

DOI: 10.11779/CJGE201904016

加载条件对土拱效应影响的 Trapdoor 模型试验研究

徐超^{1,2}, 张兴亚¹, 韩杰³, 杨阳^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下结构工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 堪萨斯大学土木/环境与建筑工程系, 英国 劳伦斯 66045)

摘要: 土拱效应是一种土中应力的重分布现象, 它是由土与土中结构物间刚度的差异而引起的。目前关于循环荷载对于土拱效应影响的研究十分有限。使用铝棒相似土代替砂土作为填料, 通过自制的模型试验装置进行了土体自重、表面静荷载及循环荷载作用下的平面应变 Trapdoor 模型试验, 利用土拱率作为土拱效应强弱的衡量指标, 对比研究了不同加载条件对土拱效应的影响, 并将试验所得结果与前人的研究成果进行了对比验证。结果表明, 静荷载与循环荷载均会削弱已有稳定“土拱”, 削弱程度随荷载幅值及频率的增大而增大, 随荷载作用面积的增大而减小。相同荷载水平下, 循环荷载对土拱效应的削弱较静荷载更强, 两者间的差异随荷载幅值的增大而减小, 随荷载频率的增大而增大, 且峰值荷载下的差异小于零荷载下的差异。总体而言, Evans 提出的土拱率计算公式能够较好地用于土体自重及静荷载作用下的 Trapdoor 试验中土拱率的预测, 而对于循环荷载作用下的情况, 还有待对计算公式进行进一步地改进。
关键词: 土拱效应; Trapdoor 模型试验; 土拱率; 循环荷载; 铝棒相似土

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0726-07

作者简介: 徐超(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土工合成材料和地基加固方面的教学和科研工作。E-mail: c_axu@tongji.edu.cn。

Trapdoor model tests on impact of loading conditions on soil arching effect

XU Chao^{1,2}, ZHANG Xing-ya¹, HAN Jie³, YANG Yang^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil/Environmental and

Architectural Engineering, The University of Kansas, Lawrence 66045 UK)

Abstract: The soil arching effect is a redistribution of the stress in soil. It is caused by the rigidity difference between the soil and the structures in the soil. The studies so far about the impact of cyclic loading on the soil arching effect is very limited. A custom-made apparatus is used to conduct plain-strain trapdoor model tests under soil self-weight, static loading and cyclic loading to study the impact of different loading conditions on the soil arching effect. The analogical soil of aluminum rods is used as the fill instead of sand. The parameter of the soil arching ratio is used to evaluate the soil arching effect. The test results from this study are compared with those from the previous studies. It is indicated that both static loading and cyclic loading reduce the existing steady soil arching. The reduction of the soil arching effect increases with the loading magnitude and frequency and decreases with the loading area. Under the same loading level, the cyclic loading reduces the soil arching effect more than the static loading. The difference of reduction caused by them decreases with the loading magnitude and increases with the loading frequency. Besides, the difference under the peak pressure is less than that under the zero pressure. On the whole, the expressions given by Evans^[18] can well predict the soil arching ratios in the trapdoor tests under soil self-weight and static loading. However, an improvement of the expressions is necessary for the trapdoor tests under cyclic loading.

Key words: soil arching effect; trapdoor model test; soil arching ratio; cyclic loading; analogical soil of aluminum rod

0 引言

土拱效应是岩土工程中最常见的现象之一。法国军事工程师于 19 世纪首次在谷仓工程中发现了土拱效应^[1]。20 世纪二三十年代, 其在隧道工程中的重要性受到了广泛地关注^[2]。而后, 国内外学者从试验、

理论、工程实践等方面对土拱效应进行了大量研究, 并取得了可观的成果。1936 年, Terzaghi^[3]首次使用 Trapdoor 试验直观地证实了土拱效应的存在并分析了

收稿日期: 2018-05-02

“土拱”作用区域中应力的分布。之后, Trapdoor 试验成为了研究“土拱效应”最为常用的方法之一。

基于现有的研究成果,人们对土体自重及表面静荷载作用下的土拱效应已经有了较为全面的认识。但在公路、铁路等实际工程中,“土拱”上作用的荷载从形式上来看与循环荷载更为接近,将其视为静荷载可能在一定程度上低估了其对“土拱”的削弱作用。Bhandari^[4]基于表面局部循环荷载作用下土拱效应的离散元数值模拟结果提出,循环荷载会导致已有“土拱”结构的弱化,而土工合成材料加筋可以使“土拱”结构在循环荷载作用下表现得更为稳定。徐朝阳等^[5]通过动载作用下桩承式路堤的模型试验及数值模拟得出了相似的结论,并发现动载对“土拱”的削弱作用比静载更为明显。Jenck 等^[6]通过 Trapdoor 模型试验观察并记录了循环荷载加卸载过程中作用在 Trapdoor 上的应力及填料中竖向位移场的变化。赖汉江等^[7]通过离散元数值模拟分别从宏观和细观角度分析了均布循环荷载作用下的土拱效应,结果表明,在循环荷载作用下,土拱效应先逐渐减弱而后趋于稳定。

上述研究成果研究大多是通过数值模拟的手段实现的,与现实条件下的情况可能存在一定的差异。且总体来看,关于循环荷载对土拱效应影响的研究十分有限,认识有待深化。本文通过平面应变 Trapdoor 试验对比研究了不同加载条件对土拱效应的影响,并通过试验结果与前人研究成果的对比,验证了现有理论的实用性。

1 Trapdoor 模型试验简介

1.1 试验装置

本研究采用同济大学自行研制的平面应变 Trapdoor 模型试验装置,见图 1。试验箱全高约 700 mm,长度为 900 mm,可容纳 7 个宽度 $B = 128$ mm 的硬木块 (B1~B7),每两个木块间留有微小的空隙以消除摩擦力的影响,木块的厚度为 50 mm 略小于试验箱的宽度 (51 mm)。每个木块下方安装有一个测量精度为 0.01 kg 的“S”形的力传感器,用来测量作用在该木块上的压力,将压力除以木块的上表面积即可求得作用在木块上的应力大小。7 个木块分别由连接在控制箱上的 7 个升降电机带动,可以单独升降。控制箱可以控制并记录木块的位移。试验箱厚度略大于木块,以避免和铝棒前后表面的摩擦。试验箱前表面为透明的钢化玻璃,以便对填料变形的观测。在加载试验中,通过伺服加载系统控制加载板对填料施加静荷载和循环荷载,伺服系统的最高加载频率为 20 Hz,力的分辨精度为 1 N,可以根据不同试验的需要,更

换具有不同长度 L 的加载板。加载板受到的反作用力可以通过连接在伺服加载系统内的力传感器进行监测以确保系统的输出力与设定的力一致。

1.2 试验材料

1956 年, Schneebeli^[8]首次使用二维棒状相似土代替砂土作为填料进行了平面应变试验。而后, Ladanyi 等^[9]、Jenck 等^[10]许多学者也采用了类似材料来研究无黏性土。结果表明,如 Ladanyi 等^[9]所述,此种材料在较好地还原了无黏性土的一些重要特征的同时具有比真实砂土更为简单的力学特性,比较适合用于无黏性土的研究。本研究中将直径为 3, 4, 5 mm, 长度为 50 mm 的圆柱形铝棒按质量比 1:1:1 混合作为填料,填料重度为 22.4 kN/m³。通过休止角试验测得,铝棒相似土的内摩擦角 ϕ 为 21°。此值远小于真实砂土的 ϕ 值,但与 Jenck 等^[10]研究中的相似材料的 ϕ 值较为接近。

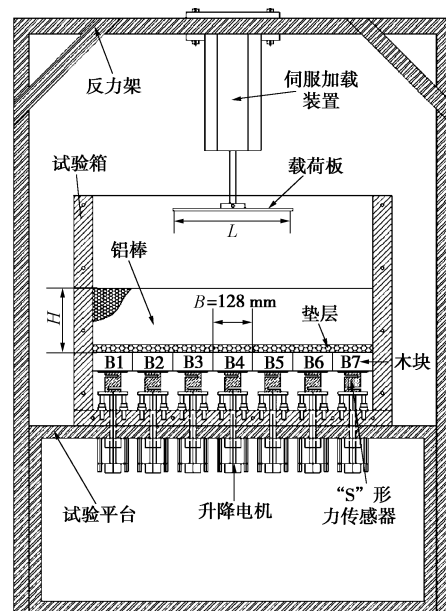


图 1 试验装置图

Fig. 1 Schematic of test apparatus

1.3 试验方案及过程

本研究中,将位于中间的木块 B4 作为 trapdoor, 填料高度 H 取为 trapdoor 宽度的两倍,即 260 mm。开始填料之前,需通过控制箱将 7 个木块调整至同一水平高度,以确保初始状态下没有“土拱”出现。随后,在底部均匀地铺设 5 层直径为 5 mm 的铝棒作为垫层以避免应力向木块上传递时出现应力集中。填料过程中,将混合好的铝棒相似土分层铺设,每层约 20 mm。铺好一层后,检查各木块上的传感器读数是否相近,以确保材料密度的均匀性。Trapdoor 试验主要分为

(1) 填料自重作用下的 Trapdoor 试验

该组试验中,刚开始时,trapdoor 每次下移约 0.2 mm,直至位移达到 2 mm,而后每次下移约 1.2 mm 直至总位移量达到 30 mm。

(2) 静载作用下的 Trapdoor 试验

填料铺设好后,按(1)中步骤将 trapdoor 下移 8 mm,而后通过加载板对填料表面施加 8 kPa 静载,保持 50 s 以保证荷载与变形稳定后卸载。卸载后仍等待 50 s 以确保稳定,之后按相同的步骤施加 10 kPa 及 12 kPa 荷载。试验加载过程如图 2 所示。该组试验分为两个试验,试验 JT1 中加载板长度 $L=3B$,JT2 中 $L=2B$,以研究加载面积对土拱效应的影响。

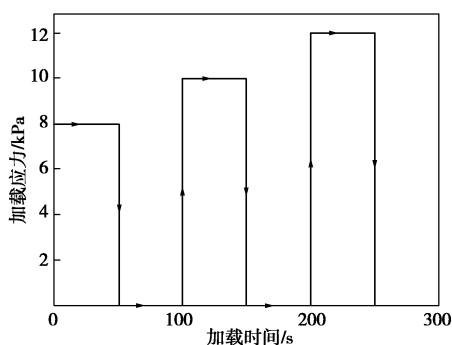
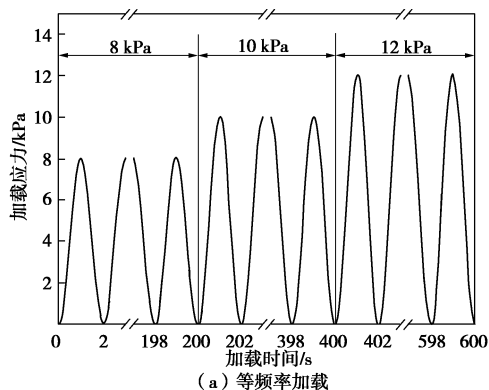


图2 静载试验加载过程

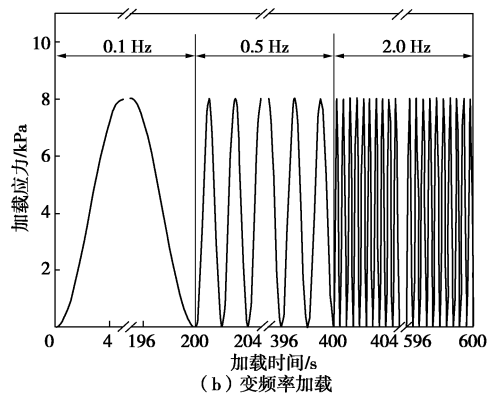
Fig. 2 Loading procedure of tests under static loading

(3) 循环荷载作用下的 Trapdoor 试验

填料铺设好后,按1.3节中步骤(1)将trapdoor下移8 mm,而后通过加载板对填料表面施加循环荷载,荷载波形符合三角函数。在等频率加载试验中,荷载频率为0.5 Hz,分三级加载,荷载峰值分别为8, 10, 12 kPa, 每级荷载持续200 s以保证填料在循环荷载作用下受力与变形状态达到稳定,如图3(a)所示。等频率加载试验分为两个试验,试验XT1中 $L=3B$,XT2中 $L=2B$;在变频率加载试验中(XT3),加载板长度 $L=3B$,荷载峰值为8 kPa,分3个频率(0.1, 0.5, 2.0 Hz)加载,每个频率的循环荷载同样持续200 s,如图3(b)所示。



(a) 等频率加载



(b) 变频率加载

图3 循环荷载试验加载过程

Fig. 3 Loading procedure of tests under cyclic loading

对应于每个 Trapdoor 试验,均完成一个相应的参照试验,以便于试验结果分析。参照试验的加载过程与相应的 Trapdoor 试验完全一致,但没有 trapdoor 位移的产生。静载参照试验编号为 JC1、JC2,循环荷载参照试验编号为 XC1、XC2、XC3。

2 试验结果与分析

本文采用 McNulty^[11]定义的土拱率作为指标评价土拱效应的强弱,其表达式为

$$\rho = \frac{\sigma_v}{\gamma H + q} \quad (1)$$

其中, σ_v 为作用在 trapdoor 上的平均竖向应力, γ 为土的重度, H 为土层厚度, q 为填土表面作用的均布超载。 ρ 值越小表明土拱效应越强。由于本次试验的超载非均布荷载,将按 1.3 中所述,通过参照试验来确定 $\gamma H + q$ 值。

文中将试验结果与现有理论成果进行了对比。需要指出的是,现有土拱率计算公式中的超载 q 实际表示作用在土体表面的均布荷载的大小,由于本研究中载荷板长度 ($L=2B, 3B$) 相对于 trapdoor 尺寸较大,为了便于使用前人公式,将试验中载荷板施加的局部荷载大小视为均布荷载值代入公式求得计算值。

2.1 填料自重作用下的 Trapdoor 试验

填料自重作用下的 Trapdoor 试验中土拱率 ρ 随 trapdoor 归一化位移 δ ($=\Delta/B$, 其中 Δ 为 trapdoor 竖向位移) 的变化曲线如图 4 所示。随着 trapdoor 竖向位移的增大,土拱率的变化可分为 4 个阶段:①初始拱;②最大拱;③应力恢复;④极限状态。这与 Iglesia 等^[12]的研究成果相吻合。图中的虚线分别表示最大拱和极限状态初始点对应的归一化位移,其值分别为 1.25% 和 10.55%。该结果与 Han 等^[13]的研究中给出的 1.5% 和 10% 接近。

图4中实线表示按照现有土拱率计算公式计算得到的土拱率大小。Terzaghi^[16]、Evans^[17]及Iglesia等^[12]的计算公式可以较好地预测极限状态下土拱率(即极限土拱率)的试验值;对于最大拱对应的土拱率,即最小土拱率,按照Iglesia等^[14]和Evans^[17]的计算公式求得的计算值与试验值较为接近。总体来看,本次试验研究中土拱率的试验值与Evans^[17]的计算值一致。

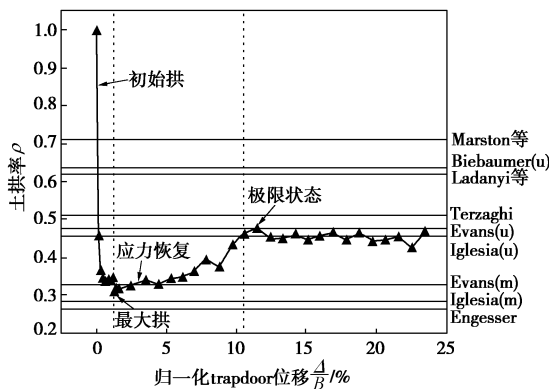


图4 土拱率与 trapdoor 归一化位移的关系

Fig. 4 Relationship between soil arching ratio and normalized displacement of trapdoor

2.2 参照试验

表1中列出了静载加载各阶段 trapdoor 上作用的应力值。循环荷载作用下的参照试验中 trapdoor 上应力的峰谷值随时间的变化如图5所示,图中曲线被分为3个阶段,分别对应3个不同的荷载大小或频率,曲线的峰谷值分别对应荷载的峰谷值。由于每个阶段开始时峰谷值均有较大波动,故取每个阶段最后50秒峰谷值的平均值作为其代表值,同见表1。表1中的应力值可作为土拱率计算中的 $\gamma H + q$ 值。

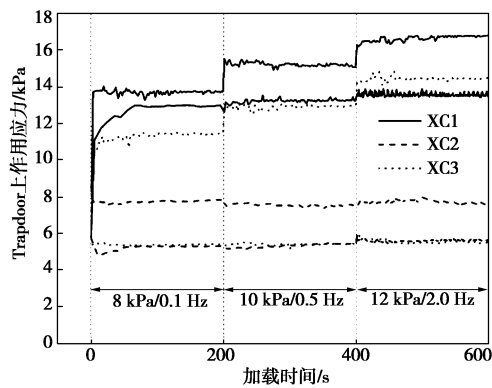


图5 循环荷载作用下的参照试验中 trapdoor 上作用应力的峰谷值

Fig. 5 Peak and valley values of pressure on trapdoor in reference tests under cyclic loading

表1 参照试验中不同阶段 Trapdoor 上的应力值
Table 1 Pressures on trapdoor at different stages in reference tests

试验编号	JC1/kPa	JC2/kPa	XC1/kPa	XC2/kPa	XC3/kPa
填料完毕	5.79	5.94	5.75	5.77	5.75
8 kPa (0.1 Hz)					
加载/峰值	13.27	11.38	13.57	11.44	12.96
卸载/谷值	5.56	5.48	5.51	5.41	5.31
10 kPa (0.5 Hz)					
加载/峰值	15.35	13.59	15.13	12.96	13.26
卸载/谷值	5.56	5.47	5.56	5.44	5.43
12 kPa (2.0 Hz)					
加载/峰值	16.49	14.88	16.80	14.46	13.54
卸载/谷值	5.46	5.46	5.53	5.53	5.60

2.3 静载作用下的 Trapdoor 试验

实际工程中土拱率的发展阶段一般对应于应力恢复阶段,故 Trapdoor 试验中 trapdoor 的位移取 8 mm (6.3%归一化位移)。静载作用下的 Trapdoor 试验中各木块上的应力分布及变化如图6所示。“8 mm 位移”表示 trapdoor 下降 8 mm 之后、荷载施加之前的应力分布状态。在该阶段,明显可以看出土拱效应已经发

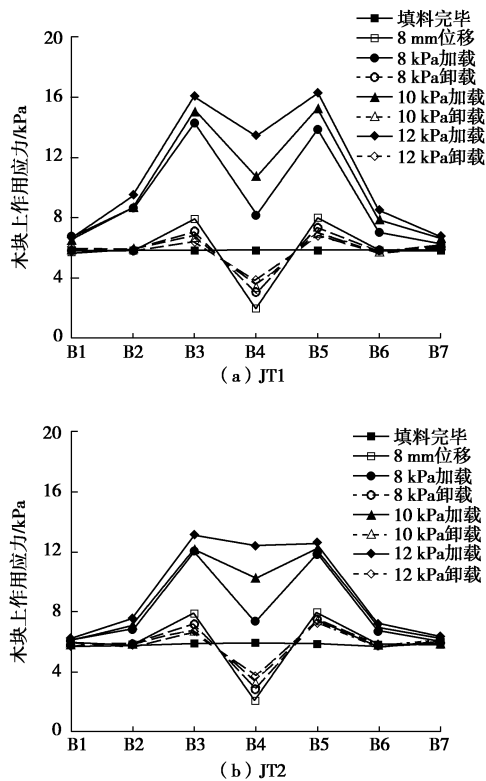


图6 静载作用下的 Trapdoor 试验中各木块上应力分布
Fig. 6 Pressure distribution on blocks in trapdoor tests under static loading

挥作用，trapdoor 上应力减小，其两侧木块上应力增大。随着静载的增大，木块上作用的应力均增大，但 trapdoor 及其两侧木块上的应力趋于一致，说明静载的施加削弱了土拱效应，且荷载值越大，削弱程度越明显。相同荷载水平下，试验 JT2 中 trapdoor 与其两侧木块上的应力较试验 JT1 中更为接近，说明荷载作用面积越小，土拱效应受到的影响越大。表 2 中给出了该组试验中不同阶段 trapdoor 上的应力大小。

表 2 Trapdoor 试验中不同阶段 trapdoor 上的应力值

试验编号	JT1/kPa	JT2/kPa	XT1/kPa	XT2/kPa	XT3/kPa
填料完毕	5.80	5.94	5.72	5.73	5.77
8 mm 位移	2.01	2.01	2.08	2.07	2.08
8 kPa (0.1 Hz) 加载/峰值	8.19	7.35	10.06	9.52	9.32
8 kPa (0.1 Hz) 卸载/谷值	3.03	2.87	3.80	4.11	3.48
10 kPa (0.5 Hz) 加载/峰值	10.69	10.22	12.01	11.21	10.37
10 kPa (0.5 Hz) 卸载/谷值	3.45	3.32	4.19	4.54	4.08
12 kPa (2.0 Hz) 加载/峰值	13.42	12.35	14.02	12.66	10.97
12 kPa (2.0 Hz) 卸载/谷值	3.85	3.74	4.50	4.84	4.47

图 7 所示分别为“8 mm 位移”(ρ_{trap})、每级荷载加载(ρ_{load})与卸载(ρ_{unload})阶段对应的土拱率的值，图中虚线为 ρ_{load} 与 ρ_{unload} 各自的拟合线。土拱效应本质上是由 trapdoor 上方“活动区”土体与“稳定区”土体之间的相对位移引起的。在加载阶段，由于土体的压缩，“活动区”与“稳定区”间的相对位移减小，土拱效应减弱，故 ρ_{load} 大于 ρ_{trap} 。卸载后，由于土体的回弹，“活动区”与“稳定区”间的相对位移有了一定程度的恢复，“土拱”强度也因此有了一定的恢复，故在同一荷载阶段， ρ_{unload} 小于 ρ_{load} 。 ρ_{unload} 和 ρ_{load} 均随荷载的增大而增大，此结果与前述 Trapdoor 上应力变化结果一致，表明当已被荷载削弱的“土拱”稳定后再次受到较之前更大的荷载作用时，“土拱”的强度会被进一步削弱。相同的荷载水平下，JT2 中的 ρ_{load} 略大于 JT1 中的 ρ_{load} ，说明荷载作用面积越小，其对土拱效应的削弱作用越明显。然而，在卸载阶段 JT1 与 JT2 中的 ρ_{unload} 几乎相等，土拱效应的强弱相同。

按已有成果中均布荷载作用下的极限土拱率的计算公式求得计算值，与试验值进行比较。发现除 Terzaghi^[16]和 Evans^[17]计算公式外，其他公式的计算结果与试验值相差较远。图 7 中给出了按 Terzaghi^[16]和 Evans^[17]计算公式求得的土拱率计算值。可以看到，两种公式计算出的土拱率均大于试验中加载阶段的土拱率值，其中按照 Evans^[17]公式的计算值更为接近试

验值。

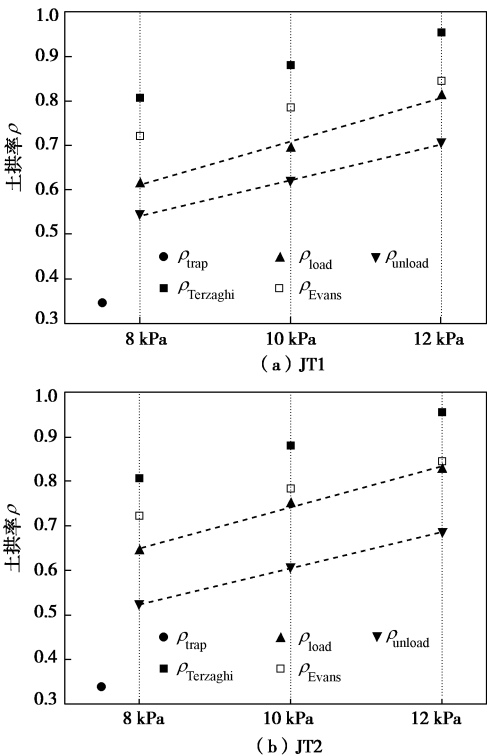


图 7 静载作用下 Trapdoor 试验中土拱率的变化
Fig. 7 Change of arching ratios in trapdoor tests under static loading

2.4 循环荷载作用下的 Trapdoor 试验

图 8 所示为循环荷载作用下的 Trapdoor 试验中 trapdoor 上作用应力的峰谷值变化。与参照试验情况相同，3 个试验中应力的峰值均被分为 3 个阶段。在每个阶段开始时，trapdoor 上的应力值迅速增大，而后逐渐趋于稳定。3 个试验中应力谷值的变化趋势与峰值相同，但变化幅度明显较小。将各阶段最后 50s 中应力峰谷值的平均值列于表 2。

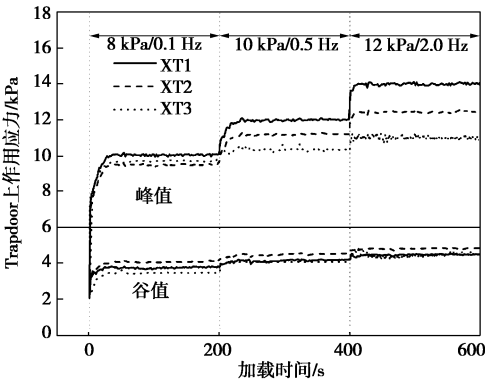


图 8 循环荷载作用下的 Trapdoor 试验中 trapdoor 上作用应力的峰谷值
Fig. 8 Peak and valley values of pressure on trapdoor in trapdoor tests under cyclic loading

将表2中各阶段应力峰谷值的平均值除以表1中相应的应力峰谷值的平均值作为循环荷载作用下各阶段的峰值土拱率(ρ_{peak})及谷值土拱率(ρ_{valley}),如图10所示,图中实线为 ρ_{peak} 和 ρ_{valley} 各自的拟合曲线。作为对比,图10中同时给出了 ρ_{unload} , ρ_{load} 及其拟合曲线。与 ρ_{unload} 和 ρ_{load} 的大小关系相似,相同荷载水平下, $\rho_{\text{peak}} > \rho_{\text{valley}}$,说明峰值荷载作用下的土拱效应比相应的谷值荷载作用下的“土拱效应”弱。且随着荷载大小及频率的增大, ρ_{peak} 与 ρ_{valley} 均增大,说明更高的循环荷载幅值与频率对土拱效应的削弱程度更大。然而, ρ_{peak} 与 ρ_{valley} 之间的差值明显小于 ρ_{unload} 和 ρ_{load} 的差值,XT2及XT3试验结束时 ρ_{peak} 与 ρ_{valley} 甚至几乎相等,说明循环荷载对于土拱效应的削弱与静载相比更为彻底,荷载从峰值降为零后,土拱效应只有较小程度的恢复。总体而言,每级荷载下均有关系: $\rho_{\text{peak}} > \rho_{\text{load}}$, $\rho_{\text{valley}} > \rho_{\text{unload}}$,说明循环荷载对土拱效应的影响较静载更大。但从拟合曲线的斜率来看,土拱效应的强弱对静荷载幅值的增加更为敏感,幅值越大,循环荷载与静载下的土拱效应的强弱越接近。

图9中给出了按Terzaghi^[16]和Evans^[17]公式求得的均布荷载作用下极限土拱率的计算值。可以看到,XT1中,按Evans^[17]公式求得的计算值与峰值荷载作用下的土拱率试验值基本一致;而XT2和XT3中,峰值荷载作用下的土拱率试验值基本位于按Evans^[17]与Terzaghi^[16]公式求得的计算值之间。

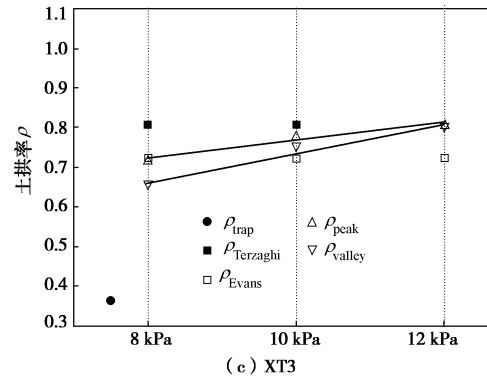
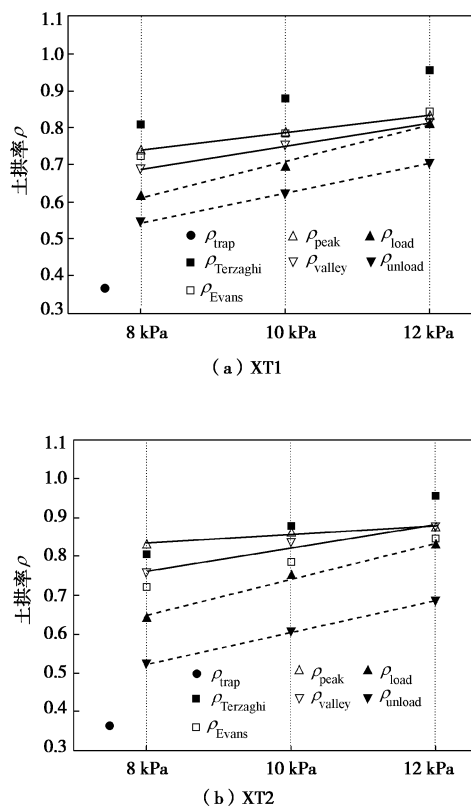


图9 循环荷载作用下的 Trapdoor 试验中土拱率的变化

Fig. 9 Change of soil arching ratios in trapdoor tests under cyclic loading

为了定量地比较动静荷载对土拱效应的影响,本文定义了两个比例系数 α 和 β ,其表达式为

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{peak}}}{\rho_{\text{load}}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\rho_{\text{valley}}}{\rho_{\text{unload}}} \quad (3)$$

$\alpha > 1$ 和 $\beta > 1$ 分别表示在同一荷载阶段荷载峰值和谷值的作用下,循环荷载对土拱效应的削弱作用强于静荷载。图10给出了 α 和 β 随荷载大小及频率的变化。需要指出的是,在计算XT3对应的比例系数时, ρ_{load} 和 ρ_{unload} 对应的是8 kPa静载作用下的Trapdoor试验的结果。图10中所有的 α 和 β 值均大于1,且均随荷载值的增大而减小,这些结果与前述土拱率的变化结果一致,说明循环荷载相对于静载对土拱效应的削弱程度更大,且随着荷载值的增大,两者间的差异减小。但随着荷载频率的增大,两者间的差异增大。图中 β 值均大于相应的 α 值,说明峰值荷载作用下循环荷载与静荷载对土拱效应削弱程度的差异大于零荷载作用下两者间的差异。

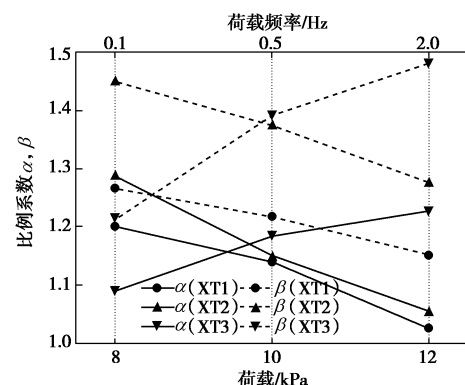


图10 α , β 随荷载大小及荷载频率的变化

Fig. 10 Change of α and β with magnitude and frequency of load

3 结 论

本文使用铝棒相似土代替砂土作为填料,通过自

制的模型试验装置进行了土体自重、表面静荷载及循环荷载作用下的平面应变 Trapdoor 试验, 对比研究了不同加载条件对土拱效应的影响, 并将试验所得结果与前人的研究成果进行了对比, 得到了以下结论:

(1) 在土体自重作用下, 土拱率 ρ 随 trapdoor 竖向位移 δ 的变化曲线分为初始拱、最大拱、应力恢复和极限状态 4 个阶段。最大拱和极限状态初始点两个特征点对应的 δ 分别为 1.25% 和 10.55%。

(2) 静荷载和循环荷载的施加均会削弱已有土拱效应, 且荷载幅值越大, 其对土拱效应的削弱作用越强。在加载阶段 (或峰值荷载作用下) 的土拱效应弱于卸载阶段 (或谷值荷载作用下) 的土拱效应。相同大小的荷载作用下, 荷载作用面积越小, 荷载频率越高, 其对土拱效应的削弱越明显。

(3) 循环荷载对土拱效应的削弱强于静荷载, 两者间的差异随荷载幅值的增大而减小, 随荷载频率的增大而增大。峰值荷载作用下循环荷载与静荷载对土拱效应削弱程度的差异小于零荷载作用下两者间的差异。

(4) Evans^[17]公式可以较好地用于土体自重荷载及静载作用下的 Trapdoor 试验中土拱率的预测。然而, 对于循环荷载作用下的情况, 还有待对计算公式进行进一步地改进。

参考文献:

- [1] FELD J. Early history and bibliography of soil mechanics[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1948: 1 - 7.
- [2] TIEN H J. A literature study of the arching effect[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [3] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of the International Conference of Soil Mechanics. Harvard University, Cambridge, 1936.
- [4] BHANDARI A. Micromechanical analysis of geosynthetic-soil interaction under cyclic loading[D]. Lawrence: The University of Kansas, 2010.
- [5] 徐朝阳, 周峰, 吕惠, 等. 动荷载下桩承式路堤的承载特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(11): 3231 - 3239. (XU Chao-yang, ZHOU Feng, LÜ Hui, et al. Bearing behavior and mechanism of pile-supported embankment under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(11): 3231 - 3239. (in Chinese))
- [6] JENCK O, GOMBE G, EMERIAULT A. Arching effect in a granular soil submitted to monotonic or cyclic loading: a kinematic analysis[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Perth, 2014.
- [7] 赖汉江, 郑俊杰, 崔明娟. 循环荷载下低填方桩承式路堤动力响应分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3252 - 3258. (LAI Han-jiang, ZHENG Jun-jie, CUI Ming-juan. Dynamic response analysis of a low-filled piled embankment under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3252 - 3258. (in Chinese))
- [8] SCHNEEBELI G. Une mécanique pour les terres sans cohésion[C]// Comptes Rendus des sÉances de l'Académie des Sciences. Paris, 1956. (SCHNEEBELI G. An analogy mechanism for cohesionless soil[C]// Proceedings of the 7th Session of the Academy of the Sciences. Paris, 1956. (in French))
- [9] LADANYI B, HOYAUX B. A study of the trap-door problem in a granular mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1969, **6**(1): 1 - 14.
- [10] JENCK O, DIAS D, KASTNER R. Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(3): 295 - 305.
- [11] MCNULTY J W. An experimental study of arching in sand[D]. Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1965.
- [12] IGLESIA G R, EINSTEIN H H, WHITMAN R V. Investigation of soil arching with centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(2): 04013005-1-13.
- [13] HAN J, WANG F, AL-NADDAF M, et al. Progressive development of two-dimensional soil arching with displacement[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(12): 04017112-1-12
- [14] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[M]. Iowa: Iowa Engineering, Experiment Station, 1913.
- [15] BIERBAUMER A. Die dimensionierung des tunnel mauerwerks[M]. Leipzig: Engelmann, 1913. (BIERBAUMER A. The dimensioning of the tunnel masonry[M]. Leipzig: Engelmann, 1913. (in German))
- [16] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [17] EVANS C H. An examination of arching in granular soils[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1983.