

叠合结构变形的非线性有限元分析

赵宏旭

(湖南交通工程职业技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为了解叠合结构的力学性能, 使其广泛地应用于工程实际, 基于 ABAQUS 对叠合板变形进行了有限元分析, 得出叠合板的变形特征、刚度变化规律及变化原因等, 为叠合结构的有限元分析提供了参考。

关键词: 叠合结构; 变形; ABAQUS; 有限元分析

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)02-0010-04

Analysis of Nonlinear Finite Element for the Composite Structure Deformation

Zhao Hongxu

(Hunan Technical College of Communications and Engineering, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: In order to understand the mechanical properties of composite slab and make them extensively used in practice, the deformation of the composite based on ABAQUS is analyzed. The results of deformation property, the change rule and reason of stiffness for composite slab are obtained, which provide reference for the finite element analysis of composite structure.

Key words: composite structure; deformation; ABAQUS; finite element analysis

混凝土叠合结构是在预制构件上加浇一层混凝土而形成的一种装配整体式结构。由于叠合结构两阶段制造、2次受力, 使它具有整体性能好、工业化生产程度高、便于机械化施工、节省模板、降低造价和保护环境等特点^[1]。叠合结构的现浇部分和预制部分共同工作, 加强了结构的整体刚度、增强了抗震能力; 叠合楼板应用预应力, 可大大增加楼板的跨度, 从而可建设大开间的房屋。

目前, 有限单元法已经成为工程数值分析的有力工具。许多通用程序和专业应用程序已经在结构分析的领域内投入了实际应用, 如 ANSYS, ADINA, ABAQUS 及 MSC 系列软件等。在处理高度非线性接触问题上, ABAQUS 具有绝对优势, 它为用户提供了广泛的功能, 且使用简单^[1-4]。近年来, 石建军、孙冰等^[5-7]进行了预应力轻骨料混凝土叠合板的试验和数值模拟研究, 并取得了一些成果。本文在其研究结果基础上, 基于 ABAQUS 对叠合结构进行有限元分析。

收稿日期: 2009-02-16

作者简介: 赵宏旭 (1966-), 男, 湖南双峰人, 湖南交通工程职业技术学院讲师, 主要研究方向为建筑结构设计及施工,

E-mail: zhxbcy@tom.com

1 非线性有限元分析

1.1 材料本构模型

1.1.1 混凝土本构模型

混凝土材料采用 ABAQUS 中最常用的弹塑性弥散裂缝模型 (concrete smeared cracking model), 关于裂缝的模拟是基于弥散, 关于屈服面的定义则考虑了应力张量的第一、第二不变量, 受拉破坏面函数与受压屈服面函数在 $p-q$ 组成平面上的示意图如图 1 所示, 双轴应力状态下的破坏面与受压屈服面如图 2 所示。

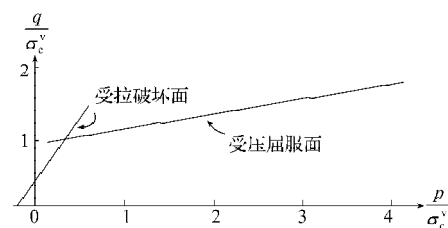


图 1 $p-q$ 平面中破坏面示意图

Fig. 1 Failure surface in $p-q$ plane

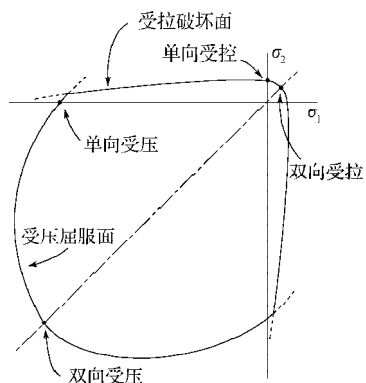


图2 双向受力状态下屈服示意图

Fig. 2 Yield sketch map in biaxial stress state

受压屈服面为Drucker-Prager形式，在 $p-q$ 平面上为一直线，偏量平面上为圆：

$$f_c = q - \sqrt{3}a_0 p - \left(1 - \frac{a_0}{\sqrt{3}}\right)\sigma_c, \quad (1)$$

其中： $p = -\frac{1}{3}\text{trace}(\sigma)$ ；

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}s:s}, \quad s = \sigma + pI$$

a_0 是常量，根据双轴受压极限应力与单轴受压极限应力的比值确定；

$$\sigma_c = \sigma_c(\bar{\epsilon}_c^{pl})$$

1.1.2 钢材本构模型

钢材最常用的本构模型如图3所示。

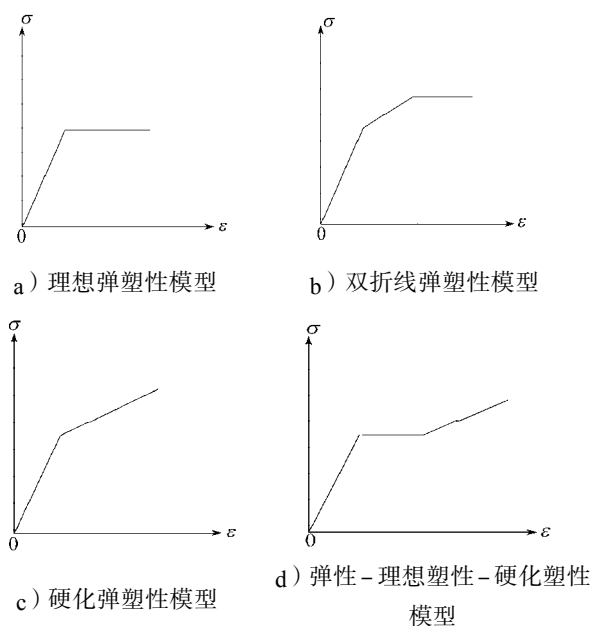


图3 钢筋的应力-应变关系

Fig. 3 The stress-strain relationship of rebar

本文所研究的叠合板中的钢筋本构模型选择双折线弹塑性模型。由于ABAQUS通过*REBAR关键字定义钢筋的空间布置、几何尺寸以及材料属性时，钢

筋与混凝土之间被认为在变形上是协调的，即认为混凝土单元与钢筋单元之间不出现相对滑移，钢筋单元仅沿其布置的轴向对系统刚度有贡献。钢筋采用离散模型，以便准确地模拟钢筋与混凝土间的相互作用；钢筋与混凝土之间的粘结滑移的模拟采用联结单元。

1.2 计算方法及步骤

由于叠合板特殊的施工过程使得其受力分析十分复杂，要准确地模拟板的整个加载过程，保证计算过程的合理收敛性能，计算方法和步骤显得尤为重要。

首先，主要运用关键字行

*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS

对钢筋施加预应力，在预制混凝土板中形成初始的预应力场。在此过程中，用*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE杀死后浇混凝土单元。

其次，施加预制混凝土板重力荷载，使预制构件在自重的作用下形成初始的预应力场，同样保持后浇混凝土单元的杀死状态。

再次，对预制构件施加一阶段荷载同时保证后浇混凝土的杀死状态。

最后，对整个构件施加二阶段荷载，用关键字行*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, ADD激活后浇的混凝土单元，同时施加后浇混凝土的重力荷载。

另外，在整个加载过程中，虚拟的空气单元处于激活状态。

1.3 有限元模型

本文对一叠合板进行有限元分析，材料参数见文献[8]。由于结构和荷载均对称，为了减小计算工作量，取1/4板进行分析。板端按试验时的边界布置施加约束，对称边界仅施加对称方向上的约束，同时还在适当的位置施加约束，避免结构在计算过程中产生刚体位移。

计算采用的叠合板有限元模型如图4。

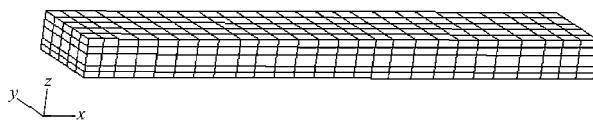


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

ABAQUS/CAE中提供了自动划分单元的前处理模块(Mesh Module)。首先用Seed菜单上的Seed Instance命令对叠合板进行边界上控制节点的设置，然后用Mesh菜单上的Element Type命令设置新老混凝土单元种类(均为20节点三维空间六面体二次单元, C3D20)，新老混凝土之间的虚拟空气单元也为C3D20单元，且其拓扑描述同新混凝土单元；钢筋采用三维线性插值梁单元(B31)，然后用Mesh菜单上的Mesh Instance命令对模型进行单元网格划分。

2 计算结果

图5为对钢筋施加预应力的情况下预制板所产生的挠度。

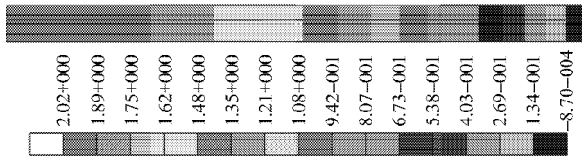


图5 预应力作用下构件的变形

Fig. 5 Deformation of the prefab slab at the end of pre-stress

从图5中可知, 预制板在预应力作用下向上翘曲, 即产生反拱值, 预制板跨中最大反拱值约为2 mm。

图6为在预制板自重的作用下预制板的变形。

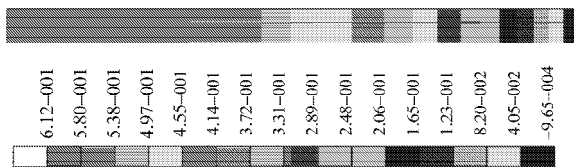


图6 预制板自重下构件的变形

Fig. 6 Deformation of the prefab slab at the end of gravity

从图6中可知, 构件在自重作用下将向下弯曲, 抵消部分反拱值, 在预应力与自重的共同作用下, 构件跨中的最终变形值约为0.6 mm。

图7为一阶段加载末构件的变形图。

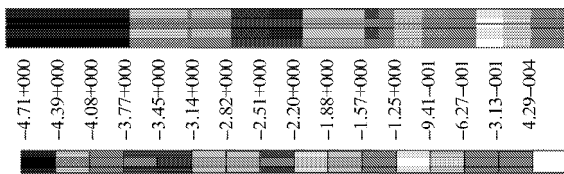


图7 一阶段加载下构件的变形

Fig. 7 Deformation of the prefab slab at the end of first loading

从图7中可知, 在一阶段荷载作用下, 构件产生较大的变形, 其最大变形值约为4.7 mm。

图8为二阶段加载过程中叠合板的变形图。在实际试验中, 若构件完全破坏时, 构件的变形以及其它表示破坏的特征将十分明显, 而且往往带有许多不确定的偶然性。而基于ABAQUS的有限单元法的分析实际只是一种严格遵守破坏准则的理想模拟, 在模拟的过程中, ABAQUS将根据破坏准则, 严格判断构件的破坏情况, 当达到预定的破坏特征时, 其计算将不再收敛, ABAQUS将终止计算。所以, 本计算并没有达到实际试验的最终破坏荷载便终止了计算过程, 图8为模拟过程的最终结果。

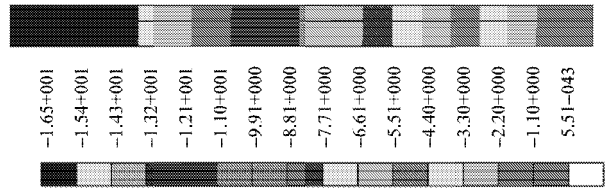


图8 二阶段加载下构件的变形

Fig. 8 Deformation of the prefab slab at the end of second loading

从图8中可知, 构件此阶段的变形更加明显, 其最终约达17 mm。

需要注意的是: 在图5~8中, 预制构件以上的部分并非是后浇的普通混凝土板, 而是在计算过程中所假设的虚拟空气单元。由于空气单元是一种无限软单元, 所以, 在荷载的作用下, 其随预制构件一起变形, 而其应力则几乎为0。

图9为荷载-挠度曲线。

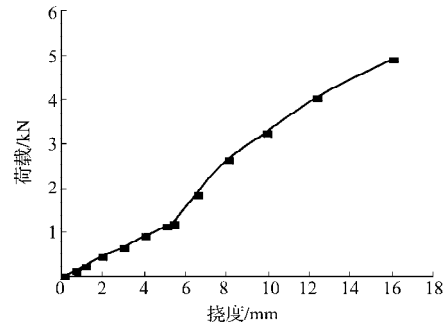


图9 一、二阶段加载下组合板的荷载-挠度曲线

Fig. 9 The loading-flexibility curve of the combined slab in tow stage loading

从图9中可知, 一阶段加载过程中, 曲线近似为直线, 说明在一阶段加载时预制板的挠度呈线性变化; 二阶段加载过程中, 变形急剧增加, 而且曲线斜率呈下降的趋势, 说明在二阶段加载的过程中, 随着荷载的增加, 构件变形不断增大, 而其刚度逐渐下降, 但构件并未发生强度破坏。因此可知, 构件有较高的强度储备; 一阶段加载到二阶段加载的过渡出现明显的拐点, 而且, 二阶段加载过程中的曲线斜率明显大于一阶段, 表明一阶段作用过程中构件的刚度明显大于二阶段作用过程中构件的刚度, 这是叠合结构典型的变形变化特征曲线, 而造成这一现象的最直接原因是构件正截面的变化引起的。

3 结语

通过对整个加载过程中构件变形分析可知构件的变形特征、构件的刚度变化规律及变化原因等。ABAQUS模拟分析真实地反映了叠合结构整个加载过程的变形特性, 说明基于ABAQUS、采用本文的分析

方法对叠合板进行非线性有限元分析是可行的,其结果为叠合结构的有限元分析提供了参考。

参考文献:

[1] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
 Jiang Jianjing. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structure[M]. Xi'an : Shanxi Science and Technology Press, 2002.

[2] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
 Zhu Bolong, Dong Zhengxiang. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.

[3] 庄 茁. ABAQUS/Standard有限元软件入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
 Zhuang Zhuo. The Get Starting of ABAQUS/Standard Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.

[4] 庄 茁. ABAQUS/Explicit有限元软件入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
 Zhuang Zhuo. The Get Starting of ABAQUS/Explicit Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.

[5] 孙 冰,曾 晟,石建军. 预应力轻骨料混凝土叠合板非线性有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(2): 34-36.

Sun Bing, Zeng Sheng, Shi Jianjun. Nonlinear Finite Element Analysis of Lightweight Concrete Combined Slab[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4 (2): 34-36.

[6] 石建军,孙 冰,杨晓锋,等. 叠合构件结合面的粘结性能探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 2004, 5(10): 50-53.
 Shi Jianjun, Sun Bing, Yang Xiaofeng, et al. Study on Caking Property of Composite Structure Combined Surface[J]. China Concrete and Cement Products, 2004, 5(10): 50-53.

[7] 孙 冰,丁德馨,曾 晟,等. 钢筋混凝土叠合结构二次受力过程数值分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(4): 260-263.
 Sun Bing, Ding Dexin, Zeng Sheng, et al. The Numerical Analysis of Two-Stage Loading Progresses on Reinforced Concrete Composite Structures[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(4): 260-263.

[8] 石建军,孙 冰,杨晓锋,等. 新型组合板的实验研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2004, 9(3): 24-26.
 Shi Jianjun, Sun Bing, Yang Xiaofeng, et al. An Experimental Study of a New Type Combined Slab[J]. Journal of Nanhua University: Science and Technology, 2004, 9(3): 24-26.

(责任编辑: 张亦静)

湖南工业大学校庆公告

2009年11月28日~29日,湖南工业大学将迎来建校30周年庆典。值此,我们谨向长期关心、支持学校建设发展的各级领导、各界朋友和海内外校友致以诚挚的问候和崇高敬意!

我们热情期盼各位校友和各界人士,以各种方式热情支持和参与校庆活动,共襄盛典、同谱华章。

特此公告 敬祈周知。

湖南工业大学

2009年3月26日