

上海软土地区 HDPE 螺旋管现场荷载下的 试验研究

方有珍^{1,2}, 王秀丽², 朱彦鹏²

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: HDPE(high-density polyethylene, 即高密聚乙烯)螺旋管以其独特的优点, 在工程中有着十分广泛应用前景。主要针对上海软土地基的特点, 根据现场施工条件来模拟试验加载方案, 对大型 HDPE 螺旋管在不同的加载阶段的管道的受力与变形规律以及管-土共同工作机理进行了分析, 以便为大型 HDPE 螺旋管在工程中应用推广提供可靠理论依据。通过对试验测试数据的整理分析, 给出了在上海软土地区大型 HDPE 螺旋管的埋设方式、合理管沟尺寸、覆土层厚度以及密度等有关参数, 并为其工程应用提出相关技术要求和建设, 供相关工程设计和施工人员参考。

关键词: 排水工程; HDPE 螺旋管; 软土; 加载模拟; 管-土共同工作机理

中图分类号: TU 992.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)05-0889-09

TESTING STUDY ON HPDE SPIRAL PIPE USED IN SOFT SOIL AREA OF SHANGHAI

FANG You-zhen^{1,2}, WANG Xiu-li², ZHU Yan-peng²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: HPDE (high-density polyethylene) spiral pipe has a broad application prospect for its unique properties. In a test on its application in soft soil area of Shanghai, the loading scheme simulates the load situation of practical projects. The mechanics-deformation patterns of HPDE spiral pipe and pipe-soil interaction mechanisms in various experimental stages are analyzed based on the test data and properties of soft soil in Shanghai, which offers the theoretical basis for its application in engineering field. Some suggestions and technical requirements are provided for design and construction in Shanghai in aspects such as laying style, rational channel dimension, and thickness and density of backfill.

Key words: drainage works; HPDE spiral pipe; soft soil; loading simulation; pipe-soil interaction mechanism

1 引言

大型 HDPE(high-density polyethylene, 即高密聚乙烯)螺旋管是引进澳大利亚 LIBROC 公司的专

利技术, 由中外合资企业兰州晟泰大型塑料管工程有限公司生产的地下排水管道。这种新型管道与目前工程中常用的铸铁管、水泥管相比, 具有自重轻、运输方便、施工简单、工期短、耐腐蚀性强和综合造价低等独特的优点, 有着十分广阔的应用前景^[1-10]。

收稿日期: 2003-11-17; **修回日期:** 2004-01-02

基金项目: 上海市政公司攻关合作项目; 兰州理工大学学术梯队与特色研究方向重点资助项目

作者简介: 方有珍(1972-), 男, 1996年毕业于甘肃工业大学工业与民用建筑工程专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事结构工程和工程力学方面的研究工作。E-mail: FYZ72@yahoo.com.cn.

我国自 20 世纪 70 年代以来开始应用硬质聚氯乙烯管材,1988 年,国家计划发展委员会资源节约和综合利用司及中国建筑技术发展中心和建设部科技情报所进行了“我国高分子塑料管发展战略研究”的课题研究。上海自 1992~1997 年一直进行“硬聚氯乙烯(UPVC)加筋管工程应用研究”,用于管径 600 mm 的市政工程,也取得了很好的经济效益、社会效益和环境效益。对于直径大于 600 mm 以及更大的地下管道目前仍然采用水泥管。由于大型 HDPE 螺旋管(直径 $D = 1\ 200\ \text{mm}$)作为上海城市排水管道尚属首例,工程界对其受力性能和特点及某些设计技术参数选定尚存在一定的疑虑。因此,对大型 HDPE 螺旋管在上海软土地基埋设后的受力性能、管-土共同工作机理及规律进行试验和应力分析,并根据现场具体施工条件,提出合理的设计及施工建议,具有十分重要的科学研究意义和工程应用价值。

2 试验现场条件的概述

2.1 工程概况

为了使 HDPE 螺旋管试验段具有区域应用代表性,本次试验段选在实际工程——合流污水沪闵外排 1.4 标元江路段污水管道工程。同时结合具体的施工工艺和现场条件,采用 24 t 挖掘机进行加载试验,并进行重复加载。显然,在上述诸多不利条件下所取得的试验数据能充分验证大型 HDPE 螺旋管道在实际工程中能否满足工程使用和安全可靠性要求,这对大型塑料管在上海市市政工程中的推广应用将具有重大的实际意义。

试验段全长 150 m,位于朱塘路、罗东路之间,管道埋设深度为 4.5 m,管道内径为 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 。该管道的服务对象为氯碱总厂、热电总厂等,该段管道所处的土层为淤泥质饱和粘土,常年地下水位在原地面以下 1.5 m 左右。根据施工现场条件,采用开槽埋管、轻型井点降水等方法。

2.2 土质特征

试验现场土质为上海地区典型的淤泥质软土,含水量很高,土基本上处于饱和状态,具体特征参数由现场地质勘测报告得到,详见表 1。

3 试验方案的设计

3.1 管道尺寸及埋设方式

目前,大型 HDPE 螺旋管道的埋设方式有:沟埋式、上埋式和隧道式。考虑到市政工程的实际需要,本次试验段采用了上海地区惯用的横列板支撑沟埋方式。沟型及尺寸如图 1 所示。

3.2 试验装置和仪表布置

试验中在管道内外侧沿环向和纵向粘贴一定数量的适应大应变的应变片,采用 7V08 数值采集系统测定指定点的应变,并在外侧土中放置一定数量的压力盒,与 JD-5 型钢弦周期测定仪配套使用,直接观测土层压力的变化。采用位移计和千分表,测量指定点的位移,具体方案测点布置详见图 2,进而观测 HDPE 螺旋管的压扁率。为了模拟不同施工条件的不利施工荷载,直接以施工现场的 24 t 挖掘机代替,以便测试 HDPE 螺旋管的受力变形性能。

表 1 土的特征系数

Table 1 The characteristic parameters of soil

土层名称	土层布置/m	采样深度/m	土的基本物理指标			土粒比重 d_s	土的流限 $w_L/\%$	土的塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	土的力学特征			
			含水率 $w/\%$	湿重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	饱和度 S_t						压实系数 α_{1-2}	压实模量 E_s/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
杂填土	- 1.0~0	1.75	29.0	19.0	96.5	2.74	40.1	21.6	18.5	0.40	0.290	6.27	18.69	17.5
褐黄色粘土	- 3.2~ - 1.0	3.75	47.0	17.1	98.5	2.74	41.9	22.2	19.7	1.26			12.40	9.0
灰色淤泥夹砂粘土	- 5.0~ - 3.2	5.75	50.0	17.0	99.8	2.75	47.0	23.6	23.4	1.13	1.175	2.02	14.29	7.0
		8.75	54.7	16.7	100.0	2.76	48.4	24.0	24.4	1.26	1.222	2.29		
灰色淤泥质粘土	- 15.0~ - 5.0	11.75	64.4	16.0	100.0	2.75	46.4	23.5	22.9	1.79	1.568	1.76	8.13	7.0
		14.75	45.1	17.1	96.1	2.76	48.4	24.0	24.4	0.86	0.734	2.99		

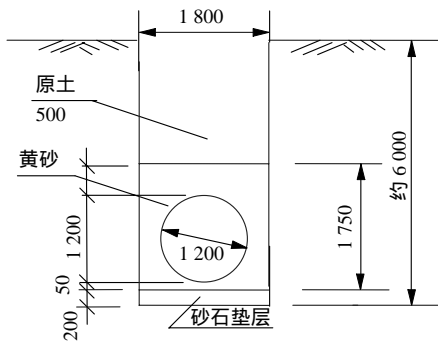
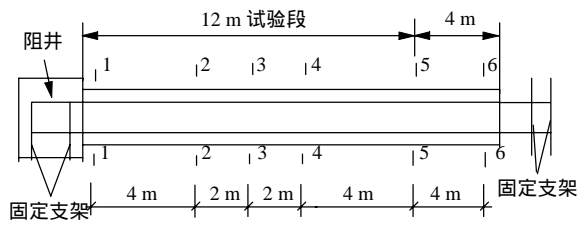
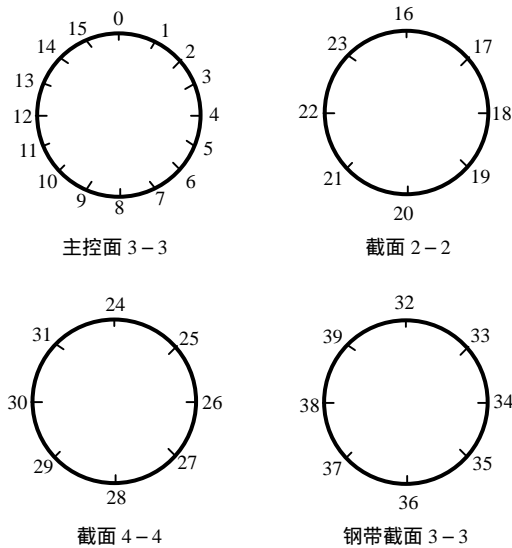


图 1 管沟尺寸详图(单位: mm)

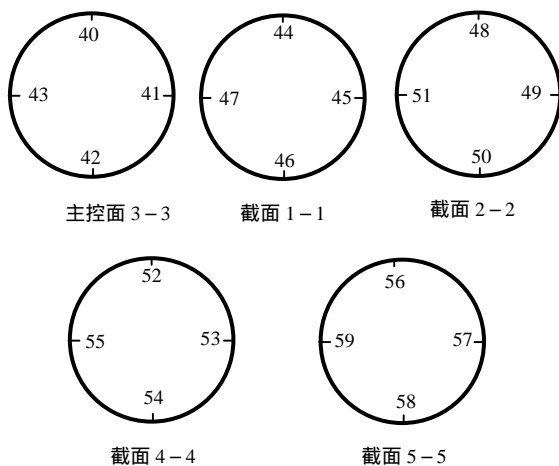
Fig.1 Channel geometry (unit: mm)



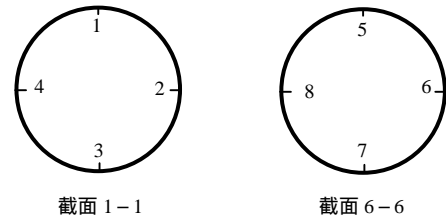
(a) HDPE 螺旋管试验段测点方案图



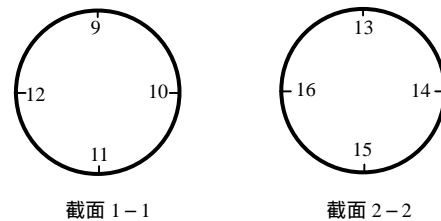
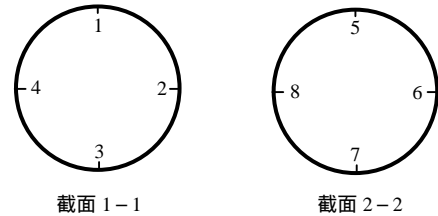
(b) HDPE 螺旋管外环向应变片布点图



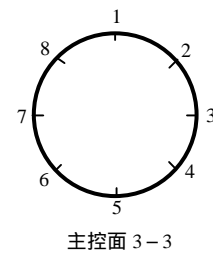
(c) HDPE 塑料螺内长度方向应变片布点图



(d) HDPE 螺旋管内位移计布点图



(e) HDPE 螺旋管内百分表布点图



(f) HDPE 螺旋管外周土体内压力盒布点图

图 2 试验方案测点布置图

Fig.2 Arrangement of settlement monitoring points

3.3 回 填

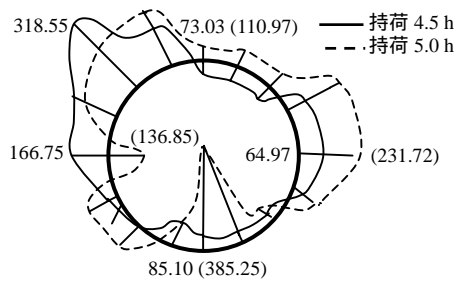
对于不同土质条件, HDPE 螺旋管的工作状态是不同的, 本次试验场地选在土质较差的淤泥质饱和粘土中埋设的排水管道的实际工程段。原状土开挖后, 按照实际工程要求的埋设方式回填, 即管道两侧同时用黄砂, 逐层回填, 逐层夯实, 直至管道上方 500 mm, 然后用原状土回填。原方案的分层回填土的厚度为每层 200 mm, 但考虑到工程实际情况, 每层回填 300 ~ 600 mm, 由挖掘机挖斗进行夯实。从现场可以看到, 这种夯实方法较人工夯实要好得多, 同时, 可进行机械化施工, 加快施工进度。

4 试验测试过程概况

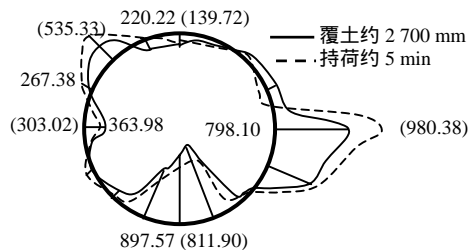
整个试验过程历时 18 d。由于是现场试验，必须配合实际工程进度，加上 7 月份的上海地区正值高温酷暑的雷雨季节，使得现场试验难度进一步加大。为了使试验更符合工程实际条件，试验过程采用实际工程施工工艺进行回填土，即先人工填黄砂至管道顶 500 mm 厚左右，然后用原状土逐层回填并以挖掘机斗进行夯实，至设计标高，最后再用 24 t 挖掘机进行加载。试验中从管顶填 500 mm 黄砂起开始进行数据测定，测定填土厚度分别为 $H = 500, 1\ 100, 1\ 600, 2\ 100, 2\ 700$ mm 厚时的数据，由此观测在回填施工过程中管的受力状态，土压力分布规律及压扁率。为了测试各阶段的管土共同工作机理，整个试验过程按以下几个阶段进行：(1) 铺设管道，回填黄砂至管顶厚约 500 mm；(2) 继续回填原土厚约 1 100 mm，并人工找平、夯实；(3) 回填覆土厚度 2 700 mm，并人工找平、夯实，维持 24 h；(4) 上挖掘机，挖掘机旋转 90°；(5) 卸去挖掘机；(6) 上挖掘机，再旋转 90°；(7) 卸载；(8) 加载(上挖掘机)；(9) 卸载，长时观测；(10) 结束。以上各阶段均挖掘机持荷 5 ~ 10 min。

5 试验结果整理与分析

5.1 HDPE 螺旋管在不同覆土条件下的测试结果



(a) 黄砂 500 mm 持荷 4.5, 5 h

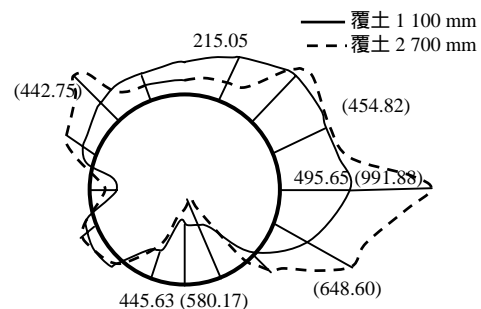


(c) 覆土约 2 700 mm 和挖掘机持荷约 5 min

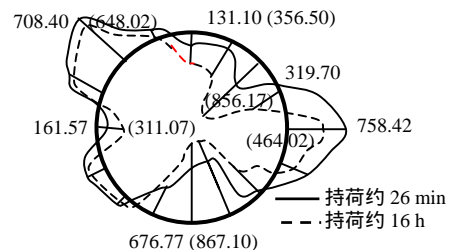
在不同覆土条件下，HDPE 螺旋管应力详见图 3~5，管道周围土压力分布见图 6(其中不带括号为实线值；带括号为虚线值)。从图 3~6 可以看出，随着覆土厚度的增加，管道周围的应力及土压力均逐渐增加。在开始回填时，根据上海地区的惯用工程作法，先拆除部分横列板，导致管道侧向压力猛增，同时由于降水井点拆除，以致水压力上涨，导致管道侧向压力大幅度增加。管道截面位移变化详见图 7, 8。从管的变形情况来看，当回填完黄砂 500 mm 厚，且持荷约 12 h，塑料管道已呈现显著竖向椭圆形，其竖向直径为最大值 1 280 mm，横向直径减少为 1 080 mm，竖向压扁率为 $\rho = (1\ 280 - 1\ 200)/1\ 200 = 6.6\%$ ，压扁率略大于规定值。这说明回填土未按规程要求进行才出现这种情况。随着覆土厚度增加，管周土压力趋于均匀，变形及应力发展均较缓慢，管顶土压力增加很少，说明“管-土”已开始共同工作，作用在地面上的荷载均匀传至土中，使管周土压力分布较均匀，这点是与刚性管完全不同的。在实际最大覆土厚度 2 700 mm 时，竖向最大直径已逐渐降低为 1 260 mm，竖向压扁率为 $\rho = (1\ 260 - 1\ 200)/1\ 200 = 5\%$ ，即管直径变化在工程要求范围内，管道最大应力值为 0.980 MPa，仍小于管子的极限承载力，即管道处于正常工作状态。说明管道在不利情况下出现的竖向椭圆正在逐步复原。

5.2 钢带在不同覆土条件下的测试结果

在不同覆土条件下，钢带应力详见图 9, 10。



(b) 覆土 1 100, 2 700 mm



(d) 第 2 次卸去挖掘机持荷约 26 min 和约 16 h

图 3 3-3 截面不同情况下应力比较图(单位：kPa)

Fig.3 Stress of section 3-3 with various loads (unit : kPa)

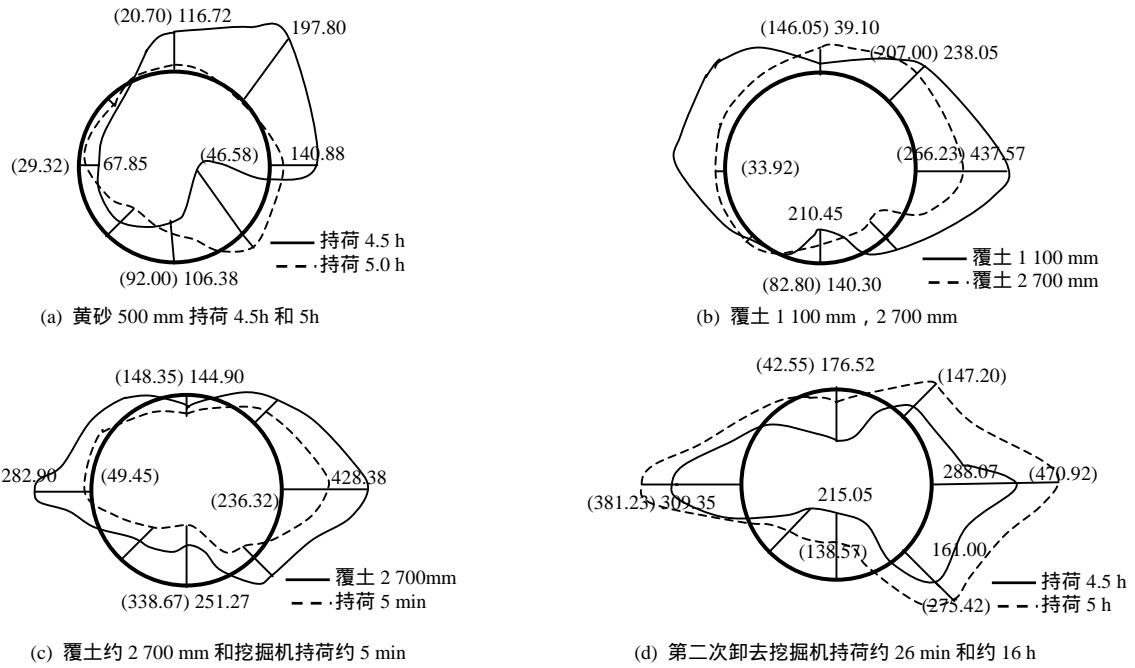


图 4 2-2 截面不同情况下应力比较图 (单位: kPa)

Fig.4 Stress of section 2-2 with various loads (unit: kPa)

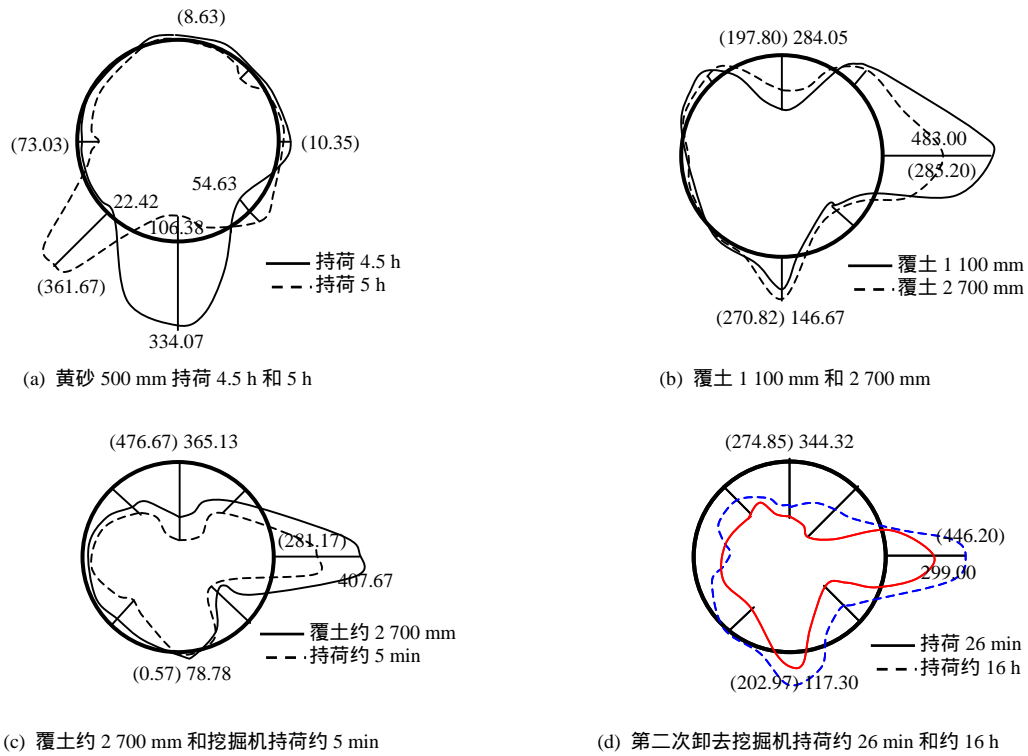


图 5 4-4 截面不同情况下应力比较图(单位: kPa)

Fig.5 Stress of section 4-4 with various loads (unit: kPa)

从图 9, 10 中可以看出, 随着覆土厚度的增加, 管道附加的钢带环向应力逐渐增加。由于在回填土初期管侧应力不均匀, 致使管周应力不均匀, 同时回填土时, 由于拆除部分横列板, 使得管道侧向 45° 方向应力猛增, 增加了其不均匀程度, 但从图中可

发现, 应力变化量沿截面周围各方向基本均匀, 说明开始回填土时应尽量使管道受力均匀以达到最佳受力状态, 因此, 要求在施工中管道两侧回填土对称, 密实并在回填土超过管顶 300 mm 才可部分拆去横列板。通过试验也发现, 管道附加的钢带环

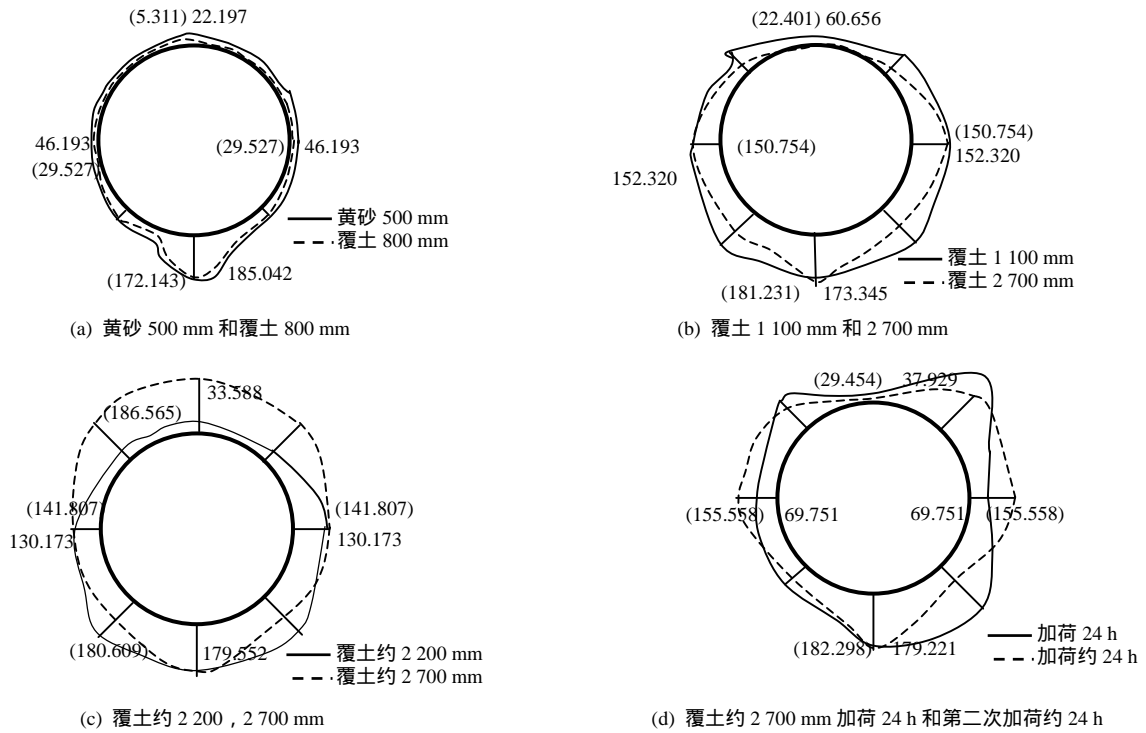


图 6 3-3 截面不同情况下土压力比较图(单位: kPa)

Fig.6 Soil pressure of section 3-3 with various loads (unit : kPa)

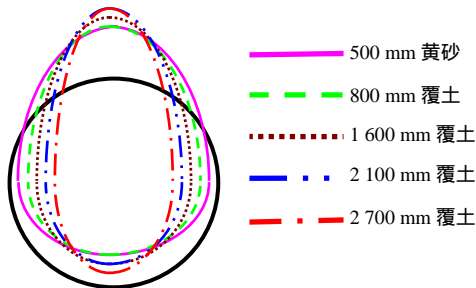


图 7 2-2 截面不同覆土情况下位移变形图

Fig.7 Deflection of section 2-2 with various backfill

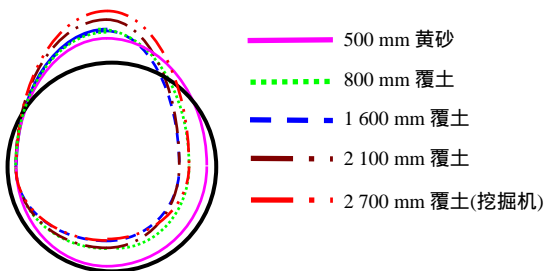


图 8 4-4 截面不同覆土情况下位移变形图

Fig.8 Deflection of section 4-4 with various backfill

向应力最大值为 75.18 MPa, 仍远小于钢带的极限承载力, 从测定的承载力指标来看, 若采用一条钢带也能满足工程要求, 但考虑变形特点及软土地基的工程实际情况, 建议采用双钢带螺旋管。

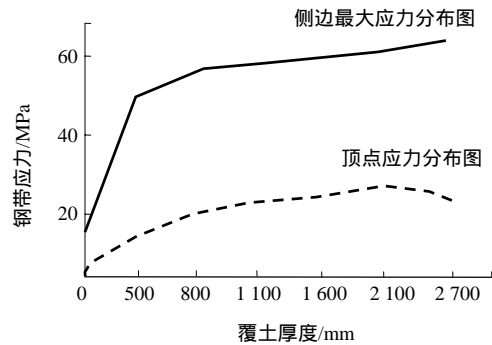
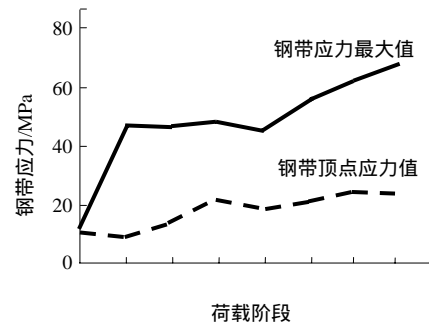


图 9 不同覆土厚度钢带侧边最大应力与顶点应力变化图

Fig.9 Maximum stress at sides of steel stripe and stress at the apex with various backfill thickness



黄砂 500 mm 持荷约 4 h; 黄砂 500 mm 厚持荷约 5 h; 覆土 1 100 mm 厚时; 覆土 2 700 mm 厚压实时; 覆土 2 700 mm 厚压实完毕时; 上挖掘机持荷 5 min; 第二次卸去挖掘机持荷 26 min 时; 卸去挖掘机持荷约 16 h 时

图 10 不同荷载下钢带侧边最大应力与顶点应力变化图

Fig.10 Maximum stress at sides of steel stripe and stress at the apex with various loading stages

5.3 HDPE 螺旋管与钢带应力对比分析

本次试验采用加双钢带的 HDPE 螺旋管, 因此刚度增加较大, 试验应力对比见图 11(图中用两种比例绘制, 带括号为实线值, 为管的应力, 单位为 kPa; 不带括号为虚线值, 为钢带应力, 单位为 MPa)。试验测试结果分析表明, 钢带承担了大部分的应力, 且从图中可以看出, 管道及钢带之间的应力符号不完全相同, 有些截面同时受压, 有些截面则是钢带受压, HDPE 螺旋管受拉, 或是有些截面钢带受拉, HDPE 螺旋管受压, 说明钢带与 HDPE 螺旋管之间存在位移滑移, 变形不协调, 钢带最大应力为 75.18 MPa, HDPE 螺旋管最大应力为 0.980 MPa, 应力比为 $n = 75.18/0.980 = 76.7$, 这说明钢带承担了大部分的应力。产生这一现象的主要原因是在管道正常工作范围内, 除去部分管道及钢带滑移外, 二者的变形量相差不大, 但二者的弹性模量 E 值相差很大, 因此, 钢带必然承担较大的应力。

5.4 加载过程对 HDPE 螺旋管应力、钢带应力、土压力及管道位移的影响

为了考虑市政工程道路荷载和施工过程中的不利荷载, 本次试验用现场的 24 t 挖掘机进行加载。试验时, 根据现场情况决定在管顶上覆土 2 700 mm 时进行加载, 加载 5~10 min 后挖掘机机头 90° 旋转, 5 min 后再次加载、卸载, 每个阶段都进行了各个参数的测定。在不同条件下, HDPE 螺旋管应力见图 3~5, 管道周围土压力见图 6, 钢带应力见图 11, 从图中可以看出, 随着荷载的变化, 管道周围的应力及土压力及钢带应力均逐渐增加, 但增加的数值较均匀, 说明管道仍然处于正常工作范围。同时, 随着荷载的变化, 管道截面竖向位移减小, 管道截面由纵向椭圆继续向圆形恢复, 至加载结束后, 最大变形为: 竖向直径为 1 250 mm, 横向直径为 1 160 mm, 管子竖向压扁率为 $\rho = (1\ 250 - 1\ 200)/1\ 200 = 4.16\% < 5\%$, 满足工程要求, 详见图 12。

5.5 持荷时间对 HDPE 螺旋管、钢带应力、土压力及管道位移的影响

为了观察管道在正常稳定情况下的工作状态, 根据试验现场情况, 共计进行了 96 h 观测。观测结果显示, 对于上海地区的情况, 前期管道应力、应变发展速度较快, 以后逐渐趋于稳定, 经过 4 d 后土体已基本相对稳定, 管道未发生较大位移。

5.6 HDPE 螺旋管道纵向位移的变形情况

由于首次在上海地区试验, 经验不足, 管顶没采取回填黄砂夯实的处理措施, 12 h 后进行大量回填土, 此时降水井点已经拆除, 地下水回升, 产生向上的浮力作用, 加上管道重量较轻, 其上覆土不均匀, 造成管道纵向局部底部标高增高, 以及管道整体出现偏移现象, 详见图 7~8, 但从试验结果分析可见, 管道仍处于正常工作应力状态。

5.7 管道截面位移及竖向椭圆度过大的原因初步分析

根据上海地区特点, 在开始回填土时, 首先在管顶 500 mm 范围内回填黄砂, 以保证其受力均匀。由于在大量回填土之前要拆除部分横列板, 使得管道侧向应力猛增, 增加了其不均匀程度, 而对于柔性管, 其各向受力越均匀越好。在回填土的过程中, 开始侧向压力过大, 造成管道截面发生较大的竖向椭圆形变形, 随着覆土厚度的增加, 上部压力增大, 管道受力趋于均匀, 使原向竖向椭圆形向圆形逐渐恢复, 当覆土厚度达到 2 700 mm 时, 上部土自重应力压力为 $p_c = \gamma_i h_i = 15 \times 2.7 = 40.5$ kPa, 侧向应力由于原状土开挖后堆土高约 5 m, 侧向压力 $k_0 \gamma_c = 0.5 \times 15 \times 7.7 = 57.75$ kPa, 同时, 由于地下水位回升, 压力增加, 预计 $h_w = 2$ m, 则 $P_w = \gamma_w h_w = 10 \times 2 = 20$ kPa, 显然侧向总压力大于竖向压力, 因此, 即使回填土全部压在管道上, 仍然难以使管从竖向椭圆完全恢复到圆形。在进行挖掘机加载后, 挖掘机重 24 t, 挖掘机底平均应力面积分布范围 $A = 3.6 \times 2 = 7.2$ m², 平均附加应力为 $p = 240$ kN / 7.2 m² = 33.3 kPa。此时, 由于土中应力扩散作用, 在管顶的应力值为 $L/B = 3/1.2 = 2.5$, $Z/B = 2.7/1.2 = 2.25$, 平均附加应力系数 $\alpha = 0.192$, 则由挖掘机在管顶产生的压力为 $P = 2 \times 0.192 \times 33.3 = 12.8$ kPa, 这样管顶压力 $\Sigma P = 40.5 + 12.8 = 53.3$ kPa, 仍然小于侧向压力, 因此在 2.7 m 覆土层上经 24t 挖掘机加载, 其应力增加, 竖向位移减小, 管道截面由纵向椭圆继续恢复至圆形, 至加载结束后, 最大变形竖向直径为 1 250 mm, 横向直径为 1 160 mm, 管子压扁率为 $(1\ 250 - 1\ 200)/1\ 200 = 4.16\% < 5\%$, 满足工程要求。可以推断, 在一般情况下随着时间的增加, 其上覆土将趋于密实, 而在投入正常使用后, 将出现重复荷载作用, 这对于管道竖向椭圆度及管道受力均将产生有利影响。

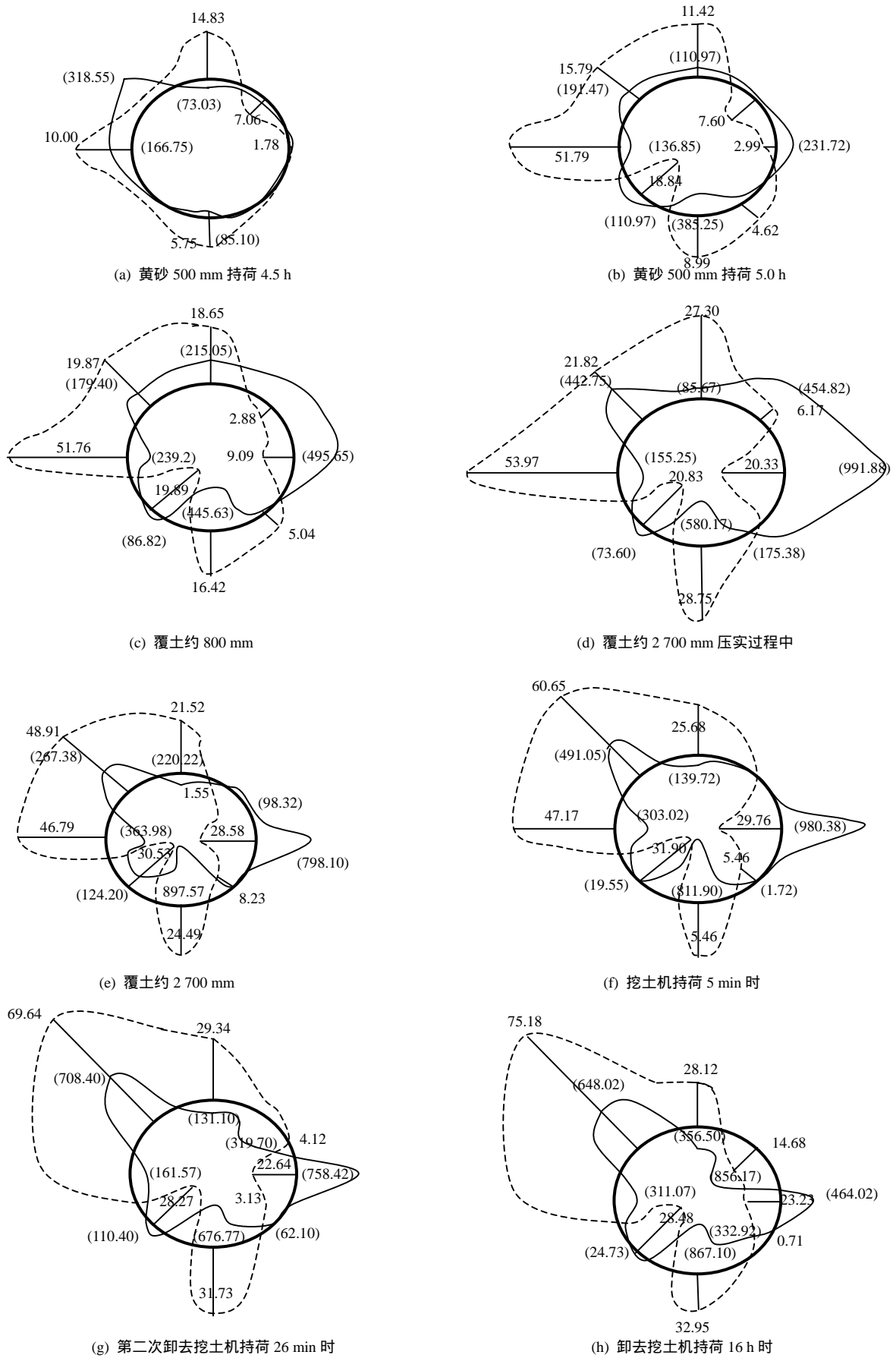


图 11 不同载荷情况下管与钢带应力比较图

Fig.11 Comparison of stress between pipe and steel stripe with various loads

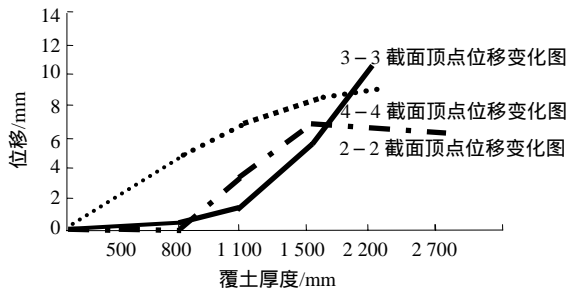


图 12 不同覆土厚度时不同截面顶点位移变化图

Fig.12 Apex displacement of various sections with various backfill thickness

6 结 论

(1) 对于上海软土地基中大型 HDPE 螺旋管, 在沟埋方式下, 参照上海地区常规的施工方法施工, 管沟周围用黄砂回填土, 只要回填土按照规范要求施工, 采用常规分层夯实, 回填至一定厚度时, 管道应力基本趋向稳定, 才能保证“管-土”共同作用效应明显。

(2) 为使管道正常工作, 要求管体必须座落在稳定且较均匀的土层中, 施工中应尽量避免严重扰动沟壁与管道, 以免局部应力过大。

(3) 在回填土达到一定值后, 由于“管-土”共同作用, 管道上部的荷载将扩散至土体中, 而非全部作用在管顶, 此时, 管顶处应力增加很少, 而环向应力均匀增大, 使管道变形逐渐均匀, 这对管道正常工作是非常有益的。

(4) 大型 HDPE 螺旋管属于柔性管, 其适应变形的能力是较强的, 对于软土地基具有较强的适应性, 从试验数据结果和观测现象发现, 开始由于侧向土压力大, 明显形成竖向椭圆形, 随着覆土厚度不断增加, 环向应力也逐渐增大, 使得管道受力趋于均匀。

(5) 此次试验采用试件是加了双钢带的 HDPE 螺旋管, 因此刚度增加较大, 经试验结果证明, 钢带承担了大部分的应力, 最大应力比为 76.7。

(6) 根据现场试验情况来看, 在实际工程施工中只要严格按照规程执行, 完全能满足工程要求, 而且可采用工程上常规的用挖掘机辅以支板加载通过, 不致影响管道的正常工作。

(7) 管道应严格执行定位, 包括纵向定位、横向定位和标高定位, 且回填土应在拆除侧壁支护时尽快完成。

(8) 鉴于上述大型 HDPE 螺旋管的特点, 故在

HDPE 螺旋管道埋设方式上可以免去一般刚性管道所设置混凝土刚性垫层或刚性管座, 这对减少工序、加快施工进度、降低造价都有其突出的优点, 另外, 塑料管具有良好的适应变形能力, 因此对抵抗地基沉陷变形和地震震陷变形都是非常有利的。

参考文献(References):

- [1] 陈希哲. 土力学地基基础(第 3 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.(Chen Xizhe. Soil Mechanics and Foundation(Third Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.(in Chinese))
- [2] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学(第 3 版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.(Gao Dazhao. Yuan Juyun. Soil Texture and Soil Mechanics(Third Edition)[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.(in Chinese))
- [3] 高大钊. 软土地基理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.(Gao Dazhao. Theory and Practice on Soft Soil Foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.(in Chinese))
- [4] Brand E W, Brnner R P. 软粘土工程学[M]. 叶书麟译. 北京: 中国铁道出版社, 1991.(Brand E W, Brnner R P. Soft Clay Engineering[M]. Translated by Ye Shulin. Beijing: China Railway Press, 1991.(in Chinese))
- [5] 俞调梅. 上海地区的基础工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.(Yu Tiaomei. Foundation Engineering in Shanghai[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991.(in Chinese))
- [6] (美)米切尔 J K. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞译. 南京: 南京工学院出版社, 1988.(Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. Translated by Gao Guorui. Nanjing: Nanjing College of Technology Press, 1988.(in Chinese))
- [7] 孙更正, 郑大国. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.(Sun Gengzheng, Zheng Daguo. Foundation and Underground Engineering in Soft Clay[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1983.(in Chinese))
- [8] 王钟琦, 孙广慧, 刘双光等. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.(Wang Zhongqi, Sun Guanghui, Liu Shuangguang, et al. Testing Techniques in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.(in Chinese))
- [9] 王秀丽, 朱彦鹏, 方有珍. 大直径柔性管的有限元分析与研究[J]. 甘肃工业大学学报, 1999, 15(1): 84-88.(Wang Xiuli, Zhu Yanpeng, Fang Youzhen. Finite element analyses of the big ductile pipe[J]. Journal of Gansu University of Technology, 1999, 15(1): 84-88.(in Chinese))
- [10] Jeyapalan J K, Saleira W E. Finite element analyses of the response of HDPE pipe under backfill and traffic loads using micro-computer[A]. In: The Proceeding of the 10th Fuel Gas Plastic Pipe Symposium[C]. Orleans: [s. n.], 1987. 65-78.