

南水北调中线总干渠衬砌板破坏原因及对输水能力的影响

文 / 王 军 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

肖 华 长江设计集团有限公司

李卓棣 中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司

摘要: 为研究南水北调中线总干渠衬砌板破坏原因及对输水能力的影响,通过对中线总干渠通水运行8年来衬砌板破坏形式及数量的分析,得出高地下水位渠段地下水位升高导致衬砌板隆起和黄河以北气温变化水面变幅区域衬砌板冻胀是总干渠衬砌板破坏的主要形式,建立了总干渠水力学模型,对衬砌板不同破坏数量和不同隆起高度对输水能力的影响进行了定量分析,研究成果对中线总干渠衬砌板维护和输水能力保障有一定的指导意义。

关键词: 水利工程;南水北调中线工程;膨胀土;地下水;快速排水

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.05.073

引言

南水北调中线一期工程从丹江口水库陶岔闸引水,经唐白河流域西部过长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口,沿黄淮海平原西部边缘,在郑州以西孤柏咀处穿过黄河,沿京广铁路西侧北上至北京、天津,全长1432km。其中,渠首至北拒马河段长1197km,为梯形明渠,采用全断面衬砌,防渗减糙。工程沿线地层差异性较大,在具有承压水的渠段,地下水可能会带来渠道衬砌及渠坡稳定问题^[1-2]。衬砌板破坏将影响减糙效果,对中线一期总干渠输水能力带来了一定影响,影响总干渠供水效益的发挥。目前,已有众多学者开展了我国寒区渠道衬砌板冻胀破坏机理^[3-6]、中线总干渠衬砌板水下修复^[7]等相关研究工作。本研究以南水北调中线一期总干渠明渠段为研究对象,分析通水以来的衬砌板破坏规律,研究衬砌板的破坏原因,并从衬砌板破坏数量和隆起高度方面分析对总干渠输水能力的影响。

一、中线总干渠衬砌板破坏原因

(一) 衬砌板破坏形式分析

中线总干渠通水运行8年多来,在历年巡查过程累计发现了230余处、约7500块衬砌板破坏现象。根据衬砌板破坏统计台账,衬砌板破坏问题从陶岔渠首至北拒马河明渠段均有,主要破坏形式有隆起、冻胀、裂缝、错台、滑移、沉陷、破损等。总干渠渠道衬砌板为素混凝土,隆起、沉陷、冻胀等变形均会导致衬砌板裂缝,但本文所述的裂缝破坏是指衬砌板无明显其他破坏情况下的衬砌板开裂。

本文针对现有的统计资料,对衬砌板破坏形式进行了统计分析(见图1),衬砌板隆起和冻胀破坏占比分别达到51%和44%,其他破坏形式的衬砌数量合计占比仅为5%。由此来看,中线总干渠衬砌板破坏的主要形式是隆起和冻胀。

(二) 衬砌板破坏原因分析

1. 衬砌板隆起破坏原因分析

渠道高地下水位、外水入渠、膨胀土膨胀、冻胀等均可能导致衬砌板隆起破坏,但高地下水位渠段衬砌板

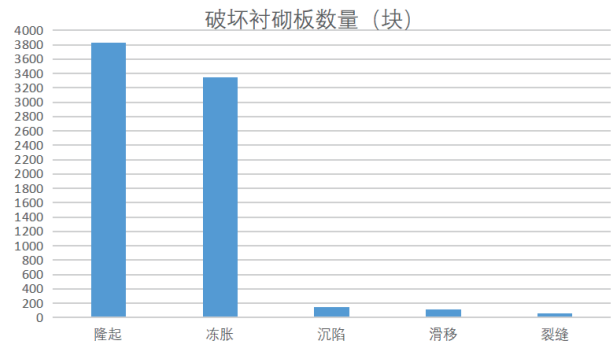


图1 不同破坏形式的衬砌板数量统计

隆起破坏的数量占有隆起衬砌板破坏数量的93%,且破坏多发生于汛期降雨后。因此,降水等原因导致的渠道两侧地下水升高是渠道衬砌板隆起破坏的主要原因。

2. 冻胀破坏原因分析

冻胀破坏多发现于12月至次年2月份,破坏位置均位于渠道水位变幅区域。杨凤桂对中线总干渠京石应急渠道衬砌冻胀原因进行了分析,认为衬砌板基土含水量高,温度低,造成土体水当大气负温传入土中时,土中的自由水冻结成晶体并积聚,致使衬砌板冻胀破坏^[3]。

3. 沉陷破坏原因分析

衬砌板沉陷破坏的原因比较复杂,有的是因为强降雨导致外水入渠,衬砌板下土体掏失后衬砌板塌陷;有的是高地下水位渠段衬砌板先发生隆起破坏后,渠道内水流掏失衬砌板下土体形成空腔,进而又发生沉陷破坏;有的是衬砌板下土体填筑不密实,土体含水量升高湿陷,导致衬砌板沉陷破坏。

4. 裂缝破坏原因分析

本文研究的衬砌板裂缝主要是指非隆起、沉陷、冻胀引起的裂缝,主要开裂的原因是混凝土和易性差、养护或搅拌不到位等造成的收缩裂缝。

5. 滑移破坏原因分析

目前,衬砌板发生滑移变形的数量较少,从现场情况来看,主要是因为强降雨外水入渠对衬砌板及其下面

土体冲刷导致的衬砌板移位。

二、衬砌板破坏对中线总干渠输水能力的影响

(一) 中线总干渠水力学模型

构建中线总干渠恒定非均匀流水力学模型，研究分析衬砌隆起和淤积对总干渠输水能力的影响。

将总干渠划分为若干计算单元，通过迭代求解基本方程来推求各个断面的平均水力要素。采用Saint-Venant方程组来描述渠道一维无压恒定流，其连续方程和动量方程为：

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dx} + q = 0 \\ -\frac{dZ}{dx} = \frac{u^2}{c^2 R} + \frac{u}{g} \frac{du}{dx} - \frac{2uq}{gF} \end{cases} \quad (2.1-1)$$

式中：Q为流量；F为过水断面面积，对于非棱柱体渠段，过水断面面积是水位和流程的直接函数，对于棱柱体渠段，F是水位的直接函数；u为流速；z为水位；C为谢才系数；q为单位长渠段上分出的流量，假设分水流量垂直于总干渠渠线，流出为正。

采用向前差分格式，对式(2.1-1)进行离散，式(2.1-1)可变换为：

$$\begin{cases} Q_i = Q_{i+1} + q\Delta x_i \\ Z_i + \frac{u_i^2}{2g} = Z_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2g} + \frac{u_i^2}{c^2 R} \Delta x_i - \frac{2u_i q}{gF} \Delta x_i \end{cases} \quad (2.1-2)$$

同理，对于总干渠上的倒虹吸、有压涵洞等输水建筑物，可采用一维有压恒定流方程进行模拟，其连续方程和动量方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{u^2}{c^2 R} - \frac{2uq}{gF} = 0 \end{cases} \quad (2.1-3)$$

式中：H为测压管水头。

一般情况下中线工程倒虹吸过水断面面积沿程不

变，式(2.1-3)可变换为：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q^2}{F^2 c^2 R} - \frac{3Qq}{gF^2} = 0 \end{cases} \quad (2.1-4)$$

对式(2.1-4)进行离散：

$$\begin{cases} Q_{i+1} - Q_i + q\Delta x_i = 0 \\ H_{i+1} = H_i - \frac{u_i^2}{c^2 R} \Delta x_i + \frac{3u_i q}{gF} \Delta x_i \end{cases} \quad (2.1-5)$$

根据渠段下游水位和上游流量，即可通过迭代计算得到计算单位的水位和流量，从而得到总干渠不同流量状态下的水面线。

(二) 衬砌板破坏对总干渠输水能力的影响分析

根据中线总干渠衬砌板破坏形式及处置手段，衬砌板隆起对中线总干渠输水能力的影响主要包括两类：

1) 当渠道衬砌板发生隆起变形时，水流表面阻力增加，渠道糙率相应增加；2) 当采用临时处置措施时，水流表面阻力不仅会相应增加，并且渠道过流面积因临时压重措施而减小。

参考《水力计算手册(第二版)》中河道植被糙率的计算方法，确定中线总干渠衬砌板隆起导致的糙率变化：

$$n = n_0 \sqrt{1 + C_d \frac{\sum A_i}{2gAL} \frac{1}{n_0^2} R^{4/3}} \quad (2.1-1)$$

式中：n为考虑衬砌板隆起后的渠道综合糙率；n₀为渠道设计糙率，取为0.015；C_d为衬砌板隆起阻力系数，取为1；ΣA_i为衬砌板隆起面积。

结合渠道实际衬砌破损情况，分别在渠首段、河南段、河北段选取计算渠段，利用式(2.2-1)计算不同衬砌板隆起数量和隆起高度下渠道综合糙率变化，结合中线总干渠恒定非均匀流计算模型，研究衬砌板隆起对总干渠过流能力的影响，计算结果详见表1。

表1 不同衬砌板隆起数量和隆起高度对总干渠输水能力的影响

计算段	衬砌板破坏数量(块)	比例	衬砌板平均隆起高度(cm)	糙率	设计水深下过流能力(m ³ /s)	过流能力较设计值减少	设计流量下渠道水深(m)	设计加大水深(m)
渠首段	18	5%	5	0.0156	336.0	4.01%	8.17	8.78
	18		10	0.0163	323.3	7.64%	8.33	
	18		15	0.0168	311.9	10.89%	8.48	
	30	8%	5	0.0161	327.3	6.47%	8.28	
	30		10	0.0170	308.4	11.90%	8.53	
	30		15	0.0180	292.3	16.47%	8.76	
	37	10%	5	0.0163	322.6	7.83%	8.34	
	37		10	0.0175	300.6	14.12%	8.64	
	37		15	0.0186	282.5	19.28%	8.91	

计算段	衬砌板破坏数量(块)	比例	衬砌板平均隆起高度(cm)	糙率	设计水深下过流能力(m ³ /s)	过流能力较设计值减少	设计流量下渠道水深(m)	设计加大水深(m)
河南段	21	5%	5	0.0156	310.5	2.97%	7.11	7.71
	21		10	0.0162	299.2	6.50%	7.24	
	21		15	0.0168	289.0	9.68%	7.36	
	34	8%	5	0.0160	303.3	5.20%	7.19	
	34		10	0.0169	286.8	10.39%	7.38	
	34		15	0.0178	272.6	14.80%	7.57	
	42	10%	5	0.0162	299.2	6.50%	7.24	
	42		10	0.0173	279.8	12.55%	7.47	
	42		15	0.0184	263.8	17.55%	7.69	
河北段	12	5%	5	0.0157	58.0	3.33%	4.4	4.49
	12		10	0.0163	55.7	7.17%	4.46	
	12		15	0.0169	53.6	10.59%	4.55	
	20	8%	5	0.0161	56.4	5.94%	4.45	
	20		10	0.0172	53.0	11.65%	4.6	
	20		15	0.0181	50.1	16.42%	4.7	
	25	10%	5	0.0164	55.5	7.47%	4.47	
	25		10	0.0176	51.5	14.13%	4.64	
	25		15	0.0188	48.3	19.54%	4.8	

根据计算结果可知，当衬砌板破损比例为5%，衬砌板平均隆起高度为10cm时，典型计算段糙率将大于0.016；当衬砌板破损比例大于8%，衬砌板平均隆起高度为5cm时，典型计算段糙率将大于0.016。糙率增加导致渠段过流能力减小，对于渠首段和河南段，当衬砌板隆起数量达8%以上，且衬砌板隆起高度大于20cm时，计算渠段通过设计流量时渠道内水位将超过加大水位；对于河北段，当衬砌板隆起数量占5%以上，且衬砌板隆起高度大于15cm时，计算渠段通过设计流量时渠道内水位将超过加大水位。

结语

(1) 通过对中线总干渠通水运行8年来衬砌板破坏形式及数量等监测统计资料的分析，高地下水水位渠段地下水水位升高导致衬砌板隆起和黄河以北气温变化水面变幅区域衬砌板冻胀是总干渠衬砌板破坏的主要形式。

(2) 当明渠段衬砌板破损比例为5%，衬砌板平均隆起高度为10cm时，或当衬砌板破损比例大于8%，衬砌板平均隆起高度为5cm时，渠段糙率将大于0.016，超过了渠道综合糙率设计值0.015。

(3) 对于渠首段和河南段，当衬砌板隆起数量占8%以上，且衬砌板隆起高度大于20cm时，通过设计流量时渠道内水位将超过加大水位；对于河北段，当衬砌板隆起数量占5%以上，且衬砌板隆起高度大于15cm时，

通过设计流量时渠道内水位将超过加大水位。研究成果对中线总干渠衬砌板维护和输水能力保障有一定的指导意义。

参考文献

[1] 崔皓东, 王金龙. 南水北调中线陶岔-沙河南部分典型挖方渠段渗流场分布及渗流控制措施研究[R]. 武汉: 长江科学院, 2010.

[2] 张家发, 王满星, 丁金华. 典型条件下堤身堤基渗流规律分析[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(5): 23-27.

[3] 杨枫桂. 南水北调中线总干渠京石应急段渠道衬砌冻胀裂缝原因分析[J]. 水科学与工程技术, 2012(1).

[4] 秦广莉. 渠道衬砌体冻胀破坏机理及防冻措施研究[J]. 水利科技与经济, 2016(02): 20-22.

[5] 刘旭东. 混凝土衬砌渠道抗冻胀技术措施及其机理研究[D]. 西北农林科技大学, 2010.

[6] 张伯平, 牟过斌, 闫宁霞. 渠道衬砌体冻胀破坏机理与防治对策[J]. 水利与建筑工程学报, 2003(01): 10-12.

[7] 张克, 段寅, 刘曦, 时之光. 输水渠道衬砌板水下快速修复技术方案研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 358-361.