

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.087



开放科学(资源服务)标识码OSID:



# 考虑滑移效应的体外预应力波形钢腹板梁桥的应力增量

杨美良, 樊林杰, 袁以鑫, 刘阳帆  
(长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 体外预应力筋的应力增量在波形钢腹板梁桥理论中至关重要。在已有的应力增量计算方法中, 适用于波形钢腹板梁桥的方法相对较少, 考虑预应力筋滑移效应的更少。为研究适用于波形钢腹板组合梁体外预应力筋应力增量的计算公式, 考虑在转向块处体外预应力筋与混凝土之间滑移效应的影响, 通过分析预应力筋的变形和结构整体变形的几何关系, 推导出对称荷载作用下的应力增量计算公式。结合现有试验数据, 利用 Ansys 建立了实体模型, 使用非线性弹簧单元 Combin39 来实现预应力筋的滑移效应; 并将求得的计算值与试验值和模型值进行对比分析。结果表明: 推导的应力增量公式计算值与波形钢腹板组合梁试验值吻合较好, 验证了该方法的适用性; 考虑滑移效应影响时, 结构的整体挠度和应力增量增大, 承载能力降低。

**关键词:** 波形钢腹板; 体外预应力; 相对滑移; 有限元分析; 应力增量

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0178-08

## Stress increment of externally prestressed corrugated steel web girder bridge considering slip effect

YANG Meiliang, FAN Linjie, YUAN Yixin, LIU Yangfan

(College of Civil Engineering, Changsha University of Technology, Changsha 410114, P. R. China)

**Abstract:** The stress increment of the in vitro prestressing tendons is of critical importance in the theory of waveform steel web girder bridges. Among the existing stress increment calculation methods, there are relatively few methods suitable for corrugated steel web girder bridges, especially considering the slip effect of prestressed tendons. In order to study the calculation formula for the external prestressed tendon stress increment of composite beams with corrugated steel webs, this paper consider the influence of the slip effect between the external prestressed tendons and the concrete at the steering block. By analyzing the geometric relationship between the deformation of the prestressed tendons and the overall deformation of the structure, the calculation formula of stress increment under symmetrical loads is deduced. Combined with the existing test data, an entity model was established using Ansys, and the nonlinear spring unit Combin39 was used to realize

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 湖南省教育厅重点科学研究项目(18A131)

作者简介: 杨美良(1967-), 女, 博士, 教授, 主要从事桥梁新结构、新技术研究, E-mail: yangmeiliang@163.com。

Received: 2021-01-18

**Foundation item:** The SRF of Hu'nan Provincial Education Department (No. 18A131)

**Author brief:** YANG Meiliang (1967-), PhD, professor, main research interests: new bridge structure and technology, E-mail: 1065506644@163.com.

the slip effect of the prestressed tendons; the calculated value obtained was compared with the experimental value and the model value for analysis. The results show that: 1) The calculated value of the deduced stress increment formula is in good agreement with the test value of the corrugated steel web composite beam, which verifies the applicability of this method. 2) When considering the influence of the slip effect, the overall deflection and stress increment of the structure increase, and the bearing capacity decreases.

**Keywords:**corrugated steel web; external prestress; relative slip; finite element analysis; stress increment

波形钢腹板梁桥是近年来兴起的一种桥梁形式,因其优越的性能而引起广泛关注。最早的法国建成的Cognac桥<sup>[1]</sup>,有效减小了大跨度桥梁的自重荷载。与传统的PC箱梁桥相比,波形钢腹板箱梁桥结构自重小,能显著降低腹板对上下翼缘板的约束作用,大幅度提高底板的有效预应力,在全球得到普遍推广。

目前,研究者已在波形钢腹板梁桥抗弯<sup>[2]</sup>、抗剪<sup>[3]</sup>、疲劳<sup>[4]</sup>、动力特性<sup>[5-6]</sup>等方面取得了一定的成果,但对于应力增量的涉及相对较少,且大多数是基于传统的PC箱梁桥,几种比较典型的方法分别是黏结折减系数法<sup>[7]</sup>、基于截面配筋率指标建立回归公式法<sup>[8]</sup>、基于变形的计算方法<sup>[9-10]</sup>和基于能量法<sup>[11-12]</sup>的计算方法。Antoine等<sup>[7]</sup>采用黏结折减系数法对预应力混凝土结构进行了研究,得到了考虑剪切变形的应力增量计算公式。Harajli等<sup>[13]</sup>建立了非线性有限元模型,进行参数拟合,分析体外预应力梁的“二次效应”影响和预应力筋的应力增量。Kim等<sup>[14]</sup>建立了适用于计算后张法体外预应力连续梁的非线性模型,并将计算出的弯矩分布结果与试验结果进行对比分析,验证了模型的正确性。刘晓刚等<sup>[8]</sup>采用基于截面配筋率指标建立回归公式的方法,进行了无黏结预应力筋应力增量的研究。通过将大量参数进行对比分析,构建了组合结构屈服时应力增量的计算方法。杜进生等<sup>[10]</sup>开展了关于塑性铰区长度的研究,提出了基于结构变形的应力变化分析方法,并进行了大量的试验梁对比,但并未给出体外预应力筋极限应力的计算公式。刘钊等<sup>[11]</sup>从能量法的角度入手,推出了结构处在正常使用阶段时预应力筋应力增量的解析解公式。苏俭<sup>[12]</sup>考虑典型布筋形式与荷载工况,利用能量法推导了体外预应力筋的应力增量解析计算公式,其中考虑了剪切变形的影响。刘玲<sup>[15]</sup>等进行了6根体外预应力加固混凝土简支梁的试验研究,研究了混凝土强度、跨高比、有效预应力、受拉区普通钢筋的数量等参数对预应力筋应力增量的影响。杜进生等<sup>[16]</sup>基于理论分析和数

值模拟,研究了波形钢腹板组合梁破坏时塑性铰的长度变化,但并没有提出波形钢腹板组合梁体外预应力筋应力增量的计算公式。徐荣桥等<sup>[17]</sup>基于ABAQUS软件的自定义单元,编写了一个自定义有限元单元,较好地模拟了体外预应力筋的实际情况,能计入滑移效应产生的影响,并基于此构建了应力增量的计算公式,但这是基于传统PC箱梁桥的理论,并不能完全适用于波形钢腹板组合梁桥,后续还需进行针对性的研究。

在现有的体外预应力筋应力增量研究方面,大部分是基于传统PC箱梁桥,针对波形钢腹板组合梁桥建立的应力增量研究鲜有报道。笔者在现有波形钢腹板梁桥试验的基础上,结合Euler-Bernoulli理论,通过预应力筋的变形和结构整体变形的几何关系,推导了考虑滑移效应的体外预应力筋应力增量的计算公式,将公式计算结果与试验梁和Ansys数值模型的结果进行对比,以证明本文理论的适用性。

## 1 考虑滑移的应力增量模型

考虑一简支梁,结合折线布筋形式,建立简化计算模型,如图1所示,同时对预应力筋做如下假定:

1)在外力作用下,组合梁和体外预应力筋均处于线弹性工作状态,未发生屈曲破坏。

2)未发生剪切滑移时,结构还遵循“拟平截面假定”。

3)考虑钢腹板剪切作用对梁体结构变形产生的影响。

4)忽略预应力筋在锚固端和转向块处的摩擦力,简化受力分析。

设预应力筋端点的初始位置为 $(x_i, y_i)$ ( $i=1, 2, 3, 4$ ),形状为三折线。

如图1所示,预应力筋线形简化为三折线形式。为简化计算过程及公式,定义各段为第 $i$ 段(顶点为 $i$ 和 $i+1$ )( $i=1, 2, 3$ ),则第 $i$ 段变形前的长度为

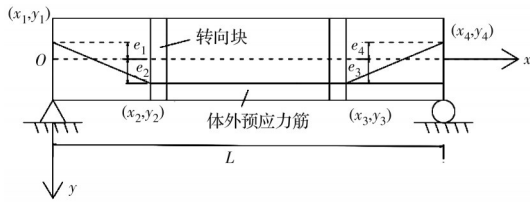


图 1 计算简图

Fig. 1 Calculation diagram

$$L_i^2 = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (1)$$

如果顶点  $i$  的位移用  $(u_i, v_i)$  表示,那么第  $i$  段预应力筋发生变形后的总长度可以表示为

$$(L_i + \Delta L_i)^2 = (x_{i+1} + u_{i+1} - x_i - u_i)^2 + (y_{i+1} + v_{i+1} - y_i - v_i)^2 \quad (2)$$

展开式(2)并消去高阶小量,化简后可得

$$\Delta L_i = (u_{i+1} - u_i) \cos \theta_i + (v_{i+1} - v_i) \sin \theta_i \quad (3)$$

其中:  $\theta_i$  为第  $i$  段预应力筋与  $x$  轴之间的夹角,即

$$\cos \theta_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{L_i}, \sin \theta_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{L_i} \quad (4)$$

根据几何关系,可以得到整根预应力筋在发生变形后的伸长量为

$$\Delta L_s = \sum_{i=1}^3 \Delta L_i = \sum_{i=1}^3 (u_{i+1} - u_i) \cos \theta_i + (v_{i+1} - v_i) \sin \theta_i \quad (5)$$

式(5)是通过解得预应力筋在锚固端和转向块处的位移,得到结构整体变形后推导的预应力筋伸长量计算公式。有了伸长量表达式,就能够得到预应力筋在结构变形后的应力、应变增量的表达式分别为

$$\Delta \epsilon_s = \frac{\Delta L_s}{L_s} = \frac{1}{L_s} \sum_{i=1}^3 (u_{i+1} - u_i) \cos \theta_i + (v_{i+1} - v_i) \sin \theta_i \quad (6)$$

$$\Delta \sigma_s = E_s \Delta \epsilon_s \quad (7)$$

其中:  $L_s$  和  $E_s$  分别表示预应力筋的总长度和弹性模量。根据梁理论,用组合梁的挠度和转角来表示预应力筋在转向块处的位移,可以得到

$$u_i = -e_i \psi(x_i), v_i = \omega(x_i) \quad (8)$$

其中:  $e_i$  是转向块与中性轴的偏心距(见图 1);  $\psi(x_i)$  是梁的转角;  $\omega(x_i)$  是梁的挠度。如果采用 Euler-Bernoulli 梁理论,那么  $\psi(x_i) = \omega'(x_i)$ 。此时,把式(8)代入式(6)、式(7)中,就可以得到 Euler-Bernoulli 梁理论中预应力筋的应力增量表达式为

$$\Delta \sigma_s = \frac{E_s}{L_s} \sum_{i=1}^3 \left\{ [-e_{i+1} \omega'(x_{i+1}) + e_i \omega'(x_i)] \cos \theta_i + [\omega(x_{i+1}) - \omega(x_i)] \sin \theta_i \right\} \quad (9)$$

因此,得到一个关于挠度的应力增量公式。后续只需求得组合梁的挠度公式,将其代入式(9)中,即可得到预应力筋的应力增量。

## 2 理论分析

### 2.1 跨中挠度计算

波形钢腹板组合梁主要的力学特征是:“混凝土顶、底板受弯,钢腹板受剪”。因此,进行挠度的推导时,将同时考虑两种作用的影响:混凝土顶、底板产生的弯曲变形;钢腹板的剪切变形。

在推导两点对称加载情况下(图 2)的挠度公式时,一般是先考虑只有一个集中荷载作用时的情况,然后通过叠加原理,得到对称加载时的挠度公式。因此,只需进行集中荷载  $F$  下(图 3)的挠度公式推导,通过叠加计算,即可求得两点对称加载情况下的挠度公式。

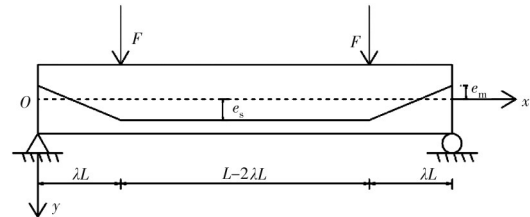


图 2 两点对称加载时的计算简图

Fig. 2 Calculation diagram for two-point symmetrical loading

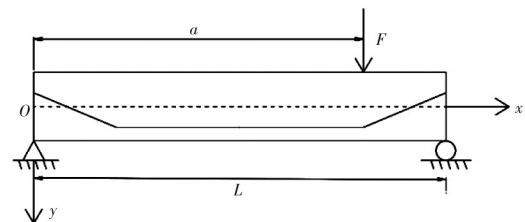


图 3 集中力 F 作用时的计算简图

Fig. 3 Calculation diagram when the concentrated force F is applied

集中荷载  $F$  作用下,组合梁所受的剪力和弯矩表达式可以表示为

$$Q(x) = \begin{cases} \frac{L-a}{L} F, & x \in [0, a] \\ -\frac{a}{L} F, & x \in (a, L] \end{cases} \quad (10)$$

$$M(x) = - \begin{cases} \frac{F(L-a)}{L}x, & x \in [0, a] \\ Fa \left( \frac{L-x}{L} \right), & x \in (a, L] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $F$  为外荷载;  $a$  为图 2 中集中力  $F$  与梁端的距离;  $L$  为简支梁跨径。

波形钢腹板的剪切模量采用 Johnson 等<sup>[18]</sup>建立的有效剪切模量  $G_e$  的计算公式

$$G_e = \frac{G(a+b)}{(a+b \sec \alpha)} \quad (12)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$  的具体尺寸见图 4;  $G_e$  为钢板的抗剪弹性模量。

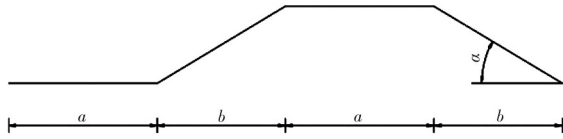


图 4 波形钢腹板示意图

Fig. 4 Sketch of corrugated steel webs

假设只受剪力时, 组合梁挠曲线上任一点处的斜率等于该点所在截面的剪应变, 那么可得

$$\omega_2 = - \begin{cases} \frac{-F(L-a)x}{6E_c I_c L} (x^2 - 2aL + a^2), & x \in [0, a] \\ \frac{-F(L-a)}{6E_c I_c L} \left[ x^3 - \frac{L}{L-a} (x-a)^3 - (2aL - a^2)x \right], & x \in (a, L] \end{cases} \quad (16)$$

根据叠加原理, 将式(14)和式(16)按图 2 所示

$$\frac{d\omega_1}{dx} = k \frac{Q(x)}{AG_e} \quad (13)$$

式中:  $\omega_1$  为简支梁在剪力作用下的挠度;  $A$  为竖向抗剪面积,  $A=2ht$ , 可参见文献[19],  $h$  为钢腹板竖向高度;  $t$  为钢腹板板厚;  $Q(x)$  为剪力;  $k$  为剪切系数, 此时取  $k=0$ 。

将式(11)代入式(13)中, 可得到组合梁因发生剪切变形而产生的挠度  $\omega_1$ 。

$$\omega_1 = - \begin{cases} \frac{F(L-a)}{G_e AL} x, & x \in (0, a] \\ -\frac{Fa}{G_e AL} x + \frac{Fa}{G_e A}, & x \in (a, L] \end{cases} \quad (14)$$

设波形钢腹板组合梁弯矩引起的挠度为  $\omega_2$ , 可得

$$\frac{d^2 \omega_2}{dx^2} = -\frac{M(x)}{E_c I_c} \quad (15)$$

式中:  $E_c$  为混凝土板弹性模量;  $I_c$  为混凝土板对形心轴的惯性矩。

将式(11)代入式(15)中, 可得

进行计算, 得到两点对称加载时组合梁的挠度公式

$$\omega = \begin{cases} \frac{Fx}{G_e A} - \frac{F(x^3 - 3\lambda L^2 x + 3\lambda^2 L^2 x)}{6E_c I_c}, & x \in [0, \lambda L] \\ \frac{\lambda LF}{G_e A} - \frac{F(3\lambda L x^2 - 3\lambda L^2 x + \lambda^3 L^3)}{6E_c I_c}, & x \in (\lambda L, L - \lambda L] \\ \frac{F(L-x)}{G_e A} - \frac{F(L^3 - x^3 + 3Lx^2 - 3L^2 x + 3\lambda L^2 x - 3\lambda^2 L^2 x - 3\lambda L^3 + 3\lambda^2 L^3)}{6E_c I_c}, & x \in (L - \lambda L, L] \end{cases} \quad (17)$$

## 2.2 应力增量求解

得到挠度之后, 根据式(9)、式(10)和式(17)可进行应力增量的求解。三折线布筋时, 对称荷载作用下

$$\cos \theta_1 = \frac{\lambda L}{L_1}, \sin \theta_1 = \frac{e_m + e_s}{L_1}, \cos \theta_2 = 1$$

$$\sin \theta_2 = 0, \cos \theta_3 = \frac{\lambda L}{L_3}, \sin \theta_3 = \frac{-(e_m + e_s)}{L_3} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} L_1 &= L_3, e_1 = e_4 = e_m, e_2 = e_3 = e_s \\ x_1 &= 0, x_2 = \lambda L, x_3 = L - \lambda L, x_4 = L \end{aligned} \quad (19)$$

可对应应力增量求解公式进行化简

$$\Delta \sigma_s = \frac{E_s}{L_s} \left\{ \left[ e_m \omega'(x_1) - e_m \omega'(x_4) \right] \frac{\lambda L}{L_1} + \left[ e_s \omega'(x_3) - e_s \omega'(x_2) \right] \left( \frac{\lambda L}{L_1} - 1 \right) + \left[ \omega(x_2) - \omega(x_1) + \omega(x_3) - \omega(x_4) \right] \frac{e_m + e_s}{L_1} \right\} \quad (20)$$

### 3 数值模型

为了比较验证,依据文献[20]的模型数据和材料设计要求,通过有限元软件Ansys,建立波形钢腹板组合梁全桥数值模型。模拟波形钢腹板组合梁从开始加载到丧失承载能力的受力全过程。

#### 3.1 试验模型数据

以文献[20]的试验参数为基础,简化计算模型,进行预应力筋应力增量的求解。模型梁长4.4 m,宽1.525 m,共设有4道横隔板。体外预应力钢筋为 $2\phi 15.24$ 钢绞线,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1860$  MPa;顶、底板普通钢筋设计强度为210 MPa, $\phi 6$  mm的光圆钢筋,横向和纵向间距均为100 mm。具体尺寸和布置形式等见图5。

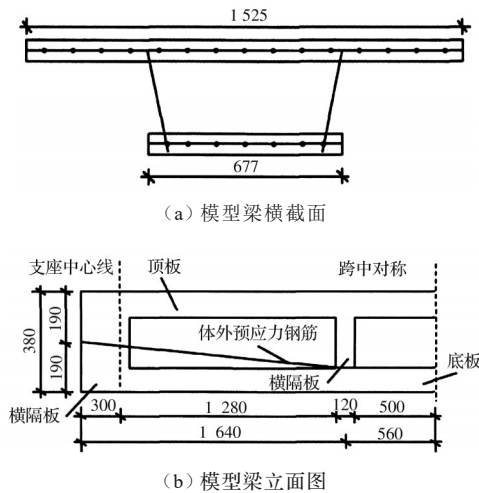


图5 模型截面尺寸(单位:mm)

Fig. 5 Model section size (Unit: mm)

波形钢腹板厚度为4 mm,细部尺寸见图6,其中: $a$ 为直板段宽度; $b$ 为斜板段水平宽度; $C$ 为斜板段宽度。

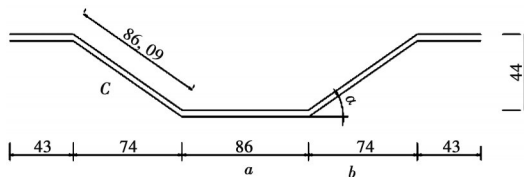


图6 波形钢腹板尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Dimensions of corrugated steel web (Unit: mm)

文献[20]中,模型试验梁加载前需进行挠度、应变和锚下有效预应力测点布置。挠度测点布置在支座和顶板;在顶、底板和波形钢腹板均设置应变测点;试验采用普通钢绞线和智能预应力钢绞线。

智能预应力钢绞线内部布置3个光栅测点。同时,在试验梁的张拉端和锚固端均设置锚下有效预应力测点。

体外预应力筋采用单端张拉,张拉力均为120 kN,一次性张拉到位。

试验梁利用反力架做支撑,采用千斤顶进行分级加载,加载方式为两点对称加载。当试验荷载小于110 kN时,采用每级10 kN的荷载增量加载;当荷载达到110 kN时,采用每级5 kN的荷载增量加载,直至梁体塑性破坏。

#### 3.2 材料单元和本构关系

数值模型由混凝土顶底板、顶底板普通钢筋、波形钢腹板、横隔板、支座处钢垫块、加载端分配梁和体外预应力筋几部分组成。

在Ansys众多实体单元中,空间实体8节点单元Solid65是专门为钢筋混凝土材料开发的,可进行非线性处理,具有拉碎和压碎的性能,可模拟钢筋混凝土的开裂、压碎、塑性变形和徐变。因此,混凝土顶、底板选用Solid65实体单元。

波形钢腹板用壳单元Shell93模拟,能考虑剪切变形带来的影响。横隔板采用Solid45单元,同时,为了避免应力集中,在锚固端和转向块处将弹性模量增加到10倍,相当于使其弹性模量无穷大,达到刚体的效果。普通钢筋选用能同时承受拉应力和压应力的Link8单元。

体外预应力筋选用只能单向受拉或者单向压缩的Link10单元,通过添加初应变的方式实现预应力筋的张拉。同时,采用Combin39单元来模拟体外预应力筋在转向块位置的滑移效应<sup>[21]</sup>。

#### 3.3 模型建立和网格划分

建立实体模型时,通过体分割法建立普通钢筋形成分离式模型,模型建成后,钢筋与混凝土为共节点,可以共同工作,不需要通过耦合来联系在一起。波形钢腹板与顶、底板之间的连接也通过体分割法,在两者连接处形成共节点。在支座处和加载处用实体单元建立垫块,增大其弹性模量,达到模拟成刚体的效果,消除加载不均衡和不对称等因素对计算结果的影响。支座处钢垫块与底板、分配梁与顶板分别施加约束,保证垫块与底板、分配梁与顶板是一个整体。

在进行网格划分时,根据波形钢腹板的形状进行,保持预应力筋、混凝土和波形钢腹板的划分方式相同,保证节点的一致性,能更好地完成布尔运算。

为分析滑移效应对应力增量的影响,共建立两个对比模型。模型一中,预应力筋在转向块和锚固端处用 Combin39 单元与混凝土粘结,以模拟滑移效应。模型二中,预应力筋在转向块和锚固端处与混凝土进行结点耦合操作,模拟成刚体,没有相对滑移。有限元整体模型如图 7 所示。



图 7 有限元模型图

Fig. 7 Finite element model diagram

### 3.4 计算结果及分析

求解过程中,通过荷载步和荷载子步的设置,实现加载梁处逐级加载。直到结构压应力或混凝土压应变超出承载范围而发生破坏为止。提取模型运行后的计算结果,得到跨中截面挠度值和预应力筋的应力值,对比分析文献[20]中试验结果和数值计算结果(图 8、图 9)。

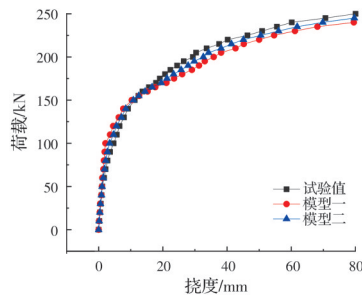


图 8 跨中截面荷载-挠度曲线

Fig. 8 Mid-span section load-deflection curve

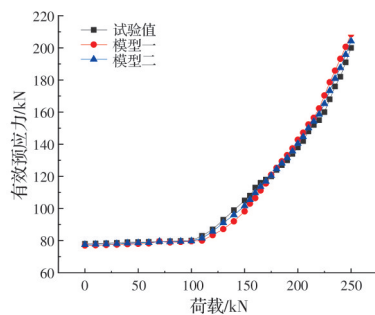


图 9 有效预应力-荷载曲线

Fig. 9 Effective prestress-load curve

分析结果表明:模型值与试验值相差不大,验证了模型分析的准确性,较好地拟合了实际情况。从图 8、图 9 中可以看出,曲线有明显的三阶段变化,分别对应模型梁从开始加载到破坏过程中的 3 个阶

段:弹性阶段、开裂阶段和塑性阶段。

弹性阶段:当荷载小于 100 kN 时,结构处于线弹性受力范围,底板尚未出现裂缝,此时力筋应力变化很小。

开裂阶段:当荷载增大到 100 kN 时,底板混凝土出现开裂,结构进入开裂阶段,结构刚度明显减小。但由于底板混凝土较薄,受拉区普通钢筋没有屈服,还处于线弹性受力范围,所以结构整体挠度变化很小,应力增量的变化也较小。

塑性阶段:当荷载增大到 150 kN 后,底板钢筋开始屈服,结构刚度持续降低,进入塑性阶段。结构整体挠度变化和应力增量增长速度显著加快。

当体外预应力筋仍处于弹性受力阶段时,图 8 所示荷载-挠度曲线大致呈线性增长关系,只有在力筋达到非线性段后,才变为曲线。此时结构整体挠度迅速增大,直至顶板被压碎,模型梁因失去承载能力而破坏。

对比模型一、二的曲线可以发现,考虑滑移效应时,结构整体挠度变形和应力增量增大,承载能力降低。说明滑移效应对应力增量的影响较为明显,不能忽略,在设计时应考虑其影响。

对比荷载-挠度曲线和有效预应力-荷载曲线可以发现,Ansys 建模得到的结果和试验所得结果虽有误差,但吻合情况良好,相差不大。说明 Ansys 模型较好地模拟了试验梁从开始加载到发生破坏的受力全过程。

## 4 理论公式验证

对比分析理论计算结果、模型结果和试验测试结果(见表 1)。

表 1 计算结果、模型结果和试验结果对比

Table 1 Comparison of calculation results, model results and test results

数值来源	应力增量 $\Delta\sigma_s$ /MPa	与试验值比值
计算值	24.92	0.96
模型一	24.53	0.94
模型二	23.68	0.91
试验值	25.90	1.00

分析表 1 可知:

1) 推导公式的计算值与文献[20]的试验值相比,误差不超过 5%,处于允许范围。计算值与模型值拟合程度较好,验证了公式的适用性。

2) 分析模型一、二可知,考虑预应力筋在转向

块处的滑移效应时,得到的应力增量比不考虑时的结果偏大,且更为接近试验值。说明力筋的滑移效应带来的影响不能忽视,后续研究中应考虑此因素。

为进一步验证公式的适用性,参考同样布筋形式和加载形式下的模型梁数据,对文献[22]和文献[23]的数据进行理论的验证计算,并进行对比(见表2)。

表2 计算值和试验值对比分析

Table 2 Comparative analysis of calculated value and test value

数据来源	计算值 $\Delta\sigma_s$ /MPa	试验值 $\Delta\sigma_s$ /MPa	比值
模型梁	24.92	25.9	0.96
文献[22]	28.67	30.5	0.94
文献[23]	35.81	38.5	0.93

分析表2可得:与试验值相比,公式的计算值偏低,但处于允许范围,且误差不大。表明公式计算所得的应力增量与实际情况吻合良好。

## 5 结论

1)在考虑预应力筋在转向块处滑移效应的影响工况下,得出结构变形与力筋伸长量之间的理论关系。并结合 Euler-Bernoulli 梁理论进行简化,推导出适用于波形钢腹板体外预应力筋的应力增量计算公式,将其应用于已有的试验,对公式进行验证,所得误差较小,证明其有一定的适用性。

2)建立的 Ansys 模型模拟了试验梁从开始加载到结构破坏的全过程。结果表明,模型计算得到的应力增量与挠度近似正相关。在引入滑移效应的影响后,模型的整体变形和应力增量增大,承载能力降低。

3)有限元计算结果表明,以混凝土板开裂和顶底板受拉区普通钢筋屈服为分界点,组合梁的受弯破坏过程经历了弹性阶段、开裂阶段和破坏阶段。

## 参考文献

[1] 李宏江, 万水, 叶见曙. 波形钢腹板PC组合箱梁的结构特点[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 53-57.  
LI H J, WAN S, YE J S. Structural features of prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 53-57. (in Chinese)

[2] 刘梓锋, 王志宇, 周夏芳. 波形钢腹板-钢管混凝土翼

缘组合梁的受弯性能分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (Sup1): 325-332.

LIU Z F, WANG Z Y, ZHOU X F. Bending behavior of composite girders with corrugated steel webs and concrete filled steel tube flanges [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(Sup1): 325-332. (in Chinese)

[3] 邓文琴, 刘朵, 王超, 等. 变截面波形钢腹板内衬混凝土组合梁剪扭性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 618-623.

DENG W Q, LIU D, WANG C, et al. Test study on shearing and torsional behavior of concrete-encased non-prismatic composite girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 618-623. (in Chinese)

[4] 彭鲲. 波形钢腹板组合梁疲劳性能的试验和理论研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

PENG K. Experimental and theoretical study on the fatigue performance of composite girders with corrugated steel webs [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)

[5] 李志聪, 张鹏. 波形钢腹板组合连续箱梁动力特性研究[J]. 公路, 2019, 64(8): 127-130.

LI Z C, ZHANG P. Research on dynamic characteristics of continuous box girder combined with corrugated steel webs [J]. Highway, 2019, 64(8): 127-130. (in Chinese)

[6] 桂水荣, 张政韬, 陈水生. 结构参数对大跨波形钢腹板箱梁桥动力特性的影响[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 39-44.

GUI S R, ZHANG Z T, CHEN S S. Influences of structural parameters on dynamic characteristics of long span box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 39-44. (in Chinese)

[7] ANTOINE E N, FADI M A. Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons: Part 2: Proposed methodology [J]. ACI Structural Journal, 1992, 88(6): 683-692.

[8] 刘晓刚, 聂鑫, 樊健生. 波形钢腹板组合梁无黏结预应力筋应力增量研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 47-55.

LIU X G, NIE X, FAN J S. Research on prestressing tendons stress increment of prestressed composite beams with corrugated webs [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 47-55. (in Chinese)

[9] 贾艳敏, 魏皓天, 王宇琪, 等. 基于挠度的预应力连续钢梁预应力筋应力增量分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59 (2): 70-73.

JIA Y M, WEI H T, WANG Y Q, et al. Stress increment analysis of prestressed steel bar in prestressed continuous steel girder based on its deflection [J]. Railway Engineering, 2019, 59(2): 70-73. (in Chinese)

[10] 杜进生, 刘西拉. 基于结构变形的无黏结预应力筋应力变化研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 12-19.

- DU J S, LIU X L. Research on the variations of unbonded prestressed tendon stresses based upon the structural deformation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(8): 12-19. (in Chinese)
- [11] 刘钊, 贺志启, 王景全. 基于能量法的体外预应力梁力筋应力增量研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(1): 136-140.  
LIU Z, HE Z Q, WANG J Q. Stress increment study of external tendons based on energy method [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 38(1): 136-140. (in Chinese)
- [12] 苏俭. 基于能量法的波形钢腹板桥梁体外力筋应力增量研究[J]. *上海公路*, 2016(2): 36-39, 11.  
SU J. Stress increment of external tendons in bridges with corrugated steel webs based on energy method [J]. *Shanghai Highways*, 2016(2): 36-39, 11. (in Chinese)
- [13] HARA JI M, KHAIRALLAH N, NASSIF H. Externally prestressed members: Evaluation of second-order effects [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(10): 1151-1161.
- [14] KIM K S, LEE D H. Nonlinear analysis method for continuous post-tensioned concrete members with unbonded tendons [J]. *Engineering Structures*, 2012, 40: 487-500.
- [15] 刘玲. 体外预应力加固混凝土 T 梁及箱梁的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
LIU L. Experimental study on concrete T-girder and box girder strengthened with external prestressing tendons [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [16] 杜进生, 冯建祥, 边晓龙, 等. 波纹钢腹板体外预应力混凝土箱梁塑性铰长度研究[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(5): 67-73.  
DU J S, FENG J X, BIAN X L, et al. Research on plastic hinge length of external prestressed concrete box girder with corrugated steel webs [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(5): 67-73. (in Chinese)
- [17] 徐荣桥, 管羽飞, 林建平. 考虑滑移的体外预应力筋的分析理论[J]. *工程力学*, 2017, 34(5): 198-204.  
XU R Q, GUAN Y F, LIN J P. Analysis of externally prestressed tendons considering influence of relative slip [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(5): 198-204. (in Chinese)
- [18] JOHNSON R P, CAFOLLA J, BERNARD C. Corrugated webs in plate girders for bridges [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1997, 122(2): 157-164.
- [19] 李宏江, 叶见曙, 万水, 等. 剪切变形对波形钢腹板箱梁挠度的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(4): 17-20.  
LI H J, YE J S, WAN S, et al. Influence of shear deformation on deflection of box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(4): 17-20. (in Chinese)
- [20] 陆小蕊. 波形钢腹板组合梁体外预应力增量设计方法[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
LU X R. Design method for stress increment of externally prestressed tendons in corrugated steel web composite beam [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [21] 杨美良, 龚静敏, 李传习. 体外预应力索滑移效应的有限元分析[J]. *中外公路*, 2009, 29(2): 108-111.  
YANG M L, GONG J M, LI C X. Finite element analysis of slip effect of external prestressed cable [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2009, 29(2): 108-111. (in Chinese)
- [22] 李立峰, 刘志才, 王芳. 波形钢腹板 PC 组合箱梁抗弯承载力的理论与试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 89-96.  
LI L F, LIU Z C, WANG F. Theoretical and experimental research on the flexural behavior of external prestressed composite beam with corrugated webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 89-96. (in Chinese)
- [23] CHEN X C, BAI Z Z, ZENG Y, et al. Prestressed concrete bridges with corrugated steel webs: Nonlinear analysis and experimental investigation [J]. *Steel and Composite Structures*, 2016, 21(5): 1045-1067.

(编辑 胡玲)