

振冲法加固砂壳坝试验研究*

李君纯 邴能惠 朱家谟 王仁钟

(南京水利科学研究所)

提 要

本文介绍了砂壳坝抗震加固的一种新方法——振动水冲法。山东省兴旺坝振冲加固试验表明,砂壳坝的振冲加固与地基振冲加固不尽相同,砂壳坝中存在广阔的非饱和区,而且振冲过程中存在“斜坡效应”,从振冲时坝的动力反应观测资料的分析得知,振动加速度、超静孔隙水压力均随振源距的增大而急剧减小,它们与振源距均呈幂函数关系。探索振冲加固机理得知,饱和松砂的振冲加密是通过三个作用实现的:①径向冲击位移将砂挤入坡内;②引起超静孔隙水压力使砂坡液化;③固结。本文提出了一套振冲工艺参数,利用这些参数并使振冲区砂壳处于饱和状态是提高振冲效果的关键。这也是兴旺坝壳的加固效果能达到相对密度0.8左右和标贯击数达到40击以上的重要前提。

文中还简要地叙述了兴旺坝振冲施工的主要经验,说明这个方法安全、方便、经济,是抗震加固已建的松散砂壳坝的有效方法。

一、前 言

我国地震区广阔,近几年来有些大坝已遭到地震破坏,还有不少土坝砂壳紧密度不高,如遇强烈地震,极易液化失稳,因而加固松砂坝壳是迫切需要研究解决的问题。近30年来振动水冲法已广泛用于地基加固^[1,2],但是砂坡和地基的条件不同,用振冲法加固砂壳坝的加固效果如何?振冲时坝坡是否会液化失稳?是否经济?都没有经验。为此我们于1979年和1980年先后两次在山东省兴旺坝进行了砂壳振冲加固试验^[3,4],取得了初步成果和经验,并对振冲加固砂壳坝的原理进行了探索。

二、兴旺坝振冲加固试验

(一)振冲试验概况

兴旺坝砂壳坝段长85m。其轮廓见图1, 2。坝料性质见图3及表1。

* 振冲加固试验是与山东省水利厅合作的。

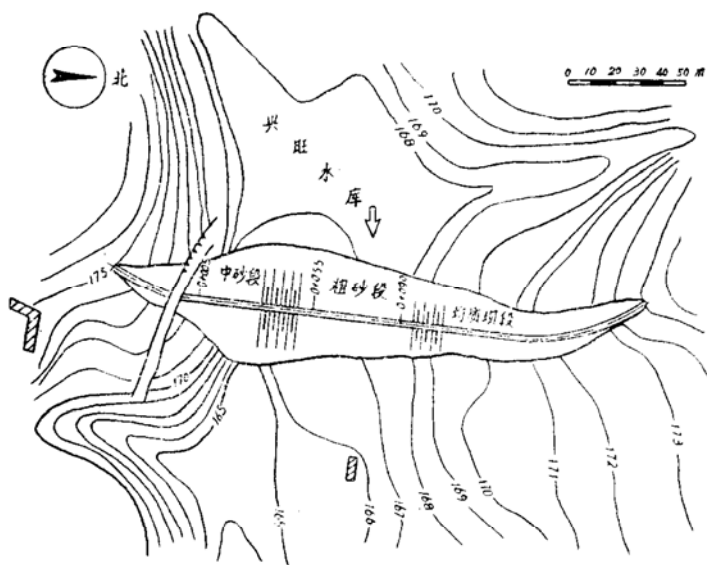


图1 兴旺水库平面图

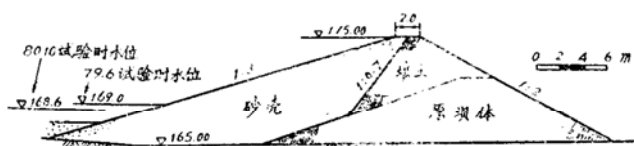


图2 兴旺坝试验段典型横断面

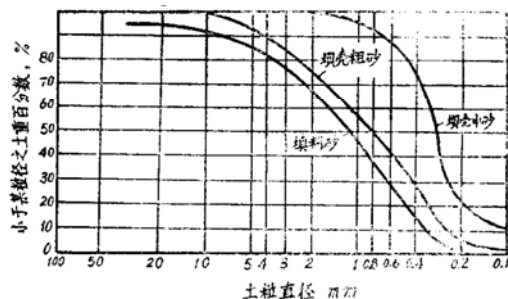


图3 兴旺坝砂壳及填料颗粒大小分配曲线

表1

兴旺坝坝体土工指标

项 目 坝 料	颗 粒 组 成				平均 粒径 D_{50}	孔 隙 比		比重 G_s	不均匀 系数 C_u	渗 透 系 数 k	抗剪强度 (饱和固结快剪)	
	粒径大小(mm)					e_{max}	e_{min}				ϕ	c
	>0.5	$0.5\sim$ 0.25	$0.25\sim$ 0.1	<0.1								
		(%)	(%)									
					(mm)	—	—	—	—	(cm/s)	($^{\circ}$)	(kg/cm 2)
坝壳粗砂	65	28	5	2	0.82	0.90	0.32	2.66	4.28	2.6×10^{-2}	38	0
坝壳中砂	18	53	19	10	0.29	1.03	0.44	2.66	3.00	2.17×10^{-3}	34	0
下游防渗体					0.015	0.68		2.75	32.6	5.4×10^{-6}	20.7	0.21
振冲填料	78	20			1.2	0.89	0.29	2.70	4.8	1.7×10^{-2}	38	0

试验采用ZCQ30—Ⅱ型振冲器^[1,5]，其特性见表2。每一偏心块重约11.2kg，偏心距约5.8cm，振频 $f_v = 24.2\text{Hz}$ 。振冲器由上补水口、万向节、潜水电机、冲头及下喷水口等组成，用起重扒杆操作，见图4，5。

试验以几种不同的孔距和振动力进行，观测了振冲时砂壳振动的加速度与孔隙水压力的变化，检查了振冲加固效果。试验布置见图6，7。

表2

ZCQ30—Ⅱ型振冲器特性参数

外形尺寸		振动功能				振动力	自由振幅
长度 (mm)	外径 (mm)	功率 (kw)	转数 (rpm)	块数	动力矩 (kg·cm)	(t)	(cm)
2200	351	30	1450	3	194	4.5	2.0
~	~			4	259	6.0	2.7
				5	324	7.5	3.4
2100	390			6	389	9.0	4.0

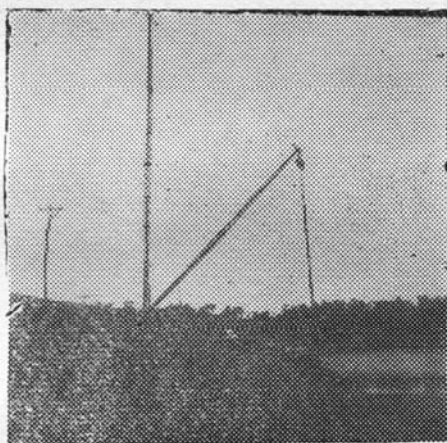
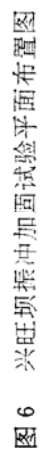


图4 振冲起重扒杆



图5 振冲器

振冲前，准备好观测仪器（参见图8）。按规定的施工程序进行振冲试验^[8]。在振冲器通过各预定深度的瞬间进行观测。记录到的坝壳加速度时程线约呈谐波，其频率 f 为24.2Hz，与振冲器的 f_v 相同，典型记录如图9，显然为强迫振动。一个典型振冲孔的振冲全过程的振动加速度与孔隙水压力观测结果见图10。



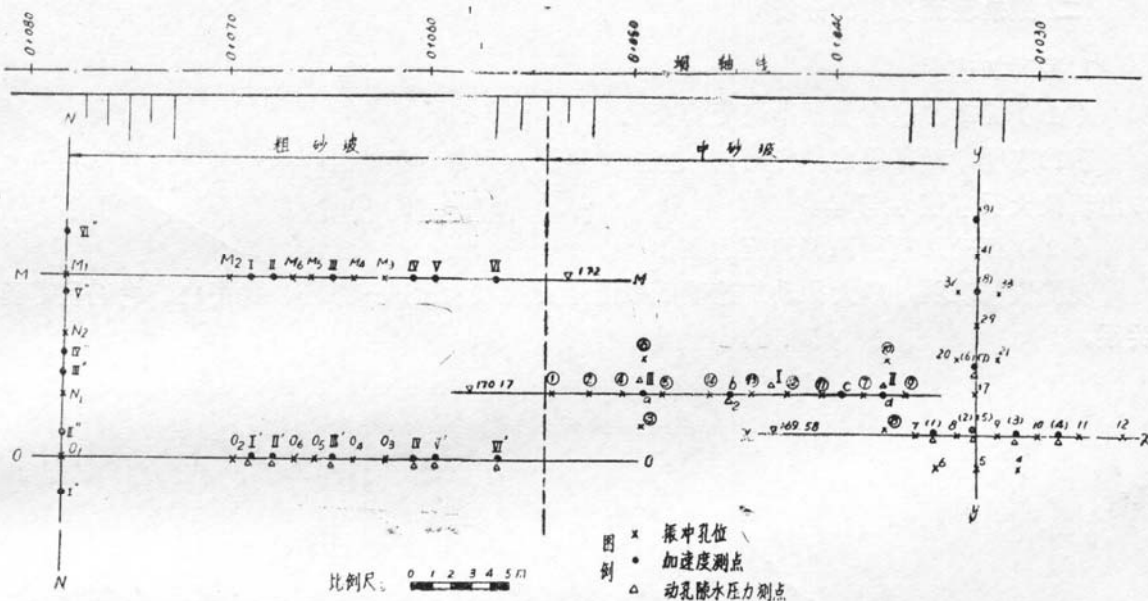


图 7 兴旺坝砂壳振冲动态观测点布置图



图 8 观测仪器现场埋设

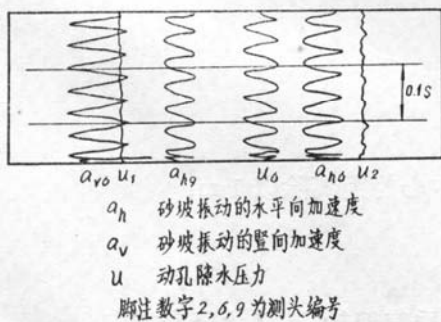


图 9 动态观测的典型记录

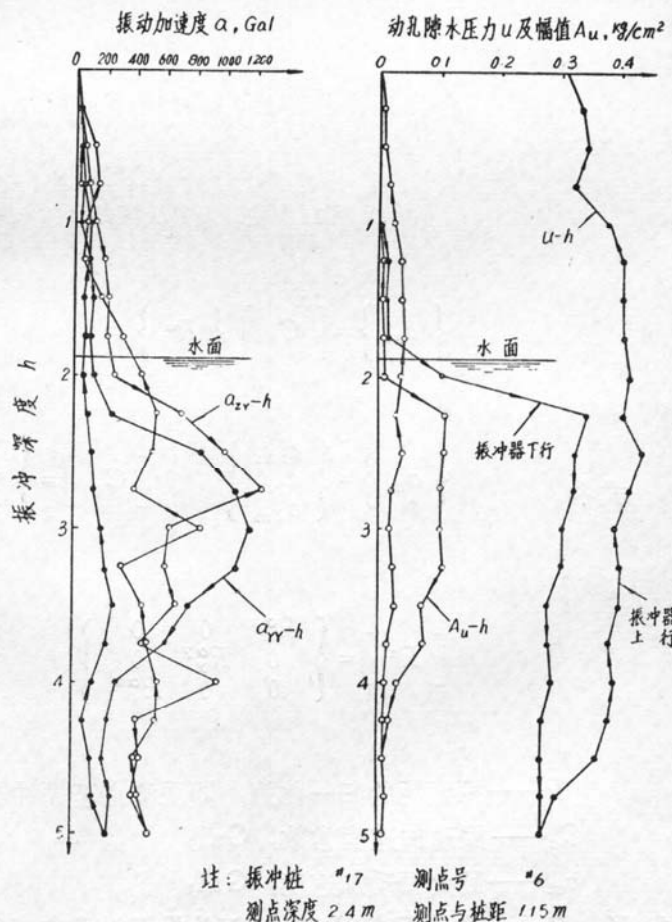


图 10 中砂段振动加速度与动孔隙水压力观测结果

(二) 振动观测资料的分析

1. 振动加速度

(1) 振动加速度随振冲深度的变化

图10表明, 对某固定测点而言, 当振冲器贯入到某一深度时, 振动加速度与动孔隙水压力出现最大反应值 a_m 与 u_m 。

(2) 振动加速度随振源距的变化

观测资料表明, 最大振动加速度随振源距 R 的增大而迅速减小, 如图11。它们呈幂函数关系。

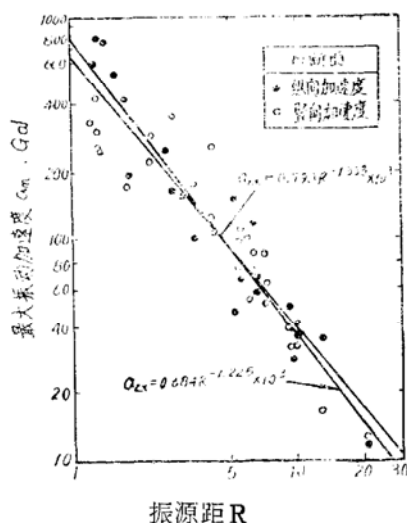


图11 粗砂段最大振动加速度与振源距的关系

$$\{a_m\} = [C_a] \{R^a\} \quad (1)$$

式中

$$\{a_m\} = \begin{Bmatrix} a_{xm} \\ a_{ym} \\ a_{zm} \end{Bmatrix}, \quad [C_a] = \begin{Bmatrix} C_{ax} & 1 & 1 \\ 1 & C_{ay} & 1 \\ 1 & 1 & C_{az} \end{Bmatrix}$$

$$[R^a] = \begin{Bmatrix} R_x^{ax} & 0 & 0 \\ 0 & R_y^{ay} & 0 \\ 0 & 0 & R_z^{az} \end{Bmatrix}$$

R ——振源距的归一化值, 即观测点至振冲器中心的距离除以 1 m;

C_a ——振动加速度常数, Gal;

a_m ——最大振动加速度, Gal;

X, Y, Z ——均为正交坐标轴; X 为沿坝轴纵向, Y 为垂直坝轴线, Z 为竖直方向。

振动加速度常数 C_a 和衰减系数 α 与振冲动力的大小、波动方向、边界条件及坝料性质等

有关。将观测资料回归分析后得知它们的变化范围为: $\alpha \approx -1.2 \sim -2.0$; $C_a \approx 500 \sim 2100 \text{ Gal}$ 。 C_a 即相当于振源距 1 m 处的最大振动加速度, 实测的 α 和 C_a 值见文献[3]中的表5-2-1。从上述振动加速度的衰减规律来看, 在距振冲器 2 m 处, 加速度仅约为 $(1/3 \sim 1/4)C_a$, 加固效果显著下降^[3,4]。

(3) 斜坡波动的水平向差异

从式(1)可得不同方向最大振动加速度的归一化值 δ_{am} 随振源距归一化值 R 的变化为

$$\delta_{am} = C_{a1} R^{\alpha_1} / (C_{a2} R^{\alpha_2}) = C'_a R^{\alpha'} \quad (2)$$

式中 $C'_a = C_{a1}/C_{a2}$; $\alpha' = \alpha_1 - \alpha_2$

脚标 1, 2 分别表示对同一振源在纵、横断面上的有关参数。实测结果见表 3。可见, 振动能的传播纵向比横向远, 横向衰减较快, 尤以中砂最为显著。我们称此现象为“斜坡效应”。它显示了坝坡与地基在振冲动力传播上的差异。但“斜坡效应”是随深度减小的。因而, 对于浅层坝壳振冲加固来讲, 振冲孔的横向间距宜稍小于纵向间距。

表 3

坝段	断面与位置 (参见图 7)	振冲力 (t)	加速度归一化值	常数 C'_a	衰减系数 α'	a_m/C'_a			
						振源距归一化值 R			
						$R-1.0$	$R-1.3$	$R-2.0$	$R-5.0$
粗砂段	纵断面 高程 172.0	7.5	a_{xxm}/a_{xxm}	1.167	-0.108	1.167	1.134	1.083	0.981
	横断面 桩号 076		a_{yy}/a_{zy}	1.274	-0.002	1.274	1.273	1.272	1.270
中砂段	纵断面 高程 169.58	7.5	a_{xxm}/a_{xxm}^*	1.119	-0.027	1.119	1.111	1.098	1.071
	横断面 桩号 033		a_{xxm}/a_{xxm}^*	2.993	-0.606	2.993	2.553	1.966	1.129
	横断面 桩号 033		a_{yy}/a_{zy}	1.221	-0.007	1.221	1.219	1.215	1.207
段	纵 横 断 面 比 较	7.5	a_{yy}/a_{xxm}	0.275	0.392	0.275	0.305	0.361	0.517
			a_{zy}/a_{zy}	0.251	0.532	0.251	0.289	0.363	0.591

* 者为振冲器上提震密的情况, 此外均为向下振冲造孔的情况

(4) 振冲的历史效应

在某一观测点 i 两侧等距离处先后进行的振冲依次称为初振、复振, 并定义复振系数为

$\xi_a = \frac{a_{ms}}{a_{mp}}$, 式中 a_{mp} 为初振时 i 点的最大加速度, a_{ms} 为复振时 i 点的最大加速度。

复振系数同振源距归一化值 R 的关系为

$$\xi_a = 0.85 - 0.11 R \quad (3)$$

还可参看实测的复振影响图 12。从图 12 和式(3)可看出, 复振时砂壳的加速度都比初振时小。可见周围先期振冲的历史效应不可忽视。

2. 振动孔隙水压力

(1) 振动孔隙水压力随振冲深度的变化

典型记录见图 10。振冲器进入浸润面后, 动孔隙水压力才显著发展, 且不再随深度而显著变化, 但在振冲器上升时, 由于填料需要每隔一定高度留振一定时间, 故动孔隙水压力 u_m 就持续增加。可见复振及持续振冲可以提高松砂的液化势。

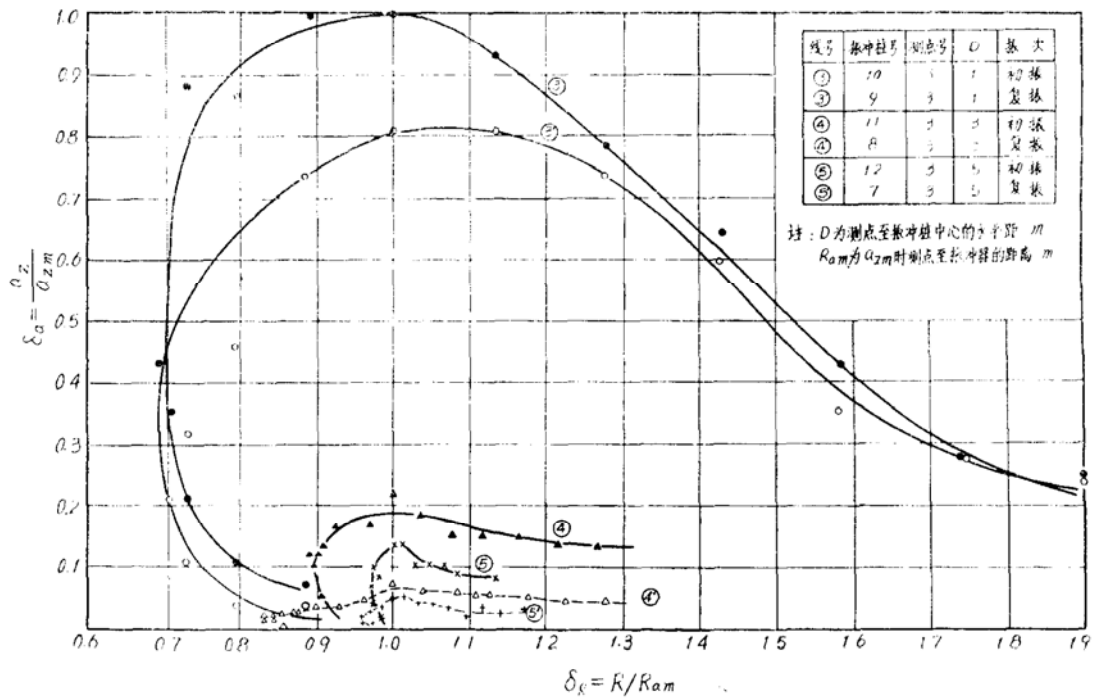


图12 复振对竖向加速度的影响

(2) 动孔隙水压力随振源距的变化

从实测资料可知, 平均振动孔隙水压力的最大值 u_m (见图13)与其最大振幅 A_{um} 同振源距归一化值 R 都呈幂函数关系, 即

$$u_m = D_u \cdot R^\beta \quad (4)$$

$$A_{um} = D_A \cdot R^{\beta_A} \quad (5)$$

动孔隙水压力衰减指数 β 变化在 $-1.8 \sim -2.6$ 间; 动孔压振幅的衰减指数 β_A 变化在 $-2.2 \sim -4.2$ 间; 常数 D_u 变化在 $0.185 \sim 0.545$ 间; 常数 D_A 变化在 $0.051 \sim 0.264$ 间。实际上 D_u, D_A 就是距振冲器1 m处的平均振动孔隙水压力的最大值与最大振幅值。比较式(1), (4), 说明动孔隙水压力随振源距的衰减比加速度更快, 故振冲造成的液化范围小于震挤范围。从深1 m和3 m的观测结果知, 离振冲器约1.4 m的范围内, 动孔隙水压力超过了竖向有效应力值 σ_z , 发生了液化(图14)。若按水平应力计, 则约在2.2 m内发生了液化或初始液化。由于固结的渗径及动应力的衰减等原因, 在液化范围内并非都能加固到要求的标准。据此次试验, 振冲孔的间距宜在1.5~1.8 m左右。

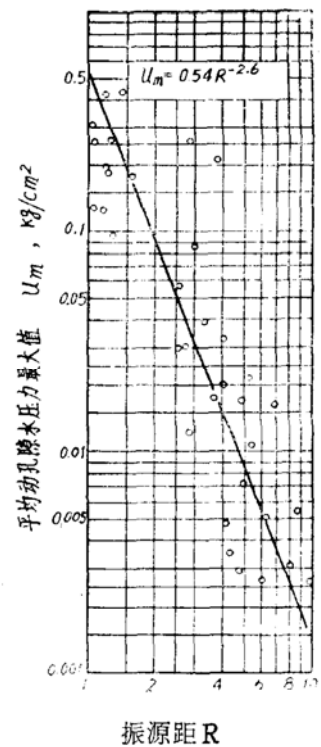


图13 粗砂段孔隙压力与振源距的关系

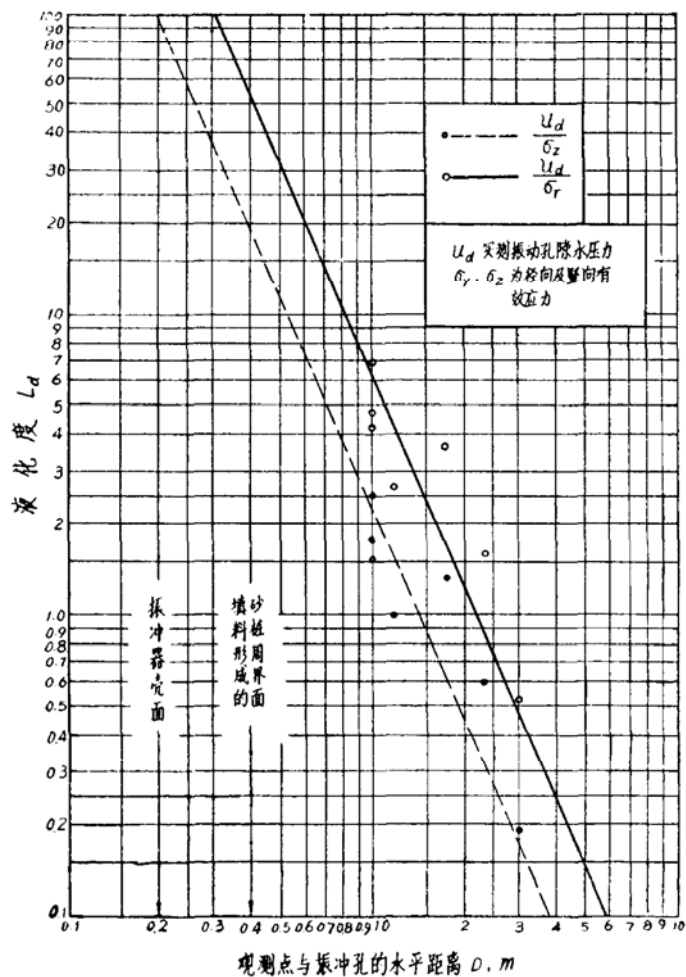


图14 振冲孔周围液化度的水平分布

(3) 动孔隙水压力的消散

兴旺坝振动超静孔隙水压力消散的观测结果如图15, 16。图15可表示为

$$u_d = 0.104 \exp(-0.00174t) \quad (6)$$

式中 u_d ——剩余超静孔隙水压力, kg/cm^2 ;

t ——消散时间, s 。

据现场观测, 达到不同消散度 U 所需的时间

$$t = 9.58 \ln(1 - U)^{-1}, \quad \text{min} \quad (7)$$

$$\text{或} \quad t = 575 \ln(1 - U)^{-1}, \quad \text{s} \quad (8)$$

由式(7), (8)知, 停振7分钟左右, 几米范围内的超静孔隙水压力就可消散50%, 20分钟后就基本消散稳定。这与现场振冲时见到的喷砂、冒水过程约持续20分钟是一致的。

3. 动孔隙水压力与加速度的关系

从式(1), (4), (5)可导出关系式

$$\left. \begin{aligned} u_m &= (D_u C_a^{-\beta/\alpha}) a_m^{\beta/\alpha} = (D_u D_A^{\beta/\beta_A}) A_{u_m}^{\beta/\beta_A} \\ A u_m &= (D_A C_a^{-\beta_A/\alpha}) a_m^{\beta_A/\alpha} = (D_A A^{-\beta_A/\beta}) u_m^{\beta_A/\beta} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(9)知, 最大动孔隙水压力 u_m 与其最大振幅 $A u_m$ 均与加速度成幂函数关系, 即在双对数座标中呈直线, 这与实测资料(图17)是吻合的。

由观测资料的回归分析知^[8,41]: $\beta/a \approx 1 \sim 2$, $\beta_A/a \approx 1 \sim 3.5$; 系数的一般范围值为

$$D_u C_a^{-\beta/a} = 8 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-4}$$

$$D_A C_a^{-\beta_A/a} = 1.5 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-5}$$

皆随加速度的方向及砂类而异。

综上所述, 为了充分发挥由振冲而引起的液化, 继而出现的重新固结作用, 振冲器必须有足够的振动力, 此振动力强迫砂壳持续振动并产生足以使振冲孔周围液化的孔隙水压力。回填料透水性应较好, 以利于孔隙水压力的消散, 使砂土排水固结。

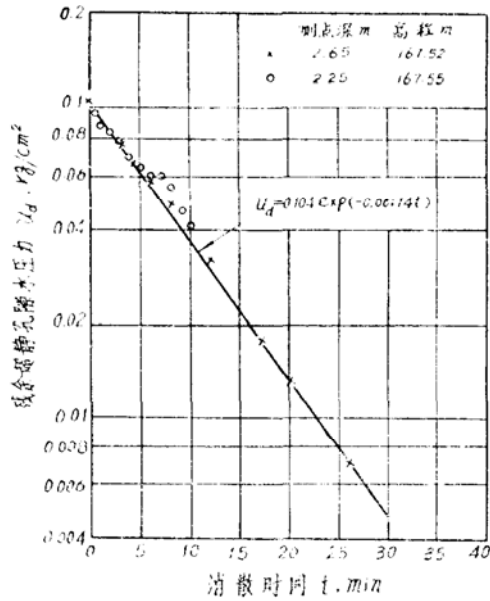


图15 中砂段超静孔隙水压力消散过程线
(测点与振冲孔的水平距离 $D = 1\text{ m}$)

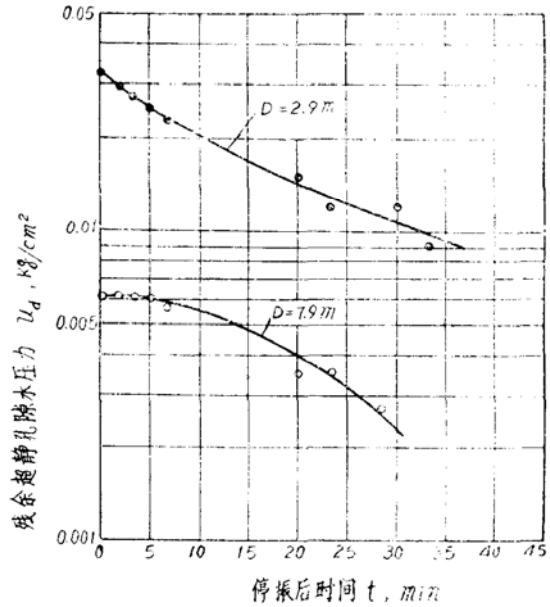


图16 中砂段超静孔隙水压力消散过程线
(测点与振冲孔的水平距离为 D)

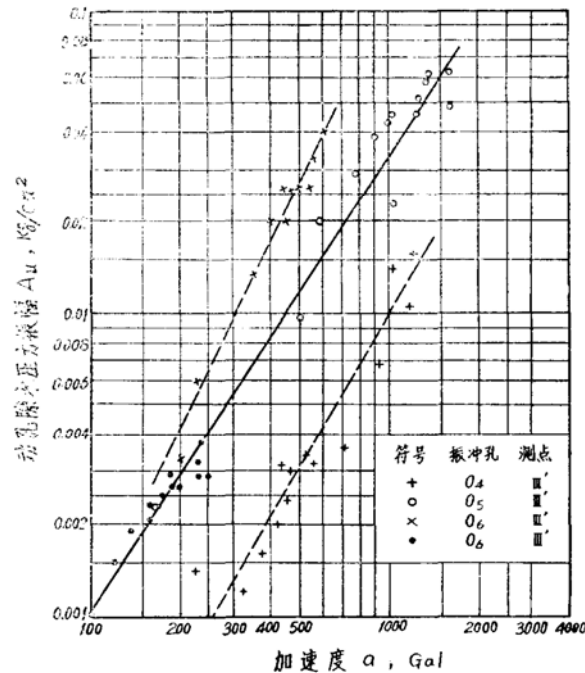


图17 动孔隙水压力振幅与加速度的关系

(三)振冲加固效果的检验

1. 砂壳原位密度

(1) 探井: 振冲加固前、后在砂壳内挖探井, 直径约1.5~1.8m, 深2~4 m。用灌砂法及环刀法测定砂壳原位密度, 结果见图18及资料[3]。从而可知, 即使加固均匀中砂, 若在振冲前将中砂浸水饱和, 振冲孔距选取1.3~1.5m, 也可使相对密度从原来的0.2~0.3提高到0.75~0.9左右^[8]。

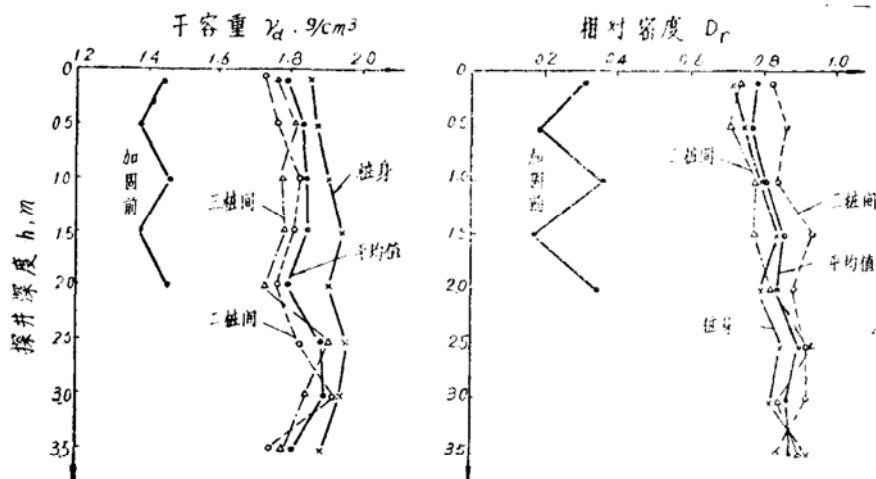


图18 中砂段(孔距1.3m)加固前后探井试验结果

(2) 探槽: 粗砂段不饱和区单孔振冲后, 开挖了探槽测定砂壳干容重以了解振冲加固的影响范围^[4], 结果见图19。由图19及式(1), (3)说明单孔振冲的纵向影响范围可达4~7 m, 与加固砂基的经验近似^[5,6], 但显著影响区仅1~2 m, 而有效加密半径约1 m左右。

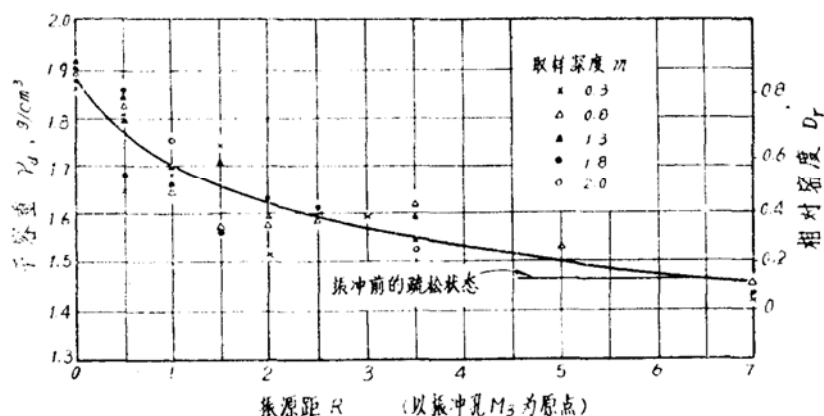


图19 粗砂段单孔振冲后的密度度

2. 标准贯入试验

振冲加固前后中砂段的标贯试验结果见图20。桩距1.3m加固后的标贯击数较加固前大为提高, 可达40击以上, 并随深度呈直线增大。

3. 静力触探试验

振冲加固前后在砂坡上试验的结果见表4。贯入阻力比加固前提高4~7倍。

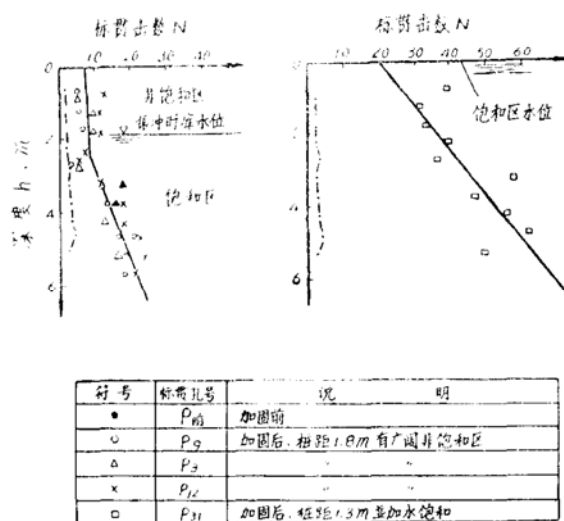


图20 中砂段加固前后的标贯击数

表 4

1979年加固前后静力触探贯入阻力试验值

坝段	振冲孔中心距 (m)	振冲加固前 (kg/cm ²)	振冲加固后 (kg/cm ²)				
			桩身	两桩间	三桩间	桩身、两桩、三 桩间平均值	两桩、三桩间 平均值
粗砂段	1.5	19.6	224.2	137.1	—	180.6	137.1
	1.8		177.15	128.3	121.6	142.4	125.0
	2.0		153.9	138.5	143.7	145.4	141.1
中砂段	1.5	13.4	65.4	65.3	71.2	67.3	68.3
	1.8		—	52.4	55.9	54.2	54.2

(四)几点经验

1. 坝壳振冲的特殊性

如坝壳是饱和的疏松中细砂, 因其渗透系数比粗砂小, 振冲时孔隙水压力高而消散慢, 因而振冲时将易于液化, 振冲孔周围会产生较大面积的裂缝、喷砂、冒水等现象, 以致坝坡坍塌, 难于施工。此时需要严格控制填料性质, 应选用纯净砾质粗砂, 并将填料预堆在孔周围, 以增加上复压力。而且随振冲器贯入随即填料, 同时按砂壳起始密度选择适当的振冲动力。在工序上, 先加固库水位附近坝坡, 稳定坡脚后, 再由下而上振冲。这样可以避免坝壳塌裂现象。

坝壳饱和与否对加固效果影响很大, 见图20。浸润面以上的砂壳, 由于毛管力的约束, 难于液化和振密, 只有振挤作用, 振冲后的平均标贯击数仅约7击, 相对密度仅0.5~0.6。若在振冲前将砂壳浸水饱和, 形成振冲时砂壳液化的条件, 从而大大提高加固效果。振冲后每加深1m 标贯击数就增大8击(图20), 深1m 以下的相对密度一般达0.85左右(图18)。由此可知, 振冲区的饱和是取得良好的加固效果的关键。

2. 振冲孔的合理布置

从图11, 13, 14, 19, 20及表3估计, 振冲孔的最优间距约为1.5~1.8m左右。重要工程还应根据被加固土的性质、振冲器的特性和加固标准等, 通过试验综合分析后确定振冲孔最优间距。

3. 填料

填料可因地制宜, 采用含泥量低($<5\%$)的砾质粗砂, 或更粗的砾石、碎石等纯净材料^[5,6]。

随振冲器提升, 宜在孔周均匀填料。有时为了避免塌孔和过大的沉陷, 可随贯入随填料。

4. 水压、水量控制

振冲器下喷水口压力一般控制在 $4\sim6\text{ kg/cm}^2$ 左右。接近孔底时, 宜尽量减小水压、加大上补水口流量, 以减小底部土层的扰动。

5. 质量控制

振冲填碎石料时, 常用电流控制质量^[5]。若改填砾质粗砂, 因振冲器周围介质液化, 振冲阻力减小, 故电流稳定在35A左右。因此, 兴旺坝改用以振冲器每提升20~30cm, 留振1~1.5分钟及按填料数量来控制。砂愈细, 振冲孔愈深, 留振时间应愈长。

6. 水下振冲加固

淹没区的砂壳宜在船上进行振冲加固。用自船上下达坡面附近的圆筒送料, 并在孔口予堆0.5~0.6m厚的填料。试验表明, 水下振冲加固是可行的。

7. 施工耗费

兴旺坝振冲加固试验表明, 若坝壳砂愈细、愈均匀, 加固密度要求愈高, 则耗费愈大。经估算, 用振冲法加固土坝可能比现有其他加固方法节省费用约一半。而且工期短、效果可靠。

三、振冲加固原理

振冲加固砂壳的几个关键步骤是: 在振冲器的振动力和水冲作用下在砂壳中造孔至预定深度, 然后将振冲器提升到一定高度, 同时向孔内添加填料并使振冲器再留振一定时间。如此向上重复操作, 直至坡面。振冲加固的效果表现在提高了砂壳的紧密度, 从而减小砂壳的变形与地震所引起的超静孔隙水压力, 随之减小砂壳的液化度; 振冲加固的同时在砂壳中形成了密实的强透水桩柱, 作为迅速消散由振动而产生的超静孔隙水压力的排水通道, 从而达到抗震的目的。通过试验研究, 可以看出振动水冲法加密砂壳效果主要是通过振挤、浮振和固结三个作用实现的, 现分述如下:

(一) 振挤作用

振冲器以一定的水平振动力将孔内部份砂土(包括填料)挤入孔壁, 使砂壳挤实, 这一作用称之为振挤作用。

分析动测资料可知, 振冲器振动力越大, 振挤作用越大。而且, 在一定深度(1m)以下振挤作用较好, 所以表层砂壳宜在振冲后再适当夯实。

振挤效果可用挤实度 η 来描述, 对于正三角形的布孔, 由几何关系可得

$$\eta = \frac{\gamma_{d1}}{\gamma_{d0}} - 1 = \frac{\lambda + 1.15W_1/(L^2 \cdot \gamma_{d0})}{1 - 0.91(d/L)^2} - 1 \quad (10)$$

式中 η ——挤实度, 据此次试验, 其值约为0.15~0.18;

γ_{d0} ——振冲前砂壳的干容重, t/m^3 , 此次试验: 粗砂 $\gamma_{d0} \approx 1.55$, 中砂 $\gamma_{d0} \approx 1.40$;

γ_{d1} ——振冲后砂壳非饱和区的干容重, t/m^3 , 此次试验: 粗砂 $\gamma_{d1} \approx 1.80$, 中砂 $\gamma_{d1} \approx 1.65$;

d, L ——分别为振冲孔的直径及孔距, $d = 0.75 \sim 0.8m$, 孔距宜根据试验确定。

λ ——被挤入孔壁的干土重与孔内原有干土总重之比, 简称挤入率。此次试验: 粗砂约为0.65, 中砂约为0.5;

W_1 ——有效填料重, 即单位孔深被挤入孔壁的填料干重(t), 此次试验: 粗砂约为0.7 t , 中砂约为0.6 t 。

(二) 浮振作用

饱和砂壳在振冲器振动力的作用下, 将产生超静孔隙水压力 u_d , u_d 将随振动往复次数(或振动历时)增加而增长, 当 u_d 达到或超过有效应力时, 砂土便产生液化^[7,8]。随后的振动将提高液化度和扩大液化范围。我们称此为浮振。

通常将某点的超静孔隙水压力与该点的竖向应力 σ_z 或径向应力 σ_r 之比称作液化度。图14为液化度 L_d 同观测点至振冲孔的水平距离 D 的关系。该图在很大程度上表示了浮振的效果。由图可见, 本试验条件下, 离振冲器约1.4m范围内发生了液化($\frac{u_d}{\sigma_z} \geq 1.0$), 在2.2m范围内发生初始液化($\frac{u_d}{\sigma_r} \geq 1.0$)。

显然, 振动力越大, 振动历时越长, 产生的 u_d 就越高, 液化范围也越大^[9,10], 振冲加密的效果也就越好。但是, 从动测资料可知, 振动器产生的动应力范围和液化范围总是有限的, 动孔隙水压力 u_d 增长到峰值后, 由于振动历时的延长所增长的压密效果有限。而且对中细砂, 超静孔隙水压力消散缓慢, 振动力过大, 会造成一定范围内坝坡的开裂。所以, 适宜的振动力与振动历时应根据上述的动测资料或根据现场试验结果确定。

(三) 固结作用

随着振冲引起的超静孔隙水压力的消散, 砂粒重新排列、固结密实, 称之为固结作用。超静孔隙水压力消散可按下列式计算:

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_d}{\partial z^2} \quad (11)$$

其消散度为

$$U = 1 - \exp(-c_v t) \quad (12)$$

上两式中的 c_v 为砂壳超静孔隙水压力消散系数, cm^2/s 。

由式(11)可知,影响固结的主要因素是砂壳的特性(c_v)、起始条件(u_{d0})、边界条件及时间 t 。纯净砂 $c_v \geq 10^2 \sim 10^8 \text{cm}^2/\text{s}$,孔隙水压力消散很快。含细粒或泥质多的砂壳, c_v 值小,消散慢,固结过程长,加固效果差。本试验实测的超静孔隙水压力消散过程如图15,16所示。图16说明,在振冲器附近的孔隙水压力已经消散的时候,远处的超静孔隙水压力刚达到峰值。

从上述分析可知,为了取得振冲加固的效果,除了注意控制振动力、振冲历时和振冲孔间距以外,还必须控制填料质量,以保证良好的固结作用。

上述三种作用很难截然分开。例如,振冲时振挤与浮振作用几乎同时产生;但是在振冲孔附近,由于振动剧烈、渗径短、桩身透水性强,故在全孔停振之前,孔的下部固结就已开始,而远处孔隙水压力却还在增长,见图16。尽管这样,在不同施工阶段三种作用仍有主次之分。造孔时主要为振挤作用,留振时主要为浮振作用,停振后主要为固结作用。

综上所述,用振冲法加固砂壳坝的实质,主要是利用振挤、液化和重新固结的作用来提高砂壳的密度。振冲加固的效果取决于正确地选择振冲器、填料与施工工艺。

四、结 语

根据兴旺坝振冲加固施工、观测并通过分析研究,可以得出以下结论:

1.用振动水冲法加固疏松坝壳,不会引起坝坡液化失稳,加固后砂壳的相对密度可达0.8左右,标准贯入击数可达40击。因而是一种比较理想的抗震加固方法。

2.使振冲区饱和,这是为浮振、固结提供条件,因而这是提高振冲加固效果的关键。

3.振冲时坝坡的振动加速度、振动孔隙水压力均随振源距呈幂函数关系,衰减急剧。有效加固区局限于孔周围半径约1m的范围内,振冲孔距宜在1.5m(中砂)至1.8m(粗砂)左右。

由于“斜坡效应”,加固浅层砂壳横向孔距可以稍小。

4.坝壳振冲施工质量的控制标准,当填料是砂土时,宜用控制留振时间与填料数量的方法。本次试验按振冲器每提升20~30cm,留振1~1.5分钟,取得满意的效果。

用振动水冲法加固坝壳还是初步尝试,此次振冲加固的深度只有6~7m。若需加固深厚的坝壳,还需进一步试验研究。

参 考 文 献

- [1] 盛崇文,碎石桩在软基加固中的应用,软土地基学术讨论会论文集,水利出版社,1980年,第242~248页。
- [2] 石原研而,斋藤彰,有馬宏,護岸液状化対策としての碎石パイルの適用例,土と基礎,Vol. 28, No. 4, 1980, pp. 9~15。
- [3] 山东省水利厅、南京水利科学研究所,兴旺庄水库振动水冲法加固砂壳坝试验技术总结,1981年6月。
- [4] 酆能惠,应用振动水冲法加固松砂坝壳的试验研究,水利水运科学研究,1982年第2期,第40~59页。
- [5] 王盛源、方永凯等,用振动水冲法快速加固软弱地基,水运工程,1979年第5期,第23~41页。

- [6] 软土地基研究组, 振动水冲法加固软粘土地基的新进展, 水利水运科学研究, 1981年第2期, 第83~85页。
- [7] Иванов, П.Л., О разжижении песчаных водонасыщенных грунтов, Гидротехническое строительство, No.9, 1951, стр. 31~44.
- [8] Seed, H.B., Martin, P.P., and Lysmer, J. Pore Water Pressure Changes During Soil Liquefaction, Proc. ASCE, No.GT4, 1976, pp. 323~344.
- [9] Castro, G. and Poulos, S.J., Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Proc. ASCE, Vol. 103, No.GT6, 1977, pp. 501~504.
- [10] Жихович, В.В., Виброуплотнение песка, Вопросы техники, Сборник I, под М. Н. Гольдштейн, Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва, 1953.

Experimental Study on Vibroflotation Method for Strengthening Sand Shell of Dams

Li Jun-chun, Li Neng-hui, Zhu Jia-mou, Wang Ren-zhong

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract

A vibroflotation method of strengthening sand shell of dams against earthquake is presented in this paper. Several vibroflotation tests were performed at Xingwang Dam. It has been known that the slope-effect and a large unsaturated zone in the dam are existed. Therefore, the vibroflotating sand shell of dams is different from the vibroflotating soil foundation. The analysis of the observed data of the dynamic response of the dam under vibroflotation indicates that the vibratory acceleration and excess pore water pressure decrease rapidly as the radial distance from the vibroflot increase, and that the relationships between both of them and the radial distance from the vibroflot are of power function. The study on the mechanism of the densification by vibroflotation shows the three factors cause the compaction of the saturated loose sand via vibroflotation; the first, the impulsive radial movements squeeze sand into the interior of slope; the second, the vibroflotations induce excess pore water pressure and set the sand slope to suffer liquefaction; and the third, sand settles down and consolidates. And then a set of technical parameters of vibroflotation are presented. To use these parameters and make the compacted zone of sand shell saturated with water is the key to increasing the compaction effect. This is the major premise for compacting the Xingwang Dam's sand shell to a relative density of about 0.8 and making the number of blows of S.P.T. more than forty.

The main experiences of the application of vibroflotation at Xingwang Dam are also described briefly in the paper. In short, the vibroflotation method is not only safe and facile, but also economical and efficient. Therefore, it's a good artificial method for earthquake resistance of the existing earth dams with weak sand shells.