



电力科技专著出版资金资助项目

SEISMIC RESEARCHES
FOR EARTH AND ROCKFILL DAMS

土石填筑坝 抗震研究

汪闻韶 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



SEISMIC RESEARCHES
FOR EARTH AND ROCKFILL DAMS

土石填筑坝 抗震研究

汪闻韶 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

土石填筑坝的抗震是一个十分复杂的问题。作者从历史文献和实际地震时土坝的震害情况中发现,土坝的抗震安全除了受地震因素的影响以外,主要与坝体和坝基的工程质量、土体的动力性质、抗震工程措施等有关。

本书着重于对土的动力特性(强度、液化和应力应变关系等)问题、土坝抗震分析(稳定、变形等)问题等进行了较详细的探讨。根据作者对土坝地震安全情况的了解和掌握的知识,初步认为有效的抗震工程措施比繁复的计算分析更为可靠,土坝的地震变形分析比稳定分析更有意义;必须分清土体液化与极限平衡和破坏间的区别,应以不出现对工程和环境有害的破坏作为衡量标准,如容许变形量、裂缝、漏水、管涌、滑塌、漫顶等。上述破坏准则的确定和预估以及要留有一定安全余地,是今后需要通过实际观察和研究并进一步继续探讨的问题。

本书可供坝工及岩土力学领域的设计、施工、科研人员等阅读,并可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石填筑坝抗震研究/汪闻韶著. —北京:中国电力出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-5123-1578-5

I. ①土… II. ①汪… III. ①土石坝-抗震-研究 IV. ①TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 064764 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.75 印张 696 千字

印数 0001—2000 册 定价 150.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是笔者根据中国水力发电工程学会要求和本人实际经历撰写的，主要总结了本人从事土石坝抗震研究工作的心得体会和收获，以及经历过的探索、思考和弯路。

全书分为第一篇工程实践，第二篇探索、思考与弯路以及附录三部分。

第一篇是本书的主体，介绍了我在土石填筑坝抗震工作中取得的比较成熟的经验和体会，共十五章。第一章综述了 50 年前人们对土坝地震稳定问题的认识，并提出了当时要开展该项研究工作的初步意见。第二至四章是对我国土坝和水工建筑物地基在实际地震中的破坏情况的调查分析，归纳出土坝和地基防震减灾工作中所存在和需要解决的主要问题。第五至七章系统介绍和论述了土的动强度和液化特性，并阐明了土体液化与极限平衡和破坏的区别及联系。第八章在扼要介绍动力学基础知识之后，详细地介绍了不同土在不同情况下的静力和动力应力应变关系的各种不同现象，并进行了初步归纳和归一化（标准化，normalization）探讨。发现土在循环荷载（如地震作用）下的应力应变关系比在静力作用下复杂得多，对于饱和砂土则更加复杂，后者主要受到孔隙水压力变化的影响。特别注意到土体达到“初始极限平衡”以后，它的变化规律已经失序，很难建立一个符合实际情况的本构关系来正确估计土坝地震后的变状。第八章只介绍了一种供土坝地震动力反应（加速度、动应力、动应变等）分析用的等效线性计算模式。第九、十章主要介绍了在根据黄文熙创议的惯性力式振动三轴试验仪上进行的饱和砂土振动孔隙水压力试验研究结果，证明饱和砂土在振动作用下孔隙水压力的变化（上升）与它的应力状态有关，并发现了预振后可以减小振动孔隙水压力的现象，反映出与砂土颗粒排列结构有关的组构性（fabric）影响。在此基础上介绍了饱和砂土振动孔隙水压力产生和变化的机理，并提出了振动孔隙水压力消散和扩散的物理机制和计算方法。第十一、十二章介绍和论述了土石坝抗震设计的一般方法，认为必须以抗震工程措施作为首先要被满足抗震安全要求的前提下，然后才去进行计算分析。对土石填筑坝地震滑动稳定分析——拟静力法、地震动力反应分析——等效线性有限元法和土石填筑坝地震变形分析方法等都做了介绍和评议。由于上述诸计算方法中还存在某些问题，因此从保证土石坝抗震安全角度出发，认为抗震工程措施比计算分析更为重要和可靠；同时，认为地震变形分析在土石坝抗震中具有重要意义，需要深入研究。第十三章提出了土（基岩）的剪切波速是土工抗震工作中的一个重要物理量，有多方面的用处，如场地土类型划分、地基土层地震液化可能性的原位检测、地基动力反应分析、地基饱和砂层原位动力特性鉴别等。第十四章专门探讨了剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用问题，认为可以用作初评，以排除不需要考虑液化问题的砂层，从而可减少不必要的液化试验研究的工作量。第十五章提出了加强我国水利工程防洪抗震减灾中土力学研究及土工科技工作的思考和建议。

第二篇是我在开展和从事土石填筑坝抗震科研工作中所经历的探索、思考与弯路。其中，有的已取得了成果，有的走过弯路后取得了进展，有的则还没有开展。第十六章是关于土坝抗震设计方法及研究途径的初探和思考。第十七章是关于饱和砂土液化概念的探索和思考。第十八章是关于饱和砂土液化问题研究的探索和思考。第十九章是关于振动三轴液化试验技术的探索。第二十章是往返荷载下饱和砂土的强度、液化和破坏问题。

附录中主要列入 3 个参考资料。附录 A 为国内外遭受过地震的部分土坝情况汇总（包括其他类似建筑物）。附录 B 为中小型水工建筑物抗震工作应注意的几个问题。附录 C 为日本土石坝抗震技术及砂土液化研究。

土石填筑坝抗震问题是一个要确保工程在地震作用下不发生破坏的安全问题，涉及地震运动、坝体和地基土石料的物理力学特性、工程结构设计、水（包括孔隙水）土间的相互作用、破坏准则、预估方法、保证措施等问题，需要全方位地进行研究和掌握，必须通过实践，取得长时期实地观测、科学研究和工程经验的积累，以求万无一失。

因作者知识有限，书中难免有错误不当之处，请读者批评指正。

江嗣韶

2006 年 11 月



前言

第一篇 工程实践

第一章 50 年前对土坝地震稳定问题的初步认识	3
第一节 引言	3
第二节 土坝地震荷载问题	3
第三节 土的地震动力特性问题	11
第四节 土坝地震稳定分析方法和防震工程措施问题	14
第五节 对开展研究工作的初步意见	20
参考文献及资料	21
第二章 我国土坝抗震与水库安全	23
第一节 引言	23
第二节 土坝的地震设防烈度问题	24
第三节 低烈度区土坝的严重滑坡问题	25
第四节 土坝坝基问题	30
第五节 地震时土坝的滑坡、变形和裂缝	34
第六节 其他震害问题	37
第七节 对土坝抗震工作的几点认识	38
参考文献及资料	39
第三章 对我国几个土坝和土堤震害原因的若干研究	41
第一节 引言	41
第二节 西克尔土坝震害的研究	41
第三节 淦阳河系堤岸震害的研究	43
第四节 山东省砂壳坝滑坡原因探讨	46
第五节 石门土坝滑坡原因探讨	48
第六节 白河土坝滑坡原因分析	49
第七节 陡河土坝坝基地震破坏试验	52
第八节 对土坝防震减灾主要问题的看法	53
参考文献及资料	53

第四章 水工建筑物抗震设计中的地基问题	54
第一节 活动断层问题	54
第二节 岩基中的软弱夹层问题	56
第三节 地基液化破坏问题	56
第四节 软弱黏性土问题	64
第五节 地基防渗和抗渗体系的抗震安全问题	66
第六节 严重不均匀地基问题	67
参考文献及资料	67
第五章 土的动强度问题	68
第一节 关于土强度的物理和工程概念	68
第二节 冲击作用下土的强度	72
第三节 循环作用下土的强度	83
参考文献及资料	101
第六章 土的液化问题	103
第一节 关于土液化概念的演进	103
第二节 土液化的正名和形成机理	119
第三节 饱和砂土的液化特性	129
第四节 其他土类的液化特性	141
参考文献及资料	158
第七章 土体液化与极限平衡和破坏的区别及关系	160
第一节 引言	160
第二节 土体液化与极限平衡和破坏的区别	160
第三节 土体液化与极限平衡和破坏的关系	163
第四节 土体液化和变形间的关系问题	172
第五节 防止土体液化破坏对策雏见	173
第六节 结论	176
参考文献及资料	176
第八章 土的应力应变关系问题	178
第一节 引言	178
第二节 动力学基础知识	180
第三节 土的应力应变关系	190
参考文献及资料	223
第九章 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究	225
第一节 引言	225
第二节 试验情况简述	225

第三节	应力状态对振动孔隙水压力的影响·····	226
第四节	振动强度和砂土密度对振动孔隙水压力的影响及其他有关问题·····	230
第五节	结语·····	233
	参考文献及资料·····	234
第十章	饱和砂土振动孔隙水压力的产生、扩散和消散·····	235
第一节	引言·····	235
第二节	关于砂土压缩特性和振动孔隙水压力产生机理的探讨·····	235
第三节	饱和砂土振动孔隙水压力扩散和消散基本方程组的建立·····	239
第四节	数解方法及算例·····	241
第五节	结语·····	244
	参考文献及资料·····	244
第十一章	土石坝抗震设计一般方法·····	245
第一节	土石坝抗震设计注意事项和工程措施·····	245
第二节	地基中地震时可液化土层和软弱黏性土层的评价方法·····	250
第三节	土石坝地震滑动稳定性分析——拟静力法·····	254
第四节	土石坝地震动力反应分析——等效线性有限元法·····	259
	参考文献及资料·····	265
第十二章	土石填筑坝地震变形分析方法初探·····	267
第一节	引言·····	267
第二节	介绍两类分析方法·····	271
第三节	评议与建议·····	285
	参考文献及资料·····	288
第十三章	土地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速·····	290
第一节	引言·····	290
第二节	土中剪切波速的特性·····	290
第三节	土的剪切波速在抗震工程中的应用和研究·····	291
第四节	结语·····	293
	参考文献及资料·····	293
第十四章	剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用·····	294
第一节	引言·····	294
第二节	利用剪切波速作为初判手段的起源·····	294
第三节	初始液化的判别准则·····	296
第四节	初始液化的临界指标问题·····	297
第五节	结语·····	299
	参考文献及资料·····	299

第十五章	加强我国水利工程防洪抗震减灾中土力学研究及 土工科技工作的思考和建议	301
第一节	引言	301
第二节	灾害的启示	301
第三节	认识的不足和偏向	309
第四节	加强水利工程防洪抗震减灾中土力学研究及土工 科技工作的建议	310
	参考文献及资料	312

第二篇 探索、思考与弯路

第十六章	关于土坝抗震设计方法及研究途径的初探和思考	315
第一节	土坝抗震设计方法初探	315
第二节	土坝抗震问题研究途径的思考	328
	参考文献及资料	335
第十七章	关于饱和砂土液化概念的探索和思考	337
第一节	引言	337
第二节	关于砂土液化的概念	337
第三节	饱和砂土的液化	341
第四节	研究和解决实际工程中饱和砂土液化问题的途径	352
	参考文献及资料	354
第十八章	关于饱和砂土液化问题研究的探索和思考	356
第一节	引言	356
第二节	砂土的强度和压密特性	356
第三节	砂土液化和强度降低及其危害性	360
第四节	砂土液化的条件和因素	369
第五节	砂土的结构性质和天然紧密度测定方法	369
第六节	外界干扰作用和动力作用问题	373
第七节	应力状态及其变化问题	375
第八节	判断砂土液化已有方法的讨论	375
第九节	对判断砂土液化试验方法的建议和商榷	378
第十节	防止砂土液化的处理措施问题	380
第十一节	结语	383
	参考文献及资料	383
第十九章	关于振动三轴液化试验技术的探索	385
第一节	背景	385
第二节	第一个惯性力式振动三轴仪及使用中发现的问题	389

第三节 对惯性力式振动三轴仪的改装及遗留问题·····	394
参考文献及资料·····	396
第二十章 往返荷载下饱和砂土的强度、液化和破坏问题·····	397
参考文献及资料·····	410
附录 A 国内外遭受过地震的部分土坝情况汇总 ·····	412
附录 B 中小型水工建筑物抗震工作应注意的几个问题 ·····	434
附录 C 日本土石坝抗震技术及砂土液化研究 ·····	436
致谢·····	480



第一篇

工 程 实 践



第一章

50 年前对土坝地震稳定问题的初步认识

第一节 引言

地震对土坝的危害性，可分为由于地基断裂或差动所造成的直接破坏和由于地面波动所引起的间接影响两种情况。前者通常发生在近震区有活动性断层的地基上，后者则在地震时有地面波动比较强烈的地区，一般在地震烈度大于Ⅵ～Ⅶ度的地区，都有可能发生。对于前一种情况，必须从地质构造上加以鉴别和估计，并应避免在这种地基上筑坝。对于后一种情况，则可借助于结构动力学的方法来处理，这是研究土坝地震稳定问题的主要方面。

就一般情况而言，在土坝运行的整个时期，地震，特别是强烈的地震，并不是经常发生的，所以在设计土坝时，对于地震的影响，大都只作为非常情况考虑，对土坝地震稳定性的核算也比较粗略。但根据 1960 年第二届世界地震工程会议汇刊中的资料^[1~3]，过去世界上曾经遭受地震损害的土坝还是不少的，因此在土坝设计中，对于地震问题仍有提起注意的必要。

土坝地震稳定中的主要问题有：①土坝在地震作用下的受力情况，即土坝地震荷载问题；②土在地震动力作用下的应力应变关系、模量、阻尼和变形及强度特性，即土的地震动力特性问题；③土坝在地震作用下的稳定条件和工程措施，即土坝地震稳定分析方法和防震工程措施问题。

第二节 土坝地震荷载问题

和一般工业及民用建筑物的地震荷载理论^[4]一样，土坝地震荷载问题也有静力理论和动力理论之分。

静力理论出现较早，最初是由日本大森^[5]提出的。静力理论假定地震时建筑物各部分都受到一个均匀而不变的加速度，由此加速度所产生的惯性力在设计中作为一种附加的静荷载。当静力理论应用于土坝设计时，则常假定土坝和地基同时受到一个相同的加速度 a ，因此作用在土坝和地基中每一单位体积上的地震力 q 为

$$q = k_e \gamma \quad (1-1)$$

$$k_e = a/g$$

式中： k_e 为地震系数； a 为地震加速度； g 为重力加速度； γ 为土的重力密度。

显然，静力理论对于土坝的动力行为和坝基地面运动的特征都没有充分考虑。同时，在模型试验和原体观测工作中，都曾发现地震加速度在土坝上的分布并不是均一的。例如，大连工学院^[6]在土坝模型试验中得到加速度沿坝高变化的情况（见图 1-1），坝顶加速

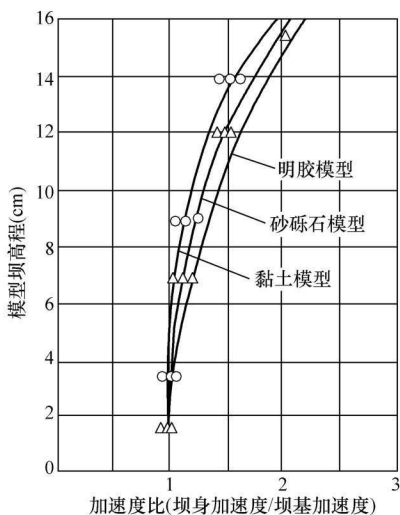


图 1-1 土坝地震模型试验中加速度在高度上分布情况示例

为等腰三角形,如图 1-2 所示。关于土坝材料的性质,他们采用了黏滞弹性体的力学模型,从而给出了土坝水平剪切振动的基本偏微分方程式,即

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{g}{\gamma} \left\{ \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[y \left(G \frac{\partial w}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right) \right] \right\} \quad (1-2)$$

式中: w 为水平位移; t 为时间; y 为由坝顶向下的距离; G 为剪变模量; η 为黏滞系数。

由此解得土坝基本振型的自振周期为

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2.61H \sqrt{\frac{\gamma}{gG}} \quad (1-3)$$

$$\omega_1 = 2.4048 \sqrt{gG/\gamma}/H$$

式中: ω_1 为基本振型土坝的无阻尼自振圆周频率; H 为坝高。

由于土坝的 G 值一般较低,用式 (1-3) 计算出来的土坝自振周期往往与地震周期属于同一数量级 (约为十分之几秒到几秒),因此,物部等认为土坝的地震荷载应根据共振现象决定。从这个观点出发,他们分析了当坝基地面运动假定 $-d_0 \cos pt$ (d_0 为振幅; $p = 2\pi/T$ 为地震圆周频率,其中 T 为地震周期) 为土坝发生共振时的位移;图 1-3 是假定

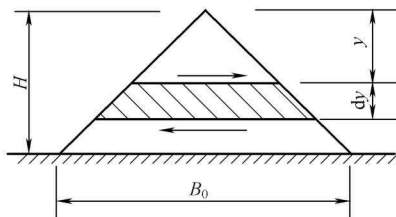


图 1-2 一元土坝等腰三角形计算断面

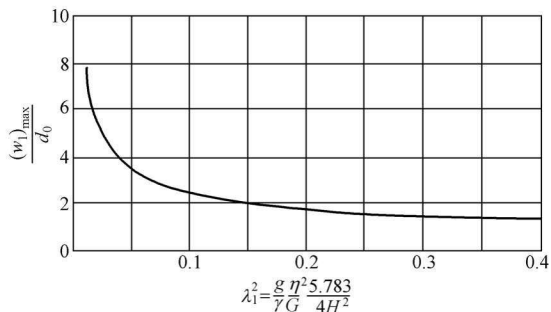


图 1-3 坝顶最大位移比与相对阻尼平方之间的关系曲线



G 和 η 都是常数时坝顶最大位移 $(w_1)_{\max}$ 与坝基振幅 d_0 之比和相对阻尼 λ_1 ($\lambda_1 = 2.4048 \times \eta \sqrt{g/\gamma G/2H}$) 平方间的关系曲线, 由此可见阻尼的影响也是不可忽视的。

物部等认为加速度 a 在坝高上的分布可近似地表达为

$$a = a_0 \left(1 + \frac{d_T - d_0}{d_0} \frac{H - y}{H} \right) \quad (1-4)$$

$$a_0 = (4\pi^2/T^2)d_0$$

式中: a_0 为坝基水平地震加速度; d_T 为坝顶最大水平位移。

后来, 畑中^[8,11]进一步发展了松村和物部等的工作。他对地震时土坝主要属于剪切振动的假设做了理论上的探讨, 说明对于底宽一般都大于坝高 3 倍以上的土坝, 采用这样的假设是适当的。他进一步考虑了河谷两岸接头对土坝振动行为的影响, 进行了二元问题的分析。他除了仍把土坝材料视作黏滞弹性体外, 还多考虑了一个与土坝位移速度成比例的阻尼力, 以概括土坝振动能量在地基中消散的影响, 从而给出了矩形河谷中有限长度土坝在垂直于坝轴线方向的二元水平剪切振动基本偏微分方程式 (见图 1-4), 即

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{g}{\gamma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(G \frac{\partial w}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{y} \left(G \frac{\partial w}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial t} \right) \right] - c \frac{\partial w}{\partial t} \right\} \quad (1-5)$$

式中: x 为土坝长度方向的坐标; c 为阻尼系数。

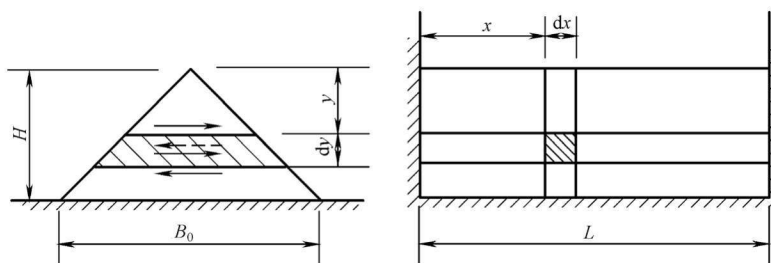


图 1-4 矩形河谷中二元土坝三角形计算断面

由此, 畑中通过分析, 与式 (1-2) 的解进行比较后得出结论: 当坝长大于坝高 3~5 倍时, 土坝的振动行为 (自振频率和位移) 可以容许按照一元问题处理; 除了接近河谷两岸局部坝段以外, 一元分析不致产生太大误差。

但畑中对土坝地震荷载问题, 没有采用根据最大加速度 $(\partial^2 w / \partial t^2)_{\max}$ 计算惯性力的方法, 而是引用了近年来在一般建筑物地震荷载动力理论中经常运用的, 根据建筑物地震反应 (地震时建筑物发生的变形) 产生等效弹性力的地震荷载估计方法^[12,13], 对于各个单独振型 (j) 的地震系数计算为

$$k_{e(j)} = \frac{\omega_{(j)}^2}{g} u_{(j)} \quad (1-6)$$

式中: $\omega_{(j)}$ 为相应于振型 (j) 建筑物的无阻尼自振圆周频率; $u_{(j)}$ 为相应于振型 (j) 建筑物与地基间的相对位移。

畑中为了确定土坝的上述地震系数, 需要推求土坝与地基间的相对位移 u , 于是将式



(1-5) 改为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + c_1^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_2^2 \frac{\partial u}{\partial t} + a_0(x, t) \quad (1-7)$$

这里假定 G 、 η 和 c 都为常数, 坝基地面的水平地震加速度为 $-a_0(x, t)$; $c_0 = \sqrt{gG/\gamma}$ (剪切波速); $c_1 = \sqrt{g\eta/\gamma}$; $c_2 = \sqrt{gc/\gamma}$ 。

解式(1-7), 并用式(1-6)计算地震系数, 对所有振型进行叠加后, 得出土坝地震系数为

$$k_c = \frac{1}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \omega_{ns}^2 u_{ns} = \frac{4}{gL} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\theta_s J_1(\theta_s)} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) J_0\left(\frac{\theta_s y}{H}\right) A_{ns} \quad (1-8)$$

$$\omega_{ns} = c_0 [(n\pi/L)^2 + (\theta_s/H)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$A_{ns} = \frac{\omega_{ns}}{(1 - \lambda_{ns}^2)^{\frac{1}{2}}} \times \int_0^t e^{-\omega_{ns} \lambda_{ns} (t-\tau)} \left[\int_0^L a_0(\xi, \tau) \sin\left(\frac{n\pi \xi}{L}\right) d\xi \right] \sin[\omega_{ns} (1 - \lambda_{ns}^2)^{\frac{1}{2}} (t - \tau)] d\tau$$

$$\lambda_{ns} = \epsilon_{ns} / \omega_{ns}$$

$$\epsilon_{ns} = [(c_1 \omega_{ns} / c_0)^2 + c_2^2] / 2$$

式中: n 、 s 为土坝长度方向和高度方向的振型阶次; u_{ns} 为相应于 n 、 s 振型土坝与地基间的相对位移; ω_{ns} 为相应于 n 、 s 振型土坝的无阻尼自振圆周频率; L 为坝长; θ_s 为贝塞尔函数 $J_0(\theta_s) = 0$ 的第 s 个根; A_{ns} 为相应于 n 、 s 振型土坝的相对阻尼; ϵ_{ns} 为相应于 n 、 s 振型土坝的总阻尼; ξ 、 τ 为相应于 x 和 t 的积分变数。

若坝基地面加速度沿坝长均匀分布, 即为 $-a_0(t)$ 时, 则

$$k_c = \frac{8}{g\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{n\theta_s J_1(\theta_s)} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) J_0\left(\frac{\theta_s y}{H}\right) \bar{A}_{ns} \quad (1-9)$$

$$\bar{A}_{ns} = \frac{\omega_{ns}}{(1 - \lambda_{ns}^2)^{\frac{1}{2}}} \int_0^t e^{-\omega_{ns} \lambda_{ns} (t-\tau)} a_0(\tau) \sin[\omega_{ns} (1 - \lambda_{ns}^2)^{\frac{1}{2}} (t - \tau)] d\tau$$

对于一元问题, 土坝的地震系数为

$$k_c = \frac{2}{g} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\theta_s J_1(\theta_s)} J_0\left(\frac{\theta_s y}{H}\right) A_s \quad (1-10)$$

$$A_s = \frac{\omega_s}{(1 - \lambda_s^2)^{\frac{1}{2}}} \int_0^t e^{-\omega_s \lambda_s (t-\tau)} a_0(\tau) \sin[\omega_s (1 - \lambda_s^2)^{\frac{1}{2}} (t - \tau)] d\tau$$

土坝的设计地震系数应取 k_c 的最大值, 根据已知的 $a_0(x, t)$ 或 $a_0(t)$, 通过积分, 可以求得 A_{ns} 、 $\bar{A}_{ns}$ 或 A_s 的最大值, 从而即可确定 k_c 的最大值。由于不同振型间有一定的相位差, 并且只有在土坝自振周期接近于坝基地震周期时最为危险, 因此在土坝设计时可只选取若干个自振周期接近于坝基地震周期的振型进行计算比较, 从中找出相应于某一振型的 k_c 最大值作为设计地震系数。

但在实际情况中, 往往缺乏坝址的 $a_0(x, t)$ 或 $a_0(t)$ 实测资料, 因此若完全采用上述方法推算土坝的设计地震系数, 是很难做到的。

对于土坝设计地震系数实际采用数值, 烟中还提出了这样的建议: 对坝顶地震系数, 建议为 $k_T = 0.3/T$, 但不大于 0.5 或小于 0.3; 对地震系数沿坝高的分布, 建议为

$$k_c = k_T J_0 \left(2.404 \, 8 \frac{y}{H} \right) \quad (1-11)$$

近年来, 英国恩伯拉散斯^[14,15]和苏联那比脱伐列齐^[16]等都在土坝地震荷载问题方面发表过有代表性的著作。他们采用的方法基本上和烟中等相似, 但也有区别或新发展的部分, 这是下面所要重点叙述的。

恩伯拉散斯所采用的方法与烟中的区别, 是把土坝材料视作弹性体而不是黏滞弹性体, 并且考虑了坝顶宽度的影响; 但是, 最有意义的是他开始考虑坝基覆盖土层的振动及其影响, 这是一个新发展的开端。

关于是否要考虑坝顶宽度的影响问题, 从恩伯拉散斯的分析结果 (如图 1-5 所示)^[14]看, 与不考虑坝顶宽度的简化等腰三角形断面, 对坝顶宽度 B_T 与坝底宽度 B_0 之比 $K' = B_T/B_0$, 就一般很小的土坝而言, 出入不会太大, 因此在大多数情况下, 可以忽略不计。

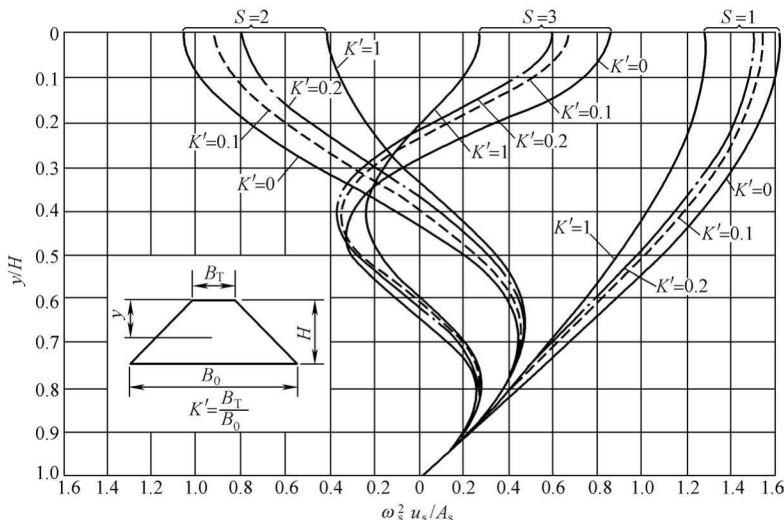


图 1-5 不同坝顶宽度土坝振型比较

关于坝基与下卧基岩间有覆盖土层的情况, 恩伯拉散斯把覆盖土层当作覆盖在刚体基岩上的弹性层, 假定基岩在地震时的水平加速度为 $-a_0(t)$, 并假定土坝的剪变模量 G 和坝基覆盖土层的剪切模量 G' 都是常数, 且采用了一个统一的阻尼常数 c_3 , 从而给出了关于一元问题的土坝和坝基覆盖土层水平剪切振动的基本偏微分方程 (如图 1-6 所示), 即

土坝

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_3 \frac{\partial u}{\partial t} + a_0(t)$$

(1-12)

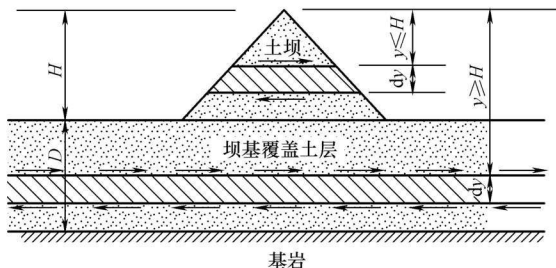


图 1-6 土坝及坝基覆盖土层一元计算断面