含砂量对人工含盐软黏土压缩特性的影响研究*

浦　姝[1]，方　玮[1]，宋玮韬[1]，张　杰[2]，英　姿[3]
（1. 南京地铁建设有限责任公司，江苏 南京 210017；
2. 北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100032；3. 东南大学，江苏 南京 211189）

摘要：沿海地区港口码头等建设工程中由吹填造陆工艺形成的地基土绝大多数是粗细粒共存、粒径级配不连续的砂-黏土混合物，具有含水率高、孔隙比大和孔隙水盐浓度较高等特点。软土地基变形规律与压缩特性密切相关，但目前关于含砂量对含盐软黏土压缩特性的影响研究却鲜有报道。针对该问题，设计不同砂含量和孔隙水盐浓度的砂-黏土混合物，对其进行一维固结试验和数值分析，研究含砂量对含盐软黏土压缩特性的影响及其细观机制。研究结果表明，盐分和砂的存在均使软黏土的压缩性减小，固结应力达到 400 kPa 左右时压缩曲线突变，数值分析结果显示此时出现条状应力带，说明含砂软黏土体中形成砂骨架。砂骨架形成前，孔隙水盐分通过促进黏土颗粒团粒化影响压缩性，形成后则由砂骨架承担了砂-黏土混合物的主要荷载，从而影响压缩性。这一研究揭示了盐分和砂颗粒对软黏土压缩行为的影响机制。

关键词：软黏土；压缩特性；含砂量；孔隙水盐分；细观机制
中图分类号：U652.2；TV16　　**文献标志码：**　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0181-09

Effect of sand content on compression characteristics of artificial saline soft clay

PU Shu[1], FANG Wei[1], SONG Weitao[1], ZHANG Jie[2], YING Zi[3]
(1. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., Nanjing 210017, China;
2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100032, China;
3. Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In the construction projects of ports and docks in coastal areas, the ground soil types formed by landfill are mostly coarse-grained mixture or sand-clay mixture, with high water content, large porosity, and high pore water salinity. In the construction projects of ports and docks in coastal areas, the foundation soil formed by hydraulic reclamation mostly consists of sand-clay mixtures with coexisting coarse and fine particles and discontinuous particle size gradation, which are characterized by high water content, large void ratio, and relatively high salinity of pore water. The deformation law of soft soil foundation is closely related to its compression characteristics. However, there is little research reported on the influence of sand content on the compression characteristics of saline soft clay. To address this problem, sand-clay mixtures with varying sand contents and pore water salinity levels are prepared. One-dimensional consolidation tests combined with numerical simulations are performed to investigate the effect of sand content on the compression characteristics of saline soft clay and reveal its micro-mechanism. The results indicate that the presence of both salt and sand reduces the compressibility of soft clay. A sudden inflection occurs on the compression curve when the consolidation stress approaches approximately 400 kPa. Numerical analysis reveals that banded stress zones emerge at this stress level, which demonstrates that a sand skeleton is formed inside the sand-bearing soft clay. Before the sand skeleton forms, pore water salinity affects compressibility by promoting the agglomeration of clay particles. Once formed, the sand skeleton bears the major load of sand-clay mixtures and further governs the compression performance. This study clarifies the action mechanism of salt and sand particles on the compressive behavior of soft clay.

Keywords: soft clay; compression characteristics; sand content; pore water salinity; meso-mechanism

收稿日期：2025-11-20　　**录用日期：**2026-01-04
***基金项目：**国家自然科学基金项目(42272322)
作者简介：浦姝(1988—)，女，硕士，高级工程师，研究方向为交通土建及人防工程。

水运工程

在我国经济高速发展的大背景下，对外贸易及交通行业的建设需求日益高涨。在水运工程及海洋运输方面，不断增长的港口码头建设需要与沿海地区匮乏的可利用土地资源间的矛盾愈发突出。为了缓解这一矛盾，吹填造陆工艺应运而生，其原理是利用水力作用，将泥浆泵和挖泥船所搅吸混合的水底砂土及黏土进行吹填，堆积成陆[1]。吹填造陆工艺目前已在我国多处港区得到应用，如粤港澳大湾区各城市[2]，地处长江口-黄浦江沿岸的上海及黄海海岸沿线苏北地区的连云港、盐城、南通各港区等[3]。吹填造陆工艺及其应用场景决定了吹填地基土一般由粗细粒共存、粒径级配不连续的砂-黏土混合物构成，其中近海黏土往往具有含水率和孔隙水盐分高、孔隙比大、灵敏度高等特点[4]。

目前，已有一些学者开展了盐分对黏土性质的影响进行了研究，但多集中于土的沉积特性、膨胀特性、界限含水率及电极电位等方面。Kaya 等[5]研究了不同介电常数的有机溶液对黏土的离子交换能力、Zeta 电动势、颗粒级配、界限含水率的影响。含砂量对砂-黏土混合物工程性质影响的相关研究则主要集中在混合土的液塑限、膨胀特性、渗透特性和强度特性等方面，其他相关性质的研究有所欠缺。汪龙等[6]基于膨润土-砂混合物研究发现，砂含量增加会导致混合土液塑限与塑性指数均减小。李培勇等[7]通过有荷膨胀试验，揭示了轴向应力与膨胀应变的关系以及吸水量与膨胀应变、轴向应力之间的关系。Chijimatsu 等[8]将关注点放在高密实砂-膨润土的渗透特性上，发现掺砂率并不会对其渗透率造成影响，其渗透率与有效干密度间的关系可直接用函数表示，后续 Samingan[9]的研究在此理论基础上也验证了该结论。Miller 等[10]通过对不同砂含量的黏土进行固结不排水三轴试验(CU)，发现当含砂量在 67%以下时，含砂量的增加只会使黏聚力小幅增加，当含砂量在 67%～74%时，随着含砂量增加，黏聚力减小和内摩擦角增大的幅度均较为明显，当含砂量在 74%以上时，黏聚力仍与含砂量呈负相关关系，而内摩擦角则趋于稳定，进一步明确了砂含量对混合土抗剪强度的影响。

综上可看出，目前关于含砂量对黏土的影响研究，其对象均为一般黏土或膨润土，然而，沿海城市地基土大多为软土，且由吹填造陆工程形成的地基土类型为含有不同盐分浓度的海相土，但目前关于含砂量对含盐软黏土工程性质的影响尚不明确。此外，为保障建构筑物安全，我国对土建工程地基变形的要求日趋严格。地基土的压缩特性是揭示地基变形规律的核心，而吹填地基土多为工程性质极差的软土，因此，开展含砂量对含盐软黏土压缩特性的影响研究具有重要现实意义。然而，目前此类研究尚较为匮乏，对其细观作用机制的探讨也仍不明确。

针对上述存在的问题，本文以江苏省连云港赣榆港区人工吹填造陆软土地基的沉降分析与控制为工程背景，参照人工吹填的砂-黏土混合物中的砂含量及孔隙水盐浓度，在室内进行人工配制含盐砂-黏土混合物，依照现场吹填土样，设计不同配比的含砂量和孔隙水盐浓度与黏土混合制样，以模拟实际工况，再对试样进行一维固结压缩试验，分析含砂量对含盐软黏土压缩特性的影响，最后对含砂含盐软黏土进行固结试验的数值模拟，探讨含砂含盐软黏土宏观力学行为的微细观机制，以揭示盐分和砂含量对软黏土压缩特性的影响规律及其机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用连云港赣榆港区吹填土(砂-黏土混合物)，X 射线衍射(X-ray diffraction，XRD)试验结果显示，高岭石和蒙脱石为混合土中黏土主要赋存的黏土矿物，两者比例约为 4∶1。施工报告显示，现场吹填土成分较为复杂，且施工过程及现场取样无法保证混合物均匀性和代表性，难以探讨含砂量对土样基本性质的影响，而室内可以控制砂的含量及黏土矿物组成保持一致，因此，本文试验采用室内配制砂-黏土混合物，以替代现场土样。

试验所用黏土为高岭土(成分为高岭石)与膨润土(成分为蒙脱石)混合而成。高岭土取自江苏徐州，成分为大量的 Al_2O_3 和 CaO 及少量的 Fe_2O_3；膨润土取自江苏镇江，主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3。试验测得的两者基本物理性质指标见表 1。

表 1　高岭土和膨润土基本物理性质指标

Tab. 1　Basic physical properties of kaolin and bentonite

试验材料	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
高岭土	2. 68	42	23	19
膨润土	2. 75	302	95	207

江苏沿海地区港口紧邻黄海，连云港港区作为亚欧大陆桥的起点，其广泛分布的海相沉积软土在以往工程中已有一定的研究，邓永锋等[11]依托连临高速公路与临海高等级公路工程进行了取样，选取两工程距海岸线 50 m(1#点位)和 30 km(2#点位)两处位置，分析了两处土体埋深 5 m 处的主要参数。两处场地土样孔隙水化学成分分析结果见表 2，Na^+、Cl^-分别为孔隙水中的主要阳、阴离子，因此，本文试验采用 NaCl(分析纯)配制孔隙水溶液。

表 2　连云港软土孔隙水化学成分

Tab. 2　Chemical composition of pore water of Lianyungang soft clay

点位	离子浓度/(g·L^{-1})					总离子质量分数/‰
	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	
1#	3. 51	25. 53	0. 57	2. 10	14. 00	49. 10
2#	0. 01	0. 37	0. 03	0. 02	0. 45	0. 90

对取回的现场吹填土样进行颗分试验发现，砂粒粒径均小于 0. 25 mm，且砂含量(砂质量占混合土总质量的百分比)为 32%，故试验用砂采用石英砂，主要成分为 SiO_2，将其通过 0. 25 mm 筛，取粒径小于 0. 25 mm 的细颗粒砂进行试验。

为了使室内配制的砂-黏土混合物更加接近现场吹填土样，设计黏土部分由高岭土和膨润土以 4:1 的比例进行混合。由于现场吹填土中孔隙水盐分浓度不一，配制 0%、1%、3%、5%质量分数的 NaCl 溶液，用以研究孔隙水盐分对软土的压缩特性的影响；同时设计掺砂量为 0%、20%、30%和 40%，其中 30%砂含量组对应现场设计工况，0%含砂量组作为参考试样，其余两组是为了模拟现场吹填不均匀的真实工况，用以研究不同砂含量下混合土的压缩特性。

1. 2　试验方法

1. 2. 1　试样制备

试样制备过程：1)按高岭土与膨润土的质量比为 4:1 的设计配比分别称取相应质量的高岭土和膨润土，将其制成复配黏土；2)按盐质量分数分别为 0%、1%、3%和 5%配制不同浓度的 NaCl 溶液，并以 1. 2 倍液限的目标含水率制备含盐复配黏土；3)将过 0. 25 mm 筛的石英砂按 0%、20%、30%和 40%含量设计配比与含盐复配黏土混合；4)用密封膜密封，在温度为 20 ℃、相对湿度为 95%的条件下养护 24 h；5)将养护完成的试样填入环刀并进行抽真空饱和。根据 JTGE 40—2007《公路土工试验规程》[12]进行室内试验，得到试样初始参数，见表 3。

表 3　固结试验初始参数

Tab. 3　Initial parameters for consolidation test

砂含量/%	盐质量分数/%	密度/(g·cm^{-3})	初始含水率/%	初始孔隙比
0	0	1. 51	87. 0	2. 35
0	1	1. 53	80. 7	2. 18
0	3	1. 54	79. 6	2. 15
0	5	1. 55	78. 1	2. 11
20	0	1. 53	81. 5	2. 15
20	1	1. 74	46. 7	1. 25
20	3	1. 78	43. 4	1. 14
20	5	1. 79	41. 6	1. 11
30	0	1. 59	62. 8	1. 71
30	1	1. 75	44. 4	1. 20
30	3	1. 80	42. 6	1. 11
30	5	1. 77	40. 9	1. 07
40	0	1. 64	50. 9	1. 45
40	1	1. 78	39. 2	1. 13
40	3	1. 87	38. 6	0. 98
40	5	1. 86	38. 0	0. 98

1. 2. 2　固结试验

固结试验采用常规一维固结仪，试验过程中试样饱和，试样高度为 20 mm，直径为 61. 8 mm。

水运工程

本文试验按 1、3.125、6.25、12.5、25、50、100、200、400、800、1 600 kPa 的荷载依次加载，以 24 h 作为加载时间标准。

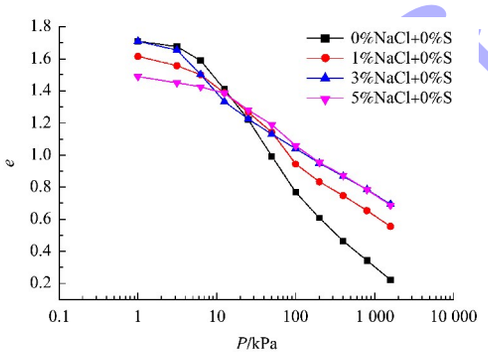
2　结果与分析

2.1　含砂量对含盐软黏土压缩曲线的影响

2.1.1　孔隙水盐分对软黏土压缩曲线的影响

按盐质量分数 0%、1%、3%和 5%的浓度梯度用 NaCl(分析纯)配制模拟孔隙水溶液，制样后进行固结试验，得到含不同浓度孔隙水溶液时软黏土的 e-lgσ'_v(e 为孔隙比，σ'_v为竖向有效应力)曲线。

孔隙水中不含盐分时软黏土的压缩曲线变化范围明显比含盐软黏土的变化范围要大，这说明盐分的加入使得软黏土的压缩性减小。同时可看出，随着盐质量分数的增大，软黏土的压缩曲线变化范围逐渐减小，即软黏土的压缩性逐渐减小，且随着孔隙水盐浓度的增大，压缩性变化幅度有所减小，见图 1。



图例中加号前后的字符分别表示混合土体中盐分在溶液中的质量分数和砂含量，例如 5%NaCl+0%S 表示混合土体中 NaCl 溶液的质量分数为 5%且未掺砂；P 为荷载。

图 1　不同孔隙水盐分条件下的软黏土压缩曲线

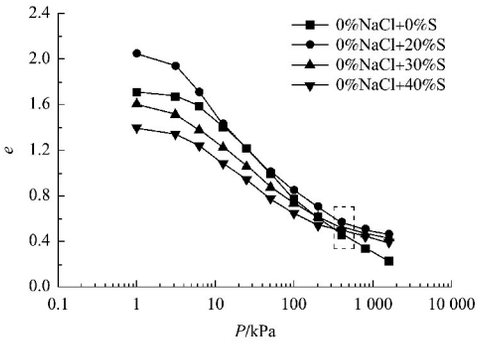
Fig. 1　Compression curves of soft clay under different pore water salinity conditions

分析其原因，主要有以下两个方面：一是通过改变重塑试样的初始含水率，进而影响初始孔隙比，本文试验初始目标含水率均为 1.2 倍液限，而盐质量分数的增加降低了软黏土的液限，使得制样得到的初始含水率降低，进而导致重塑土样初始孔隙比减小；另一方面，黏土天然具备一定的结构性，盐分的加入使土颗粒发生絮凝作用，表现出团粒化[13-14]，在此基础上的试样结构改变增大了颗粒之间的抗剪强度，从而导致压缩性减小。

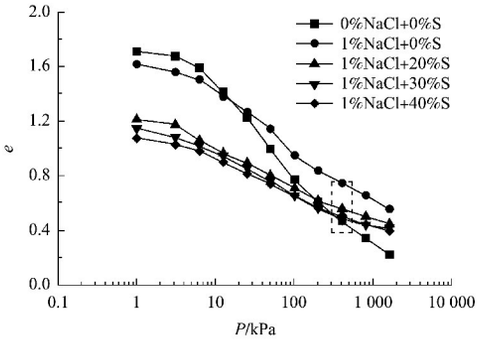
2.1.2　含砂量对含盐软黏土压缩曲线的影响

考虑含砂量对含盐软黏土压缩曲线的影响，按上述配比制样，分别进行固结试验，在任意 NaCl 浓度下，砂的掺入均会使软黏土的压缩性减小。砂-黏土混合物压缩曲线呈现出三阶段变化趋势：1)初始阶段，大致在施加荷载介于 1~3.125 kPa 之间时，由于外部荷载较小，尚未达到重塑土的屈服应力，试样仅发生微小的弹性形变，孔隙比也只有轻微下降；2)加速压缩阶段，此时竖向有效应力已经超过了重塑土的屈服应力，土体发生塑性形变，导致试样产生明显变形，孔隙比随之以较显著的梯度持续减小；3)与未掺砂软黏土压缩曲线相比，两者最大差异在于，当竖向有效应力达到约 400 kPa 时，掺砂含盐软黏土的压缩曲线出现了拐点，孔隙比减小幅度明显变小，曲线变缓，这与文献[13]、[14]中的黏土压缩曲线不同。Wang[15]、吴子龙[16]在 Fukue[17]研究的基础上将这种现象解释为在外部荷载作用下，砂骨架在砂-黏土混合物中生成，故而砂颗粒间的相互接触抑制了土样的继续变形，具体表现见图 2a)。

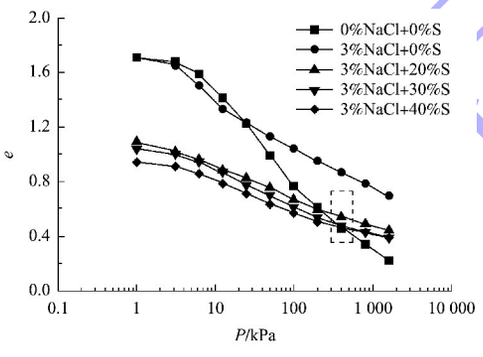
未掺砂含盐软黏土试样测得的压缩曲线下降比率较不含盐软黏土试样明显降低，可得盐分的加入使软黏土的压缩性减小，与前述一致。最关键的现象是，砂的掺入使含盐软黏土的压缩性进一步减小，压缩曲线进一步下移，作用明显；且随着含砂量的增大，含盐软黏土的压缩曲线逐渐下移，但下移幅度明显减小，见图 2。分析上述现象的原因，主要是由于含盐软黏土中的一部分黏土被不具有孔隙的砂粒所取代，致使孔隙比降低，压缩性减小。而盐分的加入也抑制了黏土孔隙比的减小，从而减小了含砂软黏土的压缩性。



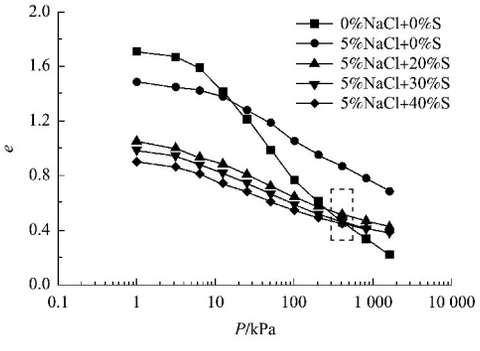
a) 0%NaCl



b) 1%NaCl



c) 3%NaCl



d) 5%NaCl

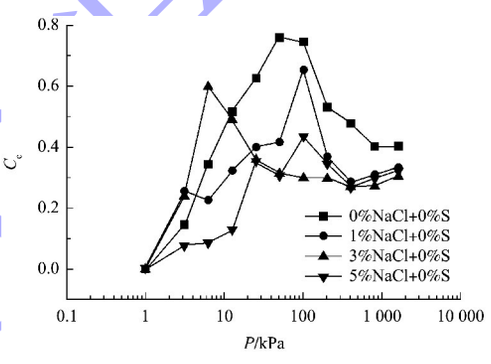
图 2　含砂量对含盐软黏土压缩曲线的影响

Fig. 2　Effect of sand content on compression curve of saline soft clay

2.2　含砂量对含盐软黏土压缩指数的影响

2.2.1　孔隙水盐质量分数对软黏土压缩指数的影响

盐分的加入明显降低了软黏土的压缩指数，部分荷载条件下下降比例超过 50%，但随着孔隙水盐质量分数的提高，降低幅度有所减小。换言之，控制固结应力不变的条件下，软黏土的压缩指数与孔隙水盐浓度间的关系呈负相关，不同孔隙水盐浓度下软黏土压缩指数较不含盐软黏土降低 20%~60%不等。这主要是由于盐分使土颗粒产生团粒化作用，使其结构发生改变，导致压缩性减小，见图 3。



C_c 为压缩指数。

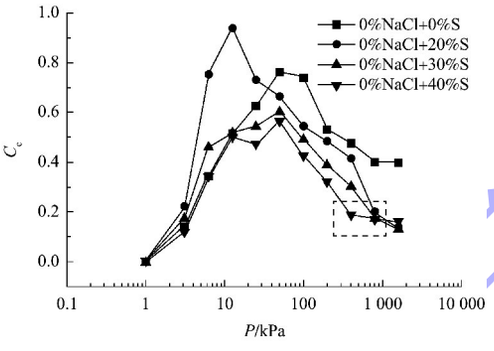
图 3　孔隙水盐分对软黏土压缩指数的影响

Fig. 3　Effect of pore water salinity on compression index of soft clay

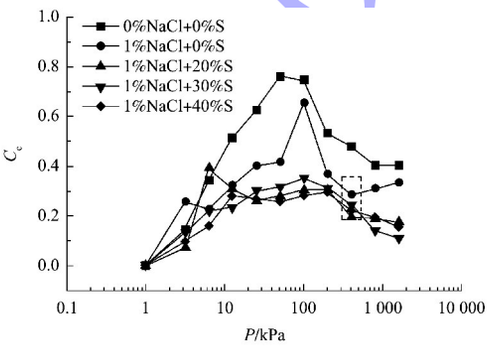
2.2.2　含砂量对含盐软黏土压缩指数的影响

砂的掺入使软黏土(0% NaCl)的压缩指数减小，且含砂量越高，其压缩指数越小。在较低的荷载条件下，含盐软黏土(含砂量为 0%)与砂-黏土混合物的压缩指数均随着有效应力的增大而呈上升趋势，但上升幅度与荷载条件并未表现出明显的线性关系，且存在一个峰值，这一表现与重塑土的屈服应力有所关联，见图 4。依据土体的弹塑性力学理论，结合文献［14］的研究成果推断，当固结压力低于重塑土屈服应力时，土体的压缩性较小，当固结压力接近屈服应力时土体压缩性会迅速增大，而固结压力超过屈服应力后含盐软黏土(含砂量为 0%)与砂-黏土混合物的压缩指数均会随着固结压力的增大而减小。

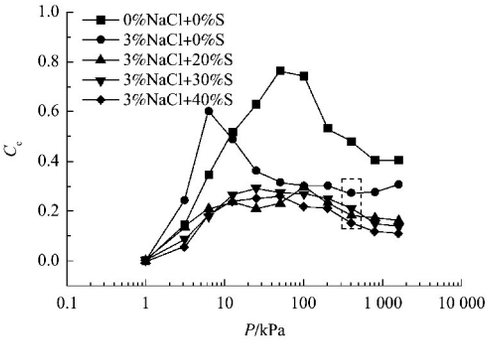
另一方面，盐分的存在使软黏土(含砂量为0%)的压缩指数减小，在此基础上，砂的加入使其压缩指数进一步减小，即砂的掺入使含盐软黏土的压缩指数减小。孔隙水盐质量分数为1%时，软黏土压缩指数峰值为0.65，含砂量为20%、30%、40%时压缩指数峰值分别为0.39、0.35、0.29；孔隙水盐质量分数为3%时，软黏土压缩指数峰值为0.60，含砂量为20%、30%、40%时压缩指数峰值分别为0.30、0.29、0.26；孔隙水盐质量分数为5%时，软黏土压缩指数峰值为0.43，含砂量为20%、30%、40%时压缩指数峰值分别为0.27、0.26、0.24。且随着含砂量的增大，压缩指数逐渐减小，减小幅度逐渐降低，见图4b)~d)。



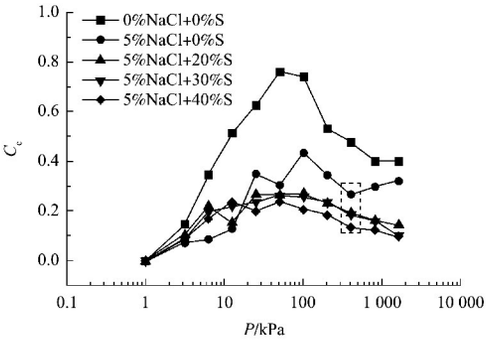
a) 0%NaCl



b) 1%NaCl



c) 3%NaCl



d) 5%NaCl

图 4　含砂量对含盐软黏土压缩指数的影响

Fig. 4　Effect of sand content on the compressibility index of saline soft clay

对比加盐时不同盐分含量下软黏土和砂-黏土混合物的压缩指数，含盐软黏土的压缩指数随着有效应力的增加呈现增大—减小—再在400 kPa附近缓慢增大的趋势，而砂-黏土混合物的压缩指数在400 kPa附近出现较明显降低，这一区别对砂骨架的形成有一定的印证作用。当施加于砂-黏土混合物上的有效应力达到400 kPa左右时，砂骨架的形成阻碍了混合土体进一步的变形，导致压缩指数明显减小。另一方面，不同孔隙水盐质量分数条件下曲线拐点均处于400 kPa荷载附近，表明砂骨架的形成主要由外部荷载控制，而孔隙水盐质量分数影响不大。

2.3　砂颗粒对软黏土压缩特性的影响机制分析

为解释含砂软黏土不同于纯黏土的压缩特性，本文采用FLAC 3D有限差分软件[18]，模拟其压缩过程，从微细观的角度解释其原因。砂颗粒的随机分布通过FLAC 3D自带的FISH语言编程实现，首先建立单一的黏土组分(group soil)，通过随机函数从中提取单元编号，将砂组分(group sand)赋予所提取的黏土单元，实现单元材质的替换，最后通过计算并调整砂单元体积占比来模拟不同砂含量的工况。

模型建立对象为砂-黏土混合物，故需参照复合材料建模，建立单元基准为砂颗粒。为减小计算量并尽量贴近实际工况，单元边长设为1 mm。简化固结试验模型尺寸后，其长、高及厚度分别取60、20、1 mm。为使结果具有显著的参照效果，以上述尺寸建立矩形网格，生成后共有1 200个单元，2 562个节点。材料初始参数见表4。

表 4　材料初始参数

Tab. 4　Initial materials parameters

材料	本构模型	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	渗透系数/(cm·s^{-1})	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
砂	弹性	2 600	4. 7	4. 3	0. 15	–	–	–
黏土	莫尔-库仑	1 850	6. 7×10^{-4}	4×10^{-4}	0. 25	10^{-7}	11	0

压缩试验数值模型采用轴对称模型，以简化计算。以模型左下角端点为原点建立坐标系，为模拟固结试验两端边界，水平方向上在 $x=0$、$x=0.06$ m 两个平面设置滑动支座约束以限制位移；为符合固结试验试样下接触面无位移的实际情况，竖直方向上于 $z=0$ 平面设置固定支座约束。以 30%含砂量为例，生成后的固结试验模型见图 5。模拟荷载的施加位置位于模型上部 $z=0.02$ m 平面处，分别以 50、100、200、400、800、1 600 kPa 的荷载进行模拟，见图 5。

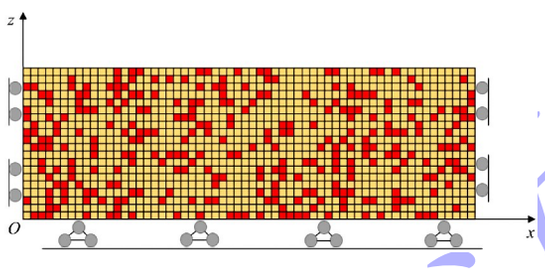
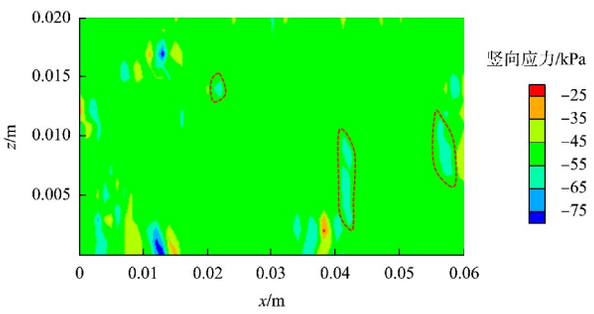


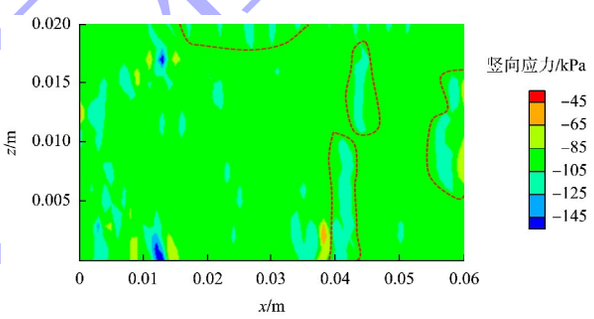
图 5　30%含砂量软黏土固结试样模型

Fig. 5　Consolidation specimen model of soft clay with 30% sand content

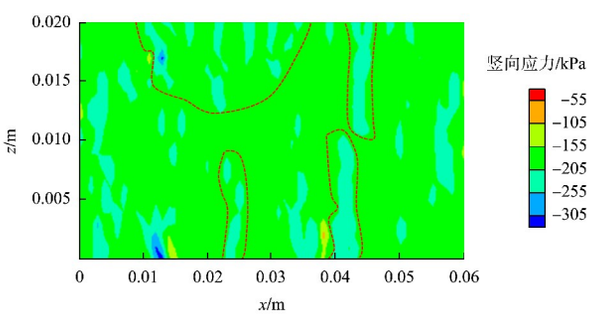
30%含砂量的软黏土数值计算变形稳定条件下的竖向应力云图见图 6。当竖向应力为 50 kPa 时，云图显现零星的竖向条状应力带，表示模拟试样的内部应力已经出现不均匀分布，模型内部其他部位所承受的应力要小于条状应力带处，而条状应力带内部应力分布较为均匀；增大荷载，当竖向应力增至 100、200 kPa 时，承受应力较大的竖向条状应力带数量增多且影响区域增大；当荷载进一步增加，到达 400 kPa 时，竖向条状应力带已经纵向贯穿整个模型，可以推断出外部荷载主要由砂颗粒承担，且已经形成了纵向贯穿模型的砂骨架，与此同时混合土体变形开始逐渐减小；施加 800 kPa 荷载后，竖向条状应力带分布更为广泛，其代表的砂骨架发育得更完全；进一步增加荷载，在 1 600 kPa 荷载条件下，条状应力带的形态与 800 kPa 时相比并不存在明显的变化，据此可以推断荷载达到 800 kPa 时砂骨架已充分发育。



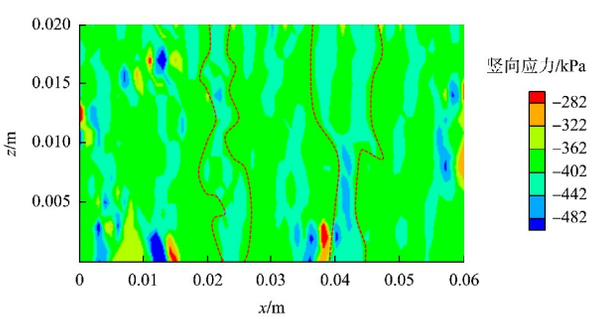
a) 50 kPa



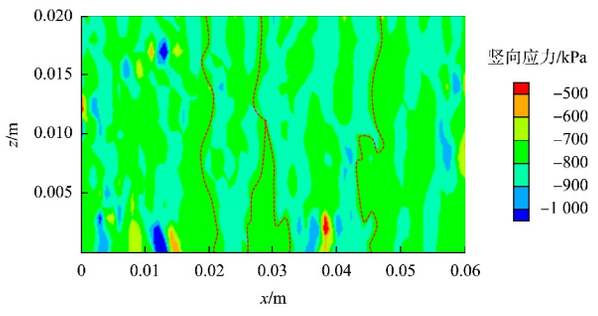
b) 100 kPa



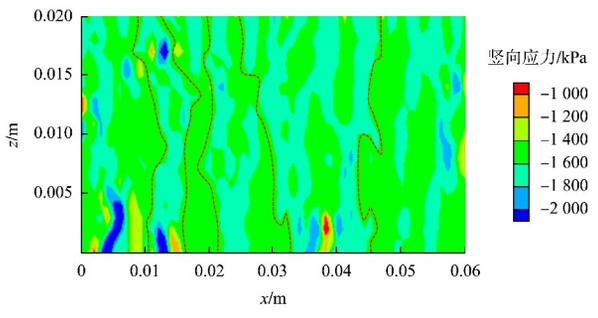
c) 200 kPa



d) 400 kPa



e) 800 kPa



f) 1 600 kPa

图 6　不同荷载作用下的竖向应力分布

Fig. 6　Vertical stress distribution under different loads

3　结论

1）盐分的存在和砂的掺入均会导致软黏土的压缩曲线下移，压缩指数减小，压缩性降低；且随着孔隙水盐浓度或砂含量的增大，软黏土的压缩性均逐渐减小，但减小幅度也逐渐降低。

2）砂的掺入明显使含盐软黏土的压缩性进一步减小。在固结应力为 400 kPa 附近时形成拐点，显示了砂-黏土混合物压缩性变化的两阶段性。荷载较小时含砂软黏土压缩性主要由黏土控制的阶段，黏土颗粒受盐分影响团粒化而影响压缩性；荷载较大时含砂软黏土中形成砂骨架，压缩性转由砂骨架控制。

3）基于 30% 含砂量的软黏土压缩过程进行数值模拟，固结过程中出现了竖向的条状高应力带，表明该处砂颗粒承担了大部分竖向应力。这一应力带现象的显著程度受荷载影响，且呈正相关，荷载为 400 kPa 时竖向条状应力带基本贯穿模型，800 kPa 时应力带发展完全，但孔隙水盐浓度对砂骨架的形成未显示出明确影响。模拟结果所显示的固结压缩过程荷载-应力分布形态与宏观压缩特性基本一致，表明当外部荷载较大时，砂骨架形成，含砂软黏土压缩性由砂骨架控制。

参考文献：

[1] 王芳, 郭进京, 郑忠成. 吹填土地基处理方法的讨论[J]. 岩土工程界, 2009(6): 15-17.
WANG F, GUO J J, ZHENG Z C. Discussion on treatment method of dredger fill foundation [J]. Geotechnical engineering world, 2009(6): 15-17.

[2] 赵树光, 杨秋芳. 盐田港东作业区软土特性及地基处理方案比选[J]. 水运工程, 2025(3): 145-151, 181.
ZHAO S G, YANG Q F. Soft soil characteristics and comparison of foundation treatment schemes in east operation area of Yantian Port [J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 145-151, 181.

[3] 刘晓鹏, 孙新鹏, 任增金, 等. 大荷载矿石堆场中深厚吹填软土的地基处理及后评价[J]. 水运工程, 2024(3): 178-183.
LIU X P, SUN X P, REN Z J, et al. Foundation treatment and post evaluation of deep hydraulic fill soft soil in heavy load ore storage yards [J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 178-183.

[4] 邓安华, 孙振涛, 张磊. 静动力排水固结法处理吹填海相泥沙软基试验研究[J]. 水运工程, 2024(4): 162-167, 195.
DENG A H, SUN Z T, ZHANG L. Treatment of hydraulic fill marine soft soil ground using static and dynamic drainage consolidation method [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 162-167, 195.

[5] KAYA A, FANG H Y. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils [J].

Canadian geotechnical journal, 2000, 37(5): 943-950.

[6] 汪龙, 方祥位, 申春妮, 等. 膨润土-砂混合型缓冲/回填材料液塑限试验[J]. 后勤工程学院学报, 2013, 29(6): 1-5.
WANG L, FANG X W, SHEN C N, et al. Study on liquid and plastic limit of bentonite sand mixtures as buffer/backfilling materials [J]. Journal of logistical engineering university, 2013, 29(6): 1-5.

[7] 李培勇, 杨庆, 栾茂田, 等. 膨润土加砂混合物膨胀特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1333-1336.
LI P Y, YANG Q, LUAN M T, et al. Study of swelling properties of bentonite-sand mixture [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(5): 1333-1336.

[8] CHIJIMATSU M, SUGITA Y, AMEMIYA K. A study on manufacturing and construction method of buffer[R]. Ibaraki: Japan Nuclear Cycle Development Institute, 1999.

[9] SAMINGAN A S. An experimental study on hydro-mechanical characteristics of compacted bentonite-sand mixtures [D]. Weimar: Bauhaus-University, 2005.

[10] MILLER E A, SOWERS G F. The strength characteristics of soil-aggregate mixtures & discussion [J]. Highway research board bulletin, 1958(183): 16-32.

[11] 邓永锋, 岳喜兵, 张彤炜, 等. 连云港海相软土在孔隙水盐分溶脱环境下的固结特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 47-53.
DENG Y F, YUE X B, ZHANG T W, et al. Consolidation behaviors of soft marine clay in Lianyungang under desalination environment of pore water [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37 (1): 47-53.

[12] 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Test methods of soils for highway engineering: JTG E40-2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[13] 张彤炜, 邓永锋, 刘松玉, 等. 渗透吸力对重塑黏土的压缩和渗透特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2260-2266.
ZHANG T W, DENG Y F, LIU S Y, et al. Experimental investigation of osmotic suction effect on hydro-mechanical behaviour of remolded clay [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(12): 2260-2266.

[14] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents [J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691-700.

[15] WANG Q, MINH TANG A, CUI Y J, et al. The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite-sand mixture [J]. Soils and foundations, 2013, 53(2): 232-245.

[16] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 砂-黏土混合物的压缩性状及其粗颗粒骨架形成机制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 121-128.
WU Z L, ZHU X Y, DENG Y F, et al. Compression behavior of sand-clay mixtures and formation mechanism of coarse granulesand skeleton [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(2): 121-128.

[17] FUKUE M, OKUSA S, NAKAMURA T. Consolidation of sand-clay mixtures [M]//Consolidation of soils: testing and evaluation. West Conshohocken: ASTM International, 1986.

[18] 田文斌. 高含水率疏浚泥沉积固结联合试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
TIAN W B. Experimental study on sedimentation-consolidation behavior of dredged clays at high water contents[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

(本文编辑　王传瑜)

水运工程