

土石坝-地基相互作用研究的现状与展望^{*}

22-24
窦兴旺 夏颂佑

许百立

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098) (水利部水利水电规划设计总院 北京 100011)

TV223.7
TV641

摘要 对土石坝-地基相互作用的研究进展作了简要回顾,并对各种研究理论进行了评述,同时对将混凝土坝-地基及土-结构相互作用问题的研究手段,直接移植到土石坝-地基这种结构和地基都呈强烈非线性的研究的可行性提出质疑.重点对相互作用研究中的人工边界及地震输入机理问题进行了详尽的论述.最后,结合作者承担的课题对土石坝-地基相互作用问题的研究进行了展望.

关键词 土石坝;地基;人工边界;地震输入机理;有限元

国内外在深厚覆盖层上修建高土石坝的经验不多.虽然俄罗斯等国家在比较深的覆盖层上修建过高堆石坝,国内也有几座土石坝的地基较为复杂,但修建在高烈度地震区,覆盖层厚度超过 200 m 以上的高土石坝在国内外尚无修建的先例.目前我国的水利工程建设中遇到的一些地基情况非常复杂,而水力资源又非常丰富的地区,以往由于技术力量和资金等方面的原因一直未曾开发,现在已列入开发计划中,如四川省某土石坝,坝高超过 100 m,位于高烈度地震区(基本烈度为 8 度)^[1],地基覆盖层的厚度超过 400 m.

迄今为止,在高烈度地震区深厚覆盖层上修建高土石坝,坝与深厚覆盖层地基的相互作用如何考虑,复杂的坝基防渗体系如何真实模拟,国内外都尚无成熟的方法.Clough 等^[2]在对岩基上的混凝土坝作动力分析中考虑地基对坝体的影响时,提出只考虑地基的刚度,忽略地基的质量,地震动从地表输入.这种方法在直接应用于高土石坝和深厚覆盖层地基相互作用问题时显然须进行深入的研究.此外,对于深厚覆盖层地基上堆石坝防渗体系的真实模拟,目前也无很好的办法.例如地基混凝土防渗墙的应力计算,以前国内外也都做过一些工作,但与实测结果相比并不能令人满意.因此,缺少合适的分析方法给复杂地基上的高土石坝的设计与科研带来了很大的困难.另一方面,坝址处一般都没有实测地震波,通常选用已有的合适的地表地震记录,结合当地场地特征和结构特性进行适当调整后作为地震输入,这给从基岩进行地震输入带来了困难.

1 土-结构相互作用研究

土-结构相互作用的研究已有近 60 年的历史,Reissner 关于弹性半空间表面刚性圆形基础振动问题的研究奠定了土-结构动力相互作用问题研究的理论基础^[3,4].这一理论至今还发挥着重大的作用.但是土-结构相互作用研究的迅速发展则是近 30 年来的事.这主要由于计算方法和计算机技术提供了有力的分析手段;此外,在工程建设实际中,核电站和大坝等抗震要求较高的工程建设对此也起着较大的推动作用.

土-结构相互作用的分析方法很多,理论上主要有连续理论和离散理论及两者的组合.弹性半空间理论是连续理论的主要代表,它以弹性半空间表面作用简谐力和位移的解析关系为基础,给出考虑结构和地基相互作用的一种简化计算方法——集中参数法.

实际上,由于一般地基条件的物理特性均呈一定程度的非线性,而且,地基在空间上也不是均匀的,甚至可以简化为成层地基的情况也是相当有限的.鉴于此,弹性半空间理论在结构和地基相互作用的研究中受到了较多的限制.随着有限单元法在工程中的应用推广,人们已意识到对相互作用问题的研究不能仅仅停留在试图寻求其近似的理论解上,依赖大容量高速运行的计算机设备,人们可以应用有限单元法充分考虑地基对结构的影响范围.

2 坝-地基相互作用研究

对于大坝的结构分析,即使在静力作用下,也要

第一作者简介:窦兴旺,男,博士研究生,从事坝-地基相互作用研究.

* 高等学校博士点基金资助课题(编号:9529401).

考虑地基的影响.通常在静力分析中,仅根据坝基应力的影响范围来确定计及的地基范围;在地震作用下的动力分析中,问题要复杂得多.概括起来,坝-地基相互作用的影响表现在以下三个方面^[5]:①地基的柔性使得坝体的自振特性发生变化;②坝的存在改变了自由场地震动特性,也就是作用在坝基面上的地震动特性与邻近自由场相比发生了变化,总的来说,使得自由场地震动记录的频谱组成中接近于坝体自振频率的分量获得加强;③坝的部分振动能量将通过无限地基向外逸散,即存在地基辐射阻尼,对坝的振动起到很大的削减作用.考虑坝-地基相互作用就是将坝和地基作为耦连体系进行研究.

随着坝工技术和相关专业技术研究的发展,坝-地基相互作用问题显得日益重要,各国都在加紧研究,但可实际应用于大坝抗震设计的研究成果还不多.

求解相互作用问题的方法中较成熟的有有限单元法和子结构法,此外,还有有限元和无限元以及有限元和边界元的杂交等方法.

所谓子结构法就是将半无限体的连续地基和坝体各视为一个独立的结构(子结构)分别进行计算,将地基对坝体的影响以作用在坝基面上的外力代替.

有限单元法是将一定范围内的地基和坝体视为一个共同体系进行分析,原则上可适用于任意地基,同时考虑地基的非线性特性影响,但也存在几个有待研究解决的问题,简述如下:

2.1 地基范围的确定

在静力分析中,所取地基的范围通常根据坝基应力的影响范围来确定.但在动力问题中,由于需计入地基质量和辐射阻尼的影响,因而没有确定其大小的确切依据.地基范围取得过大,既受到计算机存储容量和计算时间的限制,同时由于大部分时间用来计算地基的动力反应,则显得没有太大的必要,而且地基内的网格又不能割得过稀,以免影响高频振动的传递而导致较大的误差;另一方面,若地基范围取得过小,则不能充分考虑地基对坝体反应的影响.在一般的动力分析中,都采用与静力分析相同的有限元剖分网格,这更值得进一步研究探讨.

2.2 边界反射的影响

如果将地基边界取为固定,则由于边界的反复反射,形成驻波,将导致地基的共振,这不符合地基对振动能量辐射的实际情况.因此,如何有效抑制有限离散模型边界上波的反射问题,是地震学和工程地震学界一直研究和讨论较多的难题之一.许多学者提出了多种人工边界^[6~8],用于在有限离散模型的边界上模拟无限边界条件,以消除或减少人工截取边界对波的反射的影响.目前较好的人工边界有

粘性边界^[8]和旁轴近似.前者通过在边界上设置阻尼器以吸收向外辐射的能量;后者在于构造一个波只能沿一定方向传播的方程以代替波动方程,并在小入射角前提下求替代方程的截断级数解.但两者的误差均随入射角的加大而增大.当入射角接近90°,人工边界将完全丧失吸收入射波的能力.为了消除旁轴近似的误差,廖振鹏等^[6]提出了透射边界的概念.该方法在入射波垂直于边界的假设下,直接在离散模型上模拟波的传播过程.他们认为由透射方法产生的误差本身也可视为一个向外传播的波,由此提出了多次透射的概念.

近年来,有人应用有限元和无限元杂交的方法来求解坝-地基动力相互作用问题^[9].这一方法的主要特点是利用有限元模拟近场复杂地基,利用无限元表征由近场对远场地基的影响,使任意形态分布的以及无限延伸的层状地基得到了更精确的模拟.但是,该方法的关键是能否找到合适的无限元的形函数.

此外,近场用有限元,远场用边界元结合使用求解相互作用问题也是近十来年研究得较多的一种方法^[8,10].边界元只需沿所讨论问题的边界进行离散,因此,可使问题降低一维(尽管如此,其劲度矩阵是满阵).此外,边界积分方程是问题的精确表达式,仅在对其进行数值积分时才引进了近似处理.因为边界元法采用的格林函数能自动满足远场的辐射条件,因此对处理坝-水相互作用及坝-地基相互作用等包含半无限域的问题特别有效.但是边界元法在处理复杂的多层和不均质的地基问题时,却显得困难.

对于坝-地基的相互作用,有些学者认为不计入相互作用的设计是偏于保守的,也有的持相反观点.笔者在经过初步研究后认为:对深厚覆盖层地基上的高土石坝而言,不考虑坝-地基的相互作用对坝体结构设计是偏于保守的^[5].

3 地震输入机理研究

土石坝对地震的反应,是在地运动的激励下,地基、坝体、库水三者相互作用的结果.笔者认为,地震输入应包括两个方面的内容:一是输入运动本身,即在地震反应分析中,应采用什么样的地震动作为地震输入,这属于工程地震危险性分析的范畴,其任务是设定工程地震动强度和设计地震动时程.无疑,这是抗震设计中的关键之一,在抗震设计中有较大的不确定性,确定要输入的地震动通常由地震地质部门负责;二是地震输入方法,即地震输入机制.本文将对此进行较为详细的论述.

在分析坝-地基相互作用的模型中,人们通常在模型底边界输入设计地震动.但这样做的结果是,由

于地震波传播过程中产生的波传导效应,将产生放大和滤波作用,计算得到的坝底地震反应将比周围自由场大很多。

为此,近十多年来,国内外采用无质量地基的近似处理相当流行^[11],但是这种忽略地基的惯性而只考虑其刚度的做法在原理上并不符合真实情况.这种处理是在 M 阵中将对应于地基单元的项充零,从而削弱了有效地震力,这对补偿波的传导效应有益;同时削减了整个坝-地基系统的惯性(约削减 80%~90%),而 K 阵则保持原状。这样将人为放大系统的自振频率,而由自振频率的失真而产生的误差是不可预估的。

另一种输入方式是在模型底边界输入基岩地震动.这一方式首先实际应用于美国 Humboldt 湾核电站的分析^[11],并与在 Ferndals 地震(1975 年 6 月 7 日)中的实测值吻合较好。

由于地震记录一般在地表获得,因此需通过反演分析求得基岩(一般取一定深度处)地震动.把自由场记录作为输入 $X(t)$,通过求解地基阻抗求得传递函数 $H(\omega)$,将基岩地震动作为响应 $Y(t)$,则 $Y(t) = H(\omega) \cdot X(t)$.当然,目前用得最多的,也认为是较合理的做法是有限元法,实际上是将地基也视为一“结构”,在结构上部输入 $X(t)$,通过场地地震反应反分析求得响应 $Y(t)$,即为基岩地震动.胡聿贤等^[12]曾研究进行频域内的反演以及其以后发展的在频域中反演,在时域中正演,代表着当今反演分析的最新研究成果。

综上所述,目前在相互作用分析中应用和提出的地震输入方式有三种:①在坝基面上直接输入自由场记录;②在有限元模型底(或基岩处)输入自由场记录;③将自由场记录进行反演,得到基岩地震动时程,再将该时程输入到基岩进行结构的正演分析.其中第一种忽略了由于坝的存在而改变了的坝基处地震动和自由场记录的差别,有一定的近似性.尽管如此,该方法已被较成熟地应用于混凝土坝和基岩的相互作用研究中,但在土石坝-地基(特别是深厚覆盖层情况)研究中的应用,似乎还值得进一步探讨.第二种从理论上讲不是太合理,因为这样的自由场记录在传播到坝基时已经过了较多的放大,势必导致坝体动力反应的放大.然而,这又是从事数值分析研究者偏爱的一种方法,况且,模型试验时只能采用这种地震输入方式.第三种是一种理想化的方法,如果不是地基土的诸多不确定的因素,反演方法从真正意义上实现了在基岩处(如果地基模型取至基岩)地震动的输入,这是最合理的,也是最方便的地震输入方式。

4 结 语

前人已对土-结构和混凝土坝-地基相互作用问题进行了较多的研究,取得了很丰硕的成果,可以说两者的研究理论和方法正在日臻成熟。

然而,对土石坝-地基,特别是深厚覆盖层复杂地基,由于坝体和地基材料常常呈强烈非线性,以至在静力分析时土石料参数的确定,本构模型的选取等都不是容易的事.对动力分析而言,如何用有限域模型模拟无限域问题,土石料动力参数的确定,如何获得基岩地震动等问题也都未解决.在进行模型振动台试验时,由于土石结构无法适用简单的模型比尺原理,难以找到合适的材料来较精确地模拟坝体与地基材料,模型材料的静动力参数也较难获得,如何选取适合场地特征的地震动时程等问题在目前的研究中都较难得以合理地解决。

基于此,笔者以大型地震模拟振动台结构试验与数值分析相结合和相互验证的方法对土石坝-地基相互作用进行了研究,研究成果将为深厚覆盖层上的高土石坝的科研与设计提供科学依据,详情可见文献[5]。

本文的研究得到了水利部水利水电规划设计总院的科研资助,谨致谢意。

参考文献

- 1 冀春楼,夏颂佑.深厚覆盖层上高堆石坝静动力分析方法的研究:[学位论文].南京:河海大学,1995
- 2 Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures. [s. l.]: McGraw-Hill, 1975
- 3 林皋.结构和地基相互作用体系的地震反应分析及抗震设计.见:国家地震局工程力学研究所主编.中国地震工程研究进展.北京:地震出版社,1992. 211~225
- 4 赵光恒主编.结构动力学.北京:中国水利水电出版社,1996
- 5 窦兴旺,夏颂佑,许百立.高土石坝与深覆盖层地基相互作用研究.河海大学学报,1997,25(水利水电工程专辑): 12~16
- 6 廖振鹏.暂态波透射边界.中国科学,1984(6):50~56
- 7 Shen F Q. Transmitting boundary in dynamic computation: [dissertation]. Univ of Wales, 1988
- 8 Cohen M. Silent boundary methods for transient wave analysis: [dissertation]. California Institute of Technology, 1981
- 9 赵崇斌,张楚汉,张光斗.用无穷元模拟半无限平面弹性问题.清华大学学报,1986(3):37~43
- 10 Otto von Estorff. Soil-structure interaction analysis by a combination of boundary and finite elements. Berlin: ERCAD, 1989. 778~793
- 11 刘浩吾.地基混凝土坝相互作用分析中的地震输入方式.见:全国土工建筑物及地震抗震学术讨论会论文集汇编.西安:西安科学技术出版社,1986. 505~508
- 12 胡聿贤,朱镜清,朱莉.非线性振动输入反演的时频域法.地震工程与工程振动,1982(2):1~10

(收稿日期:1998-02-16 编辑:熊水斌)