

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme20230707005

埋管竖向土压力的正交数值试验与规律分析*

周 鹏^{1,2}, 陈金平¹, 李玉坤¹, 赵成军³, 熊道英⁴, 陈瑞瑞⁵,
王 焱⁴, 武黎爽⁵

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东航空股份有限公司, 山东 济南 250107;
3. 国家管网集团西部管道有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830013; 4. 国家石油天然气管网集团有限公司华南分
公司, 广东 广州 510620; 5. 国家管网集团天津天然气管道有限责任公司, 天津 300457)

摘要: 为了更精确地计算管道的竖向土压力, 总结归纳了10种影响因素, 通过改变沟槽坡角和沟槽宽度等结构参数考虑了管道的埋设方式, 共建立了10因素5水平的50种正交化数值试验模型, 借助正交数值试验的方法评价了管道竖向土压力与各因素的相关程度, 并通过单因素规律分析得到了高度显著因素作用下管道竖向土压力的变化规律。结果表明: 共有6种高度显著因素, 按显著性由大到小依次为管土模量比、回填土泊松比、沟槽坡角、原状土弹性模量、上覆土体高度、沟槽宽度; 其中沟槽宽度和管土模量比与竖向土压力系数大致呈正相关, 上覆土体高度、沟槽坡角、原状土弹性模量和回填土泊松比与竖向土压力系数大致呈负相关。研究可为管道的竖向土压力系数计算、管道的变形与应力分析提供计算依据。

关键词: 竖向土压力; 埋地管道; 数值模拟; 正交试验; 单因素分析

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1168-09

Orthogonal Numerical Test and Law Analysis of Vertical Earth Pressure on Buried Pipeline

ZHOU Peng^{1,2}, CHEN Jinping¹, LI Yukun¹, ZHAO Chengjun³, XIONG Daoying⁴,
CHEN Ruirui⁵, WANG Yao⁴, WU Lishuang⁵

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Shandong Airlines Co., Ltd, Jinan 250107, China; 3. West Pipeline Company of PipeChina, Urumqi 830013, China;
4. South China Branch of National Oil & Gas Piping Network Corporation, Guangzhou 510620, China; 5. National
Pipe Network Group Tianjin Natural Gas Pipeline Co., Ltd, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to calculate the vertical earth pressure on pipelines more accurately, 10 influencing factors were summarized. By altering structural parameters such as trench slope angle and trench width, different burial methods of pipelines were considered. A total of 50 orthogonal numerical test models were established, using 10 factors with 5 levels each. The correlation between vertical earth

* 收稿日期:2023-07-07;修回日期:2023-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52179119)资助

作者简介:周鹏(1998—),男,硕士研究生。主要从事管道变形力学仿真与测试技术研究。

E-mail:zhoupeng_1998@163.com

通信作者:李玉坤(1973—),男,副教授,博士。主要从事管道变形力学仿真与测试技术研究。E-mail:mliyk@upc.edu.cn

pressure on pipelines and various factors was evaluated through orthogonal numerical test, and the variation patterns of vertical earth pressure under the influence of highly significant factors were obtained through single factor analysis. The results showed that there were a total of 6 highly significant factors, listed in order of significance from greatest to least: the pipe-soil modulus ratio, Poisson's ratio of backfill soil, trench slope angle, undisturbed soil elastic modulus, overlying soil height, and trench width. Among these, trench width and pipe-soil modulus ratio were positively correlated with the vertical earth pressure coefficient, while the overlying soil height, trench slope angle, undisturbed soil elastic modulus and Poisson's ratio of backfill soil were negatively correlated with the vertical earth pressure coefficient. The study provides a basis for calculating the vertical earth pressure coefficient and for pipeline deformation and stress analysis.

Keywords: vertical earth pressure; buried pipelines; numerical simulation; orthogonal test; single-factor analysis

0 引言

石油天然气资源分布不均匀,通常使用长输管道来实现不同地区之间的资源交换,其安全运行与人民生活息息相关^[1]。管道运行期间,管土之间的相互作用直接影响着管道的安全裕度。为了更好的开展管道的变形与应力分析,较为准确地确定管道的竖向土压力尤为重要。

多数学者对上埋式和直槽沟埋式两种埋设方式开展了研究。A. Marston等^[2]最先根据管-土相对位移提出了管道土压力计算理论;M.G. Spangler^[3]考虑了管周土体对管道挠度的影响;曾国熙^[4]根据现场情况对Marston模型进行了修正;顾安全^[5]根据室内模型试验和现场实测资料提出了上埋式土压力计算方法;刘全林等^[6]考虑了管土相对刚度和基床形式的影响,推导了上埋式土压力理论;Y. Tian等^[7]对Spangler模型进行了改进,假定竖向土压力呈抛物线分布;F. Wang等^[8]开展现场足尺寸实验,研究了HDPE管道在回填过程中的土压力变化情况;D.B. Song等^[9]建立了减荷涵洞顶部竖向土压力的解析解,并研究了竖向土压力系数的部分影响因素。

部分学者已经不再局限于以上两种方式的研究,而是逐步开展介于两种方式之间的计算方法研究。折学森^[10]从模型试验和有限元分析上探讨了沟谷地形对管道土压力的影响;Y.G. Li等^[11]在邓肯模型的基础上形成了沟埋式涵洞与上埋式涵洞土压力的统一计算模型;B. Chen等^[12]通过试验、数值

和分析方法证实了上埋式和沟埋式的设计方法并不适用于梯形沟埋式;马强等^[13]通过正交试验分析了部分参数对高填方涵洞土压力的影响。

综上所述,多数学者从机理和影响因素角度改进管道的土压力理论,但缺少能够综合性分析各种管、土参数对竖向土压力影响的研究;且多数学者是基于涵洞开展的研究,忽略了管道与涵洞的差异。本文考虑因素的多样性,通过ABAQUS建立有限元计算模型,对10种与管顶竖向土压力密切相关的因素进行综合分析,借助正交试验的方法评价管顶竖向土压力与各因素的相关程度,并得到管顶竖向土压力与显著因素的变化规律。

1 正交数值模拟试验设计

由于影响管顶竖向土压力的因素多样,为了确保结果与全面试验结果误差不大,且尽可能减少试验次数^[14],本文采用正交试验的方法,综合研究管道、土体各参数对管顶竖向土压力的影响规律。

1.1 管顶竖向土压力的影响因素

本文基于前人研究和实际工况,总结归纳了常见的10种与埋地管道管顶竖向土压力密切相关的因素,分别为:管顶上覆土体高度(H)、管道尺寸(管径 d ×壁厚 t)、沟槽宽度(B)和坡角(α)、原状土的弹性模量(E_{s2})、夯实地基^[15]的弹性模量(E_{s1})、回填土与管道的管土模量比(E_p/E_{s3})、回填土的参数(泊松比 ν 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ)。由此建立了正交试验的分析模型,如图1所示。

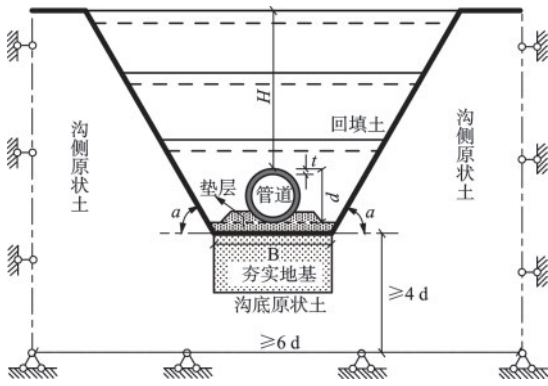


图1 分析模型示意

Fig.1 Schematic diagram of analytical model

1.2 有限元模型建立

沟槽的截面尺寸远小于管道埋设长度,故管顶竖向土压力的计算过程可以简化为平面应变问题^[16],即有限元模型中采用CPE4进行网格划分。管道埋设过程中各构件之间是复杂的非线性作用,为了简化计算模型,本文做出了以下几点假设^[17-18]:

- ①沟槽两侧坡角一致,且管道居中安装;
- ②土体是均匀、连续、各向同性的摩尔库伦材料;
- ③管道是一个连续的各向同性的构件;
- ④管底夯实地基通过改变弹性模量体现,且忽略夯实过程中应力的扩散,仅考虑沟底矩形区域的夯实效果;
- ⑤回填土为一次性回填,不考虑分层影响。

结合文献[19]中的折学森理论,在同种工况下同数值模型结果进行了对比,如图2所示。可以看出数值结果与理论结果拟合较好,随管顶覆土高度的变化呈现出一致的规律性,验证了数值模型具有一定的可靠性。

(1)计算参数

本文采用的土体本构模型为摩尔库伦模型,管道本构模型为弹塑性模型,计算参数见表1。在后

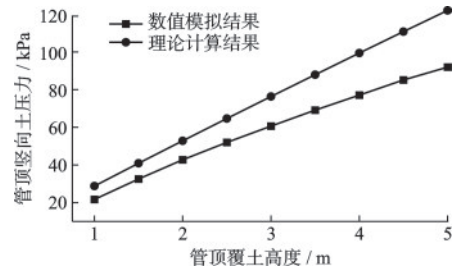


图2 理论与模拟对比分析

Fig.2 Comparative analysis of theory and simulation

续研究中以表1中数据为基准值开展因素分析。

(2)接触面相互作用

本文通过ABAQUS中表面与表面接触模型来模拟管道与管周土的相互作用及填土与原状土的相互作用^[20-22],设置管土摩擦系数和填土与原状土的摩擦系数分别为0.315和0.577,并允许界面接触后相互分离。

(3)数值模型边界效应

为了避免数值模型尺寸对仿真结果的影响,本文考虑了模型的边界效应^[16,23],平面计算区域的长度取不小于6倍管径,沟槽以下土体的竖向深度取不小于4倍管径,如图1所示。结合沟槽的截面形状以及各因子水平的取值范围,取平面计算区域的长度为40 m,沟底土体深度为5 m。模型两侧边界设置水平约束,底部设置水平与竖向约束。

(4)数值模拟过程

如表2所示,数值模拟中采用地应力平衡分析步叠加ODB文件导入的地应力平衡方法,先建立模型一,得到土体原始应力场,再建立模型二,导入土体原始应力场,然后埋设管道并回填土体。

1.3 正交试验设计

本文选用 $L_{50}(5^{11})$ 的正交表开展数值试验,即建立10因素5水平的50种正交化数值试验模型,见表3和表4。A~J分别对应管顶竖向土压力的10种影响因素,并考虑了试验误差的影响(K列)。

表1 数值计算参数^[19]

Table 1 Numerical calculation parameters^[19]

材料	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 $E/$ MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/$ ($^{\circ}$)	膨胀角 $\psi/$ ($^{\circ}$)	黏聚力 $c/$ kPa	屈服应力 $\sigma/$ MPa	尺寸 $d\times t/$ ($\text{mm}\times\text{mm}$)
原状土	1 840	10	0.3	15	0	15	—	—
回填土	1 600	5	0.35	30	0	20	—	—
X80管道	7 850	210 000	0.3	—	—	—	550	1 016 \times 20

表2 数值模拟概况

Table 2 Overview of numerical simulation

模型	部件	分析步	载荷	接触	目的
模型一	原状土、夯实	初始分析步	—	—	得到管道安装前
	地基	重力分析步	原状土与夯实地基重力		土体的原始应力
模型二	原状土、夯实 地基、回填土、 管道	初始分析步	原始应力场	—	施加原始应力场
		地应力分析步	原始应力场、原状土与夯实地基重力	取消回填土与管道在该分析步的激活状态	地应力平衡
		回填分析步	原始应力场、原状土与夯实地基重力、回填土与管道重力	回填土与原状土、夯实地基的接触、回填土与管道的接触	土体回填

表3 正交试验因素水平表^[9,24]

Table 3 Levels of orthogonal test factors^[9,24]

序号	因素	因素水平				
		1	2	3	4	5
A	上覆土体高度 H/m	1	2	3	4	5
B	管道尺寸 $d \times t/(mm \times mm)$	1 016×18	1 016×20	1 016×22	864×20	1 219×20
C	沟槽宽度 B/m	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
D	沟槽坡角 $\alpha/(^\circ)$	0	30	45	60	90
E	夯实地基 E_{s1}/MPa	50	100	150	200	250
F	原状土 E_{s2}/MPa	10	20	30	40	50
J	回填土泊松比 ν	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
H	回填土内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	20	25	30	35	40
I	回填土黏聚力 c/kPa	10	15	20	25	30
J	管土模量比 E_p/E_{s3}	1 000	10 000	20 000	42 000	80 000

表4 管顶竖向土压力正交试验表

Table 4 Orthogonal test of vertical earth pressure on pipe top

试验号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	K_z	试验号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	K_z
1	1	1	1	4	1	1	1	2	2	4	3	1.599	26	1	1	2	1	2	4	1	4	1	2	1	1.511
2	1	2	2	3	5	4	5	1	5	5	5	1.201	27	1	2	3	4	1	2	5	3	4	3	2	1.177
3	1	3	3	2	4	2	3	5	1	2	4	1.356	28	1	3	5	3	5	3	3	2	3	1	3	1.149
4	1	4	5	5	3	3	2	4	4	3	1	1.458	29	1	4	4	2	4	5	2	1	2	4	5	1.575
5	1	5	4	1	2	5	4	3	3	1	2	1.052	30	1	5	1	5	3	1	4	5	5	5	4	1.387
6	2	1	2	5	4	5	5	5	4	1	3	0.885	31	2	1	3	2	5	1	2	3	5	1	1	1.174
7	2	2	3	1	3	1	3	4	3	4	5	1.519	32	2	2	5	5	4	4	4	2	1	4	2	1.397
8	2	3	5	4	2	4	2	3	2	5	4	1.574	33	2	3	4	1	3	2	1	1	4	5	3	1.701
9	2	4	4	3	1	2	4	2	5	2	1	1.356	34	2	4	1	4	2	3	5	5	3	2	5	1.203
10	2	5	1	2	5	3	1	1	1	3	2	1.488	35	2	5	2	3	1	5	3	4	2	3	4	1.381
11	3	1	3	3	2	3	4	1	4	4	4	1.395	36	3	1	5	4	3	5	3	1	5	2	2	1.421
12	3	2	5	2	1	5	1	5	3	5	1	1.554	37	3	2	4	3	2	1	2	5	1	3	3	1.512
13	3	3	4	5	5	1	5	4	2	2	2	1.273	38	3	3	1	2	1	4	4	4	4	1	5	1.001
14	3	4	1	1	4	4	3	3	5	3	3	1.421	39	3	4	2	5	5	2	1	3	3	4	4	1.391
15	3	5	2	4	3	2	2	2	1	1	5	1.013	40	3	5	3	1	4	3	5	2	2	5	1	1.258
16	4	1	5	1	5	2	4	5	2	3	5	1.319	41	4	1	4	5	1	3	3	3	1	5	5	1.232
17	4	2	4	4	4	3	1	4	5	1	4	1.025	42	4	2	1	1	5	5	2	2	4	2	4	1.444
18	4	3	1	3	3	5	5	3	1	4	1	1.177	43	4	3	2	4	4	1	4	1	3	3	1	1.477
19	4	4	2	2	2	1	3	2	4	5	2	1.564	44	4	4	3	3	3	4	1	5	2	1	2	1.028
20	4	5	3	5	1	4	2	1	3	2	3	1.273	45	4	5	5	2	2	2	5	4	5	4	3	1.272
21	5	1	4	2	3	4	5	2	3	3	4	1.219	46	5	1	1	3	4	2	2	4	3	5	2	1.312
22	5	2	1	5	2	2	3	1	2	1	1	0.730	47	5	2	2	2	3	3	4	3	2	2	3	1.271
23	5	3	2	1	1	3	2	5	5	4	2	1.489	48	5	3	3	5	2	5	1	2	5	3	5	1.261
24	5	4	3	4	5	5	4	4	1	5	3	1.223	49	5	4	5	1	1	1	5	1	1	1	4	1.085
25	5	5	5	3	4	1	1	3	4	2	5	1.488	50	5	5	4	4	5	4	3	5	4	4	1	1.311

2 正交试验结果分析

采用管顶竖向土压力与管顶土柱自重的比值,即管顶竖向土压力系数 K_z 来开展管顶竖向土压力的规律分析, K_z 可以表示为:

$$K_z = \frac{\sigma}{\gamma H} = \frac{\sigma}{\rho g H} \quad (1)$$

式中, σ 为管顶竖向土压力,kPa; γ 为回填土的重度,kN/m³; H 为上覆土体高度,m; ρ 为回填土的密度,kg/m³; g 为重力加速度,取 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

将管顶竖向土压力系数作为正交试验结果

的评价指标,通过数值计算得到了各组合下的管顶竖向土压力,代入式(1)可得各组合下的 K_z 值,见表4。

2.1 极差分析

由表4计算得到管顶竖向土压力系数的极差分析表,见表5。其中 K_i 为某个因素的第 i 水平的评价指标之和; i 为某个因素的水平, $i=1,2,3,4,5$; k_i 为某个因素的第 i 水平的评价指标的平均值, $k_i=K_i/\text{水平重复数}$; R 为极差,即某个因素 k_i 的最大值与最小值之差, R 值越大,则该因素对管顶竖向土压力系数的影响越显著。

表5 管顶竖向土压力系数的极差分析表

Table 5 Range analysis of vertical earth pressure coefficient on pipe top

分析指标	因素										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
K_1	13.465	13.066	12.762	13.798	13.147	14.080	14.046	13.344	12.994	10.142	13.006
K_2	13.678	12.830	13.183	13.475	13.074	12.626	13.824	13.260	13.007	13.596	13.201
K_3	13.239	13.459	12.663	12.999	13.196	12.968	13.083	12.958	13.148	13.714	13.306
K_4	12.810	13.304	13.257	13.024	13.192	12.936	12.878	12.976	13.425	14.125	13.258
K_5	12.389	12.923	13.716	12.286	12.973	12.973	11.750	13.044	13.008	14.005	12.811
水平 k_1	1.346	1.307	1.276	1.380	1.315	1.408	1.405	1.334	1.299	1.014	1.301
k_2	1.368	1.283	1.318	1.347	1.307	1.263	1.382	1.326	1.301	1.360	1.320
k_3	1.324	1.346	1.266	1.300	1.320	1.297	1.308	1.296	1.315	1.371	1.331
k_4	1.281	1.330	1.326	1.302	1.319	1.294	1.288	1.298	1.343	1.412	1.326
k_5	1.239	1.292	1.372	1.229	1.297	1.297	1.175	1.304	1.301	1.401	1.281
极差 R	0.129	0.063	0.105	0.151	0.022	0.145	0.230	0.039	0.043	0.398	0.050
因素主次	5	7	6	3	11	4	2	10	9	1	8
方差 S^2	0.107	0.027	0.071	0.131	0.004	0.124	0.329	0.012	0.014	1.124	0.017

分析得到各因素的极差排序为: $R_J > R_G > R_D > R_F > R_A > R_C > R_B > R_K > R_I > R_H > R_E$,即各因素显著性的主次顺序依次为:管土模量比、回填土泊松比、沟槽坡角、原状土弹性模量、上覆土体高度、沟槽宽度、管道尺寸、回填土黏聚力、回填土内摩擦角、夯实地基弹性模量。

由于回填土黏聚力、内摩擦角和夯实地基弹性模量的极差均小于误差列(K)的极差,即这三个因素对管顶竖向土压力系数的影响较小,故在方差分析中将其并入误差列(K、I、H、E)。

2.2 方差分析

为了评价正交试验过程中各结果的差异性,并得到各因素对管顶竖向土压力系数影响的显著性,

对正交试验结果进行方差分析^[15]。

各因素的方差计算表达式为:

$$S^2 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_i^2 - \frac{T^2}{n} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

$$T = \sum_{j=1}^n y_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中, S^2 为某个因素的方差; r 为每个水平的重复数; m 为某个因素的水平数; n 为正交试验的总次数; T 为评价指标之和; y_j 为评价指标。

各因素的自由度计算表达式为:

$$f_{\text{总}} = \sum_{k=1}^t f_{\text{因素}} + f_{\text{误差列}} \quad (k=1,2,\dots,t) \quad (4)$$

$$f_{\text{因素}} = m - 1 \quad (5)$$

式中, $f_{\text{总}}$ 为正交试验的自由度之和; t 为方差分析中

的因素个数; $f_{\text{因素}}$ 为某个因素的自由度; $f_{\text{误差列}}$ 为误差列的自由度之和。

各因素的 F 值计算表达式为:

$$F = \frac{S_{\text{因素}}^2 / f_{\text{因素}}}{S_{\text{误差列}}^2 / f_{\text{误差列}}} \quad (6)$$

式中, F 为某个因素的 F 值; $S_{\text{因素}}^2$ 为某个因素的方差; $S_{\text{误差列}}^2$ 为误差列的方差之和。

通过式(2)~(6)计算可得表6所示数据。各因素的自由度均为4,误差的自由度为16,故可查得不同 α 的临界值 λ : $\alpha=0.1$ 时, $\lambda=2.33$; $\alpha=0.05$ 时, $\lambda=3.01$; $\alpha=0.025$ 时, $\lambda=3.73$; $\alpha=0.01$ 时, $\lambda=4.77$ 。本文给定因素显著性的评判标准为:当 $F > \lambda_{\alpha=0.01}$ 时,则表示该因素影响高度显著;当 $\lambda_{\alpha=0.01} > F > \lambda_{\alpha=0.025}$ 时,则表示该因素影响显著;当 $\lambda_{\alpha=0.025} > F > \lambda_{\alpha=0.05}$ 时,则表示该因素影响较为显著;当 $\lambda_{\alpha=0.05} > F > \lambda_{\alpha=0.1}$ 时,则表示该因素影响一般;当 $F < \lambda_{\alpha=0.1}$ 时,则表示该因素无显著影响。 F 越大,则该因素的影响程度越显著,对管顶竖向土压力系数的影响越大。

表6 管顶竖向土压力系数的方差分析表

Table 6 Variance analysis of vertical earth pressure coefficient on pipe top

方差来源	平方和	自由度	平均平方和	F值	显著性
A	0.107	4	0.027	9.305	高度显著
B	0.027	4	0.007	2.376	一般
C	0.071	4	0.018	6.178	高度显著
D	0.131	4	0.033	11.302	高度显著
F	0.124	4	0.031	10.767	高度显著
G	0.329	4	0.082	28.483	高度显著
J	1.124	4	0.281	97.327	高度显著
误差(E、H、I、K)	0.046	16	0.003		
总和	1.961	44			

各因素对管顶竖向土压力系数影响的主次顺序为:管土模量比、回填土泊松比、沟槽坡角、原状土弹性模量、上覆土体高度、沟槽宽度、管道尺寸,与极差分析结果一致;除管道尺寸外,其他因素均对管顶竖向土压力系数产生高度显著的影响。

3 高度显著因素规律分析

管顶沉降差的加荷作用(管道上方土体的沉降小于管侧土体沉降,管侧土体相对于管顶土体下

移,使得管顶土体受到向下作用)和沟槽地形的减荷作用(沟槽具有阻止回填土固结下沉的效应,从而减小管顶的土压力)直接影响了管顶竖向土压力系数。为了更好地研究高度显著因素对管顶竖向土压力系数的影响规律,本节开展了相应的单因素规律数值试验。

(1)上覆土体高度

如图3(a)所示,管顶竖向土压力系数随上覆土体高度增加而逐渐减小。当 $H=1$ 和 1.5 m时, K_2 变化较小,此时管道受到管顶沉降差的影响造成应力集中,而沟槽的减荷作用几乎没有,土体在管道顶部呈现为“W”型沉降。当 $H > 2$ m时, K_2 开始快速下降,这是由于沟槽的减荷作用开始逐步增大,而管顶沉降差的加荷作用随着土体等沉面的出现趋于稳定。土体在管道顶部由“W”型沉降过渡到“U”型沉降。

(2)沟槽宽度

如图3(b)所示,管顶竖向土压力系数随沟槽宽度增加而逐渐增大,近似可以认为斜率逐渐减小,这是由于随着沟槽宽度的增大,沟槽的减荷作用逐渐减小,当达到足够大时,近似认为是上埋式埋地管道。土体在管道顶部由“W”型沉降过渡到“Ω”型沉降。

(3)沟槽坡角

如图3(c)所示,管顶竖向土压力系数随沟槽坡角增加而逐渐减小。沟槽坡角从 0° 到 90° 的过程就相当于埋地管道从上埋式到直槽沟埋式的渐变过程, $0^\circ \sim 20^\circ$ 时, K_2 在1.41左右,沟槽的减荷作用不明显; $20^\circ \sim 70^\circ$ 时, K_2 快速减小,沟槽的减荷作用逐渐增大; $70^\circ \sim 90^\circ$ 时, K_2 在1.27左右,沟槽的减荷作用基本不再增大。土体在管道顶部由“Ω”型沉降过渡到“W”型沉降。

(4)原状土弹性模量

如图3(d)所示,管顶竖向土压力系数随原状土弹性模量增加而先增大后减小,并趋于不变。当 $E_{s2}=5$ MPa时,原状土与回填土的弹性模量相同,由于管道容重大,管道下方土体相较于管道两侧产生较大沉降,故管顶沉降差较小。随着原状土弹性模量的增大,管顶的沉降差与边坡的减荷效果均逐渐增大至稳定,而在弹性模量达到一定数值以后,沟槽的减荷作用将起主导,故管顶竖向土压力系数先增大后减小,并趋于不变,土体在管道顶部的“W”型沉降逐渐明显。由于实际工程中原状土的

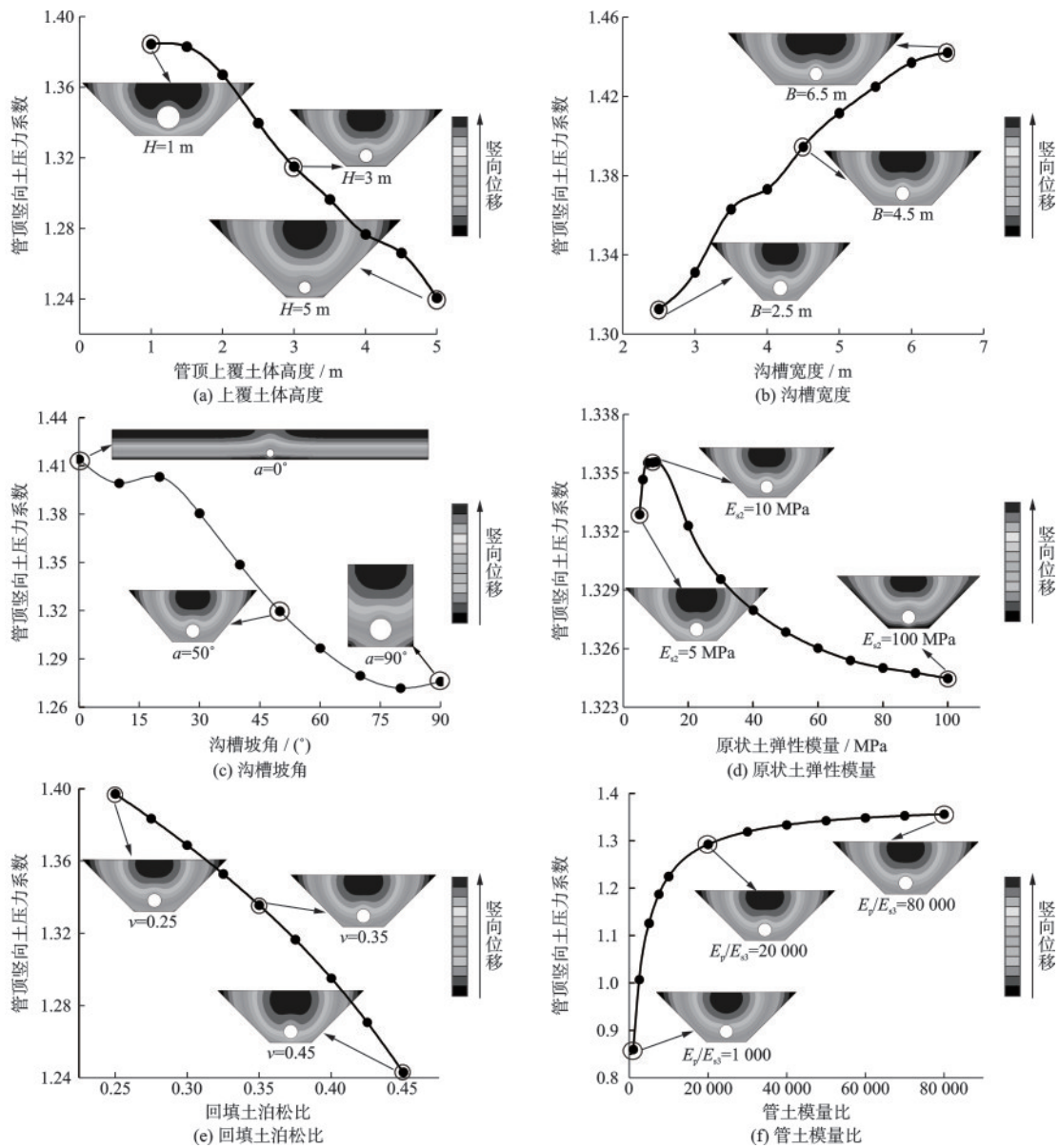


图3 管顶竖向土压力与显著因素的关系曲线

Fig.3 Curves of the relationship between vertical earth pressure on pipe top and significant factors

弹性模量通常大于回填土,故原状土弹性模量与管顶竖向土压力系数的关系也可以近似认为是负相关。

(5) 回填土泊松比

如图3(e)所示,管顶竖向土压力系数随回填土泊松比增加而逐渐减小,近似呈线性,管顶沉降差逐渐减小,土体在管道顶部的“W”型沉降逐渐弱化。

(6) 管土模量比

如图3(f)所示,管顶竖向土压力系数随管土模量比增加而逐渐增大,并趋于不变。由于管顶竖向土压力系数变化的两个直接原因为管顶沉降差和

沟坡减荷,管土模量比变化时,沟槽的减荷作用基本不变,而管道从柔性管到刚性管变化,管道的可变形能力逐渐减小,故沉降差增大,从而造成管顶竖向土压力系数逐渐增大并趋于不变。土体在管道顶部由“U”型沉降过渡到“W”型沉降。

4 结论

设计了10因素5水平的50种正交化数值试验模型,通过正交试验分析和单参数规律分析研究了各因素的显著性与规律性,得到以下结论:

(1) 各因素对管顶竖向土压力的影响程度依次

为:管土模量比、回填土泊松比、沟槽坡角、原状土弹性模量、上覆土体高度、沟槽宽度、管道尺寸、回填土黏聚力、回填土内摩擦角、夯实地基弹性模量;其中管土模量比、回填土泊松比、沟槽坡角、原状土弹性模量、上覆土体高度和沟槽宽度均具有高度显著性。

(2) 沟槽宽度和管土模量比与管顶竖向土压力系数大致呈正相关,上覆土体高度、沟槽坡角、回填土泊松比和原状土弹性模量与管顶竖向土压力系数大致呈负相关。土体在管道顶部的沉降型式多样,随各显著因素的改变而产生明显变化。

(3) 研究过程中未考虑施工工序的影响,忽略了回填过程的时空效应,今后可进一步考虑该问题,使分析结果更符合实际。

参考文献:

- [1] 喻文昭,朱鸿鹄,王德洋,等.埋地管道竖向隆起破坏研究综述[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):189-200.
Yu W Z, Zhu H H, Wang D Y, et al. A review of research on vertical uplift failure of buried pipelines [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 189-200. (in Chinese)
- [2] Marston A, Anderson A O. The theory of loads on pipes in ditch and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[M]. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913.
- [3] Spangler M G, Shafer G E. The structural design of flexible pipe culverts[C] //Highway Research Board Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 1938.
- [4] 曾国熙.土填下涵管竖向土压力的计算[J].浙江大学学报,1960(1):79-98.
Zeng G X. Calculation of vertical earth pressure of culvert under soil[J]. Journal of Zhejiang University, 1960 (1): 79-98. (in Chinese)
- [5] 顾安全.上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J].岩土工程学报,1981(1):3-15.
Gu A Q. Study on vertical earth pressure of upper buried pipeline and cavern[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1981(1): 3-15. (in Chinese)
- [6] 刘全林,杨敏.上埋式管道上竖向土压力计算的探讨[J].岩土力学,2001,22(2):214-218.
Liu Q L, Yang M. Discussion on calculation of vertical earth pressure on buried pipeline[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22 (2): 214-218. (in Chinese)
- [7] Tian Y, Liu H, Jiang X, et al. Analysis of stress and deformation of a positive buried pipe using the improved Spangler model[J]. Soils and Foundations, 2015, 55 (3): 485-492.
- [8] Wang F, Du Y J, Zhou M, et al. Experimental study of the effects produced by a backfilling process on full-scale buried corrugated HDPE pipes in fine-grained soils [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice, 2016, 7(1): 1-8.
- [9] Song D B, Chen B G, Khan A. Analytical solution of the vertical earth pressure on load-shedding culvert under high fill [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103495.
- [10] 折学森.埋地式管道垂直土压力的计算[J].长安大学学报(建筑与环境科学版),1993(1):28-34.
She X S. Calculation of vertical earth pressure of landfill pipeline [J]. Journal of Chang'an University (Architecture and Environmental Science Edition), 1993(1): 28-34. (in Chinese)
- [11] Li Y G, Xing S Y, Feng L W. Study on earth pressure on the top of trapezoid ditch-buried culverts[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93: 707-713.
- [12] Chen B, Liang S. Performance of a reinforced concrete box culvert installed in trapezoidal trenches[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(1): 120-130.
- [13] 马强,朱健,肖衡林.高填方涵洞涵顶土压力影响因素敏感性分析[J].土木工程与管理学报,2015,32(2):8-12.
Ma Q, Zhu J, Xiao H L. Sensitivity analysis of influencing factors of earth pressure on culvert top of high fill culvert [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(2): 8-12. (in Chinese)
- [14] 李维国,王清河,乔田田,等.高等工程数学[M].青岛:中国石油大学出版社,2019.
Li W G, Wang Q H, Qiao T T, et al. Advanced engineering mathematics [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2019. (in Chinese)
- [15] Chen B G, Sun L. The impact of soil properties on the structural integrity of high-fill reinforced concrete culverts[J]. Computers & Geotechnics, 2013, 52: 46-53.
- [16] Fan H, Ning B K, Gong L. Numerical simulation on vertical earth pressure distribution for culverts under high fills [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204-208: 577-580.
- [17] 帅健,王晓霖,叶远锡,等.地面占压荷载作用下的管道应力分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(2):99-103,108.
Shuai J, Wang X L, Ye Y X, et al. Stress analysis of

- pipeline subject to surface load[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 99-103,108. (in Chinese)
- [18] 张雪松, 陈金平, 周鹏. 基于数值模拟的占压管道力学响应虚拟仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(6): 73-81.
Zhang X S, Chen J P, Zhou P. Virtual simulation experiment of mechanical response of buried pipelines under pressure-occupying load based on numerical simulation [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(6): 73-81. (in Chinese)
- [19] 李玉坤, 周鹏, 陈帅, 等. 填埋式刚性管道垂直土压力计算分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增2): 771-778.
Li Y K, Zhou P, Chen S, et al. Analysis of calculation theory of the vertical earth pressure of buried rigid pipe [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup2): 771-778. (in Chinese)
- [20] Kshama R, Bipul H, Shawn K, et al. Upward pipe - soil interaction for shallowly buried pipelines in dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(11): 04018078.
- [21] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 232-239.
Wang L P, Zhang W J, Zhao S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 232-239. (in Chinese)
- [22] 王丽萍, 赵帅, 张宛静, 等. 温度影响下供水管道力学行为数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1141-1150.
Wang L P, Zhao S, Zhang W J, et al. Numerical Simulation Investigation of Mechanical Behaviors of Water Mains under Temperature Effect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1141-1150. (in Chinese)
- [23] Kim K, Yoo C H. Design loading on deeply buried box culverts[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1): 20-27.
- [24] Fernando N, Carter J P. Elastic analysis of buried pipes under surface patch loadings [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1999, 124(8): 1104-1105.

(本文编辑:赵霞)