

土工格室形式与填料类型对公路地基承载力的影响

田林¹, 李宁¹, 王宇², 刘涛¹, 李良英¹ 编译

(1. 甘肃路桥建设集团有限公司 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究土工格室形式与填料类型对加固公路地基承载能力的影响,在模型试验箱内以土工格室焊距、高度及填料类型为变量,增加土工格室加固地基顶部的压力,测量土工格室加固地基下方和附近的土压力变化及加固地基顶部的沉降,对土工格室层荷载从垂直向水平的有效传递进行评价,研究加固地基内部应力状态和表面变形特性。结果表明:土工格室的布设使加固地基产生了柔性筏基作用,可均化传递来自上部结构的应力,与未加固结构层相比其最大土压力降低了50%~60%;土工格室的加入使结构层承载能力显著提升,在最优加固效果下,极限承载能力增加了4~8倍;格室焊距与高度对结构层承载能力有一定影响,格室高度越高、焊距越小其加固效果越好;选择砾石为填料时,格室宽高比为1:0.8时加固效果最好;填料选择黏土时,格室形式的宽高比为1:1.2时加固效果最优。

关键词:土工格室; 格室形式; 填料类型; 模型试验; 承载力

1 引言

路基自身的荷载和外部荷载通过基础传给地基,使天然土层原有的应力状态发生变化,即为在上部压力作用下,地基产生了附加应力和竖向、侧向(或剪切)变形导致结构沉降;当地基受到较大应力作用时会导致其发生过度沉降或剪切破坏,从而结构损坏^[1]。因此,合理的地基设计可使来自上部结构的应力均匀扩散,使地基承受更少的压力。在进行设计前需先对地基承载力进行评估,并针对地基提出相应的承载力增强技术。用于加固软土地基的不同处置方式中,土工布布设可限制土体横向移动并通过安装连续板增加土体之间的摩阻力从而提高地基承载力^[2];而土工格室是一种较为新型的土工材料,其独特的三维立体结构大大提升了土工材料的抗剪强度,对加固地基承载能力具有更高的增强效率;格室提供的侧限作用也可以显著提高粗粒土的剪切强度,进而随着土体强度的增长提高其承载力或阻止土壤侵蚀^[3]。因此,近年来土工格室加固土体的应用研究越来越受到各国研究人员的重视。

国内外学者对土工格室加固机理及加固效果进行

了大量研究。Bathurst 通过大型直剪试验评价了填料为砂土的土工格室加固结构层剪切强度,结果表明:砂土结构层加固前后的抗剪强度没有显著差异^[4];Wes-seloo 采用单轴压缩试验讨论了单元直径不同的土工格室的变形,试验结果表明:土工格室与土构成的复合体强度与格室单元大小间存在间接的函数关系,且随单元数量的增加而减小^[5];Zhou 等研究表明:土工格室加固结构层具有更好的抗拉强度、抗剪强度,并可有效防止下部地基的剪切破坏^[6];Dash 等研究了加固层位置、土工格室焊距、高度以及保护层厚度对加固结构层加固性能的影响,认为以不同荷载分布角为变量将土工格室布设于较高位置具有更好的加固效果^[7];Lee 通过模拟浅基础和铁路行车动荷载作用下的疲劳状态,对土工格室加固的实际应用进行了试验研究,发现5层土工格室加固效果是1层土工格室加固效果的2.7倍^[8];Nair 等通过研究土工格栅加筋土在静力和循环荷载作用下的强度和刚度特性,结果发现平面加筋在达到3层后,再增加加筋层数不会再取得额外的加固效果^[9];王选仓等采用离心模型试验得出格室加入能够减少路基沉降,且格室布设2层与3层时较未加固路基沉降变形减少了32%^[10];肖化德在S313线

收稿日期:2021-05-06

基金项目:长江学者和创新团队发展计划滚动资助项目(编号:IRT_15R29);甘肃省自然科学基金杰出青年基金资助项目(编号:1606RJDA318);甘肃省自然科学基金资助项目(编号:1506RJZA064);甘肃省交通建设科技项目(编号:201806)

察布查尔一都拉塔口岸项目中采用“砾石土换填+土工格室”的处理方案处治软土路段,得出该段路堤在施工过程中和完工后,未发生地基滑动破坏;通过施工方的监测,工后剩余沉降量为 1.5~3 cm^[11];刘炜等试验研究发现:加固土剪切应力与剪切应变关系为非线性,采用格室加固可有效提高土的黏聚力,且对土的内摩擦角影响相对较小^[12]。总体来看,土工格室与填土可以形成一层柔性结构层,提高地基刚度和强度的同时减小地基沉降量^[13],被广泛应用于地基加固。

综上所述,研究人员主要通过三轴试验及大型直剪试验对土工格室的加固机理及加固效果进行大量研究,其焦点大多集中于格室加固位置、加固层数对结构层承载能力的影响;在填料方面主要研究了粗粒土填筑对结构层加固性能的影响,对其他填料应用于土工

格室时的效果评价,是否存在土工格室和填料之间的匹配性,以往研究关注较少^[14]。因此,该文通过室内大型模型试验(承载板试验)研究土工格室不同形式与填料(粉质土、黏土、砾石、砂土)之间的匹配性,进而得出其对软土地基加固效果的影响,得出合理的软弱地基处治方法。

2 原材料及室内模型试验

2.1 填料

采用粉质土(ML)、黏土(SW)、砾石(GP)、砂土(SP)分别作为填料进行下卧层及土工格室填筑。其中,粉质土作为下卧层和填料,黏土、砾石、砂土仅作为填料,土样的物理性质如表 1 所示。

表 1 填料物理性质

填料类型	含水量/ %	相对密度	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	液限/ %	塑性指数	0.075 mm 筛孔 通过率/%
粉质土	27.8	2.71	1.68	17.9	36.13	8.2	76.80
黏土	25.2	2.67	2.01	11.1	36.60	—	2.27
砾石	2.3	2.63	2.09	—	—	—	0
砂土	—	2.61	1.68	—	—	—	—

2.2 模拟试验箱设计及元器件布置

为了分析土工格室加固土的应力分布机理,自行设计了一个大型模拟试验箱,如图 1 所示,整体由 10 mm 厚钢板与槽钢焊接而成,内高 1 400 mm,内宽 1 200 mm,在其上设有反力梁,模拟试验箱内铺筑软弱地基与土工格室加固层。在大型模拟试验箱内分别设置未加固的软弱地基与土工格室加固结构层,利用承载板加载试验探究加固层与未加固层之间的应力传递效应。下部软弱地基由粉质土填充而成,在其上部设置土工格室加固结构层,加固结构层填料类型为砂土、黏土及砾石。具体步骤:首先在箱内填筑 700 mm 厚的粉质土,选择不同的变量进行上部加固结构层的填筑。为确保软弱地基尽可能达到最大干密度 85% 的压实条件,以 200、200、200、100 mm 的厚度对下承层进行分层压实处理。此外,为确保每次试验的压实条件相等,在铺设土工格室加固层之前进行一次压实度检测试验。

如图 1 所示,在软土地基中,6 个土压力盒直接布设在加固结构层下方以测量从中心点开始的土压力变化,埋设深度分别为 300、375、450 和 600 mm,以测量从

中心点开始的土压力变化。图中,在深度为 375 mm 处共布设 3 个土压力盒,位置为中心处及向右偏移 200、400 mm。在加固结构层与未加固结构层之间铺设一张聚丙烯土工膜(PP),其拉伸强度≥100 kN/m,伸长率≤30%,并根据试验内容进行上部加固结构层的铺筑。

加固地基铺筑结构如表 2 所示,在进行加固路基铺筑时,先对下承层压实度进行检测以确保其达到试

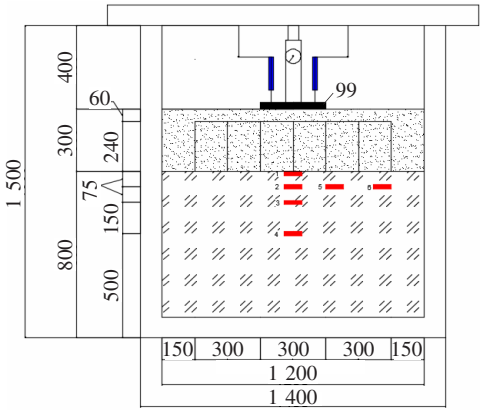


图 1 元器件布设示意图(单位:mm)

验要求,继而按照试验要求对加固地基进行铺筑。首先在下部土基铺设完成后继续铺设一层厚度为 5 cm 的填料保护层;然后在模型试验箱内对格室进行张开处理,采用钢钎进行固定;采用铁铲对格室内部进行填料填筑,并用铁铲进行初步铲平处理。铺设格室时应注意不使土工格室发生倒伏现象(格室填料应超出格室高度,进行初步整平处理后才能进行压实处理)。采用振动压实机对其进行压实处理,因试验条件限制,只能通过保证每次试验采用相同的振动压实次数(100 次),分 3 次压实。

模型试验加载方式选取承载板法进行加载,以现行 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中规定为标准,车辆与路面接触形状采用单圆均布荷载,双轮

组单轴载 100 kN,用当量圆直径 D 进行计算。标准轴载计算参数如表 3 所示。

表 2 模型试验设计		
加固地基设置	格室尺寸/(mm×mm)	压实度/%
未加固		85
土工格室+黏土	300×120,300×180,200×240	85
土工格室+砾石	300×240,400×240,500×240	85
黏土		85
砾石		85
土工格室+砂土	300×240	85
土工格室+粉质土	300×240	85

表 3 标准轴载计算参数						
标准轴载	标准轴载/ kN	轮胎接地压 强/MPa	单轮传压面当量 圆直径/mm	两轮中心 距/mm	当量圆直 径/mm	试验最大荷 载/MPa
BZZ-100	100	0.7	213.0	15	304	1.4

根据上述参数计算得出室内模型试验承载板选取直径为 30 cm、厚度为 2 cm 的圆形钢板。

3 模型试验结果与讨论

3.1 未加固地基承载力

土工格室布设位置根据下部软弱地基的承载力确定,图 2 为模型试验中未加固地基的 $P-s$ 曲线图。对于软土地基,以沉降量达到 5 mm 时加载荷载为结构层容许承载力;其沉降量达到 25 mm(百分表最大量程)作为破坏点进行试验,由图 2 可看出:软土地基的屈服应力为 69.34 kPa,容许承载力为 34.67 kPa,极限承载力为 144.80 kPa。

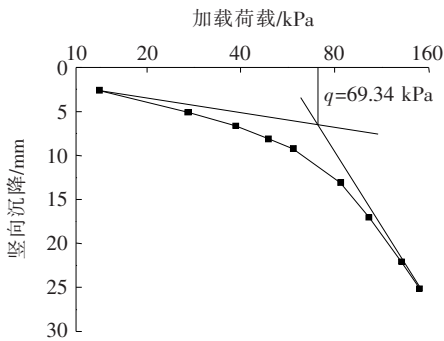


图 2 未加固地基 $P-s$ 曲线

4 可知:当填料选取为砂土时,软弱地基的垂直土压力减少显著,以加载荷载 60 kPa 为例,在测点 1 位置土压力减少了 69.5%,相比于粉质土加固结构层在 60 kPa 荷载作用下仅减少了 30.4%;测点 2 位置下实测土压力为 4.8 kPa,此时土压力减少了 59.9%,填料变为粉质土时实测土压力为 4.9 kPa,土压力减少率为 58.9%,与砂土结构层相近;测点 3 位置时砂土结构层土压力减少 64%,粉质土结构层土压力减少 61.7%,测点 4 位置下砂土结构层土压力减少率比粉质土结构层高 12.5%,由此可看出填料类型对下部软弱地基承载力的影响较大,砂土加固结构层具有更强的应力分散作用。

3.2 土工格室加固地基承载力

为研究土工格室加固地基承载力的加固效果,对加固结构层进行承载板试验来验证土工格室形式对软弱地基承载力的影响。图 3 为黏土、砾石分别作为填料加固土工格室结构层的 $P-s$ 曲线。

在模型试验箱内采用 6 种尺寸组合的土工格室与两种类型填料进行匹配,并设置空白对照组(未布设土工格室,填料铺设厚度 300 mm)进行对比分析。由图 3(a)可看出:在格室尺寸为 200 mm×240 mm 与 300 mm×240 mm 时加固效果较好,竖向沉降较少。当格室高度为 240 mm、焊距为 200 mm 时使用黏土作为填料的加固结构层承载能力最好;对于格室焊距

表 4 为两种填料作用下垂直土压力下降率。由表

表 4 不同填料垂直土压力降低率

填料 类型	荷载/ kPa	土压力盒 位置	实测压 力/kPa	实测压 力比	布辛尼 斯克压 力比	减少 率/%
砂土	60	2H(1)	5.2	0.087	0.285	69.5
		2.5H(2)	4.8	0.080	0.200	59.9
		3H(3)	3.1	0.052	0.144	64.0
		4H(4)	1.3	0.022	0.087	74.5
	240	2H(1)	21.7	0.121	0.285	68.3
		2.5H(2)	20.1	0.084	0.200	58.2
		3H(3)	15.1	0.063	0.144	56.3
		4H(4)	6.9	0.029	0.087	67.1
	480	2H(1)	47.8	0.100	0.285	65.1
		2.5H(2)	47.2	0.098	0.200	50.8
		3H(3)	30.6	0.064	0.144	55.7
		4H(4)	17.5	0.036	0.087	58.1
粉质土	60	2H(1)	11.9	0.198	0.285	30.4
		2.5H(2)	4.9	0.082	0.200	58.9
		3H(3)	3.3	0.055	0.144	61.7
		4H(4)	2.0	0.033	0.087	62.0
	240	2H(1)	43.3	0.180	0.285	36.7
		2.5H(2)	19.8	0.083	0.200	58.8
		3H(3)	15.5	0.065	0.144	55.2
		4H(4)	10.8	0.045	0.087	48.3
	480	2H(1)	84.9	0.177	0.285	37.9
		2.5H(2)	47.8	0.100	0.200	50.2
		3H(3)	39.2	0.082	0.144	43.3
		4H(4)	29.0	0.060	0.087	30.6

注： $H=150\text{ mm}$ 。

为 300 mm、高度为 120 mm 时加固结构层的极限承载力为 458 kPa；改变土工格室的高度为 180 mm，加固结构层的极限承载能力达到 555 kPa；当格室高度变为 240 mm 后，其极限承载能力为 601 kPa。由此可看出在同一种填料作用下，焊距相同，土工格室高度越高，其承载能力越强，这是由于格室高度越高，格室与格室之间的嵌挤作用更强，格室对填料的摩阻力及侧向约束力更强，使得加固结构层具有更好的应力扩散效果。

由图 3(b)可以看出：相比于黏土加固结构层，采用砾石加固地基时，在土工格室尺寸同为 200 mm×240 mm 时其极限承载力较低。由此表明，不同的填料对加固结构层承载能力有一定影响。对于焊距为

300 mm 的土工格室，格室高度为 120 mm 时加固结构层极限承载力为 1 019 kPa；格室高度为 180 mm 时其极限承载力为 1 131 kPa；当格室高度达到 240 mm 时极限承载力达到 1 223 kPa，较格室高度为 120 mm 与 180 mm 分别提升了 20.0% 与 8.1%。由此可看出，当砾石作为加固填料时土工格室焊距与高度比值为 1∶0.8(格室尺寸为 300 mm×240 mm)时具有更强的加固效果。

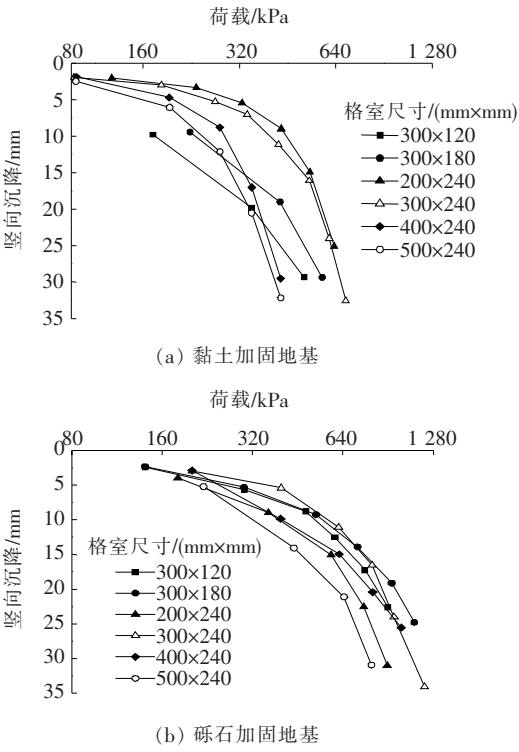


图 3 承载板试验结果

3.3 垂直方向土压力分布

以垂直土压力分析加固结构层在荷载作用下的受力特性。在承载板下部地基不同深度及不同位置安装土压力盒。测量土压力随荷载、深度和水平距离的变化规律。图 4 为在填筑的粉质软土地基上布设土工格室加固层的垂直土压力变化曲线。

由图 4 可以看出：荷载为 30 MPa 时垂直土压力随着埋深的增大曲线变化较为平缓，从 1 测点到 4 测点垂直土压力较小且减小幅度较低；随着恒定荷载的增大，1~4 测点的垂直土压力不断增大，垂直土压力变化曲线斜率变大；以荷载 480 kPa 为例，在 1 测点位置垂直土压力实测值为 84.9 kPa，测点 2 下实测土压力为 47.8 kPa，埋深深度增加 75 mm，垂直土压力值减少了 43.6%。与未加固结构层相比，通过承载板法施加恒定荷载时粉质土加固结构层的垂直土压力强度

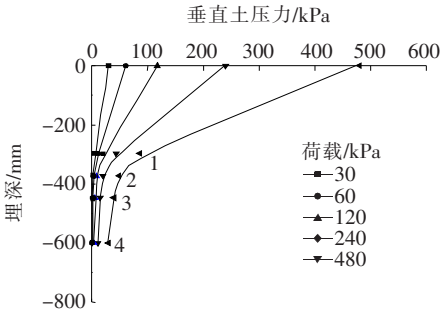


图 4 在荷载作用下填料为粉质土的垂直土压力

降低了 30%~40%;随着荷载的增大,垂直土压力下
降趋势随着深度的增加而逐渐变缓。

3.4 水平方向土压力分布

鉴于土工格室能有效地分散垂直荷载,故在水平
方向上测量垂直土压力分布以确定土工格室加固的影
响范围,土压力的测量位置用加载板宽度的倍数(0B、
1.3B 和 2.6B)表示,土压力分布结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出:在测点 2、5 位置下,随着加载荷
载的增大土压力增大,在作用荷载为 30、60、120 kPa
时土压力增幅较为稳定;当作用荷载为 240、480 kPa
时 2、5 测点土压力增长迅速;分析 2、5 测点可知侧向

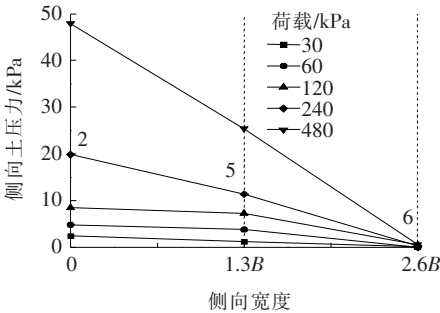


图 5 在荷载作用下填料为砂土的侧向土压力($B=153.8\text{ mm}$)

土压力随着水平位置的变化而减少,荷载越大降低幅
度越快,说明格室在较大荷载作用下加固效果体现更
明显;在荷载 30、60、120 kPa 作用下 2、5 测点土压力
降低幅度平缓且三者保持近似相等斜率;当荷载超过
120 kPa 后,2、5 测点土压力降低幅度增大,由此可知
120 kPa 为结构层的拐点荷载;测点 6 处在不同荷载
作用下其土压力无变化。

根据模型试验箱土压力盒的实测结果,利用土压
力理论的布辛尼斯克方程计算在砂土与砾石填筑下不
同形式格室加固结构层与未加固结构层的侧向土压力
变化趋势及加固效率比,计算结果如表 5 所示。

表 5 加固地基水平向土压力折减比

填料 类型	荷载/ kPa	土压力盒 位置	实测压 力/kPa	实测压 力比	布辛尼斯 克压力比	减少率/ %
砂土	60	0(2)	4.8	0.082	0.200	60.0
		1.3B(5)	2.5	0.042	0.125	66.7
		2.6B(6)	0.2	0.003	0.060	94.4
	240	0(2)	20.8	0.087	0.200	56.7
		1.3B(5)	10.8	0.045	0.125	64.0
		2.6B(6)	-0.4	-0.001	0.060	101.4
粉质土	480	0(2)	47.2	0.098	0.200	50.8
		1.3B(5)	31.6	0.066	0.125	47.3
		2.6B(6)	0.4	0.001	0.060	98.6
	60	0(2)	4.9	0.082	0.200	59.2
		1.3B(5)	3.9	0.065	0.125	48.0
		2.6B(6)	0.4	0.007	0.060	88.9
	240	0(2)	19.8	0.083	0.200	58.8
		1.3B(5)	11.6	0.048	0.125	61.3
		2.6B(6)	-0.2	-0.001	0.060	101.4
	480	0(2)	48.0	0.100	0.200	50.0
		1.3B(5)	25.5	0.053	0.125	57.5
		2.6B(6)	0.4	0.001	0.060	98.6

注: $B=153.8\text{ mm}$ 。

由表 5 可以看出在施加均布荷载情况下,填料对 5 测点的土压力减少率影响较大,在恒载 60 kPa 作用下,填料为砂土时 5 测点的土压力减少率为 66.7%,填料变为粉质土后该测点土压力减少率降低了 18.7%;荷载增大到 240 kPa,砂土结构层 5 测点土压力减少率 64.0%,较粉质土结构层高 2.7%;随着所施加均布荷载的增大,填料对 2、5 测点土压力有显著影响,测点 6 处土压力无明显变化,在填料为砂土情况下垂直土压力水平分布减少率较填料为粉质土的加固路基更高,说明砂土为填料能够更为有效地减少垂直土压力在水平方向的扩散,砂土作为填料具有更好的加固效果;6 测点位置为模型试验箱边界条件;随着荷载

增大,格室对填料的作用越来越明显。

4 土工格室加固效应分析

4.1 土工格室焊距对加固地基承载力的影响

为研究土工格室焊距对地基承载力的影响,将 4 种常见的土工格室(高度均为 240 mm)应用于加固软弱地基,其焊距分别为 200、300、400 和 500 mm,选取黏土和砾石对土工格室进行填筑。在不同土工格室焊距和填料条件下,对软土地基进行承载板试验,对其承载力和沉降进行分析。表 6 为不同填料加固软弱地基的极限承载力和容许承载力。

表 6 不同焊距土工格室加固结构层承载力试验结果

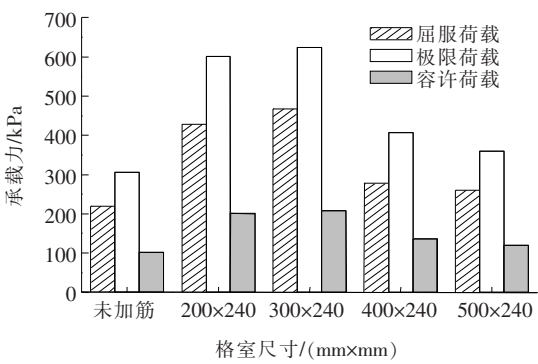
加固结构层	黏土		砾石	
	极限承载 力/kPa	容许承载 力/kPa	极限承载 力/kPa	容许承载 力/kPa
未填充	144.80	34.67	144.80	34.67
填充 300 mm	305.91	101.97	640.38	182.53
格室尺寸 200 mm×240 mm	624.07	208.02	879.00	292.66
格室尺寸 300 mm×240 mm	601.63	200.88	1 223.66	373.22
格室尺寸 400 mm×240 mm	407.89	135.62	1 019.72	300.82
格室尺寸 500 mm×240 mm	359.96	120.33	869.82	289.60

由表 6 可知:软土地基的极限承载力和容许承载力分别为 144.8 kPa 和 34.67 kPa;仅用填料对软弱地基进行处理,用黏土填筑 300 mm 测得其极限承载力与容许承载力分别为 305.91 kPa 和 101.97 kPa;用砾石填筑 300 mm 测得其极限承载力与容许承载力分别为 640.38 kPa 和 182.53 kPa,用砾石作为填料较黏土填筑地基承载力分别提高了 109.3%和 79.0%,得出不同类型填料对结构层承载力大小有显著的影响,究

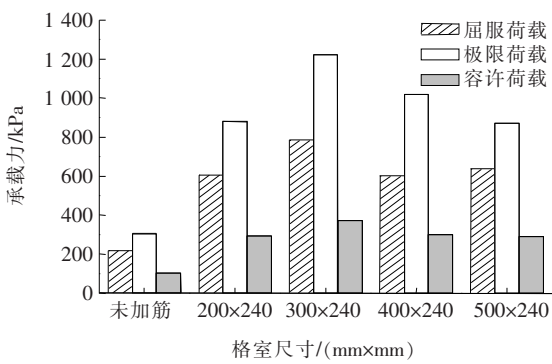
其原因砾石自身的刚性比黏土大,其抵抗变形能力更强,填筑后结构层的承载能力相对较高。

图 6 为不同填料下结构层承载力图。

由图 6 可知:在格室形式一定的情况下,砾石填筑结构层具有更大的承载力。由图 6(b)可知:格室尺寸为 300 mm×240 mm 时,加固结构层的极限承载能力为 1 223.66 kPa,其承载力强度约为软弱地基的 8 倍;未用格室加固结构层极限承载能力为 640.38 kPa,约为



(a) 黏土加固地基承载力柱状图



(b) 砾石加固地基承载力柱状图

图 6 不同填料下格室焊距对加固地基承载力的影响

格室焊距 300 mm 加固结构层极限承载力的 1/2;黏土填充格室时焊距为 200 mm 结构层极限承载力为 624.0 kPa,约为软土地基极限承载力的 4 倍,约为仅用黏土填充结构层的 2 倍[图 6(a)];随着土工格室焊距的增大,其加固效率逐渐降低;土工格室尺寸为 200 mm×240 mm 时极限承载能力最大,加固效果最好。

当使用砾石作为填料时,土工格室焊距为 300 mm 时极限承载力为 1 223.66 kPa,加固效率最好,当焊距大于 300 mm 后加固效率迅速降低,焊距达到 500 mm 时加固结构层极限承载力仅为 869.82 kPa,由此可看出砾石作为填料与黏土作为填料的土工格室加固地基的效果并不相同,说明土工格室焊距与填料粒径之间存在相关性,焊距小的格室与粒径较小填料匹配性好;粒径较大填料与焊距大的格室具有较好匹配性。

综上,在进行现场施工前应将填料堆积后进行压平压实处理继而进行铺筑,但现场填料具不均匀性,砾石粒径较大会导致结构层压实度不足。为了考虑与施工有关的问题,需控制砾石填料最大粒径不超过 25 mm。对于单元内部填充不均匀的现场条件,使用粒径小于土工格室焊距 1/10 的砾石具有最佳的加固效果。

4.2 土工格室高度对加固地基承载力的影响

为了研究土工格室高度对加固地基承载力的影响,确定格室焊距为 300 mm,以 3 种不同高度(120、180、240 mm)的土工格室进行试验,观察土工格室高度变化对加固地基承载力的影响。

表 7 为在软土地基上进行承载板试验获取的地基安全系数为 3.0 的加固地基极限承载力和容许承载力的试验结果。

表 7 格室高度对加固地基承载力的影响

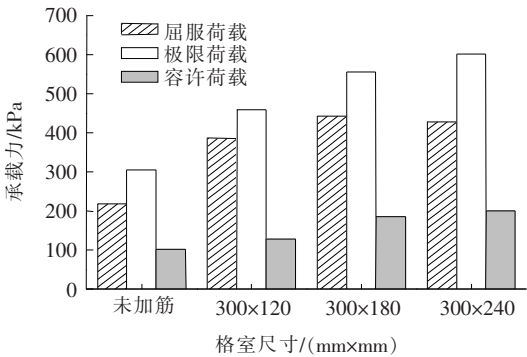
加固结构层	黏土		砾石	
	极限承载 力/kPa	容许承载 力/kPa	极限承载 力/kPa	容许承载 力/kPa
未填充	144.80	34.67	144.80	34.67
未加固填充 300 mm	305.91	101.97	640.38	182.53
格室尺寸 300 mm×120 mm	458.87	128.48	1 019.72	339.57
格室尺寸 300 mm×180 mm	555.75	185.59	1 131.88	360.98
格室尺寸 300 mm×240 mm	611.83	200.88	1 223.66	373.22

由表 7 可知:使用黏土填筑结构层时,未用格室加固下结构层极限承载能力为 305.91 kPa,容许承载能力为 101.97 kPa;当使用尺寸为 300 mm×120 mm 格室对结构层进行加固后其极限承载能力与容许承载能力为 458.87 kPa 与 128.48 kPa,与未加固结构层相比分别提升了 50.0%与 26.0%,与未填充软土结构层相比分别提升了 216.9%与 252.3%;格室高度增大到 180 mm 后结构层极限承载能力与容许承载能力增大到 555.75 kPa 与 185.59 kPa,较未加固结构层相比分别提升了 81.7%与 82.0%;格室高度为 240 mm 时加固层极限承载力为 611.83 kPa,较软土地基承载力提高了 322.5%,较仅用填料填筑情况下提高了 100%;砾石结构层未用格室加固下极限承载能力与容许承载能力分别为 640.38 kPa 与 182.53 kPa;使用焊距相同高度不同格室对砾石结构层进行加固后,在格室高度为 120、180、240 mm 下结构层的极限承载力分别为 1 019.72、1 131.88、1 223.66 kPa,较未加固结构层分

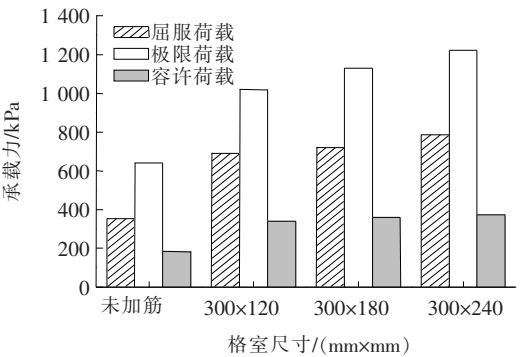
别提升了 59.2%、76.8%与 91.1%,由此可知格室高度是影响结构层承载能力的重要因素。

图 7 为不同填料下结构层承载力随格室高度变化的结果。

由图 7 可以看出:两种填料下加固结构层的极限荷载与允许荷载随格室高度的增加而增大,土工格室高度的增加使得加固效果提升;当高度达到一定程度后(200 mm),随着高度的增加,加固效果逐渐减小;比较黏土结构层与砾石结构层可看出格室高度对小粒径填料结构层的承载能力影响更明显,其原因为格室高度越高填料与格室之间的摩阻力与相互作用越强,格室起到了较好的紧箍效果。综上可知:格室高度对结构层整体的承载能力有显著影响,从极限承载力和容许承载力随土工格室高度的变化特征来看,虽然高度的增加会导致土工格室加固效率的提高,但当格室高度达到 200 mm 后,加固效果变化趋于平缓;高度继续增大,预计加固效果会降低。



(a) 黏土加固地基



(b) 砾石加固地基

图 7 不同填料下格室高度对加固地基承载力的影响

4.3 填料类型与土工格室形式的加固效率

该文以提高地基承载力的加固效率为重点,比较未加固地基和土工格室加固地基的极限承载力,并以 300 mm 厚的砾石土工格室加固地基和换填加固地基的极限承载力提高为基础,比较换填法加固地基的加固效率。土工格室加固效率采用式(1)进行计算:

$$BCR_U = \frac{q_{u(R)}}{q_u} \tag{1}$$

式中: BCR_U 为土工格室加固地基与未加固地基和置换地基相比的承载力加固效率; $q_{u(R)}$ 为土工格室加固地基的极限承载力; q_u 为未加固或仅含替换黏土和砾石的极限承载力。

计算结果如表 8 所示。

由表 8 可知:在填料为黏土时,在尺寸为 300 mm×120 mm 格室加固下结构层 BCR_U 值为 1.5,此时砾石结构层的 BCR_U 为 1.6,较黏土结构层高 0.1;在尺寸为 300 mm×180 mm 格室作用下两种类型填料有着相同的 BCR_U 值,为 1.8;当格室尺寸变为 200 mm×240 mm 与 300 mm×240 mm 时,黏土结构层的 BCR_U 值都为 2.0,而砾石结构层的 BCR_U 值分别为 1.4 与 1.9,较黏土结构层要小;当格室尺寸变为 400 mm×240 mm 与 500 mm×240 mm 时,黏土结构层 BCR_U 值大幅减小,为 1.3 与 1.2,而砾石结构层 BCR_U 值降幅较低,为 1.6 与 1.4,比黏土结构层高。

表 8 土工格室形式与填料的加固比率

填料	加固结构层	承载力/kPa		加固效果	
		极限承载力	容许承载力	与地基相比	BCR_U
黏土	未加固	144.80	34.67	1.0	1.0
	填料 300 mm	305.91	101.97	2.1	1.0
	300 mm×120 mm	458.87	128.48	3.2	1.5
	300 mm×180 mm	555.75	185.59	3.8	1.8
	200 mm×240 mm	624.07	208.02	4.3	2.0
	300 mm×240 mm	611.83	200.88	4.2	2.0
	400 mm×240 mm	407.89	135.62	2.8	1.3
	500 mm×240 mm	359.96	120.33	2.5	1.2
	填料 300 mm	640.38	182.53	4.4	1.0
	300 mm×120 mm	1 019.72	339.57	7.0	1.6
砾石	300 mm×180 mm	1 131.88	360.98	7.8	1.8
	200 mm×240 mm	879.00	292.66	6.1	1.4
	300 mm×240 mm	1 223.66	373.22	8.5	1.9
	400 mm×240 mm	1 019.72	300.82	7.0	1.6
	500 mm×240 mm	869.82	289.60	6.0	1.4

由此可知:高度相同情况下,焊距小的格室对黏土结构层加固效果更好,当焊距超过 300 mm 后格室对砾石结构层体现出较好的加筋效果。

图 8 为土工格室尺寸和填料类型对地基加固效果的影响。

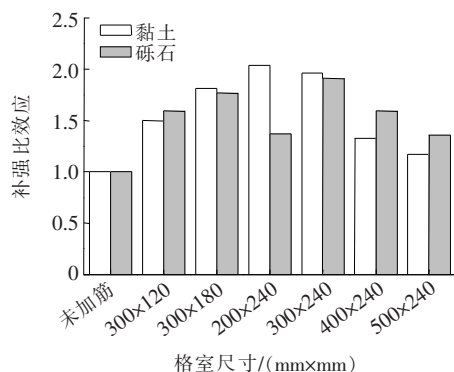


图 8 土工格室尺寸和填料对加固效果的影响

由表 8 可以看出:用黏土填充极限承载力为 69.34 kPa 的软土地基,填充后的地基极限承载力是软土地基的 4.4 倍。当采用大粒径砾石进行填筑时,形式为 300 mm×240 mm 的格室加固结构层加固效果最好;格室形式为 200 mm×240 mm 下黏土加固效果更好。分析原因是采用较大粒径填料填筑焊距较小土工格室时,填料在压实过程中自身的嵌挤作用发挥不充分,颗粒混合不充分导致单元格室内密度不一致,从而降低了土工格室的加固效率。

5 结论

(1) 土工格室加固结构层的应力分布比未加固结构层增加约 15%,土压力减小 50%~60%,即土工格室加固结构层能有效地将垂直荷载分散,起到应力扩散的作用从而防止地基发生剪切破坏或过度沉降。

(2) 格室焊距与高度是影响结构层承载能力的重要因素,相同填料下,格室焊距越大,结构层承载能力越低;格室高度越高结构层承载能力越强。格室高度对结构层整体性能的影响较格室焊距要高。

(3) 模型试验中通过对加固结构层下部地基侧向土压力的分析可知格室作用的边界条件为 2.6 倍承载板宽度。

(4) 在最优加固情况下,与未加固地基相比,土工格室可将地基极限承载力提高 4~8 倍;当土工格室填充砾石时,最大极限承载力所用土工格室焊距与高度最佳比值为 1:0.8(格室形式为 300 mm×240 mm);

填充黏土时土工格室焊距与高度最佳比值为 1:1.2(格室形式为 200 mm×240 mm)。

(5) 填料与格室的匹配性与格室焊距与填料粒径有关,粒径小的填料与焊距小的格室匹配性好;大粒径填料与大焊距格室匹配性好。

参考文献:

- [1] 曾国东,王佳,徐奋强,等. 桩土复合路基垫层剪切机理研究[J]. 中外公路,2019,39(2):19-22.
- [2] 段彦福,宋玲,刘杰,等. 地震作用下土工格栅加筋土边坡路堤动力分析[J]. 中外公路,2019,39(6):1-5.
- [3] 刘光明. 软土地基市政道路加宽工程路基差异沉降特性及处治措施综述[J]. 中外公路,2018,38(2):45-48.
- [4] Bathurst R J, Karpurapu R. Large-Scale Triaxial Compression Testing of Geocell-Reinforced Granular Soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(3):296-303.
- [5] Wesseloo J, Visser A T, Rust E. The Stress-Strain Behaviour of Multiple Cell Geocell Packs[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2009, 27(1):31-38.
- [6] Zhou Huabao, Wen Xuejun. Model Studies on Geogrid-or Geocell-Reinforced Sand Cushion on Soft Soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(3):231-238.
- [7] Dash S K, Rajagopal K, Krishnaswamy N R. Behaviour of Geocell-Reinforced Sand Beds under Strip Loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(7):905-916.
- [8] Lee, K. C. A Study on the Bearing Capacity of Shallow Foundation Reinforced by Geocell[D]. Kyung Hee University, 2002.
- [9] Nair A M, Latha G M. Large Diameter Triaxial Tests on Geosynthetic-Reinforced Granular Subbases[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(4):04014148.
- [10] 王选仓,丁龙亭,付林杰,等. 基于离心模型试验的土工格室对路基稳定性影响研究[J]. 公路工程,2019,44(5):210-215.
- [11] 肖化德. 土工格室在软土地基处理中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14(6):32,35.
- [12] 刘炜,汪益敏,陈页开,等. 土工格室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(11):250-255,277.
- [13] 刘凯,张祥,王芳,金灿,等. 级配碎石基层沥青路面复合土工格栅最佳层位研究[J]. 中外公路,2018,38(4):44-48.
- [14] Shin E C, Kang H H, Park J J. Reinforcement Efficiency of Bearing Capacity with Geocell Shape and Filling Materials[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(5):1648-1656.