

地聚物改良粗粒土的动力特性试验 及土坡地震反应分析研究

苏 慧,毛昆明,赵以新,李兴雨

(金陵科技学院,江苏南京 211196)

摘要:针对不同围压不同块石含量的地聚物改良粗粒土,进行一系列固结不排水的大型三轴循环试验。探究了不同块石含量、不同围压和不同剪应变幅值下地聚物改良粗粒土的 G_{max} 以及 $G/G_{max} \sim \gamma$ 和 $\lambda \sim \gamma$ 的演化规律,基于实验结果对地聚物改良粗粒土体动力反应所用到的修正的Davidenkov粘弹性动力本构模型进行了二次开发和子程序编译,以某一代表性边坡作为研究场地,对地聚物改良粗粒土坡在不同地震动作用下的地聚物改良土坡地震反应特性进行了数值模拟,得到了动剪应力、加速度和水平位移反应规律。

关键词:地聚物改良粗粒土;动力特性;地震反应

中图分类号:U451

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)12-0007-0006

Experimental study on dynamic characteristics and analysis on seismic response of soil slope of improvement of coarse grained soil by geopolymers

SU Hui, MAO Kunming, ZHAO Yixin, LI Xingyu

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211196, China)

Abstract: A series of large-scale triaxial cyclic tests of consolidation without drainage were carried out for geopolymers improve coarse-grained soils with different confining pressure and different stone content. The evolution law of G_{max} , $G/G_{max} \sim \gamma$ and $\lambda \sim \gamma$ of coarse-grained soil modified by geomerics under different rock contents, confining pressures and shear strain amplitude-values was explored. Based on the experimental results, the modified Davidenkov viscoelastic dynamic constitutive model used in dynamic response of coarse-grained soil modified by geomerics was developed and the subprogram was compiled. Taking a representative slope as the research site, the seismic response characteristics of the modified coarse grain soil slope with geopolymer under different ground motion were simulated numerically, and the response laws of dynamic shear stress, acceleration and horizontal displacement were obtained.

Key words: coarse grained soil by geopolymers; dynamic characteristic; seismic response

地聚物是硅铝质无机原料通过矿物缩聚生成的无定形三维网络状结构,其力学性能好,早期强度高;能有效固定几乎所有已知有毒金属离子;碳排放低等,在工程应用中具有较强的优越性。地聚

物改良土兼有陶瓷、水泥和有机高聚物特性,且原材料来源广泛、制作加工方便、硬化速度快、力学性能好、耐久性能优异、重金属固封效率高等优点,在土木工程领域具有广阔的应用前景^[1-5]。但地聚物

收稿日期:2022-08-28

基金项目:江苏省水利厅科技项目(2019062);江苏省教育厅基金(18KJD560002)

作者简介:苏慧(1968—),女,教授,博士,主要研究方向为结构振动控制、节能环保、生态护坡。E-mail:kun_ming@yeah.net

改良土的动力性能的研究却很少见到。

土的动剪切模量和阻尼比主要反映了土体动应力-应变关系的非线性和滞后性,是土的两个基本动力参数。循环荷载下传统的剪切模量定义为应力-应变滞回曲线两端的斜率,阻尼比与滞回曲线面积有关,原理如图1所示。动剪切模量(G)可根据割线杨氏模量(E_{sec})估算,割线杨氏压缩模量($E_{sec,压}$)是通过将峰值压缩应力-应变点与原点 O 连接起来的直线斜率;割线杨氏拉伸模量($E_{sec,拉}$)是通过拉伸应力-应变点与原点 O 连接起来的直线斜率获得;阻尼比代表土样在装卸循环中能量的耗散。

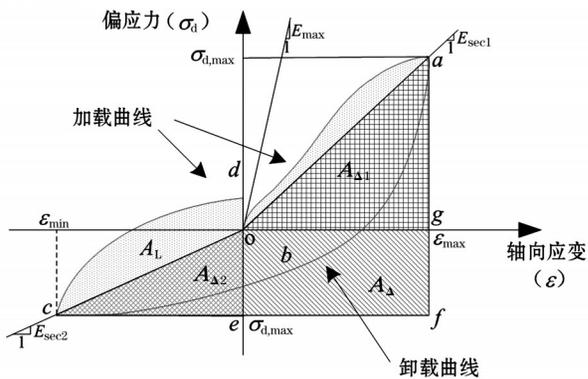


图1 应力-应变关系曲线

本章基于地聚物活性材料的稳定激发及最优掺入比试验结果,针对不同围压不同块石含量的地聚物改良粗粒土,进行一系列固结不排水的大型三轴循环试验。探究了不同块石含量、不同围压和不同剪应变幅值下地聚物改良粗粒土的 G_{max} 以及 $G/G_{max} \sim \gamma$ 和 $\lambda \sim \gamma$ 的演化规律,并给出了地聚物改良粗粒土的模量阻尼比的经验估算公式,并基于试验结果对地聚物改良粗粒土体动力反应所用到的修正的Davidenkov黏弹性动力本构模型进行了二次开发和子程序编译,以某一代表性边坡作为研究场地,对地聚物改良粗粒土坡在不同地震动作用下的地聚物改良土坡地震反应特性进行了数值模拟,得出动剪应力、加速度和水平位移反应。

1 地聚物改良粗粒土动力特性试验

1.1 实验仪器及方案

土的基本物理力学指标如表1所示,试验材料如图2所示,土石混合料级配曲线如图3所示。地聚物材料组成成分为活性材料(偏高岭土)和碱激发剂($\text{CaO} + \text{NaHCO}_3$)。

试验设备采用美国GCTS公司研制大型循环剪

表1 黏土物理性质指标

比重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含水 率/%	最大干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
2.72	34	21	13	18	1.72

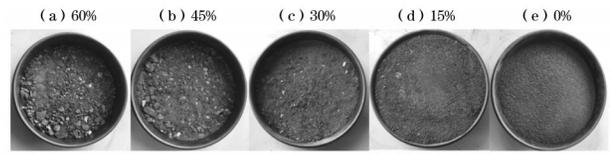


图2 试验材料

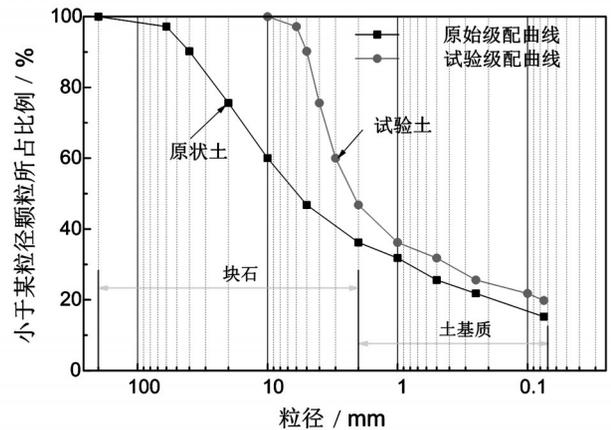


图3 试验级配曲线

切三轴仪。该试验仪通过电液伺服可以单独施加外圍压、内圍压、扭向、轴向和反压五向动态荷载,如图4所示。

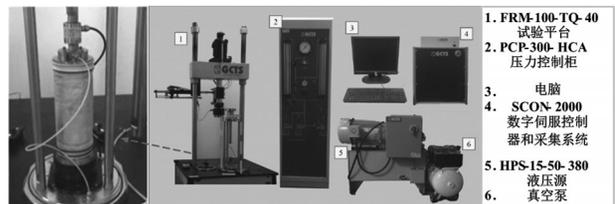


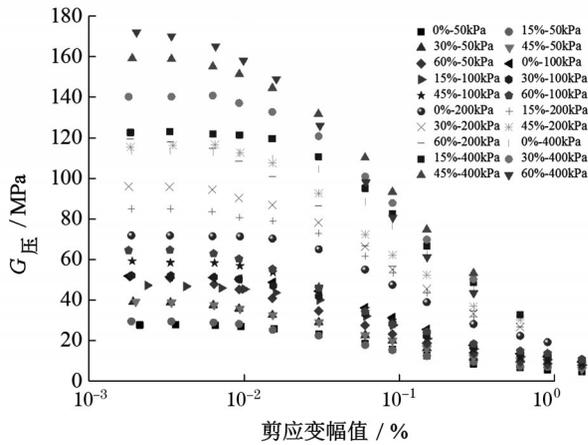
图4 GCTS大型循环剪切三轴仪

试验主要目的是研究等压固结下地聚物改良粗粒土的动剪切模量和阻尼比特性。为探讨块石含量和围压对地聚物改良粗粒土动力特性影响,考虑5个块石含量(0%, 15%, 30%, 45%和60%)与4个围压(50 kPa, 100 kPa, 200 kPa和400 kPa)联合等试验工况进行不排水多级应变控制循环动三轴试验。试样成功安装后,对试样进行反压排气预饱和,随即将反压缓慢上升至400 kPa并饱和6~8 h,当 B 值 ≥ 0.95 时即可默认试样完全饱和。完成试样的完全饱和和工作后,等压固结时间应 ≥ 12 h。固结

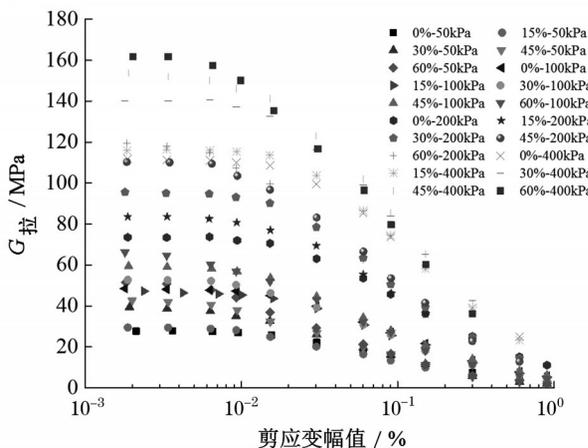
完成后,通过压缩波施加不排水应变控制分级荷载。在测试过程中,轴向应变幅值 ϵ_a 从 1×10^{-5} 至 1×10^{-2} 逐级增大。每级加载之后均对试样进行不少于30 min的恢复至初始固结状态的过程,然后进行下一级加载。每级加载5圈,加载频率为0.5 Hz。

1.2 动剪切压模量衰退曲线

图5为地聚物改良粗粒土动剪切模量随剪应变幅值的衰退曲线。从图5可以发现:围压和块石含量对地聚物改良粗粒土的动力特性有显著影响。相同块石含量下,高围压下地聚物改良粗粒土的最大动剪切模量总是高于低围压下的最大动剪切模量。围压偏差越大,粗粒土的最大动剪切模量之差越大。当围压相同时,块石含量越低,地聚物改良粗粒土的动剪切模量差异颇小,但是当围压增加时,随着块石含量的增加,这种差异会逐渐显著。



(a)动剪切压模量衰退曲线



(b)动剪切拉模量衰退曲线

图5 地聚物改良粗粒土动剪切模量衰退曲线

1.3 动剪切模量和阻尼比计算

1.3.1 动剪切模量比 G/G_{max}

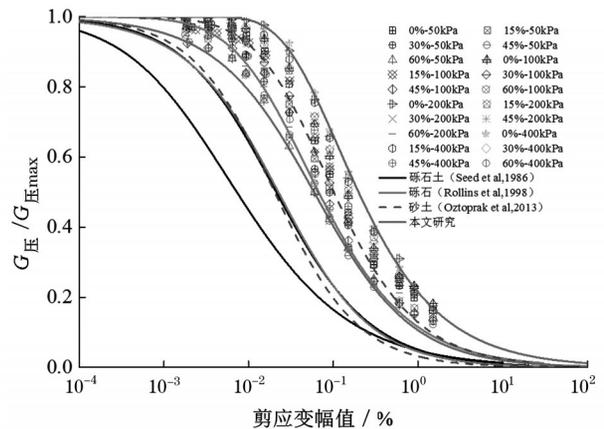
动剪切模量比 G/G_{max} 通常用来描述动剪切模量

G 随剪应变幅值 γ_a 发展的衰退过程。Martin等提出了土的弹性非线性模型,即Davidenkov模型,表达式如公式(1)所示。该模型已被证明可以有效表征土的非线性,因此,它能用来有效解释地聚物改良粗粒土动剪切模量和剪切应变幅值之间的关系。

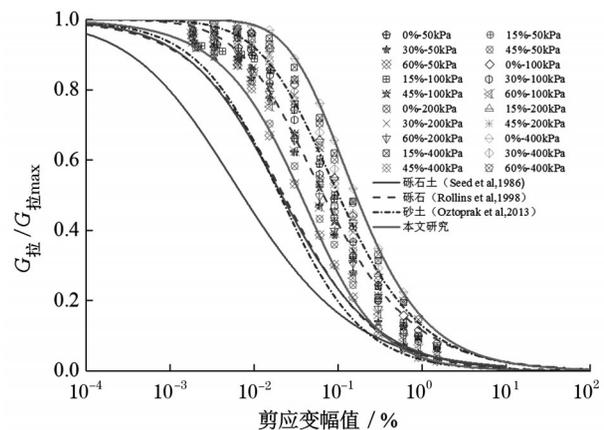
$$\frac{G}{G_{max}} = 1 - \left[\frac{(\gamma_a/\gamma_r)^{2\beta}}{1 + (\gamma_a/\gamma_r)^{2\beta}} \right]^\alpha \quad (1)$$

式中: γ_r, α 和 β 为拟合参数。该模型适用范围较广。为简单计算, γ_r 视为参考剪应变。

图6显示了在不同围压、块石含量下地聚物改良粗粒土的动剪切模量比包络曲线。同时也给出了砂土、砾石土和砾石的动剪切模量比的包络曲线。结果表明,地聚物改良粗粒土的动剪切模量比的包络曲线分布范围比其他3种土类更宽泛,并且随着剪应变幅值增大呈现逐渐衰减趋势。当剪应变幅值小于0.01%时,地聚物改良粗粒土的动剪切模量比的衰减速度明显慢于其他3种土类;当剪应变幅值大于0.01%时,地聚物改良粗粒土的动剪切



(a)动剪切压模量比包络曲线



(b)动剪切拉模量比包络曲线

图5 地聚物改良粗粒土动剪切模量比包络线

模量比开始出现迅速降低趋势;当剪应变幅值在0.01%至1.0%之间时,地聚物改良粗粒土的动剪切模量比的衰减速度明显高于其他3种土类;当剪应变幅值大于1.0%时,这4种土的动剪切模量比的衰减速度降低,并趋于等同。显而易见的是,地聚物改良粗粒土的动剪切模量比分布范围总体上高于其他3种土类。

1.3.2 阻尼比λ

阻尼比作为工程场地抗震性能评价中不可或缺的参数之一,通常用来表示振幅衰减的速度,即振幅衰减速度越快,土体耗能特性越显著。本文采用的公式见公式(2)。

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)^\beta \quad (2)$$

式中:λ_{min}为土的基本阻尼比,与土的性质、固结状态等因素有关;λ₀、β为阻尼比曲线的形状系数,与土的性质有关的拟合参数。

图7为地聚物改良粗粒土在循环荷载作用下的阻尼比曲线。结果表明在不同围压、不同块石含量下地聚物改良粗粒土的最小以及最大阻尼比都随着剪应变幅值的增加而增加。当剪应变幅值在0.001%至0.01%之间时,阻尼比曲线趋于平坦,曲线偏差基本可以忽略;当剪应变幅值在0.01%到1%之间时,曲线会发生明显变化。还应值得注意的是,循环荷载下阻尼比的增加是地质工程材料的固有属性,在特定的应力状态和应变水平下,阻尼比应为常数。但是,地聚物改良粗粒土阻尼比的分布表明,在相同剪应变幅值下,地聚物改良粗粒土的阻尼比是变化的。因此,可以推断围压和块石含量必然对地聚物改良粗粒土的阻尼比有重要影响,其变化规律应引起更多的重视。

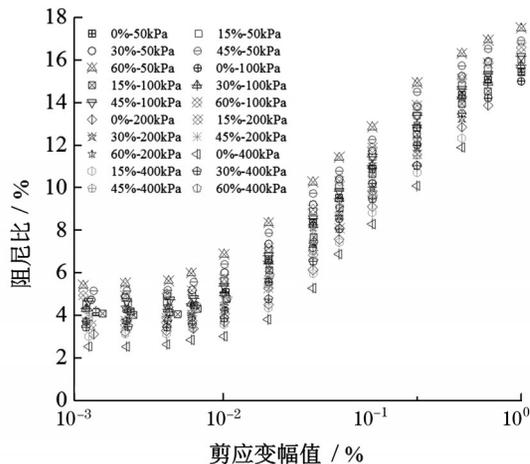


图7 剪应变幅值与阻尼比的关系

2 地聚物改良粗粒土抗震分析

2.1 建模

土坡高10 m,坡度1:1(图8)。底部为地震波输入边界,计算域的两侧人工边界采用竖向约束、水平向自由加阻尼器的黏滞边界。

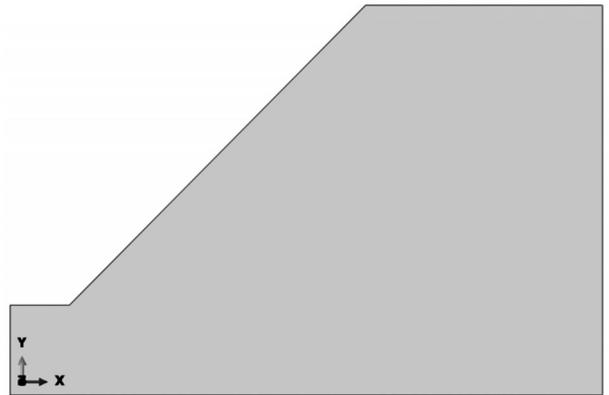


图8 土坡有限元模型

地聚物改良粗粒土的动本构模型采用基于Davidenkov骨架曲线的动力黏弹性模型,该模型采用3个参数A、B、γ₀拟合试验结果,得到土的动剪切模量比G/G_{max}~γ和阻尼比λ~γ曲线,其模型参数值如表2。

表2 动力本构模型参数

模型参数	参数值
弹性模量/MPa	3.15×10 ⁴
泊松比	0.18
密度/(kg·m ⁻³)	2 500
扩张角/(°)	36.31
初始屈服压应力/MPa	14.50
极限压应力/MPa	35.50
初始屈服拉应力/MPa	2.64
W ₁	0
W _c	1
d _c	0
ξ	0.10

地震波从基岩输入,采用中长周期频谱成分较为丰富的美国水平向强震记录Loma Prieta波和低频成分较为丰富的日本阪神地震水平向强震记录Kobe波作为输入地震动,将加速度峰值调整为0.1 g,

加速度时程如图9(a)~9(b)所示。两种地震波的傅氏谱如图9(c)~9(d),由图可知两种地震波的傅氏谱频谱特征不同,Kobe波的傅氏谱频宽较窄,Loma Prieta波的傅氏谱频宽较宽。

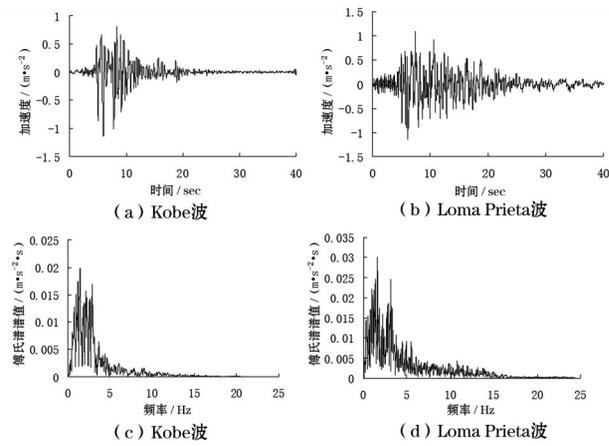


图9 输入地震动加速度时程及其傅氏谱

2.2 动应力反应分析

图10给出了不同地震动作用下边坡体系的剪应力分布云图。观察云图上颜色的深浅变化所代表的剪应力值,可以看出:随着输入地震动强度的提高,隧道结构所受的最大动应力幅值也随之提高;在相同地震动强度下,不同频谱的地震波时,基岩输入kobe波时,护坡中上部的最大动应力幅值较大,基岩输入Loma 钱Prieta波时,护坡中上部和底部的最大动应力幅值较大。

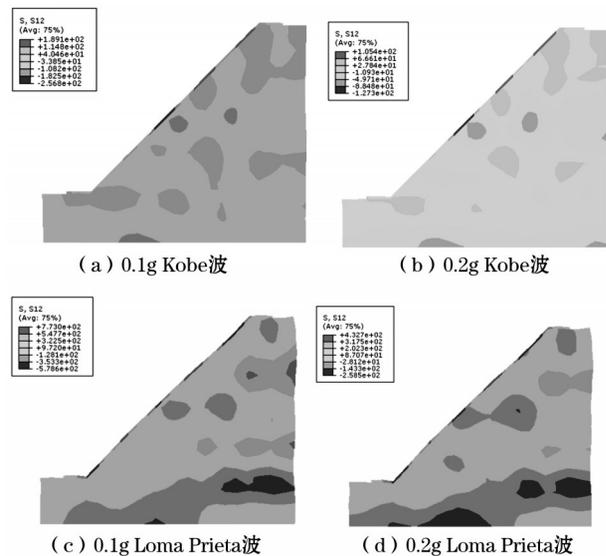


图10 不同地震动作用下土坡的剪应力分布云图

2.3 加速度反应分析

图11分别显示了0.1 g和0.2 g时水平向地震动

作用下水平向地震动作用下土坡从底部到顶部的峰值加速度的变化情况。输入同一地震波时峰值加速度变化曲线形状大致相同,在不同频谱的地震动作用下,基岩输入Loma Prieta波时,土坡的峰值加速度反应较大,输入Kobe波的峰值加速度较小。坡顶和坡底的峰值加速度较大,坡中部峰值加速度较小,加速度反应体现出“两端大,中间小”的末梢效应。因此,对于边坡的顶部和底部应考虑抗震措施。

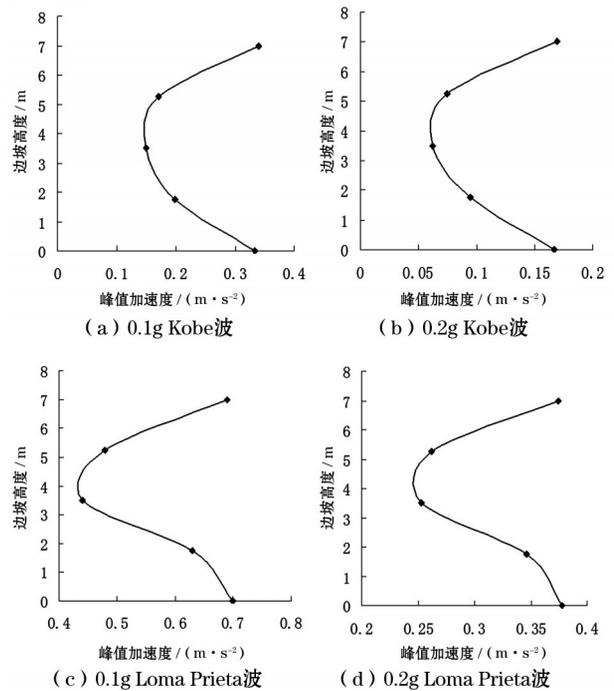


图11 不同地震动作用下土坡不同高度的峰值加速度变化

2.4 位移反应分析

土坡在不同地震动作用下的最大水平位移如图12所示,输入Kobe波、Loma Prieta波时,土坡的最大相对水平位移都发生在边坡的顶部和底部,是边坡工程的最不利位置。基岩输入Loma Prieta波时护坡的最大水平位移比输入Kobe波时的最大相对水平位移大,但变化趋势一致。

3 总 结

本文开展了地聚物改良粗粒土动力特性试验研究,分别从动剪切压模量衰退曲线、不同剪应变幅值下动剪切模量比以及阻尼比等方面探讨了围压、含石量和剪应变幅值对其动力特性的影响,对地聚物改良粗粒土体动力反应所用到的修正的Davidenkov黏弹性动力本构模型进行了二次开发和子程序编译,以某一代表性边坡作为研究场地,对

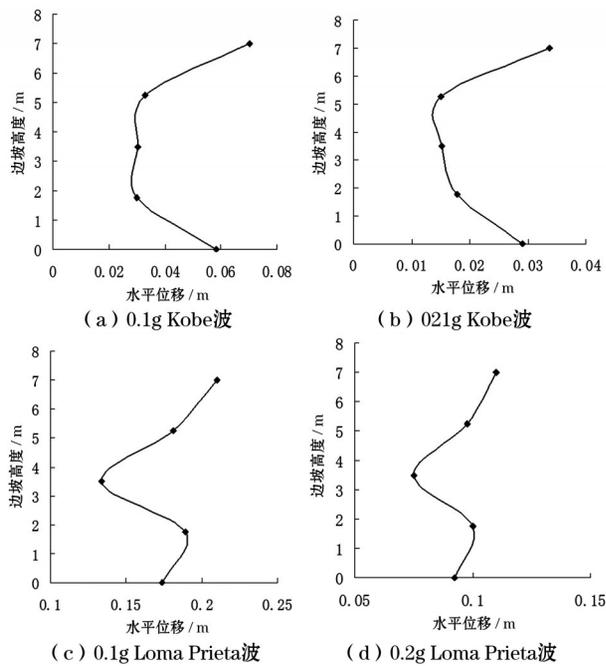


图12 不同地震动作用下土坡不同高度的水平位移变化

土坡在不同地震动作用下的地聚物改良土坡地震反应特性进行了数值模拟,得出了动剪应力、加速度和水平位移反应,得到以下结论:

(1)偏高岭土地聚物改良粗粒土的最大动剪切模量与块石含量存在近似线性增长关系,与围压呈现幂函数增长关系;在不同围压、块石含量下地

聚物改良粗粒土最小和最大阻尼比都随着剪应变幅值的增加而增加。

(2)在相同强度和频谱的地震动作用下,地聚物改良土坡中上部和底部的最大动应力幅值较大,护坡顶部和底部的加速度和水平位移较大;注浆后,土坡的强度明显增大,更有利于抗震。

(3)在不同强度和频谱的地震动作用下,在Loma Prieta波作用下地聚物改良土坡的动力反应比Kobe波作用下护坡的动力反应大。

(4)地聚物改良土坡坡顶部和底部是地震动作用下的薄弱区域,在抗震设计中应引起重视;另外对于护坡的中部和中上部也应引起相应的重视。

参考文献:

- [1] 高昊鹏,朱苦竹.地聚物砂浆在道路加固中的应用与研究[J].粉煤灰综合利用,2019(6):89-92.
- [2] 白蕾.地聚合物注浆材料的开发及性能研究[J].新型建筑材料,2018,45(7):11-15.
- [3] 胡杰,吴居涛.地聚物注浆加固技术在广州机场高速公路的应用[J].广东公路交通,2020,46(1):16-19.
- [4] 狄升贯,问鹏辉.地聚物注浆在道路基层加固补强工程中的应用与评价[J].北方交通,2019(2):52-56.
- [5] 王志兵,黄亚琴,冒娟.地聚物压密注浆在道路基层补强中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(5):97-99.

(上接第6页)

- 漫滩相软基孔压测试分析[J].防治减灾工程学报,2019,39(6):954-960.
- [18] 孙宏磊,陆逸,潘晓东,等.真空预压作用下初始含水率对疏浚淤泥固结应用研究[J].岩土力学,2021,42(11):3029-3040.
- [19] 刘志中,丁建文,王刚,等.考虑真空度衰减的真空预压沉降计算方法[J].东南大学学报(自然科学版),2016,

- 46(1):191-195.
- [20] 夏玉斌,陈允进.直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J].工程地质学报,2010,18(3):376-384.
- [21] 曹玉鹏,孙宗军,丁建文,等.高含水率疏浚泥轴对称大应变固结模型[J].岩土工程学报,2016,38(10):1904-1910.