

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0207

# 粉质黏土层预埋承插式混凝土管道 对爆破振动的动力响应\*

夏宇馨<sup>1</sup>, 蒋楠<sup>1,2,3</sup>, 姚颖康<sup>2,3</sup>, 周传波<sup>1</sup>, 罗学东<sup>1</sup>, 吴廷尧<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 江汉大学爆破工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430024;

3. 江汉大学武汉爆破有限公司, 湖北 武汉 430024)

**摘要:** 为合理评价临近爆破施工振动作用对预埋在粉质黏土层承插式混凝土管道的影 响, 通过现场预埋多管节全尺寸管道的爆破试验, 结合 DH5956 动态应变及 TC-4850 爆破振动等测试系统, 研究了爆破振动作用下承插式混凝土管道动力响应特征, 分析了管道管身及承插口动应变及振动速度空间分布规律; 基于承插口允许转角规范及管身动态拉应变破坏准则, 提出了承插式混凝土管道爆破振动速度安全判据。研究结果表明: 爆破振动作用下管道管身及承插口之间存在不协调响应特征; 爆破振动作用下管道承插口为管道最薄弱位置, 爆破振动对承插式混凝土管道的影 响应重点考虑承插口的失效; 承插式混凝土管道爆破振动速度控制阈值为 5 cm/s, 结果可对类似地层中承插式埋地混凝土管道的保护起指导作用。

**关键词:** 承插口混凝土管道; 现场试验; 动力响应; 安全判据

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Dynamic responses of a concrete pipeline with bell-and-spigot joints buried in a silty clay layer to blasting seismic waves

XIA Yuqing<sup>1</sup>, JIANG Nan<sup>1,2,3</sup>, YAO Yingkang<sup>2,3</sup>, ZHOU Chuanbo<sup>1</sup>, LUO Xuedong<sup>1</sup>, WU Tingyao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430024, Hubei, China;

3. Wuhan Explosion and Blasting Company Limited, Jianghan University, Wuhan 430024, Hubei, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effect of blasting vibration on an adjacent concrete pipeline with bell-and-spigot joints buried in a silty clay layer, four blasting field experiments were conducted by applying the DH5956 dynamic strain testing system and TC-4850 blasting vibration device mounted on the buried pipelines, and the dynamic response characteristics of the concrete pipelines under blasting vibration were studied. The spatial distributions of the dynamic strain and vibration velocity of the pipe bodies and the bell-and-spigot joints were analyzed. Based on the maximum allowable deflection degree of the bell-and-spigot joints in the specification and the criterion of the dynamic tensile stress failure of the concrete, the safety criterion of the blasting vibration velocity for the bell-and-spigot concrete pipelines was proposed. The results show that there is an uncoordinated response between the pipe bodies and bell-and-spigot joints under the action of blasting vibration; the bell-and-spigot joints are the most venerable positions of the pipelines, and the failure of the the bell-and-spigot joints should be noticed when considering the effect of blasting vibration; the blasting vibration velocity control threshold of the the bell-and-spigot concrete pipelines is 5 cm/s, this research can provide a guidance for the pipeline protection in similar construction projects.

**Keywords:** bell-and-spigot concrete pipeline; field experiments; dynamic response; safety criterion

\* 收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(41807265, 41972286); 中央高校基本科研业务费专项资金(CUGQY1931); 爆破工程湖北省重点实验室开放基金(HKLBEP20200)

第一作者: 夏宇馨(1994—), 男, 博士研究生, ricardo@cug.edu.cn

通信作者: 蒋楠(1986—), 男, 博士, 副教授, happyjohn@foxmail.com

城市综合管廊未遍及的老城区,其地下管线的分布往往错综复杂。随着我国地下交通网络的不断扩张和城市建筑物密集的进一步增大,埋地承插式混凝土给排水管道作为城市铺设最广泛的一种管道,相邻给排水管道的城市地铁隧道或基坑工程爆破施工情况屡见不鲜。爆破作为重要的岩体开挖手段,爆破振动产生的地震波不可避免地对邻近混凝土给排水管道的安全性和可用性产生严重影响。因此,为保证爆破施工邻近承插式混凝土管道的安全运行,研究爆破振动作用下管道的动力响应特征及其爆破振动安全判据具有重要的理论意义及实际应用价值。

目前,《爆破安全规程》<sup>[1]</sup>对地面建筑物以及地下构筑物明确了爆破振动速度及频率的判据,但缺乏与埋地管道相关的爆破振动安全判据。针对爆破振动作用对不同埋地管道的影响已开展了大量的研究工作<sup>[2-5]</sup>。郑爽英等<sup>[6]</sup>使用极差分析法确定了埋地输气管道受爆破振动作用其管壁厚度、管道埋深、管径、运行内压等对管道振动速度响应以及应力特征影响的贡献程度; Mokhtari 等<sup>[7]</sup>结合三维有限元软件和 CEL 方法,对 X65 钢管的不同结构参数在其受爆破冲击作用下动力响应的影响进行了研究,得出了管道最大等效应变随着内压的增高或者管径与厚度之比的减小而减小等规律,为钢管的抗爆设计提供了依据; Song 等<sup>[8]</sup>通过现场试验和数值模拟研究了炸药质量、炸药与管道接触面积以及管道壁厚等因素对于管道受爆破作用的影响,分析了铁管受爆破作用后的 3 种不同破坏状态; Jiang 等<sup>[9]</sup>以北京地铁 16 号线输气管道正上方地表振速监测结果为基础,结合数值计算,提出了在地铁开挖爆破作用下输气管道振动速度峰值与药量、爆心距和管道埋深的预测公式; 王海涛等<sup>[10]</sup>通过开展室内模型试验,模拟地铁隧道开挖,对临近管道动力响应特征进行研究,结合考虑疲劳强度设计值,确定混凝土管道的安全振动速度峰值; 张黎明等<sup>[11]</sup>对埋地钢管进行现场爆破试验,监测爆破过程中钢管的振动速度和应变变化特征,预测了管道能承受的地表最大峰值振速为 20.37 cm/s,并计算了不同距离最大段装药量下管道的安全距离。

关于管道爆破振动安全判据方面的研究,大多数偏重于将管道视为一体的刚性结构,忽视管道之间的连接来讨论管道动力响应以及安全判据,这其实是一种简化的处理。但是,在实际工程中,无论是输气球墨铸铁管道还是混凝土输水管道,都存在法兰连接或者胶圈连接。为此,本文中,针对承插式混凝土管道,通过现场全尺寸爆破试验,结合对管道管身、承插口的振动速度和动应变的监测,分析管道的动力响应特征,并建立管道在爆破振动作用下的安全振动速度判据。

## 1 现场爆破试验

### 1.1 管道埋设与炮孔布置

爆破试验场地位于武汉市经济开发区硃山路与硃山一路交汇处,爆破所在地地质情况主要为强风化石英砂岩。现场使用机械挖掘出管道沟槽,沟槽深 0.7 m,垫土高 0.4 m,并将混凝土管道拼接后放入沟槽内,管道覆土及垫土为粉质黏土,在武汉地区具有普遍性。现场管道埋设及炮眼钻孔如图 1 所示。



图 1 现场管道埋设与炮眼钻孔

Fig. 1 Pipe laying and hole drilling on site

现场受爆破作用的混凝土管道采用胶圈承插式接头, 柔性接口, 混凝土管道每节 2.5 m, 共 4 节, 内径为 1 000 mm, 外径为 1 200 mm, 管道符合混凝土和钢筋混凝土管道国家标准要求<sup>[12]</sup>, 试验所用管道总长为 10 m, 管道上部覆土厚达 2 m, 管道底部回填土、管道覆土分层夯实, 压实度达到给水排水管道工程施工及验收标准规范要求<sup>[13]</sup>, 管道两端约束情况可视为与实际埋地管道相同。管道埋设与炮孔布置空间位置如图 2 所示。

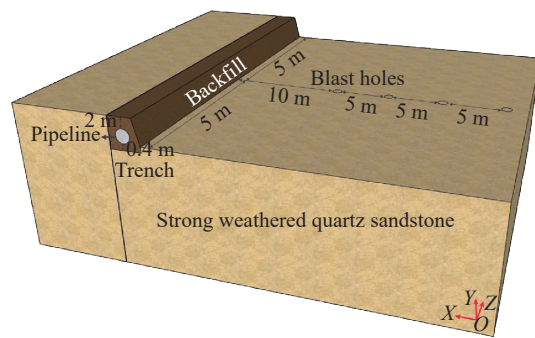


图 2 管道埋设与炮孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pipe laying and hole drilling on site

针对爆破对地下管线的影 响规律研究, 实施同等药量、不同爆心距的 4 次试验。4 次试验中炮孔深度均为 4 m, 炮孔为垂直炮孔, 直径为 90 mm; 装药结构为炮孔底部连续耦合装药, 装药长度为 106 cm, 孔底起爆; 试验场地较大, 场地边坡离爆源较远, 最小抵抗线为炸药重心距场地地表的垂直距离, 为 347 cm。现场开展由远及近不同爆心距下 4 次爆破试验, 并在混凝土管道内不同位置使用 TC-4850 爆破振动测试仪进行爆破振动速度监测, 使用 DH5956 动态应变测试系统进行爆破动应变监测。表 1 为 4 次爆破试验炮孔布置相关参数。

表 1 现场爆破试验参数

Table 1 Parameters for field blasting experiments

试验	炮孔深度H/m	炸药质量Q/kg	爆心距R/m
I	4	8	25
II	4	8	20
III	4	8	15
IV	4	8	10

### 1.2 管道应变与振动速度监测

为准确反映管道在爆破振动作用下的动力响应特征, 试验中采用动态应变测试系统 DH5956 来监测管道受爆破振动作用时的动应变特征, 所使用的应变片为单轴应变片, 长度为 80 mm, 120 Ω 型号, 连接 线为 1/4 桥, 应变片布设位置如图 3 所示。该仪器最高采样频率为 100 kHz, 具有极强的抗干扰能力, 可以精准记录管道在爆破动力作用下动应变的变化过程。

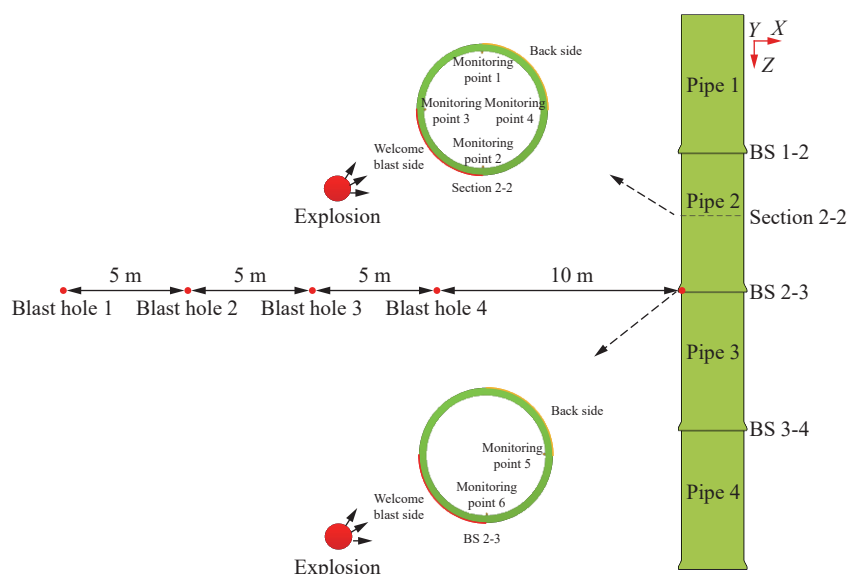


图 3 爆源与管道相对位置及动应变监测点布置

Fig. 3 Relative position between explosion source and pipeline, and arrangement of dynamic strain monitoring points

同时,试验中采用爆破振动速度监测仪 TC-4850,其三矢量低频振动速度传感器集  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向于一体,并配备相应三矢量合成分析软件。传感器在管道底部纵向布设,布设位置见图 4。通过信号输入,抗干扰接头与 TC-4850 监测仪相连。该仪器振动速度监测量程为  $0.001\sim 35.4\text{ cm/s}$ ,该范围能完全覆盖此次爆破试验管道内的振动速度数据。同时,该仪器所监测的爆破振动频率范围为  $1\sim 500\text{ Hz}$ ,涵盖了此次的爆破试验振动频率。

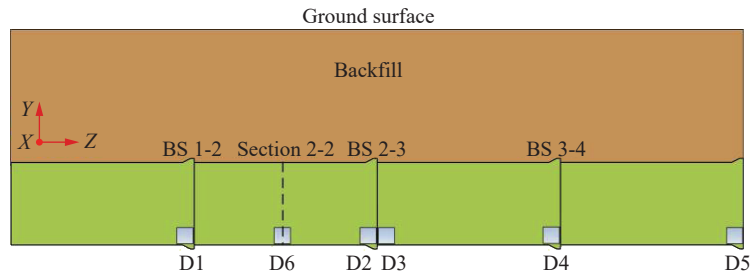


图 4 管道内振动速度监测仪的布设

Fig. 4 Layout of vibration velocity monitors in the pipeline

爆破振动速度监测仪 TC-4850 与动态应变测试系统连接的应变片均布设在混凝土管道内部,两者能记录同一次爆破冲击动力作用下管道的振动速度和动应变的特征。爆破振动监测系统的布设如图 3~5 所示。

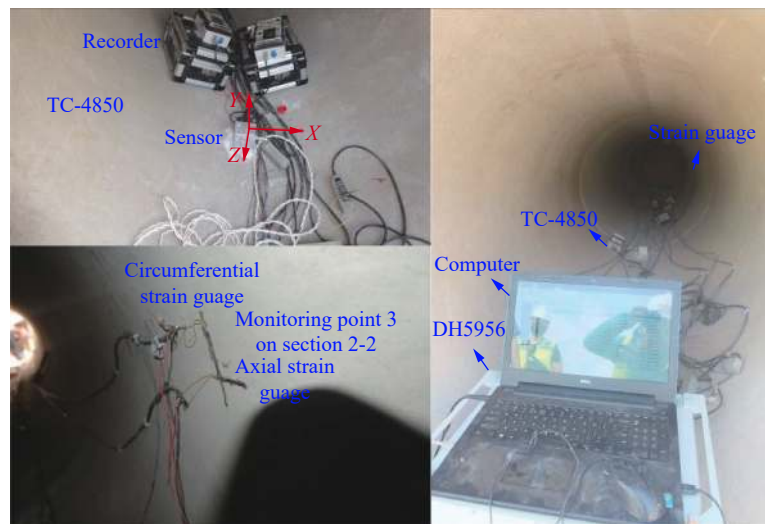


图 5 爆破试验现场管道内监测系统的布设

Fig. 5 Layout of pipeline monitoring system in the experiments

图 3 为爆源与管道相对平面示意图,4 节管道 1~4 按照规范拼接完成后,连接处的承插口分别命名为承插口 1-2、承插口 2-3、承插口 3-4,其中截面 2-2 位于管道 2 的中间。应变测试系统 DH-5956 连接的应变片布设在管道 2 中间截面 2-2 处和承插口 2-3 处。在截面 2-2 布设了 4 处应变监测点,分别位于管道截面的上(顶部)、下(底部)、左(迎爆侧)、右(背爆侧)。每处应变监测点布置沿管道轴向与沿管道环向的 2 个应变片,截面 2-2 共布设 8 个应变片。同理,在承插口 2-3 处布设 2 处应变监测点,位于管道截面 2-3 的下(管底)、右(背爆侧)部。每次试验后,将动态应变测试仪器调零。

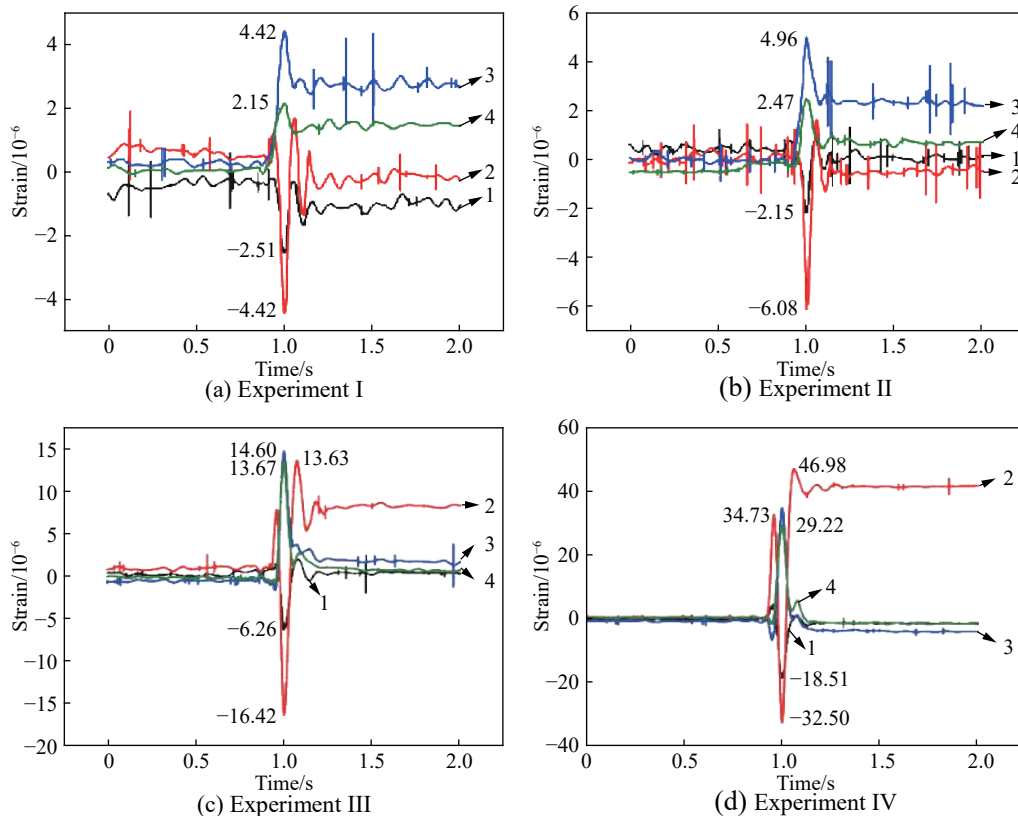
爆破振动速度检测仪共布设 6 台,沿管道纵向,使用石膏稳固连接在管道底部,其位置如图 4 所示,管道内部振动速度监测仪器均布置在承插口截面附近,管道内仪器 D2 与 D3 相邻,在承插口 2-3 两侧。爆破试验现场炸药埋设完毕后,开启爆破振动监测仪和动应变监测系统,由远及近依次起爆 4 个炮孔。

## 2 管道动应变及振动速度特征试验结果分析

### 2.1 管身动应变特征分析

#### 2.1.1 管身环向应变

管道 2 中间截面 2-2 的 4 个应变监测点分别布置在管顶、管肩两侧(迎爆侧与背爆侧)、管底, 每个监测点均布置有环向、轴向应变片, 4 次试验管道应变特征曲线如图 6 所示, 负值代表受压, 正值代表受拉。



1. Monitoring point 1; 2. Monitoring point 2; 3. Monitoring point 3; 4. Monitoring point 4

图 6 4 次试验中截面 2-2 环向应变曲线

Fig. 6 Circumferential strain curves of section 2-2 in four experiments

从图 6 可以看出, 当管道距离爆源较远时(试验 I、II), 管道顶部的环向应变监测点(1 号监测点)及管道底部的环向应变监测点(2 号监测点), 在应力波作用下, 管道均以受压为主, 且 2 次试验中 1 号监测点压应力峰值均小于 2 号监测点环向应变压应力峰值, 即管道顶部环向所受压应力小于管道底部环向所受压应力, 这是由于管道底部先于顶部受到应力波的直接作用, 管道顶部处于背爆侧, 应力波经过土-管道-空气界面的折射反射后强度衰减。

管道顶部和底部环向应变都较小, 应变曲线经历过压应力峰值, 随后有十分微弱的拉压变化, 但拉应变较之压应变要小, 最后 2 个应变曲线拉压振荡随后降低归零, 可能是管道顶部与底部受应力波折射与反射后形成的拉伸或压缩应力波作用及管道受压后弹性应变能的释放所导致的。

当管道距离爆源较近时(试验 III、IV), 管道顶部环向(1 号监测点)仍以受压为主, 但管道底部环向(2 号监测点)以受拉为主, 其首先受到相对较小拉应力, 然后变化为受压达到相对较大峰值, 随后迅速转化为受拉, 最后应变稳定在受拉区域。混凝土动弹性模量为  $40.4 \text{ GPa}$  时<sup>[14]</sup>, 试验 IV 下, 监测点 2 环向受拉应变峰值为  $46.98 \times 10^{-6}$ , 则所受动拉应力为  $1.89 \text{ MPa}$ , 远低于混凝土极限动抗拉强度<sup>[15]</sup>, 但应变曲线稳

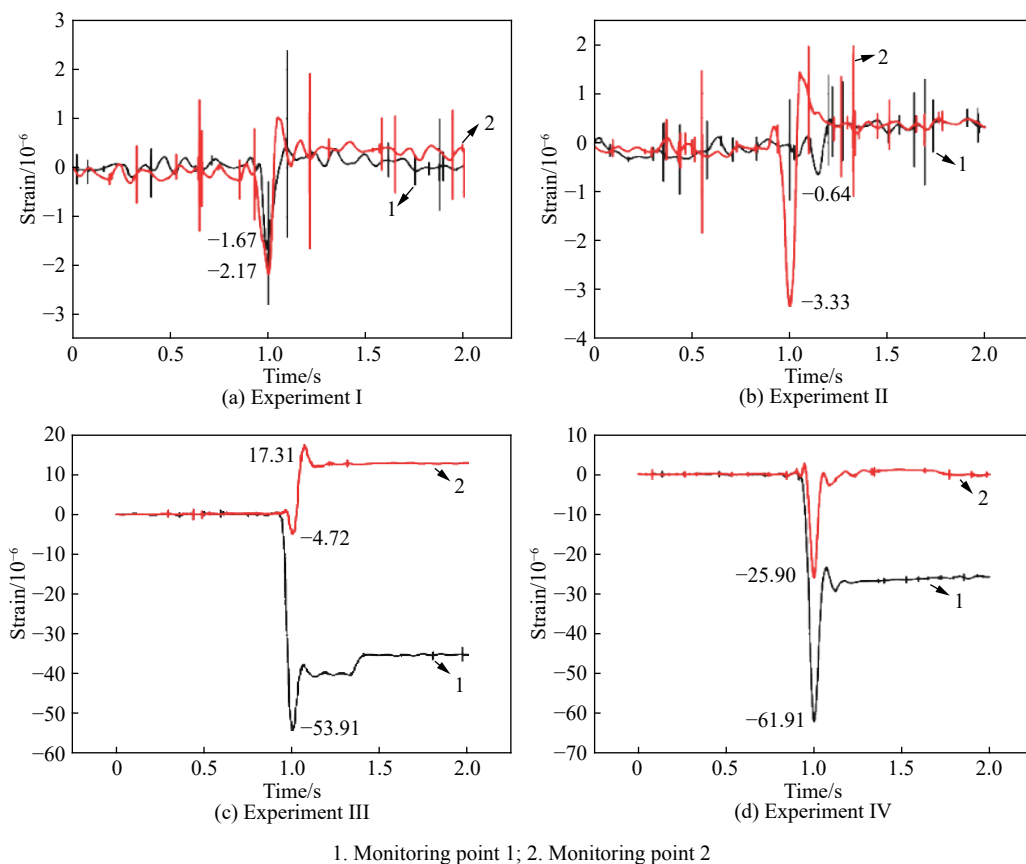
定在受拉区域,可能是因振动导致连接线不稳定所致。但是从 4 次试验可以看出,爆源由远及近时,爆源与管道的相对方位逐渐由左下方转移到正下方,管道底部所受动应力逐渐由受压转换为受拉,同时混凝土材料抗拉强度远小于抗压强度,管道更容易受到破坏。

在 4 次试验中,管道 2 两边管肩处 3、4 号环向应变监测点均以受拉为主,且迎爆侧(2 号监测点)拉应变峰值均大于背爆侧(4 号监测点)拉应变峰值,管肩迎爆侧(3 号监测点)拉应变峰值总是接近管道底部(2 号监测点)压应变峰值,应变峰值随爆心距的减小而增大。

由管道 2 中间截面处 4 个应变监测点环向应变分布曲线来看,管道环向受爆破应力波作用,主要破坏形式为受拉破坏,其中管道底部与左肩迎爆侧所受应力峰值相近,管道顶部与管道管肩背爆侧所受应力峰值相近。

### 2.1.2 管身轴向应变

对截面 2-2 内 4 个应变监测点的轴向应变进行分析,具体应变曲线如图 7 所示。



1. Monitoring point 1; 2. Monitoring point 2

图 7 4 次试验中截面 2-2 轴向应变曲线

Fig. 7 Axial strain curves of section 2-2 in four experiments

因现场 3、4 号监测点轴向应变片松动,导致测量数据失实,只监测到管道顶部和底部轴向应变数据。4 次试验下,管道轴向应变特征以受压为主,随着管道与爆源距离的减小,管道应变峰值增大。

爆心距较大时(试验 I、II),管道底部首先受到压应变,随后应变状态迅速由受压转为受拉,最后曲线振荡归零。当爆源与管道距离由远及近时,应变大小特征逐渐由管底轴向应变大于管顶轴向应变转变为管顶轴向应变大于管底轴向应变。

4 次试验中,管道顶部轴向受力特征均为受压应力,当压应力随爆心距减小而增大的时候,最大压应变为  $61.91 \times 10^{-6}$ ,则其所受动态压应力远小于混凝土抗压强度,且经过观察管道 2 上所监测断面未受到破坏。应变曲线最终未归零,可能是因振动导致连接线不稳定所导致。

### 2.2 管道承插口应变特征分析

爆破试验中, 有两监测点布置在承插口 2-3 截面的附近, 两应变片均布设在管道靠近插口的管道内壁上, 5 号监测点位于管肩背爆侧, 设有环向应变片, 6 号监测点位于管底, 设有轴向应变片。具体应变曲线如图 8 所示。

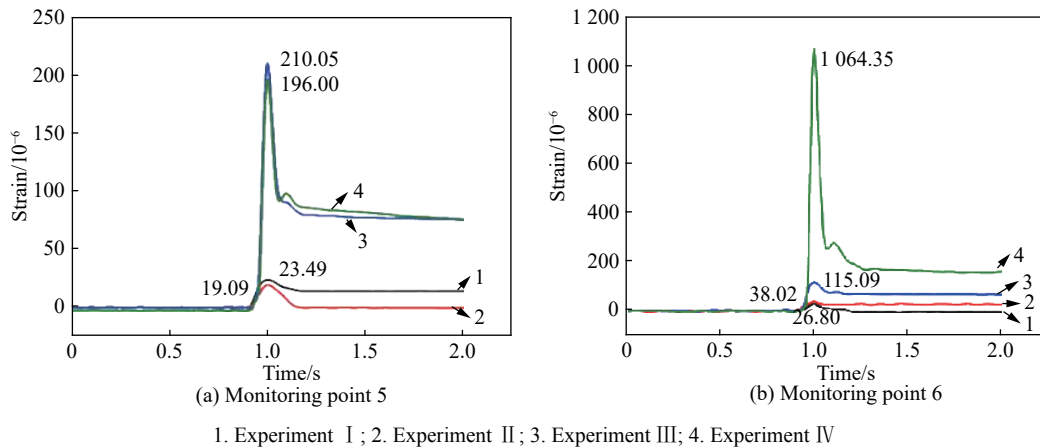


图 8 承插口监测点环向应变曲线  
Fig. 8 Hoop strain curves at monitoring points for bell-and-spigot joints

由图 8 可得, 承插口 2-3 截面附近管道底部轴向应变片与管肩背爆侧环向应变片在应力波作用下均受拉应力作用, 随后应变稳定在受拉区域, 且相同试验下拉应力峰值远大于管道 2 中间截面应变峰值, 爆源较近时, 管道承插口附近有较大残余应变。可能原因是 5、6 号应变片布置在承插口附近区域, 管道之间的连接为非刚性连接, 受爆破作用, 承插口两端管身发生相对位移, 以承插口为支点转动产生较大力矩, 致使承插口处承口与插口处产生较大应力, 该应力远大于混凝土材料的抗拉强度, 动应变监测仪器所记录到的动应变是因承口与插口处的力矩产生的, 而不是管道材料受爆破应力波作用而产生的。试验现场观察到承插口 2-3 处, 插口部分有混凝土掉块、裂缝等现象, 而管身处未观察到可见的裂缝, 这与试验所测得应变结果一致。

### 2.3 管道振动速度分布特征分析

管道内 6 台振动速度监测仪器共记录下 4 次爆破试验中, 管道 X(爆源与管道中心连线的方向)、Y(垂直方向)、Z(管道轴向)3 个方向的振动速度-时程曲线数据, 其中爆破试验 I 中 D2 号仪器测得的振动时程曲线如图 9 所示, 4 次试验详细振动速度数据见表 2。

由图 9 和表 2 可以得出, 管道内振动速度随管道与爆源距离的减小而增大, 4 次试验下, 管道内 X 方向为振动速度最大的方向, 即爆源与管道中心点连线的方向振动速度最大。同一次试验下, 与爆源同一平面上的承插口 2-3 截面附近两侧管道振动速度最大, 并由中间分别向两端递减, 监测点 D2、D3 和 D1、D4 虽各分布在承插口截面 2-3 两侧, 且因两对监测点对称于爆源与承插口 2-3 截面连线方向, 两者所受爆破振动作用后振动速度大小相近, 所测管道振动速度结果较准确。

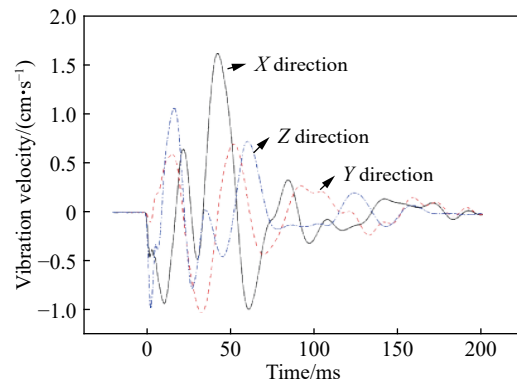


图 9 试验 I 中管道 D2 处振动速度时程曲线  
Fig. 9 Time history curves of vibration velocity measured by sensor D2 in experiment I

表2 4次爆破振动速度数据

Table 2 Vibration velocity data in four experiments

试验	爆破振动监测点	爆破振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )			试验	爆破振动监测点	爆破振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )		
		X方向	Y方向	Z方向			X方向	Y方向	Z方向
I	D1	1.15	0.85	0.73	III	D1	3.56	2.62	1.35
	D2	1.59	0.98	0.68		D2	5.85	2.36	1.89
	D3	1.61	1.06	1.02		D3	5.82	3.60	2.42
	D4	1.26	1.06	1.08		D4	4.23	2.83	1.94
	D5	0.81	0.56	0.72		D5	3.23	2.56	2.84
	D6	1.43	0.92	0.78		D6	5.02	2.57	1.72
II	D1	1.58	0.93	1.07	IV	D1	9.12	6.44	2.28
	D2	2.16	1.32	1.12		D2	14.25	8.56	4.02
	D3	2.29	0.94	0.56		D3	14.46	7.53	3.19
	D4	1.65	1.21	0.61		D4	9.81	5.66	2.21
	D5	0.77	0.56	0.76		D5	9.02	3.12	2.56
	D6	1.89	1.13	1.02		D6	12.56	7.95	3.64

由4次爆破试验管道的振动速度及动应变监测数据可得:

(1) 同一爆源作用下,与爆源直线距离最近的管道质点振动速度最大,并向管道两边递减;管道与爆源距离越近,管道整体爆破振动速度越大。

(2) 当爆心距由远及近时,在爆破振动作用下,带胶圈承插口的混凝土管道顶部、底部环向受力特征逐渐由受压转换为受拉,管肩两侧始终受拉应力作用,且管肩迎爆侧与管道底部所受应力峰值相近,管道顶部与管肩背爆侧所受应力峰值相近,管道管身在4次爆破试验过程中未发生破坏。

(3) 在相同爆源作用下,管道管身及承插口呈现出不同协调响应,即:管道承插口附近区域较管身区域所受爆破有害效应作用大得多,具体表现为与爆源相同距离的承插口处与管道处动应变峰值相差较大,承插口处管身转动动力矩产生的应变远大于管道管身因应力波引起的应变。在试验III以及试验IV时,管道承插口处最大拉应变峰值为 $1.064 \times 10^{-3}$ ,超过混凝土管道极限拉应变<sup>[16]</sup>,管道发生破坏。

通过上述试验可知,承插口连接式管道受爆破作用最易破坏的位置出现在管道与管道之间连接处。所以,分析爆破振动作用下管道的安全稳定性问题时,考虑管道之间的连接处是更加合理的。

### 3 承插式混凝土管道爆破振动安全判据

#### 3.1 基于承插口失效的振动速度安全判据

混凝土给排水管道可以分为2个部分,管身以及连接相邻管身的承插口,本试验所用给排水管道采用的是以橡胶圈为密封材料的柔性接头管道,柔性接口是能承受一定量的轴向线变位和相对变位的管道接口。此次试验中,爆破振动会使柔性接头两侧管身产生相对位移。根据《GB50268—2008 给水排水管道工程施工验收规范》中规定的预(自)应力混凝土管沿曲线安装接口的允许转角,内径为800~1400 mm的管道允许转角为 $1.0^\circ$ <sup>[12]</sup>。当管道偏转角度大于 $1^\circ$ 时,管道可能产生功能性损坏,进而导致管道承插口密封性降低,产生漏水等事故。同样,当爆破振动作用下管道产生的转角大于 $1^\circ$ 时也可能导致管道相应功能性损伤,所以使用此规范中管道偏转角度规范来判定管道受爆破振动承插口是否产生损坏是科学的。

基于所监测的4次试验中管道爆破振动时程曲线数据,对其积分可得到受爆破振动作用时管道的位移-时程曲线。如图10所示,通过积分计算,可得到两相邻仪器之间在同一时间位移相差最大的值,由此可得到截面3个承插口受爆破振动作用产生的角度变化。



根据 3.3 节可知, 爆破振动作用下, 管道 X 方向的振动速度是 3 个振动方向中速度最大的, 则管道沿 X 方向受爆破作用产生的位移也最大, 通过判断管道承插口沿 X 方向弯曲变化情况可知承插口是否在 4 次试验中受到功能性损伤。

由图 10 可以清晰地看出, 4 次爆破试验中, 与爆源同一横截面的管道承插口 2-3 受爆破振动作用的影响最大, 管道的相对位移以及偏转角度最大。如图 11 所示, 管道受爆破振动作用的偏转角度等于承插口 2-3 两旁的管道偏转角度  $\theta_L$ 、 $\theta_R$  之和, 则 4 次试验管道的偏转角度如表 3 所示。

根据 2.2 节图 8(a) 所示, 爆破试验 III 和试验 IV, 承插口 2-3 所在的 5 号监测点所在的管肩背爆侧环向动应变峰值分别为  $1.96 \times 10^{-4}$  和  $2.10 \times 10^{-4}$ , 6 号监测点所在的管底处轴向动应变峰值分别为  $1.15 \times 10^{-4}$  和  $1.064 \times 10^{-3}$ , 其所受动拉应力远大于管道混凝土极限动抗拉强度, 管道承插口处混凝土材料发生破坏。

另一方面, 通过振动速度测试数据进行处理得到的管道偏转角度结果表明: 4 次试验中, 试验 III 和试验 IV 管道承插口 2-3 偏转角大于规范中所规定的管道最大允许转角, 管道失效, 与承插口动应变数据所得出的结论一致。

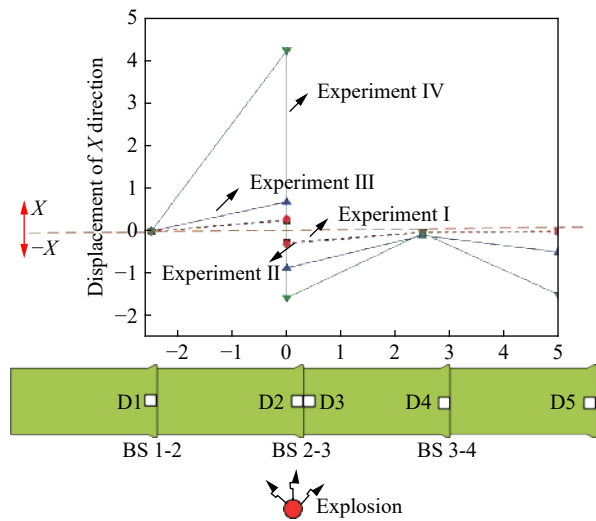


图 10 管道承插口 X 方向的相对位移

Fig. 10 Relative displacement of bell-and-spigot joints in X direction

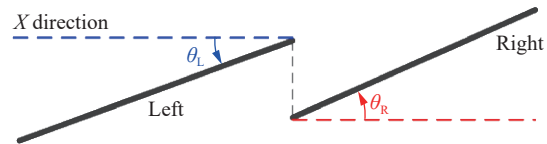


图 11 承插口偏转角示意图

Fig. 11 Deflection angle of bell-and-spigot joints

表 3 4 次试验承插口 2-3 偏转角度

Table 3 Deflection angles of bell-and-spigot joint 2-3 in four experiments

试验	$\theta_L/\text{rad}$	$\theta_R/\text{rad}$	总偏转角/rad	总偏转角/(\text{°})
I	0.005 7	0.005 5	0.011 2	0.64
II	0.006 6	0.006 3	0.012 9	0.74
III	0.015 8	0.017 3	0.033 1	1.90
IV	0.097 1	0.034 6	0.131 7	7.55

当爆源与管道承插口在同一横截面上时, 承插口受到爆源爆炸后应力波作用发生的位移及偏转角较爆源与管身同一横截面时要大。相同条件下, 爆源与承插口同一截面视为最不利位置。通过图 12 将偏转角度与承插口处爆破速度进行拟合, 结合规范中规定的管道最大偏转角度, 可算出此种地质条件下内径为 1 000 mm 的埋地承插口混凝土管道 X 方向最大安全振动速度。

管道 X 方向振动速度峰值与承插口 2-3 累积偏转角度统计关系为:

$$\theta = 0.6 e^{0.18v} \quad (1)$$

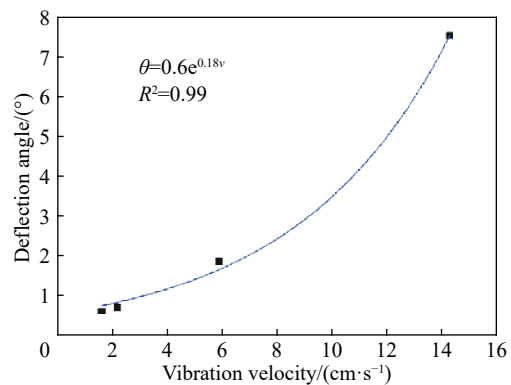


图 12 管道偏转角度与 X 方向振动速度拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve between pipe deflection angle and vibration velocity in X direction

式中:  $\theta$  为承插口最大累积偏转角度, ( $^{\circ}$ );  $v$  为管道  $X$  方向振动速度峰值,  $\text{cm/s}$ 。

此次爆破试验中, 各承插口均受到爆破振动累积作用, 其偏转角度也是管道受各次爆破振动影响累积的结果, 所以管道最大振速方向的单次安全振动速度应小于  $5 \text{ cm/s}$ 。

### 3.2 基于管身破坏的振动速度安全判据

根据 2.1 节管身动应变特征分析结果, 除管道承插口外, 管身受爆破振动作用产生的动力响应也不可忽视。管身轴向主要受动压应力作用, 环向主要受动拉应力作用, 又因混凝土材料抗压强度较大而抗拉强度较小, 则管身受爆破振动作用以受拉破坏为主。

通过建立 D6 号振动速度监测仪所测管道  $X$  方向振动速度峰值与截面 2-2 所测极限拉应变峰值的函数关系, 结合管道材料极限拉应变大小, 可得管道管身受爆破振动作用极限振动速度, 以此可简单便捷地通过管道振动速度的值来判断管道管身混凝土是否受到爆破振动破坏。图 13 为 4 次管道  $X$  方向振动速度与动拉应变拟合曲线。

管道  $X$  方向振动速度峰值与动拉应变峰值  $\varepsilon$  的统计关系为:

$$\varepsilon = 4.69 e^{0.162v} \quad (2)$$

不同强度混凝土材料极限拉应变峰值大小为  $(0.75 \sim 1.15) \times 10^{-6}$ , 即裂缝出现不稳定扩展时对应的极限拉应变值<sup>[15]</sup>。为保证管身混凝土材料在应力波作用下的安全, 管道受爆破振动作用下  $X$  方向最大振动速度为  $19.7 \text{ cm/s}$ 。

对比承插口与管身的失效判据, 承插口 2-3 处在爆破试验 III 中底部轴向应变峰值和管肩背爆侧环向应变峰值均超过  $1.15 \times 10^{-4}$ , 大于混凝土材料极限拉应变峰值, 承插口失效; 管身在 4 次爆破试验中, 最大拉应变峰值均小于  $1.15 \times 10^{-4}$ , 管身能承受管道最大振动速度为  $19.7 \text{ cm/s}$ 。可知同种试验条件下管道承插口较之管身更易受到爆破振动有害效应的影响, 胶圈承插式混凝土管道整体的破坏应以承插口处的失效判据来判定, 管道最大振速方向的安全振动速度应控制在  $5 \text{ cm/s}$  以内。

## 4 结 论

(1) 管道受爆破应力波作用, 管身环向顶部以受压为主, 管身管肩两侧以受拉为主, 管身与爆源距离由远及近时, 管身底部受力状态逐渐由受压转变为受拉, 且管身底部与管肩迎爆侧应力峰值相近, 管身顶部与管肩背爆侧应力峰值相近。轴向上, 管身顶部与底部受力特征主要以受压为主。

(2) 受爆破振动作用, 管道内与爆源同一横截面处的管道振动速度最大, 且呈现出由中间向两边衰减的趋势, 爆源离管道越近, 管道内振动速度越大; 管道内  $X$  方向为振动速度最大的方向, 即爆源与管道中心点连线的方向振动速度最大。

(3) 管道受相同爆破振动作用下, 管道管身与承插口之间出现不协调动力响应特征, 管道承插口处较管身更易受到爆破振动有害效应的破坏, 管道受外力作用下最薄弱的位置为承插口处。

感谢武汉爆破有限公司谢先启院士及其团队相关领导贾永胜、刘昌邦、黄小武、钱坤、王威、岳端阳等对本试验给予的大力支持。

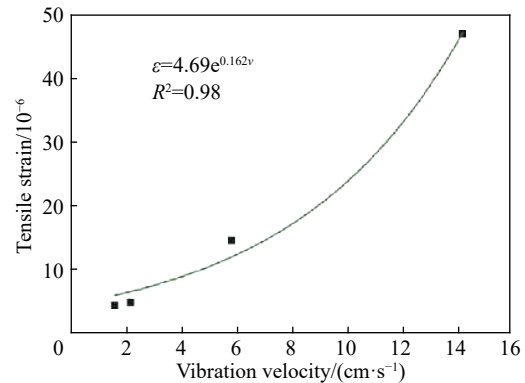


图 13 管道  $X$  方向振动速度峰值与动拉应变峰值拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve between peak vibration velocity and peak dynamic tensile strain in  $X$  direction

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破安全规程: GB6722-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [2] 马维. 地下管道结构爆振效应和冲击破坏行为实验 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(1): 39-46. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080109.  
MA W. Experimental investigation on effects of blast vibration and behaviors of impacting failure of underground pipeline structures [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(1): 39-46. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080109.
- [3] 刘建民, 陈文涛. 爆炸荷载下埋地管道动力响应分析研究 [J]. *工程爆破*, 2008, 14(2): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2008.02.005.  
LIU J M, CHEN W T. Dynamic response study of buried pipeline subjected to blast loads [J]. *Engineering Blasting*, 2008, 14(2): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2008.02.005.
- [4] ZHANG J, ZHANG L, LIANG Z. Buckling failure of a buried pipeline subjected to ground explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 114: 36-47. DOI: 10.1016/j.psep.2017.11.017.
- [5] 何忠明, 蔡军, 王利军, 等. 地铁隧道爆破开挖引起地表位移沉降的数值模拟 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(9): 3496-3502. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.09.045.  
HE Z M, CAI J, WANG L J, et al. Numerical simulation of ground subsidence due to tunnel blasting excavation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(9): 3496-3502. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.09.045.
- [6] 郑爽英, 杨立中. 隧道爆破地震下输气管道动力响应数值试验 [J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(2): 264-271. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.02.008.  
ZHENG S Y, YANG L Z. Numerical experiments of dynamic response of buried gas pipeline under the action of seismic waves induced by tunnel blasting [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(2): 264-271. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.02.008.
- [7] MOKHTARI M, ALAVI NIA A. A parametric study on the mechanical performance of buried X65 steel pipelines under subsurface detonation [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, 15(3): 668-679. DOI: 10.1016/j.acme.2014.12.013.
- [8] SONG K J, LONG Y, JI C, et al. Experimental and numerical studies on the deformation and tearing of X70 pipelines subjected to localized blast loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 107: 156-168. DOI: 10.1016/j.tws.2016.03.010.
- [9] JIANG N, GAO T, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 590-601. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.022.
- [10] 王海涛, 金慧, 贾金青, 等. 地铁隧道钻爆法施工对邻近埋地管道影响的模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3332-3339. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1409.  
WANG H T, JIN H, JIA J Q, et al. Model test study on the influence of subway tunnel drilling and blasting method on adjacent buried pipeline [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3332-3339. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1409.
- [11] 张黎明, 赵明生, 池恩安, 等. 爆破振动对地下管道影响试验及风险预测 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(16): 241-247. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.16.038.  
ZHANG L M, ZHAO M S, CHI E A, et al. Experiments for effect of blasting vibration on underground pipeline and risk prediction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(16): 241-247. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.16.038.
- [12] 混凝土和钢筋混凝土排水管: GB/T11836-2009 [S].
- [13] 给水排水管道工程施工及验收规范: GB50268-2008 [S].
- [14] LUO Q X, BUNGEY J H. Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 1996, 10(4): 237-242. DOI: 10.1016/0950-0618(96)00003-7.
- [15] WU H, ZHANG Q, HUANG F, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1-4): 605-617. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.008.
- [16] 王铁成. 混凝土结构设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 15-22.

(责任编辑 张凌云)