

文章编号:1671-8879(2013)01-0033-06

公路对环境影响的定量评估

张 杰¹, 庞 博², 杨鹏超²

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要:为了实现公路对环境影响的定量评估,基于生命周期评价(LCA)理论,应用生态指标法(Eco-indicator 99)选取了生态系统、人类健康和资源能源 3 个终点环境影响类型,建立了公路生命周期终点模型,对某一级公路进行了实例分析。结果表明:资源能源消耗对环境的损伤最严重,占总环境损伤的 70%,对人类健康的影响占 20%,对生态环境的破坏占 10%;公路生命周期终点模型能将环境影响量化到末端,减少了不确定性,推进了公路环评工作和环境保护工作。

关键词:交通工程;公路;环境;生命周期;生态指标

中图分类号:U451.2 **文献标志码:**A

Quantitative assessment on environment affected by highway

ZHANG Jie¹, PANG Bo², YANG Peng-chao²

(1. School of Traffic and Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to achieve the quantitative assessment of the highway on the environment, based on the theory of Life Cycle Assessment, an end-point damage model was established for highway impact quantitative analysis which selected three categories impacts (ecosystem, human health, energy and resources) by using the Eco-indicator 99 method. And a case analysis had been adopted. The results show that the energy and resources consumption have significantly accounted for 70% of impact, with human health accounting for 20%, and ecosystem 10%. This model can promote the field of theoretical research on highway to promote highway EIA and environmental protection. 8 tabs, 5 figs, 10 refs.

Key words: traffic engineering; highway; environment; life cycle; ecological indicator

0 引 言

伴随着中国经济的飞速发展,公路建设也进入高速发展的轨道,到 2011 年底,中国公路通车总里程达到 410.64×10^4 km,从改革开放之初的世界第 7 位跃居至第 2 位^[1]。公路对环境的影响日趋严峻,对此影响进行综合评价,从而有针对性的提出有

效措施是非常有必要的。以往的评价都是定性分析,难以在量值上对影响进行判定,给后续的治理工作带来了极大的困难。故公路的环境影响由定性分析向定量分析转化是未来的发展趋势^[2]。为了实现对公路生命周期内对环境的影响进行定量分析,本文应用生命周期终点模型,采用生态指标法将环境破坏种类共分为人体健康、生态系统质量及资源能源

收稿日期:2012-01-26

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 223 170)

作者简介:张杰(1972-),男,江苏江都人,高级工程师,E-mail:zj@mot.gov.cn。

损伤 3 种。该模型能够将环境影响量化到末端,减少了不确定性,是目前生命周期评价发展的必然趋势^[3]。

1 方法框架

1.1 LCA

目前,生命周期评价(LCA)的定义有多种提法。如美国环保局的定义:对自最初从地球中获得原材料开始,到最终所有的残留物质返归地球结束的任何一种产品或人类活动所带来的污染物排放及其环境影响进行估测的方法^[4]。环境毒理学和化学协会的定义:全面地审视与一种工艺或产品在“从摇篮到坟墓”的整个生命周期有关的环境后果^[3]。ISO 的定义:LCA 是一个评估产品(或服务)从原材料提取到最终处理整个过程中对环境造成潜在影响的工具^[5]。

根据 ISO 标准,生命周期研究包括 4 个阶段——目的和范围的确定、清单分析(LCI)、影响评价(LCIA)及结果解释,如图 1 所示^[6]。图中的双箭头说明 LCA 是一个反复的过程。随着评价者变得更加专业、对评价结果精确度的不断提高,不同阶段的各种选择都会发生变化。例如在 LCI 中可能会出现新的阶段,要求评价者重新回到“目的和范围”确定阶段,并将此过程包括在整个评价过程中。

最后可以想象 LCI 和 LCIA 都会加入新的评价内容,在某种程度上改变了评价目的,甚至需要重新考虑评价目的。

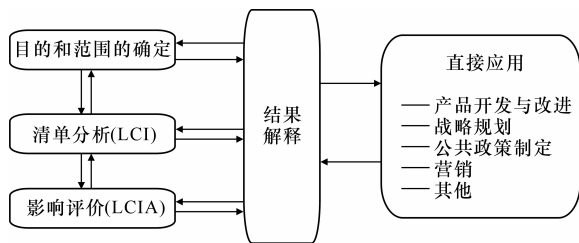


图 1 生命周期评价阶段及应用

Fig. 1 Life cycle assessment phas and application

1.2 Eco-indicator 99

环境影响评价模型分为 2 类:中点(mid-point)破坏模型和终点(end-point)破坏模型。中点破坏模型对环境影响的分析终止于环境机制的某个中间环节,而终点破坏模型则将环境影响量化到环境机制的末端^[7]。终点破坏模型是国际 LCIA 研究的新趋势,以荷兰的生态指标法(Eco-indicator 99)为代表。该方法将环境影响追踪量化到影响链的末端进

行评价,有利于揭示环境问题的客观本质和最终损伤。生态指标法用单一的标准生态指数(Standard Eco-indicator)来表示产品的终点环境影响,该方法对于产品在全生命周期中不同阶段内生态指标的计算过程均可以简化如图 2 所示^[8]。

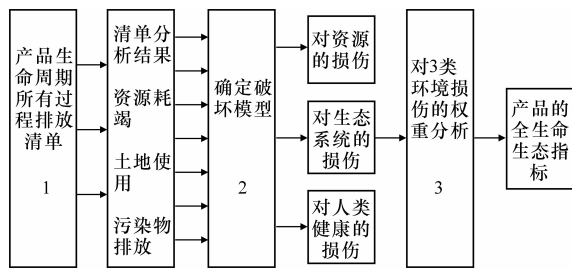


图 2 生态指数的计算过程

Fig. 2 Calculation process of Eco-indicators

2 公路对环境影响的定量评估

2.1 目标和范围的界定

选择内蒙古某一级公路进行分析。其研究目标是定量评估公路施工期间的环境影响,研究范围包括建材生产和施工阶段,但不包括由机动车辆行驶产生的环境影响。功能单位(functional unit)为每公里 6 车道的公路。图 3 所示为公路生命周期环境分析的系统边界。考虑了系统边界内与功能单位直接相关的过程,或活动消耗的资源能源及其排放物对大气、土体、水体环境影响,不考虑诸如工厂基础设施建设、工人生活等活动造成的环境影响。中国公路工程一般分为路基、路面、桥梁、隧道和交通附属等单位工程,为简化研究,暂不考虑桥梁、隧道和交通附属工程,只考虑路基土石方、排水、防护和路面工程^[9]。

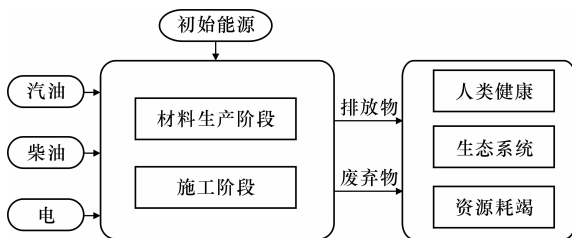


图 3 公路生命周期评价的边界确定

Fig. 3 Boundary definition of highway life cycle assessment

2.2 清单分析

公路的清单分析主要依赖于各建筑材料的能源输入、污染物输出清单及公路工程量清单,见下页表 1,对材料、能源消耗量进行数据整理和分析,进而求得公路在生命周期内材料和能源消耗清单,以及污染物排放清单。

表 1 某公路主要工程数量
Tab. 1 Major projects list of a highway

序号	材料类别	总数量
1	水泥/t	114 890. 19
2	钢材/kg	22 780 899
3	沥青/t	5 360. 169
4	汽油/L	28 469. 41
5	柴油/L	105 632 206
6	电/(kW · h)	20 723 932
7	水/m ³	633 517. 729

2.3 环境影响评价

环境影响分析包括 3 个步骤:分类和特征化、标准化、权重计算。

2.3.1 分类和特征化

分类是把清单分析结果划分到评价目的所涉及的人体健康、生态系统及资源能源 3 类损伤类型中。分类方法见表 2。

表 2 环境影响物质分类
Tab. 2 Classification of impact substances on environment

损伤类型	影响种类	物质
人类健康	气候变化	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
	有机物对呼吸系统的损伤	VOC、CH ₄
	无机物对呼吸系统的损伤	PM10、CO、NO _x 、SO _x
生态环境	酸化和富营养化	NO _x 、SO _x
资源能源	矿石资源	石灰石、铁矿石、 锰矿石
	化石燃料	标煤、石油

特征化是对清单分析结果进行统一的单位换算,这一过程主要采用特征化因子,见表 3~表 5。

公路全生命周期对人类健康的损伤特征值 H_D (单位:yr,表示年) 为

$$H_D = \sum_i H_{D_i} = \sum_i \sum_j M_{ij} \lambda_{ij} \tag{1}$$

式中: M_{ij} 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质的量(kg); λ_{ij} 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质对人类健康的特征化损伤因子; H_{D_i} 为第 i 种影响种类对人类健康的损伤特征值。

公路全生命周期对生态系统的损伤特征值 E_D (单位:PDF) 为

$$E_D = \sum_i E_{D_i} = \sum_i \sum_j M_{ij} \epsilon_{ij} \tag{2}$$

式中: ϵ_{ij} 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质对生态系统的特征化损伤因子; E_{D_i} 为第 i 种影响种类对生态系统的损伤特征值。

公路全生命周期对资源能源的损伤特征值 R_D (单位:MJ) 为

$$R_D = \sum_i R_{D_i} = \sum_i \sum_j M_{ij} \eta_{ij} \tag{3}$$

式中: η_{ij} 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质对资源能源的特征化损伤因子; R_{D_i} 为第 i 种影响种类对资源能源的损伤特征值。

表 3 人类健康特征化损伤因子
Tab. 3 Characterization of damage factors on human health

影响种类	物质	特征化损伤因子/(DALY · kg ⁻¹)
气候变化	CO ₂	2. 10×10 ⁻⁷
	CH ₄	4. 40×10 ⁻⁶
	N ₂ O	6. 90×10 ⁻⁵
有机物对呼吸系统的损伤	VOC	6. 46×10 ⁻⁷
	CH ₄	5. 46×10 ⁻⁵
无机物对呼吸系统的损伤	PM10	1. 28×10 ⁻⁸
	CO	3. 75×10 ⁻⁴
	NO _x	7. 31×10 ⁻⁷
	SO _x	8. 91×10 ⁻⁵

表 4 生态系统特征化损伤因子
Tab. 4 Characterization of damage factors on eco-system

影响种类	物质	特征化损伤因子/(PDF · m ² · yr) · kg ⁻¹)
酸化和富营养化	NO _x	5. 71×10
	SO _x	1. 04×10

表 5 资源能源特征化损伤因子

Tab. 5 Characterization of the damage factors on resources and energy		
影响种类	物质	特征化损伤因子/(MJ · kg ⁻¹)
矿石资源	石灰石	2. 04×10 ⁻²
	铁矿石	5. 10×10 ⁻²
化石燃料	锰矿石	3. 13×10 ⁻¹
	标煤	2. 04×10
	原油	3. 40×10

2.3.2 标准化

经过特征化计算,可以将清单分析结果转化为 3 类环境影响特征值。由于 3 类破坏影响类型代表的意义和单位均不一样,为了使它们可以进行横向比较且可使用一套统一量纲的权重值,就需要对其进行标准化。

公路全生命周期对人类健康的损伤标准值 H_{D_N} (单位:yr)可用式(4)计算

$$H_{D_N} = \sum_i H_{D_{Ni}} = \sum_i \sum_j H_{D_{ij}} / f_{ij} \tag{4}$$

式中: $H_{D_{ij}}$ 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质对人类健康的损伤特征值; f_{ij} 为第 i 种影响种类中第 j 种污染物质对人类健康的标准化系数; $H_{D_{Ni}}$ 为第 i 种影响种类对人类健康的损伤标准值。

公路全生命周期对生态系统的损伤标准值 E_{D_N} (单位:yr) 可用式(5) 计算

$$E_{D_N} = \sum_i E_{D_{Ni}} = \sum_i \sum_j E_{D_{ij}} / f_{ij} \tag{5}$$

式中: $E_{D_{ij}}$ 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对生态系统的损伤特征值; f_{ij} 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对生态系统的标准化系数; $E_{D_{Ni}}$ 为第*i* 种影响种类对生态系统的损伤标准值。

公路全生命周期对资源能源的损伤标准值 R_{D_N} (单位:yr) 可用式(6) 计算

$$R_{D_N} = \sum_i R_{D_{Ni}} = \sum_i \sum_j R_{D_{ij}} / f_{ij} \tag{6}$$

式中: $R_{D_{ij}}$ 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对生态系统的损伤特征值; f_{ij} 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对资源能源的标准化系数; $R_{D_{Ni}}$ 为第*i* 种影响种类对资源能源的损伤标准值。

2.3.3 权重计算

生态指标法则采用终点评价模型,用对 3 种损害类型的权重取代对影响类型的权重,从而得以简化。权重系数见表 6。

表 6 生态指标标准化及权重系数

Tab. 6 Standardization and weight coefficients of eco-indicators					
损伤类型	影响种类	物质	标准化系数单位	标准化系数	权重系数
人类健康	气候变化	CO ₂	(DALY • (capitia • yr) ⁻¹)	2.39×10 ⁻³	0.22
		CH ₄			
	有机物对呼吸系统的损伤	N ₂ O	(DALY • (capitia • yr) ⁻¹)	1.08×10 ⁻²	
		VOC			
		CH ₄			
		PM10			
	无机物对呼吸系统的损伤	CO	(DALY • (capitia • yr) ⁻¹)	6.84×10 ⁻⁵	
		NO _x			
		SO _x			
生态环境	酸化和富营养化	NO _x	(PDF • m ² • yr • (capitia • yr) ⁻¹)	3.75×10 ⁻²	0.23
		SO _x			
资源能源	矿石资源	石灰石	(MJ • (capitia • yr) ⁻¹)	1.50×10 ⁻²	0.55
		铁矿石			
		锰矿石			
	化石燃料	煤	(MJ • (capitia • yr) ⁻¹)	5.79×10 ⁻³	
		原油			

公路全生命周期对人类健康的损伤权重值 H_{D_w} (单位:yr) 可用式(7) 计算

$$H_{D_w} = \sum_i H_{D_{wi}} = \sum_i \sum_j H_{D_{Nij}} q_{ij} \tag{7}$$

式中: $H_{D_{Nij}}$ 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对人类健康的损伤标准值; q_{ij} 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对人类健康的权重系数; $H_{D_{wi}}$ 为第*i* 种

影响种类对人类健康的损伤权重值。

公路全生命周期对生态系统的损伤权重值 E_{D_w} (单位:yr) 可用式(8) 计算

$$E_{D_w} = \sum_i E_{D_{wi}} = \sum_i \sum_j E_{D_{Nij}} q_{ij} \tag{8}$$

式中: $E_{D_{Nij}}$ 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对生态系统的损伤标准值; q_{ij} 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对生态系统的权重系数; $E_{D_{wi}}$ 为第*i* 种影响种类对生态系统的损伤权重值。

公路全生命周期对资源能源的损伤标准值 R_{D_w} (单位:yr) 可用式(9) 计算

$$R_{D_w} = \sum_i R_{D_{wi}} = \sum_i \sum_j R_{D_{Nij}} q_{ij} \tag{9}$$

式中: $R_{D_{Nij}}$ 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对资源能源的损伤标准值; q_{ij} 为第*i* 种影响种类中第*j* 种污染物质对资源能源的权重系数; $R_{D_{wi}}$ 为第*i* 种影响种类对资源能源的损伤权重值。

经过对以上 3 类损害的量化、特征化、标准化及权重计算后,根据式(10) 得到产品在全生命周期的标准生态指数为

$$I_E = \sum D_i \tag{10}$$

式中: I_E 为全生命周期的标准生态指数 (capita · yr); D_i 为 3 类损害计算值。

2.4 结果分析

在生命周期清单分析及环境影响量化过程中,已采用生命周期阶段区分方法完成了对信息的组织工作,这有助于确定重大环境问题,形成结论和建议。在信息组织的基础上,将运用分析性技术进行后续的重大问题识别^[10]。

表 7 某公路生命周期各阶段的环境影响损伤特征值

Tab. 7 Impact damage eigenvalues of life cycle at various stages on a road		
项目	材料生产阶段的特征值	施工阶段的特征值
人类健康/DALY	2.90×10	3.32×10
百分比/%	89.73	10.27
生态环境/(PDF · m ² · yr)	2.53×10 ⁵	1.67×10 ⁵
百分比/%	60.26	39.74
资源能源/MJ	1.79×10 ⁷	4.84×10 ⁶
百分比/%	78.69	21.31

表 7、下页表 8 是基于 LCIA 结果的信息组织过程,它将生命周期各阶段与环境影响损伤计算结果进行对照列表,显示了生命周期各阶段不同的环境类型影响量化结果。通过对表中环境影响损伤结果的贡献进行分析,可确定具有最大贡献的生命周期阶段或环境影响类别,如下页图 4、图 5 所示。

表 8 某公路生命周期各阶段的环境影响损伤权重值

Tab. 8 Impact damage weight values of life cycle at various stages on a road

指标	材料生产阶段		施工阶段		生命周期	
	权重值/ (capita · yr)	百分 比/%	权重值/ (capita · yr)	百分 比/%	权重值/ (capita · yr)	百分 比/%
人类健康	8.44×10^2	20.62	1.34×10^2	19.24	9.78×10^2	20.42
生态环境	1.55×10^2	3.79	1.02×10^2	14.69	2.57×10^2	5.37
资源能源	3.09×10^3	75.59	4.60×10^2	66.07	3.55×10^3	74.20
总和	4.09×10^3		6.96×10^2		4.79×10^3	

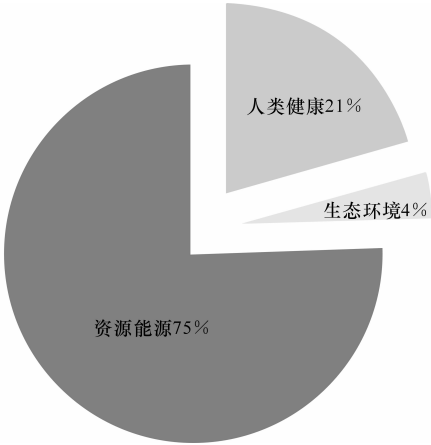


图 4 权重值对比(材料生产阶段)

ig. 4 Weight values comparison(at material production stage)

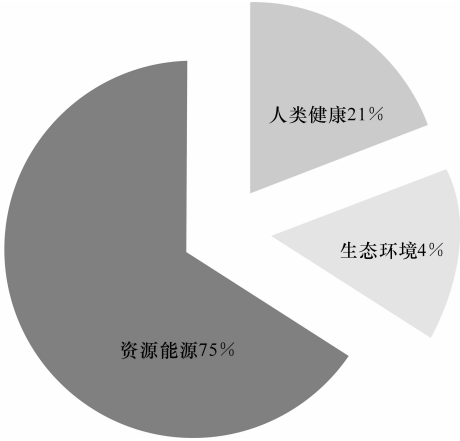


图 5 权重值对比(施工阶段)

Fig. 5 Weight values comparison(at construction stage)

表 7 表示了 1 功能单位某公路生命周期对人体健康的损伤,共折合人类残疾生命年为 32.4 年。其中材料生产阶段对人类健康损伤影响最大,折合人类残疾生命年为 29 年。

公路生命周期对生态环境的损伤值为 4.20×10^5 (PDF · m² · yr)。若假设公路使用年限为 15 年,

则表示 15 年内近 0.028 km² 上的物种完全消失。其中材料生产阶段对生态系统的损伤影响依然最大,比重约为 60%。公路主要通过排放 NO_x、SO_x 对环境产生酸化、富营养化影响,从而对环境生态系统造成损伤。由于材料生产阶段排放 NO_x 占全生命周期内的 50% 以上,导致其产生的酸化、富营养化影响对生态系统的损伤最严重。

生命周期内共造成附加能源为 2.27×10^7 MJ,即开采同等数量的资源,后代则需要额外付出 2.27×10^7 MJ 的努力。其中仍以材料生产阶段所占份额最大,为 79%。原因在于公路在材料生产阶段会消耗大量的化石燃料和矿石资源。

经过了标准化和权重计算后,可以对公路在生命周期内受人类健康、生态环境及资源能源 3 类破坏影响进行横向比较,如表 8、图 4、图 5 所示。其中,不论是材料生产阶段或是施工阶段,资源能源对环境的损伤贡献均为最大,约为 70%。其次是对人类健康的影响,约为 20%。

3 结 语

(1)1 功能单位公路生命周期折损人类残疾生命年为 32.4 年,对生态环境的损伤值为 4.20×10^5 (PDF · m² · yr),造成附加能源为 2.27×10^7 MJ。

(2)3 类破坏影响中公路对资源能源的影响最为严重,约为 70%,其次是对人类健康的影响占 20%,最后是对生态环境的破坏。

(3)由于中国在生命周期终点模型的研究尚处于起步阶段,故本文采用的环境损伤特征因子均取自荷兰数据,但是生命周期量化分析受地域性影响严重,为提高其准确率,应尽快建立具有中国地域性特征的终点模型数据库。

参考文献:

References:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2011 年公路水路交通运输行业发展统计公报[R]. 中华人民共和国交通运输部,2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistics bulletin of highway and waterway transportation indusry development in 2011[R]. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011. (in Chinese)

[2] 欧阳钦. 公路环境影响公众参与评价量化模型研究 [D]. 长沙:长沙理工大学,2011.

- [3] 张军. 基于生命周期理论的我国收费公路发展分析[J]. 交通科技, 2011(1): 87-89.
ZHANG Jun. Analysis on the development of toll road based on life cycle theory in China[J]. Transportation Science & Technology, 2011(1): 87-89. (in Chinese)
 - [4] Bilec M M. A hybrid life cycle assessment model for construction processes[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1998.
 - [5] Amponsah I. Emerging civil infrastructure and environmental sustainability: Life-cycle assessment and multi-objective optimization[D]. Los Angeles: University of South Carolina, 2008.
 - [6] GB/T 24040—2008, 环境管理生命周期评价原则与框架[S].
GB/T 24040—2008, Environmental management-life cycle assessment-principles and frameworks[S]. (in Chinese)
 - [7] 科诺·罗娜. 可持续发展实用工具与案例——环境影响评价[M]. 北京: 中国环境出版社, 2009.
 - [8] 庞博. 基于 LCA 的预应力钢筋混凝土连续刚构桥的环境影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
PANG Bo. Environmental impact assessment of prestressed concrete continuous rigidframe bridge based on LCA [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
 - [9] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(8): 149-154.
SHANG Chun-jing, ZHANG Zhi-hui, LI Xiao-dong. Research on energy consumption and emission of life cycle of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(8): 149-154. (in Chinese)
 - [10] GB/T 24042—2002, 环境管理 生命周期评价 生命周期影响评价[S].
GB/T 24042—2002, Environmental management-life cycle assessment-life cycle impact assessment[S]. (in Chinese)

(上接第 27 页)

 - [5] Murphy H W. Cement treated pavements: from the unpredictable to the dependable[C]//TRB. The 14th ARRB conference. Canberred: TRB, 1998: 140-147.
 - [6] 李燕, 范正金, 任瑞波. 基于半刚性层模量衰变路面疲劳寿命分析[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(6): 591-594.
LI Yan, FAN Zheng-jin, REN Rui-bo. Analysis of pavement fatigue life based on modulus decay about semi-rigid base[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(6): 591-594. (in Chinese)
 - [7] 孙荣山, 汪水银. 级配变化对水泥稳定碎石材料疲劳性能影响的研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6): 57-61.
SUN Rong-shan, WANG Shui-yin. Research on fatigue performance of the different gradation of cement stabilized crushed stone[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6): 57-61.
 - [8] Theyse H L, Beer M D, Rust F C. Overview of south african mechanistic pavement design method[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007 (1539): 6-17.
 - [9] AASHTO Provisional Standard, Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt(HMA) subject repeated flexural bending[S].
 - [10] 尚志远, 汪日灯. 高抗折强度路面混凝土疲劳性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(6): 44-46.
SHANG Zhi-yuan, WANG Ri-deng. Research on fatigue property of high bending strength pavement concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(6): 44-46. (in Chinese)