

环境水对混凝土静力强度影响的研究进展

邓友生^{1,2}, 闫卫玲², 杨敏¹, 黄恒恒²

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:对环境水对混凝土静力强度影响的一系列试验研究成果进行了综述,分析了湿态混凝土静力强度降低的物理机理;指出现有的研究大多为定性的解释,定量的研究较少;提出应研究多因素相互作用对混凝土静力强度产生的影响,并采用有限元法来模拟湿态混凝土各个界面的连接耦合。

关键词:环境水;混凝土;静力强度;物理机理;试验研究

中图分类号:TV139.1;TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)04-0099-06

Research progress on influence of environmental waters on static strength of concrete//DENG Yousheng^{1,2}, YAN Weiling², YANG Min¹, HUANG Hengheng² (1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: This paper presents a series of experimental studies about the influence of environmental waters on static strength of concrete, and analyzes the physical mechanism that static strength of wet concrete would decrease. Overall, it is pointed out that most of the present research is qualitative explanation, and quantitative research is rather less. Moreover, it is suggested that the impact of the interaction of several factors on static strength of concrete should be studied, and the finite element analysis method should be used to simulate the link coupling on each interface of wet concrete.

Key words: environmental waters; concrete; static strength; physical mechanism; experimental study

混凝土结构经常在水环境中工作,例如水电站、跨海桥或过河桥的基础及墩台、海上采油平台、海岸及河口结构物等。混凝土结构膨胀、收缩、徐变、不均匀沉降及周围环境温度的变化,都能使结构表面和内部产生大量的裂缝,同时混凝土中具有大量的毛细管,在外围水压和液体表面张力的共同影响下,外界水会进入到混凝土结构的孔隙或裂缝中,引起混凝土湿度的升高,从而形成湿态混凝土。湿态混凝土结构长期工作在水环境中,所以长期处于水饱和状态,并且混凝土孔隙中的自由水在各种荷载的作用下会对孔壁形成一定的水压力,进而影响到混凝土的静力强度。目前对于混凝土强度的研究大多是以自然干燥条件下的混凝土试件为基础的,而对于环境水作用下混凝土抗压、抗拉、弯曲、剪切等静力强度的变化研究还比较少。因此,本文针对环境水条件下环境水对混凝土静力强度影响的研究成果进行总结,分析湿态混凝土静力强度降低的物理机理。

1 环境水对混凝土静力强度影响的试验研究

混凝土在干燥的情况下,其强度与混凝土孔隙率、水灰比、水泥、集料、加载速率、温度、龄期等诸多因素相关,但是长期工作在水环境中的混凝土结构,混凝土内的含水量、外界水压的大小和作用时间都会对混凝土的静力强度产生很大影响。

1.1 含水量对混凝土静力强度的影响

众多试验研究^[1-6]均表明:在混凝土材料及试验条件都相同的情况下,混凝土的静力强度随着混凝土内含水量的增加而趋于降低,湿态混凝土的静力强度比干燥混凝土的静力强度低。对于孔隙率、水灰比、水泥、集料、加载速率、温度、龄期等完全相同的混凝土,临时增加其内部的含水量,混凝土的静力强度会迅速降低。

Cadoni等^[1]将混凝土在一定的湿度与温度下养护90d,然后用烘箱干燥,取一部分试件完全浸入水中并密封一段时间,分别对干燥及从水中取出的试件进行了抗拉强度试验,结果表明干燥混凝土试

件的抗拉强度为 3.28 MPa,浸水混凝土试件的抗拉强度下降到 3.02 MPa,即浸水混凝土试件的抗拉强度降低了 7.62%。

王海龙等^[2] 试验研究了饱和混凝土与干燥混凝土在不同加载速率下劈拉强度的变化,饱和混凝土在准静态加载时劈拉强度比干燥混凝土低,孔隙及裂缝中的自由水会影响混凝土劈拉强度,干燥混凝土的劈拉强度为 1.49 MPa,随着自由水的不断进入,劈拉强度下降到 1.32 MPa,降低了 11.41%。

Vu 等^[3] 将养护好的混凝土试件分别放在空气、烘箱中以改变混凝土饱和度,再对试件进行抗压强度试验,结果表明当混凝土的饱和度分别为 11%、42% 和 100% 时,抗压强度分别为 42 MPa、34 MPa 和 32 MPa,即混凝土抗压强度随着饱和度的升高而降低。

闫东明等^[4] 将 300 d 龄期的试件浸泡在水中 60 d 之后取出进行了直接拉伸试验,当混凝土的含水量为 0.31% 时,混凝土的拟静态强度为 2.21 MPa,当含水量增加到 4.8% 时,拟静态强度下降到 1.30 MPa,混凝土拟静态强度总共降低了 41.2%。

刘保东等^[5] 通过改变混凝土浸泡时间来改变混凝土试块的含水量,对于相同标号的混凝土试块,测试抗压强度随着含水量的增大而降低;对于自然养护的试块,测试抗压强度随着含水量的增大而下降的速度大于标准养护试块。

李林^[6] 将边长 100 mm 的 C30 混凝土立方体试块放在标准条件下养护,之后把试件放入水中浸泡直至饱和并测试其抗压强度,随后取出试件进行不同程度的烘干,并分别测试其抗压强度,结果表明标准养护条件下混凝土试件抗压强度随着含水率的增大而下降,饱和试件强度值只有干燥时强度值的 71.3%,强度下降明显。

混凝土的含水量会影响混凝土中微孔隙和微裂缝中的水饱和度,并在水化产物表层形成水膜。水泥凝胶的胶体粒子通过范德华力结合,结合力通过薄的水膜起作用,降低含水量使水膜变薄或者消失,结合力增大,从而增加了对受荷时混凝土内部滑移的约束,进而提高混凝土的强度^[6]。对于具有不同微观结构的混凝土,胶体粒子间范德华力不同,结合力也不同,含水量的减少对混凝土静力强度的影响存在差异。另外,混凝土中水泥浆体和骨料之间存在界面过渡区,过渡区内又存在大量的裂缝和孔隙,水进入凝胶体中的微小孔隙引起膨胀,加上凝胶体和骨料吸水后膨胀系数不一样,从而导致过渡区应力集中,故过渡区混凝土强度有一定的削弱^[7]。

混凝土内的含水量和孔隙率的大小相关,而混

凝土水灰比和引气剂的掺入量都会影响到混凝土孔隙率的大小。水灰比越大混凝土内孔隙也就越多,水就越容易渗入混凝土结构中,混凝土受外界环境水的影响也就越大。而加入引气剂后,引气剂不但会增大混凝土孔隙率对结构强度产生的负效应,而且会增大混凝土中非活性孔隙体积的比重,能够在其中产生均匀、封闭、互不连通的微小气泡,从而减少毛细管道的形成,缓和孔隙水对混凝土强度的影响^[8]。因此,在建设水下混凝土建筑物时,适当调整混凝土水灰比及引气剂的掺入量将会减小环境水对混凝土静力强度的影响。

1.2 外界水压对混凝土静力强度的影响

对于深海采油平台和混凝土高坝等混凝土结构,水压力成为混凝土结构的主要荷载,因此,将混凝土结构周围工作环境以及承受的荷载有效地结合起来,开展水荷载作用下混凝土静力强度的试验研究,具有一定的工程意义。

杜守来等^[9] 对不同外界水压下和同等水压下不同浸泡时间对混凝土强度的影响进行了研究。研究表明:未经外围水压作用的混凝土强度大于外围水压作用后的混凝土强度,并且混凝土强度随着外围水压的增加而逐渐降低;随着试块浸泡时间的增加,混凝土抗压强度逐渐降低。

对于水环境中工作的混凝土结构,水直接作用于混凝土,能够影响混凝土内部的饱和度,从而使混凝土局部强度发生变化,进而造成损伤破坏。同时,在其他外部荷载作用下,水也同时成为荷载,水的效应是变化的。

Bjerkei 等^[10] 研究了混凝土在水压力下的强度及变形规律,认为处于水压力作用下的混凝土,当试验时的水压力与混凝土浸泡时的水压力相同时,混凝土的抗压强度并不会因为水压力的存在而降低。但是,Bjerke 的试验条件和实际工程中混凝土的养护条件相差较远,因为混凝土的养护时间比较长或者基本为无水压潮湿养护。因此需结合混凝土在环境水中工作的实际情况进行真实水压力下环境水影响混凝土静力强度的试验研究。例如,李庆斌等^[11] 做了相关试验来研究机械围压(试件密封)和真实水围压(试件不密封)两种情况对混凝土强度的影响,围压大小分别为 2 MPa 和 4 MPa。试验研究表明:机械围压下,随着围压的增加,干燥和饱和混凝土均出现了一定的围压效应,即混凝土的强度都有所增加,且干燥混凝土的围压效应明显强于饱和混凝土的围压效应;机械围压下的混凝土三轴强度高于真实水围压下的混凝土三轴强度。

李宗利等^[12] 模拟了高坝混凝土工作环境,将混

凝土标准试件浸没于高压水体中,在混凝土内造成高渗透孔隙水压,研究高压作用后混凝土产生的强度变化情况。试验结果表明:随着外围水压的增加,混凝土抗压强度和抗拉强度都逐渐降低,其强度损失率逐渐增加,外界水压随着强度损失率的增大而增大。在同一外界水压下,外界水压对混凝土抗拉强度的影响程度要大于对抗压强度的影响程度,最大抗压强度和抗拉强度损失率分别为 32.6% 和 28.7%,可见外界水压对混凝土强度影响很大。

2 湿态混凝土静力强度降低的物理机理

一般来说,湿态混凝土内的湿度并不是均匀分布的。Neville^[13]将直径 10.16 cm(4 英寸)的混凝土圆柱体试件在水中浸没 2 d,然后测量其湿度的分布情况,发现只有占横截面约 12% 的区域内湿度发生了一定的变化。de Larrard 等^[14]测量了直径为 16 cm 的混凝土圆柱型试件的湿度分布,结果表明当试件在空气中干燥 27 d 以后,只有外层中厚 2.5 cm 的湿度区域发生了变化,整个试件中的湿度在 4 a 之后才分布均匀。这是由于在凝胶体自密实作用下,混凝土结构的吸水率随着混凝土在水中浸没时间的增加而逐渐降低,而水分在混凝土中的扩散较慢,使混凝土不能完全饱和,导致其内部不可避免地存在湿度梯度。对于试验和实际结构中的混凝土而言,混凝土内湿度梯度会对混凝土的性能造成一定的影响。

Popovics^[15]认为当混凝土试件内外湿度不同时,试件中湿度大的部分水分较多,将会发生体积膨胀,混凝土在渗透作用下失去水分时体积收缩。不均匀的收缩与膨胀在混凝土中也产生了不均匀的拉、压应力,使混凝土强度降低。

此外,由于混凝土是多孔水泥凝胶体,其内部通常有大量的孔洞和微裂缝。各种荷载作用促使孔洞和微裂缝不断发生变化,混凝土内的水分随之进行相应的迁移,导致混凝土受力复杂化。纵观国内外现有研究,湿度影响混凝土强度的原因主要有孔隙水压力作用和填充液体表面张力作用。

2.1 孔隙水压力作用

湿态混凝土中微裂缝和孔隙内存在大量的自由水,这些自由水在受压时会在混凝土中形成一定的孔隙水压力,从而对混凝土的性能产生一定的影响。混凝土的养护湿度、变形、饱和度和裂缝的开展速度等都会影响孔隙水压力。饱和混凝土中的孔隙水压力大于非饱和混凝土,尤其在受到外界压力的作用时,饱和混凝土内会产生更大的孔隙水压力。

裂缝发展速度较慢时,裂缝中的自由水比较容

易到达裂缝的末端,进一步加快裂缝的发展;裂缝发展速度较快时,裂缝中的水压力较弱,导致裂缝的开展受水的影响相对较小。不同研究者的理论分析结果均表明,对于材料及养护条件相同的混凝土,湿态混凝土的静力强度低于干燥混凝土的静力强度^[16-20]。

白卫峰等^[16]将混凝土中活性孔隙、非活性孔隙及水泥砂浆作为等效基体,粗骨料作为硬化夹杂,基于等效夹杂理论和 Mori-Tanaka 平均场的思想建立了一类双重夹杂模型,分析不同孔隙率及不同饱和度和湿度对湿态混凝土力学性能的影响。理论分析结果表明:湿态环境中,由于孔隙水的存在,在外界压力作用下,所产生的水压力对混凝土基体的开裂起促进作用。同干燥混凝土相比,由于孔隙水压力的存在,使得湿态混凝土抗压强度减小,并且随着饱和度的增大,抗压强度减小的趋势更加显著。

Guo 等^[17]利用弹性力学方法计算了混凝土孔隙的最大环向应力,发现完全充满水的孔隙最大环向应力比充满空气时大,环向应力的出现会加速混凝土的破坏,使得混凝土的抗压强度降低。

王海龙等^[18-20]认为孔隙水压力的产生是引起湿态混凝土强度降低的主要因素,并利用断裂力学的方法来讨论湿态混凝土在荷载作用下孔隙水压力对混凝土断裂强度和抗压强度的影响。研究结果表明:混凝土的强度与混凝土孔隙水压力的大小有关,裂纹面上的正应力在孔隙水压力的作用下降低,导致阻止混凝土开裂的摩阻力减小,这种类似于楔体的“楔入”作用促进了微裂纹的扩展和混凝土的开裂,导致湿态混凝土的断裂强度和抗压强度都低于干燥混凝土。

孔隙水压力理论一定程度上可以解释湿度对混凝土强度的影响,但是孔隙水压力并不会在所有荷载情况下都产生,比如在拉力荷载下,混凝土中孔隙水压力将降低或消散。此外,由于混凝土具有剪胀特性,混凝土的体积在压缩荷载接近其峰值时产生膨胀,这时混凝土中也难以产生较大的孔隙水压力。

2.2 填充液体表面张力作用

表面张力是液体表面空穴作用的结果,而表面能是液体分子间的作用力做功的结果。由于液体分子易于迁移,表面被张拉时,液体分子间的距离并不改变,只是将本体相的分子迁移到液面上来,因此,液体中的表面张力和表面能在数值上是相等的^[21]。目前,国内外出现了大量的理论与试验研究来分析填充液体表面张力与混凝土静力强度之间的关系。

液体与固体在非真空条件下接触时,整个体系同时受到固体表面能 γ_{sv} 、液体表面能 γ_{lv} 以及固液

界面能 γ_{sl} 的作用,使液体在固体的表面呈现一定的接触角 θ 。可以采用杨氏方程 (Young's Equation) 来描述固体表面能、液体表面能与固液界面能及接触角 θ 之间的关系^[22]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sv} - \gamma_{lv} \cos\theta \quad (1)$$

可以看出,要计算 γ_{sv} ,只需要知道式(1)中 γ_{lv} 与 γ_{sl} 及接触角 θ 这 3 个变量,其中 θ 和 γ_{lv} 可以通过实验仪器测得,而 γ_{sl} 无法测出,但可通过 3 个变量之间的关系及其他方式计算出 γ_{sv} 和 γ_{sl} 。因此可通过测定不同饱和度的湿态混凝土中接触角和液体表面张力,根据杨氏方程来计算出湿态混凝土表面能,从而得到表面能随混凝土饱和度的变化趋势。

当液体在固体表面湿润并铺展开来,在固体表面形成一层液膜时,会导致固体的表面能下降,固体表面能的下降程度随混凝土饱和度增大而增大^[31]。

王海龙等^[23] 根据 Griffith 的断裂力学理论,分析了裂纹及孔隙中的自由水降低混凝土的静力抗拉强度机理,通过模型与试验验证了这一理论的合理性,并提出对于湿润的混凝土,材料的理论抗拉强度 σ_s 可以表示为

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2E\gamma'}{\pi c}} \quad (2)$$

式中: E 为湿态混凝土弹性模量; c 为控制裂纹长度; γ' 为湿态混凝土的表面能。由式(2)可知,湿态混凝土的理论抗拉强度与材料的表面能有关。混凝土中只有湿度发生改变时,可认为其控制裂纹长度没有变化,混凝土强度的变化主要由弹性模量和表面能的变化所引起。当测量出湿态混凝土的弹性模量、接触角和液体表面张力时,先通过式(1)等计算出湿态混凝土的理论表面能,再由式(2)计算出湿态混凝土的理论抗拉强度,便可以得出湿态混凝土的理论抗拉强度与填充液体表面张力之间的关系。

Wittmann^[24-25] 认为湿态混凝土强度的降低主要由混凝土颗粒的表面能变化所引起,混凝土中水的侵入使材料微观粒子间的范德华力减小,从而降低了混凝土的表面能,由 Griffith 准则可得:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\lambda\gamma_0} \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

其中
$$\lambda = \frac{\rho p}{3E} \quad (4)$$

式中: γ_0 为混凝土的表面能; $\Delta l/l_0$ 为混凝土试件的长度改变量; o 为混凝土的初始表面能; ρ 为混凝土材料的理论密度; E 为混凝土弹性模量。随着混凝土试件含水率的增加, γ_0 降低, $\Delta l/l_0$ 稍有增加,由式(3)(4)可看出混凝土的相对强度 $(\sigma/\sigma_0)^2$ 减小,即混凝土的湿度增加时,其强度减小。

Griffith 理论只适应于尖锐的裂缝并且材料为理想脆性材料,但是利用该理论来预测混凝土抗拉强度时数值相差较小^[23]。所以该理论可以用来合理地说明湿态混凝土抗拉强度降低机理。

Matsushita 等^[26] 人工配制了与海水类似的溶液,测得其表面张力为 0.090 N/m,而水在 20℃ 时的表面张力为 0.073 N/m,低于海水表面张力。孙志伟等^[27] 通过楔形劈裂试验和三点弯曲试验对干燥混凝土试件、水浸泡的混凝土试件及海水浸泡的混凝土试件分别进行了测试,得到海水浸泡后的混凝土静力强度低于水浸泡后的混凝土静力强度,并认为混凝土静力强度的变化是浸泡液体表面能及表面张力的变化引起的。基于以上研究,孙志伟等^[28] 通过对全干燥、半干燥、水浸泡和海水浸泡 4 组混凝土试件的测试,表明浸泡混凝土的液体表面张力增大时,混凝土的表面能减小,混凝土抗折强度也减小。所以,浸泡液体表面张力变化可以用来解释湿态混凝土静力强度的变化。

王海龙等^[2] 把准静态荷载作用下饱和混凝土的劈拉强度降低机理解释为:混凝土中的水在液体表面张力的作用下有足够的时间通过凝胶孔、凝胶体和骨料之间的界面至缝端,裂缝中的自由水不但使裂纹异向张开,而且使混凝土尖端的黏聚力降低,最终导致饱和混凝土静力劈拉强度降低。该解释本质为混凝土的静力劈拉强度降低是液体表面张力降低所引起的。

填充液体对混凝土表面能的削弱是导致混凝土静力强度降低的重要原因,但试验中表面能的大小难以测定,因此仍需开展大量的研究工作来准确定量分析填充液体对混凝土静力强度的削弱。

3 结 语

环境水对混凝土静力强度的影响是一个非常复杂的问题,大量试验研究及理论分析结果表明:①混凝土内部含水量及外界水压对其静力强度有一定的影响,含水量的增加及外界水压的作用都会降低混凝土静力强度,外界水压越大,作用时间越长,混凝土静力强度降低越明显;②孔隙水压力的产生及填充液体表面张力的变化是引起湿态混凝土静力强度降低的主要原因,混凝土中表面能的变化导致湿态混凝土表面能低于干燥混凝土,使得混凝土静力强度降低。

现有的研究大多为定性的解释,定量的研究较少,并且对单个影响因素研究较多,多因素相互作用对混凝土的静力强度产生影响的研究较少。随着水下混凝土建筑的不断修筑,还要进行大量研究来对

比验证环境水对混凝土强度的影响,应从细微观的角度出发,利用超声波、磁分析、光纤等先进技术来观测水在混凝土破坏过程中的作用;采用有限元分析软件来模拟湿态混凝土各个界面的连接耦合,以加深对不同环境水下混凝土静力强度变化的认识;开展一系列试验来研究不同混凝土水灰比、孔隙率、龄期、加载速率、温度、骨料级配、渗透系数、骨料粒径等条件下水对混凝土静力强度的影响,以及进行不同填充液体条件下混凝土静力强度的对比试验。

参考文献:

[1] CADONI E, LABIBES K, ALBERTINI C, et al. Strain-rate effect on the tensile behavior of concrete at different relative humidity levels [J]. *Materials and Structure*, 2001, 34(1) : 21-26.

[2] 王海龙,李庆斌.不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理[J]. *工程力学*, 2007, 24(2) : 105-109. (WANG Hailong, LI Qingbin. Experiments on saturated concrete under different splitting tensile rate and mechanism on strength change [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2) : 105-109. (in Chinese))

[3] VU X H, MALECOT Y, DAUDEVILLE L. Experimental analysis of concrete behavior under high effect confinement; effect of the saturation ratio [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009 (5) : 1105-1120.

[4] 闫东明,林皋,王哲,等.不同环境下混凝土动态直接拉伸特性研究[J]. *大连理工大学学报*, 2005, 45(3) : 416-421. (YAN Dongming, LIN Gao, WANG Zhe, et al. Research on dynamic direct tensile properties of concrete under different environments [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45 (3) : 416-421. (in Chinese))

[5] 刘保东,李鹏飞,李林,等.混凝土含水率对强度影响的试验[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(1) : 9-12. (LIU Baodong, LI Pengfei, LI Lin, et al. Experimental study on influence of water content on concrete strengths [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(1) : 9-12. (in Chinese))

[6] 李林.含水率对混凝土性能影响的研究[D].北京:北京交通大学,2009.

[7] 李鑫鑫.孔隙水对混凝土静力特性的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.

[8] 王建军.水下工作的混凝土结构强度影响因素分析 [J]. *吉林水利*, 2012 (5) : 11-13. (WANG Jianjun. Analysis of factors affecting the strength of the concrete structure underwater [J]. *Jilin Water Resources*, 2012(5) : 11-13. (in Chinese))

[9] 杜守来,李宗利,金学洋.孔隙水压对混凝土抗压强度影响的初步研究[J]. *人民长江*, 2009, 40 (3) : 54-56. (DU Shoulai, LI Zongli, JIN Xueyang. Preliminary effect of pore water pressure on the compressive strength of

concrete [J]. *Yangtze River*, 2009, 40 (3) : 54-56. (in Chinese))

[10] BJERKEI L, JENSEN J J, LENSCHOW R. Strain development and static compressive strength of concrete exposed to water pressure loading [J]. *ACI Structure Journal*, 1993(3) : 310-315.

[11] 李庆斌,陈樟福生,孙满义,等.真实水荷载对混凝土强度影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(7) : 786-791. (LI Qingbin, CHEN Zhangfusheng, SUN Manyi, et al. Effect of water loading on strength of concret [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7) : 786-791. (in Chinese))

[12] 李宗利,杜守来.高渗透孔隙水压对混凝土力学性能的影响试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(11) : 72-77. (LI Zongli, DU Shoulai. Experimental study on properties of concrete due to high seepage pore water pressure [J]. *Engineering Mechanics* 2011, 28 (11) : 72-77. (in Chinese))

[13] NEVILLE A M. *Properties of concrete* [M]. London: Pitman Publishing Ltd. , 1981.

[14] de LARRARD F, BOSTVIRONNOIS, J L. Long-term strength of silica-fume high-strength concretes [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1991(43) : 109-119.

[15] POPOVICS S. Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1986, 83(3) : 227-236.

[16] 白卫峰,陈健云,范书立.细观夹杂理论预测湿态混凝土抗压强度 [J]. *工程力学*, 2008, 25 (11) : 134-140. (BAI Weifeng, CHEN Jianyun, FAN Shuli. Prediction of compressive strength of moisture concrete by meso-inclusion theory [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25 (11) : 134-140. (in Chinese))

[17] GUO J S, WALDRON P. An elastic model to quantify the effect of moisture on the mechanical properties of concrete at the time of test [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2001, 53(3) : 151-162.

[18] 王海龙,李庆斌.湿态混凝土抗压强度与本构关系的细观力学分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8) : 1531-1536. (WANG Hailong, LI Qingbin. Mesomechanics analysis of compressive strength and constitutive equation of wet concrete [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8) : 1531-1536. (in Chinese))

[19] 王海龙,李庆斌.饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理 [J]. *水利学报*, 2006, 37 (8) : 958-968. (WANG Hailong, LI Qingbin. Micro-mechanism of static and dynamic strengths for saturated concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (8) : 958-968. (in Chinese))

[20] 王海龙,李庆斌.孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响 [J]. *工程力学*, 2006, 23 (10) : 141-144. (WANG Hailong, LI Qingbin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. *Engineering*

Mechanics,2006,23(10):141-144. (in Chinese))

[21] 谈慕华,黄蕴元. 表面物理化学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985:16-28.

[22] 程传焯. 表面物理化学[M]. 北京:人民交通出版社,1999:3-9.

[23] 王海龙,李庆斌,孙晓燕,等. 水饱和混凝土静力抗拉强度降低细观机理及本构模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(1): 65-72. (WANG Hailong, LI Qingbin, SUN Xiaoyan, et al. Mesomechanism of tensile strength reduction and tension constitutive model of saturated concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2008,16(1):65-72. (in Chinese))

[24] WITTMANN F H. Surface energy and fracture energy [C]//The 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis Ltd.,2010:13-18.

[25] WITTMANN F H. Strength and fracture energy of concrete in seawater [C]//The 6th International Conference on

Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London:Taylor & Francis Ltd.,2007:213-217.

[26] MATSUSHITA H,ONOUE K. Influence of surface energy on compressive strength of concrete under static and dynamic loading [J]. Advanced Concrete Technology, 2006(4):409-421.

[27] 孙志伟,任昭君,赵铁军. 海水对混凝土断裂能及强度的影响[J]. 混凝土,2007(7):9-13. (SUN Zhiwei,REN Zhaojun, ZHAO Tiejun. Influence of seawater on the fracture energy and strength of concrete [J]. Concrete, 2007(7):9-13. (in Chinese))

[28] 孙志伟,任昭君,赵铁军. 液体表面张力对混凝土断裂能及其应变变化的影响[J]. 工程建设,2007,39(3):6-9. (SUN Zhiwei, REN Zhaojun, ZHAO Tiejun. Influence of liquid surface tension on the concrete fracture energy and its strain softening [J]. Engineering Construction, 2007,39(3):6-9. (in Chinese))

(收稿日期:2014-04-15 编辑:熊水斌)

(上接第98页)

还需进一步探讨。防汛抢险螺旋桩在沉桩过程中沉桩扭矩存在较为明显的极值,当沉桩到一定深度之后沉桩扭矩将基本保持稳定。改型后的桩体结构提高了沉桩时桩体强度的安全系数,同时,改型后的桩体受到横向载荷后横向位移有所变大,但能满足实际使用要求。

参考文献:

[1] 韦谢恩. 防汛抢险螺旋桩沉桩过程仿真研究[D]. 广州:华南农业大学,2010.

[2] WEI Xie'en, WANG Yuxing, TANG Yanqin. Simulation of anti-flood spiral pile driving process based on ANSYS/LS-DYNA [C]//Proceedings of 2010 World Automation Congress. Kobe: Curran Associates,2010:239-243.

[3] 王亚利. 防汛抢险螺旋桩头结构参数优化[D]. 广州:华南农业大学,2011.

[4] 叶建忠,周健. 关于桩端阻力问题的分析与研究现状[J]. 建筑科学,2006,22(2):64-68. (YIE Jianzhong, ZHOU Jian. Analysis and review of research on the issue of pile end bearing capacity [J]. Building Science,2006,22(2):64-68. (in Chinese))

[5] POULOS H G. Pile behaviour-theory and application [J]. Geotechnique,1989,39(3):365-415.

[6] 张明义,邓安福. 静压桩贯入地基的球孔扩张-滑动摩擦计算模式[J]. 岩土力学,2003,24(5):701-704. (ZHANG Mingyi, DENG Anfu. A spherical cavity expansion-sliding friction calculation model on penetration of pressed-in piles [J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(5):701-704. (in Chinese))

[7] 孙鸣. 钢筋混凝土螺旋桩可行性分析[J]. 天津城市建设学院学报,2001,7(3):187-190. (SUN Ming. Analysis of the feasibility of reinforced concrete screw pile [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction,2001,7(3):187-190. (in Chinese))

[8] US Army Corps of Engineers. Design of pile foundations [M]. Washington, D. C.: University Press of the Pacific, 1991.

[9] POULOS H G. Pile behaviour-theory and application [J]. Geotechnique,1989,39(3):365-415.

[10] RANDOL M F. Science and empiricism in pile foundation design [J]. Geotechnique,2003,53(10):847-875.

[11] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe pile in sand [J]. Can Geotech,2003,40:36-45.

[12] ABBAS J M, CHIK Z H, TAHA M R, et al. Time-dependent lateral response of pile embedded in elastoplastic soil [J]. J Cent South Univ, Technol, 2010, 17: 372-380.

[13] KIM N, PARK J S, KIM S K. Numerical simulation of ground anchors [J]. Computers and Geotechnics,2007,34(6):498-507.

[14] MERIFIELD R S, SMITH C C. The ultimate uplift capacity of multi-plate strip anchors in undrained clay [J]. Computers and Geotechnics,2010,37(4):504-514.

[15] 周葆春,王靖涛. 论土体应力应变关系曲线类型和临界状态[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(1):63-67. (ZHOU Baochun, WANG Jingtao. On the type of stress-strain relation curves and the critical state for soils [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 63-67. (in Chinese))

(收稿日期:2014-03-20 编辑:郑孝宇)