

复杂索塔结构空间受力状态研究

汪劲丰¹, 傅静瑶²

(1. 浙江大学建工学院, 浙江杭州 310027, 2. 杭州市市政设施监管中心, 浙江杭州 310003)

摘要:索塔是缆索承重桥梁中的一重要受力构件, 型式多样、荷载条件复杂, 其最终的应力状态同桥梁施工过程密切相关, 且空间受力特性明显。以一实际斜拉桥索塔为背景, 采用实体退化系列单元模拟了整个施工过程, 对索塔结构的应力状态进行了分析, 探讨了索塔根部截面竖向正应力随施工过程的变化情况。分析结果表明索塔结构的应力空间特性明显, 施工过程中应力变化复杂。空间分析弥补了平面分析的不足, 其结果对保证索塔安全、完善索塔设计具有实际意义, 所采用的分析方法值得推广应用。

关键词:索塔; 施工过程; 实体退化单元; 空间分析

中图分类号:U441.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)03-0084-03

0 前言

对于缆索承重的桥梁, 如斜拉桥、悬索桥等, 索塔负责将上部结构的部分或全部荷载传递给基础, 它是缆索承重桥梁一重要受力构件。其受力状态同施工过程密切相关, 且随施工过程不断变化。目前一般采用平面分析方法模拟整个施工过程, 对索塔的受力状况进行分析。为了满足美观及适用的要求, A型、倒Y型、钻石型等型式复杂多样的索塔常被采用。该类索塔各组成部分的轴线与荷载作用方向将不完全在同一个平面, 这与平面分析理论中的假设不一致, 索塔结构的受力状态表现出了明显的空间特性。为了保证索塔的安全, 提高其耐久性, 对施工过程中及成桥后索塔结构真实应力状态的把握非常重要, 因此有必要采用空间方法对整个索塔的施工过程进行模拟, 以弥补平面分析方法的不足, 但目前仍无非常有效的方法对大跨PC桥梁的施工过程进行模拟^[1]。本文以一预应力混凝土斜拉桥——杭州文晖大桥为背景, 采用浙江大学徐兴教授提出的实体退化系列单元^[2], 对索塔结构施工过程的真实应力状态进行分析研究。

1 工程背景

本文以杭州文晖大桥^[3]为研究对象, 对索塔结构的应力状态进行分析。该桥属双塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 属于半漂浮体系。桥跨布置为103m+240m+103m, 桥面宽34m。其斜拉索采用扇形布置, 每塔19对, 梁上基本索距为6.0m, 塔上基本索距为1.4m。文晖大桥立面布置如图1所示。主梁截面采用双实心边主梁形式, 为纵、横双向预应力混凝土结构, 梁高2.5m, 两实心边主梁中心距为25.5m, 两主梁之间用横梁及桥面板相连, 顺桥向每隔6m设一道横梁, 其间距与索距相同, 横梁厚度为30cm, 桥面板厚度为28cm。主梁横截面型式如图2所示。其主塔是由塔柱和上下横梁组成的门式框架结构, 如图3所示, 自承台顶至塔顶高80.0m, 中间设两道横梁。

该桥索塔采用爬模法施工, 中跨主梁采用牵索挂篮进行悬臂浇注, 边跨采用移动支架进行施工。

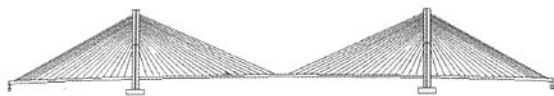


图1 主桥立面布置图

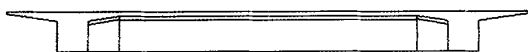


图2 主梁横截面图

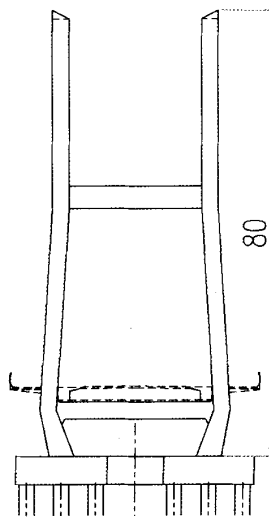


图3 索塔立面图

2 有限元模型

2.1 有限元网格

由于传统的空间单元模式不能兼顾结构分析效率与分析精度, 且不利于模拟大量预应力筋的空间效应, 本文采用自行提出的实体退化单元对整个施工过程进行空间模拟。该单元是在三维实体等参单元的基础上, 直接引入各类构件(如板、壳、梁、膜等)的简化假定而得出的, 它结合了实体等参单元和板壳单元的优点, 既能同实体等参元一样精确描述结构的形状, 又能像板壳等单元一样进行网格划分, 具体可参看文献^[4]。

根据索塔和主梁实际施工的情况, 采用实体退化单元建立了各施工阶段的空间分析模型。图4 a)~c) 分别示意了索塔施工某段时、索塔施工完毕及主梁某段架设时的空间分析有限元网格, 成桥状态下的有限元网格如图5所示。各有限元模型均是按设计成桥位置建立的, 每个塔柱沿顺桥向和横桥向均划分一个单元, 下、中、上塔柱沿高度方向分别划分成4、22、38个单元, 下横梁分4个单元, 上横梁分16个单元, 整个索塔共划分84个单元, 其节点数为963^[4]。分析

收稿日期: 2006-04-14

作者简介:汪劲丰(1976~), 男, 安徽怀宁人, 工学博士, 研究方向为大跨桥梁结构健康监测及安全预警研究。复杂桥梁结构仿真分析及施工控制。

时,钢筋混凝土的模量取 $3.65 \times 10^{10} \text{Pa}$,泊松比采用 0.16667。

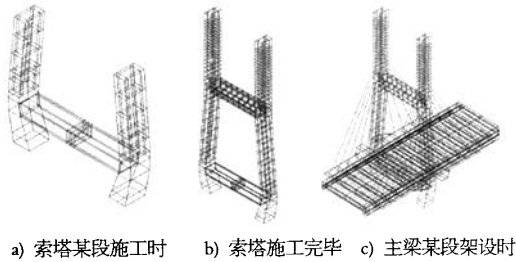


图 4 文晖大桥索塔施工过程模拟有限元网格图

2.2 荷载及位移边界条件

在对施工过程进行模拟分析时,须根据实际情况客观考虑其荷载及边界条件,这直接关系到结构分析的正确性。采用实体退化单元能方便地对结构的荷载及边界条件进行客观模拟。

在索塔施工时,主要考虑结构自重、施工机具重量、预应力荷载等。按规范,混凝土容重取 26kN/m^3 。对预应力荷载分成两个阶段来考虑^[9]:即预应力张拉后灌浆前阶段,采用虚功原理将预应力效应等效为节点荷载;而预应力管道灌浆后阶段,将预应力筋作为结构一部分,通过结构分析自动考虑预应力的二次效应。根据设计情况,索塔的支承条件按索塔在承台处固结,塔梁在施工过程中固结。

2.3 模拟工况

为了掌握结构的实际受力状态,必须对施工过程中的各关键工况进行分析。根据施工的实际情况,对索塔施工过程,共确定了 21 个分析工况,如表 1 所示。

表 1 索塔施工过程模拟分析工况划分

工况号	工况描述
1	下塔柱、下横梁施工
2~6	中塔柱 1~5 号块施工
7	张拉下横梁第一批预应力筋
8	下横梁施工支架拆除
9~10	中塔柱 6~7 号块施工
11	上横梁施工
12~14	上塔柱 1~3 号块施工
15	张拉上横梁预应力筋
16	上横梁施工支架拆除
17~20	上塔柱 4~7 号块施工,索塔封顶
21	主梁施工到 3 号段,第三对斜拉索张拉完毕后,张拉下横梁剩余预应力筋

3 分析结果

由于该索塔的两塔柱受力情况相同,在此选取一个塔柱的分析结果进行讨论。为了便于叙述,对塔柱截面 4 个角点进行了标识,如图 5 所示,其中 N_z 、 N_b 分别表示塔柱内边(靠近行车道)中跨、边跨侧的角点, W_z 、 W_b 分别表示塔柱外边中跨、边跨侧的角点。



图 5 塔柱截面角点标识示意图

3.1 理论分析结果

图 6 列出了索塔封顶后(工况 20),塔柱截面 4 个角点的竖向正应力状况。从图中可看出,在塔柱上横梁以下的区域外边缘的应力同内边缘的应力差别较大,尤其是在靠近下横梁区域,这主要由于塔柱轴线呈折线形,在竖向荷载作用下,会产生弯矩,使得中横梁底部截面外缘压应力减小,甚至出现局部受拉的情况,而张拉下横梁上的预应力加剧该变化趋势。因此,从受力角度,索塔布置为直线形最合理;但综合考虑到主梁结构型式、斜拉索的布置、下部基础造价及景观等的要求,塔柱又必须布置成折线型。设计中应综合考虑上述多种因素,经分析比较选择索塔轴线线形,以求受力合理、造价最省。

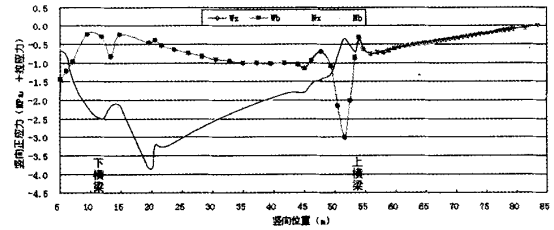


图 6 索塔封顶后(工况 20)塔柱截面应力状况

索塔在竖向荷载和横梁预应力荷载作用下,索塔沿横桥向(面内)弯曲;在斜拉索水平分力作用下,索塔沿纵桥向(面外)弯曲。索塔在竖向荷载、预应力荷载及斜拉索索力作用下,其受力将更加复杂。图 7 示意了横梁剩余预应力筋张拉完毕(第三对斜拉索张拉完毕后)塔柱截面的竖向正应力状况。从图中可以看出,塔柱在下横梁附近区域,各角点的竖向正应力值各不相同,空间受力特性明显。因此,只有对各施工阶段建立空间分析模型,对施工过程进行空间模拟才能计算出索塔在施工过程及成桥状态的客观应力状况,而目前我国桥梁设计中广泛采用的 GQJS、桥梁博士等软件都是基于平面杆系理论的,这应引起设计单位的注意。

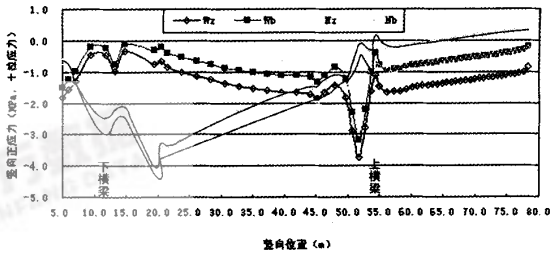


图 7 下横梁第二批预应力筋张拉后(工况 21)塔柱截面应力状况

由于结构构造的原因,塔柱在上横梁上的局域区域(19.50m)应力变化较复杂,图 6、图 7 也反映了这一点。在此专门对该位置截面竖向正应力随索塔施工过程的变化情况进行了探讨,如图 8 所示。从图中可看出,在索塔施工过程中,截面内侧面点的应力随施工过程呈增加趋势,索塔施工完毕时有 4.0MPa 的压应力储备,而外边缘点的竖向正应力随施工过程变化缓慢,且在部分施工阶段出现了受拉状态,但拉应力数值较小。

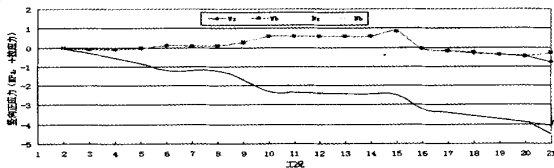


图 8 竖向位置 19.50m 截面的正应力随施工过程变化情况

3.2 理论值同实测值的比较

在施工过程中,在塔根部截面的4个角点处埋设了4个钢弦式应力传感器,对关键工况下应力的应力状况进行了监测。以施工的第5工况为初始值,将测试结果与空间分析结果进行了比较,列于图9。从图9中可以看出,除少数工况差别稍大外,达到0.6MPa,其余均吻合较好,差值均在0.3MPa之内。考虑到应力测试精度难以保证,可认为理论分析结果总体上同实测结果吻合良好,这说明了本空间方法能有效地分析塔柱截面的客观

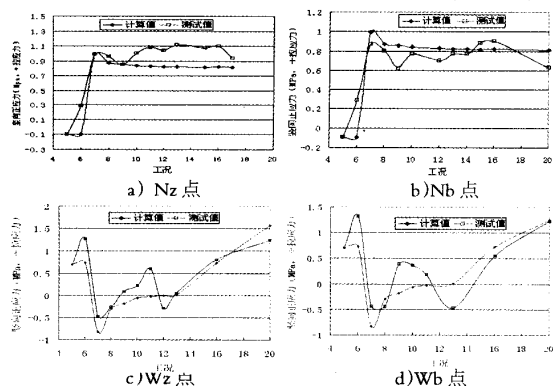


图9 塔根部截面应力测试值与计算值比较

应力状况。

4 结论

本文基于自行提出的实体退化系列单元,对文晖大桥索塔施工过程进行了空间模拟分析,通过分析得知:

1) 型式复杂的索塔结构,在竖向荷载、预应力荷载、索力等作用下,结构受力复杂,空间受力特性明显,对其整个施工过程进行空间模拟分析非常必要。

2) 本文采用的空间分析方法可行,能很好地解决复杂索塔结构施工过程的空间模拟问题,运用该方法能对索塔的设计进行复核及评价,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 贾丽君,肖汝诚,孙斌,等. 大跨度悬索桥的三维应力分析方法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 33-35.
- [2] 徐兴,凌道盛. 实体退化单元系列[J]. 固体力学学报(计算力学专辑), 2001, 22: 1-12.
- [3] 铁道部第四勘测设计研究院. 杭州市文晖路艮山门立交桥设计图.
- [4] 汪劲丰,施笃铮,项贻强,等. 杭州市文晖路立交桥主桥的空间分析[J]. 计算力学学报, 2003, 20(3): 377-382.
- [5] 汪劲丰. 预应力混凝土斜拉桥施工控制的关键技术研究[D]. 杭州,浙江大学建工学院, 2003.
- [6] 林同炎, NED H. BURNS. 预应力混凝土结构设计(第三版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. 7-14, 245-270.

