

DOI: 10.11779/CJGE201511009

基于原位测试指标的砂土时间效应定量表征初步研究

周燕国^{1, 2}, 丁海军^{1, 2}, 陈云敏^{1, 2}, 黄 博^{1, 2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 时间效应对土体抗液化强度有显著影响, 其定量表征是砂土地震液化判别的研究难点之一。基于土体小应变剪切模量 G_{\max} 和静力触探锥尖阻力 q_c 的经验表达式, 对土体密实度和有效应力作归一化处理, 提出了砂土时间效应的表征指标 AI。该表征指标在数学上表达为小应变剪切模量与大应变静力触探锥尖阻力的结构性参数的比值函数。通过分析已有室内试验数据发现重塑砂土具有稳定的 AI 值, 而对现场数据的分析则揭示了砂土沉积年代越久、AI 值越大的整体趋势。该表征指标能揭示土体力学特性随时间的演变规律却不含时间变量, 因此是一个“表观时间”参数, 为进一步研究时间效应对砂土抗液化强度的影响规律提供了基础。

关键词: 砂土液化; 时间效应; 小应变剪切模量; 静力触探测试; 表征

中图分类号: TU435; TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2000-07

作者简介: 周燕国(1978-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与岩土地震工程、土工离心机物理模拟方面的研究和教学工作。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

Characterization of ageing effect of sands based on field testing indices

ZHOU Yan-guo, DING Hai-jun, CHEN Yun-min, HUANG Bo

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Ageing has significant effect on soil liquefaction resistance, and the quantitative characterization of ageing effect is one of the key research themes in assessment of soil liquefaction. An ageing index (AI) characterizing soil ageing effect is proposed based on small strain shear modulus (G_{\max}) and cone penetration resistance of CPT testing (q_c), with further normalization of soil density and stress state. This index is expressed by a function of the ratio between the fabric parameter of small strain shear modulus and that of large strain penetration resistance. The analysis of laboratory test data shows that the reconstituted sand has a stable reference AI value, while the field data reveal that AI increases with the increase of geologic age of the soil deposit. AI is an apparent parameter as it can characterize the extent of soil ageing without the variable of time, which provides a sound basis for further researches on the effect of soil ageing on liquefaction resistance.

Key words: soil liquefaction; aging effect; small strain shear modulus; cone penetration resistance; characterization

0 引 言

土体的工程特性会随时间变化。这种土体在自然沉积过程中或扰动过后, 工程力学特性在恒定应力状态下随时间变化的现象称为“时间效应”^[1]。土体的时间效应体现在多个方面: 小应变剪切模量随时间逐渐增长^[2-4], 大应变静力触探端阻随时间逐渐增大^[5-6], 砂土抗液化强度随时间逐渐提高^[7-8]等。

在场地液化判别方面, 目前国内外大多以 Seed 简化方法为框架, 基于土体抗液化强度与原位测试指标的经验相关性, 判别一定地震剪应力比下场地液化可能性^[9-11]。这里原位测试指标包括标贯(SPT)锤击数 N , 静力触探(CPT)端阻 q_c 及剪切波速 V_s 。事实上, 砂土的原位测试指标和抗液化强度 CRR 都是时间效

应函数, 即都会随时间发展而产生变化。因此, 目前所用的液化判别式仍存在完善空间, 研究时间效应对砂土抗液化强度影响规律具有重要工程意义。

已有学者基于室内试验及现场测试, 根据场地实际的沉积年代, 建议了砂土抗液化强度的时间效应修正方法^[12-13](如图1)。然而, 实际场地沉积历史久远, 且通常经历了多次地震事件的剧烈扰动, 绝对的土层

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578501, 51127005, 51178427); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047005); 全国优博论文作者专项项目(201160); “国家特支计划”青年拔尖人才项目(2013); 浙江省杰出青年科学基金项目(LR15E080001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014FZA4016)

收稿日期: 2014-09-08

年代并不对应土体抗液化性能的实际变化。为克服这一局限, 本文联合小应变波速测试和大应变静力触探测试, 通过对密实度和应力状态的归一化, 初步建立了基于土体力学特性的时间效应表征指标, 具备反映土体在复杂地质地震历史过程中形成的时间效应的能力, 为场地土体时间效应评价提供有效手段。

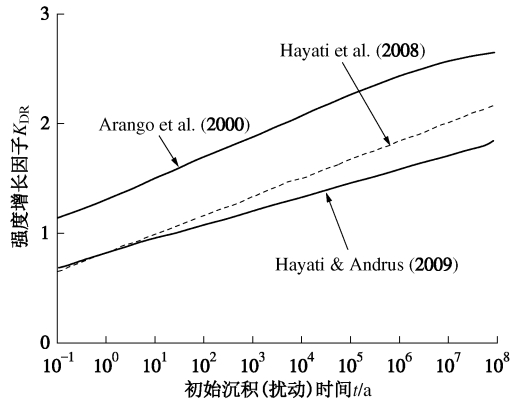


图 1 抗液化强度时间效应趋势线^[13]

Fig. 1 Trend of aging effect on liquefaction resistance^[13]

1 时间效应机理

时间效应主要源于三方面的机制: 物理作用、化学作用及微生物作用。

Mesri 等^[14]及 Schmertmann^[15]认为在工程时间尺度内次固结阶段的蠕变, 土颗粒重新分布使土骨架形成更加稳定的结构, 是土体强度得到强化的根本原因。土体在恒定外荷载作用下, 土颗粒不断迁移使土骨架趋于更加稳定的结构, 从而使得土体的刚度增大, 压缩性降低。由于土颗粒间的接触力存在法向力和切向力, 在外荷载作用下, 在法向力和切向力的共同驱动下, 土颗粒自身不断旋转, 最终使得土颗粒平行于有效主应力方向, 从而达到该应力状态下最稳定的结构。另外, 土颗粒的重新分布也可能导致颗粒之间产生联锁效应, 这主要是因为土颗粒表面存在不规则部分及粗糙面, 在运动过程中, 土颗粒发生滑移和咬合, 使颗粒的突出犄角部分相互抵扣形成一个联锁区域, 加强颗粒间剪切连接, 从而增加土体的剪切刚度。此外, 由于实际场地并非均匀场地, 承担的应力也并非均匀分布, 在蠕变过程中, 不均匀应力使土骨架中产生应力拱, 从而增加土体的整体稳定性。

实际场地土体还处于较为复杂的化学环境中, 土颗粒通过化学作用改变土体强度的黏聚力组成部分, 这主要包括两方面^[5]: 一是在水环境中, 砂土中的硅会形成硅酸凝胶覆盖在砂颗粒表面, 从而起到黏结剂的作用增加土体的黏结强度; 二是砂土骨架中易于溶解的碳酸矿物, 在饱和环境下将迅速溶解并随时间逐渐沉淀在土颗粒的接触面上, 增加颗粒间的胶结作用。

影响土体工程特性的时间效应机理除了上述物理和化学机制外, 还有一些其它作用, 如微生物作用、爆炸后气体消散影响等。在不同的时间尺度下, 这些机制将共同作用, 不断改变土体的工程特性。

2 时间效应对 G_{\max} 及 q_c 影响规律

剪切波速测试和静力触探测试是工程实践中获得土体工程特性的最为常见的手段, 贯入阻力 q_c 和剪切波速 V_s 是表征土体工程特性的重要参数^[16]。大量测试结果表明, 时间效应会显著改变土体的小应变剪切模量, 且小幅强化静力触探的贯入阻力。

小应变剪切模量 G_{\max} 是表征土体结构性的重要参数^[17-19], 影响土体小应变模量的因素有很多, 最主要的是有效应力、孔隙比及土体的微观结构 (颗粒接触数目、方向性和接触形式)^[20]。Schneider 等^[21]认为 G_{\max} 由土颗粒之间的接触数量和接触面积控制。Hardin 等^[22]最早将小应变剪切模量表达为有效应力和孔隙比的函数, 即 Hardin 公式。对砂土而言:

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^n, \quad (1)$$

式中, A 为试验常数, 与土体种类及应力历史相关; n 为经验指数, 约等于 $1/2$; $F(e)$ 为孔隙比函数, $F(e) = (2.973 - e)^2 / (1 + e)$ 或 $F(e) = 1 / (0.3 + 0.7e^2)$ 。

贯入阻力 q_c 表征的是土体的大应变特性, 受探头附近砂粒的膨胀、收缩及旋转等一系列复杂相互作用影响^[23-24]。与小应变特性不同, 贯入阻力基本不受颗粒间的接触影响, 土体的侧向约束及土体强度特性制约着贯入阻力的发展, 这些强度特性主要取决于土体密实度和水平应力。Baldi 等^[25]用下式来反映土体贯入阻力与密实度及有效应力的关系:

$$q_c = C_0 \cdot \exp(C_1 \cdot D_r) \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{C_2} \cdot \left(\frac{\sigma'_{h0}}{p_a} \right)^{C_3} \cdot p_a. \quad (2)$$

式中 σ'_{v0} 及 σ'_{h0} 分别为土体竖向有效应力和水平向有效应力; D_r 为土体相对密实度; C_0 , C_1 , C_2 和 C_3 均为回归系数。

以往研究表明, 时间效应对土体的强度和刚度都会产生较明显的影响^[26-27]。对于小应变剪切模量 G_{\max} , Anderson 等^[28]认为时间效应的影响可表达为

$$I_G = \Delta G / \lg(t_2 / t_1), \quad (3)$$

$$N_G = I_G / G(t_0). \quad (4)$$

式中 N_G 为归一化的剪切模量随时间变化值; ΔG 为 t_1 到 t_2 时间段内小应变剪切模量的变化值; $G(t_0)$ 为参考时间 t_0 (一般取 1000 min) 下的小应变剪切模量。

对于静力触探端阻 q_c , Mesri 等^[14]提出用下述经验公式估计洁净砂贯入阻力随时间的变化:

$$\frac{q_c}{(q_c)_R} = \left(\frac{t}{t_R} \right)^{C_D C_a / C_c}. \quad (5)$$

式中 t_R 及 $(q_c)_R$ 为参考时间及参考时间下的贯入阻力; C_u/C_c 为次固结阶段压缩指数与压缩指数比; C_D 为经验参数, 表示地基处理引起的密实效果。

3 基于原位测试的时间效应指标

虽然 G_{max} 或者 q_c 能反映一定的时间效应, 但由于这两个指标还受密实度及应力状态的影响, 不同状态土体之间无法通过单一指标来判断时间效应的强弱, 因此有必要对测试指标进行密实度及应力状态的归一化处理, 得到更简洁、可靠的表征指标。一方面, 小应变剪切模量和静力触探端阻受土体密实度和有效应力水平的共同影响; 另一方面, 剪切模量能进一步反映土骨架小应变接触特性, 而 CPT 端阻反映大应变摩擦行为。因此将两者结合起来, 有望对砂土时间效应做合理评估^[29-30]。

Rix 等^[29]通过室内试验研究了相对密实度及应力状态对 G_{max} 及 q_c 相关关系的影响, 试验结果如图 2 所示。由图 2 (a) 可见, 随着 q_{c1N} (即相对密实度) 的增大, G_{max}/q_c 比值减小, 这表明贯入阻力对相对密实度更为敏感。由图 2 (b) 可见, 随着上覆有效应力的增长, G_{max}/q_c 逐渐减小, 这同样表明应力状态对贯入阻力的影响要比小应变模量更大。上述现象说明相对密实度及应力状态对土体小应变模量的影响程度均弱于贯入阻力。

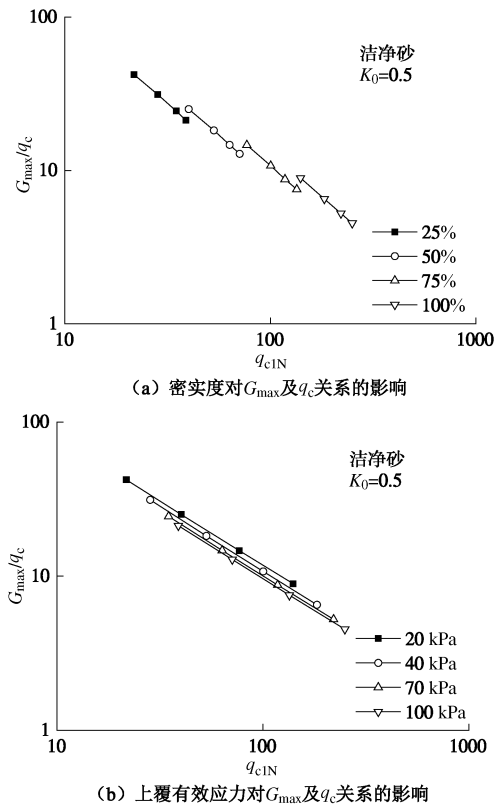


图 2 室内试验结果^[29]

Fig. 2 Results from laboratory tests

从式 (1)、(2) 可以看出, G_{max} 和 q_c 表达式中应力影响指数并不一致, 密实度影响函数也不相同。Lancellotta^[31]认为归一化端阻与土体相对密实度具有良好的相关性, 许多学者^[29-30]提出在 G_{max}/q_c - q_{c1N} 平面中分析土体时间效应。图 3 为根据 Andrus 等^[32]的场地数据分析得到的 G_{max}/q_c 随 q_{c1N} 的变化规律, 不同地质年代土体在 G_{max}/q_c - q_{c1N} 平面中位于不同区域。Schneider 等^[33]认为公式 (6) 定义的经验参数 K_G 可在一定程度上反映并量化土体时间效应, 图 3 中不同地质年代土体的 K_G 值明显不同。因此, 可以通过场地测试结果在 G_{max}/q_c - q_{c1N} 平面中的位置, 结合 K_G 指标粗略评估土体时间效应。

$$K_G = \frac{G_{max}/q_c}{[(q_c/p_a)/(\sigma'_{v0}/p_a)^{0.5}]^{-m}} = \frac{G_{max}/q_c}{q_{c1N}^{-m}}, \quad (6)$$

式中, σ'_{v0} 为上覆有效应力, $p_a=100$ kPa, 为标准大气压, q_{c1N} 为归一化贯入阻力; m 为经验指数, 通常取值为 0.75^[21, 29]。

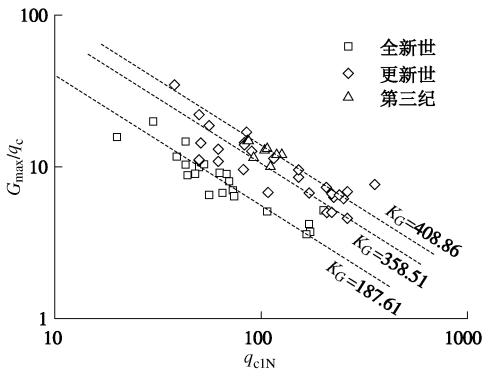


图 3 G_{max}/q_c 现场测试结果

Fig. 3 Ratio of elastic stiffness to cone resistance from field tests

上述研究基于统计结果将 G_{max} 与 q_c 进行简单比值, 未考虑应力状态和密实度的耦合影响。研究表明 K_G 值不仅与土体时间效应相关, 还受应力状态影响, 因此无法准确的定量评价土体时间效应^[34]。对此, 下面将进一步对应力和密实度进行归一化, 以获得物理意义更明确地评价指标。将式 (1) 变换为竖向与水平向有效应力的函数:

$$G_{max} = A \cdot \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{na} \cdot \left(\frac{\sigma'_{h0}}{p_a} \right)^{nb} \cdot p_a \quad (7)$$

式 (2) 和 (7) 反映了土体贯入阻力及小应变模量与土体类别、相对密实度、应力状态的关系。

联合 q_c 及 G_{max} 表征土体时间效应, 应消除孔隙比 (密实度)、竖向有效应力及侧压力系数的影响。首先, 结合砂土的最大、最小孔隙比, 将 q_c 和 G_{max} 表达式中孔隙比影响部分 $H(e)$ 及 $F(e)$ 用孔隙比指数函数拟合并替换 (图 4), 得

$$G_{\max} = A \cdot e^{a_1} \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{na+nb} \cdot (K_0)^{nb} \cdot p_a \quad , \quad (8)$$

$$q_c = C_0 \cdot e^{a_2} \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{C_2+C_3} \cdot (K_0)^{C_3} \cdot p_a \quad . \quad (9)$$

然后对 q_c 进行一次 a_1/a_2 的指数变换, 得到

$$\begin{aligned} & q_c^{a_1/a_2} \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{(na+nb)-(C_2+C_3)(a_1/a_2)} \cdot (K_0)^{nb-C_3(a_1/a_2)} \\ &= C_0^{a_1/a_2} \cdot e^{a_1} \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{na+nb} \cdot (K_0)^{nb} \cdot p_a^{a_1/a_2} \quad . \quad (10) \end{aligned}$$

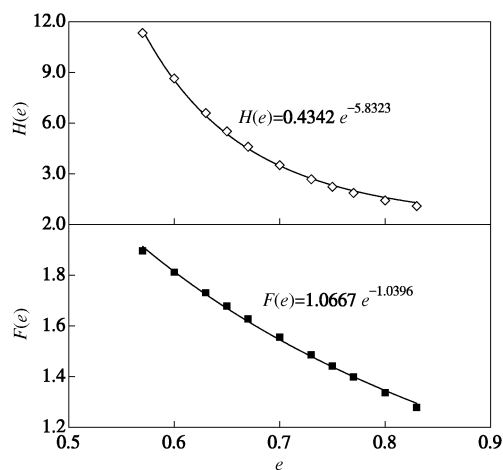


图 4 孔隙比影响函数转换示意图

Fig. 4 Conversion diagram of influence function of void ratio

最后将式 (8) 除以式 (10), 得到消除孔隙比及应力状态的表达式:

$$\begin{aligned} & \frac{G_{\max}}{q_c^{a_1/a_2} \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{(na+nb)-(C_2+C_3)(a_1/a_2)} \cdot (K_0)^{nb-C_3(a_1/a_2)}} \\ &= \frac{A}{C_0^{a_1/a_2}} \cdot p_a^{(1-a_1/a_2)} \triangleq AI \quad . \quad (11) \end{aligned}$$

等式右边的 A 与 C_0 不受密实度及应力状态影响, 综合反映土类、结构性、应力历史等复杂因素对小应变剪切模量和大应变贯入阻力影响, 并且 a_1/a_2 只与土类相关。对某种土体 (如福建标准砂) 而言, 等式右边反映了土体时间效应, 而等式左边联合原位测试结果可计算该时间效应大小 (记作 AI), 因此 AI 具备定量表征能力。

该表征指标从土体力学特性出发, 不含绝对时间变量 t , 综合反映砂土结构性随时间的变化, 可以视作是一个“表观”时间参数。大量的现场测量结果表明, 土体小应变模量对时间效应比贯入阻力更敏感。因此可以预期时间效应越显著, 该表征指标值越大。对于具体场地, 可结合原位测试获得土体小应变模量、贯入阻力、上覆有效应力及侧压力系数这 4 个参数, 利用该参数评估土体时间效应大小。另外, 式 (11) 右边部分是与土体类别及时间效应相关的试验常数,

因此该指标对不同土体而言应该有所差异, 但可以通过进一步研究获得基本参数区间。

4 室内及现场数据校验

目前, 国内外关于小应变剪切模量 G_{\max} 和大应变贯入阻力 q_c 的室内联合测试十分有限。Puppala 等^[35]通过标定试验获得 Monterey 砂静力触探测试结果, Schnaid 等^[36]给出了该砂土小应变剪切模量的经验表达式, 从而可计算出土体的剪切刚度。表 1 给出了 Monterey 砂的联合测试结果。

本节对 Puppala 等^[35]室内试验数据及 Andrus 等^[32]场地测试结果进行分析, 校验上述表征指标 AI 的有效性。对于式 (8)、(9), 不同砂土其参数不同。本文暂时按照表 2 取值, 并且在对 Andrus 等^[32]的场地数据分析时取侧压力系数为 $K_0=0.5$ 。

表 1 Monterey 砂联合测试结果^[35]

Table 1 Laboratory tests on the properties of Monterey sand

D_r /%	σ'_v /kPa	K_0	q_c /MPa	G_{\max} /MPa
55	50	0.41	4.5	42.0
49	96	0.44	6.0	56.9
72	100	0.42	8.4	63.8
86	100	0.37	10.3	66.6
89	100	0.35	12.5	66.9
90	100	0.34	12.2	66.9
56	200	0.35	7.5	79.5
69	200	0.48	17.6	90.4
90	200	0.44	21.8	98.4
55	300	0.62	11.5	109.8
57	300	0.46	11.0	102.9
71	300	0.40	20.3	106.4
74	300	0.38	20.5	106.8
88	300	0.40	35.0	115.9

表 2 各常数项试验拟合值

Table 2 Fitting values of experimental constants

参数	C_0	C_1	C_2	C_3	A	na	nb
值	33.5	0.22	0.64	2.49	685	0.22	0.22

图 5 所示为重塑 Monterey 砂在各时间效应表征指标中的对比情况。可以发现, 在 $G_{\max}/q_c - q_{c1N}$ 双对数平面中试验结果基本呈线性分布, 可定性区分土体时间效应。 K_G 指标大致水平分布, 但仍略受密实度影响随 q_{c1N} 的增大而减小, 这表明采用统计方法得到的 K_G 指标在评估土体时间效应时不能完全消除密实度影响。本文提出的时间效应指标 AI 基本不受密实度影响, 具有稳定值, 这与重塑砂土具有的时间效应相一致, 表明该表征指标是合理、可行的。由于该时间效应指标物理意义明确, 联合小应变指标 G_{\max} 及大应变指标 q_c , 结合场地状态参数上覆有效应力 σ'_{v0} 及侧压力系数 K_0 , 将密实度及应力状态进行归一化处理, 因此能更明确地反映土体具有的时间效应。

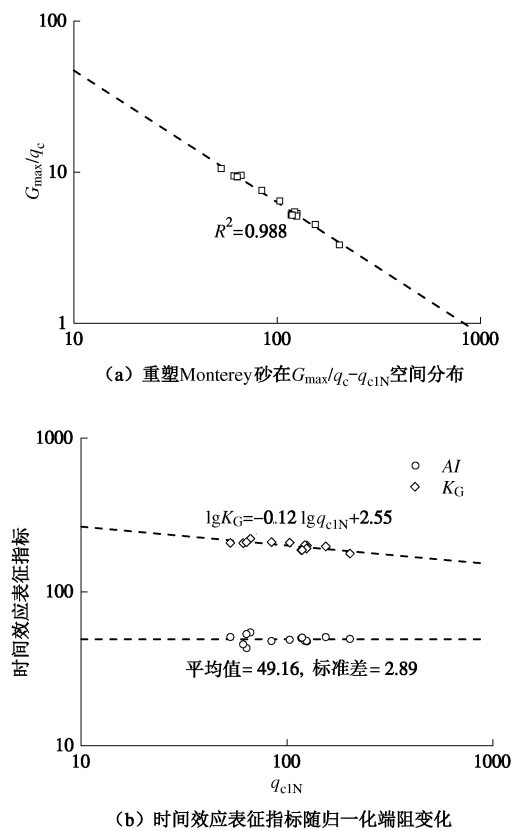


图 5 各时间效应表征方法对比

Fig. 5 Comparison of characterization methods of ageing effect

图 6 是根据 Andrus 等^[32]场地数据分析得到的时间效应指标值随密实度变化的分布图。由图可见，对于同一时间段（如全新世），时间效应指标值基本水平分布，表明其值不受密实度及应力状态影响；对应于不同地质时间，AI 值会随着沉积年代的增长而增大。图 7 为这些场地的时间效应表征指标 AI 随绝对时间 t （年）的变化图。表征指标 AI 随时间对数大致呈线性分布，表明 AI 可以有效区分不同绝对地质沉积年代的场地土体。需要说明的是，由于本文计算 AI 采用了表 2 的参数，其统计可靠性未定，因此图 6，7 仅是定性展示了 AI 对时间效应表征的可行性，其定量可靠性需要进一步研究。

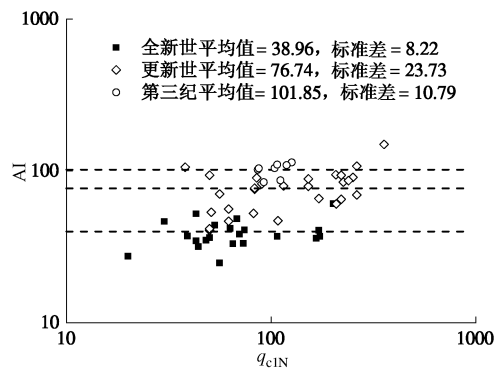


图 6 表征指标 AI 随归一化端阻变化

Fig. 6 Change of AI with normalized cone tip resistance

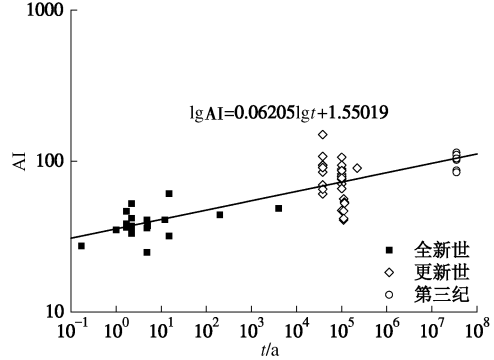


图 7 场地数据表征指标 AI 随时间变化

Fig. 7 Variation of AI with time based on field data

5 结 语

本文基于土体小应变剪切模量 G_{max} 和静力触探锥尖阻力 q_c 的经验表达式，对土体密实度和有效应力两者作归一化处理，提出了砂土时间效应的定量表征指标 AI。该表征指标从土体力学特性出发，不含绝对时间变量，因此是一个时间效应的“表观”参数，为进一步研究时间效应对砂土抗液化性能的影响规律提供了有效手段。

该表征指标在数学上表达为小应变剪切模量与大应变静力触探锥尖阻力的结构性参数的比值函数。通过分析已有室内试验数据发现重塑砂土具有稳定的 AI 值，而对现场数据的分析则揭示了砂土沉积年代越久、AI 值越大的整体趋势。该表征指标的合理性和有效性得到了初步验证。

由于该表征指标涉及的参数与土类相关，除了基于已有的室内和现场数据进一步分析建立与土类相关的参数外，后期将针对某种特定的砂土开展试验，系统研究其地震历史和时间效应的影响规律，检验本文提出时间效应表征指标的可靠性。

致 谢：本项目研究得到了美国 Clemson 大学 Ronald D. Andrus 教授的帮助，在此表示感谢。

参考文献：

[1] BOWMAN E T, SOGA K. Mechanisms of setup of displacement piles in sand: Laboratory creep tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1391 - 1407.

[2] 黄茂松, 陈云敏, 吴世明, 等. 振冲碎石桩加固饱和粉砂土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 69 - 73. (HUANG Mao-song, CHEN Yun-min, WU Shi-ming, et al. Strengthening of saturated silty soils by vibro replacement stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 69 - 73. (in Chinese))

- [3] 王炳辉, 杨树才, 陈国兴, 等. 固结时间对软黏土动剪切模量的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(4): 399 - 404. (WANG Bing-hui, YANG Shu-cai, CHEN Guo-xing, et al. Effect of consolidation time on dynamic shear modulus of soft clay[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(4): 399 - 404. (in Chinese))
- [4] 陈光仔, 蔡袁强, 王 军, 等. 时间效应对砂土小应变动力特性影响及其细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4215 - 4223. (CHEN Guang-zai, CAI Yuan-qiang, WANG Jun, et al. Research of dynamic properties changes and microscopic mechanism of ageing sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 4215 - 4223. (in Chinese))
- [5] MITCHELL J K, SOLYMAR Z V. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**(11): 1559 - 1576.
- [6] 孔纲强, 杨 庆, 郑鹏一, 等. 考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1913 - 1919. (KONG Gang-qiang, YANG Qing, ZHENG Peng-yi, et al. Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1913 - 1919. (in Chinese))
- [7] ARANGO I, MIGUES R E. Investigation on the seismic liquefaction of old sand deposits[M]. San Francisco: Bechtel Corporation, 1996.
- [8] LEON E, GASSMAN S L, TALWANI P. Accounting for soil aging when assessing liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(3): 363 - 377.
- [9] YOUD T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(10): 817 - 833.
- [10] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 1019 - 1027. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 1019 - 1027. (in Chinese))
- [11] 袁晓铭, 曹振中. 砂砾土液化判别的基本方法及计算公式[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 509 - 519. (YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Fundamental method and formula for evaluation of liquefaction of gravel soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 509 - 519. (in Chinese))
- [12] ARANGO I, LEWIS M R, KRAMER C. Updated liquefaction potential analysis eliminates foundation retrofitting of two critical structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, **20**(1): 17 - 25.
- [13] HAYATI H, ANDRUS R D, GASSMAN S L, et al. Characterizing the liquefaction resistance of aged soils[C]// Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic IV, ASCE, 2008: 1 - 10.
- [14] MESRI G, FENG T W, BENAK J M. Postdensification penetration resistance of clean sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(7): 1095 - 1115.
- [15] SCHMERTMANN J H. The mechanical aging of soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(9): 1288 - 1330.
- [16] 周燕国, 陈云敏, 黄 博, 等. 利用弯曲元测量土体表层剪切波速的初步试验[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1883 - 1887. (ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min, HUANG Bo, et al. Preliminary tests of measuring shear wave velocity on soil surface using bender elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1883 - 1887. (in Chinese))
- [17] 战吉艳, 陈国兴, 杨伟林, 等. 苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 559 - 566. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 559 - 566. (in Chinese))
- [18] 凌贤长, 王子玉, 张 锋, 等. 京哈铁路路基冻结粉质黏土动剪切模量试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 38 - 43. (LING Xian-zhang, WANG Zi-yu, ZHANG Feng, et al. Experimental investigation on dynamic shear modulus of frozen clay from subgrade of Beijing-Harbin Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 38 - 43. (in Chinese))
- [19] 孙 锐, 袁晓铭, 刘晓键. 动剪切模量比与剪切波速对地震影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1267 - 1274. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming, LIU Xiao-jian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1267 – 1274. (in Chinese))
- [20] ZHOU Y G, CHEN Y M. Laboratory investigation on assessing liquefaction resistance of sandy soils by shear wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, **133**(8): 959 – 972.
- [21] SCHNEIDER J A, MCGILLIVRAY A V, MAYNE P W. Evaluation of SCPTU intra-correlations at sand sites in the Lower Mississippi River valley, USA[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization ISC, 2004: 1003 – 1010.
- [22] HARDIN B O, RICHART JR F E. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1963, **89**(1): 33 – 65.
- [23] 蔡国军, 刘松玉, PUPPALA A J, 等. 基于 CPTU 测试的桩基承载力可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 404 – 412. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, PUPPALA A J, et al. Reliability assessment of bearing capacity of pile foundation based on CPTU data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 404 – 412. (in Chinese))
- [24] 刘松玉, 蔡国军, 童立元, 等. 基于 CPTU 测试的先期固结压力确定方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 490 – 495. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan, et al. On preconsolidation pressure of clays from piezocone tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 490 – 495. (in Chinese))
- [25] BALDI G, BELLOTTI R, GHIONNA V, et al. Interpretation of CPTs and CPTUs Part II: Drained penetration in sands[C]// Proceedings, Fourth International Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and In Situ Measurements. Singapore, 1986.
- [26] 黄茂松, 吴世明, 赵竹占. 振动挤密砂桩与振冲碎石桩抗液化分析[J]. 浙江大学学报 (工学版), 1992, **26**(2): 165 – 171. (HUANG Mao-song, WU Shi-ming, ZHAO Zhu-zhan. Liquefaction analysis of subsoil strengthened by vibroflotation stone pile method and vibro-compaction sand pile method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1992, **26**(2): 165 – 171. (in Chinese))
- [27] 周 健, 曹 宇, 贾敏才, 等. 强夯-降水联合加固饱和软黏土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(3): 376 – 380. (ZHOU Jian, CAO Yu, JIA Min-cai, et al. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(3): 376 – 380. (in Chinese))
- [28] ANDERSON D G, STOKOE K H. Shear modulus: a time-dependent soil property[J]. Dynamic Geotechnical Testing, 1978, **654**: 66 – 90.
- [29] RIX G J, STOKOE K H. Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance[C]// International Symposium on Calibration Chamber Testing. New York: Elsevier Publishing, 1991: 351 – 362.
- [30] FAHEY M, LEHANE B M, STEWART D. Soil stiffness for shallow foundation design in the Perth CBD[J]. Australian Geomechanics Journal, 2003, **38**(3): 61 – 90.
- [31] LANCELOTTO R. Analisi di affidabilit  in ingegneria geotecnica[R]. Torino: Politecnico di Torino, 1983. (LANCLOTTO R. Reliability analysis in geotechnical engineering[R]. Turin: Polytechnic University of Turin, 1983. (in Italian))
- [32] ANDRUS R D, HAYATI H, MOHANAN N P. Correcting liquefaction resistance for aged sands using measured to estimated velocity ratio[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(6): 735 – 744.
- [33] SCHNEIDER J A, MOSS R E S. Linking cyclic stress and cyclic strain based methods for assessment of cyclic liquefaction triggering in sands[J]. G otechnique Letters, 2011, **1**(4): 31 – 36.
- [34] SCHNEIDER J A, LEHANE B M. Evaluation of cone penetration test data from a calcareous dune sand[C]// Second International Symposium on Cone Penetration Testing, 'CPT10'. Huntington Beach, 2010: 1 – 8.
- [35] PUPPALA A J, ACAR Y B, TUMAY M T. Cone penetration in very weakly cemented sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(8): 589 – 600.
- [36] SCHNAID F, YU H S. Interpretation of the seismic cone test in granular soils[J]. G otechnique, 2007, **57**(3): 265 – 272.