

清华大学土木工程系组编

土木工程新技术丛书

主 编 崔京浩

结构试验与 工程检测

陈志鹏 张天申 邱法维 王宗纲 编著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



TU
Q636

清华大学土木工程系组编

土木工程新技术丛书

主 编 崔京浩

结 构 试 验 与 工 程 检 测

陈 志 鹏
邱 法 维

张 天 申
王 宗 纲

编 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



清华大学土木工程系

土木工程新技术丛书

结构试验与工程检测

内容提要

本书是由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”中的一本,是为满足当前建筑业对结构试验、工程检测及建筑物安全鉴定与加固补强方面的需要编写的。全书共8章,分为3篇。

上篇为拟动力实验方法,内容包括拟动力实验方法的基础和应用两部分。中篇为建筑物动力特性测试,内容包括测试方法与要求、试验数据的分析处理和建筑物动力特性测试实例。下篇为建筑物的安全鉴定与加固处理,内容包括结构安全检测、结构安全性鉴定与评估,以及建筑物结构的加固补强。

本书紧贴我国的工程实际和城市化过程中的常见问题,作者根据长期从事相关工作的过程中积累的宝贵经验,以解决实际问题为出发点,对有关内容进行了详细而深入的阐述,反映了国内外的研究成果。书中的工程实例有助于读者对本书内容的理解与掌握。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材或教学参考书,也可作为有关专业的工程技术人员和科研人员的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

结构试验与工程检测 / 陈志鹏等编著. —北京: 中国

水利水电出版社: 知识产权出版社, 2004

(土木工程新技术丛书 / 崔京浩主编)

ISBN 7-5084-2518-9

I. 结... II. 陈... III. ①土木工程—工程结构—
结构试验②土木工程—检测 IV. TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 121258 号

土木工程新技术丛书

结构试验与工程检测

陈志鹏 张天申 邱法维 王宗纲 编著

中国水利水电出版社

知识产权出版社

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京密云红光印刷厂印刷

787mm×1092mm 16开 11印张 261千字

2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

印数: 0001—3200

定价: 22.00元

ISBN 7-5084-2518-9

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044; 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

清华大学土木工程系组编

土木工程新技术丛书

编 委 会

名誉主编 龙驭球

主 编 崔京浩

副 主 编 石永久

编 委 (按姓氏拼音字母排序)

包世华 陈志鹏 崔京浩 方东平 龚晓海

李德英 李永德 廉惠珍 龙志飞 卢 谦

卢祥之 卢有杰 陆化普 路新瀛 石永久

佟一哲 王元清 吴俊奇 杨 静 阳 森

叶列平 叶书明 张铜生 张新天

总 序

土木工程——一个古老而又年轻的学科。

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程(Civil Engineering)是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术。”

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程(Military Engineering)而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，防护工程、发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，显示出勃勃生机。其中，工程材料的变革和力学理论的发展起着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖、瓦、灰、砂、石，而是由新理论、新材料、新技术、新方法武装起来的，为众多领域和行业不可缺少的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

《土木工程新技术丛书》由清华大学土木工程系组织编写，成立了编委会，由崔京浩教授任主编，聘请中国工程院院士龙驭球先生为名誉主编。

丛书的组织编写原则遵循一个“新”字。一方面，“新”体现在组织选编的书目上(见封底的书目)：当然首选那些与国家建设息息相关、内容新颖、时代感强的书。改革开放以来，特别是新世纪到来之际，国家建设部门对运行管理、安全保障、质量监控、交通分析等方面的需求日益迫切，在书目选择上我们有意识地侧重了这一方面，力求引进一些国外的理论和实践，为我国建设服务；另一方面，“新”体现在各分册的内容上，即使是一些分册书名比较传统，其内容的编写也都努力反映了新理论、新规范、新技术、新方法，读者可以从各分册内容摘要和章节目录编排上看出这种特色。

这套丛书的读者对象是比较宽泛的，除土木工程技术人员以外，对建设部门管理人员也是一套很有指导意义的参考读物。特别需要指出的是，这套书的作者几乎全是高等学校的教师，职业决定了他们写书在逻辑性、条理性和可读性诸方面有其独特的优势。在组织编写时我们又强调了深入浅出、说理透彻、理论与实际并重的原则，以便大专院校作为教材选用。

《土木工程新技术丛书》编委会

前 言

本书共分三篇，上篇为拟动力实验方法；中篇为建筑物动力特性测试；下篇为建筑物的安全性鉴定与加固处理。这三部分内容都是作者在长期从事这些工作的过程中积累的经验与认识，力图从基本原理入手，讲述试验方法、试验数据的分析处理和试验结果等内容。本书结合试验实例进行讲述，能增加读者的感性认识，既便于理解，又比较生动形象。

结构试验与工程检测的内容很多，不少专家已有著述出版，因此本书没有进行全面的论述，只是对上述三部分内容做了比较详尽和深入的阐述，对多年从事的工作进行总结、归纳与提高，希望以此作为本书的特点，便于与读者交流。

在本书的写作过程中，不少专家学者的论著也给了我们十分有益的启发和帮助，在此表示感谢。由于我们的学识、能力、条件有限，书中定会有缺点错误，敬请读者批评指正。

本书撰写分工为：上篇，邱法维；中篇，陈志鹏、王宗纲；下篇，张天申；全书由陈志鹏统稿。

作 者

2004.10.31

目 录

总序

前言

上篇 拟动力实验方法

第一章 拟动力实验方法的基础

第一节 引言	1
第二节 拟动力实验的基本方法	5
第三节 拟动力实验的数值积分方法	8
第四节 等效单自由度体系的拟动力实验	12
第五节 子结构拟动力实验方法与技术	13

第二章 拟动力实验方法的应用

第一节 子结构拟动力实验方法与技术的实际应用	21
第二节 多维拟动力实验方法	31
第三节 无条件稳定的数值积分方法（隐式方法）	35
第四节 拟动力实验的误差及其控制方法	40

参考文献	42
------	----

中篇 建筑物动力特性测试

第三章 测试方法与要求

第一节 建筑物动力特性测试的目的	45
第二节 测试方法——脉动法	46
第三节 测试的特点及对仪器设备的要求	52
第四节 传感器布置的原则	52

第四章 试验数据的分析处理

第一节 随机数据分析	57
第二节 从数据分析估计建筑物的动力特性	62
第三节 平移振动信号的识别	64
第四节 扭转振动信号的识别	65
第五节 耦连振动信号的分解	68
第六节 扭转振动对响应信号幅值的影响	69
第七节 几种特殊振动情况下的振动信号分析	71

第五章 建筑物动力特性测试实例	76
第一节 高层建筑的动力特性	76
第二节 工业厂房的动力特性	84
第三节 塔桅建筑的动力特性	88
第四节 桥梁的动力特性	95
参考文献	102

下篇 建筑物的安全性鉴定与加固处理

第六章 结构安全性检测	103
第一节 结构检测的内容及程序	103
第二节 材料强度的现场检测	105
第三节 超声法检测混凝土强度及内部缺陷	109
第四节 结构钢筋配置及锈蚀状态的无损检测	114
第五节 结构的现状查勘	117
第六节 新型加固材料及技术的配套检测方法	123
第七节 现场检测及安全鉴定中应注意的几个问题	126
第七章 结构安全性鉴定及评估的内容与方法	129
第一节 结构安全性鉴定的程序与方法	129
第二节 结构安全性鉴定的主要内容	133
第三节 结构安全性鉴定的分级标准	135
第四节 建筑物的抗震安全鉴定	137
第八章 建筑物结构的加固补强	141
第一节 建筑物加固补强的原因及目的	141
第二节 建筑物加固补强的主要内容	142
第三节 各类主要加固方法简介	146
第四节 加大截面法	148
第五节 主要加固材料	165
参考文献	166

上篇 拟动力实验方法

第一章 拟动力实验方法的基础

第一节 引言

结构抗震实验研究的主要目的有两个：一是对材料或结构的表现进行深入的了解；二是对结构的预期反应进行验证。前者在于发展抽象的、概括性的结构数学模型，主要采用小尺度的单自由度试件和周期性的加载方法；后者是将已经存在的数学模型用于构件或结构，根据实验对预期的响应进行验证，主要采用地震模拟振动台实验方法和拟动力实验方法。拟静力加载实验方法是目前结构工程中应用最为广泛的实验方法，它可以最大限度地获得试件的刚度、承载力、变形和耗能等信息，但不能模拟结构在实际地震作用下的反应；地震模拟振动台实验是能最真实地再现地震动和结构反应的实验方法，高精度的多自由度地震模拟振动台的建造和发展为研究结构弹塑性地震反应提供了有效的手段。但是对于大型结构或构件，需要大型地震模拟振动台，这是一项投资很大的设备，因此也就限制了它的建设规模，从而影响了许多大型结构进行地震模拟实验。正是由于地震模拟振动台承载能力的限制，一般的振动台实验只能进行小尺度的模型结构实验，由于小尺度结构模型的动力相似律很难满足要求，尤其是在弹塑性范围内，实验结果往往难以推广到原型结构中去，这也是振动台实验的一个不足之处，因此限制了它的应用；虽然计算机技术有了迅速的发展，结构的理论分析和计算水平也已极大地提高了，但是对于结构在地震作用下的弹塑性响应计算，需要事先给出构件的恢复力模型，而这种恢复力模型的选择和参数确定是目前结构理论中还没有很好解决的问题，尤其对于具有复杂形体和构造的结构体系更是如此。拟动力实验方法吸收了周期性加载实验和地震模拟振动台实验这两种实验方法的优点，同时吸收了结构理论分析和计算的优点，可以模拟大型复杂结构的地震反应，所以自从其开发成功以来^[1]，在结构工程方面得到了广泛的应用。同时，拟动力实验方法本身的研究也取得了重大进展；特别是近年来，在概念、方法、技术和设备等方面都与最初阶段的拟动力实验有了很大的不同，应用领域也从最初的研究结构本身扩展到了研究土-结构相互作用、土层地震反应分析、桥梁结构、多维多点地震输入和设备抗震等方面。

拟动力实验方法是1969年由日本学者 M. Hakuno 等人^[1]首次提出的，是将计算机与加载作动器联机求解结构动力方程的方法，目的是真实地模拟地震对结构的作用。这种方法当时称为杂交实验方法 (hybrid testing)，后来国内外多称之为拟动力实验方法 (pseudodynamic testing) 或联机实验方法 (on-line test)。这种实验方法可以进行大型结构的地震模拟实验，同时解决了理论分析计算中恢复力模型及参数难以确定的困难。这种方法的

关键是结构的恢复力直接从试件上测得，无需对结构恢复力作任何理论上的假设。当时 M. Hakuno 是将模拟计算机与电液伺服作动器联成一个实验系统，如图 1-1 所示，试件为悬臂的钢梁，当系统启动后，如果输入地震加速度信号 $\ddot{x}_0$ ，则系统的方程为

$$a + \frac{c}{m}v + \frac{1}{m}r + \ddot{x}_0 = 0 \quad (1-1)$$

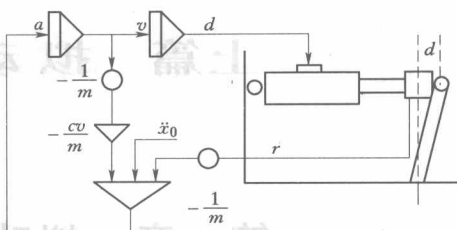


图 1-1 模拟计算机控制的
拟动力实验系统

式 (1-1) 即为单自由度结构在地震作用下的动力方程，整个实验过程按式 (1-1) 自动进行。但是这个实验系统存在很大欠缺，由于采用的是模拟计算机，计算精度低，而且求解复杂微分方程以及满足各种边界条件都比较困难，而且模拟计算机难以进行各种复杂的判断和控制，所以考虑改进实验系统并采用数字计算机代替模拟计算机是很自然的。

到了 1974 年，K. Takanashi^[2] 采用数字计算机代替了性能较差的模拟计算机，发展了用于结构弹塑性地震反应的拟动力实验系统，其目的在于研究目前描述结构或构件恢复力特性的数学模型是否正确，进一步了解难以用数学公式表达其恢复力特性的结构地震反应。此项实验获得了成功，更重要的是它标志着结构抗震实验方法的重大进展。从此，拟动力实验方法在结构抗震实验研究中确立了其不可替代的地位。与理论计算相比，它无需对结构作任何假定就能获得结构体系的真实地震反应特征；而与拟静力实验和地震模拟振动台实验相比，它既有拟静力实验那样经济方便的特点，又具有振动台实验那样真实模拟地震作用的功能。图 1-2 给出了拟动力实验过程与数值计算过程之间的比较。

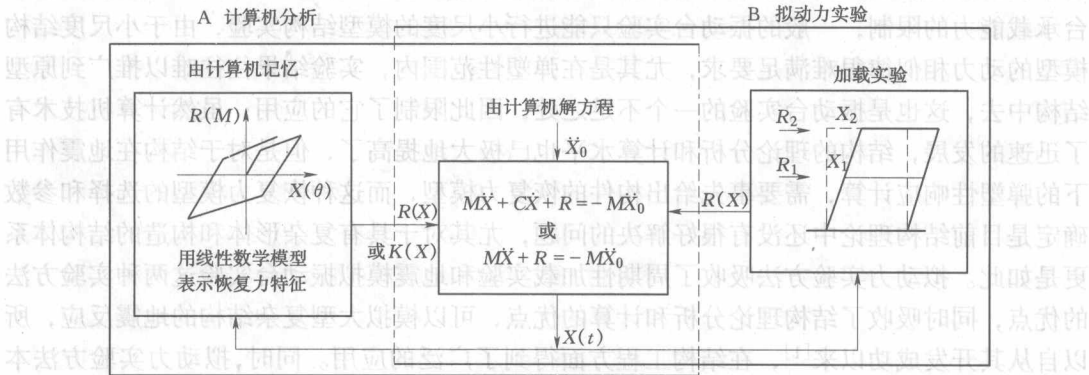


图 1-2 数值计算与拟动力实验之间的比较

最初 K. Takanashi 在拟动力实验中采用的数值积分方法是线性加速度方法，动力方程采用的是增量的形式，需要给出刚度矩阵，在弹塑性状态下其瞬态刚度（正切刚度）通过测量得出。由于位移传感器精度的限制，瞬态刚度的变化很剧烈，往往造成实验结果不理想。为了克服这个困难，H. Tanaka^[3] 在数值方法上改用中央差分法代替线性加速度方法，这样在拟动力实验的计算中直接使用测量的恢复力而避免使用瞬态刚度，从而提高了实验结果的稳定性和精度。因此后来实施的许多拟动力实验均采用中央差分法作为实验的数值

积分方法。

拟动力实验方法和实验技术的发展大致可分成两个阶段：第一阶段是 20 世纪 70 年代到 80 年代中期，这一阶段是拟动力实验方法与技术的开发、改进和初步应用阶段，这一时期的实验研究工作主要集中在日本，总共进行了将近 30 项拟动力实验，表 1-1 列出了

表 1-1 日本进行过的拟动力实验

Type of specimen (1)	References (2)	Major dimensions (3)	Number of degrees of freedom (4)	Comments (5)
(a) Application to steel structural members and systems				
1-story-1-bay frame	Takanashi, et al. 1978	Beam: H-200×100 Column: rigid Span length: 2.6 or 3 m Story height: 1.2 m	1	First on-line test
2-story-1-bay frame	Takanashi, et al. 1980	Beam and column: H-200×100 Span length: 2.6 m Story height: 1.5 m	2	First multiple DOF test (adoption of central difference method)
Steel footing	Kaneta, et al. 1980	Column: H-100×100 Depth of RC footing: 3 m	1	
Beam-to-column high-strength bolt connection	Takanashi, et al. 1981	Beam: H-200×100 Column: H-150×150	2	
1-story-1-bay braced frame	Miyazawa, et al. 1981	Moment connection detail Beam and column: PL-16×32	1	
Beam-to-column high-strength bolt connection	Kaneta, et al. 1983	Brace: 6 ϕ Beam: H-125×125 Column: H-125×125 Moment connection detail	1	On-line test with micro computer
1-story-1-bay frame	Takanashi, et al. 1983	Beam and column: H-200×200 Span length: 2.9 m Story height: 1.45 m	1	First fast on-line test
H-shaped column in biaxial bending	Takanashi, et al. 1984	Column H-70×70 Height: 0.89 m	2	Individual input in each horizontal direction
2-story-1-bay braced and unbraced frames	Yamazaki, et al. 1984, 1986	Beam and column: H-100×50 Beam: PL-20×3.4 Span length: 2 m Story height: 1 m	2	Comparison between shake table and on-line tests
6-story-2-bay by 2-bay steel braced frames	Yamanouchi, et al. 1984	Span length: 3.75 m (first story: 4.5 m) Total height: 21.5 m Span length: 7 m	6	Full-scale test, treated as six-degree-of-freedom-system with high viscous damping for fourth to sixth modes
3-story-1-bay frame	Hayama, et al. 1984	Beam and column: H-300×200 Span length: 2 m Story height: 1.5 m	3	
Cantilever column anchored in RC slab	Okada, et al. 1984	Column: H-150×150 Anchor bolt: 22 ϕ Anchoring depth: 0.208 m	1	Floor response used as input acceleration
1-story-1-bay frame	Takanashi, et al. 1984	Column: PL-15.9×26 Beam: rigid Span length: 0.7 m Story height: 0.48 m	1	Comparison between shake table and fast on-line tests

续表

Type of specimen (1)	References (2)	Major dimensions (3)	Number of degrees of freedom (4)	Comments (5)
(b) Application to reinforced concrete structural members and systems				
End-fixed or simply supported column	Okada, et al. 1977	Column: $\square$ -150 $\times$ 150 Height: 0.6 m	1	First on-line test to RC structure
2-story-1-bay frame	Kitagawa, et al. 1984; Kubota, et al. 1980	Beam and column: $\square$ -200 $\times$ 200 Span length: 3 m Story height: 1.5 m	2	Comparison between shake table and on-line tests
1-story-1-bay space frame with shear wall	Okada, et al. 1981	Span length: 1.5 m Story height: 0.96 m	2	Individual input to each horizontal direction
2-story-1-bay frame with shear wall	Teshigawara, et al. 1982	Column: $\square$ -150 $\times$ 150 Beam: $\square$ -150 $\times$ 180 Shear wall: rigid Story height: 0.9 m Span length: 0.8 m	2	Test of coupled shear-wall assemblage
1-story-1-bay space frame with shear wall	Seki, et al. 1984	Span length: 1.0 m Story height: 0.9 m	1	Eccentric loading and torsional response
7-story-3-bay 2-bay frame with shear wall	Kaminosono, et al. 1984	Story height: 3.0 m (first Story: 3.75 m) Span length: 5 or 6 m Total height: 21.75 m	1	Full-scale test, treated as one degree of freedom by modal reduction
Simply supported beam	Iemura, 1984	Beam: $\square$ -150 $\times$ 100 Span length: 1.5 m	1	Comparison of virgin and repaired beams
Cylindrical shell	Hisada, et al. 1984	Diameter: 1.6 m Height: 1.6 m Thickness: 0.06 m	1	On-line test with temperature gradient effect
2-story-1-bay frame	Tsutsumi, et al. 1985	Beam and column: $\square$ -200 $\times$ 200 Span length: 2 m Story height: 1 m	2	Use of implicit Newmark method by measuring tangent stiffness
Shear wall with orthogonal walls	Kobayashi, et al. 1985	Width: 1 m Height: 0.8 m Thickness: 0.1 m	1	
1-story-1-bay space frame	Mizoguchi, et al. 1985	Span length: 1 m Story height: 1.024 m	1	Eccentric loading and torsional response
Column with side	Ishimaru, et al. 1985	column: $\square$ -250 $\times$ 250 Height: 1.5 m	1	
(c) Application to geotechnical engineering study				
Pile embedded in soil	Mochizuki 1975	Pile: PL-100 $\times$ 16 Pile length: 0.49 m	1	On-line test for soil-structure interaction
Dynamic triaxial test	Katada, et al. 1984		1	On-line test using equations of wave propagation, including effect of liquefaction

Note: H=H-shaped cross section; $\square$ =rectangular cross section; PL= steel plate; units in millimeters unless otherwise specified.

注 表中内容若译为中文,会有不够确切之处,故保留原文。

日本在这一时期所进行的拟动力实验情况。美国学者在这一时期也作了许多理论研究工作, K. Takanashi 和 M. Nakashima^[4]对这一时期的拟动力实验工作作了详细的评述和总结, 指出了存在的问题和未来发展方向。第二个阶段是 20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期, 随着拟动力实验方法的不断应用, 原有问题的不断解决和新问题的不断出现, 拟动力实验方法也发生了新的变化, 这一阶段拟动力实验在概念、方法和技术上都与最初有了很大的不同。第一, 面对的建筑结构向着更高、更大、更复杂的方向发展, 实验室及设备规模对大型结构实验的限制是必须冲破的; 第二, 传统的拟动力实验方法是基于显式数值积分方法开发的, 无论实验设备的技术水平多么先进, 由于显式数值积分方法都是条件稳定的, 对于现代结构刚度大、自由度多的特点, 显式数值积分方法的条件稳定性限制就明显暴露出来了, 这是理论上必须解决的问题; 第三, 传统拟动力实验采用的是一种准静态的加载过程, 无法考虑加载速率对结构反应的影响, 而地震对结构的作用恰恰是动力的, 加上近年来在一些结构中采用了橡胶隔震器、粘滞阻尼器、摩擦阻尼器等一些新的元件和设施, 使结构具有明显的速度依赖特征。为了解决上述问题, 在拟动力实验中提出了一些新的方法和技术, 首先是子结构技术在拟动力实验中的应用^[5~7], 这种方法充分考虑了结构的整体规模, 同时也最大限度地发挥了实验室规模和设备的功能; 其次是理论上发展了用无条件稳定的数值积分方法代替目前使用的条件稳定的数值积分方法^[8,9], 消除了传统拟动力实验中数值积分方法的固有欠缺。为进一步考虑加载速率对实验结果的影响, 提出了快速拟动力实验方法及数值修正方法来消除加载速率的影响^[10~13]。此外, 新型加载设备和技术的研究^[4]、实验误差分析理论的建立及抑制方法的研究也都取得了很大进展^[15~19], 拟动力实验方法在建筑结构领域之外的其他方面的应用也都有所尝试^[20,21]。

我国在拟动力实验方法的研究和应用方面开展得稍晚, 大约从 20 世纪 80 年代初开始了拟动力实验的研究与应用^[22], 目前国内已经有许多单位开展了此项实验的研究与应用, 主要有中国建筑科学研究院^[22~26], 清华大学^[27,28], 哈尔滨建筑大学^[29~33], 湖南大学^[34,35], 西安建筑科技大学^[36]和重庆建筑大学^[37]等单位; 研究的对象从构件、子结构体系到整体结构都有; 加载方式有单自由度的、等效单自由度的和多自由度的; 采用的数值方法有线性加速度法, 中央差分法和隐式无条件稳定的 α -方法等; 在加载控制软件的编制和实验误差的抑制方面都达到了很高的水平。相信经过国内专家的不断努力, 一定可以达到国际先进水平, 为抗震研究工作作出应有的贡献。

第二节 拟动力实验的基本方法

一、基本思想

拟动力实验的基本思想是基于结构动力方程的数值计算过程, 对于一个离散的多自由度结构系统, 其动力方程可写为

$$Ma + Cv + Kd = f \quad (1-2)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为质量阵、阻尼阵和刚度阵; a 、 v 和 d 分别为相对加速度、速度和位移; f 为地震力向量。

为了能够对式 (1-2) 进行数值求解, 需要将式中的微分方程变成差分方程的形式, 设时间步长为 Δt , 式 (1-2) 在某一时刻 t_i 的离散时间动力方程为

$$Ma_i + Cv_i + Kd_i = f_i \quad (1-3)$$

为了数值求解离散动力方程 (1-3), 首先考虑线性加速度方法, 线性加速度方法是假定在 t_i 到 t_{i+1} 范围内加速度按线性规律变化, 如图 1-3 所示, 设位移 d_i 、速度 v_i 和加速度 a_i 已经求得, 根据图 1-3, 当 $\tau = \Delta t$ 时, t_{i+1} 时刻的位移可表示为

$$d_{i+1} = d_i + v_i \Delta t + a_i \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\Delta a}{6} \Delta t^2 \quad (1-4)$$

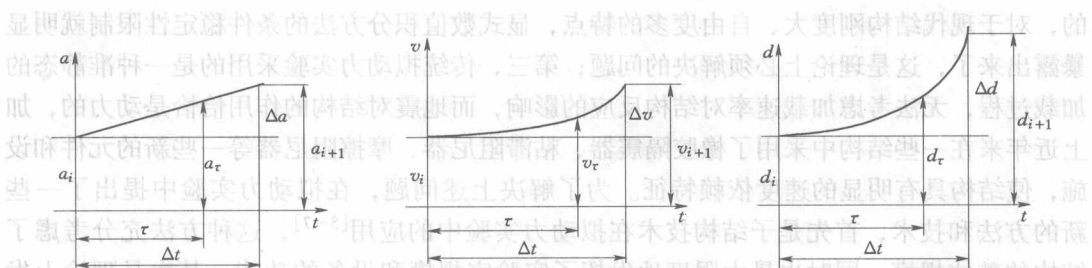


图 1-3 线性加速度方法的变化关系

速度为

$$v_{i+1} = v_i + a_i \Delta t + \frac{\Delta a}{2} \Delta t^2 \quad (1-5)$$

由式 (1-4) 和式 (1-5) 可得

$$\Delta d = d_{i+1} - d_i = v_i \Delta t + a_i \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\Delta a}{6} \Delta t^2 \quad (1-6)$$

$$\Delta v = v_{i+1} - v_i = a_i \Delta t + \frac{\Delta a}{2} \Delta t^2 \quad (1-7)$$

由式 (1-6) 可得

$$\Delta a = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta d - \frac{6}{\Delta t} v_i - 3a_i \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 代入式 (1-7) 可得

$$\Delta v = \frac{3}{\Delta t} \Delta d - 3v_i - \frac{\Delta t}{2} a_i \quad (1-9)$$

显然速度增量 Δv 和加速度增量 Δa 都可以从位移增量 Δd 求出, 为了求出 Δd , 需要用到 t_i 到 t_{i+1} 时刻的增量动力平衡方程

$$M\Delta a + C_i \Delta v + K_i \Delta d = \Delta f_i \quad (1-10)$$

在式 (1-10) 中假定了 C_i 和 K_i 在 t_i 到 t_{i+1} 范围内不变, 将式 (1-8) 和式 (1-9) 代入式 (1-10) 中整理得

$$\left[K_i + \frac{6}{\Delta t^2} M + \frac{3}{\Delta t} C_i \right] \Delta d = \Delta f_i + M \left(\frac{6}{\Delta t} v_i + 3a_i \right) + C_i \left(3v_i + \frac{\Delta t}{2} a_i \right) \quad (1-11)$$

显然, 为了求位移增量 Δd , 必须得到正切刚度 K_i , 当年 K. Takanashi 就是采用此方法进行拟动力实验的。具体过程是由 t_i 时刻的测量位移和测量力计算刚度 K_i , 然后由式

(1-11) 计算出位移增量 Δd ，再由式 (1-8)、(1-9) 求出加速度增量 Δa 和速度增量 Δv ，从而可以得到 t_{i+1} 时刻的位移 d_{i+1} 、速度 v_{i+1} 和加速度 a_{i+1} ；将位移 d_{i+1} 由加载作动器在试件上实现，并测回试件的反力则可以计算下一步的正切刚度 K_{i+1} ，然后再求位移增量 Δd ，这个过程如此循环，直到输入的整个地震过程结束。采用线性加速度方法进行拟动力实验所遇到的一个很大困难就是正切刚度 K_i 的计算，因为在弹塑性范围内，要保证准确的地震响应就要保持时间步长选择很小，而实验加载逼近过程又要求有可靠的正切刚度估计，由于位移传感器的精度以及一个位移加载步长的量值可能非常小，有时将会造成正切刚度的计算结果数值极大的困难（类似于被 0 除），这种正切刚度在各个离散点的陡变往往导致整个实验系统进入不稳定状态。

二、中央差分法

为了克服上述困难，H. Tanaka^[3]在拟动力实验中采用了中央差分法代替线性加速度方法，中央差分法采用了如下的速度和加速度假定：

$$v_i = \frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2\Delta t} \quad (1-12)$$

$$a_i = \frac{d_{i+1} - 2d_i + d_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 和式 (1-13) 代入离散时间动力方程 (1-3) 中并令 $Kd_i = r_i$ ，经整理可得下式：

$$d_{i+1} = \left(M + \frac{\Delta t}{2} C \right)^{-1} \left[2Md_i + \left(\frac{\Delta t}{2} C - M \right) d_{i-1} - \Delta t^2 (r_i - f_i) \right] \quad (1-14)$$

显然 d_{i+1} 只与恢复力 r_i 有关，而与试件的正切刚度无关，从而避开了线性加速度方法中的困难。 d_{i+1} 表达式 (1-14) 中右端都是已知量，因此中央差分法是一种显式方法。图 1-4 给出了采用中央差分法的拟动力实验概图。

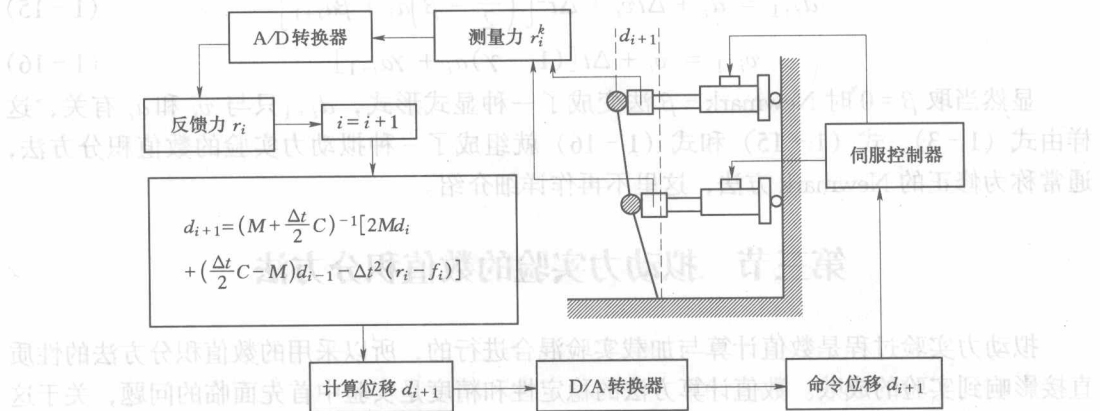


图 1-4 采用中央差分法的拟动力实验概图

由于加载作动器与试件和反力墙之间的连接可能存在缝隙，在加载过程中各传力部分还存在着弹性变形，因此加载作动器本身的位移传感器的测量值并不等于试件位移，所以对试件的位移测量采用单独安装的位移传感器，而拟动力实验所要达到的目标位移是按试

件的位移为准,控制的位移是作动器的位移,同时每一步的加载位移增量也不是一次完成的,是通过多次逼近达到目标值的,这个过程可以通过图 1-5 来说明。

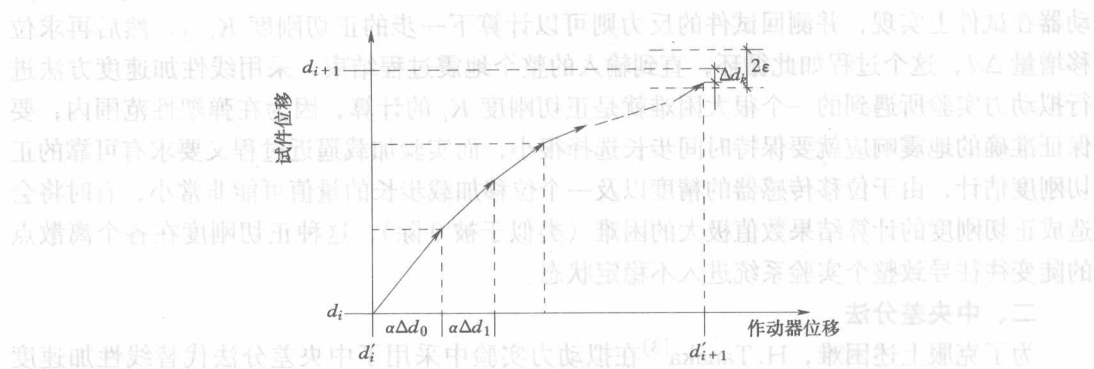


图 1-5 拟动力实验的作动器加载过程

由图 1-5 可以看到,试件在 Δt 时间内由位置 d_i 向 d_{i+1} 运动,位移步长为 Δd_0 ,此时作动器的位移处于位置 d'_i ,将 Δd_0 乘上一个系数 α ($\alpha=0.3\sim 0.8$) 作为作动器的命令位移增量由 d'_i 向 $d'_i + \alpha \Delta d_0$ 加载,此时试件距目标值 d_{i+1} 还剩下 Δd_1 ,重复上一步的加载过程直到 $\Delta d_k \leq \epsilon$,则由 d_i 向 d_{i+1} 的加载过程即告结束。当然,试件的实际位移距目标位移还有 Δd_k 的误差值,如何消除 Δd_k 对实验的影响将在误差分析一节中讨论。另一个问题是对于多自由度系统,各个自由度上的目标位移很难同时达到,当某个自由度已经满足误差要求达到目标位移值而其他自由度还未达到目标位移时,则达到目标位移的作动器保持当前状态,未达到目标的作动器继续加载直到试件所有自由度的位移均达到目标。

Newmark- β 法作为一种常用的数值积分方法,它的显式形式也是可以用于拟动力实验的,对于式 (1-2) 的整体动力方程,Newmark- β 法的位移和速度表示为

$$d_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) a_i + \beta a_{i+1} \right] \quad (1-15)$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta t [(1 - \gamma) a_i + \gamma a_{i+1}] \quad (1-16)$$

显然当取 $\beta=0$ 时 Newmark- β 法变成了一种显式形式, d_{i+1} 只与 v_i 和 a_i 有关,这样由式 (1-3)、式 (1-15) 和式 (1-16) 就组成了一种拟动力实验的数值积分方法,通常称为修正的 Newmark 方法,这里不再作详细介绍。

第三节 拟动力实验的数值积分方法

拟动力实验过程是数值计算与加载实验混合进行的,所以采用的数值积分方法的性质直接影响到实验的成败。数值计算方法的稳定性和精度是实验中首先面临的问题,关于这方面的研究在许多文献中都有过详细讨论^[38~41],稳定性准则和精度分析方法已经建立。本节根据上一节中得出的几种数值积分方法的递推公式,讨论这几种数值积分方法的稳定性和精度问题,更为详细的研究工作可参考文献^[42~44]。

一、稳定性条件 对于弹性系统,上述几种数值积分方法的递推公式可以写成以下的状态方程形式: