引用格式：陈思乐，陈盛扬，江佳斐，等. 超高性能混凝土(UHPC)连接的预制板式拼装综合管廊受力性能研究[J]. 工业建筑，2026，56(2)：175-182. CHEN Sile，CHEN Shengyang，JIANG Jiafei，et al. Mechanical Property of Precast Slab-Assembled Utility Tunnel with UHPC Connections [J]. Industrial Construction，2026，56(2)：175-182 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25121707

超高性能混凝土(UHPC)连接的预制板式拼装综合管廊受力性能研究*

陈思乐[1]　陈盛扬[1]　江佳斐[1]　薛伟辰[1]　李　亚[1,2]　王恒栋[3]　王　建[3]

(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. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司，上海　200092)

摘　要　超高性能混凝土(UHPC)连接的预制板式拼装混凝土综合管廊由底板、侧壁和顶板组成，其中底板出筋并通过UHPC与侧壁纵筋形成搭接。为研究UHPC的连接预制板式拼装混凝土综合管廊的受力性能，基于商用有限元软件ABAQUS，建立了此类综合管廊的分析模型，开展了节点试验以验证模型关键构造的合理性。试件的破坏形态、承载力与延性均与有限元计算结果基本吻合。在此基础上，开展了有限元参数分析，主要研究参数包括轴压比(0.05，0.1，0.15)与UHPC后浇段的位置(底板上表面处、底板以上350 mm处、底板以上500 mm处)等。有限元分析结果表明：预制和现浇模型的破坏模式均为侧壁受弯破坏，预制模型比现浇模型的承载力低3%；与轴压比为0的综合管廊相比，轴压比为0.05，0.1，0.15模型的承载力分别提高了11.6%，15.4%，18.3%，延性系数分别降低了2.4%，5.4%，8.6%；UHPC后浇段的位置对管廊整体结构的承载力与延性影响不大。可见，UHPC连接的预制板式拼装混凝土综合管廊具有良好的受力性能。

关键词　UHPC；板式拼装混凝土综合管廊；有限元分析；力学性能

Mechanical Property of Precast Slab-Assembled Utility Tunnel with UHPC Connections

CHEN Sile[1]　CHEN Shengyang[1]　JIANG Jiafei[1]　XUE Weichen[1]　LI Ya[1,2]　WANG Hengdong[3]　WANG Jian[3]

(1. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 201418, *China*; 3. *Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd.*, *Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: A precast slab-assembled concrete utility tunnel connected by Ultra-High Performance Concrete (UHPC) consists of a base slab, sidewalls, and a roof slab, and the rebars protruding from the base slab are lap-spliced with the longitudinal reinforcement of the sidewall by UHPC. To study the mechanical properties of the precast slab-assembled concrete utility tunnel with UHPC connections, an overall model of the utility tunnel was established based on the commercial finite element software ABAQUS. A joint test of the utility tunnel was conducted to validate the model's rationality. The failure modes, bearing capacity, and ductility of the specimens were in good agreement with the finite element calculation results. On this basis, a parametric finite element analysis was conducted, focusing on key parameters such as the axial compression ratio (0.05, 0.1, and 0.15) and the vertical location of the

* "十三五"国家重点研发计划(2016YFC0802405)。

第一作者：陈思乐，本科，主要从事预制混凝土结构的研究。

通信作者：李亚，博士，副教授，主要从事装配式混凝土结构研究，liya@shnu.edu.cn。

收稿日期：2025-12-17

© 2026 工业建筑

UHPC cast-in-place segment (at the base slab top surface, and 350 mm above it, and 500 mm above it). The finite element analysis results showed that both precast and cast-in-place models failed due to sidewall flexure, with the bearing capacity of the precast model being 3% lower than that of the cast-in-place model. Compared to the utility tunnel with an axial compression ratio of 0, the bearing capacities of the models with axial compression ratios of 0.05, 0.1, and 0.15 increased by 11.6%, 15.4%, and 18.3%, respectively, while their ductility coefficients decreased by 2.4%, 5.4%, and 8.6%, respectively. The location of the UHPC cast-in-place segment had little effect on the overall bearing capacity and ductility of the utility tunnel structure. In general, the precast slab-assembled concrete utility tunnel with UHPC connections has good mechanical properties and shows broad prospects for engineering applications.

Keywords: UHPC; slab-assembled concrete utility tunnel; finite element analysis; mechanical properties

0 引 言

综合管廊作为集约化敷设各类市政管线的地下隧道空间,是实现城市"生命线"统一规划、建设与运维的关键基础设施[1]。目前,我国综合管廊工程主要采用现浇施工与预制拼装两种建造方式。其中,预制拼装技术将管廊在工厂预制为节段,运至现场组装成整体,具有施工快捷、构件质量易于控制、环境影响小等突出优势,其应用日益广泛[2]。

根据节段间横向连接形式的不同,预制拼装综合管廊可划分为整舱式、槽型式、叠合板式和预制板式等多种结构体系[3]。其中,预制板式体系通过将底板、侧壁和顶板分别预制,再采用灌浆套筒、螺栓或后浇混凝土等方式实现整体连接,具有单块预制构件重量小、现场湿作业量少等优点[4]。目前,预制板式拼装混凝土综合管廊的横向连接方式主要包括套筒灌浆连接和螺栓连接,套筒灌浆连接性能可靠、适用性广、安装简便[5],但灌浆施工工艺复杂,灌浆密实性难以检测;螺栓连接受力性能良好、操作简便[6],但其预留的钢筋较长,不方便运输,且定位要求较高。鉴于此,亟需提出一种受力性能好、安装精度要求低、施工便利的新型连接方案。

近年来,国内外学者开始尝试采用超高性能混 凝土(UHPC)代替传统混凝土结构连接区域中的混凝土。UHPC是一种新型水泥基复合材料,钢纤维的掺入改善了钢筋与混凝土之间的黏结作用,同时减小了混凝土裂缝宽度并使其分布均匀[7]。目前,UHPC已被应用于预制混凝土结构的钢筋连接中,但有关UHPC连接预制混凝土结构静力性能和抗震性能的研究相对较少。李新星等[8]开展了UHPC连接预制混凝土剪力墙受力性能研究,发现UHPC连接剪力墙承载力、延性和耗能能力均等同于现浇试件;Zhang等[9]开展了UHPC连接预制混凝土框架低周反复试验,试验结果表明,相比于接缝处采用普通混凝土连接的试件,UHPC连接试件具有更好的抗震性能,此外,利用UHPC与钢筋之间较高的黏结强度可以显著地减小接缝处钢筋的搭接长度。

综上可见,UHPC连接预制混凝土结构具有钢筋搭接长度短、施工便利等特点,且采用此种连接方式的剪力墙和框架结构均可通过合理的设计实现等同现浇。然而,将此种连接方式应用于预制板式拼装综合管廊时,其整体与节点的受力性能尚缺乏系统研究。

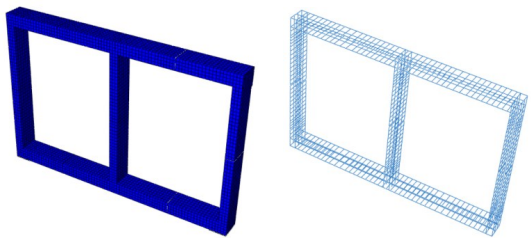
鉴于此,本文拟基于商用有限元软件ABAQUS建立UHPC连接的预制板式拼装混凝土综合管廊的有限元分析模型,并开展综合管廊中节点试验以验证该模型的合理性。在此基础上,开展整体结构的参数化有限元分析,重点探讨轴压比与UHPC后浇段位置等关键设计参数的影响规律,以期为该类新型装配式综合管廊的实际工程应用提供理论依据与技术参考。

1 有限元建模

1.1 模型概况

基于课题组前期开展的低周反复荷载试验中的套筒灌浆连接预制板式拼装综合管廊,采用商用

有限元软件 ABAQUS 进行有限元足尺建模[10]，所建立的 UHPC 连接综合管廊有限元模型如图 1 所示。混凝土采用三维实体单元(C3D8)，形状为六面体。钢筋采用桁架单元(T3D2)，不考虑剪切变形。预制混凝土与后浇 UHPC 交界面采用面-面接触(库仑摩擦型接触)，切线方向的黏结滑移接触设为罚函数以传递切向应力，摩擦系数取 0.8，法线方向设为硬接触以传递法向应力[11]。模型边界条件与试验装置保持一致，一端设置为铰支座，限制 x、y、z 方向平动并允许在平面内转动，另一端设置为滑动支座，约束 y、z 方向平动并允许沿 x 方向位移及平面内转动。加载方式采用位移控制的单向加载模式。



(a) 混凝土　　(b) 钢筋

图 1　UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊有限元模型

Fig. 1　Finite element model of the precast slab-assembled concrete utility tunnel with UHPC connections

1.2　材料本构

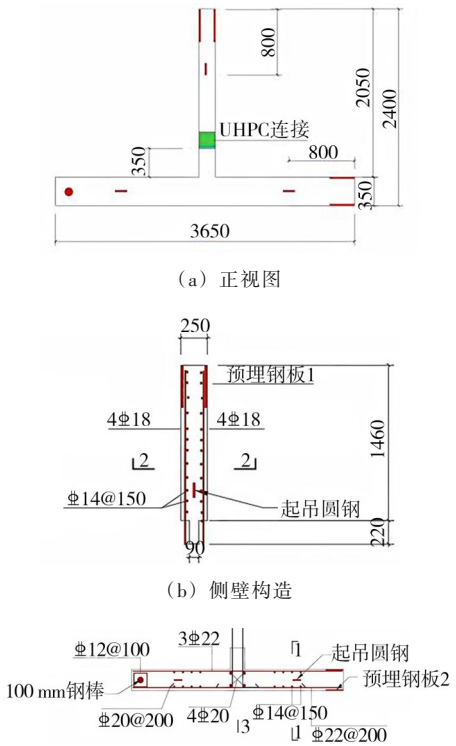
本研究中，普通混凝土和 UHPC 均采用混凝土损伤塑性本构模型(CDP)进行描述[12]，其抗拉强度、抗压强度和弹性模量均根据材性试验实测值确定。普通混凝土和 UHPC 本构关系分别参考 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》[13]和 CECS—2020《超高性能混凝土结构技术规程》的内容确定；钢筋材料采用理想弹塑性模型，屈服前处于弹性阶段，屈服后应力保持恒定，其屈服强度与弹性模量取值均源自试验中对所用钢筋的实测数据。

2　有限元模型验证

为了验证模型的合理性，建立了 UHPC 连接的预制板式拼装综合管廊中节点的非线性有限元分析模型，并将数值模拟结果与课题组前期完成的同类型节点在低周反复荷载作用下的试验结果进行了系统对比。

2.1　试验概况

UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊中节点包括预制混凝土底板与侧壁，底板与侧壁通过后浇 UHPC 连接，其厚度均为 600 mm。混凝土强度等级为 C40，钢筋强度等级为 HRB400。试件截面几何尺寸及配筋如图 2 所示。试验中，按照我国 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》[14]中规定的荷载+位移混合控制加载方法施加水平低周反复荷载。



(a) 正视图

(b) 侧壁构造

(c) 底板构造

图 2　中节点试件尺寸及配筋示意　mm

Fig. 2　Schematic diagrams of dimensions and reinforcement arrangement for the middle joint specimen

2.2　有限元与试验结果对比

2.2.1　破坏形态对比

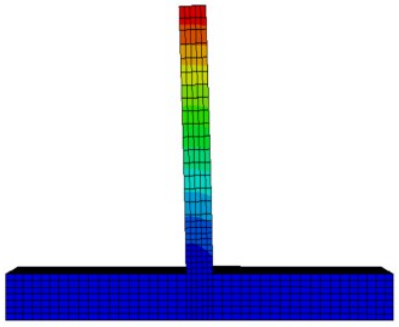
试件和有限元模型破坏形态如图 3 所示，有限元模型破坏模式与试验结果相似，最终均表现为侧壁受弯破坏。破坏主要集中在底板与侧壁的交界面区域，该处出现贯通裂缝，外侧混凝土保护层大面积剥落，纵向钢筋外露。

2.2.2　骨架曲线

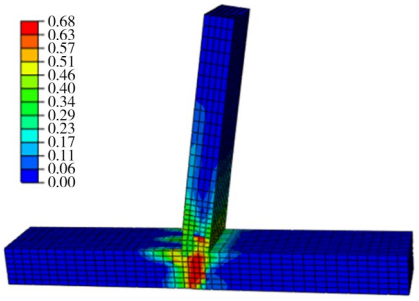
图 4 给出了试验结果与有限元数值模拟所得的骨架曲线(正向加载)。两者在整体形态和发展规律上吻合良好。在水平荷载作用下，试件依次经历了弹性阶段、开裂阶段、屈服阶段和峰值破坏阶段。开裂前，荷载-位移关系基本呈线性；开裂后结构刚



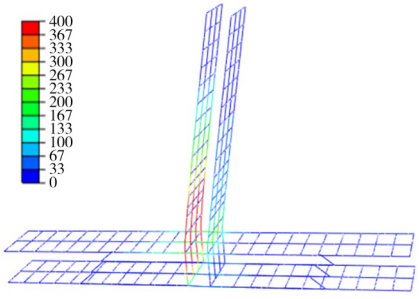
（a）试验变形



（b）有限元变形



（c）有限元的混凝土受压损伤



（d）有限元模型的钢筋 Mises 应力云图，MPa

图 3　试验试件和有限元模型破坏形态

Fig. 3　Failure modes from tests and finite element analysis

度明显降低，曲线斜率减小；试件屈服后，随着位移增大，其承载力随位移增加逐渐上升至最大值，随后出现回落，加载过程中未发生陡降现象，表现出较好的延性性能。有限元模型计算得到的峰值荷载为 61.5 kN，试验值为 55.7 kN，两者偏差为 10%。由此可见，本文建立的 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊中节点非线性有限元分析模型能够较准确地反映试件的受力特性，可用于后续整体结构受力性能的数值分析。

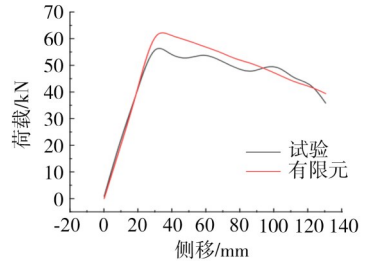


图 4　试件骨架曲线（正向加载）

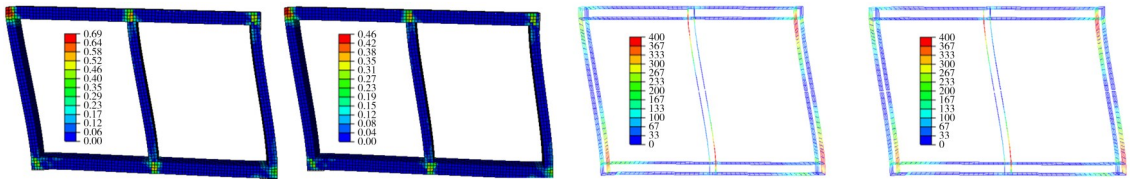
Fig. 4　Skeleton curves of the specimen (forward loading)

3　UHPC 连接的管廊整体结构受力性能研究

为研究 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊整体结构的受力性能，本文基于课题组前期的试验设计[11]建立了 UHPC 连接的预制板式拼装综合管廊整体结构模型及现浇对比模型。模型的轴压比均为 0.05，UHPC 后浇段均位于底板上表面以上 350 mm 处。预制及现浇有限元模型混凝土受压损伤、钢筋 Mises 应力云图及骨架曲线分别如图 5、6 所示。有限元分析结果表明：预制与现浇模型均表现为侧壁端部的受弯破坏。在塑性铰发展顺序上，预制模型首先于侧墙内侧形成塑性铰，随后延伸至顶板与底板区域；而现浇模型则先在外侧墙区域形成塑性铰，随后在外侧进一步发展，如图 7 所示。预制和现浇模型的计算结果如表 1 所示。可见：各模型的峰值荷载基本一致，其差值不超过 3%；预制模型在进入屈服阶段后，随侧向位移增大，其刚度持续退化，但承载力未发生骤降，表现出良好的延性变形能力。综上可见，本文建立的 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊与现浇对比模型的受力性能基本一致。

4　有限元参数分析

作为地下结构，管廊的上部覆土将会产生轴向压力，影响结构的力学性能。由于综合管廊埋深大多较浅，上部覆土厚度一般不超过 10 m，故侧壁轴压比通常在 0.15 以下[15]。此外，UHPC 后浇段的布设位置也会影响管廊的受力与变形[16]。为了研究轴压比和 UHPC 后浇段的布设位置对管廊整体结构



（a）预制模型受压损伤　（b）现浇模型受压损伤　（c）预制模型钢筋 Mises 应力云图，MPa　（d）现浇模型钢筋 Mises 应力云图，MPa

图 5　预制和现浇结构模型破坏形态

Fig. 5　Failure modes of precast and cast-in-place structure models

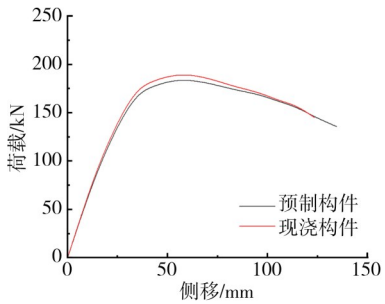
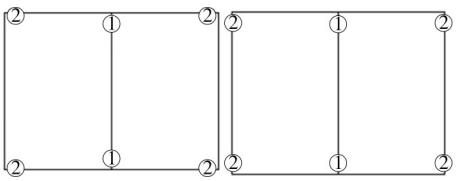


图 6　预制和现浇模型骨架曲线（正向）

Fig. 6　Skeleton curves of precast and cast-in-place models (forward loading)



（a）预制模型　（b）现浇模型

图 7　预制和现浇模型塑性铰出铰顺序

Fig. 7　Sequence of plastic hinge formation for precast and cast-in-place models

表 1　预制与现浇模型计算结果

Table 1　Calculation result of precast and cast-in-place models

类型	屈服荷载/kN	屈服侧移/mm	峰值荷载/kN	极限侧移/mm	延性系数
预制	170.80	29.24	184.42	142.34	5.04
现浇	175.98	27.87	189.95	135.47	4.86

受力性能的影响，开展了关于轴压比和后浇段位置的参数分析。综合管廊整体结构有限元模型参数如表 2 所示。

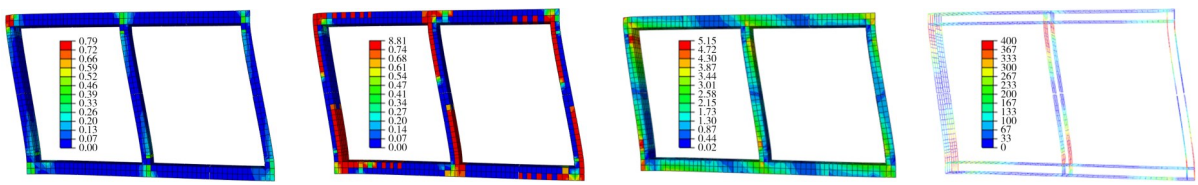
表 2　有限元模型参数

Table 2　Parameters of finite element models

预制模型编号	轴压比	UHPC 后浇段的位置
ZT1	0	底板上表面以上 350 mm 处
ZT2	0.05	底板上表面以上 350 mm 处
ZT3	0.1	底板上表面以上 350 mm 处
ZT4	0.15	底板上表面以上 350 mm 处
ZT5	0	底板上表面以上 500 mm 处
ZT6	0	底板上表面处
ZT7	0.15	底板上表面以上 500 mm 处

4.1　轴压比

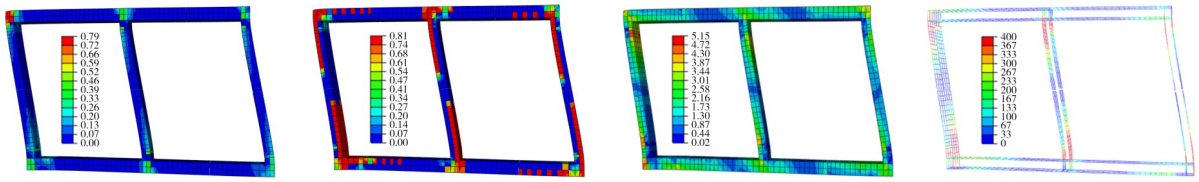
为了研究轴压比对 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊受力性能的影响，本文对轴压比分别为 0，0.05，0.1，0.15 的 UHPC 连接综合管廊整体结构开展了有限元分析，各模型的破坏形态与骨架曲线及计算结果分别如图 8~11、表 3 所示。由图 8~10 可知：结构的破坏形态为侧壁端部受弯破坏。由图 11 可知：轴压比基本不改变结构的初始加载刚度，轴压比越大，模型的承载力越高；由表 3 可知：轴压比为 0.05 时，其峰值荷载比无轴压试件高 11.6%；轴压比为 0.1 时，其峰值荷载比无轴压试件高 15.4%，轴压比为 0.15 时，其峰值荷载比无轴压试件高 18.3%。另外，随着轴压比的提升，结构延性略有降低，轴压比为 0.05~0.15 模型的延性系数分别降低了 2.4%~8.6%。有限元结果表明：对于埋



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土 Mises 应力云图，MPa　（d）钢筋 Mises 应力云图，MPa

图 8　轴压比 0.05 计算结果

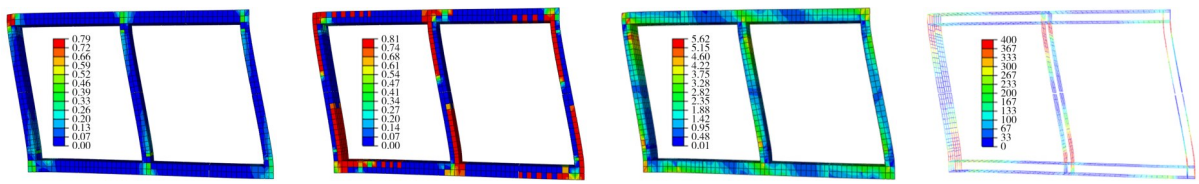
Fig. 8　Results of the finite element analysis for an axial compression ratio of 0.05



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土Mises应力云图，MPa　（d）钢筋Mises应力云图，MPa

图9　轴压比0.1计算结果

Fig. 9　Results of the finite element analysis for an axial compression ratio of 0.1



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土Mises应力云图，MPa　（d）钢筋Mises应力云图，MPa

图10　轴压比0.15计算结果

Fig. 10　Results of the finite element analysis for an axial compression ratio of 0.15

深较浅（不超过5 m）的此类管廊，在受力分析时可适当忽略轴压比的影响。

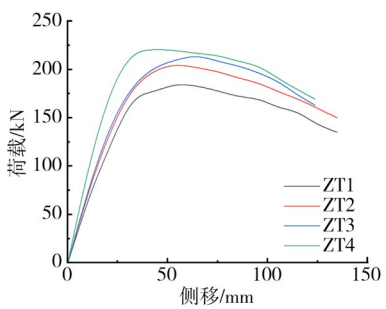


图11　不同轴压比下试件骨架曲线（正向）

Fig. 11　Skeleton curves of specimens with different axial compression ratios (forward loading)

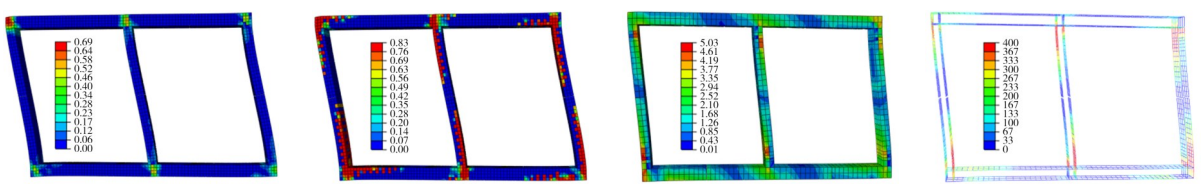
4.2　UHPC后浇段的位置

为了探究UHPC连接的综合管廊整体结构在不同UHPC后浇段位置下结构响应的差异，本文对UHPC连接的综合管廊后浇段在底板上表面以上高度H分别为350 mm（模型ZT1、ZT4）、500 mm（模型ZT5、ZT7）和0（模型ZT6）这5种模型开展了有限元分析，不同后浇段位置的模型破坏形态和骨架曲线分别如图12~15所示。可知：开裂前，不同后浇段位置试件的刚度差别不大，骨架曲线基本重合；开裂后，UHPC后浇段位于底板以上350 mm处模型的刚度稍高于后浇段位于底板以上500 mm处和后浇段位于底板上表面处模型；不同后浇段位置模型峰值荷载相差不大，差值在5%以内；轴压比为0或0.15时，同轴压比下，不同后浇段位置的综合管廊骨架曲线具有基本相同的变化规律。

表3　模型计算结果

Table 3　Calculation result of models

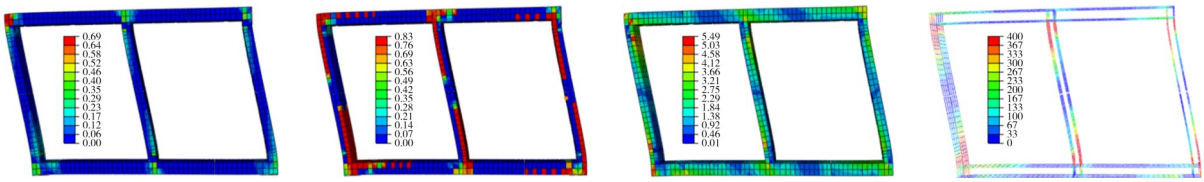
编号	屈服荷载/kN	屈服侧移/mm	峰值荷载/kN	极限侧移/mm	延性系数
ZT1	170.80	29.24	184.42	142.34	5.04
ZT2	186.41	28.81	205.81	141.76	4.92
ZT3	183.62	26.12	212.82	124.87	4.78
ZT4	201.97	26.91	218.17	124.11	4.61



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土Mises应力云图，MPa　（d）钢筋Mises应力云图，MPa

图12　H=350 mm模型计算结果

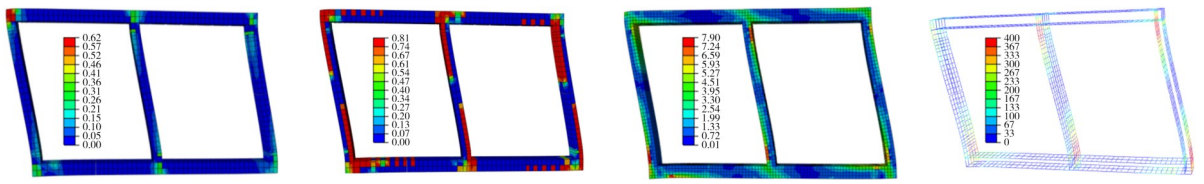
Fig. 12　Results of the finite element analysis for H=350 mm



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土 Mises 应力云图，MPa　（d）钢筋 Mises 应力云图，MPa

图 13　H=0 mm 模型计算结果

Fig. 13　Results of the finite element analysis for H=0 mm



（a）混凝土受压损伤　（b）钢筋受拉损伤　（c）混凝土 Mises 应力云图，MPa　（d）钢筋 Mises 应力云图，MPa

图 14　H=500 mm 模型计算结果

Fig. 14　Results of the finite element analysis for H=500 mm

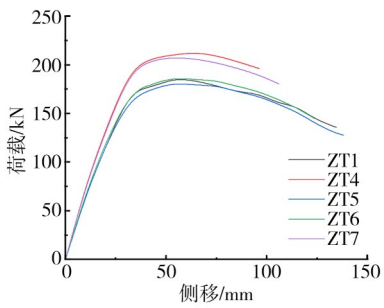


图 15　不同 UHPC 后浇段位置下骨架曲线（正向）

Fig. 15　Skeleton curves for various vertical locations of the UHPC cast-in-place segment (forward loading)

5　结束语

通过有限元分析以及试验验证，研究了轴压比、UHPC 后浇段的位置对 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊整体结构受力性能的影响。结果表明：

1）在单向水平荷载作用下，预制和现浇整体结构模型破坏形态均为侧壁端部受弯破坏；预制模型峰值荷载为 184.42 kN，现浇模型峰值荷载为 189.95 kN，二者峰值荷载差值不超过 3%；预制板式拼装综合管廊有限元模型的延性优于现浇模型。

2）侧壁轴压比不超过 0.15 时，结构的承载力随轴压力的增大而增大，但延性略有降低。相比于轴压比为 0 的 UHPC 连接综合管廊，轴压比为 0.05~0.15 模型的承载力分别提高了 11.6%~18.3%，延性系数分别降低了 2.4%~8.6%。

3）对于 UHPC 连接的预制板式拼装混凝土综合管廊整体结构有限元模型，UHPC 后浇段位置的改变对其承载力和延性影响不大，模型峰值荷载相差不超过 5%。轴压比为 0 或 0.15 时，同轴压比下，不同后浇段位置的综合管廊骨架曲线具有基本相同的变化规律。

参　考　文　献

[1] 王璐. 叠合板式预制拼装综合管廊中节点抗震性能研究[D]. 上海：应用技术大学，2020.

[2] 姚怡文，蒋理华，范益群. 地下空间结构预制拼装技术综述[J]. 城市道桥与防洪，2012(9)：286-292.

[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] 刘硕. 低周反复荷载下预制混凝土板拼装综合管廊试验研究[D]. 上海：同济大学，2017.

[5] 刘良林，肖建庄. 钢筋套筒灌浆连接研究进展[J]. 建筑结构学报，2023，44(1)：235-247.

[6] 张雷. 螺栓连接预制混凝土框架柱与节点抗震性能试验研究[D]. 上海：同济大学，2019.

[7] RICHARD P，CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research，1995，25(7)：1501-1511.

[8] 李新星，周泉，李水生，等. 基于 UHPC 的钢筋错位连接装配式混凝土结构研究及应用[J]. 施工技术(中英文)，2023，52(16)：1-6.

[9] ZHANG Z Y，DING R，NIE X，et al. Seismic performance of a novel interior precast concrete beam-column joint using ultra-high performance concrete [J]. Engineering Structures，2020，

222: 111145.

[10] 薛伟辰. 新型预制拼装综合管廊受力性能试验研究报告[R]. 上海:同济大学, 2019.

[11] 李佳,薛伟辰,宋佳峥. 成型钢筋混凝土柱抗震性能非线性有限元分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(6):20-27.

[12] 薛伟辰,陈盛扬,胡翔. 预制板式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):23-27.

[13] 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.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.

[15] GRAYBEAL B. Material property characterization of ultra-high performance concrete: FHWA-HRT-06-103 [R]. McLean, VA: U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA), Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006: 1-176.

[16] QIU M H, SHAO X D, YAN B F, et al. Flexural behavior of UHPC joints for precast UHPC deck slabs[J]. Engineering Structures, 2022, 251: 113422.