

# 大跨装配式应急公路钢桥方案设计与模糊层次比选

孙 昊,刘永健,孙明钰,邱洁霖,张 凯

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**装配式公路钢桥在战时抢修、抗震救灾中桥梁修复与加固等应急工程中发挥了重要作用,但现有装配式公路钢桥最大理论跨越能力只有 69 m,导致部分交通要道的大跨度桥梁短时期无法修复,造成了巨大的经济效益和社会效益损失。为满足大跨度桥梁应急抢修的要求,以单跨 90 m 装配式公路钢桥为研究对象,提出采用抗弯和抗扭性能较好的矩形钢管截面作为桁架构件的主要截面以提高结构的跨越能力,在继承原有研究成果的基础上设计了“321”型、“200”型矩形钢管桁架方案,创新性地设计了“600”型矩形钢管桁架方案和三角形桁架方案。在有限元建模分析的基础上,详细分析了 4 种设计结构方案在移动荷载作用下的最大位移、组合应力、用钢量及 1 阶稳定屈曲系数这 4 个关键指标各自的优劣。为了方便桥梁设计方案的比选,以桥梁设计的基本目标作为评价设计方案的影响因素,利用模糊数学和层次分析法分解评判指标体系,建立了运用二级模糊综合评价决策方法进行设计方案优选比较的指标体系和方法。最后,结合单跨 90 m 装配式公路钢桥的 4 种设计方案,给出了模糊层次分析评价和设计方案优选的具体过程。研究结果表明:“600”型矩形钢管桁架方案所对应的判断结果矩阵中的元素值最大,说明该设计方案在力学性能、经济合理性、技术可行性、施工方便性等方面优势明显,为 4 个设计方案中的最优方案。研究成果可为后续大跨装配式公路钢桥的研制方案提供设计思路和技术参考。

**关键词:**桥梁工程;设计方案;模糊评判;层次分析;装配式公路钢桥;矩形钢管截面;优选

**中图分类号:**U448.36

**文献标志码:**A

## Comparison and selection of scheme design and fuzzy hierarchy for large-span fabricated emergency highway steel bridge

SUN Hao, LIU Yong-jian, SUN Ming-yu, QIU Jie-lin, ZHANG Kai

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Fabricated highway steel bridge plays an important role in the emergency projects of bridge repair and reinforcement in wartime rush repair and earthquake relief. But the maximum theoretical spanning capacity of existing fabricated highway steel bridge is only 69 m, which leads to the situation that large-span bridges of some major communication lines can not be repaired in a short period and results in huge economic and social benefits losses. To meet the emergency repair requirements of large-span bridge, a fabricated highway steel bridge with single span of 90 m was investigated. In order to improve spanning capacity of the structure, rectangular steel tube section with good flexural behavior and torsional property was adopted as the main section of the

收稿日期:2016-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51378068,51308056);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1211002,2014G2210003);交通运输部企业技术创新项目(2013315490060)

作者简介:孙 昊(1979-),男,河南新野人,讲师,工学博士,E-mail:sunhaoylz2003@163.com。

truss members. On the basis of the former research results, the “321” and “200” type rectangular steel tube truss schemes were designed, and then “600” rectangular steel tube truss scheme and the triangular truss scheme were innovatively designed. Based on finite element analysis, respective advantages and disadvantages of four key indexes, such as the maximum displacement, combination stress, amount of steel and the first order stable buckling coefficient under moving load of the four design schemes were analyzed in detail. In order to facilitate the comparison and selection of bridge design schemes, index systems and methods were established by using two-level fuzzy comprehensive appraisal method to select the optimal design scheme, which took the fundamental objective of bridge design as influence factor to evaluate design scheme and used fuzzy mathematics and analytic hierarchy process decomposition to judge index system. Finally, combined with four design schemes of fabricated highway steel bridge with single span of 90 m, the concrete process of fuzzy analytic hierarchy process (AHP) evaluation and design scheme optimum selection was given. The results show that element value of “600” rectangular steel truss scheme’ corresponding judgment result matrix is maximal, which means that this scheme has obvious advantages in mechanical performance, economical rationality, technical feasibility and construction convenience, so “600” rectangular steel truss scheme is the optimal among the four design schemes. The research results provide some scheme design ideas and technical reference for subsequent development scheme of large-span fabricated highway steel bridge. 5 tabs, 10 figs, 22 refs.

**Key words:** bridge engineering; design scheme; fuzzy appraisal; analytic hierarchy; fabricated highway steel bridge; rectangular steel tube section; optimum selection

## 0 引言

装配式公路钢桥是一种可以快速架设的,主要用于各种车辆通过江河、沟谷等障碍,并可在战时抢修、抗震救灾、水毁桥梁修复、危桥加固、临时栈桥及道路抢修时应急使用的制式桥梁<sup>[1]</sup>。装配式公路钢桥最早由英国工程师 Bailey 设计于 1938 年。中国在 1962 年 8 月成功研制出“321”型装配式公路钢桥,随后又设计和开发出新一代装配式公路钢桥——HD200 型装配式公路钢桥。由于装配式桥梁具有结构简单、用途广泛、适应性强、互换性强和容易组装等特点,在应急抢险和栈桥施工中发挥了巨大作用。但是,中国现有装配式公路钢桥“321”型或 HD200 型在单车道汽车-10 级荷载作用下的最大理论跨径为 69 m,实际应用中架设的单车道汽车-20 级荷载的最大跨度为 50 m,桥梁的承载能力和跨径都相对较小,严重制约了应急抢险中的大跨控制性桥梁工程的修复与保通。因此,急需研制一种经济合理、跨越能力较大、架设方便快捷的装配式公路钢桥,以适应抗震救灾、抗洪抢险及战时大跨度桥梁应急抢修的要求<sup>[2-5]</sup>。2008 年汶川地震桥梁结构抢修中,单跨 40 m 以下的桥梁用现有的“321”型和 ZB200 型进行适当的组合能够完成快速抢修保通,但是单跨 50 m 以上的桥梁仍没有办法在短时

间内完成抢修,严重制约了抗震救灾的进度。因此,研究 50~90 m 跨越能力的装配式公路钢桥具有重要的工程价值<sup>[6-7]</sup>。

鉴于此,本文以 90 m 跨度、设计荷载为单车道公路 II 级的装配式公路钢桥为例,设计了 4 种装配式公路钢桥方案,在建立不同设计方案有限元模型的基础上,比较了不同设计方案在移动荷载下的最大位移、组合应力、用钢量及 1 阶稳定屈曲系数等 4 个方面各自的优劣,最后针对 4 种设计方案进行模糊层次比选,根据比选结果最终推荐相对合理的设计方案。

## 1 大跨度装配式公路钢桥方案设计

综合分析国内外对突破现有定型产品跨越能力的尝试,可知主要研究思路有 2 种<sup>[8]</sup>:①充分利用“321”型和“200”型钢桥构件,通过选用不同截面形式(矩形钢管截面)、不同桥型(如斜拉桥、悬索桥等)以增大现有装配式公路钢桥的跨越能力;②选用国内外较为可行的拼装单元形式,突破现有装配式公路钢桥尺寸和节段重量的限制,研发一种技术指标相对合理的新型装配式公路钢桥。本文在已有研究成果的基础上,提出了“321”型矩形钢管桁架、“200”型矩形钢管桁架、三角形桁架、“600”型矩形钢管桁架 4 种设计方案。

### 1.1 “321”型矩形钢管桁架方案

传统的“321”型桁架组合形式仅适用于 50~60 m 跨径的装配式钢桥,本设计方案采用矩形钢管代替原设计的槽钢和工字钢,并对原“321”型桁架在尺寸上作了改变,在高度上提高了 10 cm,实现了桁架片竖向与横向尺寸的一致性,满足了结构在不同方向的拼装与组合。所有杆件断面形状采用矩形钢管截面,杆件截面的抗弯和抗扭惯性矩明显增大,提高了结构的承载能力,能够满足桥梁结构跨越更大障碍物的要求。“321”型矩形钢管桁架的基本结构尺寸如图 1 所示,其中上下弦杆截面尺寸为 180 mm×100 mm×8 mm,斜腹杆和竖杆截面尺寸为 100 mm×80 mm×6 mm。

为了满足 90 m 跨径的要求,“321”型矩形钢管

桁架方案采用组合桁架的形式,同时为了满足桁架模数的要求,本次设计方案的实际跨径为 91.56 m,桁架布置形式如图 2 所示。

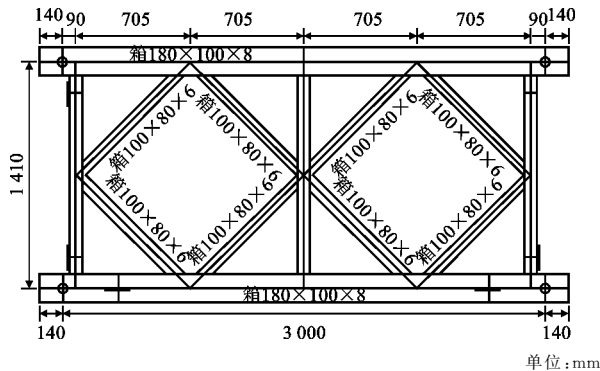


图 1 “321”型矩形钢管桁架结构立面

Fig. 1 Elevation of rectangular steel tube truss of “321”

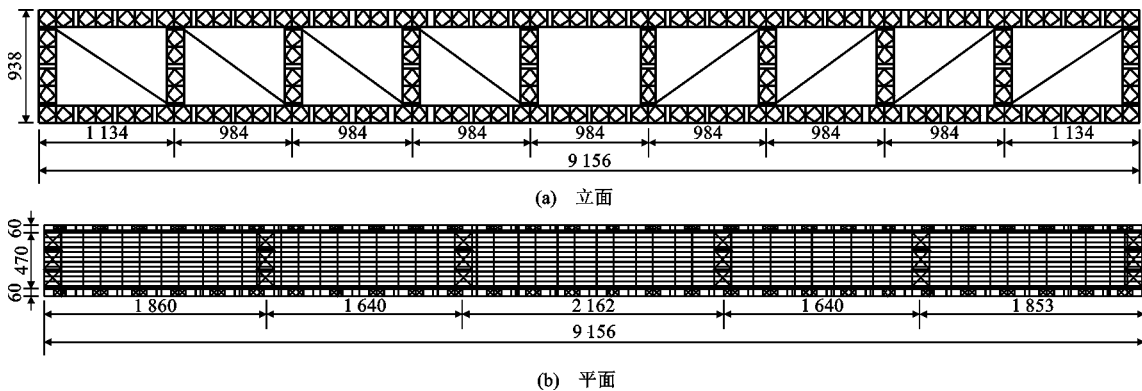


图 2 “321”型矩形钢管桁架布置

Fig. 2 Layout of rectangular steel tube truss of “321”

### 1.2 “200”型矩形钢管桁架方案

传统“200”型桁架组合形式仅适用于 50~70 m 跨径的装配式钢桥,在采用组合桁架式结构之后,结构的用钢量基本控制在 2.2 t/m 左右,且在跨径增大后,结构的经济性越发明显<sup>[9-10]</sup>。考虑到“200”型桁架的尺寸参考的是英制尺寸,在进行组合桁架设计时结构尺寸不利于组拼,因此本设计方案对原“200”型桁架尺寸作了一定的优化,将桁架高度改为 2 m,长度增加到 4.18 m,从而实现了桁架片竖向与横向尺寸的一致性,同时所有杆件断面形状改为矩形钢管截面,进一步提高了其跨越能力。“200”型矩形钢管桁架的基本结构尺寸如图 3 所示。

“200”型矩形钢管桁架的上下弦杆截面尺寸为 180 mm×100 mm×8 mm,斜腹杆和竖杆截面尺寸为 100 mm×80 mm×6 mm。为了满足 90 m 跨径的要求,“200”型矩形钢管桁架方案采用组合桁架的形式,组合桁架的高度为 8.46 m,同时为了满足桁架模数

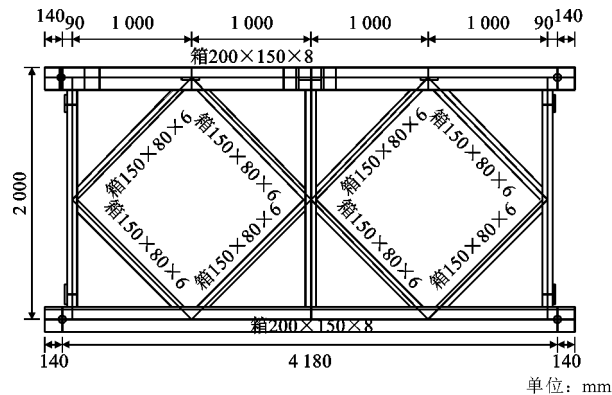


图 3 “200”型矩形钢管桁架结构立面

Fig. 3 Elevation of rectangular steel tube truss of “200”

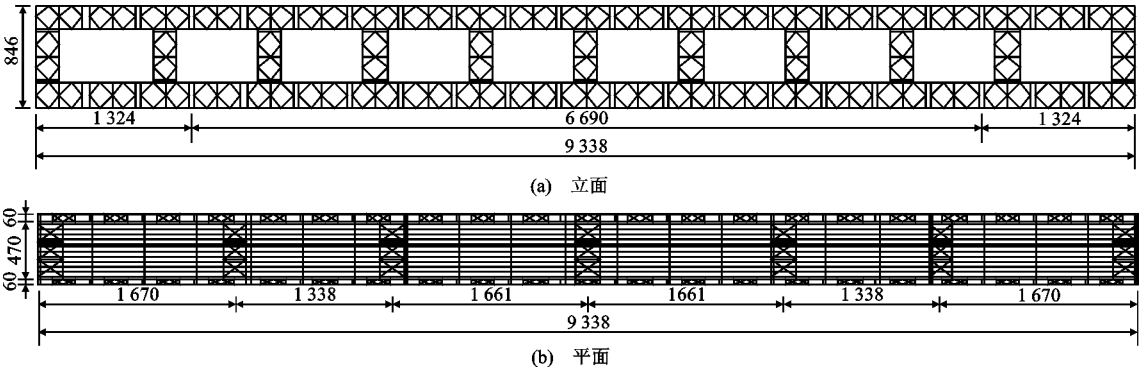
的要求,本次设计方案的实际跨径为 93.38 m,桁架布置形式如下页图 4 所示。

### 1.3 三角形桁架方案

三角形桁架方案采用长 2.135 m 的三角形单元构造而成,三角形单元与上下弦杆以及弦杆之间

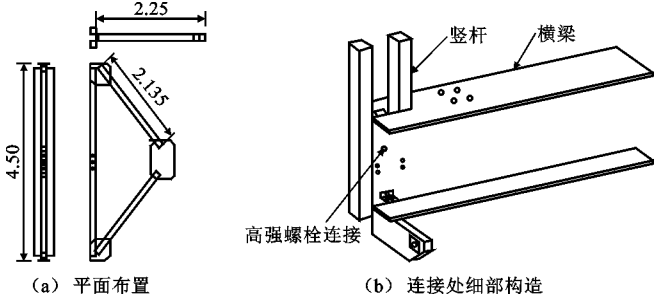
均采用高强螺栓连接,模块化的制作工艺与机械化的施工技术显著提升了架桥的速度,其最大跨径可达 91 m,既可用于永久性的城市与农村公路桥梁,也可用于临时性桥梁以及破坏桥梁的抢修。三角形桁架方案的具体单元形式和构造细节如图 5 所示,

上下弦杆截面尺寸为  $620.2\text{ mm}\times307.1\text{ mm}\times14.1\text{ mm}\times23.6\text{ mm}$ ,联系横梁尺寸为  $762.2\text{ mm}\times266.7\text{ mm}\times14.3\text{ mm}\times23.4\text{ mm}$ ,三角形单元杆件截面均为  $140\text{ mm}\times140\text{ mm}\times10\text{ mm}$  的矩形。三角形桁架的布置如图 6 所示。



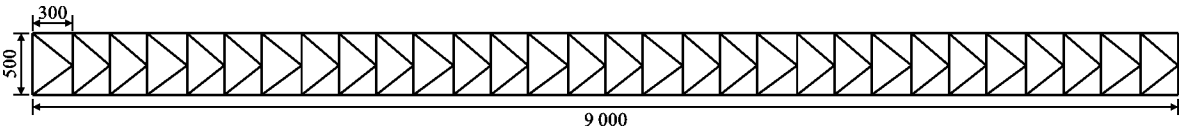
单位:cm

图 4 “200”型矩形钢管桁架布置  
Fig. 4 Layout of rectangular steel tube truss of “200”



单位:m

图 5 三角形桁架方案构造细节  
Fig. 5 Details of triangle truss program



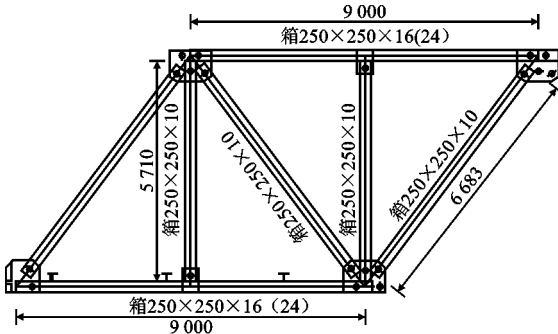
单位:cm

图 6 三角形桁架布置  
Fig. 6 Layout of triangle truss

1.4 “600”型矩形钢管桁架方案

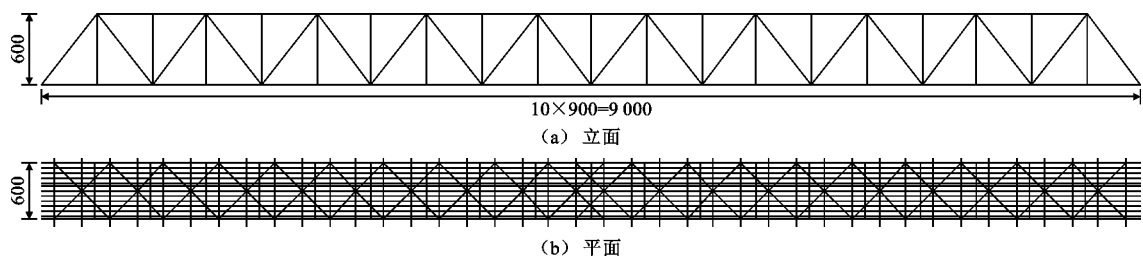
“600”型矩形钢管桁架方案以英国艾克罗重型桥设计方案为蓝图,将原艾克罗重型桥的各杆件截面改为矩形钢管截面,同时对各杆件的尺寸也进行重新设计,因其桁架高度为 600 mm,故称其为“600”型。本方案的拼装单元主要有 3 种:上下弦杆、斜腹杆和竖腹杆,不同杆件间采用节点箱连接。主桁架的上下弦杆截面尺寸为  $250\text{ mm}\times250\text{ mm}\times16(24)\text{ mm}$ ,斜腹杆和竖杆截面尺寸为  $250\text{ mm}\times250\text{ mm}\times10\text{ mm}$ ,横向连接系纵横杆截面尺寸为  $150\text{ mm}\times150\text{ mm}\times7(10)\text{ mm}$ ,桥面系横梁截面尺寸  $340\text{ mm}\times250\text{ mm}\times9(14)\text{ mm}$ 。“600”型矩形钢

管桁架具体尺寸见图 7,桁架方案布置见下页图 8。



单位:mm

图 7 “600”型矩形钢管桁架结构立面  
Fig. 7 Elevation of rectangular steel tube truss of “600”



单位:cm

图 8 “600”型矩形钢管桁架布置

Fig. 8 Layout of rectangular steel tube truss of “600”

2 有限元计算结果的比较分析

考虑装配式桁架节段的装配式特点,在有限元建模过程中节段与节段间的连接采用完全释放梁端约束形式模拟,其余杆件均采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟<sup>[11]</sup>。不同设计方案的有限元模型如图 9 所示。

由于 4 种装配式公路钢桥设计方案的杆件截面形式与面积各不相同,且不同设计方案的轴力都能满

足设计要求,因此仅对 4 种设计方案在移动荷载下的最大位移、组合应力、用钢量、1 阶屈曲稳定系数进行对比分析,分析各个方案的优劣,为后续设计方案模糊优选奠定基础。

2.1 移动荷载下的最大位移

移动荷载下不同设计方案最大位移见下页表 1。由表 1 可知,在移动荷载作用下各方案的位移值均满足容许值的要求,但是同等跨径下“600”型矩形钢管桁架方案的位移最小,说明其结构的整体刚度最大。

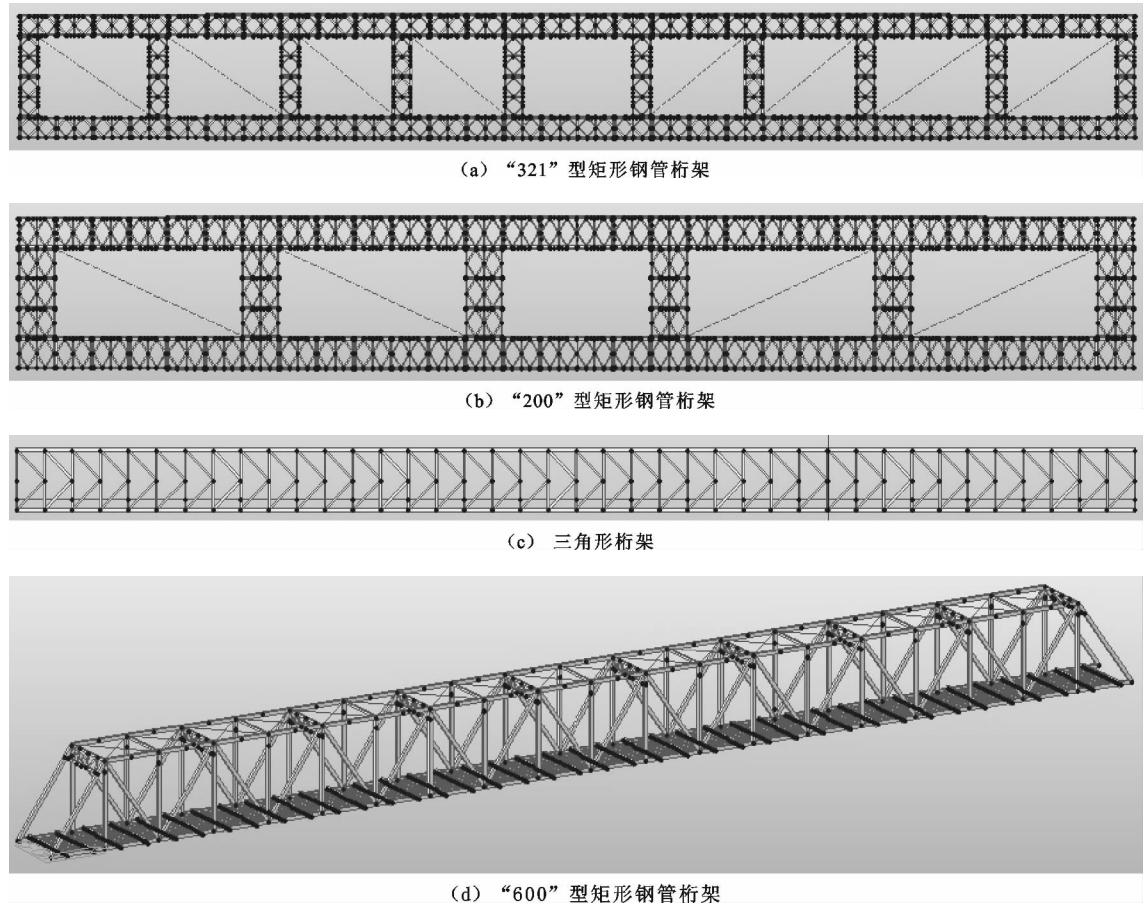


图 9 四种设计方案的有限元模型

Fig. 9 Finite element models of four design schemes

表 1 移动荷载下不同设计方案最大位移

Tab. 1 Maximum displacement of different design schemes under moving load

不同设计方案	最大位移
“321”型矩形钢管桁架	107.8
“200”型矩形钢管桁架	133.9
三角形桁架	129.1
“600”型矩形钢管桁架	91.5
位移容许值	300.0

2.2 组合应力

4 种设计方案的最大组合应力比较结果见表 2。

表 2 不同设计方案最大组合应力

Tab. 2 Maximum combined stress of different design schemes

不同设计方案	最大组合应力
“321”型矩形钢管桁架	381
“200”型矩形钢管桁架	446
三角形桁架	164
“600”型矩形钢管桁架	238
组合应力容许值	260

由表 2 可知:在移动荷载作用下同等跨径的三角形桁架方案和“600”型矩形钢管桁架方案的组合应力值均满足规范容许值的要求,其中同等跨径下三角形桁架方案的组合应力值相对较小,“600”型矩形钢管桁架方案的组合应力的安全系数在 1.1~1.4 之间;“321”型矩形钢管桁架方案和“200”型矩形钢管桁架方案的最大组合应力较大,均超过了规范规定的容许应力。但是通过仔细查看组合应力计算结果可知仅 1%左右的单元组合应力值超限,且组合应力超限的单元主要位于下层弦杆与横梁相交处,是由于有限元建模采用刚性连接所产生的较大剪应力和扭转应力,从而造成局部应力计算结果失真。

2.3 用钢量

不同设计方案的用钢量见表 3。由表 3 可知,4 个设计方案的用钢量基本控制在 2.0 t/m 左右,其中“200”型矩形钢管桁架方案的用钢量最大,三角形桁架方案的用钢量最小。

2.4 屈曲稳定系数

本次屈曲分析的屈曲荷载  $q = d_y + cd_k$ , 其中,  $d_y$  为永久作用,  $d_k$  为可变作用,  $c$  为屈曲系数<sup>[12-14]</sup>。在计算中考虑的永久作用为结构的自重,可变作用主要有公路Ⅱ级荷载和横桥向风荷载。不同设计方案的屈曲稳定系数计算结果见表 4,其中“321”型矩形钢管桁架方案和“200”型矩形钢管桁架方案的屈

曲稳定系数均小于 4,结构容易失稳;而三角形桁架方案和“600”型矩形钢管桁架方案的屈曲稳定系数较大,结构稳定性相对较好,其中“600”型矩形钢管桁架方案的稳定性更好。

表 3 不同设计方案用钢量

Tab. 3 Amount of steel of different design schemes

不同设计方案	用钢量
“321”型矩形钢管桁架	2.16
“200”型矩形钢管桁架	2.55
三角形桁架	1.93
“600”型矩形钢管桁架	2.06

表 4 不同设计方案屈曲稳定系数对比分析

Tab. 4 Buckling stability coefficients of design schemes

不同设计方案	屈曲稳定系数
“321”型矩形钢管桁架	3.9
“200”型矩形钢管桁架	3.1
三角形桁架	12.4
“600”型矩形钢管桁架	13.5

3 设计方案的模糊比选

3.1 评价指标体系的建立

本次设计方案评价指标体系采用二级评价体系。桥梁设计方案的基本目标主要包括力学性能、经济合理性、技术可行性、施工方便 4 性个方面。把基本目标分解为具体的评价指标,结合不同设计方案的特点和技术要求,具体分析其对基本目标的影响程度,即所谓的二级评价指标<sup>[15]</sup>。具体的二级评价指标体系如图 10 所示。

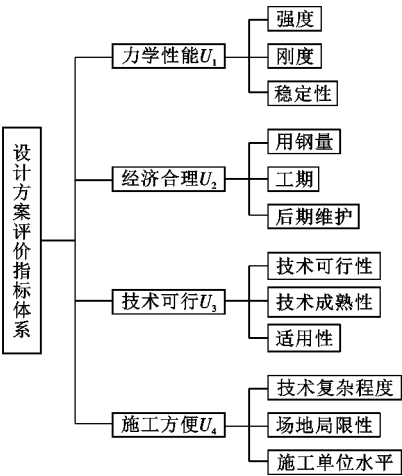


图 10 设计方案评价指标体系

Fig. 10 Evaluation indexes system of design scheme

3.2 综合评价指标的确定与处理

对于定量指标,主要是消除量纲,对其进行规范

化处理;对于定性指标,主要是在定性目标的域 $[0,1]$ 上根据分级因素的相互关系分别给出不同的评定值。综合考虑不同设计方案评价指标的具体情况,采用七级因素等级集 $E$ (很差、差、较差、中、较好、好、很好),在域 $[0,1]$ 上其相应评价等级对应的数值为 $E=[0.05,0.20,0.35,0.50,0.65,0.80,0.95]$ 。

3.3 权重矩阵的构造

同一层次内的 2 个不同因素 $u_i$ 和 $u_j$ ,对应用 $1,2,\cdots,9$ 来表示因素 $u_i$ 相对于 $u_j$ 的重要程度,数字越大表示越重要(1 表示 2 个因素同等重要),其他可采用 $1\sim9$ 之间的数字进行内插。用 $p_{ij}$ 表示因素 $u_i$ 相对于因素 $u_j$ 的重要程度判断值,可按表 5 取值<sup>[16-17]</sup>。

表 5 权重指标重要程度判断值

Tab. 5 Judging values of importance degree of weight indexes

$p_{ij}$	因素 $u_i$ 与 $u_j$ 的关系
1	具有同等重要性
3	具有稍微重要性
5	具有明显重要性
7	具有强烈重要性
9	具有极端重要性
2,4,6,8	重要性处于 $1\sim3,3\sim5,5\sim7,7\sim9$ 之间

设计方案评价指标体系中不同指标在设计方案模糊优选中的作用不尽相同,不同影响因素的重要程度也不相同。根据表 5 中的权重指标重要程度判断值,对某一层面的所有因素进行两两比较以决定其重要程度,并对比较结果进行相应的评分即可得到判断矩阵 $P$ 。对于判断矩阵 $P$ 需要进行一致性检验,当判断矩阵的随机一致性比率 $C_1$ 与平均随机一致性指标 $R_1$ 的比值 $C_R$ 小于 0.1 时,可以认为判断矩阵 $P$ 具有满意的一致性,说明权重系数分配比较合理;否则,就需要重新调整判断矩阵 $P$ 中的元素,直到取得的判断矩阵 $P$ 具有满意的一致性为止。

3.4 优选方案确定的过程

对于设计方案的模糊层次优选比较一般采用二级模糊综合评判,具体评判步骤如下<sup>[18-22]</sup>。

(1)评价指标按不同属性划分成 4 个互不相交的因素子集: $U=\{U_1,U_2,U_3,U_4\}$ ,其中 $U_1,U_2,U_3,U_4$ 的具体含义见图 10 中的第 1 层次。

(2)对因素子集 $U_k(k=1,2,3,4)$ 进行模糊评判。根据 $U_k=\{u_{k1},u_{k2},\cdots,u_{ki},\cdots,u_{kn}\}$ 中各因素对 $U_k$ 所起作用的大小确定模糊权重向量 $A_k=\{a_{k1},$

$a_{k2},\cdots,a_{ki},\cdots,a_{kn}\}$ ;对于因素 $u_{ki}$ 按照权重指标的重要程度判断值组成单因素模糊评判矩阵 $R_k$ ,则可以得到因素子集 $U_k$ 的单级模糊综合评判结果 $B_k$ ,其中 $B_k=(b_{k1},b_{k2},\cdots,b_{km})=A_kR_k$ 。

(3)将基本目标 $U$ 上的 4 个因素子集 $U_k$ 看成总因素集 $U$ 上的 4 个不相关单因素,按照 $U_k$ 对总因素集 $U$ 的贡献大小,确定其权重分配,形成权重模糊向量 $A=(a_1,a_2,a_3,a_4)$ ,把各个因素子集 $U_k$ 的单级评判结果 $B_k$ 作为总的单因素评判矩阵 $R$ ,即

$$R=\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{41} & \cdots & b_{4m} \end{bmatrix}$$

则可得最终的模糊综合评判结果

$$B=AR=A\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}=A\begin{bmatrix} A_1 & R_1 \\ A_2 & R_2 \\ A_3 & R_3 \\ A_4 & R_4 \end{bmatrix}=(b_1,b_2,b_3,b_4)$$

根据最大隶属度原则,与评价结果 $b_1,b_2,b_3,b_4$ 中最大值相对应的设计方案即为最优方案。

3.5 设计方案的比选与确定

针对大跨装配式公路钢桥提出的 4 个设计方案,进行模糊评判以确定最终的推荐方案。

3.5.1 初级评判

根据不同因素对 4 种设计方案的影响程度和七级因素评定标准,可得到不同层级因素的模糊矩阵、权重矩阵及单级模糊评判结果。

因素 $U_1$ 的模糊矩阵为

$$R_1=\begin{bmatrix} 0.65 & 0.50 & 0.95 & 0.80 \\ 0.65 & 0.50 & 0.80 & 0.95 \\ 0.65 & 0.50 & 0.80 & 0.95 \end{bmatrix}$$

根据不同因素的相互比较可得因素 $U_1$ 的判断矩阵的权重矩阵 $P_1$ 为

$$P_1=\begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

由 $P_1$ 可得到模糊权重向量 $A_1=(0.490\ 27,0.394\ 3,0.172\ 2)$ ,经计算可知 $C_R<0.10,A_1$ 可以作为权重向量,则单级模糊评判的结果为

$$B_1=A_1R_1=(0.955\ 0,0.734\ 6,1.310\ 8,1.260\ 3)$$

同理可得因素 $U_2,U_3$ 和 $U_4$ 的模糊矩阵、权重

矩阵和单级模糊评判结果

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.50 & 0.95 & 0.80 \\ 0.50 & 0.65 & 0.50 & 0.80 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.65 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = (0.869\ 6, 0.814\ 7, 1.144\ 2, 1.141\ 7),$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.65 & 0.80 & 0.95 \\ 0.65 & 0.65 & 0.95 & 0.80 \\ 0.65 & 0.65 & 0.65 & 0.80 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = (1.090\ 4, 0.955\ 0, 1.208\ 7, 1.310\ 8),$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.65 & 0.80 & 0.95 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.65 \\ 0.50 & 0.65 & 0.65 & 0.80 \end{bmatrix}, P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_4 = (0.719\ 1, 0.879\ 1, 1.016\ 5, 1.232\ 2)$$

3.5.2 二级评判

由初级模糊评判的结果可得到总模糊评判矩阵

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.955\ 0 & 0.734\ 6 & 1.310\ 8 & 1.260\ 3 \\ 0.869\ 6 & 0.814\ 7 & 1.144\ 2 & 1.141\ 7 \\ 0.719\ 1 & 0.879\ 1 & 1.016\ 5 & 1.232\ 2 \end{bmatrix}$$

根据二级因素的相互比较,可得一级因素  $U$  的权重矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

由此可以得到一级因素  $U$  的权重指标向量  $A$  为

$$A = (0.888\ 1, 0.377\ 7, 0.223\ 9, 0.136\ 2)$$

因此 4 种设计方案的最终模糊评判结果

$$B = (1.518\ 7, 1.293\ 7, 2.005\ 4, 2.011\ 8)$$

根据模糊层次评判的最大隶属度原则,与评判结果矩阵中最大值对应的方案即为相对最优方案,即“600”型矩形钢管桁架方案为相对最优方案。

4 结 语

(1)针对现有装配式公路钢桥跨越能力有限的现状,创造性地提出了采用矩形钢管代替原设计的槽钢及工字钢方案,新设计方案能够显著地提高装

配式公路钢桥的承载能力和跨越能力。

(2)提出了“321”、“200”、“600”型矩形钢管桁架和三角形桁架 4 种设计方案,分析了不同设计方案在移动荷载下的最大位移、组合应力、用钢量及 1 阶稳定屈曲系数 4 个方面的优劣性。

(3)根据模糊层次比选的要求,分别建立了不同层次因素的模糊评判矩阵及权重矩阵,根据最大隶属度原则,推荐“600”型矩形钢管桁架方案为相对最优方案。

(4)通过本文的研究能够为大跨装配式公路钢桥的设计方案提供一种新的思路,但真正投入使用还需要相应的模型试验和荷载试验进行验证与改进,以确保“600”型矩形钢管桁架方案更好地应用于工程实践。

参考文献:

References:

[1] 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.  
HUANG Shao-jin, LIU Mo-sheng. Multipurpose manual of fabricated highway steel bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

[2] 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): 85-88.  
XIAO Ye-tao. On the types, characteristics and applications of prefabricated highway steel bridges [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2007(3): 85-88.

[3] 于志国,王树栋. 我国应急钢桥的研究应用与展望[J]. 石家庄铁道学院学报, 2000, 13(3): 1-3.  
YU Zhi-guo, WANG Shu-dong. Research and application and development of national emergency steel bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2000, 13(3): 1-3.

[4] 苏善根,喻忠权,郝海龙. 装配式公路钢桥的演变[J]. 公路, 2010(7): 39-41.  
SU Shan-gen, YU Zhong-quan, HAO Hai-long. Evolution of fabricated highway steel bridge [J]. Highway, 2010(7): 39-41.

[5] 李斐然. 超宽“321”型装配式公路钢桥的研发与应用[J]. 公路, 2015(3): 67-70.  
LI Fei-ran. Development and application of ultra-wide “321” type prefabricated highway steel bridges [J]. Highway, 2015(3): 67-70.

[6] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 5.12 汶川地震灾区高速公路和国省干线公路恢复重建工程调查、检测、评估[R]. 成都:四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 2008.



- Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Investigation, detection and evaluation of restoration and reconstruction project of highways, national and provincial trunk roads in disaster areas induced by Wenchuan earthquake on May 12, 2008[R]. Chengdu: Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, 2008.
- [7] 庄卫林, 刘振宇, 蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1377-1387.  
ZHUANG Wei-lin, LIU Zhen-yu, JIANG Jin-song. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377-1387.
- [8] 刘玉娟, 姚文奇, 刘永健, 等. 基于 321 型和 HD200 型的大跨径装配式公路钢桥的研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(12): 1488-1492.  
LIU Yu-juan, YAO Wen-qi, LIU Yong-jian, et al. Research on large span assembled highway steel bridge based on type-321 and type-HD200[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014, 37(12): 1488-1492.
- [9] 汪立之. 装配式公路钢桥的现状和质量管理[J]. 公路, 1998(8): 15-16.  
WANG Li-zhi. The status quo and quality management of fabricated highway steel bridge[J]. Highway, 1998(8): 15-16.
- [10] 刘 尧, 叶贵如, 张治成. 桥上桥在大件运输中的应用研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(1): 176-179.  
LIU Yao, YE Gui-ru, ZHANG Zhi-cheng. Method "bridge on the bridge" used in the massive product transportation[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(1): 176-179.
- [11] ZHANG Y L, LI B, BIAN S C. Application of ANSYS to reliability analysis of prefabricated steel bridge[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1907-1914.
- [12] 刘 剑, 刘永健, 杨炳成. 关于桥梁结构线弹性稳定安全系数的讨论[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2009, 34(6): 719-724.  
LIU Jian, LIU Yong-jian, YANG Bing-cheng. A discussion on linear elastic stability safety coefficient of bridge structure[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2009, 34(6): 719-724.
- [13] 李斐然. 超宽“321”型装配式公路钢桥的第二类稳定性研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2015, 36(4): 92-95.  
LI Fei-ran. Second stability study of super wide "321" prefabricated highway steel bridge[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2015, 36(4): 92-95.
- [14] 赵灿晖. 上承式钢桁拱桥面内极限承载力分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 80-85.  
ZHAO Can-hui. In-plane ultimate bearing capacity analysis of deck-type steel braced arch bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 80-85.
- [15] TEE A B, SLINA B M D. Fuzzy mathematical approach in condition assessment of highway bridges[J]. Civil Engineering, 1988, 15(1): 17-24.
- [16] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000.  
XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Fuzzy mathematics method and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2000.
- [17] 徐伯初. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.  
XU Bo-chu. Principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [18] 吕颖钊, 贺拴海. 在役桥梁承载力模糊可靠性的马尔科夫预测[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4): 39-43.  
LU Ying-zhao, HE Shuan-hai. Prediction of Markov fuzzy reliability for existing bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 39-43.
- [19] 张建仁, 王 磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 49-55.  
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.
- [20] BHATT R, MACWAN J E M. Fuzzy logic and analytic hierarchy process-based conceptual model for sustainable commercial building assessment for India[J]. Journal of Architectural Engineering, 2016, 22(1): 1-10.
- [21] SUN L, GU W J. Pavement condition assessment using fuzzy logic theory and analytic hierarchy process[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(9): 648-655.
- [22] 刘 珊, 姚 刚, 张 雯, 等. 公路建设项目环境影响的多级模糊综合评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1): 80-83.  
LIU Shan, YAO Gang, ZHANG Wen, et al. Fuzzy comprehensive assessment of highway construction project impacts on environment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 80-83.