

钢箱梁横隔板刚度设计理论与试验

吴红林¹, 张 航¹, 季振明¹, 宋 谋¹, 蒋 峰¹, 孙中华²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 中建八局第一建设有限公司, 济南 250100)

摘 要:从畸变基本理论出发, 推导得到不同横隔板间距条件下钢箱梁横隔板最小刚度的计算理论及公式。在此基础上根据能量守恒原理, 明确了横隔板最小刚度公式的适用范围。采用有限元分析方法, 研究了常规钢箱梁截面横隔板间距不同对畸变效应的影响, 在此基础上分析并解决了钢桥规范公式在计算较小间距横隔板时需要超厚横隔板的问题, 为常规钢箱梁合理设置横隔板提供明确的理论指导。以在建“世界第一跨径钢混组合梁桥”为背景桥梁, 设计大比例缩尺试验研究扭转工况下横隔板刚度变化对钢箱梁变形的影响。采用了 3D 扫描技术和三维有限元方法对试验结果进行分析, 研究表明横隔板刚度在提供基本约束的情况下, 横隔板刚度变化对箱梁畸变效应的影响十分有限。

关键词:桥梁与隧道工程; 钢箱梁; 畸变角; 弹性地基梁; 横隔板刚度; 横隔板间距

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)07-1845-15

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241341

Theoretical and experiment on stiffness design of steel box beam transverse diaphragm

WU Hong-lin¹, ZHANG Hang¹, JI Zhen-ming¹, SONG Mou¹, JIANG Feng¹, SUN Zhong-hua²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division First Construction Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: This paper, based on fundamental distortion theory, derives theoretical formulas for calculating the minimum diaphragm stiffness of steel box girders under different diaphragm spacing conditions. On this basis, using the principle of energy conservation, the applicable range of the minimum diaphragm stiffness formula is clarified. Finite element analysis is used to study the impact of varying diaphragm spacing on the distortion behavior of conventional steel box girder sections. This analysis addresses and resolves the issue present in design codes, where excessively thick diaphragms are required for small spacings, providing clear theoretical guidance for the rational placement of diaphragms in conventional steel box girders. Using the "world's longest-span steel-concrete composite girder bridge under construction" as a case study, a large-scale reduced model test was designed to investigate the impact of diaphragm stiffness variations on the deformation of steel box girders under torsional conditions. 3D scanning technology and finite element methods were employed to analyze the test results, and the research shows that once the diaphragm stiffness provides basic constraints, further changes in stiffness have a very limited effect on the distortion

收稿日期: 2024-12-18.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3801103); 内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2021-09).

作者简介: 吴红林(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 桥梁结构基础理论. E-mail: wuhonglinhit@hit.edu.cn

behavior of the box girder.

Key words: bridge and tunnel engineering; steel box girder; distortion angle; elastic foundation beams; diaphragm thickness; diaphragm spacing

0 引言

钢箱梁桥具有受力性能优越、跨越能力强以及经济合理等特点,因而在现代各种桥梁中得到广泛应用^[1]。Dabrowski^[2]用数学公式定量分析了畸变效应后,对薄壁结构的扭转研究一直是钢箱梁的研究重点。钢箱梁设置横隔板最主要的目的是避免扭转荷载作用下产生过大畸变^[3-6]。Szewczak 等^[7]认为横隔板对箱梁的抗扭刚度有很大的贡献,目前普遍认为在钢箱梁中设置横隔板是一个提高箱梁整体作用并减少畸变效应的好方法。Ren 等^[8]考虑横隔板的剪切变形,以超静定结构为基本计算模型,推导了畸变角、畸变翘曲位移和畸变翘曲应力的解析解。研究结论表明,当横隔板数目达到某一上限后,畸变效应将不再减小。为了比较精确地量化钢箱梁的畸变效应,郭金琼^[9]介绍了弹性地基梁比拟法,利用能量的变分原理,得到一个在形式上和弹性地基梁理论挠曲微分方程十分接近的一个畸变微分方程,利用弹性地基梁的理论来求解箱梁的畸变效应,该方法十分有效。

Park 的团队^[10-13]对钢箱梁横隔板进行了长期且系统性的研究,该团队在有限元分析的基础上,优化了双对称截面钢箱梁桥横隔板间距设置、对箱梁的变形进行了精确的分析。在此基础上,参数化研究了中间横隔板有效变形刚度比,并给出了实板、框架和桁架 3 种横隔板匹配的跨距数、当量跨长度和横隔板间距。Lee 等^[14]使用三维有限元进行参数化研究,考虑了横截面宽高比、跨径和横隔板厚度等变量,明确了有效的横隔板间距。Lee 等^[15]对单跨矩形钢箱梁桥进行了三维有限元分析,计算了不同横隔板刚度条件下箱梁的翘曲应力,并提出了中间横隔板间距的设计方法。

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[16](以下简称《钢桥规范》)借鉴日本《道路桥示方书 同解说钢桥钢部材篇》^[17](以下简称日本《钢桥规范》),在条文 8.5 给出了横隔板间距与刚度相应的计算公式,该公式的出现使得我国钢箱梁横隔板的设计从早期的经验设计过渡到较合

理的结构理论设计。但是,规范公式并没有给出公式所依托的力学模型或结构理论。由于缺乏对《钢桥规范》条文 8.5 中计算公式的机理说明或力学推导,钢桥设计人员并不能确切理解该公式的力学含义。

在钢箱梁桥设计实践中,采用《钢桥规范》条文 8.5 会出现若干问题^[18]:特定钢箱梁截面及畸变荷载条件下,在横隔板最小刚度计算中,横隔板间距越大,最小刚度越小;横隔板间距越小,刚度反而要求越大(厚度与横隔板间距的 3 次方成反比)。《钢箱梁桥设计》^[19]工程案例也表明当横隔板间距 6 m 时,实腹式横隔板厚度为 14 mm;当横隔板间距缩小到 4 m 时,横隔板厚度按照规范公式要求最少 48 mm,这显然与实际情况存在差异;同时在横隔板间距计算中,对于等效跨径小于 50 m 的桥梁,《钢桥规范》只给出了横隔板最大间距的限制,没有给出横隔板最小间距的限制,这导致设计人员按照常识理解多采用小间距,从而导致设置很多过厚的横隔板;过多过厚的横隔板并不能同等效率降低畸变效应,反而大大增加结构自重。此外,桥梁工程中大量使用的扁平钢箱梁是否可以直接采用《钢桥规范》条文 8.5,《钢桥规范》也未明确说明。

我国钢桥已经进入大规模建设时期^[20],钢箱梁是钢桥的主要结构形式,钢箱梁横隔板间距及厚度的合理设计是控制钢桥成本的最重要指标。由于《钢桥规范》条文 8.5 在钢桥设计实践中带来的部分困扰,钢箱梁横隔板的设计实践中更多是基于设计工程经验,从而导致钢箱梁横隔板设置数量偏多、厚度偏厚,一定程度上限制了桥梁精细化设计的要求。因此,迫切需要开展《钢桥规范》条文 8.5 横隔板机理的研究,明确规范公式的合理适用范围及条件。

钢箱梁横隔板设计主要受扭转荷载作用下畸变效应控制,同时还受其他多种因素制约,包括钢桥第二体系、是否为曲线梁桥、横隔板疲劳细节等。本研究主要从扭转荷载作用下畸变效应角度分析《钢桥规范》条文 8.5,基于畸变力学基本原理,明确规范公式背后的力学机理与依据。从畸

变角角度研究横隔板最小刚度,依据公式隐含的力学模型推导出《钢桥规范》横隔板最小刚度公式。同时,采用试验结果和有限元数值模拟对钢箱梁畸变角进行研究。在此基础上给出了横隔板最小刚度公式的适用范围,同时明确给出在公式不适用的区间范围横隔板刚度修正取值方法。

1 横隔板最小刚度公式推导

1.1 横隔板刚度设计规范摘要

为了防止钢箱梁出现过大的畸变设置中间横隔板,《钢桥规范》^[16]第8.5.2条对钢箱梁横隔板最小刚度有明确的规定:相邻两横隔板之间的计算跨径 L_D 在规定范围内(对跨径不超过100 m的普通钢箱梁, $L_D \leq 6$ m或 $L_D \leq 0.14L-1$ 且 ≤ 20 (跨径大于50 m)),横隔板的最小刚度的计算公式为:

$$K \geq 20 EI_{DW} / L_D^3 \quad (1)$$

式中: K 为横隔板刚度; E 为钢材的弹性模量; I_{DW}

为畸变惯性矩; L_D 为两横隔板之间的计算跨径。

上述条文内容借鉴了规范条文解释没有说明为何通过控制横隔板刚度来控制畸变应力大小,设计人员运用该公式时也不清晰其中蕴含的力学机理,只能较为机械地执行。因此,需要深入研究式(1)的力学机理。

对实腹式横隔板,横隔板刚度计算公式为:

$$K = 4GA_c t_D \quad (2)$$

式中: t_D 为横隔板厚度; G 为钢材剪切模量; A_c 为实腹式横隔板面积。

1.2 简支边界条件下钢板的畸变角计算

一块长为 B 、宽为 H 、厚度为 t 的薄板,在简支边界条件下,沿宽度方向受到 $V_d/2$ 竖直向上的剪力,记为 $P(V_d/2)$,如图1所示,运用结构力学知识,可以计算出钢板剪切变形为 Δ ,如式(3)所示:

$$\Delta = kPB / (4GHt) \quad (3)$$

式中: k 为剪力调整系数。

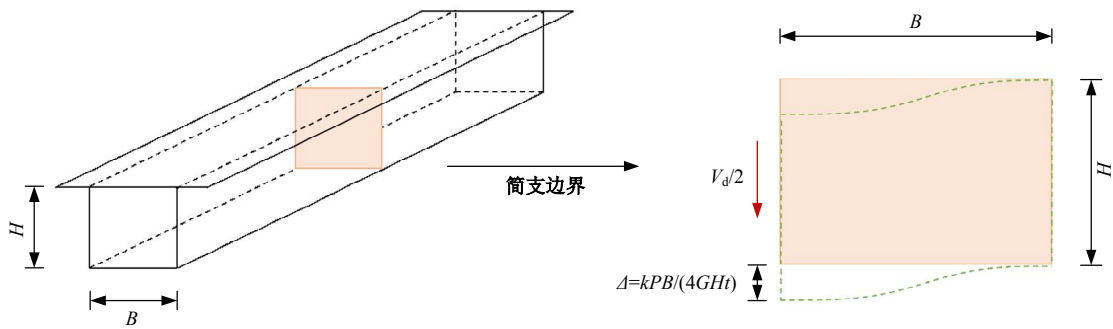


图1 钢横隔板受到剪力作用发生变形

Fig. 1 Steel intermediate diaphragm subjected to shear forces

对应的畸变角 γ_1 可通过式(4)解出:

$$\gamma_1 = \Delta / B = kPB / (4GBHt) \quad (4)$$

1.3 简支边界条件下钢箱梁的畸变角计算

钢箱梁每隔一定的间距设置横隔板,提取两相邻横隔板间的箱梁段进行研究。建立力学模型:横隔板在自身平面内的刚度接近于无穷大(简支边界条件),在垂直于平面的方向,可以自由翘曲,横隔板提供简支边界条件,在跨中位置受集中力 V_d 作用。

计算箱梁在畸变荷载下的总势能,取箱梁段进行框架分析,翼缘部分因为荷载作用,可以取箱梁截面为封闭矩形研究,根据最小势能原理和欧拉方程,得到以畸变角 γ 表示的畸变微分方程为:

$$EI_{11} \gamma^{(4)} + EI_R \gamma = V_d B \quad (5)$$

式中: EI_{11} 、 EI_R 分别为箱梁的抗畸变翘曲刚度和

箱梁抗畸变框架刚度。

横隔板自身平面内刚度接近无穷大,在垂直平面的方向,可以自由翘曲。这样畸变微分方程对应的边界条件为简支边界条件。

类比弹性地基梁的四阶微分方程和以畸变角为参数的畸变微分方程,两类方程的相关参数对比如表1所示。

根据简支边界条件和外荷载情况,可以求解弹性地基梁跨中截面的挠度,类比可以解得相同的约束条件、外荷载条件下箱梁跨中截面的畸变角 γ_2 。

$$\gamma_2 = V_d B L_D^3 / [48EI_{11} (1 + 48EI_{11} / EI_R L_D^4)] \quad (6)$$

上述畸变微分方程的求解边界条件是简支边界条件,畸变角的大小主要由横隔板间距 L_D 决定。

表 1 类比弹性地基梁与箱梁畸变

Table 1 Beams on elastic foundations and box girder distortion

弹性地基梁	参数	箱梁畸变	类比的参数
$EI_b y^{(4)} +$ $ky = q$	—	$EI_{11} \gamma^{(4)} +$ $EI_R \gamma = V_d B$	—
EI_b	抗弯刚度	EI_{11}	抗畸变翘曲惯矩
k	地基模量	EI_R	抗畸变框架刚度
q	分布荷载	$V_d B$	畸变垂直分力偶
y	挠度	γ	畸变角

在钢箱梁桥横隔板设计中,需要量化这种“简支边界条件”,即需要明确钢箱梁横隔板的具体尺寸。如果横隔板自身的畸变角远小于箱梁截面产生的畸变角,就可以在力学上保证箱梁畸变微分方程两端简支的近似条件,从而采用可以类比两端简支的弹性地基梁解法求解箱梁畸变。

根据式(4)和式(6),引入无量纲数 C , C 的物理含义为钢箱梁畸变角与横隔板畸变角的比值。当 $\gamma_2/\gamma_1 \geq C$ 时,两者产生的畸变角有数量级上的差异,此时横隔板为箱梁提供了较强的约束条件(简支边界条件):

$$\frac{kPB}{4GBHt} \leq \frac{V_d BL_D^3}{C \cdot 48EI_{11}(1 + 48EI_{11}/EI_R L_D^4)} \quad (7)$$

式中: $P = V_d/2$, $4GBHt$ 为规范中给定的实腹式横隔板刚度 K 的计算公式;调整因子 $\delta = 1 + 48EI_{11}/EI_R L_D^4$; k 为剪切调整系数,矩形截面的精确取值是 1.2。

解得 $K \geq C \cdot 24k\delta EI_{11}/L_D^3$, 该公式就是中国《钢桥规范》条文 8.5.2 对应公式的来源(规范公式没有公式来源与说明)。对比《钢桥规范》中横隔板最小刚度公式 $K \geq 20EI_{Dw}/L_D^3$, 可以求解出无量纲数 C 。从式(6)可以看出,畸变角的大小首要决定条件是横隔板的间距,横隔板的刚度只要满足简支边界条件即可。如果采用超厚横隔板或双横隔板,使横隔板起到固定边界条件的作用,在实际钢箱梁桥工程中显然不适合、不经济。

根据《钢桥规范》8.5.2 条文首先确定横隔板间距 L_D , 然后根据条文公式 $K \geq 20EI_{Dw}/L_D^3$ 确定横隔板刚度,就可以满足控制畸变角的要求,这在某些情况下是不合理的。实际钢箱梁桥横隔板刚度大小的变化对应微分边界条件的对应变化(弹性支承、简支支承),对控制畸变效应作用有限,畸变效应的控制最主要仍然是合理控制横隔板

间距。

1.4 算例分析

设计一组等截面矩形钢箱梁,根据 1.3 节中取长箱梁段进行框架分析的力学模型受力条件和规范中对横隔板间距的规定,拟定横隔板间距 $L_D = 20$ m, 钢箱梁截面主要参数列于表 2。

根据式(1)和式(7),联立方程组解得 3 个截面对应的 C 值为: $C_1 = 10.5$, $C_2 = 14.35$, $C_3 = 63.45$ 。证明横隔板畸变角远小于箱梁畸变角,两者有数量级的差异,横隔板可以对钢箱梁产生有效的约束效应。

表 2 钢箱梁截面主要参数

Table 2 Main parameters of steel box girder

构造尺寸/mm	截面 1 ($b/h=1.0$)	截面 2 ($b/h=1.2$)	截面 3 ($b/h=2.0$)
顶板宽度	2 500	3000	5000
顶板厚度	20	20	20
底板宽度	2 300	2 800	4 800
底板厚度	32	32	32
腹板高度	2 500	2 500	2 500
腹板厚度	10	10	10
上翼缘宽度	100	100	100

2 横隔板最小刚度公式适用性分析及修正

2.1 理论研究

日本《钢桥规范》和中国《钢桥规范》对钢箱梁横隔板最小刚度进行了规定,本文第 1 节对此公式进行了推导。研究表明规范中的横隔板最小刚度公式核心是控制钢箱梁畸变角 γ_2 和横隔板畸变角 γ_1 的比值。用微分方程求解分析箱梁畸变时,需满足以下基本假定:忽略各板平面的法向应变;忽略各板平面内的剪切应变;翘曲正应力在板厚方向为常数,在截面中线方向呈直线分布。

在上述基本假定成立的前提下,根据最小势能原理和欧拉方程推导得到畸变微分方程的一般表达式(见式(5))。

上述箱梁畸变理论的研究对象是早期的钢筋混凝土箱梁,钢箱混凝土箱梁横隔板的间距很大, L_D 在 20~50 m, 甚至更大。而钢箱梁的横隔板间距 L_D 一般在 6 m 以内。因此,钢箱梁计算畸变效应考虑剪切效应的影响。

简支梁在跨中集中荷载作用下,当“钢箱梁高度 h -横隔板间隔 L_D 之比”较小时,跨中截面的变

形主要受到弯曲变形的影响;当高跨比较大时,跨中截面的变形不仅受到弯曲变形的影响、剪切变形和轴向变形也是不可忽略的因素。此时畸变微分方程成立的基本假定需要修正,故横隔板最小刚度公式也需要修正,如图2所示。

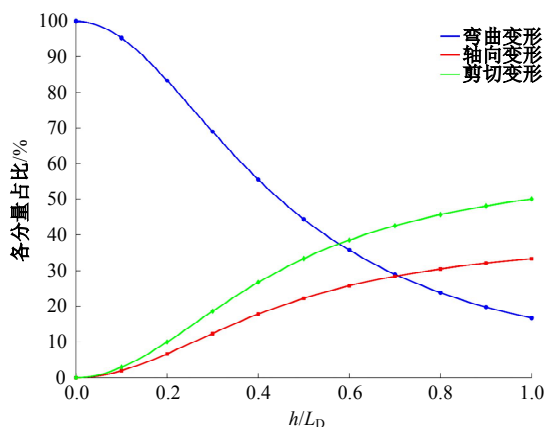


图2 高跨比对梁变形的影响

Fig. 2 Relationship between h/L_D and deformation

在钢箱梁工程应用中,基于钢桥第二体系理论和《钢桥规范》中横隔板最小间距规定,偏安全尽可能多设置横隔板,导致横隔板间距 L_D 普遍较小,一般在4~6 m,甚至间隔3 m。此时箱梁“高度-间距之比”(h/L_D)数值较大,跨中截面集中力荷载作用下相邻两横隔板之间的钢箱梁不只受到弯曲变形的影响,各板的轴向变形、剪切变形的分量不可忽略。箱梁变形的畸变微分方程(见式5)需要修正,仍然按照规范中给出的最小横隔板刚度公式计算,会存在问题,因此需要进一步研究 h/L_D 较大时应该如何设置匹配的横隔板刚度。

2.2 公式适用区间研究

2.2.1 高度横隔板间距之比对公式适用性的影响

假设横隔板最小刚度公式成立,在保证横隔板刚度满足最小刚度的条件下确定横隔板厚度 t_D 。采用1.4算例中的钢箱梁截面1、截面2和截面3分别根据规范公式计算得到的横隔板最小厚度见图3。

在ABAQUS软件中建立截面1~3对应的钢箱梁有限元模型,采用Q355钢材本构参数,单元类型为SR4三维壳单元,横隔板受到简支边界条件约束,钢箱梁两端简支,跨中区域受畸变荷载作用($\bar{V}_d = 25 \text{ kN}$, $\bar{H}_d = 30 \text{ kN}$)。

采用有限元分析和微分方程求解方法计算钢箱梁的变形角,比较两种方法计算结果的差异。

研究 h/L_D 变化时,横隔板最小刚度公式的适用性。需要特别说明的是,为使畸变角求解结果更加准确,采用畸变微分方程的解析解作为畸变微分方程的结果。计算结果如图4所示。

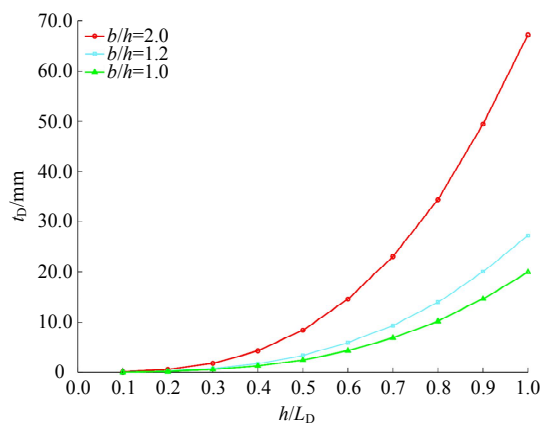


图3 h/L_D 与 t_D 之间的关系

Fig. 3 Relationship between h/L_D and t_D

从图4可以看出截面形状也影响《钢桥规范》公式的适用性,但是不改变钢箱梁随 h/L_D 增大时畸变角误差增大的变化趋势。对于 b/h 值较大的扁平形状钢箱梁,式(1)的适用区间较小,适用性较差;对 b/h 取值趋近于1的钢箱梁,式(1)的适用区间较大,适用性更好。

2.2.2 横隔板厚度、截面高宽比指标-对畸变效应的影响

前文的研究证明了截面高宽比指标(b/h)不改变钢箱梁畸变角误差增大的变化趋势,取 $b/h = 1.2$ 为代表算例进行研究计算。设计双因素正交实验,因素1(横隔板厚度 t_D)有12个水平,因素2(h/L_D)有5个水平。建立正交实验模型进行有限元分析,建模参数采用2.2.1节(Q355钢材本构,SR4三维壳单元)有限元模型参数,横隔板受到简支边界条件约束,钢箱梁两端简支,分析畸变荷载($\bar{V}_d = 25 \text{ kN}$, $\bar{H}_d = 30 \text{ kN}$)作用于跨中区域时,对应的钢箱梁畸变角变化规律,计算结果汇总于表3。

因素1不同水平时对应箱梁畸变效应的结果影响如图5所示。从图5中可以看出,当横隔板刚度达到一定数值后再增加横隔板刚度时,畸变效应不再降低。此时对应的横隔板刚度可以满足畸变微分方程的简支条件。

显然,改变横隔板间距,控制 h/L_D 取值是比增加横隔板刚度更有效的方法;在横隔板可以提

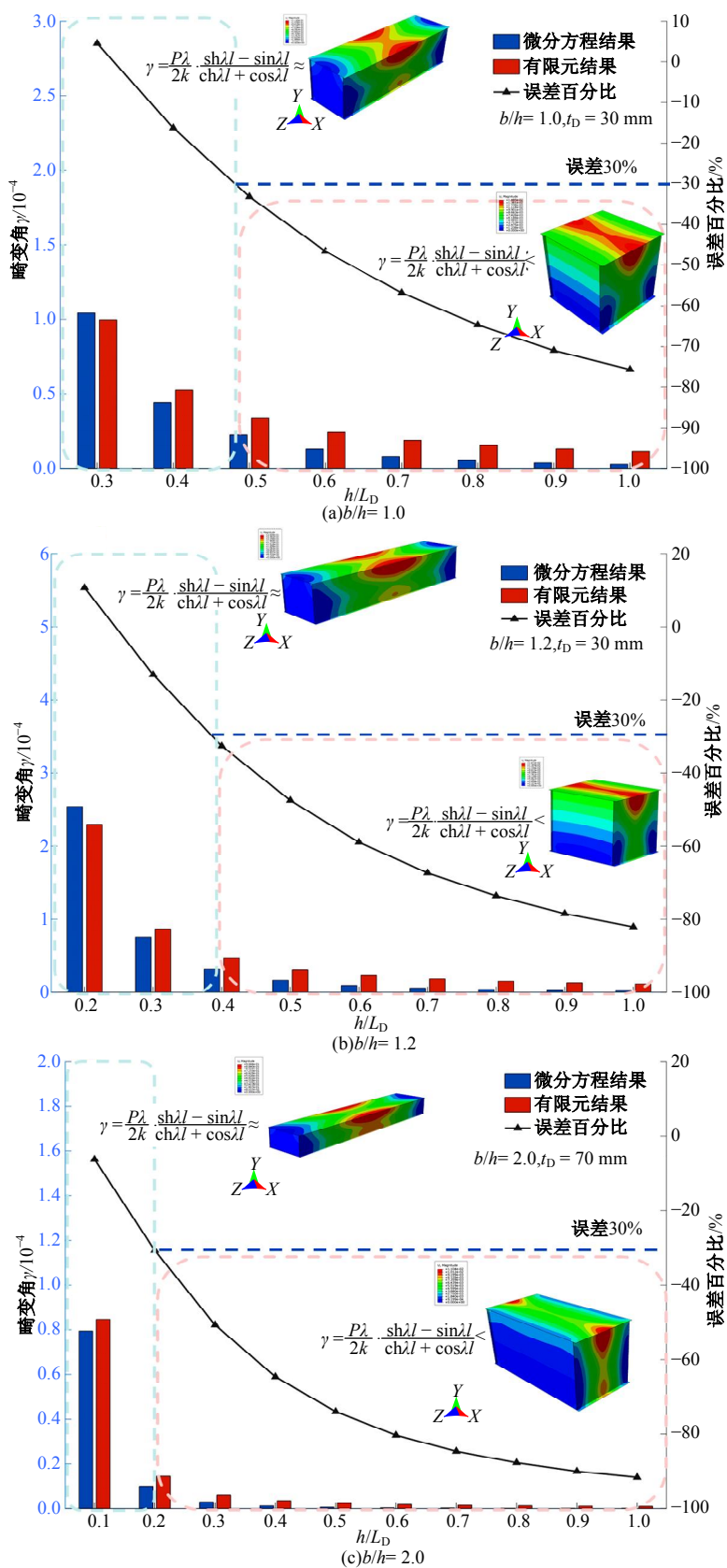


图 4 剪力-挠度曲线图

Fig. 4 Shear-deflection curve diagrams

表 3 正交试验畸变角有限元分析结果

Table 3 Orthogonal test FEA results

横隔板厚度 t_D /mm	$h/L_D=0.4$	$h/L_D=0.6$	$h/L_D=0.8$	$h/L_D=0.9$	$h/L_D=1.0$
2	8.45E-05	6.03E-05	4.66E-05	4.44E-05	4.35E-05
4	6.16E-05	3.74E-05	2.97E-05	2.75E-05	2.60E-05
6	5.59E-05	3.17E-05	2.40E-05	2.18E-05	2.03E-05
8	5.31E-05	2.89E-05	2.12E-05	1.90E-05	1.75E-05
10	5.13E-05	2.72E-05	1.95E-05	1.73E-05	1.58E-05
12	5.02E-05	2.61E-05	1.84E-05	1.62E-05	1.47E-05
14	4.93E-05	2.53E-05	1.75E-05	1.54E-05	1.39E-05
16	4.87E-05	2.46E-05	1.69E-05	1.48E-05	1.33E-05
18	4.82E-05	2.42E-05	1.65E-05	1.43E-05	1.28E-05
20	4.78E-05	2.38E-05	1.61E-05	1.39E-05	1.24E-05
22	4.74E-05	2.35E-05	1.58E-05	1.36E-05	1.21E-05
24	4.71E-05	2.32E-05	1.55E-05	1.33E-05	1.18E-05

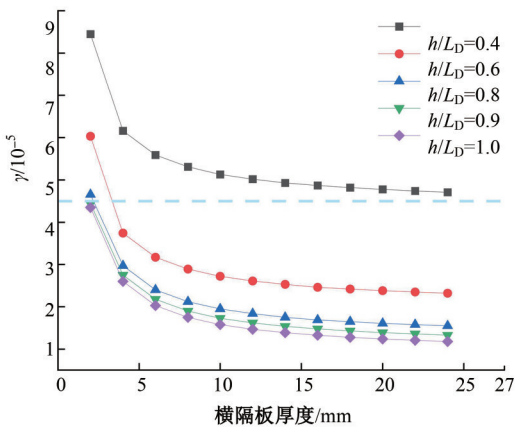


图 5 畸变角变化结果

Fig. 5 Results of distortion angle variation

供简支边界条件的情况下,继续增加横隔板刚度对钢箱梁变形影响不大,畸变角趋于收敛。

从图 5 中可以看出,横隔板间距较小时,钢箱梁畸变角 γ 数值较小,较小的横隔板刚度便能控制钢箱梁的畸变角在较低水平,所需要最小刚度趋于稳定,与《钢桥规范》公式规定的横隔板间距越小,最小刚度按照 $1/L_D^3$ 越大幅增大存在差异。原因在于规范公式确定横隔板刚度的核心是控制钢箱梁畸变角 γ_2 和横隔板畸变角 γ_1 的比值。横隔板畸变角远小于钢箱梁畸变角时,横隔板可以有效约束钢箱梁的畸变变形,提供畸变微分方程简支边界条件,从而可以直接采用两端简支畸变微分方程查表求解。 h/L_D 较大时(横隔板间距 L_D 较小),真实的钢箱梁畸变角 γ_2 数值上很小。同时,畸变微分方程由于未能考虑剪切应变和轴向应变,计算结果偏小,这进一步导致 γ_2 数值上更小。

此时仍沿用 γ_2/γ_1 来控制畸变效应,畸变荷载

作用下横隔板允许的变形量被控制在很小的水平,导致横隔板刚度计算结果远超过实际需要的刚度。实际情况下,当 h/L_D 较大时,设置较小的横隔板刚度能控制钢箱梁的畸变角在较低水平。

2.3 参数优化

通过文献调研,单箱单室钢箱梁常规主要截面 $0.9 < b/h < 1.4$,见表 4。

表 4 钢箱梁截面汇总

Table 4 Summary of steel box beam sections m

桥 名	最大跨度	梁宽(不计翼缘)	主截面梁高	b/h
Sneyer 桥	164	7.5	6.4	1.17
城凯岛桥	95	7.0	5.0	1.40
琵琶湖桥	140	7.0	5.5	1.27
米山桥	93	7.5	4.5	1.67
京滨大桥	130	5.5	5.0	1.10
河口湖大桥	130	7.5	6.1	1.23
饰磨临海大桥	165	8.5	6.5	1.31
海田大桥	250	8.5	9.0	0.94
第二留萌川桥	163	7.8	6.0	1.30

基于国内外既有典型钢箱梁统计,采用截面 2($b/h=1.2$)可以较好地反映常规单箱单室钢箱梁的截面情况。根据上述研究,在 h/L_D 较大时,横隔板最小刚度公式适用性很差,以截面 2 为钢箱梁代表截面,修正横隔板刚度计算公式。

以畸变角变化率($\Delta\gamma/\gamma$)为设计分析指标,根据表 3 有限元计算的结果,以 2 mm 横隔板对应的畸变角为基准,比较横隔板刚度变化对箱梁畸变变形的影响,结果见图 6。

图 6 进一步证明了横隔板刚度满足畸变微分方程简支边界条件后,增加横隔板刚度对钢箱梁变

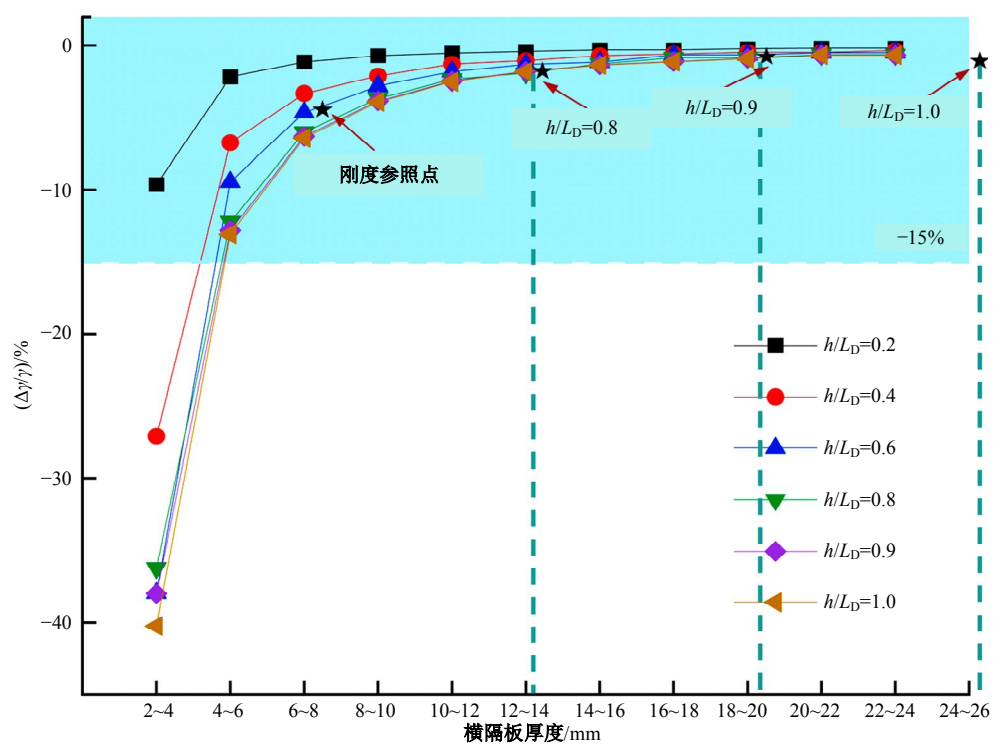


图 6 横隔板刚度对箱梁畸变变形的影响

Fig. 6 Influence of cross-sectional properties on distortion angle

形影响不大,畸变角变化率 $\Delta\gamma/\gamma$ 最终趋于收敛。

$h/L_D=0.6$ 时,规范计算得到的横隔板最小厚度约为 5.9 mm;根据图 6 有限元的计算结果,横隔板厚度取 6~8 mm 时,畸变角变化率出现明显拐点, $t_D=6$ mm 时横隔板刚度处于提供简支边界条件的临界值。以拐点为此算例横隔板刚度的参照点,根据《钢桥规范》中横隔板最小刚度与 L_D^3 成反比关系计算出 $h/L_D=0.8$, $h/L_D=0.9$, $h/L_D=1.0$ 对应的横隔板最小厚度,并在图 6 中标出对应的畸变角变化率。 $h/L_D\geq 0.8$ 时,以《钢桥规范》为依据控制的畸变角变化率都处于收敛速率较低的区间段(见图 6 中的标识点)。

h/L_D 越大,畸变角变化率曲线收敛越慢,收敛速率在厚度超过(8 mm)后急剧降低,曲线走向趋于平缓,横隔板刚度提高很多,而 $\Delta\gamma/\gamma$ 变化值很小。

结合 2.2 节的研究, h/L_D 较大时钢箱梁畸变角真实值很小,此时不需要控制 $\Delta\gamma/\gamma$ 保持很小的值,横隔板也能提供简支边界条件,保持钢箱梁畸变角在较低水平;而《钢桥规范》中的计算方法是将横隔板刚度提高很多,对应 $\Delta\gamma/\gamma$ 的变化值很小,对控制钢箱梁畸变角的绝对值指标效率很低,设计过于保守。

根据有限元分析计算的结果,针对常规单箱

单室钢箱梁,取 $|\Delta\gamma/\gamma|\leq 15\%$ 界限,对应于不同的横隔板间距 L_D ,界定提供简支边界条件真实需要的横隔板厚度(可通过式(2)转化为刚度)。以界定的横隔板刚度和《钢桥规范》计算的横隔板刚度比值为依据,提出刚度修正系数 λ ,结果列于表 5。

表 5 横隔板最小厚度建议值

Table 5 Recommended minimum thickness of diaphragm

h/L_D	修正厚度/mm	规范计算厚度/mm	修正系数 λ
0.4	$4\leq t_D\leq 6$	1.75	2.86
0.6	$4\leq t_D\leq 6$	5.91	0.84
0.8	$4\leq t_D\leq 6$	13.94	0.35
0.9	$4\leq t_D\leq 6$	20.03	0.25
1.0	$4\leq t_D\leq 6$	27.24	0.18

注:常规截面钢箱梁 $h/L_D>1.0$ 时,根据关系式 $(\lambda_1/L_{d1}^3=\lambda_2/L_{d2}^3)$ 求对应的修正系数,如 $L_D=1.75$ m 时,修正系数 $\lambda=0.062$ 。

3 试验验证

3.1 试验设计

以山东省套尔河特大桥梁项目为背景,大桥全长 4 168 m,主桥设计为跨度 338 m 的混合梁连续刚构桥,建成后将成为世界上最大跨度的梁式桥。依托实际工程,对其钢混结合段部分进行了 1:2 的大型缩尺试验。试验的主要研究内容是在

反对称荷载作用下,横隔板刚度对钢箱梁变形的影响。试验目的在于证明当横隔板间距较小时($h/L_D>0.8$),横隔板实际所需刚度远小于通过《钢桥规范》计算的最小刚度。

钢箱梁节段主要由三道横隔板划分为两个研

究节段,从上至下分别记为上横隔板、中横隔板、下横隔板,各横隔板断面参数见图 7。其中上横隔板与中横隔板间距 $L_D=1.5\text{ m}$,中横隔板与下横隔板间距 $L_D=2.0\text{ m}$ 。钢箱梁顶板及底板厚 16 mm ,腹板厚度 14 mm ,横隔板厚 8 mm 。

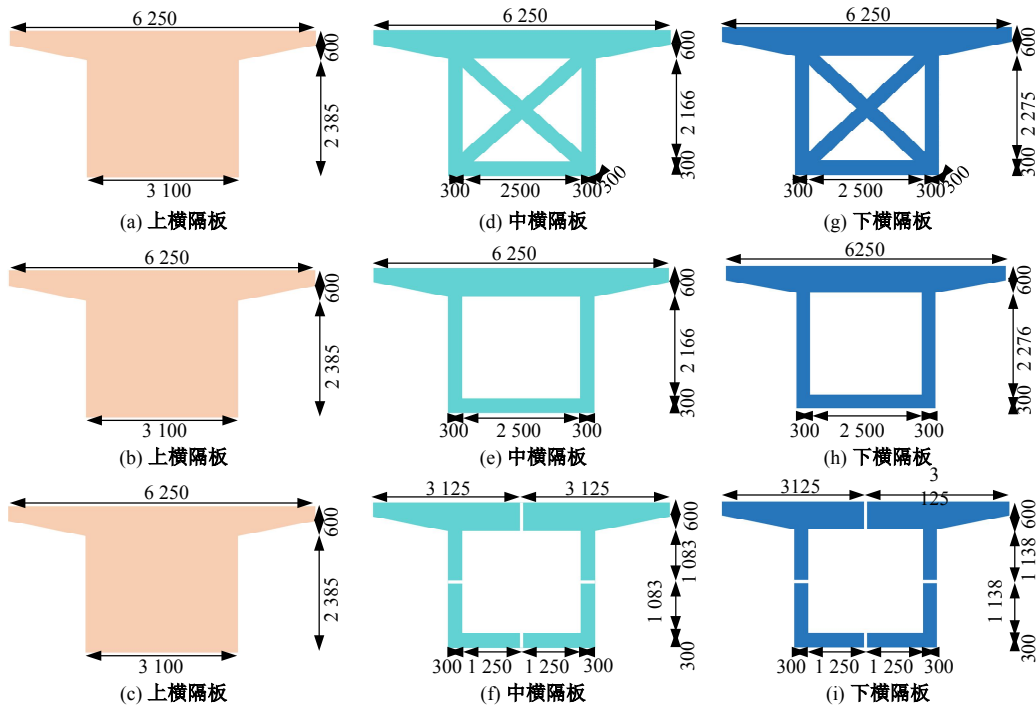
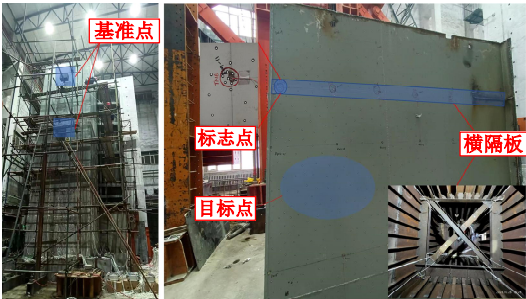


图 7 横隔板截面参数

Fig. 7 Intermediate diaphragm cross-section parameters

在钢箱梁最上部分顶板一侧绑定分配钢梁,分配梁两端分别连接了双向作动器,在东侧的作动器逐级施加 $1\ 200\text{ kN}$ 推力,西侧作动器逐级施加 $1\ 200\text{ kN}$ 拉力,根据荷载分解法,反对称荷载可以分解为扭转荷载和畸变荷载。试验部分过程如图 8 所示。

在钢箱梁两侧腹板和底板上贴目标点,在横隔板断面对应的位置钢箱梁外间隔 0.5 m 设标致点,便于后期处理数据时辨识,独立于试验梁架设两个基准点,在后期处理坐标点数据时以基准点为固定点进行坐标系对齐。在空载状态下和反对称荷载工况下,采用手持式 3D 扫描仪对试验梁钢箱梁部分进行扫描:试验梁处于空载状态时,扫描仪对箱梁初始状态进行扫描记录箱梁空间状态 1;在横隔板处于全刚度状态,反对称荷载逐级加载至 $1\ 200\text{ kN}$ 持荷时进行二次扫描记录为状态 2;卸载后切割横隔板 X 形桁架,加载至 $1\ 200\text{ kN}$ 后持荷,进行第三次扫描记录为状态 3;再次卸载后沿各板中线位置切割横隔板框架,加载至



(a) 大比例尺缩尺模型试验



(b) 扫描试验梁

图 8 钢箱梁反对称荷载工况试验

Fig. 8 Anti-symmetric loading condition test on steel box girder

1 200 kN 后持荷,进行第四次扫描记录为状态 4。通过比较状态 1 和 2、状态 1 和 3、状态 1 和 4 研究横隔板刚度变化对钢箱梁变形的影响。

3.2 试验分析

由于试验钢箱梁较大,为了提高 VX Elements 软件分析结果的准确性,减少累积误差,将钢箱梁截面分为上、下两部分进行状态比较。以钢箱梁上部状态 1 和状态 2 之间的变形结果为示例对扫描的点云数据进行后处理。

对应于状态 1 和状态 2 的点云数据被输入到 Geomagic Control 软件中,数据单位指定为毫米(mm)。在参考点处对 3 个正交平面进行最佳拟合,建立相应的特征平面,根据特征平面将数据与全局坐标系对齐,并加载和输出相应的旋转矩阵,如图 9 所示,将状态 1 与状态 2 对应的目标点坐标通过上一个步骤输出的旋转矩阵做空间变换,使目标点进行相同的坐标变换对齐到全局坐标系,此时目标点在状态 1 下的坐标设为基准值,如图 10 所示。将状态 2 目标点数据设置为“test”,将状态 1 目标点数据设置为“reference”。将两个状态下的目标点数据,采用“N 点对齐的方法”对齐基准点,如图 11 所示。分别输出“reference”和“test”

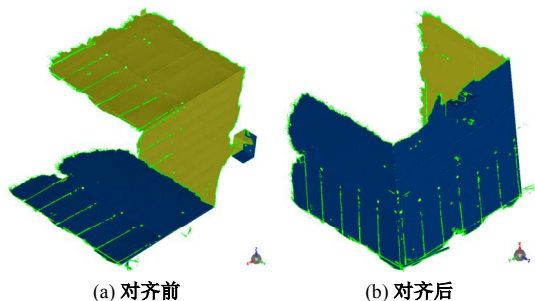


图 9 箱梁对齐到全局坐标系前、后状态对比

Fig. 9 Comparison of box girder states before and after alignment to global coordinate system

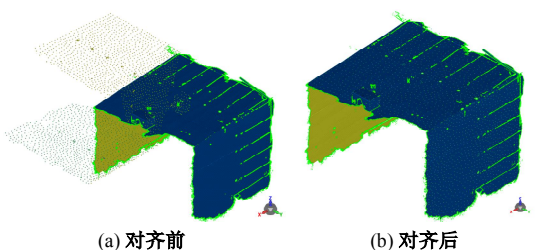


图 10 目标点对齐到全局坐标系

Fig. 10 Alignment of target point to global coordinate system

对齐后的目标点坐标,在 PolyWorks Metrology Suite 软件中计算标志点的空间位移,标志点 1 的空间位移结果整理于图 12。根据上述方法依次处理点云数据,记录各分量上的位移数据。

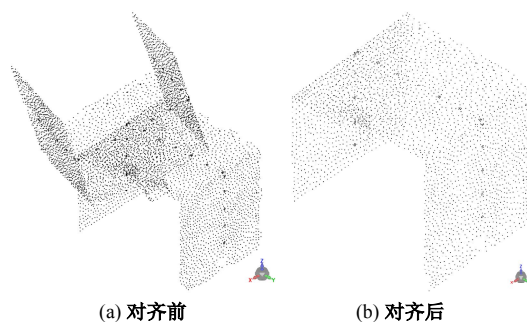


图 11 采用 N 点对齐方法对齐基准点

Fig. 11 Align reference points using N-point alignment method

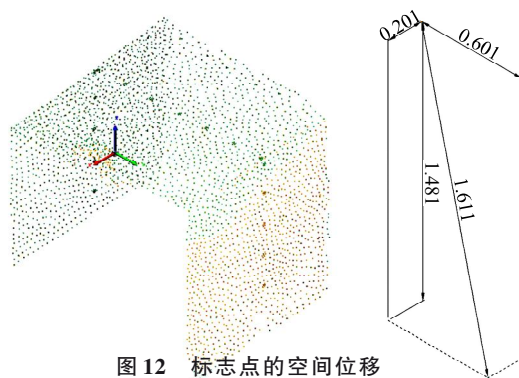


图 12 标志点的空间位移

Fig. 12 Spatial displacement of marker points

3.3 有限元分析

根据缩尺试验钢箱梁的尺寸,在 ABAQUS 软件中建立有限元模型。底座部分和混凝土部分采用三维可变形实体单元,钢箱梁段采用三维可变形板壳单元。混凝土采用 C50 本构模型数据,钢箱梁采用 Q355 钢材材料数据,考虑非线性因素和局部屈曲对模型结果的影响,建立简化模型。设置全局种子尺寸 50 mm,混凝土实体部分采用 C3D8R 单元,钢箱梁段采用 S4R 单元,对应力集中区域局部加密种子密度。全刚度状态试验梁模型共划分单元 383 427 个,节点总数为 430 282。混凝土底座采用固结约束,在分配钢梁两端施加反对称集中荷载模拟作动器施加外荷载,输出应力场、应变场、位移场。忽略箱梁沿轴向的变形,提取钢箱梁横截面内两个方向上的变形结果。切割横隔板后的工况同样采用上述参数,应用 ABAQUS 建立简化有限元模型,见图 13。

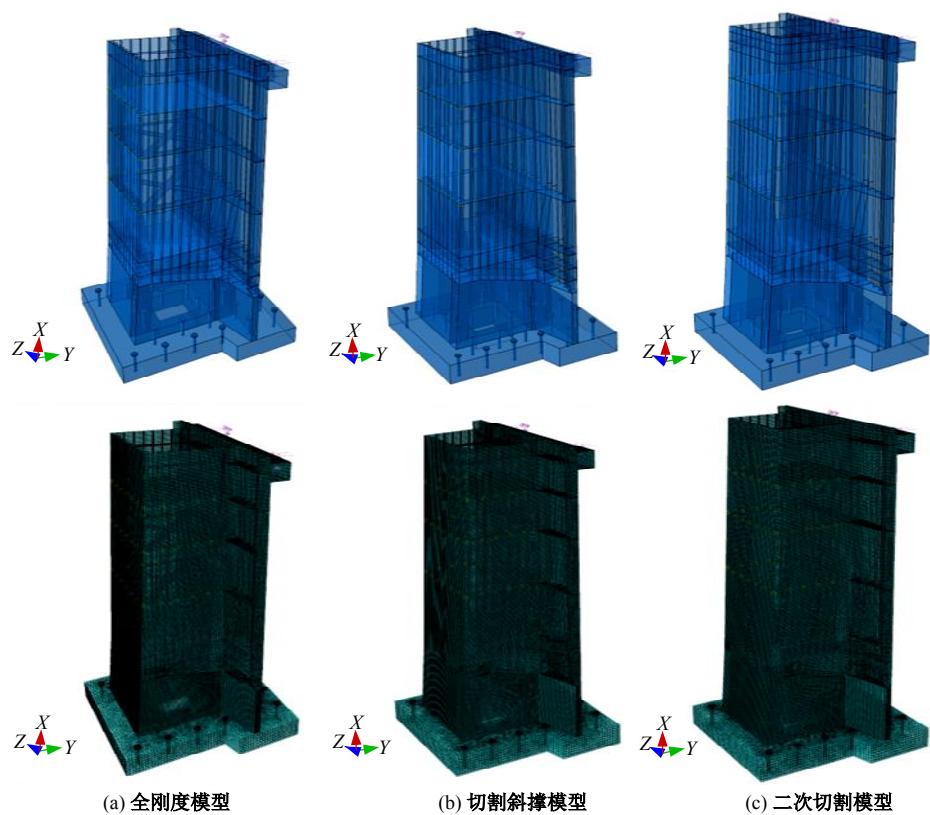


图 13 试验梁有限元模型

Fig. 13 Finite element models

提取横隔板断面外侧标志点的位移结果,位移结果主要为钢箱梁横截面内两个方向,其中U2为沿钢箱梁腹板方向,U3为沿钢箱梁底板方向。

分别对上横隔板、中横隔板、下横隔板在面内两个分量上的变形结果进行三次曲线拟合,比较95%置信区间内有限元数值分析结果与扫描的点云数

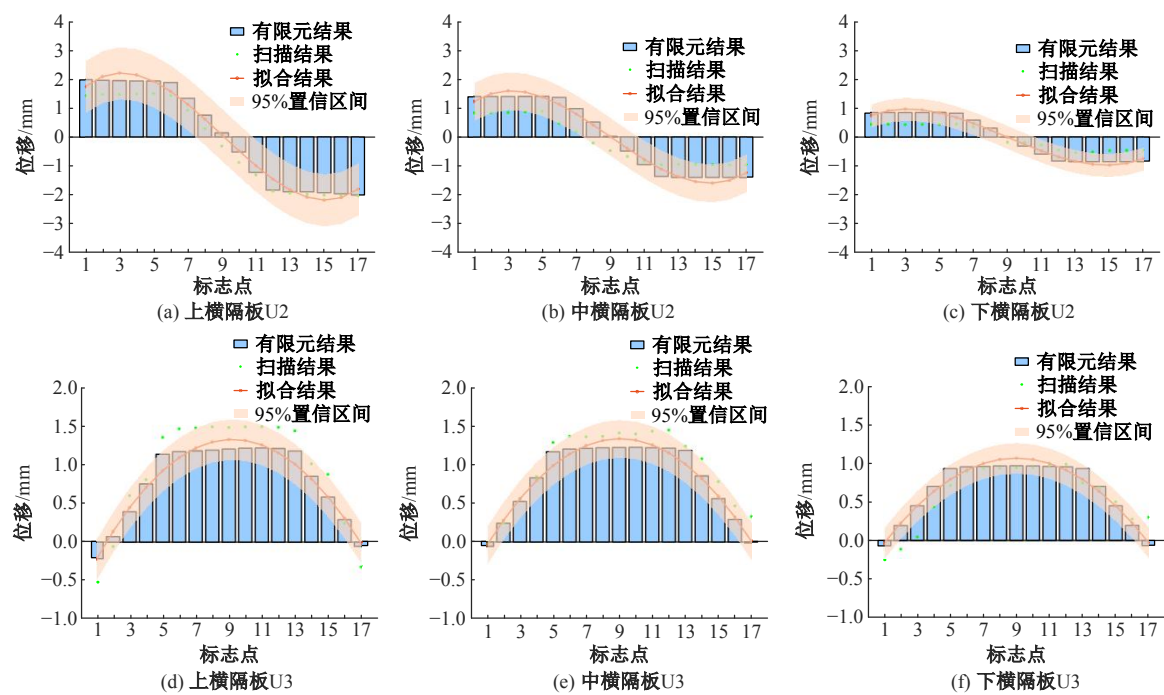


图 14 状态 1 和状态 2 变形比对结果

Fig. 14 Comparison of deformation result between state 1 and state 2

据后处理得到的变形结果,见图 14;横隔板切割 X 斜撑后工况数据处理结果整理于图 15;整理沿各板中线位置二次切割横隔板框架对应的数据处理结果,如图 16 所示。

比较有限元计算结果和试验结果,实测数据基本落在拟合曲线 95% 置信区间内,两者结果拟合较好,采用有限元模型可以准确地模拟钢箱梁

在反对称荷载工况下的变形。在有限元模型中剥离出畸变荷载的影响,在畸变荷载导致的钢箱梁变形结果的基础上用式 $\gamma = 2\Delta_v/b + 2\Delta_h/h$ 求解畸变角,其中 Δ_v 为截面畸变竖向总变形的一半, Δ_h 为截面畸变横向总变形的一半。全刚度模型、切割斜撑模型、二次切割模型 3 种有限元计算结果见图 17~图 19。

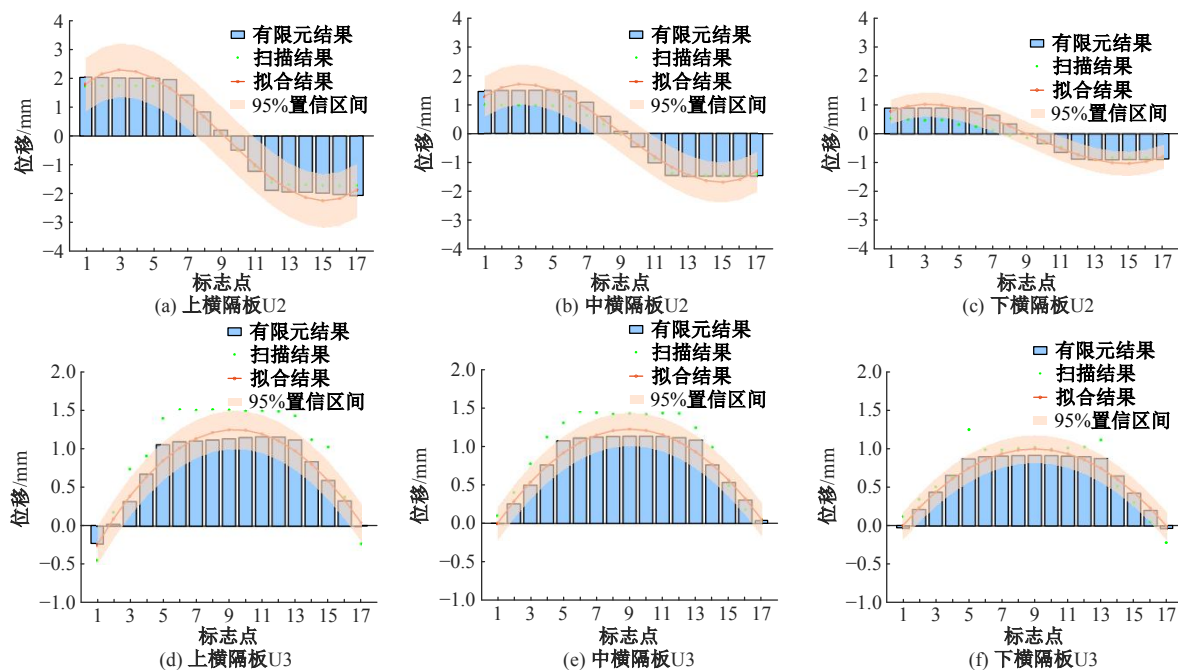


图 15 状态 1 和状态 3 变形比对结果

Fig. 15 Comparison of deformation result between state 1 and state 3

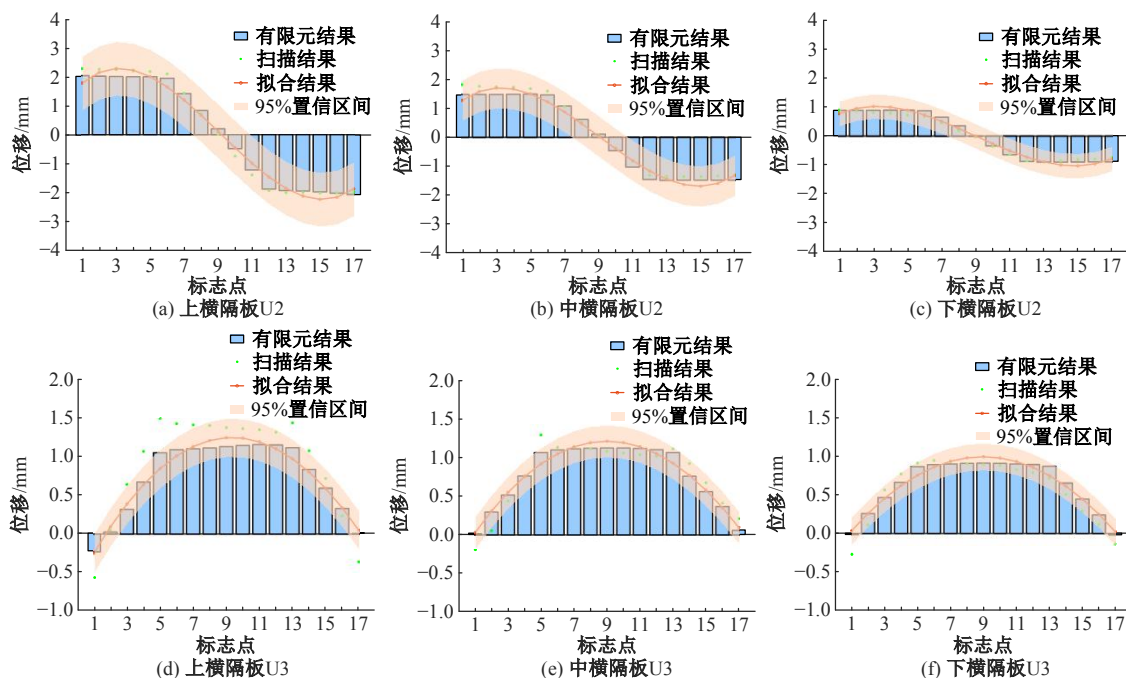


图 16 状态 1 和状态 4 变形比对结果

Fig. 16 Comparison of deformation result between state 1 and state 4

比较横隔板 X 桁架刚度变化前、后对箱梁的畸变角的影响,以开口率为依据,在横隔板处于全刚度状态时,采用 X 形桁架模型计算刚度;切割后

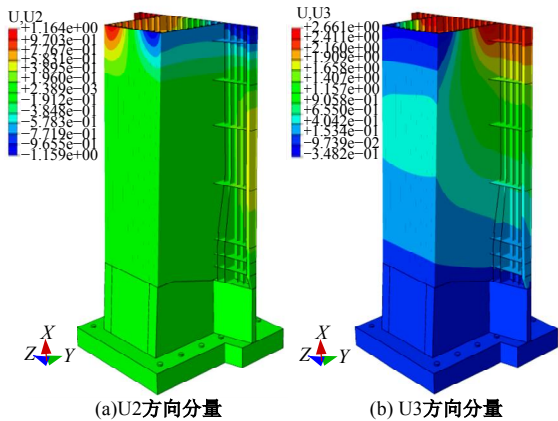


图 17 全刚度状态下的变形结果
Fig. 17 Deformation results under full stiffness condition

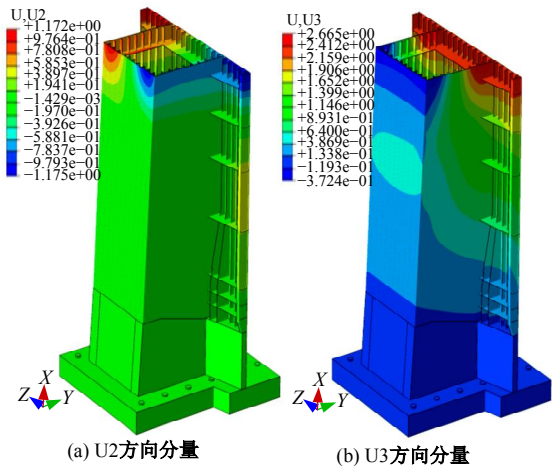


图 18 切割斜撑状态下变形结果
Fig. 18 Deformation results under cross-bracing cut condition

采用矩形框架式模型计算刚度。需要注意的是,切割后只降低了横隔板的刚度,横隔板间距并没有发生改变。

记上横隔板与中横隔板节段跨中截面为截面 I、中横隔板与下横隔板节段跨中截面为截面 II。取 3 块横隔板平均间距($L_D=1.75\text{ m}$),根据中国《钢桥规范》计算上横隔板、中横隔板、下横隔板所在截面的横隔板最小刚度;计算上横隔板、中横隔板、下横隔板切割前后的刚度,计算结果列于表 6。

两次切割导致横隔板刚度共减小了约 60%,比较横隔板刚度两次改变对截面 I 和截面 II 对应的畸变角变化情况如图 20 所示。

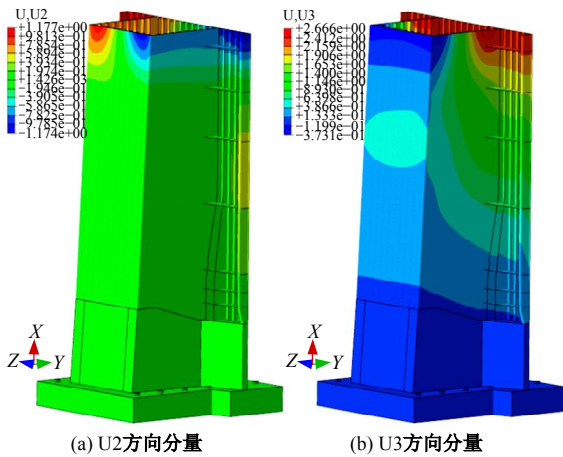


图 19 二次切割状态下变形结果
Fig. 19 Deformation results under secondary cutting condition

表 6 横隔板刚度对比

Table 6 Comparison of diaphragm stiffness N·mm					
横隔板位置	全刚度	切割斜撑刚度	二次切割后刚度	《钢桥规范》计算刚度	修正刚度
上	2.40E13	2.40E13	2.40E13	5.33E14	3.35E12
中	4.40E12	1.64E12	1.60E12	5.70E14	3.42E12
下	4.47E12	1.66E12	1.62E12	6.22E14	3.73E12

由图 20 可知:截面 I 对应畸变角变化率 $|\Delta\gamma/\gamma|$ 约为 1.7%~2%,截面 II 对应畸变角变化率 $|\Delta\gamma/\gamma|$ 约为 6.1%~6.3%,可见改变横隔板刚度对钢箱梁畸变变形影响较小,横隔板此时可以有效约束钢箱梁的畸变变形。试验验证了修正刚度后横隔板可以提供简支边界条件、修正刚度具有较好的适用性。

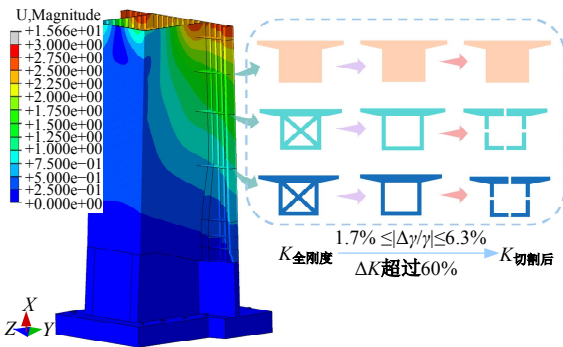


图 20 切割横隔板前后钢箱梁关键截面变形结果比较
Fig. 20 Comparison of key section deformation results of steel box girder before and after cutting diaphragm

4 结 论

(1)中国《公路钢结构桥梁设计规范》关于横

隔板最小刚度的规定,核心是通过控制横隔板畸变角和钢箱梁畸变角的比值:即保证横隔板畸变角 γ_1 和钢箱梁畸变角 γ_2 有数量级上的差异,横隔板刚度在畸变微分方程中才能起到简支边界条件的作用。

(2)常规单箱单室钢箱梁桥在跨中畸变荷载作用下,在 h/L_D 较小时($h/L_D \leq 0.4$,横隔板间距大),中国《公路钢结构桥梁设计规范》条文 8.5 有较好的适用性;在 h/L_D 较大($h/L_D > 0.4$,横隔板间距小)时,基于微分方程求解得到的钢箱梁畸变角较考虑剪切变形的真实钢箱梁畸变角要小(偏小超过 30%),从而导致 γ_2/γ_1 比值偏小,计算得到横隔板刚度更加偏大,横隔板最小刚度公式适用性需要修正。引入修正系数 λ 对横隔板最小刚度进行修正。减小横隔板间距 L_D ,修正后的横隔板刚度不会无限增大且趋于稳定。

(3)钢箱梁跨中区域受畸变荷载作用时,横隔板刚度达到简支边界条件对应的刚度后,增加横隔板刚度对钢箱梁畸变变形影响很小,跨中截面畸变角 γ 和畸变角变化率 $\Delta\gamma/\gamma$ 都趋于收敛。

(4)从控制钢箱梁畸变变形的角度上看,通过改变横隔板间距(即改变 h/L_D)是最有效的方法,不应该通过增加横隔板刚度来控制钢箱梁畸变效应。在一般情况下,《公路钢结构桥梁设计规范》规定 $L_D \leq 6$ m 或 $L_D \leq 0.14L-1$ 可以保证畸变效应满足要求,前提条件是横隔板刚度在畸变微分方程中起到简支边界条件的作用。当 L_D 较大,同时钢箱梁为扁平钢箱梁时,建议在规范基础上,单独计算畸变翘曲应力的绝对值,以判断畸变翘曲应力与钢材容许应力之比是否满足 0.02~0.06。

(5)钢箱梁截面形状也影响横隔板最小刚度公式适用性,对于 b/h 值较大的扁平形状钢箱梁,公式的适用区间较小,适用性较差;对 b/h 值趋近于 1 的钢箱梁,公式适用区间较大,适用性更好。

参考文献:

- [1] Kang Y J, Yoo C H. Thin-walled curved beams . 1. Formulation of nonlinear equations[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1994, 120(10): 2072-2101.
- [2] Dabrowski R. Curved Thin-Walled Girders: Theory and Analysis[M]. London: Cement and Concrete Association, 1972.
- [3] 范红波, 傅中秋, 刘锦军, 等. 钢箱梁横隔板优化布置对顶推施工力学性能的影响分析[J]. 施工技术, 2024, 53(12): 64-70, 106.
Fan Hong-bo, Fu Zhong-qiu, Liu Jin-jun, et al. Analysis of the influence of the optimized arrangement of steel box girder diaphragm on the mechanical properties of jacking construction[J]. Construction Technology, 2024, 53(12): 64-70, 106.
- [4] 戴公连, 粟森. 一种新支点横隔板设置下的斜交连续钢箱梁桥受力特性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(7): 2398-2405.
Dai Gong-lian, Su Miao. Mechanical characteristics of skewed continuous steel-box girder bridge affected by new supporting diaphragm arrangement[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(7): 2398-2405.
- [5] 傅中秋, 李业飞, 吉伯海, 等. 曲线钢箱梁横隔板变形对焊缝细节疲劳应力的影响研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(6): 43-51.
Fu Zhong-qiu, Li Ye-fei, Ji Bo-hai, et al. Influence of diaphragm deformation on fatigue performance of welding details of curved steel box girder[J]. World Bridges, 2022, 50(6): 43-51.
- [6] 吴冲. 现代钢桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] Szweczek R M, Smith E A, Dewolf J T. Beams with torsional stiffeners[J]. Journal of Structural Engineering, 1983 109(7): 1635-1647.
- [8] Ren Y Z, Cheng W M, Wang Y Q. Distortional analysis of simply supported box girders with inner diaphragms considering shear deformation of diaphragms using initial parameter method[J]. Engineering Structures, 2017, 145: 44-59.
- [9] 郭金琼. 箱形梁设计理论[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [10] Park N H, Choi Y J, Kang Y J. Spacing of intermediate diaphragms in horizontally curved steel box girder bridges[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41: 925-943.
- [11] Park N H, Choi S, Kang Y. Exact distortional behavior and practical distortional analysis of multi-cell box girders using an expanded method[J]. Computers and Structures, 2005, 83(19): 1607-1626.
- [12] Park N H, Choi Y J, Yi G S, et al. Distortional analysis of steel box girders[J]. Steel Structures, 2002, 2: 51-58.
- [13] Park N H, Yoon K Y, Cho S K, et al. Effective dis-

- torsional stiffness ratio and spacing of intermediate diaphragms in steel box girder bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2004, 4(2): 93-102.
- [14] Lee J, Lee K, Choi J, et al. Intermediate diaphragm spacing for single-cell rectangular steel box girder bridges considering aspect-ratio[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 168: No. 105877.
- [15] Lee J, Lee K, Choi J, et al. Effect of cross-sectional rigidity on intermediate diaphragm spacing of steel-box girder bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 188: No. 107006.
- [16] JTG D64-2015. 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [17] 日本道路协会. 道路桥示方书同解说Ⅱ钢桥钢部材[M]. 东京: 日本道路协会, 2017.
- [18] 李文华. 崇启大桥钢箱梁横隔板设置与畸变效应分析[D]. 北京: 北方工业大学土木工程学院, 2014.
- Li Wen-hua. Analysis of distortion effect and diaphragm settings on steel box girder of Chongqi bridge [D]. Beijing: School of Civil Engineering, North China University of Technology, 2014.
- [19] 贾高炯. 钢箱梁桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [20] 张元海, 龙均翊, 陈东亮, 等. 跨中横隔板对箱形梁畸变效应影响研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 150-156.
- Zhang Yuan-hai, Long Jun-yi, Chen Dong-liang, et al. Research on influence of mid-span diaphragm on distortion effect of box girders[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 150-156.