

# 强夯碎石桩的发展及成桩机理分析

王保田 唐劲柏

( 河海大学土木工程学院 南京 210098 )

**摘 要** 强夯置换法是 80 年代才开始应用的软土地基处理方法,在我国已成功应用于多个工程.介绍强夯置换法的发展概况,用波动理论定性阐述强夯置换法在成桩过程中桩土界面的变化,说明了夯击能量从第一击接近球状传播到形成柱状桩体后的接近一维传播变化过程,探讨了夯锤势能转换成使桩体向下延伸的动能、桩体压密的势能、通过桩体侧面和底面向桩外传播的动能比例.分析结果表明:强夯置换法特别适用于抗剪强度极低的饱和软粘土地基,置换深度一般不超过 8 m;用强夯法将粗颗粒料(如碎石)夯击到土层中能够形成柱状体,复合地基不仅置换部分强度大幅度提高,天然土部分由于排水固结作用和挤密作用也使强度有所提高.

**关键词** 强夯置换法;能量转换;复合地基;置换深度

中图号 TU473

## 1 强夯置换法的发展

强夯法由法国 Menard 技术公司 1969 年首先应用于处理滨海填土工程<sup>[1]</sup>. 该法通过对地基施加巨大的夯能,使地基土中出现冲击波和动应力,用以提高土的强度、降低土的压缩性、改善土的液化条件、消除湿陷性黄土的湿陷性、提高土层的均匀程度. 30 年来的应用表明,强夯法具有广泛的适用性,但对饱和软粘土处理效果不好. 80 年代开始,将强夯法与置换法结合起来,形成了强夯置换法,即利用强夯法的高能量冲击,将砂石料、矿渣等强度高、透水性好材料夯入土中,形成整体层式置换或柱状桩式置换复合地基. 强夯置换过程具有垫层作用、混合土作用、透水桩的排水作用、挤密作用、振密作用等诸作用的联合作用. 近年来用强夯置换法进行加固的多项工程均取得了良好的效果<sup>[2~4]</sup>.

## 2 强夯置换夯击过程中能量转换分析

### 2.1 碰撞过程中的能量变化

在软弱地基中,由强夯置换法形成一定长度的桩体后,继续夯击时,由碰撞理论,质量为  $m_1$  的物体(夯锤)与质量为  $m_2$  的物体(如碎石桩)碰撞,当两物体运动轨迹为同一直线上时,有:

a. 速度变化关系式 
$$e = \frac{V_{22} - V_{12}}{V_{11} - V_{21}} \quad (1)$$

式中: $V_{11}, V_{12}$ —— $m_1$  物体碰撞前后的速度; $V_{21}, V_{22}$ —— $m_2$  物体碰撞前后的速度; $e$ ——恢复系数, $e = 1.0$  为完全弹性碰撞,碰撞过程中没有能量损失, $e = 0$  为完全非弹性碰撞,碰撞过程中能量损失最大, $0 < e < 1$  为不完全弹性碰撞,能量损失在上述两者之间.

b. 动量守恒定律

在没有外力干扰时,碰撞过程中系统总动量保持不变:

$$m_1 V_{11} + m_2 V_{21} = m_1 V_{12} + m_2 V_{22} \quad (2)$$

式中: $V_{11}, V_{21}$ —— $m_1, m_2$  系统在碰撞前瞬间速度; $V_{12}, V_{22}$ —— $m_1, m_2$  系统在碰撞后的速度.

### c. 能量损失公式

将基准面取在两物体碰撞的接触点,则碰撞后的  $m_1, m_2$  系统内机械能损失 ( $\Delta E$ ) 可不计势能变化,而完全由动能的变化表示:

$$\Delta E = \left( \frac{1}{2} m_1 V_{11}^2 + \frac{1}{2} m_2 V_{21}^2 \right) - \left( \frac{1}{2} m_1 V_{12}^2 + \frac{1}{2} m_2 V_{22}^2 \right) \quad (3)$$

式中  $\Delta E$ —— $m_1, m_2$  系统在碰撞过程中的机械能损失。

$$\text{由公式(1)(2)(3)可得} \quad \Delta E = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) (V_{11} - V_{21})^2 \quad (4)$$

对于强夯置换过程中的某一次夯击,  $m_1$  为夯锤质量,  $m_2$  为本次夯击前桩体质量和桩周土综合影响质量之和。设夯锤落高为  $h$ , 落地前瞬时速度为  $V_{11} = \sqrt{2gh}$ , 相应动能  $E_0 = m_1 gh = m_1 V_{11}^2 / 2$ 。取质量为  $m_2$  的桩体在夯前初速度  $V_{21} = 0$ 。公式(4)可写作:

$$\Delta E = \alpha E_0 \quad (5)$$

$$\text{能量损失系数} \quad \alpha = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) \quad (6)$$

式中  $\Delta E, E_0$ ——系统碰撞过程中的能量损失和初始动能。

系统初始能量除碰撞过程中损失部分 ( $\Delta E = \alpha E_0$ ) 外,另一部分  $E = (1 - \alpha) E_0$  则用于使桩体密实和向深处发展,即为用于地基加固的能量。由公式(5)可知,我们希望碰撞过程中能量损失越少越好,即要求  $\alpha$  越小越好。

## 2.2 能量损失系数 $\alpha$

### 2.2.1 对 $(1 - e^2)$ 项的讨论

由公式(6)知,  $\alpha$  由  $(1 - e^2)$  和  $m_2 / (m_1 + m_2)$  两项的乘积组成。当  $(1 - e^2)$  越小,  $\alpha$  越小。 $\alpha, e$  与碰撞情况的关系是:

情况 1 当  $e = 0$  时,  $1 - e^2 = 1$ , 为完全非弹性碰撞情况,这时  $V_{22} = V_{12}$ , 碰撞过程中系统能量损失最大,  $\Delta E_{\max} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_0$ 。

情况 2 当  $e = 1$  时,  $1 - e^2 = 0$ , 为完全弹性碰撞情况,这时  $\alpha = 0$ 。当  $V_{12} = 0$  时,由公式(1)有  $V_{22} = V_{12} + V_{11}$ , 碰撞过程中系统没有能量损失。

情况 3  $0 < e < 1$  (即  $0 < 1 - e^2 < 1$ ) 时,为非完全弹性碰撞。 $e$  越与 1 接近,碰撞越接近于完全弹性碰撞,碰撞时系统损失能量越小。对于强夯置换法而言,系统中  $m_1$  物体为钢质夯锤,刚度很大,与之碰撞的物体为刚度大的弹性体时,则碰撞过程接近于弹性碰撞;与之碰撞的物体弹性小,易发生塑性变形时,则碰撞接近于完全非弹性碰撞。因用于置换的材料多为碎石、钢渣等刚性较大的材料,因此,与强夯天然土相比,更接近于弹性碰撞。这时  $e$  与 1 接近,  $\alpha$  与 0 接近,强夯过程中损失能量较小。

以上分析表明,采用强夯置换法更有利于夯能向土体深处作功,使夯击影响深度增加。也就是说,在其它条件相同的情况下,用梅纳德公式  $H = K \sqrt{Mh/10}$  估算强夯影响深度时,强夯置换法的  $K$  值的取值较强夯天然地基的  $K$  值的取值大。

### 2.2.2 对 $m_2 / (m_1 + m_2)$ 项的讨论

由于  $m_1$  越大,  $m_2 / (m_1 + m_2)$  项越小,  $\alpha = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2)$  也越小,碰撞时能量损失越少,因此,在某一夯点的初始几击用于加固的能量大,随着桩体的延长,  $m_2$  迅速增加,  $m_2 / (m_1 + m_2)$  接近于 1,对  $\alpha$  几乎不产生影响。

## 3 强夯置换法的桩体形态发展过程

### 3.1 强夯置换施工过程及实测桩体形态

强夯置换法施工时,先在加固区表面铺设一定厚度的碎石等垫层材料,以利于施工机械行走和提供桩体材料。然后将质量几吨到几十吨的夯锤吊高到几米到十几米,自由落下,将地表铺设的碎石(或其它置换材

料)夯入软土层中,形成碎石桩(或其它材料置换桩).某工程强夯碎石桩复合地基地质剖面如图1所示.由图可见,碎石桩形态良好.

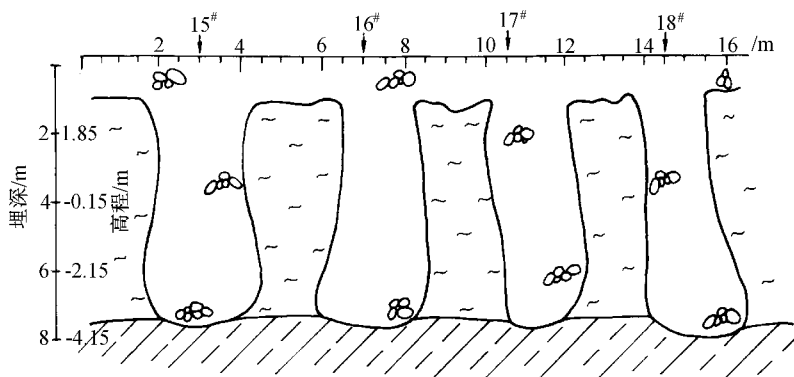


图1 强夯碎石桩剖面(地质CT拍摄)\*

Fig.1 Section of DRM column(geological CT picture)

### 3.2 强夯置换法成桩过程分析

强夯碎石桩成桩过程中,头几次夯击过程情况最为复杂,常见夯坑尺寸与锤底基本一致,夯坑深达几十到上百厘米,边界条件剧烈变化,如图2所示.从宏观上看,此时夯击在土中产生冲剪破坏型式.夯点下置换体形成柱状形态,随后,夯实置换体与周围土体间的界面就成了两种不同介质的分界面,如图3所示.继续夯击时,冲剪破坏型式逐渐转化为局部破坏的型式,分界面主要向下扩张,桩长增加,而桩径相对稳定[5].

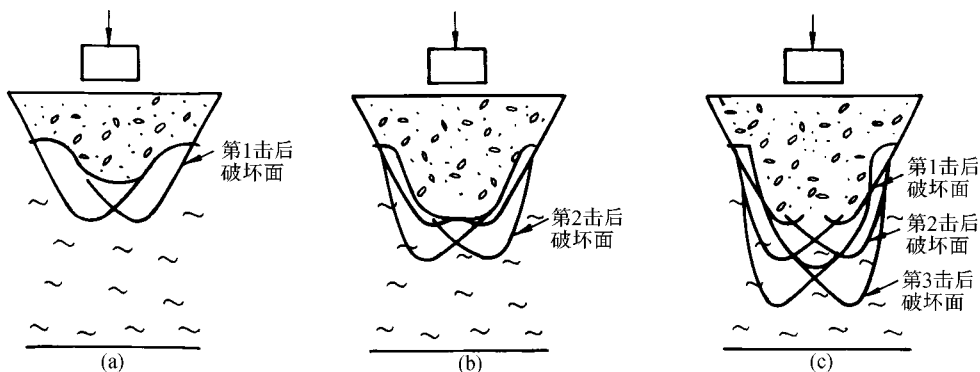


图2 前几击强夯置换地基破坏发展情况

Fig.2 Development of failure surfaces at primary tamping

### 3.3 波动在桩体中的传播

强夯置换施工时,在前几击夯击后,地基中形成了柱状置换体.以后的继续夯击产生的振动自桩顶向下传播,经过一定时间,到达置换桩的侧面和底面.在界面上,振动波要产生反射和透射现象.发射波在桩体中使桩体进一步密实,透射波穿过界面使界面向外扩张.对成桩过程起控制作用的是压缩波(P波)和剪切波(S波).P波和S波反射和透射过程中能量公式如下:

波的强度公式:

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 V \tag{7}$$

式中: $I$ ——波能强度; $\rho$ ——介质密度; $A$ ——波的振幅; $\omega$ ——圆频率; $V$ ——波速.

由式(7)可见,波在一定介质中传播时,除振幅 $A$ 外,均为常数.因此,波的强度与振幅的平方成正比,波

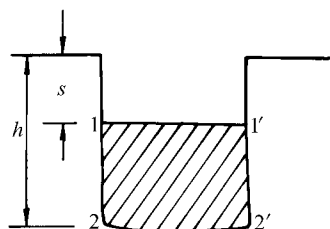


图3 桩土界面情况

Fig.3 Interface between column and soil

\* 孙连城,林国清.深圳机场扩建停机坪强夯碎石桩静载荷试验报告及地基强度静动力试验成果对比说明,1993.3

的振幅的比值也表示了波能强度比值。

当波达到两种介质的界面上时,会出现如图 4 所示的反射和透射现象.两种介质中波速的关系满足

$$\frac{V_{1P}}{\sin \alpha} = \frac{V_{2P}}{\sin \gamma} = \frac{V_{1S}}{\sin \beta} \quad (8)$$

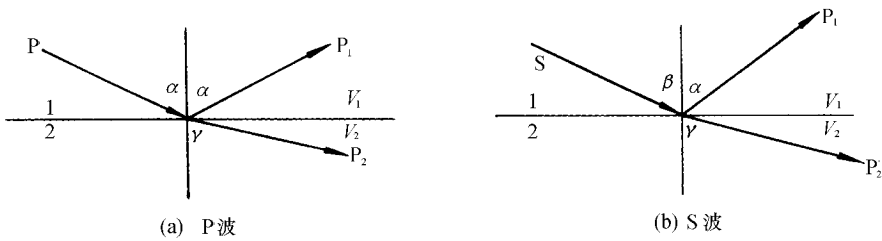


图 4 入射、反射、透射示意图

Fig.4 Incidence, reflection and transmission

现用  $A_P$  和  $A_S$  分别表示 P 波 S 波的振幅,用  $C$  和  $D$  分别表示反射波  $P_1$  和透射波  $P_2$  的振幅.  $\alpha$  和  $\gamma$  分别为入射角和透射角,  $\beta$  为 P 波透射角  $\gamma$  对应的 S 波入射角.果普里茨和麦卡尔研究了振幅比  $\frac{C}{A_P}$ ,  $\frac{D}{A_P}$  和  $\frac{C}{A_S}$ ,  $\frac{D}{A_S}$  的关系,即反射波和透射波的振幅比<sup>[3]</sup>,如图 5 所示。

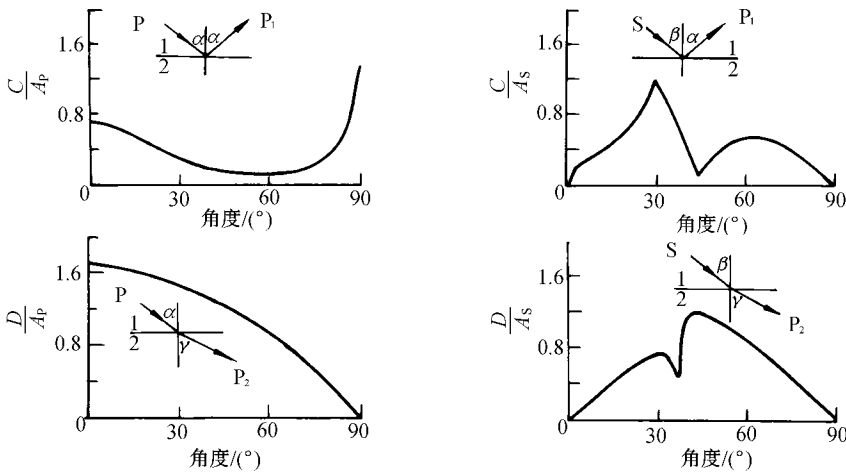


图 5 反射波和透射波的振幅比随入射角的变化

Fig.5 Variation of ratio of amplitudes of reflected and transmissive waves with incidence

为方便起见,进一步将振幅比分为三档 (<0.4 为弱, 0.4~0.6 为中, >0.6 为强),图 5 关系可分类如下:

- 1 类:入射角  $0^\circ \sim 15^\circ$  特点是反射强,透射也强;
- 2 类:入射角  $15^\circ \sim 40^\circ$  特点是反射中,透射强;
- 3 类:入射角  $40^\circ \sim 80^\circ$  特点是反射弱,透射强;
- 4 类:入射角  $80^\circ \sim 90^\circ$  特点是反射强,透射弱。

结合图 3 可知,两个侧面 1—2 和 1'—2' 为竖直面,向下传播的波到达该面,入射角在  $80^\circ \sim 90^\circ$  范围内,反射强而透射弱,表示该面稳定,反射波使桩体密实,因而桩的直径稳定.底面入射角在  $0^\circ \sim 15^\circ$  范围内,特点是反射和透射都强,夯击时既有反射波使桩体密实,又有透射波使桩体向下延伸.侧面与底面交界区和靠近地表面的桩侧面入射角在较大范围内变化,因而这两个区域不稳定<sup>[6]</sup>。

## 4 结 语

讨论了强夯置换法形成的碎石桩复合地基成桩过程中能量交换,用波动理论解释了成桩过程中桩土界面的变化机理.由于强夯置换法施工速度快、造价低,有广泛的应用前景.特别是对于不排水强度  $c_u < 20$  kPa 的软粘土地基,采用振动水冲法进行碎石桩施工不适用,但强夯置换法能够很好地对其处理.但强夯置换法形成的碎石桩等置换体深度一般不超过 8 m,因此,对于厚度超过 8 m 的软粘土地基,用该法处理的效果有待

进一步验证.

### 参 考 文 献

- 1 Menard L ,Broise Y. Theoretical and practical of dynamic consolidation. *Geotechnique* ,1975 25( 1 ) 3 ~ 18
- 2 周广泉. 置换强夯——复合地基工程实践. *建筑技术* ,1992( 1 ) 8 ~ 12
- 3 小理查特 F E. 土与基础的振动. 北京 :中国建筑出版社 ,1976. 121 ~ 142
- 4 Lo K W ,Ooi P L ,Lee S L. Dynamic replacement and mixing of organic soils with sand charges. *Journal of Geotechnical Engineering* ,1990 , 116( 10 ) 35 ~ 41
- 5 刘惠珊. 强夯置换加固软土地基——土动力学在岩土工程中的应用. 北京 :建筑工业出版社 ,1998. 15 ~ 60
- 6 郭见扬. 夯能的传播和夯实柱体的形成. *土工基础* ,1996 ,10( 4 ) :17 ~ 19

## Development of DRM and Analysis of Column-Formation Mechanism

Wang Baotian      Tang Jinbai

( *College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098* )

**Abstract** Dynamic Replacement Method ( DRM ) is a foundation treatment method which began to be used in engineering in 1980 's. The method has been successfully used in many engineering projects in our country. In the paper , the history of development is introduced first. Then the process of exchange of the surfaces of column and soil is discussed on the basis of the theory of wave transmission. The process of energy transmission from the spherical surface at the first hammering to one dimension at the shaping of the column. The ratio of the kinetic energy to the potential energy which densifies the column ,and the ratio of the wave energy spreading from the side surface and the bottom surface of the column are discussed. The conclusion is that DRM especially suits the treatment of very soft foundations in which shear strength is very low. The depth of the column is usually less than 8m. The column of large size material ( e. g. crushed stone ) can be shaped by DRM. The strength of compound foundations can be improved not only the partial of the column but also the natural soil owing to the effect of consolidation and densification.

**Key words** dynamic replacement method ;energy transformation ;wave theory ;replacement depth