

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.010

封闭环境中群桩桩间土超孔压消散数值模拟

高子坤¹, 何俊²

(1. 莆田学院土木建筑系, 福建 莆田 351100; 2. 湖北工业大学土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:通过分析封闭环境中群桩基础成桩后, 桩间土体及下卧土层中超静孔隙水压力消散的边界条件和初始条件, 建立了场地边界径向渗流受到阻隔时, 饱和黏土中群桩桩间横观各向同性土体固结的定解条件, 应用数值理论建立了相应定解问题的有限元程序, 对桩间及下卧土层中压桩挤土造成的孔压消散时空变化规律进行了模拟研究. 结果表明: 下卧土层的渗透特性对桩间土体的孔压消散有明显影响, 特别当下卧土层水平向渗透系数很小时, 桩间土超孔压消散将延续非常长的时间.

关键词:群桩; 桩间土; 封闭环境; 孔压消散; 数值模拟; 时空变化

中图分类号: TU473.1+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)03-0290-05

所谓封闭环境是指大面积分布的群桩基础, 且桩基础周围的场地排水不畅或桩身长度范围内场地周围土体为经过地基处理的低渗透性的其他已建土木工程的基础^[1-2]. 在封闭环境下, 群桩场地内固结渗流具有空间性, 但在工程场地以外区域渗流基本不受在建工程的压桩影响, 所以桩间土的固结特性不同于单桩桩间土体固结, 也不同于一般场地条件下的群桩基础桩间土体的固结, 需要根据其独特的边界条件单独研究.

预制桩压入过程对周围环境的挤土破坏及成桩后其承载力随时间而变化的现象很早就被人们发现. 胡中雄等^[3-4]对饱和黏性土中的桩基进行了观测、试验和分析, 认为桩的竖向极限承载力随时间的增长而增长, 总的变化规律是初始增长速度快, 随后逐渐变缓, 并趋于某一极限值. 显然, 饱和黏土中孔压消散的时空特性是产生该现象的主要原因^[5-8]. 同时, 孔压消散的速度和渗流方向也决定了压桩对周围环境和地下建(构)筑物破坏的可能性和持续时间的长度或破坏的程度, 所以有必要深入研究桩间土体的固结渗流规律. 姚笑青^[9]分析了桩间土中超孔隙水压力的分布及大小, 建立了桩间土再固结模型, 用三维固结理论编制了差分计算程序, 并将计算的桩间土固结度增长与实测桩承载力的增长进行了对比, 两者的后期增长率吻合较好, 表明可由桩间土固结度的增长来预估桩承载力的增长, 但该研究未明确考虑下卧土层的影响, 也不考虑工程场地周围环境的影响.

由于在封闭环境下, 超静孔隙水压力的消散持续时间更长, 下卧土层的渗流特性对桩间土体固结的影响更显著, 所以本文对该问题进行深入的分析研究, 探索超孔压消散的时空规律, 为预测大面积群桩施工对周围环境破坏程度以及桩基础承载力时效计算提供依据.

1 定解条件和有限元模型的建立

根据文献[10], 土体固结渗流的空间轴对称问题的基本微分方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + C_v \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

为便于计算机编程并考虑土性参数的分层设置要求, 将基本微分方程重新表述为

$$r \frac{\partial u_i}{\partial t} = C_{hi} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) + C_{vi} \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中

$$C_{hi} = \frac{(1 + \nu_i) k_{hi} E_s}{3(1 - \nu_i) \rho g} \quad C_{vi} = \frac{(1 + \nu_i) k_{vi} E_s}{3(1 - \nu_i) \rho g}$$

式中： u_i ——超静孔压； C_{hi} ——水平向固结系数； C_{vi} ——竖向固结系数； r, z ——空间轴对称问题的径向坐标和竖向坐标； ν_i ——土的泊松比； k_{hi} ——水平向渗透系数； k_{vi} ——竖向向渗透系数； E_s ——压缩模量； ρ ——水的密度；下标 $i = 1$ 表示桩间土， $i = 2$ 表示下卧土层。

桩基础成桩后，对于桩基础场地周围为渗透性很低的地层，或为经地基处理的渗透系数很小的已建工程的地基基础，其向桩基周围场地的径向排水将受到阻隔，桩间土体固结排水模型可认为如图 1 所示，即可通过研究桩基础中某一基桩的桩间土体的固结渗流过程，得到整个桩基础的固结规律。

根据图 1，假设桩体为圆柱形，桩土作用边界为径向隔水边界，桩基础下卧土层的下层面为竖向向隔水边界，地面为自由排水面，可得固结问题的边界条件、初始条件和连续性条件。

a. 边界条件：

$$\left. \frac{\partial u_1}{\partial r} \right|_{r=r_w} = \left. \frac{\partial u_1}{\partial r} \right|_{r=r_e} = u_1 \Big|_{z=0} = 0 \quad u_2 \Big|_{r=R_0} = \left. \frac{\partial u_2}{\partial z} \right|_{z=H_1+H_2} = \left. \frac{\partial u_2}{\partial z} \right|_{r>r_e, z=H_1} = 0 \quad (2)$$

式中： r_w ——桩孔壁的半径； r_e ——成桩后初始超静孔隙水压力影响半径； R_0 ——基础半径，对矩形基础根据 $R_0 = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$ 计算等效半径，其中 a, b 为矩形的边长； H_1, H_2 ——桩长和下卧土层厚度。

b. 初始条件：

$$u \Big|_{t=0} = f(r, z) \quad (3)$$

c. 连续性条件：上下层土体的界面上需满足连续性条件，即接触面上的任意点任意时刻都有等式：

$$u_1(r, H_1, t) = u_2(r, H_1, t) \quad k_1 \left. \frac{\partial u_1(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=H_1} = k_2 \left. \frac{\partial u_2(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=H_1} \quad (4)$$

式(4)表示界面上超静孔压连续和垂直向渗流的流速相等。

根据上述定解条件编制计算程序，对压桩挤土造成超静孔压消散规律进行工程实例数值模拟研究。

2 实例分析

上海某试桩资料^[9]：试验用桩为一 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的混凝土方桩，桩体自重 125 kN ，入土深度 24.5 m 。桩群范围为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ ，桩距 1.5 m 。成桩 409 d 后的固结度为 92% 。以层厚为权重加权平均计算的桩间土参数值为： $\rho' = 0.81 \text{ t/m}^3$ ， $E_s = 3530 \text{ kPa}$ ， $k_v = 0.130 \text{ mm/d}$ ， $k'_h = \frac{2}{3} k_h = 0.864 \text{ mm/d}$ ， $\mu = 0.48$ ， $c_u = 12.4 \text{ kPa}$ ，所以，固结系数： $C_{hi} = \frac{(1+\nu)k'_h E_s}{3(1-\nu)\rho g} = 0.206 \text{ m}^2/\text{d}$ ， $C_{vi} = \frac{(1+\nu)k_v E_s}{3(1-\nu)\rho g} = 0.0309 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

下卧土层固结系数 C_{h2}, C_{v2} 分 3 种，对应图 2~7 中的 (a) (b) (c) 3 种情况。

几何参数： $H_1 = 24 \text{ m}$ ， $H_2 = 25 \text{ m}$ ，桩尖进入下卧土层 0.5 m ；对于方桩，计算时等效半径取： $r_w = \sqrt{(0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m})/\pi} = 0.28 \text{ m}$ ， $r_e = \sqrt{(1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m})/\pi} = 0.84 \text{ m}$ ； $R_0 = \sqrt{(15 \text{ m} \times 15 \text{ m})/\pi} = 8.4 \text{ m}$ 。

初始条件确定：姚笑青^[9]和唐世栋^[11]研究表明，桩距较小、沉桩速率较快时，桩群内超孔隙水压力瞬时可能达 $(1.5 \sim 2.0)\rho' gh$ ，有的甚至达到 $(3 \sim 4)\rho' gh$ ，这就是孔压叠加的结果。由于这很高的超孔隙水压力，导致土中竖向有效应力等于零，土中出现横向裂缝，裂缝致使超孔隙水压力迅速消散，裂缝闭合，整个桩群内超孔隙水压力趋于一个稳定值 $\rho' gh + c_u$ （横向裂缝处为 $\rho' gh$ ）。唐世栋等^[12]也认为，群桩基桩周围超孔隙水压力的分布规律和影响范围主要受到水裂作用的限制，为分析群桩桩间土中初始超孔隙水压力的分布规律提供了依据。根据上述分析，取初始条件为

$$u(r, z, t) \Big|_{t=0} = \rho' gz + c_u \quad (r_0 \leq r \leq r_e) \quad (5)$$

式(5)与空间坐标 r 无关，这种初始条件的假设适用于桩间距较小的群桩基础。对于桩间距很大的情况，水裂

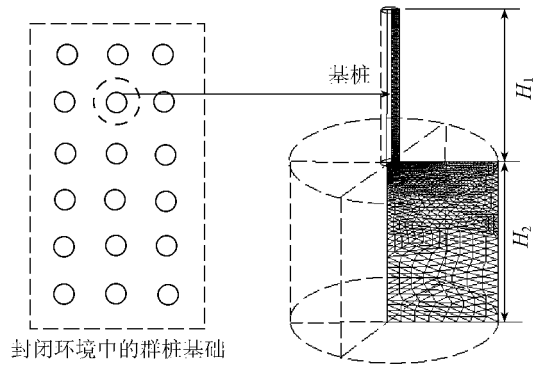


图 1 FEM 计算模型

Fig. 1 FEM model

作用局限于紧靠基桩周围的局部区域,初始超静孔隙应力分布应与径向坐标有关,此时,需要对初始孔压进行专门的研究和测试.

根据上述定解条件(式(1)~(5))和有限元模型(图1)编制FEM数值仿真计算程序,计算结果见图2~7,

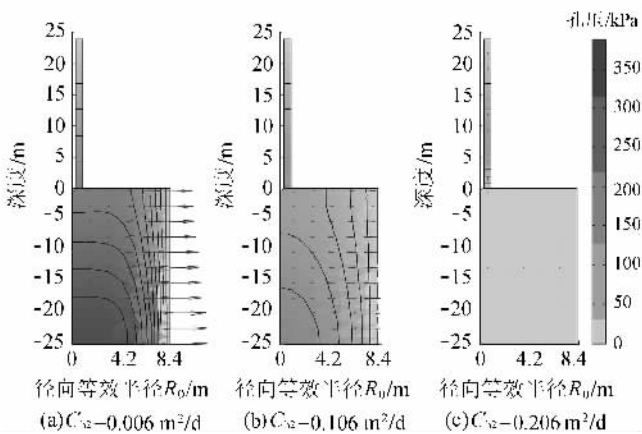


图2 成桩30 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 2 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 30 d

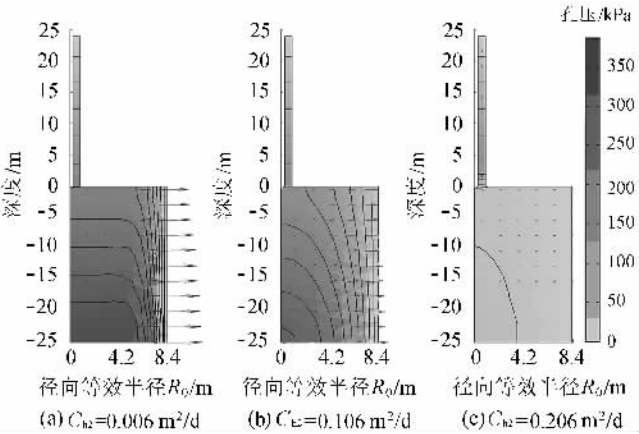


图3 成桩120 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 3 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 120 d

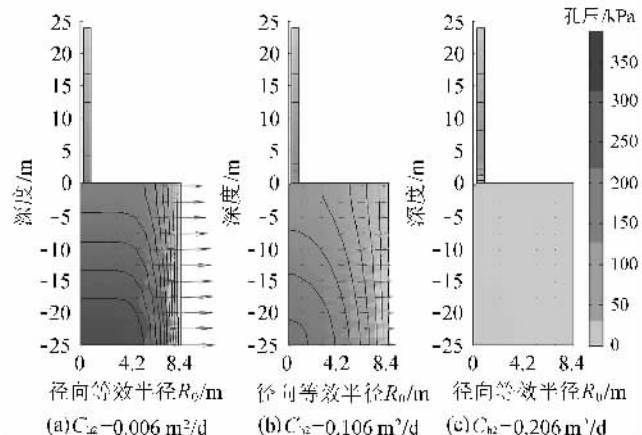


图4 成桩210 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 4 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 210 d

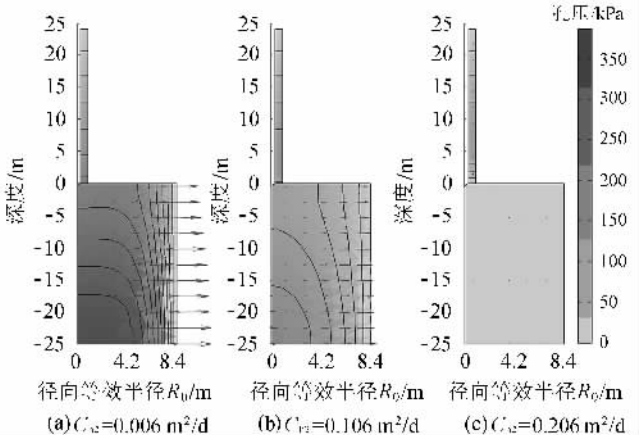


图5 成桩300 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 5 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 300 d

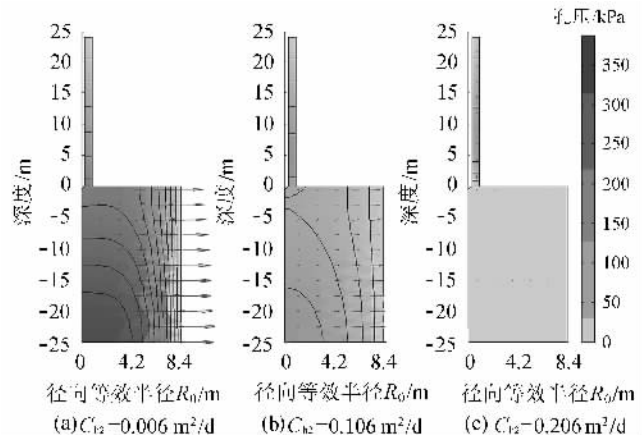


图6 成桩390 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 6 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 390 d

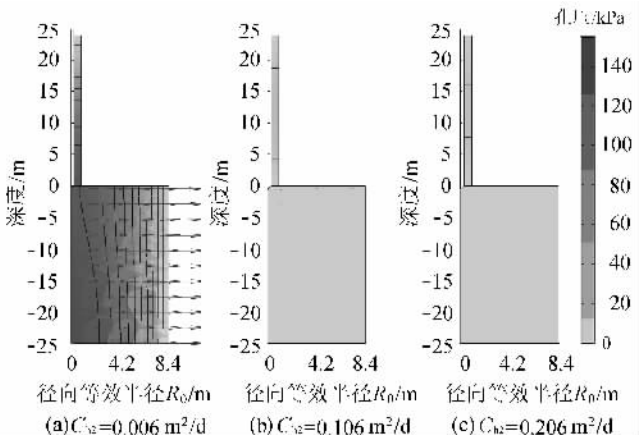


图7 成桩4200 d后渗流速度和孔压分布

Fig. 7 Distribution of seepage velocities and pore water pressures after 4200 d

图中箭头表示渗流方向,箭头长短表示渗流速度大小,箭头越长渗流速度越大;图中同时绘出超静孔压等值线以及孔压和灰度对应关系的色棒。

由图2~7分析可得以下结论:

a. 沉桩390 d后(图6)且 $C_{h2} = C_{h1} = 0.206 \text{ m}^2/\text{d}$ 时,桩间土中超静孔压分布都已趋于0 kPa,这与试桩资料描述的成桩409 d后的固结度为92%的情况是相符的。

b. 桩间土超静孔压消散和下卧土层的固结渗流特性关系很大。由图2~6中(c)图可明显看出,桩间土超孔压很快消散并接近0 kPa,而图(a)显示桩间土超孔压最大值仍在250 kPa左右。根据本文的计算结果,对于摩擦型桩,仅考虑桩间土体孔压消散或固结度对承载力时间效应的影响,即不考虑下卧土层的固结渗流特性或认为下卧土层为隔水层的假设是不合理的。

c. 下卧土层的超静孔压消散与桩间土体的渗透特性或孔压消散程度有同步性,即在封闭环境条件下,当下卧土层渗透系数较小时,桩间土将在较长时间内保持较大孔压,这个现象说明在下卧土层渗透系数较小时,深层超静孔压水压力对地下建(构)筑物的破坏能力将更强、更持久。

d. 当下卧土层的渗透系数,特别是水平向渗透系数很小时,桩间土超孔压消散将延续非常长的时间,甚至达10 a以上,如图(a)所示,即桩基础承载力的提高是非常缓慢的或者说压桩挤土对周围环境的破坏是非常持久的。

3 结 论

a. 桩间土超静孔压消散和下卧土层的固结渗流特性关系很大,必须在计算分析中予以考虑。

b. 下卧土层中超静孔压水压力对地下建(构)筑物的破坏能力更强、更持久。

c. 下卧土层的渗透系数,特别是水平向渗透系数很小时,桩间土超孔压消散将延续很长的时间。

d. 研究结果可用于压桩挤土造成的环境破坏程度及破坏范围预测和饱和黏土中群桩基础承载力时效计算分析。

参考文献:

- [1] 高子坤, 施建勇. 封闭环境中群桩桩间横观各向同性土体固结解[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1467-1471. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong. Consolidation of soil among group-piles after pile sinking in enclosed field[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1467-1471. (in Chinese))
- [2] 高子坤, 郭进军. 压桩挤土效应数值方法和试验研究[J]. 莆田学院学报, 2009, 16(2): 87-92. (GAO Zi-kun, Guo Jin-jun. The general review on numerical and experimental methods of soil squeezing due to pile-jacked[J]. Journal of Putian University, 2009, 16(2): 87-92. (in Chinese))
- [3] 胡中雄. 饱和软黏土中单桩承载力随时间的增长[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(3): 58-61. (HU Zhong-xiong. Increase with time of bearing capacity of single pile in saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(3): 58-61. (in Chinese))
- [4] 童建国. 单桩承载力时间效应的试验分析[C]//浙江省第五届土力学及基础工程学术讨论会论文集. 宁波: 浙江大学出版社, 1992: 65-69.
- [5] 高子坤, 施建勇. 饱和黏土中单桩桩周土空间轴对称固结解[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 979-982. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong. Consolidation solution of soil around single-pile after pile sinking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 979-982. (in Chinese))
- [6] 高子坤. 群桩桩间横观各向同性土体固结问题级数解[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 775-779. (GAO Zi-kun. Series solutions of consolidation of transverse isotropy soil among jacked-in group-piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 775-779. (in Chinese))
- [7] BOWMAN E T, SOGA K. Mechanisms of setup of displacement piles in sand: laboratory creep test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1391-1407.
- [8] 高子坤, 施建勇, 顾士坦. ANSYS 软件在 Biot 固结方程求解中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 59-61. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong, GU Shi-tan. Application of software ANSYS to solving Biot consolidation equation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(3): 59-61. (in Chinese))
- [9] 姚笑青. 桩间土的再固结与桩承载力的时效[J]. 上海铁道大学学报: 自然科学版, 1997, 18(4): 91-94. (YAO Xiao-qing. The reconsolidation of the soil among piles and the time effect of pile bearing capacity[J]. Journal of Shanghai Tiedao University: Natural Science, 1997, 18(4): 91-94. (in Chinese))
- [10] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.

[11] 唐世栋.用有效应力原理分析桩基承载力的变化全过程[D].上海 :同济大学 ,1990.

[12] 唐世栋 ,王永兴 ,叶真华.饱和软土地基中群桩施工引起的超孔隙水压力[J].同济大学学报 :自然科学版 ,2003 ,31(11): 1290-1294.(TANG Shi-dong ,WANG Yong-xing ,YE Zhen-hua. Excess pore water pressure caused by installing pile group in saturated soft soil[J]. Journal of Tongji University :Natural Science 2003 ,31(11):1290-1294.(in Chinese))

Numerical simulation of dissipation of excess pore water pressure of
squeezed soil among pile groups in enclosed fields

GAO Zi-kun¹ , HE Jun²

(1. Civil Engineering Department of Putian University , Putian 351100 , China ;

2. College of Civil and Architectural Engineering , Hubei University of Technology , Wuhan 430068 , China)

Abstract : The boundary and initial conditions for the dissipation of the excess pore water pressures of squeezed soil and in underlying soil strata among pile groups in enclosed fields were analyzed. The definite solution conditions for the consolidation of transversely isotropic soil among pile groups in saturated clay were established when the radial seepage at the site boundary was obstructed. The FEM procedures for the corresponding definite solutions were proposed based on numerical theories. The temporal and spatial variation of the dissipation of the excess pore water pressures of squeezed soil and in underlying soil strata among pile groups were studied. The results show that the dissipation of pore water pressure of soil among pile groups is greatly affected by the permeability of underlying soil strata. Especially when the horizontal permeability coefficient is relatively small , the dissipation of the excess pore water pressure of squeezed soil among pile groups has a long duration.

Key words : pile group ; squeezed soil ; enclosed field ; pore pressure dissipation ; numerical simulation ; temporal and spatial variation

· 简讯 ·

第 3 届全国水工岩石力学学术会议将在上海召开

由中国岩石力学与工程学会主办 ,中国岩石力学与工程学会岩体物理与数学模拟专业委员会、中国岩石力学与工程学会测试专业委员会、中国岩石力学与工程学会青年工作委员会、《岩石力学与工程学报》编辑部协办 ,同济大学承办的第 3 届全国水工岩石力学学术会议将于 2010 年 8 月 28—29 日在上海召开.

会议主要议题如下 :

- a. 岩石、结构面力学和渗流性质.
- b. 岩体工程勘察、测试、探测与试验新技术、新方法、新设备.
- c. 岩体工程物理与数值模拟方法与工程应用.
- d. 岩体工程数字化技术与健康诊断理论.
- e. 高坝坝基设计理论与分析方法.
- f. 岩质边坡工程稳定性分析与治理.
- g. 大型地下洞室群设计与安全控制.
- h. 深埋长隧洞及 TBM 施工中的岩石力学问题.
- i. 岩体及坝基和边坡的动力特性及响应.
- j. 环境岩土工程问题.

会议详细情况可登录 http://www.csmee.com/CN/News/2009-10/EnableSite_ReadNews3688481255276800.html 查询.

(本刊编辑部供稿)