

第 1 章

桥梁结构地震破坏形式和 抗震设计法的变化

1.1 概 述

桥梁作为重要的社会基础设施，具有投资大、公共性强、维护管理困难的特点。桥梁同时又是抗震防灾、危机管理系统的一个重要组成部分，提高桥梁的抗震性能是减轻地震损失、加强区域安全的基本措施之一。特别是随着我国交通建设事业的迅速发展，桥梁无论在数量上还是延伸长度上都在快速增长，城市高架桥已经成为大中城市的主要交通动脉，高速公路、铁路在国民经济和居民日常生活活动中发挥着重要的作用，地震中桥梁设施的损坏、倒塌所带来的影响常常超过了桥梁因改建或维修所需要的巨额财政支出，提高桥梁的抗震能力是我国公路交通建设中所面临的重大课题。

工程结构抗震是基于总结和验证灾害基础上发展起来的一门学科。长期以来，人们为了从地震威胁中解脱出来，从过去的灾害中不断总结经验、分析原因、吸取教训，制定有效的抗震设防措施，达到减轻地震损失的目的。可以说，近一个世纪以来，结构抗震设计理论和技术的发展都是以沉痛的灾害教训为代价的，新的结构抗震设计标准和设计理念的确立都经历了灾后的反思、验证、总结和提高的过程。同时，地震如同震动台试验，能检验抗震设计理论是否有效，促进抗震设计理论的发展。

我国是一个多地震国家，人民的生命和财产长期受到地震灾害的威胁。仅 1976 年的唐山地震，震级 M7.8 级，就造成 24 万居民死亡，这在近代的地震历史中是十分罕见的大灾难。当时，我国的社会基本设施建设还比较落后，桥梁的数量、规模均十分有限，使用中的桥梁又以简支梁桥、拱桥为主，地震破坏所带来的影响远不及房屋建筑大。在唐山地震中有 18 座桥梁倒塌、20 座桥梁发生严重破损和 34 座桥梁出现中等程度的损伤，桥梁破坏的

主要形式是落梁、地基失效、支座破坏、桥墩断裂、梁间碰撞等。受到唐山地震灾害的教训以后，抗震设计开始在我国桥梁工程建设中得到重视，高等院校、科研单位相继开展了桥梁抗震的研究工作，取得了长足的进步，制定了相应的桥梁抗震设计规范，为提高桥梁抗震性能起到积极的作用。

桥梁抗震设计理论经历了静力弹性设计法、动力弹性法以后，动力弹塑性设计法的有效性已经得到广泛的认同，延性设计、减隔震结构等结构抗震设计方法已在各国的抗震设计规范中得到不同程度的应用，我国桥梁抗震设计规范也正朝着弹性设计、弹塑性设计法并存的方向发展，因此仅了解和掌握弹性设计理论已不能满足工程结构抗震设计的需要，弹塑性地震响应设计方法在桥梁结构抗震设计中的重要性越来越显著。

1.2 地震对桥梁结构的影响

结构物受到的地震影响主要有两种形式：一种是场地运动引起的结构物振动，另一种是场地相对位移产生的强制变形。前者是以惯性力的形式将地震荷载施加在结构物上，而后者则是支点强制变形产生的超静定内力或过大的相对变形影响结构的安全性。

图 1.1 表示地震波从震源到结构物的传播过程示意图。如图所示，结构物受到的地震运动是由震源发生的地震波经过地壳传到地下深层基岩，再从基岩传至表面土层的场地，建筑在地基上的结构物随场地运动发生振动和变形。刚性结构的地震响应取决于场地的运动，而柔性结构的地震响应除了随同场地的振动外，还将产生相对于地基的振动。因此，结构受到的地震惯性力影响不但与场地运动特性有关，而且还与结构物本身的动力特性（如振动周期、阻尼等）有关。

按图 1.1 的地震波传播途径，地震波从震源到地表面的传播过程中，从大的方面可划分为两个阶段：第一阶段是从震源传到地下基岩，第二阶段是从地下基岩传至地表面的建筑物。在第一阶段的地震波传播中，波形的变化主要表现为振幅的衰减。根据机理，振幅衰减包括几何衰减、粘性衰减和能量辐射衰减三个部分。由于在这一阶段中地震波的周期特性变化比较小，波形改变是以振幅衰减为主，因此也称之为距离衰减。地震波在第二阶段的传播中需要穿过地表面的土层，由于土层之间存在分界面，波在土层之间发生折射和反射后传到地表面。地面的地震波周期和振幅特性与基岩位置的地震波相比有比较明显的差异，这种差异与地表面土层结构和地质条

件密切相关。根据地震波传播的这种特点，研究结构地震响应时，除了必须考虑震源发生的地震规模外，还需要考虑地震波的传播距离和表面土层结构、土质条件的影响。

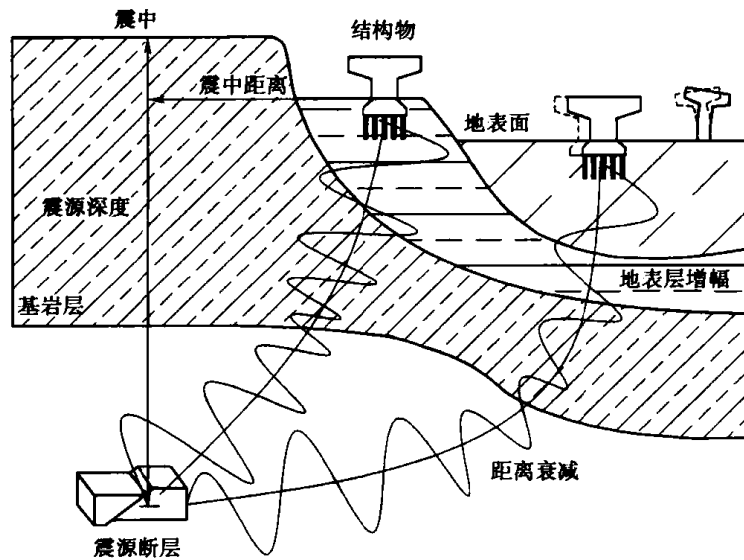


图 1.1 地震波传播途径示意图

第二种地震影响是因为纵向延伸比较长的桥梁结构，各桥墩（台）所在的位置、地质条件往往很不相同，支点之间受到的地震运动很难一致，地震中发生相对位移引起的影响。特别是跨越断层地带、液化地基的桥梁，场地相对位移是发生落梁破坏、支座切断、梁和墩台的结构损伤等地震破坏的主要原因。与第一类影响相比，场地相对位移对桥梁结构的影响更难预防、抗震设计更加困难，目前相关的研究活动还处于初始阶段。

3 桥梁结构的地震破坏形式

钢筋混凝土桥墩在水平反复荷载作用下的破坏形式

在地震荷载作用下钢筋混凝土桥墩发生三种有代表性的破坏类型，分别称为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏。

所谓弯曲破坏，是指结构的弯曲承载能力 P_b 低于剪切破坏的承载能力 P_s ，结构强度由抗弯性能起控制的破坏形式。图 1.2a) 表示桥墩发生弯曲破坏的形态。在水平反复荷载作用下，由于构件的截面弯曲抵抗能力低，在损伤截面内形成塑性铰，产生比较大的回转变形，损伤开始到最终破坏之

间的变形幅度很大，具有比较好的变形能力。

所谓弯剪破坏，是指结构由于弯曲损伤引起剪切强度下降，最终以剪切破坏的形式达到极限状态。与弯曲破坏相比，弯剪破坏的变形能力相对较差，从损伤到破坏之间的变形能力十分有限，是一种脆性破坏。在破坏形态上同时包含弯曲裂缝和剪切裂缝，破坏时以剪切裂缝为主[图 1.2b)]。

所谓剪切破坏，是指结构弯曲承载能力 P_b 高于剪切承载能力 P_s ，结构的强度完全由剪切强度控制的破坏形式。图 1.2c) 为剪切破坏的破坏形态，破坏时以斜方向的剪切裂缝为主。剪切破坏也是一种脆性破坏，塑性变形能力很差。

由于钢筋混凝土结构的破坏形式影响结构的变形能力，延性比较差的结构在地震中因构件失去承载能力容易发生倒塌性破坏，修复比较困难，因此，脆性的剪切破坏、弯剪破坏是结构在地震中不希望出现的破坏形式。

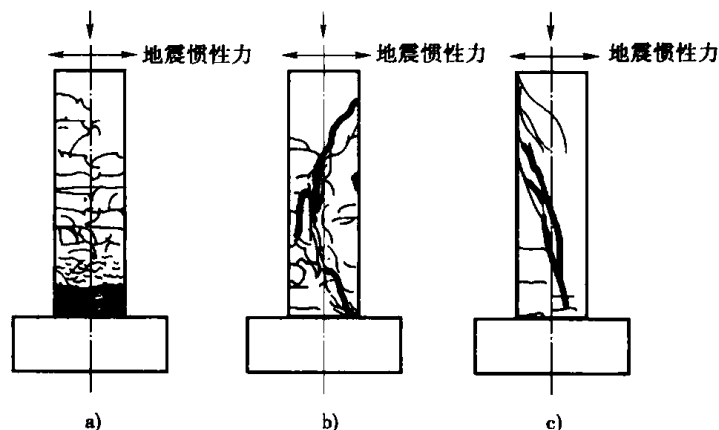


图 1.2 钢筋混凝土构件的地震破坏形式
a)弯曲破坏 ;b)弯剪破坏 ;c)剪切破坏

桥梁结构地震破坏的主要形式

根据桥梁过去的地震破坏情况，除了如液化、断层等因地基失效引起的破坏以外，混凝土桥梁最常见的破坏有以下四种形式。

(1)弯曲破坏 如图 1.3 所示，结构在水平地震荷载作用下由于过大的弯曲变形导致混凝土保护层脱落、钢筋压屈和内部混凝土压碎、崩裂，结构失去承载能力。整个破坏过程可以用以下四个阶段来描述：

当弯矩达到开裂强度时 截面出现水平弯曲裂缝 如图 1.3a)所示；

随着裂缝的发展和荷载强度的提高，受拉侧的纵筋达到屈服强度，如图 1.3b 所示；

随着变形量的增大，混凝土保护层脱落、塑性铰范围扩大，如图1.3c)所示；

钢筋压屈 或拉断 和内部混凝土压碎、崩裂 如图 1.3d)所示；

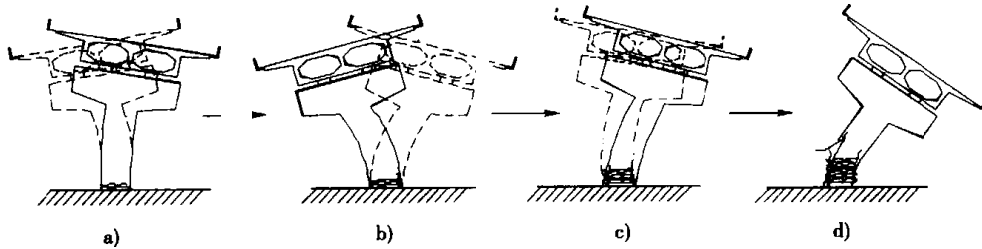


图 1.3 桥墩的弯曲破坏过程

如前所述，钢筋混凝土结构弯曲破坏时具有比较好的变形能力，在损伤发生以后由于塑性变形吸收地震能量和刚度下降能够减轻地震荷载的强度，因此，这种形式的破坏通常可以避免桥梁在地震中发生倒塌破坏。图 1.4 为弯曲破坏的实例，其中前一例损伤发生在桥墩中间纵向钢筋截断位置，而后一例则发生在刚架桥墩变截面弯矩最大处，两者在地震中均维持支撑上部结构的机能，没有发生桥梁倒塌破坏。

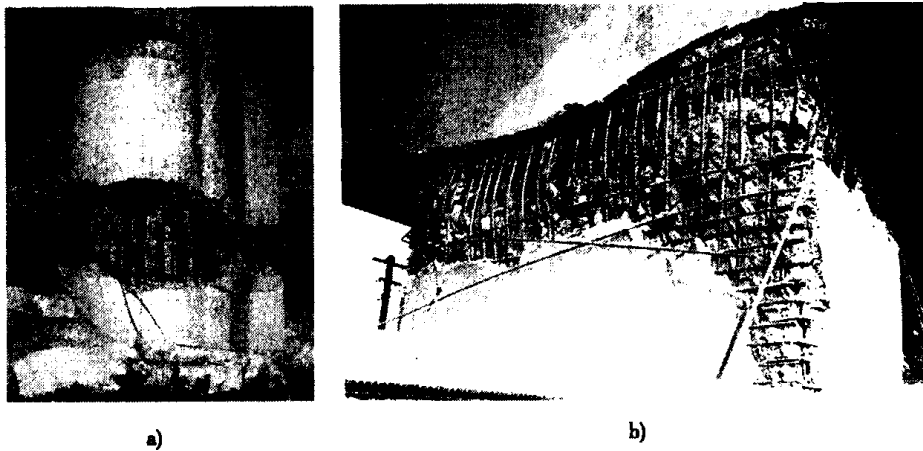


图 1.4 桥墩弯曲破坏实例

(2)剪切破坏（弯剪破坏）如图 1.5 所示，在水平地震荷载作用下，当结构受到的剪切力超过截面剪切强度时发生剪切破坏，整个破坏过程可以用以下四个阶段来描述：

截面弯矩达到开裂强度时 截面出现水平弯曲裂缝 如图 1.5a)所示；

随着裂缝的发展和荷载强度的提高，柱内出现斜方向的剪切裂缝，如图 1.5b)所示；

局部剪切裂缝增大，箍筋屈服导致剪切裂缝进一步增长，如图 1.5c) 所示；

发生脆性的剪切破坏 如图 1.5d) 所示。

地震时，剪切破坏是桥梁遭受致命性破坏的重要原因，这种形式的破坏比较多见。图 1.6 为发生剪切破坏的一些实例，梁桥因桥墩剪切破坏而失去了承载能力。

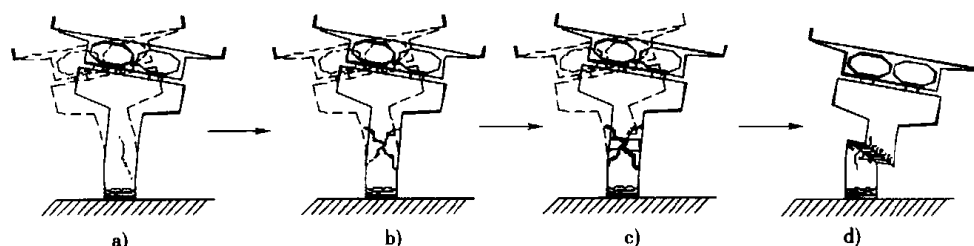


图 1.5 桥墩的剪切破坏过程

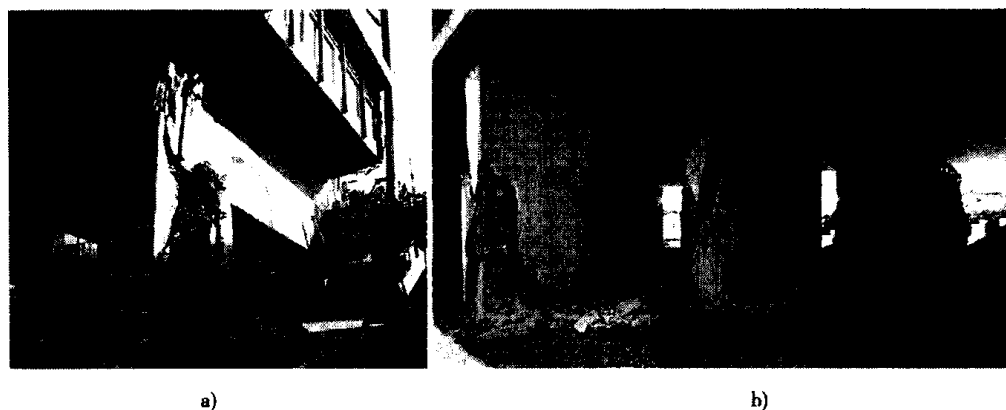


图 1.6 桥墩剪切破坏实例

(3)落梁破坏 当梁体的水平位移超过梁端支撑长度时发生落梁破坏。落梁破坏的主要原因是由于梁与桥墩（台）的相对位移过大，支座丧失约束能力后引起的破坏形式，发生在桥墩之间地震相对位移过大、梁的支撑长度不够、支座破坏、梁间地震碰撞等情况。图 1.7 为日本兵库县南部地震中西宫大桥和阪神高速公路桥梁发生的落梁破坏以及破坏机理，其中西宫大桥主要由于软弱地基中不同墩间相对位移过大引起支座破损，最终导致落梁破坏，而阪神高速公路高架桥的落梁破坏则由于其中的一个支座损坏后梁间追尾碰撞所引起。

(4)支座损伤 上部结构的地震惯性力通过支座传到下部结构，当传递

荷载超过支座的设计强度时支座发生损伤、破坏。支座损伤也是引起落梁破坏的主要原因。对下部结构而言，支座损伤可以避免上部结构的地震荷载传到桥墩，避免桥墩发生破坏。图 1.8 为支座地震破坏的实例。

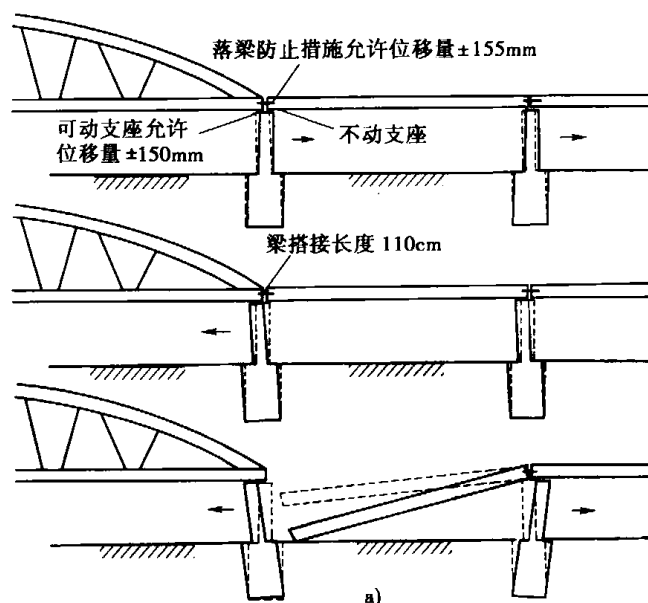
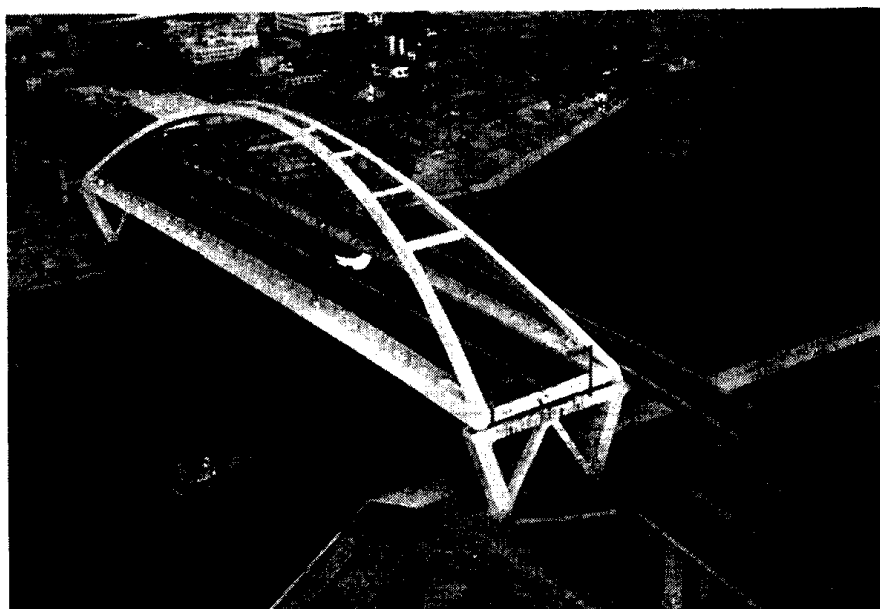


图 1-7

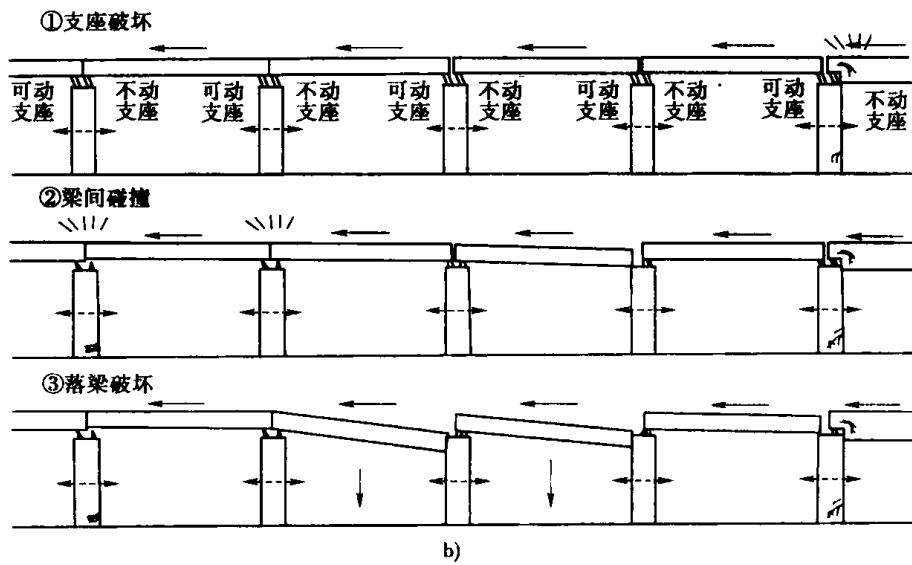
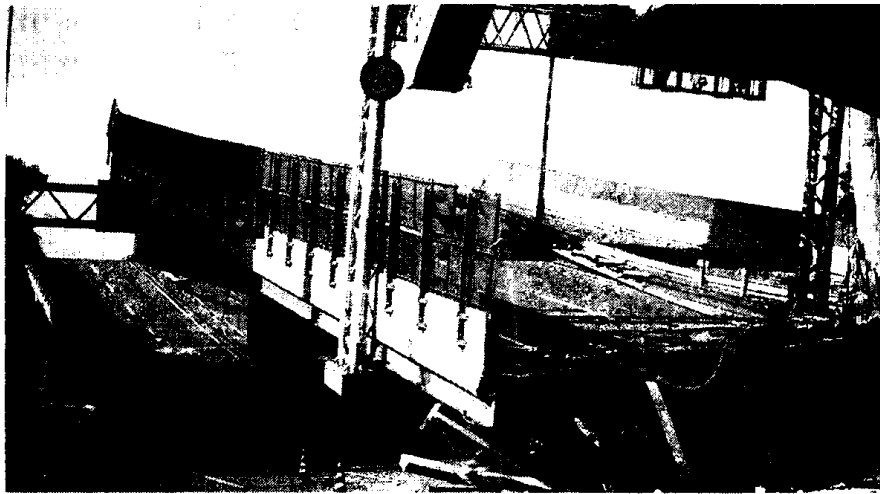


图 1.7 落梁破坏实例

a)西宫大桥 ;b)阪神高速公路桥梁

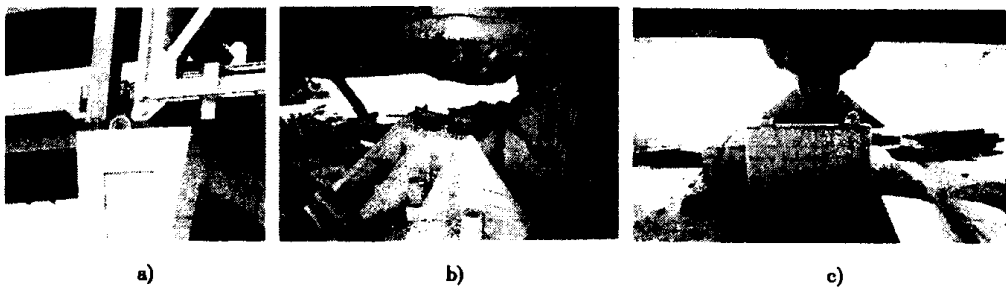


图 1.8 支座损伤实例

1.4 最近主要地震中桥梁破坏的经验教训

在历史上所发生的各次大地震中，桥梁、道路虽然均有不同程度的破坏记录，但是，早期地震由于桥梁总量十分有限，而且人们日常生活对桥梁的依赖程度也相对比较低，地震中桥梁的倒塌破坏往往不太引起注意，对结构物的地震破坏主要关心的是建筑物是否倒塌。随着城市交通建设的迅速发展自 20 世纪 60 ~ 70 年代前后，特别是 1971 年美国洛杉矶发生 San Fernando 地震以后，桥梁的地震破坏逐渐受到重视，地震中因桥梁破坏引起的次生灾害也越来越显著，这些地震中的桥梁破坏比较有代表性。

以下，以近几年来地震中桥梁结构所遭受到的地震破坏为例，介绍地震破坏的形式及教训。有关 1976 年唐山地震和 1994 年美国 Northridge 地震中桥梁的破坏情况，文献 [1] 已经作了比较详细的介绍，这里从略。

日本兵库县南部地震中桥梁破坏的基本特征和经验教训

日本是一个多地震国家，长期以来为了减轻地震灾害损失投入了大量财力和人力从事结构抗震研究 尽管如此 在 1995 年 1 月 17 日发生的兵库县南部地震 (震级 M7.2 的内陆地震) 中以神户市为中心仍然遭受到了严重的地震破坏 地震中死亡人数达 6433 人 许多结构物被毁 直接经济损失达约 10 兆日元 (1 元人民币相当于 14 日元)。这次地震对桥梁的破坏尤为严重 城市高架桥、高速公路、铁路桥都不同程度地遭受到地震破坏 高速公路桥和铁路桥的地震损失达约 9000 亿日元。地震中除混凝土桥梁发生倒塌破坏外，钢桥也首次在地震中遭受严重的损伤。根据地震以后的分析结果，钢筋混凝土桥墩 (特别是独柱式) 地震破坏的基本特征是剪切强度不足、延性差。

在这次地震中 阪神高速神户 3 号线皮尔茨桥梁的倒塌破坏最引人注目 (图 1.9)。该桥为独柱式悬臂结构 (类似于 T 形刚构)，地震中桥梁整体在横桥方向发生了倒塌破坏。对于该桥的倒塌过程和破坏机理分析在学者之间有不同的见解，一般认为剪切强度不足、配筋过少和不适当的纵筋截断是地震破坏的重要原因。图 1.10 为该桥的结构形式、桥墩配筋构造以及倒塌的机理。如图 1.10b) 所示，在纵筋截断截面由于弯曲裂缝贯通导致剪切强度下降，引起倒塌破坏。

在日本兵库县南部地震中，大量桥梁发生地震破坏的最根本原因是结

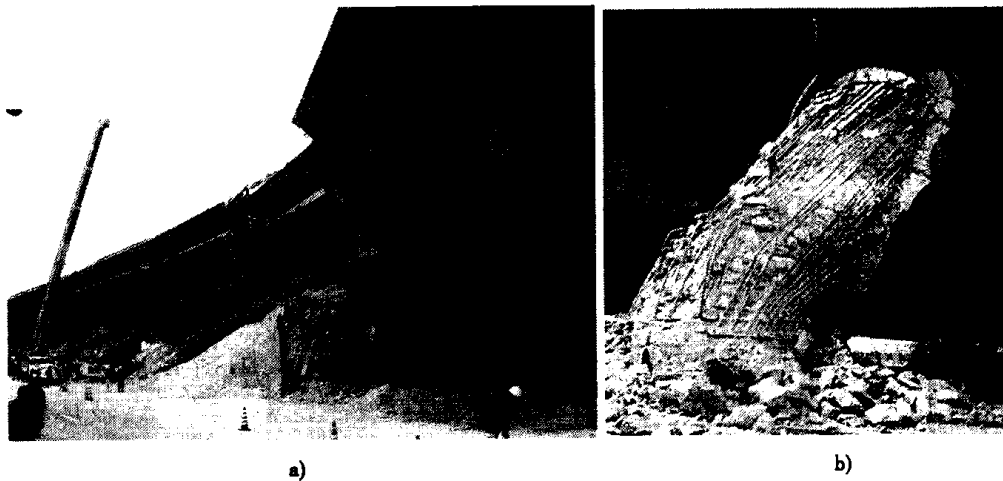


图 1.9 神户高速 3 号线皮尔茨桥横向倒塌破坏

构受到的实际地震荷载超过设计地震荷载。倒塌或遭受严重破坏的桥梁以按 1964 年颁布的规范设计的桥梁为主，设计所用的加速度反应谱峰值仅为 $200 \sim 400 \text{cm/s}^2$ 而桥梁实际承受的地震波反应谱峰值达 $1g$ 甚至到 $2g$ (g 为重力加速度)。由于抗震设计采用的是弹性理论，设计时没有验算屈服以后的结构变形，因此，当地震荷载超过弹性响应的范围时，实际地震内力分布与计算结果不一致，强度不足或配筋不合理的桥梁在地震中发生倒塌或落梁破坏。

地震灾害表明，对具有相当随机性质的地震现象，结构可能受到的地震荷载在设计阶段很难估计，只按弹性设计理论不能有效地防止桥梁的地震破坏，抗震设计不但在弹性范围而且也应 在弹塑性范围确保结构的安全。兵库县南部地震以后，日本新的公路桥梁抗震设计规范完全采用了两阶段设计方法，对于中小地震、强地震分别按弹性理论和弹塑性理论设计，满足中小地震不损伤、大震可以修复的抗震设防要求。

2 台湾集集地震中桥梁破坏的基本特征和经验教训

1999 年 9 月 21 日在台湾省发生的集集地震为震级 $M7.6$ 级的内陆地震，地震中死亡人数 2405 人、负伤人数超过 8000 人、行踪不明者 79 人。以台中县南投市为中心，许多建筑物、结构物遭受到了地震破坏。地震破坏比较严重的桥梁有 10 多座，而且主要发生在横跨断层的桥梁。断层位置的桥墩之间发生高差达 $2 \sim 10\text{m}$ 的相对竖向位移，这种破坏形式在过去的地震中较为罕见。这次地震中虽然也有一部分桥梁因受到的惯性力过大引起结构

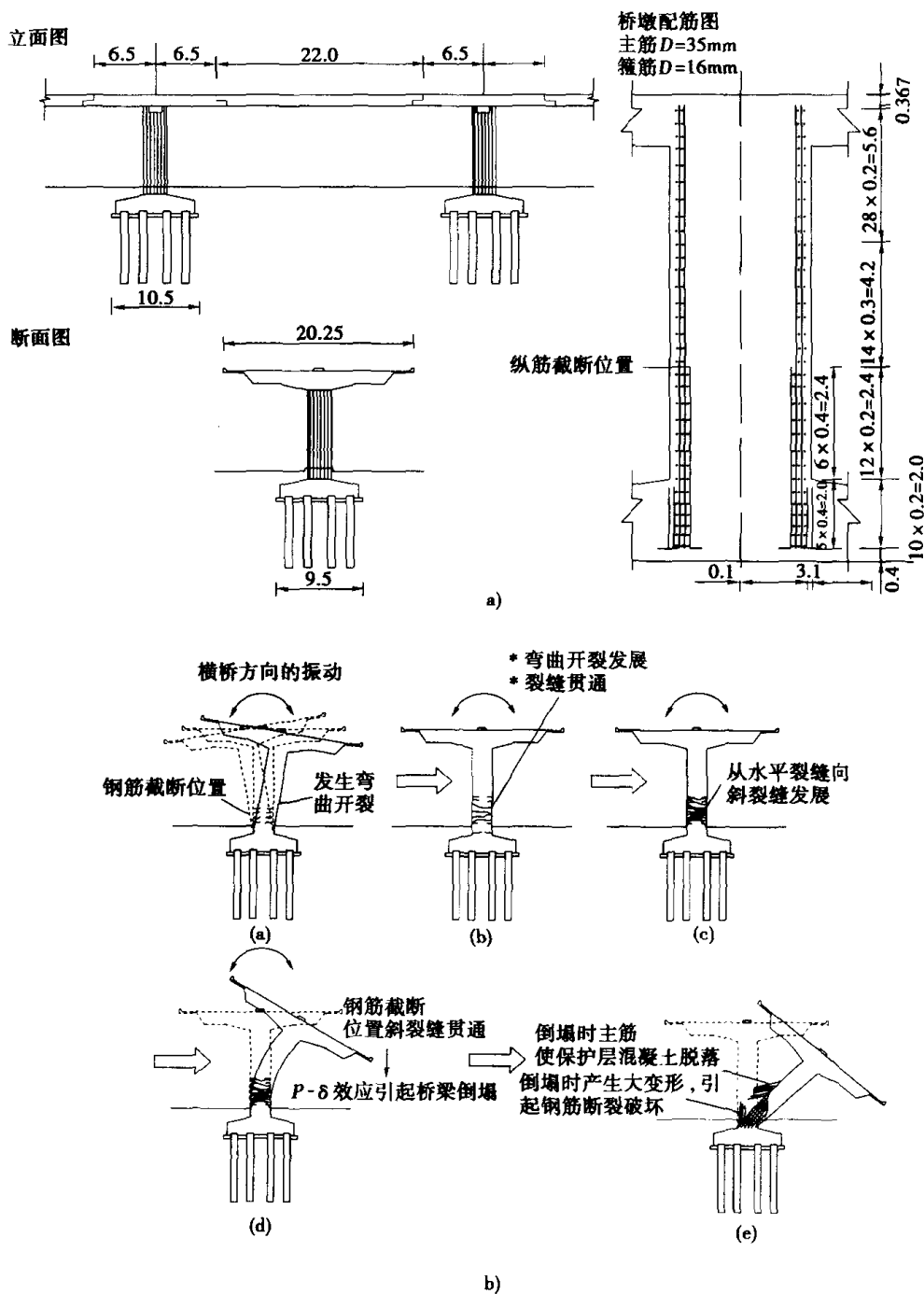


图 1.10 阪神高速神户 3 号线皮尔茨桥的结构形式和桥墩地震破坏机理 (尺寸单位: m)

a) 结构形式和配筋, b) 破坏机理分析

损伤, 但是总体上讲, 相对位移和地基失效引起的支座破损、钢筋混凝土桥墩损伤、落梁破坏等是桥梁地震破坏的主要原因, 与前述日本兵库县南部地

震相比有明显的差别。图 1.11 为集集地震中桥梁破坏的情况，落梁破坏、剪切破坏、支座破损比较显目。

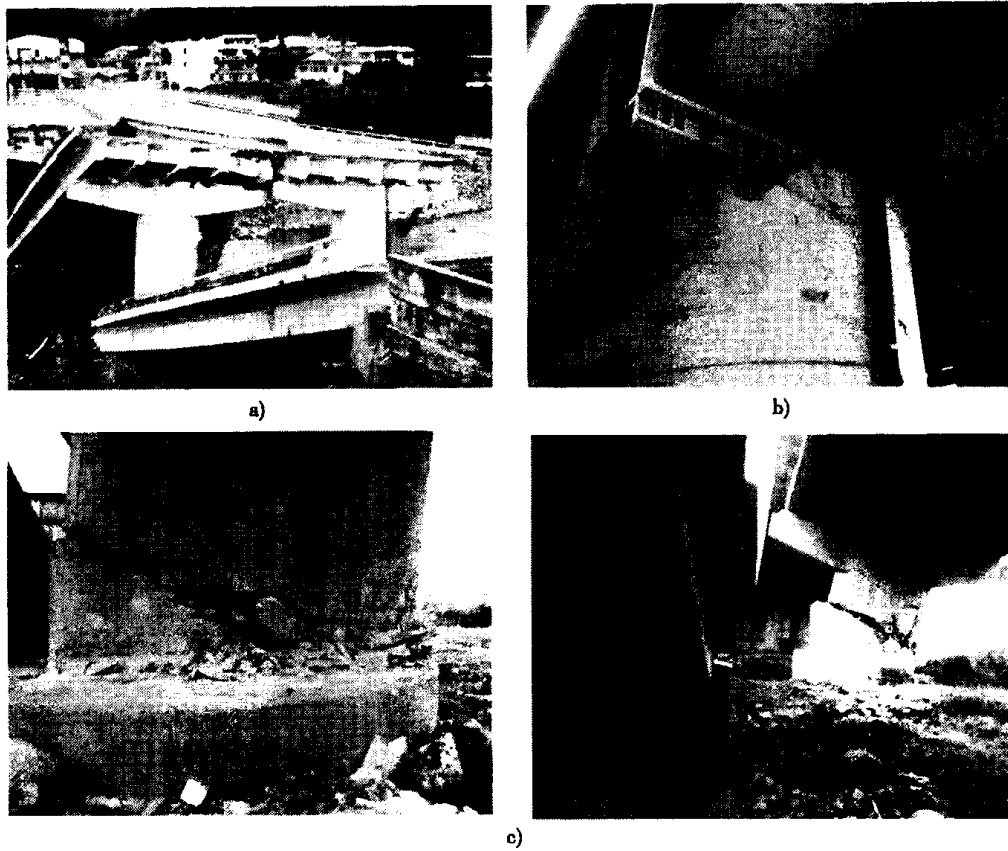


图 1.11 台湾集集地震中桥梁的破坏形式

a) 石围桥(分离式 3 跨简支曲线桥); b) 锚罗溪桥支座破坏; c) 鸟溪桥的下部结构(双幅分离式 17 跨简支梁桥)

台湾集集地震中桥梁破坏的主要特征是由断层位移所引起，而过去的抗震设计研究过于强调设计地震荷载的大小，缺少对断层位移影响的研究，集集地震中出现的问题显露出目前抗震研究工作的不足和局限性，今后对发生 5~10m 断层错位的结构如何保持其机能是抗震研究所面临的新课题

3 土耳其 Kocaeli 地震桥梁破坏的基本特征和经验教训

1999 年 8 月 17 日在土耳其西北部工业城市 Kocaeli 南约 11km 处发生震级 M7.4 的地震，18000 多人在地震中被夺去了生命。桥梁发生的地震破坏主要由横越断层的桥梁发生过大的地震位移所引起，在遭受地震破坏的

桥梁周围断层达 4m 以上，受到地基变形的影响，基础、下部结构发生比较大的相对移动，一些桥梁发生了落梁破坏、支座破损、梁体移位等损坏。

图 1.12a) 为 Sakarya 桥的落梁破坏情况。该桥横越断层位置，由于较大的相对位移，桥梁发生了与台湾集集地震相似的破坏形态。图 1.12b) 为连接 SEKA 造纸厂的工厂专用桥梁地震破坏照片，由于下部结构（圆柱形独柱式桥墩）的剪切破坏，桥梁发生了致命性损坏。土耳其 Kocaeli 地震中桥梁的破坏形式总体上与台湾集集地震时的桥梁破坏形式有相类似的特点，场地的相对位移是桥梁破坏的主要原因。

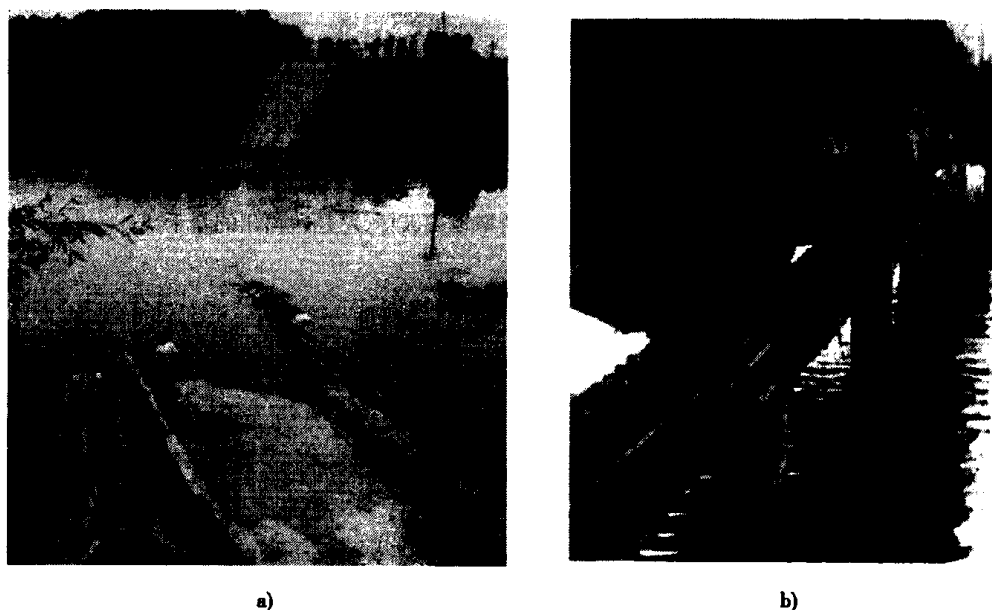


图 1.12 土耳其 Kocaeli 地震中桥梁破坏形式

a) Sakarya 桥落梁破坏 (多跨简支); b) SEKA 造纸厂通道桥墩地震破坏

4 日本新泻县中越地震的破坏特征和经验教训

日本在 1995 年发生兵库县南部地震以后，对桥梁的抗震设计方法进行全面的修改，至 2002 年，对既有桥梁的抗震性能评估和加固基本结束，按新的抗震设计标准加固的桥梁理应不容许出现剪切破坏先行的破坏形式。2004 年 10 月 23 日发生的新泻县中越地震（震级 M6.8 级 死亡 30 余人）检验了抗震加固的效果，经过加固以后的桥梁在地震中基本上没有发现剪切破坏的现象，而没有经过加固的桥梁出现如图 1.13 所示的剪切破坏形式，剪切强度低对桥梁抗震性能影响的严重性再次得到验证。这次内陆直下型

地震的最大烈度小于 1995 年的兵库县南部地震，桥梁的破坏程度总体上并不显著，与公路桥相比，铁路桥的破坏相对比较严重，发生弯曲破坏的桥梁经过修复后短时间内恢复了使用功能。



图 1.13 新泻县中越地震中铁路桥墩地震破坏（跨越鱼沼川的新干线）

5 地震类型与地震破坏力

包括 1994 年美国 Northridge 地震在内，桥梁破坏比较严重的地震都属于内陆直下型地震，这类地震的特点是震源浅、震中位置离受灾地区的距离近，瞬间产生强大的地震运动，结构在强烈的地震荷载作用下发生破坏，比板块断层地震更具有破坏力。

为了比较内陆直下地震与板块断层地震之间的场地运动不同特性，图 1.14 给出了两种地震中记录到的地震波波形。图 1.14a) 和 b) 为内陆地震的地震波，无论是日本兵库县南部地震还是美国 Northridge 地震都是在数秒内发生极大的地震运动，但是，强地震运动的持续时间并不是十分长。图 1.14c) 为日本钏路冲地震中记录到的地震波，钏路冲地震属于板块断层地震，如图所示，与前者的内陆地震相比，板块断层地震中强地震运动的持续时间比较长。如果比较一下图 1.14 中三条地震波的加速度值，可以看出它们间的最大加速度差异并不很大，但是桥梁的破坏情况却绝然不同，在后者的地震中（钏路冲地震）桥梁基本上完好无损而在兵库县南部地震和美国 Northridge 地震中却发生了相当严重的破坏，因此，用地震波最大加速度评价地震破坏力，不能完全反映出地震运动的本质，反而容易造成判断上的失误。现行抗震设计规范根据峰值地面运动的最大加速度判断场地危险度是比较片面的设计理论。

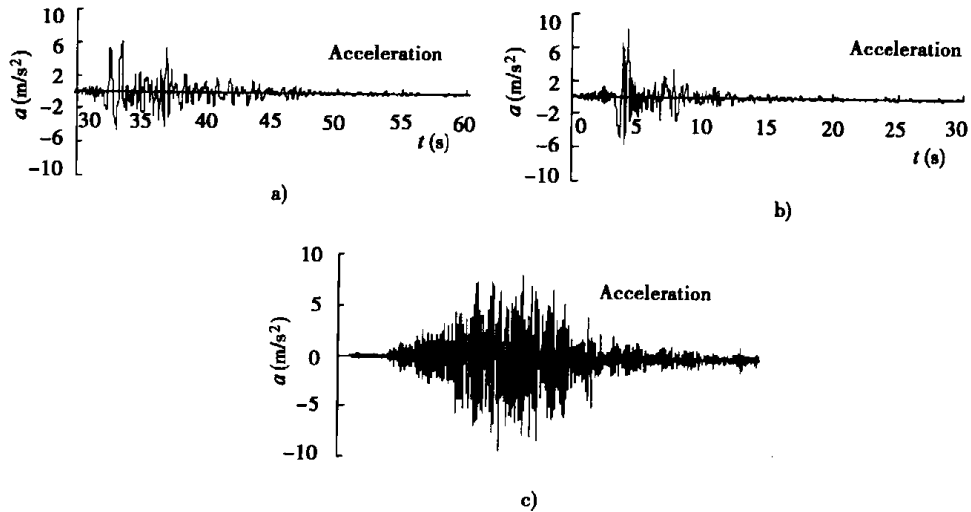


图 1.14 内陆地震和板块断层地震的地震波对比

a)日本兵库县南部地震 ;b)美国 Northridge 地震 ;c)日本钏路冲地震 (1993 年 ,钏路气象台 ,EW 方向)

1.5 桥梁抗震设计方法的变化

地震中结构物的破坏资料为桥梁抗震技术研究提供了最有效、最直接的试验依据。一个多世纪以来,随着地震损伤和破坏资料的积累,桥梁抗震设计理念和计算方法发生了比较大的变化,在许多方面已经取得了不少共识,设计思想正趋向于统一。具体变化主要反映在以下几个方面。

(1) 提高结构延性

根据过去的桥梁地震破坏情况,改善结构延性是提高桥梁抗震性能的重要因素。为了抵抗桥梁遭受意外的惯性力作用,防止结构在损伤以后发生倒塌性破坏,在钢筋混凝土结构中可通过提高核心混凝土的套箍效应、避免脆性的剪切破坏、控制损伤截面等措施来提高结构的延性。

(2) 验算结构损伤以后的变形性能

弹性理论仅当截面应力在弹性范围内时成立,如果结构的地震响应超过了弹性应力,按弹性理论设计的桥梁的抗震安全性得不到保证,因此,设计阶段通过对结构在弹塑性范围内变形能力的验算,避免结构在强震时发生致命性破坏。

(3)地震响应计算方法的改进

结构的地震响应是动力学问题，早期采用的静力计算方法不能合理地预测结构在地震过程中的响应。最近，随着实测地震波的积累和对场地运动特性认识的不断深入，桥梁地震响应计算从静力算法向动力算法变化，更加真实地模拟结构在地震过程中的力学行为。

(4)多阶段设计方法

弹性设计理论只有当结构内力在弹性范围内时成立，它不能预测结构的弹塑性地震响应，因此当结构的地震响应超过设计地震荷载而进入弹塑性范围时，仅按弹性理论设计的结构不能保证结构在强震时的安全。相反，延性设计方法是容许结构在强震中发生一定损伤的设计体系，难以兼顾中小地震条件下的抗震性能，因此，桥梁抗震设计从过去单一设计地震荷载向多阶段设计地震荷载方向变化，小地震采用弹性理论、大地震采用弹塑性理论设计 对不同阶段设定不同的抗震设计目标 实现小震不坏、中震可修、大震不倒的抗震设计概念。

(5)减隔震结构的应用

减隔震结构是利用结构的振动周期特性和阻尼特性减轻地震荷载的设计方法，即通过长周期化和高阻尼吸收地震能量的方法减少地震荷载强度。目前已经开发出多种减隔震装置 如高阻尼叠层橡胶支座、铅芯橡胶支座、滑动支座和多种阻尼装置，并在桥梁抗震设计中得到了应用。特别是如高阻尼叠层橡胶支座、铅芯橡胶支座的应用在一些国家的桥梁抗震设计中已经十分普及。

(6)配筋构造和落梁防止措施

为了提高结构的延性，对箍筋的配置方法和锚固构造提出了比较高的要求，确保核心混凝土的延性。同时为了提高桥墩的结构延性，对纵筋截断截面提出了比较严格的要求，确保塑性铰能按设计所要求的截面位置出现。

1971年 美国洛杉矶郊区发生的 San Fernando 地震中，以高速公路桥梁为主发生多起落梁破坏 此后 以美国、日本等多地震国家为中心 桥梁设计规范开始提出了设置落梁防止措施的要求，经过历次地震以后，不但防止落梁措施的有效性得到了普遍的认可，而且对它的设计提出了更高的要求。

抗震设计标准的确定不单是安全要求的问题，而是包含着设计理念、经济指标和安全等级的平衡、民众的期待、地震的综合防灾机能等许多复杂的因素，因此需要根据风险评估、危机管理等综合地震防灾系统的要求来确立桥梁抗震设计体系

1.6 结构地震响应分析方法

桥梁抗震设计中地震响应计算方法从静力计算方法向动力计算方法转变,随着计算机的发展和普及以及桥梁结构形式的复杂化、多样化,有限单元数值计算方法成为桥梁结构动力分析的主流。

动力分析包括计算模型、结构动力特性以及外力作用下动力响应计算几个部分。计算模型是影响计算结果是否合理的首要前提,因此需要根据结构形状、外力作用方式、结构振动特性等实际情况综合判断,适当选择。严格地讲,桥梁的地震响应要从三维结构考虑,但是,通常的桥梁为纤细结构,而且地震荷载又以低阶振型的影响为主,因此抗震设计一般以杆系结构模型为主,只有某些特殊场合,比如计算需要模拟地震波在土层中传播影响等情况时,计算模型中的一部分或全部应采用二维或三维单元。

同静力计算一样,动力分析也有线性和非线性两种情形,而非线性分析又包括几何非线性、材料非线性和双非线性三种形式,在计算分析时需要根据地震荷载的大小、结构形式以及结构物的重要性等实际情况考虑采用。当地震荷载比较小且结构具有一定刚度时,地震响应可以按线弹性理论计算。几何非线性是考虑结构形状变化影响的计算方法,一般用在柔性桥梁,比如大跨度悬索桥、斜拉桥等柔性结构在地震时几何形状变化显著的情形。考虑塑性影响的弹塑性地震响应是延性设计的基础,也是本书中将要讨论的重点。

参考文献

- [1] 范立础.桥梁抗震.上海:同济大学出版社,1997
- [2] 中华人民共和国交通部.公路工程抗震设计规范(JTJ 004—89).北京:人民交通出版社,1989
- [3] 中华人民共和国交通部.公路桥梁抗震设计规范(征求意见稿)
- [4] 日経コンストラクション编.土木が遭遇した阪神大震災日経BP社,1995
- [5] 社团法人日本建設コンサルタンツ協会.阪神・淡路大震災被害調査報告書.1995