

# 复合主拱圈弹塑性本构关系等效方法

乔文靖<sup>1,2</sup>, 宋一凡<sup>1</sup>, 孙克东<sup>3</sup>

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 西安工业大学建筑工程学院, 西安 710032
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075

**摘要** 基于原拱圈和加固层共同工作、协调变形原理,以复合主拱圈加固圬工拱桥的拱段为研究对象,推导出适合有限元分析的混凝土与砌体理想弹塑性本构关系。对加固后的拱段应用推导的本构关系,采用有限元软件ANSYS建立了数值分析模型,并对该本构关系进行实验校核。结果表明,采用混凝土与砌体理想弹塑性本构关系,有限元数值和实测数值非常接近,有限元极限承载力数值比实测极限承载力数值小6.8%~9.2%;建立的混凝土和砌体的理想弹塑性本构关系在复合主拱圈加固圬工拱桥时可靠性较高,可供同类桥梁结构分析应用。

**关键词** 复合主拱圈;拱段;有限元数值;实测数值;本构关系

**中图分类号** U442.53

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.2.002

## Elastic-plastic Constitutive Relation Equivalent Method of Composite Main Arch Circle

QIAO Wenjing<sup>1,2</sup>, SONG Yifan<sup>1</sup>, SUN Kedong<sup>3</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China
3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China

**Abstract** The arch segment of masonry arch bridge strengthened by composite main arch circle method is researched based on the theory that original arch and reinforcing layer can work together and coordination deformation. An ideal elastic-plastic constitutive relation of concrete and masonry that can be applied to finite element analysis is deduced. This ideal elastic-plastic constitutive relation is applied to reinforced arch segment, numerical model is established by finite element software ANSYS and is checked by test. The result show that the finite element numerical adopted this ideal elastic-plastic constitutive relation of concrete and masonry is close to measured value, ultimate bearing capacity of the finite element numerical reduced by 6.8%—9.2% compared to measured value. The results show that an ideal elastic-plastic constitutive relation of concrete and masonry is reliable when masonry arch is strengthened by composite main arch circle method, this method can be applicable in the analysis of the same kind of bridge structures.

**Keywords** composite main arch circle; arch segment; finite element numerical; measured value; constitutive relation

实腹式圬工拱桥采用钢筋混凝土复合主拱圈加固<sup>[1,2]</sup>后可以增大主拱圈刚度、强度,提高桥梁承载力,所以,科学开发这种加固技术,具有十分重要的意义和广阔的发展前景<sup>[3-5]</sup>。目前,对于复合主拱圈加固圬工拱桥的计算方法有如下几种:文献[6]中提出了基于组合截面内力分配的拱桥加固计算方法,也就是将石砌体和混凝土采用弹性模量转化为同一种材料,再进行统一换算截面计算,采用这种方法计算时,由于要

将两种材料的弹性模量转化为一种截面,比较麻烦,而且只能考虑混凝土或石砌体一种材料的非线性,计算精度会受到影响;文献[7]提出组合截面的正截面承载力计算公式,考虑了原构件和新构件的抗压强度设计值,但没有考虑材料的非线性,所以对于结构的极限承载力数值有影响;而在复合主拱圈加固石拱桥的极限承载力分析中,若要考虑材料非线性,必须至少输入砌体和混凝土两种材料的弹塑性本构关系

收稿日期: 2013-09-03;修回日期: 2013-11-29

基金项目: 国家交通运输部西部交通建设科技项目(2011318812970)

作者简介: 乔文靖, 博士研究生, 研究方向为石拱桥加固, 电子信箱: qiaowenjing76@163.com

引用格式: 乔文靖, 宋一凡, 孙克东. 复合主拱圈弹塑性本构关系等效方法[J]. 科技导报, 2014, 32(2): 21-25.

进行数值模拟,圬工拱桥主拱圈和混凝土的弹塑性本构关系可以采用文献[8]中提到的本构关系,在数值分析中,原拱圈和加固层必须分开建模,以便后期附不同材料的本构关系,在随后采用有限元进行极限承载力分析时,必须将预估荷载分为若干荷载步进行平衡迭代。对于这种建模方法,因单元比较多,需要考虑的材料非线性比较复杂,故实体模型求解需要耗费很多时间,计算精度也受到影响。

本文推导砌体和混凝土作为统一材料的等效弹塑性复合材料本构关系<sup>[9,10]</sup>,取3个受压区高度不同的模型,进行圬工拱桥加固后拱段的有限元分析和模型实验验证。将两数值进行比较,如果有限元数值接近实测数值,说明采用该种弹塑性本构关系等效方法进行有限元分析在精简模型、简化计算工作量和计算时间的同时,能准确地进行极限承载力分析,可供同类桥梁结构分析应用。

## 1 实验研究

### 1.1 实验概况

为了计算复合主拱圈加固圬工拱桥偏压构件的极限承载力,本文特制作了复合主拱圈加固圬工砌体短柱的模型。为了直接反映圬工拱桥加固后破坏的形式,本文采用以直代曲的短柱设计方法,共设计3个试件,偏心距分别为147、100、60 mm,以保证加固后的试件受压区高度不同,从而反映实际加固后拱桥中的3种受压情况:1)试件A,只有砌体部分受压,加固层受拉;2)试件B,砌体全部受压,加固层部分受拉部分受压;3)试件C,砌体和加固层均受压。试件中未加固前圬工砌体采用强度等级为C25混凝土砌块,砂浆强度为M10,砌筑后圬工砌体尺寸为380 mm×260 mm×845 mm。加固层采用标号为C40混凝土,加固层中配置 $\phi 12$ 的纵筋及 $\phi 8$ 的箍筋,具体尺寸:试件A为200 mm×96 mm×845 mm,试件B和试件C均为200 mm×140 mm×845 mm。为了加强砌体和混凝土的结合面的黏结性能,特配置了相应的植筋,同时为了保证加固部分受力均匀,不会引起应力集中,在砌体的两端分别做高200 mm的钢筋混凝土垫层。

在位于加固试件中部截面的纵向钢筋和混凝土表面贴上电阻应变片,考察极限状态下钢筋及混凝土的受力状态。该实验模型在200 t千斤顶上进行一次加载实验,具体加载装置以试件B加载为例,如图1所示。



图1 加载装置

Fig. 1 Bearing set

加载程序为先以估算的极限荷载的10%进行预压,然后卸载到0,再以每级为极限荷载的10%的荷载进行加压,直到极限荷载的90%后,再以每级5%加压直到试件破坏。

### 1.2 结果及分析

#### 1.2.1 破坏现象及受力性能

从各试件破坏的外观现象看,加固构件破坏时均为受压侧砌体达到极限而破坏,破坏时加固层没有明显外鼓,和砌体链接在一起,说明结合面能够通过植筋的方法有效地粘结在一起受力。具体破坏形式如图2所示。



(a) 试件A

(b) 试件B

(c) 试件C

图2 试件破坏形式

Fig. 2 Destruction form of the test

试件A,当加载为极限荷载的31%时,远离偏压侧加固层的混凝土表面出现裂缝,砌体表面有细小的裂缝,随着荷载的增大,整个砌体部分出现倾斜现象,千分表的度数增大。构件破坏时,在近偏压侧砌体表面部分,细小裂缝汇通形成一条主要大裂缝,远离偏压侧加固层的混凝土裂缝和试件B相比,横向裂缝发展较多、较宽,加固层中纵筋受拉,如图2(a)所示。试件B,当加载为极限荷载的63%时,远离偏压侧加固层的混凝土表面出现裂缝,砌体表面有细小的裂缝,随着荷载的增大,整个砌体部分出现倾斜现象,构件破坏时,在砌体中间部分,细小裂缝汇通形成一条主要大裂缝,而加固层部分和试件C相比,横向裂缝发展较多,加固层中纵筋受拉,如图2(b)所示。对于试件C,当加载为极限荷载的80%时,砌体中间出现细小纵向裂缝,加固层远离偏压侧部分出现少数微小裂缝,近偏压侧的千分表读数迅速增大,随着荷载的增大,裂缝迅速变大,砌体和加固层连接处也出现裂缝,靠近偏压侧的砌体中部出现砌块外鼓现象,但远砌体部分和加固层连接在一起,并未明显脱落,最后砌体破坏,加固层的纵向钢筋受压,如图2(c)所示。

#### 1.2.2 正截面承载力

测量各材料的实测强度,砌体为9.8 MPa,加固层混凝土为35.5 MPa。通过实验加载,得到试件A、B、C的极限承载力分别为582、903、1398 kN。由此可知,整个截面全截面受压时,极限承载力较大,较加固层全部受拉时,承载力提高1倍多,较全截面部分受拉部分受压提高54.8%。但从破坏形式

看,加固层全部受拉时,加固层上的横向裂缝较多,类似于钢筋混凝土梁的少筋梁破坏;而加固层全部受压时,加固层处基本没有裂缝,破坏始于砌体部分的受压破坏,类似于钢筋混凝土梁的超筋梁破坏;加固层部分受压部分受拉时,加固层处横向裂缝明显,同时砌体部分受压竖向裂缝也明显,类似于钢筋混凝土梁的适筋梁破坏。

## 2 基本材料的本构关系

由于采用的是整体式建模,本文进行钢筋混凝土复合主拱圈加固圬工拱桥的材料非线性承载力分析时,只考虑了砌体和加固层混凝土统一材料的非线性,钢筋弥散于整体式结构之中。

### 2.1 砌体的本构关系

国内外学者对单轴受压砌体本构关系的研究较早,较有代表性的有苏联学者提出的对数型表达式<sup>[11]</sup>;朱伯龙等提出的两段式型本构关系,补充了对数型缺少应力-应变曲线下下降段的不足<sup>[12]</sup>;Powell和Hodgkinson提出的多项式型(抛物线型)本构关系,具有光滑的上升段和下降段曲线,适用于非线性有限元分析<sup>[11]</sup>,具体表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_{01} \left[ 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{01}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{01}} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_{01} \\ \sigma_1 = \sigma_{01} & \varepsilon_{01} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_1$ 为砌体应力, $\sigma_{01}$ 为砌体峰值压应力, $\varepsilon_{01}$ 为与砌体峰值应力对应的峰值压应变,取值为0.0022, $\varepsilon_u$ 为砌体极限压应变,取值0.0044, $\varepsilon$ 为砌体应变。

### 2.2 混凝土的本构关系

许多学者通过大量的理论和实验研究得出结论:混凝土受压时,受压区的应力-应变关系是曲线形状,形成明显的非线性形状<sup>[12]</sup>。在理论计算中大量采用的本构关系有Sargin总结的单一有理分式模式,Rusch总结的二次抛物线后加水平直线模式,Hognestad总结的二次抛物线后加斜直线模式,过镇海总结的二次抛物线后加有理分式模式等<sup>[12]</sup>。本文计算采用Rusch总结的二次抛物线后加水平直线模式,整个曲线形式圆滑平顺,可较好地反映混凝土受压时应力-应变变化的连续性。其模式可以表述为

$$\begin{cases} \sigma_2 = \sigma_{02} \left[ 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{02}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{02}} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_{02} \\ \sigma_2 = \sigma_{02} & \varepsilon_{02} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\sigma_2$ 为混凝土应力, $\sigma_{02}$ 为混凝土的峰值应力, $\varepsilon_{02}$ 为与混凝土峰值应力 $\sigma_{02}$ 对应的应变,取值0.002, $\varepsilon_{cu}$ 为混凝土极限压应变,取值0.0033。

## 3 混凝土与砌体弹塑性的本构关系

在分析加固结构时,应考虑原拱圈和加固层的共同作用。从已有的理论和实验研究可以看出,通过大量实桥的有限元建模计算分析,得出圬工拱桥的极限承载力破坏以受压

为主,砌体和混凝土这两种材料按照统一复合材料的理论,根据两种材料在破坏前共同协调变形这一前提条件,同时假设开裂后混凝土不参与受力退出工作。而加固结构是偏心受压结构,受拉侧的混凝土受力后必然会开裂,如图2所示,混凝土开裂后认为不再参与全截面受力。在上述假设条件下,可获得混凝土和砌体统一的本构关系:

$$\sigma = \frac{N}{A_s} = \frac{\sigma_1(\varepsilon)A_m + \sigma_2(\varepsilon)A_c}{A_s} \quad (3)$$

式中, $N$ 为构件截面所受轴力; $A_s$ 为截面面积; $A_m$ 、 $A_c$ 分别为砌体和混凝土的面积。

加固结构中砌体的本构关系考虑如下:本文中拱圈采用的是C25和10号砂浆砌筑,所以实测砌体峰值压应力为9.8 MPa; $\varepsilon_{01}$ 取值为0.0022; $\varepsilon_u$ 取值为0.0044,将上述值代入式(1)得出式(4):

$$\begin{cases} \sigma_1 = 9.8 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{0.0022} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{0.0022} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq 0.0022 \\ \sigma_1 = 9.8 & 0.0022 \leq \varepsilon \leq 0.0044 \end{cases} \quad (4)$$

加固结构中混凝土的本构关系考虑如下:本文研究的石拱桥加固拱肋采用的是C40混凝土,实测混凝土峰值压应力为35.5 MPa; $\varepsilon_{02}$ 取值为0.002; $\varepsilon_{cu}$ 取值为0.0033,将上述值代入式(2)得出式(5):

$$\begin{cases} \sigma_2 = 35.5 \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{0.002} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{0.002} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq 0.002 \\ \sigma_2 = 35.5 & 0.002 \leq \varepsilon \leq 0.0033 \end{cases} \quad (5)$$

基于模型实验中原圬工砌体和加固层混凝土的本构关系,推导出砌体和混凝土统一的本构关系,如式(6)~式(9)所示。建模时,将原圬工砌体部分和加固层中的混凝土部分建为一种单元,并输入本文所推导的统一复合材料本构关系进行计算。试件A统一材料的应力-应变关系曲线如图3(a),试件B和试件C统一材料的应力-应变关系曲线如图3(b)。

砌体和混凝土共同工作,共同受压,在线性范围内,有

$$\sigma = \frac{9.8 \times \left[ \frac{2\varepsilon}{0.0022} - \left( \frac{\varepsilon}{0.0022} \right)^2 \right] A_m + 35.5 \left[ \frac{2\varepsilon}{0.002} - \left( \frac{\varepsilon}{0.002} \right)^2 \right] A_c}{A_s} \quad 0 < \varepsilon \leq 0.002 \quad (6)$$

砌体和混凝土共同工作,共同受压,考虑混凝土的材料非线性,有

$$\sigma = \frac{9.8 \left[ \frac{2\varepsilon}{0.0022} - \left( \frac{\varepsilon}{0.0022} \right)^2 \right] \cdot A_m + 35.5 A_c}{A_s} \quad 0.002 < \varepsilon \leq 0.0022 \quad (7)$$

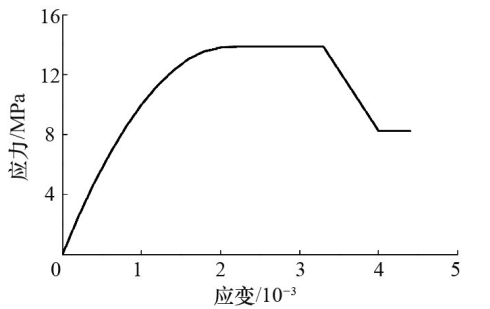
砌体和混凝土共同工作,共同受压,考虑二者的材料非线性,有

$$\sigma = \frac{9.8 A_m + 35.5 A_c}{A_s} \quad 0.0022 < \varepsilon \leq 0.0033 \quad (8)$$

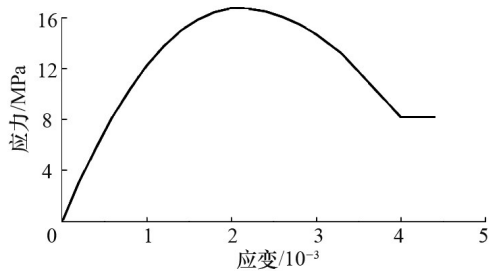
混凝土开裂退出工作,考虑砌体的材料非线性,有

$$\sigma = \frac{9.8A_M}{A_S} \quad 0.0033 < \varepsilon \leq 0.0044 \quad (9)$$

式(6)~式(9)中,试件A:  $A_M=0.0969 \text{ m}^2$ ,  $A_C=0.0184 \text{ m}^2$ ,  $A_S=0.1153 \text{ m}^2$ ; 试件B和试件C:  $A_M=0.0969 \text{ m}^2$ ,  $A_C=0.028 \text{ m}^2$ ,  $A_S=0.1249 \text{ m}^2$ 。



(a) 试件A



(b) 试件B和C

图3 复合材料的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain curve of composite material

## 4 统一复合材料本构关系验证

### 4.1 有限元分析模型

有限元分析软件采用大型结构通用软件 ANSYS, 选用实体单元 solid65 建立砌体和加固层部分, 能模拟砌体和混凝土作为统一材料的开裂行为, 并使用多线性弹塑性材料模型。对于加固层处的钢筋, 计算出纵向钢筋的配筋率和箍筋的配筋率, 采用整体式配筋形式计算, 钢筋材料质量密度为  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.3<sup>[13]</sup>, 混凝土和砌体统一的应力-应变如式(6)~式(9)所示。确定边界条件时, 将加固构件的下垫层底面采用面约束。加载时, 在加固构件上垫层顶面加线荷载。由于统一的复合材料与钢筋采用不同材料, 具有不同的几何物理关系, 所以计算中通过调整子步数, 打开线性搜索, 自动时间步长, 同时将网格划分均匀满足计算精度, 收敛标准采用位移控制收敛。图4给出利用统一的复合材料本构关系建立有限元计算时的一个整体计算模型。

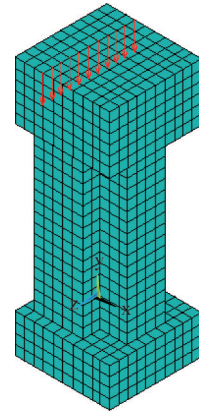


图4 加固后 ANSYS 模型

Fig. 4 ANSYS modeling of the reinforcement

### 4.2 计算结果分析

利用图4所示模型进行有限元数值分析, 计算了砌体和混凝土作为统一材料本构关系的极限承载力, 同时和实测数值相比较。试件A, 实测数值为 582 kN, 有限元数值为 533 kN, 有限元数值比实测数值小 9.2%; 试件B, 实测数值为 903 kN, 有限元数值为 845 kN, 有限元数值比实测数值小 6.8%; 试件C, 实测数值为 1398 kN, 有限元数值为 1297 kN, 有限元数值比实测数值小 7.8%。实测数值是根据实际实验得来, 实验中影响承载力的因素较多, 如砌体垫块两端混凝土的开裂、实验材料实际的抗压、抗拉强度的增大等, 都会影响承载力, 而有限元计算时考虑的是结构的理想状态, 故和实际计算值有所偏差。

## 5 结论

针对复合主拱圈加固石拱桥拱段实验研究, 假定原砌体和加固层共同工作, 推导和验证了砌体和混凝土作为统一材料的理想弹塑性复合材料本构关系, 使有限元模型简化, 精简了计算量, 并得出如下结论:

1) 通过室内模型实验, 得到不同受压区高度下钢筋混凝土复合主拱圈加固圬工拱桥拱段偏心受压构件的受力性能及破坏形式。

2) 用 Rusch 总结的二次抛物线后加水平直线模式作为混凝土的本构关系, 砌体采用 Powell 和 Hodgkinson 提出的多项式型(抛物线型)理想弹塑性本构关系, 推导出适合复合主拱圈加固圬工拱桥的理想弹塑性复合材料的本构关系, 建立有限元模型, 得出有限元计算值, 并通过与实测数值比较, 验证了此方法的可靠性。

3) 推导的混凝土和砌体复合材料本构关系模式, 应用于复合主拱圈加固好的圬工拱桥拱段进行结构分析, 采用推导的复合材料本构关系的计算结果和实测数值比较, 二者数值相近, 复合材料非线性的有限元数值比实测数值小 6.8%~9.2%, 说明构建混凝土和砌体复合材料的理想弹塑性本构关

系,在简化建模和计算量的同时,能准确地进行复合主拱圈加固石拱桥承载力特别是极限承载力的分析。

#### 参考文献(References)

- [1] 刘向华,周安,杨庆印.南陵石拱桥的试验分析与加固研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(8):1208-1211.  
Liu Xianghua, Zhou An, Yang Qingyin. Test analysis and reinforcement study for Nanling stone arch bridge[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(8): 1208-1211.
- [2] 黄炎生,宋欢艺,蔡健.钢筋混凝土偏心受压构件增大截面加固后可靠度分析[J].工程力学,2010,27(8):146-151.  
Huang Yansheng, Song Huanyi, Cai Jian. Reliability analysis of reinforced concrete members strengthening by augmented section under eccentric compression[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 146-151.
- [3] Garmendi L, Sanjose J T, Garcia D. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(12): 4374-4385.
- [4] Dubey R S. Rebuilding of stone arch bridge by constructing a reinforced cement concrete curved box for south western railway[J]. Indian Concrete Journal, 2011, 85(6): 56-60.
- [5] 汪劲丰,吴光宇,项贻强,等.预应力混凝土桥梁结构非线性仿真研究[J].计算力学学报,2010,27(5):895-901.  
Wang Jinfeng, Wu Guangyu, Xiang Yiqiang, et al. Study on the nonlinear simulation of prestressed concrete bridge[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(5): 895-901.
- [6] 黄海东,向中富,刘剑锋,等.基于组合截面内力分配的拱桥加固内力计算方法[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(2):200-247.  
Huang Haidong, Xiang Zhongfu, Liu Jianfeng, et al. Study on internal force distribution method of co-section for arch bridges strengthening[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 27(2): 200-247.
- [7] 张晶,钱永久.套箍法加固石拱桥主拱圈的正截面承载力的理论分析[J].公路交通科技,2008,25(6):76-80.  
Zhang Jing, Qian Yongjiu. Theoretical analysis of normal section bearing capacity of stone main arch ring strengthened by reinforced concrete[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 76-80.
- [8] 乔文靖,宋一凡,陈书生.复合主拱圈加固石拱桥极限承载力参数研究[J].科技导报,2013,31(15):65-68.  
Qiao Wenjing, Song Yifan, Chen Shusheng. Maximum bearing capacity parameter of stone arch bridge reinforced by composite main arch[J]. Sciences & Technology Review, 2013, 31(15): 65-68.
- [9] 乔文靖,宋一凡,陈书生.复合主拱圈加固石拱桥弹塑性本构关系研究[J].广西大学学报:自然科学版,2013,38(1):100-105.  
Qiao Wenjing, Song Yifan, Chen Shusheng. Research on elastic-plastic constitutive relation of stone arch bridge reinforced by composite main arch circle method[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2013, 38(1): 100-105.
- [10] 欧智菁,陈宝春.钢管混凝土柱极限承载力的统一算法[J].土木工程学报,2012,45(7):80-85.  
Ou Zhijing, Chen Baochun. Study on unified calculation method for the ultimate load carrying capacity of concrete filled steel tubular columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 80-85.
- [11] 李研,孟广生,伊新生,等.砌体本构关系的研究进展[J].吉林建筑工程学院学报,2009,26(4):5-8.  
Li Yan, Meng Guangsheng, Yi Xinsheng, et al. Summarized on research achievements of constitutive relationship of masonry[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering, 2009, 26(4): 5-8.
- [12] 贺栓海.桥梁结构理论与计算方法[M].北京:人民交通出版社,2003:219-227.  
He Shuanhai. The theories and calculation method of bridge structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 219-227.
- [13] 夏旻,肖汝诚,吴剑波.钢管混凝土拱桥极限承载力的参数研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2007,35(4):106-109.  
Xia Min, Xiao Rucheng, Wu Jianbo. Rametric study of the ultimate load-carrying capacity of a concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(4): 106-109.

(责任编辑 王媛媛)

#### ·学术动态·



### 中国科协与甘肃省签署合作协议

2013年12月26日,中国科协常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰与甘肃省委副书记、省长刘伟平,分别代表中国科协与甘肃省人民政府签署合作协议。甘肃省人民政府副秘书长俞建宁主持签字仪式。

此次合作协议内容涉及公民科学素质建设、引才引智、对口扶贫、推进企业技术创新、科普基础设施和民族地区科普服务体系等,明确了双方权责,形成了长效合作机制。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15342887.html>。