

小半径曲线钢箱梁桥顶推施工箱梁 横向倾覆稳定性研究

车铁成¹, 邓涛², 王巍¹, 龚洪苇², 周越良²

(1. 浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310014;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 目前曲线箱梁桥顶推施工在工程实际中得到了广泛应用, 相对于直线桥, 顶推中小半径曲线桥的箱梁受力更为复杂, 箱梁体易发生横向倾覆, 应该加以高度重视。为此, 以一小半径曲线钢箱梁桥为工程背景, 应用箱梁横向倾覆稳定系数计算方法, 针对施工中最不利工况, 在顶推施工过程中的不同阶段悬臂长度与成桥跨数对箱梁稳定的影响, 建立小半径曲线箱梁桥计算的有限元模型, 初步探讨顶推施工中关键阶段的钢箱梁横向倾覆稳定性。计算结果表明: 施工中的悬臂段长度对结构倾覆稳定性有较大的影响, 悬臂段越长, 稳定系数越小, 结构抗倾覆稳定性能越差; 随着成桥跨数的增加, 远端支座荷载偏心距随之减小, 梁体抗倾覆稳定系数增大。

关键词: 曲线钢箱梁桥; 顶推施工; 横向倾覆稳定性; 支座脱空

中图分类号: U445.462

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)02-0144-05

Stability of Transverse Overturning of Steel Box Girder Bridge with Small Radius Curve

CHE Tiecheng¹, DENG Tao², WANG Wei¹, GONG Hongwei², ZHOU Yueliang²

(1. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The pushing construction of curved box girder bridges has been widely used in engineering practice. Compare to the straight-line bridge, the top push small radius curve bridge box beam force is more complex, because the box beam body is prone to horizontal overturning, which should be paid great attention. To this end, a steel box girder bridge with small radius curve was taken as an example, the box beam lateral overturning stability coefficient calculation method was adopted to construct the most adverse working conditions in the top push construction process in different stages of the cantilever length and bridge span on the stability of the box beam. A finite meta-model was adopted to simulate a small radius curve box beam bridge which is followed by a preliminary discussion on the steel box beam horizontal top-over stability. The calculation results show that the length of the cantilever section during construction has greater impacts on the overturning stability of the structure. When the cantilever section is longer, the smaller the stability coefficient, the worse the anti-overturning stability of the structure. As the number of bridge spans increases, the eccentricity decreases accordingly at the far-end bearing, and the beam's anti-overturning stability coefficient increases.

Keywords: curved steel box girder bridge; jacking construction; lateral overturning stability; support voiding

近年来, 曲线桥梁体倾覆事故不断发生。例如, 2019年10月10日无锡高架桥侧翻事故, 2017年1月19日福建在建的龙潭特大桥右线梁体发生倾覆,

给现今桥梁工作者敲响了警钟, 桥梁设计不仅要满足强度要求, 箱梁横向倾覆稳定性也同样重要。对此针对运营中曲线桥的箱梁横向倾覆稳定性, 一些

专家学者做过不同方面的研究^[1-2],研究成果较为成熟。而不同于运营阶段,在顶推法施工中,桥梁的边界条件和荷载条件在各个施工阶段均在发生变化,梁体正负弯矩交替变化,抗倾覆稳定性分析更为复杂^[3]。对于顶推施工曲线桥箱梁横向倾覆稳定性问题的研究,左家强^[4]对半径 $R = 500 \text{ m}$ 的预应力混凝土连续梁进行顶推施工研究,发现悬臂部分的梁体向内侧扭转,使得内侧滑道支反力大于外侧滑道支反力。黄成国等^[5]采用有限元方法计算步履式顶推施工曲率半径 400 m 的四跨连续钢箱梁,对顶推施工中箱梁横向倾覆稳定性影响因素进行了敏感性分析。吴大宏等^[6]通过对最小半径 R 分别为 500 m 和 800 m 的变曲率三跨连续梁的研究,基于悬臂阶段存在扭矩,在自重荷载作用下必然会产生弯扭耦合作用的影响,应用横向抗倾覆稳定性计算方法进行了验算。

前述研究顶推施工小半径曲线桥半径均在 400 m 以上,为了进一步研究小半径曲线钢箱梁桥在顶推施工过程中箱梁的横向抗倾覆稳定性,本文以半径 $R = 110 \text{ m}$ 的某大桥为背景,主要考虑顶推施工荷载及自重作用,利用抗倾覆稳定性计算原理,结合 MIDAS/Civil 软件建立顶推施工计算模型,对不同施工阶段导梁及箱梁的支座运算,得到内外侧支座反力可计算抗倾覆系数 k ,以此对小半径曲线钢箱梁顶推施工箱梁横向抗倾覆稳定性评价,为此类工程施工提供借鉴意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

某大桥共 2 联,采用 $4 \times 20 \text{ m}$ 钢筋混凝土现浇箱梁 $+30 \text{ m} + 3 \times 45 \text{ m} + 30 \text{ m}$ 等截面连续钢箱梁,最大跨径 45 m ,半径 $R = 110 \text{ m}$ 。立面见图 1,平面布置见图 2。连续钢箱梁采用顶推施工方法,钢箱梁截面形式采用单箱双室,顶面宽 9.90 m ,底面宽 5.22 m ,梁高约 2 m ,底板与顶板平行。梁顶板厚 16 mm ,底板厚 16 mm ,顶板纵肋为 $10 \text{ m} \times 160 \text{ mm}$ 的板肋以及 $300 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的 U 型肋,底板纵肋为 $400 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ 的 U 型肋,中腹板为 $10 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 的双向板肋,边腹板为 $12 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的板肋。具体结构形式见图 3。主梁不考虑纵坡的影响,材料采用 Q345qc 钢材,弹性模量为 $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$,泊松比为 0.3 ,重度为 78.5 kN/m^3 。为了减少主梁悬臂段的应力,主梁前端设置 30 m 的钢导梁,材料为 Q345 钢材。

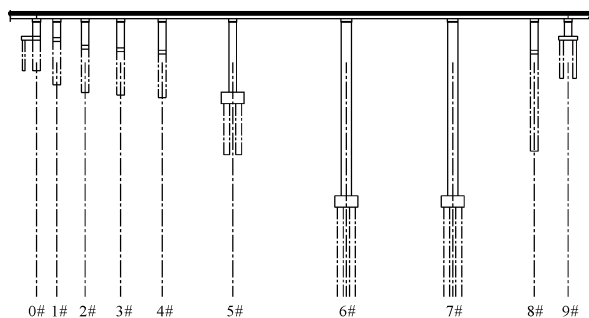


图 1 曲线钢箱梁桥立面图

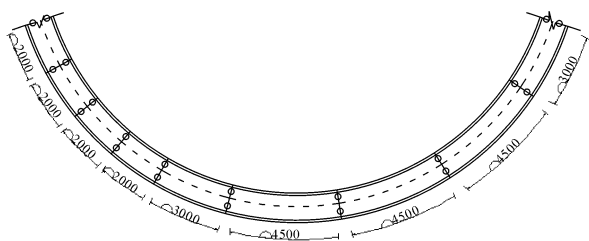


图 2 曲线钢箱梁桥平面布置图(单位:cm)

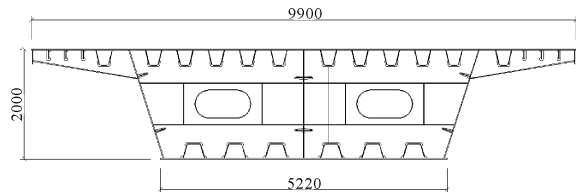


图 3 钢箱梁断面结构形式示意图(单位:mm)

1.2 施工方案

施工流程图如图 4 所示。

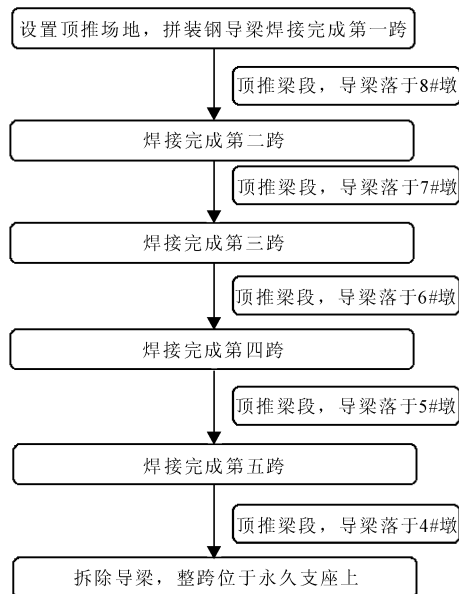


图 4 施工流程图

2 抗倾覆稳定性计算方法

众多学者对箱梁倾覆稳定性计算方法做了研究^[7-14]。曲线桥梁的倾覆往往是从支座失效或脱空开始的^[15]，但现今规范并未对施工中桥梁的横向稳定性进行规定。文献[16]和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17] (JTG 3362—2018) 共同规定，按式(1)、式(2)规定验算横向抗倾覆性能，曲线桥的受力状态如图 5 所示。

$$k = \frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} = \frac{e_{外}}{e} \geq k_{qf} \quad (1)$$

$$e = \frac{F_{外} e_{外} - F_{内} e_{内}}{F_{外} + F_{内}} \quad (2)$$

式中： k_{qf} 为横向抗倾覆稳定性系数，取 $k_{qf} = 2.5$ ； $\sum S_{bk,i}$ 为使上部结构稳定的作用基本组合（分项系数均为 1.0）的效应设计值； $\sum S_{sk,i}$ 为使上部结构失稳的作用基本组合（分项系数均为 1.0）的效应设计值。 e 为荷载的偏心距， $F_{内}$ 、 $F_{外}$ 分别为内、外侧支座的支反力， $e_{内}$ 、 $e_{外}$ 分别为内、外侧支座距离梁体中心线的距离。

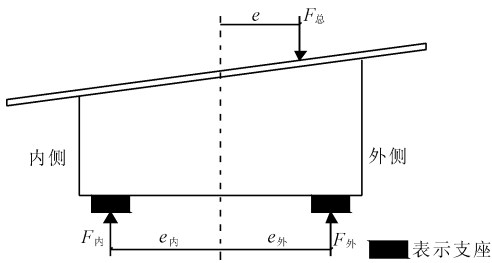


图 5 截面受力示意图

3 顶推施工钢箱梁倾覆稳定性分析

3.1 有限元模型建立

鉴于弯桥的受力特点，该桥采用空间分析程序 MIDAS/Civil 进行模拟，计算各施工阶段支座的受力状态。导梁及主梁有限元模型均采用梁单元。图 6 所示阶段的有限元模型共计 306 个节点及 60 个单元。

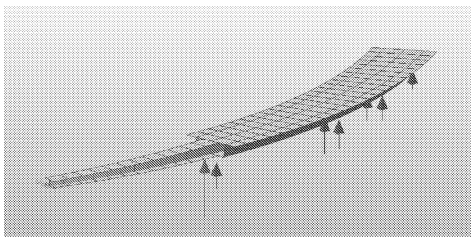


图 6 桥梁模型

计算施工过程中，采用与顶推节段相应的模式，顶推过程模拟时按主梁单元划分 2.5 m 向前顶推一次为一个施工工况。本次研究为了分析不同悬臂状态以及不同成桥跨数对箱梁的横向倾覆稳定性的变化特点，所以主要考虑顶推施工荷载与桥梁自重作用。由于本桥施工阶段较多，选取如图 7 及图 8 所示的特殊位置作为主要的施工阶段进行讨论箱梁的受力特点及稳定性变化。

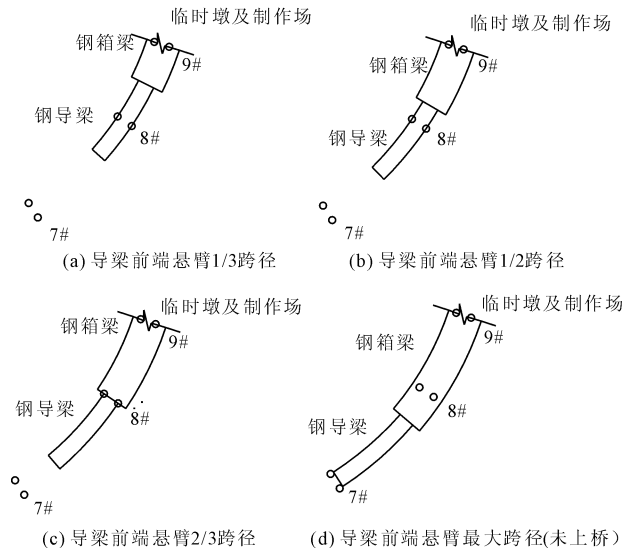


图 7 不同悬臂长度施工阶段

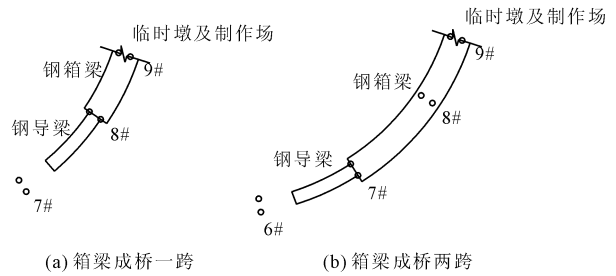


图 8 不同成桥跨数施工阶段

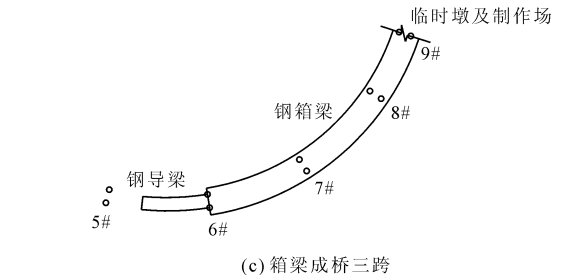


图 8 不同成桥跨数施工阶段

3.2 悬臂长度对稳定性的影响

不同悬臂状态 8#墩支座处计算结果如表 1 及图 9 所示。

由表 1、图 9 可知：悬臂段长度对结构倾覆稳定性有较大的影响，悬臂段越长，稳定系数越小，结构抗倾覆稳定性越差；悬臂段重心位于该段支座处切

线的内侧,在重力的作用下会让结构产生向内侧的扭转作用,使内侧支座反力增大,外侧减小,悬臂长度越大,产生的影响越大。当悬臂一半跨径时,抗倾覆系数尚可满足要求,但当悬臂段为全跨径时,外侧支座脱空,梁体向内侧倾覆,而悬臂 2/3 跨径时,稳定系数也小于 2.5,因此当跨径较大时,可以增加临时墩,减小悬臂长度,以增强箱梁抗倾覆稳定性能。

表 1 不同悬臂状态 8#墩支座处计算结果表顶推位置

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
悬臂 1/3 跨径	233.1	274.6	2.61	2.61	-0.21	12.23
悬臂 1/2 跨径	284.2	519.4	2.61	2.61	-0.76	3.42
悬臂 2/3 跨径	264.9	901.3	2.61	2.61	-1.42	1.83
悬臂全跨径 (未上桥)	支座脱空	2087.4	2.61	2.61	—	—

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

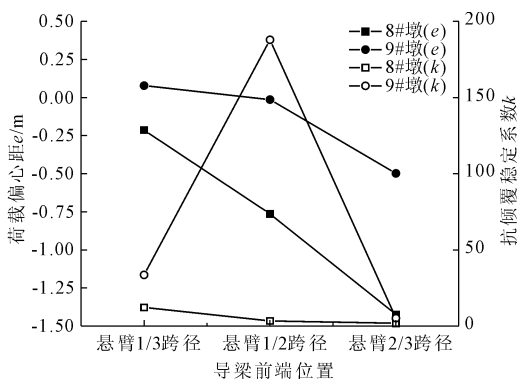


图 9 8#墩、9#墩荷载偏心距与抗倾覆稳定系数随悬臂长度变化曲线

3.3 悬臂长度对已成桥梁段稳定性的影响

不同悬臂状态 9#墩支座处计算结果如表 2 及图 9 所示。

表 2 不同悬臂状态 9#墩支座处计算结果表

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
悬臂 1/3 跨径	461.2	434.5	2.61	2.61	0.08	33.55
悬臂 1/2 跨径	429.9	434.5	2.61	2.61	-0.01	187.91
悬臂 2/3 跨径	315.7	464.4	2.61	2.61	-0.50	5.25
悬臂全跨径	支座脱空	404.9	2.61	2.61	—	—

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

由表 2 及图 9 可知:随着悬臂段长度的增加,远端支座处荷载偏心由外侧向内侧偏移;在偏向内侧之后,悬臂段越长,箱梁抗倾覆稳定性能越低。

3.4 成桥跨数对稳定性的影响

钢箱梁不同成桥跨数 9#—6#墩支座处计算结果如表 3—表 6 及图 10 所示。

表 3 不同成桥跨数 9#墩支座处计算结果表

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
箱梁成桥一跨	315.7	464.4	2.61	2.61	-0.50	5.25
箱梁成桥两跨	360.2	451.8	2.61	2.61	-0.29	8.86
箱梁成桥三跨	364.1	452.7	2.61	2.61	-0.28	9.22

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

表 4 不同成桥跨数 8#墩支座处计算结果表

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
箱梁成桥一跨	264.9	901.3	2.61	2.61	-1.42	1.83
箱梁成桥两跨	731.9	699.6	2.61	2.61	0.06	44.32
箱梁成桥三跨	726.1	702.3	2.61	2.61	0.04	60.02

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

表 5 不同成桥跨数 7#墩支座处计算结果表

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
箱梁成桥两跨	503.7	833.1	2.61	2.61	-0.64	4.06
箱梁成桥三跨	874.7	802.4	2.61	2.61	0.11	23.20

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

表 6 不同成桥跨数 6#墩支座处计算结果表

顶推位置	$F_{外}/kN$	$F_{内}/kN$	$e_{内}/m$	$e_{外}/m$	e/m	k
箱梁成桥三跨	445.0	860.5	2.61	2.61	-0.83	3.14

注: e 为负数偏心向内,反之向外。

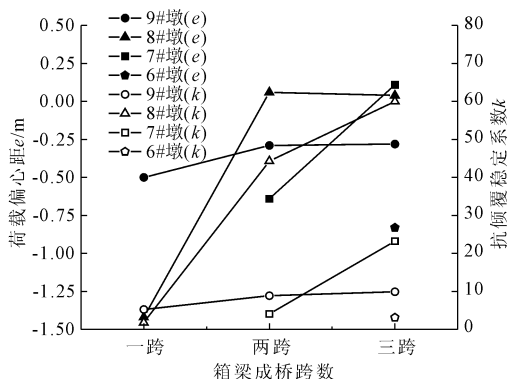


图 10 9#墩、8#墩、7#墩、6#墩荷载偏心距与抗倾覆稳定系数随着箱梁成桥跨数变化曲线

由表 3—表 6 及图 10 可知:随着成桥跨数的增加,远端支座处荷载偏心距随之减小,梁体抗倾覆稳定系数增大,说明总体上随着成桥跨数的增加,箱梁有更好的横向倾覆稳定性。

4 结 论

(1) 该大桥顶推施工时悬臂段会让箱梁产生向内侧的扭转作用,使内侧支座反力增大,外侧减小,悬臂段越长,稳定系数越小,结构抗倾覆稳定性越差。

(2) 该大桥顶推施工随着成桥跨数的增加,远端支座处荷载偏心距减小,梁体抗倾覆稳定系数增大。

(3) 本次研究仅初步考虑了桥梁的自重及施工荷载作用下钢箱梁在部分不同施工阶段的抗倾覆稳定性的变化。影响梁体横向倾覆稳定的因素还有很多,例如曲率半径、风荷载、轴线偏移等。

参考文献:

- [1] 王兵见,赵航,张豪,等.独柱墩梁桥横向稳定计算理论与验证[J].中国公路学报,2017,30(9):93-100.
- [2] 李文杰.某高速匝道独柱墩连续箱梁桥横向抗倾覆稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):226-229.
- [3] 郝晋新.大跨度连续钢系杆拱桥顶推施工临时结构优化设计[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):163-168,204.
- [4] 左家强.复杂条件下顶推小半径连续弯梁设计研究[J].铁道工程学报,2019,36(6):56-61.
- [5] 黄成国,朱铮栋,唐益军,等.曲线钢箱梁桥步履式顶推施工横向倾覆稳定性影响因素的分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(3):399-404.
- [6] 吴大宏,左家强,苏勇.变曲率小半径顶推混凝土连续梁关键技术研究[J].高速铁路技术,2017,8(6):56-61,77.
- [7] 彭卫兵,朱志翔,陈光军,等.梁桥倾覆机理、破坏模式与计算方法研究[J].土木工程学报,2019,52(12):104-113.
- [8] 刘旭勇.桥梁抗倾覆计算方法研究[J].建筑技术开发,2019,46(11):126-127.
- [9] 潘志强,吉禹霏.桥梁抗倾覆计算方法研究[J].天津建设科技,2017,27(4):54-55.
- [10] 彭卫兵,潘若丹,马俊,等.独柱墩梁桥倾覆破坏模式与计算方法研究[J].桥梁建设,2016,46(2):25-30.
- [11] 潘若丹.直线独柱墩梁桥抗倾覆计算理论和方法研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
- [12] Peng W B, Zhao H, Dai F, et al. Analytical method for overturning limit analysis of single-column pier bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017,31(4):04017007.
- [13] Xiong W, Cai C S, Kong B, et al. Overturning-collapse modeling and safety assessment for bridges supported by single-column piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(11):04017084.
- [14] Shi X, Zhen C, Ma H Y, et al. Failure analysis on a curved girder bridge collapse under eccentric heavy vehicles using explicit finite element method: case study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(3):05018001.
- [15] 王强.曲线独柱墩连续箱梁桥横向抗倾覆稳定性研究[J].现代交通技术,2018,15(2):67-69,80.
- [16] 孙宝锋.曲线桥抗倾覆稳定性设计方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(9):236.
- [17] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [10] 段钊,彭建兵,王启耀.泾阳南塬多序次黄土滑坡特征参数与成因[J].山地学报,2016,34(1):71-76.
- [11] 郭晨,许强,魏勇,等.陕西泾阳南塬蒋刘4#滑坡运动堆积特征及流动性成因分析[J].科学技术与工程,2017,17(27):15-25.
- [12] 许强,魏勇,彭大雷,等.泾阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制[J].水文地质工程地质,2018,45(1):123-130,143.
- [13] 马鹏辉,彭建兵,李同录,等.陕西泾阳“3·8”蒋刘黄土滑坡成因及运动特征分析[J].工程地质学报,2018,26(3):663-672.
- [14] 马鹏辉,彭建兵,王启耀,等.泾阳南塬典型黄土滑坡成因、堆积及运动特征分析[J].工程地质学报,2018,26(4):930-938.
- [15] 李章勇,安耀明.基于改进模糊层次分析法的精神压力量化研究[J].生物医学工程研究,2018,37(3):320-325.
- [16] 梁燕,乔俊,谢超,等.裂缝对灌溉诱发黄土滑坡的影响——以陕西省泾阳南塬为例[J].科学技术与工程,2019,19(20):305-314.
- [17] 张景生.水分长期入渗诱发黄土滑坡的机理研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):64-70.
- [18] 王师迪,师亚芹,李高阳.陕西咸阳地震砂土液化的发现及意义[J].地震工程学报,2018,40(2):305-315.
- [19] 邢西淳,毛娟,邵辉成.汶川8级地震前后陕西地形变异常特征分析[J].高原地震,2011,23(4):17-23.
- [20] 聂忠权,范文,陈党民,等.黄土崩塌体的地震稳定性评价——以陕西咸阳为例[J].灾害学,2014,29(4):93-97.
- [21] 桂静云.泾阳南塬多序次黄土滑坡运动机理研究[D].西安:西安科技大学,2017.

(上接第 70 页)