

赵才煜,孙柏涛,陈洪富.铁路工程抗震设计规范中桥梁抗震相关规定与发展沿革[J].地震工程学报,2023,45(5):1214-1221.
DOI:10.20000/j.1000-0844.20230407001
ZHAO Caiyu,SUN Baitao,CHEN Hongfu,Related provisions and development evolution of seismic bridge design in the codes for seismic design of railway engineering[J].China Earthquake Engineering Journal,2023,45(5):1214-1221,DOI:10.20000/j.1000-0844.20230407001

铁路工程抗震设计规范中桥梁抗震 相关规定与发展沿革

赵才煜^{1,2}, 孙柏涛^{1,2}, 陈洪富^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 生命线基础设施抗震安全对我国防震减灾与抗震救灾工作具有重要意义,铁路桥梁更是关乎人员转移与物质运输的安全与稳定。基于地震区铁路桥梁震害资料分析和震害调查研究,结合我国铁路桥梁抗震设计工作的经验、教训及相关科研成果,我国陆续出版了3本《铁路工程抗震设计规范》。文章回顾我国铁路桥梁抗震设计规范60年的发展历程,对我国开展铁路桥梁抗震设计工作的历史时期进行划分;通过对比和总结1977、1987、2009年颁布的《铁路工程抗震设计规范》中的铁路桥梁部分,发现该系列规范的发展逐步体现了基于性能的设计理念,场地分类更加精细,地震作用考虑更为科学,且对于铁路桥梁的抗震构造措施有了更加明确的规定。研究可为改进和完善地震区铁路桥梁震害预测方法提供参考依据。

关键词: 铁路桥梁;震害调查;抗震设计规范;设计标准

中图分类号: P319.56 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2023)05-1214-08
DOI:10.20000/j.1000-0844.20230407001

Related provisions and development evolution of seismic bridge design in the codes for seismic design of railway engineering

ZHAO Caiyu^{1,2}, SUN Baitao^{1,2}, CHEN Hongfu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of CEA, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: The seismic safety of lifeline infrastructure is of great importance for disaster prevention and mitigation and earthquake relief work in China, as railway bridges are more associated with the safety and stability of personnel transfer and material transportation. Based on the analysis of the seismic data and seismic damage investigation of railway bridges in earthquake areas, combined with practical experience from seismic design of railway bridges in China and relevant

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2019EEEE0103);国家自然科学基金联合基金重点项目(U2239252);国家重点研发计划课题(2019YFC1509301)

第一作者简介: 赵才煜(1998—),男,硕士研究生,主要从事桥梁震害预测研究。E-mail: zhaocaiyu209@163.com。

通信作者: 陈洪富(1983—),男,博士,副研究员,主要从事地震灾害风险评估、抗震加固研究。E-mail: chen-hongfu@163.com。

scientific research results, three issues of the *Code for Seismic Design of Railway Engineering* have been successively published in China. This paper reviewed the 60-year development history of codes for seismic design of railway bridges in China and classified the historical periods in which seismic design work for railway bridges has been performed in China. A comparison and summary of the sections regarding railway bridges in the 1977, 1987, and 2009 issues of the *Code for Seismic Design of Railway Engineering* revealed that the code series gradually embodies the concept of performance-based design, with more refined site classification, more scientific consideration of seismic effects, and more explicit provisions for seismic structural measures of railway bridges. Thus, the objective of this study is to offer a reference to improve and refine the methods for predicting seismic damage of railway bridges in seismic zones.

Keywords: railway bridge; seismic damage survey; seismic design code; design standard

0 引言

铁路桥梁抗震设计是随着经济条件和科学认识水平的发展而不断变化的。随着震害资料的不断积累以及人们对地震作用下各类结构地震反应研究和认识的不断加深,铁路桥梁的抗震理念也在不断进步。新中国成立前,我国虽然已经修建了一部分铁路桥梁,但是当时并未对其地震危险性 & 结构易损性展开系统性研究^[1],也没有相应的抗震设计标准,因此修建的铁路桥梁均未考虑抗震设防。

新中国成立初期,地震区的桥梁设计一开始是直接翻译和沿用苏联的规范。一方面对于桥梁的建造设计,1950 年铁道部设计局组织翻译了苏联 1947 年《铁路桥涵设计规程(TYИИМ—47)》,并以此为蓝本编制了《铁路桥涵设计规程(初稿)》,于同年 6 月颁发^[2]。其后,又将上述初稿的桥梁活载标准改为中华人民铁道桥梁中-Z 制标准,修改了桥梁所用钢材的性能要求,于 1951 年 12 月颁布了我国第一本正式的《铁路桥涵设计规程》^[3]。1958 年,《铁路桥涵设计规程》^[3]被《铁路桥涵设计规范》^[4]替代。这是我国铁路桥涵设计规范的首次更迭,主要针对第三章“钢铁结构”进行了修订,包括优化了钢材容许应力的受力形式,在强度计算中考虑了附加力,修正和补充了钢桥跨结构和钢墩台各杆件强度、总稳定性和耐劳强度的计算公式等。

另一方面,抗震设计规范也是铁路桥梁设计的主要依据之一。同样于 1955 年,在中国科学院土木建筑研究所所长刘恢先的主导下,我国翻译了苏联的《地震区建筑规范》^[5]。该规范在“道路构筑物”一章中对桥梁等人工构筑物受到的地震荷载做出了相关规定。20 世纪 50 年代,我国华北地区、西北地区以及中南地区等主要干线上的铁路桥梁均按《地震

区建筑规范》^[5]和《铁路桥涵设计规程》^[3]进行设计。

而 20 世纪 60 年代至 1976 年这一时期,我国华北地区、中南地区、西南地区及西北地区等主要干线上新修建的铁路桥梁及其抗震设计主要参考《铁路桥涵设计规范》^[4]和 1959 年版《地震区建筑规范(CH-8-57)》^[6]。后者的编制任务于 1958 年开始,由原国家建委带头,中国科学院土木建筑研究所负责编制,铁道部专业设计院参与编制。该规范主要以苏联 1957 版抗震规范为依据,吸收并采用了当时最新的抗震研究成果和相关规定,包含道桥等抗震设计内容,于 1959 年 5 月正式定稿,成为我国第一部抗震规范的草案稿。

1964 年,刘恢先主持编制了我国第二部抗震规范的草案稿,其中仍然包括“道路构筑物”一章。该草案稿在 1959 版《地震区建筑规范(CH-8-57)》^[6]的基础上,吸取国内外先进研究成果和抗震设计经验,并对部分内容进行删减和修改而来,于同年 11 月定稿,命名为《地震区建筑设计规范(草案稿)》。该规范虽然没有得到正式颁布,但对当时的工程设计及以后的规范发展起到了积极作用。

在具体的抗震防震措施上,我国主要以 1968 年《京津地区道路建筑物抗震设计暂行规范(初稿)》为依据^[7]。该规范基于 1965 年乌鲁木齐地震、1966 年邢台地震和东川地震这 3 次强烈地震的震害经验,并结合京津冀地区的实际情况进行编制,是由《地震区建筑设计规范(草案稿)》发展而来的。虽然该规范未能被审批公布,但对当时的铁路桥梁抗震设计起到了积极的促进作用。这些早期规范为日后《铁路工程抗震设计规范》的编制奠定了基础。

此后,我国《铁路工程抗震设计规范》历经三代发展,无论是理论方法的研究深度还是应用的广度,

在世界上都是具有先进性的。本文将按照时间的脉络分别介绍三代规范的发展与内容,并对比三版规范的主要差别。

1 1977 年《铁路工程抗震设计规范(试行)》

在《京津地区道路建筑物抗震设计暂行规范(初稿)》编制完成后的十年内,我国又陆续发生了多次强烈地震,包括 7 次 7 级以上地震(表 1)。它们对铁路及其沿线造成的震害推动了我国第一本铁路工程抗震规范的编制。

表 1 1969—1976 年我国强烈地震情况

Table 1 Strong earthquakes in China during 1969—1976				
	日期	地点	震级	最大烈度
1	1970-01-05	云南省通海县	7.7	10~11
2	1973-02-06	四川省炉霍县	7.6	10
3	1974-05-11	云南省昭通市	7.1	9
4	1975-02-04	辽宁省海城市	7.3	9~10
5	1976-05-29	云南省龙陵县	7.4	9
6	1976-07-28	河北省唐山市	7.8	11
7	1976-08-16	四川省松潘县	7.2	9

上述强烈地震造成的破坏引起了国家的高度重视。为了更好地开展铁路工程的抗震设计工作,原国家基建委和原交通部委托原铁道部编制了《铁路工程抗震设计规范(试行)》^[8](下文简称“1977 版铁规”)。原铁道部第一设计院主持该规范的编制,中国科学院工程力学研究所、兰州地震大队、兰州大学、兰州铁道学院,以及铁道部第二、三、四设计院等八家单位共同参与编制。

该规范的编制除了依据 1959 版《地震区建筑规范(CH-8-57)》、1964 年《地震区建筑设计规范(草案稿)》、《京津地区道路建筑物抗震设计暂行规范(初稿)》3 本已有规范外,还参考了国外有关资料,并对通海、昭通、海城等地区的地震进行了深入的现场调查和地质勘探,总结了强烈地震带来的震害经验。同时,对桥墩的动力特性、海城地震区域的砂土地基液化进行了实验和研究,并将成果纳入了其中。

1976 年 5 月,原铁道部基建总局组织了定稿审查会议。在定稿两个月后,即 1976 年 7 月 28 日,唐山发生了 7.8 级强烈地震,铁路遭受到十分严重的破坏,相关单位立即到现场进行调查,其丰富的震害资料带来了新的震害经验。根据这些经验教训,铁道部第一设计院又对审定稿做了修改与补充。1977 年 5 月 1 日,铁道部铁基字 96 号文正式批准该规范,并在全路正式实施。

“1977 版铁规”的主要特点是吸取并总结了对

铁路工程造成破坏最严重的海城地震和唐山地震的震害经验。铁路桥梁在两次地震后的震害情况如表 2 和图 1、2 所示。震害调查发现,在可液化土及软土地基上的桥梁受到的破坏普遍比较严重。因此,该规范在抗震措施上首先强调了要特别重视这种桥梁,因为它们在 7 度区就有可能发生比较严重的震害,如位于 7 度区的辽河特大桥,在海城地震发生后震害严重,致使行车中断时长超过 130 h,是抢修通车的关键;反之,建于密实地基上的桥梁,即使是在 9 度及以上的区域,震害也比较轻微,如唐山大地震中京山铁路上 5 座位于 10~11 度区的桥梁,因为地基土密实,其震害相对较轻。

表 2 唐山、海城地震铁路桥梁震害表^[9-10]

Table 2 Table of earthquake damage of railway bridges in Tangshan and Haicheng earthquakes ^[9-10]				
	地震烈度	遭受震害铁路桥梁比例/%	不同等级破坏比例/%	
			轻微及中等破坏比例	严重破坏及毁坏比例
唐山地震	7~11	40	55	45
海城地震	7~9	41	75	25

注:海城地震桥梁震害统计仅包括地震区西部

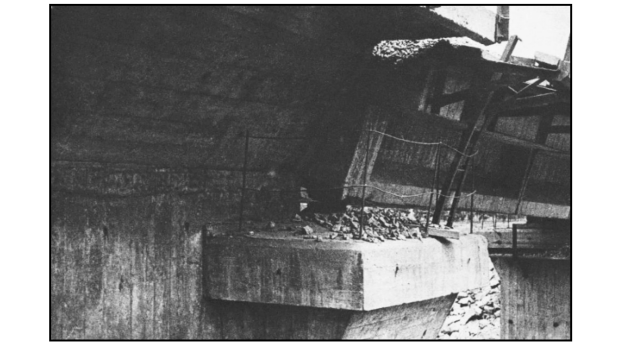


图 1 唐山地震中梁侧向位移(从支座上掉落)^[9]
Fig.1 Lateral displacement of beam in Tangshan earthquake (falling from the support)^[9]



图 2 唐山地震中桥面侧向位移^[9]
Fig.2 Lateral displacement of bridge deck in Tangshan earthquake^[9]

综上,该规范在抗震措施方面:第一,规定了应结合地质、路基等实际情况,尽量绕开此类极不利地段,当无法规避时,则规定应采用桩基础或沉井基础等深基础,该方法一直沿用至今;第二,若考虑可液化土及软土的地质情况,桥孔应适当加长,桥台应建在稳定的地基上。

2 1987 年《铁路工程抗震设计规范 (GBJ 111—87)》

1979 年 1 月,铁道部下达了修改《铁路工程抗震设计规范(试行)》的任务。1987 年 7 月 1 日,原国家计划委员会批准《铁路工程抗震设计规范 (GBJ 111—87)》^[11](下文简称“1987 版铁规”)正式施行。

规范编制组在编制过程中认真总结了原规范试行以来的经验教训,组织了专题的科学研究,进行了比较广泛的调查。在铁路桥梁抗震设计方面,相对于“1977 版铁规”,主要的修改补充内容有以下 5 点:

(1) 优化了抗震设计标准^[12]。“1987 版铁规”中新划分了 3 个铁路抗震设计标准,即Ⅰ、Ⅱ级铁路的损坏部分稍加整修,可正常使用;Ⅲ级铁路即Ⅰ级工企铁路,经短期抢修后可恢复通车;Ⅱ、Ⅲ级工企铁路的重大桥梁等工程不发生严重破坏。而“1977 版铁规”中只包含前两条。该分类不仅考虑了运量的大小,而且将遭受破坏后导致的直接经济损失、修复难易程度、对人民生活造成的不便,及对运输造成的损失等因素均考虑在内。

(2) 新增了场地分类。场地土类别仍分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类,但分别给它们定名为坚硬场地土、中等场地土及松软场地土。同时,参照《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ 11—78)》^[13]中规定的方法,计算土层平均剪切波速,并将其纳入规范中(表 3)。在评定场地类别时,取土层深度 25 m 内各土层的平均剪切波速来判定,这样的分类方法比较简单可行。

表 3 《铁路工程抗震设计规范 (GBJ 111—87)》场地分类
Table 3 Site classification in the Code for Seismic Design of Railway Engineering (GBJ 111—87)

场地类别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
土层剪切波速 v_{Se} 范围/(m/s)	$v_{Se} > 500$	$500 \geq v_{Se} > 140$	$v_{Se} \leq 140$

(3) 调整了抗震设计控制条件中地基土容许承载力的修正系数。地基为 $150 \text{ kPa} < \sigma_0 \leq 500 \text{ kPa}$ 的岩石和土的容许力修正系数由 1.25 调整至 1.30,这是因为松软地基上工程的震害一般较重。

(4) 优化了梁式桥桥墩的抗震设计方法。

“1977 版铁规”未考虑地基变形对桥墩的影响,其抗震设计方法仅适用于岩石地基上的桥墩,不适用于非岩石地基上的桥墩。其规定计算的地震荷载有时偏大,增加了工程投资,有时偏小,未考虑桥墩的控制设计^[14]。因此“1987 版铁规”进行计算时,将地基变形的影响计入在内,其表达式如下。

$$M_{ijE} = \eta_c \cdot K_h \cdot \beta_j \cdot \gamma_j \cdot k_{ij} \cdot J_i \cdot g \quad (1)$$

式中: M_{ijE} 为非岩石地基的基础(或承台)质心处 j 振型的地震力矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); η_c 为综合影响系数,与桥墩顶至基础顶的高度或一般冲刷线高度有关; K_h 为水平地震系数; β_j 为 j 振型动力系数,与桥墩自振周期和场地类别有关; γ_j 为 j 振型参与系数,与基础的质量(t)有关; k_{ij} 为 j 振型基础质心角变位($1/\text{m}$); J_i 为基础对质心轴的转动惯量($t \cdot \text{m}^2$); g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

同时,还补充了四类适用于岩石、非岩石地基上梁式桥各式桥墩地震作用的简化计算方法,包括各式实体或空心桥墩、各式实体或空心的刚架桥墩、地基土较柔软的低桥墩,以及无承台的刚架桩墩。

(5) “抗震措施”一节中,“1987 版铁规”第 4.2.7 条规定,采用明挖基础的桥台,当基础底面摩擦系数 ≤ 0.25 时,宜采用砂卵石换填,其厚度由原来“不应小于 0.3 m”修正为“不应小于 0.5 m”,目的是进一步提高抗滑稳定性。

总而言之,修订后的“1987 版铁规”以科学研究为工作基础,增添了新内容,扩大了适用范围,条文依据也更加充分合理。

3 2009 年《铁路工程抗震设计规范 (GB 50111—2006)》(2009 版)

“1987 版铁规”颁布后的近 20 年里,有关结构抗震的理论和工程实践都有了飞速发展。2006 年,《铁路工程抗震设计规范 (GB 50111—2006)》正式公布,它是在上一版的基础上修订而成的。2009 年,应建标[2009]88 号的要求,铁一院会同有关单位对其又进行了修订,颁布了《铁路工程抗震设计规范 (GB 50111—2006)》(2009 版)^[15](下文简称“2009 版铁规”)。该规范在铁路桥梁抗震设计方面,与“1987 版铁规”的主要区别有以下 7 点:

(1) 抗震设计标准发生了改变。上一版规范根据不同等级铁路的运量大小及其在铁路网中的重要性,采用基本烈度作为设计烈度,并要求其在遭受到设计烈度的地震响应时不产生大的结构性破坏,即用设计烈度(50 年超越概率 10%)进行抗震设

计^[16]。新版规范规定了铁路工程按“三水准、两阶段”进行抗震设计^[17],即所有的铁路工程按照多遇地震、设计地震、罕遇地震 3 个地震动水准进行抗震设计;而大跨铁路桥梁,如悬索桥、斜拉桥等结构因具有良好的力学性能和经济指标,又常位于铁路交通网的枢纽位置,其抗震设计采用两阶段设计,即“中震不坏,大震可修”。

另外,抗震设防的范围扩大,新版规范将 6 度区纳入了铁路工程抗震设防范围,因为 6 度区约占我国抗震设防区域面积的一半,在这些区域已经发生了多次破坏性地震,实际烈度最高达到 8 度。同时,我国铁路里程中桥梁里程占 1/5 以上,且桥梁大多属于铁路线中的关键节点,一旦其中某一节点中断,

就会造成严重的损失。

(2) 场地类别和场地土类型进一步细化。新规范参照《建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)》^[18]和《中国地震动参数区划图(GB 18306—2001)》^[19],将场地类别由“1987 版铁规”中的三类划分为四类,反映构筑物所在场地的地震效应,其划分主要取决于土层剪切波速随深度的变化规律和土层厚度或基岩埋深(表 4)。

“1987 版铁规”中场地土类型共分为三类,而新版规范将场地土类型按地基土刚度划分为 4 类,并将其重新命名为岩石或坚硬土、中硬土、中软土和软弱土。场地土类型与土层剪切波速的关系如表 5 所列。

表 4 《铁路工程抗震设计规范(GB 50111—2006)》(2009 版)场地类别划分

场地类别	I	II	III	IV
土层剪切波速 v_{Se} 范围/(m/s)	$v_{Se}>500$	$250<v_{Se}\leq 500$	$150<v_{Se}\leq 250$	$v_{Se}\leq 150$

表 5 场地土类型划分

场地土类型	剪切波速 v_{Se} 范围/(m/s)
岩石或坚硬土	$v_{Se}>500$
中硬土	$250<v_{Se}\leq 500$
中软土	$150<v_{Se}\leq 250$
软弱土	$v_{Se}\leq 150$

III,地震后可能产生较大破坏,但不出现整体倒塌,经抢修后可限速通车。

然而,国外在桥梁基于性能的设计方法上,有着更深入的研究。Kappos^[20]于 2018 年对欧洲规范 Eurocode 8 中基于性能的桥梁设计方法进行了概述,与我国“2009 版铁规”相比,欧洲规范不仅给出了桥梁结构构件的性能标准,还提供了基于性能的设计格式,值得借鉴与学习。

(4) 地震作用计算发生了较大改动。“1987 版铁规”中对于桥墩水平地震作用的计算,是根据“不同地震烈度下水平地震系数 K_h ,通过综合影响系数 η_c 的调整,使计算结果与宏观震害结果趋于一致”。新规范对此进行了较大改动,直接采用地震动峰值加速度 A_g 进行桥墩的地震作用计算^[17],多遇及罕遇地震下的水平地震基本加速度 α 值按表 6 选用。对于地震动峰值加速度大于 $0.2g$ 的地区,铁路桥梁在罕遇地震下的抗震设计考虑了折减,8 度区为 $1.9A_g$,9 度区为 $1.6A_g$ 。

(3) 新增了“抗震设计的基本要求”一章。针对铁路桥梁,增加了其抗震设防类别划分的内容,根据它们在铁路网中的重要性和修复的难易程度,将桥梁工程划分为 A、B、C、D 四类,并规定了这四类工程的地震作用重要系数及抗震设防措施等级。

同时,此版规范体现了基于性能的设计思想。为了确保铁路桥梁在地震作用下的安全性,防止其在地震下丧失功能或发生严重损伤,规范规定了三级抗震性能要求作为工程的抗震设防目标:抗震性能要求 I,地震后不损坏或轻微损坏,能够保持其正常使用功能;抗震性能要求 II,地震后可能损坏,经修补,短期内能恢复其正常使用功能;抗震性能要求

表 6 水平地震基本加速度 α 取值

Table 6 Value of the acceleration α of horizontal earthquake						
设防烈度	6 度	7 度		8 度		9 度
设计地震 A_g	$0.05g$	$0.1g$	$0.15g$	$0.2g$	$0.3g$	$0.4g$
多遇地震	$0.02g$	$0.04g$	$0.05g$	$0.07g$	$0.1g$	$0.14g$
罕遇地震	$0.11g$	$0.21g$	$0.32g$	$0.38g$	$0.57g$	$0.64g$

因为地震作用的变化,相关单位对地震区铁路桥墩原部颁标准图进行抗震验算比对,得到了两本

规范之间的区别。按照“1987 版铁规”,桥墩基本都能够通过验算;按照新版规范,有很多桥墩不再满足

抗震验算要求,这说明修改后规范的抗震设防标准和地震安全性都有所提高。

特别需要说明的是,高铁桥梁的上部结构与桥墩一般具有较大的刚度和较高的基频,即使在较大的地震作用下仍具有较好的抗震性能,且延性较小,再加上无砟轨道的铺设,提高了高铁桥梁的整体性。因此,我们不能忽视轨道结构在地震作用下对桥梁结构的影响。

(5) 对于桥墩抗震设计的反应谱曲线,“2009 版铁规”正式引入了三水准设计理念,通过提出地震动反应谱特征周期 T_g ,将工程场地的场地类型、地震动参数区划等影响因素考虑在内,设计更加科学合理,体现了性能化设计的理念。三版规范的对比如图 3、4 所示。

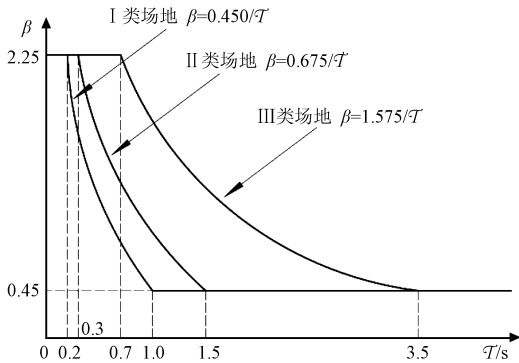


图 3 “1977 版铁规”与“1987 版铁规”动力放大系数 β 曲线

Fig.3 β -curve of dynamic amplification factor in the codes of 1977 and 1987 editions

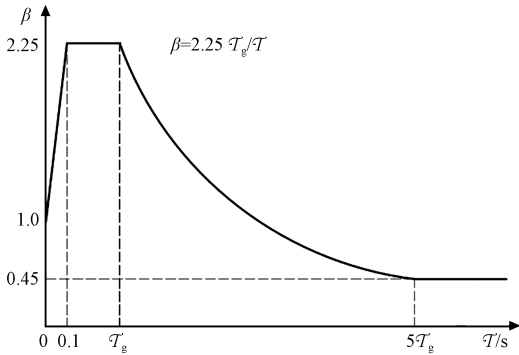


图 4 “2009 版铁规”动力放大系数 β 曲线

Fig.4 β -curve of dynamic amplification factor in the code of 2009 edition

此外,关于长周期结构,由于其动力行为缺乏研究,为了避免对设计造成困难,新规范中对于桥梁自振周期有所限定,自振周期超过 2 s 的结构,其反应谱曲线应另行研究。

(6) 新增了支座抗震设计内容。地震区桥梁支

座在地震时发生破坏的工程实例很多,支座锚固螺栓、支座限位装置等受力集中部位经常发生破坏,导致梁缝顶死、梁体位移,甚至落梁,因此地震区支座设计应遵循构造简单、受力明确、便于更换的原则。同时,支座本体的抗震能力应高于其他连接构件,支座与梁体的连接强度应高于其与桥墩台的连接强度。

当地震动水准超过设计要求时,支座的损伤也应尽可能控制在支座纵、横向限位装置或锚固螺栓等易更换部位,方便更换和快速修复,如图 5 所示。

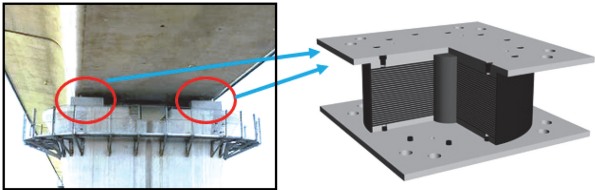


图 5 隔震支座

Fig.5 Vibration isolation bearing

(7) 抗震措施方面更加具体。第一,“2009 版铁规”新增了“对设防烈度在 8 度或 9 度区内,桥头路堤高度大于 3 m 的特大桥、大中桥桥台后 15 m 范围内的路堤基底以下的可液化土层或软土做加固处理”的规定,以减轻路基及桥梁的震害。因为根据我国唐山、海城两次地震中桥梁的震害经验,松软地基、液化地基上的桥头路堤普遍下沉,最严重的下沉可达 3 m,造成锥体铺砌破坏,进一步加重了桥台的震害。第二,新增了地震区桥梁防落梁装置及抗震措施等相关要求。大量震害实例表明,采取合理的抗震措施能够有效减轻桥梁震害,为了防止落梁,不仅应保证桥梁支座的各个部位有足够强度,还应采取纵向梁端连接措施并使用支挡设施,如图 6 所示。



图 6 桥梁防落梁装置

Fig.6 Girder fall protection device of bridge

特别需要说明的是,大跨铁路桥梁(如悬索桥、斜拉桥等)具有索塔结构,地震荷载会引起塔底的纵向弯矩及纵向剪力,因此应在塔梁间采用合理的纵向连接装置以提高该类桥梁的综合抗震能力。

《铁路工程抗震设计规范(GB 50111—2006)》

(2009 版)是在原国家标准《铁路工程抗震设计规范(GB J111—87)》的基础上修订而成的,并且沿用至今。该规范明确了我国铁路的技术发展方向,总结了我国抗震设计的经验和教训,吸取了专题科研成果,借鉴了国内外有关标准的规定,推动了我国防灾减灾事业的发展。

4 总结

本文阐述了我国铁路工程抗震设计规范的沿革与发展,分析了每个历史时期不同版本规范对铁路桥梁抗震设计的相关规定,并与先前的规定进行了对比,得出的结论如下:

(1) 铁路桥梁抗震设计标准随着震害资料的不断积累和研究的不断深入趋向多维化,并随着我国经济与结构性能化设计的发展,从“单水准”设防改变为“三水准,两阶段”设防。同时,抗震设防的范围也进一步扩大,逐步契合我国国情。

(2) 场地分类精细化。场地分类从最初未命名的三类发展至今,已按照土层剪切波速分为四类并命名,更加充分地考虑了桥梁建设的场地条件。

(3) 地震作用计算方法更符合实际。地震作用是各类结构抗震设计的核心,铁路桥梁地震作用的计算从仅考虑水平力,发展到同时考虑水平力、地基变形及地震作用下场地反应对桥梁的影响等,其结果与实际也更加吻合。

(4) 抗震措施更加具体。抗震措施针对的工程问题和隐患趋于丰富化和多样化,对于铁路桥梁抗震的薄弱环节和特殊震害现象,规范中补充和完善了相应的抗震构造措施。

(5) “2009 版铁规”距今已近 20 年,与我国《公路桥梁抗震设计规范(JTG/T 2231-01—2020)》^[21]相比,存在明显的发展滞后等问题。尤其在地震荷载方面,其并没有对“地震作用”“抗震分析”“桥梁减隔震设计”等方面做出详细的阐述,由此可见,我国铁路工程抗震研究工作仍需进一步完善。

综上,铁路工程抗震设计规范的版本差异对于桥梁结构抗震能力有着重要影响,因此在铁路桥梁震害预测中考虑桥梁的建造年代及其遵循的规范版本具有重要意义。除此之外,我国在 2008 年之后,高速铁路迅猛发展,为了保证线路平稳,高速铁路采用了以桥带路的方案,到目前为止,高速铁路中的桥梁里程普遍占总里程的 50% 以上。本文通过梳理三版《铁路工程抗震设计规范》的发展历程,旨在为改进和完善地震区铁路桥梁震害预测方法提供参考

依据。

本文是通过查阅不同时期的《铁路工程抗震设计规范》和相关论文,并对铁路桥梁抗震设计部分进行对比得出的,对我国铁路桥梁抗震设计工作发展的认识可能存在一些不完整之处,难免出现一些疏漏和谬误,仅供从业者一起讨论。

参考文献(References)

- [1] 孙柏涛,李洋.中国震害预测工作的沿革与发展[J].工程力学,2021,38(1):1-7,51.
SUN Baitao, LI Yang. Evolution and development of earthquake disaster prediction in China[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 1-7, 51.
- [2] 胡谨初.《铁路桥涵设计规范》的今昔(上)[J].铁道标准设计通讯,1990,34(1):7-12.
HU Jinchu. Past and present of code for the design of railway bridges and culverts (I)[J]. Railway Standard Design, 1990, 34(1): 7-12.
- [3] 中央人民政府铁道部.铁路桥涵设计规程:铁设桥(51)字第 117 号[S].北京:中央人民政府铁道部,1951.
Ministry of Railways of the Central People's Government. Code for design of railway bridges and culverts: iron bridge (51) No. 117[S]. Beijing: Ministry of Railways of the Central People's Government, 1951.
- [4] 中华人民共和国铁道部.铁路桥涵设计规范:铁基总技武(58)字第 402 号[S].北京:人民铁道出版社,1958.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for the design of railway bridges and culverts: iron-based general technique (58) No. 402[S]. Beijing: People's Railway Press, 1958.
- [5] 苏联重工业企业建筑部.地震区建筑规范:ПСП-101-51[S].赵丽敏,译.北京:纺织工业出版社,1954.
Ministry of Heavy Industry and Enterprise Construction of Soviet. Code for buildings in seismic area: ПСП-101-51[S]. ZHAO Limin, trans. Beijing: Textile Industry Press, 1954.
- [6] 苏联部长会议国家建设委员会.地震区建筑规范(CH-8-57)[S].西北工业建筑设计院,译.北京:建筑工程出版社,1959.
Soviet Construction Committee of Council of Ministers. Code for buildings in seismic area (CH-8-57)[S]. Northwest Industrial Architectural Design Institute, trans. Beijing: Architectural Engineering Press, 1959.
- [7] 周以城.我国铁路桥梁有关地震规范沿革[J].桥梁建设,1982,12(4):84-88.
ZHOU Yicheng. Evolution of seismic codes for railway bridges in China[J]. Bridge Construction, 1982, 12(4): 84-88.
- [8] 中华人民共和国铁道部.铁路工程抗震设计规范(试行)[S].北京:人民铁道出版社,1977.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for seismic design of railway engineering (for trial implementation)[S]. Beijing: People's Railway Press, 1977.

- [9] 中国建筑科学研究院.1976年唐山大地震房屋建筑震害图片集[M].北京:中国学术出版社,1986.
China Academy of Building Research. Picture collection of building damages caused by the 1976 Tangshan earthquake [M]. Beijing: China Academic Publishers, 1986.
- [10] 中国科学院工程力学研究所.海城地震震害[M].北京:地震出版社,1979.
Institute of Engineering Mechanics, China Academy of Sciences. Damage of Haicheng earthquake [M]. Beijing: Seismological Press, 1979.
- [11] 中华人民共和国铁道部.铁路工程抗震设计规范:GBJ 111—87[S].北京:人民铁道出版社,1987.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for seismic design of railway engineering: GBJ 111—87 [S]. Beijing: People's Railway Press, 1987.
- [12] 廖蜀樵.《铁路工程抗震设计规范》简介(上)[J].世界地震工程,1987,3(2):1-13.
LIAO Shuqiao. Brief introduction of code for seismic design of railway engineering (I) [J]. World Earthquake Engineering, 1987, 3(2): 1-13.
- [13] 国家基本建设委员会建筑科学研究院.工业与民用建筑抗震设计规范:TJ 11—78[S].北京:中国建筑工业出版社,1978.
Architecture Design and Research Institute of State Capital Construction Commission of China. Code for seismic design of industrial and civil buildings: TJ 11—78 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1978.
- [14] 廖蜀樵.《铁路工程抗震设计规范》简介(下)[J].世界地震工程,1987,3(3):1-9.
LIAO Shuqiao. Brief introduction of code for seismic design of railway engineering (II) [J]. World Earthquake Engineering, 1987, 3(3): 1-9.
- [15] 中华人民共和国建设部.铁路工程抗震设计规范:GB 50111—2006 (2009年版)[S].北京:中国计划出版社,2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for seismic design of railway engineering: GB 50111—2006 (2009 edition) [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [16] 屈爱平,李龙安,何友娣.新老《铁路工程抗震设计规范》中地震作用的比较分析研究[J].桥梁建设,2006,36(增刊2):140-143.
QU Aiping, LI Longan, HE Youdi. Comparison, analysis and study of seismic action in old and new editions of code for seismic design of railway engineering [J]. Bridge Construction, 2006, 36 (Suppl02): 140-143.
- [17] 倪燕平.《铁路工程抗震设计规范》的修订及对铁路桥桥墩的影响[J].铁道标准设计,2005,49(11):82-84.
NI Yanping. Revision of code for seismic design of railway engineering and its influence on railway bridge piers [J]. Railway Standard Design, 2005, 49(11): 82-84.
- [18] 中华人民共和国建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [19] 国家质量技术监督局.中国地震动参数区划图:GB 18306—2001[S].北京:中国标准出版社,2001.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. Seismic ground motion parameter zonation map of China: GB 18306—2001 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [20] KAPPOS A J. Seismic design of bridges: present and future [C]//Politecnico di Milano. Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 2018: 459-499.
- [21] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.

(本文编辑:赵乘程)