

引文格式:刘 静,李 林.地震崩塌松散堆积体路基沉降变形特征与稳定性研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(3):196-208.
LIU Jing, LI Lin. Study on settlement and deformation characteristics and stability of subgrade on loose deposit caused by earthquake collapse [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(3): 196-208.

DOI:10.19815/j.jace.2025.03054

地震崩塌松散堆积体路基沉降变形特征与稳定性研究

刘 静¹, 李 林²

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100195; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为深入评估地震堆积体在灾后重建中的应用潜力,以汶川地震灾后南华隧道和盘龙山隧道处的典型堆积体为依托,通过室内试验获取其黏聚力、内摩擦角、最优含水率及最大干密度等关键物理力学参数。在此基础上,设计并开展了5组不同工况下的土工离心模型试验,重点探讨含水率变化和颗粒级配特征对堆积体路基稳定性与变形行为的影响机制,同时结合数值模拟方法开展路基沉降与稳定性分析。结果表明:两处堆积体呈粗粒含量高、孔隙大但级配良好的特征,CBR试验结果显示其承载性能良好,压实后具备较高的路用能力;填筑过程中中下部坡面出现水平位移,沉降量随压实度提升而显著减小;地震荷载作用下,中下部边坡易出现滑塌破坏,安全系数偏低,亟需采取有效支挡与防护措施;研究成果可为灾后堆积体区域公路重建工程提供理论依据与实践指导。

关键词:路基稳定性;离心模型试验;堆积体;数值分析

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)03-0196-13

Study on settlement and deformation characteristics and stability of subgrade on loose deposit caused by earthquake collapse

LIU Jing¹, LI Lin²

(1. China Highway Engineering Consulting Corporation, Beijing 100195, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to further evaluate the potential application of seismic deposits in post disaster reconstruction, typical deposits at Nanhua tunnel and Panlongshan tunnel after the Wenchuan earthquake were used as a basis to obtain key physical and mechanical parameters such as cohesion, internal friction angle, optimal moisture content, and maximum dry density through indoor experiments. On the basis, five sets of geotechnical centrifuge model tests were designed and carried out under different working conditions, focusing on exploring the influence mechanism of moisture content changes and particle size distribution characteristics on the stability and deformation behavior of the subgrade. At the same time, numerical simulation methods were used to analyze the settlement and stability of subgrade. The results show that the two deposits have the characteristics of high coarse particle content, large pores but good grading. The CBR test results show that the deposits have good bearing performance and high road capacity after compaction. During the filling process, there is horizontal displacement on the

lower slope surface, and the settlement decreases significantly with the increase of compaction degree. Under the action of earthquake loads, the middle and lower slopes are prone to collapse and damage, with a low safety factor, and the effective support and protective measures are urgently needed. The research results can provide theoretical basis and practical guidance for road reconstruction projects in post disaster accumulation areas.

Key words: subgrade stability; centrifuge model test; deposit; numerical analysis

Author resume: LIU Jing(1984-), female, senior engineer, E-mail: 357640403@qq.com.

0 引言

受印度板块与亚欧板块强烈碰撞影响,中国西南地区形成了典型的高山峡谷地貌。“5·12”汶川地震中,该区域发生大量滑坡与崩塌,崩塌物堆积于山脚或谷地,形成形态各异的松散堆积体^[1-3]。沿公路分布的这些堆积体易引发滑坡、泥石流等次生地质灾害^[4-5]。为尽快恢复交通,部分路段需直接在堆积体上修建路基,尤其在四川、云南等地震多发山区,道路工程难以避开震后堆积区域。然而,由于堆积体结构松散、孔隙率高、黏结力弱,在其自身沉降尚未完全完成的情况下填筑路基极易诱发沉降与失稳,影响公路的运输安全和稳定性^[6]。因此,研究松散堆积体上的路基沉降特性与边坡稳定性,对提升灾后山区公路重建质量和长期运营安全具有重要意义^[7]。

众多研究表明^[8-13],松散堆积体的稳定性不仅与其物理力学特性紧密相关^[14-15],而且取决于其几何构型特征,包括边坡高度、顶部平台宽度、边坡坡角等几何因素。毛雪松等^[16]借助松散堆积体路基边坡的实地调研结果建立松散堆积体的有限元模型,研究了平台宽度、坡高、坡角与松散堆积体稳定系数之间的联系。松散堆积体宏观物理力学性质主要取决于其微观组构,堆积体粗颗粒间的摩擦力和咬合力以及颗粒自身强度等是堆积体强度的主要来源^[17]。成浩等^[18]基于离散元颗粒流分析方法,从堆积体微观组构出发研究了含石量和坡度对松散堆积体滑动特性的影响。边宏光等^[19]从宏观观角度研究了碎石含量对堆积体力学特性的影响,并依托临淄至临沂高速公路填方路堤研究了碎石含量对路堤稳定性的影响机制,结果显示增加碎石含量可有效改善土体结构,有利于提升边坡稳定性。尹小涛等^[20]通过建立离散元数值模型分析发现,黏聚力与摩擦角对松散堆积体的稳定性和失稳破坏模式存在显著影响。

除物理力学性质和几何构型外,松散堆积体孔

隙率大,易受降雨影响。雨水渗入增加其含水率,削弱土颗粒间的抗剪强度,易引发失稳^[21-22],含水率升高会显著降低堆积体的黏聚力和内摩擦角,改变破坏模式^[23],暴雨或地震等极端工况下,边坡失稳风险明显上升^[24]。降雨条件下的离心模型试验也表明,持续降雨会导致堆积体逐层破坏,而土工格栅支护能有效提升其边坡稳定性^[25]。

以上研究探明了松散堆积体的基本物理力学性质及其稳定性的主要影响因素,揭示了松散堆积体边坡失稳机制与破坏模式,对于松散堆积体加固和稳定性评价提供重要的依据。然而,已有研究多数侧重于松散堆积体自身力学性质和稳定性,对松散堆积体路用性能及其上路基填筑后的稳定性研究尚未见报道。因此,对松散堆积体的路用性能展开研究,探明松散堆积体上路基的沉降变形和稳定性特征,为灾后松散堆积体上公路设计、施工及加固提供必要的理论依据,具有极为重要的社会意义和工程实际价值。

本文以南华隧道进口处和盘龙山隧道进口处堆积体路基施工段为工程依托,开展堆积体抗剪强度、压实特性以及承载能力试验,研究两处堆积体的基本物理力学特征和路用性能。在此基础上,考虑不同含水率和颗粒级配的影响,开展盘龙山隧道进口处堆积体上路基稳定性的离心模型试验,结合有限元数值分析深入探究松散堆积体上路基典型断面的沉降变形与稳定性特征,揭示松散堆积体上路基边坡失稳破坏的应力变形特征、破坏模式和动力响应特征,提出松散堆积路基边坡的加固措施,以期对灾后公路重建设计和施工提供科学合理的数据支撑。

1 试验材料与方法

1.1 松散堆积体材料

本文以四川省省道 S303 线映秀至卧龙段的南华隧道进口处(K3+580~K3+780)堆积体(1[#]堆积体)、盘龙山隧道进口处(K9+290~K9+410)堆积体(2[#]堆积体)为研究对象,如图1所示。这两处



(a) 1#堆积体



(b) 2#堆积体

图 1 松散堆积体

Fig. 1 Loose deposit

松散堆积体为“5·12”汶川特大地震中大面积山体滑坡以及大量崩塌物滚落形成。1[#]堆积体下层为碎块石,架空结构,透水性极强,上层为碎石土,局部夹有大的漂砾,透水性相对较差。2[#]堆积体下层的块石粒径偏大,上层块石粒径相对下层块石较小,堆积体内部孔隙很大,透水性极强。两处堆积体最厚处均超过 20 m,横向长约 200 m。

表 1 3 种岩石的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of three kinds of rocks

岩石种类	表干密度/(g·cm ⁻³)	颜色	抗压强度/MPa	抗风化性	吸水率/%	泊松比	弹性模量/GPa
辉长岩	3.10	黑绿色	300	好	0.30	0.27	135
闪长岩	2.90	灰黑色	290	较好	0.40	0.28	87
青灰板岩	2.61	青灰色	201	较差	0.17	0.28	48

1.2.1 压实特性试验

为了保证堆积体路基具备足够的强度和良好的稳定性,需对其进行压实处置,使碎石重新组合、相互嵌挤,减小空隙率,提高土石混合料的密实度,形成密实整体结构,从而增强路基强度并提高其稳定性。基于《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[26]筛分试验,探究 1[#]堆积体、2[#]堆积体以及路基填料的颗粒级配曲线与不均匀系数,其中不均匀系数的计算公式为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1}$$

式中: C_u 为土体不均匀系数; d_{60} 、 d_{10} 为土的特征粒径,分别表示小于该粒径的颗粒质量为总土质量的 60% 和 10%。

通过重型击实试验确定 3 种材料的最大干密度和最佳含水量。具体的试验步骤为:首先将每种材料按四分法至少准备 5 个烘干至恒重的试样,并按照不同含水率加入相应的水分;接着将每个试样分为 3 份,在大试筒中分 3 次进行填充,每次击实 98

考虑到堆积体方量大,难以对堆积体内部组成和构造进行整体分析,因此现场采样对其基本情况进行分析。现场勘察结果显示,两处堆积体主要为碎(块)石土,部分粗粒的粒径远大于 10 cm,且呈棱角状,尺寸不规则。1[#]堆积体岩石主要包括辉长岩、闪长岩和青灰色板岩。辉长岩的主要矿物为方解石、辉石及少量橄榄石,呈现等粒结晶质结构和块状构造,通常为黑绿色,具有韧性和较好的抗风化性,可用作承重材料。与 1[#]堆积体相比,2[#]堆积体的岩土性质较为简单,其基岩主要为元古代澄江~晋宁期中细粒辉长岩、闪长岩及石英闪长岩,风化程度较弱,坡体主要为地震中滚落的碎石和少量无黏结性的土组成;堆积体主要由地震堆积形成的碎(块)石土和由河流冲刷形成的鹅卵石所组成,堆积体下部的岩性与堆积体中的岩石性质比较接近,主要组成部分为辉长岩和闪长岩。表 1 给出了两处堆积体中辉长岩、闪长岩和板岩的基本物理力学参数。

1.2 物理力学试验

通过开展击实试验、三轴试验以及加州承载比(CBR)试验,评估 1[#]堆积体、2[#]堆积体和路基填料的压实特性、抗剪强度和承载力等物理力学性能。由于灾区交通受阻,外运优质路基填料的距离较远,为降低施工成本,灾后公路重建通常选择就地取材,主要采用周边震后堆积体作为路基填料。通过比较两种堆积体的性质,确定 1[#]堆积体和 2[#]堆积体物理力学性能相对较差的堆积体,以此堆积体作为离心模型试验和数值分析的研究对象,为堆积体上路基沉降变形特性和稳定性研究提供必要参数基础。

次;最后取样烘干得到含水率。

1.2.2 抗剪强度试验

对 1[#]堆积体、2[#]堆积体和路基填料分别进行固结不排水和固结排水的三轴剪切试验,测量 3 种材料的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。

1.2.3 承载能力试验

作为测定路基强度的重要手段,CBR 试验可反映路基或路面结构层的承载能力。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对 1[#]堆积体、2[#]堆积体和路基填料进行 CBR 试验。具体试验步骤为:首先将取来的试样放在 50 ℃烘箱内烘干,过孔径 40 mm 的圆孔筛,筛除大于 40 mm 的颗粒,按四分法取出 4 份试料准备做击实试验。接着,取出一份进行击实试验,求试样的最大干密度和最佳含水率。剩下的 3 份试料按最佳含水率配制,装入塑料袋中浸润 2 h。将浸润好的试料分 3 次倒入桶中,按规定的击实数进行击实。最后,卸下套环装好百分表,泡水 4 d 后测量膨胀,进行贯入试验测得 CBR 值。

1.3 离心模型试验

边坡稳定性分析和评价的主要研究方法包括 1g(g 为重力加速度)物理模型试验、离心模型试验和数值仿真^[27]。离心模型试验可以还原重构真实重力场,使离心模型的应力与原位路基受力一致,满足岩土力学模型要求应力相等、应力状态相同的关键相似条件^[28],可以较为真实地揭示岩土工程结构的应力变化以及破坏过程。根据重力场和离心力场等效原则,采用实际工程中 2[#]堆积体土样材料进行模型设计和制作,模型和原型相似比关系如表 2 所示,试验在长安大学 TLJ-3 型土工离心机开展,试验离心加速度为 16.6g。

表 2 相似比关系

Table 2 Similar scale relationships

模拟物理量	相似比
几何长度/沉降	$1/n$
面积	$1/n^2$
体积	$1/n^3$
应力	1
颗粒尺寸	n
力	n^2
土体密度	1
固结、消散时间	n^2
质量	n^3
内摩阻力、黏聚力	1

1.3.1 离心模型试验方案设计

本试验选用经过筛分、干燥的 2[#]堆积体现场材

料进行离心试验。通过现场勘察,堆积体中最大粒径范围在 60~150 mm,离心模型试验所用的材料必须在原级配基础上进行缩尺,以满足试验要求。采用综合缩尺法进行试验,堆积体最大粒径为 20 mm,模型箱的最小尺寸约为 10 倍~20 倍的材料最大粒径,可基本满足消除模型箱边界效应影响的要求。离心模型的设计断面如图 2 所示,模型底边长 700 mm,宽度为 360 mm,高度为 400 mm,括号内数字代表实际尺寸。本试验共设计 5 组离心模型试验,试验工况设计如表 3 所示。其中,1[#]、2[#]和 3[#]模型主要对比研究不同含水率对路基边坡沉降破坏特征的影响规律;1[#]、4[#]和 5[#]模型对比研究最佳含水率下不同颗粒组成对路基沉降破坏特征的影响,其中模型试样最佳含水率由压实特性试验得到。

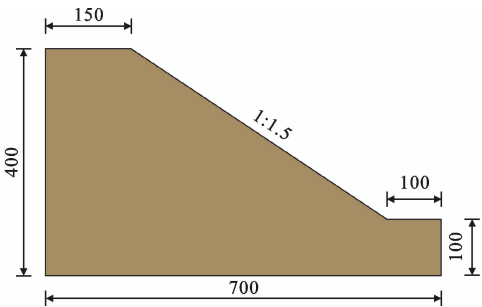


图 2 离心模型断面(单位:mm)

Fig. 2 Centrifuge model cross-section (unit: mm)

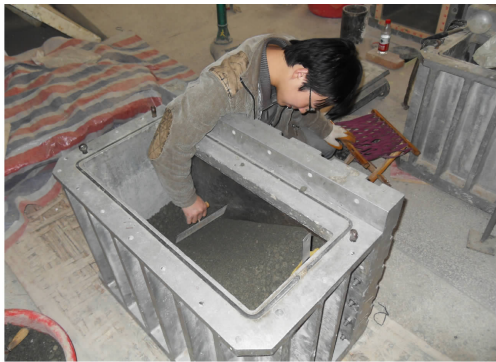
表 3 离心模型试验工况

Table 3 Cases of centrifuge model tests

模型 编号	含水 率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	各颗粒粒径(mm)质量分数/%		
			<5	5~10	10~20
1 [#]	5.19	2.50	60	20	20
2 [#]	5.79	2.40	60	20	20
3 [#]	6.39	2.30	60	20	20
4 [#]	5.19	2.50	50	25	25
5 [#]	5.19	2.50	40	30	30

1.3.2 离心模型试验关键步骤

按照试验设计要求配置试样,包括含水率、干密度和颗粒级配。混合均匀后密封静置 24 h 时,确保水分均匀分布。在清理干净的 700 mm×360 mm×500 mm 模型箱中画好试样几何边界,填充试样并夯压,切削调整模型至设计的断面形式,如图 3(a)所示;覆盖隔离布,填满容器,盖好盖板并封闭,倒置容器,标记测量点,如图 3(b)所示。将模型置于离心机吊篮中,并设置配重,根据模型总重设定离心加速度为 16.6g。试验过程中录像实时观察记录数据。试验结束后,采用游标卡尺测量监测点位移。



(a) 模型修整



(b) 模型画线定点

图 3 离心模型制作过程

Fig. 3 Centrifuge model manufacturing process

2 堆积体路基物理力学特性分析

2.1 压实特性分析

3 种材料的颗粒级配曲线如图 4 所示。根据公式(1)求得的 1# 堆积体、2# 堆积体以及路基填料的不均匀系数如表 4 所示。可以看出,1# 堆积体、2# 堆积体以及路基填料的不均匀系数均大于 10,且颗粒级配曲线较为陡峭,说明级配良好。1# 堆积体和路基填料的颗粒级配相似,且相较于 2# 堆积体,细颗粒所占质量百分比更大,平均粒径较小,颗粒间空隙较小,其路用压实性能优于 2# 堆积体。

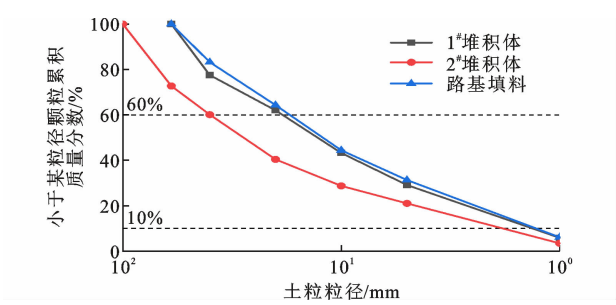


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle grading curves

由于现场取样的颗粒粒径部分大于试验要求的最大粒径 40 mm,本研究开展击实试验前先将这部

表 4 不均匀系数

Table 4 Nonuniform coefficient

材料	1# 堆积体	2# 堆积体	路基填料
不均匀系数	11	16	11

分颗粒进行挑选筛除,并采用综合缩尺法将颗粒级配进行相应缩小,得到击实试验所需试样,进而通过重型击实试验确定 3 种材料的最大干密度和最佳含水量。

图 5 分别为 1# 堆积体、2# 堆积体以及路基填料 3 种土样材料的干密度与含水率的关系。可以看出,1# 堆积体、2# 堆积体和路基填料的最佳含水率分别为 5.7%、6.5%、4.9%,最大干密度分别为 2.28、2.40、2.43 g · cm⁻³。

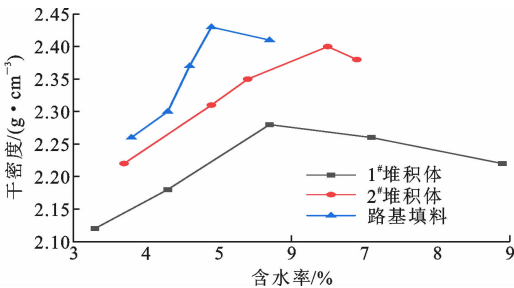


图 5 试样击实曲线

Fig. 5 Compaction curves of samples

由于击实试验在试样的制作过程中对直径大于 40 mm 的粒径进行了替换,因此,需结合级配曲线,采用式(2)、(3)分别对 3 种材料的最大干密度和最佳含水率进行修正,得到如表 3 所列 3 种材料修正后的最佳含水率和最大干密度。可以发现,与 1# 堆积体和路基填料相比,粗颗粒含量较大的 2# 堆积体最大干密度较低,最佳含水率较高。主要原因是由于其较高的粗颗粒含量容易使得土石混合料形成骨架孔隙结构,其细粒含量不足以完全填筑较大的孔隙,相应的最大干密度减小,最佳含水率增大。施工过程中,可通过配置适量细粒对堆积体空隙较大的部位进行填充,监控干密度和含水率等参数,并严格控制压实度达到确保堆积体路基稳定性的目的。

$$\rho'_{\text{dmax}} = 1 / \left(\frac{1 - 0.01p}{\rho_{\text{dmax}}} + \frac{0.01p}{\rho_w G_s} \right) \quad (2)$$

$$\omega'_0 = \omega_0 (1 - 0.01p) + 0.01p\omega_2 \quad (3)$$

式中: ρ'_{dmax} 为校正后的最大干密度; ρ_{dmax} 为用粒径小于 40 mm 的土石混合料压实试验所得的最大干密度; ρ_w 为水的密度; p 为土石混合料试样中碎石粒径大于 40 mm 颗粒的质量百分数; G_s 为土石混合料试样中碎石粒径大于 40 mm 颗粒的毛体积比重; ω'_0 为校正后的最佳含水率; ω_0 为用粒径小于 40

mm 的土石混合料压实试验所得的最佳含水率; ω_2 为粒径大于 30 mm 颗粒的吸水率。

表 5 修正后的最佳含水率和最大干密度
Table 5 Corrected optimum moisture content and maximum dry density

材料	土石比	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%
1 [#] 堆积体	30 : 70	2.51	3.68
2 [#] 堆积体	20 : 80	2.50	5.19
路基填料	30 : 70	2.58	3.19

2.2 抗剪强度分析

表 6 给出了 1[#] 堆积体、2[#] 堆积体以及路基填料的固结排水和固结不排水三轴试验的测试结果。从表 6 可见,本次排水固结剪切试验中松散堆积体土样的最小黏聚力为 17.25 kPa,与常规土石混合料黏聚力基本接近于 0 有所不同。其原因是由于 1[#] 堆积体、2[#] 堆积体含水率较高,具有一定比例的细粒成分,且粗颗粒之间的咬合作用形成了一定的黏聚力。在该堆积体稳定性分析计算中,如果忽略 c 值,则计算结果往往偏向于安全。考虑到堆积体作为路基填料时要进行压实处理,因此堆积体上路基真实工作环境经历了一定的压实固结。因此,在研究堆积体路基沉降变形特性和稳定性的过程中,宜采用三轴固结排水试验测试的强度指标作为数值模拟和理论计算的参数。

表 6 三轴剪切试验结果
Table 6 Triaxial shear test results

材料	试验类型	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力 c /kPa
1 [#] 堆积体	固结排水	37.25	45.37
	固结不排水	37.20	22.31
2 [#] 堆积体	固结排水	35.12	42.86
	固结不排水	29.80	17.25
路基填料	固结排水	36.31	43.53
	固结不排水	37.45	27.68

2.3 承载能力分析

试验测试得到的 1[#] 堆积体、2[#] 堆积体以及路基填料的 CBR 值如表 7 所示。

表 7 不同材料的 CBR 值
Table 7 CBR value of different materials

材料	1 [#] 堆积体	2 [#] 堆积体	路基填料
CBR 值/%	108.8	90.3	105.0

从表 7 可以看出:1[#] 堆积体的承载能力更高,一方面是因为 2[#] 堆积体中青灰色板岩含量较 1[#] 堆积体和路基填料高,其岩质较软,在压入相同贯入量时所需荷载较小;另一方面是因为 1[#] 堆积体中含有的细颗粒较 2[#] 堆积体多,空隙率较小,密实度较高,

形成的骨架密实、结构更优。因此,在 1[#] 堆积体上填筑路基的稳定性更好,本文选用路用性能较差的 2[#] 堆积体开展离心模型试验和数值分析,以考察在其上填筑路基时的稳定性。

3 堆积体路基离心模型试验分析

以 1[#] 模型的离心试验结果为例,对试验中的测点位置和试验后的裂缝状态进行描述说明。1[#] 模型的最大沉降位移为 3.3 mm,位于模型中间靠近箱壁位置,该沉降量为堆积体上填筑路基施工期和工后沉降总和。在模型的坡体表面高度 16~21.5 cm 位置处有明显的水平位移,即实际填筑路基中堆积体边坡可能出现侧向拱胀隆起破坏。模型高度为 26~34 cm 处出现一条近 18.5 cm 长的裂缝,深度约为 0.8 cm,经分析该裂缝形成的原因一方面与填料的压实不均匀有关,另一方面是由于模型箱吊装过程震动作用造成试样产生了初始裂缝。

离心模型的试验结果如表 8 所示。可以看出:随着离心模型试样含水率的提高,压实度有所减小,模型的表面沉降量和边缘位移均明显增大,坡面最大水平位移也随之增大,表明坡体变形程度变大。在相同含水率下,模型颗粒组成的变化会导致压实度的增加,其表面沉降量降低,表明优化坡体颗粒组成对减小坡体沉降量具有积极影响。在相同含水率下,随着模型压实度的增加,坡面最大水平位移变化幅度较小,其中 1[#] 模型具有最小的水平位移,表明本离心模型设置的颗粒组成对坡面水平位移影响较为有限。5 组离心模型试样坡面最大水平位移的发生位置基本处于距离模型底面 160~210 mm 的位置。

模型试样顶面的竖直位移变化趋势如图 6 所示。可以看出,由于模型周边摩擦力的影响,其紧贴模型箱壁的一端为 0,离心模型顶面在距离箱壁一侧 50 mm 处沉降量最为明显;其中 3[#] 模型整体的顶面竖直位移最为明显,5[#] 模型整体的顶面竖直位移量值最小。进一步对比表 8 中 3[#] 和 5[#] 模型试样的含水率和干密度可知,5[#] 模型试样的含水率低于 3[#] 试样,相应 5[#] 模型试样干密度大于 3[#] 模型试样,表明堆积体的沉降变形和稳定性受含水率和颗粒组成影响显著,含水率越小,压实度越高,堆积体上路基沉降越小,其稳定性越好。

图 7 给出了不同模型竖向位移沿模型深度的变化趋势,其中模型顶面深度为 0。由图 7 可见:离心模型试样的沉降主要发生在距离堆积体顶面 1/3 高

表 8 离心模型试验结果
Table 8 Centrifuge model test results

模型编号	含水率/%	压实度/%	堆积体表面最大沉降量/mm	堆积体边缘位移/mm		坡面最大水平位移/mm	
				水平	沉降	位置	数值
1 [#]	5.19	90.0	3.3	0.2	0.5	160~215	1.9
2 [#]	5.79	87.0	5.2	0.3	0.7	160~220	2.2
3 [#]	6.39	85.7	6.9	0.5	1.1	165~220	4.5
4 [#]	5.19	90.5	3.2	0.5	0.6	145~205	2.1
5 [#]	5.19	91.9	3.0	0.4	0.4	160~220	2.0

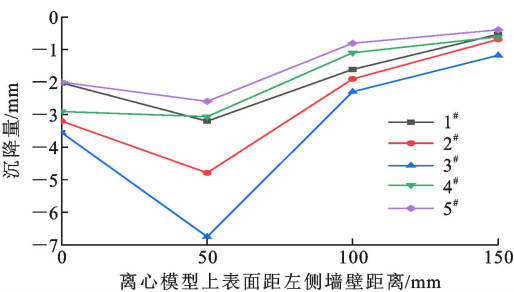


图 6 模型顶面垂直位移变化趋势

Fig. 6 Vertical displacement change trend of top surface of model

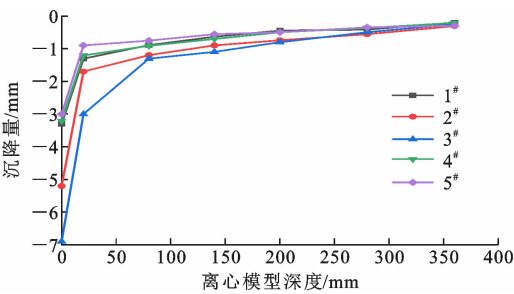


图 7 竖直位移沿模型深度变化趋势

Fig. 7 Vertical displacement change trend along model depth
度范围内,且堆积体含水率减小、压实度增大都会显著降低模型沿深度方向的沉降量;相反,体积含水率最高、干密度最小的 3[#] 模型试样沿深度方向的沉降量最大,再次说明了堆积体边坡的沉降特征和稳定性受含水率和干密度影响显著,在压实情况下堆积体整体稳定性明显有所提高。

4 堆积体路基稳定性数值分析

堆积体稳定性的分析方法主要包括基于极限平衡理论的极限平衡法和以有限元为基础的数值计算法等^[29-30]。其中,极限平衡法将堆积体视为刚体,不考虑堆积体内部本身的应力-应变关系,按某种规则将滑动趋势范围内的堆积体划分为小块体,通过块体的平衡条件建立整个堆积体的平衡方程,以此为基准计算得出边坡稳定性。有限元法则以连续介质力学为基础,将分析域离散成有限的在节点处相

联结的子域,在单元中采用低阶多项式插值,建立单元刚度矩阵,再利用能量变分原理集成总刚度矩阵,最后结合初始条件及边界条件进行求解。Geo-Studio 软件能够结合极限平衡和有限元法有效分析边坡安全性^[31-33],已成为岩土、地质领域较为全面可靠的分析软件,被广泛应用于复杂坡体的稳定性分析。本文分别采用 Geo-Studio 软件的 SLOPE/W 模块、SIGMA/W 模块、QUAKE/W 模块对堆积体进行稳定性、应力变形以及动力响应进行分析。考虑到 2[#] 堆积体的岩土性质较 1[#] 堆积体差,因此以 2[#] 堆积体为例对堆积体上填筑路基的典型断面稳定性进行数值分析。

4.1 堆积体潜在滑动面分析

根据 2[#] 堆积体实际工程状况,选取坡面坡度为 1:1.5 的典型截面进行堆积体路基边坡稳定性分析,路基宽度为 20 m,高度为 26 m,左侧靠近陡崖。数值模拟中路基填料和堆积体黏聚力和内摩擦角取值按照 2[#] 堆积体的固结排水试验结果取值。分别选用 Bishop 法、Janbu 法、Morgen 法、Ordinary 法研究其稳定性,滑动方向选为向下坡一侧滑动,基面荷载用换算土柱重模拟,换算土条为 20 m×0.667 m,重度为 20 kN·m⁻³。

表 9 为采用 4 种稳定性分析方法计算得到的 2[#] 堆积体路基边坡典型截面的最小安全系数。由于 Bishop 法仅考虑网格间的正应力满足力矩平衡原理,Janbu 法仅考虑正应力满足力平衡原理,Morgen 法对正应力和剪应力综合考虑,同时满足力和力矩的平衡原理,因此 4 种计算方法得到的最小安全系数有所差异。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[34],本段堆积体稳定系数高于 1.25,正常情况下可不采取其他抗滑处理措施。

SLOPE/W 模块得到对应的最危险滑动面形状、位置以及最小安全系数如图 8 所示。图中绿色区域代表潜在滑移体,数字代表最小安全系数。通过对比图 8(a)和图 8(d)可以发现,4 种计算方法得

表 9 不同分析方法下的最小安全系数

Table 9 Minimum safety factor under different analytical methods

计算方法	Bishop 法	Janbu 法	Morgen 法	Ordinary 法
最小安全系数	1.458	1.285	1.453	1.301

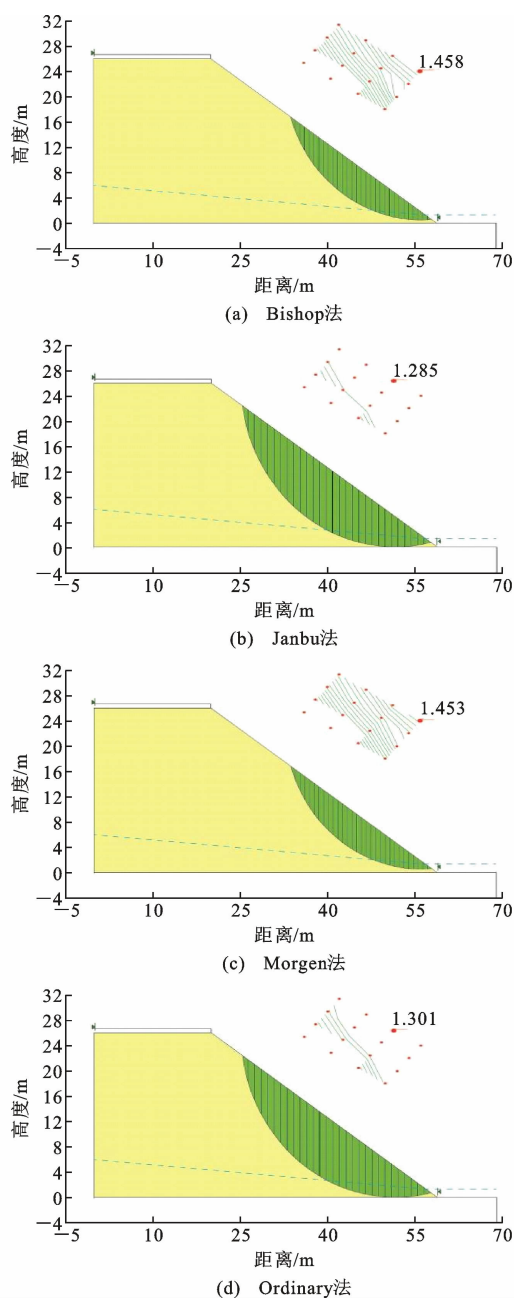


图 8 不同分析方法下的最危险滑动面形状及位置

Fig. 8 Shape and location of most hazardous sliding surface under different analytical methods

到的最危险滑动面虽大小不完全一致,但均位于斜坡中下段,与离心模型试验获得的结果一致。数值计算结果和离心模型试验均表明,在堆积体上填筑路基容易出现边缘压实度不足和坡脚应力集中问题,堆积体下部坡面由于无约束容易出现侧向挤出,

导致坡面隆起和滑移。因此,在堆积体上路基填筑需要重点关注堆积体下段的稳定性,在堆积体坡脚处宜采取挡墙等支挡措施防止堆积体滑移失稳。

4.2 应力和位移特征分析

采用 SIGMA/W 模块对堆积体路基的应力和位移进行有限元模拟。模型参数设置和模型尺寸与第 4.1 节保持一致,选用四边形网格模型,模型共有 208 个网格节点,共计 221 个单元。模型左侧边界水平约束,底边固定约束,坡面设为自由边界,如图 9 所示。模型堆积体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,采用位移收敛准则,收敛限值为 0.001。从图 9 可以看出堆积体上填筑路基后基本的变形特征,即靠近山坡一侧的沉降变形相对边坡一侧较大,堆积体沉降从上到下呈递减趋势。

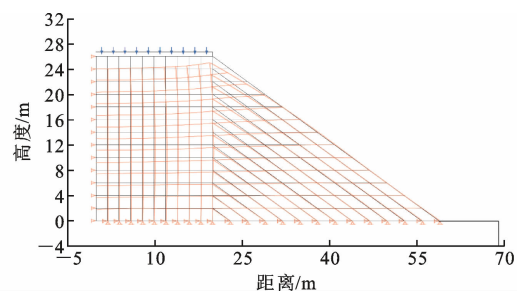


图 9 堆积体计算模型

Fig. 9 Computation model of deposit

为进一步分析堆积体上路基填筑后的应力与变形分布特征,图 10 给出了堆积体 X 方向(水平方向)和 Y(竖直方向)方向的位移和应力云图。从图 10(a)、(b)可以看出:在堆积体自重荷载和路基填筑应力作用下,堆积体 18~26 m 的高度范围内水平向位移为负值,说明堆积体在该范围内的水平位移朝向山坡一侧,在基底到 18 m 高的范围内,堆积体 X 方向位移为正,即堆积体在该范围内水平位移朝向堆积体坡面一侧,出现侧向挤出隆起位移;堆积体沿 Y 方向的位移从基底向上逐渐增大,最大沉降为 1.02 m,出现在靠近山坡一侧。从图 10(c)、(d)可以看出:堆积体水平方向的应力分布从基底向上逐渐增大,最大应力为 188.48 kPa,出现在堆积体最上方靠近路肩处;竖向应力从坡面一侧向山体侧逐渐增大,最大为 400.40 kPa,堆积体坡面由于缺乏有效约束作用,其附近竖向应力和水平应力均接近于 0,在竖向自重应力作用下出现较大水平向位移。因土体强度取决于有效应力状态,坡面处土体强度低,因此坡面下方容易出现局部滑移破坏。通过以上分析可知,在填筑路基过程中,滑坡体下方坡面临空,缺乏有效的水平向约束容易产生较大的水平向

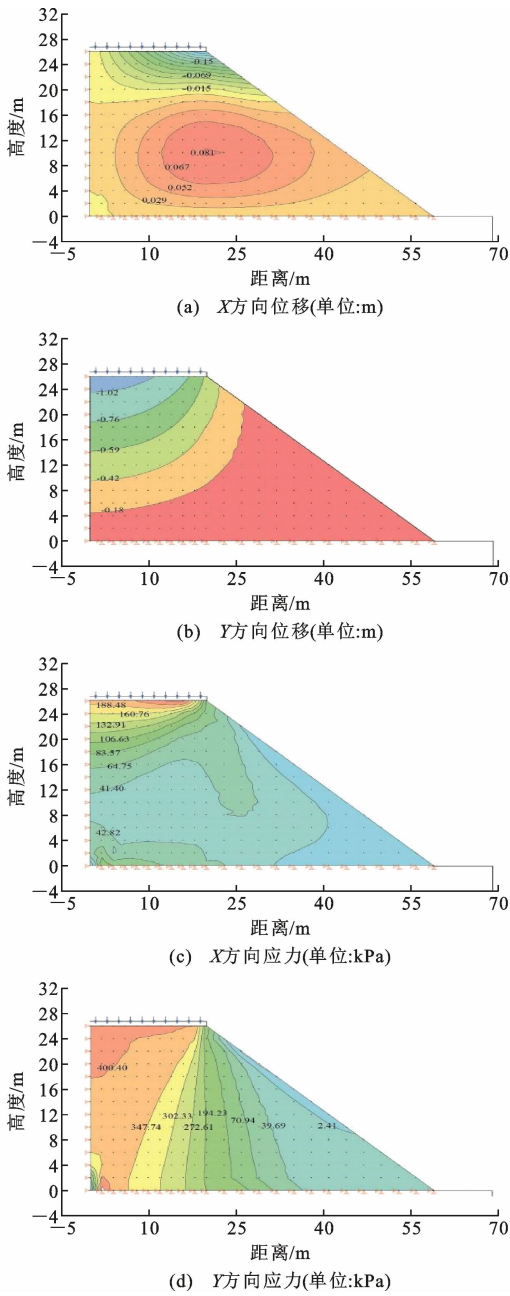


图 10 位移和应力云图

Fig. 10 Nephogram of displacement and stress

位移和局部滑移,因此在堆积体上路基填筑过程中应在坡脚处沿坡面修筑支挡结构,提升堆积体下方坡面的侧向约束作用,防止堆积体下方局部滑移失稳。

4.3 沉降量分析

通过改变模型土料的重度和弹性模量以模拟 5 组不同离心模型的含水率和颗粒组成,同时对应离心模型的重力加速度 $16.6g$,采用 GeoStudio 软件的 SIGMA/W 模块对离心试验进行模拟,得到的沉降量分析结果如图 11 所示。对比图 6 和图 7 可以看出:离心模型试验的表面最大沉降量出现在距离

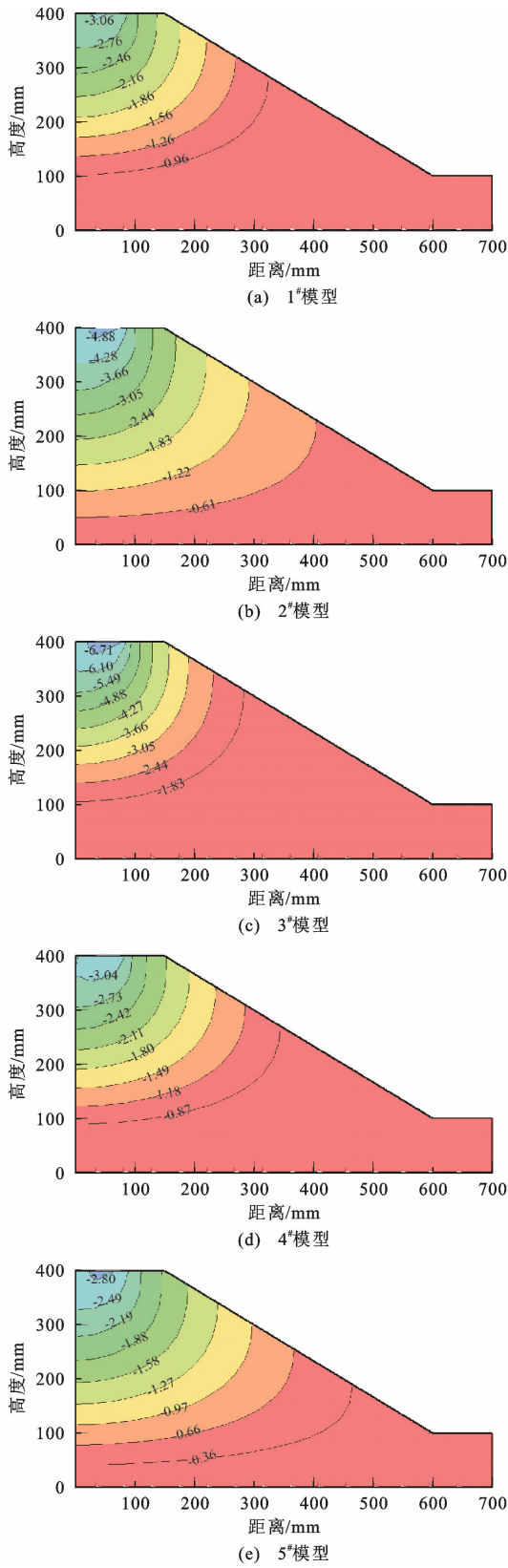


图 11 SIGMA/W 沉降量结果

Fig. 11 SIGMA/W settlement results

模型墙壁 50 mm 的范围内;不同模型沿模型深度方向的沉降量逐渐减小,沉降主要集中在距离表面

150 mm 的范围内。由图 11 可以看出:不同模型沿模型深度方向的沉降量均逐渐减小,且靠近陡崖侧较堆积体坡面侧沉降量更大,模型表面最大沉降量基本出现在距离山坡侧 50 mm 左右,与图 6 和图 7 得到的结果基本一致。随着含水率的增大(模型 1、2、3),沉降量增大;随着压实度的增加(模型 1、4、5),沉降量呈减小趋势,与离心模型试验得到的沉降量结果较为一致。

进一步采用 SLOPE/W 模块和 SIGMA/W 模块分析模型土料的压实度对边坡稳定的安全系数和边坡表面最大沉降量的影响,边坡稳定性分析采用 Bishop 法,计算结果见表 10。可以看出:随着压实度的提高,边坡稳定的安全系数逐渐提高,且表面最大沉降量逐渐降低。

表 10 SLOPE/W 和 SIGMA/W 计算结果

Table 10 Calculation results of SLOPE/W and SIGMA/W

压实度	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90
安全系数	1.318	1.328	1.339	1.349	1.360	1.371
表面最大沉降量/mm	7.25	6.69	5.71	4.85	4.01	3.08
压实度	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	
安全系数	1.383	1.396	1.409	1.423	1.438	
表面最大沉降量/mm	2.79	2.53	2.36	2.18	2.10	

4.4 地震荷载下动力稳定性分析

因两处堆积体地处西南地震频发地带,受地形地貌、地层岩性、地震裂度等多方面因素的影响,堆积体在地震荷载作用下极易孕育崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。因此,建立如图 12 所示堆积体路基地震计算模型,通过 QUAKE/W 对地震荷载工况下堆积体进行稳定性分析,探究松散堆积体路基的动力稳定性,以确定是否需要采取抗滑措施。

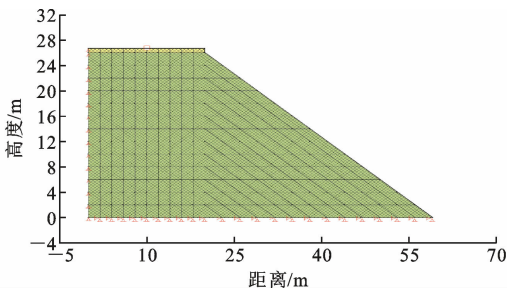


图 12 堆积体地震网格模型

Fig. 12 Seismic grid model of deposit

考虑到地震荷载作用下边坡的破坏主要由水平向动力加速度引起,竖向地震加速度对边坡动力稳定性影响较小。因此,仅考虑水平向地震加速度的影响,对堆积体模型施加该区域典型水平向地震加速度,地震持续时间 10 s,最大加速度为 341.7

$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$,地震波最大峰值出现在 2.14 s 处,波形如图 13 所示。取堆积体顶面中间点的动力响应特征进行分析,图 14 给出了 QUAKE/W 模拟得到的堆积体顶面中间点处位移响应时程曲线。从图 14 可以看出,该点水平向位移地震响应曲线相对地震波具有一定的滞后性,水平向最大位移出现在 5.6 s,滞后于地震波最大峰值出现时刻 2.14 s。

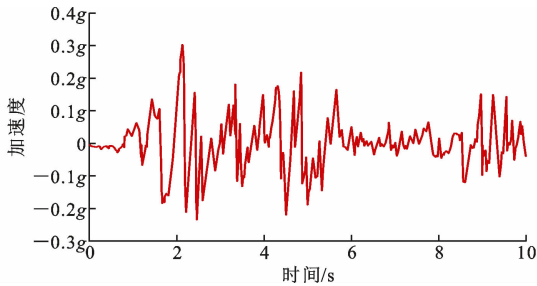


图 13 地震波波形

Fig. 13 Seismic waveform

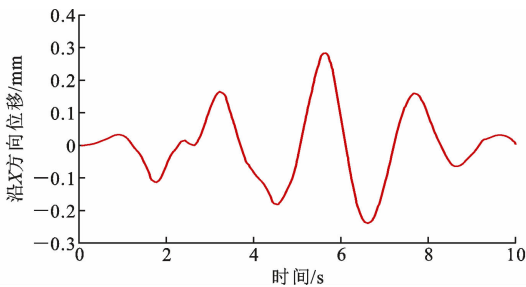


图 14 堆积体顶面中间点沿 X 轴方向位移

Fig. 14 Displacement of the middle point of deposit top surface along X-axis

图 15 给出了地震作用下松散堆积体最危险滑动面的形状和位置,计算所得的安全系数为 0.519,远远小于《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[34]中规定的最小安全系数 1.25。从图 15 可以看出,地震荷载作用下松散堆积体的滑动破坏范围更大,从静力的坡趾破坏形式转变为沿坡底的较大范围滑动破坏。

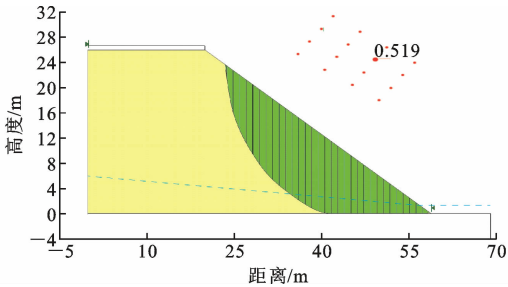


图 15 地震工况下滑动面

Fig. 15 Sliding surface under earthquake

进一步与静力稳定性系数相对比可知,尽管该

堆积体在静力作用下安全系数均高于 1.25,但在地震荷载作用下由于松散堆积体内部结构松散,且坡面下方缺乏有效约束,可能沿堆积体内部裂缝或软弱面发生滑动破坏。因此,为确保松散堆积体路基的安全稳定,在坡趾和坡面下方区域应修筑相应的支挡结构,保证公路运输的长期安全性。

5 结 语

(1)两处堆积体颗粒级配良好,具有一定的黏聚力,压实后可作为路基填料;与 2[#]堆积体相比,1[#]堆积体颗粒级配更好,空隙率较小,压实后密实度较高,承载能力更强,在其上填筑路基的稳定性较好。

(2)压实度、颗粒级配和含水率显著影响路基沉降特征和稳定性。降低含水率和提高压实度可有效提升堆积体的稳定性,施工中应严格控制干密度和含水率,以降低堆积体路基的沉降变形。

(3)离心模型和数值分析结果显示,2[#]堆积体竖向位移自基底向上增加,最大沉降出现在靠近陡崖侧,且边缘易出现压实不足和应力集中,导致侧向挤出、隆起及滑移失稳。

(4)2[#]堆积体在地震时易沿裂缝或软弱面滑动失稳,因此,在该堆积体上填筑路基应在坡脚处沿坡面修筑支挡结构,防止堆积体滑移失稳。

参考文献:

References:

[1] 崔 鹏,韦方强,何思明,等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报,2008,26(3): 280-282.
CUI Peng, WEI Fangqiang, HE Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 280-282.

[2] 许 冲,戴福初,姚 鑫,等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增 1):2972-2981.
XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS based certainty factor analysis of landslide triggering factors in Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2972-2981.

[3] 毛雪松,王 楠,高胜雨,等. 川藏公路南线(西藏境)松散堆积体类型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(5):8-14.
MAO Xuesong, WANG Nan, GAO Shengyu, et al. Loose deposits types along the south line of Sichuan-

Tibet (in Tibet) highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(5): 8-14.

[4] 吴 永,何思明,裴向军,等. 震后沟道泥石流启动条件:松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析[J]. 岩土力学,2012,33(10):3043-3050.
WU Yong, HE Siming, PEI Xiangjun, et al. Analysis of condition of startup of gully debris flow after earthquake: the hydraulic mechanism of instability of loose deposits in rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3043-3050.

[5] 李家春,黄丽珍,田伟平,等. 公路自然灾害类型划分[J]. 长安大学学报(自然科学版),2011,31(2):33-37.
LI Jiachun, HUANG Lizhen, TIAN Weiping, et al. Type classification on natural disasters of highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(2): 33-37.

[6] 张丽娟. 松散堆积体沿河路基稳定性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.
ZHANG Lijuan. Study on stability for soil riverside roadbed[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.

[7] 刘 静. 堆积体路基稳定性模型试验与数值分析[D]. 西安:长安大学,2011.
LIU Jing. Model test and numerical analysis of subgrade on deposit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

[8] ZHANG L, JIANG X, SUN R, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes with cracks under rainfall infiltration conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105907.

[9] 贾文斌. 松散堆积体填料边坡稳定性分析[J]. 工程技术研究,2024,9(2):13-15.
JIA Wenbin. Stability analysis of loose accumulation filling slope[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(2): 13-15.

[10] 全霄金,唐建政,付艳青,等. 双向地震作用下崩塌堆积体边坡动力模糊可靠性分析[J]. 地震工程学报,2024,46(2):343-348.
TONG Xiaojin, TANG Jianzheng, FU Yanqing, et al. Dynamic fuzzy reliability analysis of collapse accumulation slopes under bidirectional earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 343-348.

[11] 张吉庆. 石忠高速公路松散堆积体路堑边坡稳定性分析及处治技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
ZHANG Jiqing. Research on stability analysis and

- treatment technology of the impact deposit soil cutting slope of Shizhong highway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [12] 田海,孔令伟,李波.降雨条件下松散堆积体边坡稳定性离心模型试验研究[J].岩土力学,2015,36(11):3180-3186.
- TIAN Hai, KONG Lingwei, LI Bo. Centrifugal modeling tests on stability of deposits slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3180-3186.
- [13] SUN Q Z, ZHAO L H, QIN Y G, et al. Experimental study on the failure of loose accumulation landslides under rainfall conditions[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1291592.
- [14] 武明.土石混合非均质填料力学特性试验研究[J].公路,1997,42(1):40-42,49.
- WU Ming. Experimental study on mechanical properties of soil-rock mixed heterogeneous filler[J]. Highway, 1997, 42(1): 40-42, 49.
- [15] 孙文君,宋杨,路维,等.黄土-碎石混合体的力学性质试验研究[J].公路,2016,61(5):178-181.
- SUN Wenjun, SONG Yang, LU Wei, et al. Experimental study on mechanical properties of loess-macadam mixture[J]. Highway, 2016, 61(5): 178-181.
- [16] 毛雪松,肖亚军,王铁权,等.坡体外形对松散堆积体路基上边坡稳定性影响分析[J].公路,2017,62(11):36-41.
- MAO Xuesong, XIAO Yajun, WANG Tiequan, et al. Impact of slope shape on slope stability with loose deposits subgrade[J]. Highway, 2017, 62(11): 36-41.
- [17] ZHANG S, ZHANG L M, PENG M, et al. Assessment of risks of loose landslide deposits formed by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(5): 1381-1392.
- [18] 成浩,韩培锋,苏有文.基于离散元方法的松散体滑动堆积特性及影响因素分析[J].物理学报,2020,69(16):165-180.
- CHENG Hao, HAN Peifeng, SU Youwen. Sliding and accumulation characteristics of loose materials and its influencing factors based on discrete element method[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(16): 165-180.
- [19] 边宏光,王顺,李典庆,等.碎石含量对填方路堤边坡稳定性影响分析[J/OL]. 工程力学,2024;1-11 [2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20240221.1905.020.html>.
- BIAN Hongguang, WANG Shun, LI Dianqing, et al. Influence of gravel content on the stability of filling embankment slope[J/OL]. Engineering Mechanics, 2024; 1-11 [2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20240221.1905.020.html>.
- [20] 尹小涛,王水林,马双科,等.强度变化对崩坡积体堆积机制及稳定性影响研究[J].岩土力学,2010,31(2):620-626.
- YIN Xiaotao, WANG Shuilin, MA Shuangke, et al. Study of stability and accumulation mechanism of colluvium affected by change of strength property[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 620-626.
- [21] CARRIERE A, GAUTHIER V, DESJARDINS R, et al. Evaluation of loose deposits in distribution systems through: unidirectional flushing [J]. Journal AWWA, 2005, 97(9): 82-92.
- [22] 孙志亮,孔令伟,郭爱国,等.应力比与含水状态对松散堆积体动力参数及地表反应谱的影响[J].岩土力学,2015,36(10):2765-2772.
- SUN Zhiliang, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Effects of stress ratio and moisture condition of loose deposits on their dynamic parameters and ground response spectrum [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2765-2772.
- [23] WANG X, SU Q, ZHANG Z Y, et al. Stability analysis of loose accumulation slopes under rainfall: case study of a high-speed railway in Southwest China [J]. Railway Engineering Science, 2024, 32(1): 95-106.
- [24] 赵建军,巨能攀,涂国祥.松散堆积体工程边坡变形机理分析及支护对策研究[J].工程地质学报,2008,16(5):611-615.
- ZHAO Jianjun, JU Nengpan, TU Guoxiang. Deformation mechanism and supporting measures of man-made slopes in loose deposits[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 611-615.
- [25] 杨连祥,翁效林,胡继波,等.强降雨条件下高陡填方雪道路基稳定性分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):170-179.
- YANG Lianxiang, WENG Xiaolin, HU Jibo, et al. Stability analysis of high and steep fill snow way roadbed under heavy rainfall condition[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 170-179.
- [26] 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications

Press, 2020.

[27] 胡晋川. 基于突变理论的黄土边坡稳定性分析方法研究[D]. 西安:长安大学, 2012.

HU Jinchuan. Based on the catastrophe theory study on stability analysis method of cut slope in loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[28] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1-3, 7.

BAO Chenggang, RAO Xibao. Principle of the geotechnical centrifuge model test [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1-3, 7.

[29] 郭献章, 杨治华, 李凤柱, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡锚固优化分析[J]. 金属矿山, 2022(11): 186-192.

GUO Xianzhang, YANG Zhihua, LI Fengzhu, et al. Optimization and analysis of the consequent rock slope anchorage engineering with weak interlayer[J]. Metal Mine, 2022(11): 186-192.

[30] 吴礼军, 徐文彬. 邻近高陡边坡采矿爆破振动规律及边坡稳定性分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 113-119.

WU Lijun, XU Wenbin. Analysis of blasting vibration law and slope stability in mining near high and steep slope[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 113-119.

[31] 冯忠居, 李 德, 江 冠, 等. 基于可靠度理论的高边坡二次开挖稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(8): 130-136.

FENG Zhongju, LI De, JIANG Guan, et al. Stability analysis on of secondary excavation of high slope based on reliability theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(8): 130-136.

[32] 米 琼, 戴世金, 张瑞娜, 等. 干污泥高维填埋的堆体边坡稳定性模拟与分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1397-1402.

MI Qiong, DAI Shijin, ZHANG Ruina, et al. Slope stability simulation of dry sludge pile in high-dimensional landfill operation[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1397-1402.

[33] TAO Y F, XUE Y G, LI S C, et al. Parameter susceptibility analysis of the Shimen landslide (Liaoning province, China)[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56(1): 7-11.

[34] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.