

文章编号 :1007 - 649X(2000)03 - 0034 - 03

基础设施网络系统建筑结构的设防烈度优化决策

陈艳艳¹, 宋建民², 王光远³

(1. 北京工业大学建筑工程学院 北京 100022 ; 2. 郑州工业大学土木建筑工程学院 , 河南 郑州 450002 ;
3. 哈尔滨建筑大学工程理论与应用研究所 , 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要 : 针对土木基础设施网络系统 , 讨论了系统总投入(造价与损失期望之和) 的评估方法 , 建立了结构设防烈度与系统总投入的函数关系 , 考虑未来损失期望 , 以系统总投入最小作为主要优化指标 , 进行了建筑结构最优设防烈度的优化决策 , 通过将系统优化变量转化为较少的离散变量 , 减轻了优化工作量 .

关键词 : 抗震 ; 优化设计 ; 结构设防烈度 ; 基础设施 ; 网络系统

中图分类号 : TU 311. 2 文献标识码 : A

0 引言

土木基础设施系统多为建筑物或构筑物与生命线耦联的系统 , 如果将建筑物和构筑物视为点单元 , 生命线线段视为弧单元 , 则可用网络模型来描述它 . 地震的发生将导致其发生重大损失 , 尤其对其中的建筑物或构筑物 , 如水厂厂房、泵房、桥梁、涵洞、立交桥等结构 , 因修复困难 , 周期长 , 地震灾害的影响将更为严重 . 因此 , 有必要在安全与经济二者之间做均衡 , 进行结构抗震优化设计 . 而结构设防烈度的合理确定直接影响到系统的抗震水平及经济投入 , 是系统抗震优化设计的关键 . 在全局优化的思想下 , 本文以系统总投入最小为目标 , 进行系统内建筑结构的设防烈度优化决策 .

1 土木基础设施系统抗震可靠性分析

按照我国设计规范^[1]的规定 , 结构的破坏采用 5 个等级 (以 Ψ_n 代表第 i 级破坏) :

$[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5] = [\text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌}]$,

对于在设防烈度下设计的结构 , 根据“小震不坏 , 中震可修 , 大震不倒”的设计原则 , 结构失效可认为符合单失效模式 , 在已知建筑场地的地震危险性分析的结果后 , 可得设防烈度为 I_d 的结构设计方案发生 B_i 级破坏的概率

$$P_f[B_i | \bar{x}(I_d)] = P_f[B_i | I_d] (i = 1, 2, \dots, 5). \quad (1)$$

它们只是设防烈度 I_d 和破坏等级 B_i 的函数 (具体计算方法详见文献 [1]) , 而与结构的具体尺寸无关 . 从现行设计规范的精神和规定来看 , 这是完全合理的 . 根据三级设防的原则 , 场地已确定就意味着未来的地震作用被确定 (危险性分析的结果) , 设计方案 $\bar{x}(I_d)$ 所起的作用仅仅是它所提供的总体抗力 , 设防烈度正是这种抗力的总代表 .

在网络工程系统中 , 系统功能的实现一般是通过各单元的有效连通实现的 . 故在研究源汇对的连通可靠度时 , 应规定与连通失效相应的结构失效准则 . 当各个建筑结构只遭遇中等及中等以下的破坏 $[B_1, B_2, B_3]$ 时 , 一般不会发生源汇对之间的连通失效 , 故点状结构连通失效准则应该是结构发生 B_4 (严重破坏) 级破坏或 B_5 (倒塌) 级破坏 , 即 B_3 级以上 (记为 B_3^*) 的破坏 . 因而在系统各源汇对连通可靠度分析中 , 第 n 个构筑物在设防烈度 I_{dn} 下的连通可靠度 Ψ_n 应为

$$\Psi_n(I_{dn}) = 1 - P_{fn}(B_3^* | I_{dn}) , \quad (2)$$

线状结构如路段等可根据其具体方案评估其连通可靠度 . 地震发生时 , 源汇点间任一条路径 $A_i (i = 1, 2, \dots, J)$ 能够连通 , 则可认为该源汇点间能有效连通 , 并可保证灾区震后最基本的运输需求 , 故而可以以此连通概率近似作为系统抗震可靠度 . 因而 , 系统抗震可靠度可表示为

收稿日期 : 1999 - 12 - 10 ; 修订日期 : 2000 - 05 - 10

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目 (59493300)

作者简介 : 陈艳艳 (1970 -) , 女 , 河南省郑州市人 , 北京工业大学副教授 , 博士后 , 主要从事土木工程系统优化设计方法的研究 .

$$\Psi_s = P\left\{\bigcup_{i=1}^I A_i\right\}. \quad (3)$$

通过对路集进行正交化运算^[3],则可得出源汇对间连通抗震可靠度。

2 系统造价及损失期望

系统全局优化的关键是目标函数应使系统总投入最小,如仅考虑予建结构的造价,则系统造价为各单元造价之和。

$$C_S = \sum_{n=1}^{N_1} C_n(I_{dn}), \quad (4)$$

式中: $C_n(I_{dn})$ 为按设防烈度 I_{dn} 设计的第 n 个结构的造价; N_1 是预建结构的个数。

在地震的作用下,系统损失期望可根据损失产生的原因(结构本身破坏及系统服务中断)分为两部分,即

$$L_S = L_S^{(e)} + L_S^{(s)}, \quad (5)$$

式中: $L_S^{(e)}$ 是因结构自身破坏产生的损失期望; $L_S^{(s)}$ 是因系统服务中断产生的损失期望。

与结构失效相应的系统总损失期望为系统中待建构筑物相应损失期望之和,根据多级失效准则及结构易损性分析, $L_S^{(e)}$ 可以表示为

$$L_S^{(e)} = \sum_{n=1}^{N_1} L_n^{(e)}(I_{dn}) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^5 P_{jn}^{(e)}(B_i, I_{dn}) \cdot D_{ni}^{(e)}, \quad (6)$$

式中: $L_n^{(e)}(I_{dn})$ 是第 n 个构筑物(设防烈度为 I_{dn})与结构失效相应的损失期望; $P_{jn}^{(e)}(B_i, I_{dn})$ 是第 n 个结构发生 B_i 级破坏的概率; $D_{ni}^{(e)}$ 为第 n 个结构发生 B_i 级破坏的直接损失。

网络工程系统多为多源多汇的网络,任一源汇对 $k(k=1, 2, \dots, K)$ 连通失效都会引起系统功能部分丧失,从而带来相应的系统损失 $D_k^{(s)}$ 。考虑各源汇对连通失效的可能性,与系统失效相应的工程系统总损失期望可表示为

$$L_S^{(s)}(I_{dn}) = \sum_{k=1}^K L_k^{(s)}(I_{dn}) = \sum_{k=1}^K (1 - \Psi_s^k(I_{dn})) D_k^{(s)}, \quad (7)$$

式中: $L_k^{(s)}(I_{dn})$ 为第 k 个源汇对连通失效带来的系统损失期望; $D_k^{(s)}$ 为第 k 个源汇对连通失效带来的损失; $\Psi_s^k(I_{dn})$ 为第 k 个源汇对的连通可靠度。

从而系统全局优化的目标函数,即系统总投入 W_S 可由下式得出:

$$W_S = C_S + L_S^{(e)} + L_S^{(s)}. \quad (8)$$

3 结构设防烈度最优决策

综上所述,在系统全局优化思想下,对系统中各建筑结构进行设防水平的优化设计,应使得系统总投入(造价与损失期望之和)最小,故系统抗震优化设计的数学模型可以归纳如下:

求网络中欲优化结构的最优设防烈度向量:

$$[I_{dn}^*] = [I_{d1}^*, I_{d2}^*, \dots, I_{dN_1}^*],$$

使系统的总投入

$$W_S([I_d]) = \sum_{n=1}^{N_1} C_n(I_{dn}) + \sum_{N=1}^{N_1} L_n^{(e)}(I_{dn}) + \sum_{k=1}^K (1 - \Psi_s^k([I_{dn}])) D_k^{(s)} \rightarrow \min, \quad (9)$$

并满足投资约束

$$C_S = \sum_{n=1}^{N_1} C_n \leq C_0, \quad (10)$$

式中: C_0 为建设投资上限。

若不考虑投资约束,由下式得出系统内建(构)筑物的最优设防烈度 I_{dn}^* :

$$\frac{\partial W_S}{\partial I_{dn}} = \frac{dC_n}{dI_{dn}} + \frac{dL_n^{(e)}}{dI_{dn}} - \sum_{k=1}^K \frac{\partial \Psi_s^k}{\partial I_{dn}} D_k^{(s)} = 0, \quad (11)$$

在有投资约束时,可用 lagrange 乘子法求解上述规划,可构造 lagrange 函数为

$$F([I_{dn}], \lambda) = L_S^{(e)} + L_S^{(s)} + \lambda \{C_0 - C_S\}, \quad (12)$$

式中: λ 为 lagrange 乘子,可由下式求得投资约束下的建(构)筑物最优设防烈度:

$$\frac{\partial F}{\partial I_{dn}} = \frac{dL_n^{(e)}}{dI_{dn}} - \sum_{k=1}^K \frac{\partial \Psi_s^k}{\partial I_{dn}} D_k^{(s)} - \lambda \frac{dC_n}{dI_{dn}}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = C_0 - C_S = 0. \quad (14)$$

上述规划求得设防水平为连续值,但目前工程实践中还广泛采用离散的烈度等级,而且大规模网络优化中常涉及系统可靠度分析及数学规划的双重维数灾。故在实际工程中,可根据地震危险性分析、单元重要性分析^[6]、功能要求、投资限制等因素将欲决策的结构选择若干较合理的离散设计烈度,进而评估各设防水平单元的相应造价、连通可靠度,然后利用枚举法等方法进行系统方案组合,计算各种方案下的系统优化目标及约束条件,从而确定满足约束条件的最优方案,即单元最优设防水平的配置。最后可在最优设防水平下,进行结构最小造价设计^[7]。

4 算例

下面以一实例说明该方法的实际应用。

某地区交通系统,网络形式见图 1,点单元(3)(6)(9)(12)为 4 座城镇,欲在点单元(5)处建一立交桥(7)处建一桥梁,此地区为二类场地土,八度设防区.路口点单元(2)(3)(4)(6),(7)(8)(9)(11)(12)为其上无构筑物的路口,单元可靠度可视为 1.路口点单元(1)(10)(13)的可靠度分别为 0.78,0.85,0.90,其它各路段单元的连通可靠度见表 1,各城镇间不能连通的损失见表 2.试进行点单元(5)(7)处构筑物的最优设防水平决策.

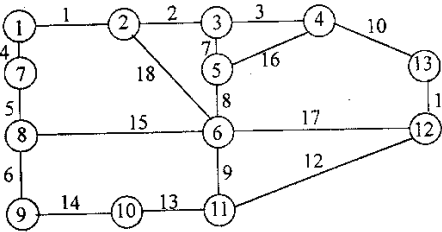


图 1 交通网络图

表 1 路段单元的连通可靠度

单元号	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
Ψ_n	0.78	0.76	0.76	0.78	0.79	0.78	0.85	0.75	0.80
单元号	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]
Ψ_n	0.80	0.86	0.67	0.75	0.80	0.76	0.78	0.77	0.78

表 2 各城镇间不能连通的损失

源汇对	(3)(6)	(3)(9)	(3)(12)	(6)(9)	(6)(12)	(9)(12)
损失/万	50	20	40	10	20	3

根据重要性、当地基本烈度、投资限制、系统功能失效损失估计,单元(5)处立交桥可取设防烈度为 8.5 度或 9 度,单元(7)处桥梁设防烈度为 8

度或 8.5 度,各方案下发生各级破坏的损失、破坏概率、损失期望的结果略.

经各方案组合,计算方案下的系统总造价及损失期望,可得使系统总投入最小的最优方案是单元(5)处立交桥取设防烈度为 9 度,单元(7)处桥梁设防烈度为 8 度.系统总投入为 184.2 万元.

5 结束语

本文提出了一种基础设施系统内结构最优设防水平的实用优化方法,考虑未来损失期望,系统优化目标能满足全局优化的要求,通过将优化变量转变为较少的离散变量,优化工作量大大减轻.

参考文献:

[1] GBJ 11-89,建筑抗震设计规范[S].
[2] 王光远.抗灾结构的最优设防荷载与最优可靠度[J].土木工程学报,1991(5):10-15.
[3] ABRAHAM S H. A simple technique for computing network reliability[J]. IEEE Trans on Reliability,1982,R-31:114-118.
[4] 霍达,李桂青,王东炜.城市建筑网络工程系统抗震可靠性分析[M].北京:地震出版社,1993.
[5] 王光远.工程软设计理论[M].北京:科学出版社,1992.
[6] 陈艳艳.单元重要度在土木基础设施网络系统概念设计中的应用[J].哈尔滨建筑大学学报,1998,31(1):8-15.
[7] 陈艳艳.土木基础设施网络系统两阶段抗震全局优化设计[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(1):5-10.

The Optimum Decision for Structure Design Intensity
in Civil Infrastructure Network System

CHEN Yan - yan¹, SONG Jian - min², WANG Guang - yuan³

(1. College of Architectural Engineering, Beijing University of Polytechny, Beijing 100022, China; 2. College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 3. Research Institute of Engineering Theory & Application, Harbin University of Architecture and Civil Engineering, Harbin 150090, China)

Abstract In this paper, the total investment (the sum of system original cost and future loss expectation) of the civil infrastructure system (CIS) is discussed and the relationship function between structure design intensity and system total investment is built. Considering the future loss expectation and aiming at minimizing the total investment cost, the optimum structure design intensity is decided. Through changing the optimum variables into fewer discrete ones, an effective optimum method for CIS aseismic design is suggested.

Key words earthquake; optimum design; structure design intensity; civil infrastructure; network system