

# 黄土不同湿度状态下动、静变形特性关系的探讨

张朝晖<sup>1</sup>, 骆亚生<sup>2</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 从实用角度出发, 对西安、兰州和太原 3 个典型黄土地区的原状黄土在不同湿度状态下所取得的动三轴振陷资料以及常规侧限压缩、湿陷试验的资料进行了统计分析, 给出了黄土动、静力变形特性参数之间的相关关系, 探讨了用常规的静力特性参数评估动力特性的可能性。

**关键词:** 原状黄土; 湿陷特性; 振陷特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)03-0028-04

中图分类号: S151.92

## Relation of Dynamic Deformation Characteristic and Static Deformation Characteristic of Loess Under Different Moisture Conditions

ZHANG Zhao-hui<sup>1</sup>, LUO Ya-sheng<sup>2</sup>

(1. Yangling College of Vocation and Technique, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** From the viewpoint of practicality, the data of routine confined compression-collapse tests and dynamic subsidence tests of loess from three loess areas of Xi'an, Lanzhou and Taiyuan under different moisture conditions are analyzed and arranged. Based on these data, the relation between the dynamic deformation characteristic parameter and the static deformation characteristic parameter is presented, and the possibility of evaluating the dynamic characteristic by using the parameter of routine static characteristic are discussed.

**Keywords:** intact loess; collapse characteristic under moisture conditions; dynamic subsidence characteristic

在我国以往对于黄土工程性质的研究主要集中在静力方面<sup>[1-3]</sup>, 而对黄土动力特性的研究关注不够。对黄土动力特性研究的深度、广度和推广应用来说还远不如对黄土静力特性的研究。而且, 由于动三轴仪器数量有限, 原状黄土在试验和资料分析上仍然存在不少困难。在这种情况下, 在研究其不同起始湿度状态以及湿度状态的变化对黄土动力特性影响的同时, 探讨各相应状态下黄土动、静力特性参数之间的联系, 无论从揭示机理和简化应用方面都显出明显的必要性。若能够在黄土动力特性和静力特性之间找出规律, 建立起它们之间的联系, 利用各地现有的大量静力试验资料来估计当地黄土的动力特性将是一件十分有益的事情。文献[4]曾利用黄土在动三轴仪上压缩、湿陷和振陷试验的资料, 描述了黄土压缩、湿陷和振陷 3 种变形的关系, 建立了它们之间的关系表达式。但是, 该文献中黄土的压缩、湿陷和振陷资料皆由三轴试验求得, 而人们在实际生产中积累的及

规范规定的黄土压缩、湿陷试验都均在侧限压缩条件下求取, 利用文献中的资料仍然达不到简化应用的目的。本文通过对文献[5], [6]中西安、兰州和太原 3 个典型黄土地区的原状黄土在不同湿度状态下的动三轴试验中的振陷资料以及常规侧限压缩、湿陷试验的资料进行分析和整理, 从实用角度出发探讨黄土动、静力变形特性参数之间的联系以及用常规的静力特性参数评估动力特性的可能性。文献[5], [6]中所用试验材料来源相同, 试验前试样的准备情况相同且相互对应, 所进行的动力学试验和静力学试验均可以作为分析问题的基础。

### 1 不同含水率下黄土湿陷变形特性

黄土常规侧限压缩、湿陷试验如文献[5]中所述。由文献[5]得出各地用来试验的原状黄土土样所表现出的湿陷变形特性如下。

(1) 在同一压力下初始含水率愈低, 相应的湿陷

系数愈大;而初始含水率愈接近饱和含水率,相应的湿陷系数也愈低。但不同地区的黄土,初始含水率对湿陷系数的影响有所不同,西安黄土在含水率小于 $100\text{ g/kg}$ 时具有较大的湿陷系数,而当含水率达到 $150\text{ g/kg}$ 以上时湿陷系数迅速降低;太原黄土在含水率为 $50\text{ g/kg}$ 时湿陷系数较大,当含水率达到 $100\text{ g/kg}$ 以上时湿陷系数有明显的降低;兰州黄土初始含水率对湿陷系数在试验的压力范围内随压力的增大没有表现出降低趋势,但其整个湿陷系数的值相对要小。这种情形可以从黄土的结构特性方面做出解释,西安黄土和太原黄土具有较强的结构性,在含水率低时能维持较高地结构强度,因此即使承受较大压力,压缩量也相当有限,但其干密度偏低,说明还具有很大的潜在压缩空间,所以一经浸水,其湿陷系数是相当大的;在含水率较高时其结构强度迅速降低,承受压力时产生的压缩变形量已经较大,而浸水时的变形量相应的要小得多,因此其湿陷系数也迅速降低。兰州黄土由于干密度较大,土质较密,变形发展的空间本来有限,湿陷系数随压力发展虽缓慢增加,但终究数值不大。

(2) 同一压力下初始含水率愈大则湿陷系数愈小。西安黄土、太原黄土干密度较小,由于具有较高的结构强度,在低含水率下基本上压力愈大对应的湿陷系数愈大。随着含水率的增大结构强度迅速降低,因压力愈高对结构强度降低的敏感性愈高,所以高压下对应的湿陷系数降低的反而更剧烈。兰州黄土的结构特性较差,但因其干密度较高,压缩变形的空间有限,基本上是压力愈高、含水率愈大,而相应的湿陷系数也就高一些,同一含水率下按压力大小其湿陷系数数值的层次较为明显,但湿陷系数的值与西安、太原黄土相比总体来说较低。

(3) 相对于不同地区的黄土,初始含水率对湿陷系数的影响因该黄土结构性强弱而有所不同,文献[5]中所定义的黄土的潜在湿陷率可以较好地反映不同黄土种类的结构特性。

## 2 动三轴仪上黄土的振陷变形特性

黄土的振陷变形试验如文献[6]所述,由文献[6]得出各地用来试验的原状黄土土样所表现出的振陷变形特性如下。

(1) 同一种黄土在初始受力条件相同时,含水率对黄土的振陷变形有明显影响,表现为含水率愈大,同一动应力下对应的振陷系数愈大。当含水率较小时,黄土的振陷变形与动应力在较大的范围内表现为近乎直线的关系;随着含水率的继续增大,黄土振陷

变形与动应力关系的曲线特征愈来愈明显,而达到振陷变形急剧发展所需的动应力则愈来愈小。

(2) 对应于同一含水率,残余应变随动应力的增大而增大。大多数试样在施加小的动应力时,残余应变增加较小,近于线性变化。但当动应力增加至某一界限值时,残余应变呈非线性急剧增长,直至破坏。

(3) 黄土的残余应变具有明显的结构特征。不同地区黄土明显不同的结构特性,表现为不同地区的黄土在相同的湿度和初始受力条件下,达到振陷变形急剧发展所需的动应力明显不同,其中西安黄土所需动应力最大,太原黄土次之,兰州黄土最小。同时也说明,不同地区间的黄土干密度对振陷变形的影响远小于结构特性的影响。

(4) 初始固结压力的影响在该次试验中反映虽不明显,但从总的趋势上可以看出,西安黄土、太原黄土由于具有较高的结构强度,初始固结压力愈大则试样所受的偏应力愈大,对土样结构性的破坏也就愈大,因此在初始固结压力低时达到振陷变形急剧发展所需的动应力多表现为比初始固结压力高时所需的动应力要高;兰州黄土由于具有的结构强度较低,初始固结压力愈大则试样所受的偏应力愈大,在不破坏试样的前提下对土样的轴向压缩也就愈大,土样得到了相应程度的压实,因此在初始固结压力低时达到振陷变形急剧发展所需的动应力反而多表现为比初始固结压力高时所需的动应力要低。

(5) 从黄土振陷变形发展的过程来看,黄土所受的动应力在达到使其结构破坏的破坏动应力之前,动应力所能引起的残余变形量很小,在该试验中基本上在 $0.4\%$ 左右。而一旦发生破坏,后继的振动次数将对振陷变形量的发展发挥决定性影响,此后继振动次数愈多,振陷系数愈大。所以控制黄土振陷变形发展的根本在于使地震对它所施加的动应力低于黄土结构性发生破坏时的破坏动应力,即保持黄土结构性的完整是控制黄土不产生较大振陷变形的有效手段。

## 3 关于建立黄土湿陷变形与振陷变形关系的讨论

由于黄土的大空隙、强胶结和欠压密的结构特性是导致其在静力下受湿发生湿陷和在动应力下受荷发生振陷的主要因素,因此黄土的密实度(如孔隙比 $e$ 或干密度 $\gamma_d$ )、初始含水率和结构性对其湿陷和振陷有决定性影响。黄土的振陷与湿陷分别是以振和湿作为诱发因素,使黄土的结构破坏而发生的附加沉陷。黄土的湿陷量随起始含水率的增大而减小,随静应力的提高而增大,而黄土在一定动应力下的振陷量

却随起始含水率的增大而增大,随静应力的提高而减小。因此,黄土的湿陷系数(浸水作用)与振陷系数(动荷作用)之间必然会通过黄土的起始含水率与作用静应力而存在着一定的联系。在振动三轴试验中黄土湿陷变形、振陷变形之间的联系已如文献[4]所述,得出了其振陷系数随着湿陷系数的增大而减小的关系。

虽然,黄土的湿陷和振陷都是土体的一种压密形式,但湿陷系数是黄土在某一侧限固结压力下饱和浸水至变形稳定后测得的,由起始含水率浸湿至饱和状态是影响其变形的惟一因素;而动三轴试验测得的振陷系数除动应力作用外,还要受诸如固结应力比和振次等诸多因素的影响。如果说文献[4]中都以三轴条件为基础对黄土进行的湿陷变形、振陷变形试验容易做到初始受力状态相同,得到了黄土振陷系数与湿陷系数间具有较好规律的关系,则用在压缩仪上得到的黄土静力湿陷系数来与三轴仪上得到的振陷系数建立联系,以充分利用现有的大量资料时,虽然更重要的实际意义,但是在它们之间能否直接建立关系还需进一步研究。这里的问题是:(1)振陷系数与湿陷系数间建立联系应该只限定在变形范围内,不应该,也不能够延伸到动强度范围去,因为黄土在强度破坏后,振陷变形可以有很大发展,动应力与振陷变形之间已经丧失了一一对应关系。而在动强度破坏以前,残余变形量(振陷)变化的规律性较好,表现在同一含水率下,动应力愈大,残余变形量愈大;同一动应力下,含水率愈大,残余变形量愈大。(2)湿陷系数与振陷系数都需限定在同一个静应力条件和起始湿密状态条件下,此时湿陷系数是确定的,换句话说,它从另一个角度综合地代表了土性和静应力状态,振陷系数则代表了这种条件下的黄土受动荷(动应力和振次)作用下的反应,在它们之间有一定联系是毫无异议的。本文对静应力相同的条件由动三轴试验的固结应力比取用侧限压力系数  $K_0$  来满足。

本文以文献[5],[6]的试验资料为基础,对西安、兰州和太原三地黄土在结构破坏前不同动应力(20, 40, 60, 80 kPa)下的振陷系数及相应湿度状态下的湿陷系数分别整理绘制成如图 1—3 所示的振陷系数与相应初始含水率下的湿陷系数的关系曲线。

从图中可见,在上述黄土的振陷系数和湿陷系数之间存在着明显的规律性,对于不同的动应力和固结压力,都有湿陷系数愈大,相应的振陷系数愈小类似的曲线形态,试验点数据的离散性也不大。

(1)对同一个固结压力,不同动应力的一簇曲线总是动应力愈大,曲线愈高,即初始含水率相同(同一

个湿陷系数)时,动应力愈大,振陷量愈高,其中任一个动应力的曲线,总是湿陷系数愈大(初始含水率愈小),振陷系数愈小;

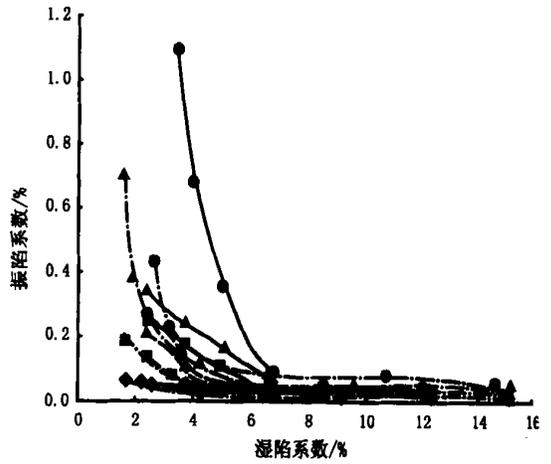


图 1 西安黄土强度破坏前的振陷系数与常规湿陷系数关系曲线

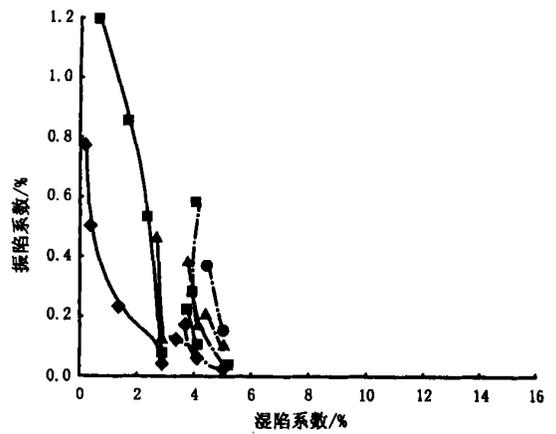


图 2 兰州黄土强度破坏前的振陷系数与常规湿陷系数关系曲线

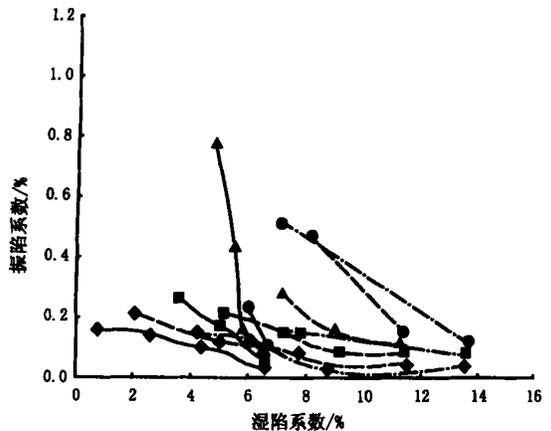


图 3 太原黄土强度破坏前的振陷系数与常规湿陷系数关系曲线

(2) 在不同固结压力的上述各簇曲线间,除西安黄土因具有较强的结构性而是低固结应力的一簇曲线在其它两簇曲线以右外,太原黄土和兰州黄土均有随固结应力的增大而对应簇曲线右移的规律,反映了固结压力增大后使土体发生新的压密的影响;

(3) 为了便于直观反映不同地区黄土的差异,图 1—3 中各地区各图均采用相同比例绘制,虽 3 类土的起始含水率均由 50 g/kg 变到 300 g/kg 甚至 350 g/kg,但兰州黄土因其密度高而湿陷系数变化较小。含水率变化可使固结变形增大,以后的振动引起的振陷系数迅速下降;而西安黄土因其密度低在含水率由 50 g/kg 变化到 300 g/kg 时,湿陷系数变化很大,但振陷系数变化较小,它在结构破坏前受联结强度制约,在结构破坏后受压力变密制约;太原黄土基本上表现出介于西安与兰州黄土之间的特征。

从本质上讲,侧限湿陷系数与三轴振陷系数之间应该而且被证明有实质的联系,但保持静应力状态相同只有  $K_0$  固结的特殊情况,而且考虑动应力振次变化的影响时使问题变得颇为复杂。在三轴湿陷系数与三轴振陷系数间建立联系,虽可摆脱静应力条件相同的困难,但除应力比外仍然必须同时引入动应力和振次的影响,不会使问题的复杂性减少多少,尤其是这种建立的关系与应用大量已有湿陷系数研究资料的目的相背离,缺乏研究的实用价值。由此,作者认为,长期以来存在的由湿陷系数估计振陷系数的企图并没有理论和应用的前景。无需在这方面再作徒劳的探索,而把注意力投向结构性对 2 种系数的影响上去。

## 4 结 论

从实用的角度出发对西安、兰州和太原 3 个典型黄土地区的原状黄土在不同湿度状态下的动三轴振

陷资料与侧限压缩、湿陷资料进行了分析和整理,探讨了由黄土动、静力特性参数之间的联系用常规的静力特性参数估计动力特性的可能性,主要结论如下。

(1) 文献[5],[6]中的压缩试验、湿陷试验和振陷试验均得到了与文献[4]中研究完全一致的规律性,但由于文献[5],[6]中采用了具有不同结构类型的西安黄土、太原黄土和兰州黄土 3 类试样,在其动静力学试验的对比中发现和证明了结构性对上述各种规律性的重大影响,从而更加突出了在上述研究中引入结构性的必要性和迫切性。

(2) 本文通过对不同黄土在不同固结压力和不同初始含水率以及不同静、动应力条件下的大量试验分析了用静力湿陷系数预估动力振陷系数这种思想的可行性,得到了这种思想并不具有理论意义与实用意义前景的结论,再一次强调了在黄土静、动力学特性研究中实际引入和重视黄土结构性的思想。

### [参 考 文 献]

- [1] 钱鸿缙,王继堂,罗宇生,等.湿陷性黄土地基[M].北京:中国建筑出版社,1985.
- [2] 关文章.湿陷性黄土工程性能新篇[M].西安:西安交通大学出版社,1992.
- [3] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [4] 巫志辉,谢定义,方彦,等.湿型原状黄土的震陷特性[A].第三届全国土动力学学术会议论文集[C],上海:同济大学出版社,1990.285—290.
- [5] 骆亚生,谢定义,邢义川.原状黄土的地区湿陷特性及其潜在湿陷率[J].西北农林科技大学学报,2002,30(5):90—95.
- [6] 骆亚生,谢定义,董为民,等.不同地区黄土振陷特性的对比分析[J].陕西水力发电,2001,17(1):4—7.

## 欢迎订阅《中国农业资源环境文摘》

《中国农业文摘——土壤肥料》于 1985 年创刊,收录了全国 200 余种农业科技期刊中关于土壤学、肥料学、植物营养学和生态环境科学方面的文献,是本学科专业核心期刊评价的指标刊物,也是我国本学科唯一一种文献检索刊物。为适应新形势下科研工作与农业生产的要求,我们拟将《中国农业文摘——土壤肥料》于 2003 年起更名为《中国农业资源环境文摘》,刊物性质与发行范围不变。《中国农业资源环境文摘》的报道内容包含原来《中国农业文摘——土壤肥料》的报道范围,侧重报道生态农业、环境科学、资源可持续利用以及学科之间交叉领域的新理论、新技术和新方法,使交叉领域内容新颖的文献及时报道出来,为广大土壤科学、资源与环境科学的科学技术工作者服务,促进学术交流,推动学科发展。

本刊仍为双月刊,16 开,刊号:CN 11—4920/S,ISSN 1002—543X。邮发代号:18—124。每期定价 10.00 元。公开发售,全国邮局均可订阅,如错过订期,可直接向编辑部订阅。

编辑部地址:北京中关村南大街 12 号中国农业科学院科技文献信息中心

邮政编码:100081

联系电话:010—68919886 转 2313