

昆明盆地砂土液化灾害评价^{*}

虎雄林, 杨润海, 张建国, 郑定昌

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 系统收集整理昆明盆地 238 个钻孔资料, 根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001) 中砂土液化的判别方法, 对其中 81 个钻孔进行了液化判别和等级划分。结果显示, 昆明盆地地形平坦, 由北向南高程渐低, 自然坡降为 1‰~2‰, 地层由第四纪的冲积、湖积及湖沼相沉积之砂质粘土、淤泥、草煤及粉砂组成, 其液化判定结果与盆地地貌和沉积物的分布规律一致。在Ⅷ度以上地震烈度影响下, 滇池北岸到昆明机场的范围内存在砂土液化的可能。

关键词: 昆明盆地; 砂土液化; 灾害评价

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2009)增刊-0464-06

0 引言

砂土液化是地震地质灾害之一, 具有很大的危害性, 常伴有喷砂冒水、地面沉陷、诱发高速滑坡、地基失稳等现象。它的破坏效应是使建筑物的地基失效, 以致倾斜、开裂、倒塌, 给人类的生产和生活造成极大的损失。自 1964 年美国阿拉斯加地震和日本新潟地震以来, 砂土液化引起的建筑物破坏现象受到国内外众多地震学者的重视, 有关砂土液化判别方法的研究较多, 目前应用比较广泛的是美国伯克利地震工程研究中心(ERRC)的 Seed 和 Idriss 教授(1981)提出的液化判别“简化方法”。

近年来, 我国工程地震学者对砂土液化分析和判别方法的研究也渐趋成熟(谢定义, 1992; 石兆吉, 1993, 1997; 阮永芬, 侯克鹏, 2000)。Huang(1961)在国内最早提出了用动三轴仪研究砂土液化, 汪闻韶(1984)按照 Huang 提出的方法, 发表了动三轴试验结果, 指出了初始剪应力大小对液化的影响。根据 1966 年邢台地震和 1970 年通海地震的砂土液化经验, 《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11-74)第一次在抗震设计规范中给出了砂土液化判别式。1989 年, 根据海城地震、唐山地震及国外大地震的资料和室内液化试验的研究成果, 《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)第一次提出了液化初步判别的思想, 且修改后的液化判别既适用于砂土也适用于粉土。2001 年, 《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)对

地面下 15~20 m 的液化判别问题做出了具体的规定。

昆明盆地(24°35′~25°10′N, 102°33′~102°52′E)位于金沙江、南盘江和红河 3 条流域的分水岭地带, 地势北高南低, 北窄南宽。在地质构造单元上, 昆明盆地位于“康滇地轴”东南侧呈南北向展布的古生代拗陷中。盆地从中更新世形成的宽广大湖面及产生的河流沼泽相环境, 到现代滇池水面的广阔区域均成了晚更新世以来昆明盆地浅层粘土发育的良好环境条件。在此环境条件下, 昆明盆地浅层软土按沉积规律形成了相应的湖相沉积、沼泽沉积(沼泽相和泉沼相沉积)、河滩相沉积(牛轭湖相及河漫滩相沉积)等类型。根据中国第四代地震烈度区划图的结果, 昆明盆地抗震设防烈度为Ⅶ~Ⅷ度, 在此烈度下, 昆明盆地存在发生砂土液化的可能。

本文系统收集整理了昆明盆地 238 个钻孔资料(图 1), 其中建筑物和构筑物工程建设钻孔 157 个, 水文地质监测钻孔 23 个, 昆明市地震地质区划研究钻孔 58 个。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)中液化判别的方法, 对这些钻孔进行了初步液化判定, 得到 157 个钻孔不会发生液化, 其余的 81 个钻孔存在液化的可能, 并对这 81 个钻孔进行了液化程度划分。

1 原理

1.1 液化的初步判别原理

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)

* 收稿日期: 2009-11-30.

基金项目: 中国地震局“十五”重点项目——“昆明活断层探测与地震危险性评价”资助。

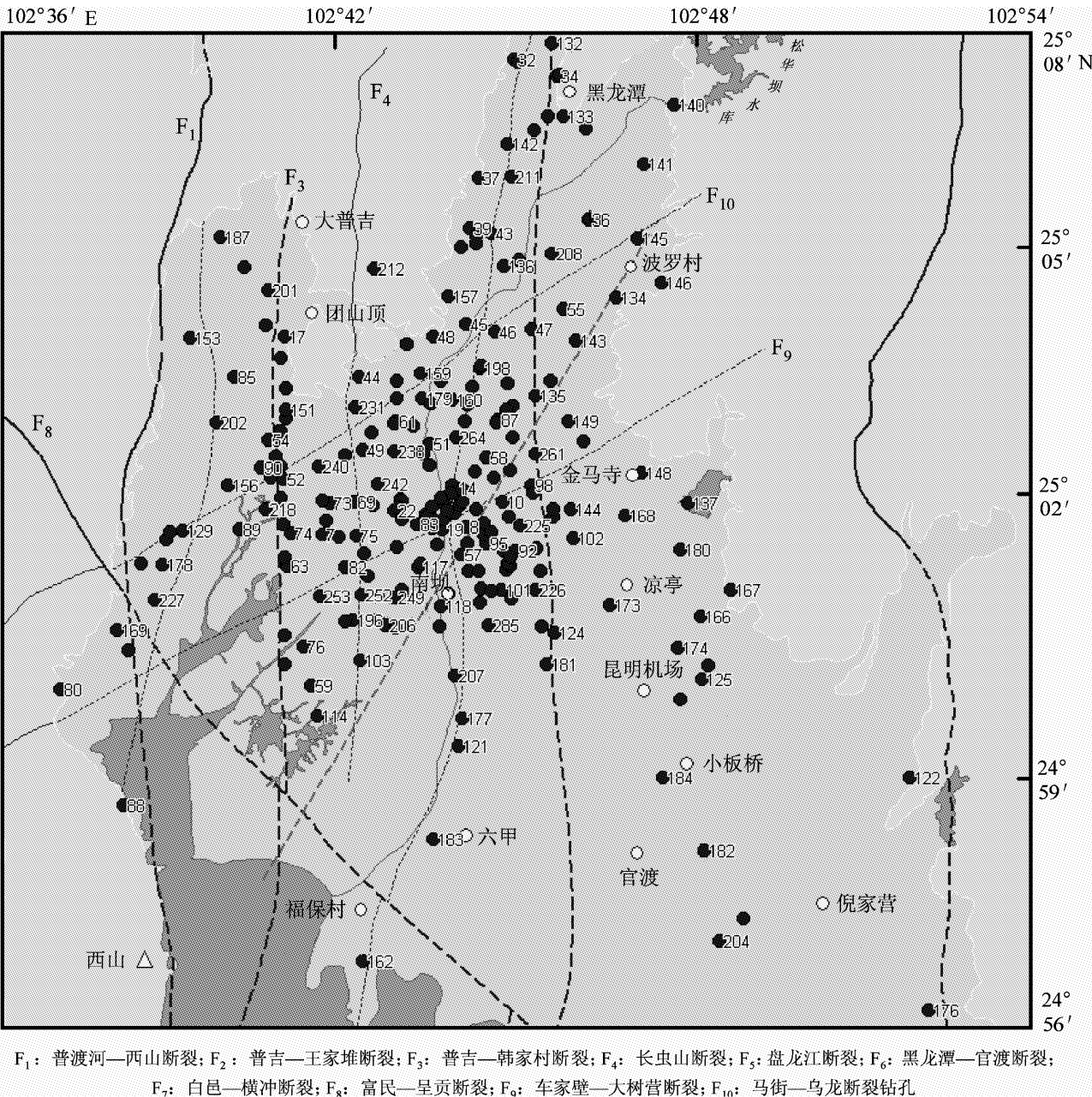


图 1 钻孔平面位置图
Fig. 1 Borehole location map

中液化判别的规定，饱和的砂土或粉土，符合下列条件之一时，可初步判别为不液化或可不考虑液化影响：

- (1) 地质年代为第四纪晚更新世（Q3）及其以前时，地震烈度为Ⅶ、Ⅷ度时可判别为不液化。
- (2) 粉土的粘粒（粒径小于 0.005 mm 的颗粒）含量百分率，Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度分别不小于 10%、13% 和 16% 时，可判别为不液化土。
- (3) 天然地基的建筑，当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合下列条件之一时，可不考

虑液化影响：

$$d_u > d_0 + d_b - 2,$$
$$d_w > d_0 + d_b - 3,$$
$$d_u + d_w > 1.5d_0 + 2d_b - 4.5.$$

(1)
(2)
(3)

式中： d_w 为地下水位深度，单位：m，宜按建筑使用期内年平均最高水位采用，也可按近期内年最高水位采用； d_u 为上覆盖非液化土层厚度，单位：m，计算时将淤泥和淤泥质土层扣除； d_b 为基础埋置深度，单位：m，不超过 2 m 时应采用 2 m；

d_0 为液化土特征深度, 单位: m, 可按表 1 采用。

表 1 液化土特征深度判断表			
Tab. 1 Characteristics depth table of liquefied soil			
饱和土类别	液化土特征深度/m		
	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

1.2 根据标准贯入击数进行的液化判断原理

当初步判定认为需进一步进行液化判别时, 采用标准贯入试验判别法判别地面下 15 m 深度范围内的液化; 当饱和土标准贯入锤击数 (未经杆长修正) 小于液化判别标准贯入锤击数临界值时, 判为液化土。在地面下 15 m 深度范围内, 液化判别标准贯入锤击数临界值按下式计算:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1 (d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (d_s \leq 15).$$

(4)

在地面下 15 ~ 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:

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1 d_s) \sqrt{3/\rho_c} \quad (15 \leq d_s \leq 20).$$

(5)

式中: N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值, 按表 2 采用; d_s 为饱和土标准贯入点深度, 单位: m; ρ_c 为粘粒含量百分率, 当小于 3 或为砂土时, 采用 3。

表 2 标准贯入锤击数基准值			
Tab. 2 Number of SPT hammer the reference value			
设计地震分组	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
第一组	6 (8)	10 (13)	16
第二、三组	8 (10)	12 (15)	18

1.3 液化等级判别原理

对存在液化土层的地基, 按式 6 计算每个钻孔的液化指数, 并按表 3 综合划分地基的液化等级:

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n (1 - N_i/N_{cri}) d_i W_i.$$

(6)

式中: I_{LE} 为液化指数; n 为在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数; N_i 、 N_{cri} 指分别为 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的数值; d_i 为 i 点所代表的土层厚度 (m), 可采用与该标准贯入试验点相邻的上、下两标准贯入试验点深度差的一半, 但上界不小于地下水位深度, 下界不大于液化深度; W_i 为 i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值 (单位为 m^{-1})。若判别深度为 15 m, 当该层中点深度不大于 5 m 时应采用 10, 等于 15 m 时应采用零值, 5 ~ 15 m 时应按线性内插法取值; 若判别深度为 20 m, 当该层中点深度不大于 5 m 时应采用 10, 等于 20 m 时应采用零值, 5 ~ 20 m 时应按线性内插法取值。

表 3 液化等级判断表			
Tab. 3 Liquid level determination table			
液化等级	轻微	中等	严重
判别深度为 15 m 时的液化指数	(0,5)	(5,15)	(15,∞)
判别深度为 20 m 时的液化指数	(0,6)	(6,18)	(18,∞)

2 昆明盆地钻孔液化砂土层的物理特性

通过收集、整理和分析昆明盆地内钻孔资料, 可能发生液化砂土层的物理参数如表 4 所示, 各种物理参数在深度和平面分布上相差较大。

(1) 比重: 如图 3 所示, 砂土层的比重在深度方向上相差不大, 但可明显分为两组, 一组比重平均为 2.6 左右, 主要集中在团山顶附近, 自南向北愈靠近滇池土层比重愈小; 另一组比重平均为 2.0 左右, 可能与滇池附近沉积物含泥炭值成分多有关。

(2) 粒度成份: 各孔的粒度成份如表 5 所示, 主要粒度成份为细砂粒、粉粒和粘粒。细砂粒含量主要集中在 18% ~ 22% 和 62% ~ 77% 两个范围。

(3) 含水量: 含水量一般平均为 25% ~ 35%, 在垂直方向上也相差不大。

(4) 塑性指数: 塑性指数的值较为分散, 但在团山顶附近, 呈自南向北愈靠近滇池愈小的规律。

3 结果

根据 1.2 中的方法得到的液化层的标准贯入锤击数后, 对昆明盆地可能存在液化的区域进行了判断, 对可能的液化程度进行了等级划分 (表 6), 并将结果表示在图 2 中。

表 4 可能液化砂土层物理参数
Tab. 4 Physical parameters of liquefied sand layer

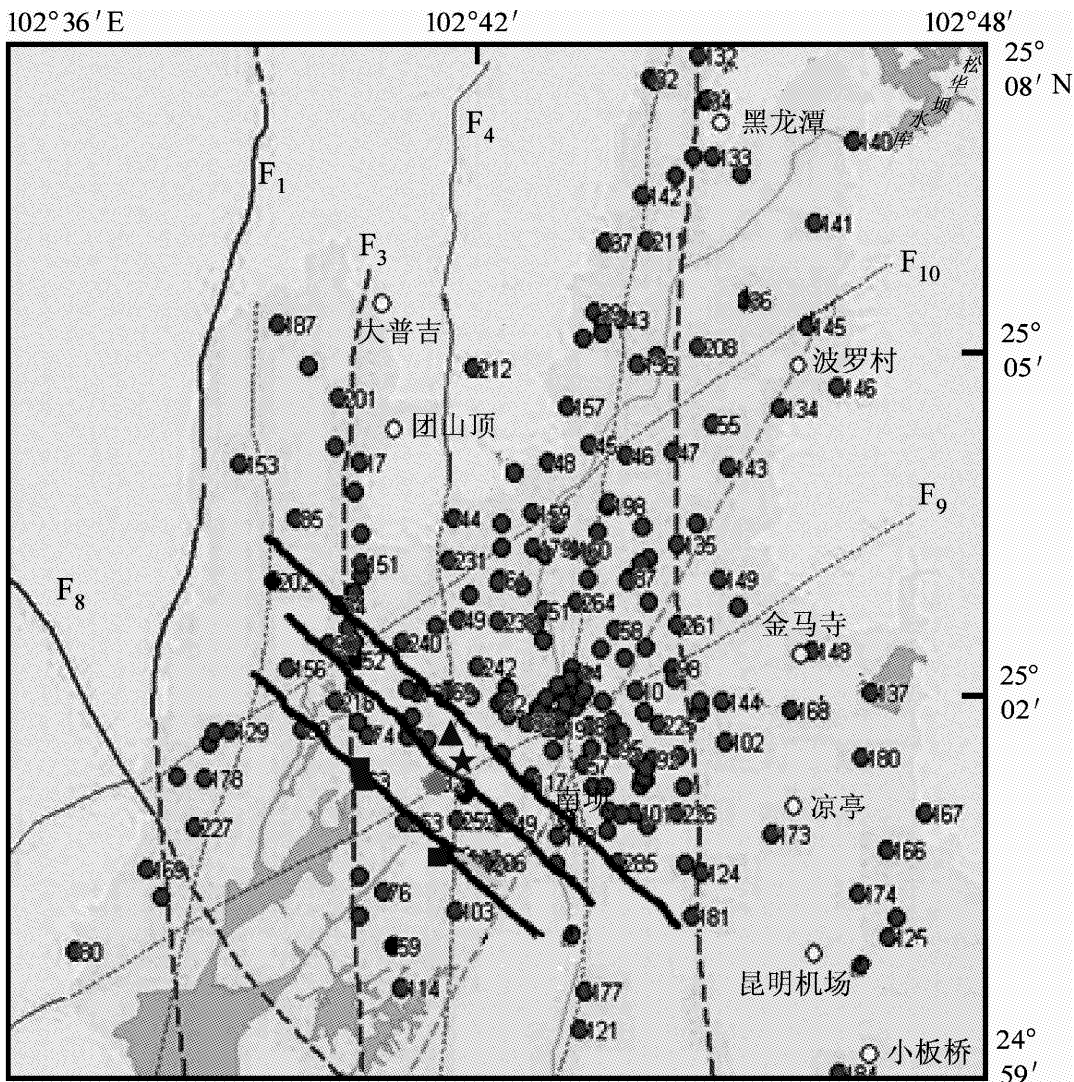
孔号	土层深度/m	比重	含水量/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	粘聚力/Kpa	内摩擦角	压缩系数
52	9. 1	2. 74	29	0. 445	37. 3	22	15. 3	23. 6	0. 2	
	18. 6	2. 73	24. 3	0. 409	28	19. 2	8. 8	30. 5	13	
53	13. 2	1. 94	27	0. 73	17	9	8	15	18. 5	
54	12. 9	1. 94	30	0. 82	36	21	15	53	6	0. 42
59	13	1. 76	45. 2	1. 23	39. 7	21. 5	18. 2	5. 5	22. 8	
	16. 8	1. 89	28. 7	0. 84	24. 7	19	5. 7	18. 3	20. 3	0. 154
	19. 4	1. 83	27. 2	0. 93	26. 6	20. 71	5. 89	17. 6	30. 8	0. 39
78	5. 8	1. 92	27	0. 79	33	22	11	37	37. 3	0. 53
	8. 15	1. 97	27	0. 73	39	24	15	60	8. 3	0. 22
	14. 3	1. 93	29	0. 78	35	21	14			0. 46
82	15. 6	1. 93	29	0. 773	25	19	6	7. 4	14. 4	0. 17
90	10. 6	2. 67	25	0. 686	26	19	7	52. 4	11. 8	0. 23
202	10. 7	2. 63	27	0. 79	29	21	8	87. 9	18. 2	0. 22
	20	2. 71	18	0. 58	23	17	6	81. 2	11. 6	0. 22
203	5. 9	2. 61	25	0. 9	36	21	17	84. 6	4. 8	0. 29
	10. 2	2. 61	34	0. 94	41	24	14			0. 49
156	13. 8		30	0. 96			14	21. 8	11. 5	0. 43
75	6. 8	1. 84	33	0. 92	34	23	11	26	27. 7	0. 51
75	8. 5	1. 91	28	0. 79	26	22	4	10	30. 5	0. 25
75	10. 3	1. 82	36	1. 02	31	22	9	18	7	0. 66

表 5 各孔粒度成分
Tab. 5 Composition of pore size

孔号	土层深度	细砂粒（%）	粉粒（%）	粘粒（%）
52	9. 1	66	13	13
	18. 6	70	15	13
59	13	22. 8	60. 6	16. 6
	16. 8	62. 3	25. 5	12. 2
202	7. 6	46	36	18
	10. 7	39	33	28
	20	43	20	28
74	8. 3	68. 9	10. 5	16. 5
82	15. 6	18	15	11
53	13. 2	18	69	13
75	6. 8	71	10. 6	8. 5
	8. 5	77	22	0
	10. 3	66	34	0

表 6 液化判断结果表
Tab. 6 The outcome of liquefied judge

孔号	标准贯入实测值（N）/次	液化临界值（Ncr）/次	液化判别结果	液化指数	液化等级
52（东风西路）	14. 0	10. 6	不液化		
	15. 0	26. 6	液化	2. 9	轻微
53（云南艺术学院）	5. 0	13. 4	液化	2. 0	轻微
54（五华区）	8. 5	10. 7	不液化		
59（滇池路）	3. 9	11. 6	不液化		
	5. 4	26. 3	液化	3. 7	轻微
74（昆明西郊）	8. 0	1. 9	不液化		
82（严家地）	7. 0	16. 4	液化	8. 6	中度
90（高薪开发区）	9. 1	10. 6	不液化		
203（西山区人民法院）	4. 8	11. 9	液化	30. 7	重
	5. 8	15. 8	液化		
	7. 0	15. 1	液化		
	5. 0	17. 0	液化		
75（西坝新闻路）	6. 0	17. 0	液化	28. 5	重
	5. 0	20. 0	液化		
	10. 0	21. 0	液化		
	12. 0	23. 0	液化		



▲: 重度液化区; ★: 中度液化区; ■: 轻微液化区;

F₁: 普渡河—西山断裂; F₂: 普吉—王家堆断裂; F₃: 普吉—韩家村断; F₄: 长虫山断裂; F₅: 盘龙江断裂; F₆: 黑龙潭—官渡断裂;
F₇: 白邑—横冲断裂; F₈: 富民—呈贡断裂; F₉: 车家壁—大树营断裂; F₁₀: 马街—乌龙断裂钻孔

图 2 液化等级平面分布图

Fig. 2 Distribution of liquefied level plane

4 结论与讨论

综合以上液化判别结果, 昆明盆地砂土液化灾害评价结论如下:

(1) 从研究区地基土的特性分析, 在Ⅷ度以上地震烈度影响下, 普渡河—西山断裂 F₁ 在滇池北岸到昆明机场区域内有可能发生砂土液化的可能。

(2) 昆明盆地地形平坦, 由北向南高程渐低, 自然坡降为 1‰~2‰, 其地层由第四纪的冲积、湖积及湖沼相沉积之砂质粘土、淤泥、草煤及粉

砂组成。在低洼之处多见积水塘及沼泽地, 广泛发育软土, 地下水位高; 砂土液化判定结果分布与地貌和沉积物的分布规律是一致的。

(3) 从判别方法分析, 由于标准贯入锤击数受地层条件、设备和操作习惯等因素的影响, 再加上土工试验等方面的误差, 试验结果不稳定, 因此以标贯试验为基础的液化判别存在不稳定的可能。由于钻孔资料的空间分布不均匀性, 由此引起的对昆明盆地砂土液化等级的划分存在不确定性。

(4) 砂土液化的影响因素很多, 所以在进行砂土层液化评判时不能单纯从单方面或单一统

计公式来简单评判，应综合考虑各影响因素，采用多因子判别分析法加以判别，才能对砂土液化与否做出较为客观的判断。

参考文献：

阮永芬, 侯克鹏. 2000. 粉土地震液化判别方法研究的现状和实际存在的问题[J]. 昆明理工大学学报, 25(1): 64 – 67.

石兆吉. 1993. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. 岩土工程学报, (1): 74 – 80.

石兆吉. 1997. 砂土液化判别和评价综合方法研究[J]. 地震工程与工程振动, (1): 82 – 88.

汪闻韶. 1984. 关于饱和砂土液化机理和判别方法的某些探讨[M]. 北京: 水利电力出版社.

谢定义. 1992. 饱和砂土液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 14(3): 45 – 50.

GB50011 – 2001, 建筑抗震设计规范[S].

GBJ11 – 1989, 建筑抗震设计规范[S].

TJ11 – 74, 工业与民用建筑抗震设计规范[S].

Huang W X. 1961. Investigation on stability of saturated sand foundations and slopes against Liquefaction[J]. In: Proceedings of the fifth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2: 629 ~ 631.

Seed H B, Idriss. 1981. Evaluation of liquefaction potential of sand deposits based on observation of performance in previous earthquake[J]. insitu testing to evaluate liquefaction susceptibility susceptibility, session, ASCE National convention, (24): 206 – 210.

Hazard Assessment of Sand Liquefaction in Kunming Basin

HU Xiong-lin, YANG Run-hai, ZHANG Jian-guo, ZHENG Ding-chang
(Earthquake Administration of Yunnan Province; Kunming 650224, Yunnan, China);

Abstract

We systematically collect the data of 238 boreholes in Kunming Basin. We also discriminate standard of sand liquefaction and divide the degree of sand liquefaction on the Kunming Basin, based on the Sand liquefaction method of "code for seismic design of buildings (GB50011 – 2001)". The results show that, the flat terrain of Kunming Basin gradually from north to south elevation is low and its the natural gradient is 1 ‰ – 2 ‰. The formation of Kunming Basin make up of limnology clay, mud, grass coal and silt composition of the Quaternary alluvial and lacustrine facies of the sandy, its liquefied results is consistent with the law of the distribution of landforms and sediments. Within the northern bank of Dianchi Lake to Kunming Airport, there are potential possibility of soil liquefaction on degrees or higher VIII seismic intensity.

Key words: Kunming basin, sand liquefaction, hazard assessment