

第二届全国地震工程学术会议论文集

(第一卷)

中国地震学会地震工程专业委员会
中国建筑学会地震工程学术委员会
武汉工业大学工程结构抗震研究所

主办
承办

武 汉

1987. 11. 9 ~ 14.

第二届全国地震工程学术会议

组织委员会

主任委员：刘恢先

副主任委员：胡聿贤 叶耀先

委员（以姓氏笔划为序）：

朱伯龙 刘志刚 李桂青 陈寿樑

陈厚群 沈聚敏 罗学海 徐宗和

徐植信 龚思礼 谢礼立

秘书长：李桂青（兼）

目 录

一、地震动与地震危险性分析

地震动记录持时与工程持时	谢礼立、张晓志	1
地震动工程持时与结构地震破坏	张晓志、谢礼立	7
根据等裂度线形状估计断层破裂长度和距离参数的方法	周锡元、苏经宇、王广军	13
强震运动功率谱密度函数的统计特性	江近仁、孙景江、陆钦军	20
地震动峰值的初步分析	李大华	26
关于基岩场地反应谱的一些特征	郭玉学、王彦宇	32
唐山地震宁河烈度异常区场地影响的研究	刘曾武、杨光、吕根盛、吴显德、王东强	38
地震反应谱的经验公式及其谱特性	严建武、彭克中	44
厦门市设防地震动参数的选择	陶夏新	51
湛江市地震危险性分析	王阜、孙平善、田启文、李大华	57
局部粘弹性地形地震响应分析的三维边界元素法	廖河山、李文艺、徐植信	63
地震影响地震中烈度的实用计算方法	邓民宪、宋龙伯、江铁鹰	69
关于地震小区划分方法的研究	徐耀廷	76
地震动影响小区划的简化方法	苏经宇、谭健	82
不同距离定义的意义及其对地震危险性分析结果的影响	王广军、苏经宇、周锡元	89
结合地壳形变率的地震危险性分析	丁伯阳、雷中生、杨斌	96
地震波沿竖向岩层衰减的实验研究	曹培杰、钱渠杭、寇殿卿、袁雨亭	103
应用地震危险区划概率法进行地震区划的研究	林辉德	109
江苏省及其邻近地区强震台阵	黄树棠	117
多层横观各向同性弹性体动力学问题的解	岳中琦	124
1975年海城地震的烈度空间衰减规律	刘汉兴、时振梁、汪素云	129
模糊震级在地震危险性分析中的效应	陈达生、左惠强	137
地震信号数据压缩方法的研究	王秋光、王晓春	143
黄河上游拉西瓦水电站场址地震危险性分析	陈振达、金春山、林卓	149
自相关回归法在地震地面运动功率谱分析的应用	卫明	155

二、场地土地震反应和土—结构相互作用

判别水平土层液化势的孔隙水压力分析方法	丰万玲、石兆吉	161
土壤震陷试验研究	郁寿松、石兆吉	167

用不同方法计算水平土层地震反应的对比分析	王余庆、高艳平	173
成层非均质土坡的抗震稳定性	栾茂田、金崇毅、林 泉、赵 颖	179
万庄某场地设计反应谱的研究	高艳平、王余庆	185
评价砂土场液化的实用能量法	何广纳、曹亚林	191
粘粒含量对轻亚粘土在动荷作用下孔压发展的影响	王 厚、费涵昌	196
边坡抗震稳定性分析	刘 颖	201
打桩对可液化地基的加密效果	乔太平、刘惠珊	207
上海地铁隧道周围土介质的液化分析	祝龙根、杜 坚、徐礼至	213
合肥市轻亚粘土液化特性的研究	费涵昌、刘 勇、马立新、俞 兵	218
粘弹性非均匀层状地基的动力柔度阵	王复明、林 泉	225
建筑地基液化变形机理	陈克景、刘惠珊	232
安阳市附近地区水平形变分析	惠国良、田葆济	238
非对称塔楼——基础——地基相互作用系统的动力分析	贾 抒、何玉敖	244
地基土与多层剪切型结构的非线性动力分析	王荣昌、俞钱道、应稼年	251
地基不均匀性对重力坝地震反应的影响	林 泉、张瑞丰、王复明	257
群桩的动力反应分析	张守华、李锐培	263
三维土—结构系统的非线性地震反应分析	张长生	268
土—结构—流体相互作用体系的地震响应分析	曹国教、沈怡萱	274
考虑土与结构相互作用的井塔抗震分析	王依群、何玉敖	280
土石坝与地基地震反应分析的波动—剪切梁法	孔宪京、张天明	286
刚性下卧层对基础反平面动力性态的影响	曹心传	292
某高层建筑地基抗震的研究	滕 俊	299
动力群桩效应研究	卢明良、张守华	306
土与结构动力相互作用问题的有限元分析	宋二祥、袁宗康	311

三、结构试验与分析

双向低周反复荷载作用下钢筋混凝土梁—柱边节点的性能	朱伯龙、陈希周	317
改善矩形截面钢筋混凝土短柱抗震性能的一个新途径	胡庆昌、陈云卿	323
坝体几何尺寸对混凝土重力坝动态特性的影响及分析	钱胜国	330
钢筋混凝土构架的高阶阻尼	冯文龙	336
单层厂房大型屋面板屋盖纵向基本刚度试验研究	李平安、尹梅魁	341
有粘结和无粘结预应力混凝土框架的抗震能力	苏小平、朱伯龙	347

地震时坝面散粒体跃移距离的估计	倪汉根、孔宪京	353
卧式石油化工设备抗震性能研究	张国锋、朱伯龙、吕西林	359
钢筋混凝土模型柱的振动台试验及其动力相似关系研究	吕西林、朱伯龙	364
电瓷型高压电气设备抗震性能研究	赵玉祥、朱伯龙	370
立式支腿式化工储液容器抗震研究	施卫星、朱伯龙、吕西林	376
钢筋混凝土面板堆石坝动力模型试验研究	韩国城、孔宪京、李俊杰、王承伦	382
预应力钢筋混凝土筒支梁桥的空间地震反应分析及试验	朱 晔、陈兴冲	388
双向水平反复荷载作用下钢筋混凝土柱的抗震性能	翁义军、沈聚敏	394
板峡拱坝的原型振动试验	黄万春、朱 威、杜井林、罗学海	399
丹江口水利枢纽左岸混凝土坝与土石坝接头抗震模型试验研究	谢昌举	405
安康闸墩动力模型试验	王炳乾、熊昌玉	411
武汉长江大桥钢梁振动记录的分析	王倩梅、黄万春	416
丹江水利枢纽泄水闸闸墩振动特性原型动力试验分析	钱胜国、郑文斌、阮世远	422
混凝土空心水砌块农房墙体抗侧力试验研究	郑健彬、周庆元	429
周期反复荷载作用下压剪和压弯剪预埋件的性能及其设计方法	殷芝霖、李玉温	435
多自由度拟动力试验技术的研究	何逊楠、沈聚敏、宝志雯、张天申	441
装配式大板建筑结点抗震浅析	陈建国	449
利用火箭激震法实测非洲北部土层弹性波速	李仲文、胡佑维、陈忠云	452
轻墙框架农房恢复力特性的试验研究	龚乃光、江自强、王 方	460
实验辅助工程设计	袁 兵	465
深圳国贸大厦振动实验研究	张大名、吴章珠、袁 兵、汤旋驹、柳祥钦	470
设有隔震砂层的砖房模型振动台试验	高云学、杨玉成、吴冲云	475
底层大空间剪力墙商住模型振动台试验	方鄂华、傅平均、王宗纲	481
钢筋混凝土框架结构模型地震反应的试验研究	霍晓鸣、沈聚敏、王 明	489
混凝土平台部分预应力梁柱的抗震安全设计	钱稼茹、张惠英、陈 鹏	495
拟动力试验装置的实现——对原有红山试验机的改造	清华大学土木系、四机部十五所 联合研究小组	501
构造柱与普通砖房模型振动台试验研究	夏敬谦、黄东生	509
某框架结构梁柱节点抗震鉴定与加固试验研究	龙明英、钟益村、高小旺	515
船闸闸首动力特性的试验研究	孙海峰、宋逸先、马良筠、钮传让	522
动接触减振法的实验研究	陶建人、林 卓、王成伦	528
钢筋混凝土柱考虑软化段的抗力性能	黄金枝、季耀东	534

筒体结构的动力分析及实验	王卫东、张吉平、傅平均、裘宗源	540
框架—石膏板隔墙体系试验研究	李桂青、邢羽翔	548
轻质材料填充的高层建筑的动态特性量测分析	陈志鹏、宝志雯	554
四、结构地震反应与抗震设计		
再论地震工程学的发展趋势	胡幸贤	561
抗震结构最优设防水平的模糊决策	武爱虎、王光远	569
高层结构对地震激励的响应	孟怀江、胡楚雄	577
结构双参数破坏准则及其动力可靠性分析	霍俊荣、胡幸贤	585
不等高厂房纵向剪—扭振动分析	刘大海、钟锡根、杨翠如	591
排架房屋横向抗震空间分析	钟锡根、杨翠如、刘大海	597
高层建筑楼板水平地震剪力计算	杨翠如、刘大海、钟锡根	604
钢筋混凝土电视塔地震反应研究	邢向谦、张良铎、刘顺金、孙国安	612
动力方程直接积分的静力子结构算法	连伟良、楼梦麟、林 卓	618
地震作用下有裂缝重力坝应力强度因子的分析和测定	周 晶、林 卓、倪汉根	624
双向水平地震动作用下结构反应的组合方法	刘 季、黄玉平	630
抗震结构的模糊动力可靠性分析	李秋胜、曹 宏	636
多层滞回框架结构变形能力的抗震可靠性分析	程伟康	644
坝面动水压力的简便算法及坝水耦合振动分析	孙克明、林 卓	650
结构刚度分布未确知情形地震反应的估算	王前信	656
高层框架实用振动分析	郭东工	662
泰山核电站主厂房内网架结构的抗震分析	王天真、夏祖斌、何德炜	667
地震荷载下储液罐的提高效应	熊建国、程 利	673
预应力装配整体式板柱结构抗震设计中的预应力取值问题	阎兴学	679
大跨度立体桁架结构的竖向地震内力	张毅刚	685
钢筋混凝土阶形柱的抗震设计	吴育才	691
水平双向地震作用下质量和刚度偏心结构物的反应	董明耀、刘 伟、郭 利	697
斜置储液罐的内力计算与地震破坏分析	郭 利、程 利	703
在强地震下柱轴压比对贮仓结构延性的影响及其限值	耿树江、刘小勇	708
土基上船闸同室的地震反应分析	戚冠华、施善云	714
海洋平台 ⁶ 结构地震响应的近似计算	陈 琦、曹国光	720
具有不同阻尼的结构体系的地震反应分析	董尧光、袁冠礼	727

传递矩阵法在核电站结构振动分析中的应用	朱镜清、董刚	733
基于普遍型模糊规划的抗震结构优化设计	陈树勋、王光远	739
单层偏心结构及一类多层偏心结构地震反应的摄动解	杨绍瑞、张善元	745
蓟县独乐寺观音阁16米塑像抗震性能的探讨	李世温	751
我国建筑结构平扭耦联地震反应的研究概况	乔天民	756
偏心结构地震反应的地震扭转效应系数法	乔天民	762
抗震结构非线性随机反应及可靠性分析	刘季、李秋胜	769
Q变换求结构动态反应	罗持久、李桂青	777
主观非随机不确定因素对结构抗震可靠性的影响	邢羽翔	784
结构的疲劳可靠性	曹宏、李秋胜	790
基于一次二阶矩方法的框架结构抗震可靠度	沈华	796
抗震结构的局部效应分析在实际抗震结构中的应用	曲乃泗、张文武、朱维	802
高压输电塔抗震分析及整体稳定分析	曲乃泗、苗世华	807
十度以上地震对水工建筑物影响	汪闻韶	812
土石坝地震加速度分布	金崇磐、李裕生	818
土石坝地震加速度分布的概率分析	吴再光、韩国城、林泉	824
结构低周次疲劳性能对地震破坏反应的影响	程民宪、陈聘	830
地震荷载下剪力截面的广义强度计算	霍达、王志忠、厉勉	836
上游法尾矿坝的地震反应分析	张维全、王余庆	842
工程结构系统的能量分析原理与主动设计方法	黄金枝	848
桩基础桥墩有限元非线性地震反应分析	朱晔、冯志勇、谢志明	854
浅层局部土性变化对场地设计反应谱的影响	范敏、刘惠珊	850
五座热电厂主厂房弹塑性地震反应分析	李树桢、尹之潜、李玉宝、杨淑文、文良漠	866
高层建筑的变形计算方法及P— Δ 效应的影响	尹之潜、李树桢、杨淑文	873
多维地面运动作用下偏心结构扭转耦联振动及地震反应分析	李宏男、尹之潜	880
模糊抗震可靠性分析	邢羽翔	886
框架——剪力墙结构体系的动力计算方法	宋加宁、李桂青	893
装配式大板居住建筑竖向接缝抗震设计及方法	张昌叙	899
基于可靠性的结构优化设计综述	汤昶、李桂青	905
基于动力可靠性分析的抗震结构优化设计	汤昶	910
钢筋混凝土偏心受压构件在地震荷载作用下弯矩和轴力的关系	舒宣武	914

五、结构控制与减振设计

结构控制与控制结构	李桂青	917
设有工后滞回钢筋混凝土框架结构的减振设计	瞿伟康	921
门式框架具有基础隔震装置的控制分析	李桂青、邹祖军	926
利用建筑物底层弱抗剪缝隔震设计问题的探讨	李秉邦、李林海	933
对楼层动力基础的优化进行多层厂房水平振动控制的研究	邵晓君、何玉敖	939
顶部突出物对主结构的减振影响	徐海燕	945
用于结构抗震的隔震消能体系设计和计算	周福霖	952

六、结构动力特性

重力坝的动力特性与计算模型	朱威、罗学海	958
柱承式贮仓的自振特性	张耀明	964
刚架支承式贮仓的自振特性	张耀明	969
自由振动分析的组合法——元法	王焕定、王伟	997
高层建筑结构自由振动的近似计算	曹宏、李芝艳、李秋胜	983
连续二铰拱桥自由振动及其影响参数	伍国瑞	987
葛洲坝大江船闸提升楼的自振特性及爆破振动	黄涛、徐光耀	993
储液圆柱罐动力特性研究	覃柳林	1001
储液罐耗散阻尼研究	覃柳林	1007
串联多自由度体系振型和频率的计算方法	陶牟华	1013
利用微机分析斜张桥的动力特性	李发国	1017

七、生命线工程抗震

城市生命线工程抗震评定与修复决策的专家系统	刘锡荃	1081
地下管道的失效概率与震害预测	陈忠云、张耀	1089
生命线网络地震可靠性分析研究现状	朱美珍	1035
多柱式高压电器设备抗震研究	张其法、杨亚第、苏文藻	1041
用离散模型分析地下管道的地震应力	熊占路	1047
生命线工程系统的可靠性	冯居民	1053
地下埋设管线通过不同介质的地震反应研究	谢旭、何玉敖	1059

八、震害预测与抗震防灾

工矿企业抗震防灾规划的定量依据.....	章在塘	1067
城市防灾理论综述.....	沈 华	1075
现有钢筋混凝土框架结构抗震鉴定方法.....	钟益村、高小旺、龙明奂	1081
抗震结构的模糊震害预测与损失估计.....	欧进萍、王光远	1088
现有建筑物的震害预测和抗震决策分析.....	杨玉成	1095
泛布尔代数在震害预测中的应用.....	周 洋	1101
城市震预测中的房屋数据库.....	杨雅玲、杨玉成	1108
专家系统在评价建筑物损性中的应用.....	朱继澄、宋雅桐	1114
多层砖房的抗震可靠度与震害预测.....	张 洛、王文广、许永屯	1120
德州市典型多层砖房震害预测.....	卓君莉、李明海	1126
价值工程在房屋抗震加固中的应用.....	张鸿熙、王庆海	1132
县级抗震防灾规划若干问题的探讨.....	崔自正	1136
旧有建筑的抗震加固.....	解云翔	1141
多层砖混结构抗震鉴定与设计的统计分析.....	楼永林、王敏权、苏志奇	1145
结构震害的选择性和累积性.....	吴良致、周根寿	1153
钢筋混凝土单层厂房重层盖塌落震害的防治.....	吴良致	1159
场地震害小区划及震害预测.....	石兆吉	1165

九、其 它

空心砖应用研究综述.....	盛克苏	1170
农村居民点抗震研究.....	薛挺宏、周今立、俞汝珍	1175
专家系统与地震工程.....	杜瑞明	1183
IPM—PC/XT 微机动态数据采集与处理系统的研制.....	曹恒亮、张 耀	1187
上海地区工程抗震中的一些问题.....	徐植信	1193
华北北部地区潜在震源区识别的主因子模糊聚类方法.....	崔永高、段光贤	1199

地震动记录持时与工程持时

谢礼立 张晓志

(国家地震局工程力学研究所)

关键词：记录持时、反应持时、屈服加速度 a_y 、工程持时 T_e 。

摘 要

本文将现有地震动持时定义区分为记录持时和反应持时两种，并对其优、缺点进行了评述。提出了一个地震动工程持时的概念和定义，并推导了工程持时的预报方程。工程持时具有概念清晰、直观、计算简便、预报方程既与主要地震参数又与主要结构参数相联系的特点，既能客观地描述地震动的持时特征又能满意地给出地震动持时对结构地震破坏的影响。

一 前 言

地震动持时既是地震动的重要特征之一，也是影响结构非线性反应、破坏以致倒塌的重要因素。以往对于持时的研究主要是集中在以下三个方面：

1. 地震动持时的定义；
2. 地震动持时的影响因素及其预报方程；
3. 持时与结构地震破坏之间的联系及其工程应用。

几十年来，这三个方面的研究吸引了许多研究者的兴趣并取得了很多有意义的研究结果。但是已往对地震动持时的研究，往往将上述具有联系的三个方面割裂开来，或者偏重于将持时作为地震动的一个特征，从地面运动的角度研究持时的定义及其与主要地震参数之间的联系；或者偏重于持时对结构破坏的影响，从工程的角度研究持时的定义、与结构破坏的联系及其工程应用；很少能同时从地面运动的角度和工程应用的角度出发、从二者的有机联系上对持时进行全面的研究。这就使得已往的地震动持时研究中存在着一个突出的问题，即：

凡从地面运动角度出发定义的地震动持时，都具有定量计算简便、易于建立与主要地震参数之间联系的优点，但却缺少与结构地震破坏之间的满意联系，这

样定义的持时往往难以反映对结构反应的影响。凡从工程应用的角度出发定义的地震动持时，一般都考虑了与结构的地震反应和地震破坏的联系，但却不便于定量计算，不易于求得与主要地震参数之间的联系。笔者认为这一问题是影响持时研究的进一步发展和持时工程应用的关键性问题。

为了尝试解决地震动持时研究中的上述问题，笔者拟同时从地面运动特征与工程应用的观点出发，对持时研究的三个方面进行全面的研究。本文中则在这样的全面研究基础上，提出一个既能反映地震动特征又能反映持时对结构地震反应和地震破坏影响的新的地震动持时——工程持时的概念和定义，并在二阶矩持时现有研究结果的基础上建立工程持时的预报方程。

二 现有持时定义的特点及其分类

目前，地震动持续时间的定义种类繁多，至今尚无哪个定义为大多数人所接受。但是根据定义者侧重点的不同，可以容易地将现有的地震动持时定义严格地区分为本质不同的两大类。其一是从地面运动的角度出发、通过对地震动加速度记录进行直接或间接的处理而得到的持时定义。因为此类持时定义与结构特性无关，本文中称其为记录持时。其二是从工程应用的角度出发，通过对某个结构反应量的处理而得到的持时定义。因为此类持时定义与某个结构反应量相联系、持时的定量计算亦必需经过结构反应分析，本文中称其为反应持时。较有代表性的记录持时有以下几种：

1. 用地震动的绝对幅值控制的“括号持续时间” t_b 。该定义取加速度记录图上绝对幅值在第一次和最后一次达到或超过事先规定的值（如0.05g或0.1g等）之间所经历的时间、作为地震动持续时间。

2. 用地震动的相对幅值控制的持续时间 t_r 。该定义与括号持续时间对加速度记录进行的处理相同，只是将控制幅值由前者的绝对幅值0.05g等改为此时的 $(1/2, 1/3, 1/e)a_p$ 等。这里的 a_p 是加速度记录的峰值。

3. 用地震动的相对能量控制的持续时间 t_e 。如用从地震动能量达到总能量的5%开始至达到总能量的95%为止所经历的时间、作为地震动持续时间的定义。也有用地震动总能量的70%来控制的相对能量持时。

4. 以地震动的平均能量控制的持续时间 t_m 。如把地震动加速度时程等效为平稳的随机过程，该平稳过程的强度为 A_{rms} ，持续时间为 T_d ，则通过关系式：

$$\int_0^{T_d} a^2(t) dt = A_{rms}^2 \times T_d \quad (2-1)$$

可确定持续时间 T_d 的量值。又如用累积RMS函数给出地震动持续时间的定义等、均属于平均能量控制的地震动持续时间之列。

5. 以地震动的能量分布特征控制的持时。如1984年谢礼立、周雍年^[3]定义的二阶矩持时。

仅有很少的反应持时定义。如：

6. Perez^[4]定义单自由度体系对地震动的弹性反应超过某给定值的积累时间为该地震动的反应持续时间。

7. 鹿林^[5]定义在整个结构反应时程中、消耗在非线性反应上的积累时间为屈服反应持时。

两大类持时定义的划分具有重要的意义：

(1) 它使得何谓从地面运动角度和从工程应用角度对地震动持时进行研究有了具体的内容和确切的含意。

(2) 不难看出，记录持时(即从地面运动角度出发定义的地震动持时)缺少与结构地震破坏之间的满意联系，其根本原因在于，记录持时本身缺乏与结构特性之间的有机联系。反应持时(即从工程应用的角度出发定义的地震动持时)不便于定量计算，不易于求得与主要地震参数之间的联系，其根本原因是现有的反应持时通过结构反应间接地与地震动特性以及结构特性相联系，关系十分复杂。这种持时不仅与地震动的幅值分布、结构参数甚至还与结构反应的过程有关，是一种综合结果。由此得到的反应持时与主要地震参数之间必然难以建立一种简便、直观的联系。

综合以上两点可以看出：在继承记录持时和反应持时的优点而又摒弃其不足的原则下寻求一种新的地震动持时的定义，使之既与地震动本身的特征相联系又能反映结构的主要特性和对结构的破坏作用、而且容易定量计算，是必要的、非常有意义的。

下面本文将对二阶矩持时的定义及其特性作以介绍，然后在此基础上根据结构进入塑性非线性反应的特点给出地震动工程持时的定义并建立其预报方程。

三 地震动工程持时定义及其预报方程

1. 二阶矩持时介绍

1984年谢礼立、周雍年指出：记平方加速度图全部面积的重心坐标为 T_c ，则一般说来(多次地震事件例外)在 T_c 附近的那个时段应该是地震动时程中振动比较强烈的部分，即主震段或强震段。而平方加速度图上能量分布的二阶矩，即

$$T_d = \left| \frac{\int_0^T (t-T_0)^2 a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt} \right|^{1/2} \quad (3-1)$$

式中: $T_0 = [\int_0^T t \cdot a^2(t) dt] / [\int_0^T a^2(t) dt]$ (3-2)

T_d 反应了地震动能量相对其重心的一个分布特征。它反应了地震动强震段集中或分散的程度、亦即反应了地震动持续时间的特征。据此谢、周^[1]定义以 T_d 为中心两倍长 $T_{\dots}$ 为地震动持时、简称为二阶矩持时, 即:

$$T_{\dots} = 2T_d \quad (3-3)$$

此外, 谢、周^[1]还指出, 在大多数情况下, 地震动能量分布接近于单峰状; 在感兴趣的震中距范围内, 强震段前后的能量分布也接近于对称, 如果假设地震动能量沿时间轴的分布 $a^2(t)$ 在形态上与高斯正态分布曲线的形状接近的话, 则根据概率分布理论可得:

(1) 地震动能量沿时间轴的分布形状可由两个参数 T_d 和 $T_{\dots}$ 完全确定。

(2) 在给定的地震动持续时间 $T_{\dots}$ 内, 集中了地震动总能量的 68%, 这接近于 70% 相对能量, 是 90% 相对能量的 76%。

(3) 在 $a^2(t)$ 接近高斯正态分布的假定下, 给出的持时 $T_{\dots}$ 与其它持时定义, 如绝对幅值控制的持时, 相对幅值控制的持时, 以及相对能量控制的持时等, 都存在一种简单的确定性的联系, 这一特性很重要, 本文后面的式(3-13)就是基于这一点导出的。

1985年周雍年等^[2]用回归方程,

$$Y = a \times 10^{bM} \times R^c \times 10^{dS} \quad (3-4)$$

研究了二阶矩持时 $T_{\dots}$ 与震级 M 、震中距 R 和场地条件 S 之间的关系, ($S=0, 1$ 和 2 , 分别表示基岩场地、硬土场地和软土场地。)并给出如下结果:

$$T_{\dots} = 0.477 \times 10^{0.144M} \times 10^{0.144R} \times R^{0.144} \quad (3-5)$$

$$(r=0.76, \sigma=6.3)$$

$$T_{\dots} = 0.253 \times 10^{0.144M} \times 10^{0.144R} \times R^{0.144} \quad (3-6)$$

$$(r=0.76, \sigma=2.29)$$

式(3-5)和(3-6)中, $T_{\dots}$ 和 $T_{\dots}$ 分别表示用日本数据和用中国数据得到的结果, r 是多元相关系数。

2. 地震动工程持时定义

人们都已熟知诸如 $0.05g$ 、 $0.1g$ 等地震动绝对幅值控制的地震动持续时间的定义和以一定比例的加速度峰值 a , 如 $(1/2) \cdot a$ 、 $(1/3) \cdot a$ 、 $(1/6) \cdot a$ 等相对

幅值控制的地震动持续时间的定义。在这些定义中绝对或相对幅值的选取是相当随意的。为了克服这种随意性并使得地震动持续时间与结构特性相联系，本文定义一个绝对幅值水平：

$$a_s = \frac{Q_s}{m \cdot \beta_s(T_s)} \quad (3-7)$$

式中：

- Q_s —— 体系的屈服强度；
- m —— 体系的质量；
- T_s —— 体系的自振周期；
- β_s —— 地震动反应谱在 T_s 处的值。

显而易见， a_s 具有加速度的量纲且是使体系从线性反应状态过渡到非线性反应状态的临界值或简单地说是使体系进入屈服状态的临界值。所以本文称 a_s 为体系的屈服加速度。

用 a_s 作绝对幅值水平，定义地震动加速度图上加速度的绝对值在第一次和最后一次达到或超过 a_s 之间所经历的时间叫做该地震动在所论结构体系下的工程持续时间、简称为工程持时并记为 T_e 。

工程持续时间有如下的性质：

- (1) 同一个地震动对于不同性质的结构，可以有不同的工程持续时间。
- (2) 当 $a_s > A_{max}$ 时， $T_e = 0$ ；这时，表明结构在这样的地震动作用下永远不会进入塑性；地震动的持时对结构的反应，基本上没有影响（随机反应例外）。
- (3) 与结构特性如 Q_s 、 m 、 T_s 、 ζ （阻尼比）以及反映地震动综合特性的反应谱 β 等之间具有简单而且直观的联系。

3. 工程持时的预报方程

为了得到工程持续时间与震级 M 、震中距 R 和场地条件 S 之间的联系，我们利用二阶矩持时 T_{e2} 的特性及其预报方程。假定地震动能量 $a^2(t)$ 沿时间轴的分布大致地服从高斯正态分布，如图(3-1)所示，则有：

$$a^2(t) = a_s^2 \cdot \exp[-(t-T_s)^2 / (2 \cdot T_{e2}^2)] \quad (3-8)$$

$$a_s^2 = a^2(T_s) = a^2(T_s) = a_s^2 \cdot \exp[-(t_s-T_s)^2 / (2 \cdot T_{e2}^2)] \quad (3-9)$$

由(3-9)式可得：

原书空白

质和刚度、强度具有循环退化性质的两种三线性、单自由度结构体系进行了大量的弹塑性计算分析。下文中称与此两类结构对应的数学模型分别为负刚度模型和循环退化模型。

负刚度模型是需要考虑 $P-\delta$ 效应的一类结构的数学模型，已为许多人所广泛使用^{[2][3]}。现有的研究表明，负刚度模型结构的破坏以致倒塌受到地震动持续时间的很大影响。此外在负刚度模型中、刚度和强度均随最大位移的增加而退化、部分地反映了结构的积累耗能和疲劳破坏性质，因此形式上的变形破坏准则实质上具有一定的双重破坏准则的意义。

循环退化模型是由张良铎、那向谦^[4]提出的一种结构数学模型，其特点是结构的刚度和强度不仅随最大结构变形的增加而退化，而且随滞回循环次数的增加而退化。大量的实验研究表明许多结构尤其是某些钢筋混凝土结构客观上具有循环退化的性质^{[5][6]}。循环退化模型中，结构体系的刚度和强度随最大变形和滞回次数的增加而退化，较完整地反应了结构的耗能积累和疲劳破坏性质。极其有利于使地震动持续时间对结构倒塌的作用得到充分的反映并使双重破坏准则以简便实用的形式得到充分的考虑。

负刚度模型和循环退化模型的恢复力骨架曲线和滞回曲线分别示于图(2-1)和图(2-2)中。骨架曲线的确定一共需要 k_0 、 b_1 、 b_2 、 u_1 、 Q_0 五个独立参数。此外为实现对滞回曲线的控制，还必须给定参数 γ 和 α 。单自由度体系的运动方程是：

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + f(u) = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad m \cdot \ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot m \cdot \omega_0(u) \cdot \dot{u} + f(u) = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (2-2)$$

$$\text{引进} \quad \omega_0 = (k_0/m)^{1/2} \quad T_0 = 2 \cdot \pi / \omega_0$$

式中， ω_0 ——刚度为 k_0 质量为 m 的当量弹性体系的无阻尼固有圆频率； T_0 ——与 ω_0 相应的结构自振周期； ζ ——当量弹性体系的阻尼比。

$$\text{定义} \quad u = [(b_2 - 1) \cdot u_1 + (b_1 - b_2)] / b_2 \quad (2-3)$$

即当下降段与横轴相交时结构倒塌，因为到达该点时，结构已经完全丧失了抵抗外力的能力。式(2-3)中的符号见图(2-1)和(2-2)。此外，对于循环退化模型还规定当

$$Q_i \leq 0.2 Q_0 \quad (2-4)$$

时结构也发生倒塌。式中， $Q_i = Q_0(\alpha)^i$ 为第 i 次循环时的结构屈服强度； i ——循环次数； Q_0 ——结构的初始屈服强度。 α 为一个大于0小于1的常数。

本文的弹塑性分析是对具有0.2sec、0.5sec、1.0sec三个典型结构自振周期的结构进行的。每个结构自振周期之下都考虑了 $Q_0 = 3000\text{kg}$ 、 2500kg 、 2000kg 三个不同的屈服强度，加之参数 K_0 和 α 取值的不同，共计对27个具有不同参数的结构进行了弹塑性分析，具体的参数取值参阅文献[6]。体系运动微分方程(2-1)或(2-2)的求解采用Willson—— θ 法，拐点的处理采用朱镜清^[7]推荐的精确处理