DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.007

压实黄土物理性质对其抗压强度的综合影响

亢佳玉[1], 王丽琴[1], 牛俊涛[2], 吕旭东[2], 邓国华[1,3], 侯文帅[1], 刘 珏[2]

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院,陕西 西安 710048; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司,陕西 西安 710018;
3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司,陕西 西安 710061)

摘要: 压实黄土的力学特性直接关系到高填方工程的安全。无侧限抗压强度最能直接反映黄土的力学性质,因此,为研究基本物理性质对压实黄土强度的影响,针对采取的不同场地、不同沉积时代的黄土,进行了不同含水率、不同压实度试样的无侧限抗压强度试验,分析了其应力-应变曲线特征,探讨了无侧限抗压强度与基本物性指标之间的关系,引入综合物理量 Z,建立了两者的关系。结果表明:在试验的压实度范围内,随着含水率增加、压实度减小,无侧限条件下压实黄土的应力-应变曲线从强软化型向弱软化型转变;压实黄土物理性质对其无侧限抗压强度的影响规律与沉积时代密切相关,沉积时代不同时,变化规律存在差异。

关键词: 压实黄土; 无侧限抗压强度; 综合物理量; 沉积时代

中图分类号: TU43 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0533-07

Comprehensive influence of physical properties of compacted loess on its compressive strength

KANG Jiayu[1], *WANG Liqin*[1], *NIU Juntao*[2], *LÜ Xudong*[2], *DENG Guohua*[1,3], *HOU Wenshuai*[1], *LIU Jue*[2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi′an University of Technology, Xi′an 710048, China; 2. China Northwest Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Xi′an 710018, China; 3. Xi′an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi′an 710061, China)

Abstract: The mechanical properties of compacted loess are directly related to the safety of high fill engineering projects. Unconfined compressive strength can directly reflect the mechanical properties of loess. Therefore, to study the influence of basic physical properties on the strength of compacted loess, the unconfined compressive strength tests of loess samples with different water contents and different compaction degrees were carried out for different sites and different sedimentary time. The stress-strain curve characteristics of the samples were analyzed, the relationship between unconfined compressive strength and basic physical properties was discussed, and a comprehensive physical quantity Z was introduced to establish the relationship between them. The results show that within the range of compaction degrees tested, as the water content increases and the compaction degree decreases, the stress-strain curves of compacted loess under unconfined conditions transform from strain-softening behavior of strong type to weak type. The influence of physical properties of compacted loess on its unconfined compressive strength is closely related to the sedimentary age, and the variation laws differ with different sedimentary ages.

Key words: compacted loess; unconfined compressive strength; comprehensive physical index; sedimentary time

随着人类活动与工程建设的大量开展,黄土地区的新城土地开发及公路、铁路、机场等基础设施建设中填方工程越来越多。一般的填方工程多分布于沟壑纵横的地貌环境,在填方体上开展工程活动,需对作为填方体的黄土有更深刻地了解,才有利于工程的进展[1]。虽然无侧限抗压强度指标主要用于室内试验的比较研究或分类,在实际工程中的应用较少,但黄土边坡临空面土体处于无侧限条件,其力学性质可通过无侧限抗压强度来表达,该强度受土体的性质、含水率、压实度等因素的影响.无侧限抗压强度降低时,可能导致填方边坡发生崩塌、滑坡等工程危害。因此,研究压实黄土无侧限

收稿日期: 2024-04-01 **修回日期**: 2025-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(52178355);陕西省自然科学基础研究计划(2022JM-216)

第一作者: 亢佳玉(1998—),女,硕士生,主要研究方向为黄土力学与工程。E-mail:3274574131@qq.com

通信作者: 王丽琴(1976—),女,博士,副教授,主要研究方向为黄土力学与工程。E-mail:wanglq@xaut.edu.cn

抗压强度随物理性质的变化规律具有重要的工程意义。

学者们对于黄土无侧限抗压强度的研究主要集中在两方面,一方面表现为对改良黄土强度的研究,如粉煤灰[2]、石灰[3-4]、水泥[5]等对黄土的加固效果。通过无侧限抗压强度试验,黄涛等[6]研究氧化镁和微生物共同作用时黄土的无侧限抗压强度随氧化镁的掺量、养护龄期的变化规律;Chen等[7]发现纳米MgO作为节能环保稳定剂时可提高黄土的工程性能,并确定了纳米MgO的最佳含量为2%;贺智强等[8]证实了木质素磺酸钙加固黄土的可行性,并确定了改良黄土所需的最佳掺量和最优养护时间。陈瑞锋等[9]研究了赤泥改性黄土的基本力学性质,得到了最佳配比,并建立了无侧限抗压强度与电阻率之间的经验公式;Xing等[10]研究了小麦秸秆、水泥含量对盐碱土的影响,并提出不同水泥含量、小麦秸秆含量、养护龄期等条件下的无侧限抗压强度的预测公式;Consoli等[3]等通过添加石灰改良土壤,通过量化石灰量、孔隙率、含水量对黄土无侧限抗压强度的影响,证明空隙/石灰比是评估soil-lime混合物强度的最佳参数;Fontoura等[11]描述巴西纳塔尔沙丘的风积沙在无侧限抗压强度试验中的力学行为与强度,证实了通过孔隙/水泥因子估算无侧限抗压强度的可行性;Zhang等[12]、Li等[13]发现油污不仅会污染土壤,还会改变黄土的物理力学性质,分析柴油污染土的无侧限抗压强度在不同工况下的变化情况;Mirzababaei等[14]发现在粘土中加入地毯废纤维可以显著提高无侧限抗压强度。另一方面是通过无侧限抗压强度对黄土的结构性进行分析,如邵生俊等[15]用黄土的无侧限抗压强度定义了表示黄土初始结构性的构度指标;陈存礼等[16]通过无侧限抗压强度试验,分析制样含水率和试验含水率变化对压实黄土结构性的影响;杨更社等[17]为研究冻融循环对黄土结构性的影响,对不同含水率下的黄土进行不同循环次数的无侧限抗压强度试验,得到随含水率和冻融循环次数的增加,无侧限抗压强度减小;王丽琴等[18]通过对不同取土角度的原状、重塑黄土进行无侧限抗压强度试验,研究了黄土的各向异性,表明在垂直于沉积面或压实面取样时,黄土的结构性最强,强度最大;王博等[19]在原状黄土的结构性参数基础上,通过无侧限抗压强度试验,提出重塑黄土的结构性参数,并原状黄土的初始结构性参数远大于重塑黄土的相应参数,含水率增大对原状黄土初始结构性削弱程度明显高于重塑黄土。

综上所述,关于压实黄土无侧限抗压强度的研究已有很多,但其随物性指标变化规律的定性研究较多,定量研究较少。因此,本文通过无侧限抗压强度试验,分析其应力-应变曲线特征,研究黄土的基本物理性质对无侧限抗压强度的影响,建立无侧限抗压强度与其基本物理指标之间的关系,揭示压实黄土物理性质对其抗压强度的综合影响。

1 试验方案

1.1 试验用土

试验土样取自表1所示的三个场地,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),对各土样分别进行基本物性指标测定,结果如表1所示。

表1 试验黄土的物性指标

Tab. 1 Physical property indexes of test loess

土样	取土场地	取土深度/m	天然含水率w/%	土粒比重G_s	塑限w_p/%	液限w_L/%	塑性指数I_P	最大干密度ρ_{dmax}/g•cm^{-3}	最优含水率w_{op}/%
西安Q_3黄土	西安市东郊韩森寨旁幸福林带	3~5	18.81	2.71	22.4	31.9	9.5	1.67	20.40
西安Q_2黄土	西安市长安区地铁某区间站	23~25	20.79	2.69	25.6	34.6	9.0	1.75	18.98
兰州Q_3黄土	兰州市西固区马耳山村某边坡	7~8	4.06	2.74	14.9	25.1	10.2	1.69	17.00

1.2 试验方案

取三个不同场地的黄土,分别制作不同压实度(K=80%,85%,90%,95%,100%)与不同含水率(w=2%,5%,10%,13%,15%,18%,20%,23%,25%,w_{op})的重塑试样共140个,进行无侧限抗压强度试验。试验仪器采用南京自动化仪器厂生产的常规应变控制式三轴剪力仪,轴向变形速率控制在0.368 mm/min。试验采用圆柱形试样,其直径为39.1 mm,高为80 mm。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

根据试验方案进行试验,得到三种场地同一压实度下不同含水率压实黄土的应力-应变曲线分别如图1~图3所示,其中,σ表示轴向应力,kPa,ε表示轴向应变,%;K表示压实度,%。

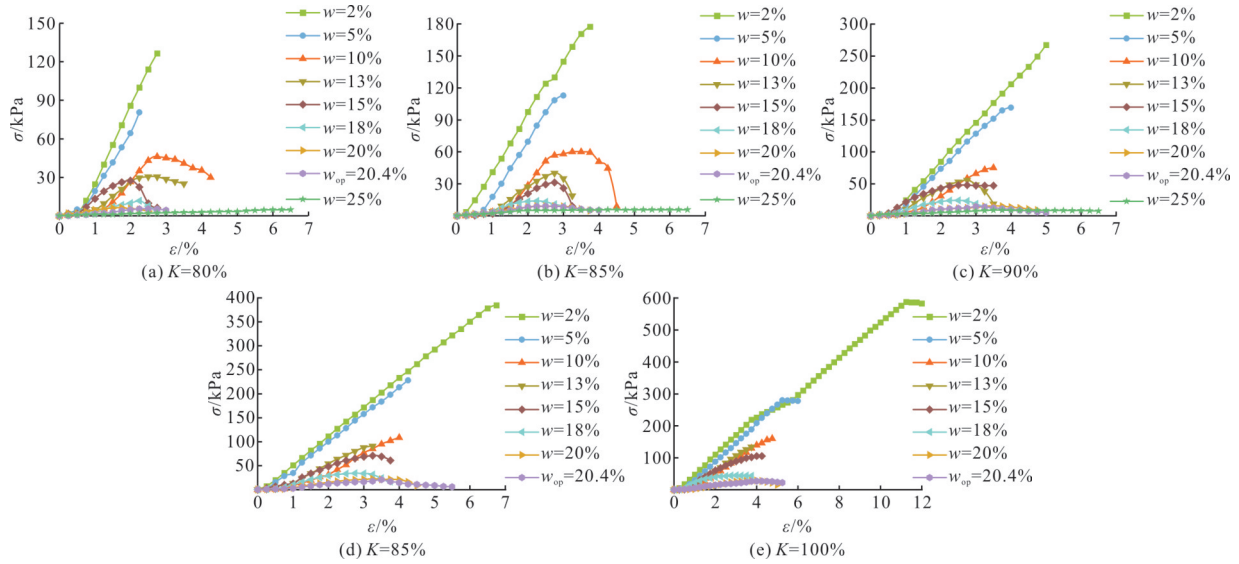


图 1　不同压实度西安 Q_3 黄土的应力-应变曲线

Fig. 1　Stress-strain curves of Xi′an Q_3 loess with different compactness

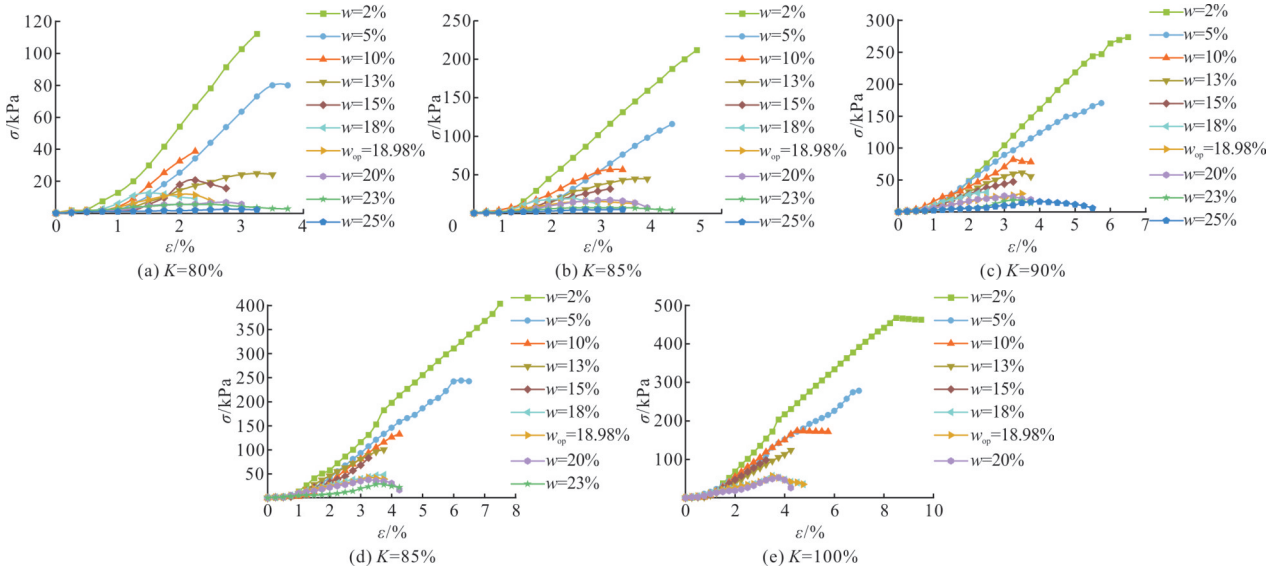


图 2　不同压实度西安 Q_2 黄土的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of Xi′an Q_2 loess with different compactness

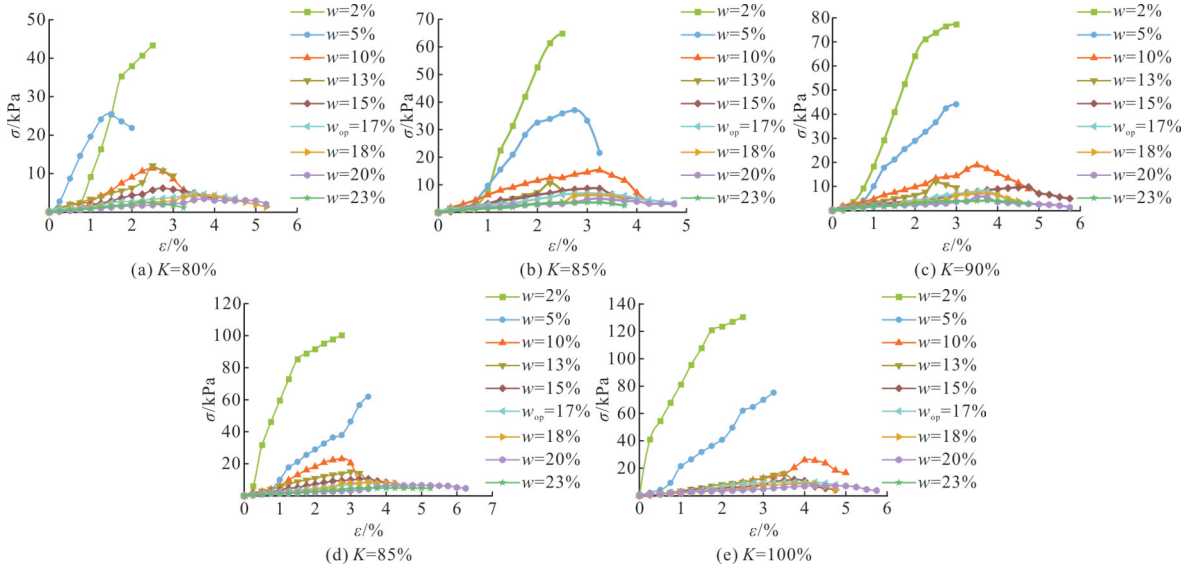


图 3　不同压实度兰州 Q_3 黄土的应力-应变曲线

Fig. 3　Basic physical indexes and unconfined compressive strength of loess in literature [18], [21]

由图 1～图 3 可知,三个场地的压实黄土在不同条件下的应力-应变曲线均为软化型。含水率低压实度高时,试验过程中随着应变的增加,土样所受轴向荷载快速增加,且达到最大值后发生脆性破坏,应力甚至骤降为 0。随着含水率的增加、压实度的减小,应力-应变曲线逐渐从强软化型向弱软化型转变,峰值点降低且向右移动。造成这一现象的原因是:随着含水率的增加,水会破坏试样内部架空颗粒结构,使得试样骨架结构支撑荷载的能力减弱,并且含水率增加会溶解土颗粒之间的矿物成分,使颗粒间的联结键作用被削弱,达到相同应变所需的荷载减小,试样的无侧限抗压强度减小。随着压实度的减小,颗粒之间的孔隙增大,土体更加疏松,可压缩空间较大,无侧限抗压强度减小。

2.2 压实黄土无侧限抗压强度分析

从图 1～图 3,分别可得三种压实黄土在不同压实度不同含水率时的无侧限抗压强度 q_u。不同压实度试样的无侧限抗压强度 q_u 随着含水率 w 的变化曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:不同场地的黄土,随着压实度的增加,试样孔隙体积减小,土体抵抗变形的能力不断增强。对比同一场地压实黄土在不同压实度时的应力-应变曲线,以西安 Q_3 黄土为例,如图 4(a)所示,随着压实度的增加,无侧限抗压强度增大,这是由于随着压实度的增加,试样内部的颗粒逐渐密实,颗粒之间的孔隙比随之减小,颗粒之间的接触、排列方式更加稳定,说明初始孔隙比的大小直接影响压实黄土的强度。

不同场地、不同沉积时代的压实黄土在不同条件下应力-应变曲线的形状基本相似,变化规律一致:随着竖向荷载的逐级增加,试样的应变随之增大,试样的孔隙比减小,土体更加密实,随着竖向荷载的进一步增加,土体的架空颗粒骨架结构被进一步破坏,骨架结构失去支撑荷载的能力,土体被压实,土体抵抗变形的能力增强。并且在竖向荷载作用下,土体内部颗粒之间的移动与滑移作用受压实度的影响,压实度增加,颗粒移动较小,变形更小。高压实度的试样骨架破坏,发生变形所需的荷载相较于低压实度土样更大,且高压实度的试样受含水率影响较小,因而高压实度试样的抗压性能更加稳定。

从图 4 可以看出,三种黄土试样在不同压实度下的无侧限抗压强度随含水率的变化规律也基本一致,均表现为:压实度一定时,无侧限抗压强度随含水率增加而减小;含水率一定时,无侧限抗压强度随压实度增加而增加,曲线整体向上“移动”,且移动幅度在含水率较小时更大。

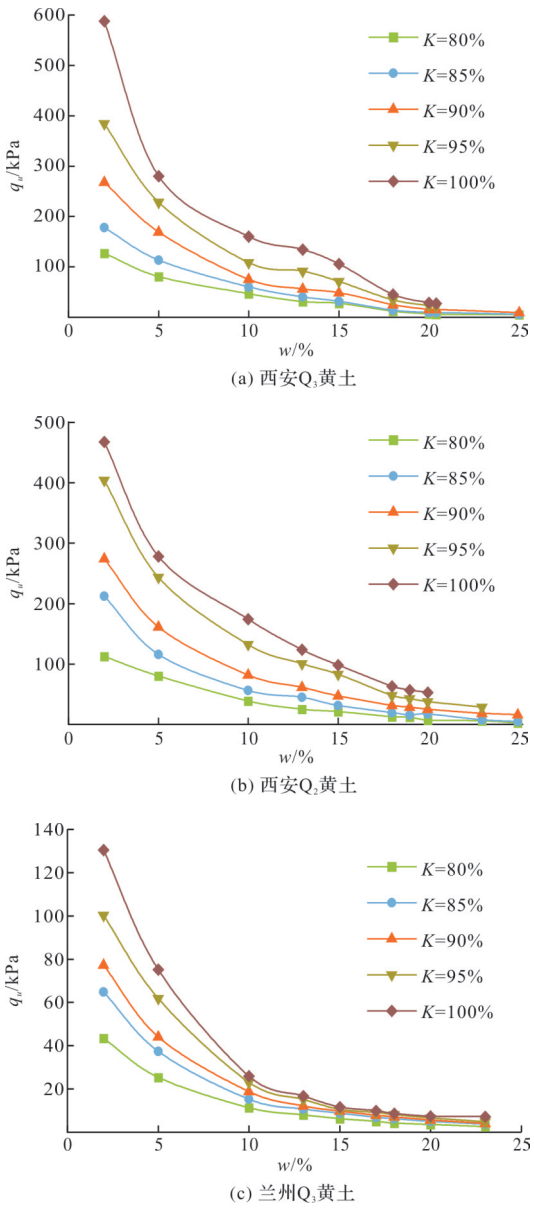


图 4 不同压实度试样的 q_u-w 关系曲线

Fig. 4 q_u-w relationship curves of samples with different compactness

2.3 压实黄土抗压强度与物理性质的关系

由上可知,压实黄土物理性质及压实度不同时,其抗压强度就不同,为反映黄土物理性质对其抗压强度的综合影响,采用综合物理量[20]进行分析,其表达式为

$$Z = I_L \cdot I_P \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \frac{\rho_d}{\rho_{sat}} = \frac{(w - w_p) \cdot S_r \cdot \rho_d}{(S_r + w) \cdot \rho_w} \quad (1)$$

式中:Z 表示综合物理量;I_L、I_P、ρ_d、ρ_{sat}、ρ_w、w、w_p、S_r 分别表示黄土的液性指数、塑性指数、干密度、饱和密度、含水率、塑限、饱和度。

综合物理量的表达式中包含了三个独立的物

理指标，同时也可以反映不同情况下的物理状态。通过三个独立的物理指标可导出其他六个三相指标，因此，综合物理量也可转化为：

$$Z=\frac{(w-w_p)\cdot s_r\cdot\rho_d}{(s_r+w)\cdot\rho_w}=\frac{w-w_p}{G_s+e}\cdot\frac{G_s^2}{1+e}=\frac{\dfrac{m_w}{m_s}-\dfrac{m_p}{m_s}}{\dfrac{m_s}{V_s}+\dfrac{V_V}{V_s}}\cdot\frac{\left(\dfrac{m_s}{V_s}\right)^2}{1+\dfrac{V_V}{V_s}}=\frac{\dfrac{m_w-m_{wp}}{V}}{\rho_w}\cdot\frac{ms}{m_s+m_{wsat}}=\frac{\rho_L}{\rho_w}\cdot R_s \tag{2}$$

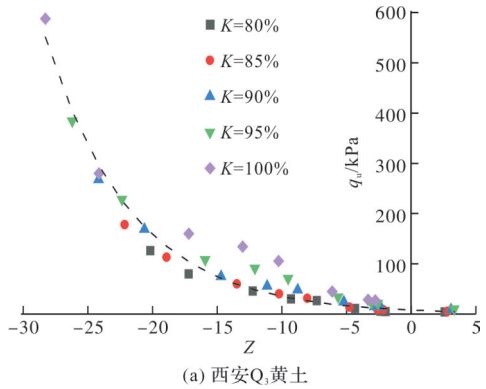
式中：$\rho_L=m_w-m_{wp}/V$，表示试样含水率与塑限含水率对应的密度之差；$R_s=m_s/m_{wsat}$，表示饱和土体的颗粒含量；m_{wp}与m_{wsat}分别表示塑限含水率及饱和土体中孔隙水的质量。

由式(2)可知，综合物理量Z反映了土体实际含水率与塑限含水率状态的密度差及饱和时固体颗粒的含量。

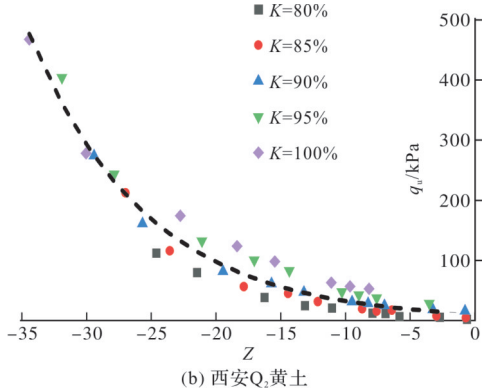
因$\rho_d=K\cdot\rho_{dmax}$，将其代入式(1)，得式(3)：

$$Z=\frac{(w-w_p)\cdot s_r\cdot K\cdot\rho_{d\max}}{(s_r+w)\cdot\rho_w} \tag{3}$$

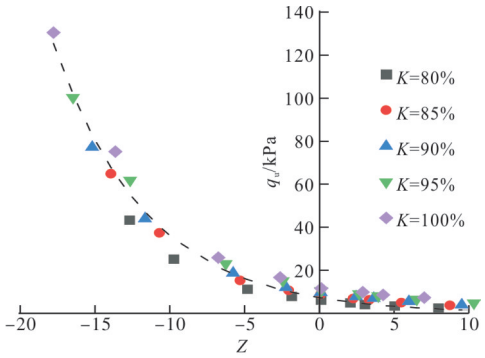
通过式(3)计算各土样的综合物理量Z，绘制各土样无侧限抗压强度q_u随Z的变化曲线，如图5所示。



(a) 西安Q_3黄土



(b) 西安Q_2黄土



(c) 兰州Q_3黄土

图5　压实黄土无侧限抗压强度与综合物理量的关系曲线

Fig. 5　Relationship curves between unconfined compressive strength and comprehensive physical index of compacted loess

从图5可看出，压实黄土的无侧限抗压强度随综合物理量的增大而减小，且基本呈指数型规律，具体表达式为：

$$q_u=a\cdot e^{bZ} \tag{4}$$

经拟合，三个场地黄土无侧限抗压强度的参数见表2，曲线见图5中虚线所示.

表2　各场地压实黄土的无侧限抗压强度拟合参数

Tab. 2　Fitting parameters of unconfined compressive strength of compacted loess in each site

土样	a	b	R^2
西安Q_3黄土	12.7	0.13	0.952 4
西安Q_2黄土	5.8	0.13	0.960 6
兰州Q_3黄土	12.7	0.13	0.976 7

从表2可以看出，式(4)描述压实黄土无侧限抗压强度与综合物理量关系的相关系数R^2均在0.95以上，且从图5可以看出拟合曲线大致穿过实测点，说明式(4)可反映q_u-Z的关系．三种黄土的参数b均相同，说明此参数与场地、时代均无关；西安Q_3黄土的参数a与兰州Q_3黄土一致，但与西安Q_2黄土的不同，说明参数a与场地无关，仅与黄土的沉积时代相关．具体地，试验压实黄土无侧限抗压强度与综合物理量Z的关系可表示为：

西安、兰州Q_3黄土：

$$q_u=12.7e^{0.13Z} \tag{5}$$

西安Q_2黄土：

$$q_u=5.8e^{0.13Z} \tag{6}$$

从以上分析可见：压实黄土的无侧限抗压强度与其物理指标之间的关系密切，利用综合物理量Z，根据黄土的含水率w、塑限w_p、压实度K、最大干密度ρ_{dmax}和饱和度S_r，通过式(5)、式(6)就可计算出相应不同物性状态压实黄土的无侧限抗压强度，说明压

实黄土的无侧限抗压强度受物理指标的综合影响.

3 文献实例验证

为验证得到的压实黄土无侧限抗压强度q_u与综合物理量Z的关系是否适用于其他场地的压实黄土,查找给出压实黄土相关物性指标及实测无侧限抗压强度的文献,对其压实黄土的无侧限抗压强度进行预测,并与实测值进行比较.

参考文献[18]与[21]分别给出了甘肃省兰州市兰州大学榆中校区某直立边坡和陕西省榆林市靖边县、陕西省延安市洛川县Q_3黄土的相关物性指标及实测无侧限抗压强度,见表3.

表3 文献中黄土的基本物理指标及无侧限抗压强度[18],[21]

Tab. 3 The basic physical indexes of loess in the literature[18],[21]

土样	土粒比重G_s	塑限w_p	液限w_L	干密度ρ_d/g·cm^{-3}	试验含水率/%	无侧限抗压强度实测值q_u/kPa
榆中Q_3黄土	2.70	20.00	28.00	1.25	2	85.02
					5	77.47
					10	19.30
					15	14.51
					18	11.28
					20	8.59
榆林Q_3黄土	2.69	15.47	25.10	1.69	7	69.68
延安Q_3黄土	2.72	17.40	31.63	1.26	2	92.17

根据表3中的物性指标,通过式(1)计算各黄土的综合物理量Z,代入式(5),得黄土的无侧限抗压强度预测值.绘制文献中不同含水率黄土试样无侧限抗压强度的实测值与预测值的关系,见图6.可以看出,两者较接近,初步说明通过式(5)描述压实黄土无侧限抗压强度与综合物理量关系的合理性与适用性.

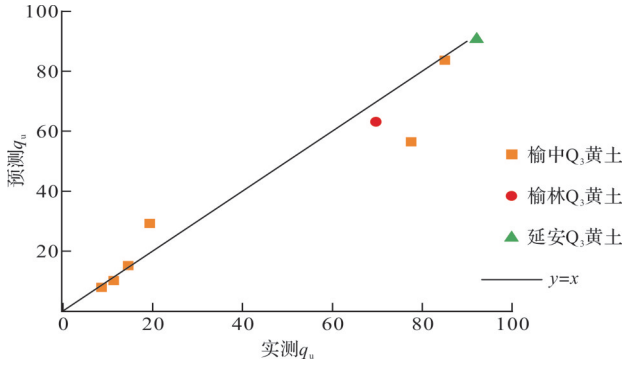


图6 文献中Q_3黄土q_u的实测值与预测值的关系

Fig. 6 Relationship between measured and predicted values of Q_3 loess q_u in the literature

4 结论

(1)在不同条件下,压实黄土的破坏类型为脆性破坏,其应力-应变曲线形状均表现为软化型,随着含水率增加,曲线从强软化型向弱软化型转变;

(2)通过综合分析,压实黄土的无侧限抗压强度值与其压实度K、含水率w、塑限w_p、颗粒比重G_s、饱和度S_r、最大干密度ρ_{dmax}等物理指标相关;

(3)综合物理量Z可以很好地反映各物理指标的影响,从压实黄土的q_u-Z曲线发现其变化符合指数函数的变化规律;

(4)建立了各压实黄土无侧限抗压强度与综合物理量之间的定量关系,其中参数b与黄土场地、沉积时代无关,参数a仅与黄土的沉积时代相关;将这一定量关系应用于文献中的压实黄土,验证了此关系的合理性与适用性.

未找到可用于验证Q_2压实黄土无侧限抗压强度值与综合物理量关系的相关文献,试验所用黄土与验证Q_3压实黄土的数量也有限,因此本文所得的无侧限抗压强度与综合物理量的关系需在今后研究中不断验证.

参考文献 References

[1] SUN L, LI P, XIAO T, et al. Influence of compaction condition on the UCS and structure of compacted loess [J]. Environmental Earth Sciences. 2023, 82(17): 411.

[2] YAN C G, ZHANG Z Q, JING Y L. Charac-teristics of strength and pore distribution of lime-flyash loess under freeze-thaw cycles and dry-wet cycles [J]. Arabian Journal Of Geosciences. 2017, 10(24): 544.

[3] CONSOLI N C, LOPES L D S, HEINECK K S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils [J]. Journal of Materials in Civil Engineering. 2009, 21(5): 210-216.

[4] JIA L, GUO J, ZHOU Z D, et al. Experimental investigation on strength development of lime stabilized loess[J]. RSC Advances. 2019, 9(34): 19680-19689.

[5] ZHANG Y, Johnson A E, White D J. Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100279.

[6] 黄涛，方祥位，张伟，等. 活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3300-3306, 3316.
HUANG Tao, FANG Xiangwei, ZHANG Wei, et al. Experimental study on solidified loess by microbes and reactive magnesium oxide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3300-3306, 3316.

[7] CHEN S, NI P, SUN Z, et al. Geotechnical properties and stabilization mechanism of Nano-MgO stabilized loess[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4344.

[8] 贺智强，樊恒辉，王军强，等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 731-739.
HE Zhiqiang, FAN Henghui, WANG Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 731-739.

[9] 陈瑞锋，田高源，米栋云，等. 赤泥改性黄土的基本工程性质研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 89-97.
CHEN Ruifeng, TIAN Gaoyuan, MI Dongyun, et al. Study of basic engineering properties of loess modified by red mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 89-97.

[10] XING G Q, LIU C J, XUAN W, et al. Prediction of unconfined compression strength for saline-alkaline soils mixed with cement and wheat straw[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(3): 1-14.

[11] FONTOURA T B, SANTOS JUNIOR O F D, SEVERO R N F, et al. Unconfined compression strength of an artificially cemented aeolian dune sand of Natal/Brazil[J]. Soils & rocks, 2021, 44(1): 1-8.

[12] ZHANG S, LI R, BAI W, et al. Effects of oil contamination on the physical-mechanical behavior of loess and its mechanism analysis[J]. Geofluids, 2021(3): 1-12.

[13] LI R J, ZHANG S B, LI R J, et al. Experimental study on mechanical behaviors of loess based on two different modes of oil contamination [J]. Geofluids, 2022(s1): 1-11.

[14] MIRZABABAEI M, MIRAFTAB M, MOHAMED M, et al. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(3): 483-493.

[15] 邵生俊，郑文，王正泓，等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15-19, 38.
SHAO Shengjun, ZHENG Wen, WANG Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-19, 38.

[16] 陈存礼，蒋雪，苏铁志，等. 结构性对压实黄土无侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2539-2545.
CHEN Cunli, JIANG Xue, SU Tiezhi, et al. Influence of soil structure on unconfined compression behaviour of compacted loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2539-2545.

[17] 杨更社，魏尧，田俊峰，等. 冻融循环对结构性黄土构度指标影响研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(6): 675-681.
YANG Gengshe, WRI Yao, TIAN Junfeng, et al. Effect of the freeze-thaw cycle on structural loess structural index [J]. Journal of Xi′an University of Science and Technology, 2015, 35(6): 675-681.

[18] 王丽琴，赵聪，胡向阳，等. 黄土强度及结构的各向异性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 25-29.
WANG Liqin, ZHAO Cong, HU Xiangyang, et al. Strength and structural anisotropy of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 25-29.

[19] 王博，黄睿，黄雪峰，等. 延安新区黄土结构性参数对无侧限抗压强度的影响规律[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 202-208.
WANG Bo, HUANG Rui, HUANG Xuefeng, et al. Influence of loess structural parameters on unconfined compressive strength in Yan′an New Area[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(3): 202-208.

[20] 王丽琴，邵生俊，鹿忠刚. 物理性质对黄土初始结构性的综合影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3484-3490.
WANG Liqin, SHAO Shengjun, LU Zhonggang. Influence of physical properties on the initial structure of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3484-3490.

[21] 慕焕东，邓亚虹，张文栋. 沙漠-黄土高原过渡区砂质黄土强度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 146-154.
MU Huandong, DENG Yahong, ZHANG Wendong. Experimental study on strength of loess in the transition zone of desert and the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(8): 146-154.

（编辑　吴海西）