

# 高速公路液化地基处理原则与方法

## On the standards and methods of improvement for liquefaction ground in expressway engineering

刘松玉, 朱志铎, 方磊, 杜延军  
(东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096)

**摘要:** 在大量现场试验基础上研究了高速公路液化地基处理的原则和方法, 提出了适合于高速公路液化地基的处理措施原则, 详细分析了强夯法和沉管干振碎石桩法的设计施工工艺和环境影响评价, 并提出以 SASW 法为主、标准贯入试验控制的液化地基处理质量检验方法, 在江苏省高速公路大面积施工实践中取得了成功。研究成果对类似工程有参考意义。

**关键词:** 高速公路; 液化地基; 强夯法; 碎石桩; 瞬态瑞利波

**中图分类号:** TU 435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2001)02-0135-04

**作者简介:** 刘松玉, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 现任东南大学交通学院副院长, 岩土工程研究所所长。主要从事桩基工程、地基处理等方面的研究。

LIU Song-yu, ZHU Zhi-duo, FANG Lei, DU Yan-jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on a large amount of field tests, this paper presents the standards and methods of improvement for liquefaction ground in expressway engineering. The dynamic compaction and the cast-in-situ gravel piles were successfully used and many new results are put forward. The results also show that the SASW method has many advantages in detecting the effect of large scale soil stabilization and can be widely applied in expressway engineering.

**Key word:** expressway; liquefaction ground; dynamic compaction; gravel pile; SASW

## 1 前言<sup>y</sup>

我国是一个多地震国家, 也是世界上地震灾害最严重的国家, 地震经常威胁着工程安全。当前我国正处在新地震活跃期, 地震发生频率增大, 这对我国正在蓬勃发展的基础设施建设构成了严重威胁。国内外震害经验表明, 地震时道路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, 这些震害主要是由于沉陷、液化等地基失效引起的。

JTJ 004-89《公路工程抗震设计规范》规定, 在地震区高速公路建设必须进行液化地基处理, 但由于当时我国高速公路建设经验少, 规范中对高速公路液化地基处理的设计方法和措施未给出具体规定。因此, 加强研究高速公路液化地基处理的方法和设计原则对完善规范、保证高速公路工程质量和正常营运具有重大现实意义。笔者结合江苏省连徐高速公路、宁宿徐高速公路的液化地基处理实践, 提出了高速公路液化地基处理的原则和具体方法, 可作为工程设计的依据。

## 2 高速公路液化地基处理原则

### 2.1 高速公路液化地基处理的特点

与一般工民建不同, 高速公路为大型线型工程, 地

基处理长度往往达几十公里, 工程量大, 对地基处理设计参数的每一点变化都会产生较大的经济影响, 常规方法往往不适合, 因此必须对地基处理方法进行优化。

高速公路沿线基础类型较多, 如扩大基础、桩基础等, 一般路段堤高变化大(2~7 m), 对地基处理要求不一样, 特别是一般路段和一般构造物常以变形作为设计控制指标, 因此处理原则与方法应有针对性。高速公路往往穿越多种地貌单元, 土层条件多变, 同一种地基处理方法, 也应根据土层变化进行调整, 同时, 沿线施工环境变化大, 在施工顺序、施工方法上应重视对邻近已建和在建筑物物的影响。高速公路地基处理质量检验方法应根据量大面广的特点, 采用快速、经济、有效的方法, 常规的载荷试验、标准贯入试验等受到一定限制。

### 2.2 高速公路液化地基处理原则

在确定高速公路液化地基处理原则之前, 必须先进行地基液化可能性和危害性评价。考虑到高速公路特点, 根据 JTJ 004-89《公路工程抗震设计规范》和 GBJ 11-89《建筑抗震设计规范》的有关规定, 建议高速公路地基液化实用评价方法程序如图 1 所示。主要指标仍采用 JTJ 004-89《公路工程抗震设计规范》中的规定, 其中初判增加了土层埋深, 即基本烈度为 7,

8, 9 度时, 液化深度下限分别为 15, 17, 20 m, 超过该深度时, 不考虑液化影响。再判时强调以剪切波速法为主, 标准贯入试验控制的方法, 而且剪切波速以瞬态瑞利波法测定, 临界剪切波速采用 GBJ 0021—94《岩土工程勘察规范》推荐的计算公式。整个步骤见图 1 所示。

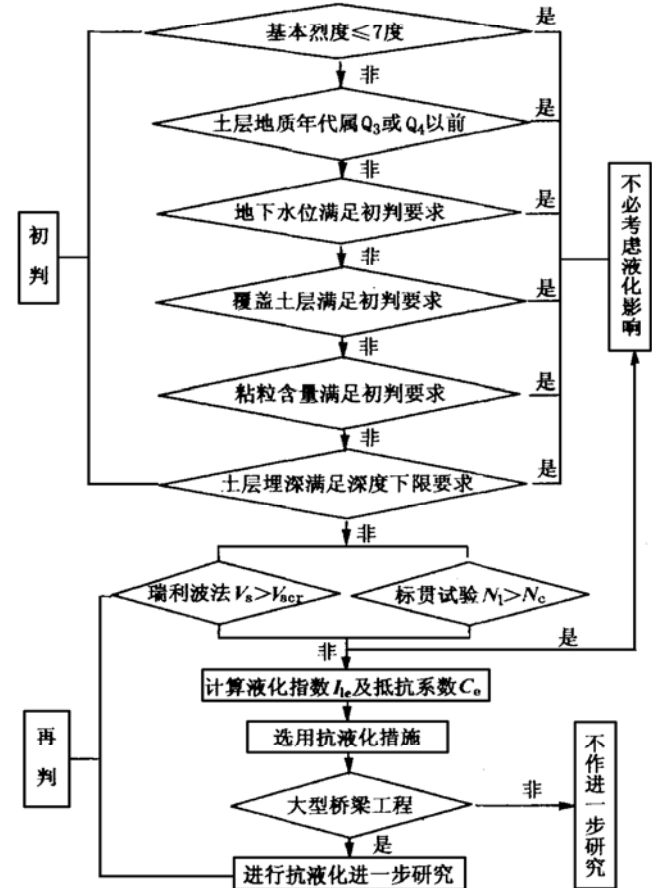


图 1 高速公路地基液化势评判程序

Fig. 1 Procedure to determine liquefaction potential

表 1 高等级公路抗液化措施原则

Table 1 Standards for liquefied ground improvement in expressway engineering

| 部位            | 液化地基处理原则 |      |      | 备注         |
|---------------|----------|------|------|------------|
|               | 轻微液化     | 中等液化 | 严重液化 |            |
| 特大桥、大桥、立交、跨线桥 | B        | A    | A    | 两侧各 50 m   |
| 中小桥、通道、涵洞     | 不处理      | B    | A    | 两侧 10~50 m |
| 一般路段堤高 > 4 m  | 不处理      | C    | A    | 处理至坡脚      |
| 一般路段堤高 ≤ 4 m  | 不处理      | 不处理  | C    | 外 3 m 左右   |

注: 表内措施未考虑倾斜场地的影响。A 表示全部消除液化的措施, 桩基础应穿透液化层; B 表示基础结构和上部结构采取的构造措施, 主要为减小或适应不均匀沉降的措施; C 表示部分消除液化的措施, 即在中心线两侧一定范围内(如 10 m)不处理或只进行简单处理, 而在其外侧作处理

关于液化程度分级《公路工程抗震设计规范》中没有明确给出液化程度的确定方法, 仅以液化抵抗系数  $C_r$  作为设计修正的依据, 不利于确定液化地基处理措施。为此, 建议引用 GBJ 11—89《建筑抗震设计规范》中根据液化指数  $I_{L_e}$  进行分级的方法, 将液化程度分为

轻微、中等、严重三个等级。进一步地, 根据高速公路不同构造物和路段特点, 采用表 1 的液化地基处理原则。

3 高速公路液化地基处理方法

关于液化地基加固处理方法, 在工民建、水利工程等领域已进行了不少研究, 常用的方法有换填法、强夯法、振冲碎石桩法、振密法等。为探索适合高速公路液化地基处理方法, 笔者在江苏省连徐高速公路徐州段进行了详细的试验研究<sup>[4]</sup>。提出了强夯法和沉管干振碎石桩两种加固方法及其相应的设计方法、施工工艺。在大面积施工实践中推广应用, 取得了成功<sup>[4]</sup>。

3.1 试验概况

试验工程为连徐高速公路徐州段, 沿线约 60 km 长度内广泛分布废河泛滥沉积物, 一般以粉土—粉细砂为主, 埋藏浅, 地下水位距地表 0.5~1.0 m, 天然地基承载力低, 地震作用下易产生液化。试验区土层物理性质见表 2。经过评判, 0~7.6 m 为可液化土层, 液化势为中等—严重液化。

表 2 试验区土层物理性质

Table 2 Physical characteristics of soil layers

| 土层 | 埋深/m    | 颜色  | 类别     | 标贯击数/击 |
|----|---------|-----|--------|--------|
| ①  | 0.0~4.5 | 黄褐色 | 粉土     | 4      |
| ②  | 4.5~7.6 | 灰色  | 粉土夹粉细砂 | 7      |
| ③  | 7.6~9.0 | 灰色  | 粉细砂与粉土 | 10     |
| ④  | 9.0m 以下 | 灰绿色 | 粉质粘土   | 14     |

经分析论证, 采用强夯法和沉管干振碎石桩法进行加固试验。强夯法进行了单点夯和群夯试验, 群夯试验情况见表 3。沉管干振碎石桩采用平底活页式走管振动打桩机, DZ-40 型振动锤, 锤重 36 kN, 激振力 280 kN, 振动频率 950 次/分, 桩管直径 377 mm, 试验进行了 1.4 m 和 1.6 m 桩距。桩径 500 mm, 桩长 10 m, 均采用正三角形布置, 碎石采用 1.2~3 cm 自然级配, 每根桩的碎石灌注量按充盈系数 1.1 考虑, 施工顺序采用跳打形式并由外缘向中心进行。

3.2 强夯试验成果分析

表 4 为单点夯试验成果。综合分析单点夯和群夯试验成果得到下列认识:

(1) 强夯法是加固高速公路液化地基的有效方法, 具有快速可靠的优点。但是由于高速公路工程的特殊性, 常用的排水方法如塑料板、排水沟等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, 在施工工艺上应从中央到边缘或半幅施工并辅以 50~70 cm 的垫层。试验段和大面积施工证明, 这种调整是行之有效的。

(2) 对于以粉土、粉细砂为主的液化土层, 强夯法加

固的有效深度可按梅纳公式确定,折减系数  $\alpha$  取 0.53。

(3) 对于类似条件的场地,设置一定厚度的碎石垫层可以改善施工条件,对加固效果也有一定提高。

(4) 对于粉土、粉细砂为主的土层,强夯孔隙水压力消散很快,主夯、副夯和满夯之间的间歇时间小于 72 h。强夯后,地基强度随龄期没有明显增长。

(5) 强夯时,土体侧向位移与累计夯沉量之间具有较好的相关性,在最佳夯击次数之前基本是线性关系,侧向位移约为累计夯沉量的 1/10,强夯时平面有效影响范围约为  $3D$  ( $D$  为锤的直径)

(6) 强夯时周围环境会产生振动影响,建筑物安全距离  $S$  (m) 可根据夯击能大小来估计,  $S = \beta \sqrt{Wh}$ 。对于粉土、粉细砂,  $\beta$  可取 1.1~1.2;  $W$  为锤重(t);  $h$  为落距(m)。

### 3.3 沉管干振碎石桩试验成果分析

综合分析试验成果可得到下列几点认识:

(1) 沉管干振碎石桩在公路工程中具有较大优点,

它克服了振冲碎石桩的不足,通过振密、挤密、排水等作用,可以大大提高地基强度,完全消除液化,是处理液化地基的另一种有效方法。

(2) 与强夯法相比,沉管干振碎石桩造价高(约为强夯法的 2 倍),但可靠性好,因此主要适合构造物的地基处理。试验提出,对严重液化地基、桥梁、桥头部位、通道、涵洞基础及两侧均采用沉管干振碎石桩处理,若处理段与强夯处理相遇时,采用强夯法处理,一般路段设计处理时均采用强夯法;当要求全部处理液化层时,桩长必须穿过液化层,但当液化层深度大于 15 m 时,由于施工条件限制,可采用其它方法;当要求部分消除液化时,处理后的非液化土层应满足液化初判时的上覆土层厚度要求。

(3) 沉管干振碎石桩施工对周围土层产生振动、挤密影响,其影响范围达 5 m,孔隙水压力  $\Delta u$  随振源距的衰减基本符合  $\Delta u \propto r^\beta$  的关系,实测  $\beta$  值约为 0.65。因此构筑物离开碎石桩施工时的最小安全距离为 5 m。

表 3 群点夯试验主要成果一览表

Table 3 Parameters of the group dynamic compaction

| 试验区域   |                    |                    | 夯前处理       | 点夯            |         |               |         |         |          | 满夯            |         |
|--------|--------------------|--------------------|------------|---------------|---------|---------------|---------|---------|----------|---------------|---------|
|        |                    |                    |            | 一遍            |         | 二遍            |         | 夯击间距 /m | 夯点布置方式   | 单击夯能 / (kN•m) | 夯击数 / 击 |
|        |                    |                    |            | 单击夯能 / (kN•m) | 夯击数 / 击 | 单击夯能 / (kN•m) | 夯击数 / 击 |         |          |               |         |
| E- 5 标 | I A                | K223+ 400 ~ 440 右幅 | 场地平整       | 3000          | 3~ 5    | 3000          | 3~ 6    | 5.0     | 正方形      | 1000          | 3~ 6    |
|        |                    |                    | 50 cm 碎石垫层 | 3000          | 3~ 6    | 3000          | 3~ 6    | 5.0     | 正方形      | 1000          | 3~ 6    |
| I 区    | I B                | K223+ 400 ~ 440 左幅 | 场地平整       | 2000          | 4       | 2000          | 3~ 6    | 6.0     | 梅花形      | 1000          | 3~ 6    |
|        |                    |                    | 50 cm 碎石垫层 | 2000          | 4~ 6    | 2000          | 3~ 6    | 6.0     | 梅花形      | 1000          | 3~ 6    |
| E- 5 标 | II A               | K225+ 360 ~ 400 右幅 | 场地平整       | 3000          | 3~ 4    | —             | —       | 5.0     | 正方形      | —             | —       |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |
| II 区   | II B               | K225+ 360 ~ 400 左幅 | 场地平整       | 2000          | 4~ 6    | —             | —       | 6.0     | 梅花形      | —             | —       |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |
| E- 7 区 | A 区                | K218+ 940 ~ 963 右幅 | 80 cm 碎石垫层 | 2500          | 4       | 2500          | 4       | 5.0     | 梅花形      | 700~ 800      | 4       |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |
|        | B 区                | K218+ 940 ~ 963 左幅 | 70 cm 碎石垫层 | 2000          | 4       | 2000          | 4       | 3.5     | 正方形      | 700~ 800      | 4       |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |
| C 区    | K218+ 963 ~ 980 左幅 | 70 cm 碎石垫层         | 1500       | 5             | 1500    | 5             | 3.0     | 正方形     | 700~ 800 | 5             |         |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |
| D 区    | K218+ 963 ~ 980 右幅 | 100 cm 碎石垫层        | 3000       | 4             | 3000    | 4             | 5.0     | 梅花形     | 700~ 800 | 4             |         |
|        |                    |                    |            |               |         |               |         |         |          |               |         |

注: 1. 第一、二遍点夯间隔时间为孔隙水压力消散 90% 以上; 2. 满夯搭接方式为 1/4 锤搭接; 3. 夯前测试内容为标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)、瑞利波测试(SASW)和原状土样土工试验, 夯中测试内容为夯沉量、孔隙水压力、地下水位, 夯后测试内容为标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)、瑞利波测试(SASW)和原状土样土工试验

表 4 单点夯试验主要成果一览表

Table 4 Result of single dynamic compaction test

| 试验段   | 夯击能/(kN·m) | 夯前处理     | 总击数/击 | 总夯沉量/cm | 最大隆起高度/mm | 累计水平位移/mm | 有效影响范围/m | 有效加固深度/m | 有效深度折减 $\alpha$ | 最佳夯击数/击 | 孔压消散时间/min | 安全距离/m |
|-------|------------|----------|-------|---------|-----------|-----------|----------|----------|-----------------|---------|------------|--------|
| E-5 标 | 1500       | 整平       | 6     | 151     | 70        | —         | 7.0      | 6.5      | 0.53            | 5       | 140        | —      |
|       | 2000       | 整平       | 7     | 179     | 120       | 130       | 7.5      | 7.0      | 0.50            | 4       | 150        | 17.0   |
| E-7 标 | 1500       | 垫层 0.7 m | 6     | 138     | 80        | 122       | 7.0      | 6.5      | 0.53            | 5       | 180        | 14.0   |
|       | 2000       | 垫层 0.7 m | 5     | 130     | 80        | 163       | 7.5      | 7.5      | 0.53            | 4       | 200        | 17.5   |
|       | 2500       | 垫层 0.8 m | 5     | 208     | —         | 151       | 7.5      | 8.5      | 0.54            | 4       | 150        | 19.5   |
|       | 3000       | 垫层 1.0 m | 5     | 173     | 82        | 199       | 8.0      | 8.7      | 0.50            | 3       | 200        | 18.7   |

注: 1. 最大隆起高度指离夯坑中心 4m 处(E-7 标)和 2m 处(E-5 标); 2. 孔压消散时间指超孔隙水压力消散到 90% 所要的时间

(4) 沉管干振碎石桩加固粉土粉细砂地基, 主要使土层孔隙比减小, 密度增大, 内摩擦角增大。当桩径为 50 cm, 桩间距 1.4~1.6 m 时, 地基承载力提高近 1 倍, 设计荷载 150 kPa 时的桩土应力比约为 2~3。随着龄期增长, 地基强度无明显增长。

(5) 地表下桩长一半处, 地基加固效果最好。对试验区土层条件平面上有效加固范围约为  $4d$  ( $d$  为桩径), 考虑到抗液化要求, 桩间距采用  $3.5d$  具有足够的安全度。

(6) 沉管干振碎石桩施工会对地表土层产生扰动, 引起下沉或隆起, 因此, 施工时, 桩顶压实和路基填筑前地表碾压并设置 20~30 cm 透水垫层是必要的。

#### 4 高速公路液化地基处理质量检验方法

针对高速公路地基处理的特性, 根据可靠、快捷、经济的原则, 笔者对瞬态瑞利波法 (SASW) 在质量检验中的应用进行了系统对比研究, 提出了适合高速公路地基处理的质量检验方法。

(1) SASW 法具有快捷、可靠的特点, 是地基处理效果评价的一种实用新技术, 特别适用于大面积地基处理评价<sup>[4, 6, 7]</sup>。

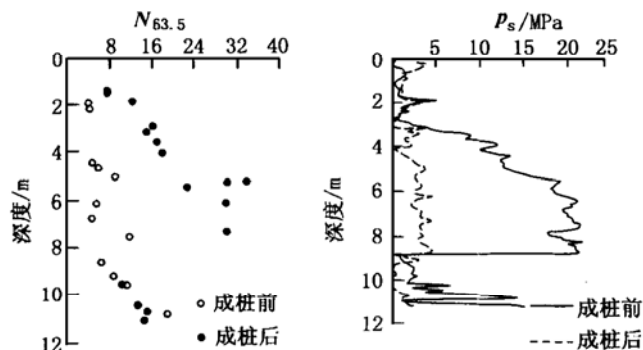


图2 碎石桩成桩前后桩间土 SPT、CPT 测试结果

Fig. 2 Test result of SPT, CPT in soil among gravel piles

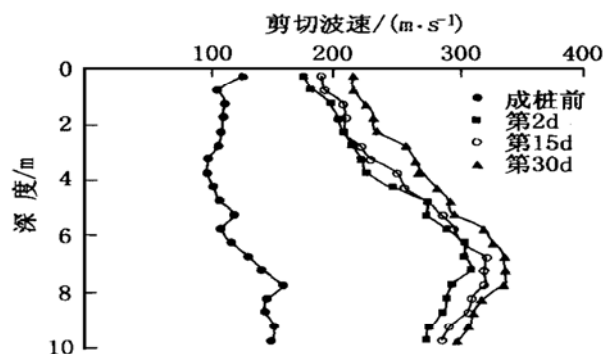


图3 碎石桩成桩前后剪切波速比较图

Fig. 3 Shear wave velocity before and after the gravel piles construction

(2) SASW 法测试给出的剪切波速  $V_s$  与标准贯入试验 (SPT) 和静力触探试验 (CPT) 的成果相当吻合 (见

图 2, 3),  $V_s$  与实测标准贯入击数  $N$  之间具有良好的相关性 (见图 4), 即  $V_s = 30.2N^{0.92}$ 。

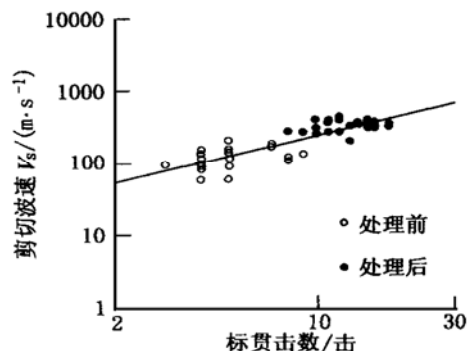


图4 标贯击数  $N$  与剪切波速相关关系图

Fig. 4 Relation before  $N$  and shear wave velocity

(3) 高速公路液化地基处理质量检验采用以 SASW 法为主、标准贯入试验控制的方法进行, 如对强夯法来说, 标准贯入试验按每 5000  $m^2$  3 孔, SASW 法按每 40 m 一点, 路中心两侧交叉进行。

#### 5 结 语

提出了高速公路液化地基的液化评判、处理原则, 强夯法和碎石桩法加固的设计方法和研究成果以及适合高速公路液化地基处理的质量控制方法。研究成果已在江苏省高速公路工程建设中推广应用, 产生了重大经济效益。

研究工作得到江苏省高速公路指挥部、徐州市高速公路指挥部、中交一局、铁道部十九局等施工、监理单位的大力支持配合, 在此一并表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范[S].
- [2] GBJ 11-89, 建筑抗震设计规范[S].
- [3] GBJ 0021-94, 岩土工程勘察规范[S].
- [4] 刘松玉, 等. 高等级公路液化地基处理与桥梁地基抗震处理技术研究报告[R]. 南京: 东南大学交通学院, 1999. 1~104.
- [5] 孔令伟, 等. R 波在强夯加固软弱地基中的作用探讨[J]. 工程勘察, 1996(5): 1~5.
- [6] 吴世明. 瑞利波弥散特性及其勘察技术的新进展[A]. 2000 高层建筑基础工程[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 647~653.
- [7] Liu S Y, et al. Application of SASW in improvement of liquefied ground[A]. Second CHINA-JAPAN joint symposium on recent development of theory and practice in geotechnology[C]. Hong Kong: 1999. 247~255.
- [8] Seed H B, Booker J R. Stabilization of potentially liquefied sand deposits using gravel drains[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977(GT7): 757~767.