

饱和黄土液化及其理论研究现状

杨振茂^{1,2} 赵成刚¹ 王兰民³ 饶为国⁴

(1 北方交通大学 2 郑州市规划勘测设计研究院 3 甘肃省地震局 4 郑州市公路管理局)

摘 要 本文综述了饱和黄土液化及其理论研究的现状,列举了许多由于地震引起的饱和黄土液化灾害事例。最后指出了当前研究中存在的一些问题,并对今后的研究工作提出了建议。

关键词 饱和黄土 液化 地震灾害

中图分类号: TU444 **文献标识码**: A

文章编号: 1000-131X (2003)11-0038-06

REVIEW OF THE RESEARCH ON LIQUEFACTION OF SATURATED LOESS

Yang Zhenmao^{1,2} Zhao Chenggang¹ Wang Lanmin³ Rao Weiguo⁴

(1 Northern Jiaotong University 2 Zhengzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute 3 Gansu Province Seismological Bureau 4 Zhengzhou Highway Managing Bureau)

Abstract

The research on liquefaction of saturated loess in the countryside and the aboard is conducted in the paper. Many practical examples for the liquefaction of saturated loess due to earthquake in the worldwide are introduced. The art-of-the-state about the research of the topic is reviewed. It is found that some problems occurred the research are pointed and discussed. At last, some suggestions are made for the reference in the future research.

Keywords: saturated loess, liquefaction, earthquake disaster

1 引言

我国黄土地区大多地处高烈度地震区,在这些地区,地震作用所引起的滑坡和震陷作为黄土地区的两大灾害已为人们所公认。从近期对地震实例的调查和室内初步试验研究表明,饱和黄土甚至高含水量黄土也具有很高的液化势和流态破坏势;当土层中的含水量较高时,在一定强度的地震作用下会产生液化或流滑,引起建筑物地基的失稳和斜坡丘陵地带的泥流。因此液化成为黄土地区重要的地震灾害之一。

2 黄土地震液化实例

1989年1月23日,在前苏联塔吉克斯坦共和国首都杜尚别市市郊西南约30km的吉萨尔村地区发生了一次5.5级地震,在半干旱的缓斜坡丘陵地形地貌下近乎平坦的风成黄土层中触发了广泛的液化,并形成大规模的泥流,向前流滑了2km,致使100多栋房屋埋

在5m厚的泥中,220人丧生或失踪。地震时在最靠近震中的塞穆布里台站记录到的这次地震的加速度时程约7s,主震持续了约4s,其南北向峰值加速度约为0.125g,大约相当于我国地震烈度表中7度地震的平均峰值加速度。Ishihara等调查后认为,液化的发生是由于农业灌溉水湿化了7-17m范围内的多孔隙风成黄土层。

1920年12月16日,宁夏海原发生了震级8.5级的大地震,震中烈度为12度,在距震中70-90km、地震烈度为10度的清水河四级黄土台塬的晚更新世马兰黄土层中,发生了大范围的液化。上覆土体沿缓斜坡坡降方向向前滑移了1.5km之远,使当地村庄被夷为平地,造成了严重震害。

1811年和1812年的美国新马德里三次8级地震,在密西西比河流域的Q3黄土层中,引起了大规模的液化沉陷,形成或扩大了Reelfoot湖。

以上地震灾害特别是塔吉克黄土地震液化的工程意义在于拓宽了可液化土的范围和产生条件,引起了世界岩土工程界对于干旱地区黄土液化和液化效应的重视。新颁布的建筑抗震设计规范(2002)对于黄土液

化问题作了专门说明:关于黄土液化的可能性及其在地震记录中虽不乏报道,但缺乏较详细的评价资料,黄土液化现象很少见到。对于黄土液化问题,规范认为值得重视和进行进一步研究。

考虑到农业灌溉条件的逐步改善,大中城市向河谷高阶地上的大规模扩展,局部地下水位上升特别是地震时的地下水位上升,我国黄土地区许多局部区域的含水量会大大增加,从而使黄土液化成为黄土地区的一大潜在灾害。因此,本文对黄土液化的试验和研究进行综述,其目的是引起人们对这一问题的关注,促进其研究。

3 黄土液化理论研究的现状

目前,国内外有关黄土液化方面的研究较少,相关的研究主要集中在中国、美国、日本和前苏联。

美国的研究主要在 Missouri-Rolla 大学^[1-5]。Prakash 等^[1] (1982) 曾对美国中部的黄土状土进行过等幅循环荷载下的动三轴液化试验,提出了饱和黄土液化的轴向应变标准和孔隙水压力标准。Puri^[2] (1984) 对取自美国东部 Shelby 县的原状黄土和重塑黄土进行了等幅循环荷载下的动三轴液化试验,研究了饱和黄土的液化标准和破坏标准,其结果与 Prakash 的基本相同。Shannon 等^[3] (1989) 对美国圣路易斯东部地区的粉状黄土进行了等幅循环荷载下的动三轴液化试验,定性研究了循环应力比、超固结比、塑性指数、侧压力系数和含水量对粉状黄土液化的影响。Guo 等^[4] (1998) 对美国中部的粉土和粉-粘混合土液化做了进一步研究,发现液化循环应力比随塑性指数增大而先降后升,其低值点塑性指数为 4 左右。

Ishihara 等^[6] (1990) 对 1989 年前苏联塔吉克 5.5 级地震引起黄土液化,导致大规模泥流的事件进行了现场调查研究。

白铭学等^[7] (1990) 以 1920 年海原 8.5 级地震引起石碑黄土塬液化滑移事件为例,研究了高烈度地震时黄土地层的液化移动。王家鼎等^[8] (2001) 据此提出了一种强震作用下黄土斜坡滑移的复合机理。

刘公社、巫志辉^[9] (1994) 研究了动荷载下饱和黄土的孔压演化规律及其在地震动分析中的应用。

中国地震局兰州地震研究所对原状黄土试样进行了正弦往返荷载和随机地震荷载下的液化试验,结合具体黄土液化事例,研究了黄土液化机理、饱和黄土液化标准和液化破坏标准、黄土液化产生的场地条件、物性条件和地震动条件以及固结应力条件和地震时程

的类型、峰值、卓越周期和有效持时对液化的影响。建立了孔隙水压力增长模型,提出了一种基于随机地震荷载作用下动三轴试验的黄土液化分析预测方法,并用这种方法对 1920 年海原 8.5 级地震所引起的黄土液化事件进行了反演,对兰州一个厂区进行了黄土液化小区化尝试^[10-19]。

中国建筑科学研究院地基基础研究所受宁夏地震局的委托,对宁夏固原原状黄土进行了室内液化试验,得出了固原饱和黄土的孔压增长模型^[20]。

河海大学刘汉龙等^[21] (2002) 通过室内饱和击实黄土动三轴试验来模拟强夯黄土地基的液化势,研究认为对于强夯处理的黄土,若处于饱和或近饱和状态,在动荷载作用下会发生液化并引起较大变形。余跃心等^[22,23] (2002) 通过饱和原状黄土液化试验研究,探讨了孔压增长规律,并从微观结构角度研究了黄土液化机理。

何开明等^[24] (2001) 初步分析了黄土与砂土在液化机理、孔压增长模型、体积压缩系数及渗透系数方面的差异以便认识黄土液化具有孔压增长快、消散慢和沉降大的特性。

何开明等^[25] (2002) 和王志刚等^[26] (2001) 用有限元方法对碎石桩黄土复合地基抗液化性状进行了数值分析,为在黄土地区开展碎石桩处理方法提供了理论依据。

4 当前黄土液化研究中存在的主要问题

4.1 关于重塑样的制备

Puri^[2] (1984) 在其博士学位论文中,采用的重塑样直径为 2.9 英寸(73.65mm),高 5.8 英寸(147.3 mm)。用小型击样锤,分 25 层击实,每层 25 击,制得了与原状样具有相同初始含水率和密度的重塑样。但黄土是典型的具有大孔隙结构的欠压密土,结构性很强,结构遭到破坏后,采用击实法制得的重塑样的密度一般应比原状样大。即便击实功足够小,可以制得整体表观密度与原状样相同的重塑样,但也很难保证试样内部结构的一致性。

刘汉龙等^[21] (2002) 认为击实黄土的物性、结构与强夯黄土相似,因此通过室内饱和击实黄土动三轴试验来模拟强夯黄土地基的液化势。但强夯加固黄土地基的机理主要是利用强夯产生的强大冲击波作用破坏土的原有结构,改变土体中颗粒之间和与水的相互作用以及孔隙的分布状态,颗粒进行重新排列,由天然紊乱状态进入稳定状态。挤出土中的气体和水,使

土体由松散到密实,从而提高地基的强度并降低其压缩性^[27]。这和室内土工试验中制取重塑样在机理上和所得到的土的结构上还是有一定差别的。

4.2 关于黄土试样的饱和方法及饱和度对液化的影响

Missouri-Rolla 大学的研究者^[1-5]认为对于黄土这样的细粒土,为了使试样达到可以接受的饱和标准,Skempton 系数 B 的值要达到 0.98 以上。采用反压技术来饱和试样,观察到由于黄土的初始饱和度较低, B 值大于 0.98 需要 7 天以上的时间。因此,在进行最初几次试验后,对饱和技术进行了改进。采用先施加一个负压(-10 mm 汞柱)12h 以后进行反压饱和的技术。通过这种方法,可以加速饱和进程,在 48h 到 72h 内 B 值可以达到 0.985。对于原状和重塑土样均可采用这种饱和方法。

刘公社等^[9](1994)也采用了真空抽气之后反压饱和的方法。

中国地震局兰州地震研究所的研究者^[10-19]认为由于黄土独特的多孔隙、弱胶结的结构性和敏感的水理特性,黄土处于饱和状态时,通常不能达到完全饱和,仅中孔隙、大孔隙中充满了水,部分小孔隙和绝大多数微孔隙未充水。饱和度一般为 80-95%。在做动力三轴试验时,试样饱和有一定困难。认为对砂土行之有效的高负压或低负压饱和法,对黄土试样却无法使用。因为黄土孔隙的连通性不如砂土,在浸水状态下抽气会使原有结构遭到破坏,自然浸水时间过长又会由于湿陷而溃散。通过反复试验,发现脱气水水位差循环渗流既可使黄土试样的饱和度在较短时间内(一般在 1h 以内)达到规范要求的 80%以上,又不致使试样的结构在饱水过程中破坏,获得均匀饱和试样,试验规律性好,成功率高。然而,对于饱和度的大小是否会影响到孔压增长的问题,他们给出的最大孔压与饱和度的关系表明,当饱和度大于 80%以后,最大孔压不但不随饱和度的增加而增大,反而减小。当饱和度大于 95%以后,在动荷载的作用下,孔压增长甚微。因为当饱和度大于 95%以后,黄土的结构处于极不稳定的状态。当动荷作用时,孔压还未来得及上升,土的结构已发生崩溃性破坏,导致残余应变急剧增长。因此,对于模拟地震前地下水位突然瞬间上升或土层含水量在较短的时间内迅速增长,使黄土饱和,随后地震动作用引起饱和和土层液化,对这种情况来说,用脱气水水位差循环渗流的方法可满足黄土液化试验的要求。

河海大学的研究者^[21-23]对原状黄土的饱和和采用兰州地震研究所的脱气水水位差循环渗流的方法。对于

击实土样采用抽气饱和的方法。

4.3 关于饱和黄土液化机理

Missouri-Rolla 大学的研究者认为黄土液化与砂土液化机理相同,没有对其机理进行更为深入的研究^[1-5]。

兰州地震研究所则从土动力学、水电化学和微结构的角度对饱和黄土液化机理进行了研究,认为黄土液化与砂土液化在机理上并不完全相同^[10-19]。指出可溶盐的溶解、不完全饱和、大中孔隙的崩溃及微小孔隙充水形成的对孔压的消散作用是黄土地震液化与砂土液化在液化机理上的主要区别。

余跃心等^[22, 23](2002)对于塔吉克黄土地震液化和海原黄土地震液化分别提出了不同的液化机理。认为 1989 年塔吉克发生 5.5 级地震,风成黄土在近乎平坦的场地发生大规模泥流,总的来讲,其液化的根本原因是由于水和地震力这两个因素共同作用的结果。由于长期生活和灌溉用水不断下渗,使得 7-17m 深度范围内黄土处于部分或近乎饱和状态,也就是说黄土处于接近临界失稳的状态。在地震作用下,强烈的地震波使地下水位迅速上升,使土体饱和,基质吸力降低,土体稳定性进一步减弱。同时土体发生剪切,剪力破坏了颗粒间微弱的残余粘结力,并使颗粒发生错动,大颗粒逐渐靠拢,细颗粒填充孔隙,黄土发生剪缩并使其发生较大体积变形。在几乎不排水的条件下,土体中的孔隙水压力急剧上升,有效应力降低,土体软化,强度降低。由于孔隙水压力逐渐累积,最终达到约束围压,产生液化流滑破坏。

余跃心认为,1920 年宁夏海原 8.5 级地震时黄土的液化机理与塔吉克有一定区别。地震时,地下水位的上升使 10-16m 深度内的砂质黄土层处于含水的饱和状态。张振中等人对兰州黄土进行了地震时程分析,时程具有明显的冲击型地震波特点。时程前段的高幅值动应力除了使地下水位短时迅速上升以外,同时还诱发了黄土的结构性体积变形。结构性体变与剪缩的耦合使孔压迅速上升,导致黄土残余变形很大,强度迅速降低而达到液化。

4.4 关于饱和黄土液化标准与液化破坏标准

液化分析中存在着选用什么作为液化判别标准的问题。液化判别标准的选择是与液化的定义相联系的。Seed 提出以初始液化作为液化判别标准并以此为基础通过动三轴试验确定出动循环强度。前人对饱和和砂土、饱和和轻亚粘土和粉土的液化已做过大量研究,大多采用初始液化作为液化的孔压标准。Prakash、Puri 和 Shannon 等^[1-5]对美国中部的黄土状粉土也提出了类似

的液化孔压标准, 它们所提出的液化破坏标准为双幅循环应变达到 5%、10% 和 20%。且发现 5% 和 10% 的双幅循环应变出现在初始液化前, 20% 的双幅循环应变的出现远滞后于初始液化发生之后, 依赖于施加的动应力的循环应力比的大小。但王兰民等^[10-13, 15-19]通过对兰州饱和和马兰原状黄土试样的液化试验表明, 饱和黄土完全液化时, 孔压仅能上升到围压的 70% 左右, 对应于液化时的动应变可达 2%-14%。事实上, 主要是残余应变。考虑到黄土的结构破坏应变为 3%, 以及建筑物不能承受的应变值随建筑物的形式和重要程度而不同^[28]。为此, 他们建议饱和黄土的液化标准应取为孔压达到初始有效围压的 70%; 同时又考虑到, 对于饱和黄土试样来说, 往往在孔压发生显著增长, 但还未达到液化标准前, 由于有效应力的降低, 轴向动应变急剧增长达到 3% 以上, 而 3% 为黄土结构的破坏应变值, 故饱和黄土的液化破坏标准被确定为: 当孔压达到初始有效围压的 20%-70% 时, 轴向动应变等于 3%。段汝文等^[14] (1998) 在对兰州某工程场地的饱和黄土试样进行振动液化试验时, 观察到黄土液化时孔隙水压力达不到初始有效侧压力, 据统计一般只能达到 60%-80%。其次是变形幅值不象砂土那样大, 当幅值达到一定值时, 残余变形急剧增大, 很快超过 10%, 此时土样即发生破坏。根据试验结果, 没有采用孔压标准而采用的是 5% 和 10% 的破坏应变标准。

4.5 关于动荷载下饱和黄土的孔压发展规律

刘公社等^[9] (1994) 针对陕北洛川国际标准剖面上 Q3 饱和原状黄土试样, 在振动三轴试验条件下, 分析了动荷大小、动荷形式、振动频率、固结应力比对饱和黄土振动孔压演化过程的影响。分析表明由于粘性和结构强度的存在, 使饱和黄土的动孔压与无粘性土的动孔压规律有一定差异。在振动过程中, 孔压线上不出现像砂土那样的剪胀现象, 孔压过程线表现出单调增长的形态。动荷形式和波序排列对饱和黄土孔压发展影响较小。振动频率对强度、变形的发展有一定影响, 但不影响孔压时程曲线的形态。对试验规律作数学拟合, 他们建议孔压计算公式如下:

$$u = u_{\max} \cdot \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{N}{N_f} \right) \right]^b$$

式中:

u ——孔压;

u_{\max} ——液化最大孔压, 与土性、静应力状态和动荷大小有关;

N ——振次;

N_f ——液化振次;

b ——试验参数。

b 值随固结比变化, 其经验关系为:

$$b = 0.35167 - 0.05K_c$$

此处式中:

K_c ——固结比。

兰州地震研究所^[10-19] 对饱和原状黄土试样在动三轴试验中的孔隙水压力发展规律进行了研究。在最初阶段, 孔隙水压力急剧上升, 后期阶段增长速率减慢, 最终趋于稳定。这是因为黄土的渗透系数小于无粘性砂土, 故在振动初始时, 孔隙水压力不易消散和转移, 使土体的结构迅速破坏产生较大的体变势, 致使初始阶段孔压急剧上升; 另一方面, 正因为黄土颗粒细小, 有少量的粘粒存在, 使黄土具有一定的结构强度和粘性强度, 其结果阻碍和限制了孔隙水压力增大, 致使后期的孔压增长较缓慢, 直至趋于稳定。

在各向均压固结情况下, 密度较低时, 饱和黄土液化孔压发展表现为, 开始上升速率较缓慢, 当循环次数较高时, 在某一振动次数时往往出现孔压迅速增高的现象。当密度较高时, 开始时急剧上升, 之后上升速率逐渐下降, 直至稳定不变。前者这种孔压的发展与松砂和中密砂极为相似, 后者与密砂极为相似。此外, 孔压的上升速率还明显受到动应力幅值的影响, 动应力愈大, 孔压上升愈快。

对试验结果的非线性拟合发现, 在均压固结条件下, 饱和黄土的孔压增长, 可用一个多项式来表示, 即:

$$\frac{u_d}{u_f} = \sum_{i=1}^m (-1)^{i+l} \cdot a_i \cdot \left(\frac{N}{N_f} \right)^i$$

式中:

u_d ——孔压;

u_f ——液化最大孔压;

N ——振次;

N_f ——液化振次;

a_i ——系数, 由试验确定;

m ——级数;

l ——指数;

m 和 l 可根据围压和液化振次确定如下:

(1) 当 $\sigma'_0 < \sigma_v$ 时, $m=5$, $l=1$ 。

(2) 当 $\sigma'_0 \geq \sigma_v$ 时, m 和 l 可分别由下式确定:

$$m = \begin{cases} 4 & N_f \leq 20 \\ 5 & N_f > 20 \end{cases}$$

$$l = \begin{cases} 1 & N_f < 45, N_f > 50 \\ \begin{cases} 1 & i=1,2,4 \\ 0 & i=3 \end{cases} & 45 \leq N_f \leq 50 \end{cases}$$

式中:

σ'_0 ——试验有效固结围压;

σ_v ——土样所受的原有上覆土层压力。

宁夏地震局委托中国建筑科学研究院地基基础研究所完成的“固原黄土动力特性试验”的试验报告给出了液化试验中孔压比随振次的变化曲线^[20]。王志刚^[26] (2001) 将其转化成孔压比随振次比的变化曲线, 用 $y=ax$ 的线性关系 (y 表示孔压比, x 表示振次比, a 表示回归系数) 对所有数据点重新回归, 其结果为 $y=1.119304x$, 其相关系数为 $r=0.915$, 因此认为采用的线性假设对固原饱和黄土是适宜的。

刘汉龙等^[21] (2002) 认为在均压固结条件下, 饱和和击实黄土的孔压增长可用 A 型曲线来拟合, 即:

$$\frac{U_d}{U_f} = (1 - e^{-\beta \frac{N}{N_f}})$$

式中:

U_d ——孔压;

U_f ——破坏或液化时的最大孔压;

β ——曲线拟合参数;

N ——振次;

N_f ——破坏振次。

余跃心等^[22, 23] (2002) 认为在均压固结条件下, 饱和和原状黄土的孔压增长可近似地用 A 型曲线来拟合; 但 A 型曲线只考虑了地震时程中高峰值应力对孔压增长的影响, 并未考虑黄土这类结构性土体变特征对孔压增长的影响。认为可以在 A 型孔压增长方程上添加结构修正项来反映结构性对孔压增长的影响, 称为修正 A 型孔压增长方程。即:

$$\frac{U_d}{U_f} = \left(1 - \left(\frac{1}{v} \right)^{N_r} e^{-\beta N_r} \right)$$

U_d 、 U_f 、 β 意义同前, N_r 为振次比, v 为不同固结应力条件下增湿体应变值 (%), 该值反映了黄土的原始结构性、胶结物的含量等性质。认为对于黄土这类结构性强, 具有较大体变性的土, 其在动荷载作用下

的孔压增长采用修正 A 型曲线更为合适。

可以看出, 对于饱和和原状黄土, 不同的研究者根据自己的试验结果得出了不同的孔压增长模型, 对于饱和和重塑黄土, 目前只有刘汉龙等提出的 A 型模型。因此, 对于饱和黄土 (包括原状和重塑) 在动荷载作用下的孔压发展规律, 还需要作进一步的研究。

4.6 关于强震作用下黄土地层的低角度滑移

1920 年宁夏海原 8.5 级大地震时, 在固原清水河四级黄土台塬的马兰黄土中, 发生了大规模的黄土低角度滑移, 造成了严重震害。1986 年宁夏地震局在滑移区对滑移形态和地层构成及性质进行了考察研究, 得出结论认为滑移是由于马兰黄土中含砂层段地震液化上涌推挤两侧土层造成的^[7]。

王家鼎等^[8] (2001) 对此滑移经过现场勘察、室内试验及理论推导, 提出了一种强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理——位于第一层古土壤层下部的饱和黄土和砂土震动液化; 位于其上部的黄土层受地震力和液化的双重作用而呈现波浪地貌, 进而部分黄土解体、斜抛、粉尘化和远程运移而形成黄土流或黄土瀑布。用他们提出的滑距公式对滑移体的滑距进行了计算, 计算结果与实际值较为一致。

而余跃心等^[22, 23] (2002) 则认为是地震时程末的地震波与静剪应力的共同作用使黄土地层沿着平缓的坡面高速下滑。认为如此大的滑距仅是由缓坡面重力分量而没有地震力的作用是难以想象的, 远距离的滑移恰恰证明了黄土在地震时程前期的孔压已达到相当高的值, 土体已软化, 时程末的地震波和沿坡面的重力分量是长距离滑移的根本原因。对于此观点, 需要指出的是, 地震力是一种往返作用力, 而不可能一直作用于下坡方向, 且仅靠时程末几个循环的作用在短时间内产生如此远距离的滑移, 似乎是不可能的。

由上可知, 不同学者的研究结果存在较大差异, 且带有很大的推测成分。

5 需要进一步研究的问题

由前面的综述可知, 目前在黄土液化的理论研究方面已取得了一定成果, 但笔者认为在以下方面有必要进行深入研究。

1. 黄土液化是一个较新的研究课题, 对于它的室内试验方法, 目前尚无统一的规定, 需要经过大量试验, 不断归纳总结, 把试验过程标准化。

2. 对黄土液化的概念、液化机理、液化判别标准、液化产生条件及影响液化的因素、动荷载下孔压与应

变的发展规律进行系统的研究,初步建立饱和黄土振动液化分析的理论体系。

3. 揭示强震作用下黄土地层低角度滑移的机理,研究滑移产生的条件。

4. 进行深入细致的现场调查和理论分析,建立室内试验结果与现场调查结果之间的联系,把室内研究结果用于工程实际。

5. 对于黄土液化,目前尚未见到现场评价方法,今后应发展现场测试和评价黄土液化性能的方法。

6. 研究液化黄土地基的处理方法和定量描述改良后土体抗液化性能的方法。

参考文献

- [1] Prakash S, Puri V K. Liquefaction of loessial soils [A]. Proceeding of 3rd international earthquake microzonation conference [C]. 1982. Vol.1: 1101-1107
- [2] Puri V K. Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils [D]. Mo. U.S: University of Missouri-Rolla, 1984
- [3] Shannon S. Liquefaction and settlement characteristics of silt soils [D]. Mo. U.S: University of Missouri-Rolla, 1989
- [4] Guo T Q, Prakash S. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 1999, 125(8): 706-710
- [5] Prakash S and Sandoval J A. Liquefaction of low plasticity silts [J]. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 71(7): 373-397
- [6] Ishihara K, Okusa S, Oyagi N and Ishchuk A. Liquefaction-induced flowslide in the collapsive loess deposit in Soviet Tajik [J]. Soils and foundations, 1990, 30 (4): 73-89
- [7] 白铭学,张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J].工程勘察,1990 (6): 1-5
- [8] 王家鼎,白铭学,肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J].岩土工程学报,2001,23 (4): 445-449
- [9] 刘公社,巫志辉. 动荷载下饱和黄土的孔压演化规律及其在地基动力分析中的应用[J].工业建筑, 1994 (3): 40-44
- [10] Wang Lanmin, Zhang Zhenzhong and Wang Jun. Liquefaction problem in seismic microzonation in loess areas [A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation [C]. France: 1995. Vol.1: 917-923
- [11] 王兰民,王峻,李兰. 随机地震荷载作用下黄土液化的试验预测[A]. 第四届全国土动力学学术会议论文集[C].杭州:浙江大学出版社,1994. 134-137
- [12] 王兰民,王峻,李兰等. 城市黄土地液化的预测方法[J]. 西北地震学报, 1997, 19 (增刊): 7-12
- [13] 李兰. 饱和黄土动力特性的几点探讨[A].第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. 大连:大连理工大学出版社, 1998. 138-143
- [14] 段汝文,王峻,李兰. 饱和黄土振动液化问题探讨[A]. 第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. 大连:大连理工大学出版社, 1998. 144-148
- [15] 石兆吉,王兰民. 土壤动力特性·液化势及危害性评价[M].北京:地震出版社, 1999
- [16] 王兰民,刘红玫,李兰,孙崇绍.饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,22 (1): 89-94
- [17] 刘红玫,王兰民.黄土孔隙微结构的定量研究及其与黄土液化的相关关系[A].湿陷性黄土与工程[C].北京:中国建筑工业出版社,2001. 546-550
- [18] 李兰.饱和黄土液化标准的试验研究[A].湿陷性黄土与工程[C].北京:中国建筑工业出版社, 2001. 529-533
- [19] 李兰,刘红玫.任意波荷载下饱和黄土液化特性的试验研究[A].土动力学与岩土工程[C].北京:中国建筑工业出版社,2002. 140-145
- [20] 中国建筑科学研究院地基基础研究所.固原黄土动力特性试验报告.1983
- [21] 刘汉龙,余跃心,王兰民.强夯黄土地基液化试验研究[A].土动力学与岩土工程[C].北京:中国建筑工业出版社,2002. 218-223
- [22] 余跃心,刘汉龙,王兰民.黄土孔压增长模式研究[A].土动力学与岩土工程[C].北京:中国建筑工业出版社,2002. 225-229
- [23] 余跃心,刘汉龙,高玉峰. 饱和黄土孔压增长模式与液化机理的试验研究[J].岩土力学,2002,23 (4): 395-399
- [24] 何开明,王兰民,王峻,曾国熙. 黄土液化与砂土液化的差异浅析[J].地震研究, 2001,24 (2): 146-149
- [25] 何开明,王兰民,曾国熙. 饱和黄土地基的液化数值分析[J].工业建筑,2002,31 (7): 29-31
- [26] 王志刚.碎石桩—黄土复合地基的抗液化性状数值分析[J].高原地震,2001,13 (2): 58-61
- [27] 地基处理手册(第二版)编写委员会.地基处理手册[M]. (第二版). 北京:中国建筑工业出版社.2000
- [28] 关文章. 湿陷性黄土的工程性能新篇[M].西安:西安交通大学出版社. 1992

杨振茂 北方交通大学博士研究生,郑州市规划勘测设计研究院副院长,主要从事岩土力学与工程的研究工作,发表文章十多篇。

邮编 450052 河南省郑州市嵩山北路 6 号郑州市规划勘测设计研究院 Tel:0371-7181759 13837176129

赵成刚 教授,博士生导师。Tel:010-51688118 010-62119390 e-mail: yangzhenmao@163.com