

某高速公路互通连续钢箱梁结构计算分析研究

余鸿彬, 谭宗伟, 夏腾

(武汉远行通路桥工程设计咨询有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:该文以某高速公路互通枢纽(36+55+36)m连续钢箱梁为工程依托,运用桥梁结构分析软件Midas/Civil,分别采用简化梁单元法、基于梁单元的多体系应力叠加法、板壳单元法进行结构计算分析。通过比较各种方法计算的应力情况、挠度以及自振特性等,论证了多体系应力叠加法和板壳单元法计算的可靠性,并根据各种计算方法的特点,总结了各种方法的适用环境,可为钢箱梁的结构计算提供指导和借鉴。

关键词:钢箱梁;多体系应力;板壳单元;有限元;自振特性

1 工程概况

依托工程钢箱梁桥跨布置为(36+55+36)m,桥面宽度16.75m,主跨跨越山东荣(成)—内蒙古乌(海)高速公路。钢箱采用单箱三室截面,箱顶面设置单向2%横坡,底板水平设置。钢箱梁边腹板采用斜腹板,腹板斜率为4.6:1,中腹板采用直腹板,主梁箱梁中心线处梁高2.5m。钢箱梁标准段顶板采用厚16mm的钢板,底板采用14mm的钢板,腹板采用16

mm的钢板,支点处顶底板、腹板加厚至24mm。箱内纵向交替1.5m左右分别设置实腹式横隔板和框架式横隔板。在悬臂两侧,悬臂腹板每1.5m左右一道。中间横隔板板厚12mm,支点横隔板板厚28mm。悬臂隔板16mm厚,悬臂下缘底板为16mm厚钢板、宽360mm,下缘底板间设置4mm厚装饰板。钢箱梁顶板设置U形纵向加劲肋,间距为600mm。悬臂处设置T形、I形纵向加劲肋,底板设置U形纵向加劲肋,间距750mm。钢箱梁横向设置3个支座,支座间距4.75m。钢箱梁标准断面如图1所示。

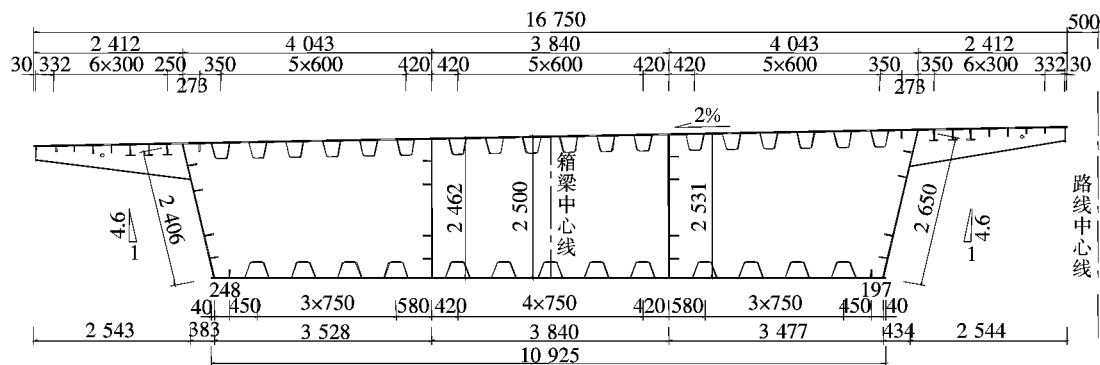


图1 钢箱梁标准断面(单位:mm)

2 钢箱梁计算方法

2.1 计算参数

(1) 恒载:钢材重度 $\gamma=78.5\text{ kN/m}^3$,桥面净宽15.75m,铺装采用12cm沥青混凝土和8cm钢纤维

混凝土,护栏采用钢筋混凝土护栏。各荷载取值如表1所示。

(2) 活载:公路—I级。

(3) 温度:按整体升温 25°C 、整体降温 -25°C 考虑;基于该桥的铺装形式,梯度温差按JTGD60—2015《公路桥涵设计通用规范》第4.3.12条取用,考虑

收稿日期:2020-03-10(修改稿)

作者简介:余鸿彬,男,大学本科,工程师。E-mail:361269710@qq.com

表 1 恒载计算参数

| 荷载类型 | 荷载集度/(kN·m ⁻¹) |
|--------|---|
| 外侧护栏 | 0.46 m ³ /m×25 kN/m ³ =11.5 |
| 内侧护栏 | 0.42 m ³ /m×25 kN/m ³ =10.5 |
| 沥青混凝土 | 0.12 m×15.75 m(宽度)×24 kN/m ³ =45.4 |
| 钢纤维混凝土 | 0.08 m×15.75 m(宽度)×25 kN/m ³ =31.5 |
| 二恒合计 | 98.9 |

钢箱梁顶板厚度范围内,正温差 $T_1=14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2=14\text{ }^{\circ}\text{C}$,负温差 $T_1=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 支座沉降:中支座不均匀沉降取 10 mm,边支座取 5 mm。

2.2 简化梁单元法

在进行钢箱梁初步设计时,为了验算拟定结构是否满足受力要求,选用的快速计算方法一般为简化梁单元法。简化梁单元法未考虑第二体系的影响,通过将顶底板的纵向加劲肋等效成顶底板厚度,从而建立由顶板、底板、腹板组合成的简单截面,建立梁单元进行计算。设计钢箱梁顶板普通段板厚 16 mm,墩顶加厚段 24 mm,将顶板 U 肋按间距 600 mm 考虑到顶板中,得出顶板普通段板厚为 25.6 mm,加厚段为 33.6 mm;将底板 U 肋按间距 750 mm 考虑到底板中,得出底板普通段板厚为 22.2 mm,加厚段为 32.2 mm。用 Midas/Civil 建立梁单元模型如图 2 所示。

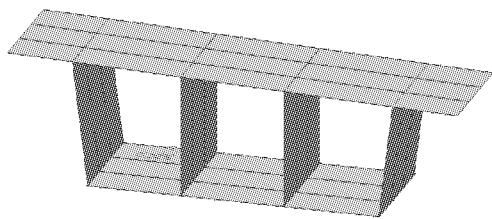


图 2 简化梁单元法计算断面

2.3 多体系应力叠加法

钢箱梁按照传力途径主要划分为 3 个受力体系。第一体系为结构总体体系,主要是顶板和纵肋作为主梁的一部分,共同参与受力。第一体系主要考虑剪力滞影响的有效分布宽度计算。钢桥顶板及其纵肋支承在横肋上,横肋支承在纵向腹板上,此阶段对应的体系为第二体系。第三体系称盖板体系,即支撑在两相邻顶板纵肋之间的桥面板横向变形。第三体系应力属于薄膜应力效应,通常可以忽略,故不予计算。

钢箱梁第一体系应力计算考虑剪力滞效应,按 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》(以下简

称钢桥规)第 5.1.8 条计算:

$$b_{e,i} = \begin{cases} b_i, & \frac{b_i}{l} \leq 0.02 \\ \left[1.06 - 3.2 \frac{b_i}{l} + 4.5 \left(\frac{b_i}{l} \right)^2 \right], & 0.02 < \frac{b_i}{l} \leq 0.3 \\ 0.15l, & \frac{b_i}{l} \geq 0.3 \end{cases}$$

式中: $b_{e,i}$ 为翼缘有效宽度; b_i 为腹板间距的 1/2 或翼缘外伸肢为伸臂部分的宽度; l 为等效跨径(见钢桥规表 5.1.8),计算简图见图 3。

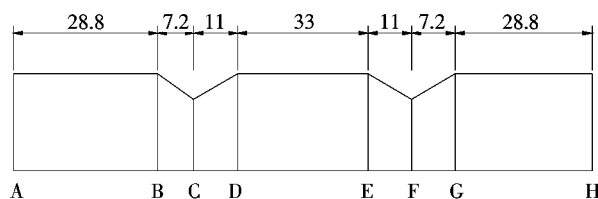


图 3 等效跨径计算简图(单位:m)

根据图 3 计算得到钢箱梁有效分布宽度见表 2。

表 2 钢箱梁有效分布宽度计算结果

| 位置 | 等效跨径/m | 有效分布宽度/m | | | 顶板系数 | 底板系数 |
|----|--------|----------|------|------|------|------|
| | | 悬臂 | 箱室顶板 | 箱室底板 | | |
| A | 28.8 | 1.98 | 5.14 | 4.76 | 0.85 | 0.88 |
| B | 28.8 | 1.98 | 5.14 | 4.76 | 0.85 | 0.88 |
| C | 18.2 | 1.72 | 4.56 | 4.27 | 0.75 | 0.79 |
| D | 33.0 | 2.04 | 5.28 | 4.88 | 0.87 | 0.90 |
| E | 33.0 | 2.04 | 5.28 | 4.88 | 0.87 | 0.90 |
| F | 18.2 | 1.72 | 4.56 | 4.27 | 0.75 | 0.79 |
| G | 28.8 | 1.98 | 5.14 | 4.76 | 0.85 | 0.88 |
| H | 28.8 | 1.98 | 5.14 | 4.76 | 0.85 | 0.88 |

第二体系应力计算主要包括横梁及纵肋的计算。桥面板作为横梁的盖板,横梁作为简支体系计算,计算跨径 $L=3\ 840\text{ mm}$,两道横梁之间距离的一半 $b=750\text{ mm}$ 。I 形截面有效分布宽度采用钢桥规公式(5.1.8—3)。行车道横梁断面见图 4。

桥面板作为纵肋的盖板,纵肋作为多跨连续梁计算,两道纵肋腹板之间距离的一半 $b=150\text{ mm}$,计算跨径 $L=1\ 500\text{ mm}$,纵肋有效分布宽度计算参考钢箱梁第一体系应力计算公式。纵肋计算断面见图 5。

横梁及纵肋计算采用 Midas/Civil 2019 建立有限元模型。单个横梁承受顺桥向 1.5 m 范围内的铺装

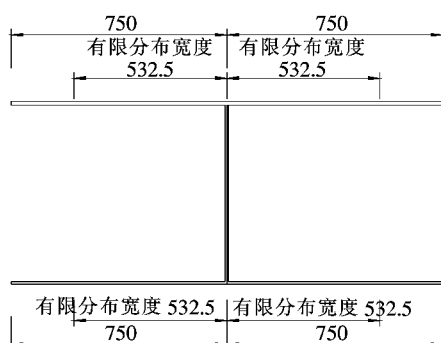


图 4 行车道横梁断面(单位:mm)

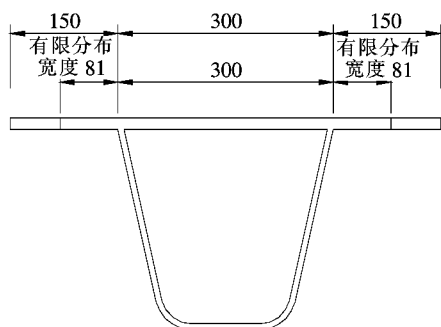


图 5 纵肋计算断面(单位:mm)

层重量以及 U 肋重量,单个纵肋承受横桥向 0.6 m 范围内的铺装层重量。横梁上翼缘板顺桥向有效宽度为 $550 \times 2 = 1\,100$ mm,此范围内,按车辆荷载,可布置 1 个 140 kN 轴重的车轮,按影响线加载。纵肋上翼缘板横桥向有效总宽为 $162 + 300 = 462$ mm,此范围内,只承受单侧车轮荷载,故纵肋按车辆荷载加载时,移动荷载工况系数取 0.5。

2.4 板壳单元法

对于变宽幅度较大、结构较为异形的钢箱梁,采用传统的梁单元计算很难模拟实际结构,并且难以保证计算结果的准确性。此时,可针对钢箱梁各个组成构件,建立板壳单元进行全桥分析,模型对顶底板、腹板、隔板等均可进行分析,且可同时考虑多个体系应力。顶底板纵肋按等效板厚计入模型中,不再单独建立纵肋模型。采用 Midas 建模,共建立板壳单元 2 846 个。

3 钢箱梁计算结果分析

3.1 顶底板、腹板应力

分别用 3 种方法对该连续钢箱梁进行计算,采用承载能力极限状态基本组合,荷载分项系数根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》4.1.5 条选取。各计算方法算得的应力见表 3。

表 3 钢箱梁各部位应力 MPa

| 计算方法 | 顶板 | | 底板 | | 腹板剪应力 |
|------------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 最大值 | 最小值 | 最大值 | 最小值 | |
| 简化梁单元法 | 73.5 | -75.6 | 111 | -90.1 | 59.8 |
| 多体系第一体系应力 | 106.3 | -92.7 | 122.5 | -119.4 | 62.7 |
| 应力叠加第二体系应力 | 51.2 | -53.7 | | | |
| 合计 | 157.5 | -146.4 | 122.5 | -119.4 | 62.7 |
| 板壳单元法 | 94.6 | -124.8 | 110.3 | -108.0 | 65.8 |

由表 3 可知:3 种计算方法顶、底板正应力均小于 270 MPa,剪应力均小于 155 MPa,满足规范要求。3 种计算方法底板应力及腹板剪应力水平较为接近,充分说明 3 种计算方法的可靠性。采用多体系应力叠加方法计算的顶板应力水平大于其他两种方法,故进行结构设计时采用此种方法计算可增大结构安全储备。

3.2 活载挠度计算

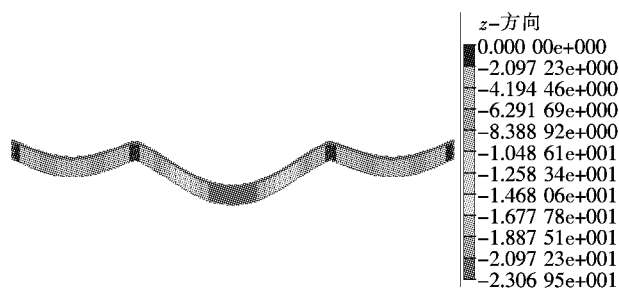
钢桥规第 4.2.3 条指出,计算竖向挠度时,应按结构力学的方法并采用不计冲击力的汽车车道荷载频遇值,频遇值系数为 1.0。钢桥规规定,连续梁活载竖向挠度限值不应大于计算跨径的 $1/500$ 。各计算方法活载对应的最大竖向位移如图 6 所示。

由图 6 可知:简化梁单元法和多体系应力叠加法活载最大位移为 23 mm 左右,为计算跨径的 $1/2\,391$;板壳单元法活载最大位移为 28.2 mm,为计算跨径的 $1/1\,964$,各方法活载位移较为吻合且均满足规范要求。前两种方法采用梁单元计算,结构整体刚度基本一致,故采用简化梁单元法进行结构初步计算时,结构的活载挠度指标具有充分的可靠性。

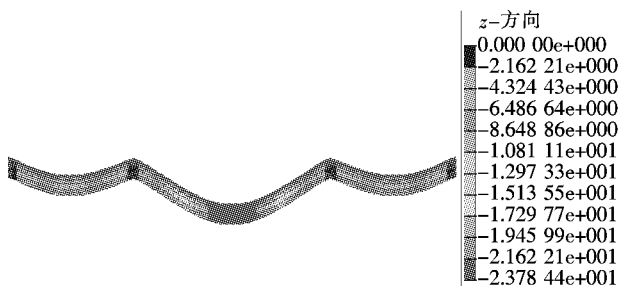
3.3 结构自振特性分析

结构的自振特性,主要包括自振频率、振型和阻尼比。桥梁结构中,自振频率和振型是进行结构动力分析及抗震设计的重要参数,也是桥梁运营过程中进行损伤判别的基本依据。自振频率也是桥梁荷载试验中重点测试的项目。桥梁结构的自振特性,通常和结构刚度、质量、材料阻尼特性、边界条件密切相关。

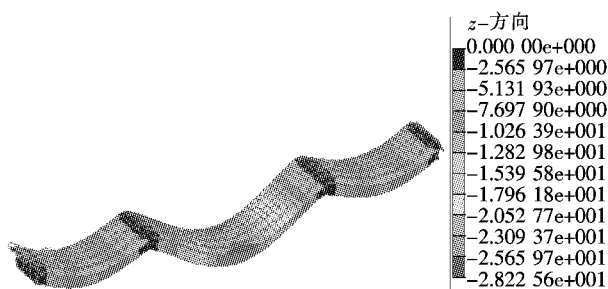
针对该文钢结构计算的 3 种方法,采用 Midas 板块当中的特征值分析,对连续钢箱梁的动力特性进行研究。特征值分析采用 Lanczos 法进行计算,取前 10 阶振动频率及振型进行分析。各计算方法的自振频率曲线如图 7 所示,板壳单元的 1、4、5、7 阶振型如图 8 所示。



(a) 简化梁单元法



(b) 多体系应力叠加法



(c) 板壳单元法

图6 活载位移图(单位:mm)

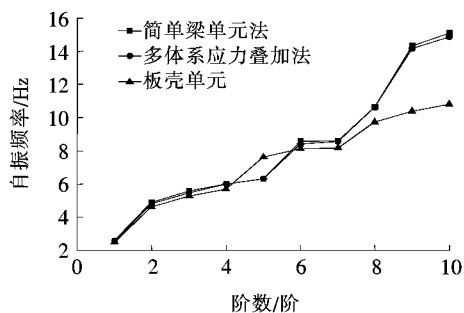
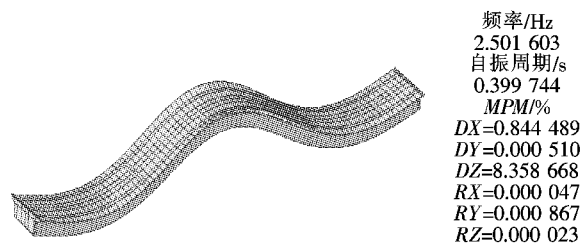
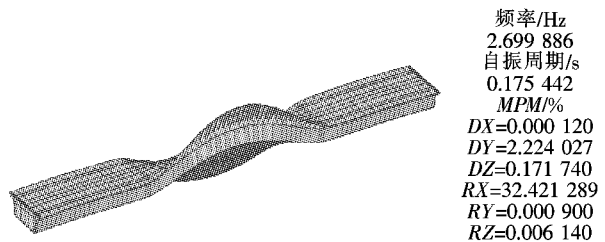


图7 各计算方法自振频率曲线图

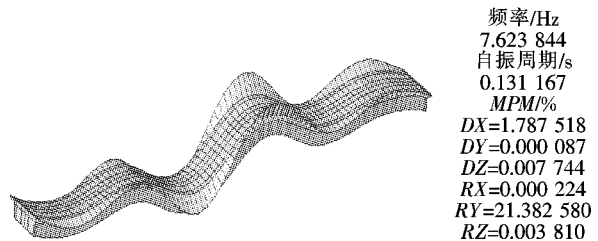
由图7可以看出:3种计算方法前8阶振型的自振频率基本吻合,故3种方法对结构自振特性的计算结果均具有可靠性。取板壳单元法部分振型进行分析,1阶振型表现为纵向水平为主的弯曲振动;4阶振型表现为结构的1阶扭转振动;5阶振型表现为结构的竖向弯曲振动;7阶振型表现为结构的2阶扭转振动。从结构的前8阶振型可看出,梁体竖向和扭转振



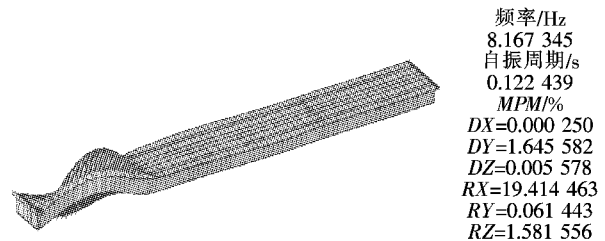
(a) 1阶振型



(b) 4阶振型



(c) 5阶振型



(d) 7阶振型

图8 板壳单元法振型图

动交替出现,说明钢箱梁结构的梁高拟定、横隔板的设置密度及支座横向间距取值十分合理,不仅给桥梁结构提供了足够的支撑,更保证了桥梁的横向稳定性。

4 结论与建议

以某高速公路互通枢纽(36+55+36)m连续钢箱梁为实际工程背景,对连续钢箱梁3种计算方法的特点进行简述,并分别采用3种方法对钢箱梁进行结构计算,对比分析结构的应力、活载位移及结构自振特性等计算结果,得出以下结论:

(1) 从简化梁单元法、多重体系应力叠加法到板

混凝土连续箱梁体外预应力加固技术研究

张运清, 赵庆云, 孟涛

(山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘要: 体外预应力加固连续箱梁难点在于确定合理的体外预应力力度, 该文以某高速公路预应力混凝土连续箱梁为研究对象, 通过对比分析静载试验与有限元计算结果, 推断箱梁刚度折减情况, 得到了桥梁实际损伤状况, 并结合体外预应力加固设计原则合理确定了各跨需施加的体外预应力, 经加固前、后静载试验数据对比, 验证了加固效果良好, 桥梁承载能力满足要求, 确保了桥梁安全运营。

关键词: 预应力混凝土箱梁; 体外预应力; 加固; 静载试验; 有限元分析

预应力混凝土连续箱梁桥具有行车平顺、抗扭刚度大、变形小、施工便捷等优点, 在中国公路及城市桥梁中广泛应用, 但是随着自身劣化、车辆超载、环境腐蚀等因素影响, 许多箱梁底板、腹板等部位出现裂缝病害, 裂缝的存在会削弱梁体刚度和强度, 结构的受力因刚度的变化导致内力重分布, 影响结构的使用耐久性及承载安全性, 甚至会造成桥梁结构的破坏, 必须对其进行加固。JTG/T J22—2008《公路桥梁加固设计规范》对几种常见加固方法进行了说明, 其中, 体外预应

力加固法布置灵活、运营干扰少, 不仅能显著提高结构承载能力, 还具有增大结构刚度、调整结构受力状态等作用, 在旧桥加固工程中广泛应用。

如何准确推断病害桥梁的损伤情况, 并合理确定体外预应力力度是体外预应力加固法的难点, 该文以某高速公路预应力混凝土连续箱梁为研究对象, 通过静载试验与有限元模型结果对比分析, 合理确定病害箱梁需施加的体外预应力, 并通过静载试验对加固效果进行验证。

壳单元法, 结构计算的复杂程度由浅及深; 对于常规钢箱梁进行初步设计计算时, 采用简化梁单元法即可, 既能满足初步设计的深度要求, 也能大大节省工作量。对于常规钢箱梁结构的施工图设计, 根据需要可选择多体系应力叠加法进行计算, 此种方法计算的活载位移及自振特性均具有较高的可靠性, 并且结构应力的安全储备更高。针对变宽裤衩钢箱梁, 传统的梁单元计算方法很难进行模拟, 故建议此时可采用板壳单元法进行计算, 此种方法计算精度较高, 钢箱梁各部位均能进行分析, 但此种方法工作量相对较大。

(2) 根据各种方法的计算结果可知, 该连续钢箱梁顶底板正应力、腹板剪应力及活载挠度均满足规范要求, 且具有较大的安全储备; 自振特性分析表明, 该文设计的钢箱梁结构尺寸选择、构件布置等均十分合理, 可为同类型桥梁的设计提供指导和借鉴。

参考文献:

- [1] 于长鰲, 宋文学, 李永, 等. 双箱单室曲线钢箱梁桥的不同建模方法计算结果对比分析[J]. 公路交通技术, 2018(6).
- [2] 谭洪涛. 松花江公铁两用桥钢箱梁力学性能分析[J]. 中外公路, 2018(6).
- [3] 熊诚, 汪斌, 梁庆学. 城市高架连续钢箱梁计算分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(3).
- [4] 龙小湖. 大跨径简支钢箱梁桥设计分析[J]. 黑龙江交通科技, 2018(2).
- [5] 袁霖宇. 成都市二环路高架桥特殊钢箱梁设计研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 舒琳智. 城市钢箱梁人行天桥结构计算分析研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2013.
- [7] 吕向明. 连续钢箱梁桥自振特性分析与动力荷载试验[J]. 工程质量, 2011(6).
- [8] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].

收稿日期: 2019-11-20

作者简介: 张运清, 男, 硕士, 工程师. E-mail: a15275162160@163.com