

# 超高层建筑结构生命周期多维度经济成本评估及优化方法

赵 昕<sup>1</sup>, 姜世鑫<sup>2</sup>

(1. 同济大学建筑设计研究院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**超高层建筑结构具有结构体系复杂、结构功能多样、生命周期长、投资量大、持有人固定不变等特点, 其全生命周期成本费用包含初始费用、维护费用、灾害失效费用以及拆除费用等多项费用。为了实现超高层结构全生命周期经济利益最大化而采用的生命周期经济评估方法通过方案对比、构件对比、费用项目等多维度对超高层结构成本费用进行管理。使用该方法能够在项目初期就对结构项目进行全面的评估与优化, 同时, 一个超高层建筑的实例将被引用来说明其有效性与适用性。

**关键词:**生命周期; 多维度; 经济分析; 超高层建筑; 结构优化

**中图分类号:** TU973+.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-4764(2012)S2-0043-05

## Multi-dimensional Life Cycle Economic Cost Assessment for Super Tall Building Structures

ZHAO Xin<sup>1</sup> JIANG Shixin<sup>2</sup>

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, P. R. China; 2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Super-tall building structures have the features of complex structural systems, diverse structural functions, long service life, massive investment and fixed owners. The life-cycle cost of super-tall building structures mainly contains initial cost, maintenance cost, failure cost caused by hazard and demolition cost. In order to achieve the minimization of the life-cycle cost of the super-tall building structure, a multi-dimensional life cycle economic cost assessment method is proposed in this study. The proposed method considers alternative design schemes, structural components and cost items. The overall cost management and optimization will be done at the initial phase of the structural project if this method can be employed. The proposed method is applied to a super tall building to illustrate its effectiveness and applicability.

**Key words:** Life cycle; multi-dimensional; economic analysis; super tall buildings; structural optimization

近十年来,随着世界各地经济不断发展,城市化进程越来越快,城市商业综合体得到迅猛发展;另一方面,由于城市土地资源紧张,超高层建筑便成为政府及房地产公司投资的热点。在建筑功能方面,超高层建筑主要以出租的形式进行商业、办公、酒店、公寓等用途,所以其投资持有人一般固定不变;在社会影响方面,超高层建筑的高度、数量及外观体现了一个城市经济发达的程度,故其具有投资量大、建成后的使用周期长等特点;在结构体系方面,超高层建筑结构对抗震、抗风以及可靠度有较高的需求,故其结构体系复杂,结构构件尺寸大,结构构件检测与维护费用相对较高。

针对上述特点,在超高层建筑结构初始设计阶段,就应考虑结构生命周期范围内的特征与形态,从经济性的角度对不同的方案进行全生命周期的评估与优化,选取最优方案,使结构生命周期内的各项费用达到最小,增强结构的可持续发展能力,实现结构全生命周期的优化管理。

全生命周期成本费用这一概念最早来源于美国军用设备管理,随后应用于机械制造、航空航天等各个产业,二十世纪八九十年代,来自欧洲和美国的科学家 Sarja, Frangopol

等人就开始了建筑、桥梁等结构的全生命周期性能研究<sup>[1]</sup>;美国国家标准与技术研究所(NIST)在其1995年出版的手册中定义了建筑生命周期费用<sup>[2]</sup>:建筑或建筑系统在一段时间内包括持有、运营、维护以及废弃的折现花费。1998年颁布的权威性《国际标准 ISO2394》提出了建筑结构的经济优化观点<sup>[3]</sup>,从经济的角度提出了结构全生命周期的优化目标,即使结构生命周期总费用趋于最小:

$$C_{tot} = C_b + C_m + \sum P_f C_f$$

其中,  $C_b$ —初始建设成本;  $C_m$ —维护与拆除成本;  $P_f$ —结构生命周期内的失效概率;  $C_f$ —失效损失。

上述公式高度概括了建筑结构生命周期费用所包含的项目,除初始建设费用外,一部分是可控制的维护与拆除成本,另一部分是有一定随机性的结构失效费用。造成失效的原因可能是外力作用,如较强的风荷载、地震荷载、火灾、爆炸荷载等;也可能是内部作用,如材料的腐蚀老化等。对于现代超高层建筑结构来说,由于其建筑结构重要性系数较高,保养维护的投入也较高,加之目前生产的材料抗老化及抗腐蚀能力越来越强,在设计阶段主要考虑的结构失效原因

即为灾害失效。灾害失效主要取决于结构所处位置的地理环境因素,初始建设时结构或构件的抗震、抗风性能目标,结构建成以后的检测、维护及修复也能够通过提高结构质量来减少灾害失效的损失。通过以上分析,建筑结构的生命周期费用项目以及它们之间的关系可用下图来表示。

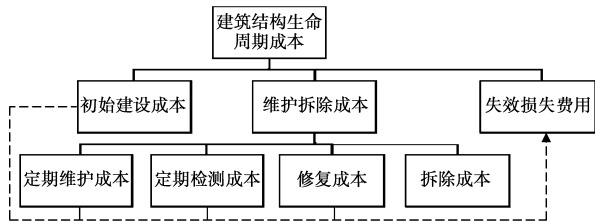


图 1 建筑结构生命周期费用项目关系图

现今的超高层结构设计,比选不同方案的主要指标是经济因素,但设计人员在考虑经济因素时往往只注重不同方案的初始材料费用以及施工费用,这种考虑方式往往不够全面,因为结构不仅在建设时会产生费用,在生命周期的各个阶段都会产生不同的费用项目。因此,文章提出了一个更加完善的结构全生命周期经济成本评价体系与方法,指导结构的设计与优化。

### 1 基于生命周期经济成本的结构评估及优化体系

超高层结构的生命周期经济成本评价体系可以分为三个维度:构件维度、方案维度以及费用项目维度,如下图所示。在以往的超高层结构的设计中,设计人员在结构及构件造价的优化过程中主要考虑的是不同方案下不同构件的初始费用,即只考虑了下图中初始费用对应的xz平面。

在基于生命周期的结构经济成本评估优化方法中,必须计入结构生命周期内所有费用项目,即图中的Y轴,这样就将原来的二维经济成本评估体系扩展到三维,如图1所示,

由二维扩展到三维的优化过程,可按照以下两种方式进行: 1)针对不同的方案,先在xy平面上进行优化,即计算不同方案下的结构全寿命周期总费用,然后比选不同方案,得出最终优化方案。2)先在yz平面上进行优化,选取某一个构件,针对该构件的不同方案计算其全生命周期费用,选取最优构件方案,然后将不同构件的最优方案进行筛选与组合,形成最终的方案。

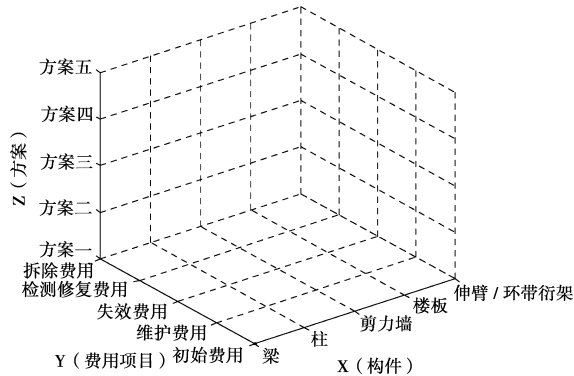


图 2 三维结构经济成本评价体系

对于一般建筑结构来说,由于其结构材料单一,体系相对简单,在比选不同方案时,按照第1种方法进行即可。而超高层结构的结构体系比较复杂,一般为钢材与混凝土混合结构,其结构构件尺寸较大,构件的力学性能也与传统构件不尽相同。所以,对于超高层建筑结构来说,宜先进行整体方案优化,如结构体系的不同方案选择等;再进行构件层次的优化。即先按照第1种方法宏观控制结构的经济成本,再按照第2种方法对构件进行局部优化,使结构更加完善。

超高层结构生命周期经济成本的费用项目种类繁多,为了避免不同费用的重复计算,需要对不同时段不同情况下的费用进行细化统计,这样原来的三维评价体系就扩展到了四维,如图3所示。

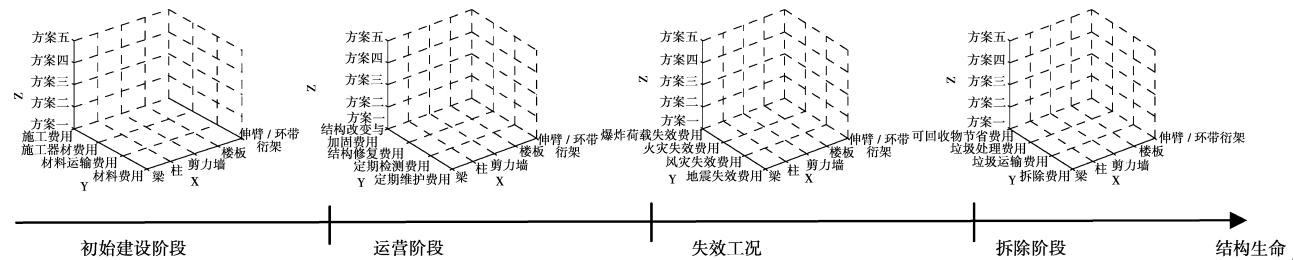


图 3 四维结构经济成本评价体系

## 2 结构生命周期主要费用项目计算方法:

### 2.1 初始费用与维护费用

初始费用主要由材料费用与施工费用组成,其中材料费用不仅指材料的造价,还要包括它在工厂预制的加工费用,以及加工完成后运输到施工场地的费用,即材料到场费用。施工费用包含劳动力成本与施工器械费用两部分,施工器械宜采用租赁的形式,这样即节约经济成本也有益于资源的循环利用。维护费用包含不同材料的维护费用:若构件暴露部分为钢材,则需要定期的防腐防火涂装,防止涂料过期,造成灾害隐患;若构件暴露部分为混凝土,也需要定期进行涂刷

与清理,防止保护层内的钢筋锈蚀,但相比于钢材,混凝土的维护费用较少,维护周期也较长,因此在进行方案对比时,可忽略其维护费用。由于维护是定期的,所以可以按照时间跨度计算总维护费用,而时间跨度可以取超高层结构的设计使用年限(一般为100年)。

### 2.2 灾害失效费用

结构在生命周期内可能遭遇的灾害主要有地震灾害、风灾、火灾以及爆炸荷载等。由于一些灾害发生概率极低,而且可以通过一定措施进行有效控制,所以暂不考虑其造成的失效费用。而地震灾害在中国属于频发灾害,且对结构的威胁也最大,所以此文主要考虑这部分损失费用。根据抗震设

防规范与方法,这部分费用的计算主要对结构所在地区的场地基本烈度、结构抗震设防烈度,以及结构设计时的抗震性能目标进行经济性的评估。在某个地震作用下,结构发生不同性能水准的破坏概率不同,在计算时,用不同的概率乘以对应的性能水准破坏损失,便可以得到总的失效费用。文章灾害失效费用计算采用王光远建议的损失系数方法<sup>[4]</sup>。

结构遭到破坏带来的损失值  $D$  包括三个部分:  $D = D^{(1)} + D^{(2)} + D^{(3)}$ 。

式中:  $D^{(1)}$ ——结构破坏本身的直接损失,指结构构件的损失和修复拆除的费用;  $D^{(2)}$ ——结构破坏而在屋内引发的损失,包括屋内设备、装修、工艺品损失;  $D^{(3)}$ ——结构破坏引发的间接损失,包括停产、有毒物质泄漏等原因造成的社会经济、政治、人身伤亡等损失。

(1) 直接损失:  $D_i^{(1)} = \beta(B_i)C(I_d)$ ; 式中  $\beta(B_i)$  为破坏状态  $B_i$  引发的直接损失系数;  $C(I_d)$  为设防烈度  $I_d$  下结构或构件的造价。

(2) 屋内损失:  $D_i^{(2)} = \gamma(B_i)C_{eq}$ ; 式中  $\gamma(B_i)$  为破坏状态  $B_i$  引发的室内损失系数;  $C_{eq}$  为屋内设备资产的价值。

(3) 间接损失:  $D_i^{(3)} = \delta(B_i)D_i^{(1)}$ ; 式中  $\delta(B_i)$  为破坏状态  $B_i$  引发的间接损失系数;  $D_i^{(1)}$  为上述直接损失。

结构或构件总的失效损失  $\sum P_f C_f = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 P(I_i) P_j(I_d) D_j(I_d)$ , 式中  $P(I_i)$  为目标地震的超越概率, 1~3 分别代表小震、中震、大震。  $P_i(I_d)$  为结构构件产生不同状态等级破坏的概率。以七度设防为例, 结构或构件的概率数据可按照表 2 选取。

表 1 七度设防下结构或构件发生各种破坏的概率

目标地震	多遇地震(小震)	偶遇地震(中震)	罕遇地震(大震)
生命周期(100 年)			
超越概率	0.865	0.19	0.05
完好 $P(B_1)$	0.620 80	0.175 57	0.007 24
轻微破坏 $P(B_2)$	0.244 00	0.355 56	0.110 36
中等破坏 $P(B_3)$	0.128 92	0.426 03	0.671 65
严重破坏 $P(B_4)$	0.006 16	0.041 35	0.196 26
倒塌 $P(B_5)$	0.000 12	0.001 49	0.014 49

### 2.3 拆除费用

超高层建筑一般为城市地标性建筑,因此其使用寿命一般都要高于其设计使用年限,而且只要维护保养得当,超高层建筑结构可以一直使用下去,所以一般情况下可不考虑其拆除费用。但是超高层建筑结构的构件可能因为灾害失效、建筑功能改变等原因拆除,在进行生命周期经济评估时,宜考虑其拆除费用。拆除方法主要有机械拆除法以及爆破拆除法,在工期允许的情况下,一般采用更为绿色和经济的机械拆除法。拆除费用主要分为拆除工程费用、垃圾运输处理费用以及材料回收费用,其中材料回收费用为负值,需要在总费用中减去该部分,这也体现了绿色可持续的建筑理念。

### 3 算例

根据以上基于生命周期经济成本的评估优化方法,选取某超高层结构的框架柱设计实例。该超高层结构高度约为 300 m, 采用了支撑框架-核心筒-环带桁架混合结构体系, 图 4 为塔楼的结构体系构成图。其中, 外框架由型钢混凝土柱、柱间支撑及钢梁组成。沿塔楼立面布置了 4 道加强层, 每道加强层由二层楼高的环带桁架将外围框架柱连接在一起, 增加了外框结构的整体性和抗侧能力。具体结构形式如下图所示。

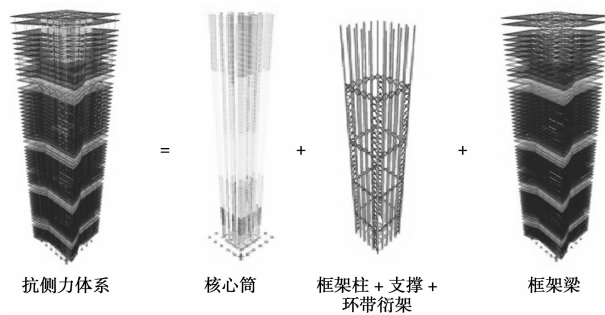


图 4-1 抗侧力体系构成图

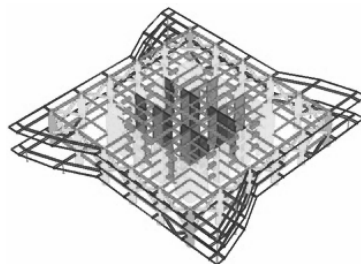


图 4-2 加强层轴测图

参考国内规范,将该超高层结构框架柱的备选方案设为型钢混凝土柱与钢管混凝土柱两种。

#### 3.1 设计参数

设某超高层结构框架柱截面最不利内力组合为:  $P = 1.5 \times 10^8$  N;  $M_x = 1.2 \times 10^7$  N·m;  $M_y = 0.8 \times 10^7$  N·m;  $V_x = 1.2 \times 10^6$  N;  $V_y = 1.5 \times 10^6$  N。参照相关规范(主要为《钢管混凝土结构技术规程》YB 9082-2006 与《钢管混凝土结构设计及施工规程》CECS 28:90)对两种方案柱截面参数设计及验算如下:

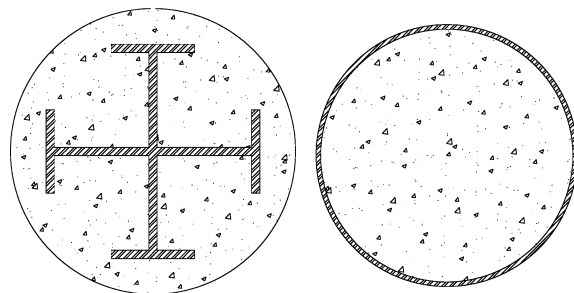


图 5 钢管混凝土柱与型钢混凝土柱截面对比

表2 钢筋混凝土柱与钢管混凝土柱设计参数对比

柱几何长度/mm	柱直径 D/mm	钢筋/钢管尺寸/mm	钢材型号	混凝土标号	总配筋率	控制验算条件	荷载率	
钢筋混凝土柱	4 250	2 400	十字钢筋 1 500×400× 50×50	Q345B	C60	1.3%	偏心受压承载力	0.823
钢管混凝土柱	4 250	2 200	钢管厚度 35	Q345B	C60	—	偏心受压承载力	0.815

表3 钢筋混凝土柱与钢管混凝土柱不同破坏等级下损失系数

破坏状态等级	划分标准描述	$\beta(B_i)$	$\gamma(B_i)$	$\delta(B_i)$
基本完好(B <sub>1</sub> )	混凝土未出现裂缝,不需修复即可继续使用	0.00	0.00	0.00
轻微破坏(B <sub>2</sub> )	外部混凝土出现少量裂缝,简单修复即可继续使用	0.05	0.05	0.00
中等破坏(B <sub>3</sub> )	外部混凝土明显裂缝,局部节点处可能出现保护层剥落,钢筋未屈服,需进行中等修复	0.15	0.15	0.60
严重破坏(B <sub>4</sub> )	柱节点处出现混凝土较严重剥落及钢筋屈服现象,柱内钢筋未屈服,需对柱进行大修或加固处理	0.90	0.50	3.5
倒塌(B <sub>5</sub> )	柱外部混凝土大面积剥落,柱内钢筋屈服,需将柱拆除	1.00	0.95	8.50
基本完好(B <sub>1</sub> )	外部钢管完好,不需修复即可继续使用	0.00	0.00	0.00
轻微破坏(B <sub>2</sub> )	外部钢管基本完好,简单涂装即可继续使用	0.05	0.00	0.00
中等破坏(B <sub>3</sub> )	外部钢管局部出现屈服,需对钢管进行加铆钉或焊接等加固修复措施	0.30	0.15	0.25
严重破坏(B <sub>4</sub> )	柱节点处出现钢材大面积屈服现象,柱内混凝土损伤严重,需将柱拆除重建	1.00	0.20	5.00
倒塌(B <sub>5</sub> )	柱外部钢管大面积屈服甚至产生裂痕,柱内混凝土开裂严重,需将柱拆除	1.00	0.55	6.50

此例中假设柱周围装修及设备价值为柱造价的1.5倍。最后根据损失系数以及概率数据确定地震损失,加入到生命周期总的经济成本中进行方案对比。

4)拆除费用按照施工费用的70%取值,材料回收费用部分,钢材按照初始造价的30%取值,混凝土部分忽略不计。

5)此例因仅进行方案的经济性对比,暂不考虑费用贴现率及通货膨胀率的影响。为使费用无量纲化,取1 m<sup>3</sup>混凝土的费用为1,其他费用价格参照市场价格及其与混凝土价格的比值进行计算。最终得出两种柱的生命周期各项费用总结如下表。

表3 钢筋混凝土柱与钢管混凝土柱生命周期费用统计

	初始费用	维护费用	失效费用(地震灾害失效)	拆除费用	生命周期总费用
混凝土费用	18.3	0	直接损失 8.10		
钢筋费用	92.4	100年总费用	屋内损失 10.55		
施工费用	15.6	混凝土维护费用	间接损失 26.14		
总费用	115.9	100年总费用	总失效损失 44.79		
钢管混凝土柱				-16.8	143.89

### 3.2 生命周期经济成本计算

在进行两种柱方案的经济成本评估与计算时,主要需要注意以下几点:

1)钢筋混凝土柱由于需要钢筋绑扎费用以及模板费用,故施工造价要高于钢管混凝土柱。

2)钢管混凝土柱由于钢管暴露在外面,需要定期进行防腐、防火涂料维护与更换,所以其生命周期维护费用要高于钢筋混凝土柱。

3)对于两种柱的地震损失费用,参考《建筑地震破坏等级划分标准》对两种柱不同破坏等级下的损失系数定义如下表<sup>[5]</sup>。

续表3

	初始费用	维护费用	失效费用(地震灾害失效)	拆除费用	生命周期总费用
混凝土费用	12.4	0.7/年	直接损失 11.41		
钢筋费用	91.8	100年总费用	屋内损失 6.31		
施工费用	9.8	混凝土维护费用	间接损失 19.21		
总费用	107.5	100年总费用	总失效损失 36.93		
钢管混凝土柱				-20.6	193.83

### 3.3 评价

根据以上评估及计算结果,可以看出钢管混凝土方案的生命周期经济成本明显高于钢筋混凝土柱方案。主要原因是钢管混凝土柱由于钢材暴露在空气中,定期进行维护的费用较高,加之超高层结构的生命周期较长,所以钢管的维护费用在生命周期费用中占的比重较大。若仅考虑初始费用,则钢筋混凝土柱初始费用高,钢管混凝土柱经济性占优,但这种评价方式显然是不合理的。按照基于生命周期经济成本的评估方法,应选用钢筋混凝土柱方案。

## 4 结论

文章相比以往的基于初始建设费用对超高层建筑结构进行经济

性评估与优化的方法,加入了生命周期的维度,即考虑了结构在时间维度下可能产生的费用项目,将原来的二维思考模式扩展到三维甚至四维空间中。通过这种方法,使设计人员在结构设计时就能明确以生命周期经济成本为标尺的评价体系,针对这种体系选择更为合理的结构形式与构件方案,最大限度节省资源、节约成本,实现结构的长远利益。这种评价体系建立以后也方便业主在全生命周期的各个阶段对结构进行管理,提高结构的耐久性,延长结构的使用寿命。

文章在第三部分选取了一个算例说明了基于生命周期经济成本的评估方法在实际中的应用,该例虽然能够选出最优方案,但对于庞杂的生命周期费用项目体系本例仅选取了具有决定作用的几个部分,对于具体费用的计算仍缺乏精确性。若想要实现结构或构件生命周期经济成本的准确评估与管理,就需要结构工程师与建筑的不同功能部门人员配合协作,建立完善的结构生命周期经济成本数据库。对于结构的初始费用评估,中国已经有专业的造价预算体系,但是对运营阶段的维护费用以及结构失效后的经济损失,还没有完善的数据系统可供查询。只有强有力的数据保障,才能建立完善的生命周期经济评价体系,实现超高层结构生命周期全过程的优化设计与管理。

#### 参考文献:

- [1] FRANGOPAL D M, LIN K Y, A C ESTES. Life-cycle cost design of deteriorating Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 10: 1390-1401.
- [2] FULLER S K, PETERSON S R. Life-cycle cost manual for the federal energy management program[M]. U. S. Department of Commerce, 1995.
- [3] ISO 2394. General principles on reliability for structures[S]. Geneva: International Organization for Standardization; 1998.
- [4] 王光远,季天健,张鹏. 抗震结构全寿命预期总费用最小优化设计[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 1-6
- [5] 建设部(1990)建抗字第 377 号. 建筑地震破坏等级划分标准[S].
- [6] 王光远,邵卓民,等. 抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [7] 吴炜煜,岳媛媛. 基于多维费用阵列的工程项目信息管理[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(12): 2095-2099.
- [8] 董建,陈光. 工程项目全寿命周期费用体系研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 138-142.
- [9] WEN YK, KANG YJ. Minimum building Life-cycle cost design criteria. I Methodology [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 3: 330-337.
- [10] WEN YK, KANG YJ. Minimum building Life-cycle cost design criteria. II Applications [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 3: 339-346.
- [11] 陈艾荣. 基于给定结构寿命的桥梁设计过程[M]. 北京:人民交通出版社,2009:132-150.
- [12] 金伟良,钟小平,胡琦忠. 可持续发展工程结构全寿命周期设计理论体系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(9): 401-406.
- [13] 张海霞. 基于循环经济视角的建(构)筑物拆除和建筑垃圾管理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [14] Narasimhan H, Chew MYL. Integration of durability with structural design; an optimal life cycle cost based design procedure for reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2009,23: 918 - 929.
- [15] Mitropoulou CC, Lagaros ND, Papadrakakis M. Life-cycle cost assessment of optimally designed reinforced concrete buildings under seismic actions[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96: 1311 - 1331.
- [16] Cariaga I, El-Diraby T, Osman H. Integrating value analysis and quality function deployment for evaluating design alternatives[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(10):761 - 770.

(编辑 周沫)