

DOI: 10.7511/jslx20221117001

基于滑动元法的连续拉索滑移分析

王 恺

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘 要:实际工程中,拉索在索撑节点处滑移十分普遍。考虑滑移的影响,索撑节点不能简单地用铰接模拟。现有的拉索滑移分析方法往往需要迭代,计算过程复杂且收敛性无法保证。本文提出一种拉索滑移分析新方法——滑动元法,以预应力鱼腹梁为例进行理论推导,介绍了滑动元法的基本原理和计算步骤。结合有限元软件,利用滑动元法对算例进行计算分析,结果表明,滑动元法计算快速无需迭代,可以较为准确地分析拉索滑移。

关键词:拉索;滑移;索撑节点;刚度矩阵;平衡方程

中图分类号:O302

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0519-06

1 引 言

索结构在土木工程中应用广泛,连续拉索在索撑节点处的滑移现象十分普遍。文献[1]将索撑节点分为滑动张拉索节点、滚动张拉索节点和自锁式抗滑移索夹三种类型。实际上,在索结构的施工过程中,常需要使连续拉索在索撑节点处自由滑移,以实现结构预应力的施加^[2]。在使用阶段,部分索结构允许拉索在索撑节点处自由滑移,以减小不均匀荷载作用下各段拉索的内力差值^[3],如预应力鱼腹梁^[4]。外荷载作用引起拉索滑移,拉索滑移又会导致结构内力重分布,因此索结构平衡状态的准确求解必须充分考虑拉索滑移的影响。

拉索滑移会导致索撑节点两侧索原长改变,因此不能直接用二节点单元或悬链线单元模拟。有限元软件尚未开发考虑滑移影响的索单元,而接触单元建模复杂且适用性差。目前针对连续拉索滑移行为的分析,主要有以下两类,(1) 索力平衡状态求解;(2) 拉索滑移的真实过程模拟分析。文献[5]推导了索段滑移刚度,建立平衡方程,根据索力差迭代调整索原长直至索力平衡。文献[6]提出了两跨连续索在中间节点滑移的一种理论解。文献[7]采用二节点悬索单元对多跨连续索进行静力平衡求解,循环迭代直至索力平衡。文献[8]采用二

分法加快索原长调整的收敛速度。文献[9]提出冷冻-升温法,依据位移协调,通过虚加温度荷载反复迭代调整两侧索原长直至索力平衡。文献[10]通过固定铰链模拟滑轮对拉索的约束作用,提出了一种适用于滑移索结构的角平分线法。然而,求解索力平衡方程,往往需要迭代,计算过程复杂且收敛性无法保证。拉索滑移真实过程的模拟分析^[10,11]往往需要借助复杂的数学物理方法,难以用于工程实践。

本文结合预应力鱼腹梁工程应用背景,推导连续拉索滑移分析新方法——滑动元法。该方法概念清晰,精度较高,无需迭代即可一次性求解,易于计算机编程实现,具有良好的应用价值。

2 预应力鱼腹梁介绍

预应力装配式鱼腹梁(简称预应力鱼腹梁)作为预应力钢结构,能够主动控制基坑变形,施工便捷,是一种绿色环保安全的新型基坑支护方式^[12]。

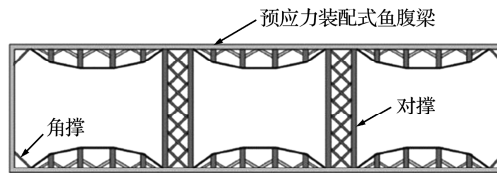


图1 预应力鱼腹梁平面布置

Fig. 1 Plane layout of IPS earth retention system

收稿日期:2022-11-17; 修改稿收到日期:2023-03-21.

基金项目:国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项,城市地下空间精细探测技术与开发利用研究示范(2019YFC0605100)资助项目.

作者简介:王 恺(1992-),男,硕士,工程师(E-mail:821797633@qq.com).

引用本文:王 恺. 基于滑动元法的连续拉索滑移分析[J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 519-524.

WANG Kai. Analysis of continuous cable sliding based on sliding variable method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 519-524.

在预应力鱼腹梁使用过程中,需要根据基坑开挖情况动态张拉钢绞线,实现对基坑变形的主动控制^[13]。因此,预应力鱼腹梁索撑节点处钢绞线的滑移在全生命周期里均可能发生。拉索滑移的准确分析,对于计算预应力鱼腹梁实际内力分布和变形特征至关重要。预应力鱼腹梁索撑节点结构形式如图2所示,拉索既与索撑节点保持接触又可自由滑移,通过构造设计减小相对摩擦造成的预应力损失。

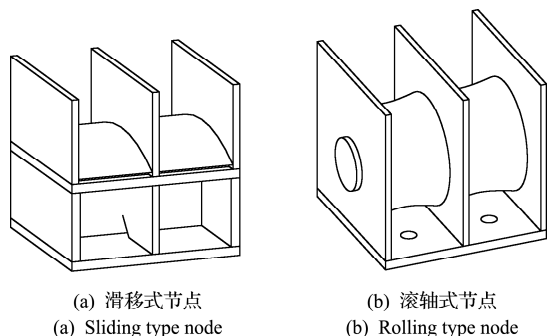


图2 预应力鱼腹梁索撑节点
Fig. 2 Cable-strut joint of prestressed fish-bellied beam

3 滑动元法原理与计算步骤

滑动元法以拉索在索撑节点处的滑移量 s 为基本变量,首先提取滑移刚度矩阵,随后建立索力平衡方程求解滑移量 s ,最后根据位移协调计算各段索的索原长改变及平衡状态索力。本节以预应力鱼腹梁为例,介绍滑动元法的原理和计算步骤。

3.1 基本计算假定

根据连续拉索滑移的特点,做出如下计算假定。

(1) 相邻索撑节点之间的拉索为直线。如果拉索应力较高,自重引起的索力很小,此时可忽略重力对拉索线型的影响,假定相邻索撑节点间的拉索为直线。

(2) 假定拉索与索撑节点之间的接触为点接触。拉索与索撑节点接触部位的长度,远小于索长,可以将接触简化为点接触,点的位置为接触部位的中点。

(3) 忽略索撑节点处的摩擦力,假定相邻索段索力相等。索撑节点处摩擦力较小,为了适当简化分析,忽略摩擦力影响,假定相邻索段的索力相等。

(4) 拉索的无应力索长总和不变,即索原长的总长不变。

(5) 不考虑几何非线性对结构刚度矩阵的影响。假定结构在外力作用而产生的变形量远小于其原始结构尺寸,忽略结构在受力过程中的变形对结构刚度矩阵的影响。

3.2 初始状态求解

拉索在索撑节点处的滑移量 s 是索滑移行为分析的关键。如图3所示,规定滑移量 s 为滑动过程中拉索和索撑节点接触位置的相对改变量,方向以沿索撑节点切线方向顺时针滑移为正方向。根据定义,滑移量 s 的物理意义为引起相邻索段索原长改变的量。

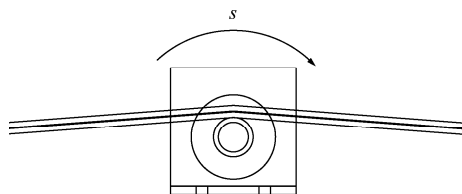


图3 预应力鱼腹梁索撑节点拉索在索撑节点处的滑移量
Fig. 3 Slip value of the cable at cable-strut joint

预应力鱼腹梁索撑节点和索段的编号如图4所示,1~ n 号节点滑移量依次为 $s_1 \sim s_n$,端部固定节点0和 $n+1$ 处 $s_0 = s_{n+1} = 0$ 。

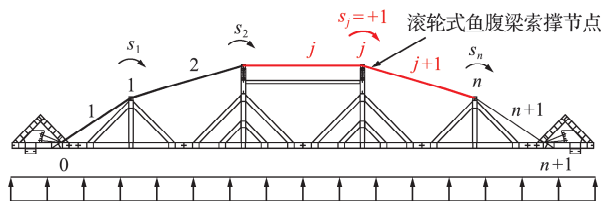


图4 预应力鱼腹梁拉索滑移
Fig. 4 Cable slip in prestressed fish-bellied beam

完成有限元建模,并施加荷载和约束,环境温度为 T_1 ,提取1~ $n+1$ 号索段的长度 $L(1) \sim L(n+1)$ 。假定索撑节点暂时固定约束住,滑移未发生(下文将此状态简称为固定节点),计算当前状态下各索段的索力 $F_0(1) \sim F_0(n+1)$,此时结构的状态称为初始状态。

3.3 滑移刚度矩阵提取

完成初始状态求解后,依次对 $j=1 \sim n$ 号索撑节点进行以下步骤。

(1) 放松第 j 号索撑节点,固定约束住其余所有索撑节点。

假定第 j 号节点发生单位正向滑移 $s_j = +1$,而其他节点不滑移。根据位移协调,索段的索原长改变量等于其两侧节点滑移量之差,第 j 段和第 $j+1$ 段索的原长改变量 $\Delta L(j)$ 和 $\Delta L(j+1)$ 为

$$\begin{cases} \Delta L(j) = s_j - s_{j-1} = +1 \\ \Delta L(j+1) = s_{j+1} - s_j = -1 \end{cases} \quad (1)$$

其余索撑节点处拉索均不发生滑移

$$\Delta L(1) = \dots = \Delta L(j-1) = \Delta L(j+2) = \dots = \Delta L(n+1) = 0 \quad (2)$$

选取等效温度法调整索原长,等效模拟拉索滑

移引起的索原长改变。规定索原长改变量以变短为正,以变长为负。为了实现与滑移量 $s_j = +1$ 相应的索原长改变,分别需要对 $1 \sim n + 1$ 号索段施加温度荷载 $\Delta T(i) (i = 1 \sim n + 1)$

$$\Delta T(i) = \Delta L(i) / \alpha L(i) \quad (i = 1 \sim n + 1) \quad (3)$$

根据式(2,3)可得到索原长调整温度荷载向量

$$\Delta \mathbf{T} = (0 \cdots 0, \frac{1}{\alpha L(j)}, \frac{-1}{\alpha L(j+1)}, 0 \cdots 0) \quad (4)$$

式中 α 为拉索的材料热膨胀系数。

(2) 在有限元软件中,根据步骤(1)求解得到温度荷载向量 $\Delta \mathbf{T}$ 的元素值,分别给各段拉索施加温度荷载,并再次按照固定节点求解。可以求解得到 $i = 1 \sim n + 1$ 号索段的索力 $F_1(i, j)$,进一步求解可得 $s_j = +1$ 引起第 i 段索的索力改变,

$$B_{ij} = F_1(i, j) - F_0(i) \quad (i = 1 \sim n + 1, j = 1 \sim n) \quad (5)$$

式中 $F_1(i, j)$ 为第 j 个索撑节点发生单位正向滑移引起的第 i 段索的索力值, $F_0(i)$ 为初始状态第 i 段索的索力值。

(3) 恢复向量 $\Delta \mathbf{T}$ 和 $\Delta \mathbf{L}$ 中元素值为默认值 0。通过本步骤清零为实现 $s_j = +1$ 而施加的等效温度荷载。

(4) 依次对 $j = 1 \sim n$ 号索撑节点重复步骤(1~3)。整理 $B_{ij} (i = 1 \sim n + 1, j = 1 \sim n)$, 可得拉索滑移刚度矩阵 \mathbf{B} , 即

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n+1,1} & \cdots & B_{n+1,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.4 索力平衡方程求解

预应力鱼腹梁最终平衡状态如图 5 所示。

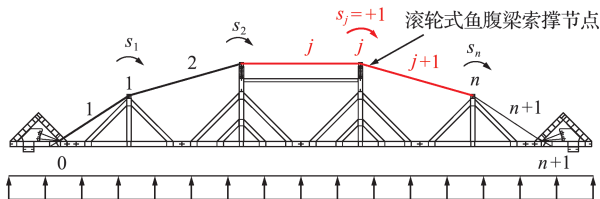


图 5 预应力鱼腹梁最终平衡状态

Fig. 5 Final balanced state of prestressed fish-bellied beam

假设滑移过程 $1 \sim n$ 号索撑节点处拉索滑移量为 $s_1 \sim s_n$, 最终平衡状态各段索索力变为 $F(i) (i = 1 \sim n + 1)$ 。

$$\begin{cases} F(1) = F_0(1) + B_{11} \cdot s_1 + B_{12} \cdot s_2 + \cdots + B_{1n} \cdot s_n \\ F(i) = F_0(i) + B_{i1} \cdot s_1 + B_{i2} \cdot s_2 + \cdots + B_{in} \cdot s_n \\ F(n+1) = F_0(n+1) + B_{n+1,1} \cdot s_1 + B_{n+1,2} \cdot s_2 + \cdots + B_{n+1,n} \cdot s_n \end{cases} \quad (7)$$

式(7)用矩阵形式可以表示为

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}^T = \Delta \mathbf{F} \quad (8)$$

式中 $\Delta \mathbf{F}$ 滑移过程各索段索力变化为

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F(1) - F_0(1) \\ F(2) - F_0(2) \\ \vdots \\ F(n) - F_0(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据 3.1 节中(3)的假定,得平衡状态 $F(1) = F(2) = \cdots = F(n + 1)$, 可以列出索力平衡方程

$$\begin{bmatrix} B_{11} - B_{21} & \cdots & B_{1n} - B_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n,1} - B_{n+1,1} & \cdots & B_{n,n} - B_{n+1,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(2) - F_0(1) \\ \vdots \\ F_0(n+1) - F_0(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解得到滑移向量 $\mathbf{S} = (s_1, \cdots, s_n)^T$ 。

3.5 连续拉索索力调整

$$\begin{cases} \Delta T(1) = -(s_1 - s_0) / [\alpha L(1)] \\ \cdots \\ \Delta T(i) = -(s_i - s_{i-1}) / [\alpha L(i)] \\ \cdots \\ \Delta T(n+1) = -(s_{n+1} - s_n) / [\alpha L(n+1)] \end{cases} \quad (11)$$

由式(11),根据各索撑节点的滑移量给 $i = 1 \sim n + 1$ 号索段施加等效温度荷载以调整索力。

根据位移边界条件, $s_0 = s_{n+1} = 0$, 可得等效温度荷载向量 $\Delta \mathbf{T}$ 为

$$\Delta \mathbf{T} = \left[\frac{-s_1}{\alpha L(1)} \cdots \frac{s_{i-1} - s_i}{\alpha L(i)} \cdots \frac{s_n}{\alpha L(n+1)} \right] \quad (12)$$

给拉索施加等效温度荷载 $\Delta \mathbf{T}$ 并再次进行有限元求解, 可得最终平衡状态。

滑动元法主要步骤相对固定, 非常适合进行计算机编程。利用有限元软件 ANSYS 二次开发编程功能, 完成基于滑动元法的宏文件编制, 滑移刚度矩阵和索力平衡方程均可实现参数化的分析控制和求解, 不需迭代即可求解得到最终平衡状态, 大大提高了分析计算的效率。

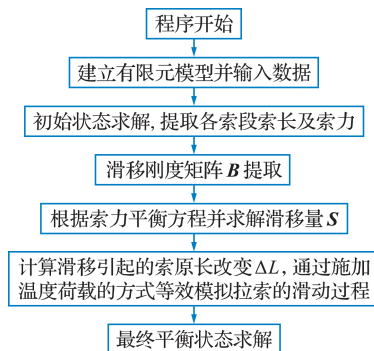


图 6 基于滑动元法的程序运行

Fig. 6 Operation diagram of the program based on sliding variable method

4 算例分析

4.1 斜拉梁算例

如图7所示,悬臂梁通过一跨过索撑节点的钢索悬挂,其中悬臂梁采用 $H150 \times 250 \times 8 \times 4$ 工字型截面,节点和索段的位置及编号在图中均有标注,不考虑索撑节点处的摩擦力。悬臂钢梁上作用均布荷载 3.16 kN/m 。在 ANSYS 中完成悬臂钢梁模型的建立,其中钢梁采用 BEAM188 单元,钢索采用 LINK10 单元。利用滑动元法分析拉索滑移,并与冷冻-升温法^[9]及不滑动(固定节点)不滑移的计算结果对比。

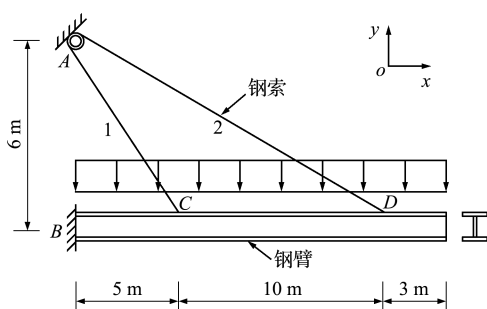


图7 斜拉梁
Fig. 7 Cable-stayed beam

平衡状态1号和2号索段的拉力分别为 F_1 和 F_2 。如图8所示,按照不滑动求解, F_1 和 F_2 相差高达44.28%,结果失真与实际不符。冷冻-升温法和滑动元法计算得到的 F_1 和 F_2 基本相等,且两种方法计算得到的钢梁内力和变形也基本相同。这表明滑动元法能够考虑钢索滑动的影响,较为准确计算结构平衡状态。冷冻-升温法求解拉索滑移问题需要迭代,收敛速度受不平衡分配系数影响,收敛速度存在不确定性^[8]。滑动元法不需要迭代,利用滑移刚度矩阵和索力平衡方程,可一次性求解出平衡状态各索段的索力。

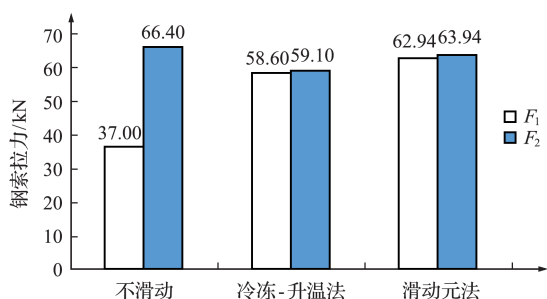


图8 钢索拉力计算结果
Fig. 8 Calculation result of the tensile force of the steel cable

4.2 预应力鱼腹梁算例

图10为应用于某基坑工程的预应力鱼腹梁,

构件截面及材料参数列入表1。其中,预应力钢绞线总根数为32根,设计预张力 $P = 2860 \text{ kN}$ 。

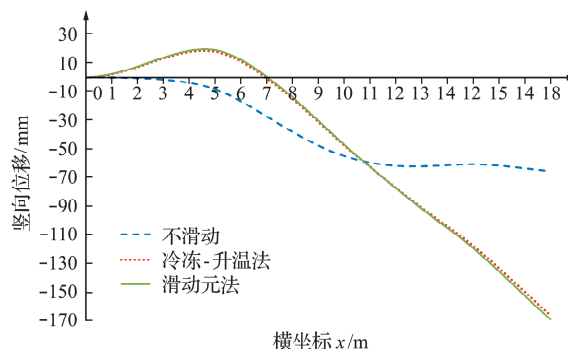


图9 钢梁挠度计算结果
Fig. 9 Calculation results of steel beam deflection

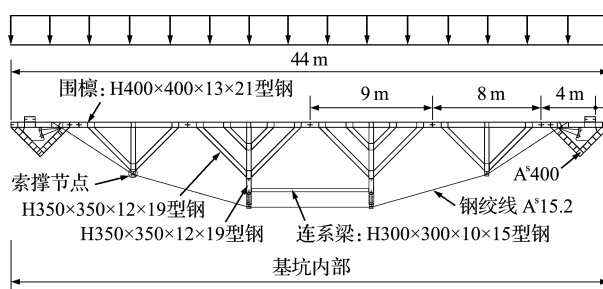


图10 预应力鱼腹梁算例
Fig. 10 Numerical example of prestressed fish-bellied beam

表1 构件截面及材料参数

Tab. 1 Member section and material parameters

构件名称	截面	材料	弹性模量 $/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	热膨胀 系数/ $^{\circ}\text{C}$
围檩	H 400×400×13×21	Q345	2.06×10^{11}	1.2×10^{-5}
撑杆	H 350×350×12×19	Q345	2.06×10^{11}	1.2×10^{-5}
连系梁	H 300×300×10×15	Q345	2.06×10^{11}	1.2×10^{-5}
钢绞线	A ^{15.2}	冷拔高碳钢	2.00×10^{11}	1.2×10^{-5}

基坑开挖至一定深度时,在指定标高安装预应力鱼腹梁,钢绞线张拉至70% P 对土体预加载,激发被动土压力,使围护结构产生反向水平位移,此时结构处中间平衡状态。随着基坑逐步开挖至设计深度,坑内土体逐渐卸载,被动土压力逐步转化为主动土压力且不断增大,预应力鱼腹梁的位移也不断增大,迅速张拉钢绞线至设计预张力 P ,将基坑水平位移控制在合理的范围内,此时结构处于最终平衡状态。

根据预应力鱼腹梁的实际参数建立相应的有限元模型,围檩、H型钢撑杆和连系梁均采用 BEAM188 单元,预应力钢绞线采用只拉不压的 LINK10 单元,约束预应力鱼腹梁围檩端部节点的 U_x, U_y 和 U_z 及关键节点的平面外自由度。为了模拟土体的约束作用,采用 COMBIN40 单元在围檩

外侧设置只拉不压的弹簧。弹簧内侧节点与鱼腹梁围檩上的节点耦合，而外侧节点则处于固接状态。弹簧单元间隔为 0.1 m，弹簧刚度根据文献[16]提供的方法结合围护结构及土体的参数进行计算，刚度值 K 近似取 2×10^6 N/m。

表 2 不同工况荷载信息

Tab. 2 Load information under different conditions

状态	Pcon/kN	土压力	$w/kN \cdot m^{-1}$
中间平衡态	2000	被动土压力	弹簧压力
最终平衡态	2860	主动土压力	80

由于基坑工程变形控制较为严格，预应力鱼腹梁的变形相对于其结构尺寸很小，因此可不考虑几何非线性对结构刚度矩阵的影响，符合滑动元法的基本计算假定。利用滑动元法对预应力鱼腹梁的拉索滑移进行分析，无需迭代即可快速求解得到平衡状态。

如图 11 所示，中间平衡状态各段钢绞线张力均为 2000 kN，最终平衡状态各段钢绞线张力均为 2860 kN，计算结果与工程的实际情况相符，证明滑动元法能够很好地分析钢绞线滑移。

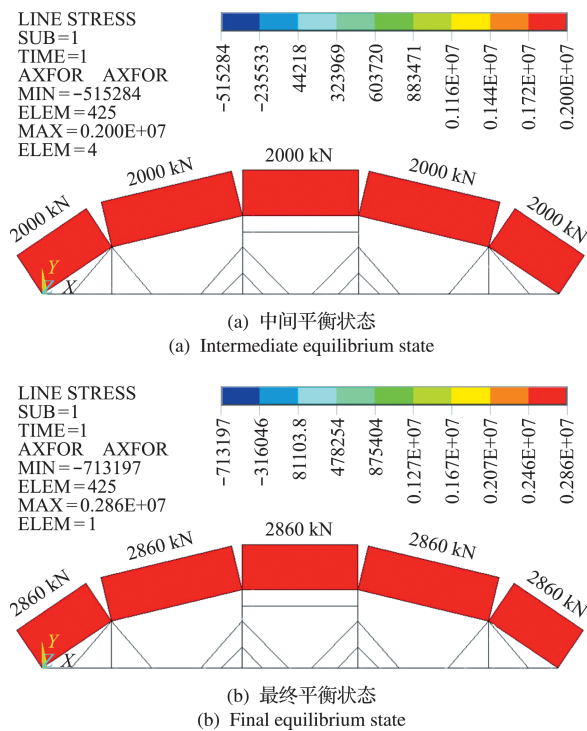


图 11 钢绞线张力(单位:kN)
Fig. 11 Tension of steel strands (unit: kN)

5 结 论

滑动元法以位移协调为基础，根据索力平衡方程求解拉索滑移量，通过施加等效温度荷载，模拟滑移引起的索原长及索力的改变，准确求解结构的

平衡状态。本文阐述了滑动元法的基本原理，推导了滑动元法的计算步骤，应用该方法对典型算例进行了模拟分析，结论如下。

(1) 滑动元法原理清晰，计算快速准确无需迭代，易于计算机编程实现，可以较好地分析拉索滑移问题。

(2) 允许拉索在索撑节点处自由滑移，可使得各段拉索的索力近似相等，拉索的应力峰值减小，提高拉索的使用效率。

(3) 滑动元法假定拉索自由滑移，实际工程中有很多情况索撑节点处的摩擦力不可忽略，拉索摩擦滑移问题仍需要进一步研究。

(4) 滑动元法基于小变形假定，不考虑几何非线性对结构刚度矩阵的影响，因此适用于小变形结构。

参考文献(References):

[1] 王国庆,刘红波,于敬海,等. 预应力拉索抗滑移节点类型及应用[A]. 第十九届全国现代结构工程学术研讨会[C]. 2019. (WANG Guo-qing, LIU Hong-bo, YU Jing-hai, et al. Type and application of anti-slipping joints of prestressed cables[A]. The 19th National Symposium on Modern Structural Engineering[C]. 2019. (in Chinese))

[2] 俞 锋. 索滑移分析的计算理论及其在索杆梁膜结构的应用研究[D]. 浙江大学, 2015. (YU Feng, Calculation Theory of Cable Slip Analysis and Its Application in Cable-Strut-Beam Membrane Structure [D]. Zhejiang University, 2015. (in Chinese))

[3] Cui X Q, Guo Y L. Influence of gliding cable joint on mechanical behavior of suspen-dome structures [J]. *International Journal of Space Structures*, 2004, **19** (3): 149-154.

[4] 刘全林,陈伟宏,宋伟民,等. 一种基坑支护用大跨度预应力鱼腹梁及其安装方法: 中国专利 201210362458. 2 [P]. 2012. 09. 25. (LIU Quan-lin, CHEN Wei-hong, SONG Wei-min, et al. Long-span pre-stress fish belly sill for foundation pit support and mounting method there of CN201210362458 [P]. 2012. 09. 25. (in Chinese))

[5] 唐建民,沈祖炎. 悬索结构非线性分析的滑移索单元法 [J]. 计算力学学报, 1999, **16**(2): 143-150. (TANG Jian-min, SHEN Zu-yan. A nonlinear analysis method with sliding cable elements for the cable structures [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 1999, **16**(2): 143-150. (in Chinese))

[6] 唐建民,卓家寿. 在中支座可滑动的两跨连续索的静力分析 [J]. 计算力学学报, 1999, **16**(4): 483-488, 432. (TANG Jian-min, ZHUO Jia-shou. Nonlinear static anal-

- ysis of two-span continuous cables sliding on the middle supporting[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 1999, **16**(4):483-488. (in Chinese))
- [7] 聂建国,陈必磊,肖建春.多跨连续长索在支座处存在滑移的非线性静力分析[J]. *计算力学学报*, 2003, **20**(3):320-324. (NIE Jian-guo, CHEN Bi-lei, XIAO Jian-chun. Nonlinear static analysis of continuous cables with sliding at the middle supportings[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, **20**(3):320-324. (in Chinese))
- [8] 魏建东,刘忠玉.一种连续索滑移的处理方法[J]. *计算力学学报*, 2003, **20**(4):495-499. (WEI Jian-dong, LIU Zhong-yu. One method dealing with cable sliding [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, **20**(4):495-499. (in Chinese))
- [9] 郭彦林,崔晓强.滑动索系结构的统一分析方法——冷冻-升温法[J]. *工程力学*, 2003, **20**(4):156-160. (GUO Yan-lin, CUI Xiao-qiang. An unified analytical method for gliding cable structures-frozen-heated method[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, **20**(4):156-160. (in Chinese))
- [10] Yu X M, Chen D W, Bai Z Z. A new method for analysis of sliding cable structures in bridge engineering [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2018, **22**(11):4483-4489
- [11] Aaufaure M. A three-node cable element ensuring the continuity of the horizontal tension: A clamp-cable element[J]. *Computers & Structures*, 2000, **74**(2):243-251.
- [12] Zhou B, Accorsi M L, Leonard J W. Finite element formulation for modeling sliding cable elements[J]. *Computers & Structures*, 2004, **82**(2-3):271-280.
- [13] 庄诗潮,张建霖,张灿辉,等.装配式预应力鱼腹式钢支撑系统的刚度研究[J]. *土木工程学报*, 2021, **54**(4):18-25. (ZHUANG Shi-chao, ZHANG Jian-lin, ZHANG Can-hui, et al. On stiffness of prefabricated prestressed fish-belly steel support system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, **54**(4):18-25. (in Chinese))
- [14] 沙敏军,赵骏强.装配式预应力鱼腹梁钢支撑受力机理研究[J]. *施工技术*, 2019, **48**(S1):1305-1308. (SHA Min-jun, ZHAO Jun-qiang. Study on mechanical mechanism of assembled prestressed fish-bellied beam steel support [J]. *Construction Technology*, 2019, **48**(S1):1305-1308. (in Chinese))
- [15] Park J S, Joo Y S, Kim N K. New earth retention system with prestressed wales in an urban excavation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(11):1596-1604.
- [16] 曾庆敦,甄圣威.横向荷载作用下桩-土耦合系统的土弹簧刚度[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2010, **31**(4):383-388. (ZENG Qing-dun, ZHEN Sheng-wei. Soil spring stiffness of soil-pile coupling system under transverse load[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2010, **31**(4):383-388. (in Chinese))

Analysis of continuous cable sliding based on sliding variable method

WANG Kai

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In engineering practice, sliding of a cable at a cable-strut joint is common. Because of sliding, a cable strut joint cannot be simply represented by a hinge. The existing analytical methods for cable sliding needs iteration, whose calculation process is complex and convergence cannot be guaranteed. This work proposes a novel sliding variable method to analyze cable sliding. The pre-stressed fish-belly beam is utilized to demonstrate the theoretical derivation. Meanwhile, the basic principle and calculation steps are clarified. Based on a finite element software package, a numerical experiment is conducted using the sliding variable method. The results show that the sliding variable method is fast and does not need iteration, and the cable sliding can be analyzed more accurately.

Key words: cable; slide; cable-strut joint; stiffness matrix; equilibrium equation