

# 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述

顾培英<sup>1,2</sup>, 王岚岚<sup>1,2</sup>, 邓昌<sup>1,2</sup>, 汤雷<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 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)

**摘要:**为合理模拟渡槽损伤, 客观评价渡槽结构安全, 依据渡槽破坏实例, 结合他人数值仿真、模型试验研究成果, 归纳总结渡槽地震、风致、水毁、耐久性典型破坏特征。重点分析简支梁式渡槽桩基、支撑结构、槽身可能破坏模式。结果表明: 桩基存在土体支承不足、桩身抗压能力不足、桩顶位移超限破坏模式; 墩底易发生弯曲或剪切破坏, 牛腿易剪切破坏, 排架柱两端、连梁节点附近易破坏; 槽身纵梁可能发生弯曲、剪切、弯剪组合失效, 端横梁易损伤, 底板跨中及两端、侧墙与肋板底部、上部拉杆易开裂; 渡槽还存在开裂、碳化、剥落剥蚀、渗漏、钢筋锈蚀、接缝止水等耐久性破坏。

**关键词:**渡槽结构; 破坏特征分析; 破坏模式; 简支梁; 综述

中图分类号: TV332

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)05-0001-08

**Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China**//GU Peiying<sup>1,2</sup>, WANG Lanlan<sup>1,2</sup>, DENG Chang<sup>1,2</sup>, TANG Lei<sup>1,2</sup> (1. *Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** In order to simulate the aqueduct damage and evaluate the structure safety in a reasonable way, aqueduct failure characteristics were summarized and analyzed based on failure living examples existing research results of numerical simulations and model tests. The typical failure characteristics of aqueducts caused by earthquake, high wind, flood and durability were summarized. The possible failure modes of the pile foundation, the support structure and the aqueduct body for aqueduct structures of simple supported beam types were mainly analyzed. Firstly, the failure modes of the pile foundation includes three types, insufficient soil bearing, insufficient compression strength of the pile and the displacement of the pile tip exceeding limiting values. Secondly, bending or shear failure may occur at the pier-bottom. Shear failure may occur at the corbel. Failures tend to occur at the ends of a bent frame column and around the joints of a coupling beam. Thirdly, failure types of bending, shear or shear-bending may occur at the longitudinal beam. The end floor beams, the mid-span and ends of a bottom plate, the bottom of side walls, the bottom of rib plates and the upper tie bars are easy to be damaged. Furthermore, there are many durability damages, such as cracks, concrete carbonation, concrete scaling, leakage, reinforcement corrosion and seal damage.

**Key words:** aqueduct structures; failure characteristics analysis; failure modes; simple supported beam; review

我国是农业大国, 过去修建了大量用于灌溉的中小型渡槽, 流量、跨度较小, 结构设计参照当时水工建筑及桥梁规范, 未对结构问题作专题研究。随着南水北调工程与国内水利基础建设的兴建, 渡槽被广泛采用, 大型渡槽常采用预应力新技术, 相关研究成果相继出现。国外渡槽建造较少, 研究文献不多, 且大多关注渡槽抗震问题, 强调结构抗震设计<sup>[1]</sup>。长距离调水工程中, 渡槽是一种重要的水工建筑物, 一旦失效, 直接和间接经济损失不可估量,

社会影响深远, 有必要开展大跨度高架渡槽结构安全评价技术研究。

国内外对混凝土坝与桥梁结构安全评价、混凝土结构老化病害评估及损伤诊断已开展大量研究, 笔者对大体积混凝土结构(如重力坝)整体安全性也进行了某些尝试<sup>[2-7]</sup>, 但国内外渡槽结构安全评价研究较少, 特别是输水状态下结构整体安全评价。笔者提出基于振动诊断技术的大跨度高架渡槽结构安全评价技术, 该技术将损伤局部性与整体安全性

有机联系起来,实时掌握渡槽结构安全状态。为此需对渡槽结构典型破坏特征有较为全面的了解,笔者首先依据收集到的国内部分渡槽破坏实例,结合他人部分数值仿真、模型试验研究成果,分析渡槽典型破坏特征。由于我国震灾严重,洪涝灾害频繁,许多地区经常出现大风(包括台风)天气,渡槽运行过程中常遭遇地震、台风、洪涝导致的突发性破坏。针对多厢矩形或多槽 U 形预应力筒支梁式重力槽墩或排架渡槽结构,重点分析了桩基、支撑结构、槽身可能的破坏模式。

# 1 渡槽破坏实例及破坏特征分析

## 1.1 渡槽破坏实例

根据收集到的文献资料<sup>[8-33]</sup>,统计分析了国内部分渡槽破坏实例,见表 1。由表 1 可知,渡槽破坏原因主要包括地震、风致、水毁、耐久性问题(包括混凝土碳化、止水老化、冻融、腐蚀、水流冲刷、土体冻胀、不均匀沉降等)、超载破坏及设计不合理或施工质量差等,其中地震、风致、水毁破坏具有突发性。

表 1 部分渡槽破坏实例

序号	工程名称	工程概况	结构形式	破坏时间	破坏情况	破坏原因	破坏原因分类
1	湖北孝感下分场渡槽 <sup>[8]</sup>	1968 年建成,全长 290 m,13 跨,23 榀排架	矩形双悬臂单排架结构	1974-02-22	空槽时被大风吹倒 240 m,风力 7~8 级	大风吹倒	风致破坏
2	湖北枣阳滚河渡槽 <sup>[8-10]</sup>	1970 年建成,全长 2 060 m,跨度 15 m	矩形双悬臂空心墩、筒支桁架单排架结构	1974-04-17	9 跨筒支单排架槽身(共 135 m)被大风吹倒	低估了结构静风荷载,忽略了结构脉动风荷载效应,且结构自身抗风构造存在缺陷	风致破坏
3	甘肃白银市靖会电力提灌工程总干二泵祖厉河渡槽 <sup>[11]</sup>		U 形薄壁排架结构	1977-07-28	渡槽 2 号墩冲垮,2 跨槽身倒塌	祖厉河发生洪水	水毁破坏
4	甘肃白银市靖会电力提灌工程总干渠野糜川渡槽 <sup>[11]</sup>			1977-11-25	22 跨 330 m 长的槽身和排架几分钟内全部倒塌	渡槽出水口东侧渐变段漏水沉积	水毁破坏
5	广西上思县那布渡槽 <sup>[8,12]</sup>	1977 年建成,全长 1 300 m,30 m 跨桁架拱 36 跨,10 m 跨三铰拱 22 跨	矩形截面桁架拱及三铰拱	1980-07-23	32 个桁架拱被台风吹倒,风力 7~8 级。	未考虑风荷载作用,横向稳定性差是风致破坏的主要原因	风致破坏
6	沈阳张沙布渡槽 <sup>[13-14]</sup>	1969 年建成,长 35 m,7 跨,宽 4.28 m	排架结构	1976 年、1986 年	1976 年排架明显开裂,裂缝逐年扩大,1978 年加固,1986 年再次在加固段顶部附近发现裂缝	设计未考虑冻胀荷载作用	土体冻胀破坏
7	甘肃省景泰川电力提灌工程 <sup>[15-17]</sup>	一期工程 1969—1974 年建成,渡槽 41 座,长 6.167 km;二期工程 1984—1994 年建成,渡槽 94 座,长 11 495 m	多为 U 形薄壁筒支梁式排架或重力墩结构	1982 年春灌前(一期)、1996—2004 年(二期)	1982 年春灌前一期工程总干渠 83% 槽身开裂,西干渠 86% 槽身开裂。1996—2004 年间混凝土保护层剥落;钢筋外露并锈蚀严重;部分构件棱角变圆;槽身漏水严重;基础部位混凝土膨胀。	施工质量差,保护层薄;设计未考虑温度影响,端部未设置附加钢筋,纵向钢筋短,断面厚度小,混凝土抗裂强度不够;基础受地下水侵蚀;混凝土产生冻融破坏;裸露在空气中的结构主要为碳化破坏	施工质量差 设计不合理 腐蚀破坏 冻融破坏 碳化破坏
8	湖北宜昌宋家嘴渡槽 <sup>[8,18]</sup>	1971 年建成,全长 1 990 m,123 榀排架,124 节槽身	矩形筒支梁式排架结构	1983 年	1983 年 4 月 25 日 16 榀排架和 17 节槽身(共 272 m 长)被大风吹垮。1983 年 8 月 28 日 33 榀排架和 35 节槽身(共 560 m 长)被大风吹垮	静风荷载估计过小,未考虑脉动风载,致使结构配筋严重不足,刚架横梁首先发生破坏,导致整个结构倒塌	风致破坏
9	甘肃白银市靖会电力提灌工程 <sup>[19-20]</sup>	1972—1973 年建成(野糜川渡槽 1977 年失事重建),7 座渡槽,长 1 855 m,跨度 15 m	U 形薄壁排架或重力墩结构	1986 年发现裂缝,大面积渗漏,1991 年全面检查观测	排架:70 榀排架中 64 榀有 525 条裂缝,最长 10.09 m,最宽 2.7 mm;大多位于排架柱棱角上,竖向开裂;数量、速度逐年增加;保护层普遍脱落。槽身:发生开裂和面积渗漏现象,混凝土剥落,钢筋锈蚀。	排架:保护层厚度不足;施工用水和骨料中含大量氯离子,混凝土碳化也加剧了钢筋锈蚀,产生裂缝。槽身:破坏原因同上,裂缝产生渗漏,渗漏使裂缝进一步扩展,并产生冻融破坏	施工质量差 腐蚀破坏 碳化破坏 冻融破坏
10	宁夏固海扬黄灌溉工程白府都渡槽 <sup>[21]</sup>	灌溉工程 1978 年开工,1986 年竣工	U 形薄壁结构	1993-11-23	冬灌期间槽身突然整节垮落	由于连年冻融交替破坏,冬灌期间槽身突然整节垮落	冻融破坏
11	浙江衢州市铜山源灌区会泽里渡槽 <sup>[22-23]</sup>	1978 年建成,全长 705 m,由 46 榀排架和 47 节槽身组成,跨度 15 m	U 形薄壁排架结构	2000 年左右	47 节槽身均有 5~16 条横向贯穿裂缝,间隔 0.5~1.0 m,槽身外侧有游离氧化钙析出,漏水严重。混凝土浇筑质量较差,部分底板厚度仅 8 cm(原设计 10 cm),构件承载力、抗裂不满足规范要求	混凝土浇筑质量较差,工程日趋老化,经常超负荷运行	施工质量差 碳化破坏 超载破坏

续表 1

序号	工程名称	工程概况	结构形式	破坏时间	破坏情况	破坏原因	破坏原因分类
12	陕西宝鸡市冯家山水库灌区北干渠肖家桥渡槽 <sup>[24]</sup>	1973 年建成,全长 36 m,3 跨	U 形薄壁排架结构	2002-08-01	渡槽出口码头和第 3 跨槽身塌落至沟内,连接段与渐变段损坏,总长 19 m	渗漏水作用下土壤饱和,砌石支墩处土体软化,承载力降低,下游岸坡滑坡,导致事故发生	水毁破坏
13	齐齐哈尔市富拉尔基区工农兵灌区干渠渡槽 <sup>[25]</sup>	1963 年建成,全长 36 m,6 跨	矩形连续梁式灌注桩排架结构	2004 年前(根据部分资料推测)	桩基表面混凝土剥离;进出口浆砌石翼墙多处开裂,整体向内倾斜,渗水漏水;侧墙与底板多处开裂,缝宽 5~8 mm,渗水漏水严重	桩基多年受水流冲刷,表面混凝土剥离;翼墙基础长期浸泡、冲刷;桩基冻拔导致槽身不均匀沉降,引起侧墙与底板开裂,槽身渗水漏水	水流冲刷土体冻胀破坏
14	宁夏固海扬水工程 <sup>[26-27]</sup>	1978—1992 年建成,共 62 座渡槽	多为 U 形薄壁筒支梁式排架结构	2007 年左右	排架、槽身开裂,混凝土碳化严重,槽身多处渗水,渗水处混凝土疏松剥落,钢筋外露锈蚀严重。1.6% 的渡槽基本完好;61.3% 需维修;37.1% 基本不能使用	渡槽砂石料及施工用水含有害可溶性盐,存在长期冻融破坏、混凝土碳化现象,且设计不合理,施工质量差	腐蚀破坏设计不合理施工质量差碳化破坏冻融破坏
15	陕西汉中市石门水库灌区沥水沟渡槽 <sup>[28-29]</sup>	1972 年建成,全长 214.1 m,最大高度 43.3 m,最大跨度 17.13 m	U 形薄壁排架结构	2008-05-12	混凝土碳化、开裂破损严重,汶川地震后整体受损严重,基本无法正常正常运行	施工质量差,经几十年运行,槽箱和排架混凝土碳化、开裂破损严重,汶川地震加剧了渡槽破坏	施工质量差碳化破坏地震破坏
16	四川玉溪河引水工程团结渡槽 <sup>[30]</sup>	20 世纪 70 年代末建成,全长 102 m,3 跨	U 形双悬臂支撑墩结构	2013-04-20	2~5 号帽框牛腿发生剪切破坏,裂缝上下贯通,缝宽上大下小;支撑摇轴下部混凝土被压碎	渡槽距雅安地震中很近,轴线与地震传播方向大致呈 90°,横向破坏性大,槽身侧倾,槽内水体横向震荡,帽框牛腿偏心受压;原荷载和地震合力超过混凝土承载力	地震破坏
17	四川玉溪河引水工程大石板渡槽 <sup>[31]</sup>	20 世纪 70 年代末建成,全长 68 m,2 跨	U 形双悬臂承台结构	2013-04-20	2 号、3 号承台左右牛腿剪切破坏,牛腿根部产生竖向贯穿裂缝,缝宽 0.5 mm	牛腿偏心受压,引起剪切破坏	地震破坏
18	湖北宜昌市善溪冲水库老林河渡槽 <sup>[32-33]</sup>	20 世纪 70 年代初建成,全长 377 m	砌体槽身双曲连拱式排架结构	2014 年左右	槽身开裂、漏水严重,拱圈和排架钢筋外露锈蚀	设计不合理,混凝土强度不满足要求,施工质量差,钢筋保护层厚度不足,混凝土碳化严重,侧墙止水老化及底板出现裂缝,基础存在不均匀沉降	设计不合理施工质量差碳化破坏止水老化不均匀沉降

## 1.2 地震破坏特征

依据收集到的国内部分渡槽破坏实例,结合他人部分数值仿真、模型试验研究成果,分析渡槽典型破坏特征。王博<sup>[34]</sup>采用拟静力法得到高强混凝土渡槽支架模型破坏过程。研究得出当水平荷载增至最大荷载的 45%~64% 时,远端排架连梁顶部和近端连梁底部出现垂直弯曲裂缝;荷载反向后,裂缝贯通。随着水平荷载的反复施加,连梁端出现约 45° 方向交叉斜裂缝,远端排架上端外侧和下端内侧、近端排架上端内侧和下端外侧相继出现水平裂缝。随着荷载的继续增大与循环次数的增多,排架梁端剪切斜裂缝和柱脚处弯曲裂缝出现并发展,柱脚截面受压侧混凝土保护层剥落,之后相应位置处纵向受力钢筋屈服并向外凸出,形成以裂缝为中心逐步向两侧扩展的塑性铰。试验表明,排架两端产生塑性铰,呈延性破坏,进入处于非弹性阶段后,变形主要集中在塑性铰区。袁文阳<sup>[35]</sup>对矩形三槽筒支三向预应力空心重力墩渡槽结构进行动力有限元分析,槽墩最大应力出现在墩帽顶部靠近支座部位,槽身应力较大部位主要是下部纵梁、横梁及上部拉杆。渡槽橡胶支座减震模型横向、纵向地震时最大动应力分别在槽身中墙根部、槽墩底部。槽墩模型破坏形态表明,强震时槽墩发生纵向弯曲破坏,破坏部位

位于槽墩基础以上 1/4 高度范围内。徐建国等<sup>[36]</sup>采用渡槽薄壁结构弹塑性动力分析模型,对矩形薄壁筒支预应力结构开展非线性地震响应计算分析,结果表明,强震作用下除槽台附近的渡槽端部、中跨跨中位置和排架柱根部进入一定程度的非线性状态外,其余部位均处于线弹性工作状态,非线性状态部位首先出现破坏。刘琨等<sup>[37]</sup>对大跨度箱形筒支预应力渡槽进行三维有限元法地震响应数值分析,结果表明槽墩与基础接触面背风侧出现局部拉裂破坏。冯奕<sup>[38]</sup>对 U 形排架渡槽采用三维 CAD/CAE 分析模型,通过多点多维地震波作用下的动力时域分析,得到混凝土损伤破坏主要集中在排架柱与盖梁和承台交接处、盖梁靠近支座部位、槽身端部及槽身与支座连接部位,其中排架柱与盖梁、承台交接部位最早出现地震损伤。何祥瑞等<sup>[39]</sup>采用二维线弹性模型扩展有限元法对 U 形排架渡槽进行计算分析,结果表明渡槽结构连梁与排架柱节点、排架柱脚是排架渡槽的抗震薄弱部位。

实际工程(陕西汉中市石门水库灌区沥水沟渡槽、四川玉溪河引水工程团结渡槽和大石板渡槽)表明,架空结构对地震效应非常敏感,尤其是高度或跨度大的架空结构水平地震作用响应,其破坏主要集中在下部结构与基础部分,渡槽槽墩及下部基础

作为渡槽的支撑结构,对渡槽整体安全稳定至关重要<sup>[37]</sup>。

### 1.3 风致破坏特征

从调查到的渡槽(湖北枣阳滚河渡槽、湖北孝感下分场渡槽、广西上思县那布渡槽和湖北宜昌宋家嘴渡槽)风致破坏实际状况看,渡槽均是在顺风向风力作用下,沿渡槽横向(与输水方向垂直)倒塌,顺风向破坏为结构的主要破坏形式<sup>[40]</sup>。这主要是由于风载作用于渡槽槽体,造成槽体横向位移过大,从而导致槽墩或支撑排架无法承受而出现破坏。渡槽风致破坏具有突发毁灭性。

目前渡槽设计已对风载作用有较为清楚的认识,抗风设计得到重视,一般情况下这类新建渡槽风致破坏的可能性不大,除非出现实际风载远大于设计值的极端台风天气。

### 1.4 水毁破坏特征

根据甘肃白银市靖会电力提灌工程总干二泵祖厉河渡槽和陕西宝鸡市冯家山水库灌区北干渠肖家桥渡槽工程实例并结合其他水毁破坏情况<sup>[41]</sup>,渡槽水毁破坏最终是由地基变形引起,主要有以下两种情况:①大多数渡槽修建于河床上,基础往往会遭遇水流冲刷、挖沙船挖沙、洪水袭击,地基易被掏空,加之洪水长时间浸泡,地基承载力下降且不均匀,导致基础不均匀沉降,引起槽身倾斜或开裂,甚至出现基础被冲毁,渡槽整体倒塌的现象。②对于非河床式渡槽,若遭遇暴雨洪涝灾害,地基被洪水长时间浸泡,同样会导致基础不均匀沉降,甚至会引发滑坡、泥石流等地质灾害,造成槽身倾斜或开裂,甚至基础被冲毁,渡槽整体倒塌。

### 1.5 耐久性破坏表现形式

渡槽耐久性破坏主要包括混凝土裂缝、混凝土碳化、钢筋锈蚀、混凝土剥落或剥蚀、渗漏、地基变形(尤其是不均匀沉降)等。

**a. 混凝土裂缝。**混凝土裂缝是渡槽结构最常见的病害形式,一般位于槽身和支承结构上。裂缝主要有以下两种:①结构性裂缝(又称受力裂缝),由承载能力不足引起;②非结构性裂缝,主要由变形引起。裂缝具有直观性,不同原因引起的裂缝具有不同特征,裂缝分布及扩展程度不同,结构受损程度亦不同。严重开裂将破坏结构整体性,削弱结构承载力,影响渡槽正常运行,甚至丧失承载能力而毁损。同时,渡槽裂缝会导致其他病害的发生、发展,如环境水侵蚀、渗漏溶蚀、冻融破坏、混凝土碳化和钢筋锈蚀等,以上病害与裂缝病害恶性循环,对渡槽耐久性产生较大危害。

**b. 混凝土碳化与钢筋锈蚀。**以下情况会引起

钢筋锈蚀:①混凝土碳化;②混凝土中含有硫酸盐、氯离子;③外在侵蚀性介质渗入;④应力腐蚀。钢筋锈蚀对结构性能影响如下:①钢筋与混凝土间黏结力降低,发生黏结破坏;②钢筋有效截面面积减小,钢筋承载力降低;③钢筋锈蚀后体积膨胀,引起混凝土开裂、剥落,截面有效尺寸减小,结构承载力降低。

**c. 混凝土剥落或剥蚀。**混凝土剥落或剥蚀破坏是一个由表及里、由浅到深的破坏过程,引起因素如下:①水流冲刷;②混凝土质量差,暴露在空气中出现风化或剥落现象;③冻融作用;④混凝土碳化;⑤侵蚀性介质作用。

**d. 渗漏。**渡槽渗漏原因如下:①槽身裂缝,尤其是贯穿性裂缝;②止水结构失效;③混凝土施工质量差。渡槽渗漏导致水量损失,引起或加剧混凝土溶蚀、侵蚀、钢筋锈蚀等病害,加速渡槽老化,影响结构耐久性。此外,还可能冲蚀基础及岸坡,危及渡槽整体稳定。

**e. 地基变形。**渡槽地基变形包括如下情况:①地基不均匀沉降,纵向会使槽身产生错位或拉裂,横向则会引起槽墩或排架倾斜,影响渡槽正常运行;②进出口段渗漏及沉降,由于我国早期修建的很多渡槽的槽身与渠道进出口连接段置于填方基础上,填土质量差,部分未采取有效防渗或排水措施,过水时在渗流作用下,容易引起槽身与连接段错动、止水拉裂,可能发生边坡失稳破坏,危及渡槽边跨基础及排架安全;③土体冻胀导致基础变形,如基础上抬或拉断,由于基础各处土壤性质、含水量不同,上抬不均匀,纵向槽身呈“罗锅形”,横向支承结构倾斜,产生平面弯曲,可能导致槽身漏水、槽墩(架)倾斜、边坡失稳,甚至整体倒塌等严重后果。

我国北方大部分地区每年约在11月份进入冻结期,并持续5个月左右,最大冻土层深度达1.5m。水工建筑物冻害发生普遍,涵、闸、渡槽、渠道、桥梁和挡土墙等中小型建筑物的冻胀、融沉、滑坡破坏更为突出,往往建成第一年冬季即出现上抬、裂缝和严重变形,并逐年加剧,有些3~5a即完全破坏<sup>[42]</sup>。北方不少渡槽因基础冻害发生不同程度的断裂、倾斜、上抬等破坏,最终使渡槽无法运行。例如黑龙江佳木斯桦南县共和灌区南干渠钢渡槽中间桩基冻拔上抬,向阳山三合干渠清茶渡槽也因冻害导致槽身上抬,新兴八支渠渡槽因冻害而毁弃等<sup>[43]</sup>。

位于寒旱区的西部,由于独特的地理和气候特点,地面灌溉造成土地大量盐分滞留和堆聚,致使结构遭到侵蚀破坏,加之冻融交替环境因素影响,导致寒旱地区渡槽结构及基础遭受严重破坏。据统计,我国西部地区水工混凝土建筑物70%的破坏受损

与冻融破坏、硫酸盐侵蚀、氯离子侵蚀有关,其中35%左右因严重盐冻破坏而导致提前失效<sup>[16]</sup>。

## 2 简支梁式渡槽结构破坏模式

渡槽由槽身、支撑结构、基础及进出口建筑物等部分组成,有多种可能破坏模式,不同结构类型有不同的破坏模式,目前大型渡槽多为多厢矩形或多槽U形预应力简支梁式重力槽墩或排架渡槽,基础多为混凝土桩基础<sup>[44]</sup>。根据上述小型渡槽破坏实例、部分大型渡槽模型试验及数值仿真研究成果,重点分析简支梁式渡槽结构桩基、支撑结构、槽身的破坏模式。

### 2.1 桩基破坏模式

桩基按承载性状分为摩擦型桩和端承型桩两大类。摩擦型桩在承载能力极限状态下,桩顶传来的竖向荷载全部或大部分由桩侧摩阻力承担,根据桩侧摩阻力分担比不同,摩擦型桩又分为摩擦桩和端承摩擦桩两种:①摩擦桩,竖向荷载全部由桩侧摩阻力承担,端承力可忽略不计;②端承摩擦桩,荷载大部分由桩侧摩阻力承担,端承力只占一小部分。端承型桩在承载能力极限状态下,竖向荷载全部或大部分由桩端承担,同样端承型桩又分为端承桩和摩擦端承桩两种:①端承桩,竖向荷载全部由端承力承担,桩侧摩阻力可忽略不计;②摩擦端承桩,荷载大部分由端承力承担,桩侧摩阻力只占其中一小部分。

桩基主要有3种破坏模式:①土体支承力不足,桩尖持力层较软的打入桩和孔底沉积较厚的钻孔灌注桩属于摩擦桩,当桩侧摩阻力不足以抵抗桩顶荷载时,发生刺入破坏;②桩身抗压能力不足,对于端承桩或桩身有缺陷的摩擦型桩,桩侧摩阻力尚未充分发挥,但因桩身抗压能力不足,会导致上部荷载作用下桩身混凝土被压碎;③桩顶位移超过设计允许值,持力层为砂土、粉土的打入桩或扩底桩属于端承摩擦桩或摩擦端承桩,端承力分担比较大,端承力破坏需较大位移,土体支承力尚未达到极限状态,但桩顶位移往往会超过设计允许值。

渡槽水毁破坏实例表明,破坏最终是由地基变形引起的,对于桩基而言,水毁对短桩危害性较大,尤其是对荷载全部或大部分由桩侧摩阻力承载的短摩擦型桩。

结合渡槽耐久性破坏中的土体冻胀破坏实例,对于桩基(多为摩擦型桩)而言,桩侧摩阻力除承担上部荷载外,还承受冻拔作用。在非冻土区,主要根据地基承载力确定桩基埋深,根据上部荷载设计其截面尺寸及配筋。冻土区摩擦型桩的设计除此之外,还应满足地基土切向冻胀力作用下结构整体稳

定和桩身强度要求,冻深较深地区冻胀力往往是桩长及配筋设计的控制条件。早期建成的小型渡槽由于上部结构及槽内水体自重较小,桩长较短,桩基抗冻拔能力较差,冻土区土体冻胀问题较为突出。对于目前新建或将建的大型渡槽,由于上部结构及水体自重大,桩长较长,桩基(包括摩擦型桩、端承型桩)抗冻拔能力较强,较少出现土体冻胀破坏。

此外,对于受地下水硫酸盐、氯离子等侵蚀腐蚀破坏的桩基,需在地下水位干湿交替区加强防腐蚀处理,以保证桩基的承载力。

### 2.2 支撑结构破坏模式

渡槽支撑结构,支撑渡槽上部结构并将上部荷载传递至基础,在地震中易损伤破坏,其抗震性能直接影响渡槽整体结构抗震能力。拟重点分析重力式槽墩、排架两种支撑结构破坏模式。

#### 2.2.1 重力式槽墩

袁文阳<sup>[35]</sup>对槽墩开展的模型试验表明,强震时槽墩发生纵向弯曲破坏,破坏位于槽墩基础以上1/4高度范围内。刘琨等<sup>[37]</sup>进行的渡槽地震响应数值分析可知,槽墩与基础接触面背风侧出现局部拉裂破坏。由于渡槽重力式槽墩研究成果较少,但在某种程度上与桥墩类似,所以这里还借鉴了部分桥墩破坏模式研究成果。对于桥梁而言,强震作用下钢筋混凝土桥墩破坏模式主要为弯曲、剪切、弯剪、扭转及弯扭破坏等<sup>[45]</sup>,其中前3种破坏模式较为常见。孙治国等<sup>[46]</sup>根据剪切与弯曲变形比值关系提出了桥墩破坏模式判别标准。艾庆华<sup>[47]</sup>通过振动台试验可知,桥墩试件具有良好箍筋约束时,呈水平开裂破坏;小剪跨比和低配箍率时,小震后多为水平裂缝,中震后裂缝呈斜向发展,小剪跨比下剪切裂缝更为明显。剪跨比为决定桥墩破坏模式的重要影响因素,高柔结构一般呈弯曲破坏特征,矮刚结构呈剪切破坏特征<sup>[48]</sup>。渡槽地震破坏实例也表明,支撑墩牛腿剪跨比较小,均发生剪切破坏。

由此可见,强震作用下渡槽槽墩底部易发生弯曲或剪切破坏,牛腿易发生剪切破坏。结合耐久性破坏实例分析,槽墩也不可避免存在耐久性破坏。

#### 2.2.2 排架

王博<sup>[34]</sup>的渡槽结构模型破坏试验结果表明,混凝土排架两端形成塑性铰,呈延性破坏,进入非弹性阶段后,变形主要集中在塑性铰区。徐建国等<sup>[36]</sup>通过渡槽结构非线性地震响应计算分析,得出强震作用下渡槽排架柱根部进入一定程度的非线性状态,形成塑性铰。冯奕<sup>[38]</sup>认为地震过程中,损伤最早出现在排架柱与盖梁、承台交接部位。何祥瑞等<sup>[39]</sup>计算分析表明,渡槽结构连梁与排架柱节点、排架柱脚

是排架渡槽的抗震薄弱部位。

结合渡槽排架耐久性破坏实例(湖北宜昌宋家嘴渡槽被大风吹垮,刚架横梁首先发生破坏,导致整个排架结构倒塌<sup>[18]</sup>),排架往往存在开裂、碳化、混凝土剥落或剥蚀、钢筋锈蚀等破坏。

总的来说,渡槽排架除一般耐久性破坏外,在强震、大风作用下,排架柱两端、连梁与排架柱节点附近也易发生破坏。

### 2.3 槽身破坏模式

袁文阳<sup>[35]</sup>计算结果表明,槽身应力较大部位主要是下部纵梁、横梁及上部拉杆,渡槽橡胶支座减震模型横向、纵向地震时最大动应力分别发生在槽身中墙根部、槽墩底部。徐建国等<sup>[36]</sup>得出强震作用下渡槽中跨跨中位置进入一定程度的非线性状态,形成塑性铰。冯奕<sup>[38]</sup>动力时域分析表明,地震作用下U形渡槽槽身两端存在损伤破坏。

结合槽身耐久性破坏实例分析,槽身往往存在开裂、碳化、混凝土剥落或剥蚀、渗漏、钢筋锈蚀等破坏。此外,槽身接缝止水也经常发生老化破坏。对于一般矩形截面渡槽,槽身各部件破坏模式分析如下<sup>[49]</sup>:①侧墙,侧墙有可能由于底部弯矩过大遭受破坏或迎水面开裂。②底板,底板跨中截面最易拉裂。③纵梁,纵梁两端搁置于承台上,梁上作用槽身传递的自重和水重,可视为简支梁,纵梁可能在弯曲或剪切、弯剪组合作用下失效。跨中截面、临近支座截面及两者之间分别存在弯曲、剪切及弯剪组合失效的可能性。④肋板与拉杆,只有当其他部分变形破坏后才会发生肋板与拉杆破坏。肋板可按悬臂梁考虑,承担侧板传递的静水压力,其底部可能因抗弯能力不足而破坏。顶部拉杆可按杆件考虑,主要承受轴力,可能因抗拉能力不足被拉断。

## 3 结语

笔者依据收集到的国内部分渡槽破坏实例,结合他人部分数值仿真、模型试验研究成果,分析我国渡槽典型破坏特征。渡槽运行过程中,除存在一般性破坏外,还会遭遇地震、台风、洪涝导致的突发性破坏。针对多厢矩形或多槽U形预应力简支梁式重力槽墩或排架渡槽结构,重点分析了桩基、支撑结构、槽身可能的破坏模式。

桩基存在土体承载力不足、桩身抗压能力不足、桩顶位移超过设计允许值3种破坏模式。槽墩在强震作用下,槽墩底部易发生弯曲或剪切破坏,牛腿易发生剪切破坏;排架在强震、大风作用下,排架柱两端、连梁与排架柱节点附近易发生破坏。槽身下部纵梁可能发生弯曲、剪切、弯剪组合失效,槽身下部

端横梁易损伤,槽身底板跨中及两端、侧墙底部、肋板底部、上部拉杆易开裂。除此之外,渡槽还不可避免存在开裂、碳化、混凝土剥落或剥蚀、渗漏、钢筋锈蚀、接缝止水等耐久性破坏。

### 参考文献:

- [1] 袁纯强.大型渡槽剪力滞效应的研究[D].上海:同济大学,2007.
- [2] 顾培英,黄勤红,邓昌,等.基于重整化群的水工混凝土结构整体破坏概率研究[J].水利水运工程学报,2010(4):1-5.(GU Peiying, HUANG Qinrong, DENG Chang, et al. Damaged probability of concrete for hydraulic structure based on renormalization group theory [J]. Hydro-science and Engineering, 2010(4): 1-5. (in Chinese))
- [3] GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Determination of local damage probability in concrete structure [C]//2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Nanjing: China Association of Hydraulic Engineering Education, 2012:489-493.
- [4] GU Peiying, DENG Chang, ZHANG Daosheng, et al. Probability of overall collapse for concrete gravity dam based on renormalization group theory of unequal probability unit [C]//The 2nd SREE Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2013). London: CRC Press, 2014:135-140.
- [5] 顾培英,邓昌,汤雷.基于重整化群方法的三棱柱单元整体破坏概率模型[J].水利水电科技进展,2014,34(3):16-19,80.(GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. A model of overall damage probability of triangular prism unit based on renormalization group method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3):16-19,80. (in Chinese))
- [6] 顾培英,邓昌,汤雷.基于重整化群有限原胞级整体安全性分级评价[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):355-360.(GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Safety classification evaluation of an overall structure based on limited primitive cell level using renormalization group theory [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(4):355-360. (in Chinese))
- [7] 顾培英,邓昌,肖仕燕,等.基于二维逾渗相变重整化群的混凝土重力坝断面破坏评价[J].水利水电科技进展,2015,35(6):31-36,85.(GU Peiying, DENG Chang, XIAO Shiyun, et al. Development of cross-section damage based on two-dimensional percolation transition with renormalization group theory for concrete gravity dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6):31-36,85. (in Chinese))
- [8] 李遇春.渡槽风工程研究[D].上海:同济大学,2001.

- [9] 李遇春. 某双悬臂渡槽风致破坏原因分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1485-1489. (LI Yuchun. Wind damage mechanism analysis of a double-cantilever aqueduct bridge [J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 2008, 36(11): 1485-1489. (in Chinese))
- [10] 李遇春. 滚河渡槽风致破坏机理分析[C]//第七届(2006)全国风工程和工业空气动力学学术会议. 成都:西南交通大学, 2006:185-190.
- [11] 范昌德,陈正堂. 靖会电力提灌工程志[M]. 兰州:甘肃人民出版社, 1994.
- [12] 潘旦光,楼梦麟,李遇春. 渡槽风毁事例分析[J]. 水利学报, 2001, 32(9): 92-96. (PAN Dangguan, LOU Menglin, LI Yuchun. Case study of a wind-destroyed aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(9):92-96. (in Chinese))
- [13] 李洪升,张小鹏,李光伟. 合理考虑冻胀力的结构物设计原则[J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 77-80. (LI Hongsheng, ZHANG Xiaopeng, LI Guangwei. Design principle of structure considered frost force [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(5): 77-80. (in Chinese))
- [14] 常风生,张顶山,姜文俊,等. 张沙布渡槽桩柱破坏的成因及维修[J]. 东北水利水电, 2004, 22(2): 35-36. (CHANG Fengsheng, ZHANG Dingshan, JIANG Wenjun, et al. Cause and repair of pile damage in Zhangshabu Aqueduct [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2004, 22(2): 35-36. (in Chinese))
- [15] 戴星亮. 钢筋混凝土薄壳渡槽破坏机理与防治对策研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.
- [16] 常周梅. 寒旱区渡槽排架的侵蚀破坏机理及结构性态分析[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2014.
- [17] 闫立泰. 渡槽防渗漏处理措施初探[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 143-144. (YAN Litai. Anti seepage treatment measures of aqueduct [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(6): 143-144. (in Chinese))
- [18] 李遇春,楼梦麟. 某排架式渡槽风致破坏机理分析[J]. 中国农村水利水电, 2002(9): 38-40. (LI Yuchun, LOU Menglin. Wind damage mechanism analysis of bent aqueduct [J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(9): 38-40. (in Chinese))
- [19] 庞勇. 渡槽排架出现裂缝的原因及处理措施[J]. 甘肃科技, 2012, 28(6): 123-124. (PANG Yong. Causes and treatment measures of crack about aqueduct frame [J]. Gansu Science and Technology, 2012, 28(6): 123-124. (in Chinese))
- [20] 郭俊晟. 渡槽裂缝产生的原因及加固补强技术应用[J]. 甘肃科技, 2013, 29(2): 105-106. (GUO Juncheng. Causes and reinforcement technology of aqueduct crack [J]. Gansu Science and Technology, 2013, 29(2): 105-106. (in Chinese))
- [21] 赵永定. 工程冻害问题浅析[J]. 陕西水利, 1997(2): 30-31. (ZHAO Yongding. Simple analysis of freeze problems in engineering [J]. Shaanxi Water Resources, 1997(2): 30-31. (in Chinese))
- [22] 胡玉棠. 渡槽设计中的几点体会[J]. 浙江水利科技, 2001(增刊1): 52, 54. (HU Yutang. Experience of designing aqueducts [J]. Zhejiang Hydraulics, 2001(Sup1): 52, 54. (in Chinese))
- [23] 石向荣. 预应力钢筋混凝土矩形渡槽槽身设计[J]. 浙江水利科技, 2002(5): 13-14. (SHI Xiangrong. Design of prestressed concrete rectangular flume [J]. Zhejiang Hydraulics, 2002(5): 13-14. (in Chinese))
- [24] 樊宏孝,高晓婷,王凤玲. 冯家山水库灌区北干渠肖家桥渡槽水毁事故原因分析[J]. 西北水电, 2008(3): 21-22. (FAN Hongxiao, GAO Xiaoting, WANG Fengling. Analysis of the cause of Xiaojiaqiao Aqueduct Failure [J]. Northwest Water Power, 2008(3): 21-22. (in Chinese))
- [25] 姜波,聂龙涛,聂婷雯. 工农兵灌区渡槽渗漏成因分析及修补措施[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(3): 294. (JIANG Bo, NIE Longtao, NIE Tingwen. Causes and treatment measures of aqueduct seepage [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012, 40(3): 294. (in Chinese))
- [26] 和志国. 固海扬水工程渡槽防渗加固处理的探讨[J]. 水利建设与管理, 2010(6): 57-59. (HE Zhiguo. Reinforcement treatment of aqueduct seepage in Guhai Engineering [J]. Water Resources Development & Management, 2010(6): 57-59. (in Chinese))
- [27] 杜宇旭,张玲. 固海扬水渠道工程老化评价中数学模型的应用[J]. 宁夏工程技术, 2008, 7(1): 87-91. (DU Yuxu, ZHANG Ling. The application of project aging appraisal mathematical model in channels of Guhai Water-lifting Project [J]. Ningxia Engineering Technology, 2008, 7(1): 87-91. (in Chinese))
- [28] 韩晓,荣扬莉. 沥水沟渡槽震损恢复重建设计研究[J]. 陕西水利, 2015(2): 163-165. (HAN Xiao, RONG Yangli. Reconstruction design of aqueduct earthquake damage [J]. Shaanxi Water Resources, 2015(2): 163-165. (in Chinese))
- [29] 王亚红,王正中,林凯生. 沥水沟渡槽槽身过流能力复核[J]. 人民黄河, 2011, 33(1): 117-118. (WANG Yahong, WANG Zhengzhong, LIN Kaisheng. Flow capacity check of aqueduct [J]. Yellow River, 2011, 33(1): 117-118. (in Chinese))
- [30] 郭毅. 玉溪河灌区“4·20”地震团结渡槽震损应急修复浅析[J]. 城市建设理论研究, 2014. Doi: 10.3969/j.issn.2095-2104. 2014. 03. 0303. (GUO Yi. Simple analysis of emergency repair about aqueduct earthquake damage in 4·20 earthquake [J]. Urban Construction Theory Research, 2014. Doi: 10.3969/j.issn.2095-2104. 2014. 03. 0303. (in Chinese))

- [31] 袁松涛. 大石板渡槽承台牛腿裂缝加固技术浅谈[J]. 四川水利, 2014, 35(1): 25. (YUAN Songtao. Reinforcement technology of aqueduct crack in cap corbel [J]. Sichuan Water Conservancy, 2014, 35(1): 25. (in Chinese))
- [32] 赵家成, 张亮亮, 潘青松. 某渡槽结构的老化成因分析及修复措施[J]. 山西建筑, 2016, 42(2): 22-24. (ZHAO Jiacheng, ZHANG Liangliang, PAN Qingsong. The cause analysis and maintenance measures of an aqueduct structure of aging [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(2): 22-24. (in Chinese))
- [33] 潘青松, 赵家成, 张亮亮. 老林河渡槽的老化现状及成因的分析[J]. 灾害与防治工程, 2014(2): 39-43. (PAN Qingsong, ZHAO Jiacheng, ZHANG Liangliang. Present situation and causes of aging of Laolin River Aqueduct [J]. Disaster and Control Engineering, 2014(2): 39-43. (in Chinese))
- [34] 王博. 大型渡槽结构地震反应分析理论与应用[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [35] 袁文阳. 大型渡槽结构抗震分析与模型试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- [36] 徐建国, 王博, 陈淮, 等. 大型渡槽结构非线性地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2006, 22(4): 35-40. (XU Jianguo, WANG Bo, CHEN Huai, et al. Non-linear earthquake response analysis of a large-scale aqueduct [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(4): 35-40. (in Chinese))
- [37] 刘琨, 段亚辉. 基于有限元法的大跨度预应力渡槽地震响应分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(6): 121-124, 128. (LIU Kun, DUAN Yahui. Seismic response analysis of long-span prestressed aqueduct based on finite element method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 121-124, 128. (in Chinese))
- [38] 冯奕. 基于三维设计平台的输水结构随机地震破坏风险分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [39] 何祥瑞, 张华, 纪爱丽. 基于XFEM的渡槽单向地震动作用下裂纹开展分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 186-189. (HE Xiangrui, ZHANG Hua, JI Aili. Analysis of crack growth of aqueduct under effect of single dimensional earthquake force based on XFEM [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 186-189. (in Chinese))
- [40] 李遇春. 高排架渡槽风振的计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 139-145. (LI Yuchun. Computing method of wind-induced vibration for tall-bent aqueduct [J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences), 2002, 30(2): 139-145. (in Chinese))
- [41] 黎定国. 渡槽水毁破坏及加固处理[C]//第八届全国水利水电工程青年学术讨论会. 南昌: 江西省南昌水利水电高等专科学校, 2000: 43-45.
- [42] 李超. 水工混凝土抵御冻融破坏对策研究[J]. 水利天地, 2012(6): 30-31. (LI Chao. Study on the countermeasure of hydraulic concrete to freezing and thawing damage [J]. Water Conservancy World, 2012(6): 30-31. (in Chinese))
- [43] 徐长华, 满守耀. 寒区渡槽冻害防治措施[J]. 黑龙江水利科技, 2011, 39(6): 283-284. (XU Changhua, MAN Shouyao. Prevention measures of aqueduct frost damage in cold region [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2011, 39(6): 283-284. (in Chinese))
- [44] 夏富洲, 王长德, 曹为民, 等. 大流量预应力渡槽设计和施工技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 20-25. (XIA Fuzhou, WANG Changde, CAO Weimin, et al. Research on design and construction technology for large flow prestressed concrete aqueduct [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 20-25. (in Chinese))
- [45] 韩强, 董慧慧, 郭婕. 考虑强度和刚度退化及捏拢效应的钢筋混凝土桥墩滞回模型及其参数识别[J]. 振动工程学报, 2015, 28(3): 381-393. (HAN Qiang, DONG Huihui, GUO Jie. Hysteresis model and parameter identification of RC bridge piers considering strength and stiffness degradation and pinching effect [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(3): 381-393. (in Chinese))
- [46] 孙治国, 李宏男, 王东升, 等. RC桥墩弯剪破坏判别准则与抗震分析的改进模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 42-50. (SUN Zhiguo, LI Hongnan, WANG Dongsheng, et al. Discrimination criterion governing flexural-shear failure modes and improved seismic analysis model for RC bridge piers [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 42-50. (in Chinese))
- [47] 艾庆华. 钢筋混凝土桥墩抗震性能数值评价与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [48] 李永哲. 钢筋混凝土桥墩弹塑性变形及塑性铰区特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004.
- [49] 贾超. 基于可靠度的结构风险分析及其在南水北调工程中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.

(收稿日期: 2016-10-26 编辑: 骆超)

