

不同荷载水平及速率下超软土水相核磁共振 试验研究*

李彰明^{1)†} 曾文秀¹⁾ 高美连²⁾

1) (广东工业大学岩土工程研究所, 广州 510006)

2) (上海纽迈电子科技有限公司, 上海 200333)

(2013年7月7日收到; 2013年8月28日收到修改稿)

大规模建设中面临越来越多的淤泥等超软土地基处理, 其目的是尽可能排出超软土体中的水而使土体固结, 以改善其物理力学性能. 静动力排水固结法试图利用高能量冲击而将超软土中部分结合水转换为自由水, 进而实现更多水的排出而有效固结. 然而, 目前还不十分清楚能造成这种水相变化的冲击荷载究竟要达到何种水平及速率. 为此, 在模拟条件的、淤泥土的不同类型荷载水平及速率试验基础上, 进行核磁共振水相测试, 探索了典型荷载水平及速率下这种超软土中结合水可转化为自由水的条件及规律, 主要为: 1) 对应于通常工程荷载的较低能量真三轴试验荷载速率与水平 (1.6 MPa/s 与 100 kPa 及以下), 淤泥类超软土中非自由水不能转化为自由水. 2) 对应于静动力排水固结法条件的高速冲击荷载下 (每击荷载水平 3787 kPa, 速率 631.2 MPa/s), 非自由水可转化为自由水; 且冲击总能量越大 (遍数及击数越多), 就越易析出自由水. 3) 约束样品的侧限刚度对非自由水转化为自由水的影响可忽略.

关键词: 荷载水平及速率, 超软土, 核磁共振试验, 水相变化

PACS: 82.56.-b, 74.25.nj, 76.60.-k, 33.25.+k

DOI: 10.7498/aps.63.018202

1 引言

近些年来, 核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 作为一个跨学科测试技术方法用于研究不同砂岩岩石、催化剂、胶体和生物组织^[1], 并且越来越多地应用于包括岩土介质在内的各种材料物理及几何特征测试及估算, 如用于水泥在水渐进析出变化状态下各类凝胶孔隙水特征^[2]; 岩体含水层范围测试及其岩石孔隙度、渗透率、导水系数估算^[3], 以及在石油及其开采领域所涉及介质的分析应用^[4]等. 此外, 近来该项技术也在骨皮质成像及评价^[5]、分子间双量子相干性^[6]、量子态及尺度上超级芝诺效应 (super-Zeno effect)^[7]与液态同核两个量子比特的相关量子动力学问题^[8]等微观与细观量级问题上获得进一步应用. 由此, 有理由

相信该技术方法亦可推广应用于主要由细观矿物及含水孔隙构成的软土的相关分析研究. 大规模建设中面临越来越多的淤泥与淤泥质土等超软土地基需要处理, 处理的一个重要目的是尽可能排出超软土体中的水而使土体固结, 以改善其物理力学性能. 然而, 在通常的工程静态荷载下, 所排出的水只是土体中的自由水或其中的一部分, 而无法排出其结合水. 在一定覆盖静压力下又作用冲击荷载、设置了多向人工排水体系的静动力排水固结法^[9]试图解决这一问题; 该加固法中试图利用高能量冲击而将部分结合水转换为自由水, 进而实现更多水的排出. 从理论上讲, 静动力排水固结法软基加固时, 纵波在不同的介质中, 振动传播的频率、速度、能量是不同的, 有着不同的动力效应, 当颗粒固体与水两者之间动力差大于颗粒对水的吸附能力时, 自由水、毛细水、弱结合水甚至部分强结合水

* 国家自然科学基金 (批准号: 51178122) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ukzmli@163.com

(部分结合水成为自由水)将从颗粒间隙析出,然后通过排水而固结^[9].然而,在实际问题中,造成水相变化的这种水平的动力及差异究竟应是多少还鲜见报道,对于淤泥这种超软土尤其如此.

本文在取之于实际工程的淤泥土的不同类型荷载水平及速率试验基础上,进行核磁共振水相测试,以探索何种荷载水平及速率下饱和超软土(淤泥)中结合水(主要为弱结合水)可转化为自由水及与转化量的可能对应关系,以为地基工程设计提供基础.

2 实验部分

2.1 样品信息

淤泥土样取自广州南沙某地基处理工地,平均含水量为63.6%,孔隙比1.87,重度 17.6 kN/m^3 ,液限和塑限分别是47.1%和28.3%.取样及蜡封均按土工试验要求在原位进行,此后在室内进行相关力学试验.淤泥土样共15个,所受荷载水平及速率如表1.

2.2 实验仪器

采用上海纽迈电子科技有限公司生产MiniM-R60,共振频率23.309 MHz,磁体强度0.55 T,线圈

直径为60 mm,磁体温度为 $32.00 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3 样品制备

- 1) 标样制备:称取不同质量的氯化锰水溶液;
- 2) 准备待测样品称取质量并记录后,直接测试.

2.4 实验参数

$P_{90}(\mu\text{s}) = 19$, $P_{180}(\mu\text{s}) = 34.00$, $\text{TD} = 266424$, $\text{SW}(\text{kHz}) = 200$, $D_3(\mu\text{s}) = 80$, $\text{TR}(\text{ms}) = 1000$, $\text{RG}_1 = 20$, $\text{RG}_2 = 3$, $\text{NS} = 4$, $\text{EchoTime}(\mu\text{s}) = 260$, $\text{EchoCount} = 4000$.

上述各参数的物理意义: $P_{90}(\mu\text{s})$ —— 90° 脉宽, $P_{180}(\mu\text{s})$ —— 180° 脉宽, TD ——采样点数, $\text{SW}(\text{kHz})$ ——采样频率, $D_3(\mu\text{s})$ ——射频延时, $\text{TR}(\text{ms})$ ——重复采样等待时间, RG_1 ——模拟增益, RG_2 ——数字增益, NS ——重复采样次数, $\text{EchoTime}(\mu\text{s})$ ——回波时间, EchoCount ——回波个数.

2.5 实验方法

运用核磁共振测量分析软件及CPMG序列采集样品 T_2 衰减曲线,并以.pea格式保存,运用反演软件反演该文件.

表1 样品信息表

试验方法及土样类别	土样编号	荷载水平及速率条件
试验前试样	SQ1, SQ2, SQ3	取样后的原始状态下(未施加荷载),即荷载水平0 kPa,加载速率0.0 MPa/s
真三轴 ¹⁾ 试样1	Z1-1, Z1-2	试样饱和度0.93,围压100 kPa,竖向冲击荷载水平100 kPa,加载速率0.8 MPa/s(冲击3次,间隔时间10 min)
真三轴试样2	Z2-1, Z2-2	试样饱和度0.93,围压100 kPa,竖向冲击荷载水平100 kPa,加载速率1.6 MPa/s(冲击3次,间隔时间10 min)
高速冲击 ²⁾ 试样1	C1-1, C1-2	无刚性侧限、围压0 kPa;每击 ³⁾ 竖向荷载水平3787 kPa,加载速率631.2 MPa/s(竖向冲击1遍,3击/遍)
高速冲击试样2	C2-1, C2-2	无刚性侧限、围压0 kPa;每击竖向荷载水平3787 kPa,加载速率631.2 MPa/s(冲击3遍,遍间隔24 h;3击/遍)
高速冲击试样3	C3-1, C3-2	无刚性侧限、围压0 kPa;每击竖向荷载水平3787 kPa,加载速率631.2 MPa/s(冲击5遍,遍间隔24 h;3击/遍)
高速冲击试样4	C4-1, C4-2	置于刚性容器($\phi 17 \text{ cm} \times H 8 \text{ cm}$)内,有刚性侧限;每击竖向荷载水平3787 kPa,加载速率631.2 MPa/s(冲击1遍,3击/遍)

1) 美国GCTS生产的SPAX-2000(改进型)静动真三轴试验系统;2) 自研发的多向高能高速电磁力冲击智能控制试验系统;3) 竖向冲击接触面为圆形, $\phi 8.2 \text{ cm}$.

3 结果与讨论

3.1 各样品含水率测试结果与分析

自然界中水为氢质子最多的一种物质,又由于核磁共振的信号来源主要为氢质子,氢质子越多,说明含水率越多,反之则越低.因此通过信号量定标的方法,核磁共振技术可以被用来测量物质中水的质量.磁共振技术通过测定水的质量,可计算出待测淤泥样品中水的含量,从而得到其含水率.

测定5个标准样品,可得到表2中图示的水质量与幅度的相关线性关系.其中图中横坐标为水的

质量,纵坐标为信号幅度.

测试各样品水峰面积,同时利用水峰面积与水质量的线性关系,得到样品中的含水量,进而得到各样品的含水率,如表3所示.根据土样实际情况及对比核磁法结果表明:核磁法测试的含水率在25%—35%之间,而该种土样用常规方法测会大于50%.因此,此种核磁法可能没有测到全部的水分.此外,可以观察到,实验前的土样3个平行样含水率相差较大,分析原因可能是均一性不是很好;同时真三轴试样2的两个平行样测得的含水率相差也较大.

表2 标样测量结果

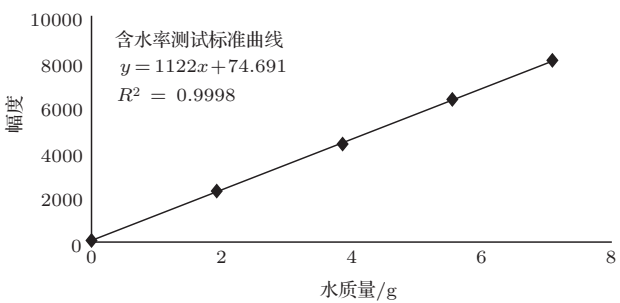
标样	质量/g	幅度	水信号幅度与水质量的关系	
0	0	84.2701	 含水率测试标准曲线 $y = 1122x + 74.691$ $R^2 = 0.9998$	
1	1.9243	2262.532		
2	3.8619	4332.292		
3	5.5541	6324.392		
4	7.0936	8053.15		

表3 样品测量结果

试验方法及土样	样品编号	幅度	样品质量/g	含水量/g	含水率/%	平均含水率/%
试验前	SQ1	12845.42	33.51	11.38	33.97	28.12
	SQ2	10462.42	39.31	9.26	23.55	
	SQ3	4709.05	15.40	4.13	26.83	
真三轴试样1	Z1-1	5102.58	15.89	4.48	28.20	29.22
	Z1-2	10335.30	30.23	9.14	30.25	
真三轴试样2	Z2-1	10607.55	36.84	9.39	25.48	29.21
	Z2-2	4721.05	12.58	4.14	32.93	
高速冲击试样1	C1-1	10583.48	34.91	9.37	26.83	26.85
	C1-2	12290.45	40.53	10.89	26.86	
高速冲击试样2	C2-1	10590.91	38.68	9.37	24.23	22.18
	C2-2	8532.52	37.47	7.54	20.12	
高速冲击试样3	C3-1	11785.94	39.33	10.44	26.54	26.10
	C3-2	3866.41	13.17	3.38	25.66	
高速冲击试样4	C4-1	11451.41	37.25	10.14	27.22	26.91
	C4-2	10739.87	35.75	9.51	26.59	

那么核磁共振测得的水是哪种水呢? 我们对SQ2号样品进行了加水测试. 测试结果发现, 如图1, 滴入水后核磁共振测试到的两类水均有变化(信号幅度增加, 即水量增加). 这也说明此种核磁共振方法测试到肯定有自由水, 目前淤泥这种高含水量超软土中弱结合水是否能全部测试到还有待研究. 未能测试到的可能原因有: 一是淤泥土样本本身细微结构中所含颗粒及水质成分复杂(诸如可能含有一定金属), 影响核磁共振对于含水量测试; 二是测试脉宽偏大而造成未能采集到短弛豫氢. 改进的方法诸如采用短脉宽的变温核磁共振仪进行测试, 通过采集短弛豫的氢, 因而可能采集到诸如强结合水的信号.

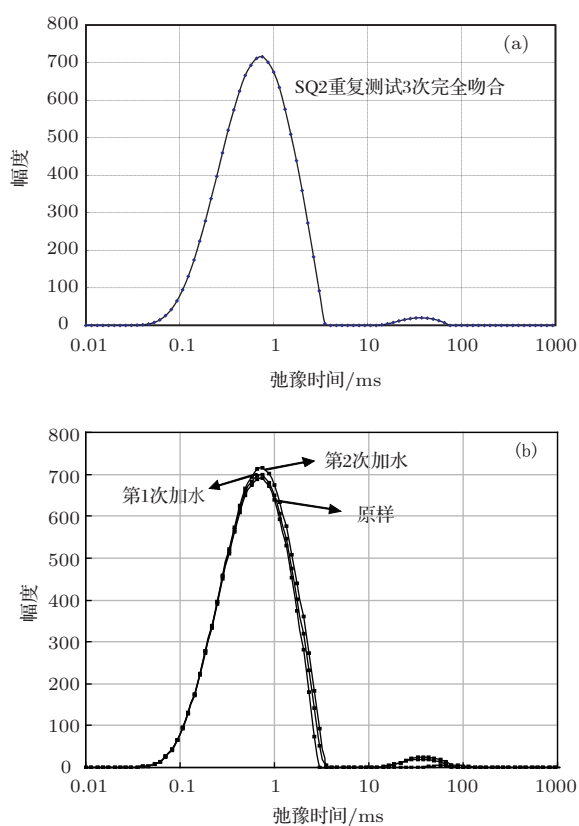


图1 SQ2样品加水测试的幅度信号 (a) SQ2重复测试三次, 完成符合; (b) SQ2原样, 第一次加水, 第二次加水测试谱图

3.2 T_2 谱图/水分分布情况

3.2.1 不同实验条件各样品 T_2 图谱

使用迭代寻优的方法将采集到的 T_2 衰减曲线代入弛豫模型中拟合并反演可以得到样品的 T_2 弛豫信息, 包括弛豫时间及其对应的弛豫信号幅度分量, 如图2(a)所示横坐标为范围从 10^{-2} ms 到 10^4 ms 对数分布的 100 个横向弛豫时间分量 T_2 , 纵坐

标为各弛豫时间对应的信号幅度分量 A_i (为便于定量分析, 该信号分量经质量及累加次数的归一化处理), 已知信号幅度与其组分含量成正比关系, 积分面积 A 即为样品的信号幅度. 且该淤泥样品水分分为两种状态的水分, T_{21} 及 T_{22} .

T_2 弛豫时间反映了样品内部氢质子所处的化学环境, 与氢质子所受的束缚力及其自由度(水分状态)有关, 而氢质子的束缚程度又与样品的内部结构有密不可分的关系. 在多孔介质中, 孔径越大, 存在于孔中的水弛豫时间越长; 孔径越小, 存在于孔中的水受到的束缚程度越大, 弛豫时间越短.

图3所示为 15 个淤泥土样品的 T_2 弛豫谱图.

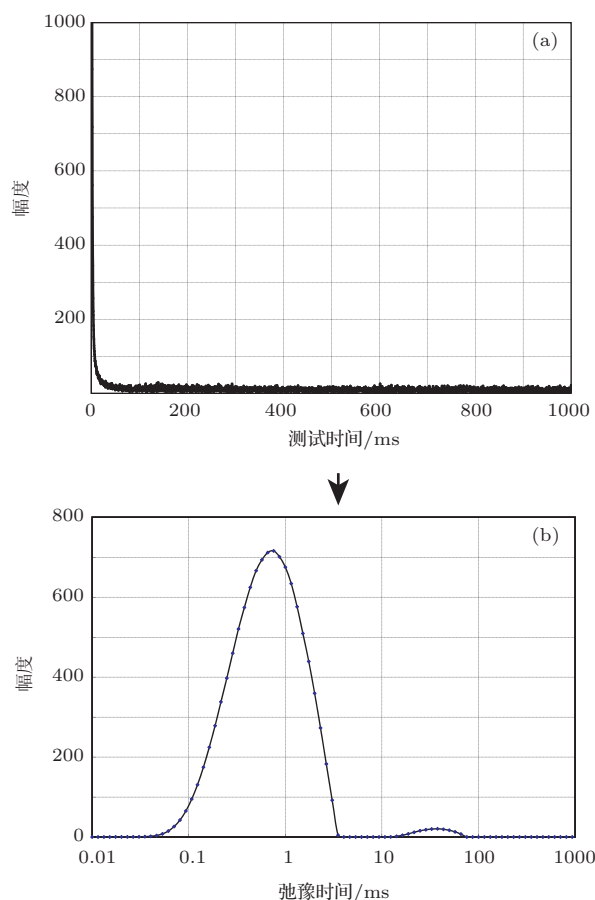


图2 典型 T_2 弛豫图谱

3.2.2 不同实验条件样品两种水分状态变化规律

各样品的 T_2 谱图具体信息如下表. 分别对比了不同工艺, 观察发现, 第一种状态的水分还是有一定的规律存在, 而第二种状态的水分没有规律性变化. 由图4可清楚观察到, 相对于测试前, 真三轴(围压 100 kPa, 竖向冲击荷载水平 100 kPa, 加载速率 1.6 MPa/s 及以下)不同频率试验样品的第一个

峰值基本无变化,表明该种荷载频率及水平下非自由水基本不会转化为自由水;相对于测试前,高速冲击荷载下非自由水可转化为自由水,而且冲击总

能量越大,就越易析出自由水.此外,由图4(c)可见,样品所受到侧限约束刚度对非自由水转化为自由水的影响可忽略.

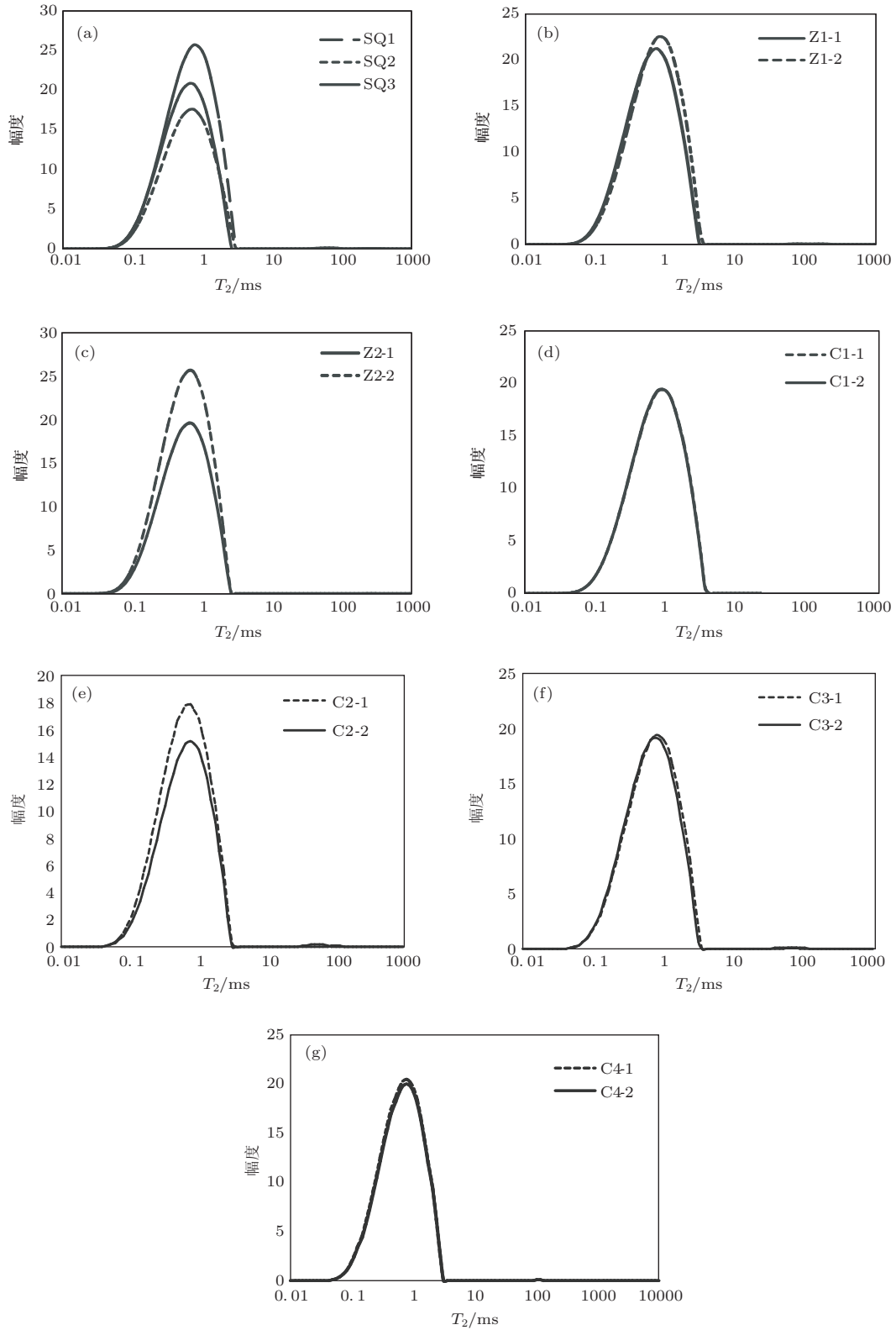


图3 各样品 T_2 谱图 (a) 实验前样品 T_2 谱图; (b) 真三轴试样 1 样品 T_2 谱图; (c) 真三轴试样 2 样品 T_2 谱图; (d) 高速冲击试样 1 样品 T_2 谱图; (e) 高速冲击试样 2 样品 T_2 谱图; (f) 高速冲击试样 3 样品 T_2 谱图; (g) 高速冲击试样 4 样品 T_2 谱图

表 4 不同实验条件水分状态分布对比

试验方法及土样	样品编号	A_{21} (第一个峰幅度)	A_{22} (第二个峰幅度)	A_{21} (第一个峰平均幅度)	A_{22} (第二个峰平均幅度)
试验前	SQ1	383.14	0.21		
	SQ2	265.36	0.78	318.04	0.40
	SQ3	305.63	0.22		
真三轴试样 1	Z1-1	320.48	0.48	330.94	0.45
	Z1-2	341.41	0.43		
真三轴试样 2	Z2-1	287.87	0.04	331.68	0.02
	Z2-2	375.49	0.00		
高速冲击试样 1	C1-1	301.83	0.81	302.10	0.84
	C1-2	302.37	0.88		
高速冲击试样 2	C2-1	272.73	1.06	250.05	0.71
	C2-2	227.37	0.35		
高速冲击试样 3	C3-1	313.90	0.68	206.77	0.50
	C3-2	99.63	0.32		
高速冲击试样 4	C4-1	307.00	0.43	303.49	0.44
	C4-2	299.98	0.45		

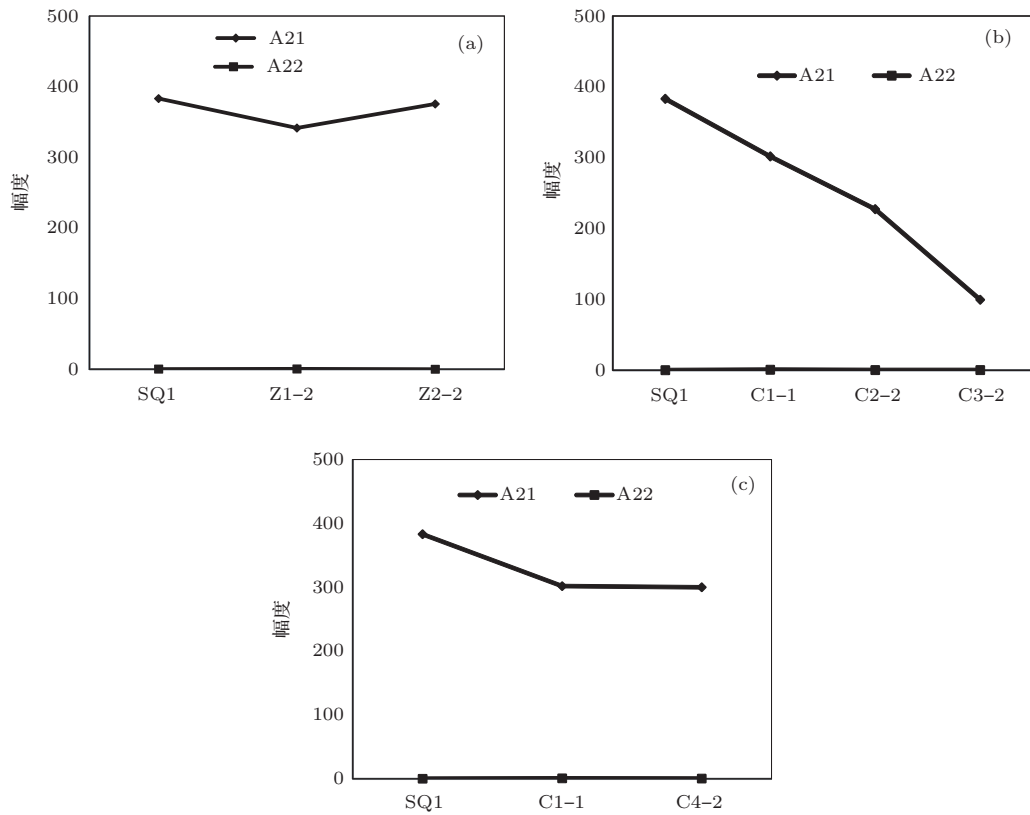


图 4 不同荷载水平及速率下两种状态水分变化对比 (a) 试验前、真三轴试样 1 与真三轴试样 2 两种状态水分变化对比; (b) 试验前、高速冲击试样 1、高速冲击试样 2 与高速冲击试样 3 两种状态水分变化对比; (c) 试验前、高速冲击试样 1 与高速冲击试样 4 两种状态水分变化对比

4 结 论

1. 对应于通常工程荷载的较低能量真三轴试验荷载速率与水平 (1.6 MPa/s 与 100 kPa) 及以下, 淤泥类超软土中非自由水不能转化为自由水.

2. 对应于静动力排水固结法条件的高速冲击荷载下 (每击荷载水平 3787 kPa, 速率 631.2 MPa/s), 非自由水可转化为自由水; 而且冲击总能量越大 (遍数及击数越多), 就越易析出自由水.

3. 约束样品的侧限刚度对非自由水转化为自由水的效应可忽略.

4. 常规较大脉宽核磁共振方法用于测试淤泥类超软土中的非自由水还存在一定困难, 有待改进; 诸如可采用短脉宽的变温核磁共振仪进行测试, 通过采集短弛豫的氢, 进而采集强结合水的信号.

上述前两点为科学地进行地基处理工程设计提供了依据.

参考文献

- [1] Editorial The Third International Meeting on MR Applications to Porous Media 1996 *Magn. Res. Ima.* **14** 697
- [2] McDonald P J, Rodin V, Valori A 2010 *Cemt. Concr. Res.* **40** 1656
- [3] Zhang C D, Pang Y L 2006 *Chin. J. Eng. Geophys.* **3** 1
- [4] Deng K J 2010 *Theory and Application of Nuclear Magnetic Resonance Logging* (Dongying: China University of Petroleum Press) (in Chinese) [邓克俊 2010 核磁共振测井理论及应用 (东营: 中国石油大学出版社)]
- [5] Bao S L, Du J, Gao S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 88701
- [6] Shen G P, Cai C B, Cai S H, Chen Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 103301
- [7] Ren T T, Luo J, Sun X P, Zhan M S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4711
- [8] Xu J W, Chen Q H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 40302
- [9] Li Z M 2011 *Strengthening and Quality Control of Soft Soil Foundation* (Beijing: China Building Industry Press) p185 (in Chinese) [李彰明 2011 软土地基加固与质量控制 (北京: 中国建筑工业出版社) 第 185 页]

Nuclear magnetic resonance test and analysis on water phase of the ultra-soft soil under different load level and rate*

Li Zhang-Ming^{1)†} Zeng Wen-Xiu¹⁾ Gao Mei-Lian²⁾

1) (Inst. of Geotechnical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

2) (Shanghai Niumag Corporation, Shanghai 200333, China)

(Received 7 July 2013; revised manuscript received 28 August 2013)

Abstract

In large-scale constructions, more and more ultra-soft soil foundation treatments are faced. The treatment purpose is to discharge as much as possible the pore water in the soft soil and make it consolidated, so as to improve its physical and mechanical performances. The static and dynamic drainage consolidation method is tried to use high-energy impact and convert part of the combined water in the ultra-soft soil into free water, and thus achieve more water discharge and effective consolidation. However, it is unclear what level and rate of the impact load could cause the water phase to change. For this, based on the tests with different load level and rate for the ultra-soft soil under simulated engineering condition, water phase test of the soil by nuclear magnetic resonance (NMR) was carried out, in order to explore the rules or conditions under which the combined water in this ultra-soft soil could be converted into free water at typical load level and rate. Our main conclusion is that: (1) corresponding to the engineering usual load, true tri-axial test at low load rate and level (1.6 MPa/s, the 100 kPa), the combined water in the ultra-soft soil cannot be converted into free water; (2) corresponding to the condition of high-speed impact load (a3787 kPa load level per blow and a rate of 631.2 MPa/s) used in the static and dynamic drainage consolidation method, the combined water in the ultra-soft soil could be converted into free water; and the greater the total impact energy, the easier the conversion into free water; (3) the effect of constraint sample confining stiffness on the conversion of combined water to free water can be ignored.

Keywords: load level and rate, ultra- soft soil, NMR test, water phase change

PACS: 82.56.-b, 74.25.nj, 76.60.-k, 33.25.+k

DOI: 10.7498/aps.63.018202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51178122).

† Corresponding author. E-mail: ukzmli@163.com