
高层建筑结构概念与结构设计

译 文 集

建筑科学 编辑部

建筑科技资料No.1

高层建筑结构概念与结构设计 译文集



建筑科学编辑部

1988

前 言

国际高层建筑与城市规划委员会出版了两本论文集：*Advances in Tall Buildings*(1986)；*Developments in Tall Buildings* (1983)。这两本论文集集中反映了国际上高层建筑的最新发展和设计、施工实践经验。

近年来国内高层建筑发展很快。在结构高度、结构形式、设计计算方法等方面都提出了一些新问题。为了借鉴国外经验，特选编本译文集。

本译文集共选了23篇论文和一个附表。其中22篇论文和附表都选自以上二本论文集。“在高层和超高层建筑中的结构表现”选自“*The Engineering Aesthetics of Tall Buildings (1985)*”一书，因为这篇论文很清楚地阐明了高层建筑设计中的结构概念和结构体系，对建筑师和工程师都很值得一看。选入本译文集的标准是选择对我国建筑科技人员有参考价值的资料，即反映国外高层建筑最新发展、高层建筑结构概念和结构体系、结构计算方法及设计施工实践经验等方面的论文。

目录中论文的分类是以上两本论文集原有的。国际高层建筑与城市规划委员会长期按5个方面征求论文。本集只选四方面的论文，未选城市规划方面的论文。

本译文集由季直仓、吴济民、戴国莹、邵弘、龚炳年、赵宁、黄小坤、李丹、艾利明翻译，郝锐坤、赵西安、龚炳年、邵弘部分校对。全集由季直仓负责主编、总校阅。

本书内容简介

本译文集主要选自国际高层建筑与城市规划委员会出版的两本论文集：*Advances in Tall Buildings*(1986)；*Developments in Tall Buildings*(1983)。内容主要是有关高层建筑结构体系与结构概念、高层建筑钢结构设计及高层建筑钢筋混凝土结构设计方面的论文。这些论文对高层建筑结构的研究和设计均很有用。

本译文集适宜于从事高层建筑结构设计和研究的工程技术人员及有关高等院校师生阅读和参考。

建筑抗震设计—建筑科技资料 No.2

内容简介

建筑抗震设计—资料为译著。原书为 *Design of Earthquake-Resistant Buildings*, Minoru Wakabayashi, 1986。作者是日本京都大学防灾研究所教授。全书共分六章：1、地震与地面运动；2、地面运动下的结构振动；3、地震荷载下建筑结构的性能；4、建筑结构抗震设计；5、基础抗震设计；6、安全评价与现有建筑结构的加固。作者的目的是向在校学生、毕业后从事结构工程的毕业生及要进行抗震设计的实际工程师提供一本简明的教材。书的特点是可给读者提供抗震设计方面坚实的基础知识。

本书内容广泛，叙述深入浅出，适宜于从事建筑设计、建筑抗震研究的建筑工程技术人员及有关高等院校师生阅读、参考。

建筑科技资料由《建筑科学》编辑部编印，目的是向建筑工程技术人员提供一些有实用价值的科技资料。每一资料分册出版，内部征订发行。还有需要《高层建筑结构概念与结构设计》一书者可邮款向《建筑科学》编辑部购买，每本5.00元。需《建筑抗震设计》一书者可速向该编辑部索取订单。《建筑抗震设计》每本5.40元。《建筑科学》编辑部地址：北京安外小黄庄建研院。

目 录

前言

结构体系与结构概念

- 钢-混凝土组合筒体建筑的抗震设计..... (1)
- 筒体结构应用与发展..... (17)
- 高层建筑结构方案的选择..... (31)
- 高层工业建筑..... (44)
- 在高层和超高层建筑中的结构表现..... (58)
- 高层建筑深基础——沉箱和高承载力桩..... (65)

准则与荷载

- 地震荷载和反应的新发展..... (84)
- 美国高层建筑防火的实际进展..... (99)
- 预制R. C.框架柱子施工偏差对高层建筑总安全度的影响.....(115)

高层建筑钢结构设计

- 高层建筑组合结构体系的新发展.....(122)
- 偏心斜撑高层建筑对地震的动力反应.....(132)
- 结构超静定的影响及其在稳定和强度设计准则中的重要性.....(143)
- 多层建筑总体稳定性分析的简化方法.....(149)
- 框架设计中的P- Δ 效应.....(159)

高层钢筋混凝土结构设计

- 柔性无支撑柱的简化设计方法.....(166)
- 高层建筑设计中侧向位移的限制.....(189)

钢筋混凝土高层建筑中的侧向承力体系	(196)
结构抗震能力与结构整体性	(206)
在超高层建筑中柱子长度的变化	(214)
墙体刚度和高度对非线性地震反应的影响	(228)
超高强混凝土的设计	(238)

高层建筑设计介绍

香港汇丰银行工程	(246)
Onterie 中心大楼设计	(270)

附表 世界上最高的100个建筑	(275)
-----------------------	-------

钢—混凝土组合筒体建筑的抗震设计

Hal Iyengar, Mohammad Iqbal

引 言

在过去二十年为了减少高耸建筑的造价，已发展了几种新的结构体系。它们包括筒体、筒中筒和成束筒结构体系。所使用的材料既有钢筋混凝土又有型钢 (Khan, 1974)。人们发现，降低高层建筑结构造价的最有效途径就是建造钢—混凝土混合结构。在这种结构中，利用了各种材料的优点而消除其缺点。混凝土构件体系（如剪力墙和框架筒）是抵抗风力和提供水平刚度的有效构件。它们和简单的钢框架（特别是楼面框架）混合应用既加快了施工速度又降低了建设造价。钢—混凝土混合使用的目的就是利用混凝土的刚度承受水平荷载，利用钢的轻巧和可作成大跨度楼面框架。有了这种混合体系的建造方法，并为施工和制造业所接受，它们已得到了广泛的应用。在此同时又促进了这种体系进一步的完善和发展 (Iyengar, 1977; Iyengar, 1979; Iyengar和Iqbal, 1982)。这种钢—混凝土混合体系作为钢结构和钢筋混凝土结构的一种发展已得到广泛的普及和应用。在目前的实际应用中，对于一幢高层建筑，从造价和结构上来考虑的话，在三种结构体系（钢结构、钢筋混凝土结构和钢—混凝土组合结构）中，大多数首先选用钢—混凝土组合结构。由于有众多的钢筋混凝土和型钢构件类型，这些构件的适当组合就能满足整个建筑结构的要求。

由于到最近为止高层建筑大多建造在非地震区，混合体系的

设计主要考虑抗风设计。可是在最近几年，将由于抗风设计而发展起来的高效能结构体系用来建造经济的高层建筑抗震结构的兴趣已日益增加。

一个由小间距布置的周边柱和窗间深梁组成的框筒形成了仅开有窗洞的混凝土筒体。从结构的观点看，这种体系具有弯曲悬臂构件（如细长的剪力墙）和由梁柱组成的框架性能。在水平荷载作用下产生的倾覆力由筒体承担（因而在构成框筒的柱中产生拉压力），而水平剪力主要是由框筒中平行于作用力方向的框架承担（图1）。在现代的筒体建筑中是水平层间位移起控制作用而

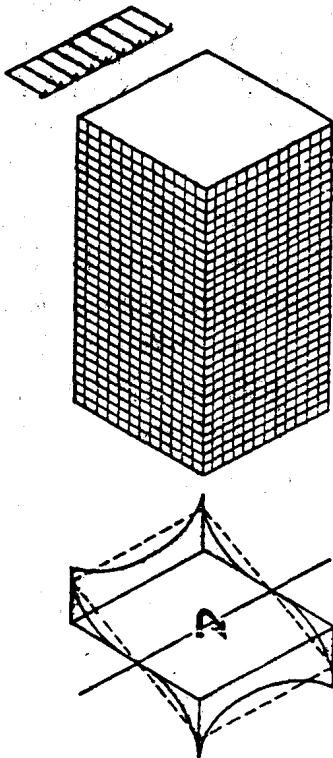


图 1 筒体建筑的剪力滞后效应

不是强度起控制作用。此外保持柱和窗间梁之间适当的刚度平衡使得这些构件在提供水平刚度时得到充分的利用也是非常必要的。

从抗震的观点看，可以把框筒设计成为象一个三维的延性抗力矩空间框架那样工作。从而使外筒柱和窗间梁成为抵抗地震力和辅助承受垂直力的构件。要使延性框架在强烈的地面运动作用下不垮，框架由强柱弱梁组成是很有必要的 (Seinacetal, 1980)。延性框架中的梁柱设计必须要考虑四个基本点：

1. 每层柱应承受层间剪力。
2. 在任何节点，柱的抗弯强度大于梁的抗弯强度。

3. 为了承受水平和垂直荷载，窗间梁的设计必须满足强度和延性的要求。梁的刚度必须满足框筒的

水平位移要求。

4. 柱子钢筋的细部设计必须防止脆性剪切破坏和受压破坏。

对于地震区框筒结构体系的可行性目前研究得还不多。有人考虑有窗间深梁的框筒体系可能不满足强柱弱梁的需要，因而柱子可能会先于梁而出现塑性铰，对结构的稳定产生不利的影响。

本文验证了上述问题，而且提出了一种适应于地震区组合筒体结构的设计方法。文中首先对适应于非地震区的设计和施工方法进行了简单的综述，然后考虑地震的影响，说明了非弹性时程分析的设计方法。文中对一个43层的混合筒体结构，考虑1940年EL Centro波（E—W分量）进行了研究，最后给出了进一步的设计指南。

组 合 筒 体 体 系

组合筒体体系是由钢筋混凝土外框筒和内部的铰接柔性钢框架所组成。外框筒承受全部水平力（图1）。在组合体系中混凝土外框筒得到了充分的利用。框筒由小间距布置的宽柱和深梁组成，外观上和开孔墙一样。通常柱梁面积占这种开孔墙的百分之三十到四十。柱间距变化范围是6~15ft（2~5m），取决于构件的尺寸。由于有剪力墙，可形成不同外观的框筒。混凝土本身的整体性特点保证了节点的连续性和刚度。这种开孔筒体墙可用成套模板技术或滑模施工。建筑上，混凝土筒体的表面可做成任意合理的形状以便与其它部分联接，而且如果需要也可直接暴露在外面。所以外框筒具有结构和围护的双重功能。图2是一37层混合筒体结构的立面图，体现了外筒的基本特点。开孔筒体墙通常减少了建筑立面的玻璃面积，从而降低了冷热负荷，节省了空调费用。由小间距布置的柱形成的框筒另一个优点就是简化了窗间

墙的细部构造。因为每一个窗子皆由周边的筒体构件围成，窗玻璃可用简单的垫圈直接安装在构件上。在非地震区，混凝土框筒体系可建到100层或更高。

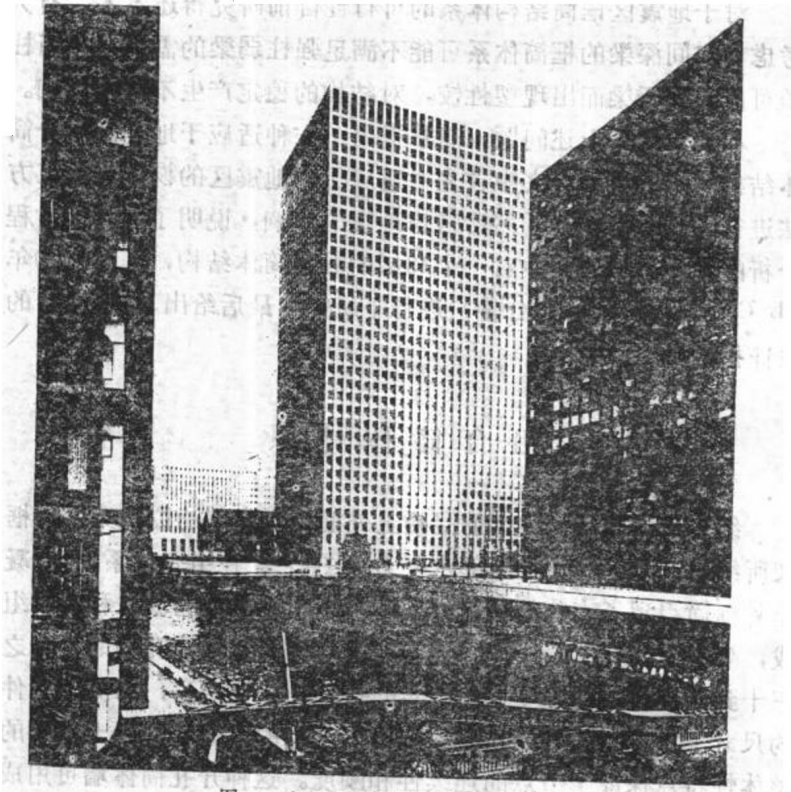


图 2 在芝加哥的Gateway II大楼

图3示一结构平面图，周边是框筒，内部是钢楼面框架和钢柱。所有内框架都是非刚性联接，设计上仅考虑承受重力荷载。同钢结构中一样，楼面框架是由组合金属板和组合钢梁(或桁架)形成的。一典型的窗间梁和周边柱剖面(图3)表明钢梁是与一个小尺寸钢柱联在一起。而钢柱与混凝土框筒的垂直构件组合在一

起。用这种方法可允许组合结构中钢结构部分先于混凝土构件部分施工安装。楼板用暗销接合的方法固定在周边柱和梁上。

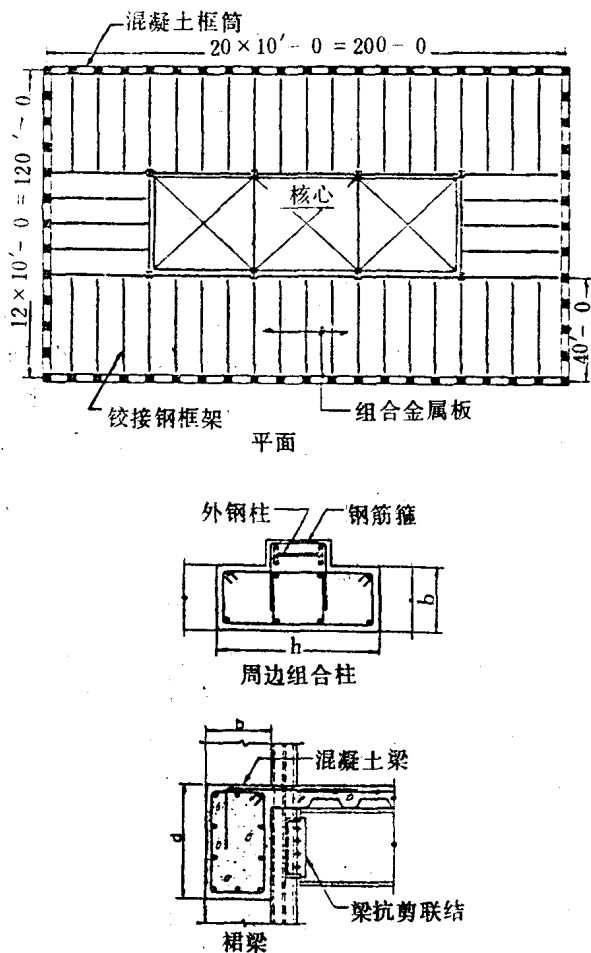


图 3 组合框筒结构的楼层平面和构造

在六十年代中期开始使用混合筒体体系时，结构的形状主要局限于棱柱形。例如示于图2和图3中的两种结构。实际上由于外

框筒可做成不同的外形，使这种体系呈现多样化。外框筒具有良好的抗扭刚度使这种体系也可用于非对称的结构形式。只要合理利用非对称，这种体系几乎能适应任何形体。

外筒体体现了最简单的概念，而且在施工中可先安装钢结构部分。由于混凝土施工是在结构的周边或钢结构部分的外围，施工配合比较简单。然而外部结构的刚度要求限制了外轮廓的变化。

分析和设计

水平荷载作用的分析通常仅考虑框筒的作用而忽视钢结构参与部分。水平荷载全部由三维框筒承担，在柱中产生轴力和弯矩。这种结构的初步分析可按框—剪结构来做。在分析过程中，由于开孔筒体墙与实体墙受力性质不同，必须进行一定的判断。Khan和Amin（1973）对筒体悬臂效应进行了详细的讨论，这些对实际分析是很有帮助的。

在框筒的最终设计时，风荷载作用可用三维框架分析程序（在程序中考虑柱轴向变形）进行框筒结构的受力分析。构件截面大（高梁和宽柱）的影响应通过它们对刚度的贡献来考虑。这种影响可通过两种方法进行分析，一是根据梁柱净跨对中心线跨度的比值来调整构件的性能，一是将结构分成单层用有限元分析。类似的一个较好的分析方法是將框筒转化为实体筒后，用有限元法分析。

筒体建筑的初步设计可使用规范规定的静力来做（ICBO，1980；ATC，1978）。规范规定的静力要比结构在中强地震作用下在弹性阶段的反应地震力小。这样的设计目的使结构是延性的。对结构的最终设计阶段，需用时程分析的方法。通用的结构分析程序都可进行三维弹性时程分析。应用钢筋混凝土在反复荷载作用下的理想化模型也可对钢筋混凝土平面框架进行非弹性反

应分析, 例如图4所示的武田滞回曲线刚度衰减模型(Takada, Sozen和Neilson, 1970)。这种模型是理想化的反复荷载作用下钢筋混凝土构件中弯矩和转角的关系。这种模型已使用在程序DR-RAIN-2D中, 这个程序的功能是计算平面结构对地面运动的反应(Kanaan和Powell, 1975)。近来的研究表明塑性矩(屈服弯矩)的大小对钢筋混凝土墙或框架的结构性能影响很大(Derecho等, 1979; Fintel和Ghosh, 1980), 而目前的规范中有关地震计算的条款没有明确的考虑屈服弯矩的影响。设计中, 若正确地考虑屈服水平, 则设计上可有一定的灵活性, 从而能够控制塑性铰产生的顺序和位置。这种考虑屈服影响的设计方法已在一对称的31层框剪结构中得到应用(Fintel和Ghosh, 1980)。

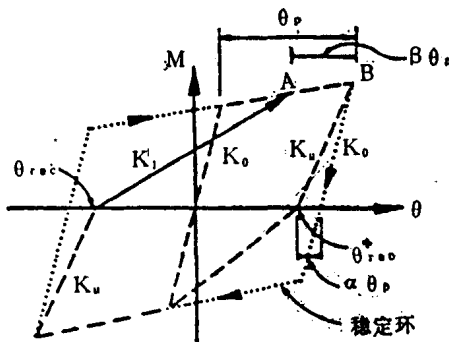


图4 修正的武田模型
(Kanaan和Powell, 1979)

从结构的观点出发, 框筒与框剪有一重要的不同, 即在水平荷载作用下, 框筒中的受力是三维的而框剪中构件受力是平面的。Khan和Amin指出(1973)可用两平面框架正确的表示框筒的受力特性。这两平面框架一为框筒中的翼缘框架, 一为其中的腹板框架。两平面框架

的联结要使腹板框架承受全部水平剪力而翼缘框架对角柱起轴向约束作用。为节省计算费用及计算时对内存的要求, 翼缘框架可用一具有其特性的柱代替。采用这种等效平面框架、武田的钢筋混凝土刚度衰减模型及相应的计算程序(如DRAIN-2D)就可进行混合框筒的非弹性时程分析。下述的43层混合筒体结构的例子总结了设计过程。

设计实例

考虑43层混合筒体结构的抗震设计, 结构的平面尺寸是 $36.6 \times 61.0\text{m}$ ($120 \times 200\text{ft}$) (图3)。

在对结构进行较细致的抗震分析前, 先对结构进行重力和静风荷载的设计。作静力分析的三维空间模型示于图5A中, 风荷载作用下顶层位移控制在 $H/500$ 以内, 主要的建筑数据及结构要求列在表1中, 周边柱和窗间梁不但要承担风荷载而且要承担重力荷载。

设计实例组合筒体体系 **表1**

层数	43	办公室活荷载	2400Pa(50lb/ft ²)	
高度	170m(559ft)	隔墙荷载	958Pa(20lb/ft ²)	
平均风压	1915Pa(40lb/ft ²)	平动周期	5S	
水平位移	0.33m(13.2in)	扭转周期	1.5S	
楼层平面尺寸	参看图3			
板	50mm(2in)复合金属板加 83mm (4 1/3in)、4000Psi 结构轻混凝土面层			
钢楼面框架	W21×44, A36复合型钢, 中心距3.00m(10ft)			
外框筒尺寸				
楼层	h	d	b	f'c(kPa)(psi)
0—10	0.9m(36in)	0.84m(33in)	0.51m(20in)	(35)5000
10—20	0.9m	0.84m	0.51m	(35)5000
20—30	0.9m	0.84m	0.51m	(28)4000
30—42	0.9m	0.84m	0.51m	(28)4000

进行非弹性时程分析时, 使用等效的平面框架(图5B)。等效框架是由框筒的腹板和翼缘框架组成, 所以等效框架与三维筒体框架的受力性能相当接近。如图6所示, 二维和三维模型的水平位移及梁中弯矩符合得很好。两个模型显示了类似的振动特点, 图7是结构的前三个振型和周期。

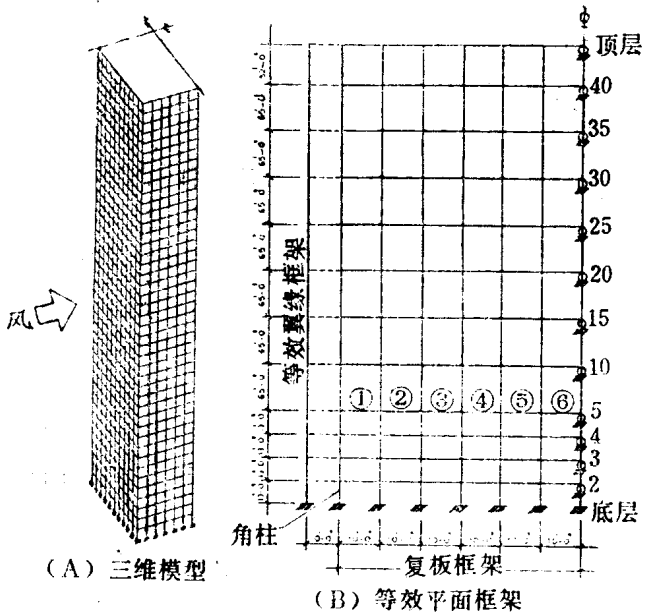


图 5 43层组合筒体建筑的分析模型

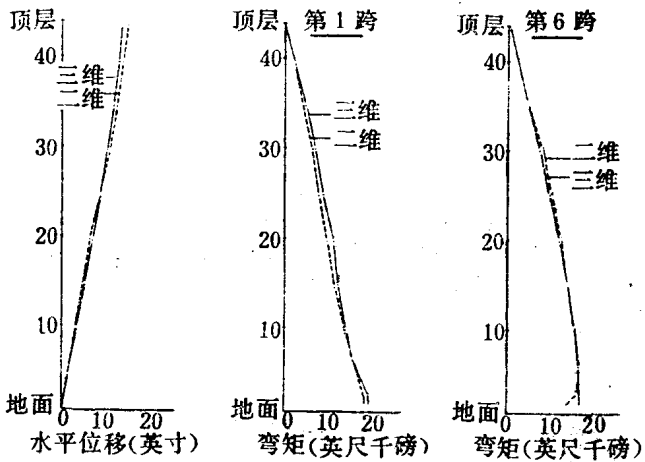


图 6 二维和三维计算模型结果的比较

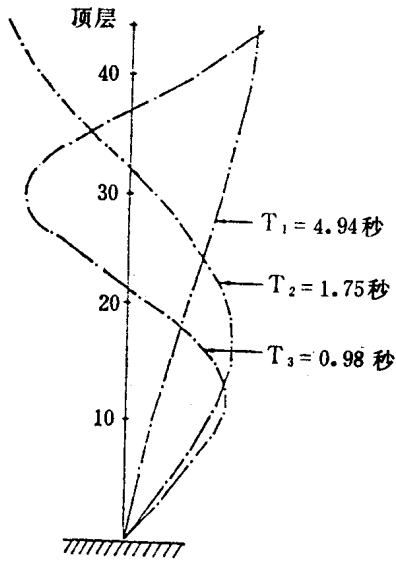


图 7 三个振型

作动力分析时选用两种地震等级（强度）。

1. 设计地震：1940年EL Centro 波E—W 分量前十秒强度的三分之二。

2. 最大地震：1940年EL Centro 波E—W 分量前十秒强度。

选择EL Centro 波E—W分量作为输入的地面运动是基于 Derecho 等（1970）对参数的研究。这个研究表明这种波（图 8）对建筑物来说是影响最强烈的输入地面运动。

输入的地面运动强度和持续时间的选择是基于作者的判断而且和

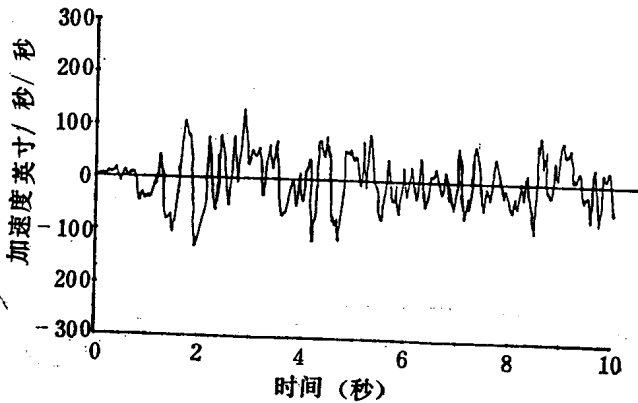


图 8 1940年EL Centro E—W分量的加速度记录 (Derecho, 1979)

目前常用的选取方法相同。在两种地震荷载的作用下对结构的要求是在设计地震作用下，框筒中的应力不超过其屈服值，在最大地震作用下，窗间梁的延性允许达到10，在两种地震力作用下，周边柱都不屈服。文中只给出结构在较短方向的受力反应。

图9A是沿建筑物高度的位移，随着地震强度的增加顶层位

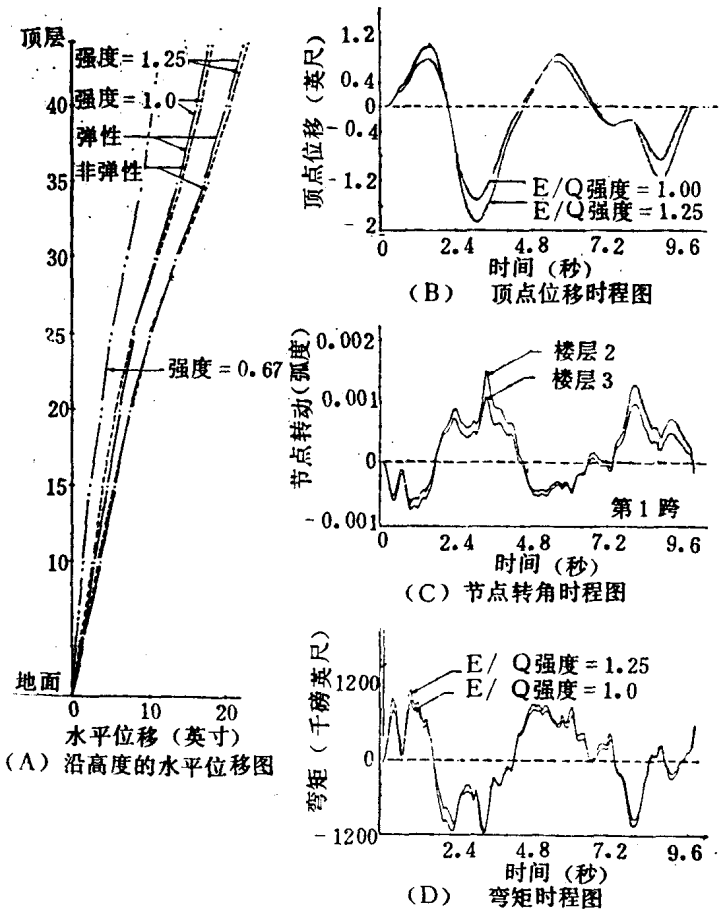


图 9 动力分析结果