

地震荷载下煤矸石路基变形室内试验与数值模拟分析

李永靖, 乔朋庆, 邢 洋, 闫宣澎

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:通过对重塑煤矸石试件进行动三轴试验,研究了随机地震荷载作用下的煤矸石路基填料震陷特性。依据正弦循环荷载作用下的试验结果,获得了不同轴向固结压力下的煤矸石震陷变形特性经验公式;并运用FLAC^{3D}对辽宁阜新某煤矸石路基进行了地震荷载作用下的响应分析。试验表明:煤矸石轴向累积应变随动荷载幅值增加而增大,呈指数关系;震陷试验中,煤矸石试件变形规律经历了振动压密、振动剪切和振动破坏三阶段,与普通路基填料类同,表明煤矸石作路基填料是可行的。数值模拟表明:地震荷载超越概率10%时,路面残余变形不大,路基整体处于稳定状态;地震荷载超越概率2%时,路基边坡将出现滑动带,处于危险状态,且震后残余变形较大。以上研究成果为煤矸石路基抗震设计提供了一定的试验依据,具有较为重要的工程应用价值。

关键词:地震荷载;煤矸石;路基变形特性;数值模拟

文章编号:1003-8035(2014)02-0054-06

中图分类号:U216.41+7

文献标识码:A

0 引言

煤矸石是指矿井建设、巷道掘进和煤炭开采过程中排放的一种含炭岩石,是一种固体废弃物,也具有资源性^[1-2]。辽宁阜新煤炭资源日益枯竭,成为首个被国家批准的资源枯竭型城市,拥有具有可利用潜质的矸石山11座,分别在新邱、海洲、东梁和艾友等地区,压占农田19.358 km²,堆存量19.88 × 10⁸ t。煤矸石长期裸露,会对空气、地下水资源、农田和自然环境造成严重的危害^[3-4]。当前煤矸石的综合利用方向主要为:生产陶瓷、生产烧结砖、回收矿产和煤矸石发电等^[5-7]。

目前,煤矸石作为路基和塌陷区地基填料成为煤矸石综合利用的重要方向。煤矸石的震陷变形特性是煤矸石动力学特性的重要内容,是评价场地震陷和路基抗震稳定性的主要方面。各地煤矸石的矿物成分、形成年代和产出方式各不相同,因而物理力学参数差异巨大,对其进行专门的动力测试是应用的前提。地震荷载诱发的场地震陷将引起道路地基和建筑物地基不均匀沉陷,造成建筑物的裂缝、倾斜、倒塌和沉陷等。煤矸石的动力特性和随机地震荷载的研究是比较困难的,岩土体和建筑物的耦合动力响应分析就更加复杂^[8]。张清峰等人^[9]通过室内试验,研究了强夯法加固煤矸石地基的加固效果。动三轴试验、共振柱试验、现场波速测试和数值分析是研究煤矸石震陷变形特性的主要手段^[10-13]。

本文以辽宁阜新煤矸石作为试验原材,进行了随

机地震荷载和正弦循环荷载下的动三轴试验,并运用FLAC^{3D}对煤矸石路基进行了地震响应分析。

1 煤矸石震陷试验

1.1 试验仪器

动三轴试验和共振柱试验是分析土动力特性的主要室内试验方法,前者适用于土的动应变超过10⁻⁴量级时,后者适用于土的动应变低于10⁻⁴量级时。本次试验采用DDS-70微机控制电磁式振动三轴仪,具有自动记录动应力的时程曲线、动应变的时程曲线和动孔压的时程曲线能力。试样高80 mm,直径39.1 mm。

1.2 试样制备

煤矸石试样(以下简称试样)原材取自阜新艾友煤矸山。为了适应动三轴试验试件的尺寸要求,首先采用小型撞击式破碎机将煤矸石破碎,然后筛分,使得颗粒粒径在0.5~5 mm。然后将煤矸石击实并削制成型。

1.3 地震荷载

依据《中国地震动参数区划图》,阜新地区震级

收稿日期:2013-10-29;**修订日期:**2013-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274111);辽宁省教育厅基金项目(L2013137)

作者简介:李永靖(1976—),男,山东烟台人,博士,教授,主要从事土木工程方面的教学和科研工作。

E-mail: lyjsdyt@126.com

$M = 7.0$ 。参考 H. B. Seed 等人研究方法,将实测地震波进行转换,得到超越概率 10% 和 2% 时的随机地震荷载时程曲线(图 1)。从图 1(a)中可以看出:超越概率为 10% 时,地震加速度峰值约为 $0.1g$ (g 为重力加速度);由(b)得到超越概率 2% 时,地震荷载加速度峰值约为 $0.16g$ 。对比图 1(a)和(b)可以得到:超越概率越小,地震加速度峰值越大。

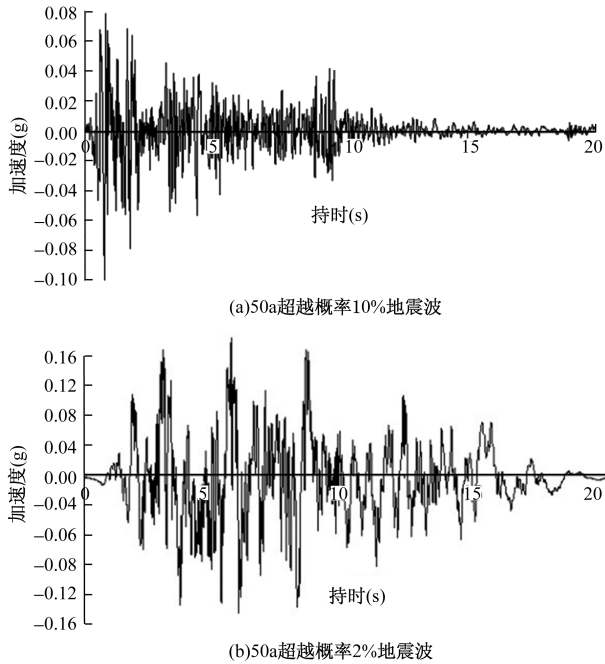


图 1 阜新地区地震时程曲线

Fig. 1 The seismic wave curves in Fuxin area

1.4 荷载施加

1.4.1 静荷载施加

依据研究问题的应力状态,在试样轴向和侧向施加轴向固结压力 σ_{1c} 和侧向固结压力 σ_{3c} ,使试样在振动三轴仪上固结到稳定状态。其中轴向固结应力 σ_{1c} 取 100kPa、150kPa、200kPa,侧向固结应力 σ_{3c} 按式(1)取值。

$$K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c} \quad (1)$$

其中: K_c 为固结应力比,取 $K_c = 1$ 。

1.4.2 动荷载施加

(a) 随机地震荷载

待试样固结变形稳定后,将阜新地区超越概率 10% 和 2% 时的随机地震荷载时程曲线(图 1)分别施加到试样上,记录动应力和动应变时程曲线。

(b) 正弦循环荷载

待试样固结变形稳定后,将正弦循环荷载(参数

如:周期 $T = 1s$,振次 $N = 10$ 次,动应力幅值 σ_{dmax} 分别为 20kPa、40kPa、60kPa、80kPa)施加到试样上,记录动应力和动应变时程曲线。

轴向累积应变可由式(2)得到:

$$\varepsilon_p = (H_1 - H_2) / H_1 \quad (2)$$

式中: H_1 ——表示动荷载作用前的高度;

H_2 ——表示动荷载作用后的高度。

1.5 结果分析

图 2 为随机地震荷载作用下,每隔一段时间(0.2s)记录一次试样轴向应变,得到的试样轴向累积应变随时间曲线。从图 2(a)中可以看出:试样的轴向累积应变随时间 T 和含水量 ω 的增长而增加,随轴向固结压力 σ_{1c} 增长而减小。说明试样含水率越高,越容易被压缩。对比图 2(a)和(b)可知:地震荷载越大,试样轴向累积应变越大。

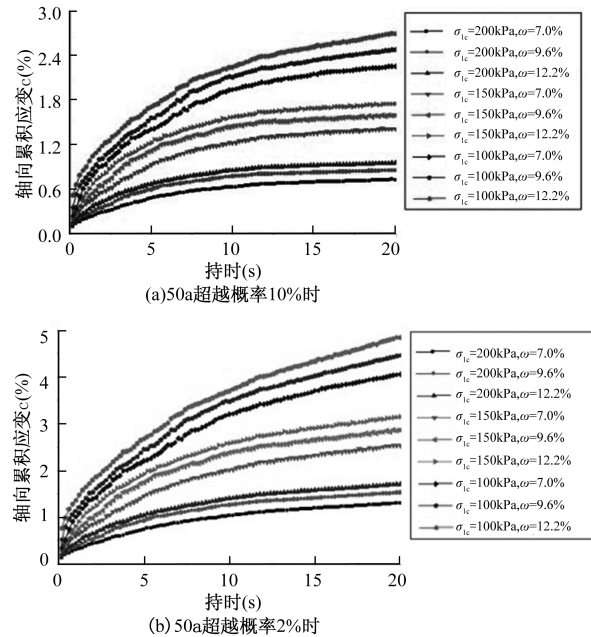


图 2 轴向累积应变时程曲线

Fig. 2 Axial accumulate strain time-history curve

图 3 各点为正弦循环荷载每个周期结束后煤矸石试样的轴向应变 ε_p 。结合图 2 和图 3 可以看出:在研究煤矸石轴向累积应变时,正弦循环荷载一定程度上可以代替随机地震荷载。从图 3(a)可以看出:起振阶段,试样轴向累积应变增长迅速;振次 N 超过某值(本次试验约为 4)时,试样轴向累积应变增速变缓。说明起振阶段试样轴向累积应变迅速增大的原因是试样孔隙比 e 迅速减小,随着振次的增加,孔隙比 e 到达稳定状态。对比图 3(a)、(b)、(c)和(d)可

以得到:试样轴向累积应变随动应力幅值 σ_{dmax} 增大而变大。

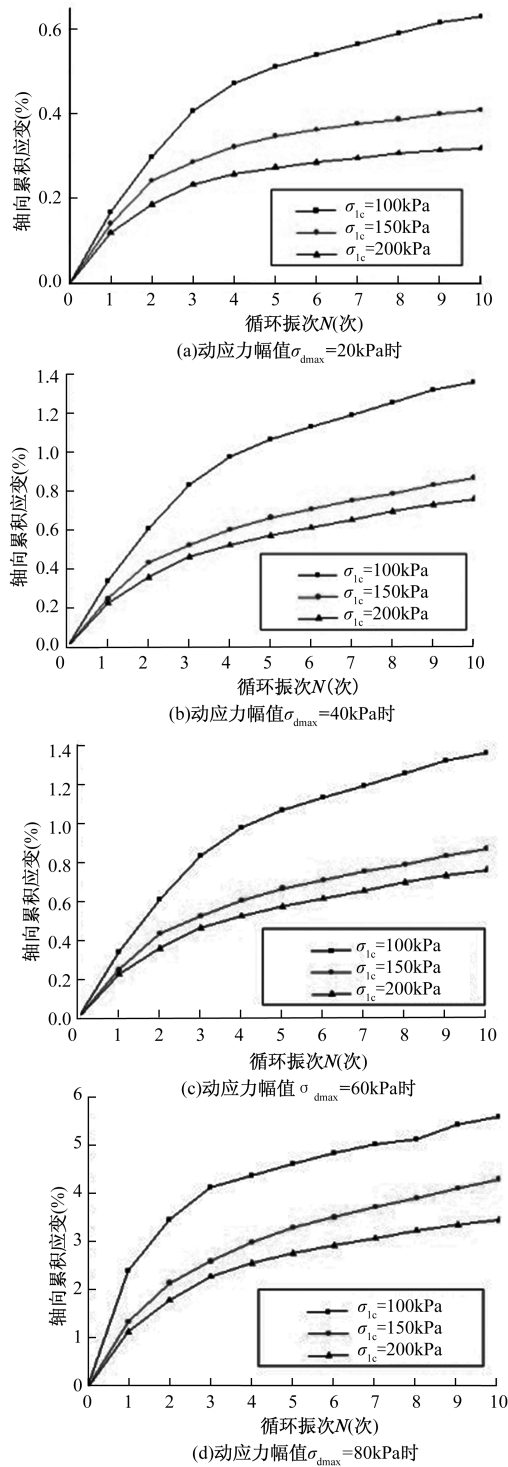


图3 不同动应力幅值下轴向累积应变与振次关系

Fig. 3 Relation between axial accumulate strain and vibration times under difference amplitude

将试样轴向累积应变 ε_p 与动应力幅值 σ_{dmax} 绘制成一条曲线,就成为震陷曲线(图4)。从图中可以看出:震陷曲线前段,试样轴向累积应变 ε_p 变化不大,然后呈线性增长直到最后破坏。表明试样经历了振动压密、振动剪切和振动破坏三阶段,与碎石路基填料过程相近,说明动荷载作用下煤矸石变形特性符合路基填料要求。

利用 Excel 对震陷曲线进行非线性回归分析,建立了如下回归方程,见公式(3)。

$$\varepsilon_p = [A / (\frac{\sigma_{1C}}{\sigma_{1C0}})^n] \times \exp(\sigma_{dmax} / \alpha) + B \quad (3)$$

式中: ε_p ——轴向累积应变;

σ_{dmax} ——动应力幅值;

A、B、n、 α ——试验得到的参数。

回归分析结果见表1,具体回归参数见图4。

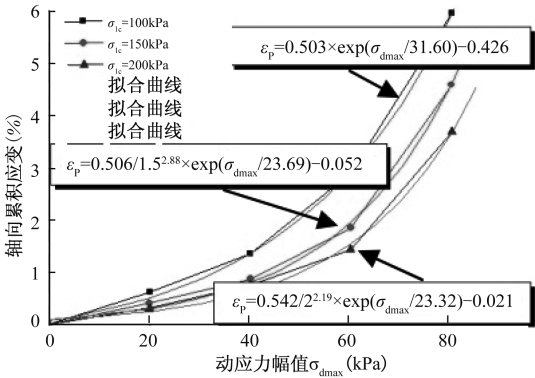


图4 不同固结压力下震陷曲线

Fig. 4 The seismic settlement curves under difference seismic settlement curves

表1 试验结果及回归分析

Table 1 The experimental result and regression analysis						
编号	动应力幅值 (kPa)	轴向固结压力 (kPa)	N = 10 轴向累积应变 (%)	回归结果残差 (%)	相对误差 (%)	
1	20	100	0.63	0.52	0.11	17.46
2	20	150	0.41	0.31	0.1	24.39
3	20	200	0.32	0.26	0.06	18.75
4	40	100	1.36	1.36	0	0.00
5	40	150	0.87	0.8	0.07	8.05
6	40	200	0.76	0.64	0.12	15.79
7	60	100	2.89	2.94	-0.05	1.73
8	60	150	1.84	1.92	-0.08	4.35
9	60	200	1.43	1.54	-0.11	7.69
10	80	100	5.92	5.91	0.01	0.17
11	80	150	4.56	4.54	0.02	0.44
12	80	200	3.67	3.65	0.02	0.54

2 路基地震响应分析

2.1 模型建立

路基横断面具体尺寸如图 5 所示。建立路基全断面网格模型(图 6)。模型计算参数见表 2,模型宽 132m,高 28m。边界条件采取:水平方向及底部受约束,上部自由。计算模型在自重状态下求解到节点最大不平衡力小于 1N 时,开始施加地震荷载。

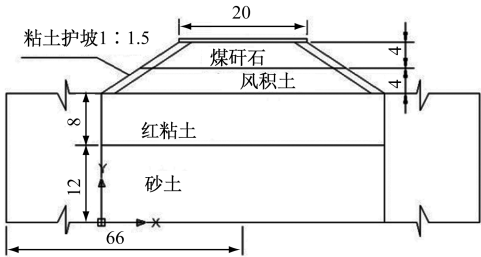


图 5 路基断面图
Fig. 5 The design of subgrade

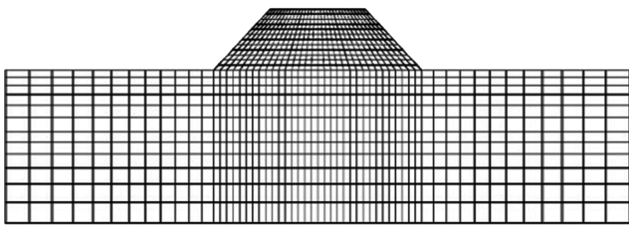


图 6 有限元网格
Fig. 6 Finite element model

表 2 模型计算参数

Table 2 The calculating parameter of model						
材料类型	厚度 (m)	密度 (kg)	体积模量 K (MPa)	剪切模量 G (MPa)	粘聚力 c (kPa)	摩擦角 $\varphi (^{\circ})$
砂土	12	1850	18.2	6.72	0	23
红粘土	8	1810	6.3	1.91	6.2	11
风积土	4	1820	19.1	10.22	13.6	21
煤矸石	4	2037	82	28.76	42.7	34

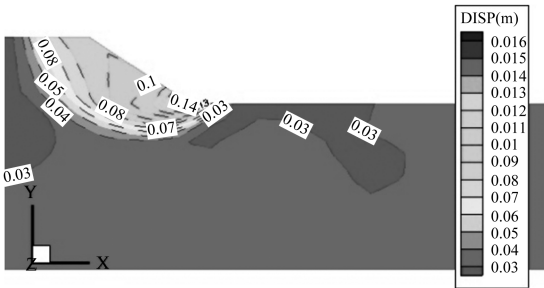
2.2 结果分析

不同地震荷载作用下的煤矸石路基位移矢量云图见图 7。从(a) 图中看出:路基震动位移最大值为 1.1cm 左右,说明超越概率 10% 时,路基基本安全;从(b) 图中看出:施加超越概率 2% 的地震荷载作用,路基边坡将出现滑动带,说明路基容易出现滑坡等危险状态。

不同地震荷载作用下的煤矸石路基竖向位移见图 8。由(a)、(b)图看出:路基竖向位移随着地震荷

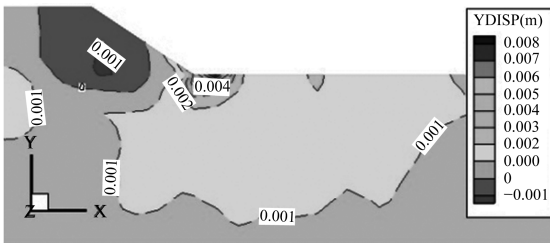


(a)50a超越概率10%

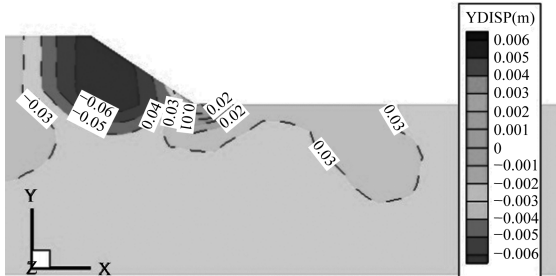


(b)50a超越概率2%

图 7 位移矢量云图
Fig. 7 The displacement vector nephogram



(a)50a超越概率10%



(b)50a超越概率2%

图 8 竖向位移云图
Fig. 8 The vertical displacement nephogram

载强度的增大而增大。从(b) 图中还看出,路肩边坡处竖向位移最大,说明路肩边坡在地震荷载作用下容易出现滑坡现象。

地震荷载作用下路基中心位移-时程曲线如图 9 所示。从图中看出:路基中心沉降位移随地震荷载的强度增大而增加;地震荷载施加后,路基残余变形在超越概率 10% 时较小;而超越概率 2% 时,路基最终残余变形值较大,说明路基残余变形随地震荷载强

度增大而增加。

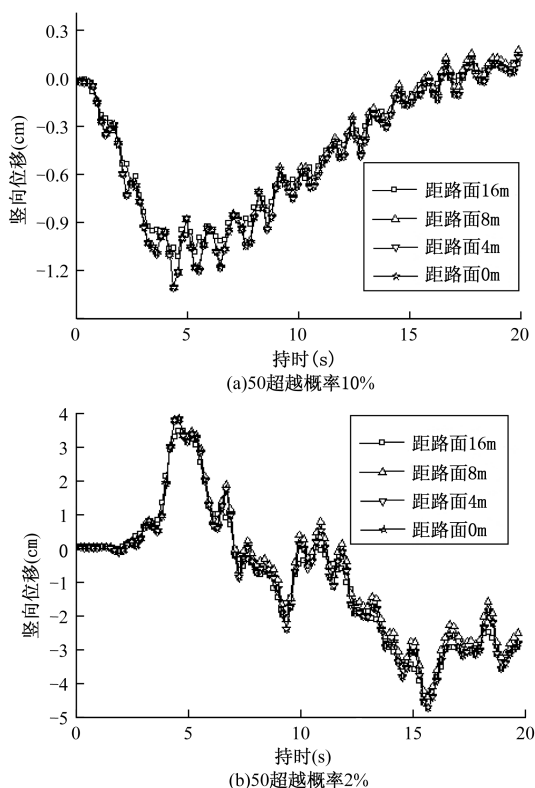


图9 路基中心不同深度沉降位移-时程曲线

Fig.9 Relation between displacement and time

3 结论

(1) 通过动三轴试验,建立了不同轴向固结压力及动应力幅值影响下的煤矸石震陷变形数学公式;且煤矸石试件变形规律经历了振动压密、振动剪切和振动破坏三阶段,与普通路基填料类同,说明煤矸石作路基填料是可行的。

(2) 数值模拟表明:在地震荷载超越概率2%时,路基两侧更容易出现滑动带,且随地震荷载强度增加而变得严重;震后路基会留下较大的残余变形。上述结果为煤矸石路基抗震设计提供了参考,具有较为重要工程价值。

参考文献:

- [1] 杨雅婷,龚檬,温庆博,等. 煤矸石用作防渗防污材料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 282-286.
YANG Yating, GONG Meng, WEN Qingbo, et al. Experimental study on coal gangue applied as anti-seepage and anti-fouling materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 282-286.
- [2] 李永靖,邢洋,张旭,等. 煤矸石骨料混凝土的耐久性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1215-1219.
LI Yongjing, XING Yang, ZHANG Xu, et al. Experimental study on the durability of the concrete with coal gangue aggregate [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1215-1219.
- [3] 张明亮. 粉煤灰对煤矸石酸性重金属淋滤液的修复作用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 654-658.
ZHANG Mingliang. Utilization of fly ash for remediation of heavy metals from acid coal waste leachate [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 654-658.
- [4] 黄俊雄,邓寅生,张新. 煤矸石填充煤矿采空区的环境影响试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(2): 68-70.
HUANG Junxiong, DENG Yansheng, ZHANG Xin. Experiment study of environmental impact during underground filling the goaf with gangues [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(2): 68-70.
- [5] 邢永强,冯进城,荣晓伟. 河南平煤四矿煤矸石山自燃爆炸成因及防治分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 145-150.
XING Yongqiang, FENG Jincheng, RONG Xiaowei. Discussion on causes of combustion and explosion and of coal gangue at the No. 4 mine of Pingdingshan coal mine and countermeasures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 145-150.
- [6] 张金喜,陈炜林,杨荣俊. 煤矸石集料基本性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 739-743.
ZHANG Jinxi, CHEN Weilin, YANG Rongjun. Experimental study on basic properties of coal gangue aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 739-743.
- [7] 王国平. 辽宁阜新煤矸石资源化研究[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2005.
WANG Guoping. Studies on the recovery of coal gangues in Fuxin district, Liaonin province, China [D]. Chengdu University of Technology, 2005.
- [8] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
XIE Dingyi. Soil dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [9] 张清峰,王东权. 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1049-1056.
ZHANG Qingfeng, WANG Dongquan. Physical model tests of coal gangue foundation under dynamic compaction

- loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 1049 – 1056.
- [10] 贺建清, 阳军生, 靳明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 199 – 205.
- HE Jianqing, YANG Junsheng, JIN Ming. Experimental study on mechanical behaviors of coal gangue mixed with soil under cyclical loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 199 – 205.
- [11] 刘松玉, 邱钰, 童立元, 等. 煤矸石的动力特性试验研究[J]. 东南大学学报, 2005, 35(2): 280 – 283.
- LIU Songyu, QIU Yu, TONG Liyuan, et al. Experimental research on dynamic properties of coalmining wastes[J]. Journal of Southeast University, 2005, 35(2): 280 – 283.
- [12] Elliot R P, Dennis N D, Qiu Yanjun. Permanent Deformation of sub grade Soils Phase I: Repeated Load Testing of Four solid[R]. MBTC FR – 1089, 1998.
- [13] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential [J]. Soil Mech. Found Div, ASCE, 1971, 97 (SM9): 1249 – 1273.

Experimental study and numerical simulation on deformation characteristics of coal gangue fill subgrade under seismic loads

LI Yong-jing, QIAO Peng-qing, XING Yang, YAN Xuan-peng

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin 123000, China)

Abstract: Based on laboratory dynamic triaxial tests, seismic characteristics of coal gangue fill subgrade under random earthquake loading were studied. The empirical formula of coal gangue's seismic subsidence ratio has been established. Numerical simulation of coal gangue subgrade in Fuxin area, Liaoning province based on FLAC3D were presented. The results showed that the relationship between cumulated axial strain of coal gangue and amplitude of dynamic stress was index. The seismic settlement test showed that coal gangue sample experienced compaction, oscillatory shear and flutter failure stage. Therefore, Coal gangue fill subgrade may be applicable. The results showed that subgrade is safed under the earthquake loads which exceeding probability to be 10 percent in the future 50 years. Subgrade slope would appeared sliding zone and left large residual deformation. The research results will provide reference for the seismic design of coal gangue and has important engineering practical values.

Key words: seismic loads; coal gangue; deformation characteristics of subgrade; numerical simulation