

砂砾土液化的剪切波速判别方法

曹振中, 袁晓铭

(中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 剪切波速也正逐步成为土层液化判别的基本指标之一, 但采用现场波速资料得到的砂砾土液化判别方法尚较少见。针对 2008 年汶川 8.0 级地震显著的砂砾土液化现象, 获取 45 个场地剪切波速结构, 以此提出基于剪切波速的砂砾土液化判别方法; 构建相应模型和计算公式, 并分析现有 2 种典型砂土液化剪切波速判别方法对砂砾土的适用性。提出的砂砾土液化剪切波速判别方法由初判和复判组成, 初判包括地质年代、埋藏条件和含砾量 3 个条件; 复判模型则由地震烈度、剪切波速基准值、地下水位、砂砾土埋深和含砾量等 5 个参数构成, 并分别采用归一化方法和优化方法推导出剪切波速基准值以及地下水位和砂砾土埋深的影响系数。砂砾土与砂土属不同土类, 相同波速值下二者密实程度不同, 现有砂土液化剪切波速判别方法对砂砾土不适用, 给出的判别结果明显偏于危险。获取的砂砾土液化资料扩充现有液化数据库内容, 提出的砂砾土液化剪切波速判别方法简单明了, 回判成功率高, 可为工程应用及规范修订提供参考。

关键词: 土动力学; 砂砾土; 液化判别; 剪切波速; 汶川地震

中图分类号: TU 413.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)05 - 0943 - 09

SHEAR WAVE VELOCITY-BASED APPROACH FOR EVALUATING GRAVEL SOILS LIQUEFACTION

CAO Zhenzhong, YUAN Xiaoming

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Although the in-situ shear wave velocity tests have been used commonly as engineering testing techniques and shear wave velocity V_s has gradually become a basic index for soil liquefaction evaluation, the in-situ V_s -based liquefaction assessment methods for gravel soils are not available so far. The significant phenomena of gravelly soil liquefaction in the 2008 Wenchuan 8.0 Earthquake are investigated and the in-situ V_s structures for 45 sites in the event are obtained. In terms of the investigation data, the V_s -based approach for liquefaction evaluation of gravel soils is presented and the existing V_s -based methods for evaluating sandy soil liquefaction are inspected. The liquefaction discrimination of gravel soils can be divided into the two steps: the preliminary evaluation and further evaluation. In the preliminary step the geological ages, the buried condition of gravel soil layer and gravel contents of gravel soils are considered and five parameters including seismic intensity, reference values of V_s with depth of gravel soils, groundwater table and gravel content of gravel soils are concerned in the further step. The reference values of V_s as well as the influential coefficients of gravel soil depths and groundwater levels are deduced by normalization method and optimization method respectively. As the type of gravel soils differs from the sandy soils, the densities of two type soils even for the same V_s value are different. If the existing liquefaction assessment procedures for sandy soils are employed, the liquefaction resistance of

收稿日期: 2009 - 12 - 13; **修回日期:** 2010 - 03 - 29

基金项目: 国家科技部公益性地震行业科研专项(200708001); 国家自然科学基金资助项目(90715017); 国家科技部国际合作项目(2009DFA71720)

作者简介: 曹振中(1982 -), 男, 2004 年毕业于华东地质学院土木工程系, 现为博士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究工作。通讯作者: 袁晓铭(1963 -), 博士, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土地震工程方面的教学与研究工作。E-mail: yxmiem@163.com

gravel soils will be significantly overestimated, which means that the methods of liquefaction evaluation for sandy soils are not suitable for gravel soils. The proposed method is noticed with clear expression and high success ratio of regression discrimination; and it can easily be used in engineering practice and code revision.

Key words: soil dynamics; gravel soils; liquefaction discrimination; shear wave velocity; Wenchuan Earthquake

1 引言

砂土液化^[1~5]一直是岩土抗震研究中的一个热点问题。土层中的剪切波速是衡量土力学性能的综合指标,涉及许多影响因素^[6],如孔隙比、有效应力、应力历史和地层年代等,与抗液化能力也具有很强的相关性,因此剪切波速逐渐发展成为液化判别的一种基本指标,并形成了不同形式的液化判别式。目前基于剪切波速的液化判别方法均是建立在砂土液化资料基础之上,其中,我国较具影响力的为石兆吉等^[7]提出的方法(简称石兆吉法),而国外典型的有 R. D. Andrus 和 K. H. Stokoe^[8]提出的计算方法(简称 Andrus 法)。需注意的是,砂砾土属于碎石土,与砂土分属不同土类,用于计算砂土性能的公式理论上不能用于砂砾土。

国内外目前关于砂砾土液化的震害经验不多,针对砂砾土的液化判别方法也十分有限。日本学者提出了以动三轴试验为基本手段的砂砾土液化判别方法^[9],而美国学者提出了基于贝克贯入试验(BPT)的砂砾土液化判别方法^[10]。但对于前者,大粒径动三轴液化试验技术复杂,应用上受到明显限制;对于后者,国内目前不使用这一测试技术。另外,标准贯入和静力触探这样的常规现场试验在砂砾土场地无法实施,因而我国现有规范中基于标贯试验的液化判别方法对砂砾土没有可行性,无法进一步推广到砂砾土场地的液化判别问题上。

2008 年 5 月 12 日我国四川发生了 8.0 级大地震,调查表明此次地震中砂砾土液化十分普遍^[11]。四川省境内砂砾土分布十分广泛^[12]。我国土石坝多采用砾石为垫层,在人工填海及高速公路等建设中砂砾料应用广泛,砂砾土液化判别方法亟待解决。

原位测试土层剪切波速技术应用日益广泛而以此技术为基础的砂砾土液化判别方法目前还是空白。以汶川地震为背景,本文利用 45 个砂砾层液化场地的测试分析数据,力图建立便于工程应用的基于剪切波速的砂砾土液化判别方法,构建相应模型和计算公式,并讨论现有砂土液化剪切波速判别方

法对砂砾土的适用性,为砂砾土液化预测方法研究和工程应用提供技术支持。

2 现场测试与基本数据

2.1 测试点分布

调查结果表明,汶川地震液化集中在长约 160 km、宽约 60 km 范围内,主要分布在成都、德阳和绵阳 3 个地区,从低烈度区到高烈度区都有液化现象出现,8 度区较为集中。

本文选取 45 个典型场地进行测试分析,测试点分布如图 1。其中有 28 个液化场地,17 个非液化场地。勘察场地位于不同的烈度区,7 度区内 11 个,8 度区内 25 个,9 度区内 9 个。需注意的是,45 个场地经勘察后确认地下水位以下土层中没有砂层,排除了砂土(细粒土)液化的可能。

2.2 测试技术和液化层确定方法

本文对各测试点都进行钻孔,采用日本 OYO 公司瞬态表面波仪测试土层剪切波速。表面波仪为 4.5 Hz 检波器,间距 2 m,在相邻检波器中点敲击,直接生成二维土层剪切波速结构。同时,所有场地进行了超重型动力触探试验,重锤质量为 120 kg,落距为 100 cm,探头直径为 $\phi 74$ mm,锥角 60° ,探杆直径为 $\phi 60$ mm。形成土层柱状波速结构时,每层中取各实测值的平均作为此层的剪切波速值。

以液化点与非液化点土层分布以及剪切波速结构为基础,确定液化层以及非液化层深度和厚度。根据钻孔柱状图土层分布,排除黏土、地下水位之上等不可能发生液化土层。对于液化场地,以波速与超重型动力触探击数 N_{120} 相对较低作为液化层;对于非液化场地,理论上可选择地下水位以下任何一层,但这里采用保守方法,选取相对较密实砂砾层作为非液化层。在确定液化和非液化层位和层厚时,取超重力触探击数 N_{120} 表现平稳的一层。

2.3 典型剖面分析

为进一步说明液化层、非液化层深度和厚度的确定方法,选取如图 2 所示的 3 个典型场地进行分析,其中确定的液化和非液化层如图 2 虚框所示。

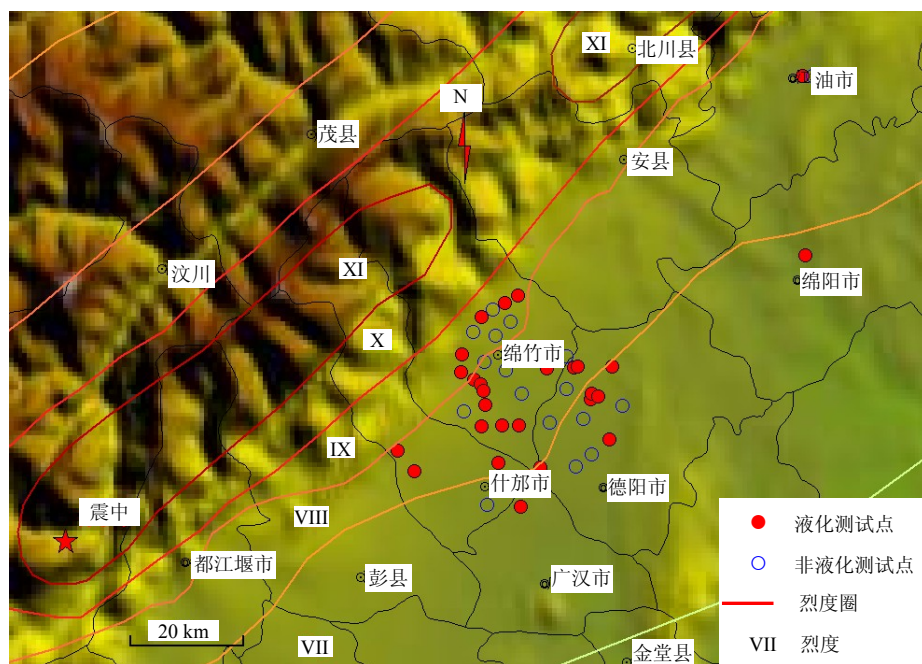


图 1 测试点地理位置

Fig.1 Locations of the investigation sites

图 2(a)为液化场地, 首先排除地下水位之上没有液化可能性的粉质黏土, 根据 N_{120} 曲线及剪切波速分布曲线, 地下水位之下的砂砾层基本上可分为 3.0~6.1 和 6.1~10.5 m 的 2 层。第 1 层剪切波速与动力触探击数均较平稳, 第 2 层动力触探击数波动稍大。判定第 1 层 3.0~6.1 m 为液化层, 统计时选取该层的平均剪切波速作为液化层的波速值。图 2(b)为液化场地, 按同样原则, 判定的液化层为 0.8~8.3 m。

图 2(c)为非液化场地, 根据动力触探击数曲线, 共有 0.0~3.0, 3.6~5.6, 6.0~8.0 和 8.0~11.0 m 的 4 个平稳层。保守考虑, 选择动力触探击数相对较大的 3.6~5.6 m 的一层作为非液化层。

2.4 基础数据

将按以上原则确定的 45 个场地的基础数据列于表 1。为行文方便, 表 1 还包括了国内外 2 个典型的剪切波速砂土液化判别方法对此次地震砂砾土液化的判别结果以及本文方法的判别结果。

3 现有砂土液化判别式适用性分析

3.1 2 种典型砂土液化判别方法

虽然砂砾土与砂土分属不同土类, 用于计算砂土性能的公式原则上不能用于砂砾土, 但掌握现有砂土液化判别方法对砂砾土的适用情况, 对了解各

种土类液化判别方法的区别和联系还是有益的。

对于基于剪切波速的砂土液化判别, 国外典型方法为 Andrus 法, 其要点是分别计算砂层受到的地震剪应力比 CSR 及其抗液化应力比 CRR , 其中 CSR 为

$$CSR = 0.65(a_{\max} / g)(\sigma_v / \sigma'_v)r_d \quad (1)$$

式中: a_{\max} 为地表峰值加速度, g 为重力加速度, σ_v 为上覆土压力, σ'_v 为有效上覆土压力, r_d 为应力折减系数。

CRR 可表示为

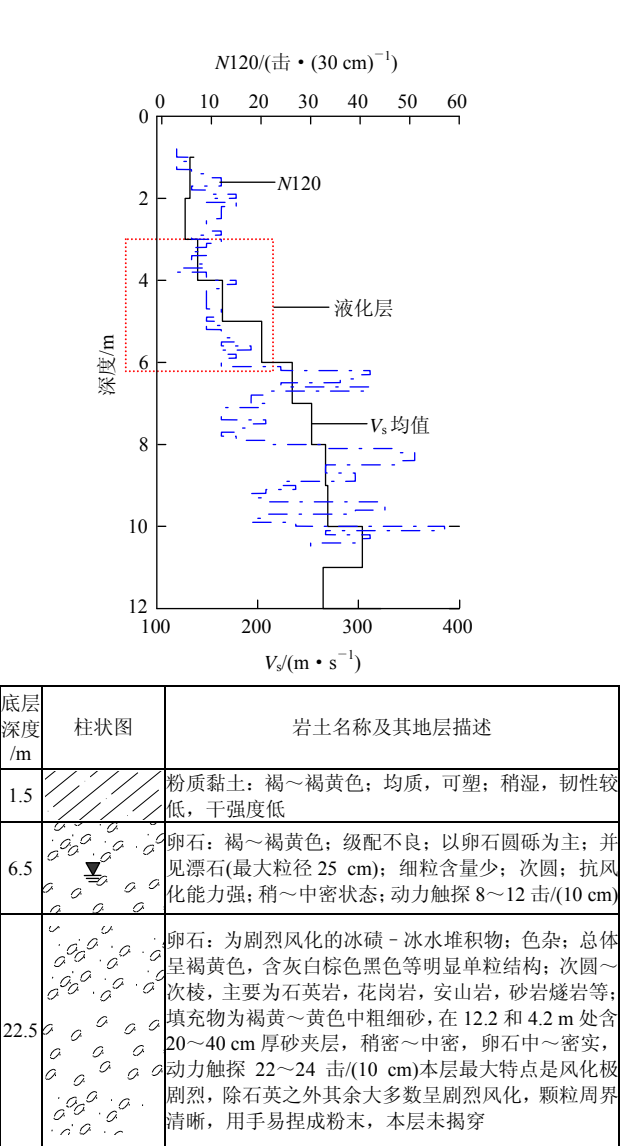
$$CRR = 0.022(V_{sl}/100)^2 + 2.8[1/(V_{slc} - V_{sl}) - 1/V_{slc}] \quad (2)$$

式中: V_{sl} 为修正剪切波速, V_{slc} 为液化剪切波速上限值。

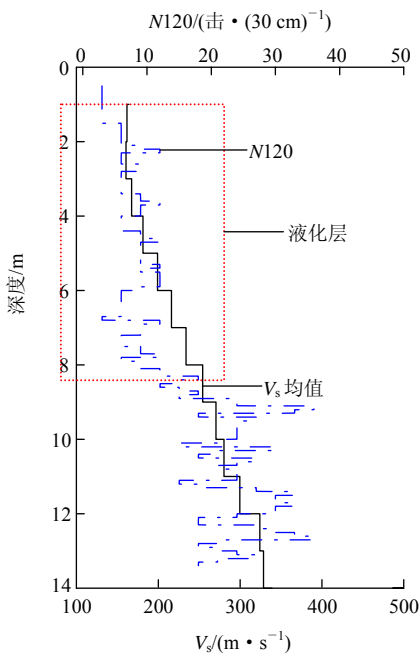
若计算得到的 $CRR < CSR$, 则该场地判别为液化, 否则为不液化。使用 Andrus 法时, 7, 8 和 9 度区的地表峰值加速度按常规分别取 0.1, 0.2 和 0.4 g。

我国基于剪切波速的砂土液化判别的代表方法为石兆吉法, 该法已纳入天津市《建筑地基基础设计规范》(TBJ1-88), 这一方法随后进行了细微调整, 其表达式为

$$V_{scri} = \bar{V}_s(d_s - 0.013 \cdot 3d_s^2)^{0.5} [1.0 - 0.185(d_w/d_s)] \quad (3)$$



(a) 绵竹市板桥镇板桥学校(场地 9, 液化点)



(b) 德阳市柏隆镇松柏村(场地 10, 液化点)



(c) 绵竹市什地镇五方村(场地 40, 非液化点)

图 2 典型剖面及分析

Fig.2 Typical soil profiles of the investigated sites

表 1 测试点数据和分析结果汇总
Table 1 Summary of the testing and analytical data

编号	地理位置	烈度	砂砾层 深度 /m	地下 水位 /m	剪切 波速 /(m·s ⁻¹)	是否 液化	判定结果			编号	地理位置	烈度	砂砾层 深度 /m	地下 水位 /m	剪切 波速 /(m·s ⁻¹)	是否 液化	判定结果		
							Andrus 方法	石兆吉 方法	本文 方法								Andrus 方法	石兆吉 方法	本文 方法
1	广汉市南丰镇 昆庐小学	7	2.3~8.0	1.4	161	是	误判	误判	成功	24	绵竹市拱星镇 祥柳村	9	3.4~6.2	3.4	233	是	误判	成功	成功
2	德阳市柏隆镇 果园村	7	1.5~2.2	1.5	165	是	误判	误判	成功	25	绵竹市兴隆镇 安仁村	9	4.0~6.0	4.0	267	是	误判	误判	误判
3	德阳市黄许镇 金桥村	7	4.0~6.1	2.2	164	是	误判	误判	成功	26	绵竹市汉旺镇 武都村	9	5.0~7.7	1.6	150	是	成功	成功	成功
4	德阳市天元镇 白江村	7	2.2~6.0	2.2	142	是	误判	误判	成功	27	绵竹市湔底镇 白虎头村	9	1.2~3.2	1.2	178	是	成功	误判	成功
5	德阳市德新镇 胜利村	7	2.2~5.0	1.9	187	是	误判	误判	成功	28	绵竹市遵道镇 双泉村	9	2.5~5.0	2.5	200	是	误判	成功	成功
6	德阳市德新镇 长征村	7	1.0~3.0	1.0	160	是	误判	误判	成功	29	德阳市德新镇 五郎村	7	5.0~13.0	5.0	269	否	成功	成功	成功
7	绵竹市游仙区 涌泉村	7	2.0~6.0	1.3	152	是	误判	误判	成功	30	什邡市回澜镇 雀柱村	7	6.0~15.0	6.0	287	否	成功	成功	成功
8	绵竹市新市镇 新市学校	8	2.5~3.5	1.0	133	是	成功	成功	成功	31	德阳市扬嘉镇 火车站	7	6.1~8.7	6.1	218	否	成功	成功	成功
9	绵竹市板桥镇 板桥学校	8	3.0~6.1	3.0	159	是	成功	成功	成功	32	德阳市黄许镇 胜华村	7	2.5~7.5	2.0	208	否	成功	成功	成功
10	德阳市柏隆镇 松柏村	8	0.8~8.3	0.8	185	是	成功	误判	成功	33	德阳市柏隆镇 南桂村	8	9.8~14.0	4.7	304	否	成功	成功	成功
11	绵竹市板桥镇 兴隆村	8	4.0~9.5	2.4	195	是	成功	成功	成功	34	绵竹市区某制 药厂	8	3.4~7.4	3.4	282	否	成功	成功	成功
12	绵竹市新市镇 石虎村	8	2.9~5.8	2.9	161	是	成功	误判	成功	35	德阳市孝感镇 和平村	8	9.6~12.0	3.7	305	否	成功	成功	成功
13	绵竹市孝德镇 齐福小学	8	3.5~7.0	3.5	180	是	成功	误判	成功	36	绵竹市板桥镇 八一村	8	6.2~7.2	6.2	248	否	成功	成功	成功
14	绵竹市玉泉镇 桂花村	8	0.6~3.7	0.6	153	是	成功	误判	成功	37	绵竹市玉泉镇 永宁村	8	8.1~12.2	1.4	337	否	成功	成功	成功
15	什邡市禾丰镇 镇江村	8	1.8~2.9	0.9	187	是	误判	误判	成功	38	德阳市孝德镇 大乘村	8	5.7~7.8	4.5	257	否	成功	成功	成功
16	绵竹市齐天镇 桑园村	8	2.8~4.2	2.8	199	是	误判	误判	成功	39	德阳市孝泉镇 民安村	8	7.3~9.0	3.7	259	否	成功	成功	成功
17	绵竹市富新镇 永丰村	8	4.0~8.0	2.8	238	是	误判	误判	误判	40	绵竹市什地镇 五方村	8	3.6~5.6	2.0	187	否	成功	成功	误判
18	德阳市略坪镇 安平村	8	1.8~2.8	1.8	141	是	成功	误判	成功	41	江油市三合镇 俞家贯村	8	5.0~8.0	3.0	233	否	成功	成功	成功
19	绵竹市板桥镇 白杨村	8	1.5~6.1	1.5	150	是	成功	成功	成功	42	绵竹市兴隆镇 川木村	9	8.5~9.9	8.0	272	否	成功	误判	成功
20	绵竹市土门镇 林堰村	8	6.0~8.0	6.0	250	是	误判	误判	误判	43	绵竹市九龙镇 同林村	9	9.4~11.0	2.0	234	否	成功	误判	误判
21	德阳市德新镇 清凉村	8	1.0~5.0	1.0	203	是	误判	误判	成功	44	绵竹市汉旺镇 林法村	9	4.3~8.3	4.3	365	否	成功	成功	成功
22	什邡市师古镇 思源村	8	2.0~4.0	1.5	164	是	成功	误判	成功	45	绵竹市东北镇 长林村	9	4.0~6.0	4.0	323	否	成功	成功	成功
23	江油市江油火 车站	8	2.4~7.0	2.4	215	是	误判	误判	成功										

式中： d_s 为砂层埋深； d_w 为地下水位深度； \bar{V}_s 为剪切波速基准值，在 7，8，9 度时分别取 63，89 和 125 m/s。

3.2 判别结果分析

采用上述式(1)~(3)对本次场地进行判别，结果如表 1 所示。Andrus 方法中对液化点和非液化点判别成功率分别为 43%和 100%；石兆吉方法对液化点和非液化点判别成功率分别 25%和 88%。2 种砂土液化判别方法对于本次地震中砂砾土液化判别结果趋势一致：对于非液化场地的判别成功率很高，

甚至达到 100%，但对于液化场地判别成功率均较低，将很多实际液化场地判别为非液化，明显偏于危险，超出了可接受范围。

本文认为，砂砾土与砂土属不同土类，相同波速值下二者密实程度不同，这是造成现有砂土液化判别方法对砂砾土液化场地出现大量误判的原因。例如，当实测剪切波速超过一定值(220 m/s 左右)后这 2 种方法判定的场地均没有液化可能，因为这一波速值对砂土来说处于密实状态，而对于砂砾土来说仍处于松散状态^[13]，仍具有很大的液化可能性。

因此,建立基础不同,基于砂土液化资料建立的液化判别方法不适用于砂砾土的液化判别。

4 砂砾土液化判别模型的建立

4.1 基本思路

从上述结果可见,砂砾土液化剪切波速判别方法需要专门建立。虽然目前我国抗震规范基于标准贯入击数的液化判别方法不适于砂砾土,但本文仍借鉴其基本思想^[14]。其一,将判别方法分为初判和复判两部分,这样可大大减少工作量。其二,参考抗震规范液化判别式最初建立时的模式,建立砂砾土液化判别的基本模型。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。

4.2 初判

根据调查结果,本文将不可能液化及可不考虑液化影响的情况作为初判条件总结为以下3点:

(1) 地质年代条件。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,将此作为初判条件之一。

(2) 砂砾土埋藏条件。将本次地震砂砾土液化及非液化点砂层埋深与地下水位深度绘于图3,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。

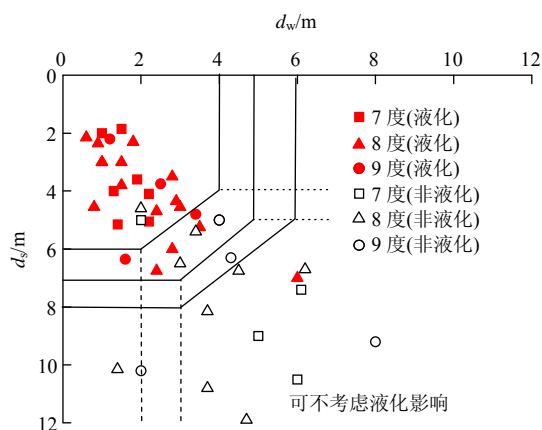


图3 液化以及非液化点砂层埋深与地下水位深度关系

Fig.3 Relations of groundwater level and depth of liquefied and non-liquefied gravel soils

(3) 砂砾土含砾量。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。取含砾量上限作为初判条件,则若7,8,9度时含砾量分别超过

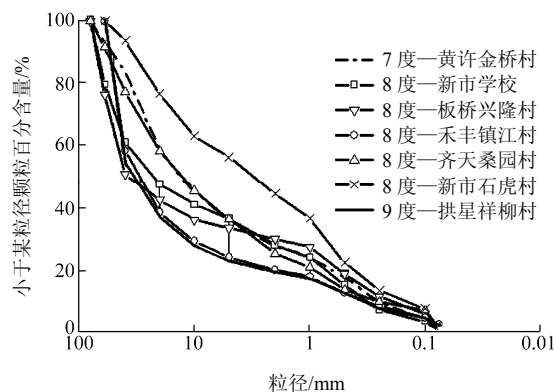


图4 液化砂砾土级配曲线

Fig.4 Grain size distribution curves of the liquefied gravel soils

70%, 75%和80%,此时可判为不液化。

4.3 复判模型

以剪切波速作为砂砾土液化判别的基本指标,复判基本模型可写为

$$V_{s-cr} = V_{s-0} [1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3)] \quad (4)$$

式中: V_{s-cr} 为临界剪切波速, V_{s-0} 为剪切波速基准值, α_w 为地下水位影响系数, α_s 为砂砾层埋深影响系数。这样,砂砾土液化判别式的关键问题可转化由 V_{s-0} , α_w 和 α_s 来确定。

4.4 剪切波速基准值

通过此次地震砂砾土液化数据分析可知,砂砾层埋深以及地下水位深度变化较大,为建立剪切波速与烈度的关系,这里借国内外对剪切波速的修正关系^[15],将实测剪切波速修正至同一水平下的修正剪切波速(砂砾层埋深为3 m,地下水位为2 m),修正公式为

$$V'_s = V_s (47 / \sigma'_v)^{0.25} \quad (5)$$

式中: V'_s 为修正剪切波速, V_s 为实测剪切波速, σ'_v 为有效上覆压力。建立修正剪切波速与烈度的关系如图5所示。

通过直观方法确定图5液化点与非液化点的临界曲线,以此作为砂砾层埋深3 m、地下水位2 m时区分液化与非液化的界线,相应的剪切波速即为基准值,结果如表2所示。

4.5 砂砾层深度及地下水位影响系数

将测试点的剪切波速除以不同烈度下的剪切波速基准值(波速比),绘制波速比与砂砾层深度的关系图,寻找液化点与非液化点的临界曲线,该临界曲线的斜率即为砂砾层深度的影响系数(如图6(a)所示)。采用同样的方法可以得到地下水位的影响系数(如图6(b)所示)。

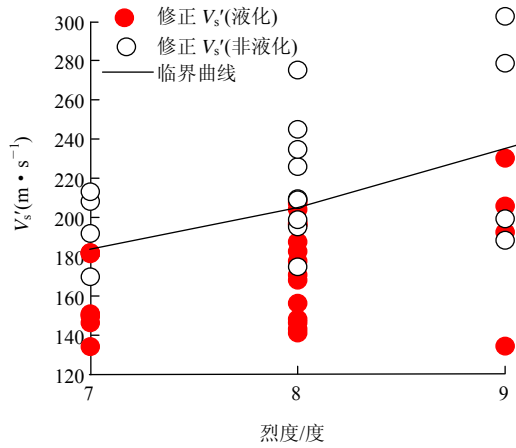


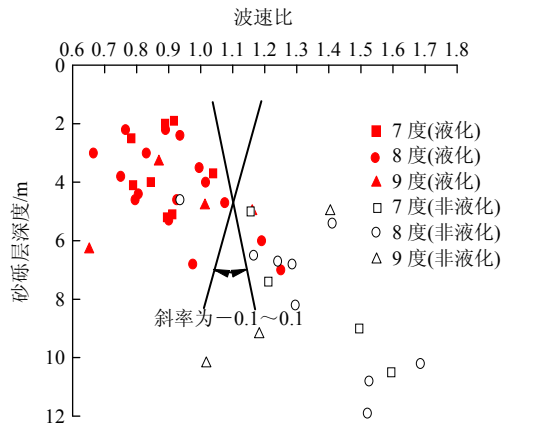
图 5 修正剪切波速与烈度对应关系

Fig.5 Relationship between modified shear wave velocity and seismic intensity

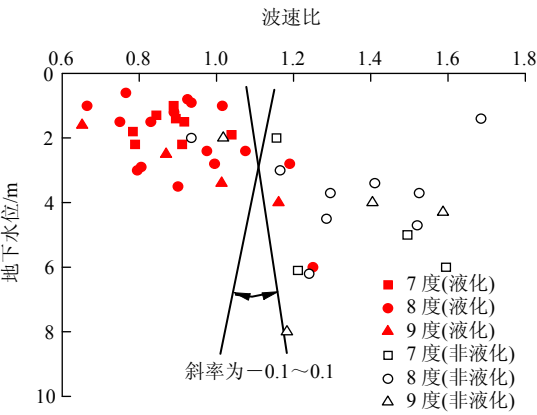
表 2 剪切波速基准值

Table 2 Reference values of the shear wave velocity

烈度/度	$V_{s,0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
7	180
8	200
9	230



(a) 深度影响



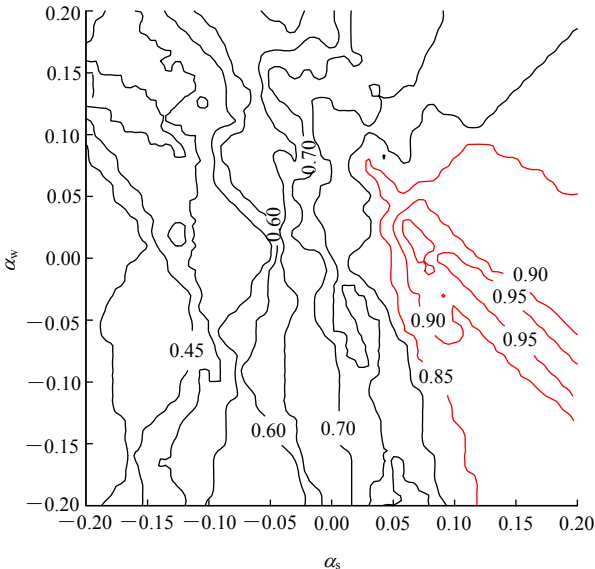
(b) 地下水位影响

图 6 砂砾层深度和地下水位影响系数

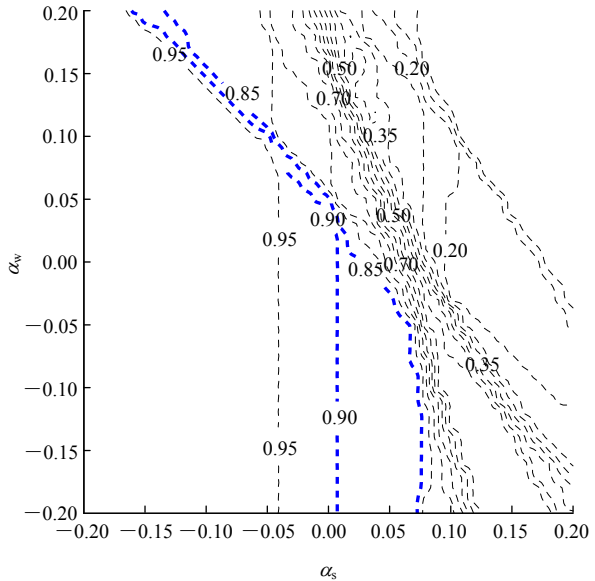
Fig.6 Influential coefficients of gravel soils depths and groundwater tables

砂砾层埋深和地下水位深度影响系数具有不确定性, 图 6 中 2 条直线沿纵坐标方向的斜率表示影响系数的变化, 二者可变范围均为 -0.1 到 0.1 。本文将采用优化方法解决这一问题。首先分别计算砂砾层埋深与地下水位不同影响系数下判别式对液化点的判别成功率(如图 7(a)所示), 以及对非液化点的判别成功率(如图 7(b)所示), 然后综合图 7(a), (b), 寻找两者的交集, 满足判别式对液化点的判别成功率以及对非液化点的判别成功率均达到最大时的影响系数即为最佳取值(如图 7(c)所示)。

从图 7(c)可以看出, 对于液化点与非液化点的判别成功率均超过 0.85 时, α_s 与 α_w 位于一狭小的区域内(图中阴影部分)。为简化公式, 取 $\alpha_s = 0.06$, $\alpha_w = -0.06$, 这样式(4)中的待定参数就可全部得出。



(a) 对液化点判别成功率影响



(b) 对非液化点判别成功率影响

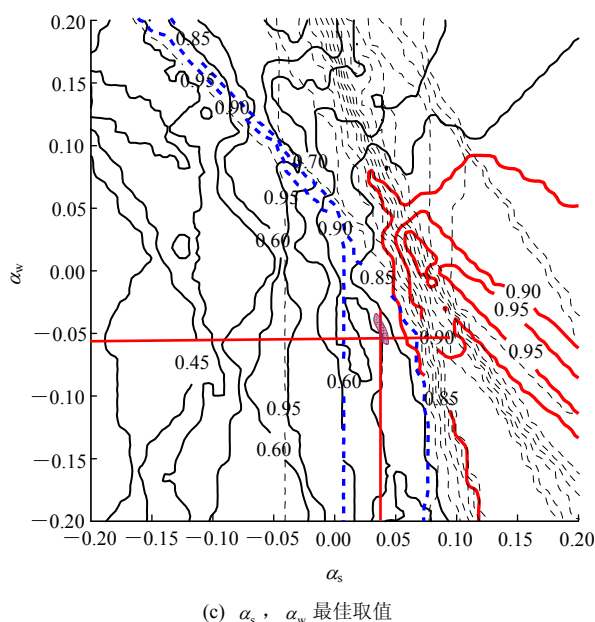


图7 α_s , α_w 不同取值对非液化点和液化点判别成功率影响以及最佳取值

Fig.7 Effects of α_s and α_w on discrimination success ratios for liquefied and non-liquefied sites and optimized values

将表1中所有数据代入式(4)对测试点进行回判,则液化测试点的判别成功率为89%,非液化测试点的判别成功率为88%,表明构建的模型合理。

4.6 含砾量的影响

含砾量(以 P_5 表示,即大于5mm的颗粒百分含量)对砂砾土抗液化能力的影响是一个复杂的问题。一般地震现场勘察资料有限,难以提供同等条件下不同含砾量对抗液化强度影响的定量分析结果,靠现有的现场资料目前仅能得到初判条件。

关于含砾量对砂砾土抗液化能力的影响,国内外进行了一些动三轴试验^[16~18]。结果表明,砂砾土抗液化强度随含砾量的增加而提高,且基本上呈线性增长关系;不同固结压力下,80%含砾量砂砾土的抗液化强度较35%时高10%~30%,较50%时高5%~20%。但需要注意的是,上述试验是在控制相对密度下进行的,而本文模型应控制剪切波速一致。二者条件不同,因此现有室内试验结果对本文来说只是一种参考。

参考现有试验结果,本文将含砾量对砂砾土液化势的影响以 $[1 + \alpha_p(P_5 - 50\%)]$ 作为修正系数,其中 α_p 为待定系数,取 $\alpha_p = 0.5$,表示80%含砾量砂砾土的抗液化强度较50%时高15%,以此作为含砾量对砂砾土液化势影响的定量评价标准。

5 砂砾土液化复判公式

综合上述研究结果,砂砾土液化复判中临界波速计算模型可写为

$$V_{s-cr} = V_{s-0} [1 + \alpha_w(d_w - 2) + \alpha_s(d_s - 3)][1 + \alpha_p(P_5 - 50\%)] \quad (6)$$

从上面分析可得到系数 α_s , α_w 和 α_p 分别为0.06, -0.06 和 0.5。这样,砂砾土液化临界波速计算公式可具体表达为

$$V_{s-cr} = V_{s-0} [1 - 0.06(d_w - 2) + 0.06(d_s - 3)][1 + 0.5(P_5 - 50\%)] \quad (7)$$

或

$$V_{s-cr} = V_{s-0} [0.94 + 0.06(d_s - d_w)][1 + 0.5(P_5 - 50\%)] \quad (8)$$

在完成初判条件后,若实测剪切波速 V_s 小于临界剪切波速 V_{s-cr} ,则砂砾土判为液化,否则为不液化。

6 结 论

(1) 原位测试土层剪切波速技术应用日益普及,我国成都平原及其他一些地区砂砾土分布广泛,工程建设中又大量使用砂砾土,发展基于剪切波速的砂砾土液化判别方法十分必要。

(2) 以往基于剪切波速的砂砾土液化判别方法尚少的根本原因是地震现场资料的匮乏,此次汶川地震现场45个液化场地波速资料的成功获取,扩充了现有液化数据库的内容。

(3) 本文基于汶川地震实测数据建立了砂砾土液化的剪切波速判别方法,由初判和复判两部分组成,其中初判包括地质年代、埋藏条件和含砾量等3个条件,排除了不可能液化的工况。

(4) 复判模型则由地震烈度、剪切波速基准值、地下水位、砂砾土埋深和含砾量等5个参数构成,剪切波速基准值以及地下水位和砂砾土埋深的影响系数分别采用归一化方法和优化方法给出。

(5) 砂砾土与砂土分属不同土类,相同波速值下二者密实程度不同,现有的砂土液化剪切波速判别方法对砂砾土不适用,液化判别的成功率只有25%~40%,明显偏于危险。

(6) 本文提出的砂砾土液化剪切波速复判公式液化点和非液化点的回判成功率分别为 89%和 88%, 表明本文构建的模型合理, 计算公式较为可靠, 可为工程应用及规范修订提供参考。

致谢 参加本文工作的有王维铭、侯龙清、董林、孙锐、陈龙伟、陈红娟、蔡晓光、张建毅, 在此表示感谢! 同时, 感谢四川省地震局和地方政府的大力支持配合。

参考文献(References):

- [1] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(GT2): 201 - 255.
- [2] YOU D T L, IDRIS I M. Proceedings of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils[R]. Buffalo, NY: NCEER - 97 - 0022, 1997.
- [3] SEED R B, MOSS R E S, KAMMERER A M, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering, a unified and consistent framework[R]. EERC, USA: Earthquake Engineering Research Center, 2003.
- [4] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 1 - 10.(WANG Wenshao. Distinction and interrelation between liquefaction state of limit equilibrium and failure of soil mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 1 - 10.(in Chinese))
- [5] COX B R. Development of a direct test method for dynamically assessing the liquefaction resistance of soils in situ[Ph. D. Thesis][D]. Austin: University of Texas at Austin, 2006.
- [6] 汪闻韶. 土工地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速[J]. 水利学报, 1994, (3): 80 - 84.(WANG Wenshao. An important parameter in geotechnical engineering for earthquake disaster mitigation—shear wave velocity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (3): 80 - 84.(in Chinese))
- [7] 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 Zhaoji, YU Shousong, FENG Wanling. Shear wave velocity based soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 74 - 80.(in Chinese))
- [8] ANDRUS R D, STOKOE K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(11): 1 015 - 1 025.
- [9] 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: [s. n.], 1998: 183 - 188.(LIU Huishan. Gravel soils liquefaction evaluation discuss[C]// Proceedings of the 5th National Earthquake Engineering Symposium. Beijing: [s. n.], 1998: 183 - 188.(in Chinese))
- [10] YOU D 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]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(4): 297 - 313.
- [11] 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): 1 288 - 1 296.(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): 1 288 - 1 296.(in Chinese))
- [12] 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 Yinwu. The ages of formation of Chengdu basin and features of its early deposits[J]. Geological Review, 1992, 38(2): 149 - 156.(in Chinese))
- [13] 《工程地质手册》编辑委员会. 工程地质手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.(Engineering Geology Manual Compilation Group. Engineering geology manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.(in Chinese))
- [14] 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))
- [15] SYKORA D W. Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis[R]. Vicksburg, MI: GL - 87 - 26, 1987.
- [16] 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 Kunyao, CHANG Yaping, CHEN Ning. Experimental study of liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (2): 37 - 41.(in Chinese))
- [17] SUZUKI Y, GOTO S, HATANAKA M, et al. Correlation between strength and penetration resistances for gravel soils[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(1): 92 - 101.
- [18] EVANS M D, ZHOU S P. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(3): 287 - 298.