

文章编号: 1000—7598—(2006) 12—2219—06

黏性土力学强度与微结构动态 环境能场内在关联分析

王 伟, 冯小平, 邹 昀, 王 俭

(江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 通过两组不同含水率的黏性土分别在快浸、慢浸、冻融、不同应力条件下的试验, 讨论了黏性土力学强度特性与其微结构动态环境能场的本质关联, 分析研究了黏性土微结构动态环境能场、外部环境条件变化与其内在介质环境变化之间的密切关联。结果表明, 水的浸入对土的微结构特性影响至关重要, 对土的抗剪强度的影响明显高于土的变形特性, 偏湿土和受振动的土击数越多, 对土的初始结构损伤越厉害, 但土的后期结构强度有所提高。分析表明冻融对土的微结构破坏最为严重, 其次是慢浸。

关 键 词: 黏性土; 微结构; 动态环境能场; 力学强度特性

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Analysis of intrinsic correlation of mechanical strength with microstructure dynamic environmental energy field of clayey soils

WANG Wei, FENG Xiao-ping, CHEN Yan, WANG Jian

(Department of Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Through two group tests on clayey soils with different water contents under Quick-soaking, slow-soaking, freezing-thawing, different stresses; the following studies were performed: the relationship between mechanical strength and microstructure dynamic environmental energyfield of clayey soil; the interrelation between the microstructure dynamic environmental energyfield; changing of external environment and medium environmental intrinsic of clayey soil. The results show that the water soaking is vital to microstructure, its influence on shear strength is higher than it on deformation properties of clayey soil obviously; when number of blows of more wet and vibrated soil increased, the damage of initial construction increased, but the later strength of construction increased for a little. Analysis indicates that the freezing-thawing is most important to failure of microstructure of soil; the second is slow-soaking.

Key words: clayey soil; microstructure; dynamic environmental energy field; mechanical strength properties

1 前 言

土结构颗粒之间的叠置可以是松散的、紧密的、各向异性的, 土是孔隙性大变形物质, 只要外界环境条件如荷载、水的浸入、温度、应力历史等改变, 黏性土在这些动能、热能、势能作用下, 每个土颗粒单元介质周围都存在一个环境能场, 这个环境能场还包括电场等。土微结构的强与弱正是这些土颗粒单元介质间环境能场相互作用的结果, 外界环境条件改变会导致土的内在介质环境能场发生复杂的、一系列的变化, 使土颗粒介质间相互作用行为

改变, 土颗粒处于相应的位移、滑移、偏转、重新调整颗粒之间的排列, 使土颗粒间位置产生畸变, 土结构颗粒间联结发生变化。即使外界环境恒定不变, 土结构内在介质环境能场也不是静态的, 一直持续动态的变化, 发生随时间而运作的蠕变, 土的微结构完全是一个动态环境能场。黏性土的黏-弹-塑性性质和抗剪强度的性质^[1~4], 决定黏性土本身的形变过程和破坏过程的特点, 而土的力学性质和水理性质主要取决于土的微结构形态、颗粒间的联结力和排列。为了深入了解黏性土微结构动态环境能场的变化与土的力学强度的本质关联, 进行了一

收稿日期: 2005-04-18

作者简介: 王伟, 女, 1952 年生, 硕士, 副教授, 主要从事土力学地基基础教学及软土地基处理、抗震等方面的研究。

系列的试验, 试验选用无锡地区黏性土。

2 试验方法及成果

分别选取两大组试样: a 组土样含水率 $\omega = 22.1\%$, 塑限 $\omega_p = 21.0\%$, 比较接近塑限含水量; b 组土样含水率 $\omega = 29.23\%$ 。对每一种土分别压入环刀、套乳胶膜, 并在土样的上下各放一滤纸透水石, 再用橡皮筋固定。试验包括: (1) 普通、快速浸水、慢速浸水、冻融土样做压缩试验、三轴压缩试验。慢浸和冻融的土样准备好后, 放入水中浸 24 h, 冻融土样再放入冰箱 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 待完全冻结 4 h 后, 拿出让其充分自然融化; 快浸试样在做试验前 4 h 对其自然快速浸水。压缩试验结果见表 1, 其中 PT_a , KS_a , MS_a , DR_a , PT_b , KS_b , MS_b , DR_b 分别表示 a , b 土样的普通、快浸、慢浸、冻融 4 种情况。(2) 不同含水率下压缩试验, 三轴压缩试验的对比试验, 分别采用含水率为 26.7% , 28.79% 两组土样。(3) 不同应力历史压缩试验、三轴压缩试验的对比试验。制备土样时分别采用击实数为 20, 25, 30, 使土样做试验之前处于不同的应力状态。(4) 静止、振动后的土样压缩试验、三轴压缩试验的对比试验。振动土样是将备好的土样置于振动台上预先振动, 再做固结试验、三轴压缩试验。为方便起见, 在下面的讨论中把 a 土样、 b 土样相对称为偏干、偏湿土样。

3 黏性土力学强度与微结构内在关联分析

3.1 黏性土不同状态下变形特征与微结构内在关联分析

普通、快浸、慢浸、冻融 4 种土样处于不同的物理状态, 则土微结构内在介质环境完全不同, 表 1 为黏性土不同状态时物理力学性参数, 由表 1 的抗压强度可看出:

表 1 黏性土不同状态时物理力学性参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of clayey soil under different states

土样 编号	含水率 $\omega/\%$	含水率 增量/ $\%$	比重 G_s	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	压缩系数 α/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	α 增大 倍数	E_s 减小 倍数
PT_a	22.10		2.74	2.11	0.11	14.42		
KS_a	22.89	0.79	2.74	2.16	0.21	7.35	1.9	2
MS_a	24.89	2.79	2.74	2.24	0.30	5.12	2.7	2.8
DR_a	23.87	1.77	2.74	2.22	0.37	4.13	3.4	3.5
PT_b	29.23		2.74	1.93	0.14	13.11		
KS_b	30.13	0.9	2.74	1.95	0.42	4.35	3	3
MS_b	32.40	3.17	2.74	1.96	0.48	3.8	3.4	3.5
DR_b	32.12	2.89	2.74	2.00	0.52	3.41	3.7	3.8

注: 表中偏干 a 土样 $\omega = 22.10\%$, 偏湿 b 土样 $\omega = 29.23\%$, 增大、减小倍数都是相对 a , b 普通土样。

(1) 两组土样压缩系数 α 的大小顺序: 冻融 $\alpha_{DR} >$ 慢浸 $\alpha_{MS} >$ 快浸 $\alpha_{KS} >$ 普通 α_{PT} 。压缩模量 E_s 的大小顺序: 冻融 $E_{sDR} <$ 慢浸 $E_{sMS} <$ 快浸 $E_{sKS} <$ 普通 E_{sPT} 。

(2) 慢浸比普通土样的含水率增加了 2.79% , 压缩系数 α 增大了 2.7 倍, E_s 减小了 3.4 倍。由于水浸入土中的时间长短不同、快慢速率不同, 缓慢浸入土体的水有充足的时间湿化、软化、解体颗粒间原有的联结, 慢浸比快浸更容易破坏土颗粒间的联结, 使原始凝聚力和固化凝聚力减小, 水浸入土体时间越长, 土颗粒之间的联结强度解体越严重。

(3) 慢浸比冻融含水率增量还要大, 但冻融土体抗压强度降低得最多、变形最大, 产生大的融陷变形。表中偏干土样的冻融土样和普通土样含水率只差 1.77% , E_s 从 14.42 MPa 降低到 4.13 MPa , 降低了 3.5 倍; 压缩系数从 0.1 MPa^{-1} 增大到 0.37 MPa^{-1} , 增加了 3.4 倍。显然, 冻融使土的微结构发生巨变, 导致土宏观力学性质发生变化, 导致土的变形急剧加大。

图 1(a), (b) 分别表示偏干、偏湿两组土样的压缩试验 $e-p$ 曲线。曲线 2, 4, 7, 9 分别表示普通、快浸、慢浸、冻融土样, 普通土样曲线平缓, 快浸的曲线较陡, 慢浸和冻融的两条曲线最陡, 曲线越陡, 压缩性越高, 总变形中不可恢复的塑性变形的比例占得更多。慢浸曲线 7、冻结曲线 9 初始段最陡, 斜率最大, 说明冻融、慢浸土样, 对土初始微结构破坏的最严重。偏湿土样比偏干土样曲线陡得多, 初始孔隙比的增量也大得多。

图 1(c) 中曲线 4 偏湿冻融土样、曲线 2 偏干冻融土样, 两条曲线差值较大, 偏湿土样初始线段比偏干土样陡得多, 说明偏湿冻融土样结构强度最差, 变形最大。

3.2 黏性土不同状态下抗剪强度特性与微结构内在关联分析

表 2 为黏性土在不同状态时抗剪强度参数, 由表 2 可看出:

(1) 黏聚力 c 从大到小的排序: 普通 $C_{PT} >$ 快浸 $C_{KS} >$ 慢浸 $C_{MS} >$ 冻融 C_{DR} 。 a , b 两组中普通土样的含水率差值是 6.39% , 偏湿的土样比偏干的粘聚力 C 降低了 2 倍; 普通土样 a 与快浸土样的含水率差值只有 0.55% , 但黏聚力也降低了 2 倍; b 普通土样与快浸土样的含水率差值是 0.79% , 黏聚力降低了 2.43 倍。可见, 水一旦浸入土样, 即使浸入的水并不多, 含水率的增值并不大, 也会使土的抗剪强

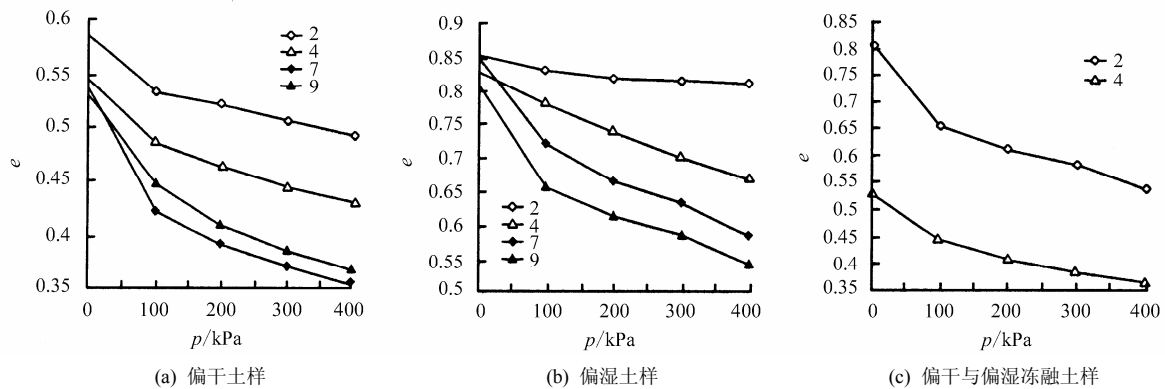


图 1 e - p 压缩曲线
Fig.1 The compression curves between e and p

表 2 黏性土不同状态时抗剪强度参数
Table 2 Shear strength parameters of clayey soil under different states

土样编号	含水率 ω /%	含水率 ω 增量/%	黏聚力 c /MPa	黏聚力 c 减小倍数
PT_a	22.57		33.58	
KS_a	23.12	0.55	16.8	2
MS_a	23.67	1.1	13.16	2.6
DR_a	24.70	2.13	7.65	4.4
PT_b	28.96		15.99	
KS_b	29.75	0.79	6.57	2.43
MS_b	32.06	3.1	6.49	2.46
DR_b	32.13	3.17	6.44	2.48

注：表中粘聚力减小倍数相对于普通土样。

度产生明显的变化。水的浸入对土微观结构的影响至关重要。

(2) 偏湿土样快浸、慢浸、冻融相对普通土样含水率增量明显大于偏干土样，但偏干土样粘聚力的减小倍数明显大于偏湿土样，说明偏干土颗粒间联结强度遇水后所受到的影响比偏湿土更大、更敏感。也说明偏干的土样一旦浸水将比偏湿土样的微结构更容易受到破坏，特别是偏干的冻融土样与偏湿冻融土样含水率相差 7.43%，但偏干土的黏聚力却降低了 4.4 倍，偏湿土黏聚力降低了 2.48 倍，偏干土的黏聚力 C_{aDR} 几乎接近偏湿土样的 C_{bDR} 。

(3) 慢浸和快浸由于外界的水浸入快慢速率不同、时间长短不同，多孔分散的土结构使颗粒间原本存在的胶结物吸水膨胀，颗粒表面之间的化学亲合势减弱，颗粒间生成的键桥被逐渐软化，黏土孔隙溶液、相接触的水—离子层电解质浓度、成分、交换阳离子成分都发生变化，颗粒间的引力减小、斥力增加，颗粒间联结强度削弱，抗剪强度急剧降低。

(4) 偏干快浸、慢浸、冻融土样之间的含水率差值都不大，但冻融过的土样，黏聚力降低了 4.4

倍。土微体结构是通过颗粒间联结特征相互作用表现出来的，在外力、土的自重作用下颗粒容易移位、偏转、滑移，重新调整各自的位置、重新排列组合。冻结的黏土矿物是由土颗粒、水、气、多元介质组成，冻结时发生水分迁移和冻胀，而冻结后再融化的黏土是从一种由特殊材料组成的紧密状态逐渐变成另外一种高度分散的散体结构，颗粒集合体由于冻胀力被拉裂成含网状的裂隙体，融化的水浸入后湿化、软化颗粒间的联结，在这个过程中的弱化效应使颗粒间联结解体更加恶化，导致抗剪强度急剧降低，可见土的抗剪强度直接受控于土的微结构，含水率的变化是影响土微结构颗粒间联结强度的大小和耐久性最重要的介质元素。

图 2(a), (b)为偏干 a ，偏湿 b 土样的应力与应变关系曲线，其中曲线 2，4，7，9 分别表示普通、快浸、慢浸、冻融土样，可看出抗剪强度的大小顺序：普通>快浸>慢浸>冻融。偏干普通土样应力-应变关系曲线在前期呈现很陡趋势即应变的增值小于抗剪强度的增值，土微结构抗剪强度大，而冻融土样的曲线呈现极低的一条平缓曲线，应变的增值远大于抗剪强度的增值，抗剪强度最低。偏湿的快浸、慢浸和冻融土样的曲线初期呈现急速微弯段，此时的抗剪强度低、变形大，说明水的浸入对土的初始结构破坏大。由于土是分散体系结构，而分散体系结构强度要素是靠黏土矿物颗粒间联结强度、矿物颗粒与胶结物界面上的化学亲合势来实现，而其直接受外界环境条件变化所制约，水浸入的多与少、方式的不同，土微结构环境能场中的离子键、共价键、化学键和偶极力、阳离子等各种键和键发生变化，而这些键和链又控制颗粒间联结强度的大小，控制土颗粒间的应力-应变-强度关系，直接影响土体的应力-应变-强度本构关系。

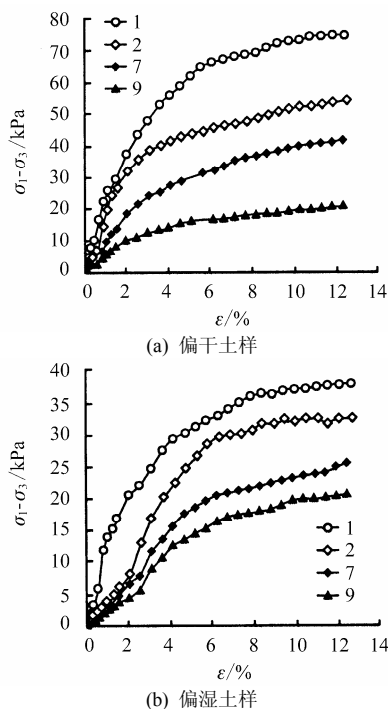


图2 应力($\sigma_1-\sigma_3$)与应变 ε 关系曲线
Fig.2 The stress ($\sigma_1-\sigma_3$)-strain curve ε

3.3 含水率、应力状态变化时土的变形特性与微结构内在关联分析

表3反映击实数、含水率变化时的变形特性。由表3看出：(1)含水率相同时，土样随着击实数的增加（把击实数的变化可看作是不同的应力历史状态）压缩系数 α 减小，而压缩模量 E_s 增大，土的压缩性降低，抵抗变形的能力有所增强。由于颗粒的相对移位而使土颗粒重新排列，接触面积增大，颗粒之间的摩阻力增大，其结构强度较高，则抵抗变形的能力增加，从表3可看出增加的幅度不大。

(2)击数相同、含水率相同经振动的C土样，土颗粒重新调整、移位、滑移、偏转，土微结构骨架趋于相对不稳定状态，颗粒之间的联结被弱化，土结构强度软化而降低，抵抗变形的能力降低，振动后的土样压缩性增大，但增加幅度不大。

表3 不同击实数、相同含水率变形特性比较

Table 3 The deformation properties under different blow counts and same water content

土样编号	含水率 ω /%	压缩系数 α /MPa ⁻¹	压缩模量 E_s /MPa
A-20	26.78	0.63	2.84
A-25	26.78	0.59	2.97
A-30	26.78	0.56	3.12
B-20	28.79	1.22	1.52
B-25	28.79	1.12	1.66
B-30	28.79	1.05	1.78
C-20	28.79	1.28	1.46
C-30	28.79	1.10	1.68

注：土样A、B为静止土样，C为振动后的土样，字母后的20，25，30为击实数。

压缩曲线图3(a)，(b)中曲线3，6，9含水率 $\omega=28.79\%$ ，曲线4含水率 $\omega=26.7\%$ 稍许偏干，曲线4，6，9击实数为30，曲线3为20，曲线9为被振动的土样，由图可看出：

(1) (b)图曲线6，9击数相同为30，曲线6比振动过的土样曲线9稍缓，土结构强度较高，所以抵抗变形的能力较高。而被振动过黏性土曲线9，在反复的动荷载下土颗粒接触联结强度被弱化，骨架结构稳定性差，土骨架结构较松散，土颗粒间的联结数目相对减少，土结构强度在振动过程中能量受到一定损失，抵抗变形的能力降低。

(2) 曲线4比其它4个土样稍许偏干，含水率仅差2.01%，击实数与曲线6，9相同，但曲线性状不同，曲线平直坡度缓，初始孔隙比比曲线3，6，9小得多，总变形也小得多。显然曲线越陡，土的塑性变形占的比例越大。分析比较可得出：含水率相同时增大击实功可提高土的压缩模量，但增加幅度不大；备好的试样经预振之后其压缩性增加幅度不大；但黏性土含水率的微小变化导致土的压缩特性发生如此剧烈的变化，对土的微结构颗粒间的联结和排列都起到至关重要的作用，导致土体的力学特性发生极大变化，可见含水率是影响土微结构的关键因素，直接决定黏性土的力学性质。偏湿的土、振动的土塑性变形比偏干的土大得多，偏干的土结构强度较高。

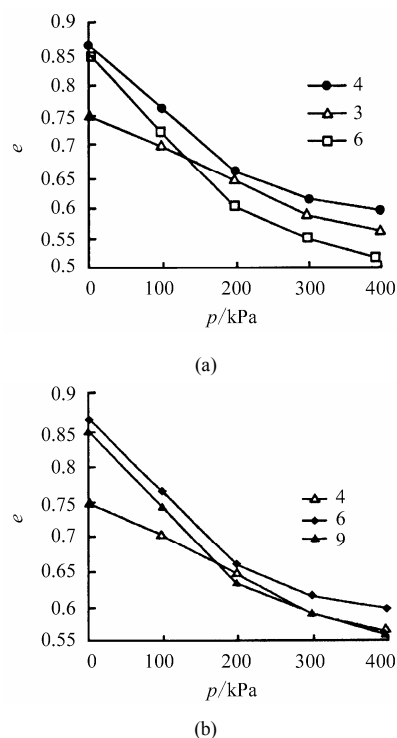


图3 e - p 压缩曲线

Fig.3 The compression curves between e and p

3.4 含水率、应力状态变化时土的抗剪强度特性与微结构内在关联分析

表 4 为不同含水率时土样的抗剪强度。由表 4 可看出: (1) 在相同的应力历史下 A, B 两土样含水率相差了 2.01 %, 黏聚力 c 降低了 2.24 倍, 抗剪强度降低幅度大。随着含水率增大, 水—离子层减小了原生颗粒间黏结力, 增大次生颗粒的楔压力, 颗粒间分子键(范德华—伦敦力)愈小, 颗粒间联结强度随着水—离子层厚度增加而降低, 使颗粒间的联结强度和刚度降低。(2) 含水率相同, 增大击实数, 在低应力下(20~25 击)黏聚力增加幅度很小, 在高应力下(25~30 击)黏聚力增加较明显。(3) 黏性土在含水量相同偏湿、击数少、被振动的土样黏聚力减小的百分数为 4.5 %, 击数多、被振动的土样黏聚力减小的百分数为 22.5 %, 可见偏湿土样击数越多、被振动土微结构颗粒间联结破坏越多、强度降低越多。

表 4 不同含水率时土样抗剪强度的变化

Table 4 Shear strengths under different water contents

土样编号	含水率 ω / %	含水率 ω 增量 / %	黏聚力 c / kPa	黏聚力 c 减 小倍数	黏聚力 c 减小 百分数 / %
A-20	26.78		35.17		
B-20	28.79	2.01	15.67	2.24	
A-25	26.78		36.50		
B-25	28.79	2.01	16.33	2.24	
A-30	26.78		41.00		
B-30	28.79	2.01	20.00	2.05	
C-20	28.79		15.00		
B-20	28.79		15.67		4.5
C-30	28.79		16.33		
B-30	28.79		20.00		22.5

注: 黏聚力减小的百分数相对静止土样。

比较表 2 和表 4 可看出土的微结构在不同含水率、相同击实功能下抗剪强度减小的倍数大于土的变形特征, 这就是说含水率变化, 对土的抗剪强度的影响大于土的变形特性。黏性土颗粒表面具有很大的比表面和吸附能, 水的介入首先减弱颗粒间的联结强度, 尔后在自重或外力作用下土颗粒易于移位。

图 4 给出不同应力历史、不同含水率时应力与应变关系曲线。

图 4(a) 中曲线 1 击实数为 20, 曲线 6 击实数 30, 两条曲线为含水率相同的偏干土样; 曲线 4 击实数为 20, 曲线 9 击实数 30, 两条曲线为含水率相同的偏湿土样。由图可知: (1) 偏干土样不管击数是 20 还是 30, 曲线初始段表现明显的线性段, 在偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)达到一定值时才出现应变, 这说明土体此时具有一定的初始结构强度, 有抵御剪切变形的能力, 表现出偏应力增长的速率大于应变增长

的速率, 击实数多的土样峰值、残余强度高, 颗粒相互靠拢、颗粒间联结强度提高, 土的摩阻力增大, 土偏干时击数增加其微结构强度提高, 土的抗剪强度增加, 但增加幅度不大; (2) 曲线 9 从一开始就在曲线 4 的右侧, 在同一偏应力下曲线 9 的应变大于曲线 4, 曲线 4 在受剪初期应变为 0, 说明偏湿的土样击实数越多土的初始微结构强度破坏越多, 土体抗剪切变形的能力越低。但同时可看出击数多的曲线 9 其峰值、残余强度都比曲线 4 的晚到并且稍大于击数少的曲线 4, 说明偏湿的土样随着击数增加产生后期效应, 显示出一定的后期结构强度; (3) 偏干土样曲线 6 与偏湿土样曲线 9 击数相同都是 30, 偏干土样曲线在初始偏应力作用下有一段应变为 0, 曲线陡, 切线模量大, 而偏湿土样曲线一开始就有较大的应变值, 显然偏干土样击数多初始结构强度高, 而偏湿土样击数越多初始结构强度破坏越多, 则抗剪强度就低。

图 4(b) 中曲线 9 表示未振动的土样, 曲线 2 为振动过的土样, 含水率相同、偏湿、击实数相同为 20。曲线 4 为偏干土样。可看出在相同含水率、相同的应力历史条件下, 未振动的土样最初一段应变为 0, 说明具有一定的初始结构强度, 经振动过的土样初始线性段不明显, 初始颗粒间联结强度被弱化, 当剪应力大于颗粒间的联结力, 经振动过的土样土体更加各向异性, 土中剪应变的发展各处不均衡, 往往在局部区域内土体发生较大剪应变, 在剪应变大的区域先发展到峰值并超过它而逐渐向低应变区迁移、延伸, 土体破坏的过程是逐点逐点地发展, 在此过程中颗粒间联结被弱化, 引起颗粒相互错位、滑移、偏转, 颗粒的主轴发生偏转, 颗粒变动的过程逐步把主面调整到垂直于应力作用线上, 导致土体发生蠕变, 产生较大的不可恢复的塑性变形。由曲线表明, 振动过的土样峰值和残余强度都小于未振土样, 并且都比未振动的提前到达峰值、残余强度, 说明振动过的土样结构崩解比未振土的要快、要早, 先剪切破坏。残余强度是在大剪切位移下黏土强度下降, 在受剪过程中由原来颗粒结构凝聚排列向非定向性的颗粒位移, 随着应变的增加而逐渐转化沿剪切面的定向性排列, 水—离子层中水分子定向排列和阳离子的分布因受剪而遭到破坏, 引起结构强度降低。土体宏观上的变形和强度完全是由土微观结构发生变化而起着决定性控制作用。

振动过的曲线 2 比未振动的曲线 9 在同一偏应力作用下有较大的应变, 偏湿土样稍大于振动土样,

偏干土样曲线 4 最晚到达峰值且值最大。偏湿振动土样曲线 2, 偏湿土样曲线 9 相对偏干土样曲线 4 的峰值差值非常大, 可见含水率的微小增量, 导致抗剪强度急剧下降。

图 4(c) 表示振动土样在含水率相同、偏湿、不同应力条件的应力-应变曲线。曲线 1 击数是 20,

曲线 6 是 30。曲线 6 在曲线 1 的右侧, 在相同的偏应力下应变大于曲线 1 的, 其峰值、残余强度又大于曲线 1, 其性状和 (a) 图曲线 9, 4 类同, 说明偏湿土样击数越多或者受振动的土击数越多, 对土的初始结构损伤越厉害, 但随着击实数增大, 土的后期结构强度有所提高, 呈现出一定的后期效应。

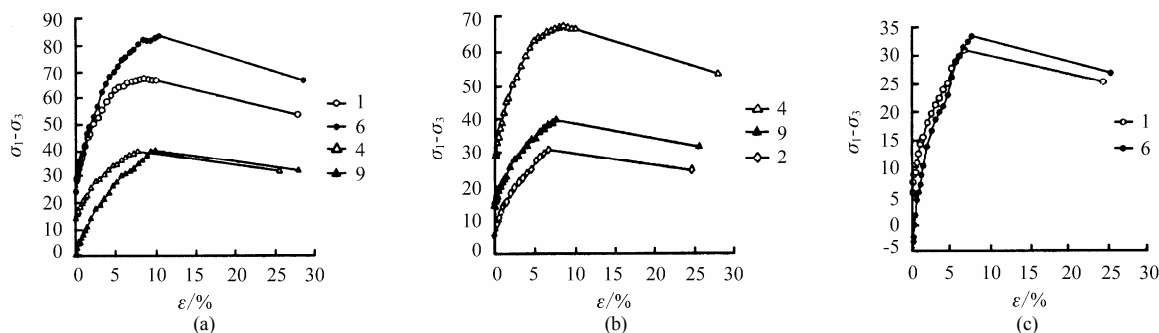


图 4 应力与应变($\sigma_1 - \sigma_3$)- ε 关系曲线

Fig.4 Curves between ($\sigma_1 - \sigma_3$) and ε

4 结 论

(1) 水的浸入对土微结构特性影响至关重要, 使土微结构内在介质环境巨变, 导致土的力学强度发生骤变。冻融对土的微结构破坏最为严重, 结构性最差, 抗剪强度最低, 变形最大, 其次是慢浸。

(2) 偏干土样遇水后颗粒间联结强度所受影响比偏湿土样更加明显、敏感, 更容易受到破坏、解体。

(3) 含水率的变化, 对土抗剪强度的影响大于土的变形特性。水的介入首先改变土微结构内在介质环境, 土颗粒吸水膨胀、湿化、软化, 使颗粒间的化学亲合势减弱, 颗粒间生成的键桥被逐渐软化, 减弱水—离子层对原生颗粒黏结力、对次生颗粒的楔压作用增大, 减弱了土微结构颗粒间的联结强度, 黏土孔隙溶液、相接触的水—离子层电解质浓度、成分、交换阳离子成分都发生变化, 土微结构环境能场中的离子键、共价键、化学键、偶极力变化, 导致土微结构内在介质环境的键能和键改变, 而这些键和键又控制颗粒间联结强度的大小, 同时促使并改变颗粒间的排列组合, 其二者相互制约、相互牵制、相互影响, 产生双向交叉效应, 土微结构颗粒间的联结强度和颗粒间的排列组合控制土颗粒间的应力—应变—强度关系, 控制土体的应力—应变—强度的本构关系。土体宏观上的变形和强度完全是由土微观结构发生变化而起着决定性控制作用。

(4) 应力历史对土微结构影响大小同时也受土含水率高低的影响, 土偏干时, 击数越多土初始结构性好, 土的峰值和残余强度大, 土的抗剪强度就较高。土样偏湿击数越多, 对土的初始结构破坏越

厉害, 但随着击实数增大, 土的后期结构强度有所提高。

(5) 偏湿土样与振动土样类同, 即随着击实数逐渐增加呈现出一定的后期效应。偏湿的土、振动的土塑性变形比偏干的土大得多。

(6) 被振动过的土样的应力-应变曲线初始线性段不明显, 初始颗粒间联结强度被弱化, 土体更加各向异性, 颗粒相互错位、滑移、偏离、颗粒的主轴发生偏转, 其峰值、残余强度都小于未振土, 并且都比未振动土提前到达, 振动过的土样结构颗粒联接崩解比未振动的要快、早、先剪切破坏。

(7) 含水率相同, 增大击实数, 在低应力下(从 20 击到 25 击)粘聚力增加幅度很小, 在高应力下(从 25 击到 30 击)粘聚力增加较明显。

参 考 文 献

- [1] Maio C Di, Santoli I, Schiavoue P. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state[J]. **Mechanics of Materials**, 2004, 36: 435—451.
- [2] Alonso E E, Vaunat J, Gens A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54: 173—183.
- [3] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机理研究[J]. **岩土力学**, 2001, 22(1): 1—5.
TAN Luo-rong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 1—5.
- [4] 吴紫汪. 冻土蠕变特征的细观分析[J]. **岩土工程学报**, 1997, 19(3): 93—105.
WU Zi-wang. Microstudy on frozen soil creep characteristic[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(3): 93—105.