

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.11.010

论基于性能的城市桥梁抗震设计

穆祥纯

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘 要: 基于性能设计的城市桥梁是世界未来工程设计的主要发展方向, 基于性能的城市桥梁抗震理念和方法是世界桥梁抗震设计技术发展的趋势。阐述了基于性能设计的内涵, 介绍了国内外基于性能的城市桥梁抗震设计发展的新趋势, 对我国该领域的不足和努力方向进行了分析思考, 并提出了相关建议。

关键词: 性能设计; 城市桥梁; 抗震

中图分类号: U44

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)11-0034-04

0 引言

城市桥梁通常指城区范围内建造的跨河、跨江、跨海桥梁, 立交桥及人行天桥等, 它是城市生命线的重要组成部分。

“基于性能”一词源于英文 Performance-based, 基于性能的抗震设计(PBSD)理论是 20 世纪 90 年代由美国科学家和工程师首先提出的, 并最早应用于桥梁抗震设计。这一理论一经提出, 即引起业内极大的反响和关注。人们认为, 这是未来城市桥梁设计的主要发展方向, 可在不同强度水平的地震作用下, 有效地控制桥梁结构的破坏状态, 使城市桥梁结构实现明确的不同性能水平, 从而使桥梁结构在整个生命周期内, 在遭受可能发生的地震、车辆超载、船舶撞击等外力作用下, 将破坏和损失降到最小。基于性能的抗震设计理念, 是指被设计的建筑物(含城市桥梁), 在使用期间满足抗震各种预定功能或性能目标要求的设计理念。这一思想影响了美国、日本和欧洲各国地震工程界, 各国同行表现出了极大的兴趣, 近些年来展开了多方面的研究。

1 基于性能设计的内涵诠释

城市桥梁性能设计的发展是建立在强烈震害及其他自然灾害的损失调查基础上的, 在每一次灾害给人类带来巨大损失的同时, 也暴露出城市桥梁设计上的不足, 并为桥梁设计方法的改进提供了最直接的指导。现阶段的抗震方法和抗震规范就是在总结以往的经验教训的基础上发展起来

的。在现行的桥梁抗震思想的指导下, 我国城市桥梁抗震设计取得了较大进步, 许多既有桥梁在实际地震中表现出良好的抗震性能。同时也有相当一部分桥梁遭受了严重的破坏, 使得城市交通受阻, 灾后救援工作无法进行, 给社会带来了巨大的经济损失。鉴于此种情况, 我国近期出台的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG B02-01—2008), 采用了“两水平设防, 两阶段设计”的抗震设计思想。但是, 仍存在缺乏具体的量化准则、某些规定比较模糊等问题, 使得技术人员在实际设计中很难控制。发达国家已开始致力于基于性能的设计规范的制定, 以提高基础设施的建设水平。与传统方法相比, 基于性能的设计方法从结构设计理念上发生了重大改变, 制定新的、建立在全寿命设计和可持续发展理念上的设计规范和标准, 是我国桥梁建设走向国际竞争舞台的需要。

基于性能的结构(含城市桥梁)抗震设计的内涵诠释为: 建立以结构抗震性能分析为基础的设计方法, 使设计出的结构在未来的地震灾害下能够维持所要求的性能水平。即: 应根据城市桥梁结构的重要性以及建设方的特殊要求确定其性能指标, 并根据不同的性能目标提出不同的抗震设防水准, 使设计的桥梁结构在未来的地震中具备预期的性能。

应该说基于性能的抗震设计并不是一个全新的概念。1992 年, 美国学者就明确提出基于性能的抗震设计思想。美国 SEAOC(基于结构可靠度), ATC(授权培训中心)和 FEMA(美国一体化救灾机制)等组织均给出了基于性能设计的描述。

(1)SEAOC(基于结构可靠度)对基于性能抗震设计的描述是“性能设计应该是选择一定的设计标准, 恰当的结构型式, 合理的规划和结构比例,

收稿日期: 2020-03-16

作者简介: 穆祥纯(1955—), 男, 教授级高级工程师, 原副总经理, 享受国务院政府特殊津贴专家, 长期从事桥梁设计、城市交通研究及技术管理工作。

保证建筑物的结构与非结构的细部构造设计,控制建造质量和长期维护水平,使得建筑物在遭受一定水平地震作用下,结构的破坏不超过一个特定的极限状态”。这一描述在国际上受到广泛认可。

(2)ATC(授权培训中心)对基于性能抗震设计的描述为“基于性能抗震设计是指结构的设计标准由一系列可以取得的结构性能目标来表示。主要针对混凝土结构并且采用基于能力的设计原理”。

(3)FEMA(美国一体化救灾机制)对基于性能抗震设计的描述为“基于不同强度地震作用,得出不同的性能目标。在分析和设计中,采用弹性静力和弹塑性时程分析来得到一系列的性能水平,并且采用建筑物顶点位移来定义结构和非结构构件的性能水平,不同的结构型式采用不同的性能水平”。

今后,桥梁结构抗震性能水准如何确定呢?以往的实际震害表明,在以生命安全为单一设防水准的规范指导下设计的结构,尽管可有效防止倒塌,但结构破坏带来的直接和间接财产损失是事先无法预料的。为了能改变这种情况,结构设计不仅要保证生命的安全,同时也要控制结构的破坏程度,将物质财产的损失控制在可以接受的范围内。这就需要在实际设计中,针对不同地震作用水准,明确工程结构应该具有的性能水准。

为了研究地震设防水准和结构性能指标间的关系,有专家在参照对比钢筋混凝土建筑结构不同震害等级的损伤指数范围以及地震设防水准的基础上,提出了钢筋混凝土桥梁结构不同地震水平的损伤性能指标,而这些合理性能目标的确定,有赖于震害观测资料和实验数据的积累,且与地震设防水准和预期性能要求密切相关。

2 基于性能的城市桥梁抗震设计研究趋势

2.1 国外先进国家的研究趋势

基于结构性能的抗震设计理论提出以来,美国、日本和新西兰等国家在研究课题中,建立了以结构功能评价为理论基础的结构设计体系。美国加利福尼亚结构工程师学会早在 1992 年成立了“放眼 21 世纪委员会”(Vision2000CommitteeSEAOC)。该委员会的目的是建立新的结构性能设计体系框架,其研究工作得到美国自然科学基金会和加州政府的有力资助。美国联邦紧急救援署(FEMA)和国家自然科学基金会(NSF)还资助开展了一项为期 6 a 的行动计划,对未来的抗震

设计进行了多方面的基础性能研究。日本也在多方资助下于 1995 年开始了为期 3 年的“新建筑结构体系开发”研究项目,成立了有国内著名学者参加的新建筑构造体系综合委员会,下设性能评价、目标水准和社会机构 3 个分委员会。

基于性能的抗震设计是世界各国工程结构抗震设计规范未来的主要发展方向,相关研究成为当前国际地震工程领域的一个热点。主要研究方向是:研究基于性能的抗震设计理论框架,然后从地震设防水准、结构性能水平、基于性能的抗震设计方法等方面,对国外桥梁结构基于性能的抗震设计研究现状进行总结,并探讨将基于性能的抗震设计建立在可靠度理论基础上的研究热点,基于性能抗震设计理论体系应用于实践需要解决的一些关键问题。

国外研究人员对当今基于性能抗震设计发展的新趋势,即其所追求的目标,就是在结构的整个寿命期内,提出了在“一定的条件”下,投入在抗震上的费用最少,即追求结构在服役期内的“最佳经济效益-成本比”。这里的“费用”是指增加抗震能力的投资和因地震破坏造成的损失,包括人员伤亡、运营中断、重复修建等;“一定的条件”是指结构的性能目标。

2.2 国内研究的新趋势

近些年来,围绕着基于性能的城市桥梁抗震设计,国内许多专家、学者积极探索不同类型荷载作用下对桥梁结构基本性能的要求,提出桥梁结构性能设计的基本概念与设计方法,并综合考虑桥梁作用荷载的统计性质、结构构件和材料的工作性能、维修加固和重建的难易程度、结构的重要性等,通过控制桥梁结构的可能损伤度和破坏程度来满足桥梁的安全度与使用性能要求。

近年来,我国专家针对汶川地震等灾害造成的巨大经济损失,对过去长期视为正确的设计思想和方法进行了深刻反思。过去的抗震设计理念只片面地以人身安全为设计目标,这远远不够,抗震设计不仅应考虑人身安全,还应使结构破坏所造成的经济损失得以控制。结构抗震设计应经济又可靠地保证结构的功能在地震作用下不致丧失甚至不受影响,因此,需要进一步探讨更完善的结构抗震设计思想和方法。

我国相关人员已认识到,基于性能的抗震设计实质上是对“多级抗震设防”思想的进一步细化,在未来抗震设计中,在不同地震设防水准下,能够有效地控制结构的破坏状态,使结构实现不同性能水平,从而使结构在整个生命周期内,在

遭受可能发生的地震作用下,总体费用达到最小。目前,国内外在结构性能抗震设计方面的研究主要集中在结构性能目标、性能水准的确定、抗震性能评估方法的研究上,因而,其提出的设防性能目标是按地震作用水准和建筑性能水准来确定抗震性能目标。

国内相关科研机构在以下4个方面取得了突破性的进展^[5, 6]:

(1)针对三级结构性能水准:指生命安全水准、结构损伤水准、确保使用功能水准。生命安全水准要求在地震作用下不产生楼层倒塌;结构损伤水准要求保证不发生危及结构安全的损伤;确保使用功能水准要求结构不产生影响建筑功能的变形等。

(2)针对三级抗震设防水准:相应于三级结构性能水准提出的最高设防水准,在建筑寿命期间遭遇一次地震危险的水准和可能遭受多次地震危险的水准。

(3)针对结构计算分析方法:对应于三级结构性能水准和抗震设防水准提出的结构计算分析方法和极限状态;弹性解析法及使用极限状态;弹塑解析法及破坏极限状态;等效线性化反应谱解析法及保证结构使用功能的变形限值等。

(4)针对结构安全性:根据上面确定的特性参数,估计结构的临界变形、屈服点,确定设备正常使用的地震反应限值,可以采用极限变形或能量作为评估安全性的基准。

2.3 基于性能的抗震设计方法

主要包括以下3个方面:

(1)承载能力抗震设计方法

这是我国规范现阶段采用的设计方法。对于常遇地震,利用反应谱计算底部剪力,然后按一定规则分配至结构全高并与其他荷载组合,进行结构的强度设计,使结构各部分都具有足够的承载能力,然后再进行变形验算。承载能力设计方法的优点是易于使用,性能概念清楚,细部设计可靠,通过非线性静力分析验算,进一步增强了对结构非线性反应的控制,可以更好地达到预期性能目标;缺点是该方法基于弹性反应,对于非弹性反应仅用与结构类型有关的系数加以折减,表面上它控制整个性能目标,实际上却只是保证了一种性能目标。

(2)基于位移的抗震设计方法

该方法采用结构位移作为结构性能指标,与传统设计方法相比,基于位移的抗震设计方法从根本上改变了设计过程。主要的不同是,该方法用位移作为整个抗震设计过程的起点,假定位移或

层间位移是结构抗震性能的控制因素,设计时用位移控制,通过设计位移谱得出在此位移时的结构有效周期,求出此时结构的基底剪力,进行结构分析,并且进行具体配筋设计。设计后用应力验算,不足的时候用增大刚度而不是强度的方法来改进,以位移目标为基准来配置结构构件。

该法考虑了位移在抗震性能中的重要地位,可以在设计初始就明确设计的结构性能水平,并且使设计的结构性能正好达到目标性能水平,是性能设计理论中很有前途的一种方法。但应用于多自由度体系、多种结构类型等时,还需要进一步研究。

(3)能量法

假设结构破坏的原因是地震输入的总能量,地震对结构物及其内部设施的破坏是由其输入的能量与结构物所消耗的能量共同决定的。能量设计法的优点在于能够直接估计结构的潜在破坏程度,对结构的滞回特性以及结构的非线性要求概念清楚。另外,耗能元件的设置可以更好地控制损失。缺点在于应用方法不够简化,不确定因素较多。

我国新建的广东虎门二桥,在该大桥工程设计中,成功地引入性能设计理念和相关技术措施。这座大桥采用非线性时程分析方法,考虑多点激励地震输入,研究了多点激励行波效应对超大跨径多塔斜拉桥的地震响应影响,比较了不同地震视波速和地震动频谱特性对桥梁结构地震响应的影响规律。结果表明,对于超大跨径的多塔斜拉桥,多点激励行波效应对其地震响应有显著影响,行波效应对超大跨径多塔斜拉桥地震响应的影响受地震动频谱特性的影响较大,对于超大跨径多塔斜拉桥的抗震设计仅考虑一致激励输入是不合理的。

3 相关思考和建议

3.1 相关思考

(1)基于性能的城市桥梁抗震理念和方法是世界桥梁抗震技术发展的大趋势,我们应积极推进城市桥梁性能和抗震设计基准的国际化工作,与世界上先进的抗震设计基准相呼应和相协调,不断加快该领域的国际化步伐。

(2)基于性能的设计方法,不但可以改善现行抗震设计方法中存在的问题,而且还可以根据投资-效益理论使安全、经济和社会等多方因素达到一个较好的平衡。应该看到,我国基于性能的抗震设计还处于起步阶段,应树立长远眼光,预见

基于性能的设计方法对未来桥梁建设和防灾减灾的重要作用。

(3)应充分认识到,现代桥梁工程中隔震、减震、消能控震等措施,系基于性能设计思想的核心内容,都是“以柔克刚”抗震的科学手段,亦是未来的发展潮流。同时,我国原有一些标准规范的指标偏低,已不适应桥梁安全、耐久和创新的发展,因此必须尽快修订和完善我国相关桥梁设防标准,以更好地抵御大地震和其他自热灾害。

(4)在城市桥梁建设施工组织方面:应树立先进的性能设计和抗震设防新理念,大力推进施工机械化和设备大型化,城市桥梁构件的设计尽可能简单化和预制化,以便于加快施工进度,有效实施工程质量控制;应重视施工组织设计,特别是施工计划安排及进度控制,以提高工作效率,保障施工进度和质量。

(5)要学习和借鉴日本近些年的成功做法,在现代桥梁设计中注意应用“长桥高墩”,特别是设置有伸缩缝的相邻联桥墩,不仅要主梁支承长度取值放大一些,还需要设置主梁限位装置。根据国外相关规范以及我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG-B02-01—2008),合理设置纵向防落梁构造,并注意限位装置,以利于防落梁构造作用的发挥。

(6)我国许多地区处于地震多发区,对已经修建的桥梁,应根据性能设计思想对其进行结构及抗震性能评价,并结合评价结果考虑相应的加固措施。应定期对桥梁支座、伸缩缝等连接构件进行维护,并可将挡块、连梁装置等安装于伸缩缝等上部接缝处;可安装限位装置于简支的相邻梁间,作为耗散地震能量的耗能装置。

(7)近年来,特别是汶川地震后,我国积极开展了对特大地震灾害造成的城市垮塌的分析研究工作,并取得显著成果。科研工作者还应积极开展城市性能设计及桥梁减隔震技术的科学研究,以期将我国城市桥梁地震风险和损失降至最低。

3.2 相关建议

(1)目前地球正处于大地震频发期,桥梁工作者应树立基于性能设计的先进理念,查找我国与先进国家在性能设计和抗震设计理念及科学研究上的差距,扬长避短,实现城市桥梁建设的可持续发展。

(2)我国基于性能的抗震设计起步较晚,及现

代桥梁抗震设计规范还不完善,应根据世界桥梁技术的发展新趋势,总结桥梁设计、施工和运营中反映出来的问题,树立性能设计的先进理念,及时对现行标准、规范进行维护和修订,以满足桥梁工程建设的需求。

(3)应进一步开展基于性能的城市桥梁抗震设计的专题研究,引入新的创新理念和运作机制,积极开展城市桥梁抗震设计的创新工作;提高桥梁结构的延性,开展桥梁结构的耗能设计,确保桥梁结构的受力更均匀、性能更稳定,避免或减轻自然灾害特别是地震灾害对桥梁结构的破坏,以实现城市桥梁的安全、耐久和美观。

(4)今后,我国建于高烈度地震区的桥梁仍可能遭受大地震的破坏,应修改和完善相关桥梁抗震规范,抗震设防的基本理念:按多遇地震进行抗震设计,按罕遇地震对桥梁进行多水准设防,按一般情况进行桥梁抗震设计。同时,按地震动峰值加速度和地震动反应谱特征周期进行抗震验算,按抗震设防烈度要求采取相应的抗震措施。抗震设防的目标应是:小震不坏、中震可修、大震不倒。

(5)国内的相关科研院所应认真总结近期国内外特大地震所带来的灾难性破坏,开展城市桥梁性能设计的专题研究,突出重点,力求取得实效。要注重现代桥梁的运营安全,运用全寿命周期效益分析方法,使城市桥梁的功能适用性、环境协调性和结构安全性高度统一。

(6)应加强该领域国内外学术交流,积极关注国际上城市桥梁性能设计和桥梁抗震领域的发展趋势。相关科研院所应及时了解和搜集国外的最新科研成果,开展国内外的学术交流活动,促进我国基于性能的城市桥梁抗震技术的进步。

参考文献:

- [1] 穆祥纯.城市桥梁结构安全度和耐久性问题的研究[C]//第十六届全国桥梁学术会议论文集.长沙:人民交通出版社,2004.
- [2] 穆祥纯.论北京城市桥梁设计的创新技术[C]//第十七届全国桥梁学术会议论文集.重庆:人民交通出版社,2006.
- [3] 穆祥纯.基于创新理念的城市桥梁与市政建设[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [4] 张玉玲,潘际炎.桥梁结构性能设计新思路[C]//2003年全国桥梁学术会议论文集,北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 吴冲.桥梁结构性能设计基础理论的探讨[C]//2003年全国桥梁学术会议论文集,北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 穆祥纯.城市桥梁垮塌的最新案例分析及对策研究[J].城市道桥与防洪,2016(2):68-72.