

文章编号: 1000-4750(2011)02-0129-05

预应力钢箱高强混凝土组合梁 受扭性能全过程分析

*胡少伟^{1,2}, 陈 亮^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏, 南京 210029; 2. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏, 南京 210029)

摘 要: 为研究预应力钢箱高强混凝土组合梁从加载到破坏受扭全过程的力学性能, 把受扭全过程分为开裂前和开裂后两个阶段。基于变角空间桁架理论模型, 通过受力平衡方程、几何条件和应力-应变关系等, 推导出适用于预应力组合箱梁全过程分析的一系列方程, 进而提出了预应力钢箱高强混凝土组合梁全过程分析的简化算法, 并利用 VB 编制了预应力钢箱高强混凝土组合梁受扭全过程分析的仿真计算程序, 制作了输入和输出的可视化界面。最后, 对试验和理论分析结果进行了对比, 结果表明方法合理, 精度满足要求。

关键词: 预应力钢箱高强混凝土组合梁; 受扭性能; 仿真可视化界面程序; 全过程分析; 理论与试验对比分析

中图分类号: TU317^{+.1}; TU398^{+.9} **文献标识码:** A

COMPLETE HISTORY ANALYSIS ON TORSIONAL PERFORMANCE OF PRESTRESSED STEEL-HSC COMPOSITE BOX BEAMS

*HU Shao-wei^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: In order to study the full-range torsional performance of prestressed Steel-HSC (high strength concrete) composite box beams, the whole torsional process is divided into two stages: a pre-cracking stage and a post-cracking one. Based on the spatial truss model theory with a variable angle, a series of equations for the complete history analysis on its torsional performance were derived in the paper by using the equilibrium, deformation compatibility conditions and stress-strain relationships. A simplified method of torsional analysis on composite beams was given out. The corresponding VB programme was provided out, which have visual interface for input and output. The comparison between test and predicted results shows that the method proposed is rational and meets relevant requirements.

Key words: prestressed Steel-HSC composite box beam; torsion performance; VB programme with visual interface; complete history analysis; comparison between test and predicted results

受扭作用下的预应力钢箱高强混凝土组合梁的破坏机理是工程界研究的一个重要课题。由于钢-混凝土组合构件在受扭下的受力状态实际上属于非弹性的空间受力状态^[1-2], 尤其在混凝土开裂后发生内力重分布, 其内力与变形的关系极其复杂。综合考虑组合梁受力后的静力平衡、材料的非

线性特性和变形协调可以深入了解预应力钢箱高强混凝土组合梁在整个受扭过程中的内力和变形, 有助于对预应力钢箱高强混凝土组合梁受力性能有一个比较全面的认识。

国内外一些学者对轴力作用下的钢筋混凝土构件以及预应力混凝土构件纯扭性能进行全过程

收稿日期: 2009-07-22; 修改日期: 2009-10-13

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2007010); 人事部留学人员回国科技项目《钢-高强混凝土组合桥梁复合受力性能》(Q40502)

作者简介: *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);

陈 亮(1984—), 男, 安徽潜山人, 工程师, 硕士, 从事工程结构与材料的科学研究(E-mail: liangchen84@163.com).

分析^[3], 并取得了很大的成就。普通钢-混凝土组合梁受扭性能全过程分析表明^[4], 组合梁受扭破坏过程大致可以分为三个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。然而, 目前国内外还没有相关文献报道预应力钢箱高强混凝土组合梁受扭破坏机理的研究情况。不仅需要探讨预应力对抗扭强度的影响, 还需要进一步了解受扭过程中内力和变形情况。本文利用空间桁架模型理论, 推导出了一系列适用于预应力钢箱混凝土组合梁受扭分析的关系式, 并提出了组合梁受扭性能全过程分析的简化算法, 然后, 编制了分析程序, 制作了输入和输出的可视化界面。最后, 对试验和理论分析结果进行了对比, 结果表明方法合理, 精度满足要求。

1 基本方程推导

本课题组已完成的 3 根预应力钢箱高强混凝土组合梁的横剖面结构图如图 1 所示。混凝土板开裂前, 钢筋应力很小, 扭矩全部由混凝土翼板和钢箱梁共同承担, 可按弹性工作状态分析; 但临近开裂时, 需考虑混凝土塑性发展引起的刚度降低。混凝土板开裂后, 把配有纵筋和箍筋的混凝土翼板实心截面假想成箱形截面进行受力分析。在外加的预应力与扭矩的双重作用下, 翼板中纵筋承受的拉力最大, 所以在复合受力下纵筋是翼板的极限强度的控制因素, 其它影响因素还有混凝土开裂后纵筋内力重分布以及纵筋与箍筋的配筋强度比等。试验表明, 全过程分析时可以认为整个过程中钢箱梁和混凝土板协同工作。

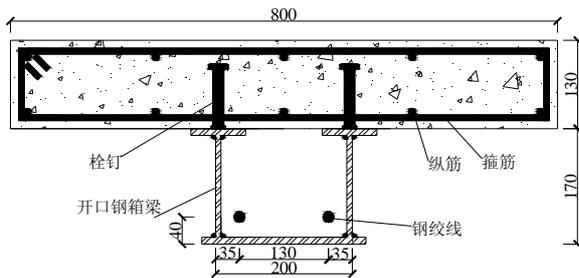


图 1 试验梁截面参数 /mm
Fig.1 Details of specimens

1.1 受力平衡条件

依据空间桁架理论计算模型的基本假定, 由受力平衡条件, 扭矩 T_c 与混凝土斜压杆倾角 α 、等效壁厚 t_e 以及斜压杆受压区混凝土平均压应力 s_c 之间的关系可由下列方程表达, 图 2 给出了空间桁架理论计算模型。

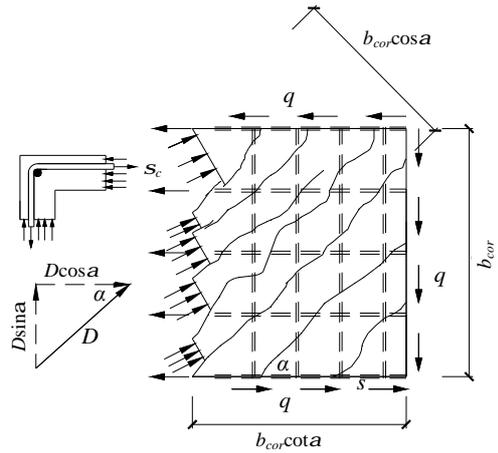


图 2 空间桁架模型计算简图

Fig.2 Spatial truss model with variable angle

根据力矩平衡有:

$$T = 2qA_{cor} \tag{1}$$

作用于侧壁的剪力流 q 所引起的桁架内力斜压杆的总压力为 D , 由静力平衡条件可知:

$$Dsina = qb_{cor} \tag{2}$$

混凝土斜压杆平均压应力为:

$$s_c = \frac{D}{b_{cor} \cos \alpha t_e} \tag{3}$$

混凝土斜压力纵向分量与纵筋内力平衡方程:

$$A_s s_{ys} - N = s_c t_e u_{cor} \cos^2 \alpha \tag{4}$$

混凝土斜压力横向分量与箍筋拉力平衡方程:

$$A_{vt} s_{yv} = s_c t_e s \sin^2 \alpha \tag{5}$$

式中: q 表示剪力流; A_{cor} 、 u_{cor} 分别表示剪力流中心线所围区域的面积和剪力流路线所围成面积的周长; s 表示箍筋间距; s_c 表示混凝土斜压杆平均压应力; A_s 、 A_{vt} 分别表示纵筋总截面面积和箍筋单肢截面面积; s_{ys} 、 s_{yv} 为纵筋和箍筋应力; α 表示斜压杆倾角; N 表示预应力张拉使纵筋产生的总拉力。

1.2 几何条件

箱形截面梁受扭时, 比拟为空间桁架的混凝土斜压杆, 不仅承受轴压力作用而且受弯, 其表面呈双曲抛物面形状。利用几何关系可以导出斜压杆弯曲曲率 y 与组合梁扭率 q' 之间的关系为 $y = q' \sin 2\alpha$ 。假定混凝土斜压杆的压应变沿受压区有效高度 t_e 呈线性分布, 并将斜压带条混凝土表面应变记为 e_{ds} , 有 $e_{ds} = y t_e$ 。由变形体虚功原理, 求得扭率 q' 与箍筋应变 e_{yv} 、纵筋应变 e_{ys} 和混凝土压应变 e_c 之间的协调关系^[5]:

$$q' = \frac{u_{cor}}{2A_{cor}} \left(e_{ys} \cot a + e_{yv} \frac{u_{cor}''}{u_{cor}} \tan a + \frac{2e_c}{\sin 2a} \right) \quad (6)$$

由扭转变形最小值条件, 即 $\frac{dq'}{da} = 0$, 得出:

$$\tan^2 a = \frac{e_c + e_{ys}}{e_c + e_{yv} u_{cor}'' / u_{cor}} \quad (7)$$

由式(4)、式(6)和式(7)得:

$$e_{yv} = \frac{e_{ds} A_{cor} s_c s}{2u_{cor}'' A_{vt} s_{yv}} - \frac{u_{cor}}{u_{cor}''} e_c \quad (8)$$

由式(5)、式(6)和式(7)得:

$$e_{ys} = \frac{e_{ds} A_{cor} s_c}{2(A_s s_{ys} - N)} - e_c \quad (9)$$

1.3 高强混凝土应力-应变关系

高强混凝土受拉的应力-应变关系, 本文采用下式^[6]:

$$s_l = f_{tk} \left(1.2 \frac{e}{e_{lp}} - \left(\frac{e}{e_{lp}} \right)^6 \right), \quad 0 < e \leq e_{lp} \quad (10)$$

式中: e_{lp} 为混凝土剪切状态下峰值拉应力处的拉应变; f_{tk} 为受拉混凝土应力-应变曲线中的峰值应力, 取混凝土轴心抗拉强度。

本文混凝土受压软化方程以文献[7]的高强混凝土应力-应变曲线为基础, 修正系数仍然采取 Collins 的经验系数^[8], 公式如下:

$$s_c = \begin{cases} f_{ck} \left(1.115 \frac{e_c}{e_0} + 0.26 \left(\frac{e_c}{e_0} \right)^2 - 10.375 \left(\frac{e_c}{e_0} \right)^3 \right), & e_c \leq e_0 / I \\ \frac{f_{ck}}{I} 0.498 \left(1 \frac{e_c - 1}{e_0} \right), & e_c > e_0 / I \end{cases} \quad (11)$$

其中系数 I 按下式计算:

$$I = \sqrt{\frac{e_{ys} + e_{yv} + 2e_0}{e_0}} - 0.3 \quad (12)$$

I 与纵筋拉应变 e_{ys} 和箍筋拉应变 e_{yv} 有关, I

的倒数 $\frac{1}{I}$ 称为软化系数。

1.4 钢筋应力-应变关系

钢筋应力-应变关系采用理想弹塑性模型。

$$s_i = \begin{cases} E e_i, & e_i \leq e_{yi} \\ E e_{yi}, & e_i > e_{yi} \end{cases}, \quad i = ys, yv \quad (13)$$

式中: e_i 、 e_{yi} 分别为钢筋应变与屈服应变。

2 计算方法

根据前面推导的平衡方程和几何条件, 已知纵筋初始预拉应力、混凝土和钢筋应力-应变关系曲线, 就可以得到预应力钢箱高强混凝土组合梁扭矩和扭转变形之间的关系, 并得到钢筋内力情况。需要说明的是, 空间桁架模型适用于开裂后斜裂缝已经形成的情形, 对于混凝土开裂前的扭转不能由此理论得出。开裂前的计算关系式为:

预应力钢箱高强混凝土组合梁抵抗扭矩能力可表示^[9]为:

$$T = T_c + T_s \quad (14)$$

式中, T_c 、 T_s 分别表示开裂前混凝土翼板和钢箱梁承担的扭矩。

考虑开裂前预拉应力的影响, 将 $t = g s_l$ 代入

式 $t = \frac{T_c}{a_s b_c h_c^2}$ 中, 可得:

$$T_c = a_s b_c h_c^2 g s_l \quad (15)$$

扭率计算公式:

$$q' = \frac{a_s g s_l}{K_1 G_c b_s h_c} \quad (16)$$

组合箱形截面上的剪力流连续^[10], 钢箱梁所承担的扭矩 T_s 可以表达为:

$$T_s = 2h_s b_s g s_l h_c \quad (17)$$

式中: a_s 、 b_s 按截面尺寸 h/b 比值查 St.Venant 系数表求得; g 取值见文献[11]。 K_1 为构件临近开裂时, 混凝土塑性性能影响的纯扭刚度修正系数, 当 $s_l < 0.85 f_{tk}$ 时, $K_1 = 1$; $0.85 f_{tk} < s_l < f_{tk}$ 时, $K_1 = 0.65$ 。

2.1 混凝土平均斜压应力 s_c 及合力作用点处压应变 e_c 的计算

如图 3 所示, 令 $e = \frac{t_e - z}{t_e} e_{ds}$, 则有:

$$s_c t_e = \int_0^{t_e} s(z) dz = -\frac{t_e}{e_{ds}} \int_0^{e_{ds}} s \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de$$

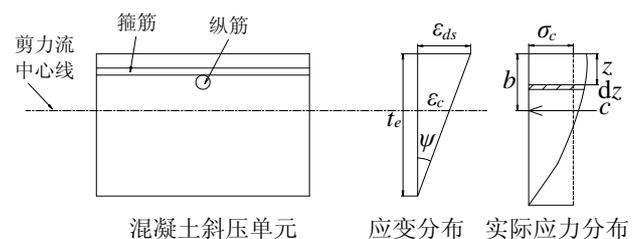


图 3 混凝土斜压杆应力及应变图

Fig.3 Stress and strain distribution of compressive concrete

混凝土受压区的截面应力对翼板外表面取矩:

$$M = \int_0^{t_e} zS(z)dz = -\frac{t_e}{e_{ds}} \int_0^{e_{ds}} \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) S \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de \quad (18)$$

合力作用点翼板外表面距离为:

$$b = \frac{M}{S_c t_e} = \frac{\int_0^{e_{ds}} \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) S \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de}{\int_0^{e_{ds}} S \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de} \quad (19)$$

于是,合力作用点处压应变 e_c 为:

$$e_c = \left(1 - \frac{\int_0^{e_{ds}} \left(1 - \frac{e}{e_{ds}} \right) S \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de}{\int_0^{e_{ds}} S \left(t_e - \frac{e}{e_{ds}} t_e \right) de} \right) e_{ds} \quad (20)$$

2.2 有效厚度 t_e 与纵筋内力 s_{ys} 和箍筋内力 s_{yv} 之间的关系

可由式(4)和式(5)导出:

$$t_e = \frac{A_s s_{ys} - N}{u_{cor} S_c} + \frac{A_v s_{yv}}{S S_c} \quad (21)$$

根据上面的方程,就可以给出开裂前和开裂后预应力钢箱高强混凝土组合梁纯扭性能全过程分析的计算步骤:

1) 输入截面几何尺寸、配筋、材料性能和预应力张拉的原始数据;

2) 从 $e'_{ds} = 0$ 开始,以一定步长为增量,由式(14)~式(17)求出开裂前扭矩和扭率。当达到峰值主拉应变时,可求得开裂扭矩 T_{cr} 和 q'_{cr} ;

3) 设定初始混凝土斜压应变 e_{ds} , 输入假定的 t_e ;

4) 采用软化的混凝土应力-应变关系,由合力点处压应变计算式(20)、式(11)和式(12)求得混凝土平均斜压应力 s_c ;

5) 由式(8)和式(9)分别求出 e_{yv} 和 e_{ys} ; 根据钢筋的应力-应变关系式,求出 s_{yv} 、 s_{ys} ;

6) 由式(21)计算 t_e , 并与初值比较,若精度不够,取其作为初值重复3)步~5)步,直到获得所要求的精度为止;

7) 由式(7)计算斜压力倾角 α 值,由式(6)计算 q' ;

8) 求出 T_c 、 T_s 和 T 。

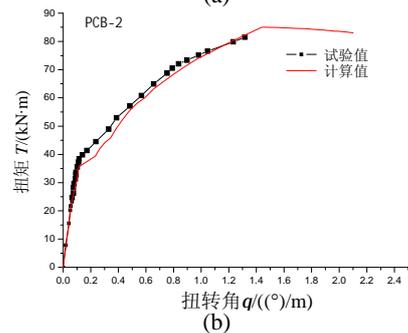
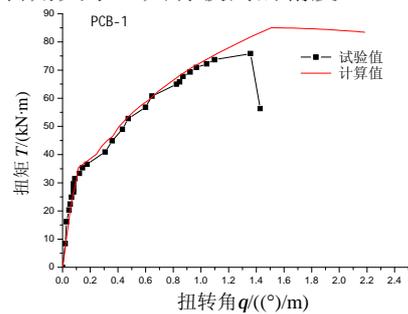
计算过程中,以一定的步长赋给一系列的 e_{ds}

值,对每个步长重复上面的计算步骤,就可以得到扭矩-扭率关系曲线。

3 全过程分析计算结果

本文根据上述方法对已完成的3根纯扭的预应力钢箱高强混凝土组合梁进行了非线性全过程分析,全过程计算程序得到的数据分为开裂前和开裂后两部分。试验结果和理论分析表明,预拉应力对箍筋应变值几乎没有影响,而对纵筋应变影响明显,预拉应力越大,纵筋初始拉应变越大,相当于削弱了原有纵筋截面面积,纵筋达到屈服状态也越快。预拉应力对开裂扭矩值影响比较明显,预拉应力越大,构件开裂时开裂扭矩越小;而预拉应力对极限扭矩值影响不大。

图4给出了3根预应力钢箱高强混凝土组合梁计算的扭矩-扭转角变形曲线与实测曲线的对比。从图4中可以看出,开裂前计算曲线和实测曲线基本吻合,计算曲线与实测曲线在开裂后的变化趋势基本上一致。极限扭矩理论计算值比实测值偏大,主要原因是:理论计算时主要以应变做为控制变量,并且没有考虑试验装置对组合梁约束的不利作用,而试验时以荷载做为控制变量,接近极限荷载时,变形发展很快,不能保证变形均匀发展。由于试验受到试验加载装置和量测设备的影响 PCB-2 和 PCB-3 没有量测到下降段的数据。本文建议的非线性方法,能够计算出纯扭作用下的预应力钢箱高强混凝土组合梁从开始受荷到破坏整个受荷过程的扭矩-扭转角关系,具有较高的精度。



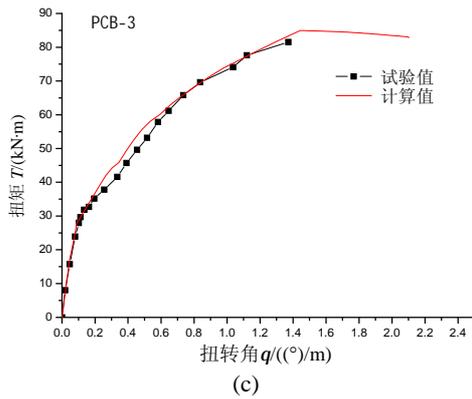


图4 计算扭矩-扭转角关系曲线与试验曲线比较

Fig.4 Comparison of calculated torque-twist curve with testing torque-twist curve

4 结论

通过预应力钢箱高强混凝土组合梁受扭的全过程分析可以看出：开裂前组合梁处于弹性阶段，采用弹性方法就可以求解；开裂后，根据空间桁架模型理论，利用简化算法，通过计算机的迭代，便能得出预应力钢箱高强混凝土组合梁受扭的各参数的变化曲线。本章通过平衡、协调条件和本构关系得出的一系列计算公式和提出的简化算法，概念清晰、实用；采用VB制作的可视化界面，使得计算便捷；全过程分析计算结果具有较高的精度。

参考文献：

- [1] Singh R K, Mallick S K. Experiments on steel-concrete beams subjected to torsion and combined flexure and torsion [J]. *India Concrete Journal*, 1977, 51(1): 24—30.
- [2] Ray M B, Mallick S K. Interaction of flexure and torsion in steel-concrete composite beams [J]. *India Concrete Journal*, 1980, 54(3): 85—94.
- [3] 丁金城, 康谷贻. 轴力作用下钢筋混凝土构件扭转性能全过程分析[J]. *建筑结构学报*, 1987, 8(1): 1—10.
Ding Jincheng, Kang Guyi. Complete response process analysis of torsional behavior in reinforced concrete member under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 1987, 8(1): 1—10. (in Chinese)
- [4] 胡少伟, 聂建国, 朱林森, 罗玲. 钢-混凝土组合梁受扭性能全过程分析[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(4): 435—454.
Hu Shaowei, Nie Jianguo, Zhu Linsen, Luo Ling. Complete history analysis on torsional performance of composite steel-concrete beams [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2004, 21(4): 435—454. (in Chinese)
- [5] 张立新, 康谷贻. 开裂预应力混凝土构件扭转性能的全过程分析[J]. *天津大学学报*, 1987(4): 1—10.
Zhang Lixin, Kang Guyi. Analysis of complete response process of cracked prestressed concrete member under torsion [J]. *Journal of Tianjin University*, 1987(4): 1—10. (in Chinese)
- [6] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 2002.
GB 50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. 2002. (in Chinese)
- [7] 李惠. 高强混凝土及其组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Li Hui. High strength concrete and its application in composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [8] Hsu T T. Torsion of reinforced concrete [M]. Van Nostrand Reinhold Company Ins, 1985.
- [9] 胡少伟. 组合梁抗扭分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Hu Shaowei. Torsional analysis and design of composite steel-concrete beams [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 聂建国, 唐亮, 胡少伟. 钢-混凝土组合箱梁的抗扭强度[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(1): 1—11.
Nie Jianguo, Tang Liang, Hu Shaowei. Torsional strength of steel-concrete composite box girders [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(1): 1—11. (in Chinese)
- [11] 陈亮. 预应力组合箱梁受扭与复合弯扭性能试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009.
Chen Liang. Experimental study on prestressed Steel-HSC composite box beams under torsion & combined bending and torsion [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese)