

文章编号: 1000-582X(2003)02-0042-05

混凝土劣化对结构性能的影响

陈朝晖, 黄河

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 结构耐久性破坏现象普遍而严峻, 耐久性研究具有必要性和紧迫性, 其中, 钢筋锈蚀和冻融循环是造成结构耐久性损伤的 2 大主要因素。文章针对这 2 种因素, 总结了当前混凝土劣化对结构性能影响的一些研究成果, 初步探讨了多因素对结构性能的影响, 指出结构耐久性研究应结合材料学科和结构学科 2 方面进行, 从单因素确定性的分析向多因素耦合且不确定性分析转化, 在研究结构安全耐久性的同时, 应加强结构适用耐久性以及适用耐久性与安全耐久性的耦合问题的研究, 侧重研究材料性能的退化对结构构件承载力、刚度和延性的影响。

关键词: 结构耐久性; 混凝土劣化; 钢筋锈蚀; 冻融循环

中图分类号: TU375

文献标识码: A

混凝土作为最普遍的建筑材料之一, 在工程应用中已有 100 多年的历史。长期以来, 人们认为混凝土结构持久耐用。然而事实并非如此, 混凝土结构建成后, 在周围环境因素的侵蚀下, 随其使用时间的延长, 结构内部将发生一系列物理、化学变化, 其各种物理性能逐渐降低, 对整个结构适用性和安全性造成影响。随着工程建设的蓬勃发展, 耐久性问题已变得日益严重, 2001 年“土建结构工程的安全性及耐久性”工程科技论坛的一些研究调查报告和一些资料^[1-2] 都表明耐久性下降不仅造成重大经济损失, 而且严重威胁工程的安全性。目前, 我国许多工程人员十分轻视结构的耐久性, 许多建设工程仍沿着老路重蹈覆辙。有专家估计, 我国“大干”基础设施工程建设的高潮还可延续 20 年, 如果忽视耐久性, 迎接我们的还将会“大修”20 年的高潮, 其费用数倍于当初这些工程建设时的投资。

耐久性研究可分为材料学科和结构工程学科的研究^[2]。目前混凝土耐久性研究成果的绝大多数是材料学科取得的。从材料学科的角度, 耐久性表现为材料性能随时间的退化, 主要包括钢筋锈蚀、冻融循环、碱-骨料反应、化学作用等的机理及物理、化学和生化过程及环境侵蚀分析。从结构工程的角度, 结构耐久性表现为材料性能的退化对抗力、刚度等方面的影响以及结构可靠性、安全性和适用性等随时间的变化, 而

这方面研究还需加强和深入。笔者立足于混凝土材料耐久性退化机理, 从结构工程学科的角度总结了混凝土劣化对结构性能影响的研究成果以及存在的薄弱环节, 为混凝土耐久性研究提出一些侧重点与方法。

1 单因素对结构性能的影响

影响混凝土结构耐久性降低的因素很多, 各因素之间相互影响, 共同作用。针对这种情况, 耐久性研究一般先从单因素对结构性能的影响着手, 再综合多种因素, 探讨结构性能的变化。目前大部分成果只研究了单因素作用机理。下面首先介绍针对单因素研究的一些成果, 再探讨多因素的情况。

1991 年召开的第二届混凝土耐久性国际会议上 Metha 教授在题为《混凝土耐久性一五十年进展》的报告中指出: “当今世界, 混凝土破坏的原因, 按重要性递减顺序排列是: 钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境的物理化学作用”。在 2001 年“土建结构工程的安全性及耐久性”工程科技论坛上黄土元教授也精辟指出混凝土破坏的主要因素是“南锈北冻”。由此可见钢筋锈蚀和冻融循环是造成结构耐久性损伤的 2 大主要因素, 下面以这 2 个因素为主进行讨论。

1.1 钢筋锈蚀

导致钢筋锈蚀的原因主要有: 混凝土保护层碳化

收稿日期: 2002-10-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助(59908015)

作者简介: 陈朝晖(1968-), 重庆人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土结构可靠性、安全性及耐久性分析理论和应用研究工作。

和氯离子侵入并在钢筋表面达到一定浓度。一些研究表明,混凝土保护层碳化使混凝土抗压强度有所提高,延性降低^[3],但一方面由于混凝土的早期强度有增长趋势,另一方面,与粘结强度和钢筋性能相比,混凝土延性的变化对构件性能的影响较小,因此,一般重点放在锈蚀后构件性能的研究上,研究对象主要为梁,对钢筋锈蚀混凝土构件的抗剪、抗扭性能还有待研究。

1) 正截面抗弯承载力的研究。钢筋腐蚀程度通常采用腐蚀率表示,即锈蚀钢筋截面损失率或钢筋直径损失率。通常,当钢筋截面损失率大于 0.5% 时,会产生纵向裂缝;当锈蚀率达到 5% ~ 10% 时,由于腐蚀不均匀,钢筋力学性能均有一定降低;当其截面损失大于 10% 时,会导致混凝土保护层剥落,钢筋应力-应变关系变化很大,没有明显屈服点,屈服强度与极限抗拉强度非常接近,且都有降低,延伸率明显下降。钢筋锈蚀造成钢筋截面减小,极限延伸率降低,构件有效高度降低,锈蚀产物膨胀使混凝土保护层产生纵筋裂缝,结构粘结性能和承载力下降^[4-5]。研究表明,构件正截面抗弯承载力与钢筋腐蚀率基本呈线性关系,且承载力下降的速度大于腐蚀率增加的速度^[6-7]。可见,腐蚀状态下受弯构件承载力除受腐蚀率影响外,还受钢筋表面坑蚀造成的应力集中,钢筋延伸率、屈服强度和抗拉强度的降低、屈服台阶变短以及由于混凝土保护层开裂导致构件截面有效高度的减少等因素的影响。

2) 锈蚀钢筋粘结强度的研究。文献[8-9]的研究表明:当锈蚀量增大,锈胀裂缝发展,极限粘结强度、残余粘结强度呈指数关系降低,并得出考虑锚固位置影响的锈后钢筋粘结滑移本构关系:

$$\tau_w(s_w, x) = \Psi_w(x) \cdot \overline{\tau_w(s_w)} \quad (1)$$

其中: $\Psi_w(x)$ 为考虑锈胀开裂影响的粘结锚固位置函数; $\overline{\tau_w(s_w)}$ 为考虑锈胀开裂影响的平均粘结应力滑移关系;

文献[10]的锚固破坏试验表明,在配置了箍筋的前提下,锚固长度较长时,即使发生较大程度的腐蚀,也不会出现支座处的锚固失效,即锚固强度受钢筋锈蚀的影响较小。而在拔出试验中,当保护层出现纵筋裂缝后,粘结强度迅速降低,裂缝宽度超过 1.5 ~ 2.0 mm 后,粘结力基本丧失,平均粘结强度仅为无纵向裂缝时的 3.5% ~ 5.5%。对没有箍筋的无腹筋梁,腐蚀开裂后又将发生锚固破坏^[11-12]。可见,腐蚀条件下的锚固强度除受腐蚀程度的影响外,还与箍筋有关。

3) 腐蚀构件适用性的研究。Mangat 和 Elgarf^[13] 对未加荷条件下快速锈蚀的钢筋混凝土梁的抗弯试验表明钢筋腐蚀对梁的刚度有显著影响,钢筋直径锈蚀损

失为 5% 时,试件的挠度约为未腐蚀构件的 2 倍。且由于局部粘结性能减弱,使横向裂缝数量减少,但宽度加大,同时,纵筋裂缝直接影响结构外观,使构件不能满足适用性要求。

以上事实说明,当钢筋腐蚀率较低时,构件承载力下降的幅度并不大,而混凝土和钢筋的局部粘结性能有明显下降,构件的适用性往往先于承载力安全性而达不到要求。

上述研究着重在纵筋锈蚀上,事实上,箍筋首先锈蚀,尤其在纵筋与箍筋的相交处,箍筋锈蚀更为严重。当纵筋截面损失率为 5% ~ 10% 时,箍筋多已锈断。箍筋锈蚀不仅直接影响构件的抗剪承载力,且对受压构件承载力有间接影响。锈蚀产物的膨胀力引起混凝土保护层疏松剥落,箍筋间距越小,这种影响越大,使箍筋丧失对混凝土的约束能力^[13]。

锈蚀下的结构内力分析是十分复杂的问题,目前还没有理想的计算表达式。文献[14]进行了 30 多根钢筋锈蚀前后的混凝土受弯和受压构件的试验,提出对于钢筋锈蚀的受弯构件和受压构件,采用正常构件的计算方法进行强度计算时,应根据锈蚀开裂的不同程度来考虑各种损失所引起的构件强度降低。对钢筋锈蚀混凝土保护层已开裂的受弯构件,应考虑钢筋截面损失、屈服强度降低和粘结力损失。对钢筋锈蚀混凝土保护层已开裂的受压构件,除考虑上述损失外,还要考虑截面几何损失对承载力的影响。

事实上,钢筋锈蚀存在时间和空间上不确定性,而目前的分析还是基于锈蚀量的确定性分析,与当前可靠性设计理论相一致的基于环境(尤其是微环境)和结构初始状态的不确定性分析应是我们今后研究的方向之一。

1.2 冻融循环

由冻融循环引起混凝土的老化、破坏有 2 种形式:表面剥落和内部开裂。这 2 种破坏形式由不同的原因导致,是不同时期的问题。表面剥落经常发生在有受冻循环的条件下使用除冰盐的混凝土路面,由于盐的存在,混凝土内渗透压增大,饱和度提高,结冰压增大,加剧了混凝土的受冻破坏。混凝土受冻后内部开裂的原因,是孔隙的溶液结冰膨胀,作用于孔隙壁,产生微裂纹损伤,多次的冻融循环使损伤积累导致混凝土内部疏松开裂。文献[15]研究表明包括抗压、劈裂、抗拉及抗剪强度、弹性模量、泊松比和剪切模量等混凝土力学性能均随冻融循环次数增多而降低。普通混凝土经过 90 次冻融循环后的试件力学性能减损均在 10% 以上,剪切模量减损超过 20%。文献[16]研究表明最大粘结

强度随冻融循环次数增加而减小。经过冻融循环的试件最大粘结强度与其相应抗压强度的平方根的比率和未经过冻融循环的试件的比率相同。由上述资料 and 许多实际工程受冻害的特征可得出冻融破坏主要表现为对结构适用性而不是强度的影响。我国北方地区使用除冰盐的路面典型的冻融破坏特征就是——表面砂浆剥落,集料暴露,而下面的混凝土保持坚硬完好,其强度没有降低。因此,对于冻融循环作用下的混凝土结构耐久性研究重点应放在对结构适用性的影响上。

冻融后的混凝土性能评价指标有动弹模量的变化值(DF值)、抗压强度降低值、重量损失、剥蚀量和膨胀值等。试验方法分快冻和慢冻。大量试验表明,冻融破坏在构件内部产生裂纹、表面出现剥落,抗压强度指标对内部裂纹很不敏感,而在慢冻试验中,水泥水化强度还有增长的趋势;同时,随着裂缝开展,吸水率增大,也会引起构件重量增大,因此,抗压强度和重量损失不能很好反映冻融破坏的程度。目前,公认的指标是由ASTMC666-86-A提出的耐久性指标DF值。该值是基于冻融前后混凝土相对弹性模量的变化^[17]。

相对弹性模量:

$$P_c = (F_c)/(F_0) \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: P_c 为C次冻融循环后的相对弹性模量; F_c 为C次冻融循环后的横向基频; F_0 为冻融前的横向基频。

耐久性指数:

$$DF = P_N/M \quad (4)$$

式(4)中, P 为N次冻融循环后的相对动弹模量;

M 为当DF降至60%左右时的冻融循环次数,一般为300次。

一般来说,快冻法的DF值小于慢冻法。

文献[17]从微观破坏机理的角度建立了混凝土宏观力学现象的数学模型,对于冻融循环的定量研究作了有益的探索。该文提出冻融循环引起的混凝土损伤是疲劳损伤。冻融循环往复作用的结果使混凝土内部的微裂纹损伤不断积累发展,导致混凝土各项宏观性能的降低,因此冻融循环对混凝土是一种疲劳破坏。该文采用疲劳损伤理论,得出在冻融循环作用下的混凝土宏观性能的降低与微观损伤发展的关系:

$$D = 1 - \left[(1 - D_0)^{\beta+1} - \frac{C(\beta+1)\sigma_{\max}^\beta}{E_0^\beta} N \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (5)$$

$$\text{其中, } \beta = \frac{\lambda - \frac{E_i}{E_0}}{1 - D_0 - \lambda}; C = \frac{1 - D_0 - \lambda}{\epsilon_i^\beta}; \lambda = \frac{\sigma_i}{E_0 \epsilon_i};$$

$$\sigma_i = \sigma |_{\epsilon = \epsilon_i};$$

D 为材料弹性模量的损失率; D_0 为加载时刻混凝土的初始损伤; N 为冻融循环的次数;

ϵ_i 为混凝土在发生损伤局部化之前的最大应变。对于普通混凝土取应力为80%抗拉强度时的应变;对于高强混凝土取应力为90%抗拉强度时的应变;

E_0 和 E_i 为混凝土初始弹性模量和应变为 ϵ_i 时的弹性模量;

E_0 和 E_i 为在一个冻融循环周期内,由混凝土孔溶液冻结产生的最大静水压力。

上述模型对混凝土抗冻性的预测与实验结果符合良好,但其实用化的关键在于模型参数在实际结构中的可测性和可操作性,这同样是目前大多数定量模型用于实际工程的耐久性评定时遇到的难题之一。

1.3 碱集料反应

碱集料反应使混凝土原材料中水泥、外加剂和水中的碱与骨料活性物质反应生成膨胀性或吸水膨胀性产物,使混凝土构件产生内部应力。碱集料反应产生的膨胀应变超过0.04%~0.05%时会引起开裂,对受约束的自由膨胀常表现为网状裂缝。由于抗拉强度、弹性模量下降及钢筋由于膨胀反应造成的附加应力,可使混凝土结构出现不可接受的变形和扭曲。由于活性骨料经搅拌后大体上呈均匀分布,所以一旦发生碱集料反应,将导致混凝土构件失去设计性能。目前对此类问题的研究主要集中在骨料活性的快速检测方法和指标的确定以及抑制碱集料反应的外加剂的研制上,其耐久性损伤的定量分析几乎是空白。

1.4 化学物质侵蚀

环境中的酸性物质可使水泥水化产物中的氢氧化钙变成可溶性钙盐,使水泥水化物剥落,粗骨料外露而导致混凝土强度下降。环境中的碱性物质与水泥水化产物发生化学反应,生成胶结力弱且易为碱溶液侵蚀的产物,同时进入混凝土孔隙的碱溶液形成具有膨胀性的结晶体,使混凝土胀裂并逐渐剥落。

2 结构性能的综合变化

事实上,自然环境和人为因素影响下的结构性能退化往往不是单因素单独作用而是多因素综合作用的结果,这既包括一种单一破坏的发生可能引发其它破坏现象(例如冻融循环引起混凝土表面剥落,钢筋裸露,产生钢筋锈蚀现象,加速了结构的破坏),又包括多因素共同作用、相互影响的破坏现象。所谓相互影响既可能是相互促进,也可能相互制约。文献[18]研究了硫酸盐溶液对混凝土抗冻性的影响,结果表明:硫酸盐的侵蚀作用和冻融循环破坏作用相互影响,互相促

进。冻融循环作用下混凝土试件的抗渗透性能下降,使硫酸盐溶液更容易渗透到混凝土试件内部,增加内部硫酸盐浓度,使硫酸盐侵蚀速度加快。硫酸盐作用使混凝土试件发生膨胀,在试件中引起裂缝,混凝土强度下降,裂缝吸水后使该处的冻融破坏加剧,强度下降时的混凝土抵抗侵蚀能力下降。文献[19]研究在氯化钠溶液中混凝土的冻融循环,由于氯化钠溶液的冰点较水低(冰点的降低对混凝土抗冻是有利的,在混凝土内部,这种有利因素起主导作用),使混凝土内部产生的微裂缝相对于水中较少,其相对动弹性模量下降速度稍缓,即氯化钠溶液对冻融循环中动弹性模量的变化起了制约作用。

实际工程中,结构构件都处于应力状态,同时受到环境因素的侵蚀。研究应力状态下损伤的结构构件性能才与实际情况比较符合。文献[20]对 3 块使用了 15 年的大型屋面板抗弯试验表明:损伤的混凝土构件承载力、刚度和延性都有不同程度的下降,钢筋屈服时构件丧失承载力,裂缝开展过程呈少筋梁破坏。文献[21]的加载腐蚀试验表明,在应力与腐蚀耦合工况下,结构的腐蚀速度明显加快。

因此,使用环境中结构耐久性研究除了目前的单因素单独作用外,更应加强对多因素综合影响机理的研究。

3 结 论

从以上分析可以看出混凝土的劣化对结构的影响首先表现为对结构适用性的破坏,即产生裂缝、剥落、加剧变形等,进一步造成结构承载力的降低,威胁结构安全性。而且适用性的下降,如裂缝的产生与发展,使外界有害物质容易进入,导致结构损伤的综合发展。在结构耐久性不断降低的过程中,其适用性与安全性往往相互影响,如钢筋锈蚀过程就是一个典型例子。而目前对此耦合现象的定量研究还不足。

总之,导致混凝土结构产生耐久性破坏的因素存在多种,实际结构的耐久性破坏往往是由这多种因素综合作用引起的,而这些因素的变化规律以及作用规律具有很强的时间不确定性,因此,今后结构的耐久性研究应侧重以下几方面:

1) 从单因素确定性的分析向多因素耦合且不确定性分析转化。

2) 耐久性破坏现象首先表现为结构适用性降低,从而进一步影响结构安全耐久性,而且适用耐久性与安全耐久性也不是相互独立,而是相互关联的,今后,应在继续开展结构安全耐久性研究的同时,加强结构

适用耐久性以及适用耐久性与安全耐久性的耦合作用的研究。

3) “南锈北冻”是我国目前混凝土破坏的主要因素,应重点加强这两方面的研究,对于前者应建立完善的钢筋混凝土结构锈蚀数学模型,后者,应不局限于定性的现象描述,而应从微观机理出发,建立混凝土冻融破坏的定量预测模型以及评估模型。

4) 耐久性涉及到材料学科与结构学科两方面,耐久性问题既是材料的问题又是结构的问题,应结合两方面进行耐久性综合分析。并侧重全方面研究材料性能的退化对结构构件承载力、刚度和延性的影响。

参考文献:

- [1] 黄士元. 21 世纪初期我国混凝土技术发展中的几个重点问题[J]. 混凝土, 2002, 149(3): 3-7.
- [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] 朱伯龙. 碳化混凝土的结构性能[J]. 工业建筑, 1998, 28(9): 41-44.
- [4] 惠云玲. 锈蚀钢筋力学性能变化初探[J]. 工业建筑, 1992, 22(10): 33-36.
- [5] 惠云玲. 锈蚀钢筋性能实验研究分析[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-13.
- [6] CABRERA J G. The effect of reinforcement corrosion on the strength of the steel/concrete bond [C]. Latvia: Proceeding on international conference bond in concrete, 1992.
- [7] 李荣. 钢筋混凝土构件锈蚀后正截面承载力的试验研究[D]. 北京: 冶金部建筑研究总院, 1996.
- [8] 张伟平, 张誉. 锈后钢筋混凝土粘结滑移性能的试验研究[A]. 中国土木工程学会第九届年会论文集[C]. 杭州: 中国水利水电出版社 2000.
- [9] 张伟平, 张誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 40-44.
- [10] AL-SULAIMAINI G J. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members[J]. ACI structural Journal, 1990, 87(2): 220-231.
- [11] NAVARATNARAJAH V. A theory of transfer bond resistance of deformed reinforcing bars in concrete under lateral pressure [J]. Magazine of concrete research, 1987, 39(140): 161-168.
- [12] YOLSHIHIRO. Mechanical behavior of RC Beam Damaged by Corrosion of Reinforcement[C]. Wishaw: Proceeding of the 3rd international Symposium on corrosion of reinforcement in concrete, 1990.
- [13] MANGANT PRITPAL S, ELGANT MAHAMOUND S. Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 149-158.
- [14] 惠云玲. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究, 工业建筑, 1997, 27(6): 14-18.
- [15] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. 土木工

- 程学报, 1997, 34(4): 35 - 42.
- [16] SHIH T S. Effect of Freezing Cycles on Bond Strength of Concrete[J]. Journal of Struct. Engng, ASCE, 1988, 114(3): 719 - 725.
- [17] 蔡昊. 混凝土抗冻耐久性预测模型[D]. 北京: 清华大学土木系, 1998.
- [18] 慕儒. 氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 523 - 529.
- [19] 魏广和, 慕儒. 氯盐溶液与快速冻融共同作用下混凝土的性能[J]. 建筑技术, 2001, 32(10): 658 - 660.
- [20] 全明研. 老化和损伤的钢筋混凝土构件的性能[J]. 工业建筑, 1990, 20(2): 15 - 19.
- [21] 慕儒. 荷载作用下高强混凝土的硫酸盐侵蚀[J]. 工业建筑, 1999, 29(8): 52 - 55.

Effect of Reinforced-Concrete Deterioration on Structures

CHEN Zhao-hui, HUANG He

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstracts: It is proposed that the research of the structural durability is necessary considering the structural damages under the effect of deterioration of reinforced concrete. The most common reasons, which cause the deterioration of structures in China, are reinforcement corrosion and freeze-thaw cycles of concrete. Based on the summarizing of research works of the effect of reinforced concrete deterioration on structures, it is indicated that the structural durability research should be carried out either in view of material science or that of structural science, and should be also considered the interaction of several factors with uncertain nature instead of the determined individual factor analysis. The structural durability of serviceable should be paid much more attention while researching the durability of structural capacity. The effect of reinforced concrete deterioration on structural capacity, rigidity and durability should be researched henceforth.

Key words: structural durability; concrete deterioration; reinforcement corrosion; freeze-thaw cycles

(责任编辑 姚 飞)

(上接第 41 页)

FEM Analysis of Stress Distribution Law in the Rocksalt Cavity's Surrounding Rock

LIU Xin-rong, JIANG De-yi, XU Jiang, XIAN Xue-fu

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory For the Exploitation of South - West Resources and Environmental Disaster Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Basic on the FEM numerical analysis, the contour maps stress of rocksalt cavity's surrounding rock and the major principal stress's law changed with the depth and horizontal direction are analyzed. The influencing factors to the distribution of the stress surrounding rocksalt cavity, such as cavity's span, water pressure and the depth of rocksalt layer is also studied. The results show that major principal stress becomes big with the increase of rocksalt's depth. The cavity's influence to the stress's distribution will be clearer with the nearer to the cavity. The stress's centralization will be weaker with the accretion of water pressure in rocksalt's cavity. But the stress's centralization will be stronger, and the stress's value increases.

Key words: cavity's surrounding rock; crustal stress; distribution; affect factor

(责任编辑 姚 飞)