

基于整体建模的混凝土泵车结构强度分析与试验研究

王斌华, 吕彭民, 田润利

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 以某5节臂的45 m混凝土泵车为研究对象, 采用实体单元与接触单元相结合的方法模拟各臂架之间的连接, 板壳单元和梁单元用于模拟泵车其余结构, 建立了整车有限元计算模型. 通过力学分析得出了臂架水平且垂直于支撑点对角线时为泵车危险工况. 在危险工况下对该泵车整体结构进行了有限元强度分析. 计算结果表明: 连接销处和臂架油缸支座处易发生大应力. 根据计算结果进行了现场试验, 试验结果表明计算分析与测量值相当吻合.

关键词: 混凝土泵车; 有限元分析; 结构强度分析; 试验研究

中图分类号: TH123; TU 646

文献标识码: A

0 引言

混凝土泵车在工作过程中, 臂架姿态复杂多变导致泵车工况复杂, 且结构设计的轻量化要求以及机动灵活的使用要求使得泵车的结构复杂, 因此对混凝土泵车的结构强度研究具有重要意义. 目前国内的学者对混凝土泵车做了大量的研究^[1-5]. 文献[1]基于多体动力学理论和拉格朗日方程建立四节臂混凝土泵车臂架的刚性运动微分方程. 文献[2]用柔性多体动力学的理论分析四节臂混凝土泵车臂架系统的动态特性. 文献[3-5]对混凝土泵车进行了结构动强度试验研究以及结构疲劳寿命可靠性分析.

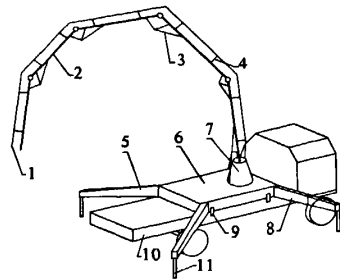
泵车臂架属于细长薄壁箱型结构, 它由多节臂通过销轴连接而成, 整体刚度较小. 在进行有限元分析时, 连接部位的模拟好坏直接影响到数值计算的可靠性. 为了更真实地模拟臂架各节臂的连接情况, 笔者采用实体单元模拟各连接销轴, 采用接触单元模拟销轴连接, 建立了整体有限元计算模型, 对泵车进行结构强度分析, 并进行了试验研究, 为泵车的结构改进和优化设计提供依据.

1 混凝土泵车的数值模拟

1.1 混凝土泵车有限元模型的建立

混凝土泵车结构简图如图1所示, 建立全车

主要受力构件的整体有限元模型.



1—输料管; 2—臂架系统; 3—调节机构; 4—托架;
5—后支腿; 6—支撑台; 7—回转台; 8—前支腿;
9—U型螺栓; 10—车架底盘; 11—支撑油缸

图1 混凝土泵车结构简图

Fig.1 Sketch of concrete pump truck

泵车处于泵送工作状态时, 前后支腿张开并通过顶伸液压缸支撑起整车构件, 而支腿是与支撑台相连, 支撑台通过U型螺栓与车架底盘固连, 回转台则连接着臂架系统与支撑台, 因此有限元模型中应包括支撑油缸、前后支腿、支撑台、回转台和臂架系统, 它们构成了泵车泵送时的主要受力构件, 而将底盘车自重载荷通过计算, 分配在支撑台与底盘U型螺栓悬挂点处.

采用空间板壳单元模拟前后支腿、支撑台、回转台和臂架系统, 对于输料管、托架、支撑油缸以及臂架之间的调节机构采用空间梁单元模拟, 对

收稿日期: 2008-11-06; 修订日期: 2009-01-13

基金项目: 国家西部交通建设科技资助项目(200531881212)

作者简介: 王斌华(1979-), 男, 江西上饶人, 长安大学博士研究生, 主要从事结构动力学研究, E-mail: wbher2003@hotmail.com.

于销连接位置采用接触单元模拟,连接销采用实体单元模拟,共划分板壳单元 82 176 个,梁单元 704 个,接触对的目标单元 19 208 个,接触对的接触单元 7 235 个,实体单元 12 131 个,节点共 90 381 个。

根据文献[6],选取臂架上的结构件自重载荷和工作载荷的动荷系数为 1.25,其余部件自重载荷的动荷系数为 1.15。静强度分析时,施加的荷载有主要承力结构件自重、混凝土重量和底盘车自重。混凝土充满了料管,因此用梁单元模拟输送管和混凝土,且该单元采用的密度为两种材料的等效密度。定义如下:

$$\rho = \rho_p + \rho_c \cdot \frac{V_c}{V_p} \quad (1)$$

式中: ρ 为等效密度; ρ_p 为输送管密度,取 $\rho_p = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ_c 为混凝土密度,取 $\rho_c = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; V_c 为单位长度输送管内混凝土体积, V_p 为单位长度输送管体积。

1.2 臂架危险工况研究

泵车臂架由五节臂组成,相互之间通过调节机构调节臂架姿态,臂架与回转台相连,并且回转台可以实现绕垂直轴水平旋转,因此泵车泵送姿态是空间连续可变的。通过分析可知,臂架系统的不利工作姿态应是臂架水平姿态。臂架位于垂直和水平姿态时,回转台均处于不利工况。前后支腿出现最大支反力时,支腿承受最大弯矩和剪力,支撑台也承受最大扭矩,因此支撑台和前后支腿的不利工作位置应是前支腿和后支腿分别出现最大支反力时的位置,且臂架姿态为水平伸直状态。支撑台、前后支腿和回转台相对位置为 1/2 对称布置而非 1/4 对称布置,因此可通过以下分析确定支腿受力最大位置。限于篇幅,仅列出前支腿分析算法,后支腿分析方法类似。泵车泵送工作示意图见图 2。假设前支腿出现最大支反力时,则其相反侧的后支腿已不再支撑地面,该假设与实际工况相符。为简化推导过程,分析时仅考虑臂架重量 G 以及臂架水平时对转台的弯矩 M 。

O 点为回转台中心, A 、 B 、 C 、 D 为支腿支撑点, F_A 、 F_B 、 F_C 、 F_D 为支撑点反力, OE 为臂架伸直方向,选取坐标原点为 O , X 轴与臂架共线,见图 2。已知: $G = 68\ 560 \text{ N}$, $M = 891\ 280 \text{ N} \cdot \text{m}$, $OA = OD = 5.667 \text{ m}$, $OB = OC = 8.313 \text{ m}$, $\alpha = 84.6^\circ$, $\beta = 120.1^\circ$ 。由假设知, $F_B = 0$, 因此由力平衡与弯矩平衡方程得:

$$F_A + F_C + F_D = G \quad (2)$$

$$F_A OA \cos \gamma_3 = F_D OD \sin \gamma_1 + F_C OC \cos \gamma_2 \quad (3)$$

$$F_D OD \cos \gamma_1 = M + F_C OC \sin \gamma_2 + F_A OA \sin \gamma_3 \quad (4)$$

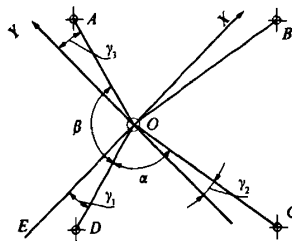


图 2 前支腿最大受力工况分析示意图

Fig. 2 Sketch map of the maximum force acting on front support

根据式(2)~(4)及 $\gamma_2 = \gamma_1 - 90^\circ + \alpha$, $\gamma_3 = \beta - \gamma_1 - 90^\circ$, 采用 Matlab 进行数值分析得出 F_D — γ_3 关系曲线($0^\circ \leq \gamma_3 \leq 90^\circ$)如图 3 所示。当 $\gamma_3 = 15.4^\circ$ 时, F_D 出现最大值,而此时臂架方向垂直于 A 点与 C 点连线。

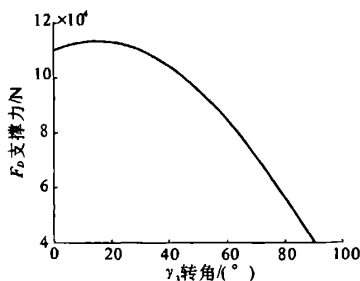


图 3 F_D — γ_3 曲线图

Fig. 3 F_D — γ_3 curve

因此,当臂架水平旋转至垂直于不同侧的前支腿与后支腿支撑点连线时,与臂架邻近的支腿会出现最大支反力,由此可以确定支腿的不利工况位置。因此混凝土泵车的计算校核工况为:①臂架水平旋转至前支腿受力最大位置;②臂架水平旋转至后支腿受力最大位置;③臂架垂直位置。3 种工况下的有限元计算模型图见图 4。

1.3 混凝土泵车有限元计算结果

限于篇幅,文中只列出应力值较大的计算结果,工况 3 应力计算值较小,不予列出。泵车材料为 900 号高强度钢,许用应力值为 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{900}{1.5} = 600 \text{ MPa}$ 。计算结果见表 1。工况 1 的应力云图见图 5,工况 2 应力云图见图 6。

可以看出,虽然计算应力值小于材料许用应力值,但在连接销轴套处以及臂架油缸支座处易发生大应力。轴套作为销轴连接构件在实际泵送工作中会承受较大的动载荷。而支座大应力区域均位于焊缝连接处。因此从疲劳寿命角度考虑,这

些大应力区域应作为试验测试对象。

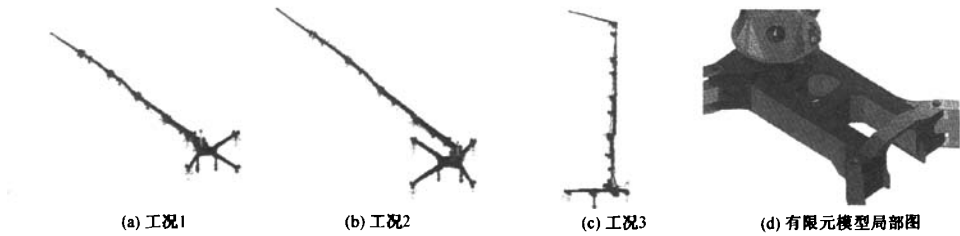


图 4 混凝土泵车有限元计算模型

Fig. 4 FEM of concrete pump truck

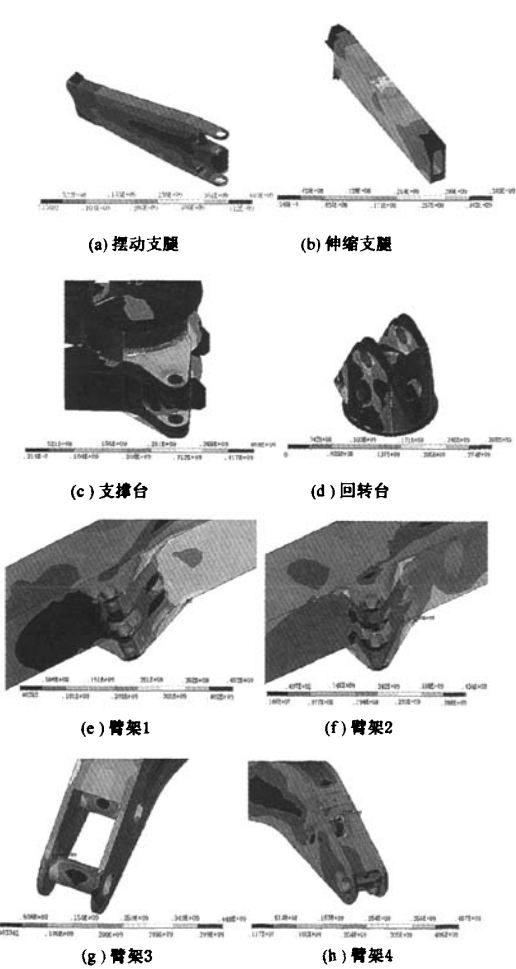


图 5 工况 1 应力分布

Fig. 5 Von stress distribution of operation condition 1

2 45 m 混凝土泵车静态加载试验

采用 YJ—31 型静态电阻应变仪和 P20R—25 型预调平衡箱对样车进行静态加载检测试验。根据计算分析时选取的动荷系数,计算出加载质量,在臂架、回转台、支撑台、和前后支腿处均布置沙

袋,其余则悬挂配重块。在较大应力点布置应变片或应变花(单向应力状态部位贴应变片,复杂应力状态处贴应变花)。结构在应变花处最大主应力 σ_{\max} 和最小主应力 σ_{\min} 按下式计算^[7]:

表 1 泵车应力计算结果

Tab. 1 Calculated stresses of pump truck

计算工况	应力 σ /MPa	位置
工况 1	463	受力最大前支腿(摆动支腿)连接销孔
	385	受力最大前支腿(伸缩支腿)上盖板
	469	支撑台连接销孔处
	308	回转台油缸支座处
	452	臂架 1 油缸支座处
	434	臂架 2 油缸支座处
	448	臂架 3 连接销轴套处
工况 2	457	臂架 4 连接销轴套处
	432	后支腿侧板底部
	452	支撑台与底盘连接处

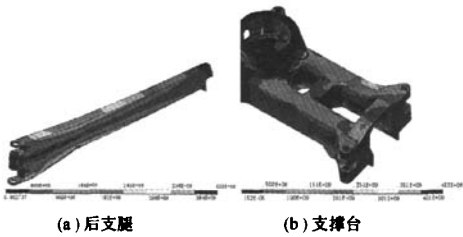


图 6 工况 2 应力分布

Fig. 6 Von stress distribution of operation condition 2

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + [2\varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y)]^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + [2\varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y)]^2} \right) \quad (6)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_{45° 分别为应变花在水平、垂直和45°方向的应变值; E 、 μ 分别为材料的弹性模量和泊松比。

根据计算结果选择测点对泵车结构进行应力

测试,测试结果与有限元计算结果对比见表 2.

表 2 泵车应力有限元计算结果与试验测试数据
Tab.2 Calculated stresses and test data of pump truck

应变片	试验应力值 σ_1/MPa	计算应力值 σ_2/MPa	位置	工况
1	-287.8	-267.0	臂架 1 油缸支撑座	工况 2
2	-303.0	-298.0	臂架 2 上与臂架 1 连接端	工况 2
3	468.7	460.0	后支腿侧板	工况 2
4	-319.7	-315.0	摆动支腿下底板	工况 1
5	377.3	363.0	臂架 1 上盖板	工况 1
6	381.4	376.0	臂架 1 上与臂架 2 连接端处	工况 2
7	-254.8	-247.0	臂架 3 上与臂架 2 连接端	工况 2
8	266.3	256.0	臂架 2 上靠近与臂架 1 连接端	工况 2
9	210.9	198.0	臂架三中部上盖板	工况 1
10	-226.0	-211.0	转台油缸支撑座	工况 1
11	-230.1	-236.0	伸缩支腿上盖板	工况 1
1 号应变花	-241.5	-239.0	支撑台上靠近前支腿销接处	工况 1
2 号应变花	-374.1	-371.0	伸缩支腿侧板上	工况 1

由表 2 可知:①计算结果与试验结果相当吻合,表明用本文方法进行整体建模是合理有效的;②该泵车车体部分最大应力发生在后支腿侧板处,而臂架部分的最大应力发生在臂架 1 上与臂架 2 连接端处,使用过程中应加强监测.

3 结论

(1)采用空间板壳单元和梁单元,并结合实

体单元和接触单元建立混凝土泵车整体计算模型,其计算结果与试验相当吻合,且接触单元模拟销接处几何非线性结果可行.计算分析结果可指导泵车结构改进和优化设计.

(2)混凝土泵车危险工况应为臂架水平且垂直于不同侧支撑点连线时,该最大受力工况的分析方法可用于类似支撑机构的受力分析.

参考文献:

[1] 戴丽,刘杰,刘宇,等.基于多体动力学的混凝土泵车臂架的运动分析[J].东北大学学报:自然科学版,2007,28(10):1469-1472.
[2] 刘杰,戴丽,赵丽娟,等.混凝土泵车臂架柔性多体动力学建模与仿真[J].机械工程学报,2007,43(11):131-135.
[3] 张大庆,吕彭民,何清华,等.混凝土泵车结构动强度试验研究[J].振动与冲击,2005,24(3):111-113.
[4] 吕彭民,汪红兵,张大庆.混凝土泵车冲击载荷对结构动态特性的影响[J].中国公路学报,2003,16(4):115-117.
[5] 董忠红,汪洁,倪凤英,等.水混输送泵车结构可靠性疲劳寿命研究[J].筑路机械与施工机械化,2004(7):38-40.
[6] QC/T 718—2004,中华人民共和国行业标准[S].
[7] 吕彭民.大型复杂结构抗疲劳设计[M].北京:科学技术出版社,1999:78.

Structural Strength Analysis and Experimental Research of Concrete Pump Truck Based on Integrated Model

WANG Bin-hua, LV Peng-min, TIAN Run-li

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The 45m length concrete pump truck with 5-arms is taken as research object, and the whole vehicle finite element model is established by combining solid element with contact element to simulate the connection between arms and using shell element and beam element to simulate other structures of pump truck. The most dangerous working situation where arm direction is perpendicular to supporting point diagonal is concluded by mechanical analysis. The body's strength is analyzed under the most dangerous working situation. The result shows that high stress distributes in the connecting hinge and cylinder foundation. According to the result of finite element strength analysis of whole vehicle, the field test is carried out. A comparison between the analytical result and the test result shows that the two results are in good agreement.

Key words: concrete pump truck; finite element analysis; structural strength analysis; experimental research