

兰右山边坡岩体力学参数研究

李 健¹, 谢守益², 巫德斌², 徐卫亚²

(1. 江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210005 ; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 通过单轴压缩试验、三轴压缩试验、岩体现场声波测试和软层现场 PANDA 测试得出了兰右山边坡岩体基本质量值和地质力学权值, 按 Hoek-Brown 强度准则估算了岩体力学参数, 并以此参数作为兰右山边坡工程设计和施工的参考依据。

关键词 兰右山边坡, 岩体力学参数, Hoek-Brown 强度准则

中图分类号 :TU457 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2005)04- 0459- 04

兰右山位于南京至杭州高速公路宜兴段某路堑开挖段, 地貌上表现为低缓剥蚀丘陵区。本段线路以路堑形式通过, 开挖长度约 600 m, 最大开挖深度 40 m, 海拔高度为 50 ~ 60 m, 主要为泥盆系砂岩和粉砂岩。兰右山段近地表岩层风化强烈, 遍布露天采石场及废料堆, 原始地形、地貌有较大改变。特别是南坡地带, 由于露天采石场的存在, 在距公路轴线 60 m 左右的地方形成近乎直立的高为 25 m 左右的陡坡。兰右山基岩裂隙密度相对较大, 硬性岩层与软弱岩层中的裂隙发育密度差异明显, 尤以五通组石英砂岩中节理较发育, 而在粉砂质泥岩中, 节理发育程度相对较低。据现场地质调查, 砂岩中节理走向有北东、北西和北东东向 3 组, 地表水系统发育, 地表水排泄以片流为主, 浅层地下水类型为浅层孔隙潜水和基岩裂隙水。准确地估计岩体力学参数, 对兰右山边坡工程的设计和施工具有十分重要的意义。为此, 笔者采用室内试验、现场试验和经验法对兰右山边坡岩石力学参数进行了研究, 并提出了用于边坡工程设计的岩体力学参数建议值。

1 室内岩石力学试验

采用中国科学院武汉岩土力学研究所开发、研制的 RMT-150B 刚性伺服试验机对兰右山边坡工程开挖岩体的典型岩样——石英砂岩、粉砂质泥岩岩样进行了单轴压缩试验和三轴压缩试验。试件为标准圆形试件, 每组 3 ~ 6 个。全风化泥岩不固结不排水三轴试验的内摩擦角为 3°。各特征岩性不同风化程度的单轴试验和三轴试验结果如表 1 所示, 典型的应力-应变曲线如图 1 和图 2 所示。

表 1 岩样室内试验结果

Table 1 Test results of rock specimens

岩 性	风化程度	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	试验方式
粉砂质泥岩	中	2.41	1.00	1.00			U
	全	2.16			34.00	3.0	T
石英砂岩	中	2.51	26.60	14.20			U
	微	2.65	10.79 ~ 20.71		6.69 ~ 12.30	57.3 ~ 58.2	T
	中	2.57	6.86 ~ 10.37		3.42 ~ 6.24	52.6 ~ 59.4	T
含砾砂岩	中	2.31	14.70	9.20			U
	中	2.54	18.17	0.33	53.10		T

注 :U 表示单轴压缩试验 ;T 表示三轴压缩试验。

2 岩体现场声波测试与软层现场 PANDA 测试

2.1 岩体现场声波测试

动力法是测定岩石弹性常数的一种速度快、成本低、成果有效的实验方法。采用动力法测得岩体弹性波

波速后,可用弹性力学公式进行计算,定量判定岩体的动力学基本性质,推算出相应的静力学指标,同时亦可获取安全稳定的判据。

笔者选取兰右山地段边坡地质勘察钻孔 ZK396 作为声波测试钻孔,采用 FSS-40 单孔测试换能器按一发双收方式分段进行了岩体声波探测,结果见图 3。图 3 表明,各岩组以及相同岩组、不同风化卸荷带岩体的声波纵波速度差异都较大。在采石场露头区,采用 25 kHz 夹心式换能器和洞壁平透法按一发一收方式对不同风化带的露头进行了声波测试,结果见表 2。

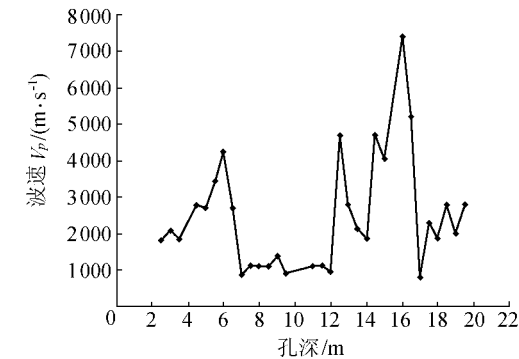


图 3 ZK396 岩体声波纵波速度沿孔深的变化曲线

Fig.3 Variation of velocity of longitudinal wave in rockmass with depth of boring ZK396

试验结果显示:兰右山全风化粉砂质泥岩动阻力为 2~5 MPa,为中等性能的岩土体,在地下水作用下,兰右山中等风化泥岩的力学性能大大降低,PANDA 试验动阻力为 1 MPa 左右,相当于地下水作用下活化的岩体的不固结不排水强度黏聚力 c 为 50 kPa 左右,力学性能极差,说明爆破松动、风化及水的作用会使泥岩岩体活化,力学强度急剧降低。

3 岩体力学参数的经验分析法

经验分析法中的 RMR 和 Hoek-Brown 方法是确定岩体力学参数一种比较有效的方法。为此,本文采用上述 2 种经验方法分析兰右山边坡岩体力学参数。

3.1 岩体 BQ 值和 RMR 值的确定

GB 50218—94《工程岩体分级标准》^[1]规定采用定性与定量相结合的方法进行工程岩体分级。定量方法应采用声波测试手段,并结合岩块强度试验来确定岩体物理力学性质;BQ 分级以岩石坚硬程度和岩体完整程度来衡量岩体基本质量,而岩石坚硬程度按岩石单轴饱和抗压强度来划分,完整程度用岩体完整性系数来

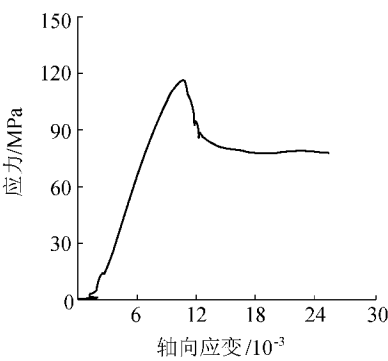


图 1 含砾砂岩三轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.1 Strain-stress curve for pebbled sandstone

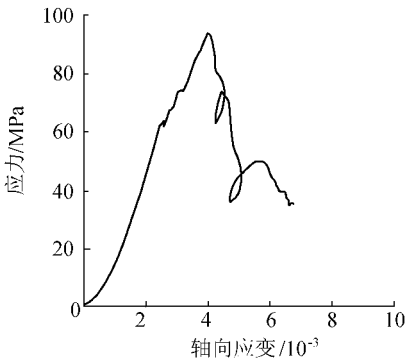


图 2 石英砂岩单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.2 Strain-stress curve for quartz sandstone

表 2 岩体纵波速度测试结果

Table 2 Test results of velocity of longitudinal wave in rockmass m/s					
岩性	露头 1	露头 2	露头 3	露头 4	露头 5
中风化带粉砂质泥岩	1868	1657	1407	1173	2065
石英砂岩卸荷带	1993	1734	1391		
石英砂岩	3018	2977	3130	2922	

2.2 软层现场 PANDA 测试

由于兰右山地段边坡岩体软层发育,并控制着边坡岩体稳定性,因此研究软层岩体的力学性质具有重要意义。软层岩体力学试验非常困难,但掌握其力学性质又非常必要。为此,利用法国生产的 PANDA 仪(其穿透能力达 4~6 m,抗力达 20~30 MPa)进行了现场试验,试验结果如图 4 和图 5 所示。

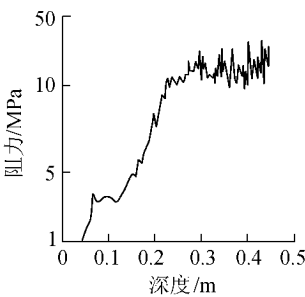


图 4 全风化泥岩天然状态下 PANDA 试验曲线

Fig.4 Curve of PANDA testing for completely weathered silty mudstone under natural condition

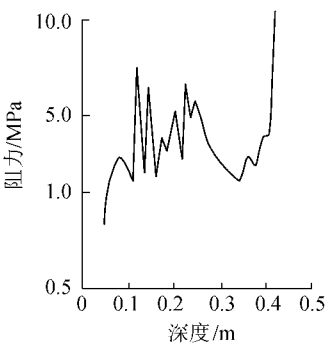


图 5 中等风化泥岩地下水状态下 PANDA 试验曲线

Fig.5 Curve of PANDA testing for middle weathered silty mudstone under groundwater condition

表示. Bieniawski^[2]的地质力学评价方法(RMR)采用岩石单轴抗压强度、岩石质量指标 RQD、结构面间距、结构面性状、地下水状态、节理面产状与边坡的关系 6 个因素权值来评价岩体的质量. 本文结合兰右山边坡岩体的工程实际, 先用前 5 个因素评定权值, 再按各特征岩体权值大小评价岩体级别.

研究表明《工程岩体分级标准》确定的 BQ 值与地质力学分级方法确定的 RMR 值基本相关, 利用《工程岩体分级标准》确定的 BQ 值来估算 RMR 值是可行的. 因此, 基于 RMR 指标体系以及《工程岩体分级标准》确定了岩体基本质量值和地质力学权值, 并利用 Hoek-Brown 准则推求了兰右山边坡岩体力学参数, 见表 3.

表 3 兰右山边坡岩体 BQ 和 RMR 值
Table 3 BQ value and RMR value for rockmass of Lanyoushan slope

岩 性	风化程度	$V_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	K_v	R_c/MPa	BQ 值	RMR 值
粉砂质泥岩	全	1 256	2 200	0.33	0.5	174	15
	中	1 855	2 500	0.55	4.1	242	18
	弱	1 734	2 200	0.62	6.2	263	23
石英砂岩	全	1 820	4 500	0.16	35.8	263	23
	中	3 240	4 500	0.52	67.6	423	53
	弱	3 012	4 500	0.45	104.6	414	55

注: V_p 表示纵波速度; V_s 表示横波速度; K_v 表示波速比; R_c 表示岩石单轴抗压强度.

3.2 Hoek-Brown(HB)强度准则

Hoek 等^[3]根据岩体特征方面的理论和实践经验确定了岩体破坏时主应力之间的关系式

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \tag{1}$$

式中: σ_1 ——岩体破坏时的最大主应力; σ_3 ——岩体破坏时的最小主应力; σ_{ci} ——岩石试样的单轴抗压强度; m_b, s, a ——岩体材料常数, 取决于岩体特征. Hoek 等^[3]还建议根据 Bieniawski 岩体分类指数来确定岩体强度指数(GSI), 并提出用 GSI 来预测 HB 准则参数 m_b, s, a , 即

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp[(I - 100)/28] \\ s = \exp[(I - 100)/9] \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-I/15} - e^{-20/3}) \end{cases} \tag{2}$$

式中 I 为岩体强度指数. 完整岩石的 m_i 值可通过 m_i 值表^[4]查得.

3.3 岩体抗压、抗拉强度的估算

岩体抗压强度 σ_{cm} 可通过假定式(1)中的 $\sigma_3 = 0$ 求得, 即

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a \tag{3}$$

岩体抗拉强度 σ_{tm} 可通过假定式(1)中的 $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{tm}$ 求得, 即

$$\sigma_{tm} = -s \sigma_{ci} / m_b \tag{4}$$

3.4 岩体变形模量的估算

岩体变形模量是岩石工程研究中的重要力学参数, 通常根据岩体分类并利用经验公式进行估算.

Hoek 等^[5]建立了岩体变形模量 E_m 与 RMR 值的关系式

$$E_m/\text{GPa} = 2R - 100 \tag{5}$$

式中 R 为 RMR 值.

Serafim 等^①建议采用关系式

$$E_m/\text{GPa} = 10^{(R-10)/40} \tag{6}$$

Hoek 等^[3]通过进一步研究, 给出了 $\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}$ 时的修正公式

$$E_m/\text{GPa} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(I-10)/40} \tag{7}$$

这些关系式已得到工程界的广泛应用和验证.

① SERAFIM J L, PEREIRA J P. Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. In: Proc Int Symp Eng Geol & Underground Construction, Lisbon: 1983. 33—44.

3.5 岩体抗剪强度参数的确定

边坡工程设计与研究中广泛采用 Mohr-Coulomb(MC)强度准则

$$\sigma_1 = \frac{2c}{1 - \sin\varphi} + \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\sigma_3 \tag{8}$$

来确定岩体的黏聚力 c 与内摩擦角 φ .

4 岩体力学参数建议值

根据前述 BQ 与 RMR 值以及 Hoek-Brown 与 Mohr-Coulomb 强度准则 ,提出了兰右山边坡岩体力学参数的建议值^[6] ,如表 4 所示.

表 4 兰右山边坡岩体力学参数建议值

Table 4 Suggested values of rockmass mechanical parameters of Lanyoushan slope

岩 性	风化程度	$\sigma_{ci}/$ MPa	RMR 值	m_i	$E_m/$ GPa	MC 强度准则		HB 强度准则		$\sigma_{cm}/$ MPa	$\sigma_{tm}/$ MPa
						$c/$ MPa	$\varphi/(^{\circ})$	$c/$ MPa	$\varphi/(^{\circ})$		
粉砂质泥岩	全	0.5	15	4	0.1	0.008	16	0.06	7	0.022	0.00
	中	4.1	18	4	0.3	0.070	17	0.13	14	0.190	0.00
	弱	6.2	23	4	0.5	0.120	18	0.16	17	0.320	0.00
石英砂岩	全	35.8	23	17	1.4	1.400	28	0.40	45	4.600	0.00
	中	67.6	53	17	10.9	3.500	37	0.90	57	14.300	0.13
	弱	104.6	55	19	12.0	5.100	38	1.10	61	21.200	0.15
含砾砂岩	弱	30.0	20	6	0.9	0.650	20	0.29	31	1.000	0.00

5 结 语

本文在考虑影响岩体力学参数的诸多地质因素的基础上 ,基于单轴压缩试验、三轴压缩试验、岩体现场声波测试和软层现场 PANDA 测试结果 ,求出了兰右山边坡岩体基本质量值和地质力学权值 ,并按 Hoek-Brown 强度准则估算了岩体力学参数 ,从而为兰右山边坡工程设计和施工时岩体力学参数的选取提供了重要依据.

参考文献：

[1] GB 50218—94 工程岩体分级标准[S].

[2] BIENIAWSKI Z T. Rock mass classification in rock engineering[A]. In : BIENIAWSKI Z T ,eds. Explor for Rock Eng ,Proc of the Symp [C]. Cape Town : Balkema ,1976. 97—106.

[3] HOEK E ,BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Intl J Rock Mech & Mining Sci & Geomechanics Abstracts ,1997 , 34(8) :1165—1186.

[4] HOEK E ,MARINOS P G ,MARINOS V P. Characterisation and engineering properties of tectonically undistributed but lithologically varied sedimentary rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2005 42(2) : 277—285.

[5] HOEK E ,BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. J Geotech & Geoenv Eng ,ASCE ,1980 ,106(GT9) :1013—1035.

[6] 巫德斌 ,徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2005 33(1) 89—93.

Study on rockmass mechanical parameters for Lanyoushan slope

LI Jian¹ , XIE Shou-yi² , WU De-bin² , XU Wei-ya²

(1. Jiangsu Transportation Survey and Design Institute , Nanjing 210005 , China ;
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The BQ value and RMR weight of rockmass of the Lanyoushan slope were obtained by uniaxial compression test , triaxial compression test , in-situ acoustic wave testing of rockmass , and in-situ PANDA testing of soft strata. Then , the mechanical parameters of rockmass were estimated by using the Hoek-Brown strength criterion. The results provide a basis for engineering design and construction of the Lanyoushan slope.

Key words :Lanyoushan slope ; rockmass mechanical parameter ; Hoek-Brown strength criterion