



带卸荷板的大圆筒结构受力特性分析

郭梦圆, 覃 杰, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 带卸荷板的大圆筒结构在实际工程中受力特性复杂, 难以用规范进行计算。运用有限元软件建立带卸荷板的大圆筒结构模型, 研究其分别在岸桥荷载、波浪力和堆载土压力作用下的竖向拉力、环向拉力、竖向弯矩和环向弯矩, 以及荷载的分布位置, 了解其不同荷载作用下的受力特性。结果表明, 岸桥荷载对大圆筒整体结构应力分布影响较小, 但对圆筒顶部弯矩影响显著; 圆筒顶部受竖向弯矩影响较大, 圆筒下部受环向弯矩影响较大; 3 种荷载作用下, 最大竖向及环向弯矩均出现在圆筒与圆筒的相接处, 圆筒下部呈波浪侧受拉、土侧受压的现象。

关键词: 带卸荷板的大圆筒; 受力特性; 荷载; 有限元软件

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0044-05

Mechanical characteristic analysis of large cylindrical structure with unloading plate

GUO Meng-yuan, QIN Jie, CHEN Liang-zhi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The mechanical characteristics of the large cylindrical structure with unloading plates are complex in practical engineering, and thus it is difficult to calculate by codes. Therefore, we build a model for this structure by finite element software to study its vertical tension, circumferential tension, vertical bending moment, circumferential bending moment, and the load distribution positions under the action of the quay crane load, wave force, and loading earth pressure. The results show that the load of a quay crane has little influence on the stress distribution of the whole structure of a large cylinder but has a significant impact on the bending moment at the top of the cylinder. The top of the cylinder is greatly affected by the vertical bending moment, while the lower cylinder is greatly influenced by the circumferential bending moment. Under the three kinds of loads, the maximum vertical and circumferential bending moments occur at the joint between cylinders, and the lower cylinder is under tension on the wave side and compression on the soil side.

Keywords: large cylinder with unloading plate; mechanical characteristics; load; finite element software

大圆筒结构作为应用广泛的重力式码头结构之一, 具有节省混凝土、稳定性好等优点^[1]。目前关于大圆筒结构的研究多围绕大圆筒结构整体稳定性、位移分析等开展, 大部分没有考虑上部卸荷板及其荷载^[2-5]。然而, 随着船型和港口吞吐能力的增大, 大量港口大力发展集装箱运输业务, 将老码头进行升级改造的情况愈加普遍, 也导致原结构所受的岸桥荷载显著增大^[6]。本文运用有

限元软件, 建立带卸荷板的大圆筒整体模型, 研究岸桥荷载、波浪力、堆载土压力分别作用下大圆筒的内力特性^[7]。

1 工程概况

某码头升级改造工程, 原结构为重力式结构, 采用无底薄壁大圆筒连片式布置, 圆筒外径为 18.0 m、壁厚 0.34 m, 采用 C40 混凝土。圆筒外趾

收稿日期: 2021-07-21

作者简介: 郭梦圆(1993—), 女, 硕士, 工程师, 从事港工结构研究。

悬挑 80 cm, 底高程为-15.1 m, 顶高程为 3.0 m。圆筒顶上为现浇钢筋混凝土卸荷板, 采用梁肋式结构, 由 1 根前轨道梁、1 根肋梁、2 根横梁及底板组成。大圆筒码头结构断面及卸荷板见图 1。

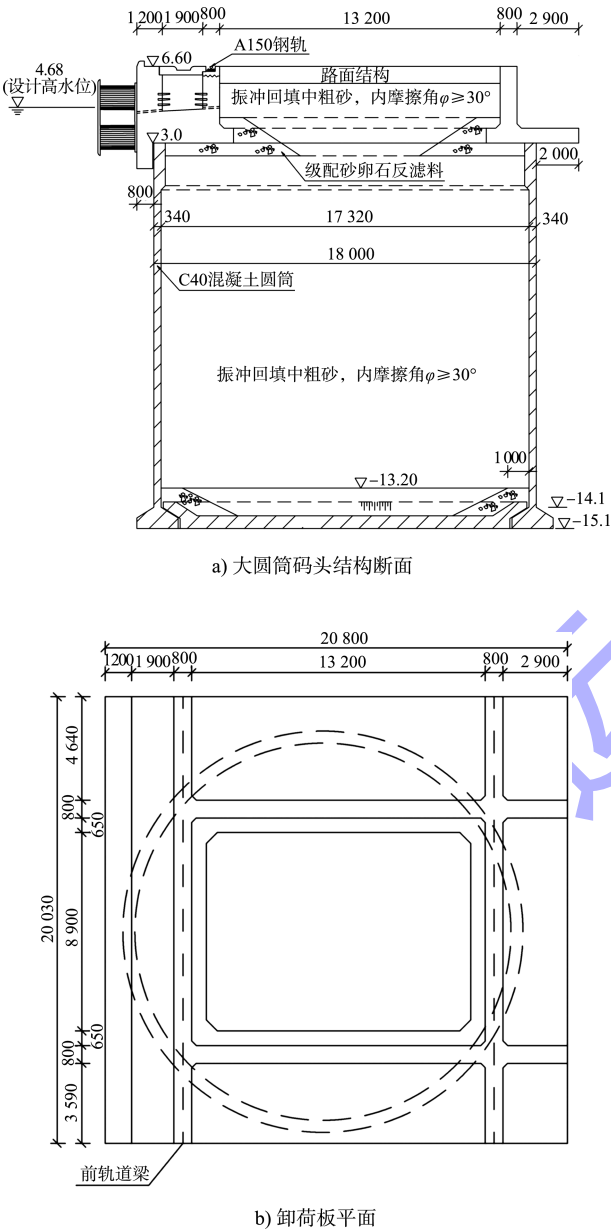


图 1 大圆筒码头结构断面及卸荷板平面
(高程: m; 尺寸: mm)

2 计算条件

2.1 计算水位及波浪荷载

计算工况采用设计高水位+50 a 一遇波浪作用条件, 最不利波向为 SSW 向, 设计高水位为 4.68 m, 设计低水位为 0.40 m, 平均潮差 3.38 m。设计波

浪条件为: 波向 SSW 向, 重现期 50 a, 设计高水位, 波高 $H_{1\%}$ 为 3.78 m, 平均周期 T_m 为 7.5 s, 波长 L 为 78.7 m。

由于大圆筒结构连续排列, 波浪力按平面直墙波浪力计算方法确定, 波吸力作用不利。根据波浪条件, 码头前沿水深 d 为 19.78 m, $T_m \sqrt{g/d} = 5.28 < 8$, 且 $d \geq 2H_{1\%}$, 故墙前产生立波, 波浪力按照文献[8]计算, 分项系数根据文献[7]取 1.3。

2.2 码头面均载及工艺荷载

码头面均载取 40 kPa。装卸机械采用自动化双小车岸桥, 支腿 4 个, 10 个轮/支腿, 平均轮距 1.23 m, 轨距 35 m、基距 14 m^[9]。岸桥预埋件受力见表 1。

表 1 岸桥预埋件荷载

| 设施 | 设计荷载/kN | 荷载作用方向 |
|------|---------|------------|
| 防风拉索 | 1 920 | 垂直向上拉力 |
| 锚碇座 | 1 100 | 水平力(平行于轨道) |
| 顶升板 | 4 000 | 垂直向下压力 |

考虑非工作状态下岸桥荷载更大, 因此计算工况选择岸桥非工作状态。在海侧或陆侧风荷载作用下, 作用在码头结构上的岸桥荷载之间存在组合, 在计算中进行考虑。分项系数取 1.5。

2.3 贮仓压力及土压力

贮仓压力按照文献[7]计算, 分项系数取 1.35。土压力分为码头面均载引起的可变土压力(简称“堆载土压力”)和回填料引起的永久土压力(简称“填料土压力”)。卸荷板以下的土压力计算根据文献[7]进行部分折减: 对卸荷板, M 点以上的土压力可不计卸荷板底面以上重力的影响, N 点以下的土压力按无卸荷板的情况计算, M 、 N 之间按直线过渡。分项系数取 1.35。

2.4 荷载组合及施加方式

本文对比研究岸桥荷载、波浪力、堆载土压力作用下的结构受力特性, 其余荷载在计算时均施加在结构上。考虑到大圆筒之间有倒滤结构, 波浪力、土压力的添加范围分别为大圆筒波浪侧、土侧 154°圆心角; 贮仓压力施加在大圆筒内壁, 范围为整个圆周。它们的作用范围见图 2。

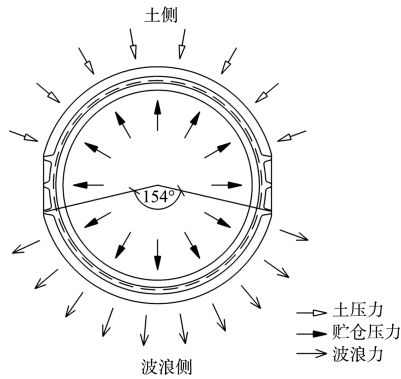


图 2 波浪力、贮存仓压力、土压力作用范围

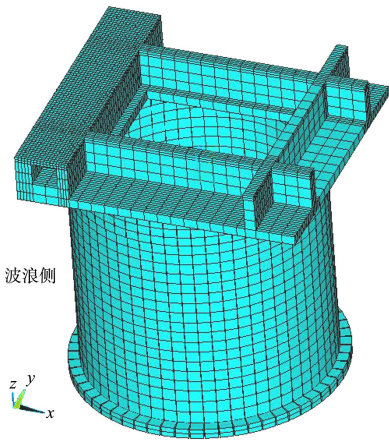


图 4 大圆筒结构计算模型

前墙波浪压强分布①、填料土压强分布②见图 3。

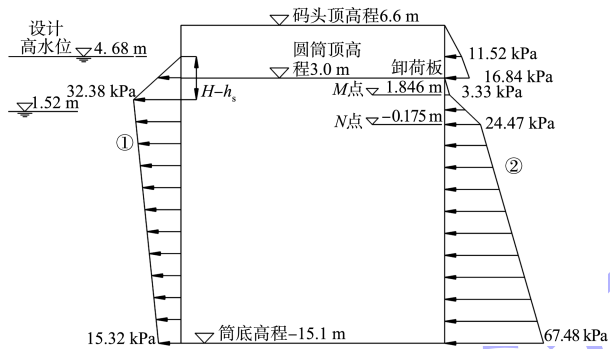


图 3 码头墙面波浪压强和填料土压强分布

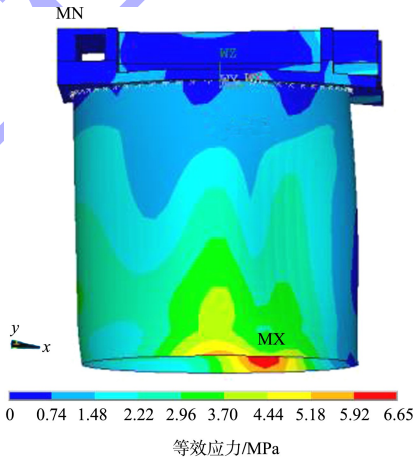
3 有限元模型

因上部卸荷板受到自身重力及作用在卸荷板上的荷载(岸桥荷载、系缆力等), 很难对其简化作用在圆筒上, 故将卸荷板与大圆筒整体建模。运用有限元软件建立带卸荷板的大圆筒结构三维模型。本构模型采用线弹性模型, 计算中模型结构参数取弹性模量 $E=32.5\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.2$ 。卸荷板采用实体单元建立, 下部大圆筒结构采用板单元建立, 大圆筒底趾采用梁单元建立。模型边界条件为大圆筒底边固定, 卸荷板与大圆筒之间运用多点约束方法进行实体-壳装配, 以模拟卸荷板与大圆筒之间的刚性约束。

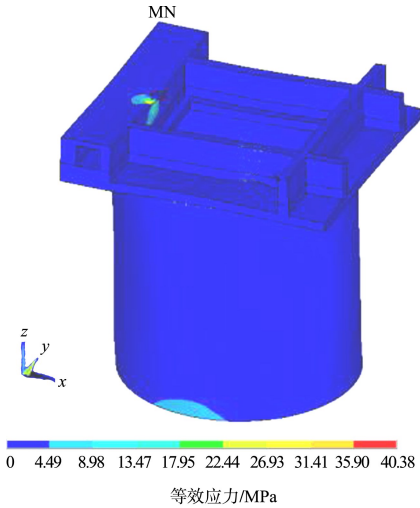
网格划分后的大圆筒结构模型见图 4, 其中 x 轴正向为土侧、负向为波浪侧。由于大圆筒顶端向下 2.1 m 内宽度加厚为 0.54 m, 故将圆筒分为两部分: 上部壁厚为 0.54 m 的圆筒顶端和下部壁厚为 0.34 m 的大圆筒进行结果分析。

4 结果分析

不同荷载作用下大圆筒整体结构 von Mises 等效应力分布云图见图 5。



a) 自身重力作用



b) 岸桥荷载作用

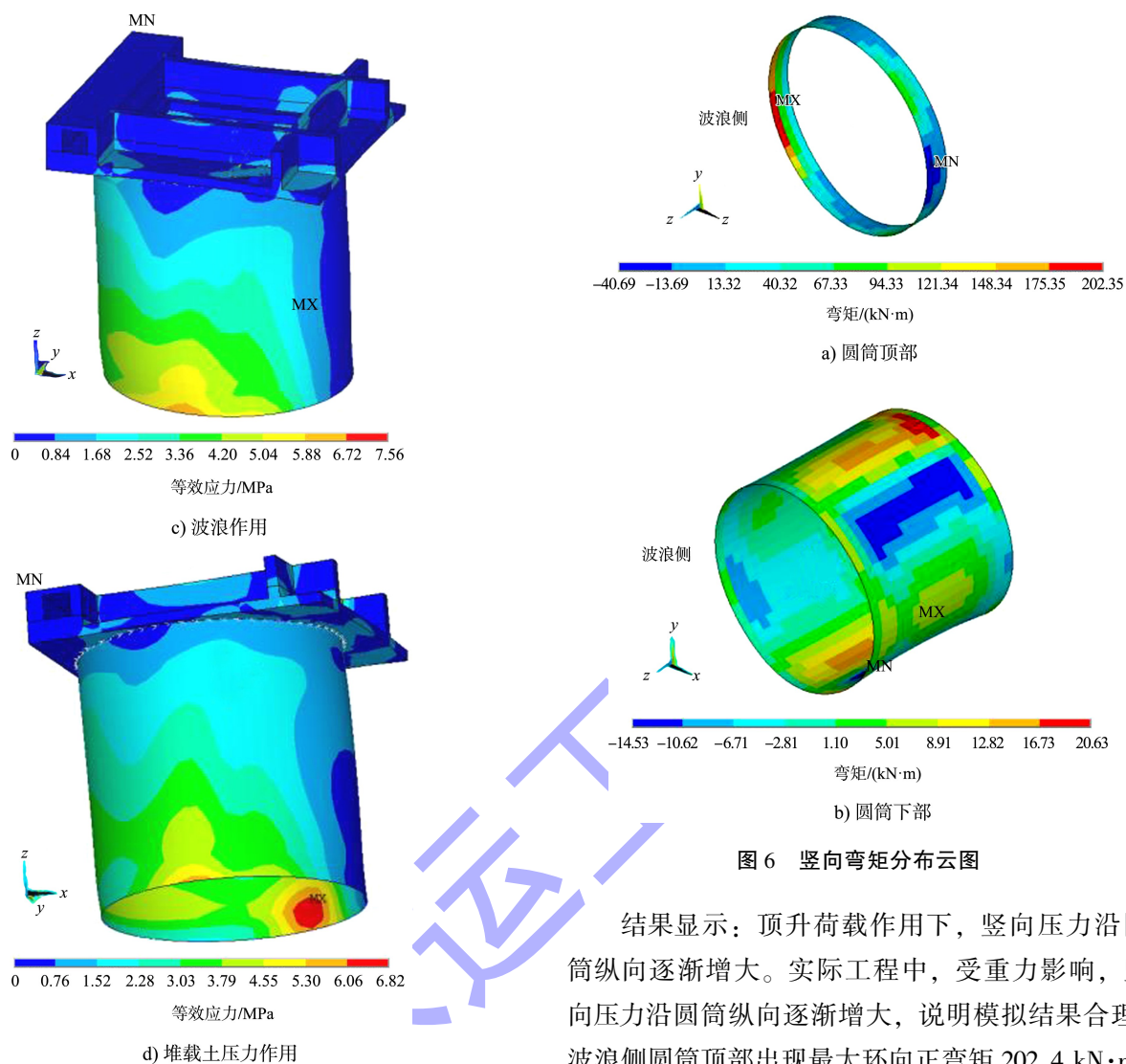


图 5 不同荷载作用下大圆筒等效应力分布云图

由图 5 可知,岸桥荷载作用下,最大等效应力位于顶升荷载作用位置,为 40 MPa,其余部位应力不超过 9 MPa,而在自身重力、波浪荷载、堆载土压力作用下,最大应力出现在筒两端的筒壁内侧,约为 7 MPa。可见岸桥荷载对大圆筒整体结构应力分布影响很小。

4.1 岸桥荷载

在岸桥荷载作用组合中,顶升荷载影响最大。圆筒内力结果见表 2,竖向弯矩分布云图见图 6。

表 2 岸桥荷载作用下大圆筒内力结果

| 位置 | 值类型 | 竖向拉力/ kN | 环向拉力/ kN | 竖向弯矩/ (kN·m) | 环向弯矩/ (kN·m) |
|------|-----|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 圆筒顶部 | 最大值 | -143.1 | 876.3 | 202.4 | 49.1 |
| | 最小值 | -1 209.2 | -197.9 | -40.7 | -21.4 |
| 圆筒下部 | 最大值 | 63.4 | 521.6 | 20.6 | 44.6 |
| | 最小值 | -1 308.1 | -1 319.3 | -14.5 | -48.2 |

结果显示:顶升荷载作用下,竖向压力沿圆筒纵向逐渐增大。实际工程中,受重力影响,竖向压力沿圆筒纵向逐渐增大,说明模拟结果合理。波浪侧圆筒顶部出现最大环向正弯矩 202.4 kN·m,波浪侧圆筒外侧受拉。圆筒顶部最大竖向正弯矩 49.1 kN·m。圆筒下部竖向弯矩和环向弯矩最大值均出现在筒两端靠近波浪侧,但数值较顶部小。可见岸桥荷载对圆筒顶部环向弯矩和竖向弯矩影响显著。实际情况中,卸荷板搭接在圆筒上,而非模型中约束竖向位移,因此圆筒顶部受力结果应乘以一定的折减系数。

4.2 波浪力

波浪力作用下的内力结果见表 3,圆筒环向弯矩分布云图见图 7。

表 3 波浪力作用下大圆筒内力结果

| 位置 | 值类型 | 竖向拉力/ kN | 环向拉力/ kN | 竖向弯矩/ (kN·m) | 环向弯矩/ (kN·m) |
|------|-----|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 圆筒顶部 | 最大值 | -122.7 | 504.1 | 51.8 | 14.8 |
| | 最小值 | -674.7 | -310.4 | -64.9 | -16.8 |
| 圆筒下部 | 最大值 | 263.3 | 776.6 | 21.8 | 26.4 |
| | 最小值 | -1 082.7 | -1 115.0 | -14.6 | -35.7 |

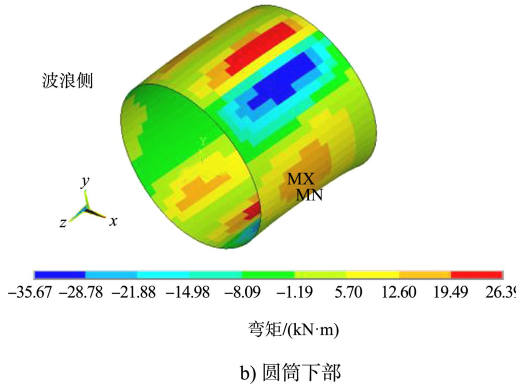
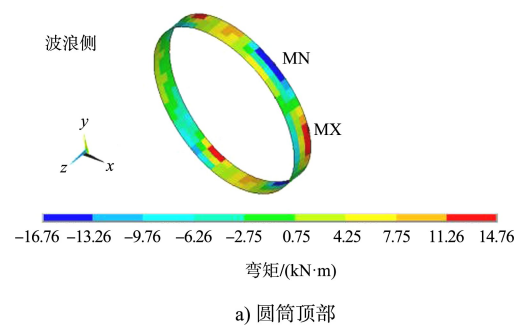


图 7 波浪作用下环向弯矩分布云图

结果显示：波浪作用下，圆筒顶部最大竖向弯矩出现在筒两端，为 51.8 kN·m，环向弯矩最大值出现在圆筒土侧，为 14.8 kN·m。圆筒下部最大竖向弯矩出现在筒两端底部，为 21.8 kN·m，最大环向弯矩出现在筒两端靠近波浪侧，为 26.4 kN·m。最小竖向、环向弯矩均出现在筒两端靠近土侧，分别为 -14.6、-35.7 kN·m。圆筒下部整体为波浪侧受拉、土侧受压。圆筒顶部环向弯矩远小于岸桥荷载作用的结果，下部圆筒内力分布与岸桥荷载作用基本一致。

4.3 堆载土压力

堆载土压力作用下的圆筒内力结果见表 4，环向弯矩分布云图见图 8。

表 4 堆载土压力作用下大圆筒内力结果

| 位置 | 值类型 | 竖向拉力/ kN | 环向拉力/ kN | 竖向弯矩/ (kN·m) | 环向弯矩/ (kN·m) |
|------|-----|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 圆筒顶部 | 最大值 | -136.8 | 369.3 | 36.3 | 20.8 |
| | 最小值 | -631.0 | -209.7 | -59.2 | -15.4 |
| 圆筒下部 | 最大值 | 191.1 | 567.0 | 21.0 | 35.6 |
| | 最小值 | -1 081.4 | -1 112.5 | -15.9 | -34.9 |

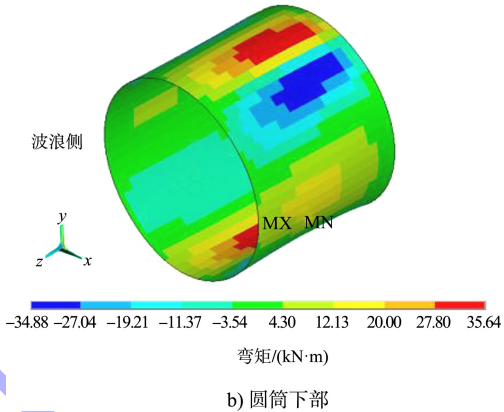
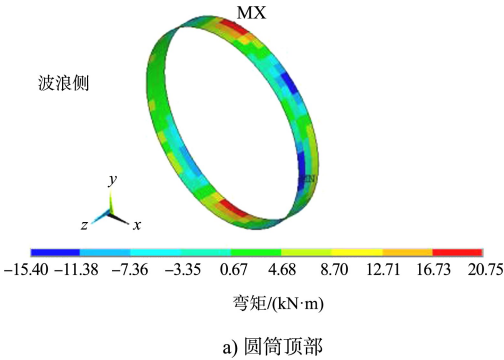


图 8 堆载土压力作用下环向弯矩分布云图

结果显示：土压力作用下，圆筒顶部最大竖向弯矩出现在波浪侧，为 36.3 kN·m，环向弯矩最大值出现在筒两端，为 20.8 kN·m。下部圆筒最大竖向弯矩出现在筒两端底部，为 21 kN·m，最大环向弯矩出现在筒两端靠近波浪侧，为 35.6 kN·m。最小竖向、环向弯矩均出现在筒两端靠近土侧，分别为 -15.9、-34.9 kN·m，筒壁内侧受拉。波浪侧筒壁受压，压力沿圆筒纵向增大，至筒底达到最大值；土侧则从筒顶至筒底逐渐由压力转为拉力，至筒底达到最大拉力，说明圆筒有向前倾覆趋势。波浪侧环向拉力沿筒壁纵向增大，土侧则从筒底逐渐由拉力转为压力，最大环向拉力为 567 kN。

综上，在 3 种荷载分别作用下，圆筒下部均为波浪侧圆筒壁环向受拉、土侧圆筒壁环向受压；波浪侧圆筒壁竖向受压、土侧圆筒壁竖向受拉。