

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.035

钢桁腹 - 混凝土组合箱梁偏载系数取值 影响因素分析

于小芹, 杨霞林

(兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以南京江山车行天桥为研究背景,为探究钢桁腹 - 混凝土组合箱梁的偏载系数的影响因素,利用有限元软件 ANSYS 对其腹杆壁厚、悬翼比、高跨比和宽跨比等参数与应力增大系数和位移增大系数进行相关性分析,将有限元分析结果与经验系数值及修正的偏压法计算出的偏载系数值进行比较分析。结果表明:腹杆壁厚、悬翼比、高跨比和宽跨比的变化对两个增大系数的影响不尽相同,宽跨比对钢桁腹 - 混凝土组合结构的偏载系数影响最大,其次是高跨比和腹杆壁厚,悬翼比的影响几乎可以忽略不计;经验系数法对钢桁腹 - 混凝土组合箱梁并不完全适用,位移增大系数比应力增大系数更加接近于经验系数值;在钢桁腹 - 混凝土组合箱梁宽度不是太大的前提下,位移增大系数与修正的偏心压力法计算出的偏载系数值更为接近。

关键词: 钢桁腹 - 混凝土组合箱梁; 偏载系数; 增大系数

中图分类号: U443.35

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)05-0203-06

Analysis of Relative Parameters of Eccentric Load Coefficient of Steel Truss - Concrete Composite Box Girder

YU Xiaoqin, YANG Xialin

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the research background of Nanjing Jiangshan motorway flyover, the influence factors of eccentric load coefficient of steel truss web - concrete composite box girder is explored. The correlation between the thickness of steel pipe wall, wide wing ratio, height-span ratio and width-span ratio of steel truss web - concrete composite box girder and the stress increase coefficient and displacement increase coefficient is analyzed by using the finite element software ANSYS. The finite element analysis results are compared with the empirical coefficient values and the bias load coefficients calculated by the modified bias method. The results show that the thickness of steel pipe wall, the ratio of wide wing, the ratio of height to span and the ratio of width to span have different effects on the two increasing coefficients. The ratio of width to span has the greatest effect on the eccentric load coefficient of steel truss web - concrete composite box girder, and the second is the ratio of height to span and the thickness of steel pipe wall. The effect of wide wing ratio can be ignored. The empirical coefficient method is not fully suitable for steel truss web - concrete composite box girder, and the displacement increase coefficient is closer to the empirical coefficient than the stress increase coefficient. On the premise that the width of steel truss web - concrete composite box girder is not too large, the displacement increase coefficient is closer to the bias load coefficient calculated by the modified eccentric pressure method.

Keywords: steel truss web - concrete composite box girder; eccentric load coefficient; increasing coefficient

作为新兴的钢-混组合结构,钢桁腹-混凝土组合箱梁中的钢桁腹杆取代了普通混凝土箱梁中的混凝土腹板。该组合箱梁由混凝土顶底板和连接顶底板的钢桁腹杆构成,外加体内、外预应力钢束,使钢与混凝土完美结合,高效率工作^[1]。其基本构造如图 1 所示。

钢桁腹-混凝土组合箱梁桥自重小、受力简单、外观优美、通风性能好等优点均优于其他箱梁。钢桁腹杆便于采用工厂化大批量生产,而且该组合箱梁应用了体外预应力等新技术,便于张拉、检测、维护和更换。因此,在中等跨径与大跨径桥梁中,该结构的竞争优势颇为良好^[2]。

国外对该组合结构的研究主要集中于节点与全桥承载能力两个方面,主要方法是先对节点或整体结构的受力性能进行实验研究,再通过有限元的数值模拟对试验数据进行验证^[3-5]。而我国学术界对该组合结构的研究正处于初步阶段,主要借助有限元软件对该组合结构进行研究^[6-7],理论公式推导与工程实例均较少^[8]。

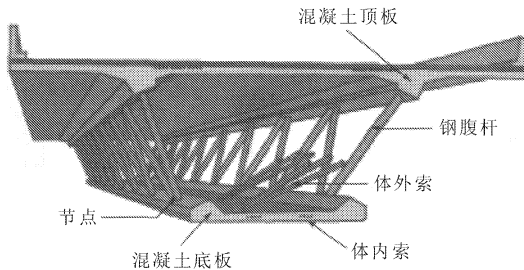


图 1 钢桁腹-混凝土组合箱梁构造

偏载系数在国内规范中没有明确定义与限定,有关偏载系数公式算法还不够精确,现在一些比较常用的计算方法有经验系数法、偏心压力法和修正的偏心压力法等^[9]。经验系数法一般将经验系数 ξ_1 取为 1.15,这样取值比较简单方便,但是没有考虑箱梁的尺寸变化、荷载大小和偏心距等因素,对一些桥型来说偏于不安全;偏心压力法和修正的偏心压力法都有特定公式求偏载系数,后者是在前者计算上又考虑了抗扭刚度^[10]。现在工程上又出现了一种荷载增大系数法,为了得到所要求的设计内力,将增大系数中的最大值与车辆轴荷相乘所得到的值输入到 ζ_{\max} 程序中,即可得到所求结果。该方法较为简便且偏于安全,更适用于工程使用^[11]。

国内外对钢桁腹-混凝土组合结构偏载系数的分析较为罕见,是否直接利用现有计算理论及经验系数法尚待进一步研究和探讨,本文将利用有限元

软件 ANSYS 对钢桁腹-混凝土组合箱梁影响偏载系数的主要参数进行敏感性分析,得到偏载系数随腹杆壁厚、悬翼比、高跨比以及宽跨比变化的变化规律,望能为实桥设计提供参考。

1 有限元模型

1.1 ANSYS 建模

本文讨论的简支钢桁腹-混凝土组合箱梁的有限元模型横向和纵向尺寸构造见图 2 和图 3。选用 Solid 185 来进行顶板和底板的模拟,选用 Beam 188 进行钢桁腹杆的模拟,钢桁腹杆与混凝土顶底板进行刚接形成共节点形式^[12],模型的相关数据资料在表 1 中显示,有限元模型如图 4 所示。腹杆倾斜的角度为 67° 左右,两相邻腹杆的最大距离为 1.95 m。

表 1 有限元模型的相关参数

位置	选用单元	材料	弹性模/MPa
顶底板	Solid 185	C50 混凝土	3.45×10^4
钢桁腹杆	Beam 188	Q345C 级钢管	2.06×10^5

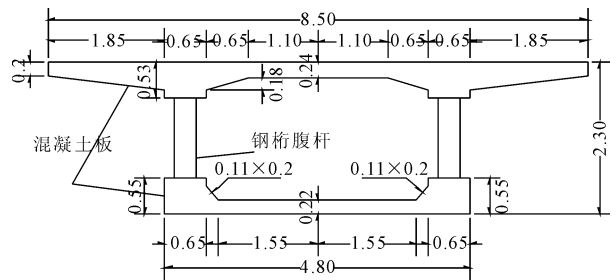


图 2 组合结构横截面尺寸图示(单位:m)

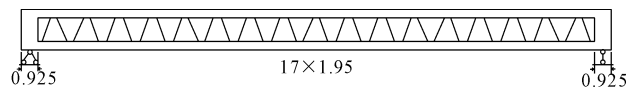


图 3 组合结构纵向尺寸图示(单位:m)

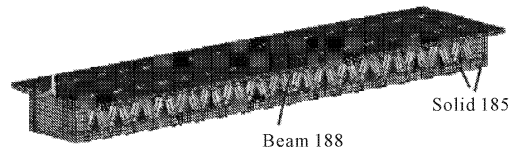


图 4 有限元模型图示

1.2 组合箱梁加载点与分析点

为了便于表达,现用字母表示模型各部分尺寸,如图 5 所示, b_1 表示悬臂板长度, b 表示箱梁宽度一半, H 表示箱梁高度。

将偏载系数用应力和位移这两种不同的方式划成(正)应力增大系数(指在偏心荷载作用下,控制截面即腹板处的最大应力与平均应力的比值)和位

移增大系数(指在偏心荷载作用下,控制截面即腹板处的最大位移与平均位移的比值),分别用 ξ_1 和 ξ_2 表示。文献[11]提出此方法仅适用于跨中,不适用于支座处,因此,仅在跨中处施加荷载进行讨论。依据《公路桥规》中车道荷载的要求对有限元模型施加 $P=330\text{ kN}$ 的跨中集中偏载^[13],桥梁自重均匀分布,对偏载增大系数产生影响较小,计算中可忽略。跨中集中偏载的施加位置在图 6 中的 3 点处,取 1 点与 2 点的应力值与挠度值研究钢桁腹-混凝土组合箱梁桥的 ξ_1 和 ξ_2 变化规律。

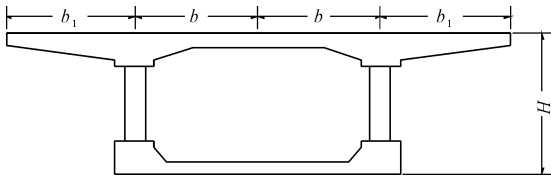


图 5 钢桁腹-混凝土组合箱梁模型尺寸

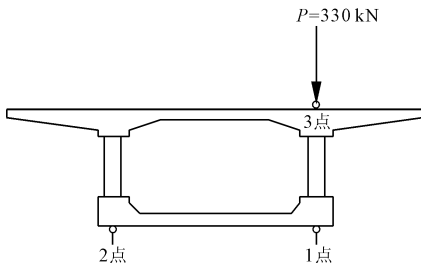


图 6 跨中集中偏载施加点与讨论点图示

为方便计算,将 ξ_1 和 ξ_2 按各自的定义分别简化为式(1)和式(2):

$$\xi_1 = \frac{2\sigma_{z2}}{\sigma_{y1} + \sigma_{y2}} \quad (1)$$

$$\xi_2 = \frac{2U_{y2}}{U_{y1} + U_{y2}} \quad (2)$$

式中: σ_{z1} 和 σ_{z2} 分别是偏载 P 作用下 1 点和 2 点的纵向应力, U_{y1} 和 U_{y2} 分别表示在偏心荷载 P 作用下 1 点和 2 点的竖向位移。

2 几何参数分析

2.1 腹杆壁厚

腹杆壁厚是指腹杆截面外圆半径 R_0 与内圆半径 R_i 之差,腹杆截面如图 7 所示。

取 $R_i = 10\text{ cm}, R_0 = 15\text{ cm}, 20\text{ cm}, 25\text{ cm}, 30\text{ cm}, 35\text{ cm}, 40\text{ cm}$ 。其余尺寸不变,共建立 6 个有限元模型。分析数据可见表 2 和图 8。

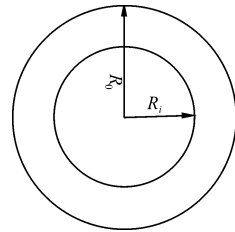


图 7 腹杆截面

表 2 腹杆壁厚对 ξ_1 和 ξ_2 的影响

有限元模型	R_i/cm	R_0/cm	腹杆壁厚/ cm	σ_{z1}/MPa	U_{y1}/mm	σ_{z2}/MPa	U_{y2}/mm	ξ_1	ξ_2	经验系数法	偏心压力法
CASE-1	10	15	5	1.918	3.61	1.121	2.77	1.2623	1.1317	1.15	3
CASE-2	10	20	10	1.815	3.11	1.082	2.55	1.2622	1.0989	1.15	3
CASE-3	10	25	15	1.819	2.95	1.065	2.47	1.2614	1.0886	1.15	3
CASE-4	10	30	20	1.794	2.85	1.053	2.43	1.2603	1.0813	1.15	3
CASE-5	10	35	25	1.764	2.81	1.040	2.39	1.2582	1.0808	1.15	3
CASE-6	10	40	30	1.726	2.75	1.024	2.35	1.2555	1.0784	1.15	3

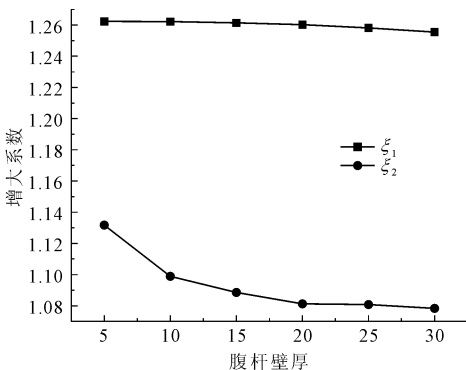


图 8 腹杆壁厚对 ξ_1 和 ξ_2 的影响

由表 2 和图 8 能够看出,腹杆壁厚越大, ξ_1 和 ξ_2 越小, ξ_1 的减小幅度较小,整体下降幅度也不明显,最大值不超过 1.3,最小值也在 1.25 以上,变化不大。而 ξ_2 在截面半径差从 5 cm 变为 15 cm 时,变化幅度相对较大,而从腹杆壁厚为 15 cm 以后时, ξ_2 减小幅度变小。从整体来看, ξ_1 比 1.15 大,而 ξ_2 均比 1.15 小,可见,经验系数法取值在腹杆截面面积变化的影响来讲,相对于 ξ_2 偏于安全,而相对于 ξ_1 偏于不安全。偏载系数的变化曲线说明偏载系数能够受到腹杆壁厚变化的影响,但敏感度较低。现实计算中,采用应力和位移进行腹杆截面面积变化时偏载

系数的计算时会呈现出些许差异,对此应当注意。

2.2 悬翼比

悬翼比是 b_1/b , 如图 9 所示。为满足工程实用性, 现取 $b = 2.4 \text{ m}$, 将悬翼比从 0.5 以 0.1 逐次递增至 1.0, 则 b_1 分别为 1.20 m、1.44 m、1.68 m、1.92 m、2.16 m、2.40 m。其余尺寸不变, 共建立 6 个有限元模型, 分析悬翼比对位移放大系数与应力放大系数的影响, 得到相应的变化曲线, 结果见图 9。

由图 9 可知, 悬翼比在 0.5 到 1.0 范围内的变化对 ξ_1 和 ξ_2 均较小, 尤其对 ξ_1 几乎没有影响, 而 ξ_2 随悬翼比的增大而增大, 但增大幅度很小。 ξ_1 和 ξ_2 均比经验系数值 1.15 大, 用经验系数法取值相对于 ξ_1 和 ξ_2 均偏于不安全。偏载系数的变化曲线说明偏载系数受悬翼比变化影响很小, 必要时可以忽略其影响。

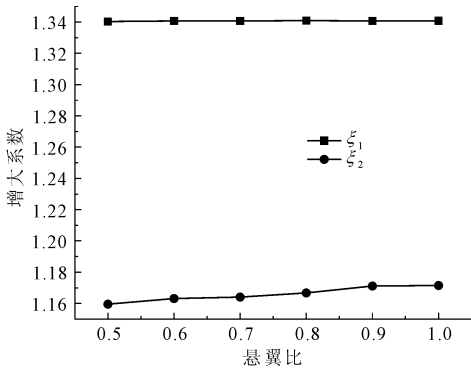


图 9 悬翼比对 ξ_1 和 ξ_2 的影响

2.3 高跨比

H/L 定义为梁高与计算跨度的比值, 跨度为 35 m, 将 H/L 从 0.05 开始, 增量为 0.01, 最终至 0.1, 则 $H = 1.75 \text{ m}$ 、 2.10 m 、 2.45 m 、 2.80 m 、 3.15 m 、 3.50 m , 其余尺寸不变, 建立 6 个有限元模型。绘制变化曲线见图 10。

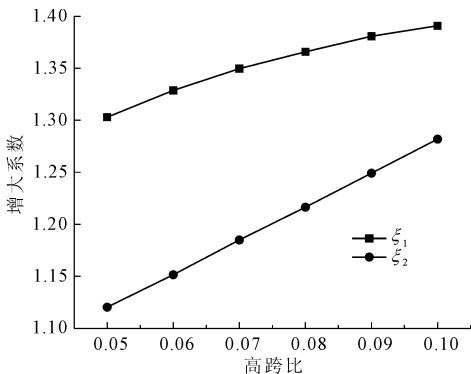


图 10 高跨比变化时的增大系数

由图 10 可知, ξ_1 和 ξ_2 随高跨比的增大单调递增, 而且增大幅度均较大, ξ_2 的增幅明显大于 ξ_1 ,

增幅逐渐变缓, 而 ξ_2 随高跨比增加近乎成一条斜直线, 且斜率较大。变化曲线说明高跨比对偏载系数的影响敏感度较高, 经验系数法相对于 ξ_1 和 ξ_2 仍偏于不安全。

2.4 宽跨比

将 $2b/L$ 定义为宽跨比。跨度为 35 m, 将 $2b/L$ 从 0.08 开始以 0.02 为增量, 增至 0.18, 则 $2b = 2.8 \text{ m}$ 、 3.5 m 、 4.2 m 、 4.9 m 、 5.6 m 、 6.3 m , 从悬翼比的影响分析来看, 悬臂板长度影响很小, 取 1.5 m, 其余尺寸均不变, 建立 6 个有限元模型, 绘制结果见图 11。

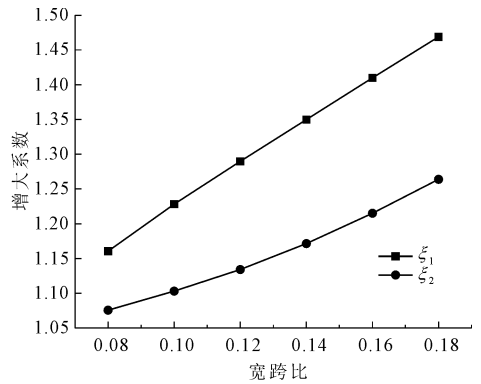


图 11 宽跨比变化时的增大系数

由图 11 可知, ξ_1 与 ξ_2 随宽跨比的增大单调递增, 且增幅均较大, ξ_1 增幅大于 ξ_2 , ξ_2 增幅由小变大, 而 ξ_1 随宽跨比的增加几乎呈斜直线状态, 且斜率较大, 最大值与最小值相差 0.3 之多, 敏感度较高。

2.5 参数相关性比较

从图 12 和图 13 可看出, 对偏载系数影响最大的是宽跨比, 其次依次是高跨比和腹杆壁厚, 悬翼比变化对钢桁腹 - 混凝土组合箱梁的偏载系数影响最小, 在分析该结构偏载系数时可以忽略其影响。

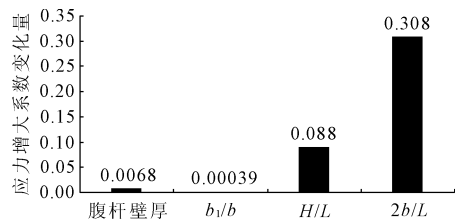


图 12 应力增大系数变化量

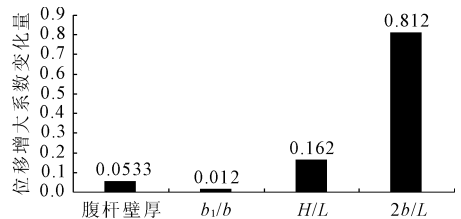


图 13 位移增大系数变化量

3 理论计算

文献[14]已验证修正的偏心压力法比偏心压力法和经验系数法更能较为准确地计算桥梁的偏载系数。为验证应力和位移增大系数方法是否能较为准确的计算出偏载系数,现采用修正的偏心压力法公式计算出数值与之作比较。由于宽箱梁宽跨比比比较大,偏载系数计算有其独特的计算方法,传统的计算方法不适用于宽箱梁^[11],所以就选取腹杆壁厚的变化这组模型来进行验证。

计算组合结构的偏载系数,首先要采用腹板换算法将钢桁腹杆换算成混凝土腹板。采用文献[8]按剪切变形相等的原理进行了钢桁腹杆与混凝土板的换算,换算混凝土板厚公式如下:

$$T_c = \frac{E_f A \cos^2 \alpha \sin \alpha}{G_c H_c} \quad (3)$$

式(3)中 T_c 为换算后的连续混凝土腹板厚度, E_f 为钢桁腹杆的弹性模量, A 为钢管的截面面积, G_c 为混凝土剪切模量, $G_c = 0.4E_c$, H_c 为换算后的混凝土腹板高度,即钢桁腹杆的垂直高度。

修正的偏心压力法计算公式如下:

$$\xi = nK \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{n} + \beta \frac{ea_w}{\sum a_i^2} \quad (5)$$

式(4)中 ξ 为偏载系数, n 为箱梁截面的腹板总数,式(5)中 K 为荷载横向分布系数, e 为偏心距即作用点到截面中心的距离, a_i 为第 i 腹板到截面中心的距离, a_w 为外侧腹板到截面中线的距离,而 β 为修正系数,表达式为:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{L^2}{12} \times \frac{I_t}{\sum a_i^2 I_x}} \quad (6)$$

式(6)中, L 为桥梁计算跨度, G 、 E 分别为抗剪抗弯弹性模量, I_x 、 I_t 分别为抗弯抗扭惯性矩^[15]。

计算方法如下^[16]:

$$I_t = \int \frac{4\Omega^2}{t} ds + \sum_{i=1}^n c_i w_i t_i^3 = \frac{4w^2 h^2}{w(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}) + \frac{2h}{t_3}} + 2cat_4^3 \quad (7)$$

式(7)中的 w 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 a 、 h 如图 14 所示。

根据式(3)一式(7)计算出的各数据如表 3 所示,应力、位移增大系数分别用 ξ_1 和 ξ_2 表示。

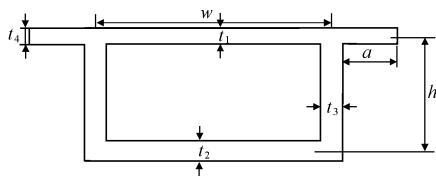


图 14 各参数表示图示

表 3 模型 1—模型 6 参数修正偏压法计算数值及偏载系数

模型	T_c/m	I_x/m^4	I_t/m^4	β	ξ	ξ_1	ξ_2
CASE-1	0.159	3.835	4.783	0.078	1.156	1.262	1.132
CASE-2	0.382	3.931	6.319	0.062	1.123	1.262	1.099
CASE-3	0.668	4.054	7.010	0.057	1.115	1.261	1.089
CASE-4	1.017	4.205	7.381	0.057	1.113	1.260	1.081
CASE-5	1.431	4.384	7.602	0.057	1.115	1.258	1.081
CASE-6	1.908	4.590	7.745	0.056	1.113	1.256	1.078

从表 3 和图 15 来看,用修正偏压法计算出的偏载系数大小介于应力增大系数和位移增大系数之间,而且更加接近于位移增大系数。走向趋势也与位移增大系数相近,说明位移增大系数更接近实际的偏载系数,而应力增大系数更加偏于安全。

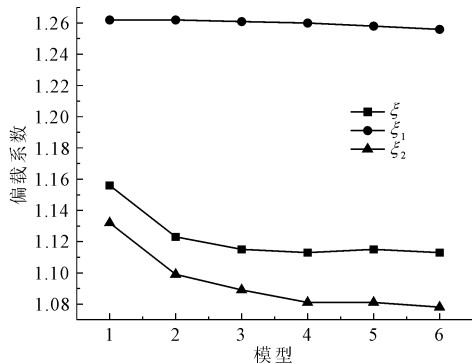


图 15 偏载系数比较

4 结论

(1) 实际工程中,偏载系数计算方法的不同能够造成很大的误差,本文得出应力大多数情况下都大于位移偏载系数。将偏载系数计算方法详细地分为应力和位移两种不同的计算方法,遇到实际问题再做具体分析。

(2) 偏载系数随高跨比和宽跨比的增加单调递增,随壁厚增加而单调递减。宽跨比对钢桁腹-混凝土组合结构偏载系数影响最大,其次是高跨比和腹杆壁厚,悬翼比的影响最小,可以忽略不计。

(3) 由经验系数法取值得出的 1.15 对钢桁腹-混凝土组合箱梁并不完全适用,只是在位移增大系数中较为适用,将该结构箱梁的经验系数值提高

为 1.2 更为安全,但在实际应用中还需通过计算分析确定其偏载系数。

(4) 在箱梁宽度不是太大的前提下,位移增大系数更加接近于修正偏心压力法计算出的偏载系数,而应力增大系数更为安全。

参考文献:

- [1] 阎卫国. 钢桁腹组合结构桥梁新型节点构造研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 61-66.
- [2] 阎卫国. 钢桁腹预应力混凝土箱梁桥的设计应用[J]. 中国市政工程, 2012(5): 35-38.
- [3] Jung K, Kim J J, Yi J, et al. Development and evaluation of new connection systems for hybrid truss bridges[J]. Journal of Advanced Concrete Technology. 2013, 11(2): 61-79.
- [4] Liu Y, Xin H, He J, et al. Experimental and analytical study on fatigue behavior of composite truss joints[J]. Journal Steel Research. 2013, 83: 21-36.
- [5] Machacek J, Cudejko M. Longitudinal shear in composite steel and concrete trusses[J]. Engineering Structures. 2009, 31(6): 1313-1320.
- [6] 郑尚敏, 万水. 钢桁腹组合梁剪力滞效应的有限元分析[J]. 公路交通科技. 2013, 30(11): 68-72.
- [7] 陈扬. 钢桁腹-混凝土组合梁桥力学性能与设计方

法研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.

- [8] 雷聪. 钢桁腹组合梁桥力学性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2015: 11-55.
- [9] 陈水生, 苗守举, 桂水荣, 等. 单箱多室波形钢腹板箱梁偏载系数参数分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 160-165.
- [10] 陈水生, 彭武, 桂水荣, 等. 单箱双室波形钢腹板 pc 组合箱梁桥偏载系数研究[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 42-46.
- [11] 陈国强. 连续宽箱梁的偏载增大系数的讨论[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 66-71.
- [12] 张岩, 杨霞林, 冀伟. 钢桁腹式混凝土组合箱梁的结构性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 21-25.
- [13] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 26-27.
- [14] 郭忆, 叶见曙, 万红燕. 预应力混凝土箱梁偏载系数试验研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2002, 16(4): 14-16.
- [15] 程翔云. 桥梁理论与计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 274-275.
- [16] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 135-136.

(上接第 202 页)

- [3] 刘海京, 夏才初, 朱合华, 等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 947-953.
- [4] 郑俊杰, 刘秀敏, 欧阳院平, 等. 大断面隧道锚杆设置的优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 341-346.
- [5] 陈锦涛, 韩爱果, 任光明. 基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 178-182.
- [6] 曾晓东. 运营隧道衬砌裂缝及渗漏水病害整治技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 201-205.
- [7] 宁波, 李科兴. 隧道全寿命周期结构安全风险性分析模型探讨[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(1): 105-109.
- [8] 杨成勇. 高速铁路隧道衬砌裂缝病害及其整治措施研究[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(6): 53-54.
- [9] 付威. 公路隧道渗漏水机理分析及治理对策研究

[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

- [10] 李有兵. 长大隧道机械化配套安全快速施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 110-116.
- [11] 康宝生. 我国隧道施工机械化的发展与思考[J]. 建筑机械化, 2017, 38(9): 19-25.
- [12] 关宝树. 漫谈矿山法隧道技术第十一讲——谈隧道施工机械化[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 1163-1170.
- [13] 刘见中, 田成金. “机械化换人 自动化减人”实施目标和路径[J]. 劳动保护, 2015(10): 96-98.
- [14] 王志坚. 郑万高铁隧道大断面机械化施工关键技术研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(8): 1257-1270.
- [15] 金强国. 郑万高铁隧道大型机械化施工支护优化[J]. 隧道建设, 2018, 38(8): 1324-1333.
- [16] 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.