

# 太行山东麓北拒马河冲积扇结构探测及 地震砂土液化判别

刘莎莎<sup>1)</sup>, 丰成君<sup>2, 3)\*</sup>, 谭成轩<sup>2, 3)</sup>, 邓亚虹<sup>1)</sup>, 戚帮申<sup>2, 3)</sup>, 孟 静<sup>2, 3)</sup>,  
张 鹏<sup>2, 3)</sup>, 宋焱勋<sup>1)</sup>, 慕焕东<sup>1, 4)</sup>, 周永恒<sup>1)</sup>

1) 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710061; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3) 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;

4) 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西西安 710048

**摘 要:** 北拒马河冲积扇及邻近地区位于太行山东麓, 地表覆盖全新世(Q<sub>h</sub>)松散砂土与粉土, 该区域地下水埋深较浅, 潜在地震最大震级达 6.5 级, 在地震作用下存在发生砂土液化危险性。通过野外地质调查、工程地质钻探和高密度电阻率法勘探揭示北拒马河冲积扇地层结构特征。在此基础上, 采用原位标准贯入试验和室内动三轴试验评价北拒马河冲积扇饱和砂土和粉土的液化危险性。结果表明: (1) 北拒马河冲积扇由三组沉积旋回组成: 第一组为分布于北拒马河南支古河道内的全新世河流相砂、砂砾石、砾石层; 第二组为埋深 15 m 左右的晚更新世—全新世冲洪积相沉积层, 上部为亚砂土, 下部为细、粉砂; 第三组为埋深 15 m 以下的晚更新世洪积相沉积层, 上部为淤泥质亚黏土, 中部为亚砂土、细粉砂, 下部为卵砾石层。(2) 北拒马河冲积扇饱和砂土与粉土存在液化危险性, 由标贯法液化判别结果可知, 冲积扇南缘砂土液化等级为轻微, 冲积扇东缘靠近涿州市区砂土液化等级为中等。(3) 北拒马河冲积扇砂土的液化风险随震级与地震烈度增大而增大, 在近场 6.5 级地震作用下产生Ⅶ、Ⅷ度地震烈度时, 北拒马河冲积扇会发生砂土液化。

**关键词:** 饱和砂土; 砂土液化危险性; 动三轴试验; 标准贯入试验; 抗液化剪应力法

中图分类号: TU441.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.091403

## Structural Exploration and Seismic Sand Liquefaction Assessment of North Juma River Alluvial Fan in the Eastern Piedmont of Taihang Mountains

LIU Sha-sha<sup>1)</sup>, FENG Cheng-jun<sup>2, 3)\*</sup>, TAN Cheng-xuan<sup>2, 3)</sup>, DENG Ya-hong<sup>1)</sup>, QI Bang-shen<sup>2, 3)</sup>,  
MENG Jing<sup>2, 3)</sup>, ZHANG Peng<sup>2, 3)</sup>, SONG Yan-xun<sup>1)</sup>, MU Huan-dong<sup>1, 4)</sup>, ZHOU Yong-heng<sup>1)</sup>

1) School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

3) Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081;

4) Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048

**Abstract:** The North Juma River alluvial fan and its adjacent areas are located at the eastern piedmont of Taihang Mountains. The surface of this area is covered by Holocene loose sand and silt, and the groundwater depth is relatively shallow. This area is susceptible to earthquake with a maximum magnitude of 6.5. Sand liquefaction may occur due to an earthquake. Field geological survey, engineering geological drilling, and high-density resistivity methods are used to explore the stratigraphic structure characteristics of North Juma River alluvial fan. Accordingly, the liquefaction risk of saturated sand and silt in the North Juma River alluvial fan is assessed using

本文由中国地质调查局地质调查项目“通州—石家庄活动构造带区域地质调查”(编号: DD20190317)和国家自然科学基金项目(编号: 41772275)联合资助。

收稿日期: 2021-07-18; 改回日期: 2021-09-11; 网络首发日期: 2021-09-15。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘莎莎, 女, 1996 年生。硕士研究生。地质工程专业。E-mail: liushasha9604@163.com。

\*通讯作者: 丰成君, 男, 1985 年生。博士, 副研究员。主要研究方向为: 地应力、构造应力场、断层活动危险性、城市地质安全风险评估等。

E-mail: feng2010618@aliyun.com。

in-situ standard penetration test and indoor dynamic triaxial test. Based on the findings of research: (1) The alluvial fan of the North Juma River is composed of three groups of sedimentary cycles: The first group is Holocene fluvial sand, sand gravel, and gravel stratum distributed in the paleochannel of the southern branch of the North Juma River; The second group is the Late Pleistocene to Holocene alluvial-proluvial facies sedimentary stratum with a buried depth of about 15 m. The upper part of the alluvial-proluvial facies sedimentary stratum is comprised of sub-sand while the lower part is comprised of fine, silt sand; The third group is the late Pleistocene proluvial facies sedimentary stratum with a buried depth of more than 15 m. The upper part of the proluvial facies sedimentary stratum is comprised of silty loam, the middle part is comprised of sandy soil and fine silt, and the lower part is comprised of pebbles. (2) There is a liquefaction risk of saturated sand and silty sand in North Juma River alluvial fan. Based on the liquefaction evaluation results of the standard penetration method, the sand liquefaction level on the southern margin of the alluvial fan is slight, and the eastern margin of the alluvial fan near Zhuozhou City is medium. (3) The liquefaction risk of sand in the alluvial fan of North Juma River increases with an increase in earthquake magnitude and intensity. When the earthquake intensity of VII and VIII occurs due to a near-field earthquake of M6.5, sand liquefaction will occur in the alluvial fan of North Juma River.

**Key words:** saturated sand; liquefaction risk of sand; dynamic triaxial test; standard penetration test; anti-liquefaction shear stress method

砂土液化是地震引起的一种破坏严重的次生灾害,往往会产生喷水冒砂、地面沉陷和地基失效等现象,对工程建设造成巨大的损坏,威胁人类生命财产安全。国内外发生的数次强震活动引起的砂土液化均造成了严重的灾害损失,如 1976 年唐山地震、1999 年土耳其地震、2008 年汶川地震和 2011 年新西兰地震等均出现了严重的喷水冒砂、地基沉陷承载力丧失、地裂缝延伸等现象,大量农田被覆盖,公路、铁路等路面开裂、房屋建筑物等被毁坏(刘恢先, 1985; Cetin et al., 2004; 曹振中等, 2010; 陈龙伟等, 2013; 陈同之, 2014; 方怡等, 2016; 王景禄, 2020)。严重的液化灾害引起国内外学者的广泛关注,对液化的相关问题进行了许多研究,包括砂土液化的形成机理、判别方法和危险性评估等(Ku et al., 2004; 刘小丽等, 2007; 周健等, 2011; 黄雅虹等, 2012; 董林等, 2015; 周燕国等, 2017)。

拒马河发源于河北省涞源县北部太行山麓,是大清河水系北支主要支流(丁志宏等, 2013; 崔红波, 2020)。其下游平原主要是山前洪积、冲积扇形平原,沿河两岸沉积大量第四系松散饱和砂土和粉土(吴忱和赵明轩, 1993)。而河北省新构造运动强烈,地震活动频繁,曾发生过多级强震(宫猛等, 2016; 孙丽娜等, 2017),如 1658 年涞水 6 级地震和 1976 年唐山 7.8 级地震等。根据杨凡(2017)的地震烈度衰减关系式,唐山 7.8 级地震与涞水 6 级地震产生的地震烈度衰减至拒马河流域分别为 VII 度和 VI~VII 度。高振寰(1984)认为,在平原中河漫滩、古河道等埋藏有饱水的粉细砂地层中,当砂层与地下水埋深较小,砂层松散饱和且地震烈度大于 VI 度时,场地可能产生具有破坏性的地震砂土液化。因此,北拒马河冲积扇的饱和砂土和粉土地层可能存在砂土液化危险。

预防和减轻液化灾害的前提是在地震发生前对场地进行液化危险性评价。砂土液化有诸多判别方法,Seed 判别法是国外规范中应用较广的一种判别方法,其通过对比地震中产生的剪应力和土体液化所需的剪应力进行场地液化判别(Seed and Idriss, 1971; 于仕达等, 2021)。美国国家地震工程研究中心对 Seed 简化法进行修订提出 NCEER 法,该方法通过对比砂土中循环应力比和循环阻力比大小进行液化判别(郝兵等, 2019)。《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中给出的标贯法是我国学者总结唐山地震、汶川地震和其他地震液化区调查资料,通过统计分析建立起来的液化判别方法,该方法考虑了地震动、初始应力和土体特征等影响因素,经数次修订完善,是国内工程项目中液化判别最常用的方法。黄文熙院士(1962)在国内首先提出用动三轴仪研究砂土液化问题。该方法通过对试样施加模拟的动荷载,测得动荷载作用下的砂土的动荷载、液化振次等参数分析研究砂土的液化问题,是目前公认的室内研究砂土液化机理进行液化判别的有效手段(柯瀚等, 2004)。剪切波速法是石兆吉根据 Dobry 刚度法原理和我国现场资料提出的液化判别方法,该方法通过对比土层的剪切波速与液化临界剪切波速大小进行液化判别(郝兵等, 2019)。

北拒马河冲积扇饱和砂土和粉土的工程地质稳定性对邻区范围内的京港澳高速(G4)、京昆高速(G5)、首都环线高速(G95)等交通干线和南水北调中线等水利工程的安全运营具有重要影响作用,而目前对于该区域的砂土液化危险性的研究较少。鉴于此,本文以太行山东麓北拒马河冲积扇饱和砂土和粉土为研究对象,依托中国地质调查局项目“通州—石家庄活动构造带区域地质调查”,通过野外地

质调查、工程地质钻探和高密度电阻率法勘探推测北拒马河冲积扇地层结构特征;其次采用现场标准贯入试验方法和室内动三轴试验方法对场地进行砂土液化综合判别,计算其液化指数,评估液化风险等级;最后整理分析试验所得液化判别结果,为北拒马河冲积扇及邻区砂土液化灾害的预防和治理提供科学参考。

## 1 北拒马河冲积扇地质背景

### 1.1 地形地貌与地层结构

北拒马河洪积扇、冲积扇平原位于太行山东麓,面积约 1250 km<sup>2</sup>。经过中生代燕山运动的隆起后又经过喜马拉雅运动抬升,地貌整体西北高,东南低,坡度较缓,地形较为平坦,自西北向南成扇形展布。冲积扇位于涿州市西部,切割并堆积在洪积扇

体内,二者以 2~8 m 陡坎接触。冲积扇以镇江营为顶点,中轴为镇江营与涿州间的北拒马河中支河道,北缘为尚乐、长沟,南缘为孙家庄、南马村,前缘为下胡良、涿州、松林店(吴忱和赵明轩,1993)。

### 1.2 区域地质构造背景

北拒马河冲积扇所处的河北省属华北亚板块,新构造运动强烈,地震活动较为活跃,历史记载和有记录资料的 7 级以上特大地震就有 5 次(温超等,2020)。该区域及邻近地区断裂构造较为发育,断裂走向以 NE 走向和 NNE 走向为主, NW 走向次之,主要断裂有黄庄—高丽营断裂、南苑—通县断裂和涿水断裂等(图 1)。黄庄—高丽营断裂为走向 NNE, 倾向 SEE 的高角度正断层,1970 年 9 月 30 日北京附近 6.5 级地震发生在该断裂带上。南苑—通县断裂为走向 NE, 倾向 NW 的高角度正断层,1665 年 4 月

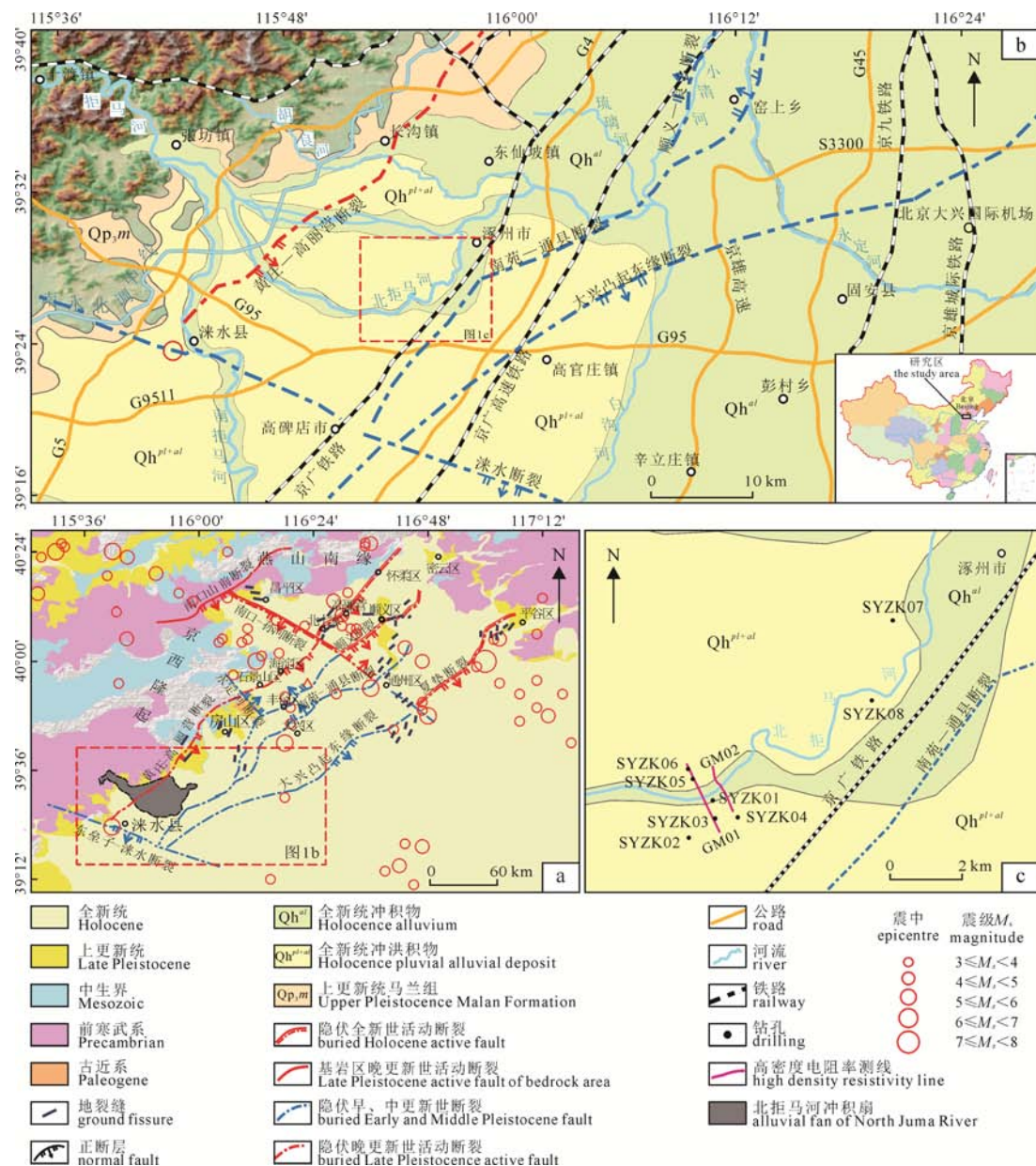


图 1 研究区地质概况图

Fig. 1 Generalized map of the geology of the study area

16 日通县 6.5 级地震发生在该断裂带上(李绍柄, 1990)。1658 年 2 月涞水县城发生 6 级地震与黄庄—高丽营断裂活动性具有很好的对应关系(周永恒等, 2021)。

### 1.3 水文气候条件

拒马河是北京市与河北省交界处的一条界河, 发源于河北省涞源县西北太行山麓, 在张坊镇铁锁崖附近分为南、北拒马河流入下游洪积扇、冲积扇平原(丁志宏等, 2013)。洪积扇、冲积扇平原区河流水系发育, 水位落差较小, 属于暖温带半湿润、半干旱季风型大陆性气候, 冬季干冷少雨, 夏季炎热多雨, 年平均气温为 11.7℃, 降水主要集中在 6—9 月, 降水量年内、年际相差悬殊, 在丰水年份 2012 年降雨量可达 883.6 mm, 流域多年平均年降水量为 562 mm 左右(冯庆达, 2018)。

## 2 北拒马河冲积扇结构探测解析

通过野外地质调查可知, 研究区地表大面积覆盖全新世(Qh)砂土和粉土, 为了解北拒马河冲积扇的地层岩性特征, 在冲积扇扇缘处布设 8 个工程地质钻孔, 钻孔位置及孔深信息见表 1。

根据钻孔岩心揭露, 冲积扇地层主要包含全新统和上更新统欧庄组。全新世地层岩性主要为黄褐色粉土、棕黄色-土黄色粉砂、细砂和中砂。黄褐色粉土, 粉粒结构, 稍湿, 稍密, 局部含姜结石, 形状不规则, 粒径 2~3 cm。棕黄色粉砂, 粉粒结构, 颗粒较均匀, 级配较差, 稍湿, 稍密。土黄色中砂、细砂颗粒较均匀, 级配较差, 磨圆程度差, 为棱角状, 稍湿且结构松散。砂土矿物成分以石英、长石为主, 含少量黑云母及其他岩屑。上更新统欧庄组地层岩性主要为灰白色含砾粗砂和砾石层。粗砂为粗粒结构, 稍湿, 松散, 颗粒分选性一般, 磨圆度差为棱角状, 矿物成分以石英、长石为主, 含少量黑云母及其他岩屑。砾石多为安山岩、火山角砾岩和白云岩, 含少量辉绿岩和花岗岩, 分选性和磨圆程度一

般, 为次圆状一次棱角状, 砾石直径范围以 2~5 cm 为主, 少量可达 8~10 cm。

为进一步探测北拒马河冲积扇第四系结构, 在松林店镇北布置两条高密度电阻率测线。GM01 测线位于松林店村北, 测线长度 2 km, 走向 N69°E; GM02 测线位于房树村西, 测线长度 1.4 km, 总体走向 N71°E。高密度电阻率探测结果显示, GM01 测线纵向上反演电阻率变化特征总体为高一低一高, 0~500 m 处为典型的三层电性结构, 表层电阻率为低阻特征, 500~1200 m 间表层反演电阻率由低阻逐渐过渡为中、高阻, 推断与北拒马河河道内部第四系土层结构变化有关。在 1200~1850 m 之间表层反演电阻率为低阻特征, 与 0~500 m 段电性特征相似。GM02 测线的总体电性变化特征与 GM01 相似, 测线北侧为高一低一高三层电性层位, 中部表层反演电阻率为中、高阻特征, 两侧为低阻特征, 测线南侧表层低阻未表现出向中、高阻过渡的迹象, 受测线长度限制, 可能 GM02 测线未探至冲洪积扇扇缘边界部位。

结合 GM01 和 GM02 测线反演电阻率的变化特征, 两条测线解释推断成果显示冲积扇由三组沉积旋回组成: 第一组为北拒马河河道内的河流相砂、砂砾石、砾石层, 主要分布于拒马河南支古河道内; 第二组为埋深 15 m 左右的晚更新世—全新世冲洪积相沉积层, 上部为亚砂土, 下部为细、粉砂层; 第三组为晚更新世洪积相沉积层, 顶界埋深在 15 m 以下, 上部为淤泥质亚黏土, 中部为亚砂土、细粉砂, 下部为卵砾石层(图 2)。

## 3 北拒马河冲积扇地震砂土液化判别

地震引起的砂土液化是指松散饱和砂土受地震力作用, 土体内部结构改变, 土体颗粒间孔隙减小, 孔隙水压力不断增长使得土体有效应力大幅下降, 土体抗剪强度不断降低直至丧失承载能力, 最终发生喷水冒砂等液化现象。

表 1 钻孔位置及孔深  
Table 1 Location and depth of drills

| 钻孔编号   | 地理位置   | 坐标         |           | 孔口高程/m | 钻孔深度/m |
|--------|--------|------------|-----------|--------|--------|
|        |        | 经度(E)      | 纬度(N)     |        |        |
| SYZK01 | 房树村西   | 115°54'26" | 39°25'38" | 38     | 50.21  |
| SYZK02 | 松林店村西口 | 115°54'04" | 39°25'04" | 44     | 50.25  |
| SYZK03 | 松林店村   | 115°54'28" | 39°25'21" | 45     | 50.40  |
| SYZK04 | 松林店村   | 115°54'49" | 39°25'22" | 43     | 50.3   |
| SYZK05 | 松林店村北  | 115°54'08" | 39°25'57" | 24     | 50.1   |
| SYZK06 | 房树村西   | 115°54'03" | 39°26'07" | 35     | 50.2   |
| SYZK07 | 八家窑村   | 115°57'12" | 39°28'22" | 19     | 50.1   |
| SYZK08 | 包子铺村   | 115°56'53" | 39°27'09" | 23     | 50.4   |

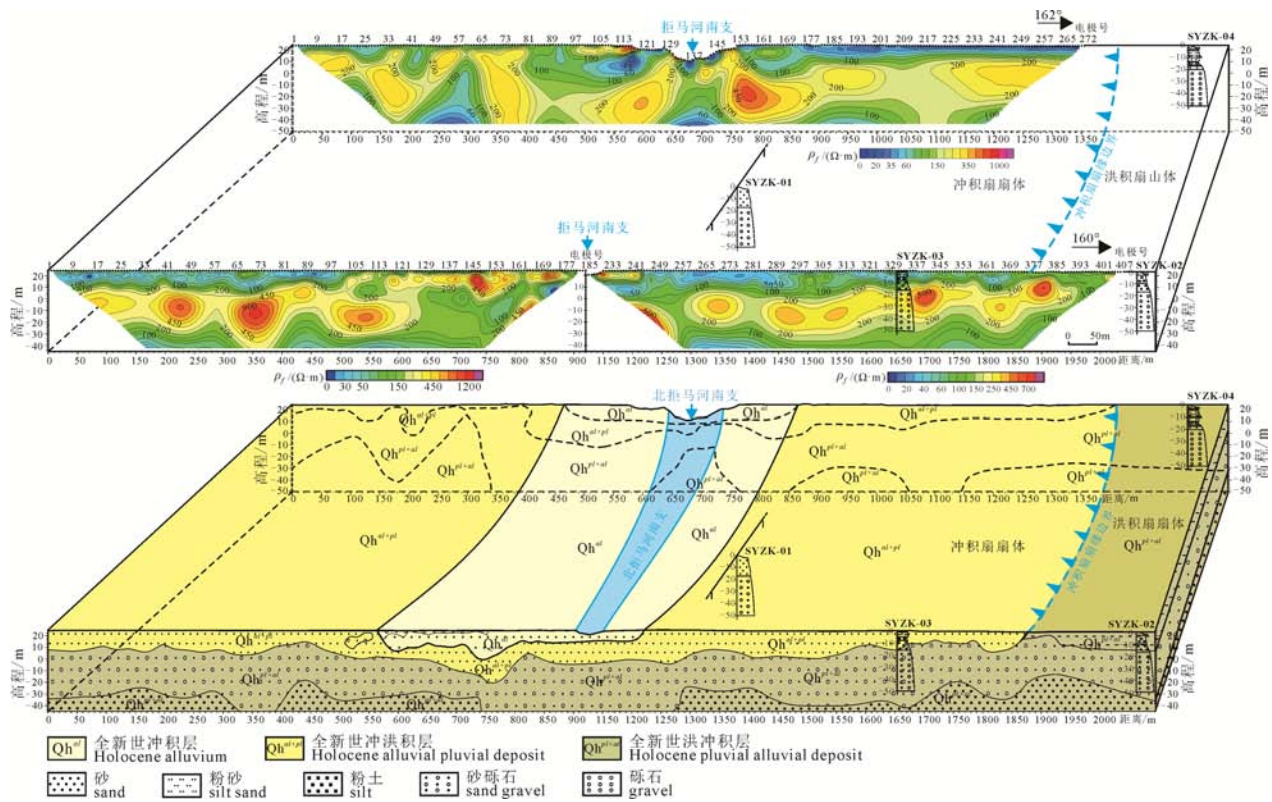


图 2 北拒马河冲积扇扇缘高密度电阻率法勘探剖面

Fig. 2 High density electrical sounding survey section across the margin in the North Juma River of alluvial fan

3.1 标准贯入试验液化判别结果

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,在地面以下深度 20 m 范围内,液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (1)$$

式中,  $N_{cr}$  为液化判定标准贯入锤击数临界值;  $N_0$  为液化判定标准贯入锤击数基准值, 当设计基本地震加速度为 0.10 g、0.15 g、0.20 g、0.30 g、0.40 g 时, 分别采用 7、10、12、16、19;  $d_s$  为饱和土标准贯入点深度, m;  $d_w$  为地下水位深度, m;  $\rho_c$  为黏粒含量百分率, 当小于 3 或为砂土时, 应采用 3;  $\beta$  为调整系数, 设计地震第一组取 0.80, 第二组取 0.95, 第三组取 1.05。

对存在液化砂土层、粉土层的地基, 应探明各液化土层的深度和厚度, 按公式(2)计算每个钻孔的液化指数, 并按表 2 综合划分地基的液化等级。

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^n \left[ 1 - \frac{N_i}{N_{cri}} \right] d_i \omega_i \quad (2)$$

式中:  $I_{IE}$  为液化指数;  $n$  为做判别深度范围内每个钻孔标准贯入试验点的总数;  $N_i$ 、 $N_{cri}$  分别为  $i$  点标准贯入锤击数的实测值和临界值, 当实测值大于临界值时应取临界值;  $d_i$  为  $i$  点所代表的土层厚度, m;  $\omega_i$  为  $i$  土层单位厚度的层位影响权函数值,  $m^{-1}$ 。

研究区的建筑工程抗震设计基本地震加速度值为 0.15 g, 抗震设防烈度为 7 度, 设计地震分组为第二组, 液化判别标准贯入锤击数基准值取 10, 调整系数  $\beta$  取 0.95。由工程地质钻探钻孔水文观测可知, 区域内地下水位埋藏很浅, 0.5~3.0 m, 各土层均在地下水位以下。对 20 m 深度范围内的可能液化砂土层进行标准贯入试验, 液化判别结果见表 3。

由标准贯入试验法液化判别结果可知, 北拒马河冲积扇存在一定的液化风险, 冲积扇南缘的砂土液化等级为轻微, 冲积扇东缘靠近涿州液化市区砂土液化等级为中等。

3.2 动三轴试验液化判别结果

利用动三轴试验进行土液化的室内判定, 主要是在设定振动频率下测得施加不同循环荷载所对应的破坏振次, 绘制整理出动应力比与破坏振次的关系曲线, 进而求得对应于不同振次的动应力比。然后, 采用抗液化剪应力法, 将求得的地震作用等效平均剪应力与饱和砂土的抗液化剪应力相比较判断砂土液化的可能性。

表 2 液化等级与液化指数的对应关系  
Table 2 Corresponding relationship between liquefaction grade and liquefaction index

| 液化等级          | 轻微                  | 中等                   | 严重            |
|---------------|---------------------|----------------------|---------------|
| 液化指数 $I_{IE}$ | $0 < I_{IE} \leq 6$ | $6 < I_{IE} \leq 18$ | $I_{IE} > 18$ |

3.2.1 试验设计

试验所用仪器为西安力创(LETRY)公司研发生产的 DST-20KN 型微机控制多功能动三轴试验机, 施加频率为 1 Hz 的等幅正弦波, 试验为固结不排水试验。所用土料为北拒马河冲积扇饱和粉土和砂土, 基本物理指标见表 4。

试样均为重塑试样, 直径 3.91 cm, 高 8.00 cm。试验按照《土工试验方法标准》GB/T50123—2019 进行, 采用一个固结应力比  $K_c=1.0$ , 一个相对密度

$D_r=35\%$ , 三个固结压力分别为  $\sigma_0=100\text{ kPa}$ , 200 kPa, 300 kPa, 采用抽气饱和法进行饱和。

3.2.2 液化判别标准

液化判别通常采用由 Seed 和 Idriss 等人提出的初始液化孔压判别标准, 即试样在循环荷载作用下, 孔隙水压力增长到所施加的围压大小时, 试样发生液化(Seed et al., 1983)。然而以往研究表明, 在动应力作用下, 孔隙水压力发展还未达到围压值时, 试样就已产生较大的应变, 发生液化破坏。因此工程

表 3 标准贯入试验法液化判别结果  
Table 3 Liquefaction assessment results by the standard penetration test

| 钻孔编号   | 岩性 | 标贯深度<br>$d_s/\text{m}$ | 临界锤击数 | 实测锤击数 | 相对密度 | 液化判别 | 液化指数  | 液化等级 |
|--------|----|------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|
| SYZK01 | 细砂 | 5.17                   | 14    | 13    | 稍密   | 液化   | 5.62  | 轻微   |
|        | 细砂 | 6.17                   | 15    | 8     | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 细砂 | 7.17                   | 16    | 15    | 稍密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 15.17                  | 21    | 19    | 中密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 16.17                  | 22    | 20    | 中密   | 液化   |       |      |
| SYZK03 | 细砂 | 12.15                  | 16    | 12    | 稍密   | 液化   | 5.64  | 轻微   |
|        | 中砂 | 13.15                  | 17    | 10    | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 14.15                  | 17    | 11    | 稍密   | 液化   |       |      |
|        | 细砂 | 15.15                  | 18    | 13    | 稍密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 16.15                  | 18    | 16    | 中密   | 液化   |       |      |
| SYZK04 | 粉砂 | 11.15                  | 20    | 13    | 稍密   | 液化   | 4.03  | 轻微   |
|        | 粉土 | 12.15                  | 20    | 15    | 稍密   | 液化   |       |      |
|        | 粉砂 | 15.15                  | 22    | 21    | 中密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 16.15                  | 22    | 19    | 中密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 17.15                  | 23    | 21    | 中密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 18.15                  | 24    | 23    | 中密   | 液化   |       |      |
| SYZK05 | 中砂 | 9.15                   | 18    | 17    | 中密   | 液化   | 2.08  | 轻微   |
|        | 中砂 | 10.15                  | 19    | 17    | 中密   | 液化   |       |      |
|        | 中砂 | 11.15                  | 20    | 16    | 中密   | 液化   |       |      |
| SYZK06 | 粉土 | 5.15                   | 9     | 8     | 松散   | 液化   | 5.86  | 轻微   |
|        | 粉土 | 6.15                   | 9     | 7     | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 粉土 | 7.15                   | 11    | 10    | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 粉土 | 8.15                   | 11    | 8     | 松散   | 液化   |       |      |
| SYZK07 | 细砂 | 6.15                   | 14    | 13    | 稍密   | 液化   | 15.69 | 中等   |
|        | 粉砂 | 8.15                   | 16    | 9     | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 粉砂 | 9.15                   | 17    | 10    | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 粉砂 | 10.15                  | 18    | 8     | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 细砂 | 11.15                  | 19    | 8     | 松散   | 液化   |       |      |
|        | 粉砂 | 12.15                  | 19    | 14    | 稍密   | 液化   |       |      |
| SYZK08 | 粉土 | 5.15                   | 12    | 8     | 松散   | 液化   | 6.98  | 中等   |
|        | 粉土 | 6.15                   | 13    | 8     | 松散   | 液化   |       |      |

表 4 砂土物理性质参数  
Table 4 Physical property parameters of sand

| 岩性 | 取土深度/m      | 比重   | 干密度/<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 含水率/<br>% | 最大干密度/<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 最小干密度/<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|----|-------------|------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 粉土 | 5.15~6.15   | 2.7  | 1.41                               | 26.3      | 1.66                                 | 1.13                                 |
| 粉砂 | 8.15~9.15   | 2.68 | 1.51                               | 24.7      | 1.74                                 | 1.24                                 |
| 细砂 | 11.15~12.15 | 2.68 | 1.58                               | 25.4      | 1.79                                 | 1.27                                 |
| 中砂 | 15.15~16.15 | 2.68 | 1.60                               | 26.1      | 1.79                                 | 1.26                                 |

上通常也采用应变标准进行液化判别,即试样在动应力作用下,轴向应变幅值达到特定值时发生液化。王建华和程国勇(2005)认为当应变判别标准取3%~6%之间时,重塑土的抗液化强度与原状土的抗液化强度相关性较高。因此,本文以轴向应变幅值达到5%作为砂土液化破坏标准。

### 3.2.3 动三轴试验过程

①土样准备:依照《土工试验规程》要求对试验土样进行烘干后降至室温,碾碎、过筛。按要求配制的含水率计算出所需喷洒的蒸馏水量后,均匀喷洒定量蒸馏水并搅拌均匀,密封静置一晚使土体内水分均匀,复测含水率误差不超过1%。

②分层压样法制样:根据试样尺寸及要求的干密度,计算后称取所需土样,用压样模分五层压实,每层土样压实后将表面刨毛,再进行下一层装样压实可确保各层土样接触良好,试样均匀。所制备试样的干密度之间误差不超过 $0.02 \text{ g/cm}^3$ 。

③抽真空饱和:试验采用抽气饱和方法对试样进行饱和,将制备好的试样装入饱和器内,放入真空抽气缸内进行抽气,当真空度接近一个大气压后继续抽气1个小时,然后注入清水,待饱和器完全被淹没水中后,解除真空,静置一昼夜后待用。经测定饱和度达95%以上。

④试样固结:施加固结围压并打开排水阀门进行试样固结,试验以每小时轴向变形增量小于 $0.01 \text{ mm}$ 或者孔隙水压力完全消散作为固结稳定

标准,固结完成后关闭排水阀门。

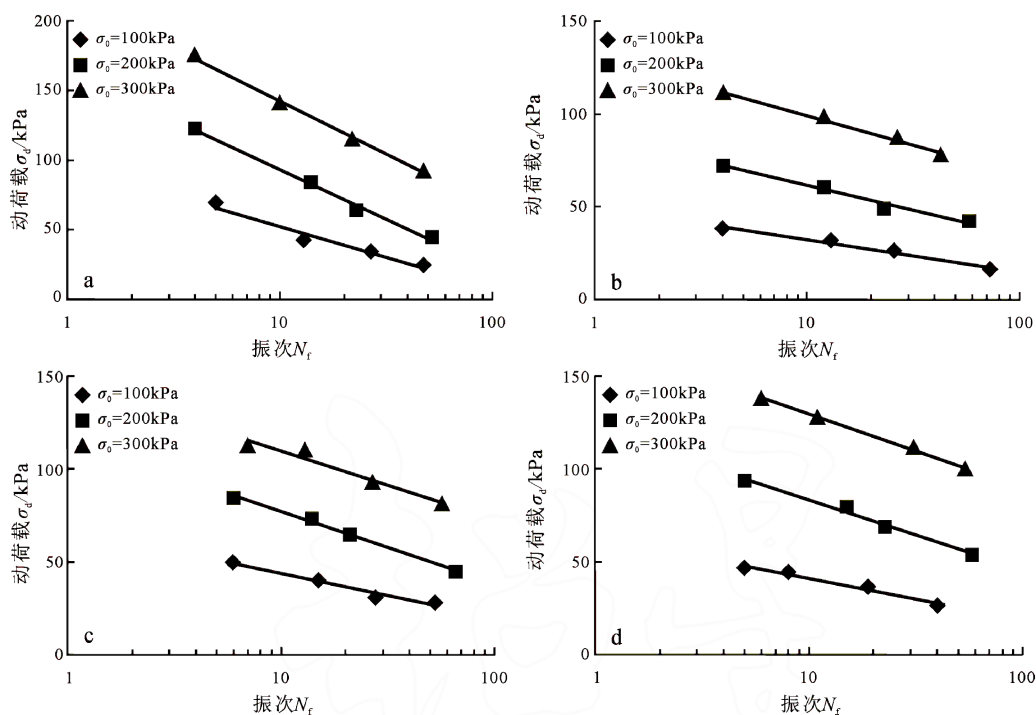
⑤施加循环荷载:在保持围压不变的基础上,对试样施加轴向循环荷载,当试样的轴向应变幅值达到5%时,试样发生液化破坏,动三轴仪自动停止施加循环荷载。

### 3.2.4 试验结果分析

相对密度为 $D_r=35\%$ ,固结应力比 $K_c=1.0$ 时,不同固结围压下试样液化时的动荷载与循环振次关系曲线见图3。

由图3可以看出,砂土发生液化时的振动次数随着动荷载增大而减小,原因是动荷载强度越大越容易造成土体的内部结构发生破坏。在同一动次数下,固结围压越大,砂土液化所需的动荷载越大,原因是固结围压越大,砂土内部颗粒间的接触越紧密,颗粒间的相对位置越难发生改变,即围压越大,砂土结构破坏所需的动荷载越大。

在固结压力 $\sigma_0=100 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ kPa}$ 、 $300 \text{ kPa}$ ,固结应力比 $K_c=1.0$ 时,对不同动荷载作用下饱和砂土的试验结果进行整理,得到砂土的动应力比 $\sigma_d/2\sigma_0$ 与振次 $\lg N_f$ 的关系曲线(图4)。可以看出饱和砂土的动应力比 $\sigma_d/2\sigma_0$ 与循环振次有良好的归一性关系,近似于线性相关。按要求的抗震设防烈度对应的等效循环次数求出相应的抗液化应力比。利用抗液化剪应力判别方法,求得天然埋藏状态下的抗液化剪应力和地震作用时等效平均剪应力。



a—粉土; b—粉砂; c—细砂; d—中砂。

a—silt; b—silty sand; c—fine sands; d—medium sand.

图3 试样动荷载与破坏振次关系曲线

Fig. 3 Relation curve of dynamic stress and destroy vibration number for samples

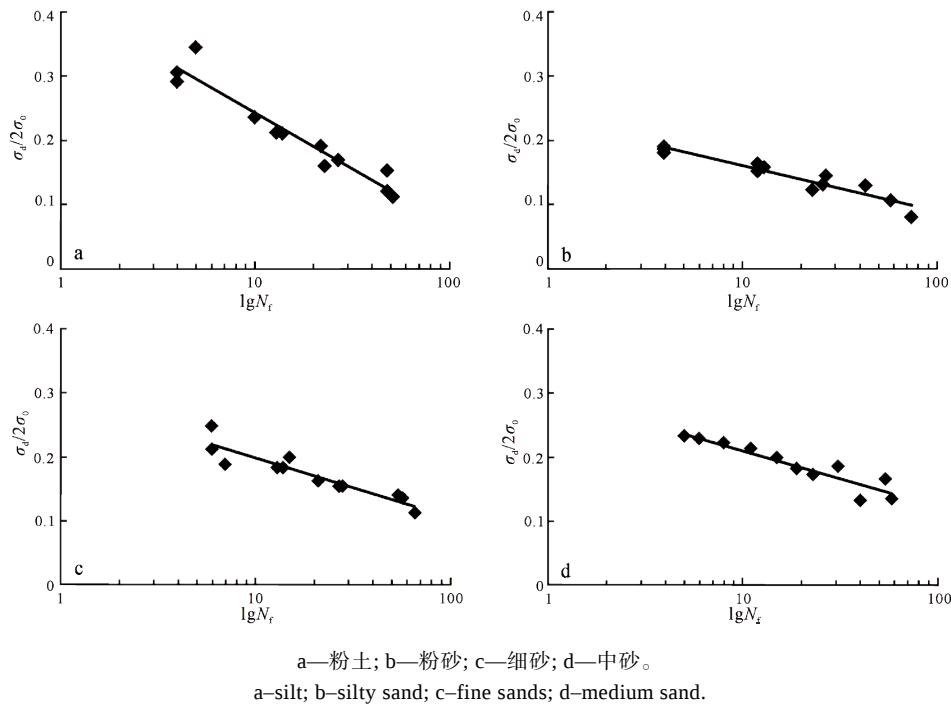


图4 试样液化应力比与破坏振次的关系曲线

Fig. 4 Relation curve of liquefaction stress ratio and destroy vibration number for samples

### 3.2.5 饱和砂土的抗液化剪应力计算

天然埋藏状态下砂层的抗液化剪应力  $\tau_d$  可由下式计算:

$$\tau_d = C_r \sigma'_v \frac{\sigma_d}{2\sigma_0} \quad (3)$$

式中:  $\tau_d$  为砂土的抗液化剪应力, kPa;  $C_r$  为考虑现场和室内条件差异的应力校正系数, 可取 0.66~0.61;  $\sigma'_v$  为地震前上覆土层自重有效压力, kPa。

### 3.2.6 计算地震作用下的等效平均剪应力

将随时间不规则变化的地震剪应力转化为有一定等效循环次数的均匀剪应力  $\tau_e$ , 计算公式为:

$$\tau_e = 0.65K \frac{\alpha_{\max}}{g} \gamma z \quad (4)$$

式中:  $z$  为砂土的深度, m;  $\gamma$  为深度  $z$  以上的上覆土层天然重度, kN/m<sup>3</sup>, 地下水位以下为饱和重度。  $\alpha_{\max}$  为地震动峰值加速度;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。  $K$  为应力折减系数, 当  $z \leq 9.15$  m 时,  $K=1.0-0.00765z$ ; 当  $9.15 \text{ m} < z \leq 23$  m 时,  $K=1.174-0.0267z$ 。

对比实际地震荷载引起的等效平均剪应力与试验得到的抗液化剪应力, 当  $\tau_e > \tau_d$  时, 判定为砂土液化, 反之不发生液化(李松林, 1990)。

丰成君等(2019)推测涞水—高碑店沿线潜在地震震级上限为 6.5 级, 孙丽娜等(2017)推测涿州及邻区潜在地震最大震级为 6.5 级, 潜在最大震级地震发生时会在北拒马河冲积扇及邻近地区产生 VI~VIII 度地震烈度。将随机变化的地震波简化为等效正弦波, 等效循环次数  $N_f$  为 8 次、12 次和 20 次时, 对

应的地震烈度分别为 VI、VII 和 VIII(蔡国军等, 2008; 谢定义, 2011)。由图 4 砂土的液化应力比与破坏振次  $\sigma_d/2\sigma_0$ - $\lg N_f$  关系曲线, 不同振次对应的动应力比, 根据公式(3)和公式(4)分别计算出砂土抗液化剪应力和地震等效剪应力, 利用地震作用剪应力与土层抗液化强度之比值  $F_L$  作为判别液化强度的参数(苏经宇等, 1994):

$$F_L = \frac{\tau_e}{\tau_d} \quad (5)$$

当  $F_L > 1$  时, 发生液化;  $F_L = 1$  时处于临界液化状态;  $F_L < 1$  时不发生液化。砂土液化判别结果见表 5。

表 5 动三轴试验液化判别结果  
Table 5 Liquefaction assessment results based on the dynamic triaxial test

| 等效振次(烈度) | 岩性 | $\sigma_d/2\sigma_0$ | $\tau_d/\text{kPa}$ | $\tau_e/\text{kPa}$ | $F_L$ | 液化可能性 |
|----------|----|----------------------|---------------------|---------------------|-------|-------|
| 8(VI)    | 粉土 | 0.26                 | 7.6                 | 3.2                 | 0.42  | 不液化   |
|          | 粉砂 | 0.17                 | 7.6                 | 4.8                 | 0.64  | 不液化   |
|          | 细砂 | 0.21                 | 13.3                | 6.1                 | 0.46  | 不液化   |
|          | 中砂 | 0.22                 | 19.5                | 7.2                 | 0.37  | 不液化   |
| 12(VII)  | 粉土 | 0.23                 | 6.7                 | 9.7                 | 1.45  | 液化    |
|          | 粉砂 | 0.15                 | 7.1                 | 14.5                | 2.06  | 液化    |
|          | 细砂 | 0.19                 | 12.2                | 18.2                | 1.49  | 液化    |
|          | 中砂 | 0.20                 | 18.1                | 21.7                | 1.20  | 液化    |
| 20(VIII) | 粉土 | 0.19                 | 5.6                 | 19.5                | 3.49  | 液化    |
|          | 粉砂 | 0.14                 | 6.3                 | 29.1                | 4.59  | 液化    |
|          | 细砂 | 0.17                 | 10.9                | 36.3                | 3.33  | 液化    |
|          | 中砂 | 0.18                 | 16.4                | 43.3                | 2.65  | 液化    |

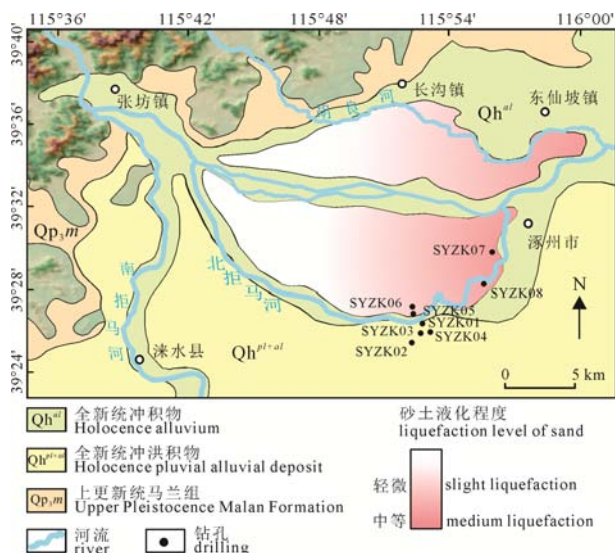


图5 北拒马河冲积扇砂土液化评估图  
Fig. 5 Evaluation of sand liquefaction  
in the North Juma River alluvial fan

根据动三轴试验结果结合抗液化剪应力法判别砂土液化,从表中可以看出地震等效振次和地震烈度增大,  $F_L$  随之增大,发生砂土液化的强度增大,因此,在研究区近场发生潜在 6.5 级地震时,冲积扇及邻近地区可能发生砂土液化。

### 3.3 北拒马河冲积扇砂土液化评估

通过整理研究区地质勘察资料,可知拒马河下游冲积扇处前缘沉积大量松散砂土,且研究区范围内地下水位较浅。由前人研究可知,在平原中河漫滩、古河道等饱水粉细砂地层在地震作用下易发生砂土液化(高振寰, 1984)。由于缺少北拒马河冲积扇北缘的相关地质资料,故根据冲积扇砂土分布特征,结合本文液化判别结果合理推测出北拒马河冲积扇砂土液化评估图(图 5)。建议在后续研究中可获取更多工程地质钻孔资料和峰值地面加速度数值,建立峰值地面加速度模型,根据模型和钻孔数值进一步计算临界标准贯入锤击数及液化指数,进行砂土液化精确分区。

## 4 结论与建议

本文基于野外地质调查,结合工程地质钻探和高密度电阻率法地球物理勘探,揭示了太行山东麓北拒马河冲积扇浅层地层结构,采用标准贯入原位试验和室内动三轴试验,定量评价了北拒马河冲积扇浅层砂土液化危险性,通过本文系统研究,初步得到以下结论和认识:

(1)北拒马河冲积扇由三组沉积旋回组成:第一组为分布于北拒马河南支古河道内的全新世河流相砂、砂砾石、砾石层;第二组为埋深 15 m 左右的晚更新世—全新世冲洪积相沉积层,上部为亚砂土,

下部为细砂、粉砂层;第三组为晚更新世洪积相沉积层,顶界埋深在 15 m 以下,上部为淤泥质亚黏土,中部为亚砂土、细粉砂,下部为卵砾石。

(2)北拒马河冲积扇松散饱和砂土存在一定的液化危险性,根据原位标准贯入试验结果判别冲积扇南缘的砂土液化等级为轻微,冲积扇东缘靠近涿州市区砂土液化等级为中等。

(3)北拒马河冲积扇砂土的液化风险随震级与烈度增大而增大,由动三轴试验结果判别北拒马河冲积扇砂在近场 6.5 级地震作用下产生 VII、VIII 地震烈度时会发生液化。

(4)采用原位标准贯入试验与室内动三轴试验相结合的方法判别砂土液化情况,可为场地地震砂土液化危险性评价和防灾减灾提供科学参考,未来随着原状砂土取样技术不断完善,采取室内动三轴试验判别砂土液化危险性将会取得更加可靠的结果。

**致谢:** 中国地质科学院地质力学研究所王惠卿博士、万佳威博士、范玉璐博士、中国地质大学(北京)商世杰硕士等参与野外调查、取样工作,西安理工大学岩土工程研究所提供动三轴试验条件,钻孔施工由河北省地质工程勘察院协助完成,谨表感谢。

### Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190317), and National Natural Science Foundation of China (No. 41772275).

### 参考文献:

- 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印. 2008. 基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 27(5): 1019-1027.
- 曹振中, 侯龙清, 袁晓铭, 孙锐, 王维铭, 陈龙伟. 2010. 汶川 8.0 级地震液化震害及特征[J]. 岩土力学, 31(11): 3549-3555.
- 崔红波. 2020. 拒马河流域径流特征分析[J]. 地下水, 42(4): 151-153.
- 陈龙伟, 袁晓铭, 孙锐. 2013. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害述评[J]. 世界地震工程, 29(3): 1-9.
- 陈同之. 2014. 2011 年新西兰地震液化特征及现有液化判别方法检验[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 丁志宏, 李伟, 赵勇刚. 2013. 近 20 年来拒马河流域土地利用变化及其驱动力研究[J]. 海河水利, (5): 27-29.
- 董林, 王兰民, 夏坤, 袁晓铭. 2015. 含细粒砂性土标贯液化判别方法改进研究[J]. 岩土工程学报, 37(12): 2320-2325.
- 方怡, 黄雅虹, 吕悦军, 张力方, 钱海涛. 2016. 液化规范判别与实际震害现象的差异对比——以唐山地震震害为例[J]. 震灾防御技术, 11(1): 76-85.
- 丰成君, 戚帮申, 王晓山, 张鹏, 孙明乾, 孟静, 谭成轩, 陈群策. 2019. 基于原地应力实测数据探讨华北典型强震区断

裂活动危险性及其对雄安新区的影响[J]. 地学前缘, 26(4): 170-190.

冯庆达. 2018. 拒马河流域新构造运动及其对地下水赋存规律的控制作用研究[D]. 青岛: 山东科技大学.

高振寰. 1984. 震害与地质条件[J]. 长春地质学院学报, (4): 98-106.

宫猛, 郭蕾, 张素欣, 王晓山, 董博. 2016. 河北地区地震时空演化特征分析[J]. 华北地震科学, 34(4): 11-15.

郝兵, 任志善, 李从昀. 2019. 几种地震液化判别方法的对比[J]. 岩土工程技术, 33(5): 278-283.

黄文熙. 1962. 砂基和砂坡的液化研究[J]. 水利水电技术, (1): 38-39.

黄雅虹, 吕悦军, 荣棉水, 方怡. 2012. 关于深层砂土液化判定方法的探讨——港珠澳大桥水下隧道工程场地为例[J]. 岩石力学与工程学报, 31(4): 856-864.

柯瀚, 陈云敏, 周燕国, 张民强. 2004. 动态三轴试验确定砂土抗液化强度[J]. 土木工程学报, 37(9): 48-54.

李绍柄. 1990. 河北强震发生的地震地质条件与构造模式[J]. 长春地质学院学报, 20(2): 177-184.

李松林. 1990. 动三轴试验的原理与方法[M]. 北京: 地质出版社: 63-72.

刘恢先. 1985. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社.

刘小丽, 刘红军, 贾永刚. 2007. 黄河三角洲饱和粉土层地震液化判别方法及液化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 26(S1): 2981-2987.

苏经宇, 周锡元, 樊水荣, 高小旺. 1994. 土层地震液化的危险性分析[J]. 建筑科学, (1): 37-42.

孙丽娜, 齐玉妍, 金学申. 2017. 河北地区活断层潜在地震最大震级及危险性研究[J]. 地震, 37(2): 147-156.

王建华, 程国勇. 2005. 饱和砂土的剪切波速与抗液化强度相关性研究[J]. 岩土工程学报, 27(4): 369-373.

王景禄. 2020. 某公路场地砂土液化判别及预测分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

吴忱, 赵明轩. 1993. 拒马河下游河道变迁与地貌演变[J]. 地理学与国土研究, 9(4): 42-47.

温超, 蔡玲玲, 黎勇, 孟立朋, 周月玲, 张合, 郭秋娜. 2020. 河北中强地震序列类型统计及空间分布特征[J]. 华北地震科学, 38(4): 8-14.

谢定义. 2011. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社: 207.

杨凡. 2017. 河北及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 地震地磁观测与研究, 38(2): 98-103.

于仕达, 张延军, 李云峰. 2021. 安庆市某地区液化场地判别研究[J]. 世界地质, 40(1): 169-174.

周燕国, 谭晓明, 梁甜, 黄博, 凌道盛, 陈云敏. 2017. 利用地震动强度指标评价场地液化的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 38(7): 1869-1877.

周健, 陈小亮, 杨永香, 贾敏才. 2011. 饱和层状砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 32(4): 967-972.

周永恒, 杨肖肖, 丰成君, 张鹏, 孟静, 谭成轩, 邓亚虹, 宋焱勋, 王继明. 2021. 北京平原区黄庄—高丽营断裂(房山—涞水段)第四纪活动特征的浅层综合探测证据[J]. 地球学报, 42(5): 677-689.

中国建筑科学研究院. 2010. 建筑抗震设计规范(GB50011-2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.

## References:

CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, DU Guang-yin. 2008. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(5): 1019-1027(in Chinese with English abstract).

CAO Zhen-zhong, HOU Long-qing, YUAN Xiao-ming, SUN Rui, WANG Wei-ming, CHEN Wei-long. 2010. Characteristics of liquefaction-induced damages during Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(11): 3549-3555(in Chinese with English abstract).

CETIN K O, YUOUD T L, SEED R B, BRAY J D, STEWART J P, DURGUNOGLU H T, LETTIS W, YILMAZ M T. 2004. Liquefaction-induced lateral spreading at Izmit bay during the Kocaeli (Izmit)-Turkey earthquake[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(12): 1300-1313.

CUI Hong-bo. 2020. Analysis of runoff characteristics of Juma River basin[J]. Ground Water, 42(4): 151-153(in Chinese with English abstract).

CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. 2013. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 29(3): 1-9(in Chinese with English abstract).

CHENG Tong-zhi. 2014. Liquefaction characteristics of New Zealand 2011 earthquake and test of the existing liquefaction evaluation methods[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(in Chinese with English abstract).

China Academy of Building Research. 2010. Code for seismic design of buildings(GB50011-2010)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press(in Chinese).

DING Zhi-hong, LI Wei, ZHAO Yong-gang. 2013. Study on land utilization change and driving influence in Juma River Basin in recent 20 years[J]. Haihe Water Resources, (5): 27-29(in Chinese).

DONG Lin, WANG Lan-min, XIA Kun, YUAN Xiao-ming. 2015. Improvement of SPT-based liquefaction discrimination methods for fines-containing sandy soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 37(12): 2320-2325(in Chinese with English abstract).

FANG Yi, HUANG Ya-hong, LV Yue-jun, ZHANG Li-fang, QIAN Hai-tao. 2016. The comparison of liquefaction between estimated by code and the earthquake damagetake—An example of the Tangshan Earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 11(1): 76-85(in Chinese with English abstract).

FENG Cheng-jun, QI Bang-shen, WANG Xiao-shan, ZHANG Peng, SUN Ming-qian, MENG Jing, TAN Cheng-xuan, Chen Qun-ce. 2019. Study of fault activity risk in typical strong seismic regions in northern China by in-situ stress measurements and the influence on the Xiong'an New Area[J]. Earth Science Frontiers, 26(4): 170-190(in Chinese with English abstract).

FENG Qing-da. 2018. Research on neotectonics of Juma River

- basin and its control effects on groundwater occurrence law[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-huan. 1984. Seismic disaster in relation with geological conditions[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, (4): 98-106(in Chinese with English abstract).
- GONG Meng, GUO Lei, ZHANG Su-xin, Wang Xiao-shan, Dong Bo. 2016. Study of seismic spatial-temporal evolution characteristic in Hebei and its adjacent area[J]. North China Earthquake Sciences, 34(4): 11-15(in Chinese with English abstract).
- HAO Bing, REN Zhi-shan, LIN Cong-yun. 2019. Comparison of several discrimination criteria for seismic soil liquefaction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 33(5): 278-283(in Chinese with English abstract).
- HUANG Wen-xi. 1962. Research on liquefaction of sand base and slope[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, (1): 38-39(in Chinese with English abstract).
- HUANG Ya-hong, LU Yue-jun, RONG Mian-shui, FANG Yi. 2012. Study of evaluation method of liquefaction for sandy soil in deep layer: taking undersea tunnel site of Hongkong-Zhuhai-Macao great bridge for example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(4): 856-864(in Chinese with English abstract).
- KE Han, CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, ZHANG Min-qiang. 2004. Evaluation of liquefaction resistance by means of dynamic triaxial tests with shear wave velocity measurement[J]. China Civil Engineering Journal, 37(9): 48-54(in Chinese with English abstract).
- KU C S, LEE D H, WU J H. 2004. Evaluation of soil liquefaction in the Chi-Chi, Taiwan earthquake using CPT[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24(9): 659-673.
- LI Shao-bing. 1990. Seimogenic geological condition and tectonic model strong earthquake risk in Hebei Province[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 20(2): 177-184(in Chinese with English abstract).
- LI Song-lin. 1990. The principle and method of dynamic triaxial-test[M]. Beijing: Geological Publishing House: 63-72(in Chinese).
- LIU Hui-xian. 1985. The great Tangshan Earthquake of 1976[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- LIU Xiao-li, LIU Hong-jun, JIA Yong-gang. 2007. Investigation on prediction methods and characteristics of earthquake-induced liquefaction of silty soil in the Yellow River delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(S1): 2981-2987(in Chinese with English abstract).
- SEED H B, IDRIS I M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 97(9): 1249-1273.
- SEED H B, IDRIS I M, ARANGO I. 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 109(3): 458-482.
- SU Jing-yu, ZHOU Xi-yuan, FAN Shui-rong, Gao Xiao-wang. 1994. Hazard analysis for seismic soil liquefaction[J]. Building Science, (1): 37-42(in Chinese with English abstract).
- SUN Li-na, QI Yu-yan, JIN Xue-shen. 2017. Seismic risk and maximum magnitudes of potential earthquakes for active faults in Hebei Province[J]. Earthquake, 37(2): 147-156(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-hua, CHENG Guo-yong. 2005. Study of correlation between the shear wave velocity and the liquefaction resistance of saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 27(4): 369-373(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-lu. 2020. Discrimination and prediction analysis of sand liquefaction in a highway site[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- WU Chen, ZHAO Ming-xuan. 1993. Juma downstream channel changeand geomorphic evolution[J]. Geography and Territorial Research, 9(4): 42-47(in Chinese).
- WEN Chao, CAI Ling-ling, LI Yong, MENG Li-peng, ZHOU Yue-ling, ZHANG He, GUO Qiu-na. 2020. Statistical and spatial distribution characteristics of moderate and strong earthquakes sequences in Hebei Province[J]. North China Earthquake Sciences, 38(4): 8-14(in Chinese with English abstract).
- XIE Ding-yi. 2011. Soil Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press: 207(in Chinese).
- YANG Fan. 2017. Study on seismic intensity attenuation relationship in Hebei and adjacent areas[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 38(2): 98-103(in Chinese with English abstract).
- YU Shi-da, ZHANG Yan-jun, LI Yun-feng. 2021. Identification of liquefaction site in an area of Anqing[J]. Global Geology, 40(1): 169-174(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yan-guo, TAN Xiao-ming, LIANG Tian, HUANG Bo, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min. 2017. Evaluation of soil liquefaction by ground motion intensity index by centrifuge model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 38(7): 1869-1877(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian, CHEN Xiao-liang, YANG Yong-xiang, JIA Min-cai. 2011. Study of liquefaction characteristics of saturated stratified sands by dynamic triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 32(4): 967-972(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yong-heng, YANG Xiao-xiao, FENG Cheng-jun, ZHANG Peng, MENG Jing, TAN Cheng-xuan, DENG Ya-hong, SONG Yan-xun, WANG Ji-ming. 2021. Evidence of shallow synthetic exploration of Quaternary activity characteristics along Fangshan—Laishui section of Huangzhuang—Gaoliying fault in Beijing Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(5): 677-689(in Chinese with English abstract).