

文章编号: 0451—0712(2005)06—0009—05

中图分类号: U448. 213

文献标识码: A

偏心支承对 90° 圆心角双跨弯箱梁桥的影响

宋国华^{1,2}, 罗 玲^{2,3}, 王东炜¹

(1. 郑州大学土木工程学院 郑州市 450002; 2. 北京工业大学建筑工程学院 北京市 100022;

3. 北京市市政工程设计研究总院 北京市 100045)

摘 要: 通过对 72 个圆心角为 90° 的双跨偏心支承弯箱梁桥模型的计算分析, 以梁格系法为基础编制的 3D—BSA 软件系统为结构计算工具, 以 Excel 2000 为数据处理工具, 用统计分析的方法建立双跨偏心支承弯箱梁桥结构反应在使用极限状态及承载能力极限状态下与桥梁跨长、支承偏心距等参数间的经验公式, 为双跨偏心弯箱梁桥的实用设计提出适当建议或借鉴依据。

关键词: 弯箱梁桥; 偏心支承; 实用设计; 经验公式

弯箱梁桥是现代交通工程中的一种重要桥型, 运用于各种桥梁结构体系, 在大型立交桥和高架桥中经常被采用。

在我国, 求解弯箱梁桥的方法有很多, 如有限元法、有限条法、有限梁段法和梁格系法等。但该桥型的复杂受力特性使得各种方法均需计算机求解。而求解弯箱梁桥的简捷实用方法数之寥寥, 且多以表格形式出现, 实为程序计算所得, 直观的经验公式尚不多见。有关弯箱梁桥的大多数研究结果都没有系统化、统一化, 我国规范对弯箱梁桥的设计也无明确规定。

国外的研究方法与国内大同小异, 但规范上已有明确规定。如美国州际公路及交通署协会(1996) 指南规范(AASHTO)和加拿大公路桥梁设计规程(CHBDC)(1996), 建议可以使用梁格比拟法、折板法、有线条法和有限元法分析弯箱梁桥^[1]。在实用方法的研究上, 国外也已展开, 如 Khaled Sennah 等以有限元建立模型桥, 以简支弯箱梁桥的曲率、室数、车道数、形状系数等为参数, 用统计包来拟合多参数公式, 把分析结果拟合为弯矩分配系数和剪力分配系数的经验公式^[2]。

鉴于目前我国弯箱梁桥研究中存在的问题和弯箱梁桥的快速发展现状, 急需提出能结合工程实际的、工程师乐于接受的弯箱梁桥的实用设计方法。

基于上述需要, 本文建立了 72 个圆心解为 90°

的双跨偏心弯箱梁桥模型, 以梁格系法为理论基础编制的“斜弯坡及异型空间桥梁分析软件系统 3D—BSA”为结构计算分析工具, 以 Excel 2000 为数据处理工具, 用统计分析的方法建立弯箱梁桥受力性能与各参数间的经验公式, 为双跨偏心弯箱梁桥的实用设计提出适当建议或借鉴依据。

1 研究过程

1.1 软件 3D—BSA 的内部约定

- (1) 长度必须以“m”为单位;
- (2) 力的单位必须为“kN”;
- (3) 时间须以天数计算;
- (4) 总体坐标系 z 轴必须铅直向上;
- (5) 局部坐标系 $oxyz$ 必须由三点确定。 x 轴由第一点指向第二点, x 轴和第三点确定 oxy 面, 且 y 轴沿着第三点方向, z 轴由右手定则确定;

(6) 永久构件和外荷载, 其拆除阶段序号可填大于施工阶段总数的任意整数。

1.2 研究参数的确定

本文所研究的参数包括桥梁总长 L 及中间支承偏心距 e , 其取值范围如下:

$L: 70, 80, 100, 130, 150, 180, 200(\text{m});$

$e: 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5(\text{m}).$

1.3 其他模型参数的确定

根据 3D—BSA 建模的需要, 其他模型参数确

定如下。

(1) 施工阶段: 每跨按一个施工阶段, 时间为 30 d; 桥面铺装为一施工阶段, 时间为 30 d; 混凝土收缩、徐变为一施工阶段, 时间为 1 410 d。共计 1 500 d, 也是遵照软件的建议确定的。

(2) 支承单元: 支承类型选用 y 向固定, z 向活动的 y 向双支座支承, 也就是横桥向抗扭支承。

(3) 橡胶支座: 每一桥台处设有 3 个橡胶支座, 其压缩刚度和剪切刚度分别为 $3.10 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 和 $1.1 \times 10^4 \text{ kN/m}$ 。

(4) 材料信息: 所有材料均选用 C40 混凝土, 其 $E = 3.3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $\mu = 0.1667$ 。

(5) 截面特性: 选用单箱截面, 上宽 9.0 m, 下宽 5.0 m, 桥梁跨中高取为单跨长的 $1/40$, 支座处高度取为单跨长的 $1/18$ 。其他截面高按二次插值生成。

(6) 自重荷载: 重力体密度均取为 25.5 kN/m^3 。

(7) 二期恒载: 桥面铺装厚度 0.08 m, 密度 24 kN/m^3 ; 防撞墙左右侧密度 7.5 kN/m^3 , 左右侧边距 0.2 m。

(8) 混凝土收缩徐变: 按规范 (JTJ 023-85) 规定, 取混凝土加载龄期 $\tau = 10 \text{ d}$ 。

(9) 活载信息: 取汽车—超 20 级, 挂车—120, 人

群荷载 3.5 kN/m^2 , 纵向加载步长 1.0 m, 横向加载步长 0.5 m。左右车道数均为 1, 单列系数 1, 行车时速 80 km/h。

(10) 荷载组合: 按规范规定取正常使用极限状态 (有 2 种) 和承载能力极限状态 (有 6 种) 下的荷载组合。

2 数据处理

对纵梁取最后一个施工阶段的单元位移, 均取控制截面处绝对值最大的位移。对纵梁的极限状态配筋内力取使用极限状态和承载能力极限状态两种, 每种状态又分别取最大值和最小值。支承反力取用组合 1 和组合 2 两种状态下的最大和最小值, 其中组合 1 为: $1 \times \text{自重} + 1 \times \text{二期恒载} + 1 \times \text{汽车—超 20 级} + 1 \times \text{人群荷载}$; 组合 2 为: $1 \times \text{自重} + 1 \times \text{二期恒载} + 1 \times \text{挂车—120}$ 。将记录下的数据用 Excel 进行整理, 每种内力对不同研究参数进行曲线拟合, 再加以汇总。如内力 $M_{zmin}(\text{承})$ 的处理过程如下: 将 $M_{zmin}(\text{承})$ 与桥梁总长 L 之间的关系拟合为三项式曲线并示出其表达式, 如图 1; 接着拟合 $M_{zmin}(\text{承})$ 在图 1 中的三项式曲线系数及常数与支承偏心距 e 的关系曲线及其表达式, 如图 2; 这样即可得到图 1 中 $M_{zmin}(\text{承})$ 的系数 A 、 B 、 C 及常数 D , 见表 1。

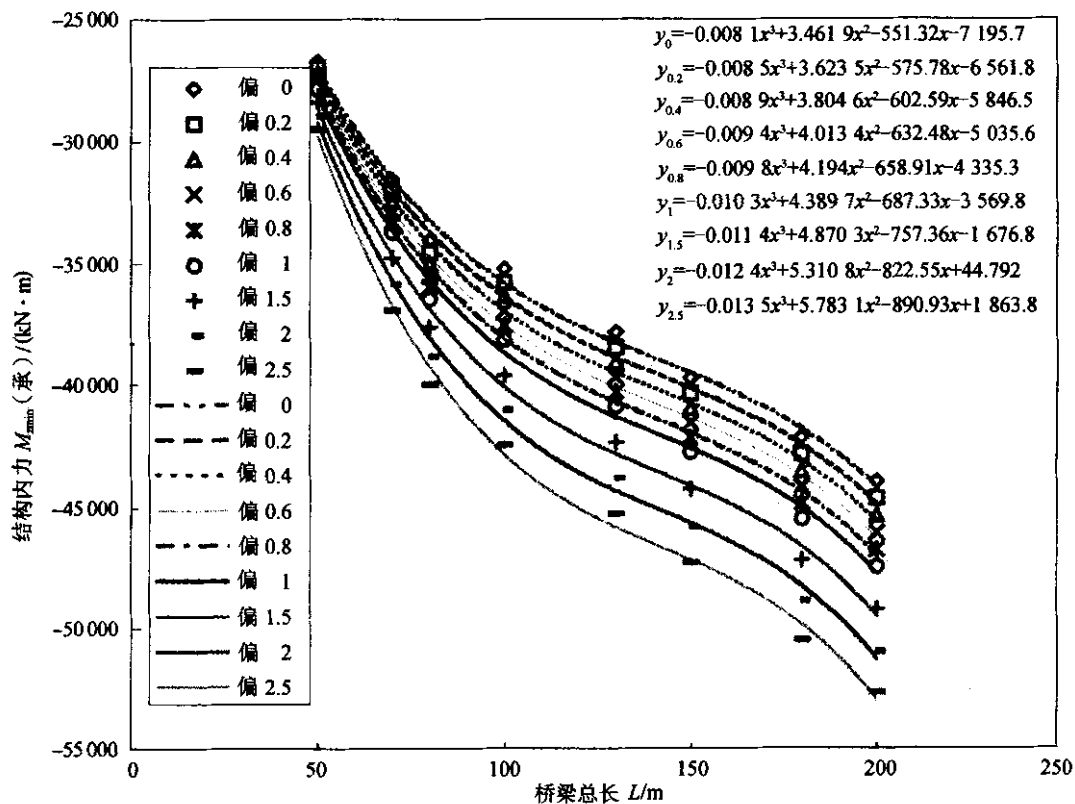
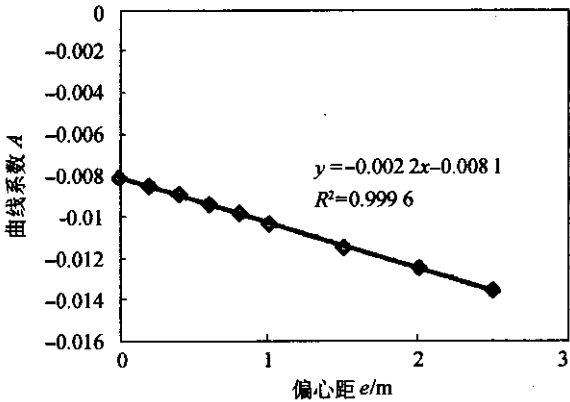
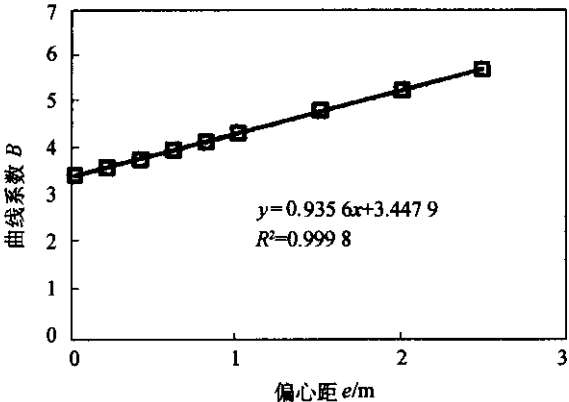


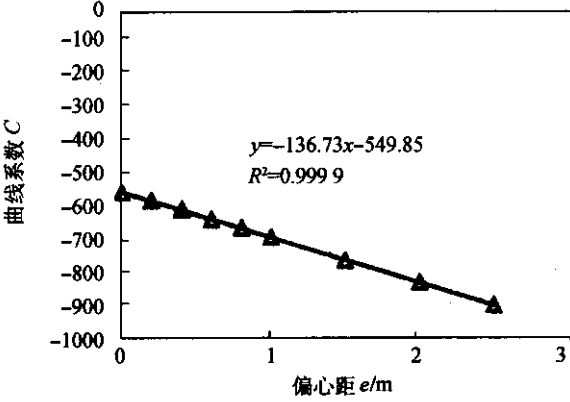
图 1 在偏心距 $e = 0 \sim 2.5$ 时, 内力 $M_{zmin}(\text{承})$ 与桥梁总长 L 的关系曲线及其表达式



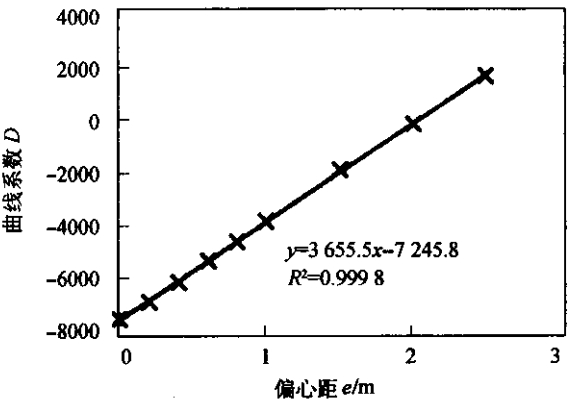
(1) 内力 M_{zmin} (承) 的三项式曲线系数 A 与偏心距 e 的关系



(2) 内力 M_{zmin} (承) 的三项式曲线系数 B 与偏心距 e 的关系



(3) 内力 M_{zmin} (承) 的三项式曲线系数 C 与偏心距 e 的关系



(4) 内力 M_{zmin} (承) 的三项式曲线系数 D 与偏心距 e 的关系

图 2 内力 M_{zmin} (承) 的三项式曲线系数 A, B, C 及常数 D 与偏心距 e 的关系

表 1 结构反应与偏心距 e 的关系表达式 ($=AL^3+BL^2+CL+D$)

项 目	系数 A	系数 B	系数 C	常数 D
N_{xmax} (使)	0.000 1	$0.013\ 8e-0.036$	$-1.151\ 3e+2.608\ 8$	$48.164e+42.362$
N_{xmin} (使)	0	$-0.001\ 2e-0.003\ 6$	$0.923\ 7e+5.022\ 1$	$-45.105e-1\ 117.8$
Q_{ymax} (使)	0	$-0.002\ 1e+0.041\ 7$	$0.618\ 9e-15.199$	$30.835e+2\ 536.9$
Q_{ymin} (使)	0	$0.002\ 1e-0.041\ 8$	$-0.612e+15.223$	$-31.198e-2\ 538.6$
M_{zmin} (使)	$-0.001\ 9e-0.009\ 2$	$0.828\ 8e+3.903\ 5$	$-123.6e-590.96$	$3\ 463.9e+1\ 378.7$
M_{zmax} (使)	$0.000\ 2e^2-0.001\ 8e+0.001\ 7$	$-0.066\ 3e^2+0.753\ 1e-0.402\ 1$	$7.903\ 1e^2-91.954e+43.857$	$-223.71e^2+2\ 471.8e+5\ 256$
N_{xmax} (承)	0.000 1	$0.013\ 6e-0.036\ 5$	$-1.149\ 4e+2.594\ 8$	$50.402e+53.797$
N_{xmin} (承)	$e \in [0,1] -0.000\ 2$	$-0.016\ 1e+0.057\ 3$	$2.569\ 5e+0.103$	$-93.068e-1\ 233$
	$e \in (1,2.5) -0.000\ 1$			
Q_{ymax} (承)	0	$0.000\ 2e^2-0.003\ 2e+0.064\ 4$	$-0.054\ 6e^2+0.861\ 6e-23.597$	$41.419e+3\ 650.8$
Q_{ymin} (承)	0	$0.002\ 6e-0.064\ 3$	$-0.717e+23.592$	$-41.84e-3\ 653.8$
M_{zmax} (承)	0	$-0.008e^2+0.089\ 3e+0.032\ 1$	$1.831e^2-23.002e+67.154$	$-32e^2+352.4e+4\ 849.4$
M_{zmin} (承)	$-0.002\ 2e-0.008\ 1$	$0.935\ 6e+3.447\ 9$	$-136.73e-549.85$	$3\ 655.5e-7\ 245.8$
R_{ymax} (1)	$4 \times 10^{-5}e^2-0.000\ 2e-0.000\ 1$	$0.036\ 6e+0.046\ 1$	$-4.983\ 5e-7.381\ 2$	$112.95e+283.37$
R_{ymax} (2)	$-7 \times 10^{-5}e-3 \times 10^{-6}$	$0.030\ 1e+0.002\ 2$	$-4.314\ 7e-0.854\ 1$	$94.768e+37.938$
R_{ymin} (1)	$-0.000\ 1e+0.000\ 3$	$0.041\ 1e-0.156\ 3$	$-5.329\ 4e+29.153$	$65.796e-3\ 742.7$
R_{ymin} (2)	$-4 \times 10^{-5}e+0.000\ 6$	$0.028\ 8e-0.310\ 4$	$-3.849e+51.35$	$-4.948\ 3e^2+51.174e-3\ 607.1$
T_{zmax} (1)	0	$-0.137\ 2e-1.599\ 3$	$134.04e+237.95$	$-2\ 200.5e+5\ 357.3$
T_{zmax} (2)	0	$-0.104\ 2e-2.677\ 7$	$87.065e+237.95$	$-466.75e+2\ 215.4$
T_{zmin} (1)	0	$-0.139e-1.472\ 2$	$132.12e+176.28$	$-2\ 990.9e-9\ 405.3$
T_{zmin} (2)	0	$-0.084\ 9e-2.667\ 5$	$88.163e+116.79$	$-1\ 245.3e-3\ 698.3$
u	0	-2×10^{-6}	$1 \times 10^{-5}e^2-3 \times 10^{-5}e-8 \times 10^{-5}$	$-0.000\ 9e-0.000\ 7$
v	0	5×10^{-6}	$4 \times 10^{-5}e^2-0.000\ 2e-0.000\ 2$	$0.004\ 2e+0.001\ 1$
θ_x	0	-1×10^{-6}	$-3 \times 10^{-6}e^2+3 \times 10^{-5}e-6 \times 10^{-5}$	$-0.000\ 7e+0.001\ 8$

将所记录的结构反应内力、位移及支承反力进行两次曲线拟合后,即可得到曲桥梁跨长 L 和支承偏心距 e 二者耦合的结构反应经验公式表达式,分别列于表1、表2中。其中表2中的各项反应受支承偏

心值 e 影响很小,故 e 的影响忽略不计;在各组偏心距的反应中,为安全起见,取反应项目绝对值较大的那组作为该反应的表达式。

表 2 与偏心距 e 无关的反应项目与桥梁总长 L 的关系表达式

项 目	表达式	项 目	表达式
$Q_{zmax}(\text{使})$	$69.536L-652.98$	$M_{ymax}(\text{承})$	$5.779\ 1L^2-34.016L-2\ 956.3$
$Q_{zmin}(\text{使})$	$-69.419L+647.86$	$M_{ymin}(\text{承})$	$-8.565\ 9L^2-84.317L+4\ 751.4$
$M_{xmax}(\text{使})$	$1.783\ 7L^2-17.184L+2\ 422.2$	$R_{xmax}(1)$	$137.18L-1\ 922.9$
$M_{xmin}(\text{使})$	$-1.781\ 5L^2+16.549L-2\ 380$	$R_{xmax}(2)$	$111.41L-1\ 412.7$
$M_{ymax}(\text{使})$	$4.103\ 9L^2+3.460\ 9L-2\ 305.9$	$R_{xmin}(1)$	$120.71L-2\ 999.7$
$M_{ymin}(\text{使})$	$-7.228\ 9L^2-75.973L+5\ 356.5$	$R_{xmin}(2)$	$111.75L-2\ 742.9$
$Q_{zmax}(\text{承})$	$79.853L-455.1$	w	$-3\times10^{-5}L^2+0.001\ 8L-0.051\ 5$
$Q_{zmin}(\text{承})$	$-79.816L+458.57$	θ_y	$-0.000\ 2L+0.006\ 4$
$M_{xmax}(\text{承})$	$2.422\ 8L^2-8.221\ 4L+1\ 714.9$	θ_z	$1\times10^{-5}L-0.000\ 4$
$M_{xmin}(\text{承})$	$-2.414\ 7L^2+4.796L-1\ 359.6$		

3 数据处理结果

为了验证表1、表2中所有经验公式的可靠性,特将各经验公式用 Matlab 6.5 汇编成程序,并对公式进行验证。其中将 $L=80\text{ m}$ 、 $e=1$ 的模型验算结果列于表3。由表3可知,大部分反应项目的经验公式值与

程序计算值还是比较接近的,二者比值一般均不超过10%。所以整体来看,大部分项目用多项式表示还是很理想的。只有内力 $M_{zmax}(\text{使})$ 、 $M_{zmax}(\text{承})$,支承反力中的 $R_{ymax}(1)$ 、 $R_y(2)$ 及除 u 外的所有位移相差较大。

表 3 经验公式值与程序计算值的对比

反应项目	程 序 计算值	经 验 公式值	经验公式值 程序计算值	反应项目	程 序 计算值	经 验 公式值	经验公式值 程序计算值
u	-0.007 64	-0.022 4	2.931 937	$M_{xmx}(\text{承})$	16 050	16 563	1.031 963
v	0.014 32	0.008 5	0.593 575	$M_{ymax}(\text{承})$	31 403	31 309	0.997 007
w	-0.133 59	-0.099 5	0.744 816	$M_{zmax}(\text{承})$	9 142	5 941.5	0.649 912
θ_x	-0.009 75	-0.007 9	0.810 256	$N_{xmin}(\text{承})$	-928	-916.344	0.987 44
θ_y	-0.008 39	-0.00 96	1.144 219	$Q_{ymin}(\text{承})$	-223 1	-2 260.5	1.013 223
θ_z	0.000 52	0.000 4	0.769 231	$Q_{zmin}(\text{承})$	-6 080	-5 926.7	0.974 786
$N_{xmax}(\text{使})$	122	116.246	0.952 836	$M_{xmin}(\text{承})$	-16 010	-16 430	1.026 234
$Q_{ymax}(\text{使})$	1 640	1 654.8	1.009 024	$M_{ymin}(\text{承})$	-58 489	-56 816	0.971 396
$Q_{zmax}(\text{使})$	5 088	4 909.9	0.964 996	$M_{zmin}(\text{承})$	-36 510	-35 736	0.978 8
$M_{xmax}(\text{使})$	12 498	12 463	0.997 2	$R_{xmax}(1)$	9 396	9 051.5	0.963 335
$M_{ymax}(\text{使})$	24 519	24 236	0.988 458	$R_{ymax}(1)$	-192	-196.696	1.024 458
$M_{zmax}(\text{使})$	6 214	6 161.9	0.991 616	$T_{zmax}(1)$	11 630	11 088	0.953 396
$N_{xmin}(\text{使})$	-711	-717.961	1.009 79	$R_{xmin}(1)$	7 029	6 657.1	0.947 091
$Q_{ymin}(\text{使})$	-1 640	-1 655	1.009 146	$R_{ymin}(1)$	-2 424	-2 405.9	0.992 533
$Q_{zmin}(\text{使})$	-5 103	-4 905.7	0.961 336	$T_{zmin}(1)$	2 412	1 964.1	0.814 303
$M_{xmin}(\text{使})$	-12 500	-12 458	0.996 64	$R_{xmax}(2)$	7 719	7 500.1	0.971 641
$M_{ymin}(\text{使})$	-48 550	-46 986	0.967 786	$R_{ymax}(2)$	-117	-111.454	0.952 598
$M_{zmin}(\text{使})$	-28 390	-27 719	0.976 365	$T_{zmax}(2)$	-775	-432.71	0.558 335
$N_{xmax}(\text{承})$	138	124.471	0.901 964	$R_{xmin}(2)$	6 427	6 197.1	0.964 229
$Q_{ymax}(\text{承})$	2 230	2 262	1.014 35	$R_{ymin}(2)$	-1 261	-1 276.3	1.012 133
$Q_{zmax}(\text{承})$	6 062	5 933.1	0.978 736	$T_{zmin}(2)$	-6 706	-6 162.7	0.918 983

另外因为内力 N_x 各项及位移 θ_z 值都很小,故可忽略不计。所以只剩下 $M_{z\max}(\text{承})$ 、 $T_{z\max}(2)$ 、 $T_{z\min}(1)$ 和各位移需要进一步修正,这些反应除了 w 外,均在水平面(xoy 面)内,即属于桥梁在水平面内的反应,也是目前弯箱梁桥研究中的薄弱环节,本文不做进一步讨论。

4 结论

- (1)用统计分析的方法得到有关圆心角为 90°的双跨偏心支承弯箱梁桥的结构反应的经验公式,方法可行,可方便地用于该种桥型的初步设计。
- (2)反应 N_x 各项及 θ_z 值都很小,设计时可忽略不计。
- (3)内力 Q_z 各项、 M_x 各项、 M_y 各项,支承反力 R_x 各项及位移 w 和 θ_y 均只与跨长 L 有关,设计时可不考虑支承偏心的影响。
- (4)内力 Q_y 和 M_z 及支承反力 R_y 和 T_z 中的各分项反应可以用多项式表达,其参数仅为桥梁总长 L 和偏心距 e 。
- (5)桥梁在水平面内的部分反应,如内力 $M_{z\max}(\text{承})$,所有位移及支承反力 $T_{z\max}(2)$ 、 $T_{z\min}(1)$ 等用经验公式计算误差较大。

(6)本文结论仅限于满足文中条件的圆心角为 90°的双跨偏心支承弯箱梁桥的设计参考。

符号说明:

- 位移: u 、 v 、 w 分别表示 x 、 y 、 z 方向的线位移;
 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的转角位移。
- 内力:第 1 个字母 N 、 Q 、 M 分别表示轴力、剪力和弯矩;第 2 个字母 x 、 y 、 z 分别表示 x 、 y 、 z 方向;第 3~第 6 个字母 \max 、 \min 分别表示最大值和最小值;(使)表示正常使用极限状态;(承)表示承载能力极限状态。
- 支承反力: R 、 T 分别表示支承反力和支承反力矩; x 、 y 分别表示 x 、 y 方向; \max 、 \min 分别表示最大值和最小值;
(1)、(2)指荷载组合 1 和荷载组合 2。

参考文献:

[1] Khaled Sennah, John B Kennedy. Shear distribution in simply-supported curved composite cellular bridges. Journal of bridge engineering, ASCE, 1998, 3(2).

[2] Khaled Sennah, John B Kennedy. Simply supported curved cellular bridges: simplified design method. Journal of bridge engineering, ASCE, 1999, May.

[3] JTJ 023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

Influence of Eccentric Support on Two-Span Curved Box-Girder Bridges with 90-Degree Central Angle

SONG Guo-hua^{1,2}, LUO-ling^{2,3}, WANG Dong-wei¹

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China
3. Beijing General Municipal Engineering Dessign and Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: In this paper 72 models of a two-span curved box-girder bridge with 90-degree central angle and eccentric support are made, software system 3D-BSA is used to compute, Excel 2000 to treat dada, and statistic analysis method to set up empirical formulas between structure responses and parameters, such as bridge span and eccentricity of support for this type of bridges under service capacity state and carrying capacity state, so as to make some suggests or basis for pratical designs.

Key words: curved box-girder bridge; eccentric support; practical design; empirical formula