

2005年
辽宁土木工程
学术会议论文集

岩土、抗震与结构工程的 理论和实践

主 编 朱浮声



NEUPRESS
东北大学出版社

2005 年辽宁土木工~~程~~文集

岩土、抗震与结构工程的理论和实践

主 编 朱浮声

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 朱浮声 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土、抗震与结构工程的理论和实践 / 朱浮声主编. — 沈阳 : 东北大学出版社,
2005.9

ISBN 7-81102-190-0

I. 岩… II. 朱… III. 岩土工程—工程技术—研究 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 098691 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳农业大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm×260mm

印 张: 33

字 数: 866 千字

出版时间: 2005 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2005 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功 孙 锋

责任校对: 张 秘

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 120.00 元

《岩土、抗震与结构工程的理论和实践》 编委会

主 编 朱浮声

副主编 张成金 林立言 王敏权 张海东

编 委 (以姓氏笔画为序)

王家伟 王石花 邓子林 杨丽春 张丙吉

前 言

为了促进辽宁省土木工程领域学术讨论和技术交流，2005 年辽宁省土木工程学术会议由辽宁省土木建筑学会工程勘察及岩土工程分会、抗震防灾分会、建筑结构专业委员会和辽宁省建筑工程勘察科技情报站等学术团体联合发起，在鸭绿江畔美丽的丹东市胜利召开了。

此次学术会议是我省土木工程界的一次盛会，汇集了全省岩土工程、结构工程和抗震防灾领域的专家、学者、工程技术人员和管理人才。会议代表提交的学术论文涉及上述领域的广泛内容，包括岩土工程勘察、设计、施工，工程测量、地基处理、基坑开挖与支护和岩土工程检测技术等；结构工程的设计、试验研究、理论分析和施工技术，以及建（构）筑物的评估、检测和加固技术等。我们相信，通过会议和论文集的介绍、讨论和交流，必将促进土木工程中的新经验、新技术、新理论和新方法在我省工程技术界的推广应用，达到推动技术进步、推动学科发展的目的。

论文集的编辑与出版得到了中冶沈勘工程技术有限公司、辽宁省建设科学研究院、辽宁省建筑设计研究院和中国建筑东北设计研究院等单位的大力支持和协助，特此致谢。

**辽宁省土木建筑学会工程勘察及岩土工程分会
辽宁省土木建筑学会工程建筑结构的专业委员会
辽宁省土木建筑学会抗震防灾分会
辽宁省建筑工程勘察科技情报站**

2005 年 9 月

目 录

• 地质勘察与测试 •

饱和黏性土和粉土变形参数特性分析	郝庆芬	张海东	李昌龙	(1)
瑞利波勘察技术在地基评价中的应用			张宝山	(5)
场地土的类型和建筑场地类别的划分	顾克慧	王锡谦	徐 明	于 津
西北地区盐渍土的工程特性和地基处理			姚 山	(19)
唐钢超薄带钢生产线技术改造工程勘察实例			李德江	(24)
沈阳地区膨胀指数 I_D 规律研究及应用	解 磊	赵中华	辛立武	孙荣刚
土的表观黏聚力分析			董 晔	(36)
营口市场地土类别划分	董文中	王宁伟	郝双艳	(41)
按轻探击数确定挖孔桩砂土极限端阻力标准值	李建明	温成世	林国友	(45)
盘锦地区饱和黏性土和粉土抗剪强度参数讨论	郝庆芬	赵俭斌	徐秀香	(48)
岩土参数的统计值分析与选用		张海东	陈 明	(52)
秦皇岛滨海饱和和软土的试验研究			王凤江	(58)
地下管线探测原理与应用			宁 力	(64)
遥感技术在大伙房水库输水工程地质勘测中的研究与应用				
.....	张 力	张广勇	池春广	(70)
GIS 技术在城市防灾减灾中的应用	王宁伟	郝大为	荣恒光	陆法津
石佛寺水库坝基液化处理研究与应用	张 力	王百强	孙 有	(83)
国外某工程利用静力触探确定地基承载力的方法	龙 飞	宋宪松	周 密	(87)
广场式建筑勘探孔孔深的确定	王晓晖	张丙吉	徐瑞华	(93)
鞍山地区大孔隙比黏性土层的探讨			李海臣	(96)
旁压试验在沈阳地铁勘察中的应用	解 磊	宋英伟	辛立武	孔任重
深基坑工程的勘察特点		洪廷彩	韩金路	(103)
GPS-RTK 在地形测量中的应用			蔡连举	(106)
关于勘察文件审查工作中一些问题的探讨			姜秀萍	(109)
高密度电法在地质环境治理中的应用			王华林	(113)
锦州城区第四纪沉积物工程地质探讨		陶玉秋	李 猛	(115)
盘锦滨海地区软土工程勘察钻探方法浅谈			杨崇卫	(118)
关于海上工程测量			蔡连举	(121)
关于岩土工程勘察报告中一些问题的探讨	刘 翔	姜秀萍	刘福岳	(125)
水上勘察工作中的一点体会		蔡吉伟	李范龙	(128)

• 岩土工程 •

砂土中螺旋锚抗拔承载力试验研究	王妍	王杰	房艳峰	刘福天	(130)
关于复合地基问题的几点看法			王凤池	朱浮声	(135)
沉管隧道软基水下注浆处理探讨	王妍		杜嘉鸿	王杰	(139)
坡顶荷载对边坡稳定性的影响			梁建平	王健	(143)
黑岱沟露天煤矿储煤场高填方压实填土工程	王勇	王玉丰	徐贵娃	姜恒友	(148)
大型深基坑围护结构施工方案的优化设计				黄立新	(153)
高压旋喷法在挖孔桩桩端地基处理中的应用	宋宪松		苏艳军	屈林永	(158)
高压旋喷处理高层建筑软弱下卧层工程实例			屈林永	潘福刚	(161)
土工格栅在软基处理中的应用	张丙吉	宋宪松	贺清云	李涛	(164)
深基坑开挖降水对地表及建筑物沉降影响的实测研究	郭瑶	赵文	徐岩	韩利	(168)
深层搅拌桩在营口地区的应用	王勇	徐贵娃	王玉丰	姜恒友	(174)
耦合约束数值方法在基坑支护稳定性分析中应用	李明	梁力	董天文	刘福东	(180)
关于静压管桩的讨论				张俊峰	(186)
灰色关联分析法分析软土地基承载力	张丽娟	赵俭斌		王海丰	(189)
振冲置换法在粉土、粉细砂地层中的应用			张利	宁力	(193)
大面积湿陷性黄土地基处理				李国志	(198)
沈阳市人工挖孔灌注桩竖向抗压承载力验收检测方法探讨	金延	康立中		王茂龙	(203)
426mm 径锤击式沉管灌注桩的应用	刘晓林	刘学龙		张德宝	(208)
中、粗、砾砂地层复合载体夯扩桩桩端承载力特征值的确定	程全	夏友河	王大平	李金铭	(213)
管桩施工中常见的质量问题及处理办法	杨占宇	金延	王鹏	邹俊林	(216)
一种浅层砂砾土加密处理方法在实践中的应用	李庆生	丑述卫	宋其峰	马凌	(220)
钻孔压浆桩承载力的估算			洪廷彩	韩金路	(224)
深层搅拌设计中置换率的探讨				胡仁众	(228)
振冲法加固非液化黏性土(软土)地基效果分析			于津	高晓东	(231)
浅析煤矸石地基处理方案的选择	高晓东		于津	顾克慧	(233)
复合载体夯扩桩在工程中的应用			李黎明	刘涛	(235)
利用接触单元进行桩土相互作用有限元分析	贾志杰	梁力	董天文	戴玉买	(239)
压密地基承载能力的研究与应用			吴哲滨	周志华	(244)
不同作业条件下人工挖孔扩底墩的应用				李德江	(247)
桩-承台复合基础在某山区地基中的应用				张兴祥	(251)
关于人防工程顶板等效竖向荷载的计算				艾厚英	(256)
沈阳市地下工程环境岩土问题浅析	赵中华	宋英伟	胡仁众	孙荣刚	(258)
刚性桩与柔性桩复合地基共同作用研究现状	宋英伟	赵中华	胡仁众	孔任重	(263)

营口地区软黏土强夯实践	刘树春	刘 涛	贾 丽	陈鸿仁	(267)
大直径桩桩端土承载力特征值表的编制	温成世	李建明	陈 鸣	(272)	
关于用静载试验确定大直径桩单桩竖向承载力的讨论	温成世	许春枝	(275)		
大直径灌注桩单桩沉降量计算精度比较	温成世	陈 鸣	方元琴	(277)	
大直径桩端承载力与轻探击数的关系	温成世	李建明	(279)		
大直径桩承载力不需经桩体尺寸效应修正	沈 蓉	温成世	李建明	(281)	
浅谈静压管桩的承载力	温成世	郭 巍	(283)		
大直径灌注桩单桩水平承载力特征值估算法	温成世	徐香军	李玉芝	(286)	
振冲桩复合地基承载力及检测	钟胜民	陶玉秋	(290)		
岩土工程领域的信息化——工程地质数据库信息系统	高晓军	曹秀龙	(293)		
单桩竖向极限承载力试桩资料不完整的解决方法	李振江	黄贵东	刘绍文	(297)	
锚杆承载力的几点易混淆的问题	崔 昆	张立峰	(301)		
岩土工程监理及其发展方向	范丽华	陶玉秋	(304)		
软弱下卧层承载力验算的分析与评价	王玉丰	王 勇	徐贵娃	姜恒友	(307)
灰色系统方法在基坑护坡桩变形观测中的应用	蔡连举	郑晓波	(310)		
长螺旋钻孔泵送混凝土成桩工艺的应用	刘 伟	迟 军	(314)		
高炉扩容中的关键性岩土工程问题	王凤江	(318)			
水泥土组合桩单桩竖向承载力研究	李玉红	陆法谭	王宁伟	郝大为	郝双艳
长螺旋钻管内泵压混凝土桩虚土事故原因分析探讨	李范龙	厦传清	(328)		
应用振冲置换法复合地基的经验总结	李范龙	(331)			
CFG 桩复合地基的初步研究及其应用	杨小兵	荣恒光	王宁伟	郝大为	陆法谭
.....	郝双艳	(334)			
新世纪岩土工程展望	潘 猛	刘春刚	李 纯	(338)	
钻孔灌注桩在地下连续墙施工中的应用	蔡吉伟	李范龙	(342)		
某玻璃厂污水工程木桩复合地基	章锡鼎	邵筱梅	(344)		
营口的软土地基及其处理	刘树春	李 勇	贾 丽	刘 涛	陈鸿仁
营口地区地基不均匀变形的特点和规律	姜秀萍	刘福岳	刘 翔	(350)	
大口径灌注桩牙轮钻进速度的估算	石岩山	(353)			
软土地基建筑物纠偏	刘树春	刘 鹏	齐玉石	陈鸿仁	(355)
岩石地基桩基设计	邓子林	刘振一	李忠林	王敬东	姚德俊
厦门亿力琴园基坑钢板桩支护设计及变形分析	王晓晖	孙 昕	汪智慧	高达志	(360)
喷锚支护在较深基坑中的应用	张向阳	齐 震	张 勇	(365)	
静压管桩受力机理和承载力取值	邓 华	冯 辉	邓子林	(371)	
煤矸碎石野外大型抗剪强度的测定	田在宇	郑 伟	(374)		
泵送大体积混凝土基础施工技术	张 权	孙 昕	(378)		
城市地下综合管廊结构设计	王福田	姚 明	刘 俊	(381)	
复合载体夯扩桩的原理及应用	姚 明	王福田	(384)		
桩长确定分析	姚德俊	高达志	邓子林	(387)	
谈辽沈地区应用静压管桩应注意的问题	赵俭斌	孙传胤	康立中	林 南	(389)

几种桩基础的经济性分析	任 昊	孙若军	张广生 (393)
CFG 桩复合地基承载力检测应注意的问题	孙传胤	崔立民	滕伟川 顾克慧 (397)

• 结构工程与检测 •

用于砌体结构损伤识别的动态方法研究	王茂龙	朱浮声	金 延 (401)
基于弹性波动理论的多维地震动转动分量研究	孙 强	李宏男	张明月 (407)
FRP 钢筋混凝土梁非线性有限元分析	张海霞	朱浮声	(415)
对辽宁省墙体改革与可持续发展的思考	林立岩		(419)
预应力钢与高强混凝土组合梁滑移计算公式	刘 莉	王连广	杨 佳 (422)
多层钢-混凝土核芯筒混合结构地震反应分析	柴 硕	赵成文	潘振宇 (426)
多维地震动作用下结构随机反应分析现状及研究综述	孙 强	李宏男	张明月 (433)
轻钢结构住宅支撑体系抗震性能研究	潘振宇	赵成文	柴 硕 (439)
我国钢骨混凝土结构的发展与展望	王连广	慕光波	朱森岩 (445)
服役结构维修加固决策理论研究现状	边晶梅	潘 猛	(450)
应用 Mander 程序对不同肢长异型柱的抗震性能数值模拟	陈 鑫	赵成文	(456)
钢框架半刚性连接节点性能的研究方法	李晓龙	朱浮声	(461)
基于神经网络的钢骨高强混凝土短柱延性预测	慕光波	王连广	王 澈 (464)
多层钢结构住宅结构体系的选择	徐宇鸣	朱浮声	(468)
城市建筑物抗震普查信息管理系统的设计与应用	荣恒光	郝大为	王宁伟 朱 疆 郝双艳 (472)
采用碳纤维束网防治混凝土构件裂缝的试验研究	张 旭	张文献	赵毓成 (477)
网架结构设计方案的优化	刘 艳	高齐翔	(482)
钢筋混凝土建筑物表面泛白现象浅析	刘心亮	张文献	(485)
装配板式桥梁加宽后部分构造计算研究	李 纯	朱浮声	(489)
北方应用清水混凝土的质量控制	安 明	袁树东	刘 哲 (494)
村镇民居的抗震设防与加固	刘 艳	高齐翔	(498)
管廊支架的合理设计	李国志		(501)
预应力混凝土结构耐久性浅析	张 实	袁树东	(504)
结构构造杂谈	许恩孚		(508)
现浇混凝土空心无梁楼盖的设计及应用	齐 震	张向阳	高云望 (511)
混凝土结构的耐久性问题	姚 明	王福田	(515)

饱和黏性土和粉土变形参数特性分析

郝庆芬¹ 张海东² 李昌龙³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 辽宁省建筑设计研究院岩土工程公司, 沈阳 110005;

3. 辽宁省高速公路管理局, 沈阳 110003)

摘 要 通过对辽宁省软土地基螺旋板载荷试验确定地基土变形模量, 通过室内土工试验确定压缩模量并进行分析, 研究不同深度对变形模量和压缩模量的影响, 并应用螺旋板载荷试验的压力—变形曲线制定具有实际工程意义的地基土的等效变形模量数学表达式。采用线性等效模量代替地基土的非线性变形模量, 为计算瞬时沉降变形的弹性公式提供参量。

关键词 螺旋板载荷试验; 变形模量; 压缩模量; 等效模量

1. 引 言

螺旋板载荷试验是 20 世纪 80 年代由国外引入的方法, 它主要适用于地下水位以下软土地层和难以取样的砂土地层, 近年来也用于部分硬黏土地层。它是由试验得到的压力—变形—时间关系曲线, 采用理论计算得到一些地基土重要参数的一种原位测试方法。由于螺旋板载荷试验在我国利用的时间较短, 尚处在摸索阶段, 本文主要是在螺旋板载荷试验的基础上对地基土的各种变形参数进行探讨, 为本地区的勘察工作提供参考。很多规范或手册在计算瞬时沉降时都用 Boussinesq 的弹性解和 Schlecher 的形状影响系数。在这些方法中, 要用到变形模量, 它包括残余变形部分。研究证明, 即使在应变不大的情况下, 土的应力—应变关系也具有非线性特征, 因此在计算瞬时沉降用到的变形模量不应是常量。故研究等效模量随压力变化的非线性规律应当是有意义的。

2. 饱和地基土变形机理

天然土体一般是由矿物颗粒构成骨架体, 孔隙水和气体填充骨架孔隙而组成的三相体; 饱和土是由土颗粒和水组成, 土颗粒之间存在胶结物, 有的没有黏结, 但它们都有能传递荷载, 从而形成传力的骨架, 称土骨架。外荷载作用于土体, 一部分由孔隙中的水承担, 称孔隙水压力; 另一部分由土骨架承担, 就是有效应力 (即土中控制其压缩和抗剪强度的应力)。太沙基 (Terzaghi, 1923) 凭经验得到饱和土的有效应力原理, 即总应力等于有效应力与孔隙水压力之和, 它可用于孔隙水是静止的或匀速运动的情况。孔隙水压力分为两部分: 一是静水压力, 由水的自重引起 (以大气压力为基准), 在荷载施加之前就存在于地基中; 一是超孔隙水压力, 是外荷载引起的孔隙水压力的增量。有效应力是粒间传递的总荷载与土体总截面积之比。在一般压力 (100~600kPa) 作用下, 土粒和水的压缩与土的总压缩量之比是很微小的, 可以忽略不计。因此, 土体的变形是孔隙流体的流失及气体体积、颗粒重新排列、粒间距离缩短和骨架体发生错动的结果。

3. 地基土变形参数

3.1 变形模量与压缩模量之间关系理论分析

土的变形模量是指土体在无侧限条件下应力与应变的比值, 其中的应变包括土的弹性应变和塑性应变两部分, 通常在土与基础的共同作用分析中用变形模量 E_0 考虑。土的压缩模量 E_s 是土体在完全侧限条件下的竖向有效应力与应变的比值。 E_0 和 E_s 两者在理论上可以换算。由弹性理论知, 一弹性体受应力分量 σ_x , σ_y 和 σ_z 作用时, 其相应的应变分量为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E_0} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E_0} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E_0} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于压缩试验是在土样不允许侧向膨胀条件下进行的, 所以 $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$, 根据侧限条件 $\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_s}$, 可得变形模量

$$E_0 = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \cdot E_s = \beta E_s \quad (2)$$

其中, $\beta = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}$ 。

根据我国《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)规定: μ 按表 1 取值。

表 1 μ, β 的取值

土的种类	μ	β
黏 土	0.42	0.39
粉质黏土	0.38	0.53
粉 土	0.35	0.62

3.2 不同深度对地基土压缩模量、变形模量的影响

本试验数据来自盘锦地区, 分别对 11 组黏土、11 组粉质黏土、21 组粉土进行室内土工试验及其相应的原位测试。数据分析列于表 2 和表 3。

表 2 地基土压缩模量随深度变化

土 类	深 度 /m	液限指数 I_L	孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_s /MPa
黏 土	2	0.55	1.071	0.62	3.857
	3	0.93	1.187	0.857	4.421
	4	0.95	1.024	0.76	4.623
	5	0.85	1.144	0.82	5.058
粉 质 黏 土	2	0.89	0.956	0.46	5.143
	3	0.832	0.923	0.472	5.564
	4	0.745	0.932	0.5	5.792
	5	0.826	0.927	0.5	6.433
粉 土	2	0.976	0.873	0.37	4.856
	3	1.08	0.80	0.342	5.643
	4	1.33	0.836	0.29	6.152
	5	1.14	0.802	0.34	7.210

表 3

各类地基土变形模量随深度变化

土 类	深度/m	E_0	βE_s	$E_0 - \beta E_s$	$\frac{E_0 - \beta E_s}{E_0}$
黏土模量 /MPa	2	1.744	1.504	0.240	0.137
	3	2.125	1.724	0.401	0.189
	4	2.213	1.803	0.410	0.185
	5	2.443	1.973	0.470	0.193
粉质黏土模量 /MPa	2	3.306	2.726	0.580	0.176
	3	3.631	2.949	0.682	0.188
	4	3.835	3.070	0.765	0.200
	5	4.191	3.409	0.782	0.186
粉土模量 /MPa	2	3.410	3.011	0.399	0.117
	3	3.997	3.499	0.498	0.125
	4	4.453	3.814	0.639	0.143
	5	5.237	4.470	0.767	0.146

表 3 中地基土的变形模量 $E_0^{[1]}$ 是利用螺旋板载荷试验测出的 $P-S$ 曲线按变形控制原则确定承载力及其相应的沉降值获得的。由表 2 和表 3 可知, 压缩模量和变形模量随深度增加, 且粉土的变形模量较大, 宜作为建筑物的良好地基。

由以上分析可知: 理论上得出压缩模量 E_s 可换算成变形模量 E_0 , 但对于饱和黏性土和粉土, 式(2)计算得到的结果一般较螺旋板载荷试验所得到的变形模量低, 这主要是因为压缩试验的土样容易受到较大的扰动(尤其是低缩性土)。通过对以上数据的分析, 对于这类饱和土, E_0 与 βE_s 值比较接近, E_0 与 βE_s 值相差在 20% 之内, 故可以利用室内试验确定地基土的变形模量。据资料统计^[2], 对于较硬的土, E_0 可能是 βE_s 的 2~8 倍, 土愈坚硬, 倍数愈大。

3.3 多层地基土的变形模量

如果地基受压层范围内有几层性质完全不同的土层, 其平均模量可用式(3)计算。

$$E = \frac{\sum H_i \bar{\sigma}_{zi}}{\sum \frac{H_i \bar{\sigma}_{zi}}{E_{0i}}} \quad (3)$$

式中: H_i —— i 土层厚度, m;

E_{0i} —— i 土层的变形模量, kPa;

$\bar{\sigma}_{zi}$ —— i 土层的平均附加应力, kPa。

4. 利用等效变形模量进行非线性分析^[2]

本试验模型数据采用 2m 深处黏土螺旋板载荷试验的 $P-S$ 曲线, 将其绘于双对数坐标内, 呈折线形(见图 1)。对每个试验曲线都可找到 4 个参数, 这些参数是: 第一折线段斜率 μ_0 , 第二折线段斜率 μ_1 , 折点 (p_k, s_k) 和单位沉降荷载 (p_1, s_1) , 即沉降 $s_1 = 1\text{mm}$ 对应的荷载值。

由于本试验场地选在营口地区, 为偏软地基土, 黏土压缩模量小于 5MPa。本类土双对数

坐标曲线拐点荷载 p_k 大于“单位沉降荷载” p_1 。一般地基土承载力特征值取在接近于比例界限值,我们利用折线拐点前部分即可。经推导,该类土拐点前 P - S 曲线方程为:

$$s = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{\mu_0}} \cdot s_1 \quad (p \leq p_k) \quad (4)$$

在该拐点荷载曲线段内,可在 Mindlin 解的基础上推算出在半无限体内部螺旋板载荷试验地基土在垂直均布荷载作用下的等效变形模量 $E_{0\cdot eq}$, 即

$$E_{0\cdot eq} = \omega \frac{pd}{s} \quad (5)$$

式中: ω ——与试验深度和土类有关的系数;

d ——载荷板直径;

s ——与 p 对应的沉降, mm。

将式(4)代入式(5)得

$$E_{0\cdot eq} = \omega \frac{p}{\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{\mu_0}}} \cdot d = p \left(1 - \frac{1}{\mu_0} \right) \cdot p_1^{\frac{1}{\mu_0}} \cdot d \quad (6)$$

通过对该场地试验数据的分析知,营口偏软地区黏性土 4 个参数取值: $\mu_0 = 0.7 \sim 1.43$, $\mu_1 = 0.83 \sim 1.60$; $p_1 = 20 \sim 50 \text{ kPa}$, $p_k = 70 \sim 95 \text{ kPa}$ 。

5. 结 论

(1) 在盘锦地区,利用螺旋板载荷试验得到按变形控制原则确定地基土的变形模量 E_0 与理论上按 $E_0 = \beta E_s$ 计算的结果比较接近。对于这类饱和黏性土和粉土,现场载荷试验所得到的变形模量 E_0 较理论 βE_s 高,且对于饱和粉土的变形模量与理论 βE_s 相关较好。

(2) 对于某种特定土, μ_0 , μ_1 , p_1 , p_k 这 4 个参数应为定值,只要知道其物理、力学指标,它的螺旋板载荷试验 P - S 曲线可以基本确定。由等效变形模量公式可知: $E_{0\cdot eq}$ 由第一折线段 μ_0 确定,它与施加的荷载 p 成幂函数关系。在计算瞬时沉降一类弹性公式时,利用等效变形模量非线性分析具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002, 269~270
- 2 张珊菊. 地基变形特性及其在平板载荷中的应用. 广东工业大学学报(自然科学版), 2004
- 3 张在明. 等效变形模量的非线性特征分析. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 56~59

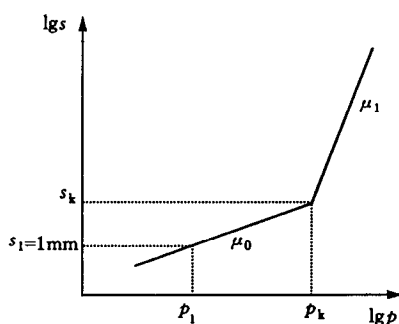


图 1 双对数螺旋板载荷曲线示意图

瑞利波勘察技术在地基评价中的应用

张宝山

(中冶沈勘工程技术有限公司, 沈阳 110015)

摘 要 本文介绍了瑞利波的特点和测试方法, 指出瑞利波速与地基土力学指标间存在密切关系, 可以用于天然地基土和人工地基土的评价。

关键词 地基评价; 瑞利波勘察; 地基土力学指标

1. 引 言

瑞利波勘察技术作为一种物探手段, 在岩土工程勘察、地基评价等方面有着广泛的应用前景。该项技术所提供的瑞利波速度 V_R , 是岩土层所固有的特性, 它与地基土的力学指标密切相关, 尤其是承载力特征值 f_{ak} , 变形模量 E_0 , 压缩模量 E_s , 动力触探击数 $N_{63.5}$, 标准贯入击数 N 。静载试验、动力触探试验、标准贯入试验是岩土工程勘察原位测试的关键手段, 通过这些试验, 可确定各地区各类岩土层的强度和变形指标。前者的物理意义明确; 后两者的物理意义不明确, 但通过与前者进行大量的对比试验取得数据, 即可用来评价地基强度和变形指标。

瑞利波速度 V_R 的物理意义明确, 它表示不同岩土界面下弹性面的波传播速度。它不受地下水影响, 与岩土的密实度关系密切。在取得瑞利波速度 V_R 与静载试验、动力触探试验、标准贯入试验对比试验数据的条件下, 利用瑞利波速度 V_R 完全可以定量地评价各类岩土层的强度和变形指标。

获取瑞利波速度 V_R 的方法, 目前以稳态、瞬态瑞利波法, 检层法, 跨孔法最为流行, 后者直接获取剪切波速度 V_S , 通过 $V_R = (0.875 \sim 0.920 \sim 0.955) V_S$ 可计算出瑞利波速度 V_R 。无论采用何种方法都是可行的。

2. 瑞利波的特点及其测试方法

2.1 瑞利波的特点

作用于均匀半无限空间表面的点震源能产生纵波、横波和瑞利波, 其能量比为 7:26:67。随着波的传播距离增大, 半空间表面纵波和横波的振幅与 r^2 成反比例减少, 瑞利波振幅则与 r 成反比例减少关系。其中, 纵波的质点振动与波的传播方向一致, 呈疏密运动; 横波质点的振动与波的传播方向垂直; 瑞利波的质点振动是由垂直分量和水平分量合并而成, 在水平方向呈倒转的椭圆运动, 在垂直方向呈正转的椭圆运动, 转动的方向总是与波的传播方向相反。计算结果表明, 瑞利波的质点垂直运动分量和水平运动分量位移的绝对值随介质的泊松比增大而增大, 二者的比值大约为 1.5。随着传播深度的增加, 面波质点的位移迅速地衰减, 衰减系数与波长 λ_R 成反比。这说明瑞利波质点运动的轨迹始终是长轴垂直于地面的椭圆, 并且随着波长的增大, 波在深度方向上的衰减变慢, 即面波在介质中穿透得越深。

除此之外,在弹性半无限空间面波速度与纵波和横波的速度尚满足下列关系:

$$V_P > V_S > V_R \quad (1)$$

$$f(V_R) = \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left[1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2\right] = 0 \quad (2)$$

式中: V_R ——瑞利面波速度;

V_S ——横波速度;

V_P ——纵波速度。

可以证明:在 $V_S > V_R > 0$ 范围内,假设 $V_R = 0$, 则 $f(V_R) = -16 + 16\left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2 < 0$; 假设 $V_R = V_S$, 则 $f(V_R) = 1 > 0$ 。方程(2)至少有一个实数解,因此瑞利面波在半无限空间表面总是存在的。

当 $\frac{V_S}{V_P} = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{3} \sim 0$, 即泊松比 $\mu = 0 \sim 0.25 \sim 0.5$ 时,由方程(2)可求得

$$V_R = (0.875 \sim 0.920 \sim 0.955) V_S \quad (3)$$

可见瑞利波的速度 V_R 与横波速度 V_S 相当接近。

2.2 瑞利波的测试方法

如前所述,作用于半无限空间表面的点震源能产生丰富的瑞利波,因此在地表面设置垂直传感器可以记录到瑞利波的垂直分量。通过振幅谱分析和相位谱分析,把记录中不同频率的瑞利波分离出来,从而得到 V_R - f 曲线或 V_R - λr 曲线。

当稳态激震源作用于地表面时,震源处的垂直变形随时间变化的曲线用下式表示:

$$Z(t) = \sin \omega t \quad (4)$$

地表任意一点垂直变形随时间变化的曲线为:

$$Z(t) = \sin(\omega t - \psi) \quad (5)$$

其中:

$$\psi = \omega \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{S}{V_R} \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (8)$$

由式(4)~式(8)得

$$V_R = \frac{2\pi f S}{\psi} \quad (9)$$

式中: V_R ——地基土瑞利波速度, m/s;

f ——激震器的振动频率, Hz;

S ——两个垂直传感器之间的水平距离, m;

ψ ——两个垂直传感器之间振动的相位差。

由式(9)可以看出,只要知道激震器的振动频率 f 和两个垂直传感器的距离 S , 并计算出它们之间振动的相位差 ψ , 就可以求出两个垂直传感器之间地基土的瑞利波速度 V_R 。

计算两个垂直传感器之间振动的相位差 ψ 可采用如下两种方法:

(1) 当两个垂直传感器距离 $S = \lambda_R$ 或 $S = \frac{1}{2}\lambda_R$ 时, 振动记录的相位差分别为 $\psi = 2\pi$ 和 $\psi = \pi$;

(2) 两个垂直传感器的距离 $S < \lambda_R$ 时,

$$\psi = \omega\tau_t = 2\pi f\tau_t \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 得

$$V_R = \frac{S}{\tau_t} \quad (11)$$

可见瑞利波速度 V_R 等于两个传感器之间的距离 S 除以两个传感器间相对时差 τ_t 。

2.3 瑞利波法的速度及勘测深度

瑞利波的 V_R-f 曲线或 $V_R-\lambda r$ 曲线反映的是层状地层基阶模态的频散曲线, 它表示瑞利波相速度随频率降低(即波长增大), 沿深度方向的变化规律。对瑞利波的基阶模态的频散曲线通过计算机软件或以下公式进行反演计算, 可获得瑞利波分层速度。

当 $V_n > V_{n-1}$ 时:

$$V_{Rn} = \frac{V_n h_n - V_{n-1} h_{n-1}}{h_n - h_{n-1}} \quad (12)$$

当 $V_n < V_{n-1}$ 时:

$$V_{Rn} = \frac{\frac{h_n - h_{n-1}}{V_n} - \frac{h_n - h_{n-1}}{V_{n-1}}}{\frac{h_n}{V_n} - \frac{h_{n-1}}{V_{n-1}}} \quad (13)$$

式中: V_{Rn} ——第 n 层的瑞利波速度;

V_n, V_{n-1} ——半波长等于 h_n 和 h_{n-1} 的瑞利波相速度。

瑞利波法勘测深度与地层的刚度、层状结构型式有关, 随着层状地层平均刚度逐渐提高, 其勘测深度加深。一般来说, 对于中硬场地土勘测深度可达 25~50m; 中软场地土可达 15~25m; 软弱场地土可达 15m 以内。因此, 了解波长、距离、反映深度之间的关系, 是确定瑞利波探测装置的基础。地表的面波的频散特征, 随其传播距离和波长而逐步改变, 只有在和波长相应的合适距离上, 才会得到反映该深度内的瑞利波速度。

3. 瑞利波速度与地基土物理力学指标的关系

瑞利波速度与其能量传递所通过范围的地层是相应的, 对于刚度递增的层状地层, 瑞利波速度与其半波长的实际地层有着良好的对应关系, 并与该范围内的其他物理力学指标密切相关。由式(3)可知, 瑞利波速度与剪切波速度相当接近, 可以根据地基土的泊松比调整二者之间的关系。对于第四纪地层来说, 其泊松比 μ 介于 0.25~0.5 之间, 因此可以近似地认为:

$$V_R = 0.935 V_S \quad (14)$$

3.1 瑞利波速度与天然地基土物理力学指标的相关关系

$$V_R = 70.75 N^{0.1436} h^{0.2563} \quad (n = 269; R = 0.913) \quad (15)$$

$$V_R = 88.82 e^{-0.7497 h} h^{0.2546} \quad (n = 105; R = 0.872) \quad (16)$$

$$V_R = 13.82 \gamma^{3.1617} h^{0.216} \quad (n = 105; R = 0.861) \quad (17)$$

$$V_R = 81.19 I_L^{-0.2192} h^{0.3030} \quad (n = 122; R = 0.882) \quad (18)$$

$$V_R = 98.56 q_u^{0.0635} h^{0.2810} \quad (n = 46; R = 0.879) \quad (19)$$

$$V_R = 93.58 C^{0.097} h^{0.3119} \quad (n = 41; R = 0.897) \quad (20)$$

式中: $N, e, \gamma, I_L, q_u, C$ ——标准贯入值, 天然孔隙比, 天然容重, 液性指数, 无侧限抗压强度和黏聚力。

3.2 瑞利波速度与人工填土物理力学指标的相关关系

(1) 尾矿坝堆积材料的瑞利波速度 V_R 与岩土工程性质的关系

统计结果表明, 瑞利波速与标准贯入值力触探比贯入阻力、天然隙比、容重、内摩擦角等有密切的相关关系。

$$V_R = 65.65 N^{0.3312} h^{0.0761} \quad (n = 252; R = 0.860)$$

$$V_R = 29.84 P_s^{0.3746} h^{0.0868} \quad (n = 301; R = 0.894)$$

$$V_R = 93.78 e^{-0.9746} h^{0.1941} \quad (n = 252; R = 0.844)$$

$$V_R = 46.48 \gamma^{1.6494} h^{0.1151} \quad (n = 252; R = 0.815)$$

$$V_R = \frac{\varphi^{2.1733} h^{0.1428}}{17.29} \quad (n = 193; R = 0.800)$$

式中: n ——统计数据个数;

R ——复相关系数。

尾矿坝堆积材料与一般的人工填土不同, 它是矿石经过破碎、研磨和选矿后排出的废弃物, 按岩土工程分类属于不同粒径的砂、粉土和黏性土。

(2) 人工杂填土

人工杂填土层成分复杂, 粒径不均、密实度差, 未经加固的人工杂填土层, 其瑞利波速度一般都离散。人工杂填土大体可分为两类, 一类以黏性土为主含建筑垃圾、碎石, 多出现在城镇建筑场地; 另一类以碎石土为主含少量黏性土, 多出现在填海造地建筑场地。

4. 瑞利波速度 V_R 与静载试验, $N_{63.5}$, 标准贯入 N 对比试验

为了进一步研究瑞利波速度 V_R 与承载力特征值 f_{ak} 和变形模量 E_0 /压缩模量 E_s 的关系, 作者在沈阳、大连、鞍山、本溪、抚顺、营口、葫芦岛、吉林、扶余、五常、德州、南京、深圳等十余个城市, 以碎石类土、砂类土、黏性土、粉土、加固后的回填土为对象进行了静载、动力触探、标准贯入试验、瑞利波法等原位对比试验。

4.1 天然地基瑞利波速度 V_R 与 $f_{ak}, E_s, E_0, N_{63.5}$ 的关系

碎石类土: $V_R = 19.36 f_{ak}^{0.4330} \quad (n = 19; r = 0.963)$

$$V_R = 59.8 E_0^{0.4814} \quad (n = 18; r = 0.963)$$

$$V_R = 121.5 N_{63.5}^{0.3630} \quad (n = 28; r = 0.88)$$

砂类土: $V_R = 12.23 f_{ak}^{0.5319} \quad (n = 19; r = 0.963)$

$$V_R = 77.23 E_0^{0.4085} \quad (n = 18; r = 0.963)$$

4.2 人工填土经加固处理后的地基

碎石土: $V_R = 10.58 f_{ak}^{0.5768} \quad (n = 29; r = 0.904)$