

爆炸模拟地震作用埋地供水管网原型试验

王 闯, 刘 威, 李 杰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用土中引爆 TNT 炸药产生模拟地震波, 首次通过试验研究了带有柔性接头球墨铸铁管网的动力响应。详细阐述了试验设计思想与方法, 给出了主要试验结果。对试验结果的初步分析表明: 试验设计思想合理、有效; 接头变形与管网系统结构关系密切; 接头变形超过一定界限时, 必须考虑接头变形的塑性发展。

关键词: 爆炸模拟地震; 原型试验; 埋地供水管网; 球墨铸铁管接口变形; 管土相对滑移

中图分类号: TU435

文献标志码: A

Full-scale Test of Buried Water Supply Pipeline Network with Explosion Simulation Earthquake

WANG Chuang, LIU Wei, LI Jie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The seismic wave is generated by detonating trinitrotoluene (TNT) explosives in the soil, and the dynamic response of nodular cast iron pipeline network with flexible joints is studied. The idea and the method of the test design are introduced in detail and the main test results are presented. A preliminary analysis shows that the test design is reasonable and effective. The joint deformation has a close relationship with the systemic structure of the pipeline network. When the joint deformation is greater than a threshold value, the plastic deformation should be taken into consideration.

Key words: explosion simulation earthquake; full-scale test; buried water supply pipeline network; joint deformation of nodular cast iron pipeline; pipe-soil relative slippage

应综合考虑管网系统结构和地震动衰减特性等因素。然而, 以往的试验研究虽然包括了现场人工震源试验^[1-4]、室内拉拔试验^[5-10]和振动台试验^[11-15], 但所有这些试验均针对一条埋地管线, 未能反映管网的系统特征、未能体现出地震动在实际工程场地内的衰减特性。利用埋地管网的动力响应, 意义重大却仍属空白。为此, 本文完成了如下工作: 浅埋 24 m×24 m 的“田”字型管网(管网由带柔性接头的球墨铸铁管组成, 管线通过直管接头、弯管接头、三通及四通接头相连接), 建立了一个近似于真实的埋地管网系统; 在管网近距离土中引爆大剂量 TNT 炸药, 制造出足以激起试验管网动力响应的、具有随距离衰减特性的模拟地震动; 通过试验, 测得场地加速度、接口变形、管身应变、管土相对滑移等; 根据试验结果, 探讨了管网接口变形的分布特点; 从接口变形量、场地速度峰值和场地平均应变峰值的角度, 分别给出了接口出现塑性变形的阈值范围。

1 试验设计

1.1 管网设计

试验管网铺设范围为 24 m×24 m, 平面呈“田”字型, 埋深 0.5 m; 管网主要由球墨铸铁管构成, 各球墨铸铁管通过带橡胶圈的柔性承插接头连接, 包括: 直管接头、弯管接头、三通接头、四通接头等; 同时, 布置了少量焊接钢管, 以保证整个埋地管网的完整性。管网布置如图 1 所示。

试验所用的球磨铸铁管规格为: 插口外径 222 mm; 承口内径 224.5 mm; 管身内径 200 mm; 壁厚 6.3 mm; 承口深度 100 mm; 管段长度 3 m 和 6 m; 弹

城市埋地管网覆盖范围广、系统特性强, 在强烈地震中极易发生破坏。在埋地管网地震响应研究中,

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278380)

第一作者: 王闯(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为生命线工程抗震。E-mail: wchuang8727@163.com

通讯作者: 李杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为现代混凝土结构及生命线工程。E-mail: lijie@tongji.edu.cn

性模量 $1.35 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. 无缝钢管规格为: 钢号 A106B, 碳素结构钢; 外径 219 mm; 壁厚 6 mm; 管段长度 12 m; 弹性模量 $2 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

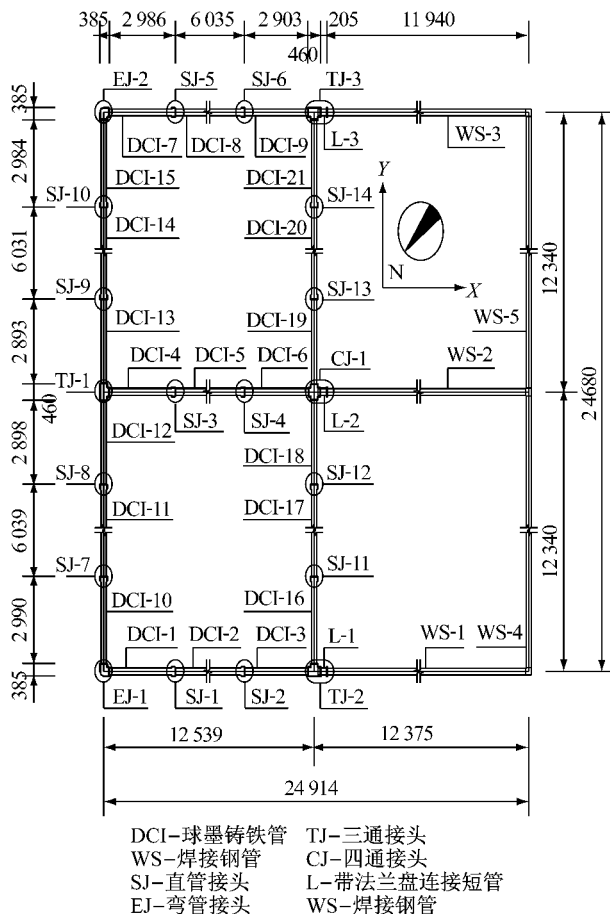


图 1 管网布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of pipeline network (unit: mm)

1.2 爆点设计

使用土中引爆大剂量片状 TNT 炸药的方法获得满足试验要求的场地地震动. 根据以下几个要求, 确定炸药的药量、位置、埋深: ① 通过现场多次人工钻孔勘察, 试验场地地下水水位约在 5~7 m 之间, 因此, 炸药埋深不超过 5 m 时, 可以不考虑地下水的影响, 确保起爆成功; ② 为了获得比较强烈的地震动, 装药量应尽可能大, 但同时, 为了避免爆炸时地表土过度飞溅影响试验, 在炸药埋深一定的情况下, 应控制最大装药量; ③ 场地地震动应给试验管网以足够的激励, 同时, 也要避免激励过大, 导致测试仪器出现超量程的情况. 由此, 结合经验估计与现场试爆的方法, 最终确定: 炸药量取 30 kg; 炸药埋深 5 m; 爆点距试验管网的最近位置取 10 m, 爆点布置如图 2 所示.

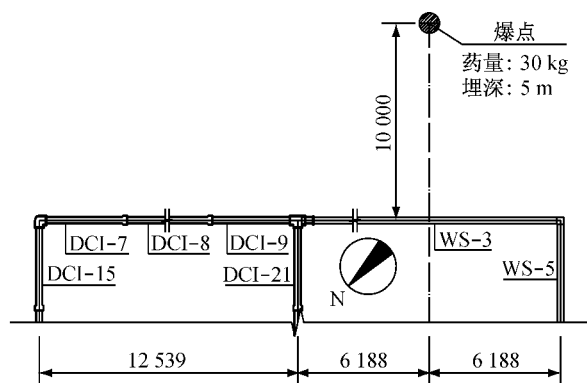
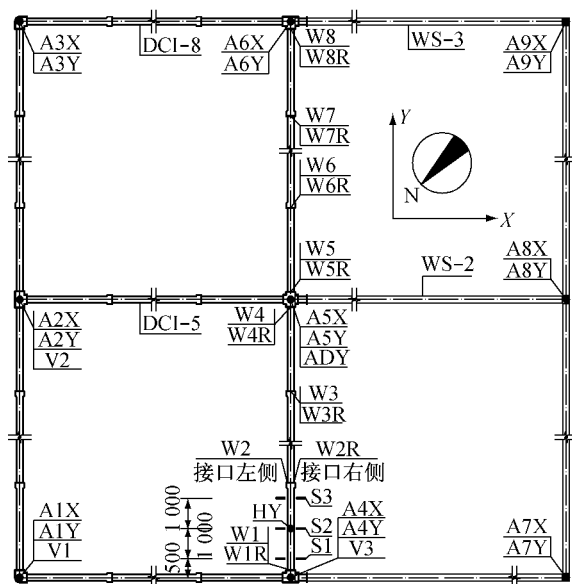


图 2 爆点布置 (单位: mm)

Fig. 2 Location of detonation point (unit: mm)

1.3 场地加速度测试

加速度传感器埋置于管网控制点 (即: 管网所有弯管接头、三通接头和四通接头的中心点) 正上方的地表土中, 埋深 30 cm, 以消除地震波在地表的折射影响; 使用加速度传感器 A1X~A9X 和 A1Y~A9Y 分别测试场地各点 X 方向和 Y 方向的加速度; 在传感器 A5Y 的正下方土中埋置加速度传感器 ADY, 埋深 65 cm. 各加速度传感器平面位置如图 3 所示.



A1X~A9X: 地面 X 向加速度传感器
A1Y~A9Y: 地面 Y 向加速度传感器
ADY: 地下 Y 向加速度传感器
V1~V3: 地面 Y 向速度传感器
W1~W8: 接口左侧变形位移计
W1R~W8R: 接口右侧变形位移计
S1~S3: 球墨铸铁管管身应变片
HY: 管土相对滑移测试仪

图 3 传感器布置

Fig. 3 Layout of sensors

使用电荷输出型加速度传感器测试, 并在数据传输线尾端配置电荷放大器, 传感器频率响应范围为 0.2~1 000 Hz; 将传感器粘贴于特制立方体空心

有机玻璃盒内,以方便其在土中固定;玻璃盒盖板处,使用 702 胶水密封、防水;传感器埋置时,人工分层压实玻璃盒周围土壤,确保安装牢固.加速度传感器安装如图 4 所示.

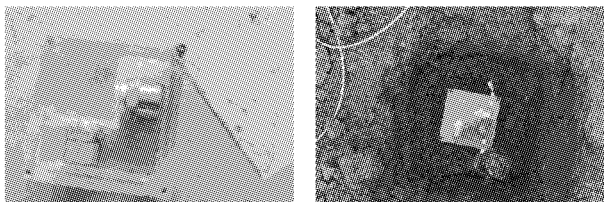


图 4 加速度传感器安装

Fig.4 Installation of acceleration sensors

1.4 场地速度测试

为了检验场地加速度测试结果的准确性,在加速度传感器 A1Y, A2Y 和 A4Y 玻璃盒正上方,分别使用橡皮泥牢固粘贴速度传感器 V1, V2 和 V3,之后填土、压实.速度传感器的安装方法如图 5 所示.

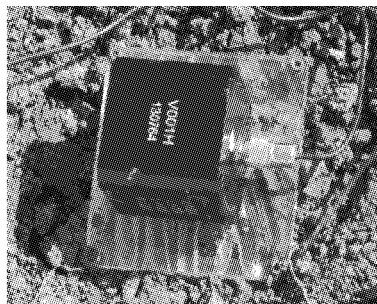


图 5 速度传感器安装

Fig.5 Installation of velocity sensors

1.5 接口变形测试

试验选取了位于管网中央管线上的 8 个柔性接口为测试对象.测试仪器采用定制的高精度变阻式拉杆位移计,量程为 30 mm,独立线性度为 0.1%,相当于最大误差 0.03 mm.安装时,使用螺栓将传感器底座与接头插口一侧管线的外壁相连;通过带孔焊接钢片、使用两颗螺栓将传感器拉杆与接头承口边缘相连.传感器安装完毕后如图 6 所示.为了区分

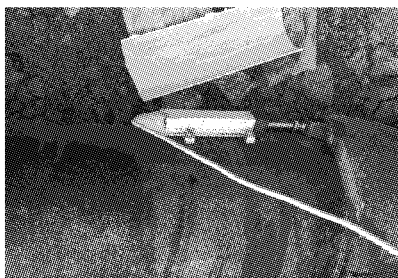


图 6 拉杆位移计安装

Fig.6 Installation of displacement meters

接头轴向拉压变形和水平面内的弯曲变形,在接口左右两侧面均布置了一个位移计,接口左侧位移计如图 3 中 W1—W8 所示;接口右侧位移计如图 3 中 W1R—W8R 所示.

1.6 管土相对滑移测试

使用同济大学史晓军、陈隽和李杰等设计的“土与地下结构接触面土体滑移动态测试仪”^[13]测试管土相对滑移.该仪器由塑料滑轮、有机玻璃罩、角位移计组合而成,如图 7 所示.塑料滑轮直径 6 cm,圆心打孔,与角位移计转轴连接,表面刻痕以保证与管线外壁的有效接触.有机玻璃罩的作用在于保护滑轮的转动不受土壤的干扰、固定角位移计、将管周土体的位移传递到滑轮上.角位移计采集滑轮的转动角度,根据滑轮直径,将角位移换算至线位移.仪器量程 0~30°,线性度 0.1%,相当于测试线位移最大误差为 0.02 mm.安装时,先将测试仪放置于球墨铸铁管管壁上方,确保滑轮与管壁紧密接触;再将滑轮位置调至角位移计量程中间值;之后,使用较湿润的土将传感器固定;最后,回填土并压实.由于仪器量程较小,为避免测试时超出量程,测试仪布置于远离爆点的管线上,平面位置如图 3 之 HY 所示.

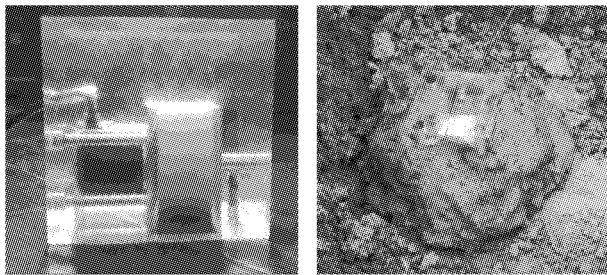


图 7 土与地下结构接触面土体滑移动态传感器

Fig.7 Dynamic pickup of slippage on the contact surface between the soil and the underground structure

1.7 管身应变测试

为了考虑管土相互作用、管线接头的力学性质,使用应变片 S1—S3(图 3)测试了球墨铸铁管管身轴向应变.应变片采用全桥连接,如图 8 所示,以消除

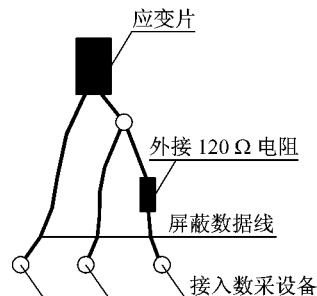


图 8 应变片全桥连接

Fig.8 Full bridge configuration of strain gauge

长距离信号传输的不利影响. 在应变测点所在截面的左右两侧各安装一个应变片, 两者的平均值即为该截面轴向应变. 应变片使用 702 胶防水、树脂 AB 胶防撞.

1.8 数采系统

使用动态信号采集设备共 4 台, 每台 16 个通道, 各设备触发端口均连接至有线路由器, 由电脑统一控制, 完成同步测试, 如图 9 所示. 采样频率 20 kHz, 设备接地以消除交流电影响.



图 9 动态信号采集设备
Fig.9 Dynamic test system

2 试验准备

2.1 试验场地

试验场地位于南京市江宁区汤山镇一野外平坦、开阔地块, 场地东西向长度约 60 m, 可使用的南北向长度约 200 m, 在管网铺设区域内 (24 m×24 m) 场地坡度为 1.6%, 可视为平整场地. 试验场地如图 10 所示.



图 10 试验场地
Fig.10 Test site

2.2 土性测试

为了充分掌握该地块土土性, 在试验当天取土, 完成土性常规测试、共振柱及循环三轴联合测试. 土样位置如图 11 所示.

常规测试中, 采用环刀法测定土的密度, 用烘干法测定土的含水率, 采用直剪仪测定了土体的承载力和液限、塑限等其他静力特性参数. 常规测试结果如表 1 所示.

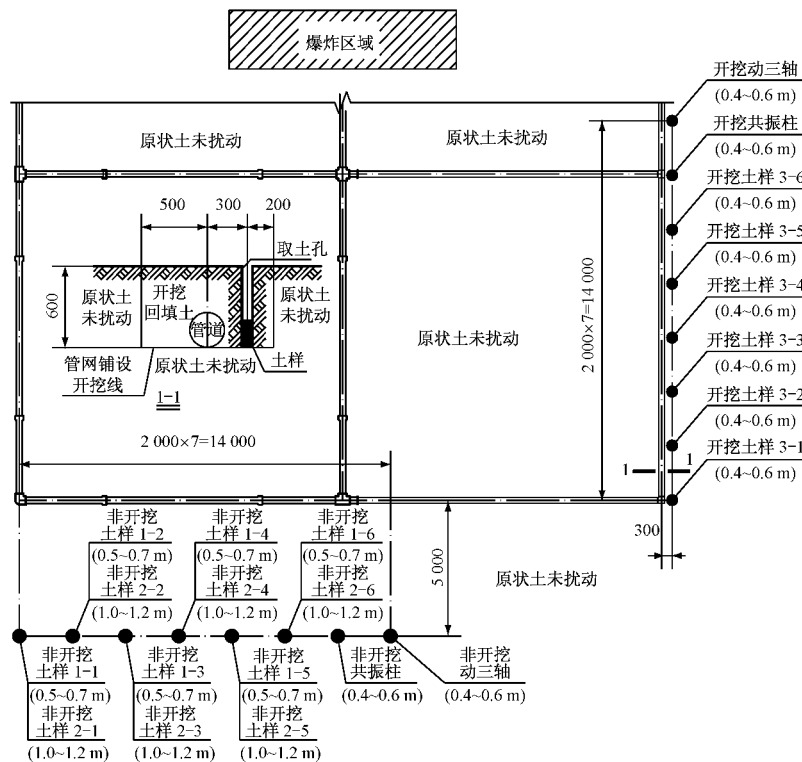


图 11 土样位置(单位:mm)

Fig.11 Location of soil samples (unit: mm)

对 4 个土样进行了共振柱与循环三轴联合试验, 得到了动剪应变 γ_d 在 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 范围内的 (G_d/G_0)— γ_d , D — γ_d 关系曲线, 其中, G_d , G_0 , D 分别为动

剪切模量, 初始动剪切模量, 阻尼比. 试验结果如图 12 和图 13 所示.

表 1 土性常规测试结果

Tab.1 Conventional testing results of the soil property

土层	比重/G	含水量 W/%	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
非开挖 (0.5~0.7 m)	2.73	26.40	19.30	37.40	21.60	27.00	20.00
非开挖 (1.0~1.2 m)	2.73	24.30	19.70	37.20	21.20	43.00	18.00
开挖 (0.4~0.6 m)	2.73	32.20	18.40	36.00	20.70	20.00	18.00

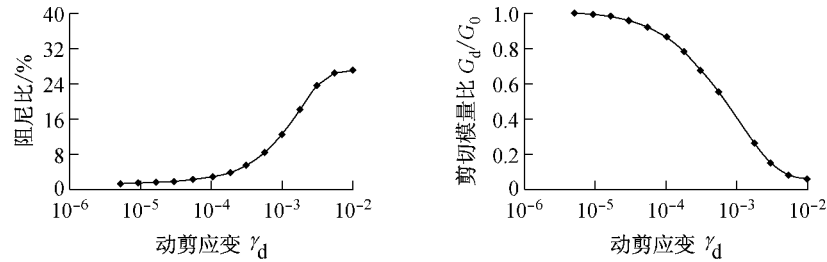


图 12 非开挖土样动力特性测试结果

Fig.12 Test result of dynamic property of nonexcavation soil

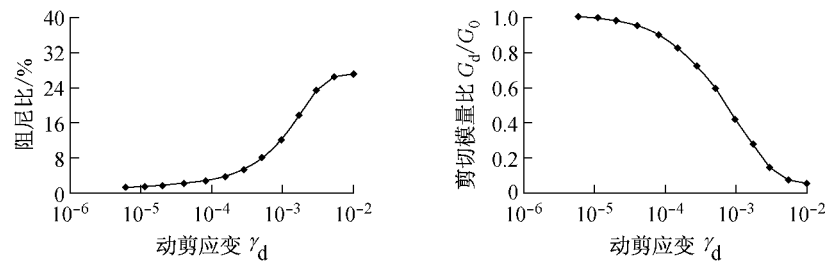


图 13 开挖土样动力特性测试结果

Fig.13 Test results of dynamic property of excavation soil

根据土样试验结果,可见土的应力应变关系符合“应变软化”规律,可用分段双曲线模型将土的非线性弹性本构关系表示为

$$\frac{1}{G_d} = a_r + b_r \cdot \gamma_d \quad (1)$$

式中, a_r 和 b_r 为拟合参数。

当 γ_d 趋向于零时, $1/G_d$ 趋向于 a_r , 此时 G_d 用 G_0 表示, 即 $G_0 = 1/a_r$, 称 G_0 为初始动剪切模量; G_0 根据前段试验数据按最小二乘法回归推得, 且 G_0 与 γ_d 为 10^{-6} 时的 G_d 值之差并不大于 3%; 当 γ_d 在 10^{-6} 与 10^{-4} 之间时, 双曲线模型拟合参数如表 2 所示。

表 2 双曲线拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of hyperbola

土 名	G_0/MPa	a_r/MPa^{-1}	b_r/MPa^{-1}
非开挖	20.52	0.048 73	22.576 14
开挖	12.94	0.077 28	32.979 19

2.3 管网铺设

管线管槽深 60 cm、宽 100 cm; 开挖后, 整平槽底、槽壁; 管线切割、定位、粘贴应变片后下土安装。安装时控制柔性接头插入深度, 以满足其轴向拉、压变形的需要。在球墨铸铁管与钢管交接处, 使用短球墨铸铁连接件, 一端插入三通或四通接口, 另一端使用法兰盘与钢管连接。管线安装完成, 如图 14 所示。

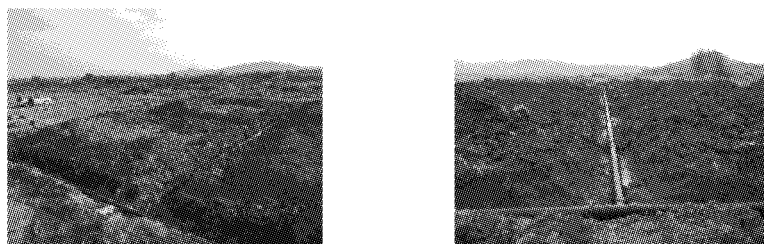


图 14 管线安装

Fig.14 Pipelines installation

回填土,并使用向场地注水加速其沉降固结与人工压实相结合的方法,提高回填土的均匀性和密实性,回填后现场如图 15 所示.待场地土充分固结、沉降后,铺设数据传输线,安装、调试传感器及数采系统.

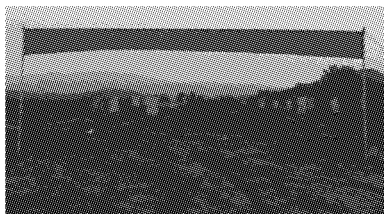


图 15 试验现场
Fig.15 Test field



3 试验过程

3.1 爆炸模拟地震

首先,人工钻孔,孔深 500 cm,孔径 10 cm. 然后,将 TNT 炸药(重量 0.02 kg)放入孔底,使用雷管引爆,以在孔底形成空腔,并排出地下水,方便大剂量 TNT 炸药的安放.之后,使用塑料导管,将 10 kg 炸药放入孔底空腔,再放入雷管,继续装药至 30 kg;最后,使用塑料导管将炸药捣实,向孔中填入细土,封装炸药;至此,炸药安放完毕,如图 16 所示.

检查仪器运行良好,现场警戒,打开数采系统,引爆炸药,采集数据,完成试验.



图 16 安装炸药

Fig.16 Setting the TNT explosives

3.2 试验现象描述及分析

爆炸发生时,测试人员距爆点水平距离约 50 m,听到的爆炸声响比较沉闷,未有回声发生.这说明:炸药爆炸所产生的能量,基本只在土壤中传播,在分析场地地震波时,可忽略空气波的影响.同时,测试人员能感觉到地面明显的晃动,且以水平晃动为主,略感上下震动.这说明:本试验所制造的地震动包含了一部分竖向分量,但以水平分量为主.事实上,试验所用各传感器的测试结果均由场地水平震动产生,不会受到场地竖向震动的影响.伴随爆炸声响,可以看到爆点上方土壤被抬起,但未大规模飞散,如图 17 所示.这说明试验所选用的炸药药量与埋深是比较合理的,炸药爆炸所产生的能量得到了

比较充分的利用.

爆炸发生后,爆点所在位置的地面发生明显凸起,如图 18 所示,凸起高度约 1.2 m,平面大致成圆形,直径约 5 m;将凸起土体挖除后,发现地下形成空腔,如图 19 所示.

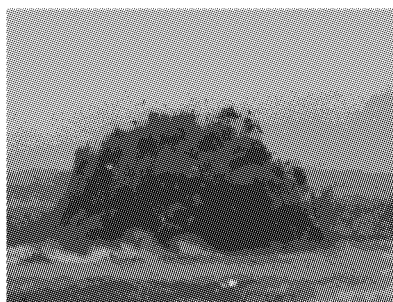


图 17 爆炸瞬间
Fig.17 The moment of explosion



图 18 地表凸起
Fig.18 Raised topsoil

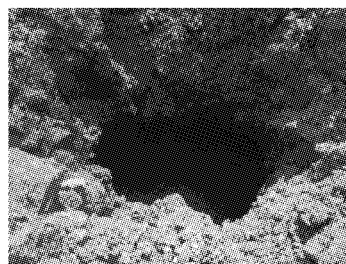


图 19 地下空腔
Fig.19 Cavity in the soil

4 试验结果

4.1 加速度测试结果

限于篇幅,此处仅给出了 A4Y, A5Y 和 A6Y 三个直接与柔性接口变形相关的加速度测试结果(汉明窗 0~100 Hz 线性相位低通滤波、基于最小二乘法的二次函数基线调整);同时,为分析测试结果,将加速度积分至速度、位移,如图 20—图 22 所示。

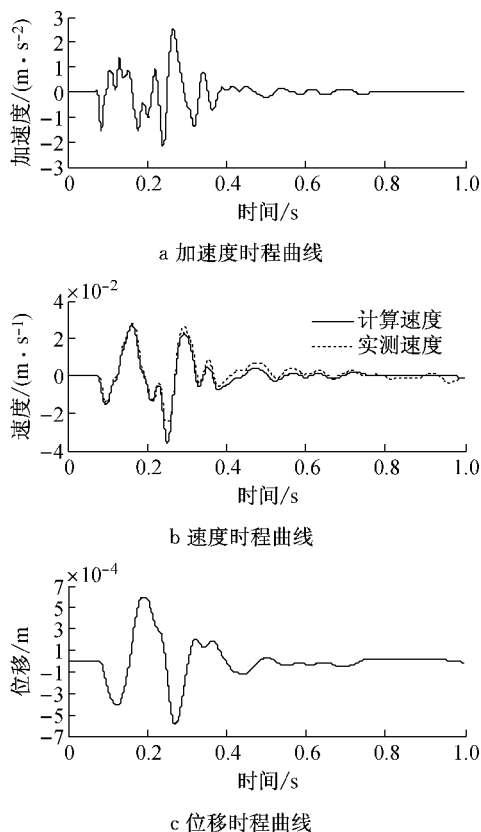


图 20 A4Y 加速度、速度、位移时程曲线

Fig.20 Time history curves of acceleration, velocity and displacement of A4Y

4.2 接口变形测试结果

在测试过程中,个别位移计(W1R, W2R, W5 和 W5R)损坏,将其他测试结果整理后(汉明窗 0~100 Hz 线性相位低通滤波),如图 23 所示。

4.3 管身应变和管土相对位移测试结果

为得到柔性接头、管土相互作用的力与位移关系,将应变片(S1, S2, S3)和管土相对位移测试仪(HY)的测试结果使用汉明窗 0~100 Hz 线性相位低通滤波,如图 24 和图 25 所示。

4.4 测试结果准确性的验证

将加速度传感器 A4Y 测试结果积分至速度,并与速度传感器 V3 测试结果相对比,如图 20b 所示,

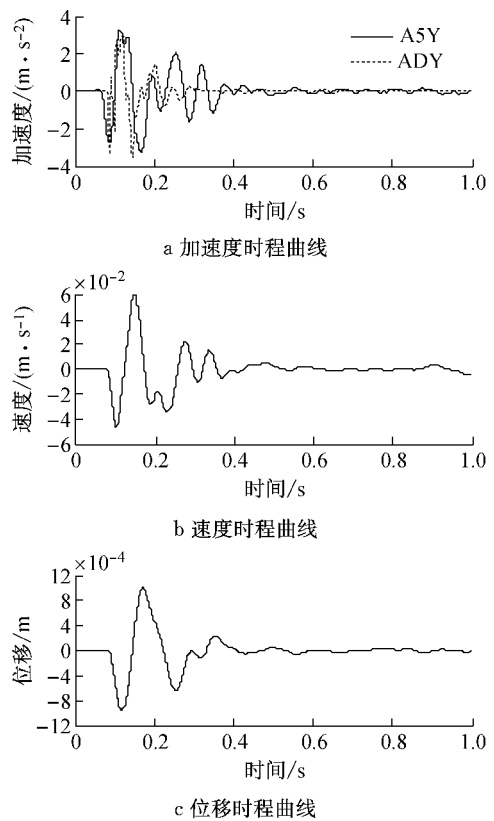


图 21 A5Y 加速度、速度、位移的时程曲线

Fig.21 Time history curves of acceleration, velocity and displacement of A5Y

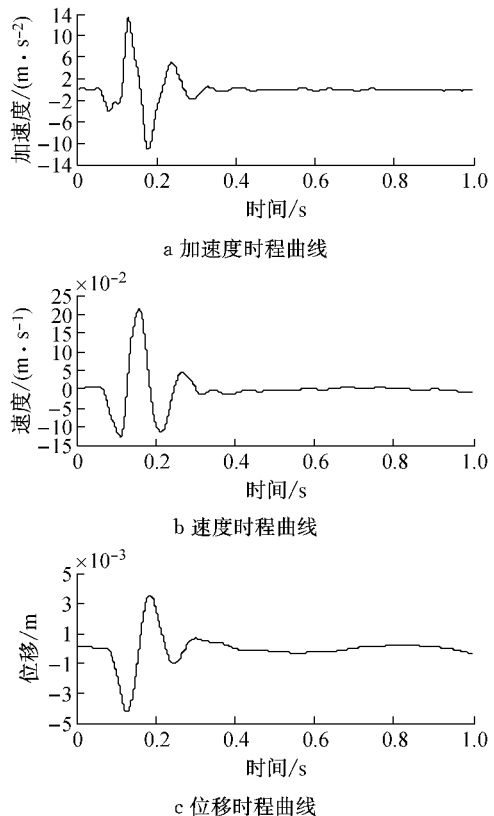


图 22 A6Y 加速度、速度、位移的时程曲线

Fig.22 Time history curves of acceleration, velocity and displacement of A6Y

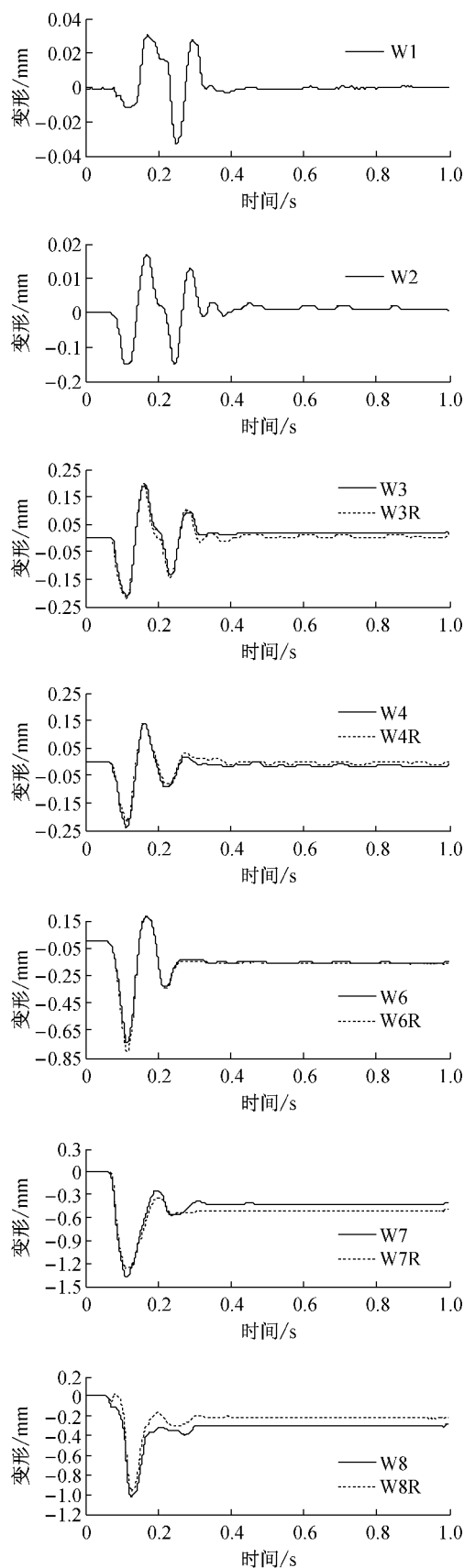


图 23 接头变形时程曲线

Fig.23 Time history curves of joint deformations

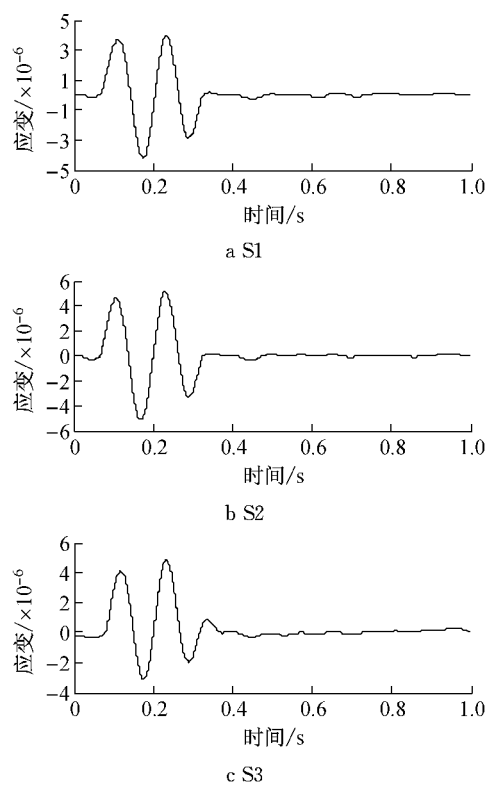


图 24 管身应变时程曲线

Fig.24 Time history curves of pipe strain

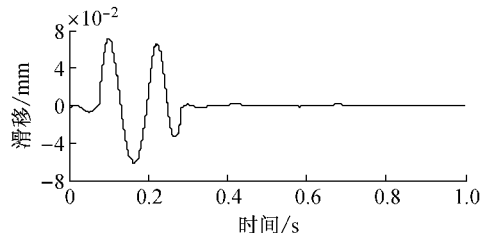


图 25 管土相对滑移时程曲线

Fig.25 Time history curve of pipe-soil relative slippage

两者波形吻合,可见该试验所测加速度真实可信.对比加速度传感器 A5Y 与 ADY 测试结果,如图 21a 所示,埋深 30 cm 处的 A5Y 略大于埋深 65 cm 处的 ADY,这与地震动由下向上传播时,受到土体放大作用的规律是吻合的.对比同一接头两侧面测得的变形值,如图 23 所示,两者波形一致,可见接头基本没有发生弯曲变形;所测接头轴向变形值是可信的.

5 试验分析

本次试验获得了大量试验结果,限于篇幅,本文仅侧重分析管线接口变形的地震反应特征.

5.1 接口变形分布特点

整理各接口变形峰值(约发生在 0.1 s 左右)及爆心距沿 Y 方向的投影,如表 3 和图 26 所示.

表 3 接口变形峰值对比

Tab.3 Contrast of the joint peak deformations

接口位 移计	爆心距 Y 方向投影/m	接口变形 峰值/mm	场地速度峰 值/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	场地应变 峰值/ $\times 10^{-6}$
W1	34	0.012	1.6	50
W2	31	0.151	2.3	
W3	25	0.216	3.9	
W4	22	0.224	4.7	
W6	19	0.761	6.2	290
W7	13	1.314	10.3	
W8	10	0.981	12.7	

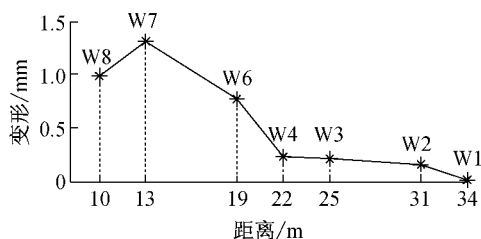


图 26 接口变形峰值对比

Fig. 26 Contrast of the joint peak deformations

分析前述结果可以发现:

(1) 直管接口位移计 W7, W6, W3 和 W2 的峰值, 随爆点距的增加而减小. 这是因为: 随爆心距增加, 地震波的能量在传播过程中不断扩散、消耗, 导致作用于管线的能量随之减小;

(2) 管网接口变形峰值的分布, 在端部三通接口(位移计 W8 和 W1)及管网中部四通接口(位移计 W4)处, 出现明显拐点. 说明接口变形的峰值不仅与地震动强度关系密切, 也受到了接头形式、位置等管网系统结构的影响.

(3) 由图 23 发现: 距爆点较近的三个接口(位移计 W6~W8 处)出现了永久变形, 而其他接口仍处于弹性状态. 这说明: 在接口变形超过约 0.8 mm 时, 应考虑接头变形的塑性发展. 从加速度传感器 A4Y 测试结果的积分位移曲线分析(该位置无场地永久位移), 这种接口变形的塑性发展, 并非由场地位移导致.

5.2 接头变形峰值与场地速度峰值的关系

1967 年, Newmark 根据地震波为行波和管土共同变形的假定, 提出了计算埋地管线变形的的方法如下^[16-17]:

$$\Delta \approx \varepsilon \cdot L \approx V \cdot L/c \quad (1)$$

式中: Δ 为接头变形上限; ε 为场地应变; V 为场地速度峰值; c 为地震波速度; L 为管段长度. 可见, 场地速度峰值是评价埋地管线接头变形的重要物理指标.

对加速度传感器 A4Y, A5Y 和 A6Y 测试结果的积分速度时程进行线性插值, 可得到各接口位置对应

的场地速度时程曲线, 如图 27 所示. 对比各场地速度峰值(0.1 s 左右)与接口变形, 如表 3 所示, 接口变形峰值随场地速度峰值的减小而减小; 同时, 结合近爆端三个接口(位移计 W6~W8 处)已进入塑性阶段的现象, 可以得到结论: 当场地速度大于 $6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时(即位移计 W6 处的场地速度峰值), 应考虑接口变形的塑性发展.

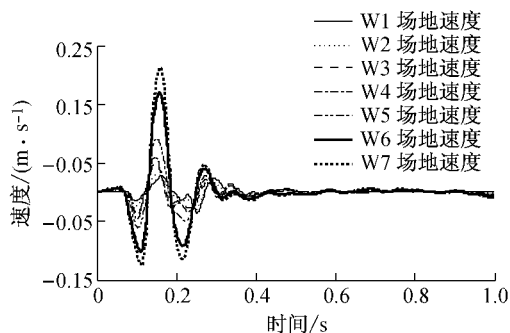


图 27 场地速度时程曲线

Fig. 27 Time history curves of ground velocities

5.3 接头变形峰值与场地应变峰值的关系

如前所述接口变形计算公式(1), 可见, 场地应变峰值是评价埋地管线接头变形的另一重要物理指标. 将传感器 A4Y 与 A5Y 处的位移时程相减, 并与其之间的距离(12 m)相除, 可以得到 A4Y 与 A5Y 之间的场地平均应变; 同理, 亦可得到 A5Y 与 A6Y 之间的场地平均应变, 如图 28 所示. 将场地应变峰值(0.1 s 左右)与接口变形峰值对比, 如表 3 所示. 可见: 随着场地应变峰值的减小, 接口变形减小. 同时, 也从另一个角度说明: 当场地应变大于 290×10^{-6} 时(即位移计 W6~W8 处对应的场地平均应变幅值), 应考虑接口变形的塑性发展.

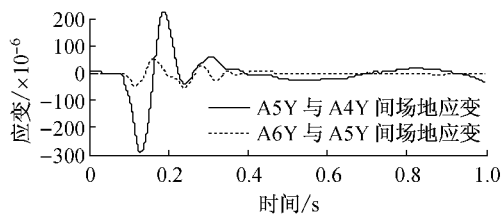


图 28 场地应变时程曲线

Fig. 28 Time history curves of ground strain

6 结论

本文以 $24 \text{ m} \times 24 \text{ m}$ “田”字型埋地管网为研究对象, 以土中引爆 TNT 炸药产生模拟地震动, 开展了带有柔性接头的埋地供水管网模拟地震试验研究, 得到了一些初步结论:

(1) 试验结果表明本文的试验设计是成功的,

测试结果是合理、可信的;

(2) 采用爆炸模拟地震动,可以深入考察埋地管网的地震反应;

(3) 接口变形与管网系统结构关系密切,在端部三通接头及管网中部四通接头处,变形突降;

(4) 接口变形超过 0.8 mm,或场地速度峰值大于 $6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,或接头附近场地平均应变峰值大于 $290 \mu\epsilon$ 时,必须考虑接头变形的塑形发展。

参考文献:

- [1] Nobuji Nasu, Satoru Kazama, Takaki Morioka, *et al.* Vibration test of the underground pipe with a comparatively large cross-section [C] // Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: International Association for Earthquake Engineering, 1974: 583-392.
- [2] 叶耀先,魏琰,陈聃,等.浅埋地下管线的振动性状[C]//中国建筑学会地震工程学术委员会:地震工程论文集.北京:科学出版社,1982:79-86.
YE Yaoxian, WEI Lian, CHEN Dan, *et al.* Vibration nature of the narrowly buried underground pipelines [C] // Earthquake Engineering Memoir of Earthquake Engineering Academic Committee, Architectural Society of China. Beijing: Science Press, 1982: 79-86.
- [3] 李长升,王仲,捷高,等.埋地管道现场激震试验研究[J].油气储运,1994,14(1):36.
LI Changsheng, WANG Zhong, JIE Gao, *et al.* Study on the field vibration test of the buried pipeline [J]. Gas Storage and Transportation, 1994, 14(1): 36.
- [4] Ashford S A, Juinarnongrit T. Performance of lifelines subjected to lateral spreading [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center of University of California, 2006.
- [5] Prior J C. Investigation of bell and spigot joints in cast iron water pipes [M]. College of Engineering of the Ohio State University, 1935.
- [6] Singhal A C, Benavides J C. Axial and bending behavior of buried pipeline joints [C] // Proceedings of the Fourth National Congress on Pressure Vessel and Piping Technology. [S. l.]: Society of Mechanical Engineers, 1983: 572-578.
- [7] Wang L, Li H. Experimental study on the damping and resistant characteristics of conventional pipe joints [C] // Proceedings of the Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1994: 324-330.
- [8] Maragakis E, Siddharthan R, Meis R. Axial behavior characteristics of pipe joints under static loading [C] // Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Buffalo: University at Buffalo of the State University of New York, 1999:54-59.
- [9] 黄鹭娜.带渗漏供水管线试验研究与供水管网震后功能分析[D].上海:同济大学,2009.
HUANG Luna. Experimental study on the water supply line with leakage and post-earthquake function analysis of water supply network [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [10] Green R A, Lynch J P, Michalowski R L, *et al.* Damage detection and health monitoring of buried segmental concrete pipes [C] // Geo-frontiers Congress 2011. Dallas: ASCE, 2011: 1743-1752.
- [11] 孟海,陈隽,李杰,等.地下管线-土非一致激励振动台试验研究[J].地下空间与工程学报,2008,4,(5):852.
MENG Hai, CHEN Jun, LI Jie, *et al.* Shaking table test of soil-pipe dynamic interaction under non-uniform earthquake wave excitation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4, (5): 852.
- [12] Choo Y W, Abdoun T H, O'Rourke M J, *et al.* Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(12): 1043.
- [13] 孟海.埋地管线-土动力相互作用非一致激励振动台试验模型研究[D].上海:同济大学,2008.
MENG Hai. Shaking table test of soil-pipe dynamic interaction under non-uniform earthquake wave excitation [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [14] Qiao L, Yuan C, Miyajima M, *et al.* Shake-table testing and FLAC modeling of liquefaction-induced slope failure and damage to buried pipelines [C] // Proceedings of the ASCE Congress: Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. Sacramento: GSP, 2008: 181-190.
- [15] Sim W W, Towhataet I, Yamada S, *et al.* Shaking table tests modeling small diameter pipes crossing a vertical fault [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35, 59.
- [16] Newmark N M. Problems in wave propagation in soil and rock [C] // Proceedings of International Symposium on Wave Propagation and Dynamics Properties of Earth Materials. Albuquerque: University of New Mexico, 1967: 7-26.
- [17] 孙千伟.地下供水管网地震反应分析模型及抗震可靠度分析[D].上海:同济大学,2012.
SUN Qianwei. Seismic analysis model and reliability analysis of buried pipeline network under earthquake [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.