



# 祁临高速公路强夯振动压实黄土的力学性质分析

骆凤涛<sup>1,2</sup>, 王家鼎<sup>1</sup>, 宋飞<sup>3</sup>, 何华<sup>4</sup>

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069; 2. 中交通力公路勘察设计工程有限公司设计室, 陕西西安 710075; 3. 山西省交通科学研究院设计室, 山西太原 030006; 4. 铁道部第一勘察设计院监理公司, 陕西西安 710065)

**摘要:**目的 为黄土地带高速公路建设提供黄土动力学依据和优选新的施工法。方法 以山西境内祁临高速公路北张沟高填路段为例, 主要从黄土的结构特点和力学性质上分析, 并通过现场及室内实验论证, 综合比新法与常规法的异同点。结果 强夯压实法在黄土地基加固处理中具有合理性与有效性, 随着夯击能量的增大, 压缩模量显著增大; 击数越大, 强度增长幅度也越大, 但击实功过大会使试件的初期强度降低; 压实力大于 300 kPa 时, 随龄期变化很明显; 静力触探结果表明强夯压实后黄土强度显著提高。结论 强夯振动压实法简单、实用, 能快速有效地提高黄土地基和路基的强度, 确保工程实施的安全性。

**关键词:**黄土; 强夯振动压实; 常规压实; 力学性质

**中图分类号:** U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274 X (2007) 02-0261-05

目前, 有关黄土动力学特征, 国内外均有一些较为深入的研究, 如 Prakash 等对美国中部黄土液化标准、物性指标和粒径分布对抗液化能力的影响研究; 谢定义、巫志辉等(1986—1990)、段汝文等(1987—1990)及骆亚生等(2001)在动三轴上对黄土在等幅荷载作用下应力-应变关系、强度、弹模等进行了研究; 王兰民(1991—2003)对随机地震荷载作用下黄土动力学性质的研究, 等等。随着我国高速公路建设的快速发展, 在公路工程建设中, 黄土地区地基的处理对工程项目的安全性能具有较大的影响, 如何采取有效的处理措施达到减少和防治其所产生的危害, 同样也是工程建设中的一项重要研究内容<sup>[1-3]</sup>。目前, 采用强夯法处理回填土的技术运用越来越广泛, 在黄土地区的一些工程中也得到了应用。为此, 本文结合山西省境内祁临高速公路北张沟高填路段, 探讨采用强夯振动压实处理方法在实际工程中的应用。

## 1 实际工程现场强夯振动压实黄土试验

### 1.1 工程概况

北张沟高填方路堤位于山西省霍州市三教乡村

东约 300 m 处, 起终点桩号分别为 K102 + 008.095 和 K102 + 186.020, 全长 177.07 m。该处地貌类型为黄土塬-冲积扇区, 冲沟为典型的“V”型沟, 沟顶宽约 100 m, 沟深 62 m, 两侧壁陡峻, 坡角均大于 50°, 天然沟底高程大至在 687 ~ 750 m 之间。

根据工程地质调绘、钻探和物探资料, 高填方加筋土路堤地层主要由第四系全新统冲洪积( $Q_4^{al+pl}$ )黄土状土、上更新统风积( $Q_3^{col}$ )马兰黄土、中更新统风积、冲积( $Q_2^{col+al}$ )黄土、亚砂土、砾砂、卵石组成。

该工作区有两层土具有湿陷性。一是地表的  $Q_4^{al+pl}$  黄土状土, 根据挖探土分析成果计算其总湿陷量为 53 cm, 湿陷土层厚 4.0 m; 二是分布于两岸的  $Q_3^{col}$  马兰黄土, 计算其总湿陷量为 24.75 cm, 湿陷土层厚 5.10 m。结合区域已有的探井分析资料, 综合判定该场地为 II 级(中等)非自重湿陷场地。

在进行高路堤填筑前对地基采取了强夯处理措施, 施工中采用起重机, 夯锤由 5 块长 2 m 宽 2 m 的钢板层层焊接而成, 吊至 10 ~ 15 m 高后, 自由下落, 达到强夯加固地基的目的。

### 1.2 强夯压实黄土取样及基本性质试验

在该公路施工地段选取土样, 按照部颁标准进行

收稿日期: 2006-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572157, 40502028); 高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20050697013)

作者简介: 骆凤涛(1972—), 女, 云南个旧人, 西北大学博士生, 高级工程师, 从事公路工程、地质工程研究。

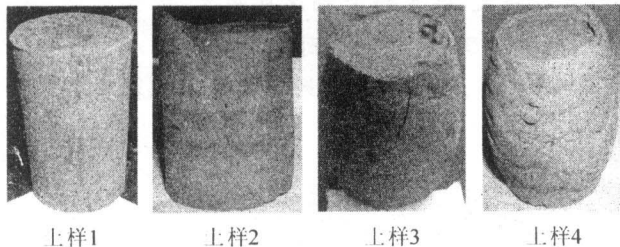
了土的颗粒分析、比重及液塑限等试验。试验结果表明,该土样属粉质黄土,按新规程定名为粉质黏土(见表 1)。

表 1 黄土物理性质试验结果

Tab. 1 Loess physical property test result

干容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	含水量/%	塑限/%	液限/%	塑性指数	孔隙比	内摩擦角/ $^\circ$	黏聚力/ $\text{kPa}$
16.1	13	16.7	26.9	10.2	0.62	27.0	101.8

现场地基在进行压路机碾压后,再经过单击能量为  $100 \text{ t} \cdot \text{m}$  连续 10 击的强夯后,平均下沉量为  $0.4 \text{ m}$ 。试验用原状土取自两个点,土样 1 为一取样点,土样 2,3,4 为另一取样点。沿深度的取样状况表明,随着深度的增加,干容重逐渐变小,亦即压实度逐渐降低。土样的基本性质试验表明其为粉粒含量很高的低液限黏土。该土体标准重型击实试验的最大干密度为  $19.27 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,最佳含水量为  $11.5\%$  (见表 2)。



土样1 土样2 土样3 土样4

图 1 现场取样照片

Fig. 1 Field sample picture

表 2 现场强夯压实黄土取样简表

Tab. 2 Sample condition table of field dynamic compaction loess

土样	深度 /cm	龄期 /d	夯击能量 / $\text{t} \cdot \text{m}$	含水量 /%	干容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	压实度 /%
土样 1	50	15	$10 \times 100$	19.7	16.36	87.0
土样 2	50	60	$10 \times 100$	12.9	18.06	96.1
土样 3	100	60	$10 \times 100$	11.3	16.32	87.0
土样 4	150	60	$10 \times 100$	12.9	15.80	84.3

### 1.3 夯实功能对击实黄土力学性质的影响及规律

为了进一步研究夯实功能对击实黄土力学性质的影响及规律,对原状土和强夯土分别进行了静三轴试验<sup>[4]</sup>。

根据试验结果,分别给出了不同围压下(50, 100, 200, 300, 400 kPa),现场原状土和强夯土的应力-应变曲线(见图 2,3)。

从试验结果可以看出:随着围压的增大,峰值应力增大;当围压较小时,两种土体均呈脆性破坏特征;随着围压不断地增大,土体由脆性破坏向塑性转化。

当法向应力增大时,各击实功下土样的强度呈明显增长趋势,击数越大,强度增长幅度也越大。由

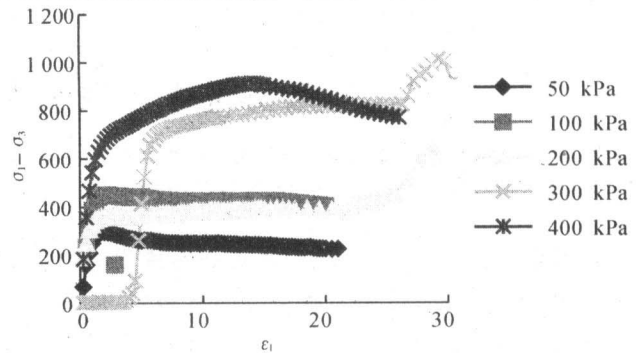


图 2 现场原状土应力-应变曲线

Fig. 2 Field undisturbed soil stress-strain curve

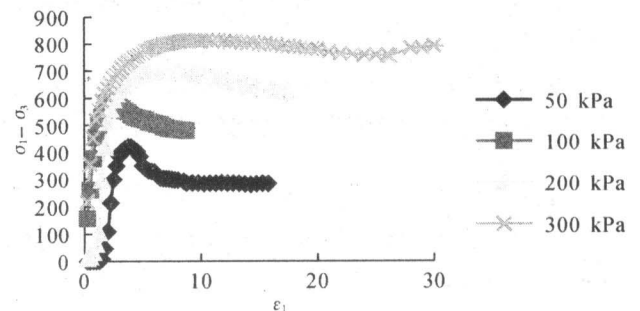


图 3 强夯土应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic compaction soil stress-strain curve

于空间的挤密,被水膜包裹的集粒将彼此靠拢,随着时间的推移,水分会缓缓地进入未被浸入的黏粒层间,使原先的黏粒表面水膜变薄,溶液浓度增高,部分盐晶随之析出并胶结周围的碎屑颗粒或刚性集粒,使击实土强度得到提高<sup>[5-7]</sup>。

继续增大锤击次数,虽然还能挤出一些空气,但这些空气却不能及时排出,且受到压缩的空气使土中的内应力增加,并导致产生裂缝。与此同时,土粒表面的部分结合水受到空气扰动形成自由水,粒间作用力有所降低,其结果使土抵抗外界荷载的能力降低。因此,5 击  $\times$  54 击土体的干容重大于 5 击  $\times$  27 击土体,但强度反而降低。随着年龄的增长,土粒间的联结增多,裂缝会逐渐闭合(即土的触变性),从而使强度得到恢复和提高。

现场原状土的抗剪强度包络线如图 4,强度指标  $C = 88.0 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 27^\circ$ ;强夯土的抗剪强度包络线如图 5,强度指标  $C = 101.87 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 27^\circ$ 。由图 4 和图 5 可以看出,同一龄期的土样,C 值随击实功变

化幅度较大,而  $\varphi$  值随击实功变化较小。

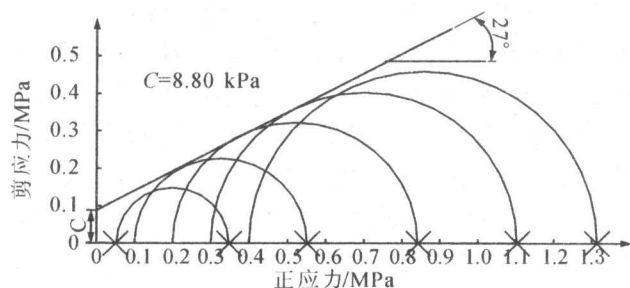


图4 原状土抗剪强度包络线

Fig. 4 Field undisturbed soil shear strength envelope curve

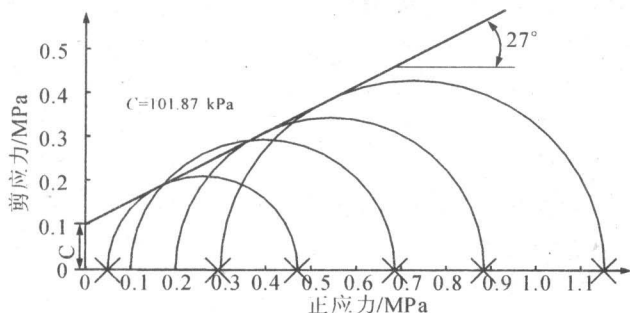


图5 强夯土抗剪强度包络线

Fig. 5 Dynamic compaction soil shear strength envelope curve

### 1.4 强夯压实黄土固结试验

对以上4个土样进行不饱水不固结试验,其  $e$ - $\lg p$  曲线见图6。

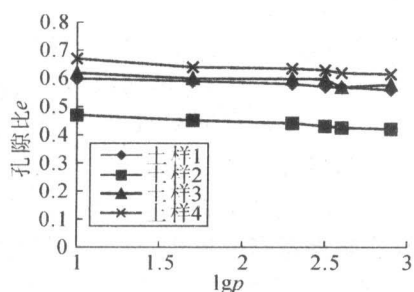


图6 现场强夯压实黄土固结试验结果

Fig. 6 The consolidation test of field dynamic compaction loess solidifies

饱水与不饱水试验结果见图7和图8。其中,饱水试验是指在施加第一级荷载后,立即向容器内注水,致使土样饱和而进行的压缩试验;不饱水试验是指试验过程中用湿棉纱围住上下透水面及四周,防止水分蒸发进行的试验。

从固结试验结果看,随着深度的增大,压缩模量基本呈减小趋势,即土体抵抗变形的能力逐渐减小。土体强夯压实与室内击实的压缩试验结果比较得出:强夯土的干容重小,压缩模量反而大。对这种现象可作如下分析:现场强夯土取样时已具有一定的

龄期,触变恢复正在进行,而击实土样则是制样后立即进行试验,一部分结构强度尚未恢复。我们知道,击实土的强度将随龄期而变化,且变化较大,可以推测其压缩性也将随龄期而变化。因此,新制备的击实土与有一定龄期的强夯土相比,在一定压力作用下,颗粒在空间的位置易于调整。

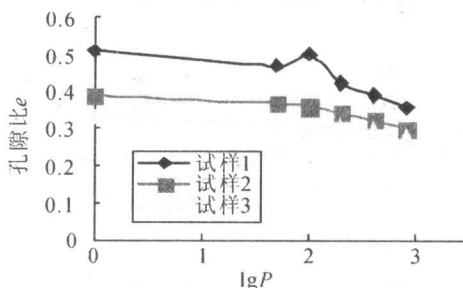


图7 不饱水固结试验的  $e$ - $\lg p$  曲线

Fig. 7 The  $e$ - $\lg p$  curve of unfull water consolidation test

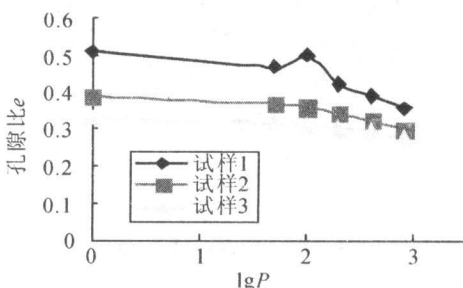


图8 饱水固结试验的  $e$ - $\lg p$  曲线

Fig. 8 The  $e$ - $\lg p$  curve of full water consolidation test

### 1.5 强夯压实黄土的湿陷试验

取龄期为60 d的50 cm深处强夯土土样,分3个加压等级50,100,200 kPa,观察其湿陷性(见表3)。结果表明,在50,100 kPa压力作用下,试件浸水后呈弱膨胀性;200 kPa压力作用下,试件呈现非常轻微的湿陷,远小于“规程”规定的1.5%的湿陷系数。

表3 强夯黄土的湿陷试验结果

Tab. 3 The dynamic compacted loess collapsibility test result

压力 $p$ /kPa	50	100	200
湿陷系数 $\delta_s$ /%	-0.57	-0.25	0.18

### 1.6 强夯压实黄土的强度试验

对土样进行固结快剪试验,应力-应变曲线见图9。强夯前后填土的静力触探比贯入阻力见图10和图11。

在夯后45天龄期,进行了静力触探试验。

从某一测点的静力触探结果看,夯后的锥尖阻力  $p_s$  明显增加,平均从2.51 kPa增加到11.98 kPa,且由于强夯土的时效性,估计其强度还会增加。

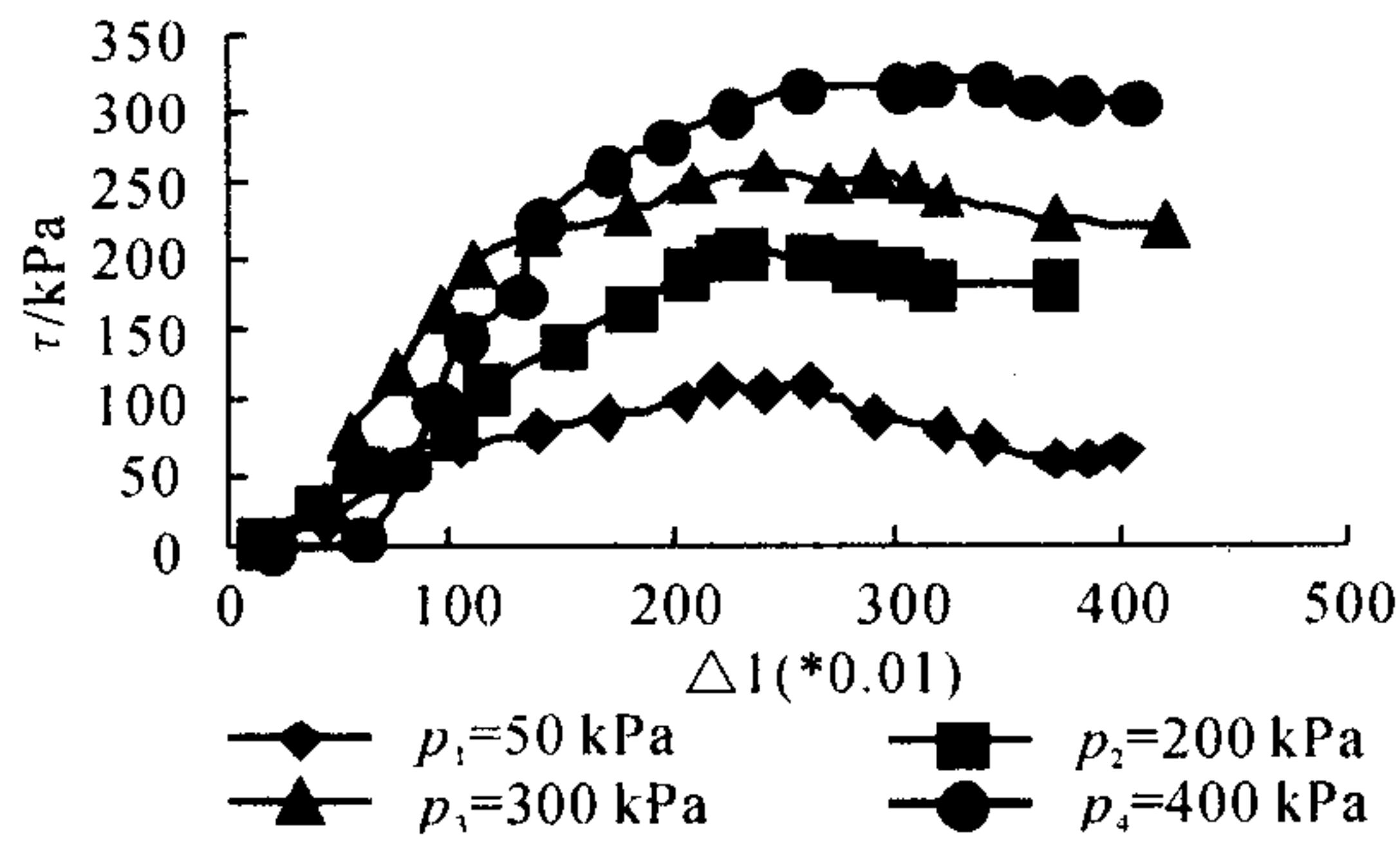


图 9 现场土样的应力-应变曲线  
Fig. 9 Field soil stress-strain curve

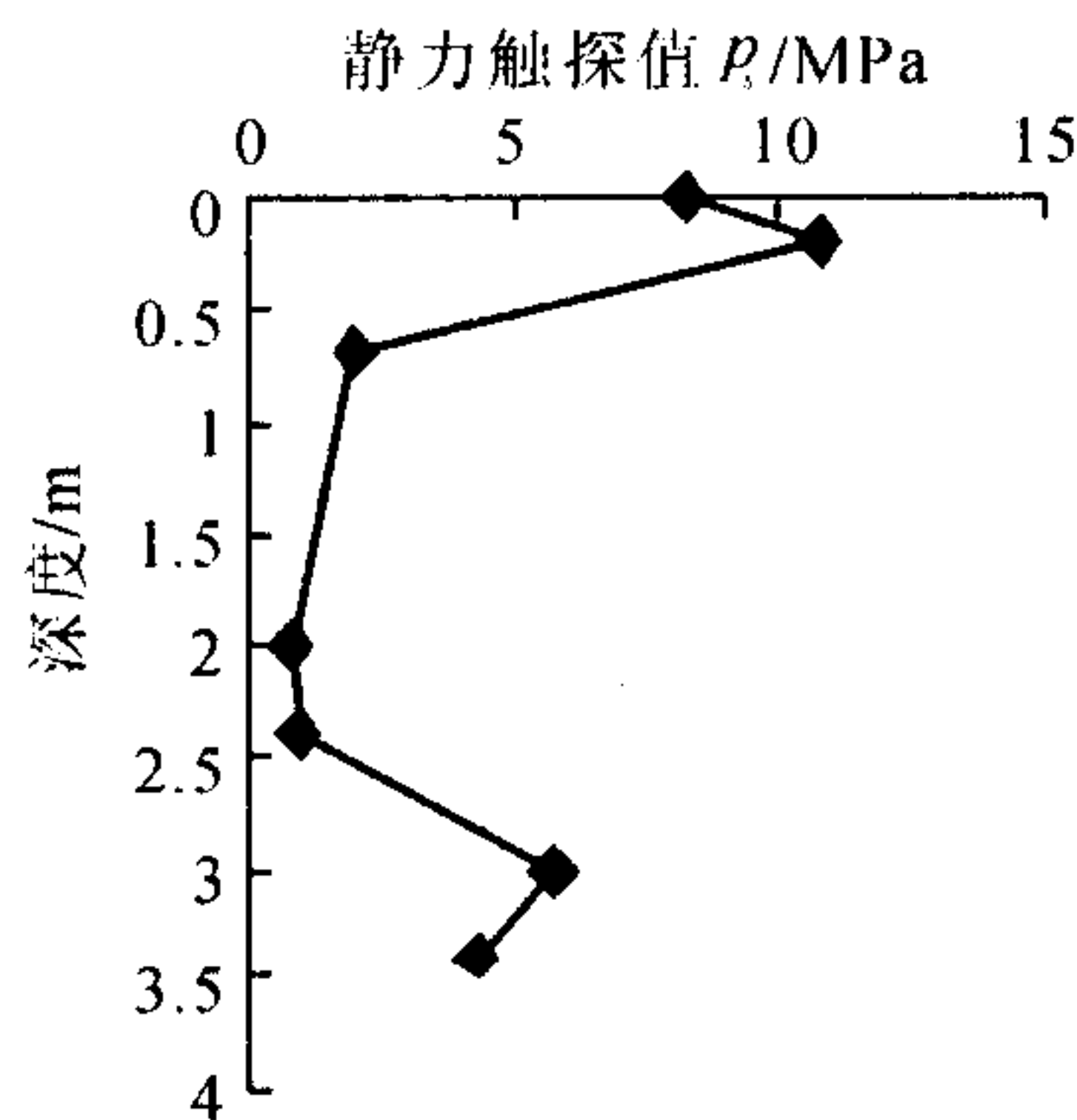


图 10 强夯前填土的静力触探比贯入阻力

Fig. 10 Fill static cone penetration test penetration-obstruction of before dynamic compaction

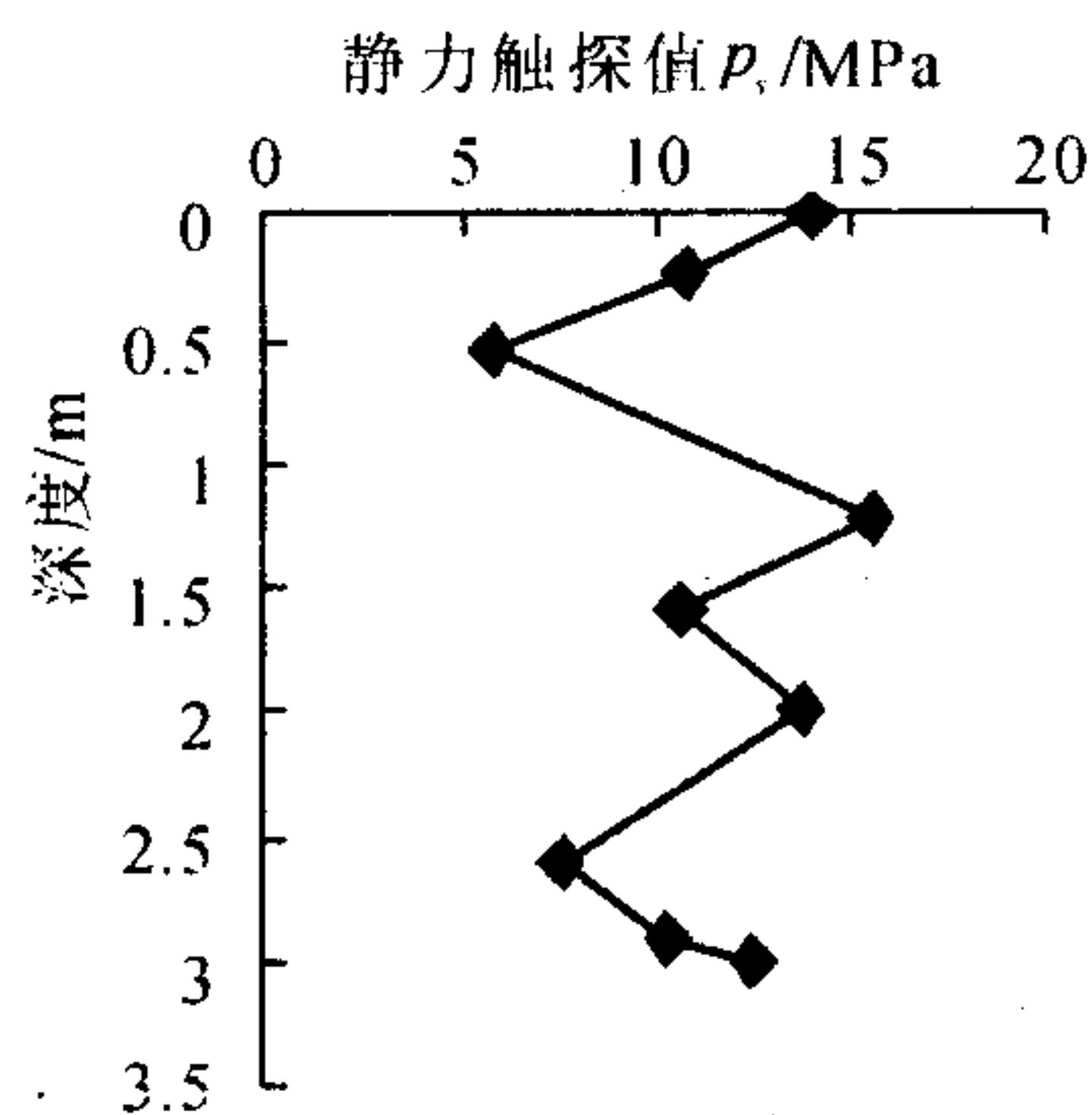


图 11 强夯后填土的静力触探比贯入阻力

Fig. 11 Fill static cone penetration test penetration-obstruction of after dynamic compaction

## 2 黄土强夯机理及与常规压实方法的比较

### 2.1 黄土强夯机理

通过上述试验及结果分析,对黄土地区公路地基及路基通过夯锤施加冲击能量,从而达到快速加固的机理作以下分析。

对黄土地基这种典型的非饱和土,其机理可从以下强夯法加固地基模式进行分析(见图 12)<sup>[8]</sup>。由于巨大的冲击力远超过地基土的极限强度,使土体产生冲击破坏,从而产生较大的瞬时沉降,锤底土形成土塞向下运动。因锤底下土体结构被破坏,致使土体软化,侧压力系数增大,侧压力也随之增大,土体不仅被竖向压密而且被侧向挤密。这一压实区就是图 12 中所示的 A 区,即土的破坏压实区( $\sigma > \sigma_f$ ),由于泊桑效应明显,因此水平向加固区宽度也大,为苹果形。在该区外为次压实区,土应力介于土的弹性极限  $\sigma_1$  与极限强度  $\sigma_f$  之间,即为图中的 B

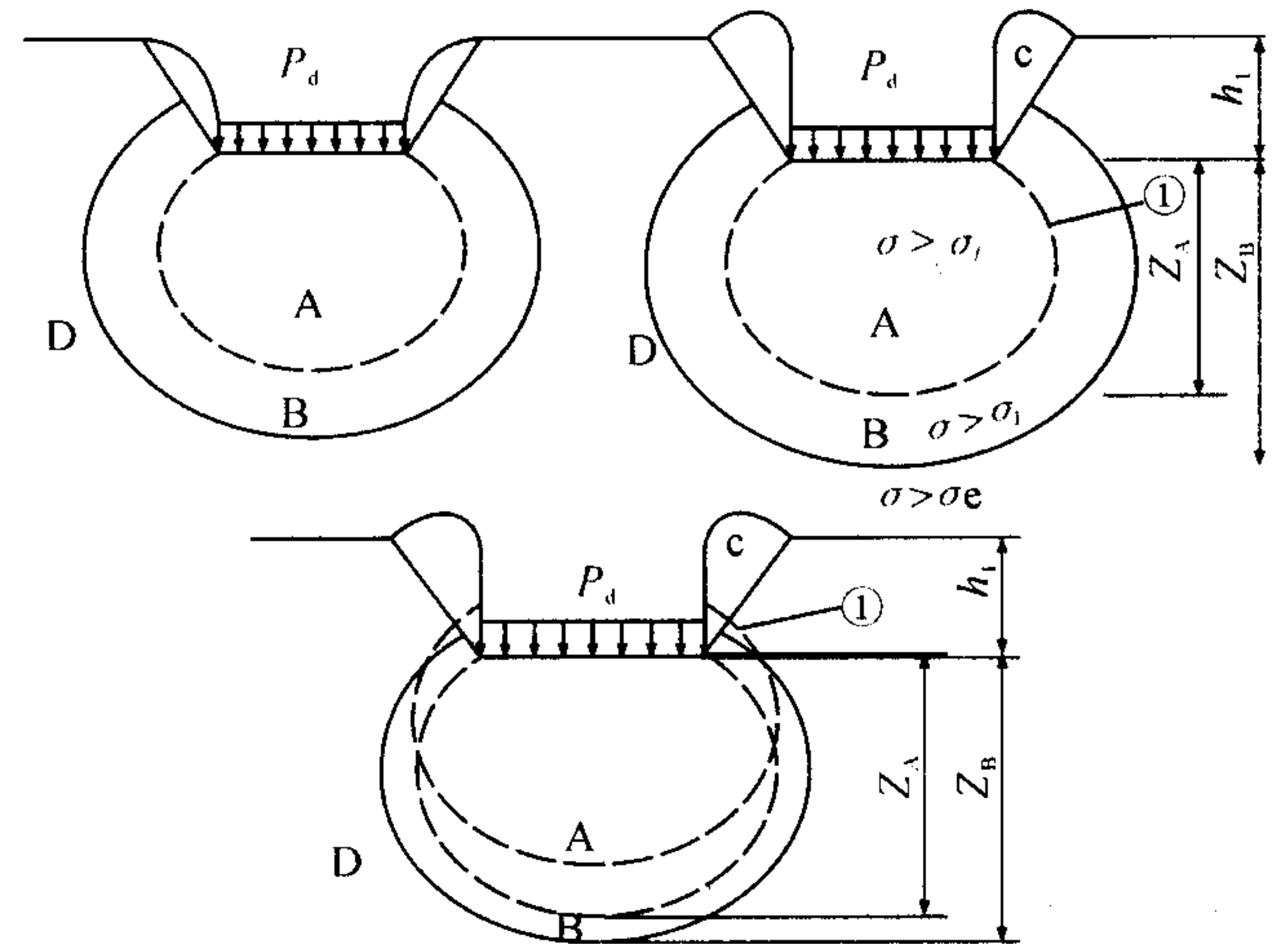


图 12 强夯地基加固模式图

Fig. 12 Dynamic compaction foundation reinforcement pattern char

区。该区土未被充分压实或未压实,与夯前比较,干密度有少量增长或不增长。由于动应力远大于后来土体的自重应力,坑底土在向侧向挤出时,坑侧区在侧向分力作用下将隆起,形成被动破坏区,即图中的 C 区。B 区外的 D 区,由于土动应力影响小,已不能破坏土结构,故不能再压密或挤密,但强夯引起的振动仍对这一区产生一定影响,在振动波作用下,土粒受剪产生错动,可使之振密。

### 2.2 强夯与常规压实的比较

2.2.1 加固原理不同 常规压实理论基本上都是关于压实土含水量的,较典型的有 Proctor 的毛细管湿润说,该理论指出,只有当土中水分达到最佳含水量时,颗粒表面的湿润作用使土体在压实时最易移动和滑动,从而得到某级外力作用下的最大干容重<sup>[9]</sup>。

黄土地基经强夯后瞬时产生数十 cm 沉降这一事实,说明其是可压缩的。根据动力固结理论可知,强夯对非饱和土的加固主要是在振动波作用下,土颗粒互相靠拢,排出孔隙中的气体,颗粒重新排列,土体在动荷作用下被挤密压实,强度提高,压缩性降低。

2.2.2 加固工艺不同 强夯法由于土中动应力的作用,使之压实深度大,并侧向挤出,其加固范围直径约为夯锤直径的2.5~4倍。强夯工艺要求分遍夯,每遍间隔一定时间,夯点间要求隔一定距离。常规压实中的重锤夯实法则不同,除本身单击能量小外,它采用的是一夯换一夯或一夯压半夯,每遍间也不间隔一定时间;碾压则采用表面压实机具一遍一遍地满压,也不设置时间间隔。

### 3 结 论

通过在山西省祁临高速公路北张沟高填方路段地基强夯处理的实施和现场试验及研究,得出如下结论。

1)随着夯击能量的增大,压缩模量显著增大,且饱水试件的压缩模量大于非饱水试件;同时,黏聚力 $C_{cq}$ 与内摩擦角 $\varphi_{cq}$ 随击实功在本试验中接近呈线性增长,回弹模量则提高更快,以接近3倍的速率增长。

2)各击实功下土样的强度随龄期基本呈增长趋势,击数越大,强度增长幅度也越大。击实功过大,会使试件的初期强度降低。

3)对标准击实试件,当压应力小于200 kPa时,抗剪强度随龄期变化幅度很小,大于300 kPa时,随龄期变化很明显。

4)在土体干容重相同的情况下对黄土填料现场强夯压实后,土体的压缩模量和强度指标较之室

内击实土体明显地大。

5)现场静力触探结果表明,强夯压实后黄土的强度有显著提高。

### 参考文献:

- [1] LSHIHARA K. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Soviet Tajik[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 73-89.
- [2] PRAKASH S, PURI V K. Liquefaction of loessial soils [J]. Proceeding of 3rd International Earthquake Microionation Conference, 1982, (1): 1 101-1 107.
- [3] 江正荣. 地基与基础施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 谢婉丽,王家鼎. 山西霍州北张沟高填方加筋黄土稳定性有限元分析[J]. 西北大学学报:自然科学网络版, 2003: 创刊号.
- [5] 陈希哲. 土力学与地基基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [6] 交通部第二公路勘察设计院. 路基[M]. 北京:人民交通出版社, 1996.
- [7] 潘文,阮永芬. 高填土路堤稳定性分析报告[M]. 北京:中国水力水电出版社, 2004.
- [8] 王家鼎,刘悦. 高速黄土滑坡蠕、滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报:自然科学版, 1999, 29(1): 79-82.
- [9] 中国振动工程学会及土动力学专业委员会. 土动力学工程应用实例与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.

(编辑 雷雁林)

## Mechanical properties analysis on Qilin Highway dynamic compaction loess

LUO Feng-tao<sup>1,2</sup>, WANG Jia-ding<sup>1</sup>, SONG Fei<sup>3</sup>, HE Hua<sup>4</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, State Key Laboratory of the Continental Dynamics, Xi'an 710069, China; 2. China Transportation Tong-Li Highway Survey of Design Engineering Company, Design studio, Xi'an 710075, China; 3. Shaanxi Provincial Research Institute of Communications, Design Studio, Tai'yuan 030006, China; 4. The First Survey & Design Institute of Railway, Supervision Company, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** **Aim** Provides the loess dynamics basis and the new technology for the loess region highway construction. **Methods** Take the high filled section of BEIZHANG ditch in qilin highway for instance, analysed from the loess structure feature and mechanical properties, and proved through experiment in the scene and the lab, syntactically compared similarities and differences between dynamic compaction and conventional compaction method. **Results** This method has the the rationality and the validity in loess ground reinforcement processing, along with compact energy increasing, the compression module remarkably increases; when striking number in a big way, the intensity growth scope is also bigger, but this may cause the test sample the initial period intensity reduce; When compaction effort is bigger than 300 kPa, is very obvious along with the age time change; the static sounding result indicates the loess intensity remarkable enhancement after the dynamic compaction. **Conclusion** Dynamic compaction was a simple and practical method that can effectively enhanced the loess ground and the subgrade strength, and guarantee security of the project.

**Key words:** loess; dynamic compaction; conventional compaction; mechanics property