

# 高填方下土体本构模型 对波纹管涵结构影响分析

顾佳沈<sup>1</sup>, 梅子玥<sup>2</sup>

(1. 江西水利电力大学, 江西 南昌 330099; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:**高填方深埋条件下, 填筑体围压超大, 常模量线弹性模型难以充分反映其非线性变形特征。为评估高围压条件下土体本构模型选取对深埋波纹管涵结构的影响, 以某抽水蓄能电站下库弃渣场一处70 m深埋波纹管涵为研究对象, 在统一几何模型、边界条件及分层施工路径条件下, 对线弹性土体本构模型及邓肯-张非线性土体本构模型进行对比分析。结果表明, 非线性模型分析所得管顶最大沉降较线弹性模型提高约13%; 最大环向压应力增幅约10%。两种模型的主要响应分布规律和强度判定结果一致。说明土体本构模型选取对结构变形预测影响明显, 而对强度判定影响有限。对于以变形控制为主的高填方深埋工程, 采用非线性本构模型更为合理。研究结果可为江苏省类似高填方埋置结构的数值分析提供参考。

**关键词:**深埋填方; 波纹管涵; 邓肯-张模型; 围压相关模量; 非线性分析

**中图分类号:**TV698 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)06-0021-0005

## Influence of soil constitutive models on the structural response of corrugated steel pipe culverts under high fill conditions

GU Jiashen<sup>1</sup>, MEI Ziyue<sup>2</sup>

(1. Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China;  
2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Under conditions of high fill and deep burial, the confining pressure in the fill mass becomes extremely high, and the constant-modulus linear elastic model cannot adequately reflect the nonlinear deformation characteristics of the soil. To evaluate the influence of soil constitutive model selection on the structural response of a deeply buried corrugated steel pipe culvert under high confining pressure, a 70 m deeply buried corrugated steel pipe culvert located in the lower reservoir spoil disposal site of a pumped-storage power station is selected as the study object. Under unified geometric model, boundary conditions, and layered construction sequence, a comparative analysis is carried out between the linear elastic soil constitutive model and the Duncan-Chang nonlinear soil constitutive model. The results show that the maximum crown settlement predicted by the nonlinear model is approximately 13% greater than that predicted by the linear elastic model, while the maximum circumferential compressive stress increases by about 10%. The two models exhibit consistent main response distribution patterns and identical strength assessment results. This indicates that the selection of the soil constitutive model has a significant effect on the prediction of structural deformation, but only a limited influence on

收稿日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(52579124)

作者简介: 顾佳沈(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工建筑物安全监控研究。E-mail: 2300113168@qq.com

strength assessment. For high-fill deeply buried projects governed mainly by deformation control, the nonlinear constitutive model is more reasonable. The results can provide a reference for the numerical analysis of similar high-fill buried structures in Jiangsu Province.

**Key words:** deep fill; corrugated steel pipe culvert; Duncan-Chang model; confining pressure dependent modulus; nonlinear analysis

波纹钢管涵作为柔性埋地结构,具有自重轻、施工便捷和适应地基变形能力较强等特点,已广泛应用于交通、水利和市政工程。高填方深埋条件下,随着覆土厚度增大,结构受力与变形受土-结构共同作用影响更加显著,土体本构模型选取对计算结果的影响也随之增强<sup>[1]</sup>。近年来,江苏省在水利、市政及交通基础设施建设中,涉及高填方回填与埋置结构的工程场景不断增多,对相关数值分析方法的合理性提出了更高要求。

工程数值分析中,土体常采用常模量线弹性模型处理。该方法计算简便,但在高围压条件下,土体变形模量随应力水平变化明显,线弹性假定可能难以充分反映其非线性变形特征<sup>[2]</sup>。邓肯-张模型能够较好描述土体模量随围压变化的规律,适用于高填方深埋条件下的土体变形分析。因此,有必要在统一计算条件下,对不同土体本构模型下波纹钢管涵的结构响应进行对比研究。

本文以某抽水蓄能电站下库弃渣场70 m深埋波纹钢管涵为研究对象,在统一几何模型、边界条件及分层施工路径条件下,分别建立线弹性土体模型和邓肯-张非线性土体模型,对结构沉降与环向压应力进行对比分析,以揭示高填方条件下土体本构模型选取对结构响应的影响,为江苏省类似高填方埋置结构工程的数值分析提供参考。

## 1 数值模型与计算方案

### 1.1 研究对象与对比原则

以某抽水蓄能电站下库弃渣场深埋波纹钢管涵为研究对象,选取覆土厚度约70 m的典型工况开展数值对比分析。该区段位于沟谷高填方范围内,双壁波纹钢管高埋深段长约105 m,属于受力较不利的代表区段。结构几何尺寸、材料物理力学参数及回填控制指标均取自工程设计与现场试验,其中,线弹性模型参数见表1,邓肯-张非线性模型参数依据《ABAQUS在岩土工程中的应用》并结合工程设计资料与现场试验成果综合确定。其中,变形参数按模型常用取值形式选取,强度参数结合弃渣料

试验成果确定,密度取值与线弹性方案一致。其余结构材料均采用线弹性模型处理,其中波纹钢、混凝土及垫层材料参数按工程设计取值输入。两类模型的差异仅体现在土体本构关系上,从而保证计算结果能够反映本构模型选取对结构沉降和环向压应力的影响<sup>[3]</sup>。高填方条件下波纹钢管涵的受力变形受填筑高度、土压力分布、结构刚度及施工过程的共同影响<sup>[4]</sup>。

表1 线弹性模型材料参数

材料	密度 $\rho$ / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ / Pa	泊松比 $\nu$
波纹钢	7 850	$2.06\times 10^{11}$	0.300
弃渣料	2 000	$1.00\times 10^7$	0.200
C20混凝土	2 400	$2.55\times 10^{10}$	0.167
C40混凝土	2 550	$3.25\times 10^{10}$	0.167
级配碎石垫层	1 900	$1.20\times 10^7$	0.200
透水性材料	1 900	$6.00\times 10^7$	0.200
基础	2 000	$3.00\times 10^7$	0.200

### 1.2 数值模型、结构等效与边界条件

采用二维平面应变有限元模型模拟管-土共同作用。考虑双壁波纹钢管截面构造较复杂,二维计算中采用等效平钢板法进行简化,并以单位长度构件抗拉刚度和抗弯刚度等效为基本原则,即等效平钢板与实际波纹钢板在轴向受拉和截面抗弯两方面具有相同力学响应<sup>[5]</sup>,即,

$$E_1 A_1 = E_2 A_2 \quad (1)$$

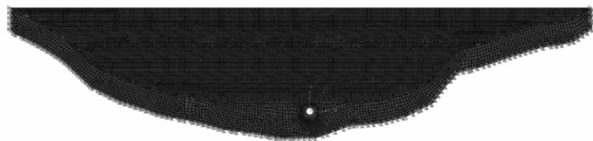
$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (2)$$

式中: $E_1$ 为等效平钢板弹性模量,MPa; $A_1$ 为单位长度平钢板截面面积; $I_1$ 为单位长度平钢板截面惯性矩; $E_2$ 为波纹钢板弹性模量,MPa; $A_2$ 为单位长度波纹钢板截面面积; $I_2$ 为单位长度波纹钢板截面惯性矩。

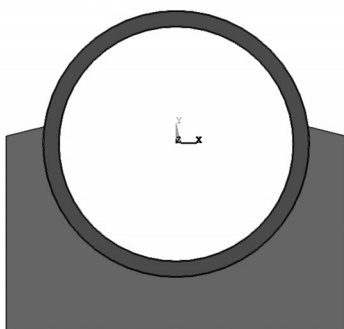
波纹钢板的截面面积与惯性矩参数依据《冷弯波纹钢管》(GB/T 34567—2017)确定。根据工程

设计参数,双壁波纹管管内径为4.5 m,外管内径为5.1 m,波距为380 mm,波高为140 mm,钢板厚度为6 mm,钢材为Q355B,内外管之间填充C40自密实混凝土,局部采用C20混凝土加强。经等效计算,双壁组合结构总等效壁厚取28.6 mm,考虑内外管受力对称,数值模型中内外侧分别取等效壁厚14.3 mm。

模型边界按常规埋地结构分析方法设置,底部约束水平与竖向位移,侧边界约束水平位移,顶部为自由表面。土体与结构之间采用一致的接触处理原则,以保证两类方案的对比基础统一。在线弹性方案中,土体采用常模量线弹性参数;在非线性方案中,弃渣填料采用邓肯-张模型描述其非线性变形特征。该模型能够反映土体初始模量随围压变化及切线模量随应力水平衰减的规律,适用于高填方、高围压条件下的土体非线性分析。采用二维平面应变有限元方法建立深埋波纹管涵数值模型,土体与结构按照不同受力特点选取相应单元类型进行离散,并对管涵附近区域实施局部网格加密处理。模型计算范围、边界条件及波纹管涵断面构造见图1。



(a) 深埋波纹管涵二维计算模型及边界条件



(b) 双壁波纹管排水涵断面模型

图1 计算模型

### 1.3 计算方案与评价指标

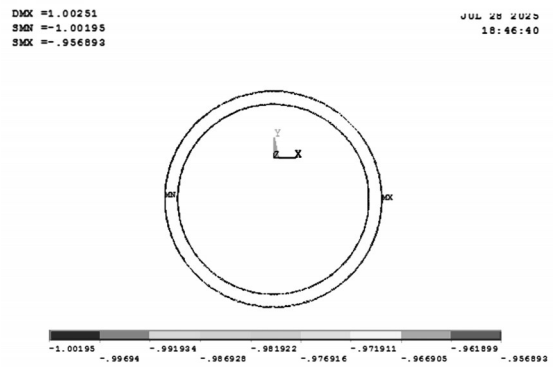
为模拟高填方施工过程对结构响应的影响,计算中采用分层填筑方式逐步施加荷载<sup>[6]</sup>。两类方案采用相同的填筑分层、施工路径和边界处理,仅改变土体本构模型,以保证对比结果的可比性。

结合波纹管涵在高填方深埋条件下的受力特点,选取管顶竖向沉降和结构环向压应力作为主要评价指标。前者用于反映土体本构模型变化对结构整体变形的影响,后者用于表征结构受力水平及控制部位变化。通过对两类模型计算结果进行对比,分析土体本构模型选取对深埋波纹管涵结构响应的影响。

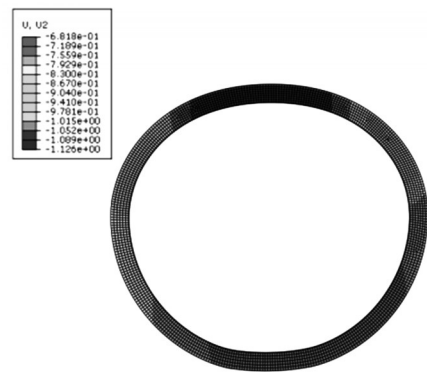
## 2 数值响应分析

### 2.1 竖向沉降响应特征

两种模型在最终填筑至70 m埋深后的竖向位移云图如图2所示。最大沉降均出现在管顶区域,并向两侧逐渐衰减,整体分布形态基本一致。最大沉降均出现在管顶区域,并向两侧逐渐衰减,整体分布形态基本一致。



(a) 线弹性模型竖向位移(单位:m)



(b) 邓肯-张模型竖向位移(单位:m)

图2 竖向位移云图

在线弹性模型中,管顶最大沉降为1.00 m;在邓肯-张非线性模型中,对应最大沉降为1.13 m,增幅约13%。差异主要集中于结构顶部及其上部一定范围内,在远离结构区域,两种模型计算结果趋于接近。

沉降差异主要与高填方下土体模量的应力相关性有关,埋深和土体模量是影响埋地钢管变形响应的重要因素<sup>[6]</sup>,与本文计算结果一致,说明在高填方深埋条件下,土体本构模型的选取会明显影响结构变形预测;对于以沉降或变形控制为主的工程分析,采用非线性土体本构模型更为合理。主要计算结果见表2。

### 2.2 环向应力响应特征

两种模型下结构环向压应力分布如图3所示。由云图可见,最大环向压应力均出现在管顶区域,沿管周向两侧逐渐减小,整体分布规律基本一致。这说明在深埋高填方条件下,尽管土体本构关系不同,但波纹钢管涵的主要受力模式并未发生改变,结构整体仍以环向应力响应为主。

表2 线弹性模型与邓肯-张模型关键响应指标对比

指标	线弹性模型	邓肯-张模型	差异特征
管顶最大沉降 / m	1.00	1.13	非线性模型沉降更大,增幅约13%,差异主要集中在管顶及其上部区域
最大值位置	管顶偏拱肩区域	管顶偏拱肩区域	两种模型控制部位一致
强度判定结果	满足规范要求	满足规范要求	两种模型安全判定一致

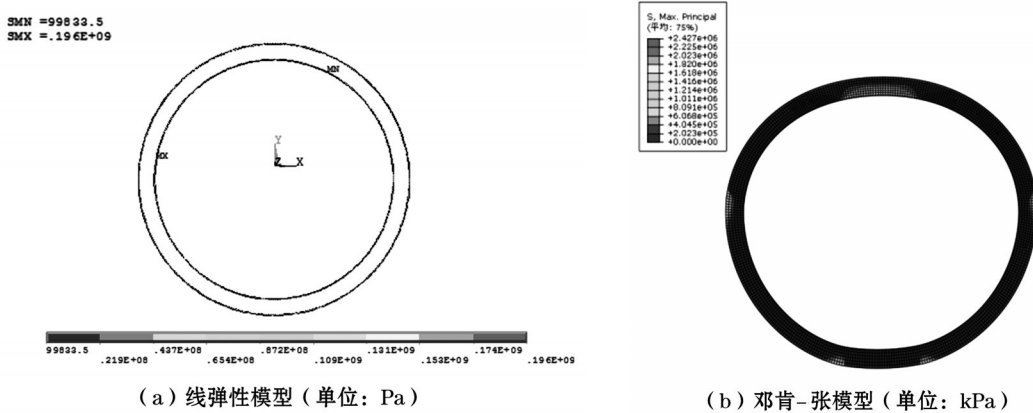


图3 环向应力分布图

定量分析表明,线弹性模型计算得到的最大环向压应力为112.4 MPa,邓肯-张非线性模型对应值为124.7 MPa,增幅约10%。与竖向沉降相比,环向压应力对土体本构模型变化的敏感性相对较低,说明土体非线性对结构应力峰值有一定放大作用,这说明高围压条件下土体非线性主要影响局部区域

的荷载传递与应力重分布过程,对结构整体受力形态影响有限。相关研究表明,在土-结构相互作用分析中,考虑土体非线性后,结构内力响应通常表现为幅值调整,而分布规律变化相对较小<sup>[7]</sup>。两种模型所得峰值应力均未超过钢材屈服强度,结构强度判定一致。主要计算结果见表3。

表3 线弹性模型与邓肯-张模型环向应力及工程判定对比

对比内容	线弹性模型	邓肯-张模型	对比结论
最大环向压应力 / MPa	112.4	124.7	非线性模型提高约10%
峰值位置	管顶偏拱肩区域	管顶偏拱肩区域	受力控制部位一致
分布形态	沿管周呈拱顶集中分布	沿管周呈拱顶集中分布	整体分布规律基本一致
是否超过钢材屈服强度	否	否	均满足强度要求
安全判定	满足规范要求	满足规范要求	工程安全结论一致
工程意义	可用于强度控制分析	更适于变形控制分析	变形控制工况下宜采用非线性模型

### 3 结 论

以某抽水蓄能电站上下库弃渣场高填方双壁波纹管涵为对象,在统一几何模型、边界条件与分层施工路径条件下,对土体本构采用线弹性模型与邓肯-张非线性模型进行了对比分析。取得如下研究成果:

(1)在70 m深埋高填方条件下,两种模型所得沉降分布形态总体一致,均表现为管顶区域沉降集中、向两侧逐渐衰减的拱形扩散趋势,但沉降幅值存在明显差异。围压相关非线性使最大沉降由1.00 m增至1.13 m,增幅约13%,说明变形响应对土体本构假定具有较高敏感性。

(2)环向应力分布规律在两种模型下基本保持一致,最大值均出现在管顶偏拱肩区域,差异主要体现在幅值层面。邓肯-张模型计算所得最大环向压应力提高约10%,但受力模式并未发生改变,结构整体仍以环向膜应力为主导。这表明,在深埋高围压条件下,土体非线性对内力分布形态影响有限,其作用主要体现为应力峰值的幅值调整。

(3)在本工程参数范围内,两种模型所得环向应力水平均未超过钢材屈服强度,结构安全判定结

果一致。总体来看,线弹性模型可用于结构受力规律的初步分析;对于以沉降或变形控制为主的高填方深埋工程,采用非线性土体本构模型更为合理。

#### 参考文献:

- [1] 吴冠庆,魏进,岳夏冰,等.低填方钢波纹管涵洞受力变形特性及垂直土压力计算[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(9):1337-1345.
- [2] 张常光,吴凯,隋建浩.基于小主应力轨迹的上埋式涵管竖向土压力非线性描述[J].岩土工程学报,2021,43(12):2200-2208.
- [3] 李杰,李晨,刘纯利.邓肯-张模型参数计算方法对切线弹性模量影响研究[J].中国水运,2022,22(16):49-51.
- [4] 杨晓华,李嘉璐,李斌,等.高填方路堤下钢波纹管涵受力与变形特征离心模型试验[J].公路交通科技,2020,37(10):74-82.
- [5] 张勇发,高英志.半拱形大孔径钢波纹管涵受力变形数值分析[J].公路交通科技,2022,39(3):78-84.
- [6] 郜新军,包建新,张浩,等.高填方大直径钢波纹管涵变形机制与控制技术研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):10-19.
- [7] 褚夫蛟,曾水生,方文富,等.高填方大直径钢波纹管涵洞力学特性[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(9):1338-1342.