

黄土震陷研究

何光

朱鸿博

(合肥工业大学土木系)

(西安冶金建筑学院建工系)

一、前言

黄土与黄土类土广泛分布在我国西北、华北地区、这种土垂直节理发育,土的颗粒成分以粉土粒占大多数。粘土粒结成薄膜,包裹着粉土粒,形成很松的排列,粘土薄膜起着支撑粉土粒的作用。一旦土被浸湿,土骨架崩溃,不但产生大量变形,而且引起强度的大量损失。有人认为,粘粒的胶结作用是由于浸水而遭破坏,解释为,黄土的崩解是剪切现象,是否产生崩解要看剪应力水平而定。还有人指出,崩解是在高压下产生的,而在低压下浸湿时要发生膨胀作用。也有用在临界的粒间接触处的反凝作用的机理来说明黄土崩解的,并且指出了溶质和溶质浓度的改变对崩溃的影响。总之,黄土的这种崩解现象是一种复杂的过程。它削弱了土结构的联接,破坏了土团聚体,使土的变形和强度发生很大变化,在动力作用下特别是在突加荷载作用下更是如此。事实上,当黄土的含水量很低时,由于具有高凝聚强度,能使黄土形成相当高的陡坎,但浸水后,土粒间的胶结作用遭到破坏,凝聚强度大为丧失,陡坎就要崩解。Anagnosti曾指出,黄土浸水饱和后如遇动荷载,甚至会液化。Seed^[1]认为,我国1920年12月16日甘肃大地震造成的黄土塬大面积滑坡,不是孔隙水压力就是孔隙气压力促使黄土液化而造成的(这只是Seed当时的猜想)。目前,有许多单位对黄土的震陷特性进行了研究^[2,3],本文结合陕西省咸阳市地震小区划土样动力试验,对黄土土样进行浸水同时施加动荷载来模拟地震时地下水位上升土体同时受地震动荷载的作用情况,进行黄土的震陷特性研究。

震陷是指土体在动荷作用下产生的附加沉降,它与土的残余变形密切相关。研究指出,软塑粘土地基上建筑物的震害主要是由地震时地基土产生的附加不均匀沉降所引起。黄土的震陷有两个含义,一是土体在荷载作用下的附加沉降;二是由于土体有较高的含水量或浸水后,土体本身有湿陷性,在动荷的作用下,产生的震动湿陷。

二、研究方法

采用电磁式三轴仪,探井内人工取土样,试验土样采用直径3.91cm,高度8.1cm的圆柱体。土样首先在静压力 σ_3 和 σ_1 作用下固结,固结拟模原状土样的天然应力状态,轴向压力 σ_1 等于土层的上覆自重压力,侧向固结压力 $\sigma_3 = K_0 \sigma_1$, K_0 取为0.59,试验严格按《土工试验规程》SDS₀₁₋₇₀进行,不等压固结稳定标准为:5分钟内轴向变形不超过0.005mm,每小时的轴向变形不超过0.01mm,动荷为频率1Hz的正弦波形,振动次数为10次,试验土样为12

组(每组4个土样,其中每二组土样相同),进行了6组浸水试验和6组不浸水试验。不浸水试验:在上述压力下,固结稳定后,分别施加不同的动荷,测定振动10次后的残余变形量,就可画出 $N=10$ 次时的动应力和残余应变的关系曲线。浸水试验:先把土样按一定的应力比加载到相应的偏应力,维持应力状态不变,从下向上浸水,水头保持100cm,浸水的同时施加 $N=10$ 的动荷;这样以便比较浸水和不浸水的差别,试验后分别测出试样的含水量、饱和度等。对比试验中的试样物理指标、动力条件及应力条件均相同。试验土样的物理性态指标见表1。

表1

土样编号	取土深度 (m)	土 名	密 度 (g/cm ³)	含水量 (%)	干 密 度 (g/cm ³)	孔 隙 比	备 注
TK-1	4.85—5.00	黄土	1.56	15.57	1.35	1.0	有湿陷性
TK-2	2.50—2.65	黄土	1.94	16.25	1.67	0.62	无湿陷性
TK-3	5.30—5.45	黄土	1.57	12.6	1.39	0.936	有湿陷性
TK-4	4.85—5.00	黄土	1.52	19.67	1.27	1.12	有湿陷性
TK-5	2.30—2.45	黄土状亚粘土	1.83	19.23	1.53	0.76	无湿陷性
TK-6	2.75—2.90	黄土	1.88	25.8	1.49	0.81	无湿陷性

三、试验分析及结果

不浸水的土样试验记录曲线见图1,浸水后立即施加动荷的土样试验记录见图2。从图2中可看出,当变形发生突变,变得愈来愈大时,这时的动应力幅值也发生突变,这明显的变化现象,是因为孔压的升高,黄土结构大幅度地破坏,粒间有效应力降低,使土的应变增大,而这时相应的动应力幅值就开始变小。图1,2对比可以看出浸水和不浸水试样在动荷载作用下,它们之间有明显的区别。

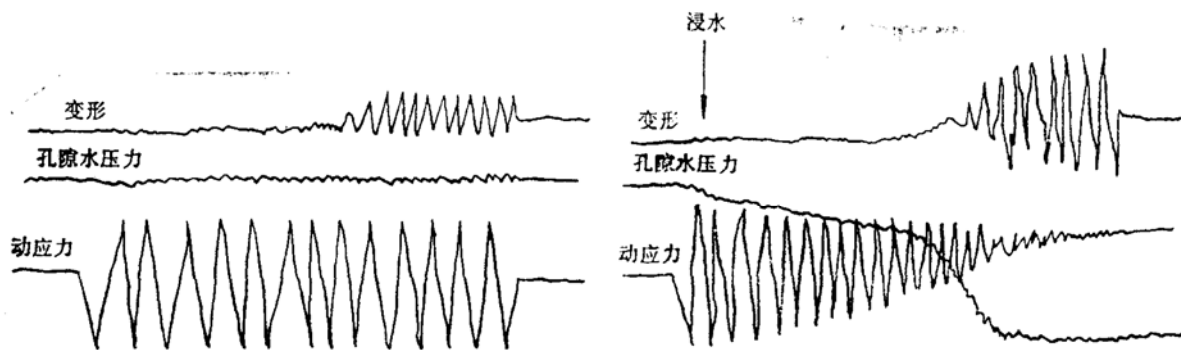


图1 不浸水土样的变形、孔隙水压力和动应力曲线

图2 浸水土样的变形、孔隙水压力和动应力曲线

(一)破坏形态

图3为不浸水的土样剪切型破坏。随着动应力的循环次数的增加,土的轴向总变形和剪切变形均不断增加,最后导致典型的剪切破坏。形成大致成 $45^\circ + \frac{\phi_d}{2}$ 的剪切面。而具有湿

陷性的黄土浸水后立即加动荷, 它的破坏形态有“鼓肚”现象, 没有明显的剪切面, 土样结构全部破坏, 呈崩解状。而非湿陷性的黄土浸水后受动荷作用的破坏形态介于上述两者之间, 即有“鼓肚”现象, 也出现剪切面, 在较大范围内土体塑流变形, 在剪切面附近土体软化, 且剪切面的角度大于 $45^\circ + \frac{\phi_d}{2}$ 。

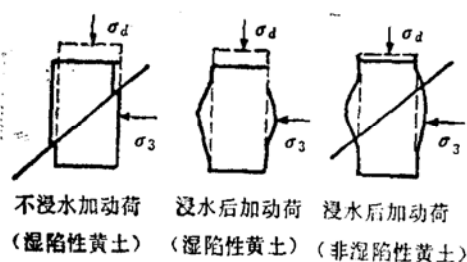


图3 土样破坏形态

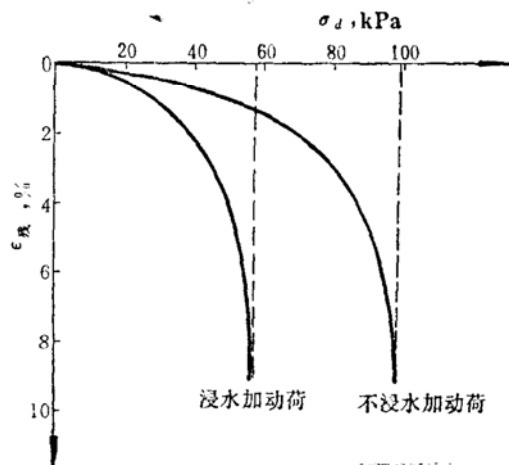


图4 土样震陷曲线

(二) 震陷曲线

图4为 σ_d 与 $\epsilon_{残}$ 的震陷曲线。不浸水的土样残余应变随动应力的增大而增大。动应力较小时, $\epsilon_{残}$ 较小, 当动应力增大到某一界限值时, $\epsilon_{残}$ 迅速增大, 直到试样最后破坏。而浸水土样, 动应力很小时, $\epsilon_{残}$ 就较大, 震陷曲线也较陡, 根据12组试验结果的统计数字表明, 黄土发生动力震陷, 即 $\epsilon_{残}$ 趋于很大时的 σ_d 值有较大的差异, 浸水土样的 σ_d 值为不浸水土样 σ_d 的75%左右。

(三) 振次对震陷的影响

不浸水试验振次少时, 振次和动应变基本呈直线。随着振次的增加, 变形累积到使黄土结构屈服, 残余变形急剧增大, $\delta_{残}-N$ 曲线变陡。

浸水试验非湿陷性土样 $\delta_{残}-N$ 曲线有两个反弯点, 即随着振次的增加, 残余变形累积到黄土结构屈服, 产生一定的塑性变形, 曲线平缓。然后土结构又达到新的平衡后, 随着振次的增加, 应变又急剧增加。有湿陷土样 $\delta_{残}-N$ 为非线性曲线, 呈上凹状, 曲线较陡, 土样很快发生崩解, 抗剪能力完全丧失, 见图5。

(四) 孔隙水压力

随着动应力的增大, 量测到的孔隙水压力明显增大, 残余应变急剧增加, 试样很快达到破坏状态。由于水的浸入, 破坏或削弱了土粒间的联结, 使得土体在振动作用下孔压升高, 粒间有效应力降低, 土的结构破坏, 随之发生显著的下沉。根据试验数据的统计, 土体发生崩溃时的孔压仅为 σ_3 的60%左右, 远达不到像砂土液化时 $u = \sigma_3$ 的标准。按照Seed提出的反正弦模型绘制孔压比(u/σ_3)与破坏振次比(N/N_L)的关系曲线见图6。

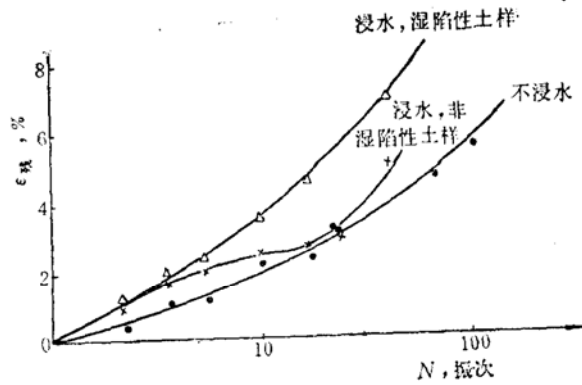


图5 残余变形与振次的关系

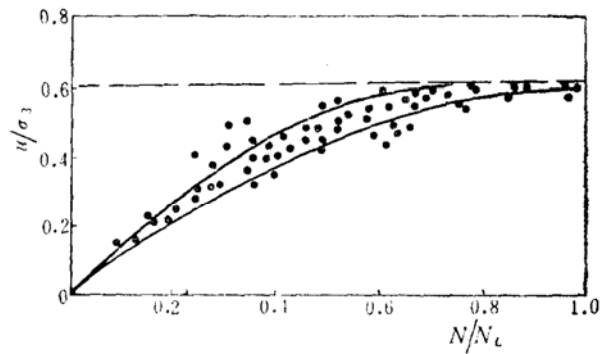


图6 孔压比与破坏振次比的关系曲线

四、震陷机理

振动湿陷就意味着土结构的破坏。湿陷性黄土具有粒状架空接触式结构,其内部存在着许多大的架空孔隙。这种结构即使土样受到均压作用,土骨架中的应力都非均匀分布。在土粒的胶结物上将发生应力集中,使胶结物受到压、剪、弯、扭的组合应力作用。随着水的浸入,黄土的加固凝聚力破坏,连结强度减弱,黄土的骨架就会失去稳定,土粒重新排列。架空孔隙周围的颗粒将契入孔隙内,造成湿陷现象。特别在浸水后遇动力荷载作用,颗粒填充孔隙,发生相对稳定。原来由颗粒间承担的有效应力迅速释放转移给孔隙水,导致土中孔隙水压力的升高,颗粒间有效应力降低,使土体产生震动湿陷。当然震陷后的黄土不等于其强度完全丧失,相反,会有新的强度产生。因此,震动湿陷后的黄土地基在经过一定时间仍能达到新的稳定,稳定程度取决于应力状态。震陷变形表现为体积和剪切两部分。动力状态下黄土的湿陷塑性变形与静力状态下的黄土的湿陷塑性变形和塑性理论中的塑性变形都不同。静力状态下,是由于土的物理状态的改变引起的,而动力状态下的黄土湿陷是由上述两种状态的综含,即由土的物理状态的变化和应力状态的改变所引起。

五、结 论

1. 当湿陷性黄土浸水后, 如遇动荷载作用土体内的动孔隙水压力上升, 虽然孔隙水压力达不到侧压力 σ_3 , 仅达到 σ_3 的60%左右, 土体就会崩解, 产生类似砂土液化的现象, 验证了Seed教授关于黄土也可能发生类似砂土液化的猜想。

2. 试验中有些土样按照黄土规范可不定为湿陷性黄土, 在常规压缩试验中, 其湿陷性非常小, 但在动力试验中这些土样浸水后施加动荷, 土体也会发生崩解, 发生很大的残余变形, 这种现象在地震中是会发生的, 地震时地下水上升, 孔隙水压力提高, 也会使部分非湿陷黄土产生动力湿陷。

参 考 文 献

- [1] Seed, H.B., Landslide During Earthquake Due to Soil Liquefaction, Proc. ASCE, JSMFD, Vol. 94, No. SM5, 1968.
- [2] 张振中等, 黄土震陷研究与震害预测, 西北地震学报, Vol. 9.
- [3] 巫志辉等, 原状黄土动力特性的进一步探讨, 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文集, 1985年。