

# 对岩土工程中混凝土结构的耐久性问题的探讨

卫 军 吴兴昊

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉 430074)

## 1 前 言

混凝土的耐久性问题是指在各种力学和非力学因素的长期作用下,因混凝土材料构成的稳定性和各种性能逐渐衰减和劣化,导致逐渐丧失承载力而失效的过程。混凝土结构耐久性的研究,是针对上述的作用因素,研究如何对建筑物和构筑物的耐久性进行设计、施工控制以及对已有结构进行残余寿命评估等问题,涉及到结构的设计、施工以及投入使用后的管理等阶段<sup>[1, 2]</sup>。耐久性支配着混凝土结构在整个服役过程中的“健康”和“寿命”,结构耐久性不足所造成的后果非常严重。如美国1991年仅修复由于耐久性不足而损坏的桥梁就耗资910万美元;英国、日本等国每年也花费大量的资金用于维修和修复现存的各种构筑物<sup>[3]</sup>。我国尚没有这方面的统计资料,但据有关部门估计,其损失也是非常惊人的<sup>[2]</sup>。除了在力学因素作用下混凝土结构的耐久性失效问题之外,在地下水及周边岩土内所含各种矿物质等环境介质作用下,混凝土结构亦存在着耐久性问题。如何对混凝土结构的耐久性实行控制和评估,是人们的追求目标。由此可见,混凝土结构的耐久性研究是与国计民生相关的重大研究课题。

混凝土结构在力学因素作用下的耐久性问题,已有多种工程控制方法,并取得了不错的效果<sup>[2]</sup>。但对由非力学作用因素引起的混凝土结构的耐久性问题进展并不大。所以,本文主要探讨在非力学因素作用下的混凝土结构的耐久性问题。

长期以来,人们以具体影响因素分类,对混凝土的耐久性进行研究,虽有不少成果问世,但距应用目标,尚有不小的距离<sup>[1, 2, 4~6]</sup>。究其原因,主要在于结构设计、施工控制及结构的残余寿命评估等

行为,均以材料的可测度、可演绎的量值作为分析、设计的参数,通过某种分析或实验监控来实现。而已有的混凝土耐久性的研究成果,或从化学、物理化学等角度入手,集中研究如何通过材料的内部组分构成进行调整,以达到改善材料性能,提高材料的耐久抗力的目的;或者通过研究某些非力学作用因素引起的危害,对混凝土结构的设计和施工提出各种针对措施等<sup>[1, 2]</sup>。可以这样说,现有的研究成果只能解决混凝土结构耐久性局部问题,而无法把“耐久性”这个性质,像结构强度那样,在统一的结构安全可靠度基础上进行控制。目前的这种局面导致:(1)现有的混凝土耐久性的研究成果与结构的设计和施工控制、结构残余寿命评估等行为脱节<sup>[1, 2]</sup>;(2)针对已有问题所获得的研究成果,不足以阐明混凝土结构的耐久失效的机理,无法完善地建立以混凝土的耐久性作为控制目标的结构设计理论。由此可见,关于混凝土结构的耐久性研究应该具有“大局观”,在结构工程学科、材料工程学科和非均质力学等学科的交叉领域,对混凝土和钢筋在非力学因素作用下的耐久性丧失的力学过程和机理,影响耐久性的作用因素的量化,基于结构可靠度分析上的混凝土构件耐久抗力计算理论,以及结构物的整体安全耐久可靠性等几个层次来开展深入研究,只有如此,才能促进混凝土结构耐久性的研究和工程应用的完善发展。

## 2 混凝土和钢筋耐久性丧失的力学过程

### 2.1 混凝土耐久性丧失的力学过程

混凝土的耐久性破坏主要表现为:在非力学因素作用下,混凝土内部的裂缝过度扩展,造成其性

能逐渐下降, 最终导致混凝土丧失预定(设计)的承载能力。对于这种破坏现象, 传统的研究方式均以改善混凝土的性能, 提高混凝土对各种非力学因素的抵抗能力为目的。考虑耐久破坏时的裂缝扩展现象亦属于典型的力学破坏现象, 抓住这个特征, 从研究混凝土的耐久破坏的力学过程入手, 解决能反映混凝土破坏过程的材料参数, 以及非力学因素的“荷载化”问题, 就可能把混凝土耐久性与混凝土的强度等性能统一在同一基础之上, 建立统一的设计模型和理论<sup>[2]</sup>。

混凝土的耐久破坏过程可用图 1 所示的模型来说明。设微单元  $i$  在初始时刻  $t_0$  时, 混凝土微单元内部的损伤量为

$$\delta^i(t_0) = \sum_j \delta_k^i(t_0) \quad (1)$$

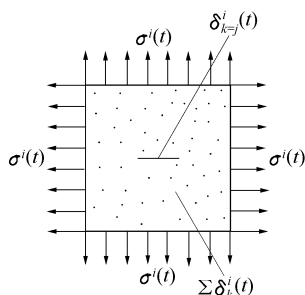


图 1 混凝土的耐久破坏模型

Fig.1 Durability failure model of concrete

在非力学因素作用下, 某个时刻  $t$  的混凝土内的损伤  $\delta_{k=j}^i(t)$  产生不稳定扩展, 由此导致微单元破坏。记损伤  $\delta_{k=j}^i(t)$  产生不稳定扩展时在单元上的外作用为  $\sigma^i(t)$ , 单元内损伤扩展处的内作用为  $\sigma_{k=j}^i(t)$ , 则微单元  $i$  相应的力与位移场可以由材料内部的损伤状态确定, 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma^i(t) &= f[\delta^i(t), \delta_{k=j}^i(t), \sigma_{k=j}^i(t)] \\ \varepsilon^i(t) &= g[\delta^i(t), \delta_{k=j}^i(t), \sigma_{k=j}^i(t)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于混凝土来说,  $\sigma_{k=j}^i(t)$  可视为已知, 若  $\delta^i(t)$  和  $\delta_{k=j}^i(t)$  已知的话, 通过力学分析, 式(2)反映的关系可以确定。这意味着, 上述的非力学因素对混凝土产生的作用能通过微单元  $i$  的损伤量等参数变化来间接量化。在此基础上, 混凝土的耐久破坏过程可以用模型来进行描述<sup>[2]</sup>。

鉴于现代材料测试手段的飞速发展, 材料内部结构的 CT 透视、红外辐射成像技术等测试手段已开始得到应用<sup>[7, 8]</sup>, 通过实验手段观测在非力学因素作用下混凝土材料内部的  $\delta^i(t)$ ,  $\delta_{k=j}^i(t)$  已不困难, 由此可见, 把混凝土的耐久破坏过程用力学模

型描述完全可能和可行。

## 2.2 钢筋耐久性丧失的力学过程

混凝土中钢筋耐久性的劣化, 是影响混凝土结构耐久性的直接因素之一。由于处于混凝土中的钢筋不断锈蚀, 造成它的有效承载力降低, 则是钢筋耐久性丧失的主要原因。一般说来, 呈碱性的混凝土对钢筋起到保护作用, 但由于混凝土的碳化, 混凝土便失去了对钢筋的保护作用, 随着空气中的氯离子侵入, 钢筋表面不同部位出现较大的电位差, 形成阴极和阳极, 钢筋就产生所谓的电化学腐蚀, 此乃混凝土结构中钢筋锈蚀的主要形式<sup>[1, 2]</sup>。

国内外学者对锈蚀钢筋的大量试验研究表明:

(1) 与未锈蚀钢筋相比, 锈蚀钢筋的抗拉强度与屈服强度非常接近, 其比值约为 1.1。

(2) 锈蚀钢筋的应力-应变关系较未锈蚀钢筋发生了较大变化, 钢筋的塑性能下降。这说明锈蚀钢筋的破坏可能从塑性转化为脆性, 危害会更大。

(3) 钢筋的锈蚀破坏了混凝土与钢筋之间的粘结作用, 导致钢筋混凝土构件的受力、变形等工作性能劣化。

(4) 除因锈蚀造成的截面损失外, 导致锈蚀钢筋强度降低的原因还有不均匀锈蚀所造成的应力集中以及缺口效应等。大量的研究表明, 局部锈蚀的钢筋其强度甚至低于均匀锈蚀的钢筋。

(5) 高应力状态下钢筋的应力腐蚀会导致钢筋产生无破坏先兆的突然断裂。

如何对混凝土结构中的钢筋的耐久状态进行预测, 文[9]曾根据电化学理论进行了确定钢筋的锈蚀程度的探讨。考虑混凝土中钢筋锈蚀过程的复杂性, 在揭示混凝土内钢筋锈蚀的机理的同时, 应抓住结构检测对混凝土内钢筋的可测度量——钢筋直径、密度、表面状态等, 重点研究它们与各种作用因素之间的变化关系。在此基础上, 遵循与混凝土类似的思路, 建立钢筋的锈蚀程度(耐久表征量)与钢筋的强度、延性等力学量, 在各种作用因素作用下随时间逐渐变化的模型。

## 3 钢筋混凝土构件的耐久抗力计算

在各类非力学因素作用下, 混凝土及钢筋的耐久性均随时间逐渐劣化, 由此造成混凝土构件的抗力随时间而降低。唯象地来看, 上述过程相当于在外荷载作用下结构的抗力随时间不断降低的过程<sup>[10]</sup>。根据结构设计的基本理论, 结构设计计算应满足:

$$S(t) \leq R(t) \quad (3)$$

式中： $S(t)$ 为荷载作用， $R(t)$ 为结构的抗力作用。

显然，混凝土结构构件抗力应按式(3)计算。分别对影响耐久性的荷载作用和构件抗力随时间的变化进行研究。这里要研究的重点问题有：

(1) 研究各种非力学因素与混凝土和钢筋性能变化的相关关系，由此来量化耐久荷载效应。

(2) 在(1)的基础上，确定与耐久性的荷载作用有关材料耐久参数。

(3) 基于可靠度分析，对混凝土构件在耐久荷载作用下的耐久抗力与材料参数之间的关系进行研究，由此确定混凝土构件的耐久抗力计算方法。

这个研究环节起着承上启下的作用。它把材料的抗力变化、耐久荷载效应作用在混凝土构件抗力变化这个过程中统一起来，其实质是目前从事混凝土耐久性研究的两大主要学科——材料工程学科和结构工程学科之间的融合，是混凝土材料学科与结构工程学科之间的“接口”研究，值得重视。

## 4 混凝土结构耐久性设计方法的研究

通过上述两个层次的研究，可以基本解决耐久荷载效应与材料的耐久性设计参数的确定、以及在耐久荷载效应作用下，混凝土构件的抗力变化计算等问题。由于混凝土结构基于众多的构件组合，而不同受力特征的构件具有不同的耐久性特征和抗力变化规律，再加上混凝土结构的耐久性失效是一个随机过程。这需要在前面的工作基础上，对混凝土整体结构耐久性进行研究。重点研究它与构件耐久抗力的关系，研究解决混凝土结构随时间变化的耐久可靠度、混凝土结构的耐久性设计方法、已有混凝土结构的状态评估等问题。通过这些研究，实现混凝土结构设计方法由传统的单一强度控制(显含)向由强度、耐久性双指标控制的方向发展。

## 5 结束语

笔者认为，混凝土结构耐久性的研究，应该作为多学科的交叉课题，分层次、分重点在以下几个方面开展研究：

(1) 对混凝土、钢筋等材料的耐久性丧失过程的力学基础开展研究。重点研究它们在岩土工程中所遇到的、典型的非力学因素作用下，混凝土、钢筋等材料可测度的耐久表征指标的变化。由此来实现非力学因素的荷载量化和材料的耐久性设计指标等问题。

(2) 对混凝土构件的耐久抗力开展研究。重点解决基于可靠度基础上混凝土构件耐久抗力变化的计算问题。

(3) 混凝土结构的耐久性设计方法研究。旨在解决基于安全可靠度基础上的混凝土结构耐久性设计方法以及已有混凝土结构的残余寿命评估计算等问题。

## 参 考 文 献

- 1 卫 军, 吴兴昊. 混凝土结构耐久性研究中的若干问题[A]. 见: 李杰, 顾祥林编. 混凝土结构基本理论与工程应用会议论文集[C]. 上海: 同济大学, 2000, 57~61
- 2 李 田, 刘西拉. 混凝土结构耐久性分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 3 Mullik A K. Why concrete is not always durable[A]. In: Proc. Intel. Congr. Chem. Cem.[C]. [s. l.]: [s. n.], 1997, 1~31
- 4 Gerds A. Durability of Reinforced Concrete Structures[EB/OL]. Homepage of Prof. Dr.-Ing. Wittmann's Laboratory for Building Materials, 1998-12-31
- 5 ACI Committee 201. Guild to Durable Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1997, 88(5): 544~582
- 6 CEB: Durable Concrete Structure Design Guide[M]. [s. l.]: Thomas Telford, 1992
- 7 杨更社. CT 技术在岩石损伤检测中的应用研究[J]. 实验力学, 1998, 13(4): 451~455
- 8 邓明德, 樊正芳, 耿乃光. 混凝土的微波辐射和红外辐射随应力变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 577~583
- 9 刘西拉, 苗树柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报, 1990, 23(4): 69~78
- 10 贡金鑫, 赵国藩. 考虑抗力随时间变化的结构可靠性分析[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(5): 43~51

# CONCRETE STRUCTURE DURABILITY IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

Wei Jun, Wu Xinghao

(School of Civil Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)