doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.06.001

L 型和 T 型承插式综合管廊接头地震反应特性研究

谢家辉，宾　佳，刘炳浩，补国斌

（湖南工业大学 土木与环境工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：采用有限元模拟方法，建立了考虑接头的综合管廊模型，分别对 L 型承插式接头和 T 型承插式接头在不同长度和不同伸出长度组合下的地震响应特性进行了分析。结果表明：L 型承插式接头的伸出长度越长越不利于综合管廊抗震性能的提高，当其长度为 0.2 m、伸出长度为 0.1 m 时，抗震性能最佳；T 型承插式接头中，随着凸块长度和伸出长度增加，其水平相对位移减小，抗震性能提高，但切应力随之增大；综合比较发现，T 型接头的尺寸增加更有利于提高综合管廊的稳定性。

关键词：综合管廊；承插式接头；数值模拟；地震反应

中图分类号：TU352　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2025)06-0001-08

引文格式：谢家辉，宾　佳，刘炳浩，等 . L 型和 T 型承插式综合管廊接头地震反应特性研究 [J]. 湖南工业大学学报，2025，39(6)：1-8.

Study on Seismic Response Characteristics of L-Shaped and T-Shaped Socket Type Utility Tunnel Joints

XIE Jiahui，BIN Jia，LIU Binghao，BU Guobin

（School of Civil and Environmental Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：By using the finite element simulation method, a utility tunnel model has thus been established with joints taken into consideration, followed by an analysis of the seismic response characteristics of L-shaped and T-shaped socket joints under combinations of different lengths and extension lengths. The results show that the longer the extension lengths of the L-shaped socket joint, the less conducive it is to improving the seismic performance of the utility tunnel. Specifically, optimal seismic performance can be achieved when the length is 0.2 m and the extension length is 0.1 m. As for T-shaped socket joints, with an increase of the convex block length and the extension length, the horizontal relative displacement decreases, thus enhancing the seismic performance, while the shear stress increases accordingly. Based on a comprehensive comparison, it is found that an increase of the size of T-joints is more conducive to improving the stability of the utility tunnel.

Keywords：utility tunnel；socket-type joint；numerical simulation；seismic response

1　研究背景

城市地下综合管廊是浅埋于城市道路下方的公用隧道空间，是将电力、通信、燃气、给排水等管线集中敷设的构筑物，被称作“生命线工程”，对于基础设施的稳定和安全至关重要 [1]。接头作为综合管廊

收稿日期：2024-07-03

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52308500）；湖南省自然科学基金资助项目（2025JJ70048）；湖南省教育厅优秀青年科研基金资助项目（24B0547，23B0556）；湖南省教育厅科研基金资助项目（22C0328）

作者简介：谢家辉，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为土木工程，E-mail：2446369534@qq.com

通信作者：宾　佳，男，湖南工业大学副教授，博士，主要研究方向为地震工程与智能建造，E-mail：binjia@hut.edu.cn

的关键组成部分，其设计对管廊的整体抗震能力有显著影响：地震作用下，接头处易发生开裂、滑移和错动等现象，导致管廊整体结构失效。因此，科学合理的接头设计对于增强综合管廊的抗震能力至关重要。

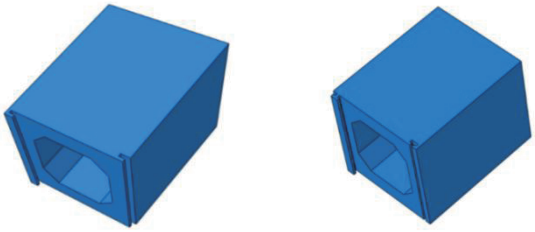
现有的综合管廊接头形式主要分为柔性接头和刚性接头。柔性接头的优点是可有效缓解地震作用下的应力传递，但在高强度地震作用下可能会出现变形过大的情况，影响管廊的整体性能。刚性接头的优点是可以提供良好的承载能力和稳定性，但在地震作用下易产生较大的应力集中，导致接头处发生破坏。承插式接头则介于柔性接头和刚性接头之间，既有一定的变形能力，又保证了一定的刚度。近些年来，C. Klappers 等 [2] 研究了如何分别采用梁、弹簧单元以适当的方式模拟接头的行为，并进行了比较。Ding X. M. 等 [3] 对有接头和无接头的综合管廊进行了一系列振动台试验，以评估接头对综合管廊抗震性能的影响。Zhang W. G. 等 [4] 通过振动台模型试验，研究了带接头的两舱箱型综合管廊及其周围土体的抗震性能。颜良 [5] 通过 ATENA 软件建立了考虑管廊腋角的三维有限元模型，并分析了管廊受力情况。王璐 [6] 以叠合板式拼装多舱管廊为基础，对管廊横向节点足尺模型进行了试验，通过对管廊中节点试件施加水平方向的低周反复荷载模拟地震荷载，对管廊节点位置的抗震性能进行了研究。黄臣瑞 [7] 建立了上下分体预制装配式综合管廊三维精细化模型，探讨了回填土质量、双向地震动等因素对预制管廊地震响应的影响规律。蒋录珍等 [8] 基于振动台试验，通过非线性弹簧模拟了综合管廊的接头，并分析了模型的加速度响应、位移响应等。Liu W. 等 [9] 通过考虑连接形状、地面条件、管道直径等参数，详细分析了管道连接对埋地分段管道接头变形的影响。Zhao W. S. 等 [10] 研究了长周期脉冲近断层地震动对隧道的影响，发现综合管廊接头部位是震害较严重的部位 [11]。

综上所述，现有文献关于目前工程实际运用的承插式接头形式较为单一，对不同形式的承插式接头连接的综合管廊少有研究。故本文拟采用数值模拟方法，分别建立 L 型和 T 型两种承插式接头类型的三维综合管廊精细化有限元模型，探讨地震作用下这两种类型的承插式接头在不同尺寸参数组合下的地震响应特性，以期为承插式预制装配式综合管廊接头设计及地震响应分析提供借鉴。

2 计算模型

2.1 计算范围

管廊的截面尺寸为 4 m × 4 m，腋角尺寸为 0.55 m × 0.55 m，顶底板厚 0.55 m，管廊接头左右两侧根据接头形式设有 L 型和 T 型凸块和凹槽，如图 1 所示。



a）承插式 L 型接头模型　b）承插式 T 型接头模型

图 1　承插式综合管廊接头示意图

Fig. 1　Schematic diagram of socket-type joints for the utility tunnel

三维数值模型土体尺寸为 18 m × 30 m × 30 m，满足底部和侧边到综合管廊的距离大于结构尺寸的 3 倍要求 [12]，如图 2 所示。

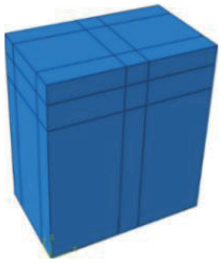


图 2　土体范围示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the soil mass-range

2.2 本构模型

因土体遵循摩尔－库伦（Mohr- Coulomb）强度准则，故本研究中，混凝土采用损伤塑性本构模型 [13]。

2.3 接触与边界条件设置

通过定义主从接触面模拟土体与综合管廊之间的接触关系。主面为综合管廊的外表面，从面为土体的内表面，摩擦因数取 0.5。两管节之间的接触，同样采用面－面接触，摩擦因数取 0.3。土体四周采用黏弹性边界 [14]，谷音等 [15-16] 经过大量的数值计算，验证了黏弹性边界单元具有与集中黏弹性人工边界相同的精度，并且实施更为简便，黏弹性边界施加情况见图 3。

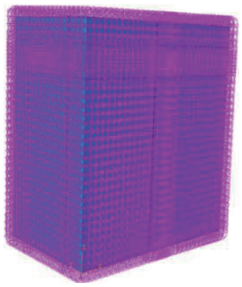


图 3　土体的黏弹性边界

Fig. 3　Viscoelastic boundary of the soil mass

2.4 土体的单元类型与网格划分

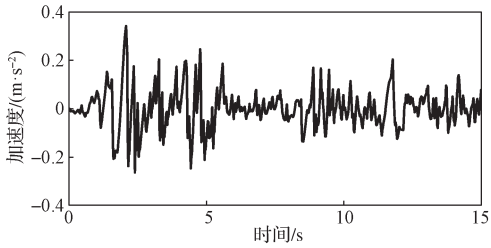
对于土体模型网格划分，通过全局布种设置每 1 m 划分一个单元，且土体与管廊接触的部分再进行细化，对于土体与管廊接触的部分，通过局部布种设置每 0.5 m 划分一个单元，土体采用 C3D8R 单元，单元数为 4 201。

2.5 结构的单元类型与网格划分

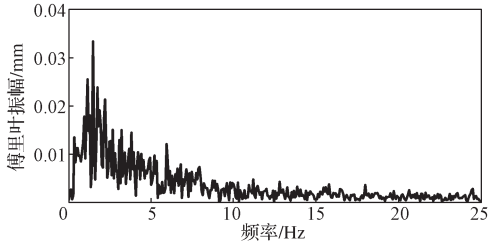
考虑到是两种不同接头形式的承插式接头，故参考潘旦光 [17] 对网格划分的建议，均以全局布种，即以每 0.25 m 划分一个单元，单元类型为 C3D8R。

2.6　地震波的选取与输入

综合管廊所在场地为二类，输入地震波选取适用于两类场地的 El Centro 波，该地震波能量主要集中在前 15 s 内释放，图 4 所示为 El Centro 波的前 15 s 加速度时程及傅里叶谱。



a）加速度时程



b）傅里叶谱

图 4　El Centro 地震波的加速度时程与傅里叶谱曲线

Fig. 4　Acceleration time history and Fourier spectrum curves of seismic waves of El Centro seismic waves

3　计算结果及分析

3.1　L 型凸块尺寸对综合管廊的地震响应影响

3.1.1　L 型凸块长度对综合管廊地震响应的影响

本节主要讨论 L 型接头的凸块尺寸对综合管廊的地震响应影响，选用的 L 型接头凸块长度如图 5 所示。

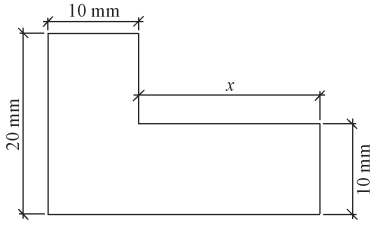


图 5　L 型接头凸块长度示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the convex block length of the L-shaped connector

通过调节图 5 中 x 的长度，将凸块尺寸分别设置为 10 mm × 10 mm、10 mm × 20 mm、10 mm × 30 mm、10 mm × 40 mm。选取如图 4 所示的 El Centro 波并进行双向地震输入，分析 L 型接头的地震响应特性。选择 L 型接头承插口接触面作为典型截面，取典型截面管廊顶部右侧顶点 a 以及底部右侧顶点 b 为监测点，不同接头的水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 6 和图 7 所示，其位移和切应力最大值见表 1。由图 6、图 7、表 1 可知：1）截取 2.0~2.5 s 时的相对位移曲线发现，顶部和底部监测点的水平相对位移曲线基本拟合，凸块尺寸为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m 时，顶底部监测点测得的相对位移曲线几乎重合；2）当截取加速度出现的峰值 2.3 s 时，凸块尺寸为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m 的点几乎重合，相对位移分别为 0.054 41, 0.053 26, 0.054 37, 0.054 32 mm。可见，0.2 m 的凸块顶部和底部两个监测点的水平位移相对较小，为 0.053 26 mm，比凸块尺寸为 0.1 m 时的水平相对位移小 2.11%；比凸块尺寸为 0.3 m 时的水平相对位移小 2.04%；比凸块尺寸为 0.4 m 时的水平相对位移小 1.95%。0.2 m 的凸块相较于尺寸为 0.1 m 的凸块，其长度较长，能更好地限制水平位移；相较于 0.3, 0.4 m 的凸块，其长度也能使接头更加稳定，不易发生水平相对位移。

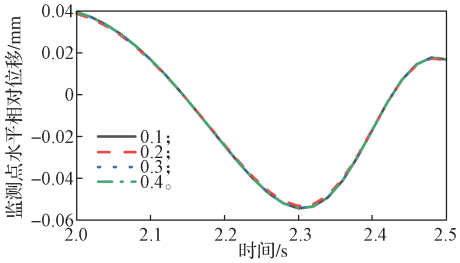


图 6　2.0~2.5 s 时不同 L 型凸块接头长度的监测点水平相对位移

Fig. 6　Horizontal relative displacement of monitoring points at different lengths of L-shaped block joints at 2.0~2.5 s

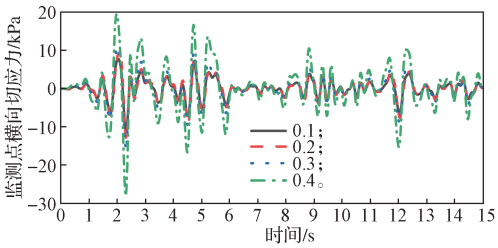


图 7　L 型凸块不同接头长度的 a 点横向切应力变化曲线

Fig. 7　Transverse shear stress variation curves at point a of L-shaped protrusion with different joint lengths

表 1　L 型凸块不同接头长度的位移和应力最大值

Table 1　Maximum values of displacement and stress values of L-shaped blocks with different joint lengths

凸块长度/m	顶底板水平相对位移/mm	a 点最大横向切应力/kPa
0.1	0.054 41	11.42
0.2	0.053 26	12.97
0.3	0.054 37	15.82
0.4	0.054 32	28.12

3.1.2　L 型凸块伸出长度对综合管廊地震响应的影响

本节研究凸块的伸出长度对综合管廊地震响应的影响，变化的伸出长度为图 8 中 x 的长度。

通过改变 L 型接头的伸出长度，分别取 0.1, 0.2, 0.3 m，同样采用 El Centro 波，进行双向地震动输入，

从底部垂直入射。监测点同样取顶底板凸块的端点 a 和 b，不同伸出长度的顶底板水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 9 和图 10 所示，其位移和切应力最大值见表 2。

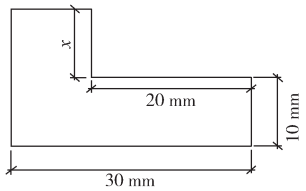


图 8　L 型凸块伸出长度示意图

Fig. 8　Diagram of the extension length of the L-shaped convex blocks

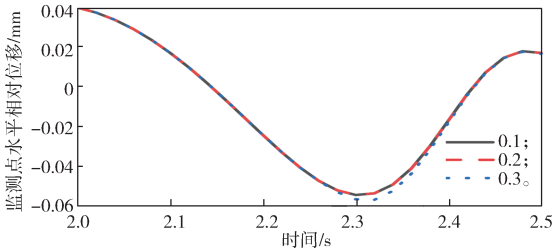


图 9　2.0~2.5 s 时 L 型凸块不同伸出长度的顶底板水平相对位移

Fig. 9　Horizontal relative displacement of the roof and floor with different extension lengths of the L-shaped blocks at 2.0~2.5 s

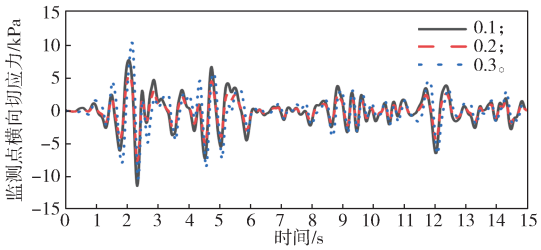


图 10　L 型凸块不同伸出长度的监测点 a 横向切应力变化曲线

Fig. 10　Curves of transverse shear stress variation at monitoring point a of different extension lengths of L-shaped convex blocks

表 2　L 型凸块不同伸出长度的位移和应力最大值

Table 2　Maximum values of displacement and stress of L-shaped convex blocks with different extension lengths

凸块伸出长度 /m	顶底板水平相对位移 /mm	a 点最大横向切应力 /kPa
0.1	0.053 26	19.2
0.2	0.054 37	18.8
0.3	0.054 36	21.8

由图 9、图 10、表 2 可知：1）观察 2.3 s 时顶底板的水平相对位移，发现当 L 型凸块长度固定为 0.2 m 时，随着伸出长度增加，顶底板的水平相对位移也逐渐增加，当伸出长度从 0.1 m 增加到 0.3 m 时，水平相对位移分别增加 2.08%, 2.07%；伸出尺寸为 0.1 m 时，综合管廊顶底板的水平相对位移最小，由此可知 L 型凸块的伸出长度过长不利于综合管廊接头的稳定。

3.1.3　两种长度变化对 L 型综合管廊地震响应的影响

本节将同时变化伸出长度和凸块长度，综合比较分析两种长度在地震作用下对 L 型接头的影响，并通过比较得出最优的长度组合。各工况条件见表 3。不同工况下的顶底板水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 11、图 12 所示，其位移和切应力最大值见表 4。

表 3　L 型接头不同工况的伸出长度和凸块长度设置值

Table 3　Setting values for the extension length and lug length of L-shaped joints under different operating conditions　m

工 况	一	二	三	四	五	六	七	八	九
凸块长度	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
伸出长度	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3

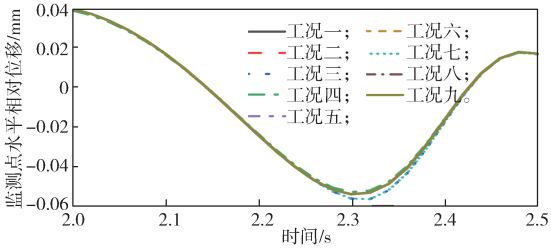


图 11　L 型凸块 2.0~2.5 s 时不同工况下顶底板水平相对位移

Fig. 11　Horizontal relative displacement between the roof and floor under different working conditions during 2.0~2.5 s of L-shaped convex blocks

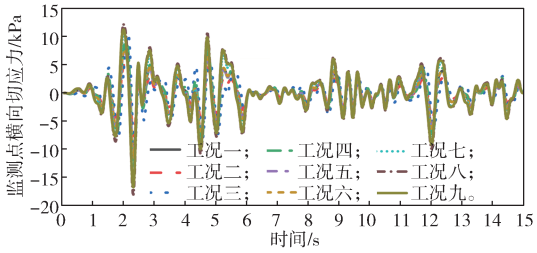


图 12　L 型凸块不同工况下 a 点横向切应力变化曲线

Fig. 12　Curves of transverse shear stress at point a under different operating conditions of L-shaped block

表 4　L 型凸块不同工况下的位移和应力最大值

Table 4　Maximum values of displacement and stress of L-shaped convex blocks under different working conditions

工况	水平相对位移 /mm	a 点最大横向切应力 /kPa	工况	水平相对位移 /mm	a 点最大横向切应力 /kPa
一	0.054 41	11.4	六	0.054 36	11.5
二	0.054 38	7.6	七	0.056 56	15.8
三	0.056 56	10.3	八	0.054 34	18.0
四	0.053 26	13.0	九	0.054 31	16.7
五	0.054 37	10.8			

由图 11、图 12、表 4 可知 9 种工况的位移曲线基本相近，观察加速度峰值出现的 2.3 s 时的位移可知：1）工况三和工况七，x、y 分别取最大值和最小

值，在加速度峰值时的位移最大，为 0.056 56 mm。这是由于工况三轴向伸出长度较长而横向长度较短，嵌入凹槽长度较短，所以发生了较大的水平相对位移；工况七为凸块轴向和横向长度较长，不易稳定。2）工况四水平相对位移最小，为 0.053 26 mm。其凸块横向长度较为适中，且轴向伸出长度最短，故在地震影响下的水平相对位移最小，抗震效果较好。3）分别观察工况一、四、七，工况二、五、八，工况三、六、九，比较监测点 *a* 最大切应力的变化，得知当 L 型凸块伸出长度不变时，其横向切应力会随着长度的增加而增加，工况四、七分别比工况一增加了 14.0%, 38.6%；工况五、八分别比工况二增加了 42.1%, 136.8%；工况六、九分别比工况三增加了 11.6%, 62.1%。4）对于 L 型接头连接的综合管廊，由于其凹槽部分侵占了管廊部分外壁，所以伸出长度过长会导致接头不稳固，其伸出长度越小，抗震性能越强。接头本身的长度过短则接头的限位功能较弱，过长则不利于接头稳定，当接头长度适中且伸出长度最短时，其抗震性能最佳。

3.2　T 型凸块尺寸对综合管廊的地震响应影响

3.2.1　T 型凸块长度对综合管廊地震响应的影响

本节讨论不同长度的 T 型凸块对综合管廊地震响应的影响，接头尺寸设置如图 13 所示，本小节发生变化的为图 13 中 *x* 的长度。同样选取 El Centro 波并进行双向地震输入，分析 T 型接头的地震响应。通过截取 2.0~2.5 s 时的加速度最大值的区间，对凸块顶部和底部监测点的水平相对位移及横向切应力进行对比分析。不同接头长度的顶底板水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 14、图 15 所示，其位移和切应力最大值见表 5。

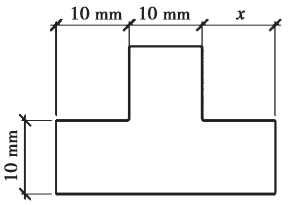


图 13　T 型接头凸块长度示意图

Fig. 13　Schematic diagram of the extension length of the T-shaped joints

由图 14、图 15、表 5 可知：1）顶部检测点 *a* 的最大切应力随着 T 型凸块的长度增加而有所增加，当长度从 0.1 m 增加到 0.3 m 时，测点 *a* 的最大横向切应力分别增加了约 46.9%, 92.2%；而测点 *b* 的最大横向切应力分别增加了约 53.2%, 94.3%。2）当凸块长度从 0.1 m 增加到 0.3 m 时，顶底板的水平相对位移分别减小了约 0.13%, 0.07%。随着凸块嵌入深度的增加，其水平相对位移逐渐减小，说明 T 型凸块长度的增加可以提高综合管廊的抗震性能，使得综合管廊更稳定。

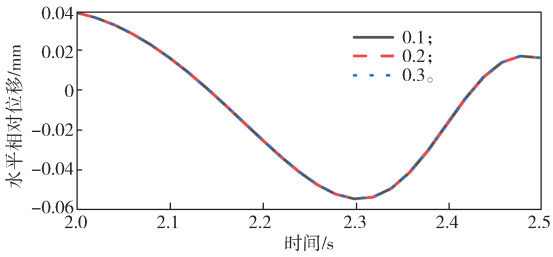


图 14　2.0~2.5 s 时 T 型凸块不同接头长度监测点水平相对位移

Fig. 14　Horizontal relative displacement of monitoring points with different sizes of the T-shaped convex blocks during 2.0~2.5 s

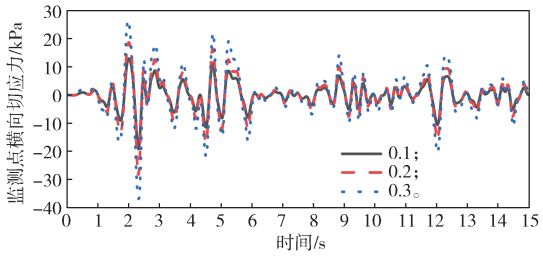


图 15　T 型凸块不同接头长度的 *a* 点横向切应力变化曲线

Fig. 15　Curves of transverse shear stress variation at monitoring point *a* of different extension lengths of T-shaped convex blocks

表 5　T 型凸块不同接头长度的位移和应力最大值

Table 5　Maximum values of displacement and stress of T-shaped convex blocks under different working conditions

凸块长度 /m	顶底板水平相对位移 /mm	顶点最大横向切应力 /kPa
0.1	0.054 36	19.2
0.2	0.054 29	28.2
0.3	0.542 50	36.9

3.2.2　T 型凸块伸出长度对综合管廊地震响应的影响

本节的凸块长度固定为 0.1 m，地震波输入方式、接触设置、网格划分、监测点都与 2.2.1 节相同。本节中 T 型凸块伸出长度为图 16 中 *x* 的长度。

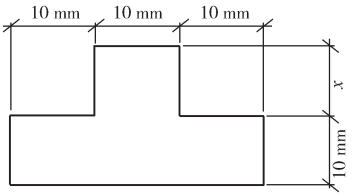


图 16　T 型凸块伸出长度示意图

Fig. 16　Diagram of the extension length of the T-shaped convex blocks

测得不同伸出长度的顶底板水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 17、图 18 所示，其位移和切应力最大值见表 6。由图 17、图 18、表 6 可以得知：1）当凸块长度从 0.1 m 增加到 0.3 m 时，顶底板的水平相对位移分别减小了 0.07%, 0.20%；随着

接头伸出长度增加，其水平相对位移逐渐减小，说明 T 型凸块伸出长度的增加可提高综合管廊的抗震性能，使综合管廊更稳定。

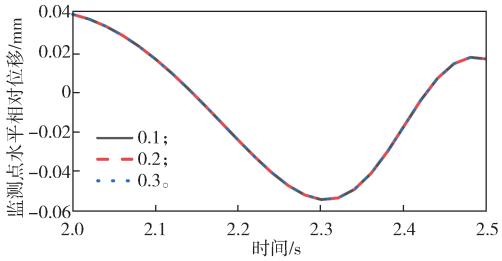


图 17　2.0~2.5 s 时 T 型凸块不同伸出长度顶底板的水平相对位移

Fig. 17　Horizontal relative displacement of the roof and floor with different extension lengths of the T-shaped convex blocks during 2.0~2.5 s

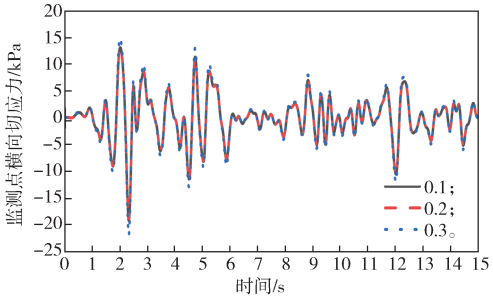


图 18　T 型凸块不同伸出长度监测点 *a* 横向切应力变化曲线

Fig. 18　Variation curves of transverse shear stress at monitoring point *a* with different protrusion lengths of T-shaped convex blocks

表 6　T 型凸块不同伸出长度的位移和应力最大值

Table 6　Maximum values of displacement and stress of T-shaped convex blocks with different extension lengths

伸出长度 /m	顶底板水平相对位移 /mm	顶点最大横向切应力 /kPa
0.1	0.054 36	19.2
0.2	0.054 32	18.8
0.3	0.054 25	21.8

3.2.3　两种长度变化对 T 型综合管廊地震响应的影响

本节将变化凸块长度和伸出长度，综合比较分析两种尺寸对综合管廊在地震下的影响，并比较得出最优的长度组合。各工况条件设置见表 7。不同工况下的顶底板水平相对位移、横向切应力变化曲线分别如图 19、图 20 所示，其位移和切应力最大值见表 8。

表 7　T 型接头不同工况的伸出长度和凸块长度设置值

Table 7　Setting values for the extension lengths and lug lengths of T-type joints under different operating conditions　m

工况	十	十一	十二	十三	十四	十五	十六	十七	十八
凸块长度	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
伸出长度	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3

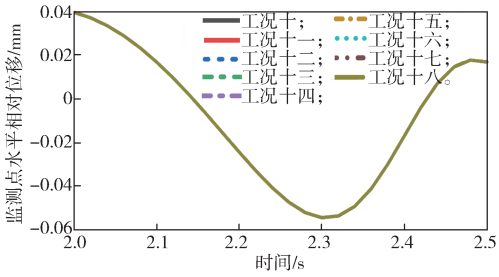


图 19　T 型凸块 2.0~2.5 s 时不同工况下顶底板水平相对位移

Fig. 19　Horizontal relative displacement between the roof and floor under different working conditions during 2.0~2.5 s of T-shaped convex blocks

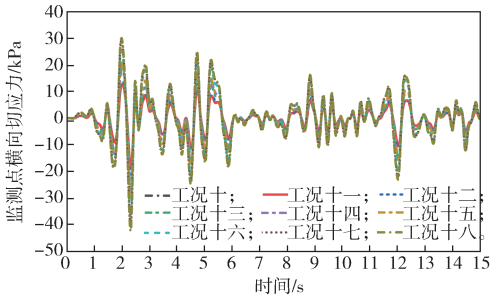


图 20　T 型凸块不同工况下 *a* 点横向切应力变化曲线

Fig. 20　Curves of transverse shear stress at point *a* under different operating conditions of T-shaped convex blocks

表 8　T 型凸块不同工况下的位移和应力最大值

Table 8　Maximum values of displacement and stress of T-shaped convex blocks under different working conditions

工况	水平相对位移 /mm	顶点最大横向切应力 /kPa	工况	水平相对位移 /mm	顶点最大横向切应力 /kPa
十	0.054 36	19.2	十五	0.054 28	30.0
十一	0.054 32	18.8	十六	0.054 25	36.6
十二	0.054 32	21.8	十七	0.054 25	40.3
十三	0.054 30	28.2	十八	0.054 23	42.0
十四	0.054 30	30.0			

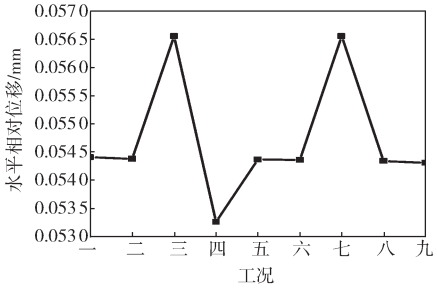
由图 19、图 20、表 8 可知：1）2.3 s 时，综合管廊顶底板的最大水平相对位移从工况十～十八依次减小，工况十八即 T 型凸长度为 0.3 m、伸出长度为 0.3 m 时，顶底板的水平相对位移出现最小值；工况一即 T 型凸块长度和伸出尺寸均为 0.1 m 时，顶底板的水平相对位移出现最大值，故可以得知 T 型凸块的横向长度和轴向长度的增加有利于减少综合管廊的水平相对位移，提高综合管廊的稳定性。2）从工况十～十八，监测点 *a* 的最大横向切应力变化整体为上升趋势，说明尺寸的增加会导致 T 型接头受到的应力也有所增加。3）对于 T 型接头连接的综合管廊，由于其凹槽部分嵌入了管廊内部，其伸出长度的增加或者本身长度的增加都会有效地限制管廊的位移，增加其抗震性能。当接头本身长度最长且伸出

长度最长时，其抗震性能最佳。

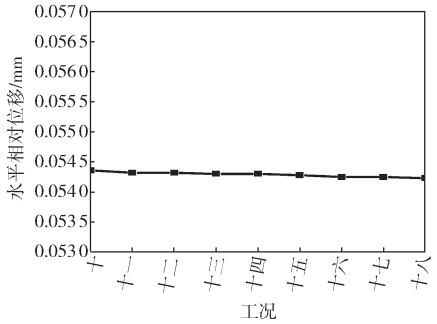
3.3　两种承插接头地震影响下的响应差异

3.3.1　结构的位移差异

对比分析综合管廊承插接头 L 型凸块（工况一～九）和 T 型凸块（工况十～十八）在地震作用下的位移差异，由于工况一～九和工况十～十八下凸块的变化方式相同，所以具有一定的可比性，故取每种工况的最大水平相对位移，将数轴的坐标统一，得到的不同工况下水平相对位移最大值见图 21。



a）L 型凸块



b）T 型凸块

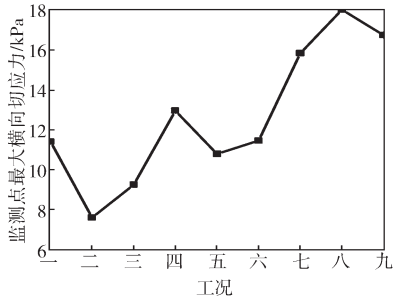
图 21　凸块的水平相对位移最大值变化曲线

Fig. 21　Curves of maximum horizontal relative displacement of conves block

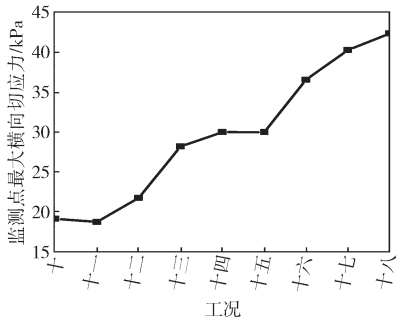
由图 21 可知：1）L 型凸块监测点水平相对位移最大值受到长度变化的影响较为明显，其中当长度或伸出长度取最大值时水平相对位移出现最大值；2）T 型凸块监测点的水平相对位移受到凸块尺寸的变化不明显，凸块长度增大时顶底板水平相对位移呈现下降趋势，说明 T 型凸块由于整体嵌入综合管廊内部，所以其凸块的尺寸增加会使得综合管廊更趋于稳定，反而由于 L 型凸块的部分结构充当了综合管廊外壁的一部分，所以 L 型凸块的长度过长和伸出长度过短都不利于综合管廊的稳定。

3.3.2　接头的应力差异

选取监测点 *a* 在 18 种工况下的最大横向切应力，发现其最大切应力的出现时间均为 2.3 s，变化趋势如图 22 所示。由图可知：1）整体上看，在地震作用下，T 型接头受到的横向切应力要大于 L 型接头，这可能是由 T 型接头整体嵌入综合管廊内部导致的。2）分别看两种接头的应力变化，即图 22，随着尺寸增加，管廊接头处受到的应力也呈现出增加趋势，这是因为接头之间的接触面积随之增加，接头之间的约束效应也增加，切应力逐渐增大。



a）L 型接头



b）T 型接头

图 22　两种接头 *a* 点的应力最大值变化曲线

Fig. 22　Maximum stress variation curves at point *a* of the two joints

4　结论

本研究提出两种新型构造形式的综合管廊承插式接头，通过研究两种接头形式在不同长度和不同伸出长度的影响下，对其进行地震响应分析，得出最优尺寸组合和两种接头的优劣，主要结论如下：

1）对于 L 型接头连接的综合管廊，由于其凹槽部分侵占了管廊部分外壁，所以伸出长度过长会导致接头不稳固，其伸出长度越小抗震性能越强；接头本身的长度过短则接头的限位功能较弱，过长则不利于接头稳定，当接头长度适中并且伸出长度最短时，其抗震性能最佳。

2）对于 T 型接头连接的综合管廊，由于其凹槽部分嵌入了管廊内部，其伸出长度的增加或本身长度的增加都会有效限制管廊位移，当接头本身长度最长且伸出长度最长时，其抗震性能最佳。

3）对于接头尺寸的变化，L 型接头受到的影响较为明显，由于 T 型接头嵌入了管廊内部的原因，T 型接头受到的影响较小。

4）综合考虑接头相对位移和切应力，长度为 0.2 m、伸出长度为 0.1 m 的 L 型承插式接头以及长度为 0.3

m、伸出长度为 0.3 m 的 T 型承插式接头，其抗震性能较好。

参考文献：

[1] 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.
QIAN Qihu. To Transform Way of Urban Development by Constructing Underground Utility Tunnel[J]. Tunnel Construction，2017，37(6)：647−654.

[2] KLAPPERS C，GRÜBL F，OSTERMEIER B. Structural Analyses of Segmental Lining-Coupled Beam and Spring Analyses Versus 3D-FEM Calculations with Shell Elements[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research，2006，21(3)：254−255.

[3] DING X M，FENG L，WANG C L，et al. Shaking Table Tests of the Seismic Response of a Utility Tunnel with a Joint Connection[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2020，133：106133.

[4] ZHANG W G，HAN L，FENG L，et al. Study on Seismic Behaviors of a Double Box Utility Tunnel with Joint Connections Using Shaking Table Model Tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2020，136：106118.

[5] 颜 良 . 无腋角综合管廊结构足尺模型静载试验及有限元分析 [D]. 长沙：湖南大学，2018.
YAN Liang. Static Load Test and Finite Element Analysis of Full-Scale Model of Utility Tunnel Structure Without Axillary Angle[D]. Changsha：Hunan University，2018.

[6] 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：上海应用技术大学，2020.
WANG Lu. Study on Seismic Behavior of Joints in Prefabricated Composite Plate Assembled Utility Tunnel[D]. Shanghai：Shanghai Institute of Technology，2020.

[7] 黄臣瑞 . 上下分体预制装配式综合管廊地震响应研究 [D]. 广州：华南理工大学，2018.
HUANG Chenrui. Study on Seismic Response of Upper and Lower Split Prefabricated Utility Tunnel[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2018.

[8] 蒋录珍，李 杰，陈 隽 . 非一致地震激励下综合管廊接头响应数值模拟 [J]. 世界地震工程 , 2015, 31(2)：101−107.
JIANG Luzhen，LI Jie，CHEN Jun. Numerical Simulation of Utility Tunnel Joint Effects Under Non-Uniform Earthquake Excitation[J]. World Earthquake Engineering，2015，31(2)：101−107.

[9] LIU W，SONG Z Y，WANG Y C. Seismic Analysis of the Connections of Buried Segmented Pipes[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences，2020，123(1)：257−282.

[10] ZHAO W S，CHEN W Z. Effect of Near-Fault Ground Motions with Long-Period Pulses on the Tunnel[J]. Journal of Vibroengineering，2015，17(2)：841−58.

[11] 任 青，赵晓斌，杨 涛，等 . 阶梯型综合管廊非一致地震激励下的动力响应 [J]. 防灾减灾工程学报，2023，43(2)：222−231，239.
REN Qing，ZHAO Xiaobin，YANG Tao，et al. Dynamic Response of Stepped Utility Tunnel Under Non-Uniform Earthquake Excitation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2023，43(2)：222−231，239.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . 城市轨道交通结构抗震设计规范：GB50909—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014：185.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures：GB50909—2014[S]. Beijing：Standards Press of China，2014：185.

[13] LEE J，FENVES G L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics，1998，124(8)：892−900.

[14] 王鹏宇 . 预制综合管廊地震响应分析 [D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2018.
WANG Pengyu. Seismic Response Analysis of Prefabricated Utility Tunnel[D]. Harbin：Institute of Engineering Mechanics，China Earthquake Administration，2018.

[15] 谷 音，刘晶波，杜义欣 . 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元 [J]. 工程力学，2007，24(12)：31−37.
GU Yin，LIU Jingbo，DU Yixin. 3D Consistent Viscous-Spring Artificial Boundary and Viscous-Spring Boundary Element[J]. Engineering Mechanics，2007，24(12)：31−37.

[16] 刘晶波，谷 音，杜义欣 . 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元 [J]. 岩土工程学报，2006，28(9)：1070−1075.
LIU Jingbo，GU Yin，DU Yixin. Consistent Viscous-Spring Artificial Boundaries and Viscous-Spring Boundary Elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2006，28(9)：1070−1075.

[17] 潘旦光 . 复杂场地的土层地震反应分析 [D]. 上海：同济大学，2003.
PAN Danguang. Seismic Response Analysis of Soil Layer in Complex Site[D]. Shanghai：Tongji University，2003.

（责任编辑：廖友媛）