

公路隧道中系统锚杆的功效研究

陈力华^{1,2}, 林 志², 李星平²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘 要: 系统锚杆是锚喷支护的重要组成部分, 目前广泛应用到公路隧道的初期支护中。然而, 系统锚杆到底对隧道结构的稳定起到多少作用一直没有有效的定量计算方法。以某高速公路隧道为例, 用有限元强度折减法计算了不同地质条件下锚杆对隧道安全系数大小的影响。结合有限元数值模拟, 通过对锚杆各种效应的分析后得到如下结论: 在很多地质条件下锚杆对公路隧道稳定性影响不大, 建议在有条件的情况下可以逐步开展取消系统锚杆的工程试验验证, 为公路隧道不设置系统锚杆提供更多的工程依据。

关 键 词: 隧道; 有限元强度折减法; 安全系数; 系统锚杆

中图分类号: U451

文献标识码: A

Study of efficacy of systematic anchor bolts in highway tunnels

CHEN Li-hua^{1,2}, LIN Zhi², LI Xing-ping²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: A support structure of systematic anchor bolts is a key part in the system of shotcrete-bolt supports, and it is widely used in preliminary bracing of highway tunnel at present. However, there is no effective quantitative way to calculate the role of the systematic anchor bolts for the stability of tunnel structure. Taking a certain expressway tunnel for example, the influence of anchor bolts on safety factors of tunnels under different geological conditions is calculated with FEM strength reduction method. Together with FEM numerical simulating and analysis to various kinds of effects from anchor bolts, conclusions can be drawn as follows. The anchor bolts have little influence on stability of expressway tunnel under much more geological conditions; therefore, it is suggested that experimental verification of canceling the systematic anchor bolts should be carried out gradually if possible, so as to provide more engineering basis for canceling anchor bolts in highway tunnels.

Key words: tunnel; finite element strength reduction; safety factor; systematic anchor bolts

1 前 言

锚杆已经广泛应用到隧道工程中, 锚杆成为锚喷支护的重要组成部分。目前主流的学术观点认为, 锚入岩体内部的钢筋与围岩融为一体, 能达到提高围岩的力学性能, 改善围岩的受力状态, 实现加固围岩、维护围岩稳定的目的^[1]。通常锚杆的加固效应有以下 4 种: ①增强效应; ②成拱效应; ③悬吊效应; ④内压效应^[2]。

然而, 目前对锚杆的联接及作用机制还不很清楚, 锚杆的设计仍是经验性的, 锚杆究竟对保持隧道结构的稳定性起到了多少作用目前还没有明确

的答案, 学术界对于隧道系统锚杆功效的认识也不统一。

谭忠盛、喻渝、王明年等^[3-4]采用实际观测的方法对深埋、浅埋黄土隧道系统锚杆的作用效果进行了对比研究, 得到了拱部系统锚杆作用效果不明显这一重要结论, 并应用于工程实际, 取得了良好的经济效益。厦门东通道海底隧道为我国第一座海底隧道, 实际施工过程中取消了密集的系统锚杆, 而仅仅在工字钢连接点附近设置 1~2 根长 4 m 的锁脚钢花管, 施工实践表明效果很好^[5]。陈建勋等^[6]以哈尔滨绕城高速公路天恒山隧道为依托工程, 通过监控量测的手段研究了高含水率土质隧道中取消

系统锚杆的支护效果, 研究结果表明取消系统锚杆, 仅采用锁脚锚杆的情况下隧道初期支护的结构变形和受力均在允许范围之内, 初期支护工作状态良好。郑颖人等^[7-10]通过有限元强度折减法计算得到了一些隧道结构的安全系数, 对隧道结构的安全性做了开创性的研究。通过强度折减法计算得到的安全系数是对隧道结构安全储备、稳定程度的定量描述。

笔者采用有限元强度折减法, 计算了 3 种围岩条件下无锚杆的隧道和有锚杆的隧道安全系数的大小, 对锚杆在隧道工程中为维护隧道稳定所起到的作用做出科学、定量的说明。

2 隧道安全系数的计算

2.1 有限元强度折减法

有限元强度折减法是有限元极限分析法的一种, 在边坡稳定性分析中早已得到了广泛应用, 被多次证明是能正确计算边坡安全系数及自动搜索滑动面的正确的方法^[11-15]。

结构的失稳往往表现为材料的破坏。采用有限元强度折减法计算安全系数时, 将岩(土)材料的强度参数降低, 直到整个结构体系达到濒临破坏的状态为止^[16], 即

$$c' = c/F; \quad \tan \varphi' = \tan \varphi / F \quad (1)$$

式中: c 、 φ 分别为土的黏聚力与摩擦角; F 为折减系数, 濒临破坏时的折减系数即为结构的安全系数。锚喷衬砌的隧道设置系统锚杆及钢拱架和锚杆及钢拱架均为钢材, 可看作是符合 Von Mises 屈服准则的理想弹塑性材料。按照“强度折减”的思想, 为使在强度折减过程中锚杆及钢拱架发挥的作用也应得到同等地减小, 须满足:

$$f'_y = f_y / F \quad (2)$$

式中: f_y 、 f'_y 分别为锚杆折减前后的屈服强度。

需要强调的是, 强度折减这一过程并非围岩及衬砌材料强度真正发生了变化, 而是为了寻找整个体系的极限状态(濒临破坏的状态)将各种材料为体系稳定发挥的作用同步消减的假想的过程。

2.2 隧道失稳在有限元计算中的表现

材料强度参数降低必然导致应力重新分布。岩(土)体内应力调节, 充分发挥围岩成洞自稳的能力, 计算中能找到既满足静力平衡, 又满足应力-应变关系和强度准则的解, 表现为位移未发生突变。计算隧道模型中的材料均为理想的弹塑性材料, 当材料临近屈服状态时, 微小的应力增量都会导致无限的应变。在有限元计算中临界屈服表现为某些部位的位移突然发生较大的变化, 虽然网格精度、收敛准则的选取等因素对计算的位移大小有一定的影响, 但这些因素不能改变濒临破坏时整个结构位移突变的总体趋势。本文选取某几个特征点位移与折减系数的关系曲线, 通过曲线的突变确定隧道的安全系数。

隧道结构的失稳形式主要为拱顶悬垂与塌落失稳、侧壁突出与滑移失稳, 因此可以将拱顶沉降值、周边收敛值作为特征点的位移。

3 计算及分析

不同级别围岩的衬砌断面如图 1 所示, 衬砌支护参数满足《公路隧道设计规范》^[1]的建议值。V 级围岩组合式锚杆环向间距为 1.0 m, 纵向间距为 0.8 m, 长 3.5 m, 24 cm 厚 C20 喷射混凝土, 内设 18 工字钢, 间距为 0.8 m; IV 级围岩砂浆锚杆环向间距为 1.2 m, 纵向间距为 1.0 m, 长 3.0 m, 15 cm 厚 C20 喷射混凝土, 内设钢格栅, 间距为 1.0 m; III 级围岩砂浆锚杆环向间距为 1.2 m, 纵向间距为 1.2 m, 长 2.5 m, 8 cm 厚 C20 素喷射混凝土。

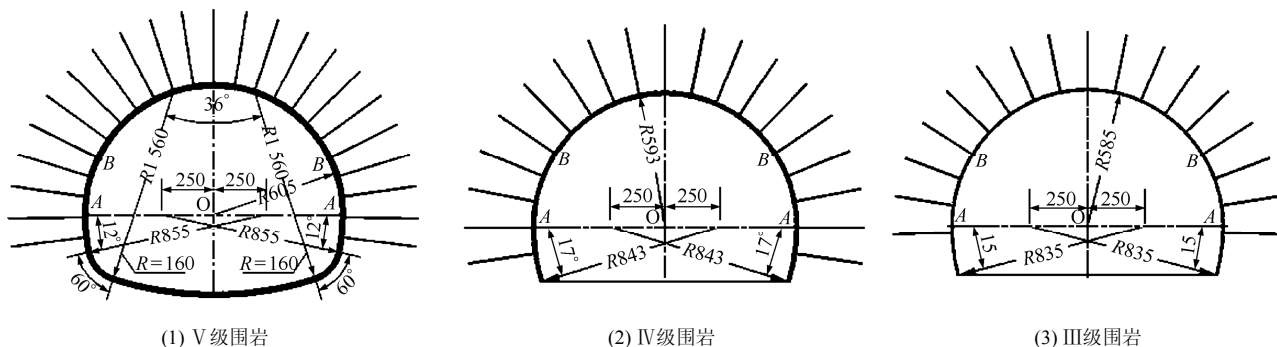


图 1 衬砌断面(单位: cm)

Fig.1 Lining cross-sections (unit: cm)

模型中心点 O 距离地表均 50 m, 距离模型下边界均 50 m, 距离左右边界均 45.93 m。

本次计算采用 Midas/GTS 软件, 采用能量收敛标准, 分 15 步加载, 每步迭代 20 次。

有限元计算中围岩和支护结构的物理力学参数见表 1, 围岩的力学参数取《公路隧道设计规范》^[1]表 A.0.4-1 中靠中间的值。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

材料	γ /(kN/m ³)	c /kPa	ϕ /(°)	E /GPa	ν	f_y /MPa
V 级围岩	18.0	120	24	1.5	0.40	
IV 级围岩	22.0	400	32	3.6	0.33	
III 级围岩	24.0	1 100	44	13.0	0.27	
锚杆	78.5			200.0	0.26	400
18 工字钢	78.5			200.0	0.26	400
钢格栅	78.5			200.0	0.26	400
喷砼	24.0	1 950	53	25.0	0.167	

注: 钢材均为满足 Von Mises 屈服准则的材料; 围岩及喷砼满足 Mohr-Coulomb 屈服准则。

笔者直接计算初支完成时隧道的安全系数, 没有考虑施工过程的影响, 是由于①隧道在开挖了还未支护时更易坍塌、安全储备更小。若分施工步逐步计算隧道安全系数, 在中间施工步有限元计算就不收敛, 不能得到初期支护完成时隧道的安全系数。②采用不同的开挖方法、不同的支护时机都会对成型隧道围岩和衬砌结构的的应力状态产生不同的影响。越早衬砌, 衬砌结构受力越大, 围岩自稳能力不能充分发挥; 越晚衬砌, 围岩受力越大, 衬砌结构的强度不能充分发挥。但是, 无论怎样衬砌, 达到整个结构濒临破坏时围岩和衬砌都应充分发挥自身强度, 极限状态时衬砌和围岩都处于濒临破坏状态, 因此极限状态与开挖支护时机无关。

为对比分析, 分别计算了不同级别的围岩在隧道无任何支护、只有系统锚杆支护、只有喷砼支护和锚喷支护 4 种情况时的安全系数, 并作出折减系数与特征点位移的曲线关系, 如图 2 所示。将计算结果进行统计, 得到不同工况时隧道的安全系数见表 2。

表 2 不同工况时隧道的安全系数

Table 2 The safety factors of the tunnel in different work conditions

衬砌方式	不同围岩级别的安全系数		
	V 级	IV 级	III 级
裸洞	1.4	2.9	6.4
系统锚杆	1.6	3.0	6.4
喷砼	2.5	3.3	6.5
系统锚杆+喷砼	2.6	3.3	6.5

3.4 衬砌中系统锚杆的效用分析

从表 2 中可以看出, 各种地质情况下设置系统锚杆并不能有效提高整个隧道结构的安全储备, 系统锚杆对安全系数的影响不大。IV 级、V 级围岩中设置喷射混凝土及拱架能较大地增加隧道的安全储备, 为隧道的稳定发挥较大的作用, III 级围岩隧道自稳能力很强, 喷射混凝土对隧道整体安全系数影响不大, 实际工程中喷混凝土能有效防止掉块。

数值模拟中岩体、锚杆力学模型的建立基于大量的假设, 与实际情况存在一定的偏差, 但有限元的计算结果仍具有规律性的指导意义。尽管有限元强度折减法计算隧道安全系数还存在一些问题, 但在同等条件下安全系数的相对的数值大小仍能表征相对的安全程度, 即安全系数高的隧道比安全系数低的隧道更安全。计算过程中认为锚杆为桁架单元, 并与岩土体之间节点没有相对的位移, 而实际工程中砂浆不饱满可能导致锚杆和周围的岩(土)体有相对位移, 所以模型夸大了锚杆的功效, 即使如此, 隧道的安全系数也没有明显提高, 所以锚杆不能有效地提高隧道结构的强度储备, 在隧道中起的作用甚小。下面将分析锚杆的各种效应的作用机制, 对这些效应到底能不能对隧道的安全发挥作用做出合理解释。

(1) 系统锚杆的增强效应不明显

通常理论认为系统锚杆发挥承载能力的作用原理及计算过程为^[5]: 由于锚杆、喷射混凝土与围岩的共同作用, 在锚杆作用范围之内形成一个加固后的承载拱, 该承载拱的厚度与锚杆的长度、间距及围岩的力学性质等因素有关, 承载拱的强度校核按砌体理论验算:

$$\left. \begin{aligned} &\text{抗压强度} \\ &K_a N \leq abhR'_b \\ &\text{抗剪强度} \\ &K_Q Q \leq N \tan \phi + bhc \\ &\text{偏心距控制} \\ &M / N \leq 0.3h \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: K_a 、 K_Q 分别为承载拱抗压及抗剪安全系数; a 、 ϕ 分别为承载拱轴向力偏心影响系数及岩体内摩擦角; b 、 h 分别为承载拱纵向计算宽度及厚度; c 、 R' 分别为岩体黏聚力和修正单轴抗压强度; M 、 N 、 Q 为验算截面所受弯矩、轴向力及剪力。

一般地钢筋混凝土结构中如果梁的配筋率低于 0.3%, 即使在布筋非常有利的情況下构件性质与素混凝土构件无异, 仍会发生脆性破坏。隧道中, 若 $\phi 22$ mm 系统锚杆环向及纵向均按照 1 m 的间距布

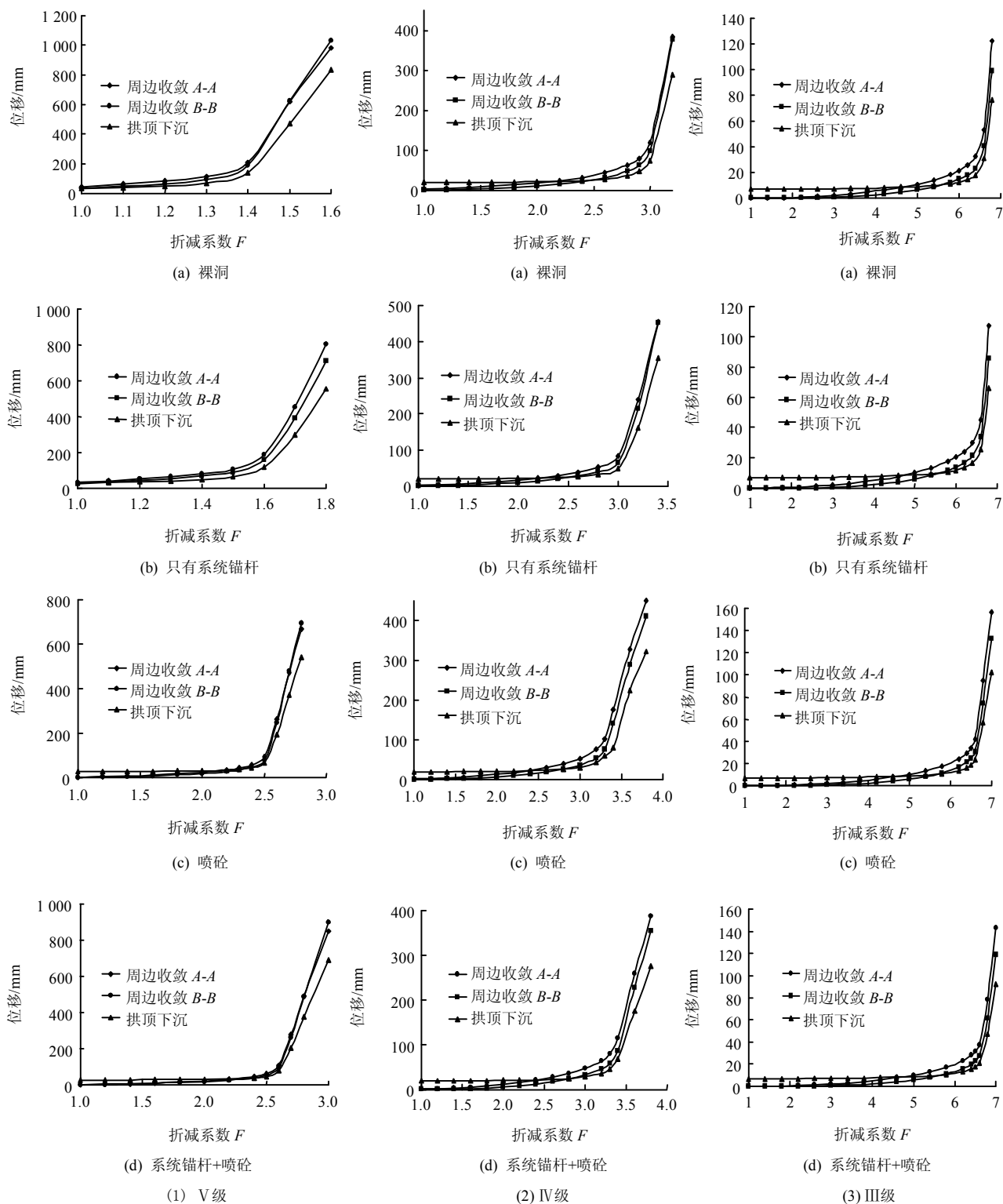


图 2 不同工况的折减系数-位移曲线

Fig.2 The curves of reduction factors and displacements under different work conditions

置, 计算得到“承载拱”中的配筋率仅有接近 0.038%, 显然这样低的配筋率对围岩的力学性质不会有明显的改善, 可认为系统锚杆增强效应不明显。

虽然岩土结构不同于混凝土结构, 但一种强度较高的材料植入另一种强度较低的材料中期望达到

改善强度较低材料力学性能的原理是一致的, 即对于混凝土材料和岩(土)材料这种增强效应的原理是一致的, 显然需要保证强度较高材料有足够的数量才能明显的对强度较低材料的力学性能有所改善。笔者通过有限元强度折减法计算得到 V 级围岩只有锚杆支护且锚杆间距为 30 cm×30 cm 时隧道的

安全系数能达到 2.6, 此时配筋率为 0.42%。可见植入足够数量的锚杆, 配筋比率达到一定数量时, 还是能对岩(土)材料的性能有所加强, 对安全性产生较大的作用, 但实际工程中不可能如此密集的设置锚杆。

(2) 成拱效应不能发挥

假定系统锚杆施做完成后形成了承载拱, 这个拱承受外围的荷载, 拱截面主要受到弯矩、轴力、剪力的作用, 受力分析如图 3 所示。取出 A-A 断面, 对这个断面进行受力分析。从图中可以看出, 锚杆的方向垂直于轴力的方向, 显然这样的布筋方向对抗弯、抗压和抗剪作用甚小。

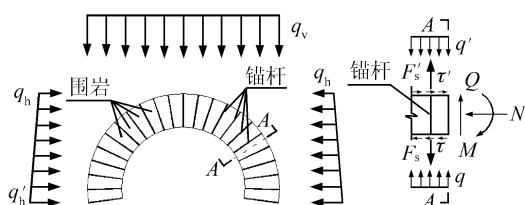


图3 “承载拱”受力示意图

Fig.3 Sketch of mechanical analysis for “load-bearing arch”

(3) 内压效应难以实现且难以维持

通过内压效应使围岩达到三轴受压的状态来改善围岩的受力性能, 但实际工程中内压效应是难以实现的。隧道的开挖后支护顺序: 喷射 4~6 cm 的混凝土—挂钢筋网—打锚杆—立拱架—继续分层喷射混凝土。当立完拱架继续喷射混凝土时, 锚杆端部就被喷射混凝土包裹, 不能再施加预压力, 即使端部保护的很好能施做螺栓。锚杆施工完成后, 砂浆并没有形成强度, 不能施加内压力。《公路隧道施工技术规范》^[17]规定, 锚杆安设后不得随意敲击, 其端部 3 d 内不得悬挂重物, 实际工程中不可能等 3 d 再去拧紧螺栓, 很多时候并没有拧紧螺栓就进行下一步工序。即使施加了内压力, 这种内压效应也难以维持, 植入岩(土)内的钢筋的预应力会松弛, 达不到预先的效果, 而且钢筋容易锈蚀, 一方面因为地下环境本身对钢筋的耐久性不利。另外, 钢筋在高应力状态下也较普通情况下更易锈蚀, 即使施加的内压, 也不能持续有效地充分发挥作用。相比内压效应所能发挥的效果和施工锚杆所耗费的成本, 锚杆是一种性价比极低的支护手段。

(4) 锚杆的悬吊作用难以实现且不必发挥

隧道中发生坍塌的位置往往由不稳定的楔形岩块造成。通常认为隧道内局部不稳定的块体可以利用锚杆的“悬吊作用”进行加固, 即一个不稳定

的岩块被系统锚杆“悬吊”后能稳定, 但是, 施工过程中工人须站在危石下作业, 用风枪打眼时, 风枪的振动可能成为不稳定岩块发生坍塌的诱因, 显然施工过程是相当危险的。

事实上, 超前支护措施已经能对不稳定的楔形岩块“悬吊”, 超前支护发挥“悬吊作用”如图 4 所示。

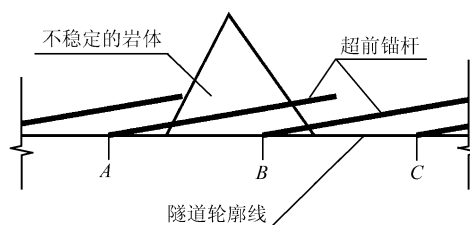


图4 超前支护的“悬吊作用”

Fig.4 Suspension function of the advanced support

由于超前锚杆一端固定在已经完成初期支护的拱架上, 另一端深入掌子面前方未开挖的岩体中, 这样超前锚杆形成了一简支梁, 对节理面倾角较小岩层也能有效的支挡, 能在很大程度上阻止局部坍塌发生。

《公路隧道施工技术规范》对拱架提出的如下要求: 钢架支撑必须具有必要的强度和刚度, 钢架的设计强度, 应保证能单独承受 2~4 m 高的松动岩柱重量^[17]。锚杆的长度一般为 2~4 m, 如果松动岩柱高 2~4 m, 不设置锚杆, 隧道仅依靠拱架也能稳定; 如果松动岩柱高度大于 2~4 m, 即使设置了锚杆, 锚杆也在塌落区之内, 也不能发挥功效。通过普氏理论计算的塌落拱高度一般大于锚杆的长度, 锚杆是处于塌落区之内的, 因此隧道设计、施工中应优先选择拱架衬砌。

(5) 系统锚杆的施工会贻误衬砌时机

隧道被开挖还未支护的一段时间内围岩会产生较大的变形, 应力急剧释放; 若及时支护可能隧道不会坍塌, 若支护不够及时, 应力释放到一定程度时围岩自身所提供自稳能力不足以保证隧道的稳定性时就会坍塌。锚杆的施工费工、费时, 可能会因为锚杆的施做贻误最佳的支护的时机, 导致隧道坍塌。有监控量测数据表明, 在浅埋黄土隧道中有系统锚杆的段落比无系统锚杆的段落拱顶沉降大 40%左右、水平收敛大 25%左右^[4]。

(6) 锚杆施工、检测难度大

按照目前的施工方法, 锚杆在施工上也存在一定难度, 锚杆的长度及角度都难以得到保证; 砂浆不饱满, 导致围岩与锚杆的黏结作用差和导致理论

上的悬吊作用不能发挥。锚杆属于隐蔽工程,一旦施工完成检测难度大。

4 结 论

(1) 本文有限元计算中围岩为均质材料,实际工程中破碎~极破碎的各类岩体、各类土体、黄土、完整性好的岩体可以近似地看作均质材料。有限元计算至少可以说明在这些地质情况下系统锚杆不能有效地提高隧道结构的安全储备,对隧道的安全系数影响不大。建议在这些情况下逐步开展取消锚杆的工程试验验证,为公路隧道中不设置系统锚杆提供更多可类比的工程依据。

(2) 对于岩质隧道可以酌情减少锚杆用量,不必采用系统锚杆的形式,锚杆的方向应尽量垂直于节理面。在隧道设计中应优先选择拱架衬砌,锚杆应在喷射混凝土(拱架)完成后再施做。

(3) 锁脚锚杆对固定拱架、防止拱架失稳有一定的作用,可以少量设置。

参 考 文 献

- [1] 重庆交通科研设计院等. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 重庆建筑工程学院, 同济大学. 岩石地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [3] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面深埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1618—1625.
TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Experimental research on bolt anchorage effect on large-section deep-buried tunnel in loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1618—1625.
- [4] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面浅埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 491—495.
TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Experimental study on bolt effect on large section shallow depth loess tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 491—495.
- [5] 郭小红, 王梦恕. 隧道支护结构中锚杆的功效分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2234—2239.
GUO Xiao-hong, WANG Meng-shu. Analysis of efficacy of rock bolt for tunnel support structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2234—2239.
- [6] 陈建勋, 王超, 罗彦斌, 等. 高含水率土质隧道不设置系统锚杆的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 815—820.
CHEN Jian-xun, WANG Chao, LUO Yan-bin, et al. Experimental research on high-water-content soil tunnel without systematic bolts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(5): 815—820.
- [7] 郑颖人, 胡文清, 王敬林. 强度折减有限元法及其在隧道与地下洞室工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, 40(增刊): 239—243.
- [8] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91—104.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(1): 91—104.
- [9] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚健, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39—61.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Chu-jian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. **Engineering Science**, 2006, 8(12): 39—61.
- [10] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97—101.
ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 97—101.
- [11] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [12] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(6): 835—840.
- [13] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254—260.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 254—260.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 381—388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 381—388.
- [16] UGAI K. A method of calculation of total safety factor of slopes by elastoplastic FEM[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(2): 190—195.
- [17] 交通部重庆公路科学研究所. JTJ042—94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.