引用格式：陈盛扬，王庆华，李亚，等. 环向加载模式下双舱槽型拼装综合管廊静力性能非线性分析[J]. 工业建筑，2026，56(2)：190-197.
CHEN Shengyang，WANG Qinghua，LI Ya，et al. Nonlinear Analysis of the Static Performance of Double-Chamber U-Shaped Assembled Utility Tunnel Under Circumferential Loading[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：190-197 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG26012704

环向加载模式下双舱槽型拼装综合管廊静力性能非线性分析*

陈盛扬[1,2]　王庆华[1]　李　亚[3]　薛伟辰[1]

（1. 同济大学土木工程学院，上海　200092；2. 北京科技大学国家材料安全服役中心，北京　100083；
3. 上海师范大学建筑工程学院，上海　201418）

摘　要　将上下2个预制槽型构件在施工现场通过张拉预应力筋连接成整体，即形成了预制槽型拼装综合管廊。该管廊具有运输安装便捷、工期短、对环境影响小等特点。基于商用软件ABAQUS，建立了槽型拼装综合管廊模型，通过前期完成的单舱槽型拼装综合管廊环向加载试验，验证了模型的合理性。基于该模型，开展了环向加载模式下(模拟土压和顶部过载)双舱综合管廊受力全过程的非线性分析。研究参数包括：现浇/预制管廊、侧向土压力系数(0.55，0.65，0.75)和预应力筋有效预应力(400，500，600 MPa)。有限元分析表明：与现浇管廊不同，预制管廊的塑性铰首先出现在顶底板跨中，随后出现在顶底板与中壁交界处，最后在侧壁拼缝处出铰而导致结构破坏；预制管廊的承载力和延性均高于相应的现浇管廊(承载力和延性分别高2%和33%)；相较于侧向土压力系数为0.55的管廊，侧向土压力系数为0.65和0.75的管廊承载力分别提高了6.4%和11.75%，而延性则降低了2.3%和18.6%；预应力筋有效预应力的大小对管廊承载力和延性的影响均很小。双舱预制槽型拼装综合管廊具有较高的承载力和良好的延性，工程应用前景广阔。

关键词　预制槽型拼装；综合管廊；环向受力；非线性分析；承载力；延性

Nonlinear Analysis of the Static Performance of Double-Chamber U-Shaped Assembled Utility Tunnel Under Circumferential Loading

CHEN Shengyang[1,2]　WANG Qinghua[1]　LI Ya[3]　XUE Weichen[1]

(1. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 2. *National Center for Materials Service Safety*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*; 3. *School of Civil Engineering*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 201418, *China*)

Abstract: The upper and lower prefabricated U-shaped components are connected by prestressed tendons at the construction site to form a prefabricated U-shaped assembled utility tunnel. This type of tunnel offers convenient transportation and installation, a short construction period, and minimal environmental impact. A finite element model of the U-shaped assembled utility tunnel was established using the commercial software ABAQUS, and its validity was verified through a circumferential loading test on a single-chamber U-shaped assembled utility tunnel conducted in an earlier study. Based on this model, a nonlinear analysis of the entire loading process of a double-chamber utility tunnel under circumferential loading (simulating earth pressure and top overload) was carried out. The parameters investigated included: utility tunnel type (cast-in-place vs. prefabricated), lateral earth pressure coefficient (0.55, 0.65, and 0.75), and effective prestress of the prestressed tendons (400, 500, and 600 MPa). The

* "十三五"国家重点研发计划(2016YFC0802405)。

第一作者：陈盛扬，博士，助理研究员，主要从事预制混凝土结构、路基路面工程方面研究。

通信作者：薛伟辰，博士，教授，博士生导师，主要从事预制混凝土结构、预应力混凝土结构及FRP筋混凝土结构等方面的研究，xuewc@tongji.edu.cn。

收稿日期：2026-01-27

finite element analysis showed that, unlike cast-in-place utility tunnels, plastic hinges in prefabricated tunnels first appeared at the mid-span of the top and bottom slabs, then at the junctions between the slabs and the middle wall, and finally at the joints of the side walls, leading to structural failure. The bearing capacity and ductility of prefabricated tunnels were higher than those of cast-in-place tunnels (by 2% and 33%, respectively). Compared to the tunnel with a lateral earth pressure coefficient of 0.55, the bearing capacity of tunnels with coefficients of 0.65 and 0.75 increased by 6.4% and 11.75%, respectively, while ductility decreased by 2.3% and 18.6%. The effective prestress level of the prestressed tendons had little effect on the bearing capacity and ductility of the tunnel. Overall, the double-chamber prefabricated U-shaped assembled utility tunnel has high bearing capacity and good ductility, offering broad prospects for engineering applications.

Keywords: prefabricated U-shaped assembly; utility tunnel; circumferential loading; nonlinear analysis; bearing capacity; ductility

0 引 言

综合管廊是指建于城市地下用于容纳两类及以上城市工程管线的构建物及附属设施。综合管廊施工通常分为现浇和预制拼装两种工艺,预制拼装综合管廊是在工厂内分节段浇筑成型,现场采用拼装工艺施工形成整体的综合管廊[1],相较于现浇的施工方式,预制拼装因具有施工周期短、质量易保证、环保节能综合效益显著等优点而被广泛应用于实际工程中[2]。

根据横向构造方案不同,预制拼装综合管廊主要分为整舱预制拼装综合管廊、预制槽型拼装综合管廊、双面叠合管廊、预制板式拼装综合管廊4类[3]。其中,预制槽型拼装综合管廊将上下2个预制槽型构件在施工现场通过张拉预应力筋连接成整体。与整舱预制拼装综合管廊相比,预制槽型拼装综合管廊具有预制构件体积和重量较小、运输便捷、吊装难度低、施工效率高等优点;与双面叠合、预制板式拼装综合管廊相比,槽型拼装综合管廊具有运输便捷、成本可控等优点。总体而言,预制槽型拼装综合管廊具有横向连接构造简单、运输便捷、施工效率高等优点,适用于单舱或双舱综合管廊建设,应用前景良好[4]。

目前,有关预制槽型拼装混凝土综合管廊受力性能的研究主要集中在我国。本课题组从2004年开始开展槽型拼装综合管廊接头的抗弯试验研究[5]。在试验研究基础上,基于内力平衡与变形协调原则建立了预应力筋连接接头的抗弯承载力计算模型[5]。随后,本课题组在国际上首次开展了单舱整体管廊环向加载试验[5]。试验研究表明:管廊的最终破坏形态为角部加腋区外缘混凝土剪切破坏,拼缝面在整个加载过程中基本保持平面;预应力筋的有效预应力对管廊的正常使用性能有较大影响,但对结构承载力影响不大。基于试验和理论分析,提出了适用于预制槽型拼装综合管廊的带刚域弹性铰闭合框架计算模型[6]。

近年来,本课题组又开展了单舱、双舱预制槽型拼装综合管廊整体结构抗震试验[7-8]。结果表明:现浇管廊塑性铰首先在内侧壁产生,随后在外侧壁出现;由于预应力筋的作用,预制管廊塑性铰首先在内侧壁产生,随后在顶底板出现,而拼缝截面处未发生破坏;预制试件承载力高于相应的现浇试件(高约24%);预制与现浇试件的延性几乎相同。

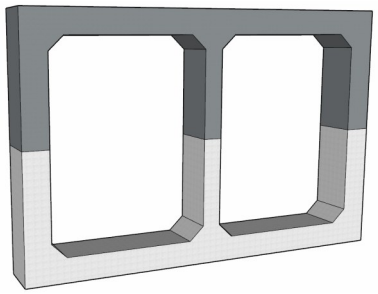
目前已开展了预制槽型拼装综合管廊抗震性能的试验研究,证明了单舱和双舱管廊均具有良好的抗震性能;由于整体结构静力试验加载的复杂性,仅对单舱管廊开展了静力试验研究,尚未对工程中常用的双舱管廊的静力性能展开研究。因此,本文拟基于ABAQUS有限元分析软件建立双舱槽型拼装综合管廊有限元分析模型,分析该模型在土压和顶部荷载作用下的静力性能。此外,还将探讨侧向土压力系数以及预应力筋有效预应力等对管廊静力性能的影响。研究结果将为该类管廊的设计和工程应用提供参考。

1 模型信息及相关参数

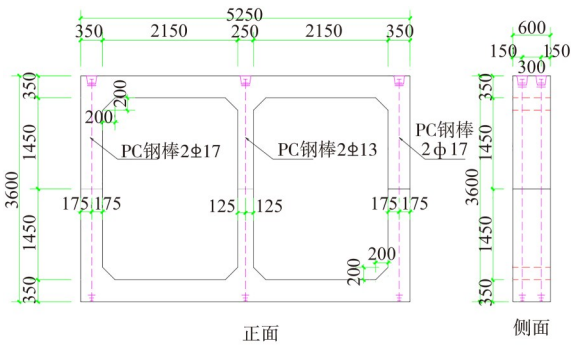
1.1 试件设计和边界条件

以国家首批地下综合管廊试点城市——六盘水市某综合管廊为原型,开展了双舱预制槽型拼装

综合管廊静力性能非线性有限元分析。管廊由上下2个对称的U型预制构件组成（图1），每个侧壁中心处沿纵向布置2根直径17 mm、屈服强度标准值为1080 MPa的预应力钢棒。混凝土设计强度等级为C40，普通钢筋强度等级为HRB400，钢棒有效预应力（600 MPa）施加原则参考国标GB/T 50838—2015《城市综合管廊工程技术规范》[9]。



（a）结构示意



（b）连接构造

图1 预制槽型拼装综合管廊示意 mm

Fig. 1 Schematic diagrams of the prefabricated U-shaped assembled utility tunnel

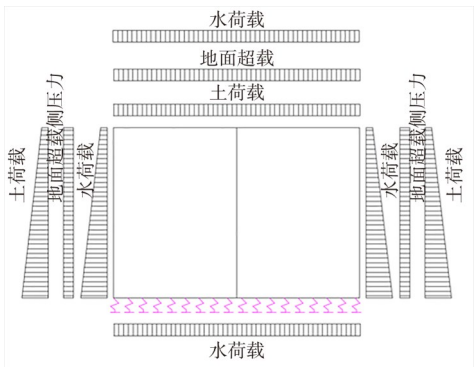
根据控制截面弯矩等效原则，将结构受到的土压力、地面超载等荷载转化为集中荷载（图2）。集中荷载分两组：竖向荷载q_1和横向荷载q_2。加载分3个阶段：第1阶段，施加q_1、q_2至基本组合荷载；第2阶段，q_1、q_2按比例加载，直至q_2达到被动土压力值；第3阶段，保持q_2不变，继续增大q_1，直到结构无法继续承载。

1.2 有限元建模

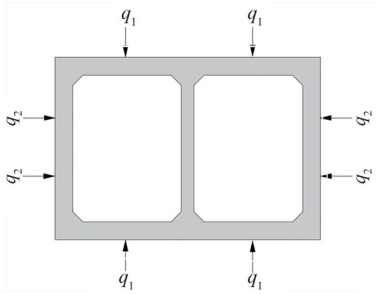
基于商用软件ABAQUS，按照上述受力和边界条件建立了双舱预制槽型拼装综合管廊与现浇综合管廊有限元模型（图3）。其中，混凝土单元采用C3D8R单元，钢筋采用T3D2单元。

混凝土采用了损伤塑性模型，其抗拉强度、抗压强度和弹性模量均依据课题组前期试验的混凝土实测力学性能指标进行设置。此外，为了更准确体现混凝土的塑性损伤特性，模型设置了混凝土的拉伸损伤和压缩损伤系数。钢筋的本构模型采用双折线模型，其屈服强度和弹性模量均根据课题组前期试验的实测力学性能指标进行设定。

预应力钢棒采用线弹性模型，并设置了热膨胀系数，通过降温实现“冷缩”效应。实际工程中，通过对钢棒施加预应力使管廊拼缝面压紧产生静摩



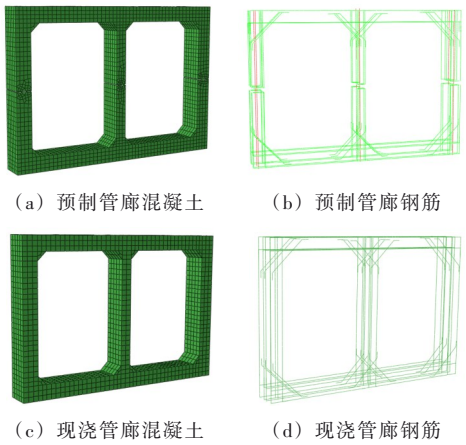
（a）受力示意



（b）受力简化

图2 预制槽型拼装综合管廊受力示意

Fig. 2 Force diagram of the prefabricated U-shaped assembled utility tunnel



（a）预制管廊混凝土　（b）预制管廊钢筋

（c）现浇管廊混凝土　（d）现浇管廊钢筋

图3 双舱综合管廊有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the double-chamber utility tunnel

擦力来抵抗剪力。基于这一特性，有限元模型中拼缝面采用接触单元模拟，法向接触行为设为“硬接触”，允许接触后拼缝面发生分离；切向接触则设置摩擦，摩擦系数为 0.8。

2　模型验证

基于上述双舱管廊有限元建模原则，开展了单舱槽型拼装综合管廊的非线性分析，并将结果与课题组前期完成的环向加载试验[6]进行对比。环向加载试验简图见图 4，单舱管廊有限元模型见图 5。

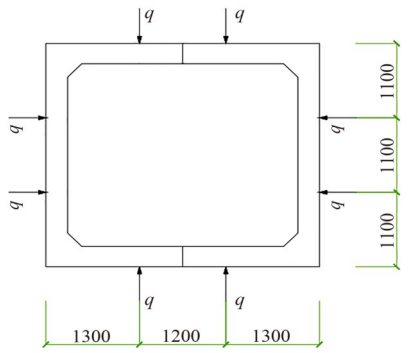
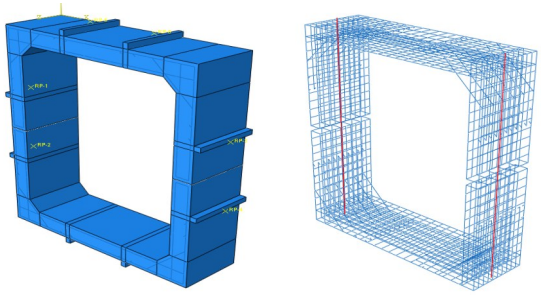


图 4　环向加载试验简图[6]　mm

Fig. 4　Schematic diagram of circumferential loading



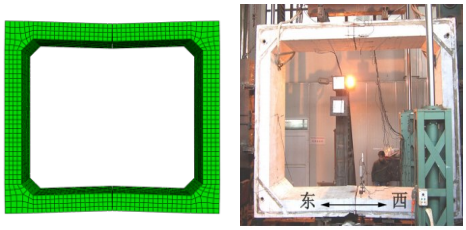
（a）混凝土及加载钢梁　　（b）钢筋及预应力筋

图 5　单舱预制拼装综合管廊环向加载有限元模型

Fig. 5　Finite element model of the single-chamber prefabricated utility tunnel under circumferential loading

在极限状态下，有限元模型与试验试件的变形对比如图 6 所示；混凝土应力、应变云图如图 7、8 所示；试验中试件混凝土开裂照片如图 9 所示。对比可知：有限元分析得到的结构变形形态与试验基本一致，均为钢筋屈服后，顶板加腋区上部混凝土拉应变迅速增大，试件发生剪切破坏。有限元模型与试验的腋角外侧钢筋荷载-应变曲线如图 10 所示，可见二者总体形状及变化趋势相似。

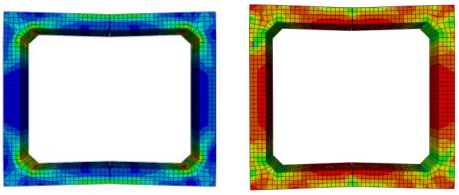
综上所述，建立的单舱槽型拼装综合管廊非线性有限元分析模型的计算结果与试验结果吻合良好。表明采用商用软件 ABAQUS 建立的预制槽型拼装综合管廊有限元模型能够较好地反映结构的受力特点，适用于管廊结构的全过程有限元分析。



（a）有限元　　（b）试验

图 6　整体变形

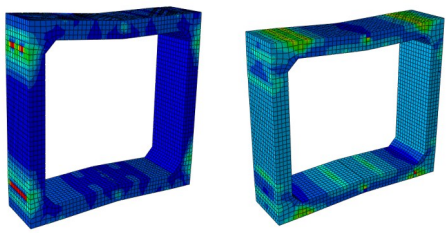
Fig. 6　Overall deformation



（a）混凝土应力云图　　（b）最大主应变云图

图 7　混凝土 Mises 应力及最大主应变云图

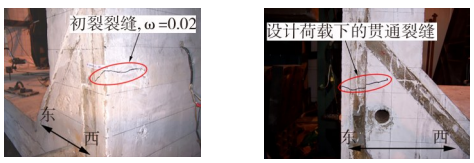
Fig. 7　Concrete Mises stress and maximum principal strain contour plot



（a）竖直方向　　（b）水平方向

图 8　混凝土竖向和水平应力及应变分布

Fig. 8　Distribution of vertical and horizontal stresses and strains in concrete



（a）腋角外侧初裂裂缝　　（b）腋角外侧贯通裂缝

图 9　试验试件现场照片[5]

Fig. 9　Field photos of test specimens

3　双舱综合管廊有限元分析

双舱预制管廊与现浇管廊的有限元分析结果如图 11~13 所示。图 11 为极限状态下现浇和预制管廊的变形对比。可见，现浇管廊侧壁的变形较

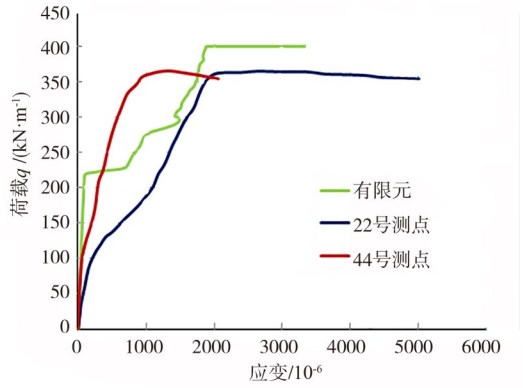
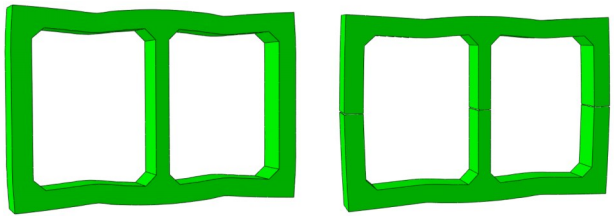


图 10 钢筋有限元和试验的荷载—应变曲线

Fig. 10 Load-strain curves of reinforcement from finite element analysis and experiment

小，而预制管廊侧壁的变形较大。图 12 为承载力极限状态下现浇和预制管廊的钢筋应力云图。可见，2 个管廊的纵筋均未屈服，现浇管廊顶底板端部外侧的钢筋应力最大，而预制管廊顶底板跨中内侧的钢筋应力最大。图 13 为管廊在破坏阶段下钢筋的应力图，现浇管廊的顶底板跨中内侧、顶底板与中壁交界处外侧、侧壁端部外侧的钢筋均屈服；预制管廊顶底板跨中内侧、顶底板与中壁交界处外侧、侧壁拼缝处预应力筋均屈服。即预制结构的侧壁拼缝处预应力筋屈服，侧壁端部的预应力钢筋未屈服，而现浇结构的侧壁钢筋屈服点位于侧壁端部。



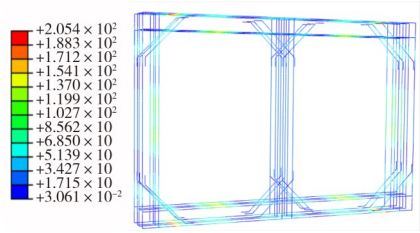
（a）现浇试件　　（b）预制试件

图 11 结构变形对比

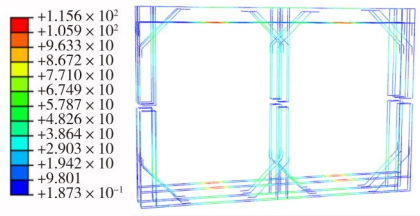
Fig. 11 Structural deformation diagrams

图 14 为塑性铰在顶底板出现后向侧壁转移的过程中结构的受压损伤情况。此时，结构顶底板加载点处的混凝土出现斜向受压损伤，说明结构在此阶段存在剪切破坏的可能。在不考虑结构发生剪切破坏的情况下，2 个模型的出铰顺序如图 15 所示。预制和现浇管廊分别出现了 10 个和 12 个塑性铰，其中，前 8 个塑性铰的出铰顺序和位置一致。预制管廊的最后 2 个塑性铰出现在侧壁拼缝面处，而现浇管廊的最后 4 个塑性铰则均出现在侧壁端部。

预制和现浇管廊的特征参数见表 1，顶板跨中



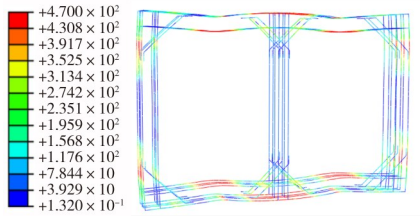
(a) 现浇试件



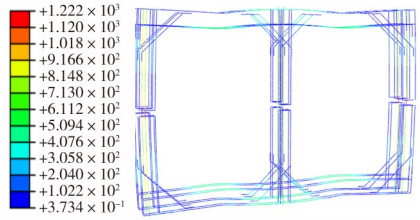
(b) 预制试件

图 12 承载力极限状态　MPa

Fig. 12 Ultimate limit states of bearing capacity



(a) 现浇试件



(b) 预制试件

图 13 破坏阶段　MPa

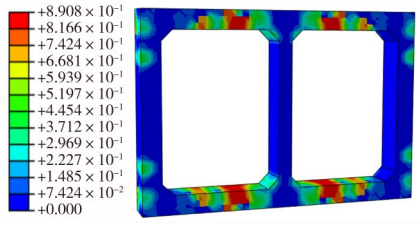
Fig. 13 Failure stages

的荷载-挠度曲线如图 16 所示。由表 1 和图 16 可知：预制试件初始刚度小于现浇结构；预制管廊的承载力和相应挠度分别为 715 kN 和 10.59 mm，现浇管廊的承载力和相应挠度分别为 701 kN 和 6.11 mm；预制管廊的延性系数为 3.84，现浇管廊的延性系数为 2.88。可见，预制管廊的承载力和延性均高于相应的现浇试件，承载力和延性分别高 2% 和 33%。

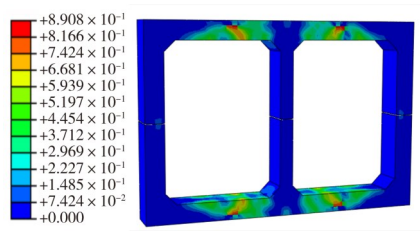
4　参数分析

4.1　侧向土压力系数

《隧道标准规范（盾构篇）及解说》[10]指出，侧压



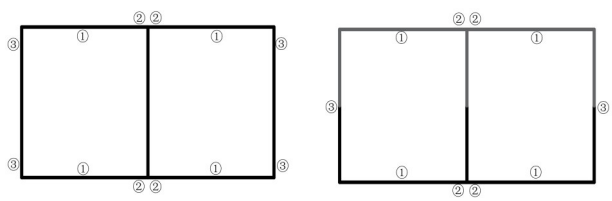
（a）现浇试件



（b）预制试件

图 14　管廊受压损伤模型

Fig. 14　Compressive damage models of utility tunnels



（a）现浇试件　（b）预制试件

图 15　出铰顺序

Fig. 15　Order of hinge formation

表 1　预制/现浇试件特征参数

Table 1　Characteristic parameters of prefabricated and cast-in-place specimens

试件	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	延性系数
现浇	551	3.35	701	6.11	595.9	9.65	2.88
预制	525	4.62	715	10.59	685.0	17.74	3.84

力系数主要与岩土体的软硬程度有关，其取值见表 2。为研究预制槽型拼装综合管廊在中硬黏性土、超软黏土下结构的静力性能，分别针对侧压力系数（k）为 0.55 和 0.75 的工况进行了有限元分析。极限状态下管廊的变形如图 17 所示，侧压力系数为 0.55 时，管廊侧壁的变形明显大于侧压力系数为 0.75 时的变形。

极限状态下管廊主要受力钢筋的应力云图如图 18 所示。可知：当侧压力系数为 0.55 时，结构的塑性铰出铰顺序为顶底板跨中—顶底板端部—侧壁拼缝；当侧压力系数为 0.75 时，塑性铰出铰顺序

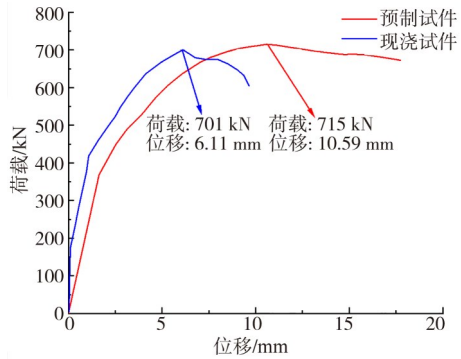


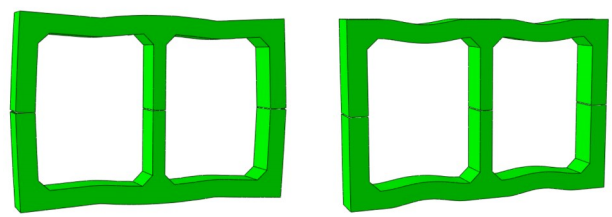
图 16　预制/现浇试件的荷载-位移曲线

Fig. 16　Load-displacement curves of prefabricated and cast-in-place specimens

表 2　侧向土压力系数取值[10]

Table 2　Lateral earth pressure coefficients

土种类	标贯 N/次	侧向压力系数
中硬黏性土	4~8	0.55~0.65
软黏土	2~4	0.65~0.75
超软黏土	<2	0.75~0.85



（a）k=0.55　（b）k=0.75

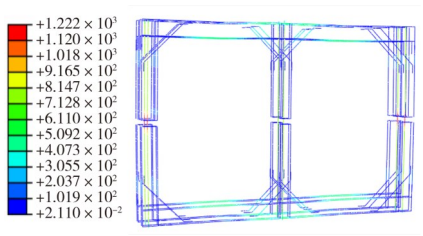
图 17　管廊变形

Fig. 17　Deformation diagrams of utility tunnels

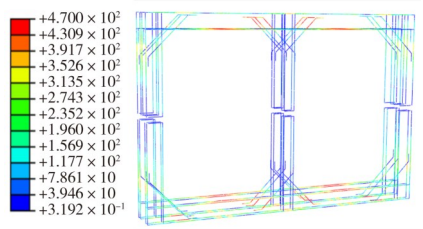
则为顶底板跨中—顶底板端部—侧壁端部。随着侧压力系数的增大，槽型拼装综合管廊结构拼缝处的预应力筋应变逐渐减小，当侧压力系数为 0.75 时，侧壁拼缝处的预应力筋在受力过程中未屈服。

图 19 为侧压力系数分别为 0.55，0.65，0.75 时管廊顶板跨中荷载-位移曲线，表 3 列出了不同工况下预制管廊的特征参数。可见：随着侧压力系数的增加，管廊的承载力逐渐增大，3 个管廊的承载力分别为 672，715，751 kN；而延性系数逐渐降低，分别为 3.93，3.84，3.20。与侧压力系数为 0.55 的试件相比，侧压力系数为 0.65 和 0.75 的试件承载力提高了 6.4% 和 11.75%，延性降低了 2.3% 和 18.6%。说明侧向土压力系数对管廊的承载力和延性有显著影响。

在本文受力工况下，侧向土压力系数对槽型拼装综合管廊结构的侧壁位移影响较大。与出现土



（a）k=0.55



（b）k=0.75

图 18　管廊钢筋应力云图　MPa

Fig. 18　Stress contour plot of reinforcement in pipe gallery

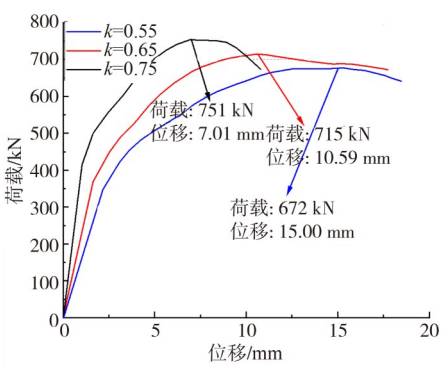


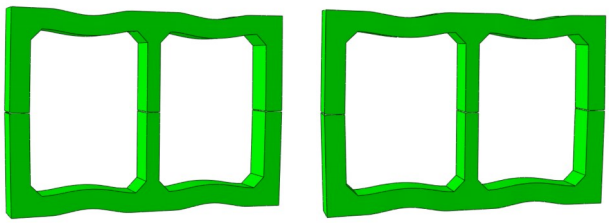
图 19　不同侧压力系数下管廊的荷载-位移曲线

Fig. 19　Load-deflection curves of utility tunnels under different lateral earth pressure coefficients

压力系数较大时相比，当侧压力较小时，在顶板荷载作用下侧壁跨中位移较大，导致管廊节点处的转动较大，因此顶板跨中表现出位移变大而承载力降低的响应。

4.2　预应力筋有效预应力

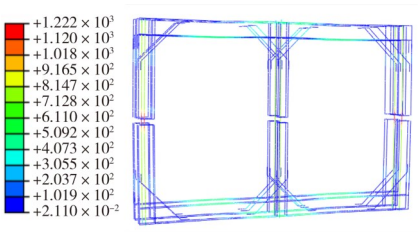
为研究预应力筋有效预应力对预制槽型拼装综合管廊整体结构环向受力性能的影响，开展了预应力筋有效预应力（σ）分别为400，600 MPa的有限元分析，有限元分析结果如图20、21所示。可知：两种工况下结构整体的变形和塑性铰的发展基本一致，塑性铰出铰顺序为顶底板跨中—顶底板与中壁交界处—侧壁拼缝。



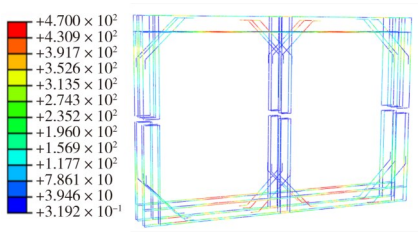
（a）σ=400 MPa　　（b）σ=600 MPa

图 20　管廊变形

Fig. 20　Deformation diagrams of utility tunnels



（a）σ=400 MPa



（b）σ=600 MPa

图 21　钢筋应变

Fig. 21　Rebar strain diagrams

图22为预应力筋有效预应力分别为400，500，600 MPa时管廊顶板跨中的荷载-位移曲线。可知：3个管廊的承载力分别为713，715，716 kN，对应的

表 3　管廊特征参数

Table 3　Characteristic parameters of utility tunnels

编号	k	σ/MPa	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	延性
PUT-k_1	0.55	500	499	4.82	642	18.95	3.93
PUT-k_2	0.75	500	610	3.36	638	10.76	3.20
PUT-f_1	0.65	400	550	4.86	650	19.48	4.01
PUT-f_2	0.65	600	560	4.91	630	19.15	3.90

注：PUT-k_1为侧压力系数为0.55模型结构；PUT-k_2为侧压力系数为0.75模型结构；PUT-f_1为有效预应力为400 MPa模型结构；PUT-f_2为有效预应力为600 MPa模型结构。

位移分别为 8.2，10.59，12.50 mm；3 个管廊的延性表现良好，延性系数分别为 4.01，3.84，3.90。说明预应力筋有效预应力对管廊的承载力、延性影响较小，但对峰值挠度存在一定影响。

在本文受力工况下，结构顶板处的承载力主要受节点核心区处转角影响。当侧压力系数为 0.65 时，拼缝处的张开量与预应力筋有效预应力相关性较小，随着预应力筋有效预应力的增大，拼缝处张开量变化较小，管廊核心区转角变化较小。因此顶板跨中表现出承载力、延性变化不明显的响应。

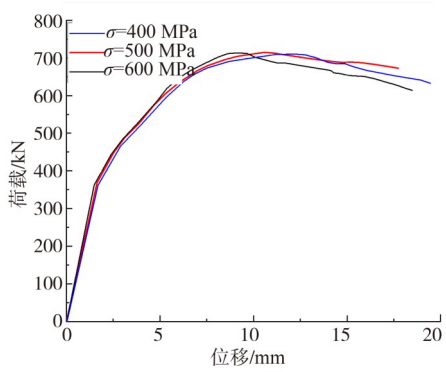


图 22　不同有效预应力下管廊荷载-位移曲线

Fig. 22　Load-deflection curves of utility tunnels under different effective prestress levels

5　结束语

基于商用软件 ABAQUS 建立了槽型拼装综合管廊模型，通过前期完成的单舱槽型拼装综合管廊环向加载试验，验证了模型的合理性。基于该模型，开展了环向加载模式下双舱管廊受力全过程的非线性分析。对比分析了预制和现浇管廊静力性能，进一步开展了侧向土压力系数（0.55，0.65，0.75）和预应力筋有效预应力（400，500，600 MPa）对预制管廊静力性能的影响。研究结果表明：

1）预制管廊和现浇管廊的塑性铰均首先出现在顶底板跨中，随后出现在顶底板与中壁交界处。由于预应力筋的影响，预制管廊的塑性铰最终出现在侧壁拼缝处，而现浇管廊则在侧壁端部出现塑性铰。

2）预制管廊的承载力和延性均高于相应的现浇试件，承载力和延性分别高 2% 和 33%。

3）侧向土压力系数对管廊的承载力和延性有显著影响。相较于侧向土压力系数为 0.55 的试件，侧向土压力系数为 0.65 和 0.75 的试件承载力分别提高了 6.4% 和 11.75%，而延性则分别降低了 2.3% 和 18.6%。

4）预应力筋有效预应力对结构的承载力和延性影响较小。当预应力筋有效预应力分别为 400，500，600 MPa 时，管廊表现出相同的破坏模式，承载力相差不超过 1%，延性相差不超过 5%。

参　考　文　献

[1] XUE W C, CHEN S Y, SONG Z. Pseudo-static tests on full-scale hybrid precast utility tunnel composed of double-skin sidewalls and cast-in-place bottom slab[J]. Structures, 2023, 58: 105573.

[2] XUE W C, CHEN S Y, WANG Q H. Cyclic loading test conducted on the bottom joints of a hybrid precast utility tunnel composed of double-skin sidewalls and a precast bottom slab [J]. Buildings, 2024, 14(2): 341.

[3] 薛伟辰，王恒栋，油新华，等. 我国预制拼装综合管廊结构体系发展现状与展望[J]. 施工技术，2018，47(12)：6-9.

[4] 陈盛扬，胡翔，薛伟辰. 预制槽型拼装混凝土综合管廊整体结构受力性能分析[J]. 特种结构，2021，38(3)：28-32.

[5] 胡翔. 预制预应力综合管沟结构性能、设计与施工关键技术研究[D]. 上海：同济大学，2007.

[6] 胡翔，薛伟辰. 预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J]. 土木工程学报，2010，43(5)：29-37.

[7] 薛伟辰，康明睿. 单舱槽型拼装混凝土综合管廊抗震性能试验研究报告[R]. 上海：同济大学，2015.

[8] 薛伟辰，王庆华. 双舱槽型拼装混凝土综合管廊抗震性能试验研究报告[R]. 上海：同济大学，2020.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合管廊工程技术规范：GB/T 50838—2015[S]. 北京：中国计划出版社，2015.

[10] 日本土木学会隧道工学委员会. 隧道标准规范（盾构篇）及解说[M]. 朱伟，译. 北京：中国建筑工业出版社，2001.