

附件 1:

西安理工大学

博士创新基金项目

申 请 书

项目名称: 不同温度环境中水工沥青混凝土

动态力学性能及破坏机理研究

申 请 者: 宁致远

导 师: 刘云贺 教授 王为标 教授

学科名称: 结构工程

联系电话: 177 0922 2439

起止时间: 2020.01 ~ 2022.06

入学年月: 2018.09

攻读方式: 全日制非定向博士研究生

申请日期: 2020.10

西安理工大学研究生院制

二〇一三年五月

项 目 名 称		不同温度环境中水工沥青混凝土动态力学性能及破坏机理研究				
申请项目类别 (在相应类别上画“√”)		<input type="checkbox"/> 基础研究 <input checked="" type="checkbox"/> 应用研究 <input type="checkbox"/> 开发研究				
所属学科		结构工程				
起止时间		2020.01 ~ 2022.06		申请金额		30000.00 元 (叁万元整)
项 目 申 请 人	姓 名	宁致远	性 别	男	出生年月	1989.11
	已获学位 及获学位时间		工程硕士 2015.05		专业技术职务	博士生
	入学时间		2018.09		攻读方式	全日制非定向博士研究生
	承担或参加其他科学研究基金项目及研究情况： 本人参加的国家自然科学基金项目为：“高寒区水工沥青混凝土动力特性及破坏机理研究”(51779208)。					
	本人自入学以来,集中精力、积极投身到“高寒区水工沥青混凝土动力特性及破坏机理研究”课题中。截至目前,已取得部分研究成果,研究进展具体如下： 1. 在试验研究方面,课题组已开展了水工沥青混凝土在不同温度环境中的动态抗压试验,研究了动态强度、弹性模量、峰值应变等宏观力学参数的演化规律;在理论分析方面,结合试验成果,基于时温等效原理,分别建立了动态抗压强度、弹性模量关于温度和应变率的计算模型。已公开发表论文3篇,具体有： [1] Ning Zhiyuan, Liu Yunhe, Wang Weibiao. Compressive behavior of hydraulic asphalt concrete under different temperatures and strain rates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003594 . [2] 宁致远,刘云贺,王为标,张凯. 不同温度条件下水工沥青混凝土抗压特性及防渗性能试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 527-535. [3] 宁致远,刘云贺,薛星. 不同温度条件下水工沥青混凝土动态抗压特性研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 24-34. 2. 在细观数值模拟方面,通过颗粒流离散元数值分析平台,结合沥青混凝土的实际级配特征,建立了三维随机骨料模型,开展了不同温度环境中沥青混凝土的力学性能细观离散元模拟的部分研究工作,已整理出部分研究成果。					
项 目 组 主 要 成 员	姓 名	性 别	年 龄	技术职务	主要承担工作任务	本人签字
	刘云贺	男	52	教授	试验及理论指导	刘云贺
	王为标	男	61	教授	试验及理论指导	王为标
	杨一帆	女	24	研究生	室内试验	杨一帆
	王 琦	男	24	研究生	室内试验	王琦

一、立项依据

1、研究项目的国内外概况、科学意义和应用前景

1.1 科学意义

水工沥青混凝土是由沥青、粗骨料、细骨料及填料等材料按一定比例混合而成的多相复合材料，具有适应变形能力强、防渗性能好和环境友好等优点，广泛应用于堆石坝防渗面板和心墙工程中^[1-2]。自上世纪 20 年代以来，世界上已建有 300 多座沥青混凝土面板坝和 200 多座沥青混凝土心墙坝。近年来，在相关领域的研究和工程应用也证明了沥青混凝土堆石坝是一个非常具有竞争力的坝型^[3-4]。

目前我国已建成的沥青混凝土堆石坝主要分布于以新疆为主的西部地区(图 1)。而我国西部的地震烈度和频度都相当高(图 2)，例如西藏拟建的某重要沥青混凝土心墙坝工程，设计烈度为 IX 度，100 年超越概率 2% 的设计地震峰值加速度达到了 530 gal。所以，地震工况多成为设计中的控制工况，地震作用对坝体的安全性有着巨大的影响。此外，这些重点工程多处于温度变化较大的高寒区，随着温度环境的变化，沥青混凝土材料在地震等动荷载响应下的应力水平会有很大的差别。然而，根据防渗体所处的温度环境，开展沥青混凝土动态力学性能研究，国内外的相关研究甚少，对已建和在建的沥青混凝土工程的抗震安全不由得让设计者和建设者担忧。因此，如何确保沥青混凝土工程在不同温度环境中的抗震安全性成为需要高度关注和亟待解决的科学问题。

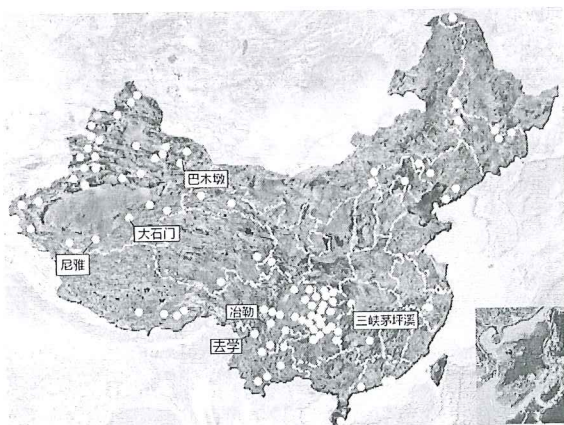


图 1 已竣工的沥青混凝土堆石坝在我国的分布



图 2 中国地震动峰值加速度区划图

基于此，针对防渗体所处的温度环境和受力特点，本课题开展沥青混凝土的动态力学性能研究，揭示其动力破坏机理，建立其静动力本构模型，是突破沥青混凝土工程在高寒、高烈度区发展亟待突破的科学问题，具有广阔的应用价值，这对推动沥青混凝土防渗工程的应用和发展具有非常重要的意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水工沥青混凝土力学性能研究进展

有关水工沥青混凝土力学性能的研究已有近百年的历史。经过国内外众多学者的努力已取得一系列的重要研究成果,对水工沥青混凝土的研究和工程应用起到积极的推动作用。

对于沥青混凝土的静力学特性研究,陕西机械学院孙振天教授比较早的开展了水工沥青混凝土静力学三轴试验研究,在试验最大围压为 1.2 MPa 的情况下,得到了水工沥青混凝土在常温条件下的应力变形特性。后续其他学者 Fischer^[5]、Höeg^[6]、王为标^[7-8]、朱晟^[9]、陈宇^[10]、张伟^[11]、田小革^[12]、李志强^[13]等也相继开展了一系列沥青混凝土力学特性研究,对工程的建设起到了很好的指导作用。

沥青混凝土的动态力学性能直接关系到土石坝防渗体的抗震安全。近年来,国内外学者对沥青混凝土的动态力学性能进行了相关研究。王庆寿等^[14]针对碧流河水库沥青混凝土心墙土石坝,采用简易的振动三轴仪,在小围压(≤ 0.3 MPa)和小轴压(≤ 0.5 MPa)条件下测定了沥青混凝土的动模量和动泊松比。余梁蜀等^[15-16]通过动三轴试验表明沥青含量是影响沥青混凝土动力特性的主要因素。王建祥等^[17]认为围压和固结比的增大有利于沥青混凝土抗动荷载能力,但会降低阻尼比。Akhtarpour 等^[18]学者通过动三轴试验表明:即使施加多达 1000 次的循环荷载,沥青混凝土的应力应变-强度特性及防渗性能也未降低。即使施加强地震所产生的剪切应力,循环荷载对其影响也非常小。伊朗学者 Feizi-Khankandi^[19-20]用土工三轴仪对沥青混凝土试件进行了动三轴试验研究,并在此基础上,开展了沥青混凝土心墙堆石坝模型试验,坝模型高 0.45 m。模型试验结果表明:沥青混凝土作为心墙材料具有优异的抗震性能,同时 Feizi-Khankandi 提出了用于伊朗北部 Garmrood 沥青心墙堆石坝进行动力分析的材料参数,然而由于土工三轴仪设备的局限性,未能揭示沥青混凝土材料的动强度特性。

近 20 多年来,西安理工大学水工沥青防渗研究所结合三峡茅坪溪、四川冶勒、去学等十多个实际工程分别采用土工三轴仪和改进的动三轴仪进行了不同工程的沥青混凝土动力性能试验,在此基础之上,王为标等^[21]系统地总结和研究了大量的动力试验成果,得到了在对数坐标上沥青混凝土的动模量与平均静压力大致呈线性关系的结论。上述研究成果主要关注沥青混凝土的循环荷载效应,而地震作用一般是循环荷载效应和应变率效应耦合作用的结果,大量工程经验表明,混凝土类结构遭受地震作用时通常在加速度

大脉冲作用下遭受破坏^[22]。近年来，国内外学者针对沥青混凝土材料应变率效应开展了相关研究。

Srinivasan 等^[23]对比研究了准静态和高应变速率作用下沥青混凝土的破坏模式，结果表明准静态作用下沥青混凝土的破坏模式主要为沥青胶浆与骨料的黏结破坏，而高应变速率作用下主要为骨料开裂和沥青胶浆与骨料的黏结破坏。王为标和 Höeg^[24]通过三轴试验表明当轴向应变速率为 $1\% \text{ min}^{-1}$ 时，沥青混合料的变形模量约为应变速率 $0.01\% \text{ min}^{-1}$ 的 2 倍；然而当应变速率小于 $0.01\% \text{ min}^{-1}$ 时，沥青混凝土变形模量没有显著变化。赵科^[25]以拉洛水利枢纽为背景，研究了应变速率对沥青混凝土应力-应变特性、强度等力学参数的影响规律。结果表明， $0.024\% \text{ min}^{-1}$ 和 $0.12\% \text{ min}^{-1}$ 条件下沥青混凝土的抗压强度约为 $0.6\% \text{ min}^{-1}$ 条件下的 50% 和 70% 左右。宁致远等^[26]对沥青混凝土材料在地震响应下的应变率效应进行了试验研究，研究了 $10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下沥青混凝土的应力-应变全曲线特征、动态抗压强度、弹性模量、吸能能力等力学性能的变化规律，建立了强度和弹性模量与应变率的数学关系。Nakumara^[27]针对沥青混凝土面板在地震作用下主要经受的是动拉应变的特点，研究了沥青混凝土在不同应变速率条件下的动拉应变性能，研究表明动应变速率对沥青混凝土的动拉应变破坏有显著影响。Fang 等^[28]结合日本最大规模全库铺设的沥青混凝土面板水库，开展了大量的沥青混凝土室内试验，提出了以动拉应变作为极限破坏状态的设计方法。王为标等^[29]自主研发了变速斜剪仪，对沥青混凝土进行了不同应变速率($10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)和剪切角度(45° 和 60°)的斜剪试验，研究了剪切强度、剪切模量、破坏应变、内摩擦角、粘聚力等力学参数的演化规律，对比了不同荷载条件下沥青混凝土的剪切模量和剪切强度，建立了剪切模量、剪切强度和粘聚力关于应变速率的数学关系。

纵观国内外研究现状，以往关于沥青混凝土动态特性的研究主要是结合某一具体工程或特定温度区间条件进行的，缺乏全方位温度区间的试验研究和系统性的理论研究；对沥青混凝土动态抗压性能研究较多，对动态拉伸性能研究较少；对单一应力状态下的动态性能研究较多，对复合应力状态下的动态性能研究较少。

1.2.2 沥青混凝土材料研究方法进展

混凝土是由胶凝材料、骨料、填料、孔隙等组成的多相非均匀复合材料，其内部结构具有多尺度性^[30]。Wittmann 等^[31]首次从微观、细观和宏观三个尺度研究了混凝土材料的力学特性，认为混凝土材料在某一尺度下的力学特性可借助于低一层尺度下的结构特

征加以解释说明。因此，混凝土类材料的宏观破坏机理可借助细观力学的方法加以研究和验证。

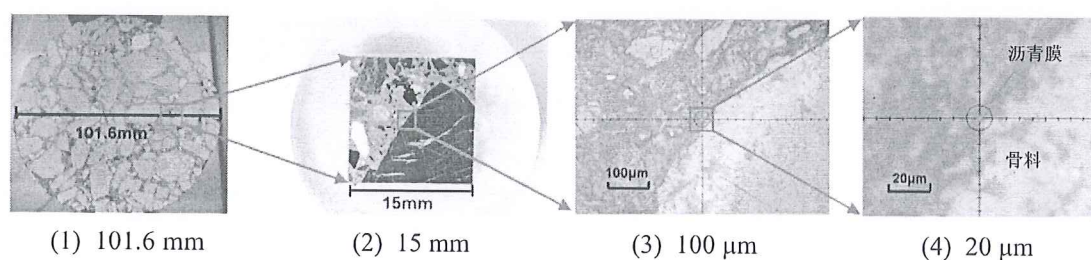


图3 不同尺度下沥青混凝土断面成像特征^[32]

开展混凝土等岩土材料细观尺度的力学试验研究，目前大家公认的较为有效的方法是利用基于 X 射线的 CT 技术对试件各断面进行扫描成像，研究试件在受载后的内部结构特征以及实时监测细观裂纹从萌发、出现、扩展到贯通的演化全过程。早在 20 世纪 80 年代，Morgan 等^[33]首次采用医用 CT 机器对混凝土进行了 CT 扫描，捕获了骨料、砂浆以及裂纹的断面图像。然而，限于成像设备等多方面的限制，导致 CT 图像的精度还不是很很高，细观微裂纹的识别技术还有待进一步提高。Wittmann^[34]将混凝土当作非均质材料，从细观层次上研究了混凝土结构的损伤力学特性和裂缝扩展过程。Oral 等^[35]通过热红外线法、CT 成像法、微波法和声发射法分别研究了混凝土的内部结构特征，认为基于 X 射线的 CT 技术是研究混凝土内部结构特征较为有效的方法。John^[36]、Lawer^[37]等分别采用数字关联技术和 CT 技术研究了混凝土表面破裂特征和内部裂纹演化特征，认为数字关联技术适合于观察混凝土表面微小裂纹，而基于 X 射线的 CT 技术描述混凝土内部裂纹更为有效。此外，他们还进一步讨论了裂纹形状对混凝土强度和韧性的影响。

国内的研究也较活跃，葛修润^[38-39]、任建喜^[40-41]等在三轴压缩条件下采用 CT 扫描首次实现了岩石细观裂纹从萌生、扩展到贯通的全过程，并实现了由 CT 图像重建裂纹扩展的三维图像。杨更社等^[42-43]研究了 CT 图像中 CT 数的分布规律，推导了岩石损伤密度和 CT 数的定量关系，并建立了 CT 数分布的数学模型。丁卫华等^[44]基于医用 CT 机器，成功研制了类岩石材料 CT 动载试验装置，重点讨论了试验过程中试件的黏结、对中、装样等关键技术问题，实现了混凝土动态拉压加载及卸载过程中裂纹演化过程的准实时监测。此外，他们对岩石的损伤演化进行了阶段划分，提出了密度损伤增量的概念，建立了密度损伤增量与体应变的数学关系^[45]。陈厚群^[46]、党发宁^[47]等运用 CT 仪器对单轴压缩条件下混凝土的细观破裂过程进行了实时扫描观测，获得了混凝土内部 CT 尺度裂纹开裂、扩展、贯通的全过程演化特征。田威等^[48]运用 CT 扫描和 3D 打印技术重构了与天然砂岩

试样结构相接近的 3D 打印试样,通过单轴压缩和劈裂试验对比研究了两种试样的强度和变形规律,结果表明 3D 打印试样能高度还原天然砂岩试样的内部复杂结构,为研究岩土类材料的内部结构和细观数值模拟结果的印证提供了一种新的研究途径。朱琳等^[49]开展了混凝土 CT 试验研究,基于灰度共生矩阵理论研究了混凝土细观损伤演化过程,可以确定试件的最大损伤断面,进而预测试件的断裂位置。此外,他们还建立了混凝土的细观损伤变量表达式,用于定量表征试件的细观损伤。郭乃胜等^[50]通过 CT 扫描识别道路沥青混合料试件的内部结构特征,并用粗集料、沥青砂浆和空隙各组分的密度和面积为主要特征参数,提出了沥青混凝土试件的均匀性评价指标,建立了一种评价沥青混凝土均匀性的方法。

总的说来,基于 CT 技术扫描室内试件断面成像,目前在实时监测、加载方式、裂纹演化、测量及模型三维重构等方面取得了一系列进展,为岩土材料在细观尺度的研究做出了一定贡献。此外,岩土类材料在细观层次的破坏机理研究除了通过 CT 试验研究,还需要通过理论分析和微细观数值计算加以扩展。

随着计算机技术的迅猛发展,目前细观力学的研究已在岩石、混凝土、堆石体等岩土材料领域得到了较为广泛的应用。秦川和张楚汉^[51]基于颗粒离散元方法建立了混凝土细观力学模型,阐明了混凝土动态强度提高的主要原因。武明鑫等^[52]采用试验和细观数值分析相结合的方法,认为混凝土受拉断面的受力不均匀是弯拉强度高于直拉和劈拉强度的原因。金浏^[53]提出了一种具有高计算效率的细观单元等效模型与方法,并结合扩展有限元法,实现了混凝土三维静态拉伸断裂过程的模拟。周伟等^[54]基于连续-离散耦合分析方法^[55]建立了堆石料随机颗粒不连续变形模型,该模型能够反映堆石体的复杂形状和破碎行为。

目前岩石、混凝土以及道路沥青混凝土等岩土材料在细观层次方面的创新、成功的经验与方法,对水工沥青混凝土细观层次的研究具有极高的借鉴价值,也为本课题采用宏细观相结合的方法开展水工沥青混凝土的动力特性及破坏机理研究,提供了切实可行的研究方法。

高寒、高烈度等复杂条件对沥青混凝土在不同温度环境中的抗震安全性提出了新的挑战。本项目拟以沥青混凝土的动力特性为研究主线,结合沥青混凝土材料所处的温度环境和受力特点,系统地研究沥青混凝土在全温度变化区间的静动态力学性能,构建其静动力本构模型,结合宏观损伤破坏特征,揭示其细观破坏机理。研究成果将为沥青混凝土防渗体工程在高寒、高烈度区以及高坝中的应用和发展提供理论支持和技术支撑。

参考文献

- [1] 郝巨涛. 国内沥青混凝土防渗技术发展中的重要问题[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1213-1219.
- [2] 郝巨涛, 刘增宏, 汪正兴. 我国沥青混凝土防渗工程技术的发展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 115-125.
- [3] 饶锡保, 程展林, 谭凡. 碾压式沥青混凝土心墙工程特性研究现状与对策[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 51-57.
- [4] ICOLD. 1992. Bituminous cores for fill dams. Bulletin 84. International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.
- [5] Fischer H R , Dillingh E C , Hermse C G M . On the interfacial interaction between bituminous binders and mineral surfaces as present in asphalt mixtures[J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 495-499.
- [6] Kaare Höeg, Valstad T , Kjaernsli. Asphalt core embankment dams: recent case studies and research[J]. Hydropower and dam, 2007, 13(5): 112-119.
- [7] Wang Weibiao. Research on the suitability of asphalt concrete as water barrier in dams and dikes[D]. University of Oslo, Oslo, Norway, 2008.
- [8] 王为标, 孙振天, 吴利言. 沥青混凝土应力-应变特性研究[J]. 水利学报, 1996, 5: 1-8.
- [9] 朱晟. 沥青混凝土心墙堆石坝三维地震反应分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2933-2938.
- [10] 陈宇, 姜彤, 黄志全, 等. 温度对沥青混凝土力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 92-96.
- [11] 张伟, 黄斌, 张本蛟. 水工室温沥青混凝土工程特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 27-33.
- [12] 田小草, 韩海峰, 李新伟. 不同加载模式下沥青混凝土的断裂特性[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 758-761.
- [13] 李志强, 张鸿儒, 侯永峰等. 土石坝沥青混凝土心墙三轴力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 997-1002.
- [14] 王庆寿, 郭威勤, 王儒贤. 沥青混凝土动变形模量和动泊松比的测定及其影响因素的研究[J]. 硅酸盐建筑制品, 1989(1): 9-16.
- [15] 余梁蜀, 晋晓海, 丁治平. 心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 194-198.
- [16] 余梁蜀, 许庆余, 王文进, 等. 沥青混凝土低温性能试验和工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 34-39.
- [17] 王建祥, 唐新军, 何建新, 等. 考虑多因素的浇筑式沥青混凝土动力特性研究[J]. 材料导报, 2018, 32(12): 2085-2090.
- [18] Ali Akhtarpour, Ali Khodaii. Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 319-334.
- [19] Siamak Feizi-Khankandi, AA Mirghasemi, A Ghalandarzadeh, et al. Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(3): 319-332.
- [20] Feizi-Khankandi, AA Mirghasemi, A Ghalandarzadeh, et al. Seismic analysis of the Garmrood embankment dam with asphaltic concrete core[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(2): 153-166.
- [21] Wang Weibiao, Kaare Höeg. Cyclic behavior of asphalt concrete used as impervious core in embankment dam[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 2011, 137(5): 536-544.
- [22] 杜修力, 王阳, 路德春. 混凝土材料的非线性单轴动态强度准则[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 300-309.
- [23] Srinivasan Arjun Tekalur, Arun Shukla, Martin Sadd, et al. Mechanical characterization of a bituminous mix under quasi-static and high-strain rate loading[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 1795-1802.
- [24] Weibiao Wang, Kaare Höeg. Simplified material model for analysis of asphalt core in embankment dams [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 199-207.
- [25] 赵科. 水工沥青混凝土力学性能试验研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2014.
- [26] 宁致远, 刘云贺, 薛星. 不同温度条件下水工沥青混凝土动态抗压特性研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 24-34.
- [27] Y. Nakamura. Improvement of impervious asphalt mixture for high ductility against earthquake excitation[C]. // Proceedings of 4th International Conference Dam Engineering, China. 2004: 647-656.
- [28] Fang Huolang, Tashiro Yukihide, Oouchi Makoto, et al. Aseismic design of reservoir faced wholly with asphalt concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1550-1562.

- [29] Wang Weibiao, Hu Kai, Feng Shan, et al. Shear behavior of hydraulic asphalt concrete at different temperatures and strain rates[J]. Construction and Building Material, 2020, 230: 117022-117021.
- [30] Liu Hankun, Ren Xiaodan, Li Jie. Indentation tests based multi-scale random media modeling of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 209-220.
- [31] Wittmann F H , Roelfstra P E , Sadouki H. Simulation and analysis of composite structures[J]. Material Science and Engineering, 1985, 68(2): 239-248.
- [32] Zhu Xingyi, Ying Yuan, Li Lihan, et al. Identification of interfacial transition zone in asphalt concrete based on nano-scale metrology techniques[J]. Materials and Design, 2017, 129: 91-102.
- [33] Morgan I L, Ellinger H, Klinksiek R, et al. Examination of concrete by computerized tomography [J]. ACI Material Journal, 1980, 77(1): 23-27.
- [34] Wittmann F H. Structure and Mechanical Properties of Concrete[J]. [日]东北大学建筑学报. 第22号, 1983, 22(3): 93~111.
- [35] Buyukozturk. Imaging of concrete structures [J]. NDT&E. International, 1998, 31(4): 233-243.
- [36] John S L , Denis T. K. , Surendra P. S. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 465-475.
- [37] Lawer J S , Keane D. , Shah S. P. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 465-475.
- [38] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬. 岩土损伤力学宏观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [39] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩石工程学报, 2001, 23(2): 191-195.
- [40] 任建喜, 葛修润. 岩石单轴细观损伤演化特性的 CT 实时分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 99-104.
- [41] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425-431.
- [42] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250-254.
- [43] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-285.
- [44] 丁卫华, 陈厚群, 尹小涛, 等. 类岩石材料 CT 动载试验装置的关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 20-28.
- [45] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 基于 X 射线的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1793-1797.
- [46] 陈厚群, 丁卫华, 蒲毅彬, 等. 单轴压缩条件下混凝土细观破裂过程的 X 射线 CT 实时观测[J]. 水利学报, 2006(9): 1044-1050.
- [47] 党发宁, 田威, 韩文涛, 等. 基于细观损伤的混凝土破裂过程的三维数值模拟与 CT 试验验证[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 674-680.
- [48] Tian Wei, Han Nv. Preliminary research on mechanical properties of 3D printed rock structures [J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, 40(3): 483-493.
- [49] 朱琳, 党发宁, 丁卫华, 等. 基于 CT 技术和灰度共生矩阵理论研究不同荷载作用下混凝土的细观损伤演化过程[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 97-107.
- [50] 郭乃胜, 尤占平, 谭忆秋, 等. 基于 CT 技术的沥青混合料均匀性评价方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 1-9+55.
- [51] 秦川, 张楚汉. 基于细观力学的混凝土劈拉破坏率相关特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3771-3777+3783.
- [52] Wu Mingxin, Chen Zhenfu, Zhang Chuhan. Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: I. drop-weight tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 135(2): 94-112.
- [53] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[M]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [54] Ma G , Zhou W , Chang X L, et al. Combined FEM/DEM Modeling of Triaxial Compression Tests for Rockfills with Polyhedral Particles[J]. International Journal of Geo-mechanics, 2014, 14(4): 401-414.
- [55] Munjiza, Owen A, Bicanic D , et al. A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids[J]. Engineering Computations, 2013, 12: 145-174.

2、主要研究内容

本课题主要开展以下三个方面的研究工作：

(1) 不同温度环境中水工沥青混凝土动态抗拉、抗压性能试验研究

以寒区沥青混凝土防渗面板所在地的年平均气温为参考，在已有的 MTS 力学试验平台，研发可温控的动态拉、压试验装置，开展沥青混凝土动态抗拉、抗压力学性能试验，研究不同温度和应变速率条件下沥青混凝土动态强度、弹性模量、破坏应变等宏观力学参数的演化规律；考虑温度和应变速率共同作用，采用多元回归分析的方法，基于时温等效原理，建立沥青混凝土动态强度、弹性模量和破坏应变的计算模型。

(2) 不同温度环境中水工沥青混凝土破坏机理及静动力本构模型研究

研究沥青混凝土粘聚力、内摩擦角等强度参数的演化规律，借助电镜扫描和声发射特性测试技术，对比研究不同温度和应变速率下沥青混凝土的宏细观损伤破坏形态，揭示沥青混凝土在不同温度环境中的动态破坏机理。研究不同温度和应变速率条件下沥青混凝土应力-应变全曲线特征，基于弹塑性力学、粘弹性力学及损伤力学理论，构建沥青混凝土静动力本构模型。

(3) 不同温度环境中水工沥青混凝土动态特性细观离散元模拟

根据沥青混凝土的实际级配特征，基于颗粒流离散元数值平台，建立三维球形随机骨料细观模型，在与宏观试验结果验证的基础上，研究不同温度和应变速率条件下沥青混凝土内部剪切带、接触力链及平均接触数的演化规律；考虑细观接触参数的非均质性，对粘结半径、粘结强度和粘结刚度进行参数敏感性分析，建立沥青混凝土宏-细观力学参数之间的内在关联，揭示沥青砂浆与骨料相互作用的力学机制。建立沥青混凝土空心圆柱体数值试样，研究动剪-扭复合应力作用下沥青混凝土内部颗粒的细观力学响应，突破复杂应力状态下沥青混凝土动态破坏机理的研究瓶颈。

3、研究特色和创新点

本课题对不同温度环境中的水工沥青混凝土动态力学性能及破坏机理进行深入研究，其特色与创新之处如下：

(1) 结合沥青混凝土的成型特点，研发成型模具和拉伸连接夹具，开展不同温度环境中沥青混凝土的动态抗拉试验研究。

(2) 考虑温度和应变速率共同作用，建立沥青混凝土强度、弹性模量的计算模型以及静动力本构模型。

(3) 根据沥青混凝土的实际级配特征，建立三维球形随机骨料细观模型，研究粘结半径、粘结强度、粘结刚度等细观接触参数的非均质性对宏观力学性能的影响，建立宏-细观力学参数之间的内在关联。

二、研究方法和技术路线

1、拟采取的研究方法和技术路线

本课题拟采用试验研究、理论分析和细观数值模拟相结合的方法,系统地进行不同温度环境中水工沥青混凝土的动态力学性能及破坏机理研究,为沥青混凝土在高寒、高烈度区的应用和发展提供理论基础和技术支持。技术路线如图4所示。

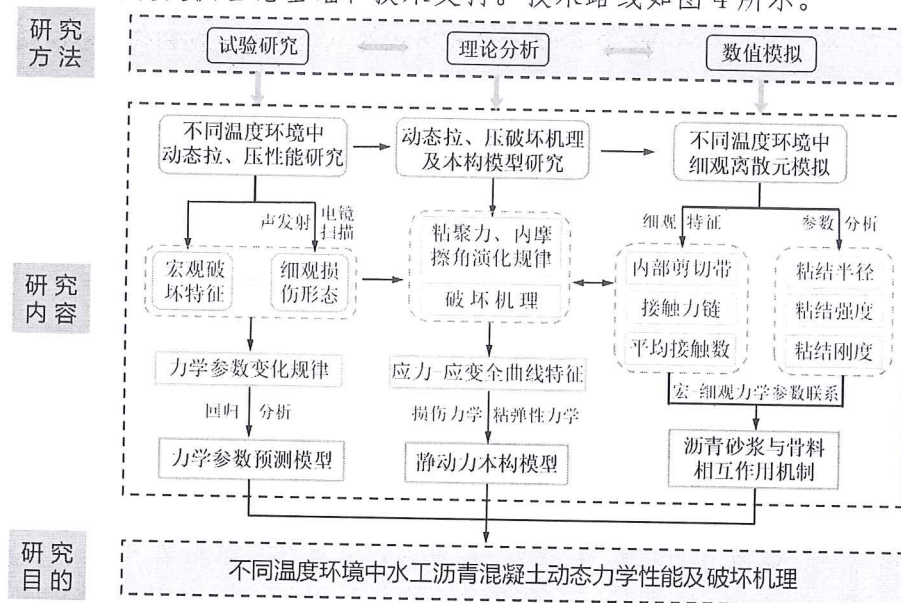


图4 技术路线图

(1) 水工沥青混凝土试件配合比

考虑到不同配合比制备的沥青混凝土试件,其力学性能具有较大的差异性。为了使研究与实际工程具有可比性,本课题采用的配合比与在建的沥青混凝土防渗体工程保持一致。

(2) 不同温度环境中水工沥青混凝土动态抗拉、抗压试验研究

①以寒区防渗体面板所在地的全年平均气温变化范围为参考,拟选取的试验温度范围为 $-30^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,每级试验温差为 10°C 。根据地震作用下混凝土类材料响应的应变速率范围,拟采取的应变速率分别为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-2} s^{-1} 。试验装置采用高低温环境箱和MTS静动态试验机(图5),为确保各试验温度条件下沥青混凝土试件的力学性能稳定,根据《水工沥青混凝土试验规程》要求,将每组试件在高低温环境箱中恒温24 h,而后控制MTS静动态试验机进行动态抗拉、抗压试验。

②获取不同温度和应变速率条件下沥青混凝土动态抗拉强度、抗压强度、弹性模量、破坏应变、吸能能力等宏观力学参数的演化规律,研究温度影响因子和动态增强因子分别关于温度和应变速率的变化规律,基于时间-温度叠加原理,考虑温度和应变速率的共

同作用,采用多元回归分析的方法,建立动态强度、弹性模量、破坏应变等宏观力学参数的计算模型。

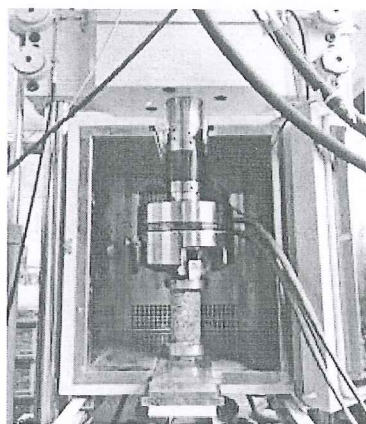


图5 动态拉压试验装置

(3) 不同温度环境中水工沥青混凝土动态拉压破坏机理及本构模型研究

①在动态拉、压试验基础上,研究沥青混凝土粘聚力、内摩擦角等强度参数随温度和应变速率变化的规律,通过声发射特性测试技术,对比研究不同温度和应变速率下沥青混凝土的宏细观损伤破坏特征。

②对试件破坏后的表面颗粒裂纹形态进行分析,通过电镜扫描试验,拟采取的放大倍数为1000、5000及10000倍,研究沥青砂浆、沥青膜及骨料的形态特征,揭示沥青混凝土在不同温度环境中的动态破坏机理。

③研究不同温度和应变速率条件下沥青混凝土应力-应变全曲线特征,基于弹塑性力学和粘弹性力学理论,建立塑性应变随温度变化的经验公式;基于损伤力学理论和声发射测试结果,探明沥青混凝土在不同温度和应变速率下的损伤演化特性,最终构建沥青混凝土粘弹塑性损伤的静动力本构模型。

(4) 不同温度环境中水工沥青混凝土动态特性细观离散元模拟

①通过颗粒流离散元数值计算平台,根据沥青混凝土实际级配特征,建立三维球形随机骨料模型(图6)。

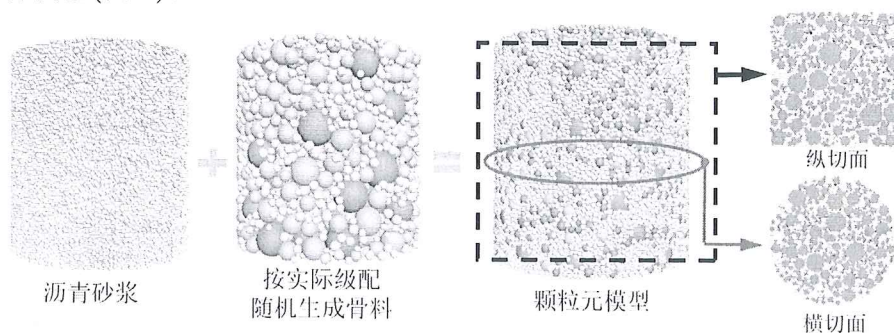


图6 沥青混凝土三维球形随机骨料离散元模型

②根据沥青混凝土宏观动态拉、压试验结果，采用参数反演分析方法，对细观接触本构模型参数进行标定，研究不同温度和应变速率条件下沥青混凝土内部裂隙从萌发、扩展到贯通的全过程演化特征，分析内部剪切带、接触力链和平均接触数等细观结构特征的演化规律。

③在②的基础上，进行细观接触参数敏感性分析，考虑沥青砂浆和骨料细观接触的非均匀性，假定各组分的粘结半径、粘结强度和粘结刚度等细观接触参数符合韦伯分布或对数正态分布，研究细观接触参数的非均质性对内部粘结力、宏观抗剪强度、内部剪切带、接触力链和平均接触数的影响规律，建立沥青混凝土宏-细观力学参数之间的内在关联。

④在②和③的基础上，建立沥青混凝土空心圆柱体数值试样，研究动剪-扭复合应力作用下沥青混凝土内部的组构变化、内部粘结力等细观力学响应，揭示动剪-扭复杂应力作用下沥青混凝土的动态破坏机理，突破复杂应力状态下沥青混凝土动态破坏机理的研究瓶颈。

2、研究工作进度安排

(1) 2020 年 07 月~2020 年 12 月

整理不同温度环境中水工沥青混凝土动态抗压特性试验成果，研究沥青混凝土的动态抗压等宏观力学参数的变化规律，建立动态强度、弹性模量和破坏应变关于温度和应变速率的计算模型。预期发表论文 1 篇。

(2) 2021 年 01 月~2021 年 06 月

根据沥青混凝土的成型特点，研发成型模具和受拉夹具，在已有的 MTS 力学试验平台的基础上，研发可温控的动态受拉试验装置，结合声发射测试技术，开展不同温度环境中水工沥青混凝土动态抗拉及宏细观破坏形态试验研究，整理相关试验成果。预期发表论文 1 篇。

(3) 2021 年 07 月~2021 年 12 月

研究不同温度和应变速率条件水工沥青混凝土的细观损伤破坏形态及破坏机理，构建静动力本构模型根据沥青混凝土实际级配特征，建立三维球形随机骨料模型，研究沥青混凝土的动态细观力学响应。预期发表论文 1~2 篇。

(4) 2022 年 01 月~2021 年 06 月

研究粘结半径、粘结刚度等细观接触参数的非均质性对沥青混凝土宏观力学性能的影响，建立宏-细观力学参数之间的联系。整理所有研究成果，撰写结题报告，完成课题结题工作。

三、预期成果及应用前景

1、预期成果形式与数量

- (1) 提交研究结题报告 1 份
- (2) 发表高水平论文 3~4 篇，其中 SCI/EI 论文 2 篇以上。

2、应用前景

水工沥青混凝土是由矿料、沥青等按一定比例组合的复合材料，具有较好的防渗性能，适应变形能力强，非常适宜作为大坝的防渗体。自上世纪 20 年代以来，世界上已建有 300 多座沥青面板坝工程，其中 130 多座为沥青混凝土心墙土石坝。从国内外的应用来看，水工沥青混凝土已在百米级低坝中取得了非常成功的应用。随着我国水电事业的高速发展，沥青混凝土堆石坝亟待向 200m 级突破。因此，沥青混凝土在高坝中的应用和发展是国内外学者关注的前沿热点。

我国西部地区水资源开发利用是经济社会发展稳定的重要保障，水库大坝的修建是水资源开发利用的主要工程措施。在我国西部地区建设水库大坝常面临软弱地基、陡岸坡和深厚覆盖层等恶劣地质条件，而沥青混凝土堆石坝因其具有较大变形的优势成为理想的坝型。然而，我国西部地震的烈度和海拔都相当高，地震工况多成为设计中必要的控制工况，在高海拔地区温度的变化对沥青混凝土力学性能的影响显著。因此，明确沥青混凝土在全温度变化区间的动力特性是沥青混凝土堆石坝在高寒、高烈度区广泛应用的关键科学问题。

综上所述，开展沥青混凝土在全温度变化区间的静动力特性研究，准确地获取沥青混凝土材料的强度及变形参数，精准地预测防渗体结构的应力与变形，对沥青混凝土堆石坝在 200 m 级高坝和高寒、高烈度区的应用和发展提供理论依据和技术参考。


四、经费预算

1、项目经费预算			
序号	支出科目	金额 (元)	预算依据及理由
1	材料费	6000	试验所需的沥青、填料、导线、应变片等材料
2	试件加工费	3000	试件成型、切割等
3	测试费	4000	试验扫描、成像等
4	差旅费	4000	调研、考察 2000*2 次
5	会议费	3000	国内会议 2 次
6	文献打印/出版费	4000	文章版面费、资料打印、装订等
7	劳务费	6000	研究生劳务 500*12 个月
合 计		30000.00 元 (叁万元整)	

五、指导教师意见：

(对项目可行性及拟取得成果提出明确意见)

本项目研究团队搭配合理，前期调研充分，研究目标明确，研究内容和研究方案切实可行，预期将在沥青混凝土动态力学性能研究方面取得创新性成果。

指导教师签字： 

2020年 9 月 28 日

六、同行专家推荐意见：
(另附)

七、学院学位委员会评审意见：

同意申请!

主席签字：黄发宁 舒
2020年9月30日

八、研究生院意见：

签章：

年 月 日