

清华大学优秀博士学位论文丛书



混凝土动力冲击性能试验 与细观数值仿真研究

武明鑫 著 Wu Mingxin

Study on Dynamic Impact Behavior
of Concrete Through Experimental Tests
and Meso-scale Simulation

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

混凝土动力冲击性能试验 与细观数值仿真研究

武明鑫 著 Wu Mingxin

Study on Dynamic Impact Behavior
of Concrete Through Experimental Tests
and Meso-scale Simulation



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本文基于细观颗粒元数值模型和动力试验相结合的方法,分析了混凝土直拉、劈拉、弯拉强度等性能;建立了落锤-结构全系统仿真模型,对混凝土梁落锤冲击试验进行仿真分析提出了颗粒元能量模式与传统断裂能的转换关系;基于颗粒元-有限差耦合方法进行了无黏结预应力混凝土梁冲击试验仿真,论证了钢筋-混凝土类复合材料的动力特性与破坏机理。

本书适合高校和科研院所水利、土木建筑、力学、材料等专业的师生阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

混凝土动力冲击性能试验与细观数值仿真研究/武明鑫著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-47398-5

I. ①混… II. ①武… III. ①混凝土—力学性能试验—研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 125176 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:董 瑾

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9.25 字 数:155 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

产品编号:071577-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,更要看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月5日

序

混凝土材料动力本构关系的正确选取,是高坝抗震设计的关键问题之一。国内外开展的大量的试验研究表明,混凝土动力与静力破坏机制显著不同,具有明显的率相关效应,但是基于材料均匀假设的宏观模型只能做到近似描述其破坏规律,难以解释其力学机理。根据现代材料科学的基本理论,一种材料的性能与其组成、结构之间存在紧密的内在联系,充分掌握和分析其微细观组分以及排列结构是深入了解材料物理力学性能及其破坏机理的关键。混凝土作为一种典型非均质复合人工材料,其宏观层次上复杂的变形力学响应是其细观乃至微观组成与结构的体现。因此,只有深入分析混凝土材料在不同层次的组成和排列结构的作用与内在联系,从整体到局部,从宏观到微观,才能更清楚地把握混凝土材料的变形力学性能。

迄今有关混凝土基础变形力学行为的研究,国内外已有长足的进展,逐渐突破了传统经典本构理论和宏观研究方法的束缚,从早期的视混凝土为线弹性和黏弹性介质的研究,发展为按弹塑性或黏弹塑性介质考虑;从唯象理论模型发展到将混凝土视为黏结颗粒介质或富含缺陷的多相非均质材料;由细观组构出发的静态、准静态行为研究逐渐发展到考虑循环荷载效应以及率相关效应的高速动态行为研究。现有的混凝土细观力学研究,丰富和提升了对该类材料的宏观变形力学响应和细观组构发展演化之间关联属性的认识,多相、非均质、细观组分的结构性、多场耦合与动力响应等正在或即将成为该类研究的前沿热点。

武明鑫博士采用细观颗粒元仿真和宏观动力试验相结合的方法,对混凝土动力特性和破坏机理进行了系统研究,取得了丰富的科研成果,构成了本书的主要内容。主要创新有:

1. 系统地完成了混凝土梁的落锤冲击动力性能试验,创造性地完成了无黏结预应力钢筋混凝土梁动力冲击性能试验。以上两项试验内容丰富,试验工作量巨大,测试精度与重复性优良,因而得到了一系列关于混凝土梁动力性能的规律性认识,其中关于梁的惯性力、变形力、断裂能的试验分析

与转换具有创新性。关于混凝土梁裂纹扩展规律与预应力钢筋变形的相互作用的结果具有独特的创新意义；

2. 创造性地建立了包括冲击落锤-混凝土梁的全系统仿真的细观颗粒元模型,使试验结果与仿真结果吻合,从而验证了仿真模型的合理性与应用前景;在预应力钢筋混凝土梁方面,又提出了一个颗粒元-有限差的耦合模型,使这一连续与非连续耦合模型应用于钢筋的塑性屈服与混凝土的断裂破坏过程分析,并取得了基本成果。预计该模型应用前景广阔;

3. 在混凝土梁(结构)的初始静载对动态断裂强度的影响方面,采用细观颗粒元模型,合理地解释了其动力强度随初始静载水平而变化的机理;从能量分析与细观的角度阐明了预静载的作用、率相关效应、混凝土破坏机理等。

混凝土材料在外部复杂荷载和环境作用下,其内部缺陷的发展和演化规律及其导致的渐进破损和最终破坏全过程是一个极其复杂、富有挑战性的研究课题,当前仍有许多问题有待进一步研究。作为本书作者的博士论文导师,我认为本书所涉及的研究课题具有重要的理论意义及工程应用价值,其创新成果也得到了国内外相关学者的认可。本书在写作上概念表述清晰,基本问题明确,它的出版将有助于促进相关学科的建设 and 学术交流。

张楚汉

清华大学水利水电工程系

2016年10月

前 言

混凝土材料受到地震或冲击等动力荷载作用时,其动态力学行为与静力状态下有着完全不同的破坏过程和耗能机制。国内外学者对混凝土动力性能的研究已经进行了几十年,取得了丰富的研究成果,但主要的研究工作仍集中于宏观规律的试验与分析方面,对其动态损伤断裂过程和机理的研究仍然不足。基于材料均匀性假设的宏观模型仅能做到近似描述混凝土动力破坏规律,难以解释其力学机理。因此,发展细观动力模型,采用细观数值模拟和宏观动力试验方法相结合的方式,对混凝土动力特性进行系统研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书主要由作者在清华大学水利水电工程系攻读博士学位期间完成的科学研究成果组成,为促进相关学科的学术交流,特整理出版。本书包含的主要研究工作和创新成果有:

1. 基于细观颗粒元模型,对混凝土直拉、劈拉、弯拉强度试验进行仿真,数值结果和试验中静动力抗拉强度符合良好。三种抗拉强度关系符合现行统计经验公式,验证了仿真模型的有效性。

2. 建立了稳定可靠的混凝土落锤冲击试验测试系统,通过改变重锤质量、下落高度和锤头材料完成了不同加载速率的冲击试验,对试验中混凝土梁的承载力、动态位移、应变、断裂过程、动量-冲量平衡关系、惯性力和断裂能等动力特性进行了测量和分析。

3. 基于细观颗粒元建立了落锤-结构全系统仿真模型,对冲击试验进行全过程模拟,研究了系统能量的转化过程,并提出颗粒元能量模式与传统断裂能的转换关系。细观数值方法与试验的相互验证揭示了混凝土动力冲击性能与破坏机理。

4. 设计了无黏结预应力混凝土梁冲击试验,对钢筋屈服-混凝土断裂的非线性相互作用过程进行系统分析,证明预应力钢筋限制了混凝土的变

形和裂纹扩展,钢筋的屈服程度决定了混凝土的裂纹扩展程度和多次冲击的剩余承载力。

5. 基于颗粒元-有限差耦合方法,建立了无黏结预应力混凝土梁冲击试验仿真模型,其中混凝土颗粒单元和钢筋杆单元在锚固点交互作用,对混凝土损伤断裂和钢筋屈服的破坏过程进行模拟,并与试验结果进行比较。研究表明,颗粒元-有限差耦合模型适用于钢筋-混凝土类复合材料的动力特性与破坏机理研究。

6. 基于颗粒元模型对混凝土进行了动力弯曲模拟,解释了初始静载影响的力学机理。通过对力链、裂纹发展和能量过程进行分析,揭示当初始静载水平处于静力线弹性阶段时,混凝土动力强度随初始静载增加,初始静载处于静力线弹性极限时,动力强度最大;而当初始静载处于静力的损伤软化阶段时,初始裂纹的产生使结构产生损伤,混凝土动力强度下降。

衷心感谢导师张楚汉教授以创新的学术理念和前瞻的科学视角对作者学术研究工作进行的指导。在南华大学进行试验研究期间,承蒙陈振富教授、郭长青教授、李韬等同学的帮助;清华大学张泂同学在第6章数值仿真中提供了有益支持;本课题获得国家自然科学基金(51479098)资助,在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平与学识有限,书中错误与不足之处在所难免,诚恳地欢迎来自广大读者的批评指正。

摘 要

混凝土在动力荷载作用下,其本构关系与破坏性能显示出明显的与加载速率相关的特征,同时动力强度随应变率的增加而增加,即率相关效应。本文基于细观颗粒元数值模型和动力试验相结合的方法,对混凝土动力冲击性能进行分析和研究。论文的主要研究工作和创新成果有:

1. 基于细观颗粒元模型,对混凝土直拉、劈拉、弯拉强度试验进行仿真,数值结果和试验中静动力抗拉强度符合良好。三种抗拉强度关系符合现行统计经验公式,验证了仿真模型的有效性。

2. 建立了稳定可靠的混凝土落锤冲击试验测试系统,通过改变重锤质量、下落高度和锤头材料完成了不同加载速率的冲击试验,对试验中混凝土梁的承载力、动态位移、应变、断裂过程、动量-冲量平衡关系、惯性力和断裂能等动力特性进行了测量和分析。

3. 基于细观颗粒元建立了落锤-结构全系统仿真模型,对冲击试验进行全过程模拟,研究了系统能量的转化过程,并提出颗粒元能量模式与传统断裂能的转换关系。细观数值方法与试验的相互验证揭示了混凝土动力冲击性能与破坏机理。

4. 设计了无黏结预应力混凝土梁冲击试验,对钢筋屈服-混凝土断裂的非线性相互作用过程进行系统分析,证明预应力钢筋限制了混凝土的变形和裂纹扩展,钢筋的屈服程度决定了混凝土的裂纹扩展程度和多次冲击的剩余承载力。

5. 基于颗粒元-有限差耦合方法,建立了无黏结预应力混凝土梁冲击试验仿真模型,其中混凝土颗粒单元和钢筋杆单元在锚固点交互作用,对混凝土损伤断裂和钢筋屈服的动力破坏过程进行模拟,并与试验结果进行比较。研究表明,颗粒元-有限差耦合模型适用于钢筋-混凝土类复合材料的动力特性与破坏机理研究。

6. 基于颗粒元模型对混凝土进行了动力弯曲模拟,解释了初始静载影响的力学机理。通过对力链、裂纹发展和能量过程进行分析,揭示当初始静载水平处于静力线弹性阶段时,混凝土动力强度随初始静载增加,初始静载处于静力线弹性极限时,动力强度最大;而当初始静载处于静力的损伤软化阶段时,初始裂纹的产生使结构产生损伤,混凝土动力强度下降。

关键词: 混凝土;动力冲击性能;细观颗粒元模型;落锤试验;率相关效应

Abstract

The behavior of concrete under dynamic loads is strongly rate-dependent and differs significantly from that under static ones because the dynamic strength increases as the increase of strain rate. This phenomenon is known as the rate effect of concrete. In the present study, experimental tests and meso-scale numerical simulation are performed to study the dynamic impact characteristics of concrete. The achievements are concluded as follows.

1. The meso-scale particle element model (PEM) of concrete is introduced and used to simulate tests which determine the tensile strengths of concrete. The uniaxial tensile, splitting and flexure strengths in the numerical simulation match well with the corresponding experimental results. Both the numerical and the test results conform to the current statistical relationship of the three strengths. Thus, the meso-scale PEM for concrete are validated.

2. The impact behavior of concrete beams is investigated using drop-weight facility. Different tups are used and varying drop weights and heights are applied. The experimental results, including impact loads, mid-span displacements, dynamic strains, cracking processes, inertial forces are measured and analyzed in the study. Finally, the equilibrium of momentum-impulse and energy conversion is examined.

3. A complete model of the hammer-transducer-concrete beam system using meso-scale PEM is proposed. The numerical results are compared with those from the drop-weight tests. The strain-fracture energy concept is introduced to particle element modeling and the energy conversion between kinetic and strain-fracture energy components are discussed for different strain rates.

4. The unbonded prestressed concrete beams are systematically tested

using drop-weight facility. The interactions between the concrete beam and prestressed tendon in the impact tests are analyzed. It is concluded that the deformation and cracking of concrete are effectively controlled by the tendons. However, if the tendons are yielded, the concrete beams will be cracked seriously with less residual capacities.

5. Based on the complete system model for drop-weight tests of concrete beams, a coupling analytical model is used to simulate the impact tests of unbonded prestressed concrete. The PEM model is used for the heterogeneous and brittle material of concrete, while the finite difference method (FDM) is introduced to analyze the behavior of prestressed tendons. The results of PEM-FDM coupling simulation in regard to the dynamic behaviors of concrete beams and the interactions with tendons all support the experimental tests. The coupling model can be applied to dynamic analyses of other composite structures.

6. Based on the meso-scale PEM for concrete, a series of dynamic bending tests with varying static pre-loadings are analyzed. The effects of pre-loading can either be an increase or decrease in dynamic strength depending on the different ranges of the complete static stress-strain curve on which the pre-loadings are imposed. When the pre-loading is imposed within the linear elastic limit, the strain energy in the elastic range produced by the static pre-loading is pre-stored in the beam. Such energy will result in a significant increase in total consumed energy and dynamic strength leading to the failure of the beam. Nevertheless, if the static pre-loadings are imposed in the damaged or strain softening range, a few initial cracks will appear around the mid-bottom of the beam, resulting in a partial release of the pre-stored strain energy. Under this condition, the total consumed energy at the instant of dynamic loading is reduced, leading to the decrease of dynamic strength.

Key Words: concrete; dynamic impact behavior; meso-scale particle element model; drop-weight tests; mechanism of rate effects