

基于能量损失的抗滑桩损伤模型及其应用

周云涛^{1,2}, 石胜伟^{1,2}, 蔡强^{1,2}, 张勇^{1,2}, 梁炯^{1,2}, 程英建^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

摘要: 抗滑桩承受荷载的过程伴随着桩身结构的损伤累积, 为了获得抗滑桩损伤演化情况, 基于 Najjar 损伤理论推导了随应变变化的损伤因子表达式, 建立了抗滑桩受拉、压荷载作用下的混凝土损伤模型。将该损伤模型嵌入至 Abaqus/CAE 模拟程序自带的混凝土塑性损伤模型中, 分析了二郎山 1# 滑坡抗滑桩损伤情况, 得出如下结论, 采用文中构建的拉、压损伤模型模拟得出的桩顶水平位移为 30.3cm, 与现场观测的桩后裂缝宽度数据相吻合, 得出滑坡推力增大是导致二郎山 1# 滑坡抗滑桩产生大变形的直接原因; 抗滑桩在产生大位移过程中受压损伤值较小, 桩身未发生压破坏; 抗滑桩在产生大位移过程中靠近滑坡一侧滑面位置的拉损伤较为严重, 并产生了拉破坏, 损伤区域达到截面面积的 3/4, 是抗滑桩工程修复亟需关注的位置。

关键词: 损伤模型; 损伤因子; 本构模型; Abaqus 程序; 抗滑桩; 二郎山 1# 滑坡

中图分类号: U213.1+52.1; O346.5 文献标识码: A 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



DAMAGE MODEL OF ANTI-SLIDE PILE BASED ON ENERGY LOSS AND ITS APPLICATION

ZHOU Yuntao^{1,2}, SHI Shengwei^{1,2}, CAI Qiang^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2},
LIANG Jiong^{1,2}, CHENG Yingjian^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734, Sichuan, China)

Abstract: The process of anti-slide pile bearing load is accompanied by damage accumulation of pile structure. For the purpose of knowing the condition of damage evolution of anti-slide pile, this paper induced damage factor expressions varying with strain based on Najjar damage theory, and established the concrete damage model of anti-slide pile under the action of tension and pressure loads. This damage model was embedded in the built-in concrete damage model of Abaqus/CAE program, and then this paper drew the following conclusions by analyzing the damage condition of anti-slide pile of 1# landslide

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目 (201511051); 中国地质调查项目 (DD20190643); 四川省国土厅项目 (KJ-2018-20)

作者简介: 周云涛 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土病害机理及控制技术方面研究。E-mail: zzyytt2040@tom.com。

收稿日期: 2018-10-24; **修回日期:** 2019-10-31; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 周云涛, 石胜伟, 蔡强, 等. 基于能量损失的抗滑桩损伤模型及其应用 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (6): 1107-1115

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.06.094

ZHOU Yuntao, SHI Shengwei, CAI Qiang, et al. Damage model of anti-slide pile based on energy loss and its application [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (6): 1107-1115 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.06.094

in Erlang Mountain; the simulated horizontal displacement was 30.3 cm by using the damage model of anti-slide pile under the action of tension and pressure loads, which was consistent with the figure of crack width observed on site, concluding that the increased landslide load was the immediate cause to the large deformation of 1# landslide in Erlang Mountain; the value of compression damage was less in the process of the large displacement happened to the anti-slide pile and no compressive damage occurred to the pile structure; but tensile damage was severe at the sliding surface near the landslide during the large displacement occurred to the anti-slide pile and tensile damage occurred on the pile, with the damage zone reaching the 3/4 of the cross-sectional area, which is an important position that requires attention to the restoration of the anti-slide pile.

Key words: damage model; damage factor; constitutive model; Abaqus program; anti-slide pile; 1# landslide in Erlang Mountain

0 引言

抗滑桩主要承受边、滑坡剩余下滑力或土压力等水平荷载的作用,其抗弯与抗剪一直是桩体静力计算的关键。在抗滑桩发生位移过程中,承受过大弯矩或剪力部位会产生应力集中区域,承受较高的应力,表现为该部位材料强度劣化,同时伴随结构的局部损伤、裂纹扩展甚至断裂。因此,抗滑桩在服役过程中的桩身材料损伤就成为了评价桩身安全的关键指标。

抗滑桩由混凝土材料与钢筋材料构成,两者共同承受滑坡荷载,在抗滑桩未产生明显裂缝前,可认为钢筋未发生屈服,钢筋损伤也可忽略不计,因此,抗滑桩损伤的核心在于混凝土材料的强度劣化。多数学者采用损伤力学从弹性、弹塑性、细观、宏观等角度对混凝土材料的损伤本构模型进行了较为深入的研究。1976年,Dougill^[1]将损伤概念引入到混凝土材料,对混凝土损伤研究具有开创性的意义;1985年,Lemaitre^[2]提出了基于能量释放率的损伤演化加载函数,损伤演化以混凝土应变的幂函数表示;1986年,Mazars^[3]提出了混凝土各向同性的损伤本构模型;随后,1989年Ju^[4]、1990年Yazdani^[5]、1994年Lubarda^[6]、1998年Faria^[7]等均对混凝土损伤本构模型开展了较为深入的研究。在国内,李杰、吴建营等^[8-9]建立了基于复合热动力学基本原理的损伤准则,并提出了数值模拟计算方法;张其云、李杰等^[10-12]提出了混凝土随机损伤本构模型;王中强等^[13]建立了一种运用辛普生积分方法精确计算混凝土损伤的本构模型。近年来,多位学者采用 Abaqus 程

序来直观显示结构的损伤程度,逐步建立了混凝土的塑性损伤模型^[14],提出了混凝土损伤因子和参数的取值方法^[15-16],并将其推广到 RCZ 形柱、CFST 柱、越层柱、组合构件等结构损伤应用上^[17-21],为抗滑桩的损伤研究提供了较好的理论方法。目前,滑坡治理工程中对受水平荷载作用抗滑桩变形采用损伤力学原理进行分析或研究基本未见报道,但抗滑桩为钢筋混凝土材料,采用现有的混凝土损伤本构模型研究抗滑桩的强度劣化、刚度下降等损伤演化具有一定可行性,同时采用 ABAQUS 程序直观显示抗滑桩损伤破坏演化过程对于工程应用具有指导意义。

文章借鉴固体材料损伤理论,将抗滑桩的混凝土材料简化为弹塑性介质,通过能量损失原理推导损伤因子表达式,得出损伤因子随混凝土应变演化关系,将建立的抗滑桩损伤模型应用于二郎山 1#滑坡抗滑桩治理工程,采用 Abaqus 程序再现抗滑桩损伤破坏演化过程,研究成果对于大变形抗滑桩修复工程设计具有指导意义。

1 抗滑桩损伤模型

1.1 抗滑桩损伤分析

抗滑桩是一种钢筋混凝土材料,主要受滑坡推力或土压力的弯剪作用,由钢筋骨架和混凝土共同承受荷载。现行的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)^[22]规定,在不同的环境类别和水、土介质腐蚀性等级条件下,桩身最大裂缝宽度限值为 0.4 mm,超过此限值即认为抗滑桩失效。采用 Gergely-Lutz 混凝土裂缝宽度经验公式^[23]反算钢筋应力可以发现,满足桩身配筋率情况下,0.4 mm

裂缝宽度对应的钢筋最大应力不会超过 0.6 倍的钢筋屈服应力, 此时的钢筋处于线弹性受力状态, 卸荷后钢筋应力迹线可恢复, 表征抗滑桩在受荷失效前钢筋骨架尚未产生损伤, 因此, 文中不再考虑抗滑桩中钢筋骨架的损伤问题。对于混凝土材料, 水泥砂浆在搅拌过程中会发生物理化学反应, 形成大量的孔隙结构, 孔隙尺寸多为 10 A 到 10^4 A, 并随水灰比的不同有差异, 而环绕基体和骨料的界面, 孔隙率比砂浆基体的孔隙率更大, 也是混凝土产生损伤最严重的部位。混凝土材料凝固成形后, 整体结构承受滑坡推力或土压力荷载作用, 其材料内部的微裂纹、微孔隙不断扩展、贯通, 损伤逐渐形成演化, 宏观上表现为桩顶的永久性变形或混凝土材料的塑性变形, 致使混凝土单轴受拉或受压的本构模型不断改变, 超过峰值应变后应力-应变曲线下降, 混凝土承载能力降低。由于抗滑桩混凝土多为矩形或圆形截面构件, 裂缝常出现在受拉区或构件边缘位置, 随着滑坡荷载的增加, 抗滑桩裂缝不断扩展, 抗滑桩实际受力面积减小, 承载能力相应降低。因此, 抗滑桩的损伤随着截面真实应力的增加而不断增大。

1.2 抗滑桩损伤变量

损伤变量 D 是连续损伤力学中用以描述含细观缺陷材料的力学效应, 其可预测工程材料或结构服役期间的变形、破坏以及使用寿命。材料损伤变量受多种复杂因素影响, 损伤力学中其分析方法繁多。经典损伤力学理论从单元受损面积角度出发, 定义损伤变量 $D^{[24]}$ 为

$$D = (A - A_0) / A \quad (1)$$

式中, D 为材料损伤变量, $D=0$ 表示材料无损状态, $D=1$ 表示材料完全破坏状态; A 为材料的原面积; A_0 为材料受损伤后的有效面积。

对于抗滑桩结构, 其混凝土材料损伤可从受力过程中能量消耗的角度进行分析, 根据 Najjar 的损伤模型^[25], 混凝土材料的损伤变量可定义为

$$D = \Delta W_\varepsilon / W_0 \quad (2)$$

式中, W_0 为混凝土材料无损状态的应变能密度, 如图 1 所示, 对于混凝土单轴受拉或受压的应力状态, W_0 为

$$W_0 = E_0 \varepsilon^2 / 2 \quad (3)$$

其中, E_0 混凝土材料的弹性模量; ε 为混凝土材料的应变; 而 ΔW_ε 表示混凝土无损状态的应变能密度 W_0 与混凝土损伤状态的应变能密度 W_ε 之

差, 即

$$\Delta W_\varepsilon = W_0 - W_\varepsilon \quad (4)$$

而

$$W_\varepsilon = \int \sigma d\varepsilon = \int f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

式中, W_ε 为应变能密度, 在无精确函数 $f(\varepsilon)$ 条件下, 可对 W_ε 的计算进行线性简化, 即 $W_\varepsilon = \sigma \varepsilon / 2$; σ 为混凝土材料应力。

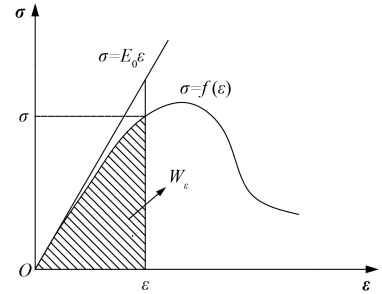


图 1 Najjar 材料损伤模型

Fig. 1 The damage model of Najjar material

将公式 (3)、(5) 代入公式 (2), 则损伤变量 D 可改写为

$$D = 1 - \frac{2 \int f(\varepsilon) d\varepsilon}{E_0 \varepsilon^2} \quad (6)$$

根据上式 (6) 以及图 1 可知, 损伤变量 D 随着混凝土应变的增大不断增加, 对于无损混凝土材料, $\varepsilon=0$, $D=0$; 对于损伤混凝土材料, $\varepsilon>0$, $0<D<1$; 极限状态条件下, ε 达到极限应变, $D \rightarrow 1$, 混凝土材料产生破坏。因此, 若已知混凝土材料的全应力-应变曲线, 则可描述混凝土损伤随应变的非线性变化规律, 进而预测混凝土的损伤演化及发展情况。

2 工程应用

2.1 工程概况

二郎山 1#滑坡位于四川省天全县二郎山东坡龙胆溪右岸, 国道 318 线 K2730+500~K2731+010 处。二郎山 1#滑坡治理工程自 2001 年 12 月以其主体工程完工为标志起, 已安全运营多年。该工程作为在极其不利条件下实施的重大工程, 经各种致灾因素的不断作用与破坏, 仍然确保了该特大型滑坡区域内公路的运营与安全, 对川西和西藏自治区交通及基础设施建设起到了重要作用。

二郎山 1#滑坡地形较陡, 平均坡度约 43° , 地

貌分区属龙门山中、高山区。滑坡区前缘海拔为 1895 m，后缘海拔为 2008 m。龙胆溪水流量大、流速快，自西向东冲刷坡脚，产生强烈的切割作用。滑坡区属二郎山主干断裂带，该主干断裂带总体走向为北东，倾向北西，是龙门山中央断裂带的南西段延伸部分，其性质为压扭性逆冲断层，在剖面上呈叠瓦状构造。区内新构造运动以强烈上升为主，且该区地震活动较频繁，地震烈度为 8 度。组成坡体的主要地层是志留系罗惹坪组下段钙质泥岩，其次是冲洪坡积物和崩坡积物^[26]。

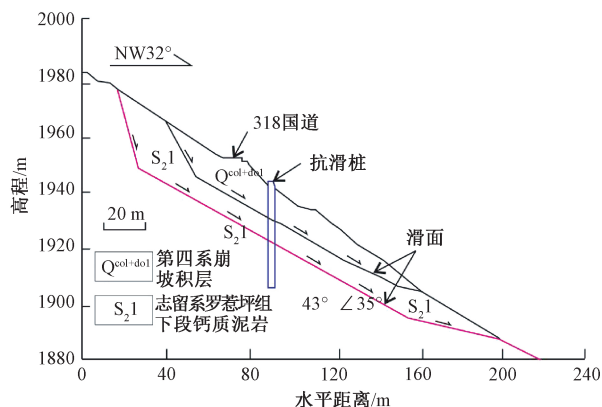


图 2 二郎山 1#滑坡工程地质剖面

Fig. 2 Geological profile map of 1# landslide in Erlang Mountain

2011 年，该特大型滑坡在自然因素和人类工程不断侵扰条件下，首次发现滑坡异常，因该滑坡工程是二郎山目前最险要区段的重点要塞工程，因此对其进行保养与维护是川藏公路的重要手段。自 2011 年滑坡出现异常后，至今组织多次现场调研，发现在 1#滑坡 A2 段 1#~20#桩背处显现一条比正常调整缝既深又宽的裂缝，主要位于 K2730+746~K2730+862 里程内的公路外侧附近。即 1#锚索抗滑桩~20#锚索抗滑桩之间，其中尤以 3#~17#桩间更为突出。主要表现在：1#~20#桩的桩背处呈现一贯通裂缝，该裂缝距公路外缘水平距离 10.5 m，裂缝最宽超过 30 cm，裂缝可见最深深度 5 m 左右，如图 3 所示。缝面平滑而陡倾（约 70°），倾向河侧。变形形迹目前局限于裂缝加宽这一种形式，其他均没有明显的变形现象，包括公路路面及公路以下与裂缝间的坡面都完好无损。

经现场调研与工程经验总结分析，得出裂缝出现及加宽的主要原因有以下几点：

(1) 抗滑桩中部分锚索锚头损坏，导致锚索功能降低或完全失效，从而使抗滑桩桩顶应有的约束力丧失，导致桩顶位移增加。



图 3 二郎山 1#滑坡 1#~20#桩后深长裂缝

Fig. 3 Long and deep crack at the back of 1#~20# piles of 1# Landslide in Erlang Mountain

(2) 二郎山 1#滑坡规模巨大，地处高山峡谷区，地质条件复杂，受地震、强降雨、车辆动力荷载作用以及材料劣化等因素影响，长期服役的滑坡治理工程随时间其性能、功能不断降低，致使滑坡的长期稳定性降。

(3) 二郎山 1#滑坡滑体深厚，所设抗滑桩较长，最长达 67.3 m，且桩外侧临空面高陡，给桩顶位移变形提供了便利。

总而言之，二郎山 1#滑坡抗滑桩产生深长后缘裂缝的根本原因在于滑坡推力的增加与抗滑桩

桩体的劣化, 其本质为由长期滑坡荷载引起的桩体损伤, 进而诱发的桩顶大变形。

2.2 抗滑桩混凝土材料损伤因子计算

基于文中建立的损伤因子, 以文献 [27] 提供的混凝土受拉与受压应力-应变本构方程为基础, 计算混凝土损伤因子, 描述其损伤演变过程。

对于单轴受拉的混凝土材料, 其应力-应变表达式如下^[27]:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^3 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $x = \varepsilon / \varepsilon_t$, $y = \sigma / f_t$, f_t 为峰值拉应力; ε_t 为峰值拉应力对应的应变; α_t 数值详见文献 [27]。

对于单轴受压的混凝土材料, 其应力-应变表

达式如下^[27]:

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\alpha_d (x - 1)^2 + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $x = \varepsilon / \varepsilon_c$, $y = \sigma / f_c$, f_c 为峰值压应力; ε_c 为峰值压应力对应的应变; α_a 、 α_d 数值详见文献 [27]。

按照上式 (7) 与式 (8) 计算获得的混凝土受拉与受压应力-应变关系曲线如图 4 所示。根据式 (6) 可计算不同标号混凝土损伤因子随应变增量的关系, 由于本工程的抗滑桩混凝土标号为 C30, 因此, 仅计算此标号下混凝土受拉、受压损伤因子, 如图 5 所示。

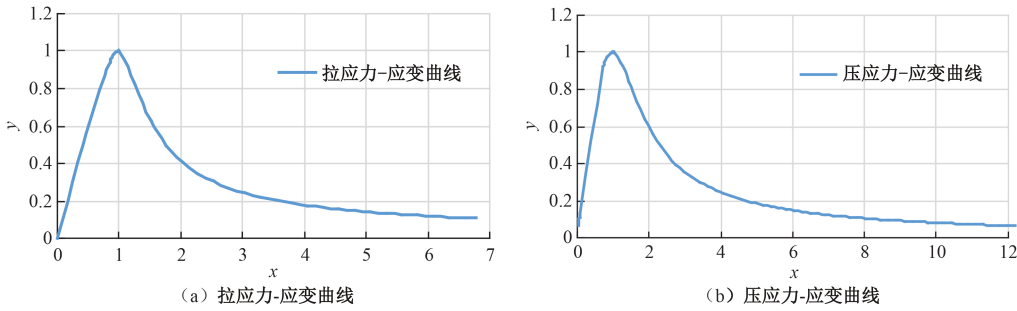


图 4 C30 混凝土应力-应变曲线
Fig. 4 Stress curves with strain for C30 concrete

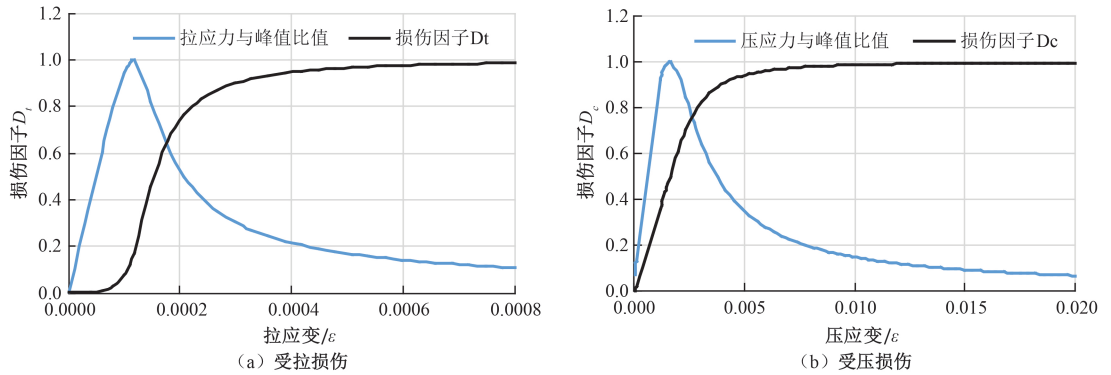


图 5 C30 混凝土损伤因子与应力随应变变化规律
Fig. 5 Laws of damage factor and stress with strain for C30 concrete

为了便于对比研究, 将混凝土受拉、受压的应力与损伤因子放在同一框图中, 计算 C30 混凝土损伤因子, 如图 5 所示, 以混凝土拉 (压) 应变为横坐标, 损伤因子以及混凝土的拉 (压) 应力与其峰值的比值为纵坐标。对于受拉损伤, 损伤因子曲线近似为“S”形, 呈现出缓慢增加再极速增大然后缓慢增加趋近于 1 的规律。当混凝土拉

应力达到峰值时, 损伤因子仅为 0.17, 此时混凝土未产生拉破坏。当混凝土拉应变达到 0.0002 时, 混凝土的抗拉强度降低到峰值的 50%, 损伤因子接近 0.8, 此时可认为混凝土受拉破坏。对于受压损伤, 损伤因子呈现出线性增长然后缓慢增加趋近于 1 的变化规律。当混凝土达到峰值压应力时, 损伤因子约为 0.5, 因此, 当混凝土损伤因子在

0.5 以下,混凝土未达到峰值强度,可以判定混凝土未产生受压破坏。由以上可见,通过损伤因子可以将混凝土微观损伤与宏观应变联系起来,更加直观地描述混凝土受拉(压)力学状态与损伤演化的关系,因此,损伤因子的引入可以更好地预测混凝土拉破坏与压破坏过程。

2.3 抗滑桩弹塑性损伤模拟及分析

2.3.1 模拟方法

在现阶段研究中,Abaqus/CAE 大型有限元程序常应用于分析混凝土构件损伤演化及破坏过程^[28-29]。可将文中提出的混凝土损伤模型嵌入到Abaqus/CAE 程序自带的混凝土塑性损伤本构模型中,借以模拟二郎山 1#滑坡治理工程抗滑桩损伤演化情况。为了便于探讨抗滑桩桩体的损伤,文中仅对 K2730+746~K2730+862 里程公路外侧桩顶变形较为严重的 5#桩进行模拟。该桩长 50 m,自由段长 30 m,嵌固段长 20 m,桩截面面积为 2 m×

3.5 m,模拟中将嵌固端考虑为完全固定边界条件,自由段考虑为简支梁进行模拟分析。

通过滑坡稳定性计算可以得出,5#抗滑桩所承担的下滑力约为 1000 kN/m,桩间距为 6 m,受荷段为抗滑桩自由段,将作用于抗滑桩的下滑力假定为三角形分布荷载^[30],则滑面处的最大压力为 400 kPa。

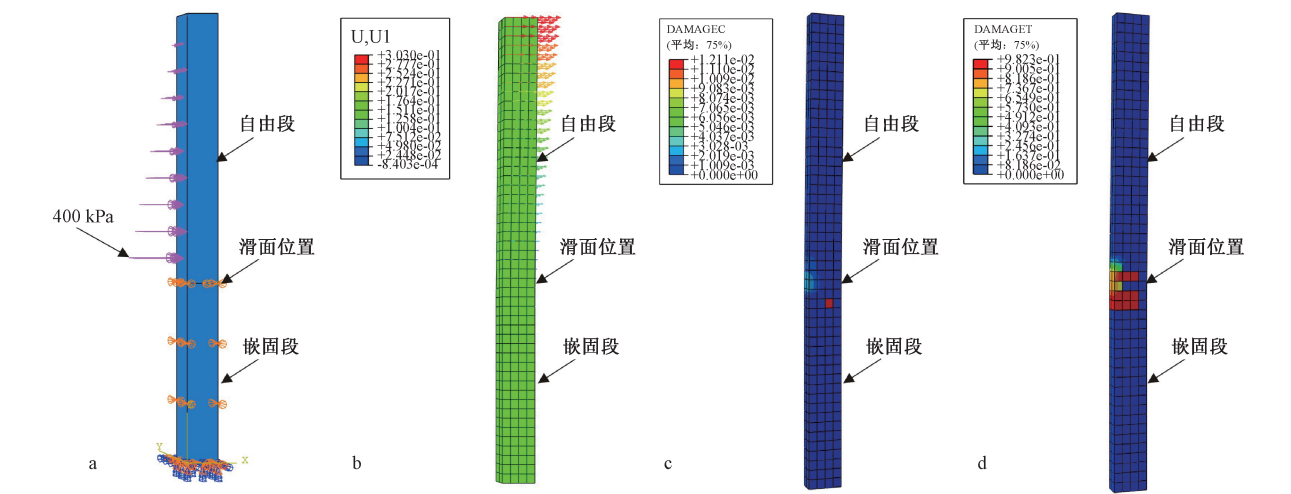
抗滑桩为钢筋混凝土材料,其中混凝土材料采用八节点减缩积分实体单元(C3D8R),箍筋采用三维桁架线性单元(T3D2),只考虑轴力,不考虑剪力和弯矩作用。纵筋采用三维减缩面单元(SFM3D4R),实体均采用 1.0 m 网格密度。抗滑桩实体模型如图 6a 所示,其中包含边界条件与荷载。

将图 5 混凝土拉压损伤因子随应变的变化曲线与表 1 中的模拟参数嵌入至 Abaqus/CAE 程序自带的混凝土塑性损伤本构模型中,初步获得如图 6b—6d 所示的模拟结果。

表 1 抗滑桩混凝土模拟参数

Table 1 Simulation parameters of concrete in the anti-slide pile

弹性模量 E_0 / MPa	泊松比 ν	膨胀角 $\theta/ (^{\circ})$	流动势偏移量 ξ	抗压强度与抗拉强度 比值 f_{b0}/f_{c0}	不变量应力比 K	粘性参数
2.648×10^4	0.167	30	0.1	1.16	2/3	0.0005



a—抗滑桩模型、边界条件与荷载;b—桩身水平位移;c—抗滑桩压损伤分布;d—抗滑桩拉损伤分布

图 6 抗滑桩模型及模拟结果

Fig. 6 Simulation model and results of the anti-slide pile

2.3.2 结果分析

桩身水平位移由滑面位置向桩顶位置依次增大,桩顶位置产生位移最大,为 30.3 cm (图 6b)。2012 年 3 月 27 日,现场调查发现,1#~20#抗滑桩桩后裂缝扩展至 20.5 cm,2012 年 10 月 12 日,再

次现场调研数据显示,桩后裂缝已发展至 31.5 cm,此后,现场多次调研发现,桩后裂缝基本稳定,这与文中的模拟结果较为吻合。对于二郎山 1#滑坡治理工程,在抗滑桩几何尺寸一定的条件下,抗滑桩桩顶位移增加的因素有滑坡推力增大与桩

身材料强度劣化。抗滑桩桩身材料是钢筋和混凝土, 抗滑桩埋于地下, 桩身材料强度劣化主要受土体腐蚀和水腐蚀作用。二郎山 1#滑坡抗滑桩基本处于高位状态, 同时滑坡地表水及地下水不发育, 大量学者研究表明^[31-32], 在水不发育的土体中, 钢筋混凝土材料的强度劣化是可以忽略不计的。由此表明, 导致二郎山 1#滑坡抗滑桩产生大变形的直接原因为滑坡推力的增大, 初步分析是滑面参数的劣化与雅安地震的动力荷载。

受压损伤部位主要在滑面附近 (图 6c), 集中在滑面以上 4 m (桩长 27~30 m) 及滑面以下 1 m (桩长 31 m) 范围内, 其中滑面以上 4 m 位置损伤值较小, 范围为 0~0.007065, 滑面以下 1 m 位置 (桩长 31 m 位置) 损伤值较大, 范围为 0.00908~0.01211。最大受压损伤值为 0.01211, 损伤部位为桩长 31 m 位置, 并处在滑动方向桩截面 3/4 位置。对比图 5b 可以发现, 当抗滑桩最大受压损伤达到 0.01211 时, 对应的压应变为 5.8×10^{-5} , 远远达不到初始屈服时对应的极限应变 1.6×10^{-3} , 由此可知, 抗滑桩在产生大位移过程中受压损伤较小, 桩身未发生压破坏。

受拉损伤部位同样在滑面附近 (图 6d), 集中在滑面以上 4 m (桩长 27~30 m) 及滑面以下 1 m (桩长 31 m) 范围内, 其中桩长 27 m 位置损伤值较小, 范围为 0~0.573, 桩长 28~31 m 位置损伤值较大, 范围为 0.6549~0.9823, 也是受拉损伤较为严重的部位。对比图 5a 可以发现, 当抗滑桩混凝土达到极限应变 1.18×10^{-4} 时, 对应的损伤值为 0.1692, 而从图 6d 抗滑桩受拉损伤分布可以发现, 桩长 27~31 m 位置均产生了拉损伤, 并超过了初始屈服极限应变, 产生了拉破坏。在桩长 27 m 与桩长 29 m 位置, 拉破坏区域占截面面积的 1/4, 而在桩长 28 m、桩长 30 m 以及桩长 31 m 位置, 拉破坏区域均达到截面面积的 3/4。由此可见, 抗滑桩在产生大位移过程中靠近滑坡一侧滑面位置的拉损伤较为严重, 并产生了拉破坏, 是抗滑桩工程后期修复亟需关注的位置。

3 结论

文章从能量损失角度建立了抗滑桩受拉、压荷载作用下的混凝土损伤模型, 并将该损伤模型嵌入至 Abaqus/CAE 模拟程序自带的混凝土塑性损

伤模型中, 分析了二郎山 1#滑坡抗滑桩损伤情况, 得出以下几点结论:

(1) 采用文中构建的拉、压损伤模型模拟得出的桩顶水平位移为 30.3 cm, 与现场观测的桩后裂缝宽度数据相吻合, 得出滑坡推力增大是导致二郎山 1#滑坡抗滑桩产生大变形的直接原因;

(2) 抗滑桩在产生大位移过程中最大受压损伤值为 0.01211, 桩身未发生压破坏;

(3) 抗滑桩在产生大位移过程中靠近滑坡一侧滑面位置的拉损伤较为严重, 并产生了拉破坏, 损伤区域达到截面面积的 3/4, 是抗滑桩工程后期修复亟需关注的位置。

参考文献/References

- [1] DOUGILL J W. On stable progressively fracturing solids [J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP, 1976, 27 (4): 423-437.
- [2] LEMAITRE J. Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1985, 51 (1-3): 31-49.
- [3] MAZARS J. A description of micro- and macroscale damage of concrete structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25 (5-6): 729-737.
- [4] JU J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25 (7): 803-833.
- [5] YAZDANI S, SCHREYER H L. Combined plasticity and damage mechanics model for plain concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116 (7): 1435-1450.
- [6] LUBARDA V A, KRAJCINOVIC D, MASTILOVIC S. Damage model for brittle elastic solids with unequal tensile and compressive strengths [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1994, 49 (5): 681-697.
- [7] FARIA R, OLIVER J, CERVERA M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35 (14): 1533-1558.
- [8] 李杰, 吴建营. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I: 基本公式 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (9): 14-20.
LI Jie, WU Jianying. Elastoplastic damage constitutive model for concrete based on damage energy release rates, part I: basic formulations [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (9): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴建营, 李杰. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 II: 数值计算和试验验证 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (9): 21-27.
WU Jianying, LI Jie. Elastoplastic damage constitutive model for

- concrete based on damage energy release rates, part II: numerical algorithm and verifications [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (9): 21-27. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张其云. 混凝土随机损伤本构关系研究 [D]. 上海: 同济大学, 2001.
- ZHANG Qiyun. Stochastic damage mechanics for concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2001. (in Chinese)
- [11] 李杰, 任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 20-29.
- LI Jie, REN Xiaodan. Recent developments on stochastic damage mechanics for concrete [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (4): 20-29. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李杰, 杨卫忠. 混凝土弹塑性随机损伤本构关系研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (2): 31-38.
- LI Jie, YANG Weizhong. Elastoplastic stochastic damage constitutive law for concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (2): 31-38. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王中强, 余志武. 基于能量损失的混凝土损伤模型 [J]. 建筑材料学报, 2004, 7 (4): 365-369.
- WANG Zhongqiang, YU Zhiwu. Concrete damage model based on energy loss [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7 (4): 365-369. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张战廷, 刘宇峰. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型 [J]. 建筑结构, 2011, 41 (S2): 229-231.
- ZHANG Zhanting, LIU Yufeng. Concrete damaged plasticity model in ABAQUS [J]. Building Structure, 2011, 41 (S2): 229-231. (in Chinese with English abstract)
- [15] 秦浩, 赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究 [J]. 结构工程师, 2013, 29 (6): 27-32.
- QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model [J]. Structural Engineers, 2013, 29 (6): 27-32. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
- ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Building Structure, 2008, 38 (8): 127-130. (in Chinese with English abstract)
- [17] 崔钦淑, 倪振强. 基于 ABAQUS 软件的 RC Z 形柱框架节点仿真分析 [J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44 (2): 212-215.
- CUI Qinshu, NI Zhenqiang. ABAQUS-based modeling analysis for the frame joints of RC Z-shaped columns [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44 (2): 212-215. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郑毅敏, 段星宇. 基于 ABAQUS 损伤塑性模型的越层柱抗震性能研究 [J]. 结构工程师, 2014, 30 (1): 93-100.
- ZHENG Yimin, DUAN Xingyu. Seismic performance analysis of skip-floor column based on damaged plasticity model of ABAQUS [J]. Structural Engineers, 2014, 30 (1): 93-100. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杜国锋, 别雪梦. 考虑混凝土损伤塑性的 CFST 柱轴压力学性能数值模拟 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2016, 32 (3): 444-452.
- DU Guofeng, BIE Xuemeng. Numerical simulation of axial compression mechanical behavior of CFST column with concrete damaged plasticity [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32 (3): 444-452. (in Chinese with English abstract)
- [20] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究 [J]. 工程力学, 2013, 30 (4): 59-67, 82.
- NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (4): 59-67, 82. (in Chinese with English abstract)
- [21] 尧国皇, 黄用军, 宋宝东, 等. 采用塑性损伤模型分析钢-混凝土组合构件的静力性能 [J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11 (3): 12-18.
- YAO Guohuang, HUANG Yongjun, SONG Baodong, et al. Analysis for static behaviour of steel and concrete composite members with plastic-damage model [J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11 (3): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [22] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- China Academy of Building Research. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [23] 陆春华. 钢筋混凝土受弯构件开裂性能及耐久性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LU Chunhua. Flexural and durability performance of RC members with transverse cracks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] 余寿文. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- YU Shouwen. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [25] KRAJCINOVIC D, LEMAITRE J. Continuum damage mechanics theory and application [M]. New York: Springer-Verlag, 1987: 233-294.
- [26] 刘小丽, 周德培. 川藏公路二郎山龙胆溪滑坡滑动机理与整治 [J]. 山地学报, 2002, 20 (6): 743-747.
- LIU Xiaoli, ZHOU Depei. The sliding mechanism and treatment measure of Longdanxi Landslide in Erlang Mountain [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20 (6): 743-747. (in Chinese with English abstract)

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures；GB 50010-2010 [S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2011. (in Chinese)

[28] 秦伟，翁其能. 承高水压山岭隧道混凝土衬砌渗透损伤机理与模型研究 [J]. 材料导报，2016，30 （ 24 ）： 152-156，162.
QIN Wei，WENG Qineng. Modeling and researching on damage mechanism and penetrability of concrete structure subjected to high hydraulic pressure [J]. Materials Review，2016，30 （ 24 ）： 152-156，162. (in Chinese with English abstract)

[29] 黄正，吕志涛，涂永明. 基于扰动应力场模型的 ABAQUS 二次开发及其与塑性损伤模型的比较 [J]. 土木工程学报，2016，49 （ 5 ）： 40-49.
HUANG Zheng，LV Zhitao，TU Yongming. Secondary development of ABAQUS based on disturbed stress field model (DSFM) and its comparison with damage plasticity model [J]. China Civil Engineering Journal，2016，49 （ 5 ）： 40-49. (in Chinese with English abstract)

[30] 蒋忠信. 震后山地地质灾害治理工程设计概要 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2015.
JIANG Zhongxin. Summary of engineering design of mountain geological disaster management after earthquake [M]. Chengdu：Southwest Jiaotong University Press，2015. (in Chinese)

[31] 曹双寅. 受腐蚀混凝土的损伤机理 [J]. 混凝土，1990，（ 2 ）： 2-5.
CAO Shuangyan. Damage mechanism of corroded concrete [J]. Concrete，1990，（ 2 ）： 2-5. (in Chinese)

[32] 安新正，易成，姜新佩，等. 基础混凝土构件腐蚀损伤研究 [J]. 河北工程大学学报（自然科学版），2011，28 （ 4 ）： 14-17，29.
AN Xinzheng，YI Cheng，JIANG Xinpei，et al. Research on corrosion damage of foundation reinforced concrete members in geotechnical environment [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)，2011，28 （ 4 ）： 14-17，29. (in Chinese with English abstract)