

建筑抗震 设计规范算例

王亚勇 戴国莹 主编

中国建筑工业出版社

建筑抗震设计规范算例

王亚勇 戴国莹 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑抗震设计规范算例/王亚勇等主编. —北京: 中国工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07892-X

I. 建... II. 王... III. 建筑结构-抗震设计-设计规范 IV. TU352.104-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 143536 号

本书系主要根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 编写的算例, 内容包括: 建筑工程场地勘察、结构时程分析的输入地震波选择、结构弹塑性推覆分析、钢筋混凝土框架及框架—剪力墙结构抗震设计、多层砖砌体结构抗震设计、大开间砖砌体结构抗震设计、多层及高层钢结构抗震设计、多层砌体结构隔震设计、钢结构消能减震设计等十七章。其内容还涉及《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2002 等。算例侧重于结构整体分析, 规则性的判断和内力、位移的计算, 尽量将规范内容具体化。本书可供建筑设计人员、研究人员和高校土建专业师生参考, 亦可供报考各级注册结构工程师的人员参考。

* * *

责任编辑: 蒋协炳

责任设计: 赵 力

责任校对: 孙 爽 王金珠

建筑抗震设计规范算例

王亚勇 戴国莹 主编

*

中国工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京华艺制版公司制版

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 502 千字

2006 年 4 月第一版 2006 年 4 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 39.00 元

ISBN 7-112-07892-X

(13846)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

根据建设部 [1997] 建标第 108 号文的要求, 由中国建筑科学研究院会同有关的设计、勘察、研究和教学单位对《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89 进行修订, 修订组于 1997 年 7 月成立, 开始全面修订。参加修订的单位有中国地震局工程力学研究所、中国建筑技术研究院、冶金工业部建筑研究总院、建设部建筑设计院、机械工业部设计研究院、中国轻工国际工程设计院 (中国轻工业北京设计院)、北京市建筑设计研究院、上海建筑设计研究院、中南建筑设计院、中国建筑西北设计研究院、新疆建筑设计研究院、广东省建筑设计研究院、云南省设计院、辽宁省建筑设计研究院、深圳市建筑设计研究总院、北京勘察设计院、深圳大学建筑设计研究院、清华大学、同济大学、哈尔滨建筑大学、华中理工大学、重庆建筑大学、云南工业大学、华南建设学院 (西院) 等, 历时 4 年完成了修订工作。2001 年 7 月由建设部和国家质量监督检验检疫总局联合发布, 编号为 GB 50011—2001 (以下简称“2001 规范”), 2002 年 1 月 1 日开始施行。

在修订过程中, 开展了专题研究和部分试验研究, 调查总结了近年来国内外大地震的经验教训, 采纳了地震工程的新科研成果, 考虑了我国的经济条件和工程实践, 并在全国范围内广泛征求了有关设计、勘察、科研、教学单位及抗震管理部门的意见, 经反复讨论、修改、充实和试设计, 最后经审查定稿。

经本次修订后, 新抗震设计规范共有 13 章 11 个附录共 507 条, 条文总数比“89 规范”增加 178 条, 其中增加了有关发震断裂、桩基、混凝土筒体结构、钢结构房屋、配筋小型砌块房屋、非结构等抗震设计的内容以及房屋隔震、消能减震设计的规定, 取消了有关单排柱内框架房屋、中型砌块房屋及烟囱、水塔等构筑物的抗震设计规定。

(一) 修订后的 2001 抗震设计规范, 具有以下特点

1. 保持建筑抗震设计规范的延续性

“2001 规范”继续保持“89 规范”的下列主要设计原则:

(1) 继续采用三个不同的概率水准和两阶段设计体现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的基本设计原则;

(2) 继续以抗震设防烈度作为抗震设计的基本依据;

(3) 继续要求不同类型的结构采用不同的地震作用计算方法; 并利用“地震作用效应调整系数”, 体现某些抗震概念设计的要求;

(4) 继续采用基于概率可靠性分析的结构构件截面抗震承载力验算的多分项系数设计表达式;

(5) 把抗震计算和抗震措施作为不可分割的设计组成部分, 强调通过概念设计, 协调各项抗震措施, 实现“大震不倒”;

(6) 砌体结构需设置水平和竖向的延性构件, 形成墙体的约束, 以防止倒塌;

(7) 钢筋混凝土结构需确定其“抗震等级”, 从而采取相应的计算和构造措施; 对框架结构等还要求控制“薄弱层弹塑性变形”, 通过第二阶段的抗震设计防止倒塌;

(8) 装配式结构需设置完整的支撑系统, 采用可靠的连接构造, 确保其整体性。

部分修改内容也体现了规范的延续性:

(1) 地震动的强度, 采用设计基本地震加速度和相应的设防烈度表示, 保持了设防烈度的延续。地震动的谱特性, “89 规范”用烈度衰减的等震线确定设计远震区域, 需考虑设计远震的城镇约占全国县级及以上城镇的 5%; “2001 规范”发展为“设计地震分组”, 进一步体现了地震震级、震中距的影响, 用加速度衰减等震线确定设计地震分组的区域, 而且设计地震第三组的城镇也约占全国县级及以上城镇的 5%。

(2) 场地类别仍然分为四类, 仍然采用覆盖层厚度和剪切波速作为划分依据。针对“89 规范”的不足, 将平均剪切波速改为等效剪切波速, 并略为调整了各类场地的覆盖层厚度分界。地基液化判别的深度, 一般仍采用 15m, 仅深基础等改为 20m。

(3) 结构地震作用计算所采用的地震影响系数, 增加了长周期的部分和不同阻尼比的规定。其中阻尼比 5% 的地震影响系数曲线的参数, 在 5 倍特征周期范围内与“89 规范”相同。

(4) 钢筋混凝土结构的最大适用高度, 基本保持“89 规范”的规定。抗震等级的高度分界则略有调整, 使同样高度的结构, 在不同的设防烈度下有不同的抗震等级。

(5) 多层砌体房屋的最大高度限制, 是砌体结构重要的抗震措施之一。对砖砌体房屋, 保持与“89 规范”相同; 对混凝土小型空心砌块房屋, 与小型砌块规程 JGJ/T 14—95 的规定相同; 对底部框架房屋, 在采取一系列有效措施后允许比“89 规范”略有增加。

2. 适度提高建筑结构抗震安全性

随着国民经济的发展, 特别是建设投资方的变化, 需要而且可能适当提高建筑结构的抗震安全性。为此, “2001 规范”在以下方面作了改进:

(1) 抗震设防范围有所扩大, 不设防的县级及县级以上城镇, 由 1990 区划图的 21.5% 减少为 17.3%, 7 度设防的县级及以上城镇, 由 1990 区划的 30.3% 增加为 33.7%。

(2) 改进了抗震不利地段的评价和处理, 包括: 对存在断裂的工程场地, 提出了如何避让的明确规定; 对局部突出地形, 明确规定建筑结构抗震计算时地震动需有所放大, 并提供了增大系数的取值范围; 增加了深层液化和软土震陷等的判别和处理技术; 借鉴构筑物抗震设计规范的经验, 提出了桩基抗震设计方法。

(3) 设计特征周期比“89规范”大 $0.05s$ ，总体上提高了中等高度房屋和单层厂房的地震作用，使量大面广的一般结构的抗震安全性有一定提高；长周期结构要按烈度、扭转效应等控制地震作用的最小取值；对称且抗侧力构件正交的结构，需要考虑实际结构偶然偏心和地震自身的扭转作用，将边榀结构的地震内力适当增大，非对称结构或抗侧力构件斜交的结构，必须考虑两个主轴方向同时施加地震作用。

(4) 弹性层间位移的控制由楼层平均值调整为最大值，并调整了层间变形限值。

(5) 补充了提高钢筋混凝土结构延性的抗震措施：提高了抗震等级一、二级增大系数的数值；对抗震等级三级也规定了增大系数；综合考虑结构中抗震墙数量、柱子剪跨比、箍筋构造和在整个结构中所处的部位，修订了钢筋混凝土柱的轴压比控制值，并规定较大轴压比的加强措施；为改善混凝土抗震墙的抗震性能，在抗震墙的底部加强部位，要控制墙体的最大轴压比，当轴压比较大时，需设置约束边缘构件。

(6) 改进了砌体结构的约束构造并严格控制底部框架砖房的设计：当砌体房屋的高度接近总高度限值时需适当增加构造柱的设置数量；提出了墙体有多根构造柱的抗震承载力简化计算方法；规定了底部设置框架—抗震墙房屋的刚度比控制、上下层结构布置、过渡层设计等，特别对托墙梁的计算和构造作了专门规定，并提高了底部框架的抗震等级。

3. 强调建筑方案要符合抗震设计的要求

建筑结构抗震设计中，“规则建筑结构”是一个重要的设计概念。“89规范”对此仅有一些简单的要求。本次修订做了较大的补充：增加了沿平面和沿高度布置的规则界限，明确规定某些不规则的上限，提出了针对不规则结构的附加抗震设计要求。特别强调不允许建筑设计采用严重不规则的设计方案。

4. 新增若干类结构的抗震设计原则

本次修订中，增加了配筋混凝土小型砌块抗震墙结构、钢筋混凝土筒体结构、混凝土板—柱结构、高强混凝土和预应力混凝土结构、高层和多层钢结构等结构体系的抗震设计原则。但不包括异形柱框架、型钢混凝土、钢管混凝土结构和混合结构。

5. 向基于更高性能要求的抗震设计迈出重要的一步

基于性能要求的抗震设计方法，是当前工程抗震领域的热门课题之一。本次修订中，在试验、试点和理论研究的基础上，对基础隔震、消能器减震和非结构抗震等作了初步的规定。

(1) 设置隔震层以隔离地震能量，是一种新型的可实现基于性能设计的结构体系。基础隔震结构的隔震层以上建筑的使用要求应高于非隔震建筑；隔震层以上结构的水平地震作用可根据隔震前后结构周期的比值，比非隔震结构有所降低，但竖向地震作用力不减少；隔震垫应保证其耐久性和地震后的复位性；隔震层以下的结构和基础，应保证大震下不致破坏。

(2) 在建筑结构中设置消能器以吸收和耗散地震能量，是实现基于性能要求抗震设计

的一种结构。消能减震结构的使用要求应高于非消能结构；消能部件可由消能器及配套的斜撑、墙板、梁柱节点等组成，应能通过局部变形提供附加阻尼来减震；消能减震设计的关键是根据预期的结构位移（中震下或大震下的控制位移要求）选择所需的附加阻尼，并进行结构的非线性位移验算。

（3）非结构构件在地震中的破坏，应根据使用要求确定，一般允许比结构构件重些，但不能危及结构本身和人身安全；非结构构件附加给结构的地震力，与其使用功能要求、位置、连接构造和材料有关，可采用等效侧力方法或楼面谱方法确定；建筑非结构构件应与主体结构有可靠的连接；主体结构支承建筑附属设备的部位及设备的支架等，应具有足够的刚度和承载力，使设备能在地震中保持其规定的使用功能或地震后能迅速恢复其功能。

（二）本算例编写的目的和作用

本书选用的算例大多是在规范试设计中的设计实例，原先主要是检验规范的应用效果，现按批准后的规范重新整理，以协助设计人员在设计中贯彻应用“2001 抗震规范”。针对结构抗震设计的特点，算例侧重于结构整体分析，规则性的判断和内力、位移计算，对构件截面设计则较为简略。

抗震规范有一些地方规定得不够具体，本算例尽量给予具体化，具有一定的参考价值，有些内容是作者所在单位的工程经验，仅供读者参考借鉴。

（三）承担本算例的作者和分工

算例承担单位是修订组中承担试设计的单位，对抗震规范比较熟悉，又有工程经验，有助于算例的实用性。各算例的分工如下：

第一章 北京市勘察设计研究院

第二、三章 中国建筑科学研究院抗震所

第四章 中南建筑设计院

第五章 上海建筑设计研究院

第六章 新疆自治区建筑设计研究院

第七章 上海中房设计院

第八、九、十章 辽宁省建筑设计研究院

第十一章 中国建筑西北设计研究院

第十二章 建设部建筑设计研究院

第十三、十四、十五、十六、十七章 中国建筑科学研究院抗震所

“2001 抗震规范”是参加修订的 25 个单位 39 位专家互相协作、共同努力的成果，本书利用了“2001 抗震规范”的具体成果，在此向规范修订的各位专家表示衷心的感谢！

目 录

前 言

第一章	建筑工程场地勘察算例	1
第一节	饱和砂土和粉土的地震液化的判别	1
第二节	建筑场地类别的确定	9
第三节	不同波速测试方法精度比较	14
第二章	结构时程分析的输入地震波选择算例	17
第一节	结构时程分析法的输入地震波规定	17
第二节	结构时程分析法输入地震波统计分析	18
第三节	结构时程分析用输入地震波实例	20
第三章	结构弹塑性推覆分析算例	24
第一节	结构弹塑性分析的规定	24
第二节	结构静力弹塑性分析原理	24
第四章	钢筋混凝土框架结构抗震设计算例	41
第一节	工程概况	41
第二节	设计依据和计算基本条件	42
第三节	主要材料和荷载	43
第四节	结构计算分析	44
第五节	结构构件截面设计	54
第五章	钢筋混凝土框架—剪力墙结构抗震设计算例	64
第一节	工程概况	64
第二节	设计依据及计算基本条件	66
第三节	主要结构材料	67
第四节	荷载和作用	67
第五节	结构计算分析	68
第六节	截面抗震验算与设计	84
第六章	多层砖砌体结构抗震设计算例	100
第一节	工程概况	100
第二节	设计依据和基本设计参数	100
第三节	结构整体计算模型	103
第四节	墙体截面受剪承载力验算	106

第五节 分析与结论	114
第七章 混凝土小型空心砌块结构抗震设计算例	115
第一节 工程概况	115
第二节 设计依据和基本设计参数	116
第三节 荷载取值	116
第四节 墙体等效侧向刚度计算	118
第五节 墙段地震剪力计算	120
第六节 墙段截面抗震验算	122
第八章 大开间砖砌体结构抗震设计算例	125
第一节 工程概况	125
第二节 设计依据和基本设计参数	125
第三节 结构布置	128
第四节 荷载标准值	128
第五节 地震作用计算	130
第六节 墙段刚度计算及地震剪力分配	134
第七节 墙段抗震承载力验算	141
第九章 底层框架—抗震墙上部砖结构抗震设计算例	150
第一节 工程概况	150
第二节 设计依据和计算基本条件	156
第三节 设计荷载标准值	157
第四节 结构布置和选型	158
第五节 结构地震作用和内力分析	158
第六节 结构构件截面设计	160
第十章 底部两层框架—抗震墙上部砖结构抗震设计算例	163
第一节 工程概况	163
第二节 设计依据和计算基本条件	166
第三节 荷载标准值	166
第四节 结构布置和选型	167
第五节 结构地震作用和内力分析	169
第六节 结构构件截面设计	172
第十一章 多层钢结构抗震设计算例	174
第一节 工程概况	174
第二节 基本设计参数	176
第三节 地基与基础	179
第四节 整体结构分析	181
第五节 构件设计	186
第六节 连接节点的设计	195

第七节 钢结构的制作及安装	211
第八节 防锈和防火	212
第十二章 高层钢结构抗震设计算例	214
第一节 工程概况	214
第二节 设计依据及计算基本条件	216
第三节 主要材料	217
第四节 地震作用计算	218
第五节 建筑结构规则性判断	225
第六节 地震作用下的变形验算	230
第七节 截面抗震验算与设计	232
第十三章 多层砌体结构隔震设计算例	245
第一节 工程概况	245
第二节 隔震支座选型和布置	245
第三节 隔震结构计算分析	247
第四节 隔震设计与施工工艺	250
第十四章 钢筋混凝土框架结构隔震设计算例	253
第一节 工程概况	253
第二节 设计依据和基本设计参数	254
第三节 荷载取值	255
第四节 隔震设计要求和隔震支座性能	256
第五节 时程分析的主要计算结果	258
第六节 隔震设计参数的确定	260
第七节 隔震与非隔震房屋经济指标综合比较	261
第八节 结语	262
第十五章 钢筋混凝土框架—剪力墙结构消能减震加固算例(一)	263
第一节 工程概况	263
第二节 抗震鉴定和加固方案	264
第三节 速度型粘滞阻尼器	265
第四节 消能减震设计要点和计算方法	266
第十六章 钢筋混凝土框架—剪力墙结构消能减震加固算例(二)	274
第一节 开孔式软钢加劲阻尼器简介	274
第二节 加固工程简介	275
第三节 结构抗震鉴定结论	275
第四节 开孔式软钢阻尼器的应用	277
第十七章 钢结构消能减震设计算例	282
第一节 工程概况	282
第二节 屈曲约束消能支撑	285

目 录

第三节 计算模型	287
第四节 地震作用和分析方法	289
第五节 计算结果分析	293
第六节 小结	300

第一章 建筑工程场地勘察算例

北京市勘察设计研究院 董津城

第一节 饱和砂土和粉土的地震液化的判别

《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 规定：抗震设防烈度为 6 度及以上地区的建筑，必须进行抗震设计。建筑物的地基存在饱和砂土和粉土时，地震作用下是否会发生液化，直接影响建筑物基础抗震设计方案及采取的措施。因此，在总结国内外地震液化的基础上，《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 在 4.3.1 条明确提出：“饱和砂土和饱和粉土的液化判别和地基处理，6 度时，一般情况下可不进行判别和处理，但对液化沉陷敏感的乙类建筑可按 7 度的要求进行判别和处理；7~9 度时，乙类建筑可按本地区抗震设防烈度的要求进行判别和处理。”

根据国内外地震液化资料分析总结，尤其是唐山地震液化现场实地勘察资料的分析总结，《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 中对液化判别提出二步判别方法。首先可通过初判，当满足初判条件之一时，不再用标准贯入锤击数按公式去判别。

一、液化的初判条件（不含黄土）

地基土液化的初判方法有下列三个。

1. 地质年代为第四纪晚更新世（Q3）及其以前时，7、8 度时可判为不液化。

应用此条款时应注意，利用小比例尺第四纪地质图来确定饱和砂土和粉土的地质年代的精度是不够的，不能做为判别依据，必须有建筑场地地基土的年代测试数据，根据测试数据才能确定是否液化。

2. 粉土的粘粒（粒径小于 0.005mm 的颗粒）含量百分率，7 度、8 度和 9 度分别不小于 10、13 和 16 时，可判为不液化土。

应用此条款判定粉土不液化时应注意：

（1）做粘粒含量分析时应采用六偏磷酸钠做分散剂，采用其他方法时，应按有关规定换算。

（2）做粘粒含量分析的样品，应取自标准贯入处的土样（即将标贯器中的扰动土样

取出做颗粒分析试验)，应满足岩土工程勘察规范对测试及试验数据的要求（每层土不应少于6个数据）。

3. 天然地基的建筑，当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合下列条件之一时，可不考虑液化影响：

$$d_u > d_0 + d_b - 2 \tag{1-1}$$

$$d_w > d_0 + d_b - 3 \tag{1-2}$$

$$d_u + d_w > 1.5d_0 - 4.5 \tag{1-3}$$

式中 d_w ——地下水位深度（m），宜按设计基准期内年平均最高水位采用，也可按近期内年最高水位采用；

d_u ——上覆非液化土层厚度（m），计算时宜将淤泥和淤泥质土层扣除；

d_b ——基础埋置深度（m），不超过2m时应采用2m；

d_0 ——液化土特征深度（m）按表 1-1 采用。

液化土特征深度（m）表 1-1

饱和土类别	7 度	8 度	9 度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

注意：此款的前提是“可不考虑液化影响”，没有明确是液化或是不液化，前二款均明确不液化。本款的涵义是，即使下部液化，在满足本条款的条件时，对上部的建筑物可不考虑液化影响。对于本条款条件应有正确理解：

首先，应明确指的是浅埋天然地基的建筑，基础埋深2m。

其次，上覆非液化土层厚度，指的是地震时不会发生液化的土类的厚度，不包括饱和砂土和粉土，淤泥和淤泥质土；或者更明确的讲，是指中等强度以上的粘性土的厚度（即规范中液化土特征深度），且不包括饱和砂土和粉土经判定不液化的土层。

再次，关于地下水位深度，不能按勘探时的水位去评价，应按设计基准期内年平均最高水位采用或近期内年最高水位采用，一般可采用近3~5年最高水位。

按规范公式（4.3.3-2），即本节公式（1-2）可以得到不考虑液化影响的水位 d_w ：

对于粉土：7 度 5m、8 度 6m、9 度 7m；

对于砂土：7 度 6m、8 度 7m、9 度 8m。

当最高水位满足上述条件时，就可不考虑液化影响。

二、液化的再判

当不满足初判条件时，规范要求进一步用标准贯入试验判别法按公式对每个钻孔中的

贯标点逐点判别。地震液化进一步判别时,应注意下列几个问题:

1. 对判别液化而布置的勘探点不应少于3个,勘探孔深度应大于液化判别深度。对于初勘阶段判断场地液化与否时,液化判别孔应适量增加,可考虑在控制性钻孔中做液化试验。
2. 液化判别孔在钻探工艺方面的要求:为了保证标准贯入数据的准确可靠,要求用泥浆钻进,泥浆在整个钻探过程中始终保持在孔口附近,避免饱和砂土或粉土的涌砂现象发生。同时解决低水位与高水位之间土层的饱和与非饱和状态在N值上的差异。
3. 利用《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001公式判别液化时,标准贯入锤击数不做杆长修正。
4. 地下水深度同初判的要求,一般可采用近3~5年最高水位。
5. 当采用标准贯入试验判别液化时,在需作判定的土层中,试验点的竖向间距宜为1.0~1.5m,每层土的试验点数及粘粒试验数据不宜少于6个。
6. 多个钻孔判别结果,如有的液化,有的不液化或液化严重程度不同时,应进行分区。

三、液化判别 [算例 1-1]

下面举出判别深度为15m的例题,判别是否液化,液化深度及液化指数,并说明液化严重程度,列出详细解题步骤:

1. 概况:某高层建筑工程场地,设防烈度为8度,基础埋深小于5m,设计地震分组为第一组,设计基本加速度为0.2g,工程场地近年最高水位埋深为2.0m,地层岩性及野外原位测试及室内试验数据见柱状图(表1-2)。

2. 液化判别:根据地层柱状图,需做判别的砂质粉土及细砂层均分布在15m以上,按《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001对15m以内的判别公式

$$N_{cr} = N_0[0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (d_s \leq 15)$$

逐点进行判别:

第一点(深度3.3m):

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(3.3 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{6}} = 7.21 \quad N_{cr} > N_{63.5} \quad \text{液化}$$

第二点(深度4.5m):

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(4.5 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{5}} = 8.86 \quad N_{cr} > N_{63.5} \quad \text{液化}$$

第三点(深度6.0m):

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(6.0 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{6}} = 9.1 \quad N_{cr} > N_{63.5} \quad \text{液化}$$

地层柱状图和标贯测试值 表 1-2

岩土名称	地层深度 (m)	地层 柱状图	标贯点中点 深度 (m)	标贯值 N _{63.5}	粘粒含量 (%)
粉质粘土	1.5				
砂质粉土	9.5		3.3	7	6
			4.5	8	5
			6.0	8	6
			7.5	9	7
细砂	15.0		10.5	18	
			12.0	20	
			13.5	23	
重粉质粘土	20.0				

第四点（深度 7.5m）：

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(7.5 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{7}} = 9.57 \quad N_{cr} > N_{63.5} \quad \text{液化}$$

第五点（深度 10.5m）：

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(10.5 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{3}} = 17.5 \quad N_{cr} < N_{63.5} \quad \text{不液化}$$

第六点（深度 12.0m）：

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(12.0 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{3}} = 19.0 \quad N_{cr} < N_{63.5} \quad \text{不液化}$$

第七点（深度 13.5m）：

$$N_{cr} = 10[0.9 + 0.1(13.5 - 2.0)] \sqrt{\frac{3}{3}} = 20.5 \quad N_{cr} < N_{63.5} \quad \text{不液化}$$

液化判别结论：9.5m 以上砂质粉土液化、9.5m 以下细砂层不液化。液化深度为 9.5m。

3. 液化层（砂质粉土）计算钻孔的液化指数：

按《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 的公式（4.3.5）计算：

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cr_i}} \right) d_i W_i \quad (1-4)$$

式中 I_{LE} ——液化指数;

n ——在判别深度范围内, 每一个钻孔标准贯入点的总数;

N_i 、 N_{cr_i} ——分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值;

d_i —— i 点所代表的土层厚度 (m), 可采用与该标准贯入试验点相邻的上、下两标准贯入点深度差的一半, 但上界不高于地下水位深度, 下界不深于液化深度;

W_i —— i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值 (单位为 m^{-1})。若判别深度为 15m, 当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10, 等于 15m 时应采用零值, 5 ~ 15m 时应按线性内插法取值; 若判别深度为 20m, 当该层中点深度不大于 5m 时应采用 10, 等于 20m 时应采用零值, 5 ~ 20m 时应按线性内插法取值。

(1) 求每个标准贯入点所代表的土层厚度 (d_i):

第一个标准贯入点与第二个标准贯入点的中点深度 (m):

$$(4.5 - 3.3) \div 2 + 3.3 = 3.9$$

第二标准贯入点与第三个标准贯入点的中点深度 (m):

$$(6.0 - 4.5) \div 2 + 4.5 = 5.25$$

第三个标准贯入点与第四个标准贯入点的中点深度 (m):

$$(7.5 - 6.0) \div 2 + 6.0 = 6.75$$

因此:

$$d_{11} = 3.9m - 2.0m = 1.9m$$

(注意: 因近年高水位为 2.0m, 位于砂质粉土液化层内, 此时计算 d_{11} , 厚度的上界面是由近年高水位深度来控制)

$$d_{12} = 5.25m - 3.9m = 1.35m$$

$$d_{13} = 6.75m - 5.25m = 1.50m$$

$$d_{14} = 9.5m - 6.75m = 2.75m$$

(2) 求每个标准贯入点所代表土层厚度中点深度所对应的权函数 W_i , 本题液化判别深度条件为 15m, 故 W_i 按 15m 深度权函数图形求解。

d_{11} 的中点深度: $(3.9 - 2.0) \div 2 + 2.2 = 2.95m$ 位于简图 5.0m 以上, 故

$$W_{11} = 10。$$

d_{12} 的中点深度: $(5.25 - 3.9) \div 2 + 3.9 = 4.575m$ 位于简图 5.0m 以上, 故

$$W_{12} = 10。$$

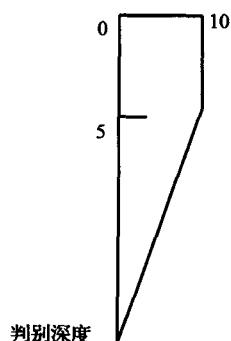


图 1-1 权函数简图

d_{13} 的中点深度： $(6.75 - 5.25) \div 2 + 5.25 = 6.0\text{m}$ ，故
 $W_{13} = 9.0$ 。

d_{14} 的中点深度： $(9.5 - 6.75) \div 2 + 6.75 = 8.125\text{m}$ ，故
 $W_{14} = 6.875$ 。

(3) 计算液化指数： I_{LE}

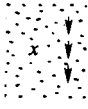
$$\begin{aligned} I_{LE} &= \left(1 - \frac{7}{7.21}\right)1.9 \times 10 + \left(1 - \frac{8}{8.86}\right)1.35 \times 10 + \left(1 - \frac{8}{9.1}\right)1.5 \times 9.0 \\ &\quad + \left(1 - \frac{9}{9.57}\right)2.75 \times 6 \\ &= (1 - 0.97)1.9 \times 10 + (1 - 0.90)1.35 \times 10 + (1 - 0.88)1.5 \times 9.0 \\ &\quad + (1 - 0.94)2.75 \times 6.875 \\ &= 0.57 + 1.35 + 1.62 + 1.13 = 4.67 \end{aligned}$$

结论：轻微液化。

四、液化判别 [算例 1-2]

1. 概况：某高层建筑，地上 24 层，地下 2 层，基础埋深 7.0m，设防烈度为 8 度，设计地震分组为第一组，设计基本加速度 0.2g，工程场地近年高水位深度为 2.0m，地层岩性及野外原位测试和室内试验数据见柱状图（表 1-3），判别是否液化，液化层最大深度及液化指数，并说明液化严重程度。

地层柱状图和标贯测试值 表 1-3

岩土名称	地层深度 (m)	地层 柱状图	标贯点中点 深度 (m)	标贯值 $N_{63.5}$	粘粒含量 (%)
粉质粘土	3.0				
砂质粉土	9.5		3.5	7	6
			5.0	8	5
			6.5	8	6
细砂	12.0		8.5	16	
			10.0	18	
			11.5	19	
粉砂	19.0		12.5	19	
			14.0	20	
			15.5	21	
			17.5	21	
粘土	20.0				