

# 大跨度屋盖钢结构拆撑过程 模拟分析的约束方程法\*

郭小农, 邱丽秋, 罗永峰, 叶智武, 罗立胜

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 分类介绍了目前在大跨度屋盖钢结构拆撑过程模拟分析中常用的几种方法(即支座位移法、等效杆端位移法、千斤顶单元法和千斤顶-间隙单元法)及其特点,针对现有方法的不足,提出了一种新的拆撑过程模拟计算方法——约束方程法,分别采用已有模拟方法和该方法对一个三点支撑的两端固定梁进行了拆撑过程模拟分析;对采用各种模拟计算方法得到的千斤顶轴力、支撑点位移以及梁中弯矩进行比较,验证了该文方法的有效性.数值分析结果表明,约束方程法是一种合理有效的模拟方法,能够正确模拟大跨度屋盖钢结构拆撑过程计算模型中的卸载单元.

**关键词:** 大跨度钢结构; 拆撑过程模拟分析; 千斤顶卸载单元; 约束方程法

**中图分类号:** TU311.41 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.09.012

## 引言

大跨度屋盖钢结构在施工过程中,通常需要在安装阶段预先搭设临时支撑,在结构安装完成后,再按照预定的方法及顺序拆除这些临时支撑<sup>[1]</sup>,如国家大剧院<sup>[2]</sup>、国家体育场<sup>[3-4]</sup>、广州新体育馆<sup>[5]</sup>和重庆大剧院<sup>[6]</sup>等.临时支撑可为主体结构的高空安装提供一个可靠的操作平台,减小安装过程中主体结构的内力和变形,提高主体结构施工过程的安全性及安装精度.在屋盖钢结构安装完成后的拆撑过程中,如何保证主体结构和临时支撑的安全性,是一个十分重要的问题.临时支撑的拆除过程是施工系统结构体系的转变过程,是主体结构和临时支撑相互作用发生变化的一个复杂的力学过程,是结构内力重分布的演变过程.在此过程中,临时支撑与主体结构从完全接触逐渐转变为完全脱离,即临时支撑由受荷状态逐渐转变为无载状态,而主体结构则由部分承载状态逐渐转变为完全承载状态.为保证拆撑过程中结构的安全,需要对拆撑过程进行准确合理的数值模拟分析.理论上,拆撑过程数值模拟的难点在于千斤顶工作机理的模拟、千斤顶与主体结构的暂时脱离及再接触现象的模拟、临时支撑由于卸载产生的回弹现象的模拟等<sup>[7]</sup>.目前,已有多种模拟千斤顶工作原理及过程的方法,但或较为复杂、或不准确、或不便于应用,本文针对这一现象,提出了一种新的模拟临时支撑千斤顶的约束方程法,以提高拆撑模型的准确性、方便性和计算效率.

\* 收稿日期: 2012-08-28; 修订日期: 2013-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078289)

作者简介: 郭小农(1977—),男,四川金堂人,博士(E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn);

罗永峰(1957—),男,博士(通讯作者.E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn).

# 1 现有模拟计算方法

选择合理的数值计算模型来模拟拆撑过程中千斤顶的力学特征,是拆撑过程分析的重要环节之一。最早模拟千斤顶特征的方法是支座位移法<sup>[8]</sup>,在此基础上发展而来的一种方法为等效杆端位移法。此后,郭彦林等<sup>[9-10]</sup>提出了千斤顶单元法和千斤顶-间隙单元法。

## 1.1 支座位移法

在拆撑过程计算模型中,用支座代替临时支撑,通过给支座施加竖向强迫位移来模拟实际拆撑过程中千斤顶逐渐下降直至脱离主体结构的过程,这种方法称为支座位移法<sup>[8]</sup>。该方法的计算原理如图 1 所示。在卸载计算过程中,若某一步的支座反力为拉力,说明实际拆撑过程进行到此刻时该支座对应的支撑已退出工作,此时应人为地删除该支座并重新进行迭代计算。当所有临时支撑对应的支座都除去时,表明卸载完成。该方法计算模型简单,无需在拆撑过程计算模型中建立临时支撑,但该方法无法模拟实际千斤顶与主体结构暂时脱离的现象,也无法模拟拆撑过程中临时支撑由于其内力变化引起的压缩或回弹现象。

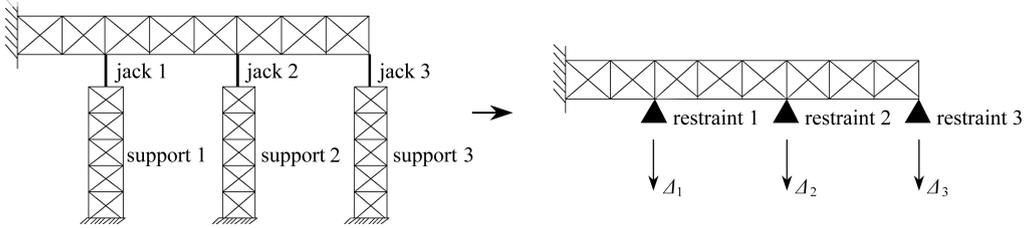


图 1 支座位移法的计算原理

Fig. 1 Principle of support displacement method

## 1.2 等效杆端位移法

等效杆端位移法<sup>[8]</sup>是将临时支撑等效为具有相同轴向线刚度的弹性杆(如图 2 所示),建立拆撑过程计算模型时,采用只能受压不能受拉的单元来模拟这根弹性杆。通过给弹性杆下端支座施加竖向强迫位移来模拟千斤顶的下降(如图 3 所示)。该方法可有效地模拟卸载过程中支撑由于轴向压力变化所引起的压缩或回弹,同时由于只压不拉单元的特性,可准确模拟千斤顶在拆撑过程中可能与主体结构暂时脱离的现象。若拆撑过程进行到某一步,所有弹性杆的轴向压力均变为 0,说明整个拆撑过程完成。然而,该方法仅能用于模拟各个相互独立的临时支撑,而不能用于模拟联体临时支撑,且该方法未将临时支撑建立在拆撑过程计算模型中,因而,无法分析及确定在整个拆撑过程中临时支撑构件的安全性。

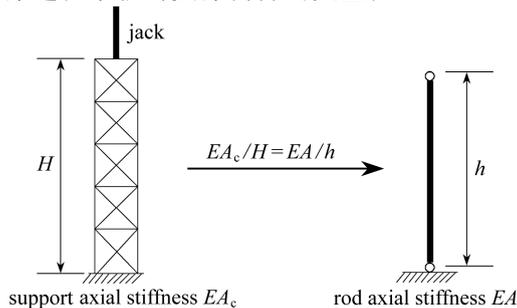


图 2 临时支撑的刚度等效原理

Fig. 2 Principle of equivalent stiffness

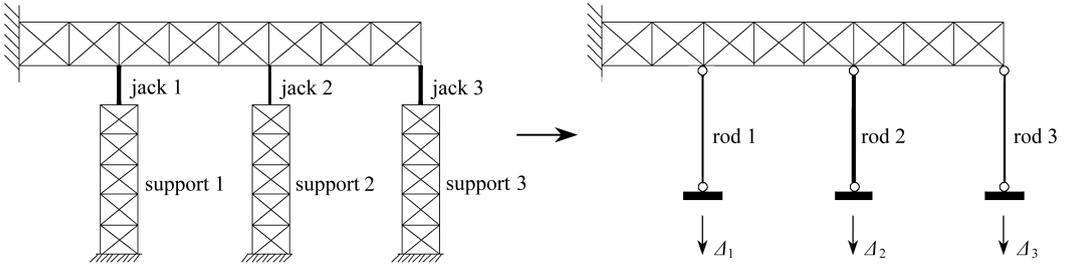


图3 等效杆端位移法的计算原理

Fig. 3 Principle of equivalent rod bottom-end displacement method

### 1.3 千斤顶单元法

所谓千斤顶单元法<sup>[9]</sup>,就是在建立计算模型时,将主体结构与临时支撑同时建立,并在二者之间采用只受压不受拉单元来模拟真实的千斤顶.建模时,将千斤顶单元的轴向刚度设为无穷大;计算时,采用施加温度荷载的方法来控制在千斤顶单元的轴向变形.

该方法设定千斤顶单元初始长度为 $l_0$ ,其材料线膨胀系数为 $\alpha = 1/l_0$ ,则当温度变化为 $\Delta T$ 时,千斤顶单元的伸长量为 $\Delta l = \alpha l_0 \Delta T = \Delta T$ ,即千斤顶单元长度的变化量与温度的变化量在数值上相同.该方法可模拟拆撑过程中由于支撑轴向压力变化引起的压缩或回弹,同时由于只压不拉单元的特性,可以准确模拟千斤顶在拆撑过程中可能与主体结构暂时脱离的现象.若拆撑过程进行到某一步,所有千斤顶单元的轴向压力均变为0,说明整个拆撑过程完成.然而,该方法在通过施加温度荷载来控制千斤顶单元的轴向变形时,由于千斤顶单元受到主体结构和临时支撑的约束,并不能按照设定的变形量来变形,因而会产生一定的计算误差.

### 1.4 千斤顶-间隙单元法

为解决千斤顶单元法存在的问题,郭彦林等提出了千斤顶-间隙单元法<sup>[10]</sup>.该方法在千斤顶顶点与主体结构相关联的节点之间设置一个两节点间隙单元,把千斤顶单元和间隙单元串连起来,通过对两个单元力学状态的判定及其参数的变化来模拟临时支撑与主体结构的脱离和接触.该方法中,由于千斤顶单元上端节点的竖向自由度并没有与主体结构耦合在一起,因此,可用施加温度荷载的方式来精确控制其长度的缩短量,是一种更为精确的方法.但目前这种方法尚不能在通用软件中使用,这就降低了其实际应用价值.

## 2 约束方程法

为弥补上述方法的不足,本文提出一种新的模拟方法,称为约束方程法.在约束方程法中,结构拆撑过程的计算模型同时包含主体结构与临时支撑体系,但二者间的千斤顶并未采用实际单元来模拟,而是用约束方程来模拟千斤顶上下端两个节点之间的相对竖向位移.为了模拟实际拆撑过程中千斤顶与主体结构间可能发生暂时脱离的现象,在模型中的支撑顶点上设置一个很短的只压不拉单元,并将该单元顶节点与相应的主体结构节点的竖向位移用约束方程耦合.

约束方程是一种关联自由度的线性方程,形式如下:

$$\text{const} = \sum_{i=1}^N (C_o(i) \times U(i)), \quad (1)$$

式中,  $U(i)$  为节点  $i$  在某个自由度方向上的位移,  $C_0(i)$  为与位移  $U(i)$  相对应的系数,  $\text{const}$  为与  $N$  个自由度项相对应的总位移。

在模拟拆撑过程中千斤顶下降时, 该方程可直观的表达式为

$$\Delta z_{i-j} = U(i) \times C_0(i) + U(j) \times C_0(j), \quad (2)$$

式中,  $U$  为节点在竖向自由度方向上的位移量;  $i$  为模型中与实际结构相对应的千斤顶上端节点;  $j$  为对应的千斤顶下端节点;  $\Delta z_{i-j}$  为  $i, j$  节点的相对竖向位移, 如图 4 所示。

拆撑模拟计算时, 取  $C_0(i) = 1, C_0(j) = -1$ ,  $\text{const}$  则为在该荷载步时千斤顶的总下降量。通过不断改变  $\text{const}$  的值, 可模拟千斤顶的下降过程。当模型中所有支撑顶节点的内力均为 0 时, 说明卸载完成。

本方法可模拟拆撑过程中支撑塔架由于轴向压力变化引起的压缩或回弹, 同时可准确地模拟千斤顶在卸载过程中可能与主体结构暂时脱离的现象。约束方程中  $\text{const}$  的输入可直接精确控制千斤顶的下降量, 且该方法可以采用通用有限元程序实现, 是一种方便可行的精确计算方法。

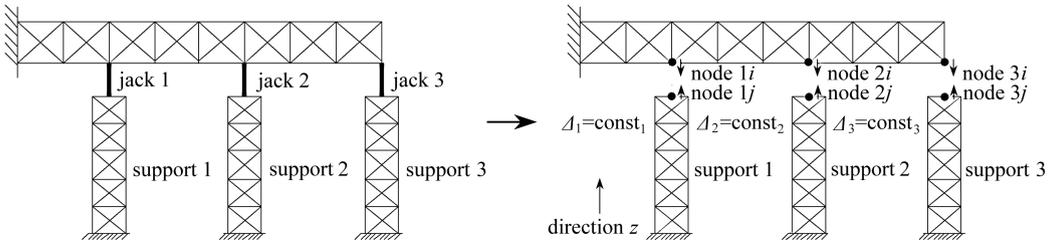


图 4 约束方程法的计算原理

Fig. 4 Principle of constraint equation method

### 3 数值算例

图 5 所示两端固定梁, 设置了 3 个临时支撑。梁长  $L = 24 \text{ m}$ , 截面采用 H 型钢 H 600 mm  $\times$  200 mm  $\times$  6.0 mm  $\times$  8.0 mm; 临时支撑高 2.0 m, 采用 H 型钢 H 500 mm  $\times$  150 mm  $\times$  4.0 mm  $\times$  6.0 mm; 材料弹性模量  $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , Poisson 比为 0.3。千斤顶高度为 0.5 m。假设梁上有均布荷载  $q = 20 \text{ kN/m}$ , 并忽略梁的自重。3 个临时支撑分别位于梁的  $L/4, L/2$  和  $3L/4$  处。计算模型中梁被划分为 12 个单元, 在与支撑连接处划分有节点, 节点编号如图 5 所示。

基于 ANSYS 有限元软件, 本节分别采用支座位移法、等效杆端位移法、千斤顶单元法及约束方程法对该结构的拆撑过程进行模拟分析。采用支座位移法建立模型时, 先建立梁, 并在节点 4, 7, 10 处建立竖向支座, 再施加荷载。采用等效杆端位移法建立模型时, 先建立梁, 并在节点 4, 7, 10 处分别建立与支撑 1, 2, 3 轴向刚度等效的只压不拉弹性杆, 再施加荷载。采用千斤顶单元法建立模型时, 先建立梁、千斤顶和支撑, 再施加荷载。采用约束方程法建立模型时, 先建立梁和支撑, 并采用  $\text{ce}$  命令将梁上节点 4, 7, 10 的竖向位移分别与相应的支撑 1, 2, 3 的顶端节点的竖向位移耦合。拆撑过程模拟计算采用分组分步的卸载方式, 千斤顶的下降顺序为  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ , 根据实际工程中对千斤顶的一般操作方式, 将拆撑过程分为 5 大步, 每大步再分为 3 小步, 共 15 小步完成。每个大步的 3 个小步分别为: 千斤顶 1 下降  $U_1/5 \rightarrow$  千斤顶 3

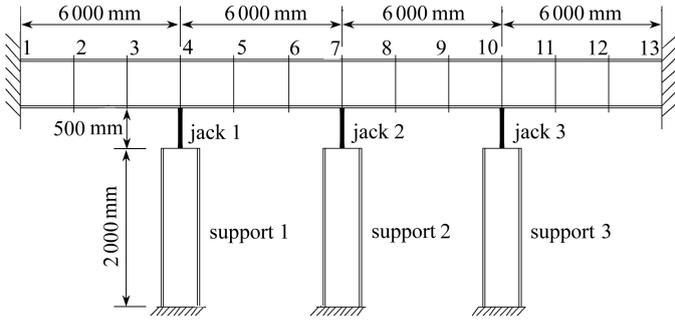


图5 两端固定梁的临时支撑模型

Fig. 5 A three-point-support beam fixed at both ends

下降  $U_3/5 \rightarrow$  千斤顶 2 下降  $U_2/5$  (参见表 1), 其中  $U_1, U_2, U_3$  分别为梁与千斤顶相接触的节点在卸载完成时的总竖向位移量, 根据计算可得  $U_1 = U_3 = 123 \text{ mm}, U_2 = 215 \text{ mm}$ . 上述计算方法得到的千斤顶轴向力、梁弯矩、千斤顶顶点位移和支撑顶点位移的变化见图 6 ~ 图 9. 图中  $x$  轴示出小步数  $i, 0$  代表结构的初始状态, 15 代表拆撑完成状态; method 1 代表约束方程法, method 2 代表等效杆端位移法, method 3 代表千斤顶单元法, method 4 代表约束方程法.

表 1 分组分步卸载步骤

Table 1 Displacement in every unloading step and substep

|         |         | displacement of jack 1 | displacement of jack 2 | displacement of jack 3 |
|---------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|
| stage 1 | step 1  | $0.2U_1$               | 0                      | 0                      |
|         | step 2  | $0.2U_1$               | 0                      | $0.2U_3$               |
|         | step 3  | $0.2U_1$               | $0.2U_2$               | $0.2U_3$               |
| stage 2 | step 4  | $0.4U_1$               | $0.2U_2$               | $0.2U_3$               |
|         | step 5  | $0.4U_1$               | $0.2U_2$               | $0.4U_3$               |
|         | step 6  | $0.4U_1$               | $0.4U_2$               | $0.4U_3$               |
| stage 3 | step 7  | $0.6U_1$               | $0.4U_2$               | $0.4U_3$               |
|         | step 8  | $0.6U_1$               | $0.4U_2$               | $0.6U_3$               |
|         | step 9  | $0.6U_1$               | $0.6U_2$               | $0.6U_3$               |
| stage 4 | step 10 | $0.8U_1$               | $0.6U_2$               | $0.6U_3$               |
|         | step 11 | $0.8U_1$               | $0.6U_2$               | $0.8U_3$               |
|         | step 12 | $0.8U_1$               | $0.8U_2$               | $0.8U_3$               |
| stage 5 | step 13 | $U_1$                  | $0.8U_2$               | $0.8U_3$               |
|         | step 14 | $U_1$                  | $0.8U_2$               | $U_3$                  |
|         | step 15 | $U_1$                  | $U_2$                  | $U_3$                  |

由图 6a ~ 图 6c 可看出, 由 4 种模拟方法得到的千斤顶轴力均呈振荡变化特征. 对于等效杆端位移法、千斤顶单元法和约束方程法, 振荡幅值随着拆撑过程的进行不断减小, 直至拆撑完成, 3 个千斤顶的轴力变为 0, 且三者的计算结果非常一致. 支座位移法的计算结果与前三者差别大, 千斤顶轴力出现为正的情况, 这是因为采用分组分步卸载方式时, 会出现某些临时支撑与主体结构暂时脱离的现象, 体现在数值上就是某些千斤顶的轴力在拆撑完成前会出现为 0 的情况, 如图 6a、图 6c 所示. 等效杆端位移法、千斤顶单元法和约束方程法能够模拟这种现象, 而支座位移法则无法模拟, 从而导致不合理的结果.

由图 8a 和图 8c 可以看出,在千斤顶单元法中,并不能精确控制千斤顶的下降量.这是由于千斤顶单元受到下部支撑和上部主体结构的约束,当其温度发生变化时并不能自由收缩(膨胀),从而不能按照预设值发生变形.

综上所述,约束方程法结合了支座位移法、等效杆端位移法和千斤顶单元法的优点,计算结果准确,且方便可行.

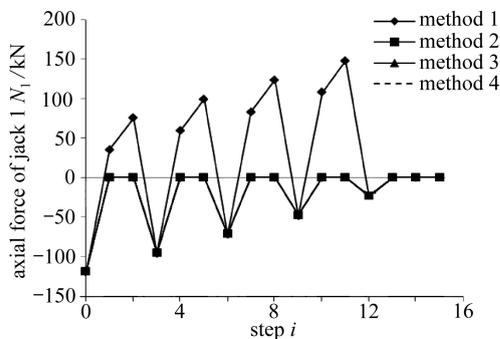


图 6a 千斤顶 1 轴力

Fig. 6a Axial force of jack 1

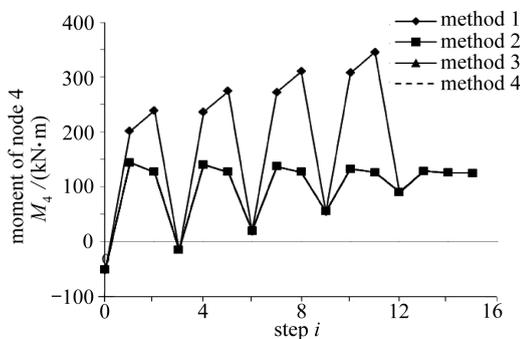


图 7a 节点 4 弯矩

Fig. 7a Moment of node 4

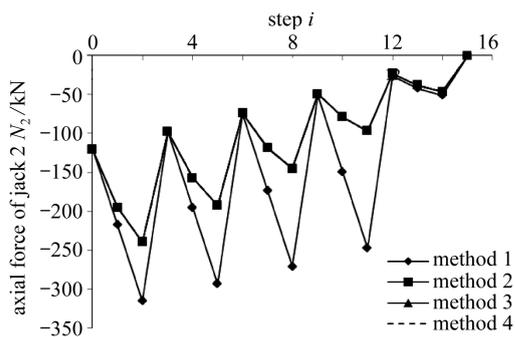


图 6b 千斤顶 2 轴力

Fig. 6b Axial force of jack 2

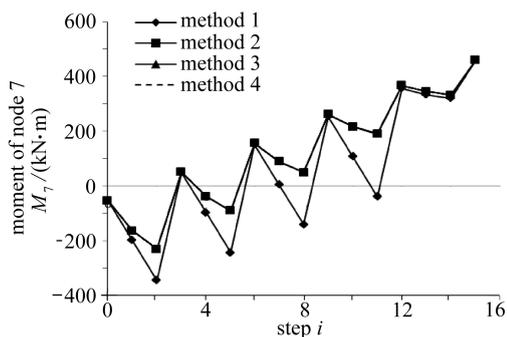


图 7b 节点 7 弯矩

Fig. 7b Moment of node 7

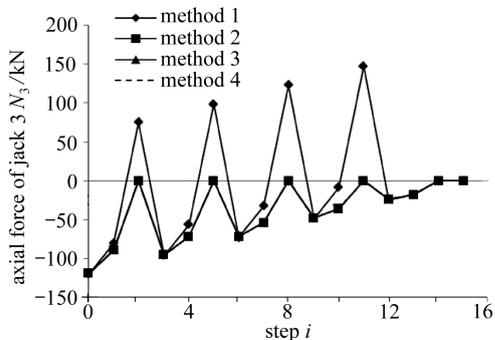


图 6c 千斤顶 3 轴力

Fig. 6c Axial force of jack 3

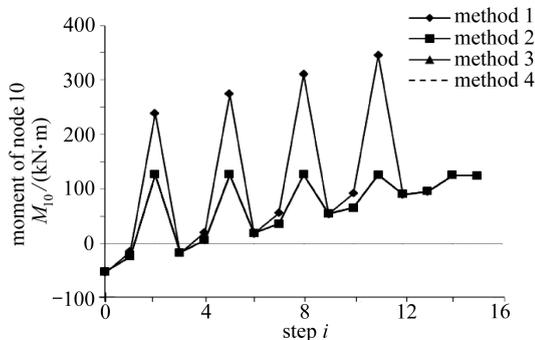


图 7c 节点 10 弯矩

Fig. 7c Moment of node 10

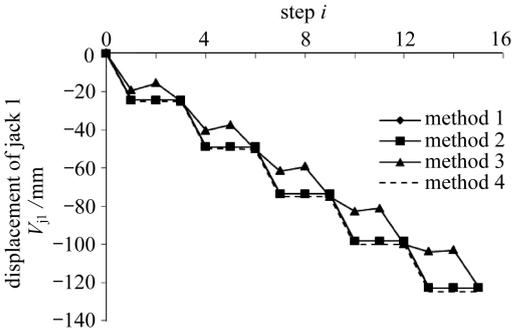


图 8a 千斤顶 1 顶点位移

Fig. 8a Displacement of jack 1

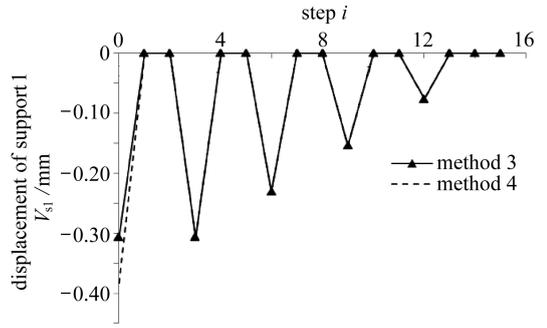


图 9a 支撑 1 顶点位移

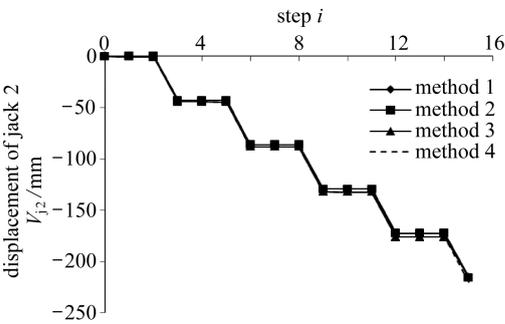
Fig. 9a Displacement of top node  
of support 1

图 8b 千斤顶 2 顶点位移

Fig. 8b Displacement of jack 2

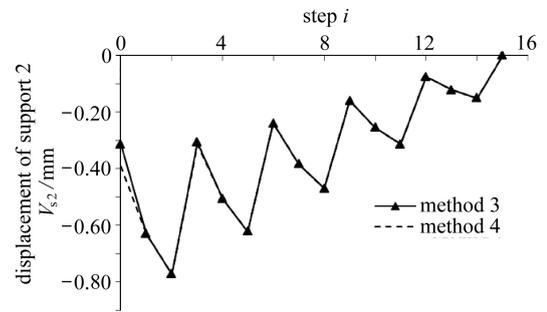


图 9b 支撑 2 顶点位移

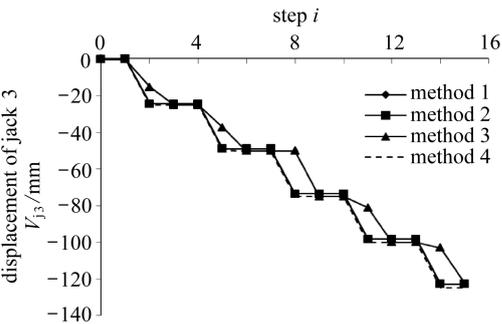
Fig. 9b Displacement of top node  
of support 2

图 8c 千斤顶 3 顶点位移

Fig. 8c Displacement of jack 3

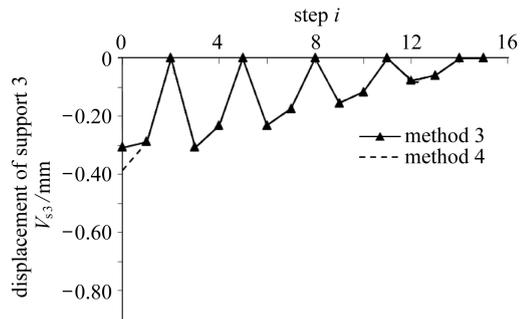


图 9c 支撑 3 顶点位移

Fig. 9c Displacement of top node  
of support 3

## 6 结 论

本文简要说明了目前大跨度屋盖钢结构拆撑过程中现有模拟方法的原理及特点,并说明了不同方法的适用性及其精确程度.针对现有方法的不足,本文提出了一种新的模拟方法即约束方程法.通过两端固接三点支撑钢梁的拆撑过程模拟分析,比较了几种拆撑模拟方法的特点,验证了本文方法的有效性及精确性.数值分析表明,本文提出的约束方程法是一种合理有

效的计算方法,可正确模拟拆撑过程中临时支撑与主体结构脱离的现象,也可精确地控制千斤顶单元的回缩量,准确分析主体结构和临时支撑的内力和变形的变化历程,可方便的应用于工程实际。

## 参考文献(References):

- [1] 郭彦林,崔晓强.大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨[J].工业建筑,2004,34(12):1-5,22.(GUO Yan-lin, CUI Xiao-qiang. Key technical problems and discussion in construction process of larger span steel structures[J]. *Industrial Construciton*, 2004, 34(12):1-5, 22. (in Chinese))
- [2] 伍小平,高振锋,李子旭.国家大剧院钢壳体施工全过程模拟分析[J].建筑结构学报,2005,26(5):40-45.(WU Xiao-ping, GAO Zhen-feng, LI Zi-xu. The analysis of whole erection process for steel shell of National Grand Theatre[J]. *Journal of Building Structure*, 2005, 26(5):40-45. (in Chinese))
- [3] 郭彦林,郭宇飞,高巍,刘学武,李久林.国家体育场钢结构屋盖落架过程模拟分析[J].施工技术,2006,35(12):36-40,73.(GUO Yan-lin, GUO Yu-fei, GAO Wei, LIU Xue-wu, LI Jiu-lin. Simulating analysis of removing temporary supports for steel structural roof in National Stadium[J]. *Construction Technology*, 2006, 35(12):36-40, 73. (in Chinese))
- [4] 范重,刘先明,胡天兵,范学伟,赵莉华.国家体育场钢结构施工过程模拟分析[J].建筑结构学报,2007,28(2):134-143.(FAN Zhong, LIU Xian-ming, HU Tian-bing, FAN Xue-wei, ZHAO Li-hua. Simulation analysis on steel structure erection procedure of the National Stadium[J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(2):134-143. (in Chinese))
- [5] 陈国栋,郭彦林,叶浩文,顾国荣,李鸿生.广州市新体育馆屋盖吊装及拆撑过程动态分析[J].建筑结构,2002,32(1):53-57.(CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin, YE Hao-wen, GU Guo-rong, LI Hong-sheng. Tracing analysis of truss roof structure for Guangzhou gymnasium from hoisting state into designing state[J]. *Building Structure*, 2002, 32(1):53-57. (in Chinese))
- [6] 叶芳芳,余志武,袁俊杰.重庆大剧院大悬挑结构卸载分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(3):123-126.(YE Fang-fang, YU Zhi-wu, YUAN Jun-jie. Unloading analysis for large cantilever structure of Chongqing Grand Theatre[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2009, 26(3):123-126. (in Chinese))
- [7] 范重,刘先明,范学伟,李丽,彭翼.大跨度空间结构卸载过程仿真计算方法[J].建筑科学与工程学报,2011,28(4):19-25.(FAN Zhong, LIU Xian-ming, FAN Xue-wei, LI Li, PENG Yi. Simulation and calculation method of unloading process of large-span spatial structures[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(4):19-25. (in Chinese))
- [8] 郭彦林,郭宇飞,刘学武.大跨度钢结构屋盖落架分析方法[J].建筑科学与工程学报,建筑钢结构进展,2007,24(1):52-58.(GUO Yan-lin, GUO Yu-fei, LIU Xue-wu. Analysis methods of removing temporary supports to large-span steel structural roof[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 24(1):52-58. (in Chinese))
- [9] 刘学武,郭彦林,郭宇飞.千斤顶单元法在大跨度钢屋盖拆撑过程数值模拟中的应用[J].施工技术,2010,39(8):24-28,33.(LIU Xue-wu, GUO Yan-lin, GUO Yu-fei. Application of jack

- element model for numerical simulation of removing temporary supports of large-span steel roof[J]. *Construction Technology*, 2010, **39**(8): 24-28, 33. (in Chinese)
- [10] 郭彦林, 刘学武. 大跨度钢结构屋盖拆撑过程数值模拟的千斤顶-间隙单元法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, **40**(1): 1-7. (GUO Yan-lin, LIU Xue-wu. Jack-gap element model for numerical simulation of removing temporary supports of large-span steel structural roof[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **40**(1): 1-7. (in Chinese))

## Constraint Equation Method for Analysis of Removing Temporary Supports From Large-Span Steel Roof

GUO Xiao-nong, QIU Li-qiu, LUO Yong-feng, YE Zhi-wu, LUO Li-sheng  
(Department of Building Engineering, Tongji University,  
Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Four calculation methods for numerical simulation analysis of removing temporary supports from large-span steel roof were introduced—support displacement method, equivalent rod bottom-end displacement method, jack element method and jack-gap element method. Then a new method, constraint equation method, was proposed. All the methods mentioned above were used separately to analyze the process of removing temporary supports from a three-point-support beam which was fixed at both ends. The comparisons of results obtained by these methods indicate that the proposed constraint equation method is rational and effective for accurate simulation analysis of removing temporary supports to steel structural roof.

**Key words:** large-span steel structure; simulation of removing temporary supports; unloading jack element; constraint equation method

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51078289)