

文章编号: 0451-0712(2005)10-0086-04

中图分类号: U416.1

文献标识码: B

连徐高速公路液化地基处理

谭发茂

(路桥集团第一公路工程局天津工程处 天津市 300451)

摘要: 地基土液化是一种特殊的工程地质现象。简要介绍了徐州地区液化地基的形成原因,液化的影响因素与工程特性,以及强夯、碎石桩施工的工艺特点。同时,总结了连徐高速公路液化地基处理时经济可行的措施。

关键词: 液化地基; 强夯; 碎石桩; 施工

连徐高速公路是国家重点工程连云港~霍尔果斯欧亚大陆桥中的一段。该路西段(徐州段)跨越黄淮冲积平原东南部,路线近一半处于液化土不良地质地段。通过试验段施工中的反复试验,为液化地基处理提供了成功的经验。本文将从液化土的形成条件、工程特性和处理措施等几个方面,简要介绍该路段液化地基处理的施工情况。

1 液化土形成的原因分析

1.1 土的液化机理

松散的砂土和粉土,在地下水的作用下达到饱和状态。如果在这种情况下土体受到震动,会有变得更紧密的趋势,这种趋于紧密的作用使孔隙水压力骤然上升,而在这短暂的震动过程中,骤然上升的孔隙水压力来不及消散,就使原来由土颗粒间接触点传递的压力(有效压力)减小,当有效压力完全消失时,土层会完全丧失抗剪强度和承载能力,变得像液体一样。这就是土的液化现象。

由此可见,发生液化现象的土质多是松散的砂土和粉土,而且离不开震动和水的作用。

1.2 液化的条件

(1)地质条件。

黄淮冲积平原由黄河泛滥泥沙沉积形成。从2 000多年前的周定王五年(公元前602年)黄河第一次大改道南徙,到入宋以后,黄河多次泛滥成灾。而后,1077年的澶州曹村大决口和1855年的兰考城北黄河大决口,使徐州平地积砂厚达8~10 m。这几层土都处于松散状态,标准贯入度试验 N 值只有3

~5击,形成了沿线液化土层的基本条件。

(2)地下水的作用。

砂土和粉土只有在饱和状态才会产生液化,而松散的砂土和粉土,在地下水位以下时才能达到饱和状态。因此,地下水的作用和地下水位的高低是影响液化的重要条件。

徐州地区地下水丰富,地下水埋深只有0.5~1.5 m,这就具备了液化形成的必不可少的条件。

(3)外力的作用。

饱和的砂土和粉土在外力如地震的作用下,抗剪强度很快丧失。砂土的抗剪强度 τ 可用下式表示:

$$\tau = (\sigma - U) \tan \varphi$$

式中: σ 为剪切面上外力作用下的法向应力; U 为剪切面上孔隙水压力; φ 为土的内摩擦角。

地震时,土体受到强烈的震动,孔隙水压力 U 急剧增高。当 U 与总法向力 σ 相等时,土体抗剪强度 $\tau = 0$,此时地基失去承载力。

地震烈度愈高的地区,地面震动愈强烈,土层就愈容易液化。一般在6度以下的地区,液化现象很少发生。但在7度以上的地区,当地面加速度超过0.13g时才发生液化;当地面加速度为0.16g时,液化就相当普遍了。

连徐高速公路西段为7度地震设防区域,具备了地基液化的外在条件。

1.3 地基液化的影响因素及液化的判别

在具备基本条件的前提下,地基土体液化还与地质年代、土颗粒粒径、土的密实度等因素有关,土是否液化还需要根据多项指标来综合分析判断。当

符合下列因素之一时可不考虑液化影响。

(1) 地质年代。

年代久远的沉积土,经过长时间的固结作用和地震的影响,土的密实程度增大,从而形成胶结紧密的结构。地质年代愈久,土层的固结度、密实度和结构性也就愈好,液化的可能性就愈小。调查表明,地质年代在第四纪晚更新世(Q3)以前的饱和土不会发生液化。

也就是说,该路段只有Q4地质年代的土层才具有可液化性。

(2) 土颗粒粒径和粘粒含量。

当土颗粒的平均粒径在0.1 mm左右时,抗液化的能力最差。土层中粘粒(粒径小于0.005 mm的颗粒)增加,土的粘聚力增大,从而抵抗液化的能力增强。当粘粒含量超过10%时,7度地震不会引起土体液化。

土的粘性可用塑性指数 I_p 来定量分析,当土的塑性指数 $I_p \leq 10$ 时,土体可液化性大。该路段表层30~50 cm以下至8~10 m间的土层,塑性指数 I_p 一般在9.5~10之间,证明其具有可液化性。

(3) 上覆层厚度与土层的埋深。

有资料表明,土质的液化深度很少有超过15 m的,更多的是小于10 m。

上覆土层具有抑制可液化土层喷砂冒水的作用,在7度地震区域,当覆盖层厚度超过7 m时,可不考虑液化。

连徐高速公路西段可液化土层的上覆土层厚只有0.5~1.0 m,上覆土层对液化翻浆的抑制作用很小。

(4) 土的密实度。

有关资料分析表明:相对密实度小于50%的砂土,地震时普遍发生液化;而相对密实度大于70%的土层,不大可能发生液化。

液化的进一步判别,可采用标准贯入试验的结果进行分析。

1.4 液化土的工程特性

(1) 液化等级的划分。

液化指数能综合反映各种因素的影响和液化的危害程度。液化指数按下式确定:

$$I = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cri}} \right) d_i W_i$$

式中: I 为液化指数; n 为15 m范围内饱和土层中标准贯入(标贯)点总数; N_i 、 N_{cri} 分别为第 i 点标贯锤击数实测值和临界值; d_i 为 i 点所代表的土层

厚度; W_i 为第 i 土层考虑单位土层厚度的层位影响权函数值, $W_i = 15 - D_{si}$, D_{si} 为该层土的中点的深度, $D_{si} \geq 5$ m,m。

当 $0 \leq I \leq 5$ 时为轻微液化;当 $5 < I \leq 15$ 时为中等液化;当 $I > 15$ m时为严重液化。

(2) 液化土的分布。

可液化土在全线呈间断分布。液化土层以软塑亚砂土及粉细砂、 $I_p \leq 10$ 的亚粘土为主。液化层厚度在1.5~8.0 m之间,埋深为0~8 m,以严重液化为多。

(3) 液化土的直观特性。

可液化土都具有较好的保水性能,含水量接近50%时,泌水也非常缓慢。刚挖出来的土,外表看起来没多少水分,轻轻地拍一拍,土的表面就会上来水分,土体就会颤悠。在地基处理过程中,机械震动引起液化之后,表面的硬土层就像是漂在水面一样,踩上去跳动可以引起几米内的漂动。液化土的表层一旦破坏,翻砂冒浆随即发生。

2 液化地基处理措施

液化地基处理的基本原则就是提高土层的密实度和改善排除孔隙水的条件,增大其透水性。考虑到高速公路与工民建相比有涉及范围大、发生震害产生的损失小和修复相对容易等特点,从经济上考虑,连徐高速公路砂土液化路段没做全部处理,经过试验段施工后,确定了具体的处理方案。

对中等液化以上的地基,大型桥梁采用碎石桩加固;对严重液化的地基,构造物基础原则上以碎石桩处理,若处理段与强夯处理段相连时,采用强夯全幅处理;对于高路堤,强夯至坡脚外3 m;路堤中心线两侧各10 m范围内不进行主夯和副夯,只进行满夯;对于存在软弱薄层的中等以上可液化段,进行全幅处理。

实际发生震害时,两侧坡脚处往往容易喷砂冒浆,导致路边坡以外地基和路堤共同沉陷和滑移,所以坡脚至边沟外缘部分需全部进行加固。对于一般路基,根据液化产生的规律,中心线两侧各10 m的范围内不做处理。

2.1 强夯处理

(1) 强夯的作用和机理。

强夯法通过重锤自由落下,在极短的时间内对土体施加一个巨大的冲击能量,这种冲击能又转化成各种波型(包括压缩波、剪切波和瑞利波),使土体强制压缩、振密、排水固结和预压变形,从而使土颗

粒趋于更加稳固的状态,以达到地基加固的目的。

(2)强夯参数的确定。

对于砂性土、粉土和其他塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土,采用强夯的效果明显。

关于强夯参数的确定有关文章介绍很多,篇幅所限,本文不再赘述。本路段强夯处的主夯与副夯采用 1 500、2 000、3 000 kN·m 等 3 种夯击能,满夯采用 700、800、1 000 kN·m 等 3 种夯击能。

(3)强夯施工。

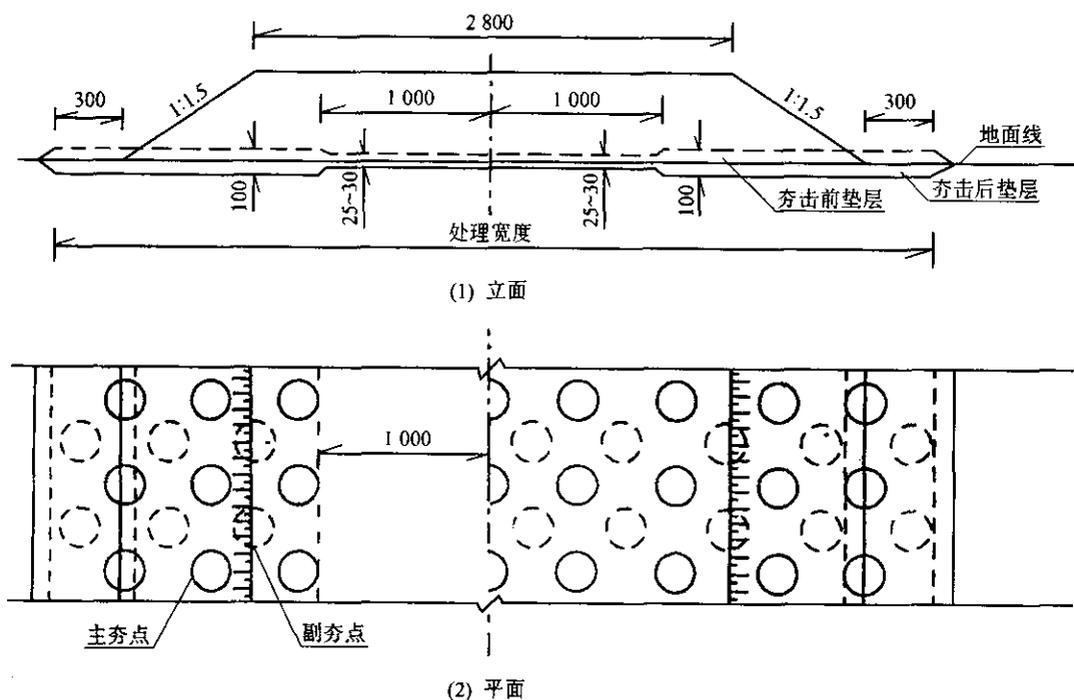
①强夯机械的选用。

本路段强夯主要有 2 种类型的机械:一种是起重能力为 50 t 的履带吊机配 18~20 t 的铸铁夯锤;另一种是 20~25 t 起重能力的吊机配 16~20 t 的夯

锤,这种夯机吊臂顶上需配辅助门架,因此每个夯点需移一次吊机,而且移动速度慢,效率较低。相比较而言,使用大吨位的履带吊机时移动方便,移一次夯机可打 3~4 个夯点,效率要比带辅助门架的夯机高出近 1 倍。

②夯点布置和夯击遍数。

夯点采用正方形布置(图 1)。主、副夯所采用的 1 500、2 000、3 000 kN·m 等 3 种夯击能,对应的夯点间距分别为 4 m、4.5 m、5 m;满夯时夯点搭接 1/4 锤径,夯击遍数为 3 遍,第一遍为主夯,间隔 72 h 待孔隙水压力消失后进行副夯,然后间隔约 72 h 后进行第三遍夯击,即满夯。施工中根据土质情况,间歇时间可以有所变化。



单位:cm

图 1 夯点布置

③垫层设置。

该地区表面固结较好的土层只有 0.5 m 左右厚,原设计没有设置垫层,机械震动很容易引起表面破坏和地基液化冒浆,使承载力下降,机械下陷进行困难。同时,使夯坑过深,起锤困难。根据试验段总结的经验,设计增加了强夯碎石垫层。

垫层的作用主要是:支承强夯机械的行走;形成应力扩散层,利于夯击能的传播;利于表层水的排除;加大夯坑底与地下水位之间的距离,避免夯坑冒浆。实践证明,垫层作用明显。

垫层在主、副夯施工段厚度为 1 m,满夯施工段为 25~30 cm。

2.2 挤密碎石桩处理

(1)挤密碎石桩的原理。

挤密碎石桩是依靠振冲器的强力振动使液化土颗粒重新排列,振动密实;另一方面依靠振冲器的水平振动力,在加碎石填料的情况下,还通过碎石使土层挤压密实。碎石桩与桩间土体形成复合桩,从而提高地基承载力。碎石桩也提供了纵向排水通道,利于土层排水固结。

(2) 机具配置。

本路段碎石桩桩径采用 0.5 m, 桩长为 7~10 m, 呈梅花状布置, 间距为 1.3~1.4 m。

施工中采用 DZ40 和 DZ60 这 2 种走管式振动沉桩机, 振动锤分 35 t、45 t 重 2 种, 激振力不小于 28 t。桩管分 377 mm 重和 426 mm 内径 2 种, 管端设平底活瓣桩头。桩管设二次投料口。

桩机起动电流达 80A, 每台桩机需配备 120 kW 发电机 1 台。当使用 1 台 160 kW 发电机带 2 台桩机时, 要注意错开起动时间, 否则发电机将会因负荷过大而发生故障。

(3) 工艺要点。

碎石桩施工分 3 次从第一投料口、第二投料口和孔口投料, 投料总量严格按设计控制。第一次投料量: 桩管内径为 377 mm 时为 50%, 为 426 mm 时为 64%。第一次投料后, 反插振动 3~4 次, 待碎石全部投入后开启第二投料口, 投料至灌满桩管, 反插 2~3 次(深度不超过 1/2 桩长)至料全部投出。然后进行孔口补料, 反插 3~4 次至设计用料全部投出。

(4) 施工工效。

据现场统计, 一般情况下, 1 台桩机完成 1 根桩需 20~25 min, 1 个台班内每台桩机正常情况下能完成 20~30 根桩。

3 效果检验方法

连徐高速公路液化地基处理效果检验, 采用标准贯入(SPT)法和瑞利波(SASW)法 2 种检测方法。

3.1 标准贯入法

标准贯入法试验(SPT)是用质量为 63.5 kg 的穿心锤, 以 76 cm 落距, 将一定规格的标准贯入器打入土中 15 cm 后再打入 30 cm, 后 30 cm 的锤击数即为标准贯入的指标 N 。

笔者认为, 液化地基加固效果具体体现在密实度提高的程度上。但在实际检验时, 由于取样时会造成土体扰动, 所以准确测定现场土体加固后的密实度是非常困难的。实践中我们可以依据土体标贯值 N 与密实度 D_r 之间的相互关系, 通过测定标贯值来观察加固情况。

另外, 我们也可以通过界定液化标贯值, 来评价加固效果是否达到防止地基液化的要求。从表 1 可知, 7 度地震区标贯限值为 $N=8$ 击。这也是连徐高速公路标贯检验的要求值。

表 1 标准贯入锤击数限值

近远震	下列地震烈度的标贯限值/击		
	7	8	9
近震	6	10	16
远震	8	12	—

连徐高速公路设计要求 $N_{63.5} \geq 8$ 击, 检查频率为 3 点/5 000 m^2 , 且不少于 3 点。

3.2 瑞利波法

瑞利波法是通过锤击作为振动源, 然后在距锤击处一定距离设置检波器, 记录所在位置的波形, 再通过频谱分析和滤波技术等分离出不同波长的振动到所在位置的时间差, 求得不同波长的瑞利波波速。不同波长的瑞利波波速反映不同深度范围内的土层性质, 由此可推出不同深度土层的瑞利波波速和剪切波波速。

连徐高速公路采用 ES—R25 工程地震仪进行检验, 图 2 为振动源和滤波器布置图。

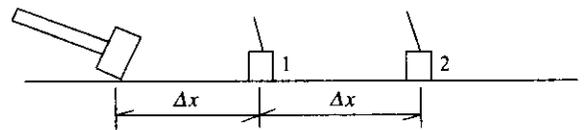


图 2 滤波器布置

根据国家地震局工程力学所推荐的标准, 土层波速 $V_s = V_{cri}$ 为不液化, $V_c \leq V_{cri}$ 时为液化。其中:

$$V_{cri} = K_v \left\{ \left[1 + 0.125 \left(d_s - \frac{1}{\sqrt{4d_s}} \right) - 0.05(d_w - 2) \right] \times \sqrt{3/p_c} \right\}^{1/5}$$

式中: K_v 为系数, 7 度地震区为 145, 8 度地震区为 160, 9 度地震区为 175; d_s 为测点深度; d_w 为地下水深度; p_c 为砂土粘粒含量。

经过计算可知, 连徐高速公路设计要求的 V_{cri} 为 200 m/s, 要求 $V_s \geq 200$ m/s。检查频率为 1 点/40 m, 测点在中心线两侧 15 m 处交叉布置。

4 结语

连徐高速公路液化地基处理前标贯值 N 只有 2~5 击, 处理后的地基 N 值普遍高于质量标准要求, 说明液化地基采用强夯和碎石桩处理是经济可行的。通过施工实践, 得出强夯法与碎石桩相比要更为经济, 而且施工速度快, 加固效果优于碎石桩。