

本书出版受国家自然科学基金资助 (90815027)

基于性能的 抗震设计 ——现状与课题

■ [日] 日本地震工学会
基于性能的抗震设计研究委员会 编
王雪婷 译
齐玉军 校
贡金鑫 审

中国建筑工业出版社

本书出版受国家自然科学基金资助 (90815027)

基于性能的抗震设计

——现状与课题

[日] 日本地震工学会
基于性能的抗震设计研究委员会 编
王雪婷 译 齐玉军 校
贡金鑫 审

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-8119 号

图书在版编目（CIP）数据

基于性能的抗震设计——现状与课题/[日]日本地震
工学会基于性能的抗震设计研究委员会编；王雪婷译。

—北京：中国建筑工业出版社，2011.1

ISBN 978-7-112-12682-8

I. ①基… II. ①日… ②王… III. ①建筑结构-抗震设计
IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 229353 号

SEINO KITEI-GATA TAISHIN SEKKEI GENJO TO KADAI

by Nihon Jishin Kogakukai Seino Kitei-gata Taishin Sekkeiho Ni Kansuru Kenkyu Iinkai
Copyright © 2006 Nihon Jishin Kogakukai Seino Kitei-gata Taishin Sekkeiho Ni Kansuru Kenkyu
Iinkai

All rights reserved.

Originally published in Japan by KAJIMA INSTITUTE PUBLISHING CO., Tokyo

Chinese (in simplified character only) translation rights arranged with KAJIMA INSTITUTE
PUBLISHING CO., Japan through THE SAKAI AGENCY and Bardou-Chinese Media Agency.
Chinese Translation Copyright © 2011 Chian Architecture & Building Press

本书经（株）酒井著作权事务所和博达著作权代理有限公司代理，日本株式会社鹿岛
出版会正式授权我社翻译、出版、发行本书中文版

基于性能的抗震设计

——现状与课题

[日]日本地震工学会

基于性能的抗震设计研究委员会 编

王雪婷 译 齐玉军 校

贡金鑫 审

*

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

北京永峥排版公司制版

北京世知印务有限公司印刷

*

开本：880×1230 毫米 1/32 印张：8% 字数：239 千字

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月第一次印刷

定价：30.00 元

ISBN 978-7-112-12682-8

(19981)

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

这是一本介绍日本关于基于性能抗震设计的著作,在一定程度上代表着国际抗震设计方法发展的水平,内容涉及建筑、桥梁、港口、水工、土工等土木工程。本书的特点是简单、易懂,不是泛泛地谈一些性能设计的概念,而是论述日本近年来在性能设计方面所做的一些实实在在的工作。例如,在确定与业主/用户的个人利益密切相关的房屋建筑的性能目标和安全水平方面,技术人员对日本市民做了广泛的问卷调查,明确性能设计中设计人员/专家、业主/用户、行政(法律)各方分别应承担的责任,做到真正以业主/用户对建筑物的性能要求为决策目标;特别是对桥梁抗震设计,在确定桥梁的性能目标时,技术人员通过街巷问卷、信件和电子邮件等形式,对日本不同年龄段、不同职业的市民进行了调查,内容包括市民对桥梁抗震的认识,例如:对破坏修复时间和抗震性能的期望等;也包括了土木工程专业工作者对桥梁抗震的认识,例如经历和未经历过大地震的专业工作者认为需要的修复时间,建造经历强烈地震也不破坏桥梁的可行性等。这些不仅涉及结构抗震技术,还涉及社会、法律等多个方面的内容,真正体现了“以人为本”的设计理念。我国在建筑基于性能的抗震研究方面也做了很多工作,新颁布的《建筑结构抗震规范》GB 50011—2010增加了性能抗震设计的内容,这是我国抗震设计方法的一大进步。将来还需要在不断吸收国外先进成果的同时,不断创新,不断发展。

总的来讲,这是一本值得土木工程工作者阅读的书。希望本书的出版能对我国土木工程抗震技术和设计方法的发展有所帮助。



2011年3月

前 言

说起翻译这本书，还是一件很有趣的事情。2007年12月，西安交通大学土木工程专业的一位叫王雪婷的同学给我发了一份电子邮件，她想报考我的硕士研究生，怯怯地问我“对外语要求高不高”，回答是“当然的”；她又问我“学日语的要不要”，回答是“太好了，成绩合格应该要”。在她看来，目前我国的主流外语是英语，稀缺的日语成为另类，殊不知这正是我所需。众所周知，日本是多地震国家，这也使日本成为国际上抗震研究最先进的国家之一。我及我的学生都是学英语的，对日文一窍不通，很多日本抗震研究的资料无法阅读。2008年一入学我就要求她到图书馆借一本日文抗震研究或设计方面的书慢慢阅读，逐渐熟悉专业日语，她就借来了翻译的这本书的原版日文书。我虽然不懂日文，但从书名、部分汉字及书中图片判断这是一本不错的书。在我的鼓励下，她开始了这本书的翻译。完成后，请清华大学叶列平教授的博士研究生齐玉军进行了校核，我则从专业方面进行把关，前后共订正了4遍，历时一年。

提起基于性能的设计，对广大读者来讲应该不是一个新鲜的名词或概念。欧洲早在20世纪50年代就提出了这一思想，美国则于20世纪80年代开始在结构抗震设计中研究这一思想的实施，日本在2000年前后开始在设计规范中应用。我国的研究始于20世纪90年代，2004年编写了中国工程建设标准化协会标准《建筑工程抗震性能化设计通则（试用）》CECS 160:2006，2010年颁布的国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010包括了性能设计的内容。所谓基于性能的设计，是以业主和用户对建筑物的性能要求为目标的，强调是否实现了对建筑物及其组成部分的性能目标，而不注重采用什么方法进行设计和建造。基于性能的设计方法为

设计人员提供更大的创造空间，可以发挥设计人员的主动性，促进新材料和新技术的应用和发展。欧洲国家在基于性能的设计方面强调建筑物的功能、防火和使用要求，而在地震频发的美国和日本，基于性能的设计侧重于结构抗震方面。这是因为地震灾害统计资料表明，在目前的技术水平下，保证人的生命安全已不是主要问题，而由于地震造成的结构功能丧失和巨额的修复费用成为当今的主要问题。所以，从2000年起，美国和日本的结构设计规范逐步转变为基于性能的设计规范。关于基于性能的设计需要说明两点：（1）基于性能的设计具有多个性能目标，这些性能目标是与不同的外界作用相对应的，即条件与性能目标构成性能矩阵，与以往简单的性能目标是不同的；另一方面，在基于性能设计的实施过程中，业主是设计目标的决策主体，而设计人员根据业主的意愿实现性能目标，即基于性能的设计规范是开放性的。（2）基于性能的设计理念是与一个国家科技、经济和社会发展水平相适应的。欧洲国家、美国和日本是世界上技术先进、经济发达的地区和国家，社会要求成为采用性能设计方法的推动力。我国至今仍是一个发展中国家，进行中的城市化是房地产业蓬勃发展的推动力，在巨大的住房需求和建筑市场管理尚不够完善的情况下，通过技术规范强化建筑物质量仍然是非常必要的。所以，在我国实现性能设计还会有一段时间，但毫无疑问也是必由之路。在这种背景下，学习国外的先进技术和理念非常重要，这也是我们翻译本书的主要目的。

本书共分四章，主要论述了日本基于性能的抗震设计方法及设计标准的演变。第1章介绍了基于性能的抗震设计的概念、与传统设计方法的区别和联系、国际上基于性能设计方法的发展等；第2章分别针对建筑结构、桥梁、地基与基础、港口设施和水坝介绍了日本基于性能抗震设计方法的发展状况；第3章介绍了基于性能的抗震设计方法和性能目标；第4章提出了基于性能的抗震设计未来需研究的问题。

本书原版由日本地震工学会编写，具有较强的权威性。但由于译者和校对者知识水平和语言表达能力所限，可能会有对原文

理解不准确或词不达意之处，敬请广大读者批评和指正。另外，感谢王亚勇教授百忙之余为本书写序。2008 年与王教授在四川地震灾区一起工作的情形仍历历在目，王教授的敬业精神成为我学习的榜样。王教授是《建筑抗震设计规范》的主编，对基于性能的抗震设计有着更深层次的理解，故请王教授作序。

贡金鑫

2011 年 3 月

原版书前言

日本兵库县南部地震之后，1999 年的建筑标准法和 2002 年的道路桥梁示方书等开始采用基于性能的设计标准。通过评估结构塑性区的反应、位移和变形，得到真实的或实用的反应校核，从而使技术人员从规定范围内确定结构截面的狭隘设计中解放出来，无论是何种结构，都可按照性能目标进行设计。

基于性能的抗震设计理念首先在建筑结构中得到应用，之后扩展到桥梁等土木工程结构领域。对于结构反应难以确定或地基液化后地下结构浮起的情况，也可采用基于性能的抗震设计方法。

以往，如果建筑结构或建筑设施的责任人不同，那么在进行设计时，采用的地震力就不同，采用的抗震计算方法或截面确定方法也不相同，想要比较结构抗震性能几乎是不可能的。但是，每个结构都有其各自的性能目标，通过性能目标可在较大范围内对结构抗震性能进行评估。从这一角度看，基于性能的设计意义重大。例如，当考虑城市的抗震性能时，以往对“建筑物……”、“桥梁……”等分别进行研究。与此相对应，在基于性能的设计中，为能够在震后 3 日内恢复城市的功能，应研究如何对这些结构进行抗震设计。如果百姓希望了解城市的总体抗震策略，以前设计人员只能用截面设计的力学计算来说明，而在基于性能的抗震设计中，性能目标已经跨越了单纯的力学计算这一障碍，可以向百姓说明抗震设计的原则和目标。

除此之外，基于性能的抗震设计还有其他优点。例如，可规定符合结构特点的抗震性能目标，进行合理的抗震设计。确定的设计地震动尽量符合建造场地的特点，选择合理的分析方法。基于性能的抗震设计允许采用新材料、新的施工方法和结构体系，提高了截面确定的灵活性，可以根据情况进行简化，确定合适的

截面形式和尺寸，而且采用概率方法确定外力、承载力并进行分析，对抗震性能进行定量评估。

但是，在基于性能的抗震设计中，为了确定合适的目标抗震水准以及保证该水准能够得到顺利执行，从结构体系和构件两方面看，需要对更高水准抗震性能的相关知识进行梳理，包括外力选取、计算分析、截面确定及抗震性能校核等。

兵库县南部地震之后，日本开始采用基于性能的抗震设计方法，但是目标性能的确定方法和具体的设计方法，会因建筑结构或建筑设施的不同有相当大的差异。对于这一问题，日本地震工学会在建筑、土木、地基、机械和地震学等各个领域展开了研究。为实施和普及基于性能的抗震设计方法，平成 15 ~ 17 年（公元 2003 ~ 2005 年）设立了“基于性能的抗震设计方法研究委员会”。

在调查各技术标准基于性能抗震设计方法的现状时，还要研究如何确定性能目标，为达到性能目标如何确定极限状态。另外，从城镇和区域地震灾害对策来看，在确定各种结构或设施所要求的性能时，还要研究目前结构、设施的性能目标是否能与此相符。

本书是以“基于性能的抗震设计研究委员会”报告的形式写成的。在本书写作期间，基于性能抗震设计研究委员会的委员们做出了很大努力，而且静冈县岩田孝仁先生也给予了很大帮助。在最终汇总阶段，得到了久保哲夫副委员长的大力支持和帮助。感谢各位委员的通力合作。

希望本书对基于性能抗震设计方法的发展有所贡献。

平成 18 年（公元 2006 年）5 月。

日本地震工学会
基于性能抗震设计方法研究委员会
委员长 川岛一彦

目 录

第 1 章 基于性能抗震设计的含义	1
1.1 性能设计的意义和定义	1
1.2 性能设计的优点	2
1.3 性能设计与传统设计方法间的关系	2
1.4 性能设计发展的国际概况	3
1.5 基于性能抗震设计的含义	5
1.6 基于性能抗震设计的步骤	7
本章参考文献	10
第 2 章 基于性能抗震设计方法的发展现状	11
2.1 建筑结构	11
2.1.1 性能目标	11
2.1.2 钢筋混凝土建筑的性能和极限状态	25
2.1.3 超高层建筑	43
2.1.4 隔震建筑	50
2.2 桥梁	58
2.2.1 桥梁抗震设计	58
2.2.2 道路桥梁抗震设计的性能规定	60
2.2.3 国外标准中桥梁的抗震性能	76
2.2.4 钢桥	78
2.2.5 大跨度桥梁基于性能的抗震加固	84
2.3 基础和地基	94
2.3.1 直接基础	94
2.3.2 桩基础	98
2.3.3 土体结构	99
2.3.4 地下结构	102
2.4 港口设施	104

2.4.1	基本抗震性能	104
2.4.2	地震灾害的分类	105
2.4.3	抗震设计现状	109
2.4.4	考虑抗震性能的设计	110
2.4.5	采用 FLIP 进行性能抗震设计	111
2.5	水坝	113
2.5.1	水坝类型	113
2.5.2	抗震设计历史	113
2.5.3	水坝的地震灾害	115
2.5.4	假定的水坝极限状态	115
2.5.5	基于性能抗震设计的重要性	116
2.5.6	水坝的性能目标	117
2.5.7	进行高精度性能校核的主要条件	117
2.5.8	规定方法的设计与基于性能设计间的关系	119
2.5.9	城市化引起的对已建水坝防灾性能的思考	119
2.5.10	从历史观点看进行性能校核的重要性	120
	本章参考文献	120
第3章	基于性能抗震设计方法	126
3.1	建筑钢结构和桁架性能评估的结构足尺试验	126
3.1.1	进行结构足尺试验的目的	126
3.1.2	足尺钢框架试验	127
3.1.3	梁的剪切破坏和结构性能	128
3.1.4	结构体和非结构体	130
3.1.5	数值分析的精度	131
3.1.6	倒塌模拟	131
3.2	桥梁	132
3.2.1	钢筋混凝土桥墩	132
3.2.2	钢桥	145
3.3	地基与液化	156
3.3.1	地基设计采用的技术	156
3.3.2	液化引起的结构或地基变形预测	156

3.3.3 沉降预测的经验方法	157
3.3.4 采用动力分析或静力分析求整体沉降量的实例	159
3.3.5 河堤液化变形或沉降的静力分析	159
3.3.6 液化地基中桩基础的性能	163
本章参考文献	166
第4章 基于性能的抗震设计	170
4.1 从地区地震防灾看要求的设施性能目标	170
4.1.1 公共基础设施的社会属性	170
4.1.2 遭受地震灾害时的救灾活动	170
4.1.3 从区域地震防灾的角度看结构的抗震性能要求	174
4.1.4 对抗震投资效果的评估	176
4.2 性能目标	177
4.2.1 建筑结构	177
4.2.2 桥梁	192
4.3 设计地震力	208
4.3.1 建筑结构的设计地震力	208
4.3.2 土木工程结构的设计地震力	215
4.4 抗震分析方法的研究课题	226
4.4.1 建筑结构的课题	226
4.4.2 采用动力分析的桥梁抗震设计	230
4.5 基于性能的抗震设计中最大变形预测	235
4.5.1 变形预测的重要性	235
4.5.2 经典的最大变形预测方法	235
4.5.3 结构特性系数	237
4.5.4 时程反应分析	238
4.5.5 专家审查的作用	239
4.6 美国基于性能的抗震设计	240
4.6.1 第一代性能设计	240
4.6.2 第二代性能设计	242
4.6.3 对抗震加固的性能设计	245
本章参考文献	248

第1章 基于性能抗震设计的含义

1.1 性能设计的意义和定义

结构设计的含义是指“如何建造具有要求功能的结构”。从这一意义上讲，就实现性能/功能而言，无论哪种结构设计都不是性能设计。那么什么样的设计方法才算是性能设计呢？这一点很重要。就抗震设计而言，引入“对于兵库县南部地震能够保证一定的安全性”或规定“对于假定的地震能够保证结构功能（例如，人身安全或交通功能）”这一目标就属于性能设计吗？

“性能设计”是指在明确性能目标的基础上，尽可能实现该性能目标的设计方法的总称。以前，我们已经明确提出了对结构要求的性能并建立了性能校核的内容和校核方法的体系，这里并不能说以往的性能要求或性能要求校核方法缺乏科学性。

有关性能设计的称法有多种，如“基于性能”、“性能评估”、“性能明示型标准”和“基于性能的标准”等。所谓的“基于性能”是指用法律规定的性能或是在法律中规定的性能。在制定设计方法时，法律只对目标性能进行了规定，而将验算方法留给设计者自己选择，但是这种设计方法并没有得到实际的应用。这是因为现在还没有达到仅通过法律规定的性能目标就可以实现抗震设计的水平。因此法律在规定了性能的同时，还规定了性能的验算方法（即抗震设计方法）。

因此，现行的设计标准在明确性能的同时，还规定了验证方法，这种标准称为“基于性能的标准”^[1]。本书不仅介绍了基于性能的标准，而且从设计方法及相关技术的角度，采用了“基于性能抗震设计方法”的描述形式。

1.2 性能设计的优点

规定性能的优点与规定方法的缺点相比是很明显的。规定方法通过“○○采用强度大于△△的□□，必须控制在 $\times \times \text{cm}$ 以下”规定了使用的材料和构件形状、尺寸，而在规定性能的方法中，要明确强度大于△△的□□必须配置在 $\times \times \text{cm}$ 以下的目的和由此可达到的性能，并规定了此目的和性能。

规定方法的设计也是为了达到某一性能目标，但只适用于某种结构的方法或其他方法有一定的缺陷，为了弥补这些缺陷，就会采用偏于安全的方法，故必须考虑方法之间的相互关系来确定所采用的方法。这种规定显然不能用于其他结构。另外有时只有单独的数值，就不知道为什么需要采用这种方法。

规定方法的设计因为规定了方法、材料、形状、尺寸等，比较具体、明确，具有容易理解、对设计人员的能力要求不高、容易检查是否符合标准的优点。相对而言，也有难以适应新型材料和结构、应实现的目标性能不够明确等缺点，而且这种方法由于缺乏替代的方法，容易成为技术进步的障碍，同时因为国与国之间采用的方法不同而难以交流，易于成为国与国之间的关税壁垒。

规定性能的方法的优点在于设计上自由、灵活，要实现的性能目标明确，能够促进技术进步，对标准的国际协调有重要意义，缺点是在审查符合性的判断方面对设计人员技术水平要求较高，需要很高的设计能力。

1.3 性能设计与传统设计方法间的关系

面向性能的技术标准体系可用图 1-1 所示的金字塔结构来说明，其中“目的”是指设计标准的社会目的，“功能要求”规定了实现目的的功能要求，“要求水准”规定了为实现功能要求所需的水准和验证方法的原则，两者都是强制性的，“验证方法”是指验证实现功能要求的方法。将满足功能要求的具体“解”称为合适的方法，验证方法或合适的方法并不是法律强制规定的，而是随着技术的进步不断改进。

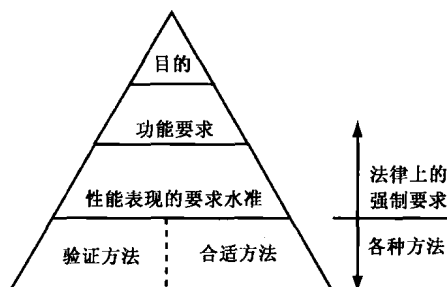


图 1-1 面向性能技术标准的金字塔结构

如上所述，在以往采用的多种标准中，规定的性能和规定的方法混在一起。对于基于性能的设计方法，在明确性能要求的同时，还要求明确图 1-1 所示的标准等级关系。从这一意义上讲，性能设计并不是以前未有过的全新设计标准，而是以往抗震设计方法的延伸和发展，只是进一步明确了校核项目和校核方法，并体系化。

采用基于性能的设计方法时需要考虑多方面的问题，例如虽然增加了设计自由度和灵活性，但可能会造成设计中现场技术人员应对能力不足，没有明确的评估方法，设计结果会因设计人员的不同而不同，故很难验证所规定性能的合理性。为此，必须有相应的验证方法。

1.4 性能设计发展的国际概况

基于性能设计的发展历程既与国际标准化组织（ISO）的规定相关，也与日本各时期所面对的国际形势紧密相关^[2]。《政府采购协定》以物品为采购对象，在被称为“东京回合”的关税与贸易总协定（GATT）的著名谈判中讨论之后，于 1981 年生效。之后，将以物品为采购对象修改为以服务分区为采购对象，在 1966 年世界贸易组织（WTO）新协定中开始生效。

《政府采购协定》的第 6 条第 1 款规定：采购单位拟定、采用或通用的技术标准，是为了说明货物或服务的特性，如质量、性能、安全、大小、符号、术语、包装、标志、标签或生产工艺与

方法，以及规定评估程序的有关要求，不得对国际贸易造成不必要的障碍。同时，第2款规定：“采购机构在制定技术标准时，在通常情况应（a）依照性能，而不是按设计或描述特征，或（b）根据现有国际标准，没有国际标准的按国家技术规定、公认的国家标准或建筑规定。”

也就是说，为进行国际协调，大量的技术标准要采用着重于性能的技术方法，这是标准未来发展的大趋势。

下面是世界各国性能设计发展的概况。为协调北欧各国建筑标准，以技术革新和经济一体化为目标的北欧建筑标准委员会（NKB）于1963年就开展了性能设计的研究。最终于1972年确定了行动流程，目的是保障北欧各国之间劳动力的流动以及扩大建筑体系及其相关产品的商业流通。在此过程中，为理解和修订各国建筑标准，将建筑标准规定分为5个水准，形成金字塔式的等级，称为北欧建筑标准委员会等级体系，如表1-1所示。早期标准的金字塔等级概念，对欧美标准的金字塔等级发展有很大影响。图1-1也是沿袭了这一流程。

北欧建筑标准委员会规定的水准体系 [NKB 水准体系]^[3] 表 1-1

水 准	定 义
水准 1：目的	从社会及其构成人员角度，对重要建筑物的所有描述
水准 2：性能要求	为明确特殊目的、意图，将水准 1 规定的所有目标按照功能项目和原则分类
水准 3：性能要求水准	为实现水准 2 的规定提出的每一性能的具体要求
水准 4：验证	性能要求符合性的验证方法
水准 5：具体解决方法	符合性能要求的具体设计方法

自1978年以来，为制定基于此方针的建筑模式标准，联合国欧洲经济委员会（ECE）对采用北欧建筑标准委员会等级体系进行了讨论，水准1~3为法律上的强制性规定，水准4和5是法律之外的内容。

英国曾制定了多种规定方法的建筑标准，但是从20世纪70年

代后期开始，这些标准会降低建筑业活力的批评逐渐出现，为此于 1984 年制订了新的建筑法，废止了方法规定，改为简洁的建筑标准，将传统的规定方法标准看做是认可的但没有强制性的标准。

新西兰自 1986 年开始研究以性能设计为目标的统一建筑标准，1990 年确立了方案（NZBC）^[4]，也采用图 1-2 所示的 5 阶金字塔等级和表 1-1 所示的北欧建筑标准委员会体系。

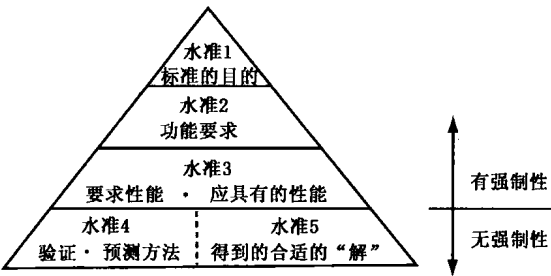


图 1-2 NZBC 的等级

美国是承认州、自治体独立制定的建筑标准的地方建筑控制体系的国家。目前，正在尝试统一各种建筑标准或制定性能设计标准，这将在后面介绍。关于抗震设计方法，加利福尼亚州结构技术协会（SEAOC）的 Vision 2000 提出的性能设计的性能矩阵是众所周知的（参照 4.6 节）^[5]。本书将以抗震水准的性能目标作为典型的性能设计方法进行详细介绍。但这只是制定明确抗震性能（即结构遭遇地震时的变化）的技术框架，不一定与上述的性能设计方向一致。也就是说只要明确抗震性能的目标，那么对抗震设计方法作出明确规定也没有关系，仍可看做是以基于性能的抗震设计为目标的。

1.5 基于性能抗震设计的含义

性能设计近年来之所以备受关注，其背景是大城市遭受地震袭击后所产生的巨大灾害，如 1989 年的美国洛马普列塔地震及 1995 年的美国北岭地震，1995 年的日本兵库县南部地震等。在以往的国际抗震设计方法中，发生大地震时保证人身安全是第一要