

DOI: 10.11779/CJGE201805001

# 砾性土层液化的触发条件

袁晓铭<sup>1</sup>, 秦志光<sup>2</sup>, 刘荟达<sup>1</sup>, 曹振中<sup>3</sup>, 徐鸿轩<sup>1</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230; 3. 广西岩土力学与工程重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 天然沉积砾性土场地液化是一个超出现有认识与现有规范的新问题, 其触发条件至关重要, 从震害现场调查提炼出相关认识最为可靠, 是后续研究的基础和导引。鉴于 2008 年汶川地震砾性土液化规模远超以往, 以其调查结果为主, 综合历史砾性土液化全部资料, 提出砾性土层液化的触发条件。现有资料分析表明: 0.15g 应为触发天然沉积砾性土层液化的地表最低地震强度, 大规模砾性土层液化发生则需要 0.2g~0.4g (Ⅷ度区) 的地震强度; 松散和接近松散状态是天然砾性土层液化的基本条件, 液化砾性土密实度可随地震强度增大而增高但仍以稍密状态为上限; 液化砾性土含砾量可达 85% 及更大, 并且不随地震强度减弱而降低; 高剪切波速天然砾性土层会发生液化, 砾性土与砂土密实程度的剪切波速分界线相差悬殊, 砂土液化判别公式不适于砾性土层; 上覆渗透性差非液化土层 (帽子) 的存在是地下砾性土层可发生液化的必要条件, 可称为帽子效应, 此厚度至少应为 0.5 m; 地下水位与帽子间不能有过厚的可排水层间隙也是下卧砾性土层可发生液化的必要条件, 可称为间隙效应, 此间隙上限可取为 2.0 m; 区别于砂土液化判别方法, 砾性土液化判别需要埋藏条件方面的特殊要求, 否则容易出现误判。

**关键词:** 砾性土液化; 上覆渗透性差非液化土层; 帽子效应; 可排水层间隙; 间隙效应

**中图分类号:** TU43; O319.56

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2018)05-0777-09

**作者简介:** 袁晓铭(1963-), 男, 研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: yxmim@163.com。

## Necessary trigger conditions of liquefaction for gravelly soil layers

YUAN Xiao-ming<sup>1</sup>, QIN Zhi-guang<sup>2</sup>, LIU Hui-da<sup>1</sup>, CAO Zhen-zhong<sup>3</sup>, XU Hong-xuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering

Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Environment Protection & Safety in

Foundation Engineering of Transportation; 3. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The liquefaction of the natural gravelly soils is a new problem beyond the existing awareness and codes, and the trigger conditions of liquefaction are critical. It is the most reliable to extract the relevant knowledge from field investigation of earthquake damages. In view of the world's largest scale of gravelly soil liquefaction in the 2008 Wenchuan earthquake, using the post-earthquake field investigation data from the meizoseismal area in the Wenchuan earthquake and the historical documents on liquefaction of gravelly soils in the world, the necessary trigger conditions for liquefaction of gravelly soils and the relevant characteristic parameters are studied. The analytical results indicate: (1) The minimum ground shaking of 0.15g is essential to trigger liquefaction of natural gravelly soils, yet the liquefaction of massive gravelly soils requires 0.20g to 0.40g of ground shaking intensity; (2) The most natural gravelly soil layers are very loose. Even though the gravelly soils can be compacted with the increasing ground shaking, the compacted gravelly soils are still slightly dense. (3) The gravel contents of the liquefied soils can reach 85% and even larger in reality, and they do not decrease with the decreasing seismic intensity; (4) The layers of gravelly soils with high shear wave velocity can be liquefied. The shear wave velocities dividing different compactions for sands and gravels are different, and the liquefaction evaluation methods for sand cannot be applied in gravelly soils. (5) The existence of a cap of overburden low-permeability and a non-liquefiable layer with minimum 0.5 m in thickness is a necessary condition for possibility of liquefaction of gravelly soils, which can be defined as the cap effect. (6) The gap for drainage between the

**基金项目:** 中央级公益性研究所基本科研业务费专项 (2016B01); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0105500); 国家自然科学基金项目 (41272357); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFBA118257, 2016GXNSFAA380117)

**收稿日期:** 2017-02-21

**\*通讯作者 (E-mail: iemcz@163.com)**

underground water table and the overburden cohesive layer cannot be large, which is another necessary condition for possible occurrence of liquefaction of gravelly soils, and the thickness should be less than 2.0 m, which can be defined as the gap effect.

(7) Different from liquefaction evaluation of sandy soils, the buried conditions of layers of gravelly soils must be considered in liquefaction evaluation, otherwise the liquefaction possibility of sites is easily misjudged.

**Key words:** gravelly soil liquefaction; overburden low-permeability and non-liquefiable layer; cap effect; gap for drainage between water table and cap; gap effect

## 0 引言

地震中土体液化是一个有趣、富有争议的自然现象,并且因会造成严重灾害<sup>[1-2]</sup>也成为是一个非常意义的研究课题。目前土体液化的概念基本上等同于砂土液化,其主要原因是以往土体液化大量出现在饱和砂土层,历史地震中砾性土液化记录不超过 10 例,且成规模的主要是人工砾土填料<sup>[3-6]</sup>。因而,绝大多数学者和几乎所有工程技术人员已经形成了土体中不含砂土就不能液化的惯性认识,不相信天然沉积砾性土在地震作用下会发生液化。同时,因以往资料有限,也难以从中总结出砾性土液化触发条件的规律。

2008 年 5 月 12 日中国四川发生的 8.0 级汶川大地震后,笔者及团队发现了大量砾性土地液化案例,发现两两间距至少 2 km 的 92 处砾性土液化区,分布于 3240 km<sup>2</sup> 范围,液化砾性土含砾量从 5%~85% 甚至更大。无论液化砾性土地场的数目和涉及区域大小以及液化砾性土的物理力学指标,汶川地震都远超历史记录,最终可确认为有记载以来全球最大规模的砾性土液化现象,并由此打破了天然沉积砾性土为非液化安全土层的传统认识。

但是,历史地震中砾性土液化实例远远少于砂土,这与砾性土的广泛分布之间存在矛盾。同时,砾性土地基一般波速大、透水性好,被认为是不会发生液化的良好土层,这与汶川地震中出现大量砾性土地液化现象之间也存在矛盾。笔者认为,这一方面意味着实际地震中砾性土层与砂土层发生液化的条件不同,即砾性土地液化需要一些更严格和特殊的条件,另一方面也意味着存在某些条件,当这些条件满足时砾性土层会发生液化,而且会发生大规模液化。

目前砾性土液化研究中,主要针对的是砾性土液化特性和判别方法<sup>[7-10]</sup>。就砾性土液化特性问题,采用室内动三轴仪和振动台在其液化可能性、抗液化强度、影响因素等方面得到了一些结果,但因大粒径土体液化试验技术不太成熟,试验结果差异颇大,甚至得到了砾性土与砂土液化特性无差别以及砾性土与砂土液化特性差别显著这两种截然不同的结果,同一学者在不同时期给出了结论也完全相反<sup>[11-12]</sup>。另外,以往振动台试验中,得到的砾性土发生液化上限含砾量为 70%,而汶川地震实际震害调查发现的液化砾性土

含砾量为 85% 甚至更大,二者相悖。这些都说明砾性土液化的触发条件尚无统一认识,而且如果仅利用室内试验,很难以揭示真相,无法分辨现有结果真伪,也无法解释上面所提到的两个矛盾。就砾性土液化判别方法,笔者曾基于现场实测数据,提出了 CDPT 和  $V_s$  等两种判别方法<sup>[13-15]</sup>。这两种方法形成方式上与现有砂土液化判别方法相同,都是以一个判别公式决定土层是否会液化。但后来笔者发现,在其他条件相同情况下的两个松散砾性土层,一个上面有较厚非液化覆盖层而另一个完全没有,采用公式判别结果都会发生液化,而实际情况是后者不会出现液化。如果换成砂土层,这二种情况则都会液化。即传统的砂土液化判别方式和做法不可照搬到砾性土,砾性土液化的发生条件需要专门研究,补充其触发液化的特殊条件。

汶川地震中获得的砾性土液化场地勘察试验资料,在数量和质量都远超以往,为砾性土液化发生条件的分析提供了机会。本文以此基础,从实测数据中分析砾性土层液化发生规律,提炼触发砾性土层液化特征参数,寻找与砂土层发生液化条件的区别和联系,并与历史地震砾性土液化资料综合,发现并掌握砾性土层液化触发条件和量化指标,为砾性土液化问题的认识和判别方法的发展提供基础和指导。

## 1 基础数据

### 1.1 砾性土及砾性土液化的概念

目前学术界和工程界在对宽级配的粗粒土定义并不统一。对砾性土液化问题而言,以往发表的论文中基本上都是采用“砂砾土(料)液化”一词<sup>[7-10, 13-14]</sup>,现在来看是十分片面和狭隘的,完全不能代表实际情况,已经造成了概念混淆。

参考《地球科学大辞典》<sup>[16]</sup>,笔者定义了砾性土的概念,指为由卵石、砾、砂、粉粒、黏粒等部分或全部组成的砾粒含量从 0~100% 的宽级配土,是砾质土、砾砂、粉砾土、砂砾土和砾类土的统称,以含砾量(砾的定义为粒径大于 5 mm 粗粒土)为主要指标,其中砾质土的含砾量为 0~15%,砾砂为 15%~33%,粉砾土为 33%~50% 且粉黏粒多于砂粒含量,砂砾土为 33%~50% 且砂粒含量多于粉黏粒含量,砾类土的含砾量为 50% 以上。

与砂土液化的概念类比, 本文所提出的砾性土液化的概念, 是指包括砾质土、砾砂、粉砾土、砂砾土和砾类土在内的含砾量从 0~100% 的砾性土, 在一定条件下均有发生液化的可能。

1.2 基础数据

对汶川地震中成都平原 63 个典型砾性土液化场地和非液化场地勘察测试结果见表 1。其中烈度和 PGA 为场地所在区域的地震烈度和场地遭遇到的地表加速度峰值;  $d_{sr}$ ,  $d_s$  和  $d_w$  分别为液化(非液化)砾性土层埋深范围、平均埋深和场地地下水位;  $N_{120}$  为中国超重型动力触探试验 (Chinese Dynamic Penetration Test) 每贯入 30 cm 的击数 (简称 CDPT 击数, 下同);  $V_s$  为剪切波速, 采用日本 OYO 公司瞬态表面波测试仪得到,  $v'_s$  为相应的修正剪切波速值 (标准 100 kPa, 约 10 m 深度);  $g_c$  为含砾量, 为确定的液化和非液化砾性土层土样试验值, \*号为勘察现场估计值。对勘察结果进行分析, 在表 1 中特别提出了两个特征参数  $H_n$  和  $d_{nw}$ 。其中,  $H_n$  为液化砾性土和非液化砾性土场地上覆黏性土层层厚度, 简称上覆不排水层厚, 代表液化砾性土层上面有一个上覆渗透性差非液化土层的“帽子”;  $d_{nw}$  为地下水位与上覆不排水层间的距离, 代表了对具有液化势的下卧砾性土层而言, 在地下水位以上存在的可用于排水的间隙, 若地下水位在上覆不排水层之内, 则  $d_{nw}$  为零或负数, 表示无排水间隙。

2 液化砾性土层特征参数及相互关系

2.1 地震动强度

汶川地震中中国数字强震动台网共获取千余条主震加速度记录, 按加速度衰减关系可给出各个液化场地地表加速度峰值, 这比中国以往地震中仅能从烈度简单估计液化场地 PGA 的做法有相当大的进步, 也为

本文分析砾性土场地液化的地震动触发条件以及研究地震动与液化场地各特征量的关系创造了条件。

汶川地震中, 液化砾性土场地遭遇的地表加速度峰值在 0.15g~0.49g<sup>[15]</sup>。就目前国内外其他地震情况看, 天然沉积的砾性土场地出现液化的地表 PGA 范围为 0.2g~0.8g。另外, 汶川地震中液化砾性土场地在Ⅷ度区 (0.2g~0.4g) 内较为集中, 以往中国砂土液化数据也较多集中在Ⅷ度区内, 这说明大规模砂土和砾性土液化发生都需要较强的地震动强度, 但更强地震动作用下液化规模增长均有限。需要指出的是, 1976 年唐山地震中, 北京密云水库白河主坝砂砾壳在低烈度Ⅵ区 (约 0.05g) 发生严重液化, 但 0.05g 只是该地区的地震强度, 而密云水库白河主坝坝高 66 m, 坝上滑坡部位的 PGA 应远大于 0.05g。

2.2 液化土层含砾量及与地震动强度关系

由表 1 可见, 汶川地震液化场地的含砾量从 5%~85% 都有分布, 其中含砾量 50% 以上的砾类土占到一半以上。液化砾性土只有含砾量 0~5%、85%~100% 这两个狭窄区间空缺。含砾量 0~5% 的砾性土液化可能性很容易理解和接受, 而对含砾量为 85%~100% 的情况, 一方面因钻机尺寸 (直径为 90 mm) 限制, 实际液化土层的含砾量会大于 85%, 另一方面室内试验已经证明了含砾量 100% 的砾性土也完全存在液化可能。因而, 笔者所提出的砾性土液化的概念, 与汶川地震中所发现的新的液化土类吻合较好。

将不同 PGA 下汶川地震液化和非液化砾性土层含砾量的最大值、最小值和均值分布示于图 1。由图 1 (a) 可见, 首先, 在不同大小 PGA 作用下, 不同含砾量的砾性土层都有液化发生, 并且不同地震强度下液化土的含砾量范围都很大。其次, 随 PGA 的增大, 液化砾性土含砾量的均值基本不变, 并不随地震强度

表 1 汶川地震砾性土场地勘察基础数据和特征参数

Table 1 Data base and characteristic parameters of investigation on sites of gravelly soils in Wenchuan earthquake													
场地 编号	地点	是否 液化	烈度	PGA /g	$d_{sr}$ /m	$d_s$ /m	$d_w$ /m	$N_{120}$	$V_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$v'_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$g_c$ /%	$H_n$ /m	$d_{nw}$ /m
1	广汉市南丰镇昆庐小学	Y	Ⅶ	0.22	2.3~8.0	5.2	1.4	7.5	161	182	26	2.3	-0.9
2	德阳市柏隆镇果园村	Y	Ⅶ	0.21	1.5~2.2	1.9	1.5	9.0	165	219	9	1.5	0.0
3	德阳市黄许镇金桥村	Y	Ⅶ	0.18	4.0~6.1	5.1	2.2	6.3	164	181	26	2.4	-0.2
4	德阳市天元镇白江村	Y	Ⅶ	0.23	2.2~6.0	4.1	2.2	—	142	162	5	1.5	0.7
5	德阳市略坪镇安平村	Y	Ⅷ	0.20	2.8~3.8	2.5	1.8	—	141	177	8	2.8	-1.0
6	德阳市德新镇胜利村	Y	Ⅶ	0.21	2.4~5.0	3.7	1.9	8.7	187	220	23	2.4	-0.5
7	德阳市德新镇长征村	Y	Ⅶ	0.20	1.0~3.0	2.0	1.0	—	160	220	35*	1.2	-0.2
8	绵阳市游仙区涌泉村	Y	Ⅶ	0.24	2.0~6.0	4.0	1.3	—	152	182	5*	1.6	-0.3
9	成都市龙桥镇肖家村	Y	Ⅶ	0.17	1.4~2.2	1.8	1.4	3.9	176	234	75	1	0.4
10	彭州市丽春镇天鹅村	Y	Ⅶ	0.24	3.1~5.1	4.1	2.4	9.0	136	154	50	3.1	-0.7
11	绵竹市富新镇永丰村	Y	Ⅷ	0.34	4.0~8.0	6.0	2.8	—	238	250	57	4	-1.2
12	绵竹市新市镇新市学校	Y	Ⅷ	0.34	2.6~3.5	3.0	1.0	6.3	133	171	64	2.6	-1.6
13	绵竹市板桥镇板桥学校	Y	Ⅷ	0.37	3.0~6.1	4.6	3.0	10.2	159	173	49	1.5	1.5

续表 1

场地 编号	地点	是否 液化	烈度	PGA /g	$d_{sr}$ /m	$d_s$ /m	$d_w$ /m	$N_{120}$	$V_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$V'_s$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$g_c$ /%	$H_n$ /m	$d_{nw}$ /m
14	德阳市柏隆镇松柏村	Y	VIII	0.24	0.8~8.3	4.6	0.8	7.5	185	221	54	0.8	0.0
15	绵竹市板桥镇兴隆村	Y	VIII	0.42	4.0~9.5	6.8	2.4	8.7	195	203	67	4.0	-1.6
16	绵竹市新市镇石虎村	Y	VIII	0.33	4.0~5.8	4.4	2.9	11.4	161	177	19	4.0	-1.1
17	绵竹市孝德镇齐福小学	Y	VIII	0.30	3.5~7.0	5.3	3.5	11.1	180	189	45	2.8	0.7
18	绵竹市玉泉镇桂花村	Y	VIII	0.39	2.8~3.7	2.2	0.6	8.1	153	215	48	2.8	-2.2
19	什邡市禾丰镇镇江村	Y	VIII	0.29	1.8~2.9	2.4	0.9	8.7	187	251	74	0.7	0.2
20	绵竹市齐天镇桑园村	Y	VIII	0.29	2.8~4.2	3.5	2.8	11.7	199	227	64	1.2	1.6
21	什邡市湍底镇白虎头村	Y	IX	0.46	1.2~3.2	2.2	1.2	—	178	237	50*	1.4	-0.2
22	绵竹市板桥镇白杨村	Y	VIII	0.35	1.5~6.1	3.8	1.5	—	150	179	60*	3.2	-1.7
23	绵竹市土门镇林堰村	Y	VIII	0.47	6.0~8.0	7.0	6.0	—	250	237	35*	4.8	1.2
24	德阳市柏隆镇清凉村	Y	VIII	0.24	1.0~5.0	4.0	1.0	—	203	246	50*	1.1	-0.1
25	什邡市师古镇思源村	Y	VIII	0.41	2.0~4.0	3.0	1.5	—	166	206	50*	1.2	0.3
26	江油市火车站候车室外	Y	VIII	0.49	2.4~7.0	4.7	2.4	—	215	238	50*	1.7	0.7
27	都江堰幸福镇永寿村	Y	VIII	0.25	2.1~3.7	2.9	2.1	15.0	250	311	85	1.0	1.1
28	成都市唐昌镇金星村	Y	VII	0.21	2.1~5.0	3.5	0.9	9.9	180	225	50	2.1	-1.2
29	都江堰聚源镇泉水村	Y	VIII	0.24	1.0~2.4	1.7	0.9	3.3	220	314	75	1.0	-0.1
30	都江堰桂花镇丰乐村	Y	VIII	0.25	1.4~2.8	2.1	1.4	6.3	205	271	45	1.4	0.0
31	绵竹市兴隆镇安仁村	Y	IX	0.44	4.8~6.0	5.0	4.0	—	267	278	76	4.8	-0.8
32	绵竹市拱星镇祥柳村	Y	IX	0.41	3.4~6.2	4.8	3.4	17.4	233	249	77	3.0	0.4
33	绵竹市汉旺镇武都村	Y	IX	0.48	5.0~7.7	6.3	1.6	—	150	162	51	5.0	-3.4
34	绵竹市遵道镇双泉村	Y	IX	0.49	2.5~5.0	3.3	2.5	—	200	233	50*	1.7	0.8
35	德阳市德新镇五郎村	N	VII	0.20	5.0~13.0	9.0	5.0	13.8	269	251	20*	3.1	1.9
36	什邡市回澜镇雀柱村	N	VII	0.26	6.0~15.0	10.5	6.0	24.6	287	257	50*	2.0	4.0
37	德阳市黄许镇胜华村	N	VII	0.18	2.5~7.5	5.0	2.0	—	208	232	55	0.6	1.4
38	德阳市场嘉镇火车站	N	VII	0.20	6.1~8.7	7.4	6.1	22.5	218	205	76	3.6	2.5
39	彭州市馨艺幼儿园	N	VII	0.26	1.4~2.8	2.1	1.4	21.9	—	—	50*	1.0	0.4
40	绵阳凌峰机械公司	N	VII	0.20	4.1~8.1	6.1	4.1	18.9	—	—	40*	2.5	1.6
41	郫县三道堰镇秦家庙	N	VII	0.18	3.6~4.8	4.2	2.1	21.6	171	195	90*	3.6	-1.5
42	郫县古城镇马家庙村	N	VII	0.20	2.4~4.0	3.2	2.4	21.3	243	285	80*	2.2	0.2
43	郫县团结镇石堤庙村	N	VII	0.18	4.0~10.0	7.0	4.0	30.9	324	435	80*	1.6	2.4
44	郫县新民镇永胜村	N	VII	0.17	3.4~10.8	7.1	3.4	19.5	380	382	60*	1.6	1.8
45	青白江大桥旁	N	VII	0.21	3.0~4.9	3.7	3.0	28.2	230	267	30*	0.0	3.0
46	德阳市柏隆镇南桂村	N	VIII	0.24	9.8~14.0	11.9	4.7	14.1	304	273	40*	2.7	2.0
47	绵竹市区某制药厂	N	VIII	0.37	3.4~7.4	5.4	3.4	14.1	282	296	50*	2.1	1.3
48	德阳市孝感镇和平村	N	VIII	0.18	9.6~12.0	10.8	3.7	27.0	305	283	50*	0.8	2.9
49	绵竹市板桥镇八一村	N	VIII	0.43	6.2~7.2	6.7	6.2	15.9	248	236	50*	4.1	2.1
50	绵竹市玉泉镇永宁村	N	VIII	0.41	8.1~12.2	10.2	1.4	37.5	337	332	50*	3.8	-2.4
51	绵竹市孝感镇大乘村	N	VIII	0.32	5.7~7.8	6.8	4.5	23.1	257	253	61	2.6	1.9
52	德阳市孝泉镇民安村	N	VIII	0.25	7.3~9.0	8.2	3.7	17.7	259	252	69	0.0	3.7
53	江油市火车站铁路线	N	VIII	0.49	5.0~8.0	6.5	3.0	—	233	240	50*	1.1	1.9
54	绵竹市兴隆镇川木村	N	IX	0.41	8.5~9.9	9.2	8.0	22.8	272	241	70*	5.6	2.4
55	绵竹市九龙镇同林村	N	IX	0.48	9.4~11.0	10.2	2.0	22.5	234	228	50*	4.2	-2.2
56	绵竹市东北镇天齐村	N	IX	0.43	4.0~6.0	5.0	4.0	—	323	336	90*	4.0	0.0
57	绵竹市汉旺镇林法村	N	IX	0.47	4.3~8.3	6.3	4.3	19.5	365	365	50*	3.2	1.1
58	都江堰工商职业学院	N	IX	0.27	2.3~4.6	3.5	2.3	18.0	—	—	30*	2.1	0.2
59	都江堰市财政金融大厦	N	IX	0.31	2.7~4.9	3.8	2.7	23.7	—	—	60*	0.0	2.7
60	绵阳市雒水镇凯江桥	N	IX	0.44	2.4~5.8	4.1	0.8	41.4	—	—	50*	0.5	0.3
61	都江堰市瑞康花园	N	IX	0.31	5.4~8.3	6.9	5.4	48.0	—	—	40*	0.0	5.4
62	都江堰市紫坪铺镇紫坪村	N	IX	0.37	3.0~5.3	4.2	3.0	23.4	—	—	60*	1.0	2.0
63	玉堂镇海关招待所	N	IX	0.32	1.5~2.5	2.0	1.5	22.5	—	—	40*	0.8	0.7

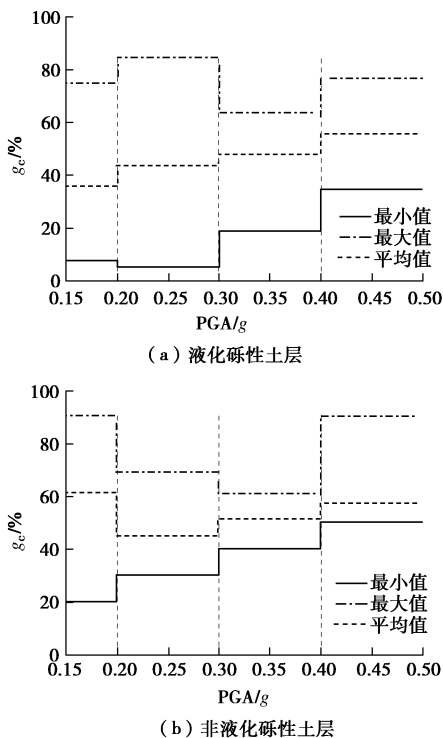


图 1 汶川地震液化和非液化砾性土层含砾量最大值、最小值和均值在不同 PGA 下的分布

Fig. 1 Distribution of maximum, minimum and averaged values of gravel contents of layers of liquefied and non-liquefied gravelly soils under different PGAs in Wenchuan earthquake

增强而变小。由图 1 (b) 可见, 在不同大小 PGA 作用下, 不同含砾量的砾性土层都有非液化情况出现, 非液化土层含砾量平均意义上也并没有随地震强度增强而变大。由此可见, 土体中不含砂土就难以液化、砾性土中含砾量越多也不容易液化的传统认识均不成立。

历史地震中, 每次液化砾性土的含砾量范围都很窄<sup>[15]</sup>, 且其中液化现象较为显著的是人工填料, 因此以往并没有形成宽级配的天然沉积砾性土地震下都会发生液化的认识。以往每次历史地震所发现的液化砾性土土性组成并不复杂, 基本都可用现有定义的一两个名词就可以表示, 比如唐山地震中密云水库白河主坝斜墙和日本阪神地震 Port 人工岛液化土分别为砾质土和砂砾土, 只有汶川地震中液化砾性土包括了砾质土、砾砂、粉砾土、砂砾土和砾类土等全部土类。

2.3 土层密实度及与地震动强度关系

将表 1 中汶川地震液化和非液化砾性土层 CDPT 击数的最大值、最小值和均值随 PGA 的变化见图 2。首先, 按中国规范标准<sup>[15]</sup>, 松散、稍密、中密、密实砾性土间分界线的 CDPT 击数为 12, 21 和 30。以此对比表 1 和图 2, 可知绝大部分的液化砾性土层密实度为松散, 仅有个别为稍密状态; 对非液化砾性土层, 70%为中密和密实状态, 而且即使 PGA 较小, CDPT 击数最小值也没有进入松散状态。由此可见, 饱和松

散和稍密是砾性土液化的基本条件, 这与砂土液化液化现有认识定性相符, 但定量上又有不同。从历史地震看, 中密饱和砂土地震下可以液化, 但从目前调查结果看, 还未发现有中等密实程度的砾性土出现液化。

同时, 从图 2 (a) 可见, 随 PGA 的加大, 液化砾性土层 CDPT 击数增大, 表明地震强度增大下可使密实程度更大的砾性土液化, 但即使 PGA 很大, 液化砾性土最密实程度也未超过稍密状态。而由图 2 (b) 可见, 随 PGA 的加大, 非液化砾性土层 CDPT 击数也呈现出增长的趋势, 但即使 PGA 较小, 液化砾性土最松散程度也为稍密而不是松散状态。

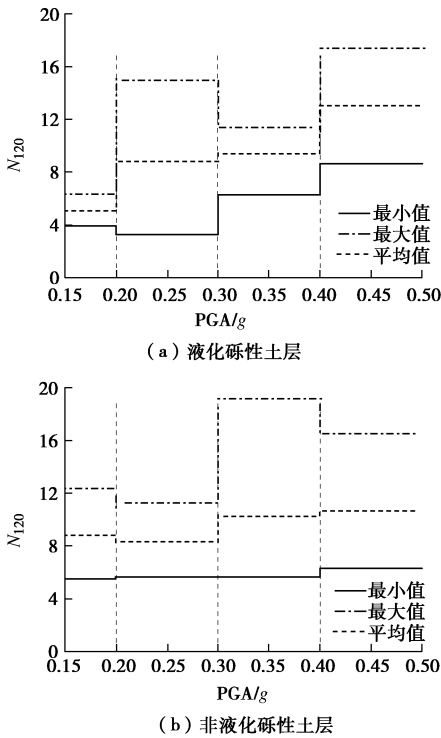


图 2 汶川地震液化和非液化砾性土层 CDPT 击数最大值、最小值和均值随 PGA 的变化

Fig. 2 Distribution of maximum, minimum and averaged values of CDPT blow count of layers of liquefied and non-liquefied gravelly soils under different PGAs in Wenchuan earthquake

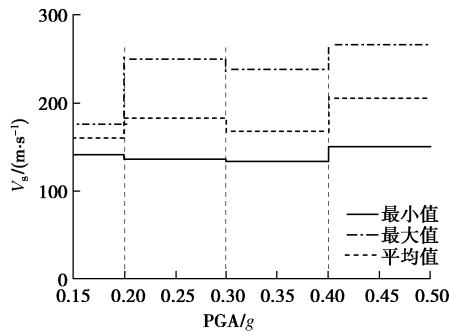
2.4 土层剪切波速及与地震动强度关系

图 3 给出了表 1 中汶川地震液化砾性土层实测剪切波速最大值、最小值和均值及与 PGA 的关系。由图 3 和表 1 可见, 液化和非液化砾性土层实测剪切波速分别为 133~267 m/s 和 154~314 m/s, 平均值分别为 184 m/s 和 217 m/s, 二者有较显著差别; 随 PGA 的加大, 液化砾性土层实测剪切波速增大, 即地震强度增大下可使剪切波速更大的砾性土层液化; 随 PGA 的加大, 不同地震强度下非液化砾性土层剪切波速均值基本持平。

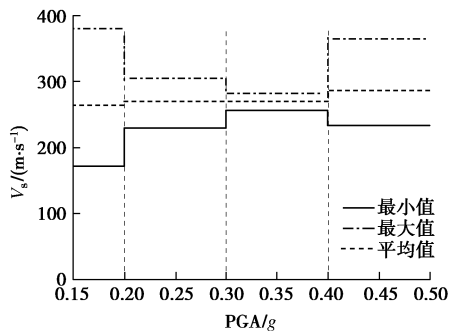
2.5 密实度与剪切波速关系

分析表 1 中数据, 可得到成都平原砾性土层 CDPT

击数（密实度）与剪切波速关系为  $V_s = 96 \cdot N_{120}^{0.32}$ （相关系数 0.7），如图 4 所示（粗线）。图中，阴影部分为可液化区，虚线为砾性土松散、稍密、中密、密实间的分界线，对应的 CDPT 击数分别 12, 21 和 30，对应的剪切波速分别为 213, 255, 286 m/s。与此形成鲜明对比的是，砂土松散、中密和密实间的剪切波速分界线分别约为 180, 220 m/s<sup>[15, 17]</sup>。



(a) 液化砾性土层



(b) 非液化砾性土层

图 3 汶川地震液化和非液化砾性土层实测剪切波速最大值、最小值和均值随 PGA 的变化

Fig. 3 Distribution of maximum, minimum and averaged velocities of layers of liquefied and non-liquefied gravelly soils under different PGAs in Wenchuan earthquake

以往历史地震中，液化砂土层现场实测剪切波速大多在 150 m/s 以下，极限值不会超过 210 m/s，液化砾性土层最大实测剪切波速为 220 m/s<sup>[15]</sup>。从图 4 和表 1 中可见，汶川地震液化砾性土层实测剪切波速平均值为 184 m/s，处在松散范围，最大值 267 m/s 也接近稍密状态。但特别需要注意的是，砾性土稍密状态下剪切波速上限值为 255 m/s，这一波速不仅远超砂土发生液化的临界波速，甚至超过了砂土常规密实状态的上限（250 m/s），而剪切波速 255 m/s 的砂土已经是超密实状态，根本不会出现液化。并且汶川地震液化砾性土层实测剪切波速 3 个最大值分别为 250, 250, 267 m/s（场地编号 23, 27 和 31），三者埋深分别为 7.0, 2.9, 5.0 m，含砾量分别为 35%, 85% 和 76%，PGA 分别为 0.47g, 0.25g 和 0.44g。这些事实表明，高剪切波速、不同埋深的高含砾量砾性土层会发生液化，以往认为天然砾性土层波速很大而不会出现液化

传统认识是错误的，以砂土为背景得到的液化问题的现有认识不适于砾性土，将导致相当危险的结果。

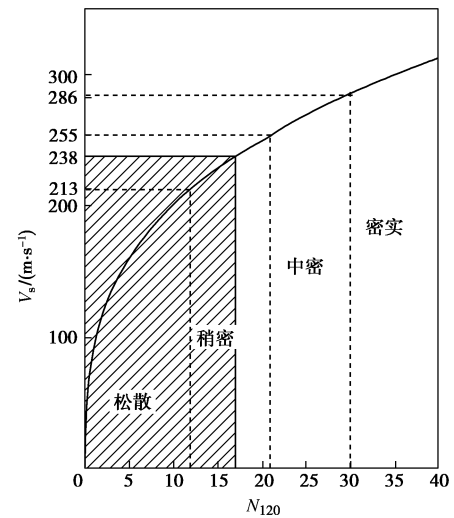


图 4 成都平原砾性土层 CDPT 击数（密实度）与剪切波速关系  
Fig. 4 Relationship between CDPT blow counts and velocities for layers of gravelly soils in Chengdu Plain

笔者曾采用现有两个典型的砂土液化剪切波速判别方法对汶川地震强震区砾性土层进行判别，液化判别成功率仅有 25% 和 43%，工程上不可接受<sup>[14]</sup>。其根本原因是砾性土密实程度与剪切波速对等关系和砂土与剪切波速对等关系不同，二者相差悬殊，因此砂土液化判别公式不适于砾性土层。

### 3 液化砾性土层结构及特征量

#### 3.1 液化和非液化砾性土层的基本结构

成都平原地层以砾性土层为主，浅表仅有零星薄砂层但不成规模，构成了该地区出现大规模砾性土液化的宏观地质条件<sup>[15]</sup>。进一步，从笔者收集到的工程地质资料看，成都平原浅表土层剖面可简化为一定厚度的黏性土层和其下砾性土层组成的二元结构。分析表 1 数据，则液化和非液化砾性土层情况可分别表示成如图 5 所示的两种基本结构，其中  $H_n$  和  $d_{nw}$  的定义同前，分别为上覆不排水层厚度和其下可排水层厚度。分析表明，砾性土液化条件与特征量  $H_n$  和  $d_{nw}$  密切相关，其一般规律为，液化场地上  $H_n$  大而  $d_{nw}$  小，而非液化场地上  $H_n$  小而  $d_{nw}$  大。

#### 3.2 上覆非液化土层

首先，将汶川地震液化场地与非液化场地上覆黏土层厚度  $H_n$  分布示于图 6。从图 6 可见，液化砾性土场地均存在上覆不排水层（帽子），两个最小厚度分别为 0.7, 0.8 m，其余均在 1.0 m 以上。与此形成对比的是，非液化砾性土场地有 4 个非液化砾性土场地不存在上覆黏土层。也就是说，上面存在渗透系数小的上覆非液化土层应是砾性土地可发生液化的必要条

件, 笔者称为帽子效应 (Cap Effect)。综合本文及历史地震调查结果, 地下砾性土层发生液化的必要条件是存在上覆非液化层且其厚度至少为 0.5 m。

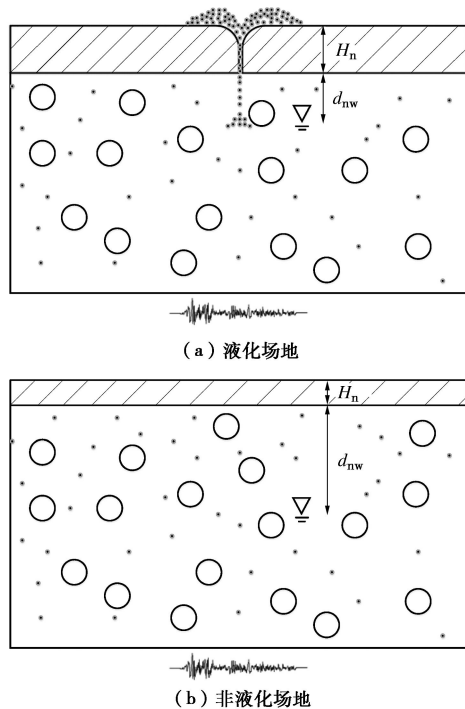
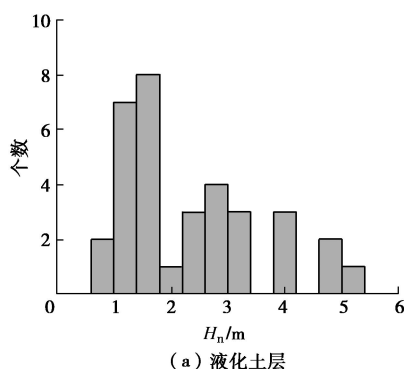
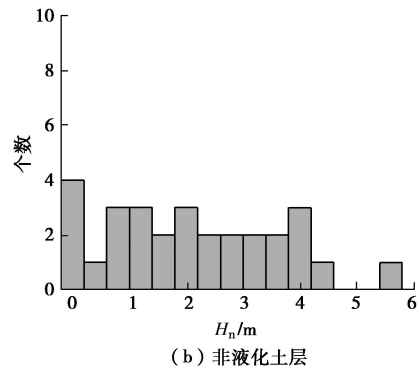


图5 汶川地震中液化与非液化砾性土层基本结构和特征量  
Fig. 5 Basic structures and characteristic parameters of shallow layers for sites of liquefied and non-liquefied gravelly soils in Wenchuan earthquake

本文所发现的帽子效应, 也可从以往砾性土液化调查实例中得到支持。笔者分析发现, 以往几次地震液化砾性土层 (包括人工填料) 均有 0.5~1.5 m 厚度不等的填土、黏土、地表硬壳等不透水上覆层<sup>[18-25]</sup>, 这与汶川地震中液化砾性土场地情况类同。但比历史地震资料更进一步的是, 本文在汶川地震现场同时获得了很多非液化砾性土场地实测数据, 从反方面支持了帽子效应的观点。如图 6 和表 1 所示, 有 4 个非液化场地中不存在上覆黏土层, 包括了砾性土层为稍密状态 (场地编号 52) 和接近稍密且受到较强地震作用 (场地编号 59) 的情况, 说明非密实饱和砾性土层, 即便受到较强动荷载作用, 如果没有上覆黏土层 (帽子), 也不会发生液化。



(a) 液化土层



(b) 非液化土层

图6 汶川地震中液化与非液化砾性土层上覆黏土层厚度  $H_n$  分布的对比

Fig. 6 Comparison of thickness  $H_n$  of overlying clay layers between sites of liquefied and non-liquefied gravelly soils in Wenchuan earthquake

### 3.3 可排水层

但渗透系数小的上覆非液化土层的存在只是砾性土场地发生液化的必要条件之一。本文另一个有意义的发现是, 地下水位与上覆黏性土层间不能有过厚的可排水间隙也是砾性土场地发生液化的必要条件, 笔者称为间隙效应 (Gap Effect)。

图 7 显示了汶川地震中液化与非液化砾性土层可排水层厚度  $d_{nw}$  的分布情况, 为简化说明问题, 计算中  $d_{nw}$  为负数时取为 0。由图 7 可见, 液化与非液化场地中的  $d_{nw}$  差异颇大, 液化场地中, 90% 场地地下水位高于 ( $d_{nw}$  为 0) 或接近 ( $d_{nw}$  不大于 1 m) 不透水上覆黏土层底面, 仅有 2 个  $d_{nw}$  为 1.5 m 左右; 非液化场地的可排水层厚度  $d_{nw}$  的 70% 超过 1.0 m, 最大超过 5 m。

值得注意的实例是, 对场地 35, 46, 47 和 49, 上覆黏土层厚度  $H_n$  都很大 (分别为 3.1, 2.7, 2.1 m 和 4.1 m), 且分别受到 0.20g, 0.24g, 0.37g 和 0.43g 的地震作用, 地下砾性土层都接近松散但都没有发生液化, 其原因是拥有较厚的可排水层 (厚度  $d_{nw}$  分别为 1.9, 2.0, 1.3, 2.1 m), 这使得地下水位与上覆黏土层底面之间的非饱和砾性土层成为具有良好排水性能的通道, 可以很好地消散地下水位之下的砾性土层在地震作用时产生的孔压, 这样即便有较厚的上覆黏土层, 较为松散的地下饱和砾性土层也不会出现液化。但是, 如果将砾性土都换为砂土, 则同样情况下地下较为松散砂土层完全可能发生液化。

反之, 如图 7 (a), 若地下水位与上覆黏性土层间没有过厚可排水层或根本不存在可排水层, 则排水通道受阻, 导致地震荷载作用下松散饱和砾性土孔压上升。综合本文结果, 可排水层厚度不能超过 2.0 m, 这是地下砾性土层发生液化的另一个必要条件, 即如果可排水层厚度超过 2.0 m, 砾性土层不会发生液化。

同样需要指出的是, 存在上覆不排水层及不厚的

可排水层只是决定砾性土层是否发生液化的要素之一。理论上讲,这两个条件都相同,地下水位以下的砾性土层是否会液化,肯定还与可排水层中土的渗透系数有关,这一点显然还需要深入研究。

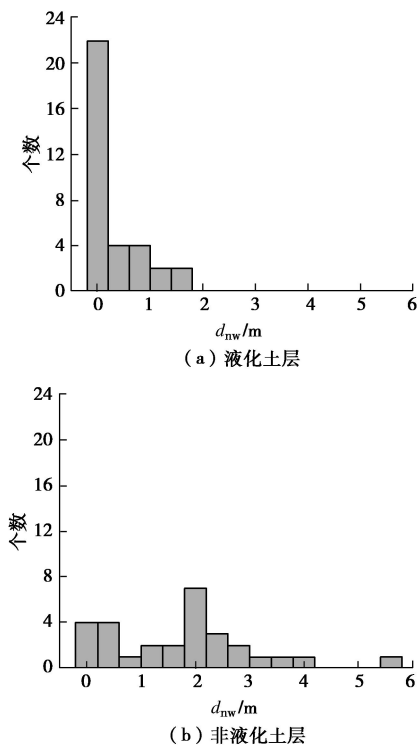


图7 汶川地震中液化与非液化砾性土层地下水位与上覆黏性土层间可排水层厚度  $d_{nw}$  的分布

Fig. 7 Distribution of thickness  $d_{nw}$  between water table and overlying clay layers for sites of liquefied and non-liquefied gravelly soils in Wenchuan earthquake

## 4 结 论

(1)  $0.15g$  应为触发天然沉积砾性土层液化的地表最低地震强度,但大规模的砾性土层液化发生则需要  $0.2g \sim 0.4g$  (Ⅷ度区) 的地震强度。

(2) 液化砾性土含砾量可到 85% 及更大,且不随地震强度减弱而降低;高剪切波速砾性土层会发生液化;认为土体中不含砂土就难以液化、砾性土中含砾量越多越不容易液化、天然砾性土层波速很大而不会出现液化的传统认识有误。

(3) 砾性土液化存在帽子效应,即上覆渗透性差的非液化土层的存在(帽子)是地下砾性土层可发生液化的必要条件,此厚度至少应为  $0.5\text{ m}$ ,反之即便是非密实饱和砾性土层受到较强动荷载作用,液化也不会发生。

(4) 砾性土液化存在间隙效应,即地下水位与上覆黏性土层间不能有过厚的可排水层间隙也是地下砾性土层发生液化的必要条件,此间隙上限可取为  $2.0\text{ m}$ ,即具有超过该厚度的可排水层的下卧砾性土层

不会发生液化。

(5) 砾性土与砂土密实程度的剪切波速分界线相差悬殊,现有砂土液化判别公式不适于砾性土层;以一个计算公式完成液化判别的方法仅适用于砂土层,以此构造砾性土液化判别方法则会出现较多误判,需要额外补充埋藏条件方面的要求,这应是砾性土液化判别方式区别于砂土液化判别方式的标志。

## 参考文献:

- [1] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害评述[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1 - 9. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 李兆焱, 袁晓铭. 2016 年台湾高雄地震场地效应及砂土液化破坏概述[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 1 - 7. (LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming. Seismic damage summarize of site effect and soil liquefaction in 2016 Kaohsiung earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(3): 1 - 7. (in Chinese))
- [3] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [4] KOESTER P J, DANIEL C, ANDERSON M. In situ investigation of liquefied gravels at Seward, Alaska[J]. Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization, 2000, GSP 97: 33 - 48.
- [5] LIN P, CHANG C, CHANG W. Characterization of liquefaction resistance in gravelly soil: large hammer penetration test and shear wave velocity approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004(24): 675 - 687.
- [6] WONG R T, SEED H B, CHAN C K. Liquefaction of gravelly soils under cyclic loading conditions[R]. Report No. UCB/EERC-74/11. Berkeley: University of California, Berkeley, 1974.
- [7] 王昆耀, 常亚屏, 陈 宁. 饱和砂砾料液化特性的试验研究[J]. 水利学报, 2000(2): 37 - 41. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(2): 37 - 41. (in Chinese))
- [8] 王志华, 周恩全, 吕 丛, 等. 基于流动性的饱和砂砾土液化机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1816 - 1822. (WANG Zhi-hua, ZHOU En-quan, LÜ Cong, et al. Liquefaction mechanism of saturated gravelly soils based on



- flowing property[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1816 - 1822. (in Chinese))
- [9] 陈国兴, 孙田, 王炳辉, 等. 循环荷载作用下饱和砂砾土的破坏机理与动强度[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2140 - 2147. (CHEN Guo-xing, SUN Tian, WANG Bing-hui, et al. Undrained cyclic failure mechanism and resistance of saturated sand-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2140 - 2147. (in Chinese))
- [10] 康飞, 彭涛, 杨秀萍. 基于剪切波速与神经网络的砂砾土地震液化判别[J]. 地震工程与工程振动, 2014, **31**(1): 110 - 116. (KANG Fei, PENG Tao, YANG Xiu-ping. Gravel soil liquefaction evaluation using artificial neural networks with shear wave velocity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, **31**(1): 110 - 116. (in Chinese))
- [11] EVANS D M, SEED H B. Undrained cyclic triaxial testing of gravels-the effect of membrane compliance[R]. Report No. UCB/EERC-87/08. Berkeley: University of California, 1987.
- [12] EVANS D M, ZHOU Sheng-ping. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(3): 287 - 298.
- [13] 袁晓铭, 曹振中. 砂砾层液化判别的基本方法及计算公式, 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 509 - 519. (YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Fundamental method and calculational formula for evaluation of gravel soils liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 509 - 519. (in Chinese))
- [14] 曹振中, 袁晓铭. 砂砾层液化的剪切波速判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 943 - 951. (CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming. Shear waves velocity-based approach for evaluation gravel soils liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 943 - 951. (in Chinese))
- [15] 曹振中, 袁晓铭. 砾性土液化原理与判别技术——以汶川8.0级地震为背景[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming. Principle and evaluation technique of gravelly soils liquefaction[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [16] 地球科学大词典编委会. 地球科学大词典[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (Earth Science Dictionary Committee. Earth science dictionary[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [17] 汪云龙, 袁晓铭, 陈龙伟. 基于弯曲元技术的无黏性土剪切波速与相对密度联合测试方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊1): 3418 - 3423. (WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, CHEN Long-wei. A measurement method for the relationship between shear wave velocity and relative density of cohesionless soils using Bender Elements technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3418 - 3423. (in Chinese))
- [18] 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. The Haicheng earthquake damages[M]. Beijing: Seismological Press, 1979. (in Chinese))
- [19] 刘令瑶, 李桂芬, 丙东屏. 密云水库白河主坝保护层地震破坏及砂料振动液化特性[M]// 水利水电科学研究院论文集第8集(岩土工程). 北京: 水利出版社, 1982: 46 - 54. (LIU Ling-yao, LI Gui-fen, BING Dong-ping. Earthquake damage of Baihe Dam and liquefaction characteristics of sand and gravel materials[M]// Volume 8 Collected Papers of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Beijing: China Waterpower Press, 1982: 46 - 54. (in Chinese))
- [20] 汪闻韶, 常亚屏, 左秀泓. 饱和砂砾料在振动和往返加荷下的液化特性[M]// 水利水电科学研究院论文集第23集. 北京: 水利出版社, 1986: 195 - 203. (WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping, ZUO Xiu-hong. Liquefaction characteristics of saturated sand-gravels under vibration and cyclic loading[M]// Volume 23 Collected Papers of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing: China Waterpower Press, 1986: 195 - 203. (in Chinese))
- [21] SIROVICH L. Repetitive liquefaction at a gravelly site and liquefaction in overconsolidated sands[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(4): 23 - 34.
- [22] YOUT T L, HARP E L, KEEFER D K, et al. The borah peak, idaho earthquake of October 28, 1983 Liquefaction[J]. Earthquake Spectra, 1985, **2**(1): 71 - 89.
- [23] YEGIAN M K, GHABRAMAN V G, HARUTIUNYAN R N. Liquefaction and embankment failure case histories, 1988 Armenia Earthquake[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(3): 581 - 596.
- [24] KOKUSHO T, TANAKA Y, KAWAI T, et al. Case study of rock debris avalanche gravel liquefaction during 1993 Hokkaido-Nansei-Oki earthquake[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(3): 83 - 95.
- [25] HATANAKA M, UCHIDA A, OHARA J. Liquefaction characteristics of a gravelly fill liquefied during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake[J]. Soils and Foundations, 1997, **37**(3): 107 - 115.