**引用格式**：何磊，楼小航，李亚，等. 底板出筋的叠合板式拼装双舱综合管廊有限元分析[J]. 工业建筑，2026，56(2)：183-189. HE Lei，LOU Xiaohang，LI Ya，et al. Finite Element Analysis of Composite Slab-Assembled Double-Cell Utility Tunnel with Bottom-Slab Protruding Rebars[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：183-189 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG26012504

# 底板出筋的叠合板式拼装双舱综合管廊有限元分析*

何　磊[1]　楼小航[1]　李　亚[2,1]　恽燕春[3]　薛伟辰[1]

（1. 同济大学土木工程学院，上海　200092；2. 上海师范大学建筑工程学院，上海　201418；3. 上海宝岳住宅工业有限公司，上海　201712）

**摘　要**　底板出筋的叠合板式拼装综合管廊由双面叠合侧壁、单面叠合顶板及现浇底板组成，侧壁与底板通过预留L形钢筋出筋实现可靠连接，兼具良好的防水性能、施工效率及结构整体性。基于ABAQUS建立该类管廊精细化有限元模型，并通过单舱综合管廊整体受力全过程试验对模型进行验证。结果表明，试件的破坏模式、峰值承载力及侧向变形与有限元分析结果吻合较好，模型具有较高的可靠性。在此基础上，对底板出筋的叠合板式拼装双舱综合管廊开展非线性受力分析，系统研究腋角高度(0，150，200，250 mm)及轴压比(0~0.1)对结构受力性能的影响。分析结果表明：管廊整体以受弯破坏为主，塑性铰首先出现在内侧壁两端，随后依次出现在顶板与底板两端，最终在边侧壁与底板拼缝处形成；增大腋角高度可显著提高结构承载力，但会在一定程度上降低延性；轴压比对峰值承载力影响不显著，但随轴压比增大结构延性逐渐降低。总体而言，该型双舱综合管廊具有良好的受力性能。

**关键词**　叠合板式综合管廊；底板出筋；有限元分析；承载力；延性

## Finite Element Analysis of Composite Slab-Assembled Double-Cell Utility Tunnel with Bottom-Slab Protruding Rebars

HE Lei[1]　LOU Xiaohang[1]　LI Ya[2,1]　YUN Yanchun[3]　XUE Weichen[1]

(1. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 201418, *China*; 3. *Shanghai Baoyue Residential Industrial Co.*, *Ltd.*, *Shanghai* 201712, *China*)

**Abstract**: The composite slab-assembled utility tunnel with bottom-slab protruding rebars consists of double-sided composite sidewalls, a single-sided composite roof slab, and a cast-in-place bottom slab. The sidewalls are connected to the bottom slab by reserved L-shaped protruding rebars. This type of utility tunnel has advantages such as good waterproof performance, fast construction speed, and good structural integrity. Based on the finite element analysis software ABAQUS, a finite element model of the composite slab-assembled utility tunnel with bottom-slab protruding rebars was established. To verify the accuracy of the model, a full-process loading test of a single-cell utility tunnel was carried out. The failure modes, peak bearing capacity, and lateral deformation obtained from the test were in good agreement with the finite element analysis results. On this basis, nonlinear mechanical analysis of the composite slab-assembled concrete double-cell utility tunnel with bottom-slab protruding rebars was conducted, focusing on the effects of haunch height (0 mm, 150 mm, 200 mm, and 250 mm) and axial compression ratio (0 to 0.1) on the structural performance. The results showed that the tunnel mainly exhibited flex-

*“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0802405)；住建部科技计划项目(2016-K4-025)。

**第一作者**：何磊，博士研究生，主要从事预制混凝土结构抗震研究。

**电子信箱**：helei00@tongji.edu.cn

**收稿日期**：2026-01-25

© 2026 工业建筑

ural failure. Plastic hinges first formed at both ends of the inner sidewalls, then at both ends of the roof and bottom slabs, and finally at the joints between the outer sidewalls and the bottom slab. Increasing the haunch height significantly improved the peak bearing capacity, but reduced the ductility to some extent. The axial compression ratio had no significant effect on the peak bearing capacity, but led to a reduction in ductility. Overall, the composite slab-assembled concrete double-cell utility tunnel with bottom-slab protruding rebars showed good mechanical properties.

**Keywords**: composite slab-assembled utility tunnel; bottom-slab protruding rebars; finite element analysis; bearing capacity; ductility

综合管廊是指在城市地下建造一个隧道空间用于容纳电力、通信、燃气、给排水等市政管线,实行统一建设与管理,以达到地下空间的综合利用[1]。综合管廊最早出现于法国巴黎,早在1833年,巴黎市政府为改善城市环境,开始大规模修建地下排水管道,将给排水管线、电力线路与通信电缆等容纳在一起,开启了建造地下综合管廊的先河。随着巴黎综合管廊的成功应用,英国、德国等欧洲发达国家也陆续开始修建综合管廊。在亚洲,日本是最早修建综合管廊的国家,1926年关东大地震后,日本为使东京都快速恢复,于是试验性地修建了三段综合管廊。但是此后管廊建设发展缓慢,直到1963年颁布的《共同沟法》订立了建造资金的分摊办法、制定了长期发展规划,这极大促进了日本综合管廊的建设,使日本的综合管廊建设水平达到了世界领先水平。我国的综合管廊修建时间较晚,1958年在北京天安门广场下修建了我国第一条综合管廊,在此之后,上海、广州、厦门、深圳等地陆续开工修建综合管廊。2014年之后,在全国36个大中城市全面启动地下综合管廊试点工程,极大促进了我国综合管廊建造技术的发展[2-3]。

根据施工方法的不同,综合管廊可分为现浇综合管廊与预制拼装综合管廊两类[4]。预制拼装综合管廊是指分节段在工厂预制浇筑成型,再运输至施工现场,通过可靠的连接方法将预制构件拼装成整体结构。相较于现浇综合管廊,预制拼装综合管廊具有施工速度快、施工质量易于保证、节能环保等优点,在我国具有广泛的应用前景。

在国内外的工程实践中,预制拼装混凝土综合管廊根据节段拼装方法的不同可以分为整舱预制拼装综合管廊、预制槽型拼装综合管廊、预制板式拼装综合管廊和叠合板式拼装综合管廊四类[5]。相比于其他三类预制拼装综合管廊,叠合板式拼装综合管廊具有良好的整体性以及优异的防水性能。在我国综合管廊建设中,叠合板式拼装综合管廊是目前应用最广泛的预制拼装混凝土管廊体系。

节点的连接方式是影响叠合板式拼装混凝土综合管廊施工效率与受力性能的关键因素。底板出筋的叠合板式拼装综合管廊是由双面叠合侧壁、单面叠合顶板以及现浇底板组成。底板与侧壁通过一端预留在底板、一端伸入双面叠合侧壁的现浇区域中的L形钢筋连接。该方法具有连接性能优异、构造简单、施工便捷的优点,具有良好的应用前景。

目前对出筋连接叠合板式拼装综合管廊的研究主要集中于综合管廊节点的受力性能。田子玄[6]开展了7个管廊节点的单调静力试验,研究不同配筋方式、不同腋角高度以及不同节点位置对管廊节点受力性能的影响,试验结果表明:叠合板式拼装节点的受力性能与现浇节点相近,并表现出良好的整体性能。采用环筋插筋连接与约束浆锚搭接连接的叠合板式拼装节点的延性优于现浇节点。郭福能[7]开展了4组8个管廊节点的静力性能试验,研究节点区纵向钢筋对节点承载力与延性的影响,试验结果表明,上下节点是否设置纵向钢筋对承载力影响不大,但是不设置纵向钢筋的构件延性比设置纵向钢筋的构件差,故建议在节点设置纵向钢筋。魏奇科等[8]开展了10个综合管廊的边节点与中节点的低周反复荷载试验,研究体积配箍率与纵筋锚固长度对综合管廊抗震性能的影响。试验结果表明:叠合板式节点与现浇节点核心区为25%配箍率时,可有效防止节点发生剪切破坏。节点外侧纵筋的锚固长度达到抗震设防锚固长度时,可有效防止节点区发生锚固破坏,并显著提高构件的受弯承载力。在综合管廊整体试验研究方面,相关研究较少,易伟建等[9]开展了不对称多舱无腋角综合管廊整体结构在集中荷载下的静载试验,并进行了有限元参数分析,试验与有限元分析结果表明:集中荷载作用下,顶板最终发生剪切破坏。无腋角与带腋

角的综合管廊在集中荷载或均布荷载作用下破坏模式均为顶板剪切破坏。

综上所述，目前底板出筋的叠合板式拼装综合管廊的研究主要集中于节点的受力性能，而针对工程中常用的双舱综合管廊整体结构受力性能的研究较少。本文基于有限元软件 ABAQUS 开展底板出筋的叠合板式拼装双舱综合管廊的受力性能非线性分析，重点研究轴压比与腋角高度等参数对管廊受力性能的影响。

## 1　有限元建模

为分析双舱综合管廊在水平荷载下的受力性能，基于 ABAQUS 软件，建立底板出筋的叠合板式拼装双舱综合管廊的三维有限元分析模型。

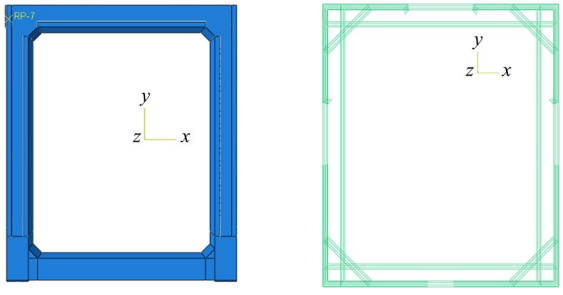
### 1.1　定义单元与材料特性

混凝土采用 C3D8R 单元，该单元为八结点六面体线性减缩积分单元，具有在弯曲荷载作用下不易发生剪切自锁现象、求解精度高等优点。钢筋采用 T3D2 桁架单元，该单元只能承受轴向的拉、压荷载，不能受弯与受剪。建立结构的钢筋模型后，采用“内置区域”将钢筋嵌入混凝土中，不考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移。

模型中混凝土的材料特性采用 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》[10]推荐的塑性损伤模型 CDP 模拟，该模型具有拉压异性特征，适合模拟混凝土、岩石、陶瓷等材料，能够准确描述混凝土材料的非线性特征[11]。钢筋的材料特性采用理想弹塑性模型，不考虑钢筋屈服后的硬化特征。钢筋与混凝土的材料参数是基于试验测出的真实值，单/双舱综合管廊有限元模型的具体细节如图 1、2 所示。

### 1.2　接触设置与边界条件

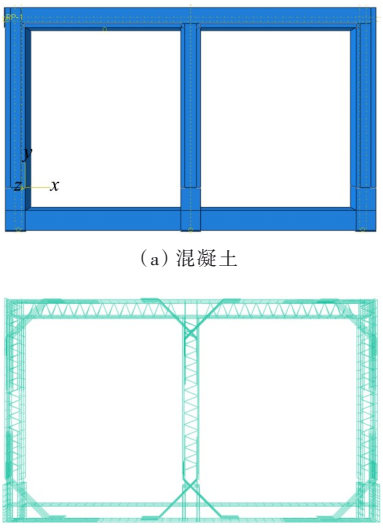
新旧混凝土接合面的接触性能对分析结果的正确性有着重要的影响。本文的有限元模型界面接触特性设置为面-面接触，法向方向设置为“硬”接触，当两个接触面之间距离为 0 时，表面可以传递压力，两个接触面分开时，表面之间没有力的传递[12]。表面切向方向设置为“罚函数”，摩擦系数设置为“0.8”。当两个表面接触产生压力时，可在表面的切线方向产生摩擦力。刚性加载板通过“绑定”接触设置与管廊连接在一起。




（a）混凝土　　（b）钢筋

**图 1**　单舱综合管廊有限元模型

**Fig. 1**　Finite element model of single-cell utility tunnel




（a）混凝土

（b）钢筋

**图 2**　双舱综合管廊有限元模型

**Fig. 2**　Finite element model of double-cell utility tunnel

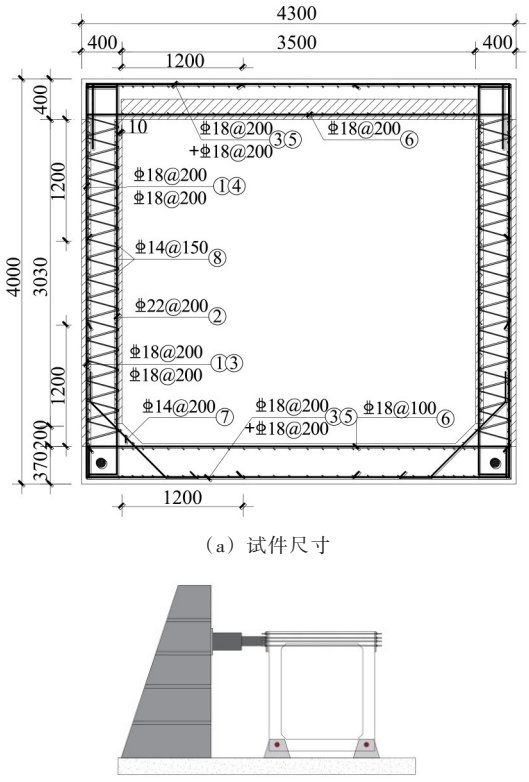
有限元模型的边界条件与试验保持一致，均在底部加载板设置铰接，选中加载板沿管廊厚度方向的中线，约束 $x$、$y$、$z$ 三个方向的位移，允许结构沿三个坐标轴转动，以模拟综合管廊真实的边界条件。由于低周反复加载时的骨架曲线与单调加载时相差不大，为提高计算效率、节约计算资源，本文采用单向加载的方式近似模拟结构的抗震性能。

## 2　试验验证

为验证本文建立的有限元分析模型的正确性，开展了底板出筋的叠合板式拼装单舱综合管廊整体结构的受力性能试验。

### 2.1　试验概况

试件以某工程中的综合管廊为原型，设计预制管廊整体试件，试件尺寸如图 3(a)所示。管廊的底板采用整体现浇并预留 L 形插筋，壁板采用双面叠合工艺，内外叶板采用桁架钢筋连接，顶板采用单面叠合楼板。底板与壁板的连接节点通过底板预




(a) 试件尺寸

(b) 试验加载

注:①~⑧分别为侧墙内外叶预制板纵筋、顶板叠合层L形搭接钢筋、侧墙预留L形筋、底板上下的纵筋、腋角纵筋、拉结筋。

**图3**　试件尺寸以及试验加载　mm

**Fig. 3**　Specimen dimensions and test loading setup

留的L形插筋伸入双面叠合侧板的中间叠合层与外叶板的纵筋搭接连接,顶板与壁板的连接节点通过在节点核心区现浇混凝土连接。混凝土强度等级为C40,钢筋采用HRB400等级。

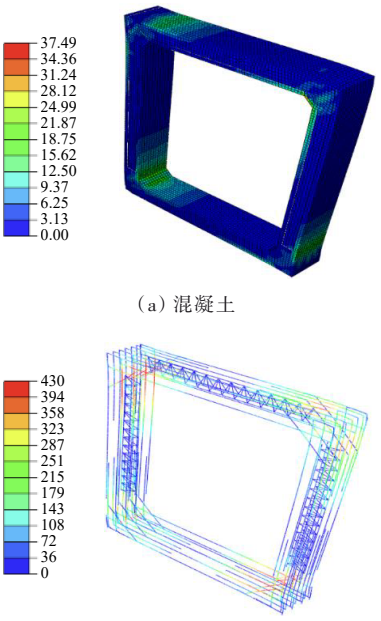
边界条件设置为底部铰接,采用两根钢棒插入底板预留的孔道与固定在地面的支座连接。试验加载如图3(b)所示。

### 2.2　有限元分析与试验结果对比

为验证本文建立的底板出筋的叠合板式拼装混凝土单舱综合管廊有限元模型的合理性,将有限元分析得到的试件破坏形态、承载力与试验结果进行对比。

#### 2.2.1　破坏形态

图4为有限元模型中混凝土应力云图与钢筋应力云图,图5为试验中试件破坏形态。与试验结果比较可以发现,有限元模型加载过后的变形与试验结果基本一致。在有限元模型中塑性铰出现于壁板两端,塑性铰处混凝土受压破坏,钢筋达到屈服状态,这与试验中观察到的现象一致。




(a) 混凝土

(b) 钢筋

**图4**　综合管廊混凝土与钢筋Mises应力云图　MPa

**Fig. 4**　Mises stress contour plots of concrete and rebar in the utility tunnel



**图5**　试件破坏形态

**Fig. 5**　Failure modes of specimens

#### 2.2.2　承载力

有限元模拟分析的荷载-侧移曲线与试验得到的荷载-侧移曲线对比如图6所示。可知,有限元模拟的峰值荷载为307.7 kN,试验得到的峰值荷载为282.5 kN,两者仅相差8.9%,且荷载-侧移曲线的形状与变化趋势基本一致。由以上的结果可知,本文建立的管廊有限元分析模型能较好反映结构的受力性能。

## 3　双舱综合管廊受力性能

基于上节模型开展双舱综合管廊在水平荷载下的受力性能并选择关键参数,研究其对管廊受力性能的影响规律。由于管廊大多为浅埋结构,顶板覆土厚度在12 m(轴压比0.1)以下,故本文分析模型轴压比均在0.1以下。共建立7个有限元模型,参数为腋角高度(0,150,200,250 mm)与轴压比(0,

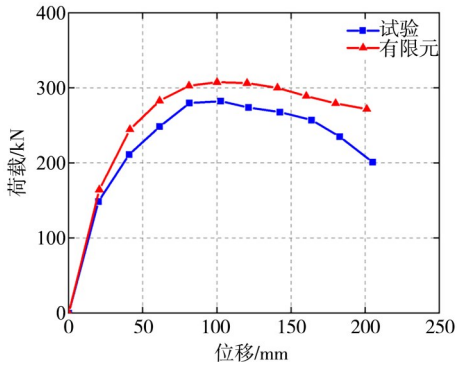



**图 6**　管廊荷载-侧移曲线

**Fig. 6**　Load-lateral displacement curves of the utility tunnel

0.02,0.05,0.1)。表 1 给出了有限元参数与分析结果,其中试件编号的命名规则为 DPT-轴压比×100-腋角高度。

**表 1**　有限元参数与分析结果

**Table 1**　Finite element parameters and analysis results

| 试件编号 | 腋角高度/mm | 轴压比 | 承载力/kN | 延性系数 |
|---|---|---|---|---|
| DPT-0-0 | 0 | 0 | 405 | 3.76 |
| DPT-0-150 | 150 | 0 | 531 | 3.58 |
| DPT-0-200 | 200 | 0 | 565 | 3.52 |
| DPT-0-250 | 250 | 0 | 581 | 3.47 |
| DPT-2-150 | 150 | 0.02 | 544 | 3.53 |
| DPT-5-150 | 150 | 0.05 | 548 | 3.34 |
| DPT-10-150 | 150 | 0.10 | 565 | 3.14 |

### 3.1　破坏形态

图 7 为试件的混凝土与钢筋的应力云图。可以看出:

1)所有试件的破坏形态均为受弯破坏,随着侧向位移的增加,底板与侧壁水平拼缝处出现应力集中,该处首先出现水平裂缝。加载后期水平拼缝发生轻微张开,拼缝受压区混凝土发生受压破坏,分析过程中未发生拼缝截面的错开。

2)无腋角管廊的塑性铰首先出现在内侧壁两端,随着侧向位移的增加,塑性铰出现在顶底板端部,最后边侧壁与底板连接处出现塑性铰,试件破坏。且破坏部位混凝土压溃,钢筋受拉屈服。

3)有腋角管廊的塑性铰首先出现在内侧壁两端腋角变截面处,随着侧向位移的增加,顶、底板腋角变截面处出现塑性铰,最后外侧壁与底板拼缝处出现塑性铰,试件破坏。且破坏位置混凝土被压坏、钢筋受拉屈服,腋角处的钢筋也进入屈服阶段。

4)增大轴压比使侧壁受拉钢筋的应力减小,延缓了受拉钢筋的屈服,壁板与顶、底板受压侧混凝土应力增大。破坏时高轴压试件混凝土压溃范围比低轴压试件大。增大轴压比可以有效减小管廊侧壁与底板水平拼缝的张开位移。

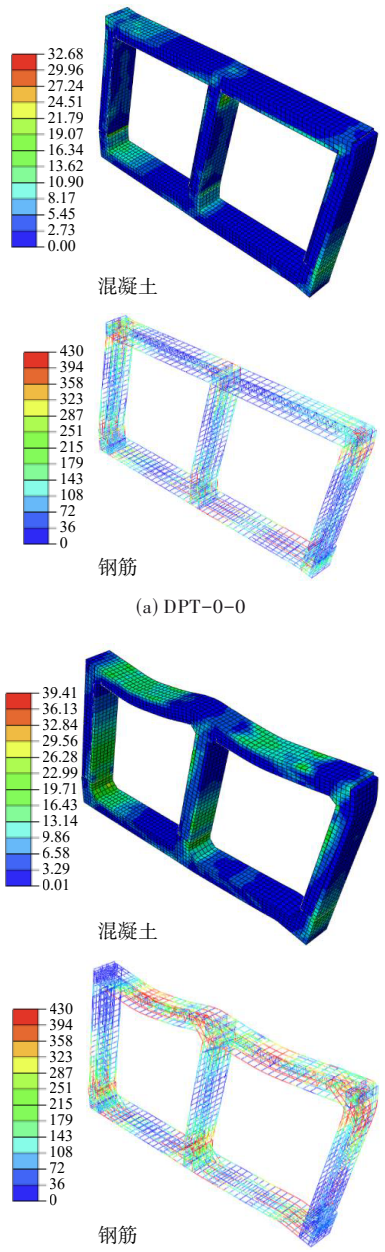



**图 7**　双舱管廊混凝土、钢筋应力云图　MPa

**Fig. 7**　Stress contour plots of concrete and rebars in the double-cell utility tunnel

### 3.2　荷载-侧移曲线

管廊的荷载-侧移曲线如图 8 和图 9 所示。可以看出:加载过程中,试件经历了开裂、屈服、达到峰值和破坏四个阶段。开裂前,荷载和位移呈线性增长,所有试件的荷载-侧移曲线基本重合,表明腋

角高度与轴压比对管廊的初始刚度无明显影响;开裂后,管廊的刚度逐渐降低,随着腋角高度的增加,管廊的开裂后刚度提高,表明增大腋角高度有利于提高管廊开裂后的刚度,各试件荷载-侧移曲线的形状与变化趋势保持一致;屈服后,随着位移增加,管廊的刚度不断下降;达到峰值荷载后,管廊的承载力开始下降,直至管廊破坏。

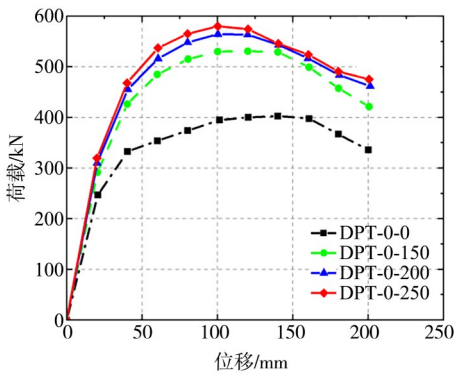



**图8**　不同腋角高度下管廊的荷载-侧移曲线

**Fig. 8**　Load-displacement curves of the utility tunnel with various haunch height

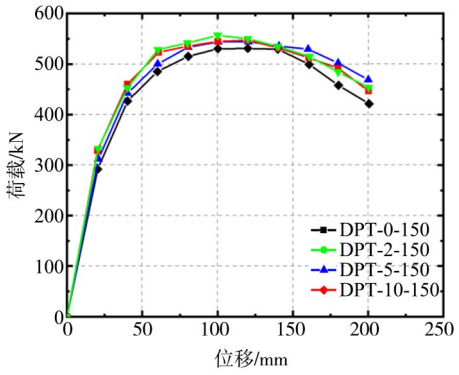



**图9**　不同轴压比下管廊的荷载-侧移曲线

**Fig. 9**　Load-displacement curves of the utility tunnel with various axial compression ratio

### 3.3　承载力

管廊的承载力见表1。可以看出:与无腋角试件相比,腋角高度为150,200,250 mm的试件承载力比无腋角试件分别提高31.1%、39.5%、43.5%。表明腋角能显著提高管廊的承载力。

试件轴压比为0.1以下时,增大轴压比对管廊承载力影响不显著。与无轴压试件相比,轴压比为0.02,0.05,0.1的试件承载力分别提高了2.45%、3.2%、6.4%,这表明轴压比在0.1以下时,其对管廊承载力的影响不大。

### 3.4　位移延性

由表1可得各试件的位移延性系数在3.14~3.76范围内,表现出良好的延性。

腋角高度为150,200,250 mm的试件位移延性系数分别比无腋角试件低4.8%、6.4%、7.7%,表明增大腋角高度会降低管廊的延性。

轴压比为0.02,0.05,0.1的试件位移延性系数分别比无轴压试件低1.4%、6.7%、12.3%。当试件轴压比在0.1以下时,增大轴压比会降低管廊的延性系数。

## 4　结　论

基于ABAQUS软件建立底板出筋的叠合板式拼装综合管廊整体结构的有限元模型,进行了腋角高度与轴压比对叠合板式拼装双舱综合管廊整体结构受力性能影响的非线性有限元分析,主要结论如下:

1)有限元模拟得到的管廊破坏模式与荷载-侧移曲线与试验结果吻合良好,有限元模拟所建立的模型可用于底板出筋的叠合板式拼装混凝土双舱综合管廊整体结构的受力分析。

2)在水平荷载作用下,管廊的破坏形态为弯曲破坏,塑性铰首先出现在内侧壁两端或腋角变截面处,随后出现于顶底板两端,最后边侧壁与壁板连接处出现塑性铰。

3)节点设置腋角能显著提高管廊的承载力,相较于无腋角的试件,腋角高度为150,200,250 mm的试件承载力分别提高31.1%、39.5%、43.5%。

4)当试件轴压比在0.1以下时,增大轴压比对管廊的承载力影响不大(相差7%以内)。

5)增大腋角高度与轴压比(轴压比不大于0.1时)均会降低管廊的延性。

## 参　考　文　献

[1]　薛伟辰,胡翔,王恒栋. 综合管沟的应用与研究进展[J]. 特种结构,2007(1):96-99.

[2]　于晨龙,张作慧. 国内外城市地下综合管廊的发展历程及现状[J]. 建设科技,2015(17):49-51.

[3]　钱七虎. 建设城市地下综合管廊,转变城市发展方式[J]. 隧道建设,2017,37(6):647-654.

[4]　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 50838—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.

[5]　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.

[6]　田子玄. 装配叠合式混凝土地下综合管廊受力性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[7]　郭福能. 预制装配整体式混凝土综合管廊构件受力性能试验

研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
[8] 魏奇科,王宇航,王永超,等. 叠合装配式地下综合管廊节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(2):246-254.
[9] 易伟建,颜良,彭真. 无腋角综合管廊结构足尺模型静载试验与有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(7):1-10.
[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2024.
[11] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学,2013,30(4):59-67.
[12] DASSAULT S. ABAQUS user subroutines reference guide [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp. , 2024.