

文章编号: 0451-0712(2005)03-0061-04

中图分类号: P642.2

文献标识码: B

# 宁杭高速公路东庐山超高边坡 岩体特征分析

徐春明, 汪春桃

(江苏省交通规划设计院 南京市 210005)

**摘 要:** 通过对东庐山的岩石成因、结构构造以及物理力学性质等特征的研究, 指出该类岩石在变形特征上可视作均质弹性各向同性体。依据边坡区岩体构造的基本特征、空间产状、原生结构面性质及分布规律, 对东庐山边坡岩体工程地质岩组和岩体结构类型进行划分。在此基础上, 建立东庐山边坡岩体的地质模型。

**关键词:** 宁杭高速公路; 岩体特征; 工程地质岩组; 岩体结构类型; 地质模型

东庐山属低山丘陵区, 是秦淮河和新桥河水系的分水岭。区内为亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明。东庐山超高边坡段位于宁杭高速公路溧水段东庐山西南坡, 线路走向约  $130^\circ$ , 起迄里程桩号为 K50+280~K51+870, 边坡型式为 8 级台阶式边坡, 从路基到第八级坡顶高差达 80 m, 是宁杭高速公路江苏省境内规模最大的岩石边坡。

该超高边坡段原始地形、地貌表现为上陡下缓, 形似“靠背椅”。陡坡坡顶高程为 153.2 m, 坡度角为  $30^\circ \sim 35^\circ$ ; 缓坡处高程为 75~90 m, 坡度角为  $20^\circ$  左右, 路基在缓坡通过。

地下水有潜水和基岩裂隙水, 钻探期间简易水文观测显示, 潜水位埋深基本稳定。基岩裂隙水受地表水和地下潜水的补偿, 一般出水量较小。

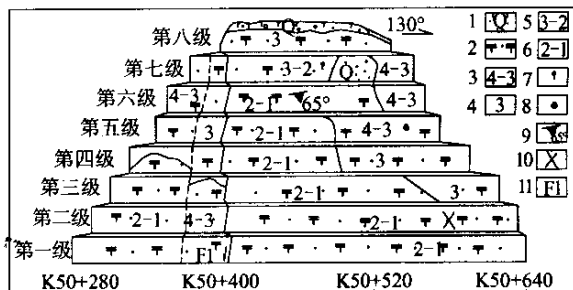
## 1 工程地质特征

中生代是本区最重要的地质变革时期, 岩浆活动频繁而强烈, 东庐山一带在这一时期形成轴向近于南北向的一系列小型褶皱, 伴生多组断裂和裂隙。

根据工程地质调绘, 断裂主要有 F1、F2、F3 和 F4 等, 其中 F1 分布于 K50+380~K50+410 之间, 产状  $280^\circ \sim 305^\circ \angle 61^\circ \sim 83^\circ$ , 具正断层性质, 与线路近于直交。断层带上窄下宽, 呈“喇叭”形, 由于受长期自然风化的作用, 形成顺坡倾斜的“圈谷”地貌, 断层带内岩石呈全~强风化状态。节理裂隙十分发

育, 主要有 4 组, 走向分别为  $350^\circ \sim 10^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 、 $295^\circ \sim 325^\circ$ 、 $270^\circ \sim 285^\circ$ , 其中  $25^\circ \sim 35^\circ$  一组最为发育。

东庐山是在火山作用后期成岩过程中褶皱而成, 组成山体的岩石有侏罗系上统龙王山组安山质熔结角砾岩以及大王山组粗安质凝灰角砾岩和粗安质熔结(角砾)凝灰岩。其中, 安山质熔结角砾岩分布于东庐山的西北坡角, 即在 K50+330 以西, 基本处在边坡外侧; 粗安质凝灰角砾岩分布于 K50+330~K50+570 路段北侧约 10 m, 南侧至坡角的范围内, 岩石和砾石成分有火山岩、泥质粉砂岩等, 熔浆及火山灰胶结, 胶结中等, 强度较低, 易风化; 粗安质熔结(角砾)凝灰岩, 以熔岩成分为主, 强度高, 耐风化, 组成东庐山岩土主体。地表大部分为残坡积层覆盖, 如图 1 所示。



注: 1 为第四系残坡积层; 2 为粗安质熔结(角砾)凝灰岩; 3 为全~强风化层; 4 为强风化层; 5 为强~中风化层; 6 为中等~微风化层; 7 为裂隙渗水处; 8 为球状风化体; 9 为流路面产状; 10 为“x”节理; 11 为断层及编号。

图 1 东庐山台阶式边坡示意

万方数据

收稿日期: 2005-01-10

各工程地质层的岩性特征分述如下。

(1)残坡积层(4 层):灰黄、灰棕色,由粘性土、全~强风化岩块以及球状风化体等组成,层厚 1~4 m;瑞利面波波速  $V_R=200\sim 250$  m/s,工程等级为Ⅲ级。

(2)全风化粗安质熔结(角砾)凝灰岩( $13_{cl}-4$  层):灰黄、棕灰色,砂土夹碎块,手捏易碎,呈松散状; $V_R=350\sim 500$  m/s,工程等级为Ⅲ级。

(3)强风化粗安质熔结(角砾)凝灰岩( $13_{cl}-3$  层):浅黄、棕灰色,假斑状结构,块状构造,含角砾,角砾具熔蚀现象,分布不均,裂隙发育,岩石较破碎,敲击声闷; $V_R=550\sim 600$  m/s,工程等级为Ⅳ级。

(4)中等风化粗安质熔结(角砾)凝灰岩( $13_{cl}-2$  层):青灰、棕灰色,块状、角砾状构造,假斑状结构,主要成分有长石、角闪石和黑云母等,裂隙较发育,敲击声脆;单轴抗压强度  $R_a=27.5\sim 47.0$  MPa,平均值为 38.6 MPa,工程等级为Ⅴ级。

(5)微风化粗安质熔结(角砾)凝灰岩( $13_{cl}-1$  层):深灰、青灰色,岩石坚硬,裂隙不发育,敲击声清脆;单轴抗压强度  $R_a=68.4\sim 130$  MPa,平均值为 110.5 MPa,工程等级为Ⅵ级。

强、中等风化及微风化工程地质层中节理裂隙比较发育,基本可归纳为 4 组,产状分别为  $182^\circ\sim$

$210^\circ\angle 55^\circ\sim 70^\circ$ 、 $210^\circ\sim 240^\circ\angle 40^\circ\sim 60^\circ$ 、 $260^\circ\sim 285^\circ\angle 61^\circ\sim 82^\circ$ 和  $295^\circ\sim 325^\circ\angle 75^\circ\sim 83^\circ$ 。裂隙密度较大(3 条/m~9 条/m),一般延伸 2~3 m,裂面光滑平直,基本无充填物,在中~微风化层中部分紧闭。不同方向裂隙互相切割,岩体往往被切成形态各异、大小不等的岩块,在第六级和第二级边坡坡面上有“×”节理。 $210^\circ\sim 240^\circ\angle 40^\circ\sim 60^\circ$ 一组裂隙,倾向与坡面交角为  $10^\circ\sim 20^\circ$ ,裂面波状起伏,局部充填 2~3 mm 厚的粘性土,第七级以下各级边坡均有分布,这组裂隙可能是成岩过程中形成的流理。

第七级边坡中部的局部有裂隙渗水现象,第六级和第五级边坡东段全~强风化层中球状风化体分布普遍。

2 岩石特征

2.1 成分和结构构造

粗安质熔结(角砾)凝灰岩:以灰、紫灰色为主,新鲜面呈深灰色,风化后呈黄褐色、紫灰色;具块状、流层状(流理)、流带状构造,风化后呈薄板状,具假斑状结构;岩石主要由晶屑、塑性岩屑和基质组成,化学成分主要有  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、CaO、MgO、FeO、 $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$  和  $Na_2O$ (表 1)。

表 1 粗安质熔结(角砾)凝灰岩成分

晶屑						塑性岩屑/%			基质/%	主要化学成分/%				
斜长石		黑云母		辉石		浆屑	溶岩条	微晶屑	塑性玻屑脱玻化长英质混溶体	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO+MgO	FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O
含量/%	粒度/mm×mm	含量/%	粒度/mm×mm	含量/%	粒度/mm×mm									
20~25,局部35	0.2×0.8~1×2	8~10,局部10~15	0.2×0.5~0.5×1.0	1~5,局部10	0.2×0.5~0.8×0.9	10~30			30~50	63.87	14.26	6.85	4.73	7.36

从表 1 可以看出,粗安质熔结(角砾)凝灰岩中外来物质很少,塑性岩屑与岩石总体成份一致,且分布均匀,属溢流相,是以熔岩成分为主的溶离作用的产物。纵横向岩性比较一致,物质成分、结构构造变化不大(指新鲜岩石)。

2.2 物理-力学性质

岩石成分、结构构造决定着岩石的物理-力学性质,粗安质熔结(角砾)凝灰岩是以熔岩成分为主的岩石,具假斑状结构,基质脱玻化,而且富硅( $SiO_2$  含量 63.87%),这就决定了岩石整体性好、强度高,在变形特征上可视为均质弹性各向同性体。

岩石坚硬,敲击声清脆,钢刀不易刻动,硬度为 5 左右。岩石耐风化,全~中风化层厚度一般在 1~

2 m,其下属微~未风化岩体。强、中、微风化层岩石的含水量、密度、抗压及抗剪强度指标详见表 2。

表 2 显示,含水量、吸水率随风化程度的加深而增加,而岩石密度、抗压强度是随风化程度的减弱而加强。可见,自然风化对岩石物理-力学性质影响较大。其中微、中等风化层岩石含水量、吸水率较低,密度较大,强度高,是东庐山边坡的主体。

2.3 岩体力学参数试验

采取高边坡区主体岩石熔结(角砾)凝灰岩进行力学参数的试验。试验结果见表 3 和表 4。

3 工程地质岩组和岩体结构类型划分

3.1 工程地质岩组划分

表 2 粗安质熔结(角砾)凝灰岩物理-力学指标

风化层名称	层号	物理指标			力学指标				
		含水量 $\omega$ %	密度 $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	吸水率 $\omega_r$ %	单轴抗压强度 $R_a$ /MPa			抗剪强度	
					天然状态	饱水状态	点荷	凝聚力 $c$ MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)
强风化层	13 <sub>cl</sub> —3	4.1~8.2	2.1~2.3	2.7~5.5	6.7~15.2		3.7~21.2		
中等风化层	13 <sub>cl</sub> —2	2.1~4.2	2.4~2.6	2.4~3.6		27.5~47.0			
微风化层	13 <sub>cl</sub> —1	0.5~1.2	2.5~2.7	0.3~1.7		68.4~130		5.4~13.3	19.0~28.6

表 3 单轴压缩试验描述、试验条件及试验结果

编号	岩性描述	风化程度	试件尺寸(平均值)/mm		天然密度	容重	弹模/GPa	泊松比	变形模量	峰值应力	动弹模	剪切模量
			$D$	$H$	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>			MPa	MPa	MPa	MPa
1	凝灰岩	微风化	72.85	144.44	23.7	25.1	28.314	0.17	20.17	66.251	64.5	27.6
2	凝灰岩	微新	73.42	143.85	25.8	26.2	41.003	0.16	23.50	115.59	73.5	31.7
3	角砾凝灰岩	中等风化	71.78	144.14	23.9	25.4	5.766	0.22	3.04	24.208	33.3	13.6
4	角砾凝灰岩	微风化	72.72	144.23	24.0	25.6	16.569	0.21	9.65	41.456	37.1	15.3

表 4 三轴压缩试验描述、试验条件及试验结果

编号	岩性描述	风化程度	试件尺寸(平均值)/mm		围压取值范围	凝聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)
			$D$	$H$	MPa		
1	凝灰岩	微风化	49.60	99.09	5~40	7.14	52.4
2	凝灰岩	微新	49.65	95.92	5~40	26.31	57.1
3	角砾凝灰岩	中等风化	49.27	94.32	5~40	0.63	46.4
4	角砾凝灰岩	微风化	49.46	95.63	5~40	2.73	49.7

东庐山边坡岩体主要为粗安质熔结凝灰岩、粗安质熔结角砾凝灰岩和安山质熔结角砾岩。依据边坡区岩体构造的基本特征、空间产状、原生结构面性质及分布规律,对东庐山边坡岩体工程地质岩组进行了划分,见表 5。

表 5 边坡岩体工程地质岩组分类

岩组类别	岩组亚类	岩组主要特性
凝灰岩岩组	微风化亚组	岩体呈新微风化,岩石较坚硬~坚硬,岩体完整。
	中风化亚组	岩体呈中风化,岩石较软弱~较坚硬,岩体较完整。
	强风化亚组	岩体呈强风化,岩石软弱,岩体破碎。
	全风化亚组	呈土状,夹碎块,强度低。
熔结角砾岩岩组	微风化亚组	岩体呈新微风化,岩石坚硬,岩体完整。
	中风化亚组	岩体呈中风化,岩石较坚硬,岩体较完整。
	强风化亚组	岩体呈强风化,岩石较软弱,岩体破碎。
断层破碎岩岩组		存于构造带内的破碎岩,胶结较差,属软岩类,地形上约呈风化凹槽

根据野外调查、结合已有熔结凝灰岩、熔结角砾凝灰岩岩体试验成果,综合计算东庐山边坡段各工程地质岩组的岩体基本质量指标  $BQ$  和  $RMR$  值

(表 6)。

表 6 东庐山边坡段工程地质岩组基本质量指标值

岩组	$R_c$	$V_r$	$V_m$	$V_R$	$K_v$	$BQ$	$RMR$
微风化亚组	67	5 500	4 650	1 000~1 200	0.71	471	63
中风化亚组	24	4 800	3 593*	800~900	0.56	308	35
强风化亚组	5	4 800	2 747*	600~700	0.33	190	14

注: \* 标记数值为根据瑞利面波波速值类比的估算值。

3.2 岩体结构类型划分

东庐山段边坡岩体以块状结构为主,块状结构岩体中发育的结构面主要为原生结构面和低序级而遍布的构造结构面(如节理等),断层稀少且规模小。结构面次生演化不显著,结构体岩石新鲜。根据结构面发育程度,块状结构又可分为 3 个亚类:整体状结构、块状结构和菱(裂)块状结构。块状结构岩体受到强烈的构造变形或次生演化作用而进一步形成碎裂结构、散体结构岩体(表 7)。

4 东庐山岩体地质模型

地质模型的主要特征标志是岩体结构,同时包括岩组特征和赋存环境特征。东庐山边坡岩体经受

表 7 东庐山段边坡工程岩体结构分类

岩组名称	风化特征			
	微风化	中(弱)风化	强风化	全风化
凝灰岩岩组	整体状—块状结构	菱(裂)块状结构	碎裂结构	散体结构
熔结角砾岩岩组	整体状—块状结构	菱(裂)块状结构	碎裂结构	散体结构
断层破碎岩岩组	碎裂结构—散体结构			

的内动力作用过程为轻微构造运动,表现为东庐山边坡岩体断层不发育、构造节理较小。外动力作用改造过程包括剥蚀作用、风化作用,剥蚀作用使岩体卸荷,改变岩体表部赋存环境,产生各种卸荷裂隙,坡顶存在卸荷裂隙切割的危岩块体;风化作用在东庐山边坡岩体中产生风化裂隙的物理风化与产生粘土矿物的化学风化都有发育,其中对东庐山边坡工程产生重要影响的是两者共同作用产生的球状风化特征,风化球在边坡段普遍发育。岩体结构主要为块状结构,表层呈碎裂结构岩体,深部为完整或断续结构岩体,它们之间呈渐变特征。表层碎裂结构岩体,易于风化残留或崩落形成滚石。边坡岩体赋存环境:地下水以裂隙水为主,地应力以自重应力为主。上述研究表明,东庐山边坡岩体的地质模型属块状结构地质体边坡。

东庐山边坡岩体的地质模型显示:

(1)东庐山边坡岩体的整体自稳能力较高,其稳定性主要受控于临空延展较长的结构面,东庐山边坡岩体主要的软弱结构面 F1 断层走向与坡体走向近于垂直、产状为  $110^{\circ} \angle 15^{\circ}$  的错动面倾向与坡面相反,切割形成的块体稳定,不构成影响稳定的重大问题;

(2)边坡结构主要由硬性结构面及结构面切割形成的块体碎裂结构,整体上东庐山边坡岩体属多节理切割的块状结构岩体,东庐山段边坡整体破坏机制和评价采用等效连续介质模型确定岩体的力学强度,采用圆弧或非圆弧滑面的刚体极限平衡计算方法研究边坡岩体的整体稳定性;

(3)节理切割是东庐山段边坡岩体的主要特征,东庐山段边坡稳定性的另一主要问题为块体失稳,东庐山段边坡岩体局部块体破坏机制以沿结构面的

剪切滑移为主,评价主要力学参数取决于结构面的力学强度,采用关键块体理论分析计算边坡岩体的局部稳定性;

(4)东庐山边坡区滚石由风化残留、风化岩体崩落形成,主要发育于坡面浅表层,滚石的存在对东庐山段岩石边坡工程有重大影响,是东庐山段公路边坡安全施工、运行必须重视的一个问题。

## 5 主要结论

(1)通过对东庐山边坡岩体岩石学特征、工程地质特征及物理-力学参数试验成果分析,岩体具假斑状结构,纵横向岩性比较一致,岩石整体性好、强度高,属单元结构,在变形特征上可视为均质弹性各向同性体。

(2)依据边坡区岩体构造的基本特征、空间产状、原生结构面性质及分布规律,对东庐山边坡岩体工程地质岩组进行划分,划分为凝灰岩岩组、熔结角砾岩岩组和断层破碎岩岩组等 3 个大组,又按各岩组风化等级分出全、强、中、微等亚组。

(3)根据各岩组结构面发育程度,确定东庐山段边坡岩体以块状结构为主,块状结构又可分为整体状结构、块状结构和菱(裂)块状结构 3 个亚类。块状结构岩体受到强烈的构造变形或次生演化作用而进一步形成碎裂结构、散体结构岩体。

(4)建立东庐山块状结构岩体边坡地质模型。东庐山边坡岩体的整体自稳能力较高,其稳定性主要受控于临空延展较长的结构面。边坡结构主要为硬性结构面及结构面切割形成的块体碎裂结构。东庐山段边坡岩体局部块体破坏机制以沿结构面的剪切滑移为主,采用关键块体理论分析计算边坡岩体的局部稳定性。东庐山边坡区滚石由风化残留、风化岩体崩落形成,主要发育于坡面浅表层,是东庐山段公路边坡安全施工、运行必须重视的一个问题。

## 参考文献:

- [1] 江苏省交通规划设计院. 宁杭高速公路溧水段施工图设计工程地质勘察报告[R]. 2000.
- [2] 河海大学, 江苏省交通规划设计院. 宁杭高速公路溧水东庐山段边坡工程稳定性研究报告[R]. 2001.