

# Nonlinear Finite Element Analysis on the Mechanical Behaviors of Double-Tee Dapped End

Guanyu Zhang

Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai  
Email: 2014zhangguanyu@tongji.edu.cn

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2017; published: May 18<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

When the end of double-tee is dapped, it can reduce the height of supporting beams with a greater lateral stability; besides, it can be used with brackets, inverted T beams and L-shaped beams flexibly with great application prospect. Base on ABAQUS, non-linear finite element analysis was used to model the behavior of the dapped end of double-tee to study the effects of various parameters believed to affect the mechanical behavior of dapped-end. Finally, the results of the finite element analysis are summarized, and the parameters which have important influence on the mechanical properties of the double-tee dapped end are determined, and the design recommendations of the double-tee dapped end are proposed.

## Keywords

Concrete, Double-Tee, Dapped End, Non-Linear Finite Element Analysis

---

# 双T板企口力学性能非线性有限元分析

张冠宇

同济大学建筑工程系, 上海  
Email: 2014zhangguanyu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2017年4月29日; 录用日期: 2017年5月15日; 发布日期: 2017年5月18日

---

## 摘 要

当预制预应力混凝土双T板端部为企口形式时, 不仅可以降低支承梁高、增加板的稳定性, 还可以灵活

地与牛腿、倒T型和L型支承梁搭配使用,有很好的应用前景。为了更进一步了解双T板企口的力学性能,本文通过有限元软件ABAQUS对带企口双T板中企口区域进行三维非线性分析,来研究各种参数对企口力学性能的影响,最后对有限元分析的结果进行总结,得出对双T板企口力学性能有重要影响的因素,并提出了双T板企口的相关设计建议。

## 关键词

混凝土, 双T板, 企口, 非线性有限元分析

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,装配式结构在我国有了较快速度的发展,主要体现在新型装配式住宅建筑和工业及公共建筑等各个方面。双T板作为建筑工业化的产物,其断面形式呈2个T形,是由受压面板和两个肋梁组成的预制预应力构件,因其受力断面比较经济,截面有效高度(内力臂)大且混凝土用量少,方便使用高强度预应力钢筋和高强混凝土,拥有耐久性好、承载力高、承载可靠、施工方便等优点;由于采用预应力技术,双T板长度可以达到30 m以上[1]。双T板是目前国际上使用广泛的预应力混凝土梁板类预制构件,在预制装配式大跨度公共建筑中及工业厂房中,双T板的应用越来越得到重视。

然而双T板体系在国内主要应用于工业厂房,在公共建筑中的应用还不成熟,目前国家标准设计图集《预应力混凝土双T板》SG432 [2]中双T板端部均做成平口形式。当双T板端部做成平口,支承梁为矩形梁时,双T板只能通过焊接或螺栓连接在支承梁上,这严重增加了建筑层高。在公共建筑中,建筑层高都有相应的规定,平口双T板支承于矩形梁这种构造方式显然不适用。双T板可在端部做成企口形式,楼面梁做成L形梁或者倒T梁,这不仅能满足公共建筑大跨度的要求以及层高的限制,还能降低支承梁的高度,然而这做法也带了一系列的相关设计问题。国内规范并没有双T板企口相应的设计方法;国内外对企口的研究多针对截面宽度较大、高度较小的矩形截面梁,对肋宽较小、肋高较大的双T板企口端部受力性能研究较少。

双T板企口端部配筋构造与普通矩形截面梁企口端部配筋构造存在较大差异,普通矩形梁企口处吊筋通常为封闭的箍筋,而双T板由于肋梁的宽度受到限制,并且肋梁中的预应力筋及抗剪钢筋相互穿插,当采用封闭的箍筋时,不仅弯折半径难以保证,而且大大增加了施工难度,这就要求我们采取别的配筋方案。同时企口内凹角处由于应力集中,如果配筋构造不合理,在正常使用过程中,往往会出现较大的裂缝,导致双T板的适用性降低。企口配筋不合理或企口截面削弱过大都会引起企口处的脆性剪切破坏先与双T板的弯曲破坏。

考虑到国内基本还未开展双T板企口端部受力性能研究,并且目前国内还未有针对双T板企口端部的直接设计方法。为了更深入了解带双T板企口的力学性能。本文通过有限元软件ABAQUS对带企口双T板中企口区域进行三维非线性有限元分析,来研究各种参数对企口力学性能的影响。最后对有限元分析的结果进行总结,得出对双T板企口力学性能有重要影响的因素,并提出了双T板企口的相关设计建议。

## 2. 带企口双 T 板非线性有限元分析

### 2.1. 模型几何尺寸及配筋信息

为了研究双 T 板企口附近的力学性能,排除由于双 T 板跨度较大时会在双 T 板跨中先发生弯曲破坏,在三维有限元模型中,带企口双 T 板的长度取为 8000 mm,截面高度为 800 mm。双 T 板企口的配筋设计主要参照了美国 PCI 设计手册[3],由于 PCI 设计手册中对于企口的配筋主要是针对企口梁,企口梁在企口附近采用封闭的箍筋作为吊筋,为了优化双 T 板企口的配筋形式,本文分析中企口吊筋采用垂直的 L 形钢筋。考虑到双 T 板的对称性,建模取双 T 板的 1/4 模型,模型采用带企口单 T 板的形式,以及在跨中截面引入对称的边界条件,具体的几何尺寸如图 1、图 2 所示。

### 2.2. 模型材料信息

模型中混凝土采用 ABAQUS 中的损伤塑性模型(CDP 模型) [4],混凝土本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [5]损伤本构,该模型考虑了材料拉压性能的差异,可模拟损伤引起的不可恢复的材料退化。这种退化主要表现在拉伸屈服后的软化以及压缩屈服后的硬化。该模型假定混凝土材料的破坏主要为拉裂和压碎,屈服和破坏面的演化由拉伸等效塑性应变和压缩等效塑性应变控制。普通钢

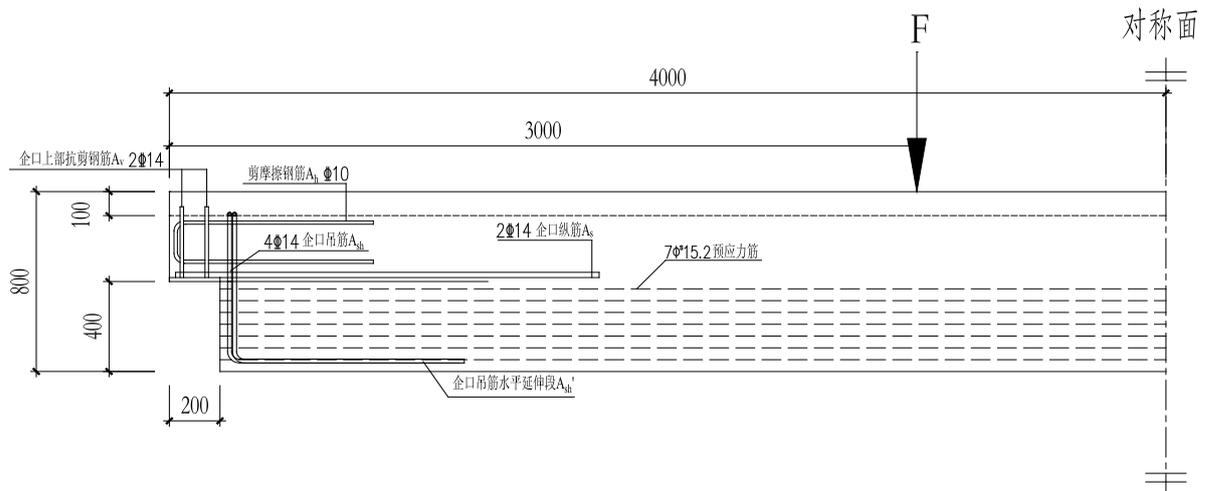


Figure 1. Front view of reinforcement details for single-tee dapped end (welded wire mesh not shown for clarity)  
图 1. 带企口单 T 板尺寸及配筋正视图(未显示面板及肋梁钢筋网)

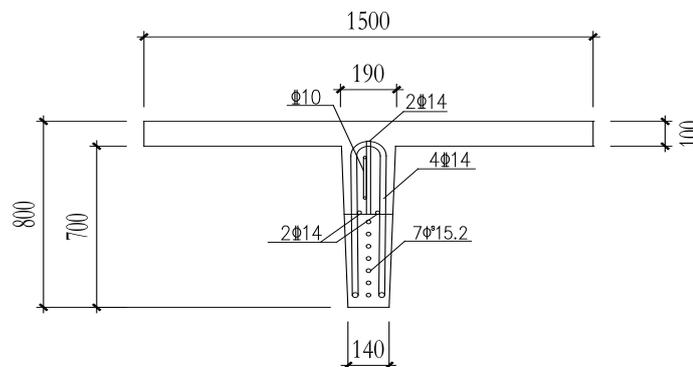


Figure 2. Sectional view of reinforcement details for single-tee dapped end  
图 2. 带企口单 T 板尺寸及配筋图

筋及预应力钢筋采用双折线的应力应变关系。双 T 板板面及肋梁钢筋网片采用 CRB550 级冷轧带肋钢筋  $\phi^R5$ ，肋梁预应力钢筋采用采用  $\phi^S15.2$  的钢绞线。

在 ABAQUS 有限元模型中，预应力的模拟可以采用降温法。值得注意的是在降温法中输入到结构分析模型中的预应力是在经过计算后扣除预应力损失的有效预应力[6]。并采用 PRESTRESS HOLD 命令来防止预应力筋与混凝土共同变形会导致有效预应力的降低。而企口端部预应力传递长度的模拟则把 1 根完整的预应力筋平均分成 7 份，每份的面积占原预应力筋面积的 1/7，第一段在双 T 板的端部，之后每一段一次缩进预应力传递长度的 1/7，直达到预应力传递长度。这样预应力在传递长度的应力变化就可模拟出来，预应力传递长度的模拟如图 3 所示。

### 2.3. 非线性有限元建模

在本文的分析中，为了更好的分析钢筋和混凝土各自的受力情况，采用分离式模型。分析过程中钢筋采用桁架单元而混凝土采用六面体实体单元，并将网格划分以后的钢筋单元嵌入到混凝土单元中，从而实现钢筋与混凝土之间的粘结。构件的配筋信息及网格划分如图 4、图 5 所示。单 T 板企口受到竖向约束，另一端引入对称的边界条件。

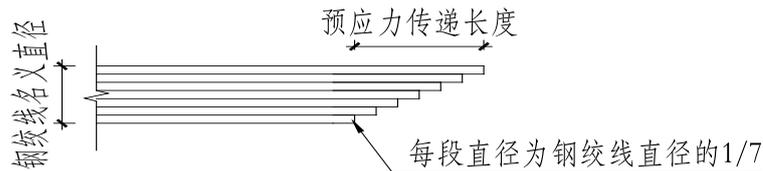


Figure 3. Modeling of prestressing transfer length

图 3. 预应力传递长度模拟

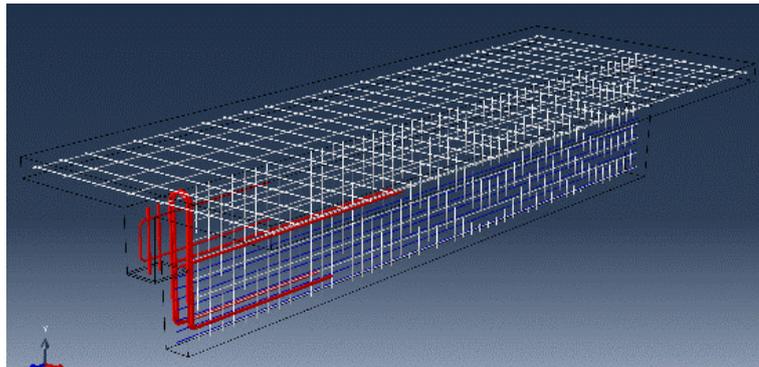


Figure 4. Three-dimensional sketch of reinforcement details for single-tee

图 4. 单 T 板配筋三维图

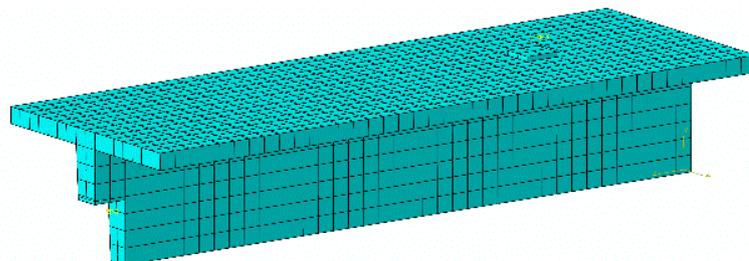


Figure 5. Single-tee mesh

图 5. 构件网格划分

## 2.4. 非线性有限元分析结果

有限元分析通过位移加载，构件的应力云图如图 6 所示，可以看出在荷载的作用下，双 T 板企口内凹角处应力较大，必须通过合理配筋，改善双 T 企口内凹角的受力性能。双 T 板企口支承反力与加载点的位移关系曲线如图 7 所示，构件的荷载和位移的关系由线性慢慢向非线性过度。

## 3. 双 T 板企口参数分析

为了更深入了解对双 T 板企口性能有影响的重要参数，在标准试件的基础上，对双 T 板的更多参数进行有限元分析，分析的参数有：预应力筋数量、吊筋、企口纵筋、肋梁(腹板)抗剪钢筋、企口上部预应力筋、混凝土强度以及企口高度。双 T 板企口参数分析表如表 1 所示。通过有限元参数分析，将参数变化的双 T 板企口承载力计算结果与标准试件极限承载力进行对比，对比结果如表 2 所示。

从参数分析的结果可以看出，增加预应力筋的数量，企口极限承载力增大，这是因为混凝土的预压应力增加企口部位的抗剪强度。随着企口吊筋、企口纵筋、及肋梁抗剪钢筋配筋量的增加，企口极限承载力增大，这是因为钢筋的存在限制了企口斜裂缝的发展，增强了混凝土间的骨料咬合力，并与混凝土共同抵抗外荷载。把部分预应力筋配置于企口上部，对混凝土的预压力限制了沿企口凹角斜裂缝的发展，混凝土的抗剪承载力得到提高，从而增大了企口的极限承载力。同时随着混凝土强度增加，企口极限承载力增加。随着企口高度的增加，双 T 板端部截面受到削弱，极限承载力随之降低。

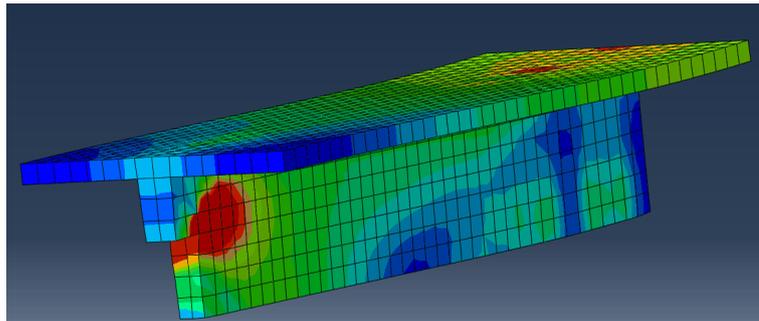


Figure 6. Stress contour figures for single-tee

图 6. 构件应力云图

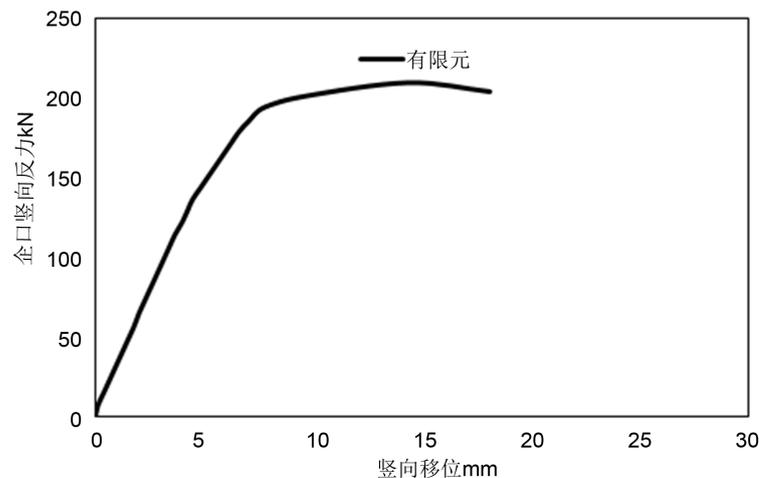


Figure 7. Curve of the support reaction force and loading point deflection

图 7. 企口支承反力与加载点的位移关系曲线

**Table 1.** Parametric study for ultimate strength of dapped end  
**表 1.** 企口承载力参数分析表

模型	预应力筋数量	吊筋	企口纵筋	肋梁抗剪钢筋(双向)	企口上部预应力筋	混凝土强度	企口高度
S1(标准试件)	7						
S2	5	4 $\Phi$ 14					
S3	3		2 $\Phi$ 14				
S4		2 $\Phi$ 14		$\Phi^R5@75$			
S5		4 $\Phi$ 18					
S6			2 $\Phi$ 16		无		
S7			2 $\Phi$ 20			C40	
S8				$\Phi^R5@50$			400
S9				$\Phi^R5@100$			
S10	7			U形钢筋篮 + $\Phi^R5@75$			
S11		4 $\Phi$ 14			1		
S12					2		
S13			2 $\Phi$ 14		3		
S14				$\Phi^R5@75$		C50	
S15						C60	
S16					无		300
S17						C40	500

**Table 2.** Comparison of parametric analysis results for dapped end  
**表 2.** 企口承载力参数分析结果比较

模型	参数		企口极限承载力 kN	承载力比值%
S1 (标准试件)	控制试件	7	209.3	100
S2	预应力筋数量	5	200.2	95.7
S3		3	186.8	89.2
S4		2 $\Phi$ 14	187.2	89.4
S5	吊筋	4 $\Phi$ 18	222.4	106.3
S6		2 $\Phi$ 16	216.2	103.3
S7	企口纵筋	2 $\Phi$ 20	222.4	106.3
S8		$\Phi^R5@50$	235.7	112.6
S9	肋梁抗剪钢筋(双向)	$\Phi^R5@100$	195.7	93.5
S10		U形钢筋篮 + $\Phi^R5@75$	249.1	119
S11	企口上部预应力筋	1	235.7	112.6
S12		2	249.8	119.3
S13		3	253.5	121.1
S14	混凝土强度	C50	222.4	106.3
S15		C60	235.7	112.6
S16	企口高度	300	217.9	104.1
S17		500	186.8	89.2

## 4. 结论

1) 带企口双 T 板由于肋梁(腹板)狭窄, 不适合配置封闭的箍筋, 必须通过合理的配筋构造来保证带企口双 T 板在正常使用下裂缝不至于过大, 并且保证其承载力达到较高的水平, 防止双 T 板在企口处突然发生脆性破坏。

2) 预应力在预应力传递长度的应力变化可以通过降温法并采用 PRESTRESS HOLD 命令, 同时通过分割预应力钢筋来模拟。

3) 在荷载的作用下, 双 T 板企口内凹角处通常会存在应力集中现象, 裂缝会首先在内凹角处出现, 必须通过相应的配筋构造来减缓裂缝的发展。

4) 通过非线性有限元参数分析可知, 企口吊筋  $A_{sh}$ 、企口纵筋  $A_s$ 、肋梁抗剪钢筋都对企口极限承载力有影响, 配筋量增大, 承载力增大; 预应力筋数量增加或者把部分预应力筋配置在企口上方均会提高企口的承载力; 增加混凝土强度及减小企口高度也会增加企口的极限承载力。

## 参考文献 (References)

- [1] 汤武华, 裘涛. 预应力混凝土双 T 板设计剖析[J]. 建筑结构, 2009(S2): 58-59.
- [2] 中国建筑科学研究院. 09SG432-2: 预应力混凝土双 T 板(平板, 宽度 2.4 m、2.4 m、3.0 m) [M]. 中国计划出版社, 2009.
- [3] Precast/Prestressed Concrete Institute. PCI Design Handbook. 7th Edition. Chicago, 2010.
- [4] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 杨旭, 邓思华, 李晨光, 等. 基于 ABAQUS 的双 T 板极限承载力的非线性有限元分析[J]. 建筑技术开发, 2013, 40(11): 1-3.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)