

考虑结构性影响的原状黄土等效线性模型

陈存礼¹, 高 鹏², 何军芳¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 对不同含水率的西安原状黄土及相同干密度的扰动饱和黄土进行动三轴试验, 用同一动应变下原状黄土的割线模量 E_{dy} 与扰动饱和黄土的割线模量 E_{drs} 之比值定义了动三轴应力条件下结构性参数 m_{ed} , 它可以综合反映土的排列和胶结特征所表现出的综合结构势(结构性强弱), 探讨了动荷作用过程中不同固结围压及含水率下结构性参数变化特性。研究表明: ①结构性参数可以反映含水率、固结围压对动三轴应力条件下原状黄土结构性的影响, 具有很好的合理性、灵敏性、稳定性。用此结构性参数随含水率、固结围压的增大而减小的特性可以合理地解释原状黄土的动应力应变特性; ②结构性参数的变化量 $m_{ed0} - m_{ed}$ 与动应变 ε_d 关系可以用双曲线来拟合(m_{ed0} 为初始结构性参数), 由此所得到的结构性参数表达式可以反映固结围压、湿度、密度、动应力和动应变对结构性的影响; ③在扰动饱和土的等效线性模型中引入结构性参数所得到的原状黄土等效线性模型能够考虑增湿、加荷对原状黄土结构性的影响, 计算结果与试验结果之间吻合较好。

关键词: 黄土; 结构性; 动三轴试验; 动本构关系

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)09-1330-07

作者简介: 陈存礼(1964-), 女, 陕西人, 博士, 高级工程师, 主要从事土动力学特性研究。E-mail: chencl@xaut.edu.cn。

Equivalent linear model of intact loess considering structural effect

CHEN Cun-li¹, GAO Peng², HE Jun-fang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Loess Soil Mechanics and Engineering Key Laboratory of Shanxi Province, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Branch, Chian Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Dynamic triaxial tests were conducted on Xi'an intact loess with different water contents and disturbed saturated loess with the same dry density as intact loess. A quantitative comprehensive structural parameter m_{ed} was defined using ratio of secant modulus E_{dy} of intact loess and secant modulus E_{drs} of disturbed saturated loess under dynamic triaxial stress condition, which could not only reflect arrangement but also coherent structure of soil particles. The effects of water content and consolidation confining pressure on the structural parameter were investigated under cyclic loading. It was indicated: ① The structural parameter could not only reveal the influences of water content and consolidation confining pressure on structure of intact loess under dynamic triaxial stress but also was rational and sensitiv as well as stable. The characteristics of dynamic stress strain could be rationally explained with that the structural parameter decerased with the increase of water content and consolidation confining pressure. ② The relationship between quantitative variation of the structural parameter $m_{ed0} - m_{ed}$ and dynamic strain ε_d could be fitted with hyperbola (m_{ed0} was the initial structural parameter), and the equation of the structural parameter obtained could reveal the influence of consolidation confining pressure, water content, density, dynamic stress and dynamic strain on structure of the intact loess. ③ A constitutive relation describing dynamic stress-strain behaviour of intact loess was presented by introducing the structural parameter to equivalent linear model of disturbed saturated loess, which could consider moistening and cyclic loading effect on structure of intact loess. Its rationality was confirmed by the agreement between the calculated and test results.

Key words: loess; structure; dynamic triaxial test; dynamic constitutive relationship

0 引 言

现实的土体都具有结构性, 结构性对土的力学特性有很大的影响, 以致研究能够反映土结构性的本构

基金项目: 陕西高校省级重点实验室重点科研项目(03JS038, 05JS32);
西安理工大学高学历人员科研启动基金资助项目(220603)
收稿日期: 2006-07-17

关系被称为是 21 世纪土力学的核心问题^[1]。

当代土结构性研究的基本途径可以归为 3 类^[2], 即细观形态学途径、固体力学途径和土力学途径。而其中的土力学途径因其能够直接建立结构性与土力学特性之间的关系, 可以定量揭示土结构性及其变化的力学效果, 而比定性显示土结构性的形象特征或从个别侧面定量描述土结构性的差异更具有优越性。

黄土是干旱半干旱区的沉积物, 由于其特定的生成环境, 使得它具有独特的结构特性, 同时, 由于黄土的低湿度、低密度及脆弱的架空结构, 使它对水有特殊的敏感性。这种水敏性和结构特性直接影响着黄土的静动力学特性和工程性质, 即对于黄土来说, 水敏性和结构性是一个不可回避的问题, 研究考虑在力和水作用下原状黄土结构性变化的静动应力应变本构关系有着重要的理论意义和应用价值。

以往, 对于静力作用下黄土结构性变化特性进行了许多研究^[3-10], 而对动荷载作用下黄土的结构性虽有研究^[11], 但还嫌颇少。为此, 本文以西安原状黄土作为研究对象, 通过动三轴试验, 用土力学的方法求取不同湿度和固结应力状态下的定量化结构性参数, 研究动三轴应力状态下黄土的结构变化特性, 并引入此定量化结构性参数, 建立能够考虑原状黄土结构性影响的动本构关系。

1 试验方案与方法

试验用土为西安 Q₃ 原状黄土, 其主要物理力学指标如表 1 所示。

表 1 黄土的物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indices of loess

比重	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	孔隙 比
2.70	19.3	1.31	32.3	20.5	11.8	1.062

由于黄土的内摩擦角一般在 24° 左右, 相应的侧压力系数 $K_0 = 1 - \sin \varphi = 0.59$ ^[12], 故本文没有考虑固结应力比的变化, 取固结应力比 $k_c = 1.69$ 。为了反映固结围压和含水率变化对黄土结构性的影响, 试验时固结围压分别取 50, 100, 200, 400 kPa, 控制试样的含水率分别为 10, 15, 20, 25, 30, 39.3 (饱和含水率)。

为了更好地反映黄土试样的动变形特性, 动荷载作用下试样高度与直径之比宜取为 1^[2], 因原状和扰动试样的直径均为 3.91 cm, 故试验时原状和扰动试样的高度均为 4 cm。扰动饱和试样是在天然含水率和天然干密度的条件下, 分五层采用压样法制备, 再用抽气饱和法进行饱和而成。低于天然含水率的原状土试样采用天然原状样风干的方法, 高于天然含水率的原

状土试样除饱和试样采用抽气饱和法外, 均采用对天然原状样滴定注水的方法, 等到风干或加水达到控制含水率后, 在保湿缸中密闭放置 48 h 以上, 以使水分扩散均匀。

试验设备为微机控制动三轴试验机, 动荷载的波形为正弦波, 频率为 1 Hz。试验采用逐级施加动荷的方法, 即对一个固结变形稳定后的试样, 在不排水条件下, 逐级由小到大施加固定振次 ($N=10$) 的动荷载。固结稳定标准取每小时的轴向变形不超过 0.01 mm。

2 基于动模量考虑的土结构性定量化参数

土结构性的强弱, 可以用土的联结和排列特征两个方面综合反映。用扰动、加荷和浸水的方式可以使土的结构势充分释放出来。扰动能破坏土的联结作用, 使土颗粒之间的联结强度降低; 加荷既能改变土颗粒的排列方式, 又可改变土颗粒的联结特征; 浸水既可使土中的化学物质弱化、溶解、吸力联结丧失, 水膜的楔入作用又可使土所固有的胀缩势释放出来。分别对与原状样干密度和含水率均相同的扰动样及饱和原状样施加荷载来释放结构势的方法求取结构性的定量化指标^[3-8], 即用扰动、浸水和加荷的方式彻底破坏原状土的结构性。但是, 用上述方法求取增湿黄土的结构性参数随含水率变化特性时, 需要对不同含水率的原状、扰动样和饱和样进行试验, 工作量大。而对与原状样干密度相同的扰动饱和土施加荷载, 也可以实现用扰动、浸水和加荷的方式来破坏结构性的目的^[8-9]。

由于对与原状样干密度相同的扰动饱和土施加荷载来实现扰动、浸水和加荷的方式破坏结构性的目的, 可避免对与原状样干密度、含水率相同的扰动样进行试验, 用此思路建立结构性参数的方法是一种简易可靠的方法, 且笔者用此思路在对黄土进行压缩试验基础上建立的结构性参数^[8]与对不同含水率的原状、扰动样和饱和样进行压缩试验得到的结构性参数^[10]相比较时, 虽两种结构性参数的数值有一定的差异, 但均可合理地解释压缩条件下黄土的变形特性, 表明这种思路建立结构性参数同样也具有合理性、灵敏性和一定的优越性。因此, 本文对不同湿度的原状黄土以及相同干密度的扰动饱和黄土进行动三轴试验, 以它们的动应力应变关系曲线为基础, 用同一动应变下原状黄土的割线模量 E_{dy} 与扰动饱和黄土的割线模量 $E_{d,rs}$ 之比值来综合反映土的排列和胶结特征所表现出的综合结构势 (结构性强弱), 定义在动荷作用下土的结构参数为

$$m_{\varepsilon_d} = \frac{E_{dy}}{E_{drs}} = \frac{\sigma_{dy}}{\sigma_{drs}}, \quad (1)$$

式中, σ_{dy} 、 σ_{drs} 分别为某一动应变下原状黄土和扰动饱和黄土的动应力。从式 (1) 可以看出, 土的联结越强、排列越不稳定, 扰动、浸水饱和后在动应力作用下的结构性损伤越大, 即 m_{ε_d} 越大。随着动应变的不断发展, 原状黄土样的原生结构性逐渐损失, 次生结构性逐渐形成, 结构性参数将随着动应变的发展而变化, 它可以反映动荷作用下原状黄土的结构性变化。

3 动荷作用下黄土结构性的变化特性

3.1 黄土的动应力应变特性

图 1 和图 2 分别为不同含水率 w 的原状黄土及扰动饱和黄土的动应力 σ_d 与动应变 ε_d 关系典型图。试验结果表明, 在不同固结应力状态下其动应力应变关系曲线均呈硬化型, 且 ε_d/σ_d 和 ε_d 之间具有较好的线性关系 (图略), 即表明不同试验条件 (湿度状态、固结应力状态) 下原状黄土和扰动饱和黄土的动应力动应变关系呈双曲线形态, 仍然可以用双曲线关系来描述。从图 1, 2 可以看出:

(1) 含水率对原状黄土的动应力 - 应变关系曲线具有明显的影响。固结应力条件相同时, 同一动应变下含水率愈低相应的动应力愈高, 随着含水率的由低转高, 动应力 - 动应变关系曲线的斜率有明显变缓的趋势。这是由于含水率的增大会使黄土的联结强度不断削弱, 结构逐渐遭到破坏所致。

(2) 含水率相同时, 固结围压对原状黄土的 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系曲线有明显的影 响, 表现为同一动应变下, 固结围压愈大对应的动应力愈高, $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系曲线的斜率随固结围压的增大而明显变大。这是因为固结围压愈大, 相应的约束程度愈大, 类似于“环箍”现象, 而侧向约束增大阻止了土颗粒间的错动, 使土的联结强度增大, 变形不易发生所致。当绘出动应力比与动应变关系 $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ ($\sigma_m = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c})/3$ 为平均主应力) 典型图 (图 3) 时, 则可以看出, 原状黄土在含水率、固结应力比相同时, $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ 关系曲线 (图 3 (a)、图 3 (b)) 对不同围压并没有归一性, 曲线位置随着固结围压的增大而下移, 即产生同一动应变对应的动应力比随着固结围压的增大而减小; 而扰动饱和黄土的 $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ 关系曲线具有较好的归一性; 且围压相同时, 原状黄土产生同一动应变所对应的动应力比与扰动饱和黄土相比明显要大得多, 这种变化特性随固结围压和含水率的增大而呈减弱的趋势。这是因为对于原状黄土而言, 固结围压愈低, 固结后对土样的结构性破坏愈弱, 结构性愈强, 且其结构性又随

着含水率的增大而减弱; 而对于扰动饱和和黄土而言, 固结后其结构性很弱所致。

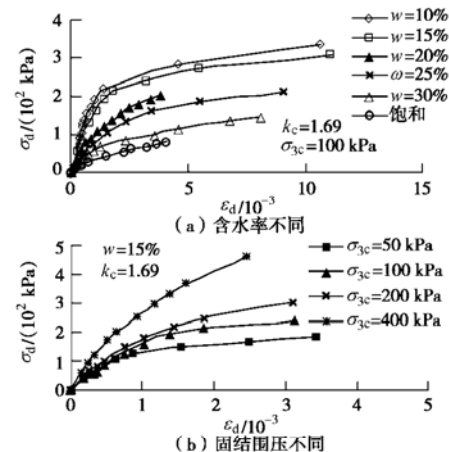


图 1 原状黄土的动应力应变关系曲线

Fig. 1 The dynamic stress-strain curves of intact loess

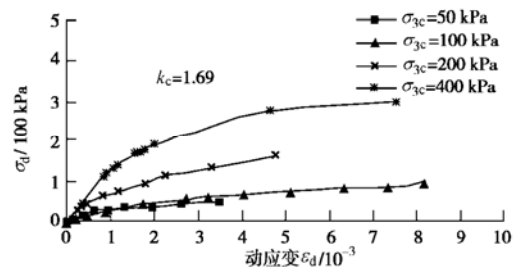


图 2 扰动饱和黄土的动应力应变关系曲线

Fig. 2 The dynamic stress-strain curves of disturbed saturated loess

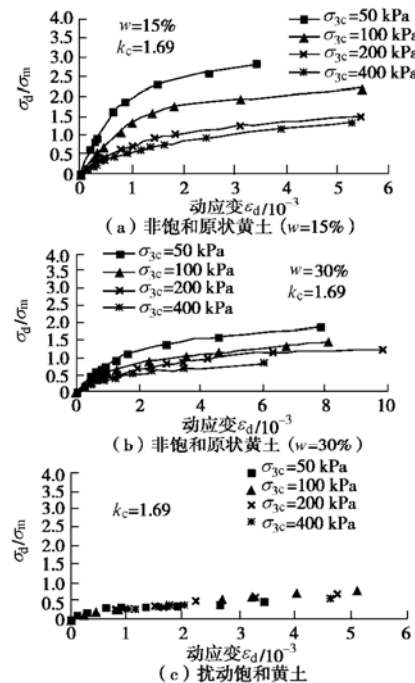


图 3 不同围压下黄土的 $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ 关系

Fig. 3 The relationship between σ_d/σ_m and ε_d under different consolidation pressures

3.2 动荷作用下黄土结构性的变化特性

由原状样及饱和扰动样的 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系曲线, 按式 (1) 计算不同动应变时原状黄土的结构性参数 m_{ed} , 绘出不同含水率下结构性参数与动应变关系 ($m_e - \varepsilon_d$) 典型曲线见图 4。试验结果表明:

(1) 固结应力比 k_c 相同, 而固结围压 σ_{3c} 不同时, 动荷作用过程中原状黄土结构性参数曲线的形状是不尽相同的。固结围压较低 ($\sigma_{3c} < 200$ kPa) 时, 结构性参数随着动应变的增大而逐渐增大, 且这种增大的趋势随着动应变的增大逐渐趋于平缓; 而围压较大 ($\sigma_{3c} \geq 200$ kPa), 结构性参数随动应变的增加而逐渐降低。这是因为固结围压较低时, 固结后土样的结构性损伤较小, 土样仍具有较强的结构性, 虽然动荷作用使原生结构有较小的损伤, 但同时又使土样振密而形成次生结构, 次生结构抵消了原生结构的损伤, 导致结构性参数随动应变的增大而有增大的趋势; 随着固结围压增大, 固结后黄土结构性有较大的损伤, 使土样的原生结构在振动过程中有较大的损伤, 次生结构的形成还不足以抵消原生结构的损伤所致。可见, 此结构性参数可以反映不同固结围压下动荷作用过程中黄土的结构性随动应变变化的特性。

(2) 固结应力条件相同时, 相同动应变对应的结构性参数随着含水率的增大而减小, 结构性参数与动应变的关系曲线随含水率的增大而逐渐下移, 即表明动荷作用下黄土的结构性随着含水率的增大而降低; 含水率相同时, 结构性参数随着固结围压的增大而减小。结构性参数的这种变化特性导致 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系曲线 (图 1 (a)) 随含水率的增大而下移, $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ 关系曲线随固结围压的增大而下移。可见, 此结构性参数可以反映含水率和固结围压变化对动荷作用下黄土结构性的影响, 显示出良好的合理性和相当的灵敏性、稳定性。

(3) 结构性参数值的大小取决于固结后原生结构的破坏与动荷作用过程中次生结构增长及原生结构破坏的共同作用对黄土结构性的破坏程度。不同固结围压作用下, 随着动应变的增大, 不同湿度黄土的结构性参数始终大于 1, 则表明动荷作用下黄土的结构性没有完全遭到破坏。

(4) 当把动荷作用下黄土的结构性参数 m_{ed} 与动应变 ε_d 关系曲线延长使其与纵坐标轴相交, 则其交点 (动应变 $\varepsilon_d = 0$) 处的 m_{ed} 可称为初始结构性参数 m_{ed0} 。不同试验条件下初始结构性参数 m_{ed0} 数值见表 2, 可以看出, 固结围压相同时, 初始结构性参数 m_{ed0} 均随含水率的增大而减小, 含水率相同时, m_{ed0} 随着固结围压的增大而减小, 但这些减小的程度随着含水率的增大而明显减弱。

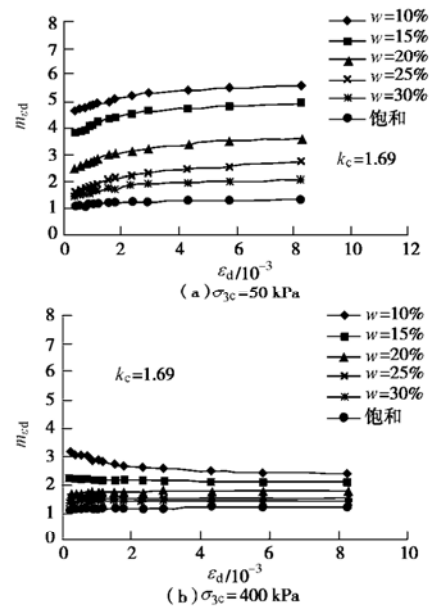


图 4 动荷作用下原状黄土的结构性量化参数曲线

Fig. 4 Structural parameter of intact loess under cyclic load

表 2 不同试验条件下原状黄土的初始结构性参数 m_{ed0}

Table 2 Initial structural parameters of intact loess under different test conditions

含水率 $w/\%$	固结围压 σ_{3c}			
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
10	4.4	4.2	3.5	3.2
15	3.8	3.3	3.1	2.4
20	2.5	2.2	2.0	1.7
25	1.6	1.4	1.4	1.4
30	1.3	1.3	1.3	1.3
39.3	1.2	1.2	1.2	1.2

(5) 根据初始结构性参数 m_{ed0} 可以计算出某一动应变下结构性参数的变化量 $m_{ed0} - m_{ed}$, 当 $m_{ed0} - m_{ed} > 0$ 时, 则它为土结构性的损伤量, 表示动荷作用过程中黄土的结构性在逐渐减弱; 当 $m_{ed0} - m_{ed} < 0$ 时, 则它为土结构性的增长量, 表示振动过程中黄土的结构性在逐渐增强。由图 5 所示的不同试验条件下典型 $(m_{ed0} - m_{ed}) - \varepsilon_d$ 关系可以看出, $(m_{ed0} - m_{ed}) - \varepsilon_d$ 关系皆呈应变硬化型, 而其相应的 $\varepsilon_d/(m_{ed0} - m_{ed}) - \varepsilon_d$ 关系 (图 6) 可拟合为直线, 则表明 $(m_{ed0} - m_{ed}) - \varepsilon_d$ 关系呈双曲线形式, 其表达式为

$$m_{ed0} - m_{ed} = \frac{\varepsilon_d}{m + n\varepsilon_d}, \quad (2)$$

式中, m, n 为试验参数, 分别等于 $\varepsilon_d/(m_{ed0} - m_{ed}) - \varepsilon_d$ 关系直线的截距和斜率。确定出原状黄土在不同试验条件下的试验参数 m, n 数值分别见表 3, 4。可见, 在同一固结应力条件下, 参数 m, n 的绝对值随着含水率的增大而增大; 含水率相同时, 参数 m 的绝对值随着固结围压 σ_{3c} 的增大而增大, $\sigma_{3c} < 200$ kPa 时, 参数 n 的绝对值随 σ_{3c} 的增大而增大, $\sigma_{3c} > 200$ kPa 时,

参数 n 的绝对值随 σ_{3c} 的增大而减小。

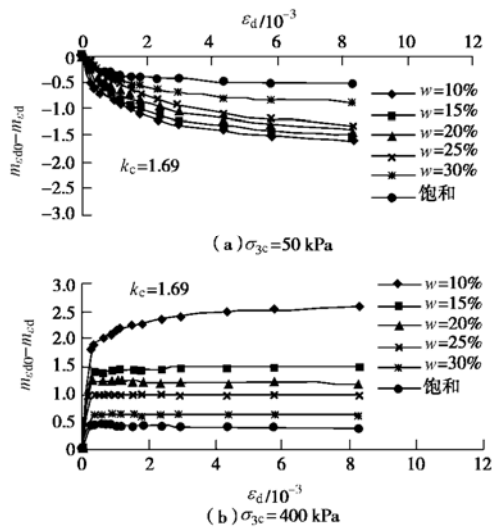


图 5 动荷作用下黄土的 $(m_{ed0} - m_{ed}) - \epsilon_d$ 关系

Fig. 5 The relationship between $m_{ed0} - m_{ed}$ and ϵ_d of intact loess under cyclic load

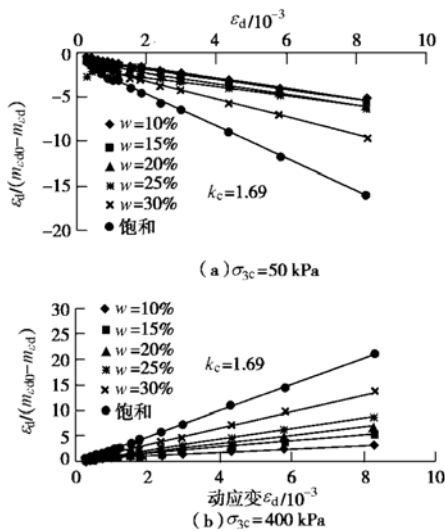


图 6 动荷作用下黄土的 $\epsilon_d / (m_{ed0} - m_{ed}) - \epsilon_d$ 关系

Fig. 6 The relationships between $\epsilon_d / (m_{ed0} - m_{ed})$ and ϵ_d of intact loess under cyclic load

表 3 不同试验条件下原状黄土的参数 m

Table 3 Parameter m of intact loess under different test conditions

含水率 $w/\%$	固结围压 σ_{3c}			
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
10	-0.547	-0.592	0.592	0.855
15	-0.801	-0.973	1.273	1.334
20	-1.195	-1.247	1.360	1.456
25	-1.403	-1.560	1.647	2.243
30	-1.974	-2.960	2.960	3.603
39.3	-2.276	-3.121	3.120	3.726

由式 (2) 可得

$$m_{ed} = m_{ed0} - \frac{\epsilon_d}{m + n\epsilon_d} \quad (3)$$

可以由试验确定出的初始结构性参数 m_{e0} 和 $(m_{ed0} - m_{ed}) - \epsilon_d$ 关系的参数 m, n 值, 根据式 (3) 求取不同试验 (含水率或固结围压不同) 条件下动荷作用过程中任一动应变下的结构性参数 m_{ed} 值。这样, 式 (3) 的结构性参数表达式可以反映固结围压、湿度、密度、动应力和动应变对结构性的影响。

表 4 不同试验条件下原状黄土的参数 n

Table 4 Parameter n of intact loess under different test conditions

含水率 $w/\%$	固结围压 σ_{3c}			
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
10	-0.572	-0.395	0.395	0.376
15	-0.583	-1.122	1.122	0.661
20	-0.605	-0.883	2.136	0.843
25	-0.642	-2.136	1.883	1.037
30	-1.105	-2.448	2.448	1.645
39.3	-1.792	-3.890	3.890	2.577

4 考虑结构性影响的原状黄土等效线性模型

4.1 考虑结构性影响原状黄土等效线性模型的建立

由式 (1) 可得

$$\sigma_{dy} = m_{ed} \cdot \sigma_{drs} \quad (4)$$

因不同试验条件下扰动饱和黄土的动应力动应变关系均呈双曲线形态, 故其动应力动应变关系可用 Hardin 等效线性模型来模拟:

$$\sigma_{drs} = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} = \frac{\epsilon_d}{1/E_{0rs} + \epsilon_d/\sigma_{yrs}} \quad (5)$$

或
$$E_{drs} = \frac{1}{1/E_{0rs} + \epsilon_d/\sigma_{yrs}} \quad (6)$$

式中, a 和 b 为试验参数, 它们分别等于扰动饱和黄土的 $\epsilon_d/\sigma_{drs} - \epsilon_d$ 关系直线的截距和斜率, E_{0rs} 为最大动模量, σ_{yrs} 为最大动应力, 且有 $E_{0rs} = 1/a$, $\sigma_{yrs} = 1/b$ 。

由于不同固结围压下扰动饱和黄土的动应力动应变关系可以归一 (图 3 (c)), 则有

$$\frac{\sigma_{drs}}{\sigma_m} = \frac{\epsilon_d}{a_1 + b_1\epsilon_d} = \frac{\epsilon_d}{1/E_{01} + \epsilon_d/\sigma_{y1}} \quad (7)$$

式中, a_1 和 b_1 为试验参数, 它们分别等于扰动饱和黄土的 $\epsilon_d/(\sigma_{drs}/\sigma_m) - \epsilon_d$ 关系直线的截距和斜率, E_{01} 为归一化的最大动模量, σ_{y1} 为归一化的最大动应力, 且有 $E_{01} = 1/a_1$, $\sigma_{y1} = 1/b_1$ 。

由式 (5) 和式 (7) 可以得到扰动饱和黄土的最大动模量 E_{0rs} 、最大动应力 σ_{yrs} 与固结平均主应力 σ_m 之间关系:

$$E_{0rs} = E_{01} \cdot \sigma_m, \quad \sigma_{yrs} = \sigma_{y1} \cdot \sigma_m \quad (8)$$

把式(8)和式(3)代入(4), 则可以得到原状黄土的动应力应变关系为

$$\sigma_d = (m_{ed0} - \frac{\varepsilon_d}{m+n\varepsilon_d}) \cdot \frac{\varepsilon_d}{1/(E_{01}\sigma_m) + \varepsilon_d/(\sigma_{y1}\sigma_m)} \quad (9)$$

可见, 只需在扰动饱和土的动应力动应变关系中引入结构性参数 m_{ed} , 就可以得到考虑结构性影响的原状黄土动应力应变关系, 这是建立可以考虑结构性影响动应力应变关系一种简单可靠的方法。由式(9)可以得到考虑结构性影响的原状黄土最大动弹性模量 E_0 , 最大动应力 σ_y 及任一动应变 ε_d 下的剪切模量 E_d , 它们的表达式如下:

$$E_0 = m_{ed} \cdot E_{01} \sigma_m, \quad (10)$$

$$\sigma_y = m_{ed} \cdot \sigma_{y1} \sigma_m, \quad (11)$$

$$E_d = m_{ed} \cdot E_{d1s}, \quad (12)$$

或

$$E_d = (m_{ed0} - \frac{\varepsilon_d}{m+n\varepsilon_d}) \cdot \frac{1}{1/(E_{01}\sigma_m) + \varepsilon_d/(\sigma_{y1}\sigma_m)}, \quad (13)$$

因 $E_d = 2(1+\mu)G_d$, $\varepsilon_d = \frac{\gamma_d}{(1+\mu)}$, $\tau_y = \frac{1}{2}\sigma_y$, 故式(13)也可以写成

$$G_d = (m_{ed0} - \frac{\gamma_d}{m(1+\mu)+n\gamma_d}) \cdot \frac{1}{1/(G_{01}\sigma_m) + \gamma_d/(\tau_{y1}\sigma_m)}, \quad (14)$$

式中, G_{01} 为归一化的最大动剪切模量, τ_{y1} 为归一化的最大动剪应力, 且有 $G_{01} = E_{01}/2(1+\mu)$, $\tau_{y1} = \sigma_{y1}/2$ 。

式(13)或式(14)即为考虑结构性影响的原状黄土的等效弹性模量的表达式, 这样, 根据式(13)或式(14)可以确定动荷作用过程中考虑结构性影响时某一动应变对应的等效弹性动模量值。

由于结构性参数 m_{ed} 是固结围压、湿度、密度、动应力和动应变的函数, 因此由上式可以确定动荷载作用下增湿及振动过程中湿陷性黄土地基的动变形发展过程, 在用 Hardin 等效黏线性模型进行动力反应有限元分析计算时, 形成动力刚度矩阵时可以引入考虑结构性影响的动弹性剪切模量 G_d 。

4.2 考虑结构性影响原状黄土等效线性模型的验证

根据扰动饱和黄土的 $\sigma_d/\sigma_m - \varepsilon_d$ 关系(图3(c)), 确定出其归一化动应力应变关系的试验参数 $a_1=0.00266$, $b_1=1.045$, 根据它们就可以确定不同固结围压下扰动饱和土的等效弹性模量 E_{d1s} 或 G_{d1s} ; 再由表2, 3, 4确定参数 m_{ed0} , m , n , 代入式(9)后可计算出不同固结围压和不同含水率(对应于不同结构性)下原状黄土的动应力应变关系, 并对试验值和计算值进行对比。图7为不同围压和不同含水率下原状黄土的应力应变关系计算值与试验值对比的典型图(图中实线为计算曲线, 点为试验数据点), 可以看出, 二者之间基本吻合。

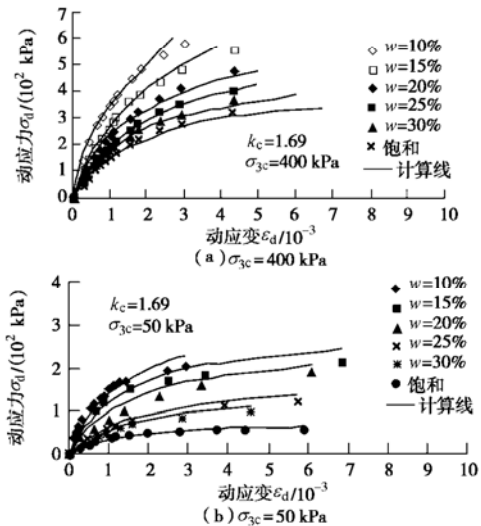


图7 原状黄土的动应力应变曲线计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison between predicted and observed dynamic stress-strain curves of intact loess

5 结 论

(1) 在动三轴应力条件下, 用同一动应变下原状黄土的割线模量 E_{dy} 与扰动饱和黄土的割线模量 E_{d1s} 之比值定义了结构性参数 m_{ed} , 它可以综合反映土的排列和胶结特征所表现出的综合结构势(结构性强弱), 具有很好的合理性、灵敏性、稳定性。

(2) 结构性参数可以反映含水率、固结围压对动荷作用过程中原状黄土结构性的影响, 用结构性参数随含水率、固结围压的增大而减小的特性可以合理地解释原状黄土的动应力应变特性。

(3) 动荷作用过程中结构性参数的变化量 $m_{ed0} - m_{ed}$ 与动应变 ε_d 关系可以用双曲线来拟合(m_{ed0} 为初始结构性参数), 由此所得到的结构性参数表达式可以反映固结围压、湿度、密度、动应力和动应变对结构性的影响。

(4) 在扰动饱和土的等效线性模型中引入结构性参数所得到的原状黄土等效线性模型能够考虑增湿、加荷对原状黄土结构性的影响, 计算结果与试验结果之间吻合较好。这是建立考虑结构性影响的动本构模型的一种简单而可靠的方法。

参考文献:

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97. (SHEN Zhu-jiang. The mathematical model for the structured soils—the key problem of soil mechanics in the 21 century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97. (in Chinese))

- [2] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [3] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 651 - 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 651 - 656. (in Chinese))
- [4] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(4): 35 - 40. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(4): 35 - 40. (in Chinese))
- [5] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系[J]. 水利学报, 1999(10): 1 - 6. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(10): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, **8**(8): 114 - 118. (LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, ZHANG Ai-jun. Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess[J]. Journal of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For, (Natural Science Edition), 2004, **8**(8): 114 - 118. (in Chinese))
- [7] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, **23**(24): 4248 - 4251. (LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi. Structural constitutive relation of soils under complex stress conditions[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, **23**(24): 4248 - 4251. (in Chinese))
- [8] 陈存礼, 胡再强, 高 鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(11): 1891 - 1896. (CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 1891 - 1896. (in Chinese))
- [9] 陈存礼, 胡再强, 谢定义. 赤泥的变形-强度特性与结构性关系的研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1862 - 1866. (CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, XIE Ding-yi. Research on the relationship between deformation-strength property and structure of red mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1862 - 1866. (in Chinese))
- [10] 陈存礼, 高 鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7): 1352 - 1360. (CHEN Cun-li, GAO Peng, HU Zai-qiang. Moistening deformation characteristic of loess and its relation to structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(7): 1352 - 1360. (in Chinese))
- [11] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 张爱军. 复杂应力条件下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(24): 4248 - 4251. (LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, ZHANG Ai-jun. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(24): 4248 - 4251. (in Chinese))
- [12] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min. Loess dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (in Chinese))