

泥石流及其散布地区 的道路設計

C·M·福列什曼著

人民鐵道出版社

泥石流及其散布地区 的道路設計

C·M·福列什曼 著
鐵道科學研究院 合譯
鐵道部專家工作室

人民鐵道出版社

一九五七年·北京

在山区修筑铁路或公路，泥石流的危害是很严重的问题，尤其是在我国目前建设阶段中亟待研究和解决。本书介绍了泥石流动力学研究材料，对通过泥石流流域的现有桥渡工作作了简要的分析，同时还叙述了设计新桥渡和改建运营桥渡的基本原则，可供山区铁路及公路设计、建设和运营有关的工程技术人员作参考用。

铁道科学研究院土工水文研究组张有天参加本书的编校工作。

泥石流及其散布地区的道路设计

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ДОРОВ В РАЙОНАХ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

苏联 С.М.ФЛЕШИМАН 著

苏联国家铁路运输出版社（1955年莫斯科俄文版）

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ · Москва 1955

铁道科学研究院 合译
铁道部专家工作室

责任编辑 王育泉

人民铁道出版社出版（北京市霞公府17号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第010号

人民铁道出版社印刷厂印 新华书店发行

书号818开本787×1092 $\frac{1}{2}$ 印张4 $\frac{1}{2}$ 字数111千

1957年9月第1版

1957年9月第1版第1次印刷

印数0001—880册 定价（10）0.75元

目 录

前 言

緒 論

第一章	粘性泥石流运动的理論基础	12
第二章	模型原理及实验研究的纲要和方法	34
第三章	粘性泥石流性質和动力学实验研究成果	48
第四章	穿过泥石流流域已有桥渡的工作的簡單分析	78
第五章	按桥渡設計条件泥石流流域的分类及选綫問題	94
第六章	泥石流整治原則及防护措施圖示	102
第七章	泥石流洩放及导流建筑物合理的形式及决定 孔徑的方法	109
第八章	攔砂堤	120
第九章	泥石流流域桥渡設計資料的收集	125
第十章	現有桥渡的改建問題	132
	書中所用名詞的解釋	136
	参考文献	137

前 言

保証道路上路基和桥涵建筑物可靠的和不間断的运营条件是对铁路和公路建筑者們所提出的最重要的要求之一。

在山区設計和建筑道路时，必須考虑到被称为泥石流^①的泥-石和水-石流發生的可能性。

但是直到最近，在泥石流散佈地区設計道路时，通常都不考虑防泥石流的措施，这是因为对泥石流現象的研究非常薄弱，其反映是在該問題上沒有对勘测者和設計者的必要的指示。因此，在运营的山区铁路和公路上許多地段，泥石流的通过經常引起过並繼續引起路基和桥涵建筑物的损伤和破坏。帶來的泥石堵塞桥孔，減少其工作淨高，冲刷或埋沒路基，破坏桥墩台，而經常引起行車的中断。

全苏铁道科学研究院（ЦНИС）副博士С·М·福列什曼曾进行了多年的研究工作来拟定在泥石流地区道路設計中有科学根据的防止泥石流的措施。这些研究成果在本書中作了扼要的叙述。

本書还叙述了直接有关铁路和公路綫路的工程設計的特点，攔阻和洩放泥石流建筑物以及現有桥渡的改建等問題（四至十

① 譯者註——我国铁路現場常用的术语是流泥泥石流。我个人認為，这个名词不很切合它所代表的概念，因之我把Селевые потоки譯成泥石流，这样不仅名词和概念相符，且在文字上更为通順；又俄文的Поток中譯一般是水流，但在此書中有时却代表泥石流，在代表泥石流的情况下，譯者一概譯为流动体；Селевые массы 則譯成泥石流體，这一名词也是杜撰的，不过倒很符合原意。还有 Суглинок 过去常譯砂粘土，砂質粘土，次粘土，頗不統一，現按照地質出版社的統一名詞，譯成亞粘土。为了讀者有所了解，以便更准确地体会原文意思，特此附註。

章)，同时还叙述了被作者看成粘性結構系統的粘性泥石流运动机构理論和实验研究材料（一至三章）。

实验研究是在为此特制的長15公尺变坡度的明槽中进行的。

作者把实验和理論研究的成果和結論建議作为工程設計的参考。同时，这些結論和成果有着独立的科学意义，因为在研究过程中发现了类似形式的流动体基本运动規律及其推动大而重雜質的基本規律。

所有对本書的意見請寄至如下地址：Москва, ст. Лосино-островская Северной ж.д., Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного строительства и проектирования (ЦНИС)。

院 長 А. И. 列普列夫

地基基础及
路基研究室主任 И. Ф. 那謝得金

緒 論

1. 泥 石 流 的 概 念

泥石流是一种携有大量泥土和礫片材料从山谷中流出的驟然的和短时的洪水。

与一般水流不同，它含有大量固体杂质（佔 10—15 到 50—60% 以上的体积百分数）。这些杂质改变了流动体的性质和其动力特性，並且影响到阻碍物，其中也包括桥梁建筑物。

泥石流的固体相与流域斜坡上造成泥石流發源地的土壤有关，它可能由粘土、粉土和砂土顆粒組成，同样也可能在其运动过程携带細石头和大石头、塊石、树木和其他杂物。

泥石流的液体相是雨水、山坡上的融雪水和部分土壤水，土壤水是在泥石流的組成土壤中在其尚未失去平衡时所含有的。

与組成泥石流的固体相元件性质（粘土，粉土，砂土顆粒，石塊）及每种杂质的相对百分含量有关，同样也与在液体泥石流中固体相濃度有关，可以按其动力地分成各种形式：稠体型——泥型（泥-石型）和液体型——水-石型。

如果固体相基本是由粘土和粉土顆粒（膠体和接近膠体顆粒）組成的，水的含量相对不大，泥石流則为緊密的、牢固結合的漿体，它有彈性、粘性和塑性性质，向兩旁扩散的特性很弱，並能在悬浮状态帶动大的固体杂质（石、树木等）。

如果在泥石流中水的份量相当大，以致於細粒不足以連成基本集体，或者泥石流固体相中不含有足够量的膠体和接近於膠体的能連結水的顆粒，基本上是砂和大的碎石材料，則流动体的运动帶有紊动特性：石塊运动的主要方式是底部运动；流动体成为

非粘性的，在河床流水断面全範圍內流动，並在河床条件改变促使石塊停止的地方，發生石塊的堵塞和淤积。

稠泥型和稠泥-石型的第-类型流动体，依1952年在第比利斯召开的全苏泥石流研究第三届大会的決議，我們称之为粘性的或結構的，而第二类型流动体，接近於水-石型、液体泥-石型、水-砂型的則称为流动的或紊动的。

当然，在自然界中也能遇到許多中間型和混合結構流。在許多情況下，同一流域依泥石漿备量的形成特性和直接引起泥石流的降雨强度不同，能够發生結構泥石流，同样也能發生紊动泥石流。甚至在同一流动体中，在不同的時間里能够是結構型也或者是紊动型。但所指出的兩种泥石流的型式是其在物理上可能的兩种極限結構，其間有質的差別，並能决定流动体的运动机构。

简化这种泥石流多种的和复杂的現象，在研究的现阶段是必需的，不仅是对於泥石流动力学理論和实验的研究是这样，而對於研究在泥石流流域铁路和公路桥渡設計的实际方法和建議也是这样。

泥石流是地球上位於热带和温帶的有山地国家的特征（澳大利亚、德国、法国、意大利、美国、瑞士、捷克、保加利亚、印度、中国、朝鮮和其他国家的山区）。

在苏联泥石流流域的散佈主要在外高加索，克里米亞，中亞細亞，哈薩克，阿尔泰和东西伯利亞一部份。

泥石流在許多情況下使人民經濟遭受巨大損失，因为它們流过时同时出現破坏的跡象：帶走庄稼，耕田被泥石流所掩沒，破坏或帶走土壤結構等。

通过泥石流流域的铁路和公路的路基及桥涵建筑物，会週期地遭受驟然發生的泥石流的有害作用：破坏，冲刷，桥涵孔徑的淤塞，路基被泥砂埋沒。

泥石流通过后的善后处理要消耗大量的物資。

确定發生泥石流的三个基本条件为：1) 流域的山区地形，

2) 强烈破坏的風化層和在山坡上形成大量疏松土壤, 3) 有暴雨降落。

应当把确定形成泥石流漿备量的条件和确定發生泥石流的条件区分开。

形成泥石流漿备量的条件主要和引起山坡地壳上層逐漸疏松和破坏的地質、水文地質和气候因素有关。

其中每一个因素在形成泥石流漿备量的单独作用, 在許多作者如H.C. 久尔巴烏穆, П.С. 涅波洛日尼, Ф.К. 柯契尔加和其他等人的文献中有詳細叙述。

但这并不应该認為关于泥石流的發生問題已接近於其最終的解决。本文中不涉及这些問題, 而仅仅指出某些作者把形成泥石流漿备量的条件和發生泥石流的条件混为一談, 同时还不正确的把影响形成泥石流漿备量的各种因素人为地分开。区域的气候特性(晝夜和季节的温度变化幅度, 暴雨量的强度和頻率, 風力和風向)直接影响風化和侵蝕过程的快慢。在流域坡地上沒有植物复盖層(沒有森林)和其他因素同样也影响这一过程。

在山区流域山坡和河床中集聚的松碎材料的备量仍不能决定發生泥石流的条件。發生泥石流的基本条件是: 足够量和足够强度的山区暴雨和融雪(也可能雨和雪混合一起), 能够产生足以卷起並沿山坡和河床帶走松碎材料的水流。

但是, 在山坡和河床已集有大量松碎材料的流域, 並非每次甚至最强暴雨都能引起泥石流。还必须要有: 这些材料应处于不稳定平衡或接近於不稳定平衡的状态。

所以, 就整个來說, 泥石流現象取決於大量天然自然界因素复杂的和綜合的作用, 並象征为兩阶段, 即是形成泥石流漿备量和發生泥石流。

第一阶段是非常長的, 逐漸的, 延續到許多月、許多年, 有时到几十年。

在已集聚有泥石流漿备量后, 第二阶段是非常短的, 其象征为

动力特性，延續不过几十分鐘或几个小时。

每一泥石流流域一般都可以分成三个区域，在泥石流現象中具有不同的象征。

泥石流發生区（上部）是流域的山坡区域，这里最先形成泥石漿备量（圖1）。

流动区（中部）是泥石流流域河床由上部泥石流發生区到山溝谷地出口的一段。大多数流域流动区都表现为显著的河床，並有稳定的流域山坡（圖2）。流动区的坡度一般比發生区的坡度緩，而比沉积区的陡。在流动区中通常既沒有新的泥石流产生，也沒有大量泥砂沉积。它仅仅在山谷中由業已形成泥石流来运送泥石漿所集聚的备量。



圖1 泥石流流域山溝外形

泥砂沉积区（下部）又常被称为冲积錐，它是泥石流流域的一部分，泥石流所帶來的固体材料在这里大量沉积（圖3）。沉积区大半都沒有固定的河床，所以其河道变化是多样的，其坡度和其他兩区比較是最緩的。

因之，当泥石流由山溝流至谷地时向各方分散，其深度，水面坡度，以及其速度將急剧减小，这就要發生大量泥砂的沉积，甚至流动的运动完全停止。

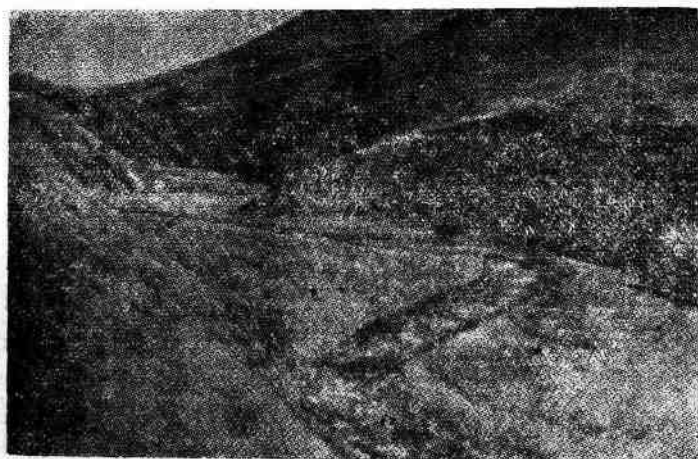


圖 2 流动区

整个来说，把破坏的岩石由上游发生区运至下游沉积区的泥石流现象可以看成侵蚀的一种形式。

在紊流运动中泥砂沉降时，大块石停止运动的时间比细石要早。在许多情况下，泥砂沉积是锥形的，因而在文献中就出现了冲积锥的名词，虽然它不是很准确的，但我们以后仍要用它。

非常粘的稠泥流或稠泥-石流，成为一个整体在运动，由山沟流出至谷地时，通常不展为扇形，而在其停止运动时，泥砂并不按其颗粒大小分类。

这样的流动体沉积成泥舌或泥-石舌状。

由上述可以看出，泥石流的频率及大小不是决定於一年之中季节循环，而是决定於有准备好的泥石流浆原料时的大雨。很遗憾，在同一个流域中泥石流的频率问题还很少研究。

泥石流的野外调查及其理论分析，能给出如下假定的情况可作为拟定泥石流频率的根据。

1. 泥石流的發生通常在夏季，在干热后的暴雨时，有时也發生在春末山坡融雪和暴雨合在一起时（在已有泥石流浆备量的条

件下)。



圖3 泥砂沉积区

2. 泥石流發生区的岩層愈松，流域的山坡和河床愈陡，則这里發生泥石流的次數也愈多。

3. 發生泥石流的机会愈少，在相等的条件下其發生可能强度愈大。

2. 問題現况和研究任务

在运营的铁路和公路与泥石流流域相交^①都是不成功的，未考虑流域的泥石流特性，也未考虑泥石流的运动和对建筑物的作用与一般水流有质的区别。在这种情况下，泥石流的通过对路基和桥涵建筑

物起着有害的作用，常常引起行車的中断。

存在着大量不成功的相关情况说明对泥石流现象的研究不够，而它的表现则是直到现在还没有对泥石流地区的道路设计问题进行必要的分析，在已有的技术文献中，对桥渡选线，防泥石流建筑物的作用和布置，桥孔的决定等问题，可以找到的仅是个别的一般建议，甚至可以找到互相矛盾的建議，当然，这些建議在任何程度上都不能满足在泥石流地区铁路和公路的设计与运营上实际的需要。由于这些原因，泥石流地区铁路设计的问题和保护运营线路不受泥石流影响的问题，在现有铁路干线及其桥涵建筑物设计技术规程(ТУП 和 ТУПМ)中没有反映。

为了使勘测和设计人员获得正确解决有关泥石流地区的相交

① 譯註——以后相交都代表铁路或公路与流域河谷相交而言。

設計問題的可能性，首先要由通過鐵路和公路綫路可能的觀點，以及按其中發生泥石流對路基和建築物作用的特性、強度、形式來對這些流域及其區段進行分類，並對其相應地探求泥石流地區綜合設計的基本原則。這就是在鐵道科學研究所進行的和本書所敘述的研究的基本任務。

研究的迫切性是為保護運營綫路不受泥石流影響及山區新綫的遠景修建的必要性所決定的。

穿過泥石流流域的鐵路和公路綜合的設計應作如下的理解，即同時決定以下的合理的和有效的設計問題：

- 1) 綫路位置；
- 2) 泥石流洩放建築物（型式、佈置、結構、孔徑尺寸）；
- 3) 可靠地保護穿過綫路不受泥石流的壞作用及導引流動體至泥石流洩放孔的建築物（泥石流攔阻建築物，保護建築物及導流建築物）。

為了解決這些問題，必須首先闡明泥石流運動所固有的規律性。

如果說現有的關於紊動泥石流動力學研究的成果〔7〕，〔8〕，〔12〕和〔18〕，可以初步近似地解決經過特徵為這種流動體流域的鐵路和公路橋渡設計的基本問題，那末關於粘性（結構）泥石流的研究處境就要壞的多。

解決鐵路和公路穿過發生粘性（結構性）泥石流流域的問題，如對下列各點無初步了解，（即或是近似地了解）也是不可能的。

- 1) 組成結構性泥石流的泥石漿的物理力學性質；
- 2) 結構性泥石流運動的一般機構及河床條件下運動阻力；
- 3) 流動體挾帶大雜質的比重比流動體重許多的特性。

闡明這些問題不僅對解決實際任務有巨大的意義，同時對粘性泥石流和其他粘性結構介質動力學的理論問題的探求也有很大的意義。

在作者领导下，铁道科学研究所进行的研究有下列的内容：

1) 对有运营铁路穿过的山区和山麓地区的许多泥石流流域进行野外调查，并对在各个区域受有泥石流不同作用的线路本身进行调查；

2) 穿过泥石流流域铁路和公路设计基础的及泥石流动力学某些原理的理论探求；

3) 粘性泥石流的基本物理力学性质及其在自由河床条件下及人工压缩河床条件下的实验研究。

研究的第一阶段是在受有泥石流有害作用的泥石流区域铁路段进行了野外调查（1948——1951年）。

在选择地段时曾经注意对各种泥石流含量条件的桥渡调查的必要性。

各种不同结构的桥涵及经过各种不同地形的大小流域泥石流渡槽，都经过调查。

除调查稠泥流和泥-石流的流域外，还对近似水石流的、有各种杂质含量及各种不同尺寸（礫石、塊石）和水流各种特性（流速、体积、流量）的流域进行了调查。

野外调查的这种组织可以按下列来分析所调查的桥渡：

- 1) 桥渡通过地点所属区域；
- 2) 泥石流洩放、攔阻和导流建筑物型式；
- 3) 建筑物在河床上的佈置及其结构元件

所调查的流域及其发生的泥石流，则按下列各点分析：

- 1) 流域面积和泥石流体积；
 - 2) 泥石流结构；
 - 3) 流动体的动力元素（流速，流量，大杂质的含量，石块尺寸）；
 - 4) 泥石流对路基和桥涵建筑物的影响
- 进行了两类实验研究：

1) 在特制的容器中研究静止状态下泥石流材料的物理力学性质 (1950年) ;

2) 在明槽中研究流动体运动的性质和机构, 以及其挤缩天然河床状态的桥涵建筑物间相互作用的特性 (1951—1953年)。

在实验研究以前曾制定研究各基本问题的假设: 而实验和野外的研究本身又是研究有关穿过泥石流流域铁路和公路设计问题理论原则和实际建议的基础 (1951—1953年)。

第一章 粘性泥石流运动的理论基础

1. 泥石流浆的性质

在静止状态下的泥石流浆被我们看成是液体扩散介质 (水) 及固体散佈相 (微細顆粒) ① 的土壤多相系。

根据现代土壤学的基本理论原则, 土壤系的物理性质与其散佈程度及胶体或近似胶体颗粒的含量是紧密相关的。

包围土壤颗粒的水分子在其周围组成了有较大密度和粘度的结合水膜。这水化膜在很大程度上失去了物理液体的性质。由于在兩相分界表面有表面分子引力, 散佈系则有很大的自由能量储备, 指出这点是非常重要的。

被结合水膜 (水化膜, 扩散膜) 所包围的胶质固体核我们称为小散佈颗粒 (参考文献 [1])。在泥石流中这类颗粒的大量含量就使它带有粘性 (有结构性)、塑性以及粘土悬液所特有的其他性质。在固体相是含有各种粗度颗粒的多散佈系的細粒泥石流浆中, 胶体性质出现的程度显然与胶体或近似胶体粒表面总和有关, 即与公式

$$S = \frac{S_0}{V}, \quad (1)$$

① 这里及往后我们都将用 B.B. 奥蒙琴教授对土壤颗粒的分类法, 而把 0.005 公厘以下称为粘土颗粒成分; 由 0.005 至 0.25 公厘的为粉土, 由 0.25—2 公厘的为砂土。所有尺寸大于 2 公厘的 (卵石、砾石、块石) 我们都假定称之为大石杂质。

所表示的固体相散佈程度有关。

公式 S_0 — 固体相顆粒和扩散介質分界总面积；

Γ — 泥石漿单位容积。

在一公方泥石漿微細粒中，甚至粘土佔10%而砂土顆粒佔90%时，前者的总表面要比后者总表面值大到100倍。因此，甚至少量的粘土顆粒就完全能够給稠泥石流以結構状态和較大的悬浮性質。

两个粘土顆粒的粘性状态的必需条件是其互相位置，它应保証在顆粒間的水受到相鄰顆粒的分子引力。当两个土壤顆粒的距离 l 小於分子力作用半徑 r 的兩倍时，則这一状态即可实现（圖4，6）。

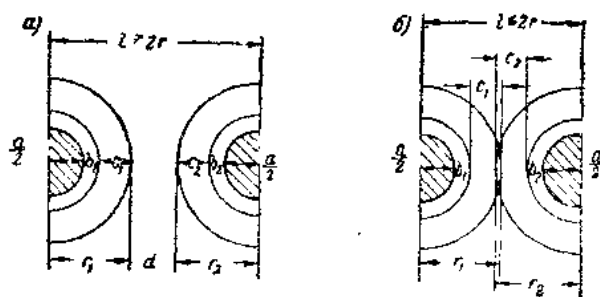


圖4 顆粒的非粘性(a)和粘性(b)状态

現研究在靜止状态下相鄰顆粒处于粘性及非粘性状态下泥石漿的性質，並假設漿体是100%水飽和的，其孔隙中沒有空气，即把泥石漿看成兩相体，而这是符合其自然界状态的^①。

当 $l > 2r$ 为非粘性状态时（圖4，a），土壤顆粒及其水化膜处在自由水場中，自由水处在分子引力范围之外，而有普通水的物理性質。

包圍顆粒核的紧密結合水的密度 γ 接近其固体核的密度 γ_m ；自由水場的密度为 $\gamma_0 = 1$ 。沒有受相鄰顆粒分子粘結的自由顆粒。

^① 偶然鑽入顆粒間个别气泡实际上不能决定这一体系的状态，故可忽略不計。

服从於阿基米德定律，因为 $\gamma_m > \gamma_a$ ，故在重力作用下趋於下沉

当 $l \leq 2$ 为粘性状态时，細小散佈顆粒互相接触，其結合水吸附膜結在一起。在这种情况下，自由水不能將膠体顆粒互相隔絕，而只能处在顆粒羣中（結構挤藏）。

固体顆粒和其周圍水化膜不受重力作用，因为微細散佈顆粒在其下沉时受到周圍顆粒的阻碍。

处在静止状态下泥石漿中含有的互相結合的微細扩散顆粒体系与前者根本不同，因为不自由水約束了固体顆粒，而被水化膜所包圍的固体顆粒的互相結合則約束了挤入孔隙中的自由水。

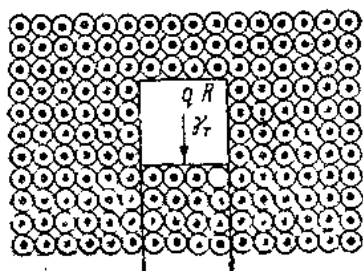


圖 5 泥石漿中的大雜質

假設在互相結合的微細散佈顆粒羣間的孔隙中不仅有自由水，且有某种大散佈顆粒 R ，其四周都是互相結合的微細散佈顆粒（圖 5）。这种顆粒的性态由重力 q 和下沉入泥石漿中所出現的阻力間平衡条件所決定。

大顆粒下沉的阻力为：

- 1) 下層吸附膜破裂的阻力，表現为其間接触層的粘度 η ；
- 2) 作为大顆粒基础的一層泥石漿的密度 γ_c ；
- 3) 該顆粒及其周圍微細散佈顆粒間的附着力 m ；
- 4) 該顆粒及其周圍介質的側摩擦力 F 。

重力作用的总阻力，即大顆粒下沉阻力为

$$G = f(\eta, \gamma_c, m, F)$$

平衡的条件是 $q \leq G$ 。

但摩擦力和附着力本身又是包圍微細顆粒，在該情況下为挤入其間的大顆粒接触面的吸附膜表層粘度的函数。

因此，使大重雜質处于悬浮状态的泥石漿基本物理性質为漿体的粘度和密度。