

朱兆斌, 宋郁民, 于丽娜. 斜交框架桥力学性能和裂缝防治研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(1): 110-116. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 250117

斜交框架桥力学性能和裂缝防治研究

朱兆斌¹, 宋郁民², 于丽娜²

(1 杭州铁路设计院有限责任公司, 杭州 310006; 2 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 实践证明下穿铁路采用框架桥是最佳方案, 受地形和道路选线条件限制时, 斜交框架桥应用更广泛。斜交框架桥力学特性复杂, 除具有正交框架桥的受力特点外, 还存在扭转和翘曲变形。本文以下穿铁路斜交框架桥为研究对象, 开展其力学性能分析与裂缝防治研究。分别采用框架桥设计辅助软件 DDQ 和有限元 ANSYS 软件建模, 以斜交框架桥的斜角角度、长度和梗斜倒角比为影响因素进行力学特性分析。研究结果表明: 斜交框架桥挠度随着斜交角的增大而增大; 斜交角小于 30° 时, 框架桥受力特性接近正交框架桥, 应力和位移随长度变换也较小; 当斜交角大于 30° 时, 应力和位移随框架桥的长度变化较大; 梗斜倒角比对框架桥的受力产生一定影响, 最优的倒角比例为 1:1; 采用软件 DDQ 设计斜交框架桥, 具有较大安全储备性能。在施工和设计过程中, 注意地基不均匀沉降引起结构裂缝, 并选择合适的水泥和集料, 合理设计混凝土配合比, 避免温度裂缝。

关键词: 斜交框架桥; 力学性能; 斜交角; 裂缝防治

中图分类号: U411.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)01-0110-07

Research on mechanical properties and crack prevention of skew frame bridge

ZHU Zhaobin¹, SONG Yumin², YU Lina²

(1 Hangzhou Railway Design Institute Co., Ltd, Hangzhou 310006, China;

2 School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Practice has proven that using frame bridges for underpass railways is the best solution. When limited by terrain and road selection conditions, inclined frame bridges are more widely used. The mechanical characteristics of oblique frame bridges are complex, and in addition to the stress characteristics of orthogonal frame bridges, there are also torsional and warping deformations. This article takes the underpass railway oblique frame bridge as the research object, and conducts its mechanical performance analysis and crack prevention research. The framework bridge design assistance software DDQ and finite element ANSYS software were used to model the mechanical characteristics of the oblique frame bridge, with the oblique angle, length, and stem chamfer ratio as influencing factors. The research results indicate that the deflection of skew frame bridges increases with the increase of skew angle; When the skew angle is less than 30°, the stress characteristics of the frame bridge are close to those of an orthogonal frame bridge, and the transformation of stress and displacement with length is also small; When the skew angle is greater than 30°, the stress and displacement vary greatly with the length of the frame bridge; The chamfer ratio of the stem has a certain impact on the stress of the frame bridge, and the optimal chamfer ratio is 1:1; Adopting software DDQ to design a skewed frame bridge with significant safety reserve performance. During the construction and design process, attention should be paid to structural cracks caused by uneven settlement of the foundation, and appropriate cement and aggregates should be selected. The concrete mix ratio should be designed reasonably to avoid temperature cracks.

Key words: skew frame bridge; mechanical characteristics; bevel; Crack Prevention

0 引言

框架桥既适合既有铁路的顶进施工工艺, 又满足城市道路下穿铁路的地形限制和选线要求, 是既有铁路改造中常用结构形式之一。为了更好地适应未

来高速铁路和既有铁路提速, 需对斜交框架桥力学性能进行精细化分析, 详细研究不同斜交角框架桥的受力特点和变形规律, 特别是较大斜交角(斜交角超过 30°)的框架桥的力学性能。蒋欢^[1]以 3 座相同跨度不同角度框架桥为例, 采用空间有限元

MidasCivil 建立板单元模型进行数值模拟并配筋,同时采用平面杆系框架桥配筋软件进行配筋,对二者配筋结果进行对比,以此为框架桥设计,总结设计经验;赵海粟^[2]运用 MIDAS 有限元软件建立公路下穿既有铁路框架桥施工三维模型,分别模拟计算单面开挖和对称开挖两种不同施工条件下对既有铁路的影响,分析铁路的空间位移情况,为本工程和以后类似工程的设计施工提供参考;张超^[3]以河南省济源市下穿铁路斜交框架桥为工程背景,采取直角补齐异性正交设计,通过有限元软件 MIDAS 建立三维空间板单元模型,计算分析结构受力特性,总结配筋特点,可为同类斜交框架桥的设计提供参考与指导;李森^[4]依托某实际工程,建立数值模型进行分析,分别改变框架地道桥的宽跨比、斜交角、高跨比、腋角尺寸并分别建立有限元模型计算分析,研究设计参数增长 15% 时受力特性的变化规律;卫星^[5]和周家新^[6]都是采用空间有限元分析方法对铁路斜交框架立交桥进行力学分析,并结合分析结果得出了铁路斜交框架桥的空间受力特点,对铁路斜交框架桥钢筋布置提出适合的方案和要求。

1 工程概况

从常规桥涵计算理论及结构上来看,铁路线路与框架桥纵向走向的斜交角大部分位于 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间。 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 为斜交角较大范围,在结构斜交框架桥的顶板下缘、底板上缘钝角处布设加强钢筋;当角度为 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,可忽略斜交作用,即不再在钝角处布设加强钢筋,按斜交跨径的正交桥进行分析计算,此时偏计算的受力偏安全^[7-8]。

从斜交框架桥所承受的上部铁路荷载来看,可分为承受单线荷载、复线荷载两类。例如,宣杭线长虹西街斜交框架桥上方为杭州至宣城上行线、下行线双线并行铁路线,上行线与下行线中心线间距 4.85 m,铁路线布设偏向斜交框架桥北出口,即不沿着桥涵中心位置对称布设,如图 1 所示。例如,杭州北-勾庄既有宣杭老线铁路为单线跨越斜交框架桥,且线路为中心布设,如图 2 所示。

从结构支撑条件来看,斜交框架桥采用了 $\phi 60$ cm 高压旋喷桩、 $60 @ 40$ cm 高压旋喷桩, $\phi 60$ cm 高压旋喷桩帷幕加 10 cm 厚碎石垫层等类型,基础底部为①强风化砂岩、中风化砂岩,且地基承载力在 350 kPa 以上;②粉砂、圆砾等承载力 180 kPa 以上;③卵石层、粉砂岩等承载力 250 kPa 以上。

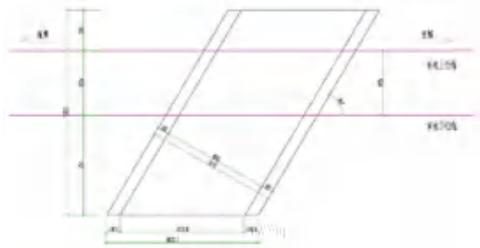


图 1 上下行铁路线非对称布设斜交框架结构平面布置图
Fig. 1 Asymmetrical layout of diagonal frame structure for up and down railway lines

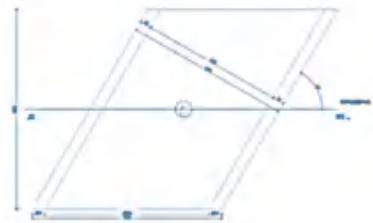


图 2 单线通行布设斜交框架结构平面布置图
Fig. 2 Layout of diagonal frame structure for single lane access deployment

本文以单线荷载的下穿铁路框架桥为例,进行力学特性的分析和裂缝防治的研究。

2 计算模型建立

2.1 模型类型

斜交框架的有限元模型包括平面杆系地道桥 CAD 系统软件 DDQ (Auto Computer Aided Design Design Drawings for Bridges and Roads) 软件模型和实体单元的 ANSYS 有限元分析软件模型。DDQ 软件基于平面杆系结构有限元的计算原理,结合斜交板的受力特点,进行线弹性的受力分析,具有计算和辅助出图功能^[9-10]。

采用 ANSYS 有限元软件进行非线性分析。将钢筋混凝土结构有限元模型作为整体式分析模型,即采用 solid65 单元设置钢筋配筋率参数来实现仿真分析,得出混凝土与钢筋对计算刚度的贡献。其中,混凝土本构关系采用多线性等向强化模型;混凝土破坏准则采用了 Willam-Warnker 五参数破坏准则^[11];混凝土应力-应变曲线在应变 $0 \sim 0.002$ 之间采用二次抛物线为上升段,在应变 $0.002 \sim 0.0033$ 之间采用直线段。钢筋采用屈服段的理想弹塑性模型。由于为边界施加力荷载,因此采用了位移收敛准则,其收敛条件为 1.5%。

2.2 边界条件

结构恒载包含结构自重、侧墙土压力、顶板上方

道床、轨道等荷载。框架桥底板上作用汽车荷载后,其荷载效应由底板传递至基础底部,对顶板及侧墙的影响很小,基本可忽略,因此在荷载施加方面,只考虑顶板上方的列车荷载,荷载示意如图3所示。



图3 侧向土压力、顶板上方压力及自重荷载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lateral earth pressure, pressure above the roof slab and deadweight loads

根据李仁涛^[12]提出的大跨度框架地道桥顶进

施工空间有限元分析,用 ANSYS 软件建立钢筋混凝土结构整体式有限元模型,进行配筋参数计算时,受斜交角的影响,在预先设定的局部坐标系下设置参数,保证钢筋方向与结构设计方向一致。

3 斜交框架的力学特性分析

为研究斜交角度、框架桥长度和各类土层对斜交框架桥力学性能的影响,先利用 DDQ 软件建立不同斜交角度模型,再用 ANSYS 有限元分析软件,分别建立不同斜交角度的框架桥模型、斜交角度和跨径不变而长度变化的框架桥模型以及不同土层和地基承载力变化的框架模型,进行受力特性的分析。

3.1 不同斜交角度对框架桥受力特性的影响

保持框架桥跨径为 12 m,长度为 15 m 不变,改变框架桥的斜交角度。分析得出不同斜交角度对框架桥的力学性能影响。

恒载作用下的位移和应力云图如图4所示。

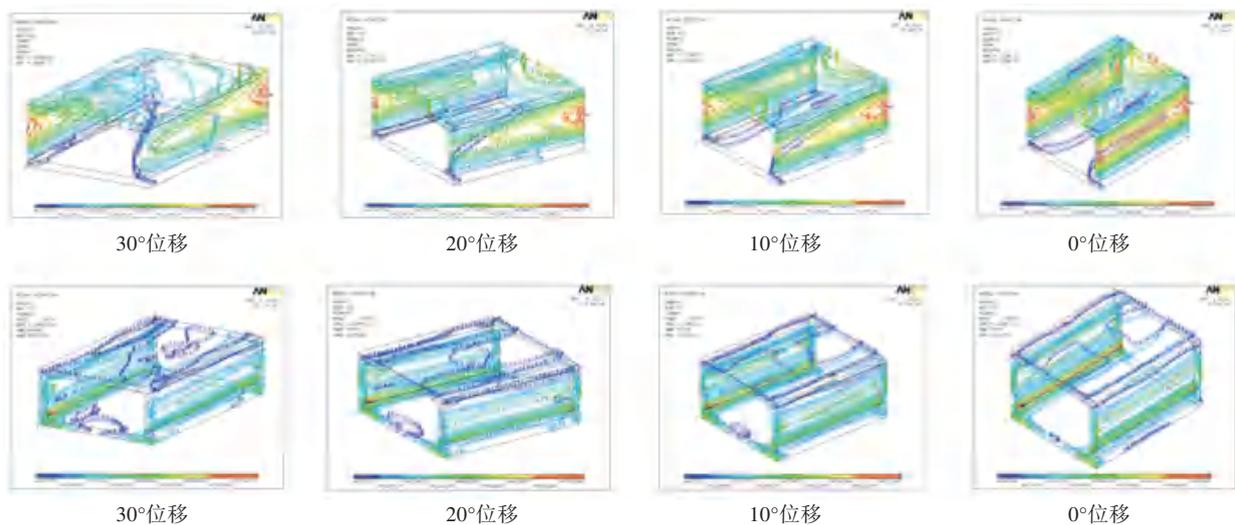


图4 恒载作用下位移和应力云图

Fig. 4 Displacement and stress clouds under constant loads

由图4可得出以下结论:

(1)恒载作用下位移最大值发生位置均为侧墙端部,两面侧墙发生位置基本相同;

(2)随着斜交角的变化,侧墙中部高度位置的位移逐步增大;

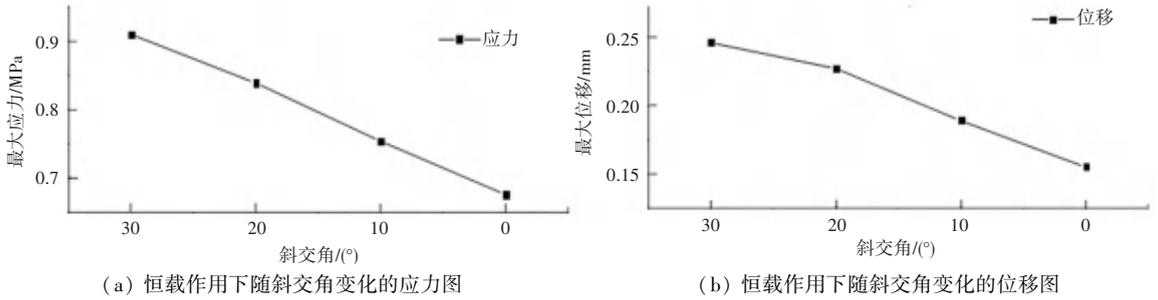
(3)结构最大应力位置发生在墙体和底板相交位置处,且靠近锐角处墙端部,且逐步呈现出增大趋势;

(4)墙体和底板相交位置处设置了梗斜,局部应力是主要受力现象,梗斜的倾斜度是影响该位置的局部受力特性的主要因素。

恒载作用下位移随斜交角变化图如图5所示。由图5可知,随着斜交角逐渐减小,框架桥的最大位移和最大应力绝对值基本呈线性减小,最大位移值和最大应力值环比降低7.8%,说明斜交角对框架桥的整体力学性能影响较大,在进行配筋时要注意斜交角所带来的结构应力集中。

组合荷载(恒载和列车)共同作用下位移和应力云图如图6所示。

组合荷载(恒载和列车荷载)共同作用下位移随斜交角变化的位移图如图7所示。

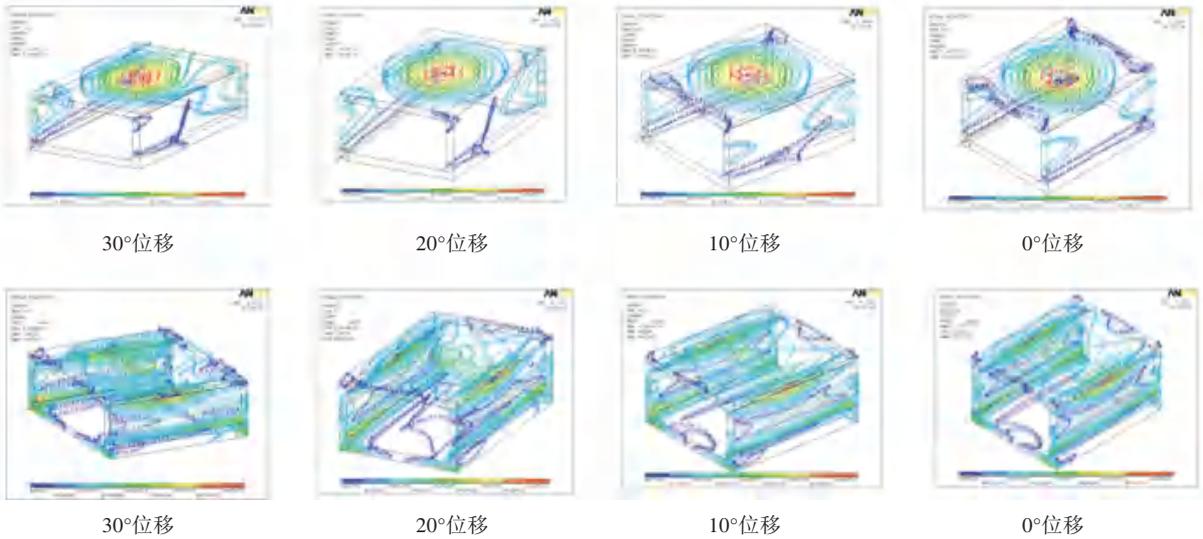


(a) 恒载作用下随斜交角变化的应力图

(b) 恒载作用下随斜交角变化的位移图

图 5 恒载作用下随斜交角变化图

Fig. 5 Plot of variation with oblique cross angle under constant load



30°位移

20°位移

10°位移

0°位移

30°应力

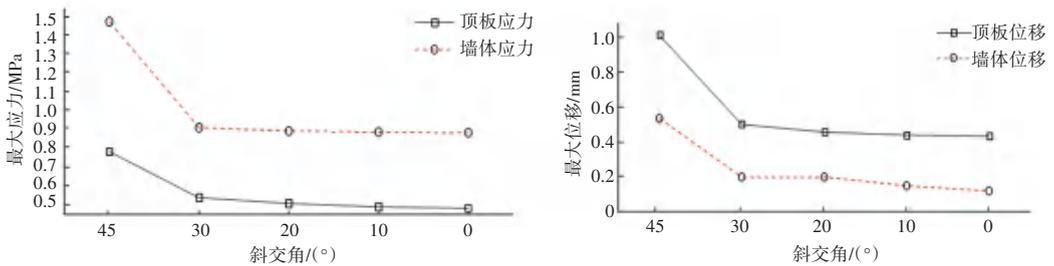
20°应力

10°应力

0°应力

图 6 组合荷载下位移和应力云图

Fig. 6 Cloud diagram of displacement and stress under combined load



(a) 组合荷载作用下应力随斜交角变化对比图

(b) 组合荷载作用下位移随斜交角变化对比图

图 7 组合荷载作用下应力和位移随斜交角变化对比图

Fig. 7 Comparison of stresses and displacements with diagonal intersection angle under combined loading

由图 6 和图 7 可知:

(1) 在恒载和列车荷载共同作用下, 斜交角虽发生变化, 但结构最大位移均在顶板端部, 而应力最大值和位移最值不在同一个地方, 发生在顶板与侧墙的交接处, 属于应力集中, 且应力分布的现象随着斜交角角度的减小越来越明显。

(2) 在不同斜交角的框架桥, 顶板最大应力均小于两侧墙体最大应力, 顶板最大位移均大于两侧墙体位移。

(3) 随着斜交角减小, 结构最大位移绝对值和最大应力绝对值均不断减小。

(4) 斜交角越大, 结构位移和应力对角度变化越敏感; 斜交角越小, 结构位移和应力对角度变化越迟钝。

(5) 产生这种情况的原因是框架桥受到周边墙体约束及周围土压力影响, 结构不符合平面应变。斜交角越大, 结构两端应力集中现象越严重, 导致结构对角度的变化比较敏感。

3.2 不同长度对框架桥受力特性的影响

选取跨径为 12 m 的框架桥保持不变, 利用 ANSYS 建立 5 种斜交角下 3 种长度 (长度分别为 15 m、30 m 和 45 m) 的实体有限元模型, 分析不同

斜交角下不同跨度框架桥的力学性能影响。组合荷载下的框架桥受力特性对比分析见表1~表3。

表1 组合荷载作用下跨径12 m长15 m框架桥的受力对比分析表

Table 1 Comparative analysis of forces in a 15 m long frame bridge with 12 m span under combined loading

斜交角	顶板位移/ mm	顶板应力/ MPa	墙体位移/ mm	墙体应力/ MPa
45°	1.020	0.786	0.54	1.480
30°	0.504	0.540	0.20	0.914
20°	0.460	0.509	0.20	0.896
10°	0.443	0.491	0.15	0.891
0°	0.437	0.484	0.12	0.887

表2 组合荷载作用下跨径12 m长30 m框架桥的受力对比分析表

Table 2 Comparative analysis of forces on 30 m long frame bridge with 12 m span under combined loads

斜交角	顶板位移/ mm	顶板应力/ MPa	墙体位移/ mm	墙体应力/ MPa
45°	0.868	0.640	0.627	1.240
30°	0.837	0.571	0.418	1.010
20°	0.818	0.534	0.318	0.992
10°	0.805	0.509	0.313	0.972
0°	0.801	0.500	0.311	0.957

表3 组合荷载作用下跨径12 m长45 m框架桥的受力对比分析表

Table 3 Comparative analysis of forces on 45 m long frame bridge with 12 m span under combined loads

斜交角	顶板位移/ mm	顶板应力/ MPa	墙体位移/ mm	墙体应力/ MPa
45°	0.574	0.578	0.415	1.120
30°	0.533	0.524	0.385	0.948
20°	0.513	0.499	0.370	0.948
10°	0.500	0.484	0.361	0.938
0°	0.496	0.479	0.358	0.929

组合荷载作用下,12 m跨径的3类长度的框架桥随着斜交角的变化应力对比,如图8所示。

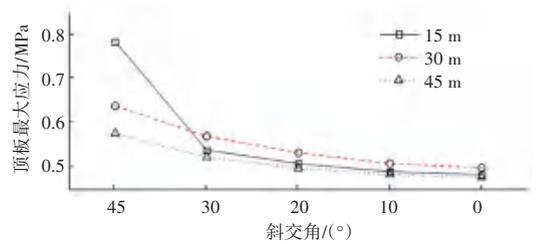


图8 组合荷载作用下不同长度框架桥顶板应力变化对比图

Fig. 8 Comparison of stress changes in top slabs of frame bridges of different lengths under combined loading

组合荷载作用下,12 m跨径的3类长度的框架桥顶板最大位移变化对比图如图9所示。

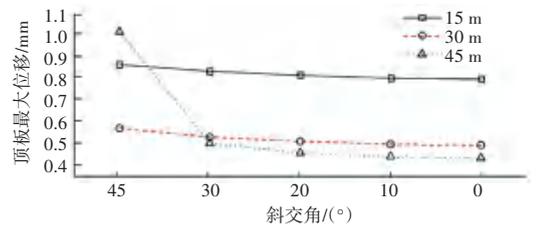


图9 组合荷载作用下不同长度框架桥顶板最大位移变化对比图

Fig. 9 Comparison of maximum displacement change of top slabs of frame bridges of different lengths under combined loads

从图8和图9可知:斜交角不变,随着跨长比的减小,斜交框架桥最大应力绝对值在减小,最大位移绝对值也明显有下降趋势,这说明调整跨长比对减小斜交框架桥的应力集中很有帮助。

3.3 梗斜倒角比对框架桥受力特性的影响

梗斜倒角的比例对框架桥的受力特性有较大影响,对结构的应力分布,尤其是应力集中效应产生明显影响。以铁路净跨径8 m长度45 m框架桥为例,由于恒载作用影响较小,故考虑研究列车荷载作用下的受力特性,分析梗斜倒角比例对结构的位移、应力影响。本文分别研究了倒角比例为1:1、1:2、1:3和3:1 4种情形下的受力特性(本文所指的梗斜倒角比例为竖直高度:水平宽度)。

梗斜倒角比例为1:1情形下框架桥在列车荷载作用下的位移及应力云图如图10和图11所示。

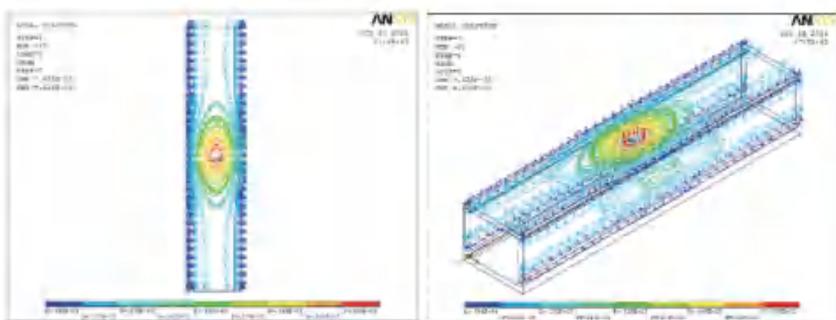


图10 列车荷载作用下结构位移图

Fig. 10 Structural displacement under train loading

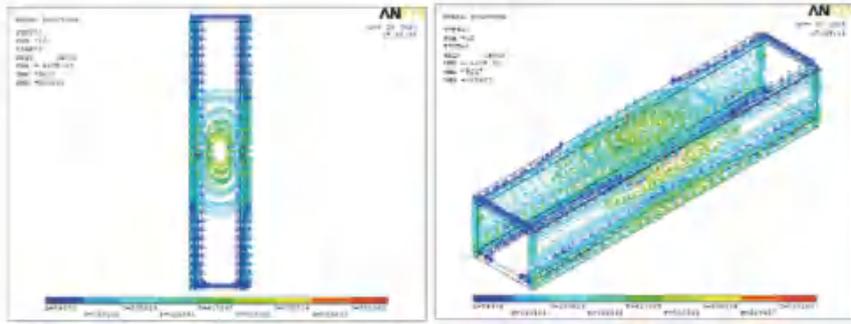


图 11 列车荷载作用下结构应力图

Fig. 11 Structural stress diagram under train loading

4 种情形的计算结果见表 4。由表 4 可知:

(1) 采用 3 : 1 比例进行加腋处理后的侧墙位移最小, 其数值为 0. 222 mm, 约为 1 : 3 比例的 0. 298 的 0. 74 倍, 降低幅度为 26%。

(2) 当梗斜 1 : 1 比例墙体应力最低, 位移比 1 : 3 比例的增大 8. 6%, 综合考虑, 梗斜倒角比例 1 : 1 最优。

表 4 梗斜倒角的比例对框架桥结构受力影响对比

Table 4 Comparison of the effect of the ratio of the diagonal chamfer of the pedicle on the structural forces of the frame bridge structure

梗斜倒角比例	1 : 1	1 : 2	1 : 3	3 : 1
顶板位移/mm	0. 620	0. 603	0. 597	0. 572
顶板应力/MPa	0. 589	0. 574	0. 563	0. 559
墙体位移/mm	0. 241	0. 235	0. 298	0. 222
墙体应力/MPa	0. 825	0. 866	0. 885	0. 868

表 5 恒载和列车荷载组合作用下不同计算模型的挠度对比结果

Table 5 Comparison results of deflections of different calculation models under the combination of constant load and train load mm

结构类型(15 m 长)	斜交角 45°		斜交角 20°		斜交角 0°	
	DDQ 模型	ANSYS 模型	DDQ 模型	ANSYS 模型	DDQ 模型	ANSYS 模型
下穿宣铁路 8 m 净跨径	5. 0	1. 130	1. 7	0. 716	1. 3	0. 680
下穿杭勾铁路 12 m 净跨径	16. 0	1. 020	5. 4	0. 460	4. 3	0. 437
下穿金华-千岛湖铁路 8 m 净跨径	9. 5	0. 478	3. 2	0. 401	3. 2	0. 383

4 框架桥裂缝防治

混凝土结构的裂缝可分为两种类型, 即结构性裂缝和非结构性裂缝。结构型裂缝主要是由强度不足而引起的; 非结构型裂缝, 则是由非受力因素引起的, 比如气候环境影响和施工不当等。依据前文的分析, 国内目前采用辅助设计软件 DDQ 进行设计的框架桥, 强度和刚度安全储备较大, 结构本身理论上不会产生受力裂缝。

4.1 结构裂缝的防治

实践中, 施工阶段框架桥常见贯穿性的结构裂缝, 调查研究发现主要是施工时框架桥的地基沉陷

3.4 不同计算模型的结果对比

本文研究斜交框架桥的力学特性, 分别用软件 DDQ 和有限元软件 ANSYS 进行分析。DDQ 软件是采用平面杆系有限元自主开发的具有计算和辅助出图功能的设计软件, 而 ANSYS 模型则采用实体单元, 进行非线性分析, 是更加精细化的分析模型。

选取 15 m 长的三座框架桥, 变化其斜交角和结构尺寸, 对比恒载和列车荷载组合作用下, 不同计算模型的挠度结果见表 5。由表 5 可知:

(1) 辅助设计软件 DDQ 的最大挠度计算结果远大于采用实体单元的 ANSYS 有限元计算结果;

(2) 采用辅助设计软件 DDQ 进行框架桥设计, 具有较大的安全储备和富余度。

不均。因此, 在设计和施工阶段, 有必要采取相应措施, 避免结构性裂缝。主要建议如下:

(1) 施工阶段做好基坑的基地处理施工, 例如基坑排水、基坑地基的加固处理;

(2) 设计阶段, DDQ 软件将顶板简化为简支梁结构, 不符合计算结果, 建议加大列车荷载作用处的梁端支撑和墙体截面和配筋;

(3) 在斜交框架桥的钝角和锐角处合理布置构造钢筋是避免结构出现受力裂缝的主要措施。

4.2 非结构裂缝的防治

非结构裂缝主要有混凝土的收缩裂缝和温度裂缝。收缩裂缝的主要特点是裂缝宽度较细, 纵横交

错且呈龟裂状的表面裂缝。施工阶段混凝土发生的收缩裂缝主要是塑性收缩与缩水收缩。避免混凝土的收缩裂缝,依据现场经验,主要采取如下措施:

(1)水泥选用 C3A 含量较低, C3S 含量适中, 细度较低, 能有效降低水化热和收缩性的水泥品种。例如某品牌的 P. O 52. 5R 水泥, C3S 平均含量 48%~52%, C2S 平均含量 27%~37%, C3A 平均含量 5%~7%, 掺料为非活性混合材料。细度测定结果是 80 μm , 筛余量为 6%~8%。

(2)混凝土拌合站的水泥储存库房面较大, 存放在 7 d 以上库房通风散热效果好, 降低了水泥使用时的温度。

(3)细集料选用中砂或粗砂, 级配良好、坚硬洁净; 粗集料选用弹性模量较高的石灰岩所轧制的碎石, 满足连续粒级, 公称粒级 5~31.5 mm。

(4)外加剂以减水剂为主, 优先选用萘系减水剂, 避免为快速施工而采用早强剂。

(5)施工阶段由于温度应力引起裂缝的主要因素是水化热过大。框架桥底板厚度一般大于 1 m, 属于大体积混凝土, 同时混凝土强度等级通常在 C50 以上, 每方混凝土水泥用量较多, 这些特点造成混凝土硬化过程中产生大量水化热, 且水化热引起混凝土内外温度差在 20℃ 左右, 因此建议夏季混凝土浇筑时间确定在下午开始浇筑, 并采用冷却集料法, 降低混凝土的入模温度。

5 结束语

(1)斜交框架桥的斜交角度越大, 结构挠度越大, 且与斜交角度呈现出非线性关系, 因此在满足线路要求的情况下, 应尽可能避免采用斜交角过大的框架桥方案, 以免结构产生较大位移;

(2)斜交角小于 30° 时, 框架桥长度的变化对结构应力值和位移值变化幅度影响很小, 接近正交的

框架桥; 斜交角大于 30° 时, 随着框架桥长度的变化, 结构应力值和位移值变化幅度均较大;

(3)在减小斜交框架桥应力集中问题时, 通过调整结构跨长比避免出现应力集中问题, 这种方法对于斜交角较大框架桥效果明显, 对斜交角小于 30° 框架桥效果不显著;

(4)梗斜倒角比对框架桥的受力产生影响, 最优的倒角比例为 1:1;

(5)采用软件 DDQ 设计斜交框架桥, 具有较大强度安全储备, 但在施工过程中应注意地基沉降不均匀引起结构性裂缝, 选择合适的水泥和集料, 合理设计混凝土配合比和施工措施, 避免温度裂缝。

参考文献

- [1] 蒋欢. 斜交框架桥配筋设计[J]. 工程建设与设计, 2022, 471(1): 77-79.
- [2] 赵海粟. 基于 MIDAS 的下穿铁路斜交框架桥的有限元分析[J]. 四川建筑, 2017, 37(2): 89-90.
- [3] 张超. 下穿铁路斜交框架桥受力分析[J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(11): 80-81.
- [4] 李森, 于洋, 黄祖慰. 等. 下穿铁路斜交框架地道桥主要设计参数分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9): 62-69.
- [5] 卫星, 强士中. 铁路斜交框架桥立交桥的空间分析[J]. 铁道建筑, 2004(5): 3-4.
- [6] 周家新. 下穿铁路斜交框架桥的空间结构分析[J]. 铁道建筑, 2005(7): 31-33.
- [7] 朱尔玉, 王恒栋, 谢玲, 等. 框架式地道桥设计与应用[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2017.
- [8] 朱健身, 陈东杰. 城市地道桥顶进施工技术与工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] 史莉莉. 基于英标 BS5400 的铁路框架桥设计[J]. 价值工程, 2019, 38(13): 131-133.
- [10] 赵勇. 下穿铁路斜交框架桥受力分析[J]. 铁道勘察, 2015, 41(6): 91-93.
- [11] 陶涛. 下穿铁路斜交框架桥的有限元分析[J]. 北方交通, 2013, 242(6): 83-85.
- [12] 李仁涛, 李家稳, 李家道. 既有线铁路梅花店隧道加固施工技术[J]. 北方工业大学学报, 2014, 26(1): 65-68.