

# Status and Prospects of Research on Design Technique of Shield Tunnel

Qin Ma\*, Shouchao Jiang, Xian Liu

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai  
Email: [\\*maqin1117@163.com](mailto:maqin1117@163.com)

Received: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2014; revised: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2014; accepted: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

With the arrival of the climax of the development and utilization of underground space, new construction techniques were continuously developed to construct tunnels under more severe conditions. However, present design techniques sometimes cannot appropriately reflect the construction techniques. Traditional design methods were still used, such as uniform rigidity ring model, beam spring model, multi-hinge ring model, etc. On account of the well-balanced progress between construction and design in the shield tunneling method, an innovation of the design technique is required. This paper shows an outline of the design technique of shield tunnel at present and improvements required for design technique.

## Keywords

Shield Tunnel, Segmental Lining, Design Techniques, Research Status

---

# 盾构隧道设计方法研究现状及展望

马 芹\*, 蒋首超, 柳 献

同济大学土木工程学院, 上海  
Email: [\\*maqin1117@163.com](mailto:maqin1117@163.com)

收稿日期: 2014年9月23日; 修回日期: 2014年10月22日; 录用日期: 2014年11月2日

---

\*通讯作者。

## 摘要

随着地下空间开发利用高潮的来临,为了满足在市区等繁华地区以及环境特别苛刻的区域建造隧道的要求,国内外不断开发出新的施工技术,然而,目前盾构隧道的设计仍然采用传统方法,如修正惯用设计法、梁-弹簧模型法、多铰圆环法等。但有些情况下,传统的设计方法不能完全适用于当下的盾构法施工新技术。因此,为了更好的协调盾构技术的设计和施工,需要完善并创新盾构隧道设计方法。本文概括介绍了盾构隧道设计方法的研究现状,并指出仍需进一步完善的方面。

## 关键词

盾构隧道, 管片衬砌, 设计方法, 研究现状

## 1. 引言

在泰晤士河隧道建设过程中,布鲁诺最先提出了隧道建设的盾构施工方法,并成功地将盾构方法运用于该工程。之后,各种新型的施工技术不断发展、施工工艺不断改进,盾构技术得到长足发展,并在地铁、隧道及其他市政公用管道等工程领域得到广泛应用。

近年来,随着人口数量的增长和城市规模的扩张,城市建设者对地下空间的开发日益重视。在城市繁华区域及一些特殊工程的施工过程中,为满足建设需要,工程设计人员有针对性地发展了各种盾构隧道新技术,如双圆盾构法、矩形盾构法、自由断面盾构法、偏心多轴盾构(DPLEX)法、MF盾构法、H&V盾构法、球体盾构法、局部扩径盾构法、机械式盾构对接技术(MSD)、MMST盾构法、ECL盾构工法、子母盾构法等。但是,当前盾构衬砌管片设计多沿用传统的设计方法,无法适应盾构新技术的要求。为了更好的协调盾构隧道的设计与施工,不至于因为设计与施工的矛盾导致设计的隧道衬砌管片或者太保守,造成资源的大量浪费,或者偏不安全,降低隧道使用寿命,引发隧道工程事故,所以就很有必要创新并完善盾构隧道衬砌管片设计方法,从而推动盾构法施工新技术的广泛应用。

## 2. 盾构衬砌管片现状及发展[1]

盾构法施工中,管片作为隧道结构的衬砌主体,直接影响工程的安全、造价及使用。当前,盾构的发展呈现出新的特点,我们应引起足够的重视,以推动先进的盾构工法的实施。

使用材料方面,混凝土、钢材、铸铁、复合材料应用较为广泛,其中,由于混凝土管片耐腐蚀,生产方便、造价低廉,因此,在盾构隧道衬砌结构中,主要采用拼装式钢筋混凝土管片。

截面形状方面,箱形和平板形是最常见的截面形式。箱型管片具有较大的手孔,螺栓连接操作面大,结构自重轻,但容易在外力作用下产生裂缝;平板形管片截面削弱小,抗弯压刚度大,能够抵抗较大的千斤顶推力,另外,手孔小,通风性好。综合比较,平板形管片适用性强,应用范围广。因此,钢筋混凝土平板形管片被广泛应用于隧道衬砌结构中。

管片环的类型多样,可以分为通用型管片、楔形衬砌环以及楔形与直线衬砌环的组合,其中,通用型管片是管片环的发展方向。衬砌环的拼装方式有通缝拼装和错缝拼装两种,国内盾构隧道以错缝拼装最多。衬砌管片接头分环缝接头和纵缝接头,接头形式多样,类型不一。其中,螺栓接头结构应用范围最广。螺栓接头结构分斜螺栓、直螺栓、弯螺栓。其中,斜螺栓大多应用于大型盾构隧道管片,而对于直径较小的盾构隧道,由于管片厚度相对较薄,此类工程多采用弯螺栓或直螺栓。

随着设计水平的提高、施工技术的进步,管片的宽度不断增加,从而使同等长度下环缝数量减少。

这样，隧道的纵向刚度得到加强，施工建设速度加快，隧道渗漏水的可能性降低。较少的管片数量对结构防水和工程造价是有利的，但是，较大的管片尺寸给管片的运输和拼装带来了挑战，降低了隧道建设的施工效率，与盾构施工构件预制、快速拼装的发展趋势相悖。目前，管片的厚度多采用试验方式确定，工程人员往往依据管片整环试验、接头试验等现场实测数据，结合数值分析确定衬砌厚度。管片存在进一步减小厚度的可能，但这与结构的耐久性和施工水平直接相关。

### 3. 衬砌管片设计模型研究现状

#### 3.1. 衬砌管片设计需要面临的问题

管片与接头共同构成隧道衬砌结构，因此，管片的结构型式、拼装方式都会直接影响结构的力学性能。另外，盾构工法同其他工法相比，在开挖方式和支护方式上也存在着显著不同，荷载的作用机制也更为复杂，因此，衬砌管片设计需要面临三个主要问题：衬砌结构本身横向受力模型及纵向受力模型的选取、衬砌管片复杂接头如何模拟、衬砌与周围地层的作用如何考虑。

#### 3.2. 国内外常用的衬砌管片横向设计模型

20世纪，国内外学者即开始了对盾构隧道结构分析方法的研究。为更加简洁地对隧道衬砌结构进行分析，相关研究大多使用简化分析方法，即将管片简化为二维或假三维模型。其中，横向设计方法包括惯用法及其修正方法、多铰圆环法、梁-弹簧模型法[2]，如图1所示。

日本土木工程协会[4]最早提出了惯用设计方法，该方法中，衬砌管片接头被简化忽略，并且假定地层抵抗力呈三角形分布，且抗力最大值出现在水平直径处。此后，该协会又提出了惯用法的修正方法，即采用局部地层弹簧抗力来替代修正惯用法中三角形分布的地层抗力。

衬砌管片中，铰接头形式有自由铰和弹性铰。多铰圆环法的特点是采用铰结构模拟了衬砌管片接头的抗弯效应，但该方法无法模拟环向接头的力学效应，从而不能反映管片真实的力学特性。

Kubo [5]分别采用梁和弹簧来模拟衬砌管片和管片接头，从而建立梁-弹簧模型，通过该模型，衬砌结构的接头效应得到充分考虑。此后，小泉淳和村上博智等[6]综合考虑接头的弯曲刚度和剪切刚度，进一步完善和发展了梁-弹簧模型。

此外，朱合华[7]等人对盾构隧道管片接头部位的力学分析做了深入研究，取得了一系列重要成果。朱合华及其合作者先后提出了梁-接头模型和梁-接头不连续模型，其研究同时发现，全周地层弹簧模型和考虑接头效应的结构设计模型更为合理。

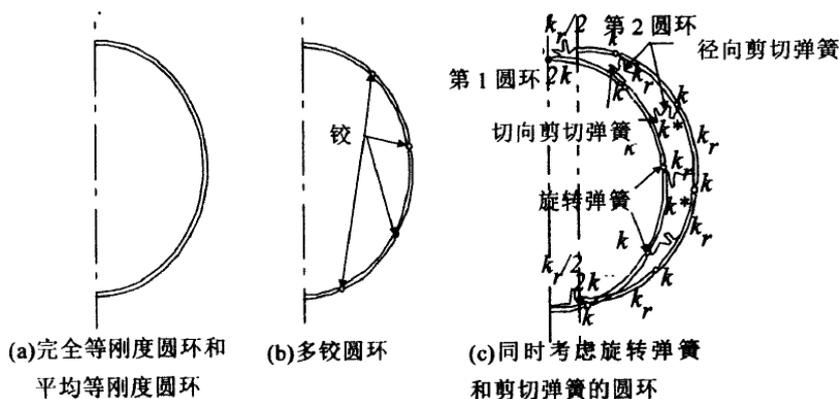


Figure 1. Typical structural calculation methods of shield tunnel segment

图1. 盾构隧道管片典型结构计算方法[3]

在上述横向设计方法中,惯用法无法计入环缝和纵缝的影响;修正惯用法实质为准三维模型,该模型考虑了错缝拼装时管片体对相邻接头的添接作用;多较环法在没有考虑环缝的影响的同时夸大了纵缝的影响;从理论上讲,梁-弹簧模型法较为精确,该方法全面地反映了结构特征。但是对于完全错缝拼装的情况,由于模型自身为平面计算模型,其还不能反映该情况下结构的真实受力状态。

### 3.3. 国内外常用的衬砌管片纵向设计模型

在隧道建设施工和运营使用过程中,过度的不均匀纵向变形经常发生,尤其对于软土隧道,这种现象更为严重和普遍,这对隧道的耐久性和安全性带来了极大隐患,因此,纵向模型研究的重要意义变得日益突出。

日本学者纵向结构理论方面成果显著,等效连续化模型和梁-弹簧模型是其中两个重要代表。其中,纵向梁-弹簧模型由村上博智和小泉淳[8]提出,等效连续化模型由志波由纪夫[9]建立。在纵向梁-弹簧模型中,衬砌环采用梁单元模拟,环向接头和螺栓以及土与隧道之间的作用采用弹簧进行模拟;纵向等效连续化模型中,隧道采用均质的圆环进行等效,并采用相同刚度和结构特性的连续梁模拟纵向接头和管片,再把隧道看作弹性地基上的直梁进行计算。

上述纵向设计方法中,均是采用沿纵向简化为梁的方式,而衬砌结构由众多管片和螺栓连接形成,结构性态极其复杂,因此,这两种纵向设计方法都很难准确反映衬砌环之间的结构性能。

总而言之,上述设计方法均采用平面化模型,而衬砌结构的实际受力往往是复杂的空间三维受力状态,采用平面模型实际上是对结构分析的简化处理,在错缝拼装下,衬砌结构的受力状态无法准确反映,结构的横向受力性能和纵向受力性能的关系也无法正确体现。

## 4. 衬砌管片设计模型的新进展

相比平面化模型,三维有限元模型计算机的计算量大,但是其对结构受力状态的模拟更为真实,这种方法最早出现在小泉淳[10]的相关研究中,其认为壳或实体单元对衬砌结构进行模拟的准确性更高。近年来,随着计算机运算能力的提升以及计算机的普及化,众多学者开始将三维有限元模型应用于整环结构计算,并提出了多种整环管片结构计算模型,使得衬砌管片设计模型取得了许多新进展,分析方法实现二维到三维的重大拓展。

随着衬砌结构精细化三维有限元模型建立,众多学者在衬砌结构力学分析时开始普遍考虑土体荷载对结构的作用,并采用有限元数值模拟和试验验证相结合的方式。为考虑结构-土体的相互作用,鞠杨等[11]选用实体单元进行分析,计入土体和材料的非线性影响,并对模型刚度进行了折减以考虑管片接头的不连续性,且对该数值分析结果进行了试验验证。彭益成,朱合华等[12]通过建立壳-接头模型,准确模拟接头的力学行为,并利用壳-接头模型模拟盾构隧道接头原型试验,数值模拟结果与试验试验实测数据基本吻合,从而证明该模型在模拟衬砌结构力学行为方面具有较高的精度和较强的适用性。

有关学者还对不同的设计模型进行了比较分析,其中,对于通风拼接和错缝拼装两种情况,朱伟等[13]分别采用壳-弹簧模型和梁-弹簧模型进行计算分析,并对两种模型计算结果进行了比较。周海鹰[14]在回顾和分析盾构隧道衬砌结构设计模型及模型中关键参数研究现状的基础上,针对现存的一些问题和不足,在多方面展开了较为深入的研究,并取得了一些理论方法上的进步,并提出了壳-矩阵-弹簧模型,并与梁-弹簧模型进行了一系列的分析比较。

衬砌结构在施工过程中的受力性能也引起了相关学者的研究兴趣。对于无工作井盾构隧道,其施工过程中往往出现负覆土、零覆土和浅覆土三种工况,张旭[15]在研究中分别考虑开挖过程中出现的三种工况,并对隧道上浮问题进行了深入研究,建立了能够反应隧道细部结构的精细化三维有限元模型,据此针对

不同的覆土深度工况，进行了一系列的分析。

部分学者结合具体工程实例对衬砌管片的力学性能进行研究。依据武汉长江隧道，张建刚，何川[16]等提出了三维壳 - 非线性弹簧模型，该模型能够全面分析管片的三维力学特征，更符合管片衬砌结构的实际受力情况。简小辉[17]对盾构隧道结构计算模型进行了研究探讨，提出了一种新的盾构隧道管片环结构计算模型，模型突破土体抗力分布的限制，放松对土体抗力分布范围的假设，以结构力学为基础，同时考虑了管片环接头刚度与盾构隧道整体刚度的差异，并通过工程实例分析对其进行了相关论证研究。曾东洋，何川[18]采用统计学原理对衬砌结构进行分析。作者对我国地铁隧道衬砌结构的内力精细实测数据基础上，并进行相关的统计分析，建立精细化的三维有限元模型，从而对结构在各种复杂作用下的力学性能进行了分析。

综上所述，随着盾构法隧道工程的大规模建设，对其设计模型的研究也不断取得进展，各种新型的设计模型不断提出，但是，这些模型的正确与否有待进一步通过试验、理论、数值分析和工程实践来验证。总之，模型正确与否，取决于模型本身对管片的实际受力和变形状态的数值模拟精度，取决于能否正确确定模型中的关键参数。而由于岩土本身以及衬砌结构复杂的特性，单纯依靠数值模型进行模拟的单一方法还无法全面了解和反映工程的实质。因此，足尺试验、模型试验是验证数值模型正确与否的重要手段。

## 5. 衬砌管片接头模型研究现状及趋势

衬砌结构是由多块管片连接而成，管片接头处的局部刚度对结构的整体受力影响较大。在管片实际连接中，管片纵横缝的接头效应广泛存在，接头处局部刚度变化、环间剪力传递都会对管片的受力变形产生较大影响。因此，接头刚度的研究，在管片设计的占有重要地位。

接头刚度的确定方法一般分为三种，一是试验研究或经验参考；二为接头刚度数值模型；三为理论推导取值。目前大多数重大地下工程都采用试验方法确定，并且对于弯曲刚度有效率和弯矩提高率取值的问题，尚未形成被广泛认可的一致结论。

### 1) 试验研究和经验参考方面

按照试验结果和工程经验，日本土木学会[4]给出了混凝土平板管片  $\eta$  和  $\zeta$  的取值范围。Muid Wood [19]重点研究了接头数量对管片环整体刚度影响，并得到了相应的计算公式，根据该经验公式，接头数量为4块或4块以下较为合理。而 Kashima Y [20]通过对加载试验结果的数据分析，得到隧道刚度有效率合理取值。

针对衬砌管片接头问题，依托于实际工程，国内学者也进行了针对性研究。苏宗贤[21]对南京长江隧道的管片接头进行了抗弯和抗剪试验，从而实测出纵缝接头抗弯刚度(转角  $\theta$ )与轴力  $N$ 、弯矩  $M$  的非线性变化特征以及环缝接头的抗剪特性。在狮子洋隧道管片接头的实体试验中，何川、封坤[22]等得出了弯矩 - 轴力 - 转角关系曲线。

### 2) 接头刚度数值模型方面

Lee, K.M., Hou, X.Y. [23]等假定隧道水平或竖直直径基本一致，提出用弹性铰和匀质圆环刚度修正方法。Lee, K.M., GE, X.W. 等[24]通过有限元分析建立拟合公式，认为软土地区隧道刚度有效率取值应在一定区间，并建议该值在 0.1~0.6 之间，采用弹塑性有限元分析的方式，钟小春，朱伟[25]对接缝转角与弯矩的关系进行了研究。作者通过对广州地铁隧道管片接头进行数值模拟，得到接近双直线形状的关系曲线，从而为管片设计中的关键参数选择提供了依据，实用性高，参考价值大。此外，为研究管片弯曲刚度有效率和弯矩提高率，黄正荣[3]采用壳 - 弹簧模型法，并给出了相应的拟合公式。

### 3) 理论推导取值

对于双轴对称的等分衬砌结构,刘建航、侯学渊[26]建立了弯曲刚度有效率的解析公式,但该公式适用性不强。采用等效方法,张建刚[27]利用“代表性区段”建立接头模型,对于匀质圆环法中的重要参数,其推导给出了相应的取值公式并且建立了这些参数之间的相互关系式。

总体看来,对于盾构隧道接头力学性能的研究,在试验、数值模拟和理论研究方面已经取得一定的进展,但形成的具有普适性的理论成果很少,有待进一步研究,从而形成相关的接头设计理论体系及相应规范,供后续参考。此外,研究过程中材料参数取值存在很大的主观性和经验性,理论分析与数值计算结果还存在一定的差异,从而使上述结果的应用还存在较大争议。同时,考虑高温、高地下水压等特殊环境条件下,管片接头的力学性能以及刚度的取值也值得进一步研究。

## 6. 衬砌管片荷载方面研究[28]

荷载-结构模型和地层-结构模型是隧道结构体系设计的两种主要方法,其中,荷载-结构法概念清晰,受力明确,计算方便,工程应用广,是目前最主要的设计方法,相比之下,地层-结构模型尚处于发展阶段。土压力和水压力是荷载-结构模型的主要作用荷载。土压力计算主要采用太沙基公式或修正法,并且土压力和水压力可以联合计算或分别计算。惯用法及其修正法、梁-弹簧模型法、多铰圆环法除水平地基抗力假定不同外,其他荷载假定均相同。其中,在惯用法及其修正方法中,假定水平地基抗力是三角形均布荷载,而梁-弹簧法和多铰环法则引入地基弹簧。对于水压力,惯用法及其修正法是将水压进行垂直方向和水平方向的分解,并且不考虑水压沿高度方向的变化,梁-弹簧法和多铰环法中,水平水压力随隧道高度增加,水压力指向管片形心,上述主要区别见图2。

## 7. 盾构隧道衬砌管片设计方法的适用范围

施工环境、地质构造及地层岩性不同,盾构施工技术的选择会不同,同理,盾构隧道管片设计方法的选择也会因此不同。目前,对传统衬砌管片设计模型适用范围的研究比较充分,如表1所示,其中,梁-弹簧模型法和修正惯用法是主要设计计算方法。而目前对三维设计模型的研究还处于研发阶段,其适用性及准确性还有待通过试验、数值模拟、理论分析和工程实践进行进一步验证。

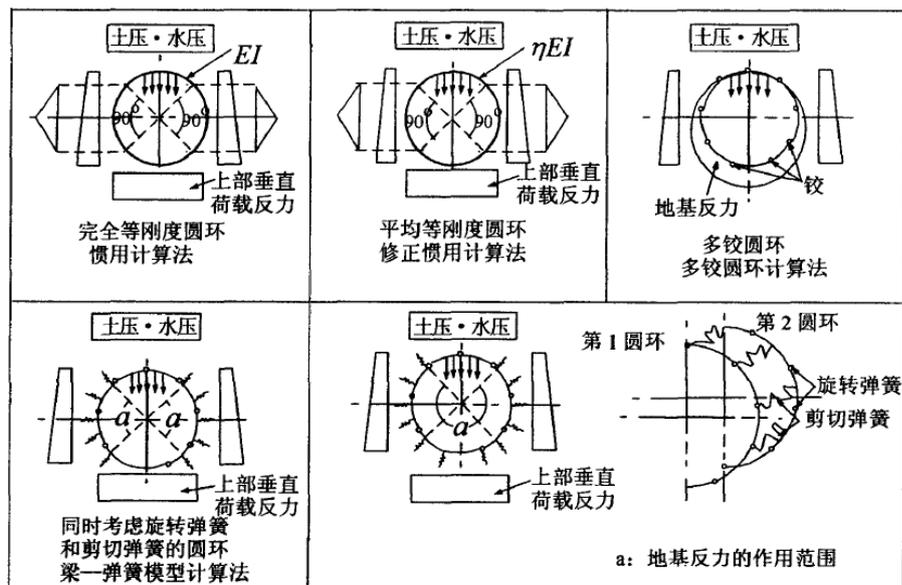


Figure 2. Comparison of four methods used in shield tunnel segment design

图2. 盾构隧道衬砌管片四种设计方法比较[3]

**Table 1.** The serviceability of several methods used in shield tunnel segment design  
**表 1.** 盾构隧道衬砌管片常用设计方法的适用性

常用管片设计方法	优缺点	适用范围
梁-弹簧模型法	最符合实际情况,但计算繁琐、管片间转动弹簧和管片环间剪切弹簧模量的大小对计算结果准确性影响较大	大直径、大埋深的盾构隧道、设计条件较为复杂的中小直径隧道
修正惯用法	计算方法简单,结果也比较符合实际,简单实用	小型隧道
多铰圆环法	本身不稳定,依靠地层反力才稳定,截面计算内力虽最小,但必须设计特殊接头或施工后卸除接头才能使接头起到较的作用,易导致安全问题	围岩强度高、弹性抗力系数高的地层中

## 8. 结语

综上所述,为了适应盾构隧道施工断面多元化、盾构隧道断面尺寸巨型化和微型化、施工新技术不断呈现、盾构施工的科技含量越来越高的发展趋势,不至于由于设计不当导致设计的隧道衬砌管片或者太保守,造成资源的大量浪费,或者偏不安全,降低隧道使用寿命,引发隧道工程事故,需要创新并完善隧道衬砌结构管片设计方法,逐渐形成成形的理论体系,从而为盾构隧道的设计提供理论基础,使得设计的盾构管片更经济、合理、耐久,使得盾构隧道新工法更容易推广应用。

## 参考文献 (References)

- [1] 裴利华 (2009) 盾构隧道管片结构设计研究. *铁道标准设计*, **12**, 86-91.
- [2] Frew, B., Wong, K.F. and Mok, C.K. (2008) A review of shield tunnel lining design. *The Shanghai Yangtze River Tunnel Theory, Design and Construction*, **5**, 37-41.
- [3] 黄正荣 (2007) 基于壳-弹簧模型的盾构衬砌管片受力特性研究. 河海大学, 南京.
- [4] 朱伟译 (2001) 日本土木学会编. 隧道标准规范(盾构篇)及解说. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [5] 久保, 结城 (1968) シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響. *日本土木学会论文集*, **150**, 27-34.
- [6] 村上博智, 小泉淳 (1978) シールドセグメントリングの耐荷機構について. *土木学会论文报告集*, **272**, 103-115.
- [7] 朱合华, 陶履彬 (1998) 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型. *岩土力学*, **2**, 26-32.
- [8] 小泉淳, 村上博智, 西野健三 (1988) ツールドトネルの軸方向特性のモデルイヒについて. *土木学会论文集*, [S.1.]:[sn], 79-84.
- [9] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己等 (1988) シールドトネルの耐震解析に於ける長手方向覆工剛性の評価法. *土木学会论文集*, [S. 1.]:[sn], 319-327.
- [10] Koizumi, A. (1992) On the design method of the shield tunnel lining. *Science & Engineering*, **8**, 125-177.
- [11] 鞠杨, 徐广泉, 毛灵涛, 段庆全, 赵同顺 (2005) 盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究. *工程力学*, **3**, 157-165.
- [12] 彭益成, 丁文其, 朱合华, 赵伟, 金跃郎 (2013) 盾构隧道衬砌结构的壳——接头模型研究. *岩土工程学报*, **10**, 1823-1829.
- [13] 朱伟, 黄正荣, 梁精华 (2006) 盾构衬砌管片的壳——弹簧设计模型研究. *岩土工程学报*, **8**, 940-947.
- [14] 周海鹰 (2011) 盾构隧道衬砌管片结构的力学性能试验及理论研究. 大连理工大学, 大连.
- [15] 张旭 (2013) 考虑土体——隧道共同作用的盾构隧道三维有限元分析. 上海交通大学, 上海.
- [16] 张建刚, 何川, 杨征 (2007) 武汉长江隧道管片衬砌结构受幅宽影响的力学分布特征研究. *岩石力学与工程学报*, **S2**, 26.
- [17] 简小辉 (2011) 盾构隧道管片结构理论分析及工程应用研究. 南昌航空大学, 南昌.
- [18] 曾东洋, 何川 (2005) 地铁盾构隧道管片接头刚度影响因素研究. *铁道学报*, **4**, 90-95.
- [19] Muir Wood, A.M. (1975) The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique*, **25**, 115-127.

- [20] Kashima, Y., Kondo, N. and Inoue, M. (1996) Development and application of the DPLEX shield method: Results of experiments using shield and segment models and application of the method in tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**, 45-50.
- [21] 郭瑞, 何川, 苏宗贤, 彭志忠 (2011) 盾构隧道管片接头抗剪力学性能研究. *现代隧道技术*, **4**, 72-77.
- [22] 封坤, 何川, 苏宗贤 (2011) 南京长江隧道原型管片结构破坏试验研究. *西南交通大学学报*, **4**, 564-571.
- [23] Lee, K.M., Hou, X.Y., Ge, X.W. and Tang, Y. (2001) An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **25**, 365-390.
- [24] Lee, K.M. and Ge, X.W. (2001) The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure. *Canadian Geotechnical Journal*, **38**, 461-483.
- [25] 朱伟, 钟小春, 秦建设 (2006) 盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究. *岩土力学*, **12**, 2154-2158.
- [26] 蒋洪胜, 侯学渊 (2004) 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究. *岩石力学与工程学报*, **9**, 1574-1577.
- [27] 张建刚, 何川 (2013) 盾构隧道衬砌整环力学机理模型. *工程力学*, **7**, 136-141.
- [28] 刘建航, 侯学渊 (1991) 盾构法隧道. 中国铁道出版社, 北京.