

砂砾土液化判别的基本方法及计算公式

袁晓铭，曹振中

(中国地震局工程力学研究所，黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要：2008年汶川8.0级大地震中液化现象显著且砂砾土液化占很大比重，而我国一些地区砂砾土分布广泛，发展相应液化预测和判别方法十分必要。我国规范液化判别方法来源于砂层（细粒土）液化资料，且按规范规定标准贯入试验不适用于砂砾场地，故现有规范中基于标贯的液化判别方法对砂砾土不可行。以汶川大地震液化震害调查和现场测试为基础，提出了基于超重型动力触探试验（动探试验）的砂砾土液化判别方法并建立了计算模型和公式。结果表明：砂砾土液化判别由初判和复判两部分组成，初判以排除不可能液化及可不考虑液化影响情况为目标，复判则可采用动探击数 N_{120} 为基本指标的计算模型。初判包括地质年代、埋藏条件和含砾量3个条件，复判模型则由动探击数基准值、含砾量、砂砾土埋深、地下水深度和地震烈度等5个参数组成。根据此次地震液化砂砾土埋深及地下水位变化范围较大的特点，采用归一化方法导出动探击数基准值，利用优化方法推导出砂砾土深度及地下水位的影响系数。提出的砂砾土液化判别方法，较全面地考虑了砂砾土液化的影响因素，复判模型和公式表达简单明了，回判成功率较高，且与现有规范具有连续性，便于工程应用。

关键词：砂砾土；液化；判别方法；动探试验；汶川地震

中图分类号：TU435 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)04-0509-11

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: yxmiem@163.com。

Fundamental method and formula for evaluation of liquefaction of gravel soil

YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong

(Institution of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: The liquefaction behaviors in the great Wenchuan 8.0 Earthquake in 2008 are quite notable, and the liquefaction of gravel soil is significant. Considering the wide distribution of gravel soil in some places in China, the liquefaction prediction methods should be developed. The existing methods for evaluating the liquefaction of sand soil result from the sand liquefaction cases, however, SPT technique can not be conducted in the gravel soil layers, and as a result, the existing code is not suitable for the liquefaction assessment of gravel soil. After the investigation for the liquefaction-induced damages in the great Wenchuan Earthquake and in-situ tests for the liquefied and non-liquefied sites, the liquefaction prediction method of gravel soil based on DPT, i.e., the dynamic penetration tests, is presented, and the corresponding model and formula are obtained. The analytical results indicate the liquefaction discrimination of the gravel soil can be divided into two steps, the initial discrimination and the second discrimination. In the initial step, the impossible liquefaction cases are selected, and in the second, the calculation model is adopted by using N_{120} as the basic index from DPT. The geological ages, buried condition of the gravel soil layer and gravel contents of gravel soils are considered in the initial discrimination. In the second discrimination, five parameters including the reference value of N_{120} , gravel content of gravel soils, depth of gravel soils, water table and seismic intensity are concerned. Considering the wide range of liquefied soil depths and its water levels, the reference value of N_{120} is deduced by the normalization method and the influence coefficients of the gravel soil depths and the water levels are obtained by the optimal method. The effect of various factors on liquefaction possibility of gravel soil is considered in the present method and the advantages of the model and formula for the second discrimination are noticed by clear expression, high success ratio of regression discrimination, good connection with the past work and convenience in engineering application.

Key words: gravel soil; liquefaction; discrimination; dynamic penetration test; Wenchuan Earthquake

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项目
(2008B001)；国家自然科学基金项目(90715017)；国家科技部国际合作项目(2009DFA71720)

收稿日期：2009-11-24

0 引言

地震下土体液化是土动力学理论研究和工程应用中非常重要的课题之一，其中需要解决的首要问题是土层液化的预测和判别，而实际液化现象调查和现场勘察测试是发展相关方法最重要的手段^[1-3]。20世纪六、七十年代我国的几次大地震中都出现了显著的液化现象，我国的专家学者通过深入调查和系统研究，提出了具有中国特色的砂土液化判别方法^[4]，对我国乃至世界的工程抗震研究发展做出了重要贡献。

2008年5月12日我国四川发生了8.0级大地震，通过较为系统和深入的调查，发现此次地震液化分布广，液化宏观现象与以往几次大地震很不相同，出现了很多值得深入研究的新问题^[5]。其中突出的特征之一是砂砾土液化，专门的勘察已经确认了这一现象的真实性，并且通过分析推断此次地震中砂砾土液化应占很大比重。我国四川省境内砂砾土分布十分广泛，仅成都盆地砂砾土覆盖面积^[6]就超过8400 km²，在河西走廊东部、天山北部、秦岭山前地带、台湾西部等地也均有砂砾土分布，另外我国土石坝很多采用砾石作为垫层，人工填海、高速公路、铁路等工程大量使用砂砾土填层，因此砂砾土液化预测和判别对于工程选址和抗震设防具有重要意义。

与砂层液化问题相比，国内外目前关于砂砾土液化的震害经验不多，判别方法也很不成熟。现有的液化判别方法基本上是建立在砂土（细粒土）液化分析基础上，是否适合于砂砾土这样的粗粒土尚不可知。同时，砂砾土场地上标准贯入试验不能实施，因而我国现有规范中基于标贯的砂土液化判别方法对砂砾土没有可行性。

由于震害经验有限，日本学者提出的砂砾土液化判别方法是以动三轴实验为基本手段^[7]，但砂砾土动三轴液化实验技术复杂，目前拥有此类装置的单位也十分有限，方法应用上目前受到很大限制。美国学者提出了基于贝克贯入试验（BPT，Becker Penetration Test）的砂砾土液化判别方法^[8]，虽然BPT方法是以现场测试指标为基础，但国内根本不使用这一测试技术。同时，BPT方法的基本要点是将贝克贯入击数转换成标准贯入击数，再根据转换的标准贯入击数对砂砾土液化可能性进行评价。基于标贯击数的液化评价方法主要来源于砂层的资料，而砾石与砂土差异显著，这种直接套用的做法存在很大疑问。

鉴于此，本文以汶川地震液化宏观调查和现场勘察测试为基础，研究一种基于现场指标的砂砾土液化

判别方法，构造模型，推导出计算公式，以填补此方面空白，为砂砾土液化预测和判别方法的发展以及规范的修订提供依据和参考。

1 勘察点的选取

经调查发现^[5]，汶川地震液化分布广，涉及长约500 km、宽约200 km的区域，在成都、绵阳、德阳、眉山、乐山、遂宁、雅安和广元等地区均有液化现象发生。液化主要分布在成都、德阳和绵阳3个地区，集中在长约160 km、宽约60 km范围内。本次地震从低烈度区到高烈度区都有液化现象出现，VIII度区较为集中。

本文选取35个典型场地进行测试分析，勘察点分布如图1。其中有14个液化场地，21个非液化场地。勘察场地位于不同烈度区，其中VII度区8个，VIII度区内17个，IX区内10个，勘察点的基本情况如表1所示。

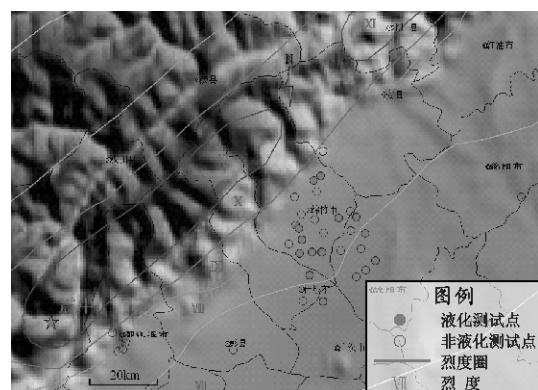


图 1 勘察点分布

Fig. 1 Distribution of the investigation sites

本次勘察所选择的液化场地，均具有显著的地表液化破坏现象或由液化导致的工程结构显著破坏现象。需要说明的是，这些场地经勘察后确认地下水位以下土层中没有砂层，已经排除了细粒土液化的可能，可以肯定液化层就为砂砾层。另外，其中一些场地地表喷出物为中砂、粉砂或细砂，但地下液化的土层是砂砾层而非细粒土砂层，关于这一点的解释，有另文专门讨论。

2 指标选取和模型构造的原则

判别砂砾土液化所使用的主要指标应以能从现场实测得到为原则，同时其测试技术要较为成熟。我国目前规范中液化判别式的基本指标为标准贯入击数，但在砂砾场地上，标准贯入、静力触探等常规试验无法进行。我国《岩土工程勘察规范》^[9]（GB50021—

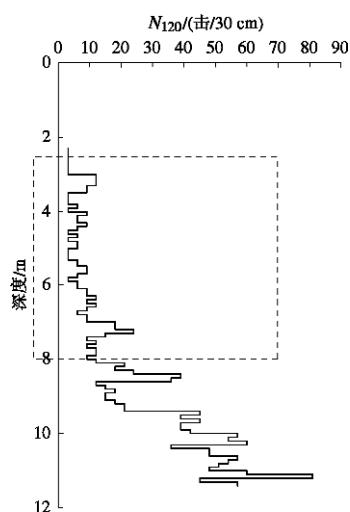
表1 勘察点基本情况

Table 1 Basic information of investigation sites

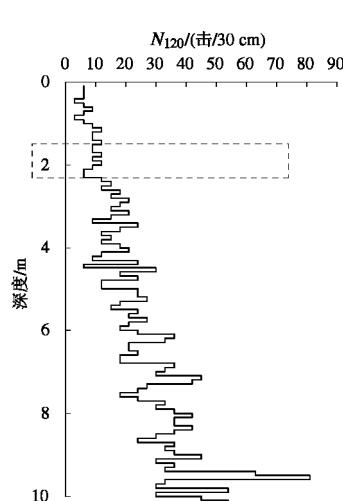
编 号 Site	地 理 位 置	地 震 宏 观 现 象	烈 度	是 否 液 化
1	广汉市南丰镇昆庐小学	喷水冒砂严重; 地表喷细-中砂, 喷水柱高 3 m, 持续几分钟; 教室地面隆起, 墙体严重开裂; 学校无喷水冒砂处房屋破坏较轻, 只有落瓦、少量微裂缝。	VII	Y
2	德阳市柏隆镇果园村	南北向 6-7 户民居喷砂冒水; 室内地面下沉 5 cm, 地表喷浅黄色粉砂; 墙体开裂, 基础无变化; 余震时又液化。	VII	Y
3	德阳市黄许镇金桥村	喷水高 1 m, 喷黄色细砂及卵石; 农田中有长几十米、宽 30 cm 裂缝, 地面下沉 20 cm; 05 年建砖混砖房屋地面隆起。	VII	Y
4	绵竹市新市镇新市学校	喷水高 1.5 m, 持续 1 min, 喷出物为白色中-细砂夹淤泥; 房屋地面下沉 2 cm, 水平侧移 2 cm。	VIII	Y
5	绵竹市板桥镇板桥学校	3 公里长、300~500 m 宽范围内均有液化破坏现象; 学校地面被 3~5 cm 厚细砂掩盖; 教学楼沉降 15 cm, 倾斜且墙体严重开裂; 河岸裂缝纵横, 侧移 20~30 cm, 下沉 30~50 cm。	VIII	Y
6	德阳市柏隆镇松柏村	位于VII度和VIII度区交界处; 南北方向 7 公里长、3 公里宽范围内均有不同程度液化现象; 喷砂类型丰富, 包括中砂、粗砂和砾石; 液化均伴有地裂缝, 裂缝穿越处民房基本倒塌, 倒塌房屋达全村半数以上; 液化灾害严重。社会影响大, 当地电视台有专题报道。	VIII	Y
7	绵竹市板桥镇兴隆村	河岸侧移, 喷砂堵塞河床; 4 亩池塘喷砂, 裂缝纵横, 水全部流失, 鱼跑光; 6 户民居内喷出 5~10 cm 厚浅黄色细砂, 地面错位 10~20 cm; 该村其它非液化区域房屋破坏较轻。	VIII	Y
8	绵竹市新市镇石虎村	原深 5 m 水井被 3.5 m 厚液化喷出物填充; 附近喷水高 1.0 m, 持续 60 min, 喷出物为中-细砂; 长 50~60 m、宽 2~3 cm 地裂缝穿过整个村庄; 89 年建房屋墙体严重开裂, 室内地面下沉约 3.5 cm。	VIII	Y
9	绵竹市孝德镇齐福小学	大面积喷砂; 喷水高 30 cm, 持续 60 min, 喷出物为黄色细砂; 93 年建砖混结构教室墙体大面积开裂; 墙基一侧鼓起, 另一侧下沉 3 cm; 抽水房水管下沉 7 cm, 有侧移。	VIII	Y
10	绵竹市玉泉镇桂花村	喷水高 1.5 m, 持续 1 分钟, 喷出物为黄色中砂; 裂缝长 50 m、宽 30 cm; 带有圈梁砖混民居不均匀沉降, 对角倾斜, 屋前沉 10~12 cm, 屋前抬起; 裂缝穿过道路路面一侧下沉。	VIII	Y
11	什邡市禾丰镇镇江村	喷水高 60~70 cm, 持续 1 min, 喷出物为细砂、粉砂夹卵石; 裂缝长 100 m、宽 10 cm、深 3 m, 一侧下沉 5 cm; 83 年建砖混结构房屋开裂, 不均匀沉降; 粮仓下沉并侧移 10 cm。	VIII	Y
12	绵竹市齐天镇桑园村	大面积喷砂冒水; 喷水高度 1 m, 持续几分钟, 喷粉细砂; 裂缝绵延几公里, 穿过几个村镇, 裂缝穿过的房屋均有不同程度开裂; 村头小桥河道被 1 m 厚喷砂填满, 水泥排水管道下沉 3 m 以上。	VIII	Y
13	绵竹市拱星镇祥柳村	方圆 300 亩范围有喷水冒砂现象; 水柱高约 10 m, 坑边有砾石喷出; 有直径 3~4 m、深 1~2 m 坑陷 7~8 处, 农田破坏严重。	IX	Y
14	绵竹市兴隆镇安仁村	全村 70 多口井不同程度的被填埋; 水柱高约 30~50 cm, 持续几分钟, 喷出物为砂夹杂砾石, 贯穿村庄的地裂缝长 50~100 m。	IX	Y
15	德阳市德新镇五郎村	无喷水冒砂等现象	VII	N
16	什邡市回澜镇雀柱村	无喷水冒砂等现象	VII	N
17	德阳市扬嘉镇火车站	无喷水冒砂等现象	VII	N
18	德阳市柏隆镇南桂村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
19	绵竹市制药厂	无喷水冒砂等现象	VIII	N
20	德阳市孝感镇和平村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
21	绵竹市板桥镇八一村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
22	绵竹市玉泉镇永宁村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
23	德阳市孝德镇大乘村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
24	德阳市孝泉镇民安村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
25	绵竹市什地镇五方村	无喷水冒砂等现象	VIII	N
26	绵竹市兴隆镇川木村	无喷水冒砂等现象	IX	N
27	绵阳市九龙镇同林村	无喷水冒砂等现象	IX	N
28	都江堰市工商职业技术学院	无喷水冒砂等现象	IX	N
29	都江堰市灌口镇财政金融大厦	无喷水冒砂等现象	IX	N
30	绵阳市安县雎水镇凯江桥	无喷水冒砂等现象	IX	N
31	彭州市天府路馨艺幼儿园	无喷水冒砂等现象	VII	N
32	都江堰市瑞康花园	无喷水冒砂等现象	IX	N
33	都江堰市紫坪铺镇紫坪村	无喷水冒砂等现象	IX	N
34	都江堰市玉堂镇海关招待所	无喷水冒砂等现象	IX	N
35	绵阳凌峰机械制造有限责任公司	无喷水冒砂等现象	VII	N

94)已经明确了标准贯入试验和圆锥动力触探(含超重型动力触探)两种测试技术的适用范围,指出标贯试验不适用砾石土地基,而超重型动力触探则对砾石层是很合适的原位测试方法。本文将采用超重型动力触探(DPT, Dynamic penetration Test)击数 N_{120} (超重型动力触探试验每贯入30 cm的击数,简称动探击数,下同)作为主要砂砾土液化评价的最基本的指标。且 N_{120} 为一连续变量,能很好地反映砾石层力学性质。

同时,砂砾土这样的粗粒土组成复杂,粒径变化范围大,从目前的经验看,单纯一个 N_{120} 指标还不能全部反映砂砾土的液化势。因此,应选取含砾量作为砂砾土液化评价的另一基本指标。同时勘察结果表明,地震烈度、地下水位和埋深对砂砾土液化具有重要影响,模型中也应包括地震强度以及土层状况这些常规指标。



(a) 广汉市南丰镇昆庐小学 (site 1)



(b) 德阳市柏隆镇果园村 (site 2)

从本文勘察结果的分析看,判别方法可分初判和复判两部分,这样可大大减少工作量。初判的基本原则为排除那些不可能液化及可不考虑液化影响的情况,而复判计算公式的模式,借鉴我国现有抗震规范中砂土液化判别的计算模型,这样不仅可充分利用我国专家学者多年的研究成果,也可很好地与以往工作衔接,便于工程师掌握和应用。

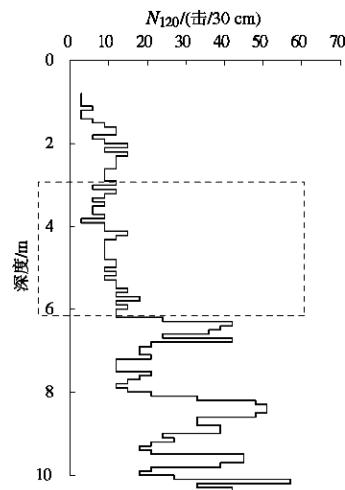
3 基础数据

3.1 典型剖面

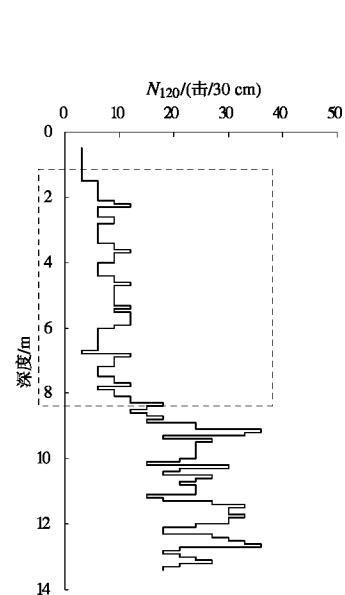
本文给出的若干典型勘察结果如图2,包括了6个液化场地和2个非液化场地,其中VII度区内3个,VIII度区内4个,IX区内1个。图2中各图的右边为柱状图,左边为动探击数 N_{120} ,判定的液化层或非液化层为图中虚框所示。

底层 深度/m	柱状图	岩土名称
1.5	素填土: 灰—褐灰色; 松散; 稍湿; 较均匀成分以黏性土为主, 含少量碎石	
2.3	黏土: 褐黄色, 均质可塑, 刚性较低, 承强度低	
7.3	砾石: 褐黄色; 级配良好, 颗粒以粗中细砂粒组为主; 含量分别为15%、25%、30%左右, 小于0.074mm的颗粒含量小于10%, 呈松散稍密状态, 超重动力触探值为4~7击/10 cm, 其中6.0~6.4 m夹杂10 cm的黑色淤泥, 淤泥呈软塑状态, 均质有轻微臭味	
8.5	卵石: 褐黄色, 颗粒抗风化能力强次圆, 7.3~8.2 m为中密~稍密状态, 超重动力触探击数为6~13击/10 cm, 8.2~8.5 m为密实状态, 动探击数为21~26击/10 cm, 本层未揭穿	

底层 深度/m	柱状图	岩土名称
1.5	粉质黏土: 灰褐色; 稍密至中密; 稍湿; 含少量砾石和卵石, 砾石色杂有黑色、褐色和灰色	
1.9	粗砂: 灰褐色稍密、稍湿, 含砾石	
5.5	强风化能力卵石: 次圆、稍密; 湿; 最大粒径达120 mm, 多数50~100 mm	
5.9	细砂: 褐—褐黄色; 稍—中密; 饱和夹少量细砾	
7.0	卵石: 褐黄色; 稍密—中密; 最大粒径达40 mm, 多数10~30 mm	
20.0	黏土: 黄色; 均匀中密; 湿; 可塑—硬塑; 光泽, 承强度和韧性高, 不易捏变形	
20.5	粉砂: 褐黄色—黄色; 均匀; 稍—中密; 饱和	
21.5	中风化粉砂岩: 褐红, 偶夹灰白砾钙质胶结; 锤击不易碎RQD=80%	



(c) 绵竹市板桥镇板桥学校 (site 5)



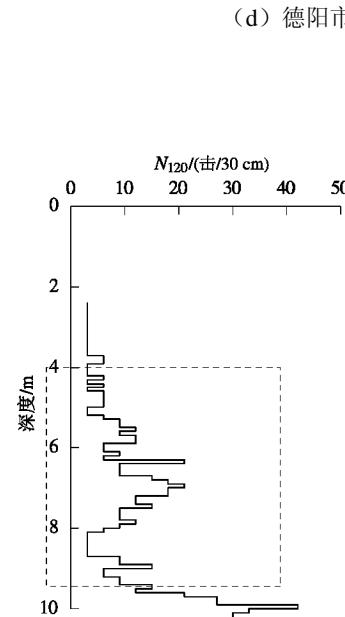
(d) 德阳市柏隆镇松柏村 (site 6)

底层深度/m	柱状图	岩土名称
1.5		粉质黏土: 褐一褐黄色; 均质, 可塑, 稍湿, 刚性较低, 干强度低
6.5		卵石: 褐一褐黄色; 级配不良, 以卵石圆砾为主, 并见漂石(最大粒径25 cm)细颗粒含量少, 次圆, 抗风化能力强, 稍中密状态, 动探8~12击/10 cm

(c) 绵竹市板桥镇板桥学校 (site 5)

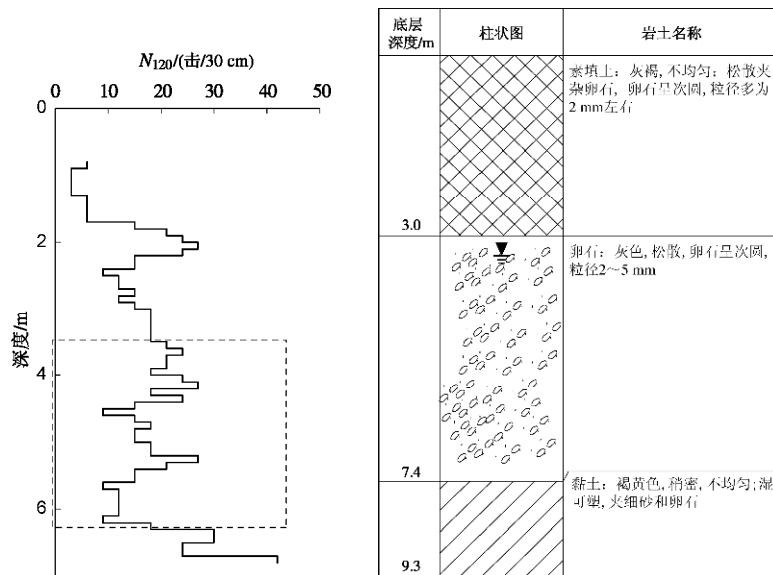
底层深度/m	柱状图	岩土名称
0.8		素填土: 灰色, 潮湿, 松散, 较均匀且以黏土为主, 偶含卵石
11.0		卵石: 灰一褐黄色; 单粒结构, 级配不良, 粗砂, 圆砾, 卵石共占85%左右, 细颗粒含量少, 次圆, 抗风化能力强, 动探为5击/10 cm 松散状态; 在5.3 m处见约10 cm得黄色粗砂夹层
11.4		卵石: 为剧烈风化的冰砾—冰水堆积物, 色泽总体呈褐黄色; 含棕色黑色等, 级配不良, 以卵砾为主, 颗粒最大为15 cm多为2~5 cm, 充填物为黄色细砂为主, 不含漂砾, 砂石主要为石英岩、花岗岩、安山岩等, 呈次圆—一次棱状, 可见颗粒周界差异之外其余大多数呈剧烈风化, 外形清晰, 用手易捏成粉末
18.0		黏土: 褐黄色, 均质致密, 硬塑, 含铁锰结核, 刚性强, 干强度高
20.3		粉砂岩: 暗一紫红色, 钙质胶结, 中等风化, 岩芯长度达1.5 m较完整, 锤击不易碎

(d) 德阳市柏隆镇松柏村 (site 6)

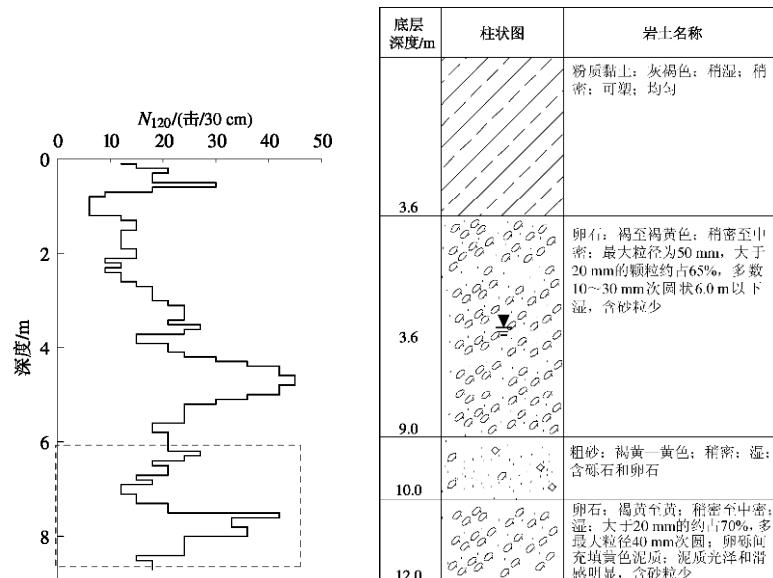


(e) 绵竹市板桥镇兴隆村 (site 7)

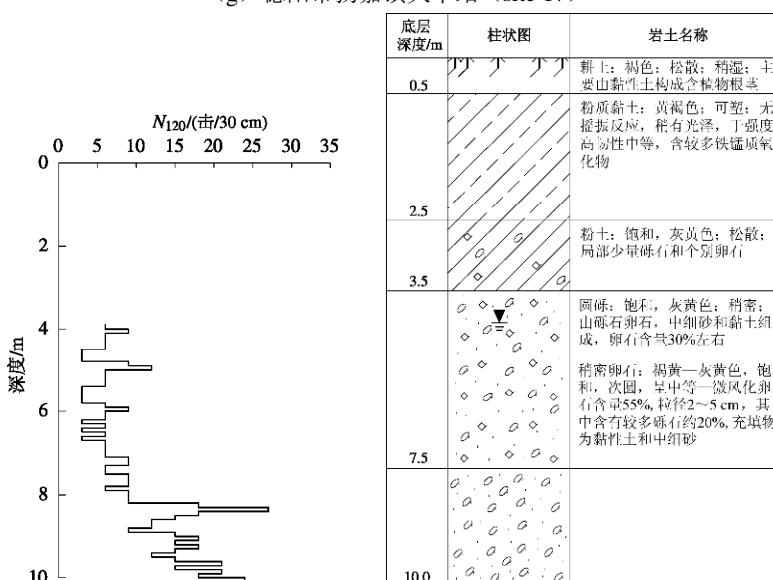
底层深度/m	柱状图	岩土名称
4.0		粉质黏土: 褐黄色, 均匀; 可塑稍湿, 稍有光泽, 干强度和刚性中等
9.5		卵石: 松散; 级配不良; 最大粒径100 mm大于50 mm的约20%其余为粗砂, 部分细圆砾, 粉粒和细砂含量少, 粗颗粒次圆, 抗风化能力强
14.0		卵石: 黄色灰白色, 稍密, 最大粒径80 mm, 大于50 mm约占5%, 大于20 mm的约占60%. 粗颗粒次圆, 大粒分抗风化能力强, 少部分砂岩质的风化严重



(f) 绵竹市拱星镇祥柳村 (site 13)



(g) 德阳市扬嘉镇火车站 (site 17)



(h) 绵阳凌峰机械制造有限责任公司 (site 35)

图 2 典型勘探剖面

Fig. 2 Profiles of typical boreholes

表 2 勘察点砂砾土基本数据
Table 2 Basic data of gravel soil in investigation sites

编号	地点	烈度	d_s/m	d_w/m	N_{120}	是否液化
1	广汉市南丰镇毘卢小学	VII	2.3~8.0	1.4	7.5	Y
2	德阳市柏隆镇果园村	VII	1.5~2.2	1.5	9.0	Y
3	德阳市黄许镇金桥村	VII	4.0~6.1	2.2	6.3	Y
4	绵竹市新市镇新市学校	VIII	2.5~3.5	1.0	6.3	Y
5	绵竹市板桥镇板桥学校	VIII	3.0~6.1	3.0	10.2	Y
6	德阳市柏隆镇松柏村	VIII	0.8~8.3	0.8	7.5	Y
7	绵竹市板桥镇兴隆村	VIII	4.0~9.5	2.4	8.7	Y
8	绵竹市新市镇石虎村	VIII	2.9~5.8	2.9	11.4	Y
9	绵竹市孝德镇齐福小学	VIII	3.5~7.0	3.5	11.1	Y
10	绵竹市玉泉镇桂花村	VIII	0.6~3.7	0.6	8.1	Y
11	什邡市禾丰镇镇江村	VIII	1.8~2.9	0.9	8.7	Y
12	绵竹市齐天镇桑园村	VIII	2.8~4.2	2.8	11.7	Y
13	绵竹市拱星镇祥柳村	IX	3.4~6.2	3.4	17.4	Y
14	绵竹市兴隆镇安仁村	IX	4.0~6.0	4.0	14.1	Y
15	德阳市德新镇五郎村	VII	5.0~13.0	5.0	13.8	N
16	什邡市回澜镇雀柱村	VII	6.0~15.0	6.0	24.6	N
17	德阳市扬嘉镇火车站	VII	6.1~8.7	6.1	22.5	N
18	德阳市柏隆镇南桂村	VIII	9.8~14.0	4.7	14.1	N
19	绵竹市制药厂	VIII	3.4~7.4	3.4	14.1	N
20	德阳市孝感镇和平村	VIII	9.6~12	3.7	27.0	N
21	绵竹市板桥镇八一村	VIII	6.2~7.2	6.2	15.9	N
22	绵竹市玉泉镇永宁村	VIII	8.1~12.2	1.4	37.5	N
23	德阳市孝德镇大乘村	VIII	5.7~7.8	4.5	23.1	N
24	德阳市孝泉镇民安村	VIII	7.3~9.0	3.7	17.7	N
25	绵竹市什地镇五方村	VIII	3.6~5.6	2.0	18.3	N
26	绵竹市兴隆镇川木村	IX	8.5~9.9	8.0	22.8	N
27	绵阳市九龙镇同林村	IX	9.4~11.0	2.0	22.5	N
28	都江堰市工商职业技术学院	IX	2.3~4.6	2.3	18.0	N
29	都江堰市灌口镇财政金融大厦	IX	2.7~4.9	2.7	23.7	N
30	绵阳市安县雎水镇雎江桥	IX	2.4~5.8	0.8	41.4	N
31	彭州市天府路馨艺幼儿园	VII	1.4~2.8	1.4	21.9	N
32	都江堰市瑞康花园	IX	5.4~8.3	5.4	48.0	N
33	都江堰市紫坪铺镇紫坪村	IX	3.0~5.3	3.0	23.4	N
34	都江堰市玉堂镇海关招待所	IX	1.5~2.5	1.5	22.5	N
35	绵阳凌峰机械制造有限责任公司	VII	4.1~8.1	4.1	6.3	N

需要指出的是, 绵竹市板桥镇板桥学校 (Site 5) 的液化震害现象非常具有典型性。通过仔细调查和勘察, 发现原来学校的勘察资料与实际情况不符。为慎重起见, 对本场地除了进行钻孔、取样和面波法横向剖面测试外, 同时在当地政府协助下使用挖掘机进行了较大规模的勘察。结果表明, 板桥学校校址和操场下部 22.5 m 以内的土层基本分布如图 2(c), 1.5 m 以内为素填土, 以下则均为砂砾层, 未见细砂层存在。因此, 可以认定该场地是砾石层液化, 并且从 N_{120} 的表现上, 进一步可以判定 3.0~6.1 m 为液化层。

3.2 基础数据

根据以往的经验和方法, 综合考虑地下水位、土层类型和 N_{120} 的表现, 将所有 35 个场地液化和非液

化层判定结果总结于表 2。

由表 2 可见, 此次液化砂砾层的地下水位 0.6~3.5 m, 埋深 (上下层的平均) 1.85~6.75 m, 厚度在 0.7~7.5 m, 勘察数据中的地下水位、埋深、厚度等比我国以往地震液化情况复杂, 变化范围较大。

4 基本思路和推导

本次勘察结果表明, 砂砾石液化的判别条件可以分为初判和复判两部分。

4.1 初判分析

(1) 地质年代影响。本次地震中第四纪更新世 Q_p (含更新世 Q_p) 以前的地层上未发现液化现象, 因此可将地层年代作为初判条件之一, 即第四纪更新

世 Q_p (含更新世 Q_p) 以前的地层可判别为不液化。

(2) 砂砾土埋藏条件影响。将本次地震砂砾土液化及非液化点土层深度与地下水位绘于图 3, 可得砂砾土液化特征深度(表 3)。若砂砾层上覆非液化土层厚度和地下水位深度大于图 3 的数值, 可不考虑液化影响。

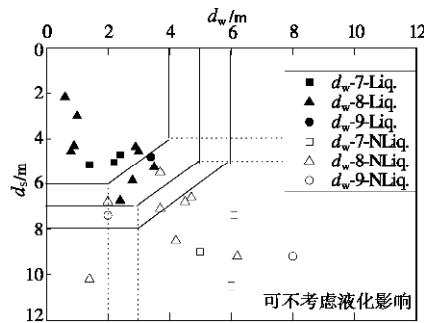


图 3 液化以及非液化点土层深度与地下水位关系

Fig. 3 Relationship between water level and depth of liquefied and non-liquefied gravel soils

表 3 砂砾土液化特征深度

Table 3 Characteristic depths of liquefied gravel soil m

烈度	7	8	9
特征深度	6	7	8

(3) 砂砾土含砾量影响。在各测试点判定的液化土层位置选取土样, 将级配曲线绘于图 4。由图 4 可见, 不同烈度下的液化土的含砾量(粒径大于 5 mm 的颗粒百分含量)在一定范围波动。从图上可以看出, 所测试的液化砂砾土场地中, 七、八和九度时含砾量上限值分别为 26%, 67% 和 75%。以往的认识中, 含砾量界限大约为 70%, 结合此认识并采用保守估计, 取含砾量七、八和九度时含砾量上限条件为 70%, 75% 和 80%, 超过时可判别为不液化。

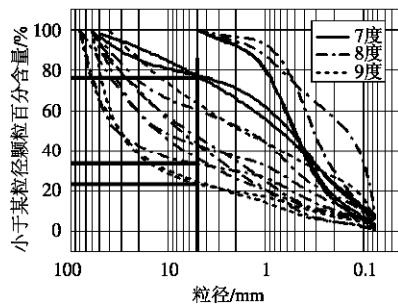


图 4 液化砂砾土层级配曲线

Fig. 4 Grain size curves of liquefied gravel soil

4.2 复判基本模型

我国抗震规范砂土液化判别式建立时的模型为

$$N_{cr} = N_0 [1 + b_w (d_w - 2) + b_s (d_s - 3)] , \quad (1)$$

其中, N_{cr} 为临界标贯击数, N_0 标准贯入击数基准值, d_s 为砂层埋深, d_w 为地下水深度, b_w 为地下水位影响系数, b_s 为砂层埋深影响系数。这一公式是我国专

家学者多年研究的成果, 并且较成功地经历了 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震的检验, 代表了细粒土液化判别的基本模式, 已在工程上得到广泛应用。

本文借鉴公式(1)的基本思路, 采用超重型动力触探击数 N_{120} 作为基本指标, 将砂砾土液化判别的临界动探击数基本模型取为

$$N_{cr-120} = N_{0-120} [1 + a_w (d_w - 2) + a_s (d_s - 3)] , \quad (2)$$

其中, N_{cr-120} 为临界动探击数, N_{0-120} 为动探击数基准值, d_s 为砂砾土埋深, d_w 地下水深度, a_w 为砂砾土地下水位影响系数, a_s 为砂砾土埋深影响系数。这样, 砂砾土液化判别的关键是确定系数 N_{0-120} , a_w 和 a_s 。

4.3 系数确定

(1) 砂砾土动探击数基准值 N_{0-120} 的确定

我国现有抗震规范在确定砂土标贯基准值时, 所用的液化资料中地下水位变化都不大(2 m 左右), 砂层埋深也基本上在同一深度(3 m 左右), 因此可直接建立标贯击数与烈度关系, 直观地给出液化与非液化分界线, 从而很容易地得到砂土标贯基准值。

但从汶川地震砂砾土液化数据可知, 砂砾土埋深及地下水位变化都较大, 难以直接建立动探击数与烈度关系。为此, 借鉴目前国内外波速判别方法中修正方式^[10-11], 本文将实测动探击数修正至砂砾土埋深为 3 m、地下水位为 2 m 的同一水平下的动探击数, 其归一化的修正公式为

$$N'_{120} = N_{120} (47 / S_v')^{0.5} , \quad (3)$$

其中, N'_{120} 为修正动探击数, N_{120} 为实测动探击数, 以此建立修正动探击数与烈度关系如图 5。从图 5 进一步得到液化点与非液化点临界线, 相应的修正动探击数则为基准值, 列于表 4, 为判别公式中的计算参数。

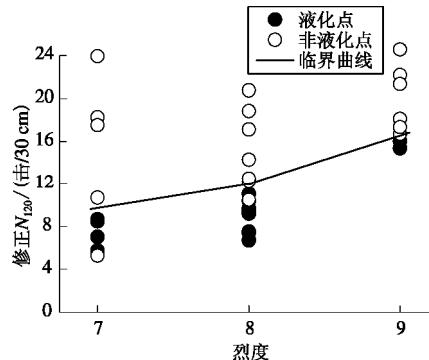


图 5 修正动探击数与烈度的关系

Fig. 5 Relationship between revised values of N_{120} and intensity

表 4 动探击数基准值

Table 4 Reference values of N_{120}

烈度	7	8	9
N_{0-120}	9	12	16

(2) 砂砾土深度和地下水位影响系数的确定

我国规范液化判别式在确定砂层埋深和地下水位的影响系数时,由于缺乏不同水位和不同埋深的资料,因而采用Seed-Idriss简化法得到临界标贯数曲线,在给定地下水位条件下绘制标贯比(临界标贯/基准值)与砂层埋深的关系,从而得到砂层埋深的影响系数 β_s ,采用类似方法也得到了地下水位的影响系数 β_w 。但需要指出的是,由此得到的影响系数 β_s 和 β_w 是以砂层液化资料为基础,对砂砾石土层显然需要另行推导。

此次地震液化场地测试结果比以往有优势之处在于液化砂砾土的埋深及地下水位均具有较大变化,可以不用借助Seed-Idriss简化法。但不足的是目前数据量有限,直接推导出的砂砾土地下水位影响系数 a_w 和深度影响系数 a_s 都有一定的不确定性,本文将采用优化方法解决这一问题。

为此,将所有测试点的动探击数除以动探击数基准值得到动探比,绘制动探比与砂砾层深度的关系如图6,其中液化点与非液化点临界曲线的斜率则为砂砾层深度的影响系数。采用同样方法可得到地下水位的影响系数,结果如图7。

从图6和图7可见,由有限数量数据确定的砂砾层和地下水位影响系数在一定范围变化,为取得最佳值,分别计算砂砾土埋深和地下水位影响系数在不同值情况下对液化点判别成功率和非液化点判别成功率的影响,结果分别如图8和图9。进一步将结果综合如图10,取二者交集(图中阴影区域),则此时影响系数为液化点和非液化点判别成功率均达到较大的最佳取值。由图10可见,二者的交集位于一狭小区域内,此区域内液化与非液化判别成功率均超过90%。为简化公式,这里 a_s 取为0.05, a_w 取为-0.05。

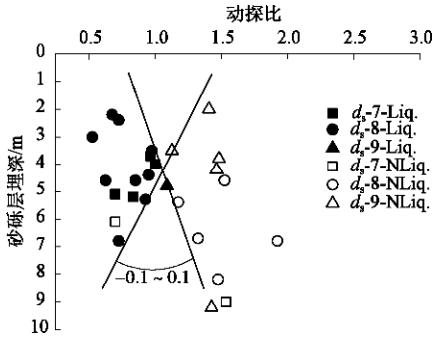


图6 砂砾层深度影响系数

Fig. 6 Influence coefficients of gravel soil depth

4.4 含砾量 P_5 的影响

就含砾量(以 P_5 表示,即大于5 mm的颗粒百分含量)对砂砾土液化势的影响问题,从此次地震现有勘察结果目前仅能得到初判条件,还难以得到更深入的认识。主要原因是由于液化现场不可人为控制,难以

提供同等条件下不同含砾量对抗液化强度影响的现场实测资料,无法给出定量分析结果。

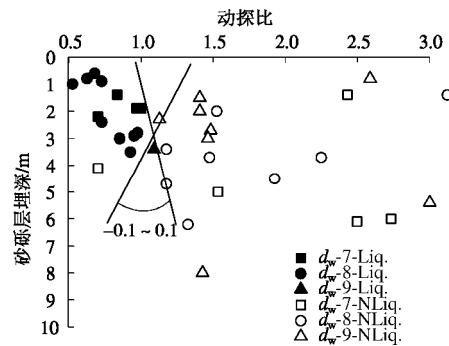


图7 地下水位影响系数

Fig. 7 Influence coefficients of water levels

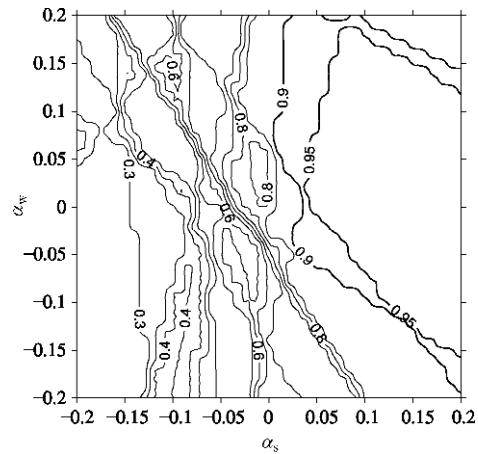


图8 a_s 和 a_w 不同取值对液化点判别成功率的影响

Fig. 8 Effect of a_s and a_w on discrimination success ratio of liquefied sites

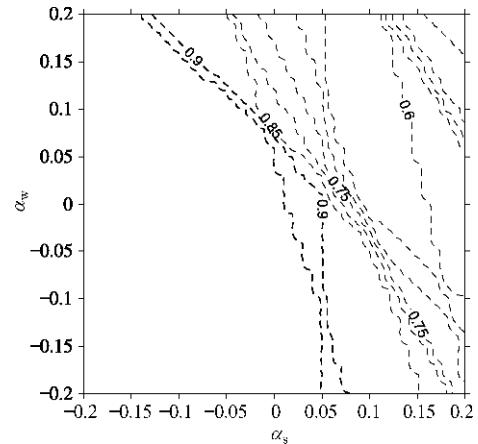


图9 a_s 和 a_w 不同取值对非液化点判别成功率的影响

Fig. 9 Effect of a_s and a_w on discrimination success ratio of non-liquefied sites

目前关于含砾量对砂砾土液化势的影响评价已经有室内大粒径动三轴实验的结果^[12-13],表明砂砾土的液化动强度比随含砾量的增加而提高,二者基本上呈线性增长关系,80%含砾量的砂砾土的抗液化强度较35%时高10%~30%,较50%时高5%~20%。本文借鉴

这一研究成果, 将上述含砾量对液化判别结果采用 $[1+0.5(P_5-50\%)]$ 的系数进行进一步的修正, 以此作为含砾量对液化势影响的定量评价标准。

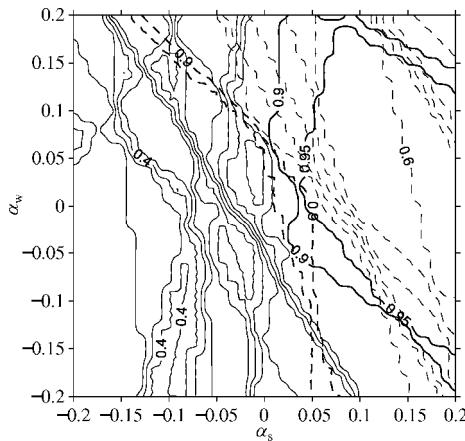


图 10 a_s 和 a_w 最佳取值

Fig. 10 Optimum values of a_s and a_w

5 复判模型和计算公式

综合上面分析结果, 砂砾土液化复判中临界动探击数最终模型可写为

$$N_{cr-120} = N_{0-120} [1 + a_w(d_w - 2) + a_s(d_s - 3)] \cdot [1 + a_p(p_5 - 50\%)] , \quad (4)$$

从上面分析得到的系数 a_s , a_w 和 a_p 分别为 0.05, -0.05 和 0.5, 这样临界动探击数计算公式具体可表达为

$$N_{cr-120} = N_{0-120} [1 - 0.05(d_w - 2) + 0.05(d_s - 3)] \cdot [1 + 0.5(p_5 - 50\%)] , \quad (5)$$

或

$$N_{cr-120} = N_{0-120} [0.95 + 0.05(d_s - d_w)] \cdot [1 + 0.5(p_5 - 50\%)] , \quad (6)$$

若实测的 N_{120} 小于 N_{cr-120} , 则砂砾土判为液化, 否则为不液化。

略去含砾量影响, 采用公式(6)对所有测试点进行回判, 液化回判成功率为 93%, 非液化回判成功率为 90%, 在一定程度上说明了本文提出的方法的合理性以及模型和公式的可靠性。

6 结 论

本文以汶川地震液化震害调查和现场测试为基础, 针对此次地震液化特点, 提出了基于动探试验的砂砾土液化判别方法, 指出了模型的构造原则和思路, 建立了计算公式, 有以下结论:

(1) 我国规范液化判别方法来源于砂层(细粒土)液化资料, 而按规范规定标准贯入试验不适于砂砾场地, 故现有规范中基于标贯的液化判别方法对砂砾土

不可行。本文选择超重型动力触探击数 N_{120} 为新的指标, 分析证明具有可行性。

(2) 砂砾土液化判别可由初判和复判两部分组成, 初判以排除不可能液化情况为目标, 复判则可采用动探击数 N_{120} 为最基本指标的计算模型。

(3) 初判包括地质年代、埋藏条件和含砾量 3 个条件, 地质年代以第四纪更新世 Q_p 为限, 液化层特征深度在烈度七, 八, 九度时分别以 6, 7, 8 m 为界, 含砾量在烈度七, 八, 九度则分别以 70%, 75%, 80% 为限。

(4) 砂砾土液化复判模型由动探击数基准值、含砾量、砂砾土埋深、地下水深度和地震强度(烈度)等 5 个参数构成, 其模式与现有规范中砂土液化判别形式类同。

(5) 与我国以往砂层液化不同, 此次地震液化砂砾土的埋深及地下水位变化范围较大, 对此采用归一化方法导出动探击数基准值, 而砂砾土深度和地下水位的影响系数则采用优化方法推出。

(6) 提出的砂砾土液化判别方法, 较全面地考虑了砂砾土液化的影响因素, 判别式简单明了, 与以往工作和现有规范能很好衔接, 工程使用方便。

(7) 提出的复判模型和公式虽然初步通过了回判检验, 但数据量目前有限, 结果尚待完善, 特别是含砾量对液化势影响的定量评价成果目前尚少, 今后还需更多研究。

虽然此次汶川地震液化场地勘察为砂砾土液化研究积累了宝贵的资料, 但数据量还是有限, 影响因素考虑还不周全。事实上, 一个指定土层是否液化不仅与其土性特征和遭遇的地震动峰值(烈度)有关, 还应与地震动持时(地震震级)有一定关系。地震震级相比其它因素影响可能较小, 目前也无法从实际地震资料出发给出此因素影响的定量评价, 但可以参考现有砂土液化判别方法中有关远近震的考虑方式, 给出震级对砂砾土液化预测结果的修正。

致 谢: 参加本文工作的有: 东华理工大学侯龙清, 中国地震局工程力学研究所孙锐、王维铭、陈龙伟、董林, 北京工业大学陈红娟, 防灾科技学院蔡晓光、张建毅。

感谢四川省地震局和地方政府的大力支持配合。

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 Hui-xian. The Great Tangshan Earthquake of 1976[M]. Beijing: Seismic Press, 1989. (in Chinese))
- [2] SEED R B, CETIN K O, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering, a unified and consistent

- framework[R]. EERC, USA: Earthquake Engineering Research Center, 2003.
- [3] Brady Ray Cox M S. Development of a direct test method for dynamically assessing the liquefaction resistance of soils in situ[D]. The University of Texas at Austin, 2006.
- [4] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB0011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 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 Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, 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))
- [6] 何银武. 论成都盆地的成生时代及其早期沉积物的一般特征[J]. 地质论评, 1992, 38(2): 149–156. (HE Yin-wu. The age of formation of Chengdu Basin and features of its early deposits[J]. Geological Review, 1992, 38(2): 149–156. (in Chinese))
- [7] 刘惠珊. 砾石的液化判别探讨[C]// 第五届全国地震工程学术会议论文. 北京, 1998: 183–188. (LIU Hei-shan. Discussion on liquefaction prediction of gravel soils[C]// Proc the 5th national Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 1998: 183–188. (in Chinese))
- [8] YOUD T L, IDRISI 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]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2001, 127(4): 297–313.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50021—94 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. (The Construction Ministry of People's Republic of China. GB0011—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994. (in Chinese))
- [10] SYKORA D. W. Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis[R]. Geotech Lab Misc Paper 1987, GL-87-26, U.S. Army Engr Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- [11] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化式的剪切波速判别方法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 74–80. (SHI Zhao-ji, YU Shou-song, FENG Wan-ling. Shear wave velocity based Soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 74–80. (in Chinese))
- [12] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 饱和砂砾料液化特性的试验研究[J]. 水力学报, 2000(2): 37–41. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2000(2): 37–41. (in Chinese))
- [13] EVANS MARK D, ZHOU Sheng-ping. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(3): 287–298.