

# 现浇管廊接头力学行为数值模拟与分析研究

王鹏宇<sup>1</sup>, 王述红<sup>1</sup>, 阿力普江·杰如拉<sup>1</sup>, 刘伟华<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中建五局 土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 承插式管廊接头是地下综合管廊接头的常用结构形式,其受力性能及破坏形式对工程设计和施工至关重要. 利用非线性有限元软件 ABAQUS 建立土-地下综合管廊结构数值模型. 将管廊划分实体单元,提取接头处结点的变形量及应力值,研究管廊及管廊周围土体的应力分布和变形规律,最后通过计算得出管廊接头处的延性系数及开裂荷载. 通过数值模拟和理论计算分析得出管廊接头处存在的安全隐患及其潜在破坏模式,为解决接头处的防水问题和不均匀沉降问题提供理论参考.

**关 键 词:** 地下综合管廊;接头位置;应力集中;结构变形;破坏模式

中图分类号: TU 990.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)12-1788-06

## Numerical Simulation and Analytical Study on Mechanical Behavior of Cast-in-Place Utility Tunnel Joint

WANG Peng-yu<sup>1</sup>, WANG Shu-hong<sup>1</sup>, JIERULA Alipujang<sup>1</sup>, LIU Wei-hua<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. CCFEB Civil Engineering Co., Ltd., Changsha 410004, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The bell and spigot joint is the common structure form of the utility tunnel joint, and its mechanical properties and failure modes are very important for engineering design and construction. First, a numerical model for soil and underground utility tunnel was established by using nonlinear finite element software ABAQUS; then, the utility tunnel was divided into physical unit elements and the stress distribution and the deformation law of the soil and the utility tunnel were studied by extracting the deformation amount and the stress value of the nodes at the joint; finally, the ductility coefficient and the cracking load of the utility tunnel were calculated. Through numerical simulation and theoretical calculation, the potential safety hazards and damage patterns of the joints in the tube gallery were obtained to provide some theoretical references for waterproofing and uneven settlement control.

**Key words:** utility tunnel; joint position; stress concentration; structure deformation; failure mode

随着城市地下空间的发展,地下综合管廊的建设越来越重要<sup>[1-3]</sup>. 因不同地质、不同埋深、不同荷载作用等因素引起管廊结构变形及内力重分布<sup>[4-5]</sup>,当管廊变形或曲率半径达到一定程度后,接头处会因张开量过大而发生破坏<sup>[6]</sup>,而管廊接头关系到整个工程的使用效果,是设计、施工中的关键. 胡翔<sup>[7]</sup>以2010年上海世博会预制管廊工程为背景,通过足尺试验对预制预应力综合管廊接

头连接性能、接头截面抗渗防水、拼缝截面挠度等管廊正常使用功能进行研究. 岳庆霞<sup>[8]</sup>采用数值模拟方法,研究管廊结构在不同的接触面、人工边界条件、行波效应、有效应力等因素影响下的地震响应效果. 姜士磊<sup>[9]</sup>采用数值方法,研究箱涵顶部在不同坡度、不同填土高度作用下垂直土压力的分布规律.

查阅国内外文献发现管廊接头处的研究仍处

于空白. 本文以益阳市管廊项目为例,通过模拟和理论计算得出接头处的受力性能及变形规律,并对潜在破坏模式进行分析.

# 1 数值模拟

## 1.1 建立计算模型

益阳管廊工程采用矩形箱涵结构形式,截面具体尺寸如图 1 所示,其中管廊底部设 15 cm 厚垫层,上部覆土按 2.5 m 设计.

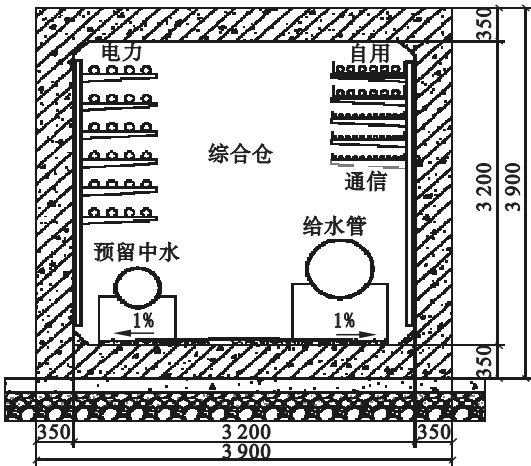


图 1 管廊截面图 (mm)

Fig. 1 Cross section of the utility tunnel (mm)

土体底面的边界约束为三向约束,顶面为自由面,前、后、左、右面的边界约束为法向约束;采用 Embedded Region 约束来限制混凝土与钢筋之间的相互作用. 罚函数接触算法模拟管廊与土体接触面之间发生的较小弹性滑动,摩擦接触中切向接触默认服从库仑摩擦模型,摩擦系数取 0.26,法向接触为“硬接触”.

## 1.2 计算参数

土体参数如表 1 所示,采用 Mohr – Coulomb 线弹塑性模型;混凝土强度等级 C40,采用塑性损伤模型;钢筋采用强化二折线模型.

## 1.3 接头处建模

接头承口、插口的结构形式如图 2,3 所示.

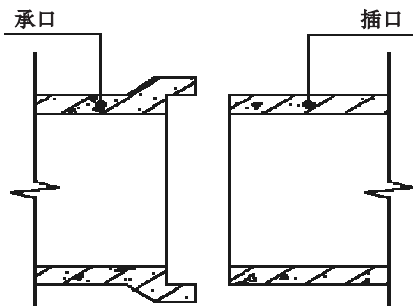


图 2 现浇管廊承插式接头

Fig. 2 Bell and spigot joint of cast-in-place utility tunnel

表 1 土体参数  
Table 1 Soil parameters

名称	埋深/m	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
细中砂	0 ~ 1	1 856	3. 69	0. 34	1	25
淤泥质土	1 ~ 4. 5	1 758	2. 2	0. 3	14. 4	12
中细砂	4. 5 ~ 7. 5	1 904	2. 5	0. 34	1	30
淤泥质土	7. 5 ~ 24	1 745	1. 92	0. 34	10	8. 6
粉质黏土	24 ~ 30	1 918	4. 02	0. 3	34. 2	16. 8
垫层	—	2 000	60	0. 26	1	40
管背填土	—	1 500	8	0. 34	10	15
路堤填土	—	2 000	18	0. 3	—	—

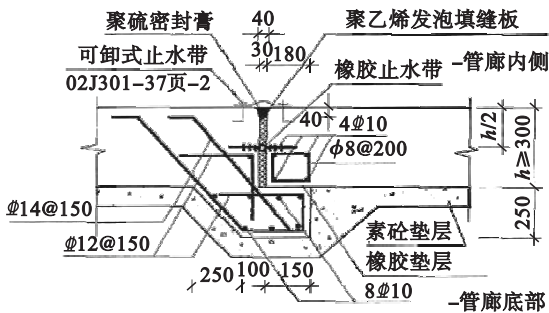


图 3 管廊承插式接头

Fig. 3 Bell and spigot joint of the utility tunnel

通过定义非线性弹簧来实现管廊接头处的相互作用,接头处有水平方向的两个平动,纵向的一个平动和绕纵向的一个转动,经有限元软件试算,具体弹簧单元取值见表 2.

表 2 接头处非线性弹簧单元取值  
Table 2 Values of the nonlinear spring element at the joint

位移/m	0	-1	-0. 1	0. 01	10 000
力/N	-1e - 10	-1e - 9	-1e - 9	5 000	5 000

1.4 上部荷载

永久荷载可以等效为 2.5 m 厚的填土荷载, 可变荷载可以等效为 10 kPa 的均布荷载. 整体模型长 42 m, 宽 20 m, 高 25 m. 土层分布如图 4 所示.

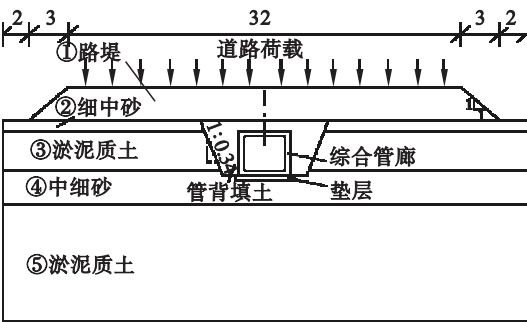


图 4 土层的分布  
Fig. 4 Strata distribution

2 计算结果分析

2.1 土体的受力与变形分析

管廊周围土体应力如图 5a 所示, 管廊底部边角处土体应力最大, 并且沿管廊向四周逐渐减小, 土体应力变化范围在 6.34 ~ 95.57 kPa. 土体沉降云图如图 5b 所示, 土体整体变形趋势竖直向下. 顶部位置位移较大, 最大达到 10.69 mm, 在控制回填土沉降时需进行加密加厚处理; 左右两侧土体变形向外逐渐减小, 底部土体变形呈凸字形.

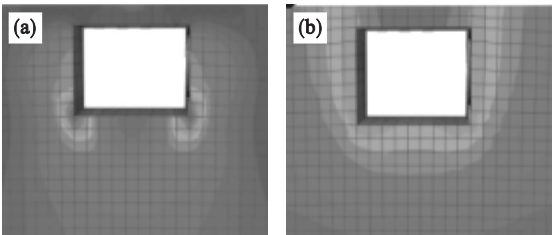


图 5 土体应力、沉降云图  
Fig. 5 Nephogram of soil stress and subsidence  
(a)—应力云图; (b)—沉降云图.

2.2 管廊接头处变形分析

绘制出图 6 所示 (图中负号表示变形方向向下) 的顶板变形曲线, 荷载作用下顶板变形近似抛物线, 中间大, 两侧小; 插口端变形比承口端小, 表明承插式连接形式对沉降起到了限制作用.

图 7 顶板接头处的竖向变形最大, 距离接头越远变形越小, 最大相差 1.52 mm, 说明顶板接头比其他位置更易发生变形.

对比图 6 和图 8 发现顶板变形量大于侧壁板变形量, 顶板所受上部土压力大于侧壁板所受侧

向土压力; 侧壁板变形由下至上是先向内凹再向外凸, 然后内凹, 底板处恢复正常.

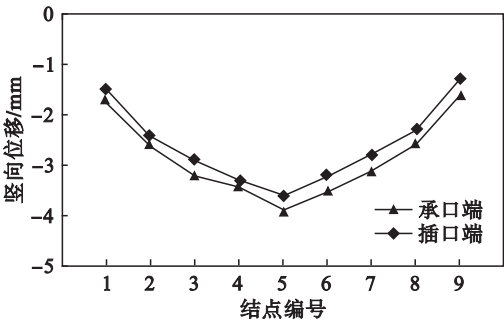


图 6 顶板接头处竖向位移变化曲线  
Fig. 6 Vertical displacements of the roof joint

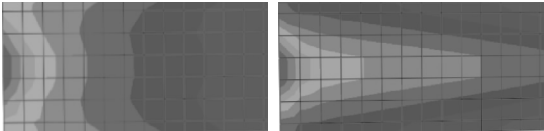


图 7 顶板竖向位移云图  
Fig. 7 Vertical displacement nephogram of the tunnel roof

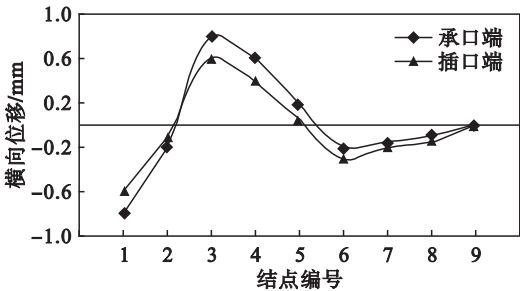


图 8 侧壁板接头处横向位移变化曲线  
Fig. 8 Transverse displacements of the sidewall joint

2.3 管廊接头处应力分析

从图 9 看出, 接头处的应力集中区域集中在承口端的顶板中部, 侧壁板下端以及插口端的 4 个角部, 并且接头处的最大应力与廊体其他位置相比最大相差 2.32 MPa, 所以接头处更易发生破坏, 接头处的应力分析更有必要.

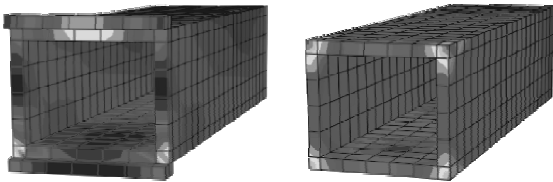


图 9 管廊接头应力云图  
Fig. 9 Stress nephogram of pipe gallery joint

如图 10 所示, 荷载作用下承口端顶板混凝土出现以压应力为主的 B 区域, 以拉应力为主的 A 区域和 C 区域, B 区域的应力大于其他两个区域, 其中 A 区域和 C 区域在距离角部 0.45 ~ 0.60 m 的位置, B 区域在顶板中间位置.

顶板承口端混凝土破坏预测:随着埋深增大、地面荷载增大、地基承载力不足等因素的影响,受拉 A 区域和 C 区域混凝土将出现以横向裂缝为主并逐渐向两侧延伸的开裂,严重时会造成地下水渗入. 受压 B 区域将出现挤压并以纵向裂缝为主逐渐向内侧延伸,严重时造成混凝土压碎.

如图 10 所示,D 和 E 区域出现应力集中,主要以压应力为主. 顶板插口端混凝土破坏机制:顶板插口端两个角部相对廊体将提前产生裂缝,受压边缘混凝土容易发生压碎破坏. 如图 11 所示,管廊顶板承口端的应力值大于廊体其他区域,相同荷载作用下管廊接头处将提前出现破坏,所以对管廊接头处的混凝土防水和强度要求需进行特殊考虑.

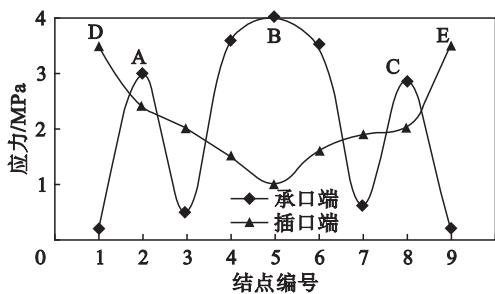


图 10 顶板接头处混凝土应力变化曲线

Fig. 10 Stress in concrete at the joint of tunnel roof

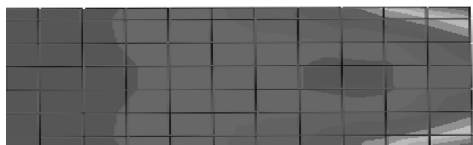


图 11 顶板插口端应力云图

Fig. 11 Roof stress nephogram at the socket

如图 12 所示,侧壁板承口端混凝土应力先增大后减少,然后再次增大后减少,出现两个应力集中区域:F 区域和 I 区域,F 区域出现在侧壁板上部接近顶板位置,以拉应力为主,I 区域出现在侧壁板下部接近底板位置,以压应力为主. 侧壁板承口端混凝土破坏机制:F 区域混凝土容易向外凸从而导致混凝土出现开裂,地下水从开裂处渗透到管廊结构内部. I 区域混凝土受压,受压边缘混凝土损伤严重,容易出现压碎现象.

从图 12 可以看出,侧壁板插口端上端角部区域 H 处应力高度集中,沿着侧壁板往下应力慢慢减少,在底板角部区域 G 时应力稍有增加. H 区域和 G 区域以压应力为主. 侧壁板插口端混凝土破坏机制:H 和 G 区域发生挤压,其中 H 区域受压边缘易出现压碎破坏,G 区域的损坏程度相对较小.

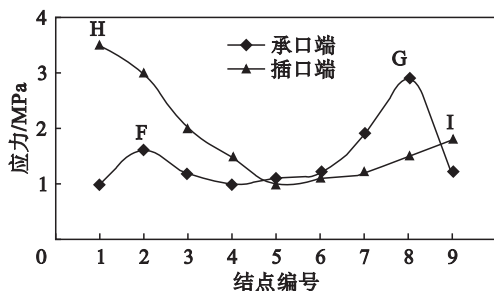


图 12 侧壁板混凝土应力变化曲线

Fig. 12 Stress in the side wall concrete

底板接头处的应力变化曲线如图 13 所示. 相同荷载作用下底板的应力变化趋势都近似抛物线形:中间应力小,两端应力逐步增大,出现压应力集中的 J,K 区域. 底板接头处混凝土破坏机制:底板接头处两端角部易发生挤压破坏,受压边缘甚至出现压碎破坏;底板中间区域应力变化较小,相对安全.

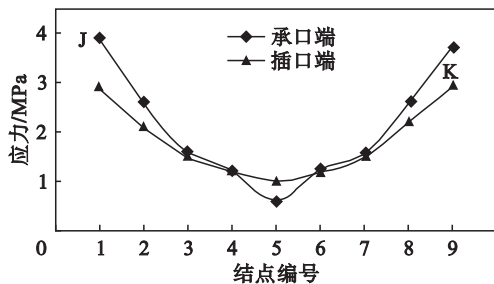


图 13 底板接头处应力变化

Fig. 13 Stress in floor slab joint

结构内钢筋骨架应力变化规律相似,不再赘述.

### 3 测试验证

为验证本文数值模拟的准确性,将模拟值与工程中监测得到的数据进行对比,如表 3,4 所示.

本文建立的承插式管廊接头计算模型其位移变化趋势及受力特点与益阳管廊工程实际测量得到的数据吻合较好. 模拟得到的承插式管廊接头处的应力值普遍大于实测值,主要因为实测时管廊上部没有车辆通行,而在模拟时考虑了上部车辆的作用.

### 4 计算分析

#### 4.1 荷载 - 位移曲线

模拟得到承插式管廊接头处跨中荷载 - 位移曲线. 初期模型刚度较大,荷载迅速增大到屈服荷载;屈服后,刚度下降导致位移急剧增加;继续加

载,荷载小幅度上升,到达峰值荷载后位移持续增加,荷载几乎不变.管廊接头处跨中破坏过程可分为四个阶段:开裂、屈服、峰值、破坏(表 5).

表 3 位移的测试值与模拟值				
Table 3 Displacement values from test and simulation				
顶板编号	位移/mm			
	实测值		模拟值	
	承口	插口	承口	插口
1	0.151	0.123	0.162	0.145
2	0.278	0.233	0.266	0.241
3	0.334	0.336	0.348	0.337
4	0.390	0.318	0.354	0.329
5	0.279	0.267	0.256	0.232
6	0.218	0.177	0.161	0.134

侧壁板编号	位移/mm			
	实测值		模拟值	
	承口	插口	承口	插口
1	0.107	0.075	0.082	0.063
2	0.033	0.021	0.022	0.016
3	0.072	0.046	0.069	0.048
4	0.045	0.032	0.037	0.029
5	0.013	0.009	0.015	0.012
6	0.010	0.002	0.007	0.003

表 5 各特征点的荷载、位移							
Table 5 Load and displacement of each characteristic point							
开裂		屈服		峰值		极限	
荷载	位移	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm
—	—	122.29	10.01	142.72	29.23	121.31	49.12

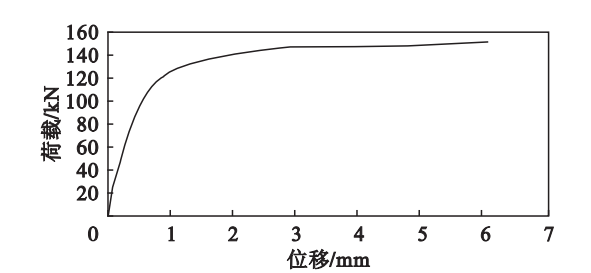


图 14 荷载-位移曲线  
Fig. 14 Load-displacement curve

4.3 接头处延性

计算得到承插式管廊接头跨中的延性系数为 4.90,表明采用承插式接头具有很好的安全预兆.

表 4 应力的测试值与模拟值				
Table 4 Stress values from test and simulation				
顶板编号	应力/kPa			
	实测值		模拟值	
	承口	插口	承口	插口
1	232	3 316	256	3 547
2	2 960	2 395	3 175	2 426
3	3 352	1 460	3 653	1 589
4	3 169	1 572	3 514	1 676
5	2 748	2 154	2 862	2 137
6	196	3 288	208	3 482

侧壁编号	应力/kPa			
	实测值		模拟值	
	承口	插口	承口	插口
1	865	3 367	1 098	3 412
2	1 463	2 935	1 655	3 032
3	1 064	1 550	1 098	1 556
4	1 138	1 108	1 238	1 193
5	2 861	1 463	2 932	1 525
6	963	1 526	1 296	1 882

4.2 位移及荷载特征值

通过荷载-位移曲线(图 14)得到管廊接头跨中部位各阶段的特征值,其中屈服荷载通过最远法确定<sup>[10]</sup>,峰值荷载为荷载-位移曲线上的极值点.

$$u_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}.$$

(1)

4.4 开裂荷载

从图 15 中可以看出在模型受荷过程中,整个截面高度范围内满足平截面假定.

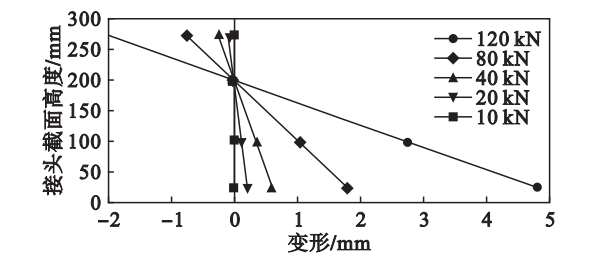


图 15 接头平截面假定  
Fig. 15 Plane assumption for the cross section of joint



由平截面假定几何关系知,在轴力和弯矩共同作用下,管廊混凝土开裂荷载为

$$\sigma_{cr}=f_t=\frac{F_{cr}\cdot a}{W}-\frac{N_{cr}}{A}, \tag{2}$$

$$F_{cr}=\frac{W}{a}\left(f_t+\frac{N_{cr}}{A}\right). \tag{3}$$

式中: $N_{cr}$ , $F_{cr}$ 分别为管廊接头混凝土开裂时的轴力与剪力; $f_t$ 为管廊混凝土抗拉强度; $a$ 为荷载加载点到计算截面的距离; $A$ 为管廊接头混凝土截面面积; $W$ 为管廊接头混凝土截面的抗弯矩. 计算得到管廊接头跨中的开裂荷载为 18.5 kN,满足安全设计和防水要求.

### 5 结论与建议

1) 通过模拟得出管廊承插式接头处的受力和变形规律.

2) 管廊周围土体最大沉降发生在管廊顶部,需对顶板上部回填土进行加密加厚处理,以减小土体差异沉降. 管廊顶板中间位置在荷载作用下变形量最大,比廊体其他位置大,在处理不均匀沉降问题时需对接头处进行重点防护;侧壁板的变形都近似波浪形,上部变形大,下部变形小.

3) 相同荷载作用下接头处的应力集中区域比廊体更易发生破坏,需着重考虑该区域的安全性. 顶板 A 区域与 C 区域、侧壁板的 F 区域都出现拉应力集中,混凝土易出现开裂,从而导致地下水渗入,建议布置适量钢纤维或者采用自密实混凝土. 顶板 B 区域和 4 个角部都出现压应力集中,该区域建议进行优化配筋处理.

4) 管廊接头截面跨中部位破坏过程经历四个阶段:开裂、屈服、峰值、破坏;通过延性系数和开裂荷载的计算,验证了承插式接头具有很好的安全预兆并且满足安全设计及防水要求.

### 参考文献:

[ 1 ] Hunt D V L, Nash D, Rogers C D F. Sustainable utility

placement via multi-utility tunnels [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*,2014,39:15 – 26.

[ 2 ] Chen J, Jiang L Z, Li J. Numerical simulation of shaking table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation [ J ]. *Tunneling and Underground Space Technology*,2012,30:205 – 216.

[ 3 ] Ingersel L C F. Considerations and strategies behind the design and construction requirements of the Istanbul Strait immersed tunnel [ J ]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2005,20( 6 ):604 – 608.

[ 4 ] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Drosos V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking [ J ]. *Bulletin of Earthquake Engineering*,2008,6( 2 ):213 – 239.

[ 5 ] Lee J, Salgado R. Estimation of footing settlement in sand [ J ]. *The International Journal of Geomechanics*,2002,2( 1 ):1 – 28.

[ 6 ] 郑永来,韩文星,童琪华,等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究 [ J ]. *岩石力学与工程学报*,2005,24( 24 ):4552 – 4558.

( Zheng Yong-lai, Han Wen-xing, Tong Qi-hua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil [ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics*,2005,24( 24 ):4552 – 4558. )

[ 7 ] Hu X. Experimental study of mechanical properties of PPMT [ J ]. *China Civil Engineering Journal*,2016,42( 5 ):115 – 118.

[ 8 ] 岳庆霞. 地下综合管廊地震反应分析与抗震可靠性研究 [ D ]. 上海:同济大学,2007.

( Yue Qing-xia. Seismic response analysis and reliability of utility tunnel [ D ]. Shanghai: Tongji University,2007. )

[ 9 ] 姜士磊. 路堤涵洞土压力三维数值计算及理论研究 [ D ]. 太原:太原理工大学,2014.

( Jiang Shi-lei. The 3-D numerical calculation and theoretical research about earth pressure on culvert under embankment [ D ]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2014. )

[ 10 ] Feng P, Cheng S, Bai Y, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete subjected to axial compression [ J ]. *Composite Structures*,2015,123:312 – 324.