

# 水利工程安全性及耐久性的基础研究

刘晓玲

山东省滨州市邹平市台子镇综合文体健康中心 山东滨州 256213

**【摘要】**在水工工程中，水工隧道受到多种灾害的耦合作用，在其使用寿命期间可能会发生不同程度的腐蚀和破坏，从而降低其抗震性能。然而，重大水利工程的研究和抗震设计主要是基于设计材料参数来考察结构的响应，这可能会高估结构在使用寿命期间的抗震能力。本文研究了水化学机械腐蚀对不同埋深水工隧洞抗震性能的影响。受水化学-机械腐蚀影响的水工隧道使用时间越长，其坍塌的可能性越大。在今后的抗震设计和性能评价中，应重视提高受水化学-机械腐蚀影响的水工隧道的抗震能力。

**【关键词】**水利工程；安全性；耐久性

## 1 前言

水工隧道是一种越来越常见的工程结构，在灌溉、发电、供水、排水、输水、施工导流、通航等生命线工程的各个方面都发挥着不可缺少的作用<sup>[1]</sup>。显然，极端自然灾害对水工隧洞的严重破坏会间接或直接地给周边环境和社区造成不可估量的损失。因此，耐久性和安全性问题已成为新建水工隧道的重要指标要求。与其他类型的地下结构不同，水工隧洞的主要任务是将通过隧洞的水支撑到特定的位置。由于混凝土衬砌在设计使用寿命期间(通常超过100年)与过水直接接触，随着时间的推移，可能会发生复杂的湿热传递、冻融作用、化学膨胀反应和氯离子增强，即水化学机械作用。同时，随着隧道衬砌混凝土使用寿命的增加，其力学参数也会受到较大的影响和恶化。在工程中，吸湿凝胶的存在会引起碱-骨料反应在吸水后膨胀，导致附加膨胀应力超过极限承载应力，导致混凝土腐蚀开裂。显然，水化力作用对混凝土衬砌的侵蚀时间越长，越容易造成混凝土材料强度的降低，从而导致隧道出现大规模裂缝<sup>[2]</sup>。这些不利因素可能诱发微裂缝的扩展，暴露胶凝骨架，导致整体结构抗震能力严重下降。

目前，地下结构的抗震性能评估采用了多种分析方法，如推覆分析、增量动态分析、耐久时间分析。最常用的方法之一是增量动态分析，它通常用于构建一系列云分析，以全面描述损害和固有特征。该方法精度高，能够表示地下结构的动力响应特性。然而，增量动态分析方法用于绘制脆弱性曲线有几个缺点，包括大量的地面运动记录，多次调整的峰值地面加速度，以及大量的计算能力和时间要求。更具体地说，这种方法需要很高的计算量来进行抗震

性能评估。为克服增量动态分析方法的不足，提出了动态推覆分析的耐久时间分析方法，并且只需一次加速度时程激励即可实现结构在不同烈度下从线弹性状态到非线性状态和倒塌状态的动力响应。耐久时间分析方法结合了推覆分析和增量动态分析方法的优点，可以有效地评估地下结构的抗震性能。因此，利用耐久时间分析方法来处理水工隧道的抗震性能和抗震性能评估是可取的。

## 2 水化学机械腐蚀影响混凝土模型

水工隧道由于其工程特性，在其较长的使用寿命期内，将不断受到各种复杂的荷载因素和环境因素的影响，如湿热运输、冻融作用、钙浸出、化学膨胀反应、化学溶解等。在这些可能的不利因素作用下，水化学-力学效应很容易引起混凝土衬砌力学性能的退化，一般情况下，混凝土的性能退化程度随水化力作用时间的延长而增大，即水工隧洞运行时间越长，在地震作用下塌方风险越大。混凝土材料参数的推导是水工隧洞评估的必要条件。水的主要作用是溶解混凝土材料中的Ca(OH)<sub>2</sub>元素，而水的CO<sub>2</sub>成分可以溶解混凝土中的Ca<sup>2+</sup>元素，引起混凝土结构的解体 and 开裂。此外，还分别考虑了侵蚀混凝土的化学效应和力学效应。

总孔隙度作为混凝土退化参数的评价方法，传统上是采用的。初始孔隙度、化学孔隙度由混凝土中的胶凝物质逐渐溶解而形成，以及物理孔隙度，由于材料在外部机械载荷作用下微裂纹和微孔洞数量的变化，可以用来解释总孔隙率。混凝土总孔隙率可用于连接混凝土材料在力学、热、水复合荷载作用下的关键参数与力学参数的数值模型。一般来说，总孔隙度，考虑初始孔隙率、机械孔隙率，以及化学孔隙度可表示弹性模量，受水化学机械腐蚀

影响的混凝土。

### 3 耐久时间分析法

对于耐久时间分析方法，任何生成的人工加速度-时间历史记录都可以显示地震烈度水平随时间从低烈度加速度分量到高烈度加速度分量的渐变过程。与增量动态分析方法不同的是，耐久时间分析中的时间表示地震烈度。随着时间的推移，结构不仅会经历响应变化，还会经历耐久时间分析激励的变化，导致结构从线弹性状态转变为弹塑性状态。同时，抗震性能较好的结构破坏和倒塌所需的激励时间明显高于抗震性能较差的结构。

### 4 弹塑性模型与相互作用系统

采用不同的数值本构模型来反映混凝土衬砌及围岩的弹塑性力学和脆性断裂，此外，混凝土损伤塑性模型可以反映地震波激励下混凝土衬砌的拉压损伤机制，并考虑不同数值本构模型之间材料的拉压特性差异。其中，C25混凝土初始静弹性模量为2.8GPa，压缩屈服应力为16.7MPa。显然，退化的静态弹性模量和压缩屈服应力在十年内略有增加。随着龄期的增加，劣化的静弹性模量和压缩屈服应力显著减小。用于水工隧道的非线性动力分析，如图1。这可以从图1(a)受水化学机械腐蚀影响的混凝土材料的拉屈服应力随龄期的增加而减小。例如，未受水化学机械腐蚀的混凝土材料30年后的拉屈服应力为1.78MPa，比受水化学机械腐蚀影响的混凝土材料的拉屈服应力高6.59%。在拉伸损伤因子-应变关系中，受水化学-机械腐蚀影响的混凝土材料损伤因子的主要差区间集中在应变为0~0.001之间(见图1(b))。

### 5 数值结果及讨论

在结构设计使用寿命期间，控制结构强度随时间退化的因素可能会大大降低结构的抗震性能。为了更好地理解水工隧洞结构的抗震性能，考虑了水工隧洞的峰值相对位移值和混凝土衬砌随时间的损伤机理。以隧道中轴线为研究

对象，对其抗震性能进行了分析。

随着时间的推移，耐久时间分析作用下受水化学-机械腐蚀影响的隧道变形行为会发生显著变化，不同服役时间水工隧洞的相对位移曲线变化趋势基本一致。也就是说，水化学机械腐蚀虽然可以改变混凝土材料的力学性能，但不足以改变水工隧洞的变形特性。然而，水化学-机械侵蚀可以改变地上结构的变形特征，因为减少了周围岩体的约束。

水化学-力学效应引起地下结构失稳的观测很少，但由于复杂因素引起的混凝土覆盖层开裂和剥落的报道较多。水工隧洞微裂混凝土一旦发生水化学机械腐蚀，在强地震作用下，水工隧洞很可能坍塌。由于老化，水工隧道容易发生严重的水化学力学变化，在强烈的地震激励下，水工隧道坍塌的可能性更大。

### 6 水工隧道水化学机械腐蚀时变脆性分析

目前对水环境下结构体地震易损性分析的研究多考虑水化学机械腐蚀对地上结构体的影响，很少考虑水工隧洞后续使用寿命退化与参考期的差异。为了揭示水化学力学对结构抗震性能的影响，选择合适的评价标准是易损性分析的关键部分。损伤指标的漂移比可表示为基于隧道等效横截面直径的拱截面与倒拱截面间的相对位移。结构损伤指标可以同时考虑隧道的累积损伤和非弹性变形响应。

三维时变易损性面相对于传统二维易损性曲线的主要优势在于，三维时变易损性面同时揭示了超过使用时间和地震烈度的概率。与受水化学-机械腐蚀影响的水工隧洞相比，未受影响的水工隧洞的损伤概率可能被低估了。此外，受水化学机械腐蚀影响的水工隧洞的损伤概率随着使用寿命的延长和地震烈度的增加而增加，为轻度/中度损伤和广泛损伤。例如，对于未受影响的浅埋水工隧道，当发生轻、中度损伤时，其损伤概率约为60.82%。75年后，受水化学机械腐蚀影响的水工隧洞发生轻、中度破坏的概

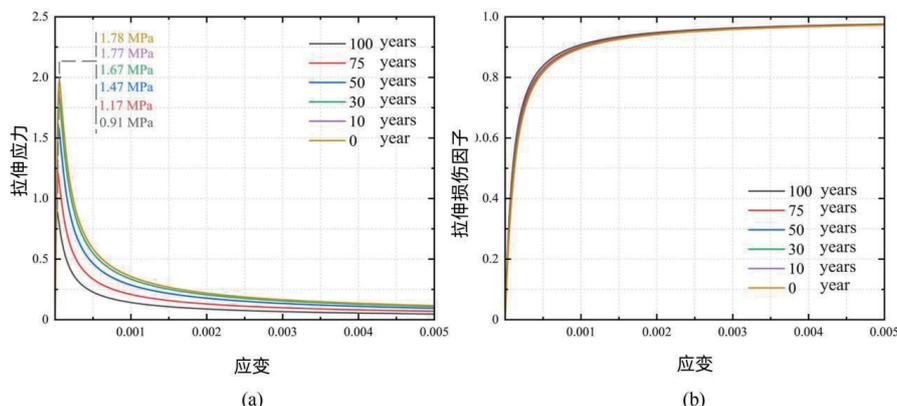


图1 降解混凝土损伤塑性模型的拉伸应力-应变和损伤本构关系 (a) 拉伸应力-应变，(b) 拉伸损伤因子-应变。

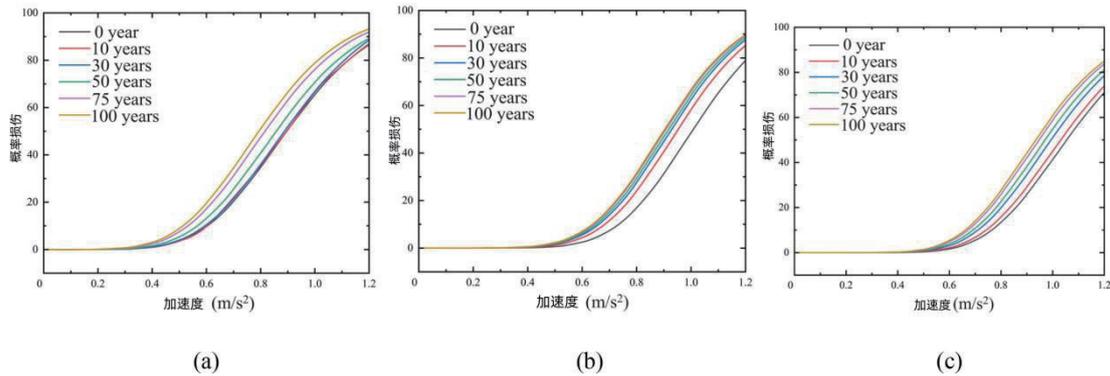


图2 受水化学-机械腐蚀影响的水工隧洞呈现轻、中度损伤的时变二维脆性曲线：(a)埋深20m，(b)埋深50m，(c)埋深80m。

率为91.91%。在相同地震烈度和使用时间下，浅埋水工隧洞的破坏概率也明显大于中埋和深埋水工隧洞。为100年后，20m、50m和70m水工隧洞发生大面积破坏的概率分别为63.37%、50.82%和44.87%。

为研究水化学机械腐蚀对水工隧洞全寿命的影响，将时变的三维易损性面转换为二维易损性曲线，方便地直接比较某一地震烈度等级下的损伤概率。图2绘制使用寿命分别为0年、10年、30年、50年、75年和100年的水工隧洞在不同破坏条件下受水化学-机械腐蚀影响的脆性曲线。图2(a)表明，当加速度为 $0.8\text{m/s}^2$ 时，20m深水化学机械腐蚀水洞在0、10、30、50、75和100年的运行中发生轻度/中度破坏的概率分别为34.68%、35.55%、35.92%、40.77%、47.38%和51.00%。50m深水化学机械腐蚀水工隧道在10年、30年、50年、75年和100年的轻、中度损伤概率较0年分别增加41.87%、63.09%、73.08%、82.28%和86.66%，如图所示图2(b)对于80m深受水化学-机械腐蚀影响的水力隧道，图2(c)表明，在10年、30年、50年、75年和100年的使用寿命下，与0年相比，损坏概率分别增加了17.48%、47.76%、68.57%、92.27%和105.20%。可见，受水化学-机械腐蚀影响的水工隧洞发生轻/中度损伤的概率随着使用寿命的增加而增加，且对混凝土强度参数退化的影响不容忽视。此外，受水化学-机械腐蚀影响的水工隧道的使用时间越长，其使用寿命(100年)期间轻度/中度损伤概率大于50%所需的地震烈度越低，如图2。即控制水工隧洞抗震性能的主要因素之一可能是混凝土在水化力作用下的劣化。

在地震烈度约为 $0.30\text{g}$ 、 $0.42\text{g}$ 和 $0.44\text{g}$ 以下时，水化学机械腐蚀效应对20m、50m和80m深隧道的时变轻、中度破坏和广泛破坏的概率变化不明显。图2在低烈度地震下也无明显变化，即设计参数可直接用于位于低烈度地区的水工隧洞的抗震设计。此外，20m深机械腐蚀水工隧洞在0、10、30年发生轻、中度损伤的概率与相应的加速度增加

( $0\sim 1.0\text{g}$ )基本相同。对于50m深受机械腐蚀影响的水工隧道，当使用年限超过30年时，轻、中度损伤的概率变化较小。而80m深机械腐蚀水工隧洞与50m深和80m深机械腐蚀水工隧洞不同，其损伤概率随服役时间的增加而增大。从工程角度看，深水水工隧道在抗震设计阶段应注重防止水化学-力学效应，浅水工隧道和中深水工隧道的修复和加固分别需要大约30年和10年的运行时间。

## 7 结论

水化学力学效应对结构的非弹性动力响应和抗震性能有重要影响。为了全面分析其对水工隧洞的影响，利用耐久时间分析方法揭示了受水化学-机械腐蚀影响的水工隧道在其使用寿命期间的长期地震行为。在低烈度地震激励下，耐久时间分析结果表明，随着使用时间的增加，未受水化学-机械腐蚀影响的浅埋水工隧洞顶拱与底拱之间的相对位移略有不同。而服役时间较长的水化学机械腐蚀影响浅埋水工隧洞在极端地震作用下的相对位移要大于未受腐蚀影响的浅埋水工隧洞。随着使用时间的延长和地震烈度的增加，埋深为50和80m的受水化学-机械腐蚀影响的水工隧道顶拱与底拱之间的相对位移总是远远大于相应的未受影响的水工隧道。中低烈度时，累积损伤面积变化不显著，但损伤程度略有增加。此外，水化学-力学效应虽然能增加水工隧洞在使用寿命期间的累积损伤面积和程度，但不能改变其损伤破坏模式。从实际工程应用来看，浅埋和中深水工隧洞在初始运行阶段可以忽略水化学-力学效应，而根据水工隧洞在不同服役时期脆性曲线的发展趋势，建议深埋水工隧洞在抗震设计阶段考虑水化学-力学效应。

## 参考文献：

- [1] 杨启春. 水利工程安全性和耐久性施工研究[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(04): 106-107.
- [2] 林红英. 山东菏泽当地的水利工程安全性和耐久性探究[J]. 城市建设, 2013, (18): 282.