

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.016

某新型三层复合盾构输水隧道精细化有限元分析

童欣,方燃

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北武汉430010)

摘要:以一种新型的外衬管片-内衬混凝土-输水钢管三层复合衬砌输水隧道为例,采用ABAQUS有限元软件建立精细化模型结构,研究了在外部水土压力和内部水压力作用下管片、螺栓、内衬混凝土、输水钢管的受力情况。研究表明,正常通水工况下,输水隧道结构满足承载力要求。研究结果可为输水隧道结构的优化设计提供参考依据。

关键词:输水隧道;外衬管片-内衬混凝土-输水钢管复合衬砌;精细化模拟

中图分类号: TU923

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)04-0099-05

Refined Finite Element Analysis of a New Three-layer Composite Water Conveyance Tunnel

TONG Xin, FANG Ran

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In this paper a new three-layer composite water conveyance tunnel with segment-concrete-steel pipe is taken as an example. Through the establishment of finite element models with the ABAQUS, the force condition of the segment, bolt, concrete, steel pipe under the external water and soil pressure and internal water pressure are analyzed. The results show that it can reduce the overall deformation of the segment under the external water and soil pressure and internal water pressure. And the water conveyance tunnel structure can meet the request of bearing capacity. The research could provide references for the structure design of the water conveyance tunnel.

Keywords: water conveyance tunnel; segment-concrete-steel pipe composite lining; refined modelling

随着盾构技术的不断发展和城市化进程的加快,盾构隧道开始被广泛应用于输水管道。常用的结构形式主要分为单层衬砌和双层衬砌,其理论研究和工程实践较为丰富。对于单层衬砌结构的应用,我国有许多典型工程案例,如:上海青草沙工程^[1-2]、南昌市城北水厂输水隧洞^[3],单层衬砌结构能承担一定的外荷载和内水压作用,但承受的荷载有限,适用于低内水压力。随着防水、加固等需求增加,双层衬砌结构逐渐发展起来,其抗震性能、防水能力及承受内水压力较单层衬砌有了显著提高^[4],典型工程包括:青松电站引水隧洞、南水北调工程团城湖至第九水厂输水隧洞、台山核电站取水盾构隧洞工程等^[5-8]。

近年来,由于供水规模日益增大,输水管径、流量等随之增加,以往的输水结构在运营过程中会出

现开裂、渗漏等现象^[9-10],因此一种新型的三层复合衬砌,即外衬管片-内衬混凝土-输水钢管复合结构开始应用于市政高压输水工程^[11-13],但目前对这种复合结构的相关研究及工程经验尚显不足,缺乏对其受力情况的研究分析。本文以某新型三层复合盾构输水隧道为研究对象,通过建立精细化有限元模型研究各结构的受力情况,为类似盾构输水隧道工程设计提供参考。

1 工程概况

该输水隧道位于我国东部地区,输水管道敷设在中心标高-22.30 m~-16.10 m粉质黏土夹粉砂中,全长约6.87 km,盾构法施工形成外衬管片,内部加设钢管用于输水通道,并在二者间隙之间注

入密实混凝土,形成外衬管片-内衬混凝土-输水钢管三层复合结构。隧道基本情况如表 1 所示,输水隧道截面如图 1 所示。

表 1 隧道基本情况一览表

管片	外径	厚度	混凝土
	6.2 m	0.35 m	C50、P12
输水钢管	管径	壁厚	型号
	DN3600	22mm	Q345R
内衬混凝土	C25 自密实混凝土		

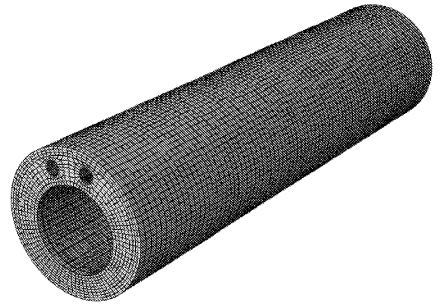


图 3 输水隧道整体模型示意图

表 2 主要部件材料属性及参数取值表

部件	密度 /($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	类型
管片	2.50	34.5	0.2	线弹性
内衬混凝土	2.40	25.5	0.2	线弹性
输水钢管	7.85	206.0	0.3	线弹性

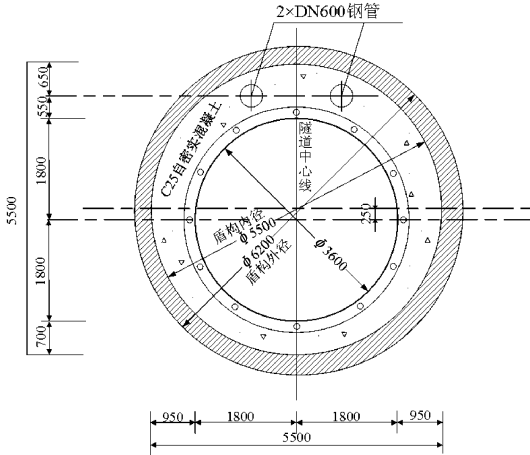


图 1 隧道断面示意图(单位:mm)

2 有限元模型建立

2.1 计算模型及材料属性

采用 ABAQUS 有限元软件建立整个数值分析模型,与地铁结构类似,每环管片采用“3+2+1”方块形式,即由 3 块 A 型管片、2 块 B 型管片 and 1 块 K 型管片组成,环向上设置 2 个 8.8 级弯螺栓连接管片,纵向上错缝拼装,整体连接情况如图 2 所示。根据盾构隧道基本情况,每环幅宽 1.5 m,结合输水钢管实际施工焊接情况及模型计算效率因素等影响,取两段洞内焊接钢管长度即 24 m 的输水隧道模型作为研究对象,输水隧道模型见图 3,其材料属性参数详见表 2。

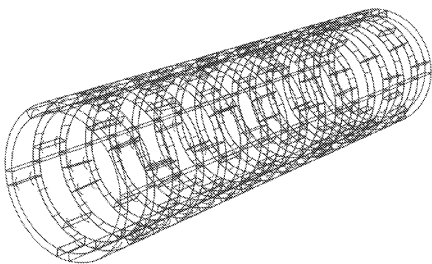


图 2 管片拼装示意图

2.2 接触关系和边界条件

在管片-管片、管片-内衬混凝土及内衬混凝土-输水钢管三对接触关系中,其摩擦系数分别为 0.5、0.5、0.3;考虑土与管片结构的相互作用,将土体用有限元中的土弹簧替代,每节管片节点均设置法向和切向接地弹簧,约束了管片的平移和转动位移,故不再设置其他边界条件^[14-15],结合地勘资料中研究截面处地基抗力系数及模型中管片网格面积,法向、切向弹簧抗拉刚度分别设为 1 260 kN/m 和 420 kN/m。

2.3 荷载条件

本文着重研究盾构输水隧道在正常通水工况下的受力性能,因此计算载荷为过江段最深截面处的载荷,内水压最高至 1 MPa。复合结构受到外水土荷载、自重及内水压的共同作用,输水隧道所处位置管片所受水土荷载如图 4 所示。根据现场勘测资料及计算所得,所受水土荷载参数如表 3 所示。

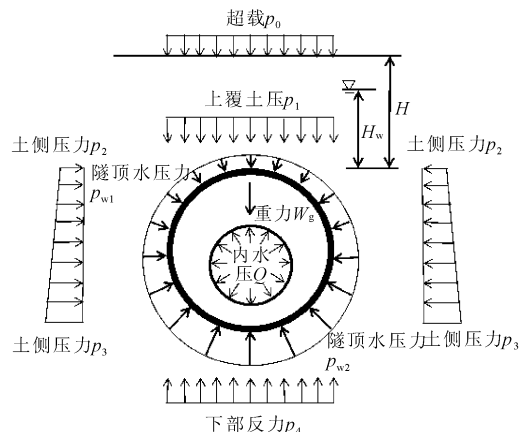


图 4 输水隧道外部荷载示意图

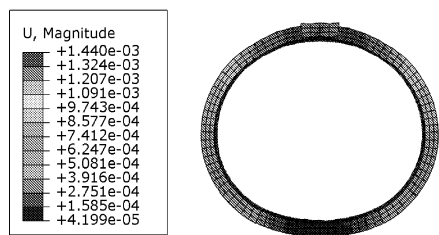
表 3 所受水土荷载参数

荷载类型	P_0	P_{w1}	P_{w2}	P_{v1}	P_2	P_3	P_4
数值/(kN·m ⁻²)	30	341	434	266	138	178	315

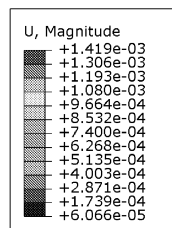
3 结果分析

3.1 管片变形

受周围土体的挤压,盾构管片竖向向内收敛,横向向外扩张,提高放大系数可以观察到(见图 5),管片整体呈扁椭圆状,与常规隧道变形情况类似^[16-17]。当输水隧道通水后,扁椭圆变形趋势有所缓解。



(a) 未通水时



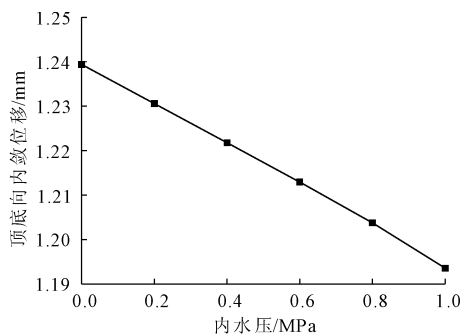
(b) 通水时

图 5 中央管片变形云图(单位:m)

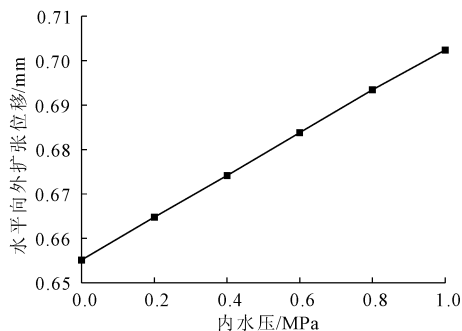
为降低两侧边界条件的影响,取位于隧道中央管片环进行分析。如图 6 所示,随着内水压逐渐增大,管片竖向收敛位移逐渐减小,横向收敛位移逐渐增大。可以得出,未通水时,管片在外部水土压力下向内压缩变形;通水运营后,管道内部产生较高内水压,在与外部水土压力共同作用下,向内的竖直压缩位移相对减少,且随着内水压逐渐增大,管片水平向外扩张位移也随之增加。因此,未通水时,隧道整体变形呈扁椭圆状,通水后变形趋势有所缓解。

3.2 管片与内衬混凝土

图 7 为管片在通水最大、最小主应力云图,可见管片总体应力分布较均匀,同时也可以观察到管片接头处的应力变化。其最大压、拉应力均较小,远小于管片轴心抗压强度设计值,由于本次模拟中管片混凝土未加设钢筋,出现了最大拉应力稍大于混凝土抗拉强度设计值的情况。

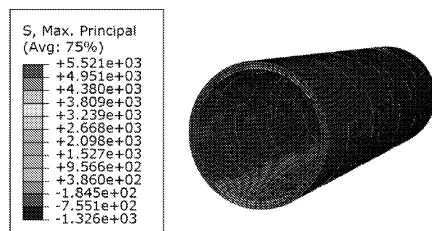


(a) 向内压缩竖直位移

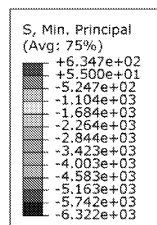


(b) 向外扩张水平位移

图 6 中央管片变形与内水压关系图



(a) 管片最大主应力



(b) 管片最小主应力

图 7 管片主应力云图(单位:kPa)

如图 8 为内衬混凝土在通水时最大、最小主应力云图,其最大压、拉应力分别为 6.281 MPa、2.054 MPa,均小于外衬管片。内衬混凝土基本不受接头影响,应力分布较为均匀。

3.3 接头受力变形

如图 9 为在通水时管片环向和纵向螺栓应力云图,环向螺栓、纵向螺栓最大应力分别为 430.5 MPa、128.4 MPa,均小于 8.8 级 M30 螺栓的屈服强度 640 MPa,且在正常通水时,管片主要受内水压及

外部水土压力,均为环向力,而轴向基本上无显著应力。因此管片结构的环向受力及环向接头螺栓受力较为关键,且内水压越大,越有可能发生破坏,故在该工况下,纵向接头螺栓较为安全。

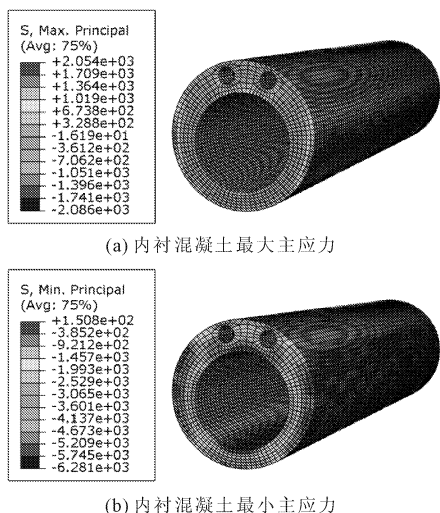


图 8 内衬混凝土主应力云图(单位:kPa)

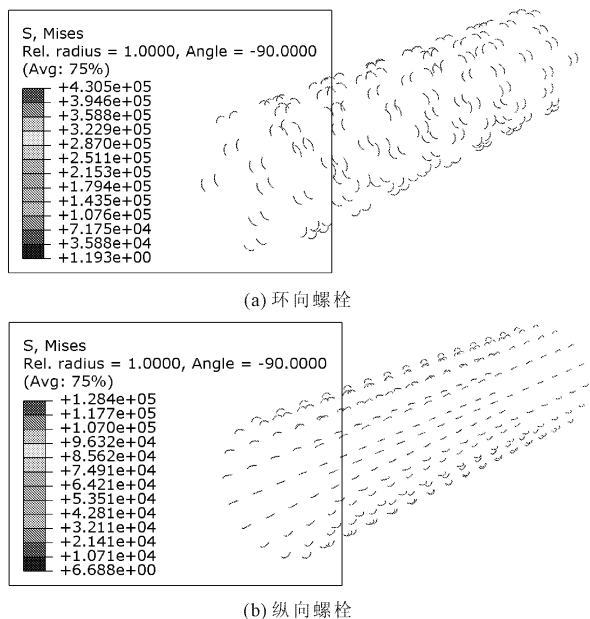


图 9 1 MPa 内水压作用下管片接头螺栓应力云图(单位:kPa)

由于管片连接处在输水过程中会收到张拉^[18],本文进一步研究了在通水工况下时中央管片各接头的张开情况(见表 4)及接头变形情况(放大因数 500,见图 10)。结果表明,顶部 1、2 号接头的张开量比 3—6 号接头略大,但整体张开量均较小。考虑到管片整体为错缝连接,接头均匀分布,因此在通水工况下,接头张开的影

表 4 中央接头张开量表

接头编号	1	2	3	4	5	6
张开量/mm	0.185	0.250	0.008	0.004	0.007	0.007

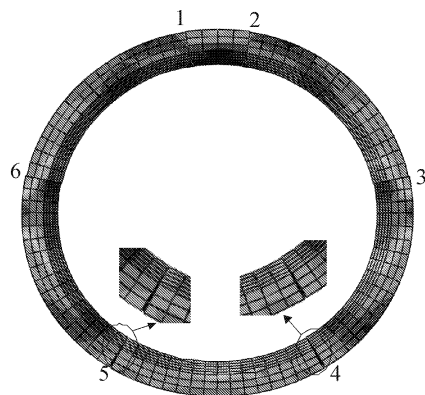


图 10 环向接头变形云图

3.4 输水钢管

图 11 为输水钢管在内水压作用下所受最大应力的变化情况,可见最大应力值随着内水压的增大而增加,几乎呈线性正相关关系。在通水时(内水压 1 MPa)输水钢管最大应力为 91.71 MPa,低于钢管 Q345R 钢材的容许应力 295.00 MPa,满足受力要求,不会发生破坏。

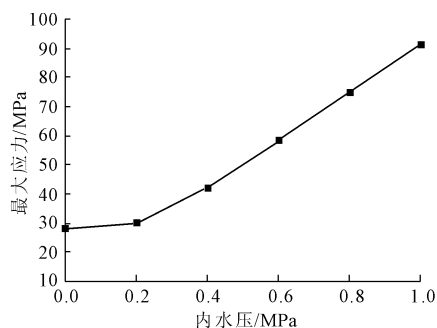


图 11 输水钢管最大应力随内水压变化情况

4 结论

本文对一种三层复合衬砌,即外衬管片-内衬混凝土-输水钢管盾构输水隧道进行有限元模拟,分析了在外部水土荷载和内部水压作用下输水隧道管片、接头螺栓、内衬混凝土、输水钢管及焊缝的受力情况,为类似高内水压盾构输水隧道项目的优化设计提供参考。主要结论如下:

(1) 输水隧道未通水时,输水隧道会受到外侧土层压力作用,外衬管片竖向向内收敛,水平向外扩张,提高放大系数可见其整体呈现扁椭圆形。通水时,内水压通过内衬混凝土传递到外衬管片,扁椭圆

变形趋势有所缓解。

(2) 外衬管片总体应力分布较均匀,在通水过程中,管片受到的压力较小,最大压应力远小于管片混凝土抗压强度要求,基本不会因受压而发生破坏。内衬混凝土的最大压、拉应力较小,且均小于管片,整体受力连续、均匀。

(3) 正常通水工况下,管片主要在环向上受力,轴向上无显著应力。在内水压及外部水土压力作用下,环向接缝处会出现一定程度的张开,但整体均较小,且由于错缝拼装,接头张开影响程度较小。

(4) 输水钢管最大应力值随着内水压的增大而增加,基本呈线性正相关关系。在隧道通水达到最高内水压时,输水钢管受力满足结构设计要求,不会发生破坏。

参考文献:

- [1] 闫治国,彭益成,丁文其,等. 青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(9):1385-1390.
- [2] 顾金山. 输水盾构隧道技术在青草沙原水工程中的应用[J]. 净水技术,2008(5):1-4.
- [3] 官林星. 穿越赣江盾构法输水隧道的设计[J]. 隧道建设,2013,33(7):579-585.
- [4] 何川,郭瑞,肖明清,等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能模型试验研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(3):42-48.
- [5] 余成学,张龙. 管片衬砌承担高内水压力的可行性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1442-1442.
- [6] 张弢,王东黎,王雷. 盾构管片钢筋混凝土内衬大型输水隧洞结构研究[J]. 水利水电技术,2009,40(7):62-65.
- [7] 官林星. 穿越赣江盾构法输水隧道的设计[J]. 隧道建设,2013,33(7):579-585.
- [8] 邹志林. 海底取水盾构隧道双层衬砌结构受力特性研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [9] Liu X, Bai Y, Yuan Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016,12(10):1364-1379.
- [10] Wang Z, Wang L, Li L, et al. Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014,40:300-308.
- [11] 汪思聪. 高内水压新型三层衬砌输水隧洞结构力学性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [12] 詹宇胜,杨远祥,梅松军,等. 西江引水工程盾构隧道内衬大口径钢管的施工技术[J]. 中国给水排水,2012,28(12):1-4.
- [13] 林少群. 高内压盾构输水隧洞三层衬砌原位试验与承载性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [14] 费康,张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [15] 葛世平,谢东武,丁文其,等. 盾构管片接头简化数值模拟方法[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):34-39.
- [16] 孙廉威. 外界荷载作用下已建盾构隧道结构性状[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [17] 谢铁军,刘珍,杨果林,等. 特定沉降阶段的盾构隧道地表沉降研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(1):141-147.
- [18] 赵佳彬,吴隽,唐丹,等. 输水盾构隧道纵缝压弯力学性能分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(1):59-65.