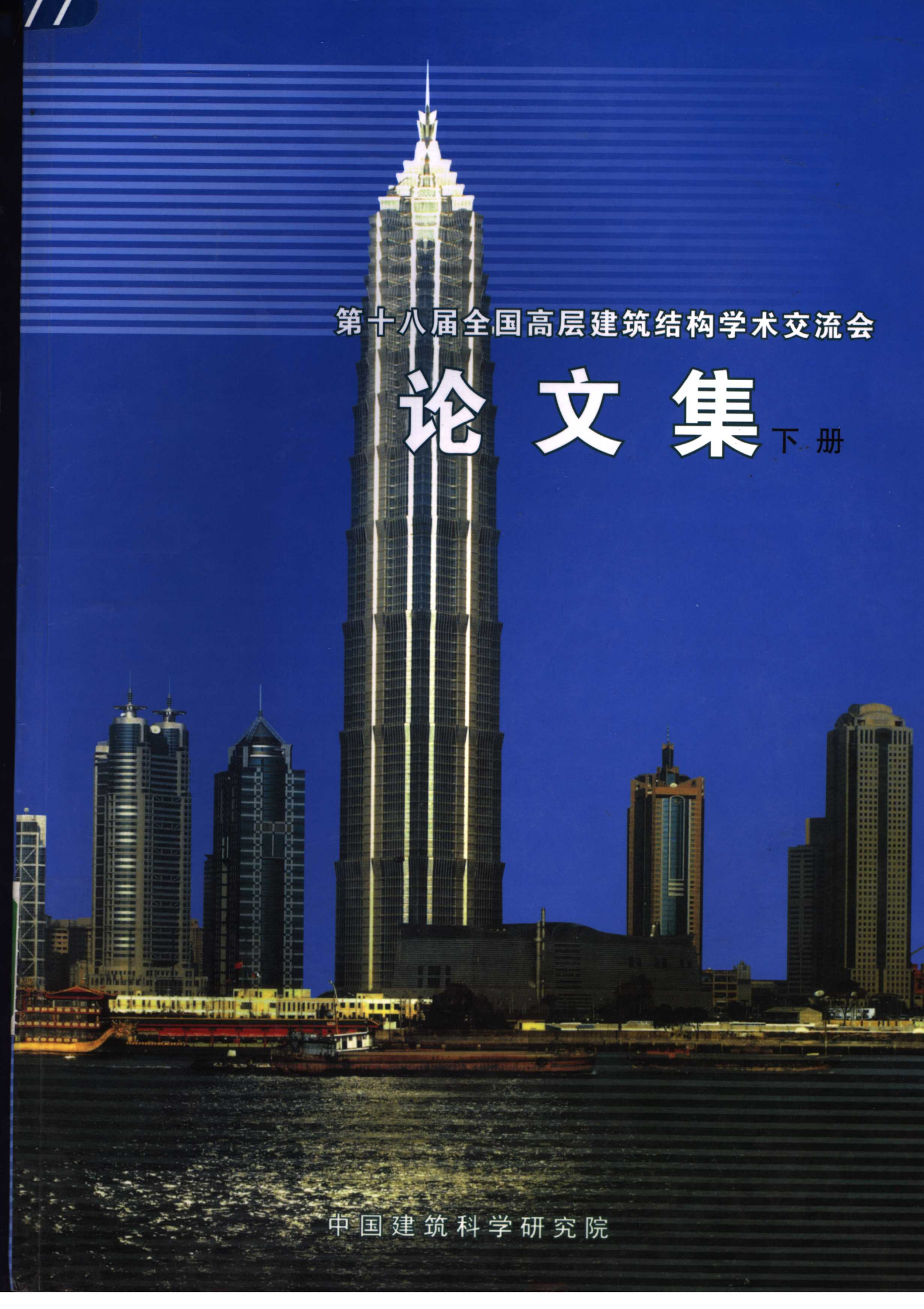


第十八届全国高层建筑结构学术交流会

论文集 下册

中国建筑科学研究院

目　　录

一、综述

关于超限高层建筑抗震设防审查的若干讨论……徐培福 王亚勇等 1
我国高层建筑钢结构的发展……崔鸿超 蔡益燕 11
国家游泳中心“水立方”的结构设计优化……顾　磊 傅学怡 19
我国高层建筑幕墙钢结构……赵西安 30
《世界上最高的 100 栋建筑》分析……胡世德 方鄂华 44
北京近年高层建筑的发展和展望……胡世德 49

二、高层建筑专项工程研究

北京电视中心综合业务楼结构设计……束伟农 柯长华等 54
北京电视中心主楼非线性地震反应分析与结构抗震性能评价……黄　嘉 柯长华等 60
深圳红树西岸筒体－剪力墙－板柱高层结构设计……孟美莉 傅学怡等 68
深圳红树西岸工程模型振动台试验研究……孙慧中 郝锐坤等 74
钢筋混凝土带承台柱帽无梁筏板在地下室底板中的应用……邹奇 傅学怡等 89
深圳金域蓝湾三期超限工程结构设计……傅学怡 刘畅等 94
深圳万科金域蓝湾三期模型振动台试验研究……肖从真 林祥等 104
浙江省电力公司生产调度综合楼模型振动台试验研究……刘军进 王翠坤等 112
转换钢桁架试验方案设置及模型制作……刘智 肖从真等 124
带筒体的转换钢桁架整体模型试验研究……肖从真 刘智等 130
钢桁架转换层不同设置高度对高层建筑抗震性能的影响……秦从律 贺明卫等 138
浙江电力调度大楼推覆分析……裘涛 刘劲松等 145
钢桁架转换层施工过程的仿真分析……秦从律 贺明卫等 151
重庆万豪国际会展大厦结构设计……薛尚铃 许秀珍等 158
重庆万豪国际会展大厦风效应研究…… 郑史雄 薛尚铃 166

三、高层建筑结构设计相关问题讨论

体型收进对高层建筑结构抗震性能的影响……肖从真 徐培福等 172
高层建筑箱形转换层结构设计探讨……黄小坤 林祥等 181
高层建筑结构设计若干问题探讨……傅学怡 吴　兵 188

建筑结构抗震分析与设计中的几个问题……李英民 邓小华等 195
上海外滩中国银行大楼的安全性与抗震性能评估……蒋利学 胡绍隆等 203
平面不规则高层建筑的结构选型……张元坤 209
高层建筑结构用钢板在设计中的应用……范 重 217
重力荷载作用下整浇钢筋混凝土无次梁楼盖工作性能研究……吴兵 傅学怡 223
苏州某门式超高层建筑的结构方案分析……丁洁民 王永春等 236
连体结构竖向地震作用分析……刘 智 王翠坤 243
北京公馆结构设计分析……杨蔚彪 程光煜等 251
某高层住宅结构方案设计……文 健 唐旭雄等 257
青岛裕泰大厦改扩建……林 广 陈星焘 262
“板带梁”在高层建筑中的设计应用……应高飞 272
高层建筑局部高位转换在续、改建工程中的应用……朱向东 276
某梭形超高层建筑结构方案的比较分析……雷淑忠 于兴银等 283
某转换结构三种设计方案的比较……李亚明 唐柏鉴等 290
按新规范设计所遇若干问题的探讨……董启灏 295
高层建筑剪力墙连梁设计的研究……李 昆 沙 安等 299
RC 巨型框架结构抗震的能力设计措施……李正良 段红霞等 303
狭长、细腰平面高层结构的优化设计……詹敬仁 肖 伟 310
短肢剪力墙配筋方式设计探讨……廖文彬 316
高烈度区高层建筑位移控制方案比较研究……顾渭建 路静雷等 321
超长转换结构的理论分析与工程实践……顾渭建 周淑玲 327
斜柱超高层筒中筒结构的受力特性研究……王永春 丁洁民 333
北京金宝街华嘉大厦抗震分析与设计……葛家琪 管志忠等 339
重庆某超限高层建筑结构优化方案……陈文钦 全学友等 350
多塔高层建筑结构地震反应分析……肖 伟 刘立平等 360
关于结构转换层设置高度的探讨……谢益人 夏洪流等 365
厚板转换层结构的分析与设计方法研究……黎帜光 黄彤斌 371
高层住宅长椿苑的抗震性能分析……陈 婧 王松山等 378
梯形框架转换层结构体系在高层建筑中的应用……林 莉 白福波 383
高层建筑结构抗震分析和设计若干问题的探讨……钱玉林 丁勇春 390
预应力混凝土结构在高层建筑中的应用……王 斌 395
钢骨砼巨型框架结构体系工程应用实例……夏长春 江韩等 400
从一多层钢结构看中/美规范之分别……何伟明 高耀勤 407
泰和高层住宅钢结构设计及经济指标分析……左权胜 周鹏洋等 412
某不规则方钢管混凝土组合高层建筑结构选型……丁洁民 巢斯 等 417
超高层中钢管混凝土梁、柱节点设计方法……陶鹤进 彭卫纲 423
高层建筑混凝土的柱抗震加固方案的探讨（一）……李华亭 崔萍等 439

高层钢结构工业厂房制造安装施工技术 ……何乃文 陈四川 445
武汉国际会展中心上部大跨度钢桁架设计及安装……周德良 452

四、高层建筑结构设计

中关村金融中心高层钢结构设计……胡纯炀 范重等 460
大连国贸中心大厦结构设计……王立长 李凡璘等 468
沈阳房地产交易中心……汪祖培 480
超长大底盘、不对称双塔高层建筑结构设计……徐永基 吕旭东等 492
锦凯花苑平面凹口超限的结构设计……项士权 茅声华 500
北京 SOHO 现代城设计……刘 军 507
上海广中路 701 号（一期）超限高层建筑的结构设计……安 岩 陈介厚 517
上海中友大厦结构设计……周云年 525
重庆世界贸易中心工程超限高层建筑结构设计介绍……郑生庆 赵启林 530
高层转换结构设计实例……杨乐 王斌 537
试论中关村大河庄苑办公楼结构设计……魏利金 542
西北某商务中心高层钢结构设计与分析……魏捷 张文华等 548
黄沙地铁商住项目超限高层结构方案设计……唐旭雄 何宪朝等 555
时代财富大厦的超限设计……孙逊 吴志彬 561
厦门希尔顿大酒店钢—砼混合结构设计……廖耘 李盛勇等 567
西港国际大厦超高层结构抗震设计……梁淑萍 顾嗣淳 574
某大厦型钢混凝土框支梁和转换层结构设计……郑志钢 王斌 581
北京朝阳园三期工程结构设计……林向军 路静雷 586
深圳市地铁大厦屋顶钢结构设计……刘文清 刘相仁 592
小高层剪力墙结构设计……叶立寰 598
深圳市政协联谊大厦结构设计……董彦章 陈岩等 603
深圳华融大厦结构设计……刘维亚 吴真一 608
顺德嘉宏台大厦结构设计……黄涤宇 黄上进 614
佳程广场结构设计……李晨 黄宇 等 621
广州某高层建筑结构设计……孙立德 廖余萍 630
超限高层商住楼海韵裕都结构设计……吕芸 彭咏梅 636
招商—城市主场工程结构设计……黄用军 方卫兵等 641
海门市行政审批服务中心采用预应力处理温度及收缩应力的设计……孙海 巢斯等 648
兰州中川机场航站楼三角形立体钢桁架设计……金建民 韩克良等 653
长顺综合楼结构设计……尤亚平 吴勇 等 658
重庆石桥广场塔楼（二期工程）结构设计……陈文钦 苟基佐等 664

五、高层建筑理论分析及计算研究

静力弹塑性分析（pushover analysis）
的方法及在程序上的实现……汪大绥 贺军利等 671
静力弹塑性分析(pushover analysis)方法的理论研究……贺军利 汪大绥等 679
西部机电高层钢结构动力弹塑性分析……洪亮 李康宁等 688
静力弹塑性分析（PUSH-OVER）方法及工程应用……薛彦涛 徐培福等 695
水平地震作用下扭转不规则结构抗震设计若干问题……魏 琏 王 森等 706
宁波浙海大厦二期工程预应力厚板转换层计算分析……刘军进 王 凯等 713
一幢特别不规则高层建筑结构的地震反应研究……姜 鋆 钱稼茹等 719
半刚性连续组合框架梁挠度的简化计算……王静峰 李国强等 732
考虑纵筋影响的异形柱轴压比限值……张 伟 梁兴文 740
多高层建筑结构考虑施工过程的内力分析……邬喆华 许国平等 746
以设计轴压比限值为目标的核心筒钢筋优化布置分析……全学友 黄辉辉 753
梁柱刚度对框架柱参数的影响……吴邦达 759
双向地震作用……韦承基 王沁平等 765
异形截面短肢剪力墙的弹性与弹塑性计算模型……李青宁 王宁 等 769
钢筋混凝土剪力墙结构基于位移的抗震设计方法研究……梁兴文 邓明科等 775
SATWE 应用的一些问题……黄警顽 781
地震动影响系数的计算……黄用军 陈岩 等 792
钢管混凝土框架层间位移的简化计算方法……王铁成 卢明奇等 796
方钢管混凝土柱轴压比限值分析……张建辉 王铁成等 802
上部结构与地下室共同工作分析及地下室设计……李云贵 807
结构弹塑性分析应用方法的探讨……邵弘 黄吉锋等 814
罕遇地震下高层建筑结构动力弹塑性有限元分析实用化……杨志勇 黄吉锋等 823
结构静力弹塑性 PUSHOVER 分析程序 EPSA……黄吉锋 杨志勇等 832
TBSA 与 TBWE 共享前后处理程序的方法……刘华锋 冯丽娟等 841
TBSA6.0 程序构件的正常使用极限状态验算……冯丽娟 刘华锋 845
基于对象的建筑结构分析与设计软件 ETABS 中文版……李楚舒 刘春明等 849
ETABS 中的自动线约束功能……刘春明 李楚舒等 855
ANSYS 与 AutoCAD 接口设计……张剑 860
结构施工图 CAD 系统的可靠性控制……吴文勇 焦柯 865
我国建筑工程设计领域 CAD 技术发展战略研究……佟铁 杨振凯等 870

六、高层建筑结构试验及减震研究

约束钢管混凝土柱抗震性能的试验研究……何文辉 肖岩 874

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

高层钢—混凝土混合结构的抗震性能试验研究及设计建议……阎兴华 张艳霞等 880
上部边框柱外移时牛腿转换节点的试验研究……全学友 陈文钦等 885
现浇圆形空心楼盖中单向模型板受力性能的试验研究……全学友 孙会郎 893
高强螺栓外伸端板连接的钢梁—钢筋混凝土柱
组合节点抗震性能的试验研究……毛炜烽 肖岩 903
钢筋混凝土框架与桩筏基础及地基动力
相互作用大比例模型试验……尚守平 王海东等 908
粘弹性阻尼减振(震)技术新进展……程文濂 李爱群等 914
粘滞流体阻尼器在高层建筑消能减振设计中的应用……李爱群 张志强等 921

七、高层建筑基础工程

高层主楼与裙房或地下车库之间的基础设计……李国胜 李军军 932
某高层群基础桩基总体设计……施卫星 940
中共“一大”会址纪念馆扩建工程基坑围护设计总结……李小军 徐若 等 945
福州河下花园支盘灌注桩基础设计探讨……杨意德 952
高层建筑地下室底板的设计探讨……李华亭 李鑫等 957
金地格林花园一期二组团基础选型及设计……黄用军 何晓龙等 963
13m 深基坑组合型围护的工程实践……胡贤忠 张善庆 967
静压管桩在软弱土层中的应用……胡芝福 田美存等 974
滨海地区预应力砼管桩倾斜、断裂的检测及处理方法……周守民 980
喷粉桩在深基坑工程中的应用……杨东峰 986
大底盘多塔楼结构的基础设计与施工……楼国山 吴建林等 990
国际市长交流中心钻(冲)孔扩底灌注桩的设计与施工……袁成铭 唐四联 1001
某办公大楼桩筏基础内力分析……姚卫国 陆明华等 1010
地下停车库基坑支护方案的计算分析……邬喆华 徐洋 等 1017
大底盘塔楼靴筏扩展基础……马宝民 1024
高层建筑和裙房整体基础与地基共同作用设计方法探索及实例……潘安平 1029
高层超高层建筑深桩基础的优化设计……吴寿泉 1035
高层建筑整体弹性基础考虑共同作用的基床拟柱简略电算方法……刘一威 倪兰洁 1039
深基坑工程的非线性数值模拟……杨毅秋 严驰 1043
高层建筑筏形基础受力试验研究及拓扑优化……兰倩 杜永峰等 1049
深基坑支护结构的可靠度分析……梁沙河 刘艳 1055
高层建筑基础设计方案优化……陆卫东 丘国雄 1061

八、其它

深圳电视中心拉索式点支承玻璃幕墙……赵西安 1067
新保利大厦幕墙单索支承体系抗震性能分析……郭铁宏 武岳 等 1075
大鹏展翅—深圳市市民中心工程结构设计简介……吴时适 1081
建筑的表达需求与结构设计安全……邢民 1086
青年工程师结构设计小问题……史有涛 马继园 1091
中华建筑理念及其超高层结构功能预测……李大华 闫熙臣等 1096
关于建筑加固方法的具体应用……梁致为 余智敏 1101
喷射混凝土在高层建筑剪力墙纠偏加固中的应用研究……张仲先 张杰等 1105
钢筋混凝土结构施工期质量保证的新方法探讨……巴松涛 1111
预应力梁在受竖向结构侧限作用下的施工技术……黄林 赵济生等 1116
复杂结构模板体系的接缝控制……吕仕民 赵红梅 1122
现浇混凝土的观感质量控制……赵红梅 吕仕民 1129
天津市《钢筋混凝土异形柱结构技术规程》
DB29-16-2003 修订简介……严士超 王依群 1136

静力弹塑性分析(pushover analysis)的方法及在程序上的实现

汪大绥 贺军利　张凤新

（华东建筑设计研究院有限公司，上海 200002）

摘要： 本文介绍了美国手册 FEMA273/274 和 ATC-40 中关于静力弹塑性分析的方法，给出了利用 ETABS 程序进行适合我国地震烈度分析的计算步骤，并用一框架结构算例予以说明，表明 Pushover 方法是目前对结构进行在罕遇地震作用下弹塑性分析的有效方法。

关键词： 静力弹塑性；能力谱；需求谱；性能点

1 前言

结构遭受强震作用后，一般将进入弹塑性阶段。对弹塑性结构进行抗震设计或性能评价的方法过去主要推荐弹塑性动力时程分析方法，弹塑性时程分析能够算出地震反应全过程中各个时刻的内力和变形状态，给出结构构件的破坏位置和顺序，发现应力和塑性变形的集中部位，从而判定结构的屈服机制、薄弱环节及破坏类型。但弹塑性时程分析也存在缺陷，计算量大、结果处理复杂，计算费用高；而且，由于尚存在许多技术上的困难，还不可能在各种情况和各种结构中都取得很理想的结果，不能回答所有地震作用下的问题，因而应用还受到局限。近年来，静力弹塑性分析(pushover analysis)作为对新结构进行抗震设计或对既有结构进行抗震能力评价的新方法，以其概念清楚，实施相对简单，同样能使设计者在某种程度上了解结构在强震作用下的弹塑性反应的特点，在国外得到广泛的应用。最具有代表性的是美国联邦紧急管理厅 1997 年出版的《房屋抗震加固指南》(FEMA-273)，应用技术委员会的 ATC-40，都引入了利用 pushover 进行基于位移的抗震设计或评价的具体实施办法[1]。还有美国加州结构工程师协会的 SEAOC Version 2000(1996)；欧洲模式规范(Eurocode-8)；日本的《日本建筑标准法》等。

利用静力弹塑性分析（Pushover Analysis）进行结构分析的优点在于：

既能对结构在多遇地震下的弹性设计进行校核，也能够确定结构在罕遇地震下潜在的破坏机制，找到最先破坏的薄弱环节，从而使设计者仅对局部薄弱环节进行修复和加强，不改变整体结构的性能，就能使整体结构达到预定的使用功能；而利用传统的弹性分析，对不能满足使用要求的结构，可能采取增加新的构件或增大原来构件的截面尺寸的办法，结果是增加了结构刚度，造成了一定程度的浪费，也可能存在新的薄弱环节和隐患。

对多遇地震的计算，可以与弹性分析的结果进行验证，看总侧移和层间位移角、各杆件是否满足弹性极限要求，各杆件是否处于弹性状态；对罕遇地震的计算，可以检验总侧移和层间位移角、各个杆件是否超过弹塑性极限状态，是否满足大震不倒的要求。

汪大绥，1941 出生，设计大师，教授级高工

2 静力弹塑性分析的方法

SAP2000n 和 ETABS 程序提供的 pushover 的分析方法，主要基于两本手册，一本是由美国应用技术委员会编制的《混凝土建筑抗震评估和修复》(ATC-40)，另一本是由美国联邦紧急管理厅出版的《房屋抗震加固指南》(FEMA273/274)。混凝土塑性铰本构关系和性能指标来自于 ATC-40，钢结构塑性铰本构关系和性能指标来自于(FEMA273/274)，而 pushover 方法的主干部分，即分析部分采用的是能力谱法，来自于 ATC-40。

其主要步骤如下：

(1) 用单调增加水平荷载作用下的静力弹塑性分析，计算结构的基底剪力 V_b—顶点位移 u_n 曲线（图 1(a)）。

(2) 建立能力谱曲线

对不很高的建筑结构，地震反应以第一振型为主，可用等效单自由度体系代替原结构。因此，可以将 V_b—u_n 曲线转换为谱加速度 S_a—谱位移 S_d 曲线，即能力谱曲线（图 1(b)）：

(a) pushover 曲线　　(b) 能力谱

图 1　pushover 曲线和能力谱之间的转换

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*}, \qquad S_d = \frac{u_n}{\Gamma_1 \phi_{n,1}} \tag{1}$$

式中 Γ_1、M_1^* 为结构第一振型的振型参与系数和模态质量，

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i\phi_{i1})/g}{\sum_{i=1}^{n}(w_i\phi_{i1}^2)/g}, \qquad M_1^* = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(w_i\phi_{i1})/g\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(w_i\phi_{i1}^2)/g} \tag{2}$$

w_i/g——第 i 层质点的质量；ϕ_{i1}——振型 1 中质点 i 的振幅；

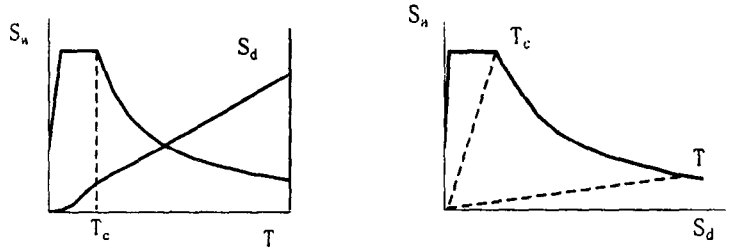
ϕ_{n1}——振型 1 中最顶层质点的振幅；u_n——结构顶点位移。

(3) 建立需求谱曲线

需求谱曲线分为弹性和弹塑性两种需求谱。对弹性需求谱，可以通过将典型（阻尼比为 5%）加速度 S_a 反应谱与位移 S_d 反应谱画在同一坐标系上（图 2（a）），根据弹性单自由度体系在地震作用下的运动方程可知 S_a 和 S_d 之间存在下面的关系

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \tag{3}$$

从而得到 S_a 和 S_d 之间的关系曲线，即 AD 格式的需求谱（图 2（b））。



（a）传统形式　　（b） AD 形式

图 2　典型弹性加速度谱 S_a 与位移谱 S_d

对弹塑性结构 AD 格式的需求谱的求法，一般是在典型弹性需求谱的基础上，通过考虑等效阻尼比 ξ_e 或延性比 μ 两种方法得到折减的弹性需求谱或弹塑性需求谱。ATC-40 采用的是考虑等效阻尼比 ξ_e 的方法。

（4）　性能点的确定

将能力谱曲线和某一水准地震的需求谱画在同一坐标系中（见图 3），两曲线的交点称为性能点，性能点所对应的位移即为等效单自由度体系在该地震作用下的谱位移。将谱位移按式（1）转换为原结构的顶点位移，根据该位移在原结构 $V_b - u_n$ 曲线的位置，即可确定结构在该地震作用下的塑性铰分布、杆端截面的曲率、总侧移及层间侧移等，综合检验结构的抗震能力。

若两曲线没有交点，说明结构的抗震能力不足，需要重新设计。

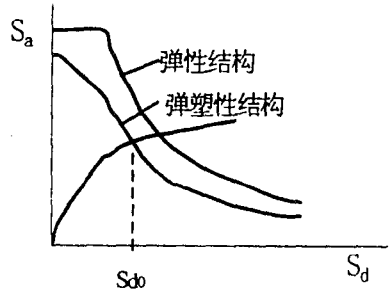


图 3　性能点的确定

因为弹塑性需求谱、性能点、ξ_e 之间相互依赖，所以确定性能点，是一个迭代过程。只要已知参数输入正确，性能点、ξ_e、需求谱等可由程序自动算出。在输入已知条件时，

需要注意的是,程序中的地震反应谱采用的是 ATC-40 中的反应谱曲线，与我国《建筑抗震设计规范》（GB50011—2001）的地震反应谱表达方式略有不同，需经等效代换成程序中的系数。

3 计算步骤

1. 建立模型、内力分析和配筋

利用程序，求出构件在设计规范规定的各种荷载工况下的内力并配筋，其中柱最大配筋率为 1%，梁最大配筋率为 1.5%。内力分析时，梁、柱用框架单元模拟，现浇板用壳单元模拟。

2. 塑性铰的定义和设置

SAP2000n 给框架单元提供了弯矩（M）、剪力（V）、轴力（P）、轴力和弯矩相关（PMM）四种塑性铰，可以在一根构件的任意部位布置一个或多个塑性铰。各种塑性铰的本构模型归纳为图 4 所示。

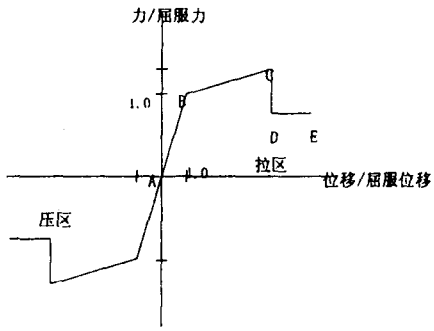


图 4　塑性铰本构关系

在上述塑性铰本构关系中，纵坐标（力）代表弯矩、剪力、轴力，横坐标（位移）代表曲率或转角、剪切变形、轴压变形。整个曲线分为四个阶段，弹性段（AB）、强化段（BC）、卸载段（CD）、塑性段（DE）。只要将几个关键点 B、C、D、E 确定出来，整个本构关系就确定了，其中确定 B 点时，涉及到屈服力和屈服位移的确定，关于屈服力和屈服位移，有两种确定方法，一种是自定义，输入某一具体值，另外一种是由程序计算；确定 C、D、E 时，各点的纵、横坐标需要分别按照力、位移与屈服力和屈服位移的比值来输入，SAP2000n 程序也提供了两种方法，一种是自定义，另一种是程序按照美国规范 FEMA273 和 ATC-40 给定。本文采用后一种方法来定义塑性铰的本构关系。

对梁单元，一般仅考虑弯矩（M）屈服产生塑性铰，对柱单元，一般考虑由轴力和双向弯矩相（PMM）作用产生塑性铰。对钢筋混凝土结构，程序根据截面的配筋值，可自动计算屈服弯矩值和轴力弯矩相关面（由 0 度、22.5 度、45 度、67.5 度、90 度五个方向的曲线形成的包络面），见图 5。

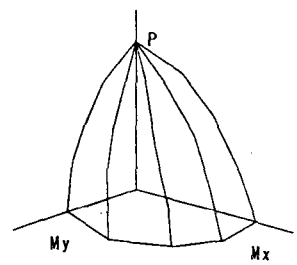


图 5 柱屈服面

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

塑性铰的位置，应设置在弹性阶段内力最大处，因为这个位置最先达到屈服。对梁、柱单元，一般情况是两端弯矩最大，弯曲塑性铰和压弯铰（PMM）应设置在两端，在剪力最大处，应设置剪切铰。

3. 侧向加载模式和 push-over 工况

侧向荷载的分布方式，即应反映出地震作用下各结构层惯性力的分布特征，又应使所求得位移，能大体真实地反映地震作用下结构的位移状况。事实上，由于任何一种荷载分布方式都不可能反映结构全部的变形及受力要求，因为不论用何种分布方式，都将使得和该加载方式相似的振型作用得到加强，而其他振型的作用则被削弱。而且，在强地震作用下，结构进入弹塑性状态，结构的自振周期和惯性力大小及分布方式也因之变化，楼层惯性力的分布不可能用一种分布方式来反映。因此，最少用两种以上的荷载分布方式进行 pushover 分析。

FEMA-273 推荐三种形式：

(1) 均匀分布：各楼层侧向力可取所在楼层质量；

(2) 倒三角形分布：结构振动以基本振型为主时的惯性力的分布形式，类似于我国规范中用底部剪力法确定的侧向力分布；

(3) SRSS 分布：反应谱振型组合得到的惯性力分布。

ATC-40 采用与第一振型成正比的侧向力分布形式。

SAP2000n 程序提供了自定义分布、均匀加速度分布和振型荷载分布三种加载方式。均匀加速度分布提供的侧向力是用均一的加速度和相应质量分布的乘积获得的；振型荷载分布提供的侧向力是用给定的振型和该振型下的圆频率的平方（ω^2）及相应质量分布的乘积获得的，可以取任何一个振型。其中，均匀加速度方法相当于均匀分布，振型荷载分布方法，当取第一振型时，相当于倒三角分布。用户也可以自定义水平力分布情况，也可以把三者按一定系数组合。

在定义 push-over 工况时，除了按上述方法考虑各种水平荷载及组合外，应首先定义重力荷载作用作为 push-over 第一工况，各种水平力及其组合作为其它工况，计算时首先计算第一工况下的内力和变形，其它工况下的计算是在第一工况下内力和变形基础上施加水平荷载，水平荷载不断增加，结构侧移不断增大，直到达到规定的位移为止。

常用的 push-over 工况主要有：

a. 重力 + 振型 1　（纵向）

b. 重力 + 振型 2　（横向）

c. 重力 + x 向加速度荷载

d. 重力 + y 向加速度荷载

4. 结果分析和性能评价

经 Pushover 分析后，得到性能点，根据性能点时的变形，对以下三个方面进行评价：

(1) 顶点侧移：　是否满足抗震规范规定的弹塑性顶点位移限值。

(2) 层间位移角：是否满足抗震规范规定的弹塑性层间位移角限值。

(3) 构件的局部变形：是指梁、柱等构件塑性铰的变形，检验它是否超过建筑某一性能水准下的允许变形。

ATC-40 将房屋遭受地震后，可能出现的状态主要分为 IO（Immediate Occupancy）、DC（Damage Control）、LS（ Life Safety）、SS（Structural Stability）四种状态，可解释为‘立即居住’、‘损坏控制’、‘生命安全’和‘结构失稳’。

ATC-40 给出了梁、柱、墙等构件在上述几种相应状态下的塑性限值，无论何种类型铰，都可以用图 6 表示，纵轴表示轴力、弯矩、剪力等，横轴表示轴向变形、曲率、转角等，其中 B、IO、LS、CP （Collapse Prevention）、C 为性能点，其中 B 点出现塑性铰，C 点为倒塌点，CP 为预防倒塌点，各性能点所对应的横坐标为相应的弹塑性位移限值。

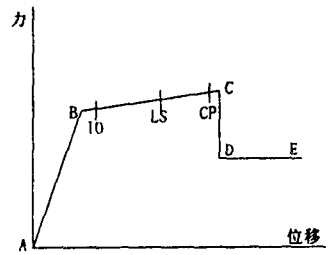


图 6　在不同性能水准下的塑性铰位移限值

4 算例

1. 工程概况

有一 15 层 54 米高的钢筋混凝土框架结构，按 7 度抗震设防，场地类别为Ⅳ类，设计地震分组为第三组，场地特征周期 T_g 为 0.9 秒。

经 SAP2000 程序地震反应谱分析，得到梁、柱、支撑等配筋，其中底层柱最大的配筋率为 2.7%，最大轴压比为 0.4%，各构件的配筋率及强度等指标均满足规范要求。

y 向的顶点位移 56.5mm，最大层间位移角为 1/650，满足限值 1/550 的要求，x 向的顶点位移 71.64mm，最大层间位移角为 1/713，大于限值 1/550，满足要求。

2. 数据的准备和输入

为了简单起见，本算例只采用程序里提供的缺省的塑性铰本构模型（即不需要另外输入图 4 中 B、C、D、E 各点值），将弯矩（M）塑性铰赋予梁的两端、轴力和弯矩相关（PMM）铰赋予柱两端，轴力（P）铰赋予支撑和链杆，其中 B、C、D、E 等关键点由程序根据计算出的配筋数量及截面尺寸，利用上述两本手册提供的相关公式确定。

由于本工程属于中等高度建筑，本文采用振型荷载（倒三角形荷载）作用在纵、横两个方向，即两个工况是：

a.　重力 + 振型 1　（纵向）

b.　重力 + 振型 2　（横向）

按照抗震规范，本算例进行两种地震烈度情况下的计算，即多遇地震和罕遇地震。根据我国现行抗震规范的地震反应谱与 ATC-40 反应谱的对比，可以确定系数 C_A、C_V。

7 度多遇地震，C_A=0.032，　C_V=0.076

7 度罕遇地震，C_A=0.2，　C_V=0.48

3. 计算结果与分析

(1) 多遇地震：

经 Pushover 计算，X 向的性能点 $S_a=0.053$，$S_d=0.027$，根据（1）式转换，得到 $V_b=3191KN$，$u_n=0.065m<0.071m$（弹性反应谱计算结果）。

Y 向的性能点 $S_a=0.064$，$S_d=0.022$，经（1）式转换，得到 $V_b=3961KN$，$u_n=0.048m<0.056m$（弹性反应谱计算结果）。

在达到上述状态时，各杆件没有产生塑性铰，与弹性计算是符合的，只是极限位移略小于反应谱计算的位移。

Y 向 V_b-u_n 关系曲线见图 7。

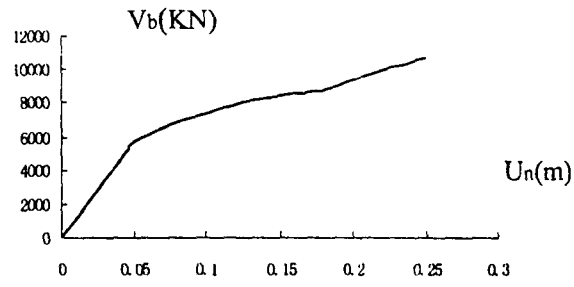


图 7 Y 向底层剪力—顶点位移曲线

(2) 罕遇地震：

X 向性能点 S_a=0.127，S_d=0.164，转换后，$V_b=7786KN$，$u_n=0.56m$

由于 $u_n=0.56m<\frac{1}{50}\times 54=1.08m$（1/50 是抗震规范规定的弹塑性层间位移角限值），所以，X 向顶点位移满足弹塑性极限要求。

Y 向性能点 S_a=0.167，S_d=0.145，转换后，$V_b=10033KN$，$u_n=0.45m$

由于 $u_n=0.45m<\frac{1}{50}\times 54=1.08m$，所以，Y 向顶点位移满足弹塑性极限要求。

在性能点状态时的 X 向和 Y 向的最大层间位移角分别为 1/82、1/105，均小于抗震规范规定的弹塑性层间位移角限值 1/50，所以，该结构的层间位移角也满足弹塑性极限的要求。

X 向在性能点时的塑性铰分布如图 8 所示，塑性铰主要出现在梁、框架柱等部位，这些铰的变形落在两种区段，B-IO、IO-LS 段。深颜色为 IO-LS 段，浅颜色为 B-IO 段，位于 IO-LS 段的梁铰，梁柱节点处保护层出现了剥落现象，塑性铰区出现了弯曲裂缝，没产生

永久变形，承载力完好；位于 IO-LS 段的柱铰，出现了弯曲裂缝，少量的剪切裂缝，没有保护层剥落现象，没有永久水平偏置，承载力完好。

综合以上评价，该工程满足使用要求。如果局部某个构件不满足塑性限值要求，则需要局部加强，而不会改变整体结构的性能。

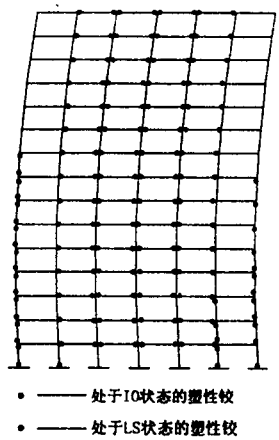


图 8 X 向结构在性能点时的塑性铰分布

5 结语

本文阐述了美国两本手册中进行 Pushover 分析的基本原理，并结合我国抗震规范对一个 15 层框架结构进行了抗震分析，结果表明，Pushover 方法不仅能够对结构在多遇地震下的弹性反应谱计算结果进行检验，更重要的是可以对结构在遭受罕遇地震后可能出现的破坏状况进行较精确的分析，比现行抗震规范中关于结构在罕遇地震作用下薄弱层（部位）弹塑性变形计算更进一步。

与时程分析法相比，Pushover 方法概念清晰，实施相对简单，同样能使设计人员在一定程度上了解结构在强震作用下的反应，迅速找到结构的薄弱环节。

当然，该方法也存在一定的不足之处，比如剪力墙的准确模拟方面，还需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] GB 50011—2001，建筑抗震设计规范，中国建筑工业出版社，2001 年。

[2] FEMA，“NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”，FEMA-273，Washington D.C.，1997

[3] ATC，“Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”，Report No. ATC-40，Applied Technology Council，Redwood City，California，1996

[4] SAP2000 Analysis Reference，Computers and Structures，Inc，1998

[5] 汪大绥，贺军利，张凤新，静力弹塑性分析的原理和计算实例，《世界地震工程》，2004；(1)：45-53

静力弹塑性分析(pushover analysis)方法的理论研究

贺军利　汪大绥　张风新
（华东建筑设计研究院有限公司，上海 200002）

提要：本文阐述了美国两本手册 FEMA273/274 和 ATC-40 中关于静力弹塑性分析的基本原理和方法，并对该方法中的关键技术问题，包括等效单自由度体系的建立、需求谱的建立方法以及性能点的求解等进行了证明和探讨，并指出了该方法的优缺点。

关键词：静力弹塑性　能力谱　需求谱　性能点

1 引言

结构遭受强震作用后，一般将进入弹塑性阶段。对弹塑性结构进行抗震设计或性能评价的方法过去主要推荐弹塑性动力时程分析方法，弹塑性时程分析能够算出地震反应全过程中各个时刻的内力和变形状态，给出结构构件的破坏位置和顺序，发现应力和塑性变形的集中部位，从而判定结构的屈服机制、薄弱环节及破坏类型。但弹塑性时程分析也存在缺陷,计算量大、结果处理复杂，计算费用高；而且，由于尚存在许多技术上的困难，还不可能在各种情况和各种结构中都取得很理想的结果，不能回答所有地震作用下的问题，因而应用还受到局限。近年来，静力弹塑性分析(pushover analysis)作为对新结构进行抗震设计或对既有结构进行抗震能力评价的新方法，以其概念清楚，实施相对简单，同样能使设计者在某种程度上了解结构在强震作用下的弹塑性反应的特点，在国外得到广泛的应用。最具有代表性的是美国联邦紧急管理厅 1997 年出版的《房屋抗震加固指南》(FEMA-273)，应用技术委员会的 ATC-40，都引入了利用 pushover 进行基于位移的抗震设计或评价的具体实施办法[1]。还有美国加州结构工程师协会的 SEAOC Version 2000(1996)；欧洲模式规范(Eurocode-8)；日本的《日本建筑标准法》等。

国内外的许多专家学者发表了大量文章，使得人们对 pushover 的认识更加深入。与此相适应，一些商业软件的新版本也增加了 pushover 分析的功能，如 Berkeley 的 DRAIN 系列，Computer & Structures Inc. 的 SAP2000，ETABS 等。

2 静力弹塑性分析方法

静力弹塑性分析[2]，是指在结构上施加竖向荷载并保持不变，同时施加某种分布的水平荷载，该水平荷载单调增加，构件逐步屈服，从而得到结构在横向静力作用下的弹塑性性能。

主要步骤为

（1）　按通常做法建立结构模型，包括几何尺寸、物理参数等；

（2）　根据单元种类（梁、柱、支撑、剪力墙等）和材料类型（钢、钢筋混凝土），确定各单元塑性铰性质（恢复力模型），根据受力形式可分为轴压、弯曲、剪切、

贺军利，1963.12 出生，工学博士，高工

压弯铰。一般程序将塑性铰集中在杆件两端，并不考虑沿杆长的分布，轴压铰集中在杆件中央；

（3）　施加全部竖向荷载；

（4）　确定结构的目标位移；

（5）　选择合适的水平加载模式；施加在结构上，逐渐增加水平荷载，结构构件相继屈服，随之修改其刚度（程序自动完成），直到达到结构目标位移，对结构性能进行评判。

3 静力弹塑性分析的原理

SAP2000n 和 ETABS 程序提供的 pushover 的分析方法，主要基于两本手册，一本是由美国应用技术委员会编制的《混凝土建筑抗震评估和修复》（ATC-40）[4]，另一本是由美国联邦紧急管理厅出版的《房屋抗震加固指南》（FEMA273/274）[3]。混凝土塑性铰本构关系和性能指标来自于 ATC-40，钢结构塑性铰本构关系和性能指标来自于（FEMA273/274），而 pushover 方法的主干部分，即分析部分采用的是能力谱法，来自于 ATC-40。

其主要步骤如下：

（1）　用单调增加水平荷载作用下的静力弹塑性分析，计算结构的基底剪力 V_b —顶点位移 u_n 曲线（图 1(a)）。

（2）　建立能力谱曲线

对不很高的建筑结构，地震反应以第一振型为主，可用等效单自由度体系代替原结构。因此，可以将 V_b —u_n 曲线转换为谱加速度 S_a —谱位移 S_d 曲线，即能力谱曲线（图 1(b)）：

（a）pushover 曲线　　（b）能力谱

图 1　pushover 曲线和能力谱之间的转换

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*}, \qquad S_d = \frac{u_n}{\Gamma_1 \phi_{n,1}} \tag{1}$$

式中 Γ_1、M_1^* 为结构第一振型的振型参与系数和模态质量，

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i \Phi_{i1})}{\sum_{i=1}^{n}(m_i \Phi_{i1}^2)}, \qquad M_1^* = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(m_i \Phi_{i1})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(m_i \Phi_{i1}^2)} \tag{2}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com