

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.01.015

# 三种大跨钢波纹管涵洞力学特性对比分析

沈斌斌

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350000)

**摘要:** 为了揭示三种大跨径钢波纹管涵洞力学特性的差异,通过有限元方法对不同工况下大跨径钢波纹管圆涵、拱涵和箱涵三种结构的力学特性进行比较,分析其变形特征、涵顶垂直土压力、涵侧土压力及结构安全性等方面的表现。结果表明:三种结构在受力变形特征的分布上差异不显著,但在应力与水平变形的最不利点位置上有所不同,涵顶垂直土压力均呈现中间小,两侧大分布,随填土高度增加,涵顶中心和涵侧竖向土压力均增大且趋势相同,涵侧土压力分布各有特点,但三者波峰与波谷位置的分布规律相似。箱涵等效应力初期较大,增长速度较快,易于达到屈服应力,而拱涵和圆涵之间则没有太大差距。在水平位移增幅方面,三者差距较小,而竖向位移增幅表现为箱涵大于圆涵,也大于拱涵。

**关键词:** 大跨径;钢波纹管涵洞;数值模拟;垂直土压力理论

中图分类号: U449.83

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0109-09

## Comparative Analysis of Mechanical Properties of Three Types of Large Span Corrugated Steel Pipe Culverts

SHEN Binbin

(Fujian Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** There are fewer systematic studies on the mechanical properties of large-span corrugated steel pipe culverts. To achieve this goal, this work employs the finite element method to comparatively analyze the mechanical behavior of three large-span steel culvert structures: circular culverts, arch culverts, and box culverts, under varying working conditions. The analysis focuses on deformation characteristics, vertical earth pressure on the culvert crown, lateral earth pressure, and the structural safety of the culverts. The results are as follows. Three kinds of structures in the distribution of force and deformation characteristics are not too different, just in the stress and horizontal deformation of the most unfavorable point location; culvert top vertical earth pressure are presented in the middle of small, two sides of the large distribution; with the increase of filling height, culvert top center and culvert side vertical earth pressure are increased and the trend is the same; culvert side earth pressure distribution has its own characteristics, but the three wave peak, wave valley culvert side earth pressure distribution is similar. Box culvert equivalent stress is larger at the beginning, the growth rate is faster, and it is easiest to reach the yield stress, while there is no big gap between arch culvert and round culvert. In terms of horizontal displacement, the differences among the three structures are minimal. However, the vertical displacement shows a clear hierarchy: the box culvert exhibits the largest increase, followed by the circular culvert, and then the arch culvert.

**Keywords:** large span; steel corrugated pipe culvert; numerical simulation; vertical earth pressure theory

涵洞作为路桥工程中的一种重要结构,约占公路桥涵总数的40%<sup>[1]</sup>。在我国现有的桥涵中,大部

分是传统的混凝土结构,随着我国公路桥涵的发展,其工程量大、施工复杂、建设周期长等诸多弊端越来越

收稿日期:2024-11-11

修稿日期:2024-12-09

基金项目:福建省自然科学基金(2022J05021)

作者简介:沈斌斌(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事路基、路面、涵洞设计等方面工作。E-mail:44529941@qq.com

越难以适应现代化建设的要 求。而在我国大力发展钢材产业背景下,主要材料为钢材的钢波纹管涵洞越来越受关注。该类型管涵不仅弥补了上述传统管涵的诸多不足,还具有自重轻、强度高、力学性能好等诸多优点<sup>[2]</sup>,使钢波纹管涵洞具有很高的研究价值。对于涵洞力学性能研究可以追溯到上个世纪初,囿于条件和时代的局限性,早期往往只有理论方面的研究,近年来学者们结合有限元软件及试验方法,对钢波纹管涵洞的力学性能有了一定研究。冯忠居<sup>[3]</sup>对埋地管道中的土压力分布进行了非线性分析,并考虑了影响管道土压力的不同因素,利用弹塑性理论,采用回归分析方法,建立管道侧向土压力的新计算公式。田子瀚<sup>[4]</sup>结合 ABAQUS 软件计算,分析了不同类型 HDPE 波纹管的力学特征以及环刚度对波纹管性能的影响,研究了管径等因素对波纹管变形、土压力和应力的影响。Dezfooli 等<sup>[5]</sup>将非线性有限元分析方法与试验研究的结果用于爱荷华公式进行比较,进一步验证了爱荷华公式可以作为工程师计算所需。Liu 等<sup>[6]</sup>对回填过程中管顶应力发展规律进行分析,作为结构施工的一个重要技术难点,其建立了一个三维有限元模型模拟在施工过程中埋地管道的变化,并提出了波纹管应力变化规律。Liu 等<sup>[7]</sup>首次采用动态分布式光纤应变传感器监测在役钢波纹管涵洞在静态和动态车辆荷载下的力学行为。Tehrani 等<sup>[8]</sup>采用室内试验方法研究了钢波纹管结构在竖向静载荷作用下的承载力,结果表明,环向刚度决定了圆形钢波纹管涵承载力,拱的几何结构对拱形钢波纹管承载力影响巨大,帮助其抵抗外荷载。

可见,国内外学者进行了广泛研究,取得了一定成果,但对于大跨径情况的钢波纹管力学特性,目前还没有系统性的研究。因此,为了研究不同工况下,特别是大跨径钢波纹管涵洞的力学特性,本文以某道路工程为背景,针对圆涵、拱涵、箱涵三种钢波纹管涵洞,采用 ABAQUS 有限元软件进行建模分析,揭示三种大跨径管涵的力学特性差异,以期 为工程提供设计参考。

## 1 钢波纹管数值模型建立

### 1.1 大跨径管涵的定义

在既有的对大跨径管涵的研究<sup>[1,9-12]</sup>中,虽然都提到了大跨径管涵并得出了相应结论,但实际上它们研究对象的跨径并不完全相同,如表 1 所示。

由于至今没有人对“大跨径”进行明确的界定,这可能会使研究人员对大跨径管涵产生歧义,因此有必要对“大跨径”作明确的定义。根据前人的研究经验及现行相关规范<sup>[13]</sup>中对于涵洞跨径的定义,本文将跨径 $\geq 5$  m 的管涵视为“大跨径”管涵。

表 1 大跨径管涵研究中实际跨径

文献	作者	研究管涵跨径/m
大跨径箱形钢波纹管涵洞力学特性数值模拟	朱承鸿	7.2
大跨径钢波纹管在露天煤矿立交工程中的应用研究	康孝孔	12.0
大跨径覆土管拱形波纹钢板桥涵加强效果分析	姚萌萌等	15.3
高填土大跨径钢波纹管涵的力学性能与设计方法研究	廖鑫	5.0
低路堤大跨径钢波纹板拱桥受力特征分析	刘哲坤等	13.0

### 1.2 基本模型与网格划分

本文模拟内容是圆、拱、箱三种截面形式管涵相互对比,三种大跨径钢波纹管涵洞的几何构造如图 1 所示。分别采用相同建模方式建立除几何模型构造不同外,其余条件相同的三种管涵模型。

模型选择单元类型如下<sup>[14]</sup>:钢波纹管选用三维一般壳单元, S4R, 四结点曲面薄壳单元,具有减缩积分,沙漏控制,可较好仿真钢波纹管力学性质;土体选用 C3D8R、八结点线性六面体单元、减缩积分、沙漏控制的三维实体单元,这类单元可以更好地模拟土的力学性质。

土体采用六面体扫掠方式划分网格<sup>[15]</sup>,以中性轴算法计算管涵周围土体,进阶算法计算其余土体。综合考虑计算成本与精度要求,将钢波纹管涵所在水平向与竖直向土体网格划分较细,其余土体可划分较粗<sup>[16]</sup>。图 2—图 4 为三类钢波纹管涵洞数值模型。

### 1.3 本构关系及材料参数

金属塑性问题应采用 Von Mises 屈服准则<sup>[17]</sup>,当某一点应力应变状态的等效应力应变达到某一与应力应变状态相关的定值时,材料就屈服。由库伦塑性准则:当材料中某点在某一平面 N 上产生滑移,作用在该面上的切应力  $\tau_n$  既要克服材料黏聚力  $c$ ,还要克服该面上正应力  $\sigma_n$  形成的摩擦力。

设置钢波纹管、混凝土基础、垫层、回填土、地基土五种材料参数。具体如表 2 所示。其中,回填土采用砂质黏土,压实度 90% 以上。

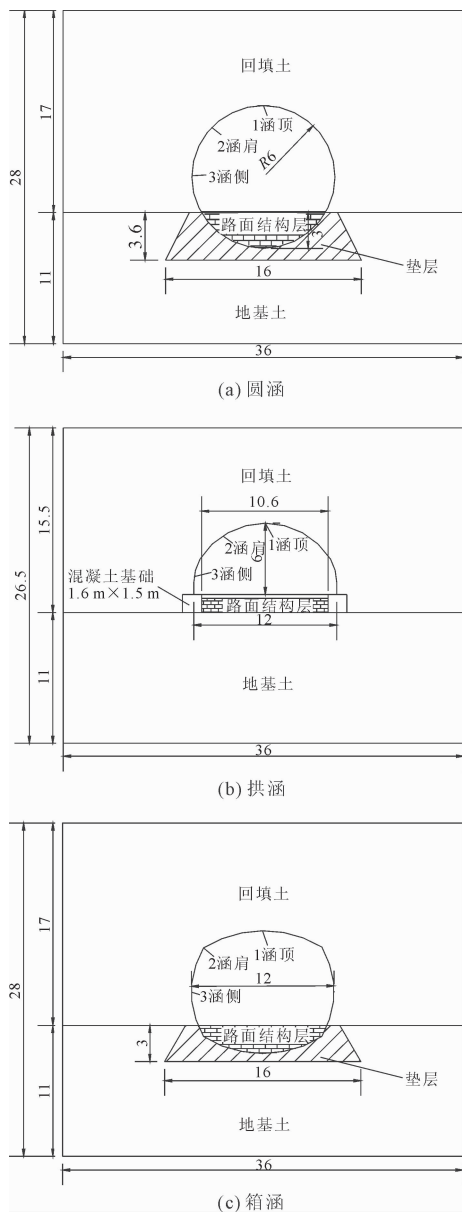


图 1 基本工况示意图(单位:m)

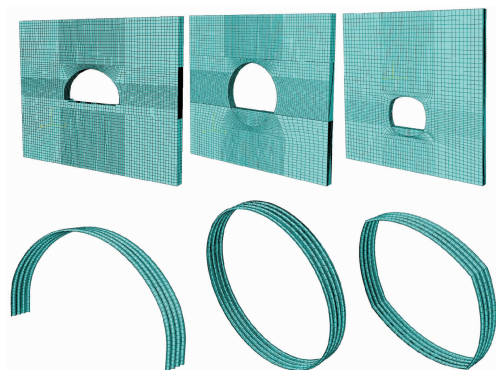


图 2 三种钢波纹管涵数值模型

1.4 接触方式及边界条件

钢波纹管与土体之间的接触作用相当复杂,可

简化为两种方式<sup>[18]</sup>:第一种方式考虑到实际施工中为分层填土,填土与管涵之间压实紧密,忽略管、土相对位移,故管、土间只传递力而没有相对位移。第二种方式则没有将管、土间的相对位移忽略,而是将管与土之间相互作用视为两个部件相互摩擦,在摩擦力作用下,管将变形,形成相对位移。

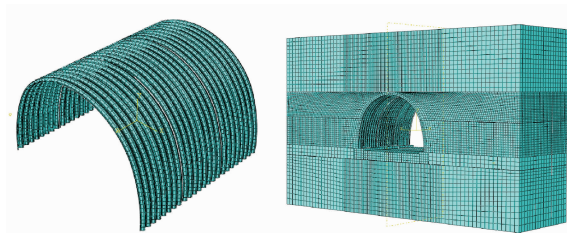


图 3 拱涵波纹管、土体及基础网格

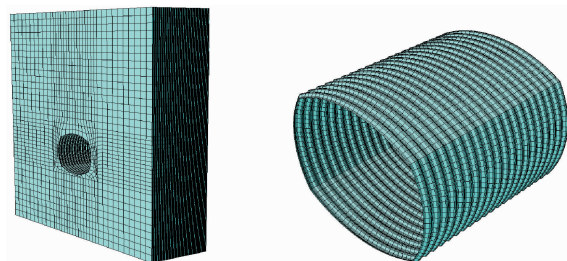


图 4 箱涵土体及基础、波纹管网格

表 2 材料参数

材料类型	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	摩擦角 /( $^\circ$ )	黏聚力 /kPa
钢波纹管	$2.1 \times 10^5$	0.25	7850	—	—
混凝土基础	$3.0 \times 10^4$	0.25	2400	—	—
垫层	100	0.20	2000	30	22
C30	$3.0 \times 10^{10}$	0.30	2400	—	—
回填土	60	0.35	1900	16	22
地基土	200	0.30	2200	33	25

在 Abaqus 中,两种相互作用方式皆能实现,第一种可采用蒙皮功能<sup>[19]</sup>,管、土为一个部件,视为一体,只在材料中体现钢波纹管与填土区别,该方式下的计算结果,通常只为得到最后钢波纹管涵受力变形而不关心管在填土过程中的变形情况,是实际工程中常用计算方式;第二种采用摩擦功能,管、土为两个部件,之间存在摩擦力,该功能的优点在于能反应实际管、土间的相对位移,对于需要关注管涵在填土过程中变形情况的研究,应采用该种方式,缺点在于较难收敛,计算效率低。考虑到计算效率且本文着重关注高填土下钢波纹管涵洞极限承载力,不注重涵侧填土管涵变化,故选择第一种接触方式。

边界条件可设置为<sup>[20]</sup>:基底完全固定,两侧土

体受  $X$  向平动限制,轴向土体对称约束  $Z$  向平动, $X$  向、 $Y$  向的转动,如图 5 所示。

### 1.5 工程概况

依托某工程大跨钢波纹管涵洞进行分析,该工程为大跨钢波纹管圆涵,涵顶最大设计填方高度为 18.7 m,涵洞的跨径为 12.0 m,总长度约为 89.67 m,钢波纹管壁厚为 7.0 mm,波形采用 200 mm(波距)  $\times$  55 mm(波高),管材采用热轧镀锌钢板加工成型的 Q235 钢波纹管,假定拱涵与箱涵各参数同上。

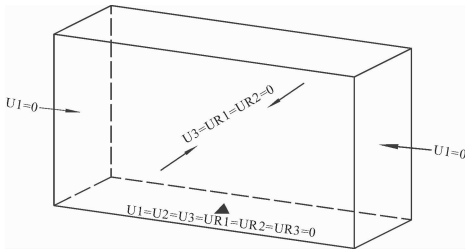


图 5 边界条件

## 2 大跨径下三种涵洞对比分析

### 2.1 结构受力变形特征

图 6—图 8 为三种管涵受力变形云图。由图可知:

(1) 拱、圆、箱涵三种结构应力总体分布差别不大,涵顶、涵底附近较小,两侧较大。由于拱涵是开口式结构,其分布相当于圆、箱涵上半部分分布。但三者应力最不利点有差别,拱涵和圆涵在涵侧,而箱涵在下半角部附近。

(2) 三种结构水平变形分布总体差别不大,呈涵内小,涵侧大分布。拱涵与圆涵整体上较为相似,最不利点均位于两类涵洞的涵侧。而箱涵最不利点位于上半角部附近。

(3) 三种结构竖向变形分布基本没有差别,拱涵分布等同于圆涵、箱涵上半部分分布。最不利点均位于涵顶。

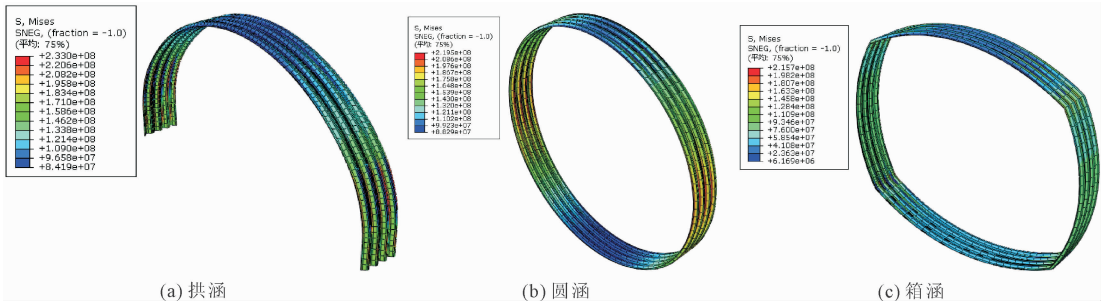


图 6 结构受力特征

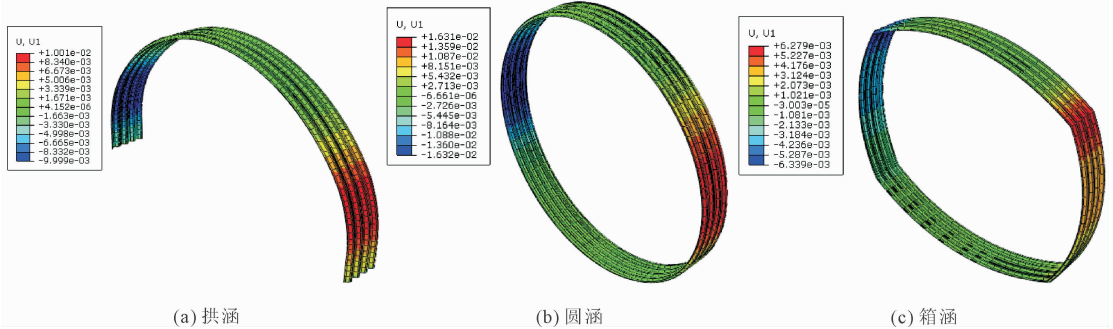


图 7 结构水平变形特征

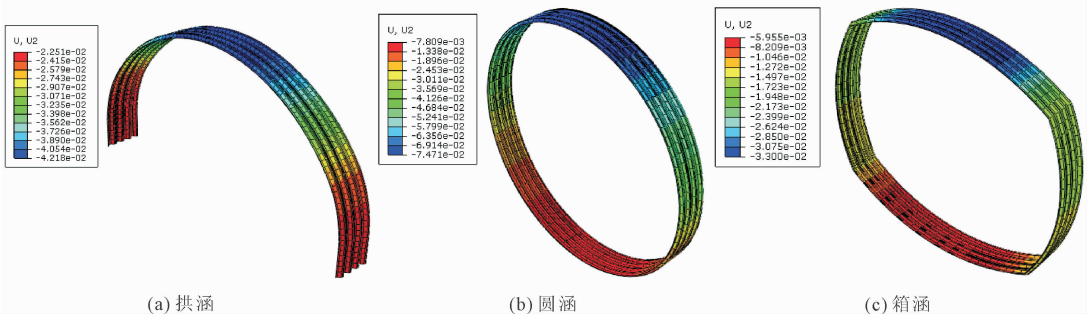


图 8 结构竖向变形特征

## 2.2 涵顶垂直土压力

由上节可知,三种钢波纹管涵洞结构力学特征没有本质差别,说明三种结构受力变形机理相同,但仍存在力学性能上的差异。为探究该问题,从涵顶垂直土压力着手,进行下一步分析<sup>[21]</sup>。

### 2.2.1 垂直土压力分布特征

填土高度 4 m 时三种结构在涵顶处的垂直土压力分布如图 9 所示。由图 9 可知:

(1) 三种结构均呈中间分布较小、两边分布较大的情况。这是因为土-钢刚度存在较大差距造成的。钢波纹管比回填土体刚度要大得多,因此涵顶土体在管涵范围内沉降量较小、两侧较大,进一步在涵顶上方形成土拱作用,相当于管涵内范围土体重量转移至两侧。

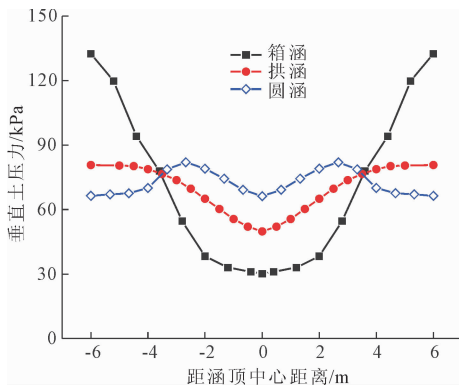


图 9 垂直土压力分布

(2) 三种结构虽均表现出土拱效应,但三者垂直土压力分布、大小变化都存在较大差异,各有特点。拱涵垂直土压力分布较均匀,在 1/3 管径范围内增大较快,范围之外较慢,大小变化范围在 50 kPa ~ 80 kPa,在三者中变化最规律;圆涵管径 1/3 范围内变化规律,但在此范围外反而减小,最后趋于平缓,最终两侧垂直土压力值均在 66 kPa 左右;箱涵 1/3 管径内垂直土压力均在 30 kPa 左右,大小变化不大,但在此范围外垂直土压力迅速增大直至 135 kPa,三者中大小变化最大。

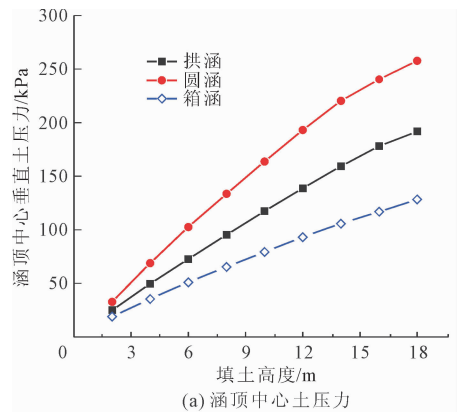
### 2.2.2 填土高度对垂直土压力及压力系数的影响

不同填土高度的三种结构涵顶中心和涵侧垂直土压力及垂直土压力系数变化如图 10 所示。由图 10 可知:

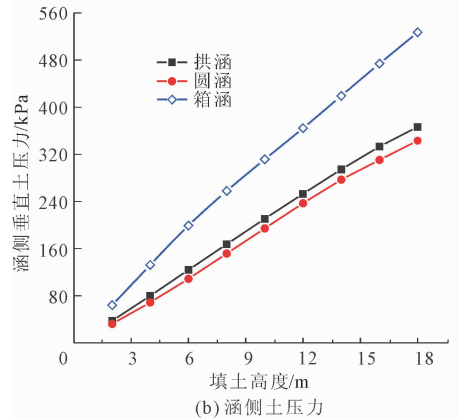
(1) 三种结构的涵顶中心及涵侧土压力均随填土高度增加而增大,并由线性转为非线性,趋势相同,这再次说明三种结构受力变形机理相同。但三种结构垂直土压力大小不同,涵顶中心处箱涵增加

最慢,卸荷性能最好,拱涵次之,圆涵增加最快;涵侧垂直土压力为圆涵最小,拱涵稍大于圆涵,箱涵远大于两者,三者的涵侧垂直土压力均大于涵顶中心,这说明三者均有将涵内上方土体重量转移至涵侧的特性,且箱涵体现最多,拱涵次之,圆涵最少。

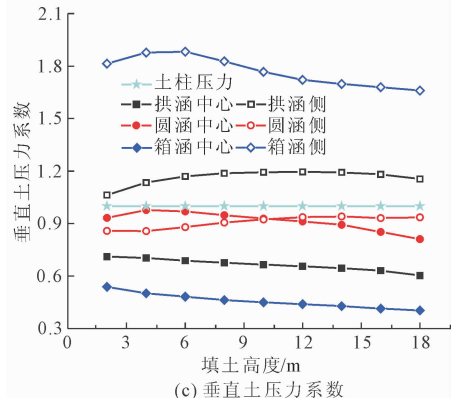
(2) 除圆涵外,涵侧土压均大于土柱压力,且随填土高度增加呈递减趋势的三种结构涵顶中心竖向土压系数均小于土柱压力。说明钢波纹管涵洞具有转移土体重量的特性,也说明钢波纹管涵洞本身具有很强的柔性特性,特别是箱涵具有极好的变形减荷特性,垂直土压系数只有 0.4,而圆型涵洞转移土体重量少,受力均匀。



(a) 涵顶中心土压力



(b) 涵侧土压力



(c) 垂直土压力系数

图 10 不同填高下垂直土压力及其系数变化

### 2.3 涵侧土压力

钢波纹管涵洞结构力学性能承受的外荷载除涵顶垂直土压力外,还受涵侧土压力影响<sup>[22]</sup>。

#### 2.3.1 涵侧土压力分布特征

填土高度 4 m 的情况下三种结构涵侧土压力的分布特征如图 11 所示。由图 11 可知:

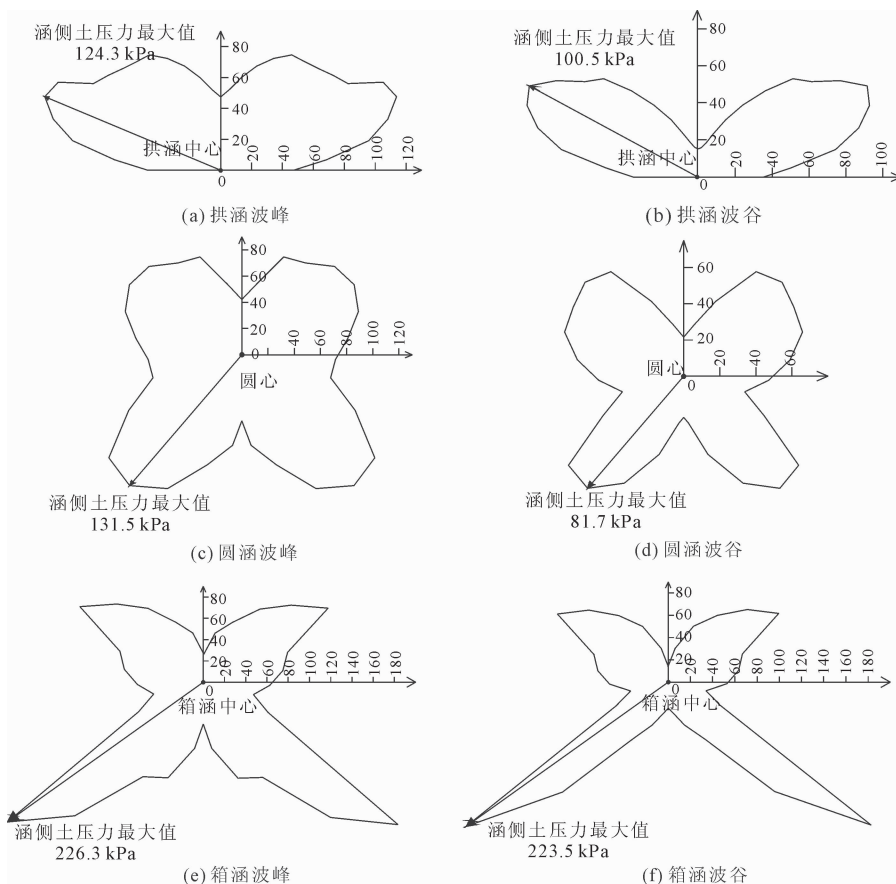


图 11 涵侧土压力分布(单位:kPa)

(2) 拱涵涵侧土压力最大值位于拱涵中心水平线 30°左右,而圆涵、箱涵均位于下半部分距中心水平线 45°左右。其中,箱涵涵侧土压力波峰、波谷最大值分别为 226.3 kPa、223.5 kPa,在三种结构中最大。圆涵分别为 131.5 kPa、81.7 kPa;拱涵分别为 124.3 kPa、100.5 kPa。

由上述可知,钢波纹管涵洞涵侧土压力对受力变形影响较大,且填土高度的变化对钢波纹管涵涵侧土压力变化影响较大。

#### 2.3.2 填土高度对涵侧土压力的影响

三种结构涵侧土压力分布如图 12 所示。由图 12 可知:

(1) 随填土高度的增加,拱涵和圆涵的涵侧土压力呈非线性增加,箱涵则基本呈线性增加,增幅远

(1) 三种结构涵侧土压力分布共同点在于涵顶较低;波峰、波谷涵侧土压力总体上分布均差距不大,但区别在于分布上拱涵涵侧土压力分布最均匀,且波峰、波谷涵侧土压力差距最大,圆涵次之,箱涵分布最不均匀,且波峰、波谷涵侧土压力差距最小,大小上三种结构涵侧土压力均为波峰大于波谷。

大于拱涵和圆涵。这说明拱涵、圆涵柔性变形有利于涵侧土压力减小,而箱涵柔性变形特性对涵侧土压力影响不大。

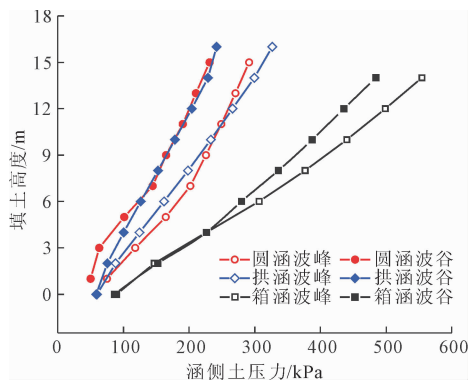


图 12 填高变化下涵侧土压力分布

(2) 拱涵和圆涵涵侧土压力的最大值非常接近,明显区别于箱涵。说明箱涵结构构造上最不利于涵侧的土压力减荷。

## 2.4 结构安全性

钢波纹管涵洞变形可分为两个阶段,第一个是涵侧填土阶段,第二个是涵顶填土阶段<sup>[23]</sup>,且规定管涵水平变形两端远离为正,靠近为负;竖向变形下沉为正,上拱为负。钢波纹管在涵侧填土阶段,主要受涵侧填土摩擦力作用而发生上拱变形,此阶段完成时,管涵上拱达到最大值,此时最大竖向和水平变形均为负值。将涵侧填土阶段完成时视为初始工况,此时的管涵视为变形前;涵顶填土阶段完成时视为终止工况,为变形后。已有研究表明<sup>[24]</sup>,该阶段的最大等效应力、最大水平和竖向变形均远小于安全限值。

为保证结构安全,除研究钢波纹管涵所受外荷载外,还需要研究钢波纹管涵自身力学性能<sup>[25]</sup>。由前述可知,虽钢波纹管涵洞有优良的卸荷特性,但由于本身刚度小于传统混凝土涵洞,在高填土下,钢波纹管涵洞最大等效应力、最大变形均易超限。

### 2.4.1 管涵最大等效应力和最大变形

三种管涵最大等效应力和最大变形随填土高度变化如图 13 所示。由图 13 可知:

(1) 三种管涵的最大等效应力、最大水平和竖向位移,除初始工况外,均随填土高度的升高而线性升高,但三种结构的初始工况受力变形大小、增幅大小各不相同。

(2) 拱涵、圆涵、箱涵随着填土高度的增加,最大等效应力斜率分别为 19.0、17.7、28.9;初始工况的应力分别为 54.8 MPa、45.5 MPa、99.5 MPa。为保证结构安全,从应力考虑,三种管涵最大填土高度分别为 10.1 m、11.8 m、4.7 m。

(3) 三种管涵最大水平位移斜率随填土高度增加分别为 1.8、2.0、2.2;最大竖向位移增加斜率分别为 2.1、2.9、3.9。

### 2.4.2 管涵变形前后形状变化对比

三种管涵变形前后形状变化对比如图 14 所示。由图 14 可知:

(1) 三种涵洞变形前后形状均发生了明显的变化,其中拱涵发生的变形幅度最大,圆涵次之,箱涵结构的变形幅度最小,箱涵相对更稳定。

(2) 发生结构变形前,三种涵洞最不利点所在位置不尽相同。拱涵和圆涵较为相近,最不利点均位于涵侧偏上方;箱涵最不利点则位于涵顶。

(3) 发生结构变形后,三种涵洞最不利点所在位置相似,皆位于涵顶。说明此时涵顶所受土压力最大。

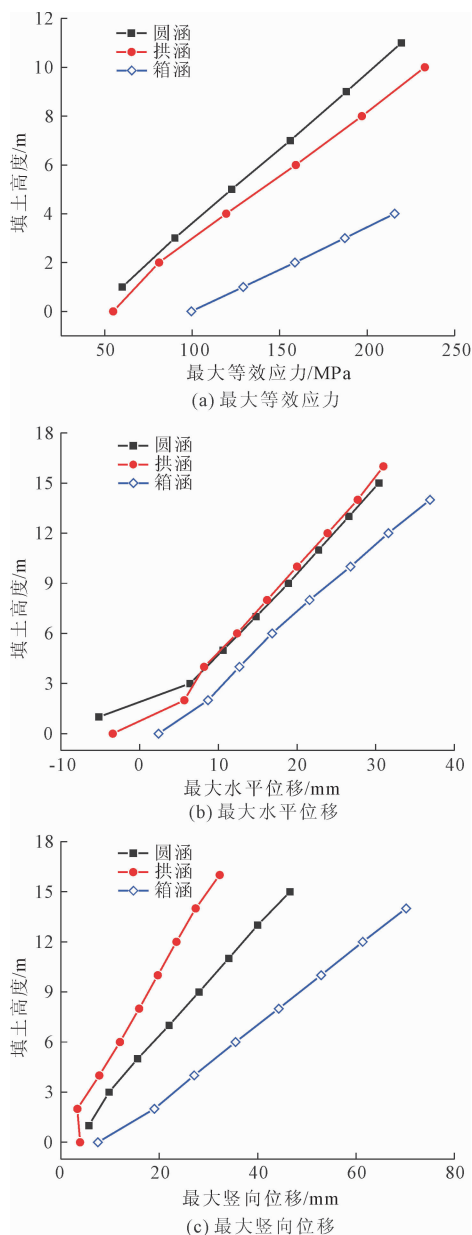


图 13 结构应力及位移最大值

## 3 结论

本文采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟,对比分析了大跨径条件下圆涵、拱涵、箱涵三种涵洞结构的力学特性,得到三种大跨径涵洞涵顶垂直土压力、涵侧土压力、最大等效应力、水平位移及竖向位移随填土高度增加而变化的规律。主要有以下结论:

(1) 三种管涵的应力与变形分布模式相似,但临界应力位置不同。箱涵最大应力和水平变形均出

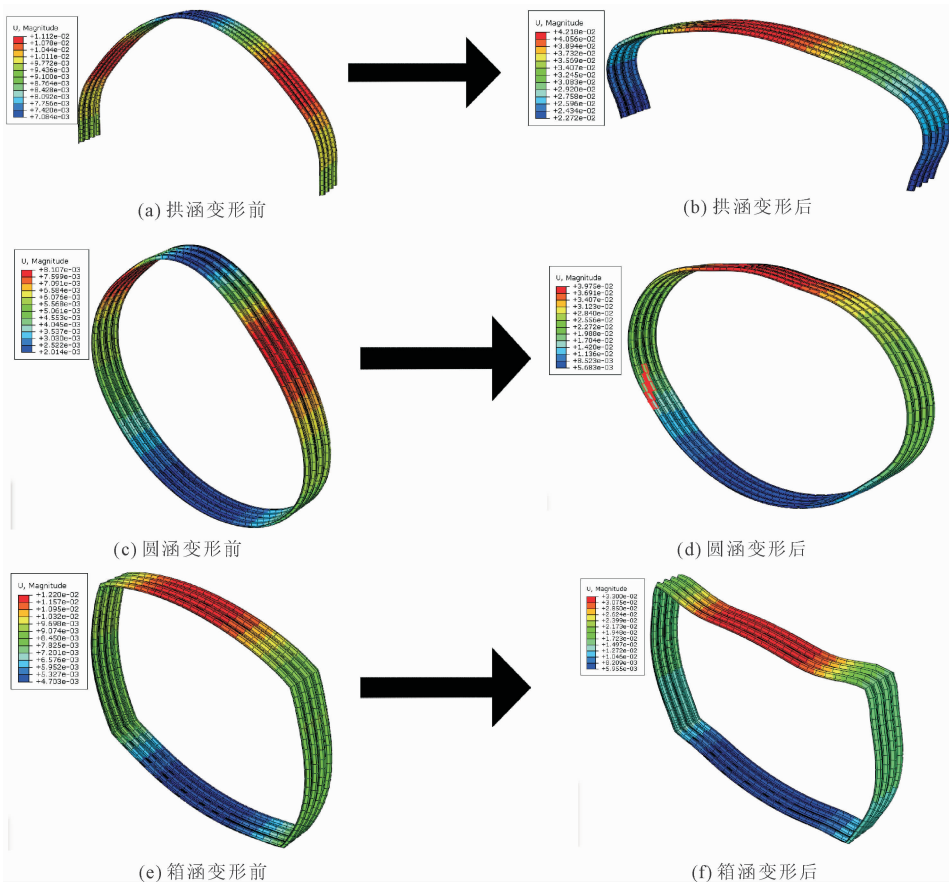


图 14 结构变形前后对比

现在角部;拱涵涵侧土压力最不利点位于涵侧上方 $30^\circ$ ,圆涵位于涵侧下方 $45^\circ$ 。

(2) 涵顶垂直土压力均呈现中间小、两侧大的分布特征。拱涵土压力变化均匀,中心、两侧垂直土压力大小均处于圆、箱涵之间;圆涵中心值最大而两侧最小,箱涵两侧土压力较中心陡增且变化幅度最大。

(3) 随填土高度增加,涵顶中心与涵侧土压力均经历先线性增长后非线性增长。三种结构涵顶中心竖直土压力系数均小于土柱压力,且随填土高度增加呈递减趋势,除圆涵外,涵侧土压力均大于土柱压力。同一填土高度下,箱涵涵侧土压力远大于拱涵、圆涵。

(4) 箱涵等效应力增速最快,易于达到屈服应力,而拱涵和圆涵相近;水平位移增速差距均不大,竖向位移增速高于圆涵和拱涵。拱涵、圆涵、箱涵最大变形超限时填土高度分别为最大等效应力超限时的2.9倍、3.4倍、5.7倍。

#### 参考文献:

[1] 廖鑫.高填土大跨径钢波纹管涵的力学性能与设计

方法研究[D].长沙:湖南大学,2014.

- [2] 乌延玲.公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究[D].西安:长安大学,2012.
- [3] 冯忠居.沟埋式大型钢筋混凝土蛋型管道土压力的研究[C]//第五届全国结构工程学术会议论文集(第三卷).海口,1996.11,北京:中国力学学会《工程力学》期刊社、清华大学出版社,1996:303-307.
- [4] 田子瀚.覆土HDPE波纹管涵土与结构相互作用试验研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [5] Dezfooli M S, Jalali H H, Razavi M, et al. Design equations for large diameter buried steel pipes inspired by the modified Iowa formula[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9):4021160.
- [6] Liu Baodong, Sun Haibo, Xu Weibo, et al. Research on the law of stress development along backfilling process between crest and valley of buried corrugated steel pipe culverts[J]. International Journal of Steel Structures, 2021, 21(1):142-153.
- [7] Liu Y, Hout N A, Moore I D. Structural performance of in-service corrugated steel culvert under vehicle loading[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3):4019142.
- [8] Tehrani A D, Kouchesfehni Z K, Chimauriya H R, et

- al. Structural evaluation of invert-cut circular and arch shape corrugated steel pipes through laboratory testing [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2021, 48 (2):187-201.
- [9] 朱承鸿. 大跨径箱形钢波纹管涵洞力学特性数值模拟 [J]. 公路, 2022, 67 (10):131-139.
- [10] 康孝孔. 大跨径钢波纹管在露天煤矿立交工程中的应用研究 [J]. 煤炭工程, 2023, 55 (2):29-33.
- [11] 姚萌萌, 刘保东, 韩淑霞, 等. 大跨径覆土管拱形波纹钢板桥涵加强效果分析 [J]. 公路, 2020, 65 (2):96-100.
- [12] 刘哲坤, 张 炜, 曲 波, 等. 低路堤大跨径钢波纹板拱桥受力特征分析 [J]. 中外公路, 2021, 41 (4):168-172.
- [13] 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 2014.
- [14] 杨锡武, 张永兴. 公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (9):119-124.
- [15] 方天云. 高填方段钢波纹管涵垂直土压力试验与计算研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [16] 王艳丽, 李祝龙, 吴大中. 钢波纹管涵洞的薄壳效应 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (5):86-90.
- [17] Mahgoub A, Naggar H E. Innovative application of tire-derived aggregate around corrugated steel plate culverts [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11 (3):4020025.
- [18] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice [M]. John Wiley & Sons, 1996.
- [19] Moser A P, Bakht B. Buried pipe design [J]. Applied Mechanics Reviews, 1990, 43 (12):278.
- [20] Algin H M. Stresses from linearly distributed pressures over rectangular areas [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24 (8):681-692.
- [21] 何 强, 刘百来, 滕文刚. 钢波纹管涵洞板厚优化有限元分析 [J]. 山东交通科技, 2022 (1):27-31.
- [22] 李祝龙, 刘百来, 李自武. 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究 [J]. 公路交通科技, 2006 (3):79-82.
- [23] 李祝龙. 公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [24] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (1):187-192.
- [25] 乌延玲. 公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

(上接第 108 页)

- [3] 何思明, 卢国胜. 嵌岩桩荷载传递特性研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (12):2598-2602.
- [4] 王金玺, 唐 红, 许 将. 武汉沿江地区超长灌注桩承载性状试验研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2024, 57 (2):178-186.
- [5] 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.
- [6] McClelland B, Focht Jr J A. Soil modulus for laterally loaded piles [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1956, 82 (4):1-22.
- [7] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design [M]. New York: Wiley, 1980.
- [8] 盛红星, 刘 杰. 嵌岩桩单桩竖向承载性状数值分析 [J]. 城市勘测, 2018 (4):170-173.
- [9] 朱佩宁, 宋亚亚, 齐昌广, 等. 岩溶地区嵌岩灌注桩承载性状试验研究 [J]. 人民长江, 2020, 51 (7):200-205.
- [10] 李 戟, 马若龙, 王志勇. 滑动测微计在桩身内力测试中的分析应用 [J]. 勘察科学技术, 2011 (4):34-36, 64.
- [11] 杨 雄, 何忠意, 齐昌广. 内力测试新技术在灌注桩试验中的应用研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2016, 35 (5):85-91.
- [12] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [13] 建筑地基基础检测规范: DBJ/T 15—60—2019 [S]. 2019.
- [14] Owusu-Antwi E B, Titus-Glove R L, Khazanovich L, et al. Development and Calibration of Mechanistic-Empirical Distress Models for Cost Allocation, Final Report [R]. Washington, D C: Federal Highway Administration, 1997.
- [15] 王遇国, 张季超. 单桩应力应变拟合曲线的推求与应用 [J]. 路基工程, 2009 (6):67-69.