

文章编号:1001-4373(2009)04-0012-05

# 基于非线性有限元和快速建模的桥梁承载力预测

陆新征<sup>1</sup>, 张炎圣<sup>1</sup>, 黄盛楠<sup>2</sup>, 董春<sup>3</sup>

(1. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室,北京 100084;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083;3. 中土赛科科技有限公司,北京 100080)

**摘要:**根据桥梁检测结果,准确、快速地预测桥梁承载力,对桥梁运营和维修具有重要意义。对基于非线性有限元软件的桥梁承载力预测技术进行了研究。首先介绍了精细建模技术,并通过大比例模型桥试验,证明了非线性有限元模型的准确性。为解决精细建模过于繁琐的问题,又开发了快速建模程序,以提高建模的方便性。最后,介绍了上述桥梁承载力预测技术的工程应用实例。

**关键词:**桥梁;承载力预测;非线性有限元;高精度;快速建模

**中图分类号:**U448.35

**文献标识码:**A

## 0 引言

桥梁受使用环境和自然环境的长期作用,经常产生各种缺陷,如混凝土开裂和碳化,钢筋锈蚀,预应力损失等。另外,车辆超载、撞击等意外事故会对桥梁产生不同程度的损伤。桥梁检测可提供反映桥梁缺陷和损伤的基础数据<sup>[1]</sup>。如何进一步根据桥梁检测结果,准确、快速地预测桥梁实际承载力,对桥梁运营和维修具有重要意义。

桥梁承载力预测可基于外观调查、设计规范、专家意见或可靠性理论<sup>[2]</sup>,但这些方法多依赖经验和统计,离散度较大。现场试验可准确评价桥梁承载力<sup>[2]</sup>,但代价高昂,次数受到限制,且不能进行实时评价。近年有限元方法和计算机技术的发展,为土木工程非线性分析提供了有力工具<sup>[3]</sup>,桥梁的有限元建模和非线性分析,可以实现桥梁承载力的动态预测,并能方便结合数据库技术,实现桥梁的智能评价和管理<sup>[4]</sup>。

本文首先介绍基于 MSC. MARC 软件的精细非线性有限元建模技术,包括单元类型、材料本构和边界模型,并通过大比例模型桥试验,证明其准确性。为解决精细建模过于繁琐的问题,且为实现意外事件发生时桥梁安全性快速评价,本文又基于 MSC. MARC 软件开发了快速建模程序。本文最后通过工程应用实例,表明上述桥梁承载力预测技术

具有良好的精确性和方便性。

## 1 精细非线性有限元建模技术

### 1.1 单元类型

梁单元模型因其计算速度快,在桥梁有限元分析中被广泛采用,但存在难以模拟局部破坏等问题。为提高桥梁分析的精确性,本文基于更高精度的实体单元和分层壳单元加以建模分析。采用实体单元建模分析最精确,但其建模工作量和计算量较大,相比之下,MSC. MARC 自带的分层壳单元,是模拟钢筋混凝土桥梁的高效单元类型<sup>[5]</sup>。分层壳单元将钢筋层置于混凝土层之间(见图 1),并能考虑钢筋层的方向,对于模拟桥梁分布钢筋(如顶板横向钢筋、腹板箍筋)特别适用。除了分层壳单元,MSC. MARC 还提供了 Rebar 单元,这是一种组合式钢筋混凝土模型,对二维和三维模型都适用<sup>[6]</sup>。预应力筋是桥梁建模的另一关键技术,尤其具有抛物线或圆弧等复杂形状的预应力筋,给建模带来不少困难。对此,MSC. MARC 提供了 Insert 技术<sup>[5]</sup>,混凝土和预应力筋可分别建模,然后通过 Insert 技术,软件自动匹配空间位置相近的混凝土节点和预应力筋节点,从而使混凝土和预应力筋共同作用。这样,预应力筋既能根据实际形状建模,又不会导致繁琐的网格划分和节点处理工作。

收稿日期:2008-11-25

基金项目:国家自然科学基金(50808106)

作者简介:陆新征(1978-),男,安徽芜湖人,副教授,博士。

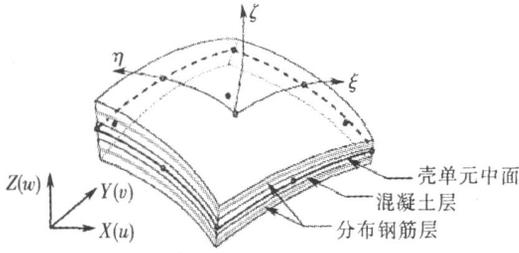


图 1 分层壳单元

Fig. 1 Multi-layer shell element

本文基于 20 m 跨简支预应力钢筋混凝土 T 梁标准图,分别采用分层壳单元和实体单元对单根 T 梁建模分析(见图 2).初始时刻施加预应力和结构自重,然后施加公路-I 级车道荷载,横向分布系数按 3 车道、5 片梁取值为 0.67.在分层壳模型中,混凝土、分布钢筋采用分层壳单元,而在实体模型中,混凝土采用六面体单元,分布钢筋采用 3D Rebar 单元.对于普通纵筋和预应力筋,2 种建模方法都采用三维桁架单元,并应用 Insert 技术.计算的车道荷载倍数-跨中挠度曲线如图 3 所示.基于分层壳单元和实体单元计算的极限承载力相对误差仅在 5% 左右,可见分层壳单元和实体单元都可用于桥梁的精细建模分析.

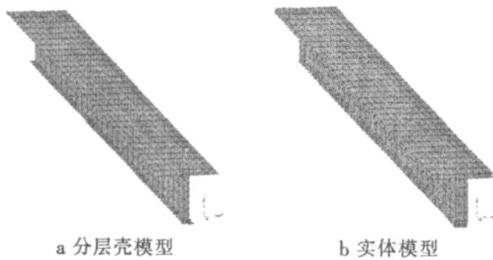


图 2 T 梁有限元模型

Fig. 2 FE model of T girder

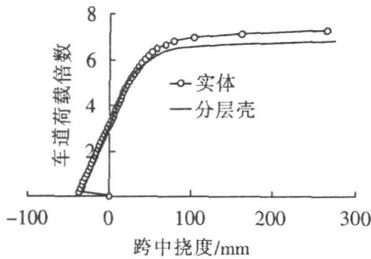


图 3 T 梁荷载-挠度曲线

Fig. 3 T girder load-deflection curve

### 1.2 材料本构

精确的桥梁建模分析,必须考虑材料非线性.对于简单问题,用户可选用 MSC. MARC 自带的材料非线性本构.另外, MSC. MARC 提供了相关技术,

自定义更复杂的材料非线性本构.例如 Table 功能,可根据需要输入材料应力-应变关系曲线,由此混凝土规范曲线、Hognestad 曲线以及过镇海曲线等<sup>[6]</sup>常用混凝土本构都能在 MSC. MARC 中实现.另外, MSC. MARC 具有良好的二次开发功能,用户可根据需要编写 Fortran 程序,将其嵌入 MSC. MARC,以精确模拟复杂的材料非线性<sup>[7]</sup>.

### 1.3 边界模型

桥梁结构计算通常把边界约束简化为固支和简支 2 种模型,但精确的建模分析还应考虑支座对桥梁端部可能存在的有限转动约束.在一般情况下,桥梁支座设计为可自由转动,对此采用简支模型是合理的.但是,有时为承受可能出现的向上反力,或者增大抗滑能力,板式橡胶支座、盆式橡胶支座以及球型支座会被改造成拉压支座<sup>[8]</sup>,该类型支座可能产生复杂的拉压应力,从而对桥梁端部产生约束弯矩,这种约束作用介于简支和固支之间.对此,可采用图 4 所示边界模型,在端部截面,各点都与底部的点建立纵向弹簧连接,则可实现有限转动刚度模型.弹簧刚度趋向 0,则为简支,趋向无穷,则为固支.转动刚度的取值,与支座性能参数以及构造情况有关,由于拉压支座应力分布情况复杂,准确的转动刚度取值应根据现场试验结果确定.

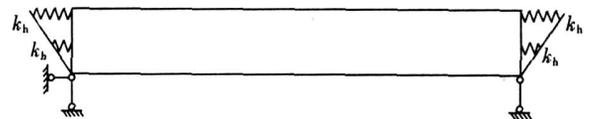


图 4 边界有限转动刚度模型

Fig. 4 Model of boundary constraints

### 1.4 模型桥试验验证

依托云南安宁至楚雄高速公路 14 号达连坝段 K149 + 200.12 轻质混凝土预应力连续刚构跨线桥工程背景,进行了缩尺模型试验以及基于 MSC. MARC 的非线性有限元分析<sup>[9]</sup>.

实际桥梁跨度为 19 m + 35 m + 19 m,横截面为单箱单室,桥面宽度为 6.5 m.试验缩尺模型几何比例为 1/4,梁截面形状根据抗弯刚度相等原则等效成工字形,实际桥梁结构及其模型试验的详细信息参见文献[9],试验照片如图 5 所示.由于试验以面内受力为主,有限元模型采用平面应力单元,其精度高于一般的梁单元.混凝土本构采用过镇海模型,钢材本构采用理想弹塑性模型,钢筋和预应力筋采用 2D Rebar 单元与混凝土形成组合式模型.

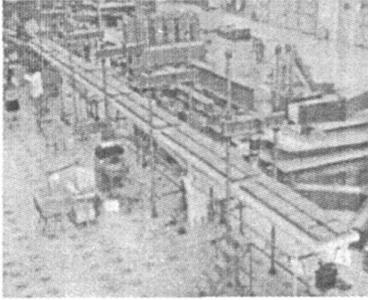


图 5 试验照片

Fig. 5 Photograph of experiment

以中跨三点加载试验及其有限元分析为例,图 6 表明有限元计算的裂缝分布情况与试验结果吻合良好,图 7 表明有限元计算的中跨跨中荷载-挠度曲线与试验结果吻合良好.可见精细非线性有限元可以真实模拟桥梁的受力行为.

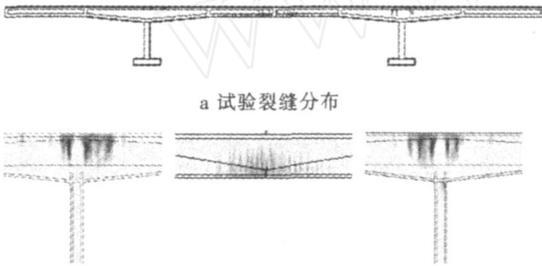


图 6 裂缝分布比较

Fig. 6 Comparison of distributions of cracks

## 2 快速建模程序

如上所述, MSC. MARC 软件为准确预测桥梁

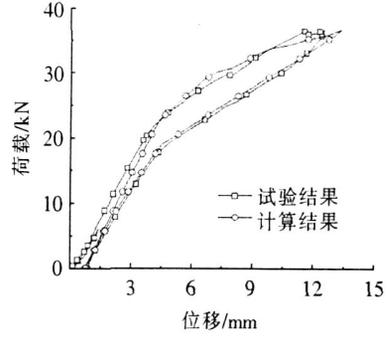
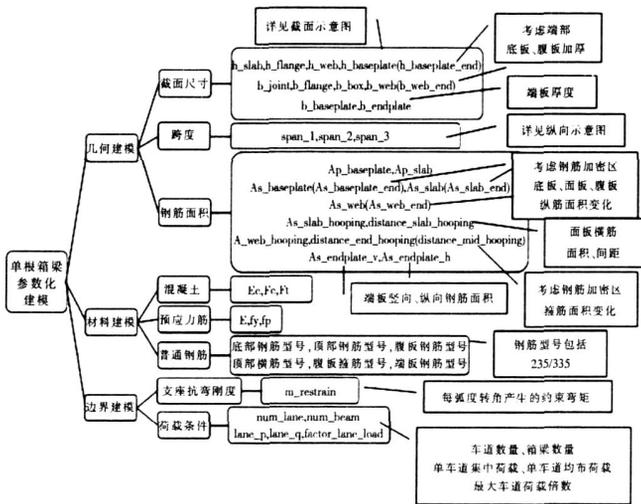


图 7 中跨跨中荷载-挠度曲线比较

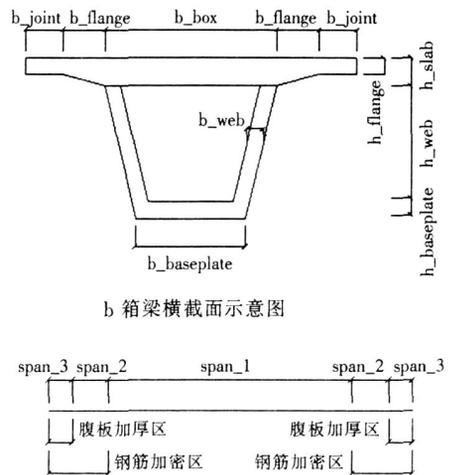
Fig. 7 Comparison of load-deflection curves

承载力提供了合适的单元类型、材料本构以及边界模型.但是,精细建模过于繁琐,难以大量推广,而且意外事件(如重车过桥)发生时,通常还要迅速对桥梁安全性做出评价,繁琐的建模工作难以适应这一要求.为提高桥梁建模速度,本文开发了基于 MSC. MARC 的典型梁式桥上部结构快速建模程序,包括基于实体单元的预应力钢筋混凝土 T 梁桥、基于分层壳单元的预应力钢筋混凝土 T 梁桥以及基于分层壳单元的预应力钢筋混凝土箱梁桥 3 个模块,可以进行典型梁式桥结构承载力分析.

快速建模程序共分 3 步: 1) 通过 Fortran 编程,进行单根梁参数化建模,包括几何建模、材料建模以及边界建模,以预应力钢筋混凝土箱梁桥为例,如图 8 所示; 2) 通过自动修改 MSC. MARC 命令流,根据横向梁的片数和纵向梁的跨数,对单根梁进行复制,形成整桥模型,进行计算; 3) 基于 MSC. MARC 后处理软件,查看曲线、云图等计算结果.



a 单根箱梁输入参数



b 箱梁横截面示意图

c 箱梁纵向示意图

图 8 单根箱梁快速建模参数

Fig. 8 Parameters of a single box girder

快速建模程序默认的材料本构如下:混凝土受压采用基于 von Mises 屈服准则的弹塑性模型,应力-应变关系采用混凝土规范曲线,受拉采用基于最大拉应力准则的弥散裂缝模型<sup>[6]</sup>;钢材采用基于 von Mises 屈服准则的理想弹塑性模型. 默认的底部预应力筋几何形状为抛物线,端部锚固位置为1/2梁高处. 程序的加载模式如下:初始时刻施加预应力和结构自重,然后车道荷载,包括均布力和跨中集中力,按比例增加,直至用户输入的最大车道荷载倍数,或者达到桥梁的极限承载力.

应用快速建模程序,只需在文本中输入相关参数就可方便建立桥梁有限元模型. 此外采用高精度的单元类型、材料本构和边界模型,并可根据桥梁检测、监测和现场试验结果进行参数取值,从而保证了桥梁模型的真实性和准确性.

### 3 工程应用实例

本文所述基于精细非线性有限元和快速建模的桥梁承载力预测技术,已在河北 6 座公路桥上得到应用,以其中某 10 孔连续梁桥为例进行介绍. 该桥单孔跨度 20 m,横向包括 10 个预应力钢筋混凝土箱梁,桥面宽度为 16.25 m.

通过快速建模程序生成该桥分层壳有限元模型,材料本构和预应力筋形状采用快速建模程序默认设置. 要求评价预应力损失对桥梁承载力的影响,所以模型中预应力分别根据设计资料和检测结果取值,并对两者计算结果进行对比.

实际工作表明,采用快速建模程序可大大节省建模时间,获得桥梁结构相关参数后,只需几分钟时间便可完成建模工作. 而在计算时间方面,如果只计算单片梁,3 min 可获得计算结果. 如果要进一步考虑空间受力特性,以提高分析精度,可将单片梁进行横向组装,生成单跨桥模型,还可进一步进行纵向组装,生成整桥模型. 单跨桥计算耗时 53 min,整桥计算耗时 21 h,尚在工程可接受范围内. 随着计算机速度的提高,计算耗时还会不断缩短.

首先对整桥破坏过程进行模拟,加载模式如下:预应力按检测结果取值,所有跨都布置公路-I级车道荷载,横向均布施加. 图 9 显示整桥破坏时混凝土开裂和预应力筋屈服情况. 可见,在此加载模式下,为边跨跨中弯坏,其破坏全过程如图 10 所示.

桥梁承载力计算还需考虑车道荷载的横向和纵向最不利布置,根据计算,边跨边梁是最危险构件,整桥承载力受边跨边梁跨中抗弯承载力控制. 因此

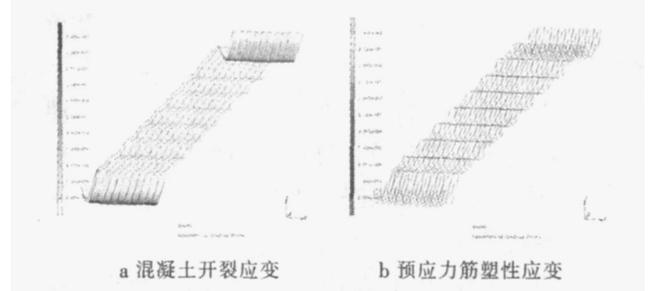


图 9 有限元应变云图(50 倍变形)

Fig. 9 FE strain contour (deformation magnify factor = 50)

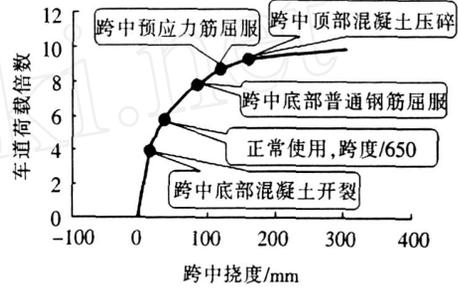


图 10 边跨破坏全过程分析

Fig. 10 Full failure procedure of side span

对边跨边梁进行公路-I级车道荷载的横向和纵向最不利布置,然后逐渐增大车道荷载,得到车道荷载倍数-跨中挠度曲线,如图 11 所示. 基于该曲线,可得到桥梁承载力,如跨中挠度等于 1/650 跨度时,对应的荷载就是桥梁正常使用承载力,而曲线平台段对应的荷载就是桥梁极限承载力. 图 11 表明,在预应力损失的情况下,该桥的正常使用承载力有所降低,但极限承载力不受影响.

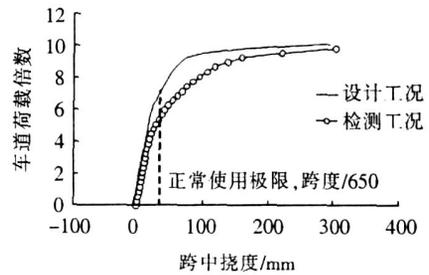


图 11 预应力损失对承载力影响

Fig. 11 Influence of bearing capacity due to prestress loss

### 4 结论

本文讨论基于非线性有限元的桥梁承载力预测,介绍和分析了精细建模和快速建模的相关技术,并结合实际工程介绍了应用情况,得到如下结论:

- 1) MSC. MARC 软件提供了对桥梁进行高精度非线性有限元分析的单元类型、材料本构和边界

模型,计算结果与试验结果吻合良好,为桥梁承载力预测提供了有力工具.

2) 快速建模程序大大提高了桥梁建模速度,使推广高精度非线性有限元分析成为可能,并且可根据检测和现场试验结果进行参数取值,保证了有限元模型的真实性和现实性.

3) 本文所述基于精细非线性有限元和快速建模的桥梁承载力预测技术,在工程领域得到很好应用,可进一步研究如何将其纳入桥梁管理系统数据库.

#### 参考文献:

- [1] 李义. 混凝土桥梁结构损伤及损伤加固[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [2] 李亚东. 既有桥梁评估方法研究[J]. 铁道学报, 1997, 19(3): 109-115.
- [3] 张炎圣, 陆新征, 李易, 等. MSC. MARC 在土木工程极限分析中的应用[C]. MSC. Software 公司 2007 中国用户年会论文集. 北京: CDROM, 2007.
- [4] 李义, 蔡敏, 胡俊. 桥梁评价系统的研究与开发[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2004, 12(3): 18-21.
- [5] 林旭川, 陆新征, 缪志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 51-56.
- [6] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] 陆新征, 张炎圣, 江见鲸. 基于纤维模型的钢筋混凝土框架结构爆破倒塌破坏模拟[J]. 爆破, 2007, 24(2): 1-6.
- [8] 胡兆同, 陈万春. 桥梁通用构造及简支梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [9] 黄盛楠, 刘英奎, 叶列平, 等. 预应力高强轻骨料混凝土连续刚构桥试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(Sup 1): 134-144.

## Prediction of Bridge Bearing Capacity Based on High-precision Nonlinear Finite Element Analysis and Fast Modeling Technology

LU Xin-zheng<sup>1</sup>, ZHANG Yan-sheng<sup>1</sup>, HUANG Sheng-nan<sup>2</sup>, DONG Chun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Structure Engineering and Engineering Vibration(Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084;

2. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

3. Sustainable Civil Engineering Consulting Ltd, Beijing 100080)

**Abstract:** Fast and accurate prediction for the bearing capacity of bridges after inspection is important to the management and retrofitting of bridges. The prediction technology of the bearing capacity of bridges is studied based nonlinear finite element analysis. The accuracy of the proposed high-precision nonlinear finite element model is verified via a large scale bridge model experiment. And a fast modeling technology is developed to reduce the workload of high-precision modeling. Finally the application of the proposed technology is demonstrated with real projects.

**Key words:** bridge; prediction of bearing capacity; nonlinear finite element; high-precision; fast modeling