

砂土震动液化

刘 颖 谢君斐 等编著

地震出版社

砂土震动液化

刘颖 谢君斐等 编著

地震出版社

1984

内 容 提 要

本书对地震引起的饱和砂土液化的机理、影响因素、水平地面下砂土液化可能性估计、砂土液化对土坝地震稳定性的影响及砂土液化的预防措施等问题进行了系统的论述,并给出了地震剪应力计算程序。可供地震工程、土建、水利及工程地质等方面的工程技术人员参考。

砂 土 震 动 液 化

刘 颖 谢君斐等 编著

责任编辑:何寿欢

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

展 望 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

850×1168 1/32 10.5印张 265千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷

印数 0001—3,000

统一书号: 13180·220 定价 1.95 元

前 言

尽管人们早就注意到地震引起的砂土液化现象，但从工程角度深入地研究这个问题，却是从本世纪中叶才开始的。

1964 年阿拉斯加地震引起的大规模滑坡和新潟地震引起的地基失效都是砂土液化造成严重破坏的典型事例。这在日本、美国和其他一些国家的工程界引起了很大的关注。地震荷载作用下饱和砂土液化问题现在已成为地震工程学和土动力学的重要研究课题。这方面的研究在日本和美国最为活跃。他们利用各种振动试验研究饱和砂土产生液化的原因和条件，探讨饱和砂层的地震反应分析方法和孔隙水压力的发展过程，给出了预测砂土液化的方法。

在我国的历史文献中，也有很多关于砂土液化现象的记载，这些资料迄今仍有很大的研究价值。由于大规模工程建设的需要，自五十年代起，有关科研部门就开始了砂土液化问题的研究，取得了一些新成果。在总结建国后几次大地震，特别是 1966 年邢台地震经验的基础上，我国首先把液化判定方法列入工业与民用建筑抗震设计规范。1975 年海城地震和 1976 年唐山地震都引起了大面积的砂土液化，给农田、水利设施、桥梁及各种工业民用建筑造成了严重的损害。此后，我国工程技术人员进一步对砂土液化问题展开了广泛的研究，取得了不少有价值的成果。

本书共八章，前面七章分别论述了砂土液化的几个实际问题，第八章介绍了国外在砂土液化研究方面的某些新尝试，最后给出了地震剪应力计算程序。参加本书编写的有：刘颖（第一章及第二章、第七章）、石兆吉（第三章及第四章）、谢君斐（第五章及第八章的第一部分）、张克绪（第六章及第八章的第二部分）、附

录由谢君斐与张克绪合写。全书由刘颖负责统编。

由于笔者水平有限，难免挂一漏万，甚至有错误，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 砂土液化的宏观现象	(1)
§ 1.1 砂土液化引起的震害	(1)
§ 1.2 砂土液化的地质背景	(12)
§ 1.3 砂土液化的土质条件	(17)
§ 1.4 砂土液化的限界指标	(24)
第二章 饱和砂土的液化机理	(30)
§ 2.1 砂水复合体系的特性	(30)
§ 2.2 残余孔隙水压力的发展规律	(35)
§ 2.3 饱和砂土的液化破坏过程	(44)
第三章 砂土液化的室内测定	(59)
§ 3.1 试验原理	(59)
§ 3.2 仪器准备	(63)
§ 3.3 试验方法	(67)
§ 3.4 数据整理	(75)
第四章 砂土液化的影响因素	(78)
§ 4.1 颗粒级配	(78)
§ 4.2 透水性能	(81)
§ 4.3 密度	(83)
§ 4.4 结构	(84)
§ 4.5 饱和度	(90)
§ 4.6 初始应力状态	(94)
§ 4.7 动荷载	(95)
§ 4.8 小结	(101)
第五章 水平地面下砂土液化可能性的估计	(105)
§ 5.1 基于震害经验的液化可能性估计方法	(106)

§ 5.2	基于室内研究和反应分析的液化可能性 估计方法	(130)
§ 5.3	液化范围的估计	(159)
§ 5.4	液化后果的估计	(161)
§ 5.5	对上述各种方法的评价	(166)
第六章	砂土液化对土坝地震稳定性的影响	(170)
§ 6.1	坝体和地基土质条件与土坝震害的关系	(170)
§ 6.2	非粘性土坝坝坡地震稳定性分析的动力 法	(173)
§ 6.3	设计地震及其坝基基岩运动参数	(175)
§ 6.4	坝的静应力分析	(176)
§ 6.5	坝的地震应力分析	(180)
§ 6.6	土的非线性弹性性能的考虑	(182)
§ 6.7	饱和砂土室内液化试验结果分析	(189)
§ 6.8	坝体和坝基内液化区的确定	(196)
§ 6.9	坝坡的地震整体稳定性	(208)
§ 6.10	坝体和坝基中饱和砂土液化预防措施的 重要性	(209)
第七章	砂土液化的预防措施	(212)
§ 7.1	振冲法	(212)
§ 7.2	排渗法	(215)
§ 7.3	强力夯实法	(220)
§ 7.4	爆炸振密法	(222)
§ 7.5	其他方法	(223)
第八章	砂土液化研究的新发展	(225)
§ 8.1	新试验技术	(225)
§ 8.2	砂土液化引起土工结构和地基的地震变 形	(230)
附录	平面动力问题有限元计算程序	(255)

第一章 砂土液化的宏观现象

大地震是一种严重的自然灾害，会给人们的生命财产造成极大的损失。伴随地震产生的各种破坏现象，尽管很复杂，但总是遵循某种规律而产生的。由地震引起的砂土液化现象也是如此。这里拟从宏观现象出发，描述与砂土液化有关的震害，讨论砂土液化产生的地质背景和土质条件，从而试图寻找出砂土液化发生的某些规律性。

§ 1.1 砂土液化引起的震害

饱和松散的砂土在强烈地震作用下会产生急剧的状态改变和强度丧失，导致地面和建筑物破坏，此即所谓液化现象。这种现象在我国历史文献中有大量记载。

我国人民很早就注意到地震引起的砂土液化现象，史书不乏其例。举其要者，如 1668 年山东郯城地震(8.5 级，震中烈度十二度)，极震区莒县“城内四乡遍地裂缝，或宽一尺至三尺，长数丈至百步，裂处皆翻土扬砂，涌流黄水；沭河东崖裂，缝宽三尺，长十五里，崩为堑，漩为渊；城东北，井三口，喷水高三、四尺”。此次地震波及范围极广，远离震中约八百公里的江西金谿也“地裂为井，黑水泥砂从中涌出”。又如 1920 年宁夏海原地震(8.5 级，震中烈度十二度)，极震区海原“山河变易，山崩土裂，黑水喷涌”；通渭“山崩崖裂，有全庄覆没者，或仅留一、二家者，平地裂缝，涌水带黑砂”。这次地震波及的范围也相当大，距震中约六百公里的甘肃临泽也“房屋倒塌，涌黑水”。

解放后的几次大地震都曾引起砂土液化现象。其中液化范围广，造成损害大的，应该说是 1966 年邢台地震、1975 年海城地

1966年3月8日和3月22日，河北邢台地区发生了强烈地震，前者震中位于滏阳河附近的牛家桥(6.8级，震中烈度九度)，后者震中位于该河下游的东汪(7.2级，震中烈度十度)。这两次地震，沿滏阳河及其支流两岸广大地区，引起了大量的喷水冒砂、地裂缝，造成堤防、岸坡大规模滑塌和河道建筑物(桥、涵、闸)严重破坏。

1975年2月4日辽宁海城地震^[1],震中位于海城县的岔沟(7.3级,震中烈度九度,图1.1)。震区东部虽然靠近震中,烈度较高,但只在个别地方,如河滩和靠河较近的洼地产生少量的喷水冒砂,各类建筑物,包括桥梁在内,没有发现因地基失效而加剧



破坏；但震区西部虽然离震中较远，烈度较低，却发生了大规模的喷水冒砂，给公路、桥梁、堤防、河岸、渠道、农田、水利设施、工业民用建筑、地下管道、油井等造成了严重的损害。

地面喷水冒砂通常开始于主震过后几分钟。冒砂较快地停息下来，但喷水的时间可持续几小时甚至几天。由于室外土层冻结，有些地方，室内喷水冒砂比室外还要强烈。地面出现大小不同的砂堆，形似火山口。

由于喷水冒砂，地层被淘空，在重力作用下，有的喷水冒砂孔形成圆形，椭圆形陷坑，坑口直径多为三、四米，大者可达八米，坑深由几十厘米至几米。

公路边沟，由于覆盖层薄弱，喷水冒砂严重，边沟被淤，路基被淘空，有的地段产生很多陷坑。陷坑随天气变暖而增加。

河床、渠底覆盖层薄弱，甚至可液化砂层露出河底，更具备液化条件。砂土液化造成岸堤开裂和向河心方向滑移，将河道挤窄，使河床抬高。辽河两岸的堤防遭到了严重的破坏。

喷水冒砂淹盖了大量农田，淤塞了很多渠道。在盘锦地区，估计淤塞渠道四百余万米，农田淤砂三百余万立方米，覆盖农田六万余亩。喷砂冒水严重的农场，农田淤砂面积约占耕地面积的百分之二十五。

砂土液化严重的地区，大量桥梁遭到严重的破坏。例如盘锦地区南河沿东方红八孔混凝土公路桥岸坡和桥头路堤开裂，一侧的桥台向河心方向滑移 1.3 米，桥墩倾斜，桥面高低不平，不能通行(图 1.2)。又如施工中的营口地区田庄台辽河大桥，全长 800 余米，二十二孔，桩基础。桩长分三种：桥台及引桥部分为 21—23.5 米；河滩部分为 50 米。地基土：地表下 40 米范围内，最上层为 5—6 米厚的粘性土，下为十几米厚的粉砂，再下为细砂。震后发现，河南岸出现多条顺河向的长大裂缝，桥台后填土开裂与桥台脱离，地面出现喷水冒砂；河的北岸更为严重。桥墩都向河心倾斜(图 1.3)。震后对桥墩进行水准测量，发现斜

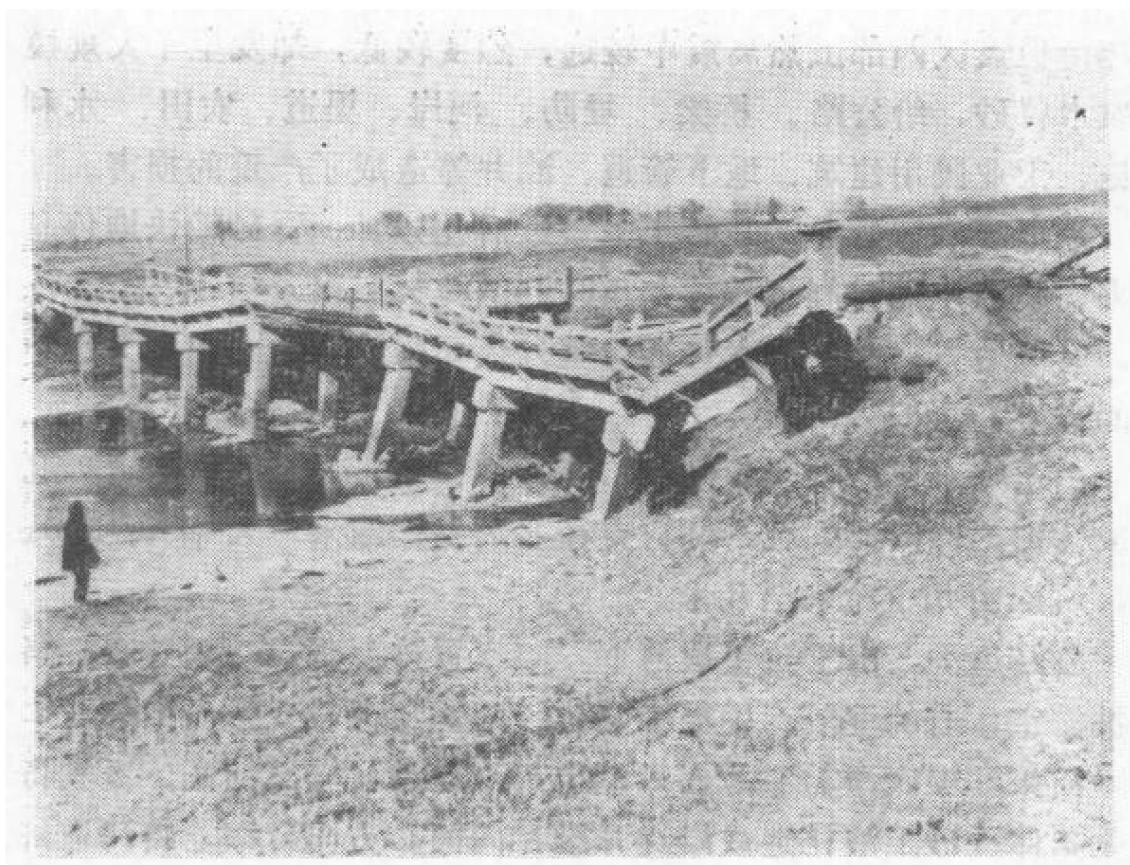


图 1.2 东方红公路桥的震害

率为 0.7%—13%，墩身下沉 1—92 厘米、墩间跨度改变，有的缩短 40—316 厘米，有的增长 3—104 厘米。两端桥台间距缩短 251 厘米。各墩向河心变位 20—436 厘米。

1976 年 7 月 28 日凌晨和傍晚，河北唐山地区发生了两次强烈地震。前者震中位于唐山市(7.8 级，震中烈度十一度)，后者震中位于迁安县野鸡坨(7.1 级，震中烈度九度)。这两次地震使唐山地区出现了大面积的喷水冒砂现象。主要出现在昌黎至天津之间的铁路线与渤海湾的滨海平原地区(图 1.4)。

据当地居民反映，喷水冒砂开始于震后几分钟，冒砂持续时间有的长几小时，而喷水持续时间有的达几天甚至十几天；喷水冒砂的高度有的可达二、三米。滦县新县医院工作人员在第二次地震(7.1 级)时正在院内；地震后约十分钟，亲眼看到院内开

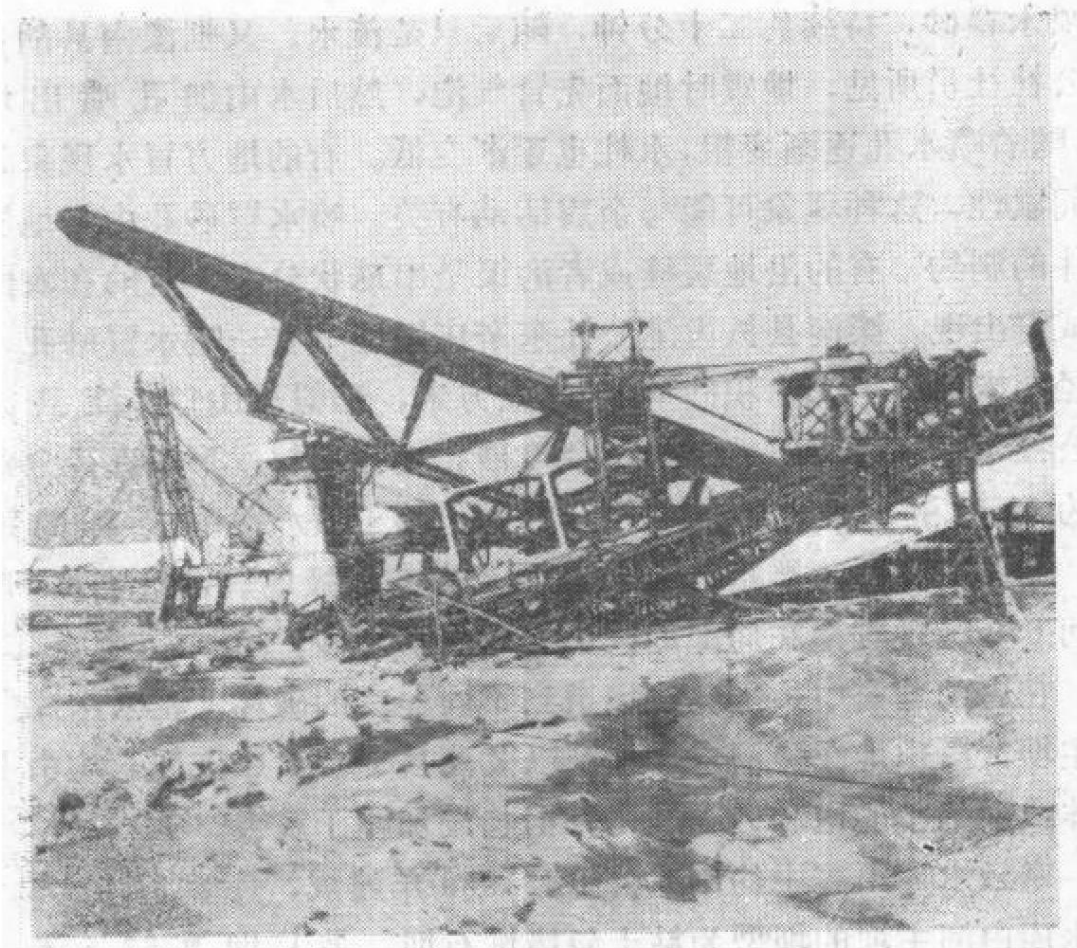


图 1.3 田庄台辽河大桥桥墩倾斜

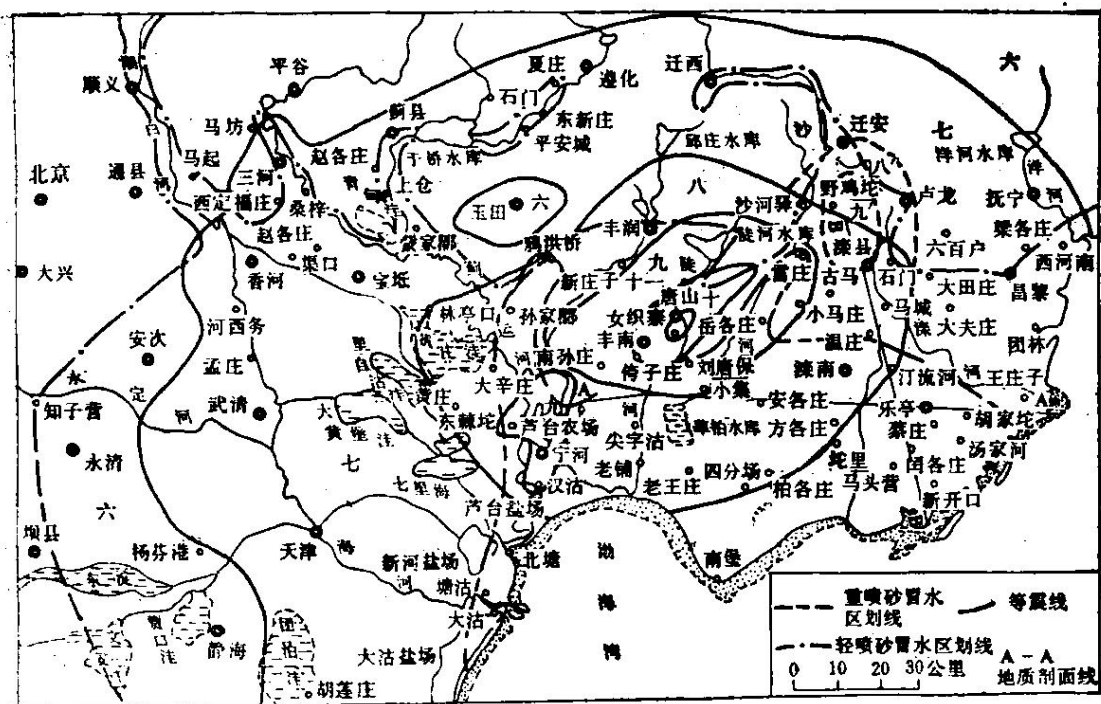


图 1.4 唐山地震喷水冒砂区示意



北林图 A00058239

328173

• 5 •

始喷水冒砂，持续约二十分钟，随后只是流水。又据滦南县胡各庄公社社员所见，地震时地面先冒气泡，然后水由细孔喷出地面，随着喷水孔逐渐变粗，水柱也逐渐变低。有的地方冒水现象具有间歇性，这种现象可能与余震活动有关。喷水冒砂孔由于地质条件的制约，有的沿地裂缝或者沟渠呈串珠状分布，有的在农田里成群出现。滦南县扒齿港公社东辛庄田地里有一喷水冒砂孔，孔径6米，深1米，积砂量约50立方米，形似火山口。滦县余庄公社李各庄附近田地里有两个喷砂孔连在一起，形成直径分别约为19米和14米的陷坑。强余震也引起了喷水冒砂，有的地区，比主震时更为严重，8月31日庐龙6.3级地震，11月15日宁河6.9级地震都在局部地区引起了喷水冒砂。

在唐山地震中，一些土坝遭到不同程度的破坏。密云水库白河主坝、唐山地区陡河水库土坝以及蓟县于桥水库土坝，均由于坝体或坝基中的饱和砂土液化，引起或加剧了震害。

密云水库距震中约150公里，1959年建成，库容44亿方。该水库白河主坝的坝型为粘土斜墙堆石坝。最大坝高63.5米，坝顶长960米。7月28日晨第一次大震后，警卫人员听到上游坡有响声，后来检查发现，水边线以下的砂砾料护层沿粘土斜墙面滑落。滑落几乎延及整个坝段，约825米，其中桩号0+200—0+700之间长约500米的坝段最为严重。经潜水检查发现，滑落严重的坝段，护层沿斜墙面全部滑落，越过防渗层上面的小坝，滑得很远。

陡河水库*，距震中18公里，坝型是碾压均质土坝，1956年建成，库容3.4亿方，最大坝高22米，主坝长1700米，总坝长6115米。主坝段坝基表土层为粘性土，厚约8米，其下为细砂，厚约10米，中有粘性土夹层。地震时陡河水库土坝遭到严重破坏。在桩号1+700以内(自左坝头起，包括旧河槽、河漫滩、一

* 河北省根治海河指挥部勘测设计院，陡河水库震害调查报告，1977

级台地)有横缝 90 余条,较严重的有 20 余条。两组长大的纵向裂缝在桩号 0+100 至 1+700 之间大体上对称地分布于上下游两侧(图 1.5)。每组裂缝由 2—5 条较大裂缝组成,裂缝组的总宽度为 2—9 米,单一裂缝的最大宽度为 2.2 米。经勘探查明,裂缝的深度有的可能贯穿到坝基砂层。主坝下游坡及坡脚附近 50 米范围内有喷水冒砂孔 60 余处,上游坡也有一些喷水冒砂孔。坝体有明显的竖向变形,防浪墙和坝顶呈波浪式起伏。



图 1.5 陡河水库土坝上游坡纵向裂缝

于桥水库距震中约 80 公里。坝型为均质粘土坝,系用水中倒土方法填筑的,1961 年建成,库容 13 亿方,最大坝高 22.7 米。震后发现下游坡有 8 条细的纵向裂缝,沿下游河槽有 20 条裂缝,其中 13 条裂缝喷黄砂或黑砂,有两处喷砂靠近坡脚。地震时减压池喷水。

喷水冒砂严重的地区,大量的桥梁遭到破坏。芦台蓟运河钢筋混凝土公路桥,9 孔,全长 128 米,桥基表土层为灰色粘性土,

厚 5—6 米，其下为灰色粉砂。地震引起两端桥台下沉，芦台侧桥台下沉 15 厘米。河滩有顺河向的裂缝。2 号墩与 7 号墩均向河心倾斜。第五孔和第八孔落梁(图 1.6)。滦县砂河钢筋混凝土公路桥，22 孔，全长 200 米。桥基粘性土覆盖层较薄，下为细砂。地震引起桥台后填土下沉，7、8、9 号墩向河心倾斜。第九孔落梁。河滩大量喷水冒砂，并有多道顺河向的裂缝。唐山市胜利桥是跨陡河的五孔钢筋混凝土公路桥。桥址附近，陡河上下游两岸严重滑塌。桥台倾斜、下沉、滑移，1 号墩折断，2、3、4 号墩倾斜，两孔落梁。

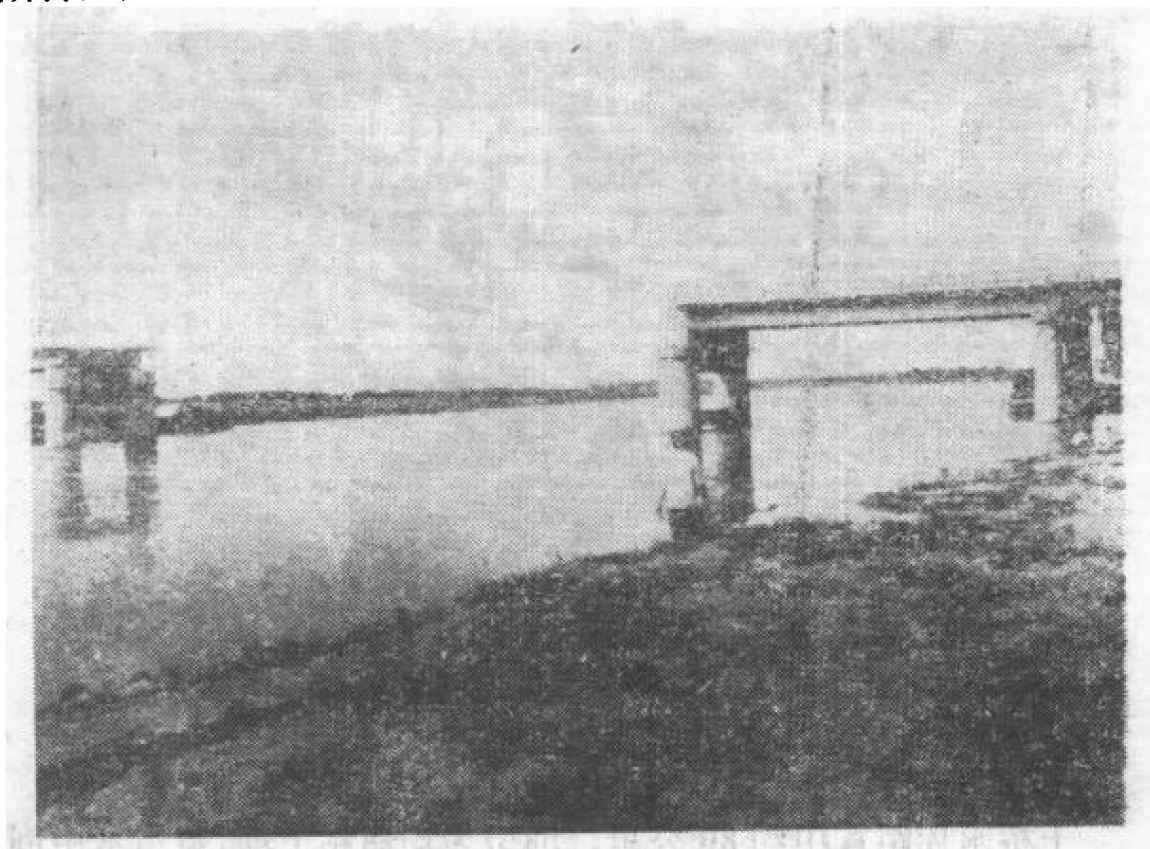


图 1.6 芦台蓟运河公路桥的震害

由于砂土液化，许多河流岸堤产生严重的开裂和滑塌，河道由于两岸向河心滑塌和涌砂而变窄、升高或堵塞。唐山市女织寨公社赵田庄附近，陡河两岸严重滑塌，以致两岸的树交会到一起(图 1.7)，河道堵塞，河水漫溢，淹没两岸大片农田。玉田县还乡河窝洛沽附近河段，岸堤遭到极其严重的破坏，滑向河心，堵

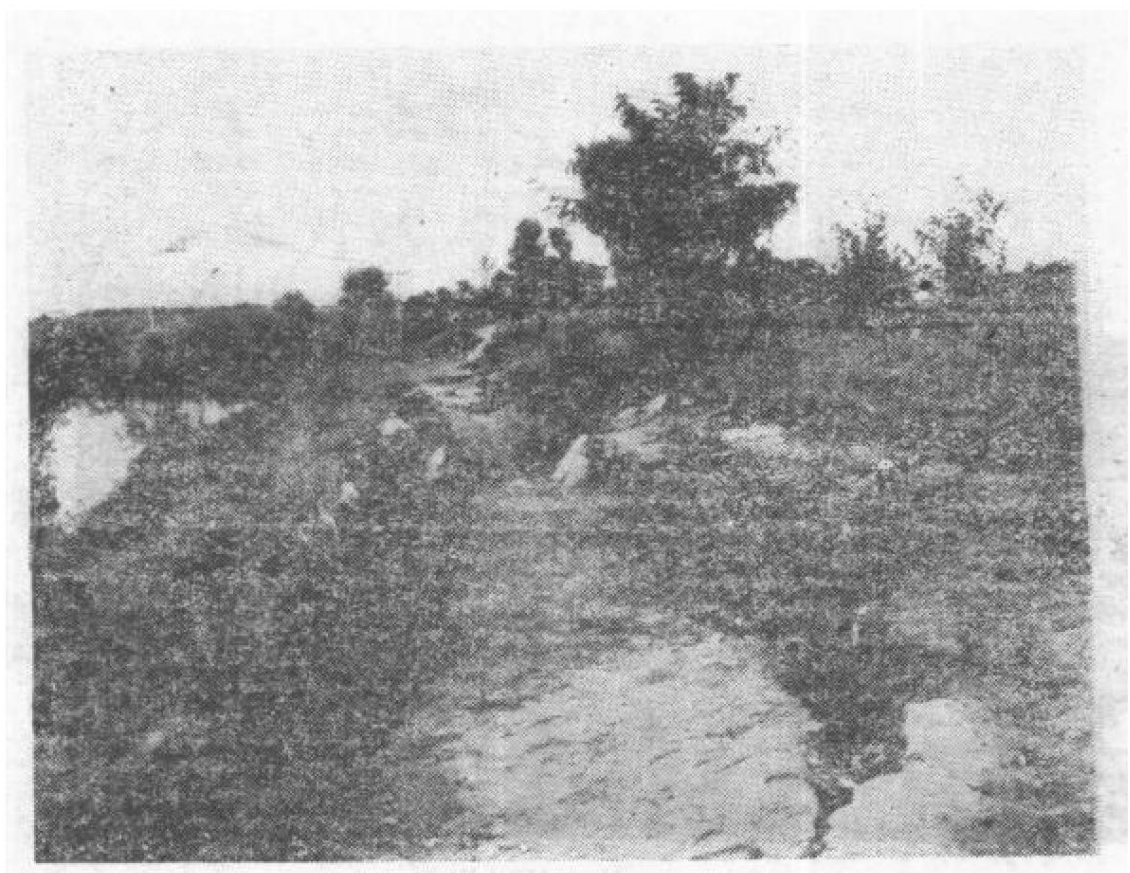


图 1.7 赵田庄附近陡河岸坡滑塌

塞河道。武清县大道张庄附近北运河岸堤严重开裂滑塌。

由于开挖渠道使覆盖层减薄，喷水冒砂多发生在渠道内，造成渠道淤砂，渠岸开裂下沉。如乐亭县全县 11 条干渠和 1800 条二、三级配套支渠均有不同程度的淤砂，有的淤砂甚至露出水面。喷水冒砂使地面低处升高，高处下沉，改变了原来的地势，破坏了原来的排灌体系。

喷水冒砂往往发生在农田里，掩盖大量农田(图 1.8)。据调查，乐亭县被喷水冒砂掩盖的农田近 9 万亩。乐亭县卢河公社后河信大队，全队有耕地 3200 余亩，被喷水冒砂掩盖 3000 亩，绝产 2000 亩。其他地区如滦南县、柏格庄农垦区也有类似情况。

砂土液化使大量灌溉用的机井遭到严重破坏。由于井筒周围砂层液化，井筒支撑减弱，在接头部位错断，井内淤砂。据了解，井筒错断的部位一般在地面下 5—20 米之间。



图 1.8 农田被砂掩盖

喷水冒砂严重的地区，大量的砌井被砂淤塞或井壁下沉坍塌。如乐亭县汤家河工委淤塞近 400 眼，阎各庄工委淤塞 250 余眼。

乐亭、滦南、丰南各县公路破坏严重，由于砂土液化，公路路面产生长而大的裂缝和塌陷(图 1.9)。乐亭县境内有沥青公路 200 余公里，百分之八十遭到了破坏。

喷水冒砂的地方，往往伴随有地面开裂下沉，并使建筑物产生下沉或倾斜甚至倒塌。这种情况滨海地区更为严重，例如汉沽杨家泊公社傅庄，地面出现宽大裂缝，下沉 3 米多，积水成塘，房屋产生严重下沉和倾斜(图 1.10)。乐亭县孟庄、王滩等公社，地面开裂下沉现象更为普遍。

在国外也有砂土液化造成地面或各类建筑物严重破坏的例子。1964 年 6 月 16 日日本新潟地震(7.7 级)的震害就是一个明显的例子^[2]。新潟市很多建筑物下沉 1 米多，并且伴随着严重的