

青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验研究

闫治国^{1,2}, 彭益成¹, 丁文其^{1,2}, 朱合华^{1,2}, 黄 锋¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 纵缝转角刚度、纵缝(环缝)剪切刚度和弯矩传递系数是盾构隧道衬砌结构计算模型中的关键参数, 历来是本领域研究的重点和热点。结合青草沙水源地原水工程, 通过管片接头原型荷载试验, 对上述关键计算参数进行研究。试验结果表明正弯矩作用下接头转角刚度符合双直线模型, 负弯矩作用下转角刚度近似成线性, 而且不同的接头构造情况下纵缝转角刚度值和其变化规律不同。在纵缝和环缝剪切试验中, 管片间的错动随荷载变化过程分为3个阶段, 其中错动主要发生在第二阶段。弯矩传递试验表明弯矩传递系数随着荷载的增大而减小。并且当纵缝转角刚度较大时, 弯矩传递系数较小, 反之亦然。最后结合试验结果, 给出了盾构隧道衬砌结构计算模型关键参数具体取值范围和一些有益的结论, 以供盾构隧道衬砌结构设计计算参考。

关键词: 盾构隧道; 管片接头; 原型试验; 转角刚度; 剪切刚度; 弯矩传递系数

中图分类号: TU451.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)09-1385-06

作者简介: 闫治国(1977-), 博士, 讲师, 主要从事地下建筑结构力学试验及抗火性能方面研究。E-mail: yanzguo@126.com。

Load tests on segment joints of single lining structure of shield tunnel in Qingcaocha Water Conveyance Project

YAN Zhi-guo^{1,2}, PENG Yi-cheng¹, DING Wen-qi^{1,2}, ZHU He-hua^{1,2}, HUANG Feng¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The key parameters for models of lining structure of shield tunnels, such as bending stiffness of radial joints, shear stiffness of radial (circumferential) joints and moment transfer coefficient, have always been the research focus in this field. The above key parameters are studied by means of the prototype load tests on segment joints in Qingcaocha Water Conveyance Project. The test results indicate that under sagging moments the bending stiffness coincides with the bilinear model, and under hogging moments it is similar to the linear model. The bending stiffness of radial joint and its variation law are different from those of various joint structures. According to the results from shear tests the dislocation change process of radial (circumferential) joint can be divided into three stages. The dislocation occurs mainly at the second stage. The results of moment transfer tests indicate that the moment transfer coefficient decreases with the increase of load. The greater the bending stiffness of radial joint is, the less the moment transfer coefficient is, and vice versa. Finally, based on the test results, the value range of the key parameters for the models of lining structure of shield tunnels is put forward. Several beneficial conclusions for the design of lining structure of shield tunnels are drawn.

Key words: shield tunnel; segment joint; prototype test; bending stiffness; shear stiffness; moment transfer coefficient

0 引言

盾构隧道装配式衬砌结构由圆弧形管片通过环向螺栓拼接成环, 再通过纵向螺栓将单个管片环连接成管状结构构成隧道主体。由于环向和纵向接头的存在,

盾构隧道装配式衬砌结构的力学特性较为复杂。目前盾构隧道结构力学基本模型主要有以下4种: 惯用法、

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878149); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0402)

收稿日期: 2010-06-24

修正惯用法、多铰圆环模型和梁-弹簧模型^[1]。

表 1 过江段与岛域、陆域段试件管片尺寸

Table 1 Dimension of specimen of river-cross section and island section mm

区段	试件形式	宽度B	厚度T	外径D	内径d	外弧长L	内弧长l
过江段	A试件块	1500	480	6800	5840	1305	1121
	B试件块	750	480	6800	5840	2627	2256
岛域、陆域段	A试件块	1500	450	6400	5500	1209	1039
	B试件块	750	450	6400	5500	2419	2079

完善。如朱合华等^[2]从卡氏第二定理出发, 给出了梁-弹簧模型的矩阵式; 侯公羽等^[3]对修正惯用法的简化进行修改, 认为管片各个截面处刚度为 EI , 接头部位的刚度为 kEI , 并对折减系数 k 的数值进行确定; 胡志平等^[4]从 Reissner-Mindlin 板单元入手, 提出了平板壳-弹性铰-地基系统模型; 朱伟等^[5]提出了一种新的壳-弹簧设计模型; 苏宗贤等^[6]提出了地层-结构模式下的壳-弹簧-接触计算模型。

在上述盾构管片结构计算模型中, 除惯用法和多铰圆环模型外, 使用其他模型计算时均无一例外地需要确定纵缝和环缝的抗弯或剪切刚度。对于这些重要力学参数, 可以通过工程类比和经验法或通过建立接头刚度计算模型的解析方法确定^[7-9], 但更为直接、有效和可靠的是通过衬砌整环试验、管片接头试验方法确定^[10-13]。文献[10]研究了纵缝受荷载情况下的混凝土应变、钢筋应力、螺栓拉力、纵缝张开量和裂缝开展情况。文献[12]得到了环向接头在正负弯矩作用下的弯矩-相对转角关系曲线。试验结果表明, 接头转角随弯矩增加分为两段线性增加。文献[13]验证了错缝拼装条件下环向接头抗弯刚度较大, 并得到了其取值范围。

本文在前人研究的基础上, 除了对纵缝抗弯力学特性进行深入研究外, 还对环缝、纵缝剪切力学特性和错缝拼装条件下弯矩传递效应进行研究, 得到了关键力学参数的取值范围及其变化规律, 为工程设计和理论分析提供参考。

1 试验概况

1.1 工程背景

青草沙水源地原水工程的目的通过横穿长江口的输水隧道将青草沙水库优质丰富的淡水输送至上海, 供生产生活之用。本工程中的输水隧道是我国首次采用单层衬砌盾构法隧道修建。输水隧道分为岛域、陆域段和过江段。

1.2 试验目的

与一般的盾构法公路隧道不同, 输水隧道不仅承受外部水土压力, 而且在营运时还需承受内部水压的

不少学者在上述基本模型的基础上进行了改进和

反复作用, 其荷载情况更为复杂。再加之本工程是我国首次采用单层衬砌盾构法修建输水隧道, 无类似工程经验可供参考借鉴。因此需开展管片接头原型试验, 对错缝拼装时管片间的弯矩传递分配情况、环缝径向剪切刚度、环缝切向剪切刚度以及纵缝径向剪切刚度、纵缝承受正、负弯矩的受力特性进行研究。

2 试验内容与设备

2.1 试件形式

试件分成岛域、陆域段和过江段三大类。其中每一类管片又分成A试件块和B试件块。表1给出了每一类A, B试件块结构尺寸。而A, B试件块结构如图1所示。除了结构尺寸略有不同外, 过江段与岛域、陆域段纵缝构造也不相同, 如图2所示。A, B试件块可拼装成直接头和错缝夹片形式, 如图3。过江段和岛域、陆域段环向螺栓直径分别为36 mm和40 mm, 机械性能8.8级, 纵向螺栓直径均为30 mm, 机械性能6.8级。

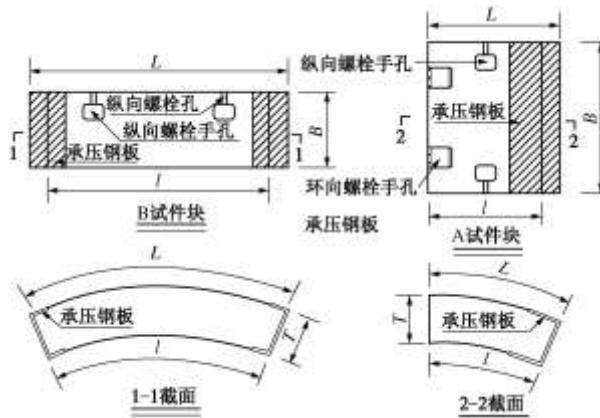


图 1 A, B 试件块尺寸图

Fig. 1 Structural diagrams of specimens A, B

2.2 测点布置

本次试验中的测点主要分成两大类, 一类是内埋测点, 指的是布置于管片受力主筋测点, 主要包括正弦式混凝土应变计、正弦式钢筋计; 另外一类是外置测点, 指的是布置于管片表面的测点, 主要为位移计。错缝夹片试验测点布置如图4所示。直接头试验测点布置与错缝夹片试验中间A试件块的测点布置一致, 因

此不赘述。

表 2 试验部分工况荷载情况

Table 2 Load conditions of several tests

工况名称	工况编号	岛域段			过江段		
		纵向力 (kN m ⁻¹)	横向力 (kN m ⁻¹)	垂向力 (kN m ⁻¹)	纵向力 (kN m ⁻¹)	横向力 (kN m ⁻¹)	垂向力 (kN m ⁻¹)
纵缝转角刚度试验	Z-1	—	1193	-629	—	875	-530
	Z-2	—	1193	-898	—	875	-755
	Z-3	—	495	650	—	345	530
	Z-4	—	495	928	—	345	755
纵缝剪切刚度试验	Z1-1	—	1193	1000	—	—	—
环缝剪切刚度试验	切向C1-4	300	633	—	—	—	—
	径向 C1-1	600	—	333	900	—	450
	C1-2	300	—	408	450	—	295
弯矩传递试验	C2-3	600	495	928	900	345	755
	C2-4	300	495	928	450	345	755

注：纵向力（横向力）为正表示试件受到纵向（横向）压力，垂向力为正（负）表示试件受到正（负）弯矩。

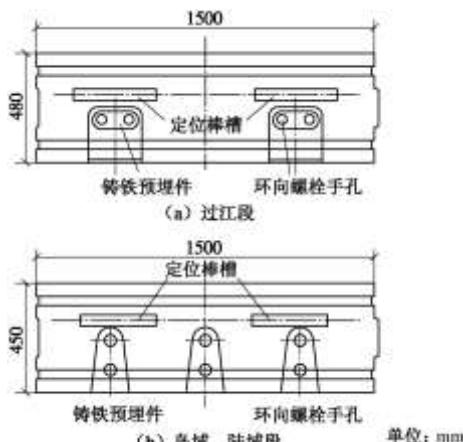


图 2 纵缝结构图

Fig. 2 Structural diagram of radial joint

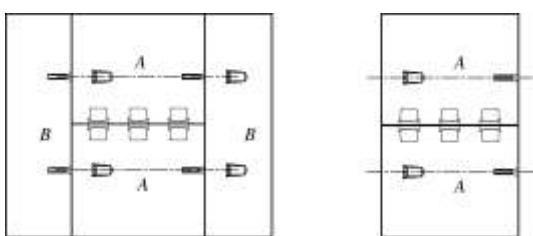
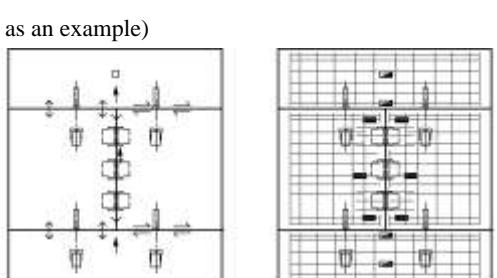


图 3 管片不同拼装形式 (以岛域段为例)

Fig. 3 Different assembly forms of segments (with island section as an example)



图例：— 纵缝张角测点
↑ 挠度变形测点
↓ 横向错动量测点
— 接头主筋应力测点
— 跨中主筋应力测点

图 4 错缝夹片试验测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points in staggered joint tests

2.3 试验工况

试验工况分为纵缝转角刚度试验（包括正负弯矩两种形式），纵缝剪切刚度试验，环缝剪切刚度试验（包括径向和切向两种形式）和弯矩传递试验。各个试验工况荷载情况详见表2。值得一提的是，在剪切试验时先施加横向力（纵向力）为纵缝（环缝）提供约束力，然后施加剪切力；在纵缝转角刚度试验时，荷载施加过程分为3个阶段，每个阶段先施加横向力后施加垂向力，3个阶段分别占总荷载值的40%，30%和30%。

3 试验结果分析

3.1 纵缝转角刚度

图5为岛域段转角刚度试验得到的纵缝弯矩（正弯矩）和张角关系，从图中可以明显看出随着弯矩的增加，纵缝张角分两段线性增加，因此不同阶段的纵缝转角刚度分别可表示为 K_{01} 和 K_{02} 。另外，由于Z-3工况的偏心距小于Z-4工况，证明当偏心距较小时，接头刚度较大，并且出现刚度分界点的弯矩值也较小。

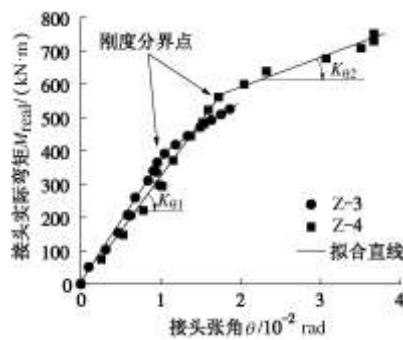


图 5 岛域段弯矩（正弯矩）与纵缝张角关系

Fig. 5 Relationship between sagging moment and opening angle from tests on island section

过江管段具有类似的特点，值得一提的是过江段

试验中的Z-3工况由于荷载值和偏心距均较小,因此试验结果只表现出纵缝张角随弯矩线性增长,未表现出明显的分段线性特征。正弯矩下过江段、岛屿段纵缝刚度值详见表3。

表3 正弯矩下纵缝转角刚度

Table 3 Bending stiffness of radial joint under sagging moment

工况	过江段		岛域段	
	$K_{\theta 1}$	$K_{\theta 2}$	$K_{\theta 1}$	$K_{\theta 2}$
Z-3	18120	—	40406	15170
Z-4	14239	5301	33888	7960

在试验荷载下,纵缝张角与纵缝负弯矩基本呈线性关系,纵缝转角刚度随弯矩的增加略有变化。由图6可知,除岛域段的Z-1工况外,其他3个工况得到的转角刚度约在14300~20500 kN·m/rad之间。

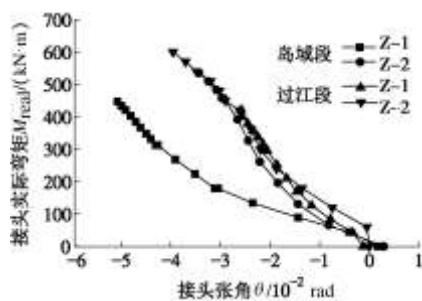


图6 负弯矩与纵缝张角关系

Fig. 6 Relationship between hogging moment and opening angle

3.2 纵缝、环缝剪切刚度

根据试验结果显示,剪切错动过程分为3个阶段(如图7):①弹性密封垫间和混凝土间的静摩擦力起到抵抗外荷载的作用,因此在此阶段剪切错动量基本为零;②当剪切力大于一定时,剪切错动明显产生并随着荷载基本呈线性增加;③由于接缝可错动的间隙已经闭合,螺栓和接缝处凸凹榫起到了抵抗剪切荷载的作用。因此,此阶段错动变形量基本为零。值得一提的是,剪切试验中的剪切错动量在卸载之后基本不可恢复。

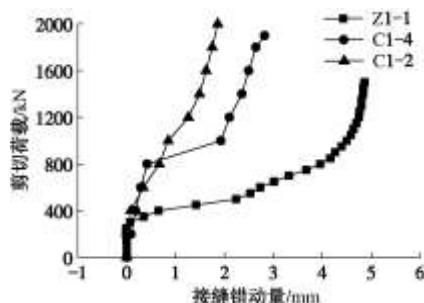


图7 岛域段剪切试验剪切力与错动量关系

Fig. 7 Relationship between shear force and deformation from

tests on island section

当纵向力较大时剪切刚度较大,反映了纵向力对于环缝间剪切错动的约束作用。表4列举了不同纵向力下环缝沿弧长方向每延米径向剪切刚度。此外纵缝沿纵向每延米径向剪切刚度约为200000 kN/m。环缝径向剪切试验中,在剪切力较大的情况时,裂缝首先出现在凹榫下侧并与纵向约成45°角。随着荷载继续增加,凹榫下侧将完全剪切破坏,图8为环缝剪切试验中剪切破坏的B试件块,该试件块的凹榫下部被剪切破坏(图片中右下部分)。



图8 环缝径向剪切试验试件凹榫破坏

Fig. 8 Shear failure of specimen B from radial shear test on circumferential joints

表4 不同纵向力约束下环缝沿弧长方向每延米径向剪切刚度值

Table 4 Values of radial shear stiffness under various longitudinal forces

区段	纵向力/(kN·m)	剪切刚度/(10⁵ kN·m⁻¹)
岛域段	600	3.1
	300	2.6
过江段	900	3.5
	450	2.2

3.3 弯矩传递系数

在A试件块和B试件块上沿纵向每延米施加相同垂向荷载的情况下,A试件块纵缝处钢筋应力明显小于B试件块跨中主筋应力(正应力表示钢筋受拉,反之受压),如图9所示。由此说明了弯矩传递效应的存在。

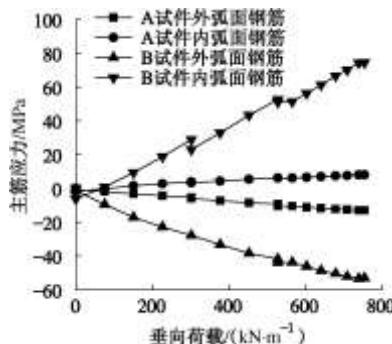


图9 过江管弯矩传递试验A,B试件块主筋应力随荷载变化关系

Fig. 9 Relationship between load and rebar stress of specimens A and B from moment transfer test on cross-river section

从图10中可以看出, 随着纵缝弯矩的增大, 弯矩传递系数呈下降趋势。过江段弯矩传递系数要大于岛域段, 大约在0.5~0.75之间, 这是由于过江段纵缝抗弯刚度小于岛域段。当纵缝抗弯刚度较小时, 承受弯矩时变形较大, 因此需要两侧管片承担更多的弯矩。

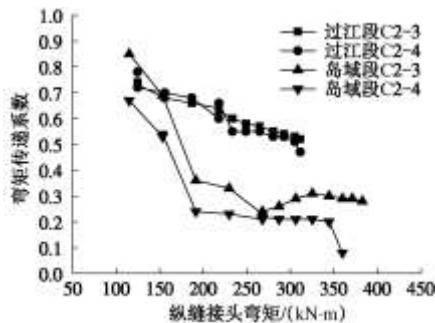


图 10 弯矩传递系数与纵缝弯矩关系图

Fig. 10 Relationship between moment transfer coefficient and moment in radial joint

4 结 论

本文就青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验的情况进行介绍, 并对试验现象和结果进行分析, 得出以下结论:

(1) 在正弯矩作用时, 纵缝转角刚度呈明显的分段线性规律, 可采用双直线模型进行拟合, 根据不同接头构造, 第一阶段纵缝转角刚度约在15000~40000 kN m/rad之间, 第二阶段约在5000~15000 kN m/rad之间。

(2) 在负弯矩作用时, 纵缝转角刚度基本随荷载线性变化, 转角刚度约在14300~20500 kN m/rad之间。

(3) 纵缝在承受正弯矩时, 小偏心情况下的纵缝转角刚度要大于大偏心情况并且纵缝转角刚度分段点的弯矩值较小。在承受负弯矩时, 大小偏心情况下的纵缝转角刚度没有明显区别。

(4) 在纵缝、环缝剪切试验中, 剪切错动和荷载变化关系分为3个阶段, 第一, 第三阶段分别由于静摩擦力和凸凹榫与螺栓作用, 剪切错动基本不变, 第二阶段是剪切错动主要发生的阶段。此外, 剪切错动基本不可恢复。环缝沿弧长方向每延米径向剪切刚度约在200000~400000 kN/m之间, 纵缝沿纵向每延米径向剪切刚度约在200000 kN/m左右。

(5) 弯矩传递系数随着荷载的增大呈下降趋势。当纵缝转角刚度较大时, 弯矩传递系数较小, 反之, 弯矩传递系数较大。

致 谢: 本次试验得到了上海青草沙投资建设发展有限公司、上海市政工程设计研究总院、上海隧道工程轨道交通设计研究院、上海隧道工程股份有限公司和宏润建设集团股份有限公司大力支持和密切配合, 在论文完成之际对上述各家单位和个人表示衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] 日本土木学会, 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (Japanese Civil Engineering Institute. Shield tunnel design codes and explanation[M]. ZHU Wei, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 26~32. (ZHU He-hua, TAO Lu-bin. Beam-spring system model for shield lining analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 26~32. (in Chinese))
- [3] 侯公羽, 杨 悅, 刘 波. 盾构管片接头模型的改进及管片内力的数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 4284~4291. (HOU Gong-yu, YANG Yue, LIU Bo. Improved joint model of shield tunnel segments and numerical calculation of inner forces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4284~4291. (in Chinese))
- [4] 胡志平, 罗丽娟, 蔡志勇. 盾构隧道管片衬砌的平板壳-弹性铰-地基系统模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1403~1408. (HU Zhi-ping, LUO Li-juan, CAI Zhi-yong. Study on flat shell-elastic hinge-foundation model in shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1403~1408. (in Chinese))
- [5] 朱伟, 黄正荣, 梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 940~947. (ZHU Wei, HUANG Zheng-rong, LIANG Jing-hua. Studies on shell-spring design model for segment of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940~947. (in Chinese))
- [6] 苏宗贤, 何 川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 131~136. (SU Zong-xian, HE Chuan. Shell-spring-contact model for shield tunnel segmental lining analysis and its application[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 131~136. (in Chinese))
- [7] 村上博智ほか. シールド工事セダメントのセグメント接手の拳動について[J]. 土木学会論文报告集, 1980, 296:

- 73 - 85. (Murakami Hirotomo. Study on the mechanical characteristic of segment joints in shield tunnel[J]. Paper Reports of Civil Society, 1980, **296**: 73 - 85. (in Japanese))
- [8] 陆同寿, 崔铁军. 圆形衬砌接头刚度模型试验与研究[J]. 地下工程与隧道, 1987, **8**(4): 21 - 23. (LU Tong-shou, CUI Tie-jun. Study and test on the joint stiffness of the circular lining[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1987, **8**(4): 21 - 23. (in Chinese))
- [9] 张厚美, 过 迟, 付德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 309 - 313. (ZHANG Hou-mei, GUO Chi, FU De-ming. A study on stiffness model of circular tunnel prefabricated lining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 309 - 313. (in Chinese))
- [10] 张厚美, 付德明, 过 迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, **39**(6): 28 - 33. (ZHANG Hou-mei, FU De-ming, GUO Chi. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2002, **39**(6): 28 - 33. (in Chinese))
- [11] 张厚美, 叶均良, 过 迟. 盾构隧道管片接头抗弯刚度的经验公式[J]. 现代隧道技术, 2002, **39**(2): 12 - 16. (ZHANG Hou-mei, YE Jun-liang, GUO Chi. Empirical formula for bending stiffness of shield tunnel segment joint[J]. Modern Tunneling Technology, 2002, **39**(2): 12 - 16. (in Chinese))
- [12] 王 哲, 李京爽. 地铁管片环向接头弯曲刚度试验研究[J]. 工业建筑, 2005, **35**(1): 86 - 88. (WANG Zhe, LI Jing-shuang. Experimental research on bending stiffness of circumferential joint shield tunneling segment[J]. Industrial Construction, 2005, **35**(1): 86 - 88. (in Chinese))
- [13] 滕 丽, 吕建中. 通用管片接头荷载试验研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2010, **16**(2): 216 - 220. (TENG Li, LÜ Jian-zhong. Load test on typical segment joints[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2010, **16**(2): 216 - 220. (in Chinese))

第十一届全国土力学及岩土工程学术会议纪要

2011年8月16日至19日,第十一届全国土力学及岩土工程学术会议在甘肃省兰州市胜利召开。此次会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国工程院土木水利与建筑工程学部主办,中国地震局兰州地震研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中铁西北科学研究院有限公司、兰州大学和中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室等五家单位联合承办,另有九家协办单位参与。第十一届土力学及岩土工程学术会议是继天津(1962)、武汉(1966)、杭州(1979)、武汉(1983)、厦门(1987)、上海(1991)、西安(1995)、南京(1999, 360人)、北京(2003, 510人)、重庆(2007, 736人)召开的前十届系列会议之后,第一次与会代表逾千人的我国土力学与岩土工程界的一次学术盛会。

一、会议盛况

第十一届会议自第一号通知发出后,得到国内众多岩土工程界专家、学者、工程技术人员和研究生的热烈响应和有关单位的大力支持。大会共收到投稿论文602篇,会议报告195个。与会代表达1199人,其中,免注册费学生代表361人,志愿者和工作人员113人。本次大会是中国土木工程学会成立近百年来规模最大、与会代表过千人的学术大会,也是甘肃省科学技术领域第一次规模超过千人的专业会议。香港地区代表组团参会并做了大会交流和发言,另有来自美国、德国、奥地利、日本和新加和等国家的学者和华人代表参会。

甘肃省政协副主席栗振亚和省政府副秘书长王志贵出席大会开幕式并致辞。中国土木工程学会秘书长张雁研究员代表主办学会出席了大会开幕式。国际土力学及岩土工程学会主席

Jean-Louis Briaud教授专程应邀出席大会,并做开幕式致辞和大会特邀报告。国际岩石力学学会当选主席冯夏庭研究员出席了大会开幕式并致辞。香港岩土工程学会主席何毅良先生、新加坡岩土工程学会主席方国光教授应邀出席会议并做了大会交流。陈祖煜院士、程国栋院士、郑晓静院士应邀出席大会,并在院士专家论坛做了精彩学术报告和交流。

二、会议筹备与组织工作

自2007年8月,中国地震局兰州地震研究所和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中铁西北科学研究院有限公司三家单位联合争取到第十一届会议的举办权之后,会议的筹备工作得到了三家单位领导的高度重视和大力投入。先后召开了4次筹备工作会议和3次内部协调会议,对会议的筹备和组织工作进行统一部署;大会首次开通了官方网站为会议宣传,并接受网上投稿、注册和预定;先后印发了大会第1、2和3号通知,分别在会议筹备的不同阶段开展宣传;在2008年至2010年间,会议各承办和协办单位的领导和科研人员在国内外不同的学术会议上对2011年兰州会议进行不同形式的宣传。

三、论文评审与刊出

大会共收到投稿论文602篇,经过学会组织专家评审,最终有548篇论文入选论文集光盘,392篇论文分别在《岩土工程学报》、《岩土力学》、《西北地震学报》、《冰川冻土》、《兰州大学学报》和《铁道工程学报》正刊或增刊正式刊出。除各期刊刊出会议论文外,本次会议还制作了论文集光盘(全文)和纸介质论文摘要集(精简版),该论文摘要集含8篇主题报告论文全文以及其他所有论文的首页。

(下转 1404 页)