

铁路标准断面隧道节理倾角效应研究

李老三

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要:以郑万铁路黄家沟隧道标准断面为研究对象,对不同产状岩质隧道进行稳定性分析,研究围岩力学响应、变形特性以及锚杆力学特征,阐明不同于传统松散介质的层状岩质隧道失稳模式及锚杆支护要点。结果表明:节理面极大削弱了岩体稳定性,开挖会引起沿层理面滑动,导致明显地质偏压。隧道开挖使得层间节理首先被破坏,节理离层区不是发生在最大主应力方向上,而是发生在节理垂直方向。水平层状或倾角较小时,顶部和仰拱节理之间产生离层区,易引起岩层弯折破坏;随着倾角增大,顺弱勢节理面滑动趋势增大,破坏主要取决于节理面强度和层状节理之间滑移;当倾角为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,破坏主要为边墙岩块弯曲压溃;竖向节理时,中间垂直土体挟持作用减弱,易剪切破坏失稳引起冒顶坍塌趋势。从群锚效应来看,锚杆与滑移面夹角大于 23° 时,锚杆支护效果发挥较为明显的效果。

关键词:层状岩体;地质偏压隧道;顺层滑移;失稳模式;锚杆支护

中图分类号: U456.3⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)01-0063-07

岩体生产过程中,经受各种地质作用和构造力影响,往往形成众多的节理、层理和断层面等缺陷,是一种各向异性非连续介质,其完整性和均匀性受到不同程度的破坏,这种不连续性对岩体结构变形和应力都有重要影响^[1]。隧道及地下工程的修建不可避免穿越节理岩体岩质地层,用基于连续性假设数值方法很难满足施工和设计要求;而离散元法特别适合于富含节理不连续面体,从节理引起的不连续性出发,把节理岩体视为由离散的块体和岩块间的节理面组成。自1971年Cundall首次提出离散单元以来,得到了众多学者的不断完善和发展。

王刚等^[2]通过断裂损伤理论,认为节理裂隙对隧道围岩稳定性的影响至关重要;郑颖人等^[3]通过模型试验研究了层状岩体的强度和变形特征;周辉等^[4]通过室内试验研究不同位置节理、不同长度节理对岩体峰值剪切强度和抗剪强度参数的影响;王贵君等^[5-6]、桑运龙等^[7]运用 UDEC 对不同节理裂隙岩体中无支护暗挖隧道进行稳定性分析;刘刚等^[8]通过模型试验研究节理密度对围岩变形及破坏影响,提出断续节理密度控制着围岩稳定性;杨忠峰等^[9]采用数值分析和现场试验验证对称型节理发育隧道支护的合理性和优化建议。

对比国内外文献,针对深埋岩质隧道节理产状研究并不多,特别是铁路隧道标准断面更少。因此,研究节理产状对铁路标准断面隧道围岩稳定性影响及锚杆力学特性具有显著理论意义和实践价值。

1 工程概况

新建郑万铁路黄家沟隧道为时速350 km 双线铁路隧道,全长7.827 km,隧道一般埋深100~300 m,最大埋深380 m。该隧道地处荆山山脉,属构造侵蚀剥蚀低山地貌区,隧址区内地势总体上呈现中间高两侧低的态势,地形复杂,沟壑交错,山峦纵横。主体山势呈北西—南东向延展,连绵起伏,地形切割较深,峰谷相间。主要岩性为志留系下统罗惹坪组砂质页岩,新滩组砂页岩。地下水主要类型有第四系孔隙潜

收稿日期:2020-10-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20200161

作者简介:李老三(1981—),男,高级工程师,研究方向为隧道及地下工程设计及研究。E-mail:20556892@qq.com

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

李老三.铁路标准断面隧道节理倾角效应研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):63-68,75.

水、基岩裂隙水。黄家沟隧道地质构造与隧道的关系及地质纵断面如图 1、图 2 所示。隧道受田家沟断裂和金斗-鞍子寨倒转背斜的影响,隧道洞身发育一系列北西向、近南北向和北东向断裂和节理密集带,对隧道的稳定性影响较大。

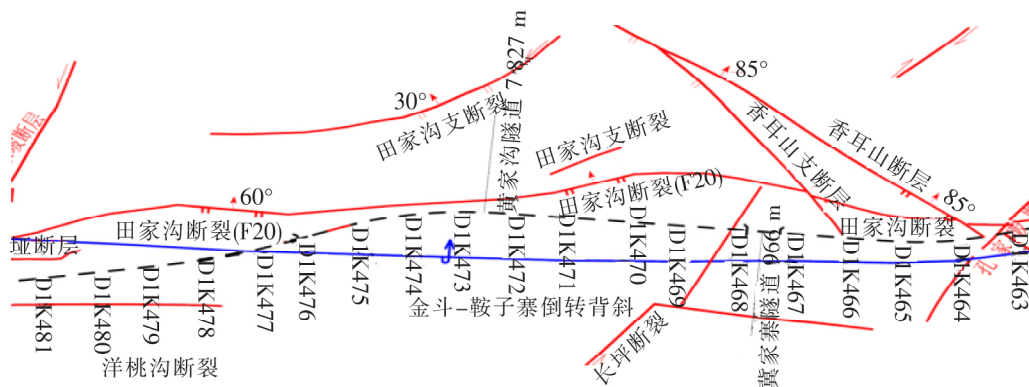


图 1 黄家沟隧道地质构造线与隧道关系图

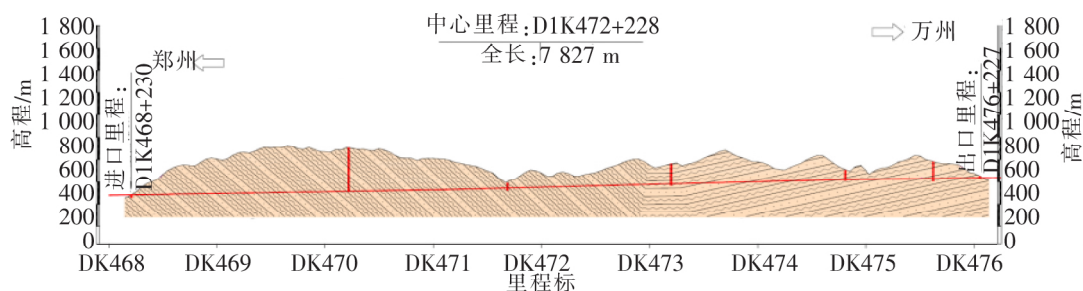


图 2 黄家沟隧道地质纵断面图

隧道所穿越山体主要有 5 组发育节理,节理密度一般为 1~3 组/m,密集处超过 5 组/m,部分节理裂隙延伸长度大于 2 m。隧道围岩层状构造明显,揭示岩层倾角一般为 $9^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。岩层呈薄层、中厚至厚层状,层理较发育,层理结合面强度较低,由于本隧道埋深较大,地应力较高,所以当结构面受力后易发生剪切破坏和顺层理面滑移破坏。

2 计算模型及参数

本次模拟计算使用 ITASCA 公司通用离散元程序 UDEC 进行模拟,该软件是一个处理不连续介质的二维程序。UDEC 程序适用于模拟节理系统的分离过程,而且能够自动识别节理面产生的新接触点,较真实反映节理面力学行为。

根据黄家沟隧道现场地质勘查报告和现场节理量测,该隧道所穿越山体主要有 5 组发育节理,节理产状如表 1 所示。

2.1 计算模型及边界条件

针对我国铁路 350 km/h 隧道标准断面设计图,研究节理岩体不同产状(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90°)时围岩稳定性影响规律。节理间距 0.4 m,模型横向取 100 m,下边界距离隧道中心 35 m,上边界距离隧道中心 100 m。左、右边界水平位移约束,下边界竖向位移约束,上边界施加自重应力约束。

2.2 计算参数

块体遵从 Mohr-Coulomb 强度准则,结构面采用面接触滑动模型。初始应力场考虑 300 m 埋深自重应力,在隧道中心施加垂直地应力 $\sigma_v = 6.90$ MPa,水平方向的地应力 $\sigma_h = 3.25$ MPa,各向按梯度变化。

表 1 节理产状

节理	产状	密度/(组·m ⁻¹)
1	N5~18°E/90°	3~5
2	N60~65°E/90°	1~3
3	N30~55°W/90°	1~3
4	N80~86°E/66°	1~3
5	N41°E/70°	2~4

根据黄家沟隧道现场地质勘查报告和文献[1],岩块和节理面计算参数如表 2、表 3 所示。

表 2 岩块材料力学参数

重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
23	5	0.32	2.80	35

表 3 节理计算参数

法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	剪切刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
6.3	2.3	10	0.16	0.03

3 节理产状分析结果及结论

由于节理的存在,出现明显顺层地质偏压现象,岩层顺着节理方向滑动,产生较大偏压荷载。

3.1 围岩应力影响

隧道开挖强卸荷引起一定范围内围岩应力释放和转移。不同节理产状引起主应力分布特征如图 3 所示。

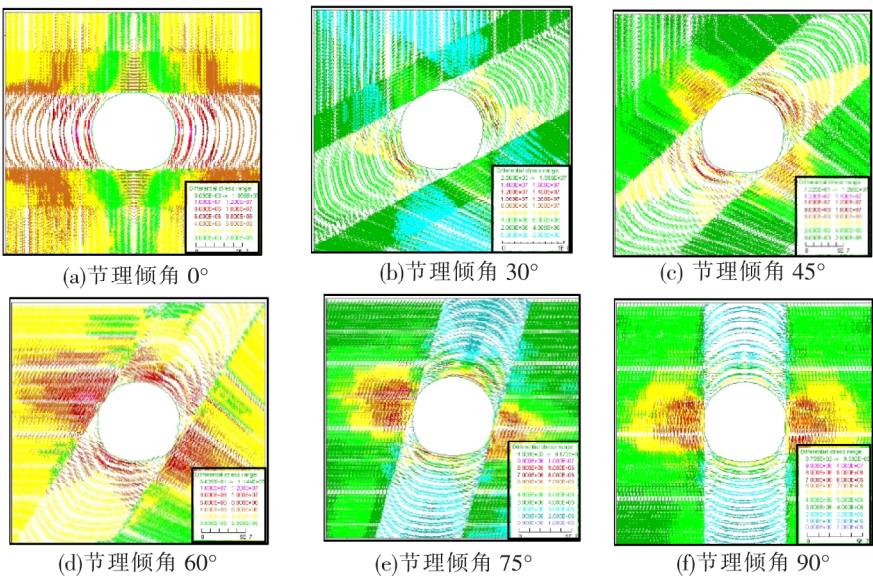


图 3 不同节理产状隧道围岩主应力分布特征

节理面相对岩块来说参数要低得多,从图 3 看出,节理面从根本上改变了围岩应力重分布,不仅影响着主应力方向,而且也影响其大小,最大主应力和最小主应力方向不再是切向和径向。应力在与不连续面平行方向释放,分布较均匀,岩体松弛明显,甚至出现了拉应力。在垂直于结构面方向洞周主应力增加,且分布极不均匀,同时在结构面附近主应力集度较大。各层岩体均相当于独立处于受弯剪状态的悬臂梁,由于层状岩体的抗弯能力不强,因而不能承受或只能承受较小的应力,容易发生弯折破坏,使结构面产生剪切滑移或张开。

对于水平的层状岩体,容易在顶部和仰拱出现鼓起,处于受拉状态。倾角较小时,节理间滑移力难以克服其黏聚力,破坏形式表现为拱部和底部节理之间沿节理层面分离。当倾角达到 60°,隧道左拱肩和右墙脚部位应力明显大于对称部位应力,因而造成了破坏的非对称性。对于倾向岩层,沿着倾斜的一方易造成岩块滑移,位移大大增加,甚至斜顶鼓起,破坏模式表现为节理面的滑移。

对于竖直产状岩体,在压应力作用下产生一个垂直于层面的拉应力,由于层间粘结力弱,因而各层之间容易产生离层,隧道侧壁容易造成边墙岩层弯曲压溃破坏。

3.2 位移影响

位移是隧道稳定性最直接的评判标准,不同节理产状(0°、30°、60°和 90°)围岩位移矢量特征分布特征如图 4 所示。

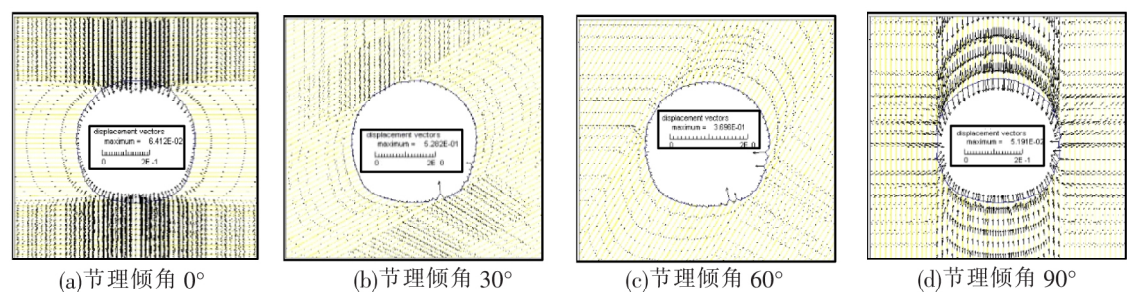


图 4 不同节理产状隧道围岩位移矢量分布特征

从图 4 中可以看出,开挖使得隧道上部围岩失去支撑,而结构面参数较弱,沿节理面剪切滑移较大,产生向洞内位移。边墙上部位移大于下部位移。结构面水平时,最大位移发生在拱顶和仰拱处,如图 4 (a)所示,而并不是在边墙,其破坏形式表现为拱部岩层弯折破坏。当节理倾角为 30°和 60°,如图 4(b)、图 4(c)所示,最大位移发生在右拱肩和左拱脚,具有明显不对称性;当竖向节理时,节理黏聚力不能抵抗层间下滑力,隧道周围岩体沿竖向节理面发生整体下滑破坏,位移主要在拱部以向下发展为主,破坏模式主要变为垂直节理剪切破坏,有冒顶塌方趋势。因此必须采取支护措施,增强节理面黏聚力和摩擦角,提高岩层抗剪强度。

3.3 节理离层区影响

由于层间节理粘结力弱,不能承受或只能承受很小的拉应力,因此层间节理逐渐张开,从而使层状岩层的各层之间处于离层状态,不同节理产状节理离层区分布特征如图 5 所示。

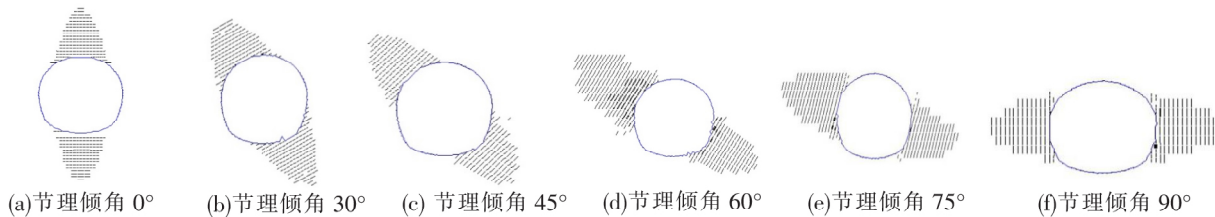


图 5 不同节理产状隧道围岩节理离层区分布特征

离层区节理面之间法向应力、法向力均为零,为隧道失稳潜在区域。从图 5 中看出,节理离层区不是发生在最大主应力方向上,而是沿垂直于节理面方向发展。随着节理倾角增大,节理离层区面积先增大,再减小。当倾角较小时,节理间主应力难以克服其黏聚力,易发生节理分离,离层后所进行的应力调整使相邻岩层的强度降低,直到沿径向发展到一定深度达到新的平衡为止。

水平层状岩体及倾角较小时,不易发生顺层滑移,顶部和仰拱节理之间产生离层区,易引起弯折破坏;随着倾角增大(30°~60°),岩层顺弱勢节理面滑动趋势增大,主要取决于节理面强度,破坏模式主要为层状岩体沿节理滑移;当倾角 75°~90°时,洞周受力趋于对称,围岩破坏主要为边墙岩层弯曲压溃,中间垂直岩体挟持作用减弱,有剪切破坏失稳引起冒顶塌方趋势。

3.4 现场数据采集与分析

应力应变监测项目共 7 项,其中围岩 1 项,初支 4 项,二衬 2 项,见表 4。

表 4 应力应变监测项目统计表

监控量测项目		监控量测元器件
围岩	围岩松动圈	多点位移计
	围岩接触压力	压力盒
初支	钢架内力	钢筋计
	喷混凝土内力	混凝土应变计
	锚杆轴力	钢筋计
	初支与二衬间接触压力	压力盒
二衬	二衬内力	混凝土应变计

埋设完成后马上读取初始读数,在喷射混凝土完成或衬砌混凝土浇注完成后进行一次读数。在初期应力应变急剧增大时,每天测 1 次;增速减缓时,每 2~4 d 测 1 次;应力应变基本稳定时,每 7~10 d 测 1 次。

在 Excel 表中输入断面里程、安装日期、围岩级别、埋深、施工方法等基本信息。

通过时间与数据变化的关系自动生成曲线,可以较直观地了解应力变化趋势,见图 6。

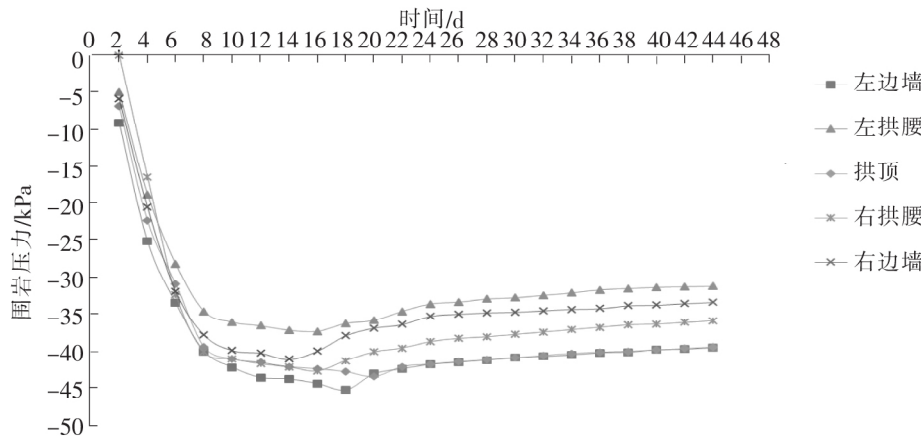


图 6 初支应力变化趋势图

4 节理岩体锚杆受力特性分析

按照铁路现行标准断面设计图,锚杆环向间距一般 1.2 m,表 5 为不同倾角左右两侧对称锚杆最大轴力值,分布形式如图 7 所示。

从表 5 看出,在倾角较小时,两侧大部分锚杆轴力差值不大,说明倾角较小时,不易发生顺层滑动,洞周围岩破坏形式与板裂介质理论一致。随着倾角增大,形成一个高密度的偏压荷载,总体两侧锚杆轴力差值增大,而且右侧明显大于左侧,岩层顺弱勢节理面滑动趋势增大,洞周破坏主要取决于节理面强度。通过锚杆轴向作用,使得各分层在弯矩作用下发生整体弯曲变形,呈现出组合梁的弯曲变形特征,提高岩层抗弯刚度和强度。

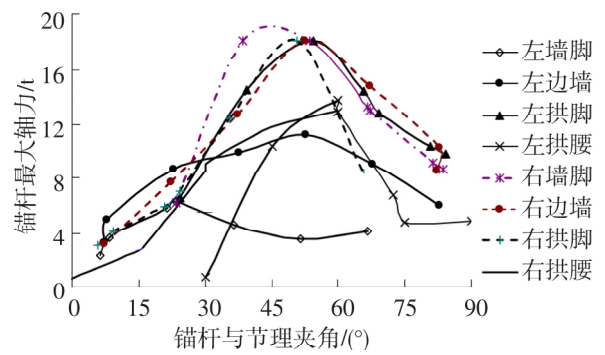


图 7 锚杆最大轴力与锚杆-节理夹角关系图

表 5 锚杆最大轴力统计表

位置	0°		30°		60°		75°		90°	
	与节理 夹角 / (°)	轴力/t	与节理 夹角 / (°)	轴力/t	与节理 夹角 / (°)	轴力/t	与节理 夹角 / (°)	轴力/t	与节理 夹角 / (°)	轴力/t
左墙脚	23.57	6.39	6.43	2.42	36.43	4.67	51.43	3.66	66.43	4.20
右墙脚	23.57	6.23	53.57	18.00	83.57	8.66	81.43	9.19	66.43	13.23
左边墙	7.26	3.36	22.74	8.65	52.74	11.22	67.74	9.05	82.74	6.11
右边墙	7.26	3.30	37.26	12.67	67.26	14.80	82.26	8.61	82.74	10.25
左拱脚	24.30	6.65	54.30	18.00	84.30	9.85	80.70	10.33	65.70	14.35
右拱脚	24.30	7.07	5.70	3.16	35.70	12.43	50.70	18.00	65.70	8.39
左拱腰	59.98	13.72	89.98	4.99	60.02	12.14	45.02	10.37	30.02	0.82
右拱腰	59.98	12.97	29.98	9.04	0.02	0.71	15.02	2.84	30.02	6.01

从图 7 可看出,右侧锚杆轴力普遍大于左侧,从锚杆最大轴力与锚杆-节理面夹角关系来看,锚杆与滑移面夹角大于 23° 时轴力较大,发挥较为明显效果,锚杆增大层间摩阻力,增强节理剪切刚度,抑制层状岩质隧道的剪切滑移程度。

5 结论

(1)针对水平、倾斜、垂直的层状岩体进行多组对比分析,由于节理面的出现,从根本上改变了围岩应力分布,极大削弱了岩体力学特性,与传统松散介质理论隧道失稳模式不尽相同,施工扰动引起围岩沿节理面滑动造成地质偏压荷载,成为层状岩体隧道失稳破坏的关键所在。

(2)不同节理产状情况下,围岩受力方向不同,最大位移位置不同,破坏形式不同,但层间节理首先破坏,节理离层区发生在岩体节理垂直方向,而不是在最大主应力方向上,随之节理倾角增大,岩层受剪破坏是造成围岩失稳破坏的根本原因之一。

(3)对不同节理产状隧道围岩节理离层区分布特征分析可知,随着节理倾角增大,节理离层区面积先增大,再减小。节理倾角在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时,对围岩稳定性影响较大。因为倾向节理破坏以层间滑移为主,同时又包含层状节理法向的弯折破坏。

(4)通过对锚杆最大轴力与锚杆节理夹角关系分析可知,随着节理面倾角增大,两侧锚杆轴力差值增大,顺弱勢节理面滑动趋势增大。由于锚杆轴向作用,增大了层间摩阻力,有效抑制了层状岩质沿节理滑移,使各分层在弯矩作用下发生整体弯曲变形,增强了隧道围岩的整体稳定性。

(5)根据对比分析,锚杆与滑移面夹角大于 23° 时锚固效果更佳,充分发挥“销钉”和“组合梁”效果,区别于现行铁路标准断面通用图以等长、等间距的系统锚杆设计理念,对锚杆打设角度应结合岩层节理走向及产状进行优化。

参 考 文 献

- [1]赵万强,赵勇,喻渝,等. TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [2]王刚,李术才,王书刚,等. 节理岩体大型地下洞室群稳定性分析[J]. 岩土力学,2008,29(1):261-267.
- [3]郑颖人,王永甫,王成,等. 节理岩体隧道的稳定分析与破坏规律探讨——隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(4):649-656.
- [4]周辉,孟凡震,张传庆,等. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3018-3027.
- [5]王贵君. 节理裂隙岩体中大断面隧洞围岩与支护结构的施工过程力学状态[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1328-1334.
- [6]王贵君,任杨茹. 节理特性对隧道围岩稳定性影响的研究[J]. 河北工业大学学报,2017,46(1):103-107.
- [7]桑运龙,李军,刘学增. 水平、垂直节理发育条件下的隧道稳定性分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(2):67-71.
- [8]刘刚,赵坚,宋宏伟,等. 节理密度对围岩变形及破坏影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(11):1737-1741.
- [9]杨忠峰,郭吉平,朱文轩. 对称型节理发育岩体隧道锚喷支护形式分析[J]. 施工技术,2017,46(1):85-88.

(下转第 75 页)

Compound Treatment Technology of Variable Stiffness Foundation in Valley Area Filled with Cut Mountain

Liu Youxiang, Wang Faling, Liu Zhongfu, Guo Yun, Long Xiaodong, Chen Kai

(Central South Survey Design Institute Group Co. Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: There is significant difference in the filling thickness of in valley area filled with cut mountain. If the foundation in these areas is not treated properly, the buildings and structures above it would easily produce uneven settlement of foundation, which would result in safety problems. Taking relocation project of Shiyang Base as the background, this paper studied the compound treatment technology of variable stiffness foundation in valley area filled with cut mountain, which includes dynamic compaction with different energy levels, grouting and DJP pile, is studied. The effects of this ground treatment technology were analyzed based on data from many tests such as dynamic detection test, single pile static load test and plate loading test. The test data show that the scheme can effectively reduce the overall settlement and differential settlement of the foundation, which means it is a new effective technology. This research can provide technical reference and experience for treatment of foundation in valley area filled with cut mountain.

Key words: variable stiffness; compound ground; dynamic compaction; slip casting; DJP pile

(上接第 68 页)

Study on the Effect of Joint Dip Angle of Railway Tunnel with Standard Section

Li Laosan

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking the standard section of Huangjiagou Tunnel of Zhengwan Railway as the research object, this paper analyzed the stability of rock tunnels with different occurrence, studied the mechanical response, deformation characteristics and bolt mechanical characteristics of surrounding rock, and expounded the instability mode and bolt support key points of layered rock tunnels which were different from the traditional loose medium. The results show that the joint plane weakens the stability of rock mass greatly, and the excavation will cause sliding along the bedding plane, resulting in obvious geological bias. The tunnel excavation causes the first failure of the interlayer joints. The separation zone of the joints does not occur in the direction of the maximum principal stress, but in the vertical direction of the joints. When the horizontal or dip angle is small, there is a separation zone between the top and the invert joint, which is easy to cause the bending failure of the rock stratum; with the dip angle increasing, the sliding trend along the weak joint surface increases, and the failure mainly depends on the strength of the joint surface and the sliding between the layered joints; when the dip angle is $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$, the failure is mainly caused by the bending collapse of the side wall rock mass; when the vertical joint, the middle vertical soil mass is held up with weakening, it is easy to shear failure and instability, resulting in the tendency of roof caving. From the point of view of group anchor effect, when the angle between anchor bolt and slip surface is greater than 23° , the effect of anchor bolt support is more obvious.

Key words: layered rock mass; geological bias tunnel; bedding slip; instability mode; bolt support