

山区高速公路深厚古滑坡堆积体复活特征 机制及防治对策研究

王丰, 刘天翔*, 雷航

(四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要:山区高速公路以路基方式穿越古滑坡后易导致其出现局部复活,甚至整体失稳。G5京昆高速公路(绵广段)K1 581+800~K1 582+280段右侧为一巨型深厚古滑坡堆积体,其前缘因边坡开挖导致古滑坡局部复活,形成新的滑移变形体。在充分查明古滑坡堆积体及前缘滑移变形体的地质结构特征的基础上,研究了其复活特征及成因机制,并对其稳定性进行了定性和定量评价。在此基础上,采取以抗滑桩为主的防治对策,并根据古滑坡的地质结构特征,确定抗滑桩最为合理的支挡位置,以最经济的处治措施对古滑坡进行了防治。处治工程完工后,古滑坡的变形得到有效抑制。

关键词:山区高速公路;深厚古滑坡;变形特征;复活特征机制;防治对策

1 引言

公路是带状工程构造物,山区高速公路多沿山坡展布,以路基的方式穿越古滑坡体较为常见,该类公路工程修筑过程中不可避免地将古滑坡体进行扰动,有可能造成古滑坡体复活形成新滑坡的问题,国内外对于古滑坡复活等问题已有相关的研究。薛德敏、胡卸文等、李育枢等通过对古滑坡的复活机制进行研究,得出滑坡复活主要受控于斜坡坡度、河流持续侵蚀下切前缘及强降雨等因素;李元彪、王卫、朱福春等在分析古滑坡病害特征和成因基础上,利用数值分析等方法,研究了路基设计位置、路基穿越方式和开挖深度对古滑坡复活和规模的影响。查明边坡(滑坡)变形破坏的地质力学模式是滑坡地质灾害防治的基础,中国学者也做了不少工作,通过分析滑坡的成因机制,才能提出相应的处治措施,例如王唤龙等分析了广巴高速公路红层堆积体高边坡的病害模式和灾害机制,为设计开挖支护方法提供了依据;吴霞、胡志刚等、周首首、周德军通过对现有古滑坡地质特征的分析,探讨了建设阶段高速公路穿越古滑坡体的边坡防护技术;韩叙领

通过对路线穿越大型古滑坡后诱发其再次复活形成的新滑坡进行了研究,提出不同的治理方案。国内学者对于公路工程穿越古滑坡导致其复活等问题的讨论,多集中于公路建设阶段,原有建设阶段处于稳定的古滑坡历经多年运营后,在降雨、地震等作用下也可能再次发生局部复活,甚至诱发整体失稳。

G5京昆高速公路(绵广段)K1 581+800~K1 582+280段右侧为一古滑坡,建设期间,高速公路在K1 582+076~K1 582+145段右侧以挖方边坡的形式穿越古滑坡。经历多年运营后,该挖方边坡处的古滑坡堆积体出现了局部复活迹象,变形持续多年,每年雨季均会出现明显下沉、开裂迹象。2017年7月,在开挖边坡后缘已形成了长大贯通性裂缝,呈弧形开裂,古滑坡前缘挖方边坡处已发展形成新的滑移变形体(图1)。

由于该滑移变形体位于二级平台以上,距高速公路平均高差约20 m,高位滑坡后将对高速公路的正常运营和行车安全造成巨大威胁。

该文在充分查明古滑坡堆积体及前缘滑移变形体地质结构特征的基础上,研究其复活特征及成因机制,并对其稳定性进行定性和定量评价,提出经济合理的

收稿日期:2020-03-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(编号:2018YFC1504901,2018YFC1504904);交通运输部建设科技项目(编号:2013318800020)

作者简介:王丰,男,硕士,工程师.E-mail:fengbaker@qq.com

*通信作者:刘天翔,男,硕士,高级工程师.E-mail:411495191@qq.com

处治措施。



图 1 高速公路开挖边坡滑移变形体及后部巨型古滑坡堆积体卫星影像图

2 地质环境条件

研究滑坡区位于四川省江油市石元乡五指山村,属构造侵蚀低山地貌,场地内为峡谷地形,高速公路路线右侧斜坡整体较缓,自然坡度为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,横坡呈折线状及台阶状,现地表多为旱地,后缘坡面植被发育,坡表可见崩坡积层及滑坡堆积层块石,后缘陡壁及斜坡坡脚河床可见少量基岩出露,总体露头条件较差。

场地总体为单斜构造,出露岩层为中生代侏罗系下统白田坝组粉砂质泥岩及砂岩。

高速公路左侧坡脚发育一溪沟,属嘉陵江水系。溪沟沟宽为 $5 \sim 10$ m,流向由北西向南东。场区其余地表水主要为大气降水及溪沟水,场地地下水主要有第四系松散层孔隙水、基岩裂隙孔隙水两种类型。

3 边坡滑移变形体与古滑坡堆积体规模及变形特征

3.1 边坡滑移变形体规模及变形特征

G5 京昆高速公路(绵广段)K1 582+076 ~ K1 582+145 段右侧为挖方边坡,位于古滑坡前缘堆积体上,由块石及含碎块石黏土等构成,为土质边坡。滑移变形体自然坡度为 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$,坡表及两侧沟内均未见基岩出露。该开挖边坡后缘自 2008 年开始变形以来,变形量已较大,已形成一个前后缘变形边界清晰,长约 55 m、宽约 45 m、平均厚度 10 m 的滑移变形体,该开挖边坡滑移变形体方量约为 3 万 m^3 ,滑动变形方向为 $\text{SE}161^{\circ}$,垂直于高速公路方向。其工程地质平面图见图 2。

3.1.1 变形特征及分区

从地表变形上看,可分为强烈变形区(I区)及拉裂变形区(II区):

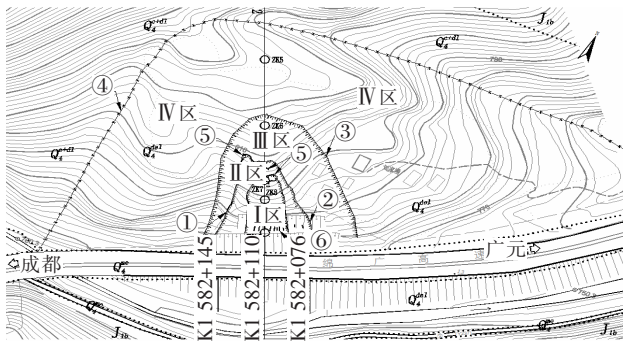


图 2 工程地质平面图

(1) 强烈变形区(I区):强烈变形区位于变形体中前部,其前缘剪出口位于二级边坡坡脚位置,部分框架梁已被剪断、梁内钢筋挠曲、锚杆被拔出,地表出现多条鼓胀裂缝。两侧边界有剪裂缝发育,边界处二级边坡坡脚水沟已被剪断。后缘距开挖坡口约 35 m 处已形成长约 25 m、宽 $0.3 \sim 0.5$ m、下错 $0.8 \sim 1.0$ m 的长大贯通性拉裂缝。

(2) 拉裂变形区(II区):强烈变形区出现滑移变形现象后进一步向两侧及后部发展,并不断加剧,范围加大,形成拉裂变形区。拉裂变形区前缘位于二级边坡坡脚位置,后缘距坡口约 45 m,亦呈弧形开裂,变形体前后缘纵向延伸约 55 m,左右两侧以沟为界,横向延伸约 45 m,左侧沟内可见明显剪裂缝发育,右侧沟内裂缝发育不明显。

3.1.2 滑移变形体结构特征

根据调查及钻探揭露,滑移变形体以砾岩块石、泥岩块石及含碎块石黏土为主。块石间有相对滚动位移,使空隙中充填有较多碎石、角砾和粉质黏土。含碎块石黏土部分段落黏土富集,黏性较强。黏土含水量较高,一般呈可塑状,局部呈软塑状。变形体下部滑床主要为粉砂质泥岩及砾岩块石。

钻孔揭示的部分黏土富集带在断面上形成连续,为前缘滑移变形体的滑带(面),前缘滑移变形体正在沿浅层滑面发生蠕滑变形。

3.2 古滑坡堆积体规模及变形特征

该古滑坡平面形态近似扇形,后缘窄前缘宽。该古滑坡堆积体规模较大,堆积体主要由砾岩块石、泥岩块石及含碎块石黏土、含砾黏土等构成。

3.2.1 变形特征及分区

根据调查及钻探揭露,古滑坡堆积体区域可分为

潜在牵引变形区(Ⅲ区)及古滑坡基本稳定区(Ⅳ区)(图3)。

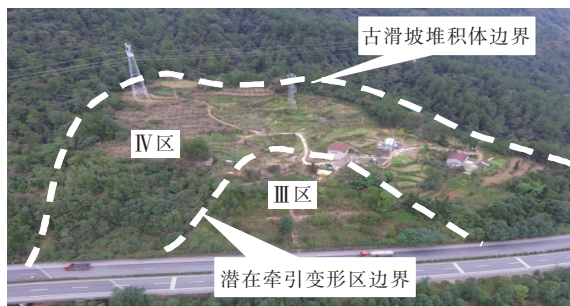


图3 古滑坡堆积体全貌图

(1) 潜在牵引变形区(Ⅲ区):古滑坡体前缘的滑移变形体开始变形松动后,会向中后部坡体进行牵引变形,引发中后部继续变形开裂,往临空面方向蠕变,潜在的滑动范围和滑动深度都会因此而加大,这部分为推测潜在牵引变形体,其滑面较前缘滑移变形体滑面更深。据推测,其主轴长约110 m,宽约90 m,最大厚度约15 m,方量超过14万 m^3 。

(2) 古滑坡基本稳定区(Ⅳ区):古滑坡前缘位于高速公路左侧溪沟内,后缘及两侧边界均以沟为界,主轴长约290 m,宽约370 m,最大厚度约45 m,平均厚度约35 m,堆积体方量超过350万 m^3 ,为巨型滑坡堆积体。斜坡自然坡度为 $10^\circ\sim 20^\circ$,坡表呈台阶状,多已开垦为旱地。除前缘溪沟沟床内有零星基岩出露外,坡表均未见基岩出露,距古滑坡堆积体后缘100~200 m处存在高50~200 m的基岩陡壁,基岩岩性多以石英质砾岩为主。

3.2.2 古滑坡堆积体结构特征

根据调查及钻探揭露,古滑坡堆积体以砾岩块石、泥岩块石及含碎石黏土、含砾黏土为主。块石间有相对滚动位移,使空隙中充填有较多碎石、角砾和粉质黏土。含碎石黏土以可塑状为主,局部硬塑状,碎石含量为15%~20%,该层处于古滑坡堆积体中部。含砾黏土多呈可塑~软塑状,局部含5%~15%角砾、圆砾,该层多处于古滑坡堆积体下部。古滑坡堆积体滑床主要为中生代侏罗系下统白田坝组的粉砂质泥岩及粉砂岩,岩体较为完整。

根据钻探揭露,古滑坡堆积体原滑带土存在多层连续分布的黏土富集带,且局部存在搓揉、挤压等迹象(图4),说明古滑坡存在过多次滑动,时间上也并非一次完成,具有多期性的特点。



图4 钻孔揭露的滑带土中搓揉、光面及擦痕现象

4 边坡滑移变形体与古滑坡堆积体成因机制分析

4.1 古滑坡堆积体成因机制

古滑坡堆积体的形成和发展是地形地质特征及各种自然因素叠加的结果,根据此次地质勘察成果分析,古滑坡成因机制主要有以下几方面:

(1) 地形地貌:根据现场调查,古滑坡为单一斜坡地貌,场区岩层产状为 $SE155^\circ\angle 37^\circ$,斜坡坡向与岩层倾向基本一致,为顺向坡,易于产生顺层滑动。

(2) 岩性特征及降雨因素:原古滑坡所处斜坡岩性多以石英质砾岩为主,底部以砂泥岩为主,砾岩岩体裂隙发育,有利于地表水下渗,底部的粉砂质泥岩相对隔水,在大气强降雨的影响下,地表水入渗后在此层聚集,泥岩饱水易软化,降低了层间抗剪强度,在后部裂隙水压力共同作用下,沿层面发生了大规模顺层基岩滑动。

(3) 河流沟谷的冲蚀作用:坡体前缘河流沟谷的冲刷是诱发古滑坡滑动的另一重要因素。在古滑坡形成前,前缘斜坡坡脚受溪沟内流水等长期冲刷掏蚀,使原斜坡形成临空面,揭示出并软化坡脚岩体的软弱结构面,最终共同诱发了斜坡产生顺层滑动。古滑坡滑动后,掩埋原冲沟,致使冲沟改道,形成高速公路左侧现有新冲沟。

此外,场地地震基本烈度为Ⅶ度,长期的地震作用也是古滑坡发生的另一重要影响因素。

4.2 边坡滑移变形体成因机制

边坡滑移变形体为古滑坡的局部复活现象,其成因机制主要有以下几方面:

(1) 岩土特征:该边坡滑移变形体位于古滑坡堆积体前缘,坡表多为含碎块石黏土及块石,表土松散,坡表以下5~10 m处发育一层连续的黏土富集带,含水量较高,软化后为坡体内的软弱层(滑带土),易形成滑动。

(2) 人类活动:由于高速公路的修建,开挖边坡,为后部古滑坡体的变形提供了临空面和空间,破坏了以前堆积体的整体完整性和应力平衡状态,在雨水和自重作用下,易发生滑移。

(3) 大气降雨:2017 年 8—9 月进入雨季后,降雨持续时间长,降雨量丰富,雨水下渗,地下水补给急增,地下水位上升,致使土体饱和而重度增加;另一方面,降水入渗至软弱带(黏土层)后,使其进一步饱水软化,滑带土抗剪强度降低,在重力作用下发生滑动。

(4) 地震作用:受“5.12 汶川地震”及其长期余震作用的影响,可能造成岩土体松动变形,有利于地表水下渗。

5 边坡滑移变形体与古滑坡堆积体稳定性分析评价

5.1 定性分析评价

(1) 边坡滑移变形体现状稳定性

根据边坡滑移变形体形成机制,该变形体位于古滑坡前缘,为古滑坡堆积体的局部复活,且滑移变形体后缘已形成长大贯通性裂缝,前缘强烈变形区地表出现多条鼓胀裂缝。左侧边界已出现明显剪裂缝。由此可见,该滑移变形体前后缘已基本贯通,整体处于欠稳定状态,今后在暴雨及地震等因素影响下,极易发生滑移失稳破坏,将会对下方高速公路的正常运营及行车安全造成巨大的威胁和危害。

(2) 古滑坡堆积体现状稳定性

就目前自然状态而言,滑移变形体后部的推测潜在牵引变形区及古滑坡基本稳定区坡表上均未有裂缝发育,同时,据访问当地村民,该坡体除上述变形体外,其他区域在近 60~70 年以来均未出现变形及滑移,农户祖辈居住多年的房屋(土房)稳定性也较好。故该古滑坡堆积体目前处于整体稳定状态,无沿岩土界面产生整体滑动的可能。但前缘滑移变形体不断发展,将会诱发古滑坡复活范围逐步扩大。

5.2 定量分析评价

5.2.1 计算(潜在)滑动面的选取

根据前述分析,此次计算选择Ⅱ区、Ⅲ区及Ⅳ区滑移面作为计算评价控制面。

(1) 强烈变形区(Ⅰ区)及拉裂变形区(Ⅱ区)滑面:该层滑面处于古滑坡体的浅层位置,定义为浅层滑面。

(2) 潜在牵引变形区(Ⅲ区)滑面:前缘的滑移变

形体开始变形松动后,会牵引中后部坡体变形,使其往临空面方向蠕变,潜在的滑动范围和滑动深度都会因此加大,其滑面较浅层滑面更深,根据钻孔揭示,其主要集中在含碎石黏土中的黏土富集带内,被定义为潜在中层滑面。

(3) 古滑坡基本稳定区(Ⅳ区)滑面:根据钻孔揭示,位于古滑坡体深层、接近原古滑坡体老滑面的位置存在一黏土富集的软弱夹层,古滑坡有沿该层发生整体滑移的风险,该层被定义为潜在深层滑面。

5.2.2 计算工况的选取

根据边坡滑移变形体及古滑坡可能发生滑移失稳的主要影响因素,其稳定性及剩余下滑推力计算主要分为:工况 1(天然工况);工况 2(暴雨工况);工况 3(地震工况)。

5.2.3 计算参数的选取

计算参数以此次勘察试验参数为依据,并结合相关经验参数,取滑体(含块石黏土和块石)天然重度为 21.9 kN/m^3 ,饱和重度为 22.4 kN/m^3 ,各层滑面参数如表 1 所示。

根据前缘滑移变形体目前的稳定状况,假定其拉裂变形区在暴雨工况下的稳定性,进行力学参数的反算,并综合室内试验成果得到的参数,最终取 $c=12\text{ kPa}$ 、 $\varphi=10.23^\circ$ 进行稳定性计算。

表 1 滑移变形体及古滑坡体滑带土抗剪强度参数取值

滑移面	天然状态		饱和状态	
	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
浅层滑面(Ⅰ区及Ⅱ区)	20.60	11.41	12.00	10.23
潜在中层滑面(Ⅲ区)	32.00	16.58	15.00	12.65
潜在深层滑面(Ⅳ区)	30.80	14.82	13.97	12.10

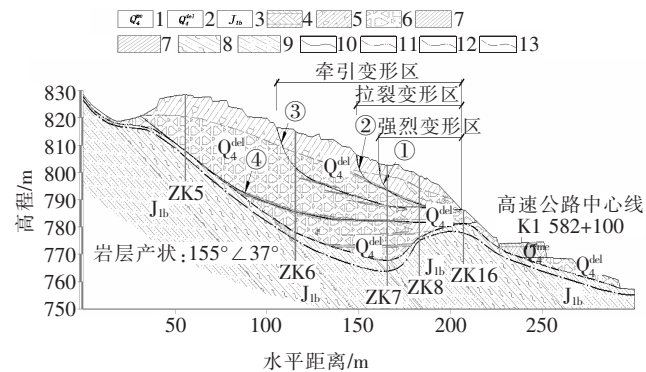
5.2.4 稳定性计算结果

选取 K1 582+110 断面(图 5)作为主断面进行计算,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可得:浅层滑面在天然工况下处于稳定状态,但在暴雨及地震工况下处于不稳定状态。中层潜在滑移面和深层潜在滑移面在 3 种工况下均处于稳定状态。

6 边坡滑移变形体与古滑坡堆积体发展趋势预测

边坡滑移变形体至 2017 年调查期间一直处于蠕



注:1.第四系全新统人工填筑层;2.第四系全新统滑坡堆积层;3.中生代侏罗系下统白田坝组;4.人工填土;5.含碎块石黏土;6.块石土;7.黏土;8.粉砂质泥岩;9.粉砂岩;10.滑面或潜在滑面;11.岩土界面线;12.强中风化界面线;13.地层分界线;① 强烈变形区浅层滑面;② 拉裂变形区浅层滑面;③ 牵引变形区潜在中层滑面;④ 基本稳定区潜在深层滑面。

图5 K1 582+110工程地质横剖面图

表2 K1 582+110断面3组滑面稳定系数计算结果

滑移面	稳定系数		
	工况1	工况2	工况3
浅层滑移面	1.225	0.961	1.048
潜在中层滑移面	1.943	1.275	1.576
潜在深层滑移面	1.657	1.205	1.325

滑变形阶段,累计变形量已较大,2017年进入雨季后已出现变形加速的迹象,在暴雨等因素的影响下,变形体将进一步发展,其失稳破坏面以浅层滑动面为主,最终将形成整体性滑坡,将对高速公路的正常运营和行车安全造成巨大威胁。

古滑坡堆积体由于形成年代久远,历经多次地质运动后,其整体已处于稳定状态,但前缘滑移变形体若持续变形发展将为后部大型崩滑堆积体的变形提供空间,会产生渐进后退式、逐级牵引的滑移变形,若不立即对前缘滑移变形体进行处治,将诱发后部滑坡堆积体发生更大规模、更大危害的变形开裂,甚至是诱发其整体滑动,将会给绵广高速公路造成严重危害。

7 工程处治措施及工后效果

综合该边坡滑移变形体及古滑坡堆积体的结构特征与稳定性分析、推力计算等,在方案研究阶段,共拟定了以下两个方案对该滑移变形体进行处治:① 方案1:在右侧边坡滑移变形体前缘设置一排抗滑桩对该滑移变形体进行支挡加固;② 方案2:在右侧二级边坡上设框架锚索予以加固。

- (1) 经济比选
方案1比方案2造价低。
- (2) 技术比选

方案1的优点:① 通过抗滑桩支挡工程可以确保该滑移变形体的稳定;② 抗滑桩受荷段相对较短,桩截面相对不大,总体工程量相对较小;③ 整个施工工期可控、工期相对更短。

方案1的缺点:① 新增征地面积相对较多;② 会产生一定量的弃土。

方案2的优点:① 新增征地面积相对较少;② 无需产生弃方,施工安全更易保证。

方案2的缺点:① 由于该段滑移变形体的地质情况,下伏基岩面为勺子状,锚索需穿过古滑坡体巨厚层滑体锚入稳定基岩体内,锚索长度需达80~95 m,长度过大,总体工程量过大;② 在深厚覆盖层里的长锚索工程有效性差,长期安全性不高,后期预应力损失较为严重,工程加固的可靠性无法得到保证;③ 整个施工工期相对更长;④ 施工工艺复杂,施工可操作性差。

(3) 方案比选结论

根据以上分析,主要从处治工程的工程造价、工程安全性、长期有效性、施工工期、施工可操作性等角度考虑,方案1技术可行,经济合理,安全可靠,综合比较后,推荐采用方案1。

综上所述,由于古滑坡滑动后,掩埋原冲沟,致使冲沟改道,形成高速公路左侧现有新冲沟。故滑移变形体前缘(高速公路现开挖二级边坡中上部)基覆界面呈反翘状,此处覆盖层厚度小,抗滑桩受荷段相对较短,桩截面相对不大,总体工程量相对较小;通过计算滑移变形体在该位置的潜在下滑推力和土压力,最终确定抗滑桩截面尺寸为1.8 m×2.7 m,桩长为27 m,桩中心间距为5 m,共12根(图6)。

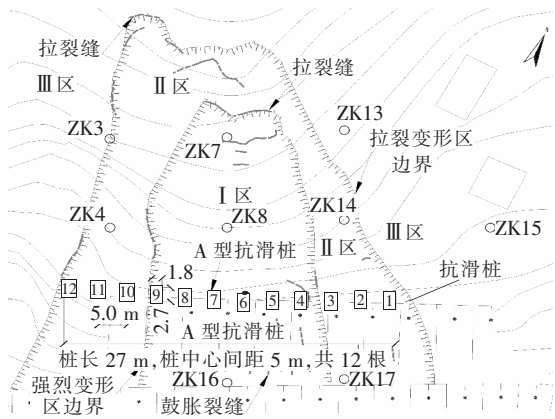


图6 处治工程平面布置图

通过详细的地质调查及钻探手段,在充分查明古滑坡及滑移变形体的地质结构和变形机制的基础上,确定了抗滑桩最为合理的支挡位置,以最经济的处治措施对古滑坡进行了处治,处治工程已完工近 3 年,度过了三个雨季,古滑坡的变形得到有效抑制,变形范围未再向古滑坡体后部牵引延伸,起到了很好的支挡效果,确保了下方高速公路正常运营安全,是一例以小体量的支挡措施治理大体量古滑坡的成功案例。

8 结 论

(1) G5 京昆高速公路(绵广段)K1 582+076~K1 582+145 段右侧挖方边坡段的滑移变形体处在一巨型古滑坡堆积体的前缘。根据变形特征,滑移变形体可分为强烈变形区(Ⅰ区)及拉裂变形区(Ⅱ区);古滑坡堆积体区域可分为潜在牵引变形区(Ⅲ区)及古滑坡基本稳定区(Ⅳ区)。

(2) 古滑坡形成因素包括地形地貌条件、岩土体自身的产状、结构特征、地下水(内因)影响、前缘冲沟侵蚀作用及临空等(外因)。前缘边坡滑移变形体是在岩土体结构特征、大气降雨、人类工程活动(边坡开挖等)和地震等综合因素影响下产生的。

(3) 根据定性及定量分析评价,前缘边坡滑移变形体在天然工况下处于稳定状态,地震及暴雨工况下处于不稳定状态;古滑坡堆积体在天然、地震及暴雨工况下均处于稳定状态。但前缘滑移变形体若持续变形发展将为后部大型崩滑堆积体的变形提供空间,会产生渐进后退式、逐级牵引的滑移变形,将诱发后部滑坡堆积体发生更大规模、更大危害的变形开裂,甚至是整体滑动。

(4) 综合该边坡滑移变形体及古滑坡堆积体的结构特征与稳定性分析、推力计算等,选取了以抗滑桩为主的支挡措施进行处治。通过查明古滑坡及滑移变形体的地质结构和变形机制,确定了抗滑桩最为合理的支挡位置,以最经济的处治措施对古滑坡进行了防治,处治工程完工后,古滑坡的变形得到有效抑制,确保了下方高速公路正常运营的安全。

参考文献:

- [1] JTG C20—2011 公路工程地质勘察规范[S].
- [2] 张倬元,王士天,黄润秋. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,2009.
- [3] 薛德敏. 西南地区典型巨型滑坡形成与复活机制研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文,2010.
- [4] 胡卸文,黄润秋,朱海勇,等. 唐家山堰塞湖库区马铃岩滑坡地震复活效应及其稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009(6).
- [5] 李育枢,钟东,周灏. 唐家湾东古滑坡成因与现代复活机制分析[J]. 地下空间与工程学报,2012(3).
- [6] 李元彪. 堆积层老滑坡病害特征及成因分析[J]. 甘肃科技,2010(24).
- [7] 王卫. 堆积层滑坡发生机理及防治措施[J]. 铁道建筑,2015(6).
- [8] 朱福春. 穿越老滑坡的道路路基方式选择研究[J]. 价值工程,2017(22).
- [9] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007(3).
- [10] 武国峰,耿炎军,张冬冬,等. 某古滑坡复活机理及变形研究[J]. 路基工程,2014(6).
- [11] 张绍成,张军. 山区公路某滑坡形成原因及处治措施分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2014(12).
- [12] 王子忠,许模,杨绍平. 瓦屋山水电站厂房区红层岩体古滑坡稳定性研究[J]. 工程地质学报,2011(2).
- [13] 张志龙,李天斌,赵其华. 二郎山和平沟滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 西北地质,2003(36).
- [14] 王唤龙,孙毅,等. 红层堆积体高边坡坡体结构及变形规律[J]. 岩石力学与工程学报,2010(1).
- [15] 吴霞. 古滑坡体上的挖填方路基边坡设计方案研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2013(2).
- [16] 胡志刚,周湘君. 高速公路穿越古滑坡边坡动态设计与施工[J]. 北方交通,2013(11).
- [17] 周首首. 高速公路穿越古滑坡体边坡防护技术探讨[J]. 西部探矿工程,2018(12).
- [18] 周德军. 高速公路穿越古滑坡体处理方案分析探讨[J]. 工程与建设,2015(3).
- [19] 韩叙领. 梁垓痞古滑坡治理稳定性分析及治理方案研究[J]. 中外公路,2016(4).
- [20] 韩叙领. 平岭大型滑坡稳定性分析及治理方案研究[J]. 中外公路,2016(5).