

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.025

考虑沉积环境影响的软土地基工程性质对比研究

吴昌胜^{1,2}, 朱志铎^{1,2}

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为了研究软土不同沉积环境导致的工程性质的差异,选取了连盐高速公路连云港段和沪苏浙高速公路苏州段两个地区的典型软土,通过两个地区软土的总体指标和具体断面指标的分析,主要研究了软土的沉积环境、黏粒含量、矿物成分和 pH 值对软土工程性质的影响。研究表明:连云港海相软土是随着海平面的变化在碱性条件下逐渐沉积,物质主要来源于海洋沉积物,以黏粒为主,黏土矿物成分以伊蒙混层为主;与连云港海相软土不同,苏州冲湖积相软土是在中性或弱碱性条件下沉积,物质主要来源于茅山和天目山地区,以粉粒为主,黏土矿物成分以伊利石为主,含水量低于 LY 软土,无侧限抗压强度、灵敏度高于 LY 软土。

关 键 词: 软土;沉积环境;物质来源;黏土矿物;工程性质

中图分类号: P 642.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0424-06

Comparative Study on Geotechnical Properties of Soft Soils Considering Depositional Environment

WU Chang-sheng^{1, 2}, ZHU Zhi-duo^{1, 2}

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Nanjing 210096, China. Corresponding author: WU Chang-sheng, E-mail: shengchangwu@126.com)

Abstract: Typical soft soils from Lian-Yan Expressway (Lianyungang section) and Hu-Su-Zhe Expressway (Suzhou section) were selected to study the geotechnical properties through general indexes and specific sections indexes considering depositional environment, respectively. The effects of depositional environment, clay fraction, clay minerals, and pH values on geotechnical properties of soft soils in LY and HSZ were discussed. The research results are as follows: Lianyungang marine clay gradually deposits with the sea level change in alkaline condition. Its material sources derives from marine sediments. Clay fraction is dominant and the principal clay mineral of the soils is illite-smectite mixed-layer mineral. Differing from the Lianyungang marine clay, Suzhou lacustrine soft soil gradually deposits in neutral condition and weak alkaline condition. Its material sources derives from Maoshan and Tianmushan. Silt fraction is dominant and the principal clay mineral of the soils is illite. Water content is lower while the unconfined compressive strength and sensitivity are higher than that of Lianyungang marine clay.

Key words: soft soils; depositional environment; material sources; clay mineral; geotechnical properties

目前,我国高速公路建设正处于快速发展阶段,尤其是东部沿海诸省。这些地区除山东部分地段外,大部分土层多为淤泥、淤泥质黏土,属于软土地基。软土^[1]虽都具有天然含水量大、孔隙比高、压缩性高、强度低、透水性差的共性,但由于各地区所处的水文地质、工程地质环境存在差异,各地区的软土在成因、结构和形态上都有其各自的特性。

国外对典型地区软土的基本特性已经进行了大量的分析和研究. Quigley^[2]通过对 Canadian soft clay 的研究发现黏土的沉积化学作用会影响岩土工程性质. Chung 等^[3]对 Chicago clay 进行了室内和现场试验,发现不同的沉积环境使 Chicago clay 的工程性质、应力历史具有明显的差异. Ohtsubo 等^[4]研究了 Ariake clay 的黏土矿物成分、Cl⁻含量等随深度的变化和对黏土工程性质的影响,研究发现,蒙脱石的含量对于 Ariake clay 的物理力学性质起着最主要的作用. Ohtsubo 等^[5]研究了 Bangkok clay 的沉积环境和土的工程特性后发现,黏土沉积环境的变化与盐含量、黄铁矿含量有关. 此外,Chung 等^[6]、Sharma 等^[7]、Nguyen 等^[8]学者也意识到了黏土的沉积环境对土的工程特性的重要影响,分别对 Busan clay、Singapore clay 和 Vietnam Mekong River delta clay 进行了室内和现场试验,结果发现沉积环境和海平面的变化有密切关系,随着地区和深度的不同,土的形成条件、矿物成分、离子含量、pH 值等均有差异,最终表现在土的工程特性具有较大的差异.

国内学者对天津、唐山、连云港、上海、杭州、宁波、温州、广州、深圳等典型地区的软土工程特性进行了大量的研究工作,得出了我国软土在力学强度和变形特征上总体符合“北强南弱、依次变化”的特点. 然而我国学者更多的关注软土的物理力学性质能否满足工程建设对变形和稳定的要求,而忽略了地质学者更感兴趣的软土沉积环境对其工程特性的影响,仅有少数学者对沉积环境和工程特性的关系进行了研究. 高国瑞等^[9]研究了中国北部的黄土、南部的红土、中部的老黏土和东南近海的海洋软土的分布规律和工程特性,并重点关注了土的物质成分与工程性质的关系. Wu 等^[10]研究了海平面变化与上海黏土沉积历史的关系,对比分析了上海黏土、Ariake clay、Bangkok clay 的物理力学性质,结果发现上海黏土以粉粒和伊利石为主,原因是沉积时长江中下游地区水动力条件较强. Liu 等^[11]全面系统地研究了连云港海相软土的沉积环境和工程特性后发现,沉积环境、水动力条件、沉积物源和沉积化学都与土层的工程特性具有重要的联系.

通过已有研究可以发现,沉积环境影响着软土的结构、构造、pH、颗粒成分、黏土矿物组成,进而影响软土的界限含水率、强度和灵敏度等工程特性. 考虑软土形成过程中沉积环境的影响,能够更深入地掌握软土的物理力学性质,更有针对性地选取软土地基的处理方法,对以后的工程建设

具有重要的参考和指导意义. 本文在前人研究的基础上,选取连盐高速公路连云港段(简称 LY)和沪苏浙高速公路苏州段(简称 HSZ)两个地区的典型软土,对比分析软土的沉积环境对其工程性质的影响.

1 沉积环境

1.1 连盐高速公路连云港段

连云港大部分地区为第四纪沉积物所覆盖. 图 1 所示为连云港地区第四纪以来海相地层的沉积图. 从图中可以看出,随着气候的变化,连云港地区在晚更新世和全新世共遭受了三次大规模的海侵,相应地沉积了三层海相地层,均位于 40 m 以内. 对连盐高速公路连云港段产生影响的主要是全新世沉积的第一层海相地层软土,该层软土厚度一般在 15 m 以内.

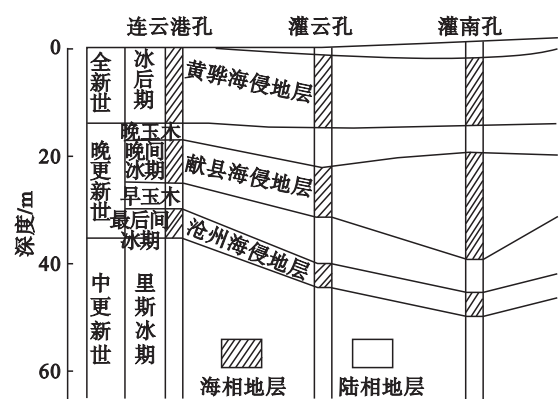


图 1 连云港地区第四纪以来地层沉积^[12]
Fig. 1 Sedimentation of Lianyungang marine clay from the Quaternary period

图 2 所示为中国南部地区 6 000 年以来黄海的海岸线变化情况. 6 000 年以前的海岸线与现在的海岸线大致相同. 6 000 ~ 5 000 年,随着全球气候转暖,冰川消退,海面上升到全新世最高海面,同时,全新世海侵也达到了最大范围. 连云港地区海岸线向内陆有了较大的延伸,一直延伸到了灌云、阜宁和盐城一带. 连云港第一层海相软土开始沉积. 随着海岸线不断的变化,连云港海相软土层的沉积环境也在不断变化,从最初的陆相沉积变为海滩相沉积,随后逐渐沦为浅海沉积环境. 海滩沉积环境时,砂粒粒组是石英、斜长石等大颗粒原生矿物的主要组成部分. 此后,随着海平面的上升,海水逐渐变深,陆源碎屑物的搬运距离也变得更远,沉积物的颗粒也变得更细,黏土矿物含量逐步增加,最终成为以黏土沉积为主的海相黏土层. 从距今 5 000 年到 1 000 年期间,海岸线小幅后退,

距今 1 000 年以来,海岸线逐渐后退,海水越来越浅,沉积环境从浅海沉积变为滨海沉积,陆源碎屑物的搬运距离减小,海水搬运的粗粒矿物增大,原生矿物含量又逐渐增多,黏土矿物含量逐渐减少.

1.2 沪苏浙高速公路苏州段

沪苏浙高速公路苏州段通过的主要区域是苏州东部冲湖积平原沉积区,地势平坦,全部被第四系松散堆积层所覆盖,具有自西向东逐渐增厚的变化规律,在剖面上显示出多沉积的韵律特点,河、湖、海相沉积交替进行,但层序清晰.对该路线产生影响的地层主要为全新世和晚更新世软土层,该层软土厚度一般在 10 m 左右,最大厚度可达 22 m.

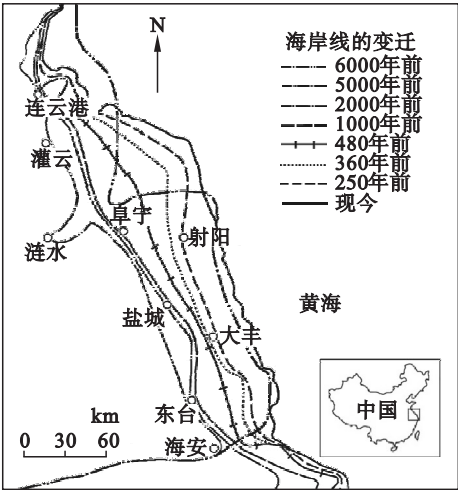


图 2 黄海岸线 6 000 年以来的变化情况^[11]
Fig. 2 Coastline movement during the past 6 000 years in China Yellow Sea

晚更新世初期,地壳呈间歇性升降,全球气候转冷,气温下降,海水退出本区,海平面显著下降,本区上升为陆地,进入了一个新的沉积阶段.距今 6 万年以来,本区迎来了较温暖的地质历史时期,

地壳下降,海平面上升,海水入侵到长江下游地区;到距今 2.8 ~ 5.8 万年之间,海水自北东向南西推进,本区海侵达到鼎盛时期.晚更新世末期,本区地壳逐渐抬升,海平面再次下降,本区发生了海退,随后进入了全新世.全新世时期,虽然全球范围内又发生了一次大规模的海侵,但本区未受波及^[13],太湖挟带的陆源碎屑物主要来源于西部茅山地区和南部天目山地区,并有可能受到长江流域的一定影响,搬运距离较短,据此推断应该含有一定量的粗粒矿物和原生矿物.该区以太湖湖沼相沉积为主,沉积了深灰色淤泥质黏土,含植物根茎,水平微层理发育,呈千层饼状.

1.3 对比

连云港海相软土和太湖冲湖积相软土都是全新世沉积,除此之外,还有很多不同点:

- 1) 连云港海相软土受到全新世海侵的影响,随着海平面的变化而逐渐沉积;太湖冲湖积相软土基本没有受到海侵的影响.
- 2) 连云港海相软土沉积于海岸线附近,往往有大量的粉细颗粒和悬浮颗粒物,这些物质在盐水环境下进行凝结沉积;太湖冲湖积相软土物质来源主要是太湖所含泥沙,在淡水环境中沉积.
- 3) 太湖软土沉积时的水动力条件要比连云港海相软土沉积时水动力条件强.

2 物理力学性质

2.1 总体指标

根据地质勘查资料,表 1、表 2 分别给出了 LY、HSZ 软土各标段的物理力学指标(平均值).从表中可看出沉积环境对两个地区软土工程特性的影响主要有:

表 1 LY 软土层物理力学指标统计表(平均值)
Table 1 Indices of physical and mechanical properties of LY soft soils(mean value)

各工程标段	w/%	e	w _L /%	I _p	I _L	C/kPa	φ/(°)	a ₁₋₂ /MPa ⁻¹	E _s /MPa
G1 标	55.4	1.487	50.9	21.7	1.21	5	3.7	1.38	1.82
G2 标	64.6	1.759	46.2	16.8	2.10	9	1.9	1.71	1.61
G3 标	69.5	1.884	56.2	26.6	1.50	10	2.4	1.93	1.34
G4-1 标	68.6	1.841	57.3	25.7	1.44	4	2.5	1.83	1.33
G4-2 标	60.7	1.674	51.6	22.3	1.41	9	4.1	1.53	1.52
N2 标	58.2	1.585	49.3	22.8	1.39	9	3.9	1.41	1.66

注:w—含水率;e—孔隙比;w_L—液限;I_p—塑性指数;I_L—液性指数;C—黏聚力;φ—内摩擦角;a₁₋₂—压缩系数;E_s—压缩模量,下同.

1) 两地软土虽然都具有软土的典型特性,但明显可以看出,LY 软土的含水量、孔隙比、压缩性

均高于 HSZ 软土,这是由于 LY 海相软土沉积过程中形成的絮状结构导致土颗粒间密实度较低所致.

表2 HSZ 软土层物理力学指标统计表(平均值)
Table 2 Indices of physical and mechanical properties of HSZ soft soils (mean value)

各工程标段	w/%	e	w _L /%	I _p	I _L	C/kPa	φ/(°)	a ₁₋₂ /MPa ⁻¹	E _s /MPa
HSZ1 标	45.3	1.265	38.7	16.9	1.39	6.4	5.5	1.01	2.54
HSZ2 标	45.6	1.292	36.8	16.0	1.55	8.1	4.8	0.98	2.45
HSZ3 标	43.6	1.253	37.5	17.0	1.36	8.1	3.9	0.83	2.66
HSZ4 标	46.8	1.327	38.1	16.7	1.52	8.0	4.7	1.13	2.29
HSZ5 标	49.4	1.396	39.4	17.2	1.58	7.8	3.6	1.25	1.95
HSZ6 标	46.4	1.306	38.8	17.8	1.43	9.8	4.3	0.95	2.48
HSZ7 标	47.8	1.367	39.4	17.9	1.47	8.6	4.1	1.16	2.28
HSZ8 标	49.4	1.394	38.9	16.6	1.63	8.2	4.7	1.01	2.54
HSZ9 标	45.4	1.282	37.3	16.2	1.50	9.8	4.0	0.97	2.51
HSZ10 标	45.3	1.278	38.0	16.2	1.45	13.0	5.1	0.89	3.22
HSZ11 标	46.4	1.320	42.4	18.9	1.21	14.5	7.7	0.85	3.85

注:w—含水率;e—孔隙比;w_L—液限;I_p—塑性指数;I_L—液性指数;C—黏聚力;φ—内摩擦角;a₁₋₂—压缩系数;E_s—压缩模量。

2) 两个地区软土塑性指数都大于 10,均为黏性土。不同的是 LY 地区软土大多为黏土(I_p > 17),而 HSZ 地区软土大多为粉质黏土(I_p < 17)。因此,可以看出两个地区软土虽然均含有一定量的黏粒,但 LY 地区软土黏粒含量要高于 HSZ 地区软土,是因为两个地区软土的物质来源和水动力条件不同所致。这也可以解释 LY 地区软土含水量、压缩性高于 HSZ 地区的原因:黏土矿物具有较强的亲水性和典型的双电层结构,通过吸附和离子交换,黏粒可聚集成絮凝体和链状结构。

2.2 具体断面指标

为了更深入地研究软土沉积环境对其工程特性的影响,在沪苏浙高速公路第七标段平望服务区(K30+350)内利用薄壁取土器钻孔取样,进行室内试验,并与连云港地区的试验结果进行对比研究。含水率试验、液-塑限试验、颗粒分析试验和无侧限抗压强度试验均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)进行,X 射线衍射试验由南京大学 XRD 实验室代为完成,pH 值试验依照 ASTM D4972-02 测试标准进行。

2.2.1 物理力学指标的对比

图 3、图 4 分别给出了两个地区物理力学性质随深度的变化曲线。对比分析两图可以得到:

1) HSZ、LY 软土含水量、液限、塑限整体变化趋势相同,呈现出表层和底层软土含量低,中间高的态势,且含水量都大于软土液限值。但 LY 软土却比 HSZ 软土的数值高出很多,主要原因是 LY 软土比 HSZ 软土含有较多的黏粒粒组,具有较强的亲水性,和前面总体指标的分析结果一致。

2) LY 软土的液限要远远大于 HSZ 软土的

液限。Ohstubo 等^[5]的研究显示液限和孔隙水含盐量的变化趋势一致。因此可以推断 LY 软土的孔隙水含盐量要远远大于 HSZ 软土的孔隙水含盐量,pH 值也要大于 HSZ 软土的 pH 值。这是因为 LY 软土是在海相沉积环境中沉积形成的,受到了海水的影响,而 HSZ 软土的沉积环境受到太湖的影响更大,基本未受到海侵影响。

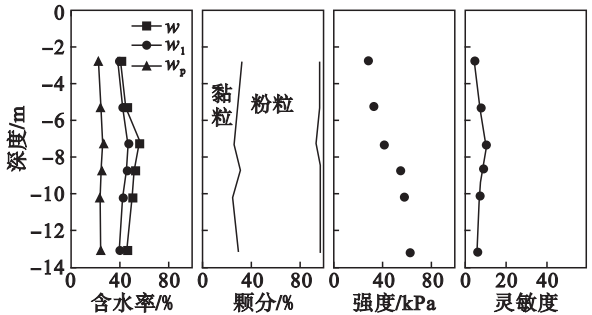


图3 HSZ 软土的岩土性质随深度的变化

Fig. 3 Variation of geotechnical properties of HSZ soft soils with depth

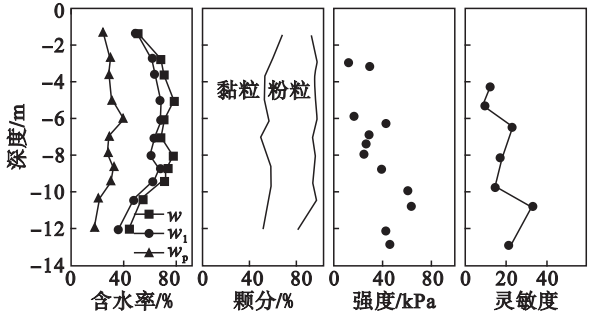


图4 LY 软土的岩土性质随深度的变化

Fig. 4 Variation of geotechnical properties of LY soft soils with depth

3) 沉积环境影响软土的黏粒含量,而黏粒含量影响着软土许多的工程性质,尤其是含水量、塑

性和压缩系数。两地软土都是由细颗粒物组成,粉粒和黏粒总质量分数在 90% 以上. HSZ 软土黏粒质量分数仅占 26% ~ 34% ,但粉粒质量分数都大于 64% ;与 HSZ 软土不同,LY 软土主要是黏粒组成,质量分数在 52% ~ 68% 之间,而粉粒质量分数都小于 40% .这也印证了总体指标的结果,HSZ 软土为粉质黏土,LY 软土为黏土,且 LY 软土的含水量、塑限都远大于 HSZ 软土的相关指标.同时根据黏粒含量也可以推断:LY 软土的压缩性要远大于 HSZ 软土的压缩性.

4) 两地软土的无侧限抗压强度随深度均有增加的趋势,但 HSZ 软土的强度值要大于 LY 地区.从灵敏度上可以认为两地软土都为高灵敏软土(>4),即具有强结构性,但 LY 软土要比 HSZ 软土结构性更强.故受扰动后土的强度降低越多,进而导致沉降越大,这也验证了黏粒含量推断的结果,从而可以认为沉积环境会影响软土的结构.

2.2.2 黏土矿物成分的对比

图 5 所示为两地软土黏土矿物成分和 pH 值随深度的分布图.对比分析两图可以得到:

1) 两地软土的黏土矿物成分明显不同,HSZ 软土的主要成分为伊利石(45% ~ 65%),并含有一定量的高岭石和少量的蒙脱石.与 HSZ 软土不同,LY 软土为伊蒙混层(55% ~ 60%),并含有一定量的伊利石和少量的高岭石与绿泥石.

2) HSZ 软土的 pH 值小于 LY 软土,显示 HSZ 软土为中性或弱碱性沉积环境,LY 软土为碱性沉积环境.这也说明了 LY 地区软土受到海侵的影响而 HSZ 地区软土基本未受波及.

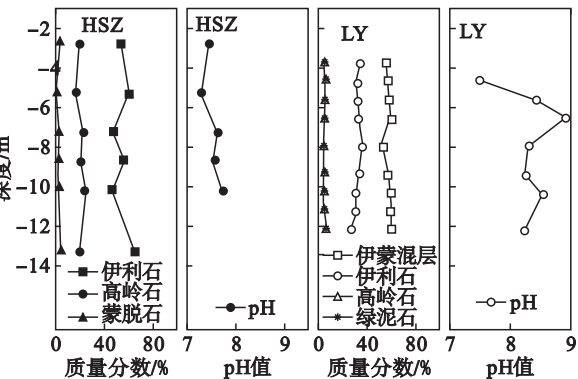


图 5 软土黏土矿物、pH 随深度的变化图
Fig. 5 Variation of clay mineral content and pH of soft soils with depth

黏土矿物记录着所在地区的物质来源、水介质条件和水动力条件. LY 地区软土的黏土矿物含量变幅小,反映了单一物源的可能性,主要是海洋沉积物;HSZ 地区软土的黏土矿物含量变幅

大,反映物源的多元性,主要来自西部山麓并可能受到长江流域的一定影响. HSZ 地区软土黏土矿物含量变幅明显比 LY 地区软土大,这反映了 HSZ 软土沉积时受到明显的水流交互混匀作用,水动力条件要比 LY 地区稍强. LY 地区软土含有绿泥石,反映了碱性环境,HSZ 地区软土大量伊利石的存在反映了中性或弱碱性的沉积环境,这与 pH 值的指示结果相一致.

3 结 论

1) 连盐高速公路连云港段软土主要为全新世海侵时期沉积的海相软土,物质来源主要是海洋沉积物.而沪苏浙高速公路苏州段软土主要为太湖冲湖积相软土,物质来源主要是西部茅山地区和南部天目山地区,并有可能受到长江流域的一定影响.

2) 两地软土都具有软土的典型工程特性,但相比 LY 软土,HSZ 软土黏粒含量较少,主要以粉粒为主.因此,HSZ 软土界限含水量比 LY 软土低,无侧限抗压强度、灵敏度比 LY 软土高.

3) 两地软土黏土矿物成分明显不同,HSZ 软土沉积时水动力条件比 LY 软土稍强,在中性或弱碱性环境中沉积,与 pH 值指示结果一致.

4) 本文初步探讨了两个地区软土的沉积环境对工程性质的影响,接下来的研究将进一步扩大研究范围,对多种沉积环境进行对比研究,在不同地区进行取样分析,提供更为全面的研究结论.

参考文献:

[1] 缪林昌. 软土力学特性与工程实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
(Miao Lin-chang. Technical characteristics of soft soil and its application in project [M]. Beijing: Science Press, 2012.)
[2] Quigley R M. Geology, mineralogy, and geochemistry of Canadian soft soils: a geotechnical perspective [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 17 (2) : 261 - 285.
[3] Chung C K, Finno R J. Influence of depositional processes on the geotechnical parameters of Chicago glacial clays [J]. Engineering Geology, 1992, 32 (4) : 225 - 242.
[4] Ohtsubo M, Egashira K, Kashima K. Depositional and post-depositional geochemistry, and its correlation with the geotechnical properties of marine clays in Ariake Bay, Japan [J]. Geotechnique, 1995, 45 (3) : 509 - 523.
[5] Ohtsubo M, Egashira K, Koumoto T, et al. Mineralogy and chemistry, and their correlations with the geotechnical index properties of Bangkok clay: comparison with Ariake clay [J]. Soils and Foundations, 2000, 40 (1) : 11 - 21.

[6]

Chung S G, Ryu C K, Jo K Y, et al. Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan New Port [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2005, 23 (3): 235 – 251.

[7]

Sharma J S, Chu J, Zhao J. Geological and geotechnical features of Singapore: an overview [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1999, 14 (4): 419 – 431.

[8]

Nguyen V L, Ta T K O, Tateishi M. Late Holocene depositional environments and coastal evolution of the Mekong River Delta, Southern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18 (4): 427 – 439.

[9]

高国瑞, 韩爱民. 论中国区域性土的分布和岩土性质的形成 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27 (5): 511 – 515.
(Gao Guo-rui, Han Ai-min. Distribution of regional soils in China and formation of their special geotechnical properties [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27 (5): 511 – 515.)

[10]

Wu C J, Ye G L, Zhang L L, et al. Depositional environment and geotechnical properties of Shanghai clay: a comparison with Ariake and Bangkok clays [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74 (3): 717 – 732.

[11]

Liu S Y, Shao G H, Du Y J, et al. Depositional and geotechnical properties of marine clays in Lianyungang, China [J]. *Engineering Geology*, 2011, 121 (2): 66 – 74.

[12]

凌申. 苏北全新世海进与古砂堤研究 [J]. *台湾海峡*, 1994, 13 (4): 338 – 345.
(Ling Shen. Study on Holocene transgression and sandbar in North Jiangsu [J]. *Taiwan Strait*, 1994, 13 (4): 338 – 345.)

[13]

宗雯. 太湖东岸第四系沉积结构与岩相古地理演化 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
(Zong Wen. The quaternary sedimentary structure and the Lithofacies paleogeography evolution in the Taihu East Lake [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.)

(上接第 404 页)

参考文献：

[1]

Villaescusa E. A review of sublevel stoping [J]. *Mass Min*, 2000, 2000 (1): 577 – 590.

[2]

Xia H C, Song Z Q, Ru L J. Finite element analysis of abutment pressure distribution characteristic of working faces in fully mechanized sublevel caving face [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 71/72/73/74/75/76/77/78: 3358 – 3361.

[3]

Yang T, Wang P, Yu Q, et al. Effects of lateral opening angle on ore-drawing in pillarless sublevel caving based on PFC2D [M]. Shanghai: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2011: 649 – 654.

[4]

Zhou C B, Yao Y K, Guo L W, et al. Numerical simulation of independent advance of ore breaking in the non-pillar sublevel caving method [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 17 (2): 295 – 310.

[5]

Anawar H M. Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 158 (1): 111 – 121.

[6]

Brunton I D, Fraser S J, Hodgkinson J H, et al. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47 (4): 647 – 656.

[7]

DeGiuli E, Duering G, Lerner E, et al. Unified theory of inertial granular flows and non-Brownian suspensions [J]. *Physical Review E*, 2015, 91 (6): 3535 – 3536.

[8]

Hill J M, Cox G M. Cylindrical cavities and classical rat-hole theory occurring in bulk materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2000, 24 (12): 971 – 990.

[9]

陶干强, 杨仕教, 任凤玉. 随机介质放矿理论散体流动参数试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28 (9): 3464 – 3470.
(Tao Gan-qiang, Yang Shi-jiao, Ren Feng-yu. Test on granules flow parameters of ore drawing with stochastic medium theory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (9): 3464 – 3470.)

[10]

Spencer A J M, Bradley N J. Gravity flow of granular materials in contracting cylinders and tapered tubes [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2002, 40 (13): 1529 – 1552.

[11]

Li W X, Qi D L, Zheng S F, et al. Fuzzy mathematics model and its numerical method of stability analysis on rock slope of opencast metal mine [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39 (7): 1784 – 1793.

[12]

乔登攀, 陶干强, 任凤玉. 崩塌法矿山含矿覆盖层回收研究 [J]. *中国矿业*, 2003, 12 (5): 35 – 38.
(Qiao Deng-pan, Tao Gan-qiang, Ren Feng-yu. Caving mining ore overburden recovery study [J]. *Chinese Mining*, 2003, 12 (5): 35 – 38.)

[13]

张志贵. 矿石损失贫化的经济评价与分析 [J]. *中国矿业*, 1992, 1 (3): 33 – 38.
(Zhang Zhi-gui. The economic evaluation and analysis of ore loss and dilution [J]. *Chinese Mining*, 1992, 1 (3): 33 – 38.)