

DOI: 10.11779/CJGE201810012

循环荷载作用下格栅防护柔性埋地管道的性能分析

肖成志, 何晨曦, 王嘉勇

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 交通循环荷载下埋地管道性能与防护是当前研究的重点问题, 首先针对格栅加筋柔性管道开展试验研究, 分析管道埋深 H 为 $3D$ (D 为管道外径) 时循环荷载水平和频率、首层格栅埋深、长度、层间距和筋材层数对管道力学与变形性能的影响, 试验结果表明: 首层格栅最佳埋深 u 为 $0.4B$ (B 为加载板宽度), 最佳层间距 u_g 为 $0.5B$, 最佳铺设长度 L 为 $5D$; 增加格栅层数能显著增强土体, 从而有效减少管道变形和加载板沉降; 提高荷载水平或降低荷载频率使管道变形、加载板沉降和格栅应变整体显著增加; 格栅应变随其与加载板中心的距离增加而减小, 格栅中心点应变随循环次数增加呈现先增加后减少的趋势。进而, 基于有限元数值模拟分析管道埋深 H 、加载板宽度 B 和管径 D 对管道力学性能的影响, 数值结果表明增加管道埋深或减小加载板宽度, 管道径向变形减小; 同等荷载作用下, 减小管径时管道径向变形增大, 筋材加筋效果减弱, 适当增加管道直径, 有利于筋材加筋作用的充分发挥, 从而减小管道径向变形。

关键词: 土工格栅; 埋地管道; 模型试验; 数值模拟; 循环荷载

中图分类号: TU472.34; TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1852-10

作者简介: 肖成志(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土工合成材料及加筋土、边坡工程和埋地管道等方面教学与研究工作。E-mail: xiaochengzhi2@sina.com。

Performance of flexible buried pipes reinforced by geogrids under cyclic loading

XIAO Cheng-zhi, HE Chen-xi, WANG Jia-yong

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The study on protection performance of buried pipes under cyclic loading has been increasingly concerned. Firstly, a series of laboratory tests are conducted to investigate the mechanical performance of buried pipes during cyclic loading when the buried depth of pipes is $3D$ (D , external diameter of pipes). The results show that the optimum embedment depth of the uppermost reinforcement, spacing of geogrid layers and length of reinforcement are $0.4B$ (B , width of loading plates), $0.5B$ and $5D$, respectively. Adding the numbers of layers of geogrids can significantly enhance the strength of soils and thus reduce the deformation of pipes and settlements of loading plates. It is pronounced that higher level of loading or lower frequency can affect remarkably the mechanical performance of buried pipes. Increasing the level of cyclic loading or lowering frequency of loads can result in the increase of radial deformations of pipes, settlements of loading plates and strains of geogrids. The strains of reinforcement decrease with the increase of distance away from the center of loading plates, and those of geogrids in the center tend to increase firstly and then decrease with the increase of cycles of loads. Furthermore, based on the numerical simulation method, the mechanical properties of pipes under different buried depths of pipelines, H , width of loading plates, B , and pipe diameter, D , are presented. The increasing buried depth or decreasing width of loading plates may reduce the radial deformations of pipes. The reinforcement effect is weakened for the pipes with smaller diameters, leading to the increase of deformations of pipes. However, the reinforcement plays a significant role in reducing the deformations of pipes with greater diameters.

Key words: geogrid; buried pipe; model test; numerical simulation; cyclic loading

0 引言

当前, 柔性管道凭借重量轻、耐老化、环保无污染等多种优异特性被广泛应用于市政、水利及矿山工程中。然而, 管道埋置于地下时, 直接或间接受到结构自身重力、土压力等恒荷载及地面交通荷载和堆载

等活荷载影响, 上部荷载持续作用会使管道受到附加压力, 进而产生附加变形和位移, 引起管道屈曲失稳

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909032); 河北省自然科学基金项目(E2014202038); 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2017027)
收稿日期: 2017-08-02

等事故。因此，对管道的安全可靠和经济耐久提出了更高的要求^[1-4]。由高分子聚合物制成的格栅具有耐腐蚀、抗拉强度高和高模量等多种优异的工程特性^[5-7]，近年来被广泛应用于岩土工程领域，也逐渐成为管道防护减载的新选择。国内外学者对格栅加筋减载管道进行一些研究，Turan 等^[8]通过试验和数值分析指出加筋能有效减小浅埋涵管的上覆土压力。Corey 等^[9]研究了格栅防护浅埋钢骨架 HDPE 管道的受力与变形特点，总结出筋材层数和筋材尺寸对管道垂直土压力和径向变形有显著影响。Hegde 等^[10]采用土工格室+格栅方法防护小直径 PVC 管道，结果表明管道埋深超过 1.5 倍加载宽度时其上覆土压力几乎可以忽略。Kawabata 等^[11]研究表明，采用格栅防护管道可以有效增强其抵抗水平变形的能力。Mohri 等^[12]利用现场试验证明，软土地基上方回填碎石材料并铺设格栅层，可以增强浅埋大直径管道抵抗上浮的能力。相比之下，国内外对循环荷载作用下格栅和埋地管道相互作用的理论研究与模型试验相对较少。鉴于此，这里采用室内模型试验研究循环荷载下格栅加筋防护埋地管道时的变形和力学性能，并结合有限元数值方法综合分析管道埋深、加载板宽度和管径对管道防护性能的影响。

1 循环荷载下格栅防护管道模型试验

1.1 模型试验设备

如图 1 所示，试验装置主要由加载作动器、反力架和模型箱等组成。模型箱的长、宽和高分别为 120，38，100 cm，其主体由 2 cm 厚钢板制成，沿长度方向一侧采用 2 cm 厚钢化玻璃以作为观察窗口，为减少内部摩擦，箱子另外三面内衬 1.2 cm 钢化玻璃；基于 Das^[13]分析尺寸效应表明，加载板宽度应该大于或等于 12 cm，这里选取加载钢板宽度 B 为 20 cm，长度为 37 cm，略小于模型箱内部宽度，以避免加载板与模型箱两侧的摩擦，加载板厚度为 1.6 cm。

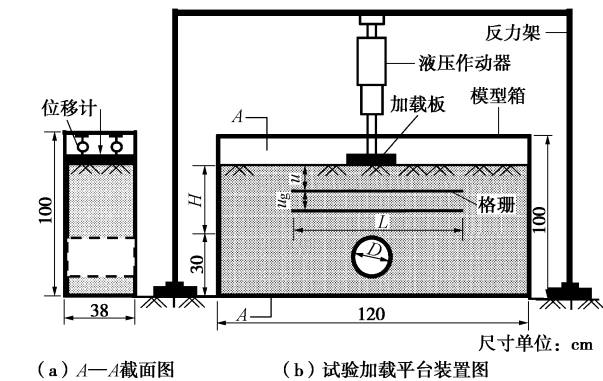


图 1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus of model tests

1.2 试验所用土工格栅

试验采用聚丙烯双向格栅加筋防护埋地管道，其工程特性参数如表 1 所示。为了分析筋材变形，试验加载时取对称一半监测格栅应变，如图 2 所示。

表 1 土工格栅工程特性参数

Table 1 Engineering properties of PP geogrids					
格栅 类型	格栅 厚度	网孔 尺寸	极限 抗拉强度	2%应变时 抗拉强度	5%应变时 抗拉强度
	/mm	/cm	/(kN·m ⁻¹)	/(kN·m ⁻¹)	/(kN·m ⁻¹)
EG3030	1	4×4	30	10.5	21

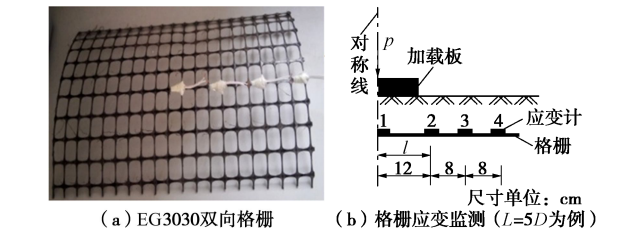


图 2 试验所用格栅及其应变监测示意图

Fig. 2 Geogrids and strains for monitoring in model tests

1.3 埋地管道

试验采用 HDPE 管道，管道外径 $D=125$ mm，管壁厚 $t=4.8$ mm。为避免管两端与试验箱内壁因挤压摩擦产生弯曲，截取管道为 37 cm，使其长度略小于箱子内部宽度，并分别用透明塑料纸和塑料板密封管道两侧，防止试验中管周土进入管道内部，如图 3 所示。

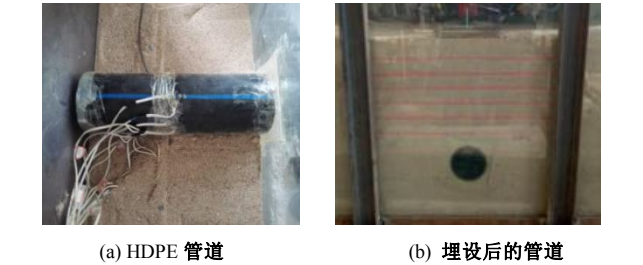


图 3 模型试验所用埋地管道

Fig.3 Buried pipes used in model tests

1.4 管周回填土

试验管周填土为干净河砂，相对密实度为 70%，基于筛分试验得到颗粒级配曲线如图 4 所示，砂土不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 2.65 和为 0.99，为级配不良砂土。砂土最大和最小干重度分别为 19.90 和 15.63 kN/m³。

1.5 模型试验方案

如表2所示，模型试验旨在定性和定量的分析埋地管道地表面受循环荷载作用下，格栅加筋防护设计参数（埋深、长度和间距等）与管道力学性能之间的相互关系。模型试验共分4步骤：①确定首层筋材最佳埋深 u ；②确定合理的筋材长度 L ；③确定合理的筋材层间距 u_g ；④基于上述确定的筋材合理参数即 u 、 L 和

表 2 循环荷载作用下格栅加筋防护埋地管道的试验方案

Table 2 Experimental plans on performance of buried pipes protected by geogrids under cyclic loading

试验描述	管道埋深 H/D	加筋层数 N	首层格栅埋深 u/B	筋材间距 u_g/B	筋材长度 L/D	循环荷载		试验组数
						荷载 P/kPa	频率 f/Hz	
第一阶段：确定最佳的 $(u/B)_{opt}$ 值	3	1	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	—	6	0~300	1	5
第二阶段：确定最佳的 $(L/D)_{opt}$ 值	3	1	$(u/B)_{opt}$	—	2, 3, 4, 5, 6	0~300	1	5
第三阶段：确定最佳的 $(u_g/B)_{opt}$ 值	3	2	$(u/B)_{opt}$	0.2, 0.3, 0.4, 0.5	$(L/D)_{opt}$	0~300	1	4
加筋层数 N 影响	3	1, 2, 3				0~300	1	3
第四阶段 循环荷载 P 影响	3	3	$(u/B)_{opt}$	$(u_g/B)_{opt}$	$(L/D)_{opt}$	0~300	1	2
						0~400	1	2
加载频率 f 影响	3	3				0~300	1, 2	2

注：各组模型试验所用砂土的相对密度 D_r 均为70%。

u_g ，分析筋材层数 N ，荷载水平 P 和加载频率 f 等参数对管道力学性能的影响。试验共计 21 组，去除重复组数，共计 16 组试验。

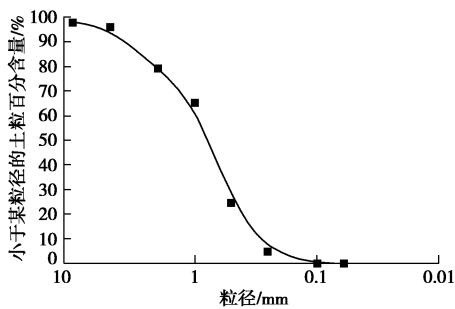


图 4 试验回填河砂颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain size distribution of river sand for filling

试验分别对加载板沉降、管道应变、管道径向变形和格栅应变进行了监测。如图1（a）所示，通过在加载板上轴线上布置两个位移计来监测加载区域沉降，另外，如图5所示，由对称原则选取管周一半布置5个应变监测点以监测管道应变，每点布置2个方向应变片来监测管道轴向和环向应变；在管道内部中心分别沿水平和垂直方向安装自制百分表以监测管道径向变形。

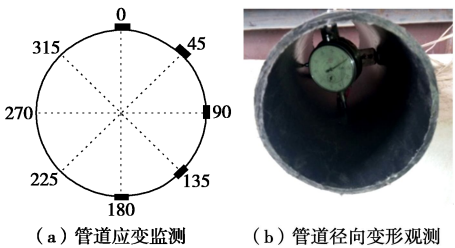


图 5 管道应变与变形监测点布置图

Fig. 5 Layout of monitoring deformations and strains of buried pipes

循环荷载按正弦波施加，变化范围在 $0\sim P_{max}$ ， P_{max} 为300 kPa或400 kPa，频率 f 为1 Hz或2 Hz。模型试验中若出现下列任一情况时则试验终止：

- （1）荷载循环次数达到5000次时；
- （2）监测加载板沉降的位移计读数随加载循环次数增加时线性急剧增大，即视为加载板地基破坏；
- （3）监测管道径向变形的百分表读数随加载次数线性急剧增大，即视为管道变形破坏。

2 试验结果及分析

2.1 埋地管道上方首层筋材的埋深 u 的影响

选取筋材层数 $N=1$ ，长度 $L=6D$ ，管道埋深 $H=3D$ ，循环荷载 $P=0\sim 300$ kPa（ $P_{max}=300$ kPa），频率 $f=1$ Hz，通过改变筋材埋深 u 来分析管道防护性能。图6给出了荷载循环次数 n 为5000次时管道径向变形比 U/D （ U_h ：水平径向变形； U_v ：垂直径向变形）和加载板沉降比 S/B （ S ：加载板沉降； B ：加载板宽度）随 u/B 变化的关系曲线。

由图6可知，随着首层格栅埋深 u （或 u/B ）的增加，管道水平径向变形比 U_h/D 、垂直径向变形比 U_v/D 和加载板沉降比 S/B 均呈现先减小后增大的趋势，且均在 $u/B=0.4$ 处达到最小值。主要原因是当 $u/B<0.4$ 时，首层筋材埋深较浅，筋-土界面上覆土压力较小，二者界面摩擦力较小，由于筋土之间无法有效咬合导致筋材两端上翘，进而在地表面呈现两道明显裂缝（如图7（a）所示），土工格栅加筋效果较差，因此管道径向变形和加载板沉降值增大；当 $u/B\geq 0.4$ 时，随着首层筋材埋深增加，单层格栅加筋作用明显减弱，加载时加载板边缘出现加筋土应力集中现象，加筋土破坏趋

向于砂土自身的破坏(如图7(b)所示),此时管道径向变形比和加载板沉降比增大;当首层埋深比值 $u/B=0.4$ 时,格栅加筋效果最佳,管道变形和加载板沉降控制效果最好。

另外,由图6(a)可知,首层筋材埋深变化时,管道垂直径向变形 U_v 明显大于水平径向变形 U_h ,且 u/B 变化对 U_h 更加敏感, U_h/D 在 $u/B=0.4$ 附近减小量明显大于 U_v/D 减小量,进一步表明 $u/B=0.4$ 时,筋材能更有效地限制土体侧向位移,减小埋地管道水平变形。

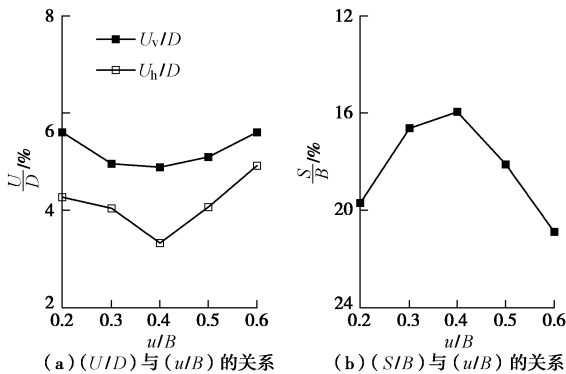


图6 首层筋材埋深对管道变形和加载板沉降的影响

Fig. 6 Effects of embedment depth of uppermost geogrid on radial deformations of pipes and settlements of loading plates

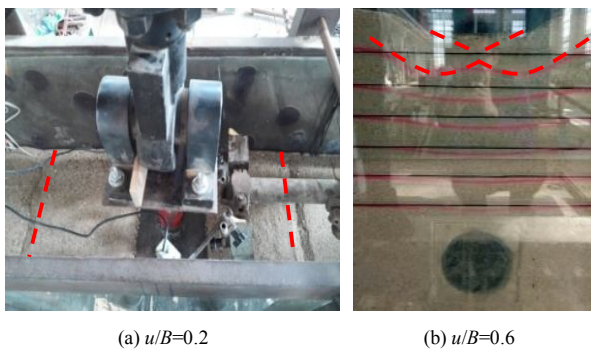


图7 砂土变形图

Fig. 7 Diagram of deformations of sand

为进一步分析 u/B 的影响,通过在管道与加载板之间设置了6层红砂(如图7(b)所示),以观察砂层变化并记录加载板中心线上6个点的沉降,图8为各个点沉降 S_i 变化曲线。由图8(b)可知:在纵向层面,即当 u/B 相同时,随深度增加沉降减少;横向观察6个不同深度处沉降比值 S_i/B ,发现其随首层格栅埋深增加均呈现先减少后增加的趋势,当 $u/B=0.4$ 时各层沉降值最小,其中管顶上方附近沉降增量几乎为0。

综合上述分析可知,加筋防护管道时首层筋材埋深的最佳取值为 $0.4B$,即 $(u/B)_{opt}=0.4$ 。

2.2 筋材的最佳铺设长度 L

选取筋材层数 $N=1$,筋材埋深 $(u/B)_{opt}=0.4$,管道埋深 $H=3D$,循环荷载 $P=0\sim 300$ kPa($P_{max}=300$ kPa),频率 $f=1$ Hz,通过改变筋材长度 L 来分析其对管道防护性

能的影响。图9为加载结束后管道水平与垂直径向变形比值 U_h/U_v 和加载板沉降变化规律。

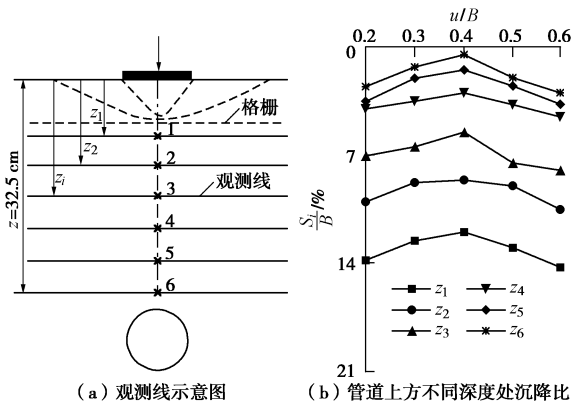


图8 不同筋材埋深时管道上方不同深度处沉降比

Fig. 8 Settlement ratios at different embedment depths of geogrids above buried pipes

由图9可知,随着筋材长度 L 增加(即 L/D 由2增至6),管道径向变形比值 U_h/U_v 和沉降比 S/B 均逐渐减小,但减小速率逐渐放缓,当 $L\geq 5D$ 时,变形比和沉降比减小速率基本不变,趋于稳定,即当 $L/D\geq 5$ 时,筋材长度对二者不敏感,继续增加筋材长度时加筋作用不明显。由此表明,筋材长度临界值 L 为 $5D$ 。

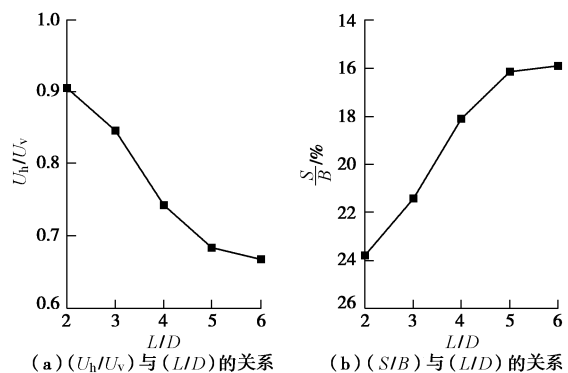


图9 筋材长度(L/D)对管道性能的影响

Fig. 9 Effects of variation of L/D on performance of buried pipes

另外,图10为不同筋材长度时应变分布情况,由图可知,筋材中点即加载板中心点正下方的应变最大,

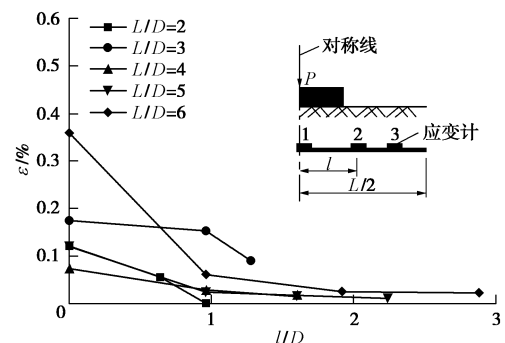


图10 筋材长度(L/D)对筋材应变分布规律的影响($n=500$)

Fig. 10 Effects of L/D on distribution of strains of geogrids ($n=500$)

距中心点越远,即 l 越大,筋材应变减少;当筋材长度 $L \geq 2D$ 时,距中心点距离 $l \geq D$ 时,筋材应变显著减少;且当 l 在 $(2 \sim 2.5)D$ 范围时,筋材应变趋于0,此时筋材长度 $L=(4 \sim 5)D$,即设置更长的筋材时作用不明显。

综合上述分析,筋材长度 L 宜为 $5D$,即 $(L/D)_{\text{opt}}=5$ 。

2.3 筋材的最佳层间距 u_g

基于确定的 $(u/B)_{\text{opt}}=0.4$ 和 $(L/D)_{\text{opt}}=5$,选取筋材层数 $N=2$,埋深 $H=3D$,循环荷载 $P=0 \sim 300$ kPa($P_{\text{max}}=300$ kPa),频率 $f=1$ Hz,通过变化筋材层间距 u_g 来分析其对管道变形 U/D 和砂土表面加载板沉降 S/B 的影响,结果如图11所示。由图可知,随着 u_g 增加,管道水平和垂直径向变形均呈先增大后减小的趋势,加载板沉降呈明显减小趋势,当 $u_g \geq 0.4B$ 时沉降趋于稳定,表明筋材层间距增加,层间土层厚度增加,有利于发挥筋-土间的摩擦力,从而增强加筋效果,提高土体承载力,达到减小砂土沉降的目的。

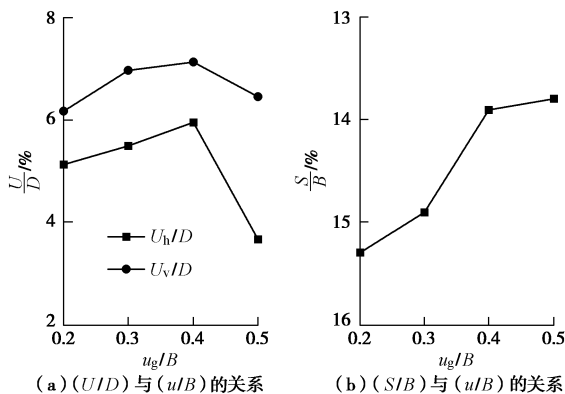


图 11 筋材层间距 u_g 对管道变形和加载板沉降的影响

Fig. 11 Effects of spacing of geogrids on radial deformation of pipes and settlements of loading plates

另外,图12给出了不同层间距的管道环向应变变化规律,由图可知,随着 u_g/B 增大,管道环向应变整体呈减小趋势,结合图5(a)可知在 45° 、 90° 和 180° 处应变减小规律明显,当 $u_g/B=0.5$ 时各监测点管道环向应变 ε_θ 均达到最小值,表明合理的筋材层间距,将有利于筋材在砂土中抑制土体变形,从而更充分的发挥格栅的加筋减载作用,减小管道环向应变。

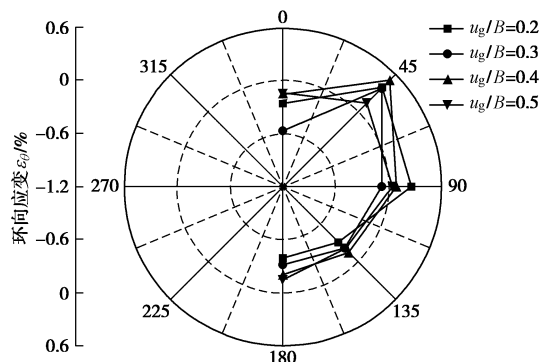


图 12 筋材层间距对管道环向应变 ε_θ 的影响

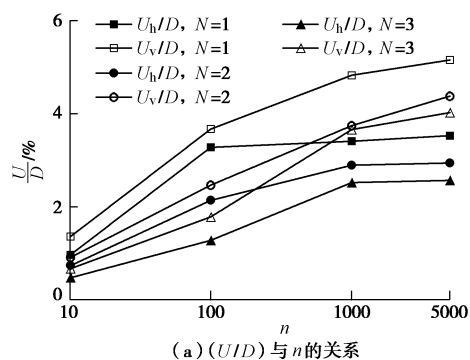
Fig. 12 Effects of spacing of geogrids on hoop strains of pipes

综合上述,格栅最佳层间距为 $(u_g/B)_{\text{opt}}=0.5$,后续试验中筋材层间距 u_g 均为 $0.5B$ 。

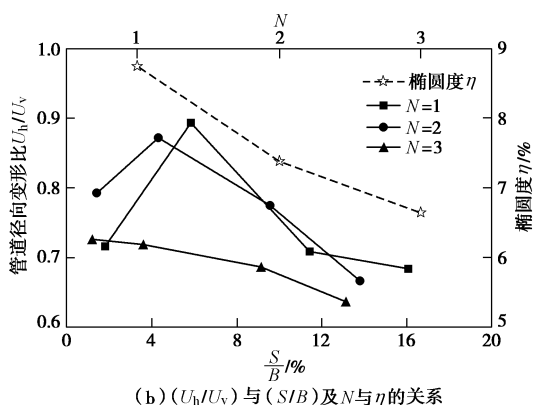
2.4 筋材层数 N 对管道力学性能的影响

选取 $(u/B)_{\text{opt}}=0.4$ 、 $(L/D)_{\text{opt}}=5$ 和 $(u_g/B)_{\text{opt}}=0.5$,管道埋深 $H=3D$,循环荷载 $P=0 \sim 300$ kPa($P_{\text{max}}=300$ kPa),频率 $f=1$ Hz,通过改变筋材层数 N 来研究管道径向变形比 U/D 、加载板沉降比 S/B 和管道环向应变 ε_θ 的分布规律,结果如图13和14所示。

由图13可知,循环次数 n 相同时,随着筋材数量 N 的增加,管道径向变形比 U/D 和沉降比 S/B 均逐渐减小,与铺设单层筋材相比:当采用双层筋材加筋防护时,管道水平(U_h/D)和垂直径向变形比(U_v/D)分别减小17.1%和14.9%,当采用3层筋材时, U_h/D 和 U_v/D 分别减小27.5%和22.1%,表明增加筋材层数能显著提高土体强度,并可将荷载更有效地扩散,限制土体侧向变形,提高砂土承载力,从而减小管道变形;当筋材层数 N 不变时,随着循环次数 n 的增加, U/D 累计增加,但循环次数 $n \geq 100$ 后管道变形增幅减缓,表明荷载加载一定循环次数后管道变形逐渐趋于稳定。



(a) (U/D) 与 n 的关系



(b) (U_h/U_v) 与 (S/B) 及 N 与 η 的关系

图 13 管道变形和加载板沉降随筋材层数变化的关系曲线

Fig. 13 Variation of deformation and settlement of loading plate with geogrid layers

这里引入椭圆度来分析格栅在抑制管道变形方面的作用,椭圆度 η 反映地表荷载下管道产生水平向外侧鼓胀和垂直径向压缩的椭圆状变形程度,计算公式为^[14]: $\eta=2(D_{\text{max}}-D_{\text{min}})/(D_{\text{max}}+D_{\text{min}})$ (式中 D_{max} 为最大管

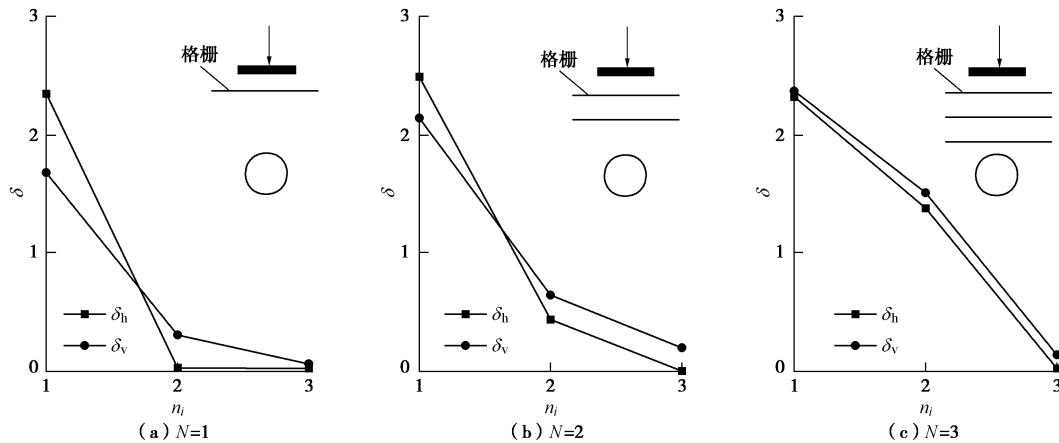


图 14 筋材层数对管道变形增量比的影响

Fig. 14 Effects of geogrid layers on deformation increment ratio of buried pipes

外径, D_{\min} 为最小管外径, $D_{\max}=D+U_h$, $D_{\min}=D-U_v$), 以此衡量管道变形程度。由图 13 (b) 可知, 椭圆度随格栅层数增加而减少, 这有利于管道维持近似圆形截面的工作状态。当格栅铺设 3 层时, 随着加载板沉降增加, U_h/U_v 持续减小, 椭圆度较小; 格栅铺设 1 和 2 层时, 随加载板沉降增加, U_h/U_v 先增加后逐渐减少, 表明筋材在加载板沉降达到一定程度后开始抑制管道变形。

为进一步表征筋材层数与管道径向变形的关系, 这里采用管道变形增量比 δ , 即每一加载阶段管道径向变形增量和该阶段管道起始变形的比值, 计算公式为: $\delta=(U_2-U_1)/U_1$ (式中 U_2 为加载阶段末期管道径向变形, U_1 为加载阶段初期的管道径向变形)。图 14 给出了同一管径不同筋材层数 N 时管道变形增量比 δ 的变化曲线 (图中: n_1 为循环次数 n 从 10 次增加到 100 次; n_2 为循环次数 n 从 100 次增加到 1000 次; n_3 为循环次数 n 从 1000 次增加到 5000 次)。

由图 14 可知: 筋材层数相同时, 管道水平 (δ_h) 和垂直 (δ_v) 径向变形增量比均随 n_i 的增加不断减小, 表明加载后期管道变形趋于稳定。当筋材层数不同时, 增量比减小幅度出现差异, 如: $N=1\sim 2$ 时 δ 随 n_i 的增加先大幅度减小后降幅减缓, 且在 n_1 处 $\delta_h > \delta_v$, 在 n_2 和 n_3 处 $\delta_h < \delta_v$; $N=3$ 时 δ 降幅一直增加且水平方向增量比始终略小于垂直方向。表明采用 3 层格栅防护埋地管道时, 筋土之间整体性更好, 相互之间连接能力更强, 使得筋材在加载过程中能一直保证其加筋减载作用的高效发挥, 从而在限制管道变形尤其是水平方向变形方面表现出色, 当筋材数量减少为单层或双层时, 其加筋效果随之减弱, 因此呈现加载初期管道水平变形控制不理想且加载后期变形降幅减缓。

图 15 为不同筋材层数时管道环向应变 ϵ_θ 分布图。由图可知, 当管道埋深相同时, 增加筋材层数, 管道环向应变逐渐减小, 尤其是由 1 层增加到 2 层时, 管

道环向应变显著减小, 且管顶减小量更大, 当筋材层数增至 3 层时, 相比 2 层时管道应变无明显变化。此外, 管道在管顶 (0°), 管侧腹部 (135°) 和管底 (180°) 应变均为负值, 表明管道在这些应变点以受压为主, 而在管道右上方 (45°) 和管侧水平位置 (90°) 应变为正值, 说明这两处管道更多承受了拉应力, 表现为向外鼓胀。

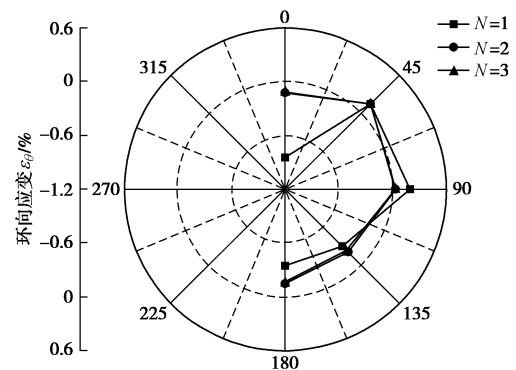


图 15 筋材层数对管道环向应变的影响

Fig. 15 Variation of hoop strains of buried pipes with geogrid layers

2.5 荷载水平 P 和加载频率 f 对管道力学性能影响

选取 $(u/B)_{\text{opt}}=0.4$ 、 $(L/D)_{\text{opt}}=5$ 和 $(u_g/B)=0.5$, 管道埋深 $H=3D$, 筋材层数 $N=3$, 施加频率相同 ($f=1$ Hz) 但 2 种循环荷载水平分别为 $0\sim 300$ kPa ($P_{\max}=300$ kPa) 和 $0\sim 400$ kPa ($P_{\max}=400$ kPa)。另外, 保持相同荷载水平 $P=0\sim 300$ kPa, 但频率 f 分别取 1 和 2 Hz, 综合对比分析对管道力学性能影响。

图 16 给出了不同荷载和频率时管道径向变形比和加载板沉降比变化规律, 当循环荷载为 $0\sim 400$ kPa 变化时, 循环 500 次以后管道径向变形比超过 $7.5\%D$, 基于大量试验和国内外相关规范规定^[15], 当柔性管道变形率超过 $7.5\%D$ 时, 管道输送效率明显降低, 因此这里选取循环次数 n 为 500 次时重点分析管道性能。

由图 16 可知, 增加荷载水平或降低荷载频率, 管道水平、垂直径向变形、椭圆度 η 和加载板沉降 S/B 总体上呈增加趋势; 当循环次数 n 不变时, 相同加载频率下, 荷载变化范围由 0~300 kPa 变化到 0~400 kPa 时, 管道径向变形、管道椭圆度和加载板沉降显著增加, 水平径向变形比 U_h/D 、垂直径向变形比 U_v/D 和沉降比 S/B 分别增加了约 5.52 倍、2.10 倍和 2.63 倍, 且 $P=0\sim 400$ kPa 时, 加载初期水平径向比垂直径向变形大, 表明提高荷载水平对管道力学响应影响较大; 当荷载水平保持不变时, 低频荷载 ($f=1$ Hz) 时, U_h/D 、 U_v/D 和 S/B 比高频荷载 ($f=2$ Hz) 时分别增加了 1.34 倍、1.33 倍和 1.09 倍, 表明由于低频荷载作用在加载板上的持续时间较长, 因此对管道及管周土体影响更大。

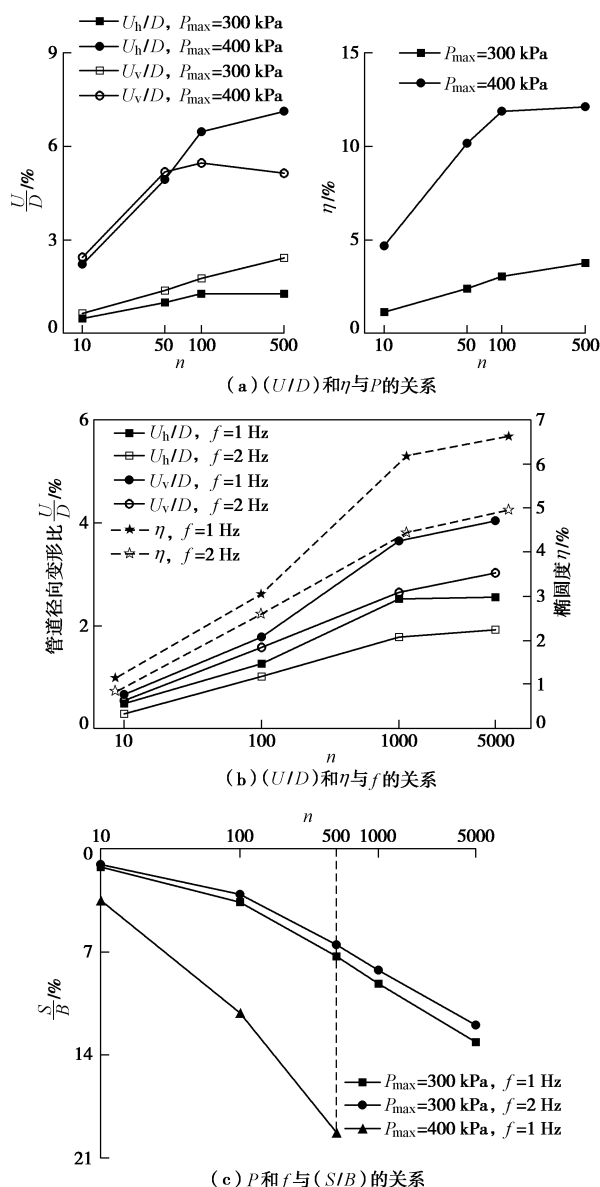


图 16 荷载 P 和频率 f 对管道变形和加载板沉降的影响

Fig. 16 Effects of P and f on radial deformation of buried pipes and settlement of loading plates

另外, 由图 16 中不同荷载和频率与管道椭圆度关系可知, 荷载水平对管道椭圆度影响更显著, 如 $n=10$ 时, 较高荷载水平 ($P_{max}=400$ kPa) 对应的管道椭圆度是较低荷载水平 ($P_{max}=300$ kPa) 对应椭圆度的 3.04 倍, 而低频荷载 ($f=1$ Hz) 对应的椭圆度是高频 ($f=2$ Hz) 的 1.41 倍, 当 n 增加到 100 次时, 提高荷载水平管道椭圆度增加了 2.88 倍, 而降低荷载频率椭圆度仅增加了 17.7%, 表明与改变荷载频率相比, 变化荷载水平在影响管道椭圆化变形中占据更主要的位置。

图 17 为改变荷载水平和加载频率时管道环向应变 ε_θ 分布图。由图可知: 在相同条件下, 将荷载 P_{max} 由 300 kPa 提高到 400 kPa 时, 管周应变明显增大; 当保持荷载和循环次数相同时, 采用低频 ($f=1$ Hz) 加载方式管道应变更大, 原因与之前分析一致: 低频率时荷载作用持续时间相对较长, 对管道性能的影响更大; 当保持荷载和频率相同时, 循环次数 n 的增加也会造成管周应变的增大。

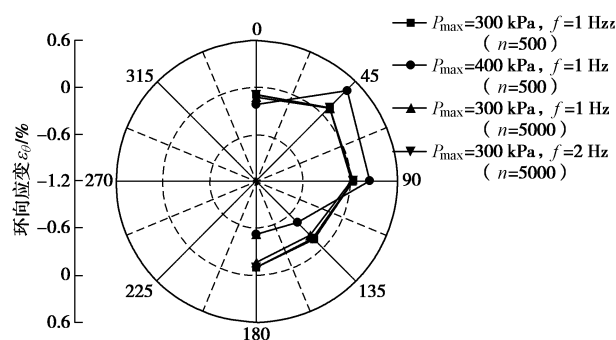


图 17 荷载与频率变化对管道环向应变 ε_θ 的影响

Fig. 17 Effects of loads and frequency on hoop strains, ε_θ , of buried pipes

2.6 循环荷载作用下格栅应变变化规律

针对 $(u/B)_{opt}=0.4$ 、 $(L/D)_{opt}=5$ 、 $(u_g/B)=0.5$ 和 $H=3D$, 选取格栅层数 $N=3$ 时, 综合分析循环荷载作用下筋材应变变化规律, 结果如图 18 所示, 其中各层筋材应变监测点如图 2 (b) 所示。

图 18 (a) 为荷载水平和频率相同时, 循环次数 n 对 3 层筋材的应变的影响。由图可知, 相同循环次数时加载板中心点正下方格栅的应变最大, 并随着离中心点距离增加格栅应变迅速减少, 一旦格栅长度超出加载板边缘范围, 格栅应变减少并渐趋于零。对同一层格栅, 随着循环次数 n 的增加, 格栅中心点的应变先增加, 但循环次数 500 次后开始呈现减小趋势, 而加载板边缘下方格栅应变变化无规律, 但整体变化不大, 而超出加载板范围的格栅应变几乎无变化, 表明循环次数对其影响不大。

图 18 (b) 为相同循环次数和频率时, 通过变化荷载水平时对格栅应变的影响。由图可知, 提高荷载

水平, 各层格栅应变均不同程度的增加, 格栅中心点的应变值变化明显, 且埋深越浅, 格栅应变值越大; 当提高加载频率时, 如图 18 (c) 所示, 格栅的各监测点应变值均减少, 表明低频率荷载作用对格栅应变影响更敏感。

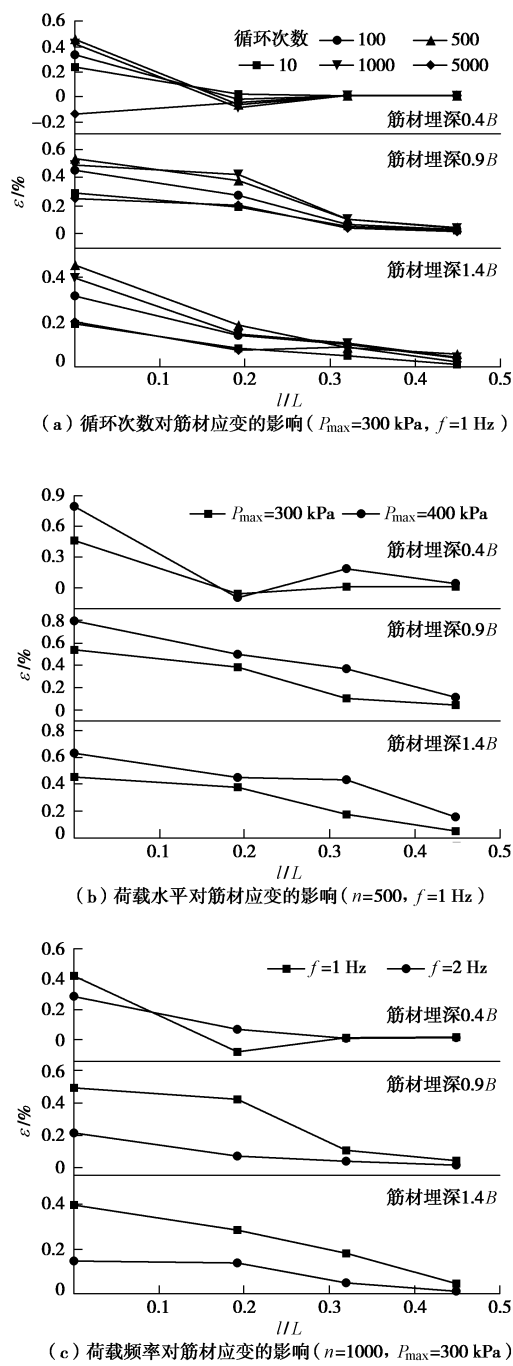


图 18 循环荷载作用下筋材应变分布

Fig. 18 Distribution of strains of geogrids under cyclic loading

3 讨 论

上述模型试验结果主要是针对管道埋深 $H=3D$ 和加载板宽度 $B=1.6D$ 时得到, 尚未考虑管道埋深、加载板宽度或管道直径改变时对管道力学性能的影响。

鉴于此, 这里借助有限元数值方法, 重点分析管道埋深、加载板宽度和管道直径对管道力学性能的影响。

3.1 有限元数值模型的建立

基于室内模型试验, 这里建立了二维数值模型, 数值模型的尺寸和网格划分如图 19 所示。回填砂土采用莫尔-库仑弹塑性模型, 为四边形单元, HDPE 管道、格栅和加载板采用理想弹性模型, 基于室内实测得到模型参数如表 3 所示。

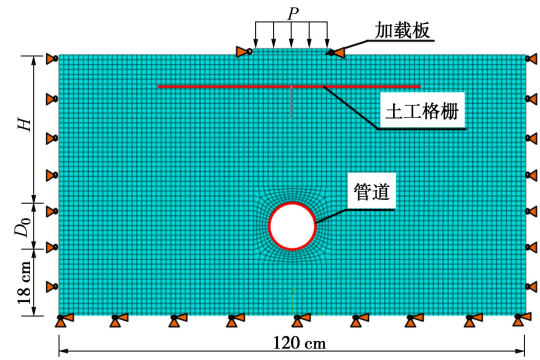


图 19 数值模型网格划分示意图

Fig. 19 Schematic diagram of meshes in numerical simulation

表 3 数值计算中模型参数取值

Table 3 Model parameters used in numerical simulation

模型材料	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量 /MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力 /kPa	泊松比
砂土	1.839	15	35	5	0.3
管道	0.965	1412	—	—	0.35
筋材	0.950	2600	—	—	0.3
加载钢板	0.785	3000	—	—	0.3

管道和土体、加载板和土体之间摩擦系数分别为 0.6 和 0.3。在加载板表面以均布荷载形式施加循环荷载, 基于模型试验分析可知, 当荷载循环次数 $n\geq 100$ 时加载板沉降和管道变形变化渐趋于稳定。因此, 这里数值模拟荷载循环作用次数以 $n=100$ 、加载幅值 300 kPa 和频率 1 Hz 时为例。模型左右边界施加水平约束, 底部边界施加水平和竖向约束, 如图 19 所示。有限元数值模拟计算讨论的工况如表 4 所示。

表 4 数值模型的计算工况

Table 4 Conditions used in numerical model

数值计算时 管径 D_0	管道 埋深 H/D_0	加载板 宽度 B/D_0	筋材埋深 u/B	筋材长度 L/D_0
D	2, 3, 4	1.6	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	6
D	3	1.0, 1.6, 2.0	0.4	6
$0.5D, D, 1.5D$	3	1.6	0.4	2, 3, 4, 5, 6

注: 表中 $D=125\text{ mm}$, 为模型试验的管道外径。

3.2 有限元数值模拟结果讨论

图20给出了荷载循环作用100次时不同管道埋深下管道水平径向变形比 U_h/D_0 和垂直径向变形比 U_v/D_0 随筋材埋深 u/B 的变化。由图中 $H=3D_0$ 时模拟和实测数值的对比可知, 数值计算的管道变形比实测值要小些, 但总体上数值模拟和实测得到管道变形规律基本一致, 表明数值模型计算结果是可靠的。三种不同管道埋深时, 管道径向变形比均随首层筋材埋深增加呈现先减小后增加的趋势, 且均在 $u/B=0.4$ 时变形达到最小, 由此可知, 三种不同管道埋深下筋材最佳埋深仍为 $0.4B$, 与试验结果相同。另外, 同一筋材埋深下, 随着管道埋深增加, 管道径向变形减小, 表明管道埋深越大, 相同的地表荷载对管道变形的影响逐渐减弱。

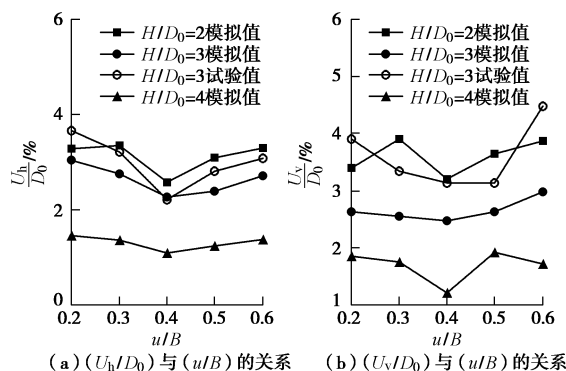


图20 管道埋深对管道径向变形的影响

Fig. 20 Effects of buried depth on radial deformation of pipes

图21给出了不同加载板宽度时, 管道水平径向变形比 U_h/D_0 和垂直径向变形比 U_v/D_0 随荷载循环次数 n 的变化 (管道水平变形扩张伸长为正; 垂直变形压缩变小为负)。如图所示: 同等条件下, 管道径向变形随着加载板宽度的增加而增大, 这是由于加载板宽度增加, 荷载作用的有效面积扩大, 对管道受力影响更加显著; 当加载板宽度相同时, 随着循环次数增加, 管道径向变形逐渐增大。

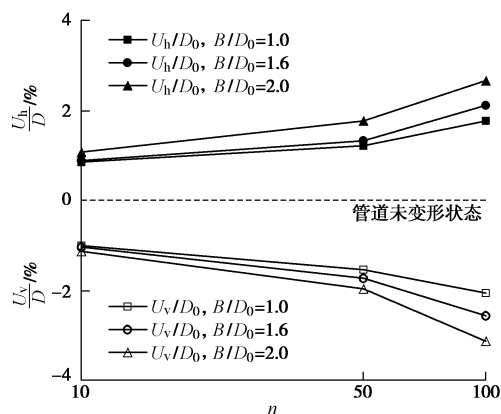


图21 加载板宽度对管道变形的影响

Fig. 21 Effects of width of loading plates on deformation of pipes

图22显示了荷载循环作用100次以后, 不同管道直径下管道径向变形随筋材长度变化的曲线。由图可知: 在筋材长度与管径比值 (L/D_0) 相同时, 随着管道直径增加, 管道径向变形比先增加后减小, 这是由于当管道直径 D_0/D 从0.5增加到1.0时, 由于管道厚径比 t/D_0 减小, 管道自身抵抗变形的能力降低, 导致管道水平和垂直径向变形比均增加, 继续增加 D_0/D 至1.5时, 筋材控制管道变形的能力发挥较充分, 克服了管道抗变形能力较差的缺点, 如筋材长度 $L=4D_0$ 时, $D_0/D=1.0$ 的管道上方筋材长度为50 cm, $D_0/D=1.5$ 的管道上方筋材长度为75 cm, 增加的筋材长度对限制管道变形的作用显著, 因此管道径向变形比减小; 随着筋材长度 (L/D_0) 增加, 管道水平径向变形比 U_h/D_0 和垂直径向变形比 U_v/D_0 均逐渐减小, 如筋材长度 L 从 $2D_0$ 增加到 $6D_0$ 时, 管道直径 $D_0/D=0.5$ 时, U_h/D_0 和 U_v/D_0 分别减小37.2%和43.6%, 当 D_0/D 增加到1.0时, U_h/D_0 和 U_v/D_0 分别减小了23.2%和27.1%, 当 D_0/D 增加到1.5时, U_h/D_0 和 U_v/D_0 分别减小了40.3%和31.3%, 表明增加筋材长度对限制管道变形有显著效果。

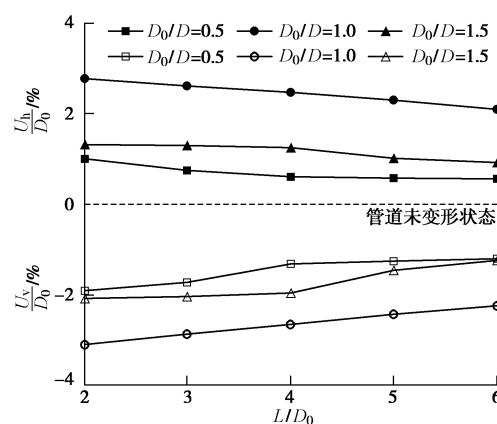


图22 管道直径对管道变形的影响

Fig. 22 Effects of pipe diameter on deformation of pipes

4 结 论

(1) 基于单层格栅用于加筋防护埋地柔性管道, 以管道性能和加载板沉降为判别指标, 针对管周砂土相对密实度为70%和埋深为 $3D$ 的管道, 开展循环荷载作用下管道力学性能综合试验, 确定了首层格栅最佳埋深和长度分别为 $0.4B$ 和 $5D$, 进而采用双层格栅加筋, 确定了格栅最佳层间距为 $0.5B$ 。

(2) 增加格栅层数, 管道水平、垂直径向变形比和加载板沉降均明显减小, 管道椭圆度减少, 且管道沿管周轴向应变明显减少且趋于均匀, 表明增加格栅层数有助于抑制管道变形, 为维持管道截面为圆形提供了保障。

(3) 提高循环荷载水平或者降低荷载频率, 管道

径向变形比、地表加载板沉降、管道环向应变均表现为增加趋势,表明高水平、低频率的循环荷载对埋地管道的力学性能影响更显著。

(4) 基于有限元数值模拟综合分析了管道埋深、加载板宽度和管径变化对埋地管道变形性能的影响,结果表明增加管道埋深或减小加载板宽度,管道径向变形减小;同等荷载和相同的筋材长度与管径比值时,当管道直径较小时,筋材加筋作用不明显,在控制管道变形方面效果较弱,当管径增至一定程度时,筋材加筋作用效果增强,有利于限制管道变形。

参考文献:

- [1] 黄强兵, 梁 奥, 门玉明, 等. 地裂缝活动对地下输水管道影响的足尺模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(1): 2968 - 2977. (HUANG Qiang-bing, LIANG Ao, MEN Yu-ming, et al. Full-scale model test on behaviors of urban underground water delivery pipeline crossing active ground fissure zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(1): 2968 - 2977. (in Chinese))
- [2] 龚晓南, 孙中菊, 俞建霖. 地面超载引起邻近埋地管道的位移分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 305 - 310. (GONG Xiao-nan, SUN Zhong-ju, YU Jian-lin. Analysis of displacement of adjacent buried pipeline caused by ground surcharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 305 - 310. (in Chinese))
- [3] 李镜培, 丁士君. 邻近建筑荷载对地下管线的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, **32**(12): 1553 - 1557. (LI Jing-pei, DING Shi-jun. Influence of additional load caused by adjacent buildings on underground pipeline[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, **32**(12): 1553 - 1557. (in Chinese))
- [4] 董冬冬, 王 非, 张亚军, 等. 交通荷载作用下 HDPE 管道附加弯矩变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**(1): 80 - 88. (DONG Dong-dong, WANG Fei, ZHANG Ya-jun, et al. Study on the changing mechanism of additional bending moment in buried HDPE pipes under traffic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**(1): 80 - 88. (in Chinese))
- [5] 张孟喜, 林青松, 刘飞禹. 循环荷载作用下土工格栅拉伸试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(7): 2024 - 2029. (ZHANG Meng-xi, LIN Qing-song, LIU Fei-yu. Tensile experiments of geogrids under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2024 - 2029. (in Chinese))
- [6] 杨广庆, 庞 巍, 吕 鹏, 等. 塑料土工格栅拉伸特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(9): 2387 - 2391. (YANG Guang-qing, PANG Wei, LÜ Peng, et al. Experimental study of tensile properties of geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(9): 2387 - 2391. (in Chinese))
- [7] KWON J, TUTUMLUER E, AL-QADI I L. Validated mechanistic model for geogrid base reinforced flexible pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, **135**(12): 915 - 926.
- [8] TURAN A, NAGGAR H E, VALSANGKAR A. Earth pressure reduction system using geogrid-reinforced platform bridging for buried utilities[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(6): 04015024.
- [9] COREY R, HAN J, KHATRI D K, et al. Laboratory study on geosynthetic protection of buried steel-reinforced HDPE pipes from static loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(6): 04014019.
- [10] HEGDE A, KADABINAKATTI S, SITHARAM T G. Use of geocells to protect buried pipelines and underground utilities in soft clayey soils[C]// Geo-Chicago, 2016: 914 - 924.
- [11] KAWABATA T, SAWADA Y, UCHIDA K, et al. Lateral loading experiments on thrust protecting method for buried bend with geogrid[C]// Geo-Frontiers Congress, 2005: 1 - 8.
- [12] MOHRI Y, FUJITA N, KASAHARA K, et al. Mechanical behavior of large flexible pipe buried in shallow cover: field performance of pipeline with uplift enhancement by use of geogrids[C]// Pipeline Division Specialty Conference, 2001: 1 - 9.
- [13] DAS B M, SHIN E C, OMAR M T. The bearing capacity of surface strip foundations on geogrid-reinforced sand and clay: a comparative study[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1994, **12**(1): 1 - 14.
- [14] Canadian Standards Association. CSA Z662—15 Oil and gas pipeline systems[S]. Mississauga: CSA, 2015.
- [15] 高立新. 埋地塑料排水管道径向变形浅析[J]. 给水排水, 2010, **36**(9): 171 - 173. (GAO Li-xin. Analysis of radial deformation of buried plastic drainage pipes[J]. Water and Wastewater Engineering, 2010, **36**(9): 171 - 173. (in Chinese))