文章编号: 1002-0268 (2010) 04-0060-06

钢箱-混凝土组合构件约束混凝土本构关系

范 亮[1,2], 周志祥[2]
(1. 西南交通大学 土木学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆交通大学 土木学院, 重庆 400074)

摘要: 为计算和分析一种新型的钢-混凝土组合结构——钢箱-混凝土组合构件, 研究钢箱-混凝土组合构件中钢箱与钢筋共同约束下的混凝土本构关系模型, 进行了一组钢箱-混凝土组合压弯构件试验, 分析了在不对称约束条件下各部分混凝土的约束效应, 根据各部分约束效应, 将混凝土分成了强约束区、弱约束区及无约束区。对约束混凝土采用非均匀材料的直接均匀化理论, 提出了析钢箱-混凝土组合构件中约束混凝土的匀质化材料本构模型, 使用试验实测数据确定了本构模型中的参数。采用该本构模型的纤维模型法全过程分析结果表明, 应用该本构关系计算所得的 *M*-*N* 曲线及荷载-应变曲线的分析结果与试验实测结果吻合良好。

关键词: 桥梁工程; 钢-混凝土组合构件; 约束混凝土; 本构关系; 压弯构件
中图分类号: U448.34 文献标识码: A

Constitutive Relationship of Confined Concrete in Steel Box-concrete Composite Members

FAN Liang[1,2], ZHOU Zhixiang[2]
(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;
2 School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For studying the behavior of steel box-concrete composite (SBCC) members, which is a new steel-concrete composite structure that composed of steel box beam, PC beam and shear key, exploring the constitutive relationship model of jointly confined concrete in SBCC members, a group of SBCC members were tested with different eccentricity. The confining effects of concrete under the asymmetric constraint condition were studied and the concrete were divided into a strongly confined region, a weakly confined region and an unconfined region accordingly. A uniform material constitutive relationship model of confined concrete in SBCC member was put forward by using direct homogenization theory of non-uniform material, and its parameters were modified to fit SBCC according to experimental results. Finally, a calculation of complete load-stress relationship curves and M-N curve were performed using this constitutive relationship in the fiber model for the whole process analysis. The comparison between the results of calculation and the results of experiment shows that they agree well with each other.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite member; confined concrete; constitutive relationship; compression-bending member

0 前言

钢-混凝土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。这样的构件不仅具有灵活的组合形式, 充分发挥材料的优势, 并常在施工的快捷安全性上有良好表现。如已经在各领域中大量使用的钢管混凝土及叠合梁等。本文在钢管混凝土[1-6]及叠合梁[7-10]的研究基础上, 提出一种新型的钢-混凝土组合结构形式——钢箱-混凝土组合受弯构件, 该结构主要针对拱桥受弯为主的区段设

收稿日期: 2009-07-16
基金项目: 国家自然科学基金项目 (50578168); 交通部西部交通建设科技项目 (200631881448)
作者简介: 范亮 (1979-), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生, 从事组合结构桥梁结构及桥梁抗震研究. (fanliang2001@gmail.com)

计，具有受力合理，施工方便。这种构件已经成功用于修建拱桥的主拱中。在钢箱-混凝土组合压弯构件分析中，对其中混凝土部分的约束效应进行了分析，进行了钢箱-混凝土组合压弯构件中约束混凝土梁的匀质化材料本构模型的研究。

1　钢箱-混凝土组合构件的提出

钢箱-混凝土组合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。在轴力和弯矩作用下，截面下部受拉而截面上部受压，这样的设置既可以减小混凝土用量，减轻自重，有利于结构受力，又可以充分发挥钢材和混凝土的力学性能。

钢箱-混凝土组合构件的截面形式见图 1，钢箱上部的加劲肋设于混凝土交界面上，将加劲肋开孔后混凝土的箍筋穿过，形成 PBL 剪力键连接。混凝土的箍筋穿过 PBL 中的圆孔，箍筋在这里不仅仅是混凝土中的抗剪钢筋和骨架钢筋，还与开孔加劲肋共同工作，起到销栓的作用，将混凝土梁与钢箱连接成一整体。

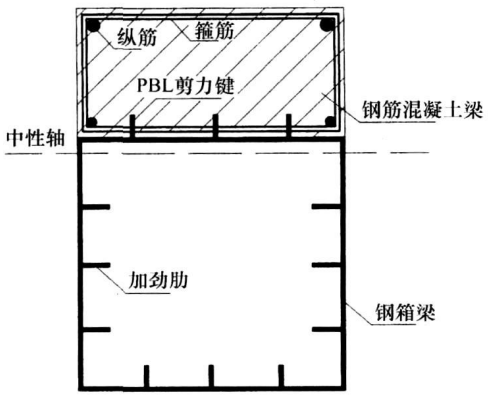

图 1　钢箱-混凝土构件截面构造

Fig 1　Cross-section of SBCC

该构件针对主拱圈的拱肋提出，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，故拱脚区段可以采用钢管混凝土等承受较大轴力并在弯矩作用下有较大刚度；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。钢箱-混凝土构件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。构件的钢箱部分在工厂预制至现场焊接成拱。由于钢结构较轻，吊装难度小，且焊接时间短，降低了拱的合龙周期。此外，已有成功工程实例（重庆万盛藻渡大桥）表明，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龙，施工时间大为减少。在已成拱的钢箱拱上浇注上方钢筋混凝土梁体时，不再需要搭设支架，钢箱顶板直接成为其底模，侧模则架设在钢箱上；待混凝土硬化后形成钢-混凝土组合主拱圈，其他上部结构与类似混凝土拱桥施工方法一致。这种施工方法与钢筋混凝土拱桥相比，拱桥的施工周期短，合龙时间快，风险小，与钢管混凝土相比，混凝土浇注质量易保证。钢箱-混凝土组合受弯构件是根据构件的受力形式合理地组合钢箱和混凝土，充分利用混凝土的受压性能，避免混凝土的受拉，将混凝土完全用于抗压。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。因此，钢箱-混凝土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-混凝土组合构件。

2　钢箱-混凝土组合构件中的混凝土约束效应

钢箱-混凝土构件中，混凝土受到箍筋、纵筋及钢箱的约束，在荷载作用下，混凝土在泊松效应下发生变形时，将受到以上各部分产生的侧限力，该侧限力将改变混凝土的受力性能，使之受力不再遵从单轴受力本构关系，处于三轴受压状态。并且，由于对本构件而言，四周的约束是不对称的，因此，混凝土处于真三轴受压状态。

本文工作主要是尝试建立一个能反映钢箱、加劲肋及箍筋对核心混凝土约束效应贡献的钢箱-混凝土组合构件中混凝土的单轴等效本构关系。以下将分析各不同部分混凝土的约束机理及约束分区，分析各部分混凝土的约束效应。

2.1　约束机理和约束分区

从本质上而言，箍筋内的混凝土至少受到箍筋的约束，其不同的只是约束效应的大小，因此都是核心混凝土。与钢管混凝土不同，由于约束效应随着竖向及横向位置的不同有改变，因此核心混凝土的不同区域的约束效应有明显不同。本文将对核心混凝土的约束效应进行分区研究。

为了研究核心混凝土的本构关系，将核心混凝土进行分区。考虑到约束效应的变化情况，本文中将核心混凝土内根据箍筋、加劲肋及钢箱顶板的分割分成 3 区，如图 2 所示。

其中 I 区核心混凝土下方被钢箱约束，两侧被加

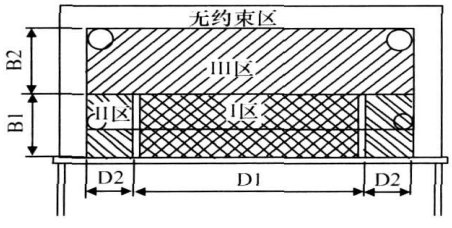

图 2 钢箱-混凝土组合构件约束分区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of confine region in SBCC

劲肋约束，同时穿过加劲肋的箍筋一方面约束混凝土，一方面利用其粘结力起到拉杆的作用，加劲肋钢板面中部钢板受到了拉杆的横向约束，约束方式类似于带拉杆方钢管混凝土[11]，对核心混凝土的约束效应明显，加强了对混凝土的约束，上方被㈣区混凝土约束。由于㈣区混凝土亦被箍筋约束，所以可以有效地约束 I 区混凝土。

㈦区核心混凝土为加劲肋两侧的混凝土，此外混凝土下方依然受到钢箱约束，一侧加劲肋钢板约束，中部有箍筋穿过，起到与 I 区混凝土内箍筋相同的作用；另一侧的大部分混凝土受到箍筋弯起部分的约束，约束方式类似于方箍筋约束混凝土，上方仍受到㈣区混凝土约束。

㈣区核心混凝土下方受到约束效应较强的强约束区混凝土的两侧及上方被较密箍筋约束，约束效应略弱于 iv区和㈦区，但仍较一般方箍筋约束混凝土强。

2.2 侧向等效应力分析

上述 3 区中，由于存在不同的约束介质和机理，各边长度也不一致，因此其各向对核心混凝土的约束作用是不同的。且由于箍筋沿纵向按一定间距布置，因此，在纵向上的约束作用也是不相同的。采用各区单独分析的方法，将各区分别沿长边、短边方向将约束应力等效为均匀分布，并乘以有效约束系数 k_e 来考虑其不均匀性。

2.2.1 I 区的侧向等效应力分析

I 区的有效约束力计算时考虑箍筋的拉杆效应。核心混凝土的约束来自钢箱顶板、加劲肋钢板及上方混凝土约束。竖向的约束力由加劲肋钢板的抗拉力提供，而横向的约束力由钢箱顶板及拉杆提供（图 3），

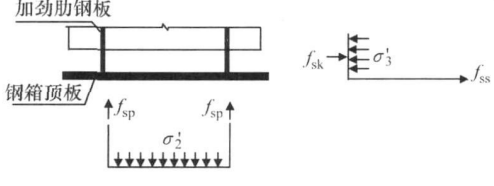

图 3 区钢板侧向受力图

Fig. 3 Lateral force analysis of steel plates in district I

其表达式如下：

$$\sigma'_2=\frac{2f_{sp}}{D_1/t_p-2},\quad \sigma'_3=\frac{f_{ss}+\dfrac{A_{sk}}{S_k t}f_{sk}}{B_1/t}-1, \tag{1}$$

式中，f_{sp}为加劲肋钢板的竖向拉应力；A_{sk}、S_k、f_{sk}为箍筋的面积、间距及轴向拉应力；t_p、t 为加劲肋钢板及钢箱顶板的厚度。

2.2.2 ㈦区的侧向等效应力分析

㈦区的有效约束力计算时，同样考虑箍筋的拉杆作用，由于竖向和横向的约束边界均不对称，分析时取约束效应较小的一侧进行计算。竖向约束力主要由箍筋的拉杆及加劲肋的拉应力提供。横向约束力取约束力较小的箍筋约束进行分析（图 4）。其表达式如下：

$$\sigma'_2=\frac{f_{sk}\dfrac{A_{sk}}{S_k}+f_{sp}t_p}{D_2-t_p},\quad \sigma'_3=\frac{f_{ss}+\dfrac{A_{sk}}{S_k t}f_{sk}}{B_1/t-1}。 \tag{2}$$

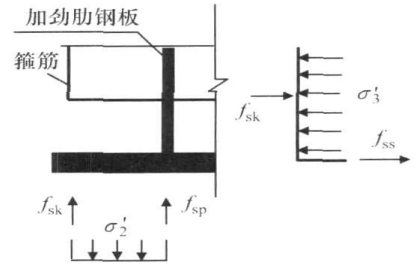

图 4 II 区钢板侧向受力图

Fig. 4 Lateral force analysis of steel plates in district II

2.2.3 ㈣区的侧向等效应力分析

㈣区的有效约束力计算时按方箍筋混凝土进行计算（图 5），由于约束区的周边长度不一致，竖向和横向的约束力表达式有所不同，即：

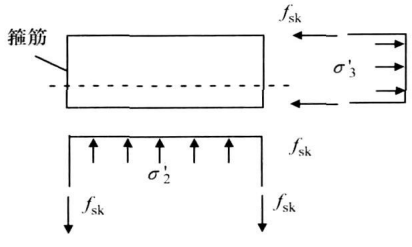

图 5 III 区箍筋侧向受力图

Fig. 5 Lateral force analysis of hoop in district III

$$\sigma'_2=\frac{\dfrac{2A_{sk}}{S_k}f_{sk}}{D_1+2D_2},\quad \sigma'_3=\frac{\dfrac{2A_{sk}}{S_k}f_{sk}}{B_2}。 \tag{3}$$

2.3 有效约束区分析

有效约束系数表征约束混凝土在横向及纵向上约束效应的不均匀性，根据约束效应的大小，可以将混凝土分成无约束区、弱约束区和强约束区，图 6 示出了钢

箱- 混凝土构件中混凝土部分，其中箍筋外围混凝土为无约束区，箍筋内混凝土中箍筋和钢筋的周边区域为弱约束区，中部区域为强约束区。

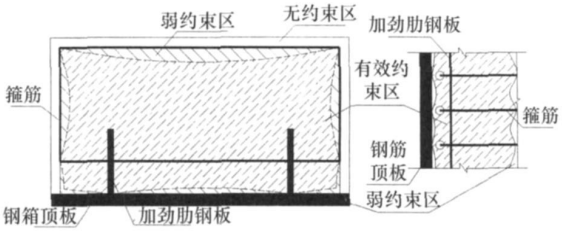

图 6　混凝土有效约束区

Fig 6　Effective confinement region of concrete core

定义横截面有效系数 k_{e1}为混凝土的强约束区和混凝土全截面面积之比。侧面有效约束系数 k_{e2}为侧向有效约束区面积与侧面面积之比。则有效约束系数 $k_e = k_{e1} \times k_{e2}$。

则核心混凝土的两侧等效约束应力 σ_2、σ_3 的表达式如下：

$$\sigma_2 = k_e \sigma'_2;\ \sigma_3 = k_e \sigma'_3。 \tag{4}$$

用有效约束应力来表征约束区混凝土的约束效应，并绘成约束效应示意图，如图 7 所示。

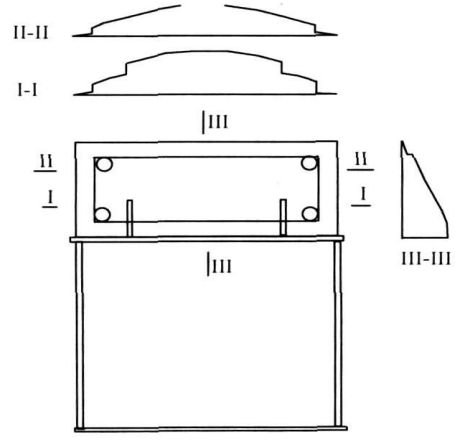

图 7　核心混凝土有效约束效应图

Fig. 7　Effective confinement of core concrete

图 7 中，混凝土的环向约束效应沿高度和宽度方向均在发生变化，在箍筋位置和钢板位置会出现约束效应的转折点。根据方钢管混凝土及方箍筋混凝土的研究成果可以得到，钢箱顶板与加劲肋间的约束效应最强，钢板与箍筋间的约束力其次，而箍筋包裹的混凝土约束效应再其次。同时，沿着钢板和箍筋的周边方向，角隅处的约束效应较强，而周边中部的约束效应较弱。

3　单一匀质法约束混凝土本构模型的建立

以上分析中，钢筋混凝土梁按各种约束情况对约束分区进行了细分。但在实际结构分析中，将混凝土区分成多个区域将使得分析过程过于烦琐，因此，在纤维模型法分析中，将采用非均匀材料的直接均匀化理论[12]，基于场量（应力及强度）的表面平均而直接计算有效应力、有效应变及有效强度，根据宏观应力和应变的关系，求得宏观有效性能。将混凝土分成保护层非约束混凝土和核心约束混凝土进行分析[12]。

约束混凝土所采用的本构模型将根据约束效应将以上 3 个区域的混凝土均匀化，以试验所得极限承载力和全过程曲线为依据，从而得到钢箱-混凝土组合压弯构件中约束混凝土梁的匀质化材料本构关系。

核心约束混凝土采用 Mander 的约束混凝土本构模型[13]。Mander 等人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，能较好反映出随约束效应的提高，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。基于加劲肋、钢箱及箍筋共同约束混凝土与箍筋约束混凝土受力的相似性，本文借鉴 Mander 等人提出的约束混凝土在单轴荷载作用下本构模型，结合 PBL、钢箱及箍筋共同约束混凝土约束机理的特点，提出了加劲肋、钢箱及箍筋共同约束混凝土本构关系的表达式，即：

$$\begin{cases} f_c = \dfrac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r}, \\ x = \varepsilon / \varepsilon_{cc}, \\ \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}\left[1 + \eta\left(\dfrac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1\right)\right] \end{cases}, \tag{5}$$

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。

4　本构模型中参数的确定

由于本构模型中的参数由理论确定较为困难，本文进行了一组钢箱- 混凝土压弯构件试验研究，研究本文本构模型用于钢箱- 混凝土构件中的参数确定。试验共 6 组，试件参数见表 1，截面形式均如图 8。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。为了避免出现钢板过早地局部屈曲，钢箱上按相关规范构造要求设置了多

道横隔板及加劲肋。

表 1 试验试件参数及实测强度表

Tab 1 Specimen parameters and measured strengths

编号	长度/ m	e_0/ m	N_u/ kN	M_u/ (kN• m)	附注
N-1	800	0	680	0	轴压- 柱
N-2	800	0 05	450	22 5	偏压- 柱
N-3	800	0. 1	312 5	31. 25	偏压- 柱
M-1	1 300		0	33 3	纯弯- 梁
M-2	1 300	0. 5	68	34	压弯- 梁
M-3	1 300	0 22	165	36 3	压弯- 梁

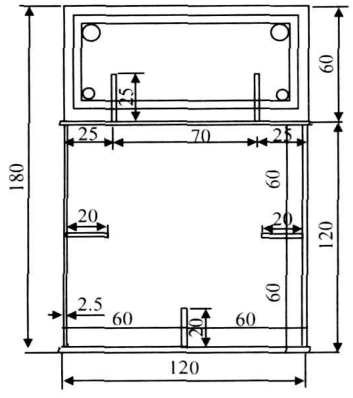

图 8 试件构造及尺寸 (单位: mm)

Fig 8 Structure and dimensions of specimen (unit: mm)

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。混凝土 28 d 的立方体抗压强度为 47. 4 MPa。钢板为 Q235 普通热轧钢板, 钢板的抗拉强度实测值为 290 MPa。

为了得到纯弯区段, 加载时在千斤顶下设置分配梁, 采用四点加载法加载 (图 9)。压弯试验时, 在梁的两端设置刀铰, 一端设置千斤顶。试验全过程中要测读荷载施加力值、挠度及应变数据。其中 2 个千斤顶的大小用测力传感器同时测读; 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。

在本构关系参数确定中, 将整个钢筋混凝土按均匀材料考虑, 对钢箱-混凝土压弯构件进行纤维模型分析法进行分析。采用上述本构模型, 通过多次试算, 以试验所得的极限承载力和全过程曲线为依据, 计算得到约束钢筋混凝土梁的匀质化材料本构关系, 其中各关键参数: f_{c0}= 35. 6、ε_{c0}= 0. 002; f_{cc}= 53. 6、ε_{cc}= 0. 007 056; η= 5 为峰值应变修正参数。

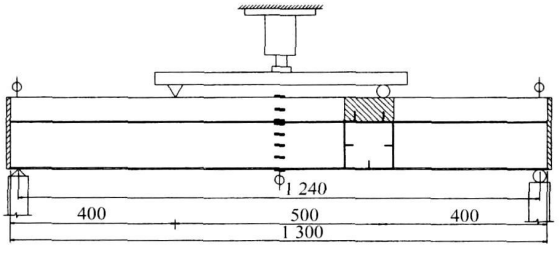

图 9 试验梁加载装置

Fig 9 Loading device for trail beam

将上述关键参数代入式 (1) 中, 计算 M-N 曲线与实测 M-N 曲线对比可见 (图 10a), 两者吻合良好。此外, 对构件荷载-混凝土应变的全过程进行了全过程分析, 并与试验实测全过程曲线进行对比 (图 10b)), 可以看出, 全过程曲线亦吻合良好。

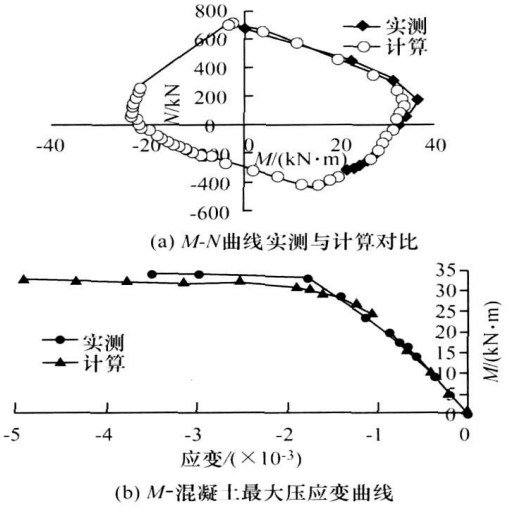

图 10 理论计算曲线和试验曲线的比较

Fig 10 Comparison between theoretical curve and experimental curve

极限强度与应变的分析曲线与实测曲线吻合良好, 表明文中提出的本构模型适用于钢箱-混凝土组合压弯构件的结构分析中。

5 结论

(1) 研究了钢箱-混凝土组合构件中的混凝土部分在钢箱、箍筋及加劲肋约束下的约束效应, 根据其约束效应的大小, 将其分成强约束区、弱约束区和无约束区 3 个部分。

(2) 研究表明, 钢箱-混凝土组合构件中的约束混凝土处于非对称约束状态, 混凝土受力形式为真三轴受压, 约束效应沿高度和宽度方向均发生变化, 笔者采用非均匀材料的直接均匀化理论, 建立了约束混凝土的单一介质匀质化本构模型, 该模型可以对钢箱-混凝土压弯构件的受力进行全过程分析。

(3) 本文进行了一组 6 片不同偏心距试验梁, 以试验实测数据确定单一介质匀质化本构模型参数, 计

算结果表明，所建立的本构模型及模型参数可以较好地分析钢箱-混凝土压弯构件的 M-N 曲线及全过程受力性能。

参考文献：

References:

[1] FURLONG R W. Strength of Steel-encased Concrete Beam-columns [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1967, 93 (5): 113-125.

[2] 郃扣霞，张佐安，丁大钧．我国钢管混凝土拱桥建设 [J]. 桥梁建设，2007 (4): 65-69.
TAI Kouxia, ZHANG Zuoan, DING Dajun. Construction of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China [J]. Bridge Construction, 2007 (4): 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 Sumei, GUO Lanhui. 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 (3): 558-560.
WANG Xiangyang, ZHONG Pei, GAO Yonghua. Analysis of Spatial Structure on Concrete Filled Steel Tube Box Arch Bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2008, 32 (3): 558-560.

[5] 卢方伟，刘晓，李四平，等．中空夹层钢管混凝土柱力学性能研究[J]. 公路交通科技，2007, 24 (5): 76-80.
LU Fangwei, LIU Xiao, LI Siping, et al. Study on Mechanical Properties of Concrete-filled Double Skin Steel Tube Columns [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (5): 76-80.

[6] UY B. Strength of Short Concrete Filled High Strength Steel Box Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57: 113-134.

[7] LIU Yun, QIAN Zhendong. 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.

[8] 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 (2): 222-228.
YU Jiancheng, ZUO Wensheng. CHENG Zuhui, Research on Combined Interface of Laminated Concrete Plate-girder Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37 (2): 222-228.

[9] NAKAMURAA S I, MORISHITA H. Bending Strength of Concrete-filled Narrow-width Steel Box Girder [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64 (1): 128-133.

[10] BURNET M J, OEHLERS D J. Rib Shear Connectors in Composite Profiled Slabs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57 (12): 1267-1287.

[11] 蔡健，何振强．带约束拉杆方形钢管混凝土的本构关系 [J]. 工程力学，2006, 23 (10), 145-150.
CAI Jian, HE Zhenqiang. Constitutive Relationship of Square CFT with Binding Bars [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (10): 145-150

[12] 秦庆华，杨庆生．非均匀材料多场耦合行为的宏细观理论 [M]. 北京：高等教育出版社，2006.
QING Qinghua, YANG Qingsheng. Maxro-micro-theroy on Multi-field Coupling Behavior of Heterogeneous Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[13] 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.

(上接第 50 页)

XI Lingzhi. Road Roughness Evaluation and Vehicle-induced Vibration Analysis on Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2008.

[17] 夏禾，张楠．车辆与结构动力相互作用 [M]. 第 2 版．北京：科学出版社，2005.
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction of Vehicle and Structures [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005.

[18] 曾庆元，郭向荣．列车桥梁时变系统的振动分析理论与应用 [M]. 北京：中国铁道出版社，1999.
ZENG Qingyuan, GUO Xiangrong. Vibration Analysis Theory and Application of Train-bridges Time-varying System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.