

## 2023年甘肃积石山6.2级地震中川乡 液化流滑灾害调查及诱因初析

陈龙伟<sup>1,2</sup>,汪云龙<sup>1,2</sup>,袁晓铭<sup>1,2</sup>,李兆焱<sup>1,2</sup>,王永志<sup>1,2</sup>,聂桂波<sup>1,2</sup>,张昊宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**2023年12月18日甘肃省临夏州积石山县发生了6.2级地震,地震导致青海省民和县中川乡金田村和草滩村发生特殊的流滑灾害,其规模之大、灾害之重在国内外实不多见。通过实地考察,得出了地震土壤液化是此次流滑灾害诱因的结论,且此次灾害是近70a以来首次具有现场实证性质的液化流滑型地震灾害。调查分析结果表明:流滑区上游滑源区地下土壤液化触发了流滑,中游流通区特殊的水文地质条件加剧了流滑的发展;土壤液化潜在多区、多源特性,即中游流通区存在疑似液化区;流滑区地震动强度较大,初步估计地震动峰值加速度值为 $0.4(\pm 0.1)g$ 。调查分析结果可为认识此次液化流滑灾害提供科学依据。

**关键词:**积石山地震;土壤液化;诱因;现场调查;流滑灾害

中图分类号:P315.9

文献标识码:A

## Preliminary analysis for the triggering of soil flowslide that occurred in Zhongchuan Town following the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake in Gansu Province

CHEN Longwei<sup>1,2</sup>, WANG Yunlong<sup>1,2</sup>, YUAN Xiaoming<sup>1,2</sup>, LI Zhaoyan<sup>1,2</sup>,  
WANG Yongzhi<sup>1,2</sup>, NIE Guibo<sup>1,2</sup>, ZHANG Haoyu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** On Dec. 18th, 2023, a magnitude 6.2 earthquake hit Jishishan Town of Linxia City in Gansu Province, and caused an unusual mud sliding disaster in Jintian Village and Caotan Village of Zhongchuan Town in Qinghai Province. The mud flowslide resulted in catastrophic consequences as casualties and demolishing and burying of residential houses. Such large mud sliding phenomenon has not been frequently reported in historical earthquakes. Through field investigation, it is confirmed that the underlain soil liquefied and triggered the disastrous phenomenon which has already been termed liquefaction-induced flowslide. Nevertheless, the massive liquefaction-induced flowslide is the first time been reported and verified by field evidence in recent 70 years. The investigation and analytical results demonstrate that the underlain soil layer in the upstream area liquefied, triggering instability and catastrophic flowslide, and the soil and water conditions in the flowing channel potentially accelerated the sliding. It is deduced that liquefaction possibly occurred in many a place, that is, the sliding channel was suspected of liquefying in various spots. The ground shaking intensity in the sliding area maintained relatively high, and that the peak ground-motion acceleration was estimated around  $0.4(\pm 0.1)g$ . The findings and investigation results are

收稿日期:2024-01-18; 修回日期:2024-02-04

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEVL0104)

作者简介:陈龙伟(1983—),男,研究员,博士,主要从事岩土地震工程、土动力学方面的研究。E-mail:chenlw@iem.ac.cn

通讯作者:袁晓铭(1963—),男,研究员,博士,主要从事岩土地震工程、土动力学方面的研究。E-mail:yxm@163.com

useful to help understanding the mechanism and process of the uncommon flowslide disaster.

**Key words:** Jishishan earthquake; liquefaction; triggering cause; in-situ investigation; flowslide disaster

## 0 引言

震害考察是地震工程发展的支柱之一。人们对于如何抗御地震灾害的认识,在很大程度上来自大地震的经验。地震震害调查是获取工程震害资料和经验最直接、最有效的手段,也是工程抗震理论和分析方法发展最重要的基础<sup>[1-2]</sup>。同时,震害现象调查也是检验现有抗震设计理论和方法的最有效手段。深入的震害调查工作,为我国乃至世界工程抗震技术的发展起到了巨大的推动作用<sup>[3]</sup>。

2023年12月18日23时59分,甘肃省临夏州积石山县发生6.2级地震。此次地震导致大量房屋损毁甚至倒塌,统计至2023年12月31日已造成151人死亡、近千人受伤。除房屋倒塌外,此次地震在青海省海东市民和县中川乡金田村和草滩村引发了被称之为“泥石流”的罕见特殊现象,房屋被厚达数米的“泥石流”掩埋,直接导致多名群众失联。灾害发生后,其成因引起了社会的广泛关注。针对此次震害的特殊性对震害进行了考察,发现此次灾害本质上是由于“泥石流”触发区地下土层地震液化所导致的流滑事件。流滑破坏是地震液化的典型震害现象之一。然而如此大规模且严重致灾的流滑现象在国内外历史地震调查中实不多见。类似案例在历史地震中确曾发生,如1989年塔吉克斯坦杜尚别地区5.5级地震引发的黄土沉积物液化,导致滑坡并伴有大规模的“泥石流”<sup>[4]</sup>;2018年印尼 Sulawesi 地震( $M_w$ 7.5)中 Palu 地区发生了大规模液化流滑<sup>[5-6]</sup>,导致数千人丧生。已有的研究表明,Palu 地区的大规模流滑灾害是由于该地区地下砂土地震液化所致。此次积石山6.2级地震中川乡流滑事件是我国近70 a震害调查中,首次发现的具有现场实证性质的液化流滑型地震灾害。

本文通过现场调查,给出此次液化流滑的震害现象,初步分析液化流滑灾害的诱因、触发机制以及流滑过程,分析结果可为认识此次特殊的、罕见的液化流滑灾害。研究防御手段提供参考。

## 1 液化流滑的概念

首先厘清几个专业名词,即泥石流、泥石流和滑坡等。参考《地球科学大辞典》<sup>[7]</sup>中词条和描述。泥石流是以细粒土为主的流动体,由流动体中所含的水、黏土和岩屑的比例不同而有不同的流动特征;泥石流中所含的水可以达到60%,水联结的程度取决于黏土矿物的含量、母质黏滞性、流动速度和地形的影响。其流动性可以从监测其运动速率得知,也可以根据其沉积的分布和地形得知。泥石流灾害是发生在山区沟谷中,由暴雨、大量冰雪融水或江湖、水库溃决后的急速地表径流激发的含有大量泥砂、石块等固体碎屑物质,并具有强大冲击力和破坏作用的特殊洪流造成的灾害。滑坡灾害指岩体或土体在重力作用下整体顺坡下滑造成的灾害。区别于这些灾害,液化流滑灾害是一种由于地震土壤液化引发的一种次生灾害。

根据以往震害调查发现,地震土壤液化的后果包括喷水冒砂、流滑、地基承载力丧失、地基沉降以及横向侧移或扩展等。地震液化流滑<sup>[8-9]</sup>是一种由地震土壤液化引发的灾害现象之一,其破坏力极强,多发生在具有一定坡度、地表下存在可液化沉积砂层的斜坡场地或坝体筑堤。液化流滑的特征表现在土体发生显著的横向流动(或位移),流动距离可达数米、数十米甚至更长,且场地土体被严重地扰乱、崩裂(塌)和迁移破坏。就物理机制而言,场地地下可液化土层在地震等动力荷载作用下,孔隙水压力升高过程使得土体抗剪强度逐渐降低,当抗剪强度降低至小于土体自重产生的剪应力时,土体发生失稳滑动,即液化流滑。液化流滑的距离与液化的范围和规模有关,可以发生局部范围的流滑,亦可以出现大范围的流滑,如1906年旧金山地震中即发生过局部的流滑,土体流动一段距离后终止<sup>[10]</sup>。

## 2 中川乡液化流滑分区特征及震害现象

据报道,积石山地震震后不久,高达3 m的浓稠“泥浆”翻滚着漫入青海省民和县中川乡的金田村和草滩村(图1),导致大量房屋被“泥浆”包围、冲毁,多名群众失联。此次事件成因引起了广泛关注。现场调查

发现,流滑区坡度较小,较难发生滑坡。由于震前没有降雨,与泥石流的基本内涵不符。泥石流又分为泥石流、泥流和水石流 3 种,因此采用“泥流”严格来说会与泥石流混淆,也容易掩盖此次灾害的特征。“砂涌”一词指的是地震液化喷冒<sup>[6]</sup>,但该名称在岩土地震工程领域不常用。而且,此次泥浆冲淤导致的灾害不是因砂土“喷冒”所致,使用“砂涌”一词不符合事实。从现场调查结果以及历史震害经验来看,此次事件实质上就是地震土壤液化导致的大规模液化流滑现象,符合液化流滑的基本特征。

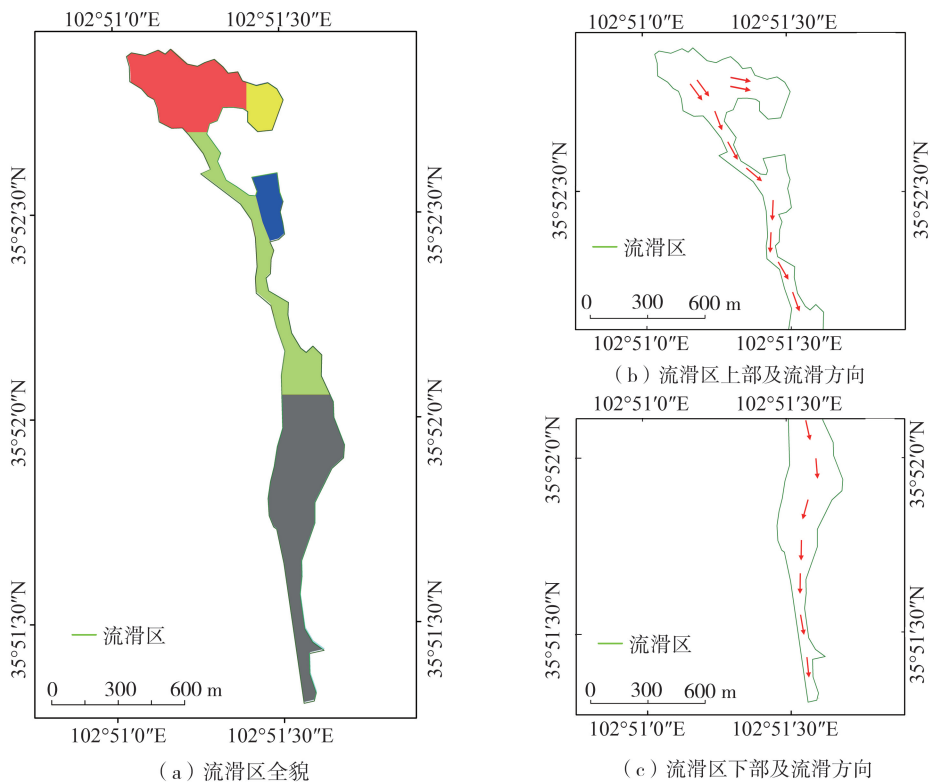
现场调查来看,此次流滑涉及的区域如图 2(a) 所示。方便起见,这里将流滑区域分为流滑滑源区(上游)(图 2(a)中红色和黄色部分)、流滑流通区(中游)(图 2(a)中绿色和蓝色部分)和流滑堆积区(下游)(图 2(a)中灰色部分和蓝绿色部分)。通过无人机成像建模,初步估计流滑上游区面积约为 0.13 km<sup>2</sup>、流滑损失土方量约为 55 万 m<sup>3</sup>。流滑启动后,流滑体沿着东西两个方向流动,如图 2(b) 所示。由图 2(b)中箭头指向所示,其中一部分流滑体向右(即向东)流滑了 300~400 m 后终止,流滑体堆积在图 2(a)中黄色部分。另一方向滑源区的流滑体沿着原有的“干沟”冲泻而下(图 2(a)中绿色部分),沿途冲走原有“干沟”两侧和底部土体,至堆积区(图 2(a)中灰色部分)。这一部分堆积体产生的后果最严重,直接造成屋毁人亡。



(a) 草滩村流滑堆积区的泥流 (b) 民房附近流滑堆积物

图 1 中川乡流滑堆积区泥流混合物及清理情况

Fig. 1 Mud debris brought by the liquefaction-induced flowslide in Zhongchuan Town



(a) 流滑区全貌 (b) 流滑区上部及流滑方向 (c) 流滑区下部及流滑方向

图 2 液化流滑区域以及土体流滑方向

Fig. 2 Area affected by the flowslide and the flowing direction of the mud debris

此次液化流滑上游滑源区的地表塌陷如图3所示。从现场土体的来源分析来看,滑源区顶部地表土体多处于塌陷状态,由于地下土层液化发生滑移,部分土体被流走,尚有部分地表土体没有随着滑体流动到下游,但表现出往下游滑动的趋势,发生了有限的横向位移。在中游的流滑流通区,土体流失严重。流通通道两侧和底部土体破坏严重,土体多被冲走,如图4所示。从下游堆积区的规模来看(图5(b)),被流滑冲走的土体体量非常大。

图5(a)显示图2(a)中往右侧流滑的土体堆积的边缘(图2(a)中黄色部分)。这一部分土体在流滑一段距离后终止。据当地村民介绍,此部分堆积区下面是农田,震前没有被灌溉。从这一部分流滑的调查结果推断,流滑区的流通区(图2(a)中绿色部分)可能存在多点液化的现象,加剧了流滑灾害的发展,或者流通区水文地质条件使得土体处于富水条件且处于临界状态,否则这一部分流滑的土体可能也会类似图2(a)中黄色部分,即流滑一段距离后停止。



图3 液化流滑滑源区因地下土层液化导致的地表塌陷

Fig. 3 Disruption of the soil mass at the origin area where the flowslide started



图4 液化流滑的流通区土壤被冲走

Fig. 4 Soil mass was carried away by the flowslide in the channel



(a) 右侧流滑区终止点



(b) 左侧流滑堆积区

图5 流滑堆积区被冲下来的土壤混合物

Fig. 5 Soil debris accumulated at the end of the flowslide

此外,图2(a)中蓝色部分是此次流滑流通区的一个转弯点,如图6所示。据村民介绍,该处原有挡水坝,其上修筑水泥路,地震后挡水坝以及水泥路被上游冲下来的“泥流”冲垮(图6(a))。据村民描述,地震发生后,从上游冲泻下来的“泥流”由于挡水坝的阻挡,喷溅到该处房屋四周,随后冲垮挡水坝向下游流滑(图6(b))。还有村民介绍,该处地震后也发生了喷冒,且伴有巨响。通过现场走访,一方面说明了上游流滑下来的土体流速快,另一方面流滑土体体量大、规模大。但是,由于地震发生在深夜,村民对震后景象的表述尚需进一步证实。



(a) 流滑流通区及流向(流滑转折点东岸视角)



(b) 流滑流通区及流向(流滑转折点西岸视角)

图6 液化流滑流通区转折点

Fig. 6 Turning spot of the flowslide that came from the origin of sliding and flowed downward

### 3 中川乡液化流滑灾害诱因分析

#### 3.1 地震动强度

此次地震由中国地震局工程力学研究所强震动观测中心共收取距震中 100 km 范围内实时强震仪记录 57 组、烈度仪记录 182 组(<https://www.iem.cn/detail.html?id=2965>)。通过数据分析,强震动观测中心初步给出的峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)分布图。此次流滑区位于地震烈度 7 度和 8 度交界附近,距离震中约 20 km。通过 PGA 分布图,初步估计流滑区的 PGA 值约为 0.4 g。由于流滑区域附近没有安装相应的强震观测仪器设备,可以从附近其他地区的强震台站记录对流滑区的 PGA 值进一步校核。距离流滑区最近强震台(JSNCJ)的震中距为 17.8 km,与流滑区的震中距相当。强震台记录到的水平向峰值加速度分别为 0.396 g 和 0.340 g,该台站距离流滑区约 15 km。所以,流滑区地震动 PGA 值可达到 0.4 g 水平。然而,流滑所在区域地形复杂,沟壑、山坡等分布广泛,局部地形可能会导致地震动 PGA 值变化较大,所以在 PGA 值估计时初步建议 0.1 g 的误差范围。

#### 3.2 流滑区上游区域液化喷冒现象

通过现场调查,调查组在流滑区上游发现显著的液化冒砂现象如图 7 所示,证实了土壤液化的发生,而土壤液化降低土层的抗剪强度,诱发了土层流滑,引发了后续的危害链。根据以往地震震害调查经验,喷水冒砂是地震中场地液化的直观后果,也是震后现场调查识别液化的主要参考物。通过地表喷冒现象判定场地液化。虽然这一方法存在漏掉实际液化,但没有地表喷出物的液化场地,在实际震害调查中,地表喷砂依然是地震现场识别液化的主要标志。通过现场发现,流滑区上游液化喷冒现象典型,而且至调查阶段,流通区底部的土壤依然处于局部松软流塑状态。



(a) 流滑区上游成片液化喷冒孔



(b) 液化喷冒孔

图 7 调查组现场发现液化喷冒和地表喷出物

Fig. 7 Sand boil and the ejecta that observed in origin area of the flowslide

#### 3.3 液化流滑过程初步分析

就机理而言,液化流滑就是饱和的松散土层在地震荷载作用下孔隙水压力升高、且短时间内难以消散,导致土层中超孔隙水压力达到土层的有效应力,土层抗剪强度降低甚至消失,同时在动荷载以及自重等荷载作用下,土层及上覆土层发生从高处往低处滑动的现象。现场调查土层剖面发现,地表 2~3 m 以下存在深厚的松散土层,初步确定该土层为液化土层(图 8 中红线以下土层)。此外,该地区时值冬季农田漫灌期,地表水通过渗流进入下方松散土层,长期漫灌可能使松散土层达到饱和状态,这也是此次事件中普遍认为的松散土层饱和的重要原因之一。同样,在 2018 年印尼地震 Palu 地区液化流滑中,地表灌溉系统也是土体饱和的重要原因<sup>[11]</sup>。然而,这个地区仅发生了一处流滑现象,而其它即使相似的地形地貌条件也没有发生流滑,农业灌溉与该处流滑的相关性仍需进一步调查。



图 8 流滑区的土层剖面以及初步确定的液化土层

Fig. 8 Soil cross-section in the flowslide area and the suspected liquefied soil layer

地震时土层发生液化,由于地形坡度,引发大规模流滑。流滑区始于上游物源区。流滑启动后沿东、西两侧冲泻而下。东侧流滑体冲出 300~400 m 后停止,而西侧流滑体沿着原有的“干沟”冲至下游的堆积区,流通距离约 3 km,导致了沿途房屋冲毁、人员伤亡。针对东西侧流滑距离的不同,推断西侧中游的流通区可能发生了多区、多源液化的现象,流通区多点发生液化,加剧了流滑的发展。但至现场调查时,冲沟中泥流冲刷严重,沟中难以接近,尚未找到直接证据论证这一推论。

### 3.4 附近其他地区

从现场调查以及新闻报道来看,本次地震触发的流滑事件是一个孤立的案例。调查组在流滑附近区域调查了相似的地形,如图 9(a)中区域 A 和区域 B,均未发生流滑现象,其中原因尚需进一步现场勘测确定。图 9(b)所示区域 A,该处位于滑源区顶部附近,为一处斜坡,地震前后未出现明显异常。据当地居民介绍,区域 B 是一条“干沟”,如图 9(b)所示。该“干沟”与流滑的流通通道(震前也是一条“干沟”)相邻,基本处于平行状态,且二者在震前基本一样,沟中均没有水,长满树木。地震后,流通区的“干沟”被冲毁,现场调查该段的流通区如图 10 所示。而区域 B 的“干沟”未出现流滑现象,依然保持震前状态。

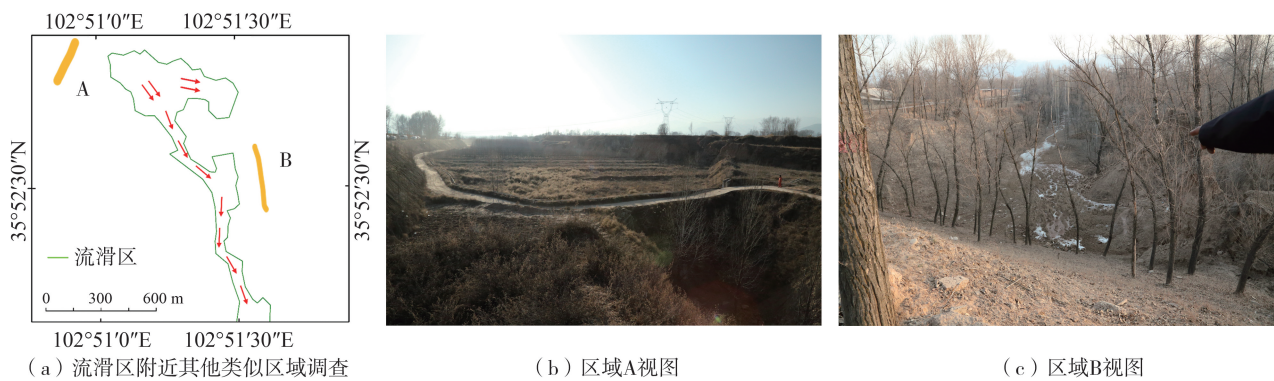


图 9 流滑区附近地形地貌相似但未发生液化流滑的场地

Fig. 9 Areas close to the flowslide but not slide



图 10 流通区通道现状

Fig. 10 Current situation of flowing channel

## 4 结论和展望

通过现场实地考察,对中川乡地震液化流滑灾害原因进行了调查分析,得出如下主要结论:

- 1) 此次灾害为土壤液化诱发的流滑所致。调查小组在流滑滑源区发现了液化喷冒现象,确认了土壤液化的事实,即流滑起源区(上游)地下土层在地震动作用下发生液化,触发了流滑,导致了后续的危害链。
- 2) 根据强震观测数据,指出流滑区地震动强度较大,初步估计流滑区地震动峰值加速度为  $0.4(\pm 0.1)g$ 。
- 3) 对液化流滑过程进行了初步探讨,推断滑源区流滑启动后,沿东、西两侧滑动。东侧流滑体滑移了 300~400 m 后停止,而西侧流滑体沿着原有的一条“干沟”冲泻而下,流通区中游可能存在多个液化点,加剧了流滑的发展,形成规模宏大的含有黏土、砂、水以及树木杂物等可流动的混合物,在下游堆积区淹没民房、沟渠等。

4) 土壤液化一个重要条件是土体要处于饱和状态,也就是土层中水的问题。地震时,发生流滑的地区

正处于冬灌时期,所以普遍认为冬灌是此次土壤液化的重要外部因素之一。此外,这个地区仅发生了一处流滑现象,而其它即使相似的地形地貌条件也没有发生流滑,其原因尚需进一步调查。

针对此类灾害的特殊性和罕见性,未来需要深入研究:①地表灌溉致地下土层饱和的物理机制和影响深度;②地区的水文地质条件空间分布特征和规律,查明地区水文地质条件与灾害的相关性,剖析此次液化流滑灾害是孤立事件还是潜在具有普遍性,为恢复重建规划提供依据;③液化土体的动力学参数特性以及与流滑的相关性;④采用多手段监测来识别危险源,同时开展灾害治理方法研究。

**致谢:**感谢中国地震局“甘肃积石山6.2级地震科考队”、青海省地震局和甘肃省地震局对现场科考工作的大力支持。

## 参考文献:

- [1] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京:地震出版社,1989.  
LIU Huixian. Earthquake damage of the great Tangshan Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [2] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害[M]. 北京:地震出版社,1979.  
Institute of Engineering Mechanics. Damage of Haicheng earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1979. (in Chinese)
- [3] 袁晓铭,曹振中,孙锐,等. 汶川8.0级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(6):1288-1296.  
YUAN Xiaoming, CAO Zhenzhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [4] ISHIHARA K, OKUSA S, OYAGI N, et al. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in soviet Tajik [J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 73-89.
- [5] KIYOTA T, FURUICHI H, HIDAYAT R F, et al. Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(3): 722-735.
- [6] HAZARIKA H, ROHIT D, PASHA S M K, et al. Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia [J]. Soils and Foundations, 2021, 61(1): 239-255.
- [7] 地球科学大辞典编委会. 地球科学大辞典[M]. 北京:地质出版社,2005.  
Committee on the Glossary and Terms in Earth Science. Dictionary on the glossary and terms in earth science [M]. Beijing: Geology Press, 2005.
- [8] LEE W H K, KANAMORI H, JENNINGS P C, et al. International handbook of earthquake & engineering seismology (Part B) [M]. London: Academic Press, 2003.
- [9] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes [J]. Géotechnique, 1993, 43(3): 351-451.
- [10] YOUD T L, HOOSE S N. Liquefaction during 1906 San Francisco earthquake [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102(GT5): 425-439.
- [11] WATKINSON I M, HALL R. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides [J]. Nature Geoscience, 2019, 12: 940-947.