

弹性波速反映黄土加固凝聚力变化的试验研究

刘旭^{1,2,3}, 王兰民^{2,3}, 白耀明³

(1. 上海交通大学建工学院, 上海 200030;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃兰州 730000;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 试验中运用骨架波速和黄土加固凝聚力的概念, 将饱和度的增加引起土体密度的增加对波速的影响与水破坏加固凝聚力对波速的影响区分开来; 在相似的压力和饱和度条件下采用动力作用前后分别测试弹性波速的方法, 将动力荷载对加固凝聚力的破坏作用与土样自身的颗粒组分对波速的影响区分开来。初步研究了水及动力作用对黄土加固凝聚力的破坏及黄土波速的变化规律。

关键词: 波速; 黄土; 动力; 加固凝聚力

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2004)03-0218-05

0 前言

黄土的湿陷问题是黄土地区的重要工程地质问题, 已有不少文献研究黄土的湿陷机理。其中加固凝聚力被破坏的理论是比较普遍被接受的^[1]。加固凝聚力是构成黄土结构强度的力学基础, 也是黄土与其它土类在力学性质上的主要区别。近年来, 兰州地震研究所在动三轴仪上对干燥的或增湿的黄土样做了大量的震陷试验^[2,3], 但是, 关于震陷机理问题的研究还远未达到令人满意的程度。作者曾设想动三轴仪内所发生的震陷原因是动力作用破坏了黄土的加固凝聚力, 因此设想通过研究动力作用前后黄土试样的永久变形与弹性波速的变化关系试验间接分析震陷的机理。虽然机理问题不可能靠一两个试验彻底说清楚, 但此次试验的方法和初步的结论应该具有一定的借鉴和启示作用。

过去, 弹性波速参数主要被直接用来判定土的工程抗震性能, 如液化、震陷等^[2,3]。但影响土体波速的原因比较复杂, 一些经验关系也仅适合于一些特定的环境。本次试验运用了骨架波速的概念^[4], 将饱和度的增加引起土体密度的增加与水破坏加固凝聚力对波速的影响区分开来; 在相似的压力和饱和度条件下, 采用动力作用前后分别测试弹性波速的方法, 将动力荷载对加固凝聚力的破坏作用与土样自身的颗粒组分对波速的影响区分开来。

1 试验过程

在同一地点、深度上取 10 cm 高、5 cm 直径的圆柱状黄土试样(原状土); 将土样进行湿化后制成不同饱和度的试样。在未进行震陷试验前, 先测得土样的声波速度。为模拟地震时黄土产生的永久变形, 在动三轴仪压力室模拟地基土承受一般建筑物下的动力、静力条件, 先对土样在轴向与侧向分别施加 200 Kpa 与 118 Kpa 的固结压力; 待固结变形稳定后, 向土样轴向施加简谐动应力, 使土样产生永久变形, 同时记录动应力-变形的时程。对同一组土样施加不同的动应力幅值和循环次数, 得到相应地不同地震烈度下的

收稿日期: 2002-02-19

基金项目: 科技部社会公益研究专项资助(2000-35); 甘肃省自然科学基金(3ZS041-A25-014); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20040060

作者简介: 刘旭(1963-), 男(汉族), 河北人, 副研究员, 现从事土动力学及地震波动理论研究。

永久变形规律,即动应力 σ_d - 永久变形 e_d 关系曲线。动三轴震陷试验结束后,测试已产生了永久变形的试样的声波速度。此次试验,动荷载均模拟Ⅷ度地震烈度的地震力,波速试验均在1个大气压下进行,土样孔隙率均为34%,干密度为1312 kg/m³。结果见表1。

表1 黄土震陷试样波速测试结果

土样编号	密度 /[kg·m ⁻³]	饱和度 /%	振前波速 /[m·s ⁻¹]	计算波速 /[m·s ⁻¹]	永久变形率	振后波速 /[m·s ⁻¹]	备注
1	1411	0.28	689	689	0.0396	425	
2	1415	0.29	691.9	687	0.021	470	
3	1434	0.34	436.5	679	0.003	426	
4	1468	0.44	414.1	662	0.0362	330	
5	1473	0.45	394.2	661	0.024	390	孔隙率为34%
6	1472	0.45	490	661	0.0156	436	
7	1473	0.45	521.1	661	0.011	430	
8	1481	0.47	494.3	657	0.005	440	干密度 dd (kg/m ³)为1312
9	1582	0.76	230.7	615	0.0608	229	
10	1583	0.76	295.5	615	0.07	245	
11	1587	0.77	250	613	0.0686	232	
12	1590	0.78	256.1	612	0.1234	254	
13	1592	0.79	263.5	611	0.1038	233	

2 波速反映常压下增湿对加固凝聚力的破坏

如果骨架不发生变化,仅由密度增加所导致的速度降低是比较小的。设干土体波速为 V_p^b ,干土密度为 dd ,水的密度为 ρ_w ,孔隙率为 φ 。增湿后土的密度由 dd 增加至 $dd + S\varphi\rho_w$,单纯由密度引起的波速变化如下(对于横波速度 V_s 及干土横波速度 V_s^b ,将 V_p, V_p^b 换成 V_s, V_s^b):

$$V_p = V_p^b = \left(\frac{dd}{dd + S\varphi\rho_w} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

为了比较,先考察一般没有凝聚力的纯净石英砂的波速变化规律。当对纯净的石英砂增湿,饱和度 S 由5%增加至80%时,水的作用仅是增加了砂的密度,而不会影响颗粒之间的连接性质(S 大于80%会出现准饱和的非线性波速现象,此问题本文暂不与考虑),水对石英砂的骨架影响不大。根据文献[5]提供的围压为1.0335E6[Nm⁻²]的Ottawa砂的数据,按式(1)得出的波速计算值(实线)和波速实测结果(星号)见图1。结果显示计算值与实测值基本一致。

但是黄土的波速与含水量关系密切,随着 S 的增大,波速迅速降低。按式(1)计算出的波速与实测的波速是不吻合的。取饱和度最低的1号试样(见表1), $S=0.28$,振动前的波速为689 m/s,代入式(1)近似得出 $V_p^b=741$ m/s。由式(1)计算出的不同饱和度的波速值是单纯由土密度变化引起的波速变化,我们称为振前计算波速;而将实测的波速称为振前波速。这两种波速均列在表1中,从该表做出图2以观察饱和度与振前波速及振前计算波速的关系。虽然试验的土样数很少,而且原状土也不十分均匀,但趋势还是比较明显的:含水量增大时,实测的波速远低于所计算的波速。说明没有动力作用时,单纯地增大含水量不仅导致了密度的增大,还明显改变了黄土颗粒之间的连接性质,降低了黄土骨架的刚度。这是水分子的楔入作用对土体骨架的软化所制,因基质吸力可以忽略。上述软化的力学模式是水对黄土加固凝聚力的破坏^[1],在一定的外因条件下可产生湿陷。由加固凝聚力的破坏对波速的影响远超过土密度增加的影

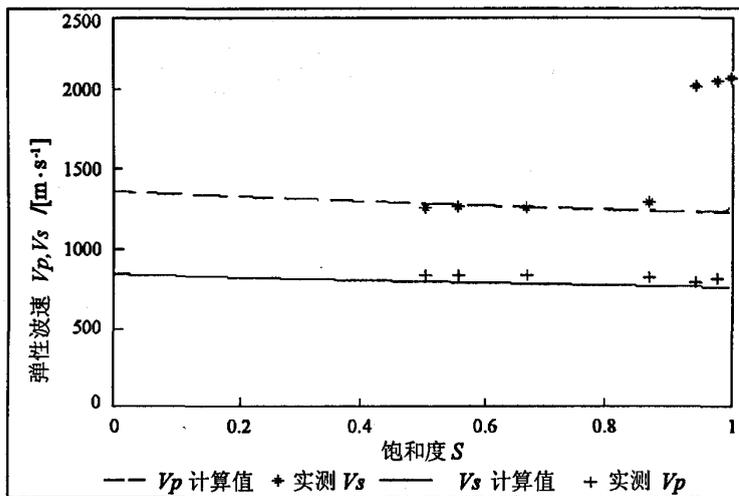


图1 Ottawa 砂波速测试与计算结果(围压: $1.0335 \times 10^6 \text{N/m}^2$)

Fig. 1 Calculated and tested V_p of Ottawa sand.

响。

3 动力作用对加固凝聚力的破坏及对波速的影响

振前试样的长度减去振后试样的长度除以原长度得出试样变形率。由表1做出原状土的波速(振前波速)与相对震陷(变形率)的关系(图3)。所有的土样在震陷实验后都缩短了,即所谓的震陷^[2,3]。可以看出振前波速越高,永久变形率越低。这与文献[2,3]的结论是一致的。

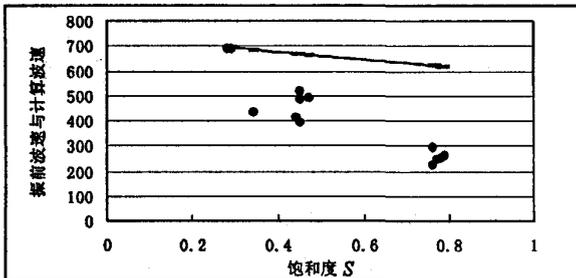


图2 振前波速与饱和度的关系图(·振前波速; -振前计算波速)

Fig. 2 Calculated and tested of loess.

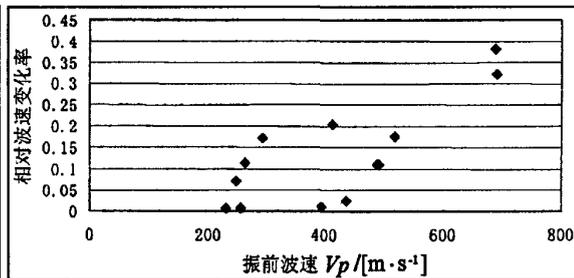


图3 动力作用下的变形率与振前波速关系

Fig. 3 Tested V_p and deformation ratio.

振前试样的波速减去振后试样的波速,再除以振前波速得出相对波速变化率。振前波速和相对波速变化率的关系见图4。可以看出,相对波速变化率均为正值,振动后土样的波速全部降低了。并且振动前波速高的黄土相对波速变化率较高。

变形率与波速变化率关系见图5。可见两者的关系并不十分密切。

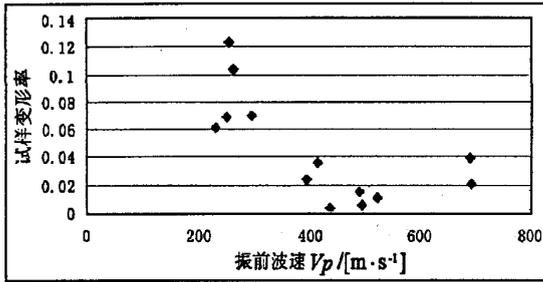


图4 相对波速变化率与振前波速的关系

Fig.4 Tested V_p and its relative change ratio.

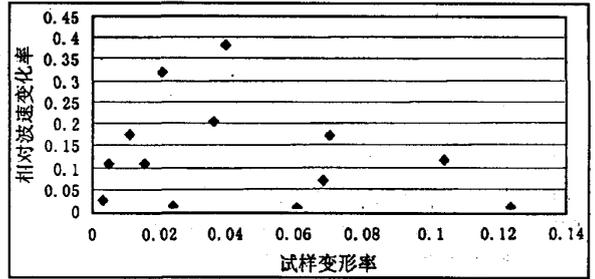


图5 动力作用下试样的变形率与波速

Fig.5 Deformation ratio and the relative change ratio of V_p .

4 振动试验结果分析

分析表1中饱和度及振前波速和永久变形率的关系(图3),很容易看出饱和度越高,波速越低,震陷量越大,这是因为震陷量是水和动力作用的结果。在试验的固结条件下,水对加固凝聚力的破坏还不至于引起大孔隙被填满,还留有相当的空间,使得动力作用产生永久变形。所有的土样在震陷试验后都缩短了,而试样直径几乎未发生变化,说明土样的密度增大了。这样土颗粒之间的接触点数必然增多,按散粒体弹性理论^[6]的一般理解,波速应增大。但是所有试样在震陷试验后波速都降低了。作者认为产生此现象的原因为:对于有着显著的结构性质的黄土而言,影响弹性性质的主要因素是黄土颗粒间的加固凝聚力受到了动力的破坏。而动力作用对加固凝聚力的破坏程度与振动前加固凝聚力的存留程度有关。这样,振动前土样越干燥,波速越高,存留的加固凝聚力越多,受到的破坏程度就相对高;相反,振动含水量越高,波速越低,加固凝聚力已经遭到了相当程度的破坏,这时单纯动力作用对加固凝聚力的破坏程度也就相对较低。这也是对图4的解释。水、大的动应力都是破坏黄土加固凝聚力的因素,都影响黄土的波速,也说明波速的确可作为黄土动力学响应的重要指标之一。

当然,如果密度能再继续增大,土颗粒之间的接触点数进一步增多,到一定程度,颗粒间的内摩擦力及基质吸力又成为主要因素,或许波速又会开始增大。一方面是破坏黄土加固凝聚力,另一方面土颗粒之间的接触点数进一步增多,这两种趋势的存在,也导致相对变形率与波速变化关系的相关性较差,见图5。由于设备的问题没有测横波速度,而且样品数量较少,是此次试验的缺憾。尽管如此,相应的规律是很清楚的。

这个试验还非常典型的说明了干土体波速与骨架波速完全不同,只有含水量的大小不改变骨架特性的土体,两者才是相同的。

5 结束语

增湿不仅增加了黄土的密度,还破坏了黄土的加固凝聚力,这两项作用在饱和度小于80%时,均导致波速的降低。但是波速的降低主要反映的是加固凝聚力的破坏,相比之下,因增湿增加土的密度对波速的影响不超过10%。动力作用也可破坏黄土的加固凝聚力,黄土因加固凝聚力被破坏而导致震陷;虽然原状黄土的波速越低,同样的动力作用所导致的永久变形越大,但是被动力作用破坏了黄土结构所导致波速降低的程度与原状土所存留的加固凝聚力有关,越干燥的原状黄土的结构越易遭到动力破坏。在形式上原状黄土的波速越高,波速相对地降低的比较多。当然可以很容易作出一些数学统计关系,但是我们认为这项工作应留待同类试验积累到相当数量后再做。

[参考文献]

- [1] 郑晏武. 中国黄土的湿陷性[M]. 北京:地质出版社,1982.
- [2] 张振中主编. 黄土地震灾害预测[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [3] 石兆吉,王兰民. 土壤动力特性·液化势及危害性评价[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [4] 刘旭,张振中,刘淦. 黄土的波速特征及骨架波速[J]. 西北地震学报,1998,19(增刊):78-82.
- [5] S N Domenico. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs[J]. Geophysics, 1977, 42(7):1339-1368.
- [6] 钟晓雄,袁建新. 散粒体的微观组构与本构关系[J]. 岩土工程学报,1992,14(增刊):39-48.

EXPERIMENTAL STUDY ON LOESS REINFORCED COHESION BY ELASTIC WAVE VELOCITY

LIU Xu^{1,2,3}, WANG Lan-min^{2,3}, BAI Yao-ming³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the concepts of elastic wave velocity of skeleton and reinforced cohesion, the change of velocity resulting from the variation of soil density with the different saturation is distinguished from that caused weakened reinforced cohesion. In the condition of the same confined press and saturation, the elastic wave velocities are measured before and after soil samples are dynamically loaded, so that the elastic wave velocity changed by dynamic load is distinguished from that by soil nature characteristics. Some regular patterns of reinforced cohesion and velocity in loess under different saturation and dynamic load are discussed in a preliminary way.

Key words: Elastic wave velocity; Loess; Dynamic load; Reinforced cohesion