

DOI: 10.11779/CJGE201504020

山东安丘地区软土震陷及地震产生的土层构造新启示

田洪水^{1*}, 王华林^{2*}, 祝介旺¹, 杨传成², 吕明英¹, 张慎河¹

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省地震工程研究中心, 山东 济南 250014)

摘 要: 通过地震调查、土工试验和 ^{14}C 测年, 从沂沭断裂地震带安丘地区的全新世中—晚期湖沼相软土中, 识别出了软土震陷灾害现象和地震产生的软土沉陷向斜褶曲、小尺度同震断层、狭缩—膨胀构造和震裂缝等共生土层变形构造, 其中, 软土沉陷向斜是直接反应震陷灾害的纵向土层变形。小尺度同震断层是地震产生的小断层, 发育在沉陷向斜之下, 其垂向延长 0.5~1.8 m。沉陷向斜随着同震断层的产生而初现; 又紧随断层向深部延伸而向下发展。地震振动使饱和软土发生触变, 土质点从沉陷向斜的转折端向两翼发生流动, 在此过程中, 附加地震应力不断作用, 结果形成了窄而深的沉陷向斜。软土震陷最大深度为 1.08 m, 平均震陷深度为 0.68 m。推断当时的地震烈度达到 VIII 度、震级超过 M6。测得淤泥质土的 ^{14}C 年龄为 $3901 \pm 33 \text{ a B.P.}$, 该地震事件约发生公元前 19 世纪。同震断层是形成震陷的重要诱导因素, 这为认识软土震陷的形成机理提供了新资料; 也为防治或减轻软土震陷的危害提出了新启示。因此, 应重视软土下伏土层可能产生同震断层的隐患。

关键词: 软土; 震陷; 触变变形; 同震断层; 全新世; 沂沭地震带

中图分类号: TU435

文件标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0734-07

作者简介: 田洪水 (1956-), 男, 教授, 从事土力学与地基础、工程地质学教学与研究工作, 近十年来致力于地震事件研究。E-mail: tianhongshui@126.com。

New revelation from seismic subsidence of soft soils and earthquake-induced soil-layer deformation structures in Anqiu area, Shandong Province

TIAN Hong-shui¹, WANG Hua-lin², ZHU Jie-wang¹, YANG Chuan-cheng², LÜ Ming-ying¹, ZHANG Shen-he¹

(1. School of Civil Engineering of Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Earthquake Engineering Research Center of

Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: By means of seism investigation, soil test and ^{14}C dating, disaster phenomena about seismic subsidence of soft soils and some earthquake-induced association structures of soil layers are identified in soft soils of limnetic facies during the Mid-late Holocene in the Anqiu area of Yishu fault-seismic zone, including subsidence synform folds of soft soils, small scale co-seismic faults, pinch-and-swell structures and seismic fissures, in which subsidence synforms are vertical deformations that directly reflect the seismic subsidence disaster. Small scale co-seismic faults are some little faults caused by earthquakes, with vertical lengths of 0.5~1.8 m under the subsidence synform. A subsidence synform comes at first along with producing of co-seismic faults and develops downward trending on the heels of these faults extending to the even deeper place. The earthquake vibration causes the thixotropic deformation of saturated soft soils, and soil particles flow from the hinge zone to two wings of the synform, in which the seismic additional stresses act continually, resulting in formation of the narrow and deep-seated subsidence synform. The deepest seismic subsidence of soft soils is 1.08 m, and the average depth is 0.68 m. It is estimated that the seismic intensity is VIII degree, and the earthquake magnitude is over M6.0. The formation age of the mucky soils for $3901 \pm 33 \text{ a B.P.}$ is obtained by the ^{14}C dating, so the seismic event occurred in about 19th Century B.C.. The co-seismic fault is an important factor for forming the seismic subsidence of soft soils, which provides the new information for understanding the formation mechanism of the seismic subsidence of soft soils and the new revelation for preventing or mitigating the harm of the seismic subsidence. Therefore, attention should be paid to possible hidden troubles of co-seismic faults to be produced in the underlying layer of soft soils.

Key words: soft soil; seismic subsidence; thixotropic deformation; co-seismic fault; Holocene; Yishu fault-seismic zone

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272066); 国家科技支撑计划项目 (2012BAK19B04-02)

收稿日期: 2014-08-04

***通讯作者**

0 引 言

软土是湖泊、沼泽和三角洲等静水—缓慢流水沉积环境形成的黏性土, 它们常含有机质, 呈暗灰—黑灰色, 孔隙比大, 含水率高, 具有压缩性高及承载力低的工程性质; 据孔隙比 (e), 软土被分为淤泥质土 ($e > 1-1.5$) 和淤泥 ($e > 1.5$); 广义软土也包括孔隙比大、承载力低的各种软弱土^[1-2]。软土震陷有两方面的含义: 一是在强地震作用下, 软土分布区的地面及软土层之上的工程基础产生的沉陷现象, 是常见的灾害之一^[1-5]; 二是地震触动软土及胶体沉积物形成的触变沉陷构造, 包括地震沉陷褶曲、触变碗和触变楔等, 属地震引发软的非液化沉积物的变形构造^[6-8]。沂沭断裂地震带是一条长期活动的地震带, 在该断裂地震带内及其两侧附近地区, 发育丰富的地震事件记录^[9-14]。作者近期从该断裂地震带内安丘地区 (图 1) 的全新统湖沼相沉积层中, 鉴别出了软土震陷灾害现象和地震产生的软土触变沉陷向斜、小尺度同震断层、狭所

一膨胀构造和震裂缝等土层变形构造。通过 ^{14}C 年龄测定, 认为由这些地震记录的地震事件发生在公元前 19 世纪。

1 地质背景

安丘地区位于沂沭断裂地震带的中—北部, 该地区的中—南部发育一箕状盆地, 它是由该断裂地震带中间两条 NNE 走向的主干断层 (F_1 和 F_2) 与 NE 走向断层 (F_3), 以及南侧汞丹山凸起所挟持的中—新生代断陷盆地 (图 1)。盆地边界断层于新生代一直发生强烈构造和地震活动^[10-11, 13-14]。在该盆地中—北部汶河河畔宽 5~10 km 的范围内, 其全新世地层自下而上为黑土湖组 (Q_4H) 和临沂组 (Q_4L) (图 1)。黑土湖组形成于几千年前的湖泊与沼泽沉积环境^[15], 自下而上由厚度 0.3~1.0 m 的黑灰色粉砂质黏土 (几千年前的淤泥质软土) 和厚度 0.2~0.8 m 黄灰色—黄色砂质黏土组成, 多被开垦为耕地; 仅在东纪庄东北侧和关王庙村附近均可见露头。临沂组是全新世最年轻的地

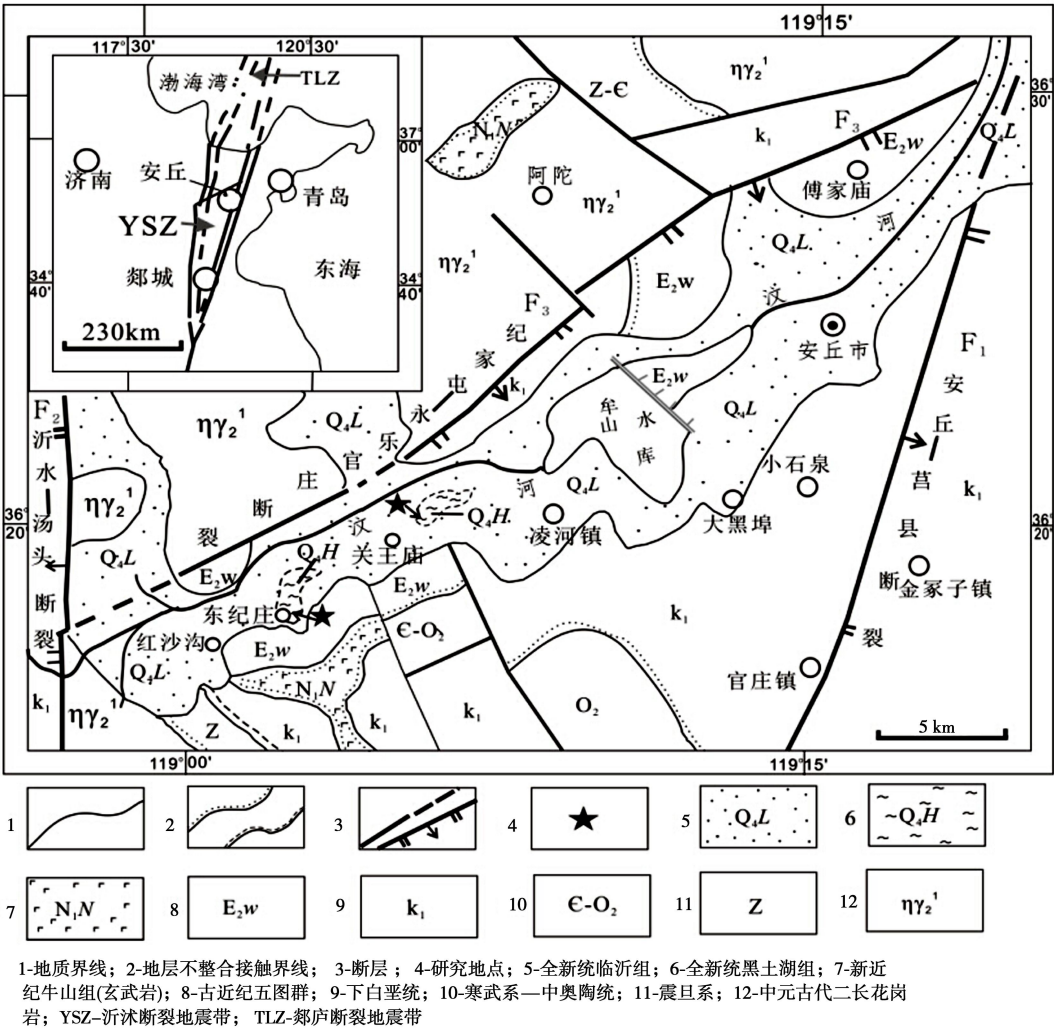


图 1 山东安丘地区地质构造简图

Fig. 1 Geological and tectonic sketch of Anqiu area, Shandong Province

层,由冲积相砂土与砂质砾石组成,厚度2~8 m,大多覆于晚更新世大站组(Q₃D)硬塑粉质黏土之上,局部覆于黑土湖组之上。该地区晚更新世大站组由粉质黏土(次生黄土)组成,厚3~7 m,隐伏于全新统之下,与全新统呈不整合接触。由于大站组粉质黏土曾是湖底之下的隔水层,其顶部(厚达0.8~1.2 m)遭受湖水的浸泡和湖沼动物的掘潜造穴,致使这部分湖底粉质黏土在当时呈软塑状态。该盆地边部至外围分布着中元古代至古近纪的基岩地层和岩浆岩。

2 软土震陷及地震产生的土层变形构造

软土震陷及地震产生的土层变形构造发育在全新世黑土湖组软土中及大站组的顶部,并在东纪庄东侧和关王庙村附近出露。软土震陷作为几千年前的震害,在当时的湖沼沉积土表面形成许多陷坑,由于震后地壳上升而遭受剥蚀和耕作改造,所以,在现在的地面上,那些陷坑见不到了。然而,在人工开挖和流水侵蚀形成的陡坎剖面上,依然清晰地看到震陷形成的沉陷向斜、小尺度同震断层及其它土层变形构造(图2,图3,图2彩图见后插3)。

2.1 软土沉陷向斜与小尺度同震断层

(1) 特征描述

在东纪庄东侧的陡坎剖面,软土震陷和小尺度断层展现得最清楚(图2(a))。该陡坎剖面长37 m,高2.4~4.3 m。各土层的总体产状为10°∠2~3°,南薄北厚,反映当时的湖沼中心在东纪庄的NNE方向。该陡坎剖面自下而上分4层土(图2(b))。其中,①-②层属大站组(Q₃D);③-④层属黑土湖组(Q₄H),第③层为发生生物化作用的软土,第④层为尚未发生生物化作用的沼泽相软黏性土。4个窄而深的沉陷向斜(图2(a)A,B,C和D)间隔6~8 m,上部宽度为1.5~2.0 m,软土沉陷深度为0.45~1.08 m,最大沉陷深度见图2(d),平均沉陷深度0.68 m。

小尺度同震断层,发育在沉陷向斜的转折端之下,断面倾角为55°~70°,断层线纵向长0.5~1.8 m,较大者向下切过湖底含动物潜穴的粉质黏土,并延入无动物潜穴的粉质黏土中。断面总体不平整,上部微张,其中下部存有局部较平直的剪切—滑动面,剪切—滑动面上可见下滑痕迹。因此,断层面具先受拉张、后发生剪切—滑动的力学特征。它们发育在上更新统大站组上部至全新统黑土湖组的下部,限定在特定地震事件层内,属层内断层,但尺度小,又称为小尺度准同沉积断层。

(2) 软土试验和¹⁴C年龄测定

a) 软土试验

3月份,剥去土层表面松散部分,用环刀分别从黑灰色软土层的下部、中部和上部取样(图2(c)圆圈处),测得3项基本物理性质指标平均值为:天然密度 $\rho=1.66\text{ g/cm}^3$;土粒比重 $d_s=2.48$;含水率 $w=11\%$ 。计算得到天然孔隙比 $e=0.66$,表明自其形成以来,在自重应力作用下,已发生一定程度固结。测得土粒成分及质量含量为:黏粒(以高岭石和伊利石为主)52.5%;细砂19.8%;粉粒16.3%,有机质11.4%。

将土样粉碎,置于水中浸泡7 d,再造原湖沼相饱和和软土。测得其的饱和含水率为64.1%,算得孔隙比 $e=1.28$ 。采用光电式液塑限仪和联合测定法,测得重塑软土的液限为 $w_L=47.6\%$,塑限为 $w_P=23.2\%$,塑性指数 $I_P=14.4$,液性指数 $I_L=2.8$ 。由于 $I_P>10$, $I_L>1.0$,呈灰黑色,含较高的有机质,含水率超过液限值,故其原始沉积土为湖沼相淤泥质土(含有机质的流塑软土)。

b) ¹⁴C年龄测定

2013年3月,从黑灰色软土层的顶部(图2(c))取土样约500 g,在中国地震局国家重点实验室测定¹⁴C年龄,获得¹⁴C年龄结果为 $3901\pm33\text{ a B.P.}$ 。¹⁴C年龄平均值(3901a B.P.)代表黑灰色软土层顶部的形成年龄。由于图2中黑灰色软土之上的软砂质黏土构成了沉(震)陷向斜的核部,所以发震时间应稍晚于3901 a B.P.,这些软土震陷及其共生土层构造应是公元前19世纪的地震记录。

(3) 解释

由于饱和软土、软黏土及软胶体的沉积颗粒细小(粒径 $<0.005\text{ mm}$),颗粒表面带负电荷,颗粒间具有强静电引力,致使它们具有高黏聚力;加之其细小孔隙中的极性水分子被强烈吸附,所以,这类饱和土受强震作用,不产生超孔隙水压力,故不发生液化^[1-2]。然而,受强震或外力扰动,它们会发生触变,其结构会被破坏,黏度和强度降低,流变性增强;当强震外力停止后,其黏稠度和强度会逐渐地有限恢复,饱和软土等对外力扰动敏感变化的流变特性称为触变性^[16-18]。实验研究表明,在动荷载作用下,随着软土震陷的发生和震陷值的增加,饱和软土的塑性流动变形相应变大,流变性显著增强^[3-4]。软土震陷的实质是软土受震发生触变沉陷,震后又不能恢复的残留变形或永久变形^[5,17,19]。

同震断层与软土震陷形成的沉陷向斜褶曲共生(图2),其垂向分布限定在特定事件岩土层中,属准同沉积的层内断层,Seilacher将这类断层称为粒序断层且确认为地震事件形成的记录^[20]。全球各地不同时代的地震沉积事件层中,总发育此类小断层^[7,12-13,20-21],这进一步印证它们为地震成因。

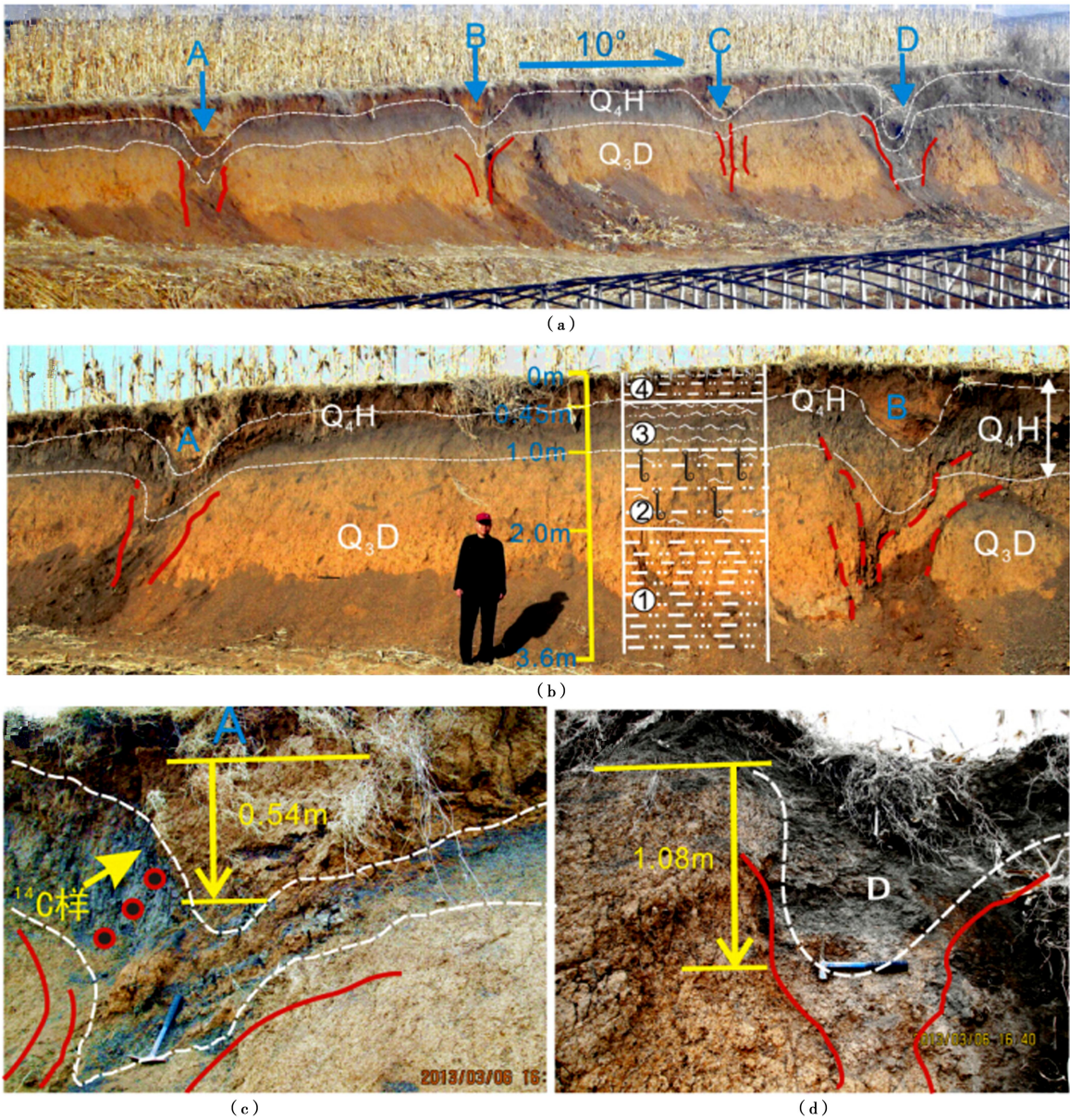


图 2 安丘东纪庄附近全新世软土震陷地震引起的土层变形构造

Fig. 2 Holocene seismic subsidences of soft soils and earthquake-induced deformation structures of soil layers near Dongji village in Anqiu area, Shandong Province

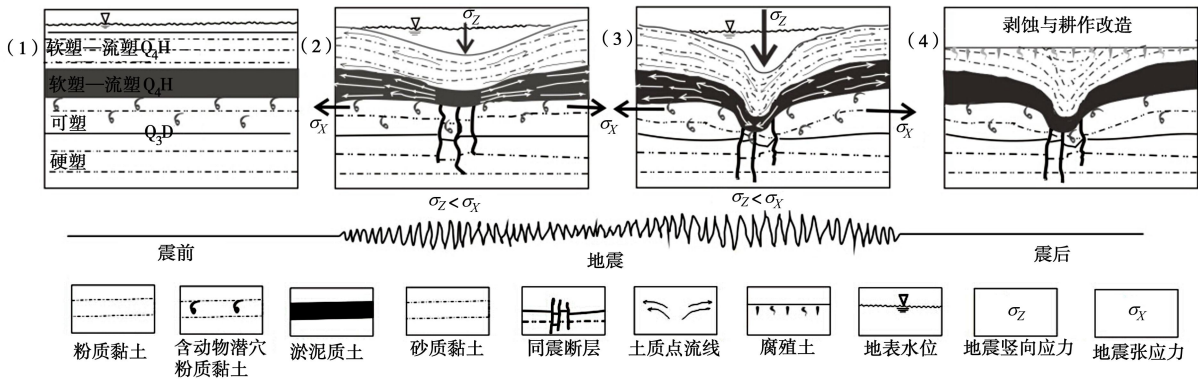


图 3 软土沉陷向斜褶曲和小尺度同震断层的形成机理和过程

Fig. 3 Formation mechanism and process for subsidence fold of soft soils and co-seismic faults

依据软土震陷形成的沉陷向斜与同震断层密切共生 (图2), 结合上述相关研究成果进行分析, 它们的

形成机理与过程如图3所示。

(1) 地震发生前, 近水平产状的饱和沉积土层受

均匀自重应力作用, 而暂时保持稳定。

(2) 强地震发生, 受拉张地震应力 (σ_x) 和竖向地震应力 (σ_z) 作用, 在竖向地震应力和拉张应力 ($\sigma_x > \sigma_z$) 集中部位, 湖沼底之下硬塑土层 (Q_3D) 形成张性小尺度同震断层; 受震发生触变的软土 (Q_4H) 结构被破坏, 黏度和强度变小, 在发生塑性流动的同时, 发生初步沉陷。在沉陷过程中, 流塑态的软土向应力较小的两侧流动, 使向斜两翼土层的厚度有所变大。

(3) 竖向地震应力增大 ($\sigma_z > \sigma_x$), 同震断层两侧发生冲剪滑动, 并向深处发展; 震陷随之向深处发展, 形成了窄而深的沉陷向斜, 在地表形成陷坑。由于土质点向两侧、也微向上发生流动, 致使两翼的土层厚度明显变大。

(4) 震后, 地震力消失, 软土层的黏稠度和强度有所恢复, 但触变沉陷褶曲和微断裂, 成为永久性变形被保留下来。后来, 地壳上升, 遭受剥蚀, 陷坑消失。受耕作改造, 在地表形成了腐殖土层。

2.2 狭缩-膨胀构造和震裂缝充填构造

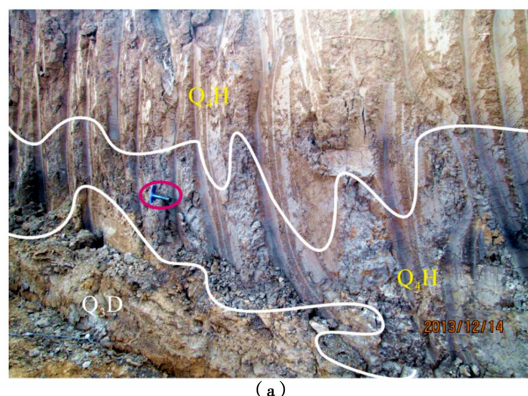
(1) 特征描述

在关王庙村附近的新近开挖的不同的陡坎剖面上, 分别见到这两种软土变形构造 (图4, 彩图见后插3)。狭缩-膨胀构造, 在高约4 m的陡坎底部被揭露出来 (图4 (a)、4 (b)); 它们是灰-灰黑色的软土发生收缩-膨胀连续延伸的布丁构造层。收缩处软土变薄, 膨胀处软土变厚。最小厚度为0.25 m, 最大厚度1.4 m。这种软沉积变形构造的埋深较大, 当其下发育同震微断层时, 转变为震陷向斜。此种地震触动土层变形构造, 在其它地震事件地层中常有产出^[13, 18, 22]。

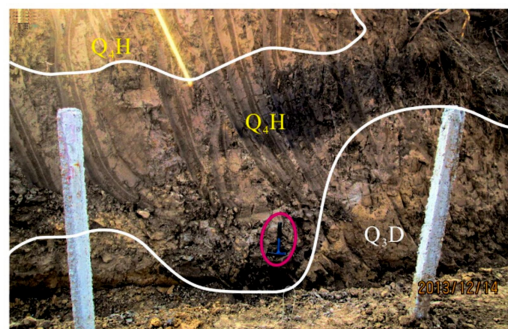
震裂缝发育在浅灰色湖积土中。震裂缝纵剖面上呈“V”形, 裂缝边较直。其开口处宽17 cm, 深34 cm。震裂缝中充填着深灰色软土 (图4 (c))。

(2) 解释

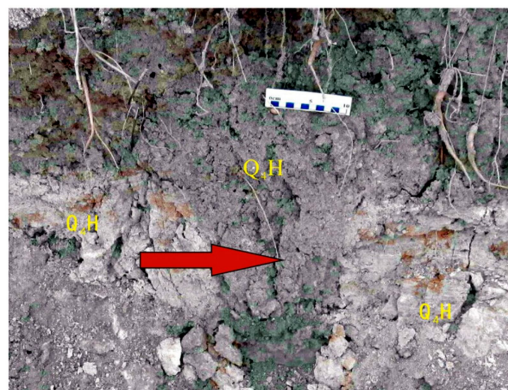
据试验^[23]和软土触变原理, 在竖向不均匀挤压和横向拉张地震力作用下, 饱和的触变软土发生塑性流动, 从而形成了不均匀收缩与膨胀的连续延伸的狭缩-膨胀构造。



(a)



(b)



(c)

图4 安丘关王庙附近全新世地震产生的软土狭缩-膨胀构造和震裂缝

Fig. 4 Holocene earthquake-induced pinch-and-swell structure and seismic fissure near Guanwangmiao in Anqiu area, Shandong Province

震裂缝充填构造也是常见的地震记录^[8-14]。图4 (c) 中的“V”形震裂缝边较直, 表明湖沼盆地边缘一度暴露在地表, 浅灰色较硬的湖积土受震裂开; 震后湖沼沉积扩展, 被深灰色软土充填。充填软土没有新的地震变形记录, 表明此后该地区地壳进入稳定时期。公元前70年的诸城地震^[14]也未使深色土层发生变形; 或当时湖沼已消亡, 该土层已固结。

3 讨 论

3.1 震级与地震烈度

软土震陷虽是常见的地震灾害, 如 1976 年唐山 7.6 级大地震使塘沽地区发生了大面积的软土震陷^[5]。但是, 目前尚无据软土震陷规模及特征来确定震级和烈度的成果资料。对饱和软土做三轴振动试验表明, 当地震烈度 \geq VII 度时, 淤泥受震动发生触变^[3]。根据震级 M 与震中烈度 I_0 的经验关系式 $M=0.66I_0+0.98$ ^[24], 假定 I_0 =VII 度, 保守计算得到震级 $M=5.6$ 。因此, 饱和软土受震触变的地震强度条件至少为 5.6 级与 VII 度烈度。鉴于安丘地区全新世软土震陷幅度较大 (图 2, 最深达 1.08 m); 再据中国地震烈度表^[25], 图 4 (c) 中的“V”形震裂缝构造反映当时地震烈度达到了 VIII

度, 所以, 由上述经验公式算得地震震级大于 6.0 级。

3.2 与砂土液化震陷的区别

强地震触动饱和砂土也产生震陷灾害, 也形成沉陷向斜^[11]。将两者比较, 两种软沉积变形构造的形态相似, 震害性质相近, 形成过程中竖向地震附加应力均占主导地位。但是, 它们的地震触动变形机理不同, 其形成的地震强度条件各异。砂土液化震陷, 是 ≥ 5 级和 $\geq VI$ 度烈度以上的强地震使饱和砂土产生超孔隙水压力, 克服了砂粒间的内摩擦力, 饱和砂土液化, 使砂土强度失效, 受地震附加应力作用而发生震陷。软土震陷形成的地震强度条件可能略高(见本文 3.1), 其机理一方面是在饱和软土受震发生触变, 软土触变的实质是软土的结构被破坏, 其黏度和强度降低, 并发生塑性流动; 另一方面, 触变软土层下小同震断层的产生和向深处发展, 对震陷和沉陷向斜形成和发展, 发挥了重要的诱导性作用。

4 结 语

尽管有许多关于软土震陷和相关研究的报道, 但在国内外, 尚未见有人报道软土震陷所形成土层变形构造的具体的实际剖面形态, 如表示软土震陷的剖面照片、素描图和示意图等。安丘地区全新世软土震陷与沉陷变形, 不仅清晰地展现了与软土震陷响应的沉陷向斜的剖面形态; 也展示了同震断层与沉陷向斜的空间分布和成因联系; 本文结合图示分析了它们的形成过程(图 3)。这为土木工程师和地震地质学家充分认识软土震陷灾害提供了具体的实例和新资料。软土沉陷构造之下发育的小尺度同震断层向纵深延伸是诱导、加剧震陷灾害的重要因素, 这为防治或减轻软土震陷的危害及基础工程设计提出了新启示: 必须重视软土下伏土层可能产生同震断层的隐患。

全新世以来, 沿郯庐地震带, 一直发生周期性强构造与地震活动。根据 $M \geq 6$ 的全新世历史地震记录, 郯庐断裂地震带的强地震主要发生在 1506—1671 年及 1829 年以来两个阶段, 对于该地震带更早的全新世地震事件, 因一直没找到有关证据, 而难以知晓^[26]。本研究发现的新证据, 为该断裂地震带全新世中晚期强地震活动提供了确凿的证据。

致 谢: 感谢中国地震局的地震动力学国家重点实验室的尹金辉研究员及郑永刚、杨雪工程师测定软土 ^{14}C 年龄。

参考文献:

[1] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 414 - 419, 511 - 521. (CHEN Xi-zhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. Beijing: Tsinghua

University Press, 2003: 414 - 419, 511 - 521. (in Chinese))

- [2] 赵明华, 俞 晓. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2008: 42 - 43, 318 - 325. (ZHAO Ming-hua, YU Xiao. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2008: 42 - 43, 318 - 325. (in Chinese))
- [3] 张虎臣. 淤泥地基地震触变研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(3): 78 - 85. (ZHANG Hu-chen. Study on the earthquake thixotropy of mucky soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(3): 78 - 85. (in Chinese))
- [4] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35 - 44. (YU Shou-song, SHI Zhao-ji. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35 - 46. (in Chinese))
- [5] 李 冬, 陈培雄, 吕小飞, 等. 软土地震震陷研究现状综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(2): 130 - 135. (LI Dong, CHEN Pei-xiong, LÜ Xiao-fei, et al. Research progress summarization of soft soil earthquake subsidence[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(2): 130 - 135. (in Chinese))
- [6] MONTENAT C, BARRIER P, OTT d'Estevou P. Seismites: an attempt at critical analysis and classification[J]. Sedimentary Geology, 2007, 196: 5 - 30.
- [7] VAN L A J. Soft-sediment deformation structures in siliciclastic sediments: an overview[J]. Geologos, 2009, 15: 3 - 55.
- [8] 张邦花, 田洪水, 张增奇, 等. 地质名山馒头山及其附近早寒武世古地震沉积事件研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1021 - 1031. (ZHANG Bang-hua, TIAN Hong-shui, ZHANG Zeng-qi, et al. The study on paleoseismic depositional events of the famous geological mountain 'Mantoushan' and its vicinity in the Early Cambrian[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1021 - 1031. (in Chinese))
- [9] QIAO Xiu-fu, SONG Tian-rui, GAO Lin-zhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 16 - 29.
- [10] 晃洪太, 李家灵, 崔昭文, 等. 郯庐活断层与 1668 年郯城 8.5 级地震灾害[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(3): 69 - 79. (CHAO Hong-tai, LI Jia-ling, CUI Zhao-wen, et al. Active faults in Tanlu fault zone and hazards produced by the 1668 Tancheng Earthquake ($M=8.5$)[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995, 15(3): 69 - 79. (in Chinese))
- [11] 田洪水, 张增奇. 从郯庐地震带安丘地区地震成因土层构造认识地震破坏作用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12):

- 1453 - 1457. (TIAN Hong-shui, ZHANG Zeng-qi. Understanding failure functions caused by earthquakes on the basis of seism- genesis soil-layer structures in Anqiu area, Tancheng- Lujiang seismic zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1453 - 1457. (in Chinese))
- [12] TIAN Hong-shui, ZHANG Zeng-qi, ZHANG Bang-hua, et al. Tectonic taphrogenesis and paleoseismic records from the Yishu Fault Zone in the initial stage of the Caledonian movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, **87**(4): 936 - 947.
- [13] TIAN Hong-shui, ZHANG Bang-hua, ZHANG Shen-he, et al. Neogene seismites and seismic volcanic rocks in the Linqu area, Shandong province, E China[J]. Geologos, 2014, **20**(2): 125 - 137.
- [14] 王华林. 公元前 70 年诸城—昌乐地震发震构造的初步研究[J]. 地震学刊, 1990, **3**: 100 - 103. (WANG Hua-lin. A preliminary study of the seismogenic structures of the Zhucheng-Changle earthquake in 70 BC[J]. Journal of Seismology, 1990, **3**: 100 - 103. (in Chinese))
- [15] 宋明春, 王沛成. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003: 1 - 970. (SONG Ming-chun, WANG Pei-cheng. Regional geology of Shandong province[M]. Jinan: Map Press of Shandong Province, 2003: 1 - 970. (in Chinese))
- [16] 侯万国. 应用胶体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1 - 391. (HOU Wan-guo. Application of colloid chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1 - 391. (in Chinese))
- [17] 李丽华, 陈 轮, 高盛焱. 翠湖湿地软土触变性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 765 - 768. (LI Li-hua, CHEN Lun, GAO Sheng-yan. Experimental research on thixotropy of wetland soft soil in Cuihu[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 765 - 768. (in Chinese))
- [18] 冯增昭. 中国沉积岩[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 507 - 615. (FENG Zeng-zhao. Chinese sedimentary rock[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 507 - 615. (in Chinese))
- [19] 翁鑫荣. 软土应力路径特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 825 - 828. (WENG Xin-rong. Experimental research on characteristics of stress path for soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 825 - 828. (in Chinese))
- [20] SEILACHER A. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. Sedimentology, 1969, **13**: 155 - 159.
- [21] WHEELER R L. Distinguishing seismic from nonseismic soft-sediment structures: criteria from seismic-hazard analysis[C]// Ancient Seismites. Washington City: Geological Society of America Special Paper, 2002, **359**: 1 - 11.
- [22] KNAUST D. Pinch-and-swell structures at the Middle/Upper Muschelkalk boundary (Triassic): evidence of earthquake effects (seismites) in the Germanic Basin[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, **90**: 291 - 303.
- [23] 吴武军, 曾佐勋, 朱文革. 鱼嘴构造流变计研究与基于流变学的分类方案[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(9): 925 - 932. (WU Wu-jun, ZENG Zuo-xun, ZHU Wen-ge. Research on rheology gauge of fish-headboudin[J]. Advances in Earthscience, 2005, **20**(9): 925 - 932. (in Chinese))
- [24] 时 伟. 工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1 - 300. (SHI Wei. Engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1 - 300. (in Chinese))
- [25] GB/T 17742—2008 中国地震烈度表[S]. 2008. (GB/T 17742—2008 The Chinese seismic intensity scale[S]. 2008. (in Chinese))
- [26] 万天丰. 山东构造演化与应力场研究[J]. 山东地质, 1992, **8**(2): 70 - 101. (WAN Tian-feng. Tectonic evolution and stress fields of Shandong province[J]. Shandong Geology, 1992, **8**(2): 70 - 101. (in Chinese))