

高赞大桥有限元仿真分析

徐郁峰, 韩大建, 梁立农

(华南理工大学土木工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 有限元仿真分析是随着计算机软硬件技术的快速发展而发展起来的一门工程技术, 是未来结构设计与分析的发展方向。文章针对高赞大桥的实际情况, 尝试利用个人计算机进行全桥全块体单元模型的第三层次仿真分析, 分析中考虑该桥的施工过程、二期调索以及后期的收缩徐变效应。分析结果精度较高, 可有效地指导设计工作, 同时也说明了利用个人计算机进行结构高层次的仿真分析已经成为现实。

关键词: 仿真分析; 结构设计; 块体单元; 施工过程; 收缩徐变

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1003-3688(2008)03-0009-06

Finite Element Simulation Analysis of Gaozan Cable Stayed Bridge

XU Yu-feng, HAN Da-jian, LIANG Li-nong

(Dept of Civil Engineering, College of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Finite element simulation analysis is an engineering technology developed with the rapid development of the hardware and software for computers and is the orientation of development in future structural designs and analysis. In the light of the actual conditions of Gaozan Cable Stayed Bridge, third-level simulation analysis of block element model of the overall bridge structure was made by using personal computers, in which the construction process of the bridge, readjustment of cables and the shrinkage and creep effect in the later stage were considered. The result of the analysis showed high precision and can be of effective guidance for designs, indicating that it has become a reality to utilize personal computers to carry out higher-level simulation analysis of structures.

Keywords: simulation analysis; structural design; block element; construction process; shrinkage and creep

1 引言

斜拉桥结构分析计算通常分为三个层次^[1]: 第一个层次是结构顺桥向总体分析计算, 考虑的重点是结构总体的力学行为, 包括桥梁结构施工过程中及成桥后主梁、主塔的应力、强度、位移的变化过程, 以确定合理的设计状态。由于这个层次的分析计算和设计是交互进行的, 反复次数多、时间长, 故要求自由度较少, 模型简单, 计算速度快、效率高, 因此这个层次的分析一般采用桥梁专用杆系综合分析程序并建立杆系有限元模型计算。第二个层次仍属结构总体设计范畴, 但考虑的重点是桥梁主要构件横桥向的力学行为, 如主梁横桥向、主塔横桥向在施工过程中及成桥后的应力、强度、位移的变化过程, 以确定合理的设计状态。这个层次的分析和一个层次的分析情况类同, 一般仍采用桥梁专用杆系综合分析

程序并建立杆系有限元模型计算。第三个层次的分析计算是指复杂细节或局部构造的结构设计, 如塔墩梁固结区、主墩承台、主塔斜拉索锚固区等部位的分析计算, 这些部位的应力非常复杂, 因此该层次的分析一般采用块体单元建立有限元模型计算, 在模型分离体的边界应力施加上有近似理想梁单元的假设。

以往, 受计算机软硬件水平的限制, 第一、二层次的分析计算大多是将空间受力依据规范和个人经验简化到平面杆系进行分析, 因而不能准确把握力的传递和应力的分布, 使得计算结果有时过于保守而有时却有低估的风险, 而低估的结果常常是产生裂缝的主要原因。近 20 年来, 随着计算机软硬件技术的飞速发展, 计算成本大大降低, 第一、二层次的分析也在向精细化方向发展, 如对复杂桥梁在用桥梁杆系专用程序进行第一、二层次的分析并确定合理的设计状态之后再采用全桥块体单元进行检算, 而第三个层次的局部块体单元分析计算也一同更精确地完成了。目前, 这门技术称为结构有限元仿真分析。

收稿日期: 2007-10-23

基金项目: 广东省交通厅资助项目(粤公院[2005]研发 02 号)

作者简介: 徐郁峰(1976—), 男, 广东广州人, 博士, 讲师, 主要研究结构设计, 结构计算分析, 施工监控等。

本文结合佛山市城市主干线上的一座主跨为 280 m 的大跨度预应力混凝土斜拉桥——高赞大桥的仿真分析工作,介绍了如何根据该桥的特点制定仿真分析的建模方案,并对建模细节进行介绍,最后给出了该仿真分析的结果以及对设计方案的评价及建议。

2 高赞大桥有限元仿真分析要求

高赞大桥位于佛山市顺德区西南部,是连接杏坛镇和容桂镇的一座重要桥梁。大桥总长 1 730 m,引道长 1 570 m。主桥采用双塔单索面,墩、塔、梁固结的预应力混凝土斜拉桥,主梁采用近似三角形断面,主塔采用独柱式,边跨设有辅助墩。主桥桥跨组合:61+89+280+89+61 m。高赞大桥结构简图如图 1 所示,主梁断面如图 2 所示。

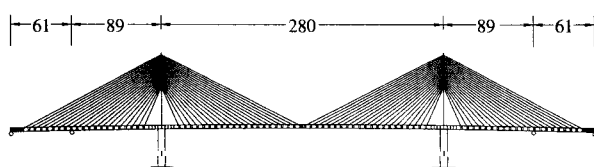


图 1 高赞大桥结构简图

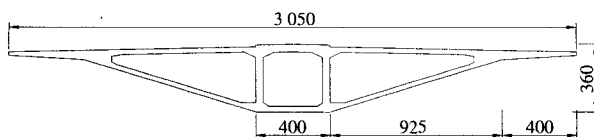


图 2 高赞大桥主梁标准段剖面图

高赞大桥仿真分析的目的是了解和校核该桥的三维应力状况,为该桥的设计工作提供可靠的数据支持,指导设计工作。具体工作内容是:

(1)计算主梁顺桥向应力沿纵桥向的分布,校核第一层次的计算结果(包括施工过程、调索过程以及后期收缩徐变效应的结果),并指导顺桥向设计;

(2)计算主梁横桥向应力沿横桥向的分布,校核和指导主梁横桥向设计;

(3)计算主梁顺桥向正应力沿横桥向的分布和各断面腹板剪应力沿竖向的分布,目的是观察顶底板剪力滞、轴力滞效应,并校核和指导顺桥向平面杆系计算中的多车道活载系数;

(4)计算并检查墩梁塔固结区的应力状况;

(5)计算并检查塔、主梁索锚固区的应力状况。

3 高赞大桥结构有限元模型的建立

3.1 建模方案的选择

对于有限元仿真分析,一般说来可以选择用块体单元或壳单元模拟结构。

使用块体单元进行有限元分析往往被认为可以真实反映模拟实际结构,要求有限元剖分十分精细。其缺点是有限元模型的自由度过于庞大,目前情况下在普通配置的个人电脑中完成计算较为困难,即使可以计算,时间也难以接受。

使用壳单元进行有限元分析的优点是当结构较为符合壳单元的变形情况时其实现效率比较高,计算规模往往比三维块体单元小得多但精度也有一定的保证,当然其前提是结

构的变形要符合壳单元的变形理论。

就高赞大桥而言,大桥主梁标准段部分箱梁非横隔板部分尚能勉强使用壳单元来模拟,但是主梁横隔板,横隔板中的斜拉索锚固区,墩梁塔固结区,主塔中的拉索锚固区等部分均无法使用壳单元来模拟。因此高赞大桥的有限元仿真分析必须采用块体单元。

3.2 全块体单元模型有限元仿真分析在个人计算机中的实现

由于高赞大桥主梁主塔构造比较复杂,特别是索锚固区,其局部尺寸比较小,这样会导致使用块体单元进行剖分时单元的尺寸变得很小,从而造成计算规模变得很大,能否在个人计算机中完成仿真分析需要对结构的规模以及剖分的尺寸进行选择。

把高赞大桥的实体模型在 ANSYS 中建立后,对其进行剖分时既要考虑计算的精度,同时也要考虑计算机的承受能力,经过多次尝试以后,最终确定单元的尺寸为 0.75 m,局部尺寸可根据具体情况细化调整。

在上述剖分尺寸下,取大桥的 1/4 结构进行剖分时,模型的单元数超过 100 万个,在 CPU 为 P4 2.4GB、内存为 2GB 的个人计算机中计算,单个工况的计算时间超过 1 h。当取大桥 1/2 结构进行剖分时,模型单元超过 200 万个,在上述机器中无法计算,已经超过其计算能力。

由于高赞大桥为主跨 280 m 混凝土斜拉桥,考虑微机承受能力而忽略其不大的几何非线性影响。

因此根据高赞大桥对称的结构布置,最终使用 ANSYS 进行有限元仿真分析采用的模型参数为:块体单元(SOLID45),单元尺寸 0.75 m,1/4 结构。

3.3 高赞大桥结构有限元模型

根据上述建模方法,高赞大桥根据对称性取 1/4 结构在 ANSYS 软件中建立有限元模型,其中斜拉索采用梁单元,承台及桩基础采用壳单元及梁单元等效其出口刚度,其余部分采用块体单元(SOLID45)。模型共包含单元 1 035 341 个,节点 248 590 个。模型的自由度为 746 751 个。高赞大桥结构模型如图 3 所示,有限元模型如图 4~13 所示。

高赞大桥仿真计算中,索用梁单元模拟,其弹性模量是根据上一阶段的索力通过 Ernst 公式更新计算得到的。

由于高赞大桥主墩不高,其主墩的基础刚度对于温度荷

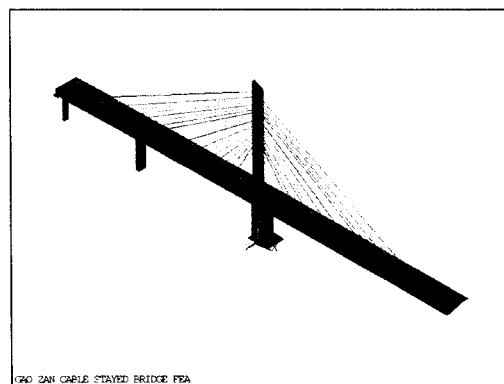


图 3 高赞大桥结构模型

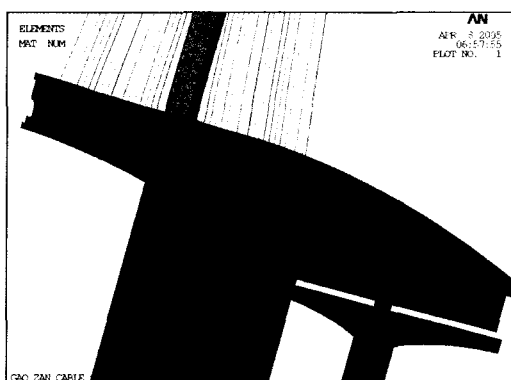


图 4 高赞大桥有限元模型(全桥)

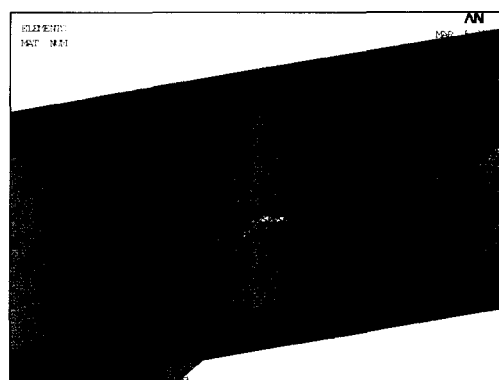


图 8 高赞大桥有限元模型(主梁索锚固区)

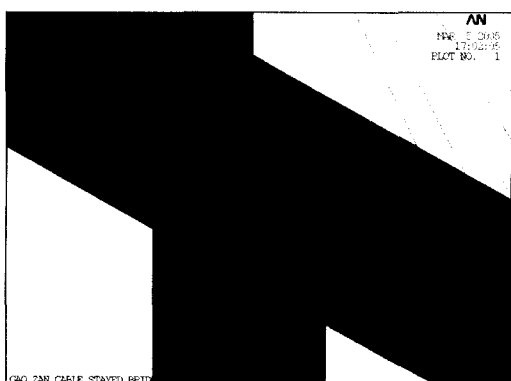


图 5 高赞大桥有限元模型(墩梁塔固结区 1)

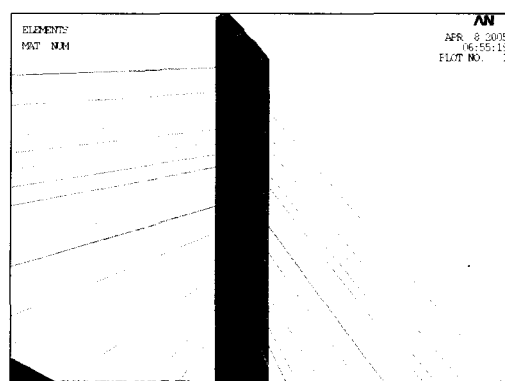


图 9 高赞大桥有限元模型(主塔)

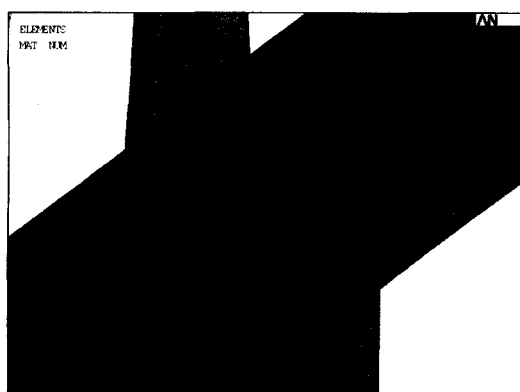


图 6 高赞大桥有限元模型(墩梁塔固结区 2)

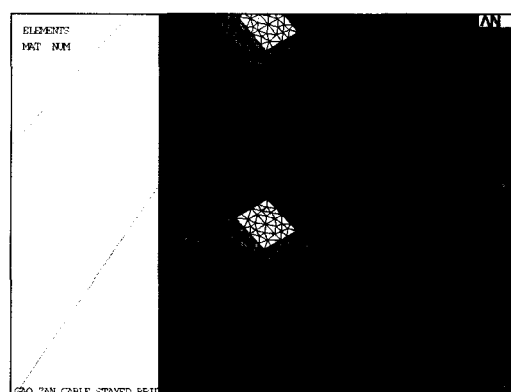


图 10 高赞大桥有限元模型(塔索锚固区 1)

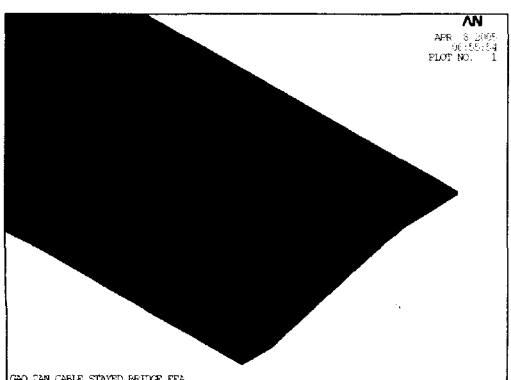


图 7 高赞大桥有限元模型(主梁)

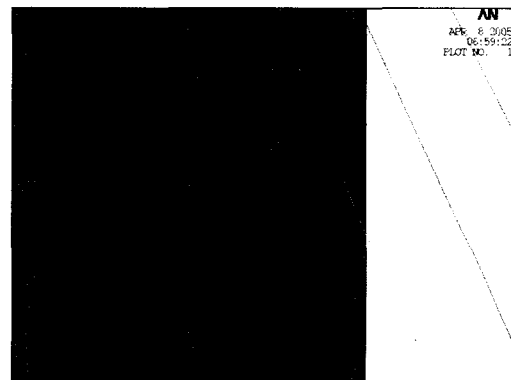


图 11 高赞大桥有限元模型(塔索锚固区 2)

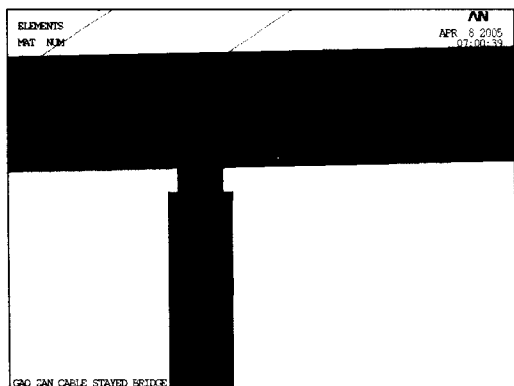


图 12 高赞大桥有限元模型(辅墩与主梁连接)

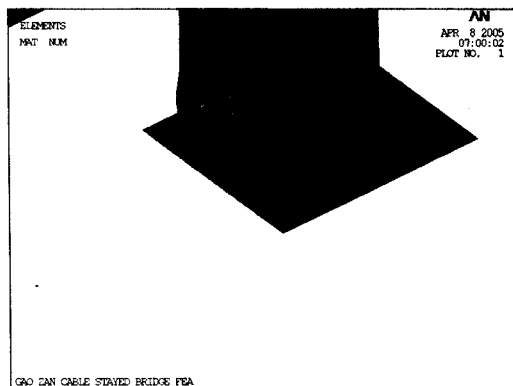


图 14 高赞大桥基础刚度模拟

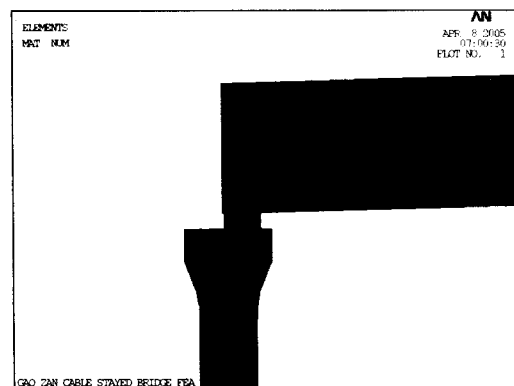


图 13 高赞大桥有限元模型(边墩与主梁连接)

载,二期收缩徐变效应等工况比较敏感,因此计算中需要把基础的刚度也模拟进来,具体的实现办法是:

- (1)使用桥梁专用程序计算大桥基础的各向等效刚度;
- (2)在仿真分析中使用无限刚的壳模拟承台把两片薄壁墩联系起来;

(3)使用梁单元模拟大桥的基础刚度,等效的原则是首先保证竖向刚度与纵向弯曲刚度等效,在此基础上等效其横向弯曲刚度与剪切刚度。

主墩基础刚度的模拟效果如图 14 所示。

4 荷载工况

根据设计要求,高赞大桥仿真分析的荷载工况^[9]包括恒载、活载以及荷载组合。

4.1 恒载工况

高赞大桥的恒载施工过程包括施工主墩、0 号块、主塔,1~21 号块主梁、辅墩、边墩、中跨合龙,桥面铺装,二期调索,成桥后收缩徐变等工况。

计算恒载工况时必须考虑以上的施工过程。施工过程的模拟在有限元仿真分析中一个较为简单的实现方法是:

- (1)根据成桥阶段的结构先建立成桥有限元模型;
- (2)根据施工阶段不断修改有限元模型,其中已建成部分要赋予刚度,未建成部分则不分配刚度($E=0$),且该部分的节点全部锁死;
- (3)叠加成桥前所有施工阶段的计算结果得到成桥时恒载作用下的计算结果。

4.2 活载工况

根据设计要求,对若干断面进行活载最不利布置,布置方法根据《公路桥涵设计通用规范》(2004-10-1 版)。其中汽车活载的影响线由设计方提供。高赞大桥荷载计算典型工况如表 1 所示。

表 1 高赞大桥荷载计算典型工况

荷载名称	关注部位	工况数	工况说明
汽车车道活载	主梁中跨跨中最不利正弯矩、主墩	3	双向六车道非偏载、 双向六车道偏载、 单向三车道偏载
	主梁中跨梁根最不利负弯矩、主墩	3	
	主梁边跨梁根最不利负弯矩、主墩	3	
	主梁边跨辅墩顶最不利负弯矩	3	
汽车车辆活载	中跨跨中	4	翼缘板最不利(3 列车队加载)、 边室顶板最不利(3 列车队加载)、 翼缘板最不利(2 列车队加载)、 边室顶板最不利(2 列车队加载)
	主跨梁根	4	
	边跨梁根	4	
	边跨辅墩顶	4	
汽车制动力	主墩	1	单向车道制动力
风荷载	主墩	2	纵风、横风、竖向风
温度	上述各部位	3	体系温差、主梁主塔温度梯度、索梁温差

4.3 荷载组合

恒载与活载组合,即可得到最不利状态。高赞大桥荷载主要组合工况如表 2 所示。

表 2 高赞大桥主要荷载组合

组合号	关注部位	最不利组合分项说明
1	主塔	恒载+风载+温度
2	主梁中跨跨中顺桥向	恒载+车道活载偏载+温度
3	主梁中跨梁根顺桥向	恒载+车道活载偏载+温度
4	主梁跨中横向 1	恒载+3 列车队加载(含冲击力)
5	主梁跨中横向 2	恒载+2 列车队加载(含冲击力)

5 结果分析与评价

5.1 恒载计算结果

恒载(至收缩徐变完成)的仿真分析结果见图 15~18。

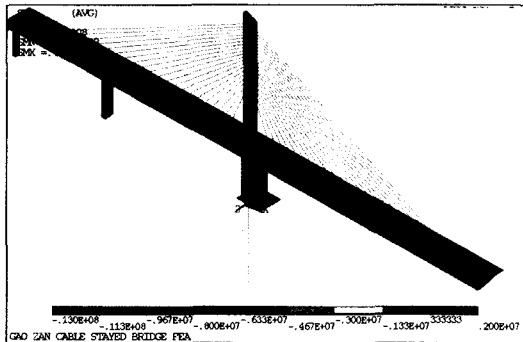


图 15 高赞大桥恒载下全桥纵桥向应力

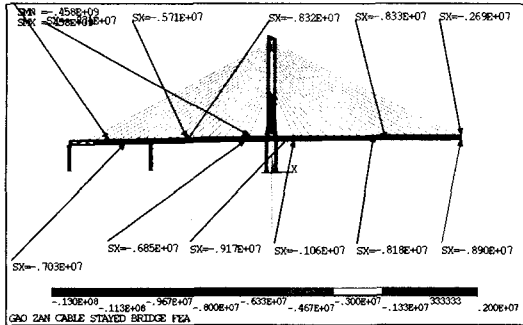


图 16 高赞大桥恒载下主梁纵桥向应力

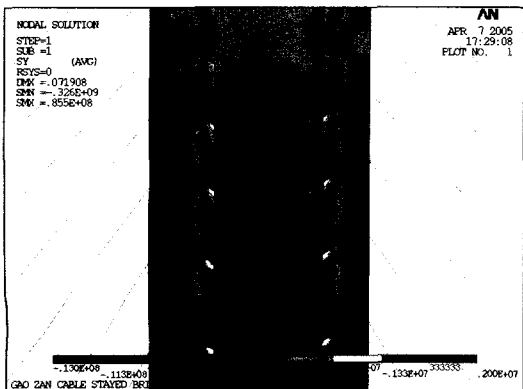


图 17 高赞大桥恒载下主塔竖桥向应力

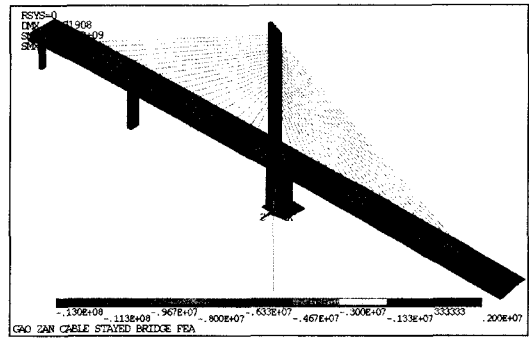


图 18 高赞大桥恒载下全桥横桥向应力

其中主梁纵桥向结果与设计采用平面杆系系统计算的结果基本一致,说明对于主梁纵桥向应力沿纵桥向分布的计算,采用平面杆系模型的计算精度已经能够满足工程要求了。

5.2 收缩徐变效应计算结果

成桥前施工过程中的收缩徐变效应在本次仿真计算中并没有考虑,成桥后至收缩徐变最终完成(10 a)这一过程的收缩徐变效应的实现方法为:

拆除斜拉索、辅墩、边墩以及一条主墩单元,使斜拉桥变为静定结构。把上述单元从成桥后至收缩徐变最终完成(10 a)这一过程所变化的内力(采用平面杆系模型,由设计提供)作为外力施加至上述静定结构的相应位置。计算其结果作为收缩徐变效应的结果。

这样计算得到收缩徐变效应的内力变化结果如图 19 所示。其主要下缘顺桥向正应力收缩徐变效应的计算结果与设计方结果的对比如图 20 所示。

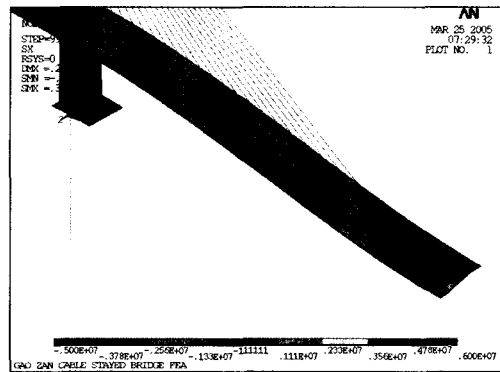


图 19 高赞大桥收缩徐变引起的内力变化

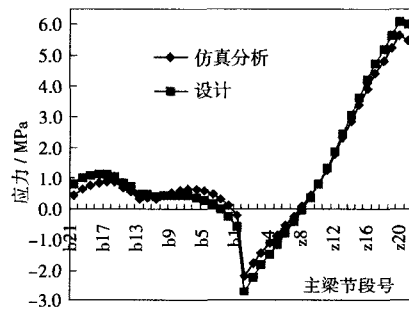


图 20 主梁下缘顺桥向正应力收缩徐变效应对比

从图 20 可以看出,采用以上方法在空间模型中仿真分析的结果与设计的结果基本一致。

5.3 剪力滞效应

边跨、中跨主梁纵桥向恒载+对称车道活载组合应力俯视图分别如图 21、22 所示。

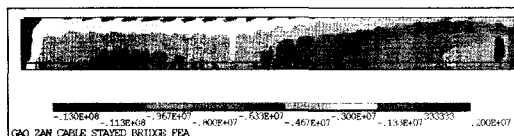


图 21 边跨主梁纵桥向应力

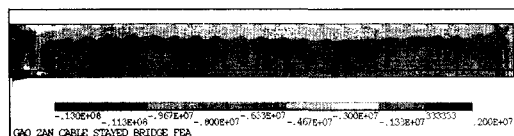


图 22 中跨主梁纵桥向应力

从图中可知,该桥剪力滞与轴力滞比较明显,边跨根部尤为突出,剪力滞与轴力滞的综合系数在 1~1.25 之间。

5.4 主梁偏载影响系数

主梁中跨跨中纵桥向应力在汽车车道非偏载与偏载情况下分别如图 23、24 所示。

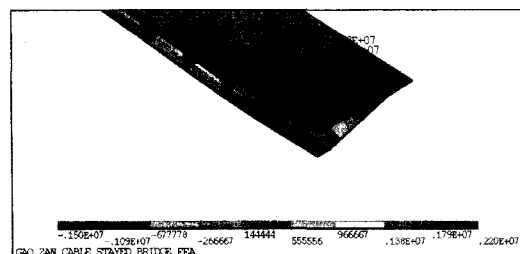


图 23 中跨跨中车道非偏载下纵桥向应力

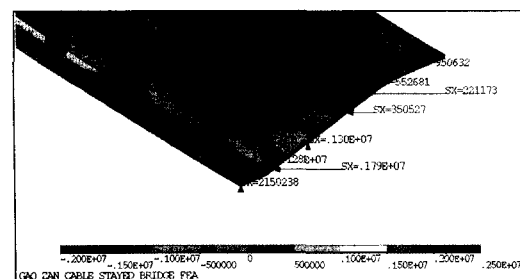


图 24 中跨跨中车道偏载下纵桥向应力

从图中可知,主梁中跨跨中偏载影响系数较小,约为 1.033,这主要是因为主梁的抗扭刚度较大的缘故。高赞大桥主梁应力集中系数如表 3。

表 3 高赞大桥应力集中系数表

项 目	中跨根部 2 号断面 (上缘/下缘)	中跨 L/4 断面 (上缘/下缘)	中跨 L/2 断面 (上缘/下缘)
剪滞系数	1.11/1.10	1.09/1.08	1.02/1.01
偏载系数	1.15/1.13	1.11/1.09	1.03/1.02
恒载应力集中系数	1.25/1.23	1.18/1.16	1.16/1.15
应力总集中系数	1.23/1.21	1.16/1.13	1.11/1.10

5.5 主梁横向受力机理

主梁横桥向应力在汽车车辆偏载加载情况下如图 25 所示。

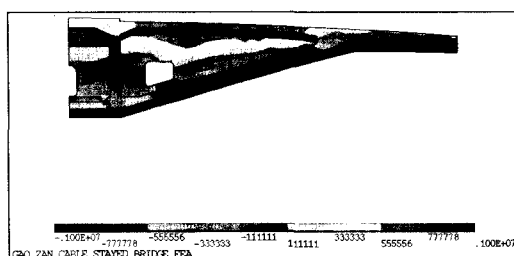


图 25 主梁在汽车车辆偏载下横桥向应力

从图 25 可知,主梁在受到顶板的竖向力时,横桥向受力机理为箱梁顶板受拉,斜底板受压,横隔板相当于悬臂梁。

6 结语

有限元仿真分析是随着计算机硬件技术的快速发展以及通用有限元软件的不断完善而发展起来的一门工程计算技术,是未来结构设计与分析的发展方向^[9]。随着计算机软硬件技术的快速发展,利用个人计算机进行结构的仿真分析逐渐成为可能。

本文针对高赞大桥的实际情况,利用个人计算机进行全桥全块体单元模型的仿真分析,分析中考虑该桥的施工过程、二期调索以及后期的收缩徐变效应。仿真分析的结果表明:对于高赞大桥主梁正应力,采用平面杆系模型的计算精度已经能够满足工程要求了;高赞大桥主梁剪力滞、轴力滞等的应力集中系数在 1~1.25 之间。

高精度的分析结果除有效地指导了设计工作外,也说明了利用个人计算机进行结构高层次的仿真分析已经成为现实。

参考文献:

- [1] 郑凯锋,陈宁,张晓翹.桥梁结构仿真分析技术研究[J].桥梁建设,1998,(2):10-15.
- [2] 广东省公路勘察规划设计院.高赞大桥设计资料[R].2004.
- [3] 徐郁峰,韩大建,苏成.高赞大桥有限元仿真分析报告[R].广州:华南理工大学城市建设研究中心,2005.