

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.007

某隧洞工程衬砌混凝土软骨料成因分析与影响评价

顾培英^{1,2}, 汤雷^{1,2}, 赵明志³, 邓昌^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 天津市引滦工程隧洞管理处, 河北 迁西 064300)

摘要: 为了查清某输水隧洞部分衬砌混凝土表面出现白色坑点的病害成因, 进行了软骨料分布统计分析、混凝土芯样试件抗压强度试验、石子骨料 X 射线衍射试验和岩相结构分析等研究。研究表明: 每平方米衬砌混凝土表面平均有 1~2 个软骨料, 内部软骨料质量分数较小, 呈随机分布; 软骨料是当初施工时在料场石子中混入的少量伊利石, 在水流冲刷作用下, 衬砌混凝土表层剥落并造成薄弱的伊利石骨料逐渐显露; 衬砌混凝土芯样试件的抗压强度均大于设计要求, 软骨料现象没有明显降低衬砌混凝土的抗压强度。

关键词: 软骨料; X 射线衍射试验; 衬砌混凝土; 隧洞工程; 工程安全评价

中图分类号: TV671 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)01-0035-05

Cause analysis of soft aggregate and impact evaluation of lining concrete structure in a tunnel project

GU Peiying^{1,2}, TANG Lei^{1,2}, ZHAO Mingzhi³, DENG Chang^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;
3. Tunnel Management Office of Luanhe River Diversion Project of Tianjin City, Qianxi 064300, China)

Abstract: In order to examine the causes of white pits that appear on the surface of lining concrete in a water tunnel, we conducted statistical analysis of the distribution of soft aggregates, carried out compression strength tests of concrete core samples, and conducted X-ray diffraction tests and petrographic analysis of gravel aggregates. The research results show that there were one to two soft aggregates per square meter on the lining concrete surface. The content of soft aggregate inside the concrete was small and exhibited random distribution. The appearance of soft aggregate was caused by a small amount of illite that was mixed into the gravels during construction, and when the concrete's surface layer was washed away, the weak illite gradually emerged. The compression strengths of the concrete core samples were all higher than the design value. The soft aggregate did not reduce the compression strength of lining concrete significantly.

Key words: soft aggregate; X-ray diffraction test; lining concrete; tunnel project; safety evaluation

北方某无压输水隧洞工程已运行近 30 a, 隧洞长 12 km 左右。2003 年工程管理部门发现约 8% 长度范围内的部分衬砌混凝土边墙及底板表面较大范围内出现白色坑点, 露出白色软石子骨料, 用指甲即可刮除, 并且该现象逐年加剧, 本文将这些软石子骨料简称为软骨料。管理部门担心软骨料现象是某种化学反应, 若软骨料增多, 则会影响结构安全。根据水工混凝土建筑物结构特点和所处工作环境的不同, 其常见病害主要包括裂缝、冻胀、冲磨、空蚀、碳化、溶蚀、侵蚀和碱骨料反应等^[1-2]。由于本工程的水质没有腐蚀性, 水流流速和混凝土碳化正常, 隧洞内部温度在 12~14℃ 之间, 不具备冻胀条件, 也不具备碱骨料反应破坏特征^[3-4], 所以

软骨料现象不属于上面所述的常见病害。为查清隧洞局部段白色坑点的病害成因,本研究首先对衬砌混凝土的表面软骨料分布进行统计分析;然后选择有代表性的位置进行取样,进而开展衬砌混凝土试件的抗压强度试验;再利用抗压强度试验后的试件对内部软骨料分布进行统计分析。另外分别对试件中所提取的软骨料或疑似软骨料、正常石子骨料进行X射线衍射(XRD)试验和岩相分析,得到衬砌混凝土软骨料的矿物成分,在此基础上对衬砌混凝土病害影响程度及其安全性进行评价。

1 衬砌混凝土软骨料分布统计分析

1.1 表面软骨料分布

衬砌混凝土表面软骨料的典型表象如图1所示。分别对隧洞左右边墙和底板的表面软骨料分布情况进行统计,结果见表1。分析表1可知,每平方米衬砌混凝土表面平均有1~2个软骨料;相对于边墙而言,底板的软骨料数量较多;软骨料粒径基本在2~3 cm之间,符合石子骨料粒径的实际情况。



图1 衬砌混凝土表面软骨料的典型表象

Fig. 1 Typical appearance of soft aggregate on lining concrete surface

表1 衬砌混凝土表面软骨料分布统计结果

Table 1 Distribution of soft aggregates on lining concrete surface

位 置	统计范围		软 骨 料		
	长/ m	宽/ m	数量/ 个	平均数/ (个·m ⁻²)	粒径/ cm
左边墙	20.00	1.55	53	1.71	2~3
右边墙	18.00	1.55	32	1.15	2~3
底 板	10.00	2.05	42	2.05	1~4

注:大多数软骨料粒径为2 cm。

1.2 内部软骨料分布

在隧洞10个表面软骨料处钻取芯样,共制作29个试件进行抗压强度试验。在抗压强度试验后,分别人工提取试件中的软骨料或疑似软骨料、正常石子骨料,称量两类石子骨料各自的质量,并加以统计,结果见表2。

表2 试件软骨料质量分数及抗压强度统计结果

Table 2 Statistical results of contents of soft aggregates and compression strengths of concrete core samples

试件	软骨料质量分数/%	抗压强度/MPa	试件	软骨料质量分数/%	抗压强度/MPa
F1-1	3.9	31.7	F6-1	6.2	44.5
F1-2	6.1	43.8	F6-2	3.9	40.9
F2-1	2.4	29.3	F6-3	1.6	44.5
F2-2	1.4	38.7	F7-1	0.4	34.5
F2-3	2.0	19.5	F7-2	1.2	33.4
F3-1	1.3	25.2	F7-3	0.2	33.7
F3-2	1.7	27.5	F8-1	2.9	41.1
F4-1	0.9	27.5	F8-2	6.3	31.8
F4-2	6.7	37.7	F8-3	12.7	41.3
F4-3	0.7	28.7	F8-4	17.0	38.7
F4-4	1.0	33.4	F9-1	1.7	36.7
F5-1	2.2	30.3	F9-2	6.9	41.8
F5-2	5.7	36.1	F9-3	7.7	33.9
F5-3	5.0	25.3	F10-1	3.5	43.3
F5-4	2.6	26.3			

注:F1-1~F1-2表示第1个芯样由表及里依次加工成1~2个试件,其他试件的编号方法相同。

分析表2可知,除个别试件外,隧洞工程大多数软骨料质量分数均较小,呈随机分布,无明显规律,其平均值由表及里依次为2.5%、4.4%、2.9%、1.8%,软骨料质量分数的总体平均值为3.2%。试件F8-3、F8-4的软骨料质量分数较大,主要是因为部分疑似软骨料被包裹在大块石子骨料中,提取软骨料较困难,而该大块石子骨料本身强度并不低,所谓软骨料其实包含了较多的正常石子骨料,所以这两个试件的软骨料质量分数偏大。值得一提的是,由于取样点位于软骨料处且提取软骨料困难,疑似软骨料中夹带了大量质量较好的正常石子骨料,所以,软骨料质量分数的实际值应该小于3.2%。大多数正常石子骨料为青色,少量为肉色,内部软骨料情况如图2所示。



图 2 内部软骨料情况
Fig. 2 Soft aggregates inside concrete

2 衬砌混凝土试件抗压强度试验

采用万能试验机,依据 SL352—2006《水工混凝土试验规程》^[5] 进行衬砌混凝土试件的抗压强度试验,结果见表 2。由表 2 可知,试件的抗压强度平均值由表及里依次为 34.4 MPa、36.9 MPa、32.4 MPa、32.8 MPa,抗压强度的总体平均值为 34.5 MPa,试件的表、里抗压强度平均值变化不大。

混凝土设计强度等级为 C20 的是 F1-1 ~ F3-2,共 3 个芯样 7 个试件,其抗压强度最大值为 43.8 MPa,最小值为 19.5 MPa,平均值为 30.8 MPa。根据 GB/T50107—2010《混凝土强度检验评定标准》,样本容量小于 10 组,采用非统计方法评定混凝土抗压强度^[6],试件平均抗压强度比标准值高 54.0%,大于规范要求的 15%;最小值为标准值的 97.5%,大于规范要求的 95%。

混凝土设计强度等级为 C25 的是 F4-1 ~ F10-1,共 7 个芯样 22 个试件,其抗压强度最大值为 44.5 MPa,最小值为 25.3 MPa,平均值为 35.7 MPa。试件的平均抗压强度比标准值高 42.8%,最小值为标准值的 101.2%,均大于规范要求。

通过上述分析可知,隧洞软骨料处的衬砌混凝土试件的抗压强度均大于设计要求,软骨料现象并未削弱衬砌混凝土的抗压强度。

3 骨料 XRD 试验和岩相结构分析

XRD 试验是指通过分析衍射图谱,获得材料的矿物成分以及原子或分子的结构形态等信息的研究手段,目前已在许多领域得到广泛应用^[7-8]。本文分别对 3 组典型的衬砌混凝土石子骨料样品进行 XRD 试验,分析其矿物成分,并进行正交偏光显微镜岩相结构分析^[9-10]。3 组石子骨料样品分别为青色石子骨料、肉色石子骨料和软骨料。

由骨料样品衍射图谱可知,青色石子骨料的矿物成分主要是白云石和极少量的石英;肉色石子骨料的主要成分是白云石和一定量的长石,还有少量的石英;软骨料的主要成分是白云石和一定量的石英,还有少量石灰石和伊利石。

岩相晶体如图 3 所示,在青色石子骨料中观察到粗大的白云石晶体,没有观察到其他矿物成分;在肉色石子骨料中观察到粗大的白云石晶体和一定量的长石晶体,还存在大量细小的白云石晶体;在软骨料中观察到细小的白云石晶体和石英晶体,还有微晶质石英。白云石表象为青色石子与肉色石子,在岩相显微镜下青色石子结晶粗大,肉色石子结晶细密并含一定量的长石,伊利石表象为灰白色石子,岩相显微镜下难以观察到伊利石。

4 软骨料成因分析及影响评价

4.1 软骨料成因分析

根据前述的 XRD 试验和岩相分析结果可知,石子骨料的主要成分是白云石,另有少量的伊利石和极少量的长石、石英、石灰石等。结合衬砌混凝土的病害表象,软骨料的成分主要是伊利石,软骨料现象主要是由少量的伊利石引起的。在试件内挑出的石子中,软骨料或疑似软骨料的数量极少,且它们很难以整块形式存在。文献[11]表明,伊利石是一种类似云母且有层状结构的黏土矿物,常由白云母、钾长石风化形成,或由其他矿物蚀变形成,其外观为白色或灰白色,含杂质较多的呈灰色或黑色,具有土状、性脆、易碎、光滑、质地

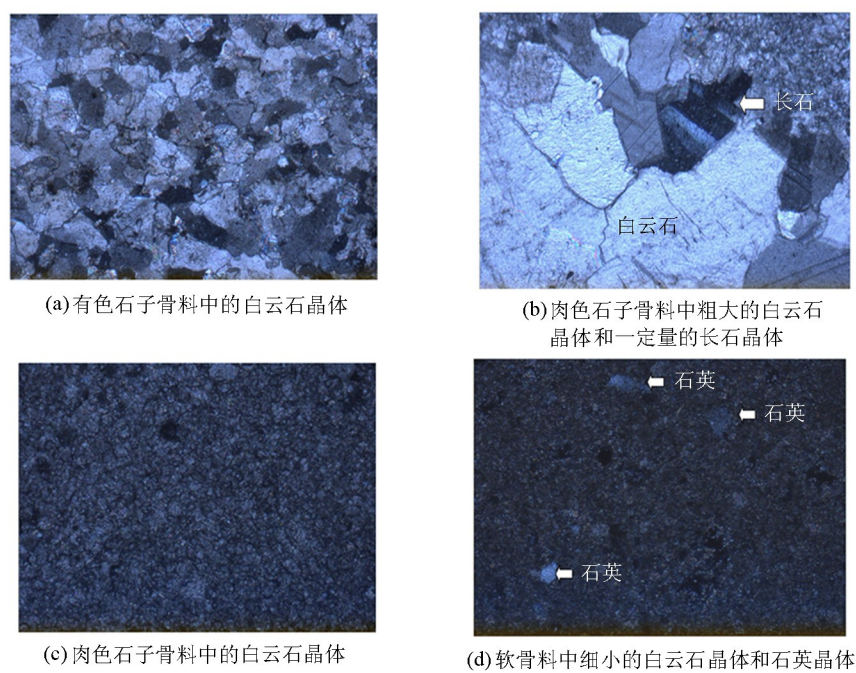


图 3 岩相晶体
Fig. 3 Lithofacies map

细腻等特性,莫氏硬度为 1~2。本隧洞工程的衬砌混凝土软骨料是当初施工时混杂于白云石骨料中的软弱伊利石,经过工程近 30 a 的运行,混凝土表层砂浆在常年水流冲刷作用下逐渐被破坏,混凝土骨料裸露,具有层状结构的伊利石性脆、易碎、硬度低,最先遭受破坏,直接表现为白色坑点现象。由于底板水流冲刷比边墙严重,所以底板表面的软骨料数量相对较多,这与前面的统计分析结果相吻合。

白云石和伊利石都是在漫长的地质演变过程中形成的岩石,在目前工况下不可能发生白云石转化为伊利石的情况,即不会出现软骨料增多现象,不会影响混凝土结构安全。衬砌混凝土表面软骨料逐年增多是由于随着工程运行年限的延长,在水流冲刷作用下,混凝土表层剥落并造成薄弱的伊利石骨料逐渐显露,但软骨料的总体数量是有限的。此外,混凝土骨料发生固态化学反应的几率极小,只有在高温或强酸、强碱等环境下才会发生化学反应^[12-13],而隧洞的内部温度在 12~14℃ 之间,地下水的水质指标远低于弱腐蚀标准,其没有腐蚀性,因此可以判断衬砌混凝土骨料不具备化学反应的条件。另外,衬砌混凝土软骨料分布统计分析表明,除混凝土表面存在软骨料现象外,其内部虽然与外界水、空气隔绝,但也存在软骨料现象,同样说明当初施工时混凝土中就存在伊利石骨料。

4.2 影响评价

隧洞工程衬砌混凝土内部软骨料分布统计分析表明,大多数软骨料质量分数均较小,呈随机分布,无明显规律,软骨料质量分数的总体平均值为 3.2%,实际值小于 3.2%。隧洞衬砌混凝土试件的抗压强度均大于设计要求,软骨料现象并未削弱衬砌混凝土的抗压强度。对试件中提取的疑似软骨料质量分数进行分析,其数量的多少与衬砌混凝土的抗压强度没有明显的关系。由此可以推断,当初施工时骨料中混杂的软骨料数量相当有限,至少没有对混凝土的整体强度产生明显的、直接的影响。

综上所述,隧洞衬砌混凝土中软骨料所占比例较小,不会明显影降低衬砌混凝土的抗压强度,若对衬砌混凝土表面加以处理,将会避免白色坑点现象的加剧发生。

5 结 语

每平方米衬砌混凝土表面平均有 1~2 个软骨料,内部软骨料质量分数较小,其总体平均值为 3.2%,呈随机分布。混凝土设计强度等级为 C20、C25 的试件平均抗压强度分别比标准值高 54.0%、42.8%,最小值分别为标准值的 97.5%、101.2%,抗压强度均大于设计要求。骨料的 XRD 试验和岩相结构分析表明石子骨料成分主要是白云石,另有少量的伊利石和极少量的长石、石英、石灰石等,软骨料的成分主要是伊利石。

骨料是当初施工时在料场石子中混入的少量伊利石,其总体数量有限。随着隧洞运行年限的延长,在水流冲刷作用下,衬砌混凝土表层剥落并造成薄弱的伊利石骨料逐渐显露。由于衬砌混凝土中骨料所占比例较小,不会明显影响衬砌混凝土抗压强度,若对衬砌混凝土表面加以处理,将会避免骨料暴露现象的加剧发生。

参考文献:

[1] 翟耀武,罗鹏. 水工隧洞混凝土的常见病害及预防[J]. 四川水力发电,2010,29(4):64-65. (ZHAI Yaowu, LUO Peng. Common diseases and control of hydraulic tunnel concrete [J]. Sichuan Water Power, 2010,29(4):64-65. (in Chinese))

[2] 杨虎,蒋林华,张研,等. 基于溶蚀过程的混凝土化学损伤研究综述[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):83-89. (YANG Hu, JIANG Linhua, ZHANG Yan, et al. Summary of researches on chemical damage of concrete based on leaching process [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1):83-89. (in Chinese))

[3] 孙彬,王景贤,周燕,等. 冻融循环、硫酸盐侵蚀和碱骨料反应的混凝土损伤鉴别方法[J]. 建筑科学,2011,27(增刊1):29-33,36. (SUN Bin, WANG Jingxian, ZHOU Yan, et al. Identification method for damages due to freeze-thaw sulfate attack and alkali-aggregate reaction [J]. Building Science, 2011, 27(Sup1):29-33,36. (in Chinese))

[4] 刘长坤. 普通混凝土碱骨料反应的成因分析与预防措施[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(4):180-182. (LIU Changkun. The causes analysis and avoiding measures of concrete alkali-aggregate reaction [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(4):180-182. (in Chinese))

[5] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S].

[6] GB/T 50107—2010 混凝土强度检验评定标准[S].

[7] 黄雨,周子舟,柏炯,等. 水泥土搅拌法加固冲填土软土地基的微观试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(7):997-1001. (HUANG Yu, ZHOU Zizhou, BAI Jiong, et al. Micro-experiments in cement-mixed soils on a dredger fill of soft ground [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(7):997-1001. (in Chinese))

[8] 朱珍德,杨永杰,蒋志坚,等. 用数字图像处理技术进行膨胀红砂岩细观结构动态劣变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2007-2013. (ZHU Zhende, YANG Yongjie, JIANG Zhijian, et al. Research on mesostructure dynamic damage characteristics of expansive red sandstone with digital image processing technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10):2007-2013. (in Chinese))

[9] 封培然. 金相显微镜用于水泥原料岩相分析的研究[J]. 水泥,2012(2):1-4. (FENG Peiran. Petrographic analysis of raw material with metallographic microscope [J]. Cement, 2012(2):1-4. (in Chinese))

[10] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400. (ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on Softening micro-mechanism of special soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3):394-400. (in Chinese))

[11] 周乐关. 矿石学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,2007:172.

[12] TIBOR Z,JAMES H T. 矿物学原理[M]. 施倪承,译. 北京:地质出版社,1992:192-213.

[13] 韩素芳. 混凝土工程病害与修补加固[M]. 北京:海洋出版社,1996:279-406.