

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0010-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.003

## 引江济淮试验工程软岩崩解特性及其影响因素试验研究

权全<sup>1</sup>, 刘扬<sup>2</sup>, 曹雪山<sup>2,3</sup>, 李国维<sup>2,3</sup>, 袁俊平<sup>3</sup>, 吴建涛<sup>2</sup>, 张坤勇<sup>3</sup>

(1. 安徽省引江济淮集团有限公司安徽合肥. 230601; 2. 河海大学道路与铁道研究所, 江苏南京 210098;

3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 100084)

**摘要:** 以引江济淮试验工程为依托, 开展砂岩与泥岩的崩解特性试验研究。通过静态烘干-浸水崩解试验, 研究不同风化程度的软岩在干湿循环作用下的崩解性状, 同时进行耐崩解试验以及点荷载强度试验, 揭示崩解性与强度、失水率的相关变化规律。试验表明: 干湿循环作用和风化作用均会减弱岩石耐崩解能力; 风化岩石的耐崩解指数与干燥岩石点荷载强度成正相关, 与岩石的失水率成线性负相关; 岩石的耐崩解性与岩石结构类型关系密切。

**关键词:** 软岩; 崩解性; 点荷载强度; 失水率; 干湿循环

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Experimental research on disintegration characteristics and influence factors of the soft rock in the diversion project of water from Yangtze to Huaihe River

QUAN Quan<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, CAO Xueshan<sup>2,3</sup>, LI Guowei<sup>2,3</sup>, YUAN Junping<sup>3</sup>, WU Jiantao<sup>2</sup>,  
ZHANG Kunyong<sup>3</sup>

(1. Anhui Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Co Ltd, Hefei, Anhui, 230601, China; 2. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Experimental study on the disintegration characteristics of sandstone and mudstone is investigated based on the diversion project of water from Yangtze to Huaihe River. The disintegration characteristics of soft rock with different weathering degree under drying and wetting cycles are studied by drying-immersion static rock slaking test. At the same time, the rock slake-durability tests and point load strength test are carried out to reveal the correlation law between disintegration and strength, the loss of moisture. The results show that the effect of drying and wetting cycles and weathering could weaken the rock slake-durability; and the rock slake-durability index increases approximately linear with the point load strength and decreases approximately linear with the loss of moisture of the rock. The slake-durability of rocks is related to rock structure types.

**Key words:** soft rock; disintegration; point load strength; the loss of moisture; drying and wetting cycles

在水利<sup>[1]</sup>、道路、采矿<sup>[2]</sup>建设等岩土工程中, 经常会遇到软岩的崩解问题。岩石崩解会导致岩石强度软化降低, 给工程建设带来安全问题。目前在干湿循环作用、岩石强度和岩石的失水率三个方面对软岩的崩解特性有了一定的研究。C.W.Badger<sup>[3]</sup>认为干燥页岩遇水后受水、气共同作用产生气致崩

解 (air breakage) 效应。岩土体在水、气相互作用下易产生不均匀内应力<sup>[4-9]</sup>, 当不均匀内应力大于岩石抗拉强度时, 发生开裂、崩解。多次干湿循环引起岩石含水率的重复变化, 是泥质岩渐进式崩解的主要原因<sup>[10-11]</sup>。在干湿循环过程中, 岩石内部粘土矿物不断产生水化膨胀、离子交换吸附、易溶性矿物

收稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC0404800); 引江济淮试验工程项目 (20168011716)

作者简介: 权全 (1979-), 男, 安徽皖寿人, 工程师, 主要从事渠道边破研究。

溶解等<sup>[12]</sup>, 进而破坏岩石微结构<sup>[12-14]</sup>, 产生崩解。对于软岩强度, West<sup>[15]</sup>和康红普<sup>[16]</sup>认为岩石单轴抗压强度与含水率呈线性相关, Erguler等<sup>[17]</sup>则认为两者是负指数函数关系。毕忠伟<sup>[18]</sup>认为崩解性越强, 强度越低, 耐崩解性与黏土矿物含量有关。

综上, 影响岩石崩解性的因素多且复杂, 但主要影响因素为干湿循环作用、岩石强度和岩石的失水率。岩石崩解特性因岩石种类不同或周边条件不同, 表现的崩解现象及物理力学性状相差很大<sup>[19]</sup>。因此本文依托引江济淮试验工程, 深入地分析了干湿循环作用、软岩的强度、软岩含水率变化与崩解性的关系。为引江济淮工程的崩解性软岩合理的处理措施提供技术支持。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

选取现场具有代表性的软岩4种: 中风化砂岩、泥岩、强风化砂岩、泥岩作为试验对象。该试验工程位于引江济淮工程江淮沟通段K40+700~K42+200, 合肥市肥西县小庙镇西南角G312国道以南, 河道全长1.5 km, 上覆地层主要为全新统粉质壤土、上更新统粉质壤土、粉质粘土、砂性土, 下伏基岩主要为白垩系砂岩、泥岩等软岩。

针对2种岩性(砂岩与泥岩)进行X衍射分析。首先在现场拟取样区域内取5~10个采样点, 每个点取样量应均匀, 总量为100~200 g; 采用四分法将土样量进行缩减, 直至所取土样质量为10~20 g, 再将土样全部过0.075 mm的筛, 进行矿物鉴定。首先样品Mg<sup>+</sup>饱和后, 用甘油水溶液处理, 制成定向薄膜, 进行X衍射分析。

根据表1, 试验区内砂岩中蒙脱石含量明显比泥岩要少, 蒙脱石含量约小于10%, 而泥岩在20%左右, 根据《岩石与岩体鉴定和描述标准》(CECS 239-2008) 6.2.5规定, 判定本工程中砂岩具有非膨胀势, 而泥岩具有弱(中)膨胀势, 这与现场检测的砂岩自由膨胀率为11%~12.5%, 泥岩的自由膨胀

率为30%~40%相互对应。

### 1.2 试验方法

试验方法主要有静态烘干-浸水循环崩解试验, 耐崩解试验与点荷载强度试验三种。静态烘干-浸水循环崩解试验是自行设计的崩解试验, 是为消除规范的耐崩解试验中机械扰动因素, 研究干湿循环次数与不同风化岩的耐崩解度的关系; 耐崩解试验测定岩石的耐崩解能力; 点荷载强度试验测定岩石点荷载强度。

#### 1.2.1 静态烘干-浸水循环崩解试验

试验步骤为: (1) 制样。中风化砂岩、泥岩, 强风化砂岩、泥岩4种岩样各取10件, 采用磨石机和切土刀制成40~60 g浑圆状试样。(2) 烘干称量。将岩样放置2 mm标准筛上, 将整体放在100℃~105℃的温度下烘干24 h, 然后取出放入干燥器内冷却至室温称量。(3) 浸入水中24 h后, 放入烘箱内烘干, 该崩解过程为一次干湿循环。对每组岩样进行多次步骤(3)浸水崩解烘干试验。

#### 1.2.2 耐崩解试验

规范的耐崩解试验测定二次循环耐崩解指数。试验步骤为: (1) 制样。中风化砂岩、泥岩、强风化砂岩、泥岩4种岩样各1组, 试件10个, 试件规格为40~60 g, 浑圆状。(2) 试样烘干称量。将各组岩样放入圆柱形筛筒内, 在100℃~105℃温度下烘干至恒量后在干燥器内冷却至室温称量。(3) 浸水崩解及烘干循环, 测定二次循环耐崩解指数。

#### 1.2.3 点荷载强度试验

干燥岩样点荷载强度试验。不同含水率下岩石的强度是不同的<sup>[15-16]</sup>。本试验的试样为干燥岩样, 消除了含水率差异对岩样强度的影响。对4种岩石各取4组, 每组试件个数为10, 采用磨石机和切土刀制成直径50 mm, 高度50 mm的圆柱样。岩样采用低温烘干, 然后将试样装入点荷载仪中, 测定不同风化岩的点荷载强度。试验结果与二次耐崩解指数进行对比分析, 揭示崩解性与强度的相关规律。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 干湿循环效应对崩解性的影响

参考规范耐崩解试验<sup>[20-21]</sup>中耐崩解性指数的计算方法, 采用式(1)计算各次干湿循环的耐崩解度, 评价崩解特性的强弱。

表1 软岩的矿物成分分析结果 (单位: %)

Tab.1 Result of mineral composition analysis of the soft rock

岩样	石英	赤铁矿	蒙脱石	钠长石	白云母	正长石
砂岩	57.3	1.77	9.43	9.55	7.69	14.26
泥岩	20.5	3	20.12	11.61	39.61	4.84

$$D_i = \frac{s_i}{s_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $D_i$ 为第*i*次干湿循环时岩石耐崩解度(%)； $s_i$ 为第*i*次干湿循环大于2 mm粒径的岩样质量(g)； $s_t$ 为岩样总质量(g)。

图1反映了静态浸水崩解试验成果，揭示了不同风化程度岩石的耐崩解度随着干湿循环次数变化规律。

由图1可知，一次干湿循环耐崩解度与软岩风化程度相关。岩性相同时，风化程度愈高的岩石，强度愈小。图1显示，中风化岩石一次循环耐崩解度明显高于强风化岩石。中风化岩强度高，对水的敏感性相对弱；强风化岩则对水的敏感性强；当软岩遇水后发生水化膨胀时，软岩颗粒间强度起到约

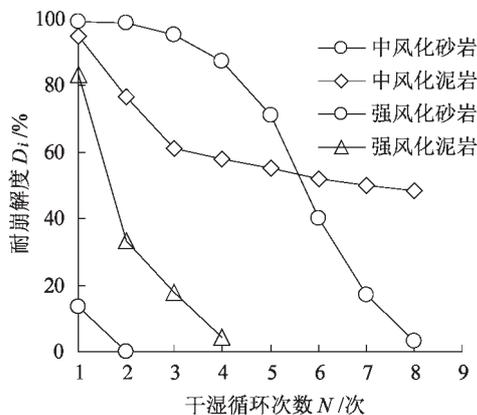


图1 风化岩的耐崩解度与干湿循环的关系

Fig.1 Correlation between slake-durability degree and drying-wetting cycles for weathered soft rock

束作用。

耐崩解度与干湿循环次数相关。随着干湿循环次数的增加，岩石的耐崩解度逐渐减小。中风化砂岩经历8次干湿循环次数崩解完全；中风化泥岩经历8次干湿循环次数，崩解还未完全，耐崩解指数仍接近50%，而强风化砂岩与泥岩在经历2~4次干湿循环次数后均崩解完全。

耐崩解度的变化规律与岩石类型相关。干湿循环初期，中风化砂岩裂隙不发育，强度整体好均匀分布，崩解只是发生在表面浅层，崩解度相对较小；中风化泥岩一次崩解度很小，原因是裂隙还未发育；二、三次干湿循环时，裂隙发育加剧，表面与内部的强度均受到破坏，于是当水通过裂隙侵入内部后，岩石的表面及内部均有崩解发生，所以干湿循环初期砂岩耐崩解性强于泥岩。干湿循环后期，砂岩随着干湿循环次数增加，结构已经破坏，剩余凝聚力

很小，接近0，且本身的渗透性较高，水很容易侵入岩石内部，于是整体崩解发生，而泥岩由于小块体积胀缩变形较均匀，内外差异变形小，裂隙不易发育，颗粒间凝聚力变化不大，渗透性较低，水难以侵入岩块内部，于是崩解速率变缓。因此随着干湿循环次数增加，中风化砂岩耐崩解特征先衰减慢，再衰减快，最后成松散砂状；而中风化泥岩则先衰减快，再衰减慢，受颗粒间强度影响较大。

## 2.2 软岩强度对崩解性的影响

通过常规的耐崩解试验与干燥岩石的点荷载强度试验，研究崩解性与强度的相关变化规律。试验结果如图2所示。

由图2可知：干燥风化岩石的点荷载强度与耐

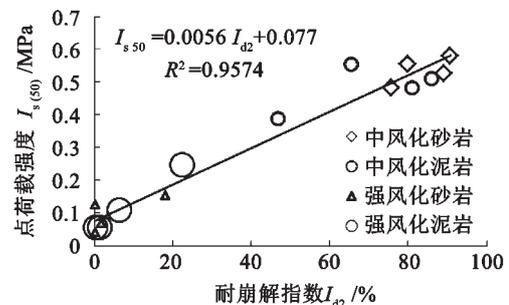


图2 风化软岩的耐崩解指数与点荷载强度的关系  
Fig.2 Relationship between slake-durability index and point load strength of weathered soft rock

崩解指数近似成线性递增关系。干燥状态下，岩石的耐崩解指数反映岩石内部亲水性矿物极限收缩后所具有的耐崩解能力；此时含水率为0，岩石点荷载强度决定于对水不敏感的钙质胶结力及颗粒间咬合力。强风化砂岩与泥岩耐崩解指数低，强度低，在干燥状态下崩解性强。

## 2.3 相对失水率对崩解性与强度交叉影响

王幼麟等<sup>[22]</sup>在对膨胀性岩体吸湿崩解研究中提出崩解临界失水率大约为2%~3%。所谓岩石的失水率是指岩样以饱和状态的含水率为基准，含水率损失的百分数，取用失水率作为评价崩解性受失水作用的影响程度，失水率及相对失水率的计算公式如式(2)、式(3)。

$$W_i = w_{\text{sat}} - w_i \quad (2)$$

$$W_r = \frac{w_{\text{sat}} - W_i}{w_{\text{sat}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $W_i$ 为岩石以饱和状态的含水率为基准的失水

率 (%)； $W_r$  为岩石以饱和状态的含水率为基准的相对失水率 (%)； $w_{sat}$  为岩石在饱和状态的含水率 (%)； $w_i$  为岩石遇水崩解前的含水率 (%)。

岩石的强度和相对失水率都是影响崩解性的主要因素，同时相对失水率对岩石的强度也有明显的影响。试验结果如图3所示。

耐崩解指数与相对失水率拟合曲线表达式为

$$I_{d1} = aW_r + b \quad (4)$$

式中： $I_{d1}$  为一次干湿循环耐崩解性指数 (%)； $a$ 、 $b$  为耐崩解指数与相对失水率的回归参数。

点荷载强度与相对失水率拟合曲线表达式为

$$I_{s(50)} = cW_r + d \quad (5)$$

式中： $I_{s(50)}$  为点荷载强度指数 (MPa)； $c$ 、 $d$  为点荷载强度指数与相对失水率的回归参数。

从图3以及表2、表3中相关系数  $R^2$  可知，岩石的相对失水率与耐崩解指数近似成线性负相关，与点荷载强度近似呈线性正相关。由于软岩结构特点差异，特别是软岩内部结构面存在与分布情况对岩石崩解试验结果与强度试验结果均较大的影响，因此图3中线性相关系数 0.83 以上还是比较好的。

岩石的相对失水率愈大，岩石的耐崩解性愈低；反之，相对失水率愈小，耐崩解性愈强。当含水率变化很小，接近为 0 时，岩石无明显崩解现象，这与实际工程中将新开挖软岩立即浸入水中时，即使浸泡许多天仍保持原状无明显崩解现象相一致<sup>[22]</sup>。

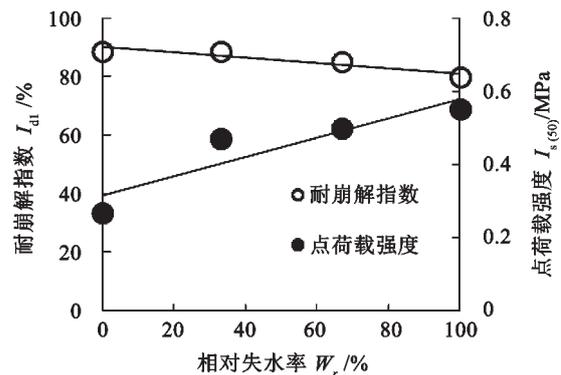
相对失水率增加，强度增加，耐崩解性减小。总体上，所有岩石的强度均受相对失水率影响。相对失水率增加时，岩石的非饱和度增大，强度增长，

表2 一次干湿循环耐崩解指数与相对失水率的回归参数表  
Tab.2 Regression parameters table of slake-durability index and loss of relative moisture in a drying-wetting cycle

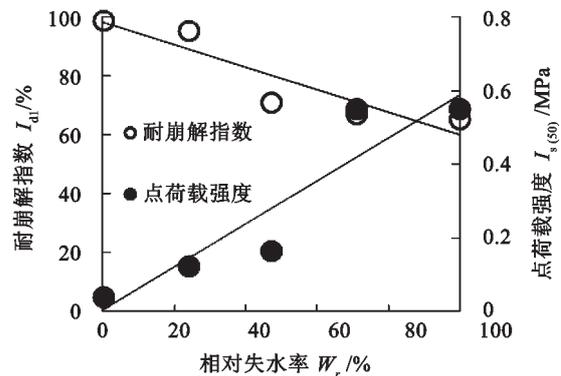
岩石类型	斜率 $a$	截距 $b$	相关系数 $R^2$
中风化砂岩	-0.091 8	90.277	0.860 9
中风化泥岩	-0.380 1	98.073	0.838 9
强风化砂岩	-0.730 2	85.900	0.841 2
强风化泥岩	-0.601 2	82.190	0.962 1

表3 点荷载强度指数与相对失水率的回归参数表  
Tab.3 Regression parameter table of point load strength index and loss of relative moisture

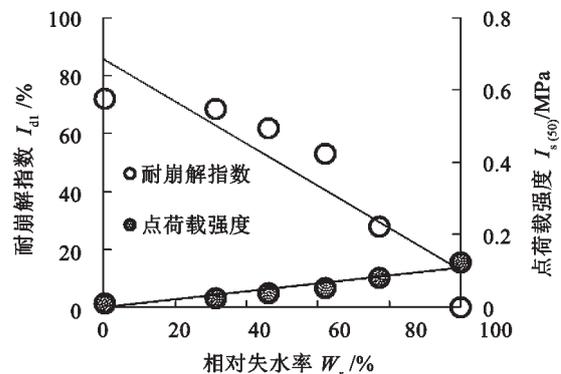
岩石类型	斜率 $c$	截距 $d$	相关系数 $R^2$
中风化砂岩	0.002 6	0.315 9	0.838 5
中风化泥岩	0.005 9	0.004	0.861 4
强风化砂岩	0.001 1	-7E-5	0.914 1
强风化泥岩	0.001 5	0.069	0.870 1



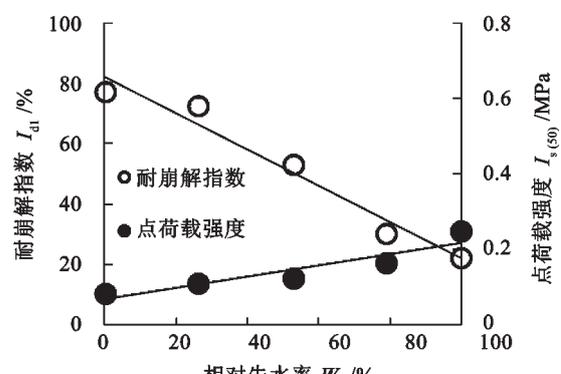
(a) 中风化砂岩



(b) 中风化泥岩



(c) 强风化砂岩



(d) 强风化泥岩

图3 相对失水率对耐崩解指数与点荷载强度的影响关系  
Fig.3 Relationship among the loss of relative moisture, slake-durability index and point load strength for weathered soft rock

这与非饱和岩土强度组成有基质吸力贡献<sup>[4-8]</sup>相吻合;强度增大率1~12倍,耐崩解指数减弱0.1~1倍。所以耐崩解性对水的敏感性弱于强度对水的敏感性。

岩石的耐崩解能力与岩石结构类型相关。如表4所示,中风化岩的耐崩解指数减小幅度明显小于强风化岩,原因是中风化砂岩强度高,受相对失水率影响要弱些,于是耐崩解指数减小幅度要小;而中风化泥岩及强风化砂岩、强风化泥岩,含粘土矿物成分多或强度较低,受相对失水率影响显著,耐崩解指数减小率要大。因此,图3(a)中耐崩解指数

表4 失水程度对风化软岩的耐崩解指数统计  
Tab.4 Slake-durability index of the weathered soft rock by the loss of relative moisture

工况	岩石类型			
	中风化砂岩	中风化泥岩	强风化砂岩	强风化泥岩
未失水 $W_r=0\%$	89%	99%	73%	77%
完全失水 $W_r=100\%$	80%	66%	0.23%	22%
耐崩解指数减少幅度	-10%	-34%	-100%	-71%

降低平缓,而图3(b)~图3(d)中耐崩解指数降低显著。

### 3 结论

1) 干湿循环作用和风化作用均会减弱岩石耐崩解能力。随着干湿循环次数的增加,耐崩解度逐渐减小;岩石的风化程度越高,崩解性越强。

2) 风化岩石的耐崩解指数与干燥强度成正相关,与岩石的失水率成线性负相关。岩石的强度越高,崩解性越弱;随着失水率增加,岩石的耐崩解指数逐渐减小,而岩石强度逐渐增加。

3) 岩石的耐崩解性与岩石结构类型有关,即中风化砂岩,强度高,受相对失水率影响要弱些,耐崩解指数减小幅度率要低;中风化泥岩及强风化砂岩、强风化泥岩,粘土矿物成分含量大或强度低,受相对失水率影响显著,耐崩解指数减小幅度要大。

#### 参考文献:

[1] 朱珍德,邢福东,刘汉龙,等.红砂岩膨胀力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):596-600.  
[2] 冯启言,韩宝平,隋旺华.鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J].工程地质学报,1999,7(3):266-271.

[3] BADGER C W, CUMMINGS A D, Whitmore R L. The disintegration of shale[J]. Journal of the Institute of Fuel, 1956, 29: 417-423.  
[4] 曹雪山.非饱和膨胀土的弹塑性本构模型研究[J].岩土工程学报,2005,27(5):832-836.  
[5] 曹雪山,殷宗泽.非饱和土二维固结简化计算的研究[J].岩土力学,2009,30(9):2575-2580.  
[6] 曹雪山,殷宗泽,凌华.非饱和土受压变形的简化计算研究[J].岩土工程学报,2008,30(1):61-65.  
[7] CAO X S, YUAN J P, HE G L, et al. In situ test and analysis method of air bulging under geomembranes in a shallow-lined reservoir[J]. Geotext. Geomembr, 2015, 43(1): 24-34.  
[8] CAO X S, YUAN J P, HE G L, et al. Investigation of air bulging beneath geomembranes used as a liner for the datun reservoir[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2016, 22(1): 53-66.  
[9] 曹雪山,唐中军.一种可加压土壤干湿循环装置:中国,ZL2016 2 0194256.5[P].2016-03-14.  
[10] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. Engineering Geology, 2009, 108: 36-42.  
[11] 郭永春,谢强,文江泉.红层泥岩崩解特性室内试验研究[J].路基工程,2008(2):53-54.  
[12] 刘新荣,傅晏,郑颖人,等.水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J].地下空间与工程学报,2012(1):77-82.  
[13] QI Jianfeng, SUI Wanghua, LIU Ying, et al. Slaking Process and Mechanisms under Static Wetting and Drying Cycles Slaking Tests in a Red Strata Mudstone[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2015, 33(4): 1-14.  
[14] CHEN HungTa, LIN TzongTzeng, CHANG JuuEn. Leaching behavior and ESEM characterization of water-sensitive mudstone in southwestern Taiwan[J]. Journal of Environmental Science & Health Part A Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering, 2003, 38(5): 909-922.  
[15] WEST G. Strength properties of Bunter sandstone[J]. Tunnels and Tunnelling, 1979, 7(7): 27-29.  
[16] 康红普.水对岩石的损伤[J].水文地质工程地质,1994,21(3):39-41.  
[17] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing(下转第20页)

很高的地方出现在手孔的两端,由此说明边线上手孔两端容易出现集中的高程度拉伸损伤。

参照地铁设计规范中的接头裂缝控制标准,以边线拉伸损伤数值的平均值作为主要评价指标,结合各裂缝张开量下对应挠度和弯矩的大小,对盾构管片接头损伤健康状况进行综合评价。可以将管片接头健康状况分为5个等级,分别是无损、微损、轻损、中损和重损,健康状况评价表如表2所示。

#### 4 结论

1) 在弯矩和轴力共同作用下,混凝土管片接头损伤破坏可分为四个阶段:全面受压阶段、小变形阶段、大变形阶段和混凝土接头接触挤压破坏阶段。

2) 随着弯矩的增加,首先在管片内边缘的手孔内侧和附近出现拉伸损伤,形成两条贯通管片宽度的拉伸损伤带,在宏观上表现为手孔和端肋的拉裂;然后在管片外边缘的接缝两侧形成一条压缩损伤带,在宏观上表现为混凝土挤压剥落现象。

3) 以裂缝张开量为参照,结合管片接头挠度、弯矩和拉伸损伤带平均值为评价指标,对管片接头的损伤状况进行综合评定,将管片接头健康状况分为5个等级,为现场评价提供借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 师永翔,赵武胜.大直径盾构隧道管片接头抗弯性能研究[J].现代隧道技术,2013,50(1):115-122.
- [2] 张厚美,傅德明,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.
- [3] 朱合华,黄伯麒,李晓军,等.盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2153-2160.
- [4] 葛世平,谢东武,丁文其,等.盾构管片接头简化数

值模拟方法[J].岩土工程学报,2013,35(9):1600-1605.

- [5] 刘四进,封坤,何川,等.大断面盾构隧道管片接头抗弯力学模型研究[J].工程力学,2015,32(12):215-224.
- [6] 艾辉军,彭立敏,施成华.基于三维非连续接触模型的管片接头静动力特性分析[J].岩土工程学报,2013,35(11):2023-2029.
- [7] 李宇杰,何平,秦东平.基于混凝土弹塑性损伤本构模型的盾构管片受力分析[J].中国铁道科学,2012,33(1):47-53.
- [8] 庄晓莹,张雪健,朱合华.盾构管片接头破坏的弹塑性-损伤三维有限元模型研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1826-1834.
- [9] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [10] LUBLINER J, OLIVER J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-329.
- [11] 刘巍,徐明,陈忠范.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J].工业建筑,2014,44(S1):167-171.
- [12] 孙庆昭.ABAQUS混凝土塑性损伤模型概述[J].重庆建筑,2014,13(11):70-72.
- [13] 王如路,张冬梅.超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J].岩土工程学报,2013,35(6):1092-1101.
- [14] 许鸣蝉,张子新.大直径盾构隧道管片损伤成因分析及处理措施[J].地下空间与工程学报,2013,9(S1):1705-1712.
- [15] 张雪健,庄晓莹,朱合华.盾构隧道管片接头三维数值模型边界条件研究[C]//海峽两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会.南宁,2014:153-158.

(上接第14页)rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009(46): 355-370.

- [18] 毕忠伟,张志军.岩石的崩解特性与抗压强度的试验研究[J].有色金属,2011,63(2):233-235.
- [19] ZHANG Dan, CHEN Anqiang, LIU Gangcai. Laboratory Investigation of Disintegration Characteristics

of Purple Mudstone under Different Hydrothermal Conditions[J]. J. Mt. Sci, 2012(9): 127-136.

- [20] CECS 239-2008, 岩石与岩体鉴定和描述标准[S].
- [21] GBT 50266-2013, 工程岩体试验方法标准规范[S].
- [22] 王幼麟,蒋顺清.葛洲坝工程某些粉砂岩石崩解特性的研究[J].长江科学院院报,1987,4(2):4-12.