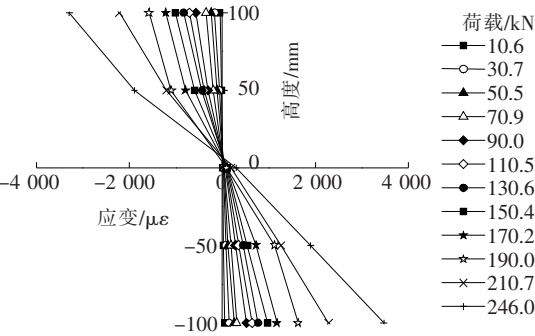


图 11 开孔钢梁腹板应变分布

沿高度呈线性分布,满足平截面假定;②随着荷载继续增大,跨中挠度增长速率和腹板应变变化率较之前明显加快,方钢管处于弹塑性工作阶段,但仍满足平截面假定;③持续增加荷载,当荷载增量很小时,跨中挠度急剧增加,荷载一位移曲线出现明显转折,腹板应变值迅速增大方钢管发生破坏;④无孔和开孔方钢管极限承载力分别约为 250、246 kN,说明此方案开孔对方钢管极限承载力基本无影响,4 孔 100 mm 孔径为最佳开孔方案。

2.6 模拟与试验对比

无孔方钢管极限承载力实测值为 250 kN,模拟值为 252 kN,误差为 0.8%,开孔方钢管实测值为 246 kN,模拟值为 243 kN,误差为 1.25%,如图 12 所示,模拟与试验荷载位移变化曲线基本一致,两者互相验证所得结果可靠。

2.7 开孔规律总结

综合数值模拟及试验分析得到以下结论:

- (1) 跨中有孔(奇数)时,孔数不变孔径增加时,其极限承载力明显减小,孔数增加开孔方钢管的极限承载力基本不变。
- (2) 跨中无孔(偶数)时,孔数和孔径均较小时,其极限承载力基本不受影响,当开孔距跨中较近且孔径

较大时极限承载力减小。如在 6 孔 200 mm 孔径时,其极限承载力大约下降 8.5%。

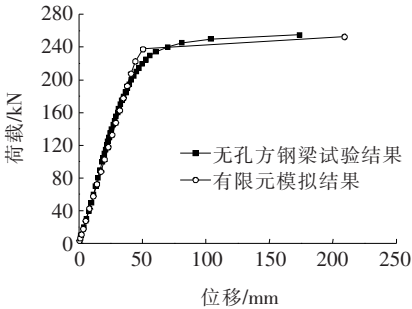


图 12 试验和模拟结果对比

2.8 开孔建议

- ① 不宜在方钢管跨中开孔且宜距跨中一定距离;
- ② 孔间距不宜过大;
- ③ 孔径不宜超过腹板高度的 1/2。

3 方钢桥受力性能研究

对方钢桥进行加载试验。观察荷载作用下,桥面板的变形、相邻方钢管的相对错动及裂缝。根据各方钢管的荷载一位移曲线变化规律,探究其荷载分配性能和极限承载力。

3.1 方钢桥有限元模拟分析

3.1.1 建模概述

试验方钢桥面板由 5 根同尺寸方钢管拼接而成,每根方钢管尺寸同前开设 4 个直径 100 mm 圆孔。模拟试验桥面板受力时,在桥面板中央方钢管跨中上表面划出一个 250 mm×300 mm 的加载区域,将集中荷载转化为加载区域上的面荷载进行施加。

3.1.2 模拟结果分析

(1) 方钢桥应力、位移云图分析

- ① 方钢桥应力云图如图 13 所示,中间方钢管在受力时,其他 4 根方钢管显示出几乎相同的变化规律;
- ② 由方钢桥竖向位移云图(图 14)可看出,当中间方钢

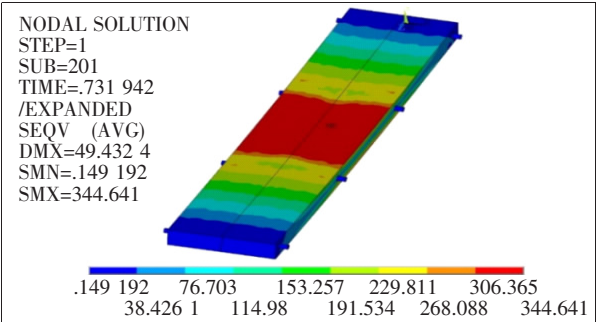


图 13 应力云图(单位:MPa)

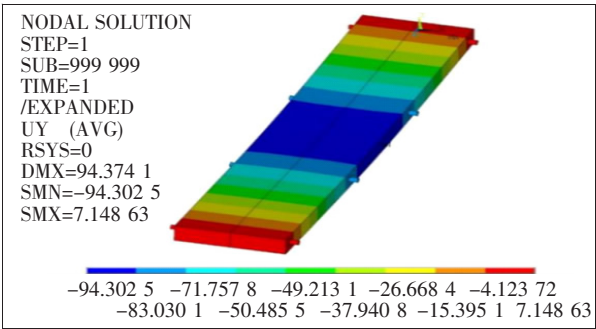


图 14 位移云图(单位:mm)

管产生竖向变形后,相邻方钢管跟随发生竖向变形,方钢管面板具有良好荷载传递性能。

(2) 跨中荷载—挠度曲线对比

为分析方钢管每根方钢管受力变形情况,从对称的方钢管桥最外侧依次向内选 3 根方钢管,分别编号为 L、M、N,如图 15 所示。图 16 为 N、M、L 方钢管跨中荷载—挠度模拟结果图。

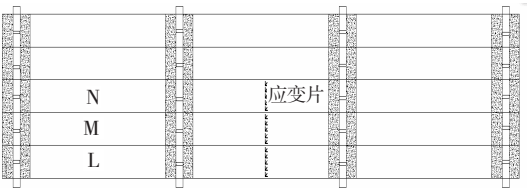


图 15 下表面应变片分布

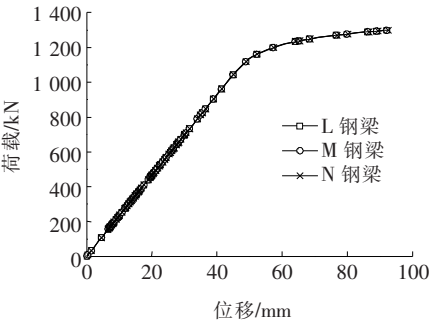


图 16 钢管跨中荷载—挠度模拟曲线

由图 16 可知:N、M、L 方钢管的荷载—挠度曲线几乎无差异,相互间相对错值都不大,曲线总体规律一致,说明方钢管桥具有良好的荷载分配性能。

3.2 方钢管桥加载试验研究

3.2.1 方钢管试验桥简介

方钢管试验桥由 5 根尺寸和横向连接孔布置同单根试验体的方钢管拼接而成;横向通过 4 根长 $L=1\,450\text{ mm}$ 、外径 $D=70\text{ mm}$ 、厚 $t=12\text{ mm}$ 的横向圆钢管连接;并在方钢管预留孔内浇筑混凝土。

3.2.2 加载方案

试验加载位置为中间方钢管的跨中,采用两点对称式液压千斤顶加载。经压力传感器标定,计算油压表每格的读数为 63 kN 。荷载等级先按 63 kN/级 预加载至 189 kN 后卸载,再按 63 kN/级 加载至 $1\,197\text{ kN}$ 后,按 32 kN/级 加载至破坏。

3.2.3 测点布置及测量内容

试验中需要测量构件挠度和应变,如图 15 所示,各测点布置:① 挠度采取对称式测量。在 L、M、N 方钢管的支座上方,距支座 $1/4$ 跨度处及跨中下方依次布置 5 个百分表测量;② 应变:在 L、M、N 方钢管跨中、开孔处、支座处沿底面横向均匀粘贴 5 个应变花测量横向应变分布;③ 方钢管相对错动及裂缝:将百分表磁座和表针分别置于 N 及其相邻方钢管之上,用于测量方钢管相对错动。用裂缝观测仪观察裂缝,相邻方钢管出现裂缝时开始记录,之后每 200 kN 记录一次。

3.2.4 结果分析

根据试验数据绘制的 L、M、N 方钢管跨中荷载—位移曲线如图 17 所示,L、M、N 方钢管跨中下表面荷载—应变关系如图 18 所示。

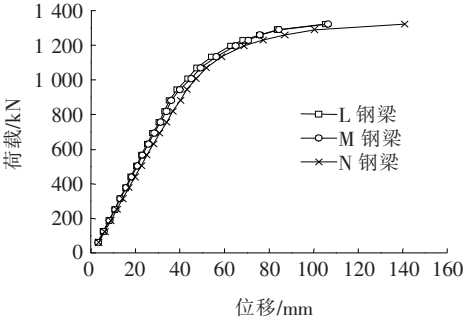


图 17 钢管跨中荷载—位移实测曲线

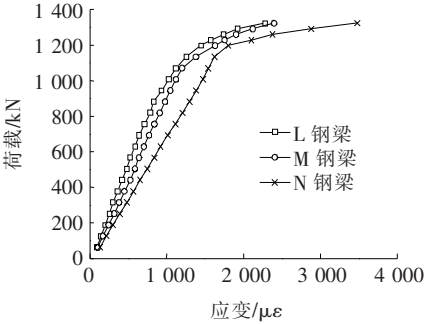


图 18 钢管跨中荷载—应变曲线

由图 17、18 可知:加载初期位移和应变的变化近似弹性变化。当荷载继续增至一定程度时,方钢管 N 变形稍大于 M、L,总体上 N、M、L 各钢管同级荷载下

变形差异不大,荷载作用在 N 钢管,通过横向连接钢管分配给 M、L 钢管使其受力和变形趋于增加,整体的承载力得到充分发挥。证明横向连接钢管有很好的支撑效果。最终破坏时仅 1/4 处孔内的混凝土发生破碎,连接孔处包裹在横向圆钢管处的混凝土未变化。

试验中不同荷载下各方钢管的荷载分配率 μ (单根方钢管的应变/5 根方钢管的应变之和) 如表 3 所示。弹性阶段 L、M、N 方钢管的荷载分配率分别约为 0.170、0.195、0.264。整体具有良好的荷载分配性能及变形能力。

表 3 各方钢管荷载分配率

荷载/ kN	μ 值		
	L 方钢管	M 方钢管	N 方钢管
378	0.178	0.182	0.280
567	0.167	0.202	0.264
756	0.169	0.199	0.264
945	0.174	0.196	0.258

3.2.5 试验总结

(1) 试验中测定试验桥最终极限承载力为 1 323 kN,前文中单根无孔方钢管极限承载力实测值为 246 kN,试验桥极限承载力约为单根方钢管极限承载力的 5 倍。以该文研究确定的方案开孔拼装的方钢桥面板具有较高的极限承载力。

(2) 经测定, N、M、L 钢管跨中挠度分别为 140.964、106.449、105.236 mm,证明了方钢桥面板具有良好的变形能力。

(3) 根据 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》相关要求,以该文所选截面尺寸的方钢管装配的方钢桥,在人行荷载和载重 15 t 以下的轻型车辆荷载作用下,跨中产生的挠度可满足规范要求。

4 结论

通过模拟和试验,研讨了方钢管的开孔规律及装配式方钢板桥的受力性能,得出以下结论:

(1) 用于拼装方钢桥面板的方钢管,其腹板开孔宜距跨中一定距离,同时孔径不宜超过腹板高度的 1/2。

(2) 采用该文提出的开孔规律和拼接方式装配的方钢桥整体具有良好的荷载分配性能及变形能力,整

体极限承载力大约为单根方钢管极限承载力的叠加。

参考文献:

[1] 胡铁山,周忻,王勇. 平原区高速公路装配式桥梁方案设计探讨[J]. 中外公路,2019(6).

[2] 郭俊国. 未来钢桥大有可为[N]. 中国冶金报,2016,5. 10.

[3] 赵君黎,李文杰,冯崑. 我国公路钢桥的进与退[J]. 中国公路,2016(11).

[4] 肖叶桃. 装配式公路钢桥的类型、特点及其应用[J]. 国防交通工程与技术,2007(3)

[5] 戴哲彬. 装配式钢桥的研究应用及展望[J]. 江苏建筑,2012(6).

[6] 喻忠权. HD200 型装配式公路钢桥的开发与应用[J]. 公路,2002(7).

[7] 朱永焯,徐关尧,苟明康. ZB—200 型装配式公路钢桥的研究设计[J]. 国防交通工程与技术,2004(1).

[8] 张井春,徐庆旋. 日本钢桥概况及中国钢桥的应用与发展[J]. 北方交通,2013(9).

[9] 角形鋼管床版橋製品新技術調査[R]. 日本:新日鐵住金株式会社,2015.

[10] 角太橋(角形鋼管を用いた床版橋[R]. 日本:新日鐵住金株式会社. 平成 22 年.

[11] 新日本製鐵(株):角形鋼管を用いた床版橋の製作? 施工要領書[M]. 日本:新日鐵住金株式会社,平成 22 年.

[12] 角太橋(角形鋼管床版橋製品)概要説明書[R]. 日本:新日鐵住金株式会社,2003.

[13] 彭在美,刘建伟. 钢结构用方矩形钢管的市场分析和应用前景[J]. 钢管,2005(6).

[14] 黄绍金,刘陌生. 装配式公路钢桥多用途使用手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

[15] 角形鋼管を用いた新形式メタル床版橋角太橋®ボン! メタルキット[R]. 日本:新日鐵住金株式会社,2012.

[16] 童乐为,宋涛炜,江蓓,等. 大尺度开孔钢梁性能的实验研究和数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008(8).

[17] Liu T C H, Chung K F. Steel Beams with Large Web Openings of Various Shapes and Sizes: Finite Element Investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research,2003,59(9):1 159—1 176.

[18] 蒋赞. 腹板大尺度圆形开孔梁的受力性能分析[D]. 湖南大学硕士学位论文,2012.

[19] 陈雁. 腹板大尺度矩形开孔梁的强度分析[D]. 湖南大学硕士学位论文,2011.

[20] 湛意雄,曾志兴. 钢板开孔对结构性能的影响及其对策[J]. 低温建筑技术,2013(11).