

# 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究

张传庆, 冯夏庭, 周 辉, 黄书岭

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 根据快速拉格朗日法的基本原理, 讨论了在其中实现应力释放法的理论根据。通过不同侧压系数下脆性岩体中圆形隧洞开挖卸荷过程的应力释放法模拟和真三维模拟, 分别讨论了应力路径问题、模拟空间效应时最终计算结果的准确性及其工程应用问题。在未包含断层、软弱带等特殊地质条件的情况下, 分析得到以下结论: (1) 应力释放法模拟中, 围岩经历的应力路径与真三维模拟不同, 故只能用前者来近似模拟开挖问题; (2) 不同的应力路径将导致不同的最终结果, 在一定的近似程度要求及计算工作条件下应力释放法模拟的最终结果可近似真三维的模拟结果, 且对于圆形隧洞问题, 当侧压系数从 1.0 开始增大或减小时, 这种近似误差将减小, 并最终趋于稳定; (3) 在工程应用中, 由应力释放法可得到收敛约束法中的 GRC 曲线, 从而使得它在工程应用中发挥重要的作用。

**关 键 词:** 隧洞; FLAC<sup>3D</sup>; 应力释放法; 应力路径; 真三维模拟; 侧压系数; 收敛约束法

中图分类号: U 459

文献标识码: A

## Study of some problems about application of stress release method to tunnel excavation simulation

ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, HUANG Shu-ling  
(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the theory of fast Lagrangian analysis of continua, the theoretical basis of the stress release method is discussed. Through the analysis of a case in which the excavating and unloading process of a circular tunnel is simulated by using the stress release method and the three-dimensional simulating method respectively; the problems including the differences of stress paths, the accuracy of the calculating results and the applicability of the stress release method are discussed. Firstly, the results indicate that the stress paths are different in these two methods. So, the stress release method can simulate the excavation in tunnel engineering only in some limitation. Secondly, as to the material with the nonlinear mechanical property, the different stress paths induce the different results. But, the results from the two methods are equal approximately if the required conditions are satisfied and the error magnitude will decrease with the increase or decrease of the confining-pressure coefficient from 1.0. Finally, GRC in the convergence-confinement method can be obtained simply through the stress release method; and it indicates the importance of this method in the corresponding application.

**Key words:** tunnel; FLAC<sup>3D</sup>; stress release method; stress path; true three-dimensional simulating method; confining pressure coefficient; convergence-confinement method

### 1 前 言

应力释放法, 也称“反转应力法”或“反转应力释放法”, 最早是由 Duncan 和 Dunlop (1969 年) 提出的<sup>[1]</sup>, 当时只限于初始应力场为均匀场的特殊情况, 后来, 通过有限元法使这一思想在非均匀应力场中也得到了应用, 孙钧等<sup>[2]</sup>曾建议了一种用开

挖面上分布面力求等效节点释放荷载的“反转应力释放法”; Mana 等<sup>[2]</sup>曾提出由挖去单元所产生的释放荷载节点力向量提取等效释放荷载向量的方法; 赵德安<sup>[3]</sup>、郝哲<sup>[4]</sup>、胡庆安<sup>[5]</sup>、徐林生<sup>[6]</sup>等分别采用了类似的方法, 对隧道工程的开挖问题进行了分析。应力释放法为在平面应变有限元中实现开挖问题而被提出来, 常常被用来模拟开挖过程的空间效应问

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50709037, No. 50539090, No. 50579091); 中国科学院岩土力学重点实验室开放研究基金 (No. O710111Z01)  
作者简介: 张传庆, 男, 1977 年生, 博士, 从事岩土工程稳定性分析理论与数值模拟方法的研究。E-mail: cqzhang@whrsm.ac.cn。

题，如二维开挖支护过程的模拟、地层压力的释放与支护压力的控制问题、三维支护时机的控制问题等等。应力释放法通过一个比例系数来控制各节点荷载释放的大小，这也就决定了围岩所经历的应力路径，而这一应力路径与工程现场或真三维模拟的应力路径不同，对于具有非线性变形特性的岩体材料来讲，将导致模拟结果与现场或真三维模拟的差异。

针对这一问题，本文研究了在快速拉格朗日法中实现应力释放法的理论依据，通过分析不同侧压系数下圆形隧洞开挖过程中的空间效应问题，研究应力释放法在平面应变模拟中围岩的应力路径，并对应力路径问题导致最终结果的差异进行分析，给出该方法的特点及应用范围，最后探讨了应力释放法在收敛约束法中的应用。

## 2 FLAC<sup>3D</sup> 中应力释放法的理论基础及其实现

根据 Mana 和 Clough<sup>[1]</sup>所建议的方法，第  $k$  步开挖，挖去  $m$  个单元后，在  $m$  个单元的全部节点上所产生的释放荷载节点力向量为

$$\left. \begin{aligned} \{F\}^k &= \sum_{i=1}^m \int_{\Omega_i} [B]_i \{\sigma\}_i^k d\Omega, \\ (i=1, \dots, m \text{ 为挖去的单元数}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\{\sigma\}^k$  为第  $k$  步开挖之初围岩的应力水平，从  $\{F\}^k$  列向量中提取出对应于开挖面节点处的全部分量  $\{F\}_B^k$ （下标  $B$  表示开挖自由面边界），即为第  $k$  步开挖引起的等效释放荷载列向量。

在 FLAC<sup>3D</sup> 即快速拉格朗日方法和有限差分原理中，应力分量全部以单元的形式存在于单元形心点处，节点处仅有不平衡力向量，且在平衡状态下节点处的不平衡力向量近似为 0 向量，故此时不能照搬有限元中的方法。应力释放法的核心思想就是求得开挖前开挖边界处开挖体对围岩的支撑力（开挖掉开挖体单元后，相应的支撑力随即消失），重建这一支撑力，然后控制其释放的规律，达到分析的目的，因此问题的关键就在于能否在 FLAC<sup>3D</sup> 中求得这一支撑力。

苏国韶<sup>[7]</sup>提出了该问题的解决方法，即开挖掉相应单元后，计算第 1 步（step 1），取得此时边界节点处不平衡力的反力即为支撑力。

本文下面给出这一方法的理论依据。

FLAC<sup>3D</sup> 每步计算的一般步骤<sup>[8]</sup>为：已知速度场 → 应变率 → 应变增量 → 应力增量 → 不平衡力 → 新

的节点速度 → 位移场 → 几何更新。开挖前的应力场已经平衡，故此时的节点速度和不平衡力均为 0。开挖后，在第 1 步计算中应变率、应变增量及应力增量均为 0，而此时的不平衡力按下式计算：

$$F_i^{<l>} = [[p_i]]^{<l>} + P_i^{<l>} \quad (2)$$

式中：下标  $i$  为向量分量标号；上标  $<l>$  为全局节点号； $P_i^{<l>}$  为施加的荷载和集中力在节点  $<l>$  处的贡献；符号  $[[\cdot]]^{<l>}$  表示拥有节点  $<l>$  的所有 4 面体上，某变量对节点  $<l>$  的贡献之和； $p_i^l$  的计算公式为

$$p_i^l = \frac{1}{3} \sigma_{ij} n_j^{(l)} S^{(l)} + \frac{1}{4} \rho b_i V \quad (3)$$

式中： $\sigma_{ij}$  为应力分量； $n_j^{(l)}$  为四面体中面  $(l)$  的法向量； $S^{(l)}$  为四面体中面  $(l)$  的面积； $\rho$  为密度； $b_i$  为单位体积的体积力； $V$  为四面体的体积。

开挖体被开挖后，开挖体边界的节点将失去开挖体与之相连单元贡献的力，故在这些节点处，不平衡力将不再为 0，其为开挖掉的与之相连单元贡献的力的矢量和，指向开挖面。而其他位置的节点，由于未发生应力增量，故其不平衡力仍然为 0。

由此看来，第一步计算完毕后，仅有开挖体边界的节点处产生了不平衡力，且不平衡力的反力即为开挖体对围岩的支撑力。

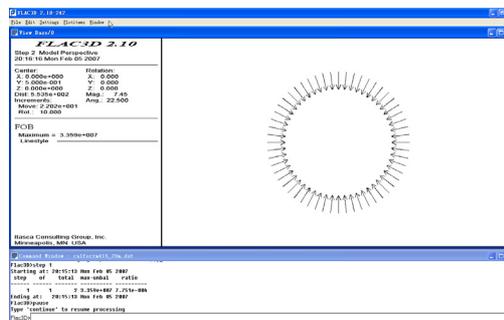


图1 开挖边界节点处的不平衡力

Fig.1 Out-of-balance force on the nodes on the excavation boundary

## 3 空间效应模拟中的应力路径问题

符号约定：本文约定第一主应力  $\sigma_1$  为最大压应力，第三主应力  $\sigma_3$  为最小压应力，且压正拉负。

如图 2 所示<sup>[9]</sup>，在  $t_0$  时刻，在掌子面开挖过后断面  $A-A'$  暴露出来，由于掌子面支撑效应的减弱，此断面围岩中原存储的一部分能量得以释放，地层压力减小，此阶段应力调整完毕后，施加支护，这时的支护压力为 0，见图 2(a)；随着掌子面的继续远离，在时刻  $t$ ，地层压力继续释放，支护压力上

升, 见图 2(b); 直到最终时刻  $t_D$ , 掌子面效应完全消失, 断面  $A-A'$  处的地层压力释放完毕, 支护承受的压力稳定下来, 洞壁位移也收敛至  $u_r^D$ , 如图 2(c)所示。

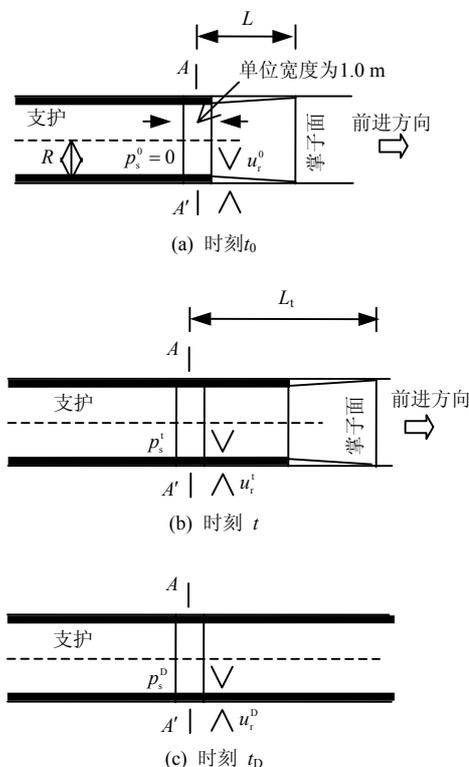


图 2 隧洞开挖过程中的应力释放<sup>[9]</sup>

Fig.2 Stress release in the excavating process<sup>[9]</sup>

不考虑支护效应时, 上述过程即是掌子面支撑效应逐渐消失的过程, 而这一三维过程可以采用平面应变问题的应力释放法, 即通过释放边界支撑力来近似模拟, 但这一方法与真三维分析相比, 其效果如何, 则需要进一步地比较分析。

实际开挖过程中, 掌子面直接或间接(主要)地约束作用限制了附近围岩的变形, 从而限制了地层压力的释放, 但并没有真实的荷载作用在洞壁上。应力释放法则是把掌子面的这一约束作用转换为等效支撑荷载, 并通过该等效支撑荷载的释放来模拟这一过程。二者所造成的最明显的差异就是洞壁岩体经历的应力路径不同。

图 3 为不同侧压系数  $k$  下由应力释放法经弹性计算得到的圆形隧洞拱顶和侧壁单元的应力路径图。模拟隧洞的几何形状和边界荷载的示意图如图 4 所示, 侧压力系数  $k$  分别为 1.0, 1.25, 1.67, 2.5, 5.0, 力学参数见表 1<sup>[10]</sup>, 可见在静水压力下隧洞拱顶和侧壁的应力路径重合, 且线性变化, 不断减小,

而  $\sigma_1$  不断增大, 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )增大。在  $\sigma_1 - \sigma_3$  平面上, 应力点最终超出了初始屈服线。随着侧压系数的增大, 拱顶单元的应力路径仍保持为直线, 且直线斜率的绝对值越来越大, 表明其越来越容易发生屈服, 而侧壁单元的应力路径则由折线渐变成曲线, 即在侧压系数较小时, 其  $\sigma_3$  先少量增大, 后逐渐减小,  $\sigma_1$  先少量减小后逐渐增大, 当侧压系数增大至一定程度后,  $\sigma_3$  就会单调减小, 甚至出现拉应力,  $\sigma_1$  也单调减小。

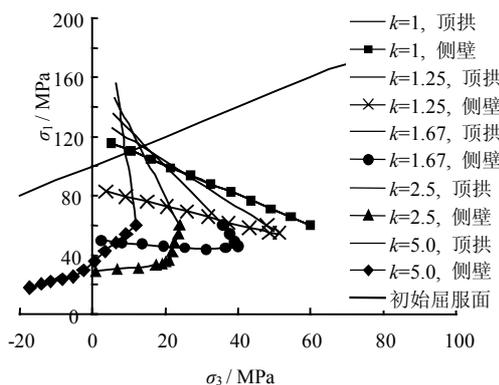


图 3 不同侧压系数下隧洞拱顶和侧壁单元的应力路径

Fig.3 Stress route of the element on the tunnel vault and side under the different side-pressure coefficients

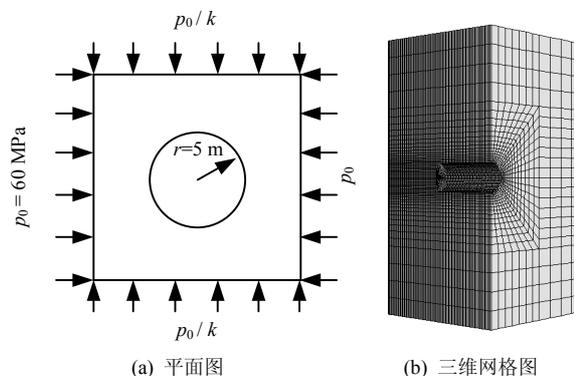


图 4 隧洞断面图、三维计算网格及计算边界条件

Fig.4 Profile, tridimensional mesh and boundary condition

表 1 力学参数<sup>[10]</sup>

Table 1 Mechanical parameters<sup>[10]</sup>

弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\nu$	初始凝聚力 $c^i / \text{MPa}$	初始内摩擦角 $\phi^i / (^\circ)$
60	0.2	50	0

若按图 2 所示的开挖过程(不计支护)进行模拟, 所得各侧压系数下洞顶及洞壁单元的应力路径如图 5 所示。由图 5 可见, 应力释放法和三维开挖模拟分别得到的隧洞拱顶和侧壁单元的应力路径大体趋势相同, 但中间变化过程有一定的差异。

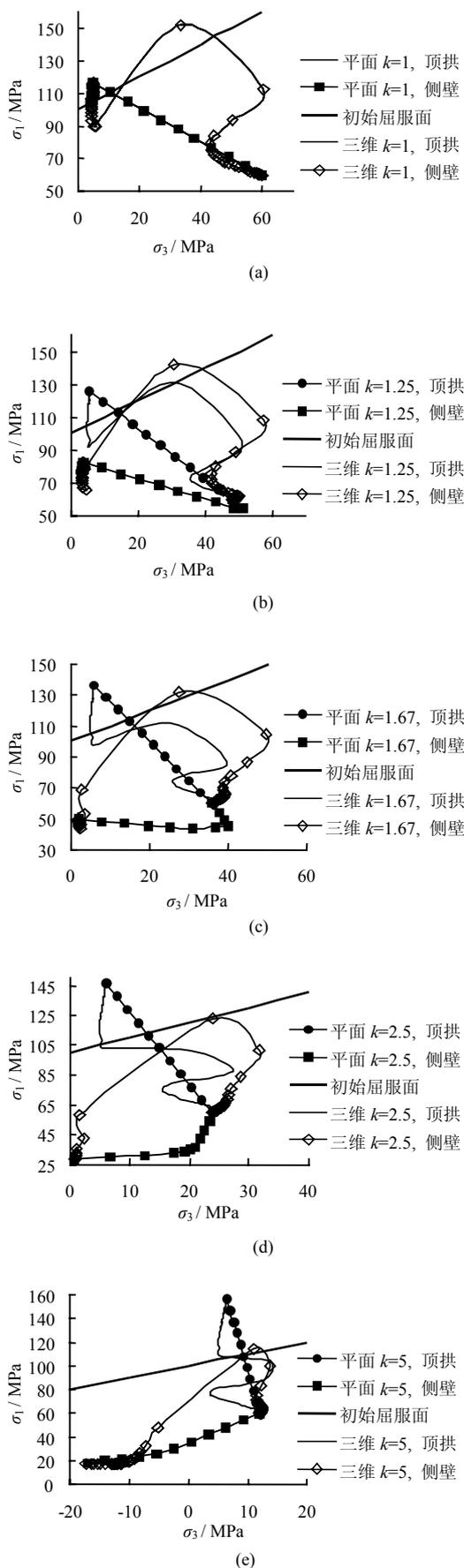


图5 不同侧压系数下隧洞拱顶和侧壁单元的应力路径  
Fig.5 Stress route of the element on the tunnel vault and side under the different side-pressure coefficients

隧洞未开挖至监测断面时，拱顶和侧壁的单元应力近似沿与应力释放法相近的路径变化，但随着掌子面的接近，监测断面后的开挖体对监测断面的约束或支撑作用增强，从而导致此处围岩内的应力集中，主应力增大，但当掌子面过后，约束作用迅速减弱，应力快速释放，故此时应力路径发生了很大弯转，并迅速接近于与应力释放法相同的终点。

由于两种方法中，围岩经历的应力路径存在差异，故其到达初始屈服线时对应的应力状态也不同，又进一步带来屈服后应力路径的差异。

应力释放法弹塑性计算所得隧洞拱顶和侧壁单元的应力路径与真三维计算所得结果如图 6 所示。计算中采用能够反映脆性岩体破坏特征的 CWFS (cohesion weakening and friction softening) 模型<sup>[10]</sup>来描述材料的力学行为，力学参数见表 1 和表 2<sup>[10]</sup>。

表 2 力学参数  
Table 2 Mechanical parameters

残余凝聚力 $c^r$ / MPa	残余凝聚力极 限塑性剪应变 $\bar{\gamma}_c^p$ / %	残余内摩擦角 $\phi^r$ / (°)	残余摩擦角极 限塑性剪应变 $\bar{\gamma}_\phi^p$ / %
15.0	0.161	48.0	0.447

在平面应力释放的过程中(图 6)，随着地层压力的减小，洞壁岩体的  $\sigma_3$  不断减小， $\sigma_1$  不断升高， $(\sigma_1 - \sigma_3)$  持续增大，当应力释放到一定程度后，拱顶围岩发生屈服， $\sigma_1$  迅速减小，虽然  $\sigma_3$  仍在减小，但  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  已明显减小。在真三维开挖过程的模拟中，掌子面开挖到监测断面附近时各主应力均有显著增大，较高的围压保证了岩体未发生屈服。掌子面过后， $\sigma_3$  减小， $\sigma_1$  增大，应力路径发生弯转，主应力差的增大最终导致了监测断面围岩的屈服。随着掌子面的远离，空间效应逐渐消失，洞壁围岩的  $\sigma_3$  迅速减小， $\sigma_1$  减小后又增大，由于屈服后围岩承载能力的限制，故增大幅度不大，可见考虑塑性变形特征后，真三维模拟所得应力路径比平面应力释放法复杂了很多。

上述弹性及弹塑性分析结果都表明，开挖过程的真三维模拟与平面应力释放法模拟所得应力路径有所不同，故以平面应力释放法来模拟开挖过程中的空间效应问题只能认为是一种近似分析方法，仍不能完全代替真三维分析。

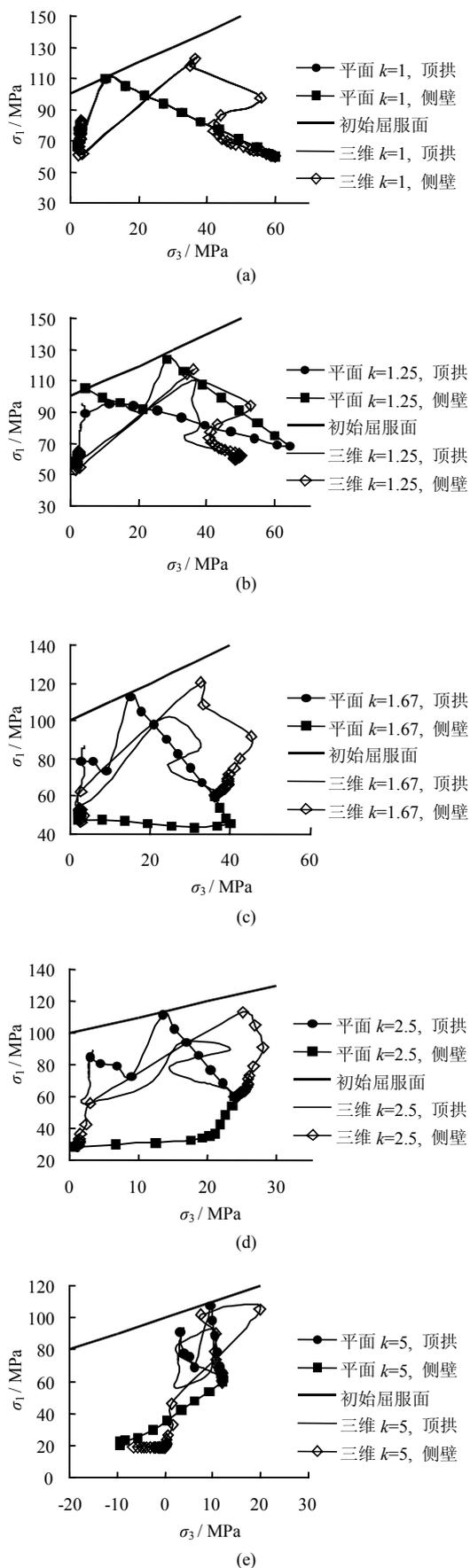


图6 不同侧压系数下隧洞拱顶和侧壁的弹塑性应力路径  
 Fig.6 Elasto-plastic stress route of the element on the tunnel vault and side under the different side-pressure coefficients

### 4 不同方法所得最终结果的比较

在不同的应力路径下，同一单元经历的变形破坏过程不同，即使最终控制达到相同的应力状态，但其最终的变形、损伤状态却不同，故在地下工程开挖中常常通过设计开挖方案来达到控制围岩稳定与调整变形的目的。

对于线弹性材料，不受应力路径的影响，所以无论何种应力路径，最终的状态将完全相同；对于地下工程来讲，即无论采取何种开挖方案，采取平面应力释放法，或是真三维模拟，所得最终结果都是相同的，见图 5；但对于弹塑性材料，其非线性性质决定了其应力路径的依赖性，因此在平面应力释放法和真三维模拟中，应力路径的不同将可能导致不同的计算结果，以下仍以以上节所给算例的计算结果加以说明。图 6 给出了上述两种方法分别模拟得出的同一单元的应力状态，显见最终应力状态的差异。表 3 分别给出了不同侧压系数时，各种方法所得同一单元的应力状态及等效塑性剪应变、同一节点的位移及塑性区深度（以径向单元数量计）的计算结果，表中相对差是以真三维开挖模拟所得结果为基准计算所得。表 3 比较结果表明，平面应力释放法计算的最终结果与真三维开挖模拟比较，存在一定误差，其与瞬间开挖计算所得结果接近，这印证了工程中非线性材料的变形力学性质对应力路径的依赖性。但从图 7 所示的相对差随侧压系数的变化规律来看，随着侧压系数的增大，相对差基本呈不断减小的趋势，当侧压系数达到一定值后（此算例为 1.67），相对差的变化曲线明显减缓，并渐趋平稳，且误差在 10% 左右，以上是侧压系数大于 1（即水平应力大于垂直应力）时的分析结果。对于圆形隧洞问题，侧压系数大于或小于 1，无非是边界条件旋转一个直角的问题，故可知，当侧压系数小于 1，即垂直应力大于水平应力时，随着侧压系数的减小，相对差的变化曲线也会明显减缓（根据此算例可知为 0.6），这说明在一定的误差要求范围内，一定侧压系数下可以以应力释放法计算的结果来近似真三维开挖模拟所得结果，而不考虑应力路径的影响。

### 5 应力释放法在隧洞工程中的应用

收敛约束法是隧洞的变形特性与支护控制中最重要的方法之一。在 20 世纪 30 年代就已经出现了，60~70 年代得到了较大的发展与应用，并得

表 3 不同侧压系数计算结果的比较

Table 3 Comparison of the results with the confining pressure coefficient

侧压系数	位置	比较对象	平面应力释放法		真三维模拟	瞬间开挖	
			计算值	相对差/%		计算值	相对差/%
k=1.0	拱顶	$\sigma_1$ / MPa	66.2	-19.9	82.6	66.4	-19.6
		$\sigma_2$ / MPa	49.4	23.5	40.0	47.6	19.0
		$\sigma_3$ / MPa	2.2	-31.3	3.2	2.3	-28.1
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	3.69	-26.5	5.02	3.66	-27.1
		位移/mm	21.3	20.3	17.7	21.1	19.2
	塑性区/个数	3		2	3		
	侧壁	$\sigma_1$ / MPa	66.2	-19.9	82.6	66.4	-19.6
		$\sigma_2$ / MPa	49.4	23.5	40.0	47.6	19.0
		$\sigma_3$ / MPa	2.2	-31.3	3.2	2.3	-28.1
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	3.69	-26.5	5.02	3.66	-27.1
位移/m		21.3	20.3	17.7	21.1	19.2	
塑性区/个数	3		2	3			
k=1.67	拱顶	$\sigma_1$ / MPa	78.7	-9.3	86.8	80.4	-7.4
		$\sigma_2$ / MPa	45.1	3.2	43.7	44.9	2.7
		$\sigma_3$ / MPa	2.6	-21.2	3.3	2.4	-27.3
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	4.30	-4.9	4.52	4.44	-1.8
		位移/mm	16.5	1.2	16.3	17.3	6.1
	塑性区/个数	4		4	4		
	侧壁	$\sigma_1$ / MPa	47.9	-8.4	52.3	48.1	-8.0
		$\sigma_2$ / MPa	38.8	2.9	37.7	38.9	3.2
		$\sigma_3$ / MPa	2.1	-12.5	2.4	2.2	-8.3
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	0.0	-100.0	0.72	0.0	-100.0
位移/m		17.0	-1.7	17.3	16.7	-3.5	
塑性区/个数	1		1	1			
k=5.0	拱顶	$\sigma_1$ / MPa	90.8	-3.2	93.8	93.7	-0.1
		$\sigma_2$ / MPa	40.4	-14.8	47.4	41.0	-13.5
		$\sigma_3$ / MPa	3.1	-18.4	3.8	3.1	-18.4
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	4.72	0.9	4.68	4.82	3.0
		位移/mm	11.6	7.4	10.8	11.7	8.3
	塑性区/个数	4		4	4		
	侧壁	$\sigma_1$ / MPa	19.6	3.7	18.9	19.6	3.7
		$\sigma_2$ / MPa	-0.6	500.0	-0.1	-0.6	500.0
		$\sigma_3$ / MPa	-9.4	42.4	-6.6	-9.6	45.5
		等效塑性剪应变/ $10^{-3}$	0.0	-100.0	0.38	0.0	-100.0
位移/m		20.0	-1.0	20.2	20.2	0.0	
塑性区/个数	2		2	2			

以不断完善。目前，收敛约束法包括反映隧洞开挖与支护过程中隧洞变形特性与支护响应的 3 类曲线，即 LDP(longitudinal deformation profile), GRC (ground reaction curve)和 SCC(support characteristic curve)<sup>[9]</sup>。对于简单的问题，可由解析方法得到 GRC

的解析曲线，但多数的复杂情况下，只能靠数值方法，即应力释放法得到该曲线，而 LDP 则一般只能通过真三维开挖过程模拟得到。图 8 中，本文算例给出了 LDP 和 GRC 曲线。由 LDP 曲线可见，掌子面前方，洞顶收敛位移缓慢增加，掌子面后方，洞顶收敛位移则急剧增加，并在大约 1 倍洞径后趋于平缓。由 GRC 曲线可见，在应力释放至 90 %之前，围岩处于弹性状态，故 GRC 为直线；当应力释放超过 90 %之后，拱顶围岩发生了屈服，故 GRC 在此时（点 F）变成曲线，位移急剧增加，这表明支护应该在应力释放超过 90 %之后施加，以减小支护承受的地层压力，但又不可太晚，以免围岩松动塌落，具体的控制方法可参考文献[11]。从图 8 中 LDP 与 GRC 的对应关系来看，通过这一方法可评估距掌子面一定距离处洞壁位移的收敛情况、应力释放程度及所需的支护力，借此来控制围岩变形和支护压力。

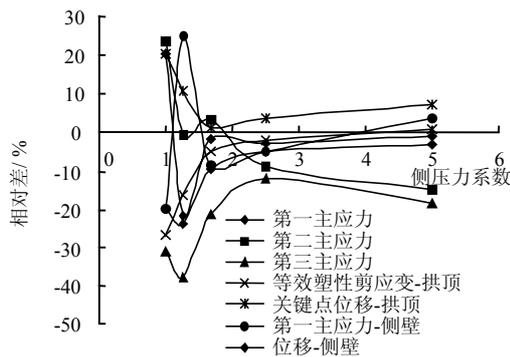


图 7 两种方法所得结果的相对差随侧压系数的变化  
Fig.7 Change of the relative difference between the results from the two method with the confining pressure coefficients

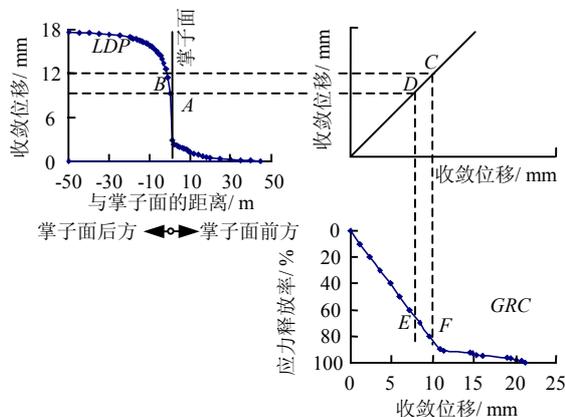


图 8 通过数值计算结果示意的收敛约束法的原理图<sup>[9]</sup>  
Fig.8 Principle sketch map of the convergence-confinement method based on the above data<sup>[9]</sup>

## 6 结 论

综上所述可得到以下几点结论:

(1) 在快速拉格朗日方法中, 通过控制节点不平衡力可以很容易地实现应力释放法的操作。

(2) 应力释放法可定性描述掌子面后方空间效应消失过程中围岩内的应力释放机制, 但此方法中围岩所经历的应力路径与实际三维的情况有差异, 这说明应力释放法尚不能准确地模拟三维的空间效应问题, 但在一定精度要求和计算条件下, 可以采用此方法来近似分析三维空间效应问题。

(3) 不同侧压系数下, 无论是应力释放法, 还是真三维模拟中围岩所经历的应力路径均随侧压系数变化, 围岩内不同部位所经历的应力路径也大相径庭, 故可认为侧压系数对应力路径存在重要的影响。

(4) 鉴于地质材料固有的非线性特性, 应力路径的差异必然导致其变形力学行为的差别, 故在隧洞工程中, 应力释放法计算所得结果与真三维模拟所得结果存在差异。对于硬脆性岩体中的圆形隧洞问题, 当侧压系数从 1.0 开始增大或减小时, 这种近似误差将不断减小, 并最终趋于平缓, 说明在一定的侧压系数下, 并满足一定精度要求时可采用应力释放法的计算结果近似真三维的情况, 否则, 则需要进行真三维模拟, 所以可以说应力释放法仍是一种近似方法。对于不同的工程实际情况应进行相应的误差分析, 并考虑计算工作量的可行性来进一步决定采用何种分析方法。

(5) 应力释放法可通过数值计算很方便地得到收敛约束法中的 GRC 曲线, 且在通过收敛约束法控制围岩变形和支护压力的问题中发挥重要的作用。

### 参 考 文 献

- [1] 段文峰, 王蕾笑, 廖雄华. 岩土工程施工力学问题数值模拟方法探讨[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, 20(2): 16—22.  
DUAN Wen-feng, WANG Lei-xiao, LIAO Xiong-hua. Discussions about problems of construction mechanics in geotechnical engineering and its numerical simulation approaches[J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 2003, 20(2): 16—22.
- [2] 孙钧, 王炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [3] 赵德安, 蔡小林, 陈志敏, 等. 侧压力系数对隧道衬砌

力学行为的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 22(增2): 2 857—2 860.

ZHAO De-an, CAI Xiao-lin, CHEN Zhi-min, et al. Influence of side-pressure coefficient on mechanical behavior of tunnel lining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(Supp.2): 2 857—2 860.

- [4] 郝哲, 李伟, 刘斌. 韩家岭大跨度隧道开挖过程数值模拟研究[J]. 西部探矿工程, 2005, (2): 96—99.

HAO Zhe, LI Wei, LIU Bin. Study on numerical simulation of excavation process in Hanjialing large span tunnel[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2005, (2): 96—99.

- [5] 胡庆安, 崔刚, 蒋丽君. 空间反向荷载法模拟隧道开挖[J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 3—5.

HU Qing-an, CUI Gang, JIANG Li-jun. Simulating of tunnel excavation by means of spatial opposite loading method[J]. *Tunnel Construction*, 2006, 26(4): 3—5.

- [6] 徐林生, 孙钧, 蒋树屏. 洋碰隧道 CRD 工法施工过程的动态仿真数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(1): 58—67.

XU Lin-sheng, SUN Jun, JIANG Shu-ping. Numerical simulation of dynamic CRD construction process in Yangpeng tunnel[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2001, 12(1): 58—67.

- [7] 苏国韶. 高地应力下大型地下洞室群稳定性分析与智能优化研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.

- [8] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> User Manual (Version 2.1)[M]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2003.

- [9] CARRANZA-TORRES C, FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(2): 187—213.

- [10] 张传庆. 基于破坏接近度的岩石工程安全性评价方法的研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.

- [11] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16: 99—105.