

隧道开挖损伤区围岩声波监测与变形模量预测研究

张久长, 韩春秀 *

(云南民族大学 土木工程系, 云南 昆明 650504)

摘 要: 针对西南地区某公路隧道的钻孔声波监测数据, 分析了爆破开挖方式下围岩损伤区的分布特征。基于岩体 RMR 分值和 Q 指标值, 采用现场声波测试结果, 预测隧道开挖损伤区围岩和原岩的变形模量。研究结果可为隧道工程的设计和施工建设提供有益的参考和技术支持。

关键词: 隧道围岩; 开挖损伤区; 声波监测; 岩体变形模量

中图分类号: U 455.6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7767(2018)02-0017-05

On Ultrasonic Monitoring and Deformation Modulus Prediction in Damaged Tunnel Surrounding Rock

Zhang Jiuchang, Han Chunxiu *

隧道在开挖过程中, 通常由于爆破震动和初始地应力重分布而造成围岩卸荷松弛, 使得隧道周围岩体裂隙萌生、扩展乃至连通, 形成一个沿开挖边界环状分布的损伤区^[1]。开挖损伤区直接影响隧道围岩的变形、强度和稳定性。为了提高隧道的安全度, 开挖损伤区围岩的支护加固是隧道工程建设的关键工作环节。开挖损伤区围岩支护设计依据的基本参数是变形模量。目前, 确定工程岩体变形模量的方法主要有原位实测法、经验估算法、等效连续介质法、物探法^[2-7]。Barton^[8]曾使用岩体质量指标 Q 评价隧道开挖损伤区围岩支护前后的变形模量。但利用岩体波速测算损伤区岩体变形模量的研究还相对较少, 工程应用案例也不多^[7,9,10]。事实上, 声波波速是岩体完整性、密实度、强度等地质和力学指标的综合反映, 与岩体的弹性静动力学参数正相关, 因此采用声波波速估算围岩变形模量具有理论上和工程上的可行性。

笔者基于已有的工程实测研究成果, 总结了岩体分类指数 RMR 、岩体质量指标 Q 与变形模量 E_m 之间的经验公式。进而利用 Barton 基于大量工程实测数据提出的岩体纵波波速与岩体质量指标 Q 的经验关系, 间接建立了由岩体纵波波速测算变形模量的经验公式。并应用该方法确定了某公路隧道开挖损伤区围岩的变形模量。

1 围岩损伤系数的测算

1.1 围岩损伤系数的定义

对于岩石类材料, 通常采用弹性模量的衰减程度来定义其损伤系数 D , 表达式如下:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

式中: E_0 为初始未损伤岩石类材料的弹性模量; E 为损伤岩石类材料的弹性模量。

公式(1)在损伤力学中是一个基本公式, 可通过室内循环加卸载试验确定岩石的损伤量。然而实际工程岩体的几何尺寸很大, E_0 和 E 都很难准确测定。另外, 岩体的变形包含了节理裂隙等的变形, 用变形模量代替弹性模量更具现实的工程意义。因此, 公式(1)很难用于确定工程岩体的损伤系数。

工程中可间接采用声波波速的衰减来估算开挖损伤区围岩的破损程度, 即损伤系数 D 的数值^[11]。测定的依据是弹性介质动力学理论。假设岩体为各向异性弹性介质, 开挖前未损伤岩体的变形模量为 E_{m0} 、泊松比为 ν_{m0} 、密度为 ρ_{m0} 。爆破开挖后损伤岩体的变形模量为 E_m 、泊松比为 ν_m 、密度为 ρ_m 。根据弹性波理论, 未损伤岩体和损伤岩体的纵波波速 V_{p0} 和 V_p 分别为:

$$V_{p0} = \sqrt{\frac{E_{m0}}{\rho_{m0}}} \sqrt{\frac{1-\nu_{m0}}{(1+\nu_{m0})(1-2\nu_{m0})}}; \quad (2)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_m}{\rho_m}} \sqrt{\frac{1-\nu_m}{(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}} \quad (3)$$

对于实际工程岩体,与 E_{m0} 和 E_m 之间的差别相比, ν_{m0} 和 ν_m , ρ_{m0} 和 ρ_m 之间的差别并不十分显著。因此,工程岩体的损伤系数 D 可以进一步简化定义为:

$$D = 1 - \frac{E_m}{E_{m0}} = 1 - \frac{V_p^2}{V_{p0}^2} \quad (4)$$

在过去的数十年中,已有较多工程案例采用纵波波速变化来定量分析岩体的开挖破损情况^[1,7,9,10,12,13]。从这些工程案例来看,采用纵波变化情况可有效测定地下各类洞室围岩的开挖损伤区范围,进而为工程注浆支护提供合理的技术参考。

1.2 围岩损伤系数的阈值

对于岩体开挖质量的评估,DL/T 5389—2007《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》有相关规定:

1)当波速变化系数 $\eta = 1 - V_p/V_{p0} \leq 10\%$ 时,认为开挖对岩体质量无影响或影响甚微;

2)当 $10\% < \eta = 1 - V_p/V_{p0} \leq 15\%$ 时,认为开挖对岩体质量影响轻微;

3)当 $\eta = 1 - V_p/V_{p0} > 15\%$ 时,认为开挖对岩体质量有影响或开挖质量较差。

按上述规定,根据公式(4)可得到满足上述判别准则的损伤系数的取值区间,并划定相应的损伤程度:

1)当 $D \leq 0.19$ 时,认为岩体损伤程度较轻,可定义为原岩区;

2)当 $0.19 < D \leq 0.28$ 时,可定义为弱损伤区;

3)当 $0.28 < D \leq 0.50$ 时,可定义为中损伤区;

4)当 $D > 0.50$ 时,可定义为强损伤区。

2 基于声波波速估算岩体变形模量的方法

2.1 岩体质量与岩体变形模量的关系

2.1.1 RMR 与 E_m

南非岩石力学专家 Bieniawski 提出岩体质量的 RMR 分级方法^[14],着重考虑了完整岩石的单轴抗压强度(UCS)、岩石质量指标(RQD)、节理间距、节理状态和地下水情况等 6 个关键指标。采用 RMR 分级方法评定岩体质量时,只需将这 6 项分值相加即可得到工程岩体的 RMR 分值:

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (5)$$

按照 Bieniawski 提供的 6 个关键指标的标准评分表,工程岩体的 RMR 分值在 0~100 范围内,共区分为 5 个等级。Bieniawski^[14]基于大量的实测数据,研究了由 RMR 分值估算岩体变形模量 E_m 的方法,并给出了相应

的经验计算公式:

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (6)$$

公式(6)仅适用于 $RMR > 50$ 的情况,因此限制了其在较差岩体中的应用。之后,Serafim 和 Pereira^[15]根据他们实测的 E_m 与 RMR 的相关性,提出一个关于 RMR 的指数函数预测岩体变形模量 E_m :

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (7)$$

2.1.2 Q 与 E_m

以 Barton 为代表的挪威岩石力学学者和工程师在大量的地下洞室工程案例的基础上,提出了地下洞室围岩的 Q 分级系统^[8]。着重考虑了岩石质量指标 RQD、节理组数 J_n 、节理粗糙度系数 J_r 、裂隙水影响系数 J_w 和应力折减因数等 6 个指标。Q 的计算公式如下:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (8)$$

与 RMR 分级方法类似,Barton 也提供了计算 Q 指标的各类因素的取值参考表格。在 Q 分级系统中,岩体质量指标 Q 的取值范围很大,为 0.001~1 000,将岩体质量等级划分为 9 级。较 RMR 分级方法更细致。为了便于工程参照,Barton 基于大量的工程实例,提出 RMR 与 Q 之间的换算关系^[8]:

$$RMR = 15 \lg Q + 50 \quad (9)$$

同样地,Barton 也基于实测岩体变形模量 E_m 与 Q 指标的相关性,提出利用 Q 指标估算岩体变形模量 E_m 的经验公式:

$$E_m = 10Q_c^{1/3}, Q_c = Q\sigma_{ci}/100 \quad (10)$$

式中: σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度,MPa。

图 1 显示了 Bieniawski,Serafim 和 Pereira 等实测的 E_m 数据以及采用 Q 指标和 RMR 分值估算 E_m 的经验公式^[8]。由此可见,在 $Q < 1.0$ 或 $RMR < 50$ 的岩体中,公式(7)和公式(10)的预测结果是非常接近的;在 $RMR > 50$ 的岩体中,公式(6)的预测值明显偏大,而公式(10)的预测值偏小,相对安全。

2.2 波速与岩体变形模量的关系

国内外均开展过利用声波速度 V_p 估算岩体变形模量 E_m 的实测研究。在这方面,因为拥有大量来自挪威、瑞典、中国等多个国家的工程实测数据,所以 Barton 的研究成果被广泛认可和应用。Barton 通过回归分析,建立了岩体纵波速度 V_p (km/s)与 Q 之间的经验关系^[8]:

$$V_p = \lg Q_c + 3.5, Q_c = Q\sigma_{ci}/100 \quad (11)$$

将公式(11)代入公式(10)可得到由纵波波速 V_p 估算岩体变形模量 E_m 的经验公式:

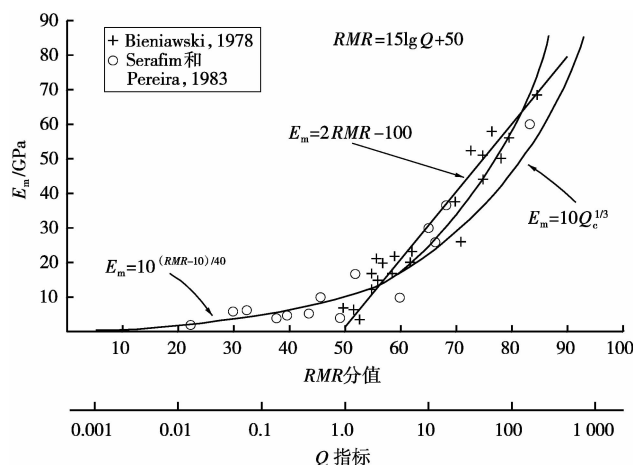


图1 E_m 与 RMR 、 RMR 与 Q 之间的经验公式^[8]

$$E_m = 10 \times 10^{(V_p - 3.5)/3} \quad (12)$$

在测得岩体的纵波波速之后,可以采用公式(11)的反函数 $Q = 10 \times 10^{(V_p - 3.5) \times 100 / \sigma_{ci}}$ 确定 Q 指标的数值。然后将计算得到的 Q 值代入公式(9),利用公式(6)和公式(7)可以估算出岩体的变形模量。

3 工程实例

3.1 工程概况

笔者所研究的隧道是西南地区某公路建设中具有挑战性的工程项目之一。该隧道建设区山高谷深,山坡陡峻,地表起伏高差较大,为典型的高原山地地貌。设计采用2条隧道穿越山体,每条隧道均设计为单向2车道。2条隧道长度均为2.2 km,隧道中部区段的埋

深约150~200 m,洞口段浅埋。构造地质条件相对稳定,无较大的区域性断层通过场区。区域构造应力不显著,地应力以竖向自重应力为主。隧道岩体为强—弱风化硬质厚层灰岩和浅变质大理岩,节理裂隙为中等发育程度。岩体结构以近水平的层状结构为主。地下水不发育,主要为孔隙水和基岩裂隙水。

毛洞跨度约为12.5 m,洞高8.5 m,采用新奥法施工。钻爆开挖采用光面爆破技术,双侧壁导坑法开挖,尽量减少爆破导致的围岩损伤。根据现场开挖情况,大部分原岩的岩体质量可评定为Ⅱ~Ⅲ级围岩,少部分为Ⅳ级围岩。

3.2 钻孔声波监测成果

在现场的一些钻孔中,开展了岩体纵波波速测试。用于声波波速测试的钻孔深度约为9 m。采用单孔法测定岩体纵波波速。测试时,每移动20 cm测定1个点的波速。图2显示了某隧道剖面处左、右两侧边墙上2个钻孔的位置。钻孔岩体纵波波速随钻孔深度变化的曲线如图3所示。

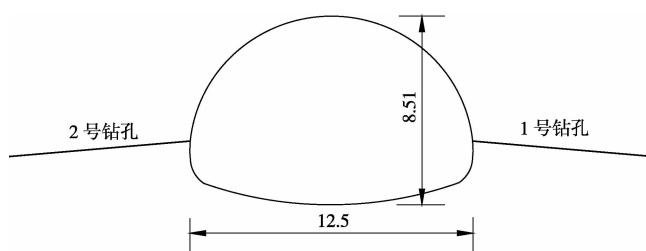


图2 隧道设计断面(m)

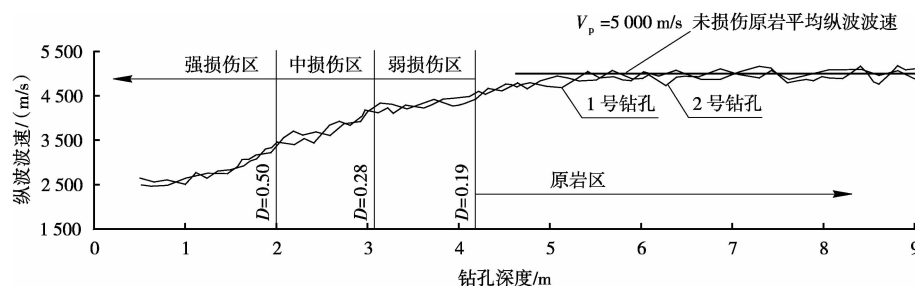


图3 1、2号钻孔岩体纵波波速随钻孔深度变化的曲线

从2个钻孔的纵波波速测试结果来看,若以原岩平均纵波波速5 000 m/s为准,并以损伤系数阈值 $D > 0.19$ 作为围岩爆破开挖损伤区的界定,则损伤区围岩的纵波波速小于4 500 m/s。因此,从开挖面到深度约4.2 m的范围,可确定为围岩的爆破开挖损伤区,而开挖面4.2 m以外可判定为原岩区。尽管在这些区域原岩的地应力状态也发生了明显变化,但受爆破开挖影响较小,岩体的完整性并未受到严重破坏。

2个钻孔测定的爆破开挖损伤区岩体纵波波速在2 500~4 500 m/s之间,均值约为3 500 m/s。根据公式(4)可估算该处围岩的损伤值为0.19~0.75。其中,弱损伤区的范围为3.0~4.2 m;中损伤区范围为2.0~3.0 m;强损伤区的范围为开挖面至深度2.0 m处。

3.3 岩体变形模量预测

从施工现场采集了一些岩块,制作成直径×高=50 mm×100 mm的标准圆柱形试样。测得试样的密度为

2.74 g/cm³。在压力机下开展单轴压缩试验,测得岩石的单轴抗压强度约为 110 MPa。

基于纵波波速的测试数据,可采用公式(12)直接估算隧道原岩与不同开挖损伤区围岩的变形模量值。然而在采用公式(6)、(7)之前,需借助公式(11)的反函数由纵波波速反算出岩体的 Q 指标和 RMR 分值。计算表明,原岩区岩体的 Q 指标值约为 9~29, RMR 分值约为 64~72,表明岩体质量较好或优良。相应的变形模量约为 31.6~43.8 GPa,均值约为 37.7 GPa。采用不同经验公式估算的损伤区围岩变形模量值见表 1。

表 1 采用不同经验公式估算的损伤区围岩变形模量值
GPa

围岩损伤区与损伤程度	公式(12)	公式(6)	公式(7)
原岩区 $D \leq 0.19$	21.5~31.6	28.8~43.8	22.9~35.2
弱损伤区 $0.19 < D \leq 0.28$	17.8~21.5	21.3~28.8	18.4~22.9
中损伤区 $0.28 < D \leq 0.40$	10.0~17.8		9.6~18.4
强损伤区 $D > 0.40$	4.6~10.0		4.1~9.6

经过爆破开挖之后,在弱损伤区, Q 指标值降低至 5~9, RMR 分值降低至 60~64,估算的岩体变形模量值约为 17.8~28.8 GPa,均值为 23.3 GPa;根据岩体质量评分结果,可判定弱损伤区围岩质量为中等偏低。在中损伤区, Q 指标值约为 0.91~5, RMR 分值降低至 60~64,估算的岩体变形模量值约为 9.6~18.4 GPa,均值约为 14.0 GPa。

临近开挖面的区域受爆破影响较大,岩体结构明显碎裂,声波预测的 Q 指标值仅为 0.091~0.91, RMR 分值也降低至 34~49,可判定强损伤区岩体的质量为差或较差等级。强损伤区围岩的变形模量约为 4.1~9.6 GPa,均值为 6.9 GPa。与原岩状态相比,变形模量显著降低。现场调查也显示,强损伤区的岩体碎裂松动,部分岩块可用手掰下来。因此,需加强喷射混凝土或注浆加固治理。

4 结论

1)通过隧道围岩的钻孔声波波速测试可较准确地确定围岩爆破开挖的损伤区范围。再基于弹性波动力学理论,可建立由波速衰减定义的岩体开挖损伤量。由此,可依据相关工程规范或标准,对岩体的爆破开挖损伤程度予以定量分析和判定,然后提出经济合理的开挖施工方案和支护加固措施。

2)由前人总结的经验公式和上述工程实例可见,基于洞室围岩的 Q 分级系统、 RMR 分级方法、纵波波速与岩体完整性之间的相关性,可建立由 Q 指标、 RMR

分值和纵波波速 V_p 测算洞室围岩变形模量 E_m 的经验公式。也可以采用现场实测获得的纵波波速 V_p 分析和评价洞室围岩的开挖质量。因此,纵波波速的现场实测具有较大的工程价值,在工程的反馈设计和施工过程中应尽可能予以监测。

3)由工程实例可见,对于原岩质量评定为 II~III 级的厚层状岩体,原岩的纵波波速可达 5 000 m/s,测算的岩体变形模量均值约为 37.7 GPa。爆破开挖弱损伤区围岩的纵波波速约为 4 250~4 500 m/s,测算的岩体变形模量约为 23.3 GPa;中损伤区围岩的纵波波速降低至 3 500~4 250 m/s,测算的岩体变形模量均值约为 14.0 GPa;强损伤区岩体因爆破震动而松动破碎,纵波波速明显降低,约为 2 500~3 500 m/s,测算的岩体变形模量约为 6.9 GPa。MET

参考文献:

- [1] 严鹏,卢文波,单治钢,等. 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1552-1561.
- [2] AGHARAZI A, TANNANT D D, MARTIN C D. Characterizing rock mass deformation mechanisms during plate load tests at the Bakhtyari dam project[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2012, 49(1):1-11.
- [3] 石安池,唐鸣发,周其健. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2079-2086.
- [4] NEJATI H R, GHAZVINIAN A, MOOSAVI S A, et al. On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2014, 73(2):531-540.
- [5] HOEK E, DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2006, 43(2):203-215.
- [6] 狄圣杰,徐卫亚,王伟,等. 柱状节理岩体横观各向同性本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(6):881-887.
- [7] 宋彦辉,巨广宏,孙苗. 岩体波速与坝基岩体变形模量关系[J]. 岩土力学,2011,32(5):1507-1512.
- [8] BARTON N. Some new Q -value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2002, 39(2):185-216.
- [9] 钟权,陈明,朱洋洋,等. 基于声波速度及岩块强度的开挖扰动区岩体力学参数预测[J]. 武汉大学学报(工学版),2013,46(2):170-173.
- [10] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7):1458-1466.

(下转第 27 页)

分行并布置隔离带,按照支路等级布置 1 上 1 下 2 条机动车道保证基本功能,外侧分别布置分隔带、非机动车道及人行道,如图 14 所示。

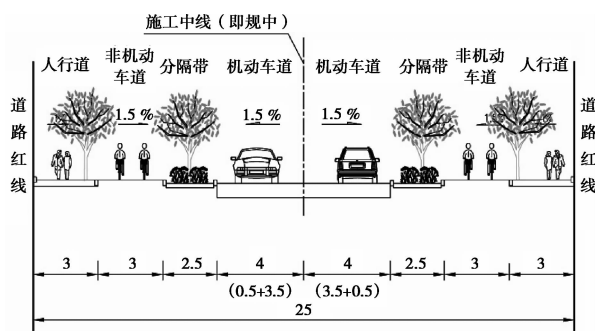


图 14 运河核心区北区道路典型横断面(m)

3) 景观设计提升

由于通州运河核心区北区内部道路与常规开放性市政道路外部条件有所不同,在一天中大部分时段机动车交通完全依靠地下环形隧道与建筑地下车库共同承担,地面道路的所有空间均可被行人及非机动车利用,因此在后期对道路景观做了针对性优化。利用不同的材质铺装来区分机动车道与慢行交通通道,机动车道铺装使用能够抵抗车辆荷载的结构并与外侧慢行交通铺装协调;同时将外侧非机动车道与人行道空间进行统筹布置,使彼此空间相互融合借用,如图 15 所示。

4) 小结

在非机动车通行时段,非机动车可借用机动车道通行从而与人行道形成分隔,同时人行道空间可向外拓展,具备布置各类城市家具的空间,为行人提供更优质的通行环境;在有机动车通行时段,慢行交通的数量已有所下降,可充分利用机动车道外侧空间进行交通组织。内部支路设计既满足了慢行交通的环境要求,



a) 效果图(1)



b) 效果图(2)

图 15 运河核心区北区内部支路效果图

提高了绿色出行交通设施的服务水平,又为高强度开发的高品质区域提供了优质的空间,净化了地面交通,体现了以人为本的交通发展理念。

6 结论

新华南北路、北皇木厂桥交通节点以及核心区内部支路的设计从不同的方面体现了区域交通发展目标,使市政交通道路能够满足运河核心区高强度地块开发的交通需求;同时重点考虑了与中心城区的交通联系,构建主、副城区顺畅的交通联系通道;在区域内打造舒适的慢行交通环境,创造优质的空间条件,体现了“以人为本”的交通发展理念。MET

收稿日期: 2017-12-20

作者简介: 董方,男,工程师,硕士,主要从事道路与交通设计工作。

(上接第 20 页)

- [11] 肖明,张雨霆,陈俊涛,等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学,2010,31(8):2613-2618.
- [12] 张建海,胡著秀,杨永涛,等. 地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1191-1197.
- [13] XIA X,LI H B,LI J C,et al. A case study on rock damage prediction and control method for underground tunnels subjected to adjacent excavation blasting[J]. Tunnelling and underground space technology,2013,35(4):1-7.

- [14] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of rock masses[J]. Civil engineer in South Africa,1973,15:335-343.
- [15] SERAFIM J L,PEREIRA J P. Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski[C]. Proceedings international symposium engineering geology and underground construction,1. 1983:1133-1142.

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609070)

作者简介: 张久长,男,讲师,博士,主要从事岩石力学与工程方面的教学与科研工作。