

# 黄河三角洲地区砂土路基液化机理探讨及处置

王成军<sup>1</sup>, 王爱民<sup>2</sup>

(1. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 2. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014)

**摘要:**从砂土路基液化机理入手,结合黄河三角洲地区地基土工程地质特征,对该地区路基砂土液化做现场振动试验,找出影响砂土路基液化的影响因素,主要内因有土体的密实度、含水量和土体中是否存在软弱区;主要外因有荷载的大小、作用时间和荷载频率。并针对砂土液化的内外因,结合青银高速公路强夯处理案例展开分析,提出了处理方法。

**关键词:**砂土;液化;液化处理;强夯;黄河三角洲地区

中图分类号:TU411

文献标识码:A

## 0 引言

液化,是指地面以下一定深度范围内的饱和无黏性土、低塑性黏性土、粉煤灰、砂砾石等土类,由于地震力反复作用,孔隙水压力急剧上升和有效压力消除,失去强度呈液态的过程。国内外地震灾害研究表明,地震时道路及桥梁会产生严重破坏,导致道路开裂、塌方、隆起、不均匀下沉,桥梁墩台滑移或墩、柱、支座破坏。在平原、河谷地区,这些破坏主要是由于液化及沉陷等地基失效引起的,由此科学研究人员和工程技术人员已将此列为工程抗震设计的重要内容。《公路工程地质勘察规范》明确规定:当抗震及设防烈度为VI~IX度的地区,在桥位、高路堤等重要构造物地段,地面以下20m范围内有饱和砂土或饱和粉土层时,应查明可液化土对桥基、路基稳定性的影响。

黄河三角洲地区位于山东省北部,东临莱州湾,西至徒骇河—滨州一线,南靠小清河,北濒渤海,面积约500 km<sup>2</sup>[1]。滨博高速公路、青银高速公路(齐河—夏津段)、荣乌高速公路(辛庄子—邓王段)均从该地区路过。区内第四系以来的黄河冲积、海积土层普遍发育,主要为亚砂土和亚黏土,含有细砂及粉细砂等。同时由于该区东靠郯庐地震带、北侧为

燕山—渤海地震带,强震发生时,地基土易发生液化与震沉。随着该区开发与建设规模的不断增大,对该区地基土液化机理及地基液化处理方法进行研究,具有重大意义。该文结合山东省交通科技项目《饱和细粒土微振液化机理探讨与沉降变形预测及处置研究》及黄河三角洲区域内青银高速公路、荣乌高速公路等工程中可液化砂土处理实践结果,对该地区路基砂土液化机理进行探讨,并提出高速公路路基砂土液化处理的几种常用具体方法。

## 1 砂土液化机理探讨

### 1.1 研究区概况

在威乌高速公路辛庄子—邓王线路段选黄河三角洲典型研究区,地形平坦,土体较均一,面积约为3m×3m的区域,地表标高6.6m左右,地下水位较浅,最浅的为0.2m,属黄河冲积平原地貌单元。根据钻探结果和室内外土工试验结果分析,推测该地区揭露深度内的地层为第四纪以来的冲积、海积土层,主要为粉质黏土、黏土、粉土、粉砂等,土体状态为软—硬塑,密度为松散—稍密。

### 1.2 现场试验

此次工作通过在黄河口潮坪选择典型研究区,

\* 收稿日期:2009-03-09;修订日期:2009-05-06;编辑:陶卫卫

基金项目:山东省交通科技资助项目,项目编号:2002A109。

作者简介:王成军(1979—),男,山东安丘人,工程师,主要从事岩土工程和公路工程的研究工作。

利用现场振动试验,通过实时孔压监测、静力触探测试、十字板剪切测试,以及相关室内试验和变形数值模拟,研究黄河三角洲粉质土液化的发生过程。

试验过程是将10 kg的重锤提到50 cm高度,自由落下,冲击在50 cm × 50 cm的荷载板上,重复冲击振动300次,使土体完全液化,然后静置约24 h,使土体强度恢复,试验点被涨潮淹没。次日再进行新一轮相同振动次数的循环荷载作用,整个现场试验过程中连续观测记录土体中孔隙水压力的累积与消散过程。每轮振动前后,均进行原位静力触探测试、十字板剪切测试。全部循环振动结束后,取原位土样进行室内实验对比分析<sup>[2]</sup>。此次外业共进行5轮振动恢复试验。

通过 Geopen 数字化地震仪测量和记录土体对振动能量吸收,研究饱和粉质土体在承受外荷动力振动中能量的损耗特性。采用孔压自动采集仪系统自动测记孔压变化值,得出超孔隙水压力,即: $\Delta u = u - u_0$ 。作  $\Delta u$  随时间  $T$  的变化曲线图,研究振动导致土体孔压的变化(图1)。

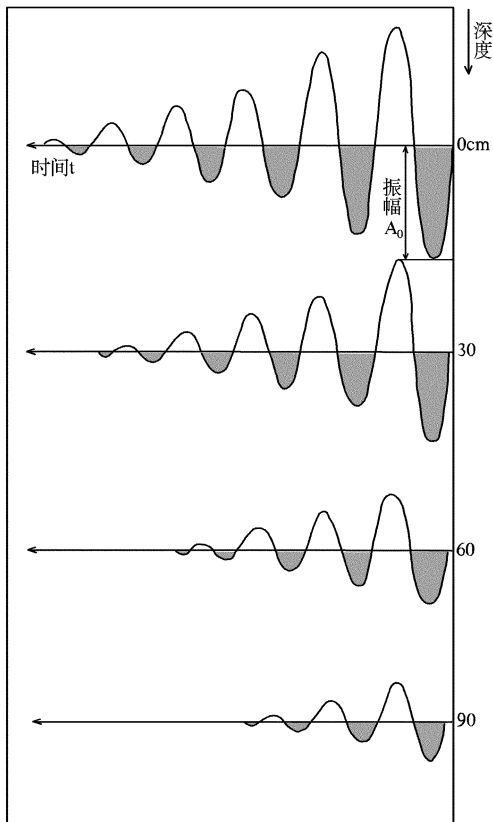


图1 实测的典型振动波谱曲线图

### 1.3 结果及分析

由图1分析,振动能量在表层0~30 cm深度衰减速度最快,呈近直线型衰减,约40%~60%的振动能量被此土体层吸收;能量在30 cm深度以下土层中的衰减速度有所降低。

将每个探头采集到的孔压值减去对应深度处的静水压力,得出超孔隙水压力,即: $\Delta u = u - u_0$ 。作  $\Delta u$  随时间  $T$  的变化曲线图2,研究不同循环振动时和振动停止后1 h内对应30 cm和60 cm深度处的超孔压变化。

由图2可得到孔压对振动的响应特征:振动作用导致的孔压上升呈突变特征,荷载停止后孔压的消散呈渐变趋势,随着荷载循环次数增加,液化发生层的深度向深部扩展。液化主要发生在硬壳层,孔压迅速升高,土体强度降低,硬壳层上下的土体强度均有提高,振动结束后土体强度逐渐向天然状态时的强度恢复。

### 1.4 砂土液化机理

饱和砂土、粉土层的孔隙全部被水充填,在振动作用下,动能增加,在重力及由于振动产生的周期剪应力  $\tau_v$  作用下,孔隙水产生超静孔隙水压力  $u + \Delta u$ ,在地震过程的极短时间内孔隙水压力  $u$  上升为  $u + \Delta u$ ,骤然上升的孔隙水压力来不及消散,这就使原来由砂粒通过其接触点所传递的压力(有效压力)减小,从而土体内的有效应力  $\sigma' = \sigma - (u + \Delta u)$  下降(其中  $\sigma$  为总应力),当  $u + \Delta u \geq \sigma$  时,土体显示出液体特性,发生液化。若土体内尚有一定的抵抗变形的残余阻力(抗剪强度  $\tau_f$ ),在  $\tau_v$  作用下仅引起有限的应变和变形,土体尚能稳定。若很大和持续强烈作用时间较长,可使土体中  $u + \Delta u$  继续上升并保持很高值,当砂粒之间传递的有效压力完全消失时,砂层会完全丧失抗剪强度和承载能力,  $\tau_f \rightarrow 0$ ,在  $\tau_f$  较低情况下,  $\tau_v$  等的作用使土体发生连续的大变形、运动,产生宏观上的流滑、喷水冒砂、震陷等震害现象<sup>[3]</sup>。

## 2 砂土液化的影响因素

通过以上试验结论,结合相关手册、规范,可以得到黄河三角洲砂土液化的影响因素。

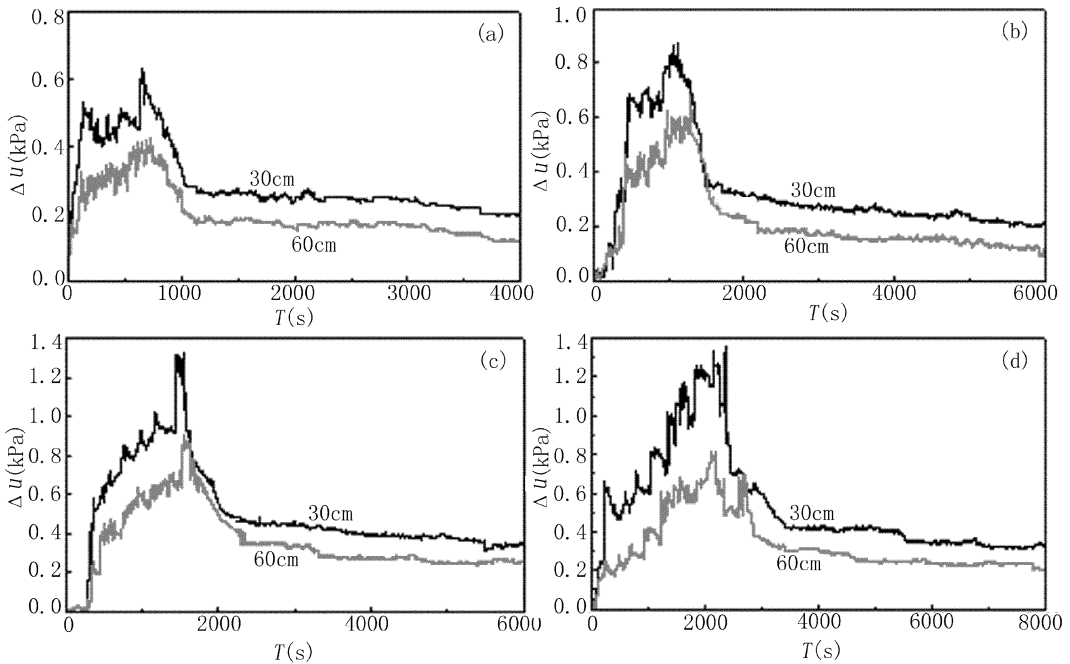


图2 振动导致的超孔隙水压力变化图

## 2.1 主要内因分析

(1)土体的密实度。在循环荷载作用下,松砂由于本身的剪缩性造成孔隙水压力的快速增长,从而导致液化。而随着砂土密实度的增大,其剪缩性亦会减弱,降低液化的影响。通过对不同密实度砂土路基的变形影响试验分析,得出循环荷载作用下,密度较小的土体变形量大,变形是逐渐达到稳定的过程;密度较大时,土体变形量很小,并且随着循环荷载的作用,土体会产生破坏,然后再重新稳定。

(2)土体的含水量。不同含水量土体对地基土变形的影响分析,得出循环荷载作用下,含水量较大时土体变形量大;含水量较小时,土体变形量很小。

(3)软弱区。软弱区存在是道路破坏的最大因素,但在检测和施工中难以准确找到软弱区位置,无法进行精确处理。

## 2.2 主要外因分析

根据地震资料和室内试验研究显示,其他条件相同或相近的情况下,土体受到荷载作用的强度越大,越易发生液化,土体受到荷载的持续时间越长,土体越易液化。加载周期越小,对土体变形破坏的影响越明显;荷载周期越大,孔压消散越充分,还越有利于土体的重新固结,从而不易液化。

## 3 路基砂土液化处理方法

### 3.1 换土垫层法

将液化土层及软弱土开挖至一定深度,回填砂、砾、粉煤灰、灰土等,并分层夯实。适用于液化土层及软弱层厚度较小且埋深小于5m和易开挖的路基。其中使用粉煤灰修筑路堤,可以减轻软土土基的附加应力,粉煤灰强度高和排水性能良好,明显地优于常用的土方回填材料,有利于减少路基沉降,提高稳定性和强度,用粉煤灰、石灰及其他材料(土、碎石)按适当比例掺水均匀拌和后是良好的筑路材料。它属于缓凝性硅酸盐材料,用它铺筑公路,路基层会结成整体层。在一定温度、湿度下其强度随龄期而增强。结硬后具有良好的板体性、水稳定性、一定的冰冻稳定性与隔温性能。

### 3.2 加密法

加密处理主要有强夯法、振动法、振冲法、挤密砂桩法等,使加密处理后土层的地基承载力及标准贯入锤击数实测值都满足规范和设计的要求。强夯法是加固高速公路液化地基的有效方法,具有快速可靠、经济效益显著的优点。但在青银高速公路齐河—夏津段K15+170~K15+360试验段的应用(强夯:锤重170kN,落距8.83m,夯距3~4m)中出现一些不利现象,主要表现为夯击数不多,导致夯坑过深,起锤困难,夯坑内积水过多,坑壁及周围土体液化严重,出现流塑或“橡皮土”现象,无法达

到沉降稳定标准(后两击平均沉降 $\leq 5$  cm)。

根据不同夯击能、不同夯间距的试夯及夯后场地地基承载力的检测结果,结合该区域工程地质、水文地质情况,发现原因主要是强夯时间在雨季,排水不易控制,地下水位偏高。对于黄河三角洲地区,强夯处理过程中地下水位的控制至关重要。但是由于高速公路工程的特殊性,常用的塑料板、排水沟等排水方法以及强夯置换法均难以大面积推广,因此设计时施工参数应遵循“低能多击”的原则,选用较低夯击能,较大夯间距,多遍数的施工工艺,辅以点夯、满夯之间,遍与遍之间较长间隙的办法,切忌实击连续施工。同时要避开雨季和地下水位偏高时进行。

在广东汕头至汾水关高速公路对可液化砂土路基处治中采用袋装砂井+强夯法(袋装砂井直径 $D=7$  cm,间距 $1.0$  m,三角形布置;强夯:锤重 $180$  kN,落距 $15$  m),在工程及经济性上均取得了良好的效果,对该类土路基砂土液化处理具有一定的实践指导意义。

### 3.3 胶结法

胶结法包括使用化学添加剂的深层搅拌法和高压喷射注浆。化学加固法:采用水泥比 $1:1$ 的高标号水泥浆液,对软土高压注浆,也可采用电渗硅化法。前者适用于地基中软土埋深大于 $5$  m的情况,具有

配方简单、经济、效果较好的优点;后者加固效果较前者好,适用于地基深处局部软土的加固处理,但造价高,难以大面积推广。水泥稳定土加固路基:采用 $425^{\#}$ 水泥,水泥掺入比为 $15\%$ ,用水泥土深层搅拌桩、水泥粉喷桩来处理软土路基,桩长 $2.5 \sim 15$  m,并用 $40$  cm厚 $5\%$ 的水泥土加 $60$  cm厚 $6\%$ 的灰土作路基硬壳层,效果良好,在该区垦利—东营港高速路段路基施工中已得到普遍采用。

### 3.4 排水法

加强排水往往与挤密结合起来做,可以设置渗水井,有效降低和排泄地下水,设置大边沟排水,可以降低地表水位;适当提高路基高度,有利于路基水分的蒸发和疏干,使路基上层土保持干燥,降低含水量,也可达到治理的目的。

### 参考文献:

- [1] 贾永刚,史文君,单红仙,等. 黄河口粉土强度丧失与恢复过程现场振动试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 40-49.
- [2] 张珂,刘正银,单红仙,等. 黄河三角洲细粒土微振液化分析[J]. 岩石力学及工程学报, 2006, 26(1): 31-44.
- [3] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.

## Study and Conduction on Liquefaction Mechansim of Sand Subgrade in the Yellow River Delta Area

WANG Cheng-jun<sup>1</sup>, WANG Ai-min<sup>2</sup>

(1. Shandong Traffic Planning and Design Institute, Shandong Jinan 250031, China; 2. Shandong Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** From the mechanism of liquefaction of sand subgrade, combining with the geo-engineering characteristics of sand subgrade in the Yellow River delta region, and carrying out roadbed vibration test of sand liquefaction in the region, elements which can effect liquefaction of sand subgrade are gained in this paper. It is identified that the internal factors are the density of soil, soil moisture content and the presence of weak areas in soil; the main external factors are the size of load, the role of time and loading frequency. Pointing to internal and external factors of soil liquefaction, combining with stong shacking experience in constructing Qingdao-Yinchuan highway, a series of approaches are put forward to guide the road survey and design and subgrade soil liquefaction process in this region.

**Key words:** Sand; liquefaction; liquefaction process; strong shacking; the Yellow River delta