

刘金砺八十周年纪念文集

桩基础研究

中国建筑科学研究院地基基础研究所编委会 主编

中国建筑工业出版社

刘金砺八十周年纪念文集

桩基础研究

中国建筑科学研究院地基基础研究所编委会 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

桩基础研究 刘金砺八十周年纪念文集/中国建筑
科学研究院地基基础研究所编委会主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-112-17016-6

I. ①桩… II. ①中… III. ①桩基础-文集 IV.
①TU473-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 135623 号

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 张 颖

刘金砺八十周年纪念文集

桩基础研究

中国建筑科学研究院地基基础研究所编委会 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22¼ 插页: 2 字数: 546 千字

2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月第一次印刷

定价: 80.00 元

ISBN 978-7-112-17016-6
(25764)

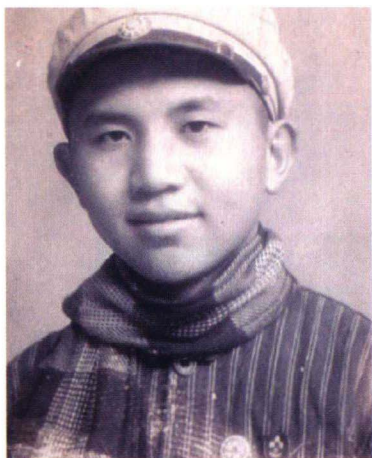
版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



中国建筑科学研究院 刘金砺 研究员



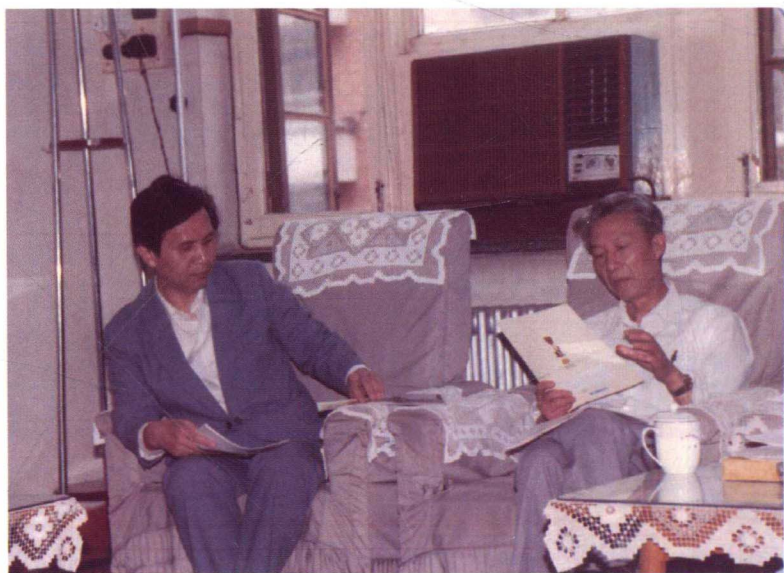
1948 年在湖南信义中学



1955 年在清华大学



1957 年进入地基所



1986 年与黄熙龄院士研究工作



1987 年在法国学术交流



1990 年在莫斯科学术交流



1994 年接受记者采访



1997 年清华毕业 40 周年校庆



2007 年与学子们在一起



2011 年

序

——桩基工程领域的耕耘者

刘金砺先生，中国建筑科学研究院地基基础研究所老所长，我国桩基础工程领域德高望重的老专家、老前辈。五十多年来，刘先生在建筑桩基技术领域辛勤耕耘，取得了丰硕的学术成果，对我国建筑桩基技术的发展做出了突出贡献。2013年欣逢刘先生八十华诞，地基研究所里提议将先生的研究成果汇编成书以兹纪念，先生谦逊，意曰不值，建议再三，始获首肯，但嘱不必赶时，编纂务以精选严谨为要。历经一年多的选编、修改、校核，《纪念文集》得以出版。

刘先生1957年从清华大学毕业进入到地基所工作，至今已五十七年。“湿陷性黄土起始压力”的研究与“软土地基强度与变形特性”的探讨，是先生从事地基基础研究的发端，所取得的基础理论研究成果已为工程实践所验证。

七十年代初，刘先生因参与北京天坛小区、前三门工程中的灌注桩研发工作，而开启了建筑桩基技术的探索之路，几十年来耕耘不辍，成绩卓著，硕果累累。从单桩的承载力试验，到群桩的荷载传递现场测试；从灌注桩后注浆技术的研发，到变刚度调平设计理念的创新，从工程实践中来，再到工程应用中去一直是刘先生倡导和践行的科研路线。传统的灌注桩因后注浆而焕发“活力”；时尚的主裙结构因变刚度调平而“和谐”。

刘先生的科研思想执着而辩证，执着于以科学的研究方法解决工程难题的精神，辩证于不固守经典理论而追求目标实现的思维。简易可靠的桩端、桩侧后注浆工法的发明有效地解决了沉渣与泥皮对灌注桩承载力影响的传统难题，产生了巨大的技术经济效益；“沉降硬化”、“沉降软化”等规律的发现，对群桩基础的设计计算具有重大指导意义；凝聚于基底的桩—土支承刚度矩阵自然对数修正模型的建立，提高了群桩基础共同作用分析计算的可靠性；将桩身Mindlin集中力解改造为考虑桩径影响的解析解和数值解，提高了桩基沉降计算的准确度；综合了承台、上部结构和桩端贯入变形影响的均化应力桩基沉降计算方法，消除了自由荷载应力叠加法计算群桩基础沉降的不合理性。减沉与增沉相结合、承载力与变形相统一，由变化基础支承刚度而调平地基变形的理念反映了先生辩证思维的研究方法。

刘先生非常注重工程实践，并致力于将工程经验和新技术、新理论、新工法提炼总结成为技术规范，以更好地应用于实际工程。五十多年来，刘先生主持和参与了大量桩基工程的咨询与设计，既有普通住宅桩基，也有许多诸如中央电视台新址大楼等重大疑难桩基工程，赢得了桩基技术领域广大技术人员的敬重与信任。刘先生主编的新中国第一本《工业与民用建筑桩基设计与施工规程》、《建筑桩基技术规范》等，以及作为主要召集人主编的《桩基工程手册》，对我国建筑桩基工程技术的发展与应用发挥了巨大的指导作用。

刘先生治学严谨，工作勤奋，悉心育人，是学生心中的良师益友，是年轻科研人员的楷模。《纪念文集》是刘先生在桩基工程领域五十多年辛勤耕耘历程的精彩展现，系统地

反映了刘先生精湛的专业技术与研究成果，展现了先生对科研工作的求真务实、一丝不苟的工作态度和对事业执着追求的刻苦精神。《纪念文集》的出版是科学知识的传递，更是学术精神的传承。我们希望青年科技工作者通过这本文集了解刘先生的学术思想与科研成果，学习刘先生的科研精神，积极创新，为我国地基基础工程领域的技术进步与科学发展而努力奋斗！

《纪念文集》编委会

2014年8月

科学征途印迹

刘金砺, 1933年6月出生于湖南益阳。1957年毕业于清华大学土木工程系建筑结构专业。同年进入中国建筑科学研究院地基基础研究所工作, 先后任技术员、工程师、高级工程师、研究员。1983年任地基所副所长, 1987年任地基所所长, 1991年兼任院副总工程师。1992年经国家教委批准为岩土工程专业博士研究生导师。历任中国土木工程学会土力学与岩土工程分会桩基础学术委员会主任委员、中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会主任委员、北京市岩土工程专业委员会主任委员等职, 国际土力学及岩土工程协会会员。

刘金砺研究员从事岩土工程研究五十余年, 荣获第十届茅以升科学技术奖土力学与岩土工程大奖, 1992年起享受政府特殊津贴。科研成果获全国科学大会奖二项、部级科技进步奖十项、国家发明专利二项、中国专利优秀奖一项。

对于岩土工程研究, 他坚持“试验、测试为先, 机理、理论为本, 实践、应用为重”的理念, 从早期的黄土、软土研究到长期的桩基研究、到人才培养, 都始终如一。

20世纪50年代, 刚踏上科研征途的他, 在黄强老先生和苏联专家阿比列夫的指导下制定黄土湿陷起始压力研究课题, 坚持在西北地区进行现场试验一年多, 结合调查和室内试验, 完成“黄土湿陷起始压力初步研究”。该成果与相关内容共同构成“湿陷性黄土工程性质与处理技术”获全国科学大会奖。

20世纪60年代初, 发掘天然地基承载潜力成为工程建设实际需求, 他承担起“软土地基强度与变形特性”研究课题, 率领团队先后赴上海、温州开展现场试验, 历时二年多。通过近20台不同基础直径、不同埋置深度、不同加载模式(慢速、快速)的荷载试验, 揭示软土地基竖向荷载下的变形与破坏特征。特征之一, 各级荷载下沉降趋于相对稳定时间为一般黏性土的10倍以上。这是软土固结和流变特性的反映。特征之二, 荷载沉降($p-s$)曲线不显示陡降, 出现荷载-沉降梯度($p-\Delta s/\Delta p$)逐渐随荷载增加而增大, 随后趋于不变, 即 $p-s$ 关系由曲线转变为斜直线, 称该斜直线起始点荷载为局部破坏荷载 p_t 。局部破坏缘于土的高压缩性。由于土的体积压缩导致基底以下土体的侧向位移不足以推动外围被动剪切区开展至基底水平面(试验中始终未观测到隆起变形)而发生“完全破坏”, 直至荷载达到 $(2\sim 2.5)p_t$ 、沉降达到80mm时, 沉降梯度、沉降相对稳定时间仍维持不变。为控制建筑物变形、确保正常使用, 建议取局部破坏荷载为极限荷载进行设计。特征之三, 发现基础外围土体的竖向变形范围远小于弹性理论计算值。这说明按弹性理论进行相邻基础影响分析, 将导致影响范围和沉降量被夸大。

20世纪70年代初, 参与北京天坛小区、前三门工程灌注桩首次大面积开发应用。当时设计、计算、成桩技术均无经验可循, 从单桩竖向、水平承载力试验方法、设计取值、分析计算等一一通过试验、分析、论证, 配合设计施工完成工程任务, 并取得单桩水平临界荷载的试验分析判定、半理论半经验计算等科研成果。“灌注桩工程性能及成桩设备与技术”获全国科学大会奖, 并为编制JGJ 4—80《工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工

规程》奠定了基础。

1979、1980年,与山东黄河河务局合作,进行粉土中系统的接近于原型的现场群桩试验,通过埋设测试元件对桩侧阻力、端阻力、承台土反力、桩土位移等进行测试,研究竖向、水平荷载下承台、桩、土的相互作用特性。发现常用桩距 $(3\sim 4)d$ 条件下,群桩侧阻出现“沉降硬化”,群桩端阻随承台宽度与桩长比增大而增强。据此,给出了侧阻、端阻随桩距、承台宽度与桩长比而变化的分项群桩效应系数。水平荷载下,群桩承载力因桩顶有限约束(嵌入承台 $50\sim 100\text{mm}$)而提高,水平位移较桩顶自由单桩而降低。据此,提出了群桩水平承载力分项综合效应系数算法。该成果获部科技进步二等奖,并被列入规范,论文被《岩土工程学报》评为优秀论文。

20世纪80年代末,适应软土地区桩基工程建设需要,在渤海湾开展系统的群桩试验,研究大小桩距、高低承台群桩基础承载性能。结果表明,群桩侧阻随桩距减小而降低,端阻随桩距减小而提高,承台效应随桩距增大而增强并明显改善群桩的承载性状。其成果获部科技进步二等奖,论文获土木工程学会优秀论文奖。

1990年,出版专著“桩基础设计与计算”,6次印刷。

1993、1994年,先后成功研发灌注桩桩端桩侧后注浆技术。1993年以天津为据点,开展桩端后注浆装置、工艺、注浆与非注浆桩静载对比试验等,初获成功。次年以上海为据点,开展桩侧后注浆试验开发,同样取得初步成功。随后结合不同地质条件工程完善工艺、优化参数、积累经验,最终完成成套技术。本世纪初,桩端桩侧后注浆技术已推广应用于建筑、桥梁、市政诸行业,效益显著,软土地区超高层建筑也采用后注浆灌注桩取代钢管桩。该二项发明专利均被规范采纳,桩端后注浆获中国专利优秀奖。

1994~1997年,承担建设部科研项目“带裙房高层建筑地基基础与上部结构共同作用计算方法”。通过大型模型试验,研究基础变形、反力、内力随荷载、结构刚度的变化性状,以及工程实测与理论分析对比,最终提出在优化设计基础上的桩土-承台-上部结构共同作用计算方法 and 应用软件。其中,桩-桩、桩-土、土-土相互作用影响的计算,基于试验和工程测试值均小于弹性理论值这一现象,建立桩、土刚度凝聚矩阵自然对数修正模型,以提高分析计算可靠性。通过北京长青大厦、皂君庙综合电信大楼、财源国际中心等7项工程实测比较,计算与实测符合程度好。该项成果获建设部科技进步一等奖。

1997~2001年,针对工程中常见的框-筒结构产生碟形沉降和马鞍形反力分布以及大型油罐产生碟形沉降等现象,提出“变刚度调平设计”理论与方法。其基本思路是根据荷载、结构、地质特点,考虑相互作用效应,优化桩土支承刚度分布,包括调整桩长桩距、桩基与复合桩基结合、复合地基与天然地基结合、增强与弱化结合、减沉与增沉结合,最终实现差异沉降和基础内力最小化。应用于北京万豪世纪中心、望京佳美风尚、北京电视中心等27项工程,差异沉降明显小于规范允许值,节约投资5605万元。该成果获华夏建设科学技术一等奖,并为规范采纳。

本世纪初,适应多层建筑减沉桩基础设计需要,依据现场试验揭示的软土中疏桩基础沉降变形以桩间土受承台压缩为主、受侧阻力作用为辅的机理,提出减沉复合疏桩基础设计和沉降计算方法。成果发表于《岩土工程学报》,并为JGJ 94—2008规范采纳。

近年来,围绕桩基沉降计算开展一系列研究,建立“基于Mindlin解的综合效应桩基沉降算法”。传统的实体深基础法计算桩基沉降需乘以 $0.25\sim 0.5$ 系数予以折减,其原

因是按半无限弹性体表面荷载下的 Boussinesq 解计算附加应力的不合理性。为此,围绕采用 Mindlin 解计算桩基沉降问题进行了如下研究:其一将 Mindlin-Geddes 集中力解改造为考虑桩径因素的解析解和数值解,消除无穷大应力值。使其计算值更贴近实际。其二,提出反映承台刚度影响的均化应力算法,消除自由荷载应力叠加法承台中点沉降计算值偏大、边角点偏小的缺陷,并制成表格方便计算。其三,收集大量单桩静载试验桩侧阻力、端阻力测试结果,综合分析给出端阻力经验参考值;对侧阻分布归类概化为 6 种计算模式,实现按长径比、土层分布、后注浆效应判定侧阻分布模式,避免一律按 Geddes 正梯形分布假定计算附加应力带来较大误差。将以上诸因素反映于 Mindlin 解附加应力计算中,以分层总和法计算沉降,称该方法为“基于 Mindlin 解的综合效应桩基沉降算法”。以实测数据验证初步表明,计算结果可不进行经验修正。以上成果分别发表于《土木工程学报》和《岩土工程学报》。

20 世纪 70 年代,主编 JGJ 4—80《工业与民建筑灌注桩基础设计与施工规程》,80 年代主编 JGJ 94—94《建筑桩基技术规范》,本世纪主持修订 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》。规程、规范的编制,以瞄准工程中的热点难点超前开展试验研究、吸纳社会既有先进技术和经验为基础。上述三项标准均获建设部科技进步奖,JGJ 94—94 规范获一等奖。

科研实践中,重视学术交流。1985 年在美国旧金山召开的第十一届国际土力学及基础工程会议上发表论文一篇,并参加会议。1986 年在北京召开的国际深基础会议上发表论文一篇,并参加会议。1989 年、1994 年召开的第十二届、第十三届国际土力学及基础工程会议上各发表论文一篇。1997 年在德国汉堡召开的第十四届国际土力学及基础工程会议上发表论文一篇,并参加会议。1999 年,赴韩国首尔参加第十一届亚洲土力学及基础工程会议,并发表论文一篇。1987、1990 年分别赴巴黎、莫斯科与相关协作单位进行岩土工程学术交流。2003 年参加中日岩土工程学术会议,并作学术报告。2006 年应邀赴香港学术交流,两次作学术报告。1993 年至 2009 年,7 次参加海峡两岸岩土工程学术交流。1992~2013 年,11 次主持全国桩基工程学术会议。

目 录

科学征途印迹

媒体专访	1
------------	---

桩基研究创新成果.....	5
---------------	---

一、竖向荷载下桩基工作性状与承载力	9
-------------------------	---

粉土中钻孔群桩承台-桩-土的相互作用特性和承载力计算.....	10
---------------------------------	----

群桩承台土反力性状和有关设计问题	24
------------------------	----

参加第十一届国际土力学及基础工程会议技术汇报	32
------------------------------	----

软土中群桩承载性能的试验研究	65
----------------------	----

泥浆护壁灌注桩后注浆技术及其应用	73
------------------------	----

后注浆灌注桩承载性状及工程应用	81
-----------------------	----

水下干作业复合灌注桩试验研究	90
----------------------	----

桩和桩基础若干机理与理论问题	97
----------------------	----

Cap-Pile-Soil Interaction of Bored Pile Groups	109
--	-----

Time Effect of Bearing Behavior of Bored Pile Group in Un-saturated Silty Soil	118
---	-----

Experimental Research on Bearing Behaviour of Pile Groups in Soft Soil	129
--	-----

The Technology and Application of Post-grouting for Slurry Bored Piles	137
--	-----

The Behavior of Post-grouting for Pile Groups Under Vertical Load	145
---	-----

二、竖向荷载下桩基沉降变形机理与沉降计算	153
----------------------------	-----

竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算	154
------------------------	-----

软土中群桩承载变形特性与减沉复合疏桩基础设计计算	167
--------------------------------	-----

不同类型桩沉降变形机理差异及中、小桩距群桩基础的沉降计算	175
------------------------------------	-----

单桩、单排桩、疏桩基础及其复合桩基的沉降计算	183
------------------------------	-----

关于长桩超长桩桩基沉降计算问题	194
-----------------------	-----

Mindlin 解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降	202
----------------------------------	-----

不同条件下桩侧阻力端阻力性状及侧阻力分布概化与应用	217
三、水平荷载下桩基工作机理与承载力	241
钻孔灌注桩水平承载力的试验研究	242
“K 法” 计算侧向受力桩存在的问题	265
群桩水平承载力的分项综合效应系数计算法	273
Comprehensive Effect Coefficients Calculating Method for Lateral Bearing Capacity of Pile Group	284
四、桩基设计与共同作用分析	293
桩土变形计算模型和变刚度调平设计*	294
竖向荷载下的群桩效应和群桩基础概念设计若干问题	304
高层建筑地基基础概念设计的思考	313
五、桩基规程规范	323
《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008 若干技术焦点	324

媒体专访

不唯上、不唯书、只为实

——专访第十届茅以升科学技术奖土力学及岩土工程大奖获奖者刘金砺

和大多数耄耋之年的老人不同，刘金砺并没选择闲庭漫步、养花赏鱼、含饴弄孙的悠然生活，而是继续着他倾注了 56 年的心血的土木工程事业。

虽身兼地基基础研究所顾问总工程师、土木工程学会土力学与基础工程学会桩基学术委员会主任委员、中国标准化协会地基基础委员会主任委员、国际土力学与岩土工程协会会员、北京市建委科学技术委员会委员、北京城建科技促进会岩土工程专业委员会主任委员、土木工程学报和岩土工程学报编委等多重身份，但这位精神矍铄的老人，不仅有着年轻于同龄人的外貌，还仍旧保持着年轻时的韧劲——每遇问题，必一门心思钻进去，不得结论不罢休。

不久前，在刘金砺获得第十届茅以升科学技术奖土力学及岩土工程大奖前夕，记者有幸在中国建筑科学研究院采访到了这位德高望重的土木工程专家。

“实践表明这种计算方法更符合实际工程的需要”

“从事岩土工程研究工作 56 年来，茅老重视工程实践、科研为工程服务的思想贯穿于我的科研工作全过程，我工作中取得一些成就也得益于这种求实精神。”刘金砺一句话概括了他对茅老的尊崇之情，也总结了自己一生为之奋斗的事业。

刘金砺对记者说，从事科研工作需要在继承前人成果的基础上有所发展，要实事求是，“不唯上、不唯书、只为实”，根据实际工程需求大胆创新，小心求证。

“以前的群桩水平承载力试验是小比例、桩顶没有嵌入承台的室内模型试验，这种试验在以往的文献中通常要考虑桩距、排列和桩数进行折减。”但是，随着社会的发展和水平的提高，人们对工程的实用性和复杂性提出了更高的要求，这样，前人的小比例试验就不再符合实际的需求。“就需要我们自己慢慢摸索，想办法解决难题。”

“根据实际工程的需要，需要进行几十组大比尺模型试验，这种试验不论是桩身强度控制，还是位移控制，综合效应系数都大于 1，我们的试验是模拟实际工程桩顶嵌入承台 5cm 形成有限约束，既减小了桩身的正、负弯矩，又降低了水平位移，在这项试验中唯一的对水平承载力起削弱效应的因素是前后桩的相互影响。”

实践是检验真理的唯一标准。根据大比尺试验成果，刘金砺和试验团队提出了群桩水平承载力分项综合效应系数的算法，并把这种计算方法列入规范，应用于实际工程设计。“实践表明这种计算方法更符合实际工程的需要。”谈到这里，刘金砺脸上洋溢着

笑容。

群桩水平承载力大比尺试验，得出了更符合实际工程需要的计算方法，那群桩竖向承载力大比尺现场又会带来哪些惊喜呢？

通过几十组大比尺现场模型试验，刘金砺团队证明在常规桩矩条件下，群桩竖向承载力不应该考虑群桩效应进行折减。“这是因为群桩端阻力存在增强效应，侧阻力对于粉土、砂土存在沉降硬化增强效应，对于黏性土，群桩效应对侧阻削弱影响较小。”刘金砺解释道。

“突破传统理论”

实际工程种类繁多，施工难易程度不同，既有理论不能满足所有工程的需要，这就需要不断地突破传统，创新设计理论和方法。

在基础设计方面，针对高层建筑、主裙连体建筑、大体量罐体等出现的差异沉降大、基础内力大、材料消耗大等问题，刘金砺提出了变刚度调平设计理论与方法，“我们的思路是：突破传统理念，根据结构型式、荷载分布、地质特征，并考虑相互作用效应，优化地基基础支撑刚度分布，包括调整桩径桩长，桩基与复合桩基结合，复合地基与天然地基结合，增强与弱化结合，减沉与增沉结合，这样最终实现差异沉降和基础内力最小化。”

在桩基沉降计算方面，将线集中力下的 Mindlin-Geddes 解改造为考虑桩径因素、分布于桩侧表面和桩端平面分布力作用下的应力解，并求出桩端以下的均化应力数值解。由此建立了 Mindlin 解均化应力群桩基础沉降算法。“为方便应用，我们给出了计算表格和计算程序。初步验证表明，计算值与实测值符合程度是很好的，不需要修正。”

除了创新理论，刘金砺还带领团队研发了桩端桩侧后注浆技术，“目前，这种技术已经应用到了上海中心、天津‘117’和津塔等建筑的建造过程中，这开创了软土地区超高层使用灌注桩的先例。”

这种技术是在钢筋笼上设置桩端、桩侧后注浆装置，灌注桩身混凝土后实施注浆，加固桩端沉渣、桩侧泥皮以及周围一定范围的土体，从而大幅度提高单桩承载力，增幅达 40%（细粒土）至 120%（粗粒土），并使沉降减小 20%~30%。“这种技术的注浆阀构造简单、性能可靠；注浆操作方便、质量可控；桩侧注浆处于桩土界面位置，因此可做到无损注浆。”刘金砺这样总结这种技术的特点。

“有朝一日或许会取代弹性理论进行分析计算”

试验中由桩侧土竖向位移观测发现，软土、砂土中应力传递水平范围远小于硬土、黏性土，更小于弹性理论值，这是为什么？

“我想这是根源于土的有限连续性，地基应力分布理论解是基于理想连续介质弹性理论。而土体是一种有限连续介质，尤以砂土、软土的连续性弱，所以才会导致这种试验结果。”这个答案，促使刘金砺在共同作用分析中建立了桩土刚度凝聚矩阵的自然对数修正模型，由此提高了计算结果的可靠性。