

文章编号: 0451-0712(2005)03-0056-05

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

# 宁杭高速公路兰右山深路堑 高边坡整体稳定性分析

汪春桃, 李端璐, 赵为民

(江苏省交通规划设计院 南京市 210005)

**摘 要:** 南京~杭州(宁杭)高速公路(江苏段)线路近南北向穿越宜兴市兰右山。兰右山山体走向近东西向, 为剥蚀低缓丘陵。深路堑西侧边坡最大挖深约 40 m, 设计边坡为台阶式, 每级边坡高度为 8 m。该段路堑边坡主要为岩质边坡, 其主要岩组为泥盆系五通组石英砂岩夹泥岩, 岩石强度一般较高, 岩层产状平缓, 具中~厚层结构类型。西侧边坡泥岩层面稍内倾。在分析深路堑工程地质特征、边坡稳定性影响因素及边坡变形破坏机理的基础上指出: 该段西侧高边坡一级台阶为泥岩, 二级以上台阶为石英砂岩, 边坡呈“上硬下软”双层结构。由于泥岩岩性特殊, 具有浸水软化、膨胀、崩解、易风化等特征, 在地下水诱因下, 这种双层结构类型对边坡稳定性十分不利。为了保证高速公路运营安全, 宜采取主动防护措施, 如坡面封闭隔水处理、预应力锚索、砂浆锚杆框架等防护方案, 以防止发生边坡深层破坏。

**关键词:** 宁杭高速公路; 兰右山; 深路堑; 岩质边坡结构面; 边坡变形破坏机理

兰右山位于江苏省宜兴市洑东镇, 东临太湖, 为宜兴市南山、白泥山向东延伸之余脉。山体走向近东西向, 山脊海拔高程约为 45~60 m, 由西向东逐渐降低。山体北坡较陡, 南坡较缓, 主要为泥盆系砂岩夹泥岩组成的剥蚀低缓丘陵。区内属亚热带季风气候区, 气候温和、湿润, 冬冷、夏热, 四季分明。

宁杭高速公路近南北向(N20°W)穿越山体, 深路堑(挖方)段长度为 500 m, 幅宽 34.5 m(路堑拉槽宽度约 40 m), 最大挖深约 40 m。

该路堑两侧边坡均为岩质边坡, 其中左幅(东)边坡高 17 m, 右幅(西)边坡高 40 m。设计边坡为台阶式, 每级边坡高度为 8 m, 一级边坡坡率为 1:1.0; 二级以上边坡坡率为 1:1.25<sup>[1]</sup>。

地质勘察期间发现, 该段断裂构造复杂, 特殊性岩土层——粉砂质泥岩层厚度大, 在垂直方向上层位多, 其空间分布特征与断裂构造密切相关。

路堑开挖后, 在详勘工作的基础上, 对边坡及路床段再次开展大比例尺地面地质调绘工作, 进一步研究路堑段: (1) 岩质边坡主要岩组岩性、强度及分布规律; (2) 岩体主要结构面(断裂、节理、层理)的类型、产状、延展情况、闭合程度及空间分布特征; (3)

主要结构面与边坡面(临空面)的空间组合关系; (4) 基岩裂隙赋水性特征及控制规律。在此基础上, 对路堑边坡稳定性影响因素及边坡变形破坏机理进行了分析。

## 1 地质构造

兰右山为轴向近于东西向的“地垒式”构造, 在山体南、北两侧均有走向为东西向的张性断裂通过<sup>[2]</sup>。山体部位相对抬升, 南、北两侧相对下降, 地貌上表现为剥蚀残丘。该段第四系土层厚度仅为 1 m 左右, 下伏基岩有侏罗系上统龙王山组火山凝灰岩夹泥质砂岩(J<sub>3L</sub>)、侏罗系上统西横山组含砾泥质砂岩(J<sub>3x</sub>)、泥盆系上段(D<sub>3</sub>)石英砂岩和岩屑石英砂岩夹粉砂质泥岩。地层产状平缓, 走向近东西向, 向南微倾, 倾角 8°~10°(图 1)。

## 2 工程地质岩组岩性与分布

1 层(Q<sub>4</sub>): 棕黄色亚粘土、粘土, 可塑~硬塑状态, 有时夹风化岩碎块, 层厚小, 仅为 0.5~1.5 m。3 层(J<sub>3L</sub>): 浅棕红色含卵、砾石粉砂岩, 钙泥质胶结, 厚层状结构<sup>[3,4]</sup>; 自上而下, 卵、砾石含量明显增多,

万方数据

收稿日期: 2005-01-10

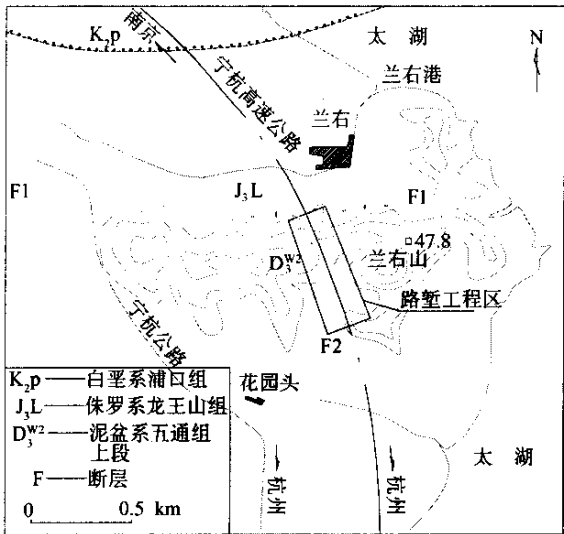


图 1 兰右山路堑地质平面示意

砾石粒径在 5~10 cm 之间,其成份主要为石英砂岩,岩样天然抗压强度为 5~10 MPa(经验值);该层

见于右侧边坡第四级台阶(K144+750)。3a 层(J<sub>3</sub>L): 砖红色含凝灰质、粉砂质泥岩(见于右侧北段 K144+600);其岩样天然抗压强度<5 MPa,为极软质岩石,浸水软化,为非水稳性岩石。4 层(D<sub>3</sub>):灰白色石英砂岩,中~厚层状结构,硅质胶结,质地坚硬,锤击有回弹;岩样饱水抗压强度为 120~180 MPa,属坚硬岩石,抗风化能力强;石英砂岩中,有时夹岩屑砂岩,灰紫色,中厚层~薄层状结构,岩样饱水抗压强度为 50~80 MPa,属坚硬~较硬质岩石。4a 层(D<sub>3</sub>):粉砂质泥岩,灰黄绿、灰黄色,中~薄层状,具层理,质地较软,手指甲可划痕;层厚可达 3~10 m,单层厚度为 50~80 cm;岩样天然抗压强度为 8~28 MPa,属较软质岩石,饱水抗压强度为 3.4~4.5 MPa,软化系数约为 0.1~0.2,为非水稳性岩石;泥岩膨胀性试验(侧向约束)的膨胀力为 24~32 kPa,膨胀率为 0.55%~1.83%,具较弱膨胀性;该层在当地常作为陶瓷业原料(陶土)而被采掘,俗称“白泥”(表 1)。

表 1 岩样物理力学指标统计<sup>[4]</sup>

层 号	岩组名称	风化程度	岩样统计	物理性质指标			单轴抗压强度/MPa	
				天然含水量 ω %	密度 ρ <sub>b</sub> g/cm <sup>3</sup>	吸水率 ω <sub>r</sub> %	天然状态	饱水状态
2	含砾泥质砂岩	强风化	(经验值)				<5	
3	凝灰质砂岩(J <sub>3</sub> )	中等风化	平均值	2.5	2.47		69.8	94.7
			统计样本值	12	12		5	7
3a	泥质砂岩(J <sub>3</sub> )	中等风化	平均值	7.26	2.37	0.31	3.29	
			统计样本值	18	30	5	23	
4	石英砂岩(D <sub>3</sub> )	中等~微风化	平均值	0.33	2.61	0.19		129.3
			统计样本值	23	23	20		16
4a	粉砂质泥岩(D <sub>3</sub> )	强风化	平均值	17.3	2.16		<5	崩解
		中等~微风化	平均值	2.7	2.53	0.14	9.4	4.5
			统计样本值	7	7	1	6	5

3 路堑岩质边坡结构面特征

兰右山第四系覆盖层厚度小,路堑边坡主要为岩质边坡。其整体稳定性主要取决于结构面的性质及其空间组合关系,以及结构体强度及其立体形态。

3.1 场区主要断裂构造

3.1.1 纵向断层 F1

横贯兰右山北坡,见于 K144+660、K144+680 边坡处。该断层规模大,延展性好,走向近东西向(N85°E)。断层面倾向北,倾角 70°~80°。断层上盘为侏罗系火山凝灰岩、凝灰质砂岩;下盘为泥盆系五通组石英砂岩夹泥岩。上盘相对下降,兼有水平位移分量,其性质属于“平移—正断层”。

该处断裂破碎带宽度可达 2~5 m,断层镜面擦痕清晰可见。其中断层角砾岩、断层泥发育,结构较

松散,质地软,呈土状,锹可挖掘。断层角砾成份混杂,有石英砂岩、凝灰质砂岩及粉砂质泥岩等。这一特征,反映断层上、下 2 盘位移量较大。

在地表,沿断层走向可追踪长度大于 100 m。推测该断层为近东西向丁蜀中生代断陷盆地南部边界断裂,即区域性断裂——“白泥山~兰右山断裂”之一。该断层走向与线路轴线近于直交,对边坡稳定性影响较小(图 2)。

3.1.2 横向断层 F2

地质调绘发现,F2 断裂可分成编号为 F2-1 和 F2-2 的 2 条断层。

(1)F2-1 断层。见于兰右山右边坡山脊(K144+720)处。断层走向近南北向(NW5°),与线路纵轴线交角近 15°;断层面陡立略向东倾斜,倾角 85°;断

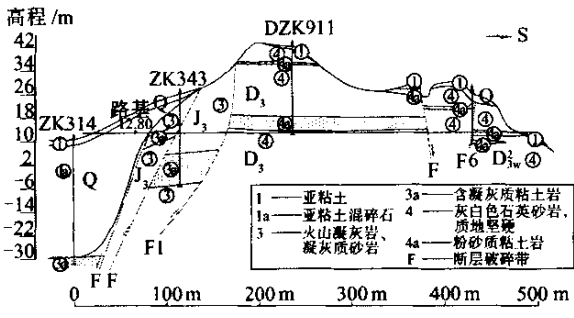


图2 兰石山路堑地质纵断面示意

层东侧为厚层泥岩(已采完),西侧为厚层石英砂岩,初步判断为“正—平移断层”。该断层右旋错断F1断层,水平向错距达数米。

(2)F2-2 断层。分布于线路纵轴线附近,见于右幅边坡(K144+844)处。断层西侧为厚层泥岩;断层东侧为厚层石英砂岩。断层面走向 350°,向东南陡倾。

F2 断裂结构面较平直,结合程度较好(钙质胶结),如图 3 所示。

### 3.2 层理与节理

(1)砂岩中节理较发育,节理间距20~30cm。

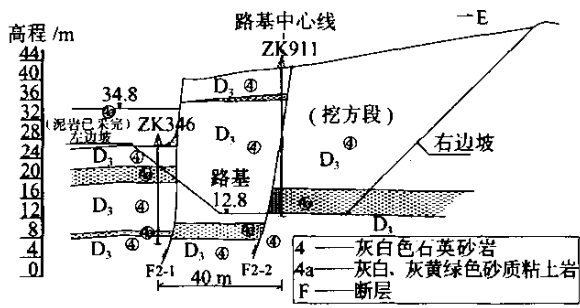


图3 兰右山路堑地质横断面示意

据统计,砂岩中节理按走向分为 3 组,分别为北东、北西和北东东向。节理面陡倾,倾角 60°~88°。其性质多为张性节理,节理面粗糙、微张 1~2 mm,延展性较差。

(2)粉砂质泥岩中观察到 3 组节理,分别为 30°/NW∠74°、138°/E∠85°和 0°/E∠82°,其中前 2 组最为发育。其性质多为剪节理,节理面平直,延展性好。

### 3.3 产状

边坡出露的粉砂质泥岩产状一般较平缓,近于水平。其中右幅边坡厚层粉砂质泥岩向南微倾,倾角 <10°;层面向坡面内倾,倾角约为 5°~8°,见表 2。

表2 路堑边坡软质岩石产状及层厚

边坡	里程桩号	岩体	产状、厚度
东边坡	K144+672~K144+854	D <sub>3</sub> 粉砂质泥岩	产状近水平,倾向南南西,倾角约 8°~10°,层厚约 6~7 m。
	K144+588~K144+619	J <sub>3</sub> 粉砂质泥岩	产状南倾,倾角约 30°~45°,层厚约 20 m。
	K144+670	F1 断层破碎带	产状向北陡倾,倾角约 60°~70°,宽度约 5 m。
西边坡	K144+689~K144+760	D <sub>3</sub> 粉砂质泥岩	产状水平。
	K144+683~K144+686	F1 断层破碎带	产状向北陡倾,倾角约 60°~70°,宽度约 5 m。

## 4 路堑边坡稳定性影响因素

### 4.1 粉砂质泥岩

粉砂质泥岩岩性较特殊:(1)质地较软,强度低,而且具弱膨胀性;(2)遇水浸泡后,岩石软化,强度明显衰减,直至崩解,属于非水稳性岩石;(3)抗风化能力差,暴露地表后极易风化,岩质变松软,强度下降。

当泥岩上覆砂岩时,地下水易沿砂岩中张性节理下渗,汇积于泥岩层表面,引起层间泥化,抗剪强度降低。在一定条件下,可能出现上部岩块沿泥岩层面蠕动或滑移,导致边坡失稳。在厚层粉砂质泥岩处在高边坡底层时(如右幅边坡),在上覆厚层砂岩荷载作用下,泥岩上部风化层可能出现某种程度塑性变形,引起较大范围边坡失稳。基于上述原因,可以认为,粉砂质泥岩这一岩性特征及空间分布状况,对边坡稳定性有重要影响(图 4)。

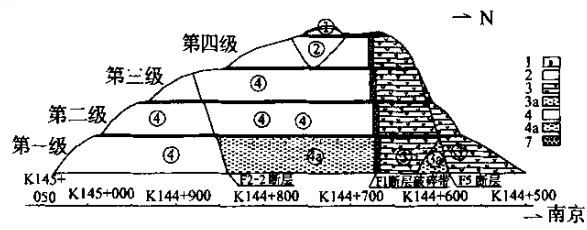


图4 兰右山右幅台阶式边坡立面

### 4.2 粉砂质泥岩结构面的性质及其空间组合关系

粉砂质泥岩中发育有 3 组节理,其中产状 138°/48°∠85°一组与线路轴线夹角小于 20°。几组陡倾节

理结构面与近水平的层理面,可构成被切割的楔形岩体。当裂隙水沿节理、裂隙渗入,可使泥岩软化、膨胀,将导致被节理切割分离的岩石块体向线路中心蠕动或部分坠落,造成边坡失稳。

#### 4.3 F2-2 断层与砂岩楔形岩体

西侧边坡 K144+850~K144+900 段一级边坡处, F2-2 断层产状陡倾, 与边坡坡脚线夹角小于  $10^\circ$ 。该段在断层东侧, 形成砂岩楔形岩体(西侧为厚层泥岩)。该断层结构面如受到拉张应力作用时, 边坡稳定性将出现问题。

#### 4.4 路堑高边坡施工与山体应力调整

在粉砂质泥岩中的 3 组节理, 其性质为剪节理, 呈闭合状, 节理面平直而光滑; 节理面间距约为 20~30 cm。路堑高边坡施工后, 由于开挖卸荷效应及边坡面(临空面)的存在, 一定范围内的岩体应力状态出现调整, 原生剪节理将出现拉张现象。这可能会导致边坡中被节理切割的泥岩楔形岩块向路堑中心蠕动、崩落, 促使边坡逐渐失稳。

#### 4.5 水文地质因素

兰右山为剥蚀丘陵, 地表水排泄以片流为主, 地下水类型主要为基岩裂隙水。区内地下水主要靠大气降水补给, 但由于汇水面积有限, 基岩裂隙水的水量小。在石英砂岩裂隙中, 偶见泉水出露, 呈点滴状, 水量很小。深路堑大拉槽后, 地下水的水动力状态相应变化, 其中向路堑方向渗流量增大。砂岩岩体中张性节理裂隙发育, 而当泥岩岩体中原生剪节理亦出现拉张后, 必然加剧裂隙水沿节理、裂隙渗入, 对边坡稳定造成不利影响。

#### 4.6 路堑施工影响

(1) 因路堑开挖时爆破药量过大, 坡面岩石较为破碎。在右幅边坡一级平台处, 已观察到被节理切割的部分楔形泥岩岩块, 出现小幅度(2~3 cm)位移现象。部分地段已施工的浆砌片石平台, 出现多条纵向拉张裂缝, 或部分塌落(长 0.5~1 m)。

(2) 兰右山北坡遍布乡民陶土(白泥)采场。在右幅边坡山脊, 距路堑中轴线水平距离仅为 100 余 m 处, 有一大型陶土采场(爆破、大型挖掘机作业), 其塘口掌子面高差已达 10~15 m。在其后缘地表出现多条贯穿地裂缝(宽度达 5~10 cm)。这些地裂缝构成大气降水贯入通道, 将严重危及边坡稳定。

### 5 边坡变形破坏机理

#### 5.1 边坡浅层变形破坏

路堑右幅边坡 K144+670~K144+850 段, 一级边坡为相对隔水的厚层泥岩, 二级以上为节理裂隙发育的石英砂岩。在结构体强度上, “上硬下软”迥然有别, 为典型双层结构边坡。

从水文地质条件出发, 上述边坡结构对边坡稳定性不利。地下水易沿砂岩中张性节理下渗汇集于泥岩层面。由于泥岩亲水性强, 浸水软化形成泥化软弱夹层, 抗剪强度降低, 从而诱发上部岩块沿泥岩面向坡面(临空面)蠕动、滑移, 导致边坡失稳。

#### 5.2 边坡深层变形破坏

当地下水长期汇集到泥岩层面时, 由于泥岩抗风化能力弱, 浸水软化、膨胀, 岩体结构渐趋松散, 在厚层泥岩(微风化岩)上部, 逐步形成具有一定厚度的强风化带。在高边坡上部岩体(砂岩)的荷载作用下, 强风化泥岩带将出现某种程度塑性变形, 泥化层向临空面挤出。随着塑性变形区不断扩大, 有可能在砂岩与泥岩接触面附近, 出现深层折线状破裂面, 引发边坡大规模变形破坏。

基于上述分析可以认为, 在地下水诱因下, 边坡“上硬下软”这一双层结构特征, 对边坡稳定性十分不利。

### 6 结论与建议

(1) 兰右山路堑段主要为岩质边坡, 其主要岩组为泥盆系五通组石英砂岩夹泥岩, 岩石强度一般较高, 岩层产状平缓, 属中~厚层结构类型。西侧(右幅)边坡处泥岩层面内倾, 未发现一定规模外倾软弱结构面, 这对边坡整体稳定性较为有利。

(2) 泥盆系五通组粉砂质泥岩和侏罗系含凝灰质、粉砂质泥岩等软质岩石, 均为特殊性岩土层。这类岩石因含大量粘土类矿物, 水稳性不良, 具有强度较低、遇水软化、泥化、崩解和膨胀等特征, 抗风化能力弱。该层是引发边坡产生变形破坏的主要岩体。建议在坡顶设置截排水或坡顶全封闭隔水处理; 在砂岩局部夹薄层泥岩处, 相应设置仰斜排水孔, 阻止地下水沿砂岩裂隙下渗, 浸润泥岩; 在边坡面泥岩暴露处, 宜采取坡面封闭隔水处理。

(3) 路堑边坡附近岩体, 由于开挖卸荷效应, 石英砂岩中张性节理发育, 泥岩中原生剪节理亦出现拉张现象, 岩块被层理、节理切割成菱形块状。在地下水作用下, 结构面泥化可能导致被节理分割的楔状体向临空面蠕动、坠落或崩塌, 从而危及工后安全营运, 因此, 路堑边坡需要防护。



(4)路堑两侧边坡中,右幅边坡高达 40 m,其一级边坡处,泥岩段长度达 180 m。据研究<sup>[1]</sup>,该边坡稳定性安全系数约为 1.1,不能满足规范要求,路堑边坡需要加固或防护。

(5)路堑工程区地震基本烈度为 6 度。该段断裂构造(F1、F2、F5)虽然较发育,但均为前第四纪老断裂。

(6)断裂构造控制了工程区内各工程地质岩组的空间分布状况。近南北走向的 F2—2 纵向断层及近东西走向 F1 断层,将西侧边坡分成 3 个块段。各段岩组,如火山凝灰岩、石英砂岩和粉砂质泥岩等,其岩性及分布状态有明显差异,边坡防护设计宜区别对待,分段处理。

(7)右幅高边坡具有“上硬下软”双层结构,在地下水长期作用下,有可能引发边坡大规模变形破坏。

对此,宜采取主动防护措施,如采用预应力锚索、砂浆锚杆框架等防护方案,防止发生边坡深层破坏。

#### 参考文献:

- [1] 江苏省交通规划设计院. 国道主干线南京至杭州高速公路(江苏境)宜兴四施工标段(K136+850~K148+325)工程地质勘察报告[R]. 2001.
- [2] 江苏省地质矿产局区域地质调查大队. 宜溧地区区域地质调查报告(1:5万)[R]. 1988.
- [3] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 中国建筑工业出版社,1990.
- [4] GB 50218—94,工程岩体分级标准[S].
- [5] 河海大学岩土工程研究所. 宁杭高速公路宜兴兰右山段路堑边坡整体稳定性分析与施工期工程防治措施建议[R]. 2003.

## Analysis of High Slope Integral Stability of Lanyou Hill Deep Cutting on Nanjing-Hangzhou Expressway

WANG Chun-tao, LI Duan-lu, ZHAO Wei-min

(Jiangsu Provincial Communication Planning and Design Institute, Nanjing 210005, China)

**Abstract:** Nanjing-Hangzhou Expressway goes across Lanyou Hill from south to north in Yixing City. The hill extends from east to west and is low. The maximum depth of the west side slope of the cutting is 40 meters. The slope is designed as steps. The height of every step is 8 meters in this region. The character of the slope is rock mass. The main rock layer is Wutong group quartz sand stone of Devonian period and the sandwich mud stone. The rock mass strength is low. The dip angle of the rock layers is small, whose thicknesses chang from middle to large. The mud stone surface of western slope inclines to interior. The influence factors of deep cutting slope stability and breakage mechanism of slope distortion of Yixin Lanyou Hill on Nanjing-Hangzhou Expressway are mainly analyzed. The results show that the first step is mud-rock, the second step and others are quartz sand-rock in this section with high slope on right side, whose slope appears “rigid upward, soft downward”. Because of the particularity of mud-rock which can soften, expand or collapse after it is inundated, the two-layer structure type is disadvantageous to slope stability under the effect of ground water. In order to ensure the expressway normal operation, some protective measures such as slope surface waterproof, prestressing anchored cable and mortar anchored pile framework are taken prevent the slope from deeply destroying.

**Key words:** Nanjing-Hangzhou Expressway; Lanyou Hill; deep cutting; slope structure face of rock quality; breakage mechanism of slope distortion