

城市再生水利用输水形式分析研究

徐 静 蓉

(北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 近年来再生水已经成为北京市水资源的重要组成部分。为了保证再生水利用输水方案合理可行, 安全可靠, 文中以永定河再生水供水北线工程为例, 首先通过大量的调研、实地踏勘, 充分了解工程区间情况, 完成了明渠输水和管道输水方案, 并对两方案工程内容、湿地方案、工程投资、工程实施难度、水质水量保障、水环境和原有工程功能影响分析、工程管理及汛期输水保障等方面进行了详细的分析研究。经比选, 虽然明渠方案具有增加沿线河道水面, 改善区域生态环境的优点, 但存在对北京市自来水第三水厂水源地造成水质污染风险, 与区域蓄滞洪功能矛盾, 汛期输水调度管理难度大, 工程投资高等问题, 因此推荐采用管道输水方案。本文提出的再生水明渠输水和管道输水形式的分析论证可供类似城市再生水利用输水方式的选择参考。

关键词: 再生水; 输水形式; 明渠输水; 管道输水

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.10.024

中图分类号: TV + TU99(21)

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2015)10-0105-06

Analysis and study on water conveyance mode for urban reclaimed water utilization

XU Jingrong

(Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, the reclaimed water becomes an important part of the water resources in Beijing. For ensuring the reclaimed water conveyance scheme to be reasonable, feasible, safe and reliable, both the open-channel conveyance and pipe conveyance schemes are made through large amount of investigation, site survey for acquiring the actual situation of the project area at first by taking the Project of the North Route of Yongdinghe River Reclaimed Water Supply, and then the detailed analyses are made on both the schemes in the aspects such as the project content, wetland scheme, project investment, project implementation difficulty, guarantee of water quality and water quantity, impacts from the water environment and the original engineering function, project management, guarantee of water conveyance during flood season, etc. After the comparison concerned, although the open-channel conveyance scheme has the advantages of enlarging the water area of river channel along the route and improving the regional eco-environment, the problems are to be caused therein, i. e. the risk of the pollution on the water quality within the water source for the Beijing No. 3 Water Treatment Plant, the contradiction between the project and the regional flood storage and detention function, large difficulty from the operation management of the water conveyance during flood season, high project investment, thus the scheme of pipe conveyance is recommended. Both the analysis and demonstration on the mode of the open-channel reclaimed water conveyance and pipe reclaimed water conveyance can provide a reference for selecting the mode of the similar urban reclaimed water conveyance.

Key words: reclaimed water; water conveyance mode; open-channel water conveyance; pipe water conveyance

永定河再生水供水北线工程是《北京市中心城再生水利用规划》^[1]及《永定河绿色生态发展带建设规划》^[2]的重要组成部分, 工程主要目的是为永定河门城湖、莲石湖、晓月湖、宛平湖、园博湖及城市段河

收稿日期: 2015-07-14

作者简介: 徐静蓉(1972—), 女, 高级工程师, 工程硕士。

道提供水源保障。同时在确保供水安全的前提下，改善沿线南旱河、永引渠和高井沟等河道水环境，并为西北热电中心提供再生水备用水源。规划水源为清河再生水厂处理后并已输送至香泉环岛的再生水，设计规模为 15 万 m^3/d ，在进入“五湖”前利用园博园、南大荒、麻峪等湿地对来水进一步处理以满足水质要求。工程符合北京市水资源利用总体战略，对提高再生水利用率，缓解京西地区水资源压力都是十分必要的。

永定河再生水北线工程的输水形式研究从 2009 年 8 月开始，从城市现状建筑及规划、工程拆迁占地、区域生态环境改善、水源地污染控制及汛期输水调度管理等工程外部条件进行分析研究，确定工程输水路由只能从自香泉环岛，沿旱河路，经永定河引水渠及高井路，至永定河高井沟入口处。工程能否利用南旱河、永定河引水渠、高井沟等现状河渠输水，输水方式的选择成为规划研究的首要任务。

1 城市再生水利用国内外研究现状

1.1 再生水用于河道湖泊景观补水国内外研究现状

城市污水经过深度处理后再生回用已成为缓解全球水资源紧缺、水环境系统破坏等水生态问题的重要途径。美国最早开始研究再生水利用课题，起始于 20 世纪 30 年代，加利福尼亚州成为世界上较早开始污水再生回用的地区^[3]。日本早在 1962 年开始尝试污水再生利用，20 世纪 70 年代初具规模，回用水主要用于城市河道景观补水^[4]。日本曾在 80 年代利用再生水重新恢复了 150 多条河道的景观功能^[5]。澳大利亚为了缓解城市用水紧张的局面，也将污水和雨水加以回收利用，给河道湖泊补水，浇灌绿地。在以色列位于半干旱地区的大部分城市河流中都补充了再生水^[6]。

我国国内的景观环境利用再生水的研究最早开始于“七五”国家科技攻关计划。此后，在天津、北京、泰安、西安、太原等缺水城市也开始了一系列污水再生技术工艺以及河道景观补水的研究示范工程。

本世纪初，在北京市严重缺水的形势下，使用再生水作为河道补水成为改善城市河湖水体环境质量的重要措施，并已在政府主管部门、建设单位获得共识。2001 年 7 月，高碑店污水处理厂再生水工程完成后，南护水系沿岸龙潭湖、天坛、陶然亭、大观园等几大公园绿化及城市绿化、道路喷洒陆续采用再生水作为水源，同时，上述几大公园内河湖也陆续采用再生水作为补水水源。

随着再生水处理技术的不断改进，我国的再生水

处理技术也已由过去的絮凝、澄清、过滤、消毒发展到进一步深度处理，出水水质已有明显改善。近年来，国内自行开发研制的多项污水治理技术包括无动力式生物净化槽技术、管道水体循环技术、景观推流曝气技术、太阳能环流技术+人工草技术、人工湿地技术、水生植被恢复技术、膜处理技术等已经广泛用于城市河湖环境的治理和改善^[7-8]。北京朝阳公园、奥运公园水环境治理项目以及北京市城市河道综合整治项目等均已建成投入使用，并取得了良好的社会和环境效益。

目前北京市共有再生水厂 13 座，再生水已经广泛用于工业、河湖环境、和市政杂用（绿化、道路浇洒、冲厕等），替代自来水或地表水供水。从 2006 年起，北京市开始新建再生水管道，作为城市河湖的主要水源，有效地改善了北京市的河湖景观环境水系。考虑再生水水质和河湖水质标准的匹配性，再生水仅限于规划水质Ⅳ类以下的河道进行利用并采取相应的水质改善措施^[7-8]。

1.2 输水形式国内外研究现状

水利工程项目设计前期任务重，需要全面细致地研究各种方案的可行性。多方案比选是前期规划设计的重要内容，国内外采用的方法有定性分析方法、技术与经济分析方法以及多属性和多目标决策方法，多目标决策方法又包含有层次分析法和关联矩阵法等方法。关于明渠输水和管道输水，国内外输水工程中各有所采用，或明渠加管涵相结合的方式，在前期均采用定性分析论证的方法进行方案比选。在南水北调中线工程规划工程中^[9]，对于采用管道还是明渠输水的方案比选问题，在已有大量基础研究成果的基础上，针对各方意见，又从城市供水兼顾农业和生态用水以及与社会经济发展相适应等方面作了分析论证补充工作。

2 北京市再生水输水形式设计

2.1 明渠输水方案

明渠输水方案自香泉环岛，利用南旱河、永定河引水渠、高井沟河道顺向或反向输水，至永定河高井沟入口，设 5 级泵站输水，按规划治理河道，并对河道进行防渗处理，沿线设截污管道。

输水方案总体布置：在香泉环岛新建调压站，敷设连通管至南旱河上游经湿地处理后入南旱河河道，顺河道明渠输水至下游永定河引水渠，在 4 号跌水下游设一级泵站扬水至电站进水闸上游，利用河道反向输水至 3 号跌水下游，在 3 号跌水下游设二级泵站扬

水至上游，在上游新建设橡胶坝、水闸等蓄水建筑物，利用河道反向输水至2号跌水，在2号跌水下游设三级泵站扬水至杏石口节制闸上游，在1号跌水下游设四级泵站扬水至上游，再利用河道反向输水至电站下游，设五级泵站扬水至模式口节制闸上游，利用环山渠道及模式口隧洞输水至高井节制闸下游，敷设连通管至高井沟，可自流进入永定河。

南旱河段明渠输水方案：利用现状南旱河输水，管线从调压站穿过香泉环岛后进入旱河上游，变为明渠输水，在杏石口路设进水闸，闸后接重力自流管沿旱河路西侧边沟及永定河引水渠埋设入永引渠渠边泵站。渠道长5.1 km，管道段长1.8 km。旱河河道需按照规划河道分段治理，进行防渗设计，分段设橡胶坝蓄水，沿线雨水口进行改造，对部分跨河桥梁进行改建。

永引渠段(旱河路~金顶街桥)明渠输水方案：本段由于河道水流方向与工程输水方向相反，明渠方案拟采用梯级泵站输水方式。首先在起点永引渠北岸修建泵站，将南旱河来水扬至4号跌水上游永定河引水渠道内，在4号跌水上游设闸，利用渠道反向输水至3号跌水下游，在3号跌水附近设泵站将水从下游扬至上游渠道，同样地经过2号、1号跌水泵站扬水至上游渠道内，并在3号、2号及1号跌水上游设闸保持河道水位。本方案利用原河道7.0 km，共需设5级泵站，设拦河闸4处。全线河段进行减渗设计，并考虑永引渠蓄水后种植水生植物加强水体净化功能，维持水体水质。

永引渠段(金顶街桥~高井闸)明渠输水方案：在模式口电站下游设泵站扬水至模式口节制闸上游环山渠道内，通过高井节制闸蓄水，利用环山渠道、模式口隧洞反向输水至高井闸。本段铺设管道全长375 m，利用原河道2.1 km，需设1级泵站，1处节制闸。

高井沟段明渠输水方案：本段明渠方案拟在高井闸下游右岸设调压井，后设管道输水，穿过石门路后进入高井沟，继续沿高井沟埋设管线至阜石路下游，与永定河再生水管道相接。本方案铺设DN1400管道全长1.2 km。

2.2 管道输水方案

管道输水方案自香泉环岛，沿旱河路，经永定河引水渠及高井路，至永定河高井沟入口布设钢管，全长18 km(管径1.4~1.6 m)，同时新建模式口隧洞长700 m，新建加压泵站1座，新建分水口3处。

本方案为全线管道输水方案，根据地形条件，南旱河、高井沟段可采用重力流输水，永引渠段需设泵站扬水。因此，本方案在香泉环岛新建1[#]调压站，后沿南旱河或旱河路、永定河引水渠铺设管道通过重力流自流方式至加压泵站。新建加压泵站位于旱河路与永引渠交汇处西北角，再生水经泵站加压后，沿永定河引水渠向上游埋设管线、穿过模式口山区后，至高井沟2[#]调压站，后继续沿高井沟、永定河通过重力流自流方式输水至湿地。管道输水方案平面布置示意图如图1所示。

线路路由确定：研究首先对北线隧洞、南线道路、阜石路西延、长安街西延、五环路随铁路S1线等六个路由进行了综合比选。考虑阜石路、五环路方案无规划条件，长安街方案对地铁1号线运营影响大，随S1线布设、南线道路方案拆迁难度大，北线隧洞与军事设施冲突。经与规划部门沟通，最终选定自香泉环岛，沿旱河路，经永定河引水渠及高井路，至永定河高井沟入口处路由作为推荐方案。

主要建筑物：管道沿线在起点香泉环岛设调压站1座，在永引渠旱河路西北角设平庄再生水加压泵站



图1 管道输水方案平面布置示意

1座，在高井沟石门路处设调压站1座。

管道全线以道路、河底埋设为主。穿铁路、公路部分采用浅埋暗挖工法施工，内套输水管。在永定河引水渠段主要以渠底埋设管道为主，局部穿越水闸、跌水等建筑物时需绕上岸坡。要求埋设于渠道下管顶覆土满足抗浮抗冲刷要求，埋设于道路或绿地下不得小于1.5 m，并对管道回填土上方河底进行护砌。针对因工程结构及施工交通造成的河道破坏部位，包括河底、河坡及两岸滨河路，均按照原设计衬砌形式和标准恢复。对与设计管线交叉的现状管线进行改移或防护。

3 输水方式比选

3.1 工程内容比较

明渠方案内容包括：河道治理17 km，南旱河、高井沟扩挖需新增占地分别为 3.4 hm^2 、 2.5 hm^2 ；加压泵站5座，占地 1 hm^2 ；新建输水管线3.0 km(DN1400, DN1600)，新建污水管线长5.1 km。

管道方案需新建输水管线长18 km，采用DN1600、DN1400钢管；新建隧洞700 m长，洞径4 m；加压泵站1座，占地 1.6 hm^2 (含维修基站)。

3.2 湿地方案比较

清河再生水厂设计出水主要指标达到地表水Ⅳ类标准，根据《北京市水资源保护规划(水功能区划)报告》，永定河平原段为地下水水源补给区，水质目标为Ⅲ~Ⅳ类。永定河引水渠上段(三家店~罗道庄)为集中式饮用水源一级保护区，水质目标为Ⅱ类，后调整为Ⅲ类。本工程为南旱河、永定河引水渠及永定河提供生态环境用水，需经人工湿地进一步处理达标后入河。

永定河生态环境用水水质指标为Ⅲ~Ⅳ类，主要水源为再生水。因此，再生水入河前的进一步净化处理和湖泊、溪流水质的日常维护是水质净化与维护工程的主要内容。再生水入河前的净化措施，借鉴奥运公园水系利用再生水补水的成功经验，入河前采用功能湿地进一步净化处理，保证入河水质。

3.2.1 明渠方案

根据水质及前期规划，明渠方案需在工程起点入河前加设湿地，再生水进一步处理后达标入河。湿地设在南旱河及旱河路两侧附近，至少设 60 hm^2 ，投资约3亿元。另外，考虑南旱河、永定河引水渠及高井沟尚有污水入河，考虑在沿河污水入河口处设小型污水处理站6处。

3.2.2 管道方案

末端与永定河规划水质净化与维护工程相接。规

划自三家店~卢沟桥段设3处湿地， 75 hm^2 ，分别位于麻峪、南大荒和分洪枢纽上游右堤砂石坑。主要处理清河及沿线再生水，处理量18万 m^3/d ，供卢三段河道及两岸绿化与公园用水。

3.3.3 比较

明渠方案需要新建湿地工程，位于海淀四季青乡，规划为门头村蓄滞洪区，涉及拆迁占地多，费用较高。

管道方案湿地工程按照规划正在实施，占地为永定河滩地，园博园及南大荒为垃圾坑回填再利用土地，拆迁占地由各区县及园林绿化部门自行解决，费用可不计。

3.3 工程投资比较

明渠方案工程总投资11.6亿元，其中工程投资7.4亿元，拆迁投资4.2亿元。另外，为满足河道水功能区划要求，还需在工程起点(南旱河香泉环岛)新建湿地 60 hm^2 ，相应增加投资。管道工程总投资8.5亿元，其中工程部分投资6.4亿元，拆迁占地投资2.1亿元。因此，管道方案较为经济。

3.4 工程实施难度比较

明渠方案实施难度问题：(1)河道按照规划实施，需要首先完成河道规划并得到批复；(2)南旱河、高井沟按照规划实施，有拆迁问题，可能影响施工进度。

管道方案实施难度问题：(1)新建再生水管线沿线需穿越多条铁路及市政道路，方案需经产权部门批准；(2)本工程沿线各种交叉、平行管线繁多，交叉施工可能影响工程实施进度；(3)穿越模式口隧洞及泵站的拆迁占地可能影响施工进度。

经过对两方案的比较分析，拆迁占地和协调相关单位方面都存在一定的风险和难度，都可能影响施工进度。通过对管道方案的实施难点详细剖析比较，管道方案相对更难。

3.5 水质水量保障比较

明渠方案输水水量损失大，蓄水面积36万 m^3 ，河湖蒸发渗漏损失合计 $2640 \text{ m}^3/\text{d}$ ，年损失水量71万 m^3 。

管道方案全线封闭式输水，水质基本维持原出水指标，水量损失较少，以输水量的0.5%计算，年损失水量27万 m^3 。

明渠方案即使河道全线截污，开敞式输水仍然存在水质污染风险。管道方案水质受外界污染几率小，但也存在封闭滋长细菌的风险。相对比较，管道方案水质水量更有保障。

3.6 水环境及对原有工程功能影响分析

明渠方案增加沿线河道水面，改善水环境的同时，

也会对地下水水质产生影响^[10]。尤其是工程沿线南旱河河道处于北京市自来水第三水厂水源保护区边线上，但由于南旱河处于北京市自来水第三水厂水源保护区边线上，与最近井距离仅有800 m，最浅取水位在地面上32 m，对地下水水质造成污染风险^[11]。

为了全面了解北京市地下水水质及污染源分布情况，探索地下水污染控制技术，北京市水务局组织开展了《北京市地下水水资源安全评价及污染防控技术研究与示范》研究项目，包含再生水入渗对水源地影响评价及预测^[12]等研究项目，研究认为，再生水入渗对浅层地下水水质产生较小影响，影响范围约12 km²；包气带及天然河床底部砂砾石对再生水中氮的去除能力较弱；再生水中有机物三氯甲烷与邻苯二甲酸酯2-乙己酯超标。

明渠方案设计在再生水进入河道前经过湿地进一步处理达标后入河，部分指标达到相关规范的排放标准，但改善后的水体中仍含有一定的营养成分、微生物菌群、固体悬浮微粒等污染物，这使得河道水体环境存在着不可预见的污染风险。为此，北京市水利规划设计研究院组织相关专家完成了《再生水作为永定河生态用水的可行性及其环境影响研究》^[13]。对于向河道提供生态用水的再生水，目前还存在急需研究解决的技术方面^[3]。

管道方案受水功能区划限制，不能直接为河道供水。可为河道预留分水口，处理后入河。管道输水渗漏甚微，对北京市自来水第三水厂水源地污染影响较小。管道基本埋设于市政道路与河底，不影响河道的引水排洪功能。

因此，由于明渠方案对水源地造成污染影响风险，关于污染程度的研究分析有关部门正在进行中，并且关于本方案的地下水环境影响需要相关试验及现场监测资料的支撑。因此目前采用管道方案较为合理。

3.7 工程管理及汛期输水保障

关于汛期管理问题，胡晓亮等^[14]提出了目前我国大部分城市存在非汛期缺水干旱，而汛期的雨水又经常带来洪涝灾害的矛盾问题。明渠方案在汛期输送再生水时，与河道行洪排水发生矛盾，尤其在反向输水段河道，输水和行洪不能同时进行。同时，明渠方案对湿地和河道防渗，总防渗面积70 hm²，与区域蓄滞功能发生矛盾。因此明渠方案不仅汛期输水保证率低，再加上本方案共有5级泵站、3条河流，分属多个部门，管理人员多，加大了汛期管理协调难度。

管道方案只设1级泵站，管理相对方便。汛期排

水与管道输水互不影响，有保障。因此考虑工程管理及汛期输水保障问题，管道方案较优。

3.8 方案比选结果

经比选，虽然明渠方案具有增加沿线河道水面，改善区域生态环境的优点，但存在对北京市自来水第三水厂水源地造成水质污染风险，与区域蓄滞洪功能矛盾，汛期输水调度管理难度大，工程投资高等问题，因此推荐采用管道输水方案。

4 结论与建议

北京是严重缺水的特大城市，开发利用再生水是缓解本市水资源紧缺和水环境污染两大难题最经济、最有效的措施。北京市再生水利用虽然起步早，建设快，但利用率低。对于再生水输水形式的研究，在大大加快北京市再生水循环利用的步伐的同时，可以更加充分有效利用河湖水系输配、存储和利用再生水，科学合理地为河道环境补充再生水。

文中对管道和明渠两种不同的再生水输水方式进行研究比较，首先在充分了解工程情况及资源的情况下，对工程方案从经济、管理、实施难度及水环境等影响进行工程技术方案比较分析研究，对类似城市再生水利用输水方式的分析研究具有十分重要的参考意义。

再生水作为非传统水源，已经进入循环经济领域。关于再生水下渗对水源地的影响问题，建议加强模型试验研究，构建合理的跟踪监测网，完善管理，将有助于推进再生水的合理利用和水资源的优化配置。

参考文献：

- [1] 北京市城市规划设计研究院. 北京市中心城再生水利用规划 [R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2009.
- [2] 北京市水利规划设计研究院. 永定河绿色生态发展带建设规划 [R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2009.
- [3] 李云开, 杨培岭, 刘培斌, 等. 再生水补给永定河生态用水的环境影响及保障关键技术研究[J]. 中国水利, 2012(5): 30-34.
- [4] Arpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitro-gen[J]. Ecological Applications, 1998(8): 559-568.
- [5] 王坦, 李昊. 再生水回用于景观水体的富营养化问题和生态修复[J]. 环境科学与管理, 2011(3): 134-137.
- [6] Juanico M, Friedler E. Wastewater reuse for river recover in semiarid Israel[J]. Wat Sci Tech, 1999(40): 43-50.
- [7] 钱靖华, 田宁宁. 再生水回用于景观水体存在的问题及防治对

- 策[J]. 水工业市场, 2008(9): 46-49.
- [8] 孟庆义, 吴晓辉, 赵立新, 等. 再生水回用于北京景观水体引起的水质变化及其改善措施[J]. 水资源保护, 2011(1): 51-54.
- [9] 韩亦方. 南水北调中线工程规划中的几个问题[J]. 南水北调与水利科技, 2003(6): 4-7.
- [10] 翟羽佳, 王会肖, 王艳阳, 等. 再生水灌溉利用对作物: 土壤系统影响[J]. 南水北调与水利科技, 2011(8): 120-124.
- [11] 郝瑞霞, 万宏文, 张毅, 等. 再生水用于河湖补水对基酚环境

风险评价[J]. 北京工业大学学报, 2008(6): 626-630.

- [12] 北京市水利科学研究所, 等. 再生水入渗对水源地影响评价及预测[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 2011.
- [13] 北京市水利规划设计研究院. 再生水作为永定河生态用水的可行性及其环境影响研究[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2012.
- [14] 胡晓亮, 王启山, 王效琴, 等. 城市雨水利用的技术经济与环境影响分析[J]. 海河水利, 2007(4).

(责任编辑 欧阳越)

(上接第 100 页)

2.6 改进措施

因拆除的闸墩结构重量大于拆除的岸墙结构重量, 导致闸墩与岸墙沉降不均, 原施工方案计算所得主拉应力极值较大, 故改进措施为在原施工方案的基础上开挖部分岸墙墙后填土。改进方案计算所得主拉应力如图 5 所示, 从图中可知改进后主拉应力极值位于边孔右侧闸墩检修门槽与底板连接处, 数值为 2.342 MPa, 应力状态较改进前有明显的改善。

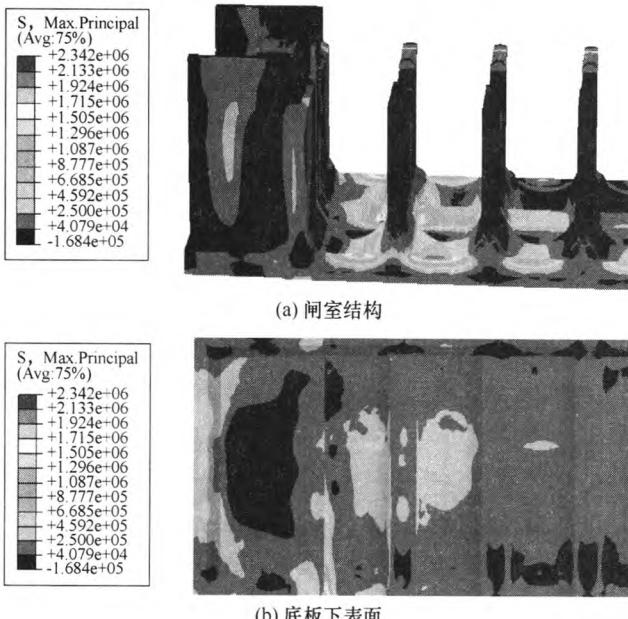


图 5 “模拟施工过程的加载计算方法”改进方案后
主拉应力分布(单位: Pa)

3 结语

本文以江苏宜陵北闸改造工程为例, 分别采用“一次加载计算方法”与“模拟施工过程的加载计算方法”对水闸闸室及底板的应力分布规律进行了计算分析并依据“模拟施工过程的加载计算方法”拆除工况计

算结果对原拆除施工方案提出改进措施。算例分析表明应用有限单元法对水闸改造工程进行结构应力计算应采用“模拟施工过程的加载计算方法”, 其计算应考虑水闸多年位移沉降的影响以及拆除部分结构、新建部分结构的施工过程对原水闸保留结构的影响, 研究成果可为同类工程提供参考。

参考文献:

- [1] 和桂玲, 乃波, 张启海. 水闸除险加固工程设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [2] 袁庚尧, 余伦创. 全国病险水闸除险加固专项规划综述[J]. 水利水电工程设计, 2003, 22(3): 6-9.
- [3] SL 265—2001, 水闸设计规范[S].
- [4] 秦卫星, 陈胜宏, 陈士军. 有限单元法分析边坡稳定的若干问题研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 586-590.
- [5] 陈胜宏, 汪卫明, 徐明毅, 等. 小湾高拱坝踵开裂的有限单元法分析[J]. 水力学报, 2003, 34(1): 66-71.
- [6] 邹德高, 周扬, 孔宪京, 等. 高土石坝加速度响应的三维有限元研究[J]. 岩土力学, 2011, Z1: 656-661.
- [7] 陈波. 高层建筑结构考虑施工过程的受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [8] 贾冬. 厚覆盖层上的水闸三维有限元静力分析和动力响应分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [9] 苏燕, 谭雯, 武甲中. 砂土地基水闸三维弹塑性静力有限元研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 248-253.
- [10] 王伟, 陈剑, 卢廷浩, 等. 苏州河河口水闸三维固结有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2054-2058.
- [11] 彭成山, 袁淮中, 王甜. 南水北调工程七里河闸的三维有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(03): 12-13.
- [12] 任旭华, 刘丽. 水闸病害分析及其防治加固措施[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(6): 49-52.
- [13] 金初阳, 柯敏勇, 洪晓林, 等. 水闸病害检测与评估分析[J]. 水利水运科学研究, 2000(1): 73-77.
- [14] 赵宁. 浅谈张村小型水电站前池退水闸改造设计[J]. 大坝与安全, 2011(2): 42-43.
- [15] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] DL 5077—1997, 水工建筑物荷载设计规范[S].

(责任编辑 郭利娜)