

DOI: 10.11779/CJGE201909006

砾性土液化评价方法的通用性和可靠性研究

曹振中^{1,3}, Kyle M. Rollins², 袁晓铭³, T. Leslie Youd², Michael Talbot⁴, Jashod Roy², Sara Amoroso⁵

(1. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 杨百翰大学土木与环境工程系, 美国 普若佛 84602;

3. 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; 4. 美国内政部垦务局, 美国 普若佛 84606;

5. 意大利国家地质与地球物理研究所, 意大利 拉奎拉 8-67100)

摘要:以2008年汶川地震液化震害调查资料为背景,基于操作性和经济性上具有显著优势的中国动力触探试验(DPT)而提出的砾性土液化评价方法,包括砾性土层液化触发条件以及判别公式(CYY公式),理论上已经得到国内外同行的认可,但其通用性和可靠性尚需检验。以5个国家29个历史地震砾性土地中美联合勘测为基础,研究DPT技术、砾性土层液化触发条件和CYY公式在不同国家、不同地震和不同场地的适用性和可靠性问题,其中,成都平原14个砾性土地勘的勘测与数据处理由中方完成,美国、意大利、新西兰、厄瓜多尔等15个砾性土地勘的勘测与数据处理由美方Rollins教授主导完成,均为新的测试检验点。结果表明:中国动力触探标准探头在不同国家、不同砾性土地勘上测试具有可行性,可以有效穿透20m的砾性土地勘,动探击数可作为砾性土液化评价的核心指标,同时亦可扩展到砾性土层的力学性能评价;不同国家、不同砾性土液化场地上,均存在不排水或排水不畅的埋藏条件,符合砾性土层液化触发条件要求;对动力触探击数进行锤击能量、有效上覆压力等修正后,CYY公式在不同国家、不同地震、不同砾性土液化场地的判别成功率约96%,具有较高可靠性。以2008年汶川地震砾性土液化为背景、以动力触探锤击数为基本指标的砾性土液化评价方法,具有国际通用的可行性。

关键词:动力触探试验;砂砾土;触发条件;CYY公式;验证

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)09-1628-08

作者简介:曹振中(1982—),男,博士,教授,主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemczz@163.com。

Applicability and reliability of CYY formula based on Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation of gravelly soils

CAO Zhen-zhong^{1,3}, Kyle M. Rollins², YUAN Xiao-ming³, T. Leslie Youd², Michael Talbot⁴, Jashod Roy², Sara Amoroso⁵

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo 84602, USA; 3. Key Laboratory of Earthquake

Engineering and Engineering Vibration, Institution of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

4. U.S. Bureau of Reclamation, Provo 84606, USA; 5. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, L'Aquila 8-67100, Italy)

Abstract: The CYY formula, proposed by Cao, Youd and Yuan in 2013 and based on the field investigations of gravelly soil sites liquefied during the 2008 Wenchuan earthquake using the Chinese dynamic penetration test (DPT), has uncertainty regarding applicability and reliability in practical use. Nevertheless, the DPT has obvious advantages in maneuverability and economy. In order to verify the reliability, accuracy and practicability of the CYY formula, 29 new gravelly soil sites in total, 26 of which are liquefied during 6 different earthquakes including the 1964 Alaska earthquake in America, the 1976 Friuli earthquake in Italy, the 1983 Borah Peak earthquake in America, the 2008 Wenchuan earthquake in China, the 2016 Muisne earthquake in Ecuador, and the 2016 Kaikoura earthquake in New Zealand, are selected for China-U S joint borehole drilling and DPT. The field tests at 14 sites in the Chengdu Plain are mainly completed by the Chinese side, and the rest of tests are mainly completed by the US side led by Professor Rollins. The results indicate that the Chinese DPT is feasible in different countries and can effectively penetrate about 20 meters of gravelly soils, and the blow count of DPT can be used as the primary index for predicting the liquefaction of gravelly soils. The 26 selected liquefaction sites consist of soil profiles in undrained conditions and are consistent with the proposed threshold condition for the occurrence of liquefaction in gravelly soils. The verification

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目(2016YFE0105500);国家自然科学基金项目(51669005);广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380117);广西高校科研项目(2013YB100)

收稿日期:2018-10-21

rate for the CYY formula is around 96%, indicating that the CYY formula has high reliability and can be used to predict the potential for liquefaction in gravelly soils in different countries after necessary corrections such as hammer energy, overburden pressure, earthquake magnitude, etc.

Key words: dynamic penetration test; gravelly soils; threshold conditions; CYY formula; verification

0 引言

文献记录的 10 余次历史地震中,零星出现了砾性土液化现象,砾性土液化的发生条件、机理、抗液化强度以及评价方法等问题一直存在争议,国内外不断开展了相关研究特别是室内试验。徐斌等^[1]给出了砂砾料振动液化后静载条件下不排水剪切强度,对于评价砂砾料液化后性状具有重要价值。Fioravante 等^[2]通过现场冷冻法获取了不同粒径的原状砾性土,试验表明原状与重塑砾性土的动强度差别不大。Flora 等^[3]的原状砾性土循环三轴试验表明,颗粒组分越粗越不容易液化,且受初始应力状态的影响明显。陈国兴等^[4]研究了饱和砂砾土的不排水动力特性及其动强度的量化方法,为描述砂砾土的破坏模式以及评价动强度提供了一个有效途径。Wang 等^[5]采用不排水三轴试验、CT 扫描及数值模拟的方法研究了砾石含量对砂砾土抗液化性能的影响,详细分析了砂砾土的细观特征。北美地区主要采用在砂土地地上建立的 Becker 贯入击数与标准贯入击数的转换关系,采用砂土液化判别公式评价砾性土的液化特性^[6]。为了改进 Becker 贯入击数, Ghafghazi 等^[7]通过在触探头上安装加速度及应变传感器,获取触探头上的锤击能量,并对锤击数进行能量修正,测试结果具有较好的一致性。然而,国内外现行抗震规范主要采纳、推荐使用以液化灾害现场调查资料与测试数据为依据建立的评价方法。

2008 年汶川地震出现了有记录以来最大规模的砾性土液化现象,118 例约 70%为砾性土液化,为评价方法的建立提供了丰富的试验场地。前期研究以汶川地震液化震害调查资料为背景,提出了砾性土液化评价方法,包括砾性土层液化触发条件以及判别公式,分别用于评判砾性土发生液化需具备的两个基本条件:①砾性土处于不排水或排水不畅的条件,即满足提出的液化触发条件^[8];②砾性土处于饱和、松散状态,具备较低的抗液化强度,采用基于动力触探的砾性土液化判别公式进行评价^[9]。

然而,提出的砾性土液化触发条件及 CYY 判别公式缺乏必要的实际液化案例的检验,鉴于此,本文历时 2 年,在中国成都平原以及美国、意大利、厄瓜多尔、新西兰等 5 个不同国家并经历 6 次不同地震中的 29 个不同历史砾性土地开展中美联合勘探与动力触探测试,其中在成都平原 14 个场地的现场勘测与数据处理主要由中方完成,美国等 15 个场地的现场勘

测与数据处理主要由 Rollins 教授牵头的美方完成,均为新的测试检验点,所有作者均直接参与了不同检验点的现场测试工作。所有现场测试均采用中国动力触探标准探头,其他国家均采用当地的钻机与重锤锤击系统,测试重锤的有效锤击能量并对动力触探锤击数进行能量修正。本文的图、表、主要结论由中美双方协商、探讨后给出,中文撰写由中方完成,双方同意将测试与检验结果在中文期刊上发表,目的是验证砾性土液化触发条件及 CYY 公式的可靠性、准确性、实用性,为提出的砾性土液化评价方法的推广应用提供支撑。

1 评价方法与检验事件

如前所述,前期研究以汶川地震液化震害调查资料为背景提出的砾性土液化评价方法,包括砾性土层液化触发条件以及判别公式。

(1) 砾性土层液化触发条件

根据成都平原的“二元地质结构”,即上层为黏土等不透水的覆盖层,下层为松散的砾性土,建立砾性土层排水条件分析模型,如图 1,其中 H_c 为上覆不透水层厚度, H_d 为地下水位与上覆不透水层底面的距离,定义为可排水层厚度, H_L 为砾性土液化层的厚度。可排水层厚度的大小,决定了下卧砾性土液化层的排水条件,若可排水层厚度较小,无法容纳下层砾性土孔压消散时排出的水,仍处于不排水或排水条件不畅的状态,砾性土层较高的透水性能无法有效发挥,松散条件下仍然容易发生液化。前期研究结果给出了砾性土发生液化的不排水触发条件,即可排水距离小于 2.0 m ^[8]。

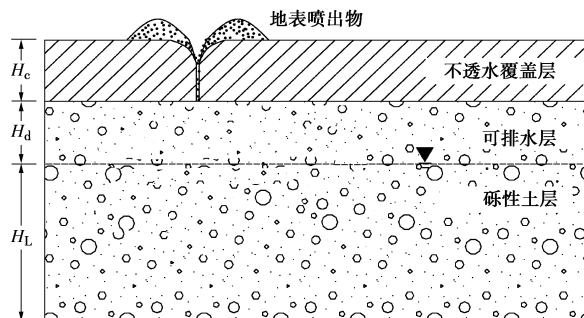


图 1 砾性土层排水条件示意图

Fig. 1 Sketch of drainage conditions in gravelly soils

(2) CYY 砾性土液化判别公式

动力触探是针对砾性土力学性能评价的一种原位测试技术,具有设备简单、操作方便、积累了丰富的经验关系等优势,可确定砾性土的密实程度,并进一步确定其抗液化强度。Cao 等^[9]在 2008 年汶川地震成都平原 19 个液化场地、28 个非液化场地开展了动力触探测试,获取了动力触探重锤的锤击能量,阐明了砾性土液化评价方法建立的基本原则,并给出了不同概率水平下抗液化强度的计算公式:

$$CRR = \exp \left[\frac{1}{2.12} (\ln [P_L / (1 - P_L)] - 8.40 + 0.35 N'_{120}) \right] \quad (1)$$

式中 N'_{120} 为修正动力触探击数; P_L 为液化概率。公式 (1) 简称为 CYY 公式。

2008 年汶川地震后,多次地震中均出现了不同程度的砾性土液化现象。如,2014 年希腊地震中 Cephalonia 岛的一个码头发生了侧向滑移,地表喷出大量砾石^[10](图 2)。2016 年厄瓜多尔地震中, Manta 港口一个码头地表开裂,喷出大量砂土和粉土,地面沉降 40~50 cm,桩基础发生了侧向滑移,其主要原因是码头建设使用含砂、砾的松散回填材料发生了液化^[11]

(图 3)。2016 年新西兰地震中, Wellington 集装箱码头为填海工程,遭受了地表破裂、变形、侧向滑移,地表喷出大量砾石^[12](图 4)。这 3 次地震的一个共同特征:砾性土液化均发生在新建的港口或码头,地下水位(海平面)位于水泥路面与下层砾性土附近,处于饱和、松散、不排水的状态,具备砾性土液化的基本条件。

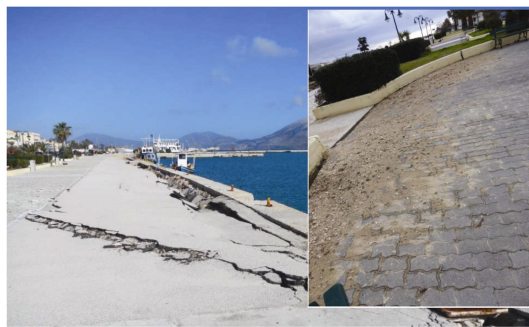


图 2 2014 年希腊地震 Cephalonia 岛砾石喷出地表,砾性土液化导致堤岸侧移^[10]

Fig. 2 Spurt-out of gravels at Cephalonia Island in Greece during 2014 Cephalonia earthquake and lateral displacement of embankment induced by liquefaction of gravelly soils^[10]

需要说明的是,在 CYY 公式建立时仅对汶川地震部分场地进行了动力触探测试,本次检验时在成都平原补充了 11 个液化场地、3 个非液化场地,均为新的测试检验点,每个测试场地的距离超过 2 km。美国、意大利、新西兰、厄瓜多尔等同一地震中的各测试点

之间也存在较大的距离,均可作为独立的数据验证点。

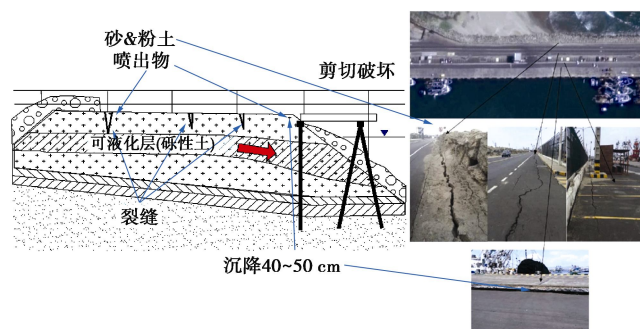


图 3 2016 年厄瓜多尔地震 Manta 港口砾性土液化^[11]

Fig. 3 Lateral spread induced by liquefaction of gravelly soils at Manta Port during 2016 Muisne Earthquake in Ecuador^[11]



图 4 2016 年新西兰地震 Wellington 集装箱码头大量砾石喷出地表^[12]

Fig. 4 Large amount of gravelly ejecta observed on a pavement surface at Thorndon Container Terminal in New Zealand during 2016 Kaikōra earthquake^[12]

2 中美联合动力触探测试

由于砾性土粒径较大,标准贯入试验、静力触探试验等工程上常规测试手段无法贯入或压入砾性土土层。动力触探试验采用的是实心圆锥探头,能够有效贯入砾性土层,并确定砾性土极限承载力、压缩模量等,具有操作简单、快速经济、应用历史悠久、能连续测试等明显优势,贯入深度可达 20 余 m,可满足砾性土层液化评价的要求。若需要进行更深土层的评定,可采取先钻孔至目标深度,再进行动力触探试验,但此时需要考虑上覆土层压力、传递至探头的有效锤击能量的影响。

本次中美联合试验分别在中国、美国、意大利、厄瓜多尔、新西兰等 5 国的 29 个砾性土场地进行了动力触探试验,其中,2008 年汶川地震成都平原 14 个砾性土场地(11 个液化、3 个非液化),1964 年美国

表 1 砾性土液化实例及验证点选取

Table 1 Case histories of gravelly soils selected for verification of CYY formula

检验点数量	国家	地震	年份	矩震级	宏观液化现象	文献来源
4 个液化检验点	美国	Alaska 地震	1964	9.2	Valdez 港口因砾性土液化导致灾难性的侧向滑移, 港口附近的冲积沉积物由 100ft 中密至非常密实的卵、砾石组成, 其间由中砂、粗砂填充 ^[13]	Coulter 等, 1966 ^[13]
3 个液化检验点	意大利	Friuli 地震	1976	6.4	意大利 Avasinis 晚第四纪山间冲积扇发现多处砾性土液化现象, 冲积扇地表发现砂、砾石喷出物 ^[14]	Sirovich, 1996 ^[14]
3 个液化检验点	美国	Borah Peak 地震	1983	6.9	在 4 个冲积扇沉积场地发现了砾性土液化现象, 其中, Pence Ranch、Larter Ranch 场地液化引起的最大侧向位移分别为 0.75, 1 m ^[15]	Youd 等, 1985 ^[15]
11 个液化检验点, 3 个非液化检验点	中国	汶川地震	2008	7.9	共发现 118 个液化场地, 约 70%为砾性土液化。选取了 47 个场地进行了连续钻孔、取样, 并在附近进行动力触探测试。钻孔显示, 砾性土层之上覆盖 1~4 m 黏性土等沉积物 ^[9]	Cao 等, 2013 ^[9]
3 个液化检验点	厄瓜多尔	Muisne 地震	2016	7.8	Manta 港口砾性土层发生液化并导致侧向滑移, 造成码头桩基础发生了破坏。相对松散的砾性土层是港口修建时通过回填形成 ^[11]	Lopez 等, 2018 ^[11]
2 个液化检验点	新西兰	Kaikora 地震	2016	7.8	Wellington 港口遭受了回填料液化、侧向滑移以及地表破裂等灾害, 建筑物和码头受损。在 Thorndon 集装箱码头的坍塌路面发现了大量的砾石喷出物 ^[12]	Bradley 等, 2017 ^[12]

阿拉斯加地震 4 个液化场地, 1976 年意大利地震 3 个液化场地, 1983 年美国博拉峰地震 3 个液化场地, 2016 年厄瓜多尔地震 3 个液化场地, 2016 年新西兰地震 2 个液化场地 (见表 1)。现场测试探头均采用中国动力触探标准探头 (图 5), 探头最大直径为 74 mm, 与探杆连接处直径 60 mm, 探头锥角 60°。升降系统采用测试场地所在国家或地区的钻机, 重锤质量、落锤距离等各国均存在较大差异, 没有统一标准, 需测定不同国家重锤传递给钻杆的锤击能量, 对动力触探锤击数进行校正。重锤锤击能量测定采用美国 PDA 公司的能量测试仪, 能量测试仪为长 60 cm、直径 65 mm 的钻杆 (图 6), 上端连接锤击砧板, 下端连接钻杆, 能量测试仪获得的能量即为重锤传递给下段钻杆的锤击能量, 能量测试仪上安装了 1 对加速度传感器、1 对对应变传感器, 通过测定动能和应变能进而换算成锤击能量。



图 5 中国动力触探探头
Fig. 5 Photo of Chinese DPT Cone

所有动力触探测试场地均有钻孔资料, 或重新补充钻孔, 获取了土层组成、分布特征、地下水位等基本参数。图 7 为意大利砾性土液化场地取样, 钻孔连续取样后按照深度依次摆放, 取样结果与原始文献的



图 6 意大利 Avasinis 动力触探及锤击能量测试
Fig. 6 DPT and hammer energy measurement at Avasinis in Italy



图 7 意大利 Avasinis 砾性土液化场地取样
Fig. 7 Gravelly samples collected at Avasinis in Italy

土层分布较为一致^[14]: 0~1.5 m 为含砾石的粉土, 1.5~10 m 为砾砂, 其中 4.3 m 附近夹 7 cm 黏土。根据钻孔、动力触探结果绘制包含土层基本信息、动力触探曲线等的成果图, 如图 8, 浅层为透水性能较差的硬覆盖层, 动力触探击数较高, 偶尔出现较大锯齿突变, 进入地下水位后动力触探击数较为平稳, 7 m 以后遇到密实的砾石层后迅速增长。

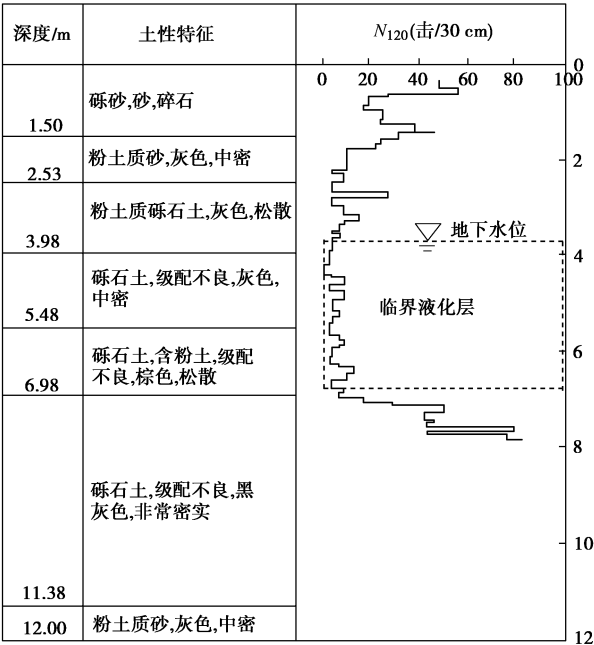


图 8 厄瓜多尔 Manta 港口钻孔柱状图及动力触探^[17]

Fig. 8 Borehole log, soil profile and DPT records at liquefied site of gravelly soils at Manta Port in Ecuador^[17]

3 基础数据整理

(1) 临界液化层的选取

29 个检验测试点均有钻孔资料或补充了钻孔, 获取钻孔柱状图、动力触探锤击数分布曲线、土层分布等以后, 需要确定液化层以及非液化层的深度和厚度。临界液化层选取依据的基本原则: 根据钻孔对整个土层进行土类划分, 剔除不会发生液化的土类或地层(如黏土、非饱和层等); 根据《岩土工程勘察规范》(2009 年版) 将动力触探击数 N_{120} 异常值剔除; 根据岩土工程勘察规范、动力触探击数 N_{120} 对可液化土层的密实状态划分为松散、稍密、中密、密实、很密等, 选取可液化土层密实状态最低的一层作为临界液化层。以图 8 为例说明临界液化层的选取: 地下水位以上分别为含砾石的砂土、含粉土的砂土以及含粉土的砾石土, 不具备液化的条件, 需剔除; 2.6 m 处动力触探遇到较大块石、动探击数出现异常, 探头将块石击碎或挤开后动探击数回归原来水平, 该处动探击数异常值需剔除; 地下水位以下 3.8~7.0 m 分别为稍密至中密的

级配不良的砾石土, 动力触探击数处于 7 击/30 cm 左右, 为最具有液化可能性的一层, 选取该层作为临界液化层, 并计算该层的平均深度、平均动力触探击数、地震循环应力比等, 即分别为表 (2) 中的 d_s , N_{120} , $CSR_{7.5}$, 其他测试检验点的数据处理采用同样的方法。

(2) 动力触探击数修正

动力触探锤击数受测试设备、操作人员、钻杆、重锤重量与落距、上覆压力等影响, 本次联合测试采用了 5 个不同国家的重锤锤击系统, 为消除测试设备差异及测试深度的影响, 参考标准贯入击数的修正方式对动力触探锤击数进行修正^[16]:

$$N'_{120} = C_1 C_2 N_{120} \quad (2)$$

式中 N_{120} 为实测动力触探击数; C_1 为修正至 100 kPa 的有效上覆压力修正系数, $C_1 = (100 \text{ kPa} / \sigma'_v)^{0.5}$; C_2 为有效锤击能量修正系数, $C_2 = \text{ETR} / 90\%$, 其中, ETR 为有效锤击能量传递系数 (%), 理论总能量按 1.2 kN·m 计算。

中国动力触探的重锤锤击系统采用 120 kg 重锤, 利用卷扬机将重锤提升 1 m, 自动脱钩后通过自由落体的方式锤击钻杆上的砧板, 进而带动钻杆、触探头对土层进行贯入, 理论锤击能量 (势能) 为 1.2 kN·m。前期研究表明, 中国动力触探的重锤传递至钻杆的有效传递效率约为 90%, 变异系数约 0.09^[9], 由于 CYY 公式构建时采用的是中国动力触探在成都平原获取的基础数据, 因此, 本次在其他国家获取的动力触探检验数据均以中方的锤击能量为基准, 即将其修正至理论锤击能量为 1.2 kN·m、传递效率为 90% 的动探击数, 中国成都平原新的动力触探检验数据不进行锤击能量修正。

(3) 震级修正

震级越大, 地震作用时间越长, 相同大小的地震荷载在不同震级条件下的作用效果不同。本次 29 个检验点来自 6 次不同震级大小的地震, 根据 Seed “简化法” 计算等效循环剪应力比时, 采用 Youd 等^[16]推荐的震级修正系数:

$$CSR_{7.5} = CSR / MSF \quad (3)$$

式中 $CSR_{7.5}$ 为修正至矩震级为 7.5 下的等效循环剪应力比; CSR 为 Seed “简化法” 等效循环剪应力比; MSF 为震级修正系数, $MSF = 10^{2.24 / M_w^{2.56}}$ 。

公式 (1) 在建立时, 基础数据均来源于 2008 年汶川地震, 为使其能在同一震级标准下使用, 也需加上震级修正系数, 相当于将 CYY 判别曲线根据汶川地震的震级大小 ($M_w=7.9$) 进行平移^[17], 将公式 (1) 修正至矩震级为 7.5 下的判别公式。

$$CRR_{7.5} = \exp \left[\frac{1}{2.12} (\ln [P_L / (1 - P_L)] - 8.40 + 0.35 N'_{120}) \right] / MSF \quad (4)$$

根据上述的数据处理方式与基本原则, 29 个砾性土场地的检验测试点的数据整理结果如表 2。

4 检验结果

(1) 砾性土层液化触发条件检验

砾性土液化的数量和规模远少于砂土, 汶川地震中出现的大量砾性土液化现象, 具有较为严格的排水条件和特殊的埋藏条件, 前期研究通过考察可排水层厚度对砾性土液化的影响, 给出了可排水距离小于 2.0 m 的砾性土发生液化的触发条件 (图 9)。定义可排水层厚度 (图 1 中 H_d) 为地下水位深度减去上覆不透水土层底面的深度, 当可排水层厚度等于 0 m 时, 表示地下水位位于砾性土与上覆不透水土层的界面处, 当可排水层厚度小于 0 m, 表示地下水位位于上覆不透水土层中, 均为不排水状态。本次 26 个液化检

验点的可排水层厚度, 小于等于 0 m 的液化检验点共 13 个, 处于完全不排水状态, 占比 50% (13/26); 0~1.0m 的检验点共 7 个, 1.0~2.0 m 的检验点共 4 个, 符合砾性土发生液化的触发条件。然而, 非液化场地也存在较多不排水条件或排水条件不畅的工况, 在这种工况下需要根据 CYY 公式进一步评价, 即根据 CYY 公式计算抗液化应力比 $CRR_{7.5}$ (式 (4)), 并计算地震循环剪应力比 $CSR_{7.5}$ (式 (3)), 若 $CRR_{7.5} > CSR_{7.5}$, 则判别为非液化。

将原始及新测试的砾性土液化场地汇总, 56% (25/45) 的液化点处于完全不排水状态, 可排水层厚度若以 0.5 m 为界限, 可囊括 67% (30/45) 的液化点, 进一步说明绝大多数的砾性土液化场地处于不排水或少量排水的状态, 而 2 m 的可排水层厚度是在汶川地震特定的工况条件得到的偏于保守的经验值。另一方

表 2 中美联合动力触探测试结果统计
Table 2 Statistics of joint China-US DPT results for verification of CYY formula

编号	地震	地点	M_w	PGA /g	$CSR_{7.5}$	d_s /m	d_w /m	H_d /m	H_L /m	σ'_v /kPa	ETR	N_{120} (击 /30 cm)	N'_{120} (击 /30 cm)	Liq.?
1	2008 汶川地震, 中国	绵竹市天城镇白江村	7.9	0.23	0.22	4.5	2.2	0.7	5.6	62.0	90%	11.4	12.6	Y
2		德阳市略坪镇安平村	7.9	0.20	0.19	3.9	1.8	-1.0	2.2	53.0	90%	6.0	7.2	Y
3		德阳市德新镇胜利村	7.9	0.21	0.23	5.4	1.9	-0.5	7.1	68.0	90%	9.6	10.2	Y
4		德阳市德新镇长征村	7.9	0.20	0.25	5.3	1.0	-0.8	6.9	58.0	90%	10.5	12.1	Y
5		绵竹市富新镇永丰村	7.9	0.34	0.34	6.6	2.8	-1.2	5.2	87.0	90%	12.6	11.8	Y
6		什邡市湔氐镇白虎头村	7.9	0.46	0.50	3.4	1.2	0.0	4.4	43.0	90%	14.7	19.7	Y
7		绵竹市土门镇林堰村	7.9	0.47	0.38	8.3	3.7	0.7	6.8	111.0	90%	8.7	7.2	Y
8		什邡市师古镇思源村	7.9	0.41	0.38	5.8	3.2	0.3	5.2	84.0	90%	14.1	13.4	Y
9		绵竹市兴隆镇安仁村	7.9	0.44	0.41	7.4	4.0	-0.8	5.1	107.0	90%	16.5	14.0	Y
10		绵竹市汉旺镇武都村	7.9	0.48	0.56	6.3	1.6	-3.4	2.7	73.0	90%	5.7	5.9	Y
11		绵竹市遵道镇双泉村	7.9	0.49	0.54	7.9	2.5	-0.4	10.0	96.0	90%	15.0	13.4	Y
12		德阳市黄许镇胜华村	7.9	0.18	0.18	4.8	2.0	1.4	4.0	63.0	90%	11.7	12.9	N
13		绵阳市凌峰机械厂	7.9	0.20	0.17	6.6	4.1	0.6	0.7	100.0	90%	16.5	14.4	N
14		绵竹市东北镇天齐村	7.9	0.43	0.38	6.6	4.0	0.0	2.2	99.0	90%	18.0	15.8	N
15	1964 Alaska 地震, 美国	Valdez (4 个场地)	9.2	0.44	0.76	6.7	1.0	1.0	2.0	89.0	95%	6.9	8.0	Y
16			9.2	0.44	0.74	4.6	0.8	0.8	2.0	58.6	95%	1.7	7.8	Y
17			9.2	0.44	0.75	5.5	1.0	1.0	2.0	70.8	95%	10.7	13.7	Y
18			9.2	0.44	0.77	6.8	1.0	1.0	1.6	85.6	95%	2.7	9.0	Y
19	1976 Friuli 地震, 意大利	Avasinis (3 个场地)	6.4	0.47	0.38	2.5	0.2	0	2.0	25.0	75%	8.7	12.3	Y
20			6.4	0.47	0.38	1.5	0.2	0	1.0	25.0	75%	5.4	7.7	Y
21			6.4	0.47	0.38	1.6	0.2	0	2.2	25.0	75%	12.0	15.0	Y
22	1983 Borah Peak 地震, 美国	Whiskey Springs	6.9	0.60	0.29	12.0	7.5	4.0	1.4	215.0	89%	37.5	14.5	Y
23		Larter Ranch	6.9	0.50	0.26	2.8	0.7	4.0	3.8	36.5	90%	6.5	9.2	Y
24		Pence Ranch	6.9	0.39	0.30	2.6	1.4	1.8	1.8	41.8	89%	9.0	7.8	Y
25	2016 Muisne 地震, 厄瓜多尔	Manta (3 个场地)	7.8	0.46	0.35	5.2	3.8	1.1	2.0	96.1	51%	15.0	8.8	Y
26			7.8	0.46	0.37	5.4	3.6	1.5	3.8	93.2	52%	16.4	9.6	Y
27			7.8	0.46	0.36	5.6	3.8	1.6	3.4	97.3	53%	12.8	7.4	Y
28	2016Kaikora 地震, 新西兰	Wellington (2 个场地)	7.8	0.24	0.21	5.5	2.6	0	2.0	86.5	84%	3.2	3.9	Y
29			7.8	0.24	0.19	3.8	2.8	0	1.7	68.5	84%	3.6	5.0	Y

注: ① M_w 为矩震级; PGA 为地表峰值加速度; $CSR_{7.5}$ 为修正至矩震级 7.5 下的循环应力比; d_s 为临界层深度; d_w 为地下水位深度; H_d 为可排水层厚度 (负值表示地下水位位于上覆黏土层之中); H_L 为临界层或可液化层厚度; σ'_v 为竖向有效应力; ETR 为能量传递系数 (理论能量 1.2 kN·m); N_{120} 为测试的动力触探击数; N'_{120} 为根据公式 (2) 修正的动力触探击数; Liq. ? 表示是否液化。②编号 1~14 号场地由中方测试并整理, 编号 15~29 号场地由美方测试并整理。

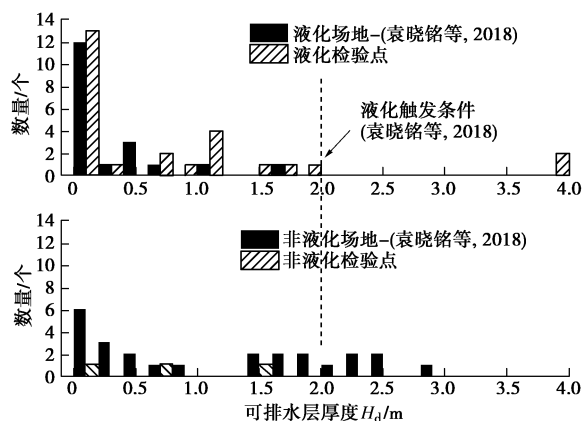


图9 排水距离触发条件检验结果

Fig. 9 Verification results of threshold thickness of drainage gravelly layer developed from investigation data in Chengdu Plain by Yuan, et al. in 2018.

面, 地下水位之下可液化层的厚度、地震荷载大小、渗透性能等均对排水条件具有很大的影响, 即可液化层厚度越大、渗透系数越小, 可液化砾性土层孔压消散需要的时间越长, 地震荷载越大可液化砾性土层的厚度越大。实际工程中严格排水或不排水的工况很少见, 部分排水条件下的砾性土是否存在液化的可能性尚不明确, 有待进一步研究。

(2) CYY 砾性土液化判别公式检验

目前抗震规范均采用确定性液化判别方法, 即判别场地“是”或“否”发生液化。本次检验亦采用确定性判别方式, 即依据液化概率 $P_L=50\%$ 的临界抗液化强度曲线, 判别砾性土地是否发生液化, 并将判别结果与实际结果进行对比。当处于临界状态时, 液化概率取 $P_L=50\%$, 根据式 (4) 可得以动力触探击数为基本指标的砾性土临界液化判别公式:

$$CRR_{7.5} = \exp(0.18N'_{120} - 4.35) / MSF, \quad (5)$$

式中, N'_{120} 为按式 (2) 修正的动力触探击数, MSF 为震级修正系数 (汶川地震 $M_w=7.9$)。若砾性土抗液化强度应力比 $CRR_{7.5}$ 小于所遭受的地震剪应力比 $CSR_{7.5}$ 时, 则砾性土判为液化, 否则为不液化。

如图 10, 5 条从左至右近乎平移的曲线分别为液化概率 85%, 70%, 50%, 30%, 15% 的修正至矩震级为 7.5 级下的 CYY 砾性土液化判别公式对应的曲线, 蓝色实线液化概率 50% 即为临界液化判别曲线。2008 年汶川地震、1964 年阿拉斯加地震、1976 意大利地震、1983 年博拉峰地震、2016 年厄瓜多尔地震、2016 年新西兰地震中的共计 29 个检验点, 除 2008 年汶川地震 1 个液化、1 个非液化场地误判外, 其余 25 个液化、2 个非液化检验点均判别成功, 液化点检验成功率高达 96% (25/26), 具有较高的可靠性。

图 10 中实心圆点、空心圆点分别为 CYY 公式建立时的原始液化、非液化基础数据, 原始液化、非液

化点在临界判别曲线附近存在一定相互交织现象, 表明 CYY 公式对原始基础数据存在少量误判。判别错误的 4 个原始非液化点 (空心圆点位于临界判别曲线左侧), 其可排水层的厚度分别为 1.5, 1.4, 2.9, 1.6 m, 排水距离较大, 排水通道良好, 发生液化的可能性非常低, 从排水的角度可将其划分为非液化点。因此, 在使用 CYY 公式评价砾性土的液化可能性时, 结合排水限定条件可具有更高的可靠性。

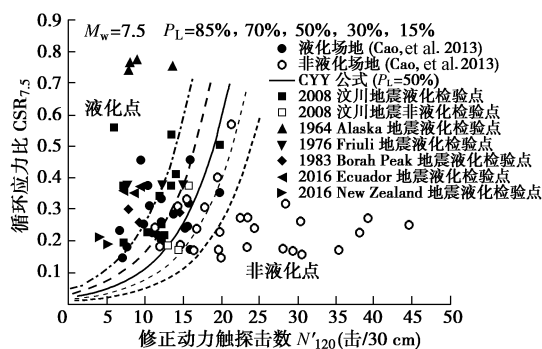


图10 砾性土液化实例检验结果

Fig. 10 Verification results of CYY formula using new DPT data listed in Table 2

5 结 论

在中国、美国、意大利、新西兰、厄瓜多尔等 5 个不同国家的 6 次不同地震中的 29 个不同历史砾性土场地开展中美联合勘探与动力触探测试, 对提出的砾性土液化触发条件及 CYY 公式的可靠性、准确性、实用性进行了验证, 取得了以下认识:

(1) 不同国家钻机上安装中国动力触探标准探头, 砾性土场地的贯入深度可达 20 m, 并进行分层、力学性能评价。中国动力触探技术具有设备简单、经济、可靠、应用历史较长、测试数据连续的优点, 可作为砾性土液化评价的核心指标。

(2) 本次 26 个液化检验点的可排水层厚度, 小于等于 0 m 的液化检验点共 13 个, 处于完全不排水状态, 占比 50%, 0~1.0 m 的检验点共 7 个, 1.0~2.0 m 的检验点共 4 个, 符合砾性土发生液化的触发条件, 对于非液化检验点, 可排水层厚度的分布规律性不强, 2 m 可排水层厚度是砾性土是否发生液化偏于保守的一个上限值。可液化层的厚度、地震荷载大小、渗透性能等均对砾性土液化存在较大影响, 有待进一步研究。

(3) 选取的 29 个检验测试点进行锤击能量、震级、上覆压力等修正后, 除 2008 年汶川地震 1 个液化、1 个非液化场地误判外, 其余 25 个液化、2 个非液化检验点均判别成功, 液化点检验成功率高达 96%, 采用 CYY 公式进行砾性土液化评价具有较高的可靠性。

(4) 砾性土液化触发条件以及 CYY 判别公式分别用于评价砾性土发生液化需具备的两个基本条件:

不排水或排水不畅; 饱和、松散。采用 CYY 公式评价砾性土的液化可能性时, 结合排水限定条件可具有更高的可靠性。

(5) 以 2008 年汶川地震砾性土液化为背景、以动力触探锤击数为基本指标的砾性土液化评价方法, 具有国际通用的可行性。

参考文献:

- [1] 徐 斌, 孔宪京, 邹德高, 等. 饱和砂砾料液化后应力与变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 103 - 106. (XU Bin, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Laboratory study on behaviour of static properties of saturated sand-gravel after liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 103 - 106. (in Chinese))
- [2] FIORAVANTE V, GIRETTI D, JAMIOLKOWSKI M, et al. Triaxial tests on undisturbed gravelly soils from the Sicilian shore of the Messina Strait[J]. Bull Earthquake Eng, 2012, **10**: 1717 - 1744.
- [3] FLORA A, LIRER S, SILVESTRI F. Undrained cyclic resistance of undisturbed gravelly soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **43**: 366 - 379.
- [4] 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 - 2148. (CHEN Guo-xing, SUN Tian, WANG Bing-hui, et al. Undrained cyclic failure mechanisms and resistance of saturated sand-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2140 - 2148. (in Chinese))
- [5] WANG Yong, WANG Yan-li. Liquefaction characteristics of gravelly soil under cyclic loading with constant strain amplitude by experimental and numerical investigations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017(92): 388 - 396.
- [6] HARDER L F. Application of the Becker Penetration test for evaluating the liquefaction potential of gravelly soils[C]// Proc NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, National Center for Engineering Research. Buffalo, NY, 1997: 129 - 148.
- [7] GHAFGHAZI M, DEJONG T J, STURM P, et al. Instrumented becker penetration test: II iBPT-SPT correlation for characterization and liquefaction assessment of gravelly soils[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2017, **143**(9): 04017063.
- [8] 袁晓铭, 秦志光, 刘荟达, 等. 砾性土层液化的触发条件[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(5): 777 - 785. (YUAN Xiao-ming, QIN Zhi-guang, LIU Hui-da, et al. Necessary trigger conditions of liquefaction for gravelly soil layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(5): 777 - 785. (in Chinese))
- [9] CAO Z, YUOUD T, YUAN X. Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation in gravelly soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, **139**(8): 1320 - 1333.
- [10] NIKOLAOU S, ZEKKOS D, ASSIMAKI D et al. January 26th/February 2nd 2014 Cephalonia, Greece Events[R]. GEER-EERI Earthquake Reconnaissance Report, <http://www.geerassociation.org>.
- [11] LOPEZ S, VERA-GRUNAUER X, ROLLINS K, et al. Gravelly soil liquefaction after the 2016 ecuador earthquake[C]// Procs Conf on Geotech Earthquake Engrg and Soil Dynamics. ASCE, Austin, Texas USA, 2018: 273 - 285.
- [12] BRADLEY B, COMERIO M, CUBRINOVSKI M, et al. M7.8 Kaikoura, New Zealand Earthquake on November 14, 2016[R]. QuakeCoRE-GEER-EERI Earthquake Reconnaissance Report, <http://www.geerassociation.org>.
- [13] COULTER H W, MIGLIACCIO R R. Effect of the Earthquake of March 22, 1964 at Valdez. Alaska[R]. US: Geological Survey Professional Paper 542-C, 1966.
- [14] SIROVICH L. Repetitive Liquefaction at gravelly site and liquefaction in overconsolidated sands[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(4): 23 - 34.
- [15] YUOUD T L, HARPE L, KEEFER D K, et al. The Borah Peak, Idaho Earthquake of October 28, 1983 Liquefaction[J]. Earthquake Spectra, 1985, **2**(1): 71 - 89.
- [16] YUOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2001, **127**(10): 817 - 833.
- [17] ROLLINS K M, YUOUD T L, TALBOT M. Evaluation of dynamic cone penetration test for liquefaction assessment of gravels from case histories in idaho[C]// Procs Conf on Geotech Earthquake Engrg and Soil Dynamics. ASCE, Austin, Texas USA, 2018: 227 - 236.