

Research on Damage of Tunnel Lining Caused by Earthquake based on ABAQUS

Qi Liang

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: Due to the frequent occurrence of earthquakes in the western region of China, the design of seismic performance of tunnels has become more and more important. It is even more important to find the damage law of linings on earthquakes. In this paper, ABAQUS finite element software is used to simulate the damage process of highway tunnel lining under earthquake by using plastic damage model, and the tensile and compression damage and stiffness decrease rate of the tunnel are analyzed. The results show that the tunnel lining is mainly subjected to tensile damage under earthquakes, and the damage occurs at the arch feet, arch shoulders, arch waists, and arch feet. With the continuous loading of seismic loads, the damage gradually penetrates. Therefore, in order to improve the seismic performance of these parts, the research results of this article provide a reference for the seismic design of the tunnel.

Keywords: Earthquake; Damage; Tunnel lining

ABAQUS 的地震对隧道衬砌的损伤研究

梁奇

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

摘要: 由于我国西部地区地震频发, 隧道的抗震性能设计变得越来越重要, 找到地震对衬砌的损伤规律则愈发重要。本文利用 ABAQUS 有限元软件, 使用塑性损伤模型模拟公路隧道衬砌在地震作用下的损伤过程, 分析隧道的拉压损伤和刚度下降率。结果显示隧道衬砌在地震作用下以受拉损伤为主, 损伤发生集中在拱脚、拱肩、拱腰和拱脚处, 随着地震荷载的不断加载, 损伤逐渐贯通。因此, 为了提高抗震性能要对这些部位进行加固, 本文研究结果对隧道的抗震设计提供参考。

关键词: 地震; 损伤; 隧道衬砌

1 引言

随着我国隧道建设里程的不断增长, 建造在地震频发地带的隧道也随之增加。对隧道的建设带来了挑战。近些年来, 西部地区地震频发, 有些隧道结构遭到了破坏, 隧道衬砌产生了裂缝、破损和渗漏水等病害, 埋下了安全隐患。因此, 有必要开展相关的研究。有限元的发展为研究隧道衬砌损伤发展提供了便捷的方法。本文将基于 ABAQUS 有限元软件, 研究公路隧道在地震过程中的衬砌损伤过程, 并分析地震过程中衬砌的损伤情况, 为发生地震后的公路隧道衬砌提供评估和加固方向。

2 混凝土塑性损伤模型

塑性损伤模型采用 ABAQUS 自带 CDP 模型, 损伤模型最早由 Lubliner 等提出, 随着研究的不断发

展, Lee 及 Fenves 改进了该模型, 更加准确且符合实际, 便于使用。改模型可以用来各类型的混凝土、砂浆等脆性材料。模拟模型在反复荷载作用下动态过程和力学行为。混凝土材料的损伤状态可以用损伤因子来描述。模型在单轴受拉时, 未达到应力峰值时, 应力为线弹性, 但应变包含弹性和塑性应变。随着混凝土结构刚度的不断减小, 应力逐渐下降, 塑性应变可以由下列公式计算得出:

$$\tilde{e}^{ck} = e_1 - e_{0r}^{el}, e_{0r}^{el} = S_t / E_0 \quad (1)$$

进一步分析可知:

$$\tilde{e}_l^{pl} = \tilde{e}^{ck} - \frac{d_t}{1-d_t} * \frac{d_t}{E_0} \quad (2)$$

模型在单轴受拉时, 直到极限应力阶段之前, 混凝土材料不断强化。应力应变关系如下:

$$e_l^{in} = e_c - e_{0c}^{el}, e_c = S_c / E_0 \quad (3)$$

通过应力应变曲线可得:

$$\tilde{e}_c^{pl} = \tilde{e}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} * \frac{s_c}{E_0} \quad (4)$$

因此, 受拉受压的应力—应变关系可分别表示为:

$$s_i = (1-d_i)E_0(e_i - e_i^{pl}) \quad (5)$$

式中, d_i, d_c 表示损伤变量, s_c, s_t 表示混凝土材料受拉和受压的应力状态, c 为受压损伤。 e 为应变。计算时通常将材料在受压之前的损伤值取 0, $e_c^{pl} = 0, d_c = 0$, 则有:

$$(1-d) = (1-d_i s_c) = 1 - w_c(1-r)d_i \quad (6)$$

在混凝土单向受拉时, $r(s) = H(\bar{s}) = 1, d = d_t$,

在混凝土单向受压时, $d = (1-w_c)d_i$, 如果 $w_c = 1$, 那么 $d = 0$, 代表混凝土材料的刚度恢复完全; 如果

$w_c = 0$, 那么 $d = d_i$, 代表混凝土材料的刚度未恢复完全; 当 $0 < w_c < 1$ 时, 代表混凝土材料的刚度仅恢复了一小部分。

由众多学者研究的混凝土本构关系, 再根据《混凝土结构设计规范 (GB50010-2010)》可以计算出混凝土的应力和塑性应变的关系, 由公式

$$d = 1 - \sqrt{\frac{s}{E_0 e}} \quad (7)$$

可以计算出混凝土损伤因子和塑性应变的关系。经过计算 C25 混凝土受拉和受压的应力应变及损伤因子的参数如图 1 和图 2 所示:

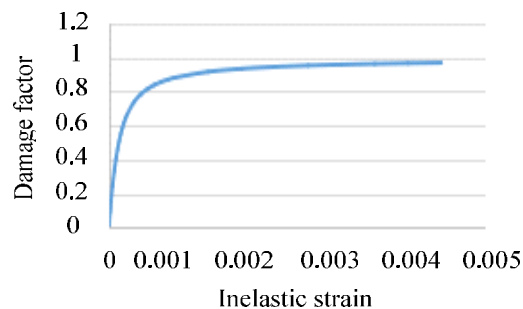
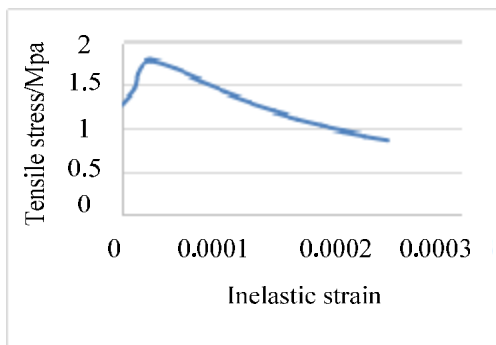


Figure 1. C25 concrete uniaxial tensile damage curve
图 1. C25 混凝土单轴受拉损伤曲线

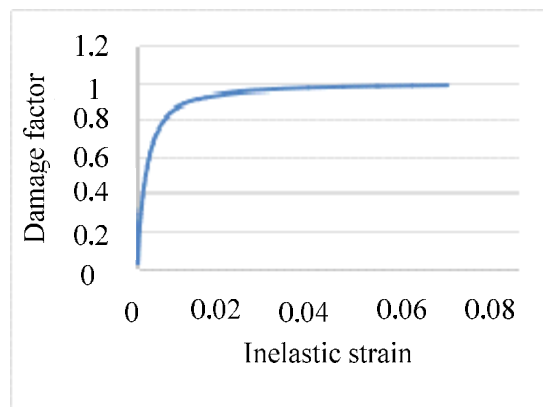
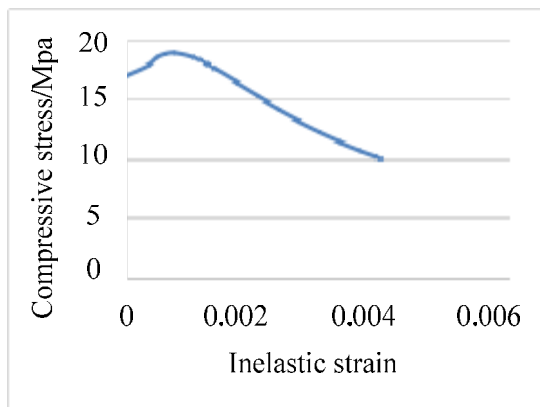


Figure 2. C25 concrete uniaxial compression damage curve
图 2. C25 混凝土单轴受压损伤曲线

3 有限元模型与参数

3.1 材料参数

有限元模型根据某公路隧道建立, 隧道跨度 12.2 米, 模拟围岩范围选择 5-8 倍的距离, 本次模型取 84 米。围岩使用摩尔库伦本构准则, 均采用实体单元。

隧道衬砌使用 ABAQUS 的 CDP 模型。

Table 1. Tunnel surrounding rock parameters
表 1. 隧道围岩参数

材料	变形模量(GPa)	密度 (KN/m ³)	泊松比	粘聚力 (Kpa)	摩擦角 (°)
V 级围岩	1.2	1936	0.3	150	30

使用强度为 C25 的混凝土，弹性模量 28Gpa，泊

松比 0.24，膨胀角 30° 密度 2700 KN/m³。阻尼选用瑞利阻尼。

3.2 边界条件

边界条件采用二维粘弹性边界，使用弹簧和阻尼器的方式施加。

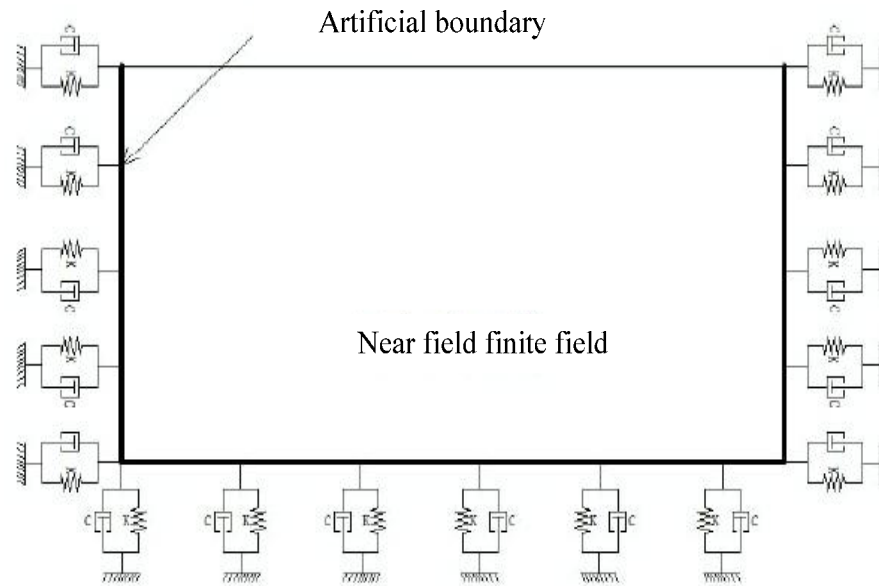


Figure 3. Artificial boundary spring-damper system
图 3. 人工边界弹簧-阻尼器系统

弹簧和阻尼的法相和切相系数由下面的公式计算得出：

$$K_{BN} = a_N \frac{G}{R}, C_{BN} = rC_P \quad (8)$$

$$K_{BT} = a_T \frac{G}{R}, C_{BT} = rC_S$$

a_N 和 a_T 分别对应粘弹性边界弹簧法相和切相的修正系数，推荐值为 0.5 和 1.0；C 为阻尼系数；G 为模型的剪切模量，可以由模型的弹性模量和泊松比求得；R 推荐取模型大小的中间值，是散射波源到人工边界的距离；c_p、c_s 是横波和纵波波速。r 为介质质量密度。

3.3 地震波的选取

本次研究的地震波采用 EiCentro 波,并对其进行基

线校正。

4 结果分析

图 4 和图 5 显示隧道衬砌在地震作用下的受拉损伤、受压损伤和刚度下降的情况。云图中 SDEG 表示为隧道衬砌结构的刚度下降，在 ABAQUS 中，DANAGET 和 DANAGEC 分别表示结构的受拉和受压损伤，当受拉损伤值大于 0.5，受压损伤大于 0.3 时，可以认为单元无效。从图 3 中我们可以看出隧道在地震的作用下，衬砌的拱腰、拱肩和拱脚发生较大的刚度下降，衬砌塑性损伤较多，随着地震过程的不断发展，衬砌损伤部位不断增多，损伤逐渐贯通整个衬砌。从图 4 可以看出，隧道衬砌在地震作用下的受拉损伤较为严重，应为混凝土受压强度较大，所以隧道

衬砌结构受压损伤较小，可以得知隧道衬砌在地震的作用下，隧道衬砌结构的损伤主要是受拉损伤，随着损伤的不断扩展，导致衬砌拉剪开裂出现裂缝，然后

裂缝逐渐贯穿整个衬砌。如果隧道衬砌损伤不断扩大，会带来安全隐患，甚至出现隧道的坍塌。

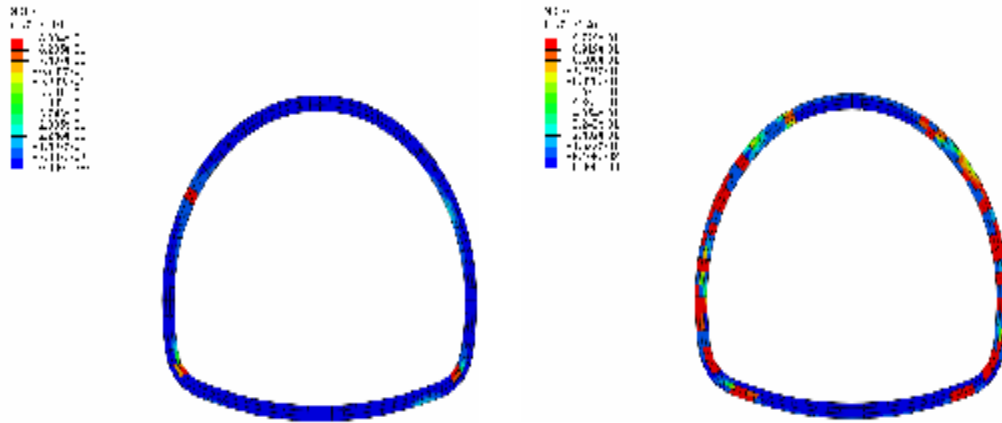


Figure 4. Stiffness reduction rate at t = 4.8s and t = 20s

图 4. t=4.8s 和 t=20s 时的刚度下降率

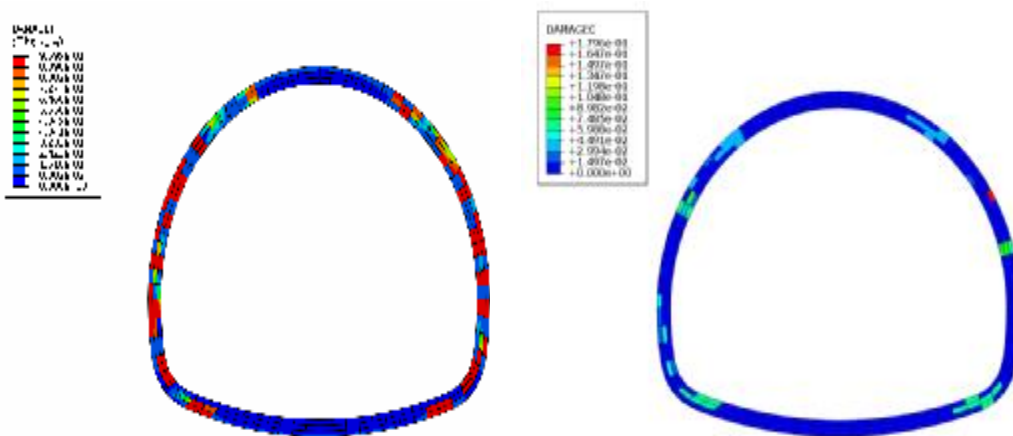


Figure 5. Tension and compression damage

图 5. 受拉和受压损伤

5 结语

本文基于 ABAQUS 有限元软件及其 CDP 损伤损伤模型研究了隧道衬砌在地震作用下损伤情况，显示隧道衬砌的受拉损伤较为严重，结构出现拉剪开裂，裂缝不断增多。隧道衬砌结构主要是受拉破坏，损伤出现在结构的不同位置。此外，拱肩和拱脚损伤由衬砌内部向外部扩展，地震的作用下隧道衬砌的拱肩和拱腰最容易发生破坏，损伤比较严重。拱顶和拱底次之。

在隧道设计中，应根据损伤规律采取相对应抗震设计方案，在结构的抗震设计中易损伤部位进行抗震设防。

References (参考文献)

- [1] Deng Liang, Zheng Xin. Research on dynamic failure mode of tunnel lining structure based on damage theory. Highway Technology of Transportation (Applied Technology Edition). 2018, 14(04), 213-216.
邓亮, 郑欣. 基于损伤理论的隧道衬砌结构动力破坏模式研究. 公路交通科技(应用技术版). 2018, 14(04), 213-216.
- [2] Cui Yuping, Sun Weize, Dong Jun, Dong Fei. Seismic dynamics analysis of tunnel structure based on long-term cumulative damage. Highway. 2013, (01), 284-288.

-
- 崔玉萍, 孙玮泽, 董军, 董飞. 基于长期损伤累积作用下隧道结构的抗震动力学分析. 公路. 2013, (01), 284-288.
- [3] Liu Jun. Research on concrete damage constitutive model and its numerical realization. Dalian University of Technology. 2012.
刘军. 混凝土损伤本构模型研究及其数值实现. 大连理工大学. 2012.
- [4] Zhang Zhanting, Liu Yufeng. Plastic damage model of concrete in ABAQUS. Building Structure. 2011, 41(S2), 229-231.
张战廷, 刘宇锋. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型. 建筑结构. 2011, 41(S2), 229-231.