

# 强夯法治理湿陷性黄土地基技术研究

尚佑平<sup>1</sup> 徐长有<sup>2</sup>

(1. 长庆石油勘探局筑路工程总公司, 陕西西安, 710086;

2. 宁夏银武高速公路工程建设指挥部, 宁夏银川, 750004)

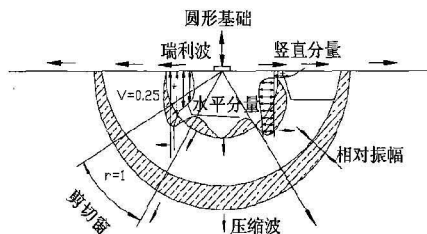
**摘要:** 本文通过对同心至固原段高速公路自重湿陷性黄土采用强夯方法, 消除黄土的湿陷性, 提高地基承载力, 根据施工的方法、试验数据、理论分析, 提出了强夯法治理湿陷性黄土地基的理论方法、施工方法及处理效果

**关键词:** 强夯 湿陷性黄土 地基 治理

强夯法又名动力固结法或动力压实法, 这种方法就是反复将重锤(一般为10000~40000kg)提升到高处使其自由落下(落距一般为10~40m)给地基以冲击和振动, 从而提高地基的强度和降低地基的压缩性。该法由于加固效果显著, 已在我国各类工业与民用建筑、机场跑道、铁路路堤、公路路基、码头堆场和填海等工程中得到广泛的应用。强夯法还具有节省材料、施工费用低、施工期短、施工设备简单、耗用劳动力少和施工文明等优点, 已成为我国目前最常用和最经济的地基处理方法, 并已取得显著的经济效益和社会效益。

## 1 强夯加固机理

强夯法处理地基是利用重锤自由落下产生的冲击荷载使地基密实, 这种冲击引起的振动在土中是以波的形式向地下传播的。这种波分为体波和面波两大类, 体波包括压缩波和剪切波, 面波包括瑞利波和乐夫波等。如果将地基视为弹性半空间体, 则夯锤自由下落过程, 就是夯锤的势能转化为动能的过程, 在夯锤接触地面的瞬间, 这部分动能除部分以声波的形式向四周传播, 一部分由于夯锤和土体摩擦而变成热能, 其余的大部分冲击动能则使土体产生振动, 并以压缩波(亦称纵波、P波)、剪切波(横波、S波)和瑞利波(表面波、R波)的波体系联合在地基内传播, 在地基中形成一个波场。离震源一定距离处的波场如图1所示:



夯锤在弹性半空间内的波场[引自Woods, 1968]

图1 强夯机理示意图

总的来说, 强夯地基效应的形成可以概括为三个方面: 第

一, 由于强夯过程中产生较大的夯沉量, 使地基的大部分沉降变形提前发生, 大大减少原地基的沉降变形; 第二, 强夯过程中产生的巨大夯击能和冲击波, 使浅部地基土得以密实, 力学性质得到较大改善, 大大提高土体强度; 强夯后, 随着孔隙水压力的消散, 地基土触变恢复, 土颗粒重新排列, 土体强度会有所增加, 同时土体压缩性也会再继续缓慢降低; 第三, 强夯过程中, 每击夯击能皆从地基浅部向深部逐渐衰减, 这样, 夯后地基浅部(一般为几米范围内)土颗粒得以密实, 土体物理力学性质得到较大改善, 形成强夯实区, 使土体浅部形成相对硬壳层, 而深部土体的物理力学性质一般不会有大的改变, 形成弱夯实区。因此, 强夯通常造成地基上硬下软的双层结构, 或者使地基本来具有的上硬下软的双层结构更加显著。

## 2 强夯治理湿陷性黄土地基的施工

### 2.1 工程概况

同心至固原高速公路自重湿陷性黄土路段为: K31+750-K32+490、K23+600-K23+905段。总长度为: 1.045km, 压实面积46033平方米, 占路线全长的3.73%。该段路基为路堤。为解决湿陷性黄土地基的隐患, 采用强夯法对湿陷性黄土用强夯法进行治疗, 目的在于消除湿陷性黄土地基的湿陷性。

### 2.2 强夯施工方案设计

强夯方案的设计是地基处理能否取得良好效果至关重要的一环。强夯效果是多种条件的综合效果。所以, 方案设计要根据地基处理的目的、工程地质条件, 合理地选择强夯能级、夯点间距、夯击数及施工工艺, 同时还要考虑锤形、锤重等因素。方案设计合理、施工工艺得当, 就能取得良好的技术效果, 相反则会事倍功半或徒劳无益, 甚至破坏地基, 所以合理的设计方案与恰当的施工工艺尚应通过现场试验确定。

2.2.1 强夯能级的选择: 强夯能级的选择依据地基处理的目的, 对于以消除湿陷为主要目的的强夯, 使用的能级取决于

预期消除湿陷的深度,要求消除湿陷的深度越深,使用的能级就越大,但目前使用的能级与消除湿陷的深度还没有较好的计算方法。

2.2.2 夯点的布置:夯点的布置通常采用正方形、三角形或梅花形,夯点间距根据强夯时侧向加密宽度线来确定。夯点布置合理、间距选择适当取得好的强夯效果和经济效益。强夯试验时采用梅花形布点,对1200kN·m能级的强夯,由于能量较小,所以夯点布置较密,进行施工时夯点间距为2.5米。

2.2.3 夯击次数:恰当地选用击数也是取得好效果的一个重要方面,要根据地层特点通过试验选择最佳击数。最佳击数常用最后二击或三击贯入度控制,其目的是使最后几击的夯沉量停留在一个小的变化范围,击数与夯沉曲线呈现平缓状态即可认为是最佳击数。最后两击贯入度之差按不大于5cm控制。

2.2.4 现场施工:现场强夯施工从2002年4月30日开始试夯,历时一个多月。由于开始强夯季节在春季,地基反潮,含水量较大,夯前在该场地测得场地内地基1~3米内得平均含水量在12%~13%,比用该场地内土击实得到的最佳含水量11.4.0%大1~2%,所以场地内没有再进行加水处理,仅对地表进行补水,然后直接进行强夯施工。

(1)进行场地整理:①清除:在坡脚范围内首先用推土机、平地机配合人工清除表土及杂草,对于植物较长的根系,安排专人用铁锹进行挖除,在全路段清表结束后,对于草根较多的区域,人工再次进行挖除,以使监理工程师满意。清除物运到指定地点废弃。②拆除:在公路用地范围内及其附近,影响施工的构造物、障碍物和设施,根据图纸及监理工程师要求进行拆除。③掘除:路基范围内的树墩、树根全部掘除并将坑填平夯实。

(2)施工放样:根据路基设计表,采用复核后的导线点、水准点,定出路基边桩,路堤坡脚桩、中桩、1/4断面桩的具体位置(每20m为一个断面,每断面测5点),并在距路中心一定的距离,易于保护位置处设置路线控制桩。

(3)试夯前原地0-200cm深度内的土分层检测(0-40cm、40-80cm、80-120cm、120-160cm、160-200cm)土的物理力学指标(天然含水量、干密度、最大干密度、孔隙比、湿陷系数、自重湿陷系数、渗透系数、液限、塑性指数、CBR值、地盘土压缩模量、颗粒分析)。

(4)根据测定地表0-120cm天然含水量,根据试验路段土质的最佳含水量,计算补充水量进行补水,采用提前围格注水或挖(钻)深2.0m孔注水使土基2.0m深度范围内含水量接近最佳含水量(误差 $\pm 2\%$ )以保证土基含水适中。

(5)拟采用的试夯区:先进行20m\*20m的试夯区布置,试夯区评价内容主要有:①通过试夯观察分析每夯点的沉降量、总沉降量。②确定和验证停锤控制标准。③观察夯锤边及周围地面隆起,临近夯坑侧挤及中心位移情况。

(6)每遍强夯后应有1-2d的停顿时间。

(7)夯实及碾压密实:原路基底面整平后,填方段坡脚以外3m范围内使基底150cm深度范围内达到90-95%压实度,强夯后使路基沉降量达到40-50cm。夯击标准按最后两击平均夯沉量不超过5cm控制。强夯后,用平地机整平、洒水,再用常规压路机碾压3遍,以使地表平整坚实。具体夯实遍数及强夯参数在施工阶段,根据试夯确定。

(8)过渡段设置:强夯实时在试验路两端各进行25m范围的过渡段施工,以保证试验段内夯实质量,在两过渡段内夯实强度按主夯点1000kN.m,副夯点800kN.m、满夯600kN.m控制,其他参数及布点形式同上。

### 3 强夯加固效果的理论分析及现场检验

强夯加固效果评价理论和方法是强夯理论研究中的核心,评价的类别可分为预测性评价和检测性评价。

#### 3.1 预测性评价的国内外的研究现状

强夯加固效果的预测性评价理论和方法研究起于L. Menard等,他们在其著名论文“Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation”中提出了估算加固深度的经验公式 $H_2 < Mh$ (H为加固深度m, M为锤重,以kg表示, h为落距,以m表示),并提出了确定土质改良程度的动力固结试验方法。随后众多学者开展了强夯加固效果预测性评价的研究,在研究方法上包括从室内外试验和工程实践建立经验公式的经验公式法,根据简化假设进行理论分析的简化理论分析法和基于较严格理论模型的数值分析法。

3.1.1 经验公式法:这方面的研究工作包括加固范围评价和加固程度评价两方面。

加固范围主要是指加固深度,关于加固深度名称上并未完全统一,类似的名称还有“影响深度”、“有效影响深度”、“有效加固深度”。

3.1.2 简化理论分析:简化理论分析法试图从基于解析的理论分析来建立强夯效果的预测性评价公式。主要用来评价加固深度。这类分析主要有两类:一类是由动力学原理、功能原理等理论或试验确定锤-土接触面上的应力,用弹性静力学公式来求解动应力的扩散,用附加应力达到某一临界值的深度来定义加固深度,称之为应力法。另一类是从冲击波及能量的传播和消耗规律来推导加固深度的计算公式,称之为能

量法。

### 3.2 强夯加固效果的理论分析

强夯施工时，重锤从高处落下时获得一定的初速度，当与地面接触后，速度从当初由动能转化为势能得到的初速度逐渐到零，这个过程的时间很短。

#### 3.2.1 采用质量-弹簧-阻尼器模型

根据夯后地基承载力确定地基在夯锤作用下只发生弹性变形的锤底动应力建立模型、计算锤底动应力。对于试验场地的地基，计算用参数见表1（单位均为国际单位制）：

$$F = (2 \cdot D_2 \cdot \lambda_2 \cdot v + \lambda_2^2 \cdot z) \cdot m$$

$$= (2 \times 0.21 \times 42.25 \times 14.34 + 42.25^2 \times 0.1) \times 100$$

$$= 43298$$

$$P_u = \alpha \cdot F/A = 0.04 \times 43298 \div 3.967 = 436 \text{ kPa}$$

$$P_a = P_u/K = 436 \div 1.75 = 249 \text{ kPa}$$

#### 3.2.2 用弹性静力学理论计算地基的附加应力

法国人J·布辛奈斯克最先给出了弹性半空间表面作用一个集中应力时弹性半空间内任一点的应力和位移。在计算强夯时夯锤产生的动应力在地基内的分布时，可视为在弹性地基上分布的半径为r的圆形均布荷载p0，求解时可将J·布辛奈斯克关于集中应力下任一点的附加应力在圆形面积上进行积分，求得关于圆形均布荷载下弹性地基内任一点附加应力的解，也可以在《建筑地基基础设计规范》中查表求得在圆形均布应力下地基内任一点附加应力系数。

表1 理论计算参数表

参数名称	D <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	A	K <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	V	Z	M	λ <sub>2</sub>
参数值	0.21	45000	3.967	99175	0.496	14.34	0.1	100	42.25

表2 夯前地基内探井土样试验数据表

深度 (m)	含水量 (%)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	空隙比 (%)	孔隙率	饱和度 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数 (%)	液性指数	压缩系数 (MPa <sup>-1</sup> )	压缩模量 (MPa)	湿陷系数	自重湿陷系数	湿陷起始压力 (kPa)
1.5	11.4	1.45	1.302	2.71	1.081	0.520	28.6	35.5	18.3	17.3	-0.399	0.08	14.0	0.088	0.031	48
2.6	14.8	1.36	1.185	2.72	1.295	0.564	31.1	42.6	21.0	21.7	-0.286	0.15	14.9	0.084	0.038	66
3.4	13.2	1.62	1.431	2.71	0.894	0.472	40.0	28.0	18.0	10.1	-0.475	0.22	8.7	0.054	0.012	74
4.5	18.6	1.81	1.526	2.71	0.776	0.437	65.0	30.4	19.2	11.2	-0.054	0.19	8.6	0.017		
5.6	18.3	1.97	1.665	2.71	0.628	0.386	79.0	29.9	18.7	11.3	-0.035	0.16	9.8			
6.7	18.5	1.96	1.654	2.71	0.638	0.390	78.5	30.8	19.4	11.5	-0.078	0.22	7.4			
7.8	19.2	1.67	1.401	2.72	0.941	0.485	55.5	39.0	19.8	19.3	-0.031	0.32	6.3			
8.5	21.2	1.94	1.6	2.71	0.694	0.410	82.8	35.1	18.5	16.7	0.162	0.18	9.1			

### 3.2.3 强夯后地基干密度的检测

夯前在地基内挖一探井，进行各项指标的检验，检验结果如表2所示。

夯后在原探井附近进行钻孔检测，检测夯后不同深度的干密度指标，其结果如表3所示。

将夯前和夯后的干密度值进行比较，得到如图2所示的曲线：

比较在同一深度的干密度变化曲线，可以看出，在强夯后地面3.5m以内，地基土的干密度有显著的提高，干密度经治理后大于1.5g/cm<sup>3</sup>，达到了预计的指标，即消除了湿陷性黄土地基的湿陷性，但在强夯后地基深度等于4m处，取样的干密度小于1.5 g/cm<sup>3</sup>，在4.5m处，取样的干密度大于1.5 g/cm<sup>3</sup>，为考虑一定的安全系数，将强夯的有效加固范围确定为3.5m。这一有效治理范围与理论计算的基本吻合，说明理论计算用来判断强夯加固湿陷性黄土地基的有效范围是可行的。

### 3.2.4 关于加固效果的讨论

(1)如何确定判断加固深度的起始面。这次加固深度理论计算的起始面是强夯结束后的地基表面，没有考虑夯沉量的影响，得到强夯的有效治理范围h1为3.5m（实测）；在本次施工中，如果考虑夯沉量h2（0.41m）的影响，即以原地面作为判断有效治理深度的起始面，强夯的有效加固范围应该是h1加上，h2，即为3.9m；在实际工程中，宜采用强夯结束后的地基表面作为确定强夯有效加固范围的基准面，即只采用

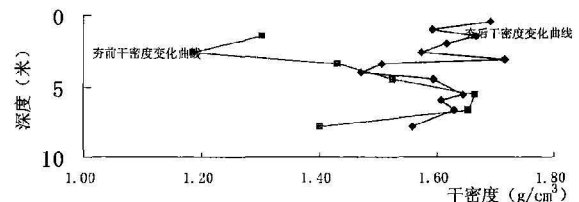


图2 强夯前后地基干密度的变化示意图

表3 夯后地基内土样试验数据汇总表

深度 (m)	天然含水量 (%)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	空隙比 (%)	孔隙率	饱和度 (%)
0.5	16.5	1.97	1.691	2.71	0.603	0.376	74.2
1	17.6	1.87	1.592	2.71	0.702	0.413	67.92
1.5	15.2	1.92	1.667	2.71	0.626	0.385	65.84
2	16.9	1.89	1.617	2.71	0.676	0.403	67.76
2.6	15.7	1.82	1.573	2.72	0.729	0.422	58.56
3.1	17.2	2.01	1.715	2.71	0.58	0.367	80.34
3.4	18.1	1.78	1.507	2.71	0.798	0.444	61.45
4	16.2	1.71	1.471	2.71	0.842	0.457	52.12
4.5	19.2	1.9	1.594	2.71	0.7	0.412	74.32
5.6	19.2	1.96	1.644	2.71	0.648	0.393	80.24
6	21.3	1.95	1.607	2.71	0.686	0.407	84.1
6.7	17.8	1.92	1.63	2.71	0.663	0.399	72.8
7.8	20.6	1.88	1.559	2.72	0.745	0.427	75.24

强夯后的有效加固范围作为强夯施工的检验结果,这样得到的有效加固范围可以直接描述加固后地基上建筑物的地基环境,避免以为夯沉量的影响给建筑物的正常使用带来隐患。

(2)治理效果的讨论。这次强夯施工的治理范围为3.5m,按原来的勘测结果,考虑到强夯施工过程中的夯沉量,基本上已经消除了强夯治理范围内湿陷性黄土地基的湿陷性。但是有效加固范围比规范给出的经验值要偏小。

(3)理论计算结果讨论:

第一,从计算结果的回归关系式的相关系数来看,理论计算得到夯后地基承载力和有效加固范围与夯锤得底面积有良好的对数关系;

第二,在一定范围内,用相同的夯击能治理湿陷性黄土地基时,采用底面积较大的重锤有效加固深度好于底面积小的重锤,这与近年来国内外的诸多试验结论相符合;第三,强夯后地基承载力的增长值可以认为能够反映地基加固程度,地基承载力增长值越大,可以认为强夯后地基被加固的程度越大,相应的强夯能量中用于提高地基加固程度的能量就越多。

由此可见,理论计算的结果基本符合可观实际,说明当夯击能一定时,在一定范围内随着强夯夯锤底面积的增加,强夯加固的有效范围增加,加固的程度降低。

#### 4 结论

(1)通过对强夯现场不同深度的干密度检测,确定了强夯

的有效治理深度为从夯后的地基顶面算起为3.5m,考虑现场实测夯沉量 $h_2$ (0.69m)的影响,即以原地面作为判断有效治理深度的起始面,强夯的有效加固范围应该4.19m,根据地基勘测的结果,场地内的地基的湿陷性基本全部消除,达到了治理的目的。

(2)运用夯后地基的承载力,将质量-弹簧-阻尼器模型与均布圆形荷载下弹性空间内静应力的分布联系起来,从理论角度计算得到强夯加固的有效治理范围为3.6m,计算结果与实测数据很接近,说明这一理论计算结果有一定的实用价值。

(3)理论计算了夯锤底面积对强夯治理湿陷性黄土有效加固范围(加固深度)和加固后地基承载力(加固程度)的影响,结果表明在其他参数的不变的前提下,夯锤的底面积与强夯的加固范围和加固后的地基承载力有良好的对数关系;在一定范围内,强夯的有效加固深度随着夯锤底面积的增加而增加,强夯的加固后地基承载力的提高随夯锤底面积的增加而减小。并且计算结果符合能量守恒定律。

参考文献:

- 1 钱鸿晋,王继堂,罗宇生等,湿陷性黄土地基[M],中国建筑出版社,1985.
- 2 湿陷性黄土地区建筑规范(GBJ 25-90)[M],中国计划出版社,1991.
- 3 裴章劲,刘卫东,湿陷性黄土地基治理[M],中国铁道出版社,1992.
- 4 高国瑞,黄土湿陷变形的结构理论[J],岩土工程学报,1990(7) 4, 1-10.