

循环剪切作用下卵石-碎石复合垫层变形特性 试验研究

李通达, 梁发云, 顾晓强

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为研究卵石-碎石复合垫层在地震荷载下的变形特性, 开展了一系列位移控制的大型循环剪切试验, 探讨了垫层材料、法向应力、剪切幅值、颗粒破碎、循环剪切次数和剪切方向等因素的影响。结果表明: 卵石、碎石在颗粒形态及孔隙率等方面的差异显著影响了垫层的变形特性; 由于垫层材料间的相互作用, 因此卵石-碎石复合垫层的水平变形和累积法向变形均大于单一材料垫层的变形。

关键词: 垫层隔震基础; 卵石-碎石复合垫层; 大型剪切试验; 循环剪切; 变形特性

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Experimental Study on Deformation Characteristics of Pebble Gravel-Crushed Aggregate Composite Cushion Under Cyclic Shear Loading

LI Tongda, LIANG Fayun, GU Xiaoqiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the deformation characteristics of pebble gravel-crushed aggregate composite cushion under earthquake loading, a series of large-scale shear tests were carried out, and the effects of cushion material, normal stress, shear amplitude, particle breakage, number of shear cycles, and shear direction were discussed. The experimental results reveal that the differences in physical characteristics such as particle shape and porosity between the pebble gravel and the crushed aggregate will affect the cushion's deformation characteristics. Due to the interaction between the cushion layers, the horizontal and cumulative normal deformations of the pebble gravel-crushed aggregate

composite cushion are larger than that of the single-layer cushion.

Key words: isolated foundation with cushions; pebble gravel-crushed aggregate composite cushion; large-scale shear test; cyclic shear loading; deformation characteristics

对于水深 50 m 以上的跨海桥梁, 目前成功的案例仅有日本明石海峡大桥(水深 50~60 m)和希腊 Rion-Antirion 桥(最大水深 65 m)。Rion-Antirion 桥可谓是深水基础创新实践的工程典范, 场地潜在的强震以及地壳板块漂移要求桥梁结构能够承受因地质构造运动而产生的垂直和水平方向 2 m 位移。因此, 该桥梁基础设计采用钢管桩加固软弱土体, 在其上覆盖卵石-碎石复合垫层, 然后将预制装配式基础置于垫层之上, 形成垫层隔震基础^[1]。

垫层隔震基础的关键之处在于采用刚性桩加固软弱地基解决了主塔基础的承载变形问题, 并通过垫层的隔震效应消减传递至上部结构的地震作用。当地震作用超过一定强度后, 主塔基础与垫层之间产生滑动, 垫层起到了“保险丝”的作用, 控制基底传递至上部结构的地震作用, 从而保护了桥梁上部结构。此外, 主塔基础以预制装配式为主, 施工难度大大降低, 提高了在水深流急环境中的建设可行性, Rion-Antirion 桥的设计方案对于强震地区的深水桥梁建设具有重要的推广价值^[2]。

需要指出的是, 垫层隔震基础虽然在 Rion-Antirion 桥中得到了成功应用, 但是一些关键问题在设计时并没有研究清楚, 更多地只是从概念上把握^[1]。对于在预制沉箱基础和复合地基之间设置的

收稿日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51878487)

第一作者: 李通达(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为岩土地震工程。E-mail: 1810188@tongji.edu.cn

通信作者: 梁发云(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土力学与基础工程。

E-mail: fylang@tongji.edu.cn。



论文
拓展
介绍

特定的卵石-碎石复合垫层,垫层效应对于此类新型基础的静力和动力特性均起到重要的调控作用^[3]。目前关于垫层效应的文献相当丰富,在室内试验^[4]、理论推导^[5]和数值模拟^[6]等方面均取得了丰硕的成果。此外,对垫层变形特性的研究也有了一定的进展。李志成等^[7]对卵石垫层的变形特性进行了研究,分析了垫层厚度、垄沟尺寸等因素的影响。王勇^[8]研究了碎石垫层的变形特性和传力机制。田建勃等^[9]通过室内试验和有限元分析揭示了碎石垫层的强度特性和变形特征。Rui等^[10]对垫层变形及荷载传递机理展开研究,指出垫层的变形、滑动面随垫层厚度、桩净间距的变化而变化。Li等^[11]通过试验研究了垫层-结构界面的剪切特性,发现界面的水平位移是由垫层剪切变形引起的。然而,对于类似于Rion-Antirion桥的复合垫层,卵石层与碎石层在厚度、颗粒形状等方面存在明显差异,卵石-碎石复合垫层的变形特性有待进一步研究。

循环剪切试验是开展土体动力特性研究、获取土体动力参数的常规手段。借助同济大学SJW-200大型多功能界面剪切仪,通过模拟地震荷载及垫层粗粒料填筑情况,开展位移控制的循环剪切试验,分析垫层材料、法向应力、剪切幅值等因素对垫层变形特性的影响,并探讨卵石-碎石复合垫层中不同土层间的相互作用及其对变形特性的影响。

1 试验条件

1.1 试验设备

试验中采用同济大学SJW-200大型多功能界面剪切仪,试样尺寸为600 mm×400 mm×200 mm(长×宽×高)。该装置可以施加不同的法向边界条件,如恒定应力和恒定位移^[12]。该装置的最大法向压力为100 kN,最大循环频率为0.1 Hz。

1.2 垫层材料及试样制备

试验采用了碎石和卵石2种材料,粒径范围为5~20 mm,其中碎石颗粒边缘锋利有棱角,卵石边缘平整表面光滑。在剪切过程中,卵石-碎石复合垫层不同区域表现出不同的变形及力学特征,因此共设计了3种垫层,分别是碎石垫层试样、卵石-碎石复合垫层试样和卵石垫层试样。

本试验中,碎石和卵石均按照同一级配标准配制。参照国家标准《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011),标准的试样颗粒级配曲线如图1所示。3种垫层试样的制备过程相同,现以卵石-碎石

复合垫层试样为例进行说明。在下剪切盒中倒入卵石,用手铺平,此时卵石试样的高度约为30 cm,施加160 kPa的法向应力,待法向变形稳定(法向位移不变,保持5 min)后再压缩15 min;继续倒入卵石并铺平,此时卵石试样的高度为70 mm,按照同一标准压实;将下剪切盒中倒满卵石,铺平并压实;参照上述过程,将上剪切盒中填满碎石并压实。试样的主要参数如表1所示。

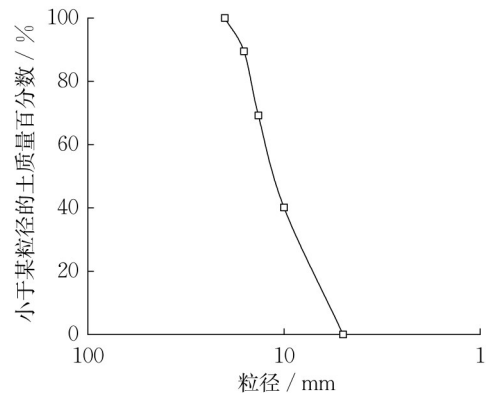


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle grading curve

表1 碎石和卵石的主要特性

Tab.1 Main properties of crushed aggregate and pebble gravel

类别	中值粒径/ mm	天然密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比
碎石	11.36	1.67	0.56
卵石	11.34	1.72	0.62

1.3 试验方案

本试验的加载路径为单向往返加载,具体加载路径如图2所示。图2中, T 表示一个完整剪切周期所用的时间。

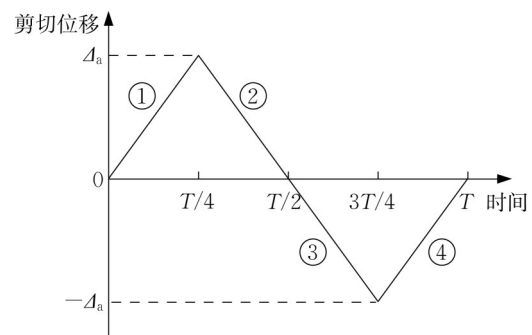


图2 加载路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of cyclic shear paths

上剪切箱固定,下剪切箱沿剪切路径从初始位置开始移动,①—②—③—④—①...,其中①—②—③—

④ 4 个过程定义为一个加载循环^[13]。选择此种加载路径可以控制循环剪切试验的剪切幅值,有助于分析试样在循环剪切作用下的变形机理。在剪切过程中,剪切速率为 $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试样的应变率为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。研究表明,粒径、法向应力、剪切幅值等因素对土体动力学特性有重要的影响。对于 Rion-Antirion 大桥,垫层的粒径范围为 $10 \sim 80 \text{ mm}$,承受的压强约为

160 kPa ,考虑场地潜在的强震,设计时要求桥梁结构能够承受因地质构造运动而产生的垂直和水平方向 2 m 位移(基础直径为 90 m)。为使试验结果更接近于实际工程状况,根据实际试验条件,考虑尺寸效应的影响,垫层粒径范围为 $5 \sim 20 \text{ mm}$,法向应力 σ 取值为 $70, 140, 160, 180 \text{ kPa}$,剪切幅值 Δ_s 为 $5, 10, 15, 20, 25 \text{ mm}$ (剪切盒长 600 mm)。试验工况如表 2 所示。

表 2 试验工况
Tab.2 Test cases

荷载	标号	试样	法向应力 σ/kPa	剪切幅值 Δ_s/mm
循环	TC1-1	卵石垫层	160	5, 10, 15, 20, 25
	TC1-2	碎石垫层	160	5, 10, 15, 20, 25
	TC1-3	卵石-碎石复合垫层	160	5, 10, 15, 20, 25
	TC2-1	卵石垫层	70, 140, 160, 180	15
	TC2-2	碎石垫层	70, 140, 160, 180	15
	TC2-3	卵石-碎石复合垫层	70, 140, 160, 180	15

2 试验结果分析

针对表 2 的试验工况,分六批开展 27 次循环剪切试验。通过试验获得数据,对比卵石垫层、碎石垫层以及卵石-碎石复合垫层变形特性的差异。

2.1 剪应力-水平位移关系

试样的剪应力-水平位移关系如图 3 所示。对于同一试样,当试验的剪切幅值不同时,剪应力-水平位移关系曲线的形状有较大的差异。以图 3a 为例:当剪切幅值为 10 mm 时,剪应力-水平位移关系曲线的形状为 Z 形,剪切过程中滑移的影响较强,曲线的形状不饱满;当剪切幅值为 25 mm 时,曲线的形状更接近梭形或弓形,形状饱满,滑移的影响较弱,剪切过程中能吸收较多动能^[14]。这与垫层的特性有关,垫层是由颗粒组成的散体材料,内部连接较为松散,较小剪切幅值不足以使颗粒重新排列,运动以滑移为主;当剪切幅值较大时,垫层内部颗粒摩擦、重排作用加剧,消耗更多动能,颗粒滑移受到抑制。

对于循环剪切试验,在计算试样的剪应力(τ)时应综合考虑循环剪切过程中不同剪切方向的剪应力,计算式如下所示:

$$\tau = \frac{\tau_{m,1} + \tau_{m,2}}{2} \quad (1)$$

式中: $\tau_{m,1}$ 和 $\tau_{m,2}$ 分别为第 1 个四分之一周期(①)和第 3 个四分之一周期(③)的最大剪应力。如图 4 所示,各垫层剪应力之间的大小关系为卵石-碎石复合垫层 > 碎石垫层 > 卵石垫层。例如,当剪切幅值为 20 mm 时,卵石-碎石复合垫层的剪应力为 143.6 kPa ,

大于碎石垫层(134.4 kPa)和卵石垫层(118.7 kPa),这与材料自身的形态学特性有关^[15]。研究表明,颗粒的形态学特性对其组成的集合体的特性有显著的影响。颗粒表面越不规则,棱角数目越多,颗粒间的咬合越紧密,抵抗变形的能力越强^[15],因此碎石垫层的剪应力大于卵石垫层。对于卵石-碎石复合垫层,碎石的存在使颗粒间的咬合较为紧密,而卵石光滑的表面使剪切过程中产生的颗粒碎屑更方便的进入到粒间孔隙内。较大的密实度使卵石-碎石复合垫层的剪应力高于单一材料的垫层。此外,由于剪应力-水平位移关系曲线包围的面积反映试样消耗能量的大小,因此在相同试验条件下,垫层的剪应力越大,剪应力-水平位移关系曲线包围的面积越大,耗能越多^[16]。

2.2 水平位移

垫层是由颗粒组成的集合体,内部连接较为松散,其变形机理与常规材料不同。为测定各垫层试样在循环剪切作用下的水平位移,通过剪切盒上的有机玻璃窗口,利用高清摄像机记录剪切过程中垫层颗粒的运动。图 5 为测量颗粒运动的示例图片,其中的黑点为基准点,圆圈为追踪点。根据初始及结束时垫层颗粒追踪点位置的变化计算颗粒的位置变化,并由此推算垫层的水平位移。根据上述方法测得的颗粒位移与实际位移之间的差异为 8.5% 。为进一步分析 3 种垫层的水平变形,将试验数据汇总,如表 3 所示。

由表 3 可知,随着剪切幅值的增加,试样的水平位移也随之增大。此外,在相同试验条件下,卵石-

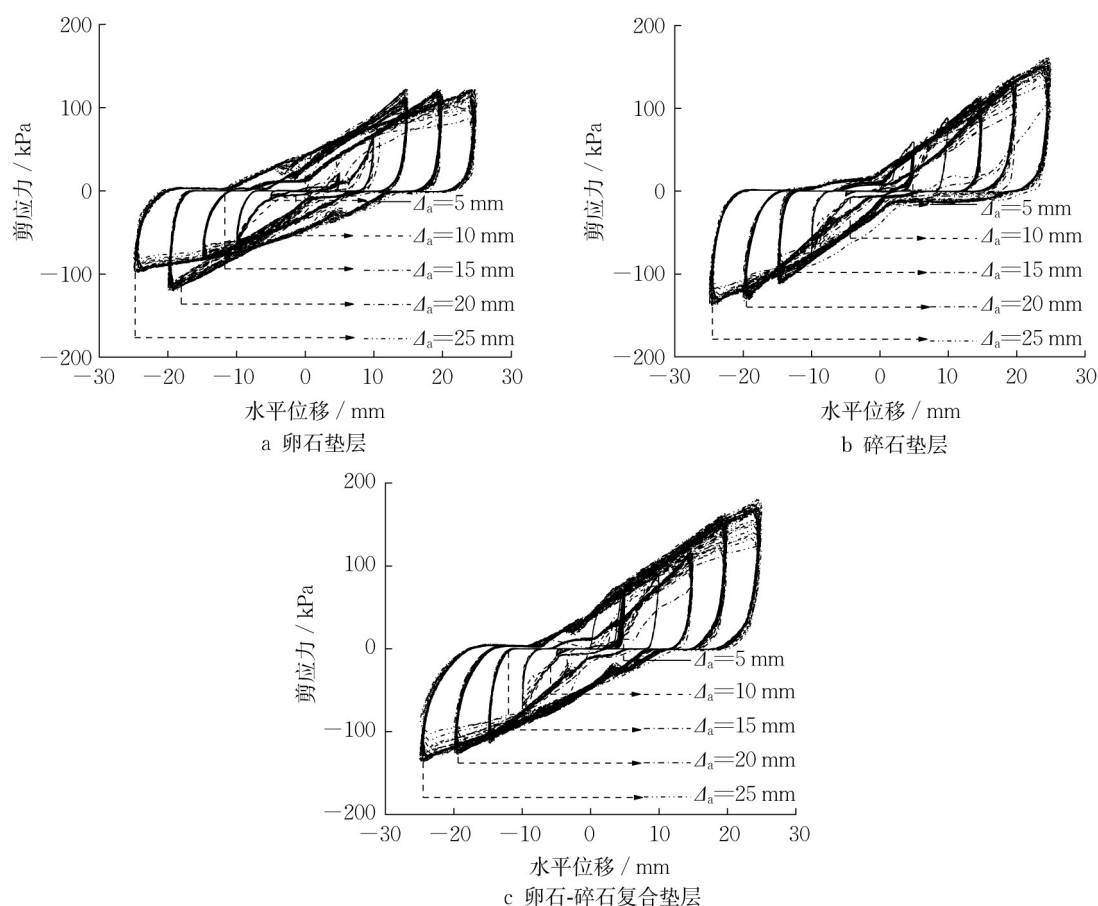
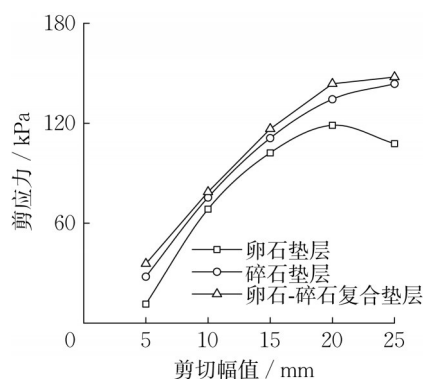
图3 不同剪切幅值下剪应力-水平位移关系($\sigma=160$ kPa)Fig.3 Shear stress-horizontal displacement curve under different shear amplitudes ($\sigma=160$ kPa)

图4 不同剪切幅值下剪应力

Fig.4 Shear stress under different shear amplitudes

碎石复合垫层的水平位移较碎石垫层大7%~12%,较卵石垫层大15%~43%,卵石-碎石复合垫层对剪切幅值的变化更敏感。此现象与颗粒形态学特性及颗粒间的相互作用有关。研究表明,垫层的宏观力学行为主要由颗粒间的接触决定,当荷载变化时,颗粒间作用力随之变化,造成颗粒体系结构变化。因形态学特性的缘故,碎石颗粒间的咬合更加紧密,原结构体系破坏时释放出更多的能量,导致新形成的结构体

系与原结构体系间存在较大差异。因此,碎石垫层在循环剪切过程中的水平位移大于卵石垫层。对于复合垫层,由于卵石的存在,旧体系破坏时释放的动能难以仅通过颗粒间摩擦消耗,使得颗粒的位移更大。复合垫层的水平位移大于单一材料的垫层。

2.3 累积法向位移

图6为试样的累积法向位移。由图6可知,剪切幅值对于垫层试样的累积法向位移影响显著,剪切幅值越大,垫层试样的累积法向位移就越大。这与颗粒间的相互作用有关,随着剪切幅值的增加,颗粒间相互作用加剧,颗粒重新排布,孔隙比减小,累积法向位移增大。以卵石-碎石复合垫层为例, $\Delta_a=25$ mm时,累积法向位移 $d_v=-21.3$ mm,大于其他剪切幅值下的累积法向位移($\Delta_a=5$ mm, $d_v=-2.2$ mm; $\Delta_a=10$ mm, $d_v=-5.2$ mm; $\Delta_a=15$ mm, $d_v=-10.9$ mm; $\Delta_a=20$ mm, $d_v=-17.8$ mm)。

除剪切幅值外,垫层试样的累积法向位移与垫层材料有关。如图6所示,在循环剪切作用下,累积法向位移的大小关系为卵石-碎石复合垫层>碎石垫层>卵石垫层。例如,当剪切幅值为25 mm时,卵

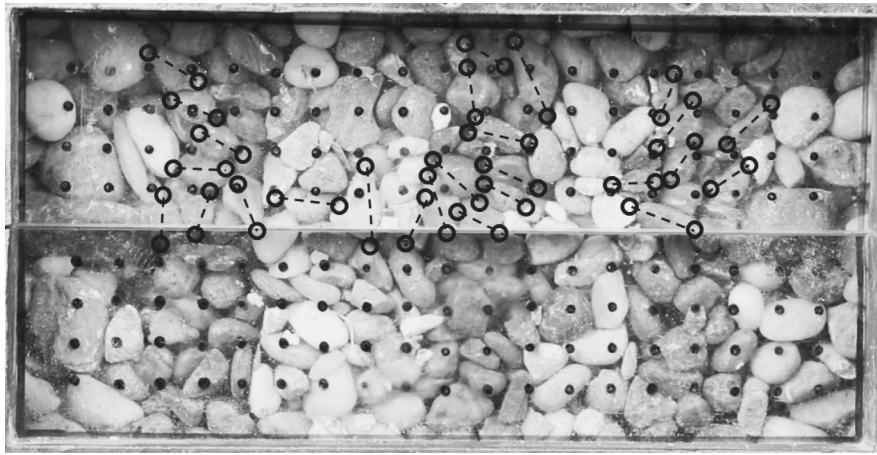


图5 用于跟踪垫层颗粒的照片示例

Fig.5 Example of a photograph used to track soil particles

表3 循环剪切作用下水平位移(循环次数=30)

Tab.3 Horizontal displacement during cyclic shear loading (number of shear cycles=30)

试样	各剪切幅值下水平位移/mm				
	$\Delta_a=5\text{ mm}$	$\Delta_a=10\text{ mm}$	$\Delta_a=15\text{ mm}$	$\Delta_a=20\text{ mm}$	$\Delta_a=25\text{ mm}$
卵石垫层	2.3	6.7	11.3	16.4	19.1
碎石垫层	3.0	8.3	12.1	17.6	20.5
卵石-碎石复合垫层	3.3	9.0	13.7	18.9	22.9

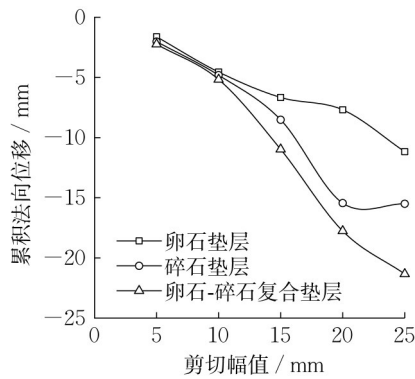


图6 累积法向位移

Fig.6 Cumulative normal displacement

石垫层的累积法向位移为 -11.1 mm ,该值相当于碎石垫层累积法向位移的 72% (-15.5 mm),卵石-碎石复合垫层累积法向位移的 52% (-21.3 mm)。

循环剪切过程中,垫层的累积法向位移与颗粒的重新排布有关。颗粒的棱角越多,颗粒间相互作用越强烈,重新排布越彻底,法向变形越大。除此之外,颗粒破碎的影响同样不可忽略。表4为试样在试验前后的粒径分布。与卵石颗粒相比,碎石颗粒棱角处更容易产生应力集中的现象^[16],颗粒也更容易破碎。受其影响,在循环剪切过程中,碎石垫层颗粒重新排布及颗粒间相互作用更强烈,更容易产生较大的法向位移。因此,碎石垫层的累积法向位移大于卵石垫层。对于卵石-碎石复合垫层试样,碎石的存在使得垫层颗粒破碎、重新排布及颗粒间的相互作用较强,同时卵石的光滑表面也使得颗粒间的孔隙更容易被颗粒碎片填充。在碎石、卵石共同作用下,复合垫层试样的累积法向位移大于单一材料的垫层。

表4 试验前后的粒径分布($\sigma=160\text{ kPa}$, $\Delta_a=15\text{ mm}$)

Tab.4 Particle size distribution before and after test($\sigma=160\text{ kPa}$, $\Delta_a=15\text{ mm}$)

试样	阶段	不同粒径颗粒分布/%				
		0~5 mm	5~10 mm	10~13 mm	13~16 mm	16~20 mm
卵石垫层	试验前	0	40.1	30.7	18.9	10.3
	试验后	1.2	39.8	30.3	18.6	10.1
碎石垫层	试验前	0	40.3	28.7	20.1	10.9
	试验后	2.0	39.8	28.2	19.4	10.6
卵石-碎石复合垫层	试验前	0	38.8	33.8	17.7	9.8
	试验后	1.6	38.0	33.3	17.4	9.6

2.4 法向应力对垫层变形的影响

法向应力是影响垫层变形的另一重要因素。试样在不同法向应力作用下的水平位移如图7a所示。在相同试验条件下,3种垫层试样水平位移由大到小的排列次序为:卵石-碎石复合垫层、碎石垫层、卵石垫层,变形规律与上文相同。对于同一试样,随着法向应力的增加,试样的水平位移变化并不大。这与颗粒间的相互作用有关。随着法向应力的增大,原结构体系破坏时释放的能量也随之增大。然而,颗粒间的相互作用也随之增强,消耗了更多的能量。在循环剪切过程中,因法向应力增大释放的势能与颗粒间相互作用消耗的能量达成一定的平衡,垫层的水平位移没有显著变化。

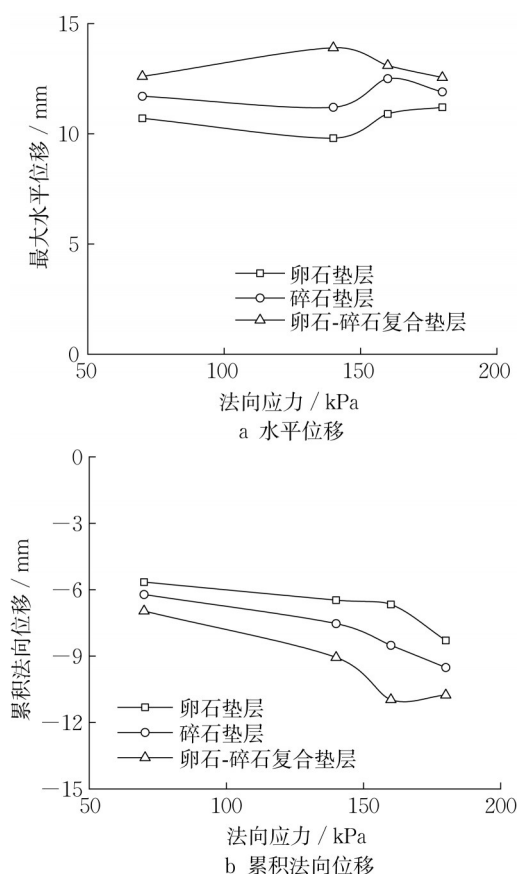


图7 法向应力对垫层位移的影响

Fig.7 Effect of normal stress on displacement of cushion specimen

为进一步研究法向应力对垫层变形的影响,根据试验数据绘制成图,如图7b所示。由图7b可知,法向应力由70 kPa增长到180 kPa时,卵石-碎石复合垫层累积法向位移由-6.90 mm变为-10.75 mm,增加了55.8%,碎石垫层累积法向位移由-6.20 mm变为-9.50 mm,增加了53.2%,卵石垫层累积法向位移由-5.60 mm变为-8.30 mm,增加了48.2%。分析认

为,法向应力越大,颗粒之间的相互作用越剧烈,颗粒破碎越多,试样法向位移越大。此外,由于碎石层与卵石层之间的相互作用,卵石-碎石复合垫层的累积法向位移大于单一材料的垫层。

2.5 循环剪切次数及剪切方向对垫层变形的影响

除上述影响因素外,循环剪切次数与剪切方向对垫层的变形特性同样有显著影响,如图8所示。

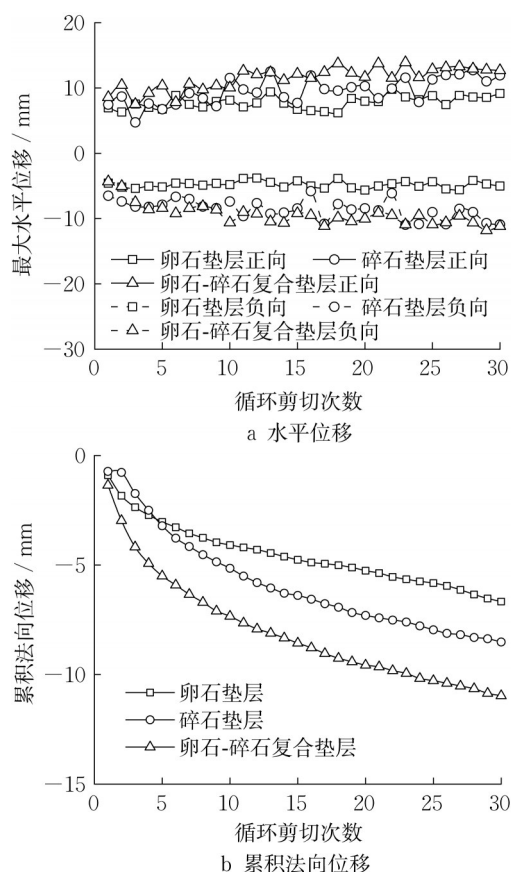


图8 循环剪切次数对垫层位移的影响($\sigma=160$ kPa, $\Delta\epsilon=15$ mm)

Fig.8 Effect of shear cyclic number on displacement of cushion specimen ($\sigma=160$ kPa, $\Delta\epsilon=15$ mm)

随着循环剪切次数的增加,垫层的水平位移逐渐增大,这与垫层自身的各向异性有关。研究表明,对于类似垫层的各向异性材料,在试样中存在一个卓越剪切方向,颗粒的长轴有向该方向偏转的趋势。随着剪切应变的发展,颗粒长轴逐渐向卓越剪切方向旋转^[17]。待颗粒长轴逐渐转至卓越剪切方向后,颗粒旋转消耗能量所占总耗能的百分比减少。在后续的剪切过程中,垫层的水平位移消耗了更多的能量。受此影响,垫层的水平位移增大。此外,循环剪切中,剪切方向的差异同样会影响垫层的变形。该

过程中,垫层颗粒重新排布,因各向异性的影响,在不同剪切方向垫层水平位移的大小不同。以卵石-碎石复合垫层为例,当循环剪切次数为27时,正向水平位移为13.30 mm,负向水平位移为9.60 mm。此外,随循环剪切次数的增加,累积法向位移增大。

3 结论

(1)垫层颗粒的形态学特性影响颗粒间的接触,进一步影响垫层的宏观力学行为。

(2)由于卵石与碎石之间的相互作用,因此卵石-碎石复合垫层的水平位移和累积法向位移均大于单一材料垫层。在循环剪切过程中,复合垫层因变形消耗了更多的能量。

(3)法向应力及剪切幅值对卵石-碎石复合垫层的变形特性有显著的影响。法向应力越高,剪切幅值越大,卵石-碎石复合垫层的变形就越大,这与垫层颗粒间的相互作用有关。

(4)循环剪切次数与剪切方向对卵石-碎石复合垫层变形特性的影响不可忽略,这与垫层自身的各向异性有关。

作者贡献声明:

李通达:进行试验研究,处理试验数据,撰写论文。

梁发云:提出研究课题,指导论文撰写,审阅并修订论文。

顾晓强:协助试验指导,审阅并修订论文。

参考文献:

- [1] COMBAULT J. The Rion-Antirion Bridge: when a dream becomes reality [J]. *Frontiers of Architecture & Civil Engineering in China*, 2011, 5(4): 415.
- [2] 林元培, 奚文俊. 台湾海峡大桥: 全天候通道方案[C/CD]//经济发展方式转变与自主创新, 第十二届中国科学技术协会年会论文集(第三卷). 北京: 清华同方光盘电子出版社, 2010: 1-4.
LIN Yuanpei, DOU Wenjun. Taiwan Strait Bridge: all time passage scheme [C/CD]//Transformation of Economic Development Mode and Independent Innovation, Proceedings of the 12th Annual Meeting of China Association for Science and Technology (Volume III). Beijing: Tsinghua Tongfang CD-ROM Electronic Publishing House, 2010: 1-4.
- [3] LIANG F Y, LI T D, QIAN Y, *et al.* Investigating the seismic isolation effect of the cushioned pile raft foundation in soft clay through dynamic centrifuge tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 142: 106554.
- [4] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 12.
ZHANG Jianmin. Reversible and irreversible dilatancy of sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 12.
- [5] GUTIERREZ M, ISHIHARA K, TOWHATA I. Flow theory for sand during rotation of principal stress direction [J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(4): 121.
- [6] 胡黎明, 马杰, 张丙印. 散粒体间接触面单剪试验及数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2319.
HU Liming, MA Jie, ZHANG Bingyin. Simple shear test and numerical simulation of interfaces between granular materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2319.
- [7] 李志成, 冯先导, 沈立龙. 沉管隧道含垄沟卵石垫层变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增1): 189.
LI Zhicheng, FENG Xiandao, SHEN Lilong. Experimental study of deformation characteristics of pebble cushion with furrow for immersed tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Z1): 189.
- [8] 王勇. 深埋沉管隧道基础碎石垫层变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3387.
WANG Yong. An experimental study of deformation characteristics of gravel cushion for deeply immersed tube tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12): 3387.
- [9] 田建勃, 韩晓雷, 于清桦, 等. 碎石垫层强度与变形特性试验研究和有限元分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 83.
TIAN Jianbo, HAN Xiaolei, YU Qinghua, *et al.* Experimental study and finite element analysis of strength and deformation characteristics of gravel cushion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 83.
- [10] RUI R, HAN J, YE Y Q. Load transfer mechanisms of granular cushion between column foundation and rigid raft [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(1): 04019139.
- [11] LI Y K, HAN X L, KHALED G, *et al.* Experimental study on the shear behavior of the interface between cushion materials and the concrete raft [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, 17(1): 04019139.
- [12] WU Y, ZHAO C, ZHAO C F, *et al.* Effect of grout conditions on the mechanical behaviors of unloading sand-concrete interface for reinforcing bored pile foundation [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 243: 118218.
- [13] 冯大阔, 张嘎, 张建民, 等. 常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性试验[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(10): 1571.
FENG Dakuo, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, *et al.* Experimental study on 3D cyclic behaviors of soil-structure interface under constant normal stiffness condition [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1571.
- [14] 黄娟, 彭立敏, 袁铁映, 等. 分级加载条件下泥炭质土滞回曲线演化规律试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(7): 1753.
HUANG Juan, PENG Limin, YUAN Tieying, *et al.* Experimental study on evolution law of hysteretic curves of peaty soil under stepped axial cyclic loading [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(7): 1753.
- [15] PAN T, TUTUMLUER E, CARPENTER S H. Effect of coarse aggregate morphology on resilient modulus of hot-mix asphalt [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005, 1929(1): 1.
- [16] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(8): 973.
- [17] 张雷, 张连卫, 张建民. 二维粒状材料双轴压缩试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增1): 314.
ZHANG Lei, ZHANG Lianwei, ZHANG Jianmin. Experimental study of 2D granular materials under biaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Z1): 314.