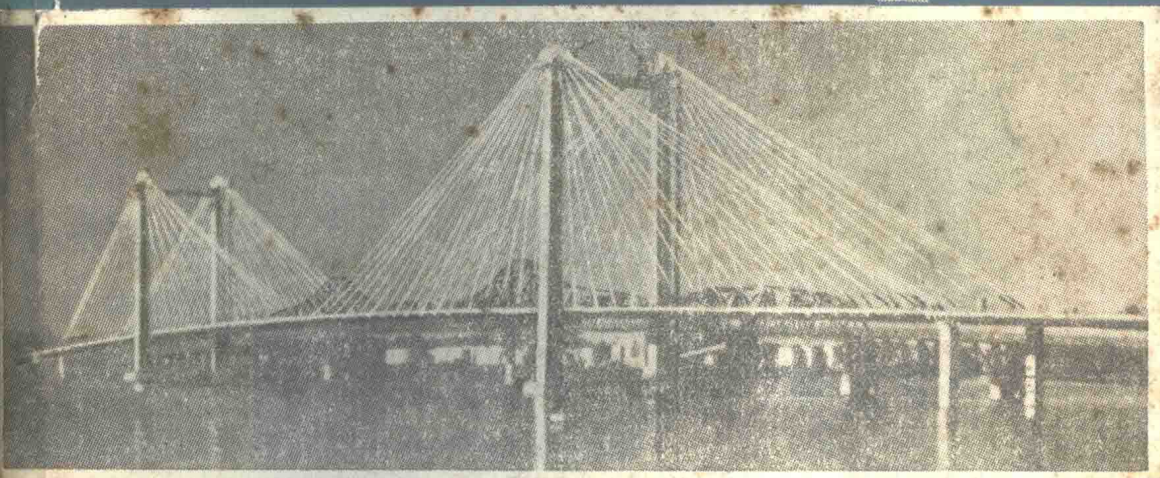


600786

551
23275



国外桥梁抗震译文集

上海科学技术文献出版社

上海科学技术文献出版社

国外桥梁抗震译文集

上海科学技术情报研究所 主编

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 16.75 插页 1 字数 414,000

1980年6月第1版 1980年6月第1次印刷

印数: 1—2,000

书号: 15192·83 定价: 2.56 元

《科技新书目》158-94

前 言

自从我国海城,特别是唐山发生地震以来,桥梁抗震就成为一个非常迫切要解决的问题。

为了有助于我国桥梁抗震设计、科学研究以及教学等方面工作的开展,我们特出此译文集。

同济大学李国豪教授不仅为本译文集确定选题,而且还审校了其中的大部分译文,对此,我们表示感谢。

上海科学技术情报研究所 1979 年

目 录

I. 地震对公路桥梁影响的文献概览	1
一、前言	1
二、桥梁结构的震害	2
(一) 概述	2
(二) 1923 年关东地震	2
(三) 1946 年南海地震	6
(四) 1948 年福井地震	7
(五) 1949 年今市市地震	9
(六) 1952 年十胜-隐岐地震	9
(七) 1962 年北官城地震	10
(八) 1964 年新潟地震	10
(九) 1968 年虾野地震	13
(十) 1968 年十胜-隐岐地震	14
(十一) 日本桥梁震害的一般情况	14
(十二) 1964 年阿拉斯加地震	15
(十三) 1970 年马当地震	15
(十四) 1971 年智利地震	15
(十五) 1971 年圣费尔南多地震	16
(十六) 根据圣费尔南多地震经验而提出的设计建议	20
第二章内的表格	22
第二章内的附图	25
第二章内的照片	65
三、地震对桥梁影响的科研活动	116
(一) 地震活动性	116
(二) 强烈地面运动的特性	117
(三) 地基土的破坏	117
(四) 作用在桥台上的土压力	118
(五) 下部结构的水动压力	119
(六) 公路桥的动力性能	120
(七) 测得的桥梁对强震的动力反应	123
(八) 动力分析	126
(九) 模型试验	130
第三章内的表格	131
第三章内的附图	142

四、抗震设计标准	185
(一) 日本抗震设计标准的简史	185
(二) 1971 年日本道路协会的抗震设计标准	185
(三) 1970 年日本公路公共工程公司抗震设计标准	186
(四) 1967 年东京高速公路公共工程公司地震设计标准	187
(五) 1968 年大阪-神户高速公路公共工程公司地震设计标准	187
(六) 1967 年日本土木工程师协会的本州-四国桥梁规范	187
(七) 1968 年日本土木工程师协会的铁路桥梁地震设计标准	188
(八) 设计地震力——加利福尼亚州公路局	189
(九) 新西兰桥梁抗震规定	190
(十) 世界各国地震规定概述	199
第四章内的表格	192
第四章内的附图	198
五、结论和建议	200
附录 A. 地震对桥梁影响的参考文献	略
附录 B. 各国抗震设计规范的简要概述	202
附录 C. 公路桥梁抗震设计规范	215
II. 地震运动及反应分析	232-263

地震对公路桥梁影响的文献概览

T. Iwasaki, J. Penzien 和 R. Clough 著

一、前 言

1971年2月9日,圣费尔南多地震对桥梁结构造成的损害说明,在理论和实验方面都迫切需要研究与地震对桥梁结构的影响直接有关的问题。

因此,在美国运输部联邦公路局主办下,伯克利加利福尼亚大学地震工程研究中心于1971年开始进行一个以“研究目前的结构抗震设计方法”为课题的三年研究计划。

该调查研究工作包括下列几方面:

(1) 搜集国际上有关桥梁抗震设计的文献,特别注意那些记载日本桥梁工程师的经验和研究的资料,因为在日本,由于地震而使桥梁结构遭到损害的情况是相当多的。

(2) 调查1971年2月9日洛杉矶发生的地震对于公路构筑物的损害,从而确定今后应优先研究的结构类型。

(3) 研究房屋抗震设计的先进经验,以便确定哪些技术对于桥梁抗震设计是可用的。特别要查明有哪些公路构筑物,它们的动力性能与房屋的很不相同,从而需要研究新的抗震设计技术。

(4) 分析研究上面(3)所查明的需要特别注意的那些公路构筑物,包括研究由典型地震干扰所引起的水平和垂直方向的反应谱。

(5) 进行上面(4)研究出来的三种结构的详细模型试验,采用尽可能大的模拟比例,以便能真实评价局部和整个结构的性能。利用伯克利加利福尼亚大学的新振动台使模型受到模拟的地震干扰。

(6) 比较由模型试验和分析计算得出的动力反应。并将模型试验和分析结果同圣费尔南多地震中某些类似的结构实际反应加以比较。

(7) 对现行的设计规范和计算方法提出修改的建议,以便将来更好地进行抗震。

本文是一系列研究报告中的第一章。第二章叙述桥梁结构在下列地震时所受到的损害: (1) 1923年关东地震(里氏7.9级), (2) 1946年南海地震(8.1级), (3) 1948年福井地震(7.3级), (4) 1949年今市市地震(6.7级), (5) 1952年十胜-隐岐地震(8.1级), (6) 1962年新潟北部地震(6.5级), (7) 1964年新潟地震(7.5级), (8) 1968年虾野地震(6.1级), (9) 1968年十胜-隐岐地震(7.9级), (10) 1964年阿拉斯加地震(8.4级), (11) 1970年马当地震(7.1级), (12) 1971年智利地震(7.5级)和(13) 1971年圣费尔南多地震。这些章节深入地说明了桥梁结构损坏的原因和类型。

第三章叙述最近进行的有关地震对桥梁结构效应的许多重要调查研究工作。这些调查研究可分成下列几类: (1) 地震特性, (2) 强烈地面运动的特征, (3) 基土的承载力和稳定性, (4) 土压力, (5) 水压力, (6) 桥梁的动力性能, (7) 桥梁对地震反应的现场测量, (8) 桥梁的动

力分析以及(9)实验室的试验。

第四章介绍许多机构目前使用的桥梁抗震设计规范,重点放在日本的规范,因为本文作者认为日本的规范是世界上现在使用的地震设计规范中最全面和最新的。此外,第四章还介绍了世界上21个国家地震规定的概要。这个概要指明正在使用的地震系数的大小,并说明了影响地震系数大小的某些因素。

第五章简要地总结了第二章中的震害概况、第三章中的调查研究工作和第四章中概括的现行规范条文。

二、桥梁结构的震害

(一)概述

为了更好地认识地震对结构物的影响,研究过去发生破坏性地震时幸存的类似结构物的损坏情况是非常重要的。这种研究对发展合理的和经济的设计方法很有价值。

本章研究了日本、美国及若干其他国家在过去由地震引起的桥梁结构的损坏特征,包括上部结构、下部结构和周围的土壤。图2.1提供了自1923年以来在日本发生的九次大地震的简要资料,这九次大地震使许多现代化建筑物受到严重破坏^{[51][210]*}。

(二)1923年关东地震^[23]

1923年9月1日在沿日本关东地区(包括东京、横滨及其他主要城市)南岸的相模海湾发生了一次强烈的地震。这种袭击现代化设备的大地震在日本还是第一次。地震记录是里氏7.9级,震中位置在北纬35.2°东经139.3°,震源深度估计在0~20公里范围内。震中位置示于图2.1和2.2中。图2.2表示日本气象局确定的烈度分布情况。日本气象局确定的烈度标准列于表2.1中。H. Kawasumi提出的相应的地面加速度的大小^[80]也在该表中列出。

关东地区的整个南部,特别是东京、横滨以及震中附近的桥梁结构和其他工程结构物都遭到了严重的破坏^[23]。虽然在大城市内,大量的震害是由火灾引起的,但是地震的振动影响也造成了很大的破坏。

关东地震是日本最大的地震之一,它对日本的地震设计方法有很大的影响。在这次地震以前,没有明确的抗震设计的规定。因此,设计的结构物几乎没有一个具有足够的侧向强度。但是在这次地震后,很快就提出了要求考虑地震力的抗震设计规范。

在关东地震时,约有二千座桥受到不同程度的损坏(见表2.2)。虽然东京的破坏是严重的,但多数桥是由于火灾、而不是受地面震动影响而损坏的。在东京,因火灾损坏的桥,有数百座,而由于地面震动而损坏的,仅十八座。靠近震中的神奈川县,因地面震动而受到的损坏最严重。在横滨市,受震动影响而损坏的桥梁的百分比非常高。

以下各节叙述了在关东地震时许多桥梁因地面震动而受严重破坏的特征。

1. Tsuruno-bashi 桥(图2.3)——它在1914年完工,架在神奈川县横滨万代町-Horaicho路的新吉田河上,离震中东北约40公里。桥址处的地面是冲积土层,很软。两个桥台都是用砖石砌成,混凝土基础。两个桥墩都是由四根螺旋形的单排铸铁管桩组成,用联结系连成整体,如图2.3所示。上部结构是三跨简支板梁。桥全长33.6米(10.5米+12.6米

* 括弧内的数字指文献目录的号码

+10.5 米),有效宽度为 7.3 米。

地震使此桥受到中等程度的损坏。两个桥台向河心推移,并向河心倾斜。两个桥墩相当大地向左岸倾斜。上部结构的三跨主要向左岸(从上游看)推移。

左岸桥台支座的锚栓被折断,因而丧失上部结构的左端和桥台顶面之间的联结,桥台能够自由地移向河心。桥的其他部分(右桥台、两个桥墩以及上部结构)顺着右桥台的向内移动而移向左岸。虽然此桥受到相当大的永久性扭曲,但在地震后能立刻开放交通。

2. 新港区桥(图 2.4, 2.5; 照片 2.1, 2.2)——此桥于 1910 年建成,位于神奈川县横滨 Kaigandori 和新港区-町之间,离震中东北约 40 公里。它跨越横滨港的一个水道。两个桥台都用砖石砌成,混凝土扩大基础置于泥岩上。在桥台上架设一个重 365 吨、长 36.6 米、宽 13.4 米的单跨弯弦再分腹杆式钢桁架。这座桥上有公路和铁路交通。

由于地震,这座桥的两个桥台遭到严重破坏,如图 2.4 和 2.5 所示。北桥台歪斜了,并且向水道中心移动了相当大一段距离。观察到的最大移动距离是 36 厘米。在桥台砌体中,也观察到严重的裂缝,在砖砌体和基础之间的接缝,发生错位(图 2.5)。南桥台的裂缝有宽达 8 厘米的。分别由填土支承着的两个桥台的胸墙被推向后面一大段距离,这可能是由于与桁架相撞所致。两个桥台本身未发现有严重的下沉。

桁架没有任何重大的损坏。但是由于桥台变位,在桁架支座和下部结构之间可看到很大的相对位移。支点之间的相对位移达 35 厘米左右。这个很大的位移使活动支座和固定支座的底座遭到破坏(见照片 2.1, 2.2)。

3. 万国桥(图 2.1; 照片 2.3, 2.4, 2.5)——此桥于 1903 年建成,紧靠新港区桥,并且跨越同一水道。桥台是用砖砌的,混凝土块基础筑于泥岩之上。桥台上架一个重 314 吨、长 36.6 米、宽 12.2 米的单孔敞开式钢桁梁(照片 2.3)。

地震使两个桥台受到严重损坏。北桥台水平地滑向水道的中心。滑动的最大距离是 1.2 米。这个大幅度的滑动引起了基础的上下混凝土块之间的相对移动(图 2.6)。在该桥台中桥轴的中心线附近,可观察到 2.7 厘米宽的巨大竖向裂缝。过大的土压力使两翼墙与桥台分离。南桥台的上部也滑向水道中心。滑动量共约 30 厘米。南桥台的两翼墙也与台身分开。

桁梁没有受到重大损坏,但是几个与下弦杆相连接的格构梁压屈了。北桥台的滚动支座和桥台一起向南移动了相当大一段距离(东边 40 厘米,西边 30 厘米)。在该支座的东边,附于桁架端部的底板完全脱离了滚轴(照片 2.4)。南桥台的固定支座与桥台一起向北移动(东边 22 厘米,西边 34 厘米),两边的锚栓全部被剪断(照片 2.5)。

很清楚,从这座桥经受的损坏情况可以预测桥台中砌块间由于滑动所引起的严重损坏。

4. Yamashi 桥(照片 2.6)——这座桥是 1922 年建成的。位于神奈川县横滨市 Kaigandori 的堀川河上,离震中东北大约 40 公里。北桥台(在上游看左岸)从顶部到底部是用现浇混凝土、两层成台阶形的混凝土砌块、水中浇注的钢筋混凝土以及软土层中的木桩基础建成的。南桥台(右岸)从顶部到底部是用现浇钢筋混凝土、三层成台阶形的混凝土砌块以及装袋混凝土(放在泥岩基础上面)建成。

架设在桥台上的单孔(普腊式)桁梁,长 52 米,宽 14 米。

地震时南桥台因没有桩基础而受到严重的损坏。桥台严重开裂,并倾斜(照片 2.6)。桥

的其它部分没有发现较大的损坏。但是桁架的大多数格构梁都压屈了。

据报道,地震时产生的土压力对南桥台有大的影响。

5. 花园村桥(图 2.7)——这座桥跨越 Ooka 河,位于神奈川县横滨市小城町和山下村公园之间,离震中东北 40 公里。两个桥台都用砖块砌筑,置于很软的土层上。桥台上架设的单孔敞开式钢桁梁长 50 米,宽 7.6 米。

地震时,两个桥台受到中等程度的破坏(图 2.7)。装有固定支座的右桥台向河心移动。该桥台顶部还出现大约 3 厘米宽的水平向裂缝,固定支座上的锚栓也被剪断。据估计:裂缝主要是由于上部结构阻止桥台向河心推移而产生的。

左桥台装有一个滚动支座,也向河心移动。胸墙由于同桁梁端相撞而倒塌。附着在支座上的螺栓也断了,而且该支座还向桥台左边移动了 24 厘米。附着在桁架末端的底板向支座左边移动了 42 厘米。因此,桁架向桥台左边共移动了 66 厘米。

上部结构没有重大损坏;但是由于桥台的位移很大,因此,桁梁的拱度完全消失。地震还使这座桥发生一次火灾,它对拱度的消失可能也有影响。

很明显,两个桥台都受到了很大的土压力。

6. 丰国桥(图 2.8; 照片 2.7, 2.8)——这座桥架在 Ooka 河上,位于神奈川县横滨市的 Horai 和 Masaqo-oho 之间,离震中东北大约 40 公里。这座桥的上部结构原来采用轻的钢木桁架。但是后来(1897 年左右)这个轻的钢木桁架改为全钢的敞开式桁梁,而原来的下部结构却没有修改。所有墩台都是以石料镶面的混凝土建成,并且建在很软的土层上。有关基础的详细资料则未能获得。上部结构由三跨简支敞开式桁架组成,全长 48.5 米(15.5 米+16.5 米+15.5 米)、宽 6.7 米。这座桥斜交 20° ,如图 2.8 中的平面图所示。

地震时,下部结构移动很大,以致上部结构一孔的一端坠入河中(照片 2.7, 2.8)。两个桥台都向河心推移,并向它们的填土方向倾斜。没有出现严重的裂缝。

两个桥墩向河心倾斜相当大。北面的桥墩倾斜了 $8^\circ 41'$,南面的桥墩倾斜了 2° 。南面的桥墩的墩身底部与基础顶部之间严重断裂。可以认为土壤的破坏是造成倾斜的主要原因。

下部结构的移动导致了上部结构的剧烈移动。在北面的桥墩上装设由一组槽钢做成的固定支座,两根桁梁和这个支座一起向南推移。虽然这个支座几乎从墩顶上脱落(见图 2.8),但是上部结构却没有从桥墩上坠下。

在南面装有一个活动支座的桥墩上,两根桁梁也向南推移,并且最南面的梁从支座上落入河中。没有从支座上掉下的桁梁则未发现有重大的损坏。

可以认为,由于这座桥的下部结构原来是为那个较轻的上部结构设计和建造的,因而地震时就不足以支承后来改换的较重的上部结构。

7. 佐川桥(图 2.9; 照片 2.9, 2.10)——这座桥架在 1 号国家公路上的佐川河上,位于神奈川县的小田原。这座桥是在地震前两个月——1923 年 7 月完工的。此桥建在佐川河口附近,是离震中非常近的一座桥——离震中西北大约 13 公里。

桥台是在软土层上浇注的重力式钢筋混凝土结构。32 个桥墩是钢筋混凝土刚性框架结构,基础是覆有木制构架的混凝土沉箱。这些桥墩也置于软土层上。

上部结构是 33 跨简支钢筋混凝土 T 型梁。全长 363 米(33×11)、宽 6.7 米(图 2.9)。

地震时,此桥受到非常严重的损坏。右桥台在台身和一翼墙之间产生了巨大的裂缝。

左桥台稍有倾斜,胸墙断裂(照片 2.11)。所有桥墩全部倒塌,因而 33 跨梁也一齐掉进河里(照片 2.9, 2.10)。本文作者认为,上部结构的倒塌是从最左面一跨开始,而逐步向右发展到整个桥梁的。

根据一个严重受损的桥墩仍在塌成两段的梁中间这一事实,作者认为,在倒塌之前,这些梁沿水平方向移动了很大一段距离。一根塌梁的一端与最邻近的桥墩间的最大距离约为 1.7 米。

可以认为,此桥严重损坏是由于下列原因:

1. 桥址离震中太近(约 13 公里),
2. 桥址处土层太软,
3. 下部结构抵抗不住由笨重的钢筋混凝土梁所产生的很大的地震力。

8. 万有桥(图 2.10; 照片 2.12, 2.13)——这座桥跨越 1 号国家公路上的万有河(现称相模河),位于神奈川县茅崎和平塚之间,离震中东北 15 米。此桥的下部结构在地震时还在施工。

两座桩基础的重力式钢筋混凝土桥台在地震发生时已经完工。桥墩是钢筋混凝土刚性框架,混凝土沉箱基础。56 个桥墩中,仅完成了河左岸附近的 6 个。其余 42 个桥墩的沉箱基础在地震时有的刚完成,有的仍在施工。

上部结构由 57 跨钢筋混凝土 T 型梁组成,全长 620 米(57×10.9)、宽 7.3 米,在地震发生时,尚未架设。

地震时,下部结构受害很广(图 2.10)。左、右两个桥台分别向河心倾斜 4° 和 12° 。桥墩的横梁上发生主要的损坏(照片 2.12)。混凝土养护不足可能是遭受损坏的重要因素。从照片 2.13 中可以看出,有几个沉箱基础移动了位置,并被抬起来。鉴于基础发生这种情况,表明桥址处的土壤已发生液化。

9. 早川桥(图 2.11; 照片 2.14, 2.15)——这座桥于 1917 年建成,架在神奈川县道小田原-汤河原线的早川河上,位于神奈川县小田原,离震中以西大约 15 公里。桥台和桥墩是用砾石掺隅棱石素混凝土建成,沉箱基础埋在砾石层中。上部结构是 6 跨简支钢筋混凝土 T 型梁,全长 82 米(6×13.6 米),宽 5 米。由于这座桥刚完工不久就担负着繁忙的交通,在地震前,南面的 3 跨就已永久变形。虽曾进行修理,但仅在裂缝内填入水泥浆而已。

地震时,此桥遭到严重破坏,包括一些梁完全和支座脱开(图 2.11; 照片 2.14, 2.15)。北面的圯工桥台产生了裂缝,有些隅石从支承面上落下来。没有发现南桥台有重大的损坏。除了中间那个桥墩外,其余的桥墩在下游那一边都产生了裂缝。最南面的桥墩被推向北,并被一根落下来的梁压斜,因而墩身严重开裂。

所有的梁都向下游(朝东)和向右岸(朝南)移动。最大位移值约为 50 厘米。南面 3 根由于繁忙的交通早就损坏的梁沿着梁肋产生了较大的裂缝因而跌落。最南面的一跨由于这种类型的破坏,最终也落入河中。

此桥的净跨长为 13.6 米,是当时最长的混凝土桥梁之一。据报道,在地震时,这座桥经受了大振幅竖向振动。

10. 高岛桥(图 2.12; 照片 2.16, 2.18)——这座桥架在东京日野东京县道上的浅川河上,离震中以北大约 53 公里。桥址附近的最大地面加速度估计为 $0.2g$, 这比前述其它桥址处经受的地面加速度要小得多。桥位下是坚硬的粘质土上覆一层三米厚的砾石。

两个桥台都是重力式混凝土结构。右桥台用桩基础。桥墩是钢筋混凝土刚架(三柱一梁)。上部结构是13跨简支工字形钢板梁,全长115米(7.5米+11@9.1米+7.5米),宽5.5米。

地震时,右桥台和两个桥墩遭到严重破坏(图2.12;照片2.16,2.18)。由于土压力的作用,右桥台向河心移动,并和上部结构相撞,因而受到严重损坏(照片2.18)。左桥台未发现有严重的损坏。

只有右岸起第4和第5两个桥墩受到了严重损坏。损坏的位置在中间那根墩柱(共三根)的上节点附近,这可能是由于上部结构作用的弯矩比较大而引起的。照片2.17表明5号墩的损坏情况。

上部结构未发现严重损坏。

(三) 1946年南海地震^[24]

这是1946年12月21日发生在日本或日本附近的最大地震之一,离本州岛和歌山县的潮岬(纪伊半岛的海岸)大约60公里(图2.1,2.13)。地震记录为里氏8.1级,震中位置在北纬33°,东经135.6°,震源深度为30公里。JMA地震烈度的分布情况示于图2.13中。

由于这次地震发生在第二次世界大战结束后不到一年,故要立即对震害加以调查和修复遇到许多困难。尽管如此,工程技术人员和地震工作者还是尽了很大努力,调查这些震害的特征,并重建被严重破坏的一些结构。说明震害情况的几份报告已经发表,可以取得[24][210]。

如表2.3中所列,被地震破坏的公路桥梁有300多座。遭到破坏的桥梁遍于日本南部地区。四国岛的高知县和本州岛和歌山县内的桥梁遭到的损坏最严重。

以下各节叙述在这次地震中两座重要的桥梁所遭到的严重破坏情况。

1. 熊野桥(照片2.19)——此桥于1935年3月建成,位于和歌山县新宫的41号国家公路上。熊野桥横跨在震中以北约90公里的熊野河上。桥址处的JMA烈度为6度,最大加速度估计为0.2g或更大一些。这一地带的表面地层是砾石和大卵石。

桥台为重力式U型混凝土结构,横向尺寸为15米,底部和顶部的纵向尺寸分别为5米和2.3米,高10米。桥墩是椭圆形钢筋混凝土柱,沉箱基础。沉箱的尺寸为11米×4米,高13米(主跨)或8米(边跨)。

上部结构全长418.5米,由三个主跨(4×54米)、六个边跨(6×41.4米)组成。所有桥跨均采用华伦(Warren)式简支桁架,宽6米。

地震时,此桥的承重支座和附属结构遭到中等程度的破坏。照片2.19表示左岸起第4个桥墩的破坏情况,表明桥墩的活动支座的移动(照片的右边)和固定支座的破坏情况(照片的左边)。下部结构(桥台和桥墩)没有重大的损坏。右岸(和歌山)一侧的翼墙脱开了约20厘米,以致使桥头引道的填土下沉最大约30厘米。

五个桁架(右岸起第4跨到第九跨)向右岸移动了约4厘米。由于这一移动的结果,下部结构上的固定支座附近的砂浆和混凝土被压碎了。没有发现垂直于桥梁轴线的横向移动。

2. 四万十川桥(照片2.20)——此桥横跨在连接高知县Hatata郡Gudo和中村的四万十河上,离震中以西约250公里。

桥台为重力式钢筋混凝土结构,桥墩为钢筋混凝土柱,沉箱基础。上部结构全长438

米,宽5.5米,由8个主跨(华伦式钢桁架, 8@46.5米)和6个边跨(钢筋混凝土梁, 6@11.6米)组成。

地震时,此桥遭到严重破坏。右桥台的胸墙出现严重裂缝,桥台下游一侧的翼墙损坏了。支承钢桁架的桥墩由于桁架坠落而遭到重大破坏。这个破坏并不是由地震直接引起的。但支承钢筋混凝土梁的桥墩出现裂缝则确是由地震直接引起的。共有6个钢桁架(左起第2到第7跨)坠落河中(照片2.20)。虽然没有关于跌落原因的详细资料,但据报道,是左起第4跨首先倒下,接着是第3跨,最后是第2,第5和第6跨。这三跨几乎是同时坠落的。

(四) 1948年福井地震^[25]

1948年6月28日,本州岛中西部的福井县福井平原发生了一次严重地震,记录为里氏7.3级。震中(北纬36.1°,东经136.2°)离福井县和石川县的几个城市和市镇非常近,因而两县都遭到大量的破坏。震源深度估计为20公里。

福井地震为日本发生的最大的破坏性地震之一。对于工程结构的震害曾进行了广泛的调查研究。有关公路桥梁震害的一些统计资料列于表2.4中。

1. Nakazuno 桥(图2.15, 2.16; 照片2.21, 2.26)——此桥于1932年建成,横跨在福井-加贺-吉崎路线上的Kuzuryu河上。这条路是福井县福田郡川井和长藤岛间的一条福井县的县道。此桥在震中以南约8公里。根据附近倾倒的墓碑情况,估计该处最大地面加速度为0.6g左右。

桥台均为桩基础的重力式钢筋混凝土结构。13个桥墩是钢筋混凝土柱,桩基础或沉箱基础。图2.16中所示系一个典型桥墩的全视图。上部结构全长257米,宽5.5米,由14跨简支钢板梁组成。

地震时,上部结构和下部结构都遭到严重破坏。左桥台的胸墙开裂(照片2.25),右桥台向河心倾斜。左岸起第1和第2个桥墩没有遭到任何破坏。但是,第3到第7个桥墩以及第9和第10个桥墩则向左岸倾斜,墩柱和沉箱基础之间的连接处严重开裂(照片2.22),并露出了钢筋。在墩顶的梁与墩柱之间的连接处也出现了大量裂缝。第12和第13个桥墩向右岸倾斜,同时在墩柱和梁之间的连接处有裂缝。

14个桥跨有10跨落入河中(图2.15; 照片2.21, 2.24, 2.26)。由于这些桥跨均落在下面的软砂层上,因此梁和横向杆件都没有遭到重大损坏,并很容易修复,供以后使用。下部结构的破坏是上部结构产生上述情况的主要原因。

2. Nagaya 桥(图2.17, 2.18; 照片2.27, 2.28)——此桥跨越胜山-三国港区(Katsuyama-Mikuniminato)路线上的Jugo灌溉渠。这条路线是福井县Higashijugo的一条县道。桥址在震中以北约20公里,该处的最大地面加速度估计在0.5~0.6g范围以内。

桥台为混凝土结构,七个桥墩均系钢筋混凝土刚性框架(二柱一梁)。上部结构全长58.5米,宽4米,由8跨简支工字形钢梁组成(4@6米+3@9.5米+6米)。支承板是滑动式的两块钢块。虽然左桥台所遭到的破坏并不太大,但右桥台却向灌溉渠的中心倾斜。左岸起第1到第3个桥墩下沉相当多,而第4到第7个桥墩不仅下沉,而且倾斜很大。在第4到第7个桥墩墩柱和梁的连接处,出现很大裂缝(图2.18; 照片2.28)。如图2.17和照片2.27所示,桥墩的沉陷使每个桥跨都大幅度地向下移动。

3. 盐屋村桥(照片2.29)——此桥位于石川县的大圣寺河河口附近,离震中以北约15

公里。桥址处的最大地面加速度估计为 $0.5g$ 。

桥台为混凝土结构, 7 个桥墩都是钢筋混凝土刚性框架(三柱一梁)。上部结构全长 86 米, 宽 4.5 米, 由 8 跨简支工字形钢梁($8@10.75$ 米)组成。

地震时, 此桥下部结构遭到中等程度的破坏。左桥台稍有倾斜, 在该桥台顶部下面 2 米的地方, 沿施工缝出现了裂缝。由于桥台倾斜, 锚栓向左岸移动约 40 厘米, 向上游方向移动约 5 厘米。右桥台也有一些倾斜。每个桥墩均向左岸倾斜并且下沉。下沉最多的是右岸起第 2 个桥墩, 计 25 厘米(照片 2.29)。上部结构没有重大损坏。

4. Segoshi 桥(照片 2.30)——此桥跨越石川县 Segoshi 的一条城市道路上的大圣寺河, 离震中以北约 15 公里。地面最大加速度估计为 $0.5g$ 左右。

桥台为混凝土结构, 7 个桥墩都是钢筋混凝土实板式结构。上部结构全长 87.2 米, 宽 3.3 米, 由 8 跨工字形钢梁(8.5 米 + $4@11.4$ 米 + 10.3 米)组成。

地震时, 下部结构和上部结构都受到中等程度的损坏。两个桥台由于回填土滑移, 都向河心倾斜。主墙和翼墙出现了几条裂缝。如照片 2.30 所示, 所有的桥墩都下沉。第 4 个桥墩下沉最多, 计 50 厘米。所有的桥墩均向左岸倾斜。混凝土桥面板普遍向上游方向移动。工字形主钢梁由于扭力和弯曲力而产生变形。

5. 板垣桥(图 2.19, 2.20; 照片 2.31)——此桥于 1933 年建成, 横跨在 Hashidate-福井线的 Ashiba 河上。该线是福井县的一条县道。根据倾倒的墓碑和其他一些损坏情况, 估计该处的最大地面加速度为 $0.6g$ 左右。桥址处的表面地层由砾石组成。

桥台为重力式钢筋混凝土结构, 12 个桥墩都是钢筋混凝土刚架(二柱一梁), 沉箱基础(图 2.19)。上部结构全长 156 米, 宽 4.5 米, 由 13 根钢筋混凝土 T 形梁($13@12$ 米)组成。支座接触面中铺有柏油纸。

地震时, 下部结构和上部结构都遭到很大破坏。两个桥台的胸墙和圬工翼墙都出现很宽的裂缝。左桥台翼墙的圬工倒塌了。第 3, 第 4, 第 5, 第 6, 第 7 和第 8 个桥墩分别向左岸倾斜 10° , 4° , 12° , 3° , 1° 和 1° 左右。倾斜的原因是墩柱和沉箱基础间的连接损坏和基础倾斜。在桥梁的横向方面没有发现永久位移。13 跨中的 8 跨由于桥墩毁坏(图 2.20; 照片 2.31)而落入河中。没有跌落的各桥跨都有很大的位移, 主梁和桥面板都遭到严重破坏。

6. 弁天桥(照片 2.32, 2.33)——此桥横跨在石川县大圣寺的一条城市道路上大圣寺河的一条支流上, 离震中北面约 18 公里。桥址处的最大地面加速度估计为 $0.4g$ 。

桥台为混凝土结构, 5 个桥墩是钢筋混凝土刚架(四柱三梁)。上部结构全长 50.3 米, 宽 3.3 米, 由 6 根工字形钢梁($2@6$ 米 + $3@10$ 米 + 8.3 米)组成。

地震时, 此桥遭到严重破坏。右桥台向河心倾斜, 两个桥台的胸墙都倒塌。左岸起第 2 个桥墩由于第 3 跨跌落而严重变形。第 3 个桥墩完全倾覆在河里。第 4 和第 5 个桥墩分别向左岸倾斜约 20° 和 3° 。搁置在第 3 个桥墩上的第 3 和第 4 跨的端部落入河中(照片 2.32 和 2.33)。右桥台上第 6 跨的支座离开了原来位置。

7. Koroba 桥(图 2.21; 照片 2.34, 2.35)——此桥横跨在石川县大圣寺的一条城市道路上的大圣寺河支流上, 离震中北面约 18 公里。桥址处的最大地面加速度估计为 $0.4g$ 。

桥台为混凝土结构, 两个桥墩是钢筋混凝土刚架(三柱和上、下两根梁)。上部结构全长 36 米, 宽 3.65 米, 由三根钢筋混凝土 T 形梁组成($3@12$ 米)。

地震时,此桥遭到严重破坏。两个桥台的翼墙均有很大的裂缝。左岸起第一个桥墩的下梁中产生了一条很大的裂缝(15厘米宽)。中间和靠下游的墩柱在墩顶下面1米的地方被严重压坏,露出钢筋。该同一桥墩靠上游的一根墩柱向上游方向倾斜约 5° 。第2个桥墩的下梁也有一条裂缝,并且向上游方向倾斜约 7° 。靠上游的一根墩柱在其一半高度的附近毁坏了,并露出钢筋。上部结构在第1和第2跨主梁和中跨附近出现了很大的裂缝。梁的这种损坏是所有直接由地震振动作用造成的损坏中最严重的一种。

8. 桥梁震害总结——根据上述有关1948年福井地震造成的桥梁震害的讨论,有两个普遍的特征值得注意。第一,上部结构受到损坏的主要原因是倾覆和下部结构内部损坏,第二,上部结构遭到的损坏程度并不严重。只有一座桥(Koroba桥)显然是直接由于地震引起的振动而使上部结构损坏。

桥梁结构各别部分的损坏情况可归纳如下:

a) 桥台的损坏,包括沉陷,倾斜(通常向河心),滑移,胸墙的损坏,桥头引道的沉降,翼墙的损坏和开裂(通常是翼墙和前墙的横向开裂)。

b) 桥墩的损坏,包括沉降,倾斜,倾覆和开裂。

c) 上部结构的损坏,包括承重支座的损坏,锚栓变形,锚栓从桥台和桥墩上脱落以及由于滚动支座损坏引起的梁的移动。

d) 主梁的损坏,包括与桥台胸墙碰撞而引起的主梁(通常是钢筋混凝土梁)梁端开裂和压坏。

e) 其它的一些重大损坏,包括混凝土桥梁施工缝处的开裂或完全损坏;由于混凝土桥梁缺少配筋而引起的损坏以及由于混凝土材料质量低劣而引起的损坏。

(五) 1949年今市市地震^[27]

1949年12月26日上午8时17分和8时25分左右,在东京以北约110公里的栃木县今市市附近(图2.1),发生了两次浅震源地震,记录分别为里氏6.4级和6.7级。震中位置在北纬 36.7° ,东经 139.7° 。

地震时,各种工程结构物,例如建筑物(大部分是居住房屋),自来水厂,铁路以及公路(周围约8公里以内)都遭到了严重破坏,有几个地方发生了滑坡。

根据余震资料,估计震中附近的地面运动具有很大的加速度和短时间的振动。震中附近的地面情况一般是岩层或具有垆姆土的沉积高原。

桥梁结构没有发现严重的损坏。一座铁路桥的支座破坏了,一座跨越铁路的公路桥的桥台损坏很轻微。

(六) 1952年十胜-隐岐地震^[28, 46]

1952年3月4日,离北海道、襟裳角东面约50公里的十胜的海底发生了一次较大的地震,记录为里氏8.1级。震中位置是北纬 42.2° ,东经 143.9° ,震源深度为45公里。

在地震期间,北海道东南地区的许多工程结构,例如,公共建筑,交通设施,房屋和住宅遭到严重的损坏。工程结构物的损失估计共约一百五十亿日圆,其中包括公路方面的损失约四亿一千万日圆(184处)和桥梁方面的损失约二亿日圆(128座桥);360日圆相等于是1美元。

尽管一些临时性的木桥倒塌了,但永久性的混凝土桥和钢桥没有受到重大损害。然而有些桥梁(纹别桥,照片2.36;静内桥,照片2.37;Horoman桥,照片2.38和大乐毛桥)的

支座,支座附近下部结构的帽盖以及悬梁的铰接部件都受到轻微的损坏。

(七) 1962 年北宫城地震^[30, 46]

1962 年 4 月 30 日,在仙台以北约 50 公里本州岛,宫城县的北部附近的内陆地区发生了一次中等程度的地震,记录为里氏 6.5 级。震中位置在北纬 38.7°,东经 14.1°,震源深度为 10 公里。

地震期间,在一个比较小的区域内,许多工程结构物,例如,公共建筑、供水系统、农业设施、工业设施以及居住房屋受到了中等程度的损坏。总的损失估计约为四十亿日圆。公路和公路桥方面的损失分别为一亿零二百万和四千三百万日圆左右。共有 187 座桥梁受到轻微的损害。仅二座桥(Eai 桥照片 2.39; Kinoh 桥)遭到中等程度的损害。主要是支座和下部结构的帽盖的损坏。在 Eai 桥上,还发现相邻两根大梁互相碰撞引起的轻微损坏。

(八) 1964 年新潟地震^[32, 42]

新潟地震于 1964 年 6 月 16 日,在本州岛的西北部发生,记录为里氏 7.5 级(51)。震中(北纬 38.4°,东经 139.2°)在新潟市以北约 55 公里粟岛附近海底(图 2.1, 2.22),震源深度估计在 20~30 公里这个范围内。

在新潟市的信濃河和吾野河河口的冲积平原上造成严重的损害,尤其是在信濃河河口附近的地区,那里有松砂层,地下水位很高。在这个地区,钢筋混凝土房屋建筑,公路桥梁以及其他结构,由于土壤液化都受到重大损害。

两个强震加速度仪,一个装在信濃河边的一幢公寓房屋(后来它被震坏)的屋顶上,一个装在它的地下室的地上,记录了地震时的加速度的时程。地上的那个加速度仪测得的水平方向最大加速度约为 0.15g(卓越周期 2 秒),垂直方向最大加速度约为 0.05g(卓越周期 0.3 秒)。

以下各节叙述 7 座桥梁的损坏情况:

1. 万代桥(图 2.24~2.28; 照片 2.40, 2.41; 表 2.6)——这座桥在 1929 年建成,在新潟市 7 号国家公路上,跨越信濃河,震中在该市以南 54 公里。这里的 JMA 烈度为 5 度,在它附近测得的最大地面加速度,水平方向为 0.15g,垂直方向为 0.05g。地基是砂性土壤(图 2.25, 2.26)。

桥台是重力式钢筋混凝土结构,支承在木桩上,桥墩是钢筋混凝土实心板,沉箱基础。上部结构总长 309 米,宽 21.8 米,由 8 个钢筋混凝土拱组成,其中两个边孔采用双铰拱,六个中间孔用连续无铰拱(图 2.24)。孔长是(17.1 米+43.6 米+46.0 米+46.9 米)×(2)。

表 2.6 是确定沉箱下地基承载力的试验结果。

地震期间,该桥受到很大的损害(图 2.27, 2.28; 照片 2.40, 2.41)。左桥台下沉 1.4 米,右桥台下沉 0.4 米。两个桥台都稍向河中心倾斜。回填土也下沉很多。左胸墙和右胸墙分别和桥台脱开 1 米和 2 米。两个桥墩也有中等程度的下降(1 号墩 30 厘米,6 号墩 15 厘米)。由于下部结构下沉,两跨靠桥台的边孔发生很大的变形和裂缝(图 2.28)。右面的边孔还稍有伸长(图 2.28)。六个连续孔有微小的永久性挠曲(中孔处小于 10 厘米),桥墩附近的石圪工稍有开裂(照片 2.41)。第 7 孔的拱肋出现小的裂缝。这孔的长度变化只有几厘米。地震后,量测墩、台的倾斜,孔长的变化以及拱的挠度变化工作断断续续进行了几个月。

虽然经过两天的小修理后,该桥能通行车辆,但大修仍需要很长的时间。最后总的修理

费约为三亿三千万日圆。在新潟市所有的桥梁中,这是最昂贵的。

2. 昭和桥(图 2.29~2.34; 照片 2.42~2.48)——这座桥在万代桥(它离震中南面约 55 公里)上游约 1.2 公里处跨越信浓河。该桥正好在地震前一个月,即 1964 年 5 月竣工。

桥址处是砂性土,左岸附近较软,右岸附近较硬(图 2.30~2.32)。桥台是桩排架(九个直径 609 毫米、长 22 米的单排桩),桥墩也是桩排架(九个直径 609 毫米、长 25 米的单排桩)。这些排架用环状联条连成整体、并有盖梁(图 2.30)。下部结构的地震设计系数是 0.2。上部结构总长 303.9 米,宽 24 米,由 12 跨简支组合钢梁($13.75+10@27.64+13.75$)组成。

地震期间,此桥遭到严重损害(图 2.33)。左桥台向河中心移动约 1 米,引道沉降相当大。与此相反,右桥台和引道没有重大损坏。左岸起第 1 到第 4 墩向右岸倾斜。墩帽处的变形量自 13 至 42 厘米。第 5 和第 6 墩完全倒塌在河中,但第 7 至第 11 墩仅稍有损坏。12 根梁中的 5 根(左岸起第 3 至第 7 根)坠入河中(照片 2.42)。由于第 5 和第 6 墩破坏,因此只有第 6 跨两端落下。

此桥的损害特征示于图 2.33 中。这些特征揭示了下列的损害的主要原因: 1) 单排钢桩组成的下部结构太柔弱, 2) 出现土壤液化(右岸附近除外), 3) 第 6 跨的两端的支座是活动的, 4) 上部结构是由不连接在一起的简支梁组成, 以及 5) 左岸附近发生极其严重的滑坡。

地震后,对此桥进行了广泛的调查研究,包括土壤调查,受害较微的部分的动力性能测量,整个结构变形的测量,拔桩研究(图 2.34; 照片 2.47, 2.48)以及受到强烈地震运动的桥系的动力分析。

3. 八千代桥(图 2.35~2.39; 照片 2.49~2.53)——此桥于 1962 年建成,跨越信浓河,在新潟的一条城市道路上,万代桥和昭和桥之间,震中以南约 55 公里。

桥址处的土壤属砂性土(图 2.36, 2.37)。桥台是重力式钢筋混凝土结构,钢筋混凝土桩基础。桥墩是钢筋混凝土实心板,也是钢筋混凝土桩基础。上部结构总长 307.4 米,宽 8 米,四跨边孔是预应力混凝土简支梁,十跨中间孔是组合钢梁($2@7.48$ 米 + $10@27.5$ 米 + $2@8.72$ 米), (图 2.35)。

地震期间,此桥受到严重损害(图 2.38, 2.39; 照片 2.49~2.53)。两个桥台都向河中心移动,但向相反方向倾斜。支承预应力混凝土边孔的左岸起第 1, 第 2, 第 12 和第 13 号墩向河中心移动(第 2 墩移动最大, 1.1 米),但由于梁的抵抗力而向相反方向倾斜。第 2 和第 12 墩严重开裂。第 3 到第 11 墩也有中等程度的移动(9 号墩最大, 40 厘米)。第 4 和第 9 墩支座处严重开裂。可以理解,两个桥台处的地面向河中心滑移对该桥的损坏有很大的影响。

由于地基土向河中心滑移,使此桥的总长度缩短了 40 厘米。2 号, 4 号, 9 号和 12 号墩支撑的梁移动很大,损坏严重。由于没有大梁坠落河中,因此地震后,还可让行人通过。

4. 东跨线桥(图 2.40~2.44; 照片 2.54~2.57)——此桥于 1963 年建成,架设在跨越日本国家铁路 Shinetsu 线的一条新潟城市道路上,位于离震中以南 54 公里的新潟县内。

桥址下是砂性土,地下水位大约在地面下 2~3 米。

桥台是钢筋混凝土实心板式结构,木桩基础。主跨的两个桥墩也是类似的结构,采用钢筋混凝土或桩基础。十三个桥墩是刚架结构,采用三根柱子,木桩基础。

设计下部结构采用的水平地震系数为 0.2。上部结构总长 229.5 米,宽 8 米,由 15 根

预应力混凝土简支梁和一根组合简支钢梁组成 ($8@13.5$ 米 + 26.5 米 + $7@13.5$ 米), (图 2.40)。

地震期间, 此桥主跨的梁受到严重损害(图 2.43~2.44; 照片 2.54~2.57)。靠新津一边的桥台和第 1 至第 7 桥墩没有重大损坏。第 8 和第 9 墩分别向新津方向和新潟方向倾斜 2° 和 4° 。此外, 第 9 墩下沉 2.5 厘米左右。第 10 至第 15 墩和靠新潟一边的桥台水平移动了约 5 厘米并向下沉陷(最大约 40 厘米)。地震后, 将第 9 墩下的所有钢筋混凝土桩都拔出来, 以便检查它们的损坏情况。最大变形约为 20 厘米(图 2.44; 照片 2.56, 2.57)。

新津一边的八根梁没有重大损坏。但是第 9 根梁(主梁)靠新潟一边的活动端跌落到铁路上。该梁的倒塌是由于第 8 和第 9 墩大大分离使两个支座分离达 67 厘米所致。新潟一边的第 7 根梁发生了水平和垂直移动, 沥青铺面裂开了。此外还发现支座破坏以及大梁碰撞的损伤。

5. 富士村桥——此桥于 1933 年建成, 在 Kita-Kambara 郡 Shiunji 的 503 号新潟县道上跨越 Ochibori 河, 离震中东南约 28 公里。

两个桥台是半重力式钢筋混凝土结构, 扩大基础, 三个桥墩是钢筋混凝土刚架结构, 沉箱基础。上部结构由四片钢筋混凝土 T 形简支梁组成, 全长 33 米、宽 3.7 米。

地震时, 此桥遭受严重的破坏。桥台滑移, 沉陷, 倾斜和严重开裂。主梁也严重开裂, 需要大修。

6. 松滨桥(图 2.45, 2.46; 照片 2.58, 2.59)——此桥跨越吾野河, 位于新潟松滨的 503 号县道上, 离震中以南约 49 公里。

地基由砂性土组成, 如图 2.46 所示。左桥台是重力式钢筋混凝土结构, 木桩基础($4 \times 7 = 28$ 根桩, 直径 20 厘米, 长 4.5 米)。右桥台是相似的结构, 但基础是沉箱(平面尺寸 3.4 米 $\times$ 10.6 米, 深 7.5 米)。第三个桥墩是钢筋混凝土实板式结构, 沉箱基础(平面尺寸 4.6 米 $\times$ 12.2 米, 深 18~23 米)。上部结构由 14 孔华伦式简支钢桁架($14@65.8$ 米)组成, 全长 921 米, 宽 6 米。各孔的支座一端是固定铰, 一端是滚动支座。

地震时, 此桥还在修建中。所有下部结构和左岸起第一、第二孔已经完成。这两孔的混凝土桥面也已经浇捣完毕。第十孔和第十一孔的钢桁架正处于架设阶段, 第十一孔的上弦杆尚未连接好。其他各孔桁架已安装就绪, 但混凝土桥面尚未浇筑。

地震时, 此桥的下部结构和上部结构都遭到破坏(图 2.48)。右桥台向河心移动了相当大一段距离(约 1 米), 有几个桥墩在水平和竖直方向都有位移。第九个桥墩沿着下游方向移动了 23 厘米, 其他几个桥墩位移不到几厘米。

第十一孔由于支撑木断裂, 滚动支座一端落入河中(照片 2.58), 这是由于地震时桁架的上弦杆还没有连接好所致。在其他各孔观察到一些中等程度的破坏, 如锚栓的破坏(照片 2.59), 支座附近砂浆的破坏以及伸缩缝处由于冲击而产生的轻微损伤。

7. 小须户桥(图 2.47~2.50)——此桥于 1963 年 12 月建成, 在新潟县 Nakakanhara 郡小须户的 538 号县道上跨越信濃河, 震中以南约 72 公里。

桥址处的地基是粘质粉土和粉质粘土(图 2.47), 比新潟的砂还细。

桥台和桥墩是钢筋混凝土实板式结构, 沉箱基础(平面尺寸 4.6 米 $\times$ 12.2 米, 深 13 米)。上部结构是三孔简支华伦式钢桁架($3@62.9$ 米), (图 2.49), 全长 189 米, 宽 4 米。

地震时, 此桥遭到中等程度的破坏(图 2.50)。所有下部结构都下沉, 但没有水平位移。