

超载作用下中美规范响应分析

闵亚芝, 孙华强, 赵吉

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064)

摘要:当代中国交通现状中,汽车超载已经成为引起交通事故和结构安全受损的重要因素之一。针对这一现象,以一座典型的 6×70 m 预应力混凝土连续梁桥为工程背景,利用监控得到的重载车辆数据作为超限荷载建立有限元模型,通过分析和比较桥梁在中国新旧桥梁规范及美国 AASHTO 规范的设计荷载和超限荷载下的最大挠度、内力和应力,讨论超载对桥梁的危害。结果表明美国规范在设计可靠性方面更加保守,具有更高的抗拉能力和抗剪能力,对我国规范改进及桥梁设计具有较大的参考价值。

关键词:桥梁工程;汽车超载;预应力混凝土连续梁;设计车辆荷载;中美规范对比

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

随着经济的高速增长,中国的桥梁建设也同样在高速发展,但是同时也出现各种频发的桥梁事故,其中汽车超载是导致桥梁事故的主要原因^[1-3]。例如:2011 年 7 月 11 日至 7 月 20 日,全国共发生 4 起桥梁坍塌事故,车辆超载是引发事故的主要原因^[4]。2012 年 8 月 24 日,哈尔滨阳明滩大桥疏解工程三环路高架桥洪湖路上桥匝道处,有 4 辆重载货车同时集中靠右侧行驶,造成匝道钢混连续叠合梁一侧偏载受力严重超载荷,导致匝道倾覆。2013 年 2 月 13 日,宁夏吴忠桥梁被超载车辆压垮。

鉴于此,本文以一座典型的 6×70 m 预应力混凝土连续梁桥为工程背景,利用相关部门健康监视记录的重载车辆数据作为实际荷载。结合中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60 - 2004)(以下简称 JTG - 04 规范)、中国《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021 - 89)(以下简称之中国 JTJ - 89 规范)、美国 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(以下简称 AASHTO 规范),采用有限元计算软件 Midas Civil V8.05 建立数值模型,通过分

析和比较桥梁在设计荷载和超限荷载下的最大挠度、弯矩、剪应力和拉应力,探究超载对预应力混凝土桥梁的危害。

1 公路桥梁车辆荷载

1.1 设计车辆荷载

我国现行规范(JTG - 04 规范)采用公路 - I 级和公路 - II 级,分为车道荷载和车辆荷载两类。车道荷载由 $q_k = 10.5$ kN/m 的均布荷载和集中荷载组成,集中荷载取值应遵循:桥梁计算跨径小于或等于 5 m 时,桥梁计算跨径等于或者大于 50 m 时, $p_k = 360$ kN;桥梁计算跨径在 5 ~ 50 m 之间时, p_k 值采用直线内插求得。公路 - II 级车道荷载的均布荷载标准值和集中荷载标准值按公路 - I 级车道荷载的 0.75 倍采用^[5]。

本文采用如图 1 和表 1 的分布方式和车辆标准值。

中国旧规范(JTJ - 89 规范)将汽车荷载以车队方式表示,分为汽车 - 10 级、汽车 - 15 级、汽车 - 20 级、汽车 - 超 20 级^[6],本文参照原桥设计标准主要采用汽车 - 超 20 级,挂车 120 级(图 2)进行模拟,车队形式为轴重 70 t 和 130 t 的双轴车四辆,中间布置 30 t + 120 t + 120 t + 140 t +

收稿日期:2014-12-01

基金项目:第 55 批中国博士后基金项目(2014M552395)

作者简介:闵亚芝(1991-),女,陕西西安人,主要从事桥梁抗风、超载方面的研究,(E-mail)215618216@qq.com

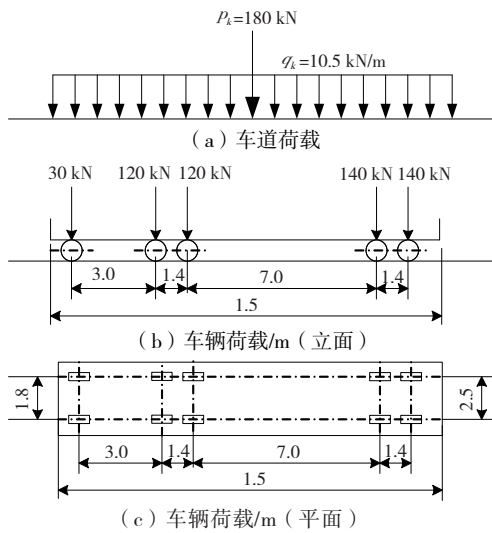


图 1 JTG-04 规范采用的桥梁布载方式

表 1 JTG-04 规范车辆荷载的主要技术指标

项 目	单 位	技 术 指 标	项 目	单 位	技 术 指 标
车辆重力标准值	kN	550	轮 距	m	1.8
前轴重力标准值	kN	30	前轮着地宽度及长度	m	0.3×0.2
中轴重力标准值	kN	2×120	中、后轮着地宽度及长度	m	0.6×0.2
后轴重力标准值	kN	2×140	车辆外形尺寸	m	15×2.5
轴 距	m	$3 + 1.4 + 7 + 1.4$			

140 t 的五轴车一辆,车间距分别为 15 m、10 m、10 m 和 15 m。挂车-120 级轴重为 300 t+300 t+300 t+300 t,轴间距为 1.2 m+4.0 m+1.2 m。当按照两行车队布载时,汽车荷载不予折减,当桥面行车道宽度在 9~12 m 之间(有硬路肩应包括硬路肩宽度)时,汽车荷载可折减 30%,但折减后不得小于用两行车队布载的计算结果。

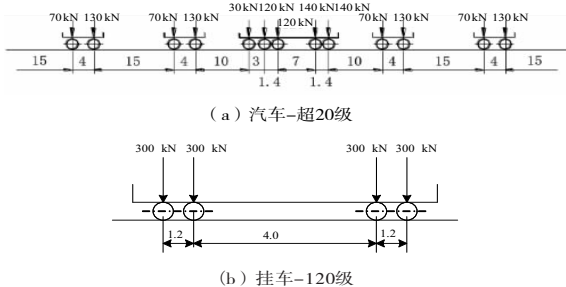


图 2 JTJ-89 规范采用的车辆布载方式

美国 AASHTO 规范将作用在桥面或附属结构上的汽车活载定名为 HL-93,包括两类组合:设计货车或设计双轴与设计车道荷载。设计货车的轴重和轴距以及轮距应依照图 3 取值,纵向布置中,包括一个 35 kN 轴以

及两个 145 kN 轴,其中 35 kN 轴与 145 kN 轴的轴距取 4.3 m,两个 145 kN 轴的轴距应在 4.3~9.0 m 之间变化,以便产生最大力效应。横向轮距取 1.8 m。设计货车的轴重和轴距以及轮距应按图 4 取值,包括一对 110 kN 轴,轴距 1.2 m。横向轮距取 1.8 m。设计车道荷载由 9.3 N/mm 的纵向均布荷载组成,如图 5 所示。在横向,应假定设计车道荷载均布在 3 m 宽度上。设计车道荷载产生的力效应不受动荷载增量值的影响^[7]。

1.2 实测超载车辆数据

实测超载车辆采用在河北宣大高速记录的数据,本文选取的典型超载车辆模型有三种,车辆构造和轴重分布如图 6 所示。

在本文的分析中,对于超限荷载,均视为施加于预应力混凝土箱梁中轴线上,不考虑超载引起的侧翻现象^[8]。采用表 2 中的桥梁健康观测记录数据中最常出现的 6 组超载车辆,按照表 2 所示方式分别按照行车道和超车道两车道布载方式组合进行布载。

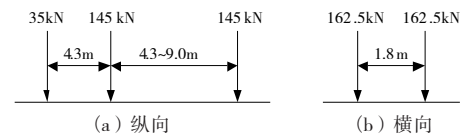


图 3 HL-93 设计货车布置图

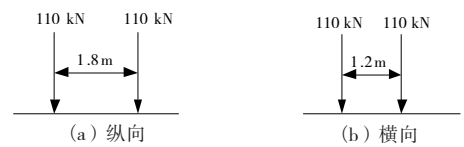


图 4 HL-93 设计双轴布置图

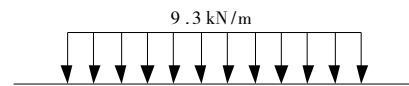


图 5 HL-93 设计车道荷载布置图

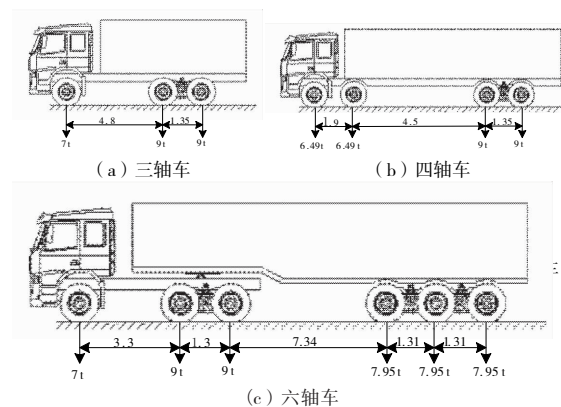


图 6 超载车辆示意图布置图(长度单位:m)

表2 车辆荷载的工况

工况	顺桥向车辆间距/m	车辆类型	行车位置	车重/t
工况一	0.0	六轴车	行车道	81.70
	0.0	三轴车	超车道	29.70
	61.3	四轴车	超车道	36.00
工况二	0.0	六轴车	行车道	99.20
	0.0	三轴车	超车道	19.40
	22.0	四轴车	超车道	25.40
工况三	98.3	四轴车	超车道	32.70
	0.0	六轴车	行车道	84.10
	21.6	四轴车	超车道	42.30
工况四	84.2	四轴车	超车道	44.20
	158.5	四轴车	超车道	41.70
	0.0	六轴车	行车道	82.90
工况五	50.0	六轴车	超车道	81.10
	0.0	六轴车	行车道	86.70
	44.0	四轴车	超车道	34.70
工况六	82.0	六轴车	超车道	87.30
	0.0	六轴车	行车道	108.20
	57.2	四轴车	超车道	43.50
	106.1	六轴车	超车道	106.40

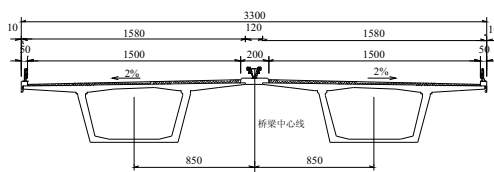


图8 连续梁桥梁截面图/cm

偏心引起的桥梁侧翻和扭转作用,不考虑支座的沉降。



图9 6×70 m 预应力混凝土箱梁迈达斯模型

考虑到中美规范的差异性,特将荷载组合方式分为三大类进行计算对比(表3)。

表3 荷载组合方式

组合	荷载组合状态	荷载组合
组合1	承载能力	1.20 (1.25)DD + 1.00(1.00)
	极限状态	PS + 1.40(1.75)M
组合2	正常使用极限	1.00(1.00)DD + 1.00(1.00)
	状态(短期)	PS + 0.70(1.00)M
组合3	正常使用极限	1.00(1.00)DD + 1.00(1.00)
	状态(长期)	PS + 0.40(1.30)M

注:(1)LC = 荷载组合;DD = 恒载;PS = 预应力荷载;M = 活载;
(2)中国规范荷载系数如上所示,括号中为美国 AASHTO 规范系数^[1-2]。

2 计算实例

超载对桥梁的危害主要可分为两大类:桥梁结构的极限承载力下降以及桥梁结构不能满足正常使用的要求。因此,本文主要结合 JTG - 04 规范、JTJ - 89 规范和 AASHTO 规范对桥梁结构在承载能力极限状态(短期效应)以及正常使用极限状态(长期效应)下的受力性能进行分析^[9]。

2.1 依托工程概况

本文采用的典型桥梁为 6 × 70 m 预应力钢筋混凝土连续梁。桥梁等级为双向六车道的高速公路,行车道宽度为 2 × 3 × 3.75 m,大桥整体宽 33 m,设计荷载为汽车 - 超 20 级,挂车 - 120 级(旧规范)。标准段主梁采用单箱单室截面,单幅桥主梁顶宽 15.8 m,底宽 6.25 m,主梁梁高 4.0 m,桥梁整体布置及标准横断面构造尺寸如图 7 和图 8 所示。主梁采用 C50 混凝土;箱梁内设置纵、横双向预应力体系,并采用美国 ASTM A416 - 97 (270 类)预应力钢绞线。

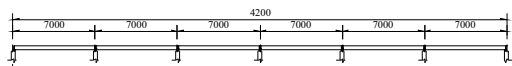


图7 连续梁桥整体布置图/cm

2.2 有限元模型

利用有限元分析软件 Midas civil V8.05,建立如图 9 所示的 6 × 70 m 预应力混凝土箱梁的数值模型,全桥划分单元共计 140 个,分别采用中美规范对比,三车道布载,其中超载工况下,车辆仅考虑中轴线布载,不考虑因

2.3 中国规范荷载组合

承载能力极限状态:这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形或变位的状态。《中国 JTG - 04 规范》规定按承载能力极限状态设计时,应根据各自的情况选用基本组合和偶然组合中的一种或两种作用效应组合,本文采用基本效应组合,具体表达式见表 3 的组合 1。

正常使用极限状态:这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项限值的状态。《中国 JTG - 04 规范》规定按正常使用极限状态设计时,应根据不同结构不同的设计要求,选用短期效应组合和长期效应组合中的一种或两种效应组合。

(1) 短期效应组合(正常使用极限状态 I)

作用短期效应组合是永久作用标准值效应与可变作用频遇值效应的组合,具体表达式见表 3 组合 2。

(2) 长期效应组合(正常使用极限状态 II)

作用长期效应组合是永久作用标准值效应与可变作用准永久值效应组合,具体表达式见表 3 组合 3。

2.4 美国规范荷载组合

美国 AASHTO 规范荷载组合和荷载分项系数种类较多,本文针对与本桥设计状态相近的几种组合进行计算。

强度极限状态 I :无风情况下车辆正常使用桥梁时的基本荷载组合。具体表达式见表 3 组合 1。

使用极限状态 I :所有荷载均取正常值的情况下,桥梁正常运营使用的荷载组合。具体表达式见表 3 组合 2。

使用极限状态 II :控制由车辆活载引起的有滑动危险的连接部的活动的荷载组合。具体表达式见表 3 组合 3。

2.3 有限元分析结果

经计算比较分析,荷载工况 6 为最不利荷载组合,故主要针对工况 6 进行数据比较分析,并选取最不利位置处进行分析,如图 10 ~ 图 13 所示(x 轴所示“JTG - 04”表示中国 JTG - 04 规范标准下的荷载作用效应,“JTJ - 89”表示中国 JTJ - 89 规范标准下的荷载作用效应,“JTG - OverLoad”表示中国规范移动荷载条件下的超载作用效应,“AASHTO”表示美国 AASHTO 规范标准下的荷载作用效应,“AAS - OverLoad”表示美国 AASHTO 规范移动荷载条件下的超载作用效应)。

折线图为超载工况影响的效应增加百分比,其计算公式:

$$y_{xy} = \frac{S_{cz} - S_{sj}}{S_{sj}} \times 100\%$$

其中: y_{xy} —— 超载效应百分比。

S_{cz} —— 超载效应值。

S_{sj} —— 设计效应值。

挠度效应最大点出现在模型的第 12 号节点处,即桥梁第一跨的跨中位置。参照图 10,经比较发现,超载作用下桥梁挠度受影响十分明显,中美移动荷载作用下的超载挠度分别达到 2.5 cm 和 3.94 cm, y_{xy} 在 JTG - 04 规范作用下,超出承载能力极限状态达 121.24%,但在 AASHTO 规范作用下并不明显约为 3.68%,由此可见,美国规范对于桥梁设计的挠度控制更加严格,使得超载作用下的桥梁安全储备较大,而由我国的桥梁设计规范设计出的桥梁对于超载的挠度作用相对敏感,易受过大的挠度影响从而导致桥梁发生变形继而开裂破坏。

弯矩效应最大值出现在模型的第 137 号节点处,即靠近桥梁最末支点位置。主要原因在于最末支点不存在负弯矩,故而是正弯矩极值点,同理,该位置的应力也应是极值点。如图 11 所示,针对中国桥梁规范,超载造成的弯矩影响并不明显,仅在承载能力极限状态下相对略有影响,弯矩增量约为 1.23;但是对于 AASHTO 规范,超载效应产生了 -9.11% 的负弯矩增量,由此可见我国规范对于超载作用下的弯矩影响控制更为保守,同时由

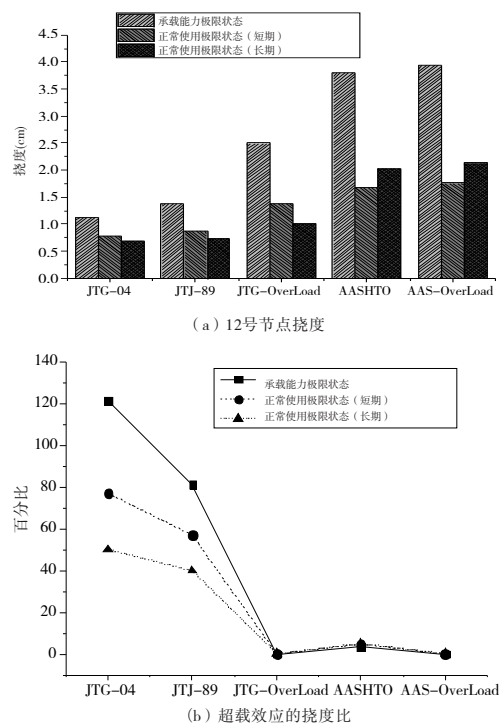


图 10 最不利荷载作用下的挠度效应比较

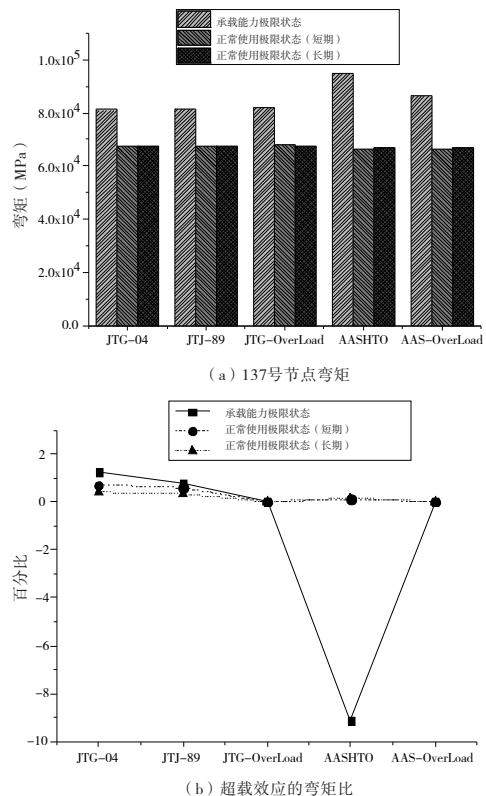
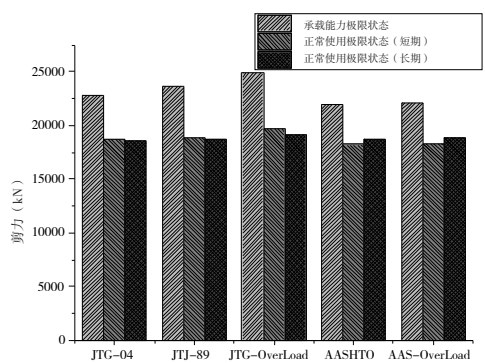


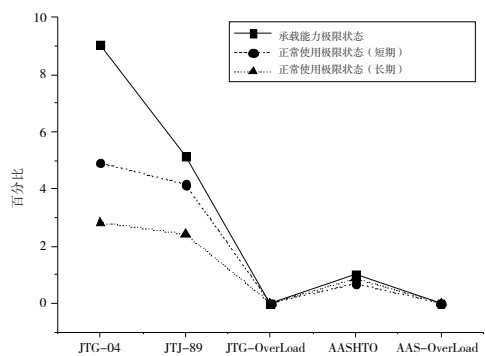
图 11 最不利荷载作用下的弯矩效应比较

于超载作用产生的弯矩效应对符合我国规范的桥梁破坏作用相对较小。

剪力效应如图 12 所示,我国 JTG - 04 规范对超载作用下的剪力比较敏感,承载能力极限状态下最大增量



(a) 137号节点剪力



(b) 超载效应的剪力比

图 12 最不利荷载作用下的剪力效应比较

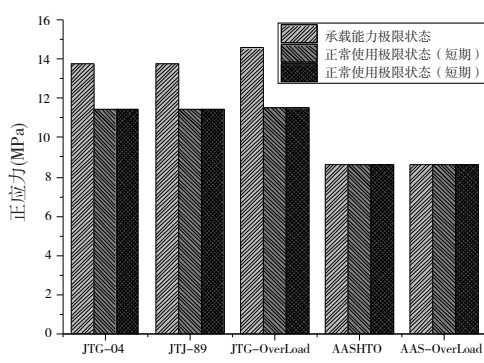
为 9.05%, 而 AASHTO 规范仅为 1%, 故 AASHTO 规范对超载作用下的影响更小, 相对更安全。

正应力效应如图 13 所示, 正应力的比较结果与剪力类似, 即 AASHTO 规范对于超载作用的影响相对更小, 相对而言更安全, 其数值增量为 0, 但承载力极限状态下 JTG-04 规范增量约为 5.66%, 中国 JTJ-89 规范增量约为 5.61%, 均高于美国规范。

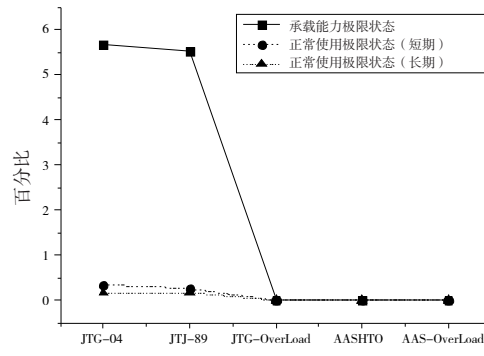
4 结论

本文根据实测超载车辆建立荷载工况, 对我国新旧规范和 AASHTO 规范的安全储备进行分析。通过以一座 6 × 70 m 预应力钢筋混凝土连续梁为背景, 主要考虑恒载和车辆荷载, 对桥梁在承载力极限状态, 正常使用极限状态(短期)和正常使用极限状态(长期)下的位移, 内力和应力进行安全校核, 得到以下结论:

(1) 对于本文计算的连续梁桥, 依照 AASHTO 规范计算所得超载效应增量中荷载挠度值、剪力值、拉力值均小于中国规范, 中国 JTG-04 规范数值略高于中国 JTJ-89 规范, 故而可知美国规范在设计可靠性方面更加保守, 相对而言具有更高的抗拉能力和抗剪能力, 中国 JTG-04 规范在抵抗超载效应方面对于桥梁承载力方面相较于中国 JTJ-89 规范并未有明显提高, 安全储备相对不足。



(a) 137号节点正应力



(b) 超载作用下的正应力比

图 13 最不利荷载作用下的正应力比较

(2) 对比弯矩、剪应力和正应力可知, 对于本文计算的连续梁桥, 超载对于结构因挠度变形而引起的开裂破坏最为明显, 对于增加弯矩导致的破坏并不明显。AASHTO 规范对于抗超载破坏的能力较为理想, 对我国日后的重载交通发展具有十分明朗的指导借鉴意义。鉴于超载对于预应力桥梁结构的影响非常显著, 尤其是挠度的增加, 极易导致桥梁结构预应力的损失、钢筋松弛, 影响结构的正常使用和耐久性。在进行数值模拟时发现对于 6 × 70 m 钢筋混凝土连续梁, 超载效应对于挠度的增加效果十分显著, 承载力极限状态增幅最高可达 121.24%, 故在逐步修正规范趋于合理的同时, 必须严格控制超载现象, 以保证桥梁结构的安全。

(3) 桥梁其他位置, 经计算结果统计分析可知, 各节点均有增量变化, 但是各增量比值接近或等于该种效应的最大值处的增量比, 故作用效应可以类比于效应极值点。

伴随经济的快速发展, 交通事业的进步也是日新月异, 我们要借鉴发达国家经验, 逐步修正自身局限, 从而推动交通运输业健康有序发展, 从而将我国的规范建设推向一个更高的层次。

参考文献:

[1] 周正祥, 王悦明. 公路车辆超载超限的现状、成因及

- 对策[J].华东公路,2006(1):84-89.
- [2] 杨国兴.桥梁垮塌引发的反思[J].黑龙江水利科技,2012(8):241.
- [3] 黄进军.公路桥梁规范汽车荷载效应比较研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [4] 郭毅,张冲.哈尔滨阳明滩大桥塌桥背后[N].法制日报,2012-08-25.
- [5] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范[S].
- [6] JTJ 021-1989,公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] AASHTO,AASHTO LRFD Bridge Design Specifications,4th ed.AASHTO[S].
- [8] 王海峰.连续箱梁桥抗倾覆稳定性分析[J].北方交通,2013(2):53-56.
- [9] 鲁玉忠,于剑丽,宋银平.中美公路桥梁设计规范对比研究[J].桥梁,2013(5):79-83.

Specification Response Analyse of China and the United States Under Overload

MIN Yazhi, SUN Huaqiang, ZHAO Ji

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In existing traffic situation in china, the vehicle overload has become one of the most important factors for traffic accidents and structural safety damage. Aiming at this phenomenon, a typical $6 \times 70\text{m}$ prestressed concrete continuous beam bridge is took as the engineering background. The data of overloaded vehicle from real-monitoring is used as excessive load to build the finite element model of the bridge. By analyzing and comparing the maximum deflection, internal force and stress under the designed load and excessive load specified in the old and new Chinese codes and the AASHTO code, the impact of overload on the bridge is discussed. The results show that the AASHTO code is more conservative in reliability design, and has higher tensile and shear ability, it has great reference value for specification improvement and bridge design in our country.

Key words: bridge engineering; truck overload; prestressed concrete continuous bridge; design vehicle load; specification comparison of China and the United States