

# Push-over 分析在桥梁抗震性能评价上的研究现状

王 维

(西南交通大学, 四川成都 610031)

**摘 要:**目前在桥梁抗震性能评价中多倾向于采用非线性时程分析计算桥梁地震响应,但是存在着工作量大,计算复杂等问题。而在基于结构位移/性能的抗震思想下,采用塑性倒塌机构分析(即 push-over)方法来评价地震作用下桥梁的抗震性能具有广泛的应用前景。该文就目前 push-over 分析应用于桥梁抗震性能评价在国内外的研究现状做了归纳总结,并对此做出适当的评价和展望。

**关键词:**push-over 分析;桥梁;抗震性能

**中图分类号:**U442.55 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716 (2007)03-0094-03

## 0 引言

目前对于桥梁结构抗震性能评价主要采用的方法包括了弹性反应谱法、非线性时程分析法、塑性倒塌机构(推倒)分析(即 push-over)等。基于弹性假设的反应谱是一种拟动力分析方法,能反应地震动强度和平均频谱特性,但是难以反应结构开裂后进入非弹性阶段的特性。建立在计算机程序分析基础上的非线性时程分析法,是目前评价桥梁地震行为中相对而言最成熟、最完善的方法。但是该方法在现有桥梁抗震性能评价的应用中还是存在着一些问题。非线性时程分析方法的技术复杂,计算工作量大,结果处理繁杂,并且结果的准确性很大程度上都依赖于输入的地震波,然而在同一地区不可能发生完全相同的两次地震。所以时程分析所选用的地震波实际上不能真正反映该地区未来可能发生的地震作用情况,分析结果具有较大的偶然性。而塑性倒塌机构分析(push-over)则因其计算过程简单、实用,在桥梁抗震性能评价中具有广泛的应用前景。

## 1 push-over 分析的研究现状

收稿日期:2006-10-24

作者简介:王维(1982-),女,四川成都人,研究生,从事桥梁结构抗震研究。

不同。对于长周期分量较多的地震波,模型的地震反应增幅较大;对于以高频分量为主的地震波,模型的地震反应增幅较小。

(2)由于结构的地震反应与地震动的频谱特性有关,仅用地震动的峰值加速度评判桥梁的地震反应是不够的,必须考虑地震动的其它特征指标。

(3)分层橡胶支座对模型的地震反应有明显的影响。当地震波主频较高时,分层橡胶支座能够

塑性倒塌机构分析(push-over)的提出是在20世纪七八十年代,但是当时并没有得到重视和进一步的研究。建立在对目标位移或形成机构的思想上的 push-over 方法,体现的是基于结构位移/性能的抗震思想,因此随着90年代以后基于结构性能/位移的抗震设计的概念提出和广泛接受,使得该方法得到重视和发展。

由于 push-over 方法的简单实用,目前,国外工程界大多数都已将 push-over 方法作结构抗震性能评价的一种方法纳入各国的规范。例如:美国加州结构工程师协会的 SEAOC Vision 200(1996);应用技术委员会的 ATC-40(1997);联邦应急管理厅(FEMA-274);建筑抗震安全委员会(BSSC)的 NEHRP(1998);欧洲模式规范(Eurocode-8);日本的 PRESS 钢筋混凝土建筑结构设计指南等。

Push-over 方法在引入我国后近年来也得到了广泛的重视,如:《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)中,就已经明确纳入 push-over 分析,即规范条文 3.6.2 中所提到的静力弹塑性分析。而在桥梁方面《交通部桥梁抗震规范》(征求意见稿)中也将 push-over 方法纳入其中。

Push-over 分析在大多数通用软件中可以实现,只要软件可以进行非线性分析,以及具有逐级加载功能。在部分软件中也专门设置了 push-over 分析功能,如:应用于平面结构分析的

起到隔绝地震能量输入的作用,模型反应明显降低;当地震波周期较长时,分层橡胶支座减小模型地震反应的效果并不显著。因此,根据地震动的频谱特性选择适当的分层橡胶支座,对于提高桥梁结构的抗震性能非常重要。

### 参考文献

- [1]范立础.桥梁抗震[M].同济大学出版社,1997.
- [2]范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].人民交通出版社,2001.



DRAIN-2DX,IDARC; 应用于三维结构分析的 DRAIN-3DX,SCM-3D,SAP2 000/NL-push 等。

2 研究主要集中的方面及问题

2.1 基本原理及其可用性研究

Push-over 分析方法提出后就做为一种拟静力分析方法,用于桥梁的抗震能力评价。但是 push-over 方法做为一种理论方法没有严格的理论基础,在实际应用中缺乏严密的论证和实践证明。

Push-over 分析基于以下两个基本假设:

(1) 结构的响应受单一振型控制,可以将多自由度体系的弹塑性反应应用等效的单自由度体系的响应来表达。

(2) 结构沿高度的变形由形状向量  $\Phi$  表示在整个地震反应过程中,不管结构变形大小, $\Phi$  始终保持不变。

从实际的情况出发,这种假设只对于第一振型起绝对控制作用的结构的结果可以接受。因此文献[1]中为了论证该方法在桥梁抗震分析中的可靠性,选取了 8 条具有代表性的地震动记录作动力时程分析,并把分析得到的抗震分析曲线与 push-over 方法得到的能力曲线同绘在一起进行比较,得到在一定条件下, push-over 分析的抗震能力曲线的屈服点和原点的连线的曲率与时程曲线弹性段的曲率基本相同,说明 push-over 方法做为简化的抗震分析方法的可靠性及可用性。但是在文献[1]中,只在弹性范围内将 push-over 分析与时程分析做了比较,没有涉及到桥梁结构进入非弹性阶段两种方法结果的比较。 push-over 分析做为一种非线性的拟静力分析,应该进一步研究该方法在非弹性阶段的结果可靠性。

2.2 侧向力模式

在 push-over 分析中,主要是计算结构的能力曲线,而影响能力曲线的核心就在于选择合理的侧向力加载模式。现纳入规范的侧向力加载模式主要有:均匀分布;倒三角形分布;广义乘方分布;抛物线分布等。在文献[2]中考虑到高阶振型影响方面,提出通过取前几阶振型来确定侧向力分布模式,每一种荷载模式种各结点的力幅值是根据相应振幅和各结点集中质量来确定。文献[3]中比较了三种侧向力加载模式对结构分析结果的影响,并与时程法作了比较。文中推荐采用根据振型分解反应谱法,由平方和开平方(SRSS)的组合规则,计算得到各层层间剪

力,再反算各层水平荷载,做为下一步的水平荷载模式。文献[4]中则提出了基于模态分析的方法,考虑到结构的动力特性特别是振型贡献率,选用振型贡献率比较高的振型,以此为依据,参考《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)可得到对应各振型的侧向荷载,再对主要振型进行组合,得到进行 push-over 分析的侧向荷载分布模式。

3 push-over 方法在桥梁应用中的研究动态

3.1 能力谱方法

能力谱是将 push-over 分析与地震反应谱相结合的一种非线性地震响应近似计算的方法,从而评价结构的抗震性能。这种方法简单、明了、实用,国外规范 ATC-33,ATC-40 推荐使用该方法。ATC-40 中推荐方法是将 push-over 方法得到的曲线和反应谱曲线统一建立为相同基准的谱线, push-over 分析得到的荷载位移曲线和加速度反应谱统一转换为加速度-位移反应谱(见图 1),来确定结构抗震性能点。

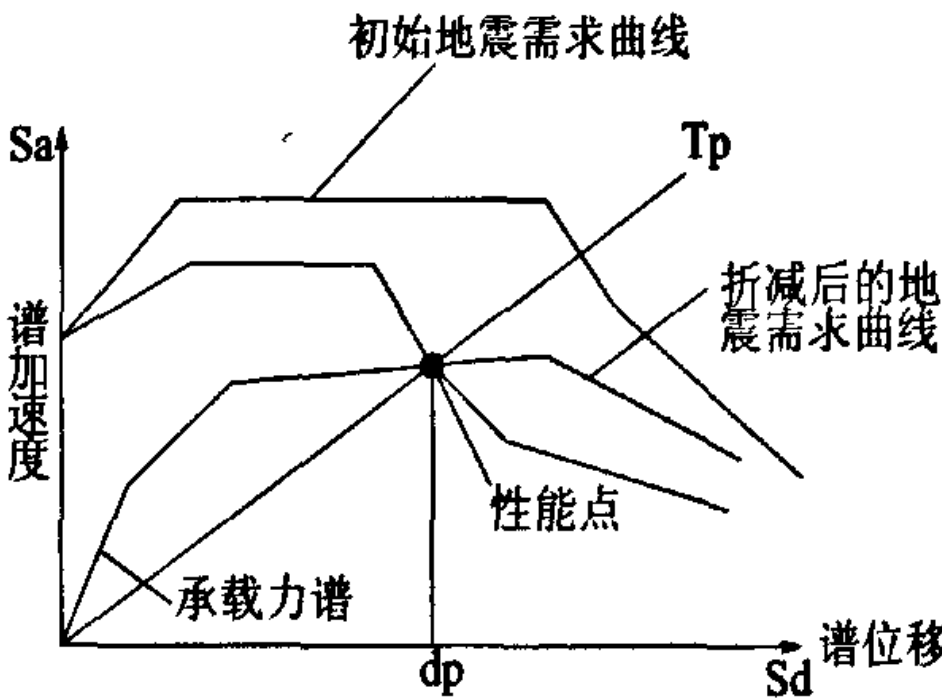


图 1 加速度-位移反应谱

文献[5]对于框架结构研究中将 push-over 分析得到的结构反应曲线与反应谱曲线绘在一起,做出对结构的抗震性能评价。但是,由于反应谱曲线为相应的弹性位移,而 push-over 方法得到的位移反应曲线,是结构在进入非弹性阶段下得到的,因此直接将两者绘在一起存在一定的问题。文献[6]对于桥梁结构抗震性能评价中修正了 push-over 曲线做为弹塑性曲线和弹性反应谱曲线结合问题,对于弹性加速度位移反应谱用折减系数方法得到相应的非弹性反应谱。对于短周期结构,弹塑性位移比弹性位移大,而对于长周期结构(除特长周期外),完全可以假定弹塑性位移等于弹性位移。

3.2 引入 push-over 分析的损伤模型

在桥梁抗震评价中的地震损伤模型主要分为:基于强度的损伤模型和基于反应的损伤模型。这些模型的计算参数主要由非线性动力分析求



得,并且难以精确确定,需要大量试验及实地观察进行校正。通过引入 push-over 方法计算地震的损伤模型能够简化计算过程。文献 [7] 中利用两次 push-over 分析结果来计算多层建筑结构的损伤指数。文献[6]针对普通桥梁结构,采用两次 push-over 分析得到损伤指数,评价结构遭受不同地震烈度时的损伤程度。这种方法避免了非线性动力分析的繁琐,同时还能得出比非线性时程分析更多的信息。

### 3.3 对于高墩桥梁的 push-over 分析

对于墩高较高这种几何非线性非常明显的结构,在地震运动作用下的地震反应呈现出明显的空间特性。文献[8]中提到,push-over 分析对墩高 >30m 的连续梁桥试算得到的结果明显大于非线性动力时程分析的结果,且相差达到 1 倍以上。因此,对于墩高较高的桥梁结构应用 push-over 计算结构地震响应时,需要注意水平荷载作用方式所以起的影响。目前对桥墩的 push-over 分析主要取一阶振型的分析结果,但是对于墩高较高的结构,结构的柔性增加,这样的分析显然是不合理的,需要同时考虑高阶振型的影响。而采用通用结构分析软件,在考虑了高阶振型后与只考虑一阶振型两组结果的差异并不明显,这方面的原因还有待进一步研究。

## 4 展望

push-over 分析方法做为结构抗震性能分析的一种分析手段,计算简单,结果直观,信息丰富,适合工程实际应用,相对于非线性时程分析可以得到更多的结构破坏的信息。所以对于 push-over 分析的研究即具有理论意义,同时也具有工程实际意义。将 push-over 分析引入桥梁结构抗震性能评

价的研究中,push-over 所得到的能力曲线与反应谱的结合,如何得到结构的需求曲线,以确定结构在地震作用下的响应值;同时对高墩桥梁独立墩的 push-over 分析如何在引入了高阶振型后,反映出工程实际中高阶振型对于桥墩的影响;在 push-over 分析中,还不能忽略剪力破坏机制,因为常规的 push-over 分析都是建立在弯曲破坏模式下,但是实际情况中如果结构构件抗剪能力不足,在形成塑性铰构件端部就发生剪切破坏,或是即使构件有充分的抗剪能力,但是如果塑性铰区域的箍筋间距不够密,混凝土在约束不够充分的情况下也会破碎;另外将 push-over 方法结合到其它方法中的应用,如引入到损伤模型中的简化计算,都是在进一步的研究中需要注意的问题。

### 参考文献:

- [1]柳春光,林皋.桥梁结构 push-over 方法抗震性能研究[J].大连理工大学学报,2005.45.
- [2]Kent K.Sasaki,Sigmund A.Freeman. Multi-mode pushover procedure (MMP)-a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis [Z].The 6th U.S.National Conference on Earthquake Engineering.
- [3]杨溥,等.结构静力弹塑性分析(push-over)方法的改进[J].建筑结构学报,2002.21.
- [4]王克海,李茜.基于模态分析的 push-over 方法在桥梁抗震分析中的应用[J].铁道学报,2006.28.
- [5]叶燎原,潘文.结构静力弹塑性分析(push-over)的原理和计算实例[J].建筑结构学报,2000.21.
- [6]潘龙,孙立民,范立础.基于推倒分析的桥梁地震损伤评价模型与方法[J].同济大学学报,2001.29.
- [7]Ghobarah A,Abour-Elfath,Biddah A. Response-based damage assessment of structures[J]. Earthquake Engng Struct Dyn,1999.28: 79-104.
- [8]谢旭.桥梁结构地震响应与抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2006.

## 河北张家口主城区污水处理厂项目获鲁班奖

在近日举行的 2006 年度中国建筑工程鲁班奖颁奖大会上,由河北省第二建筑工程公司承建的张家口市主城区污水处理厂项目获得鲁班奖。全国此次共有 87 个项目问鼎这一中国建筑工程最高奖。河北省同时获该奖项的还有河北大学逸夫研究生教学楼项目。

张家口市主城区污水处理厂项目是国家环境保护重点工程,设计规模为日处理污水 10 万 t。该工程于 2004 年 3 月开工,2005 年 4 月通过竣工验收。