

干湿循环和荷载作用下粗粒土动力特性试验研究^{*}刘森峙¹, 何忠明², 杨煜², 张微东¹, 罗嵩昊¹

(1.长沙理工大学 国际学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 通过室内大型动三轴试验分析动应力幅值、荷载频率、干湿循环次数等对粗粒土填料动力特性的影响, 根据动应力—动应变变化关系分析粗粒土的动力特性。结果表明, 粗粒土试样在相同动应力幅值和围压条件下, 荷载频率不同导致动应力—应变形成的滞回圈曲线存在差异; 在循环荷载作用下, 试样表现为应变软化型和应变硬化型两种状态; 随着干湿循环次数的增加, 试样的动应力水平逐渐衰减, 特别是在前 2 次干湿循环中水平动应力衰减程度最大, 随后逐渐趋于稳定; 干湿循环和荷载作用均会对试样的阻尼比 λ 和最大动弹模量 E_{dmax} 产生影响, 其中对阻尼比 λ 的影响程度较小。

关键词: 公路; 粗粒土; 干湿循环次数; 循环荷载; 动三轴试验

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0066-04

粗粒土(粒径为 0.075~60 mm 的颗粒质量占试样总质量的 50% 以上)广泛应用于高速公路高填方路段, 由于其粒径级配范围较广, 具有孔隙率大、压缩性能高等特点。中国南方省份大部分处于亚热带地区, 具有明显的温热交替的气候特征, 该区域粗粒土路堤填料常年经受干湿循环的影响, 强度和刚度与竣工时相比会发生较大变化。若与车辆循环荷载共同作用, 会使粗粒土填料更易产生受力变形、挤压破坏, 严重时将导致路基边坡滑塌沉陷。

已有学者利用三轴试验对土体力学强度进行初步研究, 如张希栋等借助室内双向动三轴试验和数值模拟方法, 分析了黄土在循环荷载作用下的动应力行为, 认为循环荷载作用次数是影响黄土侧向变形的主要因素; 赖夏蕾等采用室内动三轴试验, 研究了不同围压条件下土体的动应变、动强度和动剪切模量等的变化规律, 根据动强度的变化特点建立了围压、荷载次数与土体动强度之间的经验公式, 估计不同深度土体在循环荷载作用下动强度的衰变规律。但上述研究多以软土、黄土、沙土等特殊土为对象, 而作为级配范围较广的粗粒土填料, 其动力特性始终没有得到统一的认识, 并且以往的研究侧重于单一的循环荷载对土体的影响, 对干湿循环与荷载耦合作用下粗粒土动力性能的研究较少。基于此, 该文对某粗粒土高路堤边坡进行现场取样, 采用室内标准试验方法测得试样土体的最佳含水率、最大

干密度等指标, 再采用大型室内动三轴循环荷载试验分析循环荷载所用下荷载频率、动应力幅值对粗粒土试样动力特性的影响。

1 试样选取与试验方案

1.1 试样的选取及制作

按照 JTG D30-2015《公路路基设计规范》和 JTG E40-2007《公路土工试验规程》进行粗粒土取样, 并对土样进行筛分试验, 初步测量粒径大于 20 mm 的土颗粒占试样总质量的 13.7%。采取最大粒径剔除法进行三轴试样制作, 图 1 为采用最大粒径剔除法所得到的粗粒土填料的级配曲线, 表 1 为标准室内试验得出的粗粒土的基本力学参数。室内通过压力试验机制作压实度为 95% 的圆柱体三轴试样, 直径为 100 mm, 高度为 200 mm。

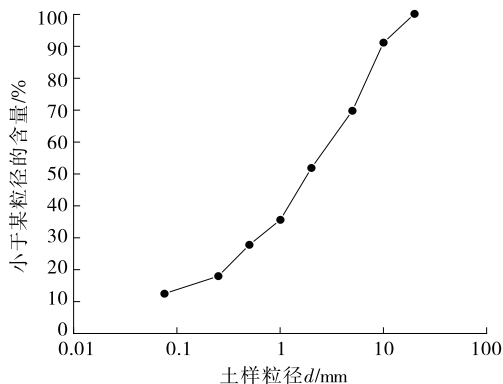


图 1 试验土样的级配曲线

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678073;51508042)

表 1 粗粒土的基本物理力学参数

项目	数值
重度/(kN·m ⁻³)	22
内摩擦角/(°)	28
粘聚力/kPa	23
最大干密度/(g·m ⁻³)	0.35
饱和体积含水率/%	29

根据试验土样粒径级配计算得到其不均匀系数 $C_u=52.3$, 曲率系数 $C_c=1.7$, 判定试验土样为级配良好土。

1.2 试验仪器与方案确定

采用长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室的全自动大型 GDS 三轴仪器设备, 该设备能自主收集应力—应变、轴向位移、侧向位移等参数, 可采用气压、水压方式施加围压, 通过设置加载自由路径对三轴试样进行循环加载, 利用伺服机对加载路径进行伺服调控。

分别考虑干湿循环次数、动应力幅值、荷载频率确定试验方案。由于路基工作区中 0.8~2.0 m 的动应力幅值一般不大于 100 kPa, 试验中采用 45、60、90 kPa 的动应力幅值 P ; 荷载频率 f 取为 0.5、1.0、2.0 Hz, 围压为 100 kPa (见表 2)。干湿循环次数 N 通过控制试样的体积含水率来确定, $N=0\sim5$ 次。同时设置三轴试验最大荷载次数为 10 000 次、固结比 $K_c=1$, 采用半正弦波连续加载。

表 2 三轴试验加载方案

试验组号	循环次数	动应力幅值	荷载频率
	N /次	P /kPa	f /Hz
A1~A3	0	90	0.5, 1.0, 2.0
B1~B3	0	45, 60, 90	1.0
C0~C5	0, 1, 2, 3, 4, 5	60	1.0

2 粗粒土动强度影响因素分析

2.1 荷载频率

根据 A1、A2、A3 的三轴试验结果 (见图 2) 分析循环荷载过程中轴载次数达到 1 000 次时荷载频率对粗粒土填料动力性能的影响。由图 2 可知: 试样在循环荷载作用下应力—应变曲线形成封闭的滞回圈, 由于荷载频率不同, 封闭的滞回圈曲线斜率存在差异, 荷载频率越大, 滞回圈的斜率越陡峭, 滞回圈曲线的覆盖面积逐渐减小。S. Werkmeister 等指出, 滞回圈的变化与土体的回弹模量有关, 低频率时土体颗粒间的摩擦较小, 可忽略不计, 而高频率下土

体颗粒之间压缩、挤密较明显, 这与土体内部颗粒的重新排列有关。试验时出现该现象的主要原因为粗粒土填料在高频率荷载作用下抵抗变形的能力越来越差, 材料的泊松比也有所下降。

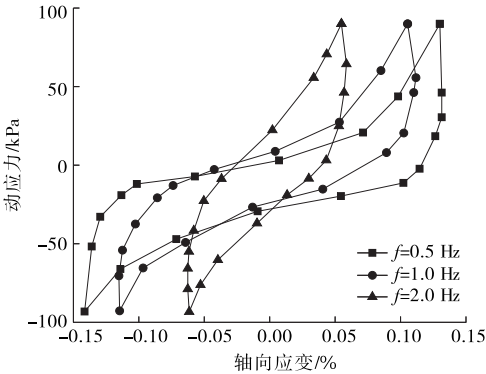


图 2 不同荷载频率下滞回圈曲线分布

2.2 动应力幅值

根据 B1、B2、B3 的试验结果 (见图 3) 分析相同围压、频率条件下不同动应力幅值对粗粒土填料强度特性的影响。由图 3 可知: 1) 动应力大小直接影响土体的累积轴向变形, 动应力幅值越大, 累积轴向应变也越大。循环荷载次数达到 1 000 次时, 动应力幅值 90 kPa 所对应的累积轴向应变最大, 为 0.13 %。2) 累积轴向应变在循环荷载前期增长速度较快, 循环荷载次数为 1 000 次时, 动应力幅值 45、60 kPa 所对应的累积轴向应变曲线发生较大突变, 由较陡峭趋势转变为平缓趋势, 动应力幅值 90 kPa 所对应的转折点更为靠前。出现该现象的主要原因为动应力幅值大小直接影响土体的受力状态, 试样在初期循环荷载作用下表现为弹性阶段, 土体为应变软化型, 试样压缩方式以纵向压缩为主、横向挤密为辅; 随着轴载次数的增加, 荷载次数达到 1 000 次左右时, 试样由应变软化型过渡到应变硬化型, 压缩方式以横向挤密为主、轴向压缩为辅。

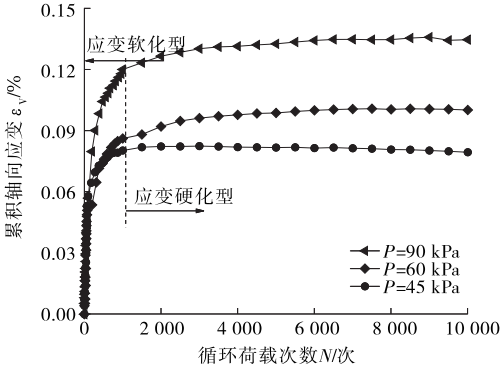


图 3 不同动应力幅值下累积轴向应变与循环荷载次数的关系

3 干湿循环下粗粒土动力响应分析

3.1 土体本构模型

土体的动应变特性研究主要是通过动应力试验获取土体的动应力—动应变关系,即得到土体的本构模型。此外,土体的动弹性模量、阻尼比、动应变之间的关系也是土体动应变特性的研究内容,土体的动弹性模量代表土体抵抗外界荷载的能力,阻尼比代表土体抵抗外界荷载作用时能量衰减的多少。现阶段,采用较多的土体本构模型一般是经验模型,其代表模型为 Masing 类模型,以 Masing 类模型和非线性骨架曲线为基础,可从多角度了解干湿循环和循环荷载作用下粗粒土的动应变特征。Hardin B. O.等假定土体为粘弹性体,将滞回圈特性通过阻尼比与动应变关系式($\lambda - \epsilon_d$)进行表达,并采用动弹性模量和动应变关系式($E_d - \epsilon_d$)对土体骨干特征曲线进行描述,在不追求准确的滞回圈和土体骨干特征公式的前提下,采用等效弹性模量 E_d 和等效阻尼比两个参数对土体本构模型进行研究。

根据 Masing 类模型可推算出循环荷载作用下土体动应力—应变关系式为:

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{1/E_{dmax} + \epsilon_d/\sigma_{dmax}} \quad (1)$$

式中: E_{dmax} 为最大轴向动弹模量; σ_{dmax} 为最大轴向动应力。

根据试验结果可拟合确定 E_{dmax} ,在假定粗粒土为线弹性的基础上,Hardin B. O.等推导出弹性模量与阻尼比的关系式[见式(2)],通过循环荷载中粗粒土试样的全应变计算出阻尼比的变化范围。

$$\lambda = \lambda_{max} \left(1 - \frac{E_d}{E_{dmax}} \right) \quad (2)$$

式(2)中 λ_{max} 可根据经验公式和试验结果确定,考虑到现阶段缺少粗粒土的经验公式,采用试验结果确定, $\lambda - \epsilon_d$ 曲线中 $\epsilon_d > 0.03\%$ 且趋于平缓时,可将趋于稳定的常数 λ 值作为最大阻尼比 λ_{max} 。

3.2 动应力—应变曲线

根据 C0~C5 组试验结果,得到图 4 所示不同干湿循环次数和相同围压条件下粗粒土动应力—动应变关系曲线。由图 4 可知:1) 相同围压条件下,动应力一定时,循环次数越多,试样的动应变越大;动应变一定时,干湿循环次数越多,试样的强度越低。经过第 1、2 次干湿循环后,试样的动应力衰减程度下降较大,随着干湿循环次数的增加,动应力的

增长速度减缓。2) 随着干湿循环次数的增加,动应力—应变曲线斜率逐渐增大,且存在明显的拐点。出现以上现象的原因为干湿循环次数对粗粒土的强度影响较敏感,直接影响粗粒土填料的抗剪强度,宏观上表现为在外荷载作用下抵抗变形的能力减弱。

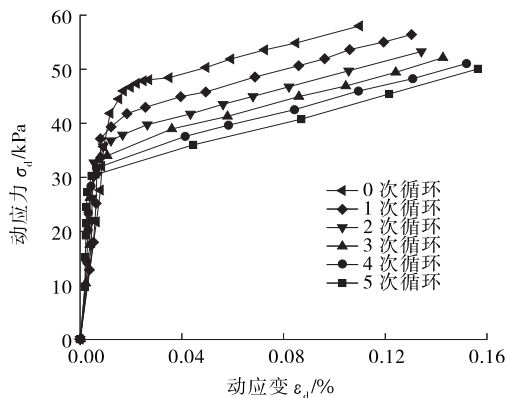


图 4 不同干湿循环次数下粗粒土动应力—动应变关系曲线

3.3 动弹性模量变化规律

根据 C0~C5 组试验结果,得到图 5 所示循环荷载作用下粗粒土动弹性模量—动应变关系曲线。由图 5 可知:在相同动应变条件下,随着干湿循环次数的增加,试样的动弹性模量逐渐降低,特别是在干湿循环第 1、2 次时,动弹性模量下降速度较快,动弹性模量的衰减与干湿循环次数的增加有密切关系,这种衰减速率在循环荷载初期阶段表现较明显,随着动应变的增加,衰减程度降低。出现该现象的主要原因为干湿循环增加了试样内部结构的松散化、裂隙化,致使试样整体力学性能下降。

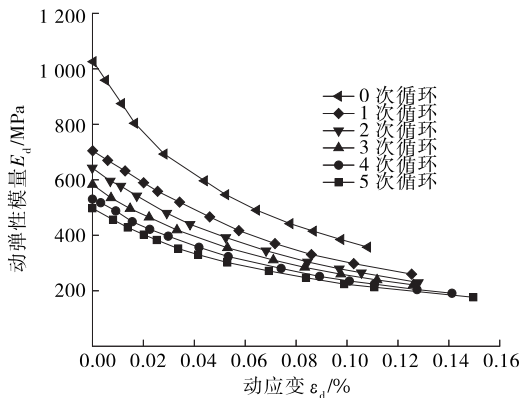


图 5 循环荷载作用下粗粒土动弹性模量—动应变关系曲线

3.4 阻尼比变化规律

图 6 为不同干湿循环次数下粗粒土阻尼比—动应变关系曲线。由图 6 可知:在相同动应力条件下,随着干湿循环次数的增加,粗粒土试样的阻尼比增

加,特别是在动应变初期,阻尼比增加速率较快,增加到一定值后出现拐点,之后趋于平缓。相比之下,干湿循环次数较多的试样的阻尼比的增长斜率在起始阶段大于干湿循环次数较少的试样,其在较早阶段就接近了最大阻尼比,第5次干湿循环后试样的 λ 达到0.43。出现以上现象的主要原因为干湿循环后的粗粒土在循环荷载下动应力波的能量损耗加大,这种动应力能量损耗具有滞后性,干湿循环为粗粒土试样内部裂缝的发育埋下伏笔,随着干湿循环次数的增加,试样在循环荷载作用下更早地表现出裂缝,内部裂缝的存在阻碍试样在循环荷载作用下动应力波的传输,造成动应力能量损失。

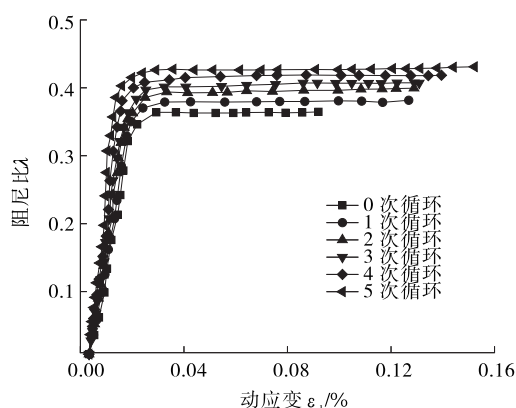


图6 不同干湿循环次数下粗粒土阻尼比—动应变关系曲线

3.5 不同干湿循环次数下 E_{dmax} 和 λ_{dmax} 的变化规律

根据图5和式(1),得到不同干湿循环次数下 E_{dmax} 和 λ_{dmax} 的变化曲线(见图7)。

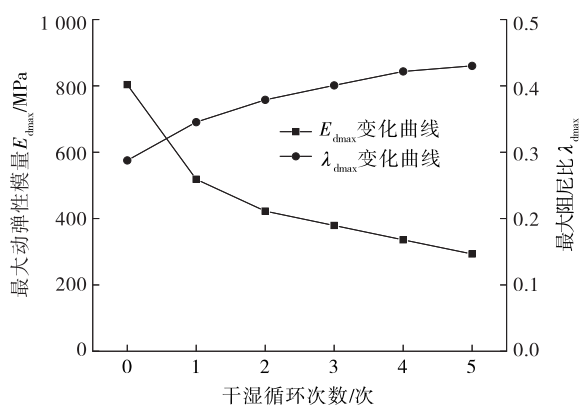


图7 不同干湿循环次数下 E_{dmax} 和 λ_{dmax} 的变化曲线

由图7可知:随着循环荷载次数的增加,最大动弹性模量 E_{dmax} 的衰减速率由大变小,由最初的800 MPa下降到300 MPa左右,最终趋于稳定;最大阻尼比 λ_{dmax} 则缓慢增加,达到0.43左右时趋于稳定。相比于最大动弹性模量 E_{dmax} ,干湿循环次数对最大

阻尼比 λ_{dmax} 的影响不大。

4 结论

(1) 在相同动应力幅值和围压条件下,荷载频率不同导致动应力—应变形成的滞回圈曲线存在差异,荷载频率增加,滞回圈的斜率和面积有所减小,土体所损耗的能力有所增大。

(2) 粗粒土试样在循环荷载作用下表现为应变软化型和应变硬化型两种状态,循环荷载次数未达到1000次时表现为应变软化型,主要为颗粒之间发生挤密,以颗粒压缩为主、横向膨胀为辅;循环荷载次数超过1000次后,由应变软化型过渡到应变硬化型,横向变形引起的密度减小量迅速增大,造成试样侧向变形增大。

(3) 根据等效线性模型,将滞回圈特性通过阻尼比与动应变关系式($\lambda - \epsilon_d$)进行表达,根据试验结果计算出动弹性模量和动应变关系式($E_d - \epsilon_d$),并确定粗粒土土水特征曲线中最大阻尼比 λ_{dmax} 和最大动弹模量 E_{dmax} 。

(4) 干湿循环第1、2次时试样的动应力水平衰减速率较大,随着干湿循环次数的增加,衰减速率逐渐平缓,试样动应力—动应变曲线斜率有所升高,试验对动应力的敏感程度有所提升。

(5) 干湿循环和荷载作用均会对试样的阻尼比 λ 和最大动弹模量 E_{dmax} 产生影响,相对而言,其对阻尼比 λ 的影响程度较小。

参考文献:

- [1] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].
- [2] 陈乐求,陈俊桦,张家生.干湿循环作用下水泥改良泥质板岩粗粒土动力特性[J].湖南大学学报:自然科学版,2017,44(9).
- [3] 雷华阳,姜岩,陆培毅,等.交通荷载作用下结构性软土动应力—动应变关系试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1).
- [4] 张希栋,骆亚生.双向动荷载下黄土的动剪切模量特性研究[J].岩土力学,2015,36(9).
- [5] 赖夏蕾,简文彬,许旭堂,等.福州淤泥质土动力特性室内试验研究[J].工程地质学报,2016,24(6).
- [6] JTG E40—2007,公路土工试验规程[S].
- [7] 刘大鹏.车辆荷载作用下风积沙和砾类土低路堤工程特性研究[D].西安:长安大学,2015.
- [8] 徐毅.交通荷载对高速公路路基影响的试验研究[D].

(下转第130页)

表 5 不同密实度下模型试验 $f_{测}/f_{密}$ 和数值模拟 $f_{测}/f_{密}$ 对比

密实度 c	模型试验 $f_{测}/f_{密}$	不同板厚(cm)情况下数值模拟 $f_{测}/f_{密}$							
		18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	0.90	0.70	0.74	0.76	0.79	0.82	0.84	0.87	0.89
0.25	0.93	0.76	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91
0.50	0.95	0.81	0.83	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.93
0.75	0.98	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
1.00	1.00	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97

$$\frac{f_{测}}{f_{密}} = k [(-0.004\ 1H + 0.300\ 1)c + (0.005\ 3H + 0.603\ 2)] \quad (14)$$

式中: k 为修正值, $k=0.95$ 。

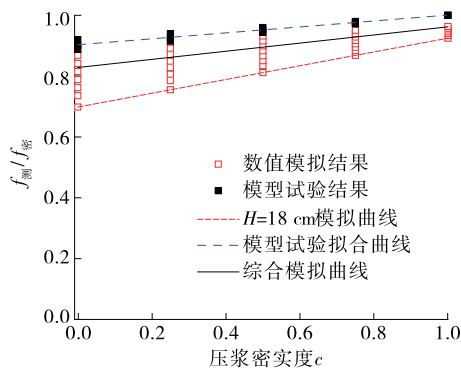


图 11 线性拟合应用曲线对比

5 结语

该文基于冲击回波法开展波纹管孔道压浆密实程度数值模拟和模型试验研究,通过有限元数值分析拟合得到 $f_{测}/f_{密}$ 、构件厚度 H 与压浆密实度 c 的理论表达式;通过模型试验,基于实测数据拟合得到 $f_{测}/f_{密}$ 与压浆密实度 c 的理论表达式;基于工程应用推广,考虑有限元模拟和实测数据,提出基于冲击回波频率测试结果的孔道压浆密实程度评估模型,为实际波纹管压浆密实度检测提供借鉴。

参考文献:

[1] 张鹏飞.实桥孔道压浆调查和力筋性能分析及其对桥
南京:河海大学,2006.
[9] 张军辉,尹志勇,郑健龙.南方湿热地区路基红黏土
Shakedown 临界应力水平试验研究[J].中南大学学报:
自然科学版,2014,45(4).
[10] Werkmeister S,Dawson A R,Wellner F.Pavement de-
sign moder for unbound granular materials[J].Journal

梁结构的影响[D].南京:东南大学,2007.
[2] 徐向锋.孔道压浆性能试验及施工质量的研究[D].南
京:东南大学,2005
[3] 冯小伟.孔道压浆材料试验及技术研究[D].长沙:长
沙理工大学,2012.
[4] 姜灏,刘海卿.回弹法对在役钢筋混凝土结构的健康
检测[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(增刊).
[5] 王磊,张建仁,张克波.回弹法和钻芯法检测劣化桥梁
混凝土强度相关性研究[J].中外公路,2010,30(2).
[6] Odile Abraham, Phillippe Cote. Impact-echo thickness
frequency profiles for detection of voids in tendon ducts
[J].ACI Structural Journal,2002,99(3).
[7] C Colla.Improving the accuracy of impact-echo in tes-
ting post-tensioning ducts[J].Review of Quantitative
Nondestructive Evaluation,2003,22.
[8] R Muldoon, A Chalker, M C Forde, et al. Identifying
voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed
concrete members by resonant frequency of impact-
echo SIBIE and tomography[J].Construction & Build-
ing Materials,2007,21(3).
[9] 季文洪,杨超.国外预应力孔道压浆质量检测实践:多
阵列探地雷达法[J].世界桥梁,2008(2).
[10] 檀永杰,徐波,吴智敏,等.基于超声对测法的钢管混
凝土脱空检测试验[J].建筑科学与工程学报,2012,
29(2).
[11] 黄政宇,纪学灵,黄靓.超声波检测混凝土缺陷成像的
定性分析法[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35
(8).

收稿日期:2018-03-26

(上接第 69 页)

of Transportation Engineering,2004,130(5).
[11] Hardin B O,Drnevich V P. Shear modulus and damp-
ing in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics &
Foundations Division,2014,98.
[12] 莫文瑜,农承尚.干湿循环效应下石灰处治膨胀土动
力特性试验研究[J].西部交通科技,2018(4).

收稿日期:2018-09-30