



美国公路桥梁 加固设计与实例

张鸿直◇著

中国建筑工业出版社

美国公路桥梁加固设计与实例

张鸿直 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

美国公路桥梁加固设计与实例 / 张鸿直著. — 北京:
中国建筑工业出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-112-18602-0

I. ①美… II. ①张… III. ①公路桥—桥梁工程—
加固—桥梁设计—美国 IV. ①U448. 145. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 250518 号

美国公路桥梁加固设计与实例

张鸿直 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

北京永峥印刷有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 4 $\frac{1}{8}$ 字数: 113 千字

2016 年 2 月第一版 2016 年 2 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978-7-112-18602-0

(27824)

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)

本书作者根据自己在美国从事桥梁设计 21 的经验，将所参与、主持的各大桥梁抗震加固设计项目进行总结分析。全书共包含 11 个抗震加固设计实例，既有常规的桥梁抗震加固，也有复杂特殊的桥梁加固设计，需要根据地震灾害的详细分析之后，才能找出加固和维修的方法。

本书适用于从事桥梁设计、桥梁施工、桥梁抗震加固、桥梁健康检测等行业的技术人员、管理人员，以及相关专业高等院校师生。

* * *

责任编辑：郇锁林 朱晓瑜

责任设计：董建平

责任校对：刘 钰 姜小莲

前 言

华盛顿州是地震多发地区，有仪器记录在案的破坏性地震就发生过十几次，其中包括 1949 年的 Olympia 地震（里氏 7.1 级），1965 年的西雅图地震（里氏 6.5 级）和 2001 年的 Nisqually 地震（里氏 6.8 级）。自 1989 年加州旧金山市大地震中造成桥毁人亡的重大事故以后，华盛顿州政府拟定了一个全州公路桥梁抗震加固的 20 年的计划，以增加桥梁在地震荷载下的安全性。

美国的高速公路网是在 20 世纪 60 年代建成的。然而，联邦政府的公路桥梁设计规范（AASHTO）直到 1983 年才有地震荷载的叙述，并且仅放在规范的附录 A 中。桥梁抗震在美国真正得到重视和发展还是 20 世纪 90 年代的事。

自 20 世纪 90 年代以来，美国的汽车工业迅猛发展，交通压力逐年增加。因此，州政府必须不断建造新的桥梁和拓宽过于狭窄的既有桥梁。政府用于桥梁的预算本来就紧张，桥梁的抗震加固的新需求更使交通预算雪上加霜。为平衡新桥建造（包含桥梁拓宽）和桥梁抗震，州政府从交通预算中拿出 3.75 亿美元作为桥梁抗震总预算，分 20 年完成全州的桥梁抗震。

桥梁抗震的资金有限，又不能准确地预测地震在何时何地发生，因此，迫使桥梁抗震的进行必须本着先易后难，“花最少的钱，办最有效的事”的优化原则，赶在强震之前完成既定目标。本书的第一篇着重介绍了桥梁抗震加固的计划，按轻重缓急制定的桥梁加固次序、加固方法、技术细节和若干项目的设计和施工实例。

大型复杂的公路桥在华盛顿州的公路系统中至关重要。如果这些桥梁在强震中坍塌或严重受损，需要大量的资金和数年

的时间才能重建，所以这些桥是桥梁抗震计划的“重点保护对象”。经过对全州的桥梁的重要性的全面评估，从中选出对全州的交通和经济具有较大影响的 25 座，重点进行地震灾害分析和抗震加固。

除这 25 座重点桥之外，其余的桥梁也必须有一个抗震加固的次序。

从抗震加固的轻重缓急来说，老桥因热胀冷缩缝处的支撑结构设计过小，其中的一跨或几跨在不太强烈的地震来临时，就会滑出支撑，造成整跨塌落。地震限位器造价低，施工方便，却可以把桥梁的上部结构连接成一个整体，防止整跨或多跨的滑出塌落，属于“花小钱，有大用处”。有人会说，“上部结构连在一起的桥梁仍然会因为柱子或基础的破坏而垮塌”。这话不错，但造成这一损坏的地震强度必定比造成从热胀冷缩缝处滑出支撑的地震要更强才行。因此，设置地震限位器被放在最优先的位置。

同样的道理，每个桥墩只有单一柱支撑的桥比每个桥墩设有多个柱的桥容易垮（如果多根柱中的一根损坏，其他柱还有可能在停止桥上交通的情况下勉强支撑，直到采用急救措施临时加固）。所以，单一柱的桥应先于多柱的桥进行柱的加固。

从地震发生的规律看，地震多发地的大震的次数较低，而小震较为频繁。遵从先地震限位器，再单柱加固，后多柱加固的时间次序，每完成一步，桥梁的抗震能力就上了一个台阶。所以这种阶梯式的加固理念应当是在经费有限的条件下最优化的选择。

基础结构在抗震加固中虽然也很重要，但开挖土壤、在地下施工，都是耗资巨大的工程，州政府一时拿不出这么多钱来，只好暂时搁置。不过，在进行结构分析时，基础结构仍应放入计算机模型中，以便对整个结构在地震中可能发生的损坏做到心中有数。

加固基础的科研项目花钱有限，理应支持。一旦预算增加

或基础遭到强震损坏，这些科研成果即可派上用场。

隔震器是抗震加固的新技术。结构在安装隔震器后，可以改变结构振动的自然频率，减少结构吸收的地震能量。隔震器还可以把进入结构的地震能通过隔震器内部的摩擦，转化成热能，起到增加阻尼的作用。安装隔震器的结构如果因结构刚度降低，位移过大，也可以和阻尼器联合使用，效果更佳。一般来说，在刚度强、体积庞大、振动频率高的土木结构上安装隔震器，其减震效果最好。

桥梁的设计一般应当遵守联邦政府和州政府的设计规范，若不遵守规范进行设计，一旦桥梁出现问题，设计工程师必须承担法律责任。

然而，规范不是简单的教条，而是经验的总结。对规范，需要活学活用，尤其是遇到特殊或复杂的桥梁设计，没有经验可以借鉴，那就需要设计工程师具有扎实的理论基础和实践经验，再加上创新精神，才能设计出优化的结构。

在斜拉桥的设计中，根据桥小、钢缆短的特点，使用经简化的线性分析代替繁杂的非线性分析，既保证了分析的准确性，又节约了时间；在大曲率钢桥的设计中，根据几根主梁上荷载分配差距大的特点，突破了规范要求的主梁数目要求，节省了造价，还将桥面板的设计从两边固定改为较薄的四边固定面板，满足了抗震要求。此外，在一座岩土情况非常复杂的过河桥设计中，由于使用了大型桩柱底部加灌高压混凝土和“三摩擦层面”单摆式隔震器两项新技术，不但实现了优化设计，减少了施工的困难（尤其是避免了在水中吊装过重的钢筋笼），还比常规的设计方法节约了两百万美元的施工费用。

桥梁的设计在不断发展，新的理论、公式、技术、计算机软件和设备层出不穷。如今，新一代桥梁工程师已逐渐显露头角，挑起大梁，但设计桥梁的能力还是无法脱离经验的积累这一基本规律。本书所叙述的这些设计实例，希望能对今后的桥梁设计和加固有参考的价值。

目 录

上篇 公路桥梁抗震加固计划 and 设计实例	1
实例一 塔科玛耐瑞斯悬索桥的地震灾害分析研究	27
实例二 斯波坎街大桥的地震灾害分析和加固维修	35
实例三 阿罗拉大道桥 (Aurora Avenue Bridge) 的 抗震加固	44
实例四 舍黑利斯张开桥 (Chehalis River Bridge) 的抗震加固	53
实例五 用土办法解决大问题	59
实例六 阿拉斯加双层公路桥的地震灾害分析	65
下篇 公路桥梁设计和实例	75
实例七 塔科玛斜拉桥的设计	87
实例八 西雅图市第一南大道张开桥的设计	93
实例九 塔科玛 I-5/SR16 连接桥之西北大桥的设计	101
实例十 梦露市 SR522 和 US2 公路大曲率连接桥的设计	106
实例十一 SR522 跨越斯诺阔密士河公路桥的设计	113
后记	122

上篇 公路桥梁抗震加固 计划和设计实例

一、华盛顿州的公路桥梁抗震加固计划

1989 年 10 月 17 日，美国加州的旧金山湾区发生了里氏 6.9 级的强烈地震（Loma Prieta Earthquake），造成了 270 人死亡。其中，塞浦路斯双层公路桥的好几跨坍塌。由于正值下班高峰，很多车辆被压扁在两层公路桥之间，50 多人当场被压身亡（图 S-1）。

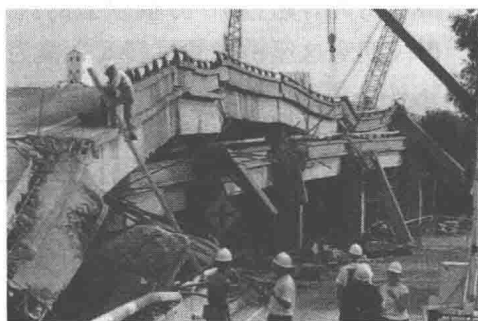


图 S-1 毁于 1989 年旧金山大地震的
塞浦路斯双层公路桥

旧金山大地震造成了几座大型公路桥的坍塌和几百人的伤亡，对全美的公路桥梁的抗震能力提出了新的挑战。地震发生后，加利福尼亚州政府立即紧急拨款 20 亿美元，启动了对全州老桥的抗震维修工程。加州是美国地震频发的地区，小震是家常便饭，大震十几年一次。为了赶在下一一次的大地震前完成这

一宏伟的计划，加州的州政府还提出了“老桥的抗震加固工作要与时间赛跑！”的口号。从此，桥梁抗震的研究、设计和施工便在加州轰轰烈烈地开展起来。

在制定老桥抗震计划前，统计了州内有地震记录的几次强震，包括：1949年4月13日的奥林匹亚地震，震级为里氏7.1级；1965年4月29日的西雅图地震，震级为里氏6.5级；2001年2月28日的尼斯珂利地震，震级为里氏6.8级。根据美国联邦政府负责地震监测和预报的USGS的历史资料，1874年还在华盛顿州的中部偏北发生过里氏7.2级的舍兰地震。按照地震发生的历史资料和统计规律，华盛顿州的地震主要发生在人口稠密的西部地区，包括西雅图、塔科马等大城市。

在西雅图市的市中心繁华地区，有一座顺海湾建造、长达4km的阿拉斯加双层公路桥（图S-2），建于1950年。该桥从结构形式上看，与在旧金山地震中被震毁的塞浦路斯双层公路桥非常相似。由于桥上每天有超过10万辆以上的汽车通过，在旧金山大地震后，市民们对这座桥梁的抗震安全极为关切。

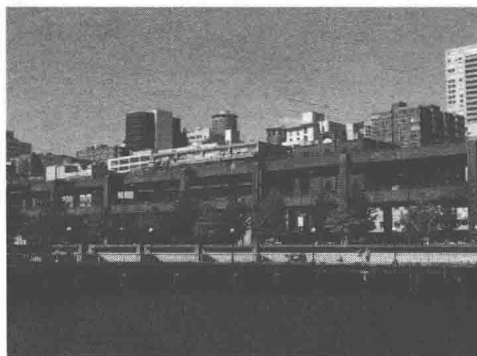


图 S-2 位于西雅图市中心的阿拉斯加双层公路桥

旧金山地震发生后，州政府交通部首先根据西雅图市民的要求，责令桥梁和结构办公室立即对阿拉斯加双层大桥进行初步的地震灾害分析，并根据分析结果决定是否应当采取抗震加

固措施。

接到任务后，桥梁和结构办公室立即组成了一个小组，对阿拉斯加大桥进行突击式的分析。但由于缺乏详细的桥梁基础周围的岩土资料，很多关键的结构分析条件都是人为假设的。再加上时间的限制，结构的分析也基本采用频率谱的线性分析。分析报告完成后，交通部认为这一桥梁的地震灾害分析太过简单，还应邀请州内的权威科研机构进一步进行研究，并在此基础上找出抗震维修的有效方法。

与此同时，交通部还从预算中拨出 3.75 亿美元的抗震专款，对全州的公路桥梁进行抗震加固。由于资金和技术力量的限制，整个项目分 20 年完成。由于阿拉斯加大桥的抗震加固比较复杂，在详细的分析研究报告完成之前，维修加固费用尚无准确数字，所以该桥的抗震费用并不包括在这笔专款之内。阿拉斯加大桥的详细地震灾害分析完成之后，州政府再根据抗震加固的需要，另外拨款。

华盛顿州共有 7000 多座公路桥，其中规模较大、较复杂的 3000 多座属于州政府管辖，其余的 4000 多座较小的桥，则分别由各州内的市县管辖。由于华盛顿州西部人口稠密，交通需求高，所以大部分公路桥实际上坐落在有较高抗震要求的西部，抗震加固任务很重。

美国的公路网主要建造于 20 世纪 60 ~ 70 年代。由于那时的桥梁设计规范没有包括地震荷载，因此，大多数公路桥都不具备抵抗强烈地震的能力，需要按新的抗震要求进行加固维修。

华盛顿州用于抗震维修的 3.75 亿美元经费，需要对上千座公路桥梁进行抗震加固，平均每座桥还摊不上一二十万美元。为了解决“僧多粥少”的问题，由桥梁办公室负责，制定了一个全州抗震维修的计划，以便按轻重缓急，用十分有限的经费，抢在大地震之前，最大限度地提升桥梁的抗震能力。

下面，对华盛顿州交通部的桥梁抗震维修计划做一扼要的介绍：

1. 抓住重点, 优先解决影响国计民生的关键桥梁的抗震安全

桥梁办公室首先对所有州政府所属的公路桥进行了重要性的分析和排队, 从中挑选出 25 座地处地震危险区的重要桥梁, 作为抗震维修的重点。这些被选出的桥梁不仅规模较大, 造价较高, 一旦在地震中受到损害, 还会对全州的交通运输和经济发展造成重大影响。

按照计划, 这 25 座重要桥梁都必须先进行地震灾害的详细分析, 以便找出问题并决定怎样进行抗震加固。州政府把这些分析研究工作按照州政府交通部、各大学的科研机构-有科研能力的大型私人土木工程公司的能力和特长进行分配, 再由州政府派人统一负责监督和审查这些项目的完成情况和质量。

在这个项目开始之前, 为了摸索桥梁地震灾害的分析研究经验, 桥梁办公室又从这 25 座重要桥梁中选出 3 座作为试点, 立即开启地震灾害的分析研究工作。这三座被选作试点的大桥包括一座大型悬索桥、一座双层的大型钢桁架桥和一座受海水潮汐影响的大型预应力混凝土浮桥。这三座桥的地震灾害分析都由美国著名的大型私人公司完成, 而桥梁办公室则任命专人, 以“桥梁技术专家”的身份负责监督和指导。

华盛顿州的公路桥梁抗震维修计划规定: 被选出的 25 座重要桥梁的地震灾害的分析报告中, 除了需要对桥梁在地震中可能发生的灾害形式做出分析之外, 还要给出抗震加固的具体建议, 包括可行的施工方法和抗震维修的造价估算。考虑到桥梁抗震经费的限制, 这些桥的抗震加固只针对地面以上的梁、板、柱等结构部件。由于埋在地下的基础结构的抗震加固十分复杂, 施工费用很高, 目前的抗震维修计划暂不考虑做基础结构的抗震加固。

20 世纪 90 年代中期, 交通部选出的 25 座重要桥梁的地震灾害分析研究工作基本完成, 但每座桥的抗震项目的施工招标工作则按每一年的桥梁抗震拨款和各个桥的抗震费用的估算逐年排队进行。

2. 花小钱就能解决大问题的抗震加固项目优先进行

桥梁在昼夜和季节变化时会产生热胀冷缩,所以必须在适当的长度设置热胀冷缩的伸缩缝。根据以往地震中桥梁损坏的统计,很多桥梁的损坏就发生在这些热胀冷缩缝处。主要原因是桥两端的桥台和桥中部设置热胀冷缩缝的地方,其下面支撑横梁的宽度设计得太窄,当主梁在地震中的水平位移太大时,会造成主梁的一端滑出下面横梁的支撑面,造成整跨塌落(图 S-3和图 S-4)。

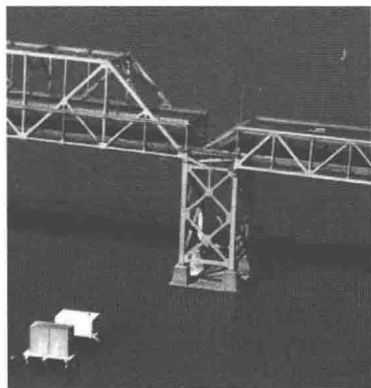


图 S-3 1989 年大地震中其中一跨塌落的旧金山湾区大桥



图 S-4 1994 年加州洛杉矶大地震中整跨塌落的公路大桥

(1) 防止桥梁在地震中整跨塌落的利器——地震限位器 (EQ Restrainer)

美国的地震限位器主要用来限制桥梁在热胀冷缩缝两侧的结构轴向相对位移。其结构形式有加州使用的高强钢缆 (Cable) 限位器 (图 S-5) 和华盛顿州的高强钢筋 (Rod) 限位器 (图 S-6)。

这两种地震限位器从原理上来说,基本是一样的,即把一定长度的钢缆或钢筋的两端分别锚固在热胀冷缩缝两侧的结构上。地震中,靠钢缆或钢筋拉住两边的结构,不让桥梁的任何部分滑出支撑结构而塌落。

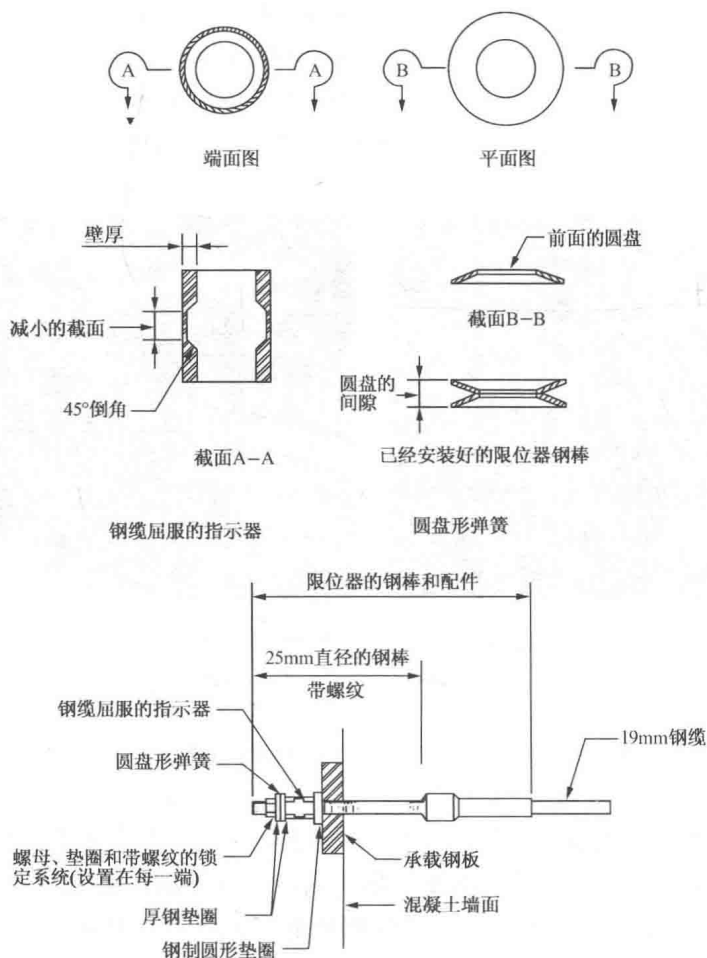
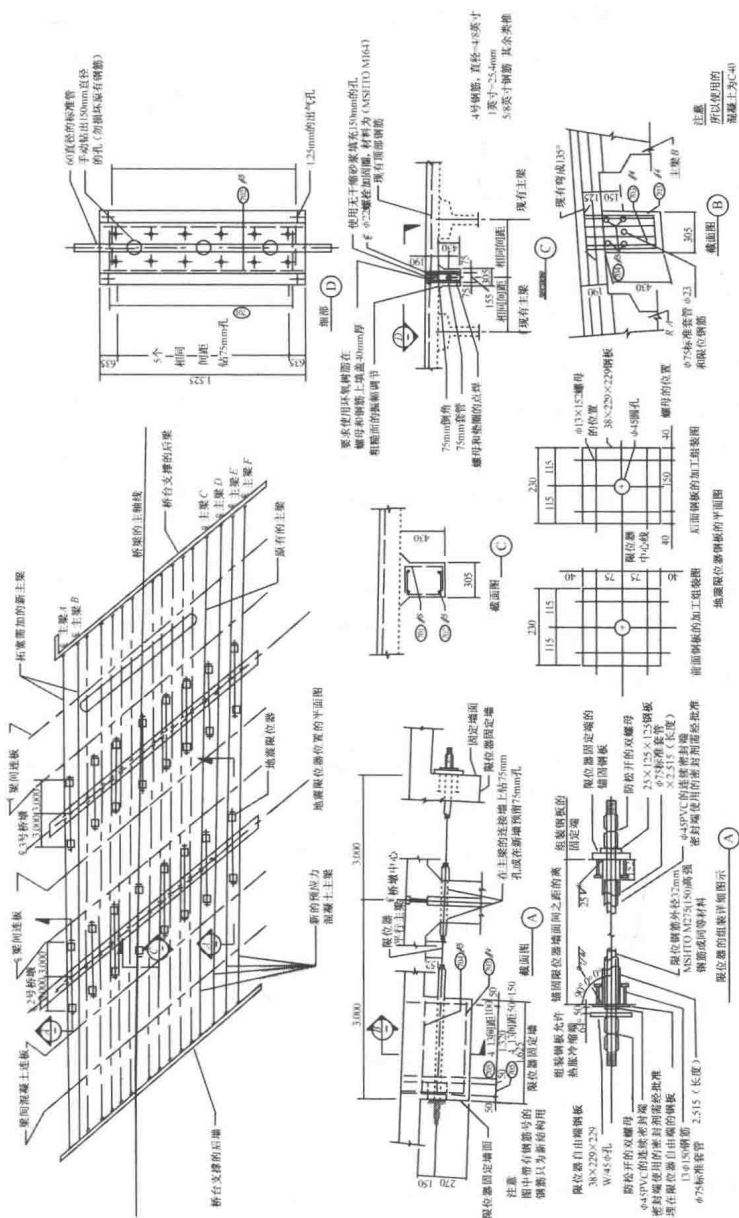


图 S-5 加州使用的高强钢缆 (Cable) 地震限位器



图S-6 华盛顿州加州使用的高强钢筋 (Rod) 地震限位器

根据高强钢筋生产厂商提供的最佳性价比，华盛顿州的地震限位器一般采用 2.2cm 直径的高强钢筋，长度至少 6.1m，作为设计的标准。钢筋标准抗拉强度为 10532kg/cm^2 。限位器的高强钢筋两端设有螺纹，并设有带定位装置的大螺母，以确保螺母在地震中固定在设计的位置。螺母的锁定位置需兼顾桥梁自由热胀冷缩的位移、地震水平位移和支撑结构的尺寸而定。所需高强钢筋的根数，必须经过结构的地震分析得出。如果有些桥梁的地震力太大，必须采用超大直径的地震限位器，设计人员则需和钢筋生产商提前特殊订货。

地震限位器只有轴向抗拉强度，而不具备横向抗剪切能力。为了防止地震限位器在地震中不被横向剪断，华盛顿州在热胀冷缩缝两端的结构中间设计了内灌混凝土的钢筒，一般预埋在桥上的混凝土或其他可供固定之用的结构中。钢筒允许沿着桥的轴向滑动，但同时具备抵抗横向地震水平力的能力。有些老桥可能在设计时设计了钢的或混凝土的横向限位器，但当时可能并不是为抵抗地震荷载的，在设计地震限位器时必须对这些横向限位器进行验算，该加固的加固，以确保桥梁横向的抗地震剪切力的安全性。

地震限位器的成本很低，施工也只限于桥梁的上部结构，简单易行。根据华盛顿州已经完成的项目的平均值，一根 2.22cm 直径的标准地震限位器的材料和施工费用大约在 2500 ~ 3000 美元之间，是花钱少、效果显著的抗震好办法。

由于地震限位器价格便宜，施工简单，在地震中能有效地防止桥梁塌落，目前华盛顿州公路桥梁设计规范要求，新设计的桥梁也必须在热胀冷缩缝两端加装地震限位器。

(2) 桥台上支撑结构的加固维修

公路桥的两端各有一个桥台，桥的主梁的一端或两端（单跨桥）是被桥台支撑的。在已经发生过的地震中，有的桥台的支撑面尺寸太小，造成主梁滑出支撑平面而塌落；有的桥梁设计使用多个互相平行的“工字形”主梁，但没有设计主梁下部的横向限

位器；地震中，主梁上部和桥板相连，刚度很大，但下部较弱，容易发生横向移动，造成主梁的横向失稳或剪切破坏。

针对上述两个可能的破坏形式，桥台上支撑结构的加固维修主要是延长桥台的支撑面的长度和在“工字形”主梁之间放置横向限位器。和热胀冷缩缝处的轴向地震限位器不同，这里的横向限位器是混凝土结构。在主梁底部之间浇灌混凝土前，先要在桥台上钻孔后埋入适当长度和直径的钢筋，使钢筋在桥台上锚固生根，以便把老桥台和作为横向限位器的新钢筋混凝土块紧密地连在一起。

老桥在桥台的支撑机构过去都设计得很窄，主梁在地震中可能会从支撑面沿轴向滑出塌落。为防止主梁滑出支撑面，需要对支撑结构加固维修（图 S-7）。

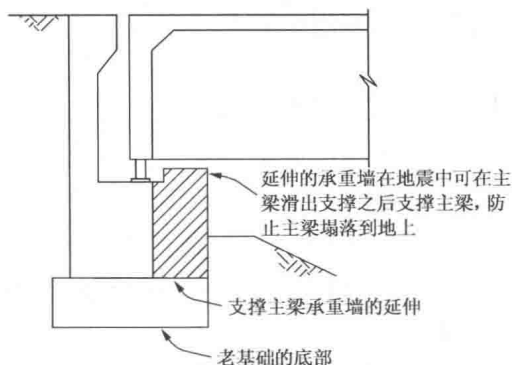


图 S-7 桥台上支撑结构的加固维修

在地震中，主梁很可能出现上下跳动及横向运动的情况。根据加速度的动力学原理，桥台的支撑加固要对新浇筑的混凝土结构和可能从新浇混凝土传递到老构件的附加荷载进行结构分析、应力计算和强度校核。简化的竖向振跳动力，可按重力所产生的荷载的 2 倍假设。

桥台上支撑结构的加固维修看似简单，但在施工时需要挖开桥台附近的回填土，才能从混凝土基础之上搭装模板和浇灌