维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷 第1期
2007年3月

西北地震学报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 29 No.1
March, 2007

黄土场地震动液化实例

廖胜修，程菊红
（甘肃省地基基础有限责任公司，甘肃 兰州 730050）

摘 要：湿度大的黄土在地震作用下会发生液化和震陷，已在室内动力试验和古地震的调查中得到了证实。目前工程规范对黄土的液化预测判别尚缺乏经验，暂未列入规范。本文介绍了一些黄土地基处理施工的实例，证明饱和黄土在受到机械振动或冲击作用的影响后，会产生液化使所处理的地基下沉，对开展黄土液化机理、液化判别与危害评价方法及工程预防措施的研究具有现实意义。

关键词：黄土；振动；液化；震陷
中图分类号：TU435 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2007)01－0054－04

Some Instances of Vibrating Liquefaction on Loess Field

LIAO Sheng-xiu , CHEN Ju-hong
(*Geotechnical Engineering Co. Ltd of Gansu Province, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: It's possible that liquefaction and seismic collapse could occur during earthquake in high-humidity loess, which has been proved to be true both in laboratory dynamic test and investigation of paleo-earthquakes. At present, the code of engineering doesn't put the predictive judgment for the liquefaction of loess into consideration. In this paper, some cases of loess ground treatment are introduced, in which the treated saturated loess liquefied, thus the ground sank, caused by mechanical shaking or impact. It is meaningful to research on the liquefaction mechanization, liquefaction discrimination, harmfulness judgment and engineering precautionary measure for loess.

Key words: Loess; Vibrating; Liquefaction; Seismic collapse

0 引言

《建筑抗震设计规范》(GB50011－2001)条文说明中指出[1]："关于黄土的液化可能性及其危害在我国的历史地震中虽不乏报导，但缺乏较详细的评价资料，在建国以后的多次地震中，黄土液化现象很少见到，对黄土的液化判别尚缺乏经验，但值得重视。……暂不列入规范，有待进一步研究。"《岩土工程勘察规范》(GB50021－2001)条文说明中也指出[2]："根据科研成果，湿度大的黄土在地震作用下，也会发生液化和震陷，已在室内动力试验和古地震的调查中得到证实。鉴于迄今为止尚无公认的预测判别方法，故本次修订未予列入"。

笔者所在的甘肃地基基础公司在兰州地区黄土场地施工，采用强夯、打桩机械进行地基处理时，经常碰到饱和黄土受机械振动影响后产生液化，出现喷水、冒砂和涌泥现象，并使所处理的地基下沉，基坑周围发生密集而明显的沉陷裂缝。如1996年在西固区庄浪路施工兰州炼油厂908号、909号和910号高层建筑，采用打入钢筋混凝土预制桩处理地基时，地基产生液化，基坑周边出现环状裂缝，缝宽达10～20 mm，裂缝开展距处理边界距离达7～8 m；1999年在兰州西固11街区2栋高层建筑地基处理，采用打入钢筋混凝土预制桩也出现同样情况。本文仅将近几年在地基处理中碰到的几处黄土震动液化现象作一简单的介绍。

1 黄土震动液化实例

收稿日期：2006-05-12
作者简介：廖胜修(1938－)，男(汉族)，四川安岳人，教授级高级工程师，主要从事岩土工程性质和地基处理技术研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

1.1 兰化化建公司水勘院住宅楼(整片灰土挤密桩)

工程位于西固区清水街东侧,南临化建锅炉房。场地地貌单元属黄河南岸Ⅱ级阶地。地基土为黄土状粉土,厚度约 18 m,具Ⅲ级自重湿陷。其下为卵石。地下水埋深 10.5 m。建筑场地呈"L"形,占地面积约 2 000 m^2,地基采用整片灰土挤密桩,桩径 Φ400,桩长 7.0 m,桩心距 1.0 m,呈正三角形布置,总桩数 2 121 根。桩身回填 2:8 灰土。成桩机械为 2 台 15 t 履带式打桩机,配 3 t 导杆式柴油锤。桩孔回填采用 8 台 10 kW 锤落式夯实机,锤重 250 kg,落距 1.5～2.0 m。

灰土挤密桩在基坑中施打,基坑深度 2.3 m。施工顺序为先外后里,隔行、隔点跳打,全场分 3～4 遍完成。施打第一、二遍时,成孔深度可达 6.5～7.0 m;施打第三、四遍桩孔时,5 m 以下含水量已接近饱和状态,成孔过程中孔隙减小,孔隙水上升,成孔后出现缩孔、坍孔。成孔深度只能达到 5.5～6.0 m。采用多次加入 2:8 灰土后反复冲孔后也只能达到 6.5 m。

在施打二、三遍桩孔时,基坑周围出现裂缝(图 1),裂缝宽度一般 3～5 mm,最大的达 20～30 mm,距基坑边最远的距离 6.7 m。振动挤密桩完成后实测,基坑底面下沉量达到 20～30 cm。

挤密前后在场地上开挖深井,采取原状土样进行了室内实验,测定了挤密前后地基土的物理力学性质(表 1)。从表 1 可见挤密前后含水量变化不大,但孔隙比和饱和度变化较大:挤密前孔隙比平均值为 0.812,挤密后降为 0.608,降低了 25%;挤密前饱和度平均值为 56.9%,挤密后上升到 72.5%,提高了 27%。很显然是由于在灰土挤密桩施工过程中受振动挤密影响,土层孔隙减小,孔隙水压力增高,特别是下部土层达到饱和状态,抗剪强度降低,土层产生液化,引起地面下沉,导致基坑四周出现明显的下沉裂缝。

表 1　水勘院住宅楼挤密前后地基土的主要物理力学性质指标

挤密前(天然状态)						挤密后(桩间土)					
深度/m	W/%	e	S_r/%	δ_s	a_{1-2}/MPa^{-1}	深度/m	W/%	e	S_r/%	δ_s	a_{1-2}/MPa^{-1}
1.6	15.9	0.799	53.7	0.026	0.42	3.3	15.7	0.595	70.7	0.002	0.12
3.1	16.1	0.792	54.9	0.043	0.46	4.3	12.6	0.605	55.8	0.001	0.17
4.6	16.1	0.909	47.8	0.038	0.36	5.3	15.8	0.630	67.3	0.002	0.10
6.3	15.5	0.680	57.6	0.004	0.17	6.3	13.1	0.576	61.6	0.004	0.11
7.6	18.2	0.873	56.5	0.023	0.22	7.3	18.4	0.620	79.8	0.001	0.11
9.9	21.5	0.819	71.1	0.005	0.23	8.3	19.8	0.611	87.2	0.001	0.13
						9.3	19.6	0.620	85.0	0.001	0.11
平均	17.1	0.812	56.9	0.023	0.31	平均	16.4	0.608	72.5	0.002	0.12

注:挤密前后试样深度均从自然地面算起。

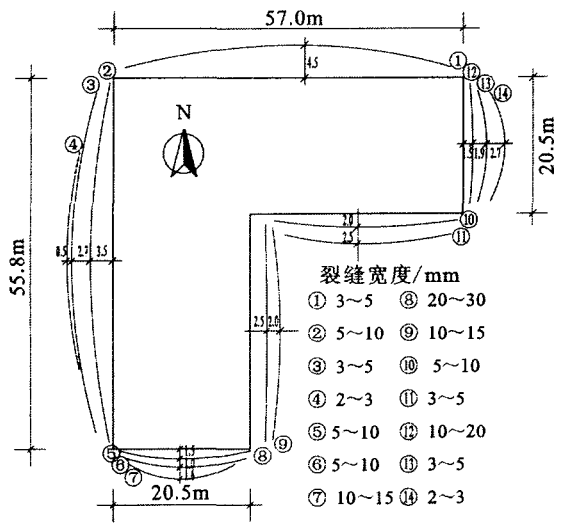

图 1　裂缝分布图

Fig. 1　Distribution of cracks.

1.2 兰化四号街区 40# 住宅楼(人工挖孔夯扩挤密桩)

兰化四号街区 40# 住宅楼位于西固区福利西路与卫东路十字西北角。场地属黄河南岸Ⅱ级阶地。地基为黄土状粉土,厚度约 20 m。地基处理采用人工挖孔夯扩挤密桩,桩径 950 mm,桩中心距 1 800 mm,呈正三角形布置,桩长 7.5～7.6 m。人工成孔夯扩桩在基坑中进行,基坑深 4.0 m,挖孔深度 7.5～7.6 m,孔底土达饱和状态。基坑底往下 1.5～2.0 m 土层含水量低,进行过人工增湿。自然地面深度 11～12 m 以下呈饱和状态。

成孔及夯扩挤密施工顺序为隔排隔行三遍完成。施工用 3 辆吊车,夯锤直径 Φ900,锤重 3 t,落高 6～8 m,分层填土厚 1.0～1.2 m,夯击 6～8 击。饱和土部分夯填建筑垃圾,其余夯填 2:8 灰土。夯

维普资讯 http://www.cqvip.com

打完第一遍时孔底未出现渗水等异常现象，在进行第二、三遍夯击时出现渗水、涌泥现象。渗水聚在孔底，一般10余厘米，多者30 cm。涌泥的井孔全场出现10余个，少则涌泥几十厘米，多则2～3 m，最大一个井孔涌泥量高达5 m。基坑南侧砖围墙(离坑边约1.5 m)开裂，地面裂缝，缝宽大者达5 mm，裂缝最远距离达7.0 m。基坑东侧围墙(离坑边约1.0 m)开裂，围墙外路面下沉。

在扩夯挤密施工前后分别在场地上开挖了深井，采取原状土样进行了室内实验，测定了地基土的物理力学性质(表2)。从表2可见夯扩挤密前孔隙比平均值为1.039，夯扩后降为0.717，降低了31%；饱和度夯扩挤密前平均值为34.5%，夯扩挤密后提升为66.4%，下部达到饱和状态。由于土层在夯击能为220 kN·m多次冲击振动下孔隙比降低，孔隙水压力增高，土层在饱和状态下产生液化，因此从人工挖掘的井孔中出现渗水、涌泥现象，基坑四周地面产生下沉开裂。

表2 兰化40#住宅楼夯扩挤密前后土的主要物理力学指标

夯扩挤密前(天然状态)					夯扩挤密后(桩间土)				
深度/m	W/%	γ_d/[N·m^{-3}]	e	S_r/%	深度/m	W/%	γ_d/[N·m^{-3}]	e	S_r/%
4	10.6	13.4	1.015	28.2	4.8	11.2	15.2	0.776	38.9
5	9.4	12.9	1.093	23.2	5.8	12.3	15.4	0.753	44.1
6	11.8	13.1	1.061	30.0	6.8	15.5	15.7	0.719	58.2
7	15.9	12.9	1.093	30.3	7.8	17.2	15.6	0.730	63.6
8	14.3	13.3	1.030	37.5	8.8	20.0	16.3	0.656	82.3
9.7	16.3	13.3	1.030	42.7	9.8	21.8	15.8	0.709	83.0
10.5	14.3	13.8	0.956	40.4	10.8	23.7	16.1	0.677	94.5
平均	13.2	13.2	1.039	34.5	平均	17.4	15.7	0.717	66.4

注：夯扩挤密施工前后探井试样深度均从自然地面起算。

1.3 750 kV官亭变电站工程(强夯)

本工程位于青海省民和县官亭镇东约1 km，南距黄河约3.5 km。地貌单元属山前洪积扇，地势呈阶梯状，场区外侧农灌渠环绕，场区内均为耕地。地基土以第四系冲洪积黄土状土为主，砂土、圆砾等以夹层、互层、透镜体状分布。北部地段属自重湿陷场地，湿陷等级Ⅱ～Ⅲ级，其余为Ⅰ级非自重湿陷场地。地下水埋深大于20 m，但区内存在着上层滞水。

地基处理采用强夯法，其目的是为了消除地基土部分或全部湿陷量和提高地基强度，降低压缩性，减少不均匀沉降。强夯能级为2 000 kN·m和4 000 kN·m。330 kV和主控楼区采用单夯击能2 000 kN·m，夯心距3.25 m，锤重150 kN，每点夯击7～9击，最后两击平均夯沉量≤50 mm。主夯阶段未曾出现异常现象，地面未出现隆起和明显翻浆。经晾晒几天后进行拍夯，总夯沉量在70～80 cm左右，拍夯后出现泛砂、冒水现象。经洛阳铲打孔观察，土层呈饱和状态，随后孔内充满水，水面上升至地表并溢流。3 m以上土层触探击数很低，$N_{63.5}$多为1～5击(天然状态6～8击)，标准贯入度试验N一般为3～5击(夯前N=5～8击)。强夯后的动力触探试验和标准贯入试验击数均比夯前天然状态试验击数减少，表明地基土强度降低。

强夯前后在场地上开挖探井，自地面起每隔1.0 m采取原状土样进行室内土工试验，测定了地基土的物理力学性质，结果见表3。

表3 官亭变电站强夯前后土的物理力学性质指标比较

强夯前(天然状态)					强夯后				
深度/m	W/%	e	Sr/%	a_{1-2}/MPa^{-1}	深度/m	W/%	e	Sr/%	a_{1-2}/MPa^{-1}
1	19.2	0.864	59.8	0.63	1	18.6	0.478	100	0.10
3	11.5	0.851	36.6	0.57	2	17.9	0.483	99.2	0.13
4	14.6	1.002	39.2	0.52	3	13.7	0.444	82.7	0.12
5	10.7	0.897	32.1	0.18	4	9.3	0.450	55.4	0.07
6	10.8	0.868	33.4	0.18	5	11.3	0.645	47.1	0.08
7	11.1	0.916	32.6	0.18	6	12.2	0.696	47.2	0.11
8	10.8	0.923	31.5	0.25	7	12.7	0.783	43.6	0.14
9	11.4	0.897	34.2	0.16	8	13.5	0.862	42.1	0.18
平均	12.51	0.902	37.4	0.333	平均	13.65	0.605	64.66	0.116

维普资讯 http://www.cqvip.com

该场地上部土层含水量较高,强度较低,在夯击振动作用下,孔隙比降低,土层达饱和状态,土的结构遭到破坏,抗剪强度降低,土体液化导致喷水、冒砂。

2 结语

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物,因其独特的亚稳定结构具有极强的易损性,常引发滑坡、液化和震陷等工程地质灾害,造成无数的工程事故。国内外历史震害和室内实验都已证实黄土具有很高的液化势,在7度地震动强度下,饱和黄土可发生液化和震陷。在工程施工机械振动或冲击荷载作用时,高湿度黄土地基也发生液化和震陷,并使所处理的地基下沉,周围地面开裂。黄土的工程地质灾害虽然已为人们所熟知,但对其在动荷载作用下表现出的易损性和灾害性尚缺乏全面深入的了解。随着经济建设的飞速发展和西部大开发战略的实施,在我国西北广泛分布的黄土液化和震陷灾害日益显著。目前对黄土的液化缺乏详细的评价资料和尚无公认的液化判别方法,黄土液化问题未列入相关规范。因此很有必要对黄土的液化和震陷开展研究工作,弄清黄土液化产生的条件、液化机理和液化判别方法,制定出液化震害预测和工程预防措施,杜绝黄土液化和震陷灾害,以适应工程建设的要求。

[参考文献]

[1] 建筑抗震设计规范(GB50011－2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[2] 岩土工程勘察规范(GB 20021－2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[3] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.

[4] 姜朴. 土动力学[A]//第6届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 上海:同济大学出版社;北京:中国建筑工业出版社,1991:53-62.

[5] 刘汉龙,余跃心,王兰民,等. 强夯黄土地基液化试验研究[A]//土动力学与岩土地震工程[C]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:218-224.

[6] 王兰民,刘红玫,李兰. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2002,20(1):89-94.

(上接48页)

(2) 被结构面切割岩体的破坏机制往往受结构面产状的组合与力作用方向所控制。清连高速公路边坡岩体中的结构面(层理、节理、裂理等)的倾向或它们的组合交线的倾向与边坡的坡面倾向相反时,边坡一般趋于稳定;边坡岩体中的结构面倾向或组合交线的倾向虽然与边坡倾向一致,但结构面的倾角或结构面组合较小的倾角都大于边坡坡角时,边坡一般趋于基本稳定;边坡岩体中的结构面或组合交线的倾向方向与边坡坡面倾向一致,但它们的倾角小于边坡坡角时,边坡一般不稳,甚至导致边坡发生大规模滑动。

(3) 用结构面玫瑰花图和极点密度图可以对岩体多组结构面的产状和密度很好的表示。从结构面玫瑰花图和极点密度图可以清楚的展现边坡岩体结构面发育的优势方位和密集程度。

对岩体结构面特征及其组合关系的研究,是分析评价清连公路边坡稳定性和岩体稳定性的重要依据。各类岩体结构面的分布规律、发育密度、表面特征、连续特征及其空间组合形式控制了岩质边坡坡体稳定性和破坏形式,对其更深入研究十分必要。

[参考文献]

[1] 黄润秋,胡卸文. 金沙江溪洛渡水电工程岩体结构模型及其工程应用研究[M]. 成都:成都理工学院. 1997.

[2] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1993.

[3] 孔宪立. 岩体工程地质及其灾害[M]. 上海:同济大学出版社,1993.

[4] 孔宪立,石振明. 工程地质学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[5] 陈剑平. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春:东北师范大学出版社,1995.

[6] 方再根. 计算机模拟何蒙特卡洛方法[M]. 北京:北京工业学院,1988.