

Structure Monitoring for Electric Power Cross-River Shield Tunnel with Super High Water Pressure

Yuhua Qian¹, Yong Chen², Liang Liu², Xuezheng Liu³

¹Jiangsu Power Transmission & Transformation Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

³Tongji University, Shanghai

Email: dyfgsqyh@163.com

Received: Feb. 21st, 2019; accepted: Mar. 6th, 2019; published: Mar. 13th, 2019

Abstract

Considering the complex stratum, high water pressure and large section in the Sutong GIL power gallery project, a structure health monitoring and safety assessment method is adopted for electric power cross-river shield tunnel. According to the characteristics of the structure mechanical behavior of the electric power cross-river shield tunnel, the earth and water pressure, reinforcement stress, bolt axial force, joint splaying amount and tunnel settlement are monitored, the reinforcement stress, joint splaying amount and bolt axial force are taken as safety classification control values and an evaluation criterion with 4 levels is proposed.

Keywords

High Water Pressure, Shield Tunnel, Complex Stratum, Gil Power Gallery, Structure Health Monitoring

超高水压电力越江盾构隧道结构监测

钱玉华¹, 陈 勇², 刘 亮², 刘学增³

¹江苏省送变电有限公司, 江苏 南京

²国网江苏省电力工程咨询有限公司, 江苏 南京

³同济大学, 上海

Email: dyfgsqyh@163.com

收稿日期: 2019年2月21日; 录用日期: 2019年3月6日; 发布日期: 2019年3月13日

摘要

针对特高压GIL综合管廊工程地层分布复杂、外部水压力高、隧道断面尺寸大等特点,提出了一种适用于电力越江盾构隧道的结构健康监测方案及安全评价标准。根据电力越江盾构隧道结构受力的特点,对水土压力、钢筋应力、螺栓轴力、接缝张开量、隧道沉降等进行监测,取钢筋应力、接缝张开和螺栓轴力为安全分级控制值,制定了4级评价标准。

关键词

超大水压, 盾构隧道, 复杂地层, GIL管廊, 结构健康监测

Copyright © 2019 by author(s) 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

1. 前言

近年来,随着国家政策的大力支持,综合管廊工程的建设得到了蓬勃发展,而盾构法隧道以其施工速度快,环境适应性高,对周围建筑物影响小,施工方便等优点[1][2]逐渐成为管廊工程穿越各类水域的主流方案。

以往对于盾构法隧道设计人员关注的通常只是施工和运行期的结构受力变形问题[3][4][5][6],而对如何建立水下大直径盾构隧道结构健康监测系统及科学系统的水下大直径盾构隧道健康状况评价方法研究不足[7]-[12]。

鉴于上述现状,本文拟依托苏通 GIL 综合管廊隧道工程,分析影响运维阶段超大水压大直径盾构隧道安全的各项因素,为进一步建立特高压电力盾构隧道结构安全性评价指标体系与评价方法提供依据,为制定合理、主动、预防性的养护措施提供技术支持,从而有效降低盾构隧道全寿命期的运营维护成本,最大限度延长盾构隧道的使用年限。

2. 工程概况

苏通 GIL 综合管廊工程起于南岸(苏州)引接站,止于北岸(南通)引接站(如图 1),越江段全长逾 5.5 km,采用水下盾构法修建,盾构机直径达 12.1 m,是典型的大直径、长距离过江隧道之一,也是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离 GIL 创新工程。该工程是华东特高压交流环网合环运行的“咽喉要道”和控制性工程,建成后,将形成华东特高压受端环网,大大提高华东地区接受区外电的能力,对促进经济社会与生态环境和谐发展具有重要意义。同时,苏通 GIL 综合管廊工程是特高压输电领域的重大技术创新,为特高压、超高压输电提供了新的方向,也将进一步提高国内电工装备制造水平,持续提升我国在世界电网技术和电工装备制造领域的影响力和竞争力。

作为世界上首个特高压 GIL 综合管廊工程,主要工程特点如下所述:

- 1) 越江盾构段全长约 5.5 km,采用管片拼装式单层衬砌,内径 10.5 m,外径 11.6 m,隧道截面如图 2 所示,是典型的长距离、大直径水下盾构隧道工程;
- 2) 隧道主要穿越地层为粉细砂、细砂、中粗砂,渗透系数大,属强透水层,含水量丰富,局部切入

粉质黏土混粉土、粉土层，总体上沿线土层相对软弱，分布具有一定差异性；

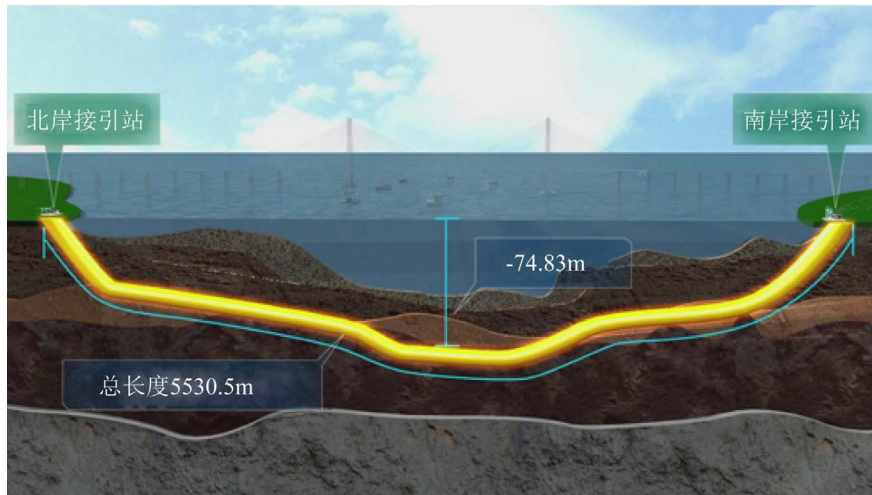


Figure 1. Schematic diagram of the shield tunnel

图 1. 盾构隧道示意图

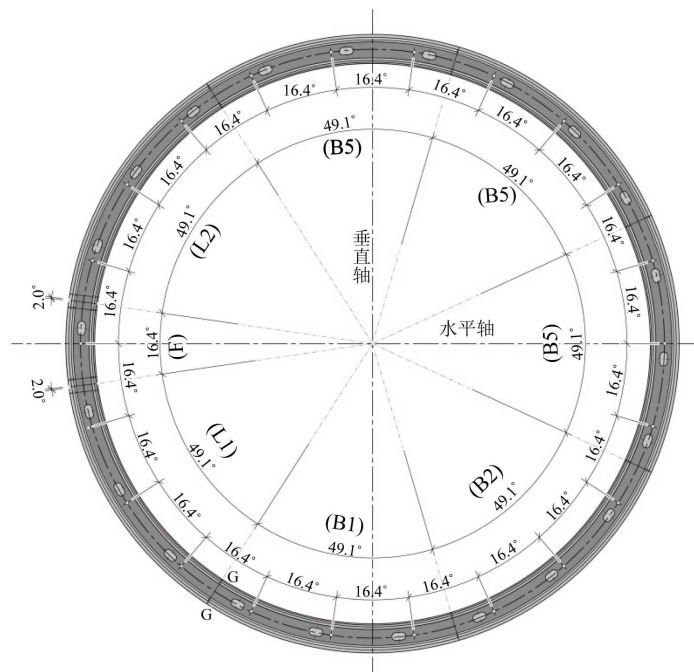


Figure 2. Typical section of the shield tunnel

图 2. 盾构隧道典型截面

3) 越江段最大水压力 0.8 MPa，全线水压力逾 0.6 MPa 的长度达 1.6 km 以上，为目前国内管廊隧道之最，具有显著的高水压特点；

4) 受两岸长江大堤、江中段高压及平面线形影响，纵断面坡度大、且多次变坡，两侧岸坡段及江中深槽过渡段坡度最大，高达 5%；

5) 隧道地处长江入海口，潮流强劲，潮差极大，水位受潮汐影响呈周期性涨落，在径流和潮汐反复交替作用下，深泓摆动频繁且摆幅较大，河床冲淤剧烈；

6) 以江中深槽为界, 北部上部 20 m 范围内普遍分布粉砂、粉砂混粉土, 液化等级为中等~严重, 南部上部 20 m 范围内普遍分布粉砂层, 液化等级为轻微。

3. 监测断面选择

依据前期工程案例调研、勘察设计资料分析及计算模拟结果, 考虑地质条件、覆土厚度、高水压作用及周边环境, 监测断面布置如下:

- 1) 地质条件: 隧道穿越淤泥质粉质黏土、粉质黏土混粉土、粉土、粉细砂等典型土层, 液化土层(如北段接近出洞位置① 3 层粉砂为严重液化土层)或土层差异分布时, 布置监测断面 6 个;
- 2) 覆土厚度: 考虑管廊在江中段覆土厚度最大(>4D, D 为隧道外径)、覆土厚度最小(<2D)以及覆土厚度在 2~3D 的典型断面, 布置监测断面 3 个;
- 3) 高水压作用: 江中深槽段, 考虑高水压(水压 0.7~0.8 MPa)对结构受力影响, 布置监测断面 2 个;
- 4) 线形变化: 结合管廊平纵线形变化对结构受力影响, 布置监测断面 2 个。

4. 监测项目的选择

影响水下电力盾构隧道安全运行的主要因素有: 外部荷载、钢筋受力状态、螺栓受力状态、接缝变形量、隧道自身沉降等。针对此情况, 最终确定苏通 GIL 管廊隧道结构健康监测项目如下:

1) 水土压力监测: 管片背后水土压力是导致隧道结构变形损伤的直接因素, 通过监测水土压力, 可以直观掌控结构受力状态, 为结构承载能力及变形预测分析提供数据支持, 同时可为水土压力计算及结构设计理论的验证、完善提供依据。

2) 钢筋应力监测: 钢筋应力间接反映了隧道管片的内力水平, 通过监测钢筋应力, 可以掌握隧道关键部位的应力状态, 结合水土压力监测, 可为评估管片的力学性能和损伤程度提供数据支持。

3) 螺栓轴力监测: 接头部位是盾构隧道结构承载及防水的最薄弱环节, 通过监测纵向及环向螺栓轴力, 可以直接反映管片之间的连接性能, 结合水土压力、钢筋应力数据, 间接反映结构的整体健康状态, 并为螺栓受力模式及设计理论深化提供数据支撑。

4) 接缝张开量监测: 通过监测接缝张开量, 不仅可直接反映隧道结构的防水性能, 还可间接反映隧道断面变形情况, 服务于结构健康状态的评价。

5) 隧道沉降监测: 通过监测隧道沉降, 可全面掌握隧道全线沉降情况, 特别是差异沉降程度, 为合理预测接头张开、管片开裂及可能的漏水、漏泥等病害提供数据支持, 辅助结构管养及维修方案的制定。

相比城市交通隧道工程, 苏通 GIL 综合管廊有着更恶劣地质环境、更高建设标准和安全要求。因此, 本工程结构安全评价应更具针对性和有效性, 相比城市交通隧道的五级预警机制, 苏通管廊预警机制需适当提高。水下盾构隧道结构管片安全评价的四级预警机制按表 1 划分, 宜用表 1 规定分级色彩标识。

Table 1. Classification criteria for safety assessment and early warning of tunnel

表 1. 隧道结构区段安全评价预警分级标准

分级	服役状态	分级定义	图示色彩
I	正常	隧道管片无安全隐患、无显著变形、无渗漏。	绿色
II	退化	隧道部分管片耐久性退化, 不影响正常功能; 隧道有局部轻度损伤或缺陷, 无安全隐患。	蓝色
III	劣化	隧道管片的耐久性劣化, 中等病害损伤, 影响正常功能; 隧道受力变形小于结构抗力设计值, 无安全隐患。	黄色
IV	恶化	隧道整体变形较大或多处管片缺损, 影响正常功能; 隧道受力变形超出结构抗力设计值, 安全性不足, 有安全隐患。	红色

5. 隧道破坏过程分析

5.1. 有限元建模

本项目前期先建立有限元模型,对隧道结构在典型断面下受力特性及破坏过程进行计算研究。数值分析采用“荷载-结构”模型,三维实体单元模拟隧道的管片和内部结构,梁单元模拟螺栓和钢筋。根据设计和勘察资料,获得模型的最初计算参数;随着隧道工程实施,将根据施工和维护阶段,修正模型参数,使得计算尽可能符合实际,逐渐完善评价标准、等级和划分值。

有限元模型如下图3所示,管片间螺栓以杆单元进行模拟,管片与管片间考虑摩擦作用。管片衬砌采用混凝土损伤塑性模型。随外部荷载增加,损伤积累到一定程度时产生裂缝并扩展,进而导致应变软化现象。损伤因子在混凝土的弹性阶段为0,当混凝土进入非弹性阶段,损伤开始积累,弹性模量不断折减;当损伤因子到1时,混凝土完全失去承载能力。

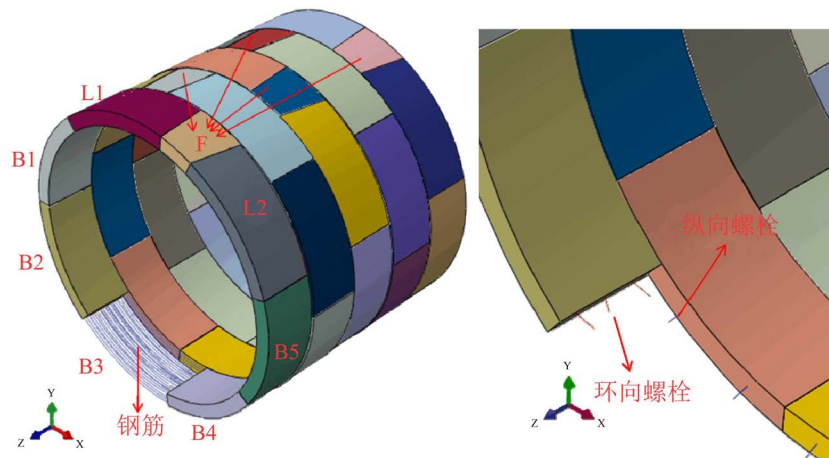


Figure 3. Tunnel model and bolts
图3. 隧道模型及螺栓

5.2. 计算结果分析

1) 大面积堆载

以水陆交接处断面2作为典型断面,达到设计荷载时,隧道变形表现为水平外扩、底部隆起和顶部下沉,如下图4所示。隧道底部隆起15.1 mm,顶部下沉6.7 mm,水平外扩20.1 mm,竖向收敛21.8 mm。收敛变形远小于3% D,隧道变形、抗浮均为安全状态。

设计荷载作用下,计算结果显示隧道整体呈现“横鸭蛋”变形,引起的接缝张开和螺栓轴力均较小,接缝张开最大值是0.17 mm,最大螺栓轴力值为29.92 MPa。混凝土最大主应力值为2.9 MPa,出现在底部;混凝土最小主应力值为-16.72 MPa,出现在左腰内侧。钢筋最大拉压应力-81.97 MPa,拉应力最大值为17.05 MPa,裂缝计算值为0.008 mm。

达到设计荷载后继续加载,隧道变形不断变大,钢筋与混凝土受力不断增加,直至钢筋屈服。

达到屈服状态时,钢筋达到压屈服值-400 MPa,隧道水平外扩和底部隆起急剧增大,顶部继续下沉,如下图5所示。隧道底部隆起71.9 mm,顶部下沉41.9 mm,水平外扩106.1 mm,竖向收敛,113.8 mm。收敛变形远大于3% D,约为9.81% D,隧道变形处于不安全状态。

最终,钢筋压屈服状态下,接缝张开最大值0.98 mm,螺栓最大轴力值为51.16 MPa。随着荷载变形增大,顶部混凝土达抗拉强度值区域扩大,最大拉应力值为2.9 MPa,最大压应力值为-55.2 MPa。隧道

左腰部位钢筋压屈服, 最大压应力值为-400 MPa; 钢筋最大拉应力值 158 MPa, 裂缝宽度计算值为 0.074 mm。

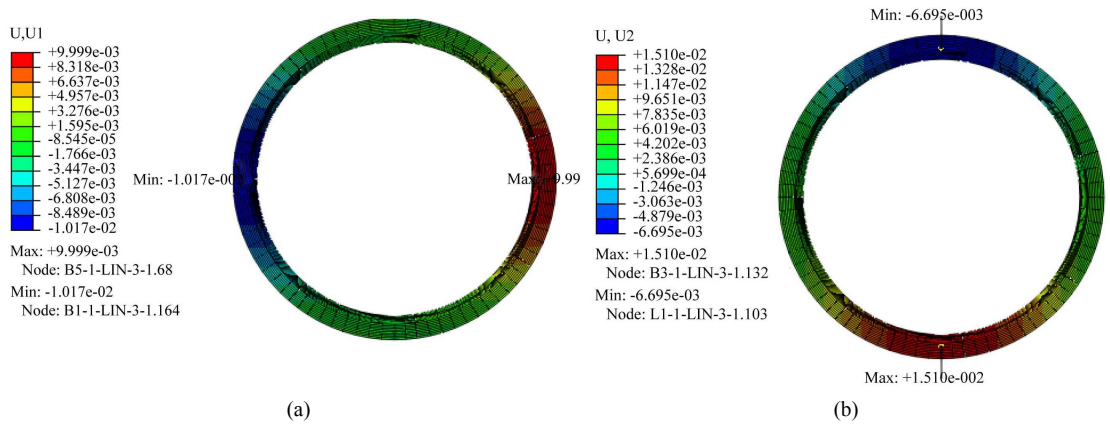


Figure 4. Structural displacement diagram under design load: (a) Horizontal displacement; (b) Vertical displacement
图 4. 设计荷载下结构位移云图(单位: m): (a) 水平位移; (b) 竖向位移

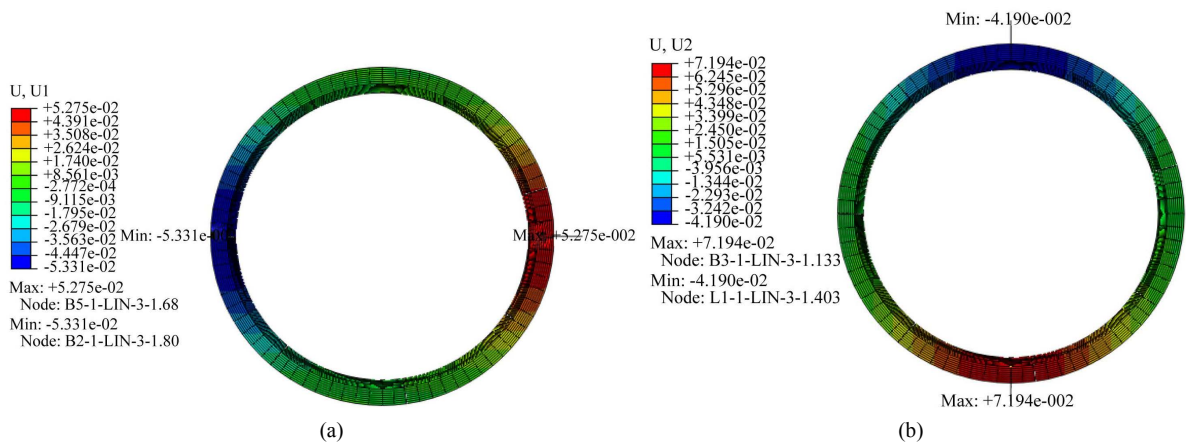


Figure 5. Structural displacement diagram when steel bars yield: (a) Horizontal displacement; (b) Vertical displacement
图 5. 钢筋屈服时结构位移云图(单位: m): (a) 水平位移; (b) 竖向位移

大面积加载下典型断面破坏过程见下表 2。

Table 2. Failure process of section under large area loading
表 2. 大面积加载下断面破坏过程

管片状态	拱顶荷载 kPa	水平扩张 mm	竖向收敛 mm	直径变形比 %	钢筋最大主应力 MPa	混凝土最大主应力 MPa	裂缝 mm	接缝 mm
设计荷载	388.11	20.1	21.8	1.88%	17.05	2.92	0.008	0.17
3% D 变形	549.30	32.1	34.6	2.98%	36.27	3.13	0.024	0.27
混凝土 -38.5 MPa	847.50	56.4	60.5	5.22%	74.5	3.04	0.035	0.52
混凝土 -46.2 MPa	1073.42	75.8	81.0	6.98%	106.1	3.06	0.05	0.67
钢筋 400 MPa	1411.92	106.1	113.8	9.81%	158	2.9	0.074	0.98

2) 局部加载

局部加载作用下, 隧道结构受力变化趋势与大面积加载时相类似, 典型断面破坏过程见下表 3。

Table 3. Failure process of section under local loading
表 3. 局部加载下断面破坏过程

管片状态	拱顶荷载 kPa	水平扩张 mm	竖向收敛 mm	直径变形比 %	钢筋最大主应力 MPa	混凝土最大主应力 MPa	裂缝 mm	接缝 mm
设计荷载	388.11	20.1	21.8	1.88%	17.05	2.92	0.008	0.17
3% D 变形	479.04	32	34.7	2.99%	51.81	3.36	0.024	0.62
混凝土 -38.5 MPa	788.34	78.1	86	7.41%	223.6	3.2	0.19	2.34
混凝土 -46.2 MPa	965.65	105.7	117.2	10.10%	320.9	3.14	0.44	3.58
钢筋 400 MPa	1134.90	132.2	147.9	12.75%	400	3.1	0.64	4.7

6. 隧道结构安全评价标准及措施

由上表可见, 大面积加载与局部加载作用下, 隧道破坏过程演化基本相同, 但在不同阶段内力、变形和损伤部位等方面略有不同, 因此不同工况下, 安全控制指标应综合考虑多种因素。在各外部荷载作用下, 隧道的结构破坏过程基本可分为 4 个阶段: ① 隧道建成至设计荷载, 隧道顶部和底部少量混凝土达到抗拉强度值, 直径变形比和裂缝均满足设计要求; ② 设计荷载至混凝土达单轴抗压强度值, 混凝土达抗拉强度区域扩大, 直径变形比超过 3% D 的设计要求; ③ 混凝土单轴抗压强度至三轴抗压强度值, 顶部和底部混凝土达到抗压和抗拉强度值, 直径变形比远超设计要求; ④ 混凝土达抗压强度至钢筋屈服, 裂缝和直径变形比远超设计和规范要求, 接缝张开量急剧增大。

因此, 大面积堆载和局部加载的安全评价应满足: 结构应力状态 $S < \text{抗力设计值 } R$ 、裂缝 $< 0.2 \text{ mm}$ 、接缝张开 $< 2 \text{ mm}$, 大面积堆载和局部加载的详细分级标准如下表 4。

Table 4. Classification criteria for safety of tunnel structures
表 4. 隧道结构安全等级划分标准

大面积堆载		局部加载	
评价等级	控制标准	评价等级	控制标准
I 级	$< \text{直径变形比 } 3\% D$	I 级	M 设计荷载
II 级	$\leq \text{混凝土单轴抗压强度}$	II 级	$\leq \text{直径变形比 } 3\% D$
III 级	$< \text{混凝土三轴抗压强度}$	III 级	m 混凝土单轴抗压强度
IV 级	$\geq \text{混凝土三轴抗压强度}$	IV 级	$\geq \text{混凝土单轴抗压强度}$

以结构损伤状态、设计使用要求和规范控制值作为安全等级划分标准, 可提取各标准下结构内力变形作为安全分级控制值, 包括钢筋应力、接缝张开、螺栓轴力、裂缝和直径变形比等。苏通 GIL 管廊隧道两层箱板结构、电力设备多, 狭窄视野严重影响直径变形比观测, 取钢筋应力、接缝张开和螺栓轴力为安全分级控制值, 根据最不利原则, 隧道结构安全分级控制值如下表 5。

根据不同的隧道结构安全评价预警等级, 采用相对应的处治措施如下表 6 所示。

7. 结语

电力越江盾构隧道受力情况复杂, 除了需要对结构受力进行详细计算分析以外, 还应对后期运维阶

段实际的结构受力情况进行实时监测，合理评估隧道健康状况，降低后期维护成本。

Table 5. Classified control value for safety of tunnel structures

表 5. 隧道结构安全分级控制值

评价等级	钢筋应力 Mpa	螺栓轴力 MPa	接缝 mm
I 级	$-80 \leq S \leq 15$	$0 < S \leq 30$	$0 < S \leq 0.15$
II 级	$-110 \leq S \leq -80 \cup 15 \leq S \leq 50$	$30 < S \leq 85$	$0.15 < S \leq 0.5$
III 级	$-220 \leq S \leq -110 \cup 40 \leq S \leq 80$	$85 < S \leq 280$	$0.5 < S \leq 2$
IV 级	$S < -220 \cup S > 80$	$S > 280$	$S > 2$

Table 6. Treatment measures of early warning level for safety evaluation of tunnel structures

表 6. 隧道结构安全评价预警等级处治措施

分级	服役状态	状态定义	处治措施
I	正常	性能完好。	照常观测和保养
II	退化	性能退化，不影响正常功能；无安全隐患	加强观测和保养力度；重点关注病害部位。
III	劣化	性能劣化，影响正常使用；无安全隐患	详细分析隧道病害损伤程；制订局部病害修复预案。
IV	恶化	性能恶化，影响正常使用，有安全隐患。	组织特殊检测，研究隧道病害状态和发展趋势；考虑限制运营，制定加固或改扩建方案。

监测断面需要综合考虑勘察设计资料分析及计算模拟结果，考虑地质条件、覆土厚度、高水压作用及周边环境变化等诸多因素进行选取。

隧道受力及破坏主要受外部荷载、钢筋受力状态、螺栓受力状态、接缝变形量、隧道自身沉降等影响，因此本项目监测项目包括水土压力监测、钢筋应力监测、螺栓轴力监测、接缝张开量监测、隧道沉降监测等。

基于监测获得的各项数据，本文针对苏通 GIL 管廊工程介绍了一种隧道结构安全评价预警分级标准以及隧道结构安全分级方法，对将来类似跨海或越江隧道工程健康监测方案的选择有一定参考价值。

参考文献

- [1] 刘建航, 候学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [2] 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.
- [3] 李春良, 王方彦, 张立辉, 王静. 复杂条件下的地铁盾构隧道的力学行为研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(5): 103-109.
- [4] 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): 26-31.
- [5] 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11.
- [6] 蔡明生. 基于断裂力学的盾构隧道管片裂损破坏机理研究[J]. 科技风, 2016(11): 163-164.
- [7] 刘学增, 蔡光远, 杨帆, 桑运龙, 吴建勋. 破碎围岩错缝拼装盾构隧道结构承载性能与变形控制指标[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 57-65.
- [8] 李军, 雷明峰, 林越翔, 等. 盾构管片裂损成因分析及结构安全性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(7): 1786-1792.
- [9] 张旭辉, 杨志豪, 洪弼宸. 盾构隧道结构健康评价的变形指标研究[J]. 地下工程与隧道, 2014(4): 7-13 + 53.
- [10] 朱斌. 软土盾构隧道横断面变形规律及控制限值研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(9): 71-76.
- [11] 汪波, 何川, 吴德兴. 隧道结构健康监测系统理念及其技术应用[J]. 铁道工程学报, 2012(1): 67-72.
- [12] 孙鹏. 隧道管片开裂状态下的运营安全性评价[J]. 建筑监督监测与造价, 2014, 7(5): 34-38.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org