

# 既有预应力宽幅空心板受力性能的破坏性试验

易汉斌<sup>1</sup>, 李传习<sup>1</sup>, 吴后选<sup>2</sup>, 江祥林<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司,  
江西 南昌 330025; 3. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330200)

**摘要:**为了准确评估宽幅空心板构件的承载能力,以昌樟(南昌—樟树)高速公路改扩建工程为依托,对肖江大桥拆除的 2 片服役 20 年的预应力混凝土宽幅空心板进行原型试验研究。试验采用 2 个 1 500 kN 千斤顶,对空心板进行分级加载直至试件破坏,分析构件的破坏模式及加载过程中挠度、应变随荷载变化的关系;基于退化分层壳元法编程考虑材料、几何非线性的有限元分析程序,并应用该程序对试验全过程进行数值模拟。结果表明:构件破坏模式为顶板混凝土压碎,跨中截面形成塑性铰的典型受弯结构破坏;加载至构件开裂时,1 号、2 号梁的开裂荷载分别为 360、320 kN,对应的实测挠度值分别为 22、16 mm,加载至破坏时,1 号、2 号梁对应的破坏荷载分别为 880、800 kN,对应的实测挠度值分别为 556、540 mm,构件具有较好的延性性能;数值模拟计算的开裂荷载和破坏荷载分别为 360、920 kN,为 1 号梁试验值的 1.00、1.05 倍,为 2 号梁试验值的 1.13、1.15 倍,数值模拟计算值与试验结果吻合较好,编程的有限元程序能较好地模拟预应力钢筋混凝土空心板的破坏全过程;由试验结果及理论计算得出,1 号、2 号梁的活载因子  $\lambda$  分别为 3.16、2.77,安全系数  $S_f$  分别为 1.57、1.43,构件具有较好的承载力性能。

**关键词:**桥梁工程;空心板;破坏性试验;极限承载力;非线性有限元分析

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## Destructive test on mechanical behavior of existing prestressed wide hollow slabs

YI Han-bin<sup>1</sup>, LI Chuan-xi<sup>1</sup>, WU Hou-xuan<sup>2</sup>, JIANG Xiang-lin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan, China; 2. Jiangxi Ganyue Expressway CO. LTD, Nanchang 330025, Jiangxi, China;  
3. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the bearing capacity performance of wide hollow slab, based on Changzhang Highway reconstruction and expansion project, a prototype test of two prestressed concrete wide hollow slabs in service for 20 years has been carried out with the opportunity of demolition and reconstruction of Xiaojiang Bridge. In this experiment, two 1 500 kN jacks were used to load the hollow slabs until the specimens were damaged, the failure modes of the components and the relationship between the deflections and strains during the loading process were analyzed. Based on the degradation of layered shell element method, a finite

收稿日期:2017-10-20

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014318363230);江西省交通运输厅科技计划项目(2014C0001)

作者简介:易汉斌(1985-),男,江西进贤人,工学博士研究生,E-mail:272864631@qq.com。

通讯作者:李传习(1963-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:lichuanxi2@163.com。

element analysis program considering the consideration of material and geometric nonlinearity was compiled, and the program was used to simulate the whole process of the test. The results show that the failure mode of the component is crushed by the roof concrete, and the typical bending structure of the middle cross section is formed by the plastic hinge, the cracking load of No. 1 and No. 2 beam is 360 and 320 kN, the corresponding deflection is 22 and 16 mm respectively. While loading to failure, the failure load of No. 1 and No. 2 is 880 and 800 kN, the corresponding deflection is 556 and 540 mm respectively, which shows that the component has better ductility. The cracking and failure loads calculated by the numerical simulation are 360 and 920 kN, which is 1.00 and 1.05 times as much as that of the test value of No. 1, 1.13 and 1.15 times as much as that of the test value of No. 2. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results, which shows that the nonlinear finite element program developed by the authors can simulate the whole failure process of the prestressed reinforced concrete flexural members well, according to the test results and theoretical calculations, the live load factors of No. 1 and No. 2 beams are 3.16 and 2.77, and the safety factors are 1.57 and 1.43 respectively, indicating that the component has good bearing capacity. 2 tabs, 11 figs, 23 refs.

**Key words:** bridge engineering; hollow slab; destructive test; ultimate bearing capacity; nonlinear finite element analysis

## 0 引言

预应力混凝土宽幅空心板因其较好的经济性能及构造特点在中国公路桥梁中运用较广泛,然而经过服役 20 多年后,发现该类桥梁存在诸多病害。根据连徐(连云港—徐州)高速公路段内 2003 年、2007 年的桥梁检测报告统计,4 年内宽幅空心板底板纵向裂缝、底板横向裂缝和铰缝裂缝分别增长了 13.7%、495%和 575%<sup>[1]</sup>。江西昌樟(南昌—樟树)高速公路的药湖大桥全长 9.1 km,上部结构均采用了先张法预应力宽幅空心板,2005 年对药湖大桥全面检测,发现约有 20 块板在跨中附近出现横向裂缝(占总板数的 2.8‰);605 块板端头出现纵向裂缝(占总板数的 8.6‰)<sup>[2]</sup>。此外,浙江、广西的多座宽幅空心板梁桥也均出现了不同程度的纵向裂缝和横向裂缝病害<sup>[3-4]</sup>。因此,开展宽幅空心板极限承载力及安全储备的研究,对在役桥梁结构的合理利用具有重要的工程意义。

确定在役桥梁结构极限承载能力的最直接方法是进行实桥试验,但试验代价大且试验机会很少,国内外均很少开展。国外仅有欧美少数几个国家进行过几座实桥的破坏性试验,Ross 对 1 座桁架桥进行了现场极限荷载试验,试验将各种部件的理论承载能力与现场试验中的实测结果进行了比较<sup>[5]</sup>;Miller 等利用 Stoney Creek 桥拆除的机会,研究了该桥在极限状态下的荷载横向分布形式<sup>[6]</sup>;Bakht 等对 1

座三跨连续钢混叠合梁桥进行了破坏性试验与数值模拟,研究了塑性铰出现与分布以及形成塑性铰后荷载重分布情况<sup>[7]</sup>。国内,徐文平以预应力混凝土 T 梁桥和预应力混凝土连续箱梁桥为对象,开展了 2 种桥型的破坏特性、破坏机理及破坏全过程的受力分析研究<sup>[8]</sup>;方志等对 30 m 跨预应力混凝土小箱梁和 20 m 跨预应力混凝土空心板进行了破坏试验及数值模拟,分析了预应力筋配筋量、张拉系数对结构承载力、变形性能及延性的影响<sup>[9]</sup>;张建仁等对 2 根服役 28 年的钢筋混凝土拱肋极限承载能力进行了试验研究,结果表明,初始裂缝、钢筋锈蚀和拱轴线的线形对结构承载能力和失效形式有较大影响<sup>[10]</sup>,但上述文献中尚未见关于宽幅空心板的破坏性试验。此外,目前采用大型通用有限元软件仅对装配式空心板的开裂行为及铰缝开裂成因进行了非线性分析,未涉及结构破坏全过程的受力分析<sup>[11-15]</sup>。

为此,本文对 2 片服役 20 年的宽幅空心板梁进行破坏性试验研究,分析其荷载-挠度、荷载-应变的关系及承载力性能和安全储备;基于退化分层壳元法,编程非线性有限元计算程序,实现构件的全过程受力性能分析。

## 1 试验介绍

### 1.1 工程概况

试验以肖江大桥的 20 m 先张法 PC 宽幅空心板为对象。该桥每跨单幅设置 8 片宽幅空心板,每

块板各设有 15 根 ASTM A416-90a 270 级(直径 15.24 mm)钢绞线,截面尺寸如图 1 所示。试验梁计算跨径为 19.6 m,空心板采用 C40 混凝土。设计荷载等级为汽车-超 20 级,挂-120。

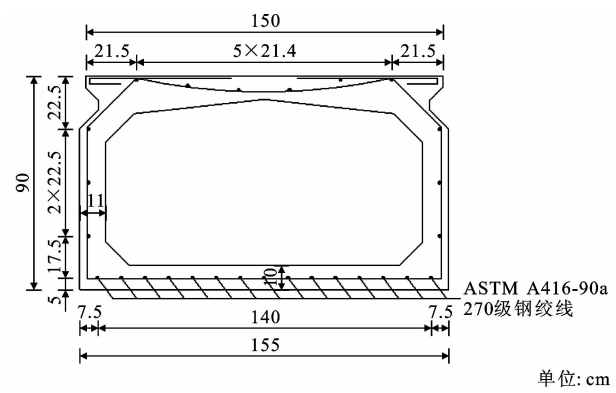


图 1 PC 宽幅空心板截面

Fig. 1 Mid-span section of wide hollow slab

1.2 试验加载及测试方案

试验采用千斤顶、枕木、反力架等构成的加载体系,试验过程采用分级循环加载。试验加载装置如图 2 所示。

试验测试内容包括荷载、宽幅空心板的变形、应变、裂缝观测,以及试验全过程的摄像记录。每一测试内容都至少通过 2 种测量方法进行测量,以相互校验,以确保所测数据的可靠性和精确度,试验测点布置如图 3 所示,其中  $L$  为构件跨径。

2 试验结果与分析

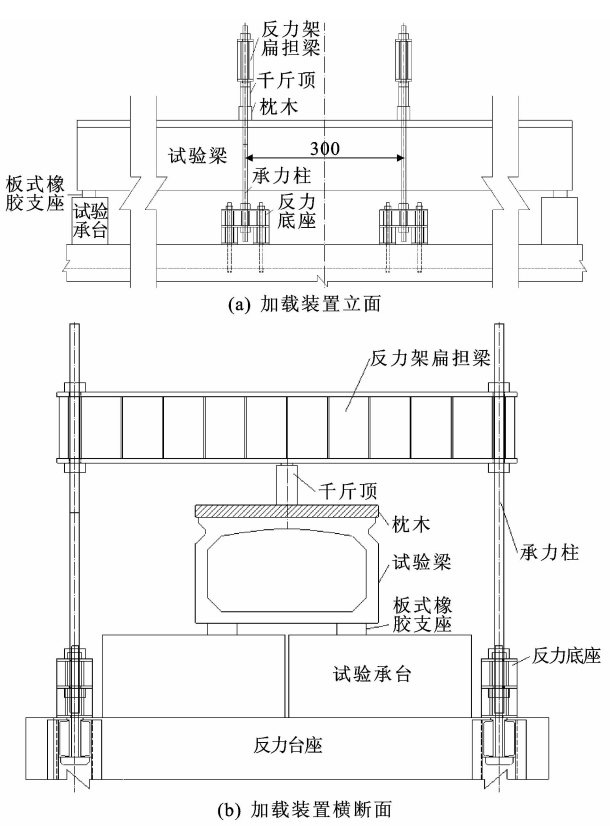
2.1 破坏现象与机理分析

试验前对 1 号、2 号梁进行外观检测,检测结果为:1 号梁梁端局部掉角(现场吊梁钻孔所致),梁体未发现裂缝,PC 空心板结构整体状况较好;2 号梁梁端腹板处共发现 6 条斜向裂缝,裂缝最大宽度为 0.2 mm。

试验结果表明,梁板整体受力过程大致分为 3 个阶段(以 1 号梁为例)。

(1)加载初始阶段,结构处于弹性状态,结构变形随荷载增大呈线性变化。

(2)当荷载  $P=360$  kN 时,PC 宽幅空心板跨中纯弯段区域内首先出现弯曲裂缝; $P=400$  kN 时,PC 宽幅空心板梁端头处出现了斜向剪切裂缝;随着荷载增大,梁体不断出现新的裂缝,原纯弯段内及支座附近处的裂缝宽度不断增大并向顶板延伸,结构刚度逐渐退化,结构变形随荷载增大呈非线性变化。



(b) 加载装置横断面

(c) 现场试验加载照片

单位: mm

图 2 试验加载装置  
Fig. 2 Test loading device

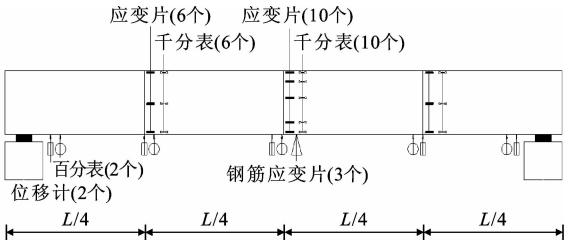


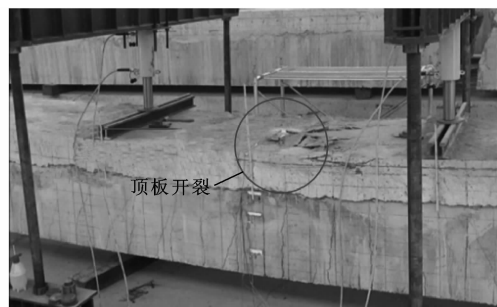
图 3 试验测点布置

Fig. 3 Layout of test points

(3)循环加载过程中,残余变形不断增大,最终导致顶板混凝土压碎,跨中出现塑性铰,屈服特征较为明显; $P=880$  kN 时,试验梁最终压溃垮塌,如图 4 所示。

2.2 位移及应变结果分析

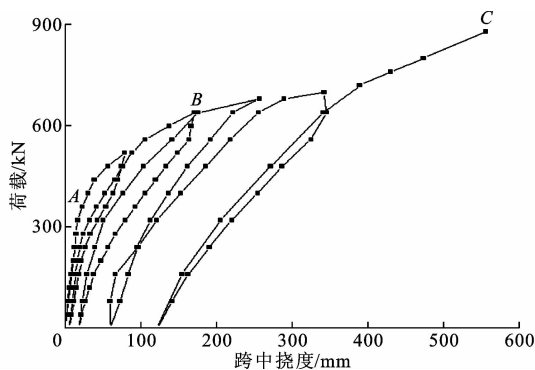
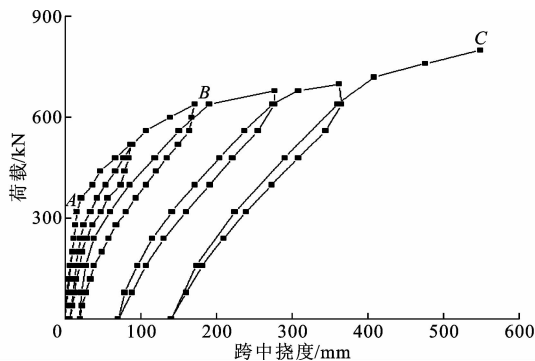
1 号、2 号梁的荷载-挠度曲线如 S 如图 5、图 6



(a) 试验梁顶板开裂



(b) 试验梁跨中断裂

图4 试验梁破坏状态  
Fig. 4 Failure state of test beam图5 1号梁PC宽幅空心板跨中的荷载-挠度曲线  
Fig. 5 Mid-span load-deflection curves of PC wide hollow slab of beam 1图6 2号梁PC宽幅空心板跨中的荷载-挠度曲线  
Fig. 6 Mid-span load-deflection curves of PC wide hollow slab of beam 2

所示。由图5、图6可看出,试验梁跨中截面的荷载-挠度曲线包络线近似呈三折线形,弯折点分别为混

凝土开裂A点、顶板普通钢筋屈服B点、空心板极限承载力C点,在C点处构件突然垮塌破坏。试验结果表明:1号、2号梁均具有非常好的变形能力,其跨中最大挠度分别为556、549 mm;1号、2号梁的极限承载力(2个千斤顶合力)分别为880、800 kN,对应的跨中极限弯矩分别为3 696、3 360 kN·m。

本文给出2号梁跨中截面上缘荷载-应变曲线(图7)。由图7可知,2号梁临近破坏时顶板混凝土的应变增加很快。荷载为640、680 kN时对应的应变分别为 $1\,217 \times 10^{-6}$ 、 $1\,627 \times 10^{-6}$ ,应换算成相应的应力值分别为39.6、52.9 MPa,这也与顶板混凝土压溃的试验现象相吻合。

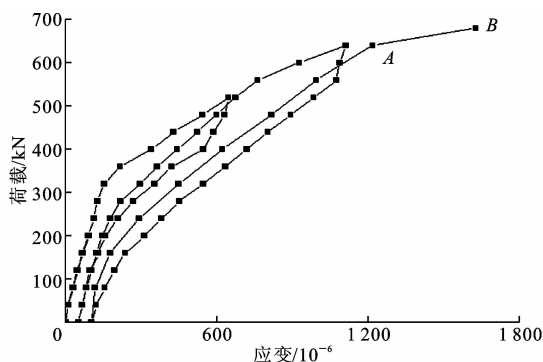


图7 2号梁PC宽幅空心板的荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of PC wide hollow slab of No. 2

### 2.3 承载能力及安全储备分析

按照《结构设计原理》<sup>[17]</sup>,计算第1类T形受弯构件的抗弯承载力 $M_\mu$ 为

$$f_{cd}b'_1x = f_{pd}A_s \quad (1)$$

$$M_\mu = f_{cd}b'_1x(h_0 - x/2) \quad (2)$$

式中: $f_{cd}$ 为混凝土轴心抗压强度设计值; $f_{pd}$ 为预应力钢绞线抗压强度设计值; $A_s$ 为纵向受拉钢筋的截面面积; $b'_1$ 为I形截面受压区翼缘厚度; $x$ 为截面受压区高度; $h_0$ 为截面有效高度。

按上述公式求得试验梁的跨中理论抗弯承载力 $M_\mu = 2\,720$  kN·m,其分别为1号、2号梁极限弯矩试验值的73.6%、81.0%。理论承载力小于结构实际极限承载力,原因是现行的《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2004)采用的是半概率极限状态设计法,且受弯构件的正截面承载力计算基于3个基本假定条件<sup>[17]</sup>,据此计算出的极限承载力实际只是一种条件极限承载力。

为了反映桥梁的承载性能引入活载因子 $\lambda$ ,并定义桥梁的安全系数 $S$ <sup>[18]</sup>为

$$S=\frac{P_d+\lambda P_1}{1.2P_d+1.4P_1} \tag{3}$$

式中： $P_d$  为恒载作用效应值； $P_1$  为活载作用效应值。

根据这一思想，本文以试验梁跨中弯矩为控制指标，定义受弯构件的安全系数  $S_f$  为

$$S_f=\frac{M_d+\lambda M_1}{1.2M_d+1.4M_1} \tag{4}$$

$$\lambda M_1=M_p \tag{5}$$

$$M'_\mu=M_d+M_p=M_d+\lambda M_1 \tag{6}$$

式中： $M_d$  为恒载作用跨中弯矩理论值； $M_1$  为车辆荷载最不利作用下的跨中弯矩理论值； $M_p$  为试验荷载作用下的跨中弯矩理论值； $M'_\mu$  为构件极限弯矩实测值。

$M_d$ 、 $M_1$  可按空心板的设计计算步骤求解得出，本文略去其求解过程。根据式(4)、式(5)求得构件的安全系数  $S_f$  和活载因子  $\lambda$ ，如表 1 所示。由计算结果可知，1 号、2 号梁空心板的安全系数  $S_f$  和活载因子  $\lambda$  均大于 1，表明空心板的承载性能较好，构件具有良好的安全储备。

表 1 试验梁安全系数及活载因子

Tab. 1 Safety factors and live load factors of test beams

梁编号	$M_d/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_1/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M'_\mu/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$S_f$	$\lambda$
1 号	946.2	871.2	3 696	1.57	3.16
2 号	946.2	871.2	3 360	1.43	2.77

3 非线性有限元分析

3.1 分层壳元法

体单元及其退化壳元如图 8 所示，体单元和退化壳单元的控制节点分别为 16 和 9 个。计算假设：垂直于单元中面的法线在其变形后仍为直线；垂直于单元中面的应力分量为 0。

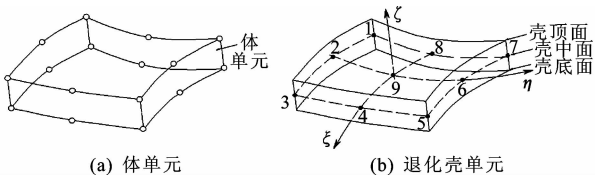


图 8 体单元及退化壳单元

Fig. 8 Solid element and the degraded shell element

由图 8 可知，壳单元内任一点整体坐标  $x_i$  ( $i=1,2,3$ ) 用 9 个壳中面节点  $x'_{ik}$  ( $k=1,2,\dots,9$ ) 关于节点形函数  $N_k$  插值，可表示为

$$x_i=\sum_{k=1}^9N_k(\xi,\eta)x'_{ik}+\sum_{k=1}^9N_k(\xi,\eta)\frac{h_k}{2}\zeta\mathbf{v}_{3k}^i \tag{7}$$

式中： $\xi$ 、 $\eta$ 、 $\zeta$  分别为壳元的曲线坐标轴  $[-1,1]$ ； $h_k$ 、

$\mathbf{v}_{3k}^i$  分别为节点  $k$  的底面和顶面 2 个节点之间的距离及单位矢量。

相应地，分层壳单元的位移场  $u_i$  可进一步推导为

$$u_i=\sum_{k=1}^9N_k(\xi,\eta)\mathbf{u}'_{ik}+\sum_{k=1}^9N_k(\xi,\eta)\frac{h_k}{2}\cdot\zeta[\mathbf{v}_{1k}^i,-\mathbf{v}_{2k}^i]\begin{bmatrix}\beta_{1k}\\\beta_{2k}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中： $\mathbf{u}'_{ik}$  为分层壳单元中面节点  $k$  的整体位移矢量； $\mathbf{v}_{1k}^i$ 、 $\mathbf{v}_{2k}^i$  均为与  $\mathbf{v}_{3k}^i$  互为正交的局部坐标系单位矢量； $\beta_{1k}$ 、 $\beta_{2k}$  分别为绕  $\mathbf{v}_{1k}^i$ 、 $\mathbf{v}_{2k}^i$  的转角位移，其与壳中面节点位移矢量  $\mathbf{u}'_{ik}$  组成了壳元节点  $k$  的 5 个基本位移未知量。

形函数  $N_k(\xi,\eta)$  表达式为

壳角节点( $k=1,3,5,7$ )

$$N_k(\xi,\eta)=\frac{1}{4}(1+\xi\xi_k)(1+\eta\eta_k)(\xi\xi_k+\eta\eta_k-1) \tag{9}$$

边中节点( $k=2,4,6,8$ )

$$N_k(\xi,\eta)=\frac{1}{2}\xi^2(1+\xi\xi_k)(1-\eta^2)+\frac{1}{2}\eta^2(1+\eta\eta_k)(1-\xi^2) \tag{10}$$

中心节点( $k=9$ )

$$N_k(\xi,\eta)=\frac{1}{2}(1+\xi\xi_k)(1-\eta\eta_k)(\xi\xi_k+\eta\eta_k-1) \tag{11}$$

式中： $\xi_k$ 、 $\eta_k$  分别为节点  $k$  的坐标。

分层壳单元模型如图 9 所示，相应的钢筋、混凝土应力修正模型如图 10 所示。

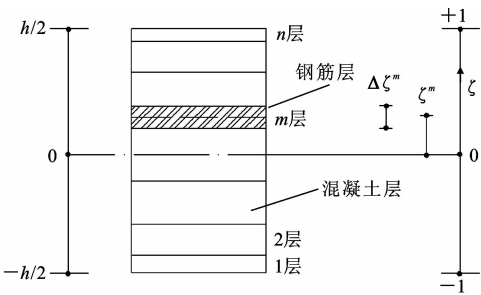


图 9 分层壳单元模型

Fig. 9 Layered shell element model

截面内力(轴力  $N_I$ 、弯矩  $M_I$ 、剪力  $Q_I$ )由分层法表示为

$$N_I=\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_I\mathrm{d}z=\frac{h}{2}\sum_{m=1}^n\sigma_I^m\Delta\zeta^m \tag{12}$$

$$M_I=-\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_Iz\mathrm{d}z=-\frac{h^2}{4}\sum_{m=1}^n\sigma_I^m\zeta^m\Delta\zeta^m \tag{13}$$

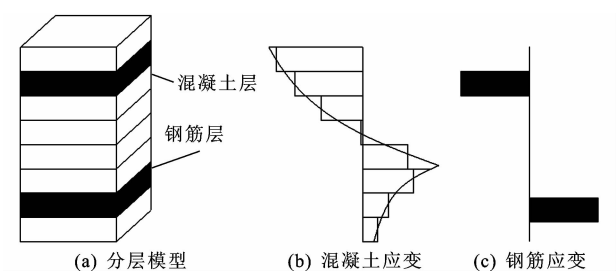


图 10 钢筋混凝土应力的修正模型

Fig. 10 Revised model of stress of steel and concrete

$$Q_I = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{Iz} dz = \frac{h}{2} \sum_{m=1}^n \tau_{Iz}^m \Delta \zeta^m \tag{14}$$

式中： $I$ 取 1、2 分别表示  $x$  向、 $y$  向； $\sigma_I$  为应力； $\tau_{Iz}$  为剪切应力； $h$  为壳单元厚度； $\Delta \zeta^m$  为任意壳单元层厚度； $\zeta^m$  为任意壳单元层中心至壳单元中心的厚度； $m$  为任意壳单元层； $n$  为壳单元分层总数。

分层壳单元几何描述、位移插值函数的推导见参见文献[19]。材料非线性遵循 Owen 双参数屈服准则，Hinton 压碎准则、Madrid 强化准则，流动法则采用常用的关联流动法则，应用弥散裂缝模型模拟混凝土开裂后行为[20-23]。

3.2 建模过程及计算结果

采用分层壳单元建立预应力混凝土空心板计算模型，共有 294 个单元，1 218 个节点。全过程分析中每个加载点每级加载 2 kN。预应力混凝土空心板的分层壳单元模型计算结果和 1 号、2 号梁试验值见表 2 和图 11。

表 2 试验梁特征点挠度和荷载

Tab. 2 Displacement and load of studied beams

参数		1 号梁 试验值	2 号梁 试验值	分层壳单元 法计算值
开裂	荷载/kN	360	320	360
	挠度/mm	22	16	21
屈服	荷载/kN	640	640	720
	挠度/mm	170	172	168
极限	荷载/kN	880	800	920
	挠度/mm	556	549	569

由图 11、表 2 可知：用非线性分层壳元模型模拟预应力混凝土空心板是可行的，其可为预应力混凝土空心板的全过程分析提供一种有效的数值计算方法；1 号梁试验值与分层壳单元法计算值更为接近，这是因为 2 号梁有初始损伤，而在非线性分层壳单元模型中未充分考虑。

4 结 语

(1)预应力宽幅空心板结构试验破坏形式为顶

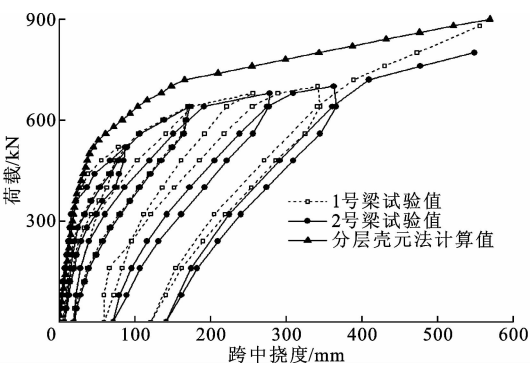


图 11 荷载-挠度对比曲线

Fig. 11 Correlation curves of load-deflection

板混凝土压碎，跨中截面形成塑性铰的典型受弯结构破坏，1 号、2 号试验梁表现出良好的变形能力和承载力性能。

(2)1 号、2 号梁空心板的安全系数和活载因子均大于 1，表明试验梁空心板具有一定的安全储备；

(3)基于分层壳单元法的非线性有限元程序计算，得出特征点的挠度和荷载结果与试验值吻合较好，能够准确地实现构件加载全过程非线性分析。

(4)通过宽幅空心板的破坏性试验可知，单块板的承载力性能和安全储备能够满足设计极限承载力及正常使用要求，其开裂病害产生的机理是否因其抗疲劳性能不足或是铰缝开裂后形成的“单板受力”所引起，需要进一步研究。

(5)经过长期服役的预应力混凝土构件往往会产生裂缝，本文分层壳单元模型中未考虑结构裂缝对极限承载力的影响，如何构建考虑初始损伤的分层壳单元模型，更准确地评估构件的极限承载力是后续研究的方向。

参考文献：

References：

[1] 袁爱民,陆近涛,朱晓文,等. 江苏省普通干线公路预应力混凝土空心板梁桥典型病害统计分析[C]//中国土木工程学会. 第十九届全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2010:1268-1273.  
YUAN Ai-ming, LU Jin-tao, ZHU Xiao-wen, et al. Statistical analysis of typical diseases of prestressed concrete hollow slab girder bridges of common trunk roads in Jiangsu Province[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 19th National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communications Press,2010:1268-1273.  
[2] 吴后选,李颀劲. 药湖大桥上部构造典型病害产生机理及其处治对策研究[J]. 公路交通科技,2008,24

- (11):93-96.
- WU Hou-xuan, LI Jie-jin. Study on the formation mechanism and treatment countermeasures of typical diseases in the upper structure of Yaohu Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 24(11): 93-96.
- [3] 周里鸣. 多跨连续预应力混凝土薄壁空心板桥病害原因研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- ZHOU Li-ming. Study on distresses for multi-span prestressed concrete thin-walled hollow slab bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [4] 叶 飞. 在役 PC 宽幅空心板破坏性试验研究及竖向预应力抗剪加固技术探讨 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- YE Fei. Destructive test research of in-service prestressed concrete changing section wide hollow slab bridge and shear strengthening study of external prestressing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [5] ROSS J. What really happened to bridge 11<sup>#</sup>; A modeling look into destructive bridge testing [R]. Park: Pennsylvania State University, 2004.
- [6] MILLER R A, AKTAN A E, SHAHROOZ B M. Destructive testing of decommissioned concrete slab bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(7): 2176-2198.
- [7] BAKHT B, JAEGER L G. Ultimate load test of slab-on-girder bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6): 1608-1624.
- [8] 徐文平. 既有预应力混凝土梁桥承载能力实桥试验及分析研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- XU Wen-ping. Experimental research and analysis on load-carrying capacity of the existing prestressed concrete girder bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [9] 方 志, 唐盛华, 何 鑫. 预应力混凝土简支箱梁足尺模型试验及非线性全过程分析 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(10): 73-81.
- FANG Zhi, TANG Sheng-hua, HE Xin. Full-scale model tests and nonlinear analysis of prestressed concrete simply supported box girders [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(10): 73-81.
- [10] 张建仁, 王 磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 49-55.
- ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.
- [11] 唐国斌, 项贻强, 管品武. 考虑混凝土徐变影响的空心板梁受力全过程分析 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增 2): 80-85.
- TANG Guo-bin, XIANG Yi-qiang, GUAN Pin-wu. Full-range study on mechanical performance of void box beam with concrete creep [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 80-85.
- [12] 冯 祁. 先张法 PC 空心板梁桥梁底开裂成因敏感性分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(6): 56-60.
- FENG Qi. Sensitivity analysis of cracking factors for the bottom slab crack of the pre-tensioned PC hollow slab girder bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(6): 56-60.
- [13] 张敬珍, 黄平明, 徐 岳. 整体现浇斜板桥的裂缝成因 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(5): 40-42.
- ZHANG Jing-zhen, HUANG Ping-ming, XU Yue. Cracks in integral skew slab bridge cast-in-site [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(5): 40-42.
- [14] 吴庆雄, 陈悦驰, 陈康明. 结合面底部带门式钢筋的铰接空心板破坏模式分析 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 15-25.
- WU Qing-xiong, CHEN Yue-chi, CHEN Kang-ming. Failure mode analysis of hinged voided slab with gate-type steel rebars at bottom of junction surface [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5): 15-25.
- [15] 陈康明, 吴庆雄, 黄宛昆, 等. 结合面底部带门式钢筋的铰接空心板桥受力性能参数分析 [J]. 公路交通科技, 2016, 33(8): 65-74.
- CHEN Kang-ming, WU Qing-xiong, HUANG Wan-kun, et al. Parameter analysis on mechanical property of hinged hollow slab bridge with gate-type steel bars at bottom of junction surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(8): 65-74.
- [16] 陈劲超. 装配式空心板桥破坏机理与加固技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- CHEN Jin-chao. Study on failure mechanism and strengthening technologies for fabricated hollow slab bridges [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [17] 叶见曙. 结构设计原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- YE Jian-shu. Principle of structural design [M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [18] 吴光宇. 大跨径 PC 桥梁非线性行为的分析理论及其极限承载力计算研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.