



Structural Nonlinear Analysis Program OpenSEES Theory and Tutorial

结构弹塑性分析程序
OpenSEES 原理与实例

陈学伟 林 哲 编著



内附光盘 25 个操作实例
学习网站 dinochen.com



结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例

陈学伟 林 哲 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例/陈学伟,
林哲编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-112-17318-1

I. ①结… II. ①陈…②林… III. ①建筑结构-结构分
析-计算机辅助设计-应用软件 IV. ①TU311. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226543 号

OpenSEES 是一个开源的弹塑性分析程序, 它有很多未商业化仍在研究阶段的算法、单元及材料本构。OpenSEES 的输入方式主要是采用 tcl 形式的命令流, 对于入门级的研究 OpenSEES 的用户会显得非常难以学习。因此建议采用 ETABS 进行结构模型的建模, 通过 ETO (ETO 的全称是 ETABS TO OpenSEES, 是将 ETABS 转化为 OpenSEES 的程序) 产生主要的命令流 tcl 文件, 然后再通过局部改动 tcl 命令流完成整个 OpenSEES 的前处理。这样用户可以花大量的时间去研究参数, 而不需要在几何模型上花时间。

本书主要分为四个部分: 第一部分介绍结构弹塑性分析的主要应用, 即基于性能的抗震分析与设计, 还介绍了弹塑性理论、单元及平台程序的发展过程。第二部分主要介绍 OpenSEES 的基本原理及一些宏观单元的理论, 便于读者理解 OpenSEES 里面常用的梁柱宏观单元模型。第三部分主要介绍 ETO 的程序及采用 ETO 进行结构模型建模的方法, 在这个章节中还会体现出 OpenSEES 的命令流的格式, 功能及使用细节。第四部分为本书附带光盘, 其中有书中所有实例的 ETABS、SAP2000 模型、主要表格及 OpenSEES 命令流。

本书主要面向基于 OpenSEES 的操作用户, 指导进行一些弹塑性分析, 用户通过举一反三, 可以自己建造更复杂的模型。

* * *

责任编辑: 刘瑞霞 武晓涛
责任设计: 董建平
责任校对: 李欣慰 刘梦然

结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例

陈学伟 林哲 编著

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 432 千字

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月第一次印刷

定价: 50.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-17318-1

(26093)

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)

序 一

在基于性能的抗震设计研究中，如何准确地模拟钢筋混凝土结构的弹塑性行为一直是个难题，OpenSEES 为解决这个难题提供了一个可行的平台。华南理工大学高层建筑结构研究所是国内最早使用 OpenSEES 的团队之一，在科研方面，团队在参加第 14 届 WCEE 预测性分析比赛中，借助 OpenSEES 平台取得了优异的成绩；在工程应用方面，我们完善了 OpenSEES 的前后处理，并将其应用于广州花园酒店结构改造可行性研究、某大跨连体结构的稳定性分析等工程中，陈学伟博士在其中做了大量开创性的工作。陈博士的这本书不仅介绍了 OpenSEES 在弹塑性分析方面的理论知识，同时结合陈博士多年的研究，提供了 25 个翔实有趣的例子供读者参考。希望在这本书的帮助下，更多的研究者使用 OpenSEES 开展科研工作，在这个平台上学习、交流和分享各自的研究成果，共同促进基于性能的结构抗震设计、结构弹塑性分析方法的发展。

韩小雷

2014 年 10 月于广州

韩小雷，江苏扬州人，教授、博士生导师，华南理工大学高层建筑结构研究所所长、广东省超限高层抗震审查专家委员会委员、亚热带建筑科学国家重点实验室建筑工程技术实验中心副主任。长期从事高层建筑结构抗震教学、科研和工程设计，出版专著 1 本、教材 3 本，发表论文 100 余篇，主持高层建筑结构抗震超限设计 30 余项。研究成果获省部级科技进步奖，工程设计获英联邦结构工程师学会中国设计大奖。

序 二

OpenSEES 是“开放的地震工程模拟系统”（Open System for Earthquake Engineering Simulation）的英文缩写，是由美国加州大学伯克利分校（UC Berkeley）的教师和学生开发的新一代采用面向对象技术的有限元软件框架，主要作为太平洋地震工程研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER）用于研究和交流的平台。

作为长期从事地震工程的研究者，本人十分有幸于 2002 年开始接触并使用 OpenSEES，特别是 2003 年至 2004 年期间当我在 UC Berkeley 土木与环境工程系做访问学者时，对 OpenSEES 的使用者及其开发者有了更为深入的接触，自然对 OpenSEES 的源起和发展也有了较为深刻的认识。事实上，OpenSEES 是由当时的 UC Berkeley 土木与环境工程系系主任 Gregory L. Fenves 教授所主持，由其博士生 Frank McKenna 所主要开发，于 1997 年发布第一个版本，当时称为“G3”，2000 年之后更名为“OpenSEES”，并沿用至今。恰如 OpenSEES 的名字一样，正是由于该系统的“开放性”，OpenSEES 一经推出，便受到全世界从事地震工程、结构工程、岩土工程的学者们和学生们的喜爱，并加入到 OpenSEES 的开发者行列，使得 OpenSEES 像滚雪球一样，其材料库、单元库和算法库越来越丰富，功能也越来越强大。2004 年，OpenSEES 被美国乔治·布朗“地震工程模拟网络”（Network for Earthquake Engineering Simulation, NEES）计划所采用，作为该计划的计算基础设施的虚拟仿真平台。现在 OpenSEES 不仅具备结构与岩土系统地震工程模拟的功能，还可以进行风工程和火安全工程的数值模拟，也是近年来迅速发展的混合模拟（Hybrid Simulation）的主要计算平台。

2004 年年底回国之后，我一直想在国内推广 OpenSEES 的使用与开发，但是却遇到了很多的困难。主要的原因就是当时国内很多学者和研究生已经习惯了使用像 ANSYS 这样具有丰富图形用户界面的商业化 CAE 软件，而 OpenSEES 表面上看起来只是一个 exe 可执行文件。虽然 PEER 的研究者也开发了一款带有图形用户界面的程序 OpenSEES Navigator，但是由于该程序是在 MATLAB 系统上运行的，使用上并不方便，效率也不高。为此，国内外的很多学者都致力于 OpenSEES 前后处理程序的研发，以方便 OpenSEES 的用户使用和工程应用。

在国内外众多的 OpenSEES 前后处理程序中，由陈学伟博士所开发的 ETO 程序是佼佼者。陈博士在攻读博士学位之间，就对 OpenSEES 有深入的了解，并在钢筋混凝土剪力墙抗震性能的研究方向颇有建树。陈博士毕业以后即在网络上发布了 ETO 程序，并结合工作经验，编写了 20 多个实例教程。陈博士的 ETO 程序和实例教程对于 OpenSEES 在国内的推广和应用起到了非常重要的作用。陈博士不仅在工作上十分勤奋，而且在虚拟空间中也是十分的友善，在 QQ 群“OpenSEES 与地震工程”中，网友每有疑问必亲自作答，具有极高的人气。

作为 OpenSEES 的“资深用户”，本人看到陈学伟博士的这部著作后，感觉到非常的

兴奋和振奋。这部书不仅对我本人的科研工作有巨大的裨益，我相信对于从事土木工程研究的莘莘学子、特别是 OpenSEES 的初学者而言，简直就是一部武林之中人人觊觎的“葵花宝典”。祝愿这本 OpenSEES 宝典对于推动我国土木工程防灾减灾的研究水平起到越来越重要的作用。

吕大刚

2014 年 10 月于哈尔滨

吕大刚，男，1970 年生，工学博士，哈尔滨工业大学土木工程学院教授，土木工程与工程力学专业博士生导师，现任哈尔滨工业大学土木工程学院副院长。1999 年博士毕业于哈尔滨建筑大学工程力学专业，2003~2004 年在美国加州大学伯克利分校土木与环境工程系作访问学者，2008~2009 年在瑞士苏黎世联邦工业大学土木工程系作访问教授。主要从事结构安全性与可靠性、工程灾害风险分析、地震工程、结构动力学、随机动力学等领域的科学研究工作。主持完成国家自然科学基金重大研究计划培育项目、重大项目、面上项目、国家科技支撑计划课题等 30 多项；指导毕业博士、硕士研究生 50 余名。出版专著 3 部，译著 2 部，发表论文 200 余篇；研究成果获教育部高等学校自然科学二等奖、黑龙江省自然科学奖和科技进步奖二等奖等多项奖励。国内学术任职主要有：中国建筑学会建筑结构抗倒塌专业委员会副主任，中国土木工程学会风险与保险研究分会常务理事，国际桥梁维护与安全协会中国团组理事，黑龙江省力学学会副理事长，中国力学学会委员，中国土木工程学会结构可靠度专业委员会委员，中国土木工程学会土力学与岩土工程学会委员，中国灾害防御协会风险分析专业委员会委员，《自然灾害学报》编委等。国际学术任职有：国际结构安全性联合委员会 (JCSS) 委员，国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) 委员，国际桥梁维护与安全协会 (IABMAS) 委员，国际全寿命土木工程协会 (IALCCE) 委员，国际计算力学学会 (IACM) 委员，“国际土木工程统计与概率应用会议 (ICASP)”、“国际易损性及风险分析与管理会议 (ICVRAM)”等 10 余个大型国际学术会议的国际科学委员。曾获黑龙江省“青年科技奖”和“留学人员报国奖”。

序 三

Opens System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) is an object-oriented, open source software developed to simulate the response of the structures under earthquake loads. It includes a vast array of state-of-the-art integration algorithms and elements developed through research.

“Structural nonlinear analysis program - OpenSEES - theory and tutorial” is the first book of its kind written in Chinese. It provides the needed introduction to the theory and implementation of OpenSEES. In addition, it provided a detailed description of the ETO (ETAB to OpenSEES) software, a pre-and post-processing software dedicated for OpenSEES. Furthermore, a total of 25 useful and detailed examples have been provided. It is anticipated that the end users will find this book a valuable resource to OpenSEES.

地震工程模拟的开放体系 (OpenSEES) 是一个致力于模拟结构在地震作用下响应、面向对象、开源的软件。它包括了大量通过研究开发的最先进的集成算法和单元。

结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例是第一本采用中文编写的同类书籍。它介绍了必需的原理和在 OpenSEES 中的实现。此外，它详细地介绍了 OpenSEES 专用的前后处理程序 ETO (ETABS to OpenSEES)。最后，它还提供了 25 个详细有帮助的实例。希望读者在读完本书后会发现它是学习 OpenSEES 珍贵的资源。

Tony T. Y. Yang, Ph. D. , P. Eng.
Department of Civil Engineering
University of British Columbia

Prof. Yang is a registered professional engineer in British Columbia, Canada. He received his B. Sc. (2001) and M. Sc. (2002) from the University at Buffalo, New York, and his Ph. D. from the University of California, Berkeley in 2006. His research focus on improving the structural performance through advanced analytical simulation and experimental testing. He has developed the next-generation performance-based design guidelines (adopted by the Applied Technology Council, the ATC-58 research team) in the United States; developed advanced experimental testing technologies, such as hybrid simulation and nonlinear control of shake table, to evaluate structural response under extreme loading conditions; developed risk-based simulation models for countries in the North and South America and the Global Earthquake Model (GEM) for the counties in the South East Asia. Prof. Yang has been actively involved in using novel technologies, such as base isolation systems and dampers to improve structural performance. Prof. Yang co-developed ‘OpenSEES Navigator’, a

software program widely used by the engineers and researchers to design and analyze complex structural systems under extreme loading conditions.

杨教授是加拿大不列颠哥伦比亚省的注册专业工程师。他先后在纽约州立大学布法罗分校获得学士学位（2001年）、硕士学位（2002年），并在加利福尼亚州立大学伯克利分校获得博士学位（2006年）。他的研究致力于通过先进的仿真分析和试验验证提高结构的性能。他发展了美国下一代基于性能设计指引（研究成果被应用技术委员会 ATC-58 研究组采用）。他发展了先进的试验验证技术，例如混合模拟和非线性控制振动台，来评估极限荷载环境下结构的响应。他发展了北美和南美国家的基于风险的仿真模型、东南亚国家的全球地震模型。杨教授积极采用先进的技术，如基础隔震系统和阻尼器来提高结构的性能。杨教授还开发了用于设计和分析在极限荷载环境下的复杂结构体系的 OpenSEES Navigator，该程序在工程师和研究者群体中广泛使用。

序 四

很高兴得知陈学伟博士的这本新书即将问世，也非常荣幸作为最先拜读此书的读者之一向大家推荐这本书。众所周知，陈博士是国内最早基于 OpenSEES 做科研的学者之一，也是 OpenSEES 在国内最重要的宣传和倡导者之一。此书的出版将会进一步帮助更多用户快速入门、掌握 OpenSEES 的基本建模和非线性分析方法，以及了解许多学术界最新模型的基本理论。基于 OpenSEES 平台，能够帮助我们的研究者和国际最前沿的科研同步；同时如果应用恰当，OpenSEES 也可能为工程界的一些重要和困难的问题提供一种新的解决途径。

对于 OpenSEES，我和陈博士的观点非常一致，都是极力倡导，并向我们的读者推荐的。首先，OpenSEES 代表着一种新的理念，就是学术成果真正意义上的公开、集成和共享。正如我们所知，即使是非常成熟的理论，从学术论文到实际算法和程序实现，往往还需要大量的工作，而这些工作基本上是重复和没有创新性的。如果论文的作者愿意把他的算法程序公开和共享，就会极大地节省后来者的工作，同时也有助于此成果的快速传播和进一步集成创新。这就是 OpenSEES 最初开发者的理念。

其次，OpenSEES 最强大之处就是其多年来一直持续集成最新科研成果，包括美国、中国、日本、加拿大、英国等等国家的成果。基于这个平台，我们不同开发者不需要互相认识就可以互相理解和深层次交流。OpenSEES 基于 C++ 和面向对象的编程方法使此集成更易于实现。

并且，OpenSEES 有突出的强非线性功能，有丰富的非线性材料和单元库，以及针对非线性问题的求解算法等。许多学术界最新的想法往往是首先在 OpenSEES 中得以验证的，比如基于性能的评估、混合试验、风险评估等。

另外，OpenSEES 也是一本很好的教科书，有丰富的资源可以查阅。这里汇集了众多学术界第一流学者的作品，比如 MIT 的 Bathe 教授的壳单元、UC Berkeley Taylor 教授的非线性材料、UCSD Elgamal 教授的多屈服面土的模型、休斯敦大学 Mo 教授的剪力墙模型、基于力插值的框架单元、倒塌极限理论、敏感性和可靠度分析、混合试验方法，等等。当你的科研需要时，可以查阅这本教科书，通过阅读源代码学会相关内容，从而快速到达学术界前沿，更易于学术创新。

最后，引用 OpenSEES 的开发者 Frank Mckenna 的一句话：Use OpenSEES, you will love it.

而正如学习基本力学或者有限元课程一样，OpenSEES 的入门也需要一定的学习时间和过程。本书正是在这个关键和重要的环节上帮助用户克服入门学习的困难，快速理解和

掌握 OpenSEES，其中很多理论附参考文献。相信陈博士的这本书对于许多正在从事艰难和复杂的科研工作的朋友们来说，有重要的参考价值。

古泉

2014-9-8 厦门大学

古泉 (1974—)，男，现为厦门大学建筑与土木工程学院土木工程系副教授。古泉副教授主要从事非线性有限元、结构敏感性和可靠度、岩土本构模型、地震工程、土与结构相互作用等研究方向。在美国加州大学圣迭戈分校 (UCSD) 获得博士学位，在加州大学圣迭戈分校和美国路易斯安那州立大学进行过博士后研究，并在美国土木咨询公司 AMEC Geomatrix Consultants 公司从事过土木工程设计和咨询工作。古泉副教授自从 2001 年赴美攻读博士期间至今一直参与地震工程领域广泛使用的大型有限元程序 OpenSEES 的源程序开发，对 OpenSEES、PEAP 等有限元软件的整体构架和开发具有较深的认识，曾在美国太平洋地震研究中心 (PEER) 做过多次 OpenSEES 培训报告，在非线性结构分析、结构敏感性和可靠度、土的本构等方面有较深入的研究。

前 言

2011年我完成了我的博士学位论文关于剪力墙构件的性能指标的研究，在这个过程中我编制了一个小型的弹塑性分析平台 MESAP，主要就是参考 OpenSEES 进行编制。在博士学位论文的大部分章节中，还详细地介绍了很多与 OpenSEES 相关的材料模型、单元模型、试验实例及单元开发原理等。这些与本书 OpenSEES 教程是相通的。毕业之后，我到一家国际性的结构顾问公司工作，主要从事高层建筑结构的设计与分析等。工作之后，我尝试着将我以前做 OpenSEES 分析时用的一个小工具 ETO 在 DINOCHEN.COM 进行发布。ETO 的全称是 ETABS TO OpenSEES，主要功能将 ETABS 转化为 OpenSEES 的程序，由于 ETABS 的前处理非常方便，因此可以借此作为 OpenSEES 的前处理工具。发布以后，发现受到了研究 OpenSEES 的用户欢迎。通过一些使用者的意见回馈，不断地更新 ETO。后来为了使大家更好地了解 ETO 的操作及 OpenSEES 的命令流，我又补充了一个 OpenSEES 与 ETO 的实例教程，这就是这本书的主体部分。

让我简单介绍一下 OpenSEES 这个程序，OpenSEES 是一个开源的弹塑性分析程序，它有很多未商业化仍在研究阶段的算法、单元及材料本构。OpenSEES 的输入方式主要是采用 TCL 形式的命令流，对于入门级的研究 OpenSEES 的用户会显得非常难以学习。因此我建议采用 ETABS 进行结构模型的建模，通过 ETO 产生主要的命令流 TCL 文件，然后再通过局部改动 TCL 命令流来完成整个 OpenSEES 的前处理。这样用户可以花大量的时间去研究参数，而不需要在几何模型上花时间。

本书主要分为四个部分：

(1) 第一部分：介绍结构弹塑性分析的主要应用，即基于性能的抗震分析与设计，还介绍了弹塑性理论、单元及平台程序的发展过程。

(2) 第二部分：主要介绍 OpenSEES 的基本原理及一些宏观单元的理论，便于读者理解 OpenSEES 里面常用的梁柱宏观单元模型。

(3) 第三部分：主要介绍 ETO 的程序及采用 ETO 进行结构模型建模的方法，在这个章节中还会体现出 OpenSEES 的命令流的格式、功能及使用细节。ETO 下载地址：

http://www.dinochen.com/opensees_book/index.htm

(4) 第四部分：本书附带光盘，其中有书中所有实例的 ETABS 模型、SAP2000 模型、主要表格及 OpenSEES 命令流。除了光盘，用户还可以在网站上下载相关的资料，网址是：

http://www.dinochen.com/opensees_book/index.htm

本书主要面向基于 OpenSEES 的操作用户，指导进行一些弹塑性分析，用户通过举一反三，可以自己建造更复杂的模型。实例的后面还增加了一些二次开发的内容，通过举例，用户可以参考开发出基于 OpenSEES 的一些结构分析程序。本书通过 OpenSEES 还会介绍一些常用于弹塑性分析的专业名词，这些专业名词与概念在其他弹塑性分析程序如

PERFORM-3D 等也同样适用。基于性能的抗震设计是现在抗震设计发展的一个潮流，其中掌握结构弹塑性分析方法是关键。希望用户通过本书能掌握结构弹塑性分析的基本概念。

这是一本还没有写完的书，希望读者通过本书与我联系，如果出版下一版会收录更多的实例，面向 OpenSEES 更新的功能。感谢 DINOCHEN.COM 的支持者的支持，感谢 WSP 我的上司黄汉华先生的支持，让我得以出版此书，感谢我的导师韩小雷老师、季静老师在我的博士论文期间对我的指导。感谢与我一同为出书努力的林哲师弟。最后感谢妻子颜宇靖对我的默默支持，她对我的照顾是我写作的动力，还有女儿 Emma，她是我创作的灵感！

最后感谢为本书写序的韩小雷教授、吕大刚教授、Prof. Tony Yang 与古泉教授，他们的写序也是对我写这本书的努力的肯定！

由于笔者的学识有限，本书应存在不少的错漏与不足之处。如有出错之处，请读者见谅，如有需要请与我联系，我的邮箱是 dinochen1983@qq.com。

好啦，开始读吧，然后，开始练习实例。

本书学习资料网页：http://www.dinochen.com/opensees_book/index.htm

目 录

序一
序二
序三
序四
前言

第 1 章 结构弹塑性分析绪论	1
1.1 基于性能的抗震设计	1
1.2 结构弹塑性分析方法	3
1.2.1 塑性铰梁柱单元的研究	3
1.2.2 纤维梁柱单元的研究	5
1.2.3 剪力墙非线性单元的研究	7
1.2.4 结构分析平台的研究	10
参考文献	11
第 2 章 OpenSEES 原理介绍	15
2.1 OpenSEES 研究背景	15
2.2 OpenSEES 平台架构	16
2.3 OpenSEES 宏观单元及算例	19
2.3.1 梁柱宏观单元理论	19
2.3.2 框架柱构件算例分析	26
2.3.3 框架结构算例分析	31
参考文献	35
第 3 章 OpenSEES 的前后处理	37
3.1 OpenSEES 的建模方法	37
3.2 ETO 程序的介绍	38
第 4 章 OpenSEES 的实例教程	45
4.1 实例 1 桁架桥结构静力分析	45
4.2 实例 2 多层框架结构静力分析	58
4.3 实例 3 简支梁弹塑性分析	72
4.4 实例 4 框架结构推覆分析	86

4.5	实例 5	框架结构模态分析	101
4.6	实例 6	框架结构弹性时程分析	112
4.7	实例 7	框架结构弹塑性时程分析	121
4.8	实例 8	钢结构低周往复分析	133
4.9	实例 9	钢结构网壳的屈曲分析	143
4.10	实例 10	单压连接单元的应用	150
4.11	实例 11	缝连接单元的应用	157
4.12	实例 12	杆件铰接的处理方法	164
4.13	实例 13	弹性壳单元的应用分析	171
4.14	实例 14	网架弹塑性分析	177
4.15	实例 15	预应力梁弹塑性分析	186
4.16	实例 16	桥梁结构多点激励下弹性时程分析	194
4.17	实例 17	剪力墙低周往复分析	203
4.18	实例 18	框架剪力墙结构推覆分析	212
4.19	实例 19	带粘滞阻尼器的框架动力分析	219
4.20	实例 20	带隔震的框架动力分析	226
4.21	实例 21	时程曲线转化为反应谱方法	233
4.22	实例 22	截面 PM 曲线分析方法	238
4.23	实例 23	实体单元的建模及应用	242
4.24	实例 24	三维钢结构节点应力分析	247
4.25	实例 25	桥梁结构的影响线分析方法	255
附录 参考资料			263

第 1 章 结构弹塑性分析绪论

1.1 基于性能的抗震设计

Sozen^[1] (1981 年) 首先提出了基于结构位移控制的抗震设计思想, 他认为结构的层间位移是直接影响结构和非结构构件损坏程度的主要因素, 设计人员在进行抗震设计时应采用位移参数来选择经济有效的抗震结构体系。他所提出的设计思想并没有提供足够的信息来指导设计人员直接把位移的计算与结构反应需求联系起来, 因而只能称其为基于位移的概念设计。随后 Sozen^[2] (1985 年) 利用数值分析和振动台试验结果来提出的位移限值, 但仍没有建立位移响应与结构配筋构造之间的关系。

Moehle^[3-4] (1989 年) 对剪力墙及框架结构进行分析, 利用位移值对结构的抗震性能进行评估, 提出了基于位移的抗震设计思想 (Performance-based seismic design, 简称 PBSDB), 建议改进基于承载力的设计方法, 这一全新理念最早应用于桥梁抗震设计中。基于位移的抗震设计需使结构的塑性变形能力满足预定的地震作用下的变形, 即控制结构在大震作用下的层间位移角。Moehle 的方法的核心思想是从总体上控制结构的层间位移角。这一设计思想影响了美国、日本和欧洲土木工程界。美国、日本和欧洲于是提出了 PBSDB 理念并展开了广泛的研究工作。

为了强化结构抗震的安全目标, 提高结构抗震性能, 满足不同业主对安全的需求, 美国联邦紧急救援署 (简称 FEMA) 和国家自然科学基金会 (简称 NSF) 联合资助开展了一项为期 6 年的行动计划, 对未来的抗震设计规范进行了多方面的基础性研究。这些研究包括: 对建筑物确定一组合理的性能水准和功能阶段; 确定地震危险性水平和相应的设计水准; 根据建筑物的重要性和用途确定性能目标; 建立基于变形的可靠性设计方法及结构分析方法; 建立建筑结构的抗震风险水平和抗震可靠性评估方法。

1995 年, 美国加州结构工程师协会完成了加州紧急事务管理厅委托的 Vision2000^[5] 的制订工作, 提出了基于性能的抗震工程 (Performance-Based Seismic Engineering, 简称 PBSE) 和基于性能的抗震设计 (Performance-Based Seismic Design, PBSDB) 的理论。这一理论追求的是“经济效益最佳, 成本最小”, 本质是要控制在未来可能发生的地震作用下的结构抗震性能。同年, 美国应用技术理事会出版了 ATC-34 报告^[6], 在该报告中对美国现行抗震设计方法进行了全面的回顾。1996 年, 出版了 ATC-40 报告^[7], 在 ATC-40 报告中正式将基于性能的抗震设计思想纳入其中, 提出了既有建筑的安全评定、加固中使用多重性能目标的建议。1996 年, 美国 FEMA 出版了 FEMA273^[8] 和 FEMA274^[9] 报告, 在报告中提出了 4 种用于基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计的方法: 线性静力分析方法、线性动力分析方法、非线性静力分析方法和非线性动力分析方法。其中包括弹塑性分析模型的建议及静力弹塑性分析 (Push-over) 的评定方法。1998~2000 年, FEMA 发布了若干关于基于性能的抗震设计方法规范文件, 其中包括影响较大的 FEMA356^[10] 规范。

FEMA356 修订并综合了 FEMA273 和 FEMA274 报告,更新了能力谱方法。2003 年美国国际规范委员会 (International Code Council, 简称 ICC) 发布了《建筑物及设施的性能规范》,其内容广泛,涉及房屋建筑、结构、非结构设施等的正常使用性能、遭遇各种灾害时 (火灾、风灾、地震等) 的性能、施工过程及长期使用性能,该规范对基于性能设计方法的重要准则作了明确规定。2006 年,ASCE 在 FEMA 356 的基础上正式颁布了规范 ASCE-41^[11]。ATC-40、FEMA273、FEMA 356 和 ASCE-41 都阐述了基于性能设计方法的基本框架、步骤、结构构件的性能水平、地震动的风险水平、抗震设防目标、结构及构件变形限值、抗震设防措施等内容,为结构性能设计提供了规范依据。除了考虑结构构件性能外,还考虑了非结构构件的影响。

美国加州大学伯克利分校 (University of California at Berkeley, 简称 UCB) 的太平洋地震工程研究中心 (简称 PEER) 的推动下,美国抗震设计理论与实践最先进的西岸城市先后颁布了基于性能的高层建筑抗震设计规范。2005 年,洛杉矶颁布了规范 An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the Los Angeles region (2005 Edition)^[12]。该规范以洛杉矶建筑规范 2002-LABC^[13] 为依据,补充了在大震作用下采用非线性动力时程分析方法代替 2002-LABC 的分析方法。2007 年,旧金山市颁布了规范 Recommended administrative bulletin on the seismic design & review of tall buildings using non-prescriptive procedures^[14]。该规范以 2005-LABC 为基础,结合 PEER 的科研成果、当地高层建筑抗震设计经验和专家的抗震研究经验,对专家抗震审查、结构抗震分析与设计方法等关键问题进行了深入的分析和论证,提出了更为合理的抗震设计方法及审查要求。

1995 年,日本在遭受了阪神 (Kobe) 地震灾害后,启动了“基于性态的建筑结构设计新框架”^[15-17] 的研究,其目的在于建立基于性能的结构设计方法。1996 年,日本政府宣布建筑法标准将按基于性能的要求来修订,以达到国际一体化要求。1998 年,由建筑研究所 (Building Research Institute, 简称 BRI) 提出了一系列性能标准,对日本建筑标准法进行了大幅度修订,采用了高阻力弹性需求谱,并正式纳入了能力谱方法。日本新的建筑标准法于 2000 年实施,日本建设省建筑研究院建立了一个抗震结构要求的框架,将性能水准取为 3 个:安全极限状态、破坏控制状态和使用极限状态。框架中研究了 3 种结构计算分析方法:弹塑性解析法及破坏极限状态、弹性解析法及实用极限状态、等价线性化反应谱法及保证结构使用功能的变形极限状态。

2003 年,欧洲混凝土协会 (Comite Euro-Internacional du Beton, 简称 CEB) 出版了《钢筋混凝土建筑结构基于位移的抗震设计》报告。欧洲规范 EC8 (2003)^[18] 也将能力谱方法纳入规范。澳大利亚则在基于性能设计的整体框架和建筑防火性能设计等方面做了许多研究,提出了相应的建筑规范 BCA1996。

中国的《建筑结构抗震设计规范》GBJ 11—89^[19] 提出的“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准设防目标和两阶段设计方法,实际上已经包含了初级的基于性能的抗震设计思路。《建筑结构抗震设计规范》GB 50011—2001^[20] 仍保留“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准设防和两阶段设计方法。在概念设计、性能控制要求上又有进一步的发展及具体化。在基于性能的抗震设计思路提出后,我国也广泛开展了基于性能的抗震设计研究。中国国家自然科学基金“九五”项目中开始立项,将“基于抗震性态的设防标

准”作为国家自然科学基金重大项目“大型复杂结构的关键科学问题及设计理论”中的一个子课题进行研究。现行的《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010（以下简称《抗震规范》）^[21]中，已增加了建筑抗震性能设计的原则规定，提出当建筑结构采用抗震性能设计时，应根据其抗震设防类别、设防烈度、场地条件、结构类型和不规则性，附属设施功能要求、投资大小、震后损失和修复难易程度等，对选定的抗震性能目标提出技术和经济可行性综合分析和论证，并规定了建筑结构的抗震性能化设计的内容和要求。

基于性能的抗震设计方法的研究是一个重要的研究内容，目前已在我国许多超限高层建筑项目中得到应用，并取得了一定的成效。我国的超限高层建筑工程设计比较适合采用基于性能的抗震设计方法。这些工程在房屋高度、规则性等方面都不同程度地超过现行标准规范的适用范围，如何进行抗震设计缺少明确具体的目标、依据和手段。按照建设部第111号令《超限高层建筑工程抗震设防管理规定》、《全国超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会抗震设防专项审查办法》^[22]、《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[23]等的要求，设计者需要根据具体工程实际的超限情况，进行仔细的分析、专门的研究和论证，必要时还要进行模型试验，从而确实采取比标准规范的规定更加有效的具体的抗震措施，业主也需要提供相应的资助，设计者的论证还需要经过抗震设防专项审查，以期保证结构的抗震安全性能^[24]。这个设计程序在某种意义上类似于基于性能的抗震设计的基本步骤。近年来，高层建筑工程抗震设防专项审查实践表明，不少工程的设计和专项审查已经涉及基于性能抗震设计的理念和方法。部分工程的设计者主动提出采用基于性能的设计理念和要求，部分工程在抗震审查中由专家组的专家提出某些基于性能的设计要求。

1.2 结构弹塑性分析方法

1.2.1 塑性铰梁柱单元的研究

框架结构的弹塑性分析模型的研究工作主要集中在单元分析模型上。目前用于模拟构件滞回性能的单元分析模型有很多，大致可以分为集中塑性模型和分布塑性模型两类。

Clough^[25]（1965年）提出了集中塑性铰模型的并联弹簧单元，基于塑性铰理论，提出一种单元弹塑性切线刚度矩阵的计算模型，即双分量计算模型。该模型考虑了二折线弯矩-转角（ $M-\phi$ ）关系。单元由两个并联的链杆组成，其中一链杆为理想弹塑性杆，另一分链杆为无限弹性杆，两个链杆共同工作，用理想弹塑性来表示屈服，而用完全弹性表示应力强化。构件的刚度阵由链杆的轴向刚度阵叠加得到。由于采用二折线恢复力模型，故在钢筋混凝土结构非线性分析中受到很大限制，但其具有明确的力学概念，能反映不同变形机理对构件滞回性能的贡献，另外还能考虑两个杆端塑性区域的耦合作用关系。多分量分析模型建立在对影响构件滞回性能的各种力学机理的正确辨识基础上，用单独的子单元分别描述各种变形机理。研究者可根据研究问题需要，采用若干个不同子单元以构成复杂程度不同的宏观单元分析模型。

H. Aoyamalvs^[26]（1967年）的三杆模型假设杆件由三根不同性质的分杆组成，考虑了杆间弹性性质、钢筋屈服和混凝土开裂非线性的影响，对应于三线型恢复力模型。