

饱和压实黄土的Duncan-Chang损伤本构模型研究

杨皓铭, 黄强兵, 解庆禹, 崔磊, 康孝森, 王作辰

Duncan-Chang damage constitutive model of saturated compacted loess

YANG Haoming, HUANG Qiangbing, XIE Qingyu, CUI Lei, KANG Xiaosen, and WANG Zuochen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91

高应力区岩石统计损伤本构模型研究

A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas

贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究

A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport

马昊, 黄达, 肖衡林, 王俊杰, 马文浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 88-88

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202406051

杨皓铭, 黄强兵, 解庆禹, 等. 饱和压实黄土的 Duncan-Chang 损伤本构模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 79-90.
YANG Haoming, HUANG Qiangbing, XIE Qingyu, et al. Duncan-Chang damage constitutive model of saturated compacted loess[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 79-90.

饱和压实黄土的 Duncan-Chang 损伤本构模型研究

杨皓铭¹, 黄强兵^{1,2}, 解庆禹¹, 崔磊³, 康孝森¹, 王作辰⁴

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部
重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710003;
4. 西安中交公路岩土工程有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 黄土地区高铁路基瞬时沉降与饱和压实黄土的力学特性密切相关, 饱和压实黄土的本构关系是表征其力学特性的重要途径。由于 Duncan-Chang 本构模型难以准确描述压实黄土破坏后的应变软化特性, 为了提高其适用性, 引入统计损伤理论, 建立了饱和压实黄土的 Duncan-Chang 损伤本构模型。选取西延高铁填方区 Q_{p3} 黄土, 开展了不同压实度的固结不排水三轴试验, 编写 vumat 子程序进行验证, 实现了饱和压实黄土三轴试验及不同压实度、不同填方坡度下路基沉降的有限元数值模拟分析。结果表明: (1) 填方区压实黄土受剪破坏时呈应变软化特性, 峰值强度与初始变形模量随压实度的增加而增加, 但峰值强度增幅随压实度增加递减, 而初始变形模量增幅随压实度的增加递增; (2) 基于统计损伤的 Duncan-Chang 本构模型所编写的 vumat 子程序, 对填方压实黄土三轴试验的剪切强度进行了验证, 结果基本一致, 能够较好地反映填方区压实黄土应变软化的力学特性; (3) 通过 vumat 计算得出, 填方路基的沉降量随压实度的增加而减少, 随填方坡度的增加而增加。研究结果可为黄土地区填方路基瞬时沉降计算与分析提供参考。

关键词: 饱和压实黄土; Duncan-Chang 损伤模型; 高铁路基沉降; 剪切特性; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0079-12

Duncan-Chang damage constitutive model of saturated compacted loess

YANG Haoming¹, HUANG Qiangbing^{1,2}, XIE Qingyu¹, CUI Lei³, KANG Xiaosen¹, WANG Zuochen⁴

(1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education,
Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Changqing Engineering Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710003, China;
4. Xi'an Zhongjiao Highway Geotechnical Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: The instantaneous settlement of high railway foundation in loess area is closely related to the mechanical properties of saturated compacted loess. The constitutive relationship of saturated compacted loess is an important way to characterize its mechanical properties; however, Duncan-Chang constitutive model is difficult to accurately describe the strain softening characteristics of compacted loess after failure. To improve the

收稿日期: 2024-06-25; 修订日期: 2024-09-14

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008404); 国家自然科学基金项目(42102317)

第一作者: 杨皓铭(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质及地质灾害防治研究。E-mail: 2022126087@chd.edu.cn

通讯作者: 黄强兵(1972—), 男, 博士, 教授、博士生导师。主要从事地质工程、岩土及地下工程方面的教学与研究工作。

E-mail: hqb@chd.edu.cn

adaptability of Duncan-Chang constitutive model, statistical damage theory is introduced to establish Duncan-Chang damage constitutive model of saturated compacted loess. Qp_3 loess in Xiyan high-speed railway filling area was selected to carry out consolidation undrained triaxial tests with different compaction degrees. The vumat subroutine was then written for verification. The triaxial test of saturated compacted loess and the finite element numerical simulation of subgrade settlement under different compaction degrees and filling slopes were conducted. The results show that the compacted loess in the filling area shows strain softening characteristics when it is sheared. The peak strength and initial deformation modulus increase with the increase of compaction degree, while the increase of peak strength decreases with the increase of compaction degree. The increase of initial deformation modulus increases with the increase of compaction degree. The vumat subroutine based on Duncan-Chang constitutive model with statistical damage is used to verify the shear strength of compacted loess in triaxial test, and the results are consistent, indicating the mechanical characteristics of strain softening of compacted loess in filling area. Through vumat calculation, the settlement of filled subgrade decreases with the increase of compactness and increases with the increase of fill slope. This study can provide basic information for the calculation and analysis of the instantaneous settlement of fill subgrade in the loess area.

Keywords: saturated compacted loess; Duncan-Chang damage model; settlement of high-speed railway subgrade; shear characteristics; numerical simulation

黄土是第四纪以来外营力作用下形成的沉积土,具有疏松多孔的结构特性^[1-3]。随着西部城市经济的发展,铁路成为沟通城市的关键^[4-6]。为解决西北地区多沟壑、地表起伏的问题,多采用压实黄土作为铁路路基填方材料^[7-8]。然而不同部位黄土压实度不尽相同,在降雨入渗等外界因素的影响下^[9-10],压实黄土含水率不断增加,黏聚力及颗粒间摩擦力逐渐减小^[11-12],抗剪强度降低^[13-15],导致压实黄土在短时间内出现不均匀沉降,极易产生铁路工程隐患^[16-17]。因此,研究饱和和压实黄土的力学特性,对工程建设具有重要意义。

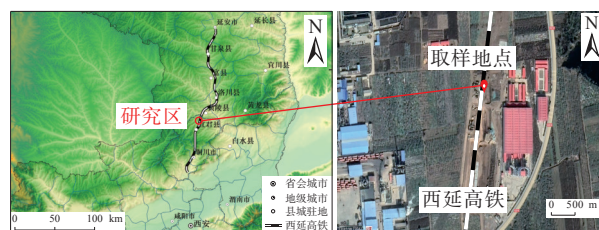
为了描述压实黄土的力学特性,诸多学者先后使用了 Duncan-Chang 本构模型^[18-19]、幂函数修正模型^[20],虽然这些模型种类繁多,但多适用于应变硬化的土体,而饱和填方黄土在固结不排水试验中表现出明显的应变软化特性,此时传统的双曲线模型或幂函数修正模型已不再适用。而造成应变软化的主要原因是土骨架、土颗粒的破坏与重组,为此,一些学者提出损伤因子的概念^[21-23],但是目前多数损伤理论仍以解析理论为主,没有相应的数值算法,进而无法应用于有限元软件的迭代分析。

鉴于此,本文提出修正 Duncan-Chang 损伤本构模型,采取西安—延安(西延)高铁填方区 Qp_3 黄土,进行固结不排水室内三轴试验,对试样的初始变形模量与峰值强度进行简要分析。根据修正 Duncan-Chang 损伤本构模型的张量形式编写出 vumat 子程序,与三轴试验结果进行验证。最后将 vumat 子程序应用于填方

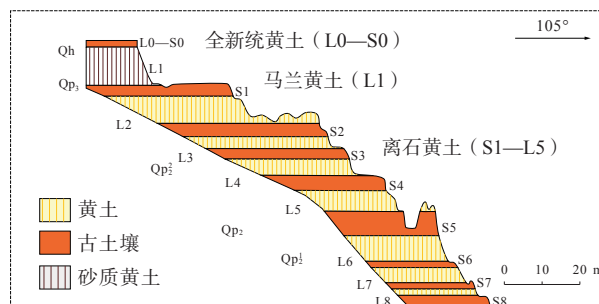
路基模型中,研究不同压实度与不同填方坡度下的路基瞬时沉降规律。

1 取样与基本物理参数分析

试样取自陕西关中盆地洛川县西延高铁后子头乡段(图 1),该场地地势平缓,线路右侧局部发育小型冲沟。用于填土的 Qp_3^{col} 黄土呈淡黄色,以粉质颗粒为主、具有大空隙及垂直节理发育。最大填方高度约 11.4 m(图 2a)。



(a) 研究区地理位置



(b) 研究区地质剖面图

图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

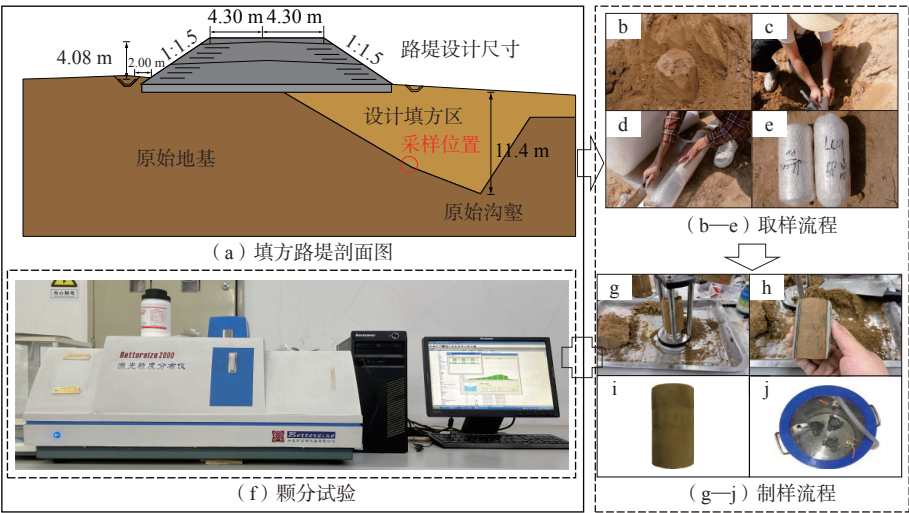


图 2 取样与制样流程

Fig. 2 Sampling and preparation process

取样时首先用直径 15 cm、高 20 cm 的 PVC 管套入原状土柱, 铲刀切削, 保鲜膜包裹, 防止水分流失, 之后使用气泡膜小心缠绕, 以防止运输过程中受到干扰 (图 2b—e)。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24] 进行土的物理性质指标测定, 得到试样的基本物理性质参数 (表 1)。从试验结果看, 试样孔隙率高, 干密度低, 含水率较高, 具有典型的黄土特征; 使

用 Battersize2000 激光粒度仪对黄土试样进行颗分试验 (图 2f), 结果表明粒径级配曲线有 2 个峰值, 分别位于 0.4 μm 和 40 μm 附近。中值粒径 $D_{50}=29.88 \mu\text{m}$, 平均粒径为 40.05 μm , 黏粒含量 (粒径小于 5 μm 的颗粒) 较少, 占比 7.5%, 粉粒含量 (粒径介于 2~50 μm 的颗粒) 较多, 占比 67.5%, 属于粉质黄土 (图 3)。

表 1 土样的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

参数	天然含水率/%	比重	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比	塑限/%	液限/%
取值	13.6	2.65	1.58	1.45	0.78	17	28

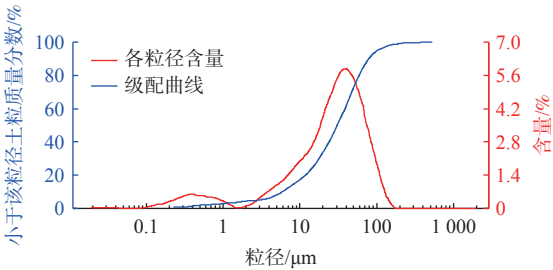


图 3 填方黄土粒径级配

Fig. 3 Particle size gradation of fill loess

2 三轴剪切试验

2.1 试验仪器

采用英国 GDS 仪器公司生产的三轴试验系统进行三轴试验。依据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)^[25] 与设计资料, 压实度 $K\geq 0.90$, 因此, 为探究不同压实度填方路基的物理力学特征, 三轴试验采用 $K=0.90$ 、0.95 和 1.00 的试验方案, 试样尺寸为直径

39.8 mm、高 80 mm。通过击实试验, 确定洛川黄土最优含水率为 14%, 对应的最大干密度为 1.76 g/cm^3 。定义 $K=(\rho_d/\rho_{d\max})\times 100\%$, ρ_d 为试验黄土的实际干密度, $\rho_{d\max}$ 为最大干密度。不同压实度黄土的制作流程为: (a) 将干燥后的黄土彻底粉碎, 过筛; (b) 将含水率配至 14% 后闷土 72 h 待水分均匀扩散; (c) 将配置好的土样分 4 层击实, 压实度分别为 $K=0.90$ (对应 $\rho_d=1.58 \text{ g}/\text{cm}^3$)、 $K=0.95$ (对应 $\rho_d=1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$)、 $K=1.00$ (对应 $\rho_d=1.76 \text{ g}/\text{cm}^3$); (d) 放入真空饱和缸中饱和 24 h (图 2g—j)。

由于路堤瞬时沉降过程时间较短, 内部水分不能及时排出, 因此对试样进行固结不排水试验 (consolidated undrain, CU)。结合实际工况, 试验中三轴室通过气压控制器施加 40, 60, 100 kPa 的围压 (σ_3), 竖向加载柱塞施加轴向压力 (σ_1)。试件在三轴室固结, 直至 95% 的超孔隙水压力消散; 在不排水的情况下,

以 0.05 mm/min 的位移速率剪切试件,直至试件破坏。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),选取应力-应变曲线上峰值偏差应力作为抗剪强度。

2.2 试验结果分析

2.2.1 应力-应变特征

图 4 为不同 K 、 σ_3 下填方黄土的应力-应变关系,反映了黄土的抗剪强度的发展情况。以 K 、 σ_3 为自变量,填方黄土的应力-应变主要表现出以下特征:(1)相同 K 下填方黄土的峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随 σ_3 的增加而增加,相同 σ_3 条件下黄土的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随着 K 的增加而增加;(2) $K=0.90$, $\sigma_3=40$ kPa 时,填方黄土应力-应变曲线

呈非线性增加,后保持平稳且略有下降; $K=1.00$, $\sigma_3=60, 100$ kPa 时,填方黄土在剪切过程中表现出明显的应变软化特性;(3)当 σ_3 从 40 kPa 增至 100 kPa, $K=0.90, 0.95$ 时,填方黄土对应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 增幅分别为 125.09%、82.02%; $K=1.00$ 时,填方黄土对应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 增幅为 27.70%,说明随 K 的增加,填方黄土试样 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的增幅逐渐减小;(4)当 σ_3 从 40 kPa 增至 100 kPa, $K=0.90$ 时,填方黄土 E_i 的增幅为 64.5%; $K=0.95$ 时, E_i 增幅为 58.84%;当 K 达到 1.00 时,填方黄土 E_i 的增幅达到 144.56%,说明随 K 的增加,黄土试样 E_i 的增幅整体呈递增趋势。

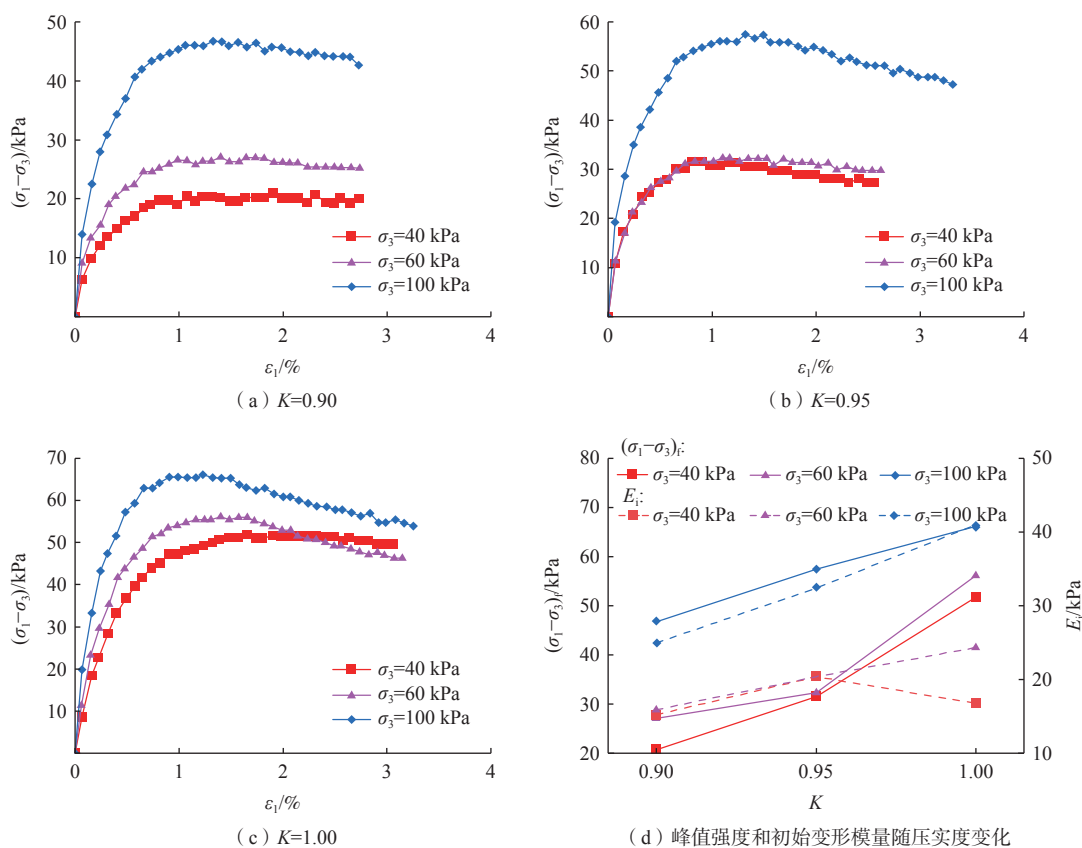


图 4 不同压实度下填方黄土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of fill loess under different compactness

2.2.2 初始变形模量与峰值强度

Duncan-Chang 本构模型广泛应用于预测及处理路基沉降问题^[26-28],而 E_i 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 是应用于该本构模型的重要物理力学参数,因此分析参数 E_i 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与 K 、 σ_3 的关系很有必要。基于固结不排水三轴剪切试验的数据,分别以 E_i 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为自变量, K 与 σ_3 为因变量绘制出三维数值云图如图 5(a)、(b) 所示。

由图可以看出, E_i 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随 K 、 σ_3 的增加而增

加,但由三维云图投影在 XY 面等值线的外法线指向不同,可以判断出 E_i 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 在这一点 (λ_c, σ_3) 的梯度 $\left(\frac{\partial E_i}{\partial K}, \frac{\partial E_i}{\partial \sigma_3}\right)$ 与 $\left(\frac{\partial (\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\partial K}, \frac{\partial (\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\partial \sigma_3}\right)$ 方向相反, E_i 的梯度指向为图 5(a) 中 XY 平面左向紫色区域,即压实度和围压减小方向; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的梯度指向为图 5(b) 中 XY 平面红色区域,即压实度和围压增加的方向。因此,随着 K 与 σ_3 的增加, E_i 的变化率逐渐减小,而

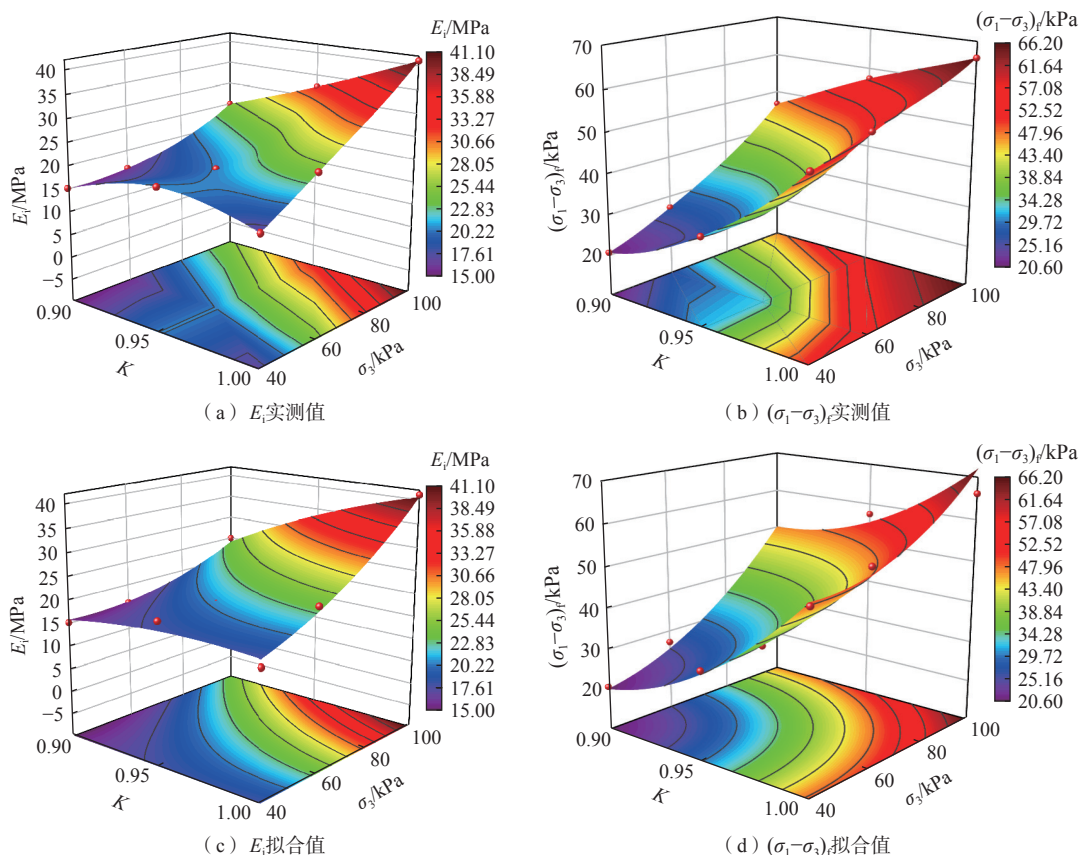


图 5 压实黄土变形与强度参数三维云图

Fig. 5 Deformation and strength parameters of compacted loess

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的变化率逐渐增加。

为了进一步量化不同土样的 E_t 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 根据图 5(a)(b) 进行非线性三维表面拟合 (图 5cd), 得到拟合式 (1) 拟合优度 R^2 分别为 0.94 和 0.98, 因此式 (1) 可以较为准确地表述初始变形模量、峰值强度与压实力、围压之间关系。

$$\begin{cases} E_t = -401\,236.56 + 955\,168.33K - 2\,373.39\sigma_3 - \\ \quad 538\,948.3K^2 + 2.92\sigma_3^2 + 2\,337.97K\sigma_3 \\ (\sigma_1 - \sigma_3)_f = 1\,745.12 - 3\,988.44K + 1.35\sigma_3 + \\ \quad 2\,307.13K^2 + 0.006\sigma_3^2 - 1.77K\sigma_3 \end{cases} \quad (1)$$

3 模型构建及数值实现

3.1 统计损伤模型建立

Duncan-Chang 本构模型多用于描述路基土的应力-应变关系, 但是该本构模型仅适用于应变硬化土样, 而路基瞬时沉降时, 饱和填方黄土土样表现为应变软化特征, 因此需要对 Duncan-Chang 模型进行修正。由于压实黄土受压过程中, 土骨架破坏重组, 抗剪能力减弱, 实质上反映出土体的损伤过程^[29, 30]。故本文引入损伤变量对 Duncan-Chang 模型进行修正, 便

于预测不同围压下饱和压实黄土的应力应变状态。假设峰值破坏前, 土体试样的应力应变满足 Duncan-Chang 本构模型:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (2)$$

式中: ε_1 ——轴向应变/%;

a ——参数, $a = \frac{1}{E_i}$;

b ——参数, $b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$;

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ——极限偏差应力/kPa。

在固结不排水三轴剪切试验中, 由于 $d\sigma_2 = d\sigma_3 = 0$, 所以切线模量 (E_t) 可以表示为:

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2} \quad (3)$$

由于 $\lg(E_t/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 两者近似呈线性关系^[31], 所以 E_t 也可表示为 $E_t = Tp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$, p_a 为大气压 (101.4 kPa),

T 、 C 为试验常数^[32]。定义破坏比 $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$, 可得:

$$E_t = Tp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \quad (4)$$

由于采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 即:

$$F = 2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi - (\sigma_1 - \sigma_3)_f (1 - \sin \varphi) = 0 \quad (5)$$

式中: c 、 φ ——土体的黏聚力/kPa、内摩擦角/(°)。

由式(4)(5)得:

$$E_t = T p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (6)$$

当土体满足 Mohr-Coulomb 准则进入屈服阶段后采用损伤理论进行修正, 根据等效应变假设:

$$\sigma = (1 - D)\sigma^* \quad (7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^* \quad (8)$$

式中: σ 、 ε ——名义应力、名义应变;

σ^* 、 ε^* ——等效应力、等效应变;

D ——损伤变量。

根据连续介质力学, 损伤变量 D 可定义为某一荷载作用下, 土体内已损伤破坏的微元个数 N_t 与未损伤破坏微元个数 N 的比值:

$$D = \frac{N_t}{N} \quad (9)$$

假设连续随机破坏的微元体服从 Weibull 分布, 其破坏概率密度函数为:

$$p(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

式中: F ——屈服准则;

m 、 F_0 ——Weibull 分布参数。

根据破坏的概率密度函数和损伤变量的定义, 由式(7)可得到土的统计损伤变量:

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (11)$$

由于室内三轴剪切试验测得的应力为名义应力, 故依据广义胡克定律和式(7)(8)可得:

$$\begin{cases} \sigma_1^* = \frac{\sigma_1 E_t \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \\ \sigma_2^* = \frac{\sigma_2 E_t \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \\ \sigma_3^* = \frac{\sigma_3 E_t \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: ν ——泊松比。

Mohr-Coulomb 准则可由双剪统一强度理论退化而来, 故根据李杭州等^[33]的研究, 土的统计损伤变量可表示为:

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{R + P \sin \varphi}{F_0} \right)^m \right] \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} P = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) E_t \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \\ R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) E_t \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \end{cases} \quad (14)$$

将式(7)(8)带入式(2)中可得:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{(1 - D)\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (15)$$

进而式(3)可变为:

$$E_t = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2} \exp \left[- \left(\frac{R + P \sin \varphi}{F_0} \right)^m \right] - \frac{m\varepsilon_1}{F_0(a + b\varepsilon_1)} - \frac{2\sigma_1 E}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \left(\frac{R + P \sin \varphi}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{R + P \sin \varphi}{F_0} \right)^m \right] \quad (16)$$

为方便后续的二次开发验证, 假设式(14)中 E_t 为固结不排水 (consolidation undrained, CU) 试验峰值点 (E_f) 的左斜率, 即 $E_t = E_{f-}$ 。根据广义胡克定律, 及式(16)得到饱和压实黄土损伤本构模型的最大主应力形式:

$$\sigma_1 = E_t \varepsilon_1 + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (17)$$

3.2 参数求解

根据上文所述, 服从 Weibull 分布损伤的 Duncan-Chang 本构模型需 T 、 n 、 R_f 、 c 、 φ 、 m 、 F_0 共 7 个参数。其中 m 、 F_0 可以通过对三轴试验数据进行线性化处理获取:

$$Y = mX + A \quad (18)$$

其中:

$$Y = \ln \left\{ - \ln \left[\frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E_f \varepsilon_1} \right] \right\} \quad (19)$$

$$X = \ln(R + P \sin \varphi) \quad (20)$$

$$A = -m \ln F_0 \quad (21)$$

对试验数据进行拟合可获得参数 m 和 A , 进而根据式(21)求取参数 F_0 、 T 、 n 、 R_f 、 c 、 φ 等材料参数可结合文献 [34] 将 CU 三轴试验数据进行处理后确定。

4 模型验证

4.1 常规三轴压缩算例

ABAQUS 在处理未内置的本构模型时, 提供了隐式和显示两种二次开发的子程序接口, 由于路堤的瞬时沉降时间较短, 符合 vumat 显示计算的工况条件, 故本文采用 vumat 子程序进行验证。

vumat 子程序是 ABAQUS 提供给用户进行 ABAQUS/

Explicit 材料本构模型二次开发的用户子程序接口,其核心任务是对单元的每个积分点进行以本构模型增量形式为基础的算法迭代,进而实现某一时刻应力 σ_{ij}^n 向下一分析步 σ_{ij}^{n+1} 的更新。

根据广义胡克定律,填方黄土试样破坏前,其增量形式为:

$$\Delta\sigma_{ij}=2G\Delta\varepsilon_{ij}+\lambda\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$$

(22)

式中: G 、 λ ——剪切模量、拉梅常数;
 δ_{ij} ——克罗内克函数。

当试样应力关系满足 Mohr-Coulomb 准则时,破坏产生,且损伤也随之进行,此时模型增量形式变为:

$$\Delta\sigma_{ij}=D_c^d\Delta\varepsilon_{ij}$$

(23)

式中: D_c^d ——带有损伤修正的刚度矩阵。

根据式(22)(23)以及 3.1 节所述内容,使用 Fortran 语言编写 vumat,具体流程如图 6 所示。首先在 ABAQUS 材料模块完成用于 vumat 的材料参数定义,之后依据 ABAQUS 操作流程,来到作业模块,完成双精度设置,调用 vumat 子程序文件。在初始分析步时,假设本构满足初始变形模量为 E_i 的线弹性迭代,之后在下一分析步中通过 Duncan-Chang 本构模型由式(6)对变形模量 E 进行修正,在这一修正阶段,模型的应力更新根据式(23)仍然服从弹性迭代,在进行第 $n+1$ 步的应力 σ_{n+1} 更新时,若主应力状态满足 Mohr-Coulomb 破坏准则,模型会进入损伤阶段,由式(16)通过损伤变量 D 更新变形模量 E_{n+1} ,进而完成应力 σ_{n+1} 的更新。以此流程对每个积分点进行计算,并将每一分析步更新的应力状态返回至 ABAQUS 主程序中,最终生成 odb 结果文件。

经过对西延高铁填方区黄土试样的 CU 试验数据进行处理,得到不同围压下压实度 $K=0.90$ 、 0.95 、 1.00 时的模型参数(表 2)。

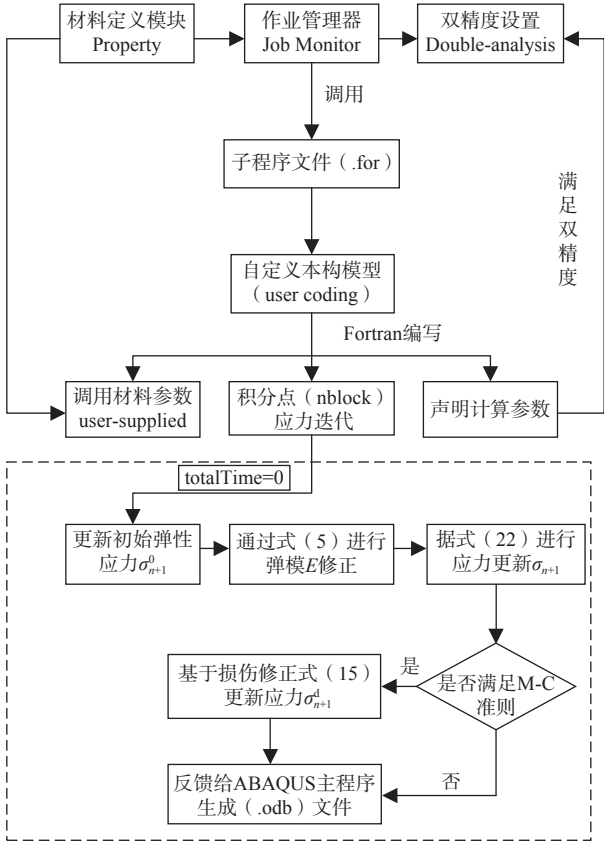


图 6 vumat 运算流程图

Fig. 6 Flow chart of vumat operation

本文建立单位长度有限元模型,边界条件与试验一致,网格采用 C3D8 网格,依据 CU 试验分析步设置为两个阶段:①施加围压的预加载阶段;②施加轴向偏差应力的加载阶段。基于建立的三维有限元模型和表 2 的填方黄土物理力学参数,本文模拟了围压下不同压实度饱和路基黄土的 CU 试验,并将试验结果、Duncan-Chang(图中简称“D-C”)模型结果及本文模型结果进行对比,如图 7 所示。数值模拟的结果可以较为准确地反映西延高铁路堤填方黄土破坏前应

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

参数	K	σ_3/kPa	T	n	R_f	Weibull参数		c/kPa	$\varphi/(\circ)$
						m	F_0		
取值	0.90	40	235.962	0.558	0.952	0.262	9.211	3.70	15
		60			0.879	0.266	12.279		
		100			0.848	0.400	103.073		
	0.95	40	302.924	0.522	0.830	0.220	4.307	12.90	16
		60			0.853	0.339	44.517		
		100			0.865	0.405	250.158		
	1.00	40	407.532	0.978	0.798	0.369	89.871	17.30	18
		60			0.819	0.341	61.321		
		100			0.853	0.408	135.915		

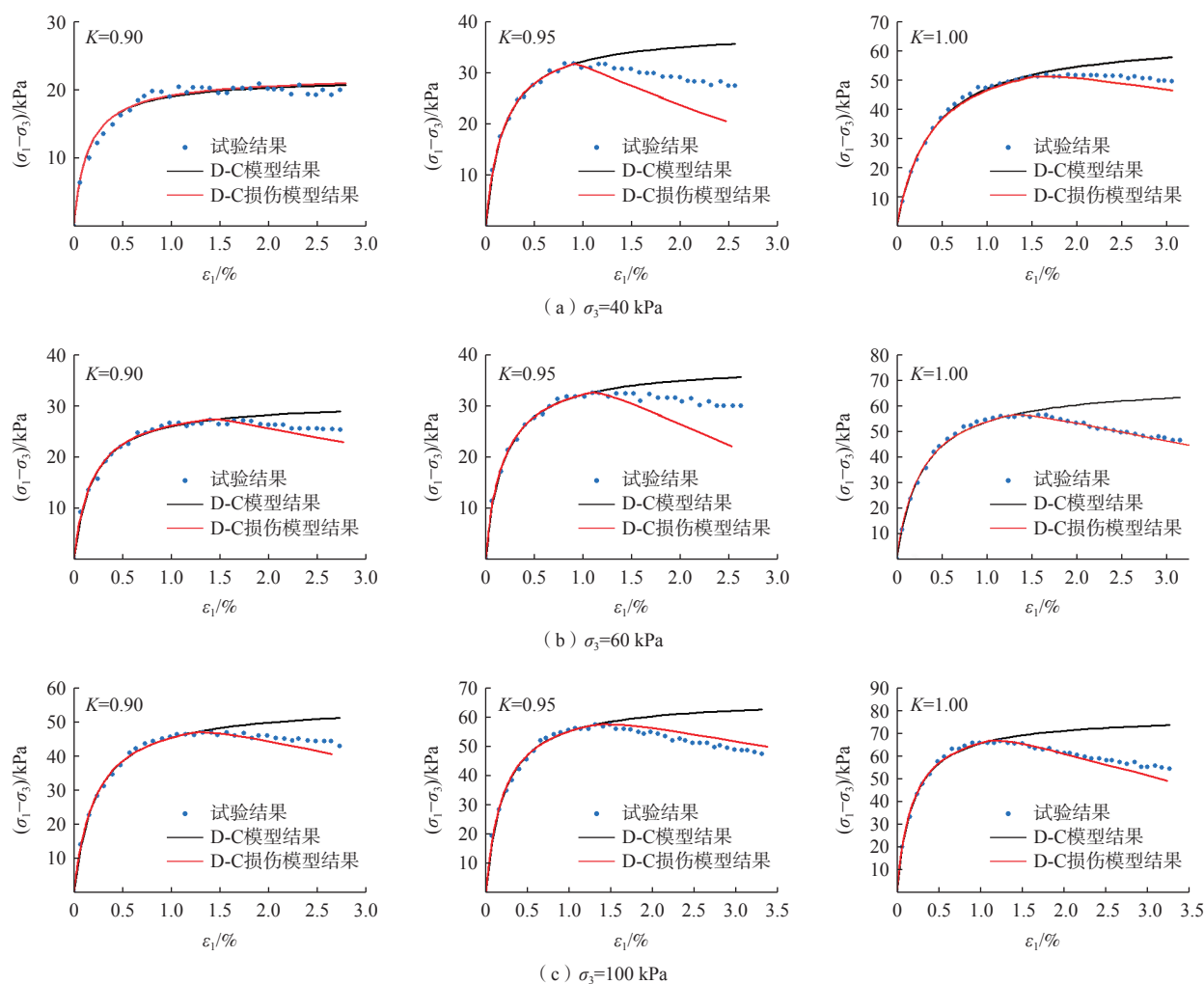


图 7 不同围压、不同压实度模型结果对比

Fig. 7 Comparison of results of different compacting models under different confining pressures

力-应变轨迹,破坏时的峰值强度及其所对应的应变,而破坏后根据损伤修正的 Duncan-Chang 本构模型,虽然模拟结果与试验有些差异,但揭示了剪切过程中填方黄土应变软化的力学特性,在路基沉降分析中具有重要意义。

4.2 填方路基分析

考虑到填方坡度与黄土压实度都会对路基的瞬时沉降量产生影响,本文建立起如图 8 所示的填方路基模型,模型厚度为 1,并且由路堤、原始地基和填方黄土三部分组成,其中路堤长 15.0 m、高 4.6 m,原始地基长 50 m、深度 25 m。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2011)^[35] 填方坡度一般为 1:0.3~1:1.25,故计算坡脚(α)设置为 45°、60°及 73°,填方黄土深度为 10 m,上底长 25 m,下底与上述坡脚相对应,分别为 15.0、19.2、21.9 m;压实度分别为 0.90、0.95、1.00。为便于计算,路堤整体采用 ABAQUS 内置的弹性本

构;原始地基采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构;填方黄土采用本文提出的修正 Duncan-Chang 损伤本构模型,各部分材料参数见表 3。模型边界条件为:底面固定,左右两边在 X 方向进行约束,对路基整体施加填方路基竖直方向上的瞬时沉降。

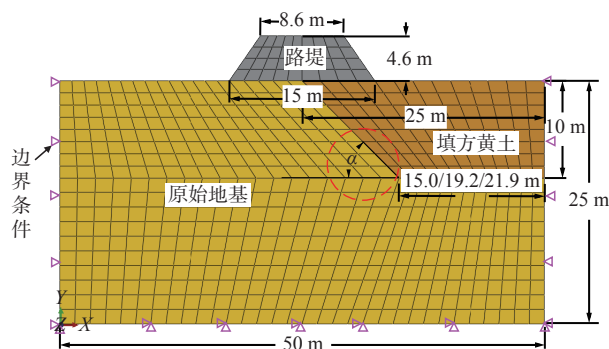


图 8 填方路基模型图

Fig. 8 Fill subgrade model drawing

表 3 路基材料参数
Table 3 Subgrade material parameter

材料	E_i/MPa	E/MPa	ν	K	T	n	R_t	Weibull 参数		c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
								m	F_0		
填方黄土	15.93	—	0.30	0.90	235.962	0.558	0.952	0.262	9.211	3.70	15
	20.39			0.95	302.924	0.522	0.830	0.220	4.307	12.90	16
	24.37			1.00	407.532	0.978	0.798	0.369	89.871	17.30	18
原始地基	—	16.15	0.30	—	—	—	—	—	—	20.50	12
路堤	—	50.00	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—

计算结果如图 9 所示, 由竖直方向(Y 方向)位移云图可以看出, 当填方坡度增加时, 路堤右侧靠近填方区的部分沉降量明显增加。

将填方黄土的材料属性替换为 ABAQUS 内置的

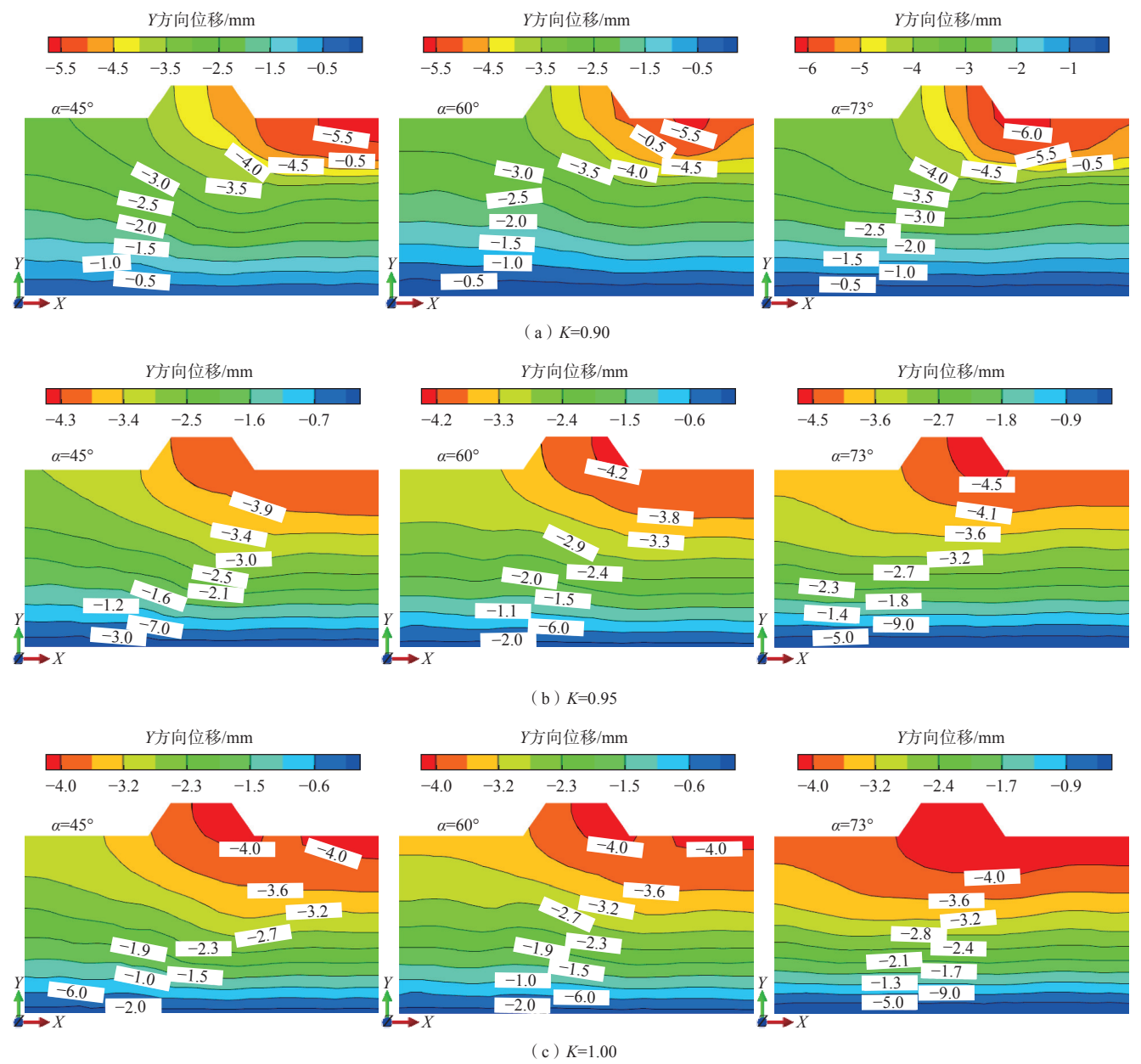


图 9 不同填方坡度路基沉降图
Fig. 9 Settlement of the subgrade with different fill slope

Mohr-Coulomb 弹塑性本构, 计算路堤瞬时沉降量。限于篇幅, 本文仅在前后两种不同材料本构下, 提取路堤顶部中点的沉降量进行对比, 如图 10 所示。可以看出, 路基的沉降量随填方黄土压实度的增加而减小, 随填方坡度的增加而增加。不同的是 ABAQUS 内置的 Mohr-Coulomb 本构模型所得瞬时沉降偏小, 计算结果较为保守, 且对填方坡度的变化不如本文损伤本构模型更加敏感。

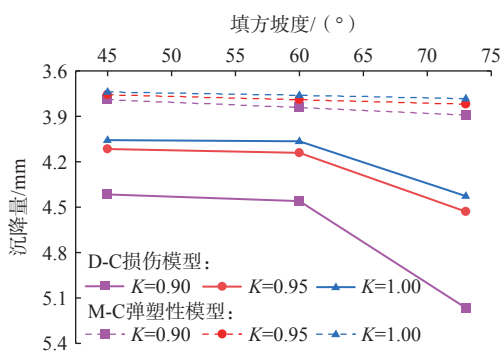


图 10 填方路基沉降量与填方坡度、压实度的关系曲线

Fig. 10 Relationship between the settlement of fill subgrade and the slope and compaction degree of fill

5 结论

(1) 不排水三轴剪切试验表明, 饱和压实黄土表现出应变软化特性, 峰值强度与初始变形模量随压实度的增加而增加。峰值强度随围压增大而增大, 压实度低时峰值强度增幅达 125.09%, 压实度高时峰值强度增幅达 27.7%。初始变形模量随围压增大而增大, 压实度低时初始变形模量增幅为 64.5%, 压实度高时初始变形模量增幅达 144.6%。

(2) 建立了一种饱和压实黄土的 Duncan-Chang 损伤本构模型, 开发了该模型的 vumat 子程序, 通过 ABAQUS 软件验证了该模型正确性, 该模型能够较好地描述饱和压实黄土受剪时应变软化特性, 克服了 Duncan-Chang 本构模型难以反映应变软化的局限性, 适用于黄土填方路基瞬时沉降计算分析。

(3) 基于本文 Duncan-Chang 损伤本构模型与 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型的数值分析对比, 揭示了填方坡度和压实度对填方路基瞬时沉降量的影响规律, 发现路面沉降量随填方路基压实度增加而逐渐减少, 而随填方坡度增加而逐渐增加; 当填方坡度由 60°增至 73°时, 路基沉降量最为显著。结果可为黄土填方路基沉降分析提供参考。

值得注意的是, 本文虽然建立了一种黄土 Duncan-

Chang 损伤本构模型, 采用陕西洛川粉黄土进行了试验与计算验证, 可为黄土地区填方工程沉降分析提供参考, 但由于黏黄土、粉黄土和砂黄土的土性存在一定差异, 模型的适用性有待后续深入研究。

参考文献 (References) :

- [1] ROGERS C D F, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J. Hydroconsolidation and subsidence of loess: Studies from China, Russia, North America and Europe: In memory of Jan Sajgalik[J]. *Engineering Geology*, 1994, 37(2): 83 - 113.
- [2] RYASHCHENKO T G, AKULOVA V V, ERBAEVA M A. Loessial soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia, and northwestern China[J]. *Quaternary International*, 2008, 179(1): 90 - 95.
- [3] YATES K, FENTON C H, BELL D H. A review of the geotechnical characteristics of loess and loess-derived soils from Canterbury, South Island, New Zealand[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 11 - 21.
- [4] 黄强兵, 王涛, 刘悦, 等. 跨地裂缝带高铁路基动力响应及 CFG 桩地基加固优化研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(1): 103 - 111. [HUANG Qiangbing, WANG Tao, LIU Yue, et al. Study on dynamic response of high-speed railway subgrade crossing ground fissure zone and optimization of foundation reinforcement of CFG piles[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(1): 103 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 夏万云. 银西高铁董志塬地区边坡侵蚀特性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 99 - 106. [XIA Wanyun. Analysis on characteristic of slope erosion in Dongzhiyuan plateau of Yinchuan-Xi'an high-speed railway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 99 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [6] HUANG Qiangbing, GOU Yuxuan, PENG Bo, et al. Model test study on the deformation and failure mechanism of high-speed railway subgrade obliquely crossing ground fissure zones[J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 41: 101010.
- [7] HU Jinfang, LIU Hongtai, REN Wenyuan, et al. An experimental study for evaluation of collapsible loess roadbed replacement method using lightweight soil[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(9): 359.
- [8] 王韵, 王红雨, 李其星, 等. 探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用[J]. *中国地质灾*

- 害与防治学报, 2023, 34(2): 102 – 110. [WANG Yun, WANG Hongyu, LI Qixing, et al. Application of the ground-penetrating radar technology in detection of soil properties of the high cutting and filling slopes in collapsible loess area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 102 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 等. 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 74 – 80. [ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 74 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [10] YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, et al. The unsaturated seepage process and mechanism of internal interfaces in loess-filled slopes during intermittent rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129317.
- [11] 谢婉丽, 葛瑞华, 郭倩怡, 等. 灌溉作用下黄土宏观力学响应及微观结构特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 82 – 89. [XIE Wanli, GE Ruihua, GUO Qianyi, et al. A study of macro mechanical response and microstructure characteristics of loess under irrigation mechanism[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 82 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘银鹏, 李同录, 胡向阳, 等. 陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 77 – 83. [LIU Yinpeng, LI Tonglu, HU Xiangyang, et al. Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 77 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 高志傲, 李萍, 肖俊杰, 等. 利用常规直剪试验评价非饱和黄土抗剪强度 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 344 – 351. [GAO Zhiao, LI Ping, XIAO Junjie, et al. Evaluation of shear strength of unsaturated loess using conventional direct shear test[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 344 – 351. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈林万, 裴向军, 张晓超, 等. 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 137 – 147. [CHEN Linwan, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 137 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [15] GUO Zhiyu, HUANG Qiangbing, LIU Yue, et al. Model experimental study on the failure mechanisms of a loess-bedrock fill slope induced by rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2023, 313: 106979.
- [16] 郑建国, 曹杰, 张继文, 等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 560 – 571. [ZHENG Jianguo, CAO Jie, ZHANG Jiwen, et al. Analysis of influencing factors of high loess-filled foundations based on centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 560 – 571. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ZHAO Meng, CHEN Liyi, WANG Shanyong, et al. Experimental study of the microstructure of loess on its macroscopic geotechnical properties of the Baozhong railway subgrade in Ningxia, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(9): 4829 – 4840.
- [18] LIU Yuyang, LAI Hongpeng, XIE Yongli, et al. Cracks analysis of highway tunnel lining in flooded loess[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, 2016, 170(1): 62 – 72.
- [19] JIA Pengjiao, KHOSHGHALB A, CHEN Chen, et al. Modified Duncan-Chang constitutive model for modeling supported excavations in granular soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(11): 04020211.
- [20] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性 [J]. 工程力学, 2013, 30(10): 108 – 114. [HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan. Deformation and shearing strength characteristic of compacted malan loess in Lüliang region[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 108 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 基于 Drucker-Prager 准则的岩石弹塑性损伤本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1103 – 1108. [YUAN Xiaoping, LIU Hongyan, WANG Zhiqiao. Study of elastoplastic damage constitutive model of rocks based on Drucker-Prager criterion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1103 – 1108. (in Chinese with English abstract)]
- [22] WANG Hui, HUAN Xiaolin, CHEN Yuqi, et al. Macro-mesoscopic Duncan-Chang damage model for hydrate-bearing sediments considering coupling effect of temperature-pore pressure condition[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021,

- 55(9): 1734 – 1743.
- [23] LI Jianwei, ZHANG Yu, LIN Liang, et al. Study on the shear mechanics of gas hydrate-bearing sand-well interface with different roughness and dissociation[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(11): 404.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019 (in Chinese with English abstract)]
- [25] 国家铁路局. 铁路路基设计规范: TB 10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. [National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design of railway Earth Structure: TB 10001—2016[S]. Beijing: China Railway Press, 2016 (in Chinese with English abstract)]
- [26] 杨光华, 姚丽娜, 姜燕, 等. 基于 e-p 曲线的软土地基非线性沉降的实用计算方法 [J]. *岩土工程学报*, 2015(2): 242 – 249. [YANG Guanghua, YAO Lina, JIANG Yan, et al. Practical method for calculating nonlinear settlement of soft ground based on e-p curve[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015(2): 242 – 249. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 谢杰辉, 牛富俊, 彭智育, 等. 滨海高速公路路基变形规律及沉降预测应用 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 97 – 107. [XIE Jiehui, NIU Fujun, PENG Zhiyu, et al. Deformation law and settlement prediction application of soft soil subgrade in coastal expressway[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(4): 97 – 107. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 雷华阳, 万勇峰, 冯双喜. 不同潮汐水位下深厚滩涂软土路基长期沉降规律及预测研究 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(6): 584 – 595. [LEI Huayang, WAN Yongfeng, FENG Shuangxi. Study on long-term settlement law and prediction of deep beach soft soil subgrade under different tidal levels[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2022, 55(6): 584 – 595. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王伯昕, 刘佳奇, 王清, 等. 冻融循环条件下粉质黏土-混凝土界面微观损伤及宏观剪切性能研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(增刊 1): 3792 – 3800. [WANG Baixin, LIU Jiaqi, WANG Qing, et al. Study of meso-damage and macroscopic shear performance of silty clay-concrete interface under freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Sup1): 3792 – 3800. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 李泽闯, 张昊, 程培峰, 等. 含粗粒滑带土剪切带演化及空间展布规律研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(4): 1067 – 1080. [LI Zechuang, ZHANG Hao, CHENG Peifeng, et al. Experimental study on the development process and spatial distribution of shear band of coarse-grained sliding zone soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(4): 1067 – 1080. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. [LI Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 等. 考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 84 – 91. [TAN Weijia, WEI Yunjie, WANG Junhao, et al. The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 84 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 李杭州, 廖红建, 盛谦. 基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(7): 1331 – 1336. [LI Hangzhou, LIAO Hongjian, SHENG Qian. Study on statistical damage constitutive model of soft rock based on unified strength theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1331 – 1336. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 蒋维, 邓建, 李隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(6): 1190 – 1194. [JIANG Wei, DENG Jian, LI Yin. Study on constitutive model of rock damage based on lognormal distribution[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(6): 1190 – 1194. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 5007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 5007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真