肖颜.基于树根桩加固的震后公路路基边坡综合修复技术[J].地震工程学报,2019,41(1):117-123.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.117

XIAO Yan. Technology Based on Root-Pile Strengthening for the Comprehensive Post-earthquake Restoration of Highway Subgrade Slopes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1):117-123.doi;10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.117

基于树根桩加固的震后公路路基边坡综合修复技术

肖 颜1,2

(1. 湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要:为实现震后路基边坡的快速修复,提出基于树根桩加固的震后公路路基边坡综合修复技术。 根据路基震害及地质环境对路基边坡的影响分析因素,采用树根桩技术及气泡轻质填土技术修复 路基边坡;利用三维有限差分法模拟树桩加固气泡轻质填土修复后路基边坡得到参数值,再结合强 度折减法计算得到的路基边坡稳定系数,最后得到优化树根桩的设计参数,以实现震后路基边坡综 合修复。以上方法通过仿真模拟实验,得到最优的树根桩排距为 2.5 dm。

关键词: 树根桩加固; 路基边坡; 边坡修复; 气泡轻质填土技术

中图分类号: X171.4

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0117-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.117

Technology Based on Root-Pile Strengthening for the Comprehensive Post-earthquake Restoration of Highway Subgrade Slopes

XIAO Yan^{1,2}

(1. Hunan Communication Engineering Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China; 2. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: A comprehensive technology for accelerating the post-earthquake restoration of subgrade road slopes is proposed. The technology is based on root-pile reinforcement and foamed lightweight soil technology, and restoration is performed in accordance with subgrade earthquake damage and the influence analysis results of the geological environment of the subgrade slope. The three-dimensional finite-difference method is used to simulate the restored subgrade slope and to obtain parameters. Then, the design parameters of the optimized root piles are acquired by combining the stability coefficients of the subgrade slope calculated through the strength reduction method. Finally, the post-earthquake subgrade is comprehensively restored. Simulation experiments reveal that the optimal root-pile spacing is 25 cm.

Keywords: root-pile strengthening; subgrade slope; slope restoration; foamed lightweight soil technology

收稿日期:2018-07-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB705500); 湖南省教育厅科学研究项目(13C24)

作者简介:肖颜(1983一),女,湖南宁乡人,硕士,讲师,研究方向为公路工程技术,公路工程造价,高职教育教学研究。

0 引言

公路是交通运输的重要途径之一,是经济发展 与民生需求的基本工程设施,是各地经济与文化交 流的纽带。地震是地壳运动引发的自然灾害,轻者 引发经济损失,重者威胁人类的生命财产安全[1-2]。 公路是震后救援人员、资源运输及人员疏散的重要 通道,是抗震救灾的生命之路[3]。强烈地震发生后, 对公路基础建设造成创伤,引起公路路基边坡的形 变与结构变化,不同震级的地震引发的道路路基边 坡损毁情况不同[4]。公路损毁会阻碍灾后应急抢救 与重建工作的进展,震后公路路基边坡修复是公路 建设维护与自然灾害援救中至关重要的问题,受到 了各界人士的广泛关注,现已有一些较好的震后公 路修复技术[5]。

文献[6]提出了基于功能梯度组合结构设计的 公路修复技术。通过分析得到混凝土路面裂缝的产 生机理,结合当前公路混凝土断裂修复方法与修复 材料研究成果,引入结构一体化的设计理念,完成公 路裂缝修复。该修复技术的施工效果较好,但不适 用于大面积损毁公路的修复。文献「7]提出了道路 微裂修复技术。通过分析道路预裂缝技术的特点, 在网状微细裂痕的路基修复过程中不添加早强性材 料,限制道路的早期通行重量,并采用沥青路面来减 少反射裂痕的产生概率。该微裂修复技术能够实现 公路裂痕的快速修复,但路面沥青层的寿命较原来

缩短。

针对上述公路修复技术中存在的问题,本文在 分析震后公路路基主体震害与地质环境对路基边坡 影响的基础上,提出基于树根桩加固的震后公路路 基边坡修复技术。将树根桩技术与气泡轻质填土技 术作为路基边坡修复的基础技术手段,根据有限差 分法模拟得到的树根桩加固气泡轻质填土修复后路 基边坡的参数计算结果,以及强度折减法计算得到 的路基边坡稳定安全系数,优化树根桩的设计参数, 完成边坡综合修复。

震后公路路基边坡综合修复方法 1

1.1 路基主体震害类型及破坏程度分析

1.1.1 公路路基主体震害类型

路基工程属于一种线性结构工程[8],主要用于 跨越长距离、大范围、复杂地域的主要结构之一。路 基震害类型的划分原则如下:

- (1) 依据震害现象及产生原因初步划分;
- (2) 根据细节差异对震害类型进行细分;
- (3) 忽略非地震引起的破坏:
- (4) 公路路基与边坡能够正常使用的不算作路 基震害。

按照上述原则,通过以往地震中路基的破坏程 度来看,地震对路基主体的破坏程度主要分为四种 不同的形式,分别为滑移开裂、塌陷、挤压破坏、砸 坏[9-10]。各类震害如图 1 所示。



(a) 滑移开裂



(c) 挤压破坏



(b) 塌陷



(d) 砸坏

图1 公路震害

Fig.1 Highway earthquake damage

- (1) 滑移开裂:在地震发生时,公路路基边较为 薄弱部分会随着地震产生移动,这种移动往往会导 致公路以及路基边坡破裂。
- (2) 塌陷:在地震波的作用下,公路路基边坡表面产生局部或大面积的变形与损毁,这些破坏主要发生在新开发的路段和地下水资源较为丰富的地段。
- (3) 挤压破坏:是指地震发生后路基边坡发生挤压振动下发生的变化,从公路路基边坡的挤压变形、扭曲展现出来,这种情况多数发生在公路路基边坡抗挤压强度较低的地段。
- (4) 砸坏:在发生地震时,公路路边碎石在惯性 力的作用下大量的砸向公路及路基边坡,造成公路 表面以及路基边坡坡槽的损坏。

1.1.2 震后公路路基破坏程度分析

通过对相关资料的研究与调查分析,地震引发公路路基破坏的机理主要有以下几点:

- (1)振动。地震发生时,震动力度过大造成路基及边坡倒塌破损,产生路基边坡滑移、塌陷等。此类震害通常会出现在路基的填挖交界处,填方路基与原公路面的压实度与刚度存在差异,振动过程中受力无法均衡导致路基土体松动开裂,形成断裂面。
- (2) 形变。地面受到地震波的影响,受力发生 形变,引起地面隆起、错裂、坍塌,导致路基及边坡扭 曲、沉陷、横向纵向开裂等。
- (3) 滑移。通常发生在桥头路堤与陡坡公路等特殊路段,陡坡路基及边坡土体在地震力的作用下,沿坡面整体下滑、垮塌,造成路面坍塌、沉陷。

1.2 公路路基边坡震害影响因素分析

通过震害调查分析,将公路路基边坡震害的影响因素归纳为:影响路基边坡稳定性的内部因素和路基边坡不稳定性的外部因素。

1.2.1 内部因素

内部因素主要是指公路路基边坡本身的特性, 包括路基的整体结构、筑路所采用的材料以及筑路 的施工措施。

路基的整体结构受控于基础设计与施工质量, 是决定震害类型与特征的主要内因。为防止路基主 体产生裂缝,设置的边坡坡度要适应路基高度与填 筑材料的性质,同时利用护坡、植被等加强路基边坡 稳定性。

筑路所采用的材料性质也在一定程度上影响路 基边坡抗震性与稳定性,碎石土、黏性土等抗风化能 力较强的材料能够增强路基边坡的抗震能力。

筑路的施工措施对路基边坡的稳定性影响较

大,通过提升施工质量、改进施工技术,能够增加路基边坡的稳定性。

1.2.2 外部因素

公路路基边坡震害的外在影响因素可划分为地 震力因素与路段所在区域的地质因素。

1.2.2.1 地震力对公路路基边坡的影响

地震力是指地震波引起的剧烈地面运动导致的结构惯性力,为随机变动的动力荷载。地震力是结构自重与地震系数的乘积,通常情况下,水平振动对建筑结构的影响最大。

公路路基边坡破坏情况与公路距离地震中心或断裂地带的远近有关,距离越近,受损越严重,公路断裂分布基本与地震等动峰值参数(地震烈度)分布近似一致。

以汶川地震为例,根据区域地质资料,破坏较为严重的公路主要为山区路段,且集中在川西高原与四川盆地之间的过渡区域,此区域的地质构造复杂,沟深坡陡,调查结果显示,邻近震中的映秀至汶川段317国道公路损毁严重,远离震中的雅安至菩萨岗段 G108 国道公路损毁较轻。

1.2.2.2 地质环境对公路路基边坡的影响

公路附近地区的工程建筑条件与公路路基边坡的施工情况有着密切的关系,是决定公路路基边坡的稳定和发生各种灾害的重要影响因素,路基边坡修建在坚硬或软质路基上,其稳定性有着很大的区别[11]。

(1) 局部地形地貌条件影响

对于较为突出的山包、山梁、高度较大的地区或 者河岸边,都对公路的交通设施抗震产生较大的影响。位于较高地形地貌的地区,建筑受灾会更加 严重。

(2) 地质构造

公路路基边坡附近地质结构较为复杂,断层较多,会给公路路基边坡带来巨大的损害,所以在进行公路建筑选择时,应该尽量避免断层地带,提高公路的交通防震等级。

(3) 地下水对公路路基边坡的影响

根据统计表明,在地下水水位越浅的地域越容易发生地震,受到地震的影响也最为严重,主要为较软的土层,淤泥土等,对其抗震能力影响较大。

1.3 震后公路路基边坡综合修复技术研究

引入树根桩技术与气泡轻质填土技术[12] 修复 损毁路基边坡,利用三维有限差分法[13] 模拟计算树 桩加固气泡轻质填土路基的各项参数值,利用强度 折减法^[14]计算得到的折减系数,作为路边基坡稳定 安全系数。在上述基础上,优化树根桩的设计参数, 完成震后公路路基边坡的综合修复。

1.3.1 气泡轻质土的基本特征

气泡轻质土的主要成分包括原料土、气泡、固化 剂和水,各成分按一定比例混合调制而成。

气泡轻质土主要应用于公路路基,为了增加路基的强度,需要满足 CBR 指标^[15] 要求,CBR 指标是评定土基及路面材料承载能力的指标。气泡轻质土的强度设定为 q_{a1},则:

$$CBR = \frac{3.5}{100} q_{a1} \tag{1}$$

气泡轻质土需要有较强的承载能力,且土体本身具备较强的自立性,经过固化后获取自立高度。 其计算公式为:

$$H_{c} = 2\left[\frac{2c}{\gamma_{t}}\cot\left(45 - \frac{c}{2}\right) - \frac{W}{\gamma_{t}}\right] \tag{2}$$

式中: H_c 代表气泡轻质土稳定的高度; c 代表该土质的粘稠力; γ_c 代表气泡轻质土的重量; W 代表气泡轻质土的分布荷载。

由上式可知,如果高度设定为 H_c 时,则此时气泡轻质土需要的强度为 g_{a2} ,其计算公式为:

$$q_{a2} = \frac{\gamma_t H_c}{2} + W \tag{3}$$

气泡轻质土的强度不仅需要满足 CBR 指标要求,还需要满足以下约束条件:

$$q_a \geqslant \{q_{a1}, q_{a2}\} \tag{4}$$

1.3.2 树根桩加固的路基边坡修复技术

树根桩可以有效承载不同方向的荷载,并且树根桩是利用灌浆灌注的方式形成,将桩身与土地紧密结合,可以有效增强其承载能力。如果将树根桩应用于公路的路基边坡,可以有效抵抗外力。

气泡轻质土构成的浇注体自立性较好,树根桩 采用直径较小的钻孔桩,计算桩身受力发生的形变, 选择适当的直径,以减少对桩身周围岩土体的扰动。

快速拉格朗日力学分析法是有限差分法中的典型代表,广泛应用于边坡工程中。在进行计算的过程中,通过不断降低坡体以及滑动面的强度,使边坡从稳定状态逐渐变为不稳定状态。则在有限元差分计算不收敛情况下,所获取的强度折减系数即为路基边坡的稳定安全系数,以下给出具体的计算过程:

$$c' = \frac{c}{F} \tag{5}$$

$$\varphi' = \arctan\left[\frac{\tan\varphi}{F}\right] \tag{6}$$

其中:F代表折减系数。根据上式可知,折减坡体以及滑动面的强度后,将所得到的参数代入拉格朗日算法中进行计算,如果程序收敛,说明该边坡处于稳定状态。加大折减系数直至程序不收敛,此时路基边坡土体会出现一定幅度的位移,说明边坡失去稳定性,对应的折减系数就是边坡稳定安全系数。

通过三维有限差分数值计算,以强度折减法模拟得到的边坡稳定安全系数作为控制指标,对树根桩设定3个相关参数:平面布置、锚固深度、桩排距。分别对这3个参数进行优化设计,完成震后公路路基边坡的综合修复。对应的公式如下:

$$p = \frac{q_{a1}}{\tan \varphi} \tag{7}$$

式中: p 代表平面布置。

$$p_1 = \frac{\varphi'}{F} \tag{8}$$

式中: p1 代表锚固深度。

$$p_2 = \frac{\varphi'}{F} * \gamma_t H_c \tag{9}$$

式中: p2 代表桩排距。

2 实验结果与分析

为了验证所提出基于树根桩加固的震后公路路基边坡综合修复方法的综合有效性,需要进行一次模拟仿真实验。实验平台的数据处理系统为Windows XP,处理器主频 2.6 GHz,设备存储空间为32 GB,ROM 内存 6 GB,实验结果图表绘制软件为MATLAB7.0。

采用所提出的路基边坡综合修复技术进行实验,观察并分析桩身弯矩力与对应的桩位之间的关系,得到的实验结果如图 2 所示。

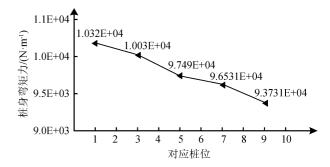
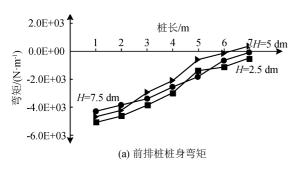


图 2 桩身弯矩力与对应桩位之间的关系曲线 Fig.2 Relationship curve between bending moment of pile body and corresponding pile position

根据图 2 选择树根桩插入的适当位置,以减少树根桩所产生的弯矩力对周围土体的扰动,增强整体结构的稳定性。

树根桩的桩身灌注采用的是压力灌浆技术,浆 液会将桩身四周的散碎岩土凝结在一起,改善了岩 土部分的强度与荷载性能,实际的双排树根桩之间



的距离应适当增加,为找到合适的排距进行模拟实验。实验中,设置实验模型中的第一排树根桩位置在路基边坡的最前端处,设置第二排桩与一排桩的距离为 2.5 dm、5 dm 与 7.5 dm 时进行模拟分析,得到树根桩排距不同时前排树根桩与后排树根桩的弯矩。实验结果如图 3 所示。

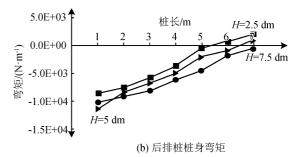


图 3 不同排距下前、后排桩桩身弯矩图

Fig.3 Bending moment diagram of pile body in front and back row under different row spacing

对比图 3 中前、后排桩桩身弯矩图可知,当 H=2.5 dm时,前排桩桩身弯矩与后排桩桩身弯矩 近似;根据图 3(a)可知,前排桩桩身的弯矩随着桩 排距的增加而减小;根据图 3(b)可知,后排桩桩身 的弯矩随着桩排距的增加而增加;当前、后排桩桩距 为 7.5 dm 时,前排桩与后排桩的弯矩值差异较大, 此时后排桩承受的滑坡推力远大于前排桩,前、后排 桩受力不均衡,不能达到抗滑效果。综合上述分析, 前、后排树根桩的排距为 2.5 dm 时,基本能够实现 两排桩的弯矩与受力均衡,以排距为 2.5 dm 对路基 边坡进行加固,能够明显减小路基边坡的水平位移。

在路基承受荷载的情况下,树根桩与桩周边的 土质都会发生沉降,但桩与土的沉降值存在一定的 差值,需要找到一个等沉面,在等沉面以上,桩周土 的沉降值大于树根桩的沉降值,在等沉面以下,桩周 土的沉降值小于树根桩的沉降值。为寻找等沉面, 需要对桩面与土质面的沉降与所承受荷载之间的关 系进行研究,得到的实验结果如图 4 所示。

根据图 4 可知,当路面荷载在增加时,桩顶及土质面的沉降距离也随之增加,且荷载范围在 90 kPa 以内时,沉降距离的变化呈现线性形式,超过90 kPa 后,沉降距离的变化增量较大,不再以线性形式增加。

分析路基边坡的树根桩桩顶与土面的沉降 (cm)与桩长径比(L/RP)之间的关系,得到的实验结果如表 1 所列。路基边坡修复中采用的树根桩桩径为固定值,桩长 L 为可调节变量。

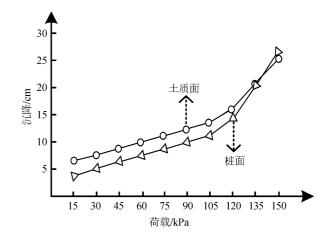


图 4 桩、土沉降与承受荷载的关系曲线

Fig.4 Relationship curve between pile settlement and bearing load

表 1 桩顶、土面沉降与桩长径比的关系

Table 1 Relationship between pile top, soil surface settlement and pile length-to-diameter ratio

桩长径比(L/RP)	桩顶沉降/cm	土面沉降/cm
10	20.0	22.3
15	19.4	21.7
20	18.8	20.9
25	18.5	20.3
30	18.2	20.0
35	18.2	20.0

根据表 1,桩长径比为 10 时,桩顶沉降与边坡表面沉降分别为 20.0 cm 和 22.3cm;桩长径比为 20时,桩顶沉降与边坡表面沉降分别为 18.8 cm 和 20.9 cm;桩长径比为 30 时,桩顶沉降与边坡表面沉降分别为 18.2 cm 和 20 cm。可知,桩顶与土面沉降分别为 18.2 cm 和 20 cm。可知,桩顶与土面沉

降随着树根桩的桩长径比增加而逐渐减少,且土面 沉降大于桩顶沉降;在树根桩的长径比大于 30 后, 桩顶与土面的沉降值趋于稳定。

结合以上数据分析结果与受力分析可知,桩长度较小时,附加应力分布范围较小,局部应力值较大,导致土层附加应力超出承载限度,沉降大于桩顶的沉降;桩长增加后,附加应力范围增加,局部应力降低,桩顶与土层沉降都减小;桩长增加到一定值时,达到应力分布区域上限,沉降不在随桩长的增加而减小。

3 结束语

地震是一种破坏力极强的自然灾害,能够在短时内造成大面积的创伤,造成建筑坍塌、公路断裂等。震后公路的修复至关重要,针对当前路基修复中存在的问题,本文结合有限元模拟,提出基于树根桩加固的震后公路路基边坡综合修复技术。通过分析震后路基存在的主体震害以及地质环境对公路路基边坡的影响,在公路路基边坡修复过程中引入气泡轻质填土技术与树根桩技术,利用有限元模拟分析,得到树根桩的平面布置、锚固深度、桩排距等参数以及气泡轻质土的强度设定值,实现震后路基边坡综合修复。

由于树根桩是由灌浆灌注的方式形成的,能将桩身与土地紧密结合,承载能力大大提高。因此本文方法在设计中考虑到将树根桩应用于公路的路基边坡,这样的做法使得路基边坡能够有效抵抗外力作用,也使得本文所提的路基边坡综合修复方法具有优势,通过仿真模拟实验,得到最优的树根桩排距为 2.5 dm。

此外,本文还引入了气泡轻质填土技术,能够减少对桩身周围岩土体对桩身稳定性的干扰,有利于维护路基边坡的稳固。未来阶段,将侧重研究震后公路修复施工的条件,针对损毁程度不同的公路提出对应的修复方案,降低施工复杂程度,提升修复效率;在修复的基础上,考虑加入抗震结构,减少余震引起的二次损毁,并综合生态植被加固来完成路基边坡修复与保护。

参考文献(References)

[1] 曾永平,陈克坚,李光川,等.铁路连续刚构桥近断层地震响应 分析研究[J].铁道工程学报,2017,34(6):50-54,59.

- ZENG Yongping, CHEN Kejian, LI Guangchuan, et al. Seismic Response Analysis of Railway Continuous Rigid Frame Bridge near Fault[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34 (6);50-54,59.
- [2] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J].水利水电技术,2017,48(2):130-137.
 ZHAO Bingqin, XIA Zhenyao, XU Wennian, et al. Review on Research of Slope Eco-restoration Technique for Engineering Disturbed Area[J]. Water Resources and Hydropower Engi-

neering, 2017, 48(2): 130-137.

- [3] 牛家永,江学良,杨慧,等.含小净距隧道岩石边坡地震动力响应特性研究[J].自然灾害学报,2017,26(5):130-139.

 NIU Jiayong, JIANG Xueliang, YANG Hui, et al. Study on Dynamic Response Characteristics of Rock Slope with Small Spacing Tunnel under Earthquakes[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5):130-139.
- [4] 张敏霞,徐平,高帅,等.采动地表土体沉陷对桥梁桩基影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊 2):4122-4133.

 ZHANG Minxia, XU Ping, GAO Shuai, et al. Experimental Study on Mining-induced Surface Subsidence Influence on the Pile Foundation of Bridge[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(Supp2):4122-4133.
- [5] 丁浩,赖金星,刘厚全,等.黄土隧道基底树根桩加固效果的数值分析[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(1):116-120.
 DING Hao,LAI Jinxing,LIU Houquan,et al.Numerical Analysis of Reinforcement Effect of Root Pile in Loess Tunnel[J].
 Road Machinery & Construction Mechanization,2018,35(1): 116-120
- [6] 王凯,葛翠翠,李柏殿,等.公路桥梁伸缩缝过渡区混凝土修复技术研究[J].硅酸盐通报,2017,36(8);2838-2843.
 WANG Kai,GE Cuicui,LI Bodian,et al.Repair Technology for Concrete in Highway Bridge Expansion Joint Transition Zone [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8); 2838-2843.
- [7] 郝冠军,田波,侯荣国.微裂技术在基层快速修复中的应用[J]. 公路交通科技,2016,33(8):51-57. HAO Guanjun, TIAN Bo, HOU Rongguo. Application of Micro-Cracking Technique in Base Quick Repair[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016,33(8):51-57.
- [8] 张东亮,黄达.落石冲击旁山填方路基边坡破坏数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(增刊 1):135-142.

 ZHANG Dongliang, HUANG Da. Numerical Modeling of Failure of Fill Roadbed Slope beside Hillslope Induced by Rock-Fall Impact[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Supp1):135-142.
- [9] 刘文月,张林洪,彭邵勇,等.金安桥电站库区边坡路基变形研究[J].水力发电学报,2016,35(4):89-97.
 LIU Wenyue,ZHANG Linhong,PENG Shaoyong, et al.Road-

bed Deformation on Reservoir Bank for Jin'anqiao Hydropower Station[J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 89-97.

- [10] 介玉新,李伟瀚,张彬.用加速度方法分析隧洞的稳定性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):301-306. JIE Yuxin, LI Weihan, ZHANG Bin. Stability Analysis of Tunnel Using the Acceleration Method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(4):301-306.
- [11] 秦凤艳,杨富莲,刘洪波,等.常见边坡支护形式的地震稳定性对比分析[J].地震工程学报,2017,39(3):460-466.

 QIN Fengyan, YANG Fulian, LIU Hongbo, et al. Comparative Analysis of Seismic Stability on a CommonSlope Support Form[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39 (3):460-466.
- [12] 李杰,代跃,陈淮.随机地震动场多点激励下宽幅大跨桥梁结构地震响应研究[J].地震工程学报,2017,39(1):39-44.

 LI Jie,DAI Yue,CHEN Huai.Seismic Response of Wide-span Bridge Structures under Multi-point Excitation of Random Ground Motion Field[J].China Earthquake Engineering Jour-

nal,2017,39(1):39-44.

- [13] 贾鹏,王兰民,万征,等.某桥梁桩基础的抗震计算研究[J].地震工程学报,2018,40(2):258-264.

 JIA Peng,WANG Lanmin,WAN Zheng, et al. Seismic Calculation and Analysis of the Pile Foundation of a Certain Bridge
 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2018, 40(2):258-
- [14] 闫超,刘松玉,籍晓蕾.一种基于强度折减法的次级滑动面分析方法研究[J].岩土力学,2016,37(4):935-942. YAN Chao,LIU Songyu,JI Xiaolei.Research on a Secondary Sliding Surface Analysis Approach Based on Strength Reduction Method[J].Rock and Soil Mechanics,2016,37(4):935-942.
- [15] 王昊,杜晓燕,叶阳升,等.异型纤维土六棱砖骨架护坡技术研究[J].铁道建筑,2017,57(9):100-103.

WANG Hao, DUXiaoyan, YE Yangsheng, et al. Research on Slope Protection Technique Using Hexagonal Brick Skeleton Filled with Heterotype Fiber Soil[J]. Railway Engineering, 2017,57(9):100-103.