

文章编号: 1000-4750(2013)11-0160-06

预应力连续组合梁负弯矩区抗弯承载力分析

胡少伟¹, 叶祥飞²

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210024; 2. 中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

摘 要: 预应力钢-混凝土连续组合梁具有承载力高、变形小等诸多优点, 作为一种新型的横向承重构件, 在工程中得到了广泛的使用。其负弯矩区承载能力计算与变形分析是其设计的关键, 目前规范还是空白。因此, 有必要对其刚度、变形及抗弯承载力进行研究。该文基于换算截面法, 引入混凝土参与受拉工作的程度系数, 确定了组合梁截面抗弯刚度, 进而推出了预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区的弹性抗弯承载力计算公式; 基于简化塑性理论, 得到了负弯矩区的极限抗弯承载力计算方法; 研究表明连续组合梁能够显著提高截面刚度与减少开裂。该文公式计算结果与实测值吻合较好, 满足工程精度要求。

关键词: 预应力; 连续组合梁; 负弯矩区; 变形; 抗弯承载力

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.07.0519

ANALYSIS ON THE BENDING CAPACITY OF THE NEGATIVE-MOMENT REGION IN PRESTRESSED CONTINUOUS COMPOSITE BEAMS

HU Shao-wei¹, YE Xiang-fei²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Mid-South Design & Research Institute, Changsha 410014, China)

Abstract: The prestressed continuous steel-concrete composite beams have lots of advantages, such as high bearing capacity, small deformation and so on, and have been widely used in engineering as a new transverse bearing component. The calculation of capacity and the deformation analysis on a negative-moment region is the key to the design of the prestressed continuous steel-concrete composite beams, and current corresponding specification is still blank. Thusly, it is necessary to research the stiffness, the deformation and a bending capacity formulation. The bending stiffness of the cross-section of the composite beams was determined, and the bending capacity in the state of an elastic limit was calculated with the method of a conversion section principle by the introduction of the degree coefficient of concrete participation in tension. Besides, the bending capacity of composite beams bearing a negative bending moment in the ultimate limit state was deduced by using simplified plasticity theory. The research shows that it is very useful to improve the rigidity of the cross section and slow cracking of continuous composite beams. It turns out that the calculation values are in a good agreement with the experimental results, which meet the engineering accuracy.

Key words: pre-stress; continuous steel-concrete composite beam; negative-moment region; deformation; bending capacity

钢-混凝土组合梁结构是基于钢结构和钢筋混凝土结构发展起来的一种新型的横向承重结构, 主

要由钢梁与混凝土翼板通过剪力连接件组合成共同受力的整体, 并使中和轴位于交界面附近, 充分

收稿日期: 2012-07-13; 修改日期: 2013-01-03

基金项目: 中央级公益性科研院所重大项目《连续组合梁新型结构在工程中应用关键技术研究》(Y410006)

通讯作者: 胡少伟(1969—), 男, 河南杞县人, 教授级高工, 博士, 博导, 主要从事工程结构与材料科学研究(E-mail:hushaowei@nhri.cn).

作者简介: 叶祥飞(1986—), 男, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 从事水工结构研究(E-mail: a1367736@163.com).

发挥钢材受拉和混凝土受压的力学性能^[1-2]。随着国民经济的快速发展,对工程设计的要求也越来越高,逐步出现了预应力钢-混凝土组合梁结构和预应力钢-混凝土连续组合梁结构,预应力的出现缓解了普通钢-混凝土组合梁负弯矩区开裂和刚度不足的问题,但负弯矩区的抗弯性能研究并不充分^[3-4],因此,有必要对其进行深入研究。在结构设计中,均采用极限状态设计法,极限状态一般可分为两大类,即承载极限状态和正常使用极限状态。正常使用极限状态对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某种规定限制,一般以变形、裂缝宽度等为控制条件;承载能力极限状态对应于结构或构件达到最大承载能力或不适于极限承载的变形^[5]。因此,进行预应力钢-混凝土组合梁设计时,需要对这两种极限状态下的组合梁刚度、变形及承载力计算方法进行研究。

1 正常使用极限状态下的挠度及抗弯承载力计算

大量试验及研究表明,在正常使用极限状态下的组合梁,钢梁与钢筋均处于弹性工作状态,正弯矩区受压区混凝土应变也在应力-应变曲线的上升段,负弯矩区的混凝土在较小荷载水平下即发生开裂,计算时一般不考虑其受拉作用,但此时的钢筋与钢梁仍处于弹性阶段^[6],即弹性工作阶段的结构性能反应正常使用阶段的结构行为。因此,对正常使用极限状态下的组合梁研究即可转化为对组合梁弹性工作状态的研究分析,即按弹性理论进行计算。

1.1 预应力钢-混凝土组合梁负弯矩区截面刚度计算

在组合梁设计中,截面刚度的确定是变形及抗弯承载力计算的基础,因此需首先确定组合梁的截面抗弯刚度。

在连续组合梁中,由于负弯矩区的混凝土会受拉开裂,从而使得组合梁的截面抗弯刚度沿梁长不再相等,需要根据其受力特点分区段确定其截面抗弯刚度,即分为正弯矩区和负弯矩区分别考虑。对于负弯矩区段的划分,与荷载作用形式、大小等因素均有关系,没有明确的理论计算公式,欧洲规范4^[7]及我国的《钢结构设计规范》(GB50017-2003)^[8]取中支座附近 $0.15L$ (L 为组合梁单跨跨度)为负弯矩区段,该区段内则忽略混凝土的受拉作用,只考虑

钢梁及钢筋,按照截面换算法计算其截面抗弯刚度;正弯矩区的截面刚度则按照考虑滑移的折减刚度法进行计算,折减刚度 B 可按下式计算:

$$B = \frac{EI_{eq}}{1 + \zeta} \quad (1)$$

式中: I_{eq} 为组合梁的换算截面惯性矩; ζ 为刚度折减系数,按文献[8]取值。

从上可知,欧洲规范4及混凝土与钢结构设计规范中均没有考虑混凝土的受拉作用,然而,当混凝土翼板受拉开裂后,尽管开裂截面混凝土提供的抗弯刚度完全丧失,但未开裂的混凝土截面还能提供部分截面刚度,这就使得未开裂区段钢筋的应变较开裂截面的钢筋应变小,即钢筋的平均应变小于裂缝截面的钢筋应变,从而出现受拉钢化效应。受拉钢化效应对混凝土抗弯构件的影响计算方法主要有^[6]:

1) CEB-FIP Model Code: MC90中采用的受拉钢化效应修正法,即先确定开裂前、开裂后及钢筋屈服时的三个基本刚度,然后结合构件的弯矩-曲率关系,分别计算三个时段的平均刚度;

2) 《美国钢筋混凝土房屋建筑规范》(ACI318-1992)采用的有效惯性矩法,即规定在计算钢筋混凝土构件的挠度时,其截面有效刚度取开裂前与开裂后截面换算刚度的插值:

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 I_{eq} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_{eq} \quad (2)$$

式中, I_{cr} 为开裂后的截面换算刚度。

3) 我国《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中,则通过刚度解析法来考虑受拉钢化效应的影响,即在刚度计算时设置一个裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数 ψ ,从而得到受弯构件截面的平均刚度^[9]。

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f'}} \quad (3)$$

式中: B_s 为构件截面抗弯刚度; h_0 为有效截面高度; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值,即 E_s/E_c ; ρ 为纵向钢筋配筋率; γ_f' 为受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值。

由于承受负弯矩的预应力钢-混凝土组合梁翼板与钢筋混凝土梁受拉区的工作状态类似,可直接引入混凝土翼板参与受拉工作程度系数 $m(0 \leq$

$m \leq 1$), 且认为: 在组合梁负弯矩区, 当翼板未开裂时, 混凝土完全参加受拉工作, $m = 1$; 随着荷载的增加, 混凝土开裂程度加剧, 翼板随荷载按线性退出工作; 当达到弹性抗弯承载力时, 混凝土完全退出工作, 直至到达承载力极限状态, $m = 0$ 。综上所述, m 可按下式计算:

$$m = \begin{cases} 1 & M \leq M_{cr} \\ \frac{M_y - M}{M_y - M_{cr}} & M_{cr} < M < M_y \\ 0 & M_y < M < M_u \end{cases} \quad (4)$$

各加载状态下的组合梁截面抗弯刚度按换算截面法计算, 为保持翼板形心位置不变, 简化计算, 假定混凝土翼板高度不变, 按宽度方向逐渐退出工作。

考虑混凝土部分受拉工作的换算截面惯性矩计算如下(如图 1)。

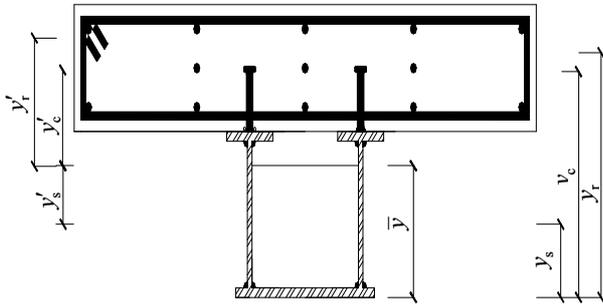


图 1 组合梁换算截面几何特征

Fig.1 The section of composite beam

组合梁换算截面的形心位置为:

$$\bar{y} = \frac{A_s y_s + A_r y_r + m A_c y_c / \alpha_E}{A_s + A_r + m A_c / \alpha_E} \quad (5)$$

式中: A_r 、 A_s 、 A_c 分别为负弯矩区纵向钢筋截面面积、钢梁截面面积及混凝土翼板截面面积; y_s 、 y_r 、 y_c 分别为负弯矩区钢梁、预应力筋与纵向钢筋及混凝土翼板形心到钢梁底部的距离。

换算截面惯性矩按下式计算:

$$I' = I_s + A_s y_s'^2 + A_r y_r'^2 + \frac{m}{\alpha_E} (I_c + A_c y_c'^2) \quad (6)$$

式中: I_s 、 I_c 分别为钢梁与混凝土翼板的截面惯性矩; y_s' 、 y_r' 、 y_c' 分别为钢梁、预应力筋与纵向钢筋及混凝土翼板形心到换算截面形心的距离。

负弯矩区组合梁截面抗弯刚度:

$$B_s = EI' \quad (7)$$

因此, 对于负弯矩区组合梁截面抗弯刚度可按式(7)确定, 负弯矩区截面刚度随加载变化过程如

图 2 所示。

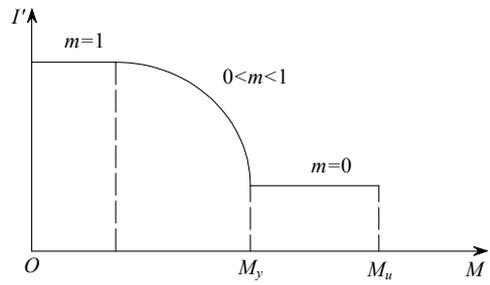


图 2 负弯矩区截面刚度随加载变化过程

Fig.2 The relationship between stiffness in negative-moment region and loading

1.2 弹性极限状态下组合梁挠度计算

根据预应力组合梁在受力全过程中的反应, 其挠度增长可分为两个阶段考虑: 第一阶段是预应力施加阶段, 产生的反向挠度 δ_0 ; 第二阶段是加载阶段, 预应力组合梁在外载作用下产生的正向挠度 δ , 预应力组合梁弹性抗弯承载状态时的挠度为 δ_y 。在实际工程中, 结构设计人员最关心的则是外荷载作用下产生的挠度, 即上述第二阶段产生的挠度 δ , 且一般最大挠度出现在跨中, 下面主要对弹性极限状态时的跨中挠度 δ_y 进行分析。

设作用在预应力组合梁上的外荷载为 $M_o(x)$, 外荷载作用下的预应力筋增量产生的弯矩为 $\Delta P_y e_m$ 。将 $\Delta P_y e_m$ 视为作用于组合梁的外力, 则弹性极限状态下的挠度:

$$\delta_y = \delta_w - \delta_{\Delta P} \quad (8)$$

式中: δ_w 为外荷载产生的跨中挠度; $\delta_{\Delta P}$ 为预应力筋增量产生的跨中挠度, 与 δ_w 反向。

在跨中位置处作用单位荷载, 产生的弯矩分布为 $\bar{M}(x)$, 组合梁在集中荷载、两点对称加载及均布荷载作用下的弯矩为 $M_w(x)$ 。

外荷载作用下组合梁产生的挠度:

$$\delta_w = \int_0^L \frac{M_w(x) \bar{M}(x)}{B_s} dx = 2 \int_0^{L/2} \frac{M_w(x) \frac{x}{2}}{B_s} dx = \frac{1}{2 B_s} A_M X_c \quad (9)$$

式中: A_M 为弯矩图面积; X_c 为半跨弯矩图形心到梁端距离。

预应力筋内力增量作用下产生的挠度:

$$\delta_{\Delta P} = \int_0^L \frac{\Delta P_y e_m' \bar{M}(x)}{B_s} dx \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8)并分别与文献[10]联立,即可求得各种加载方式下的弹性极限挠度:

1) 集中加载

$$\delta_y = \frac{\mu^2(1-\mu)FL^3}{6B_s} - \frac{k_2 e'_m L^2 \left(f_y \frac{I'}{e'_r} - \sigma_{0r} \frac{I}{e_r} \right)}{8B_s(2\mu L - k_2 e'_m)} \quad (11)$$

2) 两点对称加载

$$\delta_y = \frac{\mu(3-4\mu^2)FL^3}{24B_s} - \frac{k_2 e'_m L^2 \left(f_y \frac{I'}{e'_r} - \sigma_{0r} \frac{I}{e_r} \right)}{8B_s(2\mu L - e'_m)} \quad (12)$$

3) 均布加载

$$\delta_y = \frac{5qL^4}{384B_s} - \frac{k_2 e'_m L^2 \left(f_y \frac{I'}{e'_r} - \sigma_{0r} \frac{I}{e_r} \right)}{2B_s(L - 4k_2 e'_m)} \quad (13)$$

1.3 弹性抗弯承载力计算

预应力简支组合梁的截面抗弯承载力由钢梁、预应力钢筋及钢筋混凝土翼板共同承担,当其中任意材料达到屈服,即可认为组合梁达到弹性抗弯承载力^[11]。对于承受正弯矩的组合梁,为使组合梁受力合理,通常是钢梁先受拉屈服,直至混凝土受压屈服,组合梁破坏。

但对于承受负弯矩的组合梁,由于混凝土翼板在较小水平荷载下便开裂,钢筋承受的拉力较大,因此,通常是纵向受拉钢筋先于钢梁屈服,即承受负弯矩的预应力简支组合梁达到弹性抗弯承载力的标志为受拉钢筋屈服^[12]。

根据纵向受拉钢筋的应力变化,可将预应力组合梁的受力过程分为两个阶段^[13-14]:第一阶段为预应力施加阶段,在预应力作用下,最外层受拉钢筋产生的初始压应力为 σ_{0r} (受压为正,受拉为负);

$$\sigma_{0r} = \frac{P_0 e_m e_r}{I} + \frac{P_0}{A_0} \quad (14)$$

式中: e_r 为外层钢筋到换算截面形心的距离; I 为开裂前的换算截面惯性矩; A_0 为组合梁换算为钢的截面面积。

第二阶段为使用荷载作用阶段,随着荷载的增加,钢筋应力逐渐达到屈服强度 f_y ,此时预应力简支组合梁达到弹性抗弯承载力 M_y 。由于第一阶段无外荷载作用,组合梁截面内力与预应力筋内力相互平衡,不产生截面弯矩;第二阶段时,截面内力弯矩与外荷载产生弯矩平衡,此阶段的弯矩内力增量即为 M_y ,且可通过外层钢筋的应力增量及预应

力内力增量求得:

$$M_y = f_y \frac{I'}{e'_r} - \sigma_{0r} \frac{I}{e_r} + \Delta P_y e'_m \quad (15)$$

式中, e'_r 、 e'_m 分别为计算混凝土开裂后的换算截面惯性矩时,最外层钢筋、预应力筋作用点到换算截面形心的距离。

2 承载极限状态下的抗弯承载力计算

当组合梁达到抗弯承载极限状态时,最大弯矩处的钢筋及钢梁大部分截面均已达到屈服,混凝土完全退出工作,承载力开始下降,但通常预应力筋并未达到屈服。因此,对于承受负弯矩作用的预应力简支组合梁,可采用类似于正弯矩简支组合梁的简化塑性理论分析方法。考虑到钢筋及部分钢梁的应力强化作用可以弥补因滑移引起的截面承载力降低,因此,采用简化塑性理论计算负弯矩简支组合梁极限抗弯承载力时,忽略滑移的影响。

为简化分析,引入如下假定:

- 1) 承载力极限状态时,组合梁截面应力呈矩形分布,混凝土完全退出工作;
- 2) 抗剪连接件能够充分发挥其塑性变形能力,且不考虑其垂直掀起效应;
- 3) 忽略滑移效应的影响。

极限抗弯承载力计算模型如图3所示。

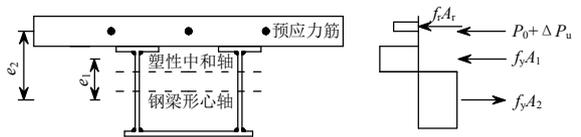


图3 极限抗弯承载力计算模型

Fig.3 The computation model of bending capacity in ultimate limit state

根据截面力的平衡,则有:

$$f_y A_1 + f_r A_t + (P_0 + \Delta P_u) = f_y A_2 \quad (16)$$

式中, A_1 、 A_2 分别为承载力极限状态时钢梁受拉区和受压区面积。

根据截面弯矩平衡,得到极限抗弯承载力:

$$M_u = f_y A_1 e_1 + (P_0 + \Delta P_u) e_2 + f_r A_t e_3 \quad (17)$$

式中: e_1 、 e_2 、 e_3 分别为钢梁受拉区合力作用点、预应力筋及纵向受拉钢筋作用点到钢梁受压区合力作用点距离。

3 试验过程

针对预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区,试

验设计了3根反向加载的组合梁(CB-29及PCB-30~PCB-31),各试验梁的基本设计参数如表1,试验装置和预应力张拉设备如图4。

表1 组合梁试件设计参数

Table 1 Main design parameters of steel-concrete composite girder

编号	跨度/ mm	翼板/ mm	纵筋	箍筋	预应力筋	栓钉	加载方式
CB-29	4000	800×130	10Φ12	Φ8@200	—	2Φ16@750	反向对称加载
PCB-30	4000	800×130	10Φ12	Φ8@200	3Φ15.24	2Φ16@180	反向对称加载
PCB-31	4000	800×130	10Φ12	Φ8@200	3Φ15.24	2Φ16@270	反向对称加载



(a) 试验装置图



(b) 预应力张拉设备

图4 试验装置和预应力张拉设备

Fig.4 Test device and prestressed tensioning equipment

PCB-30、PCB-31在荷载为60kN左右时,纯弯段翼板表面开始出现受拉裂缝,并随着荷载的增加而逐渐增多,裂缝的长度、深度及宽度也不断向更深的层次发展。随着荷载的增加,钢筋与钢梁均逐步开始屈服,直至208kN,组合梁开始进入大变形阶段,跨中挠度快速增长,混凝土翼板的裂缝最宽达到8mm,组合梁达到极限抗弯承载力,无法继续承载,受弯破坏。CB-29相比上述两根组合梁,没有施加预应力,破坏的过程较为相似,开裂荷载及极限荷载有较大的降低,分别为24kN、136kN。

4 理论计算与试验结果对比

分别按式(12)、式(15)、式(17)求得的负弯矩简支组合梁弹性极限挠度 δ_{yj} 、弹性抗弯承载力 M_{yj} 及

极限抗弯承载力 M_{uj} 与试验值进行比较,如表2所示。

表2中预应力负弯矩组合梁的挠度及承载力均按完全剪力连接情况下的公式计算,对于栓钉间距相对较大的PCB-31,没有在承载力公式推导中得到体现,因此,PCB-31的承载力计算值较PCB-30安全度较小。

表2 抗弯承载力及挠度试验值与计算值的比较

Table 2 The compare between test value and calculated value about bending capacity and deformation

编号	δ_{yj}/mm	δ_{yt}/mm	$M_{yj}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{yt}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{uj}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
CB-29	14.82	20.73	90.91	97.31	140.25
PCB-30	17.53	15.75	155.32	135.00	219.33
PCB-31	17.51	17.66	155.05	134.30	218.04
编号	$M_{ut}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	δ_{yj}/δ_{yt}	M_{yj}/M_{yt}	M_{uj}/M_{ut}	
CB-29	170.00	0.71	0.93	0.82	
PCB-30	248.75	1.11	1.15	0.88	
PCB-31	216.25	0.99	1.15	1.01	

注:下标y、u分别代表弹性极限状态和承载力极限状态;下标j、t分别代表计算值和试验值

5 结论

本文通过试验研究和理论分析,对预应力钢-混凝土连续组合梁负弯矩区抗弯承载力进行计算,得到如下结论:

(1) 引入混凝土参与受拉工作的程度系数 m ,按换算截面法确定了连续组合梁负弯矩区的截面抗弯刚度^[15-17],进而求出了其弹性抗弯承载力;按照简化塑性理论推导了连续组合梁负弯矩区的极限抗弯承载力计算公式,其计算值与试验值吻合良好。

(2) 栓钉间距对组合梁弹性过程时的受力影响较小,但栓钉间距的增大会降低组合梁的极限抗弯承载力,实际推导的抗弯承载力是偏安全的。

参考文献:

- [1] 胡少伟. 组合梁抗扭分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 88-97.
Hu Shaowei. Torsional analysis and design of composite steel-concrete beams [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 88-97. (in Chinese)
- [2] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构-试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-2.
Nie Jianguo. Steel and concrete composite structure-test the theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-2. (in Chinese)
- [3] 胡少伟, 聂建国. 箱形钢-混凝土组合梁的复合弯扭试

- 验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 54—59.
- Hu Shaowei, Nie Jianguo. Experimental study on composite steel concrete beams with box sections under combined bending and torsion [J]. Building Structures, 2006, 36(8): 54—59. (in Chinese)
- [4] Russell Q. Bridge. The Integration of partial shear connection into composite steel-concrete design procedures [D]. Sydney: University of Western Sydney, 2000: 135—139.
- [5] 河海大学. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006: 76—77.
- Hohai University. Hydraulic reinforced concrete structures [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 76—77. (in Chinese)
- [6] 张彦玲. 钢-混凝土组合梁负弯矩区受力性能及开裂控制的试验及理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 99—102.
- Zhang Yanling. The test and theory research on steel-concrete composite beam in negative-moment region [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 99—102. (in Chinese)
- [7] Eurocode 4. Part 1: General rules and rules for buildings [S]. Revised Draft, 1991: 77—79.
- [8] GB50017-2003, 钢结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 45—48.
- GB50017-2003, the steel structure design code [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 45—48. (in Chinese)
- [9] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 125—127.
- GB50010-2010, Concrete structure design codes [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 125—127. (in Chinese)
- [10] 叶祥飞. 预应力钢-混凝土连续组合梁抗弯性能试验研究与理论分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012: 55—60.
- Ye Xiangfei. Experimental research and theoretical analysis for the flexural behavior of the prestressed continuous composite beam [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012: 55—60.
- [11] 胡汉林. 预应力组合梁结构抗弯性能试验研究与理论分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010: 75—80.
- Hu Hanlin. Experimental study and theoretical analysis on the flexural behavior of the prestressed composite box beam structure [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010: 75—80. (in Chinese)
- [12] 胡少伟, 聂建国. 复合弯扭下钢-混凝土组合梁连接件的设计方法[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 28—32.
- Hu Shaowei, Nie Jianguo. A simplified design procedure of stud connector in composite steel-concrete beams subjected to combined flexure and torsion [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 28—32. (in Chinese)
- [13] 胡少伟, 聂建国, 朱林森. 钢-混凝土组合梁复合弯扭作用下非线性分析[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 1—5.
- Hu Shaowei, Nie Jianguo, Zhu Linsen. nonlinear analysis of composite steel-concrete beams under combined flexure and torsion [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 1—5. (in Chinese)
- [14] 沈为民, 宗周红, 房贞政. 预应力组合简支梁试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 77—80.
- Shen Weimin, Zong Zhouhong, Fang Zhenzheng. Experimental study on external prestressed steel-concrete composite supported beams [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2001, 29(5): 77—80. (in Chinese)
- [15] 聂建国, 卜凡民, 樊健生. 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 60—66.
- Nie Jianguo, Bu Fanmin, Fan Jiansheng. Quasi-static test on low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete under high axial compression ratio [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60—66. (in Chinese)
- [16] 胡少伟, 胡汉林. 预应力组合箱梁抗弯能力计算分析[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 101—106.
- Hu Shaowei, Hu Hanlin. Calculation and analysis on flexural capacity of prestressed composite box girder [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 101—106. (in Chinese)
- [17] 聂建国, 樊健生. 组合梁在负弯矩作用下的刚度分析[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 30—36.
- Nie Jianguo, Fan Jiansheng. Analysis of composite beam stiffness under negative bending [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(4): 30—36. (in Chinese)