

# 基于正交分析的双面组合连续箱梁 剪力滞效应影响因素研究

王喜盈, 段树金

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 考虑宽跨比、截面高度、翼缘板外伸长度、荷载类型等影响剪力滞效应的主要因素, 采用正交分析方法对钢-混凝土双面组合连续箱梁进行试验设计, 对设计工况进行数值仿真试验, 并对计算结果进行正交分析。研究表明, 荷载形式对双面组合箱梁剪力滞系数的影响最大, 宽跨比的影响次之, 而截面几何尺寸的因素如截面高度和翼缘板外伸长度在工程实用范围内的影响很小。通过统计回归, 得到了弹性阶段钢-混凝土双面组合连续箱梁上翼缘有效宽度的无量纲计算公式。

**关键词:** 双面组合连续箱梁; 剪力滞效应; 翼缘有效宽度; 正交分析

**中图分类号:** TU398+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)01-0025-06

## 0 引言

钢-混凝土双面组合连续箱梁同时吸收了双面组合梁结构和箱梁结构的优点。该结构形式主要由三部分构成, 分别为混凝土板, 钢梁和剪力连接件, 主要应用于连续梁中<sup>[1]</sup>。

双面组合梁的上、下混凝土翼缘板中均存在剪力滞后现象<sup>[2]</sup>。若忽略剪力滞效应的影响, 就会低估组合梁结构中实际产生的应力, 从而造成结构的失稳或破坏。影响剪力滞效应的因素很多, 主要有截面几何形式、宽跨比、翼缘板外伸板长度、截面高度、荷载作用方式等<sup>[3]</sup>。

现采用正交设计方法研究钢-混凝土双面组合连续箱梁剪力滞系数影响因素的敏感性, 从而区分影响剪力滞效应的主要因素和次要因素, 并拟合得到钢-混凝土双面组合连续箱梁截面上翼缘有效宽度的无量纲计算公式。

## 1 正交试验设计

### 1.1 计算模型

有限元模型: 三跨连续组合箱梁 ( $L_1 + L_2 + L_3 = 45 + 60 + 45$  m), 边跨与中跨比值为 0.75, 利用对称性, 取半结构进行建模计算, 如图 1 所示。混凝土采用 C50, 钢梁采用 Q345 的钢板, 剪力连接件采用  $\Phi 22-150$  mm 的栓钉, 混凝土板内按照配筋率配置直径为 16 mm 和 12 mm 的二级钢筋。由于连续梁在正、负弯矩区受力不同, 边跨距中支座 13 m, 中跨距中支座 12 m, 共 25 m 为负弯矩区的长度, 正、负弯矩区的截面形式是不同的, 如图 2 所示。

材料性质: 模型中定义的各项材料属性均采用了相关规范规定的强度标准值。混凝土单轴应力应变关系上升段采用 GB50010—2002 规定的公式, 下降段采用 Hognestad 的处理方法, 即

当  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$  时

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_0)^n] \quad (1)$$

收稿日期: 2011-12-29

作者简介: 王喜盈 女 1984 年出生 硕士研究生

基金项目: 河北省科技支撑计划(09215625D)

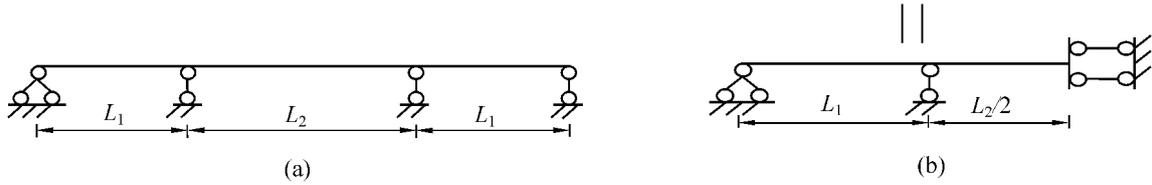


图 1 钢-混凝土双面组合三跨连续箱梁示意图

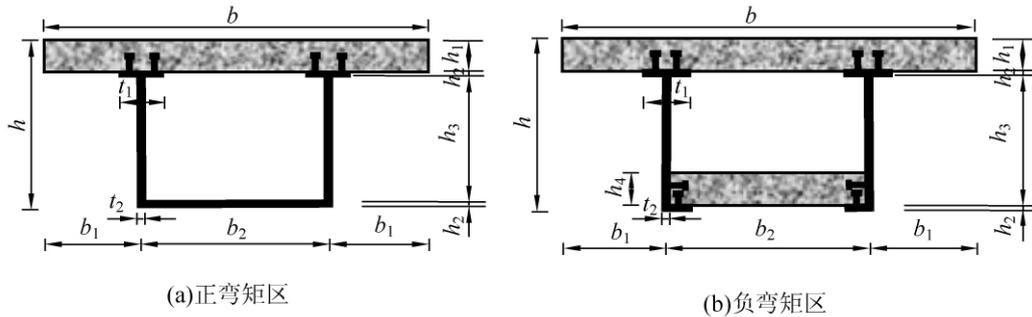


图 2 钢-混凝土双面组合连续箱梁模型截面

当  $\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$  时

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right) \right] \quad (2)$$

按照规范计算和规定可分别求得  $n = 2$ 、 $\varepsilon_0 = 0.002$ 、 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ ，该曲线可采用一系列数据点拟合出来，此处多采用多线性等向强化模型 MISO 模拟。本模型采用的混凝土为 C50，所以混凝土立方体抗压强度标准值  $f_{cu,k} = 50$  MPa，单轴抗压强度  $f_{ck} = 32.4$  N/mm<sup>2</sup>，单轴抗拉强度  $f_{tk} = 2.64$  N/mm<sup>2</sup>，初始弹性模量为  $E_c = 3.078 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>，泊松比为  $\nu_c = 0.2$ 。本模型钢梁采用的是 Q345D，所以钢梁的屈服强度  $f_y = 345$  MPa，弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>，泊松比  $\nu_s = 0.3$ 。钢梁的应力应变关系可采用理想弹塑性模型，也可为了帮助收敛采用具有强化阶段的弹塑性模型，这里采用双线性等向强化模型 BISO 模型。该模型钢筋的屈服强度为  $f_y = 335$  MPa，弹性模量  $E_s = 2.0 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>，钢筋的应力应变关系也是采用了双线性等向强化模型 BISO 模型。本模型中由于采用整体式模型，也即弥散式模型，将配好的钢筋连续均匀分布于整个单元中，综合了混凝土和钢筋对刚度的贡献。栓钉单元的纵向抗剪作用由空间二节点 Combin39 非线性弹簧单元模拟，采用 Ollgaard 于 1971 年提出的模型，即

$$Q = Q_u (1 - e^{-ns})^m \quad (3)$$

式中， $Q_u$  为栓钉在极限状态下的承载力，要满足  $Q_u = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s \gamma f$ ，其中， $A_s$  为栓钉横截面积； $E_c$ 、 $f_c$  分别为混凝土的弹性模量和抗压强度； $f$  为栓钉抗拉强度设计值； $s$  为栓钉剪切变形； $m$ 、 $n$  为模型参数分别取 0.4、0.702 mm<sup>-1</sup>； $\gamma$  为栓钉抗拉强度最小值与屈服强度之比，这里取 1.67。那么根据混凝土和栓钉的材料强度可计算出栓钉的极限承载力为  $Q_u = 145\,921.5$  N >  $0.7A_s \gamma f = 95\,541$  N，因此取  $Q_u = 95\,541$  N。

## 1.2 正交设计

对影响剪力滞效应的因素进行取值计算时，如果考虑的试验是 4 个因素，且每个因素有 3 个水平，便需要进行  $3^4 = 81$  次计算，显然不切实际，可以采用正交设计的方法来解决这类问题<sup>[4]</sup>。该方法利用一套现成的规格化的表——正交表，根据正交表的正交原理和数理统计分析，利用最少的试验次数，优选出各个因素较优参数或条件的组合。研究的影响因子及水平如表 1 所示。表中参数取值范围按文献 [5] 来确定。集中荷载加在跨中，具体的加载位置如图 3 所示。

## 1.3 仿真试验

采用正交试验设计的方法应用有限元软件 ANSYS 来安排有限元模型试验，为了表达方便，将有效宽度比作为正交设计的参数指标，翼板有效宽度问题实质上就是以剪力滞理论为基础的，剪力滞效应是用

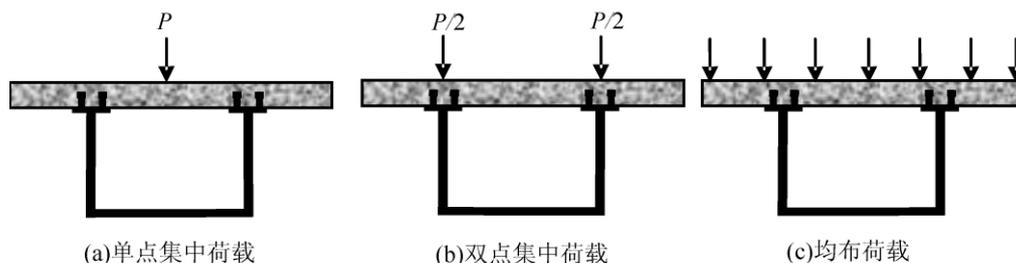


图 3 荷载作用形式

不均匀应力表示,而有效分布宽度是用等效板宽表示。但在实际工程设计中,分析翼缘应力不均匀分布的规律若采用精确的理论是比较复杂的,尤其不便于应用,所以采用翼缘有效宽度。有效宽度比是翼缘有效宽度与翼缘实际宽度的比值,也称为有效宽度系数,用  $\varphi$  表示。

根据表 1 列出的影响因素及水平,将影响剪力滞效应的这些参数作全面搭配,列出正交表 2。

表 1 各因素参数水平

水平	截面高度 $h$ /mm	翼缘板外伸长度 $b_1$ /mm	宽跨比 $b/L$	荷载类型
1	2 400	1 732	0.375	均布荷载
2	2 100	1 492	0.250	单点集中
3	1 800	1 252	0.100	双点集中

表 2 各截面翼缘有效宽度比的正交表

因素	截面高度 $h$ /mm	翼缘板外伸长度 $b_1$ /mm	宽跨比 $b/L$	荷载类型	有效宽度比 $\varphi$		
					中跨跨中	支座附近	支座附近
					上翼板	下翼板	上翼板
试验 1	2 400	1 732	0.250	单点集中	0.331	0.790	0.805
试验 2	2 400	1 492	0.100	均布	0.996	0.811	0.282
试验 3	2 400	1 252	0.375	双点集中	0.633	0.675	0.801
试验 4	2 100	1 732	0.100	双点集中	0.919	0.830	0.016
试验 5	2 100	1 492	0.375	单点集中	0.307	0.679	0.734
试验 6	2 100	1 252	0.250	均布	0.969	0.785	0.834
试验 7	1 800	1 732	0.375	均布	0.880	0.246	0.701
试验 8	1 800	1 492	0.250	双点集中	0.697	0.451	0.804
试验 9	1 800	1 252	0.100	单点集中	0.563	0.840	0.193

## 2 影响剪力滞效应因素的正交分析

正交设计法有两种分析方法,极差分析法和方差分析法。通过极差分析法确定影响目标指标的主要因素与次要因素,方差分析法确定影响因素的显著性。

### 2.1 极差分析

对三跨连续组合箱梁中跨跨中上翼缘板各试验所得的有效宽度比进行极差分析,(1) 计算每一列相同水平的试验结果总和  $K_{ij}$ ,此处下脚标  $i$  为水平数, $j$  为列数。(2) 计算平均值  $\bar{K}_{ij}$

$$\bar{K}_{ij} = K_{ij}/n \quad (4)$$

式中, $n$  表示第  $j$  列上水平号  $i$  出现的次数。(3) 计算极差  $R_j$

$$R_j = K_{j\max} - K_{j\min} \quad (5)$$

将计算出的极差按大小排列,由大到小代表敏感性的大小,也就是说  $R_j$  越大,该因素的水平变化对试验指标的敏感性高,影响就越大,则该因素越重要;反之, $R_j$  越小,说明该因素的水平变化对试验指标的敏感性低,影响就越小,则该因素越不重要。

计算结果列于表 3 中,从表中可以看出极差  $R_4 > R_3 > R_1 > R_2$ ,说明荷载类型的水平变化对试验指标有效宽度比的影响是最敏感的,宽跨比的水平变化对其影响次之,翼缘板外伸长度和截面高度的水平变化对有效宽度比的影响不大。

表 3 中跨跨中截面上翼缘有效宽度比极差分析

计算结果	截面高度 $h$ /mm	翼缘板外伸长度 $b_1$ /mm	宽跨比 $b/L$	荷载类型
$K_{1j}$	1 959	2 130	1.998	1.200
$K_{2j}$	2 196	2 001	2.478	2.844
$K_{3j}$	2 139	2 166	1.821	2.250
$\bar{K}_{1j}$	653	710	0.666	0.400
$\bar{K}_{2j}$	732	667	0.826	0.948
$\bar{K}_{3j}$	713	722	0.607	0.750
$R_j$	79	055	0.219	0.548

组合连续箱梁负弯矩区支座附近下翼缘有效宽度比的极差分析列于表 4 中, 所得极差为  $R_3 > R_1 > R_4 > R_2$ , 这时宽跨比的水平变化对有效宽度比的影响最敏感, 荷载类型变化的敏感性就次之。从表 4 的极差分析中可以看出, 对于支座附近下翼板截面有效宽度比的影响最敏感的是宽跨比, 其次依次是截面高度, 荷载类型, 翼板外伸长度。

表 4 支座附近下翼板有效宽度比极差分析

计算结果	截面高度 $h$ /mm	翼缘板外伸长度 $b_1$ /mm	宽跨比 $b/L$	荷载类型
$K_{1j}$	2 277	1 866	2.028	2.310
$K_{2j}$	2 295	1 941	2.481	1.842
$K_{3j}$	1 536	2 301	1.599	1.956
$\bar{K}_{1j}$	759	622	0.676	0.770
$\bar{K}_{2j}$	765	647	0.827	0.614
$\bar{K}_{3j}$	512	767	0.533	0.652
$R_j$	253	145	0.294	0.156

## 2.2 方差分析

假设正交表安排了  $m$  个因素的试验, 试验总数为  $n$ , 而试验结果分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。每个因素有  $n_a$  个水平, 而每个水平又做  $a$  次试验, 即  $n = a \times n_a$ 。计算试验结果的偏差平方和  $S_T$ 。总偏差的平方和  $S_T$  反映了试验结果的差异性, 其值越大表明各次试验结果间的差异就越大; 反之, 差异越小。对试验结果产生差异的原因有以下两点: 一是因素水平的变化导致的; 二是试验误差导致的。

反映各个因素对试验结果影响程度大小的  $F$  比。根据  $F$  检验原则, 如果影响因素的  $F > F_{0.01}$ , 则该因素影响特别显著; 如果  $F_{0.1} < F \leq F_{0.05}$ , 则影响一般; 如果  $F \leq F_{0.1}$ , 则该因素的影响程度很小, 可不予考虑。

双面组合连续箱梁中跨跨中截面上翼缘有效宽度比方差分析的结果列于表 5 中, 荷载类型的  $F = 92.4$  大于  $F_{0.05} = 19$  而小于  $F_{0.01} = 99$ , 说明荷载类型这个因素对有效宽度比的显著性比较大; 宽跨比的  $F = 15.4$  大于  $F_{0.1} = 9$  而小于  $F_{0.05} = 19$ , 说明宽跨比对有效宽度比的显著性一般; 截面高度和翼板外伸长度的  $F$  值均小于  $F_{0.1} = 9$ , 这两个因素对有效宽度比没有影响。

表 5 中跨跨中截面上翼缘有效宽度比方差分析

因素	$S_j$	自由度	$F$ 值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$	$F_{0.1}$	显著性
截面高度	0.010	2	2.0	99	19	9	—
翼缘板外伸长度	0.005	2	1.0	99	19	9	—
宽跨比	0.077	2	15.4	99	19	9	*
荷载类型	0.462	2	92.4	99	19	9	**
误差	0.040	2	—	—	—	—	—

注: \*\* 表示对结果影响特别显著; \* 表示对结果影响一般; — 表示对结果几乎没有影响。表 6 同。

组合箱梁负弯矩区支座附近下翼缘有效宽度比的方差分析结果列于表 6 中, 从表中可以看出, 这几个因素的  $F$  值均小于  $F_{0.1} = 9$ , 它们的变化对于支座附近截面下翼缘有效宽度比的影响不具备显著性, 即截面高度、翼板外伸长度、宽跨比、荷载类型这些因素的变化均对试验指标支座附近下翼板有效宽度比的影响不显著。

表 6 支座附近下翼缘有效宽度比方差分析

因素	$S_j$	自由度	$F$ 值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$	$F_{0.1}$	显著性
截面高度	0.125	2	3.472	99	19	9	—
翼缘板外伸长度	0.036	2	1.001	99	19	9	—
宽跨比	0.130	2	3.611	99	19	9	—
荷载类型	0.040	2	1.111	99	19	9	—
误差	0.040	2	—	—	—	—	—

### 3 简化计算公式

由以上正交分析的结果可知荷载类型及宽跨比的变化对组合箱梁上翼缘板有效宽度比的影响最敏感也最显著,而截面高度和翼缘板外伸长度对其的影响不敏感也不显著。为了便于设计计算,通过统计回归,得出弹性阶段钢-混凝土双面组合连续箱梁截面上翼板有效宽度的无量纲公式。

均布荷载

$$b_e/b = 0.39349 + 0.7419b/L - 2.0447(b/L)^2 \quad 0.1 \leq b/L \leq 0.5 \quad (6a)$$

单点集中荷载

$$b_e/b = 1.495 - 11.567b/L + 35.287(b/L)^2 - 34.27(b/L)^3 \quad 0.1 \leq b/L \leq 0.5 \quad (6b)$$

双点集中荷载

$$b_e/b = 1.0658 - 1.9783b/L + 1.6549(b/L)^2 \quad 0.1 \leq b/L \leq 0.5 \quad (6c)$$

式中,  $b_e/b$  为有效宽度比;  $b/L$  为宽跨比。

为了检验以上三种荷载作用下回归公式(6)的正确性,进行了 Pearson 相关性分析,结果如图 4 所示。三种荷载作用下,有限元分析的值都散布在回归公式附近,均布荷载、单点集中荷载、双点集中荷载其相关系数分别为 0.951, 0.909, 0.91。因此,可以认为回归公式与有限元分析出的数据点具有较好的相关性。在实际工程设计中,根据不同的荷载类型,弹性阶段下的有效宽度  $b_e$  可按回归公式进行计算。

### 4 结论

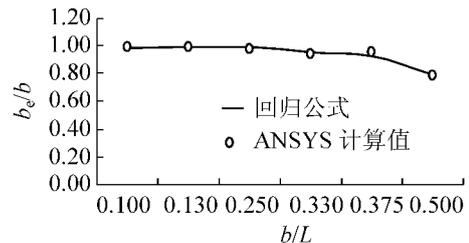
采用概论统计原理和计算机技术相结合方法对钢-混凝土双面组合连续箱梁的剪力滞效应影响因素进行正交分析,得到如下结论:

(1) 极差分析对组合梁剪力滞系数影响因素的敏感性进行了排序,正弯矩区敏感性因子排序由强到弱为荷载类型、宽跨比、截面高度、翼缘板外伸长度,负弯矩区极差分析的结果有所变动,排序为宽跨比、截面高度、荷载类型、翼缘板外伸长度。

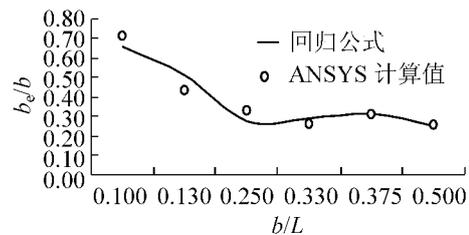
(2) 方差分析得到正弯矩区荷载类型对剪力滞效应的影响最显著,宽跨比次之,截面高度和翼缘板外伸长度对其的影响不大。负弯矩区的方差分析结果显示这几个影响因素都不显著。

(3) 对正交分析的结果经统计回归,得出弹性阶段钢-混凝土双面组合连续箱梁截面上翼板有效宽度的无量纲公式。

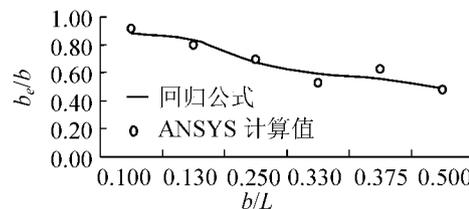
(4) 以上研究成果都是在一定条件下得到的,拟合公式也有其适用范围。



(a)均布荷载



(b)单点荷载



(c)双点荷载

图 4 不同荷载下宽跨比与有效宽度比的关系

(下转第 57 页)

**Abstract:** Shield construction is adopted for the tunnel of civil construction contract I-TS-05 of Suzhou rail transit line 1 between tower park road station and riverfront road station. This paper introduces the comprehensive construction technology in the water-rich silt stratum in Suzhou to overcome the problem that the shield can't sufficiently reach the reinforced area under water-rich silt by constructing a lap of water-stopping curtain pile outside the reinforced area to strengthen the foundation. The technology allows tri-axially reinforced soil and water-stopping curtain pile combined to form a broader reinforced area at the end of the foundation, and adopts rational use of secondary grouting and polyurethane lining in the region of shield tunneling, successfully blocking the emission path of the micro-pressure water as the shield approaches so as to solve the problem of water and silt gushing as the shield reaches the watery silt area. Through the use of the technology, the two tunneling shields are safely and successfully received. This technology has the advantages of wide applicability as well as good safety and controllability in water-rich silt strata.

**Key words:** shield tunneling; end reinforcement; silt strata; precipitation

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 29 页)

## 参 考 文 献

- [1] 郑浩,段树金. 钢-混凝土组合箱梁力学分析[J]. 石家庄铁道学院学报:自然科学版,2009,22(2):11-14.  
 [2] 杨喜文,段树金,李泽文. 钢-混凝土组合梁翼缘板有效宽度分析[J]. 铁道建筑,2007(6):11-14.  
 [3] Methee C, Amjad J A, Stuart S Chen, et al. Effective flange width definition for steel-concrete composite bridge girder [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(12), 2016-2031.  
 [4] 邵淑彩. 应用数理统计[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.  
 [5] 程海根. 薄壁箱梁剪力滞效应理论分析与试验研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2003.

## A Study of Shear Lag Effect Influencing Factors in Double Steel-concrete Composite Continuous Box Girder Based on Orthogonal Analysis Method

Wang Xiying, Duan Shujin

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The shear lag effect is determined by many factors, such as wide-span ratio, section height, flange overhang length, load type, and so on. The test specimens of double steel-concrete composite box girder are designed by orthogonal method. Then the numerical simulations are carried out according to different test conditions, and the results are orthogonally analyzed. It indicates that load type has the most significant influence to shear lag effect, followed by wide-span ratio, and section height and flange overhang length with very minor influence in engineering practice. The dimensionless formula of flange effective width is obtained for the double steel-concrete composite continuous box girder in elastic stage through statistical regression.

**Key words:** double composite continuous girder; shear lag effect; flange width; orthogonal analysis

(责任编辑 车轩玉)