

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222635

引水工程交叉建筑物结构性态互相影响分析

刘子茜, 徐力群, 张国琛

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 引调水工程不可避免地存在建筑物交叉跨越的情况, 交叉建筑物结构性态关乎工程能否安全运行。依托河南省某输水工程, 考虑输引水过程中土体—水体—结构间的耦合作用, 建立南水北调中线工程倒虹吸和输水工程中输水管道结构交叉跨越的三维有限元模型, 分别考虑结构未修建、完建期和正常运行期, 分析各模拟工况下交叉建筑物结构性态影响。结果表明, 建筑物交叉跨越会对既存建筑物产生一定影响, 尤其是交叉部分结构性态改变较大, 倒虹吸结构最大拉应力由 0.54 MPa 增至 0.97 MPa, 最大沉降量由 -1.38 mm 增至 -1.90 mm; 输水管道拉应力从 1.03 MPa 增至 1.34 MPa, 最大沉降量由 -3.78 mm 增至 -4.07 mm, 应力值、沉降量可满足工程要求; 随着输水管道两支支承埋深增加, 倒虹吸所受影响越小。研究结果可为类似工程分析提供参考。

关键词: 引水工程; 交叉建筑物; 稳定分析; 倒虹吸管; 有限元计算

中图分类号: TV311

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0104-04

1 引言

我国水资源在时间和空间上分布不均匀, 为使水资源得到充分利用, 修建了许多长距离引水工程, 如南水北调工程和滇中引水工程等^[1]。长距离引水工程往往需穿跨越上百条河流, 沟通多个流域。为提高供水保证率、方便运行管理, 总干渠与沿线途经的大小河道交叉工程全部按立交交叉设计, 河渠分流互不干扰。交叉建筑物在穿跨越大小河流中起着不可替代的作用。河渠交叉建筑物的形式主要包括渡槽、倒虹吸、涵洞三大类^[2]。交叉建筑工程因本身结构复杂在运行过程中也存在许多风险, 其失效模式可概括为结构整体性破坏、渗漏、破坏性裂缝三种^[3]。针对河渠建筑物, 甘磊等^[4]利用有限元软件分析渡槽结构在运行过程中的受力情况; 王媛等^[5]研究了引水工程中倒虹吸结构的安全综合评价; 陆丽丽等^[6]对长距离引水工程中引水隧洞结构进行了安全性评价。而实际上, 工程中会出现结构交叉跨越的情况, 研究某种单一结构不能准确反映交叉建筑物间的相互影响。刘德军等^[7]研究了新建隧道对既

有隧道结构变形的影响; 肖海波等^[8]通过三维地质力学模型试验, 揭露了交叉洞室间的相互影响; 曹伟^[9]利用有限元数值仿真分析水电站隧洞交叉段围岩的稳定性。近年来交叉建筑物的研究大多是关于隧洞交叉段及对隧洞的衬砌或开挖支护等方面。而对引水工程中交叉建筑物结构相互间的稳定影响的研究尚不多见。鉴此, 本文依托河南省某输水工程中与南水北调中线工程倒虹吸渠道交叉结构, 考虑渗流—应力耦合作用, 分析交叉建筑物之间的相互影响规律, 为今后类似工程提供参考。

2 计算原理及方法

渗流场和应力场之间是相互联系、相互影响的关系, 是同时发生的。渗流场改变渗透水压力和渗流体积力从而对应力场产生影响, 而应力场通过改变体积应变从而影响渗流场^[10]。本文采用直接耦合法, 使用耦合方程通过计算单元矩阵或单元载荷的位移和孔隙压力, 得到分析结果。

2.1 流固耦合基本方程

在流固耦合交界面处, 应满足流体与固体应

收稿日期: 2022-12-26, 修回日期: 2023-01-11

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510802)

作者简介: 刘子茜(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水工结构数值模拟, E-mail: liu_zixi@foxmail.com

通讯作者: 徐力群(1983-), 男, 博士、副教授, 研究方向为岩体裂缝扩展机理, E-mail: xuliquan6.2@163.com

力、位移、热流量、温度等变量相等或守恒,即满足方程:

$$\begin{cases} \tau_f n_f = \tau_s n_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ 为固体所受应力, Pa; d 为位移, m; q 为热流量, J/s; T 为温度, °C; 下标 f, s 分别表示流体、固体。

2.2 计算方法

计算采用 ABAQUS 软件, 模型单元采用孔隙流体—应力耦合单元, 计算时土体使用 Mohr-Coulomb 非线性本构模型, 混凝土和钢筋混凝土采用线弹性本构模型, 假定土体为均质各向同性连续介质。对模型进行地应力平衡后, 进行渗流—应力耦合计算, 计算中的水—土相互作用过程基于总孔隙水压力和有效应力。另外, 渗流分析前在模型定义初始孔隙水压力, 分别赋予材料渗透系数随饱和度的变化规律, 再在“soils”分析步中进行稳态渗流分析, 暂不考虑基质吸力对渗透系数的影响。

3 实例应用

3.1 工程概况

河南省某水利枢纽工程是以农业灌溉为主的输水及灌区工程, 输水工程设计流量为 53.9~51.7 m³/s, 可为南水北调中线工程和引黄入冀补淀工程应急供水创造有利条件。跨南水北调倒虹吸建筑物与南水北调中线工程相同, 其建筑物级别为 I 级。

南水北调干渠以渠道倒虹吸型式穿越该河, 为钢筋混凝土结构, 共两管, 单管为矩形断面 6.8 m×6.8 m, 壁厚 1 m。跨南水北调工程从已建成南水北调穿该河倒虹吸上方采用钢管穿越通过。两结构截面尺寸见图 1。

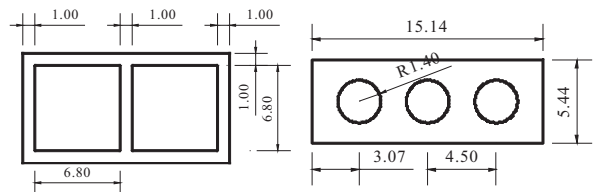


图 1 结构尺寸图(单位:m)

Fig. 1 Structural dimensional drawings

3.2 地质条件

工程场区勘探深度范围内地层为第四系全新

统冲积物, 场区地质结构为粘砂多层结构, 具有上细下粗沉积规律, 包括: ①层①。砂壤土厚约 2.0 m, 层底高程 101.42 m; ②层②。粉细砂厚 6.5~12.4 m, 层底高程 82.5~89.0 m; ③层③。重粉质壤土厚 2.1 m, 层底高程 86.9 m; ④层④。砂壤土厚 1.1 m, 层底高程 85.8 m; ⑤层⑤。细砂未揭穿, 最大揭露厚度 14.4 m。场区位于南水北调穿某河倒虹吸处, 管身两侧及顶部堆有人工填土, 土质为粉质壤土, 厚约 1.5~14.5 m, 两侧厚顶部薄。场区地下水为第四系松散层孔隙潜水, 主要赋存于层②砂层中, 地下水位埋深约 13 m, 高程 88.72 m。工程平面布置见图 2(a)。

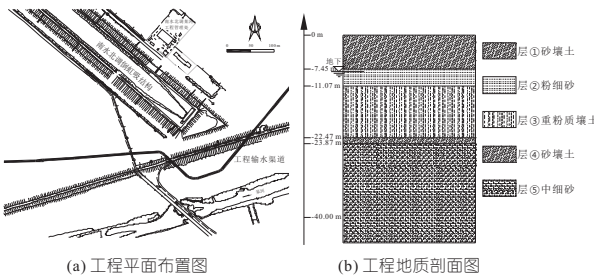


图 2 工程平面布置图和工程地质剖面图

Fig. 2 Layout plan and geological section of project

南水北调干渠以渠道倒虹吸式穿越河流, 为钢筋混凝土结构; 输水工程采用钢管从南水北调倒虹吸上方通过。根据等效刚度原理^[11]和类似工程经验, 采用折算后的弹性模型模拟倒虹吸管钢筋混凝土结构。各土层及材料的基本物理力学参数见表 1, 工程地质图见图 2(b)。

表 1 材料基本物理力学参数

Tab. 1 Basic parameters of materials

材料序号	土名/材料名	弹性模量/ Pa	泊松比	密度	渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	孔隙比	内摩擦角 / (°)	粘聚力 / kPa
①	砂壤土	5.00×10 ⁶	0.30	1 440	7.80×10 ⁻⁵	0.895	27	27
②	粉细砂	2.80×10 ⁷	0.25	1 900	1.10×10 ⁻³	0.800	31	
③	重粉质壤土	6.00×10 ⁶	0.30	1 430	8.50×10 ⁻⁶	0.916	16	25
④	砂壤土	5.00×10 ⁶	0.30	1 450	7.80×10 ⁻⁵	0.895	27	27
⑤	中细砂	2.00×10 ⁷	0.25	1 500	2.00×10 ⁻²	0.800	31	
⑥	人工填土 (粉质粘土)	3.00×10 ⁷	0.30	1 410	1.00×10 ⁻⁵	0.956	16	19
⑦	钢筋混凝土	3.00×10 ¹⁰	0.20	2 500	1.00×10 ⁻⁷	1.500		
⑧	C20 混凝土	2.55×10 ¹⁰	0.167	2 400	1.00×10 ⁻⁷	1.500		
⑨	碳钢(钢管)	2.06×10 ¹¹	0.25	7 500	1.00×10 ⁻¹⁶	1.500		

注: 密度单位为 kg/m³。

3.3 构建三维有限元计算模型

输水工程跨南水北调中线工程倒虹吸渠道交叉建筑物结构三维模型见图 3。数值模型边界范围的大小对计算结果的影响比较敏感, 张鲁渝等^[12]认为模型边界在基准方案基础上扩大 1~3 倍, 对模拟结果的影响可降低到工程可接受的范围内。因此, 研究区域三维有限元模型尺寸约为

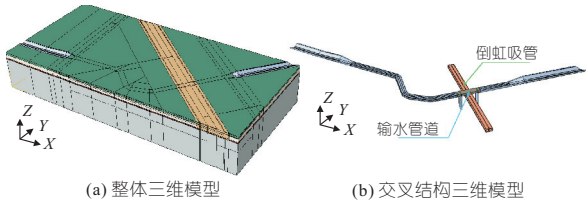


图 3 三维模型

Fig. 3 3D model

760 m×365 m×120 m(长×宽×高),满足上述原则。整个模型底边为不透水边界。 X 轴方向大致为跨南水北调渠道走向, Y 轴垂直于渠道走向, Z 轴为垂直地层方向。模型底面边界施加 Z 向约束,侧面界分别施加 X 、 Y 向约束,上面边界不施加任何约束。离散后,三维有限元模型的单元节点数为 220 468 个,单元数为 155 428 个。

计算考虑结构及其地基的自重和地下水作用等,其中地下水位埋深约 13 m。为了合理分析交叉建筑物结构之间的相互影响,先分别分析倒虹吸管与输水管道的结构状态,随后计算交叉后建筑物的结构状态,并进一步进行相互影响的对比分析。计算过程中忽略施工因素的影响,考虑交叉建筑物建成后的运行状态,计算工况与荷载组合见表 2。

表 2 计算工况与荷载组合

Tab. 2 Calculation of working conditions and load combinations

工况编号	计算工况	荷载				
		结构自重	土压力	倒虹吸管内水压力	输水管道内水压力	地下水作用
1	倒虹吸管正常运行期(管内满水) 输水管道未修建	✓	✓	✓		✓
2	倒虹吸管未修建 输水管道正常运行期(管内满水)	✓	✓		✓	✓
3	倒虹吸管正常运行期(管内满水) 输水管道完建期(管内无水)	✓	✓	✓		✓
4	倒虹吸管完建期(管内无水) 输水管道正常运行期(管内满水)	✓	✓		✓	✓
5	倒虹吸管正常运行期(管内满水) 输水管道正常运行期(管内满水)	✓	✓	✓	✓	✓

3.4 结果与分析

为了便于分析建筑物交叉区域的应力场和位移场的变化规律和说明情况,单独截取交叉建筑物结构进行分析,分别沿倒虹吸管和输水管道中心线设置两条观测线 L_1 、 L_2 ,见图 4。

3.4.1 应力场分析

重点分析建筑物主拉应力、主压应力分布规律,正应力分布规律与之类似,故不重复分析。各工况计算后得到的沿观测线 L_1 、 L_2 分布的主拉、主压应力分布情况见图 5。定义拉应力为正,压应力为负。

由图 5(a)可知,工况 1 下倒虹吸管主拉应力分布均匀,最大拉应力为 0.54 MPa,输水管道的

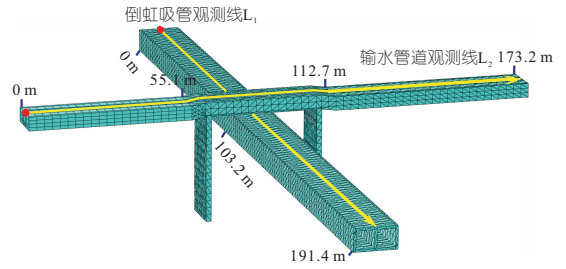


图 4 交叉建筑物三维稳定分析物理网格模型

Fig. 4 Physical mesh model for 3D stability analysis of intersecting buildings

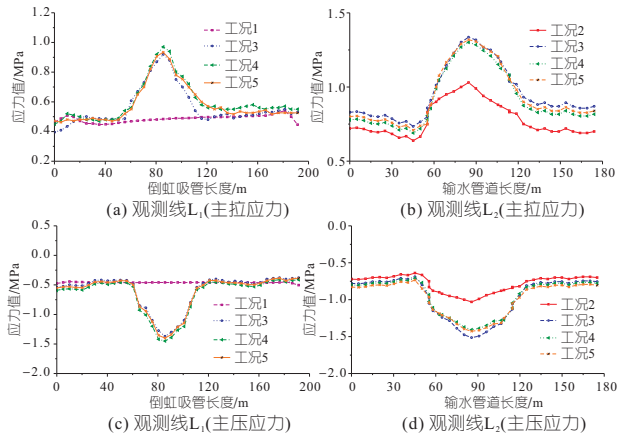


图 5 观测线 L_1 、 L_2 主拉应力、主压应力变化曲线

Fig. 5 Main tensile stress and main compressive stress variation curves of observation line L_1 and L_2

交叉跨越使倒虹吸管中间区域拉应力增大,工况 4 的最大拉应力为 0.97 MPa,增幅达 79.63%。虽然倒虹吸出现应力集中现象,但仍小于 C20 混凝土强度标准值 1.54 MPa,满足抗拉要求。工况 5 的拉应力值略小于工况 4 的拉应力值,这是因为相较于完建期,正常运行期期间管道内部充满水,产生了内水压力,抵消了一部分外部荷载压力作用,因此结构的拉应力比竣工期相应的有所减小。

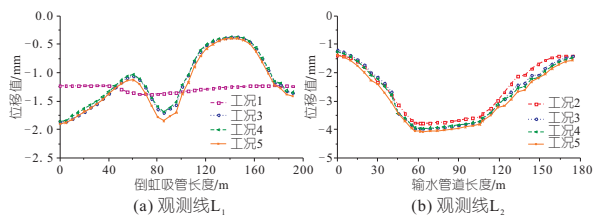
由图 5(b)可知,倒虹吸管的修建及输水管道左右两端混凝土支承的修建使输水管道中间区域拉应力变幅大于两端拉应力变幅,拉应力从 1.03 MPa 变为 1.34 MPa,增加 30.10%。

由图 5(c)、(d)可知,另一结构的交叉跨越使既存结构中间区域压应力陡增。倒虹吸管最大压应力由 -0.50 MPa 增至 -1.45 MPa,输水管道最大压应力由 -1.03 MPa 增至 -1.51 MPa,但仍小于材料抗压强度,满足抗压要求。

3.4.2 位移场分析

各工况计算后得到沿观测线 L_1 、 L_2 在 Z 方向上位移分布情况见图 6。定义位移竖直向上为正,反之为负。由于水平 X 方向、 Y 方向的位移值较小,故不分析水平向位移。

由图 6(a)可知,工况 1 中倒虹吸管的竖向位

图 6 观测线 L_1 、 L_2 竖向位移变化曲线Fig. 6 Vertical displacement curves of observation line L_1 and L_2

移沿观测线 L_1 变化不大,整体结构的沉降值在 $-1.22 \sim -1.38$ mm 之间变化。工况 3、4、5 中输水管道的修建使倒虹吸管产生不均匀沉降现象,最大沉降量为 -1.90 mm,可满足沉降控制要求。倒虹吸管结构的倾斜变形量由 0.003 mm/m 增大为 0.022 mm/m。且随着倒虹吸管及输水管道的正常运行投入,倒虹吸管结构整体沉降量增加 0.15 mm。

由图 6(b)可知,由于输水管道中间采用钢管过渡,材料的差异性使结构整体位移呈“U 型”变化规律。在输水管道下方修建倒虹吸管,输水管道的竖向位移值增加,竖向位移最大值从 -3.78 mm 变为 -4.07 mm,增加 7.67% 。

3.5 支承埋深敏感性分析

为探究输水管道两侧支承的埋深对倒虹吸部分的影响,基于工况 5 分别考虑 20、30、40、50 m 的支承埋深,计算倒虹吸拉应力、位移分布情况,结果见图 7。

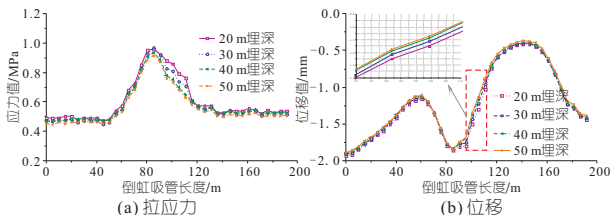


图 7 不同支承埋深下的倒虹吸拉应力、位移分布曲线

Fig. 7 Compressive stress and displacement curves of inverted siphon under different support burial depths

由图 7 可看出,不同支承埋深下的倒虹吸的应力、位移分布规律类似。支承埋深的改变对倒虹吸两端部分的影响甚微,主要还是改变中间区域的性态,应该是由于支承埋深的改变从而影响到输水管道的应力、位移分布,进而影响到倒虹吸管中部应力、位移的改变。以倒虹吸管中间部位为例,20、30、40、50 m 的支承埋深下倒虹吸管拉应力值、位移值分别为 0.86 MPa/ -1.50 mm、 0.81 MPa/ -1.43 mm、 0.75 MPa/ -1.37 mm、 0.71 MPa/ -1.35 mm,可看出随着输水管道两侧支承埋深增加,倒虹吸管整体应力、位移值减小。且支承埋深超过 40 m 后,倒虹吸拉应力、位

移值改变很小,综合考虑可认为 40 m 深度的支承是最优方案。

4 结论

a. 对比工况 1 和其他工况可看出,输水管道的上跨修建,使底部倒虹吸管应力、位移不同程度地改变,出现不均匀沉降及应力集中现象。工况 4 下,倒虹吸管拉应力增至 0.97 MPa,最大沉降量增至 -1.90 mm。对比工况 2 与工况 3、4、5,输水管道结构性态也发生改变,其中输水管道结构拉应力最大增加 30.10% ,竖向位移最大值增加 7.67% 。输水管道两侧支承的埋深越大,倒虹吸管的应力、位移变化越小,对比得到 40 m 深度的支承方案最优。

b. 新修结构的交叉跨越会对既存建筑物产生一定影响,尤其是结构中部的位移、应力场改变较大,交叉跨越结构所受应力和发生的变形均在其工程设计范围内。

参考文献:

- [1] 高媛媛,姚建文,陈桂芳,等. 我国调水工程的现状与展望[J]. 中国水利, 2018(4): 49-51.
- [2] 刘恒,宋轩,耿雷华,等. 南水北调中线交叉建筑物洪水风险估算模型研究[J]. 人民长江, 2010, 41(8): 74-77,99.
- [3] 宋轩,刘恒,耿雷华,等. 南水北调中线工程交叉建筑物风险识别[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 13-15.
- [4] 甘磊,陈官运,马泽错,等. 红旗渠曙光渡槽结构安全评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 990-998,1006.
- [5] 王媛,刘佳豪,郝泽嘉,等. 基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 79-84.
- [6] 陆丽丽,靳春玲,贡力,等. 基于改进 G2-AEW-UMT 模型的引水隧洞结构安全评价[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 172-178.
- [7] 刘德军,仲飞,胡群芳,等. 隧道下穿对引水隧洞的振动和开裂影响与控制[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(3): 65-71.
- [8] 肖海波,高波,申玉生. 锦屏二级水电站交叉隧洞模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5):90-96.
- [9] 曹伟. 隧洞支洞交叉段围岩及二衬支护有限元分析[J]. 广西水利水电, 2019(1): 23-26.
- [10] ZHONG D H, ZHANG X X, AO X F, et al. Study on coupled 3D seepage and stress fields of the complex channel project[J]. Science China technological sciences, 2013, 56(8):1906-1914.
- [11] 屈铁军,徐建,石云兴. 不同受力状态的钢筋混凝土构件的等效弹性模量[J]. 混凝土, 2016(11): 119-122.
- [12] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.

[6] 黄超,殷建国,张军,等. 层次分析法计算风险评估指标权重[J]. 中国公共安全(学术版),2018(2):19-22.

[7] 葛星,骆建雄. GIS支持下的小流域山洪灾害风险区划分方法研究[J]. 中国农村水利水电,2018(10):170-176.

[8] PRADHAN B. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing[J]. Journal of spatial hydrology, 2009, 9(2):1-18.

[9] 陈琳,刘涛,崔慧珊,等. 基于 ArcGIS 与聚类分析的公路水土保持监测布局——以赛白高速为例[J]. 交通运输研究, 2017, 3(4): 22-29.

[10] 刘志雨,杨大文,胡健伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 317-321.

[11] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.

[12] 支童,张洪波,辛琛,等. 秃尾河流域植被覆盖变化及其对径流的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(2): 40-52.

[13] JIA H C, CHEN F, PAN D H, et al. Flood risk management in the Yangtze River basin-Comparison of 1998 and 2020 events[J]. International journal of disaster risk reduction, 2022, 68:102724.

Analysis of Changes and Causes of Mountain Torrent Disaster Risk in Sichuan Province in the Past 30 Years

YUAN Yuan^{1,2}, HAN Jian-qiao³, JIN Zhong-wu^{1,2}, GUO Chao^{1,2}, LIU Hong-xi⁴

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Water Resources on River & Lake Regulation and Flood Control in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Key Laboratory for Water and Sediment Science, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To explore the temporal and spatial distribution and attribution of mountain torrent disaster risk in Sichuan Province, the spatial distribution difference and high-risk areas of mountain torrent risk during 1990-2020 were studied by AHP and cluster analysis methods, and the changing characteristic and driving reason were investigated. The results show that the risk of mountain torrent disasters increased from the west to the east in Sichuan Province. High-risk areas mostly existed in areas with dense river networks and high exposure and vulnerability, such as Meishan, Zigong, Neijiang, Ziyang, Suining, Guangan and Nanchong. From 1990 to 2020, the risk of mountain torrents showed an increasing trend in Sichuan Province. The proportion of areas with high and above risk increased from 17% to 34%. Increased risk levels were concentrated in central Sichuan, and most of them were from moderately high and relatively high risk transformed into high risk. In the past 30 years, the risk of mountain torrents has shown a downward trend in Sichuan Province, while the greater GDP and population density had changed vulnerability and disaster prevention capacity, leading to increasing risk level of mountain torrents in local areas. The results can provide theoretical guidance and practical support for forecast and early warn in flood disaster and disaster prevention and mitigation in Sichuan Province.

Key words: mountain torrent disaster; temporal and spatial distribution; disaster prevention and mitigation; Sichuan Province

(上接第 107 页)

Analysis of Interaction Between Structural States of Cross Buildings in Water Diversion Projects

LIU Zi-xi, XU Li-qun, ZHANG Guo-chen

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Cross building is inevitable in water diversion projects, and the structural state of cross buildings is crucial to the safe operation of the project. Based on a water transfer project in Henan Province, a three-dimensional finite element model of cross-crossing of water pipeline structures in the inverted siphon and water transfer project of the South-North Water Transfer Central Project was established by taking into account the coupling effect between soil-water-structure in the process of water transfer and diversion. The structural state effect of cross building under each simulation operating condition was analyzed by considering the periods of unconstructed structure, completion, normal operating. The results show that the cross-crossing building has impact on the existing building, especially for the large change of structural state in cross part. The maximum tensile stress in the inverted siphon structure increases from 0.54 MPa to 0.97 MPa, and the maximum settlement increases from -1.38 mm to -1.90 mm; The tensile stress in the aqueduct increases from 1.03 MPa to 1.34 MPa, and the maximum settlement increases from -3.78 mm to -4.07 mm. The stress value and settlement amount can meet the engineering requirements. Moreover, with the increase of the buried depth of the two supports of the water pipeline, the less the impact on inverted siphon is. The research results can provide reference for the analysis of similar projects.

Key words: water diversion project; crossed structures; stability analysis; inverted siphon; finite element calculation