

# 八 大坝混凝土动态特性

## 1 调研背景概述

大坝混凝土一般采用三级配或四级配骨料，骨料最大粒径达 120mm~150mm，粗骨料含量约占混凝土重量的 60%~70%，胶凝材料仅占混凝土重量的 8%~10%。限于试验条件，对大坝混凝土通常采用湿筛法制备试件。湿筛法是将搅拌好的大坝全级配混凝土中粒径大于 40mm 的骨料筛除制成小试件，对小试件进行各种物理力学参数的试验测定。与全级配混凝土相比，湿筛小试件的粗骨料含量减少 1~2 倍，而胶凝材料含量提高 1~2 倍。

材料组成和配比的变化，特别是水泥砂浆含量与骨料含量比例的变化，造成湿筛法得到的试验结果与大坝全级配混凝土实际物理力学性质的显著差异，难以真实反映大坝混凝土的性能指标，对大坝设计和安全评价的客观性带来较大影响。

美国从上世纪 40 年代开始进行大坝全级配混凝土研究。至上世纪 70 年代中期，美国垦务局制定的混凝土重力坝和拱坝的设计规程中明确规定，大坝混凝土的强度、弹性模量等物理特性测试时，必须采用包括全部骨料的全级配混凝土，同时规定试件最小尺寸必须大于骨料粒径的 3 倍。前苏联在上世纪 80 年代也进行了大坝全级配混凝土试验研究。

国内全级配大坝混凝土的试验研究开始于上世纪 60 年代中期。中国水利水电科学研究院率先开始了一些初步试验研究。之后，清华大学、大连理工大学、河海大学、成都勘察设计研究院等也相继开展了全级配混凝土试验研究，取得较多的成果，并制订全级配混凝土试验标准。2002 年《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001) 颁布施行。

混凝土结构在其工作过程中除了用于承受正常设计载荷（通常是准静态载荷，有时也包括蠕变载荷）外，往往还要承受各种变化的强动载荷，地震作用就是其中之一。因此，研究混凝土材料在动态载荷作用下的力学特性及其本构关系对大坝抗震安全设计具有十分重要的理论意义和实际工程意义。

一般认为，在动态载荷作用下，引起混凝土材料力学特性显著区别于其准静态下情况的主要影响因素是材料的应变率敏感效应。因此，混凝土材料率敏感效应的研究一直都得到了研究者的重视和关注。

本调研主要关注全级配大坝混凝土试验及混凝土动态试验的研究进展与动向，目的旨在为开

展大坝全级配混凝土动态特性研究提供参考。

鉴于西方国家建坝高峰时代已过，近期国外针对大坝全级配混凝土动态特性研究的成果很少，而一般结构混凝土动态研究成果相对丰富，因此，本调研工作也关注了国内外一般混凝土材料的研究成果。

调研资料的主要来源是国内外期刊、国际会议公开发表的论文，以及美国大坝建设管理机构的现行相关设计标准、手册等。

## 2 调研的原因、必要性及意义

强烈地震作用下混凝土高坝的动力反应和破坏过程极其复杂，大坝结构的抗震设计是否安全、合理，不仅取决于地震动输入的合理性和结构动力分析方法的正确性，还取决于设计采用的大坝混凝土材料动态力学特性的准确性。

近年来，随着近代力学和计算技术的发展，大坝抗震动力分析取得了重大进展，日趋成熟和完善；试验设备和测试技术的发展和提高，使得大坝结构动力模型试验能较为合理地模拟各种影响因素，更真实地反映工程结构的实际情况。

相对而言，对于影响混凝土高坝抗震安全关键因素——大坝混凝土动态特性的研究要滞后得多，有关大坝混凝土材料的动态力学特性试验研究在国内外开展得非常少，还存在不少基础性问题需要进一步探索和深化研究，成为公认的大坝抗震安全设计的“瓶颈”。

随着我国西部一大批世界级混凝土高坝正在或将在地震高烈度区建设，进一步规范我国对混凝土动强度的规定已引起共同的关注。“九五”期间，国家重点攻关项目结合小湾高拱坝实际工程，进行全级配混凝土大尺寸试件抗压和弯拉的静、动态试验，取得了一批成果。近期中国水利水电科学研究院和河海大学，结合大岗山拱坝开展了全级配混凝土动力特性试验。限于试件样本容量有限，试验结果尚具有较大的离散性，因此，需要更加深入研究。

## 3 近年发展新动向和值得关注点

### 3.1 发展的新方向和值得关注点

美国从上世纪 40 年代开始进行大坝全级配混凝土研究。至上世纪 70 年代中期，美国垦务局制定的混凝土重力坝和拱坝的设计规则中明确规定，大坝混凝土的强度、弹性模量等特性测试时，必须采用包括全部骨料的全级配混凝土，同时规定试件最小尺寸必须大于骨料粒径的 3 倍。前苏

联在上世纪 80 年代也进行了大坝全级配混凝土试验研究。国内全级配大坝混凝土试验研究，开始于上世纪 60 年代中期。2002 年《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)颁布施行。该规程只包含全级配混凝土静态试验，没有动态试验标准。

早在 1917 年，Abrams 就对混凝土动态抗压强度进行研究，发现抗压强度存在率敏感性。Bischoff (1991)根据大量实验研究结果的分析对混凝土材料在高应变率下的抗压特性从多方面进行了总结性的综述。然而，受到实验设备和实验技术条件所限，人们对混凝土材料动态拉伸下力学特性的认识相对还比较粗浅，所进行的实验研究也较晚且较少。日本学者竹田仁一（1960）等最先进行了混凝土材料在快速加载下的直接拉伸实验，发现当应变率响应为  $4 \times 10^{-3}/s$  时，抗拉强度提高 33%，当应变率响应为  $4 \times 10^{-2}/s$  时，抗拉强度提高了 55%。Malvar (1998) 在其综述性文献中描述了混凝土材料抗拉强度的应变率敏感性。图 1 和图 2 是在许多文献中被引用的抗压强度和抗拉强度随应变率的变化关系，从中可见，在同量级应变率变化范围内抗拉强度的增强效果比抗压强度的增强效果大。

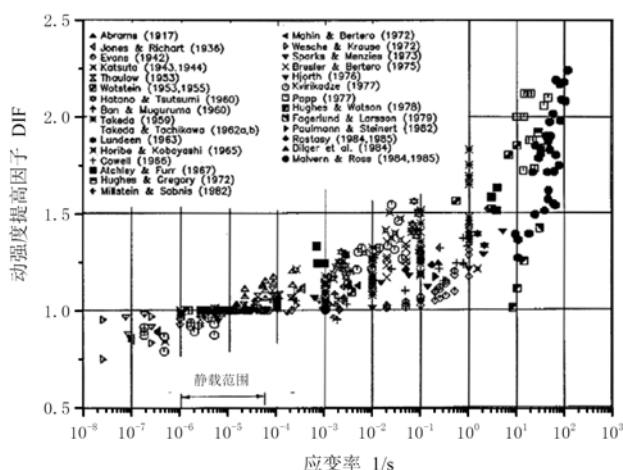


图 1 应变率对动态抗压强度提高的影响

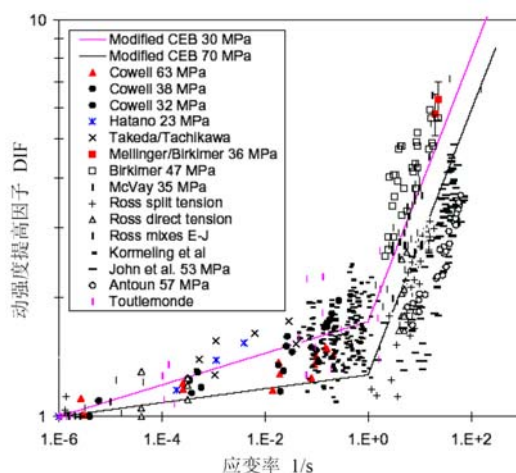


图 2 应变率对动态抗拉强度提高的影响

目前，混凝土材料动态力学特性的物理机制的解释可归结为以下 3 点：

(1) 粘性效应，也称为 Stefan 效应。其物理模型可简化为：当一层薄膜粘性液体被包夹在两块相对运动的平板之间时，薄膜对平板所施加的反作用力正比例于平板的分离速度。

(2) 裂纹演化，单轴（拉或压）载荷作用下，混凝土材料裂纹演化过程包括 3 个阶段：① 微裂纹弥散阶段，在低强度载荷作用下材料内部初始的微裂纹逐渐开裂扩展，同时又不断地生成新的微裂纹；② 微裂纹局部化阶段，随着微裂纹开裂扩展到一定程度，它们相互交织连接形成了一个或多个宏观裂纹，此时在混凝土试件某一区域内裂纹局部化现象发生；③ 宏观裂纹开裂阶段，随着裂纹局部化区的不断扩展，导致了试件的最终破坏。

(3) 惯性效应, 当应变率响应大于或等于  $10/s$  时, 惯性效应占绝对主导地位。其作用依然是限制微裂纹的局部化和宏观裂纹的开裂扩展。显而易见, 惯性效应和粘性效应分别在材料的不同应变率响应范围内起着同样的作用。因此, Ragueneau (2003) 也把粘性效应看作是源自于微观的惯性响应, 并把这归咎于代表性体积单元尺度的定义。

混凝土材料具有极其复杂的动态力学特性, 除上述材料应变率敏感效应和静水压力相关特性以及裂纹扩展导致的各向异性特征外, 还有许多其它性质, 如拉压不对称特性、剪胀与体积塑性、应变软化、加卸载的非线性滞回特性等。如何很好地描述这些动态响应特性, 并包括在本构理论的描述中, 进而发展相应的本构模型是一项复杂而困难的工作。

Bischoff (1991) 的文献中, 与动态抗压强度相对应的动态断裂应变值与准静态值之比在  $70\% \sim 140\%$  之间的范围内波动。由此可见, 动态、冲击下断裂应变值的实验结果很不一致, 既可观察到“冲击脆化”现象, 也可观察到“冲击韧性”现象。这一现象既是与材料内部微裂纹的损伤演化过程密切相关, 也是与准静态抗压强度、骨料类型、储存条件和实验条件等相关的。

一般认为, 初始切线杨氏模量对应变率不甚敏感, 但割线杨氏模量随应变率增加有所增加。这一现象, 一方面是粘性效应的表现, 另一方面也与材料内部微裂纹的损伤演化有关。Rossi(1996) 还把混凝土材料动态杨氏模量的相对增加相比动态应力强度的相对增强有点小这一现象归因于: 对混凝土材料杨氏模量起主要作用的骨料颗粒对粘性效应不甚敏感。

当前, 对混凝土材料泊松比与应变率之间关系的研究尚不多见。但一般认为混凝土在受压时, 随着应变率的增加, 其内部的微裂缝减少, 因而导致了泊松比的减小; 在受拉时, 随着应变率的增加, 其泊松比相应增加。也有实验研究认为泊松比并未随应变率的变化而发生明显的改变。

混凝土材料在动态载荷作用下本构模型的建立是一件非常复杂的工作, 相关的研究报道也很多、很杂。对应于不同的加载方式或载荷形式, 混凝土材料表现出不同的力学响应特性, 因而建立一个普遍接受、兼容并包的本构模型是相当困难, 也是不太现实的。混凝土材料动态力学本构模型大体可分为 6 个类别: ① 在准静态本构模型基础上修正而来的本构模型; ② 在粘弹性理论基础上建立的本构模型; ③ 在粘塑性理论基础上建立的本构模型; ④ 在损伤理论基础上建立的本构模型; ⑤ 在塑性与损伤相耦合的理论基础上建立的本构模型; ⑥ 在断裂理论基础上建立的本构/力学模型。

20 世纪 50 年代后期开始日本的畑野正 (1968) 进行了比较全面的大坝混凝土材料动态抗压和抗拉强度研究。美国自 20 世纪 60 年代对大坝混凝土动态力学特性试验研究相对较多。其中最具有标志性的成果是 Raphael (1984) 所进行的试验。其研究成果在美国、日本等国的设计规范中

得到反映。我国现行的《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-2000)有关混凝土动态力学特性也是源于此成果。美国垦务局的 Harris (2000)对 9 座混凝土坝中取芯进行大体积混凝土动力特性研究结果显示,地震作用下混凝土的抗压、拉强度平均增加 7.0%、14.3% (应变率约为  $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ),动静强度比大于 1,而动静破坏应变小于或等于 1。计家荣 (1998)研究了加载速率对大坝混凝土强度的影响,结果显示我国现行规范建议的混凝土动强度提高 30% 偏于不安全。

瑞士的 Bruhwiler(1990)进行了地震荷载作用下大坝混凝土特性研究,美国陆军工程兵团的抗震设计手册中采用了 Bruhwiler 的研究成果。动弹模和动抗压强度提高 15%,动抗拉强度提高 50%,动抗剪强度提高 10%。

有关全级配大坝混凝土的本构模型研究论文很少,依据小试件混凝土材料试验结果建立的本构模型是否能够应用于大坝混凝土尚需进一步的研究确定。

大坝全级配混凝土动态特性试验工作对试验设备的要求很高,同时全级配试件的制备成本也大大高于小试件,这也是相关试验成果甚少的主要原因之一。

直接拉伸试验是建立动态本构模型的关键。而试验手段对混凝土直接拉伸试验的成果影响十分显著,开发能够精确实施动力拉伸加卸载与量测的全级配试件的试验装置是开展试验研究工作的基础。同时,动态加载过程中混凝土试件内部裂缝的探测还需要先进技术来实现。目前,声发射和 CT 技术是进行混凝土内部损伤监测研究的较为有效方法,但在动态试验过程中,断面扫描速度,图像解像度等尚难以满足高精度试验的要求。

基于混凝土材料的基础试验资料,考虑大坝混凝土级配及各相介质的不均质性,进行细观非线性动态数值模拟,对探讨混凝土内部破坏过程和机理,建立混凝土细微观结构各种缺陷及其特性与其宏观力学特性的关系成为研究混凝土材料特性的辅助方法。

### 3.2 研究水平分析

混凝土材料具有极其复杂的动态力学特性,不同学者的研究结果差异很大。但是,作为最广泛使用的建筑材料,其动态特性的研究是相当重要而且十分必要的,且具有广阔的前景。然而,这一领域的研究也是相当困难的。尽管近 20 多年的研究在这方面已经取得了很大的进展,需要研究的问题还是不少。

(1) 大坝混凝土全级配动态试验成果还十分缺乏,目前试验样本尚难得到满足工程设计精度要求的统计规律。

(2) 虽然实际混凝土结构一般都会涉及到多轴应力状态,但是由于高应变率试验的高难度和

复杂性，大量的试验尚限于单轴一维试验。

(3) 大坝混凝土遭遇地震作用前，已经承受较大静态荷载作用。因此，需要建立统一的混凝土静、动本构模型及损伤破坏模型。已有学者从微、细观的角度研究了混凝土材料在准静态下的力学特性，并得到了切实可行的本构模型，但如何将其推广应用于动态情况，尚需要从理论上进行完善。

(4) 混凝土材料表现出了不连续性、非均质性、各向异性以及时空相关性等，如何在本构模型中很好的表述这些材料特性还需要从宏、细观相结合的角度深入研究。

(5) 基于纳观、介观、细观和宏观相结合的多尺度数值计算已经成为了研究的主流，如何借助这一强有力的工具推动混凝土材料动态特性的研究，将是今后深入研究的主要方向之一。

### 3.3 对本专题发展的若干建议

目前我国水电建设正处于高峰期且仍将持续一段时间。强震区高坝大库的建设对大坝抗震安全提出了严峻的挑战。大坝全级配混凝土的动态力学特性是分析大坝地震响应、判断大坝抗震安全的基础，重点需要研究下列关键问题：

#### (1) 全级配大坝混凝土材料动态直接拉伸全曲线试验研究

基于试验的材料动态直接拉伸全曲线本构关系是大坝动态损伤数值分析的基础。然而混凝土材料动态直接拉伸全过程试验对试验装置的要求非常高，试验控制与测量难度极大，能否成功取决于先进试验技术的开发。

#### (2) 混凝土静动态损伤、破坏演化规律试验研究

这两部分试验可以获得材料的静动态力学特性。大坝混凝土地震响应不仅与其静动态力学特性相关，而且与其静动态损伤演化直至破坏的规律更为密切，需要用更为先进的试验技术来实现。

声发射和 CT 技术是进行混凝土内部损伤监测研究的有效方法。从细观层次来看，混凝土内砂浆、骨料开裂、界面开裂等都是其重要的声发射源，采用声发射技术可以识别混凝土损伤破坏机制，评价混凝土的损伤积累，建立相应的损伤模型。应用 CT 技术对试件在加载过程中扫描断面成像，通过图像分析研究混凝土试件内部损伤扩展和破坏过程的发展，可以建立试件三维细观数值模型，也可识别混凝土损伤破坏机制，评价混凝土的损伤积累，建立相应的损伤模型。然而，CT 技术的分辨能力、大试件检测能力及扫描速度等因素仍制约其在大坝全级配混凝土动态试验中的有效应用。

#### (3) 基于纳观、介观、细观和宏观相结合的多尺度数值计算

全级配大坝混凝土试验成本高难度大，普遍推行还受多种条件制约。进行“数字混凝土”试验是一种有效的方法。应用多尺度数值计算工具推动大坝全级配混凝土材料动态的研究，将成为今后研究的主要方向之一。宏观与细、微观等多种尺度的结合，力学与材料科学的结合，理论分析、实验研究与数值计算的结合，研究分析与工程应用的结合是大坝全级配混凝土动态特性研究获得突破的方向。

## 参考文献

1. ACI Committee 446. Finite element analysis in concrete structures. ACI report 446.3R-97, 1998
2. Abrams D A. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete. ASTM J, 1917, 17(part II), 364-377
3. Bazant Z P, Lin P B. Non-local yield limit degradation. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1987, 26, 1805-1823
4. Bazant Z P. Non-local damage theory based on micromechanics crack interactions. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994,120, 593-617
5. Bazant Z P. Scaling of structural strength. London: Penton, 2002
6. Bazant Z P. Concrete fracture model: testing and practice. Engineering Fracture Mechanics, 2002,69:165-205
7. Bicanic N, Pearce C J, Owen DRJ. Failure predictions of concrete like materials using softening Hoffman plasticity model. Computational modeling of concrete structures, Euro-C 1994, vol.1, Swansea: Pineridge, 1994,185-198
8. Bischoff P. H. and Perry S. H., Compressive behaviour of concrete at high strain rates, Materials and Structures 1991, 24(6), 425-450
9. Bruhwiler, E. Fracture of Mass Concrete Under Simulated Seismic Action,” Dam Engineering, 1990, Vol.1(3),153-176.
10. Brühwiler E. and Wittmann F.H., Failure of dam concrete subjected to seismic loading conditions, Engineering Fracture Mechanics 1990,35(1-3),565-571
11. Brühwiler E. and Wittmann F.H., The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests, Engineering Fracture Mechanics 1990,35(1-3), 117-125
12. Budiansky B, O'Connell R J. Elastic moduli of a cracked solid. International Journal of Solids and Structures, 1976,12, 81-97
13. Burlion N, Gatuingt F etc. Compaction and tensile damage in concrete: constitutive modeling and application to dynamics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000,183, 291-308
14. Cadoni E, Labibes K etc. High-strain-rate tensile behavior of concrete. Magazine of concrete



- research, 2000, 52(5), 365-370
15. Cannon, Robert W., Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams; Appendix E, Tensile Strength of Roller Compacted Concrete, Engineer Pamphlet 1110-2-12, U.S. Army Corps of Engineers, 1995 (Sep)
  16. Drahushak-Crow, Roselle, and Dolen, Timothy P. Evaluation of Cores from Two RCC Gravity Dams, Proceedings of Roller Compacted Concrete II Conference, 1988, ASCE, New York, NY, 203-213.
  17. Dubé J F etc. Rate dependent damage model for concrete in dynamics. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 939-947
  18. Gary G, Bailly P. Behavior of quasi-brittle material at high strain rate experiment and modeling. European Journal of Mechanics, 1998, 17(3), 403-420
  19. Gebbeken N, Ruppert M. A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations. Archive of Applied Mechanics, 2000, 70, 463-478
  20. Georgin J F, Reynouard J M. Model of structures subjected to impact: concrete behavior under high strain rate. Cement and Concrete Composites, 2001, 1-13
  21. Grassl P, Lundgren K, Gylltoft K. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39, 5205-5223
  22. Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25, 869-886
  23. Harris D. W., Mohorovic C. E., and Dolen T. P., Dynamic Properties of Mass Concrete Obtained from Dam Cores, ACI Materials Journal, 2000, 97(3), 290-296
  24. Hess, John. Rapid Load Strength Testing for Three Concrete Dams, Proceedings of Association of State Dam Safety, Officials Annual Conference, 1992, 187-194.
  25. Hillerborg A, Modeer M and Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth by means of fracture mechanics and finite element. Cement and Concrete Research, 1976, 6, 773-782
  26. Hiseh S S, Ting E C, Chen W F. An elastic-fracture model for concrete. Proceeding of 3rd Engineering Mechanics, 1979, 437-440
  27. Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: 14th International Symposium

- on Ballistics, Quebec, Canada, 1993, 26-29, 591-600
28. Jefferson A D. Craft-a plastic-damage-contact model for concrete. I. Model theory and thermodynamic considerations. *International Journal of Solids and Structures*, 2003,40, 5973-5999
  29. Jerome M. Raphael, *Tensile Strength of Concrete*, ACI Journal, American Concrete Institute,1984, Vol 81 (2), 158-165
  30. Jitsu K etc. Effects of strain rate on concrete strength subjected to impact load-dynamic compressive strength test by Split Hopkinson Pressure Bar method. *International Conference on Structures Under Shock and Impact*, 1998,471-480
  31. Kuna-Ciskal H, Skrzypek J J. CDM based modeling of damage and fracture mechanisms in concrete under tension and compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004,71, 681-698
  32. Lamebert D E, Ross C A. Strain rate effects on dynamic fracture and strength. *Internal Journal of Impact Engineering*, 2000,24,985-998
  33. Leonard E Schwer, Strain rate induced strength enhancement in concrete: Much ado about nothing, 7th European LS-DYNA Conference, 2009
  34. Li Q B. Damage constitutive for high strength concrete in tri-axial cyclic compression. *International Journal of Solids and Structures*, 2002,39, 4013-4025
  35. Li Q M, Meng H. About the dynamics strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test. *International of Solids and Structures*, 2003, 40, 343-360
  36. Malvar L J and John E C. Dynamic increase factors for concrete. Twenty-Eighth DDESB Seminar Orlando, FL, August 1998
  37. Malvar L J and Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(6), 735-739
  38. Omran, M.E., Nayak, G.C., and Jain, S.C. Experimental Studies on Roller Compacted Concrete for Dams, *Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams*, 1995, 179-192.
  39. Ottosen N S. A failure criterion for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 1977,103,527-535
  40. Ragueneau F, Gatuingt F. Inelastic behavior modeling of concrete in low and high strain rate dynamics. *Computers and Structures*, 2003, 81, 1287-1299

41. RomeJI. Experimental Characterization and Micromechanical Modeling of the Dynamic Response and Failure Modes of Concrete. Ph.D.University of California at San Diego, 2002
42. Rossi P, Toutlemonde F. Effect of loading rate on the tensile behavior of concrete: description of the physical mechanisms. *Materials and Structures*, 1996, 29, 116-118
43. Schmidt M J. High pressure and high strain rate behavior of cementitious materials: Experiments and elastic/visco-plastic modeling. University of Florida, 2003
44. Soroushian P. Choi K and Kowalczak R. Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates. *ACI Journal*, 1984, 73-81
45. Tedesco J W, Ross C A. Strain-Rate-Dependent Constitutive Equation for Concrete. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1998,120, 398-405
46. Willam K J, Warnke E P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *IntAssocBridge Struct Engng Proc*, 1975,19,1-30
47. Winnicki A, Pearce C J, Bicanic N. Viscoplastic hoffman consistency model for concrete. *Computers and Structures*, 2001,79,7-19
48. U.S.Bureau of Reclamation Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams 1974(19)
49. U.S. Army Corps of Engineers, Arch dam design, EM 1110-2-2201, 2003
50. U.S. Army Corps of Engineers, Gravity dam design, EM 1110-2-2200, 1995
51. U.S. Army Corps of Engineers, Response Spectra and Seismic analysis for concrete hydraulic structures, EM 1110-2-6050, 1999
52. Yeh C H Tensile Stresses in Arch Dams 1987
53. Zhou,X,Q and H. Hao, Modelling of compressive behaviour of concrete-like material at high strain rate, *International Journal of Solid and Structures*,2008,Vol 45, 4648-4661,
54. 有賀義明, 渡邊啓行, ダムコンクリートの動的引張強度の定量的評価に関する実験的研究, *土木学会地震工学論文集*, 2003, Vol.27,
55. 畑野正, コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論, *土木学会論文集*, 第 153 号, pp31-39,1968. 5
56. 竹田仁一, 立川博之. 高速圧縮および引張を受けるコンクリートの力学的諸性質について. *日本建築学会論文報告集*, 第 66 号 1960 大会号第 1 部
57. 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型. *水利学*

报, 1997,7, 72-77

58. 陈书宇. 冲击载荷下的混凝土动态力学模型. 力学学报, 2002,34(增刊), 260-263
59. 高路彬. 混凝土变形与损伤的分析. 力学进展, 1993,23(4), 510-519
60. 郭少华. 混凝土破坏理论研究进展. 力学进展, 1993,23(4), 520-529
61. 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系. 爆炸与冲击, 2002,22(3):242-246
62. 计家荣, 高强度大体积混凝土材料特性研究, 水力发电, 1998,3: 17-20
63. 王礼立, 蒋昭镡, 陈江瑛. 材料微损伤在高速变形过程中的演化及其对率型本构关系的影响. 宁波大学学报, 1996, 9(3):47-55
64. 王礼立. 高应变率下混凝土的动态损伤和破坏研究. 中国国防科学技术报告, 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1999
65. 肖诗云等. 应变率对混凝土抗拉特性影响. 大连理工大学学报, 2001,41(6):721-724

负责人: 王海波