

PC 箱梁腹板竖向预应力扩散效应测试分析

赵宝俊^{1,3}, 尹海军^{1,2}, 郝宪武¹, 孟江¹

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710043;

3. 陕西省交通建设集团公司, 西安 710075)

摘要:为了研究箱梁腹板在竖向预应力作用下的应力扩散效应,将箱梁腹板视作狭长矩形薄板,以多对力作用在该薄板模拟腹板在竖向预应力作用下的应力场,导出竖向正应力的解析解,并采用最小二乘法原理得其数值解。引入应力均匀度参数 λ 和应力水平系数 κ ,计算得相应截面的 λ 值和 κ 值,表明 λ 值和 κ 值对竖向预应力筋间距 s 较为敏感;在保证 λ 值和 κ 值大于0.95的前提下计算得适合工程精度的腹板竖向预应力扩散角 α ,并进行多项式拟合。通过实桥测试腹板竖向应力扩散效应,同时采用有限元软件模拟计算,结果表明在竖向预应力筋作用下,腹板应力扩散效应明显,在腹板的上部和下部,两根竖向预应力筋之间存在应力空白区,在腹板中部竖向应力都比较均匀。

关键词:箱梁;腹板;竖向预应力;应力扩散

中图分类号:U443 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2011)06-0079-05

Analysis on PC Box Beam Webs by Vertical Prestress in Consideration of Stress Diffusion

ZHAO Bao-jun^{1,3}, YIN Hai-jun^{1,2}, HAO Xian-wu¹, MENG Jiang¹

(1. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710043, P. R. China;

3. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, P. R. China)

Abstract:In order to study the stress distribution effect of the webs which is under the action of vertical prestress, pairs of forces were acted on a long and narrow rectangular thin plate, and the webs stress field under the effect of vertical prestressing was simulated, with analytical solution of vertical normal stress derived and the numerical solution obtained by the Least-square method. The parameters, λ and κ , were introduced and calculated to describe vertical stress uniformity and stress level, which shows that λ and κ value are more sensitive to webs vertical reinforcement spacing. On the premise of uniformity of vertical prestress and stress level, the fitting diffusion angle of vertical prestress acting on the webs is obtained and fitted by polynomial. Vertical prestress diffusion effect of the webs was tested in bridge site and analyzed by the finite element software. The results show that the webs stress diffusion is obvious, and the stress has a good uniformity at the section of $H/2$ but a bad uniformity at axillary and shore up.

Key words: box-beam; webs; vertical prestress; stress diffusion

大跨度预应力混凝土箱梁施加竖向预应力是防止腹板开裂的重要措施之一,正确估计腹板竖向

预应力在腹板内产生的应力特征,对防止腹板开裂有重要意义。腹板开裂的原因很多,其中一个重

收稿日期:2011-04-06

基金项目:国家自然科学基金(51078306)

作者简介:赵宝俊(1980-),男,博士生,主要从事高墩大跨箱梁桥结构分析研究,(E-mail)qlhighway@126.com。

郝宪武(通讯作者),男,教授,主要从事桥梁结构理论分析研究,(E-mail)hwx1962@126.com。

要原因是竖向预应力设计计算模式没有充分考虑预加力的扩散效应、预压力空白区和应力局部效应^[1-2]。就尺寸而言,箱梁腹板高度与桥轴向跨度存在很大差异,这就使得竖向预应力筋的锚下应力扩散空间明显小于纵向预应力筋,更容易形成应力空白区^[3]。

本文在简化箱梁腹板模型基础上,推导狭长薄板应力在竖向力作用下弹性解析公式,并进行数值拟合,得出适合工程计算的应力扩散角;通过实桥测试腹板应力场扩散效应,同时采用有限元模拟计算验证。

1 矩形薄板模拟计算

用长矩形薄板在一对大小相等方向相反的局部荷载作用下模拟腹板应力场(图1)。同时做如下假定^[4]:1)腹板混凝土沿高度均处于弹性工作状态,叠加原理成立;2)腹板沿厚度方向应力分布均匀;3)不考虑非竖向预应力作用,不考虑竖向预应力筋之间相互影响。

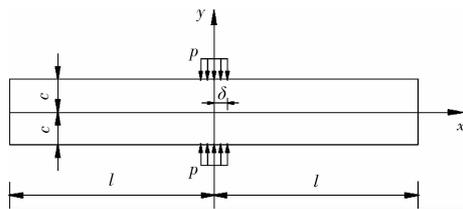


图1 腹板在单根筋作用下计算模式

当薄板的长度相对于高度无穷大时,竖向应力分量的解析表达式为^[5-6]:

$$\sigma_y = -\frac{p\delta}{l} - \frac{4p}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh} \frac{n\pi c}{l} \cdot \sin \frac{n\pi\delta}{l}}{\frac{2n\pi c}{l} + \text{sh} \frac{2n\pi c}{l}} \cdot \left[\left(c \cdot \text{cth} \frac{n\pi c}{l} + \frac{l}{n\pi} \right) \cdot \text{ch} \frac{n\pi y}{l} - y \cdot \text{sh} \frac{n\pi y}{l} \right] \cos \frac{n\pi x}{l} \quad (2)$$

式中: $p = \frac{P}{2b\delta}$ 为均布荷载; δ 为力作用宽度的1/2;

b 为板厚。

假设板很长,即: $\frac{\delta}{l} \rightarrow 0$, (2)式可简化为:

$$\sigma_y = -\frac{2p}{lb} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{n\pi c}{l} \text{cth} \frac{n\pi c}{l} + 1 \right) \cdot \text{ch} \frac{n\pi y}{l} - y \cdot \text{sh} \frac{n\pi y}{l}}{\frac{2n\pi c}{l} + \text{sh} \frac{2n\pi c}{l}} \cdot \cos \frac{n\pi x}{l}$$

$$\text{sh} \frac{n\pi c}{l} \cos \frac{n\pi x}{l} \quad (3)$$

腹板1/2高处的应力状态,代入 $y = 0$ 得:

$$\sigma_y = -\frac{2p}{lb} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{n\pi c}{l} \text{cth} \frac{n\pi c}{l} + 1 \right) \text{sh} \frac{n\pi c}{l} \cos \frac{n\pi x}{l}}{\frac{2n\pi c}{l} + \text{sh} \frac{2n\pi c}{l}} \quad (4)$$

为了便于工程计算,对(4)式数值拟合,取变量 $\eta = \frac{x}{0.5c}$, 其中 x 为计算点到作用点的水平距离。结合桥梁实际参数,取 $c = 1 \text{ m}$, $l = 50 \text{ m}$, $n = 200$, 由于每对竖向预应力钢筋的横向影响范围为 $1.35c$ ^[7], 拟合时,在 $y = 0$ 截面上,距集中力作用点 1.35 m 宽范围内等间距地取5个点,各个点处的 σ_y 由式(4)算得,根据最小二乘法计算原理得拟合公式^[8-9]:

$$\sigma_y = f(\eta) = \frac{p}{cb} (0.385 - 0.0268\eta - 0.748\eta^2 - 0.0273\eta^3 + 0.289\eta^4) \quad (5)$$

用同样的方法,可以得腹板任意高度处的竖向应力。腹板实际受力可简化为多对集中力作用在薄板上,根据公式(5),腹板的竖向正应力为^[10]:

$$\sum \sigma_y = \sum f(\eta) = \frac{p}{cb} \sum (0.385 - 0.0268\eta - 0.748\eta^2 - 0.0273\eta^3 + 0.289\eta^4) \quad (6)$$

2 竖向预应力扩散角

2.1 扩散角定义

由图2可见,计算点A点为截面上应力最大点,B点为最小点。

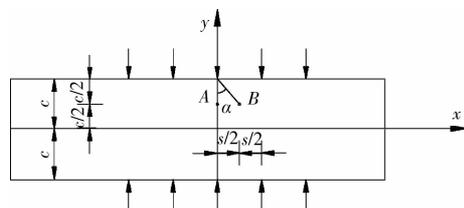


图2 腹板在多对力作用下计算模式

按叠加原理计算得A、B点的应力分别为:

$$\sigma_y(A) = \sum \sigma_y = \sum f(\eta) \quad (7)$$

其中, $\eta = x/0.5c$ ($x = 0, s, 2s, 3s, \dots$, s 为力筋间距)。

$$\sigma_y(B) = \sum \sigma_y = \sum f(\eta) \quad (8)$$

其中, $\eta = x/0.5c$ ($x = 0.5s, 1.5s, 2.5s, \dots$, s 为力筋间距)。

在竖向预应力作用下,引入应力均匀度参数 λ ,

描述腹板某高度处竖向应力分布的均匀程度^[11]。

$$\lambda = \frac{\sigma_y(B)}{\sigma_y(A)} \quad (9)$$

多根预应力筋作用效果叠加以后, B 截面的压应力最小, 力筋间距变大以后更为明显, 引入相对应力水平系数 κ , 描述截面上压应力与平均压应力的相对大小^[12]。

$$\kappa = \frac{\sigma_y}{(P/bs)} \quad (10)$$

在 $x = 0.5s$ 的截面上(2 根竖向筋中间截面)的某点 B 处, 定义 B 点和集中力作用点的连线与 y 轴的夹角为扩散角 α ^[13-14], 如图 2 示。

2.2 扩散角计算

用公式(6)、(9)、(10)计算腹板在不同的竖向预应力间距下, 在 $x = 0.5s$ 处截面上不同高度处 λ 值和 κ 值, 如图 3、图 4 示。当预应力间距与腹板半高之比 $\frac{s}{c} < 0.5$ 时, 截面各个高度应力比较均匀, 且能保持较高的预应力度; 当 $\frac{s}{c} = 0.5$ 时, 仅能保证腹板 1/4 高度处的 λ 值和 κ 值分别度达到 0.95 和 0.96。

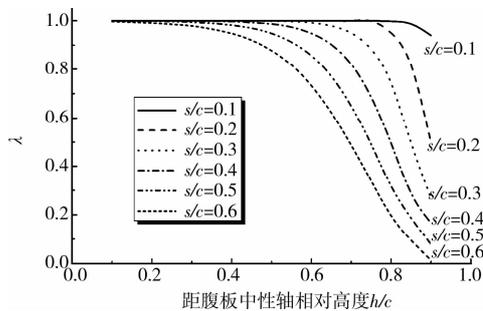


图 3 $x = 0.5s$ 截面不同高度的 λ 值

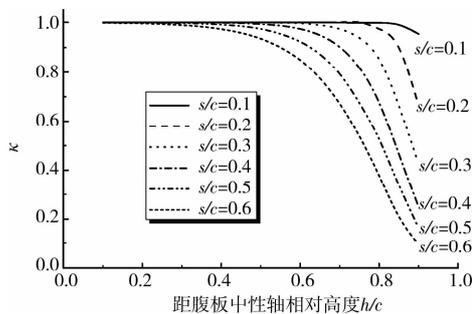


图 4 $x = 0.5s$ 截面不同高度的 κ 值

设 $s = 0.5$ m, 其他参数同前, 计算得扩散角 α 与 λ 值和 κ 值的关系如图 5。当扩散角取 26.2° 时, 计算点的 λ 值为 0.950, κ 值为 0.958。因此, 扩散角采用 26.2° 能满足工程精度。事实上, 上图计算参数取值恰好 $s/c = 0.5$, 在工程实际中, 竖向筋间距一

般都在 $0.3c$ 左右^[15], 这时, 腹板截面应力比较均匀, 整个截面都处于高应力度状态, 这也在图 4、图 5 中得到佐证。另外, 德国规范中应力扩散角按照 26° 计算, 对国内的规范具有很好的借鉴意义^[16]。

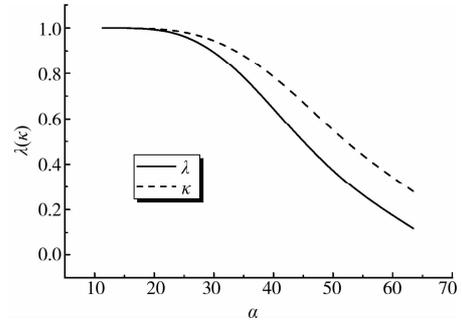


图 5 α - λ 与 α - κ 图

为了便于工程计算, 对上述 2 条曲线进行多项式拟合:

α - λ 公式:

$$\lambda = 0.811 - 0.020\alpha - 3.474e^{-4}\alpha^2 - 5.282e^{-5}\alpha^3 + 1.804e^{-7}\alpha^4 \quad (11)$$

α - κ 公式:

$$\kappa = 1.081 - 0.021\alpha + 0.0013\alpha^2 - 4.171e^{-5}\alpha^3 + 2.936e^{-7}\alpha^4 \quad (12)$$

3 腹板应力场测试

为证明腹板在竖向预应力筋作用下的扩散效应, 依托渭河桥腹板进行测试, 并用 ANSYS 有限元模型模拟分析。有限元模型腹板采用 SOLID45 单元, 竖向预应力筋采用 LINK8 单元, 采用降低预应力筋单元温度的方法施加预应力^[17]。

I-I 断面为相邻两竖向筋中间断面, 图 6 可见, 在竖向预应力筋作用下, 2 根竖向预应力筋之间的横截面存在应力空白区, 腹板应力扩散现象明显。腹板上部应力空白区高度在 0.7 m 左右, 由于上翼缘高度为 0.6 m, 应力空白区实际已进入腹板; 在腹板底部, 由于承托加底板厚度较大, 应力空白区未进入腹板; 在腹板中部, 竖向预压应力都比较均匀。

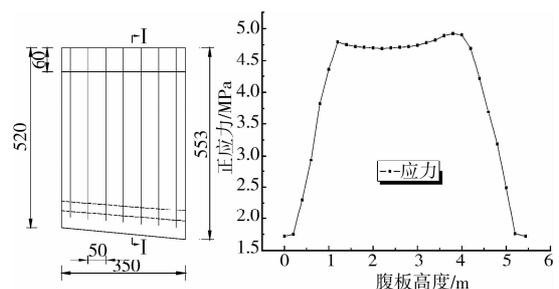


图 6 I-I 断面竖向正应力图

为测试在竖向预应力筋作用下腹板不同高度处应力扩散效应,在沿板高度方向布置 5 个断面进行测试,每个断面布置 9 个应变片(间距 25 cm)(图 7)。

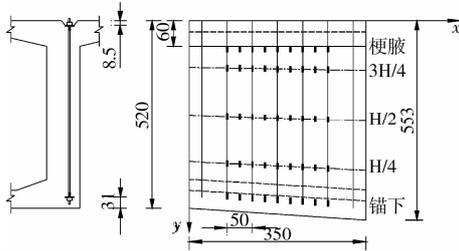


图 7 腹板尺寸及测点布置

对各截面竖向预压应力值进行测量,通过式(11)、(12)计算得 λ 和 κ 值。

表 1 各截面竖向预压应力参数值

截面	扩散角	λ		κ	
		测试值	拟合公式	测试值	拟合公式
梗腋	42.19	0.62	0.65	0.61	0.67
3H/4	26.16	0.95	0.96	0.96	0.97
H/2	18.43	0.98	1.00	0.99	0.98
H/4	21.56	0.96	0.97	0.96	0.98
锚下	33.29	0.39	0.43	0.41	0.47

计算表明印证了扩散角在 26.2° 范围以内时, λ 、 κ 的测试值与数值解吻合较好,公式(11)、(12)仍然适用,证明公式可用于箱梁腹板竖向预应力实际计算,符合腹板预压应力场计算要求,布置竖向预应力筋时可参考。

图 8 为梗腋、H/2 截面竖向正应力的实测值和有限元计算值。可见,实测值和有限元计算值能较好吻合;在梗腋处应力均匀度较差,H/2 处应力均匀度较好。

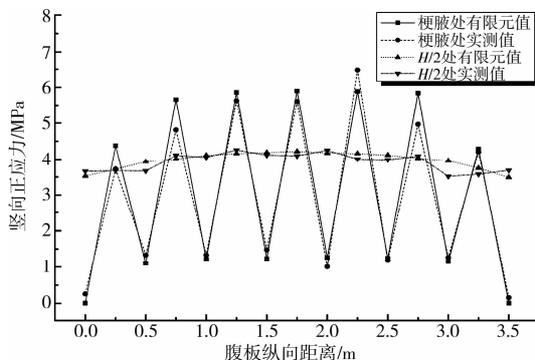


图 8 梗腋、H/2 截面竖向正应力图

4 结语

1)在竖向预应力筋作用下,腹板应力扩散现象明显,在腹板的上部和下部,两根竖向预应力筋之间

的横截面存在应力空白区,在腹板中部,竖向预压应力都比较均匀。

2)从试验结果来看,文中提出的 λ 、 κ 值计算公式应用于实际工程中能够达到工程精度要求,公式可应用于箱梁腹板竖向预应力计算,符合腹板预压应力场计算要求。

3)通过腹板应力场测试,证明在竖向预应力作用下,腹板竖向正应力的扩散规律符合弹性力学原理, λ 、 κ 值随扩散角 α 的增大而减小。当扩散角小于 26.2° 时,各截面的 λ 值趋于稳定,且都在 0.95 左右,按扩散角 26.2° 来确定竖向预应力筋的间距是偏于保守的。

参考文献:

- [1] 施颖,唐苍松,宣纪明. 混凝土箱梁腹板竖向预应力分析[J]. 桥梁建设, 2006,1(1):8-11.
SHI YING, TANG CANG-SONG, XUAN JI-MING. Analysis of vertical prestress applied to webs of concrete box girder[J]. Bridge Construction, 2006, 1(1):8-11.
- [2] ENRIQUE M, ANTONOI A. Temperature and stress distribution concrete box girder bridges[J]. Journal of Structure Engineering, 1990,9(12):32-36.
- [3] 王华,赖泉水,邵旭东. 大跨预应力混凝土箱梁腹板的竖向预应力效应分析[J]. 公路, 2008,8(8):103-106.
WANG HUA, LAI QUAN-SHUI, SHAO XU-DONG. Analysis on big span PC box beam webs by vertical prestress effect[J]. Highway, 2008, 8(8):103-106.
- [4] YOO S K, LEE J H, KIM J H. Load capability enhancement of wonhyou bridge using external PS tendons [J]. KCI J, 1995, 7(6):68-72.
- [5] DO Y M, JONGSUNG S, HONGSEOB O. Practical crack control during the construction of precast segmental box girder bridges [J]. Computers and Structures, 2005,8(25):46-49.
- [6] 黄豪,唐小兵,张开银. 竖向预应力作用效果的数值模拟与预应力损失的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007,10(5):922-924.
HUANG HAO, TANG XIAO-BING, ZHANG KAI-YIN. Numerical simulation on vertical prestressed effect and experimental studies on prestressed loss[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007,10(5):922-924.
- [7] 沈明燕,钟新谷,舒小娟. PC 箱梁桥腹板竖向预应力长期损失测试与研究[J]. 中外公路, 2007,6(12):71-73.

- SHEN MING-YAN, ZHONG XIN-GU, SHU XIAO-JUAN. Analysis and test PC box beam webs by vertical prestress long-term loss [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 6(12):71-73.
- [8] DILGER W H, LANGOHR. Shear design of haunched prestressed concrete box girders of the confederation bridge [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 6(24):38-41.
- [9] 邓志恒, 罗志佳, 林俊. 竖向预应力损失对箱梁腹板斜裂缝影响分析[J]. 公路工程, 2007, 12(6):19-22.
- DENG ZHI-HENG, LUO ZHI-JIA, LIN JUN. Analysis of diagonal cracks in box girder web effected by vertical prestressed loss[J]. Highway Engineering, 2007, 12(6):19-22.
- [10] 王卫锋, 叶敬彬, 林致胜. 施工过程箱梁腹板斜裂缝成因分析[J]. 桥梁建设, 2010, 1(1):32-35.
- WANG WEI-FENG, YE JING-BIN, LIN ZHI-SHENG. Analysis of formation causes of diagonal cracks in box girder web in construction process [J]. Bridge Construction, 2010, 1(1):32-35.
- [11] 徐栋, 孙远, 吴佳璞. 箱梁薄壁效应及腹板开裂成因分析[J]. 桥梁建设, 2009, 4(4):76-79.
- XU DONG, SUN YUAN, WU JIA-PU. Analysis of thin-wall effect and causes of cracking in web of box girder[J]. Bridge Construction, 2009, 4(4):76-79.
- [12] 陈露晔, 吴文明, 陈瑶, 等. 箱梁腹板竖向预应力设置新方法研究[J]. 公路交通技术, 2007, 12(6):48-51.
- CHEN LU-YE, WU WEN-MING, CHEN YAO, et al. Research on new methods for vertical pre-stress setting of box beam webs [J]. Technology of Highway and Transport, 2007, 12(6):48-51.
- [13] 沈明燕, 钟新谷, 舒小娟, 等. 箱梁桥竖向预应力张拉工艺与张拉时机的研究[J]. 施工技术, 2007, 10(10):38-40.
- SHEN MING-YAN, ZHONG XIN-GU, SHU XIAO-JUAN, et al. Research on tension technique and stretching time of vertical prestress in a bridge with box girder[J]. Construction Technology, 2007, 10(10):38-40.
- [14] 尹旭文, 钟新谷. 箱梁竖向预应力孔道对腹板主拉应力的影响分析[J]. 湘潭师范学院学报, 2006, 12(4):58-60.
- YIN XU-WEN, ZHONG XIN-GU. Analysis on impact of box vertical prestressed duct to web tensile stress [J]. Journal of Xiangtan Normal University, 2006, 12(4):58-60.
- [15] 郝付军, 鲁薇薇, 贺华刚, 等. 箱梁预应力施工时腹板竖向正应力研究[J]. 河北交通科技, 2008, 12(4):37-39.
- HAO FU-JUN, LU WEI-WEI, HE HUA-GANG, et al. Study on horizontal stress on the web in construction of pre-stressed box-girder [J]. Hebei Jiaotong Science and Technology, 2008, 12(4):37-39.
- [16] 李正, 韩大章, 戴捷. 悬浇箱梁节段张拉后腹板裂纹成因分析与防治[J]. 现代交通技术, 2009, 6(3):37-40.
- LI ZHENG, HAN DA-ZHANG, DAI-JIE. Analyse and control of cracks of prestressed concrete box girder web[J]. Modern Transportation Technology, 2009, 6(3):37-40.
- [17] GARDENER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 8(2):47-50.

(编辑 王秀玲)