

振冲法在粉煤灰坝基上的应用

彭贵涛

卢广运

(华侨大学)

(南京地基公司)

摘要 本文介绍应用振冲法加固粉煤灰的坝基设计和施工,对试验成果作了理论分析,对振冲机理中尚未深刻认识的若干问题加以探讨。

关键词 粉煤灰坝基,振冲法,加固。

0 前言

全国火力发电厂,粉煤灰坝的建造方法多数采用上游法——先建造一座中、低高度的初级坝,待粉煤灰堆积到一定高度后,再在粉煤灰坝基上建造各级子坝。然而,国内不少粉煤灰坝未设置内排系统,造成粉煤灰沉积层含水量高,孔隙比大,天然强度低,难以在初级坝上建造子坝。为此,必须设法寻求一重新的方案。

用振冲法加固软土地基,国内外成功的实例很多。但十字板剪切强度仅 $8 \sim 15 \text{ kPa}$,静力触探比贯入阻力仅 200 kPa 的软弱粉煤灰坝基,应用振冲法加固能否获得预期效果?这在当时尚缺少理论和实践方面的依据。

我们通过科学论证,选定谏壁电厂松林山粉煤灰坝为振冲加固的工程试点。经过主坝和副坝两项工程实践证明,质量是优良的,稳定性,排渗性能,承载力都达到或超过设计要求。本文是对主坝三级子坝加固成果的评价。

1 地质概况

1.1 主坝区地层(图1)

粉煤灰:青灰色,松散稍密,饱和, P_s 值 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。

填土:灰黑色,湿可塑, P_s 值 $0.5 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 。

1.2 粉煤灰颗粒组成及加固前强度

中砂粒占 8% 细砂粒占 24% , 粉砂粒占 46% , 按照水电部土工试验分类(SD128-84), 可将粉煤灰土划归为粉砂或粉土。粉煤灰加固前的强度见表1。

——本文1990—05—17收到。

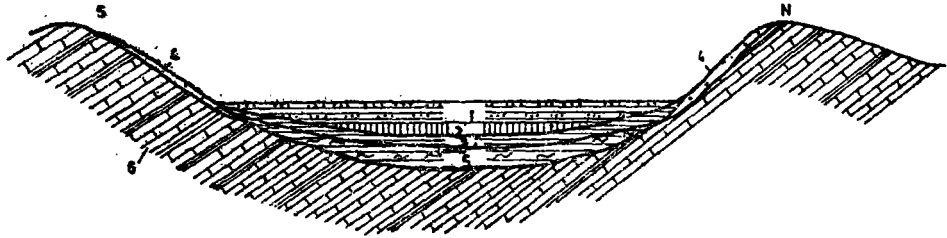


图 1 主坝纵剖面图

1—粉煤灰；2—素填土；3—亚粘土；
4—亚粘土含铁质；5—亚粘土；6—石灰岩

表 1 粉煤灰加固前强度

| 工程 名称 | 干容重 (kPa/m^3) | 相对 密度 | 比贯入阻力 P_s (MP_a) | 十字板剪切强度 C_u (kPa) | 估计承载力 [R] (kPa) |
|----------|------------------------------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 主坝 | | | | | |
| 三级子坝 | 7.9—8.5 | 0.—0.28 | 0.1—0.5 | 20 | 40 |

2 振冲法加固

2.1 振冲机械的选择及施工工艺控制指标

振冲器ICQ-30型，工作电压 $\geq 380\text{V}$ ，密实电流 $\geq 50\text{A}$ ，水压 $0.01-2.0\text{MP}_a$ 。

2.2 碎石桩距及置换率

桩距相同的条件下，桩距小置换率高效果如表 2。本工程采用 1.50m 正三角形布桩。由于粉煤灰松软粒细的特性，设计要求的桩径难以控制，多数情况下偏大。控制的方法主要以调节水压和合理留振时间来实现。桩径一般在 $850-950\text{mm}$ 范围内，置换率要求在 $0.25-0.35$ 之间是较为合理的。

表 2 不同桩距加固效果对比

| 桩距 (m) | 置换率 (m) | 干容重 (KN/m^3) | 相对 密度 | 变形模量 E_s (MP_a) | 容许承载力 [R_s] (kPa) | 复合地基抗剪强度 C_{cs} (kPa) | 内摩擦角 (度) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------|------------------------------------|--|--|-------------|
| 1.50 | 0.33—0.35 | 9.5 | 0.66 | 1.39 | 267 | 1.5 | 24.3 |
| 1.70 | 0.22—0.24 | 9.1 | 0.52 | 1.23 | 232 | 1.8 | 21 |

2.3 振冲桩桩长

确定桩长的的主要依据是软弱层的厚度，地基破坏时剪切面深度，地层液化层三方面。如软弱层不厚，则桩长宜穿透软弱层打至硬层，如软弱层很厚（ 15m 以上）桩长只需超过滑

动剪切面及液化层深度，无需穿透整个软弱层。这称为浮式桩。根据资料表明，承载力与桩长并不成比例，长桩的极限承载力不一定比短桩高。振冲引起的桩间土密实效果随深度而递减，这是由于地基应力随深度增大而逐渐削弱振动影响的缘故。这进一步说明，桩长能满足上述三方面要求，深厚的软弱层用短桩加固是可行的。况且，浮式桩与桩间土组成一个刚度较大的人工垫层，垫层能将外加荷载引起的应力向四周扩散，即垫层的应力扩散作用。对复合地基来说，碎石桩柱作用和垫层作用同时存在，从而提高地基的承载力，抗滑能力，减少沉降和差异沉降。

3 加固效果及评述

3.1 复合地基的承载力

在复合地基上分别进行碎石桩和桩间土的小型载荷试验，确定坝基的承载力。取载荷板直径与碎石桩直径相等，而桩径则按实际填料计算，相应面积为 0.5m^2 。碎石桩与桩间土的静荷载试验得到的荷载（ P ）与沉降（ S ）之间的关系曲线分别如图 2、3 所示。按经验，用相对沉降控制法，即在 P - S 曲线上，取相应于 $S=0.015b$ （ b 为荷载板直径，故 $S=0.015\times 800=12\text{mm}$ ）的荷载，作为碎石桩与间土的容许承载力，各台荷载试验得到的结果如 3 表中所示。

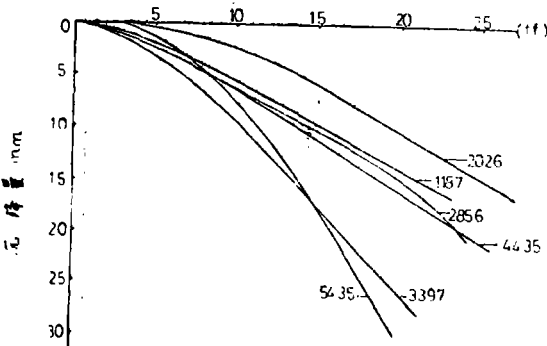


图 2 碎石桩静荷载试验 P - S 曲线

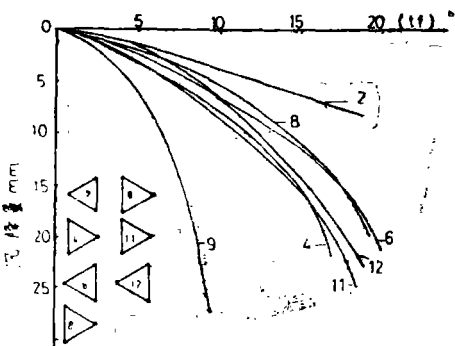


图 3 桩间土静荷载试验 P - S 曲线

表 3 复合地基荷载试验结果

| 碎石桩 试验编号 | 碎石桩容许承载力 [R] (kPa) | 桩间土试验编号 | 桩间土容许承载力 [R] (kPa) | 复合地基容许承载力 [R] (kPa) |
|-------------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 3397 | 220 | 9 | 137 | 267 (平均) |
| 4535 | 239 | 11 | 240 | |
| 4435 | 300 | 4 | 251 | |
| 2856 | 320 | 12 | 261 | |
| 1178 | 338 | 6 | 288 | |
| 2026 | 430 | 8 | 304 | |

复合地基容许承载 $[R]_{sp}$, 按下列公式计算

$$[R]_{sp} = [R]_s + m([R]_p - [R]_s)$$

式中, $[R]_s$ 为桩间土容许承载力, $[R]_p$ 为碎石桩容许承载力, m 为置换率(0.33-0.35.)

从表 3 可清楚看出, 粉煤灰地基经振冲加固后, 承载力由 40kPa 提高到 267kPa, 其提高幅度近 7 倍之多。

3.2 复合地基的抗剪强度

粉煤灰坝基经振冲加固后, 除粉煤灰本身的密实度有明显提高外, 而密实的碎石桩群也提高了整体坝基的抗剪强度。在桩距 1.5m 区测得粉煤灰的 $C_s = 6.0\text{kPa}$, $\varphi_s = 18.6^\circ$ 。根据 Priebe 研究结果, 按下列公式计算复合地基的抗剪强度指标, 即

$$C_{sp} = (1 - \omega) C_s, \quad \varphi_{sp} = \omega \tan \varphi_p + (1 - \omega) \tan \varphi_s,$$

$$\omega = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} m$$

式中: C_s , φ_s 为加固后粉煤灰强度指标; φ_p 为碎石桩身碎石强度指标; φ_{sp} , C_{sp} 为复合地基的强度指标; m 为置换率; σ_p 为作用在碎石桩上某一深度的垂直附加应力; σ_s 为作用在桩间土同一深度的垂直附加应力。

计算结果见表 4:

表 4 加固前后坝基强度比较

| 工程 名称 | 加固前 | | 加 固 | | 后 | |
|----------|--------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|
| | φ_s (度) | 容许承载力 $[R]_s$ (kPa) | φ_{sp} (度) | C_{sp} (kPa) | 容许承载力 $[R]_{sp}$ (kPa) | 压缩模量 E_{sp} (MPa) |
| 主 坝 | | | | | | |
| 三级子坝 | 12 | 40 | 24.3 | 6.0 | 3.4 267 | 11.6 |

3.3 挤密效果及排渗条件的改善

粉煤灰坝基振冲加固后, 经测试表明, 粉煤灰干容重从 7.9-8.5kN/m³, 提高到 9.50kN/m³ 相对密度从 0—0.28 提高到 0.66, 即把松软的粉煤灰加固到紧密状态。在桩距 1.6—1.8m 加固区, 粉煤灰干容重从 8.2kN/m³ 提高到 9.2kN/m³, 相对密度提高到 0.48, 这进一步说明, 即使桩距加大到 1.6—1.8m, 粉煤灰也能达到中等密实状态, 这对坝基渗流稳定是非常有利的。

同时, 加固过程中, 坝基已经在自重应力下固结。子坝建成后, 坝基又在附加应力作用下进一步迅速固结, 因而坝基下卧层一定深度内的欠固结土层的变形得到有效控制。

3.4 坝基稳定安全性评价

坝基的稳定性是加固成败的关键。为慎重起见, 采用我们编制的有效应力法——地震反程序 (EFESD), 计算下列两种情况的稳定安全性。

(1) 坝基未进行加固的情况: 这时从三级子坝到初级坝底面存在一应力水平大于 0.80 的剪力区, 部份地区达到 1.0, 当粉煤灰堆积到三级子坝容许库容时, 如发生地震, 地震力引起的最大超孔隙水压力将达到 4.0m 水柱。同时子坝前有大片液化区。见图 5(a)。在未加固的粉煤灰坝基上建造子坝, 向上游滑动的安全系数仅 0.8,

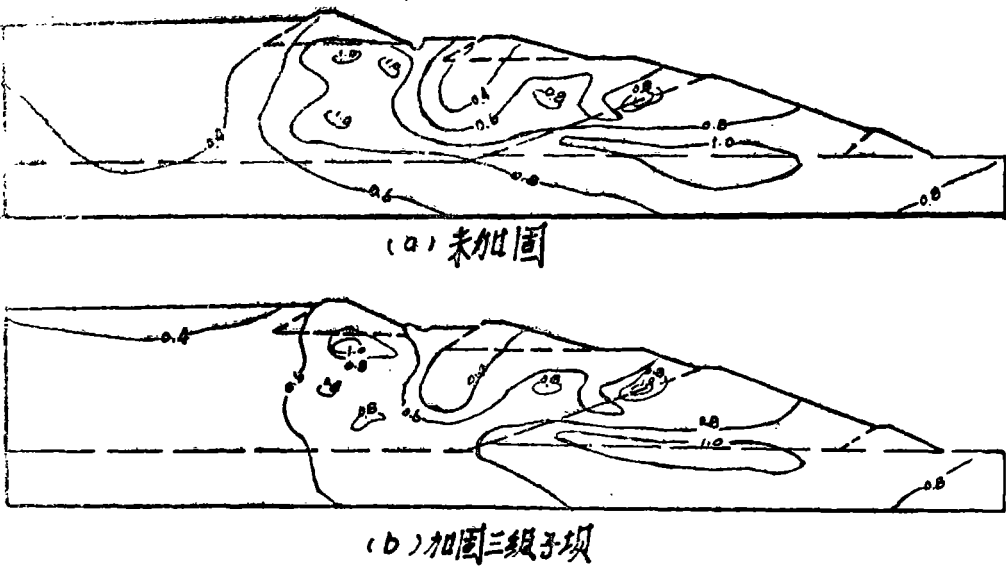


图 4 震前应力水平

(a) 不加固 (b) 加固三级子坝下灰基

(2) 三级子坝下粉煤灰地基进行加固的情况。这时应力水平大于0.8的剪力区, 只限于初级坝底及原地基土层。剪力破坏区域(应力水平=1.0)相应缩小, 如发生地震, 地震力引起的超孔隙水压力等值线下移(图 5), 液化区域缩小并远离三级子坝, 对子坝不构成威

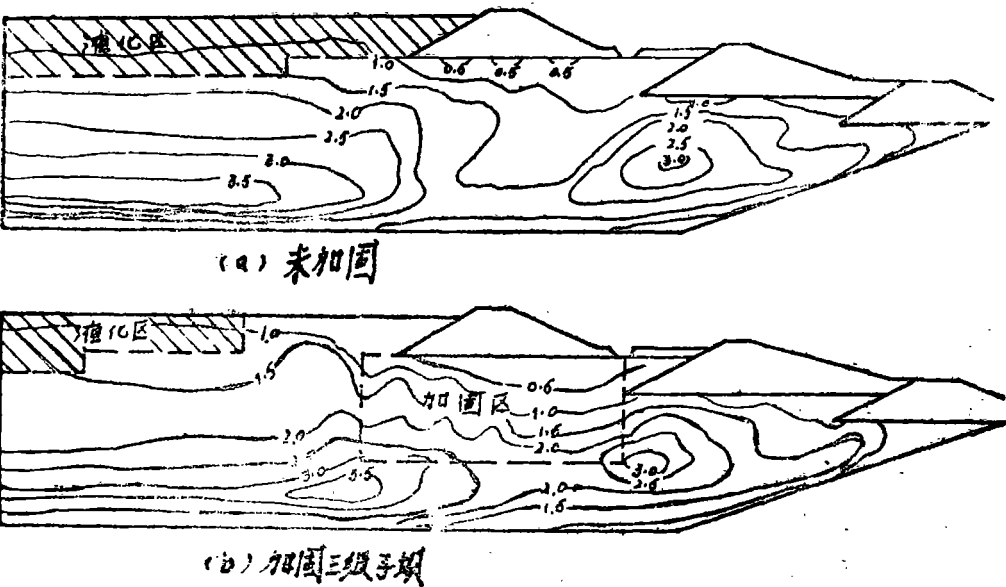


图 5 地震孔隙压力

(a) 未加固 (b) 加固三级子坝

胁。坝体最小安全系数大于1.40, 满足规范1.30—1.40要求和建坝抗滑稳定需要。

4 振冲加固机理

用碎石桩加固软弱土层的实质是将天然地基转变为复合地基。复合地基中的碎石桩有三大作用: 桩柱作用, 垫层作用, 和排水固结作用。对打到相对硬层的桩柱, 桩柱作用亦即应力集中作用是主要的。对打不到相对硬层的部分贯穿柱, 复合地基如一刚度较大的垫层, 垫层就是置换、均布应力, 应力扩散等作用。

从土力学的角度分析, 粉煤灰受振时强度大为降低, 特别是饱和粉煤灰在循环荷载作用下, 体积发生变化产生超孔隙水压力, 颗粒间摩擦力减小, 外力转由孔隙水传递。当超孔隙水压力增至与上伏压力相等时, 粉煤灰颗粒处于失重状态, 一般称为液化。这时粉煤灰强度接近于零。这是因为在 $S_a = (P-U) \tan \varphi$ 式中; 即当孔隙水压力 U 等于总应力 P 时, 抗剪力 $S_a = 0$, 振冲法之所以能在自重作用下沉入所需要的深度, 而且能将原有土体破坏, 并经振动使粉煤灰颗粒重新排列和组合, 取得加密效果, 主要利用 $S_a = 0$ 这个原理和条件进行完成的。

振冲器产生的加速度值沿径向衰减很快, 振冲挤密后的粉煤灰密实度沿径向也有很大差异, 离振冲器近密实度高, 离振冲器远密实度提高小。地面漏斗状沉陷反映了振冲挤密效果, 沉陷量大处密实度亦大。

桩柱与地基土共同受力称为复合地基。复合地基的沉降量比天然地基小得多; 其原因是地基受力后应力集中到碎石桩柱上, 粉煤灰地基相对减少了荷载强度, 因此沉降量减小。碎石桩柱虽然荷载强度较大, 但压缩模量亦大, 所以沉降较小。另外, 碎石桩柱改变了压缩变形情况。试验证明, 粉煤灰的固结过程, 由于复合地基中存在着众多碎石桩柱而构成排水通道将显著加快, 早期沉降显著, 甚至在加固过程中沉降已大部分完成。曾经育人论证过振冲加固可提高软土的先期固结应力而致后期沉降的减少。坝基完成加固已三年多, 平均沉降量仅20mm。

在周期性动荷情况下, 粉煤灰的天然结构受到破坏, 而由此产生塑性变形, 即所谓重塑效应。其表现为施工结束时, 粉煤灰强度的明显降低, 20—30天后强度逐渐恢复, 通常情况下都可超过原有粉煤灰土强度。尽管强度增值幅度并不十分明显, 但对增大碎石桩侧向约束是有利的。

5 结束语

应用振冲法加固粉煤灰坝基是国内首创。松林山主坝三级子坝是国内享有盛誉的振冲加固粉煤灰坝的工程实例。通过该工程的设计和施工, 取得了较多的技衍参数及实践经验, 为今后各地发电厂建造各级子坝的提供了一项创新的途径。

振冲加固的理想深度, 不仅在粉煤灰坝基, 就是在软土, 砂土中也是振冲法加固地基的一项重要课题。目前, 由于对振冲碎石桩受力机理尚缺乏更深刻认识, 加固的理想深度国内尚未定论。日本规范规定: 最大深度为8m。应当指出, 对于要求抗御地震液化的工程, 应当根据具体条件考虑是否需要全部液化层进行加固。

根据理论要求,人为地改变桩柱截面是可取的。例如可将桩柱上部做粗些,以利于桩柱承载力的提高。这在施工工艺上是可行的。

从大量试验得知,单桩载荷试验时,碎石桩的应力状态与复合地基中碎石桩的应力状态不同,碎石桩单桩承载力低于复合地基中碎石桩承载力。因此,国内有些专家建议,设计时可降低安全系数。

制桩工艺是加固质量的重要环节。要根据具体土层,掌握密实电流、工作水压、留振时间以及填料量的多寡,确保加固质量。

参 考 文 献

- [1] 孙更生,郑大同主编,软土地基与地下工程,中国建筑工程出版社,(1984),406.
- [2] 冶金工业部建筑研究总院主编,强力夯实法与振动水冲法,冶金工业出版社,(1989),150.
- [3] 地基处理手册编写委员会,地基处理手册,中国建筑工业出版社,(1988),191.

Application of Vibroflotation to Strengthen the Flyash Dam Foundation

Peng Gujiao

Lu Guanyun

(Hua Qiao University) (Nanjing Foundation Company)

Abstract This paper deals with the design and construction of the flyash dam foundation by applying vibroflotation as strengthening method. It gives the test results a theoretical analysis. It goes further to the mechanism of vibroflotation which the researchers just have a superficial understanding.

Key words dike foundation of flyash, vibroflotation method, stabilizing