

国内水库汛限水位调整研究进展

董前进 戴会超

(中国长江三峡工程开发总公司 湖北 宜昌 443002)

摘要 给出了汛限水位调整的含义及理念,介绍国内水库汛限水位调整运用研究进展情况,分析了汛限水位调整中存在的问题。认为传统的水库调度采用单一的汛限水位控制,使得水库防洪兴利结合库容低、汛期大量洪水资源浪费,并降低了水库汛末蓄满的几率;在现代水文预报技术日益成熟并实用的条件下,开展水库汛限水位调整研究十分必要,是现代治水理念的具体体现。

关键词 洪水管理;汛限水位;水位调整;静态控制;动态控制

中图分类号:TV697 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2009)S1-0164-04

目前,水库多是按规划设计阶段确定的汛限水位,采用固定时间、固定汛限水位的调度方式,不考虑预报,由水位确定泄流量以控制库水位,使其不超过汛限水位,或超过后尽快回落到汛限水位。这种控制方式的直接结果是导致水库汛期大量洪水资源浪费,汛末又无水可蓄,影响了水库综合效益的发挥。由此,国内外(主要是国内)对传统的汛限水位调度方式进行了大量改进研究,旨在改变以往汛限水位单一控制的方法,在不影响水库防洪效益的前提下提高洪水资源的利用效率。水利部组织的汛限水位动态控制试点工作表明,对汛限水位进行调整是充分发挥水库综合效益、提高水资源利用效率行之有效的方法。

汛限水位是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位,其在水库运行阶段直接影响着水库兴利库容与防洪库容的大小,由此,对汛限水位进行调整也必然影响水库兴利、防洪效益的平衡,并影响水库的安全运用,所以,对汛限水位调整研究现状进行总结并指出其中存在的问题是十分必要的。

1 汛限水位调整含义及理念

汛限水位调整是相对于传统的汛限水位单一或固定控制而言的,汛限水位调整是指水库在运行过程中对原规划设计阶段确定的汛限水位根据实时水、雨、工情信息和预报信息按一定的目标进行变动,通常所说的汛限水位静态控制、动态控制都属于

汛限水位调整的范围。

与传统的汛限水位控制方法相比,汛限水位调整在水库调度中更加实用、灵活,它能考虑预报信息,并重点考虑水库发生洪水的较大概率事件而非小概率事件,从不可能发生事件出发,综合利用现代科学技术提供的一切有用信息,采用弥补措施预防非常事件,科学合理地确定汛限水位调整的时间与范围。

2 汛限水位调整研究进展

国外水库管理的重点以防洪、生态、景观等功能为主,当然也有水库具有供水、发电等多种功能,但总的来说在汛限水位调整上研究很少。

国内水库对汛限水位调整做了大量的研究,下面将从汛限水位调整理念、汛限水位静态控制、动态控制等方面对汛限水位调整研究进展进行总结。

2.1 汛限水位调整理念

高波等^[1]探讨了水库汛限水位调整与运用问题,基于对水库汛限水位主要影响因素的系统分析,从洪水资源安全利用的角度出发,阐明了水库汛限水位调整综合分析论证所应遵循的原则,提出了风险设计分析论证的框架、分析方法,并对汛限水位合理调整进行论证。钟平安^[2]对防洪限制水位研究进行了总结,阐述了防洪限制水位物理意义、设置防洪限制水位的必要条件以及防洪限制水位设计应考虑的主要因素。从洪水信息获取方式、设计运用条件、

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B09),武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金(2007C017),中国博士后科学基金(20080440956)

作者简介:董前进(1979—),男,湖北安陆人,讲师,博士,从事水资源系统工程研究。E-mail:ldqjin2004@sohu.com

调度运行规则等方面分析了防洪限制水位在水库设计与运行阶段的差异。总结了在水库长期运行中由于社会经济条件、运行管理体制变化对变动防洪限制水位的客观需求,并从高新技术应用、风险分析、水库特性等角度论述了防洪限制水位动态控制的可能性。邱瑞田等^[3]对水库汛期限制水位控制理论与观念的更新进行了探讨,提出了水库汛限水位动态控制的新理念及其综合推理模式。

2.2 汛限水位静态控制

汛限水位静态控制严格按照规划设计阶段确定的汛限水位及相应的调度方式运行。其主要理念是全汛期始终要预防设计标准的小概率事件发生,满足设计的防洪安全要求。根据已有研究成果,可按如下归类阐述进展情况。

a. 固定汛限水位控制。这种控制方式是传统的汛限水位控制方法,即按照固定时间、固定汛限水位的调度方式,这里的汛限水位一般是水库在规划设计阶段所确定的,这种控制方法不考虑洪水预报信息,在水位超过汛限水位时需加大下泄流量运行,在下次洪水来临之前尽快使水位回到汛限水位。这种调度方法会导致‘汛期发生大量弃水,汛末又无水可蓄’的不利状况,造成洪水资源的浪费。

b. 分期汛限水位控制。分期汛限水位控制以洪水的季节性特点为依据,将汛期划分为若干阶段,针对不同时期采用适当的方法确定并执行各自的汛限水位方案。规范中确定分期汛限水位的方法是以汛期分期为基础,先推求同频率分期设计洪水过程,然后按水库运行原则分期调洪计算,从而确定分期汛限水位^[4-5]。这种方法充分利用汛期洪水的季节性变化规律,尽可能抬高汛限水位,增加了水库汛末蓄满的几率,但由于没有利用预报信息,因此在实际运行中难以达到理想的效果。

国内关于分期汛限水位控制的研究成果较多,郭荣文^[6]根据流域水文气象的季节性变化规律,参照我国现行洪水和动能计算规范的要求和方法,将大洪水水电站分期设计洪水计算及其分期防洪和发电运行有机地结合起来进行统筹研究。结果表明,大洪水水电站洪水分期时界明显,分期设计洪水计算成果合理、可靠,据以进行分期调洪演算和动能计算,既确保各防护对象的防洪安全,又增加了不少发电量,经济效益和社会效益较为显著。翟家瑞等^[7]对黄河洪水的分期调度与分级调度进行研究,根据洪水发生的特点,在时间上将其分为前、后期洪水,在量级上将其分为大洪水和中常洪水。指出在防洪调度中应针对洪水发生的不同特点采用不同的调度方式。通过分期洪水调度,在保证防洪安全的前提

下,可以合理处理防洪与水资源之间的矛盾,使洪水资源化,充分发挥水库的灌溉、供水、发电等综合效益,通过分级洪水调度,可以更加合理地进行防洪工程的优化调度,实现各级洪水调度的相对合理化,减少洪灾损失。眭汝安等^[8]对水库分期汛限水位动态控制进行研究,给出了分期设计暴雨、分期汛限水位和汛限水位动态控制的概念和确定方法,利用多变量AR(1)模型随机展延理论,以门楼水库为例,展延了分期降水量序列,确定了各分期发生设计暴雨的频率及其组合频率,进而对汛限水位动态控制方法进行了说明。刘攀等^[9]从洪水分期频率和年频率的关系出发,基于分期设计洪水调洪演算结果,提出了优化设计分期汛限水位的模型与解法,并结合五强溪水库进行了实例研究,结果表明分期汛限水位优化设计模型能通过稍微降低主汛期的汛限水位,大幅度提高汛前期、汛末期的汛限水位,实现洪水资源利用率的最大化。孙金辉等^[10]概化出一种预报调度的分期分级模型系统并将该模型系统应用于漳卫南运河防汛决策支持系统的岳城水库调度中。高波等^[11]研究了系统聚类法在水库汛期分期中的应用情况。

2.3 汛限水位动态控制

水库汛限水位动态控制是指水库在汛期,根据实时雨、水情,利用预报成果,在不降低水库防洪标准以及确保水库、上下游地区防洪安全的前提下,按照经科学论证并经有关部门审批的水库汛限水位动态控制方案确定的控制范围对汛限水位进行浮动的调度过程^[12]。

由汛限水位动态控制的定义可知,水库汛限水位动态控制是属于实时调度阶段的任务,其研究重点是确定水库汛限水位动态控制的范围,也称汛限水位动态控制域。这种控制方法不仅利用了水库实时的水、雨情信息,而且利用了预报信息,因此,相比水库汛限水位静态控制而言,在调度上更加主动、灵活,也易于达到效果。根据目前已有的研究成果,汛限水位动态控制主要可按如下归类。

a. 预蓄预泄法。这是一种较为常用的汛限水位动态控制方法。该方法主要是利用洪水预报或降雨预报信息(目前利用洪水预报信息较多),基于水库的泄流能力,有多大泄流能力就将汛限水位上浮多少且留一定裕度的对水库汛限水位进行调整的一种方法。这种方法计算理论比较简单,对水文预报的依赖性较强,曾在北方大伙房、清河、柴河等水库进行了试用与检验^[13]。

曹永强^[14]对汛限水位动态控制方法及其风险分析问题进行全面研究,提出了风险的来源、汛限水

位动态控制范围的确定方法、预蓄预泄和模糊推理模式法等动态控制方法并进行了相应的风险分析。王本德等^[13]系统地给出了实时预蓄预泄法的计算原理及求解步骤,并以碧流河水库为例进行了详细阐述,应用效果较好。周建军等^[15-16]研究了三峡水库减少淤积的双汛限水位调度方案及其综合影响,建议在大洪水来临前将坝前水位从145 m下降到135 m,既腾空部分库容防洪,也增加冲沙减淤作用。同时也研究了多汛限水位调度方案,按该调度方案,三峡水库汛期约80%的时间可以维持在较高水位,一般洪水期汛限水位143 m不影响坝区通航,135 m水位迎洪可大量增加防洪库容。到100年后可减淤30亿m³,增加防洪库容约40亿m³。变动回水区减淤40%,优化了坝区水沙搭配,改善了通航条件。降低库区洪水位,缓解了防洪与移民的矛盾,对发电带来较大好处,减轻了下游冲刷,同时还可减小三峡汛初泄水与鄱阳湖防洪的矛盾。高波等^[17]研究了水库汛限水位动态控制的实现途径,提出了综合应用新技术改进水库洪水预报、洪水量级判断和蓄水时机选择的技术途径。

b. 综合信息推理法。这种方法在分析影响汛限水位动态控制各种因子基础上,以影响水库汛限水位动态控制各因素的历史资料建立推理模式(称“大前提”),再根据水库实时调度面临时刻的综合信息(称“小前提”),通过推理方法给出预见期内满意的汛限水位控制方案,以此指导水库蓄泄。该方法主要有3个关键问题^[18]:一是分析汛限水位控制值与其影响因子的关系;二是建立逻辑推理关系;三是研究与选择推理方法。关键因子包括洪水与降雨预报信息,实时水情、雨情和工情信息,历次发生的洪水统计成果及调度人员与决策者的多年控制经验等。这种方法逻辑性较强,需要有准确的预报成果和多年调度经验,在实际工作中还需要易于操作、反应快捷的决策支持平台。

陈守煜等^[19]对水库设计汛限水位动态模糊控制进行分析,应用模糊水文水资源学理论与方法计算水库汛期相对隶属度函数,确定汛限水位,对水库汛期水位进行动态模糊控制。音河水库应用实例表明这种方法的科学、合理与可操作性。王本德等^[13]详细阐述了水库汛限水位动态控制综合信息分析与计算的具体方法,分别建立了碧流河水库和观音阁-縹窝梯级水库的综合信息模糊推理模式。

c. 评价决策法。由于水文系统广泛存在的不确定性,汛限水位动态控制不可避免地存在风险,因此对汛限水位方案进行风险与效益的权衡必不可少。评价决策法就是决策者根据自己的偏好在分析

权衡面临时刻各方案风险与效益的基础上确定汛限水位动态控制方案,由此,这种方法重要的是汛限水位动态控制方案评价指标体系的构建及决策者的偏好信息的介入,决策者偏好信息通常通过对指标赋予不同的权重或排序来实现。由于考虑了决策者的偏好信息,这种方法考虑因素较全面。

王才君等^[20]对三峡水库动态汛限水位洪水调度风险指标及综合评价模型进行研究,提出了多目标风险指标体系,计算了9种动态汛限水位方案下的风险指标值,通过综合评价模型对各方案进行比较和优选,得到了相对合理的动态汛限水位方案。刘攀等^[21]阐述了三峡水库运行初期的调度规则,建立了实时调度模型。提出了防洪、发电和航运等指标体系,在此基础上建立了用于动态汛限水位和蓄水时机优化的混合规划数学模型,并设计了一种混合编码方式,运用遗传算法对该模型进行优化求解。冯平等^[22]在分析水库调整汛限水位所涉及影响因素的基础上,构建了调整汛限水位的综合评价指标体系,给出了各风险指标及效益指标的估算方法,并以东武仕水库为例,计算了水库调整汛限水位所带来的风险和效益。通过考虑各指标定量单位的不统一性,提出采用模糊综合评价法来合理选择水库的汛限水位的方法。彭杨等^[23]通过寻求水库防洪、发电及航运之间的相互关系,建立了水库水沙联合调度模型,对三峡水库汛末蓄水时间和方式进行了多目标决策,应用加权均衡规划排序模型对非劣方案进行评价,给出了三峡水库汛末蓄水运行的最佳方案。殷峻暹等^[24]根据大连市供用水系统的风险及其变化过程,分析了超蓄洪水资源的利用情况及其效益,利用边际成本分析方法确定了汛限水位动态控制的范围。

d. 补偿调度法。补偿调度法适用于存在水文、水力联系的水库群或梯级水库的汛限水位动态控制。在实时调度中,根据组成水库群的各水库库容工况及预报、汇流时间差异,进行各水库汛限水位动态控制。

李玮等^[25]结合流域实时预报及梯级水库防洪库容信息,提出基于预报及库容补偿的梯级水库汛限水位动态控制逐次渐进补偿调度模型,并应用于清江梯级水库汛限水位方案。应用结果表明,在不降低库群原有防洪标准的前提下,可显著提高梯级水库发电效益和洪水资源利用率。李继清等^[26]在龙羊峡-刘家峡两库联合调度的基础上,采用库容补偿方法探讨了一种以旬为单位的动态汛限水位控制方法,建立了动态汛限水位过程线,并进行了风险与效益论证,实例研究表明这种方法可操作性强,能在

满足设计防洪要求的前提下提高水库的兴利效益。

另外,郑德凤^[27]对雨洪资源与地下水资源联合调控理论及应用问题进行研究,分析了水库汛限水位实时动态控制和水库防洪补源优化调度2种提高洪水资源利用率的方法,系统研究了利用地下水调蓄水资源时空分配的理论与方法,提出了地下水调蓄能力分析评价的若干理论与方法。杜丽惠等^[28]探讨了一种新型的、动态的汛限水位控制方法——滑动汛限水位控制法,这种方法根据循时变化的设计洪水得到循时变化的汛限水位,与不分期计算的汛限水位相比提高了水资源利用率。李旭光^[29]在水库汛限水位静态控制方面提出了适合汛期分期等多维时间序列聚类问题的时间序列相对系统聚类法,并进行了实例分析,还提出了洪水预报调度方式下汛限水位设计的约束前移法,简化了汛限水位设计计算的过程;在汛限水位动态控制方面,提出了利用中期预报进行汛限水位动态控制的实时相对安全期法。

水库汛限水位动态控制核心内容属于实时调度阶段的问题,为防止水库为保护下游安全导致汛限水位过低和为增加兴利效益而无限抬高汛限水位这样2种极端情况,有必要对汛限水位在一定范围内进行控制,这个范围就是通常所说的汛限水位动态控制域。不同水库因所在流域气象、水文、水库规模、调节性能等条件差异,并非上述汛限水位动态控制方法都适用,汛限水位动态域可由上述的1种或多种方法确定,若是多种方法综合应用,则可采用内包线法确定水库汛限水位动态控制域的上下限值。由此,水库汛限水位动态控制就是要使汛限水位在动态控制域内进行实时控制。

3 存在的问题

汛限水位调整体现的是一种洪水管理的治水理念,即从原来的防洪向承担适度风险的洪水管理转变,这是对水库洪水调度经验积累、洪水预报等新技术应用、洪水风险管理的实践总结与升华,当然,这种研究与实践还只是刚刚开始,因此,在当前的研究中也存在不少问题,值得进一步研究。

a. 需要寻找新的汛限水位调整控制方法。当前的汛限水位调整方法虽然较多,但大多是对北方的大中型水库调度实践的研究,这与北方严峻的水资源短缺形势有关,但是从整个汛限水位调整研究的点与面上看,汛限水位调整控制的方法还不够,需要在现有的基础上研究更多更新的汛限水位控制方法。比如,由于流域气候系统的不稳定性,汛期的起始其实是一个非确定的不稳定的区间,是否可在汛

限水位调整的时空上做更进一步的研究,这里的时是指汛期的起始时间,空是指汛限水位调整的幅度。这样,最终可能形成汛限水位时空的多调整研究。并且,当前的汛限水位调整研究多集中在单一水库上,对水库群的汛限水位调整研究还需进一步加强。

b. 需要进一步提高水库水文预报和气象预报的精度和可靠度。由于当前的汛限水位调整多是在预报信息特别是水文预报的指导下进行的,水文预报的精度对汛限水位调整方案影响重大,而且从已有的研究成果看,气象预报成果的可用程度不高,需要在水文预报和气象预报上进一步研究,提高预报产品的可靠度,这样可更加充分地发挥水库的综合效益。

c. 需要加强对汛限水位调整的风险管理研究。由于汛限水位调整中存在多种风险,因此在对汛限水位调整风险的研究上不能松懈,这与承担适度风险的洪水管理目标是一致的。

d. 需要对管理理念进一步统一思想,提高认识。汛限水位调整有别于传统的水库调度方式,是人水和谐、洪水管理的理念,在充分发挥水库综合效益、得到更多实惠的同时也意味着承担更多的风险与责任,这也是汛限水位调整研究进行较为缓慢的原因,因此需要水库调度管理的体制机构能与新形势下的洪水管理相协调,需要有关的科研、管理部门进一步加强合作,统一思想,提高对洪水资源合理利用的认识。

4 结语与展望

汛限水位调整研究是提高水资源利用效率的关键技术,在新的治水理念指导下,汛限水位调整研究应该更加实用、科学,其应用范围也将越来越广,最终将形成较为成熟的汛限水位调整理论与决策支持平台,从而提高水资源利用效率,更好地为水库调度生产实践服务。

参考文献:

- [1] 高波,王银堂,胡四一. 水库汛限水位调整与运用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 326-333.
- [2] 钟平安. 防洪限制水位研究的几点思考[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2002, 30(6): 1-5.
- [3] 邱瑞田,王本德,周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 68-72.
- [4] 陈宁珍. 水库运行调度[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [5] 大连理工大学,国家防汛抗旱总指挥部办公室. 水库防洪预报调度方法及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.

(下转第177页)

- [4] 姚汝方. 防渗墙低弹性模量混凝土性能试验研究[D]. 西安:西北农林科技大学, 2006.
- [5] 邱祖林, 陈杰. 深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特性[J]. 水文地质工程地质, 2006(3):72-76.
- [6] 白永年. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.
- [7] 卢剑虹. 冶勒水电站坝基防渗墙的混凝土配合比研究及应用[J]. 水电站设计, 2006, 22(1):26-30.
- [8] 许丛强. 高强低弹混凝土的试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2001(10):44-46.
- [9] 李金玉, 徐文雨, 曹建国, 等. 100m 深地下防渗墙高强低弹性模量墙体材料的开发及生产性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(1):39-41.
- [10] 肖白云. 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式的研究[J]. 水力发电, 1998(3):29-31.
- [11] 代国忠, 殷琨. 水利工程防渗墙柔性墙体材料的性能与应用研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(3):46-49.
- [12] 王清友, 孙万功, 熊欢. 塑性混凝土防渗墙[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.

(收稿日期:2008-10-20 编辑:方宇彤)

(上接第 167 页)

- [6] 郭荣文. 大洪河水电站分期洪水分期防洪发电研究[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(6):21-25.
- [7] 翟家瑞, 刘红珍, 王玉峰. 黄河洪水的分期调度与分级调度[J]. 人民黄河, 2003, 25(5):6-7.
- [8] 眭汝安, 曹升乐. 水库分期汛限水位动态控制研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2004, 34(5):81-84.
- [9] 刘攀, 郭生练, 肖义, 等. 水库分期汛限水位的优化设计研究[J]. 水力发电学报, 2007, 22(3):5-10.
- [10] 孙金辉, 魏加华, 陈继东. 水库预报调度分期分级模型系统的研究与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 10(5):15-23.
- [11] 高波, 刘克琳, 王银堂, 等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6):1-5.
- [12] 国家防汛抗旱总指挥部. 水库汛限水位动态控制试点工作意见[R]. 北京:国家防汛抗旱总指挥部, 2005.
- [13] 王本德, 周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [14] 曹永强. 汛限水位动态控制方法研究及其风险分析[D]. 大连:大连理工大学, 2003.
- [15] 周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——双汛限水位调度方案[J]. 水利学报, 2000, 31(10):1-11.
- [16] 周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——多汛限水位调度方案[J]. 水利学报, 2002, 33(3):12-19.
- [17] 高波, 吴永祥, 沈福新, 等. 水库汛限水位动态控制的实
- 现途径[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):406-411.
- [18] 张改红. 基于防洪预报调度的水库汛限水位设计与控制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [19] 陈守煜, 王淑英, 郭瑜, 等. 水库设计汛限水位动态模糊控制分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5):735-739.
- [20] 王才君, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡水库动态汛限水位洪水调度风险指标及综合评价模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):376-381.
- [21] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报, 2004, 35(7):86-91.
- [22] 冯平, 韩松, 李健. 水库调整汛限水位的风险效益综合分析[J]. 水利学报, 2006, 37(6):451-456.
- [23] 彭杨, 李义天, 张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6):682-689.
- [24] 殷峻暹, 曹永强. 基于供水风险分析的汛限水位控制范围研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):401-405.
- [25] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用[J]. 水力发电学报, 2008, 23(2):22-28.
- [26] 李继清, 姚志宗, 贾怀森, 等. 刘家峡水库汛期动态防洪限制水位论证研究[J]. 水力发电学报, 2007, 22(5):1-6.
- [27] 郑德凤. 雨洪资源与地下水资源联合调控理论及应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [28] 杜丽惠, 曹亮, 廖松, 等. 密云水库动态汛限水位分析[J]. 水力发电学报, 2005, 20(4):42-46.
- [29] 李旭光. 水库汛限水位控制若干重要问题研究及应用[D]. 大连:大连理工大学, 2008.

(收稿日期:2009-05-08 编辑:高建群)

(上接第 173 页)

- [39] ZENKIEWICZ O C. Analysis of nonlinear problems with particular reference to jointed rock systems[A]. Proceedings of 2nd conference society of rock mechanics[C]. Europe-US Workshop, Springe, Belgrade, 1970, 3:501-509.
- [40] DEASAI C S, ZAMAN M M. thin-layer element for interfaces and joint[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanic, 1984, 8(1):19-43.
- [41] ZAMAN M M, DESAI C S, DRUMM E C. Interface model for dynamic soil-structure interaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(9):1257-1273.
- [42] HOHBERG J M. A review of joint constitutive model[C]. In Proc 2nd Czechoslovak Conf on Num Method in Geomech. Europe-US Workshop, Springer, Berli, 1992:103-108.
- [43] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6):62-66.

(收稿日期:2009-02-23 编辑:高建群)