

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 砾性土的定义	1
1.2 历史地震中砾性土液化实例	2
1.3 砾性土液化研究的意义	7
1.3.1 现有认识和判别技术的局限性	7
1.3.2 我国砾性土层分布范围广泛	8
1.3.3 砾性土工程应用广泛	10
第 2 章 汶川地震土体液化问题	11
2.1 地震概况	11
2.2 液化宏观现象与特征	12
2.2.1 液化分布	12
2.2.2 液化宏观特征	16
2.2.3 与历史地震的对比	21
2.3 液化震害现象与特征	23
2.3.1 液化震害与特征	23
2.3.2 液化震害等级及分布	28
2.3.3 液化减震机理探讨	30
2.4 汶川地震砾性土液化问题	36
2.4.1 工程地质背景	36
2.4.2 砾性土液化分布	44
2.4.3 液化砾性土的土性特征	45
2.5 液化区地裂缝成因探讨	48
2.5.1 断层或断裂	48
2.5.2 液化区地裂缝	50
2.6 典型液化震害剖析	54
2.6.1 板桥学校	54
2.6.2 松柏村	57
2.7 几点重要认识	60

第 3 章 以汶川地震为背景的砾性土动力特性试验研究	62
3.1 引言	62
3.2 振动台试验	62
3.2.1 试验土样	62
3.2.2 试验方案	63
3.2.3 液化特征对比	65
3.3 大直径动三轴试验	71
3.3.1 试验设计	71
3.3.2 抗液化强度特征	74
3.3.3 残余孔压发展规律	76
3.4 弯曲元剪切波速试验	79
3.4.1 弯曲元剪切波速测试原理	79
3.4.2 试样筒弯曲元剪切波速测试系统	80
3.4.3 大直径动三轴弯曲元剪切波速测试系统	83
3.4.4 剪切波速测试结果对比	83
3.5 小结	88
第 4 章 砾性土液化特性与液化原理	89
4.1 引言	89
4.2 大直径动三轴试验影响因素	90
4.2.1 试样尺寸	90
4.2.2 土样状态	95
4.2.3 液化标准	96
4.2.4 应力条件	97
4.2.5 橡皮膜嵌入效应	99
4.3 砾性土的液化特性	105
4.3.1 含砾量的影响	105
4.3.2 砾性土孔压发展规律	108
4.3.3 砾性土抗液化强度	111
4.4 砾性土及砂土液化原理	115
4.4.1 砂土液化原理	115
4.4.2 砾性土液化原理	117
4.5 小结	129
第 5 章 砾性土液化判别方法构建原则	131
5.1 引言	131
5.2 现有砾性土液化判别方法	131

5.2.1 贝克贯入试验转换方法	131
5.2.2 大直径动三轴试验方法	134
5.2.3 雷达分类法	136
5.3 基本指标的选取	137
5.4 砾性土液化判别方法基本模型	137
5.4.1 基本思路	137
5.4.2 初判条件	138
5.4.3 复判模型	141
5.5 小结	144
第6章 基于动力触探的砾性土液化判别技术	145
6.1 引言	145
6.2 动力触探测试技术	146
6.2.1 适用范围	146
6.2.2 优缺点	147
6.2.3 误差来源	149
6.3 汶川地震现场测试	150
6.3.1 测试点选取与分布	150
6.3.2 液化层的确定	151
6.4 基于动力触探的砾性土液化判别式	152
6.4.1 基于烈度的表达式	152
6.4.2 基于 PGA 的表达式	154
6.5 动力触探砾性土液化判别方法的通用性研究	156
6.5.1 能量修正的必要性	156
6.5.2 中美动力触探锤击能量测定	157
6.5.3 能量修正方法	161
6.5.4 方法通用性检验	163
6.6 小结	172
第7章 基于剪切波速的砾性土液化判别技术	174
7.1 剪切波速测试技术	174
7.1.1 物理意义	174
7.1.2 离散性分析	174
7.2 汶川地震现场剪切波速测试	175
7.3 现有砂土液化判别式的适用性分析	178
7.4 砾性土液化判别式	179
7.4.1 基于烈度的表达式	179

7.4.2 基于 PGA 的表达式	181
7.4.3 公式检验	182
7.5 小结	185
参考文献	186
附录 A 汶川地震现场钻孔及原始测试数据	192
附录 A-1 砾性土地超重型动力触探 N_{120} 及剪切波速 V_s 结果	192
附录 A-2 钻孔及原始测试数据	194
附录 B 汶川地震液化调查及震害图集	224
附录 B-1 汶川地震液化调查记录	224
附录 B-2 汶川地震典型液化图集(60 例)	237

第 1 章 绪 论

1.1 砾性土的定义

“砾性土”是作者根据 2008 年汶川地震中土体液化实际情况定义的新名词,是砾砂、砾质土、粉砾土、砂砾土和砾类土的统称,为砾粒含量从 0% 到 80% 的宽级配粗粒土。

目前学术界和工程界对粗粒土相关定义并不统一和清晰,一方面粗粒土的组成客观上较为复杂,另一方面各行业应用目标也不同。就我国而言,《土工试验规程》(SL 237—1999)中规定粗颗粒土是指粒径大于 5mm、质量百分含量大于 50% 的土,而在其他一些规范中则将砾石含量较多的宽级配土划分为粗粒土,如《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)根据不同粒组的相对含量将土划分为巨粒类土、粗粒类土和细粒类土,其中粗粒类土或粗粒土包含细砂、中砂、粗砂、细砾、中砾、粗砾,即将砂土也包含在内。《水利水电工程土工试验规程》(DL/T 5355—2006),同样均将砂土、圆砾、角砾划分为粗粒土,即粒径范围为 0.075~60mm 的土含量大于 50% 的土为粗粒类土,其中砾粒组含量大于砂粒组含量的土为砾类土,砂粒组含量大于或等于砾粒组含量的为砂类土。

本书砾性土中各个具体组成土类的定义主要参考了《地球科学大辞典》(《地球科学大辞典》编委会,2005)。该辞典给出了砾砂、砾质土、粉砾土、砂砾土、砾类土及粗粒土的具体解释,表述方式上本书略加修改。砾砂是指砾粒含量(粒径大于 2mm)占总质量 25%~50% 的粗粒土;砾质土是指含砾量在 10%~15%,且砾粒含量少于砂粒、粉粒或黏粒含量的粗粒土,对应的英文名称为 gravelly soil;粉砾土是含砾量在 33%~50%,且粉粒含量大于砂粒含量的粗粒土,对应的英文名称为 silty gravelly soil;砂砾土是砾粒含量在 33%~50%,且砂粒含量多于粉黏粒含量的粗粒土,对应的英文名称为 sandy gravel soil;砾类土为含砾量大于 50% 的粗粒土,对应的英文名称为 gravel soil。

经过反复的现场调查、勘察测试和室内实验,2008 年汶川地震土体液化以砾性土液化为主要标志。从地震现场获取的液化砾性土的颗粒级配结果来看,其砾粒含量(粒径大于 5mm)在 10%~77%,最大粒径超过 80mm。如果将 2mm 作为砾粒组下限,汶川地震中液化土层砾粒含量更高,可达到 80%。由于这些砾性土主要通过最大取样直径约 90mm 的钻机获取,实际液化土的含砾量更高,最大粒径更大。进行液化土类命名时,由于其含砾量的范围较宽,很难找到一个单一的名

称与之对应。为了与宽级配的黏性土、砂性土相对应,我们将其统一命名为砾性土,是指由卵石、砾、砂、粉粒、黏粒等部分或全部组成的宽级配土,砾粒含量为其重要指标,变化范围可从 0% 到 80%,对应的英文名称为 gravelly soils。

关于砾粒组的划分,我国不同规范及国内外的定义均具有较大差别。我国《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009 年版)规定砾粒的粒径范围为 2~20mm,而 2005 年再版的《地球科学大辞典》《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)与《水利水电工程土工试验规程》(DL/T 5355—2006)等进行粒组划分时,规定砾粒的粒径范围为 2~60mm,即砾粒组的下限均是 2mm,在一些文献中 2mm 和 5mm 均曾作为砾粒组下限采用(汪闻韶等,1986; Fioravante et al., 2012),采用 5mm 的情况相对较多,美国规范及一些外文文献中则较为普遍采用 4.75mm(美国标准 4 号筛)(Siddiqi et al., 1987),而国内没有孔径 4.75mm 的标准筛。考虑到通用性,本书采用 5mm 作为砾粒组的下限,即含砾量是指粒径大于 5mm 的颗粒占总质量的百分含量,符号用 G_c 表示,英文为 gravel content。

1.2 历史地震中砾性土液化实例

目前关于砂土液化问题研究已经取得了较大的进展,在国内外现行的规范中也有充分体现。然而,对于砾性土的液化及判别问题认识尚少,工程实践普遍认为砾性土可划分为非液化土类,主要有以下几方面的原因。

(1) 历史地震中砾性土液化实例十分有限,2008 年汶川地震之前全球不足 10 例,可供深入研究的实例太少。

(2) 砾性土的渗透系数大,高出砂土几个数量级,地震中饱和砾性土孔压发展与消散共同作用,孔压消散较快以至于很难上升至液化的程度。

(3) 较一般场地而言,砾性土场地剪切波速普遍较大,按传统认识属于良好场地,难以发生液化。

(4) 大直径动三轴试验目前有一些研究成果,但由于试验结果受到取样难度、尺寸限制、橡皮膜嵌入效应等的影响,不排水试验结果很难充分反映砾性土的液化特性,相关研究成果的认可程度还不是很,应用于工程实践还存在较大的差距。

(5) 还没有一种基于现场测试手段有效确定砾性土抗液化强度的方法。

国内外历史地震中,砾性土液化实例远少于砂土液化,仅有的少量砾性土液化的报道,主要包括以下几例。

1975 年海城地震:石门水库所处烈度为 7 度,震时水下发出响声,水面冒泡,80min 后滑体上缘露出水面,由于砂砾料保护层施工时未专门碾压,处于相对疏松状态,地震时孔压上升产生流滑(中国科学院工程力学研究所,1979)。

1976 年唐山地震:密云水库位于北京市潮河、白河交汇处,控制流域面积

$1.57 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总库容 $4.3 \times 10^9 \text{ m}^3$, 白河大坝为斜墙土坝, 最大坝高 66m, 坝长 960m, 斜墙用中、重粉质壤土填筑, 坝体及上游斜墙的保护层均用砂砾料填筑, 保护层厚度 3~5m, 坝基为砂砾石, 最大厚度 44m, 采用混凝土防渗墙及水泥黏土灌浆帷幕防渗。1976 年唐山地震时, 白河主坝斜墙上游砂砾料保护层发生了大面积的滑坡, 滑坡长度 900m, 滑坍面积约 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积约 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$, 滑裂的面积几乎全处于水下的保护层内, 滑坡体堆积的距离很远, 大部分堆积在上游坝脚 40m 以外, 有的甚至达百米以上。密云水库白河主坝保护层砂砾料的平均含砾量为 60% 左右, 级配不连续, 缺少 1~5mm 的中间粒径(刘令瑶等, 1982; 沈珠江和徐志英, 1981)。

1976 年意大利东北部地震: Friuli 地区 Avasinis 村发生砾性土与砂土液化, 分布如图 1.1 所示。该村位于 Leale 河的冲积扇上, 冲积扇的前端为砂土液化区, 中部为砾性土液化区。在 1976 年 5 月 6 日 ($M_L=6.2$)、9 月 15 日 ($M_L=6.1$) 及 9 月 16 日 ($M_L=5.2$) 的几次地震中均在原喷水冒砂孔处再次喷冒(Sirovich, 1996)。

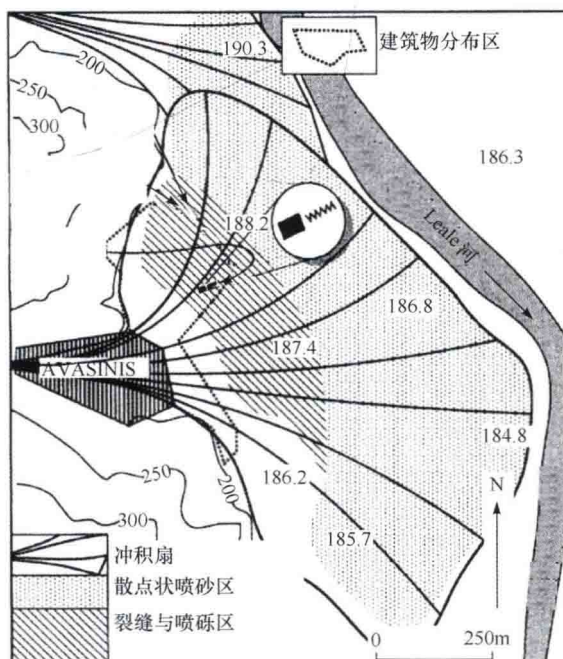


图 1.1 意大利 Avasinis 冲积扇砾性土液化分布(Sirovich, 1996)

1995 年阪神地震: 日本 Hanshin 地区发生了大面积的液化现象, 其中 Port 为该地区最大的人工岛, 液化现象几乎遍布该岛整个范围, 20m 以上的填筑料采自 Rokko 山上, 之下为几米厚的软黏土, 填筑时间为 1969 年(图 1.2)。由于填筑料含有大量的砾石, 其液化可能性以及强度一直被忽视, 加之该地区的历史地震活动较弱, 不够重

视房屋建筑的抗震措施。因此,1995 年阪神地震中,Port 人工岛上大量的建筑因砾性土液化而遭到严重破坏,该岛所遭受的地表峰值加速度为 $0.35g$ (Hatanaka et al., 1997)。



图 1.2 1995 年阪神地震液化分布 (Hatanaka et al., 1997)

为研究 Port 人工岛上砾性土填筑料的土性, Hatanaka 等 (1997) 在该岛上通过冷冻法获得了扰动较少的试样, 现场进行钻孔、标准贯入试验以及大直径动三轴试验。钻孔结果表明, 地下水位为 3m , 从地表至 18.5m 均为人工填筑砾性土, 整个砾性土层中标准贯入击数变化较为平稳, 说明填筑料土性较为均匀。液化砾性土的平均粒径范围为 $1.7\sim3.7\text{mm}$, 最大粒径为 $37.5\sim101.6\text{mm}$, 砾石含量超过 50% 。受取样设备尺寸的限制, Port 人工岛砾性土的最大粒径应超过这一范围。人工填筑砾性土的干密度为 $1.7\sim2.0\text{g}/\text{cm}^3$, 该范围接近天然沉积砾性土层的干密度, 天然沉积砂的干密度为 $1.5\sim1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。

1988 年 Armenia 地震: 6.8 级地震袭击了亚美尼亚 (Armenia) 北部, 地震形成了长达 27km 的断层, 破坏波及断层两侧 $30\sim40\text{km}$ 范围内的房屋建筑, 并造成了 40000 人伤亡。距离断层 25km 的 Ghoukasian 台站记录到的地表峰值加速度约为 $0.2g$, 据分析, 断层 $1\sim2\text{m}$ 处的加速度为 $0.5\sim1.0g$ (图 1.3)。距离断层 1km 处的高速公路路基发生了流滑, 路基附近发生了明显的喷水冒砂现象。该地区主要为 Pambak 河流冲积扇, 沉积了 140m 厚的砾性土层。液化场地位于河流附近, 地下水位为 0.2m , 标准贯入击数为 12 击/ 30cm , 路基填筑料的 $c=5\text{kPa}$, $\phi=30^\circ$ (Yeghian et al., 1994)。

1999 年台湾集集地震: 地震导致地表巨大错位、大规模的山崩以及滑坡, 基础设施严重受损, 同时在许多地区发生罕见的砂土液化现象, 造成严重的破坏。液化区主要分布在彰化县、台中县、南投县, 其中台中县雾峰乡液化范围较大、灾害较严重, 液化范围在 4km^2 以上, 其他地区液化范围及灾害相对较少 (萧峻铭, 2004)。而在台中县雾峰乡福田桥附近的河漫滩上发现了砾性土液化现象, 地点位于大里

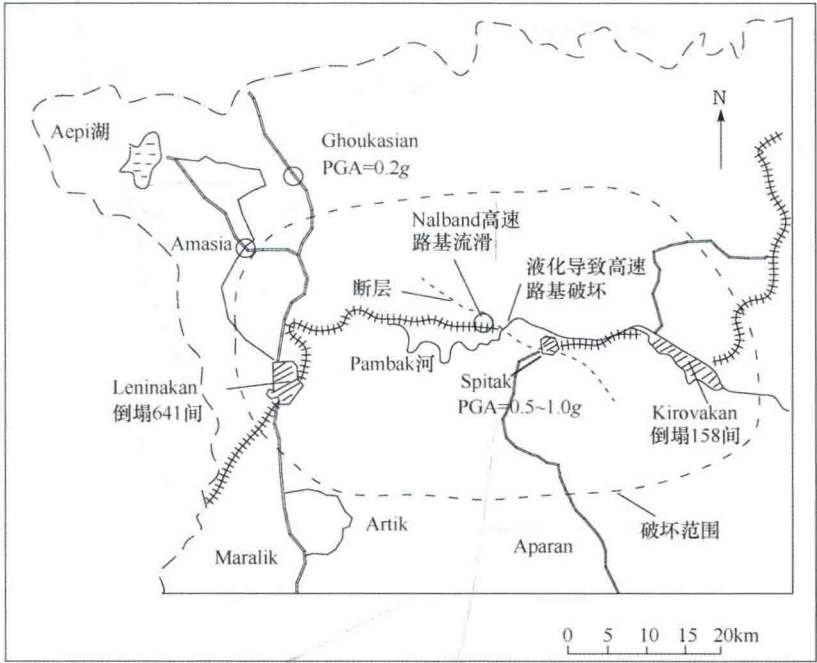


图 1.3 1988 年 Armenia 地震砾性土液化(Yegian et al. , 1994)

溪左岸,距离断层约 2km,喷砂自桥东约 50m 至桥西约 300m,另外有数条长 30~50m、宽约 30cm 的地裂缝平行于堤岸分布。钻孔结果表明,该场地地下水位约 4.5m,地表至地下 23.5m 均为砾性土层,其中 2.1~7.0m 为砾石夹黄色粉质中细砂,细砂含量约 21%,4.0~4.5m 发现薄黏土层(Lin et al. , 2004)。

将国内外历次地震中的砾性土液化实例汇总于表 1.1。

表 1.1 国内外历次地震中的砾性土液化实例汇总

编号	地震名称	地点	地震动强度	砾性土特性	文献来源
1	1964 年 Alaska 地震	美国,Alaska 州	—	冲积扇,松散,浅部砾质土液化	Koester et al. , 2000
2	1975 年海城地震	辽宁营口石门水库土坝	7 度区	松散,未经过碾压	中国科学院工程力学研究所,1979
3	1976 年唐山地震	北京密云水库白河主坝砂砾壳	(0.05g,140s)	稍密至中密,未经专门碾压	刘令瑶等,1982
		唐山市滦县城关北	10 度区	出现喷水冒砂夹带大量卵石,卵石粒径 3~9cm,最大达 15cm	汪闻韶等, 1986

续表

编号	地震名称	地点	地震动强度	砾性土特性	文献来源
4	1976 年意大利东北部地震	意大利, Priuli 地区	0.2g	冲积扇, 前缘砂土液化, 中部砾性土液化, 砾性土剪切波速 140~210m/s	Sirovich, 1996
5	1983 年 Borah Peak 地震	美国, Pence Ranch 地区	0.3g~0.5g	冲积阶地, 5°缓坡, 坡脚喷冒, 土质松散	Youd et al., 1985
6	1993 年 Hakkaido-Nansei-Oki 地震	日本, Mt. Komagataka 地区	—	崩落土, 上覆火山灰, 相对密度 30%, 平均粒径 30mm, 剪切波速小于 100m/s	Kokusho, 1995
7	1995 年阪神地震	日本神户港	0.25g~0.4g	12~15m 填土, N=5~10 击, 无上覆非液化层	Hatanaka et al., 1997
8	1999 年台湾集集地震	台湾雾峰地区	0.5g~0.8g	水位 4.5m, 4.5~23.5m 为松散砾性土液化	Lin et al., 2004
9	2008 年汶川地震	四川成都平原	6~11 度区	118 个液化场地中, 约 70% 为砾性土地, 多数松散~稍密, 最大粒径超过 20cm	曹振中, 2010

从表 1.1 可以看出, 在河流冲积、人工填土等沉积环境下发生的砾性土液化比较多, 松散至稍密的砾性土在不同地震强度下均有可能发生液化。

将 2008 年汶川地震以及上述收集到的国内外其他历史地震的液化砾性土级配曲线进行对比, 如图 1.4 所示。由图可以看出, 汶川地震液化砾性土级配曲线极大丰富了目前国际上屈指可数的砾性土液化基础数据, 同时, 汶川地震液化砾性土

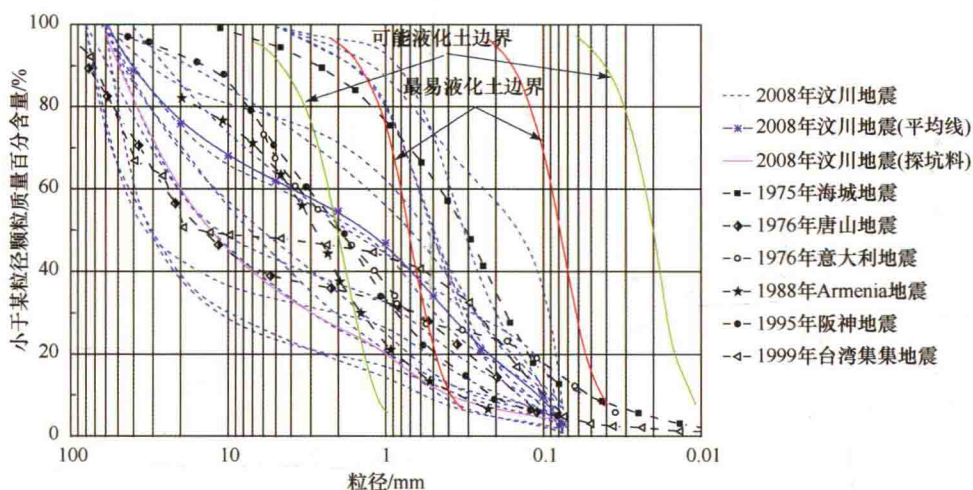


图 1.4 2008 年汶川地震液化土级配曲线与国内外现有结果的对比

的级配涵盖了其他地震的,汶川地震液化砾性土平均级配曲线穿插在其他地震级配曲线之中,具有平均意义,且液化砾性土的沉积类型具有典型性。因此,研究汶川地震的砾性土液化问题具有代表性,以此建立的砾性土液化评价方法应具有国际通用性。

历史地震中发现的液化砾性土数量有限,可用单一的名词(如砂砾土)表示液化土类,而汶川地震中发现的液化砾性土,粒径范围变化大,无法用现有的一两个名称概括,这也正是我们需要重新定义砾性土新名词的原因。

Tsuchida(1970)根据历史地震中液化土及非液化土的筛分试验结果,给出了可液化土及最易液化土的颗粒级配分布边界,认为最易液化土主要为砂土,平均粒径为 $0.08\sim 0.7\text{mm}$,部分粉土及含少量砾石($G_c < 10\%$, G_c 为粒径大于 5mm 的质量百分含量)的砂土则认为在一定条件下可能液化,可能液化土的最大平均粒径为 2.1mm ,而上述国内外实际液化砾性土远远超出了可能液化土的范围,特别是汶川地震中,液化砾性土的平均粒径为 2.0mm 左右,最大平均粒径达到 32mm ,含砾量高达 77% 。

1.3 砾性土液化研究的意义

1.3.1 现有认识和判别技术的局限性

作者及所在研究团队发现并证实了2008年汶川地震中大量的砾性土液化现象,促使新修订的《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—2012)中增加了“对存在饱和和砾砂的地基,其液化可能性需要进行专门评估”的条文,表明对可液化土的认识上更进了一步。但对于粒径更大的砾性土的液化可能性,目前国内相应勘察、设计规范未做任何说明,而实际工程中砾性土往往被当成非液化土对待,也不采取任何抗液化措施。目前国内外砾性土的应用越来越广泛,若仍停留在以往砾性土不会液化的认识上,忽略其液化可能性,造成的潜在危险越大,留下的隐患也就越大。

经过几十年的研究和实践检验,基于标准贯入试验、静力触探试验、剪切波速试验的砂土液化判别方法是目前国内外常用的、比较成熟的方法,且已经纳入相应的抗震规范,广泛应用于工程实践。然而这些工程测试技术由于试验设备本身的特点,需满足一定的适用条件:标准贯入试验是利用一定的锤击动能(锤重 63.5kg ,落距 76cm),将一定规格的空心圆柱形贯入器(外径 5.1cm 、内径 3.5cm)打入钻孔孔底的土层中,记录每贯入 30cm 的锤击数,由于贯入器内径较小,即使在砂土中,贯入过程若遇到砾石等较大颗粒,其锤击数也会迅速增大而不能真实地反映土的密实程度,因而试验不适于砾性土层,在砾性土层中试验甚至会损坏贯入器;静力触探试验是借助外力将一定规格的实心圆锥形探头(锥尖面积 10cm^2 、 15cm^2 、 20cm^2)按一定速率匀速(1.2m/min)压入土中量测其锥尖、侧壁阻力等。

实践表明,在贯入过程中遇到较大颗粒阻力值会明显升高,甚至会超出探头的极限值,不可在砾性土层中进行试验;剪切波速测试一般需要钻孔,在地表锤击产生相应的剪切波,通过孔内探头采集、分析剪切波到达每一土层的时间差进而得到每一土层的剪切波速,随着试验技术和设备的不断进步,目前通过表面波法得到相应的剪切波速应用越来越广泛,测试技术本身不受土类的限制。表 1.2 为《岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)给出的常用原位测试技术的适用范围。

表 1.2 常用原位测试方法的适用范围

测试方法	碎石土	砂土	粉土	黏性土
标准贯入试验	×	✓✓	✓	✓
静力触探试验	×	✓	✓✓	✓✓
剪切波速试验	✓	✓	✓	✓
超重型动力触探	✓✓	✓✓	✓	✓

注:✓✓很适用;✓适用;×不适用。

对于砾性土层,标准贯入试验、静力触探试验均无法进行,剪切波速试验、超重型动力触探试验不受上述土类的限制,但是基于剪切波速的砂土液化判别式是建立在砂土液化资料基础之上的。在相同剪切波速下砂土与砾性土的密实程度不同,不可直接套用砂土的液化判别式。剪切波速值、超重型动力触探值是砾性土液化判别两个可行的评价指标,但需根据新的砾性土液化资料重新建立判别公式,在后面章节将详细介绍。

1.3.2 我国砾性土层分布范围广

我国幅员广阔,地形地貌表现多样性,第四系覆盖层超过 1/5 的陆地国土面积,主要分布在华北平原、东北平原、河西走廊、塔里木盆地等。通过查询第四系分布所涉及省份的地层简表(第四系全新统)(表 1.3),砾性土层主要分布在山前或河流上游的冲积层和洪积层上,进而给出了砾性土层的主要分布区域,在四川盆地、河西走廊东部、天山北部、秦岭山前地带、台湾西部等均有较大范围的分布,其他省份也有零星分布。

表 1.3 主要省份第四系砾性土层分布(中国地质科学院,1973)

编号	省份	地质时代及砾性土层分布情况
1	宁夏	山前洪积区:上、中全新统砂砾、砂土 5~20m;下全新统砂砾石 20~100m 河谷盆地区:下全新统,下部粗砂及砾石层,中部细砂,上部粉砂及黏土质砂
2	北京	下全新统肖家河组:冲、洪积、湖积、灰白色粉砂、细砂及砾石层夹黑色淤泥及泥炭,2~12m

续表

编号	省份	地质时代及砾性土层分布情况
3	海南	全新统凉山组:灰色黏土、粉砂质泥,含砾粗砂,局部含有机质,含有孔虫和孢粉,2.5~12m 全新统万宁组:深灰色黏土夹砾质中粗砂,沉积层厚12m
4	浙江	江山、临安、杭州、嘉兴等山地丘陵区:全新统鄞江桥组,砾石、砂夹粉砂质泥,5~13m;全新统山门街组,砾石层、黏土、粉砂质泥、泥炭,7~18m;全新统之江群,黏土、砾石层,3~25m
5	甘肃	红石山—北山一带:全新统洪积层,砂砾、粉砂质黏土;全新统冲积层,砂砾、粉砂土 祁连山一带:全新统冲积层,砂砾;全新统洪积层,砂、砾;全新统风积层,砂;全新统湖积层,砂、砾、砂质黏土;冰积层,冰碛物 西秦岭一带:全新统冲积、洪积层,砂砾、砂质黏土
6	吉林	辽东—浑江一带:全新统,砂和砾石、砂质黏土、淤泥夹泥炭,有新石器时代文化遗址,大于10m
7	福建	闽西南一带:全新统冲、洪积层:黏土、砂质黏土、砂、砂砾卵石;全新统海积层,淤泥、黏土、砂、砾卵石、泥炭,3~56m
8	青海	祁连山一带:现代冰碛层,河湖相砂、砾、盐类、淤泥、风成砂、黄土及岗石杂冰碛砾石层,2~20m 西秦岭一带:粉砂、砂砾,5~10m 柴达木一带:盆地地下隐伏的达布逊组,砂砾、淤泥、盐类;山区冰水堆积泥砾、河湖相砂、砾,46m 南昆仑—南秦岭一带:冰碛、古土壤层及河湖相粉砂、砂砾、淤泥、泥质粉砂、泥炭 巴颜喀拉—唐古拉一带:粉砂、砂砾层
9	江西	赣北地区:冲积及冲湖积淤泥、黏土、砂地及砾石,3~40m 赣南地区:冲积淤泥、黏土、砂及砾石,1~26m
10	河南	豫西北地区:全新统冲积层,粉砂质黏土、黏土质粉砂、砂砾层,3~15m 豫西南地区:全新统冲积层,砂砾石层夹粉砂质黏土,3~10m
11	江苏	鲁西—连云港—泗洪一带:淤泥、砂、泥质粉砂、粉砂质泥、砂砾,2~35m 苏北—下扬子一带:粉砂、泥质粉砂、粉砂质泥、砂砾、泥炭层
12	湖南	湘西—雪峰山一带:全新统橘子洲组,泥质粉砂、砂、砾,1~10m
13	台湾	西部山麓地区:全新统冲积、生物堆积层,泥、砂、砂砾、砾石及珊瑚礁等,小于180m
14	西藏	雅鲁藏布江—日喀则—喀喇昆仑一带:河、湖相砾石、砂黏土,冰川砾石、砂
15	陕西	渭河盆地:上部冲、洪积泥质粉砂、粉砂质泥、砂、砾,5~30m;下部冲、洪积粉砂质泥、泥质粉砂、砾,含半坡动物群,10~83m 摩天岭—南秦岭一带:冲、洪积砂、砾、泥质粉砂、局部夹灰土,1~50m

续表

编号	省份	地质时代及砾性土层分布情况
16	云南	腾冲—保山—兰坪—思茅一带:冲、洪积砂、砾,1~5m 滇东南地区:冲、洪积砂、砾,1~5m
17	新疆	准噶尔—天山地区:风积、湖积、冲积层,砂砾、泥质粉砂、1~50m 塔里木盆地地区:冲、洪积砂砾,1~10m
18	四川	沙鲁里—马尔康—秦岭一带:全新统冲、洪积层,砾石、砂泥,0~80m 宝兴—盐源一带:冲、洪积,砂砾层、棕色黏土、砂土,偶夹泥炭,5~20m 四川盆地:全新统资阳组,粉砂质黏土、砂土、砾石层,7~12m
19	山东	华北平原区:冲积层,泥质粉砂、粉砂质泥夹粉砂、细砂、淤泥,偶含砾石、粗砂,10~90m 鲁西地区:冲积层,砂砾、砂、粉砂、泥质粉砂,5~8m 鲁东地区:冲积层,中粗砂夹砾、卵石,局部夹淤泥,1~12m;坡积洪积层,泥质粉砂、砾、碎石,2~10m;海积层,含卵石砾石砂、细砂、局部淤泥偶夹泥炭,3~16m
20	吉林	农安—乌兰浩特一带:砂砾石、粉细砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土和淤泥、泥炭等
21	辽宁	围场—建平—阜新—朝阳一带:冲、洪积层,砂砾石、粉质砂土、砂质黏土,4~7m

1.3.3 砾性土工程应用广泛

砾性土排水性能好、抗剪强度高,常常用于土壤改良等;人类居住环境受限,对居住面积、交通状况等要求逐渐提高,人工填海、高速公路、铁路等工程应运而生,且大量使用砾性土;另外,我国土石坝一般采用砾性土作为垫层,新中国成立以来,我国已建成各类水库 90000 余座,其中挡水建筑物为土石坝的占到水库总数的 90% 以上(向衍等,2008)。

因此,砾性土在自然界的分布较为广泛,且砾性土的工程应用越来越多,若仍停留在以往砾性土不会液化的认识上,忽略其液化可能性,就对工程建设存在很大的潜在威胁。

第2章 汶川地震土体液化问题

2.1 地震概况

2008年5月12日14时28分,四川省发生了8.0级强烈地震,震中位于汶川县(北纬 31.0° ,东经 103.4°),震源深度为14km,极震区为沿发震断层向东北方向展布的狭长地带。全国大部分地区都有震感,甚至越南、泰国也有震感。地震灾区涉及四川、甘肃、陕西、重庆、云南、宁夏6个省(自治区、直辖市)。地震发生之后,中国地震局在都江堰市体育中心设立了指挥部,并成立了汶川地震现场应急工作队,前后总共780余人,分赴四川、甘肃、陕西、重庆、云南、宁夏等地,会同地方政府和相关行业部门分成100多个灾害调查小组对6个省(自治区、直辖市)244个受灾县(区、市)的房屋、基础设施(包括生命线系统、水利设施)、企业等破坏情况进行了调查,行程达 8×10^5 km,调查范围超过 5×10^5 km²,完成4150个调查点,2240个抽样点的震害调查。调查结果表明,此次地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震,地震重灾区的范围已经超过 1×10^5 km²,汶川地震的强度、烈度都超过了1976年唐山地震,给人民生命财产造成巨大损失。本次地震有如下几个突出特点(袁一凡,2008a):

1) 震级大、波及范围广

地震当天,中国地震局通过震级速报系统报道为7.8级,随后对更多台网数据分析后,将汶川地震震级从7.8级修订为8.0级。另外,通过现场调查确定了本次地震的受灾范围,按照地震破坏程度差异,将灾区划分为极灾区、严重灾区、重灾区和受灾区4个区域,如图2.1所示。整个评估区形状呈椭圆形,长轴走向北东,总面积约 4.4×10^5 km²,涉及四川、甘肃、陕西、重庆、云南、宁夏6个省(自治区、直辖市)。四川省灾区面积 2.7×10^5 km²,主要涉及阿坝、绵阳、德阳、成都、广元等20个州市,受灾人口2270.36万人,约654.46万户。其中,极灾区:呈条带状分布,北东自甘肃文县,南西到四川汶川映秀,面积约 1.31×10^4 km²,四川省 1.22×10^4 km²。严重灾区:北自甘肃康县,南到四川大邑县,东自陕西宁强县,西到四川小金县,面积约 2.73×10^4 km²,四川省 1.94×10^4 km²。重灾区:北自甘肃天水市,南到四川雅安雨城区,东自四川南江县,西到四川小金县,面积约 8.36×10^4 km²,四川省 5.86×10^4 km²。受灾区:北自甘肃省镇原县,南到四川雷波县、云南永善县一带,东自陕西汉阴县,西到四川道孚县,面积约 3.2×10^5 km²,四川省 1.8×10^5 km²。

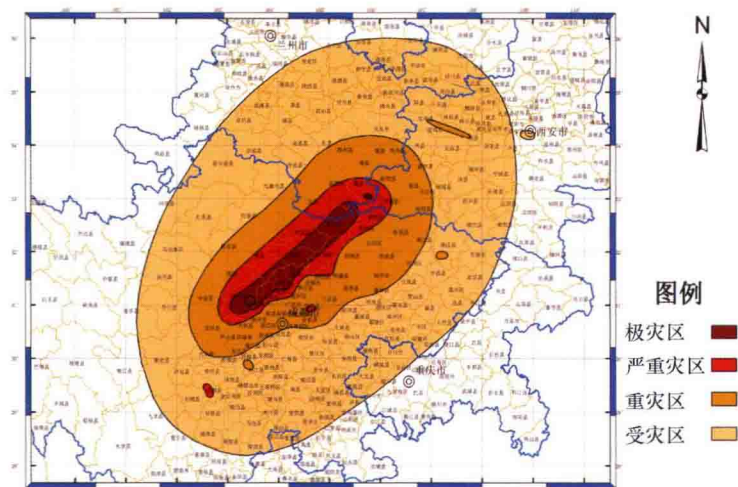


图 2.1 汶川地震灾害分区图(袁一凡, 2008b)

2) 人员伤亡重

截至 2008 年 9 月 5 日 12 时,此次地震已造成 69227 人遇难,17923 人失踪,374643 人受伤。房屋倒塌是造成人员伤亡的主要原因,据不完全统计,房屋倒塌造成的死亡人数约占 90%,其次山体滑坡掩埋公路和村庄、滚石砸到汽车、躲避不及被倒塌围墙或落物砸到造成伤亡也不在少数,约占 10%。

3) 财产损失严重

应急工作队按照《地震现场工作第四部分:灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2005)对灾区的房屋破坏、室外财产损失、基础设施、企业和其他行业等进行了详尽的抽样调查,得到了本次地震的直接经济损失结果约为 6.9×10^{11} 元,其中四川 6.2×10^{11} 元、甘肃 4.4×10^{10} 元、陕西 2.3×10^{10} 元、重庆 5.4×10^9 元、云南 1.7×10^9 元、宁夏 8.3×10^7 元。其中,地震灾区的直接经济损失占 2007 年全国国内生产总值(GDP)的 2.81%,四川损失占 2007 年四川 GDP 的 58.80%,占 2007 年全国 GDP 的 2.51%。

2.2 液化宏观现象与特征

2.2.1 液化分布

汶川地震之后很长一段时间,人们仍停留在“无液化现象”或“少数场地液化,但无液化震害”的认识上。2008 年 7 月,中国地震局组织了汶川地震科学考察专项研究,专门成立了 10 余人参加的液化调查组,作者作为液化调查组的组长和骨干成员,历经两个月、累计行程万余公里,发现新液化点(带)百余处,对本次地震土

体液化问题有了较为全面的认识。

我们认为,之前缺少认识的主要原因是绝大部分震害调查的注意力集中在山区、大中城市的房屋破坏和人员伤亡上,而与我国以往大地震一样,液化主要出现在平原上广大的农村地区。考察结果表明,2008年汶川地震土体液化的范围为新中国成立以来地震液化分布范围最广的一次,液化范围几乎涉及所有主震区,包括成都地区、绵阳地区、德阳地区、眉山地区、乐山地区、遂宁地区、雅安地区和广元地区,涵盖面积长约500km,宽约200km。东最远为遂宁市安居区,距离震中约210km;南到雅安市汉源县,距离震中约200km;北至甘肃陇南市,距离震中约280km。液化现象在烈度6、7、8、9、10、11度区内均有发现。

调查共发现118个液化点(带),这里所谓点(带)以村为单位,即使某一村庄出现很多液化及房屋破坏,也以一个点计算,液化点间隔至少2km。本次地震主要液化点如图2.2所示,其中圆点代表液化点,同心椭圆状线代表烈度圈,分别代表烈度6、7、8、9、10、11度区域的等震线(中国地震局,2008)。

由于此次地震高烈度区主要位于山脉之中,故在10、11度区的液化现象相对较少。从液化分布来看,液化集中在长约160km、宽约60km的长方形区域,长边方向与等震线长轴方向一致,主要液化区域为成都、德阳和绵阳3个地区。值得注意的是,烈度6度区内也发现了10余处液化,而且分布在成都、眉山、乐山、遂宁、雅安等不同地区。

此次地震液化涉及面积广,即使在成都、德阳和绵阳3个主要液化区,液化分布仍很不均匀,主要分布在5个条带和1个马蹄形区域内。

3个主要液化区中,成都地区液化程度属于中等,主要集中在都江堰市,液化在6、7、8、9度区都有发生,8度区内最为集中。该地区液化点主要分布在2个条带上:第1条长约35km,主要沿岷江流域西岸分布,沿都江堰、玉堂镇、青城山镇、石羊镇至温江区;第2条长约40km,沿都江堰、天马镇、丽春镇至清流镇。

德阳地区是3个主要液化区液化程度最严重的地区,主要集中在绵竹市、什邡市和德阳市,其中绵竹市最为严重,液化在7、8、9度区都有出现,8度区较为集中。该地区液化点明显呈3条带状分布:第1条位于什邡市西侧,长约20km,沿湔氐镇、师古镇、南泉镇、隐峰镇至马井镇;第2条则位于什邡市东侧,长约40km,沿遵道镇、板桥镇、齐福镇、禾丰镇、兴隆镇至广汉市;第3条位于绵竹市东侧,长约35km,沿拱星镇、富新镇、柏隆镇、德新镇至黄许镇。与其他区域不一样的是,德阳地区的液化点并不沿现有的河流分布,说明这一带可能存在故河道。

绵阳地区是三个主要液化区液化程度轻的地区,主要集中在绵阳市游仙区和江油市区,分布在7度和8度区,7度区略为集中。绵阳地区为丘陵地带,液化点分布较为零散,呈马蹄形分布,主要位于第四纪地层,分布在河流的一级阶地或河漫滩上,即江油市区和绵阳游仙区范围内的忠心镇、新桥镇、徐家镇、玉河镇一带。