doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.013

GFRP 管混凝土柱的 GFRP 管拼接方法

张 霓,王连广,韩华锋

(东北大学 资源与土木工程学院, 110819 沈阳)

摘 要: 为解决实际工程中 GFRP 管长度不足的问题,需要将两个或两个以上 GFRP 管拼接起来,并保证拼接处的力学性能,设 计了基于钢筋、钢板锚筋及钢管连接件的拼接 GFRP 管钢筋混凝土试件,并通过试验,研究了拼接 GFRP 管钢筋混凝土轴心受压 性能.试验结果表明:当加载到 35% P_u(极限荷载)左右时,在 GFRP 管的表面出现白纹;当加载到 65% P_u左右时,GFRP 管开始产 生套箍约束作用,继续加载,套箍约束作用继续存在.拼接试件的破坏以 GFRP 管的断裂为标志,破坏发生在距构件端部250 mm 处,而对比试件的破坏发生在沿试件长度方向的中间位置;试验所设计的 3 种连接方式均能够保证拼接 GFRP 管钢筋混凝土轴 心受压试件正常工作.

GFRP tube splicing method of GFRP concrete column

ZHANG Ni, WANG Lianguang, HAN Huafeng

(College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, 110819 Shenyang, China)

Abstract: In order to solve the problem of GFRP tube in practical engineering, two or more than two GFRP tubes were spliced together and the mechanical properties of the joint were guaranteed. The experimental research on the mechanical property of continuous reinforced concrete-filled GFRP tubular specimen and splicing composite columns connected with steel bars, steel plates and steel tubes subjected to axial loading was conducted, and the results showed that the white stripes appeared on the surface of GFRP tube when the load respectively reached about $35\%P_u(P_u$ -limit load), and the confinement effect of GFRP tube began to produce when the load reached $65\%P_u$. With continued loading, the confinement effect still existed, and the failure of splicing specimens with GFRP tube was a symbol, and the splicing specimens occurred near the end of connectors around 250 mm. Relatively, the failure of the continuous specimen occurred in the middle position along the length direction of the specimen. The chosen connecting ways with three methods could ensure the normal work of splicing reinforced concrete-filled GFRP tubular composite columns under axial compression.

Keywords: GFRP tube; concrete; connection; splicing; axial compression

拼接 GFRP 管钢筋混凝土构件是在整体构件内 部布置带有箍筋的纵向钢筋,并在两个 GFRP 管拼 接处设置连接件,再在 GFRP 管内浇注混凝土而形 成的一种拼接 GFRP 管钢筋混凝土构件.GFRP 管可 以有效约束核心混凝土,提高混凝土的强度和延性; GFRP 管还可作为混凝土施工时的模板,加快施工 进度;GFRP 管具有耐腐蚀性能,能抵抗恶劣环境的 影响,可用于高腐蚀的环境中,还可以改善混凝土的 耐久性及防止钢筋锈蚀.近年来,GFRP 管钢筋混凝 土构件常用于建筑结构基础和桥梁工程中^[1-5],由 于 GFRP 管的长度不足,常常需要将两个或两个以 上的 GFRP 管拼接起来,再在其内部浇注混凝土,形 成一个连续 GFRP 管混凝土构件,拼接处成为整体 连续构件的关键部位,拼接处的受力性能要好于连 续整体构件的受力性能.

目前,国内外关于 GFRP 管钢筋混凝土组合构 件的性能研究相对较多,而对拼接 GFRP 管钢筋混 凝土组合构件的力学性能研究相对较少.文献[6]采 用 0.6 m 长的短钢管,钢管外径与 FRP 管内径相同,

收稿日期: 2014-07-10.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(120401010).

作者简介:张 霓(1985—),女,博士研究生;

王连广(1964—),男,教授,博士生导师.

通信作者:张 霓,13066758899@163.com.

· 65 ·

将 3 个 4.6 m 长单元拼接成 13.7 m 长 FRP 管混凝 土桩,试验结果表明这种拼接方式可以保证 FRP 管 混凝土桩正常工作;文献[7]将4m和5.8m长的两 部分拼接成 9.1 m 长的 FRP 管混凝土桩,其中 0.6 m 长的凹凸拼接重叠部分,拼接部分的 FRP 管厚度为 管壁厚度的 1/2,重叠区域在现场安装前用环氧树 脂润湿,采用这种拼接方式要在打桩之前完成,不能 在打桩过程中拼接;文献[8]将4个外径357mm,长 13.7 m的 FRP 管混凝土桩(包括1个拼接桩)打入 地下后拔出,并测试其性能,拼接桩是由 10.7 m 和 3 m长的两部分拼接而成,拼接接头是2个50mm厚 的圆板,将8根直径19mm、长2.7m的钢筋端部拧 入圆板上螺纹孔中,每个板安装在一个 GFRP 管端 部,并填充混凝土.每个板四周有4个T型槽,将2 个板的T型凹槽对准以形成I型槽,将一个I型钥 匙插入连接接头固定.试验结果表明,该机械接头表 现良好,承载力比 FRP 桩高 7%;文献[9]进行了 4 根拼接梁的试验研究,拼接梁采用 2 个 312 mm 外 径,1.1 m长的部分拼接而成,其中3根为内部拼接, 分别用钢筋、FRP 筋及无黏结预应力筋;第4 根为外 部拼接,采用在管道行业中常用的 FRP 插座.研究 结果表明,如果对灌浆质量进行控制,内部连接件可 以提高拼接梁的刚度和强度,外部连接件取决于其 连接刚度.在国内,文献[10]对钢筋拼接 GFRP 管混 凝土组合构件的轴压性能进行试验研究,分别采用 4、6、8根钢筋连接,试验结果表明纵筋对连接处变

形基本没有影响,拼接试验连接处未破坏,采用4根 钢筋连接即可保证拼接 GFRP 管混凝土轴心受压构 件正常工作;文献[11]对基于钢板钢筋连接的拼接 GFRP 管混凝土组合构件的抗弯性能进行了试验研 究,建议连接处最小含钢率取1.96%.拼接 GFRP 管 钢筋混凝土构件的拼接处受力相对连续整体更为复 杂,为此,在实际工程应用中,需要保证拼接处的受 力性能要比连续整体部分好,才能保证拼接 GFRP 管钢筋混凝土构件在使用中达到理想状态.基于此, 本文根据 GFRP 管钢筋混凝土构件的结构及受力特 点,设计了基于钢筋、钢板锚筋及钢管作为拼接处连 接件,以此制作了拼接 GFRP 管钢筋混凝土试件,通 过试验,研究其在轴心受压下的工作机理和破坏模 式,并对其力学性能进行了分析.

1 试 验

本次试验共设计了 5 根 GFRP 管钢筋混凝土试 件,其中,1 根基于钢筋连接的拼接 GFRP 管钢筋混 凝土试件(GRCS-1),1 根基于钢板钢筋连接的拼接 GFRP 管钢筋混凝土试件(GRCSP-2),2 根基于钢 管连接的拼接 GFRP 管钢筋混凝土试件(GRCST-3 和 GRCST-4),1 根连续整体的 GFRP 管钢筋混凝 土对比试件(GRC-5).试验所用的 GFRP 管的内直 径为 200 mm,管壁厚度为 5.5 mm,GFRP 管的实测 性能参数见表 1.

表1 GFRP 管材料性能参数表

CEPD 答由么/ mm	辟巨/	环向		纵向	
GIAT EPITZ/ IIIII	堂序/ 1111	弾性模量/ (N・mm ⁻²)	强度/(N・mm ⁻²)	弾性模量/(N・mm ⁻²) 强度/(N・mm ⁻²	
200	5.5	27 400	470	16 650	288

试件的总高度为 700 mm(2 根 350 mm 长的管 拼接而成).试验所用的混凝土 150 mm 立方体试块 的抗压强度为 40.8 MPa.钢筋连接件的纵筋 4 ϕ 14, 箍筋 ϕ 8@ 50;钢板锚筋连接件是在直径 210 mm 的 钢板两面上焊接长度为 300 mm 的钢筋,钢板上留 有 4 个孔洞(受力钢筋由此孔穿入);钢管连接件的 钢管的外径为 113 mm,管壁厚度为 3.5 mm.所有试 件均设有 4 根通长 ϕ 14 纵筋,箍筋为 ϕ 8@ 150,钢筋 及钢管的实测力学性能见表 2.

表 2 钢筋性能参数表

品种	型号	屈服强度/	极限抗拉强度/	仙长变/01	
		$(N \cdot mm^{-2})$	$(N \cdot mm^{-2})$	仲氏平/%	
HPB235	$\phi 8$	269.1	433.7	21.8	
HRB335	Φ 14	380.9	564.6	18.2	
钢管	外径 113 mm	340.7	519.8		

试验前,按设计要求制作 GFRP 管、连接件及钢

筋笼,并在设计的位置上粘贴应变片.GFRP 管及连接件形式,如图1所示,各试件的主要设计参数,见表3.

试件制作过程:1)基于钢筋连接的试件制作: 首先按设计要求制作受力钢筋,长度为 700 mm,纵 筋为 4Φ14,在受力钢筋中部 300 mm 范围内采用 Φ8 箍筋加密,间距为 50 mm,并在两端部各加 2 道,间 距 50 mm.将制作好的钢筋笼放置在拼接的两个 GFRP 管内,再在 GFRP 管内灌注混凝土.在实际工 程中,按设计要求确定用于拼接的 GFRP 管的长度, 制作受力钢筋,并绑扎钢筋笼,在连接处将用于连接 的钢筋固定在受力钢筋笼上,安装并固定下部 GFRP 管,将带有钢筋连接件的钢筋笼放入下部 GFRP 管中,并固定其位置,然后安装上部 GFRP 管,保证 GFRP 管上下位置对准,封闭连接处避免漏 浆,再在上部 GFFP 管内灌入混凝土.2)基于钢板锚 筋连接的试件制作:制作受力钢筋,长度为 700 mm, 纵筋为4Φ14,先将其中1/2绑扎上箍筋,箍筋为 **φ**8,间距150, 50 mm 两种.制作钢板锚筋连接件,按 设计要求,在直径为 210 mm 的钢板两面(反正面) 上焊接长度为 300 mm 的钢筋,钢板上留有 4 个孔 洞(受力钢筋从此孔穿入).将带有 1/2 箍筋的钢筋 笼(绑扎好箍筋的放在下面)放入其中一个 GFRP 管内,在 GFRP 管内灌满混凝土,将钢板锚筋连接件 放在灌满混凝土的 GFRP 管上(纵向受力钢筋穿过 钢板孔),绑扎另1/2受力钢筋的箍筋,再将另一个 GFRP 管放在钢板上,并灌满混凝土.在实际工程中, 按设计要求确定用于拼接的 GFRP 管的长度,制作 受力钢筋(按下部 GFRP 长度,在受力钢筋下部绑扎 箍筋),制作钢板锚筋连接件,在钢板上预留穿入受 力钢筋的孔洞(受力钢筋从此孔穿入钢板),安装并 固定下部 GFRP 管,并将绑扎的钢筋笼放入下部 GFRP 管中,安装上部 GFRP 管,从上部 GFRP 管往 下灌注混凝土,当灌至连接处时,将上部 GFRP 管取 下,将钢板锚筋连接件放在灌入混凝土的下部 GFRP 管上(纵向受力钢筋穿过钢板孔),绑扎上部 受力钢筋,安装上部 GFRP 管,封闭连接处避免漏 浆,在上部 GFRP 管内灌入混凝土.3) 基于钢管连接 的试件制作:首先制作钢筋笼(纵筋为 4Φ14,箍筋 **φ8@150**,并在两端部各加2道,间距50 mm)和钢 管连接件(长度为 100, 200 mm 两种),将两个 GFRP 管拼接在一起,将制作好的钢筋笼放入 GFRP 管中,在 GFRP 管内灌入混凝土,在接近灌满下面的 GFRP 管时,将准备好的钢管连接件放入 GFRP 管 内部,保证钢管 1/2 在下部 GFRP 管混凝土内,继续 灌入混凝土至上部 GFRP 管灌满.在实际工程中,按 设计要求确定用于拼接的 GFRP 管的长度,制作受 力钢筋,并绑扎钢筋笼,在连接处将用于连接的钢管 焊接在受力钢筋笼上,安装下部 GFRP 管,将带有钢 管连接件的钢筋笼放入下部 GFRP 管中,并固定其 位置,然后安装上部 GFRP 管,保证 GFRP 管上下位 置对准,封闭连接处避免漏浆,再在上部 GFFP 管内 灌入混凝土.



(a) GFRP管材 (b) 内部受力钢筋

(c) 钢筋连接件(d) 钢板锚筋连接件图 1 GFRP 管及连接件形式



(e) 钢管连接件

表 3 主要设计参数

试件编号	连接方式	纵向钢筋/根	纵向钢筋长度/mm	连接筋数量/根	连接筋长度/mm	连接钢管长度/mm
GRCS-1	钢筋连接	4	700	4	300	_
GRCSP-2	钢板锚筋连接	4	700	4(焊接筋)	150×2	—
GRCST-3	钢管连接	4	700	—	—	200
GRCST-4	钢管连接	4	700	—	—	100
GRC-5	全长无连接	4	700	_	_	_

钢筋及钢板锚筋连接件按 GFRP 管混凝土偏心 受压构件,配置纵向受力钢筋用量,按钢筋与混凝土 锚固长度确定钢筋长度,按构造和箍筋约束混凝土 的作用机理确定箍筋间距.钢管连接件按钢管混凝 土偏心受压来确定,按套箍作用确定钢管的直径,按 端部效应确定钢管的长度. 试验前,在 GFRP 管的中部及上下 1/4 截面位 置处分别粘贴应变片,以测量 GFRP 管的环向和纵 向应变.为了防止试件端部破坏,在端部设置了钢管 夹具,以防端部应力集中使端部发生局部破坏,如 图 2所示.试验所采用的受压方式为核心混凝土和 GFRP 管共同承压,试验在 5 000 kN 试验机上进行, 加载采用单调分级加载方式.



2 结果和分析

2.1 破坏模式

在荷载作用初期,GFRP 管与内部钢筋、钢管及 混凝土变形都很小,试件处于弹性受力工作阶段.当 加载到 35% P_u(极限荷载)左右时,GFRP 管的表面 开始出现白色条纹;继续加载到 45% P_u时,条纹变 得比较明显;荷载继续增加,GFRP 管表面的纤维颜 色逐渐变得不规则,并随荷载的增加,白色条纹的范 围也在不断地向外扩展:当加载到 80%P。左右时, 可以偶尔听到 GFRP 管纤维断裂和树脂开裂的声 音.在荷载达到极限荷载 P_u(GRCS-1:2 700 kN; GRCSP - 2: 2 900 kN; GRCST - 3: 2 870 kN; GRCST-4:2 810 kN;GRC-5:2 800 kN)时,伴随着 较大的响声,在距离端部 250 mm 处(GRCS-1:距离 下端 250 mm; GRCPS - 2; 距离下端 200 mm; GRCST-3:距离上端 250 mm; GRCST-4: 距离上端 250 mm; GRC-5: 沿试件长度方向的中部), GFRP 管的纤维开始发生断裂,并沿着纤维方向从断裂的 位置向两侧迅速剥离、扩展.试件 GRCS-1、 GRCSP-2和 GRCST-3 的中部拼接处没有发生破 坏,试件GRCST-4的拼接处几乎同时发生破坏,而 对比试件的破坏发生在沿试件长度方向的中间位 置.说明,利用钢筋、钢板锚筋及钢管连接均能够保 证拼接 GFRP 管钢筋混凝土轴心受压试件正常工 作,而200 mm长钢管的连接性能比 100 mm 长钢管 的连接性能好,原因是 200 m 长的管对混凝土的约 束范围大,使内部混凝土受力更加均匀,试件破坏模 式.如图3所示.





(b) GRCSP-2 (c) GRCST-3

图 3 试件的破坏模式

(d) GRCST-4



2.2 荷载与变形

由试验得到试件的荷载与变形关系曲线,如图 4 所示.由图 4 可以看出,在荷载达到极限荷载以前,各 试件的荷载与变形关系曲线基本相似,均呈非线性关 系;当加载到 65% P_u左右时,荷载与变形关系曲线出 现明显的转折点,变形增长速度明显大于荷载增长速 度,此时试件变形分别为 6.1、6.6、5.0、4.6、3.4 mm.继 续加载到极限荷载时,试件最大变形依次为 15.0、 20.8、17.8、15.4、12.9 mm.各试件的荷载与变形关系曲 线类似,承载力相近.说明钢筋、钢板锚筋及钢管连接 方式对拼接试件承载力基本没有影响,3 种连接方式 均能保证拼接试件正常工作.



2.3 荷载与应变

由试验得到试件的 GFRP 管、钢管内部钢筋及 箍筋的荷载与应变关系曲线,如图 5 所示.



图 5 试件的荷载与应变关系曲线

由图5(a)可知,在加载初期,各个试件中GFRP 管的荷载与应变关系曲线表现出明显的线性,说明 试件处于弹性工作阶段,此阶段混凝土产生的横向 变形较小,GFRP 管的弹性模量较低,对核心混凝土 几乎没有约束作用;当加载到 65%P。左右时, GFRP 管应变的增长速度大于荷载的增长速度,此阶段混 凝土横向变形增加导致混凝土与 GFRP 管之间产生 径向压力,GFRP 管对核心混凝土产生约束作用;继 续加载,GFRP 管的荷载与应变曲线大致呈线性变 化,说明 GFRP 管对内部混凝土继续产生约束作用, 拼接处的连接件种类对 GFRP 管钢筋混凝土拼接试 件环向、纵向的影响很小.由图 5(b)可知,在加载初 期,钢管的荷载与环向应变关系曲线表现出明显的 线性,当加载到55%左右时,钢管的环向变形开始 呈非线性增长.当达到极限状态时,试件 GRCST-3 中钢管的环向未屈服,而 GRCST-4 的环向已经屈 服;在加载初期,钢管的荷载与纵向应变关系曲线呈 线性,当加载到 65%P。左右时,钢管的纵向应变曲 线开始出现明显的转折点,应变随荷载的增加而迅 速增加,在达到极限荷载时,钢管的纵向均已屈服. 由图 5(c)、(d)可知,在加载初期,纵向受力钢筋中 部的荷载与应变关系曲线呈线性关系,继续加载,应 变增长速度明显大于荷载增长速度,说明此时试件 已经进入弹塑性阶段,当达到极限荷载时,试件

GRCS-1、GRCSP-2 中纵筋已经屈服.试件GRCS-1、GRCSP-2、GRCST-3 和试件 GRCST-4 中箍筋的荷载与应变关系曲线与对比件 GRC-5 中箍筋的荷载与应变关系曲线基本相似.在达到极限状态时,各试件的箍筋均已屈服.

由此可以看出,钢筋、钢板锚筋及钢管3种连接 方式均能保证拼接 GFRP 管钢筋混凝土轴压试件正 常工作,钢筋连接与钢板锚筋连接受力机理类似,但 钢板锚筋连接件的制作比较复杂,钢管连接对拼接 处混凝土的约束作用优于钢筋及钢板锚筋连接,所 以在实际工程中推荐采用钢管连接的方式.

3 承载力计算

在轴向荷载作用下,拼接 GFRP 管钢筋混凝土 构件的破坏位置可能发生在拼接处或是非连接处, 因此对于不同破坏位置给出相应的计算公式.

1)GFRP 管钢筋混凝土构件(对比件).

拼接 GFRP 管混凝土构件在轴压下的承载力计 算为

 $N = f_{e,f}A_e + f_{e,s}A_{es} + \sigma_{12}A_f + f_sA_s.$ (1) 式中: $f_{e,f}$ 为受 GFRP 管约束混凝土的轴心抗压强 度; A_e 为受 GFRP 管约束混凝土截面面积; $f_{e,s}$ 为受 箍筋约束混凝土的轴心抗压强度; A_{es} 为受箍筋约束 混凝土截面面积; σ_{12} 为 GFRP 管轴向强度; A_f 为 GFRP 管的截面面积; f_s 为纵向钢筋的屈服强度; A_s 为纵筋总截面面积.

2) 基于钢筋连接的拼接 GFRP 管钢筋混凝土 构件.

此种情况连接处和非连接处公式相同(同 GFRP管钢筋混凝土对比件,即式(1)),但纵筋数量 不同.

3) 基于钢板锚筋连接的拼接 GFRP 管钢筋混凝 土构件.

此种情况连接处和非连接处公式相同(同 GFRP管钢筋混凝土对比件,即式(1)),但纵筋数量 不同.

4) 基于钢管连接的拼接 GFRP 管钢筋混凝土 构件.

①连接处.此种情况考虑钢管、GFRP 管、纵筋和 箍筋的共同作用,承载力计算为

 $N = f_{c,f}A_{c} + f_{c,s}A_{cs} + f_{c,t}A_{ct} + \sigma_{12}A_{f} + f_{s}A_{s}.$ (2) 式中: $f_{c,t}$ 为钢管约束混凝土的轴心抗压强度; A_{ct} 为 受钢管约束的混凝土截面面积.

②非连接处(同 GFRP 管钢筋混凝土对比件,即式(1)).

为了验证建立的拼接 GFRP 管钢筋混凝土组合 构件轴压承载力公式的正确性,将计算结果与试验 结果进行比较,见表 4.计算结果与试验结果比值的 平均值为 0.974,比值的标准差为 0.036,说明计算结 果与试验结果吻合良好.

试件名称	$N^{ m exp}/ m kN$	$N^{ m cal}/ m kN$	$N^{ m cal}/N^{ m exp}$
GRCS-1	2 700	2 740	1.015
GRCSP-2	2 900	2 740	0.945
GRCST-3	2 870	2 740	0.955
GRCST-4	2 810	2 740	0.975
GRC-5	2 800	2 740	0.979

表 4 试验结果与计算结果

注:N^{exp}为试验结果,N^{cal}为计算结果.所有试件破坏发生在非连接处,故计算公式采用 GFRP 管钢筋混凝土的计算公式.

4 结 论

1) 当加载到 35% P_u 左右时,在 GFRP 管的表面出现白纹;当加载到 65% P_u 左右时,GFRP 管开始产生套箍约束作用,继续加载,套箍约束作用继续存在.

2) 拼接试件的破坏以 GFRP 管的断裂为标志, 破坏发生在距构件端部 250 mm 处,而对比试件的 破坏发生在沿试件长度方向的中间位置. 3) 试验设计的钢筋、钢板锚筋和钢管连接方式 均能够保证拼接 GFRP 管钢筋混凝土轴压试件正常 工作,3 种连接方式对 GFRP 管钢筋混凝土拼接试 件承载力影响不明显,而 200 mm 长的钢管的连接 性能比 100 mm 长钢管的连接性能好,在实际工程 中推荐采用钢管连接的方式.

参考文献

- [1] BUSEL J. FRP Composites in construction applications, a profile in progress [M]. New York, NY: SPI Composites Institute, 1995.
- [2] ISKANDER M G, HASSAN M. State of the practice review in FRP composite piling [J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3):116-120.
- [3] PANDO M A, EALY C D, FILZ G M, et al. A laboratory and field study of composite piles for bridge substructures [R].
 FHWA-HRT-04-043, Virginia Transportation Research Council, March, 2006.
- [4] ALAMPALLI S, KUNIN J. Rehabilitation and field testing of an frp bridge deck on a truss bridge [J]. Composite Structures, 2002, 57(4): 373-375.
- [5] Fam A, PANDO M. Precast piles route 40 bridge in virginia using concrete filled FRP tubes [J]. PCI Journal, 2003, 31(2):14-41.
- [6] PARVATHANENI H K, IYER S L, GREENWOOD M. Design and construction of test mooring pile using superprestressing[C]//Proceedings of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Montreal: [s.n.], 1996: 313-324.
- [7] MIRMIRAN A, SHAO Y, SHAHAWY M. Analysis and field tests on the performance of composite tubes under pile driving impact [J]. Composite Structures, 2002, 55(2): 127-135.
- [8] HELMI K, FAM A, MUFTI A. Field installation, splicing, and flexural testing of hybrid frp/concrete piles [J]. ACI Special Publication, 2005, sp-230-62:1103-1120.
- [9] ZHU Zhenyu, AHMAD I, MIRMIRAN A. Splicing of precast concrete-filled FRP tubes[J]. Journal of Composites for Construction, 2006,10(4):345-356.
- [10]陈百玲,王连广.钢筋拼接 GFRP 管混凝土组合构件的 轴压性能试验研究[J].工程力学,2012,29(12): 355-359.
- [11]陈百玲,王连广.基于钢板钢筋连接的拼接 GFRP 管混 凝土组合构件抗弯性能试验研究[J].工程力学,2013, 30(10):178-183.

(编辑 张 红)