

### 阳鹿高速公路K52新滑坡变形特征与成因机理分析

陈云生, 刘光彬, 张一铭, 黄海峰, 吴秋军

**Deformation characteristics and genetic mechanism of a new landslide at K52 of Luyang freeway**

CHEN Yunsheng, LIU Guangbin, ZHANG Yiming, HUANG Haifeng, and WU Qiujun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-10>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### [国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用](#)

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66–72

##### [基于PFC<sup>3D</sup>的鱼鳅坡滑坡运动过程分析](#)

Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC<sup>3D</sup>

张家勇, 邹银先, 杨大山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 33–39

##### [三峡库区典型顺向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析](#)

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36–42

##### [不当钻探施工引发的滑坡变形加剧机理](#)

Mechanism of the landslide deformation due to drilling of boreholes: A case study of Fanshantou landslide at Songyang County of Zhejiang Province

罗晓娟 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 84–90

##### [黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法](#)

Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area

胡长明, 林成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 76–83, 139

##### [基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划](#)

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94–99



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-10

陈云生, 刘光彬, 张一铭, 等. 阳鹿高速公路 K52 新滑坡变形特征与成因机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 83-91.

CHEN Yunsheng, LIU Guangbin, ZHANG Yiming, et al. Deformation characteristics and genetic mechanism of a new landslide at K52 of Luyang freeway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 83-91.

## 阳鹿高速公路 K52 新滑坡变形特征与成因机理分析

陈云生<sup>1,2</sup>, 刘光彬<sup>1,2</sup>, 张一铭<sup>1</sup>, 黄海峰<sup>1</sup>, 吴秋军<sup>1,2</sup>

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029;  
2. 广西岩土灾害防治工程技术研究中心, 广西南宁 530029)

**摘要:** 阳鹿(阳朔—鹿寨)高速公路 K52 新滑坡为古滑坡堆积体中局部复活的滑坡, 处于急剧变形状态, 需进行抢险性处治。复工后对该滑坡进行了详细的地质勘察及变形监测, 借助 FLAC<sup>3D</sup> 软件对其成因、变形过程及变形机理进行了研究, 得到了以下结论: (1) 古滑坡堆积体形成于顺层岩质滑坡, 堆积体内部发育软-可塑状软弱夹层风化页岩, 为新滑坡的主要滑带土; (2) 导致新滑坡变形的主要内因为不良地质、微地貌、特殊的岩土结构, 主要外因为在中后部堆载、填土改变地表水径流路径、向滑坡排放生活用水及降雨; (3) 新滑坡具有三层滑面, 失稳前底部滑面为主滑面, 失稳阶段中部滑面为主滑面, 属前段推移后段牵引型复合式滑坡, 具多级、逐级及渐进滑动特点; (4) 新滑坡变形进程为: 后缘拉张变形-中部剪切蠕变-滑体 A、B 推移剪出失稳-滑体 C 前缘临空牵引失稳; (5) 新滑坡处治重点应防止顶部、中部及底部三个滑动面继续变形, 也应防止古滑面及古滑坡堆积体内部其余风化页岩夹层产生次级滑动。

**关键词:** 滑坡; 变形机制; 数值模拟; 高速公路; 稳定性; 变形监测

中图分类号: P642.2; TU94<sup>+3.2</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)01-0083-09

## Deformation characteristics and genetic mechanism of a new landslide at K52 of Luyang freeway

CHEN Yunsheng<sup>1,2</sup>, LIU Guangbin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yiming<sup>1</sup>, HUANG Haifeng<sup>1</sup>, WU Qiuju<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi Communications Design Group Co. LTD., Nanning, Guangxi 530029, China; 2. Guangxi Geotechnical Disaster Control Technology Research Centre, Nanning, Guangxi 530029, China)

**Abstract:** The new landslide at K52 Luyang freeway is a new-reactivated landslide, which is in the accumulation of the giant landslides formed in ancient time. This landslide is in a state of rapid deformation, which requires the emergent treatment immediately. Many steps including geological survey, drilling, in-situ test, laboratory test, and deformation monitoring are applied to analysis this giant landslide after the resumption of construction, where the characteristics of geomorphology, stratum structure, sliding surface, sliding mass, sliding bed, deformation, and hydrogeology of the landslide were identified. By using FLAC<sup>3D</sup> software, several aspects containing the cause of this sliding and deformation mechanism were analyzed. The following conclusions were given after the functional investigation: (1) The giant ancient landslide accumulation was formed by deep rock landslide. Soft plastic weak intercalated weathered shale is developed in the accumulation body, which is the main sliding zone

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-08-26 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2019-ZD5-026)

第一作者: 陈云生(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察及设计。E-mail: 417489487@qq.com

soil of the new landslide; (2) The main internal causes of the new landslide were unfavorable geology, micro landform, and the special geotechnical structure, while the main external causes were artificial loading on the middle and back part of the accumulation of the ancient landslide and rainfall; (3) There were three sliding surfaces, the lowest surface was the main sliding surface at the creep stage, the middle surface was the main sliding surface at the unstable stage, and this sliding could be classified as the composite sliding of pushing from the front section and dragging by the back section, which had the features of multiply-stage, progressively gradual failure; (4) The deformation process of this new landslide was: firstly, there was a tensile deformation in the back part of the initial landslide and a shear creep in the middle. Then, the sliding A and B lost stability due to shear failure in the front edge, and the sliding C failed caused by the tensile force due to the lost support in the front edge; (5) The key point of new landslide treatment is to prevent the deformation of the top, middle and lowest sliding surfaces, and to prevent the secondary sliding of the ancient sliding surface and other weathered shale Intercalations in the ancient landslide accumulation, which may be used as an acceptable reference for the uses of research and design by the similar engineering fields.

**Keywords:** landslide; deformation mechanism; numerical simulation; freeway; stability; deformation monitoring

## 0 引言

阳朔至鹿寨高速公路(简称阳鹿高速公路)K51+940—K52+200段为填方路基,小桩号侧为东高岭2号大桥,大桩号侧为东高岭隧道,路堤边坡自上而下按1:1.5、1:1.75、1:2分三级填筑,最大填高约40 m,其中K52+080—K52+170段右侧填筑路堤坡脚设有浆砌片石挡墙。2018年3月,时隔4年复工建设后发现该路堤严重开裂,随后进行了重新碾压填筑处治。至2019年3月,该段路堤填筑至路床顶并进入面层施工。2019年2—4月,因降雨量较大该段再次发生滑动,地表出现多条裂缝,路堤斜坡局部地段出现剪切裂缝。2019年4月,经详细勘察及变形监测后判断该路堤所处位置为古滑坡堆积体,局部复活为新滑坡,因通车在即,急需对其进行处治,随后开展了新滑坡的成因机理分析,判断其稳定性。2019年5月1日—12日,采取卸载后缘部分滑体+前缘第一、第二期反压的应急处治方案,控制住滑坡的主要变形。截至6月11日,完善了整个滑坡的防排水系统,并完成了坡脚钢管群桩防护及前缘第三期反压,使得滑坡处于稳定状态。

国内多是在现场调查、钻探等详细勘察的基础上借助数值模拟或模型试验等手段进行滑坡成因分析研究,研究成果多认为前缘减载、后缘堆载、地震、降雨等因素为滑坡发生的主要外因。阳鹿高速K52新滑坡为堆积体中后缘加载型局部复活滑坡,对于此类滑坡国内已有研究。如卫童瑶等<sup>[1]</sup>对三峡库区巫山县塔坪H1滑坡进行变形分区,认为库水位周期性波动及短时强降雨相叠加是诱发滑坡的主要因素。史文兵等<sup>[2]</sup>采用有限元软件分析了某滑坡在多种工况下的变形特征,研究结果认为滑坡发生的主要成因为填土和降雨。

张岩岩等<sup>[3]</sup>采用资料收集、地调、钻探及井探等手段对某特大型滑坡的成因机制进行了研究,研究表明其为自然降雨触发的特大型滑坡。闫国强等<sup>[4]</sup>对三峡库区巫山金鸡岭滑坡成因机制进行了研究,研究认为降雨、后缘加载、地下水阻断等是导致其变形的主要因素。何坤等<sup>[5]</sup>以四川省某古滑坡为案例,采用地调、航拍、钻探、物理力学试验及数值模拟等手段对其复活机制进行了研究,研究认为独特的岩土结构及地形地貌是复活的内因,多雨是复活的主要外因。

对于大型、巨型等规模大的滑坡,必须对其滑坡所在区域的地形地貌、地质结构特征及变形机理等进行详细研究,为处治方案的选择提供依据<sup>[6—9]</sup>。代贞伟等<sup>[10]</sup>以三峡库区藕塘滑坡为实例,将该巨型顺层岩质滑坡划分为三级,认为该滑坡具有“拉裂-滑移-剪断”、“平面滑移”、“滑移-剪断”等三种形成机制。吕俊磊等<sup>[11]</sup>借助FLAC<sup>3D</sup>对巴中市某滑坡的成因机制进行了分析,其破坏过程为由前缘向后缘逐渐贯通的牵引式滑坡。易志坚等<sup>[12]</sup>通过室内模型试验对唐古栎滑坡的成因机制进行了研究,认为该巨型岩质滑坡的前缘失稳变形是导致整个边坡失稳破坏的主要原因,并对其变形过程进行了数值模拟。张杰等<sup>[13]</sup>结合无人机航拍技术对云南彝良两河镇某滑坡的运动过程进行研究,证明该滑坡经历了三次滑动,堆积体属“多次叠加堆积”。

文中以笔者亲自参加的阳鹿高速K52新滑坡处治设计为研究案例,借助地质钻探、岩土测试、试验、变形监测及数值分析等手段,对其变形特征、演化过程、成因分析和变形机理进行了研究,为后续的处治方案、预警预灾等研究提供理论依据,同时也为同类工程的勘察设计提供参考。

## 1 古滑坡堆积体发育特征

对于古滑坡的判断,黄晓虎等<sup>[14]</sup>从微地貌特征、地层结构、岩性特征及现场变形迹象等滑坡特征出发,借助工程实例对古滑坡及新滑坡进行辨别。文中参考了其部分辨别原则。

### 1.1 地形地貌及形态特征

阳鹿高速公路K52处古滑坡堆积体位于桂林市荔

浦市西北约10 km处,属剥蚀低山地貌,山体绝对高度多在300~650m,相对高差约300 m。古滑坡堆积体位于自然山体中下部,整体轮廓呈近圈椅状,两侧发育冲沟,自然坡度前缓后陡,中部发育有平台,后缘局部见基岩裸露,基岩层面光滑,覆盖层薄,为顺层滑动证据;前缘坡度15°~25°,后缘40°~50°,为典型古滑坡堆积体地貌特征(图1)。

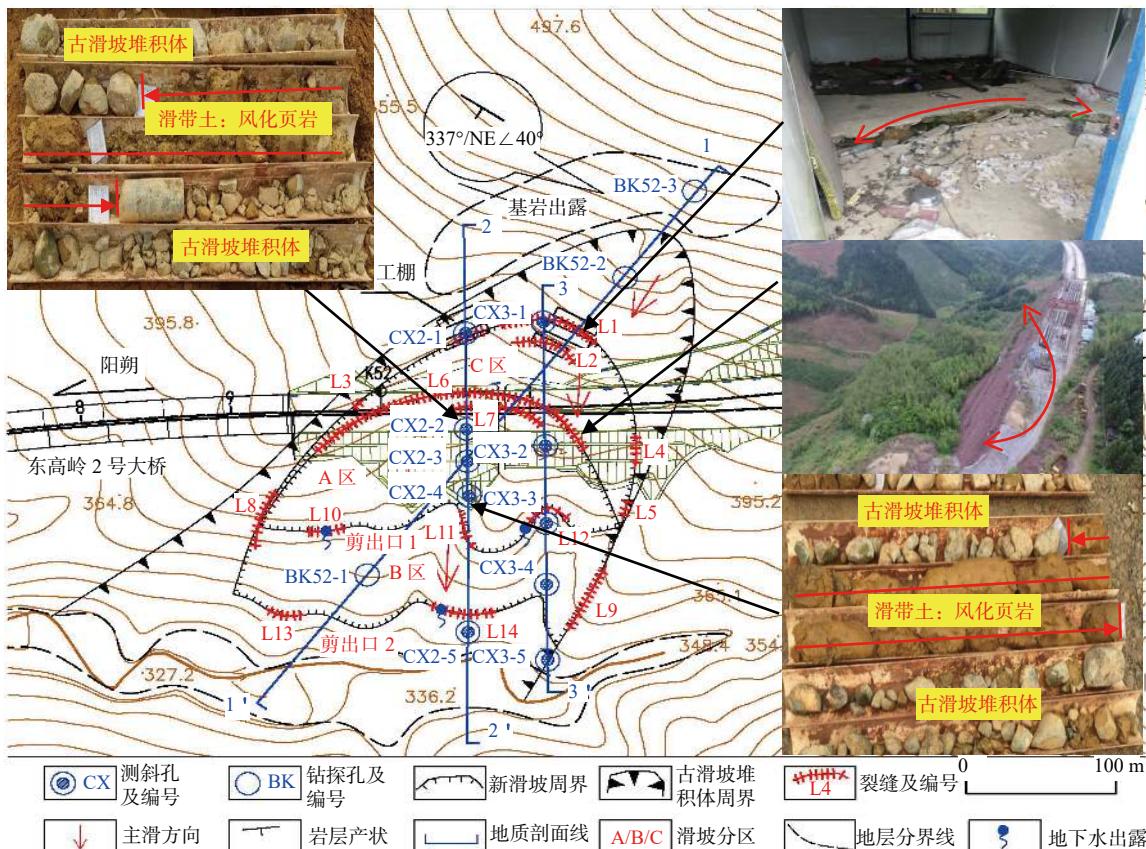


图1 项目区工程地质平面图及照片

Fig. 1 Engineering geological plan of project area and photo

### 1.2 地层特征

钻探显示该区域由人工填土、古滑坡堆积体、残积层及风化基岩组成(图2)。人工填土属高速公路基填筑层,成分为碎石、块石及黏性土,碎石、块石约占25%~35%;古滑坡堆积体由两种物质组成,分别为风化页岩及强风化泥质粉砂岩,风化页岩呈土状,软-可塑状,强风化泥质粉砂岩岩质较软,节理裂隙发育,岩芯呈碎块状,堆积区岩层产状、物质成分凌乱;残积层除了BK52-3钻孔外,其余钻孔均有揭露,主要由粉质黏土混碎石、块石组成,可-硬塑状,在古滑坡堆积体底部揭露,与正常沉积顺序颠倒;基岩埋深大,中风化泥质粉砂岩及灰岩呈互层状,含页岩软弱夹层,产状稳定,岩

层整体倾向坡脚,自然坡为顺层坡。产状、岩土结构及基岩埋深厚度异常是该处历史上发生过滑坡的有力证据。

### 1.3 水文地质特征

地表水分布在项目区各沟槽内,受大气降水补给。地下水水位、水量受降雨控制,长期监测测得勘探孔内稳定地下水位高程340~400 m,堆积体前缘水位位于堆积体内,后缘水位与滑坡堆积体底面齐平,水位线呈上陡下缓状(图2),堆积体前缘可见泉水出露,钻探及钢管群桩钻孔过程中可见地下水沿孔上冒,地下水异常符合古滑坡堆积体的水文地质特征。

以上特征可判断该区域在历史发生过沿页岩软弱层滑动的岩质顺层滑坡,滑坡体堆积在坡脚,覆盖在原残

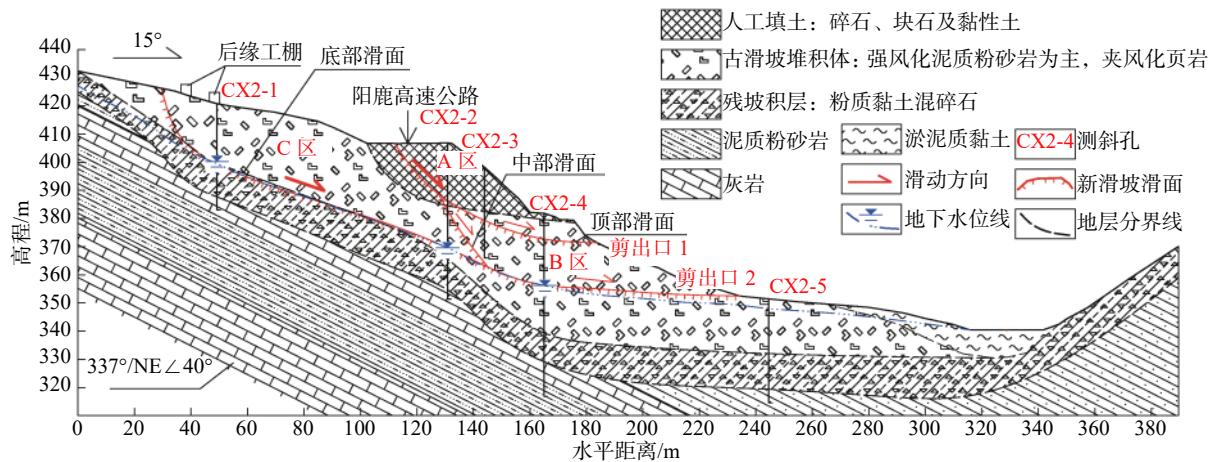


图 2 2-2'剖面工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological section of 2-2'

坡积层之上,重力搬运导致该堆积体结构松散,土岩交替分布,产状凌乱,经过外营力地质改造后,形成了目前地貌。经详细勘察,得出该古滑坡主滑方向为 $52^\circ$ ,滑动方向与高速公路走向呈大角度相交,堆积体前缘延伸至高速公路下边坡底部冲沟处,主轴长300 m,平面分布 $72\,000\text{ m}^2$ ,钻探揭露堆积体均厚40 m,总体积 $2.88\times 10^6\text{ m}^3$ 。

## 2 新滑坡特征

### 2.1 新滑坡规模、形态及结构特征

阳鹿高速公路以高填陡坡路堤形式从古滑坡堆积

体的中后缘通过(图2),路堤填筑后,古滑坡堆积体局部复活为K52新滑坡。根据钻探、测斜等综合成果,该滑坡主滑方向垂直高速路走向,轴长150 m,分布高程340~440 m,具三个滑面:顶部滑面(A区)面积约62 000 m<sup>2</sup>,滑面埋深10~20 m,均厚15 m;底部滑面(C区)对应面积约25 000 m<sup>2</sup>,滑面平均埋深21~36 m,均厚约30 m;中部滑面(A+B区)埋深13~28 m,为顶部滑面中部向底部滑面前缘贯通并向沟谷滑动的滑面。新滑坡总体积约为 $1.68\times 10^6\text{ m}^3$ ,依据规范<sup>[6]</sup>,属深层滑坡,各区结构特征见表1。

表 1 新滑坡结构特征

Table 1 Structural characteristics of new landslide

滑体区域	滑体特征	滑面特征	滑床特征
A区	上部为第四系松散人工填土,为本区主要组成部分,下部少量为古滑坡堆积体	顶部滑面,上陡下缓状,滑面由两部分组成,上部分位于人工填土内部,下部分滑面位于古滑坡堆积体内部,见图1右上照片,滑带土主要由风化页岩组成,呈土柱状,可塑状,滑带厚0.4~2.5 m	由两部分组成:上部分为人工填土;下部分为古滑坡堆积体
A+B区	由古滑坡堆积体及第四系人工填土组成,两者含量相当	中部滑面,上陡下缓状,滑面由两部分组成,上部分位于人工填土内部,下部分滑面位于古滑坡堆积体内部,见图1右中照片,滑带土主要由风化页岩组成,呈土柱状,软~可塑状,滑带厚0.4~2.0 m	由两部分组成:上部分为人工填土;下部分为古滑坡堆积体
C区	主要由古滑坡堆积体组成,上部为少量第四系人工填土	底部滑面,滑面陡倾状,由两部分组成,上部分位于残积层与堆积体交界面,下部分位于堆积体内部,滑带土上部分为粉质黏土,可塑状,下部分为风化页岩,软~可塑状,滑带厚0.2~2.0 m	由两部分组成:上部分为残积层,下部分为古滑坡堆积体

### 2.2 新滑坡变形特征

#### 2.2.1 地表变形

新滑坡地表主要发育14条裂缝,典型照片见图1,裂缝性质及规模见表2。

受滑坡变形影响,原路堤产生大量裂缝,坡脚浆砌片石挡墙呈整体式剪切变形,致使挡墙裂缝呈近竖直状,略倾倒,墙身向滑移方向相互错开近1 m,挡墙底部基础可见整体式滑移擦痕,路堤填石可见明显的剪切贯穿性断裂裂隙,典型照片见图3。

穿性断裂裂隙,典型照片见图3。

#### 2.2.2 地下变形

复工期间对该滑坡地下变形进行了长期监测,共布设了17个深部位移监测,24个地表位移监测,大部分监测点因地表施工扰动而损坏或测斜管因滑面变形而折断。文中取典型剖面2—2'进行分析(图4)。图4可以看出新滑坡存在两层明显滑动面,CX2-2在深度12.5~18 m及32.5~36.5 m之间出现了明显的位移突变。

表2 新滑坡地表主要裂缝特征

Table 2 Characteristics of surface cracks in new landslides

裂缝编号	裂缝位置	裂缝类型	裂缝特征	发现时间
L1~L2	C区后缘	拉张裂缝	呈弧形,宽0.1~0.2 m,延伸50~100 m,可见深度0.2~1.2 m,裂缝前后下错台阶高度约0.2 m	2019年5—6月
L3~L5	C区两侧	拉张剪切裂缝	缝宽0.05~0.1 m,延伸10~30 m,呈小弧度变形,为拉张及剪切综合成因,裂缝两侧可见水平向错动	2019年5—6月
L6~L7	A区后缘	拉张裂缝	呈圈椅状分布,中轴线与滑动轴近重合,裂缝宽度约0.1~0.2 m,最大可视深度0.5 m,延伸长度约100~250 m,最大错台落差约0.8 m。裂缝有进一步贯通的趋势,是本滑坡裂缝发育最为活跃的地带,沉降变形明显	2018年7月至2019年6月 裂缝持续增加
L8~L9	A区西侧B区东侧	剪切裂缝	近直线型,缝宽0.02~0.1 m,延伸10~50 m,为剪切成因,裂缝两侧可见相对错动	2019年1—4月
L10~L12	A区前缘	鼓胀裂缝	形状多样,为剪出口,与等高线近平行,缝宽0.1~0.3 m,延伸长度10~25 m,局部裂缝见地下水冒出	2019年1—4月
L13~L14	B区前缘	鼓胀裂缝	近直线,裂缝高程与等高线近重叠,为剪出口,缝宽0.1~0.3 m,延伸长度20~50 m,局部见少量地下水冒出	2019年1—4月

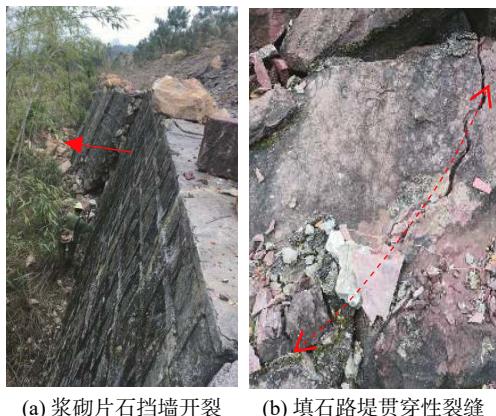


图3 破坏典型照片

Fig. 3 Typical photo of damage

变,同一断面的CX2-4在深8.0~12 m及20.5~25.5 m区间出现了明显的位移增大波动,CX2-2在深度12.5~18 m及CX2-4在深度8.0~12 m的局部测斜曲线呈现“D”字形,得出顶部滑面分别位于对应测斜孔的15 m、10.5 m处;CX2-4在深度20.5~25.5 m及CX2-2在深度32.5~36.5 m的局部测斜曲线呈现“r”字形,得出中部、底部滑面分别位于对应测斜孔的20.5 m、33 m处。测斜滑动面所对应位置与钻孔滑动面位置基本一致(图4),说明测斜成果是可靠的。监测显示堆积体底部变形不大,微小变形为中部、底部滑面滑动时牵引所致,说明堆积体未整体复活。

监测曲线(图4)还可以看出:6月2日之前,CX2-2(5月1日开始监测)对应顶部滑面平均变形速率为4.9 mm/d,对应底部滑面平均变形速率为5.2 mm/d,CX2-4(5月12日开始监测)对应顶部滑面平均变形速率为5.5 mm/d,对应中部滑面平均变形速率为5.5 mm/d,此时滑坡深部位移不满足规范<sup>[6]</sup>要求,处于急剧变形阶

段。6月2日之后,随着应急方案、钢管群桩及防排水系统的完善,变形速率呈现持续减小的趋势,日均变形均在0.5 mm以内(图4)。

### 3 新滑坡成因分析

#### 3.1 不良地质

在历史时期该区域滑动过,滑动过程中岩土体相互撞击解体,冲至坡脚堆积形成现堆积体,堆积后岩土结构松散,孔隙度大,决定了该古滑坡堆积体风化程度厚、力学参数低及地下水丰富的结构特征,有利于新滑坡的产生。

#### 3.2 微地貌

滑坡区整体呈上陡下缓地形,中部分布有台阶,两侧及坡脚均为冲沟,地形有利于汇水。坡脚冲沟常年有水,切割较深,软化坡脚,为滑坡剪出创造了天然的临空面。

#### 3.3 岩土结构

滑坡体由人工填土及古滑坡堆积体组成,其中古滑坡堆积体存在力学参数相对较低的风化页岩,为滑面的形成创造了物质条件。人工填土孔隙率大,属中~强透水层,古滑坡堆积体中的风化页岩属弱透水层,强风化层属中~强透水层,残积层的粉质黏土属弱透水层,以上结构特征有利水在风化页岩及粉质黏土顶部汇集。

#### 3.4 人工活动

人工活动主要体现以下四点(图5):①2010年开工建设阳鹿高速,公路以填方形式从本堆积体的中上部通过,路基填筑增加了下滑力,破坏了原始应力平衡,不利稳定;②高速公路的修建阻挡了原自然排水通道,增加了集水面积,地表水径流条件也发生改变,部分汇集于路堤内侧转化为地下水,进一步加速新滑坡的形成;

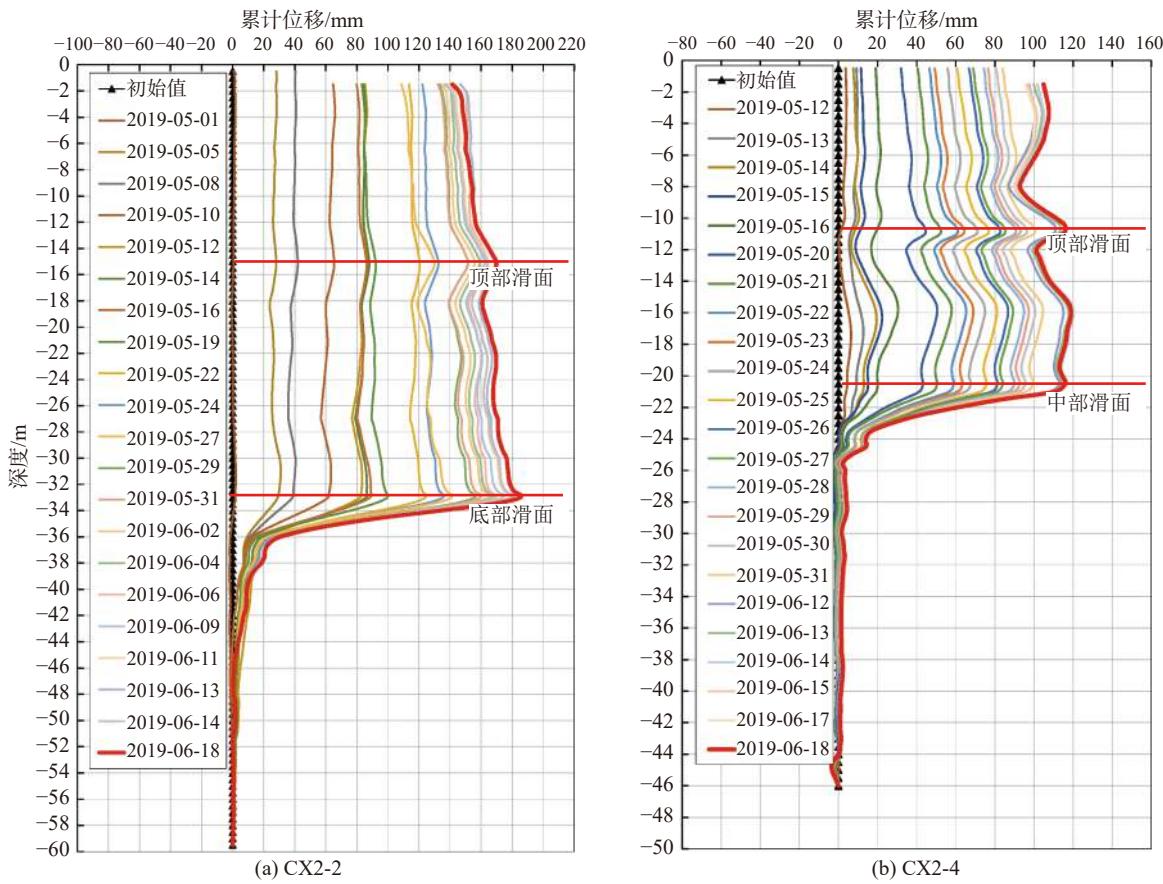


图 4 典型测斜成果图

Fig. 4 Inclinometer results

③桥梁梁场设置在滑体上,大量预制梁堆积在路基上,增加荷载,加大下滑力;④工棚设置在该滑坡后缘,不仅增加荷载,而且勘察期间可见工棚生活用水源源不断流入后缘裂缝中。



图 5 人工活动现场图片

Fig. 5 Photo of human activities

### 3.5 降雨

滑坡区位于桂林荔浦市,该区历年雨量充沛,经统计,2010—2020年间年平均降雨日数为168 d,连续降

雨最长日数达28 d,加之路堤填土及滑坡堆积体部分结构松散,停工期未做任何防排水措施(图5),有利地表水下渗,水的作用加大了下滑力、减少了抗滑力、降低了滑带力学参数等,不利稳定。

从监测数据(图6)可以看出,新滑坡深部位移分别在5月7日—5月9日、5月18日—5月20日、5月26日—5月28日发生过跳跃式突变,与强降雨呈明显对应关系,说明滑坡变形受降雨影响明显,随着应急抢

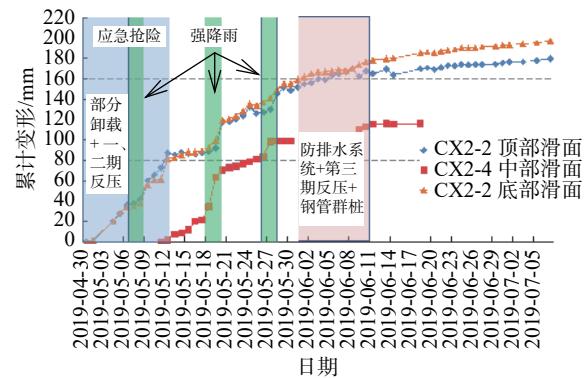


图 6 顶部、中部、底部滑面变形实测图 (CX2-2、CX2-4)

Fig. 6 Measured deformation diagram of the sliding surface

险、钢管群桩及防排水等措施的完善,该滑坡变形逐步减小,处于稳定状态。

不良地质、微地貌及独特的岩土体结构为新滑坡产生的内因,人工活动及降雨为新滑坡产生的主要外因。

#### 4 新滑坡演化过程与变形机理分析

##### 4.1 演化过程

为研究新滑坡的变形过程,利用Midas NX软件建模,编制了导入FLAC<sup>3D</sup>软件的程序,进行三维有限差分分析。计算剖面选取2—2',计算模型见图7,模型长416 m,宽10 m,高136 m,模型共划分7 154个单元,11 007

个单元节点。

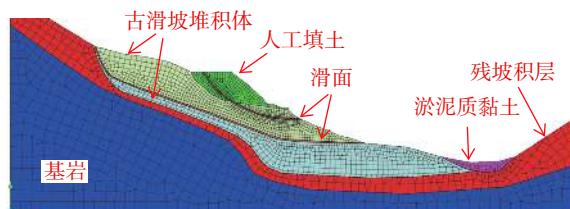


图7 FLAC<sup>3D</sup>数值分析模型图

Fig. 7 Numerical analysis model of FLAC<sup>3D</sup>

物理力学参数通过FLAC<sup>3D</sup>计算变形与实测变形相拟合反演、室内实验及经验综合得出,计算采用M-C本构模型。数值分析所用计算参数见表3。

表3 岩土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock and soil

名称	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )		弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	天然	饱和			天然	饱和	天然	饱和
人工填土	19.4	20.0	55	0.30	22	18	30	23
古滑坡堆积体	20.2	21.0	85	0.28	30	25	27	23
滑面	19.6	20.4	5.60	0.35	25	20	20	16
淤泥质黏土	18.5	19.0	1.50	0.42	15	12	9	7
残坡积层	19.0	19.8	100.00	0.26	35	30	28	23
基岩	26.5	27.0	11 500.00	0.23	150	100	45	40

取路基填筑后连续暴雨工况进行分析,分析成果见图8。

(1)由图8(a)可知,路基堆载后,首先在填方坡脚产生应力集中,但未形成滑动面,同时在顶部、底部滑面的后缘出明显的现拉张变形。由图8(b)可知,随着路基堆载时间的增加及降雨的持续,在路基堆载体的正下方滑面位置出现剪应变集中,这是因为填土自重荷载向正下方传递,致使该处滑带首当其冲。由图8(c)可知随着时间的增加,底部滑面自前缘向后缘贯通,中部滑面自中部向前缘逐步扩展,但此时最大剪应变增量仍位于填方路堤的下部,说明处于蠕滑阶段,前缘还未发生剪切破坏,顶部滑面由中部向前缘贯通,但还未形成贯通的滑动面,此时底部滑面为主滑面。由图8(d)可知运行结束时中部滑面后缘向中部逐步贯通,顶部滑面的最大剪应变增量转移至后缘,中部滑面的最大剪应变增量由中部转移至前缘,前缘出现剪切破坏,说明滑体A已由原来向顶部滑面传递荷载变为向贯通的中部滑面传递荷载,路基开裂严重,滑坡失稳,此时中部滑面转变为主滑面,由监测数据可知,对应中部滑面的变形速率也是最大。由上可知:顶部滑面、中部滑面大剪应变增量由后缘向中部及中部向前缘贯通,底部滑面由前缘

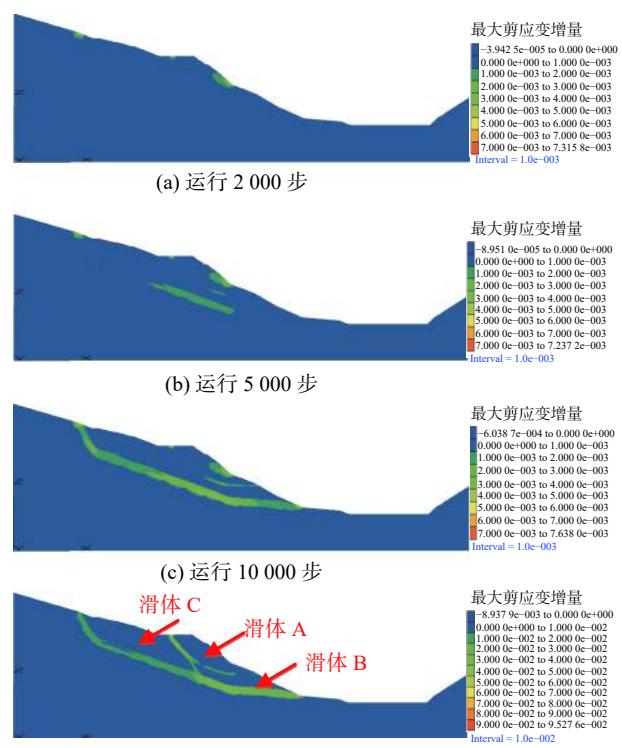


图8 剪应变增量

Fig. 8 Contour of shear strain increment

逐步向后缘贯通。

(2)由剪应变增量变化情况可知,堆积体底部未产生明显滑动,堆积体未整体复活。

(3)从表 2 可以看出,A 区后缘先发生变形开裂,随后 A、B 区两侧出现剪切裂缝,紧接着 A、B 区前缘出现鼓胀裂缝,最后 C 区两侧及后缘出现剪切及拉张裂缝,裂缝先后顺序与变形演化过程基本相符合,说明本次变形演化过程模拟是可靠的。

## 4.2 变形机理

高速公路修建前古滑坡堆积体处于稳定状态,此时堆积体应力处于平衡状态,路基填筑后,下滑力增加,新环境使堆积体不断变形来寻找新的应力平衡,而堆积体中的风化页岩为相对软弱夹层,堆载后优先在风化页岩产生变形,使得该滑坡处于蠕变状态。

随后经历近 4 年的间隙降雨入渗,对滑坡的影响如下:一是雨水沿着松散路基填筑层及堆积体下渗并在风化页岩中汇集,软化崩解岩土降低了滑面力学参数,使后缘岩土体自重增加,加大了下滑力,降低了滑带土的有效应力及基质吸力<sup>[15~16]</sup>;二是滑坡前缘基岩面平缓,后缘陡峭,前缘有利于地下水汇集,暴雨使得前缘水位抬升,岩土浮力增加,止滑力减小;三是暴雨工况下形成的渗透力易使堆积体粗颗粒中的细颗粒逐步冲走,土体逐步架空,渗透力不仅加大下滑力,土体架空后还加剧变形。降雨是诱发新滑坡的催化剂。

随着降雨的持续,滑带土一直在变形,结合 4.1 节的变形演化及表 2 的裂缝先后顺序可知,对于滑体 A 及滑体 B,堆载作用首先在新滑坡后缘出现拉张变形及中部出现剪切变形,随后从后缘及中部逐步向前缘贯通,符合推移式滑坡规律。对于滑体 C,首先在后缘出现拉涨裂缝及前缘出现剪切变形,后由前缘逐步向后缘贯通,符合牵引式滑坡规律。中部滑面贯通后,前缘出现应力集中,当抗滑段滑带土变形超过土的最大剪应变时将出现剪切破坏,新滑坡失稳。

综上所述,新滑坡中上部路基、梁场等堆载首先向滑坡前缘挤压,形成推移式滑体 A 及推移式滑体 B,滑体 C 随后受滑坡 A、滑体 B 向前变形临空牵引而形成。产生过程为:后缘拉张变形-中部剪切蠕变-滑体 A、B 推移剪出失稳-滑体 C 前缘临空牵引失稳,属前段推移后段牵引型复合式滑坡,具多级、逐级及渐进滑动特点。

## 5 结论

(1)K52 新滑坡为古滑坡堆积体中局部复活的滑

坡,该古滑坡堆积体内部发育软-可塑状软弱夹层风化页岩,为新滑坡的主要滑带土。

(2)K52 新滑坡具三层滑动面,失稳前底部滑面为主滑面,失稳阶段中部滑面为主滑面,产生过程为后缘拉张变形-中部剪切蠕变-滑体 A、B 推移剪出失稳-滑体 C 前缘临空牵引失稳,属前段推移后段牵引型复合式滑坡,具多级、逐级及渐进滑动特点。

(3)古滑坡堆积体未产生整体复活,诱发 K52 新滑坡的主要内因为不良地质、微地貌及独特的滑坡体结构特征,主要外因为在中后部堆载、填土改变地表水径流路径、向滑坡排放生活用水及降雨。

(4)K52 新滑坡在人工堆载后,暴雨工况下处在急剧变形状态,依据规范 [17],需进行处治,处置重点应防止顶部、中部及底部三个滑动面继续变形,同时应防止古滑面及古滑坡堆积体内部其余风化页岩夹层产生次级滑动。

## 参考文献 (References) :

- [1] 卫童瑶,殷跃平,高杨,等.三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73~81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73~81. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 史文兵,黄润秋,左双英,等.贵州省贵定县定东小学滑坡形成机制 [J].水土保持通报, 2015, 35(1): 287~290. [SHI Wenbing, HUANG Runqiu, ZUO Shuangying, et al. Landslide formation mechanism at Dingdong primary school of Guiding County in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 287~290. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张岩岩,文海家,麻超超,等.基于多源数据的蔡家坝特大型滑坡成因机制研究及稳定性评价 [J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2048~2063. [ZHANG Yanyan, WEN Haijia, MA Chaochao, et al. Failure mechanism and stability analysis of huge landslide of Caijiaba based on multi-source data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2048~2063. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 闫国强,殷跃平,黄波林,等.三峡库区巫山金鸡岭滑坡成因机制与变形特征 [J].岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 329~340. [YAN Guoqiang, YIN Yueping, HUANG Bolin, et al. Formation mechanism and deformation characteristics of Jinjiling landslide in Wushan, Three Gorges Reservoir region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup

- [5] 何坤,胡卸文,马国涛,等.四川省盐源玻璃村特大型玄武岩古滑坡复活机制[J].岩土力学,2020,41(10):3443–3455. [HE Kun, HU Xiewen, MA Guotao, et al. The reactivated mechanism of Boli village giant ancient basalt landslide in Yanyuan, Sichuan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3443 – 3455. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 中华人民共和国交通运输部.公路滑坡防治设计规范: GTG/T 3334-2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway landslide stabilization: GTG/T 3334-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2019. (in Chinese) ]
- [7] 张卫雄,翟向华,丁保艳,等.甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):7–14. [ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County of Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 7 – 14. (in Chinese with English abstract) ]
- [8] 窦晓东,张泽林.甘肃舟曲崖豁口滑坡复活机理及成因探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):9–18. [DOU Xiaodong, ZHANG Zelin. Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes(Zhouqu County, Gansu, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 9 – 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 黄达,匡希彬,罗世林.三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J].水文地质工程地质,2019,46(5):127–135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 127 – 135. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等.三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J].水文地质工程地质,2015,42(6):145–153. [DAI Zhenwei, YIN Yueping, WEI Yunjie, et al. Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 145 – 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 吕俊磊,胡卸文,顾成壮,等.四川省南江县下两中学滑坡成因机制分析与稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):12–17. [LYU Junlei, HU Xiewen, GU Chengzhuang, et al. Formation mechanism and stability of landslide at Xialiang middle school in Nanjiang County, Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 12 – 17. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 易志坚,黄润秋,吴海燕,等.唐古栋滑坡成因机制研究[J].工程地质学报,2016,24(6):1072–1079. [YI Zhijian, HUANG Runqiu, WU Haiyan, et al. Research on formation mechanism of Tanggudong landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1072 – 1079. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 张杰,王宇,李长才,等.云南彝良两河镇坪子滑坡成因及特征分析[J].水文地质工程地质,2018,45(6):157–163. [ZHANG Jie, WANG Yu, LI Changcai, et al. Characteristics and cause analyses of the Pingzi landslide in Lianghe Town, Yiliang County, Yunnan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 157 – 163. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 黄晓虎,易武,龚超,等.开挖致使古滑坡复活变形机理研究[J].岩土工程学报,2020,42(7):1276–1285. [HUANG Xiaohu, YI Wu, GONG Chao, et al. Reactivation and deformation mechanism of ancient landslides by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1276 – 1285. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 蒋中明,李小凡,伍忠才.悬挂型暂态饱和边坡稳定性分析方法研究[J].中国公路学报,2018,31(2):48–56. [JIANG Zhongming, LI Xiaofan, WU Zhongcui. Research on analysis method for stability of perched transient saturated slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 48 – 56. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 文海家,张岩岩,付红梅,等.降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J].中国公路学报,2018,31(2):15–29. [WEN Haijia, ZHANG Yanan, FU Hongmei, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 15 – 29. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 中华人民共和国交通运输部.公路路基设计规范: JTGD30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTGD30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese) ]