

一种水泥固化软土全龄期强度预测式

杨俊杰^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 刘强^{*3}, 董猛荣^{1,2}, 王曼^{1,2}, 米瑞^{1,2}

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;
3. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 基于杨俊杰等提出的不含拟合参数的水泥土强度与龄期的函数式, 建立了一种不含拟合参数的水泥土全龄期强度预测式。与引自文献 5 组长龄期试验数据对比结果表明, 预测结果基本反映了水泥土强度增长规律。

关键词: 软土; 水泥土; 无侧限抗压强度; 灰水比; 全龄期

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0037-05

作者简介: 杨俊杰 (1962 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境与岩土工程研究。E-mail: jjyang@ouc.edu.cn。

A method for predicting the full age strength of cement-solidified soft soil

YANG Jun-jie^{1,2}, LIU Hao^{1,2}, DONG Meng-rong^{1,2}, LIU Qiang³, WANG Man^{1,2}, MI Rui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Geosciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Based on the functional relationship without fitting parameters between the unconfined compressive strength and the age which was proposed by Yang et al.. A new formula without fitting parameters was proposed for predicting the unconfined compressive strength of cement treated soil during full age. The results show that the formula can properly predict the strength growth of cement treated soil by comparing with the experimental data that was cited from the literatures.

Key words: soft soil; cement soil; unconfined compressive strength; cement-water ratio; full age

水泥土的强度是水泥土设计的关键指标。如果已知水泥土强度与龄期的函数关系, 可根据工程的设计强度, 减少水泥土配合比试验数量及缩短试验周期, 亦可对水泥土长期强度进行预测。

国内外学者针对水泥土强度与龄期的关系提出了诸多公式, 目前已有的水泥土强度与龄期的函数式可分为式中含有拟合参数和不含拟合参数两种, 具体如表 1 所示。公式 (1) ~ (11) 中均含有拟合参数, 需要利用试验数据进行拟合确定。其中公式 (1) ~ (5) 的拟合参数为待定参数, 在进行强度预测时需要先进行拟合加以确定; 公式 (6) ~ (11) 中的拟合参数是提出者对某些试验数据进行拟合确定的, 不能保证其适用于其它土类。

式 (12) 不含拟合参数, 只需知道某一龄期的无侧限抗压强度和水泥土常用设计参数, 即可得到水泥土强度和龄期函数关系, 且计算结果与龄期 180 天内试验结果基本一致 (杨俊杰等^[15-16])。但是, 其函数是指数形式, 因此计算的强度值随龄期无限增大, 不符合水泥土长期强度增长规律^[17]。

在此设水泥土强度与龄期的关系在 180 天后符合双曲线规律, 如式 (13) 和图 1 所示。

$$q_u = \frac{t}{a+bt} \quad (13)$$

式中, a 和 b 为待定参数; $1/b$ 为渐近线, 可认为是水泥土强度的上限。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51779235)

收稿日期: 2019-06-07

*通讯作者 (E-mail: sunnyseasca@163.com)

表1 水泥土强度与龄期关系式

Table 1 Relationship between strength and age of cement-soil

分类	提出者	公式	公式编号	备注
	Nagaraj ^[1] 、 Yamadera ^[2]	$\frac{q_u}{q_u(14)} = a + b \ln(t)$	(1)	q_u 为预测值, t 为养护龄期, $q_u(14)$ 为养护 14 天的无侧限抗压强度, a , b 为拟合参数。
	Saito ^[3] 、 Kitazume ^[4]	$q_u = a + b \log(t)$	(2)	a 和 b 为拟合参数
	Sakka ^[5]	$q_u = \frac{\alpha t}{3.46 + 0.87t} K_E [R - 0.28 \exp(-0.025w_L)]$	(3)	α 为拟合参数, 不同种类的土 α 不同, R 为灰水比, K_E 为 28 天龄期水泥土变形模量与灰水比线性关系式的斜率, w_L 为原土的液限。
	Zhang ^[6]	$q_u(C_m, w, t) = \begin{cases} K_I C_m^{k_3} \exp(-k_2 w) & \text{Zone I} \\ K_{II} (C_m - C_0) \exp(-k_2 w) & \text{Zone II} \end{cases}$	(4)	$q_u(C_m, w, t)$ 为预测值, C_m 为水泥含量, w 为含水量, C_0 为界限水泥含量, K_I, K_{II}, k_2, k_3 为拟合参数, Zone I 为非活跃区, Zone II 为活跃区。
含拟合参数型	曹智国 ^[7]	$q_u = a \left(\frac{n_t}{a_w \lg t} \right)^{-b}$	(5)	a, b 为拟合参数, 与土的种类有关, a_w 为水泥掺入比, n_t 为 t 龄期下的水泥土孔隙度。
	许宏发 ^[8]	$q_u = [3.4(5a_w)^\lambda - 2a_w^{0.75}] [1 - \exp(-0.025t)] + 2a_w^{0.75} + q_{u0}$	(6)	λ 为原土性状参数, q_{u0} 为原状土无侧限抗压强度。
	Horpibulsuk ^[9]	$q_u = q_u(28) \left[\frac{w_c / C}{w_{c1} / C_1} \right]^{1.27} (0.039 + 0.283 \ln t)$	(7)	$q_u(28)$ 为 w_c/C 条件下 28 天龄期水泥土强度试验值, w_{c1}/C_1 为预测水泥土的总含水量与水泥含量的比值。
	储诚富 ^[10] 、 Liu ^[11]	$\frac{q_{u(R,T)}}{q_{u(R,28)}} = (-0.019 + 0.31 \ln t) \frac{(R - 0.129 \exp(-0.014w_L))}{(R_1 - 0.129 \exp(-0.014w_L))}$	(8)	$q_{u(R,28)}$ 为 28 天、灰水比 R_1 的水泥土强度, $q_{u(R,t)}$ 为龄期 t 、任意灰水比 R 的水泥土强度预测值。
	陈达 ^[12]	$\frac{q_u(t_1)}{q_u(t_2)} = \frac{1.3 \ln t_1 - 1}{1.3 \ln t_2 - 1}$	(9)	$q_u(t_1), q_u(t_2)$ 分别对应龄期为 t_1, t_2 时的水泥土强度预测值和试验值。
	Circeo ^[13]	$q_u = q_u(t_0) + (k_c \pm 80) \log(t/t_0)$	(10)	k_c 为无侧限抗压强度与养护时间对数的斜率。
	Mitchell ^[14]	$q_u = q_u(t_0) + k_M \log(t/t_0)$	(11)	k_M 为无侧限抗压强度与养护时间对数的斜率, 粒状土 $k_M = 480a_w$; 细粒土 $k_M = 70a_w$ 。
不含拟合参数型	Yang ^[15]	$q_u = q_{u0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^R$ $R = \frac{1}{C + \frac{w_n}{(1+w_n)a_w}}$	(12)	q_{u0} 为 t_0 龄期时的水泥土无侧限抗压强度; R 为灰水比, 即水泥质量与土中水和水泥浆中水的质量之和的比值; w_n 为待加固土的天然含水量, a_w 为水泥掺入比, C 为水泥浆水灰比, 对于水泥干粉加固, $C = 0$ 。

设式 (12) 与式 (13) 表示的曲线在 $t = 180$ 天时 (图 1 中 A 点) 相连, 即式 (12) 与式 (13) 计算的强度相等:

$$q_{u0} \left(\frac{180}{t_0} \right)^R = \frac{180}{a+180b} \quad (14)$$

同理, 设式 (12) 与式 (13) 表示的曲线在 $t = 180$ 天时, 在 A 点平滑连接, 即两条曲线在 A 点的切线的斜率相等:

$$\frac{q_{u0}}{t_0^R} R 180^{R-1} = \frac{a}{(a+180b)^2} \quad (15)$$

联立式 (14) 和式 (15), 解得参数 a 和 b:

$$a = 180^{1-R} R \frac{t_0^R}{q_{u0}} \quad (16)$$

$$b = 180^{-R} (1-R) \frac{t_0^R}{q_{u0}} \quad (17)$$

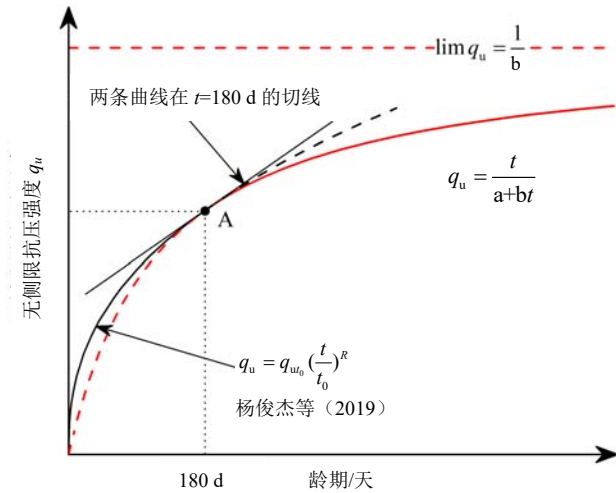


图 1 水泥土全龄期强度预测示意图

Figure 1 Schematic diagram for predicting the strength of cement soil during full age

将式 (16) 和式 (17) 代回式 (13), 并与式 (12) 联立得到式 (18):

$$\begin{cases} q_u = \frac{q_{u0}}{t_0^R} t^R & t \leq 180 \\ q_u = \frac{q_{u0}}{t_0^R} \cdot \frac{t}{180^{1-R} R + 180^{-R} (1-R)t} & t \geq 180 \end{cases} \quad (18)$$

$$R = \frac{1}{C + \frac{w_n}{(1+w_n)a_w}}$$

式 (18) 是一个不含拟合参数的水泥土全龄期强度预测式, 龄期在 180 天前为指数函数形式,

龄期在 180 天后为双曲线函数形式。只需知道 t_0 龄期的无侧限抗压强度 q_{u0} 和灰水比 R , 即可预测全龄期水泥土强度。其中双曲线的渐近线, 即水泥土强度的上限 $\lim q_u$ 由式 (19) 给出。

$$\lim q_u = \frac{1}{b} = \frac{180^R}{(1-R)t_0^R} q_{u0} \quad (19)$$

图 2 是预测结果与引自文献的试验结果的对比。图 2 中的试验数据均选自具有超过 180 天龄期的试验数据 (表 2)。Circeo 基于引自文献的试验数据, 提出了强度与龄期的关系 (式 (10)), 本文引用了其中粉土和粘土的试验数据; Hayashi 等的的数据是现场干粉搅拌形成的水泥土桩取芯测试的结果; Starcher 的数据是人工配置的混合土室内试验结果; Pham 等的的数据是粘质砂土水泥土, 但待加固土的液限为 25%, 塑限为 19%。

图 2 中的计算结果采用的是表 1 中的部分公式。Nagaraj、Yamadera (式 (1)) 与 Saito、Kitazume (式 (2)) 的计算式在形式上有所区别, 但本质均为对数线性拟合公式, 其系数之间存在对应换算关系, 计算的结果相同。式 (3)、式 (4)、式 (5) 及式 (6) 中分别含有 28 天龄期水泥土变形模量与灰水比线性关系式的斜率、界限水泥含量 C_0 、龄期 t 、水泥土孔隙度 n_t 及原状土抗压强度和原土性状参数 λ 等上述 5 组数据均无法确定的参数, 故没有采用上述公式。式 (7) 和式 (8) 中需要的 28 天龄期水泥土无侧限抗压强度数据, 在 Kitazume 的试验数据中缺少该数据, 故上述两式无法进行计算, 在图 2 b) 中没有相应的计算结果。式 (11) 中只给出了粒状土和细粒土的斜率, 而对于 Starcher 试验所用人工混合土, 该斜率无法确定, 故式 (11) 无法进行计算, 在图 2 d) 中没有相应的计算结果。

如图 2 所示, 本文提出的公式与 Nagaraj、Yamadera、Saito 以及 Kitazume 等提出的含拟合参数型公式的预测结果均与试验结果比较吻合。对于含待定参数的拟合公式, 由于参数是通过函数与具体数据拟合确定的, 因此, 在试验数据的范围内, 拟合曲线与试验结果高度一致。但是, 当龄期超过试验最长龄期后, 由于对数线性函数的特性, 其预测的无侧限抗压强度随龄期无限增长, 相对而言, 本文公式的预测结果则基本反映了水泥土强度增长规律。

表 1 水泥土无侧限抗压强度试验参数

Table 1 Test parameters of unconfined compressive strength of cement-soil

待加固土	天然密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	水泥掺量	最长龄期 /天	制样	文献
粉(粘)土	1.63~1.84	13.8~18.5	掺入比: 6%~30%	1825	现场	Circeo 等 ^[5]
日本北海道粘土	1.60~1.70	80~100	掺量: 290 kg/m ³	6205	现场	Hayashi 等 ^[6]
高岭土和 Nevada 砂的混合土	—	—	灰水比: 0.25	433	室内	Starcher ^[7]
澳大利亚砂质粘土	1.68	37.7	掺量: 120 kg/m ³	384	室内	Pham 等 ^[8]
日本川崎海相粘土	—	160	掺入比: 30%	365	现场	Kitazume 等 ^[9]

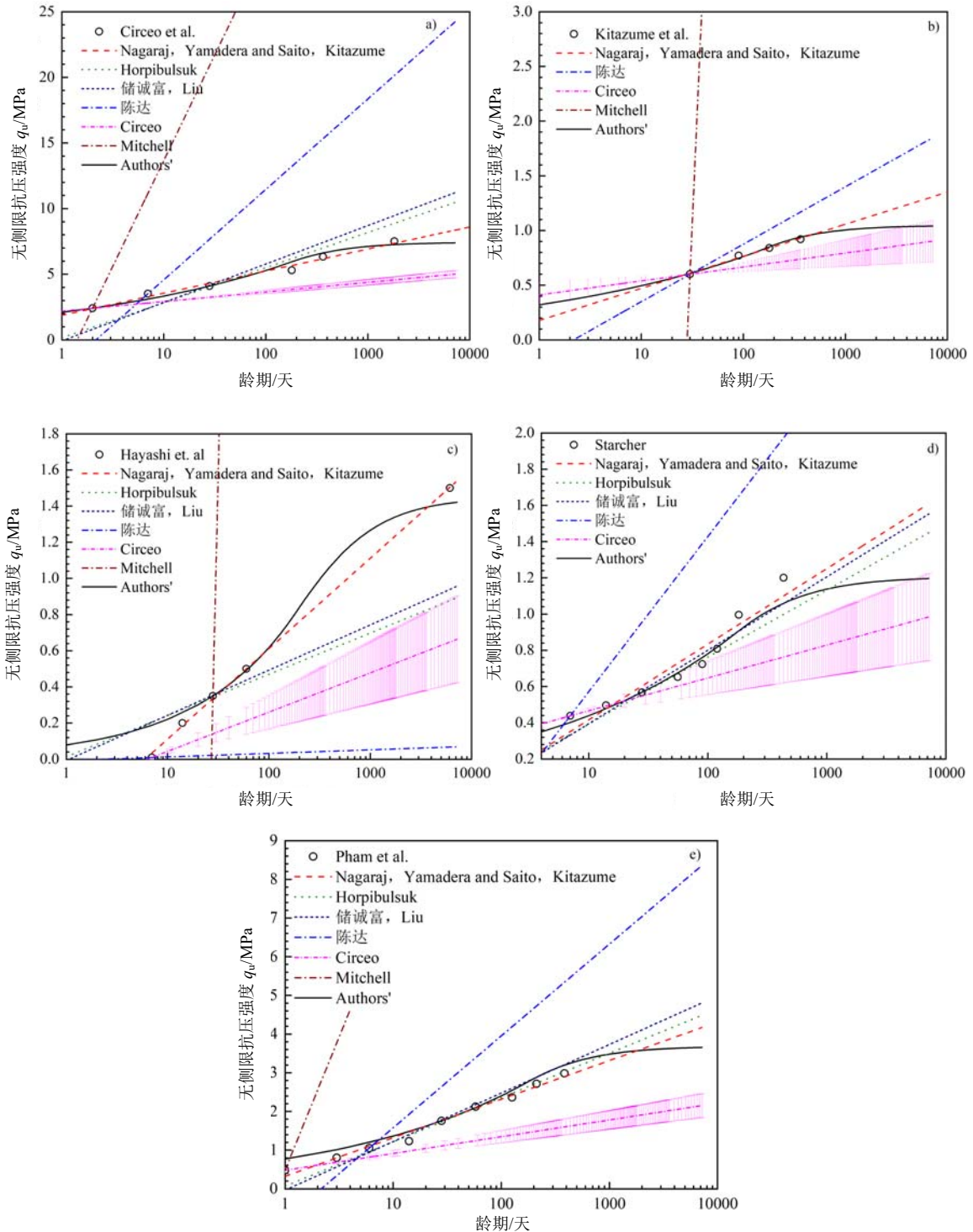


图 2 无侧限抗压强度预测值与试验值对比

Figure 2 Comparisons between predicted and experimental values of unconfined compressive strength

本文在杨俊杰等提出的不含拟合参数的水泥土强度与龄期关系式的基础上, 通过假设180天龄期后的水泥土强度增长规律为双曲线函数形式, 建立了一种不含拟合参数的水泥土全龄期强度预测式。该式的计算结果与引自文献的长龄期试验数据基本吻合。

参考文献:

- [1] Nagaraj T S, Miura N. Induced cementation of soft ground-a parametric assessment[C]. Int. Symp. on Lowland Technology, 1996: 85-97.
- [2] Yamadera A. Prediction of strength development in cement stabilized marine clay[J]. Improvement of Soft Ground, Design, Analysis and Current Research, 1997: 108-124.
- [3] Saitoh S. Experimental study of engineering properties of cement improved ground by the deep mixing method[D]. Tokyo: Nihon University, 1988.
- [4] Kitazume M, Nakamura T, Terashi M, et al. Laboratory tests on long-term strength of cement treated soil[C]. Third International Conference on Grouting and Ground Treatment., 2003.
- [5] Sakka H, Ochiai H, Yasufuku K, et al. Evaluation of the improvement effect of cement-stabilized soils with different cement-water ratio[C]. Proc. of the International Symposium on Lowland Technology, Saga University, Japan, 2000.
- [6] Zhang R, Santoso A, Tan T, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J], 2013, 139(12): 2170-2181.
- [7] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, s1: 3446-3454.
- [8] 许宏发, 马军庆, 华中民, 等. 水泥土抗压强度经验公式研究[J]. 勘察科学技术, 2009, 1: 3-6.
- [9] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj T S. Clay-water / cement ratio identity for cement admixed soft clays[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005, 131(2): 187-192.
- [10] 储诚富. 水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [11] Liu S Y, Zhang D W, Liu Z B, et al. Assessment of unconfined compressive strength of cement stabilized marine clay[J], 2008, 26(1): 19-35.
- [12] 陈达, 庄宁, 廖迎娣, 等. 水泥土力学特性随龄期发展规律试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012, 1: 26-29.
- [13] Circeo L J, Davidson D, David H. Strength-maturity relations of soil-cement mixtures[J]. Highway Research Board Bulletin, 1962, (353): 84-97.
- [14] Mitchell J K, Ueng T-S, Monismith C L. Behavior of stabilized soils under repeated loading. report 5. performance evaluation of cement-stabilized soil layers and its relationship to pavement design[R]. California Univ Berkeley Dept of Civil Engineering, 1972.
- [15] Yang J J, Dong M R, Sun T, et al. A forecast formula of strength of cement treated clay[J]. Soils and Foundations, 2019.
- [16] 杨俊杰, 王曼, 董猛荣, 等. 一种水泥土长期强度实用预测式探讨[J]. 地基处理, 2017, 28(3): 65-72.
- [17] 章定文, 刘松玉, 邵俐. 水泥土的长期强度分析[C]. 全国地基处理学术讨论会, 2006.
- [18] Hayashi H, Nishikawa J I, Ohishi K, et al. Field observation of long-term strength of cement treated soil[J]. Grouting and Ground Treatment, 2003: 598-609.
- [19] Starcher R D. Impact of curing time and curing stress on the mechanical behavior of cement-improved and cement-fiber-improved soft soil[D]. University of South Carolina, 2013.
- [20] Pham V N, Turner B, Huang J, et al. Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(4): 645-654.