

施工模拟中分步建模法的改进实现方法及应用

叶智武^{1,2}, 罗永峰¹, 陈晓明³, 贾宝荣³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国建筑第三工程局有限公司, 湖北 武汉 430064;

3. 上海机械施工集团有限公司, 上海 200072)

摘要: 针对当前分步建模法存在的刚度矩阵修正和新增结构定位等问题, 提出了将每个施工阶段分为初始时刻和结束时刻进行分析的方法. 在此基础上, 提出了钢结构施工过程中结构刚度矩阵修正的新方法. 同时, 针对新增构件定位及结构位形定位问题, 提出了修正设计位形定位法. 最后, 对现有分步建模法的实现方法进行了改进. 基于 Matlab 软件平台, 编制了改进分步建模法的计算模块, 模拟分析 2 层刚架结构的施工过程, 并与状态变量叠加法、生死单元法、一步成型法进行对比. 结果表明, 本文的刚度矩阵修正方法及修正设计位形方法正确、有效、计算精度高.

关键词: 钢结构分步建模法; 刚度矩阵修正; 转换矩阵; 新增结构定位法

中图分类号: TU311.4

文献标志码: A

Improved Method of Step by Step Modelling and Its Application in Construction Simulation

YE Zhiwu^{1,2}, LUO Yongfeng¹, CHEN Xiaoming³, JIA Baorong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Construction 3rd Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan 430064, China; 3. Shanghai Mechanized Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the problems of the modification of stiffness matrix and the positioning of added structures in the step by step modelling method, a method which divides each construction stage into beginning phase and end phase and analyzes different phases respectively was proposed. Subsequently, a new method for modifying the stiffness matrix of structures was developed in construction process analysis of steel structures. Meanwhile, to determine the position of the added structures, a correction positioning method of design configuration was advised herein. Consequently, the existing step by step modelling method was

improved. Furthermore, to simulate the construction process of a two-story frame, the improved step by step modelling method was programmed in Matlab software. The numerical results of the improved step by step modelling method were compared with those of state variable superposition method, birth-death element method and one step forming method. It is shown that the modification methods of stiffness matrix and the positioning of design configuration are reasonable, effective and accurate.

Key words: step by step modelling method of steel structures; modification of stiffness matrix; transformation matrix; positioning method of added structures

结构施工过程是一个动态变化的过程, 构件的增加或减少、边界条件的变化、结构体系的转变、荷载作用的变化等因素都会引起结构内力重分布, 进而可能导致结构的受力状态偏离设计状态^[1]. 同时, 结构的建造过程具有阶段性特点, 而非一次成型, 即在建造过程中, 下一个施工阶段建立在上一个施工阶段已完成的基础之上, 上一个施工阶段结构的内力和变形可能会对下一个施工阶段的受力状态产生较大的影响, 即各施工阶段并非独立, 而是相互影响. 因此, 精确地考虑各施工阶段之间结构受力性态的相互影响, 是衡量施工过程分析方法合理与否的关键^[2].

然而, 传统的结构分析是基于时常力学原理, 即结构是一次成型的, 且其力学分析是在给定的、已知的、不变的几何条件、边界条件和荷载条件下进行的, 整个分析过程不随时间变化. 显然, 传统分析方法不能考虑时变效应以及各施工阶段之间的相互影响, 不符合大型复杂结构施工过程动态和阶段性变化的特点, 难以满足其施工过程力学性态预测与施

收稿日期: 2014-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51078289)

第一作者: 叶智武(1988—), 男, 工学博士, 主要研究方向为施工技术. E-mail: 1040020009@tongji.edu.cn

通讯作者: 罗永峰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为施工过程分析、施工监测、检测与鉴定以及抗震性能与稳定理论. E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn

工过程安全控制的需要^[3-6]。据统计资料表明,在钢结构施工事故中,大多数是由于对处于施工状态的时变结构系统未进行准确的跟踪计算及对施工状态可能出现的破坏现象未提出预警而导致事故发生。因此,对大型复杂结构施工过程分析方法的研究具有理论与实用价值。

1 施工过程分析方法概述

施工过程中结构具有阶段性和动态变化的特点,即施工过程是一个结构从小到大、从局部到整体、从简单到复杂且几何形态、结构体系、边界条件、荷载分布和施工环境不断变化的成长过程,故施工过程中结构系统的受力状态随时间阶段性变化^[7]。王光远^[8]将施工力学划归为慢速时变力学体系,并采用时间冻结法进行分析,即根据实际施工方案,将每个施工阶段内的结构作为时不变结构进行分析,基于此,当前施工力学分析方法有时变单元法、拓扑变化法以及有限单元法^[9],其中有限单元法通俗易懂,且易于程序化,是当前施工过程分析主要采用的理论方法。在有限单元法中,较为有效的3种方法为状态变量叠加法、生死单元法和分步建模法。

1.1 状态变量叠加法

状态变量主要指结构的内力和位移。该方法的流程为:根据结构的施工顺序,将整个施工过程分成 N 个施工阶段,计算模型中的结构也分为 N 个安装单元,然后建立与施工阶段对应的 N 个计算模型。其中,第 i 个阶段模型是在第 $(i-1)$ 个阶段模型的基础上,增加第 i 个阶段的安装单元以及在第 i 个阶段增加的施工荷载。第 i 个施工阶段的状态变量计算结果取第 i 个施工阶段模型的分析结果与前 $(i-1)$ 个施工阶段的结果之和^[10]。

该方法过程简单,概念清晰,并且可以考虑荷载的分级加载特性,即下一个施工阶段的结构不承受上一个施工阶段的荷载,这与设计状态下一次成型结构的受力状态不同。然而,该方法是基于线性叠加原理,整个分析过程是线性,难以考虑上一个施工阶段结构已发生的变形对下一个施工阶段结构受力状态的影响,且无法考虑几何、材料等非线性的影响,因此该方法仅适用于简单、对称的规则结构。

1.2 生死单元法

生死单元法是一种通过单元的“生”或“死”模拟结构构件的增加或删减,从而修改结构刚度矩阵来模拟施工全过程的方法。

与状态变量叠加法相比,生死单元法可以考虑结构的非线性效应以及各施工阶段之间结构受力状态的相互影响,且该方法原理简单,已在较多的有限元软件中实现。同时,在计算过程中生死单元法仅需一个模型即可,其求解过程为连续性计算,操作较为便捷。因此,生死单元法广泛应用于大型复杂钢结构的施工过程分析中。

然而,大量应用与研究表明^[11],生死单元法有诸多弊端,主要表现在以下几个方面:

(1) 生死单元法要求结构一次成型,在整个计算过程中,结构的节点数、单元数不发生任何变化,则整体结构刚度矩阵的尺寸也不会发生变化,这样会带来较大的计算量。

(2) 在杀死或激活“死单元”时,结构刚度会发生突变,而在刚度突变之后,结构的刚度矩阵极易出现奇异,可能导致整体计算不收敛。

(3) 在有限元软件中采用生死单元法计算时,整个结构模型不能修改,且其求解过程不可中断,故该方法不可根据实际情况对模型进行合理修正从而不利于实际施工过程控制,因此生死单元法仅适用于施工方案中结构受力状态的初步判断,而不可用于伺服施工过程的准确分析与评定。

(4) 生死单元法求解过程中的“死单元”节点存在“漂移”位移,“漂移”位移一方面会影响计算过程的收敛性,另一方面会使得后续结构的安装位形偏离设计位置,即下一个施工阶段结构的安装位形是建立在上一个施工阶段该安装结构的“漂移”位置上,并且该方法的分析结果也是基于该“漂移”位置上。然而,实际中结构的安装位形往往与结构的“漂移”位形相差较大,因此生死单元法中“死单元”的漂移位移会造成结构位形计算的较大误差,进而导致结构的受力状态与实际情况相差较大。

1.3 分步建模法

分步建模法是指按照结构施工步骤,依次增加或删除结构安装构件并逐次形成结构刚度矩阵以及施加相应的荷载,从而按照拟定的施工方案分阶段计算的方法,该方法能较准确、真实地再现整个施工过程。

分步建模法的建模过程与生死单元法不同,它要求根据当前的真实状况建立几何模型,未安装的结构单元将不会出现在有限元模型中,这样就可避免生死单元法中“死单元”的漂移现象,同时,由于整个过程是连续的,不存在刚度突变现象,故其计算收敛性要远远好于生死单元法。分步建模法求解过

程可中断,还可以根据现场的反馈信息,及时修正有限元模型,该方法可控性较强,利于施工过程控制.因此,分步建模法具有收敛性好、过程可控性强以及与实际情况更为符合的优势.

然而,在分步建模法中,下一个施工阶段是建立在上一个施工阶段的基础之上,此时下一个施工阶段的结构除了已发生变位的结构之外,还会新增其他结构,即结构的节点数和单元数均会发生改变,这意味着结构刚度矩阵的大小和阶数将会随之改变,如何将上一个施工阶段结构的刚度矩阵进行修正从而适用于下一个施工阶段是分步建模法研究的难点之一.与此同时,下一个施工阶段中新增结构的位形也会影响结构刚度的大小,进而影响最终的受力状态,因此对新增结构定位方法的研究也是分步建模法的关键.

当前工程应用较多的是状态变量叠加法和生死单元法,但分步建模法更精确且更符合实际.然而,刚度矩阵修正问题和新增结构定位问题的复杂性限制了分步建模法在通用有限元软件中的实现.

本文基于分步建模法,研究结构刚度矩阵修正方法和新增结构单元定位方法,提出将每个施工阶段分为2个时刻分别进行分析的方法,解决了模型刚度矩阵修正问题;对比分析已有新增结构单元定位方法,提出修正设计位形定位法,进而对现有的分步建模法进行改进.基于 Matlab 软件编程,采用分步建模及本文结构刚度矩阵修正方法和新增结构定位法模拟一个刚架结构的施工过程,实现了本文方法在施工过程分析中的应用.

2 刚度矩阵修正方法

分步建模法需要将施工过程分为 N 个阶段,每一个阶段均会建立一个模型,且下一个施工阶段的结构相比于上一个施工阶段的结构,其刚度矩阵将因节点数、单元数的改变而发生大小与阶数的变化.

为了解决刚度矩阵变化问题,本文提出将每个施工阶段分为2个时刻并分别进行分析的方法.该2个时刻分别为施工阶段的初始时刻和结束时刻,其中,初始时刻是指新增构件按照一定原则已安装好,结构初始刚度矩阵已形成,但尚未进行计算;结束时刻是指新增构件已安装好,并且通过非线性计算,新增结构已在该施工阶段的荷载作用下发生变形,由于考虑了几何非线性效应,结构的切线刚度矩阵会随着结构位移和内力的变化而改变.因此,施工阶段

初始时刻和结束时刻的结构刚度是不同的,且结束时刻的刚度矩阵是需要存储的,用于下一个施工阶段初始时刻刚度矩阵的修正.

假定结构已完成了 $(i-1)$ ($i \geq 2$) 个施工阶段,设 \mathbf{K}'_{i-1} 为第 $(i-1)$ 个施工阶段结束时刻结构的切线刚度矩阵,在安装第 i 个施工阶段时,该阶段初始时刻并不进行计算,而是根据新增结构的位形及荷载等条件对结构的刚度矩阵 \mathbf{K}_i 进行修正,则第 i 个施工阶段初始时刻的刚度包括第 $(i-1)$ 个施工阶段完成时的刚度以及新增结构的刚度,可用下式进行修正:

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{A}_i^T \mathbf{K}'_{i-1} \mathbf{A}_i + \mathbf{A}_a^T \mathbf{K}_a \mathbf{A}_a \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_a 为新增结构的弹性刚度矩阵; \mathbf{A}_i 和 \mathbf{A}_a 分别为将原有结构和新增结构的刚度矩阵扩充至第 i 个施工阶段刚度矩阵的转换矩阵.

不失一般性,可采用平面结构模型推导式(1)中的转换矩阵 \mathbf{A}_i . 假定结构构件采用平面梁单元模拟,即每个节点上有3个自由度.在第 $(i-1)$ 个施工阶段,结构有 n 个节点,在第 i 个施工阶段,新增结构后结构的总节点为 m 个,且新增结构与第 $(i-1)$ 个施工阶段结构的公共节点为 l 个,则式(1)中各矩阵的阶数分别为: $(\mathbf{K}_i)_{3m \times 3m}$, $(\mathbf{K}'_{i-1})_{3n \times 3n}$, $(\mathbf{K}_a)_{3(m-n+l) \times 3(m-n+l)}$, $(\mathbf{A}_i)_{3n \times 3m}$, $(\mathbf{A}_a)_{3(m-n+l) \times 3m}$. 可采用分块矩阵形式表达式(1)中的各矩阵,根据各矩阵的含义及其阶数,可得

$$(\mathbf{K}_i)_{3m \times 3m} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3n \times 3n} & \mathbf{F}_{3n \times 3(m-n)} \\ \mathbf{F}_{3(m-n) \times 3n}^T & \mathbf{G}_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$(\mathbf{K}_a)_{3(m-n+l) \times 3(m-n+l)} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{3l \times 3l} & \mathbf{N}_{3l \times 3(m-n)} \\ \mathbf{N}_{3(m-n) \times 3l}^T & \mathbf{M}_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{E}_{3n \times 3n}$ 表示第 i 个施工阶段前 n 个节点间构件对刚度的贡献, $\mathbf{F}_{3n \times 3(m-n)}$ 表示前 n 个节点与 $(m-n)$ 个新增节点间构件对刚度的贡献, $\mathbf{G}_{3(m-n) \times 3(m-n)}$ 则表示 $(m-n)$ 个新增节点间构件对刚度的贡献.

由此可知,式(1)的含义是将 $3n \times 3n$ 阶的刚度矩阵 \mathbf{K}'_{i-1} 和 $3(m-n+l) \times 3(m-n+l)$ 阶的新增结构弹性刚度矩阵 \mathbf{K}_a 扩充至 $3m \times 3m$ 阶的第 i 个阶段结构初始时刻刚度矩阵 \mathbf{K}_i . 根据结构刚度矩阵对号入座原则,其扩充方法及过程可如图1所示.

为了推导方便,将新增结构中的公共节点放在刚度矩阵 \mathbf{K}_a 的最前列,形成子矩阵 $\mathbf{L}_{3l \times 3l}$,该子矩阵表示公共节点间构件对 \mathbf{K}_a 的贡献, $\mathbf{N}_{3l \times 3(m-n)}$ 表示新增结构中公共节点与新增节点间构件对 \mathbf{K}_a 的贡献, $\mathbf{M}_{3(m-n) \times 3(m-n)}$ 表示新增结构中新增节点间构件对 \mathbf{K}_a 的贡献.

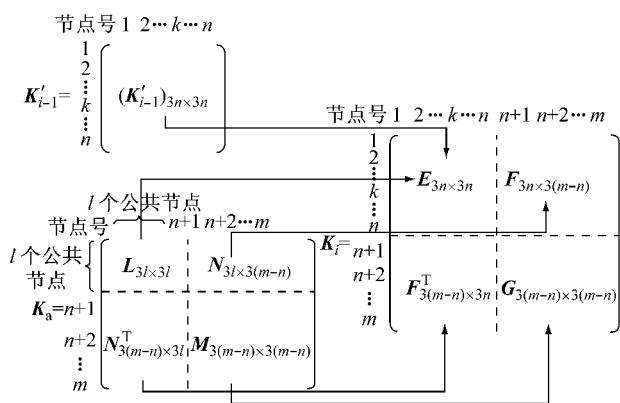


图1 刚度矩阵扩充过程

Fig.1 Expansion process of stiffness matrix

由于公共节点在第 $(i-1)$ 个施工阶段已存在, $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 中公共节点在第 $(i-1)$ 个施工阶段已经产生刚度贡献, 因此 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 中公共节点的刚度应为子矩阵 $L_{3l \times 3l}$ 与 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 中公共节点在第 $(i-1)$ 个施工阶段的刚度贡献之和. 根据图1中刚度矩阵 K'_{i-1} 与 K_a 的扩充过程及各子矩阵对应的位置, 可知

$$(A_i)_{3n \times 3m} = [I_{3n \times 3n} \quad 0_{3n \times 3(m-n)}] \quad (4)$$

$$(A_a)_{3(m-n+l) \times 3m} = \begin{bmatrix} C_{3l \times 3l} & D_{3l \times 3(m-l)} & 0_{3l \times 3(m-n)} \\ 0_{3(m-n) \times 3l} & 0_{3(m-n) \times 3(m-l)} & I_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(2)~(5)代入式(1), 可得

$$A_i^T K'_{i-1} A_i = \begin{bmatrix} (K'_{i-1})_{3n \times 3n} & 0_{3n \times 3(m-n)} \\ 0_{3(m-n) \times 3n} & 0_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_a^T K_a A_a = \begin{bmatrix} C^T L C & C^T L D & C^T N I \\ D^T L C & D^T L D & D^T N I \\ I^T N^T C & I^T N^T D & M \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_{3n \times 3n} = (K'_{i-1})_{3n \times 3n} + \begin{bmatrix} C^T L C & C^T L D \\ D^T L C & D^T L D \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F_{3n \times 3(m-n)} = \begin{bmatrix} C^T N I \\ D^T N I \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G_{3(m-n) \times 3(m-n)} = M \quad (10)$$

式中: I 为单位矩阵; $C_{3l \times 3l}$ 、 $D_{3l \times 3(m-l)}$ 为公共节点在 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 中的位置矩阵, 可通过公共节点在 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 的位置求得.

为了方便求出 $C_{3l \times 3l}$ 、 $D_{3l \times 3(m-l)}$, 与 K_a 相似, 在 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 和 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 中, 也将 l 个公共节点放至矩阵的最前列, 此时公共节点间(公共节点对非公共节点的影响除外)构件对刚度矩阵的贡献就全部局限在刚度矩阵 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 、 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 左上角的前 $3l \times 3l$ 阶子矩阵中. 式(8)中 $E_{3n \times 3n}$ 为 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 矩阵的前 $3n \times 3n$ 阶子矩阵, 即该子矩阵包含了公共节点间构件对刚度矩阵的贡献, 根据式(8)可知, $C^T L C$ 为

$3l \times 3l$ 阶子矩阵, 且位于左上角, 即新增结构公共节点间(公共节点对新增节点的影响除外)构件对刚度矩阵的贡献全部集中在子矩阵 $C^T L C$ 中, 则 K_a 经转换矩阵相乘后扩充至 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 中的其他子矩阵均为 0 , 因此, 根据 $E_{3n \times 3n}$ 中的矩阵元素对应原则, 可知, $C_{3l \times 3l} = I_{3l \times 3l}$, $D = 0$, 即式(5)可表示为

$$A_a = \begin{bmatrix} I_{3l \times 3l} & 0_{3l \times 3(m-l)} & 0_{3l \times 3(m-n)} \\ 0_{3(m-n) \times 3l} & 0_{3(m-n) \times 3(m-l)} & I_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

至此已得到式(4)和(11)分别为刚度矩阵修正方法的转换矩阵, 其前提条件是将上一个和下一个施工阶段公共节点放至刚度矩阵最前列, 使得刚度矩阵 $(K_i)_{3m \times 3m}$ 、 $(K'_{i-1})_{3n \times 3n}$ 和 K_a 中 l 个公共节点间构件对刚度的贡献对应在左上角前 $3l \times 3l$ 阶子矩阵中, 此时刚度矩阵转换矩阵的形式较为简单, 如式(11)所示. 该方法解决了分步建模法中不同施工阶段刚度矩阵大小及阶数变换的问题.

3 新增结构定位方法

分步建模法中, 新增结构是在已安装结构变形的基础上进行安装的, 则在施工过程力学模拟中, 新增结构的起始节点坐标必须以已安装结构的变形为基准进行构建, 即起始点为公共节点, 新增结构的终点即为新增节点. 因此, 新增结构的建立需要 2 个基准点, 一个是公共节点, 另一个则为新增节点. 其中, 新增节点的坐标确定了新增结构的位形, 进而影响结构的整体刚度矩阵, 对结构的受力状态至为关键, 因此, 新增结构定位方法的研究即为新增节点坐标的构建方法研究, 且关系到施工过程分析精确性.

总结已有研究文献, 当前新增结构定位方法主要有 3 种, 即设计位形定位法、“漂移”位形定位法以及切线定位法.

3.1 设计位形定位法

设计位形是指新增结构中的节点(公共节点和新增节点)坐标依据设计位置确定, 如图2所示. 假定新增结构为 de 和 ef , 则 e 、 f 节点为新增节点, 下一个施工阶段所有结构(新增结构和已安装结构)都在设计位置, 该情况适用于状态变量叠加法. 因此, 该定位方法是符合设计状态的, 且属于线性定位方法, 在大变形条件下可能会产生较大的误差.



图2 设计位形定位法

Fig.2 Positioning method of design configuration

3.2 “漂移”位形定位法

“漂移”位形定位法是采用生死单元法模拟施工过程的一种特有的定位方法,即以死单元节点在平衡方程求解过程中的“漂移”位置为新增结构的安装位形.根据生死单元法求解过程可知,“漂移”位移是由边界节点的位移引起的,且其数值大小与边界单元之间的相对刚度有关.然而,“漂移”位形定位法中“死单元”漂移位形的不确定性,使得该定位方法与实际情况不符,易出现较大的偏差,其求解过程可能不收敛,且可能会带来较大的误差.

3.3 切线定位法

切线定位法是指根据已安装单元的切线方向确定新增节点坐标的方法^[12].根据新增节点或构件与已安装构件的相对位置关系,该定位方法主要有以下4种情况:

(1) 如果新增构件没有与已安装构件连接,则采用节点设计坐标为新增节点坐标.

(2) 新增节点 O 的坐标按已有构件 cd 切线方向和构件设计长度 $|de|$ 的长度确定,如图 3a 所示.

(3) cd 为新增构件,但无新增节点,则构件为已安装构件节点 c 和 d 之间的连线,如图 3b 所示.

(4) cO_1 和 dO_2 为按照第(2)种情况确定的新增构件, O_1 和 O_2 应为同一节点,不重合时,可根据算术平均的原则由 O_1 和 O_2 确定新增节点 O 的坐标,如图 3c 所示.

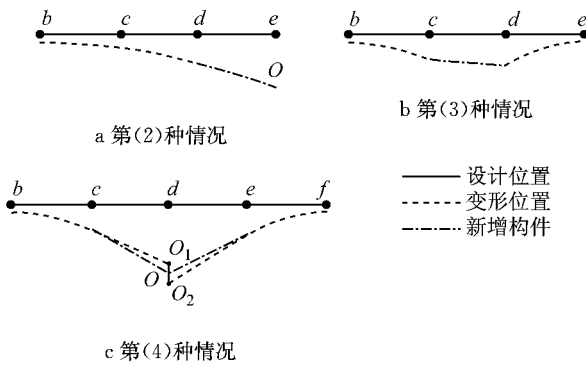


图3 切线定位法

Fig.3 Tangent orientation method

由以上4种情况确定新增节点 O 的坐标,其坐标可表示为

$$X_t^{(O)} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^a \left(X_t^{(j)} + \sum_{s=1}^b (l_s^{(j)} |cO_s|) \right) \quad (12)$$

式中: $X_t^{(O)}$ 为新增节点 O 在 t 方向的坐标; $X_t^{(j)}$ 为相连的已有节点 j 在 t 方向的坐标; $l_s^{(j)}$ 为相连的已有构件 j 在 t 方向的余弦; $|cO_s|$ 为第 s 根构件的长度; a 为新增构件与已有构件相连的节点数; b 为与第 j

个已有节点相连的新增构件数.

切线定位法中第(3)和第(4)种情况确定的新增构件长度与原设计状态不一致,除此之外,还有很多情况下,切线定位法使得新增构件与设计状态下结构构件长度不一致^[13].若在构件加工中未考虑这种变化,则会导致后续构件无法安装或强迫就位而引起较大的残余内力.

3.4 修正设计位形定位法

鉴于以上定位方法的不足,在下一个施工阶段结构位形需要根据上一个施工阶段已发生的变形来确定的施工方案中,本文提出修正设计位形定位法,即仅新增结构的节点坐标依据设计位置确定,而已安装结构则依据上一个施工阶段的变形位置确定.如图4所示,新增结构为 de 和 ef ,则 e 、 f 节点为新增节点,且2个节点均位于设计坐标处,上一个阶段的 b 、 c 、 d 节点位于 b' 、 c' 、 d' 点.

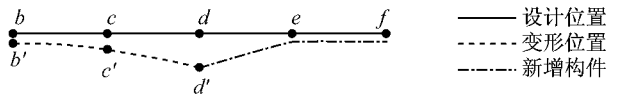


图4 修正设计位形定位法

Fig.4 Correction positioning method of design configuration

修正设计位形定位法的优点在于其不仅能够考虑上一施工步已有结构变形的影响,而且对新增构件的长度变化影响较小,同时,该定位方法简单易操作,与实际的结构安装习惯相符,可适用于施工过程分析.

4 改进实现的分步建模法分析流程

基于以上刚度矩阵修正及新增结构定位方法,可对现有分步建模法的实现方法进行改进,改进后该方法的分析流程为:

(1) 假定结构已完成 $(i-1)$ ($i \geq 2$) 个施工阶段,则得到第 $(i-1)$ 个施工阶段结束时刻结构的切线刚度矩阵 K'_{i-1} 、第 $(i-1)$ 个施工阶段结构的荷载列阵 P_{i-1} 、第 $(i-1)$ 个施工阶段结构的位移列阵 u_{i-1} .

(2) 采取适当的定位原则,确定第 i 个施工阶段初始时刻新增结构的位形,并记录此时新增结构的弹性刚度矩阵 K_a .

(3) 在安装第 i 个施工阶段时,根据新增结构的位形及荷载等条件对结构刚度矩阵 K_i 、荷载列阵 P_i 以及位移列阵 u_i 进行修正,其中 K_i 按式(1)进行修正, P_i 和 u_i 按式(13)和式(14)进行修正.

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{B}_i \mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{B}_a \mathbf{P}_a \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i-1} + \mathbf{B}_a \mathbf{u}_a \quad (14)$$

式中: \mathbf{P}_a 和 \mathbf{u}_a 分别为新增结构的荷载列阵与节点位移列阵; \mathbf{B}_i 和 \mathbf{B}_a 分别为对应的转换矩阵, 其矩阵表达式如式(15)和(16)所示, 推导过程与转换矩阵 \mathbf{A}_i 和 \mathbf{A}_a 相似.

$$(\mathbf{B}_i)_{3n \times 3m} = [\mathbf{I}_{3n \times 3n} \quad \mathbf{0}_{3n \times 3(m-n)}] \quad (15)$$

$$(\mathbf{B}_a)_{3m \times 3(m-n+l)} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3l \times 3l} & \mathbf{0}_{3l \times 3(m-n)} \\ \mathbf{0}_{3(n-l) \times 3l} & \mathbf{0}_{3(n-l) \times 3(m-n)} \\ \mathbf{0}_{3(m-n) \times 3l} & \mathbf{I}_{3(m-n) \times 3(m-n)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

(4) 采用 Newton-Raphson 法求解结构的增量平衡方程 $\mathbf{K}_i \Delta \mathbf{u}_i = \Delta \mathbf{P}_i$, 从而获得第 i 个施工阶段结构的最终位移 \mathbf{u}_i 以及变形后的结构刚度矩阵 \mathbf{K}'_i .

(5) 以此类推, 依照施工步骤, 在每一个施工阶段均考虑上一个施工阶段的内力、刚度矩阵以及新增结构位形等因素条件下修正当前施工阶段的刚度矩阵、荷载列阵和位移列阵, 求解增量平衡方程, 并保存结束时刻的刚度矩阵. 如此重复, 直至竣工状态, 即可得到结构最终的变形状态和受力状态.

因此, 改进实现方法的分步建模法计算流程如图5所示.

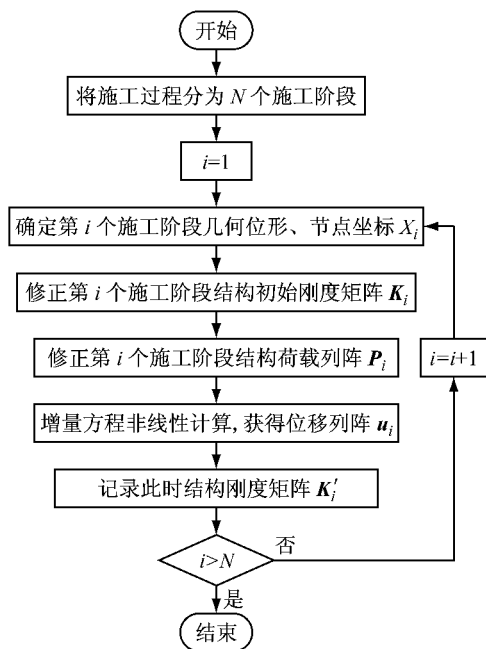


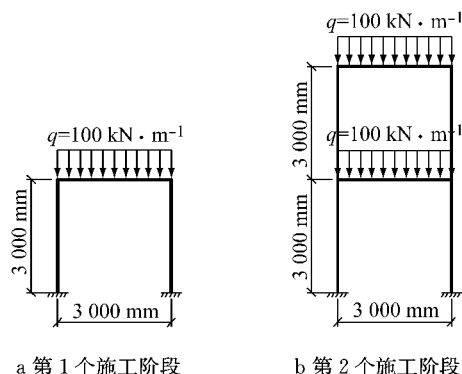
图5 改进分步建模法流程图

Fig.5 Flow chart of the improved step by step modelling method

5 算例

如图6所示, 算例为2层3 m×3 m的平面刚

架, 柱底刚接, 梁柱截面均为 H200×100×4×6, 材料为理想弹塑性, 弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 该刚架不考虑自重作用, 且每层刚架梁承受均布线荷载 $100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. 假定该刚架施工分为2个施工阶段, 即第1个施工阶段为第1层刚架施工, 第2个施工阶段为第2层刚架施工.



a 第1个施工阶段 b 第2个施工阶段

图6 2层平面刚架结构图

Fig.6 Structure sketch of two-story frame

采用有限单元法对该施工过程进行分析, 为了更精确地模拟刚架结构的受力状态和变形模式, 将每根梁和柱划分为4个长度相等的单元, 即每个单元长度为0.75 m, 每层刚架有12个单元, 其节点编号和单元编号如图7所示, 其中“1”代表节点号, “①”代表单元号, 其他编号以此类推.

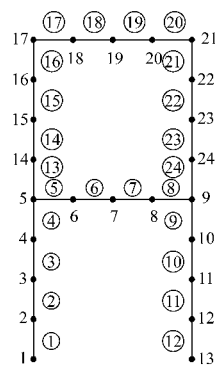


图7 节点及单元编号图

Fig.7 Number of nodes and elements

算例中分别采用设计位形定位法、“漂移”位形定位法、切线定位法和修正设计位形定位法来确定新增节点坐标, 如图8所示. 为了对比方便, 本算例增加一种情况, 即设计状态下的一步成型法. 因此, 本算例中的分析方法总共有5种情况.

分别采用基于 ANSYS 有限元软件的状态变量叠加法、生死单元法、一步成型法以及本文基于 Matlab 软件编程的改进分步建模法分析该刚架在施工过程中的受力状态, 计算得到结构关键节点(7、19

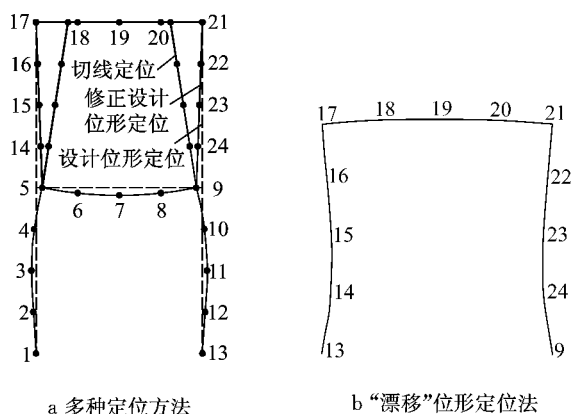


图8 新增节点定位方法

Fig.8 Positioning method of added nodes

号节点)位移如表1所示,关键构件(⑤、⑰号单元)内力如表2所示,19号节点的荷载-位移曲线如图9所示.在考虑第1个施工阶段结构的变形后,新增构件

(⑬、⑰、⑱号单元)的长度统计如表3所示.

表1 关键节点竖向位移计算结果

Tab.1 Vertical displacements of key nodes mm			
节点编号	分析方法	竖向位移	
		第1个施工阶段	第2个施工阶段
7	状态变量叠加法	-18.223	0.894
	生死单元法	-18.416	-17.527
	分步建模法-修正设计位形定位法	-18.346	-17.409
	分步建模法-切线定位法	-18.346	-17.500
	一步成型法	—	-14.000
19	状态变量叠加法	—	-20.054
	生死单元法	2.054	-18.054
	分步建模法-修正设计位形定位法	—	-20.186
	分步建模法-切线定位法	—	-18.754
	一步成型法	—	-19.303

表2 关键构件内力计算结果

Tab.2 Internal force of key members

单元编号	分析方法	第1个施工阶段		第2个施工阶段	
		轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
⑤	状态变量叠加法	-23.382	-46.820	25.120	-5.199
	生死单元法	-22.023	-46.666	2.462	-51.373
	分步建模法-修正设计位形定位法	-21.684	-46.722	3.039	-51.535
	分步建模法-切线定位法	-21.684	-46.722	3.850	-51.301
	一步成型法	—	—	19.873	-60.248
⑰	状态变量叠加法	—	—	-18.486	-44.841
	生死单元法	0	0	-17.487	-45.069
	分步建模法-修正设计位形定位法	—	—	-18.215	-44.955
	分步建模法-切线定位法	—	—	-19.559	-42.916
	一步成型法	—	—	-30.031	-50.113

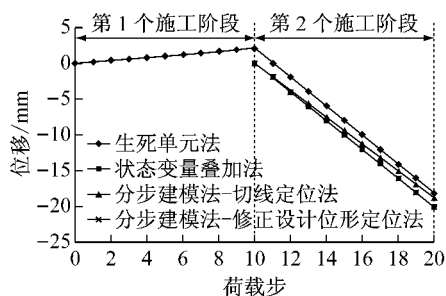


图9 19号节点荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curve of No.19 node

对比分析表1~3和图9,可得出以下结论:

(1) 一步成型法与其他方法之间的计算结果差距较大,表明结构在施工过程中的受力状态与原设计状态有较大的差异,进一步说明了对结构施工过程中的受力状态进行精确分析是非常必要的.

(2) 改进分步建模法中7号节点在第1个施工阶段的位移计算结果与生死单元法相差不大,且2种方法中⑤号单元内力也基本一致,表明本文中基

于Matlab软件的改进分步建模法计算程序有效.

(3) 由表1可知,生死单元法中19号节点在第1个施工阶段已经有2.054 mm的上拱“漂移”位移,第2个施工阶段则是以该漂移位置为起点进行计算.因此,死单元的“漂移”位移会极大地影响结构的最终位形,在大型复杂结构的施工过程分析中,该方法在结构的位形计算中将会产生较大误差.

表3 关键新增构件长度

Tab.3 Lengths of key members mm			
分析方法	单元编号		
	⑬	⑰	⑱
状态变量叠加法	750.000	750.000	750.000
生死单元法	750.001	750.250	749.969
分步建模法-修正设计位形定位法	750.291	750.000	750.000
分步建模法-切线定位法	750.000	711.456	750.000
一步成型法	750.000	750.000	750.000

(4) 由表3可知,切线定位法使得⑰号单元长度减小了38.544 mm,而其他定位方法中关键构件的

长度改变不大,进而使得切线定位法的结构刚度最大,而其他方法结构的刚度相差不大,这点从图9中可以看出.对比表1中19号节点位移可知,基于切线定位法的分步建模法计算结果相对其他方法偏小,因此切线定位法在本算例中是不太合理的.

(5) 从结论(4)可知,切线定位法在本算例中不太合理,同时生死单元法由于“漂移”位移的存在,其单元内力的计算精度受到一定影响,综合分析可知,本文提出的基于修正设计位形定位的分步建模法更为合理.

6 结论

(1) 将施工阶段分为初始时刻和结束时刻进行分析,在考虑上一个施工阶段的受力状态下,合理修正下一个施工阶段结构刚度矩阵大小和阶数,为改进分步建模法提供了理论基础.

(2) 修正设计位形定位法对新增构件长度影响较小,且易于操作,并与实际结构安装情况较为吻合,计算结果表明,采用该定位方法的结构受力更符合实际状况.

(3) 生死单元法中,死单元节点的“漂移”会使位移计算产生较大误差,改进分步建模法可避免该问题,且其求解过程可控,可广泛应用于施工过程控制中.

参考文献:

- [1] 罗永峰,王春江,陈晓明. 建筑钢结构施工力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
LUO Yongfeng, WANG Chunjiang, CHEN Xiaoming. Construction mechanism of steel structures in building engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] Cruz P J S, Mari A R, Roca P. Nonlinear time-dependent analysis of segmentally constructed structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124: 278.
- [3] 罗永峰,叶智武,陈晓明,等. 空间钢结构施工过程监测关键参数及测点布置研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(11): 108.
LUO Yongfeng, YE Zhiwu, CHEN Xiaoming, et al. Research on key parameter selection and monitoring point arrangement in construction monitoring of spatial steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 108.
- [4] 罗永峰,叶智武,郭小农. 钢结构施工过程监测数据缺失机理与处理方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,42(6): 823.
LUO Yongfeng, YE Zhiwu, GUO Xiaonong. Data missing mechanism in construction monitoring and its treatment [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(6): 823.
- [5] 刘学武,郭彦林. 考虑几何非线性钢结构施工力学分析方法[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(2): 161.
LIU Xuewu, GUO Yanlin. Construction mechanics analytical procedures for steel structures in view of the geometric nonlinearity [J]. Journal Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 161.
- [6] Choi C K, Kim E D. Multistory frames under sequential gravity loads [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111: 2373.
- [7] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报,2001,34(3): 41.
CAO Zhiyuan. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 41.
- [8] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程学报,2000,33(6): 105.
WANG Guangyuan. On mechanics of time-varying structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 105.
- [9] CAO Zhiyuan, LIANG Gang, TANG Shougao. Topological FEM method for the analysis of time-varying structures [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2004, 20: 807.
- [10] 卓新. 空间结构施工方法研究与施工全过程力学分析[D]. 杭州:浙江大学,2001.
ZHUO Xin. Research on construction methods and mechanics analysis on whole erection process for space structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [11] 郑江,葛鸿鹏,王先铁,等. 局部位形约束生死单元法及其在施工力学分析中的应用[J]. 建筑结构学报,2012,33(8): 101.
ZHENG Jiang, GE Hongpeng, WANG Xiantie, et al. A method of element birth and death of local configuration constraint and its application in construction mechanics [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 101.
- [12] 张其林,罗晓群,高振锋,等. 大跨钢结构施工过程的数值跟踪和图形模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(10): 1295.
ZHANG Qilin, LUO Xiaoqun, GAO Zhenfeng, et al. Numerical tracing and graphic simulation for construction processes of large span pre-tensioned steel structures [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2004, 32(10): 1295.
- [13] 崔晓强,郭彦林,叶可明. 大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J]. 工程力学,2006,23(5): 83.
CUI Xiaoqiang, GUO Yanlin, YE Keming. Research on the construction mechanic method of long-span steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 83.