

湿陷性黄土的强夯震动观测

林 学 文

(兰州地震研究所)

一、前 言

利用 5—40 吨的重锤从 10—40 米高空自由下落的冲力, 对软弱地基进行强夯处理以达到加固的作用, 是国外在六十年代末期开始采用的方法。这种方法的优点在于简便易行, 成本低, 效率高, 效果好。我国在这方面也取得了一定的经验, 但在处理湿陷性黄土方面, 尚缺乏经验。尤其像兰州这样地处西北黄土高原、位于黄河谷地的老城, 在城中使用强夯法时对附近的各种建筑物是否可能造成直接破坏或影响、其破坏与影响的程度和范围有多大、有无预防措施等, 都需要从实验中摸索。这就是本文所述强夯震动观测的目的。

二、观测条件及仪器

1. 观测场地

兰州市区位于黄河谷地的 I 级阶地上。选作强夯实验观测的兰州站三工段和西站机务段, 分别在老狼沟和黄峪沟沟口前古洪积扇后缘和中部的 I 级阶地的后缘。在西站机务段, 地表向下 0.5 米左右为角砾状人工填土, 其下为黄土质砂粘土和卵石土层, 在此东南 350 米处有一深为 172.25 米的钻孔, 仍未见基岩, 说明覆盖层比较厚。兰州站三工段处, 表层为薄层杂填土, 其下 14 米为淡黄色砂粘土层夹层次清晰的棕红色洪积层, 半干硬至硬, 具大孔隙, 14 米以下为软塑性 II—III 级自重湿陷性黄土。在此处西北 350 米的兰州车站的东端, 有一个深 19.6 米的钻孔, 在孔深 18.5 米处见粉红色第三系砂岩 (详见图 1)。

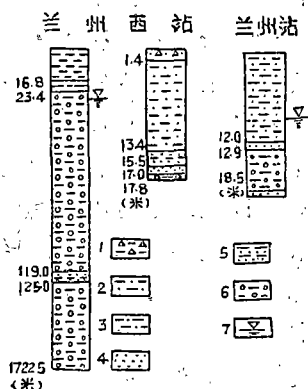


图 1 钻孔柱状图

1 人工角砾土, 2 黄土状砂粘土, 3 黄土状砂土, 4 粉土质土及粉砂, 5 砂粘土, 6 卵石土, 7 地下水位, 8 黄土

2. 实验及观测条件

强夯的夯锤重 10 吨, 锤底面积为 2×2 米²; 落锤高程在东站和西站分别为 10 米、15 米; 使用 “W—100” 型履带吊车和 “KC—3561” 型起重机并配用推土机, 采用自动脱钩器使重锤成自由落体状落地。

强夯实验是在白天正常条件下进行的。观测时使用的位移记录是“SC-16”型光线记录示波器, 配用“701-5”型放大器和“701”型拾震器; 加速度记录仪有两种, 一种是“RZS-2”型工程强震仪, 另一种是“SC-16”型光线记录示波器配用“RZS1-66”型拾震器。各测点拾震器和仪器参数, 见表 I。

表 I-1 位移记录仪器参数

“701” 拾震器	自振周期(秒)	0.85 ± 0.02
	频率范围(赫兹)	$1-20 < \pm 10\%$
	最大被测位移(毫米)	± 0.6
振子 (Fc6-400)	工作范围(赫兹)	0-200
	灵敏度(毫米/毫安)	72×10^{-4}
	线性最大振幅(毫米)	$\pm 100 \pm 3\%$
	阻尼系数	0.7 ± 0.1
“701-5” 放大器	位移 I 电压增益(赫兹)	$\geq 620(10)$
	位移 I 幅频特性(赫兹)	$10-100$ 下降 $\leq 5\%$

表 I-2 RZS-2 型工程强震仪参数

拾震器	自振频率(赫兹)	水平向 -5.3 ± 0.5 垂直向 -6.2 ± 0.5
	机电耦合系数(伏·秒/米)	水平向: ≥ 36 垂直向: ≥ 36
振子 (Fc6-2)	自振频率(赫兹)	120
	工作范围(赫兹)	60
	灵敏度(毫米/毫安)	900
	阻尼(欧姆)	内阻: 56 ± 10 外阻: $(D=0.6-0.7) 180 \pm 5$
整机	通频带(赫兹)	$1-15(\pm 1\%)$
	灵敏度(毫米/伽)	0.02-0.2

表 I-3 加速度记录仪器参数

“RZS1-66” 拾震器	自振频率(赫兹)	4.0-4.5
	机电耦合系数(伏·秒/米)	≥ 57
	阻尼常数	10-12
振子 (Fc6-400)	工作范围(赫兹)	0-200
	灵敏度(毫米/毫安)	72×10^{-4}
	线性最大振幅(毫米)	$\pm 100 \pm 3\%$
	阻尼系数	0.7 ± 0.1
整机	线性频段(赫兹)	6-35
	量程(伽)	30-1600
	时标误差	$< \pm 2.5\%$

•: 振动台低频段有误。6 赫以下误差较大故舍弃。

三、观测结果

在数据处理中, 均取各次记录的位移和加速度最大幅值的二分之一作为特征值加以研究。综合分析兰州站和西站两地的位移和加速度记录的结果, 可以得出:

1. 随着夯次增加, 锤基逐渐被夯实, 耗在土壤压密作用的冲击能不断减少, 而转化为波动的能量却相继增加, 因此无论位移或加速度的幅值, 均随夯次增加而增大, 其中尤以加速度幅值的增加更为显著, 如图 2。

2. 随着夯距(即相对于夯锤落点距离)的增加, 位移和加速度幅值均迅速降低, 特别是在 20 米范围内衰减非常快。对位移来

说, 水平径向较垂直向的衰减更快。例如在西站, 距夯点 20 米处和 5 米处的位移幅值相比, 垂直向降低了二至四倍, 而水平径向则降低了六至七倍; 在距夯点 15 米处加速度的水平径向与垂直向幅值均降低了三倍左右(图 3 表 II)。在同一测点上的加速度, 垂直向大于水平向; 在距夯点 15 米以内位移的水平向大于垂直向, 了解这一点对预防强夯时的破坏或影响可能是很重要的。

3. 对强夯震动的位移和加速度来说, 减震沟均可起到一定的减震作用, 而且减震沟对水

平径向的减震作用远大于垂直向,即对降低水平径向的位移和加速度幅值效果更为显著,见表Ⅱ、Ⅳ及图4。

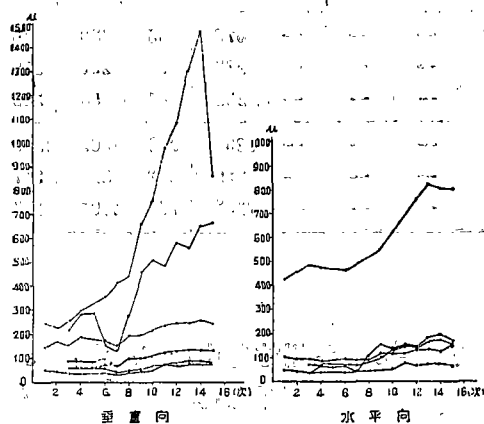


图2—1 位移幅值随夯次的变化

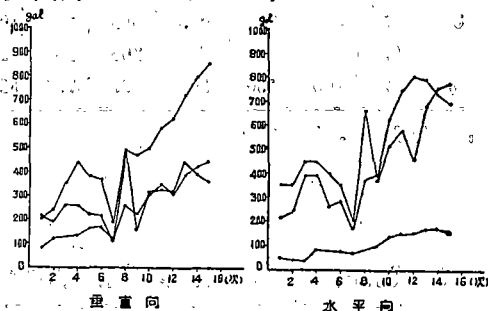


图2—2 加速度幅值随夯次的变化

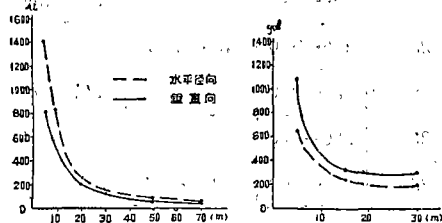


图3 位移加速度幅值随距离的衰减

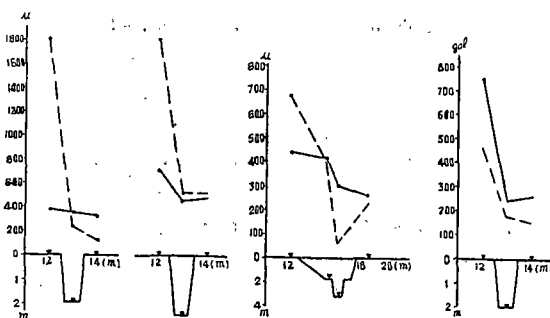


图4 减震沟对位移和加速度的衰减作用

表Ⅱ—1

位移值随夯次与夯距变化观测数据

观测方向	距夯边(m)	各夯观测值(μ)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
水平径向	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	424	454	485	480	—	465	720	—	550	985*	—	760	820	805	800
	20	—	—	72	68	65	69	47	110	78	135	154	148	184	196	170
	30	50	39	37	79	—	73	71	—	101	140	149	139	170	174	154
	50	104	98	96	86	—	98	93	93	120	118	120	137	135	129	154
	70	—	—	34	34	34	40	39	—	—	52	79	69	77	77	65
垂直向	5	246	224	256	307	—	355	420	440	660	764	976	1080	1304	1464	856
	10	—	—	217	282	287	156	133	276	462	511	483	583	556	656	667
	20	147	163	153	159	—	172	152	195	200	219	235	242	247	259	242
	30	—	—	86	86	84	92	66	100	100	111	118	126	132	131	129
	50	—	—	59	57	57	57	39	48	52	71	75	82	86	86	86
	70	48	42	39	36	—	39	37	43	47	50	53	63	65	70	71

注：*因地形变拾震器失灵，**拾震器漂移，数据仅供参考。

表Ⅰ—2 加速度值随夯次与夯距变化观测数据

观测方向	距夯边(m)	各夯观测值(gal)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
水平径向	5	199	356	473	617	646	709	693	662	—	—	—	677	665	630	646
	15	118	123	123	150	164	214	205	227	—	—	—	275	278	250	280
	30	56	118	179	196	203	216	221	221	—	—	—	252	244	254	242
垂直向	5	205	546	750	955	1005	1074	1075	1125	—	—	—	1282	1279	1262	1248
	15	99	184	254	286	300	286	297	317	—	—	—	329	332	311	327
	30	47	160	236	293	307	472°	625°	485°	—	—	—	713°	825°	439°	721°

注：• 纪录出格，仅供参考。

表Ⅱ—2 兰州站自由场与减震沟位移量对比

表Ⅱ—1 西站自由场与减震沟位移量对比

观测方向	至夯边距离(m)	自由场地(μ)	减震沟(μ)	
			深：2.0米	深：2.5米
垂直向	14	140—500	295—325	325—350
	24	120—210	—	—
水平径向	14	300—630	80—140	85—465
	24	50—190	50—130	50—130

观测方向	至夯边距离(m)	自由场地(μ)	减震沟(μ)	
			深：1.7m	深：3.2m
垂直向	18	200—370		250—270
	22	250—270		230—240
	25	180—260	180—235	
水平向	18	180—340		205—240
	22	220—350		100—110
	25	100—160	120—220	

表Ⅲ—3 西站自由场地与减震沟加速度量对比

观测方向	自由场地(gal)	减震沟(gal)
垂直向	370—460	110—340
水平径向	220—360	120—215

注：均在距夯边14米处。

4. 根据强夯时地面运动位移求得的兰州站和西站两地的地面运动周期、纵波速度及波长均列于表Ⅴ。用对应于地面运动位移最大值的周期，求得的兰州站和西站两地强夯震动时地面运动的平均周期均为0.12秒。虽然两地的平均周期相同，但地面运动的波速相差比较大。其原因在于兰州站观测点距老狼沟沟口较近，土质坚硬，土的力学性质比较好，而西站机务段处位于黄峪沟冲积扇的中部，土的力学性质较差（表Ⅶ）。所以兰州站纵波速度比较大完全是由场地条件决定的。波长是根据强夯震动时纵波速度与其频率之比求得的，西站为43米，东站为80米。

5. 东站与西站减震沟的尺度如表Ⅶ。由实验观测结果来看，除深1.7米的减震沟外，均收到显著的减震效果。因此，可用设减震沟的方法降低强夯时地面运动的位移和加速度幅

值，以减轻或防止对邻近建筑、构筑物的破坏或影响，但减震沟的深度不能低于2.0米；长度应超过建筑、构筑物边缘5米以上。

表 IV—1

减震沟对位移的衰减作用观测数据

测点位置	观测方向	各 夯 观 测 值 (μ)														
		1	2	8	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
距夯边12.0米 前沟沿	水平径向	233	364	505	818	700	1718	1955	2091	2136	2091	2209	2264	1846	1555	1546
	垂直向	—	198	260	288	300	336	352	364	368	380	376	376	380	380	384
深2.0米 沟底	水平径向	84	135	160	200	212	210	232	244	240	258	264	260	252	256	248
	垂直向	—	244	279	307	350	333	333	356	356	389	361	356	356	339	356
距夯边14.0米 后沟沿	水平径向	89	80	95	124	126	104	115	121	113	130	135	135	128	140	140
	垂直向	—	565	724	794	—	294	294	312	318	324	318	306	306	294	300
深2.5米 沟底	水平径向	91	128	159	204	249	215	236	241	241	261	266	259	254	257	267
	垂直向	—	416	253	475	507	502	507	526	527	336	336	327	323	318	318
距夯边14.0米 后沟沿	水平径向	83	108	142	194	358	—	466	456	234	259	272	264	358	278	282
	垂直向	—	657°	907°	921°	843°	327	329	333	336	350	347	346	336	343	336

注：1. • 数据仅供参考。2. 前沟沿测点为两种深度减震沟共同测点。

表 IV—2

减震沟对加速度的衰减作用观测数据

测点位置	观测方向	各 夯 观 测 值 (gal)														
		1	2	8	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
距夯边12.0米 前沟沿	水平径向	66	199	367	435	367	475	422	465	482	467	468	482	493	493	560
	垂直向	136	191	379	586	690	726	767	786	852	—	—	—	—	—	—
深2.0米 沟底	水平径向	60	86	150	120	198	163	166	182	227	184	178	246	262	268	225
	垂直向	91	128	176	176	189	216	230	230	243	243	250	248	257	257	280
距夯边14.0米 后沟沿	水平径向	59	98	121	147	200	103	153	145	153	139	158	189	210	212	242
	垂直向	89	183	194	157	180	189	236	256	330	241	266	296	341	347	330
距夯心12.0米 前沟沿	水平径向	—	523	570	614	636	682	770	726	750	795	—	—	—	—	—
	垂直向	—	260	360	400	420	440	440	440	440	440	—	—	—	—	—
深3.2米 沟底	水平径向	—	40	60	75	60	60	60	60	75	75	—	—	—	—	—
	垂直向	—	272	294	294	294	324	324	294	294	294	—	—	—	—	—
距夯心14.0米 后沟沿	水平径向	—	204	219	216	240	216	240	216	240	240	—	—	—	—	—
	垂直向	—	—	182	250	250	250	272	250	250	272	—	—	—	—	—

表 V

由位移记录求得的 T 、 V_p 、 λ 值

记 录	西 站			东 站		
物 理 量	T (Sec)	VP (m/sec)	λ (m)	T (Sec)	VP (m/sec)	λ (m)
位 移	0.120	360	43	0.120	670	80

表 VI

东站与西站土样试验数据对比

编 号	东 站 三 工 段										西 站 机 务 段					
	取样深度(米)	干容重 $r(g/cm^2)$	天然孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2}	压缩模量 $ES(kg/cm^2)$	湿陷系数 σ_{sh}	干容重 $r(g/cm^2)$	天然孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2}	压缩模量 $ES(kg/cm^2)$	湿陷系数 σ_{sh}	干容重 $r(g/cm^2)$	天然孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2}	压缩模量 $ES(kg/cm^2)$	湿陷系数 σ_{sh}
1	2.0—2.2	1.37 1.50	1.435	0.927 0.789	0.8805	0.028 0.023	0.0255	69.4 76.7	73.05	0.064 0.009	0.0365	1.27	1.140	0.075	27.9	0.069
2	3.0—3.2	1.31 1.54	1.425	1.057 0.809	0.9330	0.054 0.050	0.052	37.2 35.3	36.25	0.089 0.046	0.0675					
3	4.0—4.2	1.34 1.41	1.375	1.004 0.918	0.9610	0.039 0.061	0.040	50.5 30.8	40.65	0.093 0.065	0.079	1.29	1.086	0.037	55.7	0.079
4	5.0—5.2	1.52 1.55	1.535	0.782 0.738	0.760	0.016 0.008	0.012	109.9 214.5	162.2	— 0.001						
5	6.0—6.2	1.39 1.46	1.425	0.942 0.873	0.9075	0.023 0.059	0.041	83.0 31.0	57.0	0.074 0.048	0.061	1.41	0.915	0.020	94.0	0.023
6	7.0—7.2	1.40 1.46	1.430	0.924 0.852	0.888	0.016 0.048	0.032	110.1 37.6	73.85	0.042 0.042	0.042					
7	8.0—8.2	1.43 1.60	1.515	0.876 0.689	0.7825	0.018 0.014	0.016	102.5 119.3	110.9	0.032 0.002	0.017	1.31	1.057	0.039	51.2	0.041
8	9.0—9.2	1.53		0.767		0.014		124.1		0.001						
9	10.5—10.7	1.51		0.784		0.041		41.8		0.004		1.39	0.945	0.012	160.0	0.003
10	11.0—11.2	1.47		1.78		0.041		44.0		0.017		1.34	1.015	0.013	153.2	0.005
11	13.0—13.2	1.41		1.67		0.035		53.7		0.021						
12	15.0—15.2	1.56		1.98		0.030		54.9		0.001						

* 该资料来源于铁道部第一勘测设计院

表 VII

减震沟尺度与效果

位 置	序 号	长 (m)	宽 (m)		深 (m)	效 果
			顶	底		
东 站	1	40	1.5	0.6	1.7	无
	2	20	5.0	0.5	3.2	明显
西 站	1	10	0.9	0.6	2.0°	明显
	2	10	0.9	0.6	2.5°	明显

* 为同一减震沟, 以中间为界两段深度不同。

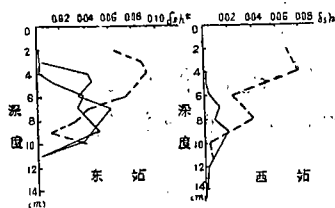


图5 强夯前后相对湿陷系数的变化

····· 夯前 ——— 夯后
• σ_{sh} 为 2 kg/cm^2 时

6. 经强夯处理后湿陷性黄土的几个主要力学性质指标的变化都比较明显。由图5可以看出, 对黄土的湿陷性来说, 深度在3—5米内基本上可以消除, 而深度在4—9米内有明显的降低作用。由图6可以看出强夯法能够大大降低湿陷性黄土的天然孔隙比及压缩系数, 提高压缩模量, 其深度在5—9米范围内效果尤为显著, 同时也说明对不同性质土的效果也不相同。图7反映出沉陷量随夯次增加而逐渐减小, 可明显地看出在六夯前沉陷量较大, 其后在一个较小的范围内波动, 并渐趋稳定。因此可以说强夯法处理湿陷性黄土地基的效果比较好, 有效深度一般可达3—5米, 影响深度可达4—9米。

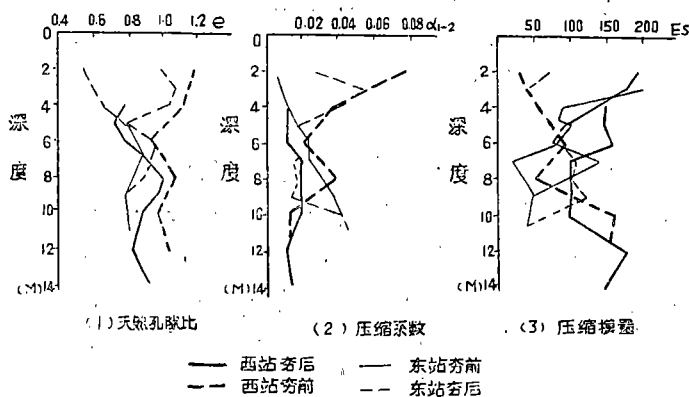


图6 湿陷性黄土强夯前后对比

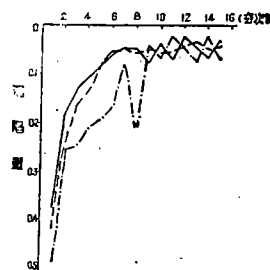


图7 沉陷量随夯次的变化

四、结 论

1. 湿陷性黄土强夯震动的位移和加速度幅值随夯次而增大、但随夯距的增加而迅速衰减, 位移的水平径向衰减更为迅速; 同一测点的加速度和位移的衰减特征也不相同。
2. 当减震沟的深度大于2.0米、长度超过建筑、构筑物边缘5米以上时, 对降低强夯震动的效果良好, 尤以水平径向更为明显, 而与沟的宽度无关。
3. 强夯法处理湿陷性黄土的效果比较好, 其有效深度可达3—5米, 影响深度可达4—9米。

文中所用土样分析及沉陷量资料, 均由铁道部第一勘测设计院提供, 在比深表感谢。参加测试工作的尚有孙崇绍、查小刚、张树清、夏根宏、司明海、蒋祖森、何新社、戚国胜、刘朔宽、左宝林等同志。

(本文1981年5月13日收刊)

参 考 文 献

- 〔1〕吉井敏尅, 溝たよるレイリー波の減衰, 地震, 第2輯, 第24卷, 第一号。
〔2〕藤井和成、中山善津、今井健二、中野正吉, 溝を通過するレイリー波群について (I), 地震, 第2輯, 第33卷, 第1号。

OBSERVATION ON VIBRATION FROM POWERFUL RAMMER IN
SOAKING SETTLING LOESS

Lin Xue-wen

(The Seismological Institute of Lanzhou)

Abstract

Strengthening the foundation soil with the powerful rammer has been developed for the last 20 years. This method has gradually been employed in China since the 1970s, and during this period some results of experiment were informed but there is still not enough experience now for strengthening the soaking setting loess and for the reconstruction of the old urban area in cities. This is just the object for which this paper is written.

Two construction sites in Lanzhou were chosen for observation on the vibration effects from the powerful rammer. Observation was carried out along several sections. Among them some sections are across shocking protective ditches with different width and depth.

The results of observation are as follows:

1. Both displacement and acceleration on soaking settling loess from the powerful rammer increase with the subsequence of driving rammer and rapidly reduce with the distance, and the attenuation of displacement in radial direction is faster than that of acceleration. The characteristics of attenuation of displacement and acceleration on the identical point are different from each other.

2. When the depth of the shocking protective ditch is greater than 2 m and its length is 5 meters more than the dimension of structures, its protecting effects from shocking are obvious, especially for horizontal vibration in radial direction the effects of the protective are not dependent on its width.

(下转83页)

兰州—天水地区现今区域构造应力场光弹模拟实验研究

张淑节 李同祺 贺玉亭

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

兰州—天水地区现今区域构造应力场光弹模拟实验的范围是：北纬 34° — 38° 、东经 102° — 108° 之间。我们采用平面模型单轴压缩进行实验。结果表明最大剪应力集中区很有规律地分布在北北东和北西西共轭剪切断裂的端点、弧形拐弯及断裂交汇等部位。与本区强震发生的部位相吻合。同时实验得出的主压应力方向与本区震源机制解很接近。此外通过对同一构造模型施加不同方向载荷及打孔等一系列实验证明：能量的积累，调整和迁移与作用力的方式密切相关，并严格地受着区域应力场的控制。

一、边界条件的确定

1. 模型与原型相似性的讨论。我们假定在深大断裂以外的地区介质是均匀的，而且发震过程又是极短暂的，可作为弹性处理，用弹性材料进行模拟是允许的。西、海、固、六盘山地区从74年以后存在着北东向的压应力，水平形变反映为基线网测量边长普遍缩短，在北东方向上线应变达最大值 $(-6.6 \times 10^{-8})^{[1]}$ 。说明本区承受着强大的水平力，采用单轴压缩进行实验是较符合实际的。又根据本区 $M_s \geq 3.5$ 级地震的震源机制解^[12]平均主压应力轴向

(上接82页)

3. It is effective to strengthen the soaking settling loess by employing the powerful rammer. The experiment shows that the effective depth of strengthening is 3-5m, whereas the influenced depth may reach 4-9m below the ground surface.

*实验开始阶段，刘百兢、韩芝两位同志参加了部分工作。

1) 陕甘宁地壳垂直运动的基本轮廓及中期地震趋势意见