

粉 细 砂 浸 水 路 堤

(嫩江河滩粉砂路堤技术总结)



人民交通出版社

粉细砂浸水路堤

(嫩江河滩粉砂路堤技术总结)

第三铁路工程局
交通部 第三铁路设计院 编
科学 研究院

人 民 交 通 出 版 社

1975年·北京

内 容 简 介

本书是修建嫩江河滩粉砂路堤的技术总结,内容包括对粉、细砂振动液化的研究试验、路堤稳定分析、边坡防护及填筑压实等。可供铁路路基技术人员及有关土建技术人员参考。

粉细砂浸水路堤

(嫩江河滩粉砂路堤技术总结)

第三铁路工程局
交通部 第三铁路设计院 编
科 学 研 究 院

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

人民交通出版社印刷二厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: 3.375 插页: 2 字数: 76 千

1975年1月 第1版

1975年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—7,000 册 定价(科三): 0.30 元

毛 主 席 语 录

人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前 言

为了适应工农业的发展，需要横跨嫩江河滩修建长达数公里高8~14米的季节性浸水路堤，河滩附近只有大量粉砂可资利用，但我国当时的路基技术规范规定不准用粉、细砂作为浸水路堤填料。因此要按规范设计就需从十多公里以外运送粘性土。这样就会影响工期，提高造价，同时还要破坏大量农田。如能研究解决使用粉砂填筑浸水路堤的问题，则不仅解决该段工程的困难，而且对路基工程技术的发展将具有重要意义。

当时规范中规定不准用粉、细砂作浸水路堤填料的主要原因，在于它在列车的振动作用下可能产生振动液化。过去工程实践中，的确曾有粉、细砂路堤因液化而发生坍塌破坏的实例；但是在我国铁路上也有些粉、细砂浸水路堤经过几十年运营至今依然十分稳固。这说明产生振动液化是有其一定条件的，不是所有的粉、细砂浸水路堤都一定会液化。因此，只要我们研究掌握粉、细砂路堤之所以破坏或成功的客观规律，在设计施工中采取一定的措施，利用粉、细砂作为浸水路堤填料是完全有可能的。

饱和砂的振动液化问题是用粉、细砂填筑浸水路堤的主要矛盾。因此从理论上弄清饱和砂的振动液化规律，找出防止振动液化的办法，是采用粉、细砂作为浸水路堤填料的关键。同时，饱和砂浸水路堤的稳定分析、边坡防护以及路堤填筑压实等是三个保证粉、细砂浸水路堤建成的重要技术环节，也必须很好地研究解决。

为解决利用粉砂填筑嫩江河滩路堤问题，根据1965年2

月原铁道部指示，由第三铁路工程局、第三设计院、铁道科学研究院等单位共同组成了包括设计、施工、科研单位的工人、干部、技术人员三结合的“嫩江河滩粉砂路堤试验研究组”。全体工作人员遵照毛主席关于“人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来”的教导，深入实际，在设计施工过程中进行广泛的调查研究和较系统的观测试验。在部及各级领导的直接支持和鼓励下，以及现场广大工人、干部、技术人员的共同努力，终于建成了这段粉砂浸水路堤。

试验研究组结合嫩江河滩粉砂路堤的具体实践和试验研究取得了以下一些结果：

在粉、细砂的振动液化方面，通过试验证明，振动液化的主要关键，在于振动时砂土密度的变化以及相应出现的孔隙水压力，只要掌握振动强度及饱和砂土密度变化的规律，在修建路堤时保证填筑密度不小于振动稳定密度，便不会出现孔隙水压力，振动液化也就不会发生。根据调查及试验结果，提出了关于防止粉、细砂浸水路堤振动液化的设计原则，为嫩江河滩路堤的设计提供了依据。

在路堤稳定性分析方面，在进行了一系列试验的基础上，确定嫩江河滩路堤稳定性检算中粉砂的内摩擦角 $\varphi = 33^\circ$ 。这一数据高于一般规范所推荐的数值（ $\varphi = 26 \sim 30^\circ$ ）。实践证明，这一结果是合理的。关于粉、细砂路堤破裂面一般假定为直线或折线形是不符合实际的。在稳定检算中应采用圆弧形。

在粉、细砂浸水路堤的防护方面，如根据水文情况需做砌石护坡时，应考虑到新填路堤在运营初期允许有一定变形，宜采用干砌片石。关于反滤层材料的规格要求，各种规定不少，但标准极不统一。嫩江河滩路堤所采用的反滤层材

料，其技术条件与既有的各种规定多不相符，但试验结果及实践证明，反滤性能良好。故对选用的反滤层材料有特殊要求时，而与一般规定又不符的情况下，建议通过专门试验来确定。

在粉砂浸水路堤填筑压实方面，进行了严格的施工控制及质量检验。在碾压机具方面，试制并使用了混凝土条式碾、格式碾等新型碾压机具，取得了较好的压实效果，保证了填筑质量。

嫩江河滩路堤自通车以来经历了七次洪水期，尤其经历了1969年接近历史最高水位的考验，基本无变形，状态良好。在齐齐哈尔铁路局的维修养护下，历年来秋检路基质量均属优良，行车速度每小时达九十公里。事实证明，利用粉、细砂填筑浸水路堤是完全可行的。

通过这一阶段的工作，虽然初步解决了用粉、细砂填筑浸水路堤的一些主要技术问题。但应指出：由于时间及条件的限制，有些工作还不够深入，有些问题还没有得到解决，有待今后进一步充实提高。

1965年底，研究试验组在现场试验研究工作基本告一段落时曾分项作过一些初步总结，以后1966年上半年又补充了一些室内试验。为了生产上的需要，在过去初步总结的基础上，系统整理出这份总结，文中提到的有关技术规范可能与现行规定不符，仅供有关单位和同志们参考。

在这里特别要提出的是，在总结定稿时，齐齐哈尔铁路局专门派人参加并介绍了该段路堤在运营期间的概况，对该段路堤的质量表示满意。

由于我们的水平不高，文中难免有不妥之处，请予以批评指正。

目 录

前 言

第一章 饱和粉、细砂路基的振动液化问题	1
一、问题概述.....	1
二、振动和振稳密度的观测结果及分析.....	4
三、对粉、细砂浸水路堤设计、施工的意见 （防止振动液化方面）.....	19
四、嫩江河滩粉砂路堤设计示例.....	23
五、初步结论和对进一步工作的意见.....	25
第二章 稳定分析	27
一、关于粉、细砂的强度指标.....	27
二、稳定分析.....	34
三、结束语.....	44
第三章 边坡防护	45
一、正式防护的设计.....	45
二、临时防护.....	60
第四章 填筑压实	60
一、施工中的压实方法.....	61
二、几种碾压机具的压实性能.....	63
三、压实质量的检验.....	83
四、结 语.....	87
附录 I 振稳密度和振动强度的观测	89
附录 II 关于用圆筒仪观测振稳密度的可靠性	95
附录 III 嫩江河滩路堤采用的临时防护措施	98
参考资料	99

第一章 饱和粉、细砂路基的振动 液化问题

本章内容包括：一、问题概述；二、振动和振稳密度的观测试验结果及分析；三、对粉、细砂浸水路堤设计施工意见；四、嫩江河滩粉砂路堤设计示例；五、初步结论和对进一步工作的意见。

一、问题概述

所谓液化乃指饱和砂在动力作用下变成流动体的现象。液化的主要原因在于：饱和松砂在受到动力作用的瞬间，砂粒相互脱离接触，力求达到新的稳定位置，从而发生重新排列，但这时孔隙中的水又暂时不能排走，结果孔隙水压力增大，砂的有效压力减小，摩擦力随之减低。当孔隙水压力增大至土粒的全应力时，土粒悬浮，砂的抗剪强度完全丧失。

国内外进行的大量试验和观测已经初步弄清，饱和砂液化的主要影响因素是：砂的性质（特别是颗粒组成和密度），动力作用（动力的种类和作用强度）以及土的初始应力状态〔3，4，14〕*。对一种土质而言：没有外荷载时，一定的密度对应一定的临界加速度（土密度不发生变化的最大加速度），密度愈大，临界加速度愈高；如果土的初始应力增大，则临界加速度亦相应地提高。各影响因素之间互有联系，但是，正如实践所证明的那样，土质特别是土的密度是最主要的因素。

*括号〔 〕内数字系书末参考资料书目，下同。

对于某一种饱和砂，在某种具体条件下是否会发生液化？如何判别？采用什么标准？在具体的工程中（如路堤）怎样对待，要否采取什么技术措施等，都是生产上必须解决的问题。过去在这些方面虽然已进行过不少工作，但是由于问题复杂，当前还没有完全统一的看法。

关于判断液化的可能性，曾有临界孔隙比、振稳密度、临界加速度和标准爆破等方法。其中临界孔隙比（剪切时体积不变的孔隙比）法，系将砂土的孔隙比（ ε_0 ）与临界孔隙比（ ε_{cr} ）对比，当 $\varepsilon_0 > \varepsilon_{cr}$ 时，则砂体不会发生液化。此法比较简单，曾经得到广泛应用。但由于这一方法没有考虑动力强度和应力状态的影响，不能正确地代表实际液化现象，因此现在工程实践中已很少采用。振动稳定密度法系利用圆筒仪试验得出的不同振动作用强度下的液化度与干容重的关系曲线，根据实际可能达到的动力强度和应力状况，在曲线上确定不液化（液化度等于零或很小）的干容重，即振动稳定密度。在实际工程中，如果砂土的干容重大于振动稳定密度，即不会产生液化现象。振动稳定密度法的概念与临界孔隙比法相似，但是它综合考虑了振动强度、土的密度和应力状态。其主要缺点是圆筒仪中砂样不可能侧向膨胀，这是与实际情况不相符的。临界加速度法是将试验求得的临界振动加速度（ a_{cr} ）与实际的振动加速度（ a ）相对比，当 $a < a_{cr}$ 时，定为砂土液化的界限。这一方法在工程实践中也得到应用，但应指出，临界加速度值一般都是利用室内试验求得的，它同样存在着试验条件不能符合实际条件（动力作用、应力状态）的缺点。标准爆破法是在现场用 5 公斤 9 号硝酸铵炸药，埋在地面下 4.5 米深处进行爆破，然后量测爆破点 5 米半径范围内地面的平均沉陷量，据以判定液化的可能性。如果平均沉陷量小于 10~20 厘米，便认为不会产生液化现象。

象。这个方法属现场试验，可避免室内试验的缺点，但是爆破作用不能代表所有实际工程的动力条件，同时判别液化与否的标准也纯属经验性的，比较粗略，因此，不能广泛使用。

砂土的液化现象都是以土体内产生一定数值的孔隙水压力为前提的，同时孔隙水压力的产生带来抗剪强度的降低。因此，如能确定孔隙水压力的变化规律，则液化的判断和稳定性的计算亦可随之解决。为确定孔隙水压力的变化规律，马斯洛夫用渗透理论推导出了振动作用沿深度的衰减及不衰减的情况下孔隙水压力的计算公式〔3〕。此外，我国水利电力科学研究院提出了应用震动三轴仪并考虑孔隙水压力的扩散和消失，确定孔隙水压力的变化〔7，8〕，但目前仍是处于探索阶段。

应该指出，饱和粉、细砂的振动液化是一个复杂的问题，要全面地、精确地解决尚有待进一步努力。上述各种方法虽各有缺陷，但多数方法在一定条件下有其实用的价值。

铁路上，有关饱和粉、细砂路基的实践不多，同时更缺乏经验总结。国外有人提出了根据临界加速度的概念来确定砂土路基计算密度的方法〔5〕。其基本出发点是：要求计算加速度小于或等于临界加速度。满足此条件的路基，在列车动荷载作用下不会产生变形，当然也就不会出现液化现象。但应指出，这一方法中为确定设计密度所需的一些参数，有的要通过大量室内试验得到，有的要用经验公式计算求得。这就使之不可能完全切合实际。如果具体条件不同则根本不能直接应用。此外，此方法也没有特别考虑饱和砂中振动强度变化的不同。

我们分析了现有各方法，考虑到要能在较短时间内解决生产上需要，在现阶段缺乏成熟经验的情况下，选择了安全

度较大的振动稳定密度（简称振稳密度）法，但振稳密度的确定不用室内试验的结果，而是在既有铁路上用拟采用的砂借助圆筒仪利用列车振动作用直接求得。以此振稳密度做为设计的依据。同时，对既有线路上稳定的饱和砂路基进行调查，使这一问题得到解决。

二、振动和振稳密度的观测结果及分析

（一）试验概况综述

振动实测主要采用较简便的手持示振仪，振稳密度的观测主要采用圆筒液化观测仪，使用的仪器和观测方法的简要说明见附录 I。

观测工作自1960年以来，先后曾在四条线路的一些区段上进行。观测地段的路基有路堤、路堑；土质有细砂、粉砂、砂粘土、粘土等。振稳密度用砂除了嫩江河滩路堤填筑用的粉砂（B砂）外还有三种（A砂、C砂及D砂）粗细不同的粉、细砂。观测点总计255个（其中振稳密度观测点93个，振动观测点162个），观测通过列车总数为3760趟。

观测工作中还初步研究了用圆筒仪观测振稳密度的可靠性以及砂的初始密度对振稳密度的影响。观测结果说明，用圆筒仪近似地确定振稳密度是可行的。初始密度对振稳密度影响不大，这些资料列入附录 II。

主要观测地段的线路情况见表 I-1，试验用的四种砂的特性见表 I-2。

（二）列车通过时路基的振动

根据1960年以来多次实测的资料，得到在列车通过时路基土的振动有如下的规律：

1. 振动频率（ f ）基本上是一定数。各测定地段实测的结果如表 I-3 所列。

表 I-1

观测试验地点		甲		线	丙 线	丁 线	备 注
线路及运营条件		干 线	联 络 线				
平纵断面 路基高度(米) 单线或复线 边坡坡度1:m 浸水情况 稳定情况		直线、平坡 3-4 复 线 1:1.5~1:1.75 不浸水 良 好	曲线R=1200, 平坡 3-4 单 线 1:1.5 不浸水 良 好	直线, 平坡 3~3.5 复 线 1:2 不浸水 良 好	直线5.8~5.7‰ 2.5~3 单 线 1:3 浸水深1~1.4米 良 好		
	钢 轨	43公斤/米	43公斤/米		50公斤/米	43公斤/米	
	枕木 (根/公里)		上行1800, 下行1600	1600	1840	1680	
	道 床	碎 石 0.3~0.5	砂 0.4	碎 石 0.5	碎 石 0.55		

观测试验地点 线路及运营条件		甲		线		丙 线 K108	丁 线 K157	备 注
		干	线	联	络			
颗粒组成 %	砂	23		22		4.5(4.0)	16.5	丙线试验 段路基表层 为粘土夹 碎石厚0.57 米,下部为 粘砂土层, 其各项指 标值列于括 号内。上部 粘土指标列 于括号外。
	粒	30.5		31.5		1.5(4.0)	71	
	组	25.5		25.5		28(27)	5.5	
	成							
比 重	粉粒	9.0		9.0		46.1(46)	3	
	粘粒	12		12		19.9(19.0)	4	
天然容重(克/厘米 ³) 干容重(克/厘米 ³)		2.66		2.66 1.53~1.88 1.34~1.55		2.71(2.7)	2.65	
						1.09~1.23(1.49)	1.55~1.63	
液 限 (%) 塑 限 (%) 塑性指数 (%)						55.5(27.2)		
						28.9(19.9)		
土 名						26.6(7.3)		
路基土质情况		细 砂	粉 砂	细 砂	粉 砂	粘土(砂粘土)	细 砂	

表 I-2

砂 样	颗粒组成(%)					比 重	干 容 重 (克/厘米 ³)		孔 隙 比	
	砂 粒			粉粒	粘粒		最 大	最 小	最 小	最 大
	> 0.25 毫米	0.25 } 0.1 毫米	0.1 } 0.05 毫米	0.05 } 0.005 毫米	< 0.005 毫米					
A砂	13.5	67	15.2	2.8		2.65	1.72	1.34	0.54	0.98
B砂	0.3 }	49.7 }	19.7 }	3.0 }	5.0 }	2.65	1.62 }	1.23 }	0.596 }	1.007 }
	0.36	65.8	41.3	7.5	7.5		1.66	1.32	0.642	1.162
C砂	16.5	71	5.5	3	4	2.65	1.85	1.445	0.43	0.835
D砂	41	47.5	3.5			2.64	1.86	1.40	0.42	0.89

砂 样	休止角 φ (度)		不同密度 δ 下的渗透系数 $K_{20} \cdot 10^{-3}$ 厘米/秒						土 名	有效粒 径 d_{10} (毫米)	不均 匀系 数 d_{60}/d_{10}
	干燥	水下	δ		δ		δ				
	状态	状态	克/ 厘米 ³	K_{20}	克/ 厘米 ³	K_{20}	克/ 厘米 ³	K_{20}			
A 砂			1.45	3.55	1.50	2.37	1.55	1.87	细砂	0.072	2.36
B 砂	30.3	28.7	1.45	3.12	1.50	2.49	1.54	2.13	粉砂	0.01 }	12 }
										0.058	2.58
C 砂	31.8	30.0	1.54	4.61	1.57	4.45	1.58	2.77	细砂	0.084	2.26
D 砂	33.2	31.4	1.56	4.23	1.60	3.13	1.63	2.99	细砂	0.086	2.91

表 I-3

测 定 地 段	振 动 频 率 (赫芝)	
	范 围	平 均 值
甲线K18	28~37	33
乙线K384, K358	27.6~33.2	31.4
丙线K108	28~34	30.5
丁线K157	27.6~33.2	31.4

2. 最大振幅 (A) 和最大振动加速度 (a) 均随行车速度增加而线性增大 (如图 I-1, I-2), 即

$$A = \alpha V, \quad a = \beta V \quad (1)$$

式中: A ——振幅, 以厘米或毫米计;

a ——加速度, 以厘米/秒² 或毫米/秒² 计;

α ——系数, 以厘米/公里/小时 或 毫米/公里/小时 计;

β ——系数以 厘米/秒²/公里/小时 或 毫米/秒²/公里/小时 计;

V ——行车速度, 以公里/小时计。

根据各测定段的资料得到相应于路基上的垂直向振幅及最大加速度处的 α 值为 0.009~0.015 毫米/公里/小时, β 值为 480~520 毫米/秒²/公里/小时。

垂直向最大振幅及最大振动加速度在钢轨接头处比在钢轨中部处大一倍左右, 其数值均随深度及水平距离的增加而逐渐减小 (如图 I-3, I-4), 衰减近似地如下式表示。

沿垂直方向:

$$\begin{aligned} A_h &= A_0 e^{-\xi h} \\ a_h &= a_0 e^{-\xi h} \end{aligned} \quad (2)$$

沿水平方向

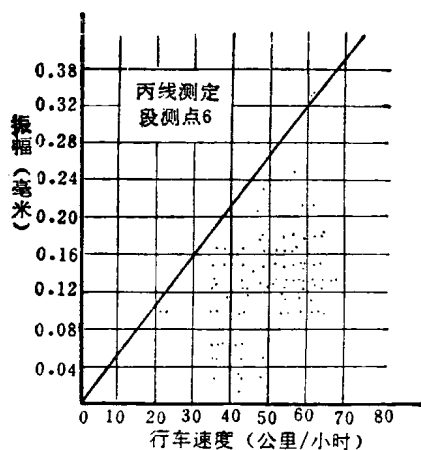


图 I -1 振幅与行车速度的关系

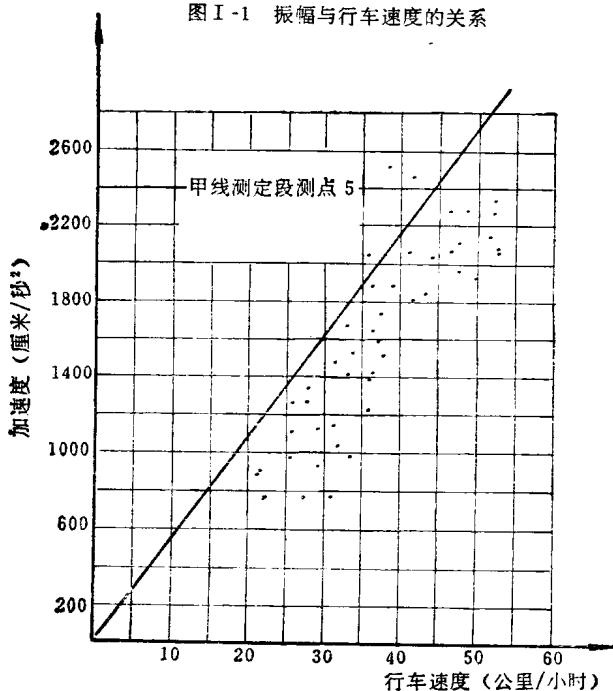


图 I -2 振动加速度与行车速度的关系