

# Application of Rock - throwing Dynamic Compaction in Soft Foundation Treatment

Qiang Zhao Jiuqiang Fu

Sichuan Zhongding Luda Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

Soft foundation treatment has a high proportion in the project, so it is very important to choose a safe, environmentally friendly and efficient foundation treatment mode. Taking the soft foundation treatment by replacement + riprap dynamic compaction method as an example, the selection, design and construction of soft foundation treatment scheme are expounded. The plate loading experiment was applied to test the treatment effect, and the test results show that the method is reasonable and can meet the engineering requirements. Dynamic compaction method is often used to dispose of collapsible loess, sand soil, clay soil, mixed filling soil, gravel soil and other special soil, but for high saturation cohesive soil, the dynamic compaction method is directly used for disposal, its disposal effect is not significant, especially the silt or silt soil, its treatment effect is worse.

## Keywords

Soft foundation treatment; Rock - throwing Dynamic Compaction; plate load; detection

## 换填 + 抛石强夯在软基处理中的运用

赵强 付久强

四川中鼎路达工程咨询有限公司, 中国 · 四川成都 610000

## 摘 要

软基处理在工程比重较高, 选择安全、环保高效的地基处理方式至关重要, 以鹿寨-钦州港公路采用换填+抛石强夯法处理软基为例阐述了软基处理方案的选择、设计与施工。采用平板载荷实验对软基处理效果进行检测, 通过计算校核检测结果, 表明采用该方法处理软基科学合理, 能满足工程要求。强夯法常被用来处置湿陷性黄土、砂土、粘性土、杂填土、碎石土等特殊土, 但对于高饱和粘性土, 直接采用强夯法来进行处置, 其处置效果并不显著, 特别是淤泥或淤泥质土, 其处理效果更差。

## 关键词

软基处理; 抛石强夯; 平板载荷; 检测

## 1 引言

因此, 对于饱和粘性土, 尤其是淤泥或淤泥质土, 单独采用强夯法来处置难以满足要求。但采用抛石挤淤结合换填换法来处置, 便能较好地解决这一难题。即先利用片块石、石渣等粗颗粒材料, 进行抛填挤淤, 形成填石硬壳层, 然后在填石上, 利用强夯置换法的动力特性, 使填石密实并进一步挤淤, 最后达到提高地基承载力和降低软土压缩系

数的工程要求。这种软基处理方法可以定为强夯置换法拓展出来的新工艺。近年来, 为了满足我国沿海地区经济快速发展的需求, 道路工程建设项目增长迅速, 而这不可避免地会遇到许多软基路段, 采取合理的处置措施则显得尤为重要。研究表明: 采用抛石挤淤结合强夯置换法处理软

基科学合理, 能满足工程的要求。

## 2 抛石强夯加固机理以及适用范围

### 2.1 饱和土中加固原理

①强夯施工后, 土体的透水率显著增强。在强夯施工过程中, 强夯锤反复夯击地面, 产生的冲击能量使夯点周围土体产生环形剪切裂缝, 进而形成树枝状的排水网络。这种结构显著提高了土体的渗透系数, 使得在高孔隙水压力作用下, 水分能够迅速通过裂隙形成的排水通道排出, 从而加速了软土的固结过程。此外, 当夯锤反复夯击土层时, 路基中会产生较大的冲击能量, 饱和土体中通常含有 1%~4% 的封闭气体以及溶解在液相中的气体。这些能量不仅促使土体密实, 还可能使封闭气体释放或重新分布, 进一步改善土体的工程性质。这种双重作用(排水网络的形成和气体的释放)共同促进了土体的固结和强度提升, 为地基处理提供了有效的手段, 同时在夯锤下落过程中会和夯坑壁发生摩擦, 部分

【作者简介】赵强(1986-), 男, 中国四川广元人, 本科, 工程师, 从事道路设计研究。

冲击能变化成热能。这些热能传入饱和土中后,就会使封闭气泡移动。每夯击一遍土中气体可减少30%~40%。

②饱和土被压实挤密。当夯锤反复夯击地基表层时候,地基中会产生巨大的冲击能量,促使土颗粒或团粒发生相互移动并逐渐靠拢。在土颗粒相互靠近的过程中,首先是包裹在颗粒表面的薄膜水发生接触。随着冲击能量的持续增加,薄膜水受到强烈的挤压应力,导致其厚度发生变化。当夯击能量足够大时,薄膜水会转化为自由水,流向颗粒之间的裂隙,并最终从上方或四周排出。这一过程使得土颗粒与土颗粒之间发生相对位移,加强土颗粒紧密排列,使得土颗粒从原本的紊乱状态逐渐转变为稳定状态。同时,土体中的裂隙大小趋于均匀,超孔隙水压力逐步消散,使土体最终达到新的稳定形态。这种机制不仅提高了被加固土体的密实度,还明显增强了被加固土体力学性能,为地基处理提供了有效的技术支撑。

③软土因其触变性,在连续强夯冲击作用下,土体结构会应强大冲击遭到破坏,土体中结合水转化为自由水,导致土的抗剪强度显著降低。然而,随着超孔隙水压力的逐渐降低至着呢广场那个水平,土体颗粒之间的接触变得更加紧密,土体的强度指标与刚度指标也随之大幅提升。随着时间的增长,土体中新的吸着水会逐渐固定,土体强度得以完全恢复并持续增长。根据现场实测数据,饱和的细颗粒土在强夯后半年内,平均强度参数可增加20%~30%,刚度参数可提高30%~60%。需要注意的是,细颗粒饱和土在其触变恢复期间对振动极为敏感。轻微的振动可能导致刚刚恢复联结的土颗粒重新分散,从而显著降低土体强度。因此,在强夯施工后不宜立即进行检测,以免干扰土体的恢复过程,影响最终的加固效果。这一特性要求在工程实践中合理安排检测时间,以确保土体强度的稳定性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。

## 2.2 非饱和土中加固原理

①在非饱和土体中,尤其是孔隙率较大、土颗粒较粗的土体中,高能级的强夯作用与机械碾压、振动压实或重锤夯击有明显差异。在强夯过程中,巨大的冲击产生的冲击波和动应力在土体中传播,导致土颗粒破碎或发生瞬间的相对位移。这种作用促使孔隙中的气体迅速排出或被压缩,孔隙率明显降低,从而土颗粒之间更加密实。因此,采用强夯法加固非饱和土能够有效提高土体的密实度和力学性能。与饱和土不同,非饱和土中的气体在强夯过程中起到了重要作用。冲击能量不仅使土颗粒重新排列,还通过压缩或排出气体减少了孔隙率,进一步增强了土体的整体稳定性。这种方法特别适用于处理粗颗粒土或孔隙率较高的非饱和土,能够显著改善其承载力和抗变形能力。然而,在实际工程中,需根据土体特性合理设计夯击能量和施工参数,以避免过度夯击导致土体结构破坏或产生不均匀沉降。通过科学施工和有效控制,强夯法能够为非饱和土地基处理提供高效、经济的

解决方案。特别是粗粒土是基于动力压密的概念。即应用冲击破坏压缩理论来描述。该理论认为,与饱和粘土不同,粗粒土受夯击时,可能不产生液化、触变和孔隙压消散现象,只是土体体积减小,密实度和强度提高,其证据是:(1)在夯击能作用下地面有大量沉降;(2)抗底形成硬壳层,其厚度约为夯锤直径的1~1.5倍;(3)夯锤会造成土体的冲击变形,影响深度范围内土颗粒中水与气的比例有所降低。

②在土体亿万年的形成过程中,使得土颗粒表面通常包裹着一层由矿物和有机物组成的新化合物或胶体物质的凝胶。这些凝胶使得土颗粒聚集成一定大小的团粒,这些团粒具有一定的水稳定性和强度。土颗粒之间的裂隙则被空气和水填充,因此土体由固相(土骨架)、液相(水)和气相(空气)三部分构成。在强夯过程中,压缩波能量作用于土体,使土颗粒更加紧密。首先,孔隙中的气体被迅速排出,随后土颗粒重新排列,从天然的紊乱状态转变为更加稳定的密实状态。同时,在波动能量的作用下,土颗粒之间的液体也逐渐排出。因此,非饱和土的夯实过程本质上是一个气相被逐步挤出、孔隙体积减小、土体密实度提高的过程。这种机制使得强夯法能够有效改善非饱和土的工程性质,提高其承载力和抗变形能力。然而,在实际施工中,需根据土体的具体特性(如颗粒大小、孔隙率、含水量等)合理设计夯击能量和施工参数,以确保土体结构的均匀性和稳定性,避免因过度夯击导致土体破坏或不均匀沉降。通过科学施工,强夯法为非饱和土地基处理提供了一种高效且经济的技术手段。

③从国内外工程实践经验看,强夯法加固软土地基的效果主要决定于土颗粒的粒径、土层特性及其含水率。一般认为,强夯法目前除了对厚层淤泥质土和淤泥不适用外,对某些类型的软土强夯效果还是比较好的。第十届土力学及基础工程会议认为土中小于0.035mm的颗粒占25%~35%时不适宜采用强夯法处理;德国学者认为颗粒直径小于0.002mm颗粒占10%~15%时,采用强夯法要慎重,如果采用,夯击的间隔时间要加长<sup>[3-4]</sup>。

## 3 工程概况

本文研究软基位于鹿寨-钦州港公路横县至钦州港段灵山县内,区域内主要为花岗岩残积土。地层参数如下:

①淤泥质土(Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>):灰褐,软塑,成分以粘粒为主,粉粒次之,粘性一般,刀切面光滑,土质较均匀,干强度及韧性中等,稍具腥臭味,岩芯呈土柱状,该层厚约0.9-3.3m。

②粉质黏土(Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>):褐灰色,可塑,主要由黏粒和粉粒组成,土质较均,切面稍光滑,稍有光泽,干强度及韧性中等,该层厚约0.6m。

③全风化花岗岩( $\gamma_5^1$ ):黄褐色,岩体结构基本被破坏,原岩尚可辨,风化成砂土状,手可捏碎,遇水易崩解,该层揭露层厚约0.4m,未揭穿。

表 1 地层参数表

Tab.1 Stratum Parameter Table

岩土名称	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 $\phi^\circ$	压缩模量 E (MPa)	承载力特征值
淤泥质土	16.5	9.5	7.4	2.5	40
粉质黏土	19	25.9	17.3	5.0	150
全风化花岗岩	19.5	20	25	8.0	280

## 4 抛石强夯设计

①强夯法处理范围应超过路堤坡脚，每边超过坡脚的宽度不宜小于 3m;

②夯击能 G 和有效加固深度 d 应考虑按下表进行考虑。

表 2 强夯法有效加固深度

Tab.2 Effective reinforcement depth of dynamic compaction method

单击夯击能 (kN*m)	碎石土、砂土等粗颗粒土	粉土、黏土等细粒土
1000	4.0~5.0m	3.0~4.0m
2000	5.0~6.0m	4.0~5.0m
3000	6.0~7.0m	5.0~6.0m
4000	7.0~8.0m	6.0~7.0m
5000	8.0~9.0m	7.0~8.0m

③强夯法的夯锤宜选用圆柱状，锤重可选 10t~60t，锤底静接地压力可取 80kPa~300kPa；锤底面积宜按土的性质确定，对砂性土宜为 3 m<sup>2</sup>~4m<sup>2</sup>，对黏性土不宜小于 6m<sup>2</sup>。夯锤落距宜为 8m~25m。

④强夯法的夯锤宜选用圆柱状，锤重可选 10t~60 t，锤底静接地压力可取 80kPa~300kPa；锤底面积宜按土的性质确定，对砂性土宜为 3 m<sup>2</sup>~4 m<sup>2</sup>，对黏性土不宜小于 6m<sup>2</sup>。夯锤落距宜为 8m~25m。

⑤强夯点采用等边三角形布置，对应的夯点间距宜为 3.5m。采用主夯、副夯、全幅满夯的次序进行，主夯、副夯、全幅之间的间隔时间根据孔隙水压力消散的时间进行确定，本区域属于花岗岩残积区属于砂土地区，间隔时间为 7 天。

## 5 抛石强夯施工

试验区中淤泥质土深度 4~5m，从触探结果来看承载力 40~120kPa，粉质黏土层厚约 2.0m，实验第一次采用在软基表面铺筑 1.0m 片块石进行强夯，夯击能为 3000KN，最后两击平均夯沉量小于 10cm 作为结束标准。

经过施工发现 1.0m 片块石，强夯机很难保持平稳，无法进行施工，遂将片块石调整为 1.5m，主夯夯点强夯 53 次之多仍然达不到结束标准。无法大面积推广施工，结合广西软基处理规范采用换填+抛石强夯处理，先挖除 2.0m 左右的软土，铺筑 1.5m 的片块石，挖除需要边挖除边回填片块石，利用已经回填的片块石作为施工机械的作业平台，夯击能调整至 1000KN，坡脚处需加强至 1000KN，改进后每夯 15 击均能达到结束标准，夯击中补料采用不易风化的片石、块石，粒径 30~60cm，强度不小于 20Mpa，主夯累计夯沉量为 1.8m，副夯累计夯沉量为 1.3m。

## 6 抛石强夯检测

强夯结束 10d 后，采用载荷试验检测地基土强度变化是否满足设计要求。检测频率为 1 处 /3000 m<sup>2</sup>，且每个工点不小于 3 处。经过检测抛石强夯后地基承载力能达到 200kPa，能满足要求，施工完成后该段路基稳定并未发生病害。

## 7 结语

本文结合实例，采用换填+抛石强夯对软基进行处治，既利用挖方中的片块石，避免产生浪费，则相比于碎石桩以及水泥搅拌桩，所需时间更短，能够更快地进行施工，产生更好的经济效益，具有广泛的前景。

## 参考文献

- [1] 桑松魁,张明义,白晓宇,闫楠,牟洋洋 [J]. 强夯置换法处理淤泥质黏性土地基加固特性试验研究,2018.06.30
- [2] 郑颖人,李学志,冯遗兴,等. 软粘土地基的强夯机理及其工艺研究 [J],1998.05
- [3] 黄生文.公路工程地基处理手册[J],2004.12
- [4] 黄瑞章,潘瑞春,周新年. 抛石挤淤结合强夯置换法在道路软基处理中的应用[J],2012.12.28