

砂性浅覆土超大直径泥水盾构施工中隧道上浮控制

徐耀斌

上海隧道工程有限公司 上海 200232

摘要: 盾构在浅覆土掘进施工中成环隧道上浮控制是盾构法施工中的重点研究内容。针对超大直径盾构机在浅覆土砂性土层中施工中隧道上浮及地面沉降制难题,结合南京建宁西路过江通道隧道工程右线始发浅覆土段盾构施工实际技术控制情况,分析管片上浮控制一般规律,总结超大直径盾构机在砂性浅覆土施工控制技术,为类似盾构法施工提供参考。

关键词: 超大直径盾构; 地面沉降; 隧道上浮

Control of tunnel uplift during the construction of super large diameter slurry shield tunneling in sandy shallow soil

Abstract: Shield tunnel floating control in shallow cover tunneling construction are the key research contents in the construction of shield boring. Aiming at the problems of tunnel floating and ground settlement system in the construction of shallow covered sandy soil by the super-large diameter shield machine, combined with the actual technical control of the shield construction of the shallow covered section of the A2 standard of the Nanjing JianNing West Road Crossing River Passage Tunnel Project, the general laws of pipe segment floating and ground settlement are analyzed, and the construction control technology of the super-large diameter shield machine in the sandy shallow cover soil is summarized, which provides a reference for similar shield construction.

Keywords: Super-large diameter shield; Tunnel floating; Ground settlement

引言

目前,超大直径盾构在城市公路、轨道交通的建设过程中得到广泛的应用。盾构掘进过程中不可避免地会引起地表沉降,尤其是盾构始发阶段,通常隧道顶覆土较浅,盾构施工对土层扰动更为明显,增加了地面沉降及管片上浮地控制难度。盾构施工中的地面沉降和离开盾尾的成环管片上浮问题是盾构法施工面临的重要课题。

对于浅覆土段盾构掘进施工引起的地面沉降及管片上浮规律,许多学者开展了针对性的研究。高洪吉等^[1]人对覆土厚度对地表沉降影响的规律研究显示相同盾构施工参数下隧道上方测点最大沉降和地层损失率随覆土厚度增大而减小,且沉降主要阶段为管片脱出盾尾后。张昭^[2]在对郑州地铁砂性地层盾构长距离掘进技术研究中认为合理的同步注浆参数可有效控制地表沉降,并总结出相应的同步注浆参数。曾学艺等^[3]在针对大直径越江盾构隧道上浮研究中从改善上覆土特性、同步注浆优化、控制掘进参数、管片上浮处理等方面提出了控制措施,并得到有效的应用。潘苗等^[4]在研究天津西站至天津站地下直线工程中对引起管片上浮因素进行了研究,提出同步注浆量和合理的初凝时间可有效控制管片上浮,软土地层中,应严格控制千斤顶油缸压力差,可从力学方面减少管片上浮。

本文依托南京建宁西路过江通道隧道工程 A2 标段右线盾构隧道工程,研究超大直径盾构在浅覆土全断面砂性土层掘进中的地面沉降和隧道上浮规律,并根据实际施工中所采取的技术措施为相似环境下的大直径及超大直径泥水盾构掘进施工提供有益参考。

一、工程概况

建宁西路过江通道隧道土建施工 A2 标段穿越长江隧道右线(上游)盾构段、江南盾构接收井及明挖段土建工程施工。包括:穿越长江隧道右线盾构段、江中废水泵房和变电所及疏散口等土建工程的施工;江南盾构接收井及井后明挖段土建工程、风井和出入口工程(含配套市政设施工程)的施工、洞口变电所、雨水泵房的施工。

A2 标长江隧道右线盾构段,全长 2361.728m,共 1181 环。江北岸上段 503m,江南岸上段 413m,江中段约 1444m。项目采用 1 台 $\Phi 15.07\text{m}$ 泥水气压平衡盾构机施工,盾构隧道管片衬砌内径 13.3m,外径 14.5m,从江北工作井始发,向南下穿长江后在江南工作井完成接收。

始发段及试推进盾构隧道断面内涉及的土层从上至下依次为:② 3d,3 粉砂(稍密)、② 3d,2 粉砂(中密)、② 3d,1 粉砂(密实)。

二、盾构始发及浅覆土段施工参数控制

1. 切口水压控制

盾构始发顶覆土浅,需要严格控制切口水压,切口水压不宜设置太高。切口水压采取水土分算的方式,静止土压力系数取 0.4,主动土压力系数取 0.37。

实际操作中,根据监测信息,作及时调整。

2. 同步注浆控制

浆液的塌落度控制在 $120\pm 20\text{mm}$,具体情况可以根据地面沉降量进行调整。每环理论注浆量为 26.46m^3 ,实际的注浆量按一般充填系数 1.2~1.5 压注。压浆量和压浆点视浆时的压力值和地层变形监测数据而定。施工中对注浆点进行压力、注浆量双参数控制,保证填充效果。

表1 同步浆配合比

组料	砂	粉煤灰	水泥	水
每方拌和量	850kg	300kg	40kg/70kg/100kg	320kg

盾构推进过程中，通过在壳体注浆孔压注不结硬的克泥效材料，可有效支撑壳体段地层变形，防止泥水后窜，减少隧道上浮。

3. 泥水管理：

(1) 始发前新浆拌制

盾构始发后，在加固区内推进，加固区内土体为水泥加固土，不利于调整泥水指标，且加固区推进过程中需要一定粘度的泥浆将水泥土完全携带出舱，防止造成吸口堵塞。因此，始发前需要依靠泥水材料将泥水指标调至不低于18s。

(2) 泥水质量控制

当盾构处于加固区内，泥水指标不宜过高。比重为1.05~1.15g/cm³，粘度为18~20s。当盾构穿越加固区后，则应适当提高泥水指标：比重为不低于1.2g/cm³；粘度不低于20s。特别是浅覆土段始发时，在加固区与非加固区推进时，泥水质量不佳，极易造成泥浆冒顶和开挖面失稳。

为了确保泥水质量，在推进过程中，泥水处理人员对泥水指标每环检测3次，及时调整泥水密度，保证推进的顺利。

4. 盾构姿态控制

加固区内推进，原则上不进行纠偏处理。出加固区后，为有效控制轴线偏差，宜将盾构切口放于低于轴线高程推进。浅覆土段推进时，应确保每环平稳连续推进，减少单次纠偏幅度和停机时间。推进速度宜控制在25mm/min~30mm/min。

5. 其它措施

(1) 本工程管片均为剪力销环，并且在始发前几环管片内弧面设置了钢板预埋件，在管片脱出盾尾前对管片环、块之间预埋件用钢板焊接连接，同时对脱出盾尾的管片螺栓及时复紧。

(2) 在隧道内采取压重措施，每环推进前，保证喂片机上有1环管片的储量。在1#车架与盾尾之间制作有压重平台（配重40t）。



图1 安装压重平台

(3) 根据管片脱出盾尾的上浮情况，利用管片增开注浆孔，多角度对管片及时进行二次注浆，以达到充分充填

壁后间隙并稳定管片的作用。

(4) 地面监测：浅覆土段施工时，尽可能多布设深层监测点，以深层监测点的沉降情况作为参数调整依据。地表监测点每隔9环布设一组断面点，每个断面共布设13个监测点，沿轴线对称分布，与隧道轴线距离分别为3m、4m、4m、4m、5m、10m。浅覆土段地面较为完整的监测断面为R2、R12、R22、R47（见下图），覆土深度约11.57m~17.72m。



图2 始发浅覆土段地面沉降测点布置图

三、隧道上浮情况及分析

1. 浅覆土段隧道总体上浮与同步注浆情况

始发浅覆土段，成环管片在脱出盾尾后，各环累计上最大上浮量范围为6mm~31mm。始发浅覆土段前20环（顶覆土11.57m~14m），始发洞门封堵完成不久，前几环盾尾注浆量较多，管片上浮量最大为20mm；随着充填系数降低至1.2~1.3，管片脱出盾尾后出现明显的上浮，最大达到31mm。始发浅覆土段后30环（顶覆土14m~18m），同步注浆充填系数为1.2~1.5，当充填系数提高时，对应脱出盾尾的管片上浮量明显较小，最小为6mm；当充填系减小时，对应脱出盾尾的管片上浮量会增加，最大为30mm。

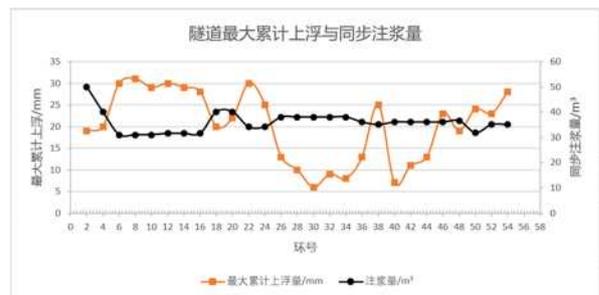


图3 始发段管片累计上浮与同步注浆量

2. 隧道上浮量与同步浆中水泥掺量分析

(1) 同步浆中水泥掺量为100kg（每方同步浆）时隧道累计上浮量

表2 同步注浆量约为31方时部分管片上浮量统计（顶覆土约13m）

环号	累计上浮量 /mm					
	第1d 测量	第2d 测量	第3d 测量	第4d 测量	第5d 测量	第6d 测量
11	13	19	23	24	25	27

12	14	22	30	30	30	29
13	8	18	26	27	27	31
14	23	25	23	27	29	29
15	21	25	25	26	29	29

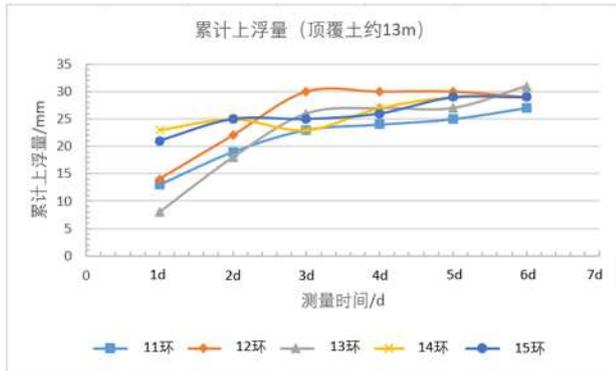


图 4 11 环~15 环管片脱出盾尾后上浮量

表 3 同步注浆量 38~40 方时部分管片上浮量统计 (顶覆土约 13.3~14.4m)

环号	累计上浮量/mm					
	第 1d 测量量	第 2d 测量量	第 3d 测量量	第 4d 测量量	第 5d 测量量	第 6d 测量量
19	10	20	23	22	21	21
20	3	15	20	21	21	22
21	2	12	18	23	26	26
23	6	11	20	24	25	24
24	0	20	25	26	26	25
25	0	15	19	21	21	23

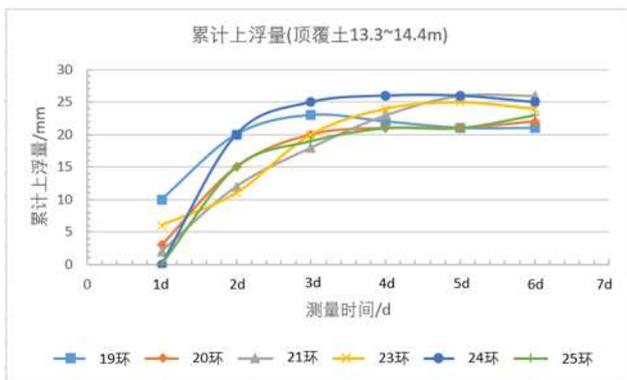


图 5 19 环~25 环管片脱出盾尾后上浮量

11 环~15 环盾尾同步注浆充填系数在 1.1 和 1.2 之间,在管片脱出盾尾的第 1d 最大上浮量就达到 23mm,在脱出盾尾的第 6d 最大上浮量为 31mm。尽管同步浆中水泥掺量较高,但在浅覆土土层中,充填系数较低仍会导致管片上浮量相对较高。

19 环~25 环同步浆中水泥掺量仍为 100kg/方,但是充填系数为 1.4~1.5。管片在脱出盾尾第 1d 上浮量为 0~10mm,在第 4d 或第 5d 累计上浮量达到 24mm~26mm 后趋于稳定。表明较高的同步浆注浆充填系数能有效控制隧道上浮。

(2) 同步浆中水泥掺量为 70kg (每方同步浆) 时隧

道累计上浮量

表 4 同步注浆量 38 方时部分管片上浮量统计 (顶覆土约 15m)

环号	累计上浮量/mm				
	第 1d 测量量	第 2d 测量量	第 4d 测量量	第 6d 测量量	第 7d 测量量
33	3	5	4	5	5
35	3	10	10	22	22
36	0	12	14	13	13
37	3	20	23	24	25

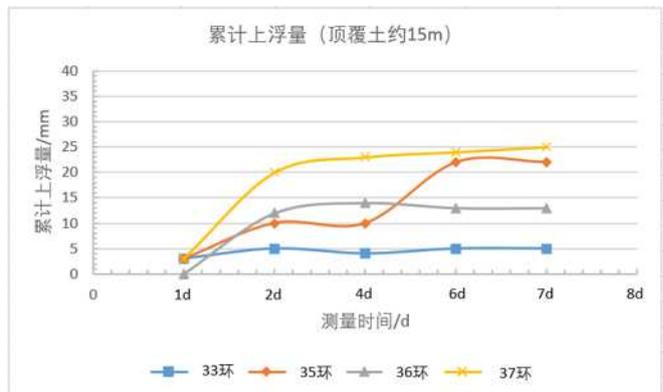


图 6 33 环~37 环管片脱出盾尾后上浮量

表 5: 同步注浆量约 34 方时部分管片上浮量统计 (顶覆土 15.53m)

环号	累计上浮量/mm					
	第 1d 测量量	第 2d 测量量	第 3d 测量量	第 4d 测量量	第 5d 测量量	第 6d 测量量
39	18	22	34	35	36	35

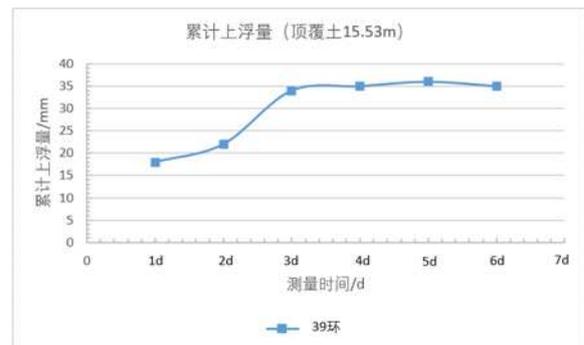


图 7 39 环管片脱出盾尾后上浮量

33 环~37 环同步浆水泥掺量为 70kg/方,充填系数约为 1.4。管片脱出盾尾第 1d 的上浮量为 0~3mm,第 6d~7d 累计上浮量达到最大 (最大 25mm),并逐渐稳定。显然在浅覆土环境下,同步注浆中水泥掺量减少,同时注浆充填系数较高,仍能有效控制隧道上浮。

39 环施工中同步注浆充填系数为 1.28,水泥掺量仍为 70kg/方,但管片累计上浮量在脱出盾尾第 5d 达到最大值 36mm,显然在同步注浆水泥掺量一定条件下,充填系数的降低使控制隧道上浮的效果下降。

(3) 同步浆中水泥掺量为 40kg (每方同步浆) 时隧道累计上浮量

表 6 同步注浆量约 36.5 方时部分管片上浮量统计 (顶覆土 16.4~17.5m)

环号	累计上浮量 /mm					
	第1d测 量	第2d测 量	第3d测 量	第4d测 量	第5d测 量	第6d测 量
41	6	5	6	6	5	6
43	9	9	16	16	16	16
44	0	2	13	12	12	13

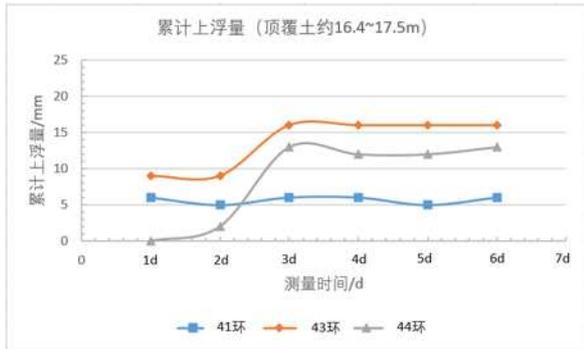


图 8 41环~44环管片脱出盾尾后上浮量
表 7 同步注浆量约 35 方时部分管片上浮量统计 (顶覆土约 18.5m)

环号	累计上浮量 /mm					
	第1d测 量	第2d测 量	第3d测 量	第4d测 量	第5d测 量	第6d测 量
52	4	18	24	23	22	23
53	0	20	25	24	22	23
54	0	23	28	28	27	28

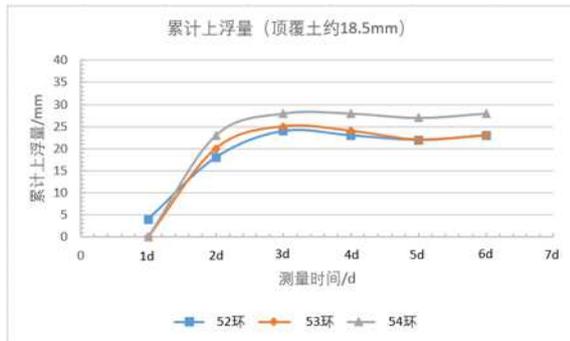


图 9 52环~54环管片脱出盾尾后上浮量

41环~44环同步注浆水泥掺量为 40kg/方，充填系数约为 1.38，管片脱出盾尾后的最大上浮量为 6~16mm；52环~54环，同步注浆充填系数约为 1.32，管片在脱出盾尾后最大累计上浮量为 23~28mm。显然在相同同步浆水泥掺量条件下，注浆量的变化仍能明显影响隧道上浮。同时，随着隧道顶覆土变厚，注浆充填系数降低（不低于 1.3）、水泥掺量适当降低，隧道上浮仍能得到较好地控制。

(4) 管片上浮分析

盾构在浅覆土砂性土层中掘进施工中，盾尾同步注浆对控制管片上浮起着至关重要的作用。根据南京建宁西路过江通道 A2 标段浅覆土段实际施工情况可知，在覆土较浅的环境下，可适当增加同步浆中的水泥掺量，并提高每环的注浆量，可有效控制隧道上浮。同时，水泥掺量不能太高，否则会引起注浆管路经常性的堵塞，影响施工进度，并增加成本。随着顶覆土的增加，注浆量和水泥掺量可逐步适当降低。

四、地面沉降分析

1. 监测断面 R2 (+2 环) 地面沉降分析

R2 监测断面位于盾构始发加固区，隧道顶覆土约 12m。盾构机穿越期间及穿越后的监测断面测点竖向位移总体呈隆起趋势，在盾构机离开监测点 10 环左右监测点累计隆起达到最大值 7.32mm，而后趋于稳定。盾构机当日推进环号所测得的 R2 断面沉降数据曲线图如下：



图 10 R2 断面点地表竖向位移曲线图

2. 监测断面 R12 (+12 环) 地面沉降分析

R12 监测断面隧道顶覆土约 13m，盾构机穿越期间及穿越后的监测断面测点竖向位移总体呈沉降趋势。当盾构机切口到达测点下方时，轴线点累计沉降为 -0.74mm，盾构通过后的第 8d 达到最大累计沉降为 -17.39mm，而后小幅隆起并逐渐趋于稳定。盾构机当日推进环号所测得的 R12 断面沉降数据曲线图入下：

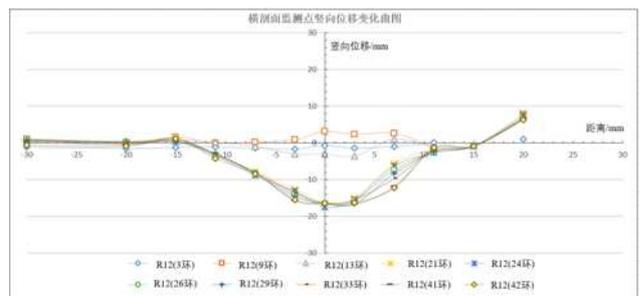


图 11 R12 断面点地表竖向位移曲线图

3. 监测断面 R22 (+22 环) 地面沉降分析

R22 监测断面隧道顶覆土约 14m，盾构机穿越期间及穿越后的监测断面测点竖向位移总体呈沉降趋势。当盾构机切口到达测点下方时，轴线点累计沉降已达 -1.54mm，盾构通过后的第 14d 达到最大累计沉降为 -20.62mm，而后沉降逐渐趋于稳定。盾构机当日推进环号所测得的 R22 断面沉降数据曲线图入下：

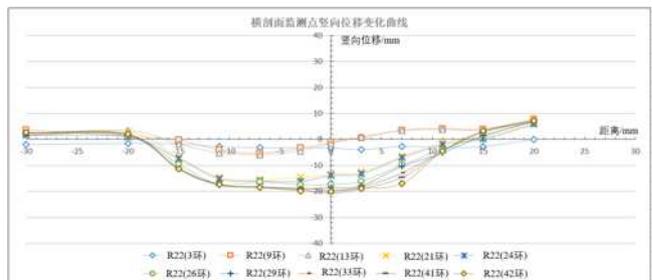


图 12 R22 断面点地表竖向位移曲线图

4. 监测断面 R47 (+47 环) 地面沉降分析

R47 监测断面隧道顶覆土约 17m，盾构机穿越期间及

穿越后的监测断面测点竖向位移总体呈沉降趋势。当盾构机切口到达测点下方时, 轴线点累计沉降为 -1.08mm, 盾构通过后的第 12d 达到最大累计沉降为 -15.46mm, 而后小幅隆起并逐渐趋于稳定。盾构机当日推进环号所测得的

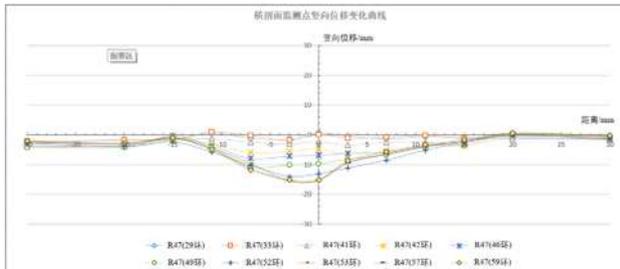


图 13 盾构机推进当日环号所测得的 R47 断面点地表竖向位移曲线图

5. 对地面沉降的分析

根据上述各监测断面地面沉降数据可知, 加固区的监测断面 R2 总体为隆起趋势, 分析认为与顶覆土较浅及盾尾注浆量较大有关; 而加固区外的 R12、R22 和 R47 断面总体为沉降趋势, 且沉降量与盾尾同步注浆呈负相关。

盾构掘进过程中, 势必对周围土层产生影响, 同时盾构掘进过程中由于开挖直径大于盾构机及隧道直径而形成的建筑空隙, 势必引起地面沉降。本工程始发段为砂性土层, 由于砂性土层孔隙比大、强度低、稳定时间长, 在动力作用下易发生流变、触变, 盾构机刀盘到达前, 地面就收到扰动而引发沉降, 盾构机通过后则需要经过较长时间地面沉降才能稳定下来。分析认为, 在砂性土层施工中, 严格控制切口水压, 根据盾构切口到达前的地面沉降数据, 合理调整气泡仓压力, 确保正面稳定; 盾构掘进过程中要及时压注克泥效, 控制背部沉降; 严格控制盾尾同步注浆, 根据施工实际情况合理选择同步浆配合比, 及时足量地压

注, 必要时, 进行二次注浆, 以达到控制地面沉降地目的。

五、结论

针对南京建宁西路过江通道隧道工程 A2 标右线浅覆土段砂性土层盾构施工中隧道上浮控制研究分析认为:

(1) 盾尾同步注浆量与管片上浮量存在明显的负相关性, 说明合理的同步注浆控制, 能有效控制管片上浮。在浅覆土段可适当提高同步浆液中的水泥掺量, 注浆充填系数不低于 1.4; 随着覆土增加, 水泥掺量和充填系数可逐步降低。

(2) 浅覆土段砂性土层极易受到盾构掘进地扰动, 盾构通过后土层需要较长时间稳定, 注浆工艺是影响地面沉降的重要因素; 盾构掘进过程中需要合理控制切口水压, 同时通过采用合理配比的同步浆液、同步注浆量, 及时压注克泥效和二次注浆, 根据地面沉降监测数据, 及时调整盾构掘进参数, 能有效控制地面沉降。

参考文献:

- [1] 高洪吉, 谢文达, 孙正阳, 孙伟, 杨志勇. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究. 科学技术与工程, 2020, 20 (29): 12143-12149.
 - [2] 张昭. 郑州地铁砂性地层盾构长距离掘进技术研究. 隧道建设, 2017, 37 (7): 851-856.
 - [3] 曾学艺, 梁禹, 李科, 阳军生. 浅覆土大直径越江盾构隧道施工阶段管片上浮分析及控制措施研究. 隧道建筑, 2017, (5): 71-75.
 - [4] 潘茁, 付秀勇, 江华. 大直径泥水盾构穿越海河管片上浮控制问题研究. 市政技术 MET, 2011, 29: 207-209.
- 作者简介: 徐耀斌, 1979 年生, 男, 工程师, 大学本科, 主要从事地下工程与隧道施工和设备管理工作。