

# 悬臂节段锚下应力状态的计算与分析

邹广林<sup>1</sup>, 李新平<sup>1</sup>, 梁杰<sup>2</sup>

(1.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2.珠海华发实业股份有限公司, 广东 珠海 519300)

**摘要:**从简单的矩形截面偏心受压构件入手, 利用 ANSYS 对悬臂节段锚下截面的上下缘应力状态进行研究。结果表明, 悬臂节段锚下截面的应力状态与材料力学中偏心受压构件的应力状态存在差异, 悬臂节段上下缘的正应力分布和局部承压区与上下缘的距离有关, 在局部承压构件的过渡区域的上下缘存在一个压应力最大点, 且悬臂节段锚下的应力变化过渡区域远超出 1 倍梁高范围。

**关键词:**桥梁; 局部承压; 悬臂节段; 预应力构件; 有限元分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0141-03

在悬臂浇筑桥梁的过程中, 每个节段浇筑后预应力张拉锚固完成的构件实际上相当于一个局部承压的构件, 根据圣维南原理, 近锚固端的应力分布与远锚固端的应力分布有很大不同。根据文献[3], 局部承压构件通常为中心局部承压的受压构件。而悬臂节段施工的顶板预应力束大都锚固在箱梁的顶板与腹板交接处, 对悬臂梁段构成为偏心局部承压的偏心受压构件, 故该梁段上下缘的应力状态与材料力学中一般受压构件的应力状态存在差异。该文采用 ANSYS 有限元软件对悬臂节段锚下应力状态进行数值计算和比较分析。

## 1 局部承压应力状态

如图 1 所示, 构件的截面积用  $A$  表示, 截面形状为正方形, 截面宽度用  $b$  表示; 在构件顶部  $AB$  面中心部分的较小面积  $A_1$  上作用有压力  $N$ , 其平均压应力为  $P_1$ , 该应力从构件的顶部逐渐扩散到全截面上。研究表明, 在离顶面距离约等于截面宽度的横断面  $CD$  上压应力基本呈均匀分布, 并且压应力的集度为  $P < P_1$ , 也就是说, 构件的  $CD$  面以下已属于全截面受压。一般把图 1(a) 中的  $ABCD$  区域称为局部承压区。

局部承压区的应力情况非常复杂。当近似按平面应力状态分析时, 处于局部承压区中的任意点都承受 3 个方向的应力, 即  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau$ 。其中:  $\sigma_x$  为沿  $x$  方向(图 1 中构件横向)的正应力, 在局部承压区  $AOBGFE$  区域,  $\sigma_x$  为压应力, 其他区域为拉应力[见图 1(b)], 在局部承压区  $ABCD$  的中点附近出现最大横向拉应力  $\sigma_{x \max}$ 。  $\sigma_y$  为沿  $y$  方向的正应力,

在局部承压区内, 大部分  $\sigma_y$  都为压应力,  $O_y$  处的  $\sigma_y$  较大,  $O$  点处的最大, 等于  $P_1$ 。当  $b/a$  值较大时, 在构件  $A$ 、 $B$  点附近,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的值都很小, 且都为拉应力。看成空间问题进行分析时, 得到的结果与上述结果类似。

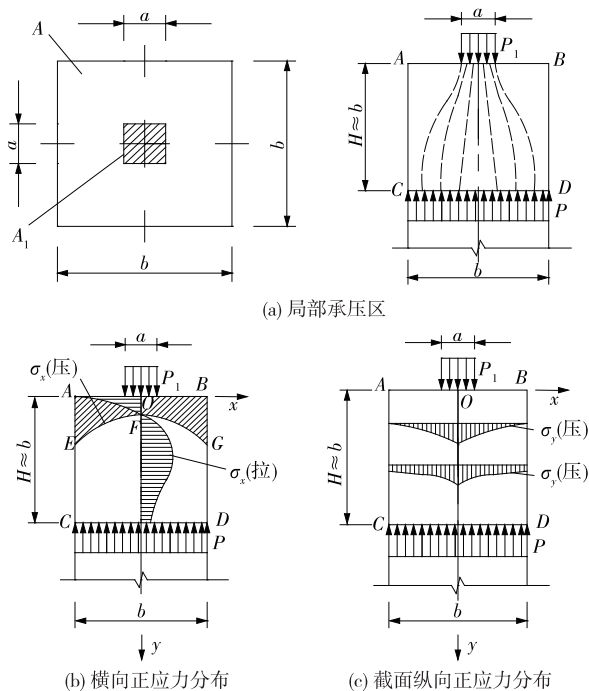


图 1 构件端部的局部承压区示意图

## 2 偏心受压的应力状态计算

鉴于实际工程中预应力砼结构大多是偏心受压构件, 采用矩形截面模拟悬臂节段锚下的受力构件, 研究截面上下缘正应力在纵向上的变化。矩形截面梁的长、宽、高分别为 24、8、3 m, 局部承压区域为边

长 0.5 m 的正方形。规定结构的宽度方向(横向)为  $x$  方向、高度方向(竖向)为  $y$  方向、长度方向(纵向)为  $z$  方向。模型的边界条件为一端( $z=0$  处)固定,材料选择砼 C50,并假定砼为均匀的线弹性材料,其弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.2,局部承压区的平均压应力  $P_1=10$  MPa。除特殊说明外,模型均不考虑重力荷载。模型的偏心受压区中心与截面中心线的距离分别为 0.5 和 1 m,得到 2 个偏心受压模型,分别用 M1 和 M2 表示,模型截面见图 2。由于结构简单,采用映射网格划分方式,单元采用 Solid45,划分网格后的模型见图 3。

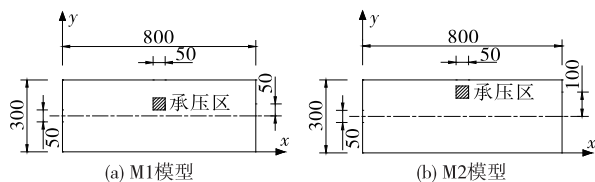


图 2 模型的偏心受压区(单位:cm)

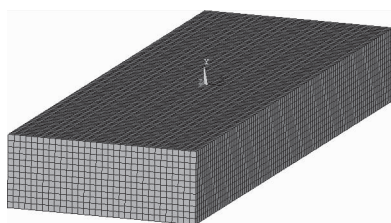


图 3 矩形梁有限元模型

M1 模型局部承压区中心正上方,截面上缘的纵向线记为  $OD_1$ ;承压区中心正下方,截面下缘的纵向线记为  $OE_1$ 。同理,在 M2 模型上的相同位置,两条纵向线分别记为  $OD_2$ 、 $OE_2$ 。 $OD_1$ 、 $OE_1$ 、 $OD_2$  及  $OE_2$  在结构上的位置见图 4,模型计算得到的各条纵向线上正应力  $\sigma_z$  分布见图 5~8(以拉应力为正、压应力为负,下同)。

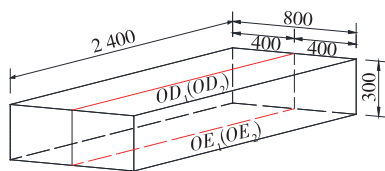


图 4  $OD_1$ 、 $OE_1$ 、 $OD_2$  及  $OE_2$  的位置示意图(单位:cm)

从图 5、图 6 可看出:M1 与 M2 模型截面上缘的正应力变化形式一样,区别在于应力值大小及出现最大压应力的位置不同。 $OD_1$  线上最大应力出现的位置距离承压端约 1.5 m,而  $OD_2$  线上最大应力出现的位置距离承压端约 0.8 m。另外,随着与承压端距离的增大, $OD_1$  线上各位置的正应力最终都

约为 0.2 MPa,而  $OD_2$  线上各位置的正应力最终都约为 0.3 MPa。在距承压端约 9.6 m 范围内, $OD_1$

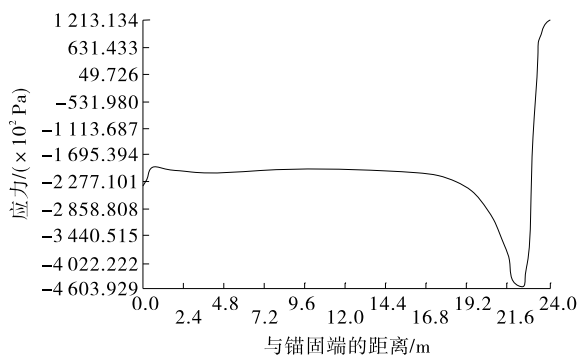


图 5  $OD_1$  线上  $\sigma_z$  的变化

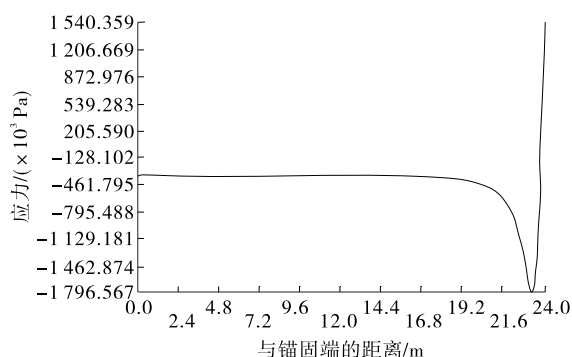


图 6  $OD_2$  线上  $\sigma_z$  的变化

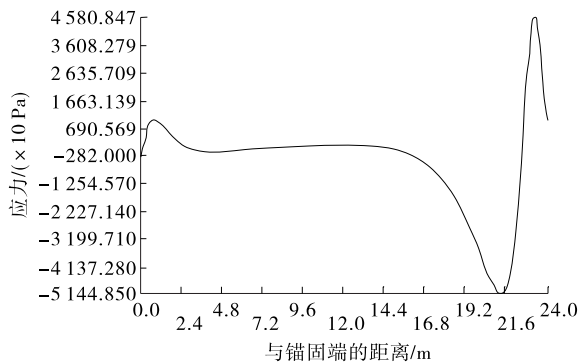


图 7  $OE_1$  线上  $\sigma_z$  的变化

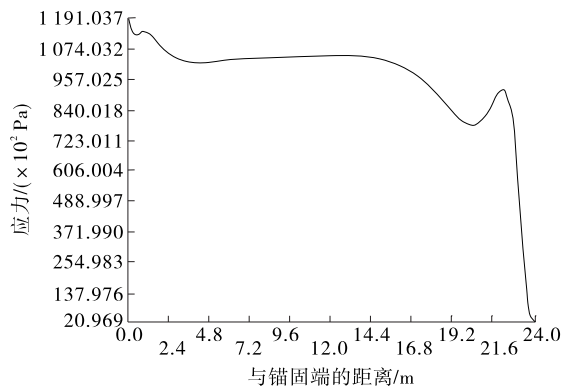


图 8  $OE_2$  线上  $\sigma_z$  的变化

线上应力变化较大,之后出现应力稳定的现象,即应力变化过渡区域约为 9.6 m,远大于一般所认为的 1 倍梁高 3.0 m。在距承压端约 7.2 m 范围内, $OD_2$  线上应力变化较大,之后出现应力稳定的现象,即应力变化过渡区域约为 7.2 m,远大于一般所认为的 1 倍梁高 3.0 m。

从图 7、图 8 可看出:两个模型截面下缘的正应力变化差别较大。M1 模型截面下缘在距承压端一定距离的区域出现拉应力,随后拉应力变为压应力,在距离承压端约 2.8 m 处达到最大值 0.5 MPa。M2 模型截面下缘全部受拉,在承压端拉应力最小,随后迅速增大,在应力达到稳定值之前又出现先减小后增大的现象,变化较为复杂。在距承压端约 9.6 m 范围内应力变化较大,之后出现应力稳定的现象,即应力变化过渡区域约为 9.6 m,远大于一般所认为的 1 倍梁高 3.0 m。由于固定端边界条件的影响,对固定端较近区域的应力暂不考虑。

综上,M1 与 M2 模型在截面下缘的纵向线上的正应力分布情况差异较大,截面上缘差异较小。两个模型在同样位置的区别在于距离局部承压区的远近不同,上缘差异较小可能是由于 M1 和 M2 模型的上缘距离局部承压区都较近,而下缘差异较大的原因在于二截面的下缘距离承压区都较远。因此,有必要研究距离承压区竖向不同距离的纵向线在正应力变化上的不同。

以模型 M2 为例,将距离截面下缘 0.5、1.0、1.5 m 且位于  $OE_2$  正上方的 3 条线分别记为  $OF_{0.5}$ 、 $OF_{1.0}$ 、 $OF_{1.5}$ ,其正应力  $\sigma_z$  分布见图 9~11。

从图 9~11 可看出: $OF_{0.5}$ 、 $OF_{1.0}$ 、 $OF_{1.5}$  线上应力变化过渡区域的长度分别约为 9.6、9.6、4.8 m,大于一般所认为的 1 倍梁高 3.0 m。局部承压区正上方与正下方的各纵向线上的正应力  $\sigma_z$  的变化规律

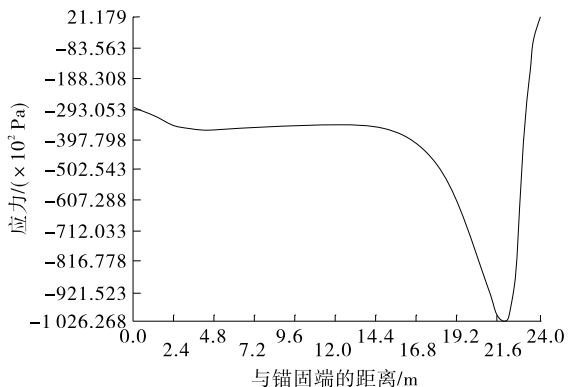


图 9  $OF_{0.5}$  线上  $\sigma_z$  的变化

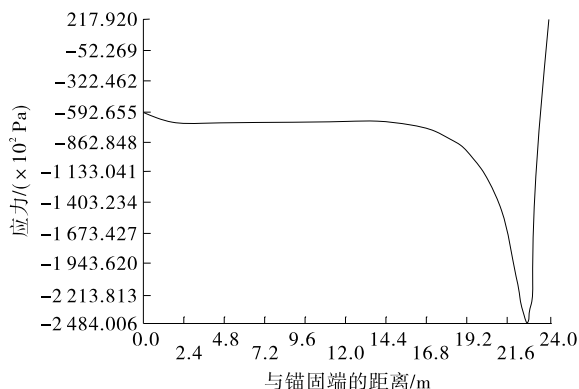


图 10  $OF_{1.0}$  线上  $\sigma_z$  的变化

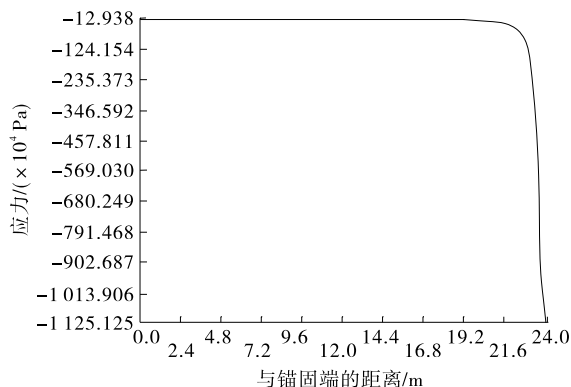


图 11  $OF_{1.5}$  线上  $\sigma_z$  的变化

与该纵向线与承压区中心的竖向距离有关,其变化规律可总结为三类:1) 当纵向线与承压中心的距离较近时,线上全部受压,且最大压应力出现在承压端,随着与承压端距离的加大,压应力迅速减小,最终达到稳定值(见图 11)。2) 当纵向线与承压中心的距离较远时,距离承压端一段长度范围内纵向线上受拉,随着与承压端距离的加大,拉应力变为压应力,压应力达到最大值后再减小,最终达到稳定值,出现最大值的位置因纵向线与承压中心的距离不同而不同(见图 10)。3) 当纵向线与承压中心的距离进一步加大时,纵向线上整体受拉,随着与承压端距离的加大,拉应力逐渐增大,在达到稳定值之前拉应力会出现一些波动,应力表现较为复杂(见图 9)。

由此可得出结论:偏心局部受压构件上下缘在纵向上的正应力变化情况和局部承压区与截面上下缘的距离直接相关。

### 3 结论

(1) 截面上下缘纵向上正应力的变化情况主要与承压区中心点到上下缘的距离有关,离开承压端

(下转第 196 页)

分别增加 1 745、1 182、237、110 元左右;限界宽度每增加 0.75 m, V、IV、III、II 级围岩段平均每延米造价分别增加 2 349、1 412、291、168 元左右;限界宽度每增加 1 m, V、IV、III、II 级围岩段平均每延米造价分别增加 3 039、1 835、440、217 元左右。隧道暗洞工程每延米造价随着断面尺寸的增加而增加,在两车道隧道建筑限界高度、支护参数等均不改变的情况下,限界宽度每增加 1 m,每延米造价(仅包含暗洞开挖、初期支护及二次衬砌)增加 1.32%~5.14%, V、IV、III、II 级围岩段平均分别增加约 5.14%、4.19%、2.51%、1.32%。

上述研究结论能为高速公路投资决策提供参考依据。但该文关于断面变化对高速公路隧道工程造价的影响分析还存在一定不足,主要表现在数据样本偏小,只能局部反映样本断面变化对高速公路隧道工程造价的影响,不能代表整个高速公路隧道工程的实际情况,还需在更加完备、多样化的样本环境中进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] JTG/T B06—02—2007,公路工程预算定额[S].
- [3] JTG B06—2007,公路工程基本建设项目概算预算编制办法[S].
- [4] 李鹏飞.围岩级别分类对高速公路隧道造价的影响[J].黑龙江交通科技,2012(11).
- [5] 邹颖,武志涛.不同断面下电缆隧道造价及影响因素分析[J].电网技术,2011(11).
- [6] 白伟,姚红志,胡小勇.地形偏压隧道判定方法及设计施工措施[J].筑路机械与施工机械化,2016(3).
- [7] 袁淑香,张言华.隧道施工涌水处理方案及技术经济分析[J].铁路工程造价管理,2013(1).
- [8] 陈文辉,秦峰,陈贵华.小净距隧道、连拱隧道、普通分离式隧道造价对比分析[J].公路交通技术,2005(6).
- [9] 谢琪.隧道横断面设计及其标准化问题的思考[J].福建建筑,2006(1).

收稿日期:2016—10—12

\*\*\*\*\*

(上接第 143 页)

部截面一定距离之后全部受压。

(2) 距离承压中心竖向一定距离内,纵向上的正应力表现为先受拉后受压,并且存在一个压应力最大的点。

(3) 上下缘正应力最终都会达到稳定值,达到稳定值的起始点距离承压端不止 1 倍梁高,即局部承压对构件的应力影响远不只是一般所认为的 1 倍梁高范围内。

#### 参考文献:

- [1] 徐芝纶.弹性力学简明教程[M].第三版.北京:高等教育出版社,2011.

- [2] 刘鸿文.材料力学[M].第四版.北京:高等教育出版社,2004.
- [3] 叶见曙,李国平.结构设计原理[M].第二版.北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 郝文化.ANSYS 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [5] 梁杰.大跨度预应力混凝土连续箱梁桥设计的应力计算方法的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [6] 王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [7] 袁国勇.ANSYS 网格划分方法的分析[J].现代机械,2009(6).

收稿日期:2016—06—22

\*\*\*\*\*

(上接第 193 页)

- [2] JTG F60—2009,公路隧道施工技术规范[S].
- [3] 李晓红.隧道新奥法及其量测技术[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] 乔志超,周建春.隧道围岩变形监测及分析[J].施工技术,2012,41(8).
- [5] 肖涛.高速公路隧道施工监控量测技术研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [6] 贡永峰,唐格.隧道围岩收敛变形监测及稳定性研究[J].中外公路,2015,35(3).

- [7] 李品钰.隧道现场施工监控量测数据分析中回归模型的选择与优化[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [8] 陈凯江.隧道施工监控量测及数据反分析技术研究[D].北京:北京工业大学,2013.
- [9] 万利.高速公路隧道施工监测技术研究[D].西安:长安大学,2006.
- [10] 王岚.高等级公路隧道施工及监控技术研究[D].长沙:湖南大学,2003.

收稿日期:2016—08—29