

第22届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE TWENTY-SECOND
NATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL
ENGINEERING

No. II

主编：陆新征

《工程力学》杂志社
2013.8

CSTAM2013-P28

第 22 届

全国结构工程学术会议

中国 乌鲁木齐
URUMQI CHINA
8.10 ~ 8.12, 2013

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
新疆大学
中国力学学会《工程力学》编委会
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室（清华大学）
土木工程安全与耐久教育部重点实验室（清华大学）
清华大学土木工程系
新疆大学建筑结构抗震与节能重点实验室

学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

阿肯江·托呼提 陈建兵 陈以一 陈永灿 崔京浩 方 秦 龚耀清 桂国庆
海拉提·巴拉提 韩林海 金 峰 李宏男 李 慧 李爱群 李守恒 刘德富 刘宏民
楼梦麟 马伊磊 聂建国 努尔夏提·朱马西 茹继平 石永久 宋二祥 苏先樾 隋允康
孙建恒 王光谦 王怀忠 王进廷 王全凤 王晓纯 魏德敏 于 江 周新刚 张广泰

组织委员会

主 席 : 努尔夏提·朱马西

常务副主席: 韩林海

副 主 席 : 于 江 阿肯江·托呼提

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈建军 陈政清 范 峰 冯 鹏 高 波 郝际平 金学松 李建中 李英民 李正良
李忠献 刘 清 陆新征 罗尧治 秦拥军 沙吾列提·拜开依 孙柏涛 王 健 武 岳
武哲 徐礼华 杨亚政 杨年山 杨蔚彪 阎 石 叶康生 曾 攀 张 鑫 张正威
朱宏平 庄 茁

秘 书 处

秘书长 : 阿肯江·托呼提

副秘书长 : 沙吾列提·拜开依

学术秘书 : 黄丽艳(负责组织论文宣读、排序、分组、评定等学术工作)

秘书组 : (按姓氏拼音为序)

阿布都塞买提·卡力 胡什塔尔·尼亚孜 韩 霞 韩凤霞 何原野 罗光辉 刘 耘
李 玲 秦拥军 温 勇 王 强 王建虎 乌布力艾山 朱景伟 方熙元等教师,
研究生若干

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部门随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在沈阳渡过了它 21 岁生日后，今年在新疆乌鲁木齐召开了第 22 届全国结构工程学术会议。

新疆地域广袤、物产丰富、风景壮丽，是我国面积最大、陆地边境线最长、毗邻国家最多的省区，是我国西部大开发的重要阵地。

乌鲁木齐是一个具有悠久历史的西域名城，远在新石器时代人类就在这里生息繁衍，唐代曾在乌鲁木齐周边设置轮台县，“轮台”也成为众多诗人吟咏广袤西域的代称。岑参、陆游等都曾留下过著名诗篇。清乾隆年代后，乌鲁木齐成为“繁华富庶，甲于关外”的城市。如今的乌鲁木齐，是全疆政治、经济、文化的中心，是中国西部对外开放的重要门户，新欧亚大陆桥中国西段的桥头堡，地处亚洲大陆地理中心，是欧亚大陆中部重要的都市。

今年会议的东道主新疆大学其前身是创办于 1924 年的新疆俄文法政专门学校。1935 年 1 月改建为新疆学院，1960 年 10 月 1 日，正式成立新疆大学，1978 年被国务院确定为新疆唯一的全国重点大学，1997 年被列入国家“211 工程”重点建设高校，2000 年被确定为国家西部大开发重点建设高校。2000 年 12 月 30 日，新疆大学与原新疆工学院合并组建新的新疆大学。2004 年，学校成为新疆维吾尔自治区人民政府、教育部“区部共建”高校。新疆大学学科门类齐全，校园环境优美，是我国西部及中亚地区的重要学术园地。

在中国力学学会结构工程专业委员会、新疆大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 297 篇，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰富的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2013 年 8 月

第 22 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 297 篇，共计 1668 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 89 篇（共 572 页），包括特邀报告和两个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

第 II 册论文 96 篇（共 532 页），包括四个学科类别：3. 钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 钢结构、材料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

第 III 册论文 112 篇（共 564 页），包括三个学科类别：6. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

2014/2

第 22 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

3. 钢筋混凝土结构、材料与构件

生态复合墙体损伤延性系数研究	陈国新 (001)
不同类型混凝土冻融循环试验与损伤模型研究	陈升平 郭彬彬 (006)
钢-混凝土组合梁刚度增大系数影响因素分析	程 竞 范 重 杨 苏 (012)
基于不同养护条件的大体积钢筋混凝土早期温度应力分析	丁 敏 程小珂 李密密 蒋秀根 (018)
混凝土板受载破坏过程力学与声发射特性试验研究	董承全 胡在良 李晋平 孟军涛 (024)
高钛重矿渣钢筋砼轴压短柱的试验研究	管 理 曾仁高 牟廷敏 陈梦成 黄 宏 (029)
CFRP 增强纤维再生混凝土轴压短柱性能试验	侯 敏 董江峰 王清远 袁书成 (033)
爆裂不确定性对高性能混凝土剪力墙火灾后抗剪承载力的影响	侯一钊 肖建庄 (038)
钢筋混凝土框架-核心筒结构抗震性能研究	胡 好 赵作周 贺小岗 纪晓东 钱稼茹 (046)
整体-局部弯曲模型在两跨连续组合梁中的应用	蒋秀根 董 蔚 孟石平 许 宁 宋美瑶 丁 敏 (052)
原位加载试验在钢筋混凝土结构中的应用	李 凯 (057)
超低温环境下混凝土本构关系试验研究	李 响 谢 剑 吴洪海 (060)
高层建筑沉降后浇带的研究现状与分析	李岷昌 赵 昱 张万庆 郑石林 (066)
剪力墙洞口双连梁设计研究	刘 畅 范 重 杨 开 (071)
高钛重矿渣钢筋混凝土纯弯构件试验研究	管 理 龙建文 牟廷敏 陈梦成 黄 宏 (078)
基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱非线性有限元分析	卢怡思 张耀庭 (083)
保障性住房装配式承重部品的关键技术和研究进展	马佳宝 王元清 张延年 石永久 刘 明 范新海 (092)
含多类损伤钢筋混凝土梁安全性评价方法及载荷影响研究	邱兆国 梁 力 张凤鹏 (098)
火灾下圆钢管混凝土温度场分析	双 妙 高建岭 张宏涛 (104)
疲劳荷载作用下受压混凝土应变性能试验研究	唐先习 梁金宝 唐先周 徐 岳 (108)
火灾后型钢混凝土柱剩余承载力数值模拟分析	唐跃锋 李俊华 孙 彬 (113)
箍筋约束混凝土单轴受压塑性损伤本构模型	滕 军 李祚华 李 安 陈 亮 (121)
短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验与分析	王 钧 马 跃 张 野 陈 伟 (128)

超厚筏板基础大体积混凝土施工水化热的数值分析.....
.....王 强 孙 威 葛 超 夏 菲 张 健 高 翔 郝中华 (134)
碳纤维长度对梁力学性能实验研究王晓初 聂红宾 王军伟 (139)
钢筋混凝土桥梁全寿命安全经济决策王增忠 姜艳君 王志强 范立础 (145)
超低温环境下箍筋约束混凝土轴心受压性能试验研究.....谢 剑 李小梅 吴洪海 (150)
完全碳化混凝土受压本构关系试验研究徐善华 朱文治 崔焕平 (156)
纤维编织网增强混凝土薄板的高温力学性能与微观界面粘结破坏分析.....
.....徐世焯 沈玲华 王激扬 付 晔 (160)
混凝土表面干燥收缩一维分布研究徐兆全 邓春林 刘 行 熊建波 (168)
离析造成混凝土强度降低的工程实例杨 凯 李 凯 刘宏生 (173)
保障性住房装配式非承重部品的工程应用与研究现状.....
.....袁 霞 王元清 张延年 石永久 刘 明 范新海 (176)
基于 ABAQUS 的表面内嵌 CFRP 筋粘结滑移性能数值模拟分析张海霞 何禄源 (182)
高性能钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究周布奎 王安宝 杨科之 (187)
高强再生混凝土组合楼板的受弯性能研究祝延涛 张建伟 曹万林 邵 泰 (192)

4. 钢结构、材料与构件

自然冷却条件下不同升温速率对 Q235 钢材力学性能的影响.....白玉星 潘俊武 (197)
三肢钢管混凝土格构式柱耐火性能分析崔志强 韩林海 宋天诣 (201)
石化钢结构超薄型防火涂料耐紫外线老化性能试验研究.....韩双鹏 白玉星 何世钦 汪忠云 (206)
钢管混凝土叠合柱耐火性能分析侯舒兰 韩林海 宋天诣 (210)
火灾高温作用下钢结构倒塌分析鞠 竹 王振清 韩玉来 梁文彦 李加雷 (214)
影响钢管角钢组合塔节点承载力的参数分析鞠彦忠 王德弘 白俊峰 贾玉琢 肖 琦 (218)
组合双塔结构连接桁架的影响分析孔相立 范 重 王义华 (222)
大型风力发电机锥台型塔筒的受力性能分析与优化设计.....李 斌 高春彦 (231)
点蚀损伤导管架平台结构构件的非线性行为初步探讨.....林振东 王仁华 窦培林 (236)
单层肋环形球面网壳模态局部化问题研究刘占辉 刘 伟 高维成 程 翔 (242)
单层球面网壳稳定性能对杆件屈曲敏感性研究马腾飞 赵淑丽 李红梅 孙建恒 (253)
变截面方钢管支撑的弹塑性稳定性研究邵永松 刘洪波 寇俊同 (259)
大跨椭圆形弦支穹顶结构稳定性的参数优化研究.....石开荣 姜正荣 (265)
内配型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能及参数分析.....史艳莉 王文达 王亚伟 (275)
四边形环索弦支屋盖体系性能研究及设计应用孙 璨 傅学怡 吴 兵 冯叶文 (280)

外包钢-钢筋混凝土组合连续梁极限承载力分析索 源 宋旭林 (288)

钢管柱-H 形梁节点中的模块化耗能技术探讨王 伟 王明兴 (294)

腹板加劲复杂卷边槽钢偏心受压构件稳定性分析.....王春刚 徐子凤 刘 泓 曹宇飞 (298)

基于多尺度建模的钢管混凝土组合框架受火全过程力学性能研究.....王景玄 王文达 (302)

天津津南国家农业科技园研发创意中心玻璃幕墙钢结构设计.....王小盾 罗 松 陈志华 刘锡良 (309)

基于灰色模型理论的大型体育场健康监测研究王秀丽 姜 楠 (315)

钢网架结构安全性与耐久性检测鉴定分析幸坤涛 杨建平 (325)

Q690 高强钢加强型相贯节点抗弯刚度数值分析.....杨俊芬 贺艳霞 张 涛 (329)

交变应力下钢绞线的腐蚀疲劳实验方法研究姚国文 蒋冬夏 (336)

焊缝尺寸对波纹钢腹板梁应力集中影响的有限元分析.....袁书成 吴彦增 王清远 谭莲飞 (340)

多跨连续单层柱面网壳整体稳定性分析张 宇 范 重 杨庆山 李 丽 (347)

钢框架梁柱新型塑性铰外移节点抗震性能研究张艳霞 孙文龙 李 瑞 赵 微 (354)

一类新型大跨空间结构健康监测系统设计张宇鑫 夏巨伟 (360)

强/台风作用下大跨空间索桁体系现场风压风振实测研究简介.....张志宏 刘中华 董石麟 (365)

部分包裹混凝土组合柱的滞回性能赵根田 (369)

水平撑杆未设置于柱中点的设计方法研究赵金友 滕诗畅 (373)

某炼钢厂吊车梁疲劳应力测试分析郑 云 陈 煊 杨建平 张贵成 李忠煜 (380)

钢管混凝土柱-RC 梁平面框架耐火性能分析.....周 侃 韩林海 宋天诣 (383)

纤维掺量对钢纤维混凝土力学性能影响研究朱 林 晏麓晖 张玉武 张 胜 (387)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

西藏林芝多布水电站地下厂房施工降水方案的比选.....刘起霞 邹剑锋 李江华 张季如 (391)

激振作用下危岩损伤特性研究陈洪凯 唐红梅 王 智 唐 兰 (396)

斜向钢管嵌岩桩水平承载力影响因素分析戴嘉平 何 磊 秦开颜 (402)

沙坝水库重力-面板堆石复合型坝体应力应变分析高 阳 叶发文 张建海 张全意 张文胜 (408)

软土盾构隧道下穿地下管线的实测分析与安全估算方法.....
.....顾沉颖 郑宜枫 李 林 赵卉子 邱裕华 魏林春 (416)

桩锚支护深基坑变形数值模拟李 潇 施旭栋 蒋秀根 (420)

高速公路填砂路基施工技术李翔宇 李红学 王会明 童 念 郭红仙 (424)

高炉渣粉煤灰地基沉降监测与预测刘 香 孔德雄 刘金升 (429)

基于 Monte Carlo 方法计算土质边坡极限荷载上限刘建强 马宗源 (435)

仿真计算岩土孔径所用分布函数的优劣比较孟凡龙 关 欣 刘 骛 孙艾茵 姚恒申 (441)

光纤光栅传感技术在高速公路隧道围岩变形实时监测中的应用.....苏胜昔 杨昌民 范喜安（444）
 考虑渗流效应的黄土隧道围岩稳定性分析孙志杰 申俊敏 马 林（449）
 边坡稳定性分析的有限单元法应用研究涂俊胤 任德斌 赵俭斌（456）
 桩顶设置隔震支座数值仿真分析王维玉 赵 拓 李鹏飞（462）
 坠落式危岩主控结构面端部塑性区分析王小委 陈洪凯（466）
 基于厦深高速铁路路基沉降观测和预测方法的分析.....王英浩 李茂达（473）
 基于贝叶斯网络的软岩隧道施工支护参数选择方法.....谢洪涛（477）
 风力发电机岩石锚杆基础静力弹塑性分析与应力状态监测.....
阎 石 宋壁丞 孙 威 阎 寒 于琦乐（483）
 深厚覆盖层场地地动特性研究杨正权 刘小生 周祥鹏 赵剑明 杨玉生（487）
 水泥土桩复合地基的路堤填土差异变形解析算法.....姚 成 姜朋明 梅 岭（493）
 同一场地上不同桩型复合地基的静力特性试验袁 满 丁继辉 冯俊辉 张攀星（497）
 某集水廊道受回填土压力的计算与分析岳 峰 乔 雄 朱彦鹏（501）
 静压 PHC 管桩群桩效应的数值模拟分析.....赵俭斌 王志斌 史永强（507）
 运用 ANSYS 软件对滑坡治理前后的稳定分析赵瑞秀 牛琪瑛 史文祥（513）
 基于变形协调的预应力锚索抗滑桩—格构梁联合加固边坡稳定性分析.....赵志强 姜朋明 梅 岭（518）
 弹性地基上含液饱和多孔梁的瞬态振动分析周凤玺 赵王刚 米海珍（522）
 主动式透水管桩技术及其效果有限元分析周小鹏 梅国雄（527）

生态复合墙体损伤延性系数研究

陈国新

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆, 乌鲁木齐 830052)

提 要: 基于刚度退化描述的损伤破坏模型, 采用双线性恢复力模型, 推导结构基于损伤的延性系数计算公式。根据 5 榀相同规格尺寸(内填材料不同)生态复合墙体非线性损伤数值分析结果, 构造新型损伤指标-荷载变化曲线, 计算生态复合墙体基于损伤的延性系数, 并与传统位移延性系数对比。结果表明: 两种计算方法得出的延性系数基本接近; 损伤延性系数在结构宏观延性性能与微观损伤演化之间搭建起连接桥梁。

关键词: 生态复合墙体; 延性性能; 刚度退化; 损伤指数; 损伤延性系数;

中图分类号: TU399; TU328 **文献标志码:** A

THE RESEARCH ON DAMAGE DUCTILITY COEFFICIENT OF ECOLOGICAL COMPOSITE WALL

CHEN Guo-xin

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based on damage model of stiffness degradation described, adopted the bilinear restoring force model, the ductility coefficient calculation formula of structure based on the damage is derived. According to nonlinear damage numerical results of 5 ecological composite walls shows the same size (filled with different material) , the new type curves of damage index - load is constructed, calculated ductility coefficient based on the damage of the ecological composite wall, and compared with traditional displacement ductility coefficient. The comparison results show that the ductility coefficient based on two calculation methods is similar; damage ductility coefficient set up connection bridges between the macro ductility performance and micro damage evolution in structure.

Key words: ecological composite wall; ductility performance; rigidity degeneration; damage index; damage ductility coefficient

结构延性是指结构毁坏之前, 在其承载能力无显著降低条件下经受非弹性变形的能力^[1]。结构或构件延性好, 表明其在外荷载作用下具有较大的塑性变形能力, 通过充分消耗能量使得最终破坏具有一定预兆^[2]。基于安全角度考虑, 多数混凝土结构设计规范要求结构或构件呈现延性破坏特征, 即在破坏前能够耗散大量的塑性能而在破坏时只释放有限的弹性能。

生态复合墙结构体系^[3]是一种生态、节能、抗震的建筑结构新体系, 它主要由预制的生态复合墙板与隐形外框及楼板装配整浇而成。作为结构的主要受力构件——生态复合墙体是由生态复合墙板与隐形外框组成的墙肢或墙段, 如图 1 所示。其中, 生态复合墙板是以截面和配筋较小的钢筋混凝土肋梁、肋柱为框格, 内嵌以炉渣、粉煤灰等工业废料或其它生态材料为主的高性能轻质砌块预制而成。

生态复合墙体其独特的构造特点使其承力体系的三部分构件(砌块、肋格及外框)能够在小震、中震及大震作用下依次发挥主要作用, 分阶段释放地震能量, 利用内填砌块的损伤和破坏、肋梁肋柱的屈服和弹塑性变形, 实现损伤从低阶尺度材料损伤到高阶尺度构件损伤的迁移演化, 从而尽可能多的消耗地震输入能量。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11242007); 教育部科学技术研究重点项目(212194)

作者简介: 陈国新(1978—), 男, 新疆巴州人, 副教授, 博士, 从事新材料及新型建筑结构体系研究(E-mail: xjbncgqx@163.com)

本文基于刚度退化描述的损伤破坏模型,采用刚度退化双线性恢复力模型,推导结构基于损伤的位移延性系数计算公式。根据 5 榀相同规格尺寸(内填材料不同)生态复合墙体非线性损伤数值分析结果,提取每一反应时刻构件承载力与该构件的整体损伤值作为自变量和因变量,构造新型损伤指标-荷载变化曲线,选择 $0.85P_{\max}$ 作为荷载阈值,计算生态复合墙体基于损伤的位移延性系数,并与传统延性系数对比。

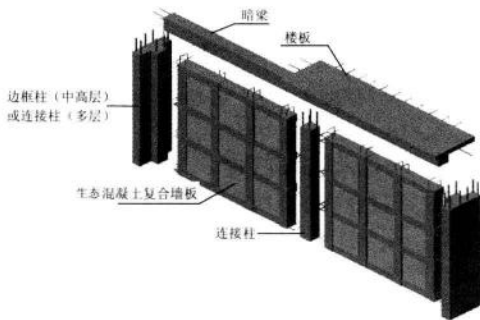


图 1 生态复合墙体构造示意图
Fig.1 Construction detail of the ecological composite wall

1 延性性能

1.1 传统延性系数

当前用于研究与工程设计中的延性指标^[4]主要采用结构延性指标,通常是指位移延性指标,可以定义为结构超过极限承载力后某一侧向位移与首次屈服时相应位移数值之比,结构延性一般采用延性系数 μ 来度量,具体定义为: $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, 其中 Δ_u 和 Δ_y 分别是极限荷载 $P_{\max}$ 和屈服荷载 P_y 对应下的极限变形与屈服变形。在荷载作用下,根据结构型式不同,结构位移延性系数可以在 2~8.5 之间变动^[5]。

对于极限变形 Δ_u , 众多试验统计结果表明:其所对应的结构荷载一般都处于 $0.8\sim 0.9 P_{\max}$ 范围之内,为了计算的简便和统一,通常将 $0.85 P_{\max}$ 处结构变形值设定为极限变形。

1.2 损伤延性系数

尽管延性系数 μ 为混凝土结构的抗震性能评估提供了一种量化指标,然而这种直观描述方式却难以揭示延性产生的本质和内在根源。事实上,对生态复合墙结构而言,反映砌块、肋梁肋柱微裂缝扩展的受拉损伤机制和反映水泥浆体塑性滑移的受剪损伤机制是导致结构性能劣化的本质因素,进而最终影响和改变整体结构的延性性能。

构件或结构随承受荷载逐渐增大,损伤产生并进一步发展,从而结构的强度降低,刚度变小。为反映强度和刚度的退化, Sozen, Bigger 等人引入了破坏比的概念,类似于破坏比,李洪泉、欧进萍^[6]提出了一种用刚度退化描述的损伤破坏模型^[7]:

$$D = 1 - \frac{K_D}{K_Y} \tag{1}$$

式中, K_Y 、 K_D 分别为构件的无损刚度和损伤后的刚度。 K_D 与 K_Y 之间的关系一般由恢复力模型来描述。

恢复力模型是根据大量从试验中获得的恢复力与变形的关系曲线经适当抽象和简化而得到的实用数学模型,也是反映结构刚度退化的一种表现,恢复力模型一般分为曲线型与折线型。曲线型恢复力模型与实际比较接近,折线型恢复力模型考虑了开裂荷载、屈服荷载、下降段等方面的内容。构件的恢复力模型愈接近实际,时程分析结果就愈能反映实际情况,但过于复杂的恢复力模型又会使程序复杂化。因此,一般都采用折线形恢复力模型。本文采用考虑刚度退化采用克拉夫^[8]退化双线性模型,有:

$$K_D = K_y \left(\frac{X_y}{X_u} \right)^{\gamma} \tag{2}$$

将式(1)变形后带入式(2)得到:

$$\mu = (1 - D)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{3}$$

式中， μ 为位移延性系数， γ 为卸载刚度系数。

由上式可以看出，若已知结构或构件的损伤值 D 以及构件卸载刚度系数 γ ，即可计算出结构或构件的延性系数，由于此延性系数是基于损伤值确定的，所以称之为损伤延性系数。这种计算延性系数的方法，将结构和构件的宏观延性性能与微观损伤演化之间搭建起了连接桥梁，使内在的损伤性能在外在延性性能表现上更为直观化。

1.3 $D-P$ 曲线

分别提取不同受力状态时结构荷载与最大受损部位处的损伤值作为自变量和因变量，建立一种新型损伤指标-荷载反应曲线，简称 $D-P$ 反应曲线，如图 2。此处的损伤指标值是通过内填砌块、肋格和外框典型区域单元的损伤值加权平均方式处理后的得到的墙体整体损伤值代表值。每一反应时刻的损伤指标可以定义为：

$$D = \frac{\sum D_i E_i}{\sum E_i} \tag{4}$$

可以看出， D_i 反映了细观层次的损伤状态，而 E_i 则计入了宏观影响区域的能量损耗对结构或构件延性性能的影响。图中 D_I 为损伤延性指标， D_A 为损伤延性面积^[1]。

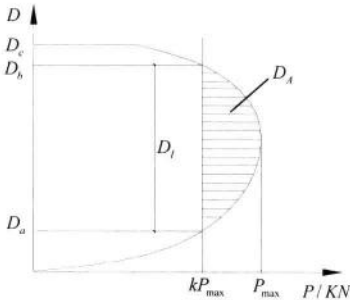


图 2 $D-P$ 反应曲线
Fig.2 $D-P$ curve

1.4 生态复合墙体刚度退化模型

课题组黄炜^[9]利用荷载反向时曲线指向最大值的规律^[8]，将墙体的恢复力模型取为退化四线型(如图 3)。

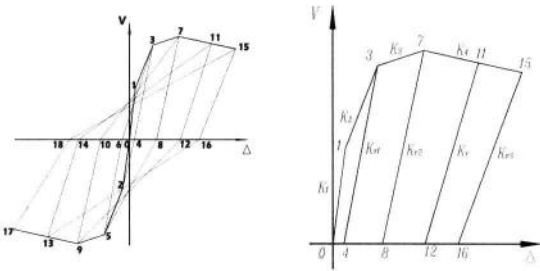


图 3 生态复合墙体恢复力模型
Fig.3 Restoring force model of ecological composite wall

加荷刚度变化规律如图 3 所示：弹性阶段(0-1 段)，弹性刚度 K_1 ；弹塑性阶段(1-7 段)，屈服前刚度 K_2 (3-7 段)、屈服后刚度 K_3 (3-7 段)；破坏阶段(7-15 段)，负刚度 K_4 。

将墙体的恢复力模型取为退化四线型，其刚度的退化规律主要针对卸载刚度，如图 3 所示。根据前期的试验结果，通过插值可以构造出墙体在三个阶段的卸载刚度，其公式如下：

$$K_r = \left(\frac{\Delta_K}{\Delta_r} \right)^{0.6} K_1 \quad \Delta_K < |\Delta_r| \leq \Delta_Y \tag{5}$$

$$K_r = \left(\frac{\Delta_Y}{\Delta_r} \right)^{0.62} K_1 \quad \Delta_Y < |\Delta_r| \leq \Delta_W \tag{6}$$

$$K_r = \left(\frac{\Delta_w}{\Delta_r} \right)^{0.66} K_1 \quad \Delta_w < |\Delta_r| \leq \Delta_U \quad (7)$$

式中： K_r 是墙体卸载刚度； Δ_r 是卸载时墙体的侧移。

由上可以看出，若知道了结构构件的损伤指标，以及不同结构的卸载刚度系数，即可求出各构件的基于损伤的延性系数。

2 生态复合墙体损伤延性系数

2.1 各墙体损伤延性指标与损伤延性面积

建立 5 榀尺寸规格相同的生态复合墙体^[10]试件的数值模型，试件编号分别为：XML-1、XML-2、XML-3、ECW-1、ECW-7，其中：XML-1 为内填植物纤维生土基砌块生态复合墙体，XML-2 为内填再生 EPS 轻骨料混凝土砌块生态复合墙体，XML-3 为内填植物纤维水泥基砌块生态复合墙体，ECW-1 为内填加气混凝土砌块生态复合墙体，ECW-7 为内填棉花秸秆砌块生态复合墙体。对墙体进行非线性损伤分析，提取每一时刻生态复合墙体荷载与损伤代表值，可以依次构造出 5 榀生态复合墙体试件的荷载-损伤指标关系曲线，如图 4。由图可以看出，采用 $D-P$ 反应曲线图表示墙体的在受力时的损伤演化过程，更能直观地表现出墙体整体损伤随荷载变化的规律：

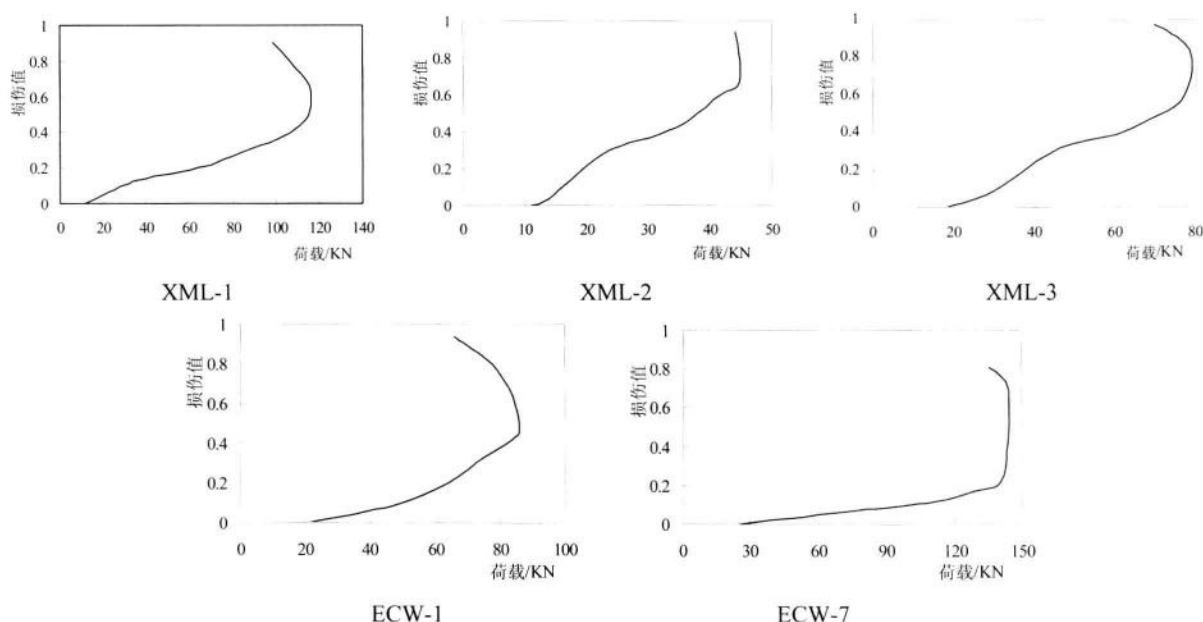


图 4 生态复合墙体损伤演化过程

Fig.4 The damage evolution process of ecological composite wall

1) 起始损伤荷载值 ECW-7 最大，XML-2 最小。

2) 除 ECW-7 复合墙体外，其余四榀墙体的 $D-P$ 反应曲线有很明显的拐点，而 ECW-7 墙体的拐点不明显，是由于该墙体在后期受力阶段，内填的棉花秸秆基本退出工作，墙体类似于框架结构，有较稳定、持续的承载力，但反复循环荷载下，承载力变化不大，而损伤不断的累积。

3) 除 XML-3 复合墙体外，其余四榀墙体的 $D-P$ 反应曲线变化较缓慢，而 XML-3 墙体的曲线有陡直段，这也是墙体发生不利的弯曲型脆性破坏的另一种体现。

2.2 损伤延性系数

根据以上计算损伤延性系数的方法，生态复合墙体的卸载刚度退化系数由前期课题组的研究成果^[9]确定，取墙体 0.85 荷载 P_{max} 对应处的损伤值，对不同内填材料生态复合墙体的损伤延性系数计算如下表，并与传统延性系数计算得出的值进行比较。

表 1 生态复合墙体损伤延性系数

Table 1 The ductility coefficient of ecological composite wall

墙体编号	损伤延性系数	传统延性系数
XML-1	5.1	4.2
XML-2	3.8	5.1
XML-3	1.9	2.3
ECW-1	4.7	4.3
ECW-7	4.3	4.6

由表可以看出，两种计算方法得出的延性系数基本接近。对于计算传统延性系数，必须用一些近似方法确定构件的屈服点位置，进而得到屈服位移，原理较简单。损伤延性系数计算时必须事先知道构件的刚度退化系数，但这种方法将结构和构件的宏观延性性能与微观损伤演化之间搭建起连接桥梁，使内在的损伤性能在外在延性性能表现上更为直观化。

3 结论

本文通过生态复合墙体的损伤延性分析和研究，主要得出以下结论：

- (1) 提出结构或构件损伤延性系数的概念，推导得到基于损伤的延性系数计算方法，从而在结构或构件宏观延性性能与微观损伤演化之间搭建起连接桥梁。
- (2) 计算得到了 5 榀生态复合墙体的损伤延性系数，结果表明，损伤延性系数与传统的延性系数基本接近。
- (3) 损伤延性系数在结构宏观延性性能与微观损伤演化之间搭建起连接桥梁，使内在的损伤性能在外在延性性能表现上更为直观化。

参考文献：

[1] 曹杨. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构非线性损伤分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[2] 王丰, 李宏男, 伊廷华. 钢筋混凝土结构直接基于损伤性能目标的抗震设计方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 128—131.

[3] 陈国新, 黄炜, 姚谦峰, 等. 基于统一强度理论的生态复合墙体等效斜压杆宽度计算[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 90—95.

[4] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892—900.

[5] 徐绩青. 延性系数确定方法的讨论[J]. 水运工程, 2004, 29(9): 14—17.

[6] 欧进萍, 邱法维. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 21—30.

[7] Park, Young-Ji; Ang, Alfredo H.-S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985, 111(4): 722—739.

[8] 胡聿贤. 地震工程学(第二版)[M]. 北京: 地震出版社, 2006.

[9] 黄炜, 陈国新, 姚谦峰. 密肋复合墙体在拟动力试验下的抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(3): 49—55.

[10] 陈国新, 黄炜, 张荫. 内填不同材料填充砌块生态复合墙体抗震性能对比[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(11): 4491—4500.

不同类型混凝土冻融循环试验与损伤模型研究

陈升平,*郭彬彬

(湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北, 武汉 430068)

摘要: 对强度等级为 C50 普通混凝土、轻骨料混凝土、自密实混凝土进行冻融循环试验, 通过观察试验现象, 记录相关实验数据, 总结了不同类型混凝土抵抗冻融循环的能力, 以及冻融后混凝土内部损伤量的变化规律。结果表明: 掺加了粉煤灰的自密实混凝土的抗冻性能最差, 轻骨料混凝土的抗冻性能最好。并根据混凝土冻融破坏机理, 进行了混凝土冻融损伤分析并建立了冻融损伤模型, 模型所预测的混凝土损伤程度符合工程冻融破坏情况。
关键词: 普通混凝土; 自密实混凝土; 轻骨料混凝土; 冻融循环试验; 损伤变量

FREEZE-THAW CYCLE TEST AND DAMAGE MODEL FOR DIFFERENT TYPES OF CONCRETE

CHEN Sheng-ping,*GUO Bin-bin

(School of Civil Engineering and Architecture Hubei University of Technology, Hubei, Wuhan 430068, China)

Abstract: Common concrete, lightweight aggregate concrete and self-compacting concrete with strength grade C50 were tested by freeze-thaw cycle. By observing the experiment phenomenon and recording relevant experimental data. It is shown that the self-compacting concrete mixed the fly ash has the worst freeze-thaw resistance, and Light weight aggregate concrete was the best. According to freezing and thawing failure mechanism, a freeze-thaw damage model was established in this paper. The model predictions agree well with the actual engineering observations.
Key words: normal concrete; self compacting concrete; lightweight aggregate concrete; freezing-thawing cycle test; damage model

1 引言

在寒冷地区的混凝土建筑物, 特别是那些处于干湿交替环境中的结构, 如水坝、桥墩、涵洞、港口码头工程等, 受到冻融作用而破坏, 未能达到设计使用寿命。混凝土抗冻性作为耐久性设计中最重要指标之一, 关于其损伤机理也得到研究学者的重视, 其中美国的 T.C.Powers 提出的静水压理论、Powers 和 Helmut 的渗透压理论为混凝土的冻融机理奠定了理论基础^[1-2]。
混凝土在经受冻融过程中, 静水压力和渗透压力所产生的应力是交替循环的, 一次冻融循环不足以使混凝土产生破坏, 但是每一次冻融循环所产生的损伤累积会导致混凝土结构失效。在冻融循环的过程中, 低温冻结类似于混凝土的加载过程, 此时混凝土应力最大; 升温溶解相当于混凝土卸载过程, 此时混凝土的应力最小。随着温度升高降低的交替作用, 混凝土不断的加载、卸载, 最终引起混凝土内部结构的破坏。然而材料疲劳损伤问题也是由于荷载交变作用, 使得材料损伤累积最终导致材料破坏^[3-4], 因此, 混凝土冻

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2012FFB00607)
作者简介: 陈升平(1965—), 男, 湖南醴陵, 教授, 博士, 系主任, 主要从事高性能纤维增强水泥基复合材料, 混凝土断裂与损伤, 工程结构加固等研究;
*郭彬彬(1988—), 女, 湖北随州, 硕士, 专业方向为结构工程(E-mail: sto20@sina.com).

融破坏可以用疲劳损伤的方法来分析。文章基于 Aas-Jakobsen 材料疲劳损伤寿命公式，在试验数据的基础上，建立在冻融环境下，不同类型混凝土其相对动弹性模量以及损伤量与冻融循环次数的关系曲线。

2 试验概况

2.1 试件设计及材料

试件截面 100mm×100mm，长 400mm，试件的混凝土强度等级为 C50，分为普通混凝土 PC50，轻骨料混凝土 LC50 以及自密实混凝土 SCC50，均采用华新水泥，使用的是江砂和碎石。其中自密实混凝土中掺加了 15%的粉煤灰，自密实混凝土、普通混凝土中各添加了 1% FDN 减水剂，而轻骨料混凝土中未掺加减水剂。通过冻融试验分析这三种不同类型混凝土的相对动弹性模量以及质量损失率的变化，评定其所对应结构的抗冻性。试件编号及配合比，见表 1

表 1 混凝土配合比以及 28d 抗压强度指标

编号	粉煤灰/ (%)	减水剂/ (%)	配合比(水泥: 砂: 石子: 水: 粉煤灰)	水胶比	砂率/ (%)	坍落度 mm	抗压强度/ MPa
SCC50	15	1	1:1.53:1.66:0.36:0.18	0.36	48	650	59.12
PC50	0	1	1:0.96:2.23:0.35:0	0.35	30	40	51.22
LC50	0	0	1:1.1:0.6:0.33:0	0.33	65	40	52.25

2.2 试验方法

本试验分为两个系列试件，对第一个系列试件测定其抗压强度，采用 100mm×100mm×100mm 混凝土试件，进行标准养护，按照 GBJ81-1985《普通混凝土力学性能试验方法》分别测定养护 7d 和 28d 的抗压强度。

第二个系列试件中，混凝土的冻融循环试验根据 GBJ82-1985《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》之快冻法，利用全自动冻融仪进行测试。试件尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体，每组 3 块，在实验过程中连续使用。试件在冻融试验过程中均处于全浸泡水状态，每次冻融循环的时间为 3h 左右，在冻结和融化终了时，试件中心温度分别控制在-17.5℃ 和 7.5℃。试件冻融循环每 50 次测一次试件的动弹模和质量，观测试块表面的冻融损伤情况。

2.3 实验结果及分析

表 2 给出了不同冻融循环后各试件相对动弹性模量与质量损失率的数值

编号	相对动弹性模量 P_n (%)/质量损失率 W_n (%)					
	50 次	100 次	150 次	200 次	250 次	300 次
SCC50	94.72/-0.82	82.51/-0.69	59.45/-0.35	31.04/0.59		
PC50	97.68/-0.77	88.60/-0.91	76.02/-0.87	63.41/-0.1	53.97/1.33	42.17/1.6
LC50	98.30/-0.91	95.54/-0.98	89.56/-1.16	77.35/-0.1	63.8/0.63	58.45/2.87

- 抗冻试验结果表明：
- (1) 自密实混凝土抗冻性较普通混凝土与轻骨料混凝土稍弱。图 1 是各试件的相对动弹性模量与冻融循环次数的关系曲线。由图 1 可见：随着冻融循环次数的增加，各试件的相对动弹性模量均出现不同程度的降低。在相同的冻融循环次数下，自密实混凝土的相对动弹性模量下降最大，而轻骨料混凝土的相对动弹性模量下降最小，因此试验中轻骨料混凝土的抗冻能力最强，自密实混凝土抗冻能力最弱。
- (2) 从图 2 可以看出，在冻融循环次数小于 50 的时候，混凝土试块的质量损失率都呈现负增长，说明混凝土试件表面完好没有出现剥蚀的现象。随着冻融循环次数的增加，各试件的质量损失率开始由负值转变为正值，其中自密实混凝土出现的最早，说明自密实混凝土试块表面最早开始剥蚀，内部吸水，造成其

质量增加。轻骨料混凝土最后出现正值，说明轻骨料混凝土的抗冻性较好。

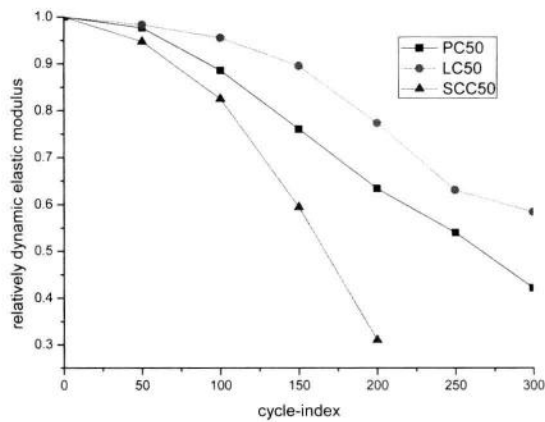


图1 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系曲线

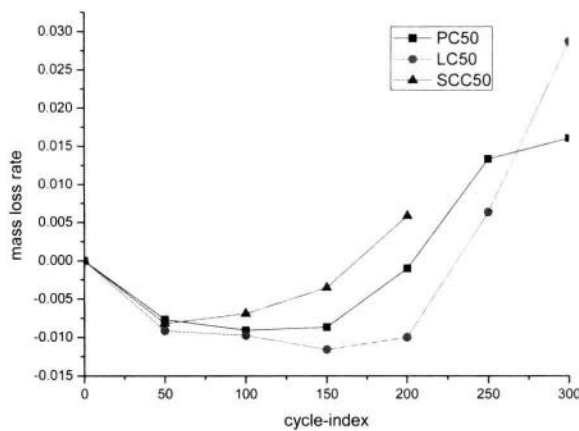


图2 质量损失率与冻融循环次数的曲线关系

3 冻融环境下混凝土损伤模型

3.1 损伤变量

损伤变量是用来描述材料受到荷载等外部因素以后，材料内部的受损伤状态以及这种状态对于材料力学性能的影响，损伤变量是材料的内部状态变量。从损伤理论出发，混凝土结构中出现微裂缝和缺陷可以看作一个材料内连续分布的损伤场。混凝土冻融损伤不断积累，导致混凝土材料性能不断劣化。相对动弹性模量作为反映混凝土材料性能变化的一个重要指标，且便于测定，可以用来定量地分析混凝土材料的内部损伤程度^[5]。

在受损材料中，测定有效面积是比较困难的，为了能间接地测定损伤，Lemaitre 提出了应变等价原理^[6]。根据这一原理将损伤度 D 定义为：

$$D = 1 - \frac{P_n}{P_0} \tag{1}$$

式中： P_n 为经过 n 次冻融循环后混凝土的相对动弹性模量； P_0 为混凝土在冻融试验之前的相对动弹性模量。

3.2 混凝土冻融损伤方程

混凝土在经历冻融循环过程中，受到静水压力和渗透压力所产生的循环应力作用。导致其内部不断产生和繁衍微裂纹，经过有限次的冻融循环，最终发生全局性的破坏。