

# 沿海软土地区复杂环境条件变化对运行输电线路基础变形影响研究

陈小涛<sup>1\*</sup>, 郑卫锋<sup>1</sup>, 温春海<sup>1</sup>, 乾增珍<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>中电联电力发展研究院有限公司, 北京

<sup>2</sup>中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月30日; 发布日期: 2024年6月7日

## 摘要

沿海软土地区运行输电线路基础容易受塔位附近地基沉降、地下水位变化以及台风等复杂环境条件变化影响, 既有输电线路基础由此产生的变形将直接关系到输电线路运行安全。本文以广东省沿海软土地区某运行输电线路既有桩基为研究对象, 量化分析了塔位附近道路沉降、地下水位变化以及台风荷载等复杂环境条件的变化规律, 并采用FLAC<sup>3D</sup>软件模拟分析了这些复杂环境因素组合作用对既有输电线路基础变形影响规律。结果表明: 塔位附近道路地基沉降、地下水位变化以及台风荷载等复杂环境条件变化都会对基础竖向沉降和水平位移产生影响。塔位周围软土地基沉降、地下水位变化对基础竖向沉降影响最大, 但对基础水平位移相对较小, 而台风作用将显著地增加基础的竖向沉降和水平位移。

## 关键词

输电线路, 沿海软土, 地基沉降, 地下水位变化, 台风荷载, 变形, 数值模拟

# Investigation on the Influence of Complex Environmental Conditions Changes on the Deformation of Operating Transmission Line Foundations in Coastal Soft Soil Areas

Xiaotao Chen<sup>1\*</sup>, Weifeng Zhen<sup>1</sup>, Chunhai Wen<sup>1</sup>, Zengzhen Qian<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Development Research Institute Co., Ltd., China Electricity Council, Beijing

<sup>2</sup>School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈小涛, 郑卫锋, 温春海, 乾增珍. 沿海软土地区复杂环境条件变化对运行输电线路基础变形影响研究[J]. 输配电工程与技术, 2024, 12(2): 13-22. DOI: 10.12677/tdet.2024.122002

## Abstract

The foundations of operating transmission lines in coastal soft soil areas are easily affected by complex environmental conditions such as road settlement near tower locations, changes in groundwater level. The deformation resulted from the complex environmental conditions changes may have a direct impact on the existing transmission line foundations, which will affect the safety of the foundations. In this study, a pile foundation of the transmission line tower in a coastal soft soil region in Guangdong Province was taken as an example. The complex environmental conditions such as road settlement, groundwater level changes, and typhoon loads near the pile foundation of the transmission tower were quantitatively analyzed. The impact laws of these complex environmental factors on the deformation of existing transmission line foundations were simulated by FLAC<sup>3D</sup> software. The results indicated that complex environmental conditions such as road foundation settlement, groundwater level changes, and typhoon loads near the tower site can all have an impact on the vertical settlement and horizontal displacement of the foundation. The settlement of soft soil foundation and changes in groundwater level around the tower had the greatest impact on the vertical settlement of the foundation, but had a relatively small impact on the lateral displacement of the foundation. Typhoon load could significantly increase the vertical settlement and lateral displacement of the foundation.

## Keywords

Transmission Line, Coastal Soft Soil, Subgrade Settlement, Groundwater Level Change, Typhoon Loads, Deformation, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国沿海软土地区输电线路基础因地基强度低、压缩性高、流变性等特点[1] [2] [3], 常面临抗拔抗压抗和水平承载力难以满足安全稳定需求的工程难题。桩基因其具有施工技术成熟和承载力高等优点, 已经成为沿海软土地区的主要输电线路基础形式[4]。但沿海地区输电线路长期运营过程中, 这些桩基础将不可避免受周围道路沉降、地下水位变化、台风荷载等复杂环境条件变化的影响。

当前, 很多学者已开展了不同工况下软土地区桩基稳定性和变形特性研究。如宋旭明等[5]采用试验和数值模拟的方法, 对江苏南沿江软土群桩基础 m 值开展了研究。徐莉等[6]介绍了广东省软土地区超大直径超长灌注桩特点。林志豪等[7]通过对滨江软土地基 4 根大直径后注浆灌注桩静载试验, 研究了软土地基桩端桩侧注浆与仅桩底注浆两种情况下灌注桩承载性状。赵大亮[8]通过单桩静载试验对连盐铁路中山河特大桥桩基桩身应变、压缩量及桩顶沉降进行测试, 得到了软土地区桩基荷载传递特性和沉降规律。律文田[9]等对软土地区桥台桩基进行了负摩阻力测试研究, 结果表明台后填土在施工完毕后相当长时间内对桩轴力仍有一定的影响。张琰[10]等针对我国沿海地区软土地基, 开展了挤扩支盘桩竖向抗压、抗拔和水平静载荷试验, 研究了挤扩支盘桩的荷载传递机理和承载性能。潘浩学[11]分析了运营期单桩与

群桩桩顶沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力、中性点位置及土体沉降等随固结时间变化规律。总体上看，软土地区桩基承载性能研究成果较为丰富，由于输电基础具有独特的行业特征，其承担拉/压交变荷载同时，还承受较大水平力作用。当前综合考虑沿海软土地基条件、复杂环境条件变化、输电线路荷载特征，对运行输电线路既有杆塔基础承载性能影响的研究工作较少。

本文以广东沿海软土地区某既有输电线路杆塔桩基为研究对象，首先基于设计条件、现场勘测和工程运行等相关资料，量化分析得到了输电塔桩基附近道路沉降、地下水位变化以及台风荷载等复杂环境条件，并进一步采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限元分析软件，模拟分析了塔基附近道路沉降、地下水位变化和台风荷载等复杂环境变化对该基础竖向沉降和水平位移的影响规律。

## 2. 工程概况

### 2.1. 地质条件

该输电线路位于广东省佛山某工业园区内道路中间的绿化带上，本研究塔位为直线塔，基础正侧面根开 6.64 m。塔基所处地层为软土地基，桩端持力层为可塑—硬塑含碎石粉质粘土。该塔为工程地质条件如表 1 所示。塔位采用灌注桩基础，其设计桩径、桩长分别为 1 m 和 15 m。

**Table 1.** The geological condition of transmission tower foundation

**表 1.** 线路塔基工程地质概况

塔基地层描述	容许承载力 /kPa	地下水位 /m	极限侧阻力 /kPa	极限端阻力 /kPa
0.0~1.7 m, 粉质粘土, 软塑, $q_c = 500$ kPa, $f_s = 35$ kPa	60	1.2	34	—
1.7~4.6 m 粉质粘土, 可塑, $q_c = 1400$ kPa, $f_s = 60$ kPa	160		48	—
4.6~8.0 m 中粗砂, 饱和, 中密, $q_c = 7500$ kPa, $f_s = 20$ kPa	230		50	—
8.0~11.8 m 淤泥质土, 流塑, $q_c = 450$ kPa, $f_s = 5$ kPa	50		18	—
11.8~12.9 m 粉土, 饱和, 稍密, $q_c = 3000$ kPa, $f_s = 35$ kPa	100		28	—
12.9 m 以下含碎石粉质粘土, 可塑—硬塑, $q_c = 1500$ kPa, $f_s = 160$ kPa	170		74	500

### 2.2. 道路沉降

塔位附近道路宽度 10 m，距塔基 8.10 m。根据卫星数据及资料推算得到 2004 至 2019 年间该塔位周边道路受大型重载货车运行荷载影响而产生的地表平均沉降如表 2 所示。

**Table 2.** Settlement of the road around the transmission tower from 2004 to 2019

**表 2.** 2004~2019 年塔位周边道路沉降情况

时间段	2004.01~2006.12	2007.01~2011.01	2011.02~2015.05	2015.06~2019.12
道路平均沉降量(mm)	19.50	29.50	13.50	13.30

### 2.3. 地下水位

本段线路附近工业园区存在一排水河道，距离该塔位 251 m。工程勘察设计时，塔位地下水位为 1.2 m。从基础运行过程看，该地区常年地下水位在 1.9~2.4 m 内变化，但部分时间也存在地下水位大于 5 m 的情况，极端最高水位约为 0.3 m。因此，地下水位取值可考虑线路建成运行时水位、线路工程勘察设计阶段水位、地下水水位正常变化范围、地下水位可能下降最大值，如表 3 所示。

**Table 3.** The value of the underground water level  
**表 3.** 不同条件下地下水位

工况	水位/m
线路运行极端高水位	0.3
线路工程勘察设计和工程设计水位	1.2
常年稳定水位	2.0
地下水水位下降最大值	5.0

## 2.4. 基础作用力

通常情况下，对软土地基运行输电线路而言，下压水平荷载组合作用对既有基础地基不均匀沉降和水平位移影响较大。根据当地气象资料，输电线路运行期间经历了多次台风天气，为了更准确的分析复杂因素组合作用下杆塔基础的变形，在确定了台风作用时基础下压和水平荷载大小。

本研究中，根据工程设计及该区域气象台站的台风实测资料，分别计算得到本工程输电线路运行期间在设计风速与最大台风风速下的基础作用力标准值如表 4 所示。即本研究中基础荷载取值分为设计工况和台风荷载两种工况，对应工况基础作用力均按下压水平力组合作用考虑。

**Table 4.** Characteristic value of load under different working conditions  
**表 4.** 不同工况下基础作用力

工况	基础下压作用力标准值/kN		
	<i>N</i>	<i>N<sub>x</sub></i>	<i>N<sub>y</sub></i>
设计工况	475	44	35
台风工况	658	62	49

## 3. 数值计算模型及模拟方案

### 3.1. 数值模拟模型及初始条件

数值模拟模型取 1/2 宽度方向建立，长度方向以基础为中心两侧各取桩径 *d* 的 5 倍，按照地层分布分层建模，数值模拟模型如图 1 所示。模型包含土体和桩基两大部分。采用的边界条件为位移边界条件，模型底部为固定约束，模型侧面为法向约束，模型顶面为自由边界。地层中存在的初始地应力主要是土体的自重作用，不考虑地质构造作用对地应力的影响，假定自重应力场就是初始应力场。

### 3.2. 模型参数选取

土体采用摩尔库伦模型，桩体采用弹性模型。FLAC<sup>3D</sup> 中常采用体积模量 *K* 和剪切模量 *G* 对材料的弹性阶段进行描述。*K*、*G* 由土体弹性模量 *E* 和泊松比  $\mu$  确定除此之外，还需给出各土层及桩体的密度  $\rho$  以及土体的粘聚力 *c* 和内摩擦角  $\varphi$ ，依据地质勘察资料，各土层模拟计算参数取值如表 5 所示。

土体与桩体是两种不同的材料，数值模拟模拟时桩体与土体之间采用面 - 面接触。从桩的实际受力机理来看，桩侧摩阻力的变化和桩端摩阻力的变化不相同，因此在桩侧和桩底分别建立接触面。接触面采用库伦摩擦模型，切向刚度和法相刚度按式(1)计算

$$k_n = k_s = 10 \left( K + \frac{4}{3} G \right) / \Delta z_{\min} \quad (1)$$

式中： $k_s$  和  $k_n$  分别为切向和法向刚度， $\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1}$ ，如表 6 所示； $\Delta z_{\min}$  为接触面法线方向连接区域上最小尺寸，m。

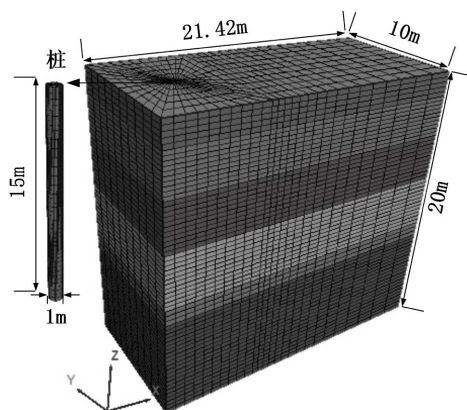


Figure 1. Numerical simulation model diagram  
图 1. 数值模拟模型

Table 5. The parameters of soil and pile materials

表 5. 土体和桩体计算参数

材料	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/^\circ$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
粉质粘土 1	3.0	0.35	8	5	1650
粉质粘土 2	7.0	0.35	20	15	1850
中粗砂	22.5	0.28	—	30	1950
淤泥质土	2.8	0.45	3	5	1550
粉土	14	0.35	4	20	1750
含碎石粉质粘土	7.5	0.30	22	15	1850
桩体	25,000	0.20	—	—	2500

Table 6. The parameters of interface

表 6. 数值模拟接触面参数

接触面位置	切向刚度 $k_s/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$	法向刚度 $k_n/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$
桩侧	555.56	555.56
桩底	555.56	555.56

### 3.3. 模拟工况

为了分析塔位附近道路沉降、地下水位变化以及道路沉降、地下水位变化、台风等因素在不同组合作用下桩基础变形规律。对既有输电塔基础开展了不同工况下基础竖向和水平承载性能的数值模拟研究，各工况情况如表 7 所示。

## 4. 数值模拟结果分析

对运行输电线路而言，既有基础变形对输电线路安全运行最为重要，因为输电线路运行规程对杆塔运行和基础位移都有严格的要求。因此，本文选取桩顶竖向沉降和水平位移作为复杂环境条件变化对既

有输电线路基础变形影响的评价依据。其中，水平位移根据线路走向，又分为横线路方向位移和顺线路方向位移。

**Table 7.** Details of transmission tower simulation conditions of subgrade and loadings  
**表 7.** 塔位基础变形模拟地基和荷载工况详情

影响因素	工况编号	模拟工况	备注
道路沉降	工况 1	地下水位 0.3 m + 设计荷载 + 道路 0 沉降	
	工况 2	地下水位 0.3 m + 设计荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 3	地下水位 0.3 m + 设计荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 0.3 m 设计荷载
	工况 4	地下水位 0.3 m + 设计荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 5	地下水位 0.3 m + 设计荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	
	工况 6	地下水位 1.2 m + 设计荷载 + 道路 0 沉降	
	工况 7	地下水位 1.2 m + 设计荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 8	地下水位 1.2 m + 设计荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 1.2 m 设计荷载
	工况 9	地下水位 1.2 m + 设计荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 10	地下水位 1.2 m + 设计荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	
	工况 11	地下水位 2.0 m + 设计荷载 + 道路 0 沉降	
	工况 12	地下水位 2.0 m + 设计荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 13	地下水位 2.0 m + 设计荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 2.0 m 设计荷载
	工况 14	地下水位 2.0 m + 设计荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 15	地下水位 2.0 m + 设计荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	
地下水	工况 16	道路零沉降 + 设计荷载 + 地下水位 5.0 m	设计荷载, 道路零沉降
复杂因素组合作用	工况 17	地下水位 0.3 m + 台风荷载+道路 0 沉降	
	工况 18	地下水位 0.3 m + 台风荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 19	地下水位 0.3 m + 台风荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 0.3 m 台风荷载
	工况 20	地下水位 0.3 m + 台风荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 21	地下水位 0.3 m + 台风荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	
	工况 22	地下水位 1.2 m + 台风荷载 + 道路 0 沉降	
	工况 23	地下水位 1.2 m + 台风荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 24	地下水位 1.2 m + 台风荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 1.2 m 台风荷载
	工况 25	地下水位 1.2 m + 台风荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 26	地下水位 1.2 m + 台风荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	
	工况 27	地下水位 2.0 m + 台风荷载 + 道路 0 沉降	
	工况 28	地下水位 2.0 m + 台风荷载 + 2004.01~2006.1 沉降	
	工况 29	地下水位 2.0 m + 台风荷载 + 2007.01~2011.01 沉降(累积)	地下水位 2.0 m 台风荷载
	工况 30	地下水位 2.0 m + 台风荷载 + 2011.02~2015.05 沉降(累积)	
	工况 31	地下水位 2.0 m + 台风荷载 + 2015.06~2019.12 沉降(累积)	

### 4.1. 道路沉降影响

图2和图3分别给出了在设计荷载作用及不同地下水位时,道路沉降对基础沉降和水平变形的影响。

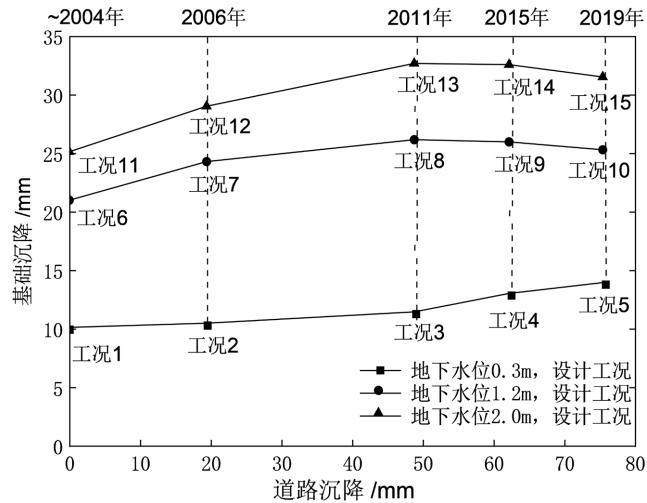


Figure 2. The influence of road settlement on foundation settlement under design loads  
图2. 设计荷载下道路沉降对基础沉降的影响

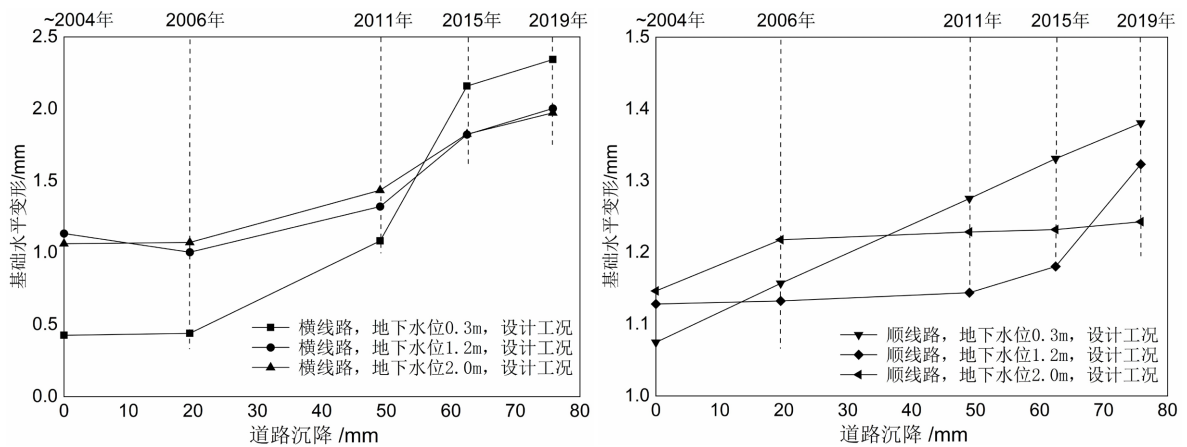
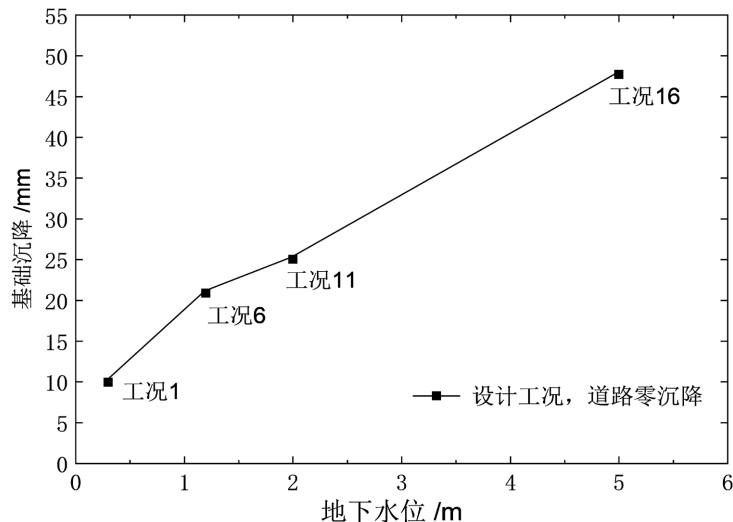


Figure 3. The influence of road settlement on lateral deformation of foundation under design loads  
图3. 设计荷载下道路沉降对基础水平变形的影响

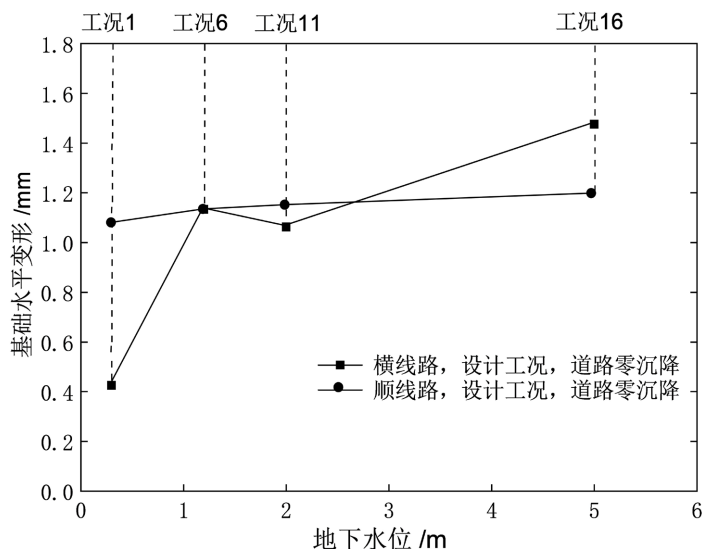
对比分析道路沉降对不同地下水位基础变形的影响可以看出:随着道路沉降的发展,基础沉降变化趋势大致为先增加后趋于稳定,水平位移变化量在5 mm左右。地下水位为1.2 m与2.0 m时,基础沉降量相差在6 mm左右。地下水位1.2 m时,基础沉降量相较于地下水位0.3 m时有显著的增大,差值约14 mm。基础顺线路方向的变形随道路沉降变化不大,在1.2 mm左右,曲线较为平缓。而基础横线路方向的变形呈增加趋势。总体来说,道路沉降对基础沉降影响最大,水平位移影响相对较小。

### 4.2. 地下水位变化影响

地下水位下降后,地基土体的力学参数会发生相应变化,这些参数变化呈现出复杂的非线性规律。为了简化计算,主要考虑地下水位对土体重度影响。图4和图5分别给出了塔位地基地下水位变化对基础变形的影响。



**Figure 4.** The influence of groundwater level change on foundation settlement  
**图 4.** 地下水位变化对基础沉降的影响



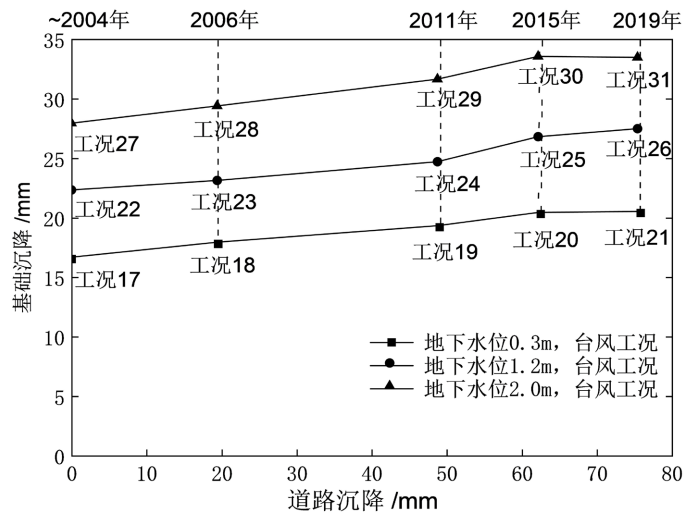
**Figure 5.** The influence of groundwater level change on horizontal deformation of foundation  
**图 5.** 地下水位变化对基础水平变形的影响

图 4 和图 5 表明, 设计工况下, 当地下水位在 0.3 m~5.0 m 范围内变化时, 基础沉降量随着地下水位的下降近似呈线性增加, 沉降量的变化范围约为 10 mm~50 mm。在基础水平变形方面, 地下水位对基础顺线路方向的变形影响不大, 对于横线路方向的变形略有影响。总体上来看, 随着水位的下降, 横线路方向的变形在逐渐增大。地下水位降到 2.0 m 之后, 横线路的变形量超过顺线路的变形量。总体上看, 当地下水位下降时, 由于孔隙水压力的消散势必会使得输电线路基础及周围土体再次产生沉降或不均匀沉降, 地下水位变化对于基础的沉降有显著影响。

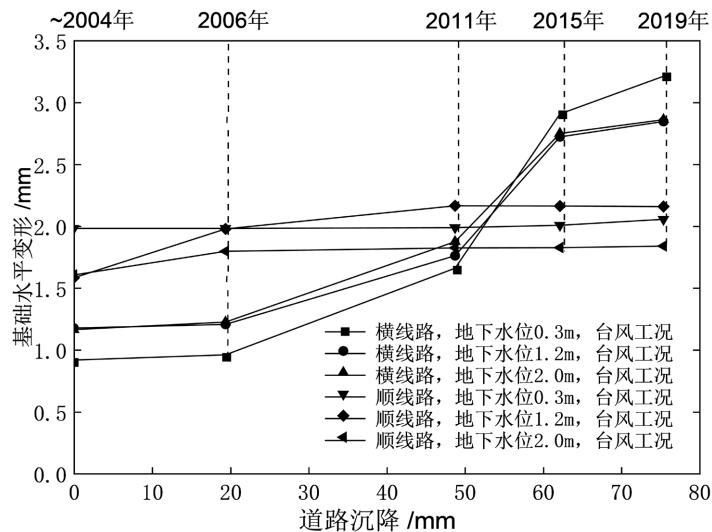
### 4.3. 复杂环境条件因素组合作用的影响

根据道路沉降、地下水位变化等多因素共同作用下基础的变形数值模拟结果, 图 6 和图 7 分别给出了复杂因素组合作用对基础变形的影响规律。





**Figure 6.** The influence of complex factors on foundation settlement  
**图 6.** 复杂因素组合作用对基础沉降的影响



**Figure 7.** The influence of complex factors on horizontal deformation of foundation  
**图 7.** 复杂因素组合作用对基础水平变形的影响

对比分析不同地下水位下的基础在受到台风工况作用和道路沉降影响的基础变形情况可以看出，基础的沉降量随道路沉降在 2004~2015 年间有所增加，之后趋于稳定。随着地下水位的下降，基础的沉降也逐渐增大。不同水位下的基础水平方向的变形量相差不大，顺线路方向的变形基本保持不变，总体维持在 2 mm 左右，横线路方向的位移随着道路沉降而增加，在 2004~2011 年间小于顺线路方向的变形量，之后超过。地下水位 0.3 m 时横线路方向的变形量略大于其他水位的变形量。总体来说，与设计工况相比，基础各方向的变形规律差别不大，但由于受到了台风作用，基础所受荷载增加，各方向的变形量与设计工况相比有所提高。

## 5. 结语

1) 综合考虑沿海软土地基条件、复杂环境条件变化、输电线路荷载特征，采用数值模拟方法，研究沿海软土地区复杂环境条件变化对既有输电线路基础变形影响规律是可行的。

2) 从本研究结果看,塔位附近软土地基道路沉降对基础竖向沉降影响最大,对基础水平方向的变形影响不大,但对基础横线路方向变形影响总体上要大于顺线路方向。地下水位变化对于基础沉降有显著影响,但对其水平位移影响不大。台风荷载作用显著地增加了基础的竖向沉降和水平位移。

3) 应加强沿海地区运行输电线路复杂环境条件变化的监测,并制定相应工程技术措施应对复杂环境条件变化对基础变形的影响。

## 参考文献

- [1] 马重,何峰,傅承诚,等.软土地区堆载下邻近高铁桩基侧向变形研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):769-776+811.
- [2] 张长生,高明显,强小俊.深圳后海湾海相淤泥固结系数变化规律研究[J].岩土工程学报,2013,35(S1):247-252.
- [3] 陈正汉,郭楠.非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J].岩土力学,2019,40(1):1-54.
- [4] 郑卫锋,张天光,陈大斌,等.我国输电线路基础工程现状与研究新进展[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):169-175.
- [5] 宋旭明,王天良,唐冕,等.基于试验和数值仿真的软土群桩基础 m 值研究[J].中国铁道科学,2023,44(1):58-66.
- [6] 徐莉,杨兴健.广东省软土地区大直径灌注桩的设计、施工及检测[J].建筑结构,2022,52(S1):2681-2687.
- [7] 林志豪,陈宏湛,陈仁伟,等.滨海软基后注浆灌注桩承载性状现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):578-586.
- [8] 赵大亮.软土地区铁路桥梁桩基试验及数值分析[J].路基工程,2019(6):119-122.
- [9] 律文田,冷伍明,王永和.软土地区桥台桩基负摩阻力试验研究[J].岩土工程学报,2005(6):642-645.
- [10] 张琰,陈培,赵贞欣.软土地基挤扩支盘桩基础试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):994-997.
- [11] 潘浩学.运营期深淤软土地区桥下道路对高架桥桩基受力特性影响研究[D]:[硕士学位论文].石家庄:石家庄铁道大学,2017.