

拱桥钢箱—混凝土组合受弯构件试验研究

范亮^{1,2}, 周志祥²

(1. 西南交通大学 土木学院, 成都 610031; 2. 重庆交通大学 土木学院, 重庆 400074)

摘要:提出了一种新型钢-砼组合结构——钢箱-砼组合受弯构件,该构件由钢箱梁,钢筋混凝土梁及PBH剪力连接件组合。通过对该构件的纯弯试验,研究了该构件的变形及受力性能。试验结果表明,钢箱和混凝土可以充分发挥自身的材料强度,同时避免混凝土开裂和钢材过早局部失稳等问题,是一种较理想的钢-砼组合结构受弯构件形式;构件中的PBH剪力键可以很好的协调钢箱和混凝土间的变形。同时对该构件进行结构分析,分析结果与试验结果吻合良好,用同等方法进行了多种影响参数分析,得到各主要构件参数对构件受力过程的影响。该组合构件在主拱中应用时具有良好的工作性能和安全快捷的施工性能。

关键词:弯曲;组合结构;受弯构件;钢箱

中图分类号:TU311.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0015-07

Experimental Analysis for Steel Box-Concrete Composite Beam of Arch Bridge

FAN Liang^{1,2}, ZHOU Zhi-xiang²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: A new steel-concrete composite structure was proposed which composed of steel box beam, PC beam and PBH Shear connection. Bend test was carried out for the performance study of deformation and stress. It was found that Material advantages of steel and concrete were fully used and crack of concrete and local instability of steel box were avoided. And the deformation between steel box and concrete can be smoothed with PBH shear connection. As the calculated values showed good agreements with the test results, the proposed formulas can be reliably applied to the practice analysis. With the different parameters analysis, mechanic performance of the composite was obtained.

Key words: bending; composite; beam; steel box

钢-砼组合构件是将不同形式的钢材与混凝土通过剪力键组合起来共同工作的构件,具有灵活的组合形式,如已经在各领域中大量使用的钢管砼^[1-5]及叠合梁^[6-9]等。然而,这种类型的构件除钢管砼外,均少用于拱桥中。而钢管砼由于截面组合不灵活,填充砼在弯矩作用下易开裂、焊缝工艺复杂等原因,已建钢管砼拱桥病害问题较多。

该文在钢管砼及叠合梁的研究基础上,提出一

种针对拱式桥梁的新型的钢-砼组合结构形式——钢箱-砼组合构件,该构件中上部为砼梁,下部为钢箱,在弯矩作用下,截面下部受拉而截面上部受压,这样的设置既可以减小砼用量,减轻自重,有利于结构受力,又可以充分发挥钢材和砼的力学性能。

钢箱-砼组合构件主要针对拱桥受弯为主的区段设计,拱桥是受压弯为主的结构。一般情况下,在拱脚区段,轴力较大,负弯矩大,故拱脚区段可以采

收稿日期:2009-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578168);交通部西部交通建设项目(200631881448)

作者简介:范亮(1979-),女,博士生,主要从事桥梁结构研究,(E-mail)fanliang2001@gmail.com。

周志祥(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)zhixiangzhou@cquc.edu.cn。

用方钢管砼等较大轴向承载力和刚度；而跨中区段，轴力较小，以受正弯矩为主，此时上缘受压而下缘受拉，钢-砼组合构件针对此区段设计，能充分利用砼和钢材的材料优势。这种构件已经成功用于主拱设计中^[10]。

钢箱-砼组合构件针对主拱圈的拱肋提出，除了适应拱圈的受力需求外，特别考虑到拱桥的施工特点，实现拱圈施工过程的快捷、安全。钢箱部分在工厂按拱圈线形加工，在桥位外焊接成拱。已有成功工程实例表明^[10]，由于封闭钢箱的抗扭刚度较大，在不大的跨度范围内，通过简单的横系梁连接，有足够的面外稳定性和可控性，可以实现两肋同时合拢，施工时间大为减少。浇筑上方砼时，模板可直接支撑于钢箱上，不再需要搭设支架；待砼硬化后形成钢箱-砼组合主拱圈，其它上部结构与类似混凝土拱桥施工方法一致。这种施工方法相较于其它形式有明显优势。与钢筋砼拱桥相比，施工周期短，合拢时间快，风险小，与钢管砼拱桥相比，砼浇筑质量易保证。

该文介绍了钢箱-砼组合构件的构造特点，通过纯弯试验研究了其受力性能，建立了该构件的纤维化模型，对该构件的受力影响因素进行了性能影响分析。

1 钢箱-砼组合受弯构件的构造

钢箱-砼组合受弯构件由上方的钢筋混凝土梁与下方的钢箱组成。通过在钢箱和混凝土间设置剪力连接件，抵抗两者之间的相对滑移，于是，钢筋混凝土梁与钢箱梁组成一个具有公共中性轴的组合截面。钢箱-砼组合受弯构件的截面形式如图 1。

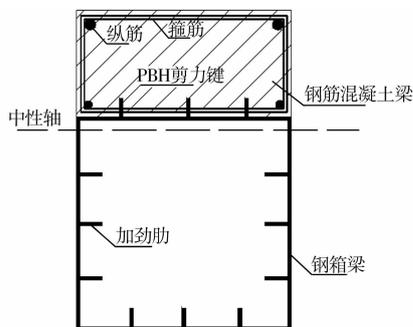


图 1 钢箱-砼受弯构件截面构造

1.1 钢箱

钢箱采用封闭式钢箱，其抗扭刚度较大，可以在复杂情况下作为支撑和跨越结构单独受力。此时，为保证钢箱各板的局部稳定性，在各板按构造要求设置加劲肋和拉筋。钢箱可以在钢结构加工厂制作后在现场进行组装。根据受力的需要，钢箱的底板

可以设计的较顶板厚，腹板亦可根据受力考虑不等距布置加劲肋的位置。

1.2 钢筋混凝土梁

钢筋混凝土梁内布置纵筋和箍筋，其中上方受压纵筋为其主筋。下方纵筋帮助受压和在特殊情况下受拉。箍筋在这里不仅仅是抗剪和形成骨架的作用，也是剪力键的一部分，将混凝土梁与钢箱连接成一体。同时，箍筋内的混凝土主要是受压，因此，适当的加密箍筋间距可以通过套箍作用提高混凝土的抗压性能。

钢箱和砼梁的高度比例应按照受力原理分配。根据受力原理，混凝土抗压而钢箱抗拉，因此，混凝土梁的高度设计应按中性轴高度进行设计。避免混凝土进入受拉区导致混凝土开裂，从而影响钢箱和混凝土间的连接和构件的耐久性。

1.3 穿孔加劲肋套箍剪力键

针对钢箱-砼受弯构件，提出一种穿孔加劲肋套箍剪力键(PBH)。PBH由加劲肋和箍筋形成，从构造上而言，在没有单独增加新构件的情况下，实现了砼与钢箱的协同受力，对于简化构造、方便施工等有明显优势。

PBH不需要另加剪力连接构造，只需将钢箱顶板的加劲肋设置于钢箱与混凝土的接触面，在其上按一定间距挖孔并将混凝土梁内箍筋穿过圆孔即可。通过浇筑混凝土，混凝土和钢箱通过加劲肋圆孔内的混凝土小圆柱抗剪。同时，混凝土小圆柱内还有箍筋穿过，将箍筋同时用作孔内的销栓钢筋。与PBL不同，穿过加劲肋的钢筋不是单根直钢筋而是与纵筋及其它箍筋形成骨架的箍筋，由于箍筋受到钢筋骨架的约束，可以有效的提高孔内混凝土小圆柱的抗剪强度和刚度。这种连接件可以有效的连接钢箱和砼，使两者变形协调。试验结果表明，在达到承载力破坏前，两者之间几乎没有滑移。因此，PBH是钢箱-砼组合构件连接件的合适选择。

钢箱-砼组合受弯构件是根据构件的受力形式合理的组合钢箱和砼，充分利用混凝土的受压性能，避免砼的受拉，将砼完全用于抗压。同时，将钢结构以钢箱的形式设置于梁的受拉区，有利于避免钢箱腹板的局部压屈。

钢箱-砼组合受弯构件用腹板实现较高的梁高，提高钢和混凝土的工作效率，减少截面用钢量和自重。在施工时，钢箱可以预制后直接安装，吊装重量轻，之后在钢箱上直接浇筑混凝土，省去支撑装置和底模，减少砼浇筑时的施工临时措施。因此，钢箱-砼组合受弯构件是一种避免混凝土开裂，施工方便且承载力高的新型高效的钢-砼组合构件。

2 试验梁的设计、制作与加载

2.1 试件设计

试验的目的是研究钢箱-砼组合受弯构件的受力性能,截面形式均如图 2、图 3。钢箱钢板厚 2.5 mm,混凝土内配置 4 根 I 级钢筋,其中上面 2 根直径 8 mm,下面 2 根直径 4 mm。混凝土与钢箱之间采用 PBH 刚性连接件。为了避免出现钢板的过早局部屈曲,钢箱上按相关规范构造要求设置了多道横隔板及加劲肋。试验共 2 个试件,试件相关参数见表 1。

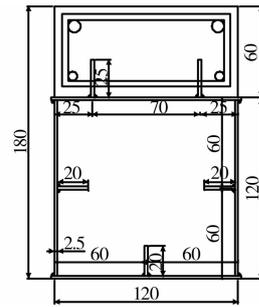


图 2 试件截面构造及尺寸

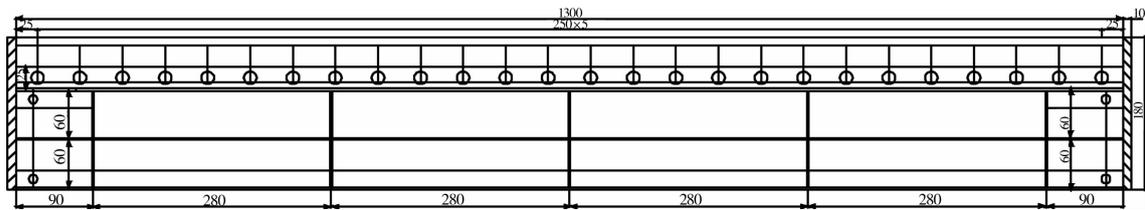


图 3 试件尺寸

表 1 试验试件表

构件编号	构件长度/mm	构件宽度/mm	构件高度/mm	钢板厚度/mm	砼厚度/mm	砼强度/MPa	钢板强度/MPa	Mu/(kN·m)
M-1	1 300	120	180	2.5	60	49.3	330	33.3
M-2	1 300	120	180	2.5	60	49.3	330	34

2.2 材料特性

2.2.1 混凝土 由于 PBH 中的孔洞直径较小,试验梁采用微粒混凝土,粗骨料最大粒径 10 mm。根据文献[11],混凝土 28 d 的立方体抗压强度为 47.4 MPa。

2.2.2 钢材 钢板为 Q235 普通热轧钢板,钢板的抗拉强度实测值为 290 MPa。

2.3 加载方案

为了得到纯弯区段,加载时通过在千斤顶下设置分配梁采用四点加载法加载(图 5)。实验全过程中要测读荷载施加力值、挠度及应变数据。其中千

斤顶的大小用测力传感器测读;挠度用百分表测量,分别在梁的两端支座及跨中设置;混凝土应变由标距 50 mm 的应变片测读,钢板应变由标距 2 mm 的应变片测读。



图 4 试验试件

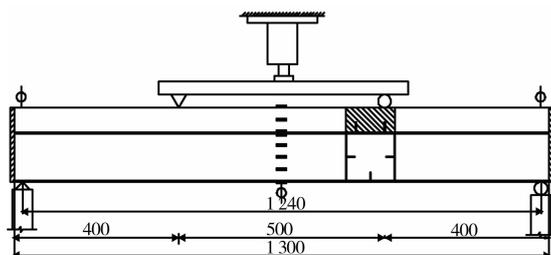
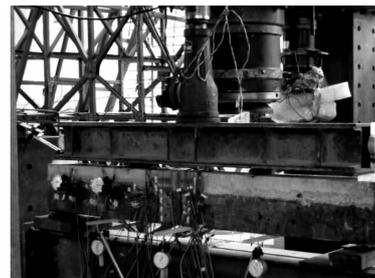


图 5 试验梁加载方式



3 结构分析

采用 XTRACT 进行结构分析,分析采用混凝土和钢材的本构关系,见图 6—8。考虑混凝土梁内箍筋

的套筋效应,对箍筋内约束混凝土采用相应的约束混凝土本构关系(图 7)^[12-14],结构分析中的单元划分见图 9。假定钢箱与混凝土间没有滑移^[15]。根据构件混凝土的约束情况,考虑箍筋、钢箱对混凝土的

约束效应,根据下式计算得到约束混凝土的应力峰值及本构曲线关键点。XTRACT 采用 Mander 等提出的箍筋约束混凝土本构关系^[16],Mander 对箍筋约束混凝土进行了深入理论研究,把箍筋对核心混凝土的侧向作用力等效为等效侧向压应力,用 William-Warnket 五参数强度准则计算约束混凝土轴向极限强度,并采用 Popovis 应力-应变表达式,建立约束混凝土的本构关系。该本构模型表达式简洁,力学概念清晰,能较好反映随约束效应提高约束混凝土的极限强度及峰值应变相应增大、下降段趋于平缓等现象。其约束混凝土本构关系的表达式为:

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon_{cc}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[1 + \eta \left(\frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \right]$$

式中: f_c 、 ε 为核心混凝土轴向应力和应变; f_{c0} 、 ε_{c0} 为非约束混凝土轴心抗压强度和峰值应变; f_{cc} 、 ε_{cc} 为约束混凝土轴心抗压强度以及峰值应变; η 为峰值应变修正参数。

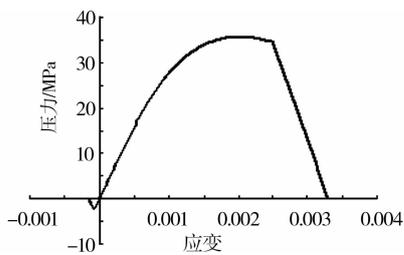


图 6 非约束砼 $\sigma-\varepsilon$

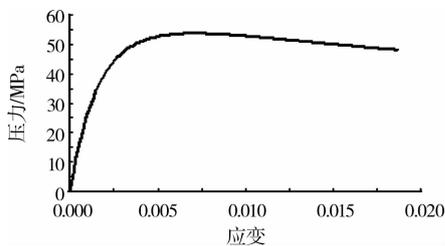


图 7 约束约束砼 $\sigma-\varepsilon$

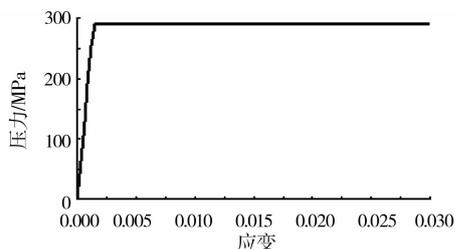


图 8 钢材 $\sigma-\varepsilon$

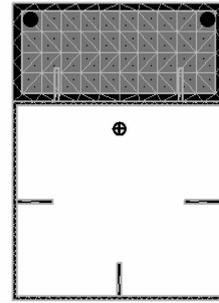


图 9 单元划分及材料选择

4 试验结果分析

4.1 弯矩-挠度曲线

跨中变形结果显示,2 曲线基本吻合,其中,计算数据与测试结果对应的,也存在多个特征点,在特征点处,曲线发生转折。第 1 个转折点是混凝土塑性点,约为 $0.6 Mu$,从 0 点至此点 $M-\varphi$ 接近为直线,构件为弹性工作阶段。第 2 个转折点为钢箱底板屈服点,约为 $0.85 Mu$,构件的刚度出现一个明显的下降,混凝土塑性点至钢箱屈服点为弹塑性阶段;此后构件的刚度进一步下降,构件强度在略有上升后缓慢下降,此阶段为破坏阶段。以下分别对这 3 个阶段的工作特点进行描述。

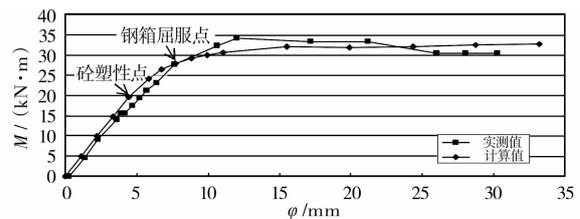


图 10 $M-\varphi$ 曲线试验与理论对比值

第 1 阶段——弹性工作阶段,混凝土和钢箱处于弹性工作阶段,这时,构件的刚度较大, $M-\varphi$ 基本保持线性,称之为弹性工作阶段;

第 2 阶段——塑性阶段,混凝土进入明显的塑性工作阶段, $M-\varphi$ 曲线斜率降低,构件的刚度明显下降,此阶段称为为构件弹塑性阶段。

第 3 个阶段——破坏阶段,此阶段钢箱下缘开始屈服并向上发展, $M-\varphi$ 曲线近似水平线,虽然 M 仍向上有少许增加,但刚度较小,变形过大,因此称之为破坏阶段。

随着荷载的增加,应变值也不断增加,但应变图基本上仍是上下 2 个对顶的三角形,平截面假定吻合良好,试验过程中亦未见钢箱与混凝土间出现滑移。

4.2 混凝土和钢箱应变分布规律

图 11、12 中为钢箱与混凝土应变的最大实测值

与计算值的比较。可以看到,计算与实测曲线在形状上的非常类似的,相差不大,计算钢箱应变略大于测试值,这有部分原因是因为应变的测试实际为应变片长度内的平均值而不是绝对意义上的最大值。砼的最大压应变的测试与计算结果吻合的非常好。

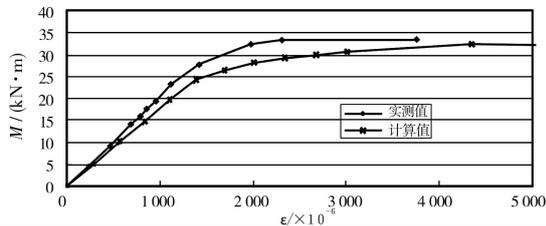


图 11 钢箱最大拉应变试验与理论对比值

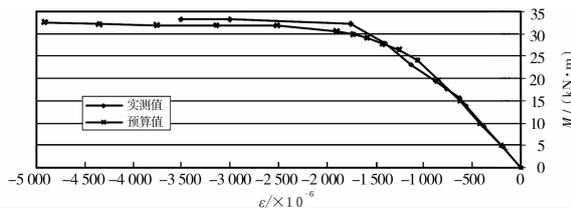


图 12 砼最大压应变试验与理论对比值

4.3 破坏模式

试验梁在破坏时,受拉区钢箱底板外缘首先屈服,其应力保持不变而应变增大,从而随着荷载的增加,屈服高度向上延伸,直至部分腹板屈服。同时,受压区混凝土的应变逐渐增加,达到极限压应变时,箍筋保护层厚度位置先出现多条水平裂缝,构件达到最大承载力。继续加载,水平裂缝逐渐向混凝土的中部发展,并最终砼被压碎(图 13)。

由于直至破坏时混凝土中只的很小的一部分位于受拉区,混凝土始终没有出现受拉裂缝;钢箱处于全受拉状态,破坏时钢箱顶板和部分腹板亦始终没有全部屈服,所以梁的刚度在加载过程中没有明显突减。



图 13 试验梁破坏(砼压碎)

5 构件参数影响分析

基于计算方法的可靠性,采用上述结构分析方法,对钢板厚度、纵筋配筋率、混凝土强度、钢材强度、钢箱高度等参数对构件受力的影响进行分析。

5.1 钢板厚度

图 14(a)分别为钢板厚度为 2.5、3 及 3.5 mm 厚,其它参数不变下 $M-\varphi$ 曲线比较,弹性工作阶段三者几乎重合,可以看出,钢板厚度的变化对弹性工作阶段没有明显影响,砼塑性点随钢板厚度增加而略有提高,钢箱的屈服点随钢板厚度成比例增加,破坏阶段,3 条曲线基本平行,其中 M_u 分别为 34.14, 38.79 及 43.49 kN·m,可以看出, M_u 与钢板厚度 t 成线性关系。

5.2 纵筋配筋率

将纵筋直径取用 6、8、10 及 12 mm,并考虑没有纵筋的情况,即直径为 0 进行分析。图 14(b)可以看出,纵筋对整个曲线影响较小,各曲线的形状基本一样,纵筋配筋率的增加可以提高 M_u , M_u 分别为 32.89、33.62、34.14、34.75、35.59 kN·m,可以看出,纵筋配筋率对 M_u 的影响亦较小。

5.3 砼强度

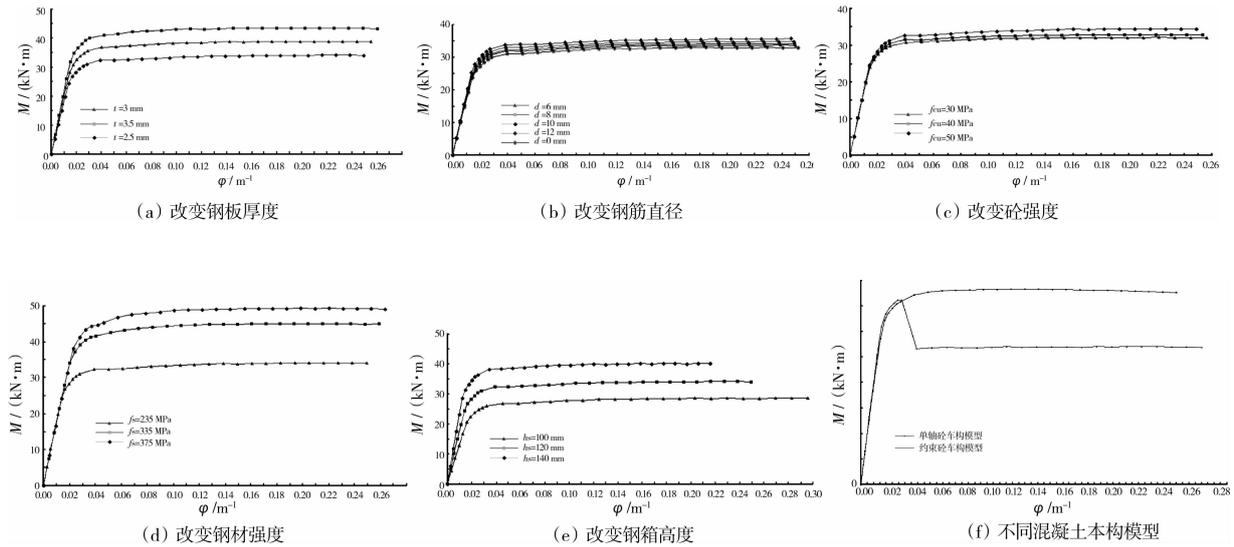
砼强度分别考虑 C30、C40 及 C50。计算所得的 $M-\varphi$ 显示(图 14(c)),混凝土强度的变化对曲线的第 1 阶段完全没有影响,3 条曲线在弹性工作阶段完全重合;钢箱屈服点和 M_u 随砼强度增加略有增加, M_u 分别为 32.09、32.83 及 34.48 kN·m。通过提高砼强度对提高 M_u 的效果并不明显。

5.4 钢材强度

钢材强度分别考虑 235、335 及 375 共 3 种强度等级, $M-\varphi$ 曲线显示(图 14(d)),在弹性工作阶段三者完全重合;钢材强度提高显著地提高了钢箱屈服点和 M_u 点,且从图中可以看出,钢材强度越高, M_u 与钢箱屈服点间的差值越大,表明在破坏阶段钢材强度提高了构件的后期承载力增长。3 种强度下的 M_u 分别为 34.14、44.97 及 49.18 kN·m,计算结果表明,提高钢箱强度可以明显提高 M_u 值。

5.5 钢箱高度

分别计算钢箱高度为 100、120 及 140 mm 时的情景。 $M-\varphi$ 曲线表明(图 14(e)),钢箱高度越高,弹性工作阶段的刚度越大,曲线上的砼塑性点,钢箱屈服点及 M_u 点成比例增长, M_u 分别为 28.52、34.14 及 40.26 kN·m。 $M-\varphi$ 曲线的弹塑性工作阶段与破坏阶段的曲线形状相似,相互平行。由图可知,提高钢箱高度可以提高构件工作刚度和承载力。同时,可以看出,钢箱越高,构件的延性越差,因此,在设计时,若想提高构件承载力,同时要求构件具有较高延性,不可单独提高钢箱高度,需要同时提高钢板厚度及钢材强度,以得到承载力和延性上的协调。

图 14 各不同参数下 $M-\phi$ 理论曲线

5.6 混凝土本构模型

当箍筋较密、配筋率较高时,混凝土本构模型分析中需要考虑钢箱和箍筋对核心混凝土的套箍效应,根据箍筋的直径和间距选用方箍筋约束混凝土本构关系(图 7);而当箍筋间距较大、钢筋直径较细时,核心混凝土套箍效应不明显,这时,整个混凝土梁可考虑均符合普通单轴混凝土本构模型(图 6)。图 14(f)中比较了上方混凝土梁核心混凝土在分析时使用约束混凝土本构关系与单轴本构关系对承载力及延性的影响。

图 14(f)显示,混凝土的延性对构件延性影响显著,当核心混凝土采用单轴本构关系时,构件在混凝土达到本构曲线峰值后,构件迅速破坏至只剩钢箱强度。表现出明显的脆性。而当考虑核心混凝土的套箍效应后,由于核心混凝土可以在峰值附近保持相当一段时间的持续变形,构件在承载力增加不大的情况下,具有较高的延性。因此,当钢箱-砼受弯梁中采用文中 2.3 提出的剪力键形式,利用箍筋与钢箱的有效连接实现混凝土与钢箱的协同工作,箍筋间距越密,配筋率越高,核心混凝土的延性越好^[17],钢箱-砼受弯梁破坏时的延性也越好。通过加密箍筋的方式可以有效提高钢箱-砼组合受弯构件的延性。

6 结论

在对钢箱-砼组合受弯构件的试验研究及分析后,对其加载至破坏的全过程可以得到以下受力特点:

1) 钢箱-砼组合受弯构件的加载破坏全过程根

据其受力及变形特点,可以分成 3 个阶段,弹性工作阶段、弹塑性工作阶段及破坏阶段。弹性工作阶段为加载至砼塑性点,弹塑性工作阶段为砼塑性点至钢箱屈服点,破坏阶段为钢箱屈服点至构件破坏。

2) 根据构件特点,提出一种带圆孔加劲肋型剪力键,实现了砼与钢箱的协同受力,对于简化构造、方便施工等有明显优势。试验显示,混凝土和钢箱间带圆孔加劲肋型剪力键连接可靠,直至加载到 M_u ,混凝土和钢箱间没有出现明显的滑移,截面基本符合平截面假定。

3) 通过对保护层混凝土及约束混凝土本构关系的设计,使用 XTRACT 对钢箱-砼受弯构件的计算可以很好的模拟钢箱-砼受弯构件受力全过程。在此基础上,研究了钢箱厚度、纵筋配筋率、钢材强度、砼强度及钢箱高度等参数的影响,得到:钢箱厚度、钢材强度及钢箱高度对受弯构件的承载力影响显著,而纵筋配筋率及混凝土强度则影响不显著。此外,钢箱高度可以明显提高构件刚度,其它参数对弹性工作阶段的刚度影响较小。

4) 钢箱-砼受弯构件的延性受核心混凝土约束效应及钢箱高度影响显著,钢箱高度越大,延性越差;混凝土配筋率越高、箍筋间距越密,延性越好。

参考文献:

- [1] FURLONG R W. Strength of steel-encased concrete beam-columns. Journal of Structural Division [J]. ASCE, 1967, 93(5): 113-24.
- [2] 邵扣震, 张佐安, 丁大钧. 我国钢管混凝土拱桥建设 [J]. 桥梁建设, 2007(04): 65-69.

- TAI KOUXIA, ZHANG ZUOAN, DING DAJUN. Construction of concrete filled steel tube arch bridges in China[J]. Bridge Construction, 2007(04):65-69.
- [3] 田华, 张素梅, 郭兰慧. 矩形钢管高强混凝土双向压弯构件截面强度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10):1520-1528.
- TIAN HUA, ZHANG SU-MEI, GUO LAN-HUI. Cross-sectional strength of high-strength concrete-filled RHS steel tubes subjected to axial compression and bi-axial bending moment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10):1520-1528.
- [4] 王向阳, 钟佩, 高永华. 钢管混凝土箱型拱桥空间结构分析研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(03): 558-560.
- WANG XIANG-YANG, ZHONG PEI, GAO YONG-HUA. Analysis of spatial structure on concrete filled steel tube box arch bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(03):558-560.
- [5] UY. Strength of short concrete filled high strength steel box columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 57 (2001):113-134.
- [6] LIU YUN, QIAN ZHEN-DONG. Double-layer model updating for steel-concrete composite beam cable-stayed bridge based on GPS [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2008, 24(1): 80-84.
- [7] 虞建成, 左文生, 程祖辉. 叠合式混凝土板梁桥叠合面受力性能分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(02): 222-228.
- YU JIANG-CHENG, ZUO WEN-SHENG, CHENG ZU-HUI. Research on combined interface of laminated concrete plate-girder bridge[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(02):222-228.
- [8] SHUN-ICHI N, HIROMITSU M. Bending strength of concrete-filled narrow-width steel box girder [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64: 128-133.
- [9] MATTHEW J. BURNET, DERIC J. OEHLERS. Rib shear connectors in composite profiled slabs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57: 1267-1287.
- [10] 朱世峰, 周志祥. 钢-混凝土组合拱桥竖转施工体系研究[J]. 施工技术, 2009, 38(7):64-68.
- ZHU SHI-FENG, ZHOU ZHI-XIANG. Study on construction system of steel-concrete composite arch bridge by vertical rotation [J]. Construction Technology, 2009, 38(7):64-68.
- [11] GBJ 107-87. 混凝土强度检验评定标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1988.
- [12] J DA, VIANNA C, L F COSTA-NEVES, et al. Structural behavior of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 2381-2391.
- [13] ROTTER J M. Rapid exact inelastic biaxial analysis [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(12): 2659-2674.
- [14] EL-TAWIL S, SANZ-PICON C F, DEIERLEIN GG. Evaluation of ACI 318 and AISC (LRFD) strength provision for composite beam-columns [J]. J. Construct. Steel Research, 2005, 34: 103-123.
- [15] 聂建国, 朱喻之. 钢-混凝土组合转换梁受弯性能分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(09): 1385-1389.
- NIE JIAN-GUO, ZHU YU-ZHI. Analyses of steel-concrete composite transfer beams in flexure [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(9): 1385-1389.
- [16] MANDER J B, PRIESTLEY M J N. Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1827-1849.
- [17] 袁锦根. 方箍约束钢筋混凝土球弯构件延性与其滞回膜型[J]. 铁道学报, 1989(S1): 24-32.
- YUAN JIN-GEN. Ductility and hysteresis model for R. C. flexural-compression members with rectangular tie confinement [J]. Journal of The China Railway Society, 1989(S1): 24-32.

(编辑 胡英奎)