

Analysis and Comparison of Load Effect between China, America and Pakistan Highway Bridge Design Code

Jiangpeng Meng¹, Gang Wang², Xiao Tian²

¹CCCC First Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Overseas Branch of China Communications Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing

Email: 568425302@qq.com

Received: Dec. 3rd, 2019; accepted: Jan. 1st, 2020; published: Jan. 8th, 2020

Abstract

This paper takes the simply supported T-Beam Bridge in the Karakun Highway Phase-II Project in Pakistan as the object, and analyzes the design method of the load effect, the value of the vehicle load and its sub-coefficient and the combination of load effect of the road and bridge design specification in China, American as well as Pakistan. The load combination effect and the difference conclusion between the different load modes are obtained for reference in China's subsequent project construction in Pakistan.

Keywords

Highway Bridges of China, American and Pakistan, Load Effect, Comparison and Analysis

中美巴公路桥梁设计规范荷载效应分析比较

蒙江鹏¹, 王 钢², 田 晓²

¹中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安

²中交路桥建设有限公司海外分公司, 北京

Email: 568425302@qq.com

收稿日期: 2019年12月3日; 录用日期: 2020年1月1日; 发布日期: 2020年1月8日

摘 要

本文以巴基斯坦喀喇昆仑公路二期项目高速段简支T梁桥为研究对象, 通过对中美巴公路桥梁设计规范关于荷载效应的设计方法、汽车荷载及其分项系数取值、荷载效应组合等方面的比较分析, 得到不同规

范荷载模式下的荷载组合效应及其相互之间的差异结论，以供中国在巴基斯坦后续项目建设中参考。

关键词

中美巴公路桥梁，荷载效应，分析比较

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

美国是世界上头号发达的国家，其运输业是支撑国民经济的重要组成部分，随着我国经济实力与美国日渐缩小，所面临的桥梁规范问题出现了一定同质化现象，我国目前倡导的一带一路，对巴基斯坦有较大的影响，所以对三国的桥梁设计规范进行对比是非常有必要的。为保持我国市场经济持续繁荣，在混凝土桥梁安全问题上，各部门保持密切合作，在设计时对于西方发达国家的规范进行了一定借鉴，并最终得到符合国情的规范标准。当今世界内容最为可靠、结构最为明晰的当属美国公路 LRFD 桥规[1]，自 1999 年颁布后，对于我国混凝土桥梁设计规范的影响十分深远。

巴基斯坦喀喇昆仑公路(Karakoram Highway, 简称“KKH-II”)二期项目是“中巴经济走廊”的旗舰项目，是中巴经济走廊陆路通道的核心路段，同时是巴基斯坦南北公路通道主骨架的重要组成部分，采用中国进出口银行贷款进行建设。本项目位于巴基斯坦北部开伯尔省，总体路线为南北走向，起于赫韦利杨，止于塔科特，路线全长 118.143 公里。项目区域海拔范围 860 m~1880 m，路线主要沿赫韦利杨、阿巴塔巴德、曼塞赫拉城区及既有 N35 巴基斯坦国道西侧山体 and 沟谷布线，地形、地质条件复杂，桥隧比例高。

由于巴基斯坦本国公路项目长期采用美标为依据进行建设，本项目是第一次采用中国规范体系建设的高速公路。公路桥梁上部结构拟采用国标 C50 水泥混凝土，因此有必要对中美巴桥梁荷载效应进行对比分析，找出差别，并利用相关研究成果指导本项目的桥梁施工。在前期的合同谈判和设计审查过程中，为了让巴基斯坦国家公路局业主和巴基斯坦国家工程咨询公司(NESPAK)的工程师更深入的理解、认可中国规范体系，推进中国标准在“中巴经济走廊”项目应用，我们设计团队对中美巴重要规范做了大量对比研究和验算工作，为推进项目建设和中国规范在巴基斯坦推广应用起到重要作用。本文是将中美巴桥梁荷载效应部分的对比分析成果进行整理，以供中国在巴基斯坦后续项目建设中参考。

2. 技术标准及方法

2.1. 设计标准

本次研究范围为赫韦利杨 - 曼塞赫拉段约 39.3 公里的高速公路，采用设计速度 100 km/h 的双向 4 车道高速公路标准建设，路基宽度 24.7 m。

本项目桥梁设计采用以中国现行规范体系为基准，同时满足美标 HL-93 汽车荷载和巴基斯坦 AA 活荷载进行设计。

2.2. 设计方法比较分析

中国规范[2][3]设计方法采用以概率论为基础，分项系数表达的极限状态设计方法设计。

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1)$$

式中： γ_0 为桥梁结构的重要性系数，按公路桥涵的设计安全等级，一级、二级、三级分别取用 1.1、1.0 和 0.9； S 为作用(或荷载)效应(其中汽车荷载应计入冲击系数)的组合设计值； R 为构件承载力设计值。

美国标准[1]关于桥梁结构设计总体上是以可靠度理论为基础，采用荷载—抗力系数设计法(Load and Resistance Factor and Design Method)

$$W_u \leq \Phi R_n \quad (2)$$

式中： W_u 为荷载效应组合设计值； R_n 为结构抗力标准值，由材料强度标准值计算确定； Φ 为结构抗力折减系数，如表 1 所示。

Table 1. Structural resistance reduction coefficient

表 1. 结构抗力折减系数

纯弯	轴拉、弯拉	轴压、压弯		剪扭
		配置螺旋箍筋	其他箍筋	
0.9	0.9	0.75	0.7	0.85

巴基斯坦工程设计中除设计荷载普遍采用 1697《西巴基斯坦公路桥梁实践规范》[4]外，其余设计方法和参数选用均采用美标规定。

式(1)不等式左 $1/\gamma_0$ 相当于式(2)不等式右的 Φ ，由表 1 知，当设计安全等级为一级时， $1/\gamma_0$ 与表 1 值相比接近美标钢筋混凝土纯弯、轴拉、弯拉构件的折减系数，但比美标轴压、弯压和剪扭构件的折减系数都要大。

3. 设计梁体类型的选取

本项目整体式路基对应的桥梁宽度为 24.7 m，即为 $2 \times [(0.5 \text{ m 护栏} + 11.45 \text{ m 行车道} + 0.35 \text{ m 护栏}) + 0.04 \text{ m}]$ ，分两幅布置。上部结构采用标准跨径 25 m、30 m 和 40 m 的装配式预应力混凝土简支 T 梁三种类型，单幅桥上部结构由 6 片 T 梁组成，梁间距 2.068 m，湿接缝宽 0.368 m。具体参数见表 2。

Table 2. Calculation model beam body parameters (middle beam)

表 2. 计算模型梁体参数表(中梁)

跨径 L (m)	计算跨径 L_0 (m)	梁板高度 H (m)	截面面积 A (m^2)	截面惯性矩 I (m^4)
25	24.0	1.70	0.7769	0.2692
30	28.9	2.00	0.8429	0.4175
40	38.8	2.50	1.0909	0.9257

4. 设计荷载比较分析

4.1. 恒载

一期恒载包括上部梁体自重；二期恒载包括桥面铺装和护栏等重量。混凝土容重取 26 kN/m^3 。计算梁体(以中梁作为研究对象)跨中和支点截面最大弯矩和剪力设计值见表 3。

4.2. 汽车活荷载

4.2.1. 中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015) [2]中关于汽车荷载规定

2015 年《通规》将汽车荷载分为公路-I 级和公路-II 级两个等级。汽车荷载由车道荷载和车辆荷载组

成。车道荷载由均布荷载和集中荷载组成，用于桥梁整体结构分析计算(如图 1 所示)。

Table 3. Design value of dead load of calculation model beam (middle beam)

表 3. 计算模型梁体(中梁)恒载设计值

跨径 L(m)	跨中截面最大弯矩 $M_{G1/2max}$ (kN·m)	支点截面最大剪力 V_{G0max} (kN)
25	2846.1	474.4
30	4700.4	650.6
40	10350.2	1067.0

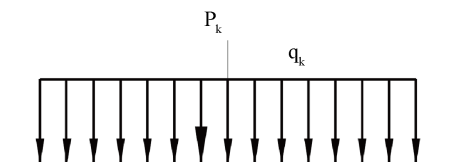


Figure 1. Calculation scheme of lane load in China
图 1. 中国车道荷载计算图式

公路-I 级车道荷载的均布荷载标准值为 $q_k = 10.5$ kN/m。集中荷载标准值 P_k 按下列规定选取：

桥梁计算跨径 $L_0 \leq 5$ m 时， $P_k = 270$ kN；桥梁计算跨径 $L_0 \geq 50$ m 时， $P_k = 360$ kN；桥梁计算跨径 5 m $< L_0 < 50$ m， P_k 值采用直线内插求得。

计算剪力效应时，集中荷载的标准值应乘以 1.2 的系数。

4.2.2. 美国《AASHTO LRFD 规范》[1]中关于汽车荷载规定

AASHTO LRFD (2012)规定公路汽车荷载为 HL-93，并应包括以下两项荷载的组合：① 设计货车或设计双轴；② 设计车道荷载。活载效应取双轴荷载 + 车道荷载或 1 辆货车+车道荷载两者中的不利者。

设计货车的前轴重 35 kN，两后轴重为 145 kN，两个 145 kN 的轴距在 4.3~9.0 m 之间变化，横向轮距 1.8 m；设计双轴包括一对 110 kN 的轴重，轴距 1.2 m，横向轮距 1.8 m (如图 2 所示)。考虑动荷载增计值 IM (冲击系数)影响，对静荷载施加的系数取为(1 + IM/100)。

设计车道荷载由 1 个车道上为 9.3 kN/m 的纵向均布荷载组成，在横桥向假定设计车道荷载均布 3 m 的宽度上，不计动荷载增计值(冲击系数)影响。设计车道数取 W/3.6 之比的整数(W 为护栏之间的桥面净跨)。

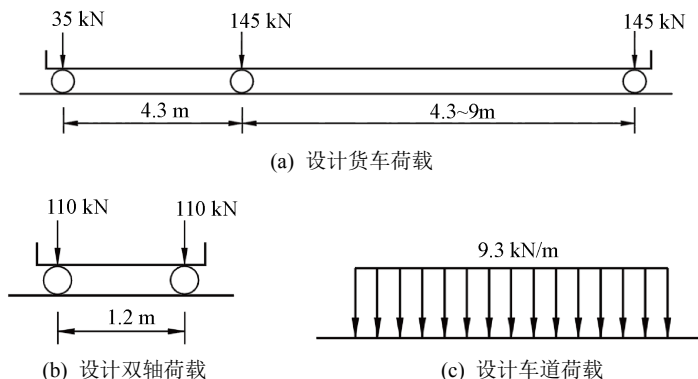


Figure 2. Load calculation diagram of American standard vehicle
图 2. 美标汽车荷载计算图式

4.2.3. 巴基斯坦汽车荷载规定

1997《西巴基斯坦公路桥梁实践规范》[4]规定巴基斯坦公路桥梁汽车荷载包括两个等级, 车辆荷载 A 和军事坦克荷载 AA。本项目根据业主要求, 设计只采用军事坦克荷载进行验算(如图 3 所示), 作用方式为履带荷载, 设计履带轴重为 700 kN, 两辆连续坦克之间的车头到车尾的距离不小于 91.5 m。军事坦克通行时需要进行交通管制, 不允许其他车辆通行, 且桥梁横向只允许一列坦克通行。

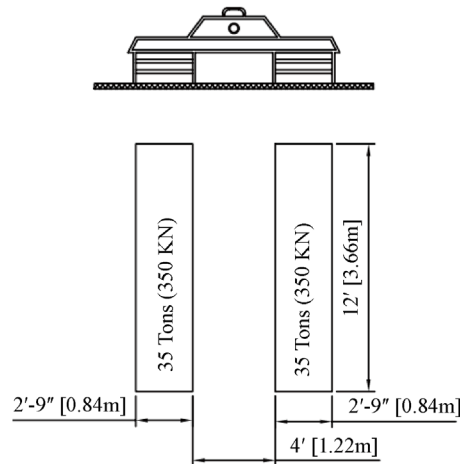


Figure 3. Pakistan military tank load
图 3. 巴基斯坦军事坦克荷载

4.3. 荷载横向分布系数的计算

本次研究计算模型选取的是横向由多片梁板组成的桥梁, 应考虑汽车荷载横向分布的影响。T 梁弯矩横向分布影响线采用刚接梁法; 剪力横向分布影响线, 主梁支点处按杠杆原理法计算; L/4 至支点处采用刚接梁法计算。由于三种规范所选梁体相同, 因此, 所计算的横向分布系数形同, 计算结果见表 4。

Table 4. Calculation model load transverse distribution coefficient
表 4. 计算模型荷载横向分布系数

跨径 L(m)	跨中截面荷载横向分布系数 m_c	支点截面荷载横向分布系数 m_0
25	0.606	0.750
30	0.603	0.750
40	0.587	0.750

4.4. 多车道横向折减系数比较分析

由表 5 知, 三种规范对于 2 车道的车道横向折减系数均为 1.0, 即不考虑车道折减, 故本次研究计算选取 2 车道进行加载。

4.5. 冲击系数的比较分析

2015 年《通规》是通过对国内外规范冲击系数的对比分析, 结合公路桥梁可靠度研究的成果, 采用了与桥梁结构基频相关的冲击系数[5] [6]。

根据本文 4.2.2, 美标对设计货车和设计双轴荷载考虑动荷载增计值 IM (冲击系数)影响, 设计 IM 取值为 33%, 对静荷载施加的系数取为 $(1 + IM/100)$, 即冲击系数为 1.33。

巴基斯坦坦克荷载的冲击系数取值为：当 $L < 9$ m 时， $\mu = 0.25$ ，当 $9 \text{ m} < L < 45.5$ m 时， $\mu = 0.1$ ， $L > 45.5$ m 时， $\mu = 0.088$ ， L 为桥梁计算跨径，冲击系数计算值如表 6 所示。

Table 5. Value of lane lateral reduction coefficient m

表 5. 车道横向折减系数 m 的取值

车道数	车道横向折减系数 m 的取值		
	中国 15 规范	AASHTO LRFD	巴 AA 荷载
1	1.20	1.20	1.00
2	1.00	1.00	1.00
3	0.78	0.85	—
4	0.67	0.65	—

Table 6. Calculation model load impact coefficient μ

表 6. 计算模型荷载冲击系数 μ

跨径 L (m)	荷载冲击系数 $(1 + \mu)$ 的取值		
	中国 15 规范	AASHTO LRFD	巴 AA 荷载
25	1.295	1.33	1.1
30	1.260	1.33	1.1
40	1.204	1.33	1.1

4.6. 车辆荷载的计算比较

采用 MIDAS/Civil 设计软件建立计算模型，中国和美标汽车荷载纵向整体受力计算采用平面杆系有限元模型，将横向简化为一片梁，采用荷载横向分布系数考虑模型的空间效应；巴基斯坦的坦克荷载纵向整体受力采用空间梁格模型考虑空间效应进行计算。

以横向分布最不利的单梁作为跨中弯矩和支点剪力的研究对象，将汽车荷载按照各规范的加载要求以最不利的方式作用在计算模型的桥梁上，得到各规范在不同跨径梁体上的汽车荷载效应值，计算结果如表 7 所示(考虑了荷载横向分布系数和冲击系数值)。

Table 7. Calculation model beam (middle beam) vehicle load design value

表 7. 计算模型梁体(中梁)汽车荷载设计值

跨径 L (m)	跨中最大汽车荷载弯矩 $M_{HA1/2}$ (kN·m)/支点最大汽车荷载剪力 V_{HA0} (kN)		
	中国 15 规范	AASHTO LRFD	巴 AA 荷载
25	2043.5/457.9	1416.5/281.6	833.2/287.1
30	2577.4/475.7	1807.7/296.1	998.4/298.5
40	3710.9/509.8	2614.8/322.1	1304.8/302.6

5. 荷载效应组合计算比较

5.1. 荷载效应组合公式及分项系数

根据本文 2.2 关于乘有系数的荷载计算方法，中国规范强度极限状态下的荷载效应组合设计值为 $S_{ud} = 1.1 (1.2S_G + 1.4S_{HA})$ ；美标和巴基斯坦荷载效应组合设计值为： $S_{ud} = 1/\Phi W_u = 1/0.9 (1.25S_G + 1.75S_{HA})$ 。

5.2. 荷载效应组合

依据各国规范关于荷载效应的计算公式,分别计算跨中最大弯矩和支点最大剪力的效应组合设计值,并进行对比分析。

由表 8 和表 9 的计算结果可以看出,中国在 2014 年公路工程技术对车道集中荷载下限值由 180 kN 提高到 270 kN 以后,使得中国荷载标准在荷载效应上与美标相适应。随着跨径的增大,荷载效应中国 15 规范与美标,中国 15 规范与巴 AA 荷载比值均在减小。除 40 m 跨径跨中最大弯矩效应组合设计值比值小于 1 外,其余中国 15 规范均大于美标和巴基斯坦 AA 荷载。

由此得出,本项目采用中国标准体系设计的装配式预应力混凝土简支 T 梁完全适应美标和巴基斯坦坦克 AA 荷载下的荷载效应要求。

Table 8. Comparison of the combined design values of the maximum moment effect in the mid span between China, America and Pakistan

表 8. 中美巴跨中最大弯矩效应组合设计值比较表

跨径 L(m)	跨中最大弯矩效应组合设计值 M_{ud} (kN·m)			$M_{中}/M_{美}$	$M_{中}/M_{巴}$
	中国 15 规范	AASHTO LRFD	巴 AA 荷载		
25	6903.9	6707.2	5573.1	1.03	1.24
30	10173.7	10043.4	8469.6	1.01	1.20
40	19377.0	19512.1	16912.4	0.99	1.15

Table 9. Comparison of combined design values of maximum shear effect at fulcrum between China, America and Pakistan

表 9. 中美巴支点最大剪力效应组合设计值比较表

跨径 L(m)	跨中最大弯矩效应组合设计值 V_{ud} (kN·m)			$V_{中}/V_{美}$	$V_{中}/V_{巴}$
	中国 15 规范	AASHTO LRFD	巴 AA 荷载		
25	1331.3	1206.4	1217.1	1.10	1.09
30	1591.3	1479.4	1484.0	1.08	1.07
40	2193.5	2108.2	2070.3	1.04	1.06

6. 结论与建议

本文以巴基斯坦喀喇昆仑公路二期项目高速段简支 T 梁桥为研究对象,通过对中美巴公路桥梁设计规范关于荷载效应的设计方法、汽车荷载及其分项系数取值、荷载效应组合等方面的比较分析,得到如下结论:

- 1) 桥梁恒载效应差异小,分项系数三国几近相同,中国规范取值 1.2,美标、巴规范取值 1.25。
- 2) 中美公路桥梁规范所规定的汽车荷载在取值方法、计算图式上比较接近,但从计算模式的选择上,中国规范还相对简单,容易掌握和运用。
- 3) 三国汽车荷载作用下的荷载效应值差异较大,就汽车荷载标准值而言,中国 15 规范弯矩是美标的 1.4 倍左右,剪力是美标的 1.6 倍左右。由此可见,中国 15 规范所采用的汽车荷载在标准简支跨径桥梁结构上引起的标准值效应处于世界先进水平。
- 4) 由于中国汽车荷载分项系数采用 1.4,美标和巴基斯坦采用 1.75 及结构抗力系数调整,使得中国 2015 规范荷载效应美标和巴基斯坦坦克 AA 荷载下的荷载效应基本一致。

由于我国公路建设的飞速发展、公路勘察设计规范不断地吸收了国内外前沿的设计理论、施工经验

和事故教训，桥涵设计荷载已经和欧美国家相当。为了使中国规范随着“一带一路”项目走出去，采用中国规范体系建设，应从高层设计，组织国内专家对“一带一路”项目国家进行技术宣讲，让海外国家公路建设的高层管理、设计审查工程师深入学习、理解中国规范体系，让“中国标准、中国方案”为更多的“一带一路”相关国家工程建设提供专业服务，打响中国工程设计咨询服务的品牌。

参考文献

- [1] AASHTO (2012) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- [2] 中交公路规划设计院. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [3] 中交公路规划设计院. JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [4] General Specification (1967) West Pankistan Highway Bridge Code.
- [5] 张喜刚. 公路桥梁汽车荷载标准研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] 张磊, 金菊, 宋娃丽. 中美规范公路混凝土桥梁设计的分析与比较[J]. 河北工业大学学报, 2011, 41(1): 99-102.