

基于实体单元的大悬臂宽箱梁空间效应分析

李中贤, 宋智, 夏昌

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 随着城市交通的发展, 预应力砼箱梁宽跨比越来越大, 常规平面杆系单元的计算结果难以体现大悬臂宽箱梁的空间效应。文中依托四跨连续梁实体工程, 采用 MIDAS FEA 建立三维实体模型, 从恒载、对称活载和偏载工况分析大悬臂宽箱梁的空间效应, 重点对箱梁剪力滞及偏载系数进行分析。结果表明, 箱梁顶板剪力滞系数最大为 2.3, 箱梁应力偏载系数为 1.3~2.7。

关键词: 桥梁; 宽跨比; 大悬臂; 宽箱梁; 空间效应; 三维实体模型

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0090-04

随着城市交通需求的日益增长, 城市高架桥逐渐向大悬臂宽箱梁方向发展。由于城市用地紧张, 宽箱梁往往墩间间距较小, 挑臂很大, 悬臂宽度和腹板间距较大, 空间效应显著, 主要表现为剪力滞效应、薄壁效应和多腹板箱梁腹板受力分配效应。箱梁桥的结构验算一般采用满足平截面假定的平面杆系分析方法, 借助相关简化系数进行空间效应近似计算, 其实质是把具有复杂空间效应的箱梁截面简化为满足平截面假定的一般梁单元, 在一定程度上考虑了箱梁的空间效应, 增加了结构安全性。但对于大悬臂宽箱梁, 在弯矩作用下, 其上下缘正应力沿宽度方向呈不均匀分布, 平面杆系分析方法采用“有效分布宽度”进行简化, 将复杂截面近似简化成简单截面, 只考虑截面上竖向剪应力因素, 未考虑桥面板面内水平横向剪应力的影响; 平面杆系方法采用偏载放大系数来简化箱梁薄壁效应和腹板受力分配效应, 当箱梁结构趋于“扁平化”时该系数很难真实反映结构受力状态, 对于“扁平化”的大悬臂宽箱梁, 平

面杆系方法不太适用。该文结合实体工程, 通过建立实体单元模型分析梁体受力状态及空间效应, 研究宽箱梁桥偏载系数分布及取值。

1 工程概况

某改建工程城区高架段, 上部结构采用 4×32 m 预应力砼连续梁, 单箱四室, 桥宽 25.5 m, 悬臂长度 4.0 m, 采用斜腹板。箱梁高 2.0 m, 顶板厚 0.28 m, 底板厚 0.26 m, 腹板厚 0.5 m, 底板宽 17.5 m, 箱梁顶板平行于道路横坡布置。桥墩采用 H 形立柱、承台桩基础(见图 1)。

箱梁采用 C50 砼, 双向预应力体系, 腹板、底板纵向和顶板横向预应力分别采用 $17\phi_{s15.2}$ 、 $9\phi_{s15.2}$ 和 $3\phi_{s15.2}$ 钢绞线, 群锚体系。纵向预应力管道成孔采用塑料波纹管、智能真空压浆工艺施工, 预应力损失计算中取孔道偏差系数 $K = 0.0015\text{ m}^{-1}$, 管道摩擦系数 $\mu = 0.15$, 一端锚具回缩量 6 mm。

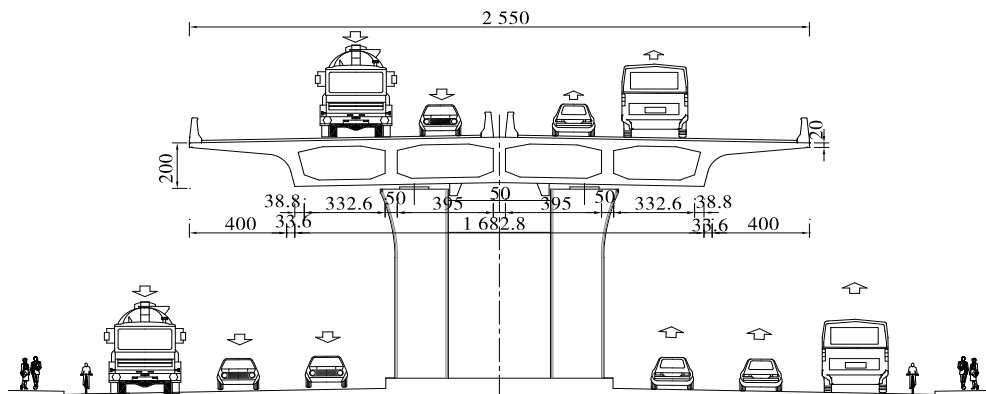


图 1 桥梁标准横断面(单位: cm)

2 结构建模及计算工况

2.1 结构建模

采用 MIDAS FEA 程序建立箱梁有限元空间实体模型,砼采用实体单元模拟,考虑预应力荷载。模型共 416 352 个单元、373 937 个节点。结构有限元实体模型、钢束模型见图 2。

按照支座实际布置形式对有限元模型施加相应约束,根据影响线加载以模拟车辆荷载作用。

2.2 计算工况

箱梁横向受力分析主要针对结构自重、二期恒载、预应力荷载和车道荷载,车道荷载根据活载布置分为对称布置和偏载(见图 3)。

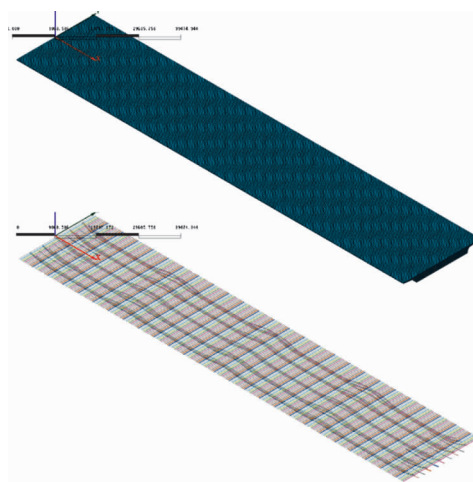


图 2 有限元模型及其预应力系统

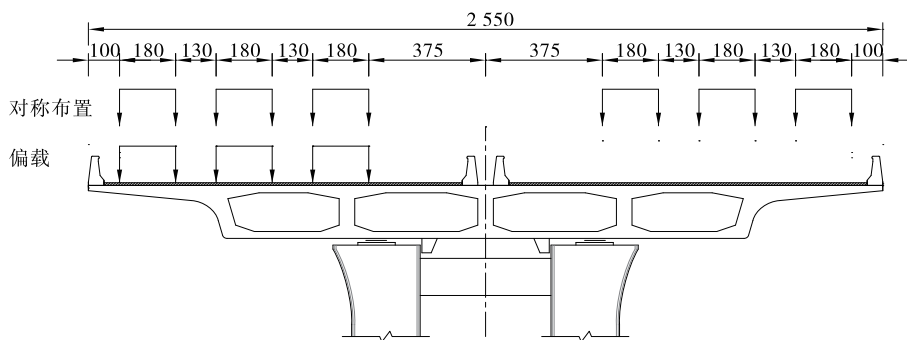


图 3 车道荷载布置示意图(单位:cm)

3 箱梁空间效应分析

3.1 箱梁横向内力分析

利用有限元分析程序,分别计算 4×32 m 大悬臂宽箱梁在各种荷载作用下的变形和受力情况,分析大悬臂宽箱梁横向内力的分布规律。恒载作用下主应力及变形见图 4~5,车道荷载作用下箱梁主应力及变形见图 6~9。

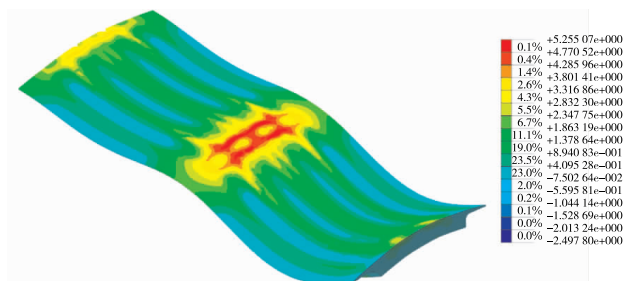


图 4 自重工况下箱梁主应力及变形(主应力单位:MPa)

由图 4、图 5 可知:1) 在恒载作用下,箱梁主应力主要集中分布于箱梁腹板及横梁处,呈格构状,最大主应力位于横梁顶部,为 5.5 MPa;跨中底板拉应

力边腹板略大于中腹板,边腹板最大拉应力为 4.6 MPa,中腹板底部最大拉应力为 4.0 MPa。2) 预应力荷载主要由腹板承受,在预应力锚固端集中应力

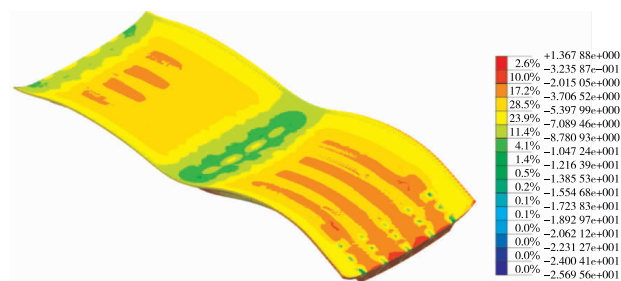


图 5 预应力工况下箱梁主应力及变形(主应力单位:MPa)

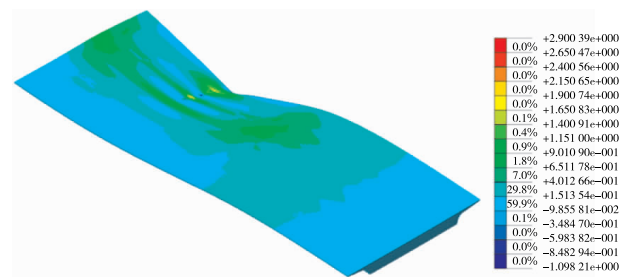


图 6 车道偏载工况下箱梁主应力及变形(主应力单位:MPa)

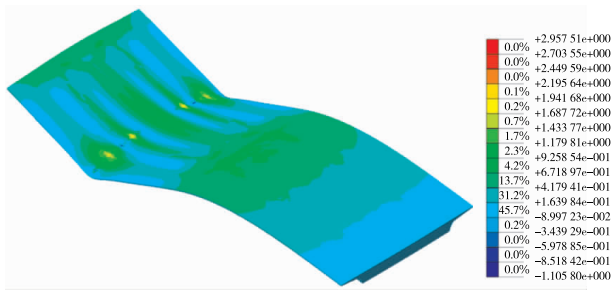


图7 对称车道荷载工况下箱梁主应力及变形
(主应力单位:MPa)

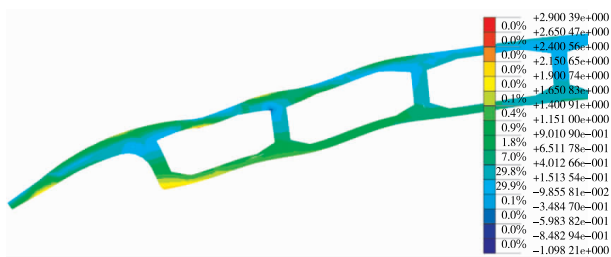


图8 车道偏载工况下箱梁截面主应力及变形
(主应力单位:MPa)



图9 对称车道荷载工况下箱梁截面主应力及变形
(主应力单位:MPa)

较明显,局部最大压应力达 25.6 MPa,中跨应力分布比边孔更均匀,满足圣维南原理。总的来说,在对称恒载作用下,从变形来看,箱梁主要变形为横向弯曲及纵向弯曲,无畸变与翘曲变形;从应力分布来看,剪力滞现象非常明显,顶板应力越靠近墩顶附近剪力滞现象越明显。

由图 6~9 可知:在偏载作用下,箱梁截面发生明显的畸变,横向弯曲和刚性扭转也较明显;主应力集中在偏载一侧,最大约 2.5 MPa,无荷载一侧应力很小,约 0.3 MPa。与偏载工况相比,对称荷载作用下箱梁畸变现象略有好转。综合来看,在车道荷载作用下,箱梁空间效应较明显,由于畸变及约束扭转,箱梁发生翘曲正应力。

3.2 剪力滞效应分析

在箱梁翼缘与腹板交叉处横向力与剪力流作用下,箱梁翼缘产生剪切扭转变形。由于剪切变形,远

离腹板的翼缘不参与受弯,即受压翼缘上的压应力随着离腹板距离的增加而减小,产生剪力滞后现象即剪力滞效应。为定量描述剪力滞现象,引入剪力滞系数,它为最大正应力与平均正应力的比值。自重作用下顶、底板正应力分布见图 10~11。

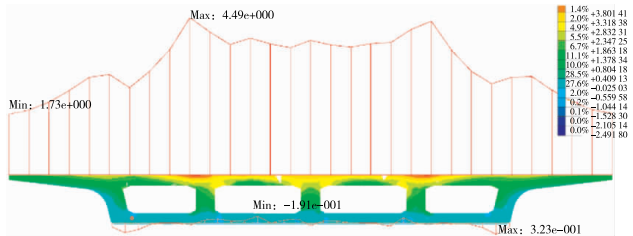


图10 墩顶截面正应力分布

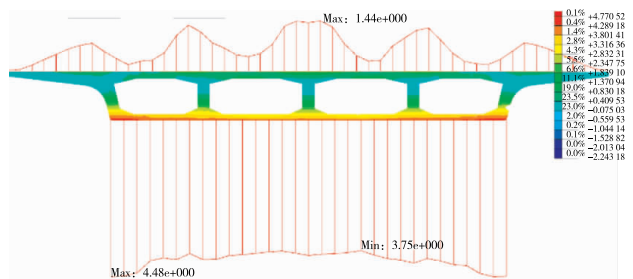


图11 跨中截面正应力分布

由图 10、图 11 可知:墩顶截面顶板拉应力分布不均匀,剪力滞系数为 1.44;底板应力较小,剪力滞不明显。跨中截面顶板受压后剪力滞分布非常明显,剪力滞系数为 2.3;底板受拉,剪力滞系数为 1.12。总体而言,顶板由于悬臂和箱室间距较大,剪力滞现象比底板更明显;顶板剪力滞现象跨中较墩顶更明显,这主要是由于墩顶靠近横梁且腹板尺寸及顶、底板厚度较大,整体刚度比跨中大。

3.3 横向偏载系数分析

工程设计中一般通过偏载系数修正平面杆系方法计算的截面应力来简化箱梁在偏载作用下的薄壁效应。在偏心荷载作用下,按空间分析得到的箱梁横截面上某点正应力 $\sigma = \sigma_b + \sigma_t + \sigma_d$, 正应力偏载系数为:

$$\xi = \frac{\sigma_b + \sigma_t + \sigma_d}{\sigma_b}$$

式中: σ_b 为对称荷载作用下的弯曲正应力; σ_t 为反对称荷载作用下的约束扭转正应力; σ_d 为畸变翘曲正应力。

剪应力偏载系数定义为:

$$\eta = \frac{\tau_b + \tau_t + \tau_d}{\tau_b}$$

式中: τ_b 为对称荷载作用下的弯曲剪应力; τ_c 为反对称荷载作用下的约束扭转剪应力; τ_d 为畸变翘曲剪应力。

建立单梁模型计算对称荷载作用下的弯曲正应力和剪应力,与实体模型偏载最大应力进行对比,得到偏心荷载作用下箱梁偏载系数(见表 1)。

表 1 偏心荷载作用下正应力及剪应力偏载系数

梁跨	主梁位置	顶板正应力/MPa		顶板正应力 偏载系数	底板正应力/MPa		底板正应力 偏载系数	腹板最大剪应力/MPa		腹板剪应力 偏载系数
		单梁模型	实体模型		单梁模型	实体模型		单梁模型	实体模型	
墩顶(2 m)		-0.075	-0.096	1.28	0.090	0.135	1.50	-0.118	-0.280	2.37
	1/8L	-0.191	-0.334	1.75	0.259	0.521	2.01	-0.100	-0.210	2.10
	1/4L	-0.340	-0.512	1.51	0.440	0.753	1.71	-0.050	-0.120	2.40
	3/8L	-0.407	-0.629	1.55	0.560	0.934	1.67	-0.015	-0.044	2.93
边跨	1/2L	-0.385	-0.592	1.54	0.536	0.920	1.72	0.050	0.078	1.56
	5/8L	-0.269	-0.436	1.62	0.375	0.674	1.80	0.118	0.206	1.75
	3/4L	-0.065	-0.132	2.03	0.091	0.196	2.15	0.164	0.345	2.10
	7/8L	0.242	0.531	2.19	-0.286	-0.608	2.13	0.154	0.372	2.42
墩顶(32 m)		0.750	0.960	1.28	-1.100	-1.430	1.30	—	—	—
	1/8L	0.292	0.552	1.89	-0.397	-0.680	1.71	-0.132	-0.344	2.61
	1/4L	0.056	0.150	2.68	-0.060	-0.154	2.57	-0.131	-0.272	2.08
	3/8L	-0.150	-0.270	1.80	0.210	0.448	2.13	-0.095	-0.154	1.62
中跨	1/2L	-0.203	-0.364	1.79	0.283	0.602	2.13	-0.020	-0.027	1.35
	5/8L	-0.185	-0.328	1.77	0.257	0.528	2.05	0.056	0.110	1.96
	3/4L	-0.078	-0.112	1.44	0.109	0.202	1.85	0.105	0.231	2.20
	7/8L	0.164	0.381	2.32	-0.224	-0.475	2.12	0.113	0.310	2.74
墩顶(64 m)		0.550	0.785	1.43	-0.700	-1.180	1.69	—	—	—

由表 1 可知:箱梁顶板及底板正应力偏载系数,主梁分布情况基本一致,墩顶两侧较大(1.3~2.7),跨中较小(1.5~2.1);剪应力偏载系数整体较大,墩顶附近为 2.0~2.7,跨中为 1.5~2.3。单梁模型无法考虑偏载引起的腹板受力分配及箱梁约束扭转和畸变效应,无法体现结构空间受力情况,在结构设计时偏不安全。对于宽箱梁,单梁模型统一采用 1.15 的应力放大系数并不准确。

4 结论

(1) 箱梁在对称恒载作用下,腹板间受力不均匀,底板应力边腹板较中腹板大;在预应力荷载作用下,箱梁整体受力有明显改善,但局部应力集中明显。

(2) 在车道荷载作用下,箱梁空间效应较明显,发生了较明显的横向弯曲、约束扭转和畸变。

(3) 大悬臂宽箱梁顶板剪力滞现象非常明显,尤其在跨中顶板压应力工况,剪力滞系数达 2.3。

(4) 在偏载作用下,主梁偏载系数沿桥跨分布受箱梁结构构造尺寸及荷载作用下应力分布的影响较大,整体而言,墩顶附近大于跨中,正应力偏载系数最大为 2.68,剪应力偏载系数最大约 2.74。单梁模型无法考虑偏载带来的空间效应。

参考文献:

[1] 戴李春,张杰.箱梁桥空间效应和分析方法研究[J].公路,2014(6):114—117.
[2] 马兆锐,秦道标,黄正荣,等.基于实体单元的等截面宽箱梁有限元分析[J].公路,2017(12):134—139.
[3] 刘钊.桥梁概念设计与分析理论[M].北京:人民交通出版社,2010.