

混合结构房屋

陆继赞 编著
李砚波



天津大学出版社

混合结构房屋

陆继贇 李砚波 编著

天津大学出版社

内容提要

本书是在《混合结构房屋》1992年版的基础上,根据1993年《建筑抗震设计规范》和1996年《混凝土结构设计规范》修订而成。书中对某些章节的内容和顺序进行了调整,增添了目前极具发展潜力的混凝土小型砌块房屋的设计内容,并在每章节后增添了思考题和练习题。其内容包括结构上的作用、砌体结构构件的承载力计算以及多层房屋、多层内框架房屋、底层框架砖房、单层砖柱厂房、单层空旷房屋等几类混合结构及构件的设计(包括抗震设计)、计算方法、概念和构造设计等,并附有实例。

混合结构房屋 陆继贇 李砚波 编著

出版发行:天津大学出版社(电话:022-27403647)

地址:天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

印刷:天津市宝坻县第二印刷厂

经销:新华书店天津发行所

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:14.25

字数:356千

版次:1992年4月第1版

印次:1998年11月第2版第1次

印数:18 001—22 000

书号:ISBN 7-5618-1113-6/TU·135

定价:16.00元

如有印装质量问题,请与本社发行部门联系调换。

第一版前言

本书是与已出版的《钢筋混凝土结构原理》《钢筋混凝土房屋结构》(两书均由天津大学出版社出版)及《钢筋混凝土特种结构》(中国建筑工程工业出版社出版)配套使用的结构工程专业的专业课基本教材。内容包括多层砖房、多层内框架砖房、底层框架砖房、单层砖柱厂房和单层空旷砖房的结构设计(包括抗震设计)及有关内容。全书均按照最新建筑结构设计规范编写。绪论由张祖光与陆继贇合写,其余各章由陆继贇编写,插图由付尔颢、戴红武完成,全书由于庆荣、张祖光审阅。

限于编者业务水平,书中不妥甚至错误之处,恳请读者不吝指正。

编 者
1991年9月

第二版前言

本书在 1992 年版《混合结构房屋》的基础上,根据本学科近来的发展和新的规范、规程,对第一版的内容进行了重新修订,增添了目前极具发展潜力的混凝土小型砌块砌体房屋的设计内容;在每章之后增加了思考题和习题。本书是与已出版的《钢筋混凝土结构原理》《钢筋混凝土房屋结构》及《钢筋混凝土特种结构》配套使用的结构工程专业的专业课基本教材。内容包括多层混合结构房屋、多层内框架砖房、底层框架房屋、单层砖柱厂房和单层空旷房屋的结构设计(包括抗震设计)及有关内容。原书由陆继贇编著,本版由李砚波修订并经过陆继贇审改。在编写过程中得到了戴自强教授、王玲勇教授、康谷贻教授、陈云霞教授、张祖光教授、赵彤副教授及杨建江副教授的大力帮助,在此表示感谢。

限于编者业务水平,书中难免存在不妥甚至错误之处,恳请读者不吝指正。

编者

1998 年 5 月

目 录

绪论	(1)
第一章 结构上的作用	(4)
1.1 竖向荷载	(4)
1.2 风荷载	(6)
1.3 地震作用	(6)
1.4 荷载效应组合	(14)
第二章 砌体结构构件的承载力计算	(16)
2.1 砌体材料的力学性能	(16)
2.2 受压构件的承载力计算	(25)
2.3 局部受压构件的承载力计算	(33)
2.4 受拉、受弯和受剪构件的承载力计算	(44)
2.5 配筋砖砌体构件的承载力计算	(47)
第三章 多层房屋	(56)
3.1 建筑布置与结构选型	(56)
3.2 墙、柱的高厚比验算	(60)
3.3 混合结构房屋静力计算方案	(62)
3.4 竖向荷载和风荷载作用下墙体的计算	(67)
3.5 地下室墙的计算	(76)
3.6 地震作用下墙体的计算	(83)
3.7 墙体的构造措施	(97)
3.8 装配式钢筋混凝土楼盖	(104)
3.9 楼 梯	(108)
3.10 过梁、挑梁、墙梁	(120)
第四章 多层内框架砖房	(143)
4.1 结构方案及布置	(144)
4.2 计算要点	(144)
4.3 抗震构造措施	(145)
第五章 底层框架房屋	(150)
5.1 结构方案及布置	(150)
5.2 计算要点	(150)
5.3 抗震构造措施	(154)
第六章 单层砖柱厂房和单层空旷房屋	(163)
6.1 单层房屋在竖向荷载和风荷载作用下墙体的计算	(163)
6.2 单层房屋在地震作用下墙体的计算	(168)

6.3 抗震构造措施	(174)
第七章 基础设计	(184)
7.1 刚性基础设计	(184)
7.2 扩展基础设计	(192)
附 录	(206)
参考文献	(218)

绪 论

混合结构房屋是指房屋的承重结构是由不同材料的构件混合构成的房屋。如屋、楼盖用钢、木或钢筋混凝土,承重墙体、柱、基础等用各种砌体或钢筋混凝土等。本书主要阐述砌体与钢筋混凝土两种结构材料形成的混合结构房屋的结构设计。混合结构房屋在我国的结构工程中一直占据着十分重要的地位,即使在钢筋混凝土结构被广泛使用的今天也不例外。它广泛用于各种中、小型民用与工业建筑,例如住宅、办公楼、学校、商店、食堂、仓库、工业车间等。据统计,在全国的住宅建设中,采用混合结构的房屋占90%以上。混合结构能广泛地应用,与这种结构体系所具有的优越性分不开。首先,它与钢结构和钢筋砼结构相比,材料来源广泛,取材容易,造价低廉。其次,其砌体部分具有承重和围护双重功能且有良好的耐久性和耐火性,维修费用低。再次,混合结构房屋构造简单、施工方便,工程总造价低,而且具有良好的整体工作性能,局部的破坏不致引起相邻构件或房屋的倒塌;对爆炸、撞击等偶然作用的抵抗能力较强。当然混合结构也存在不足,例如自重大,对抗震不利等,因此在总体高度及层数上受到限制,尤其是在地震区。但是,随着高强度材料的研究与应用,配筋砌体的研究与应用以及结构设计理论和施工技术水平的不断提高,混合结构房屋会不断发展完善,在建筑工程中的应用与发展会更为广阔。因此学习和掌握混合结构房屋的结构设计,对培养自身的工程素质,提高理论联系实际的水平有着重要意义。

混合结构房屋有单层、多层之分。常用的结构型式可归纳为:多层砌体房屋、多层内框架房屋、底层框架上层砌体房屋及单层空旷房屋等几类。

由于我国地处世界两大地震带(环太平洋地震带及地中海—南亚地震带)的交汇区,且东部台湾及西部青藏高原直接位于两大地震带上,故我国是一个多地震的国家,境内强震区分布广,发震频繁。根据历史记载,全国除浙江、贵州两省外都发生过五级以上地震。我国也是世界上受地震灾害最严重的国家之一。由于混合结构房屋的应用最为广泛,在历次大地震中,这类房屋的破坏和倒塌是造成人民生命财产损失的主要原因,因而对这类房屋进行结构设计时,必须把抗震放在首要位置。我国发布的《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)(以下简称《抗震规范》)规定,我国基本烈度6度~10度地区为抗震设防区。这意味着全国约572.4万平方公里面积(约占全国总面积的60%)的广大地区,在设计中要考虑地震影响。这就使建筑结构的抗震设计,从具有特殊性能转化为具有一般性的技术课题。本书在研究各类混合结构房屋的结构设计时,同时兼顾抗震和无地震作用的两种情况,且以抗震设计为主。

地震时,地面的剧烈运动通过房屋的地基、基础传至地上结构,使房屋产生上下跳动及水平晃动。当结构经受不住这种剧烈的颠晃时,就会产生破坏甚至倒塌。为了减轻建筑物的地震破坏,避免人员伤亡,减少经济损失,对地震区的房屋必须按抗震要求进行设计。经验证明,凡经抗震设计及保证施工质量的建筑,都具有预期的抗震效果。

衡量每次地震时震波释放能量大小的尺度叫震级。每次地震都有一个震级,震级是根据各种仪器测定的数据综合评价的。一般2级以下无感觉,2级~4级为有感地震,5级~6级为破坏性地震,7级为强烈地震,8级为特大地震。世界上发生过的最大地震为8.9级(1960年5

月智利大地震)。地震烈度是地震时一定地点的地面震动强弱程度的尺度,是指该地点一定范围的平均水平而言。我国的地震烈度共分 12 度。每次地震时,根据震级大小距震中的远近及场地特点,周围各地区有不同的烈度。为了给地震区的工程抗震设计提供合理的抗震设防指标,国家地震局对全国进行了地震烈度区划。目前采用的是 1977 年颁布,由国家地震局组织编制的我国第二张地震烈度区域划分图(比例 1:300 万)。编制该图时应用了当时已有的地震地质资料的数理统计分析及其它方面的研究成果,进行了初具时间概念的地震区域划分,即以未来 100 年内,在平均土质条件上,可能遭遇的最大地震烈度作为衡量该地区烈度的标准,并定义为基本烈度。该图可供建设工程项目的规划及工程设计使用。图中各地区标明的烈度即基本强度。《抗震规范》规定,作为一个地区抗震设防依据的地震烈度叫设防烈度,一般情况下可采用基本烈度,而对做过抗震防灾规划的城市,应按批准的抗震设防区划(设防烈度或设计地震动参数)进行设防。

地震对房屋的作用,具有突然性强、变异性大、发生概率小等特点,但一旦出现后会造成严重的后果。如果要求地震区的一般建筑物,在遭遇到大地震后,仍保持基本完好,不但技术上是困难的,而且经济上显然是不合理的。因为对一般建筑,在其预定的使用期内,遭遇到大地震的可能性很小。根据我国的国情,为了合理地处理安全可靠与经济的矛盾,对地震区的一般建筑结构提出了“小震不坏,设防烈度可修,大震不倒”的设防要求。这个要求在《地震规范》中进一步阐述为:按规范设计的建筑,当遭受低于本地区设防烈度的多遇地震影响时,一般不受损坏或不需修理仍可继续使用;当遭受本地区设防烈度的地震影响时,可能损坏,经一般修理或不需修理仍可继续使用;当遭受高于本地区设防烈度预估的罕遇地震影响时,不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。这也简称为三个水准的设防要求。

上面这段用文字描述的结构抗震三水准设防要求,带有相当大的模糊性,在具体设计运用时还必须具体化及量化。首要问题是如何确定“小震”及“大震”问题。

我国目前抗震设防的基本依据是国家地震局 1977 年颁布的全国基本烈度区划图。按其定义,基本烈度是对未来地震影响的一种长期预测,它表示了某地区今后一百年内可能遭遇的最大烈度。虽然在评定烈度时考虑了地震中发生的随机性,但在烈度区划图中未能定量给出基本烈度不确定性的程度。故以基本烈度作为抗震设防依据时,是把烈度和相应的地震作用作为确定性量来处理的。但自从颁布了《建筑结构统一标准》后,各种结构的设计规范都必须采用以概率可靠度理论为基础的设计方法。当然,结构的抗震设计也应建立在这个设计原则上,故必须赋予三个水准的地震以相应的概率含意。

新抗震规范按我国抗震设计传统,在仍采用各地区的基本烈度作为抗震设防的基本依据的同时,赋予基本烈度以概率含意。华北、西北、西南地区地震发生的概率统计分析结果表明,50 年超越概率约 10% 的烈度水平大体相当于地震区划图中的基本烈度。规范将 50 年内超越概率约为 63% 的地震众值烈度认定为“小震”(即多遇地震)烈度,大致相当于基本烈度减去 1.5 度;将 50 年超越概率 2%~5% 的烈度认定为大震(罕遇地震)烈度,大致相当于基本烈度加 1 度。这样就明确了三个水准烈度的概率含意及相互间的数量关系。

与上述三个水准相应的结构状态应当是:当遭遇多遇地震(第一个水准)作用时,结构应基本处于正常弹性工作状态;当遭遇设防烈度(第二水准)作用时,允许结构进入非弹性工作阶段,并控制非弹性变形在有约束状态;当遭遇罕遇地震(第三水准)时,允许结构出现较大的非弹性变形的无约束状态,但应控制在规定的限值内。

新抗震规范采用了简化的二阶设计方法来实现上述的三个水准的设防要求。第一阶段进行多遇地震作用下的结构承载力计算,即取第一水准的地震参数计算结构的弹性地震作用标准值和相应的地震作用效应,采用《统一标准》规定的分项系数设计表达式进行构件的承载力计算,并采用必要的抗震构造措施。第二阶段是进行罕遇地震作用下的结构弹性极限变形验算。对大多数一般结构,可先进行第一阶段设计,因为在满足了第一水准承载力计算的前提下,结构有必要的强度、变形储备,再加上一些能提高结构延性的构造措施,就能满足第二水准及第三水准的设防要求。对一些有特殊要求的建筑和地震时易倒塌的结构,仅靠第一阶段的设计是不够的,还应对结构的某些薄弱部位,验算其弹塑性层间变形以确保第三水准的设防要求。对混合结构来说,除7度~9度时楼层屈服强度系数小于0.5的底层框架砖房外(见《抗震规范》第4.5.2条)均只需进行第一阶段设计。

应该指出,由于地震的不确定性和复杂性,以及人们认识水平的局限性,目前的抗震设计方法还存在着较大的近似性和经验性,尚在不断地完善和提高,因此结构工程抗震课题的研究是当前结构工程科学中最活跃的分支之一。学习和研究混合结构的抗震设计,对提高混合结构房屋的抗震性能,从而为其开辟更加广泛的应用范围,具有深远的意义。

以上就是新抗震规范采用的“三水准二阶段”结构抗震的基本设计思想。

在具体进行混合结构抗震设计时,还要根据建筑的不同重要性,分别采用不同的设防标准。按不同重要性将建筑分为四类:

甲类 特殊要求的建筑,或遇地震破坏会导致严重后果的建筑等;

乙类 国家重点抗震城市的生命线工程建筑;

丙类 甲、乙、丁类以外的建筑,即一般建筑;

丁类 次要建筑。

一般混合结构房屋均属于丙类,仍采用设防烈度设计。其余情况按规范要求进行调整。

混合结构房屋的结构设计可按下列步骤进行。

(1)确定结构方案及进行结构布置,进行概念设计。方案主要指墙体结构、屋盖、楼盖、基础等方案,布置主要指屋盖、楼盖、墙体、楼梯、基础等具体布置。为使结构受力合理,传力线路清楚,必须与建筑设计方案同时协调进行。对地震区特别要注意抗震概念设计,满足抗震的各项要求。

(2)进行必要的结构计算,进行结构构件设计。“必要”是指设计规范明确规定要进行计算的内容。由于各种作用(特别是地震作用)的不确定性,混合结构材料力学性能及破坏机理的复杂性,对混合结构的各项结构计算,目前还只能说是一种粗略的等效计算,其目的无非使结构抗力有一个较为合理的分布及合理的可靠度。结构的可靠性,特别是抗震可靠性,主要不是通过计算手段来得到保证的。

(3)进行结构整体的及局部的构造设计。构造设计是指选择合理的材料等级、规格、数量,合理的构件型式和尺寸,构件之间的有效连接,以及不同类型构件和结构在不同受力条件下采用的特殊要求与措施。要按照规范要求细致地考虑,并切实地在施工图纸上得到反映。

(4)绘制施工图纸。结构施工图包括总体结构布置图及构件节点详图等,图纸要符合制图标准的各项要求,要准确地反映结构计算及构造设计的结果,要简明无误,便于施工。

在我国,无论是地震区或非地震区,无论当前及今后,混合结构仍将是一种量大、面广的房屋结构型式,提高这类房屋结构设计水平,无疑有着很大的现实意义。

第一章 结构上的作用

《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)指出,凡施加在结构上的集中或分布荷载,以及引起结构外加变形或约束变形的原因,均称为结构上的作用。故作用是指能使结构产生效应(内力、变形、应力、应变、裂缝等)的各种原因的总称。其中施加在结构上的集中力或分布力称为直接作用,引起结构外加变形或约束变形的原因称为间接作用。

结构上的作用,习惯上统称为荷载,因为大部分作用都是由各种负荷力形成。但是“荷载”这个术语对间接作用并不恰当,如温度变化、材料的收缩和徐变,地基变形、地震等。这些作用,都不是以力的形式出现,过去均以“荷载”来概括,叫温度荷载,地震荷载等,这就混淆了两种不同性质的作用,容易发生误解。例如,将地震荷载误认为是直接施加在结构上而与地基和结构本身无关的外力。故在新修订的荷载规范中,仅将荷载限于直接作用。对间接作用,除地震作用可根据《抗震规范》确定外,其它的一些作用,暂时还未制订出规定。

正确地确定对结构各种作用的大小是房屋结构设计的重要依据,它与合理地解决可靠性和经济性这一对基本矛盾有密切关系。作用值定得偏大,将使房屋各种构件截面增大,材料用量增加;定得偏小,又会导致降低结构的可靠度或影响正常使用。

对房屋结构的直接作用有:

- (1)结构及装修等的自重;
- (2)作用在楼面或屋面上的人群、设备、施工临时堆积的工具及材料等;
- (3)作用于屋面上的雪荷载;
- (4)作用于房屋上的风荷载;
- (5)工业厂房中的吊车荷载或其它工艺荷载。

对房屋结构的间接作用有:

- (1)地基变形;
- (2)温度变形;
- (3)材料的收缩、徐变等;
- (4)地震作用。

本章只介绍直接或间接作用在混合结构房屋上的竖向荷载、风荷载、地震作用及各种作用效应的组合。

1.1 竖 向 荷 载

房屋的竖向荷载指结构自重及楼、屋面上的活荷载,均可按《建筑结构荷载规范》(GBJ9—87)(以下简称《荷载规范》)确定。

1.1.1 结构自重

结构自重可根据构件或构造层的尺寸和材料的容重或单位面积的重量进行计算。《荷载

规范》附录一列出的《常用材料和构件的自重表》，设计时可直接查用。

1.1.2 民用建筑楼面均布活荷载

设计时所取用的楼面均布活荷载，是指结构在正常使用情况下可能出现的最大值。实际上，整个楼面同时布满活荷载并都达到最大值的可能性很小。因此在设计楼面梁、墙柱及基础时，由于负荷面积较大(图 1-1)，全部满载的可能性较小，计算时应视不同类型的房屋及楼层数分别乘以不同的折减系数，见《荷载规范》第 3.1.2 条。由于楼板的负荷面积较小(图 1-1)，故有可能达到满载。因此，在计算楼板时活荷载不能折减。

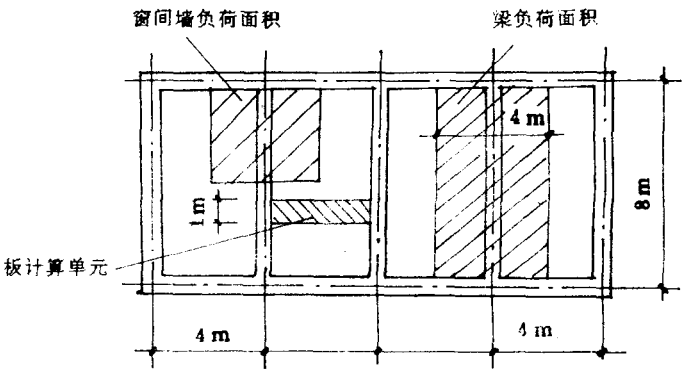


图 1-1 负荷面积示意图

1.1.3 工业建筑楼面活荷载

工业建筑楼面在生产使用或安装检修时，荷载是以集中、局部分布等多种形式作用在楼面上，设备的位置经常变动，因而楼面的荷载是比较复杂的。有时可按实际荷载计算，有时不必计算每个构件所受的最不利荷载，而是根据典型房间设备布置的最不利情况，算出该楼面的“等效均布荷载”，并以“等效均布荷载”对构件进行设计计算。楼面等效均布荷载一般可按《荷载规范》附录二确定。

对某些用途的工业建筑结构，如一般金工车间、仪器仪表生产车间、半导体器件车间、棉纺织车间、轮胎厂准备车间和粮食加工车间的楼面等效均布活荷载，可按《荷载规范》附录三采用。

1.1.4 屋面均布活荷载

屋面活荷载包括屋面均布活荷载、雪荷载和积灰荷载，均按屋面的水平投影面积计算。

屋面均布活荷载，不应与雪荷载同时考虑，其值可按《荷载规范》表 3.3.1 确定。

屋面水平投影面上的雪荷载标准值，应按下式计算：

$$S_k = \mu_r S_0 \tag{1-1}$$

式中 S_k ——雪荷载标准值， kN/m^2 ；

μ_r ——屋面积雪分布系数；

S_0 ——基本雪压， kN/m^2 。

屋面积雪分布系数 μ_r ，应根据不同类别的屋面形式，按《荷载规范》表 5.2.1 采用。

基本雪压 S_0 系以当地一般空旷平坦地面上统计所得 30 年一遇最大积雪的自重确定,其值从《荷载规范》的“全国基本雪压分布图”中查得。

在设计有大量排灰的厂房及邻近建筑时,其水平投影面上的屋面积灰荷载,应分别按《荷载规范》的表 3.4.1-1 和 3.4.1-2 确定。积灰荷载应与雪荷载或屋面活荷载两者中的较大值同时考虑。

1.2 风荷载

垂直地作用于建筑物表面单位面积上的风荷载标准值,应按下式计算:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1-2)$$

式中 w_k ——风荷载标准值, kN/m^2 ;

β_z —— z 高度处的风振系数;

μ_s ——风荷载体型系数;

μ_z ——风压高度变化系数;

w_0 ——基本风压, kN/m^2 。

风振系数 β_z 用来考虑风压脉动的影响。由于混合结构房屋高度较低,刚度较大,故计算中不考虑。

风荷载体型系数 μ_s 是指表面风压值与基本风压值的比值,正值表示压力,负值表示吸力。它与建筑物的体型和尺寸有关,其值可按《荷载规范》表 6.3.1 的规定采用。

风压高度变化系数 μ_z 应根据地面粗糙类别按《荷载规范》表 6.2.1 确定。

基本风压 w_0 ,是以当地比较空旷平坦地面上离地 10m 高统计所得的 30 年一遇的 10min 平均最大风速 v_0 (m/s) 为标准,按 $w_0 = \frac{v_0^2}{1600}$ 确定的风压值。其值应按《荷载规范》中“全国基本风压分布图”的规定采用,但不得小于 0.25kN/m^2 。

1.3 地震作用

由结构动力学可知,工程结构受到的动力作用一般分两类:一类是直接作用结构上的外加动力荷载,如机器的震动、风压力、爆炸冲击波等;另一类是地运动的干扰,如地震、地下爆炸所引起的地面运动,通过地基对结构产生的作用。故结构的地震反应是运动干扰引起的强迫振动。因而地震作用的实质是,地运动干扰而引起结构物运动状态改变时,由于结构本身的惯性而产生的作用自身的惯性力。因为是惯性力,故地震作用的大小除了和结构的质量有关外,还和结构的运动状态有关。通常把地震时结构的运动状态(各质点的位移、速度、加速度)叫做结构的地震反应。地震反应是由地震时地面运动的情况(振幅、频谱特性、持续时间)和结构本身的动力性能(自振周期、阻尼、振型等)决定的。地面的运动情况,可以由地面的加速度波形来描述。图 1-2 所示为 1940 年 5 月 18 日在美国埃尔森特罗(EL-Centro),由强震仪记录到的在地震时地面运动的加速度记录。当时震级为 7.1 级,震中距为 50km。目前,虽然世界各国已取得了许多地震波记录,但是还很难预测地震,从中找出规律来预估今后可能发生的千变万化

的地震情况。不同的地震,不同的场地,不同的震中距都会产生不同的地面运动。

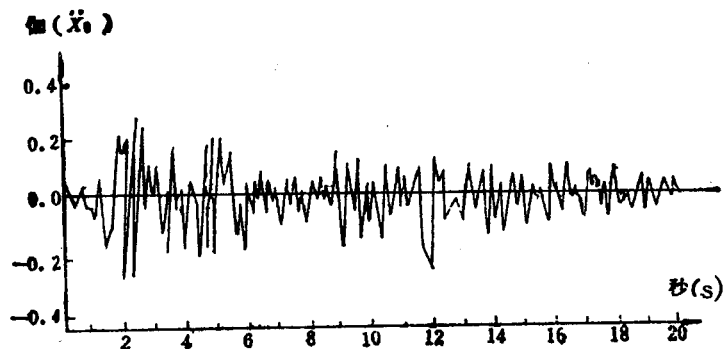


图 1-2 El-Centro 地面加速度记录图

地震时,地面运动是一个复杂的空间运动。它可以分解为 6 个运动分量,3 个转动分量,3 个位移分量。如果对每个分量进行计算,则计算的复杂性是不可思议的,因而必须简化。建筑物底面虽有一定大小,但相对于地震波长来说,可近似地认为,地震时基底各点的地面运动是相同的,即将基底看成一个点,不考虑相位差,这样就忽略了 3 个转动分量,而把地面运动分解为一个竖向和两个水平方向的分量。然后分别计算这些分量对结构的影响。大量震害分析表明,除强烈地震的震中区外,地震对结构的破坏主要是由于水平振动造成的。这一方面是由于地震时,地面运动加速度竖向分量最大值的平均值约为最大水平分量的 65%。另一方面,结构主要承受静力竖向荷载,结构在竖向有较大的抗力储备。因而在一般情况下,不进行竖向地震作用的计算。对于两个水平方向的分量,由于考虑地震时地面运动方向上的不确定性,从最不利情况出发,假定水平方向的地面运动正好与建筑物的两个主轴方向一致,即按建筑物的两个主轴方向分别考虑地震作用,各方向的水平地震作用全部由该方向的抗侧力构件承担。

1.3.1 水平地震作用

目前各国规范中考虑水平地震作用的结构计算方法大致有 3 种,即静力法、反应谱法(拟静力法)及时程分析法(直接动力法)。

一、静力法

如前所述,大量震害调查表明,很多房屋在地震作用下造成破坏的原因是因为水平结构强度不足。故建筑物抗震设计的最简单且较为有效的办法之一,是在设计计算中考虑一个等效的水平外力,以增强结构的抗侧力能力。

例如 1960 年 5 月 21 日智利大地震,在 9 度区有一座炼钢厂,因为在设计时考虑了较大的侧向水平力,厂房在强烈地震后仅受到轻微损伤,而周围的其余房屋全部倒塌。静力法最早是 1916 年佐野利器在日本的《房屋抗震结构论》中提出的,当时叫做“震度法”。此法到目前仍在日本及一些国家的抗震设计规范中被采用。

所谓“静力法”,即地震时只考虑一个方向的水平地面运动,以一系列等效的外加水平力来代替地震对结构的作用。在确定这些等效水平外力时,不考虑地震时地面运动的特点,仅取最大加速度值。并且假定结构为刚体,不考虑结构的动力特性。这些等效的水平外力仍用在结构的质量集中处,大小相当于结构的重量乘上一个侧力系数,由于假定建筑物为刚体,即认为

地震时结构本身不产生弹性振动,因而结构与地面运动有相同的最大加速度 $\ddot{x}_{0,\max}$,此时产生的最大惯性力 $-m\ddot{x}_{0,\max}$ 作为假想的等效水平外力作用于建筑物的质心处(图 1-3)。

$$F = -m\ddot{x}_{0,\max} = -\frac{G}{g}\ddot{x}_{0,\max} = -\frac{\ddot{x}_{0,\max}}{g}G = -kG \quad (1-3)$$

式中 G ——建筑物的重量;
 k ——地震系数(侧力系数),日本叫震度。

对多层房屋, $G_1, G_2, \dots, G_n$ 为各楼层处的集中重量(图 1-4)。静力法的关键是在设计时怎样确定 k 值,因为在未来的地震中,地面水平运动的最大加速度 $\ddot{x}_{0,\max}$ 是未知数。如日本规范取 k 的基本值为 0.2,并随高度、不同地区的地震强度,结构材料及地基等因素加以修正。

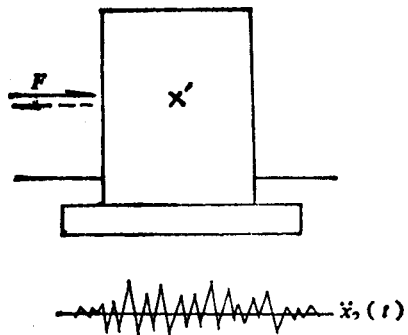


图 1-3 静力法计算简图

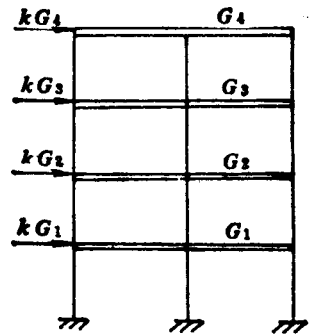


图 1-4 静力法楼层水平地震作用计算简图

静力法简单易懂,计算方便是该法的最大优点。过于粗略是它的最大缺点,即在确定等效水平地震力时,没有考虑地面运动的特点及结构本身动力特性的影响,这从结构动力学观点来分析,显然不合理。

二、反应谱法

目前,我国及世界上很多国家的抗震设计规范,都采用反应谱法来确定对结构的地震作用,这种计算理论是根据地震时地面运动的实测记录所绘制的加速度反应谱曲线为依据的。所谓加速度反应谱曲线,就是单质点弹性体系在一定的地面运动作用下,最大反应加速度与体系自振周期的函数曲线。反应谱中的“谱”类同于物理学中“谱”的概念,即把一种复杂的事件(现象)分解成若干独立的分量,并按一定的次序将它们排列起来形成图形,此图形叫做“谱”。例如光学中,太阳光通过三棱镜分解出 7 种颜色(不同频率),按一定次序排列的图形称为“光谱”。这里指的是按不同周期排列的最大加速度反应,故叫加速度反应谱曲线。如果已知体系的自振周期,利用反应谱曲线或相应的计算公式,即可确定体系的反应加速度,进而求出地震作用。

反应谱法对图 1-5 所示的单质点弹性体系作地震反应分析,得到单质点 m 的最大加速度反应值 S_a ,于是可得惯性力。反应谱法计算地震作用的基本表达式为

$$F_E = mS_a = G/gS_a = \alpha G \quad (1-4)$$

式中 F_E ——地震过程中可能出现的最大水平惯性力;
 G ——质点重量, $G = mg$;
 α ——地震影响系数, $\alpha = S_a/g$ 。

由此可见,地震影响系数 α 就是单质点弹性体系在地震时以重力加速度 g 为单位的最大反应加速度。 α 系数与地面加速度、场地土的类型及结构动力特性有关。如果将式(1-4)中的 F_E 用 F_{Ek} 代替, G 取为建筑的重力荷载代表值,即取结构和构配件自重标准值和可变荷载组合值之和;(各可变荷载组合值系数见表 1-4) α 值按《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)(以下简称《抗震规范》)根据国内外的 255 条实际地震记录统计、分析、整理出的地震影响系数反应谱曲线(图 1-6)取值,则可得到用反应谱法计算单质点弹性体系的水平地震作用标准值的公式为

$$F_{Ek} = \alpha G \tag{1-5}$$

式中 F_{Ek} ——地震作用标准值;
 G ——质点重力荷载代表值;
 α ——地震影响系数。

从图 1-6 可以看到,地震影响系数曲线是将结构的自振周期 T 作为自变量参数,以考虑结构动力特性对地震作用的影响。地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$ 的取值考虑了地面运动加速度(通过地震烈度)对地震作用的影响以及不同的抗震设防水准(多遇地震设防,罕遇地震设防)对地震作用的取值影响,见表 1-2。图中特征周期 T_g 的值控制了取得 $\alpha_{\max}$ 值的周期范围即水平段的长短,用来考虑场地类别和近震、远震对地震作用的影响。这里的近震是指建筑物所在地区遭受的地震影响来自本设防烈度区域比该地区设防烈度大 1 度地区的地震。这里的远震是指建筑物所在地区遭受的地震影响可能来自设防烈度比该地区设防烈度大 2 度或 2 度以上地区的地震。我国现行烈度区划图所标注的基本烈度区,绝大多数地区只考虑近震影响。需考虑 7 度远震的城市有候马、连云港、徐州、蚌埠、乌鲁木齐、喀什、渡口、拉萨等;需考虑 8 度远震的城市极少,只有独山子、泸定、石棉;9 度区的震中距一般都不会很远,认为本身即为震中或近震区。

由此可以看出,地震影响系数 α ,应根据结构自振周期、近震、远震、场地类别、地震烈度和多遇地震、罕遇地震,按图 1-6 采用。其方法是:

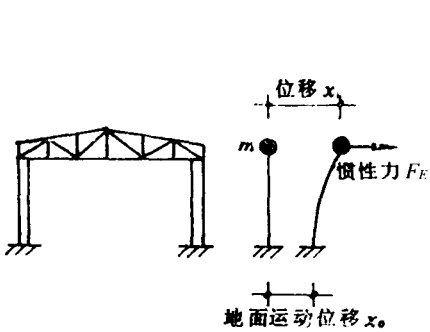


图 1-5 单质点弹性体系计算简图

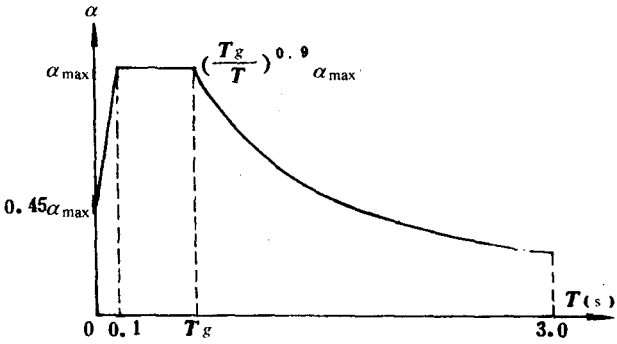


图 1-6 地震影响系数曲线

(1) 当 $T_g \leq T \leq 3.0s$ 时, α 按双曲线变化,

$$\alpha = \left(\frac{T_g}{T} \right)^{0.9} \alpha_{\max} \quad (T_g < T < 3.0s) \tag{1-6}$$

式中 T_g ——特征周期,根据场地类别和近震、远震,按表 1-1 采用;
 T ——结构自振周期,可根据理论计算或经验公式确定;

$\alpha_{\max}$ ——地震影响系数最大值,按表 1-2 采用。

特征周期 T_g (S)

表 1-1

近、远震	场 地 类 别			
	I	II	III	IV
近 震	0.20	0.30	0.40	0.65
远 震	0.25	0.40	0.45	0.85

水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$

表 1-2

烈 度	6	7	8	9
地震类别				
多遇地震	0.04	0.08	0.16	0.32
罕遇地震	—	0.50	0.90	1.40

(2)当 $0.1s \leq T \leq T_g$ 时,为安全计,这一段取水平线,即 α 均按 $\alpha_{\max}$ 取值。

(3)当 $0 \leq T \leq 0.1s$,这一段按向上倾斜的直线变化,即在 $0.45\alpha_{\max}$ 与 $\alpha_{\max}$ 之间按线性插入取值,如式(1-7)所示

$$\alpha = (5.5T + 0.45)\alpha_{\max} \quad (0 \leq T \leq 0.1s) \tag{1-7}$$

4. 为了保证结构具有最低限度的抗震能力,《抗震规范》规定, α 值的下限不应小于最大值的 20%,即 $\alpha_{\min} = 0.2\alpha_{\max}$ 。至于限制 $T \leq 3.0s$ 的问题,主要考虑当 $T \leq 3.0s$ 时, α 反应谱曲线的准备性才有保证,当 $T > 3.0s$ 时,应作专门研究,故限制 $T \leq 3.0s$ 。

我国《抗震规范》根据场地土的软硬和场地覆盖层的厚度,将场地分成四类,表 1-3 中给出了场地土划分的标准。场地土愈软, T_g 值愈大, $\alpha_{\max}$ 的平台段愈长。

场地土类别

表 1-3

场地土类型	上层剪切流速(m/s)	场地覆盖层厚度 d_0 V(m)				
		0	0~3	3~9	9~80	>89
坚硬场地土	$v_s > 500$	I				
中硬场地土	$500 \geq v_{sm} > 250$		I		II	
中软场地土	$250 \geq v_{sm} > 140$		I	II		III
软弱场地土	$v_{sm} \leq 140$		I	II	III	IV

注: v_s 为土层剪切波速;

v_{sm} 为土层平均剪切波速,取地面下 15m 且不深于场地覆盖层厚度范围内各土层剪切波速,按土层厚度加权的平均值。

在实际工作中,除了有些结构可以简化成单质点弹性体系进行分析外,很多结构,像多层混合结构房屋、多跨不等高单层工业厂房等(图 1-7),则应简化成多质点弹性体系进行计算。即将各屋面或楼面的质量分别集中在各相应的屋面或楼面处,并假定这些质点由无重量的弹性直杆支承于地面上。这样即可将多层房屋简化成多质点弹性体系。

理论分析表明,应用反应谱法,在某些假定条件下,可以将复杂的多质点弹性体系的地震反应,简化为若干单质点弹性体系的地震反应之和,即多质点弹性体系的地震计算问题可以按单质点弹性体系进行。因此,单质点弹性体系的地震反应计算,是建筑物抗震设计的基础。

多质点弹性体系的水平地震作用,可采用振型分解反应谱法求得,但此法计算较繁,在一定条件下则可采用比较简单的底部剪力法,现将这两种方法简述如下。