

DOI: 10.11779/CJGE2020S1030

P波波速与孔隙水压力系数B值关系的弯曲元试验研究

顾晓强^{1, 2}, 左康乐^{1, 2}, 高广运^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用带有弯曲元波速测试系统的GDS应力路径三轴仪, 测定了土体中P波与孔隙水压力系数B值, 研究了土体P波信号随着饱和度的演化过程, 并对比分析了孔隙水类别(自来水或无气水)、砂样中黏粒含量、土体类别对P波波速 V_p 与B值关系的影响。研究结果表明: 当孔隙水为无气水或砂样B值达到一定值时, P波信号由两大部分组成, 第一部分较第二部分幅值小但频率高, 且不受有效围压和输入波初始偏振方向影响, 可确定为P1波。当孔隙水为无气水时, V_p 与B值大小无关且保持最大波速不变; 而孔隙水为自来水时, 在B值较小时两者关系与理论曲线趋势相近, 随着B值的增大, V_p 与理论值差距越来越明显。另外, V_p 最大值与黏粒含量无关, 且受土体类别影响较小, 均大于纯水中P波波速。

关键词: 多孔介质; P波波速; 饱和度; 孔隙压力系数B; 弯曲元

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S1-0151-05

作者简介: 顾晓强(1981—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 主要从事土的基本特性、土动力学和宏微观土力学等方面的研究。E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn。

Investigation on relationship between P-wave velocity and B-value by bender element tests

GU Xiao-qiang^{1, 2}, ZUO Kang-le^{1, 2}, GAO Guang-yun^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The P-wave velocity V_p and the pore water pressure coefficient B in saturated soils are measured by bender element system in a GDS stress path triaxial apparatus. The evolution of P-wave signals with saturation and the effects of fluid type (tap water or de-aired water), clay content and different soil types on the relationship between V_p and B -value are considered. It is concluded that when the fluid is de-aired water or B -value reaches a certain value, the P-wave signal is composed of two parts. The first part has a smaller amplitude but a higher frequency than the second part. The first part is not affected by the effective confining pressure and the initial polarization direction of the input wave, and therefore it can be deduced as P1 wave. When the fluid is de-aired water, V_p is independent of B -value and the maximum wave velocity is constant. When the fluid is tap water, the relationship between V_p and B -value is consistent with the theoretical prediction in general when the B -value is small. When the B -value becomes large, the difference between the measured V_p and the theoretical value becomes larger. Besides, the maximum V_p in soil is greater than that in pure water, which is independent of clay content and soil type.

Key words: porous medium; P-wave velocity; degree of saturation; pore water pressure coefficient; bender element

0 引言

土体一般为三相介质, 由土颗粒、孔隙中液体和气体组成, 而液体占据土体孔隙的比例由饱和度反映。大量研究发现, 饱和度 S_r 对土体某些性质有着很大的影响, 例如砂土的抗液化能力^[1-3]。在实验室中, 通常用孔隙水压力系数 B 来表征试样饱和程度, B 值大小为不排水状态下孔隙水压力增量 $\Delta\mu$ 与有效围压增量 $\Delta\sigma$ 的比值, 其与饱和度 S_r 的关系(假设土颗粒不可压缩)可由下式表示^[4]:

$$B = \frac{\Delta\mu}{\Delta\sigma} = \frac{1}{1 + n \frac{K_{sk}}{K_w} + n \frac{K_{sk}}{p_{af}} (1 - S_r)} \quad , \quad (1)$$

式中, n 为孔隙率, K_{sk} 为土骨架体积模量, K_w 为流体体积模量, p_{af} 为大气压力。

式(1)也表明土骨架模量及流体模量对完全饱和

基金项目: 国家自然科学基金项目(51822809, 41772283); 地震工程国际合作联合实验室基金项目(S5-UB&TJ)

收稿日期: 2020-06-04

条件下 ($S_r=1.0$) 的 B 值也有一定的影响。

饱和度 S_r 对土体抗液化能力影响非常大, 但在室内模型试验和现场试验中难以测定 B 值。Tsukamoto 等^[2]和 Yang^[5]建议用 P 波波速 V_p 来表征饱和度, 并推导了 V_p 与 B 值的关系如下:

$$V_p = \left[\frac{4G_{sk}/3 + K_{sk}/(1-B)}{\rho} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中, G_{sk} 为土骨架剪切模量, ρ 为土体密度。结合式 (1), (2), V_p 可表征土体的 B 值和饱和度。

为验证上述 V_p 与 B 值关系, 大量学者进行了试验研究。Tamura 等^[6]试验研究表明 V_p 随着 B 值增大而增大, 且与气泡尺寸以及气泡溶解度有很大关系。Naesgarrd 等^[7]发现饱和砂土中 V_p 基本不变, 与 B 值无关。他们同时通过数值模拟研究表明当气泡均匀分布时, V_p 与 B 值的关系符合理论公式。Hatanaka 等^[8]在不同级配砂土中采用不同孔隙水进行了试验研究, 结果表明流体中气泡对 V_p 与 B 值关系影响较大。Gu 等^[9]的试验研究显示当孔隙水为无气水时, V_p 与 B 值大小无关; 而孔隙水为自来水时, V_p 随 B 值增大而增大, 但不符合理论预测, 尤其是 B 值较大时。

综上所述, 已有研究对 V_p 与 B 值关系的认识并未统一。同时天然土体必然含有一定量的细颗粒, 而之前的试验只针对纯净砂而未考虑细颗粒的影响。值得注意的是, 细颗粒的掺入往往会改变砂土孔隙结构和力学特性, 例如抗液化能力^[10-12], 但 V_p 能否表征含细颗粒砂土的饱和度缺乏试验依据。本文将通过应力路径三轴仪的弯曲元波速测量系统研究 P 波信号随土体饱和度的演化, 分析验证试样孔隙水类型、黏粒含量、土样类型对 V_p 与 B 值关系的影响。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用福建标准砂, 其粒径范围在 0.075~0.5 mm。福建砂的基本物理性质: 相对密度 $G_s=2.638$, 平均粒径 $D_{50}=0.173$ mm, 不均匀系数 $C_u=1.50$, 曲率系数 $C_c=1.13$ 。图 1 为福建砂的颗粒级配曲线。

试验的重塑试样均由砂粒和黏粒混合配制而成, 黏粒的质量百分比含量分别为 0%, 10%, 20%。黏粒由上海第四层黏土制成, 其基本性质参数参数: 塑限为 15.8%, 液限为 33.6%, 塑性指数为 17.8, 相对密度为 2.725。表 1 给出了不同含量混合砂样的基本物理参数。由表 1 可见, 随着黏粒含量的增大, 土样的最小孔隙比随之减小, 而最大孔隙比随之增大。另外试验还采用了上海第 8 层粉质黏土原状土样, 取土深度约为 50 m。土样的天然含水率和密度分别为 29.9% 和

1.92 g/cm³, 土粒相对密度为 2.74。

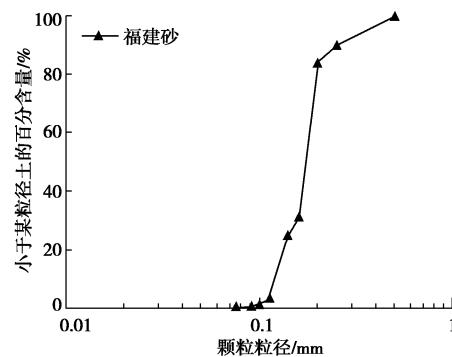


图 1 福建砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of Fujian sand

表 1 不同含量混合砂的基本参数

Table 1 Basic parameters of sand-clay mixtures

黏粒含量/%	相对密度	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最小干密度/(g·cm ⁻³)	最大孔隙比	最小孔隙比
0	2.638	1.595	1.308	1.017	0.654
10	2.658	1.660	1.315	1.021	0.601
20	2.684	1.761	1.320	1.033	0.524

1.2 试验仪器

试验仪器为英国 GDS 应力路径三轴仪, 并配置了弯曲元波速系统。该系统由安装在试样顶端和底端的两片弯曲元、控制盒以及接收系统组成。通过改进接线方式^[13], 该对弯曲元可同时进行 P 波和 S 波测试。激发波形采用正弦波, 最大激发电压为 ±14 V, 激发频率可自行设置, 采样频率为 2000 kHz。波速可由下式确定:

$$V = L_u / \Delta t, \quad (3)$$

式中, L_u , Δt 分别为弯曲元激发端尖和接收端尖的距离和波传播时间。

在进行弯曲元试验之前, 应进行标定。标定时, 将激发和接收弯曲元端对端直接接触, 测量出系统延迟时间, 同时也确定弯曲元输入和输出的偏振方向, 有利于确定 S 波初始到达点。本弯曲元系统的延迟时间为 7 μs, 弯曲元输入与输出偏振方向一致, 上下两端弯曲元各插入土样 3 mm。为更好地确定波速到达时间点, 激发频率分别采用 5, 10, 20, 50, 100 kHz。

1.3 试验方案

先利用烘箱将一定质量的福建砂和黏粒烘干, 然后经过冷却, 再按照黏粒含量确定福建砂和黏粒的质量, 混合后充分搅拌均匀至无明显的离析现象, 最后加入总质量 5% 的无气水充分搅拌。试样直径为 50 mm, 高度为 100 mm。采用湿击法, 控制相对密实度 $D_r=70.5\%$, 分 5 层制样。完成制样后, 施加 10 kPa

吸力使其站立, 并拆除模具, 然后在饱和前施加有效围压 30 kPa。

为实现不同饱和度 S_r 或 B 值, 试样先通 2~3 h CO_2 以置换试样中空气, 然后向试样中通入无气水或自来水饱和, 再使用反压饱和进一步提高饱和度, 反压饱和过程中保持有效围压 30 kPa 不变。在每个饱和阶段, 先测量 P 波和 S 波, 再测量孔隙水压力系数 B 值。饱和阶段结束后, 再施加一定有效围压使其固结, 并测量 P 波和 S 波。原状土样先进行抽真空饱和, 再进行反压饱和, 试验方案同重塑样一致。

2 试验结果与分析

2.1 波信号分析

图 2 给出了纯净砂试样中不同饱和阶段的 P 波信号和 B 值, 其中 P 波激发频率为 10 kHz。图中黑色箭头表征 P 波的初始达到位置。该试样采用无气水 (简称 DW) 饱和, 同时反压饱和阶段保持有效围压为 30 kPa。由图 2 可见, P 波信号几乎不随 B 值增大而变化。同时, P 波信号由两大部分组成, 第一部分幅值小但频率较高, 第二部分幅值大但频率较低。Biot^[14]在 1956 年建立了饱和多孔介质中波传播理论, 预测了饱和多孔介质中存在 P1 和 P2 波两种 P 波, 并被后来试验所证实^[15]。Gu 等^[9]通过输入波与输出波初始偏振方向的区别以及改变围压对两种波速的影响, 确定第一部分为 P1 波。为进一步确定两部分 P 波信号的类别, 在另一试验中将顶端弯曲元旋转 180°, 同时在试样达到饱和后, 在有效围压下进行固结和 P 波测试, 结果如图 3 所示。由图可见, P 波信号第一部分的特性和波速并不随围压增大而改变, 而第二部分波速 (红色箭头表示波的初达位置) 随围压增大而明显增大。同时, 与图 2 对比显示两部分的初始偏振方向均未改变, 推测弯曲元接收到的确实是 P 波信号。同时, Biot 预测饱和土体中 P1 波波速随土骨架模量 (或有效围压) 增加基本不变, 而 P2 波随土骨架模量 (或有效围压) 增加而显著增加, 与本次试验结果相符。

为研究孔隙水种类对 P 波信号的影响, 用自来水 (简称 TW) 代替无气水来饱和试样, 该情况下 P 波信号及 B 值见图 4。由图 4 可见, 当 B 值不大于 0.443 时, 信号基本类似, 且第一部分 P 波基本不可见。当 B 值达到 0.852, 信号特性发生较大的改变, 第一部分 P 波出现。随着 B 值进一步增大, 信号特性基本不变, 但波速先增大而后不变, 即达到完全饱和状态的最大值 1773 m/s。当 B 值大于 0.918, 孔隙水为无气水或自来水的 P 波信号特征和波速均类似。以上结果表明, 孔隙水的类别主要在 B 值较小时对 P 波有影响。

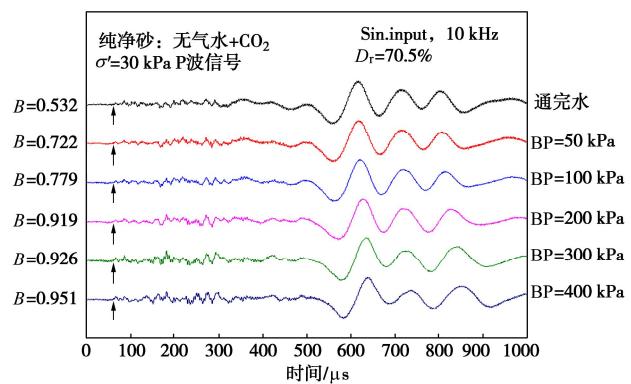


图 2 纯净砂中的 P 波接收信号 (流体为无气水)

Fig. 2 Received P-wave signals in clean sand (pore fluid: de-aired water)

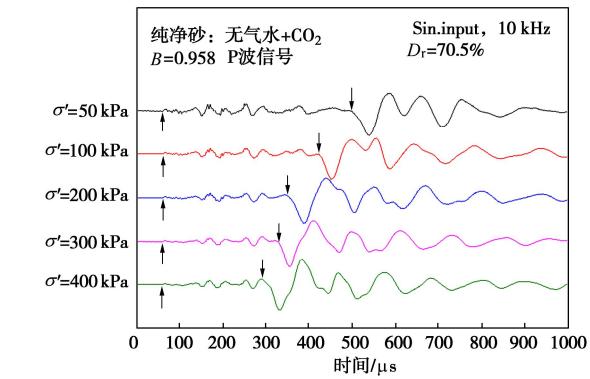


图 3 饱和状态下 P 波信号与有效围压关系

Fig. 3 Relationship between P-wave signals and effective confining stress under full saturation state

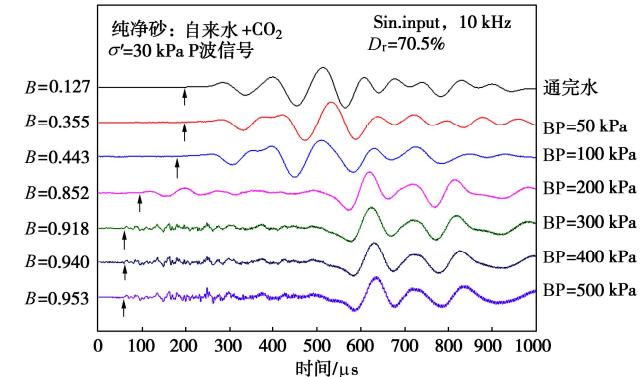


图 4 纯净砂的 P 波接收信号 (流体为自来水)

Fig. 4 Received P-wave signals of clean sand (pore fluid: tap water)

图 5, 6 分别为黏粒含量为 10% 和 20% 时试样采用自来水饱和后的 P 波信号。由图 5 可见, 10% 黏粒含量的试样和洁净砂中 P 波信号类似。当 $B=0.758$ 时, 信号的第一部分跟 B 小于 0.758 的类似, 而第二部分跟 B 大于 0.758 的类似。20% 黏粒含量的试样信号与 10% 黏粒含量时有一定区别, 需要更高的 B 值才能使

V_p 达到最大值 (1773 m/s), 同时 P 波信号的第二部分不是很明显。

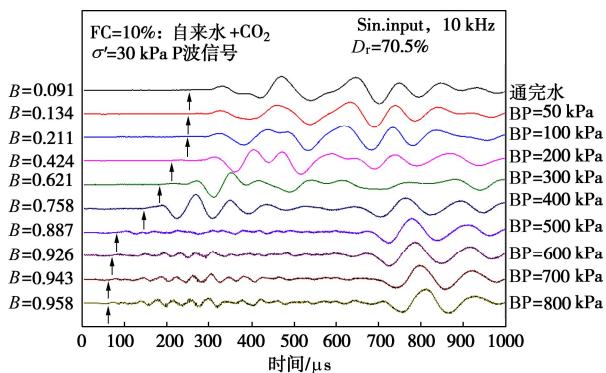


图 5 细颗粒含量为 10% 砂土的 P 波接收信号 (流体为自来水)

Fig. 5 Received P-wave signals of clean sand with 10% fines (pore fluid: tap water)

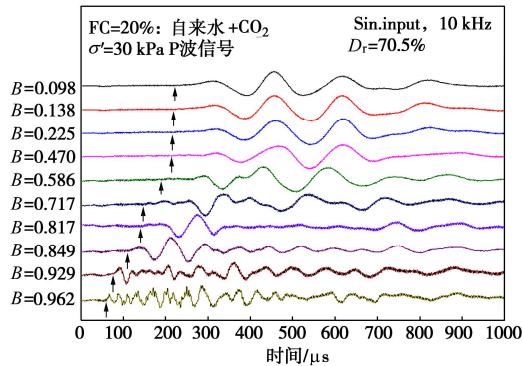


图 6 细颗粒含量为 20% 的 P 波接收信号 (流体为自来水)

Fig. 6 Received P-wave signals of clean sand with 20% fines (pore fluid: tap water)

图 7 为原状粉质黏土高 B 值饱和状态下的 P 波信号。由图 7 可见, 在高 B 值情况下, P 波信号特性基本保持不变。值得注意的是, 原状粉质黏土中 P 波信号也由两大部分组成, 与重塑砂土样不同的是, 该 P 波信号第一部分幅值较大且频率较高, 而第二部分幅值较小且频率较低。可说明在饱和状态下, 土体类别对 P 波信号有较大的影响。

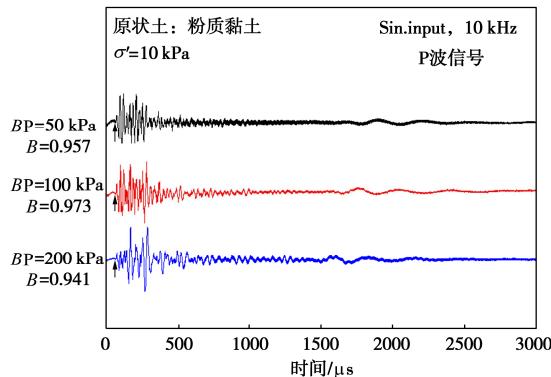


图 7 饱和粉质黏土 P 波接收信号

Fig. 7 Received P-wave signals of saturated silty clay

2.2 P 波波速与 B 值的关系

图 8 给出了各试样中 V_p 与 B 值的关系, 同时也给出了式 (2) 中 V_p 与 B 值关系的理论预测曲线, 其曲线是在有效围压等于 30 kPa 的初始状态下测定 P, S 波波速, 从而计算得出剪切模量及泊松比^[16]。

通过改变流体, 研究了孔隙水类型对 V_p 与 B 值关系的影响。由图 8 可见, 在纯净砂中, 当流体为无气水时, V_p 与 B 值大小无关, 且均达到最大波速, 此结果与 Naesgaard 等^[7]和 Gu 等^[9]相吻合; 而当流体为自来水时, 在 $B < 0.7$ 时, V_p 随 B 值增大而缓慢增大, 基本符合理论曲线趋势, 当 $B > 0.8$ 时, V_p 增长较快且与理论值差距越来越明显, 直至 $B > 0.9$, P 波达到最大波速, 其现象在含黏粒砂土中也会出现。造成该试验结果与理论值的差异可能在于气泡的不均匀分布, 与理论假设流体均质不同, 且弯曲元测量的 V_p 更能表征试样的局部模量 (即波传播路径集中于试样中部)。当采用无气水饱和时, 少量气泡可能存在于试样边缘, 随着饱和度的进一步提高, 致使气泡压缩, B 值增大, 而 P 波沿着绕过局部气泡的路径传播, 故波速保持最大值不变; 而当流体为自来水时, 气泡分布较为均匀, P 波无法完全绕过气泡传播, 随着 B 值增大, 气泡减少, V_p 随之增大。

图 8 也表明黏粒含量对 V_p 与 B 值的关系也有影响, 尤其当 $B > 0.9$ 时。例如当 $B=0.92$ 时, FC=20% 的砂样 V_p 最小, 为 1382 m/s, FC=10% 时 V_p 大约等于 1492 m/s, 而纯净砂已达到最大值 1773 m/s, 说明黏粒含量越高, V_p 对 B 值的变化越不敏感, 但砂样中最大 V_p 与黏粒含量无关。原状粉质黏土中 V_p 最大值为 1649 m/s, 略小于砂样中最大波速, 但两者都大于纯水中 $V_p=1649$ m/s ($K_w=2180$ MPa)。

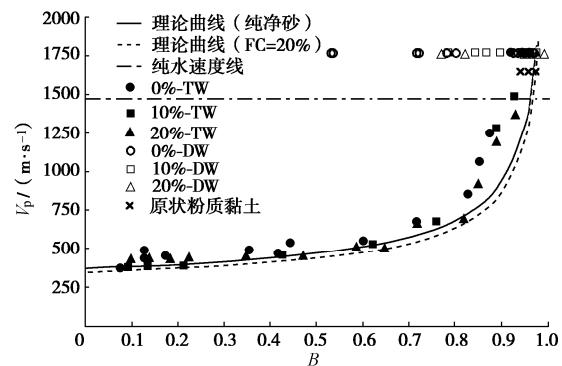


图 8 P 波波速与 B 值关系

Fig. 8 Relationship between V_p and B -value

3 结 论

本文通过弯曲元技术研究了重塑砂土及原状粉质黏土中 P 波信号特性和波速与孔隙水压力系数 B 值的

关系, 初步可得如下 3 点结论。

(1) 当砂土达到较高 B 值或孔隙水为无气水时, P 波信号由两部分组成, 第一部分幅值较小但频率较高, 不受有效围压、初始弯曲元偏振方向影响, 可确认为 P1 波, 但第二部分 P 波信号还需进一步研究。

(2) 砂土中孔隙水种类对 P 波波速影响较大, 当孔隙水为无气水时, V_p 不受 B 值大小影响, 保持最大波速不变; 而孔隙水为自来水时, V_p 先随着 B 值增大而缓慢增长, 基本符合理论趋势, 当 B 值超过 0.8 后, V_p 急剧增大, 直至达到最大波速。此差异可能由气泡的不均匀分布导致, P 波可能沿着绕过局部气泡的路径传播。

(3) 砂土中黏粒含量越高, P 波波速对 B 值的变化越不敏感, 且 V_p 最大值与黏粒含量无关。当土体完全饱和后, 土体 V_p 均大于纯水中传播速度, 受土体类别影响较小。

参考文献:

- [1] SHERIF M A, ISHIBASHI I, TSUCHIYA C. Saturation effect on initial soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(8): 914 – 917.
- [2] YOSHIMI Y, TANAKA K, TOKIMATSU K. Liquefaction resistance of a partially saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(3): 157 – 162.
- [3] TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K, NAKAZAWA H, et al. Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(6): 93 – 104.
- [4] SKEMPTON A W. The pore-pressure coefficients A and B[J]. Géotechnique, 1954, **4**(4): 143 – 147.
- [5] YANG J. Pore pressure coefficient for soil and rock and its relation to compressional wave velocity[J]. Géotechnique, 2005, **55**(3): 251 – 256.
- [6] TAMURA S, TOKIMATSU K, ABE A, SATO M. Effect of air bubble on B-value and P-wave velocity of a partially saturated sand[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(1): 121 – 129.
- [7] NAESGAARD E, BRYNE P M, WIJEWICKREME D. Is P-wave velocity an indicator of saturation in sand with viscous pore fluid?[J]. International Journal of Geomechanics, 2007, **7**(6): 437 – 443.
- [8] HAKANATA M, MASUDA T. Experimental study on the relationship between degree of saturation and P-wave velocity in sandy soils[C]// Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Part 4. Beijing: Science Press, 2008: 346 – 351.
- [9] GU X Q, YANG J, HUANG M S. Laboratory investigation on relationship between degree of saturation, B-value and P-wave velocity [J]. Journal of Center South University, 2013, **20**(7): 2001 – 2007.
- [10] POLITO C P, MARTIN J R. Effect of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(5): 408 – 415.
- [11] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixture: an experimental investigation of the effect of fines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**(3): 183 – 194.
- [12] CHANG W J, HONG M L. Effect of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands[J]. Soils and Foundations, 2008, **48**(1): 101 – 114.
- [13] LINGS M L, GREENING P D. A novel bender/extender element for soil testing[J]. Géotechnique, 2001, **51**(8): 713 – 717.
- [14] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: I Low frequency range: II Higher frequency range[J]. Journal of the Acoustic Society of America, 1956, **28**(2): 168 – 191.
- [15] PLONA T J. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies[J]. Applied Physics Letters, 1980, **36**(4): 259 – 261.
- [16] GU X Q, YANG J, HUANG M S. Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**(5): 735 – 745.
- [17] GU X Q, YANG J, HUANG M S, et al. Bender element tests in dry and saturated sand: signal interpretation and result comparison[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(5): 952 – 963.

(编校: 胡海霞)