

The Simulation Analysis of T Beam's Static Test Based on ABAQUS

Liang Yan, Ren Luo

School of Transportation of Nanjing University of Technology, Nanjing
Email: yanliang79@126.com

Received: May.16st, 2013; revised: Jun. 4th, 2013; accepted: Jun. 12th, 2013

Copyright © 2013 Liang Yan, Ren Luo. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Bridge structure in using process, can produce structural deformation due to load, when the deformation exceeds a certain limit, it will affect the bearing of the bridge structure stability. In the reality through the theoretical calculation to get deformation value of the bridge structure workload is very big, even sometimes it is difficult to calculate, the accurate deformation values of the bridge structure can be obtained by experiment and finite element calculation. Through the T test beam under different damage degree of deformation test value and ABAQUS finite element simulation of comparative analysis and research, found that one can better matches, can use ABAQUS simulation analysis was carried out on the bridge structure, and according to the results of simulation analysis and calculation to determine bridge bearing stability.

Keywords: Damage Plastic Model; ABAQUS; Reinforced Concrete; The constitutive relation

基于 ABAQUS 对 T 形梁静载试验的模拟分析

严亮, 罗韧

南京工业大学交通学院, 南京
Email: yanliang79@126.com

收稿日期: 2013 年 5 月 16 日; 修回日期: 2013 年 6 月 4 日; 录用日期: 2013 年 6 月 12 日

摘要: 桥梁结构在使用过程中, 由于荷载作用会产生结构变形, 当变形超过一定限值时, 就会影响到桥梁结构的承载稳定性。在现实中通过理论计算来得到桥梁结构的变形值, 其工作量是相当大的, 甚至有时会很难计算, 通过试验和有限元分析计算能够较好的得到桥梁的变形值。本文通过 T 型试验梁在不同损伤程度下的变形试验值与 ABAQUS 有限元模拟值进行对比分析研究, 发现两者能够较好的吻合, 可以运用 ABAQUS 对桥梁结构进行模拟分析, 并依据模拟分析计算的结果来判断桥梁承载稳定性。

关键词: 损伤塑性模型; ABAQUS; 钢筋混凝土; 本构关系

1. 引言

在实际工程领域中, 桥梁结构的变形往往作为其承载稳定性的评判指标之一, 当变形值在规范限值以内, 说明其稳定性是满足要求, 反之则说明其稳定性已无法满足设计要求。通过有限元模拟计算可以方便

有效的得到桥梁结构在不同损伤程度下的变形值, 以此可以作为评判结构稳定性的依据。有限元分析软件 ABAQUS 在钢筋混凝土结构分析上有其较强的优势, 其提供了三种混凝土本构模型: 混凝土损伤塑性模型, 混凝土弥散裂缝模型和 ABAQUS/Explicit 中的混凝土开裂模型。由混凝土受单轴压力时的应力应变关

系图来看, 混凝土材料本构关系极其复杂, 混凝土卸载时有残余变形, 不符合弹性关系, 混凝土材料在拉压过程中, 因塑性的积累和刚度的退化, 性能变化相当复杂, 而 ABAQUS 提供的混凝土塑性损伤模型引入损伤概念, 能够较好地描述混凝土在往复荷载作用下的力学行为, 比较适合模拟循环荷载作用下的材料性能。

本文运用 ABAQUS 中塑性损伤模型模拟分析 T 形试验梁在不同荷载阶段下变形及损伤情况, 通过与实验数据比较, 证明其有较好的精度。

在进行有限元模拟分析时, 材料本构关系如何选择显得尤为重用, 特别是当荷载作用复杂情况下, 本文采用的混凝土本构为 Jeeho Lee 的混凝土塑性损伤模型, 钢筋应力 - 应变关系采用二折线模型。

2. 混凝土塑性损伤本构及参数确定

ABAQUS 采用的塑性损伤模型是由 Lubliner 等提出, 并由 Lee 和 Fenves 进行了改进和发展, 混凝土损伤塑性模型可以用于单向加载、循环加载以及动态加载等场合, 它使用非关联多硬化塑性和各向同性损伤弹性相结合的方式描述了混凝土破碎过程中发生的不可恢复的损伤。这一特性使得损伤塑性模型具有更好的收敛性。混凝土损伤塑性模型是使用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非弹性行为, 是一个基于塑性的连续介质损伤模型。此模型模拟混凝土结构在周期荷载或动荷载作用下的破坏有比较好的效果, 有关混凝土损伤塑性模型更为详细资料可以参考文献[1-3]。

2.1. 混凝土材料弹性部分

弹性阶段的应力-应变关系定义是通过定义材料的杨氏模量 E 和极限弹性应力 $R_{e0}(R_{c0})$ 来实现。混凝土本构曲线中弹性阶段的斜率为混凝土弹性模量, 其可以根据本次试验所做的混凝土弹性模量试验得到的数据进行取值, 具体可以参考文献[4]。

弹性模量 $E = 26.5 \text{ GPa}$;

泊松比: $\gamma = 0.18$ 。

2.2. 混凝土材料塑性部分

屈服条件与流动法则参数:

剪胀角: $\psi = 30^\circ$;

流动势偏移量: $e = 0.1$;

双轴受压于单轴受压极限强度比: $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1.16$;

不变量应力比: $K_c = 0.666$;

粘滞系数: $\mu = 0$ 。

2.3. 混凝土损伤塑性模型非弹性阶段的应力 - 应变关系^[5]

混凝土损伤塑性模型的应力 - 应变关系选用规范附录 C 给出的混凝土本构关系, 非弹性阶段的应力 - 应变关系采用规范提供的混凝土应力 - 应变关系^[5]确定。

受压时:

$$\begin{cases} y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$(x = \varepsilon/\varepsilon_{fc}, y = \sigma/\sigma_{fc})$

受拉时:

$$y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, \quad x > 1 \quad (2)$$

$(x = \varepsilon/\varepsilon_f, y = \sigma/\sigma_f)$

其中 $\alpha_t = 0.312f_t^2$, $\alpha_d = 0.157f_c^{0.785} - 0.905$ 。

根据两式可以确定混凝土应力 - 非弹性应变曲线, 如图 1 和图 2 所示。

2.4. 混凝土损伤塑性模型的损伤因子的确定^[6]

损伤是指在单调加载或重复加载下, 材料性质所产生的一种劣化现象, 损伤在宏观方面的表现就是

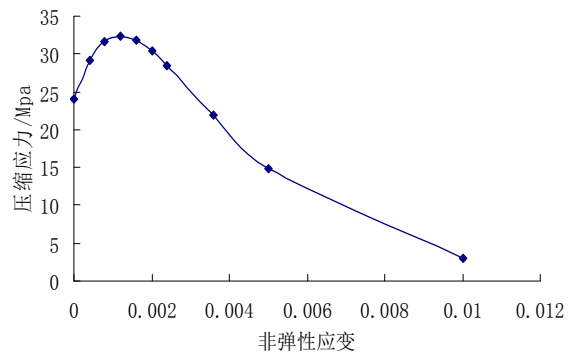


Figure 1. Inelastic strain-stress curves of concrete in compression
图 1. 混凝土压缩应力 - 非弹性应变曲线

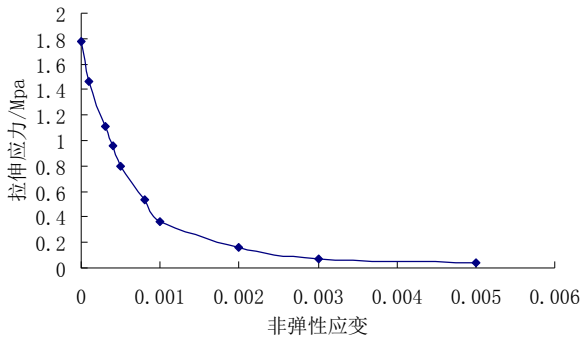


Figure 2. Inelastic strain-stress curves of concrete in tension
图 2. 混凝土拉伸应力 - 非弹性应变曲线

(微)裂纹的产生。材料的损伤状态，可以用损伤因子来描述。

根据式(1)、(2)确定的混凝土非弹性阶段的应力 - 应变关系，按下式求的损伤因子的数值：

$$d_k = \frac{(1-\beta)\epsilon^{in}E_0}{\alpha_k + (1-\beta)\epsilon^{in}E_0}, \quad (k=t,c) \quad (3)$$

式中： t, c ——代表拉伸和压缩； β ——塑性应变与非弹性应变的比例系数，受压时取 0.35~0.7，受拉时取 0.5~0.95； ϵ^{in} ——混凝土受拉受压情况下的非弹性阶段应变。

根据(3)式可以确定混凝土损伤塑性模型的损伤因子，如图 3 和图 4 所示。

3. 钢筋本构

钢筋的物理力学性能相较于混凝土材料就比较清楚，最常用的本构模型如图 5 所示，其中(a)理想弹塑性模型；(b)双折线弹性塑性模型；(c)硬化弹塑性模型；(d)弹性 - 理想塑性 - 硬化塑性模型，(a)和(c)采用相对较多。

本文钢筋材料本构采用硬化弹塑性模型，无刚度退化。折线第一上升段的斜率，为钢筋本身的弹性模量，第二上升段为钢筋强化段，此时的斜率大致可取为第一段的 1/100，具体见 3.2 节。

4. T 型钢筋混凝土筒支梁静载试验分析

4.1. 模型设计

钢筋混凝土 T 形筒支梁的跨度为 6.5 m，梁高 550 mm，翼缘宽 600 mm，腹板厚度 100 mm，在梁的两端加厚 250 mm 的混凝土。采用 C20 细石混凝土。梁

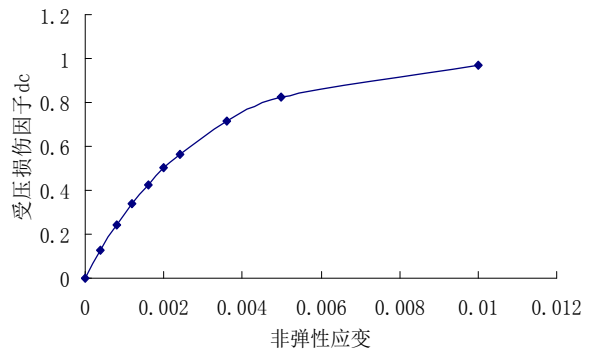


Figure 3. Inelastic strain-damage factor curves of concrete in compression
图 3. 受压应变与受压损伤因子曲线

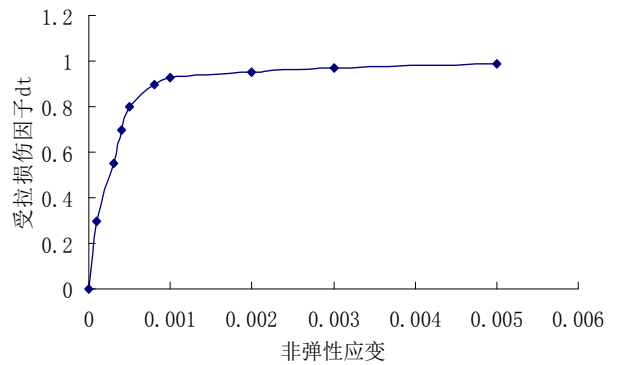


Figure 4. Inelastic strain-damage factor curves of concrete in tension
图 4. 受拉应变与受拉损伤因子曲线

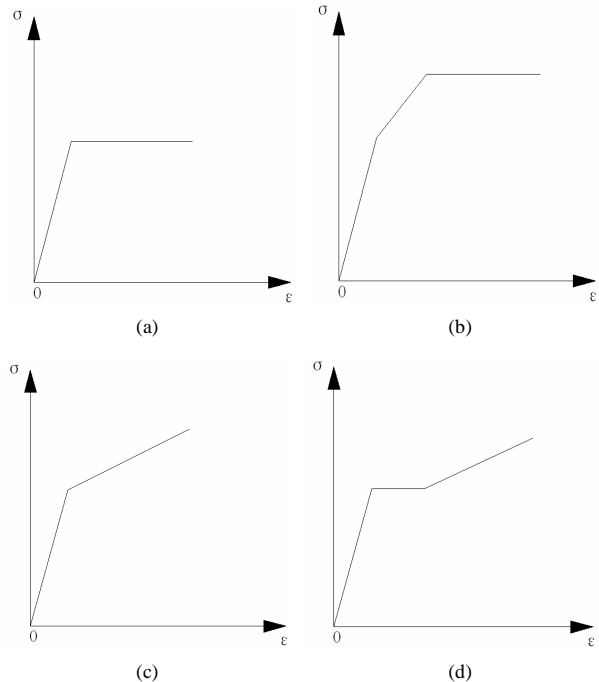


Figure 5. Strain-stress curves of rebar
图 5. 钢筋的应力应变关系

内受拉纵筋为 8 根直径 16 mm，架立钢筋 2 根直径 8 mm，箍筋、水平纵向钢筋和钢筋网均采用直径为 4 mm 的 8 号铁丝。T 形梁配筋图见图 6，试验加载见图 7，具体可以参考文献[4]。

4.2. 有限元模型设计及材料参数计算

混凝土和钢筋分别采用 C3D8R 单元和 T3D2 单元

行分离式建模，分别如图 8 和图 9 所示，并采用 Embedded 技术来实现混凝土中钢筋的模拟。为了避免加载点位置因为应力集中导致局部损坏，在加载点位置设置了一个矩形离散刚片，荷载施加在刚片的参考点上。在两端支撑处分别设了两个 Reference Point，并与支撑处梁底截面进行耦合，边界约束加在两个 Reference Point。分析步 STEP 采用 Static General 隐

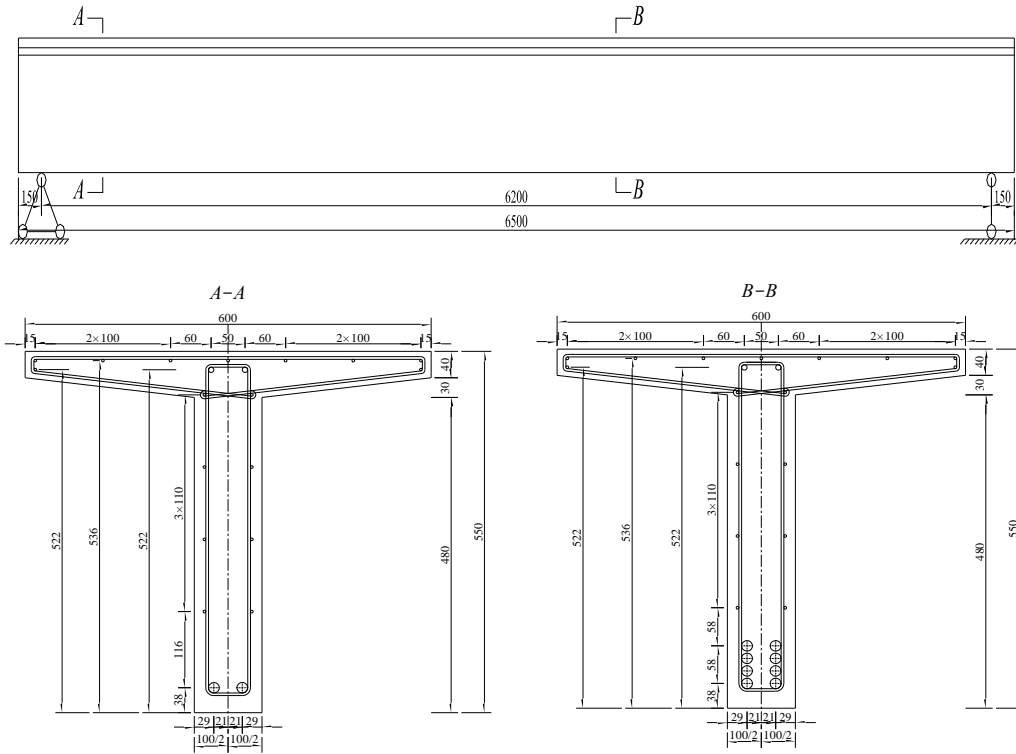


Figure 6. The reinforcement of T beam
图 6. T 形梁配筋图

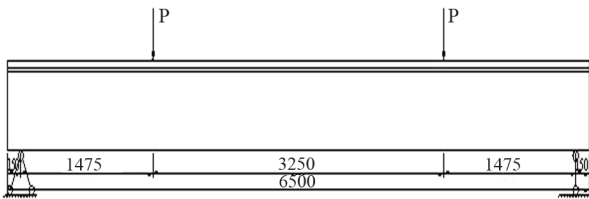


Figure 7. Static load test load diagram
图 7. 静载试验加载图

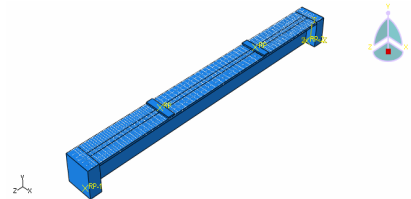


Figure 8. Concrete model
图 8. 混凝土模型

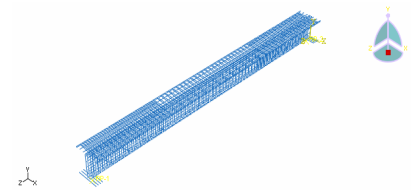


Figure 9. Rebar model
图 9. 钢筋模型

式算法。

材料中 C20 混凝土定义弹性阶段的杨氏模量 $E = 26.5 \text{ Gpa}$ 和泊松比为 0.18，在塑性阶段选用混凝土塑性损伤模型(Concrete Damaged Plasticity)。直径 16 mm 钢筋 HRB335 杨氏模量 200 Gpa，泊松比 0.3，屈服应力 280 Mpa，对应屈服应变 0，极限应力 515 Mpa，对

应应变为 0.046；直径 8 mm 钢筋 HPB235 杨氏模量 210 Gpa，泊松比 0.3，屈服应力 373 Mpa，对应屈服应变 0，极限应力 510 Mpa，对应应变 0.0645；直径 4 mm 八号铁丝杨氏模量 205 Gpa，泊松比 0.3，屈服应力 300 Mpa，对应屈服应变 0，极限应力 350 Mpa，对

应应变 0.024。

5. 计算结果

通过 ABAQUS 模拟计算得到 T 形梁各阶段下的受拉受压云图，分别见图 10 和图 11。

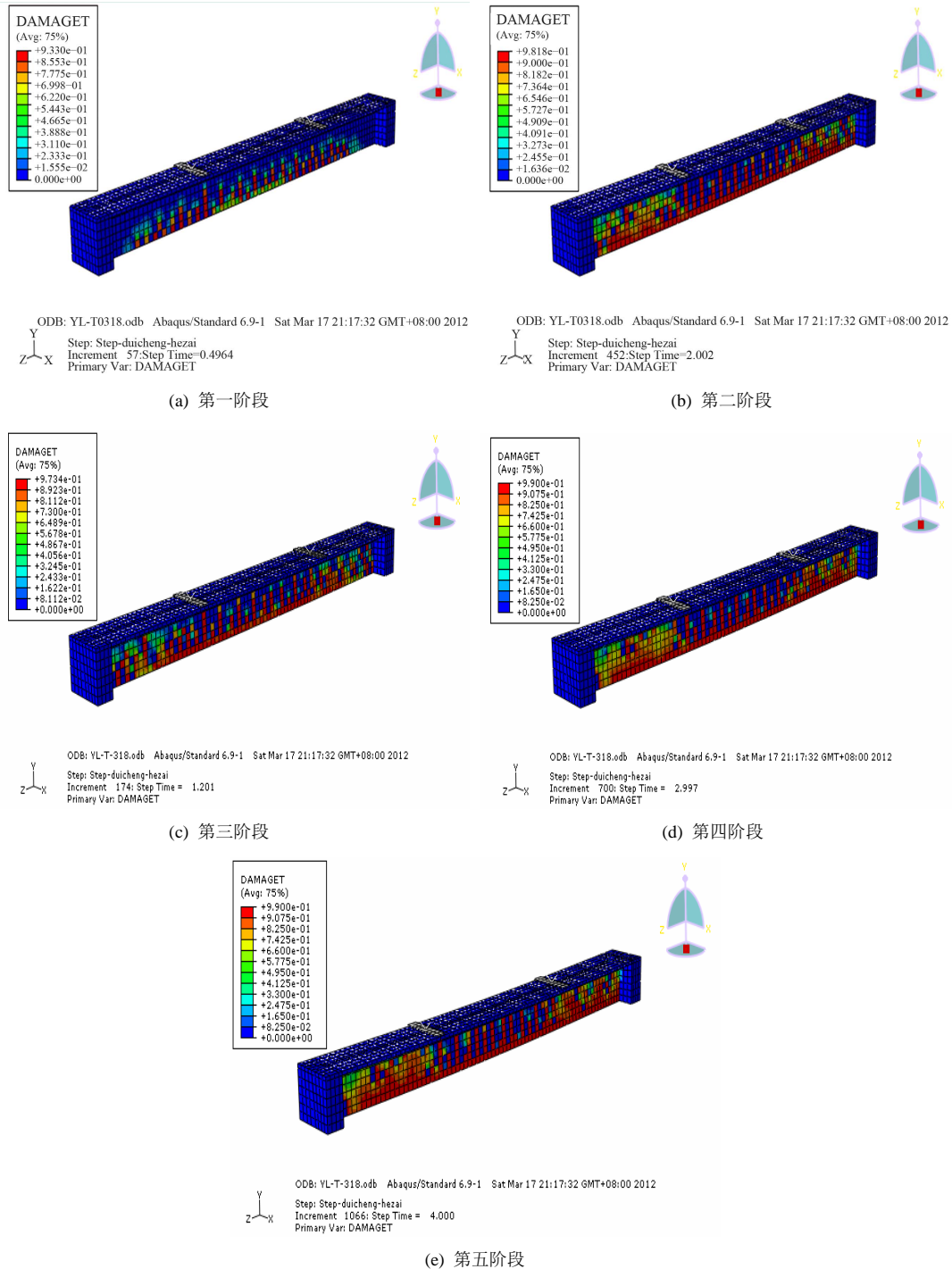


Figure 10. Tension cloud
图 10. 受拉云图

基于 ABAQUS 对 T 形梁静载试验的模拟分析

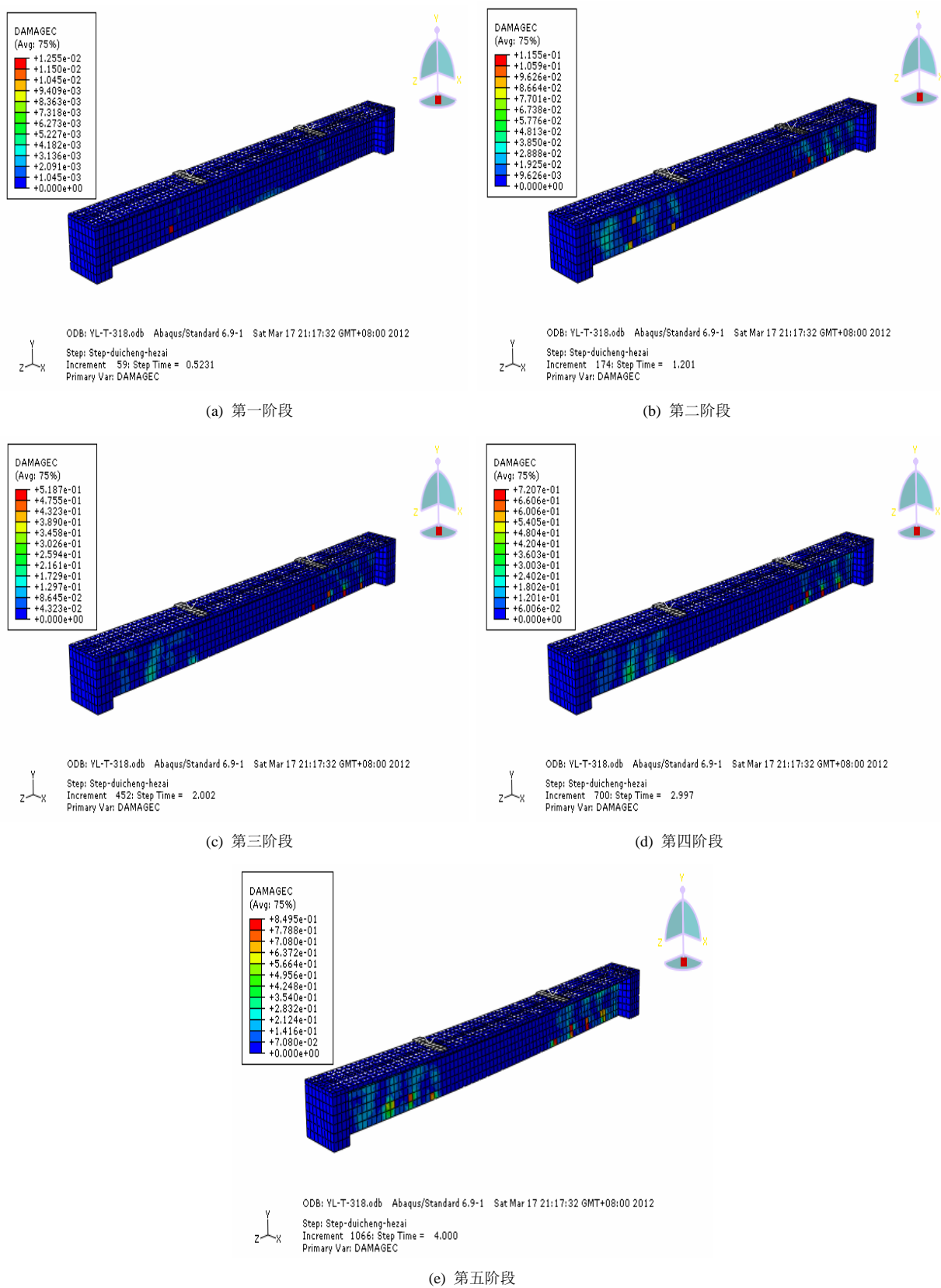


Figure 11. Compression cloud
 图 11. 受压云图

5.1. 各阶段受拉损伤云图

5.2. 各阶段受压损伤云图

给出了该简支梁在各个阶段混凝土的受压损伤和受拉损伤的演化过程，可见，在受荷初级阶段，加载处首先出现受压损伤，然后逐渐向支座延伸，受拉损伤则发展较快，随着荷载的不断增加，受压损伤和受拉损伤在加载处与支座处形成的拱形区域快速扩

展，这与 T 形简支钢筋混凝土梁试验破坏的裂缝的发展过程较为吻合。

5.3. 各阶段跨中截面的荷载挠度曲线对比

通过对试验数据和模拟数据的整理得到各阶段跨中截面挠度试验值和模拟值，将 T 形梁各阶段下跨中挠度模拟值和试验值进行对比分析，见图 12。

对比跨中荷载挠度曲线的模拟值与试验值，两

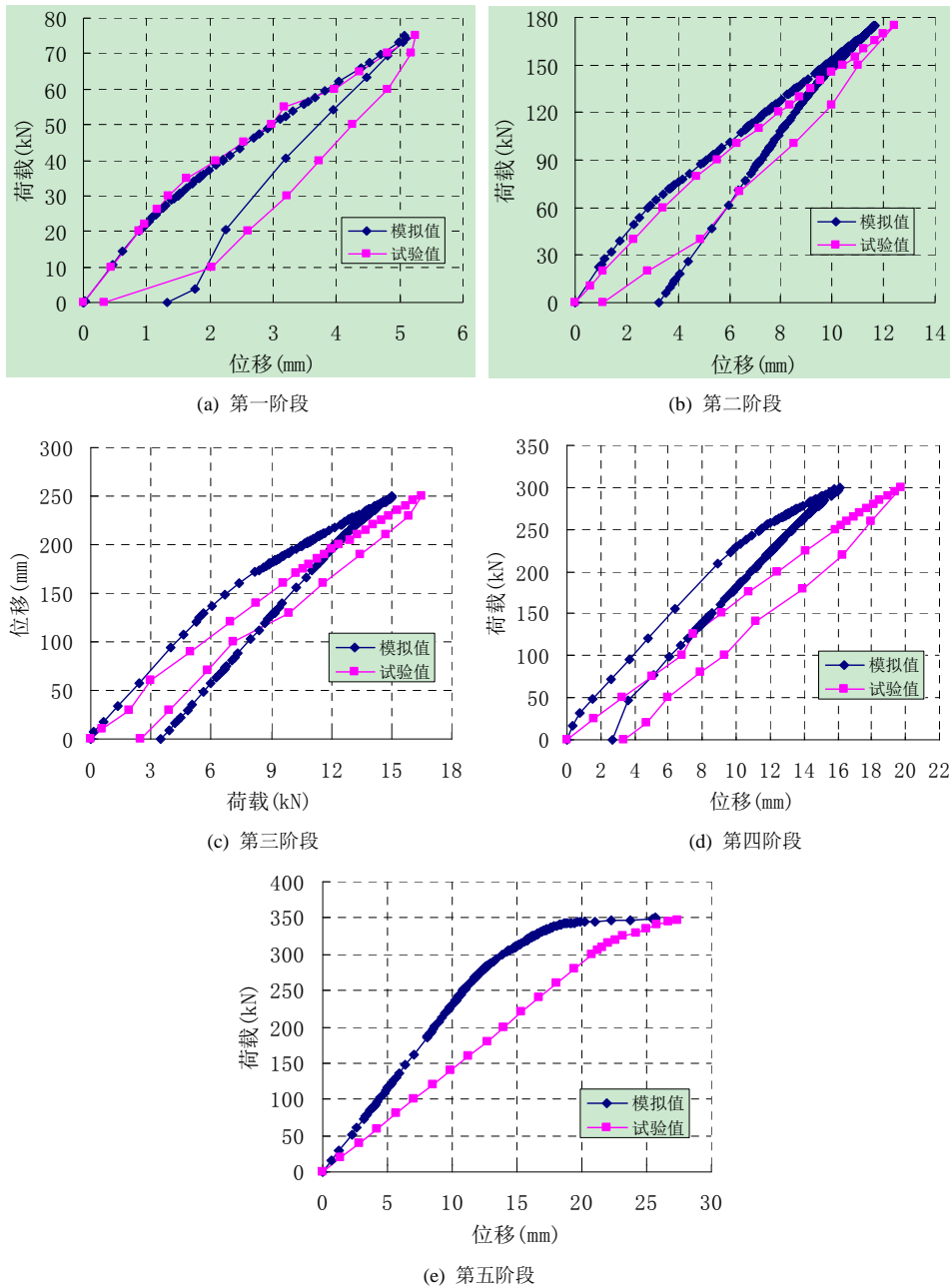


Figure 12. The cross section load-deformation curve of each stages
图 12. 各阶段跨中截面荷载 - 挠度曲线

者能够较好的吻合。从加载过程的对比来看，第一、二阶段是非常吻合，而对于第三、四、五阶段模拟值高于试验值，是因为模拟计算钢筋本构采用的是二折线模型，此三阶段钢筋进入强化阶段。从卸载过程的对比来看，两者吻合程度较差，对于第一、二阶段荷载卸载为 0 时的挠度相差较大的原因估计是 ABAQUS 无法实现钢筋混凝土梁在卸载后裂缝的合

6. 结论

1) 通过模拟值与试验值的对比分析，可知 ABAQUS 有限元软件采用损伤塑性模型能够较有效的模拟钢筋混凝土简支 T 梁的静载试验的整个过程；

2) ABAQUS 采用损伤塑性模型不能很好的模拟混凝土的开裂过程，无法实现混凝土开裂后裂缝少量

合毕的现象；

3) 有限元 ABAQUS 可以对桥梁结构进行变形模拟分析，并能依据模拟结果来判断结构稳定性情况。

参考文献 (References)

- [1] 王金昌, 陈开页. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [2] J. Lee, G. L. Fenves and ASCE. Plastic damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [3] Abaqus analysis user's manual, 19.6.3 concrete damaged plasticity. ABAQUS, Inc., 2009.
- [4] 戴冰清. 现役钢筋混凝土桥梁承载安全性综合评估方法研究[D]. 南京工业大学, 2012.
- [5] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] 张劲, 王庆扬, 胡守营等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. *建筑结构*, 2008, 38(8): 127-130.