

受静载和循环荷载作用的基础下加筋挡墙工作性能分析

肖成志^{1,2}, 王嘉勇¹, 周霞¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 基于受静载和循环荷载作用的基础下加筋挡墙模型试验, 综合对比分析了基础位置、荷载大小、频率和循环次数等因素对加筋挡墙力学与变形性能的影响。试验结果表明: (1) 以基础极限承载力为标准, 确定基础最佳偏移距离为 $0.3H$ (墙高); (2) 基础沉降和挡墙水平位移随荷载、频率和循环次数的增加而增加, 当基础受静载且达到极限承载力前, 沉降与墙高比均小于 2%, 挡墙水平位移与墙高比均小于 1%; 当基础受循环荷载时, 增加循环荷载水平和频率使初始阶段基础沉降和挡墙水平位移增加明显, 但随循环次数增加而变形收敛; (3) 紧邻基础下方的筋材应变显著高于其他层, 且循环荷载水平越高, 循环次数增多时筋材应变增幅显著; (4) 静载时挡墙破坏随基础偏移距离增加而由初始顶层面板被挤出, 逐渐过渡到破坏面沿基础边缘并向挡墙深部发展的剪切破坏为主; 当基础受循环荷载且频率较小时, 顶层面板以挤出变形为主, 增加荷载水平和频率, 挡墙以中部面板挤出破坏为主。

关键词: 土力学; 加筋挡土墙; 土工格栅; 静动载特性; 极限承载力; 基础

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)06 - 1542 - 09

Performance of geogrid-reinforced soil retaining walls subjected to static and cyclic footing loadings

XIAO Chengzhi^{1, 2}, WANG Jiayong¹, ZHOU Xia¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Technology and Research Center of Civil Engineering, Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The model tests of geogrid-reinforced soil retaining walls(GRSRW) subjected to the static and cyclic footing loadings were carried out to investigate the mechanism and deformation characteristics of GRSRW considering the factors such as the location of footing, the magnitude of the load, the frequency of load and the numbers of loading cycles. The optimum of offset, $0.3H$ (H , height of wall), was determined based on the analysis of ultimate bearing capacity of the footing on the top of the retaining wall. The settlement of the footing and the lateral deformation of geogrid-reinforced soil walls increase with the increase of the magnitude of loading, the frequency and the number of loading cycles. When the static load applied on the footing is less than the ultimate bearing capacity, the ratio of the settlement to the wall height is less than 2% and the ratio of the horizontal deformation to the wall height is always less than 1%. When the cyclic loading is applied on the top surface of retaining walls, the settlement and the horizontal deformation increase remarkably compared with those under the

收稿日期: 2016 - 08 - 03; **修回日期:** 2016 - 09 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909032); 河北省自然科学基金资助项目(E2014202038)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 50909032) and National Natural Science Foundation of Hebei Province(Grant No. E2014202038)

作者简介: 肖成志(1976 -), 男, 博士, 1999年毕业于包头钢铁学院采矿工程专业, 现任教授, 主要从事土工合成材料及其加筋土机制方面的研究工作。E-mail: chengzhixiao@hotmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1002

same level of static loads. With the increase of cyclic loads and frequency, the settlement and the horizontal deformation increase quickly at the very beginning and then the increasing slows down as the number of cycles increase. The strains in geogrids for the uppermost layer which are generally greater than those in the other layers, increase significantly when the higher cyclic loads with larger cyclic numbers are applied. The failure mode of the retaining walls under the static loading and lower cyclic loads with low frequency is that the top panel blocks is squeezed out. The failure surface occurs at the verge of foundation and then develops deeper when the offset of the footing increases continually. The blocks in the middle of retaining wall tend to be squeezed out when the cyclic loads and the loading frequency increase.

Key words: soil mechanics; geogrid-reinforced soil retaining wall; geogrids; static and cyclic loads; ultimate bearing capacity; foundation

1 引言

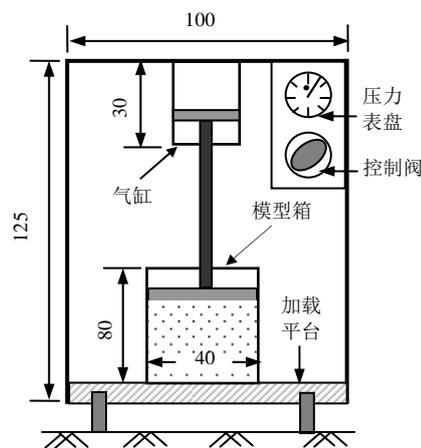
加筋挡墙结构依靠其良好的力学与变形特性、施工方便高效和外部美观等特点被广泛用于道路工程、机场高边坡和堤防工程领域^[1-2]。近些年来围绕加筋挡墙静载和动载特性进行了大量的试验与理论分析, M. C. Alfaro 等^[3-4]基于室内试验分析了静载作用时加筋挡墙变形及土压力分布形式; 陈建峰等^[5-6]结合离心机试验和数值分析对软弱地基上刚/柔性面板加筋挡墙工程特性进行分析, 指出类似结构可行的设计计算方法。另外, 挡墙回填土是影响加筋结构稳定性的重要因素, 汪恩良等^[7-8]考虑冻土在温度效应下的加筋挡墙变形, 指出冻融效应是影响筋材受力和挡墙变形的重要因素, 为高寒地区加筋结构设计提供了有益的指导。在动载分析方面, 杨果林等^[9]试验模拟加筋土挡墙铁路路基, 研究了动载水平和频率变化对挡墙的水平、竖向加速度及位移值等的影响, 指出荷载大小和频率是加筋挡墙变形与破坏的重要因素。D. Leshchinsky 等^[10]采用相似比试验对新型土工格室加筋挡墙进行振动台试验, 指出土工格室加筋挡墙具有很好的抗震效果。目前, 工程上采用新型加筋柔性桥台支撑桥台基础及其桥梁上部结构荷载, 该类挡墙支撑结构具有取代为获得桥台基础足够支撑承载能力而设桩基础的可能, 并在减少桥头跳车方面作用明显^[11]。相比传统加筋支挡结构, 这类加筋挡墙主要在靠近面板附近承受较大的来自桥台基础所传递的桥梁上部荷载, 这对加筋桥台结构的工作性能具有重要影响, C. Z. Xiao 等^[12-13]针对受静载作用的基础下挡墙所表现出承载与变形特点进行了试验分析, 初步探讨了顶部基础位置、筋材长度和面板连接方式等对挡墙性能的影响。然而, 关于此类结构的动载特性的分析很少, 且基于此类加筋挡墙结构长期承受来自上部结构交通循环荷载作用的现实要求, 本文拟对受静载和循

环荷载作用的基础下加筋挡墙的工作性能开展模型试验分析, 重点研究循环荷载水平、频率和循环次数等因素对加筋挡墙变形和筋材应变的影响。

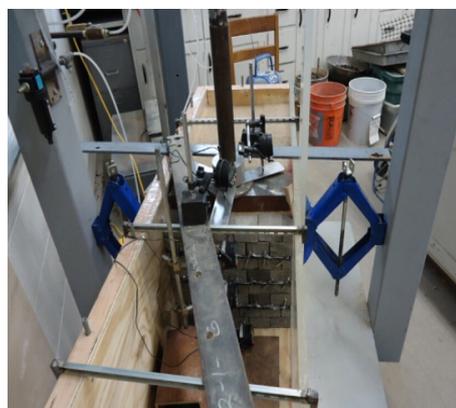
2 加筋挡土墙模型试验概况

2.1 试验设备

加筋挡墙试验基于平面应变设置, 其装置由加载平台、模型箱、加载板和位移计等组成, 如图 1 所示。



(a) 加载平台(单位: cm)



(b) 试验图片

图 1 加筋挡土墙试验平台与装置图

Fig.1 Test device for geogrid reinforced soil wall

图 1 中挡墙顶部的基础荷载采用钢板加载模拟，其厚 2.5 cm、宽 $B_f = 15$ cm、长度为 39.5 cm。试验加载通过加压气缸和压力控制阀控制。试验模型箱采用木材和钢化玻璃制成，通过一侧钢化玻璃可以观察顶部荷载作用下加筋挡墙的变形与破坏情况，模型箱内部尺寸为：1.5(长)，0.4(宽)和 0.8 m(高)。为了减少箱子侧面摩擦效应，在非钢化玻璃一侧粘贴固定 1.5 mm 厚的透明塑料薄片。同时，为了确保模型箱的刚性，箱体两侧采用一对千斤顶对称支撑，如图 1(b)中所示。

2.2 回填土

加筋模型挡墙采用干净河砂填筑，其颗粒级配曲线如图 2 所示。由图中可知： $d_{10} = 0.26$ mm， $d_{30} = 0.41$ mm， $d_{60} = 0.70$ mm。砂土不均匀系数 $C_u = 2.69$ ，曲率系数 $C_c = 0.93$ 。砂土的最大与最小干重度分别为 18.75 和 16.29 kN/m^3 。砂土相对密度为 70%，按 2 cm 分层填压，土体内摩擦角 $\phi = 33.6^\circ$ 。

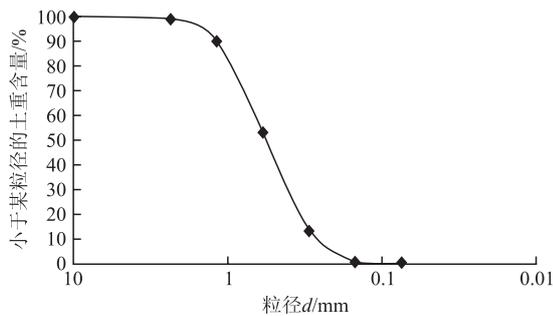


图 2 试验回填河砂颗粒级配曲线

Fig.2 Grain size distribution of river sand for back filling

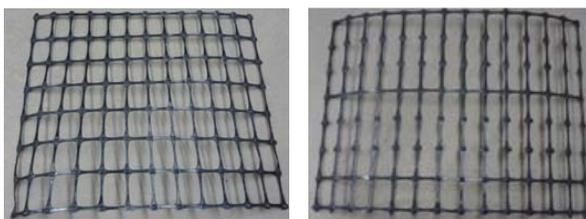
2.3 加筋筋材

加筋筋材采用 Tensar BX - 1100 双向格栅，其工程特性和规格如表 1 所示。为适当降低格栅强度，将双向格栅间隔去除两行横向肋条，如图 3 所示。

表 1 土工格栅工程特性参数

Table 1 Engineering properties of bilateral geogrids

格栅类型	厚度/mm	网孔/(cm×cm)	抗拉强度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	2%应变强度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	5%应变强度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
Tensar BX - 1100	0.76	4×4	12.4	4.1	8.5



(a) 原双向格栅 (b) 试验加工后格栅

图 3 模型试验用加筋筋材

Fig.3 Reinforcement used in tests

2.4 加筋挡土墙面板以及筋材与面板连接模式

试验加筋挡墙面板采用普通混凝土模块，其高、宽和长分别为 4.5，5.0 和 7.5 cm，如图 4(a)所示。另外，为了模拟实际工程中面板与筋材之间的连接，格栅和面板模块之间采用钢棒机械连接，以此确保筋材不会从紧邻两层的模块面板间被拉出，如图 4(b)所示。



(a) 挡墙面板 (b) 筋材与面板连接方式

图 4 加筋挡墙面板及其与筋材连接方式

Fig.4 Facing blocks and connection mode

2.5 试验方案

为了分析受静载和循环荷载作用的基础下挡墙性能，模型试验分 2 个阶段进行：(1) 确定基础距离面板前缘的最佳偏移距离 D_{opt} ：以挡墙顶部基础极限承载力为指标，改变加筋挡墙高度 H 和基础偏移距离 D 来分析加筋挡墙工作性能，如图 5 所示。挡墙高 H 取 36 和 54 cm，长为 100 cm，筋材铺设层数 n 均为 3 层，筋材长 $L = 0.7H$ ；(2) 基于最佳偏移距离 D_{opt} ，改变基础所受循环荷载 P 大小和频率，分析循环荷载下加筋挡墙的动载特性。试验监测面板不同高度 z 处的水平位移、筋材应变和基础沉降。具体试验方案和试验组数如表 2 所示。

第一阶段基础受静载试验中持续加载直至加筋挡墙破坏，并定义破坏前基础承受的荷载为加筋挡墙顶部基础的极限承载力 P_{ult} 。

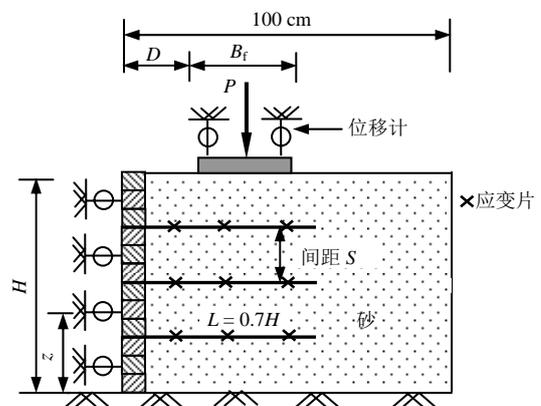


图 5 模型试验示意图

Fig.5 Diagram of model test

表 2 加筋挡土墙模型试验方案

Table 2 Test plan of retaining wall reinforced by geogrids

试验描述	荷载 P/kPa	频率 f/Hz	H/cm	D/H	试验组数
确定最优的偏移距离 D_{opt} 值	-	-	36	0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8	6
			54	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8	6
动载特性	50~100	0.25, 0.5, 1.0	36	D_{opt}	3
	50~150				3
	50~200				2

3 试验结果分析

3.1 挡墙顶部基础最佳偏移距离 D_{opt}

加筋挡墙顶部基础极限承载力 P_{ult} 随偏移距离 D 的变化趋势如图 6 所示。由图可知，当加筋层数和偏移距离 D 相同时，模型挡墙高度 H 越大，基础极限承载力越小，且 $H = 36 \text{ cm}$ 时最大极限承载力约为 $H = 54 \text{ cm}$ 时的 1.25 倍，主要原因是由于挡墙高度增加而加筋层数相同时，筋材层间距变大导致加筋效果减弱；对于 2 种高度挡墙，随偏移距离 D 增加，基础极限承载力均呈现先增加后减小的趋势，即基础越靠近加筋挡墙面板，则极限承载力明显减少；当偏移距离 D 持续增大时极限承载力 P_{ult} 显著提高，当 $D = 0.3H$ 时 P_{ult} 达到最大值；此后，当 D 继续增加时基础极限承载力 P_{ult} 明显减少，且当 $D \geq 0.6H$ 时，基础加载位置从加筋区向非加筋区过渡并最终完全处于非加筋区，由此基础极限承载力趋于稳定，与砂土地基承载力大小相同。综合上述，这里选取基础最佳偏移距离 $D = 0.3H$ 。

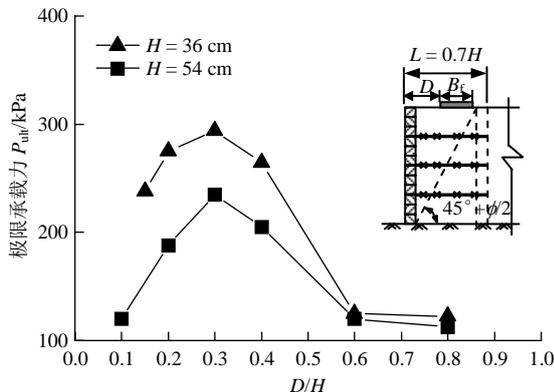


图 6 基础偏移距离 D 对其极限承载力影响

Fig.6 Ultimate bearing capacity of footing varied with offset D

3.2 静载作用下加筋挡墙顶部基础沉降变化规律

加筋挡墙顶部基础沉降值由放置于基础上的 2 个位移计监测，并取二者平均值绘制了基底压力与

沉降关系曲线如图 7 所示。由图可知，2 种高度模型加筋挡墙，对于不同的基础作用位置 D ，当基础达到极限承载力之前，沉降比 s/H (基础沉降 s 与挡墙高度 H 之比) 均随基底压力增大呈现近似线性增加趋势，且加载破坏前沉降比 s/H 均小于 2%，表明挡墙在顶部承受基础荷载作用时具有较好的控制沉降能力。

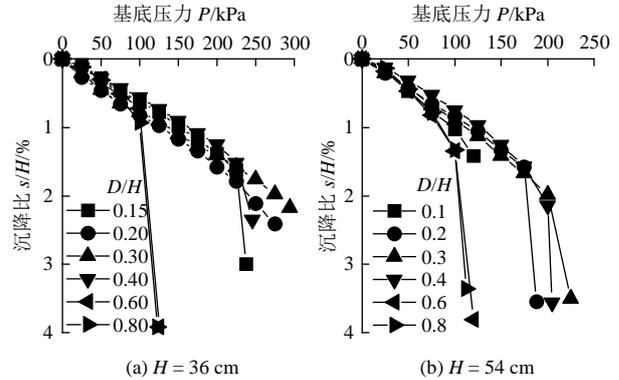


图 7 基底压力与基础沉降比的关系曲线

Fig.7 Relationship of pressure and settlement ratio of footing

当基底压力 P 和 D/H 相同时，挡墙较低时，沉降较小，以 $D/H = 0.3$ 和 $P = 200 \text{ kPa}$ 为例，图 7(b) 中较高挡墙的沉降比为图 7(a) 中较低挡墙的 1.42 倍。此外，对于同一高度模型加筋挡墙如 $H = 54 \text{ cm}$ ，当顶部基础离挡墙面板很近如 $D/H = 0.1$ 、基础位于加筋与非加筋过渡区如 $D/H = 0.6$ 或非加筋区如 $D/H = 0.8$ 时，沉降变化明显，而当 D/H 为 0.2, 0.3 和 0.4 时，即基础位于挡墙加筋区域中间部分时，在相同基底压力下，沉降明显减少，表明基础位于该区域具有更好的沉降控制能力，且承载力提高明显。

3.3 受静载作用的基础下加筋挡墙面板水平位移

为了分析加筋挡墙面板的水平位移，沿挡墙高度方向设置 3 个 ($H = 36 \text{ cm}$) 或 4 个 ($H = 54 \text{ cm}$) 监测点来监测不同高度 (z) 处水平位移 (d) 的变化，结果如图 8 所示。由图可知，不同高度加筋模型挡墙在顶部基础受静载作用时，面板水平位移呈现相同变化趋势，即面板水平位移随着基底压力的增加而逐步增加，当基础偏移距离 D 较小如 $D = 0.15H$ 或 $0.1H$ 时，如图 8(a), (b) 所示，挡墙顶部面板的水平位移明显要大于挡墙中、下部的位移，这明显与传统柔性面板加筋挡墙的水平位移在挡墙中间部位大而底部和顶部相对较小的变化特点不同，表明加筋挡墙在顶部基础受载时显著影响面板的水平位移变化规律。究其原因是顶层面板单元主要靠层间摩擦力来

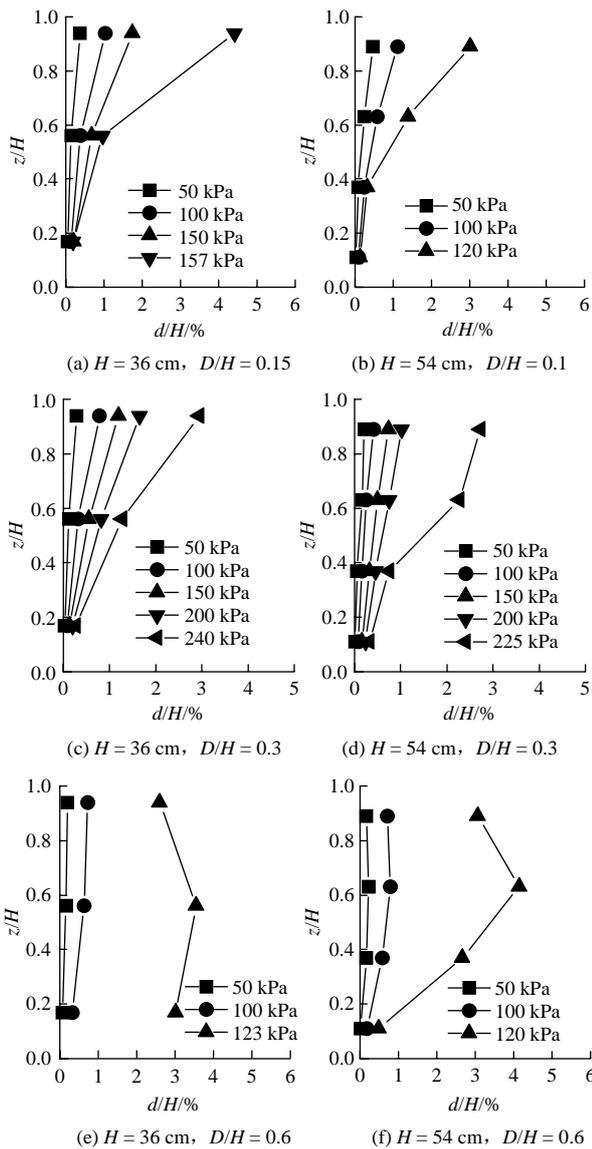


图8 挡墙面板水平位移随高度和基础偏移距离的影响
Fig.8 Lateral deformation of geogrid-reinforced soil walls varied with wall height and offset distance of footing

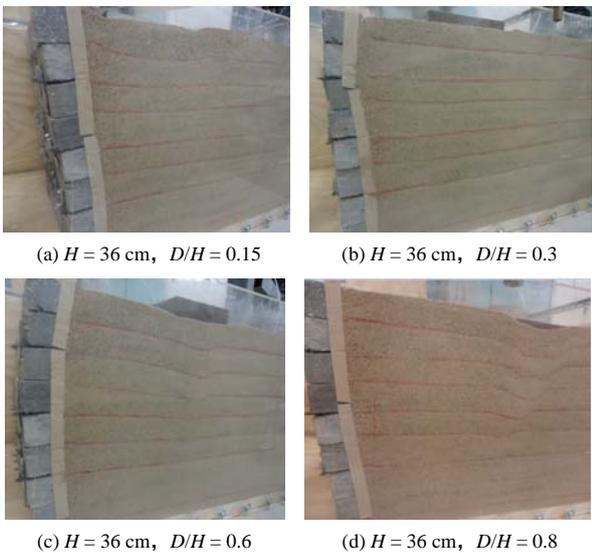


图9 偏移距离对挡墙面板水平位移的影响

Fig.9 Effect of offset distance on horizontal deformation of panel

抵抗后部压力，当基础离面板后缘较近时，因顶层面板单元自身重量小而不能提供足够层间摩擦力，故此时挡墙破坏主要以顶层面板被挤出为主，如图9(a)所示，这也解释了 D 较小时基础极限承载力较低的原因。

随着基础远离挡墙面板，如 $D/H = 0.6$ 时，如图8(e)和(f)所示，基底压力对挡墙面板的影响逐步向挡墙中、下部发展，此时加筋挡墙面板的水平位移与常规加筋挡墙水平位移变化规律趋于相同，即挡墙中部水平位移最大，呈“鼓肚”型，如图9(c)和(d)所示。总体上，加筋挡墙面板水平位移与高度的比值 d/H 在试验加载达到基础极限承载力前均小于1%，且 D/H 越小， d/H 达到1%所需的荷载越小。

由图9可知，静载且基础偏移距离较小时挡墙破坏以顶层面板模块被挤出为主，随着基础偏移距离增加，破坏面逐渐过渡到沿基础边缘并向挡墙深部发展的剪切破坏为主，由此导致挡墙中部水平位移变大。

3.4 顶部基础受循环荷载时加筋挡墙性能分析

为了分析受循环荷载作用的基础下加筋挡墙的工作性能，基于第一阶段试验确定当基础距挡墙面板前缘距离 $D = 0.3H$ 时极限承载力最大。因此，如表2所示，取模型墙高 $H = 36 \text{ cm}$ ，筋材长 $L = 0.7H$ ，层数为3层，基础最佳偏移距离 $D_{\text{opt}} = 0.3H$ ，在基础上施加3种循环荷载 P ，即 $50 \sim 100 (P_{\text{max}} = 100 \text{ kPa})$ ， $50 \sim 150 (P_{\text{max}} = 150 \text{ kPa})$ 和 $50 \sim 200 \text{ kPa} (P_{\text{max}} = 200 \text{ kPa})$ ，荷载对应频率 $f = 0.25, 0.5$ 和 1.0 Hz ，每组试验循环次数均达 10^5 次，并监测基础的沉降、加筋挡墙面板水平位移和筋材应变。

3.4.1 循环荷载作用下挡墙顶部基础的沉降变化

针对不同等级和频率的循环荷载，每组试验采用2个位移计监测基础沉降并取平均值，获得如图10所示沉降比 (s/H) 随循环次数的变化曲线，其中水平轴循环次数采用对数坐标。由图可知，在同等级别荷载下，随着循环次数增多和频率增大，基础沉降增加显著，如 $P_{\text{max}} = 100 \text{ kPa}$ 时，循环次数为 10^5 次时，频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$ 对应累计沉降约为 $f = 0.25 \text{ Hz}$ 时的1.75倍；当频率和循环次数相同时，循环荷载最大值越高，沉降增加明显，如取 $P_{\text{max}} = 200 \text{ kPa}$ 和 $f = 0.5 \text{ Hz}$ ，当循环次数达到 10^5 次时，其沉降约为 $P_{\text{max}} = 100 \text{ kPa}$ 和 $f = 0.5 \text{ Hz}$ 时的3倍，而且与图7中静载作用时相比，在循环荷载作用下顶部基础沉降明显要大于同等静止荷载时。另外，各级循环荷载作用下，当循环次数持续增加时，初始阶段沉降增加明显，但后续沉降曲线随循环次数增加趋势变缓，此时表明加筋挡墙基础受循环荷载以压实砂土为主，基础沉降增幅明显减缓。

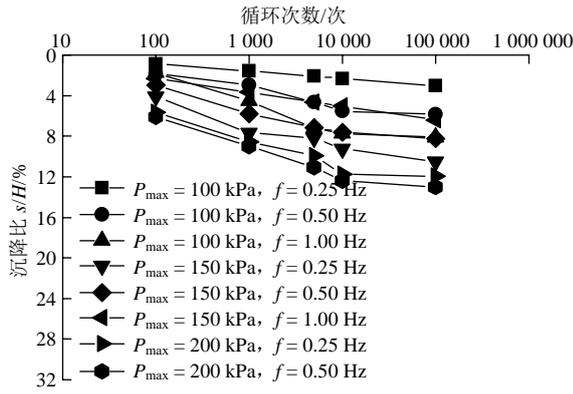
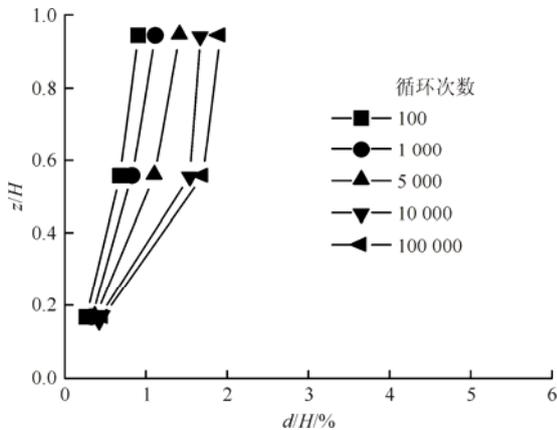


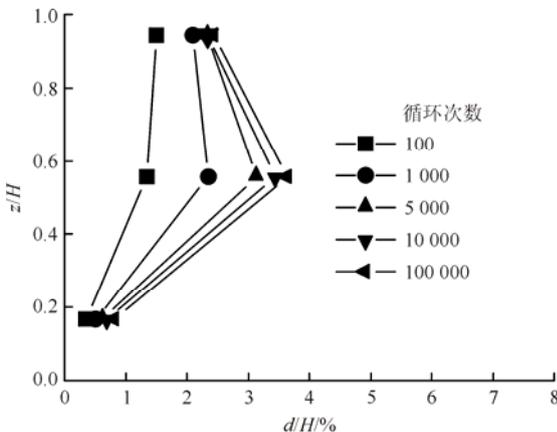
图 10 循环荷载下挡墙顶部基础沉降随循环次数的变化
Fig.10 Variation of settlement of footing located at top of retaining wall with cycle numbers of loading

3.4.2 循环荷载时挡墙面板水平位移变化规律

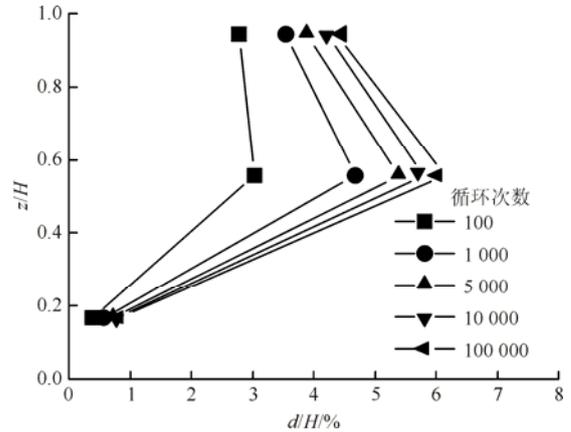
图 11 为频率相同时循环荷载大小对挡墙面板水平位移的影响。由图可知，维持荷载频率为 0.5 Hz，当荷载较小时，如 $P_{max} = 100 \text{ kPa}$ ，约为静载时基础极限承载力 P_{ult} 的 1/3，此时面板水平位移较小，与图 8(c)中静止荷载作用下变化趋势类似，即挡墙上部位移略大，下部最小，随着循环次数增加，面板水平位移增加不明显。当循环荷载 P_{max} 增加到 150



(a) $P_{max} = 100 \text{ kPa}, f = 0.5 \text{ Hz}$



(b) $P_{max} = 150 \text{ kPa}, f = 0.5 \text{ Hz}$

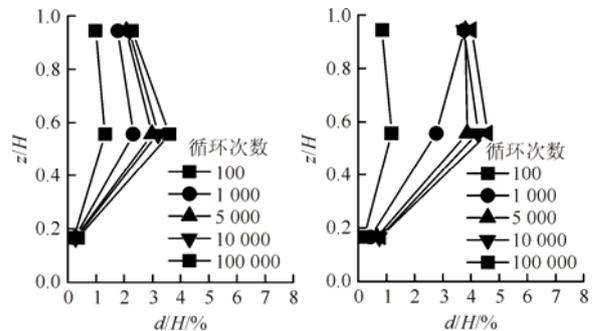


(c) $P_{max} = 200 \text{ kPa}, f = 0.5 \text{ Hz}$

图 11 相同频率时挡墙面板水平位移随荷载等级大小的变化
Fig.11 Effect of magnitude of cyclic loads with the same frequency on lateral deformation of panel of model wall

和 200 kPa 时，即最大值 P_{max} 分别约为 $P_{ult}/2$ 和 $2P_{ult}/3$ ，如图 11(b)和(c)所示，相同循环次数下，面板水平位移显著增加，且明显要比静载作用下的水平位移大，当循环次数为 10^5 次时， $P_{max} = 200 \text{ kPa}$ 时挡墙中部水平位移分别约为 100 和 150 kPa 时的 3.2 和 1.45 倍。而且随着循环次数增加，荷载对面板水平位移的影响逐渐移向挡墙中、下部，对顶部面板影响明显减弱，且随循环次数增加，水平位移增长渐趋减缓，呈现收敛趋势。

另外，这里结合图 11(b)和 12，在荷载最大值 P_{max} 相同时，分析频率变化对面板水平位移的影响。由图可知，当循环次数相同，随着频率增加，面板水平位移增加明显，尤其初始阶段水平位移增加较快，当荷载循环次数超过 5 000 以后，增长趋势明显变缓，表明柔性面板挡墙具有较好的抵抗变形的能力。



(a) $P_{max} = 150 \text{ kPa}, f = 0.25 \text{ Hz}$

(b) $P_{max} = 150 \text{ kPa}, f = 1.0 \text{ Hz}$

图 12 不同频率循环荷载作用下挡墙面板水平位移变化
Fig.12 Lateral deformation of wall panel varied with different frequency of loading

3.4.3 筋材应变

模型加筋试验时筋材共 3 层，位于由挡墙底部

向上高 $h = 0.25H, 0.50H$ 和 $0.75H$ 处, 如图 13(a) 所示。每层筋材选取距面板外缘不同距离 l 的 3 个测点, 如图 13(b) 所示。基础受循环荷载时 3 层筋材应变变化如图 14 和 15 所示。

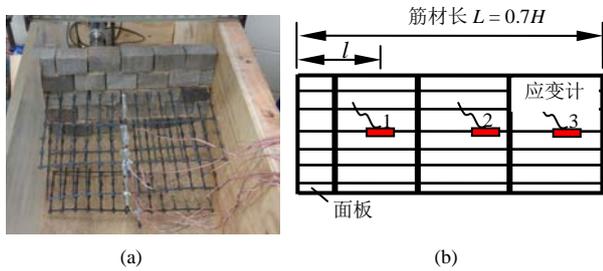


图 13 格栅应变测试布置图

Fig.13 Setup strain gauges on geogrids

由图 14 可知, 当荷载频率相同时, 荷载水平越高, 筋材应变越大, 而且筋材应变随着循环次数增加而增大, 由于顶部基础距离面板偏移距离 $D = 0.3H$, 基础作用范围主要位于远离面板的第 2 和第 3 监测点上方, 总体上, 紧邻基础下方一层即最顶层筋材应变普遍比其他两层要大, 当荷载水平较低如 100 kPa, 循环次数较少时, 顶层筋材距离面板近处应变比远端的小; 随着循环次数增多, 面板水平位移增加, 筋材应变相应增加, 且当荷载水平增大到 200 kPa 时, 挡墙 3 层筋材应变均显著增加, 且顶层筋材应变最大值达到了 1.35%, 明显大于最底层的 0.78%; 另外, 荷载水平越高, 应变随着循环次数的增加更显著, 且顶层筋材靠近面板处的应变最大。

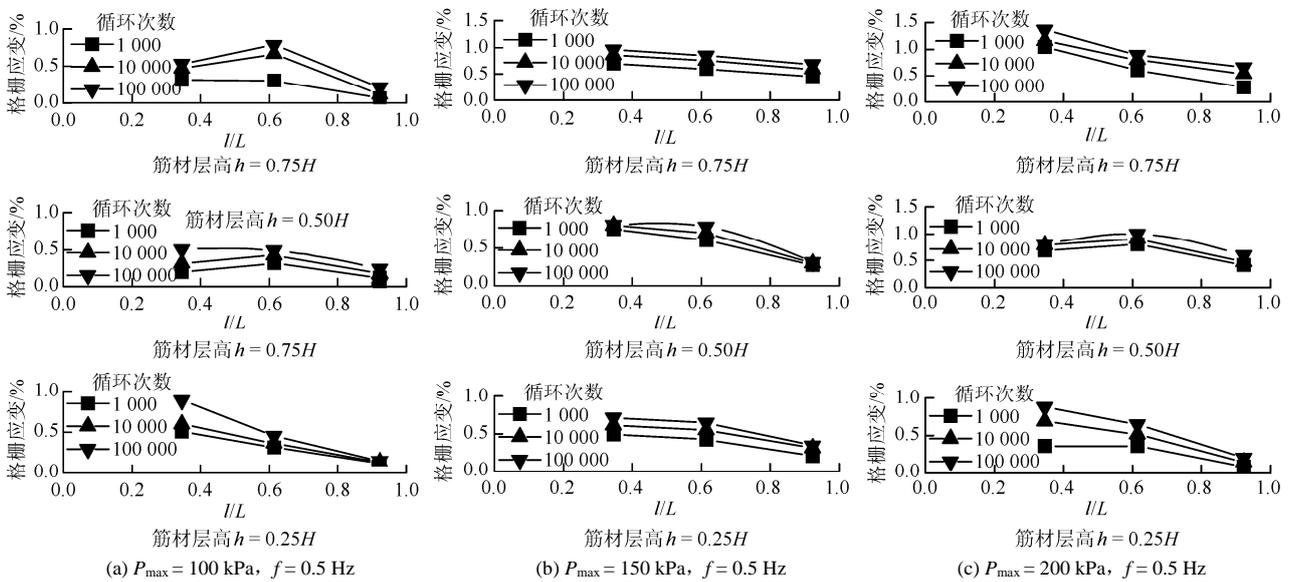


图 14 相同频率下荷载大小对加筋挡墙中筋材应变的影响

Fig.14 The influence of magnitudes of cyclic loads with the same frequency on the strains in reinforcement for retaining wall

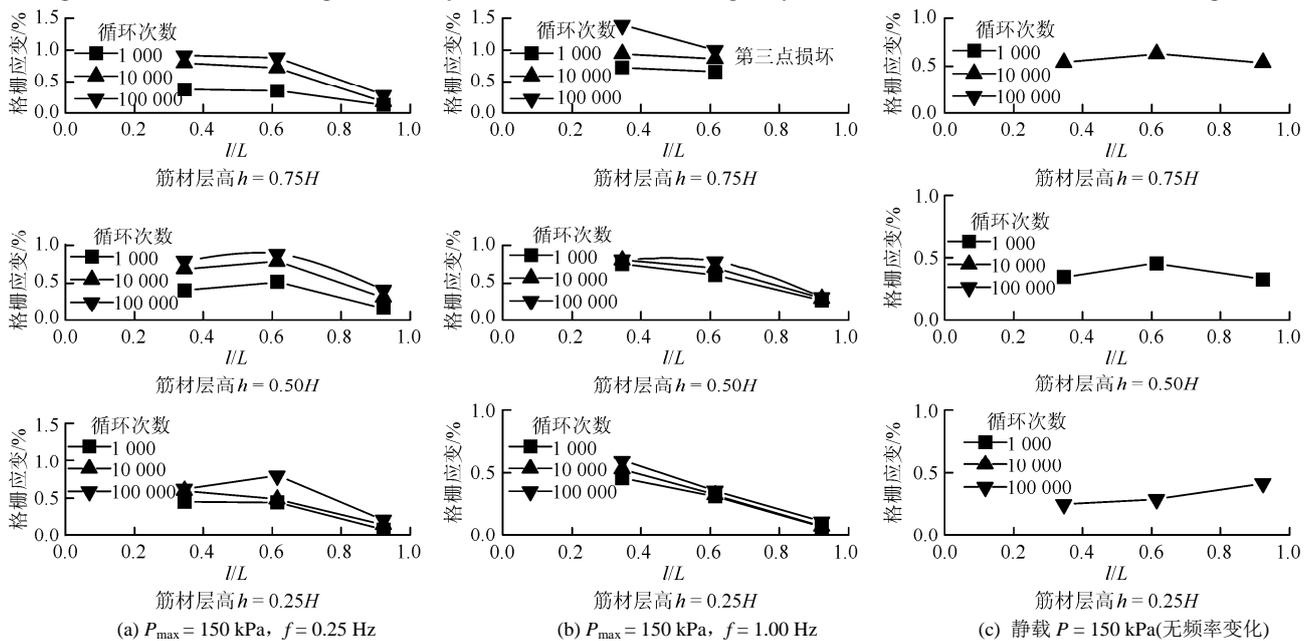


图 15 相同荷载下加载频率对筋材应变的影响

Fig.15 The effect of frequency of loads with the same magnitude on the strains of reinforcement

结合图 15 和 14(b), 对比分析了荷载水平相同, 但频率变化时筋材应变变化, 由图可知, 总体上, 频率无变化即静载时, 加筋挡墙的筋材应变普遍较小, 应变最大值约为 0.62%, 在相同循环荷载水平下, 对于相同高度的加筋层, 应变均随循环次数增加而累计增加, 频率越低时, 筋材应变增加幅度比高频率时要小, 如图 15(a)和(b)所示, 顶层筋材应变变化趋势尤其明显。

3.4.4 加筋挡墙的面板变形及破坏形式

当基础承受循环荷载时, 由表 2 可知, 各工况基础距离挡墙面板均为 $0.3H$, 各荷载水平和频率下加筋挡墙的面板变形及破坏形式如图 16 所示。

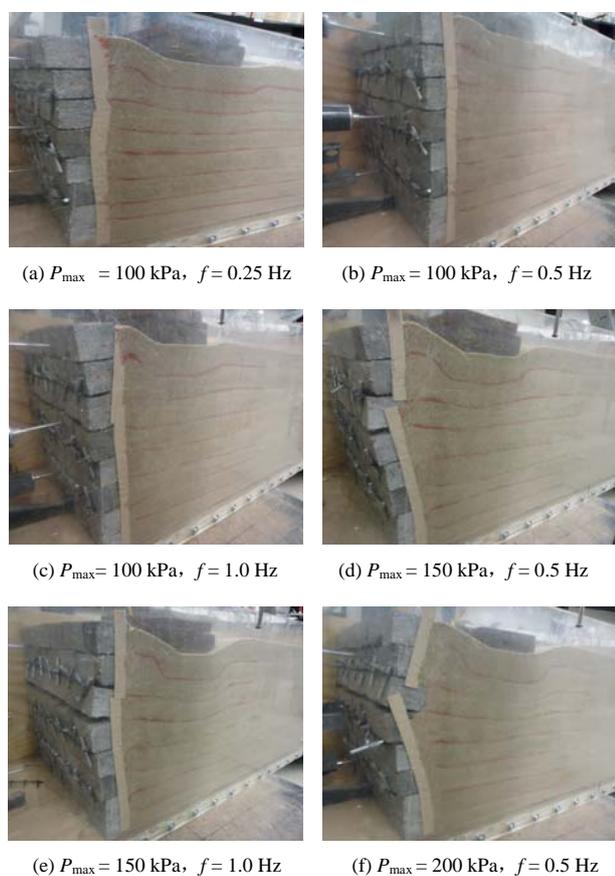


图 16 受循环荷载作用的基础下加筋挡墙面板变形及破坏形式

Fig.16 Characteristics of panel deformation and failure mode for geogrids-reinforced soil retaining wall under cyclic loads

由图 16(a)可知, 当荷载水平较低如 $P_{\max} = 100$ kPa, 频率较低时, 加筋挡墙面板水平变形较小, 以顶层面板模块向背离土体方向移动为主, 且随着循环次数增加, 最终趋于稳定, 这一点在图 11(a)中亦可呈现; 当频率增加时, 随着循环次数增加荷载对

挡墙中部水平位移影响增加, 如图 16(b)和(c)所示, 挡墙中部向临空面一侧鼓出; 尤其是当荷载水平较高时, 如 $P_{\max} = 150$ 或 200 kPa 时, 如图 16(d)~(f)所示, 挡墙中部面板模块的水平变形明显, 说明挡墙顶部基础累计沉降及荷载循环次数增加对其中、下部变形影响显著, 且中间层存在挤出破坏趋势, 试验过程中由于筋材与面板采用机械固定连接, 未出现面板完全挤出破坏情况, 结合图 11 可知, 当挡墙面板水平变形达到一定程度时, 外鼓趋势收敛, 表明加筋挡墙具有较好的抵抗因循环荷载引起的变形。

4 结 论

(1) 基于受静载作用的基础下加筋挡墙模型试验, 分析了基础偏移距离对极限承载能力的影响, 确定获得基础最大极限承载力时的最佳偏移距离为 $0.3H$, 且随着基础偏移距离增加, 挡墙破坏模式从基础底部浅层破坏或顶层面板被挤出, 逐渐过渡到破坏面沿基础边缘发展并向挡墙深部推进, 并以剪切破坏为主。

(2) 加筋挡墙顶部基础受静载作用且达到极限承载力前, 基础沉降比随基底压力增大呈现近似线性增加趋势, 且加载破坏前沉降比均小于 2%; 挡墙水平位移随基础偏移距离增加, 逐步由上部大、中下部小的特点向挡墙中部大而上、下部小的“鼓肚”型发展, 且加载破坏前挡墙水平位移与墙高比均小于 1%; 基础所受循环荷载的大小和频率增加时, 沉降初始阶段增加明显, 随后沉降曲线和水平位移随循环次数增加而增长趋势变缓, 且对面板水平位移的影响逐渐向挡墙中、下部发展, 顶部影响明显减弱。

(3) 基础受循环荷载作用时加筋挡墙的筋材应变水平明显大于受静载时, 顶层筋材即紧邻基础下方的筋材应变值比其他层大, 且循环荷载水平越高, 筋材应变随循环次数的增加更显著, 并且上层筋材靠近面板处的应变最大。

(4) 当基础处于最佳偏移距离且受循环荷载时, 当荷载为基础极限承载力的 $1/3$ 且频率较低时, 挡墙顶层面板以背离土体方向移动为主, 并随循环次数增加而趋于稳定; 当荷载和频率增加时, 基础荷载作用对挡墙中、下部变形影响显著, 此时以挡墙中部面板存在潜在挤出破坏趋势为主。

参考文献(References):

- [1] 李广信. 关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 605 - 610.(LI Guangxin. Some problems in design of geosynthetic-reinforced soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 605 - 610.(in Chinese))
- [2] KOERNER R. Designing with geosynthetics[M]. 4th Edition. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc., 1996: 1 - 761.
- [3] ALFARO M C, HAYASHI S, MIURA N, et al. Deformation of reinforced soil wall/embankment system on soft clay foundation[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(4): 33 - 46.
- [4] SKINNER G D, ROW R K. Design and behavior of a geosynthetic reinforced retaining wall and bridge abutment on a yielding foundation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(3): 234 - 260.
- [5] 陈建峰, 柳军修, 石振明. 软弱地基刚/柔性组合墙面加筋土挡墙数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 422 - 432.(CHEN Jianfeng, LIU Junxiu, SHI Zhenming. Numerical simulation of reinforced soil walls with flexible/rigid facings on yielding foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 422 - 432.(in Chinese))
- [6] 陈建峰, 俞松波, 叶铁锋, 等. 软土地基加筋石灰土路堤离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 287 - 293.(CHEN Jianfeng, YU Songbo, YE Tiefeng, et al. Centrifugal test on reinforced embankment with lime-stabilized soil as backfill on soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 287 - 293.(in Chinese))
- [7] 汪恩良, 钟 华, 孙景路, 等. 加筋土挡墙冻融试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 265 - 270.(WANG Enliang, ZHONG Hua, SUN Jinglu, et al. Experimental study on reinforced retaining walls suffering freeze-thaw cycling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 265 - 270.(in Chinese))
- [8] KENNETH E B, EARL S M, RICHARD A W. Temperatures and related behavior in segmental retaining wall system[J]. Transportation Research Record, 1996, 1534(1): 19 - 23.
- [9] 杨果林, 李海深, 王永和. 加筋土挡墙动力特性模型试验与动力分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 105 - 110.(YANG Guolin, LI Haishen, WANG Yonghe. Model tests on reinforced earth retaining wall under repeated load[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 105 - 110.(in Chinese))
- [10] LESHCHINSKY D, HOE I L, WANG J P, et al. Equivalent seismic coefficient in geocell retention systems[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27: 9 - 18.
- [11] WU J T H, LEE K Z Z, PHAM T. Allowable bearing pressure of bridge sills on GRS abutments with flexible facing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7): 830 - 841.
- [12] XIAO C Z, HAN J, ZHANG Z. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 81 - 94.
- [13] 肖成志, 陈倩倩, 韩 杰, 等. 顶部条形基础作用下加筋挡墙性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1 586 - 1 592.(XIAO Chengzhi, CHEN Qianqian, HAN Jie, et al. Experimental study of performance of geogrid-reinforced retaining wall subjected to load from strip foundation at the top surface of wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1 586 - 1 592.(in Chinese))