

南京长江大桥抗震加固技术

《南京长江大桥抗震加固技术》编委会编

中 国 铁 道 出 版 社

1998年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

南京长江大桥这座公、铁两用特大桥梁的抗震加固工程在国内尚属首例,国外也无现成方法借鉴。铁道部组织路内外科技人员,通过专题研究,坚持试验与理论相结合,在实践中逐步解决了这一重大课题。

本书为这一课题的成果。第一篇为大桥抗震加固技术总结;第二篇为专题研究报告。可为桥梁及重要建筑物抗震科研、设计和加固施工提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

南京长江大桥抗震加固技术/《南京长江大桥抗震加固技术》
编委会编 .- 北京:中国铁道出版社, 1998.11
ISBN 7-113-03114-5

. 南... . 南... . 铁路公路两用桥-抗震措施-南京
铁路公路两用桥-加固-技术-南京 .U448.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 26062 号

书 名: 南京长江大桥抗震加固技术
著作责任者:《南京长江大桥抗震加固技术》编委会
出版·发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)
策划编辑: 刘启山
责任编辑: 刘启山
封面设计:
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂
开 本: 787× 1092 1/16 印张: 185 插页: 3 字数: 600 千
版 本: 1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷
印 数: - 册
书 号: ISBN7-113-03114-5/TU·587
定 价: 50.00 元

版权所有 盗印必究
凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

谨以此书献给

伟大的中华人民共和国成立五十周年
南京长江大桥建成通车三十周年

《南京长江大桥抗震加固技术》编委会

南京长江大桥全景

南京长江大桥桥头堡夜景

序

《南京长江大桥抗震加固技术》一书, 适逢在大桥建成安全运营三十周年之际出版了。这是一件值得庆贺的大事。本书系统地阐述了大桥抗震加固技术, 内容包括现场勘测、科研试验与检算、理论分析、加固设计、施工、工程质量监控和加固效果评估等; 它从一个侧面反映了我国在地震预报和工程抗震科学技术方面的发展, 同时也为同类大型建筑物的抗震加固提供了宝贵的资料和经验。

大桥抗震加固工作是在确保主体结构、附属建筑物以及行车安全的条件下进行的, 加固期间南北交通和通信畅通无阻。

南京长江大桥的勘测设计早在 1956 年就已开始 1959 年元月完成初步设计。当时根据中国科学院地球物理研究所对南京地区地震烈度提出的分析意见认为: 南京地区的地震烈度可按 6 度考虑。根据这一意见, 在大桥设计中仅验算了连续梁固定支座所在桥墩的抗侧力能力, 未考虑更高的抗震设防要求。正当大桥建设接近尾声时, 我国东部地区的地震活动进入了高潮期。1966 年邢台地震, 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震等大地震都发生在北方, 对大桥的安全运行未造成任何影响, 但是在这几次地震之后政府和社会各界对南京长江大桥的地震安全性都十分关注。江苏省地震局在大桥上设置了强震观测仪器。1974 年 4 月 22 日江苏溧阳发生 5.5 级地震, 对大桥产生了波及影响, 设置在大桥上的强震观测仪器记录了主体结构的振动过程, 为桥梁设计和大桥的加固提供了很有价值的资料。

南京长江大桥抗震性能鉴定和加固工作, 从 1976 年开始一直延续到 1996 年; 这也是我国地震抗震科学研究和工程实践蓬勃发展的二十年。在此期间内基本上完成了工程场址的地震危险性评定从确定性方法向综合概率方法的过渡。大桥的抗震加固主要是以当时的第二代全国地震烈度区划图所给定的桥址所在地区地震基本烈度 7 度设防, 但在研究过程中应用了编制第三代中国地震烈度区划图的综合概率法, 结合桥区场地条件给定的桥区地震烈度为 7 度及其相对应的地震动工程参数, 作为评定大桥下部结构、地基砂土液化判定和抗震加固的设防标准, 同时引入了以 100 年超越概率为 5% 的风险水平作为大桥的设防标准, 这是铁路桥梁抗震设防标准的重要发展。在抗震加固研究中还应用了实测的地震记录, 这些记录表明大桥在中等强度的地震作用下, 可不考虑各桥墩的空间耦联影响。这一结论对大桥抗震能力的正确评定具有重要的影响。

在引桥可液化砂土地基加固实践中, 结合桥区的工程地质和现场条件, 自行开发研制了挤密砂桩加固设备, 并配置了施工质量监控装置, 完善了施工过程的质量保证体系, 取得了很好的效果。

当前,我国正处于新的地震活动期,本书的出版对于现有建筑物和构筑物的抗震加固和设防,特别是对提高重大工程抗御地震灾害的能力,有着十分重要的借鉴作用。

本书集中反映了参与南京长江大桥抗震科研和加固工作的全体人员的智慧和在此项工作中所取得的成就,是桥梁抗震设计、加固和科研人员的良师益友,特向读者推荐。

中国科学院院士
一九九八年九月

前 言

南京长江大桥是我国自行设计建造的首座特大铁路、公路两用桥梁,于 60 年代初兴建,1968 年建成通车。

大桥地处长江中下游中等地震活动区。该地区在 70 年代中期前建造的建筑物绝大部分均不考虑地震因素,由于大桥贯穿大江南北,是我国重要的交通枢纽,在经济建设中具有重要的地位,因而在设计建造时,委托专门研究单位鉴定,确认桥址区的地震基本烈度为六度。

正值大桥兴建和运营期间,相继于 1966 年 3 月 8 日和 3 月 22 日、1974 年 4 月 22 日和 1975 年 2 月 4 日先后发生了河北邢台 6.8 级和 7.2 级地震、江苏溧阳 5.5 级地震和辽宁海城 7.3 级地震,尤其是 1976 年 7 月 28 日唐山 7.9 级地震。引起中央和各级领导对大桥地震安全运行的高度重视和关注,提出运行中的大桥究竟能抗御多大的地震能力。为确保大桥地震安全运行,首先应对既有大桥抗震能力作出科学的鉴定,并在此基础上采取相应的保证大桥地震安全运行的对策。虽然在 70 年代中期,我国地震预报和地震工程学得到重视和发展,各类建筑抗震设计规范相继开始编制,但是要对南京长江大桥的抗震能力作出科学的评定,尚需解决一系列的难题。诸如:桥址区的抗震设防标准的确定;大桥正桥三跨连续梁在地震作用下需要考虑空间作用与否;大桥和桥堡的动力特征及其与地基相互反馈作用;引桥砂土地基液化的判别及其液化深度和宽度的确定;引桥可液化砂土地基的加固技术和加固效果的评定等。解决了这些问题,才有可能采取有效增强大桥抗震能力的工程抗震对策,避免盲目性,切实做到把有限的加固资金用到刀刃上。

对于上述问题,铁道部组织路内外工程技术和科研人员,坚持试验与理论相结合,随着我国与地震科学相关学科水平的发展,在深化认识实践中渐进解决。1974 年 4 月 22 日成功地猎取了江苏溧阳 5.5 级地震在南京长江大桥强震台阵的系统记录,填补了华东地区强震记录空白。本书首次公开发表了南京长江大桥强震台阵天然地震记录。此记录分析表明,南京长江大桥在地震作用下不呈现空间作用,不仅为大桥抗震能力计算模式奠定了科学依据,又解决了国内外长期争议的大桥抗震分析考虑空间作用与否的问题。采用地震危险性分析概率法,首次提出了 100 年超越概率为 5% 风险水平为特大桥梁的设防标准,正确评定了大桥的抗震能力。通过对桥址区全面详细的勘探、检算和理论分析,确定引桥液化地基加固的深度和宽度,做到了对大桥上部结构、下部结构和引桥可液化砂土地基提出合理的加固方法。为实现液化地基加固的目的,结合桥址场地条件专门研究、完善挤密砂桩机的改制和施工质量自动监控装置、实现机电一体化以及地基加固效果的评定方法等,经综合检测、评定,大桥加固效果极为明显,达到了抗震设防要求。

特大桥梁全面抗震加固工程,在国内尚属首例,国外也无现成方法可供借鉴,必须结合实际通过专题研究逐一解决。南京长江大桥加固工程从 1976 年开始持续了近 20 年,充分反映了特大桥梁全面抗震加固的艰难。由此可见,大桥加固技术不论从科研还是从加固技术和施工方法及加固效果的评定,均在一定程度上反映了在这一时期我国地震预报、工程地震、工程抗震和岩土工程的发展过程。其中不少科研成果具有创新内容和重要的实用性。为此,正值南京长江大桥建成通车 30 周年之际,我们将国内首例完整、系统的大桥抗震加固技术分二篇汇集撰写成书。第一篇为大桥抗震加固技术总结;第二篇为专题研究报告。为今后桥梁及重要建筑物抗震设计和加固提供借鉴并能有所受益,是我们撰写本书的意愿。

《南京长江大桥抗震加固技术》编委会
一九九八年五月

《南京长江大桥抗震加固技术》

编辑委员会名单

主 编	李东奎				
副主编	赵成灏	何连生	张雪亮		
委 员	王立堂	严 斌	李东奎	何连生	
	赵成灏	张雪亮	陈哲承	徐伟鸿	
	虞 锋				

目 录

第一篇 抗震加固技术总结

第一章 概 述.....	1
第一节 大桥工程简介.....	1
第二节 大桥抗震鉴定与加固准则.....	4
第三节 大桥抗震加固规模.....	6
第四节 大桥抗震加固工程效应.....	7
第二章 大桥抗震鉴定和加固的设防标准.....	9
第一节 地震烈度.....	9
第二节 大桥抗震鉴定和加固设防标准的确定	11
第三章 上部结构的加固设计与施工	14
第一节 正桥钢梁	14
第二节 铁路引桥 31.7m 预应力钢筋混凝土梁	22
第三节 公路引桥 31.7m 预应力钢筋混凝土梁	24
第四节 公路双曲拱桥上部结构抗震加固措施	26
第四章 下部结构的加固设计及施工	30
第一节 下部结构抗震能力的鉴定	30
第二节 南北两岸地基补探资料的分析	45
第三节 可液化地基的加固设计	48
第四节 可液化地基加固施工技术	52
第五节 公路双曲拱桥下部结构抗震加固措施	71
第六节 可液化砂土地基加固后抗震效能的检评	72
第五章 桥堡抗震性能的鉴定	83
第一节 桥堡建筑特点	83
第二节 塔楼的动力特征	83
第三节 塔楼抗震性能的鉴定	84
第四节 桥堡抗地震滑动稳定性判定	92

第二篇 专题研究报告

1 南京长江大桥强震观测台阵的天然地震记录	102
2 南京长江大桥地震反应与抗震性能的分析研究	129
3 南京长江大桥引桥地基砂土液化勘测与分析	144
4 南京长江大桥原型结构的动力试验	153

5 南京长江大桥地基加固试验报告 165

6 南京长江大桥地基防止液化加固标准分析 179

7 南京长江大桥桥址区设计地震动工程参数 137

8 南京长江大桥地基液化加固范围的试验及分析 208

9 南京长江大桥引桥液化地基加固范围的研究 226

10 片状砂的工程特性及其应用..... 234

11 南京长江大桥桥堡抗滑稳定性分析..... 241

12 南京长江大桥江南铁路引桥加固效应综合评定研究报告..... 246

13 挤密砂桩施工对既有建筑物的影响与防护..... 252

14 在线监控技术在挤密砂桩机上的应用..... 260

15 大型简支钢桁梁桥的空间地震反应分析..... 266

16 钢桁架桥三维地震响应..... 274

第一篇 抗震加固技术总结

第一章 概 述

第一节 大桥工程简介

南京长江大桥是我国铁路南北通道京沪干线和公路干线宁杨国道上的一座重要公铁两用特大桥梁。全桥长度,铁路部分 6772m,公路部分 4588m,其中江面正桥 1576m,另有分岔落地公路桥 316m。整个大桥由正桥,南北两岸铁路、公路引桥及桥头建筑组成。全桥总布置见图 1—1—1。

大桥于 1960 年 1 月 18 日正式开工,1968 年 12 月 29 日全面建成通车。至今已安全运营近三十年,它一直是我国华东地区乃至全国发展国民经济的重要交通命脉,地位十分重要。

一、正桥及其基础

正桥分上下两层,公路在上层,四车道,公路行车道宽 15m,两侧各另设净宽 2.25m 的人行道,总宽为 19.5m。铁路在下层,系双线铁路,两线路中心距为 4m。

(一)正桥上部建筑,由 10 孔钢梁组成,浦口岸第 1 孔为跨径 128m 的简支钢桁梁,其余 9 孔为三联三等跨 160m 的连续钢桁梁。主桁为平弦菱形桁,节间 8m,桁高 16m,下加劲桁弦高 14m;两主桁中心距为 14m。主桁及铁路横梁等主要结构用 16Mnq 低合金钢或性能相似的桥梁钢。全桥除铁路纵横梁连接采用高强度螺栓及公路采用焊接纵梁外,钢梁基本为铆接结构。铁路桥面采用明桥面,铺设焊接长钢轨。公路面用粉煤灰陶粒轻质钢筋混凝土板,板上铺设 5cm 厚的 300 号(C28)混凝土面层及 2cm 厚的沥青砂防磨层。

(二)正桥下部建筑,水中桥墩共 9 个。墩帽及墩身均为圆端型的实体结构,墩帽采用 300 号(C28)钢筋混凝土,墩身采用 170 号(C15)混凝土。桥墩基础结构共分为四种类型:

1 号墩为重型混凝土沉井基础,采用钢板桩围堰筑岛法施工。沉井穿过砂粘土、粉细砂、砾砂,总厚约 54m 覆盖层,底面落在砾砂层上;

2、3 号墩为钢沉井加管柱基础。钢沉井下至河床一定深度后,再在井孔内插入直径 3m 的预应力钢筋混凝土管柱,下沉至基岩,钻孔嵌固;

4、5、6、7 号墩为浮式钢筋混凝土沉井基础。沉井穿过细砂、粗砂、砾砂,总厚约 35m 覆盖层,底部嵌入新鲜岩层;

8、9 号墩为钢板桩围堰管柱基础。管柱下沉至基岩,钻孔嵌固。

(三)正桥钢梁于 0 号台,2、5、8 号墩上设固定支座,于 1、3、4、6、7、9 号墩及 10 号台上设辊轴活动支座,铸件采用 ZG₂₅B 类铸钢,辊轴采用 A5 锻钢。

二、引桥及其基础

南北两岸的铁路、公路引桥,可划分为以下几个区段:北岸自 0 号至 03 号台(南岸自 10 号

台至 13 号台)为桥头建筑区段;北岸自 03 号至 05 号墩(南岸自 13 号台至 15 号墩)为铁路、公路共用区段;北岸自 05 号墩(南岸自 15 号墩)开始,铁路、公路引桥分岔,而成为单独的铁路、公路桥区段。

(一)引桥上部建筑

1. 桥头建筑区段:北岸 0 号台及 03 号台(南岸 10 号台及 13 号台)构成桥头建筑的大堡和小堡及其间的引桥向正桥的过渡段。由于大小堡各自都需要有一定的空间,故各由前后两个桥台组成。大堡前后台之间配用铁路梁跨径为 14.2m、公路梁跨径 14.1m,小堡前后台之间配用铁路梁跨径为 7.5m、公路梁跨径 7.35m 的 T 形普通钢筋混凝土梁,大、小堡间配用铁路和公路各三孔梁跨径为 22.9m 的 T 形预应力钢筋混凝土梁。

2. 其余两个区段:北岸自 03 号台至 0109 号台(南岸自 13 号台至 60 号台)的铁路引桥,北岸自 03 号台至 034 号墩(南岸自 13 号台至 45 号墩)的公路引桥,其上部结构均为跨度 31.7m 的 T 型预应力钢筋混凝土梁。北岸自 034 号墩至 038 号台公路引桥为 4 孔双曲拱桥,墩台中心距 34.9m,南岸自 45 号墩至 63 号台公路引桥共 18 孔,也为双曲拱桥,墩台中心距自 34.9 ~ 37.2m 不等。此外,自南岸 45 号墩出岔,向桥头建筑方向引出 11 孔分岔落地桥,亦为双曲拱,墩台中心距,5 孔是 32.7m,6 孔是 22m。

(二)引桥下部建筑

1. 桥头建筑区段及铁路、公路共用区段的桥墩为双层式的钢筋混凝土框架结构,其基础为直径 55cm 的旋制钢筋混凝土管桩,入土深度超过 46m。桩长 48m(不包括桩尖),穿过饱和粉砂和细砂层,桩尖支承在砾砂层上。

2. 铁路引桥桥墩为双柱式的框架结构。顶帽为钢筋混凝土结构,1964 年 6 月以前施工的 52 座墩柱及承台(包括墩座)均为无筋混凝土结构。后来为增加结构的抗裂性,决定其余墩柱均增设分布钢筋。采用的混凝土标号:墩帽 200 号(C18),墩柱 170 号(C15),承台 140 号(C12)。铁路引桥,除北岸 0106 号墩至 0109 号台为明挖基础外,其余均为桩基础(北岸 0105 号墩为支承桩,其余均为摩擦桩)。除少量用直径 40cm 管柱及 30cm 方柱外,大部分基桩用直径 55cm 的旋制钢筋混凝土管桩。单桩的入土深度一般在 28m 左右。

3. 公路引桥,梁式桥部分的桥墩,亦为双柱式框架结构。墩顶横梁、墩柱及承台(包括墩座)均为钢筋混凝土结构,分别采用 250 号(C23)及 200 号(C18)混凝土。基桩除少数采用直径 40cm 的钢筋混凝土管桩外,大部分为直径 55cm 的钢筋混凝土管桩。双曲拱桥均系实体桥墩,正线上的 22 孔,全为灌注桩基础;分岔落地的 11 孔,有 5 个桥墩为灌注桩基础,其余为扩大基础。灌注桩桩长 20 ~ 24m,桩尖支承在粉砂或细砂层上。

(三)南北两岸的铁路、公路引桥,每孔预应力钢筋混凝土梁的两端分设钢质固定支座及摇轴活动支座,固定支座设于桥梁落地的一端(北岸铁路引桥第 105 孔除外)。

三、桥头建筑及其基础

桥头建筑为复式桥台,两岸各有一座大、小堡。大堡由两座塔楼和大厅等组成,是桥头建筑的主要部分。塔楼高达 70m,每座长 17m,宽 11m,占地面积 175m²,共 10 层。底层与大厅、接待室相连,第四层与铁路面相通,第七层与公路同一平面,顶上为红旗平台,红旗高 5m,长 8m,其骨架为钢结构。小堡顶部各安置一组群像雕塑,每组由五像组成,像身高 4.5 ~ 5.0m,采用混凝土空腹结构,重量 48 ~ 65t。

大、小堡之间有三等跨 22.9m 的梁桥,作为引桥向正桥的过渡。

(一) 大堡结构及其基础

大堡由承受铁路、公路荷载的前后两个双层刚架及连接地面、铁路面、公路面的塔楼组成。前后两个双层刚架分别设置在两个独立的基础上。双层刚架的上层支承 11 片跨度为 14.1m 的 T 形钢筋混凝土简支公路梁, 下层支承 4 片跨度为 14.2m 的 T 形钢筋混凝土简支铁路梁, 及两侧钢筋混凝土维修人员走道梁。在铁路梁以下, 还设有两层 T 形钢筋混凝土梁: 上层支承在前后两个刚架的牛腿上, 建配电间; 下层支承在前后两个刚架的承台上, 建大厅。上下游两侧为塔楼。塔楼结构基本上是独立的高层建筑。塔楼的梁柱为现浇的钢筋混凝土, 楼板为预制, 在其周围预留接头钢筋, 以便与梁柱连接。塔楼四周, 除底层为 24cm 厚的实心墙外, 其余均为 20cm 厚的空心砖墙。塔楼基础为直径 55cm 的钢筋混凝土管桩, 管桩上建筑厚 2.5m 的钢筋混凝土承台。桩的入土深度超过 40m。

(二) 小堡结构及其基础

小堡的结构布置与大堡相似。小堡间同样有前后两个双层刚架。其上层, 中间公路部分设 9 片跨度 7.35m 的预制 T 形钢筋混凝土简支梁, 两侧各为三片现浇 T 型钢筋混凝土简支梁, 作人行道和雕塑支承。其下层, 中间为 4 片跨度 7.5m 的 T 型钢筋混凝土简支铁路梁, 两侧是维修人员走道的预制钢筋混凝土横向板, 板两端分别支在铁路梁的上翼突出的牛腿及两侧楼梯间的墙梁上。在铁路面下, 还有支在前后刚架牛腿上的空心楼板过道。小堡基础亦采用直径 55cm 的钢筋混凝土管桩。承台前后两部份(分别支承前后刚架)由两片 1m 宽的梁连成整体。承台的上下游方向伸出有钢筋混凝土悬臂, 以支承楼梯间的框架立柱。两侧楼梯间为现浇钢筋混凝土刚架结构, 与中间双层刚架分开施工, 其连接是靠中间刚架预留的钢筋及承受剪力的小牛腿。楼梯间的墙均采用 20cm 厚的空心砖墙。

四、桥址地质概貌特点

桥址处, 白垩纪火山岩系和老第三纪浦口层是大桥基础的受力层, 由于地壳运动呈向斜褶皱构造。第四纪全新统(近代)以后, 本区地壳又缓慢沉降, 第三纪浦口层的侵蚀深槽和侵蚀阶地, 全为近代河流冲积层所覆盖, 在桥址处形成 7km 宽的冲积平原。近代冲积层的厚度, 在正桥河床下为 33 ~ 47m, 在两岸引桥下为 40 ~ 74m, 在基岩深槽处, 其厚度近于 100m。近代冲积层的性质, 下部为中粗砂, 砾砂和砾土, 中部为粉细砂, 上部为砂粘土。近期地壳稳定, 对工程建筑没有什么影响。

(一) 正桥(河槽)的工程地质条件

浦口岸桥头堡, 位于基岩深槽左侧的一级基岩阶地的前缘。基岩为暗红色的松软砂岩, 覆盖层厚 74m: 上部与中部为软塑砂粘土与粉细砂, 共厚约 43m; 下部为粗砂、砾砂层。

正桥 1 号墩, 位于基岩深槽上。基岩为暗红色的胶结不良的松软砂岩, 覆盖层厚 90 多 m: 上部为厚约 12m 的软塑砂粘土; 中部为厚约 26m 的粉细砂; 下部为粗砂、砾砂层。

正桥 2 ~ 7 号墩, 位于基岩深槽右侧的一级基岩阶地上。阶地面上的覆盖层厚约 35m 主要为细砂, 底部有厚约 5 ~ 15m 粗砂、砾砂层。组成阶地的基岩, 2、6 号墩为砂质页岩夹砂岩; 3、5 号墩为砂质页岩与砂岩互层; 4 号墩以砂岩为主, 夹砂质页岩; 7 号墩则全为粘土质页岩。

正桥 8、9 号墩及南京岸桥头堡, 位于二级基岩阶地上。阶地面上的覆盖层厚度, 8、9 号墩约 40m; 南京岸桥头堡为 59m。覆盖层性质, 8、9 号墩主要为细砂; 桥头堡则为砂粘土粉细砂互层, 底部有厚约 4m 的粗砂层。三个墩台处的基岩皆为角砾岩。

(二) 两岸引桥的工程地质条件

浦口岸, 冲积平原宽约 3.9km, 地面标高+ 6~7m, 地下水位在地面下 1~2m。公路引桥及铁路引桥 01~055 号墩范围基岩上的覆盖层厚度 64~74m, 全为近代冲积层, 上部为砂粘土层、粉砂层、细砂层, 底面深度约为 45m, 中粗砂与砾砂层一般分布在深度 45m 以下。铁路引桥 056~0104 号墩范围基岩上的覆盖层厚度 40~48m, 全为近代冲积层, 上部为砂粘土层、粉砂层, 底部为中细砂和砾砂层很薄。0105 号墩~0109 号台范围基岩上的覆盖层厚度 14~18m, 为近代冲积的砂粘土。南京岸, 冲积平原宽约 1.6km, 地面标高+ 6~8.2m, 地下水位在地面下约 1~2m。铁路引桥 11~32 号墩范围基岩上的覆盖层厚度 50~59m, 全部为近代冲积层, 上部为砂粘土, 下部为细砂层, 底部只有很薄的粗砂、砾砂层。铁路引桥 33~39 号墩及公路引桥 30~47 号墩范围基岩上的覆盖层厚 54~17m, 全部为近代冲积层, 除地表及底部有很薄的砂粘土层外, 几乎全为粉砂层。铁路引桥 40~60 号墩台范围基岩上的覆盖层厚约 23m, 为近代冲积砂粘土层。

两岸砂粘土的天然含水量约为 35~45%, 天然孔隙比为 0.9~1.1, 天然容重为 17.5~18.5kN/m³, 固结慢剪 $C=2.0\sim2.2\text{N/cm}^2$, $\Phi=20\sim25$ 度, 多数为软塑至流动状态的淤泥质砂粘土。两岸粉细砂, 其天然容重在 18.0kN/m³ 左右, 天然孔隙比为 0.95~1.0, 呈松散饱和状。南京长江大桥两岸引桥工程地质纵断面见图 1—1—2。

五、大桥设计采用的规范及荷载标准

南京长江大桥采用下列规范进行设计:

1. 1959 年公布施行的《铁路桥涵设计规范》。
 2. 1956 年公布的《公路工程设计准则(修正草案)》。
- 大桥还根据自身的特殊情况, 对上述规程的个别条文作了补充和修订, 对个别结构采用了新技术、新材料, 则按相应的新规定办理。
- 南京长江大桥设计中采用的主要荷载:
1. 设计活载: 在正桥部份, 铁路设计活载为中- 24 级, 引桥铁路设计活载为中- 26 级; 不论正桥、引桥, 公路设计活载均为汽- 18 级, 并以拖- 80t 检算。设计主桁时人群荷载为 3kPa (仅受人群荷重的结构为 4kPa)。
 2. 地震力: 根据中国科学院地球物理研究所 1956 年对于南京地震烈度鉴定的意见:“南京地震烈度, 应作六度考虑”, 建筑物不作特殊设防处理。

第二节 大桥抗震鉴定与加固准则

南京长江大桥的勘测设计工作始于 1956 年, 于 1959 年元月完成大桥初步设计, 大桥设计中因地震力仅按南京地震烈度六度考虑, 故只检算连续梁的固定支座所在的桥墩, 全桥未考虑抗震设防要求, 这和当时还没有我国自己的抗震设计规范和国家的经济状况是相适应的。

60 年代以后, 特别是从 1964 年至 1976 年间, 我国大陆连续发生了邢台、通海、唐山等强烈地震, 尤其是 1976 年发生在河北唐山的大地震, 给我国国民经济发展和人民生命财产造成了巨大的损失。唐山大地震以来, 随着抗震管理体制的建立, 科研机构的健全, 相应的财政经费的投入, 使工程地震、抗震理论和试验研究、强震的观测以及抗震规范的编制都有了明显的进展; 并相继开展了对既有各类工程的抗震加固、震后修复重建和提高建筑物综合抗震能力的研究工作。在这样的形势推动下, 南京长江大桥作为已建成的国民经济大动脉铁路的重要建筑物

之一,在未进行抗震设防的情况下,为防患于未然,在技术上可能、经济上合理、安全上可靠的前提下,进行大桥抗震能力的鉴定,并采取适当的抗震加固措施,显然是非常必要的。

在确定大桥抗震鉴定与加固标准前,1977年7月,大桥原设计单位按照地震烈度为七度,分别就大桥的关键部位和公路双曲拱桥进行了初步检算。检算结果表明:

正桥支座的上摆联接螺栓和下摆锚固螺栓的剪应力全部超过允许应力;

公路和铁路引桥的跨度31.7m预应力钢筋混凝土梁的支座螺栓未超过允许应力,但支座上两个电焊挡板焊缝强度不足;

公路和铁路引桥的墩身偏心在允许范围内,双层墩内部钢筋应力接近允许应力;

引桥基础地处可能液化的厚粉砂层处,以铁路南岸35号墩22.8m长的桩为例,土壤允许最大液化深度为5m;

公路双曲拱桥主拱圈和拱上结构均未发生不许可的拉应力。

当时也有部分单位专家提出,除对正桥和引桥按地震烈度七度采取一些必要的抗震设防措施外,还应按地震烈度八度对全桥结构进行验算,继续摸清薄弱环节,制定对策。组织有关科研单位进行砂土液化深度的测定和液化地基的补强研究。另外,考虑到大桥所处的重要地理位置和确保铁路运输的安全畅通无阻,铁路部门建议大桥按地震烈度八度设防。

设计单位在初步检算的基础上,依照1977年颁布的《铁路工程抗震设计规范(试行)》规定,对大桥选有代表性的、影响行车安全的关键部位,重点地分别按照地震烈度七度和八度进行了全桥结构检算,检算结果指出:由于规范规定,当地震烈度增加一度时,计算地震力将增加一倍,导致地震烈度七度和八度需要加固的内容和施工的难易程度有很大的差异,若按八度加固,不仅耗资将会大增、施工也将变得更加困难。结合桥梁受地震灾害后破坏情况的分析,设计部门认为大桥按七度设防为宜。

铁道部根据设计单位的检算报告,结合国家地震局全国烈度会议确定南京地区的基本烈度为七度,经报请国家建委批准,南京长江大桥按七度设防标准进行抗震加固。

江苏省地震局结合我国先后应用确定性法完成的我国第二代《中国地震烈度区划图》及应用概率法完成的我国第三代《中国地震烈度区划图》的公布使用,开展了一系列与南京长江大桥桥址区地震烈度有关的科学研究工作,提出了适合大桥桥址区的地震烈度为七度,并对大桥的不同部位在不同时期给出了相应的设防标准。上述这些工作,再次论证了大桥采用地震烈度七度进行设防,是适宜的。

1988年设计单位还曾按照《铁路工程抗震设计规范(GBJ111-87)》及补充地质资料对大桥的下部结构重新作了七度设防的检算。1990年与1992年进一步根据按概率法提供的大桥抗震设计地震动参数与反应谱及1989年以后提供的各墩地基土临界触探阻值和临界标贯值,对两岸铁路、公路引桥共47座桥墩桩基进行了七度设防补充检算。整个检算工作充分体现了系统性、完整性和科学可靠性。

在此基础上,提出南京长江大桥抗震鉴定与加固所遵循的主要准则:

一、鉴定标准采用桥址地区按地震烈度区划图给出的基本烈度,即按七度烈度考虑,对于不能满足七度烈度要求的部位进行加固,以达到与设防标准一致。

二、结合桥址区地震动工程参数的研究、确定,以及桥址区地震危险性分析采用的概率水平,对基本烈度七度所对应的地震动峰值加速度进行适当的调整,作为对下部结构基础鉴定标准的参照值。

三、对大桥的梁部结构,结合宏观震害的经验总结,在抗震构造措施上,对铁路引桥简支梁