

浅埋大跨矩形隧道多因素扰动下受力及变形特征研究

张 佳, 孔情情

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 依托G98环岛高速公路三亚崖州湾科技城隧道工程,通过数值仿真分析方法,研究了浅埋大跨矩形隧道在典型外部多因素扰动作用下隧道结构的受力和变形机制。数值模型考虑了隧道顶部覆土荷载突变、地质软硬互层、后期施工扰动、隧道上部车行荷载等因素;采用弹塑性损伤本构模型模拟混凝土在极端不利荷载作用下的损伤发展过程。基于数值分析结果,系统地分析了隧道结构的应力分布状态、隧道变形模式以及典型外荷载作用下结构损伤演化过程。

关键词: 浅埋大跨;矩形隧道;多因素扰动;数值仿真;损伤演化

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0222-06

Research on Stress and Deformation Characteristics of Shallow-buried Long-span Rectangular Tunnels under Multi-factor Disturbances

ZHANG Jia, KONG Qingqing

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Relying on the G98 Ring Expressway Sanya Yazhou Bay Science and Technology City Tunnel Project, by means of numerical simulation, the stress and deformation mechanisms of a shallow-buried long-span rectangular tunnel under the disturbance of multiple typical external factors are studied. The numerical model takes into account the sudden change of overburden load above the tunnel, alternating soft and hard geological layers, as well as potential subsequent construction disturbance and vehicle load on the tunnel roof. An elastoplastic damage constitutive model is adopted to simulate the damage evolution process of concrete under typical extreme adverse loads. Based on the numerical analysis results, the stress distribution, deformation mode and damage evolution process of the tunnel structure under typical external loads are systematically analyzed.

Keywords: shallow-buried long-span; rectangular tunnel; multi-factor disturbance; numerical simulation; damage evolution

1 引 言

浅埋大跨矩形隧道因其自身特点,目前已在我国城市公路建设领域中如火如荼发展。在工程建设中,受隧道顶部覆土荷载突变、地质软硬互层以及后期易受施工扰动、隧道上部车行荷载等影响,常产生结构损伤累积效应。对于大跨度隧道的稳定性研究,往往是在有限元模拟分析后对结果进行一定程度的修正。有限元分析软件能够模拟大跨度隧道结构在各种典型荷载作用下的结构应力、变形情况,并可以定量分析结构损伤累积过程,从而起到保障结

构安全以及预防破坏的作用。因此,对于复杂地层条件下的浅埋大跨隧道,研究其在外部扰动下的变形破坏特征具有重要意义。

目前,已有部分学者对隧道的变形及受力特征进行了研究。马艺虎等^[1]依托象君山隧道工程,通过现场试验,分析了断层破碎带及附近不同等级围岩断面开挖引起的隧道变形和受力特征。罗浪^[2]对浅埋暗挖大断面矩形隧道施工中地面变形规律与优化措施进行了探讨。张俊儒等^[3]针对大跨度公路隧道在软弱土质地层施工中开挖面的稳定性问题进行了相关研究。梁庆国^[4]等结合该富水黄土隧道围岩变形特征现场监测与对比分析,探讨了帷幕注浆加固效果。汪勤民^[5]以公路隧道主洞与车行横通道交叉结构为研究对象,基于有限元数值方法建立了交

收稿日期: 2026-03-02

作者简介: 张佳(1982—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。

叉结构计算模型,模拟分析了交叉部位受力变形特征及支护结构加固效果。胡儒政等^[6]研究了隧道穿越超浅埋崩坡积体偏压地层时开挖过程对隧道结构和围岩变形的影响。张玉石^[7]、王科^[8]采用数值分析方法,模拟双侧壁导坑法开挖时有、无注浆加固的工况,对比分析围岩的变形、应力和塑性区分布特征。刘维^[9]等对浅埋条件下矩形隧道顶管法施工中因支护压力波动极易诱发掘进面被动失稳情况进行了分析。毕志刚^[10]等以义东高速防军隧道为工程背景,基于有限元软件建立三维模型并分析其空间效应,研究了隧道围岩位移场和应力场演化特征与规律。许桂生^[11]基于 ABAQUS 软件建立桥隧三维数值计算模型,得到大跨浅埋暗挖公路隧道施工对地层、桥梁桩基变形的影响规律,分析加固措施对隧道施工安全的控制效果。周刚^[12]研究了行车荷载作用下新建矩形隧道下穿既有高速公路隧道结构力学响应特性。姚志雄^[13]等分析了车载作用下浅埋群洞隧道动力响应。黄光强^[14]、杨宗桦^[15]探讨了复杂交通荷载组合作用下浅埋矩形隧道结构动力响应特征。

综上所述,对于隧道变形特征的研究,尽管大部分学者已开展了相关研究,但仍需结合具体工程特点,提出契合工程实际的变形控制措施。为此,本文以 G98 环岛高速公路三亚崖州湾科技城隧道工程为对象,研究隧道在外部典型因素扰动作用下隧道结构的受力和变形机制,并利用数值模拟手段分析结构的变形特征,为今后类似工程的施工提供借鉴与技术参考。

2 工程背景

G98 环岛高速公路三亚崖州湾科技城改建工程位于三亚市崖州区,起点位于 G98 环岛高速公路崖城互通东侧,终点位于宁远河大桥东侧,工程路线全长约 6.365 km,主要建设内容包括特长隧道 1 条、互通式立体交叉 1 处、隧道管理所 1 处等,特长隧道穿越三亚崖州湾科技城核心区。主隧道——科技城隧道(如图 1 所示)位于科技城崖城互通与宁远河大桥之间,隧道建设长度 3 930 m,洞内长度 3 090 m,整体宽度 36 m,净高 5 m,符合高速公路双向四车道标准。

3 数值模拟

本文通过数值仿真研究了浅埋大跨矩形隧道在外部典型因素扰动作用下隧道结构的受力和变形机



图 1 科技城隧道

制。数值模拟过程为:首先根据设计隧道尺寸,采用 AutoCAD 软件绘制出隧道剖面平面图,然后将其导入 ABAQUS 有限元软件中,沿 z 轴方向拉伸,得到初始状态下的 3D 隧道模型,如图 2 所示。

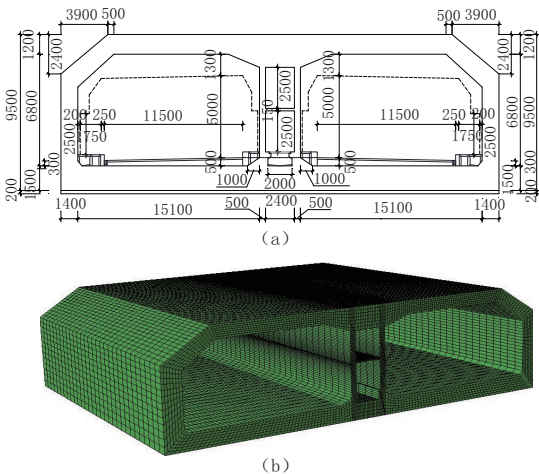


图 2 隧道尺寸及模型图

3.1 有限元模型

数值计算采用 ABAQUS 进行,该软件具有较强的力学分析能力,可模拟混凝土的多种破坏模式以及多种损伤准则。基于有限元方法,利用 ABAQUS 软件提供的相关计算模块,可以实现对隧道结构的分析,并且可对荷载施加条件、边界约束和加载方式进行设置,以确定研究对象在不同情况下的力学响应。混凝土本构模型选用 CDP 模型,利用实体单元对衬砌进行模拟,模型中单元类型为 C3D8R 三维应力单元。力学边界为上部边界自由,为避免应力集中,将底部桩基础模拟为在底部的面上约束,即边界除底面中心为固定位移约束外其余均为 y 方向位移约束。数值模拟中将初期支护与二次支护视为整体衬砌结构。隧道衬砌按均值弹塑性材料考虑,混凝土单轴受力下的应力—应变曲线如图 3 所示。

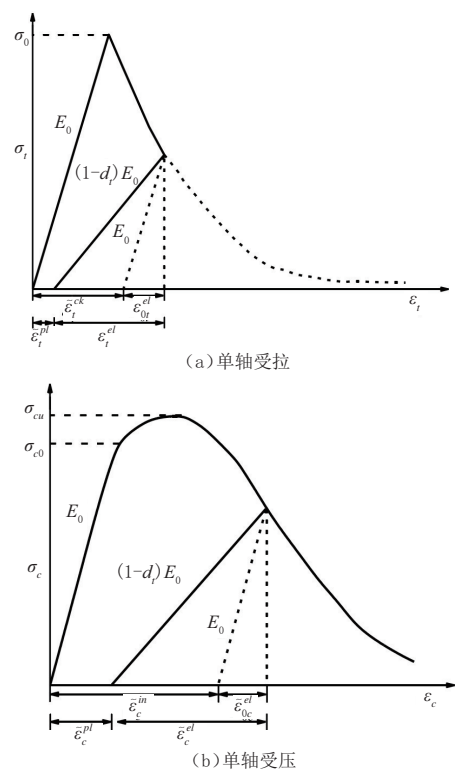


图3 混凝土单轴受力下应力-应变曲线

其混凝土单轴受压以及单轴受拉本构模型根据如下公式计算所得。

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \tag{2}$$

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E_c} \tag{3}$$

$$\varepsilon^{pl} = b_c * \varepsilon^{in} \tag{4}$$

$$D_c = 1 - \frac{\sigma_{true}/E_c}{\varepsilon^{pl}(1/b_c - 1) + \sigma_c/E_c} \tag{5}$$

式中: σ_{true} 为真实应力,MPa; ε_{true} 为真实应变; ε^{in} 为非弹性应变; ε^{pl} 为塑性应变; D_c 为压缩损伤因子; D_t 为拉伸损伤因子; d_c 为混凝土规范中的压缩损伤因子; d_t 为混凝土规范中的拉伸损伤因子; σ 、 ε 为工程应变,即名义应变。衬砌参数如表1所示。

表1 衬砌参数设置

材料	密度 / (10 ³ kg·m ⁻³)	弹性模量 / GPa	泊松比	膨胀角 / (°)
衬砌	2.50	31.50	0.2	30

3.2 计算工况

本次数值仿真目的在于研究浅埋大跨矩形隧道在外部典型因素扰动作用下隧道结构的受力和变形机制。因此考虑了隧道顶部覆土荷载突变、地质软硬互层以及后期易受施工扰动、隧道上部车行荷载等问题。覆土荷载中上部荷载采用表面荷载进行模拟;覆土侧压力采用压强并设置解析场中的表达式

进行模拟,以达到侧压力向下递增的效果;地质软硬互层以及后期易受施工扰动采用局部表面荷载进行模拟;隧道上部车行荷载同样采用表面荷载进行模拟;行车荷载采用恒载方式模拟,即选取隧道上方8 m宽度沿隧道延伸方向贯穿隧道上表面两侧进行布置荷载。其具体工况如表2所示。

表2 计算工况

工况	局部荷载作用位置(面)	局部荷载大小 /N	模型
覆土	—	-25 000	
S3	Surf-3	-25 000	
S4	Surf-4	-25 000	
S5	Surf-5	-25 000	
S6	Surf-road	-25 000×2	

4 结果分析

基于以上说明,利用ABAQUS设置多种工况,对不同工况下的衬砌结构应力状态、变形特征、损伤破坏进行如下分析。

4.1 无局部荷载的模型分析

为探究隧道结构在外部荷载作用下的受力和变形机制,首先在常规状态下,即隧道仅承受覆土压力时,对其所受的土压力进行模拟,受力分析结果如图4(a)和(b)所示。结果表明,隧道在常规状态下,最大主应力发生在连拱上表面和两侧矩形隧道拱顶内表面,最大值为2.20 MPa。同时,两侧矩形隧道拱肩转角处内表面集中受压,最大压应力为4.19 MPa。

隧道受土压力变形分析结果如图5(a)和(b)所示。由图可知,在常规状态下,右侧矩形隧道水平位

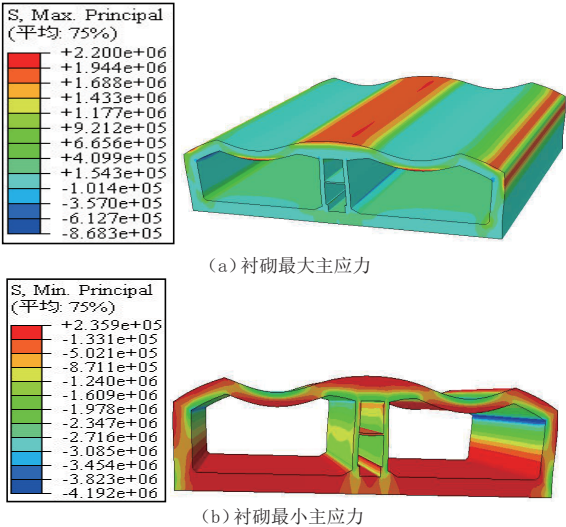


图4 隧道衬砌应力分布云图

移较小,最大值为0.88 mm;两侧矩形隧道拱顶处竖向位移较大,最大值为2.75 mm。由此可见,覆土压力对于隧道的竖向影响较大,水平位移影响较小。

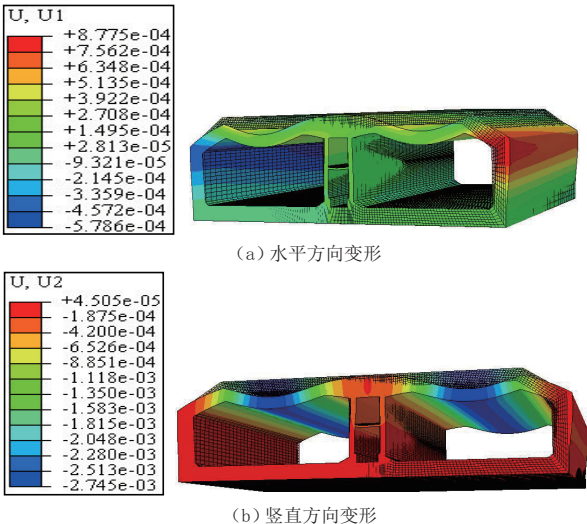


图5 隧道衬砌变形分布云图

隧道衬砌破坏云图如图6(a)和(b)所示。由图中可知,在常规状态下,隧道衬砌并未发生受压破坏,但出现轻微的受拉破坏,破坏部位位于左侧矩形隧道拱顶进口内边缘处。

4.2 施加局部荷载的模型分析

由于隧道上方存在后期施工扰动、公路运营等不确定因素,因此模拟局部荷载,分析其对隧道受力和变形的影响。本次数值模拟设置局部荷载大小相同、作用于矩形隧道不同上表面位置的几种工况,用以对比不同位置的局部荷载对隧道受力和变形的影响,具体如表3所示。由表中可知,当作用局部荷载在隧道上表面时,最大主应力在作用面附近相对集中。与常规状态下的隧道受力变形相比,两侧矩形隧道拱肩转角处内表面同样集中受压。当局部荷

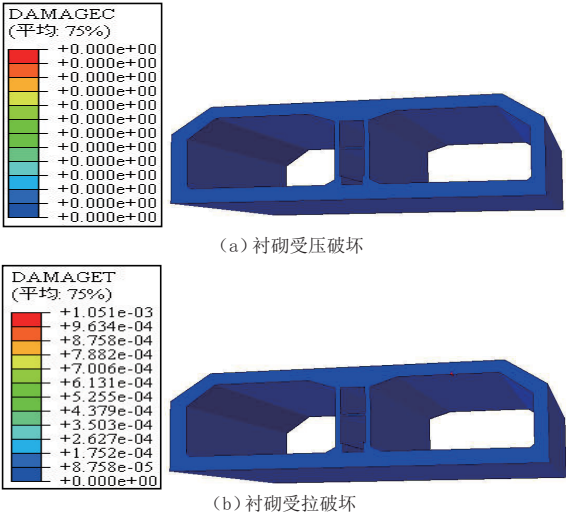


图6 隧道衬砌破坏分布云图

载施加不对称时(如S3、S5工况),作用面附近最大主应力分布较多,集中受压相对明显;隧道在偏向于局部荷载作用的一侧发生较大的水平与竖直方向变形,且发生较大的受拉破坏。破坏从连拱上表面及局部荷载作用侧隧道的拱顶内表面和拱肩外表面沿隧道轴线方向延伸,并发生轻微受压破坏。当局部荷载施加对称时(如S4工况),作用面附近集中受压较小,与常规状态下的隧道受压情况相近;隧道水平与竖直变形都较为对称,矩形隧道拱顶下表面发生轻微受拉破坏,且破坏位置相对对称,同样发生轻微受压破坏。

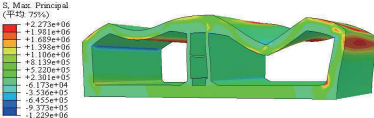
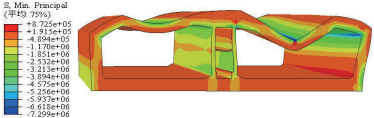
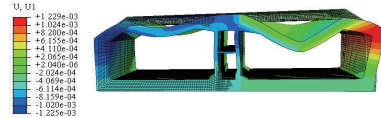
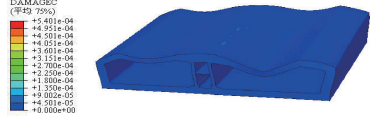
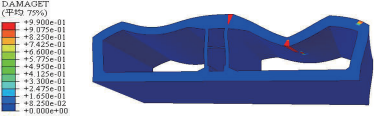
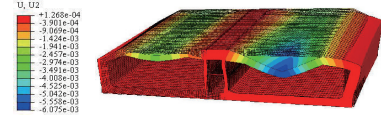
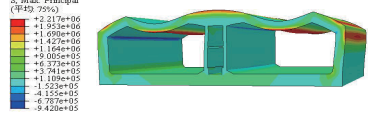
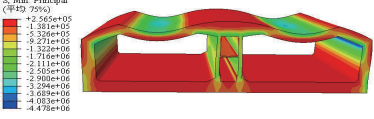
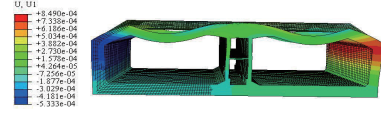
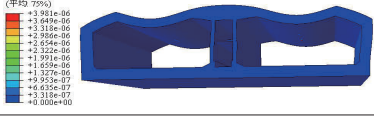
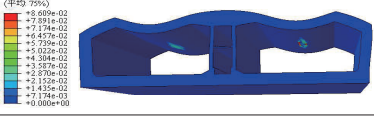
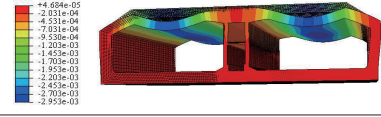
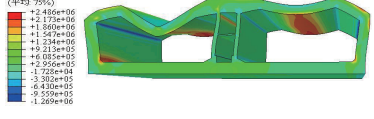
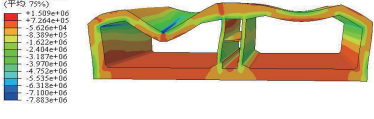
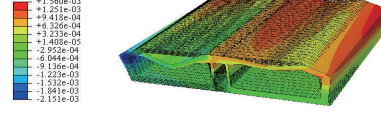
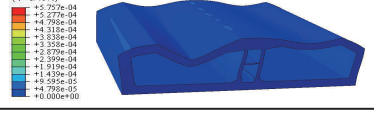
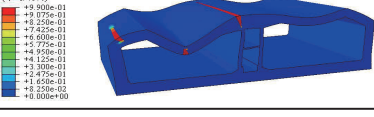
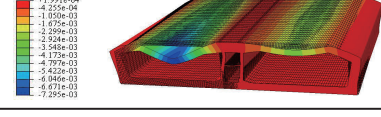
4.3 不同覆土高度的模型分析

隧道作为一项隐蔽性工程具有较大的不确定性,除了上部局部荷载的作用外,由于地质条件复杂,实际工程隧道开挖过程中,不能保证其上部覆土高度一致。因此,本文采用数值模拟方法,将不同覆土压力等效为隧道上表面的压强,分别模拟了1、1.5、2 m覆土高度,进而探讨覆土高度对隧道结构受力及变形的影响,具体数据如图7所示。从图可知,随着覆土高度的增加,最大主应力、最大压应力以及水平、竖直方向位移均逐渐增加。衬砌未发生受压破坏,但覆土高度为2 m时,出现了轻微的受压破坏。

4.4 隧道行车荷载模拟

隧道在修建过程中,其上方车辆行驶在道路表面对地面及以下地层产生行车荷载。本文行车荷载采用恒载方式模拟,即选取隧道上方8 m宽度沿隧道延伸方向贯穿隧道上表面两侧进行布置荷载,荷载类型为表面荷载,荷载取值为25 000 N。具体施加位置如图8所示。

表3 不同位置局部荷载云图表

工况	主应力 Max	主应力 Min	水平变形
S3	 S, Max, Principal (平均 75%) +2.272e+06 +1.981e+06 +1.682e+06 +1.385e+06 +1.088e+06 +7.91e+05 +4.93e+05 +1.95e+05 -1.03e+05 -4.01e+05 -7.97e+05 -1.122e+06	 S, Min, Principal (平均 75%) +5.722e+05 +1.815e+05 -4.804e+05 -1.170e+06 -1.851e+06 -2.324e+06 -3.213e+06 -4.292e+06 -5.354e+06 -6.375e+06 -7.255e+06	 U, U1 +1.229e-03 +1.024e-03 +8.200e-04 +6.155e-04 +4.110e-04 +2.065e-04 +2.040e-06 -2.024e-04 -4.069e-04 -6.144e-04 -1.020e-03 -1.225e-03
	 DAMAGEC (平均 75%) +5.401e-04 +4.951e-04 +4.501e-04 +4.051e-04 +3.601e-04 +3.151e-04 +2.701e-04 +2.250e-04 +1.800e-04 +1.350e-04 +9.000e-05 +0.000e+00	 DAMAGEC (平均 75%) +9.900e-01 +5.975e-01 +5.250e-01 +7.625e-01 +6.600e-01 +7.75e-01 +4.950e-01 +1.25e-01 +2.475e-01 +6.250e-02 +0.000e+00	 U, U2 +1.260e-04 -3.801e-04 -9.896e-05 -1.424e-03 -1.941e-03 -2.457e-03 -2.974e-03 -3.491e-03 -4.008e-03 -4.525e-03 -5.042e-03 -5.558e-03 -6.075e-03
S4	 S, Max, Principal (平均 75%) +2.217e+06 +1.955e+06 +1.691e+06 +1.427e+06 +1.163e+06 +9.005e+05 +6.377e+05 +3.741e+05 +1.105e+05 -1.523e+05 -4.125e+05 -6.787e+05 -9.428e+05	 S, Min, Principal (平均 75%) +2.565e+05 +1.381e+05 -9.271e+05 -1.324e+06 -1.710e+06 -2.095e+06 -2.480e+06 -2.864e+06 -3.248e+06 -3.632e+06 -4.016e+06 -4.399e+06	 U, U1 +8.490e-04 +7.338e-04 +6.186e-04 +5.034e-04 +3.882e-04 +2.730e-04 +1.578e-04 +4.294e-05 -2.862e-05 -3.829e-04 -4.795e-04 -5.760e-04 -6.725e-04
	 DAMAGEC (平均 75%) +3.811e-06 +3.649e-06 +3.487e-06 +3.325e-06 +3.163e-06 +3.001e-06 +2.839e-06 +2.677e-06 +2.515e-06 +2.353e-06 +2.191e-06 +2.029e-06 +0.000e+00	 DAMAGEC (平均 75%) +5.601e-02 +7.174e-02 +4.747e-02 +5.739e-02 +4.384e-02 +3.029e-02 +1.674e-02 +2.870e-02 +1.512e-02 +4.351e-02 +7.174e-03 +0.000e+00	 U, U2 +4.684e-05 -3.531e-04 -4.531e-04 -7.531e-04 -9.531e-04 -1.453e-03 -1.953e-03 -2.453e-03 -2.953e-03 -3.453e-03 -3.953e-03 -4.453e-03 -4.953e-03
S5	 S, Max, Principal (平均 75%) +2.485e+06 +1.860e+06 +1.234e+06 +6.085e+05 -2.556e+05 -1.728e+04 -3.382e+05 -6.430e+05 -9.559e+05 -1.269e+06	 S, Min, Principal (平均 75%) +1.209e+06 +5.284e+05 -5.626e+04 -8.594e+05 -1.625e+06 -2.494e+06 -3.367e+06 -4.236e+06 -5.105e+06 -5.974e+06 -6.843e+06	 U, U1 +1.560e-03 +1.251e-03 +9.415e-04 +6.326e-04 +3.237e-04 +1.485e-05 -2.525e-04 -6.044e-04 -9.165e-04 -1.232e-03 -1.548e-03 -1.864e-03 -2.181e-03
	 DAMAGEC (平均 75%) +2.777e-04 +2.777e-04 +4.318e-04 +1.879e-04 +3.350e-04 +1.911e-04 +4.350e-04 +5.55e-05 +4.790e-05 +0.000e+00	 DAMAGEC (平均 75%) +8.900e-01 +9.975e-01 +7.425e-01 +6.600e-01 +5.775e-01 +4.950e-01 +4.125e-01 +3.300e-01 +2.475e-01 +1.650e-01 +8.250e-02 +0.000e+00	 U, U2 +1.991e-04 -4.255e-04 -1.950e-03 -1.075e-03 -2.299e-03 -2.484e-03 -3.548e-03 -4.739e-03 -4.777e-03 -6.046e-03 -7.322e-03 -7.295e-03

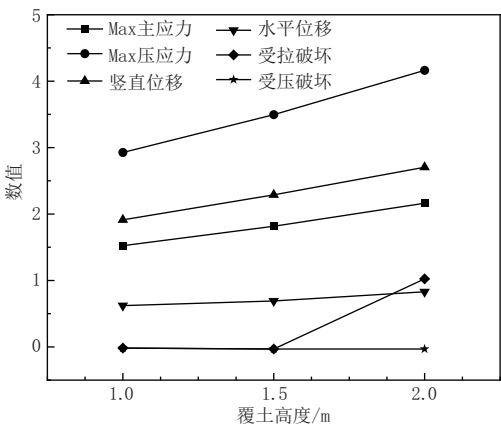


图7 不同覆土高度下隧道受力及变形

针对上图位置进行模拟后,提取施加行车荷载后的模型数据,结果如图9(a)所示。结果表明,行车荷载对于隧道的应力和变形影响较小,但使隧道发生了较大的受拉破坏。其中,隧道拱顶进出口内边缘都发生了较大的受拉破坏,而沿着荷载布置方向贯穿隧道发生的受拉破坏较轻,如图9(b)所示。

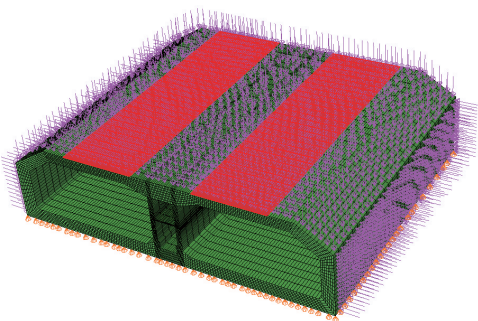


图8 行车荷载施加位置

5 结 语

本文借助 G98 环岛高速公路三亚崖州湾科技城隧道工程,运用数值模拟的方法研究了浅埋大跨矩形隧道在外部典型因素扰动作用下隧道结构的受力和变形机制。通过对隧道顶部覆土荷载突变、地质软硬互层和后期施工扰动、隧道上部行车荷载进行模拟,分析其在该类因素影响下隧道结构的受力及

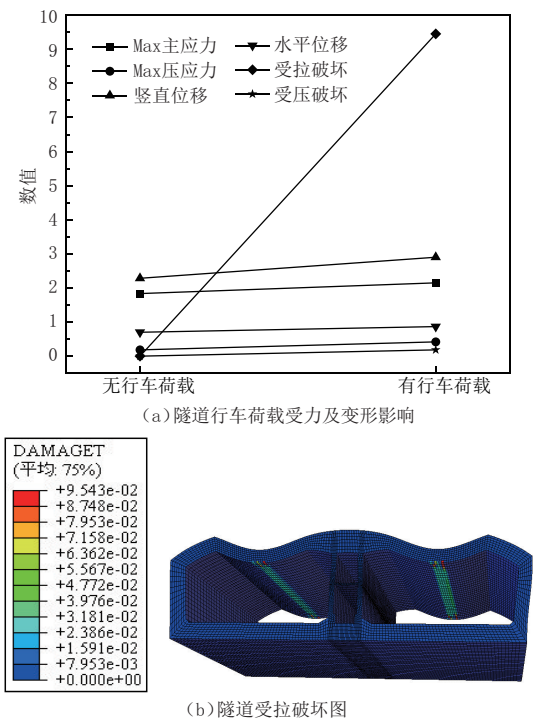


图9 施加行车荷载的模型数据

变形特征,得到以下结论:

(1)由隧道应力云图可知,隧道左右洞的拱肩、拱顶以及连拱处应力变化比较剧烈,受局部荷载扰动影响较大,有较大的应力集中现象。当局部荷载不对称时,在偏向局部荷载施加一侧的隧道拱顶出现较大的竖直方向的变形,其最大变形达7.30 mm,并伴随较大的受拉破坏。当局部荷载对称布置时,其应力应变分布和变形量都较为对称,仅隧道拱顶发生轻微的受拉破坏。由此可知,在地质软硬互层条件下,结构顶部易产生拉应力集中,在隧道开挖过程中应注意拱顶沉降与收敛的变化。同时,随着施工扰动程度的加大,隧道结构应力集中现象越明显,衬砌结构损伤程度也越大。因此,应根据施工过程逐步进行监控量测,并不断优化监测方案,及时采取保护措施。

(2)随着覆土压力的增大,隧道的各项数值也随之增大,当覆土高度达到2 m时,衬砌出现轻微受压破坏。由此可见,隧道顶部覆土荷载突变可能引起

地表沉降值的突变,且对衬砌结构产生不利影响,因此需要及时进行围岩变形监测。

(3)隧道上部行车荷载对隧道结构产生了一定的影响。隧道拱顶由于受行车荷载影响,隧道下表面存在明显的拉应力集中现象。因此,本研究可为不同环境因素对隧道结构的影响提供理论基础和技术支持,对浅埋大跨矩形隧道建设与运营维护也具有重要意义。

参考文献:

[1] 马艺虎,周容名,周春雨,等.高地应力断层破碎带隧道变形及受力特征研究[J].施工技术(中英文),2024,53(6):49-55.

[2] 罗浪.浅埋暗挖大断面矩形隧道施工中地面变形规律研究[J].科技资讯,2024,22(24):157-159.

[3] 张俊儒,马荐驰,陈鹏涛,等.滇西土质地层大跨公路隧道开挖面稳定性及开挖工法研究[J].中国公路学报,2025,38(9):242-254.

[4] 梁庆国,陈星宇,刘晓杰,等.富水黄土隧道围岩大变形控制技术——以银百高速甜永段榆林子隧道为例[J].安全与环境工程,2022,29(4):55-65.

[5] 汪勤民,何国辉,汪飞.隧道复杂结构受力变形特征及加固效果研究[J].公路,2023,68(8):406-410.

[6] 胡儒政,马家利,季洪伟,等.黄河岸崩坡积体隧道现场监测及变形特征研究[J].湖南交通科技,2025,51(3):137-142.

[7] 张玉石.浅埋偏压单洞四车道隧道开挖围岩变形特征数值分析[J].交通科技,2023(5):103-108.

[8] 王科,李娇娜,彭翔.某抽水蓄能电站地下厂房洞室群在锚杆锚固工况下围岩稳定性研究[J].水利与建筑工程学报,2024,22(3):19-27;57.

[9] 刘维,吴奔,史培新,等.浅埋矩形隧道掘进面被动失稳混合破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊1):2673-2683.

[10] 毕志刚,李旭哲,王凯,等.浅埋偏压小净距隧道施工扰动空间效应研究[J].河南城建学院学报,2023,32(6):1-8.

[11] 许桂生.大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响及控制技术研究[J].中外公路,2019,39(1):185-189.

[12] 周刚,陈伟鹏,夏龙,等.行车荷载作用下矩形隧道受力及变形研究[J].公路,2025,70(10):389-396.

[13] 姚志雄,吉磊,刘耀星,等.交通荷载对浅埋群洞隧道的动力影响分析[J].现代隧道技术,2022,59(3):107-117.

[14] 黄光强,马少坤.交通荷载作用下矩形隧道结构动力响应研究[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(4):866-874.

[15] 杨宗桦,孙杰,陈士海.地面交通荷载对浅埋隧道的动力响应分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(3):343-350.