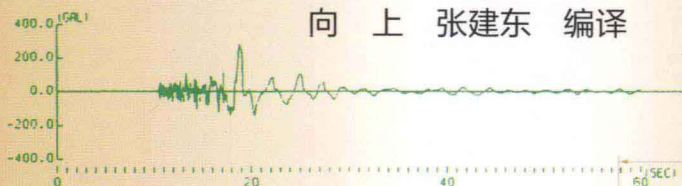


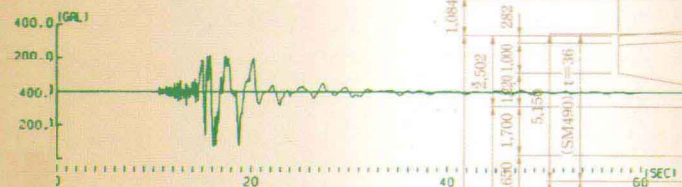
桥梁抗震与加固

[日]阪神高速公路株式会社 著

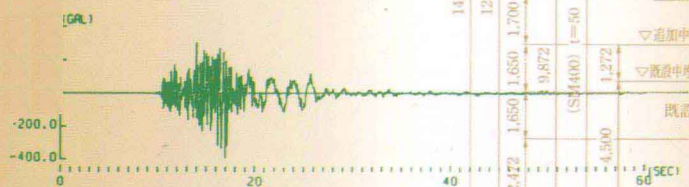
向 上 张建东 编译



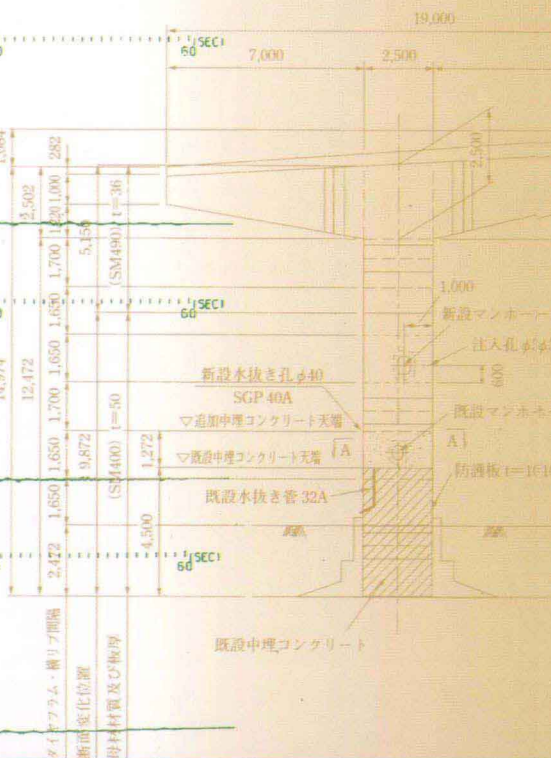
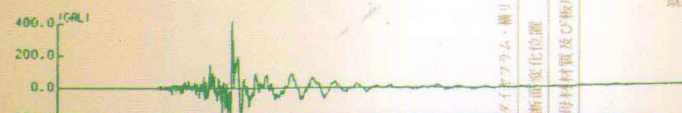
(a) N 78° E 成分 (最大值 281 gal)



(b)N 12°W成分 (最大值327gal)



(c)UD成分(最大値395gal)



阪神大地震的启示

桥梁抗震与加固

——从灾后应急修复到抗震维修加固

[日]阪神高速公路株式会社 著

向 上 张建东 编译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2012-6259号

图书在版编目（CIP）数据

桥梁抗震与加固——从灾后应急修复到抗震维修加固/
[日]阪神高速公路株式会社著；向上，张建东编译．—北京：
中国建筑工业出版社，2013.3

ISBN 978-7-112-14891-2

I. ①桥… II. ①阪… ②向… ③张… III. ①桥梁结构—
抗震结构—加固 ②桥梁结构—抗震结构—维修 IV. ①U442.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第273689号

原書名：「大震災から学ぶ 都市高速道路における地震対策 —震災復旧か
ら耐震補強、防災計画まで—」

著 者：阪神高速道路株式会社、財団法人阪神高速道路管理技術センター
出版社：株式会社電気書院

责任编辑：刘婷婷 刘文昕

责任设计：赵明霞

责任校对：姜小莲 赵 颖

本书中文版由作者阪神高速公路株式会社授权独家翻译、出版。

阪神大地震的启示
桥梁抗震与加固
——从灾后应急修复到抗震维修加固
[日]阪神高速公路株式会社 著
向 上 张建东 编译

*

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

华鲁印联（北京）科贸有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本：880×1230毫米 1/32 印张：13¹/₄ 字数：418千字

2013年5月第一版 2013年5月第一次印刷

定价：49.00元

ISBN 978-7-112-14891-2

（22959）

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）

致中国读者

日本和中国都是多地震国家，日本经历过关东大地震（1923年）、阪神大地震（1995年），2011年3月发生的东日本大地震记忆犹新。一方面，中国也经受过唐山大地震（1976年）、汶川大地震（2008年）等震灾的考验，我们都面临着大自然的严峻挑战。抵抗自然灾害的侵袭、保障基础设施的安全是我们土木工程师的共同使命和职责。

1995年阪神大地震给西日本经济圈交通命脉的阪神高速公路带来了巨大的损失，灾后重建聚集了全日本土木工程界的技术力量，在短时期内实现了全线通车。2008年汶川大地震造成了生命和财产的重大损失，灾后恢复重建给我们留下了深刻的印象。汶川大地震后，阪神高速公路集团立即派遣技术人员赴灾区考察，并与四川省交通部门进行技术交流。

阪神高速公路集团长期以来与中国交通行业有广泛的交流，并于2011年在上海成立了办事处（阪申土木技术咨询（上海）有限公司），致力于和中国同行在土木工程领域的进一步交流与合作。

本书是阪神大地震后阪神高速公路应急修复和维修加固技术的集成，日文版原书于2005年在日本出版发行。由于汇集了阪神大地震以来的最新抗震研究与应用成果，本书引起了世界各国土木工程界的广泛关注，书中涉及的很多抗震工法、加固技术等已在多个国家应用推广。两位编译者，向上和张建东都是长年留学并就职于日本，长期从事桥梁工程设计与研究，已有多部专著和译著出版，是抗震研究领域颇有建树的学者，他们的编译如实表达了原作的意图。增加撰写的第五章“铁路桥梁抗震加固”使本书更加充实完善，成为涵盖所有桥梁的抗震专著。

非常荣幸本书能在中国出版发行，很高兴与中国同行分享桥梁灾后重建与抗震加固的技术和经验。

知识是没有国境的，期待本书对中国的桥梁工程技术人员有所借鉴。

日本阪神高速公路株式会社

法人代表 幸 和范

（日文版原书编辑委员会会长）

2013年4月

编译者序

历次大地震中，桥梁都是受灾最严重的结构之一。2008年的四川汶川大地震，1657座公路桥梁中有724座遭受不同程度的破坏，造成生命线中断或受阻，严重影响了抗震救援工作，是导致大量人员伤亡的重要原因。有专家预测，如果里氏8.0级的汶川地震发生在我国特大城市，可能高达一半以上的桥梁将遭受严重毁坏，整个城市交通将陷于瘫痪。

地震作用下，桥梁的振动包含强迫振动和自由振动两个部分，又由于桥梁结构体系的多样性，荷载作用和地基条件的不确定性，其抗震设计较为复杂。而桥梁作为重要交通生命线，在抗震救灾及灾后重建中担负着极其重要的作用。遗憾的是，迄今为止，我国在桥梁抗震加固设计和施工领域尚缺乏完整的系统性文献。

日本作为地震多发国家，基于长期研究和经验积累，在抗震领域一直处于世界领先地位。1995年的日本阪神大地震成为世界抗震史上的里程碑，从国际都市大阪至神户之间33km生命线的铁路桥和公路桥遭到毁灭性破坏。震后，来自日本全国乃至全世界的抗震学者和专家致力于灾后重建和桥梁抗震加固，作为世界知名高速公路建设和运营管理的政府机构，阪神高速公路走在世界前列，本书凝聚了其灾后抗震加固成果。1995年之后的历次地震对本书涉及的抗震加固理论和方法进行了有效验证，2011年发生的东日本大地震再次证明，按照本书技术进行抗震加固的桥梁基本上没有发生严重损伤。

原书编著历时近十年，汇集了数十名著名学者、专家和直接参与灾后重建的技术人员的智慧和长期以来的研究成果及技术积累，涵盖了桥梁抗震加固的标准、设计、施工等几乎所有内容。从桥梁应急修复到最终完全加固；从加固设计的方针到次生灾害预防措施；从地震动特性到非线性地震动力响应分析；从钢筋混凝土结构到钢结构；从抗震设计细节到具体施工工法；从单一结构加固到桥梁结构体系转换；从防落梁装置到地基基础加固。本书既包括了完整的抗震加固

设计理论，也有针对具体加固施工的通俗易懂的介绍。为便于读者理解，每种加固工法还配置了算例和详细的施工案例。本书既是一本学术专著，也是一本抗震加固手册，可成为我国从事桥梁抗震设计、施工、维护和加固的工程技术人员的重要参考书，也可作为高等院校的参考教材。

原书是针对公路桥梁抗震与加固的专著，编译者参考日本铁路桥梁抗震加固技术并结合工程经验，增加编写了第5章“铁路桥梁抗震加固”，以便读者全面了解日本桥梁抗震与加固技术。

为适合中国读者的习惯，编译者对原书章节顺序作了部分调整。同时在编译中，对原书内容中的个别欠妥和笔误之处，经日方作者确认，在本次中文版中进行了订正。

在本书编译中，浙江大学谢旭教授、桥梁专家胡达和提供了大量帮助，在此表达衷心的感谢。

由于编译者水平有限，书中难免有理解错误和不足之处，恳请读者批评指正。

向 上

2012年12月于北京

前 言

1995年1月17日，前所未有的大地震袭击了日本兵库县南部地区，引发了阪神·淡路大地震（以下简称阪神大地震），到今天为止，大地震已经过去10年了。阪神大地震达到了里氏7.2级，不仅被认为是日本有地震观测以来首次7级以上的强烈地震，而且作为城市内陆直下型地震，其灾难规模超过了迄今为止的想象。大地震夺走了6千多人的生命，不仅电力、燃气、给排水、通信等生命线遭到了毁灭性破坏，以高速公路、铁路和建筑物为首的维持城市功能的公共设施也遭到毁灭性打击。这是一场罕见的发生在大城市的地震灾难，也是一场我们面对自然灾害时痛感人力渺小的震灾。

一方面，阪神大地震后，为了早日修复这些受灾结构，尽快恢复城市功能，这里不仅汇集了关西地区、还汇集了日本全国甚至全世界的人力和技术力量，全力以赴致力于灾后重建工作。另一方面，这次震灾带给我们各种教训，使得今后在制定防灾规划时面临更多的问题。不仅在基础设施硬件方面，在管理体制软件方面，以政府为首，各地区关于防灾规划的讨论也日趋活跃。

阪神高速公路也没有在大地震中幸免，由于发生的地震作用大大超过了大地震发生为止规范所规定的抗震设计要求的地震作用，导致阪神高速公路遭受以落梁破坏为主的巨大地震灾害，并随之带来因修复工作而不得不长期中断的交通。在这之后，以当时的日本建设省（译者注：相当于中国的住房和城乡建设部）为中心，对地震灾害机理进行了分析和研究，同时花费大量精力重新制定了抗震设计标准。地震发生1个月之后，建设省下达了在当时被称作《修复重建标准》的暂行规定，修复工作以及对没有遭受地震灾害的结构抗震加固工作得以迅速展开。

阪神大地震过去10年了，结构的抗震加固已基本结束。另外，地震防灾手册被重新编制，防灾支援体系也被构筑起来，即作为目前两方面目标的硬设施和软办法的抗震措施已基本完成。这种情况不仅

限于阪神高速公路，相关各单位实施的抗震措施，虽然详细内容有所不同，但被认为基本一致。然而，正如俗语“天灾正是在不经意时降临”所说的那样，即使配备了这样的设施和防灾手册，不忘地震灾害意识，并如何将这种意识保持下去被认为是今后最大的课题。还有，2004年10月发生了新潟中越地震、2004年12月苏门答腊地震引发了印度洋大海啸、今年3月发生了福岗县西方近海地震，这些强烈地震连续不断地发生了。在已经确认于不久的将来还会发生东海地震、东南海地震和南海地震之际，我们要将国民的防灾意识提高到比现在更高的高度。

今天，借助阪神大地震发生10周年的契机，我们通过阪神高速公路在阪神大地震中的抗震救灾经验，对修复工作和抗震加固施工，从规划、设计到施工，将这些经验通过一连串完整的流程以技术手册的方式汇编成书。本书是以城市高速公路为主体编写而成，因此，虽然没有涵盖城市设施的所有内容，但对于今后致力于桥梁结构的防灾规划，或者致力于抗震加固计划的技术工作者来讲，本书可作为参考。

最后，对编写本书时大量引用和参考的文献的作者们表示深深的谢意和敬意。

日本阪神高速公路株式会社
2005年8月

编辑委员会（城市高速公路研究会）

会长	幸 和范	阪神高速公路公团	审议担当
副会长	中岛 裕之	财团法人 阪神高速公路管理技术中心	理事长
委员	川北 司朗	阪神高速公路公团	民营化综合规划室 调查担当
	铃木 严	阪神高速公路公团	神戸建设局 建设规划部长
	铃木 威	阪神高速公路公团	工务部设计课 课长助理
	谷田 丰	阪神高速公路公团	计划部计划第二课 系长
	中坪 周作	阪神高速公路公团	京都建设部 征地课长
	林 秀侃	栗本钢铁株式会社	顾问
	真木 乾市	阪神高速公路公团	京都建设部施工第二课 课长助理
	松浦 健二	阪神高速公路公团	大阪建设局长
	村田 修一	KRT株式会社	副社长
	吉川 纪	大阪工业大学	结构实验中心 教授
	上中 胜	财团法人 阪神高速公路管理技术中心	规划部长
	加贺山泰一	财团法人 阪神高速公路管理技术中心	规划部规划课长
	下地 胜启	财团法人 阪神高速公路管理技术中心	规划部规划课长助理

（2005年8月）

编写人

- 第1~4章 吉川 纪、下地 胜启、林 秀侃、松浦 健二、上中 胜、加贺山泰一、川北 司朗、铃木 严、铃木 威、真木 乾市、村田 修一
- 第5章 向 上、张建东，参考「2005年以后的抗震加固现状」（阪神高速公路株式会社，2005年）

日文版原书在日本国内由株式会社电气书院出版发行。书名：大地震の启示 城市高速公路の抗震対策——从灾后应急修复到抗震维修加固，著者：日本阪神高速公路株式会社、财团法人阪神高速公路管理技术中心（2013年4月改名为财团法人阪神高速公路技术中心）。

〔日本語版原書は日本国内で株式会社電気書院より出版されている。書名：大震災から学ぶ 都市高速道路における地震対策 ―震災復旧から耐震補強、防災計画まで― 監修：阪神高速道路株式会社、財団法人阪神高速道路管理技術センター（2013年4月に一般財団法人阪神高速道路技術センターに名称変更）〕

目 录

第1章 概述	1
第2章 阪神高速公路桥梁在阪神大地震中的受灾状况	17
2.1 阪神大地震概要	17
2.1.1 地震规模	17
2.1.2 地震动特性	17
2.2 受灾概要	20
2.2.1 上部结构	21
2.2.2 下部结构	25
2.2.3 基础	31
第3章 灾后应急修复	35
3.1 概述	35
3.2 受灾后的应急措施	38
3.2.1 受灾后第一时间的措施	38
3.2.2 受灾结构次生灾害预防措施	42
3.3 应急修复	52
3.3.1 修复计划拟定	52
3.3.2 修复设计方针	55
3.3.3 各种结构修复概要	61
第4章 抗震加固设计与施工	143
4.1 抗震加固概述	143
4.1.1 概述	143
4.1.2 各种加固工法	148

4.2 钢筋混凝土桥墩 粘贴钢板加固工法	157
4.2.1 设计方法	157
4.2.2 设计算例	164
4.2.3 施工	179
4.3 钢筋混凝土桥墩 外包钢筋混凝土加固工法	194
4.3.1 设计方法	194
4.3.2 设计算例	198
4.3.3 施工	204
4.4 钢筋混凝土桥墩 粘贴碳纤维布加固工法	212
4.4.1 设计方法	212
4.4.2 设计算例	214
4.4.3 施工	219
4.5 钢桥墩 墩体钢管填充混凝土加固工法	228
4.5.1 设计方法	228
4.5.2 设计算例	240
4.6 钢桥墩 纵向加劲肋加固工法	249
4.6.1 设计方法	249
4.6.2 设计算例	257
4.7 上部结构 梁体连接加固工法	265
4.7.1 设计方法	265
4.7.2 设计算例	276
4.7.3 施工	278
4.8 上部结构 支座替换	299
4.8.1 概述	299
4.8.2 支座的种类和选择方针	299
4.8.3 支座的设计方法	305
4.8.4 施工	311

4.9 上部结构 防落梁系统	320
4.9.1 概述	320
4.9.2 梁端搁置长度	320
4.9.3 防落梁装置	323
4.9.4 位移限制装置	334
4.9.5 防落差装置	334
4.9.6 伸缩缝保护装置	334
4.10 基础	335
4.10.1 设计方法	335
4.10.2 设计算例	344
4.10.3 施工	350
第5章 铁路桥梁抗震加固	361
5.1 概述	361
5.2 既有桥梁的抗震评估及加固方法	364
5.2.1 既有桥梁的抗震评估	364
5.2.2 各种抗震加固工法	367
5.2.3 弹塑性反应谱法抗震分析	372
5.2.4 设计算例	377
编译注解	387
阪神高速公路株式会社简介	411

今年是1995年发生的日本阪神大地震^{*注1}10周年。这场地震造成了城市公路高架桥极大的、多种多样的损伤及破坏。这些受灾结构，因其设计、施工时抗震设计标准的不同而其受灾程度有所差别，越是早期建设的结构其受灾程度越大。每次强烈地震发生后，都会重新编制抗震设计标准，以下简单地从抗震设计标准方面对有关抗震规定的变迁进行说明。

1886年8月，《国、县、道修筑标准》以日本内务省令的形式下达，但未对地震有特别的规定。1919年12月，内务省颁布了《公路结构令及街道结构令》，不过也未对地震有特别的规定。1926年6月，内务省土木局颁布了《公路结构相关细则（草案）》。在第2章的桥梁条文里，规定了根据不同地区和地质条件，将结构自重的15% ~ 40%作为水平地震作用进行考虑，而钢材允许应力的提高幅度为60%，这便是世界上最早的抗震规定。

1939年2月，内务省土木局发行了《公路钢桥规范》，以取代上述《公路结构相关细则（草案）》。规范首次写入了抗震设计细节，并按表1.1对设计水平地震强度^{*注2}进行了规定。这以后的1956年5月，日本道路协会对《公路钢桥规范》进行了大幅度修编并将其出版。这本规范的抗震规定采用了震度法^{*注3}，规定仅对于恒载才考虑地震的影响（第15条的地震条文），地震时的水平地震强度按表1.2选取。在地震作用下，或者恒载与地震作用组合作用条件下，钢材允许应力的提高幅度为80%；混凝土允许应力的提高幅度为50%（第30条复合允许应力条文）。1964年6月，日本道路协会发行了《公路钢桥设计规范》，其抗震规定与1956年的《公路钢桥规范》相同，不过在地震作用下钢材允许应力的提高幅度修改为70%。这些规定，不管是哪一条都较简单，使得事实上抗震设计因技术人员的判断而相差很大，设计结果缺乏统一性。

第1章 概述

设计水平地震强度（1939年）¹⁾ 表 1.1

地区	地层	冲积层（泥砂层）	洪积层（沙砾或其他良好场地）
自古以来屡屡发生强烈地震的地区		0.4	0.2
自古以来发生过强烈地震的地区		0.3	0.15
其他地区		0.2	0.10

* 允许应力的提高幅度：钢材，80%；钢筋和混凝土，60%。

设计水平地震强度（1956年、1964年）¹⁾ 表 1.2

地区	场地	软弱场地	稍微良好的场地	良好场地
屡屡发生强烈地震的地区		0.35 ~ 0.3	0.3 ~ 0.2	0.2 ~ 0.15
发生过强烈地震的地区		0.3 ~ 0.2	0.2 ~ 0.15	0.15 ~ 0.1
其他地区		0.2	0.15	0.1

* 竖向地震强度取0.1作为标准。

于是，制定用于指导抗震规定详细使用方法的指南便很有必要。1971年6月，日本道路协会发行了《公路桥抗震设计指南》，第一次专门针对抗震设计对抗震标准进行了整理，对以往的抗震设计法进行了大幅度修改（表1.3）。根据这本指南，一方面，设计水平地震强度可以统一考虑结构所在的地区、场地条件和桥梁的重要性后计算出来，对于高桥墩等比较容易振动的桥梁，可采用修正震度法对其进行计算。另一方面，这本指南规定不考虑竖向地震强度的影响。除了设计地震强度的规定外，这本指南考虑了地震时地基液化等影响后综合评估了地震的影响。同时，还针对地震时上部结构和下部结构之间产生的相对位移规定了防落梁装置的细节，将确保结构整体安全性的理念写入了这本指南。

日本道路协会分别在1980年5月和1990年2月出版了《公路桥设计规范・Ⅴ抗震篇》。在前一本规范中，对设计水平地震强度标准值的相关修正系数中的地区调整系数进行了修改。关于考虑了桥梁固有周期因素的修正震度法，规定进行抗震设计时如果从地基面至下部结构顶部的高

度超过了15m,则其适用于考虑了地震响应的修正震度法。修正震度法的应用范围比以前扩大了。同时,这本规范修改了桥梁固有周期的计算方法,以及随固有周期而定的设计水平地震强度的修正系数,设计水平地震强度在0.05 ~ 0.3之间。对于高度比较小、固有周期短的钢筋混凝土桥墩或桥台,为了防治脆性破坏,新增加了必要时进行地震作用下变形能力验算的规定。对于一直以来没有明确规定的地震动力响应分析,规范明确了其分析方法,并同时设计地震作用进行了规定。

在1990年2月出版的规范中,将一直以来采用的震度法和考虑了地震响应的修正震度法融合在一起,并重新以震度法的形式进行了规定。规范将抗震设计时的2类场地和3类场地合二为一,使得场地类别由4种变成了3种,同时修正了设计水平地震强度的场地系数。另外,为了让设计计算更正确地反映桥梁的振动特性,这本规范根据每个独立振动体系计算惯性力,并充实了连续梁桥的抗震设计法。关于钢筋混凝土桥墩地震时变形能力的有关规定,规范将其修改为基于地震时保有水平承载力^{*注4}的验算法,同时,规范写入了结构在极限状态下地震响应分析的规定。关于地震动力响应分析,规定了一直以来没有明确的地震动输入,同时,增加了建立地震动力响应分析模型和通过地震动力响应分析进行抗震安全性验算的规定。

1995年2月,日本建设省(现日本国土交通省)下达了《兵库县南部地震中受灾公路桥梁修复重建相关标准(草案)》^{*注5}(以下简称《修复重建标准》)。由于根据1990年的《公路桥设计规范·V抗震篇》的抗震规范而设计的结构,在阪神大地震中没有遭受大的损害,《修复重建标准》便基于此而被编制出来。1995年6月,《兵库县南部地震中受灾公路桥梁修复重建相关标准》由日本道路协会出版发行。这套《修复重建标准》的目的是通过提高各结构构件的强度,同时提高桥梁的变形能力,使得桥梁整体能够承受地震。《修复重建标准》在根据震度法进行抗震设计的基础上增加了根据地震时保有水平承载力法进行抗震验算的内容。而且,为了使结构能够承受这次的阪神大地震,《修复重建标准》还将阪神大地震中实测到的地震波用于地震动力响应分析,以进行抗震验算。

1996年12月,日本道路协会出版了《公路桥设计规范·V抗震篇》。对于进行抗震设计时的地震动,规范考虑了在桥梁使用期间发生几率大

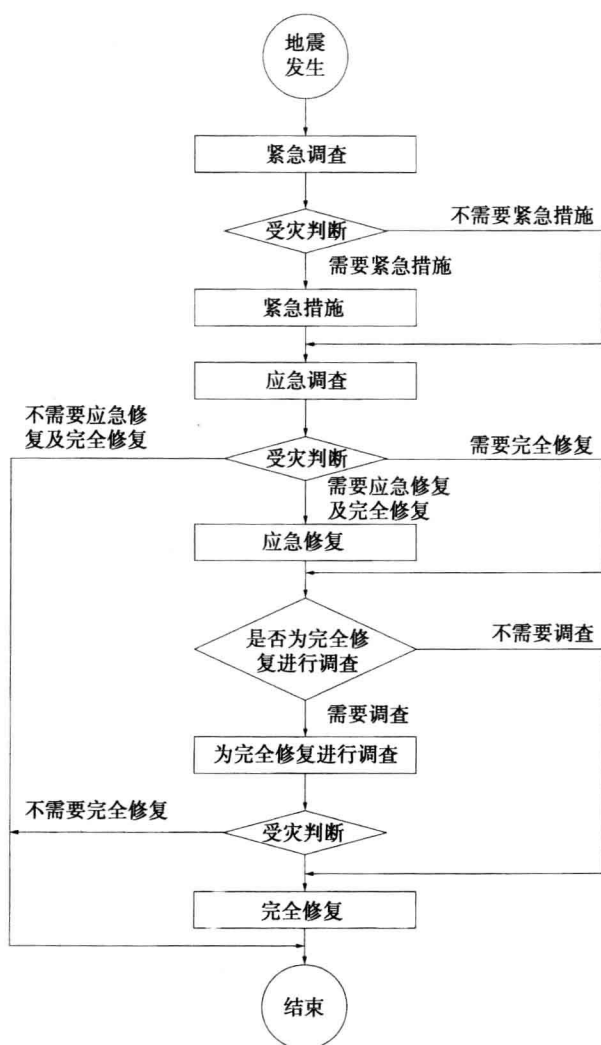
而强度小的地震动和在桥梁使用期间虽然发生的几率小而强度大的地震动共2种地震动。前一种地震动用于震度法，沿用了一直以来的方法，后一种地震动用于地震时保有水平承载力法。规范还进一步将后一种地震动分为Ⅰ类地震动和Ⅱ类地震动，并分别设定了反映各种地震动作用特性的混凝土极限应变等。Ⅰ类地震动设想的是如日本关东大地震那样发生在地震板块断层的强烈地震，而Ⅱ类地震动设想的是如阪神大地震那样的内陆直下型地震^{*注6}。另外，规范对运用地震时保有水平承载力法的水平力—水平位移关系的计算方法进行了修改。规范也对地震动力响应分析时的地震动输入进行了规定，并同时修改了与分析模型、分析方法以及安全性验算相关的规定，还对地震后的残余位移进行了评估。此后，规范增加了对采用橡胶系列减隔震支座情况下的减隔震设计方法的相关规定。

2002年3月发行的公路桥设计规范在向基于性能设计的技术标准转换中，将对桥梁的抗震要求按抗震性能、抗震性能验算方法和构造细节划分开来并进行了规定。规范改进了对钢桥墩承载力和变形能力的评估方法，并对第2等级地震动作用下支座承载力以及变形能力的评估等进行了修正。

如上所述，这次地震后，公路桥设计规范的抗震篇提高了地震作用下极限状态验算所采用的反应谱值，强化了防落梁装置，推广了减隔震支座应用以及充分运用了地震动力响应分析。规范允许结构有一定程度的损伤，将保障公路桥梁整体所需要的抗震性能作为抗震设计体系的方向。基于这样的考虑，对新建结构的抗震设计方针和既有结构的抗震加固得以贯彻执行。表1.3概括总结了以上所述内容，展示了日本公路桥抗震设计的变迁。

目前，各相关单位对既有结构的抗震加固正在进行中，工作尚未完成。预计在不久的将来，东海地震、东南海地震甚至宫城县近海地震发生的几率很高，因此有必要从现在开始就做好技术储备和相关准备。

另外，地震刚发生后，根据灾害应对基本法或大规模地震应对特别措施法编制防灾业务计划或地区防灾计划是很重要的。如果发生大规模地震，则公路管理机构的工作是收集情报，发出紧急调查指示。紧接着是掌握地震灾害状况，确保紧急输送道路，以及着手进行应急修复。这之后是为完全修复进行的调查和推进完全修复工作。震灾后的修复流程如图1.1所示，完全修复水准的方法如图1.2所示。

图 1.1 震灾后的修复流程⁶⁾