

基于扰动状态理论的沈阳砾砂修正邓肯-张模型

汪智慧^{1,2}, 陈晨^{2,3}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110023;
3. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110003)

摘要 目的 研究沈阳地区砾砂受扰动影响的应力-应变关系,以相对密实度为媒介,推导出考虑扰动影响的修正邓肯-张模型,为实际岩土工程问题的计算提供理论依据. 方法 针对沈阳地区砾砂进行三轴固结排水剪切试验;并基于扰动状态理论,采用相对密实度 D_r 为扰动参量,提出能考虑扰动影响的统一扰动度函数,并将其引入 Duncan-Chang 模型中,结合三轴试验结果,提出适用于沈阳地区砾砂的修正 D-C 模型;最后将试验曲线与理论计算曲线进行对比分析. 结果 中密或密实状态砾砂,应力-应变关系呈应变软化型;峰值强度会随围压增大而增大;峰值强度也会随 D_r 的增大而增大. 传统 D-C 模型中的参数 K 和峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 受扰动影响程度较大,而参数 n 和 R_f 在扰动过程中变化微小. 结论 采用笔者提出的考虑扰动影响的修正模型计算结果较传统 D-C 模型更接近于真实的试验结果. 因此,该修正模型可更好地模拟沈阳地区粗颗粒土的强度与变形特性.

关键词 沈阳地区;砾砂;三轴试验;相对密实度;扰动函数;修正邓肯-张模型

中图分类号 TU411.4 文献标志码 A

The Modified Duncan-Chang Model for Gravelly Sand in Shenyang Based on the Disturbed State Concept

WANG Zhihui^{1,2}, CHEN Chen^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 2. China Northeast Architectural Design & Research Institute CO., Ltd. TD, Shenyang, China, 110023; 3. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110003)

Abstract: In this paper, the strength-strain relations of the gravelly sand in Shenyang considering the influence of disturbance are established by the triaxial consolidation drained shear tests and the modified Duncan-Chang model focused on gravelly sand in Shenyang is obtained which can provide the theory basis for practical geotechnical engineering. Based on the theory of DSC, the general disturbance function which can consider the influence of disturbance is established in which D_r is used as a parameter of disturbance. Combined the results of triaxial tests, the modified Duncan-

收稿日期:2015-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51578116);中建股份科技研发项目(CSECEC-2014-Z-35)

作者简介:汪智慧(1981—),男,博士研究生,主要从事基坑和地下工程专业研究.

Chang model focused on gravelly sand in Shenyang is obtained in which the disturbance function is introduced. The test results show that the stress-strain relationship curve tends to soften for the medium dense and the gravelly sand and the disturbance has big influence of the parameter K and the peak strength $(\sigma_1 - \sigma_3) f$ in traditional D-C model and it has little influence of the parameter n and the failure ratio R_f . Also, the calculation curves by the modified model are analyzed comparing the test curves and the results show that it is better to use the modified model considering the influence of disturbance comparing the traditional models as the former can make a better description of the strength and the deformation characteristics of the coarse-grained sand in Shenyang area.

Key words: Shenyang area; gravelly sand; triaxial test; relative density; disturbed function; modified D-C model

十二五期间,随着东北老工业基地逐渐融入“一带一路”高速发展浪潮中,东北三省已成为我国向北开放的重要窗口^[1]。而沈阳市作为东北经济、政治、文化中心及最大的交通枢纽,大规模的基础设施已经建成。伴随着大规模建设,超深、超大、复杂地质条件的基坑亦如雨后春笋般大量涌现。从地质分布来看,沈阳地区粗颗粒土类所占比重较大^[2],而《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120—2012)中建议的计算模型难以满足现有复杂基坑设计的需求,且遵循规范模型计算的结果与现场实测的数据更难以符合^[3]。因此,对沈阳市粗颗粒土本构关系研究,使其得到必要的本地化修正显得攸关重要。

对粗颗粒土的本构模型研究,国内外学者已得到大量成果^[4-7]。但由于普适性、便捷性等原因,这些模型在实际工程中应用较少。现有粗颗粒土工程问题中,应用较多的为 Duncan - Chang (D - C) 模型,它是以广义 Hooke 定律为基础的非线弹性模型。D - C 模型参数少、意义明确且易于获得,从问世以来便得到广泛认可^[8-11]。

笔者针对沈阳砾砂,进行不同相对密度 D_r 的大型三轴固结排水剪切试验,探讨沈阳砾砂 D - C 模型参数受 D_r 的影响规律。基于扰动状态概念(DSC),提出统一扰动度函数,并将其引入 D - C 模型中,得到考虑扰动的沈阳砾砂修正 D - C 模型。结合三轴试验结果和传统 D - C 模型结果,对比分析修正模型在描

述沈阳砾砂应力 - 应变关系的优势所在。

1 统一扰动度函数的建立

1974 年, C. S. Desai^[12] 首先提出了扰动状态概念,用扰动度 (D_D) 度量材料受扰动的程度,并认为一般材料均为相对完整 ($D_D = 0$) 和完全调整状态 ($D_D = 1$) 的混合体;扰动后,经自调节过程,材料仍为两种状态的混合体。据此,建立了考虑应变影响的扰动度函数。在基坑施工过程中,土体受到扰动,其结构性发生变化。扰动引起的土体改变可以用密度、含水量、不均匀系数、相对密实度等土性参数的改变描述^[13]。而在土体扰动过程中,相对密实度 D_r 的变化较其他参数尤其明显^[14]。

笔者基于 DSC 理论,参考正/负扰动概念^[15],以相对密实度 D_r 为媒介,提出了能全面考虑砾砂土体正/负面扰动影响对材料弱化/强化作用的统一扰动度函数,表达式如下:

$$D_D = \left\{ \frac{2}{\pi} \arctan \left[\frac{D_{r0} - D_r}{D_r(1 - D_r)} \right] \right\}^{1/3}. \quad (1)$$

式中: D_{r0} 为砾砂初始相对密实度; D_r 为砾砂扰动状态相对密实度。

2 砾砂三轴固结排水剪切试验

2.1 试验方案

笔者选取沈阳地区砾砂,颗粒粒径主要集中在 2 ~ 10 mm,土样颗粒级配曲线见图 1,基本物理参数见表 1。试验时,根据不同相对密实度 ($D_r = 0.5 \sim 0.8$) 进行三轴固结剪

切排水试验.

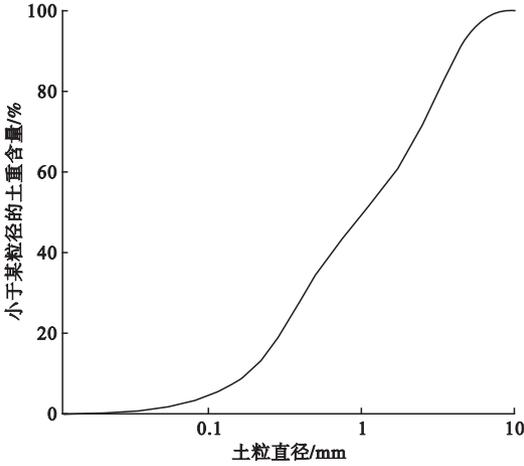


图1 沈阳砾砂颗粒级配曲线

Fig.1 Grading curve of gravelly sand in Shenyang

表1 试验基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the test

含水率 $\omega/\%$	相对 密度	天然干密 度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	最小干密 度 $\rho_{dmin}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	最大干密 度 $\rho_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	相对密 实度 D_r
28.5	2.63	1.58	1.58	1.35	1.75

采用南京泰克奥科技有限公司 LH-TTS-S Series 型全自动应力路径三轴仪进行试验. 试验仪器及砾砂试样见图 2. 试样直径 150 mm, 高 300 mm, 制样时分 7 层填筑. 剪切试验前, 对试样进行反压饱和 ($B \geq 0.95$), 剪切速率为 0.015 mm/min.

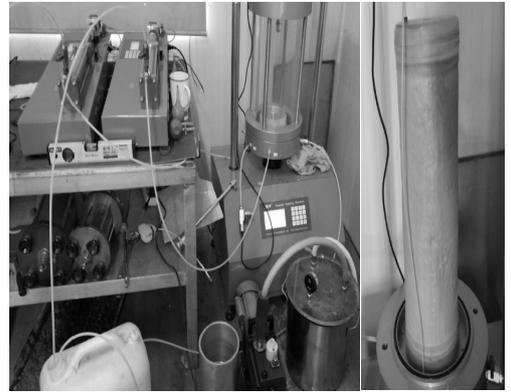


图2 试验仪器及砾砂试样

Fig.2 Sample of the gravelly sand

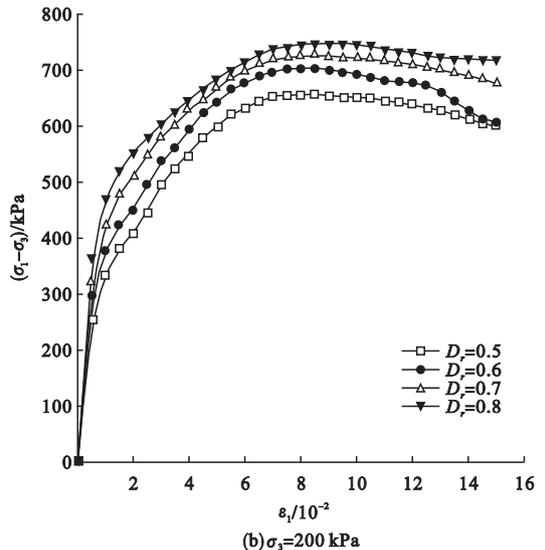
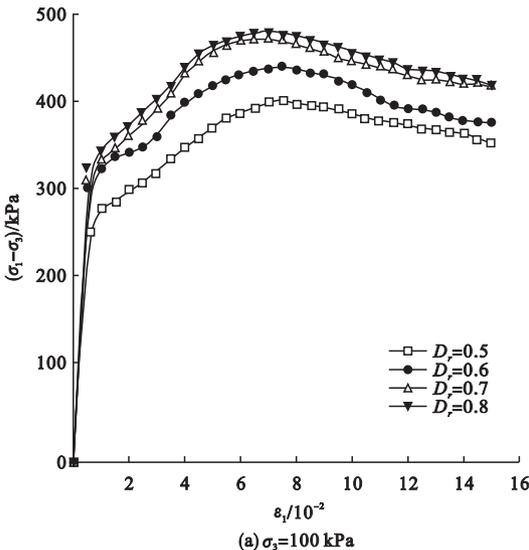
2.2 砾砂应力-应变关系曲线

不同围压条件的砾砂应力-应变曲线见图 3. 可以看出, 对于中密或密实状态砾砂, 应力-应变关系呈应变软化型; 峰值强度会随围压的增大逐渐增大; 峰值强度也会随相对密实度的增大而增大. 弹性阶段内, 砾砂偏应力-应变曲线的斜率随相对密实度的增大而逐渐增大. 这也说明初始状态下的砾砂越密实, 其初始切线模量也越大. 各工况下砾砂 D-C 模型参数见表 2.

3 砾砂 D-C 模型修正

3.1 对初始切线 E_t 模量的修正

笔者沿用 R. L. Kondner^[16] 提出的双曲线型应力-应变关系(见式(2)), 初始切



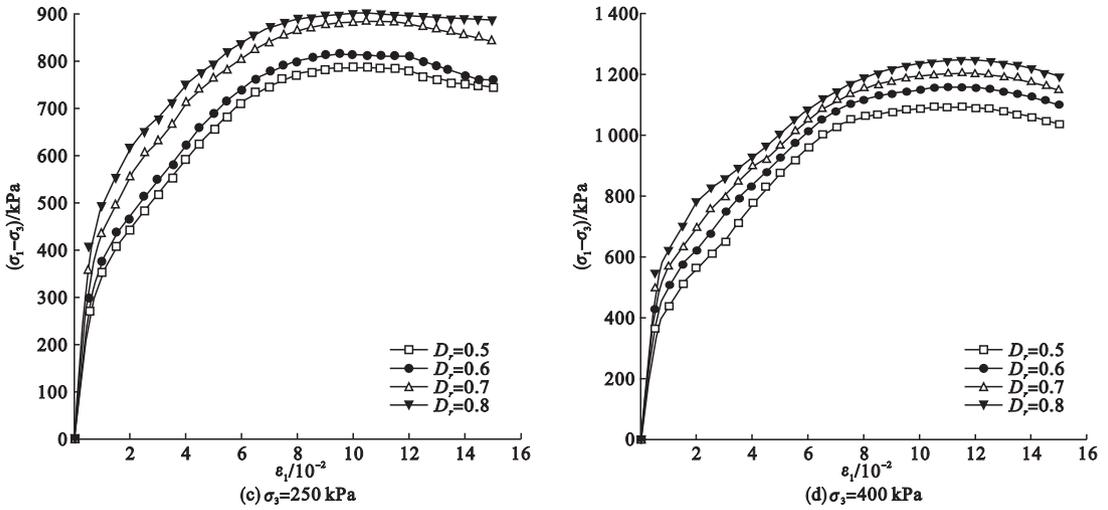


图 3 不同围压下的砾砂应力 - 应变关系曲线

Fig. 3 Stress-stain relationships of gravelly sand under different confining pressures

表 2 不同工况下沈阳地区砾砂 Duncan - Chang 模型参数

Table 2 The D-C model parameters of gravelly sand under different working conditions in Shenyang

相对密度 D_r	围压 σ_3 /MPa	初始切线模量 E_i /MPa	$\lg(E_i/p_a)$	$\lg(\sigma_3/p_a)$	参数 K	参数 n
0.5	0.1	226.8	3.350	-0.006	2 212.4	0.508
	0.2	249.0	3.490	0.295		
	0.25	324.1	3.544	0.392		
	0.4	464.6	3.612	0.596		
0.6	0.1	313.5	3.380	-0.006	2 512.0	0.501
	0.2	369.0	3.561	0.295		
	0.25	467.7	3.617	0.392		
	0.4	611.3	3.691	0.596		
0.7	0.1	354.9	3.581	-0.006	3 287.8	0.503
	0.2	410.5	3.635	0.295		
	0.25	536.1	3.693	0.392		
	0.4	709.1	3.762	0.596		
0.8	0.1	454.9	3.661	-0.006	4 491.1	0.509
	0.2	492.0	3.730	0.295		
	0.25	652.4	3.780	0.392		
	0.4	949.2	3.814	0.596		

线模量 E_i 为参数 a 的倒数. 采用邓肯等在 1970 年提出的方法^[17], 利用经验公式求解参数 a 和 b .

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

N. Janbu^[18] 发现土体初始切线模量与第

三主应力呈指数关系 (见式 (3)), 绘制 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 与 $\lg(E_i/p_a)$ 的关系曲线 (见图 4), 二者呈近似线性关系, 参数 $\lg K$ 代表直线截距; n 代表直线斜率; p_a 表示标准大气压力.

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

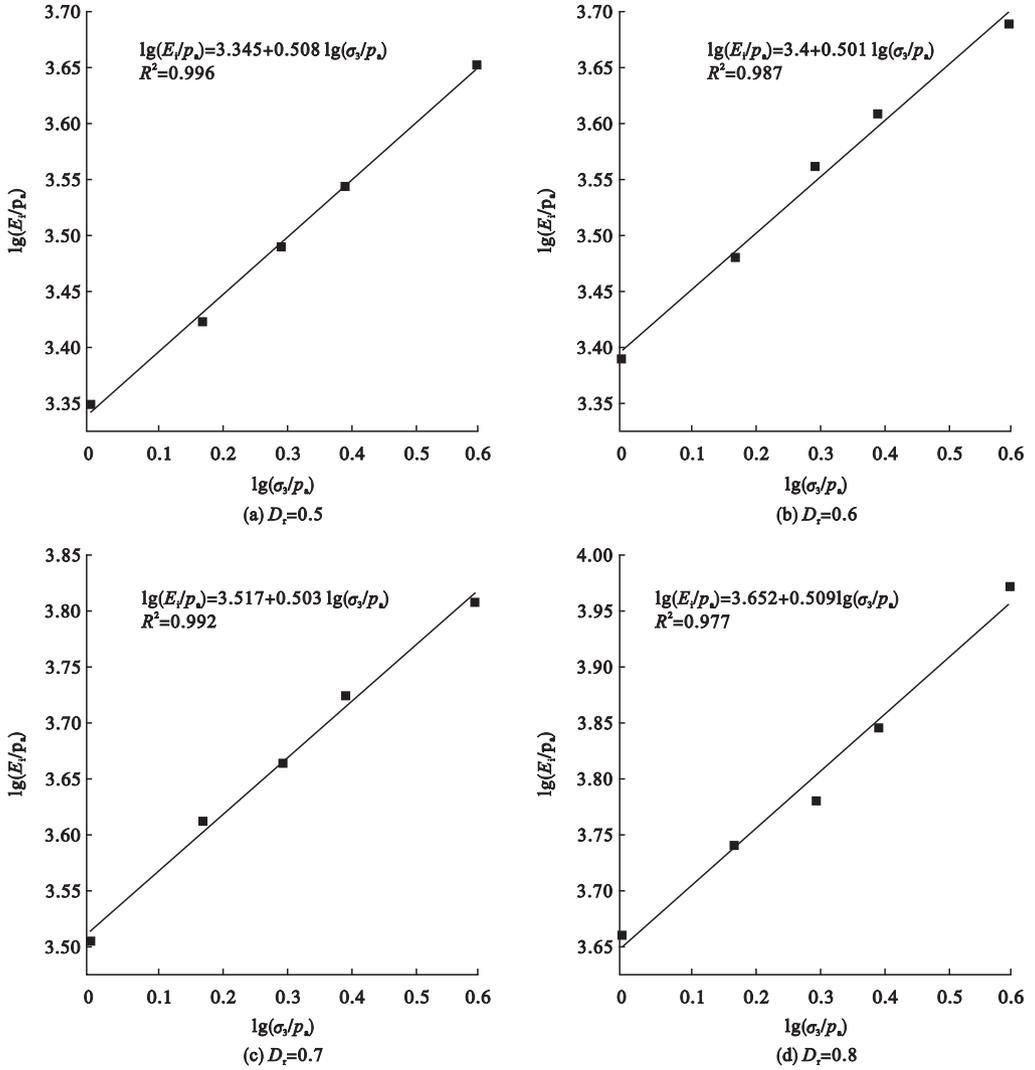


图4 不同相对密度下的 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 4 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ relationship in different D_r

从图4可知,不同相对密度下,参数 n 保持稳定,不随 D_r 的变化而大幅变化,这表明 n 受 D_r 影响很小,可不对其进行修正;而参数 K 则随 D_r 的增大而大幅增加,在考虑扰动影响的 D-C 模型中,应对其进行修正.采用式(4)对 K 和 D_r 进行拟合,拟合曲线见图5.

$$\ln K = c + dD_r \quad (4)$$

由图5可知, $\ln K$ 与 D_r 拟合曲线的相关系数达到 0.995, 拟合良好. 对于沈阳砾砂, 试验中无量纲参数 b 值约为 7.60, c 值约为 -1.27, d 值约为 2.83.

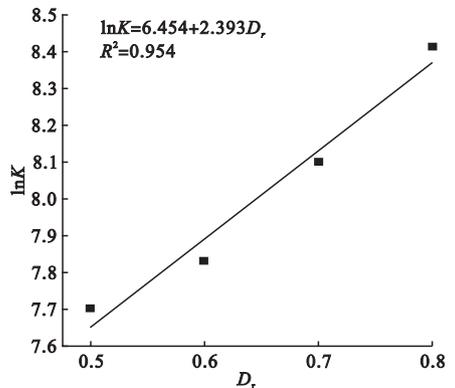


图5 砾砂试样的 $\ln K - D_r$ 曲线

Fig. 5 The $\ln K - D_r$ relationship curves of the gravely sand

3.2 对峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的修正

令式(1)中 $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$, 则极限偏应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 与参数 b 呈反比例关系, 如式(5):

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{1}{b} \quad (5)$$

定义破坏比 R_f , 其表达式见式(6), 其中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为砾砂的峰值强度.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6)$$

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 及 R_f 的确定方法参照文献[17], 结果见表 3.

表 3 不同工况下沈阳地区砾砂 Duncan - Chang 模型参数

Table 3 D-C model parameters of gravelly sand under different working conditions in Shenyang

围压 σ_3 /MPa	D_r	峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ /MPa	极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ /MPa	R_f
0.1	0.5	0.364	0.513	0.71
	0.6	0.397	0.537	0.73
	0.7	0.425	0.595	0.71
	0.8	0.432	0.629	0.69
0.2	0.5	0.657	0.943	0.71
	0.6	0.703	1.020	0.70
	0.7	0.725	0.990	0.73
	0.8	0.747	1.087	0.69
0.25	0.5	0.787	1.140	0.70
	0.6	0.815	1.212	0.69
	0.7	0.883	1.244	0.71
	0.8	0.904	1.291	0.70
0.4	0.5	1.093	1.552	0.72
	0.6	1.157	1.630	0.71
	0.7	1.202	1.717	0.70
	0.8	1.247	1.754	0.71

从表 3 可知各工况下, 破坏比 R_f 变化很小, 因此近似认为其不随 D_r 的变化而改变, 可不对其进行修正. 而极限偏应力差值随 D_r 的增加而逐渐增大, 应考虑 D_r 变化对其影响. 考虑到 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与 σ_3 有关, 笔者建立形如式(7)的关系, 参数 $\lg M$ 代表直线截距, l 代表直线斜率.

$$\lg[(\sigma_1 - \sigma_3)_f/p_a] = \lg M + l \lg[\sigma_3/p_a] \quad (7)$$

将表 3 数据带入式(7)中, 得到不同相对密实度下砾砂的 $\lg M$ 和 l 的曲线(见图 6).

由图 6 可知, 各工况中 l 基本保持稳定, 因此近似认为 l 不随 D_r 变化, 且 $l = 0.8$, 可不作修正. 而 M 随 D_r 变化幅度较大, M 随

D_r 的变化趋势见图 7, 从图中可知 M 与 D_r 呈近似线性关系.

采用式(8)对二者进行拟合, 拟合直线的相关系数 $R^2 = 0.984$, 因此, 对二者关系的拟合是合理有效的. 对于沈阳砾砂, 无量纲参数 α 和 β 约为 1.84 和 2.95.

$$M = \alpha + \beta D_r \quad (8)$$

以 D_r 为媒介, 结合式(1) ~ 式(8), 得到考虑扰动状态的沈阳砾砂修正邓肯 - 张模型为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{e^{c+D_r} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n} + \frac{R_f \varepsilon_1}{(\alpha + \beta D_r) p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^l}} \quad (9)$$

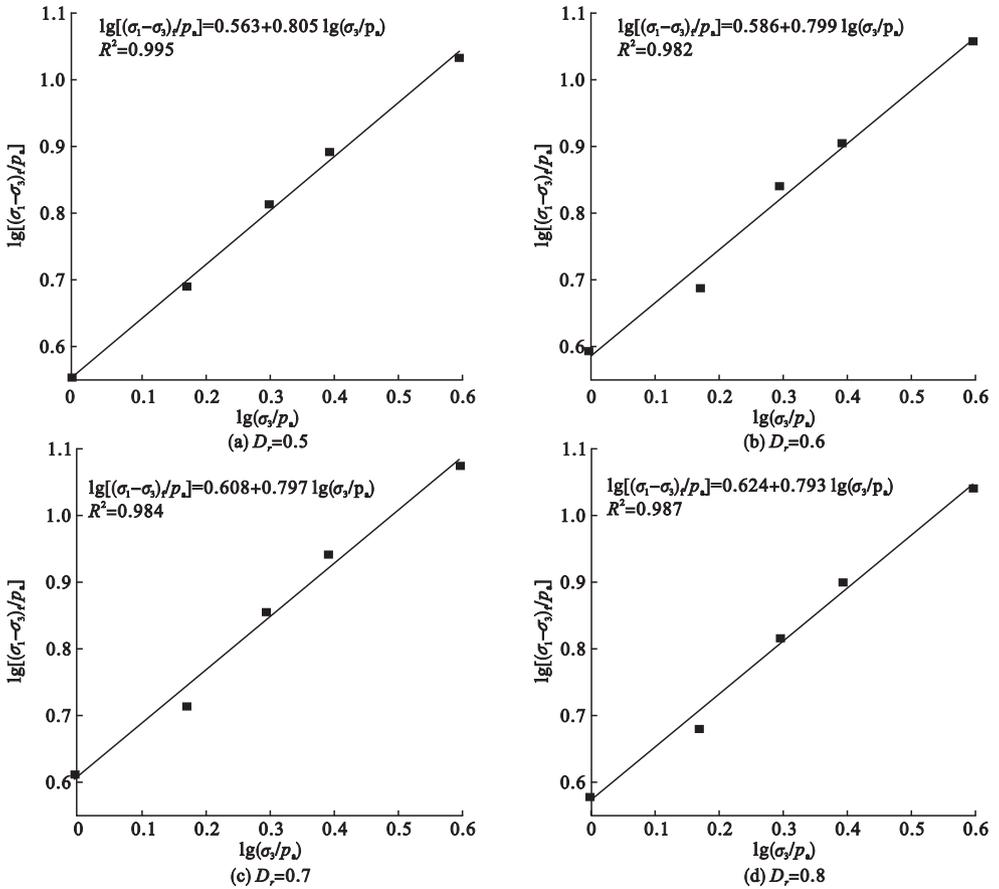


图6 不同相对密度下 $\lg[(\sigma_1 - \sigma_3)/p_a]$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 6 The $\lg[(\sigma_1 - \sigma_3)/p_a] - \lg(\sigma_3/p_a)$ relationship curves under different relative densities

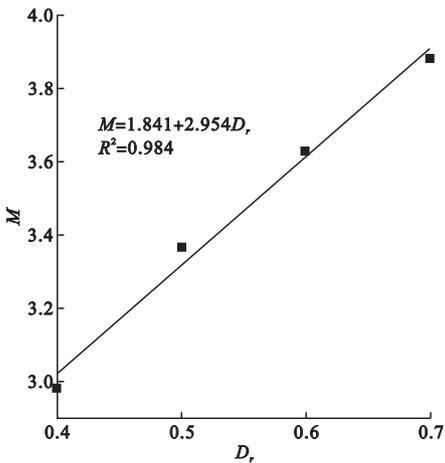


图7 砾砂的 M 与 D_r 关系曲线

Fig. 7 $M - D_r$ relationship under different relative densities

4 修正模型对比验证

为验证笔者提出的 D - C 模型预测应

力 - 应变关系的合理性, 针对围压 $\sigma_3 = 100$ kPa 的各工况, 分别采用修正模型及传统 D - C 模型与试验数据对比分析. 不同相对密度对应的扰动度 D_D 列于表 4.

表4 砾砂的扰动度 D_D

Table 4 Values of disturbance degree D_D for gravelly sand

相对密度 D_r	扰动度 D_D
0.5	0.593
0.6	0.452
0.7	-0.357
0.8	-0.626

对于实际的岩土工程问题, 绝大多数土体的变形均处于小应变范围内 ($\epsilon_3 \in [0.01\%, 0.3\%]$), 于是笔者仅对 0 ~ 1.0% 应变范围内应力 - 应变关系进行分析. 对比分析结果见图 8.

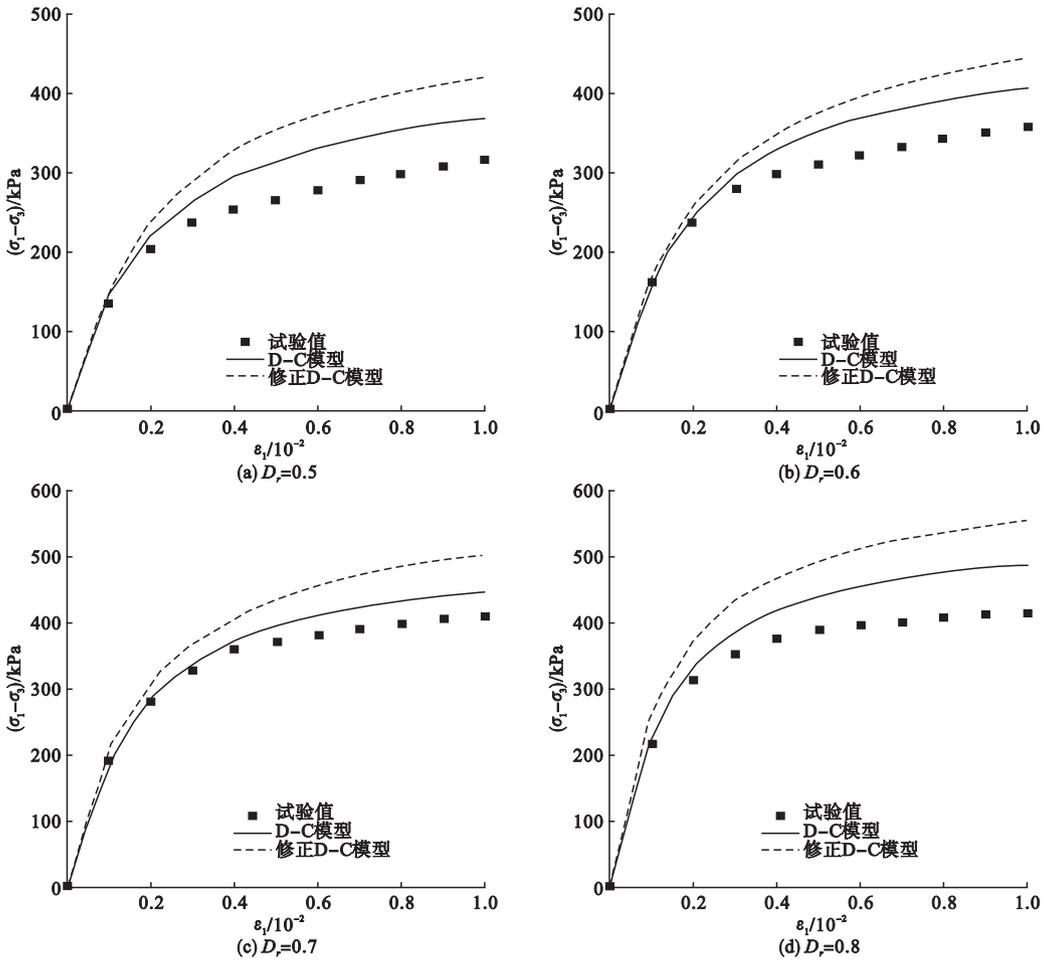


图 8 不同扰动度下砾砂的应力 - 应变曲线

Fig. 8 The stress-stain relationship curves of the gravelly sand under different disturbance degrees

从图 8 可以看出,无论试样处于正扰动或负扰动状态,对比传统 D - C 模型,笔者的修正模型在描述考虑扰动影响的砾砂应力 - 应变关系时均更接近于三轴试验结果.特别是在小应变范围内,笔者修正模型预测的结果十分接近于试验结果,而这一阶段的应力 - 应变关系在实际工程中应用最为广泛.

虽然较传统 D - C 模型,笔者的修正 D - C 模型增加三个无量纲参数,但参数均可通过常规试验获得,这使得该修正模型对解决沈阳地区岩土工程问题有着广阔的应用前景.

5 结 论

(1) 对于中密或密实状态砾砂,应力 -

应变关系呈应变软化型;峰值强度会随围压增大而增大;峰值强度也会随 D_r 的增大而增大.弹性阶段内,砾砂偏应力 - 应变曲线斜率随 D_r 增大而增大.这说明初始状态下砾砂越密实,其初始切线模量也越大.

(2) 传统 D - C 模型中的参数 K 和峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 受扰动影响程度较大,而参数 n 和 R_f 在扰动过程中变化微小.因此,在基于扰动状态理论的修正 D - C 模型中,可仅对 K 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 进行修正.

(3) 无论正扰动或负扰动状态,对比传统 D - C 模型,笔者修正模型在描述考虑扰动影响的砾砂应力 - 应变关系时均更接近于三轴试验结果.特别是在小应变范围内 ($\varepsilon_s \in [0.01\%, 0.3\%]$),修正模型预测的结果十

分接近于试验结果.

参考文献

- [1] KHODZHAEV A. The central asian policy of The People's Republic of China[J]. China and eurasia forum quarterly, 2009, 7(1): 9 - 28.
- [2] 于丹, 张晶, 陈殿强, 等. 沈阳城区土的塑限和液限相关性分析: 以沈阳地铁一号线段为例[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(4): 628 - 635.
(YU Dan, ZHANG Jing, CHEN Dianqiang, et al. Relationship between liquid and plastic limit of the soil in Shenyang city: a case of the Shenyang metro No. 1 [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2015, 31(4): 628 - 635.)
- [3] ZHAO W, CHEN C, LI S, et al. Researches on the influence on neighboring buildings by concave and convex location effect of excavations in soft soil area[J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2015, 79(3): 351 - 369.
- [4] 孙吉主, 施戈亮. 基于状态参数的粗粒土应变软化和剪胀性模型研究[J]. 岩土力学, 2008, (11): 3109 - 3112.
(SUN Jizhu, SHI Geliang. Study of strain softening and dilatancy modeling based on state parameter of coarse grained soil [J]. Rock and soil mechanics, 2008(11): 3109 - 3112.)
- [5] 姚仰平, 张丙印, 朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报, 2012(3): 127 - 150.
(YAO Yangping, ZHANG Bingyin, ZHU Jungao. Behaviors, constitutive models and numerical simulation of soils [J]. China civil engineering journal, 2012(3): 127 - 150.)
- [6] 付科. 粗粒土邓肯-张模型参数的影响因素及影响规律试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
(FU Ke. Experimental research on influencing factors and interaction regulations to Duncan-Chang model parameters of coarse grained soils [D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2012.)
- [7] 王嵩. 粗粒土力学特性及本构模型研究[D]. 广州: 中南大学, 2012.
(WANG Song. Research on mechanical property and constitutive mode of coarse-grained soils [D]. Guangzhou: Central South University, 2012.)
- [8] LI Y L, LI S Y, DING Z F, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method [J]. Journal of hydraulic engineering, 2013, 39(S2): 79 - 85.
- [9] SAOMOTO H. Soil stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis [M]. Netherlands: Springer, 2007.
- [10] KAVVADAS M, AMOROSI A. A constitutive model for structured soils [J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 263 - 273.
- [11] 任磊. Duncan - Chang 模型参数及抗剪强度参数优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
(REN Lei. Research on parameters of Duncan-Chang constitutive model and the optimization of shear strength [D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2008.)
- [12] DESAI C S. Mechanics of materials and interfaces: the disturbed state concept [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [13] 朱剑锋, 徐日庆, 王兴陈, 等. 考虑扰动影响的砂土弹塑性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 193 - 201.
(ZHU Jianfeng, XU Riqing, WANG Xingchen, et al. An elastoplastic model for sand considering disturbance [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(1): 193 - 201.)
- [14] 朱剑锋, 徐日庆, 王兴陈. 基于扰动状态概念模型的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1081 - 1087.
(ZHU Jianfeng, XU Riqing, WANG Xingchen. Theory of earth pressure against rigid retaining wall based on disturbed state concept model [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2011, 45(6): 1081 - 1087.)
- [15] 徐日庆, 张俊, 朱建峰, 等. 考虑扰动影响的修正 Duncan - Chang 模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(1): 1 - 7.
(XU Riqing, ZHANG Jun, ZHU Jianfeng, et al. Modified Duncan-Chang model considering disturbance [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2012, 46(1): 1 - 7.)
- [16] KONDRER R L, ZELASKO J S. A hyperbolic stress-strain formulation of sands [C]. Proceedings of the Second Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Brazil: [s. n.], 1963.
- [17] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1970, 96(S5): 1629 - 1653.
- [18] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests [C]. European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Wiesbaden: ISSMGE, 1963.