

改性土-膨润土竖向隔离墙材料的 压缩及渗透特性试验研究

杜延军, 范日东

(东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 膨润土系竖向隔离墙作为阻滞污染物的工程屏障有效且经济。采用沸石改性传统的土-膨润土竖向隔离墙存在抗腐蚀性弱等耐久性不足的同时, 必须考虑其压缩、渗透等工程性质的变化。通过一维压缩固结试验, 研究了不同沸石及膨润土掺量下膨润土系隔离墙材料的压缩固结和渗透特性。引入评价天然重塑黏土的压缩、渗透特性的归一化孔隙比 e/e_L 和评价天然重塑黏土固有压缩特性的孔隙指数 I_v 两种归一化评价体系, 进一步探讨了添加沸石改性前后膨润土系竖向隔离墙混合土的压缩和渗透特性。

关 键 词: 隔离墙; 固结; 压缩性; 渗透性
中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Compressibility and permeability behavior of two types of amended soil-bentonite vertical cutoff wall backfills

DU Yan-jun, FAN Ri-dong

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Soil-bentonite vertical cutoff walls are effective and economical as engineering barriers for geoenvironmental containment. The compressibility and permeability of zeolite-amended soil-bentonite vertical cutoff walls for the purpose of enhancing the chemical compatibility have not been well addressed. These two engineering properties of soil-bentonite backfills before and after amended with zeolite are assessed via a series of oedometer tests. The results are discussed using the generalized state parameter (i.e. e/e_L) and the void index I_v , which are used to analyze the intrinsic properties of remolded clays.

Key words: cutoff wall; consolidation; compressibility; permeability

1 引 言

竖向隔离墙作为一项经济有效技术, 已广泛应用在固体废弃物填埋场、城市工业污染场地的防污防渗工程实践中。我国目前多采用以塑性混凝土为墙体材料的防渗帷幕(墙)对垃圾填埋场淋漓液等进行竖向隔离^[1]。对于城市工业污染场地的隔离, 英国等欧洲国家大多采用水泥-膨润土系竖向隔离墙^[2], 美国则更推荐膨润土系隔离墙^[3]。已有研究表明, 硫酸盐等污染会明显腐蚀水泥-膨润土系竖向隔离墙、抑制水泥的水化反应^[4-5]; 在水泥-膨润土系竖向隔离墙施工过程中, 墙体浇筑的均匀性难以

保证, 造成隔离墙阻滞污染物的能力降低和原有工程特性的改变^[4]。

土-膨润土系(以下简称膨润土系)竖向隔离墙由于施工简便、成本低廉、抗渗能力强, 已被广泛应用于污染场地修复领域。膨润土系竖向隔离墙较水泥-膨润土系竖向隔离墙则具有渗透系数低、墙体均匀性好等优点^[6]。此外, 膨润土系竖向隔离墙的使用避免了大量使用水泥, 符合 CO₂ 减排的环保政策。然而工程实践中发现, 膨润土系竖向隔离墙同样面临抗化学腐蚀能力弱的问题, 例如, D'Appolonia^[7]的试验表明土-钠基膨润土经 NaOH 溶液渗透时渗透系数增加 5~10 倍; 有机物溶液、

电解质溶液浓度增大或强酸作用下均会导致黏土尤其是膨润土的结构发生改变并使渗透系数呈数量级增大^[8]。为此,通过添加改性材料以改善膨润土系竖向隔离墙与化学污染液的兼容性,并研究改性材料对膨润土系隔离墙的工程特性已成为研究的热点之一,如 Malusis 等^[9]研究了添加活性炭改性剂后的砂土-膨润土竖向隔离材料的压缩、渗透性。

沸石在环境岩土领域的应用包括阻滞酸性矿山废水等污染液^[10]、废弃物填埋场衬垫^[11]和重金属污染土安定/固化^[12]等。与膨润土比较而言,沸石具有耐酸碱性、吸附固定重金属效果佳、金属离子解吸能力弱等优势,尤其适用于受到重金属污染的场地修复技术^[13-14],有望作为膨润土系隔离墙的改性材料,增强其耐酸碱性和重金属污染物吸附能力^[15];同时,要求添加沸石后作为隔离墙主要设计参数的压缩指数和渗透系数没有明显增大。

本次以高岭土/膨润土混合土以及沸石改性的高岭土/膨润土混合土作为竖向隔离墙材料,进行了系列压缩固结试验,并探讨添加沸石改性的高岭土/膨润土混合土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性;将 Nagaraj 等^[16]用以评价天然重塑黏土压缩、渗透特性的归一化孔隙比 e/e_L 扩展到膨润土系隔离墙混合土材料,并分析比较初始含水率对归一化压缩曲线的影响;将 Burland^[17]用以评价天然沉积重塑黏土的压缩特性的孔隙指数 I_v 引入膨润土系隔离墙混合材料土,并以此讨论其压缩特性。

2 材料特性和试验方法

由于隔离墙混合土中原位土因场地不同而异,故本次试验选用有普遍工程适用意义的商用高岭土作为墙体的原位土,膨润土选用商用钠基膨润土,沸石也为商用土。3 种土的基本物理特性见表 1。

表 1 膨润土、沸石和高岭土的基本物理特性

Table 1 Properties of soils used in the test

参数	膨润土	沸石	高岭土
天然含水率 w_0 / %	16.8	8.52	2.96
塑限 w_p / %	95.4	28.2	21.2
液限 w_L / %	320.7	72.2	32.3
黏粒含量 / %	43.7	35.6	45.6
土粒相对密度 G_s	2.67	2.73	2.70

混合土料由高岭土、膨润土、沸石按一定配合比(三者干土的质量比)均匀混合并按设计含水率加水人工搅拌约 10 min。为制备固结试验的制样,将混合土料分 3 层填入环刀,每次填入后紧压环刀

于垫板垂直振锤 30 次并剔除表面“抱团”气泡。最后将试样两侧刮平并附上滤纸,置于饱和器中浸水饱和 24 h。

混合土料分为高岭土/膨润土混合土和沸石改性高岭土/膨润土混合土两类。膨润土掺量的设计值分为 5% 和 10% (记 B5 和 B10); 沸石掺量的设计值分为 0、10%、20% 和 40% (记 Z0、Z10、Z20 和 Z40), 掺量百分数均为膨润土或沸石的干土质量与高岭土干土质量之比。

实际工程中,膨润土系竖向隔离墙施工中墙体膨润土量包括混合涂料中所添加的膨润土干粉,以及采用膨润土-水比为 5: 95 的膨润土浆拌合时其中的膨润土量^[18-19]。沸石改性混合土试样的配合比模拟上述施工要求: 当沸石掺量为 X_{zeo} %, 设计含水率为 w % 时, 配合比计算采用式 (1)。

$$\left. \begin{aligned} M_{zeo} &= M_{kao} X_{zeo} \\ M_{bens} &= M_{slurry} \times 5\% \\ M_{ben} &= M_{bend} + M_{bens} = M_{kao} a + M_{bens} \\ w &= \frac{M_{slurry} - M_{bens}}{M_{kao} + M_{zeo} + M_{bend} + M_{bens}} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: M_{zeo} 、 M_{ben} 、 M_{kao} 、 M_{slurry} 分别为试样中沸石、膨润土、高岭土的干土质量及膨润土浆质量 (g); M_{bend} 、 M_{bens} 分别为膨润土干粉及膨润土浆中的膨润土质量 (g); a 为膨润土干粉的设计掺量 (%); w 为设计含水率 (%)。

文献[9, 19]表明,膨润土系隔离墙材料施工时其含水率需满足施工坍落度 (100~150 mm), 此时隔离墙的含水率一般可达到土-膨润土的混合土液限的 1~1.5 倍。据此,本次试验的高岭土/膨润土混合土试样的设计含水率取混合土液限的 1.0 倍和 1.25 倍 (记 LL1.0 和 LL1.25); s 沸石改性混合土试样的设计含水率取 50%, 近似等于各自液限。各组试样液限及实际初始含水率见表 2。

表 2 混合土试样的液限及试样初始含水率

Table 2 Liquid limits and initial water contents for all samples

土样	初始含水率 w_0 / %	液限 w_L / %
B5Z0	50.0	51.1
B5Z10	49.3	50.8
B5Z20	49.9	50.5
B5Z40	50.3	53.2
B5LL1.0	43.9	42.5
B5LL1.25	52.2	42.5
B10LL1.0	54.1	54.6
B10LL1.25	68.1	54.6

最终制备试样共 8 组, 分别记为 B5Z10、B5Z20、B5Z40 (沸石改性混合土试样), B5Z0、B5LL1.0、B10LL1.0、B5L1.25、B10LL1.25 (高岭土/膨润土混合土试样)。沸石改性混合土试样的实际膨润土掺量分别为 7.84% (B5Z10)、8.06% (B5Z20) 和 8.49% (B5Z40); B5Z0 中实际膨润土掺量为 7.62%。

固结试验加载按荷载率 (加载增量与前一等级荷载比值) 为 1 进行, 分为 3.125、6.25、12.5 kPa 至最终级荷载为 800 kPa 或 1 600 kPa (包括 B10LL1.0 及 B10LL1.25 两组)。

试样在各荷载下固结完成后, 其渗透系数 k 根据上述固结试验所得固结系数 C_v 及体积压缩系数 m_v 结果计算得到:

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的重度, 取 9.81 kN/m^3 。

3 试验结果

图 1(a) 为在控制初始含水率和保持试验试样质量一致的条件下沸石改性混合土试样的压缩曲线。由图可见曲线基本重合, 表明不同掺量沸石改性下并不改变隔离墙材料的压缩特性。随着固结应力的增大, 具有不同初始含水率的高岭土/膨润土混合土的压缩曲线逐渐趋于一致, 如图 1(b) 所示。

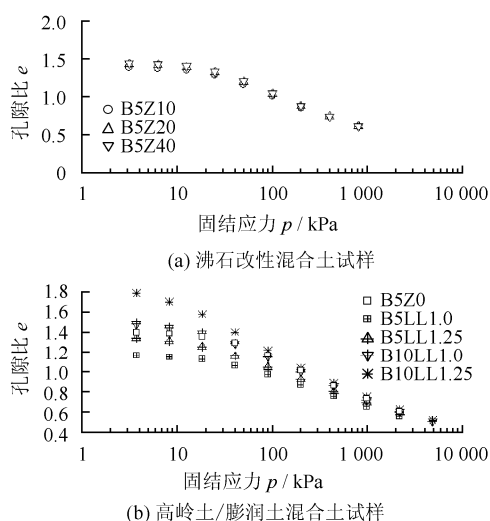


图 1 压缩曲线
Fig.1 Compression curves

各组试样的压缩指数 C_c 见表 3。从表 2 不难发现, 相同膨润土掺量条件下初始含水率自 1 倍液限增至 1.25 倍液限时, 试样压缩指数有所增加。图 2(a) 显示试验压缩指数 C_c 与液限存在着正相关性, 但相关关系与文献[20]所述略有所不同。由表 2 可知, 试样的液限几乎不受沸石掺量的影响, 但随膨润土掺

量增加而明显增高。据此可知添加沸石以及沸石的掺量并不影响混合土压缩指数, 而膨润土掺量和初始含水率是影响压缩指数的主要因素。

Nagaraj 等^[21]认为, 高压缩性饱和黏土的压缩指数 C_c 在不同应力作用下为变值, 但 C_c 与初始比体积 $(1+e_0)$ 的比值压缩率 (compression ratio) 约为定值:

$$CR = \frac{C_c}{1+e_0} \quad (3)$$

式中: C_c 为压缩指数; e_0 为初始孔隙比。

表 3 混合土试样的压缩指数 C_c
Table 3 Compression index for all samples

试样编号	压缩指数 C_c	试样编号	压缩指数 C_c
B5Z0	0.468	B5LL1.0	0.339
B5Z10	0.464	B5LL1.25	0.372
B5Z20	0.489	B10LL1.0	0.459
B5Z40	0.494	B10LL1.25	0.534

D'Appolonia^[7]认为, 压缩率随细粒含量增加呈递增趋势。对于细粒含量为 20%~40% 的土-膨润土, CR 介于 0.02~0.07 之间。Baxter^[19]采用细粒含量为 35% 的细粒土质砂 (SC) 添加 1.5% 膨润土所得压缩率为 0.11~0.12。Malusis 等^[9]的试验得到活性炭改性砂-膨润土隔离墙材料的压缩率约为 0.09~0.12。图 2(b) 总结了文献[9, 19, 21]以及本文中所得压缩率与试样液限的关系。沸石改性混合土以及高岭土/膨润土混合土试样的压缩率与液限呈存在着较好相关关系。文献[9]中采用颗粒状活性

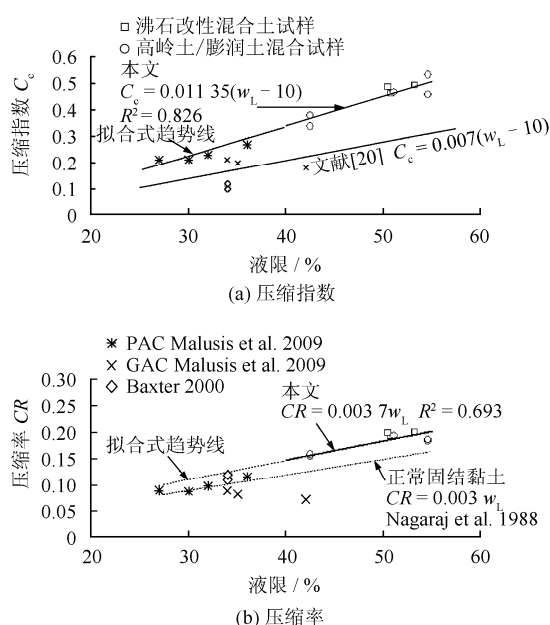


图 2 压缩指数和压缩率与试样液限关系
Fig.2 Compression index and compression ratio versus liquid limit

炭(GAC)改性的膨润土的压缩率与液限的相关关系离散性较大,而添加粉末状活性炭(PAC)的 C_c 与本文结果所拟合的趋势线相一致。

对比两种压缩性评价指标可以发现,配比成分相同、初始含水率不同的混合土压缩指数 C_c 受到初始含水率(或初始孔隙比)的影响,而配比成分相同、初始含水率不同的混合土的压缩率 CR 基本相同。采用压缩率指标可较好地消除初始含水率对相同配比成分混合土压缩特性的影响。

图3(a)为沸石改性混合土试样渗透系数与孔隙比关系曲线。尽管文献[22]认为沸石作为似砂土材料添加入黏土会造成其渗透性增加,但本次试验结果表明,添加0~40%沸石的4组试样的渗透系数并没有明显变化。高岭土/膨润土混合土渗透系数与孔隙比关系曲线如图3(b)所示,添加5%、10%膨润土的4组试样 $\lg e - \lg k$ 曲线呈线性。随着膨润土掺量的增加,同一孔隙比下试样的渗透系数发生明显降低,二者相差约5倍。由此可知,膨润土掺量是影响隔离墙混合土渗透性的主导因素。其主要原因在于随着膨润土掺量增加,混合土的双电层厚度变大,过水通道变得更加曲折所致。

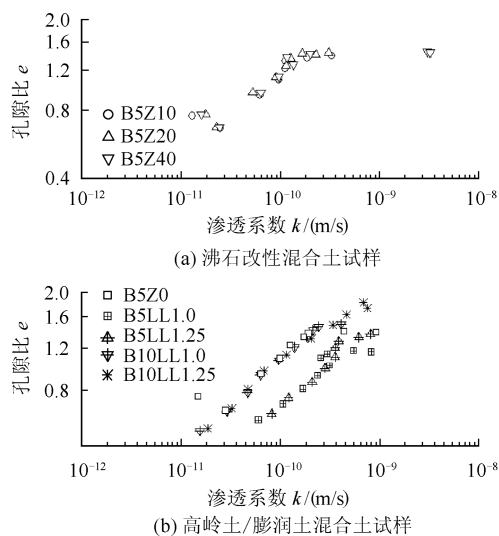


图3 渗透系数随孔隙比变化
Fig.3 Void ratio versus permeability

4 结果讨论

4.1 采用孔隙比 e/e_L 归一化

文献[16, 23]认为,液限状态下的微观结构不受机械扰动的影响,尽管液限状态下土体间含水率和孔隙比不尽相同,但控制其渗透性的有效孔隙尺寸基本相同。例如, Pandian 等^[24]研究表明数种天然及重塑黏土在液限时渗透系数十分接近,其数量级为 10^{-9} m/s。此外,液限状态下土体的孔隙水吸

力约为5~6 kPa;土体抗剪强度约为1.7~2.2 kPa,并处于与应力历史无关的状态^[24]。基于上述原因, Nagaraj 等^[25-26]以液限状态时的孔隙比 e_L 作为参考量,建立了初始含水率在液限附近时重塑饱和和无胶结黏土的归一化孔隙比(e/e_L)与固结应力和渗透系数的线性关系:

$$\left. \begin{aligned} e/e_L &= a - b \lg k \\ e/e_L &= c + d \lg k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

图4为各试样归一化孔隙比与固结应力曲线(以下简称归一化压缩曲线),其按初始归一化孔隙比约为1.0(图4(a))及1.25(图4(b))分为2组,实线为该2组曲线的拟合线。图4(a)中,各组沸石改性混合土与高岭土/膨润土混合土试样的归一化压缩固结曲线基本重合,并与文献[24, 26]所述重塑天然黏土的归一化压缩曲线相近。Cerato 等^[27]认为,重塑黏土的归一化压缩曲线随者归一化初始含水率(或初始孔隙比)的变化而上下平移,本文试验结果再次验证了该观点:归一化初始含水率为1.0、1.25的归一化压缩曲线不重合,但相互平行,从图4中拟合线的斜率和Y轴截距可以看出。

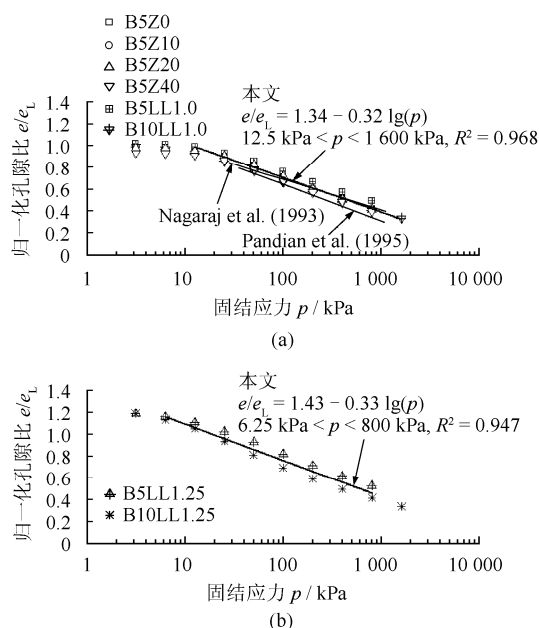


图4 不同归一化孔隙比初始值下的归一化压缩曲线
Fig.4 Generalized parameter e/e_L versus consolidation pressure for samples with different initial water contents

就本文的混合土而言,归一化初始含水率(或归一化初始孔隙比)决定了归一化压缩曲线是否重合,与沸石的掺量无关。对于归一化初始含水率为1.0~1.25之间的膨润土/高岭土及沸石改性混合土,其归一化压缩曲线可由图5中的两条平行的拟合线平移获得。

各组试样归一化孔隙比与渗透系数关系 (以下简称归一化渗透系数曲线) 如图 5 所示。由图可见, 归一化孔隙比与渗透系数之间存在线性关系; 归一化孔隙比等于 1.0 时所对应的渗透系数 (3×10^{-10} m/s) 明显低于文献[24, 28]重塑天然黏土所得的渗透系数 (10^{-9} m/s), 是因为本次采用的混合土与文献[24, 28]试验所用土的黏土矿物成分、颗粒级配不同所致。

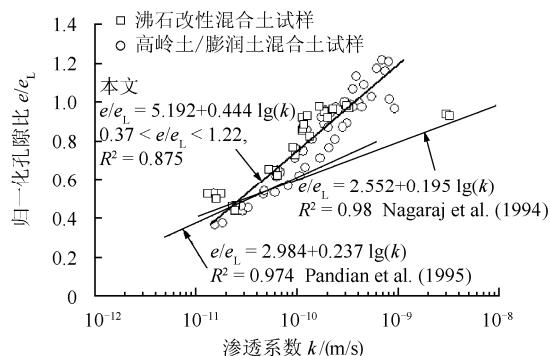


图 5 归一化孔隙比与渗透系数关系

Fig.5 Generalized parameter e/e_L versus permeability

4.2 采用孔隙指数 I_v 归一化

Burland^[17]采用孔隙指数 I_v 对初始含水率为 1.0~1.5 倍液限下的未经非风干或烘干的天然沉积的重塑黏土的压缩曲线进行归一化处理。孔隙指数 I_v 的理论定义为式 (5), 并可由经验式 (6) 拟合。

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{1000}^* - e_{100}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (5)$$

$$I_v = 2.45 - 1.285 \lg \sigma' + 0.015 (\lg \sigma')^3 \quad (6)$$

式中: e_{100}^* 、 e_{1000}^* 为固结应力, 100 kPa 和 1 000 kPa 时所对应的孔隙比; C_c^* 为固有压缩指数。此外, Burland^[17]提出了对于液限处于 25%~160%、土性划分在塑性图 A 线之上的天然沉积重塑土的 e_{100}^* 及 C_c^* 经验公式。

图 6 为本文试验结果的孔隙指数 I_v 与固结应力曲线 (即固有压缩曲线) 关系。从图中可知, 在固结应力小于 50 kPa 时固有压缩曲线无法重合; 随着固结应力的增大, 各压缩曲线趋于重合并与文献[23]相一致。高玉峰等^[29]以连云港黏性土为研究对象, 得到相类似的结果。

尽管试验试样液限介于 25%~160%; 位于塑性图 A 线之上, 但固有压缩常数 e_{100}^* (图 7(a))、 C_c^* (见图 7(b)) 与液限孔隙比 e_L 的相关关系与文献[17]中所述经验关系式有出入, 如图 7 所示。主要原因在于①图 7 中所示的经验关系式是基于天然沉积黏土所得, 本文采用的混合土与其黏土矿物组成不

尽相同; ②固有压缩常数 (e_{100}^* 和 C_c^*) 随初始含水率变化而改变^[30], 而 Burland (1990 年) 的经验公式则认为 e_{100}^* 和 C_c^* 与初始含水率无关。

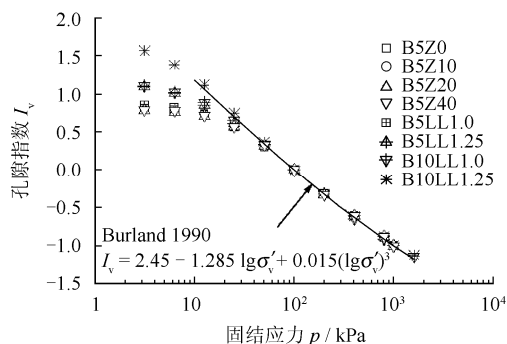


图 6 采用孔隙指数 I_v 的归一化压缩曲线 (ICL)

Fig.6 Normalized intrinsic compression curves

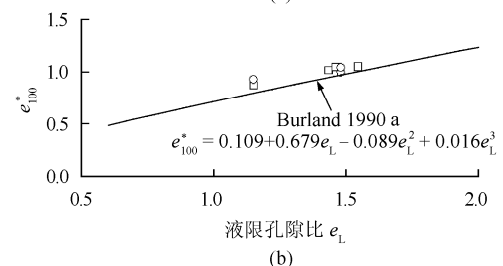
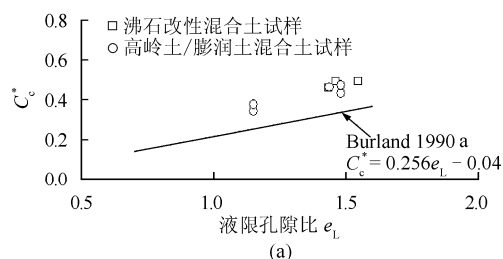


图 7 固有压缩常数 C_c^* 、 e_{100}^* 与液限孔隙比 e_L 关系

Fig.7 Relationships between e_L and constants of intrinsic compressibility C_c^* and e_{100}^*

5 结 论

(1) 影响沸石改性高岭土/膨润土混合土压缩特性的主要因素包括膨润土掺量以及初始含水率, 与沸石掺量基本无关。

(2) 膨润土掺量是影响试样渗透性的主要因素; 膨润土掺量增加 5%, 混合土试样的渗透系数减小约 5 倍。

(3) 沸石改性的高岭土/膨润土混合土和未改性的高岭土/膨润土混合土的归一化孔隙比与固结应力及渗透系数存在较好关系。初始含水率对高岭土/膨润土混合土的归一化压缩曲线的影响不容忽视; 高岭土/膨润土混合土及沸石改性的混合土试样的归一化孔隙比与渗透系数存在较好惟一性。

(4) 混合土固有压缩曲线在固结应力大于 50 kPa 时与相关文献具有高度一致性, 但两个固有压

缩常量 (e_{100}^* 和 C_c^*) 与液限孔隙比 (e_L) 的相互关系与经验关系式存在一定差异, 主要在于黏土矿物成分不同所致。

参考文献

- [1] 徐超, 黄亮, 邢皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 422—426.
XU Chao, HUANG Liang, XING Hao-feng. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 422—426.
- [2] JOSHI K, KECHAVARZI C, SUTHERLAND K, NG MYA, SOGA K, TEDD P. Laboratory and in situ tests for long-term hydraulic conductivity of a cement-bentonite cutoff wall[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(4): 562—572.
- [3] YEO S S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(10): 1189—1198.
- [4] GARVIN S L, HAYLES C S. The chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material[J]. **Construction and Building Materials**, 1999, 13: 329—341.
- [5] 白晓红, 赵永强, 韩鹏举, 等. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1260—1263.
BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, HAN Peng-ju, et al. Experimental study on mechanical property of cemented soil under environmental contaminations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(8): 1260—1263.
- [6] Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S.EPA. Evaluation of subsurface engineered barriers at waste sites[R]. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [7] D'APPOLONIA D J, RYAN C R. Soil-Bentonite slurry trench cut-off walls[C]//Geotechnical Exhibition and Technical Conferenc. Chicago: [s. n.], 1979.
- [8] MADSEN F T, MITCHELL J K. Chemical effects on clay fabric and hydraulic conductivity[J]. **The Landfill**, 1989: 201—251.
- [9] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(5): 664—672.
- [10] MOTSI T, ROWSON N A, SIMMONS MJH. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2009, 92(1-2): 42—48.
- [11] TURAN N G, ERGUN O N. Removal of Cu(II) from leachate using natural zeolite as a landfill liner material[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2009, 167(1-3): 696—700.
- [12] MOIROU A, XENIDIS A, PASPALIARIS I. Stabilization Pb, Zn, and Cd-contaminated soil by means of natural zeolite[J]. **Soil and Sediment Contamination**, 2001, 10(3): 251—267.
- [13] HAMIDPOUR M, AFYUNI M, KALBASI M, et al. Mobility and plant-availability of Cd(II) and Pb(II) adsorbed on zeolite and bentonite[J]. **Applied Clay Science**, 2010, 48(3): 342—348.
- [14] WINGENFELDER U, HANSEN C, FURRER G, et al. Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites[J]. **Environmental Science & Technology**, 2005, 39(12): 4606—4613.
- [15] JIN F, FAN R D, DU Y J. Application of soil bentonite amended with zeolite for cutoff wall backfill in land contaminated remediation[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology. Japan: [s. n.], 2010: 176—181.
- [16] NAGARAJ T S, MIURA N. Soft clay behaviour: analysis and assessment[M]. Netherlands: Taylor & Francis, 2001.
- [17] BURLAND JB. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 329—378.
- [18] PAUL D B, DAVIDSON R R, CAVALLI N J. Slurry walls: Design, construction, and quality control[M]. Fredricksbur: ASTM, 1992.
- [19] BAXTER D Y. Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [20] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [21] NAGARAJ T S, JOSHI R C, MURTHY SBR. Generalized equation for compression ratio[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, 1988, 16(1): 86—89.
- [22] MAHABADI A A, HAJABBASI M A, KHADEMI H, KAZEMIAN H. Soil cadmium stabilization using an Iranian natural zeolite[J]. **Geoderma**, 2007, 137(3-4): 388—393.
- [23] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior (Third Edition)[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] PANDIAN N, NAGARAJ T, RAJU P. Permeability and compressibility behavior of bentonite-sand/soil mixes[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1995, 18(1): 86—93.
- [25] NAGARAJ T S, MURTHY BRS. A critical reappraisal of compression index equations[J]. **Géotechnique**, 1986, 36(1): 27—32.
- [26] NAGARAJ T, PANDIAN N, NARASIMHA RAJU P. Stress state-permeability relationships for fine-grained soils[J]. **Géotechnique**, 1993, 43(2): 333—336.
- [27] CERATO A B, LUTENEGGER A J. Determining intrinsic compressibility of fine-grained soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130: 872.
- [28] NAGARAJ T S, PANDIAN N S, NARASIMHA RAJU PSR. Stress-state-permeability relations for over-consolidated clays[J]. **Géotechnique**, 1994, 44(2): 349—352.
- [29] 高玉峰, 殷杰, 洪振舜. 初始含水率对重塑连云港黏土压缩特性的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(5): 817—821.
GAO Yu-feng, YIN Jie, HONG Zhen-shun. Effect of initial water content on compression behavior of reconstituted Lianyungang clays[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)**, 2009, 25(5): 817—821.
- [30] 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.