文章编号:1674-2974(2018)01-0019-07

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2018.01.003

一种新型可展拱桥的探索

熊海贝*,宋依洁

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘 要:提出了一种新型的救灾用可展拱桥体系,包括可展桥体系、构件、连接、展开方 式等.该可展桥以三角形剪式单元作为基本可展构件,以小型机械牵引,快速展开固定.可 展拱桥由可展主拱肋、吊杆、可展桥面板等构件组成,形成了兼具可展性与稳定性的空间结 构.对有限元弹性和弹塑性模型进行分析,优化桥体结构,进行线性及非线性屈曲分析.优 选方案的线性屈曲安全系数为5.72,非线性屈曲安全系数为2.95,验证了该可展桥的承载能 力和结构性能.该可展桥具有构件轻巧、运输方便、施工快捷、承载力大等优点.

关键词:可展拱桥;三角形剪式单元;结构性能;屈曲分析;灾后交通 中图分类号:TU32 **文献标志码:**A

Design and Application of New Deployable Bridge

XIONG Haibei[†], SONG Yijie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new deployable bridge for relief was developed. The system, component, connection and deploy method of the new deployable bridge were introduced. The deployable bridge is based on universal scissor components which can guarantee swift expansion and fixation by small machinery. The bridge structure is not only stable but also deployable and consists of deployable arch ribs, rigid columns and deployable decks. The finite element software SAP2000 was used to model and optimize the bridge structure. Cross-section optimization and linear and nonlinear buckling analysis were performed. The safety coefficient of linear buckling of optimal scheme is 5.72 and the safety coefficient of nonlinear buckling is 2. 95 which evaluate the structural favorable capacity of the deployable bridge. The deployable bridge is light, easy to transport, reliable, and fast to construct. It can efficiently fix traffic interruption.

Key words: deployable bridge; universal scissor components; structural performance; buckling analysis; traffic interruption

可展桥具有便于运输、架设快速、对周边环境 影响小等特点. 国外研究可展桥的架设和结构可行 性等相关技术比较成熟. 1926 年荷兰发明家 L. Deth发明了应急折叠桥,可通过手推车运送,是此 后大型折叠桥的雏形^[1]. 2007 年,美国威斯康辛大 学研究设计了纤维加强混凝土桥面的可展桥体 系^[2].国外军用战术桥梁大都采用折叠体系,施工 速度快,架设时间短.美军使用 TLB 拖式冲击 桥^[3],该桥在一个有倾斜车架的四轮拖车上折叠安 装,桥和拖车均用铝合金制成.柴油发动机作为动

^{*} 收稿日期:2016-12-25

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2014BAL05B01),National Key Technology Support Program (2014BAL05B01) 作者简介:熊海贝(1964—),女,上海人,同济大学教授,博士 †通讯联系人,E-mail:xionghaibei@126.com

力源,需要坦克和卡车牵引. 2013年日本广岛大学 有尾一郎^[4]设计出采用剪式铰可展机构实现可展的 可移动桥.

20世纪60年代初,我国交通部公路规划设计 院在原英制贝雷桥的基础上设计了一种可拆式的 "321"装配式公路钢桥,是我国可展桥梁的雏形^[5]. 为解决"321"木桥面易损、承载力低等问题,我国进 一步设计研发了200型装配式公路钢桥^[6].2010年 国防科技大学基于现有军用装配式桥梁设计了一 种桥节可展的装配式桥梁结构^[7],桥节采用可竖向 伸展的剪叉式结构设计.2012年浙江大学关富玲及 其团队^[8]提出以剪式铰和套筒可展机构实现轴向展 开的新型可展军用桥.

可展结构的基本组成单元也经过了几个阶段 的发展.例如许多空间可展结构都是由基本构 件——剪式单元相互连接组成.将剪式单元进一步 改进,把直杆换成折杆,就形成了可以调整角度的 折线形剪式单元.折线形剪式结构的概念由 Kempe 提出,霍伯曼对其命名并应用在各种可展结构设计 中^[9].Hanaor^[10]的研究表明,这种剪式结构常常是 受弯控制,材料利用效率不高.在此基础上,Mira^[11] 设计了三角形剪式单元(universal scissor component),由三角形替换折线形杆件,能提高抗弯性能, 减少变形.

国内的可展桥梁研究主要针对桥节的折叠,收 缩后节约的空间有限,桥节之间的连接依然大量依 赖于现场施工.国外的可展桥梁大多是昂贵的军用 桥梁,需要大型配套启动机械.也较少有专门应用 于救灾情况下的可展桥梁.

本文提出了新型的救灾用轻便可展拱桥,该可 展桥以三角形剪式单元作为拱肋的基本构件.采用 有限元弹性和弹塑性模型,进行结构优化及分析, 验证了该可展桥的承载能力和结构性能.

1 新型可展桥的提出

1.1 设计目标

通过对灾区环境的分析,提出本可展桥的设计 目标为:自重轻,易于折叠、收展,保证结构运输、施 工和使用过程中的整体稳定性.

1.2 桥体构成

1.2.1 剪式单元

对比相同尺寸下直杆式剪式单元、折线式剪式 单元、三角形剪式单元在相同荷载下的内力图(如 图 1~图 3 所示),可比较每个剪式单元的受力性能. 每个单元模型与地面铰接,上部的两个节点各施加 0.5 kN的荷载.



从图 1~图 3 可看出,相比于其他剪式单元,三 角形剪式单元中的杆件主要承受轴力,其他剪式单 元中的杆件主要承受弯矩.三角形剪式单元组成可 展结构的受力优势主要有:1)轴力大而弯矩剪力 小,构件截面利用效率高,整体变形小;2)对需要反 复折叠的可展结构,节点部位是薄弱部位,避免节 点受弯降低了节点的失效概率.

1.2.2 桥体组成

以优化结构、减轻自重为原则,提出一种以剪 式组合构件为基础的新式可展拱桥.剪式组合构件 由三角形剪式单元上下连接组成,可在平面内收 展,如图 4 所示.

该可展桥由可展主拱肋、可展桥面、吊杆、横梁 和支撑体系组成(如图 5、图 6 所示),支撑体系指桥 体顶部的刚性斜撑及横撑.主拱肋由两榀平行的剪 式组合构件组成.两榀拱肋在节点处由支撑体系相



scissor member

连. 吊杆上端连接可展主拱圈的各个节点,下端通 过横梁连接可展桥面,固定形成整个结构的骨架.

桥面板非满铺,以减轻桥重,3.2 m 宽的桥面铺 设两道宽度为1.1 m 的可展桥面板,中间1 m 空置. 桥面板的折叠或展开与拱肋协同进行,配合整体结 构的收展.待桥体展开后,再进行刚性斜撑(如图5 所示)的二次安装和支座的固定,最后形成稳定 结构.



图 5 可展桥组成图 Fig.5 The composition of the deployable structure



图 6 可展桥收缩图 Fig.6 The contraction state of the deployable structure

本设计采用系杆拱桥桥型,系杆拱桥充分发挥 梁受弯、拱受压的组合作用,形成自平衡体系. 拱端 的水平推力由桥面板或预加拉索承受,拱端支座不 产生水平推力,以降低对支座墩台及地基的要求. 可在桥面底部设置预加拉力拉索,抵消桥面梁受到 的部分拉力.

1.3 展开机理

可展桥的两榀拱肋可在平面内伸缩,与桥面板

通过吊杆连接,同步伸缩.控制拱肋端部的三角形 剪式单元中 AB 两点(如图 7 所示)的相对运动即可 实现整个结构的伸缩.采用液压装置控制 AB 有最 大的相对错动时,可展桥完全收合,AB 两点相互靠 至最近,可展桥完全展开.



图 7 展开过程 Fig.7 The deployment process

桥面板收缩时采用相互折叠的方式,板件连接 处采用套筒连接,并且设计成180°的单向合页,来 控制每个板件的单方向折叠,横梁从连接桥面板的 套筒中穿过,保证与拱肋的同步折叠.具体连接方 式可参考关富玲等^[8]提出的新型可展军用桥的板件 连接.

2 可展桥结构分析

2.1 基本假定与模型建立

本设计考虑一种基本情况:中小跨度的可展开 车行桥.设计桥跨20m;单向通车,桥面布置为单向 单车道,桥面宽度3.2m,最大净高3.8m,最小净高 2.8m;承载能力为4t的轻型卡车.考虑可展桥是 在灾害条件下应用的,抗震设防烈度取8度.

在 SAP2000 软件中建立可展桥的空间杆系模型.一端的支座节点为铰接支座,另一端为滑移支座.这个假设主要是考虑到实际的施工过程,在一端设置浆砌石地基,另外一端在展开之后直接放置在地面上.

在 SAP2000 中设置三角形单元之间在平面内 铰接,平面外刚度用弹簧模拟. 平面外的刚度考虑 用预加拉力的钢丝绳连接在两个三角形剪式单元 的两端,依靠张紧的钢丝绳提供平面外刚度,这里 采用平面外刚度为 4 kN/mm 的弹簧模拟. 刚度大 小与钢丝绳的预拉力值有关,实际计算时刚度值 由试验得出. 刚性横撑、吊杆和横梁相互刚接. 拱 顶支撑与主拱肋铰接连接,桥面梁与吊框铰接 连接.

第1期

2.2 荷载

2.2.1 荷载选择

设计时主要考虑荷载:恒载、车辆荷载、风荷载. 由于可展桥一端为滑动支座,释放了水平自由度, 故认为温度对内力影响不大,不考虑温度荷载.

1)恒载:考虑节点连接以及桥面板的重量.

2)车辆荷载:假设桥面上每次只通过一辆车. 按照轴距3800mm、承载能力4t的轻型卡车创建 车辆活荷载,并定义车道.SAP2000计算出车道荷 载的影响线,自动寻找最大影响量.

3)风荷载:风荷载按《公路桥梁抗风设计规范》 (JTG/T D60-01—2004)计算.考虑保守情况,按百 年一遇风速计算.考虑山区环境,H 设为 100 m,地 面粗糙度 C 类.计算横、竖向风荷载,竖向风荷载考 虑上下风向.

2.2.2 荷载组合

设计主要考虑恒载、车辆荷载和风荷载. 区别 上风 W₂₁及下风 W₂₂,结构对称,不区分左右风.

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取用荷载组合:承载能力极限状态下的基本 组合、正常使用极限状态下的频遇组合及准永久组合,共计算14种荷载组合.

承载力极限状态:

1)1.1 \Box +1.4×车辆+0.75×1.1× W_x ; 2)1.1 \Box +1.4×车辆+0.75×1.1× W_{z1} ; 3)1.1 \Box +1.4×车辆+0.75×1.1× W_{z2} ; 4)1.1 \Box +1.4 车辆; 5)1.0 \Box +1.1 W_{z1} ; 6)1.1 \Box +1.1 W_{z2} ; 7)1.1 \Box +1.1 W_x ;

() 1.1 | \square | 1.1 (x,

8)1.1 恒+1.4 车辆+0.7×1.4 水平地震. 正常使用极限状态频遇组合:

9)恒+0.7 车辆+0.75×W_x;

10) 恒+0.7 车辆+0.75× W_{z_1} ;

11) 恒+0.7 车辆+0.75×W_{z2}.

正常使用极限状态准永久组合:

- 12) 恒+0.4车辆 $+0.75 \times W_x$;
- 13) 恒+0.4 车辆+0.75×W_{*1};
- 14) 恒+0.4 车辆+0.75× W_{z2} .

2.3 结构选型

结构体系的组成确定后,确定三角形剪式单元 的构形角度和数量最为关键.通过有限元模型来衡 量两个因素的影响.

在可展桥跨度、宽度、矢高、承载能力等条件一

致的基础上,比较三角形数量和构形角度对结构的 影响.设计如下3种方案(如图8所示),图中跨数代 表三角形剪式单元数量,夹角度数代表三角形单元 构形中锐角角度.



Fig.8 Three structure projects

有限元模型中进行各方案的分析比选,截面优 化和屈曲分析后统计材料用量和线性屈曲系数等 参数(见表 1).

表1 3种结构方案对比分析

Tab.1Comparison and analysis of the three

structure projects

方案	质量/kg	体积比*/%	屈曲系数
A:6 跨,15°	3 229	20.1	5.72
B:7 跨,15°	3 673	15.8	4.87
C:7 跨,30°	3 908	30.9	5.67

* 表示收缩体积与展开体积的比值.

可见,3种方案中A方案质量最轻,同时其一阶 线性屈曲系数最大,杆件数量少,制作简单,且完全 收缩后空间较小.故A方案为最优方案,以下设计 及分析均采用A方案模型.

2.4 构件验算

2.4.1 设计依据

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 4.2.3条规定,公路钢桥采用不计冲击力的汽车车道 荷载频遇值,频遇值系数取 1.0. 简支梁计算挠度不 应超过 L/500.

基于我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2006)、 《建筑抗震设计规范》(GB 50010—2010)和《公路钢 结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015),8 度抗震设 防、设计地震分组第一组和 II 类场地条件,进行 A 方案的结构验算. 第1期

优化后构件应力比相对较小,大部分都在 0.5 以下,验算主要由长细比控制. 表 2 显示了所有构 件类型和截面尺寸.

	表 2 构	件类型和截面尺	寸
Tab.2	Element t	ype and sectional	dimension

构件类型	截面尺寸/mm×mm	数量	质量/ kg	钢材
支撑	$\angle 125 \times 80 \times 7$	16	248.7	Q 235B
	$\angle 140 \times 90 \times 8$	4	99.7	Q 235B
拱	$\square 80 \times 45 \times 4 \times 4$	4	715.2	Q 235B
吊框	$\square 80 \times 45 \times 4 \times 4$	20	123.6	Q 235B
	φ 127 $ imes$ 7.0	32	60.4	Q 235B
	φ 114×6.0	2	54.9	Q 235B
	$\varphi 60 imes 6.0$	6	52.5	Q 235B
桥面梁	$\square 90 \times 40 \times 4 \times 6$	10	1 096.4	Q 345B
支座	φ90×6.0	2	42.5	Q 235B
	总质量/ kg		2 483.9	

图 9~图 12 所示分别是荷载组合 1 下的结构 平面内弯矩 M₃₃图、平面外弯矩 M₂₂图、轴力图以及 构件应力比.



图 9 平面内弯矩 M₃₃ 图 Fig.9 Bending moment M₃₃ diagram in plane



图 10 平面外弯矩 M₂₂图 Fig.10 Bending moment M₂₂ diagram out of plane

验算结果显示,可展桥的固定支座一侧受力最 集中.靠近固定支座的三角形剪式单元主要承受平 面外弯矩、扭矩以及轴力,固定端支座之间的连杆 主要承受弯矩.车辆荷载作用处的吊索主要承受轴



图 11 轴力图 Fig.11 Axial force diagram



图 12 构件应力比 Fig.12 Stress ratio diagram of elements

力,桥面梁在自重和车辆荷载作用下主要承受拉力. 大部分三角形剪式单元主要承受轴力.表3显示了 固定支座及跨中部位附近的构件及节点内力(构件 及节点编号在图12中表示).

表 3 重要构件及节点内力 Tab.3 Stress on important element and joint

构件编号	最不利 组合	弯矩/ (kN・m)	剪力/kN	轴力/kN	最大应力比
E-1	组合1	2.07	1.46	0.32	0.346
E-2	组合1	3.63	2.43	0.55	0.669
E-3	组合 2	1.61	1.75	12.23	0.178
E-4	组合 2	1.42	0.44	22.47	0.063
E-5	组合 3	0	1.13	6.60	0.019
节点编号	最不利 组合	$M_x/$ (kN • m)	$M_z/$ (kN • m)	F_y/kN	F_z/kN
J-1	组合1	3.41	16.12	6.40	15.30
J-2	组合1	3.23	12.24	4.70	12.69
J-3	组合1	0.02	4.02	0.10	4.12

由变形图看出,横向风荷载 W_x是结构变形的 控制荷载,如图 13 所示.

整体结构在荷载组合 7(1.1 恒+1.1W_x)下有最 大跨中位移,其中 X 方向位移 0.39 mm,Y 方向位 移-41.70 mm,Z 方向位移-2.11 mm,总位移为



图 13 结构在横向风 W_x作用下的变形 Fig.13 Structure deformation under the W_x wind load

41.76 mm, 挠度为 L/479. 略超过规范规定限制挠度(L/500), 考虑到该桥为临时用桥, 此变形可以接受.

2.5 屈曲分析

2.5.1 线性屈曲分析

线性屈曲分析是基于结构第一类稳定问题,求 解程序的屈曲特征方程得到屈曲安全系数的过程. 分析中的给定荷载设置为:工况1—风荷载和车辆 荷载叠加;工况2—车辆荷载;工况3—风荷载.

工況1下的屈曲模式如图14和表4所示.第一 屈曲模式是吊索和桥面梁的整体失稳,第二屈曲模 式是支座部位附近的主拱肋屈曲失稳,第三屈曲模 式是支座之间连杆的局部失稳.

表 4 工况 1 下前三阶线性屈曲系数 Tab.4 The first three linear buckling coefficients

in	load	condition	1

阶数	屈曲系数	失稳位置
1	-5.72	吊索及桥面梁
2	10.26	支座端剪式单元
3	-10.31	支座端连杆

从表 5 可知,本可展桥在工况 1 下的一阶屈曲 系数为 5.72,工况 2 下为 7.04,工况 3 下为 10.73. 根 据《公路桥涵设计规范》及实际工程经验,工程中一 般规定屈曲系数 $K \ge 4$,某些工程可能对其取值要 求更高^[12].本可展桥属于临时结构,满足屈曲系数 $K = 5.72 \ge 4$,说明可展桥满足整体稳定要求.

表 5 各工况下线性屈曲结果 Tab.5 The linear buckling coefficients in each load condition

荷载工况	一阶屈曲安全系数
1	5.72
2	7.04
3	10.73

2.5.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是基于结构的第二类稳定问



(a)一阶屈曲模式



(b)二阶屈曲模式



 (c)三阶屈曲模式
 图 14 工况1下前三阶屈曲模式
 Fig.14 The first three linear buckling modes under load condition 1

题,求解程序的非线性方程的过程.几何非线性 P-Δ效应和大位移通过定义静力非线性工况来考虑. 材料非线性通过"一致缺陷模态法"来模拟.以第一 阶整体屈曲模态的位移形态作为初始模态施加初 始几何缺陷,重新生成模型.

结构屈曲时,其刚度矩阵出现奇异,计算结果 不再收敛.图 15 所示为 3 种工况下非线性屈曲系 数.非线性分析的临界荷载为工况 1 的 2.95 倍,工 况 2 的 3.47 倍,工况 3 的 5.86 倍.比线性屈曲分析 得到的结果要小很多.

当外加荷载达到临界荷载时,各个结构构件的 应力仍然满足规范要求. 说明结构的整体稳定是可 展桥结构的控制因素. 非线性分析的临界荷载为工 况1的 2.95 倍,证明该桥具有一定的非线性稳 定性.



图 15 3 种工况下非线性屈曲系数 Fig.15 The nonlinear buckling coefficients in each load condition

3 结 论

提出一种新型可展拱桥,其功能是救灾时快速 展开固定,打通救援生命线.新型可展桥体系以三 角形剪式单元为基本单元,采用系杆拱桥桥型,布 置多道防线,合理布置支撑体系.对桥体结构进行 有限元分析与设计,比较不同剪式单元跨数、构形 角度的方案的综合指标.对每个方案进行构件强 度、稳定验算以及线性、非线性的特征值屈曲分析, 找出优选方案,并得出以下结论:

1)可展桥的构件应力较小,主要受稳定控制.固 端支座附近的构件有较大的弯扭内力,应在此处加 强构造设计.

2)横向风荷载 W_x 是结构变形的控制荷载,结构最大挠度为 L/479,略微超过规范规定限制挠度 (L/500),但考虑到该桥为临时用桥,认为此变形可以接受.

3)优选方案的线性屈曲安全系数为 5.72,且一 阶屈曲模式为吊索和桥面梁的整体失稳.满足工程 中一般规定:屈曲系数 K≥4.

4)优选方案的非线性屈曲安全系数为 2.95,说 明具有一定的非线性稳定性.

5)该种新型可展拱桥质量轻,运输方便;可在 现场迅速展开,操作方便;预制装配化施工,可重复 利用,克服了传统装配式公路钢桥的一些缺陷.

参考文献

[1] 夏志远,董军,池沛.可展桥的应用和发展[J]. 世界桥梁,2013, 41(6):28-32. XIA Z Y, DOND J, CHI P. The application and development of deployable bridge[J]. World Bridges, 2013, 41(6):28-32. (In Chinese)

- [2] HANUS J P. Investigation of a deployable military bridge system with a fiber reinforced concrete deck[D].Madison:College of Military Studies, University of Wisconsin-Madison, 2007:93 -98.
- [3] 江民书. Tensairity 军用桥节力学性能研究[D]. 长沙:国防科 技大学航天与材料工程学院,2010:3-9.
 JIANG M S. Research on mechanical properties of military bridge section based on tensairity structure[D]. Changsha: College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology,2010:3-9.(In Chinese)
- [4] ARIO I, NAKAZAWA M, TANAKA Y, et al. Development of a prototype deployable bridge based on origami skill[J]. Automation in Construction, 2013, 32:104-111.
- [5] 徐关尧,朱杰.我国装配式公路钢桥的发展及应用[J].钢结构, 2009,24(7):6-10.
 XU G Y,ZHU J. Development and application of portable steel bridge in China[J].Steel Constructure,2009,24(7):6-10. (In Chinese)
- [6] 戴哲彬. 装配式钢桥的研究应用及展望[J]. 江苏建筑,2012, 17(6):36-38.
 DAI Z B. The research application and prospect of potable steel bridge[J]. Jiangsu Building,2012,17(6):36-38.(In Chinese)
- [7] 孙光旭.可展桥节方案设计及动力学分析[D].长沙:国防科技 大学航天与材料工程学院,2010:16-21. SUN G X. Program design and dynamics analysis of a new deployable bridge[D]. Changsha: College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, 2010:16-21. (In Chinese)
- [8] 关富玲,周益君,况祺. 一种轻型可展军用桥梁的设计与动力 学分析[J]. 西南交通大学学报,2012,47(5):735-740.
 GUAN F L, ZHOU Y J, KUANG Q. Design and dynamical analysis of new deployable bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(5):735-740. (In Chinese)
- [9] HOBERMAN C. Radial expandable/retractable truss structures:US5024031[P]. 1991-06-18.
- [10] HANAOR A, LEVY R. Evaluations of deployable structures for space enclosures [J]. International Journal of Space Structures, 2001, 16(4):211-229.
- [11] MIRA L A. Design and analysis of a universal scissor component for mobile architectural applications [D]. Brussel: College of Civil Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 2010:67-72.
- [12] 孙文俊,陈宝泉.军用桥梁设计原理[M]. 北京:国防工业出版 社,2008:31-37.
 SUN W J, CHEN B Q. Principles of military bridge design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008:31-37. (In Chinese)