

大跨度桥梁抗震设计实用方法

叶爱君 胡世德 范立础

(同济大学)

摘要 本文是为了配合“城市桥梁抗震设计规范”的制订而进行的,目的在于给桥梁工程师们提供一个能参照执行的大跨度桥梁抗震设计方法,以及可靠实用的辅助工具。在总结学科组多年的研究成果和实践经验的基础上,根据两水平的抗震设计方法和能力设计思想,发展了大跨度桥梁抗震设计实用方法,并开发了相应的辅助工具(IPSABS软件)。最后,介绍了一个大跨度桥梁抗震设计的实例。根据本文的抗震设计方法,并借助IPSABS软件,桥梁工程师们即可自行进行大跨度桥梁的抗震设计。

关键词 大跨度桥梁 抗震设计 实用方法 延性 减隔震

中图分类号: U442.5⁺5 **文献标识码**: A

文章编号: 1000-131X (2001)01-0001-06

1 引言

随着现代化城市人口的大量聚集和经济的高速发展,对交通线的依赖性越来越强,而一旦地震使交通线遭到破坏,可能导致的生命财产以及间接经济损失也将会越来越巨大。近二十余年来,全球发生了多次破坏极大的地震,如1989年美国Loma Prieta地震,1994年美国Northridge地震以及1995年日本阪神大地震等,而且损失一次比一次惨重。几次大地震一再显示了桥梁工程遭到破坏的严重后果,也一再显示了对桥梁工程进行正确抗震设计的重要性。大跨度桥梁是交通运输的枢纽工程,投资大,对国民经济有着重大的影响,因此,进行正确有效的抗震设计,确保其抗震安全性具有更加重要的意义。

目前,国内外现有的绝大多数桥梁工程抗震设计规范,只适用于中等跨径的普通桥梁,如美国AASHTO规范^[8]和我国公路工程抗震设计规范^[5]的适用范围为150 m,日本^[6]为200 m,超过适用范围的大跨度桥梁的抗震设计,则无规范可循。与中等跨径普通桥梁相比,大跨度桥梁的地震反应比较复杂,相应地,抗震设计也比较复杂。如高阶振型的影响比较明显,以及需要考虑多点激振和行波效应、各种复杂的非线性因素、桩-土-结构相互作用等^[4]。因此,大跨度桥梁的抗震设计目前还比较困难。国内大部分设计单位对桥梁抗震缺乏研究,只能请专业研究人员代劳,这是很不正常的。只有工程师们亲自参与抗震设计,才能将抗震设计融入桥梁设计的各个阶段,达到预期的抗震设计效果。本文的研究目的,就是要给工

程师们提供一个能参照执行的大跨度桥梁抗震设计方法和可靠实用的辅助工具,使他们能自行进行大跨度桥梁的抗震设计。

2 大跨度桥梁抗震设计实用方法

“小震不坏,中震可修,大震不倒”的分类设防抗震设计思想已广为接受,也已被有些规范采用。1997年,美国应用技术委员会完成了一个科研项目(ATC-18),查阅了世界各国的公路工程抗震设计规范,并提出了改进美国公路桥梁抗震设计规范的若干建议^[1]。其中,最主要的建议是要采用两水平的抗震设计方法(two-level design approach),即要求结构在两个概率水平的地震作用下,分别达到两个不同的性能标准。现行的日本规范已采用这一方法。可以预见,两水平的抗震设计方法不久将会被各国的抗震设计规范所采用。作者所在学科组在上海南浦大桥的抗震设计中,首次在国内提出了两水平的抗震设计方法。之后,又采用该方法对20余座大桥以及城市高架桥、立交桥进行了抗震设计,积累了很多科研成果和实践经验^[2]。

另一方面,能力设计思想已越来越广泛地被国内外专家学者所接受。能力设计思想要求在一座桥梁内部建立合理的强度级配,以保证地震破坏只发生在预定的部位,而且是可控制的^[3]。具体来说,要选择理想的塑性铰位置并进行仔细的配筋设计以保证其延性抗震能力;而不利的塑性铰位置或破坏机制(脆性破坏)则要通过提供足够的强度加以避免。

本文在总结学科组历年的研究成果和实践经验^[2],并查阅大量国外资料的基础上,根据两水平的抗震设计方法,以及能力设计思想,发展了大跨度桥梁抗震设计实用方法^[4],其流程图见图1。本文认为

收稿日期: 2000-02-26

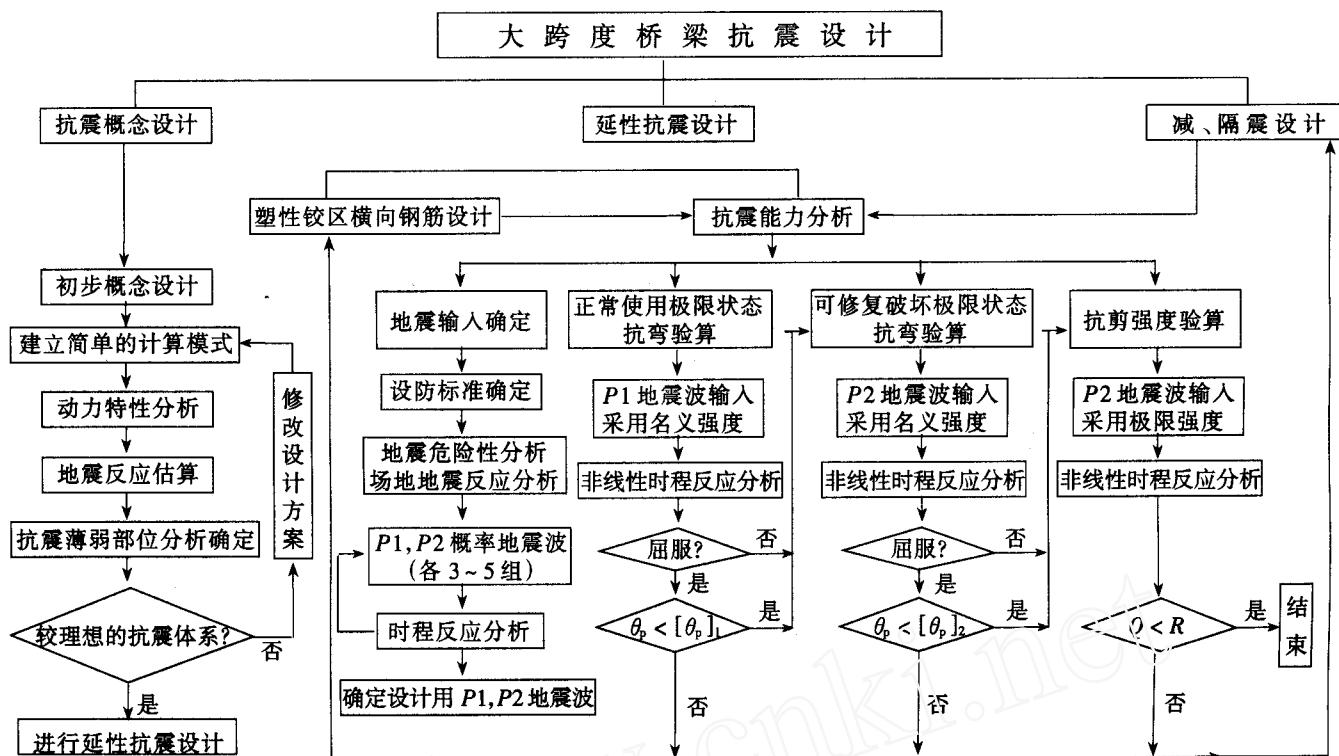


图1 大跨度桥梁抗震设计方法

大跨度桥梁的抗震设计应分两个阶段进行：(1) 在方案设计阶段进行抗震概念设计，选择一个较理想的抗震结构体系；(2) 在初步或技术设计阶段进行延性抗震设计，并根据能力设计思想进行抗震能力验算，必要时要进行减隔震设计提高结构的抗震能力。

2.1 抗震概念设计

地震灾害告诉我们：对结构抗震设计来说，“概念设计”（Conceptual Design）比“计算设计”（Numerical Design）更为重要。由于地震动的不确定性和复杂性，再加上结构计算模型的假定与实际情况的差异，使“计算设计”很难有效地控制结构的抗震性能。因而，不能完全依赖“计算”。结构抗震性能的决定因素是良好的“概念设计”。因此，在桥梁的方案设计阶段，不能仅仅根据功能要求和静力分析就决定方案的取舍，还应考虑桥梁的抗震性能，尽可能选择良好的抗震结构体系。

在进行抗震概念设计时，特别要重视上、下部结构连接部位的设计，桥墩形式的选取，过渡孔处连接部位的设计，以及塑性铰预期部位的选择。

为了保证所选定的结构体系在桥址的场地条件下确实是良好的抗震体系，须进行简单的分析（动力特性分析和地震反应估算），然后结合结构设计分析结构的抗震薄弱部位，并进一步分析是否能通过配筋或构造设计保证这些部位的抗震安全性。最后，根据分析结果综合评判抗震结构体系的优劣，决定是否要修

改设计方案。

2.2 延性抗震设计

桥梁的延性抗震设计应分两个阶段进行：1) 对于预期会出现塑性铰的部位进行仔细的配筋设计；2) 对整个桥梁结构进行抗震能力分析验算，确保其抗震安全性。这两个阶段可以有反复，直到通过抗震能力验算（或者进行减、隔震设计以减小地震反应）。

2.2.1 塑性铰区横向钢筋设计

横向钢筋不仅约束混凝土，保证截面的延性，而且要保证纵向钢筋不压溃屈曲。因此，塑性铰区的横向钢筋配置要同时满足这两个要求。在这一方面，我国规范相当不足，可参考国外规范进行。如美国 AASHTO 规范^[8]和欧洲规范^[7]对体积含箍率的规定比较一致，特别是欧洲规范对横向约束钢筋的配置有非常详细的规定。

2.2.2 桥梁结构抗震能力验算

桥梁结构抗震能力验算的任务是通过非线性时程分析以及正确的抗震验算，确保整体结构与薄弱部位的抗震安全性。因此，首先要确定抗震设防的两个水准及对应的地震输入，再分别计算出结构的地震反应，并根据两个水准地震作用下结构的性能要求，验算结构的抗弯强度及弯曲延性，还要特别验算结构的剪切强度，确保不出现剪切脆性破坏。

1) 地震输入确定

(1) 抗震设防标准

国内外各规范中基本烈度相当于50年基准期10%超越概率的地震烈度,其重现期为475年。在确定大跨度桥梁的设防标准时,既要大跨度桥梁与普通建筑物区别对待,又要兼顾经济性^[4]。本文参考文献[1][9][10],建议大跨度桥梁的抗震设防标准取为:

- ①遭遇概率水平为P1(50年基准期10%超越概率)的地震时,要求桥梁震后只需简易整修,几小时后即可正常使用,进行正常使用极限状态的抗震验算;
- ②遭遇概率水平为P2(100年基准期10%超越概率或50年基准期3%超越概率)的地震时,要求桥梁只能发生可修复的破坏,进行可修复破坏极限状态的抗震验算。

(2) 地震输入

在进行大跨度桥梁的地震反应分析时,通常要进行地震危险性分析,提供相应于两个设防水准(P1, P2)的人工地震波。考虑到土动力特性参数比较复杂,在地震危险性分析中所应用的一些主要参数均有一定区间,因此地震危险性分析必须提供3~5组人工地震波以供比较分析。将所得的几组地震波,分别作为地震输入,对桥梁结构进行时程反应分析,选取能激起结构最大反应的那一组地震波,作为结构的地震输入。

2) 正常使用极限状态抗震验算

正常使用极限状态是桥梁在震后只需简易整修,几小时后即可正常使用的临界状态。在中震作用下,在预期会出现塑性铰的部位,结构可以屈服,产生小量的塑性变形,但要满足两个条件:a.保护层混凝土不发生剥落;b.裂缝宽度较小,经简易修复就可正常使用,通常认为不超过2mm。在进行抗震验算时,可以取截面受压边缘混凝土的最大压应变为0.004,而受拉钢筋的最大拉应变为0.015^[3]。由此,可得到结构允许的塑性转角,定义为 $[\theta_p]_1$ 。

而桥梁结构在P1地震波作用下的地震反应,可以通过非线性地震反应分析程序获得,如结构已屈服,产生的塑性转角定义为 θ_p 。如果 $\theta_p < [\theta_p]_1$,则仍然满足要求,否则,要修改延性设计或进而作减、隔震设计,重新进行抗震能力分析验算。

3) 可修复破坏极限状态抗弯验算

可修复破坏极限状态是桥梁在震后经过表面修复,仍然可以正常使用的临界状态。在大震作用下,允许桥梁结构发生显著破坏(如产生较宽的弯曲裂缝,发生保护层混凝土的严重剥落)。但是,不允许发生横向约束钢筋的断裂,和纵向钢筋的压溃屈曲,核心混凝土要保持完整,不需置换。可以说,横向钢筋开始发生断裂是桥梁墩柱可修复与否的临界条件。

与此相对应的受压边缘混凝土极限压应变 ϵ_{cu} 可采用下式计算^[3]:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s \cdot f_{yh} \cdot \epsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

其中, ϵ_{su} 为钢筋达到最大拉应力时的应变; ρ_s 是约束钢筋的体积含筋率; f'_{cc} 是约束混凝土的峰值压力; f_{yh} 是约束箍筋的最大拉应力。

与 ϵ_{cu} 对应的截面极限塑性转角定义为 $[\theta_p]_2$,而桥梁结构在P2地震波作用下发生的塑性转角定义为 θ_p 。如果 $\theta_p < [\theta_p]_2$,则仍然满足要求,否则,要修改延性设计或进行减、隔震设计,重新进行抗震能力分析验算。

4) 抗剪强度验算

根据能力设计思想,在强震作用下,为了依靠墩柱塑性铰的塑性变形能力耗散能量,必须保证在塑性铰区或结构的其它部位绝不出现剪切破坏,这就要求墩柱的剪切强度要大于墩柱可能承受的最大剪力(对应于塑性铰处截面可能达到的最大弯曲强度)。

为了求出墩柱可能承受的最大剪力,在输入概率水平为P2的地震波进行非线性地震反应分析时,钢筋和混凝土的强度要采用极限强度,而不是名义强度。钢筋和混凝土的极限强度可分别取 $f_y = 1.3f_y$, $f'_c = 1.7f'_c$ ^[3],其中, f_y , f'_c 分别为钢筋的屈服强度和混凝土的圆柱体标准强度。

墩柱可能承受的最大剪力定义为 Q ,墩柱的抗剪强度(延性系数的函数)定义为 R ,如 $Q < R$,则墩柱的抗剪强度满足要求,不会发生剪切破坏,否则,要修改设计或进行减、隔震设计,重新进行抗震能力分析验算。

2.3 桥梁减、隔震设计

减、隔震技术是简便、经济、先进的工程抗震手段。减、隔震体系通过增大结构主要振型的周期,使其落在地震能量较少的范围内或增大结构的能量耗散能力来达到减小结构地震反应的目的。在进行抗震设计时,要根据结构特点和场地地震波的频率特性,通过选用合适的减、隔震装置、相应参数以及设置方案,合理分配结构的受力和变形。一方面,应将重点放在提高吸收能量能力从而增大阻尼和分散地震力上,不可过分追求加长周期。另一方面,应选用作用机构简单的减、隔震体系,并在其力学性能明确的范围内使用。

减、隔震设计的效果,同样需要进行非线性地震反应分析来验证。因此,对经过减、隔震设计的桥梁结构,依然要进行抗震能力分析验算。如果验算不通过,则应修改减、隔震设计,重新进行抗震能力分析

验算，直到满足要求为止。

3 大跨度桥梁抗震设计的辅助工具（桥梁抗震分析综合程序 IPSABS）

由前述可见，大跨度桥梁抗震设计的技术关键在于根据给定的地震输入做地震反应分析，并进行抗震验算，评估桥梁结构的抗震安全性。

为此，本文专门开发了一个桥梁抗震分析综合程序 IPSABS。该程序主要包括三大模块，即地震反应分析，抗震验算及后处理模块。地震反应分析模块可以根据用户的选择，进行桥梁结构的动力特性分析，反应谱分析，以及线性和非线性时程反应分析。其中，时程反应分析可以考虑影响大跨度桥梁结构地震反应的各种因素，包括多点激振，分块阻尼问题，各种非线性因素以及桩-土-结构相互作用等。抗震验算模块可以根据输入数据及地震反应分析结果，自动进行墩柱的抗弯强度、弯曲延性和抗剪强度验算。而后处理模块作为直观、有效的辅助手段，可以显示结构的三维计算模式、振型，地震反应包络图，反应时程曲线，还具有振型及地震反应的三维仿真显示功能。

4 大跨度桥梁抗震设计实例

某大桥为跨径组合为 130 m + 205 m + 130 m 的预应力混凝土连续刚构桥。该桥桥面宽 17.0 m，主梁采用单箱单室预应力混凝土箱梁，主墩为钢筋混凝土

双薄壁墩，墩身为 2.5 m × 9.0 m 的实体矩形截面。主墩基础为每墩 18φ2.5 m 钻孔灌注桩。

4.1 抗震概念设计

连续刚构桥的主梁与墩刚结，因此，在进行抗震概念设计时，重点应放在塑性铰位置的选取上。对于桥梁结构，通常希望塑性铰出现在便于检查和易于修复的，并且经过特殊配筋的墩柱处。

本文采用图 2 所示的计算模式进行地震反应分析，并画出内力反应包络图（图 3 为其中两个）。根据内力反应包络图与结构设计图纸，可以判断出预期会产生塑性铰的部位（抗震薄弱部位）为墩柱根部，而这一部位的抗震安全性，完全可以通过正确的配筋设计得到保证，故无需修改设计方案。



图 2 桥梁结构动力计算图式

4.2 延性抗震设计

4.2.1 塑性铰区横向钢筋设计

由上已知，该桥预期的塑性铰区在墩柱根部，需对其进行仔细的配筋设计。图 4 为设计单位提供的主墩截面配筋图，箍筋的纵向间距为 15 cm。为了提高延性，本文进行加强箍筋设计，如图 5 所示，箍筋的纵向间距减为 10 cm。

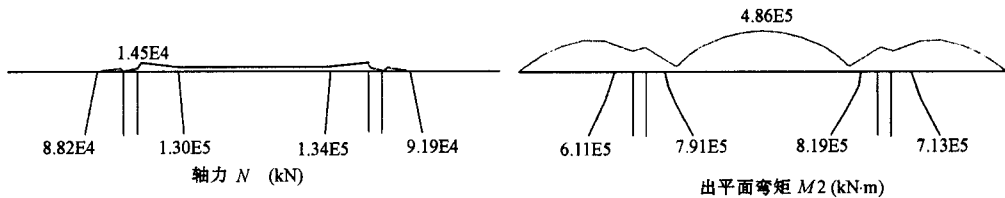


图 3 横向地震作用下的内力反应包络图

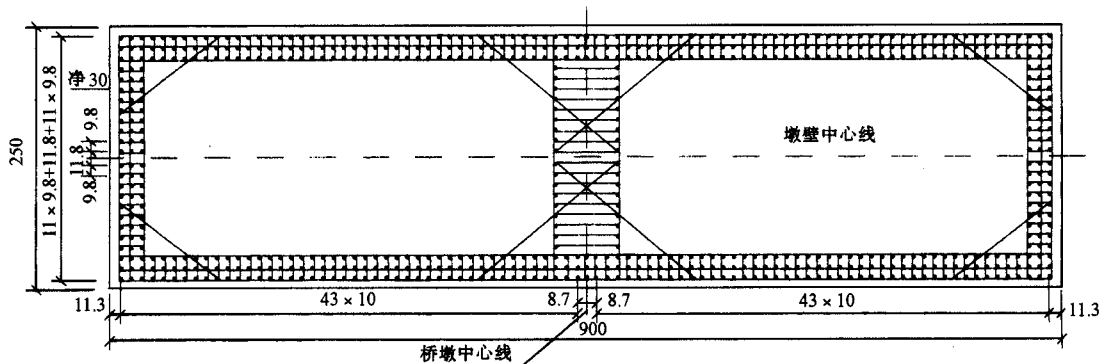


图 4 墩柱截面配筋图（设计单位提供）

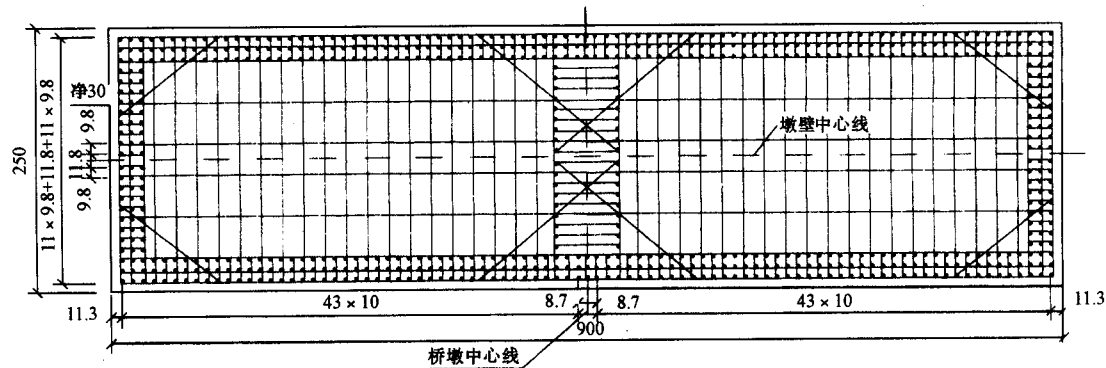


图 5 墩柱截面配筋图 (加强箍筋)

4.2.2 抗震能力验算

本文仅以可修复破坏极限状态为例。
在 P2 地震波作用下，墩底截面进入塑性工作状态，最大塑性转角列于表 1。同时，表 1 也列出了截面的极限转角。由表中数据可见，该桥在 P2 地震波作用下仍是安全的，没有必要进行进一步的延性设计和减、隔震设计。

表 1 墩底最大塑性转角 (rad)

输入方向	塑性转角 θ_{2p}	极限塑性转角 $[\theta_{2p}]_2$	塑性转角 θ_{3p}	极限塑性转角 $[\theta_{3p}]_2$
纵桥向	0.0	/	3.591×10^{-3}	6.3×10^{-2}
横桥向	3.074×10^{-4}	1.8×10^{-2}	1.202×10^{-3}	9.6×10^{-2}

注：2 方向为纵桥向，3 方向为横桥向。

5 结 论

本文在查阅大量国内外资料的基础上，根据两水平的抗震设计方法和能力设计思想，发展了大跨度桥梁抗震设计实用方法。该方法认为大跨度桥梁的抗震设计应分两个阶段进行，即抗震概念设计和延性抗震设计，必要时还应进行减、隔震设计。桥梁抗震概念设计的任务是，通过概念设计选择一个比较理想的抗震结构体系。桥梁延性抗震设计是在第一阶段设计的基础上，对塑性铰区进行仔细的横向钢筋设计，并进

行抗震能力分析验算，确保桥梁整体结构和抗震薄弱部位的安全性。如果延性抗震设计的结果不能令人满意，则要进行减、隔震设计，以减小地震反应。
在进行大跨度桥梁抗震设计时，IPSABS 程序是一个方便有效的辅助工具。

参 考 文 献

- 1 Christopher Rojahn et.al.Recommendations for improved AASHTO bridge design specifications.NCEEER BULLETIN, Vol.11, No.3, July, 1997
- 2 范立础编著.桥梁抗震.上海:同济大学出版社,1997
- 3 Priestley M.J.N., Seible F., Calvi G.M..Seismic design and retrofit of bridges, John Wiley & Sons, Inc., 19, 1996
- 4 叶爱君.大跨度桥梁抗震设计:[博士学位论文].上海:同济大学,1998
- 5 交通部公路规划设计院.JTJ 004-89 公路工程抗震设计规范.北京:人民交通出版社,1990
- 6 日本规范.道路桥示方书.同解说.V 耐震设计篇.1996.12
- 7 Eurocode 8: Structures in seismic regions design, Part 2: Bridges (draft).April 1993
- 8 American association of state highway and transportation officials.STANDARD SPECIFICATIONS for HIGHWAY BRIDGES, Division I-A SEISMIC DESIGN, SIXTEENTH EDITION, 1996
- 9 范立础,方红.大跨桥梁的抗震设计.结构工程师,1997(增刊)
- 10 中国建筑科学研究院.GBJ 11—89 建筑抗震设计规范.北京:中国建筑工业出版社,1989

A PRACTICAL PROCEDURE OF SEISMIC DESIGN FOR LONG SPAN BRIDGES

Ye Aijun Hu Shide Fan Lichu
(Tongji University)

Abstract

Lot of seismic researches and practical designs are reviewed and summarized.A practical procedure for the seismic design of long-span bridges is proposed in the paper.It is based on the two-level design approach and capacity design principles.A bridge will be designed based on two performance standards, and in turn subjected to two levels of design earthquakes with

different probability of occurring. This is called the two-level design approach. The basis of capacity design principle is that the seismic damage will be occurred at certain regions of the bridge that are designed and detailed for flexural ductility. It insures an adequate margin of strength between nonductile failure modes and the designed ductile mode of deformation. An integrated program for the seismic analysis for bridge system (IPSABS) is developed. Some practical examples are used to prove the reliability of the program.

Key words: long span bridge, seismic design, practical procedure, ductility, seismic isolation

叶爱君 博士, 讲师。主要从事桥梁结构的振动与抗震研究。通讯地址: 200092 上海四平路 1239 号同济大学桥梁工程系

胡世德 教授, 博士生导师。长期从事桥梁结构的振动与抗震研究, 对拱桥、梁桥、斜拉桥、悬索桥的抗震分析方法、计算模式、抗震性能等进行了系统研究。

范立础 教授, 博士生导师。著名桥梁与结构工程专家, 桥梁抗震学科的主要学术带头人。现任土木工程防灾国家重点实验室学术委员会常务副主任, 并兼任中国土木工程学会桥梁与结构工程分会理事长等职务。近 10 年主持和承担了“七五”攻关项目, “八五”国家攀登 B 计划, 国家自然科学基金会重大项目的多项课题。

中国土木工程学会名誉理事、著名岩土工程学家 黄文熙院士逝世

清华大学教授、中国科学院院士黄文熙先生因病于 2001 年 1 月 1 日 14 时 12 分在北京逝世, 享年 92 岁。

黄文熙教授 1909 年 1 月 3 日出生于上海。早年留学美国, 1937 年归国任教于原中央大学水利系。解放后, 先后任在南京大学、南京工学院和华东水利学院(现河海大学)任教授, 兼任南京水利实验处处长。1956 年任清华大学教授, 兼任中国水利水电科学研究院副院长。

黄文熙教授 1955 年加入中国共产党, 曾当选为第三届全国人民代表大会代表, 第二、第三届全国政协委员; 1956 年被选为中国科学院技术科学部委员(院士); 曾先后担任中国水利学会和中国水力发电学会副理事长, 中国土木工程学会和中国力学学会荣誉会员和名誉理事, 中国土木工程学会土力学及基础工程分会理事长; 曾任《水利学报》和《岩土工程学报》编委会主任。黄文熙教授是我国土力学及岩土工程学科的主要奠基人之一, 长期从事岩土工程和水工结构的教育及研究工作, 为我国水利水电事业作出了卓越的贡献。

1937 年, 他在国内首开土力学课程; 建立了国内大学的第一个土工实验室。早在 30 年代初, 他创造了框架设计的新的计算方法——框架力矩直接分配法; 1935 年他着手研究拱坝结构分析的新方法——格棚法; 1942~1957 年, 他创建了地基沉降于地基中应力分布的新的计算方法; 在 50 年代中期, 黄文熙建议用振动三轴仪进行砂土的动力特性试验, 并首先提出了用有效应力原理来解释砂土液化机理; 70 年代, 他领导建立了“清华弹塑性模型”。这些成果在国内外都产生巨大的影响。80 年代, 他看到我国在土工模型试验方面与国际先进水平的巨大差距, 亲自率团到国外考察, 后又多方奔走呼吁, 终于在我国建立了不同规模的土工离心模型试验装置, 对我国岩土工程的发展起到了巨大推动作用。他还推动了渗水力模型试验, 支持对旁压仪的理论研究, 对土工合成材料的应用和研究工作寄予极大的热忱。

黄文熙教授注重工程实践, 在水利水电工程中引进和推广了许多先进技术和工艺。如砂井预加固软土地基压法, 用反滤法和减压井防止渗透破坏, 用补偿地基原理建造不用桩基的水闸, 用就地浇注混凝土防渗墙防止地基的渗透等。他推动和支持水中填土坝和水坠坝这一具有中国特色的筑坝技术。他还积极参与了黄、淮、海和大西南、三峡等国家重大工程的咨询工作。

黄文熙教授执教 60 余年, 培养了一大批高水平的学生, 他的学生助手不少已经成为院士、博士生导师和知名的专家学者, 活跃在水利水电和岩土工程的各条战线上。

黄文熙教授工作勤恳, 效率极高。他在 1995 年 86 岁时还在《水利学报》上发表题为“拱坝抗屈折稳定初探”的论文。他治学严谨, 对于理论推导, 试验结果要求反复校核。他为人宽厚坦诚, 谦虚平和, 有长者之风, 不遗余力地提携后进, 具有很强的人格感召力。他一身正气, 高风亮节, 敢于提出不同见解, 敢于坚持正确意见。

黄文熙教授为我国的岩土工程学科作出了巨大的、不可磨灭的贡献。他的逝世使我们失去了一面旗帜, 痛失了一位杰出的导师。我们将永远怀念黄文熙先生, 我们将以我们的努力工作和团结奋斗告慰黄先生在天之灵。

黄文熙教授永垂不朽!

(本刊编辑部)