

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201801156

装配式停车楼预应力混凝土双 T 板静力非线性分析

张文龙¹, 周 威^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘 要: 为实现装配式停车楼结构的楼盖及坡道结构合理设计, 构建了未铺装和预铺装的标志跨度分别为 18 m 和 24 m 两类预制预应力混凝土双 T 板, 通过足尺试验获得了三分点加载下两类足尺试件弯曲性能以及剪跨比为 3 时两类足尺试件斜截面受力性能, 初步验证了两类双 T 板可满足停车楼楼盖及坡道正常使用和承载能力的需求. 考虑到有限数量试件的试验难以确定不同工况下双 T 板的基本静力性能, 基于分离式建模方法, 实现了荷载-变形曲线与实测结果较吻合的试验加载条件下足尺试件非线性分析. 完成了均布荷载下两类双 T 板的弯曲性能, 剪跨比范围为 1~9 的斜截面受力性能, 以及双 T 板板面上停/行车的局部受力性能的模拟分析. 结合足尺构件静力性能试验, 验证了所构建的两类预制预应力混凝土双 T 板均具有良好的裂缝和变形控制性能、斜截面和正截面承载力以及局部荷载下板面承载能力, 将其拼装并有效连接可形成具有良好受力性能的装配式停车楼结构坡道和楼/屋盖.

关键词: 装配式停车楼; 预应力混凝土; 双 T 板; 非线性分析; 弯曲; 剪切

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)12-0014-09

Nonlinear static analysis of prestressed concrete double-tees of precast parking structures

ZHANG Wenlong¹, ZHOU Wei^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control(Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To achieve rational design of diaphragms and ramps in precast parking structures, the precast concrete topped and un-topped double-tees with the span of 18 m and 24 m were designed and constructed. A series of full-scale experiments, both of flexural behavior under two point loads and shear capacity with shear-span ratio of 3.0, were carried out. The experimental results verified general feasibility of these double-tees to meet the service requirements of multi-storey parking structures. Because it is hard to obtain static performance of double-tees under various loading patterns from limited magnitude of experimental specimens, nonlinear analysis of double-tees members on basis of discrete models was carried out. The analytical results showed that the analyzing load-deformation curves under simulation of experimental loading condition coincided with the experimental curves. Both the flexural behavior of double-tees under uniform loads and shear performance of the double-tees with shear-span ratios ranging from 1.0 to 9.0 were simulated and analyzed. Moreover, a nonlinear finite element model (FEM) of driving or stopping on the local flange region of double-tees was conducted. Combination of these simulation analysis with static loading experiment reflected advantageous performance of the precast prestressed concrete double-tees, including responses of the crack and deflection control, shear and flexural capacities and local bearing capacity. Assembled effectively, these double tees can be applied to the diaphragm and ramps and provide good performance for precast parking structures.

Keywords: precast parking structure; prestressed concrete; double-tee; nonlinear analysis; bending; shear

收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(51778186); 中国航天建设集团有限公司装配式停车楼科研项目(MH20160318)

作者简介: 张文龙(1993—), 男, 硕士研究生;
周 威(1977—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 周 威, zhouwei-hit@163.com

装配式停车楼结构由于内部停/行车的空间以及有效停/行车坡道需求, 需合理布置大跨度预制混凝土结构构件. 预制预应力混凝土双 T 板(以下简称双 T 板)的板梁结合受力性能良好, 具有刚度大、

承载力高以及便于铺设形成大跨度楼/屋盖等优势^[1],且工业化生产条件下易于保证质量,自 1952 年设计定型起至今仍持续发展^[2-4],在国外发达国家如美、加、澳等广泛应用于停车楼^[5-7]. 国外有关学者针对双 T 板的受弯、受剪、局部受压、预应力效应等开展了一系列研究工作,相关成果也已体现在有关技术标准及设计手册中.

由于中国尚缺乏以双 T 板作为装配式停车楼结构楼屋盖/坡道主要结构构件的试验和理论基础,因此结合中国首座装配式停车楼结构的设计建造,总结国内外预制预应力混凝土构件性能和设计方法,尤其是借鉴美国预制/预应力混凝土学会 (PCI) 设计手册^[8],构建了未铺装和预铺装两类双 T 板,分别针对 18 m 和 24 m 两种标志跨度双 T 板,以现场足尺试验的方式,开展正截面弯曲性能和斜截面受剪性能分析^[9],获得了满足试验条件下两类双 T 板构件的刚度与裂缝及正截面与斜截面承载力等,在装配式停车楼的楼/屋盖与停/行车坡道所需的静力竖向荷载作用下,两类双 T 板构件的承载能力和变形能力均较大,相对于竖向荷载基本组合作用所需的内力,其抗力富裕程度较大,且两种跨度两类双 T 板使用阶段的拉区边缘拉应力和跨中挠度也较好地符合裂缝控制和变形控制要求. 通过足尺试验获得双 T 板的弯曲性能和剪切性能,尤其是使用性能和承载能力,为工程应用提供试验支撑.

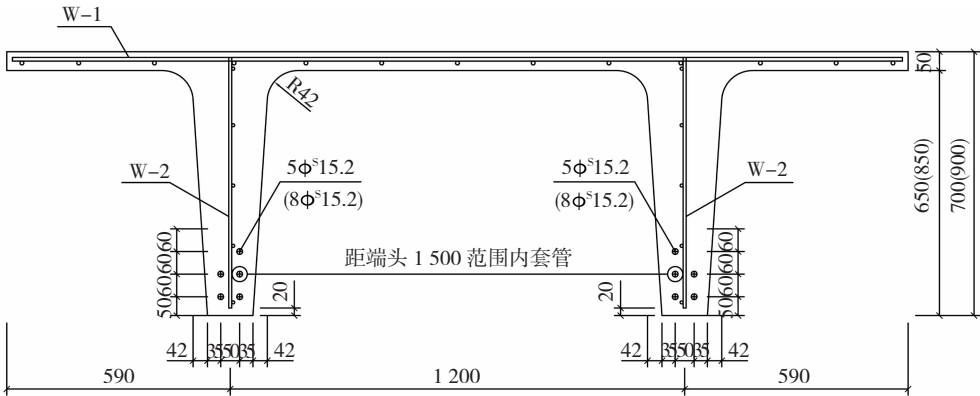
然而,足尺试件受力性能试验还是受到了诸多条件限制,试验参数和试件数量有限,难以较全面考察各类荷载工况影响. 应通过对相同条件下双 T 板试件的非线性分析获得试验条件下变形发展以及正截面和斜截面承载力等,并与实测结果进行对比分析,通过模拟分析结果与试验结果的吻合程度验证所采用的非线性模型的可靠性,在此基础上模拟分析均布荷载、变剪跨比的单点集中加载以及双 T 板

翼缘在坡道停车的车轮集中荷载等 3 种工况条件下两类双 T 板试件整体弯曲性能、支座斜截面性能以及翼缘板的局部受力性能.

为此,在双 T 板构件足尺试验结果基础上,结合非线性全过程分析方法,进行试验中未能涉及的构件性能和能力的精细考察,可进一步验证双 T 板在装配式停车楼结构中的适用性,为提出设计计算方法和优化配筋构造提供支持.

1 双 T 板试验

所构建的全跨等截面未铺装双 T 板均呈现双 T 的基本构型:板面标志宽度 2.4 m,标志跨度 18 m,实际跨度 17.98 m,标志跨度 24 m,实际跨度 23.98 m;截面高度则分别为 700 mm 和 900 mm,两肋梁底宽均为 120 mm,翼缘板厚度均为 50 mm. 预铺装双 T 板除需布置 80 mm 厚细石混凝土后浇层外,构件其余的几何尺寸与未铺装情况相同. 两类双 T 板均采用强度等级为 C50 的混凝土浇筑,板面双向布置了由 $\Phi 10$ 钢筋组成的钢筋网片 (W-1),肋梁内布置了由 $\Phi 8$ 钢筋点焊形成的钢筋网片 (W-2),分别作为板面受力钢筋和肋梁非预应力纵筋和横向钢筋. 双 T 板肋梁内布置的预应力筋为抗拉强度标准值 $1\,860\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的 $\Phi^s 15.2$ 低松驰钢绞线 (极限强度实测值为 $2\,021\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,名义屈服强度实测值为 $1\,860\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$),预应力筋张拉控制应力为 0.75 倍抗拉强度标准值,即为 $1\,395\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$;双 T 板采用先张法预应力工艺,混凝土强度达到设计强度等级的 100% 后放张预应力筋,考虑预应力筋锚固损失以及预应力筋松弛和混凝土收缩徐变损失后,计算获得的 18 m、24 m 跨度双 T 板中预应力筋有效预应力平均值分别为 $1\,079.83$ 、 $1\,079.09\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. 所构建的新型双 T 板截面与配筋见图 1.



注:DT-18T 的配筋与 DT-18 相同;括号内数值运用于 DT-24 及 DT-24T.

图 1 新型双 T 板的截面与配筋 (DT-18)

Fig. 1 Specimen size and reinforcement of double-tees (DT-18)

需要说明的是,两类 18 m 跨双 T 板自两侧板端 1.5 m 范围内每根肋梁内各有 1 根预应力筋通过套管实现无黏结,两类 24 m 跨双 T 板以同样方式实现每根肋梁内各 2 根预应力筋无黏结,避免预应力筋在放张时因较大的局部集中预加力对板端面形成劈裂裂缝^[10],虽然采取了一定措施,预应力筋放张后仍在端部发现长度不超过 2 m 的沿最下排筋的纵向裂缝。

针对两种类型两种跨度的 4 块足尺双 T 板开展了现场试验,研究目的分别是获得其弯曲性能尤其是正截面承载力,同时获得其斜截面受力和斜截面承载力,弯曲性能采取三分点加载,斜截面受力和性能采用了剪跨比均为 3 的单点集中加载,即未铺装、预铺装的两类 18 m 跨双 T 板集中力作用点距支座边缘分别为 1 800 mm 和 2 040 mm,两类 24 m 跨双 T 板集中力作用点距支座边缘分别为 2 280 mm 和 2 520 mm,斜截面受力和性能试验先后针对同一试件的两端各进行一次。试验获得的各试件弯曲开裂荷载、正截面承载力见表 1。

表 1 正截面受力和性能

Tab. 1 Mechanical behavior of flexure experiment

试件 编号	开裂状态			极限状态		
	$P_{cr}/$ kN	$Q_{cr}/$ (kN · m ⁻²)	$M_{cr}/$ (kN · m)	$P_u/$ kN	$Q_u/$ (kN · m ⁻²)	$M_u/$ (kN · m)
DT-18	100	6.30	904	220	14.86	1 608
DT-18T	125	7.88	1 241	255	16.07	2 011
DT-24	125	5.89	1 660	305	14.37	3 086
DT-24T	135	6.36	2 075	355	16.73	3 819

注: P_{cr} 和 P_u 及 Q_{cr} 和 Q_u 不含自重, M_{cr} 和 M_u 包含自重(下同)。

弯曲性能试验横向裂缝得到了充分发展,但主裂缝的延伸高度直至试件破坏一直在翼缘板以下,试件破坏时未铺装、预铺装 18 m 跨和 24 m 跨双 T 板跨中最大挠度值与计算跨度比值分别达到了 1/58、1/51、1/69 及 1/64,弯曲裂缝宽度最大值分别为 2.0(A 肋)/1.8(B 肋,下同)、2.0/1.9、3/2.5 及 3.5 mm/2.5 mm。直至试件破坏均未发现两种跨度的两类试件受压翼缘存在压碎迹象。典型试件弯曲破坏现象见图 2。

斜截面受力和性能试验中发现,针对同一试件两侧先后进行的两次试验所获得的弯剪区段斜裂缝宽度发展趋势相近,虽然弯曲试验后发现横向裂缝主要集中在纯弯段,而且按剪跨比等于 3 确定的弯剪区段均距先期进行的弯曲性能试验的近似纯弯区段的长度不小于所采用预应力筋传递长度,但每一试件两侧的单点集中破坏荷载值差异均较大。可

以认为,这种差异主要是由于弯曲性能试验后因跨中区段横向裂缝充分开展致使预应力筋与其周围混凝土的黏结性能发生退化,导致预应力筋有效应力降低,使预加力对斜截面受力和性能的影响,尤其是斜截面承载力的提高幅度受到了限制。同一试件的前一次一侧斜截面受力和性能试验完成后所造成的筋-混凝土黏结性能退化及有效预应力损失,更是加剧了对其另一侧弯剪区段有效预应力的损失,进一步降低了预加力对斜截面承载力的贡献。



图 2 DT-18T 弯曲性能试验

Fig. 2 DT-18T flexure experiment

需要强调指出,尽管存在着同一试件两端先后进行的弯剪区段斜截面承载力值差异较大的试验现象,但同一试件斜截面承载力试验值的较小值,仍大于依据混凝土实测值、横向钢筋屈服强度实测值、以及实际截面确定的斜截面承载力计算值,斜截面受力和性能试验的结果见表 2,典型试件斜截面破坏见图 3。

表 2 斜截面受力和性能试验结果

Tab. 2 Results of shear experiment

试件编号	加载次序	开裂状态		极限状态	
		P_{cr}	V_{cr}	P_u	V_u
DT-18	1	420	281	600	402
DT-18T	1	680	429	920	580
	2	600	378	760	479
DT-24	1	1 200	780	1 400	910
	2	760	494	840	546
DT-24T	1	1 320	898	1 560	1 061
	2	880	598	1 080	734

注:未铺装 18 m 双 T 板第二次剪切加载试验时设备异常,未获得试验结果。



图 3 DT-24 斜截面性能试验

Fig. 3 DT-24 shear experiment

2 非线性分析

2.1 非线性分析模型

非线性分析模型首先是按所构建两类双 T 板形状和截面尺寸建立几何模型,依据钢筋和混凝土分离建模方法,基于 ANSYS 对混凝土采用实体单元,对板面、肋梁的非预应力筋和肋梁内的预应力筋采用杆单元,并将实体单元和杆单元相关结点自由度耦合的思路获得的^[11]。混凝土的破坏准则采用了 SOLID65 实体单元中常用的 Willam - Warnker 五参数模型,材料物理力学性能取为试验实测值,混凝土弹性模量按现行规范取用;非预应力筋的应力应变关系为理想弹塑性模型,预应力筋采用 Menegotto and Pinto^[12-13]的本构关系,两种钢筋弹性段屈服强度均按其实测值取用,见图 4、5。双 T 板中预应力采取等效降温法施加给模型中的预应力筋^[14],预加力的大小取为前述足尺试件有效预应力平均值。除加载条带加密区域和肋板交接区域外,双 T 板其余部分按常规方法均匀划分网格单元,预应力筋和双 T 板钢筋网片的单元划分与混凝土体单元相对应,混凝土及钢筋网格划分见图 6。

2.2 试验工况下弯曲性能

结合图 1 的截面配筋及图 6 的网格划分建立非线性分析模型,按两端简支边界条件,对已包含构件自重的模型,按逐步施加三分点集中线荷载方式,

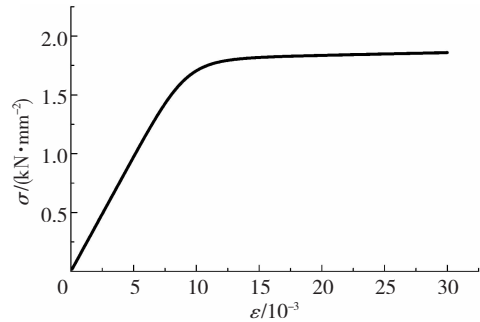


图 4 预应力筋应力 - 应变曲线
Fig. 4 Stress-strain for tendons

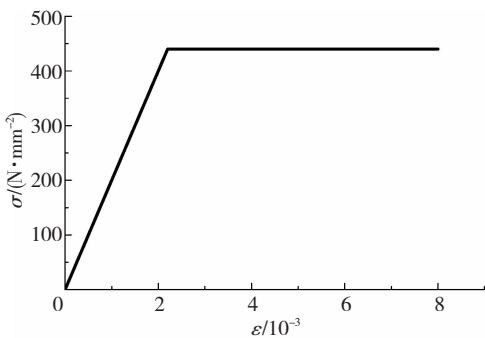


图 5 非预应力筋应力 - 应变曲线
Fig. 5 Stress-strain for rebars

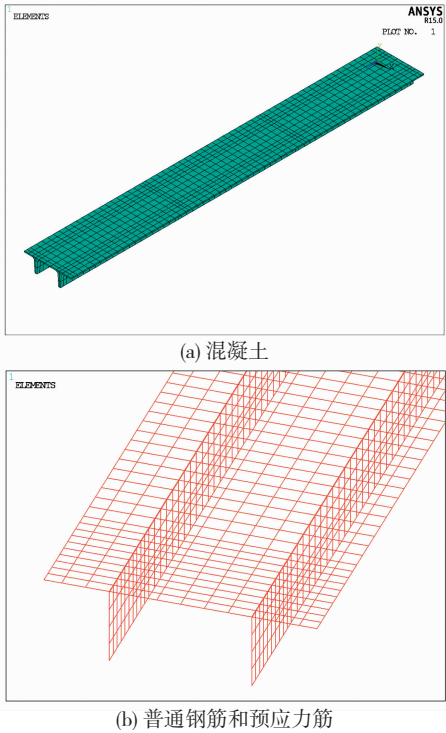


图 6 网格划分
Fig. 6 Meshing

获得模拟试验加载工况下两类标志跨度双 T 板的荷载与跨中挠度非线性分析曲线,见图 7。

由图 7 可知,两类双 T 板跨中荷载 - 挠度关系均表现为开裂前的弹性、开裂至屈服的非线性、屈服至破坏的变形急速发展的 3 个主要阶段,其发展趋势与试验所获得的荷载 - 变形关系实测结果总体上是吻合的。其中,开裂、屈服和破坏 3 个关键点,试件 DT - 18、DT - 18T、DT - 24 及 DT - 24T 计算值与实测值比值分别为 0. 876、0. 909、0. 973、0. 912、0. 948、1. 01、0. 973、0. 977、1. 0、0. 965、0. 986、0. 977。显然,模拟分析获得的计算结果与实测结果相比差异不大,尤其是峰值荷载的计算值与实测值基本吻合。模拟分析结果发现预铺装双 T 板较相同条件下未铺装双 T 板的弹性刚度和开裂后刚度均有一定提高,正截面承载力的计算值也因翼缘厚度的增大而分别提高了 5. 3% 和 16. 2%,这也与足尺试件试验结果十分吻合。

当然,足尺试件的模拟分析是假设由试件端部至弯剪区段可能发生的最近的斜裂缝范围内预应力筋与其周围混凝土黏结良好,即预应力筋具有足够的锚固长度基础上进行的。由于所完成的足尺试件具有足够长弯剪区段,该假定是合理的。同时,分析时也忽略了纯弯区段或邻近加载点的弯剪区段预应力筋与受拉混凝土以黏结作用体现的混凝土受拉强化效应,即认为达到开裂荷载后相应的拉区混凝土即全部退出工作。

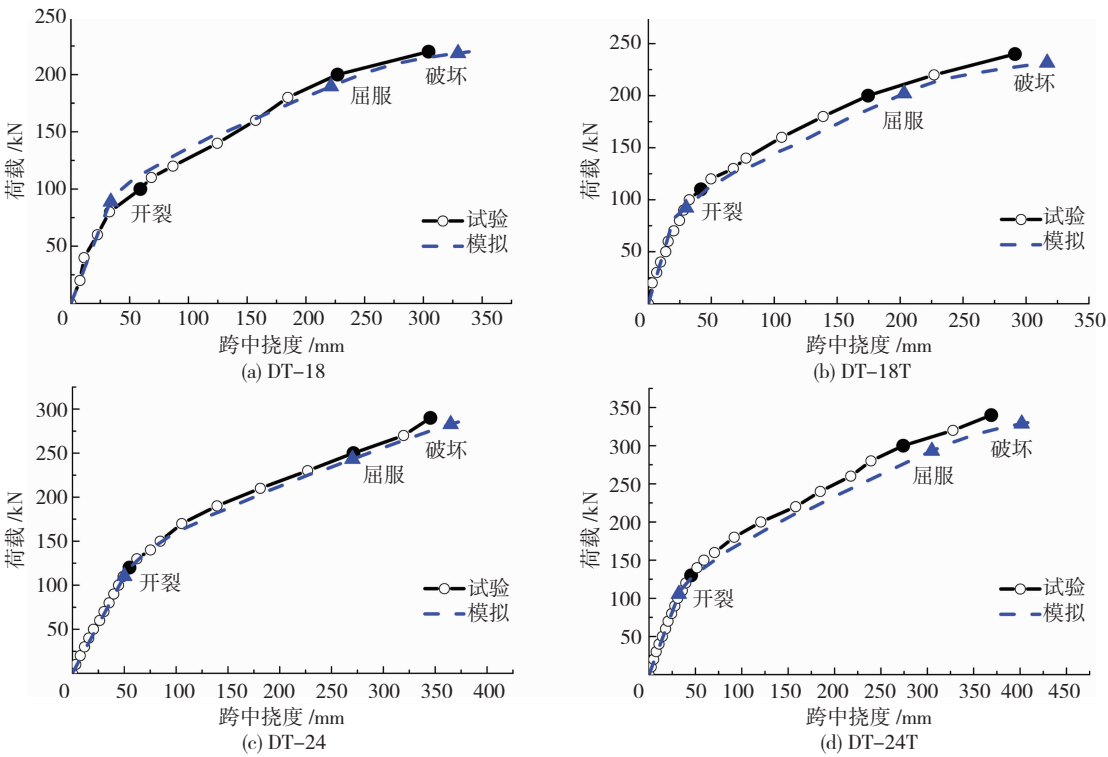


图 7 弯曲跨中荷载 - 挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection at mid-span

由分析结果还可获得难以由试验结果获得的预应力筋的应力变化、压区混凝土的压应力(受现场条件限制,试件上表面较为粗糙不能粘贴混凝土应变片)等.由图 8 荷载 - 预应力筋应力关系可知

(其中 1、2 分别为跨中位置最上排筋和最下排筋,3、4 为三分点位置最上排筋和最下排筋),18 m 和 24 m 未铺装及预铺装两类双 T 板的肋内布置的最上排预应力筋跨中应力计算值分别为 1 725.6、1 757.6、

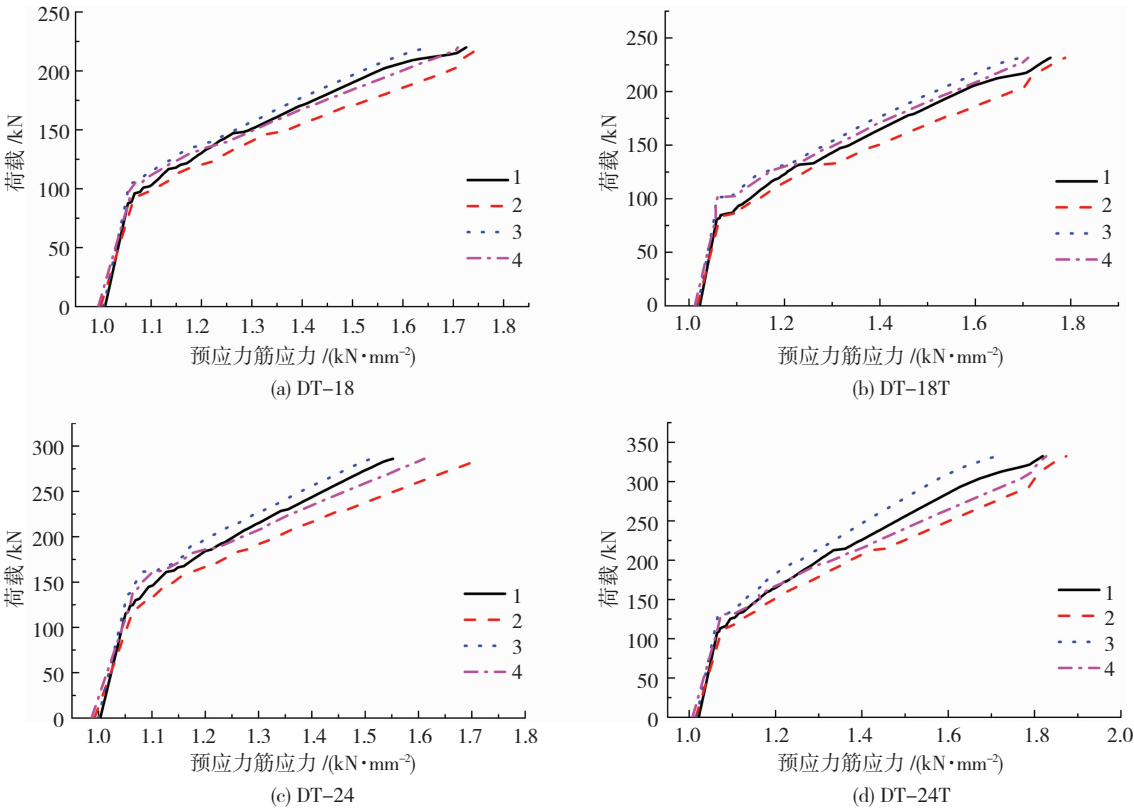


图 8 荷载 - 预应力筋应力曲线

Fig. 8 Load-stress of prestressed tendons

1 552.2、1 818.8 N · mm⁻²,最下排预应力筋相应的应力计算值分别为 1 758.1、1 851.4、1 853.7、1 834 N · mm⁻²,均不小于所采用的 1860 级低松弛钢绞线名义屈服强度实测值,即认为试件破坏时预应力筋可达到屈服强度确定的正截面承载力是相对保守的,这也验证了表 1 中按现行规范方法的正截面承载力理论值均不大于试验值的结果。

模型 DT-18 破坏时弯曲应力分布见图 9~10。达到峰值荷载时,各试件跨中控制截面压区边缘混凝土的极限压应变分别为 0.003 427、0.003 713、0.003 471、0.003 681,均较中国现行国家标准中确定正截面承载力时采用的不高于 C50 混凝土极限压应变 0.003 3 稍大。

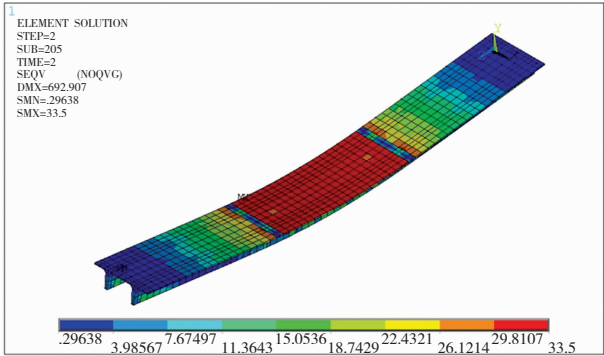


图 9 DT-18 弯曲应力云图
Fig.9 Flexural stress cloud

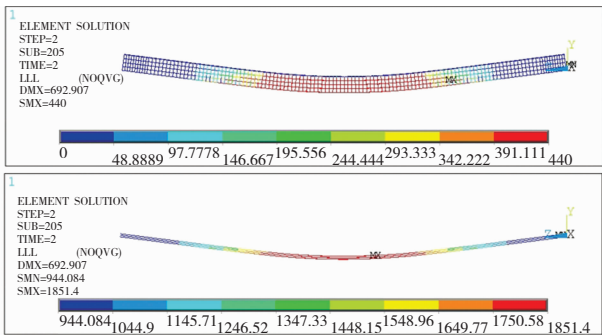


图 10 DT-18 预应力筋和钢筋应力云图
Fig.10 Stress cloud for tendons and rebars

足尺双 T 板肋梁内非预应力纵筋应力发展情况见图 11(非预应力筋对应位置与预应力筋相同)。峰值荷载下,18 m 和 24 m 未铺装及预铺装双 T 板肋梁内最下排非预应力筋的应力均为 440 N · mm⁻²,均不小于其屈服强度实测值。由于所构建的双 T 板肋梁钢筋网片纵筋主要对斜截面受力起销栓作用,也能弥散因混凝土收缩和温度应力及支座不均匀沉降等非受力作用可能出现的裂缝,其配筋量有限,其对构件正截面承载力的影响也有限。因此,按双线性本构模型获得的非预应力纵筋应力计算值对非线性分析结果的影响是可以接受的。

通过与试验结果的对比分析,说明采用所建立的非线性分析模型适用于所构建的两类双 T 板弯曲性能全过程分析,可应用于设计荷载工况下构件弯曲性能非线性分析。

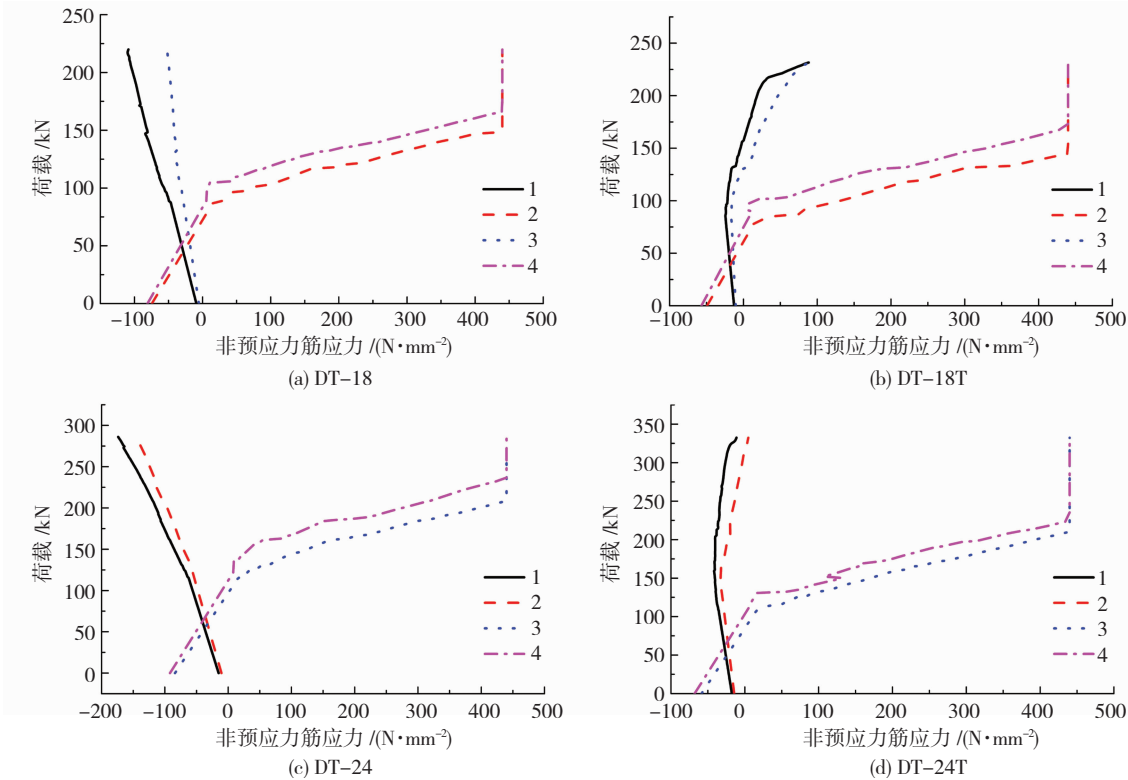


图 11 荷载-肋梁内非预应力筋应力曲线
Fig.11 Load-stress of rebars in webs

2.3 试验工况下斜截面受力性能

考虑到同一试件两端分别按相同剪跨比进行斜截面受力性能试验发现的典型状态如开裂荷载及极限荷载差异明显,主要是由于预应力筋有效预应力因前期的弯曲性能试验而降低所导致的. 因此,采用一定程度降低双 T 板的放张应力以模拟受剪性能中这种差异,可使非线性分析的过程与试验情况一致,确定试验条件下的试件端部斜截面承载力.

获得的 18 m 和 24 m 未铺装和预铺装两类试件荷载 - 加载点挠度关系见图 12,可以发现曲线总体上在前期表现为线性关系,后期具有明显的非线性,对应于试验结果可知两个阶段的分界点对应的构件出现斜裂缝. 4 个足尺双 T 板试件左、右两端斜截面开裂荷载分别为 295(左端值,右端无实测值,下同),490 与 291、750 与 622、695 与 440 kN;构件破坏时左、右两端对应的极限荷载分别为 600、920 与 760、1 400 与 840、1 560 与 1 080 kN. 因此,试件左、右两端开裂荷载计算值与实测值比值分别为 0.7、0.72 与 0.485、0.65 与 0.86、0.965 与 0.5.

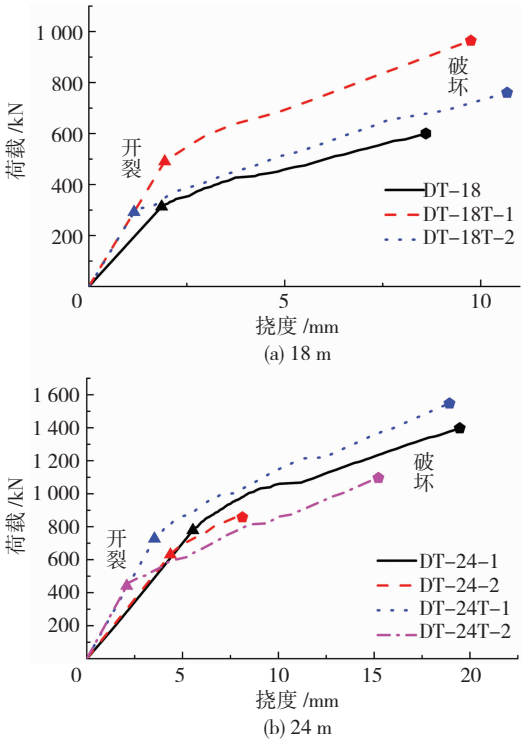


图 12 集中荷载 - 加载点位移曲线

Fig. 12 Load-deflection under concentrate load

为获得合理计算结果,两类足尺试件放张后施加预应力折减比例分别为 0.578、0.903 与 0.415、0.833 与 0.639、0.895 与 0.433. 由此,再经模拟分析后,获得两类双 T 板破坏时非预应力筋应力均为 $440 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$;各试件肋梁最下排预应力筋的应力分别为 947、1 360 与 907、1 641 与 1 117、1 507 与 975 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$,均小于预应力筋屈服强度实测值. 预

应力不同程度地限制斜裂缝开展和延伸,从而对构件斜截面承载力有一定贡献. 事实上,非预应力筋、截面几何及混凝土强度主要控制着斜截面破坏状态. 按折减端部一定长度范围内有效预应力(预应力筋传递长度、锚固长度范围内预应力)的思路,获得的模拟分析结果表明,连续进行的弯曲试验和斜截面受力试验,试件外在损伤不明显,但是依次进行的加载试验降低了弯剪区段范围内的混凝土与预应力筋的黏结性能,也降低预应力筋有效应力,削弱了预应力筋的销栓作用,从而导致斜截面承载力降低.

2.4 均布加载工况

均布荷载是装配式停车楼结构楼盖的设计荷载工况,除结构自重外,停车楼停/行车所需的可变荷载标准值为 4.0 kN/m^2 . 结合图 1 的模型施加均布荷载得到跨中荷载 - 挠度关系见图 13 ~ 14.

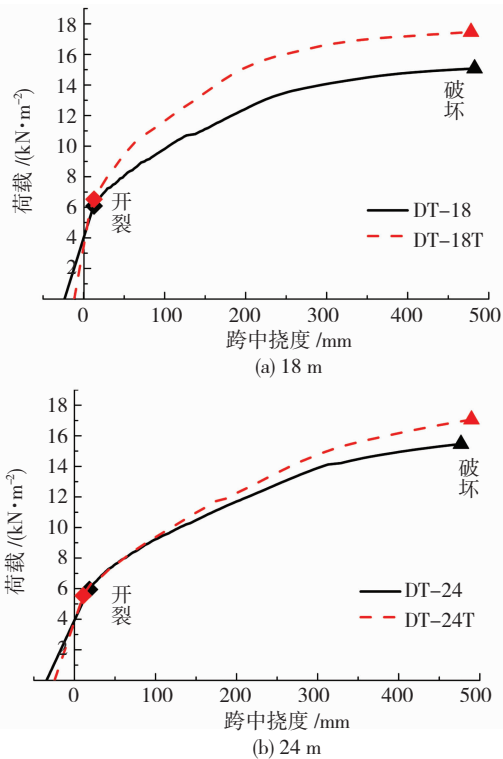


图 13 均布荷载下荷载 - 跨中挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection at mid-span under uniform load

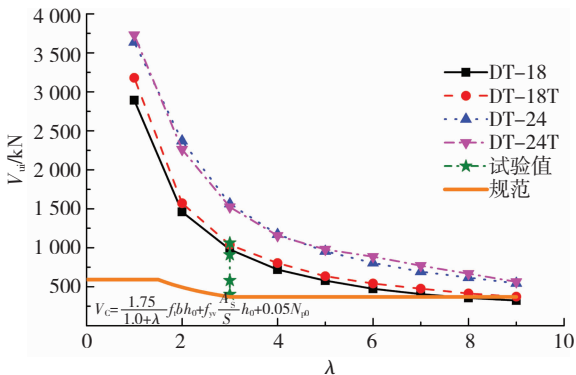


图 14 斜截面承载力

Fig. 14 Shear capacity

考虑长期效应影响后,张拉引起的预加力作用下两类试件 4 个足尺双 T 板的反拱计算值分别为 13.95、15.13、22.18、23.19 mm,荷载标准组合下跨中挠度计算值分别为 37.27、30.2、57.05、48.33 mm.即停车楼要求的正常使用极限状态下各双 T 板跨中挠度分别为 23.32、15.07、34.87 及 25.14 mm,满足现行国家标准对变形控制的 1/400(18 m 和 24 m 两类标志跨度下分别为 44.45、59.95 mm)要求.

破坏时,均布外荷载下两类双 T 板中肋梁跨中控制截面预应力筋应力最大值分别为 1 045.45、1 056.66、1 044.32、1 053.02 N·mm⁻²,非预应力筋纵筋应力最大值分别为 109.04、124.71、194.78、167.03 N·mm⁻²,预应力筋应力增量及非预应力筋拉应力水平均较低.4 个足尺双 T 板的极限荷载及跨中挠度分别为 15.08 和 506.08、17.46 和 489.7、15.46 和 511.23、17.15 kN/m² 和 524.65 mm.

相对于同条件下未铺装双 T 板,虽然因预铺装 80 mm 叠合层使构件自重提高了 2 kN/m²,但预铺装双 T 板的极限外荷载较接近,即预铺装叠合层对双 T 板正截面承载力影响较小,其主要作为构造措施有效提高装配式楼盖整体性和抗震性能.

2.5 斜截面性能的扩参数分析

按前述试验工况下斜截面受力性能分析的思路,对 4 块足双 T 板按剪跨比 $\lambda = 1 \sim 9$ 扩参数分析,获得了 9 种剪跨比条件下双 T 板的斜截面承载力的模拟分析结果,斜截面承载力与剪跨比的关系

见图 14. 足尺双 T 板斜截面承载力随剪跨比增大呈减小,随剪跨比斜截面承载力变化速率负相关的趋势,与双 T 板跨度及类型无关,且剪跨比越小,现行规范中斜截面承载力计算公式越趋于保守^[15].

虽然依次加载造成的筋-混凝土黏结破坏导致足尺双 T 板试件的斜截面承载力损失较大,但试验值仍略高于按规范方法确定的斜截面承载力计算值.与前述分析结果相一致,铺装层对双 T 板的斜截面承载力的提高幅度有限,偏于安全地,为简化设计可不考虑预铺装叠合层对斜截面承载力贡献.

3 停车和行车分析

中国首座装配式停车楼采用了标志跨度 18 m 的双 T 板,双 T 板坡道停/行车^[16],行车道布置于中部,车位按垂直式布设,即单块双 T 板可停放乘用车的上限为 2.为模拟停/行车最不利工况:停放 2 辆乘用车,同时行车道双向车辆前轮均行至双 T 板翼缘处,如图 15 所示,加载示意图 16.

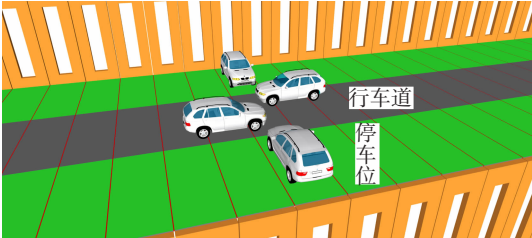


图 15 停车和行车示意
Fig. 15 Pattern for parking and driving

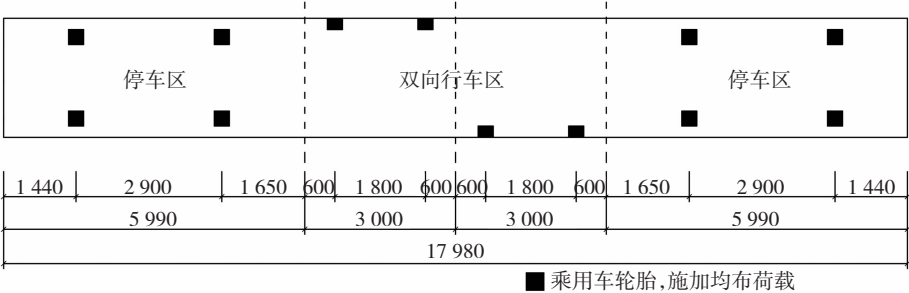


图 16 加载示意

Fig. 16 Pattern for loading

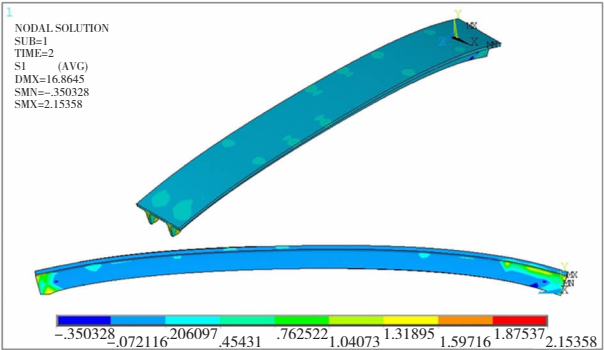


图 17 混凝土应力云图

Fig. 17 Stress cloud of concrete

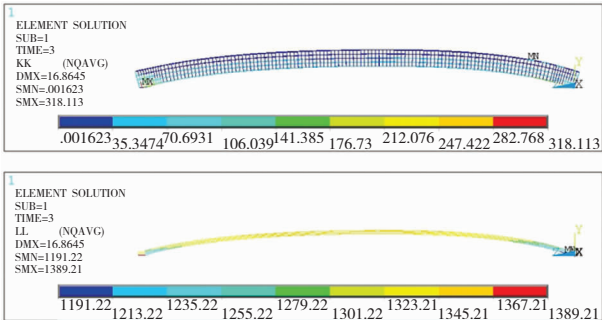


图 18 预应力筋和钢筋应力云图

Fig. 18 Stress cloud of tendons and rebars

计算结果显示,放张后、预铺装叠合层后及满布乘用车后双 T 板反拱分别为 27.12、20.62 与 12.43 mm,跨中位移 8.19 mm,跨中挠度满足变形控制要求.该工况下,混凝土、预应力筋及非预应力筋应力云图分别见图 17~18.可知,板面混凝土压应力较低,压应力最大值为 $0.07 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,压应力远小于混凝土抗压强度;跨中控制截面预应力筋应力最大值为 $1\,285.99 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,非预应力纵筋应力最大值为 $106.04 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.满足车辆停放和行驶的坡道结构变形和承载能力要求.轮胎边缘处出现明显的拉应力分布,但其最大值仅为 $0.91 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,不大于混凝土抗拉强度,即此工况下车辆行驶对双 T 板翼缘影响较小.

4 结 论

1)采用合适的单元和分离式模型,可较好模拟试验工况下两类双 T 板弯曲性能,分析结果显示两类状态下正截面承载力和全过程变形发展符合程度较高.

2)在有效预应力折减工况下进行两类双 T 板斜截面剪切性能非线性分析,有效地验证了依次进行的弯曲和剪切试验可导致有效预应力因筋-混凝土黏结性能降低而损失进而降低了斜截面承载力的假设.

3)均布荷载和停车楼楼盖停、行车两种工况下非线性分析验证了双 T 板的整体弯曲性能和翼缘局部性能满足装配式停车楼楼盖的设计和使用要求.

4)模拟和试验结果显示设计值富裕程度较高,放张后端部纵向裂缝主要是由于预拉应力较大导致,应在满足设计要求的条件下适当降低预拉应力设计值,并分阶段放张预应力筋.

参考文献

- [1] NASSERG D, TADROS M. The legacy and future of an American icon: The precast, prestressed concrete double tee [J]. PCI Journal, 2015, 60(4): 49
- [2] 庞瑞,梁书亭. 国外预制混凝土双 T 板楼盖体系的研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 121
PANG Rui, LIANG Shuting. State-of-the-art of overseas research of precast double-tee floors [J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 121
- [3] MAGUIRE M, MORCOUS G. Structural performance of precast prestressed bridge double-tee girders made of high-strength concrete, welded wire reinforcement, and 18-mm-diameter strands [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 1053
- [4] BOTROS A W, LUCIER G. Behavior of free and connected double-tee flanges reinforced with carbon-fiber-reinforced polymer [J]. PCI Journal, 2016, 9: 49
- [5] MONAHAN D R. Precast concrete parking structure lighting study [J]. PCI Journal, 2007, 52(6): 89
- [6] MITCHELL D, DEVAL R H, SAATCIOGLU M. Damage to concrete structures due to the 1994 Northridge earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 361
- [7] CHREST A P, SNYDER R. Curved precast ramp adds elegance and function to aventura parking structure [J]. PCI Journal, 1999, 44(4): 32
- [8] PCI Industry Handbook Committee. PCI design handbook: precast and prestressed concrete [M]. 6th ed. Chicago, IL: PCI, 2004
- [9] 赵培,张文龙,周威. 足尺预应力混凝土双 T 板静力性能研究//第 26 届全国结构工程学术会议论文集: 1 集 [C]//北京: 工程力学出版社, 2017: 486
ZHAO Pei, ZHANG Wenlong, ZHOU Wei. Full-scale tests on static behavior of double-tee // Proceedings of the 26th National Conference on Structural Engineering: No.1 [C]//Beijing: Engineering Mechanics, 2017: 586
- [10] OKUMUS P, OLIVER M G. Strand debonding for pretensioned bridge girders to control end cracks [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(1): 201
- [11] 张峰,徐向锋,李术才. HB-FRP 加固 RC 梁的精细有限元分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(8): 125
ZHANG Feng, XU Xiangfeng, LI Shucui. Meso-scale finite element analysis of HB-FRP strengthened reinforced concrete beams [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(8): 125
- [12] LOU T, LOPES S M R. Flexural response of continuous concrete beams prestressed with external tendons [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(6): 525
- [13] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]//Proceedings of the IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures. Lisbon: Association for Bridge and Structural Engineering, 1973: 15
- [14] 孟少平,吴畅. 预应力混凝土复杂结构非线性有限元分析相关问题的探讨 [J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 1
MENG Shaoping, WU Chang. Discussion on the nonlinear finite element analysis of prestressed concrete complex structures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 1
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [16] 周光毅,宫立宝. 装配式混凝土结构停车楼吊装施工技术 [J]. 施工技术, 2016, 45(4): 31
ZHOU Guangyi, GONG Libao. Hoisting construction technology of the precast concrete parking building [J]. Construction Technology, 2016, 45(4): 31

(编辑 赵丽莹)