

基于数字化施工的山区公路土石混合弃渣工程尺度参数测定方法研究

李刚¹, 尹小涛²

(1. 武汉建诚工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000;

2. 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: 为了解决山区公路土石混合弃渣取样代表性和实验结果离散性问题并获取弃渣工程尺度参数。结合数字化施工过程获取弃渣总重量、堆填体积和极限直立高度, 提出弃渣工程尺度容重、内摩擦角和黏聚力计算公式, 组成山区公路土石混合弃渣工程尺度测定方法体系, 并与传统有限尺寸和数量实验测定方法进行比较。研究表明: 该方法紧密结合施工过程, 不用进行额外的取样和实验, 且参数取值偏小、稳定性评价结果具有一定保守特征, 可以作为传统方法的有益补充。基于数字化施工的山区公路弃渣工程尺度参数测定方法, 可以为动态设计、动态评估提供参数支持, 也有助于动态施工、规划堆积、施工优化、施工风险管控。

关键词: 山区公路土石混合弃渣; 工程尺度参数; 数字化施工; 容重; 内摩擦角; 直立极限高度; 黏聚力

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0076-07

Engineering Scale Parametric Measurement Method of Mountainous Highway Soil-rock Mixed Waste Slag Based on Digital Construction

LI Gang¹, YIN Xiaotao²

(1. Wuhan Jiancheng Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;

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

Abstract: To solve problems of sampling representativeness or experimental results discreteness for earth-rock mixed spoil from mountain highway, and to obtain the spoil's engineering-scale parameters. Combining the total weight, fill volume and limiting stand-up height of the spoil obtained during the digital construction process, formulas for the spoil's engineering-scale density, friction angle and cohesion are built, which form a methodology system for calculating the mountain highway earth-rock mixed spoil parameters. The application and validation of the method are done by a engineering case. Compared with traditional limited size and quantity tests method, this method is closely integrated with the construction process, eliminating additional sampling and experiment works. Additionally, the parameter values obtained are lower than those traditional ones, leading to conservative stability evaluation results. The method can serve as a useful supplement to traditional methods, which can provide parameter support for dynamic design and assessment, also aids in dynamic construction, planning stacking, construction optimization and construction risk management.

Keywords: mountainous highway earth-rock mixed waste slag; engineering scale parameters; digital construction; unite weight; internal friction angle; limit erect height; cohesion

山区公路土石混合弃渣与自然土石混合体的区别在于后者已经自然固结稳定,前者只是进行了一定程度的工程压实^[1],两者的共性在于粒径范围较大,均匀性差,物理力学性质很难通过有限尺寸和有限数量试验准确测定^[2],代表性土样见图1。这类材料组成的工程边坡稳定性基本都是依据经验取值进行评价^[3],如何科学准确的获取足够尺度下具有代表性的土石混合弃渣的工程特性,是科学评价弃渣边坡稳定性的基础,是该领域亟需解决的科学技术难题。



(a) 自然崩坡积



(b) 公路弃渣

图1 典型土石混合体

目前土石混合弃渣的参数测定基本分为两个技术路线:(1)开发大尺度试验测试设备获取参数,其中长江科学院和中国科学院武汉岩土力学研究所均开发了1 m以上大尺寸测试设备,谷东京等^[4]利用室内试验探讨了重庆市奉节县藕塘滑坡地区土石混合体强度与取样高程和含水率的关系。杨忠平等^[5]通过室内大型直剪试验和离散元数值模拟探究了含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响及接触面剪切破坏机理。罗亚琼等^[6]利用土石混合体大型直剪正交试验,揭示土石混合体剪切变形特征与机理,建立土石混合体剪切损伤模型;(2)利用数值仿真试验标定取值,其中代表性的是PFC数值仿真试验系统、数值流行元试验仿真系统和DDA数值仿真试验系统等等,胡世兴等^[7]基于室内大型三轴试验与PFC^{3D}-FLAC^{3D}耦合分析方法

分析了土石混合体试样变形破坏特征以及剪切面、接触力链发展规律。张振平等^[8]利用PFC^{2D}程序建立了土石混合体直剪试验离散元模型,探讨了含石量对混合体强度的影响规律。以上研究一定程度上,解决了土石混合弃渣力学特性测量问题,但仍受限于测试设备和数值仿真效率,很难对真型土石混合弃渣进行工程尺度参数的测试和探讨。

传统土石混合弃渣的试验测试基本为现场灌砂试验测定容重,利用原状样或者扰动重塑样直剪试验测定弃渣强度参数,江泊洧等^[9]依托某水电工程高弃渣场边坡,探讨了4条垂直监测线上弃渣土工程特性的空间分布规律。王家辉等^[10]利用取自某渣场边坡坡顶和坡底不同部位的松散碎石土试样,开展了大型三轴固结排水剪切试验,研究了其剪切破坏过程中的应力与应变、体应变与轴向应变、实测泊松比随应力水平变化的关系以及邓肯-张 $E-\nu$ 和 $E-B$ 模型的适用性。袁斌^[11]利用CT技术评价了弃渣颗粒形态特征,利用室内大型三轴压缩试验,结合PFC^{3D}数值试验,分析颗粒群体形态特征对弃渣堆积体物理力学性质的影响。张家铭等^[12]利用咸池沟弃渣现场饱和试样大型三轴试验,分析了渣体材料在不同围压下应力-应变关系特性、变形特性以及抗剪强度特性。尹小涛等^[2]利用弃渣过程的天然休止角和颗分实验跟踪统计,获取不同类型土石混合弃渣内摩擦角。将上述参数代入极限平衡法软件计算弃渣边坡稳定性系数,与规范给定安全标准对比,评估其稳定性。李薇等^[13]利用调查定性评价和计算定量评价相结合的方法,对典型山区公路弃渣场稳定性进行了综合评估。张朔^[14]跟踪典型弃渣场堆填过程,对其动态稳定性进行评价,提出了山区公路弃渣场综合安全控制技术。上述研究均存在取样代表性和试验结果离散性问题。

依托实际山区公路弃渣工程,利用数字化施工技术,统计进场堆填弃渣总重量、最终堆填体积,计算弃渣工程尺度容重;跟踪堆填过程记录的多阶段极限排放休止角,得到弃渣工程尺度等效内摩擦角;结合弃渣整形施工过程中的极限堆填高度试验,换算得出弃渣工程尺度黏聚力,与传统方法对比弃渣参数取值和稳定性评价结果,检验上述方法的可行性。

1 公路弃渣工程尺度参数测定方法

1.1 工程尺度参数测定方法

山区公路土石混合弃渣工程尺度参数测定技术

路线如图 2 所示。

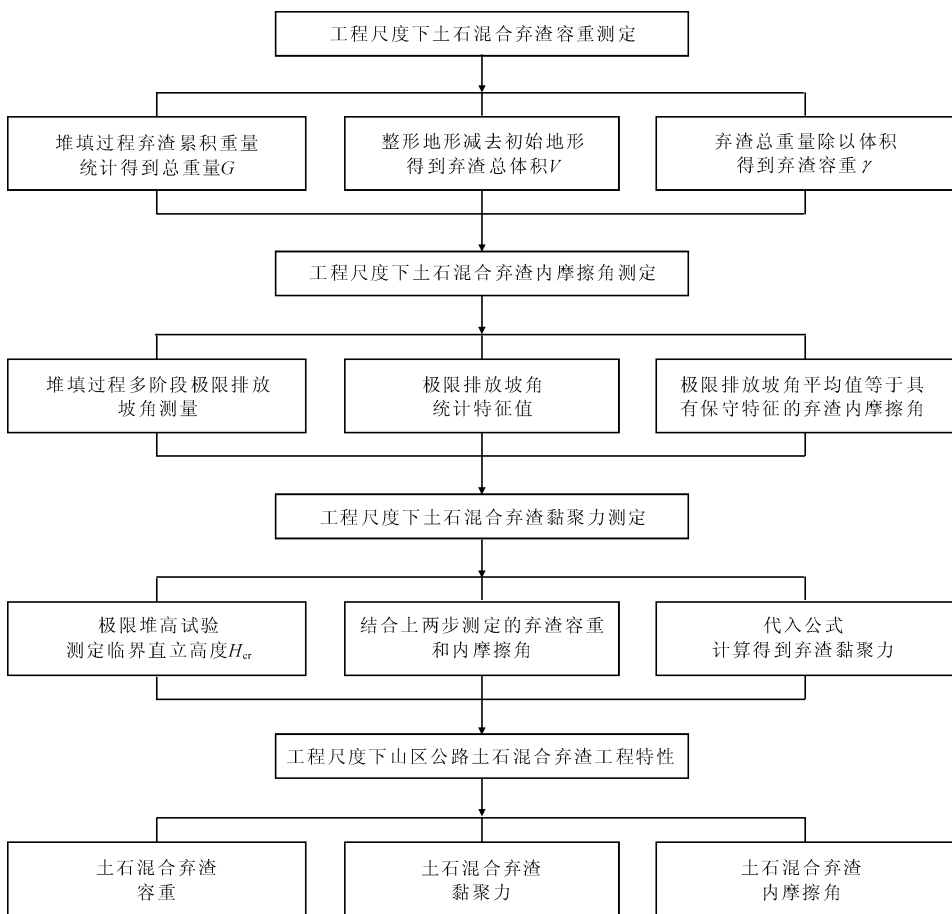


图 2 山区公路土石混合弃渣工程尺度参数测定技术路线

1.1.1 容重

依据弃渣堆填全过程数字化施工记录的弃渣累积重量数据,结合初始地形和整形地形测量作差得到弃渣总体积,弃渣总重量除以总体积计算得到工程尺度下弃渣总体容重,公式如下:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1)$$

$$G = \sum_{i=1}^n G_i \quad (2)$$

$$V = V_{\text{reshape}} - V_{\text{initial}} \quad (3)$$

式中: γ 为弃渣工程尺度容重, kN/m^3 ; G 为弃渣总重量, kN ; G_i 为每车弃渣重量, kN ,通过设置地磅或者单车载重量获取; i 为车次; n 为总车次; V 为弃渣总体积, m^3 ,通过两次测绘求差获取弃渣总体积; V_{reshape} 为弃渣后整形以后地形图获得的体积, m^3 ,通过测绘获取; V_{initial} 为弃渣前初始地形地形图获得的体积, m^3 ,通过测绘获取。

1.1.2 内摩擦角

依据弃渣堆填过程的多阶段极限排放休止角测

量(测量不少于 8 次),利用休止角统计特征值等效得到具有临界特征和保守特征的弃渣工程尺度内摩擦角,公式如下:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} \quad (4)$$

式中; φ 为弃渣工程尺度内摩擦角, $(^\circ)$,通过统计分析得到平均值; φ_i 为第 i 次坡角测量值, $(^\circ)$; n 为跟踪测量次数。

1.1.3 黏聚力

结合整形施工过程进行的极限堆高试验,得到弃渣极限直立高度,再利用极限直立高度与容重、内摩擦角及黏聚力之间的公式,推算求取弃渣工程尺度黏聚力,公式如下:

$$c = \frac{\gamma H_{\text{cr}} \text{tg}(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}{4} \quad (5)$$

式中: c 为弃渣工程尺度黏聚力, kPa ; γ 为弃渣工程尺度容重, kN/m^3 ; H_{cr} 为临界直立高度, m ; φ 为弃渣

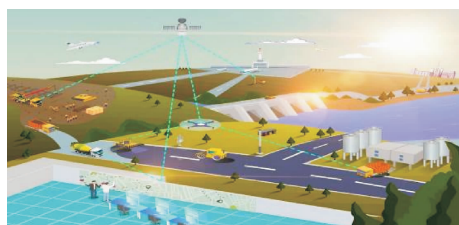
工程尺度内摩擦角, ($^{\circ}$)。

1.2 基于数字化施工测量的可行性分析

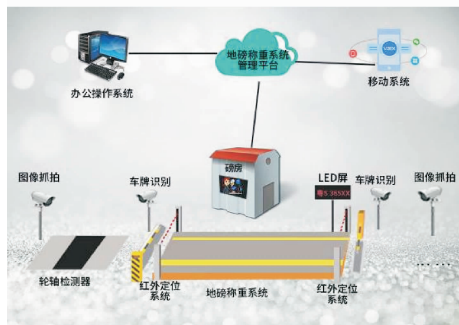
近年来随着5G物联网技术的发展,不同行业数字化和无人值守技术发展迅猛,核心数据的掌握也没有障碍,山区公路弃渣工程数字化施工在技术上总体是可行的,可以实现工程数据的精准管控和弃渣工程尺度参数测定目标。

1.2.1 堆填过程中弃渣重量获取

无序堆放,会严重威胁整体安全,或者为后期整形带来很大的不便,譬如:弃渣早期堆填太靠近边界,没有为整形留下空间,则后期会极大增加转运费用;严禁将具有膨胀特性或者湿陷性等不良工程特性的弃渣堆放在底部或者表层,这样容易造成深大滑移和浅表滑移,正确的堆填方法是利用工程特性良好的弃渣包裹上述不良特性弃渣。因此,正确的做法有利于弃渣工程后期工作和整体施工安全风险管控。在上述有效过程管控的基础上,可通过设置无人值守地磅的方式,记录山区公路弃渣场的弃渣累积净重量,实施方式见图3。



(a) 规划堆积



(b) 净重量

图3 山区公路弃渣规划堆填过程的累积重量获取

堆填次序为底部满铺,逐步后退,逐步堆高,最佳状态为每级坡之间水平距离足够,高度足够高,这样做的优点在于最终整形刷坡时由高往低比较便捷,刷下的方量有足够空间堆放。反之,则为整形造成极大的困扰,这些可以通过车载北斗系统实现,也可以通过无人驾驶无人值守设备的智能终端实现。

单车弃渣净重量通过进出称重实现,弃渣积累重量可以通过累积计重系统智能控制。

1.2.2 堆填弃渣总体积的获取

弃渣堆填过程相当于人工改变地形,可以利用激光全站仪或者无人机快速高精度地表建模技术,实现改变地形追踪,导入全站仪自带软件或者一般地图软件即可利用前后地形求差功能获取弃渣体积,实施方式见图4。



(a) 初始地形



(b) 堆填后地形

图4 山区公路弃渣堆填过程的累积体积获取

1.2.3 弃渣内摩擦角获取

可以在快速测绘地形的基础上解算求得改变地形主剖面,测量获取极限排放条件下的弃渣休止角上下限,一般坡角为上陡下缓,多阶段测量条件下,通过统计平均值获取弃渣极限排放休止角,休止角一般小于内摩擦角,将休止角统计平均值等效为弃渣内摩擦角下限值,实施方式见图5。

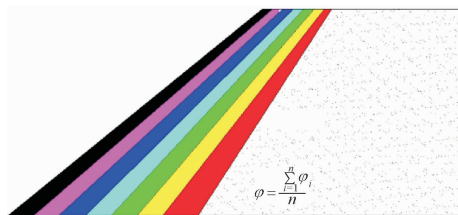


图5 弃渣堆填过程中极限排放休止角与内摩擦角关系

1.2.4 弃渣黏聚力的获取

在弃渣堆填和整形过程中,结合现场施工,利用机械设备完成极限堆高试验,统计得到不同阶段的极限直立高度 H_{cr} ,利用公式(5),结合获取的容重和内摩擦角,计算得到弃渣黏聚力,实施方式见图6。

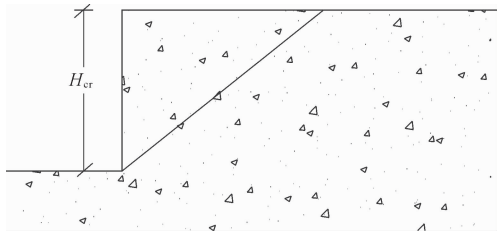


图 6 弃渣极限堆高试验

综上,可知基于现有数字化施工技术可以实现山区公路弃渣工程尺度动态参数测量和动态稳定性评价,上述工作没有额外增加工作量,可以作为规范规定方法的有益补充。

2 工程应用及检验

2.1 弃渣工程特性对比测量

2.1.1 传统方法

传统方法为整形弃渣场,现场灌砂试验测定容重,采取扰动样,在室内进行直接剪切试验,确定弃渣强度参数,试验曲线见图 7,所得结果统计列于表 1。

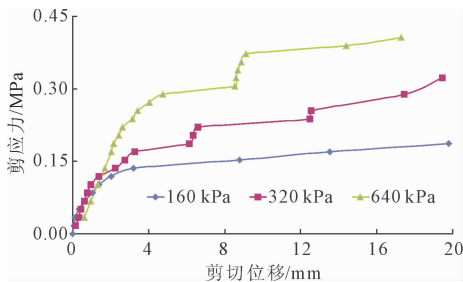


图 7 典型弃渣强度试验测试曲线

表 1 典型弃渣物理力学参数

方法	数量	值别	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)
		范围值	16.6~21.7	11.0~59.8	24.4~34.8
传统 方法	8	平均值	19.5	36.1	31.0
		标准差	1.9	17.3	4.0
		变异系数	0.096	0.478	0.129

由图 7 可知,试验尺度为有限尺度,试验曲线的局部爬升是粗粒咬合形成的局部强化,这一点在表 1 中黏聚力的离散性得到体现,变异系数 0.478 大于 0.35,属于高度变异,即黏聚力离散性高;容重和内摩擦角的变异系数分别为 0.096 和 0.129,均小于 0.15,属于弱变异性,这两个指标的离散性相对较小。上述试验测试结果是在超大粒径已经做了剔除处理基础得到的统计结果,实际弃渣数据的离散性应该比其更大一些。

2.1.2 数字化测量方法

基于上述数字化施工得到弃渣重量、体积、休止角、临界直立高度及由此计算得到的容重、内摩擦角、黏聚力测试过程见图 8,数据统计资料列于表 2。其中,容重测量所需数据,弃渣总重量 11 678 742 kN,弃渣总体积 561 478 m^3 ;内摩擦角测量所需数据,休止角范围值 28.5 $^{\circ}$ ~37.6 $^{\circ}$,休止角平均值 34.4 $^{\circ}$;极限直立高度范围值 2.9 m~4.1 m,极限直立高度平均值 3.5 m。

表 2 弃渣工程尺度物理力学参数

指标	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa
工程尺度参数	20.8	34.4	9.6

由图 8 可知,基于数字化施工的山区公路弃渣工程尺度参数的测定方法是可行的,可以得到动态参数,有助于动态设计。由表 2 对比表 1 可知,弃渣实验室测定结果除了黏聚力值之外,容重和内摩擦角普遍小于数字化测量得到的工程尺度参数,这是有限尺寸试验造成的,其中试验时剔除大颗粒对结果的影响也不容忽视。

2.2 弃渣边坡稳定性评价结果对比

将上述两类方法测量得到的弃渣物理力学性质指标代入依托工程弃渣边坡极限平衡法数值模型,见图 9,稳定性评价结果统计列于表 3。

表 3 弃渣边坡稳定性系数计算结果

弃渣场等级	实验参数 计算结果	工程尺度参数 计算结果	安全系数 标准
4 级	1.59	1.43	1.20

由表 3 可知,传统方法参数取值得到的弃渣边坡稳定性系数大于数字化施工获取的工程尺度参数得到的弃渣边坡稳定性系数,这是由于黏聚力造成的,两者的稳定性评价结果均大于正常运用工况 4 级渣场安全标准 1.20,满足工程稳定性要求,证明方法可行。

3 结论

山区公路土石混合弃渣具有显著的固体废弃、粒径范围大、无分选、欠固结特征,在有限尺寸和有限数量下很难获取代表性样本和可靠参数。根据山区公路弃渣场运行特点,结合数字化施工,提出土石混合弃渣工程尺度参数测定方法和技术,避免了取样和室内试验,同时可以兼顾动态勘察、动态设计和过程风险管控,所得主要结论如下:



图 8 基于数字化施工的弃渣工程尺度参数试验测试图

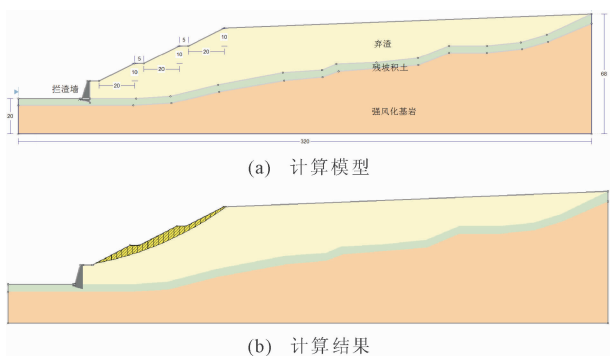


图 9 弃渣边坡稳定性计算

方法,利用数字化施工获取弃渣总重量和总体积,计算得到弃渣工程尺度容重;利用极限排放过程的休止角跟踪测量,等效获取弃渣工程尺度内摩擦角;结合整形施工过程中的直立极限高度试验,结合容重和内摩擦角,换算得到弃渣工程尺度黏聚力,上述测量过程没有增加额外工作,也无需采取扰动样和进行室内试验,简单易行,可以作为规范方法的有益补充。

(2) 基于现有数字化施工技术,可以实现山区公路弃渣工程尺度参数的数字化测量,与既有方法对比具有保守特征,证明方法和技术可行。

(3) 基于数字化施工的山区公路弃渣工程尺度

(1) 山区公路土石混合弃渣工程尺度参数测定

参数测定方法和技术,可以为动态勘察、动态设计、动态评估提供参数支持,也可以为动态施工、规划堆积、施工优化、施工风险管控提供技术支持,符合该领域发展趋势。

上述工作有助于工程大数据的形成,工程大数据有利于科学研究和技术更新,也有利地区经验和行业标准的形成,对同类工程具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质,2009,36(4):50-56,70.
- [2] 尹小涛,杨 华,但路昭,等. 西南山区交通工程弃渣的工程特性评价及其分类[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(2):389-397.
- [3] 刘建彪,杨俊毅,杨 培,等. 山区高速公路弃渣场渣体敏感性及其分类堆置[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14(10):128-131.
- [4] 谷东京,黄宜胜. 基于室内原状样试验的土石混合体强度特性研究[J]. 水电能源科学,2021,39(7):150-153.
- [5] 杨忠平,李 进,蒋源文,等. 含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1443-1452.
- [6] 罗亚琼,张 超,马婷婷. 基于大型直剪试验的土石混

合体剪切强度特性及剪切变形模拟方法研究[J]. 中外公路,2020,40(5):295-301.

- [7] 胡世兴,靳晓光,孙国栋,等. 土石混合体材料大型三轴试验及 PFC-FLAC 耦合仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3344-3356.
- [8] 张振平,盛 谦,付晓东,等. 基于颗粒离散元的土石混合体直剪试验模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(1):135-146.
- [9] 江泊洧,潘家军,程展林,等. 考虑垂直分布因素的松散弃渣土力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(3):631-639.
- [10] 王家辉,江泊洧,饶锡保,等. 渣场松散碎石土应力-应变特性研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(5):88-93,102.
- [11] 袁 斌. 颗粒群体形态特征量化及对弃渣堆积体剪切特性的影响[D]. 成都:成都理工大学,2020.
- [12] 张家铭,刘 浩,胡 恒,等. 咸池沟弃渣场渣体大型三轴试验研究[J]. 工程勘察,2012,40(12):4-7.
- [13] 李 薇,杨 华,尹小涛,等. 山区高速公路典型弃渣场稳定性综合评估[J]. 公路交通科技,2021,38(7):38-44.
- [14] 张 朔. 山区高速公路弃渣场稳定性评估和综合安全控制技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2021.

(上接第 29 页)

- [2] 赵秋红,许梦凡,董 硕. 地震-波浪耦合作用下考虑相位影响的深水桥墩动力响应分析[J]. 中国公路学报,2021,34(5):86-98.
- [3] 周 救,江 坤,李久龙. 地震作用下不同形式深水桥墩流固耦合效应研究[J]. 振动与冲击,2022,41(21):7-18.
- [4] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974,3(1):33-49.
- [5] 赵金钢,杜 斌,孔德文,等. 近场地震作用下库区深水钢筋混凝土高墩地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(1):55-66.
- [6] Goyal A, Chopra A K. Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989,18(3):325-344.
- [7] 苏京华,柳春光. 地震、波浪联合作用下深水大跨桥梁响应分析[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):140-146.
- [8] 赖 伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [9] Li Qiao, Yang Wanli. An improved method of hydrody-

amic pressure calculation for circular hollow piers in deep water under earthquake [J]. Ocean Engineering, 2013,72:241-256.

- [10] 樊 冰,李永庆,宋松林,等. 高烈度区深水斜拉桥动水效应及抗震体系研究[J]. 地震工程学报,2022,44(5):1024-1033.
- [11] 殷旭东,陈维田. 库区大跨度墩-塔-梁固结体系斜拉桥抗震性能研究[J]. 公路,2021,66(3):140-144.
- [12] 雷虎军,孙昱坤. 考虑地震动水力的跨海斜拉桥减震控制研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(7):1936-1944.
- [13] Jiang Hui, Wang Baoxi, Bai Xiaoyu, et al. Simplified expression of hydrodynamic pressure on deepwater cylindrical bridge piers during earthquakes [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(6):04017014.
- [14] 李 彤. 地震作用下土-群桩-结构-水相互作用体系的动力反应分析[D]. 上海:同济大学,1999.
- [15] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01-2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [16] 港口与航道水文规范:JTS 145-2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.