

基于折线先张法的预应力混凝土箱梁计算分析

唐芳

湖南城建职业技术学院, 湖南 湘潭 411101

摘要: 依据折线预应力混凝土相关理论与箱梁仿真分析, 得出折线张法预应力混凝土预压应力箱梁承载能力计算相关公式, 从而为折线先张法预应力箱梁工程应用提供理论依据。通过对梁箱模型的建立与单元划分、参数设定与负载与规范条件等方面的方法对预应力混凝土箱梁仿真分析, 再通过实验的方法对折线张法预应力混凝土箱梁正截面受弯承载力进行分析, 从而获得折线张法预应力混凝土箱梁正截面受弯承载力、受剪承载力、以及开裂矩与抗裂验算计算方法。结果表明, 开裂弯矩实际检测值比计算的值更大, 说明折线先张法预应力混凝土开裂弯矩可以根据混凝土结构设计有关公式进行核算, 然后还具备一定的抗裂储备。

关键词: 折线先张法; 预应力混凝土箱梁; 计算分析

中图分类号: G808.16

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)04-0629-04

Calculation and Analysis on Prestressed Concrete Box Girder Based on Broken Line

TANG-Fang

Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411101, China

Abstract: To analyze the broken line prestressed concrete box girder based on the related theory and simulation, draw the line of pre tensioned prestressed concrete compressive bearing capacity of box beam calculation formula, which provides a theoretical basis for folding first - tensioned box girder engineering application. Methods: analysis of the prestressed concrete box girder by simulation method and unit division, set up parameters of the box girder model and load and standard conditions, and then through the experimental method of line tensioned prestressed concrete box beam flexural capacity analysis, the flexural capacity, shear bearing capacity, cracking moment and crack resistance of the prestressed concrete box girder with broken line method are obtained. The results showed that the cracking moment of the detected value than the calculated values, indicating the line of pretensioned prestressed concrete cracking moment according to the concrete structure design of the formula for accounting, and also has certain anti cracking reserve.

Keywords: Broken line; prestressed concrete box girder; calculation and analysis

预应力混凝土最先在十九世纪中期开始的, 通过美国人杰克逊使用的钢筋制作的混凝土楼板, 是混凝土最初的使用形态, 在经过二十多年后德国人将预应力的钢丝加入到了混凝土中, 可以制作出梁板, 这是混凝土制作的第一次创新, 在十九世纪末, 奥地利的蒙特尔对预应力的混凝土做了相关的研究, 第一次实现了预应力与外荷载之间的拉力抵消。后又经过半个世纪的发展, 直到上个世纪四、五十年代, 由于经过第二次世界大战, 导致全球各国的钢材非常缺乏, 从而预应力混凝土开始得到广泛。从此之后混凝土应用于建筑、桥梁、公路等各个领域^[1-3]。

1 折线先张法预应力混凝土构件的特点

折线先张法预应力混凝土构件的特点主要如下:

(1) 钢绞线折线构件比传统直线构件更能适应比较变化复杂的情景, 受力性较合理, 也能增加结构跨度, 还能对混凝土任何斜裂缝进行阻止; 提高抗剪性能而且促进腹板的厚度减少, 可以更好地改变结构性能, 对于混凝土构件的使用寿命提升具有重要的意义^[4]; (2) 当钢筋数量配置情况相同的时候, 不需要埋藏相关的管道位置, 截面的有效高度一般比传统的直线高度要大, 与后张法预应力梁比较来说, 折线先张法预应力梁的承载能力更强, 而且具有更好的抗跌性, 在开展大量生产的时候折线梁的造价成本一般不高。

2 预应力混凝土箱梁仿真分析

2.1 梁箱模型的建立与单元划分

为了对预应力混凝土箱梁结构的受力情况进行很好地表述, 使有实体力筋法进行仿真建模, 也

收稿日期: 2017-02-14

修回日期: 2017-04-13

作者简介: 唐芳(1975-),女,硕士,副教授,主要从事建筑力学、建筑结构的教学与研究. E-mail:tangf123456@126.com

数字优先出版:2017-07-19 <http://www.cnki.net>

就是把混凝土结构与预应力钢筋在 ANSYS 中依次建模，并从中进行网格划分，之后把混凝土单元节点与钢筋进行耦合，而没有考虑到混凝土与钢筋混两者之间的有关移动与粘连，其结构型上的预应力是经过降温法而实现的^[3]。

需要提醒的是，在混凝土模型在单元进行划分时，要保证截面板的厚度都要分成上、中、下三层，再在每层之间依据混凝土布置的钢筋的实际情况，钢筋每隔一段距离处设置预应力钢筋单元或箍筋，这样做的目的是能够对混凝土薄壁箱梁的截面特殊性做出合理的分析，从而计算出较为准确的数据。具体详见图 1 混凝土钢筋架模型图，图 2 箱梁仿真模型图。

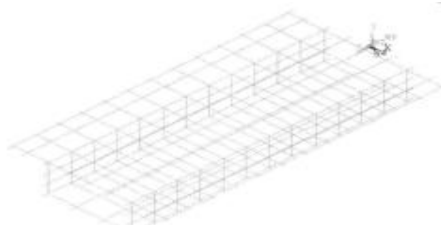


图 1 混凝土钢筋架模型图

Fig.1 The model of reinforced concrete frame

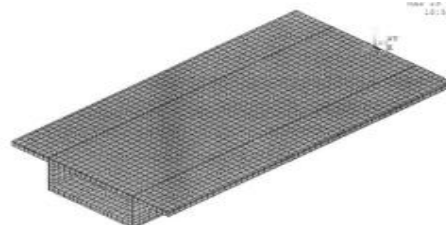


图 2 箱梁仿真模型图

Fig.2 Simulation model of box girder

2.2 负载和规范条件

把筒支箱梁作为分析模型，在 ANSYS 仿真过程中，对此箱梁模型的一侧支座进行添加 X、Y、z 三个方向规范约束，而另一侧的支座只添加 X、Y 两个方向的规范约束。

在正式实验时，箱梁上都应使用较为集中的力量施载。为了使混凝土钢筋构件受力情况得到较真实的体现，应考虑在加载处的富有弹性的垫板上，使用局部范围内的均布加载方法。其作用是为了防止此处会出现应力过分集中的现象产生。

其加载的步骤是第一步使用降温法，对预应力进行一次性集中加载，当然加载时还要对箱梁自身的重量不能忽略；第二步是对混凝土箱梁加载使用二点对称的加载的方法进行加载。在整个仿真过程中，是采用荷载步对加载整个过程进行模拟，使用的荷载步具体见表 1。

表 1 荷载 (单位: 千牛)
Table 1 Load (Unit: KN)

荷载步 Load step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
荷载 Load	预应力	自身重量	20.01	39.98	59.95	80.05	99.97	120.00	140.01	179.94	220.02	239.97	280.04	319.99	359.97	400.00

2.3 关于参数设定

在模拟钢筋混凝土的 Solid65 中，对有限元模型裂缝面分布状况是由闭合裂缝剪力传递系数 β_c 与张开裂缝剪力传递系数 β_t 来进行体现的。此文的闭合裂缝剪力传递系数 β_c 为 0.950，则闭合裂缝剪力传递系数 β_c 为了 0.500。收敛准则是主要是使用位移收敛的形式，其收敛精确度很高，设定为 0.005。运用牛顿-拉夫逊法，希望能够取得更加精准的荷载-位称曲线。其在进行计算时，经过 LNSRCH 命令实现线性搜索来使收敛的速度变得更快^[5,6]。

2.4 方案剖析

在 ANSYS 分析过程中，混凝土开裂与压缩之前，此构模型默认为线性应力变化关系。假如要对预应力混凝土的全过程进行非线性分析，这过程主要是指预应力加载到进行破坏的整个过程，这明显是不够的。此文主要是对预应力混凝土箱梁结构的有限元分析，采取压碎开关设置与不一样的本构关系进行融合，以便希望能够取得最好的的分析方案。

在对 ANSYS 分析中，在混凝土还没有正式裂开时，把整个箱梁模型作为分析对象，在结构加载的后期，使用四分之一的对称模型加以分析，其原因是由于随着荷载的力量变大，混凝土则快速地进入非线性工作时期，这个时候，如果对混凝土开裂进行考虑，则单元迭代的次数就会提升，收敛起来就相当困难了。

2.5 结果分析

表 2 不同方案的跨度挠度与极限荷载值与试验值的比较统计表
Table 2 Comparison of span deflection, ultimate load value and test value in different projects

	方案 1 Project 1	方案 2 Project 2	方案 3 Project 3	方案 4 Project 4	实验 Test
跨中极限挠度	1.698	1.901	4.598	4.500	4.702
跨中极限荷载	379	386	336	338	349

从表 2 中可知,在对荷载分析时,使用方案 1、2 进行有限元分析时,发现混凝土箱梁极限荷载比试验的值要大很多,其原因有可能是本构关系中刚度太强。当本构关系使用 MISO 即多线性等向强化模型时,与压碎开关状态无关,实测极限荷载与计算极限荷载两者相近,区别不大,它们吻合度良好。本文在 ANSYS 分析中,发现如果对压碎进行考虑,计算难度加大,不易收敛。所以,进行全面考虑先择方案 4 有限分析较科学。

3 折线张法预应力混凝土预压应力箱梁承载力的计算

3.1 正截面受弯承载力

通过实验数据分析得知,折线先张预应力混凝土的正截面弯矩计算方法,可以根据混凝土的结构设计有关规定进行。根据本次实验 1200 cm 的箱梁高度分析,认为这是第一类的 T 形截面图,其受弯承载力的计算如图 3。

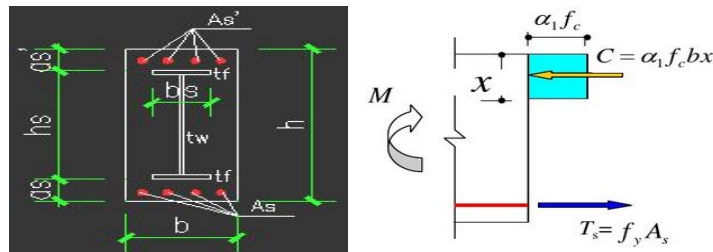


图 3 梁箱受弯承载力计算简图

Fig.3 Schematic diagram of flexural bearing capacity of box girder

根据平衡条件,可以计算出先张预应力混凝土的计算方式:

$$a_1 f_c b_f' x + A_p' \sigma_p' + A_s' f_y' = A_{p1} f_{py} + A_{p2} \zeta f_{py} + A_s f_y \quad (1)$$

$$M \leq a_1 f_c b_f' x (h_0 - \frac{x}{2}) + A_p' \sigma_p' (h_0 - a_p') + A_s' f_y' (h_0 - a_s') \quad (2)$$

其中,(1)、(2)式中梁底受拉非应力钢筋为 A_s 、直线形顶预应力筋到截面底边沿距离为 A_{p1} 、折线形预应力筋合力点到截面底边缘的距离为 A_{p2} ,截面的有效高度是 h_0 ;梁顶受压区非预应力钢筋到截面上边缘的长度为 a_s' ,预应力筋力点距离截面上边缘的长度是 a_p' , (1)、(2)式中受拉应力的钢筋截面为 A_s ,抗拉强度的设计值是 f_y ;非预应力钢筋的截面面积大小为 A_s' ,抗压强度大小为 f_y ,根据需要在受拉区的预应力筋的截面面积是 A_p' ,受弯承载力计算的应力值是 σ_p' ,混凝土轴心的抗压强度是 f_c ,计算系数是 a_1 。

3.2 关于受剪承载力分析

当前有很多因素会影响混凝土的构件,受到破坏的原理比较复杂,全球对剪切构件原理的认识是不一致的,而且没有获得比较完善模型。在规范混凝土的构件受到了承载力计算公式与考虑的原因在全球各国也是不一样的,大部分使用计算方法是根据半试验结果进行分析和半经验所得到公式,我国公路混凝土和预应力的桥涵设计方法如下^[7,8]:

$$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{sb} + V_{pb} \quad (3)$$

$$V_{cs} = a_1 a_2 a_3 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P)} \sqrt{f_{cu}} \rho_{sv} f_{sv} \quad (4)$$

$$V_{sb} = 0.75 \times 10^{-3} f_{sd} \sum A_{sb} \sin \theta_s \quad (5)$$

$$V_{pb} = 0.75 \times 10^{-3} f_{pd} \sum A_{pb} \sin \theta_p \quad (6)$$

其中, V_{cs} :斜截面内部混凝土与和箍筋共同承受力大小; V_{sb} :弯起的非预应力钢筋承受的剪力; V_{pb} :弯起的预应力筋承受的剪力; a_1 :异号弯矩影响系数; a_2 :预应力影响系数; a_3 :受压翼缘影响系数; P :纵向受拉预应力筋与非预应力钢筋百分比概率; P_{sv} :箍筋的配筋率; f_{sv} :受剪承载力计

算时箍筋; f_{sd} : 弯起的非预应力筋; f_{pd} : 弯起的预应力筋抗拉强度设计值; b : 截面腹板宽度; h_0 : 截面腹板有效高度; θ_s : 非预应力筋; θ_p : 预应力筋的弯起角。

3.3 关于开裂矩与抗裂验算

预应力混凝土梁在受荷之前, 在混凝土的截面受控区建立了 σ_{pc} (预应力), 如果存在外力荷载, 则 σ_{pc} 完全的抵消荷载弯矩在梁截面形成的拉应力, 有利于混凝土出现拉应力, 在出现外力作用的时候, 如果截面受拉区的混凝土应力等于 0 的时候也叫做消压状态, 相关的弯矩也叫做消压弯矩 M_0 。因为荷载在不断的增加时, 受拉区的边缘混凝土中会出现拉力, 如果抗拉强度最终不断增加到 f_{tk} 时, 则梁就是一种开裂的状态。这时弯矩也就叫做开裂弯矩 M_{cr} , 因为有预应力 σ_{pc} 的存在, 预应力混凝土梁开裂弯矩就有了很大提升, 抗裂性能得到了不断的提升, 根据应力的不同, 开展不同的调整工作, 因为在荷载的下端不会出现各种拉力, 又不会产生开裂的现象、或者产生约束性开裂的目标, 根据以上分析得知混凝土梁的开裂弯矩^[9,10]。可以实现以下计算公式:

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk})W_0 \tag{7}$$

其中, W_0 : 换算截面抗裂验算边缘的弹性抵抗矩; σ_{pc} : 在预应力损失全部减除以后, 预加力在抗裂验算边缘形成的混凝土预压应力; f_{tk} : 混凝土抗拉强度标准值; γ : 混凝土构件的截面塑性抵抗性影响系数。

混凝土结构设计规范 γ 依照公式 (8) 计算: $\gamma = (0.7 + \frac{120}{h})\gamma_m$ (8)

如果截面高度 h 小于 400 mm 时候, 取高度为 400 mm, 如果截面高度高于 1600 mm 的时候, 混凝土的构件抗拒设计系数的值为 γ_m , 对于箱形或“T”截面, 当 b_r/b 小于等于 2 时, 则: $r_m=1.45$ 。

表 3 开裂弯矩实测值与计算值的比较

Table 3 Comparison of measured and calculated values of craze bending moment

实测开裂弯矩 Actual measurement for craze bending moment	混凝土规范计算 Normal calculation for concrete	实测值/计算值 Actual measured value/calculated value
M_{cr}^{c2}	M_{cr}^{c1}	$M_{cr}^{c2} / M_{cr}^{c1}$
445.410	374.900	1.1881

从表中可以得出开裂弯矩值比计算的值更大, 这就体现了折线先张法预应力混凝土开裂弯矩可以根据混凝土结构设计有关公式进行核算, 然后还具备一定的抗裂储备^[11]。

4 结论

本文首先对折线预应力混凝土的理论进行了简要论述, 然后对预应力混凝土箱梁仿真进行分析, 最后从正截面受弯承载力、受剪承载力、开裂矩与抗裂验算等方面提出计算方法相关建议, 并得出了折线张法预应力混凝土预压应力箱梁承载能力计算相关公式。从而为折线先张法预应力箱梁工程应用提供理论指导。

参考文献

[1] 李国平. 预应力混凝土结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000

[2] 陈汉昌, 刘立新, 宋明慧, 等. 折线先张梁中钢绞线力学性能的试验研究[J]. 建筑设计, 2010, 41(12): 1108-1111

[3] 刘婷, 孙天荣. 预应力混凝土梁时随全过程分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 55-60

[4] 潘志强, 丁乃庆. 桥梁承载力评定方法的探讨[J]. 水道港口, 2004, 25(1): 54-58

[5] Lin TY, Buns NH. Desing of Prestressed Concrete Structures[J]. Sahu Cement Service, 1964, 17(4): 242-254

[6] Wang XY, Liu LX. Experimental Study on Bending Behavior of Prestressed Concrete Box Beam with Bent-up Tendons[A]//Proceedings of International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2009: 436-443

[7] 谢丽丽, 冯辉, 刘立新, 等. 先张法预应力混凝土梁钢绞线预应力传递长度的实验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(5): 34-36

[8] 孙学先, 延力强, 刘志峰. 箱梁几何参数变化对剪力滞效应的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(1): 29-31

[9] 方志, 曹国辉, 王济川. 钢筋混凝土连续箱梁剪力滞效应试验研究[J]. 桥梁建设, 2000(4): 1-3

[10] 刘芸欣. 钢筋混凝土连续曲线箱梁桥剪力滞效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2004

[11] 李晓芬, 刘立新, 张慧鹏, 等. 折线先张预应力混凝土梁疲劳受力性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015(7): 95-101