

桥改路基工程稳定性综合评价方法及应用研究

曹康健¹, 陈争玉², 蒋文鹏³, 尹小涛⁴

(1. 云南交投公路建设第二工程有限公司, 云南 昆明 650118;

2. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041;

3. 云南大漾云高速公路有限公司, 云南 大理 671000;

4. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 在广泛调研桥改路基工程的基础上, 凝练桥改路基工程的共性问题, 构建此类工程的稳定性综合评价方法及安全控制标准体系, 在工程应用中检验并完善该方法及指标体系。所得结论如下: 建立包括地基承载安全、改变地形边坡稳定性和变形稳定的山区公路桥改路基工程稳定性评价方法框架体系, 并分别给出了地基承载、边坡稳定性和变形稳定性对应的安全控制标准; 在实际工程建设中, 需要控制填筑高度, 使得加载造成的附加应力小于地基承载能力, 实现地基承载安全控制; 通过填筑体内部滑移、填筑体与斜坡地形接触面滑移、填筑体和自然地形深大滑移等潜在风险复核, 实现边坡稳定性的全面系统控制; 斜坡地形或者半挖半填下的差异变形造成的中长期影响需要慎重考虑, 可通过预留变形实现差异变形对路面结构中长期安全控制目标。

关键词: 桥改路基类工程; 稳定性综合评价方法; 地基承载力; 边坡稳定性; 差异变形

中图分类号: TU416.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0192—06

Comprehensive Stability Evaluation Method of Roadbed Changed from Bridge Engineering and Its Application

CAO Kangjian¹, CHEN Zhengyu², JIANG Wenpeng³, YIN Xiaotao⁴

(1. Yunnan Jiaotou Road Construction Second Engineering Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650118, China;

2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China;

3. Yunnan Dayangyun Highway Limited Company, Dali, Yunnan 671000, China;

4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Based on the extensive investigation of many bridge subgrade projects, the common problems of bridge subgrade projects were established, and the comprehensive evaluation method and safety control standard system of such projects were established, and the method and index system were applied, tested and improved in practical projects. The conclusions are as follows. A framework was proposed for comprehensive stability evaluation methods for mountain highway bridges to subgrade engineering, including foundation bearing safety, terrain-changing slope stability, and deformation stability, and the corresponding safety control standards for foundation bearing safety, slope stability and deformation stability are proposed respectively. In actual engineering construction, it is necessary to control the filling height so that the additional stress caused by loading is less than the bearing capacity of the foundation, so as to realize the safety control of the foundation bearing. By checking the potential risks of internal slip of fill body, contact surface slip of fill body and slope topography, and deep slip of fill body and natural topography, the comprehensive and sys-

收稿日期: 2021-10-11

修稿日期: 2021-11-27

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科教便[2020]98号)

作者简介: 曹康健(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事高速公路施工技术研究工作。E-mail: 316683512@qq.com

通讯作者: 尹小涛(1975—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事工程防灾减灾研究工作。E-mail: xtyin@whrsm.ac.cn

tematic control of slope stability can be realized. The influence of differential deformation caused by slope topography or half-dig and half-fill should be carefully treated, and the long-term safety control target of pavement structure caused by differential deformation can be realized through reserved deformation.

Keywords: roadbed changed from bridge; comprehensive evaluation method of engineering stability; foundation bearing capacity; slope stability; differential deformation

山区交通工程建设经常采用桥梁、路基、路堑等不同的方式通过沟谷和斜坡地形,不同分项工程的稳定性评价方法和安全控制技术往往也不同,涉及到多环节或者组合类型的变更工程更是如此,需要综合方法才能涵盖所有技术细节,否则容易造成疏漏和隐患。山区公路建设中,常遇到桥梁改成路基的情况,一方面是为了节约造价和维护成本,另一方面往往是为了土石方平衡,再有就是为了获取宝贵的平整土地。那么桥梁通过的小环境扰动,改为对原始地形改变较大的填筑工程,由此带来了地基承载问题、边坡稳定问题和差异变形产生的结构安全问题等多方面的挑战。因此,需要研究桥改路基工程的安全组构、综合评价方法、评价标准及系统安全控制等基础理论、方法和技术难题。

目前国内外对于桥改路基工程的研究主要集中在以下几个方面:(1) 勘察设计将桥改路基工程看成路基工程的重新设计或者变更设计,常按一般处理,缺乏系统工作,容易造成后期地基失稳、路堤边坡长期稳定性问题、横断面方向差异变形造成路面结构破损等不同规模 and 不同发育程度的工程隐患^[1-3];(2) 缺乏针对性研究,这部分工作已经超出了勘察设计单位的技术能力,需要专门的科研单位对其进行深入系统的研究,形成综合评估和技术保障体系支撑,也需要相关单位能重视起来,并将研究成果纳入实际工作中,形成综合保障,使得桥改路基工程的中长期工程安全及耐久性能够得到有效保证^[4-8];(3) 缺乏相关管理制度、综合评价方法和安全控制指南的指导,需要及时总结遇到的工程技术难题,形成方法或技术标准,为类似工作提供指导^[9-16]。

针对桥改路基工程,在广泛调研桥改路基工程的基础上,总结该类工程的共性问题;依托具体工程,形成综合评价方法、标准等;根据评估结果,形成不同方面的技术保障措施、优化设计及中长期质量保证建议,构建该类工程稳定性综合评价方法、指标体系和安全控制标准,为类似工程提供指导。

1 桥改路基工程稳定性综合评价方法

1.1 桥改路基工程的共性问题

桥梁经常作为山区跨越沟谷斜坡的重要结构类型,其优点在于环境扰动小;缺点是造价高,运维成本高,对场地要求高。路堤的优点是适用性广泛,起伏不同的地形均可采用,造价相对较低;缺点是环境改变较大。为了兼顾土石方平衡和山区用地,经常遇到规模不大的桥梁改成填筑路堤的情况,常见类型见图 1,即斜坡或沟谷填筑和半挖半填两类。

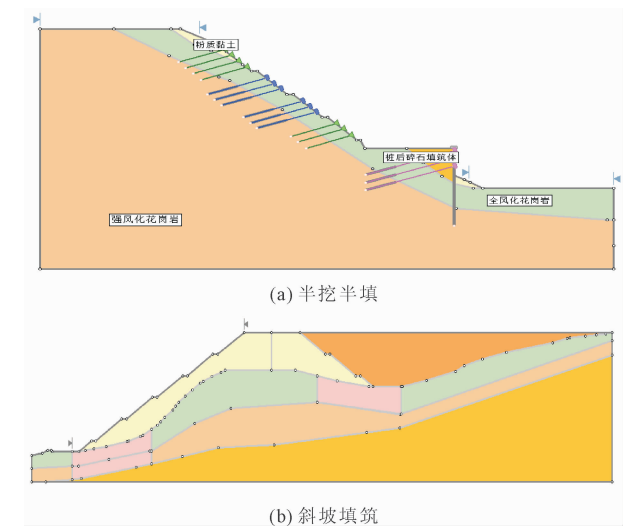


图 1 典型桥改路基工程

从图 1 可知,上述桥梁变为路堤,带来的共性问题如下:

- (1) 地基承载问题,原有桥梁为桩基础,是深基础类型,主要是深部承载性能良好的地层受力,表层地基受力有限,不存在地基承载安全问题;现在变为堆填施工,表层承载性能一般的残坡积土层成为受力主体,地基承载安全需要引起重视,即填筑高度要依据地基承载力确定。
- (2) 边坡稳定问题,原有桥梁通过方式对自然地形改变不大,对自然斜坡稳定性影响有限;路堤方式通过,对原有地形改变较大,极大地影响了边坡稳定性,需要注意边坡沿填筑体内部、填筑体与自然坡体结合部、自然坡体深部产生滑移的潜在安全风险。

(3) 差异变形问题,原有桥梁桩基支撑,承载力足够,差异变形较小;现在改为路堤形式,填筑土体的厚度差异、填筑质量和地基受力变形均可能带来路面沿线路纵向和横向产生差异变形,一般横断面方向的差异较常见,需要预先考虑。

(4) 其它问题,填筑施工前需要清表;清表地形整理成一系列高度不一的台阶,增强填筑体和斜坡结合部的相互作用;厚度较大时分层设置内部集水排水廊道;外部护面,减小降雨或者气候影响;也可以考虑设置筋材增强填筑体整体受力或者变形均匀。

1.2 工程稳定性综合评价方法

前面 3 个问题涉及到评价方法和指标体系,最后一个问题可以作为设计说明或者细节在施工组织设计中得到体现,所以桥改路基工程稳定性综合评价方法、指标和控制标准具体如下:

(1) 地基承载安全评价,主要是填筑造成的附加应力不能大于地基容许承载力,具体指标如下:

$$f_a \geq \gamma h_{\max} \tag{1}$$

式中: f_a 为地基承载力特征值,kPa; γ 为填筑体重度,kN/m³,一般可按 19 kN/m³ 取值; $h_{\max}$ 为最大填筑高度,m。如存在软弱下卧层,则参照《建筑地基基础设计规范》^[13] (GB 50007—2011) 的下卧层验算,荷载分布可以按三角形分布或者三角形与矩形组合形式,按角点或者中心点方式验算。

(2) 边坡稳定性评价,改变地形下边坡在正常运行工况(自然)、非正常 I 工况(降雨)、非正常 II 工况(地震)下沿路堤填筑体内部、填筑体与斜坡结合部、斜坡深部等不同滑移模式下的边坡稳定性是否满足工程稳定性要求,具体指标如下:

$$F_s < F_{st} \tag{2}$$

式中: F_s 为边坡稳定性系数,可以通过极限平衡法或者强度折减法计算得到; F_{st} 为路堤边坡在一定工程等级下前面 3 个工况下的安全系数标准,一般可以通过规范查表确定。

(3) 变形稳定性评价,对于路堤等填筑体的变形控制,主要部分是上部荷载造成的地基沉降变形,一般认为填筑质量在满足规范的压实要求下产生的工后沉降占比不大,即附加应力造成的地基变形为主,填筑质量造成的填筑体变形不单独考虑,主要依据路基沉降限制值不能超过 30 mm 进行控制,具体指标如下:

$$S < 30 \text{ mm} \tag{3}$$

式中: S 为地基沉降量,mm,可以采用《建筑地基基

础设计规范》^[13] (GB 50007—2011) 规定的分层总和法进行计算,也可以利用有限元估算变形值。

上述 3 个指标,3 部分稳定性均满足要求,才能保证桥改路基工程的综合稳定。

2 工程应用及检验

2.1 工程概况

依托青临高速公路 4 标段 K54 + 260 青树塘 3 号中桥改为路基工程,根据原设计,该路段左幅为路堑边坡,右幅为 3 孔 20 m 先简支后张 T 型梁桥。根据水文地质、工程环境评价、成本、质量、进度等多方面综合评估,决定将中桥调整为路基,并采取桩锚 + 挡土板加固措施,填筑所用材料主要为隧道石渣,中桥平面布置和立面构造如图 2 所示。

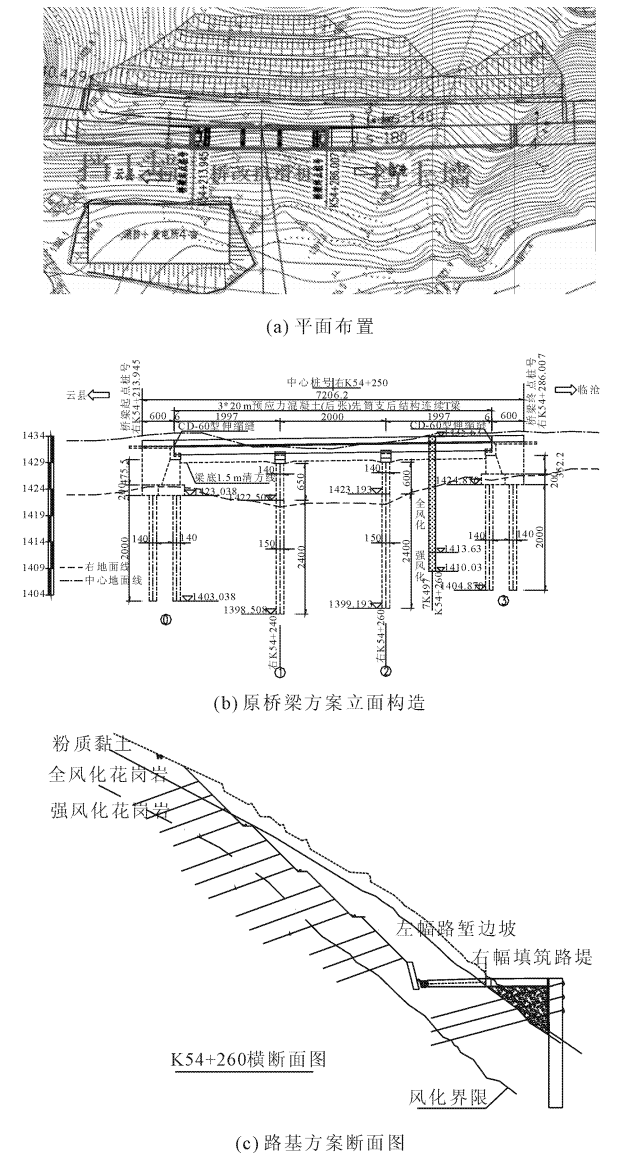


图 2 青树塘 3 号中桥改路基方案图

根据既有勘察资料,结合地面调查,桥址区覆盖第四系残坡积(Q_4^{cl+dl})碎石土层,下伏基岩为印支期花岗岩。

(1) 碎石土:褐黄色,稍密状,骨架颗粒主要由花岗岩全-强风化碎块组成,层厚约 0.5 m~2.0 m,地基承载力 $f_a=160$ kPa。

(2) 花岗岩:灰白、灰黑色,中-细粒结构,块状构造,裂隙发育,岩质坚硬。上部为全风化层,岩芯呈砂土状,厚约 8.0 m~10.0 m,地基承载力 $f_a=280$ kPa;中部为强风化,节理、裂隙较发育,岩体较破碎,多呈块状,层厚 3.0 m~4.0 m,地基承载力 $f_a=800$ kPa;下部中风化,岩体完整,强度较高,地基承载力 $f_a=2\,000$ kPa。

根据建设方提供的勘察设计资料和参数建议值表,确定了该区计算涉及岩土层的物理力学性质指标,见表 1。

表 1 各地层计算参数统计表

材料类型	工况	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /MPa	泊松 比	黏聚 力 /kPa	内摩 擦角 /($^\circ$)
黏性土	天然	17.6	25	0.34	25.0	20.0
	饱和	18.8	20	0.35	24.0	19.0
全风化花岗岩	天然	21.0	130	0.33	28.6	30.8
	饱和	21.5	80	0.34	25.8	29.8
强风化花岗岩	天然	26.0	750	0.30	110.0	40.0
	饱和	26.5	500	0.28	60.0	39.0
中风化花岗岩	天然	26.5	3300	0.25	220.0	42.0
	饱和	27.0	1600	0.26	200.0	41.0
桩后碎石填筑体	天然	19.5	300	0.34	10.0	35.0
	饱和	21.0	100	0.35	5.0	34.0

2.2 工程稳定性综合评价方案及标准

由桥改路基工程稳定性综合评价方法可知,右幅青树塘 3 号中桥改为填筑路堤,采取桩板墙加固方案,左幅仍保持原路堑边坡方案,这样形成左挖右填路基方案,评价的三个内容及安全控制标准如下:(1) 地基承载安全评价,填筑前清表地基为全风化花岗岩,该层地基容许承载力 280 kPa;(2) 边坡稳定性评价,该路段为高速公路,所以参考二级路及以上公路一级边坡工况的安全系数标准,统计列于表 2;(3) 变形稳定性评价,路堤沉降总量不大于 30 mm。评价部位、内容、工况、评价标准等统计列于表 2。

表 2 左幅路堑和右幅路堤工程稳定性综合评价内容及标准

位置	路堑和路堤边坡 工况	路堑和路堤边坡 安全标准	地基承载 安全标准 /kPa	地基沉降 控制标准 /mm
左幅路堑边坡	正常工况	1.3	全风化花岗岩 <280	沉降总量 <30
右幅桥改路堤	非正常工况 I	1.2		
	非正常工况 II	1.1		

2.3 桥改路堤段工程稳定性综合评价

2.3.1 地基承载安全评价

利用 PHASE2D 软件建立考虑施工过程的有限元数值模型,模拟左幅路堑边坡开挖和右幅路堤填筑施工过程的应力应变场变化情况,限于篇幅仅给出了自然和降雨工况路堤填筑部位竖向应力云图,详见图 3,斜坡结合部竖向应力最大值统计列于表 3。

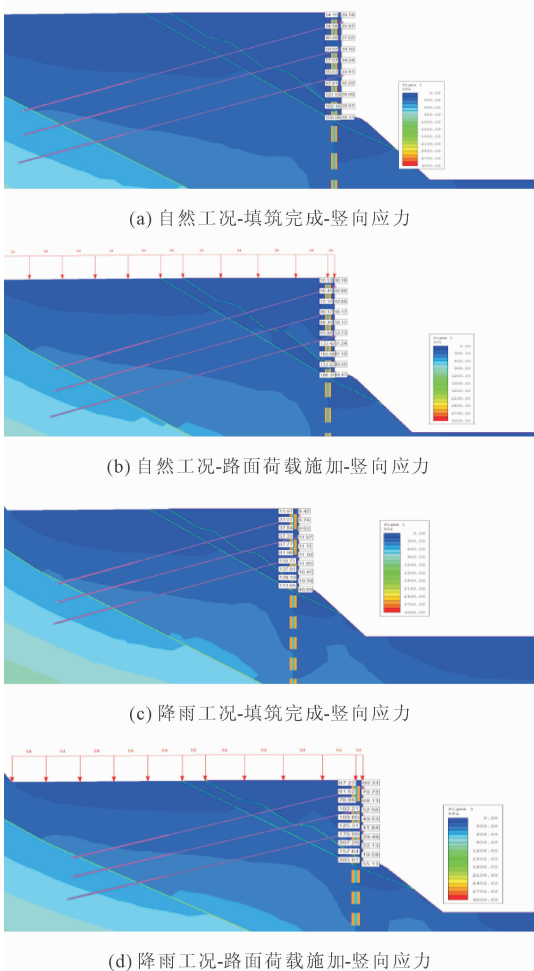


图 3 桥改路基段竖向应力云图

由图 3 和表 3 可知,最不利条件下填筑体与表层地基土之间的竖向应力最大值为 205 kPa,小于表层全风化花岗岩地基容许承载力 280 kPa,右幅路堤

段地基承载安全。左幅路堑开挖卸荷应力远大于路面荷载,所以不存在地基承载安全问题。综上,该桥改路基段地基承载安全。

表 3 不同工况路堑 + 路堤边坡竖向应力统计表

工况	竖向应力/kPa		地基承载力 /kPa
	填筑完成	路面荷载施加	
自然	156	188	280
降雨	173	206	

2.3.2 变形稳定性评价

在上述计算基础上,不同工况下该路段的水平位移和竖向位移云图见图 4,路面的最大变位值统计列于表 4。

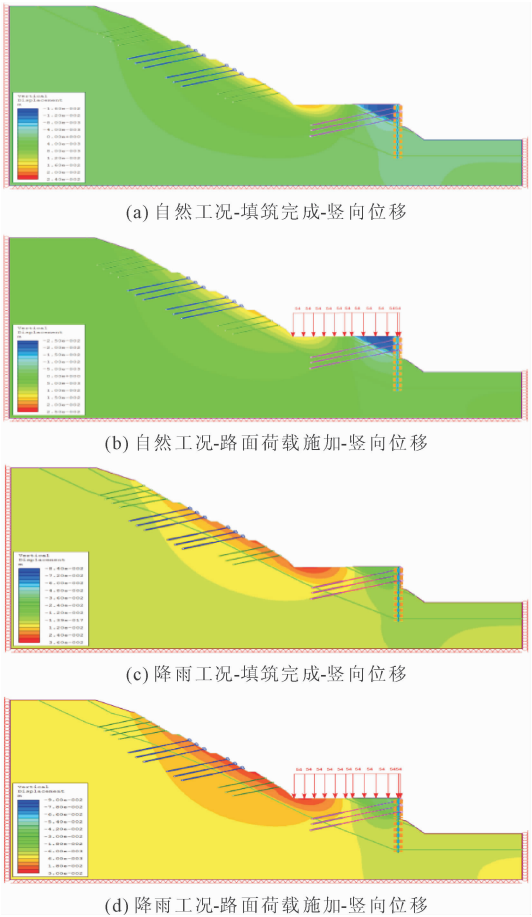


图 4 桥改路基段位移云图

表 4 不同工况路堑 + 路堤边坡竖向位移最大值统计表

工况	竖向位移/kPa		地基沉降变形 /mm
	填筑完成	路面荷载施加	
自然	34.5/-12.5	30.7/-21.0	30.0
降雨	60.3/-20.0	54.5/-31.5	

由图 4 和表 4 可知,竖向位移的最大值出现在

路面两侧,回弹变形最大值 60.3 mm 位于左幅路堑部位,沉降变形最大值 31.5 mm 出现在右幅填筑路堤位置。左幅回弹右幅下沉,符合左幅路堑开挖卸荷回弹、右幅路堤沉降的总体规律;同时降雨工况整体变形大于自然工况;路面荷载施加后左幅变形得到抑制、右幅沉降有所增加,也符合受力特性。降雨 + 路面荷载施加工况下沉降变形最大值 31.5 mm,稍大于变形控制标准 30.0 mm,实际工程的填筑路堤部分没有全部饱水条件,所以实际变形量要小于 31.5 mm,在做好地面截排水和填筑体内部控水措施的基础上,可不做特殊处理。

2.3.3 边坡稳定性评价

利用 Slide 软件建立边坡二维极限平衡数值模型,采用 Bishop 法计算边坡稳定性系数^[14],边坡稳定性分析主要是评价左幅路堑边坡和右幅路堤边坡在正常(自然)、非正常 I(降雨)和非正常 II(地震)等三个工况下的稳定性,稳定性计算结果见图 5 和表 5。

表 5 不同工况路堑和路堤边坡稳定性系数统计表

地形	工况	边坡稳定性系数 F_s	安全系数标准
开挖	正常(自然)	路堑 1.571	1.30
		路堤 1.455	
填筑	非正常 I(降雨)	路堑 1.461	1.20
		路堤 1.325	
荷载	非正常 II(地震)	路堑 1.358	1.10
		路堤 1.311	

由图 5 和表 5 可知,开挖 + 上部路堑边坡格构锚杆索加固 + 填筑改变地形 + 下部路堤边坡桩锚板加固 + 路面荷载条件下,路堑边坡和路堤边坡各工况稳定性均满足工程稳定标准。当前加固措施下,边坡稳定性评价的结论是支撑桥改路基方案的,即桥改路基方案下该区整体边坡(包括上部路堑边坡和下部路堤边坡)的稳定性均满足工程稳定性要求。

3 结 论

依托青树塘 3 号中桥改路基方案,检验了桥改路基工程稳定性综合评价方法和指标体系的合理性,所得结论如下:

(1) 依托实际桥改路基工程,构建了包括地基承载安全评价、边坡稳定性评价和变形稳定性评价的桥改路基工程稳定性综合评价方法和安全控制标准体系。

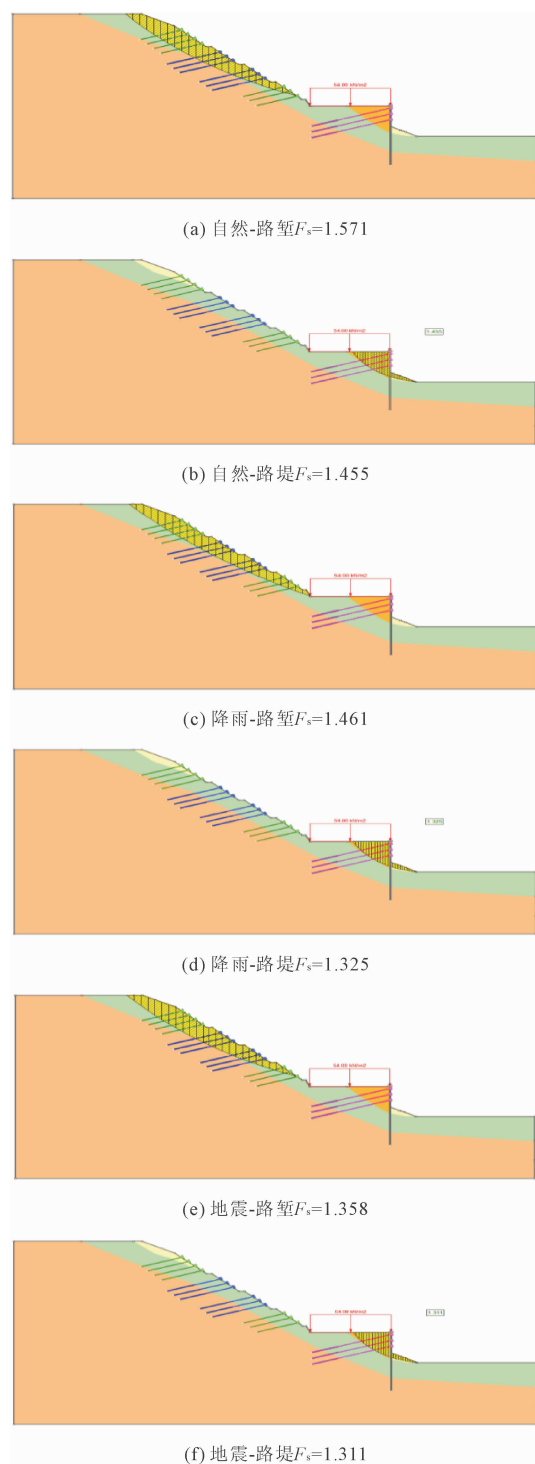


图5 边坡稳定计算结果图

(2) 利用该方法,检验了青树塘3号中桥改路基方案的合理性,发现该路段填筑造成的最大竖向应力 205 kPa,小于表层全风化花岗岩地基容许承载力 280 kPa,地基承载安全;左幅路堑边坡和右幅路堤边坡各工况下的边坡稳定性系数均满足工程稳定

性要求,边坡整体稳定;开挖和填筑造成沉降变形最大值 31.5 mm,大于沉降变形控制总量 30.0 mm,但考虑到填筑体没有全部饱水条件,在做好地面截排水和内部排水措施下,实际变形量应该小于 30 mm 控制标准,可不做特殊处理。因此,该桥改路基方案整体安全可行。

(3) 该方法可为类似桥改路基工程提供稳定性综合评价方面的指导。

参考文献:

- [1] 郑熙,杜孟芸. 高速公路桥梁改路基优化设计实例分析与评价[J]. 公路交通技术,2015(4):18-21.
- [2] 刘维娟,程谔,张朔. 云临高速桥改路基路堑边坡与填方路堤稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):125-130,143.
- [3] 付军明,张良陈,曾骏,等. 软基条件下路基与桥梁方案比选[J]. 交通科技,2013(2):69-71.
- [4] 孙来超,邓伟. 浅谈高速公路桥梁改路基的优化设计[J]. 西部交通科技,2018(4):84-86,170.
- [5] 魏松涛,王松. 山区高速公路桥梁改路基优化设计探讨[J]. 黑龙江交通科技,2014,37(5):106-108.
- [6] 曾亮亮,尹小涛. 局部不良地质下桥改路基边坡稳定性评价[J]. 土工基础,2020,34(2):121-126.
- [7] 付军明,张良陈. 软基条件下路基与桥梁方案比选[J]. 交通科技,2013(2):69-71.
- [8] 邵鹏飞. 公路路基路面质量通病成因及施工加固技术[J]. 黑龙江交通科技,2021,44(9):10-11.
- [9] 黄晓东. 高速公路路改桥后路堤土体蠕变特性及稳定分析研究[R]. 南京:江苏省南京市市政设计研究院有限责任公司,2012-10-27.
- [10] 匡寅. 山区高速公路填方路基沉降预测模型可靠性研究[J]. 建材发展导向,2020,18(16):70-71.
- [11] 李井元,丁兆锋. 成昆铁路既有桥梁改路基方案研究[J]. 高速铁路技术,2017,8(5):57-59.
- [12] 叶咸,高瑜,鲁婷,等. 复杂地质条件下泡沫轻质土路基技术方案研究[J]. 公路,2021,66(8):1-6.
- [13] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [14] 张中行,高林,吴龙生,等. 桩基础和隔离桩在控制路堤对桥基影响中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):190-195.
- [15] 滕世权,杨涛,张文彦. 老路边坡桩对拓宽路堤沉降控制影响的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):76-80,175.
- [16] 杨才,丰土根,杨景森. 高填路堤稳定性影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(3):23-27.