

• 土木工程学术前沿丛书 •

GANGJIN HUNNINGTU
QIAOLIANG KANGZHEN SHEJI HE PINGGU

钢筋混凝土 桥梁抗震设计和评估

[美] Mark Aschheim Jack P.Moehle Stephen A.Mahin 著
魏建 何庭国 等 译



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

· 土木工程学术前沿丛书 ·

钢筋混凝土桥梁抗震 设计和评估

[美] Mark Aschheim

[美] Jack P. Moehle 著

[美] Stephen A. Mahin

 魏建 何庭国 等 译

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

钢筋混凝土桥梁抗震设计和评估 / (美) 阿舒姆,
(美) 穆勒, (美) 马欣著; 魏建, 何庭国译. —成都:
西南交通大学出版社, 2009.9

(土木工程学术前沿丛书)

ISBN 978-7-5643-0449-2

I. 钢… II. ①阿…②穆…③马…④魏…⑤何… III. 钢
筋混凝土—抗震设计 IV. U448.342.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 172615 号

土木工程学术前沿丛书

钢筋混凝土桥梁抗震设计和评估

[美] Mark Aschheim

[美] Jack P. Moehle 著

[美] Stephen A. Mahin

魏建 何庭国 等 译

责任编辑	高平
特邀编辑	唐飞
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	11
字 数	201 千字
版 次	2009 年 9 月第 1 版
印 次	2009 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0449-2
定 价	32.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

摘要

对可用的抗震设计方法进行了回顾介绍,对设计和评估中的不确定性进行了讨论。制定了桥梁构件和系统建模的各方面事项,并对一系列简单桥梁的反应进行了分析研究。为了地震控制的需要,对若干设计方法和刚度假设的相对效用进行了评估。对柱体和板式墩弯曲和剪切强度的设置进行了详细检查,将柱体的非弹性剪切强度的可用形式与测试数据进行了比较。

通过反应分析研究发现,以位移为基础的设计方法对控制位移延性的要求是有效的,特别是对于短周期构筑物而言。对于短周期构筑物,传统的、以强度为基础的设计方法通常不那么有效。此外,如果预计存在非弹性反应,则一般最好采用以位移为基础的设计方法。这是因为用于指示反应的量代表了预期值,不像传统的、以强度为基础的设计方法是依赖于与弹性反应相关的量。

为加利福尼亚州桥梁施工中常用柱体建模的需要,对柱体建模的关系进行了描述。经证明,尤其是当采用增大的材料强度来计算公称弯矩强度时可以准确估算出塑性弯曲强度。对有效刚度进行了定义,此外,还描述了有效刚度随不同轴压比和纵筋量的变化。对于轴荷载等于

致谢辞

本工作是在美国加州运输部的支持下进行的。对于李洪生（音译）娴熟的合同管理，我们深表感谢。

加利福尼亚大学伯克莱分校的 Thewalt、Filippou 和 Powell 教授在研究过程中提供了有用的意见和指导，我们对此深表感谢。我们还对 Scott Campbell、Peter Clark、Rakesh Goel、Jose Inaudi、Dawn Lehman、Laura Lowes、Abe Lynn、Silvia Mazzoni 以及 Vipul Prakash、Boza Stojadinovic 和 Foued Zayati 提供协助、参与讨论及提供试验结果表示感谢。

本报告所述的数据和意见不一定代表发起方的观点。

译者序

2008年5月12日14:28,我国四川汶川发生里氏8.0级强烈地震,不仅造成了人民财产的巨大损失,同时导致公路、铁路交通运输大动脉陷于瘫痪,不仅阻碍救灾行动,而且影响灾后的恢复工作。地震造成的桥梁构筑物的损坏坍塌给了我国桥梁抗震设计工作者惨痛的经验教训。当前我国交通事业迅猛发展,公路、铁路建设进入一波接一波的高潮期。反观我国桥梁抗震设计标准和设计方法,尚未能吸收许多新的抗震研究成果,既不能反应众多新的桥梁震害的启示,也不适应我国当前桥梁建设的需要。

汶川地震后,各方都致力于对桥梁抗震设计新标准和新方法的研究。译者有幸得到了加利福尼亚大学伯克莱分校工程学院关于钢筋混凝土桥梁抗震设计和评估的研究报告,这是由美国加州运输部发起的一项研究成果。在美国,加州运输部(Caltrans)在制定和实施桥梁抗震设计标准中发挥了主导作用。

对桥梁抗震性能的预期总是不停变化着,很多要求已经不只限于防止桥梁坍塌,越来越多的性能预期都涉及损坏限制和保持桥梁运行。针对近20年来在地震中一些桥

梁的损坏或倒塌情况，已开展了重要的研究，目的在于提高钢筋混凝土桥梁的抗震性能。本书总体探讨了钢筋混凝土桥梁的抗震设计和评估，考察了设计和评估中已考虑到的一些办法，提出了抗震要求和构件能力的评估技巧，并将传统的基于强度的设计方法和最近提出的反应控制设计方法的效用进行了比较。

以位移为基础的方法可有助于估算地震反应以及分配结构的刚度和强度，从而控制总体反应。书中详述了具体的设计和评估方法。

西南交通大学张建经教授提供了本书的英文版。本书的翻译工作由中铁二院工程集团有限责任公司公司的魏建、何庭国、郭建勋同志共同完成，并得到了成都语言桥翻译有限责任公司的大力帮助。杨国静和许敏两位同志对译稿进行了全面的校核，陈克坚、张建经对译稿进行了审定，在此一并表示感谢。

翻译《钢筋混凝土桥梁抗震设计和评估》一书，希望对我们正在进行的桥梁抗震设计标准和设计方法的研究有所启示。

魏 建

2009年5月

目录

1 引 言	1
1.1 概 述	1
1.2 加利福尼亚州桥梁震害 和抗震设计标准的发展	1
1.3 设计和评估	3
2 对先前工作的回顾	4
2.1 总 则	4
2.2 非线性地震反应表示法	4
2.3 以位移为基础的抗震设计方法	5
2.4 能力设计原则	6
2.5 钢筋混凝土构件的力学性能	6
2.6 桥梁抗震设计和评估	7
3 抗震设计和评估方法	9
3.1 抗震原则和性能目标	9
3.2 设计和评估方法	11
3.3 桥梁应用	20
3.4 美国加州运输部 (Caltrans) 设计程序	21
3.5 初步 ATC-32 设计程序	23

3.6 结 论	25
4 设计和评估中的不确定因素	26
4.1 概 述	26
4.2 地震灾害描述	28
4.3 结构建模和能力	33
4.4 结构分析和动态反应	34
4.5 结 论	36
5 需求估算	38
5.1 概 述	38
5.2 基于强度和基于位移的 需求估算法	39
5.3 基于位移法在设计和评估中的 应用	39
5.4 位移估算	42
5.5 近地震动	50
5.6 桥梁位移估算	54
5.7 局部和总体变形需求	62
5.8 内力分布	64
5.9 结 论	65
6 能力估算	67
6.1 引 言	67
6.2 柱 体	68
6.3 墙式桥墩	79
6.4 桥 台	84
6.5 外伸支架和帽梁	85
6.6 箱 梁	86
6.7 梁-柱节点	87
6.8 结 论	88
7 各种设计方法的比较研究	90
7.1 简介与概述	90
7.2 研究说明	91
7.3 柱体建模	92

7.4	设计步骤	92
7.5	排架设计	93
7.6	反应分析	95
7.7	地震动输入	97
7.8	分析结果	102
7.9	设计方法的有效性	108
7.10	刚度假设的影响	109
7.11	结 论	109
8	结 论	112
8.1	总 则	112
8.2	未来的研究方向	114
附录 A	位移估算建模	115
A.1	引 言	115
A.2	荷载-位移理想值	115
A.3	峰值位移估算	117
A.4	结 果	118
A.5	结 论	119
附录 B	柱体抗剪强度模型	120
B.1	概 述	120
B.2	经验模型	121
B.3	用试验数据进行比较	127
B.4	结 论	152
附录 C	柱体分析建模	153
C.1	概 述	153
C.2	柱体说明	153
C.3	公称弯曲强度	154
C.4	力矩-曲率和力矩-位移反应	155
C.5	三线近似值	155
C.6	有效刚度	157
附录 D	术语表	158
参考书目		160

1 引 言

1.1 概 述

针对近期发生的地震中一些桥梁的损坏或倒塌情况，开展了重要的研究，以提高钢筋混凝土桥梁的抗震性能。本书总体探讨了钢筋混凝土桥梁的抗震设计和评估，回顾了设计和评估中已考虑到的一些办法，提出了抗震要求和构件能力的评估技巧，并将传统（基于强度）设计方法和最近提出的响应控制设计方法的效用进行了比较。

1.2 加利福尼亚州桥梁震害和抗震设计标准的发展

美国加州运输部（Caltrans）在制定和

实施桥梁抗震设计标准中发挥了主导作用，该部已经编写或开发出了自己的抗震设计标准。尽管 1940 年标准出台之前加利福尼亚桥梁设计中就考虑到了地震，但美国在 1940 年才首次对桥梁抗震设计标准进行了规定，1943 年和 1965 年分别制定了修订版。

在 1971 年的圣费尔南多地震中，有相当数量的桥梁损坏或坍塌。继这次地震之后，设计的横向力明显增加，并且桥梁设计标准中第一次引入了对延性设计的详细要求。此外，开始制定新的设计标准。新标准是在 1973 年完成的，并成为当前桥梁设计规范的基础。桥梁设计规范考虑了地震动衰减、土壤条件对响应的影响以及弹性结构的动态反应特点。这些标准大大提高了新桥梁结构的抗震能力。即便如此，从 1989 年洛马普列塔地震对按照桥梁设计规范及早期规范修建的桥梁所造成的损坏来看，还有很多问题需要进一步研究。例如，最近发现帽梁-柱接合点存在缺陷。1994 年北岭地震造成的破坏表明，20 世纪 70 年代中期到末期修建的桥梁也极易损坏和坍塌。自洛马普列塔地震发生以来，Caltrans 已安排了应用技术委员会来审查当前的桥梁设计规范，并提出了改进意见。Caltrans 继 1971 年圣费尔南多地震之后开始了一项三步桥梁抗震改造计划。第一阶段包括在上层建筑伸缩铰链安装抑制缆来防止分离和失去相邻面板的支承。这一阶段基本上是在 1989 年完成的，大约改造了 1 260 座州级桥梁。

1987 年，惠蒂尔海峡地震造成柱体分离出现明显的剪切破坏，说明了先前的施工中存在一些漏洞。研究计划的实施为现有桥墩的改造提供了方法。根据这些研究计划的结果，改造计划的第二阶段是着手改造支撑桥梁的独柱墩。之所以选定单柱结构进行改造，是因为它们是被视为比多柱排架更容易受到损坏的结构。改造计划在 1989 年洛马普列塔地震之后加速实施，同时在第三阶段的改造计划中还增加了多柱排架桥梁。

1.3 设计和评估

设计标准的提高主要是针对新桥梁的设计。对于这些结构，设计师已完成了对结构形式和构造的控制，还可以指定对控制反应和确保有足够强度和变形能力所需的比例和细节。

采用先前标准设计的桥梁往往在许多方面存在不足。通过评估能够识别出这些缺陷，并能制订改造计划。由于已经选择了结构形式、比例和细节，因此，为了控制反应可供设计师选择的方案更为有限，改造工程一般造价颇高，而且预算限制往往会阻碍改造工程如期望地那样广泛。近年来，通常将更多精力放在制定改造标准和评估程序上。

对于现有结构的评估和可能的改造或对于新的设计，必须进行分析来确定预期需求，并且必须设定构件能力。本书的主题是新设计和评估，关于改造策略和细节，读者可参见其他专著。

2 对先前工作的回顾

2.1 总 则

当前钢筋混凝土桥梁设计和评估的方法依靠众多地区的创建,其中包括创建非线性地震反应表示法,创建以位移为基础的抗震设计方法,创建能力设计原则以及柱体、板式墩、外伸支架、帽梁和梁柱接合点等抗震构件的力学性能。

2.2 非线性地震反应表示法

早期的地震反应研究集中于相对简单的系统。早在 1941 年,就对用于地震记录的单自由度系统的弹性反应的确定进行了讨论。Housner 于 1956 年提出了结构设计的力可以小于弹性反应所对应的力的这一

理念。Veletsos 和 Newmark 强调在采用目标延性需求的同时采用位移需求来达到系统强度。在位移延性需求的相关文章中,对抗震结构的非弹性设计采用弹性反应谱和强度换算系数进行了探讨。

Newmark 和 Riddell 探讨了不同的迟滞模型对反应的影响。他们发现,在大多数情况下,弹塑性模型是在对最大非弹性反应的保守估计下产生的,但对设计来说可忽略这些差异。Shimazaki 和 Sozen 还调查了不同的迟滞模型,并发现了部分依赖于迟滞模型的一些短周期系统的非弹性反应。Otani 发现,最大反应幅度对模型的基本特征很敏感,如初级曲线的形状和滞回曲线的“丰满度”。

早在 1980 年,动态分析中就观察到了通过横向位移($P-\Delta$ 效应)出现的重力荷载对多层建筑物反应造成的二阶效应。控制位移延性需求所需横向强度的增加在 Davidson 等人的作品中有所描述。对于 $P-\Delta$ 效应可以忽略不计的桥梁结构而言,Moehle 提出了最小横向强度的特点。

2.3 以位移为基础的抗震设计方法

1960 年, Muto 注意到,单自由度系统的最大非弹性位移与具有相同初始周期和阻尼的弹性系统无明显不同。同年, Veletsos 和 Newmark 也做了类似的观察。这些对少数非弹性系统的观察资料后来被称为“等位移规则”。Muto 得出的结论是,这一趋势可能会建议采用基于最大位移的结构设计方法。

1976 年, Shibata 和 Sozen 提出了只要能确定最小设计强度,采用替代结构法时就不会超出容许的反应位移的这一观点。同年, Freeman 提出了能力谱法,作为估计钢筋混凝土结构非弹性反应的一种手段。该法可以用来估计峰值位移反应和延性需求。

Shimazaki 和 Sozen 确定了等位移规则适用的条件。他们发现,结构采用的等位移规则适用于振动周期大于特征周期 T_g 的结构。对于初始周期小于 T_g 的结构,如果屈服强度足够大,则峰值非弹性位

移约等于弹性系统的峰值位移。对于较弱的结构，峰值非弹性位移明显大于弹性系统的计算值。**Bonacci** 证实了对 15 种样本的实验研究所得出的结果只具有一种强度、初始周期和地震记录组合。**Qi** 和 **Moehle** 提供了一种周期小于 T_g 的结构的峰值非弹性位移估算方法，并采用位移反应估算来估计墙和框架的具体要求。

Moehle 提出了相对于传统的力或延性方法而言的、以位移为基础的设计方法。他认为，以位移为基础的设计方法可以直接用于确定反应控制的比例和布局。

2.4 能力设计原则

能力设计原则要求提供足够的强度，通过在为延性反应所设计的构件中加入非弹性需求，从而防止出现反应的脆性模型。在 1961 年，这种方法被应用在多层钢筋混凝土建筑物的设计时，有人曾建议，柱子应具有足够大的强度，使塑性铰链位于梁的端部，并应提供足够的横向钢筋来确保剪切强度大于弯曲铰相应的剪切需求。

正式的能力设计原则随 1976 年的新西兰标准一起制定，要求考虑“能力设计”。设计力及建筑物能力设计的其他方面在《新西兰地震工程学会通报》的几篇文章中进行了探讨。《新西兰地震工程学会通报》后期发行版本中的 12 篇文章探讨了能力设计原则在公路桥梁设计中的应用。

2.5 钢筋混凝土构件的力学性能

观察到的震害往往会引发对钢筋混凝土构件的实验研究。1971 年的圣费尔南多地震对公路桥梁墩柱造成了前所未有的损坏，随后开始对桥梁墩柱的剪切和弯曲性能进行了大量的实验研究。

Davey 测试了循环荷载作用下八角形截面柱的非弹性反应，发

现柱子带有挠性塑性铰并在纵筋的压曲下损坏了。Munro 测试了在振动台引发的拟静力荷载和动力荷载作用下的八角形截面柱。Ang 调查了单向循环荷载作用下短粗的圆形截面桥墩的剪切和弯曲强度。Wong 调查了双向立体交叉荷载和十字循环荷载模式下的类似柱体。Iwasaki 等人测试了具有不同高宽比和相对较轻的横向钢筋的矩形和圆形截面柱。Verma 等人介绍了代表 20 世纪 70 年代之前明显特点的圆形和矩形截面柱的有限延性能力。在美国国家标准与技术研究院进行的试验中,观察到了代表典型加州施工特点的完整柱体的延性反应。

柱体和板式墩之间的区别往往是反复无常的,但可用于区分不同的特征特性。Wood 对低层建筑剪力墙(墙高/墙基线长度比小于 2)剪切强度的实验数据进行了调查,发现剪力墙横截面内的最小强度约为 $6(f_c')^{0.5}$ (单位:磅/平方英寸),并提出了改进后的剪切强度估算公式。Sozen 和 Moehle 审查了剪力墙的试验,并为抗面内剪力墙制订了构建力位移关系的程序。Haroun 对板式墩的面外试验进行了汇报。

Stojadinovic 和 Thewalt 对外伸支架性能的实验研究进行了汇报。Ingham 和 Mazzoni 等人进行了关于肘形接头的其他研究以及对外部梁柱连接的研究进行了汇报。

2.6 桥梁抗震设计和评估

美国加州运输部在制定桥梁抗震设计规定中发挥了主导作用。针对 1971 年圣费尔南多地震所造成的损坏,在 1973 年制定了新的设计标准。1973 年的标准明确考虑了断层靠近、土壤效应、动态反应以及风险。1973 年,Caltrans 抗震设计标准被纳入了全国通用的 1975 年《AASHTO 公路桥梁抗震设计标准规范》中。

美国应用技术委员会是由联邦公路管理局投资设立的,以制定《公路桥梁抗震设计准则》。本文件发布于 1981 年,对延性钢筋混