

文章编号: 1672-3031 (2003) 01-0017-06

南水北调工程抗震安全性问题

陈厚群¹

(1. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100044)

摘要: 南水北调工程的东线、中线和西线三条调水路线联系了我国长江、淮河、海河和黄河四大江河, 全长超过 3000km。各线路所经大部分地区都属峰值加速度在 $0.1g$ 以上的较强地震区, 尤其西线更甚。本文强调指出南水北调工程抗震安全的重要性及其遭受震害的严重后果, 讨论了工程抗震面临的关键技术问题, 诸如: 长距离输水工程的地震动输入参数的选择, 工程穿越活动断裂的影响, 以及长距离输水隧洞和大型输水渡槽, 特别是穿越黄河的工程。此外, 还简略介绍了规划阶段的一些初步的抗震研究成果, 包括中线工程大型渡槽的结构分析和大型振动台试验研究以及穿黄隧洞方案结构抗震分析等, 提出了有待深入研究的问题。

关键词: 南水北调; 抗震安全; 工程抗震

中图分类号: TV312

文献标识码: A

1 南水北调工程和地震

举世瞩目的南水北调工程已经正式开工。从 1952 年毛主席提出“南方水多, 北方水少, 如有可能, 借点水来也是可以的”这一宏伟设想到党中央、国务院决定开工兴建, 经历了整整半个世纪, 是几代人的理想, 凝聚了数以万计水利工作者的心血。这是一项全面建设小康社会的重要基础设施, 实现可持续发展战略的重大举措。它的实施, 对缓解北方地区水资源严重短缺局面、促进经济、社会和生态的协调发展具有重大意义。

作为实现长江、淮河、黄河和海河四大流域水资源合理配置的特大型基础设施, 南水北调工程基于从长计议、统筹考虑、科学比选、周密计划的方针, 经过深入研究论证, 最终肯定了东线、中线和西线 3 条调水线路, 以及分 3 期实施的规划。东线工程从长江下游扬州江都引长江水, 利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送, 并连接起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖。出东平湖后分两路输水, 一路向北, 在位山附近经隧洞穿过黄河, 另一路向东, 通过胶东地区输水干线, 经济南输水到烟台、威海。中线工程从加高坝体、扩大库容后的丹江口水库陶岔渠首闸引水, 沿规划线路开挖渠道输水, 沿唐白河流域西侧过长江、淮河两流域分水岭方城垭口后, 经黄淮海平原西部边缘, 在郑州以西孤柏咀处穿过黄河, 继续沿京广铁路西侧北上, 可基本自流到北京、天津。西线工程在长江上游通天河、支流雅砻江和大渡河上游筑坝建库, 开凿穿过长江与黄河的分水岭巴颜喀拉山的输水隧洞, 调长江水入黄河上游。南水北调工程的总体布局见图 1。

众所周知, 我国是一个多地震国家, 根据历史记载, 几乎各省都曾发生过破坏性地震。20 世纪全世界发生的 7 级以上强震中, 中国大陆就占 35%, 有 3 次震级为 8.5 级以上的巨大地震发生在中国大陆。据统计, 在全球 10 次死亡人数超过万人的大地震中, 总死亡人数达百万, 其中发生在我国的 4 次大震中死亡的人数占 55%。所以, 我国是世界上地震灾害最为严重的国家之一。

以南水北调工程 3 条线路而言, 大部分都穿过地震区。按照 2001 年 8 月最新颁布的中国地震动参数区划图, 作初步统计的结果表明, 以相应于基本烈度的 50 年超越概率 10% 计, 工程位于相当于 VII 度区的峰值加速度在 $0.1g$ (g —重力加速度) 以上者, 东线占 67%, 中线占 59%, 西线占 91%。其中位于峰值加速度 $0.2g$ 以上的高地震烈度区, 东线占 6%, 中线占 8%, 而西线则达 23%。因此,

收稿日期: 2003-04-03

作者简介: 陈厚群 (1932-), 男, 江苏无锡人, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 主要研究方向: 水工结构抗震。

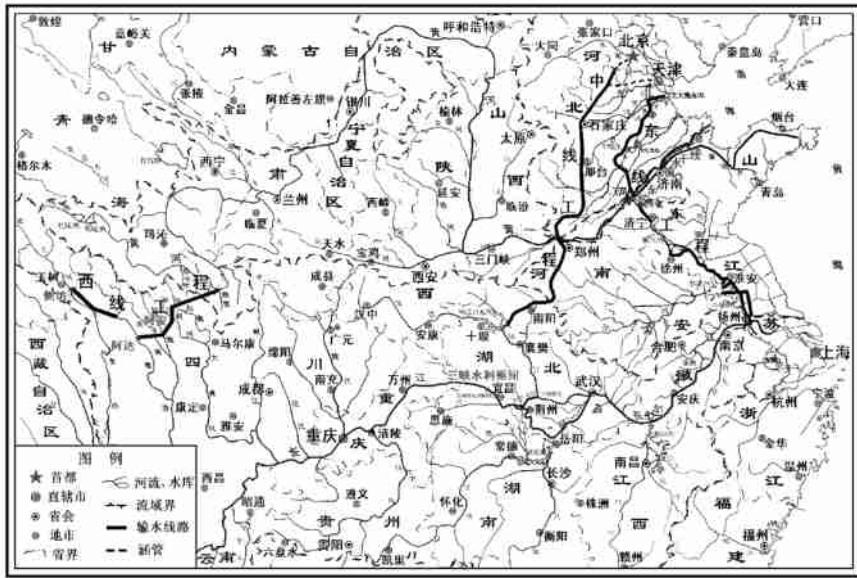


图1 南水北调工程的总体布局

南水北调工程中的抗震问题是十分突出的。鉴于工程对社会及国民经济的重大影响，特别是跨流域长距离的输水工程本身十分复杂，以中线工程为例，全长 1267km，跨越大小河流 160 余条，整个工程中的各类交叉建筑物达 1800 多座，其中长达 3~ 4km 的穿黄工程，更是国内外少有先例。一旦某个重要环节遭受震害损坏，全线输水即告中断。且中线工程沿线缺乏调蓄工程，所经地区是我国人口稠密、经济较发达地区，邻近京九、京广铁路干线，可能导致严重的地震次生灾害。因此，确保南水北调工程的抗震安全性意义十分重大。南水北调工程沿线的地震动峰值加速度分布见图 2。

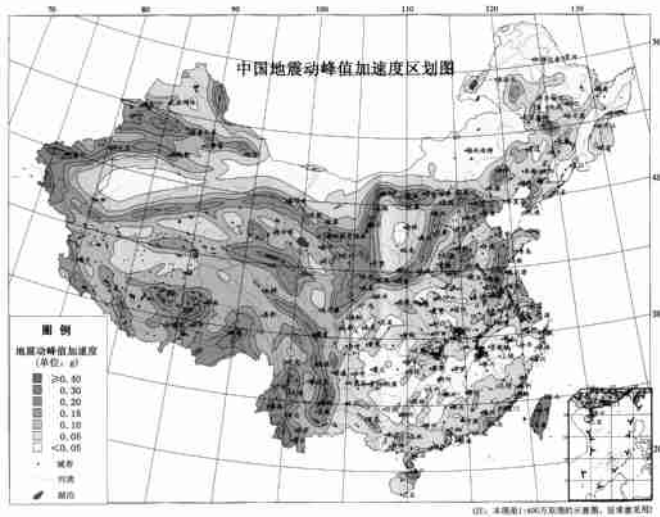


图2 南水北调工程沿线的地震动峰值加速度分布

2 南水北调工程抗震面临的关键技术问题

2.1 长距离输水工程的地震动输入

国内外对重大工程项目如核电站、大坝、超高层建筑等重要工程的场址地震危险性评价已经积累了一定经验，特别是在我国，对重大水利水电工程都进行了地震危险性分析，但都是作为一个场点考虑的。对南水北调这类长距离输水工程的地震危险性分析则尚少先例。这类工程的抗震设计要求应当是针对一个强震发生时，在工程沿线相当范围内同时发生的地震动场，而不是对具体的各个环节，在不同地震时的地震动输入的组合。因此，要研究地震动幅值和相位的空间相关联特性，以及线状地震危险性分析方法和整个线路综合地震风险分析的方法。

对于南水北调工程中的长隧洞而言,其抗震设计中的地震动输入有别于通常的地上结构。地震作用的关键已不是设计峰值加速度和反应谱决定的结构惯性力,而是地基内部各点间的相对运动所引起的洞身的相对变形,这在跨越强震时可能被错动的断层部分时更为突出。因此,设计地震动输入的关键是对工程沿线的地震动位移场和断层错动的评价。

已有震害实例和少量的强震观测结果表明,在基岩中的地震动随深度而减小,因而基岩中的地下结构工程具有较好的抗震性能。但对于南水北调中线穿越黄河的输水隧洞而言,其所穿越的覆盖土层有动力放大效应,且由于位于河势游荡变化较大、汛期冲刷较深、地震液化深度又较大的河床淤积层中,强震时,土层在长达3~4km充满承压水的洞身相互作用下,其地基不均匀沉陷变形对隧洞地震反应的影响是十分复杂和需要认真深入研究的问题。

对于南水北调工程中,穿黄和其它不少的大型渡槽结构,还有地基中不均匀地震动输入的影响问题。

2.2 工程穿越活动断裂的影响 南水北调东线位于华北平原区,属环太平洋地震构造带西侧的组成部分。郟庐断裂带是该地区重要的发震构造。1668年7月25日在山东郟城曾发生过8.5级的大地震。东线工程在宿迁市、骆马湖一带穿越郟庐断裂带,距历史上8.5级大地震震中约90km。

从大地构造上看,中线工程由南向北,跨越两个一级大地构造单元和7个二级大地构造单元,沿线有多条规模巨大的新生代以来的活动断层。在南阳、磁县、邢台、涑水等地发生过6级以上的强震,在河南焦作、新乡一线以南,较大断裂的走向以北西西至北西向为主,多半与渠线呈大角度相交;潞王坟、淇县以北至北京,渠道基本沿北北东向的太行山山前断裂带平行延伸。

东线和中线的主要地震构造分布见图3。

西线工程地处青藏高原地震区内,是我国最大、也是地震活动最强烈的地震区,同时又是我国地质构造最复杂的地区之一。这个地区的新构造运动集中体现在大面积强烈快速隆起、大规模逆冲和推覆作用导致地壳增厚和缩短、在挤压作用下块体间产生大规模水平滑移运动。工程区内断裂发育,一般规模较大,百公里以上且第四纪有活动的断裂为数不少,其中最重要的是鲜水河断裂带,它是目前我国地震活动最强的断裂带之一(图4)。

因此,有必要对南水北调工程沿线的活动断裂,包括主要隐伏活动断裂,及其典型场区断裂活动参数进行研究。为评估断裂活动可能造成的地表错动,包括其发生概率和导致结构破坏的风险提供依据。

2.3 主要工程的抗震技术问题 南水北调作为空前的大规模跨流域调水工程,面临着很多极具挑战性的工程技术问题。其中,确保工程抗震安全的设计和工程措施是一个重要方面,现就其主要工程结构的抗震技术问题概述如下:

(1) 长距离输水隧洞。已有这类工程的震害主要表现为相邻衬砌的径向变形或错位及衬砌的轴向拉开。震害主要发生在地质条件变化复杂的地段,尤其是穿越断层时。地震波传播而引起其轴线方向运动的相位差、隧洞衬砌与周围土体或岩体的相互作用、盾构式隧洞的柔性连接、预制外衬管片构造特性和内外衬砌动态联合作用等都是需要进一步解决的难题。特别是中线穿黄隧洞方案中,由于河床砂基在强震时会发生严重不均匀沉陷、在洞身和进出口竖井连接处刚度的突变等问题,以及西线长隧

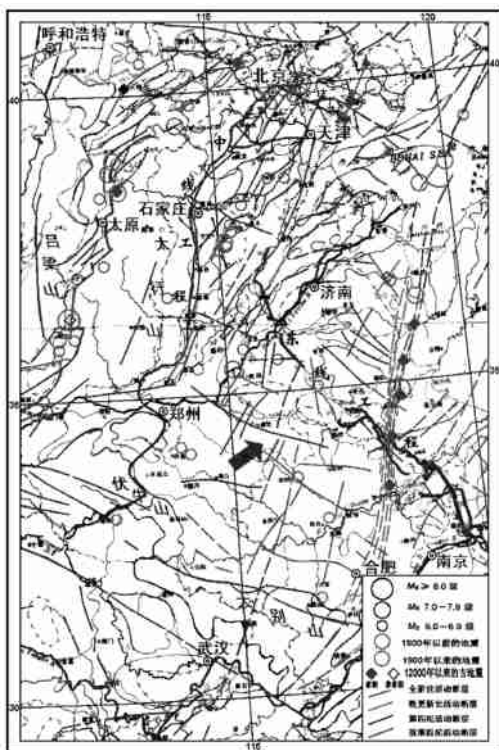


图3 南水北调东线和中线的主要断裂分布

洞受活动断裂错动的“抗断”影响问题等，都是必须予以足够重视并采取相应的有效抗震措施的。

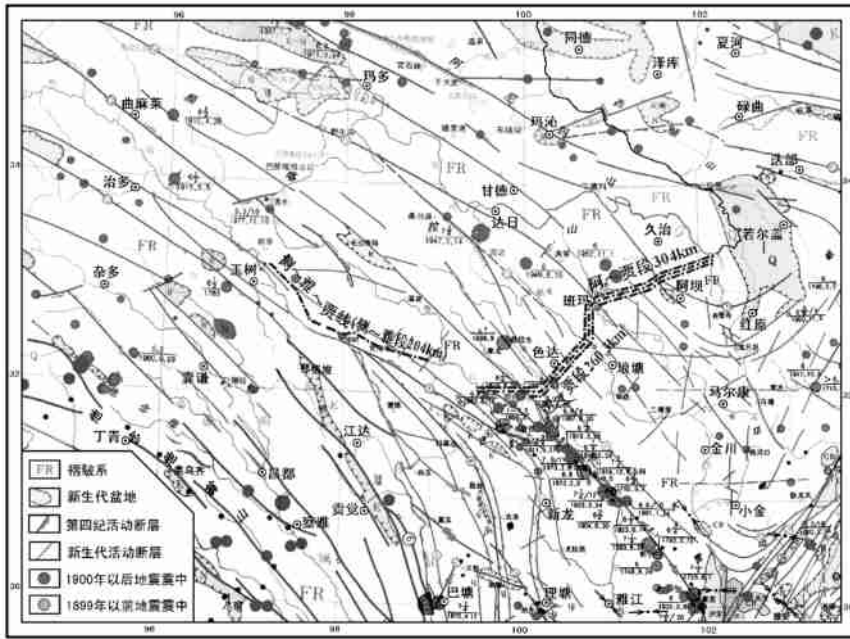


图4 南水北调西线主要地震构造分布

(2) 大型输水渡槽。渡槽是南水北调中线工程中重要的交叉建筑物，从抗震角度看，渡槽与桥梁的主要差别是上部巨大水槽内水体形成的“头重脚轻”，是对抗震不利的结构形式。但另一方面，目前用在桥梁抗震中，在桥墩和上部结构间设置减灾隔震装置的措施，已日益被广泛应用，而这类抗震措施对渡槽结构的减震效果会更加显著。这项有广阔前景的措施是值得认真深入研究的。此外，作为交叉建筑物的渡槽多建于软弱地层，通常多采用桩基础支墩，特别是在中线比选的穿黄渡槽方案中，摩擦桩深达70 m以上，槽墩下的钢筋混凝土桩体和周围砂土的非线性接触边界和动态相互作用问题，十分复杂。另外，槽体和其中水体间的流固动态耦合、槽墩间不均匀地震动输入影响、以及包括三维预应力薄壳渡槽在内的不同类型渡槽抗震性能的比较等问题，都是渡槽工程抗震中需要解决的难题。

(3) 其它工程抗震问题。在强震作用下，倒虹吸结构大直径压力钢管抗屈曲稳定及镇墩和支墩的抗震稳定性，中线总干渠跨越活动断裂时的地震反应及相应的有效抗震措施，以及加高后的丹江口大坝和西线中各类高坝的抗震安全性等都是重要的关键技术问题。

3 南水北调工程抗震问题初步研究

3.1 中线工程渡槽的抗震研究 结合中线穿黄渡槽方案的设计，中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心对长江水利委员会和黄河水利委员会的各方案，分别进行了动力分析研究。结合河北省水利水电第二勘测设计研究院中线河渡槽设计，进行了动力分析和振动台动力模型试验验证。试验对渡槽的自振频率、加速度、动水压力和动应力响应进行了初步验证。但应当指出，在上述对渡槽的抗震分析中，仅按传统的附加质量方法计入水体影响，在假定桩、土不脱离情况下按规范中的m法确定作用于桩体的地基抗力系数，对槽体和支墩间的盆式支座以正交异性的短梁近似模拟，也未进行槽底减震隔震措施和墩底不均匀地震动输入影响的研究。因此，只是在规划阶段满足方案比较的要求进行的初步研究。此外，结合北京市水利规划设计研究院进行的中线进北京的南泉水河渡槽方案抗震设计，首次探索了隔震和耗能减振技术在渡槽抗震中的应用，初步在振动台上进行了采用多组三向隔震耗能混合减振支座的渡槽动力模型试验。试验中对弹簧和橡胶隔震器分别与板墙式黏滞阻尼器混合减振的效果进行了比较。这些初步的动力分析和试验研究，尽管存在有待改进的不完善处，但毕竟为南水北调渡槽工程抗震的深入研究积累经验创造了条件。

图5给出了中线穿黄U型渡槽满水时支座断面静动叠加最大主应力等值线图。图6、图7分别为漕河渡槽结构的有限元网格剖分立体图和河渡槽模型试验情况。图8为南泉水河渡槽模型试验中采用的减振支座。

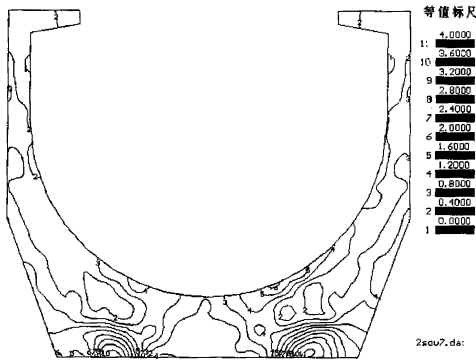


图5 中线穿黄U型渡槽满水时支座断面静动叠加最大主应力等值线图

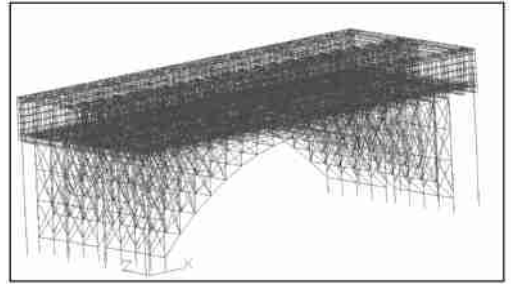


图6 漕河渡槽结构的有限元网格剖分立体图

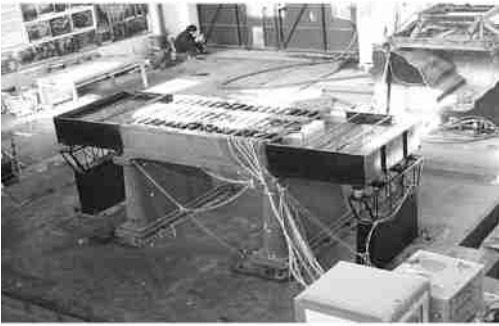


图7 河渡槽模型试验

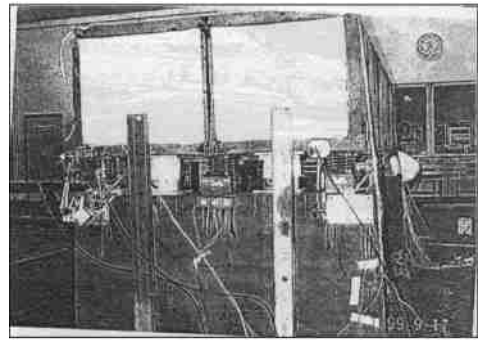


图8 南泉水河渡槽模型试验中采用的减振支座

3.2 中线穿黄隧洞方案结构抗震分析 对长江水利委员会的孤柏嘴线路隧洞方案的钢筋混凝土衬砌横截面进行了抗震分析。计算中假定地震波为垂直传播的S波，取其振动平面与隧洞轴线垂直的最不利情况，隧洞周围土层简化为水平成层，其剪切模量和阻尼比系数根据代表性钻孔资料，在忽略隧洞影响下，用等效线性法解一维波动问题求得。地基的辐射阻尼比用边界元法求得的无限域影响动力刚度矩阵计入。这是一个平面线弹性问题的求解。在沿隧洞轴线方向的分析 and 进出口弯管段的分析都比较简略。分析中没有计入由于隧洞结构与土体刚度差异很大，在地震时其接触面可能脱开和滑移的影响，对以螺栓连接的预制管片拼装的外衬刚度估计也较粗略。更主要的是二维截面分析难以反映隧洞周围河床砂基在强震作用下部分液化和沿隧洞轴线方向不均匀沉陷的影响。这些都是有待继续深入研究的问题。

4 结语

南水北调工程的抗震安全关系重大，应予足够重视。其中一些关键技术问题是国内外目前尚未较好解决的挑战性前沿课题，难度较大。需要设计、科研方面紧密配合、共同协作解决，才能为工程抗震安全切实提供科学依据。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国水利部. 南水北调工程总体规划 [R]. 2002.

- [2] GB18306-2001. 中国地震动参数区划图 [S].
- [3] 中国水利水电科学研究院. 南水北调中线穿黄渡槽和隧洞结构静动力分析研究与抗震安全评估 [R]. 2002.
- [4] 中国水利水电科学研究院. 南水北调中线工程 河渡槽抗震试验与分析研究 [R]. 2002.
- [5] 中国水利水电科学研究院, 北京市水利规划设计研究院. 大型渡槽隔震耗能混合减振技术的研究 [R]. 2002.
- [6] 中国水利水电科学研究院. 中线穿黄U形渡槽工程结构静动力分析与抗震安全评估 [R]. 2002.

Seismic safety of the South-to-North Water Transfer Project

CHEN Hou-qun¹

(1. Earthquake Engineering Research Center, IWHR, Beijing 100044, China)

Abstract: The South-to-North Water Transfer Project will connect four large rivers (Yangtze River, Huaihe River, Haihe River and Yellow River) in China with its three routes (east, middle, and west routes). The three routes are of a total length of more than 3000km. Most of the area covered by the project will be located in regions of rather high seismicity with the peak ground acceleration of higher than 0.1g, particularly, in the region of the West Route. In this paper the seismic safety and the serious consequences of earthquake damage of the project were emphasized. Some critical engineering problems were discussed, such as, the selection of ground motion parameters for long-distance water conveyance structures, the effect of active faults in the structures passing through them and the seismic design of long distance tunnels and large aqueducts, especially, for structures passing through the Yellow River. Finally, some preliminary results of the seismic studies on tunnels and large-scale aqueducts in the middle route in planning stage by means of both structural analysis and model tests on a large shaking table were introduced briefly. A series of problems pending further study were also mentioned.

Key words: The South-to-North Water Transfer Project; seismic safety; earthquake engineering

(责任编辑: 苏锦星)

简 讯

国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)通过科技部验收

国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)由科技部批准组建。主管部门为中华人民共和国水利部,依托单位为中国水利水电科学研究院和中国灌溉排水发展中心。经科技部组织专家现场检查评估和国家工程技术研究中心验收委员会综合评议,国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)完成了可行性论证报告和计划任务书要求的各项组建任务,实现了预期组建目标,具备了较强的科技成果产业化能力及辐射扩散能力,达到了验收标准,于2003年3月通过验收,并予以正式命名。通过验收是国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)发展的新起点。国家节水灌溉工程技术研究中心(北京)将以此为契机,继续完善建设,在运行阶段发挥出应有作用,为提高我国节水灌溉技术研究和产品开发水平贡献自己的智慧和力量。(国家节水灌溉北京工程技术研究中心供稿)