

地震作用下半填路堤的伤损评价研究

尹腾谦¹, 司春棣^{2,3}, 凡涛涛^{2,3}, 张勇⁴, 李奇轩⁴

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043;

3. 河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 河北省高速公路京雄筹建处, 河北 保定 071799)

摘要:针对当前半填路堤动力响应问题研究成本高、参数调整不灵活、影响因素单一等问题,基于数值模拟,以四川某路段发生震害的半填路堤为例,分析不同等级地震荷载(6级、7级、8级、9级)作用下半填路堤的设施损伤。采用人工拟合地震波,引入黏弹性边界,分析半填路堤在不同条件下的位移变形、边坡稳定性和路堤承载力。通过强度折减法与极限平衡法评估边坡稳定性,运用 Terzaghi 公式计算路堤承载力。结果表明,不同工况下,强度折减法对比极限平衡法得到的安全系数误差均在4%以内,说明强度折减法可以较好地评估边坡稳定性;随着地震等级的提高,半填路堤的位移增量逐渐增大,边坡稳定性逐渐降低,路堤承载力逐渐降低;半填路堤在8级、9级地震荷载作用下处于失稳状态;在8级地震荷载作用下,半填路堤位移增量增长约20倍,安全系数下降52.8%,路堤承载力下降57.0%,同比变化幅度均最明显,表明8级地震荷载对半填路堤的破坏性更显著。

关键词:半填路堤;地震;位移变形;边坡稳定性;路堤承载力

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0099-07

0 引言

半填路堤是为应对复杂地质环境的工程设计方案,是山区公路中常见的一种横断面形式,常受到地震灾害的影响^[1]。地震荷载会对地表造成震动,可能导致边坡出现滑动、倾倒等失稳现象,以及路堤土体发生变形、沉降等情况,影响路堤的承载能力。

许多学者对路堤的动力响应问题进行了研究。RAMADHANI et al^[2]运用强度折减法对巴拉罗亚地区的公路进行研究,通过施加地震荷载进行验证,设计了最优和安全的边坡几何形状。夏英志^[3]采用强度折减法评估路堤稳定性。陈瑞考等^[4]分析了具有不同宽高比的半填路堤与稳定安全系数的关系。ELHAKIM et al^[5]通过研究弯沉值来评价路堤承载力。骆杨静^[6]通过研究回弹模量评价路堤承载力。这些研究或是集中于土体自重情况下的响应问题,参数调整不灵活、影响因素单一;或是基于实地考察研究某区域震后的路堤灾损情况,研究成本高、可重复性差,对半填路堤的研究较少且未考虑不同等级地震波的影响。

因此,基于数值模拟,以四川某路段发生震害的半填路堤为例,以路堤位移变形、边坡稳定性、路堤承载力为指标,利用 ABAQUS 建立半填路堤模型。引入黏弹性边界,分析地震荷载作用下半填路堤的动力响应,总结动态响应变化规律,并比较不同等级地震波对路堤设施损伤的影响情况。

1 有限元模型建立

1.1 工程概况

2019年6月17日四川宜宾长宁 K33+000~K39+000 段路线发生 6.0 级地震,该路段地形起伏较大,且多为半填路堤。根据林顺等^[7]对该路段路堤震害开展的现场调查,得到半填路堤的横断面结构型

收稿日期:2024-03-06 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20240057

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFB2600605,2021YFB2600600);河北省高层次人才资助项目(A202105004);河北省交通厅科技计划项目(JX-202010,JD-202006,JD-202007)

作者简介:尹腾谦(1999—),男,硕士研究生,研究方向为路基路面工程。E-mail:745629119@qq.com

尹腾谦,司春棣,凡涛涛,等.地震作用下半填路堤的伤损评价研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(2):99-105.

式,见图 1。根据该结构型式在 ABAQUS 中创建半填路堤有限元模型,见图 2。

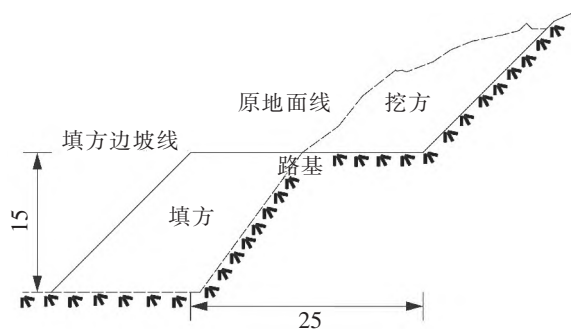


图 1 半填路堤结构型式(单位:m)

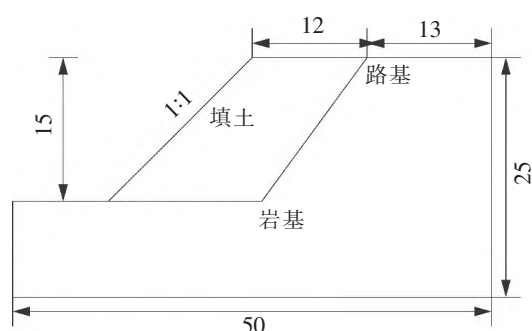


图 2 有限元路堤模型(单位:m)

根据岩土体工程分级与林顺等^[7]开展的室内动力学试验成果,取得材料参数,见表 1。

表 1 材料参数

区域	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
填土	18	0.34	1 970	15	25
岩基	100	0.28	2 000	100	35

1.2 地震动力模拟

查阅中国地震局相关资料显示,路堤受到 6 级以下地震荷载时,不产生损伤或损伤对于路堤影响很小。参考《建筑抗震设计标准》GB 50011—2010,选定 4 条人工拟合地震波,烈度水平分别为 0.05g、0.10g、0.30g 和 0.40g,峰值加速度分别为 0.2、0.5、4.0、6.0 m/s^2 ,分别代表等级为 6 级、7 级、8 级、9 级的地震波。其中,6 级、7 级地震为多遇地震,8 级、9 级地震为罕遇地震,每条地震波作用时长 20 s,均产生横波荷载与纵波荷载,纵波荷载的峰值加速度大约为横波荷载的 0.65 倍,各级地震的横波加速度时程曲线见图 3。

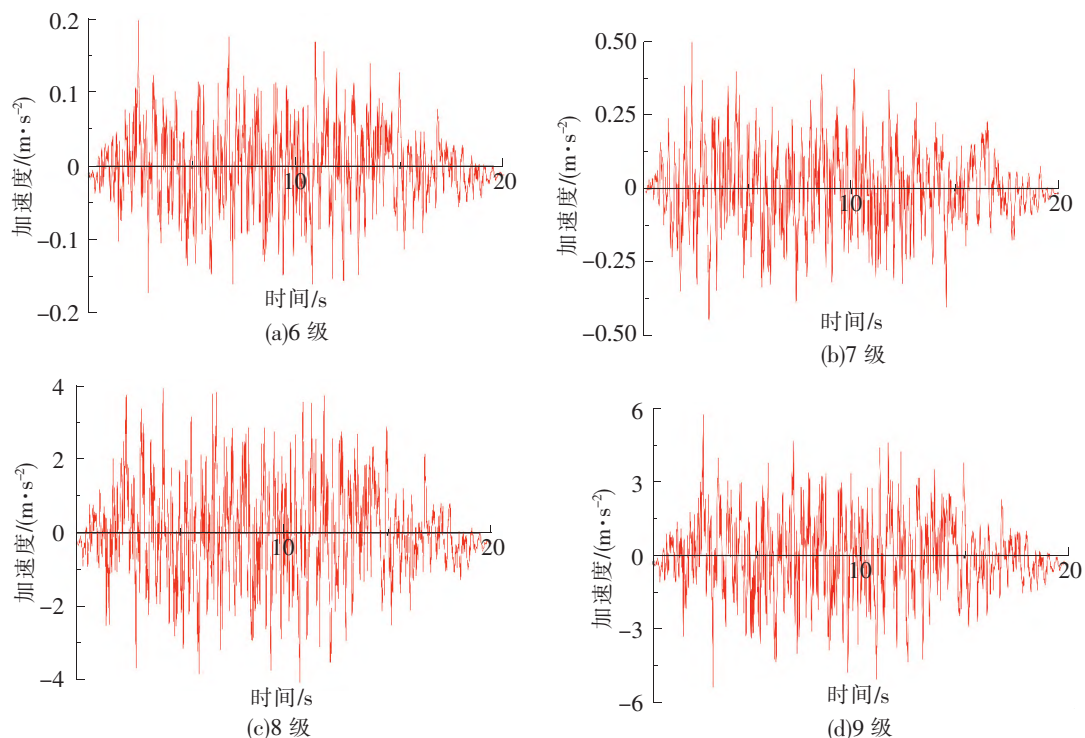


图 3 地震波加速度时程曲线

1.3 边界条件

在模型中施加地震波,需要把半无限的地基截取设置虚拟人工边界,添加的人工边界要做到准确模拟原半无限地基的情况,确保地震波输入到边界上时被吸收或者不会进行反射。采用刘晶波等^[8]提出的

将地震波转化为模型等效节点力的思想,创建黏弹性边界作为地震动输入方法。黏弹性边界在边界处由耦合的弹簧-阻尼器构成(见图 4),将地震波转变为等效应力节点,再以集中力的方式施加在各点上^[9]。

在入射地震波作用下,边界上任意节点 b 的力矢量为

$$F_b = (K_b u_b^{ff} + C_b \dot{u}_b^{ff} + \sigma_b^{ff} n) A_b \quad (1)$$

式中, $K_b u_b^{ff}$ 为为了克服位移引起弹簧单元所产生的附加应力; $C_b \dot{u}_b^{ff}$ 为为了克服速度引起阻尼器产生的附加应力; $\sigma_b^{ff} n$ 为自由场地震动在边界产生的应力张量; A_b 为边界节点控制面积。

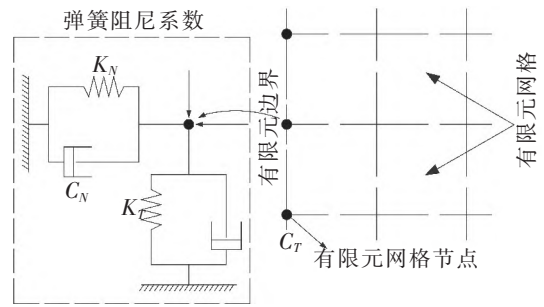


图 4 弹簧阻尼系统在有限元中的布置

2 动力响应分析

2.1 仿真研究结果

图 5、图 6 为不同等级地震荷载作用下,路堤的横向位移增量、竖向位移增量和应变增量云图,其中正值为隆起,负值为沉降。三者均为当前计算步下路堤边坡位移增量和应力点上的应变增量。

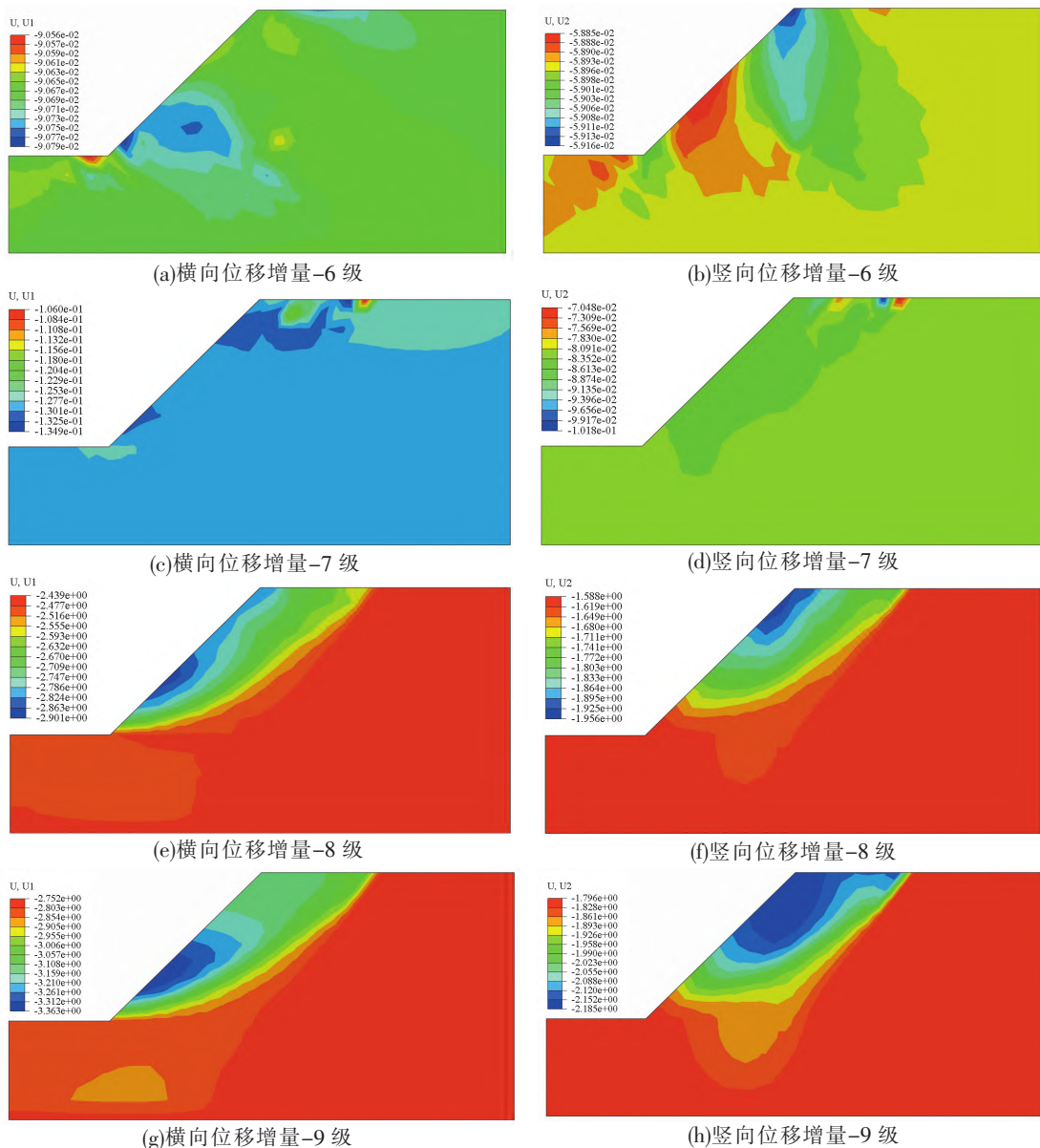


图 5 位移增量云图

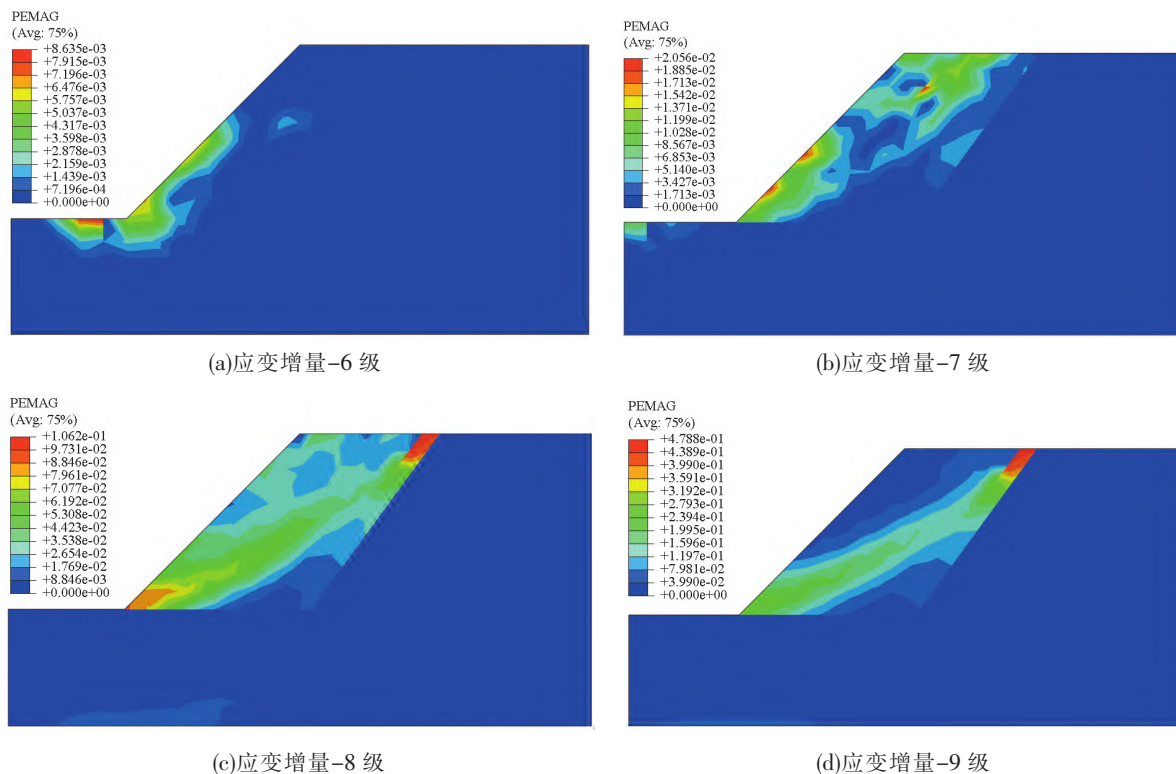


图 6 应变增量云图

由图 5、图 6 可以直观看到,随着地震等级的增加,半填路堤发生变形直至失稳的位置。随着地震等级的提升,路堤变形逐渐从路堤填土外部向内部转移,坡顶的沉降和坡脚的鼓胀明显增加,变形方向趋向坡外,逐渐发展为一条光滑的圆弧,该圆弧即是边坡失稳时的滑移面。该结果与丁梓逸等^[10]研究的地震荷载响应一般规律相吻合。

2.2 位移变形分析

在路堤的位移变形中,最大位移指节点相对于初始位置的最大偏移量,最小位移指节点相对于初始位置的最小偏移量,结果见图 7。

由图 7 可知,随着地震等级的提升,位移增量逐渐变大,横向位移增量大于竖向位移增量,这表明土体竖向有较大的安全储备。地震荷载从 6 级逐渐增加至 9 级的过程中,横向最大位移分别同比增长了 48.58%、2 050.48%、15.93%,横向最小位移分别同比增长了 17.05%、2 200.94%、12.83%,竖向最大位移分别同比增长了 72.08%、1 821.41%、11.71%,竖向最小位移分别同比增长了 19.76%、2 153.12%、13.10%。其中,在 8 级地震荷载的作用下,位移增量、位移增幅最大,其对路堤变形的影响更明显。

2.3 边坡稳定性分析

2.3.1 极限平衡法

极限平衡法是研究边坡工程中常用的方法之一,基于考虑任意形状滑动面的 Morgenstern-Price 法,引入极限平衡法,作地应力平衡,分别施加图 3 所示的地震波,结果见表 2。

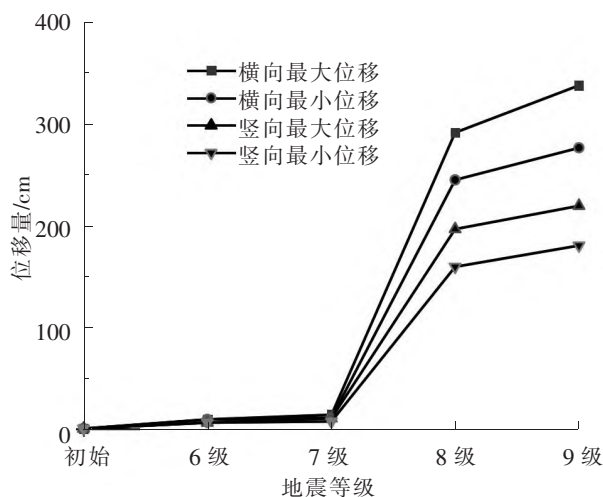


图 7 半填路堤位移变形折线图

表 2 安全系数-极限平衡法

地震等级	6 级	7 级	8 级	9 级
安全系数	1.771	1.426	0.850	0.650

2.3.2 强度折减法

有限元强度折减法具有计算简便、适用性强、省时直观等优点,是当前分析边坡稳定性最广泛的方法之一^[3]。其基本表达式为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中, τ 为土体剪应力; c 为土体黏聚力; σ 为土体正应力; φ 为土体内摩擦角。

在强度折减法中,首先设定初始较小的折减系数值,然后逐渐增加该值,得到虚拟 c' 和 φ' 的值,将虚拟 c' 和 φ' 的值代入原方程,进行迭代操作,直至边坡达到整体破坏的极限平衡状态。

判别路堤边坡失稳有 3 种判据^[11]:设置初始迭代次数,若中途停止计算,则判别失稳;在迭代过程中,折减系数与滑移体的关系曲线平滑增长,若某一折减系数对应的位移突然变大,则判别失稳;分析塑性应变的贯通状态,若出现连续贯通区,则判别失稳。

选用理想弹塑性体本构模型,采用莫尔-库仑强度准则和非关联流动法则,同时不考虑土体的软化(硬化)问题。将折减系数范围设置在 0.5~2.0 之间,作地应力平衡,施加不同等级地震波,其计算结果均收敛,结果见表 3。

表 3 安全系数-强度折减法

地震等级	6 级	7 级	8 级	9 级
安全系数	1.747	1.386	0.825	0.650

由表 3 可知,随着地震等级的增加,安全系数不断降低。在各级地震荷载作用下,强度折减法对比极限平衡法得到的安全系数误差分别为 1.37%、2.89%、3.03%、0%,误差在可接受范围内,表明强度折减法可以较好地评估边坡稳定性。地震等级达到 8 级、9 级时,2 种方法得到的安全系数均小于 1,此时边坡失稳。地震等级从 6 级逐渐增加至 9 级的过程中,强度折减法得到的安全系数分别同比下降了 8.2%、52.8%、21.2%,其中,8 级地震时的安全系数降幅最大,对半填路堤边坡稳定性影响更显著。

2.4 路堤承载力分析

Terzaghi 公式以广泛的土力学实验数据和实地测量数据为依据,融合半经验和半理论的元素,适用范围广,实用性强,常用于路堤承载力计算,其基本表达式为

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma b N_\gamma + q N_q + c N_c \quad (3)$$

式中, γ 为土的重度; b 为基础宽度; q 为基础两侧均布荷载; N_γ 、 N_c 、 N_q 为承载力系数。极限承载力 p_u 等于容许承载力的 3 倍。

ABAQUS 后处理模块输出的地震荷载作用下的半填路堤模型,其应力 S11 可视为主应力 σ ,应力 S12 可视为剪应力 τ 。其中,6 级地震荷载作用下路堤正应力 σ 与剪应力 τ 的情况,如图 8(a)和 8(b)所示。沿路堤表面上层区域取 10 组相邻节点的正应力 S11 和剪应力 S12,取点位置见图 8(c),结果见表 4。

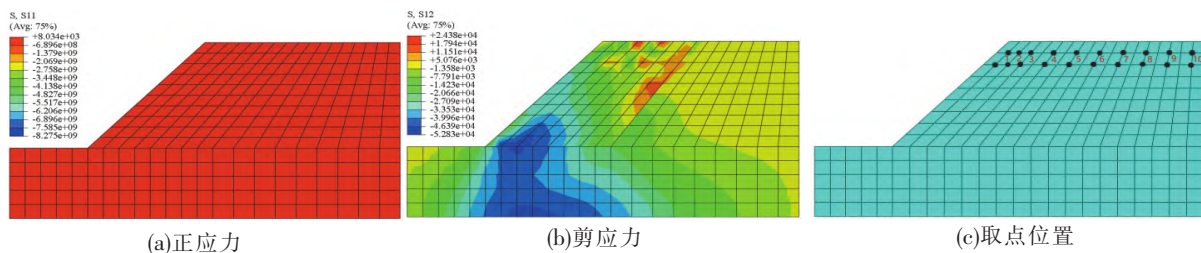


图 8 节点应力图

表 4 节点应力

Pa

节点组	正应力 S11	剪应力 S12	节点组	正应力 S11	剪应力 S12
1	-70 027.7	-12 870.10	6	-54 857.6	-17 892.10
	-54 731.9	-6 259.63		-44 257.9	-10 754.20
2	-44 260.8	-260.44	7	-36 135.6	-4 441.44
	-34 947.2	4 492.30		-26 645.5	-1 293.21
3	-24 381.5	8 361.52	8	-33 783.4	-11 843.80
	-8 742.3	14 222.80		-68 804.1	-3 7271.40
4	-41 884.2	-584.29	9	-26 695.5	5 361.90
	-27 395.1	7 630.51		-12 922.0	-3 707.93
5	-10 966.5	4 476.39	10	-70 715.3	-30 450.30
	-71 687.9	-23 324.90		-54 286.9	-25 401.50

李叶鑫等^[12]相关实验表明,相邻节点的内摩擦角和黏聚力值相差很小。假设相邻节点的内摩擦角和黏聚力值相等,利用式(2)建立相邻两节点之间的二元一次方程。通过解方程组,得到该区域的内摩擦角和黏聚力,再利用式(3),计算路堤承载力。其中,土的重度取 19.7 kPa/m^3 ,基础宽度 b 取 32.5 m ,基础两侧的均布荷载 q 取 0 。同理得 7 级—9 级地震荷载作用下的承载力,结果见表 5。

表 5 路堤承载力

地震等级	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	极限承载力/kPa	容许承载力/kPa
初始状态	15.0	25.0	3 973.2	1 324.4
6 级	12.3	24.6	3 643.5	1 214.5
7 级	11.1	22.1	2 452.0	817.3
8 级	9.2	17.4	1 053.7	351.2
9 级	6.9	12.6	562.0	187.3

由表 5 可得,随着地震等级的增加,路堤承载力逐渐减小。地震等级从 6 级逐渐增加至 9 级的过程中,承载力分别同比下降了 8.3% 、 32.7% 、 57.0% 、 46.7% 。其中,半填路堤在 8 级地震荷载作用下的承载力降幅更大,说明 8 级地震对半填路堤的影响更明显,这与路堤位移变形、边坡安全系数变化情况相一致。

3 结论

通过数值模拟,对半填路堤在地震荷载作用下的位移变形、边坡稳定性和路堤承载力进行动力响应分析,得出以下结论:

(1)随着地震等级的提升,半填路堤位移变形呈现不同程度的增加,横向位移大于竖向位移。在 8 级地震荷载作用下,位移增量、位移增幅最明显。

(2)强度折减法可以较准确地评估地震作用下半填路堤的边坡稳定性。当地震等级达到 8 级、9 级时边坡失稳,且在 8 级地震荷载的作用下,半填路堤的安全系数同比下降 52.8% ,降幅最大,表明 8 级地震对边坡稳定性的影响更显著。

(3)随着地震等级的提升,路堤承载力不断下降,在 8 级地震荷载作用下,路堤承载力同比下降了 57.0% ,降幅最大,表明 8 级地震对路堤承载力的影响更明显。

参 考 文 献

- [1]林均岐,李杰,刘金龙,等.公路系统地震破坏等级划分研究[J].世界地震工程,2013,29(1):15-20.
 [2]RAMADHANI S, MARTINI, IHZAN M, et al. The slope instability potential in the balaroa area based on the finite element method using shear strength reduction[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2023,1157

- (1):1-12.
- [3]夏英志. 某一级公路半填半挖段路基稳定性仿真研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 92-96.
- [4]陈瑞考, 魏学利, 陈宝成, 等. 新疆昌吉硫磺沟 K0+500 处路基滑塌病害成因分析及处置对策[J]. 灾害学, 2018, 33(增刊 1): 34-39.
- [5]ELHAKIM F A, ELBAZ K, AMER I M. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction[J]. HBRC Journal, 2014, 10(3): 298-307.
- [6]骆杨静. 路基回弹模量现场检测关键技术研究[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(6): 69-71.
- [7]林顺, 邬凯, 崔臻, 等. 高速公路填方路基震害特征及动力响应分析[J]. 路基工程, 2021(4): 199-205.
- [8]刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [9]刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[C]//第三届全国防震减灾工程学术研讨会论文集. 南京: 南京市土木建筑学会, 2007: 43-48.
- [10]丁梓逸, 王宇栋, 吴兴贵, 等. 基于 ANSYS 有限元强度折减法的土质滑坡地震响应特性研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊 2): 576-582.
- [11]王昕宇, 钟佩文, 张慧莉, 等. 基于不同失稳判据的黄土边坡稳定性数值计算分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(3): 143-147.
- [12]李叶鑫, 吕刚, 宁宝宽, 等. 排土场土体裂缝区植被根系及抗剪强度分布特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 108-114.

Study on Damage Evaluation of Semi-Filled Embankment Under Earthquake

YIN Tengqian¹, SI Chundi^{2,3}, FAN Taotao^{2,3}, ZHANG Yong⁴, LI Qixuan⁴

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Hebei Key Laboratory of Traffic Safety and Control, Shijiazhuang 050043, China;

4. Jing-Xiong Expressway Preparatory and Construction Office of Hebei Expressway Group Ltd., Baoding 071799, China)

Abstract: Aiming at the problems of high research cost, inflexible parameter adjustment and single influencing factor of dynamic response of semi-filled embankment, based on numerical simulation, this paper took the semi-filled embankment of a road section in Sichuan as an example to analyze the facility damage of semi-filled embankment under different levels of seismic load (6, 7, 8, 9). The displacement deformation, slope stability and embankment bearing capacity of semi-filled embankment under different conditions were analyzed by artificial fitting seismic wave and introducing viscoelastic boundary. The slope stability was evaluated by strength reduction method and limit equilibrium method, and the bearing capacity of embankment was calculated by Terzaghi formula. The results show that under different working conditions, the error of the safety factor obtained by the strength reduction method compared with the limit equilibrium method could be controlled within 4%, indicating that the strength reduction method can better evaluate the slope stability; With the increase of seismic grade, the displacement increment of semi-filled embankment increases gradually, the slope stability decreases gradually, and the bearing capacity of embankment decreases gradually. The semi-filled embankment is in an unstable state under the action of 8 and 9 earthquake loads. Under the action of 8-level seismic load, the displacement increment of semi-filled embankment increases by about 20 times, the safety factor decreases by 52.8%, and the bearing capacity of embankment decreases by 57.0%. The year-on-year variation range is the most obvious, indicating that the 8-level seismic load is more destructive to the semi-filled embankment.

Key words: semi-filled embankment; earthquake; displacement deformation; slope stability; bearing capacity of embankment