

克孜河渡槽充水载荷试验及结构承载能力评价

何建新, 杨志豪, 刘亮, 刘涛

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了评价克孜河渡槽结构的承载能力,需开展充水载荷试验。通过实时监测试验加载过程中各梁跨的跨中挠度值和卸载后残余挠度值,分析加载过程中挠度值随荷载的变化规律,确定加载级别与稳荷时间,判断渡槽结构在各级荷载下的工作状态,并引入结构承载能力评价指标结合监测结果对结构承载能力进行评价。结果表明:充水载荷试验分6级进行,稳荷时间30 min即可满足试验要求;结构各梁跨的实测挠度随水荷载增加而增大,在满槽水位时达到最大值,纵梁、左边梁和右边梁最大实测挠度分别为3.40、2.53和2.35 mm,且各级荷载下实测挠度与荷载呈显著的线性关系,线性相关系数均在0.95以上,结构处于线弹性工作状态;结构承载能力评价指标挠度极值、相对残余挠度和挠度校验系数均小于规范限值,并通过与同类工程对比,综合反映出克孜河渡槽结构具有较好的承载能力。

关键词: 渡槽; 充水载荷试验; 承载能力评价; 相对残余挠度; 挠度校验系数

中图分类号:TV672+.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)05-0175-06

Water-filled loading test and evaluation of structural bearing capacity of the Kezihe River aqueduct

HE Jianxin, YANG Zhihao, LIU Liang, LIU Tao

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to evaluate the bearing capacity of the Kezihe River aqueduct structure, Water-filled loading test was carried out. Based on the real-time monitoring of the deflection value in the midspan of the loading process and the residual deflection value after unloading, the variation of the deflection value with the upgrading of the load in the loading process was analyzed, the loading level and the load stabilization time was determined, the working state of the structure under different loads was clarified, and the structural bearing capacity was evaluated using structural bearing capacity evaluation indices. The results show that the water-filled loading test was carried out in six stages, and 30 min of load stabilization time would suffice according to the test requirements. The measured deflection value of each beam rose with the increase of the load and reached the maximum value of 3.40 mm (longitudinal beam), 2.53 mm (left beam) and 2.35 mm (right beam) when the aqueduct was at full water level. The measured deflection had a significant linear relationship with the load at all stages, with the linear correlation coefficient reaching 95% or above, indicating that the structure was in a linear elastic working state. The values of the maximum deflection, relative residual deflection and deflection calibration coefficient of the structural bearing capacity evaluation indices were all lower than the specified maximum values in the specification. Compared with similar projects, the Kezihe River aqueduct structure has good bearing capacity.

Key words: aqueduct; water-filled loading test; bearing capacity evaluation; relative residual deflection; deflection calibration coefficient

1 研究背景

新疆维吾尔自治区克孜河渡槽槽身断面尺寸大,工程区气候干燥、昼夜温差显著,槽身腹板混凝土受温

度应力作用,在自身干缩及底板混凝土约束条件下出现了较多温度裂缝,可能影响结构的承载能力^[1-2]。因此,在渡槽通水前进行充水载荷试验以验证槽身结构的承载能力是否满足运行要求是有必要的。

收稿日期:2020-06-01; 修回日期:2020-10-20

作者简介:何建新(1973-),男,河南扶沟人,硕士,副教授,硕士生导师,研究方向为水利水电工程。

目前,国内关于渡槽结构承载能力评价大多是以实测值与理论计算值的定性分析或再结合实测极值与规范中规定的允许值的对比为依据,张保军等^[3]、张文胜等^[4]通过开展充水试验,将实测的挠度值与理论计算值作对比,验证了结构承载能力的可靠性;冯光伟等^[5]、黄君宝等^[6]、刘帅等^[7]、宋志鹏等^[8]采用现场监测与三维有限元分析相结合的方法分析了不同工况下渡槽结构的应力应变及变形规律,通过与实测结果作对比,探明了结构的工作状态,并基于分析结果结合现行规范对渡槽结构承载能力进行了评价。但仅依靠定性分析及单一的极值评价指标无法充分反映渡槽结构的承载能力,例如,在槽中水位起伏变化情况下,随结构残余变形的积累,结构的弹性工作性能、渡槽在建设期和运行期受施工因素及环境因素的影响,结构的承载能力储备等问题均不能由上述评价方法反映。丁宇等^[9]根据钢筋的实测应力结合正交设计方法、神经网络模型和有限元分析对渡槽真实力学参数进行了反演,并与实测值进行对比,有较高的精确性;张锋^[10]采用考虑多因素的层次分析法对渡槽结构的安全性进行了评价;祝彦知等^[11]针对钢筋混凝土渡槽,提出了非概率时变可靠度分析方法对渡槽的结构可靠度进行了计算,这些方法可为渡槽结构承载能力的定量评价提供参考,但仍未突破承载能力评价指标单一的局限性。在桥梁结构承载能力评价中,李兴义等^[12]通过对比静载试验监测成果与三维模型理论计算结果,采用校验系数对桥梁结构承载能力现状进行了定量评价;张林华^[13]、张茵涛^[14]、吴建奇等^[15]除采用校验系数评价结构承载能力外,又通过相对残余挠度评价指标对结构的弹性工作性能做出了定量评价;王凌波等^[16]通过建立理论校验系数的推算方法,进一步优化了校验系数的评定方法,这些评价指标的使用及优化为渡槽结构承载能力的定量评价提供了新思路。



图1 克孜河渡槽整体现场图片

渡槽充水试验方案设计是结构承载能力评价的关键,但方案中加载级别及稳定荷载时间的确定多以工程经验为主,受主观因素影响强烈,缺乏客观依据,徐家湾渡槽充水试验分5级加载级别,最高一级为加大流量工况对应水位,每一级加载完成后稳定3 d再逐级放水^[17];沙河渡槽充水试验分设计水位和满槽水位2级加载,稳定荷载时间由监测所需时间确定^[18];湍河渡槽充水试验共设计水位和满槽水位2级加载工况,采用连续加载方式^[19];龙场渡槽充水试验分5级加载,加载至加大水位,加载完成后的静停时间随加载级别的提高而延长^[20]。

为评价克孜河渡槽结构的承载能力,采用实时监测系统,通过实时监测充水加载过程和卸载后该渡槽结构各测点的挠度值及挠度变化规律,分析确定充水载荷试验的加载级别、稳荷时间和结构的工作状态,并采用挠度极值、相对残余挠度和挠度校验系数结合监测结果对渡槽结构承载能力进行评价。该研究可为类似工程的充水载荷试验和承载能力评价提供参考依据。

2 工程概况

克孜河渡槽工程地处新疆维吾尔自治区喀什地区疏附县,是跨克孜河调水的输水工程,全长740 m,起止桩号为0+500 m~1+240 m。渡槽段共分为22跨,每跨长度为30 m,渡槽整体现场图片如图1所示(沿图片向内渡槽跨次递增),设计流量及加大流量分别为87、100 m³/s,相应水深分别为2.47、2.63 m,主要建筑物等级为3级。渡槽为“先浇后张”预应力钢筋混凝土结构,分两次浇筑,首次浇筑至八字墙以上25 cm,第2次浇筑腹板、顶板结构。渡槽槽身分为两孔,纵坡1/550,尺寸均为5.5 m×3.5 m(宽×高)。渡槽下部结构采用3根排架柱,柱顶设置盖梁,柱底位于钢筋混凝土承台上。渡槽槽身横断面示意图见图2。

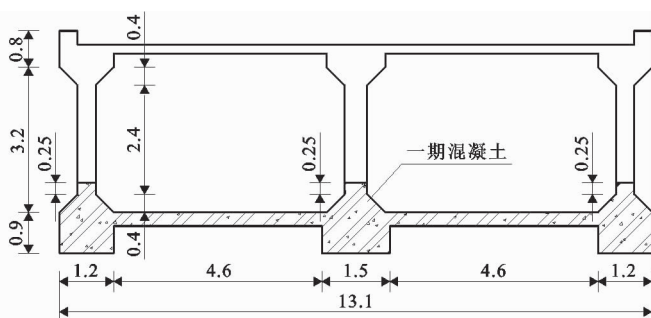


图2 克孜河渡槽横断面示意图(单位:m)

3 充水载荷试验

充水载荷试验分为充水加载和退水卸载两个阶段。

3.1 封堵方案

3.1.1 试验段选择 前期的调查资料表明,渡槽第7跨腹板混凝土出现裂缝最多,其结构的承载能力损失也应最大,对该跨承载能力的评价对于渡槽的安全运行有重要意义。同时,为模拟渡槽在实际运行条件下槽墩的沉降,需增加第8跨用于给第7、8跨之间的槽墩施加对称荷载。因此,选定渡槽第7、8跨为试验段进行充水载荷试验,其中第7跨作为主要的挠度监测段,相应的仪器设备均布置在第7跨测点处。

3.1.2 封堵措施 在渡槽内第6跨下游和第9跨上游左、右两孔共设立4个封堵围堰,封堵方式采用370 mm厚M10砂浆砖砌体为主体结构,并在背水面用钢管架支撑,迎水面以砂浆抹面和高强聚氨酯防水层作为防渗材料。在下游封堵围堰靠近底板的位置设置2根DN300的塑料排水管,以实现第2阶段的退水卸载。

3.2 充水载荷试验方案

3.2.1 充水加载级别与稳荷时间 充水加载设为5级加载:前3级分别为1/4、1/2和3/4设计流量对应水位(0.62、1.24和1.85 m),第4级为设计水位(2.47 m)、第5级为加大水位(2.63 m)。满载水位(3.00 m)是渡槽实际运行中出现概率极低的工况,对应的荷载可能对结构的承载能力有一定的影响,而通过监测该工况下控制断面的挠度值,可更充分地探明渡槽结构的承载能力。因此,在5级加载级别监测结果的基础上,以施加的荷载不会影响到结构承载能力为先决条件,可增加满载水位为第6级加载级别。

根据本次充水试验结果,第5级加载级别下荷载与挠度呈线性关系且实测挠度值(2.93 mm)小于结构设计允许值(50 mm)和对应工况下理论计算值(3.75 mm)^[21],主要是因为渡槽结构的混凝土实测强度高于理论设计强度,且预应力钢绞线实测强度与理论设计强度相近,使得结构总体刚度大于理论设计值,所以在此工况下结构的实际承载能力符合规范设计规定且优于理论设计情况,可增加第6级加载级别。通过分析第6级加载级别下挠度的监测结果,验证了该判别方式的合理性(详见后文)。

国内学者对于稳荷时间的选取主要是参考工程

经验,并没有相应的数据支持。当稳荷时间过长时,在持续水荷载作用下,结构的承载能力会受影响且监测结果也失去了准确性^[22];若时间过短,槽中水位仍在波动且结构各构件变形未协调完成,监测所得挠度值偏小,对结构的承载能力评价不利。因此,本试验采用电子式百分表实时监测试验过程中的挠度变化,并根据稳荷时间段内实测的挠度数据,以挠度值在一段时间内的变幅为指标分析确定稳荷时间。以纵梁跨中在各级荷载稳定时间段30 min内实测的挠度数据为例,相应挠度曲线见图3。

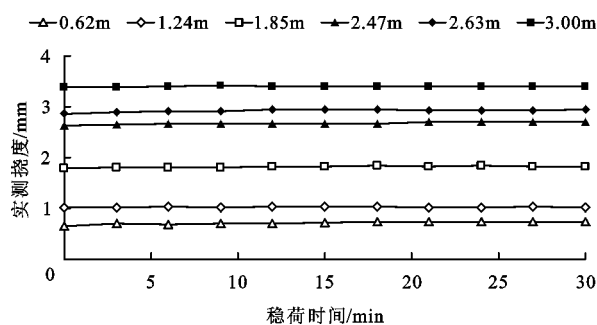


图3 各级荷载下稳荷30 min内纵梁跨中实测挠度曲线

由图3可知,各级荷载稳荷时段内纵梁跨中挠度值变幅逐渐减小,且时段末连续10 min内挠度值趋于稳定,说明在稳荷时段内结构协调变形完成,可进行下一级加载,因此以30 min作为稳荷时间是可行且合理的。

3.2.2 退水卸载试验 卸载分级与加载保持一致,最后一级加载完成及监测结束后,逐级退水卸载。在退水过程中,控制左、右两孔水位,保证水位相近,并在放空后待挠度值趋于稳定后进行结构残余挠度的监测。

3.3 监测仪器布置

3.3.1 监测设备安装 试验监测仪器采用电子式数显百分表,型号为25×0.01 mm,主要测量结构的直线位移,读数精度可达0.01 mm。将百分表通过信号线接入相应的数据采集系统,设置监测频率为1次/min,可实时地监测结构的位移变化。百分表通过磁性表座安装在第7跨测点下方预先搭建的脚手架上,并调整测杆使其与结构位移方向平行。

3.3.2 测点布置 该渡槽为梁式渡槽,在结构受力时会产生竖向位移,相应的监测点则选在结构的端部和跨中^[23]。本次试验在左边梁、纵梁、右边梁的跨中及端部共布置9个测点,其中端部用于监测槽墩在水荷载作用下产生的沉降值和各梁支座的变形值,相应的测点布置图如图4所示。



图4 渡槽跨中位移及槽墩沉降测点布置示意图(结构底部)

4 结果与分析

4.1 槽墩沉降监测结果与分析

各级加载过程中第7跨、第8跨共用槽墩的边墩沉降量(左边墩和右边墩沉降平均值)和中墩沉降量的时程曲线见图5。

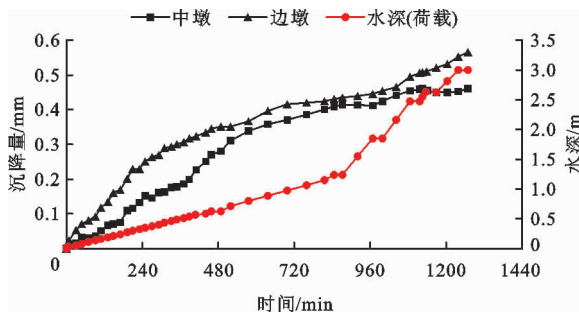


图5 加载过程中槽墩沉降时程曲线

由图5可知,中墩和边墩的沉降量随水深(试验荷载)的增大而增大,在满槽水深时,沉降量达到最大。加载期间未出现明显不均匀沉降,槽墩地基结构强度、变形满足设计要求。以边墩和中墩沉降量的平均值作为槽墩整体的沉降量,相应成果作为跨中挠度计算及结果分析的依据。

4.2 跨中挠度监测结果与分析

监测所得位移数据扣除相应的沉降量及支座变形,则得到相应的实测挠度数据。加载过程中渡槽纵梁和左、右边梁的跨中挠度时程曲线见图6。

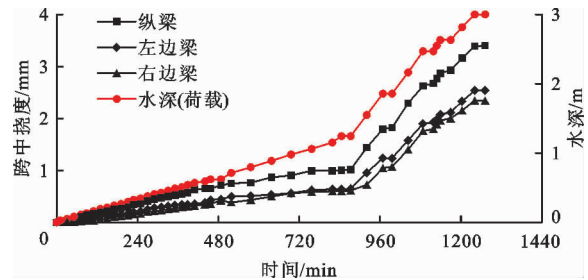


图6 渡槽纵梁和左、右边梁跨中挠度时程曲线

由图6可知,各梁跨中挠度随水深(荷载)的增加而增大,且近似呈线性变化,而变化速度的不同是因为更换水泵导致水荷载加载速率发生变化所致;在满槽水深时,挠度值达到最大,左边梁、纵梁、右边梁分别为2.53、3.40、2.35 mm。

大型预应力混凝土渡槽结构在水荷载作用下变形的宏观表现为左、右边梁的挠度实测值及其增长趋势相近,纵梁的挠度始终大于两边梁的挠度^[24]。本次充水试验挠度监测结果与一般规律相符,验证了监测结果的合理性。

每一级加载级别施加的荷载为第7、8两跨达到相应的平均水深时的总水量的水重(g 取 9.8 kN/m^3),为进一步探明各加载级别下结构的工作状态,提取每一加载级别下各梁的跨中挠度值(稳荷时间结束后的测值)并计算相应级别的总水量和水荷载,结果见表1。根据表1中的数据,采用一次函数拟合各级水荷载与相应的跨中实测挠度值,拟合结果见图7。

表1 各加载级别下总水量和水荷载及其相应的各梁跨中实测挠度

加载级别	过水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水深/ m	总水量/ m^3	总水荷载/ kN	单跨水荷载/ kN	纵梁实测 挠度/mm	左边梁实测 挠度/mm	右边梁实测 挠度/mm
0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
1	22	0.62	409.18	4010	2005	0.71	0.44	0.42
2	44	1.24	818.37	8020	4010	1.02	0.65	0.46
3	65	1.85	1221.02	11966	5983	1.82	1.23	1.07
4	87	2.47	1630.20	15976	7988	2.68	1.92	1.79
5	100	2.63	1735.82	17011	8505	2.93	2.12	2.00
6	—	3.00	1980.00	19404	9702	3.40	2.53	2.35

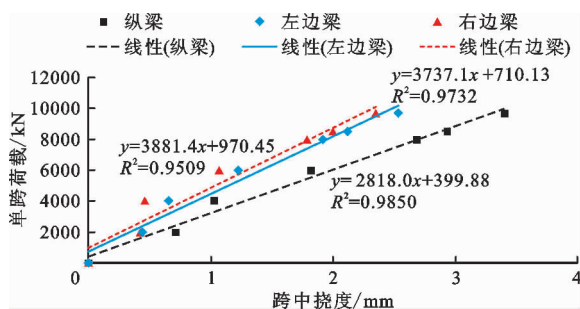


图7 单跨水荷载与各梁跨中挠度值线性拟合结果

由图7可以看出,各梁实测挠度值与所受水荷载线性相关系数皆在0.95以上,线性关系显著,结构始终呈弹性工作状态,该分析结果为结构相对残余挠度及挠度校验系数的评价提供了前提条件。退水卸载试验结果表明,卸载完成后纵梁跨中残余挠度值为0.39 mm。

5 渡槽结构承载能力评价

采用挠度极值单一指标并不能充分反映出渡槽结构的承载能力,需要综合其结构的工作状态、工作性能和结构的承载能力储备全面地评价渡槽的承载能力,并基于评价指标通过与同类工程对比以反映渡槽结构的承载能力水平。因此,引入了相对残余挠度和挠度校验系数评价指标。

5.1 挠度极值

克孜河渡槽计算跨度为30 m,《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)^[25]规定渡槽挠度的允许值为计算跨度的1/500或1/600(跨度大于10 m),而充水试验结果显示,克孜河渡槽跨中挠度极值为3.40 mm,远小于规范规定的挠度允许值50 mm,因而结构承载能力满足设计要求。

5.2 相对残余挠度

在渡槽的运行期内水位不会始终如一,在水位起伏变化时,渡槽结构的弹性工作性能就决定了其长期的使用性能。若结构弹性工作性能较差,在多次水位起伏作用下,不可恢复的挠度变形累积,有可能在结构还未达到使用寿命时,承载能力就难以满足正常运行的要求。因此,引入相对残余挠度用于评定结构的弹性工作性能。

相对残余挠度是指荷载卸除之后结构的弹性恢复能力,用卸载后结构的残余挠度值与最大荷载下结构的挠度值的比值表示,可定量地反映结构的弹性工作性能,相对残余挠度值越小,则结构弹性工作性能越好,一般要求小于相关规范中规定限值的20%。相对残余挠度的计算公式如下:

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S'_p 为测点的相对残余挠度; S_p 为试验荷载卸除后测点处的实测残余挠度,mm; S_t 为试验荷载作用下测点的实测最大挠度,mm。

克孜河渡槽跨中实测残余挠度为0.39 mm,最大荷载下实测跨中挠度为3.40 mm,计算所得相对残余挠度为11.5%,未超出限值20%的规定,结合荷载与挠度的拟合结果,说明该渡槽结构弹性工作性能较好。

5.3 挠度校验系数

工程建设中会以一定的结构可靠度进行结构设计,使其具有一定的承载能力储备,但在实际施工过程中,环境因素、人员施工水平不均匀性和材料性质变异性的影响会削减结构的承载能力储备,使其实际承载能力与理论设计承载能力相比存在差异,所以结构承载能力储备的评定对检验结构实际承载能力能否满足渡槽运行要求有重要意义。因此,引入挠度校验系数 ζ 反映结构实际承载能力与理论承载能力的差异以评定结构的承载能力储备。

挠度校验系数 ζ 由静载试验中弹性变形指标值与相应的理论计算值的比值确定。其计算公式为:

$$\zeta = \frac{S_e}{S_s} \quad (2)$$

式中: ζ 为测点的挠度校验系数; S_e 为试验荷载作用下测点的实测弹性变位,mm; S_s 为试验荷载作用下测点处的理论计算变位,mm。

根据文献[16]计算所得结构校验系数限值为1,与相关规范一致,则当 $\zeta < 1$ 时,结构的实际承载能力优于理论承载能力,说明结构具有较富裕的承载能力储备。采用文献[21]中有限元计算结果,在加大流量工况下考虑渡槽裂缝的跨中挠度最大值为3.75 mm,对应的实测挠度值为2.93 mm,代入公式(2)得挠度校验系数为0.78,未超过规范限值1,表明克孜河渡槽结构在加大流量荷载作用下仍具有较富裕的承载能力储备。

5.4 同类工程对比

将国内部分同类渡槽工程充水试验监测成果列于表2。分析表2中数据可知:所有工程挠度极值皆小于规范允许值,结构承载能力均满足设计要求;对比相同工况下的挠跨比,本工程数值中等偏小,渡槽结构承载能力相对较优;对比较验系数,本工程数值较小,渡槽结构的承载能力储备相对富裕;在相对残余挠度方面同类渡槽工程没有监测成果,无法进

行对比分析。

综上所述,本渡槽各项评价指标均优于所列已

建工程相应指标的最劣值,因此本渡槽结构承载能力水平相对较好。

表 2 国内部分渡槽工程充水试验成果统计表

序号	工程名称	单跨长度/m	工况	挠度测量/mm	挠跨比/ 10^{-3}	规范允许值/mm	残余挠度/mm	相对残余挠度/%	理论计算值/mm	校验系数
1	刁河渡槽	40	加大水位	3.91	98	67				
2	南水北调渡槽	30	满槽水位	1.03	34	50				
3	沛河渡槽	30	加大水位	2.60	87	50				
4	湍河渡槽	40	满槽水位	3.33	83	67			5.08	0.66
5	澧河渡槽	40		7.59	190	67				
6	沙河渡槽	30	满槽水位	1.10	97	50			1.84	0.60
7	养鱼塘渡槽	24	设计水位	6.40	267	40			5.55	1.15
8	十二里河渡槽	30	设计水位	3.34	111	50				
9	克孜河渡槽	30	设计水位	2.68	89					
			加大水位	2.93	98	50	0.39	11.5	3.75	0.78
			满槽水位	3.40	113					

6 结 论

通过克孜河渡槽充水载荷试验及相应的成果分析得出以下结论:

(1)根据本次试验的实际情况,稳荷时间可根据稳荷时段内挠度值的变幅及变化趋势确定,建议检查最高一级水荷载条件下结构工作状态和结构控制断面的挠度值与结构设计允许值和理论计算值的大小关系,从而决定是否增加满槽水荷载加载级别,更可充分地探明渡槽结构的承载能力。

(2)加载过程中克孜河渡槽结构挠度变形符合一般变形规律,结构始终处于弹性工作状态;结构承载能力评价指标挠度极值 3.40 mm、相对残余挠度 11.5% 和挠度校验系数 0.78 均满足规范限值要求,表明结构承载能力满足设计要求,弹性工作性能较好,并具有较富裕的承载能力储备;通过评价指标进行同类工程对比,反映出克孜河渡槽结构具有较好的承载能力水平。

(3)引入结构承载能力评价指标挠度极值、相对残余挠度和挠度校验系数能够综合地反映结构的承载能力,且可通过评价指标实现同类工程对比以反映结构的承载能力水平,为渡槽工程的结构承载能力评价提供了新的思路,有一定的应用价值,而渡槽结构型式复杂多样,针对不同的结构型式,还需对评价指标的限值开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 戴宏斌,严涛,刘茜,等.寒潮对导墙坝段施工期温度应力影响研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):200-206.
 - [2] 蒋海英.克孜河渡槽槽身裂缝成因分析及处置措施[J].水利规划与设计,2019,(4):114-117+153.
 - [3] 张保军,李亦明,尤迎春.隔河岩通航渡槽工程荷载测试及挠度变形分析[J].人民长江,2012,43(24):91-93.
 - [4] 张文胜,李红霞,周学友.南水北调中线湍河渡槽充水试验及运行初期变形分析[J].东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(S1):25-28.
 - [5] 冯光伟,贾少燕,赵廷华,等.大型薄壁预应力U形槽原型充水试验分析[J].人民长江,2013,44(16):36-38.
 - [6] 黄君宝,邓成发.基于三维激光扫描的老旧渡槽结构性能安全评估[J].中国农村水利水电,2020(3):142-145.
 - [7] 刘帅,翟聚云.大型预应力梁式渡槽应力变形监测与仿真分析[J].人民黄河,2020,42(1):126-130.
 - [8] 宋志鹏,张爱军,杨文超,等.宁夏红柳沟渡槽结构安全性评价[J].中国农村水利水电,2015(10):151-156.
 - [9] 丁宇,袁斌,黄耀英,等.基于实测钢筋应力的某大型渡槽力学参数反演分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):202-207.
 - [10] 张锋.宁夏引黄灌区输水渡槽安全鉴定与评价研究[J].人民黄河,2016,38(7):134-137.
 - [11] 祝彦知,常佳,纠永志.在役钢筋混凝土渡槽非概率时变可靠度分析[J].水电能源科学,2020,38(8):100-103.
 - [12] 李兴义,徐贵亮,荣峤,等.神朔铁路黄河特大桥预应力混凝土连续梁静力性能研究[J].铁道建筑,2017,(2):7-10.
- (下转第 187 页)

- subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake and Structures, 2017, 13(2): 211–220.
- [10] 李扬,李自力. 近断层地震动作用下 LRB 隔震储罐地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 215–224.
- [11] AKKÖSE M, ŞİMŞEK E. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam–water–sediment–foundation interaction[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(11): 3685–3700.
- [12] ZOU Degao, HAN Huichao, LING H I, et al. An approach for the real-time slip deformation coupled with strain softening of a high rockfill dam subjected to pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 30–46.
- [13] 谢俊举,李小军,温增平. 日本熊本 M_w 7.0 地震的长周期地震动[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4431–4446.
- [14] 黄景琦,杜修力,赵密,等. 近场数值波动分析中地震波输入的一种简化方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 77–82.
- [15] 史俊飞,张燎军,马天晓,等. 考虑强震能量持时的混凝土重力坝损伤累积效应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 174–179.
- [16] 张剑峰,宋志强,王飞,等. 上–下部结构相互作用对水电站厂房地震响应的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 186–193.
- [17] 李守义,吕汶蔚. 河床式水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 205–209.
- [18] 耿萍,曾冠雄,郭翔宇,等. 近场脉冲地震作用下穿越断层带隧道地震响应[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 122–131.
- [19] 李宁,李骞,任堂,等. 汶川地震紫坪铺进水塔的动态响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1127–1134.
- [20] 章小龙,李小军,陈国兴,等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126–1135.
- [21] 陈宝魁,王东升,成虎. 粘弹性人工边界在地震工程中应用研究综述[J]. 地震研究, 2016, 39(1): 137–142 + 182.
- [22] 章小龙,李小军,陈国兴,等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126–1135.
- [23] 陈曦,刘云贺,周邵鹏. 近断层地震动作用下进水塔的地震反应分析[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(1): 122–128.

(上接第 180 页)

- [13] 张林华. 基于静载试验的预应力混凝土连续梁桥承载能力研究[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 205–210.
- [14] 张茵涛. 在役预应力混凝土梁桥静载试验[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 28–30 + 38.
- [15] 吴建奇,郑晓,张婷婷. 桥梁检测中的静载试验研究[J]. 铁道建筑, 2011(2): 42–44.
- [16] 王凌波,蒋培文,马印平. 桥梁静载试验校验系数及优化评定方法研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 62–68.
- [17] 张玉民. 高墩大跨连续刚构叠箱渡槽充水试验与建模分析[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 108–111.
- [18] 陈晓光. 南水北调中线工程沙河渡槽充水试验研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 126–128.
- [19] 孙翔,李扬,郝继锋,等. 湍河渡槽充水试验监测与分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 100–103 + 21.
- [20] 杜亚楠,覃振洲. 龙场渡槽充水试验监测分析研究[J]. 广东水利水电, 2017(5): 51–55.
- [21] 柯敏勇. 克孜河渡槽槽身结构现场检测与安全评价[R]. 南京水利科学研究院, 2019.
- [22] 薛伟辰,胡于明,王巍. 预应力混凝土梁徐变性能试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 61–66.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [24] 赵顺波,张利梅,李树瑶,等. 大型预应力混凝土渡槽结构受力性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2003(1): 44–54.
- [25] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.