

北京新闻出版局批准号：京内资准字2007—Ly0108号
《工程力学》刊号：ISSN 1000-4750 CN11-2595/O3

第16届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅰ册

PROCEEDINGS OF THE SIXTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. I

主编：崔京浩

《工程力学》杂志社
2007.8

序

2007 年正值中国力学学会成立 50 周年的喜庆年份，所以今年第 16 届全国结构工程学术会议涵盖了三个内容：其一是庆祝中国力学学会成立 50 周年大会；其二是中国力学学会为了庆祝 50 周年召开全国性的学术大会’2007，本次会议属于这个大会的分会场之一；其三就是一年一度的全国结构工程学术会议。

50 年前的初春，我国著名的力学家钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀等发起成立了中国力学学会，这一创举极大地推动了力学面向国民经济发展的主战场，在积极为国民经济建设服务的同时也大大促进了力学学科的发展与强大。

中国力学学会结构工程专业委员会和《工程力学》编委会作为中国力学学会的二级机构，也一直遵循力学要面向国民经济主战场的原则，从 1991 年开始就联合主办全国性的结构工程学术会议，每年召开一次，每届会议的论文集，都收录论文 300 多篇，与会代表 150 多人。受到力学与工程界的普遍欢迎，也得到了力学学会的肯定。

今年第 16 届全国结构工程学术会议在太原理工大学召开。太原理工大学前身是创立于 1902 年的国立山西大学堂西学专斋，是我国最早成立的三所国立大学之一。经过百余年的传承与发展，学校已建设成为一所以工为主、理工结合，兼有文、管、经、法、体、美等多学科协调发展的综合性大学，是山西省唯一一所国家“211 工程”重点建设大学，是一所历史悠久，具有深厚文化底蕴和充满现代气息的高等学府。对于知识份子来说，在这种氛围里召开会议无疑是一大快事。

作为会议的主办单位之一，太原理工大学承担了繁重的会务工作，在此我们表示由衷的感谢。

崔京浩



2007 年 8 月

第 16 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 304 篇，共计 1571 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、III 册则只载本册目录。

第 I 册论文 83 篇（共 528 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算；
2. 结构设计、施工、优化与可靠度

第 II 册论文 118 篇（共 542 页），包括：3. 钢与钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 岩土、地基基础与地下工程；5. 路桥、水工、港工、特种结构

第 III 册论文 103 篇（共 501 页），包括：6. 机械结构、船舶结构、车辆及航空航天飞行器；7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固；9. 交叉学科与其他研究成果

第 16 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 I 册目录

特邀报告

儿中特殊土地基的工程特性及地基处理	白晓红 (001)
预应力 FRP 加固混凝土结构技术研究与应用	杜修力 张建伟 邓宗才 (019)
爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应与破坏模式的数值分析	方 秦 陈 力 张亚栋 柳锦春 (032)
典型古建筑保护中的基础性问题研究	雷宏刚 李铁英 魏剑伟 (045)
智能混凝土与结构	李 惠 欧进萍 (057)
引黄入晋—万家寨引黄工程综述及高新技术应用	李 珠 刘元珍 闫 旭 任够平 王育青 (077)
大跨度缆索承重桥梁非线性静风扭转失稳机理的研究	罗建辉 陈政清 刘光栋 (091)
桥梁抗震的研究进展	王克海 李 茜 (108)
水库及其环境影响	徐礼华 刘素梅 (119)
移动荷载下杆系结构内力包络图的精确计算	袁 骊 叶康生 林斯达 (134)
广义复合基础的概念和工程实践	宰金珉 周 峰 梅国雄 王旭东 翟宏飞 周桂阳 (141)
高层建筑岩石洞室地基稳定性分析方法与应用	张永兴 王桂林 (154)
建筑保温节能墙体的发展现状与展望	张泽平 李 珠 董彦莉 (166)
力学在飞机结构设计中的应用与发展	庄 茁 王向东 张朝晖 林勇文 赵志明 滕 锦 王 璞 (174)

1. 力学分析与计算

板级电子封装跌落/冲击中焊点的动力响应	白 洁 秦 飞 (182)
改型等强度壳的理论与工程应用	白雪飞 任文敏 郭日修 (186)
考虑土-结构动力相互作用时高层建筑风致振动的地基土阻尼比研究	边东洋 陈 镭 吕 鹏 (195)
弹性地基聚酯网道面系统有限元分析	蔡望鹏 董 垒 郑小平 (199)
固流耦合振动问题的加权残值法研究	陈国良 周 政 周贵宝 (203)
均布荷载下四边简支蜂窝式空心板的解析解	程远兵 程文灏 党 纪 (207)
考虑土-结构相互作用时高层建筑风振系数的计算分析	褚 濛 吕 鹏 陈 镭 (214)
梯形波槽排架轴力的简化计算	崔清洋 胡必武 (218)
有限变形下固-液耦合渗透固结问题的数值分析	丁继辉 李凤莲 王维玉 (221)
扩展集装箱式活动房结构受力有限元分析	冯远红 黄光宏 杨 柳 姜忻良 刘 杰 刘建飞 傅 爽 (227)
拉伸矩形直梁的分解定理	高 阳 赵宝生 (231)
基于四边形面积坐标的广义协调轴对称单元	管楠祥 岑 松 陈晓明 (235)
管壳式换热器管束结构断裂原因分析及改进设计	郭 臻 王 彬 郑小平 (239)
半跨水重圆弧拱形钢管在水平荷载作用下的 P- Δ 效应	郭天木 (243)

带调谐质量阻尼器的框架之瞬态响应分析	郭永强 沈耀球 陈伟球 叶贵如 (248)
各向异性多层悬臂梁在自由端受集中载荷的解析解	黄德进 丁皓江 (254)
数值模拟通气角度对超空泡形态特性影响分析	黄海龙 黄文虎 王 聪 黄庆新 黄 薇 (258)
颗粒增强复合材料的界面效应	解海鸥 魏悦广 (263)
高强螺栓疲劳缺口系数的有限元分析	雷宏刚 (267)
框架节点损伤识别的数值与试验分析	李 慧 杜永峰 王红丽 (275)
网壳膜结构非线性风振动态响应分析	李庆祥 杨仕超 黄启明 (283)
体育馆屋盖结构风振系数计算	廖玉凤 王 伟 (288)
无梁楼盖结构的弹性与塑性计算方法	凌 岚 陆洲导 (293)
广义图乘法表示杆荷载合力方法及其应用	刘光好 (298)
低层轻型木结构建筑体系整体性能研究	刘品波 刘祥庆 汪 勇 张继渝 陈 鸣 (302)
地震作用下高层结构动力响应分析的一种数值方法	刘铁林 姜迎春 刘 伟 (309)
考虑流体结构耦合作用的高速公路收费站雨篷结构的风致动力响应	刘振华 刘 艳 张其林 (313)
曲梁的平衡方程及应用	崔清洋 朱 华 (319)
混凝土圈梁受集中拉力的承载力分析	秦宇航 屈文俊 (323)
张弦梁下弦预应力钢棒自重作用下受力分析	尚仁杰 谭 明 刘 刚 吴转琴 李佩勋 (328)
基于固定重构核函数的无网格法及其在弹性力学中的应用研究	孙 威 阎 石 郭鹏飞 (334)
斜直井内钻柱的非线性螺旋屈曲	谈梅兰 甘立飞 王鑫伟 (338)
轴对称弹性空间问题通解的一种新形式	汪 涯 郑传超 陈文敏 (342)
压电作动器对热变形层合板形状修复研究	王 琦 陈浩然 (348)
板条内分叉裂纹问题的一种近似解法	王钟羨 马丽娜 (352)
极坐标下短纤维与基体间应力传递机理分析	吴平安 卫 东 李凤明 (357)
网架结构日照温度梯度的分析	朱彦鹏 张宪江 (363)
跃越屈曲平衡法中刚性压杆的弯矩分析	夏正新 董事尔 张 鹏 何人比 徐发忠 (368)
机场填筑体冲击碾压加固试验研究	谢永亮 王思捷 侯治宇 (372)
永乐人钟强度分析	徐永君 战 颂 李 敏 解小敏 丁 弢 (376)
暗钢梁板柱-剪力墙混合结构弹塑性静力分析	阎兴华 高旭英 孔祥峰 (382)
闭口薄壁自然弯扭复合梁力学行为的理论研究	虞爱民 杨旭刚 (386)
底部框架砌块砌体结构计算方案及其验证	曾 森 王焕定 崔雪娜 (391)
新型索缆锚具力学性能研究	张 衡 魏德敏 (397)
基于离散小波变换的脉动风速时程模拟研究	张文福 马吕恒 巨秀丽 刘迎春 (403)
平均屈服准则解析有鼓形三维锻压	赵德文 杜海军 刘相华 王国栋 (408)
对空间与平面力系平衡条件的认识	赵福焱 (413)
三维直角坐标下短纤维与基体应力传递机理分析	赵建军 吴平安 李凤明 (416)
泡沫铝夹层梁吸能特性数值研究	郑奇军 温杰波 孙 清 张 陵 (421)
功能梯度材料中一维 P 波的传播	朱 虹 韩杰才 盖秉政 张宇民 张立刚 (425)
三维柱坐标下短纤维与基体间应力传递机理分析	吴平安 卫 东 李凤明 (431)
网架结构日照温度效应的分析	朱彦鹏 张宪江 (438)

2. 结构设计、施工、优化与可靠度

基于遗传算法的混凝土桥面板维修优化	边晶梅 朱浮声 康玉梅 郭 梅 (444)
某高耸结构风振反应的 TMD 控制分析	葛建平 纪金豹 鄢圣超 闫维明 (449)
双塔人底盘预应力水平楼盖结构设计	顾渭建 刘云飞 (455)
结构选型方法的研究现状和合理途径	花林林 石建光 林树枝 (459)

基于 ANSYS 的结构优化设计	李福强 胡卫兵 (464)
某预应力混凝土斜拉桥换索后的索力调整	李宏江 (468)
启发式粒子群算法及其应用研究	李丽娟 黄志斌 刘 锋 (475)
乌鲁木齐地区砌体结构上加门式刚架设计方法的研究	于 江 韩风霞 (483)
楼屋面现浇板非弯曲裂缝控制计算	刘金铃 丰安生 (486)
某地下室防水补渗施工技术	马 飞 胡功笠 (490)
三类预应力混凝土框架试验研究	魏世宏 陈明政 黄林青 (495)
岸桥连接方式对水中悬浮隧道地震响应的影响	肖 剑 黄国君 (501)
超高模板支架的极限承载能力研究	谢 楠 王 勇 (505)
开洞墙体的承载能力可靠性研究	杨婷连 王杰光 (510)
某火电厂结构-铅阻尼器减震体系的弹塑性静力分析	姚 义 闫维明 彭凌云 纪金豹 (513)
门式刚架端板连接节点在加劲肋作用下的性能研究	于 江 肖前慧 张广泰 (519)
基于混沌粒子群算法的抗震工程系统可靠度最优分配	张 鹏 沈小伟 童金旺 (523)

第 II 册目录

3. 钢与钢筋混凝土结构、材料与构件

线性和非线性剪应变对钢梁临界弯矩的影响	陈树华 陈力攀 (001)
装配整体式框架梁柱节点的试验研究	杜春光 程文灏 罗青儿 荣 强 (006)
近断层地震下 R-FBI 隔震结构地震反应及防护研究	樊 剑 魏俊杰 刘 铁 (011)
湿排粉煤灰在墙体材料中的应用研究	扶名福 谢帮华 胡明玉 陈文俊 (017)
超高层建筑束筒结构受确定性动力作用的半解析分析	龚耀清 杨富莲 (021)
空间桁架理论中两个关键问题的探讨	郭宏磊 (029)
应用 Monte Carlo 重要性抽样法分析 FRP 筋混凝土梁受弯承载力可靠度	何 政 李 光 (033)
侵蚀混凝土材料的工程费效比分析	华 雪 曹 毅 夏逸平 陶西贵 (039)
大面积混凝土结构温度及收缩裂缝控制研究	姬 慧 (042)
混凝土灌芯石膏板简化计算模型	姜忻良 左仲存 (046)
钢筋混凝土装配整体式框架的试验研究	金 晶 程文灏 罗青儿 荣 强 (050)
异形柱向矩形柱转换时转换节点的受力分析	金坤炜 熊进刚 桂国庆 杨维汉 (055)
矩形钢管混凝土框架节点抗震性能试验研究	李 斌 高春彦 (059)
钢筋混凝土高剪力墙拟静力试验及滞回模型研究	李 兵 王 强 陈 鑫 (065)
建筑结构抗震设计研究新进展	李 尊 陈忠范 (069)
基于粘滞裂纹模型的裂纹扩展过程数值模拟	李宗利 (075)
新型外包钢组合梁承载力数值仿真的实现	梁 力 张道明 王 伟 李 明 (079)
论混凝土强度与耐久性的关系	刘 波 丁成平 范辉荣 (083)
方钢管混凝土结构在高层建筑中的应用研究	刘 香 马 伟 郭 彬 (087)
含有率效应的混凝土材料的粘塑性统一本构模型	刘长春 吕和祥 关 萍 (091)
中小跨度空间结构的应用进展	刘京红 杜旭冉 刘晓华 郝文秀 王 印 (096)
新配筋方案小跨高比连梁的数值分析	刘清山 闫 超 (100)
确定井字梁钢筋直径的简便方法	刘书智 崔宝霞 (106)
混凝土裂缝产生的机理分析以及抗裂性能提高的措施	马 飞 胡功笠 (110)

钢筋混凝土整体式有限元分析 SIGY 参数的研究.....	牛海成 李壮文 孙青岭 (114)
超高强度钢材钢结构的受力性能和工程应用.....	施 刚 石永久 王元清 (119)
混凝土构件耐久程度评定办法.....	施养杭 张 璐 (123)
高性能钢筋混凝土结构的耐久性研究.....	舒 阳 杜宇平 王学明 闫澍旺 颜成华 (127)
人骨料混凝土在双轴压应力状态下的变形和强度试验研究.....	宋玉普 王怀亮 (133)
普通热轧钢筋代换分析.....	苏 琪 苏 琳 (142)
钢-混组合梁变形监测与分析.....	谭文辉 李 达 (147)
Eurocode 3 局部屈曲验算特点浅探.....	田 毅 周尔华 (151)
钢筋混凝土剪力墙时程分析探讨.....	田志吕 何育青 张黎明 (155)
钢-砼叠合梁接合部受力特性分析.....	王海涛 亓路宽 (161)
高层框筒结构调谐减震分析.....	王孟秋 张文芳 (166)
L 形宽肢异形柱受剪性能试验研究.....	王铁成 计飞翔 杜 琛 (170)
影响 BRB 支撑性能的参数分析.....	郑 宏 蔡玉军 (176)
辐射式张弦梁结构自振特性分析.....	王秀丽 李晓飞 薛晓峰 (181)
混凝土结构全寿命维修策略研究.....	王增忠 张新华 范立础 (185)
钢管混凝土柱基于设计的力学性能研究.....	闻 洋 李 斌 (191)
拉索预应力桁架结构优化设计研究.....	吴 杰 杨永华 (195)
孔洞参数对钢筋混凝土开孔梁受力性能的影响.....	吴炎海 周凯敏 (200)
损伤方钢管混凝土框架加固后滞回性能试验与理论研究.....	辛立民 王铁成 张 凌 (205)
两侧加劲钢板深梁的弹塑性屈曲分析.....	郑 宏 杨飞颖 张维刚 (212)
钢-混凝土双面组合梁受拉钢筋有效分布宽度.....	杨喜文 段树金 (216)
影响矩形钢管混凝土受弯构件的主要因素.....	银英姿 李 斌 中向东 (222)
锥体式平板网架的试验与分析.....	张 磊 熊进刚 罗凤麟 (226)
混凝土梁正截面受弯承载力计算公式的比较.....	张狄龙 邸小坛 徐 骋 (230)
叠合结构梁板试验研究.....	张季超 王 蕴 刘晓东 邱剑辉 (234)
压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板试验研究.....	张燕坤 靳海江 宋小软 姜德民 刘阳花 (238)
预应力混凝土深受弯构件的裂缝实验研究.....	张永胜 李雁英 (242)
斜向水平荷载作用下两向不等肢配箍框架柱受剪性能试验研究.....	王铁成 王玉良 邵 莉 (246)
预应力矩形钢管混凝土桁架静力性能分析.....	郑 宏 周春利 (252)
波形钢腹板 PC 组合箱梁简支人行桥设计.....	朱高波 李淑琴 万 水 (256)

4. 岩土、地基基础与地下工程

水泥土搅拌桩处理具有软弱透镜体的圆砾层.....	曹 净 林 涛 赵党书 (261)
高强度预应力混凝土管桩质量通病及防治措施.....	陈 丽 王怀忠 郑 浩 (265)
桩的侧摩阻力性状试验研究.....	陈国良 杨绪普 周 政 (269)
对预应力锚索抗滑桩受力机理的初探.....	邓安福 王德兵 邓 璞 郑 冰 (273)
SSI 效应对结构动力特性及地震响应影响研究.....	段学刚 张之颖 (278)
地基临界荷载统一解.....	冯红波 赵均海 贾 萍 (282)
CFG 桩复合地基褥垫层室内试验研究.....	冯玉芹 张凤红 王英浩 (286)
高层建筑复合桩基中单桩的承载性状分析.....	葛忻声 白晓红 龚晓南 (290)
PIT 基桩低应变动力试验分析技术.....	韩 亮 (295)
双剪统一强度理论的 Rankine 主动土压力统一解.....	黄亚娟 赵均海 魏雪英 田文秀 (299)
空间主动土压力简化计算及参数分析.....	贾 萍 赵均海 冯红波 杨青顺 (303)
地下连续墙的空间非线性有限元分析.....	姜海军 陈英杰 毛德伟 (307)

固化土力学性能试验研究.....	李 兵 刘 弘 李永业 孙西欢 (311)
缓冲算子修正的单桩极限承载力的灰色预测.....	李 森 唐孟雄 陈树辉 (316)
非饱和土损伤模型与应用.....	李向东 罗晓辉 吴瑞麟 (321)
广州软土工程特性研究.....	梁令枝 童华炜 (327)
文克勒地基上弹性梁类型的判别方法研究.....	刘熙媛 郝春元 梁瑞琳 (332)
人工挖孔灌注桩施工的工艺分析.....	刘晓华 刘京红 赵文学 曹新潮 张彦中 (336)
任意形状埋置基础摇摆振动复合集总参数模型.....	刘志久 李慧剑 黎振兹 (340)
铁路单线隧道施工合理确定掌子面与支护距离问题的思考.....	宋顺德 (347)
双面加筋挡土墙的计算及其工程应用.....	苏 骏 余大庆 (351)
复合地基在南沙地基基础优化设计中的应用.....	苏克俭 张季超 江 毅 李丁辉 刘 波 (356)
既有铁路路基塌陷治理.....	孙国钧 (360)
城市隧道掘进对邻近环境影响的保护分析.....	孙宇坤 吴为义 (364)
碎石桩复合地基的抗液化研究.....	杨庆陶 魏剑伟 牛琪瑛 (368)
带肋筏板的无单元和有限元耦合方法.....	张建辉 余晓雅 (373)
挤扩支盘桩抗拔性能试验研究.....	张延庆 苑 辉 屈 展 高华东 (378)
地铁盾构对周围地下管线影响的研究现状与思考.....	吴为义 孙宇坤 (382)
水泥搅拌桩重力式挡土墙在基坑支护中的应用.....	郑旻晟 陈 燃 张季超 (386)
基于希尔挤出图的理想松散土地基极限承载力精确解.....	周桂阳 宰金珉 张树俊 (390)

5. 路桥、水工、港工、特种结构

钢管混凝土拱桥应用与研究最新进展.....	陈宝春 (395)
既有钢拱桥混凝土超声探测实例分析.....	邓洪亮 陈 玲 (399)
从动力学角度分析桥面铺装损坏的原因.....	方合雪 (403)
中山一桥设计计算分析.....	郭 静 童丽萍 (407)
大流量斜拉渡槽动力分析.....	郝文秀 徐 晓 王 蕾 (412)
高等级公路桥头跳车的成因分析及防治措施.....	黄 笑 (415)
某焦煤车间钢梁的耐撞性分析.....	贾宏伟 代学灵 (419)
子结构法在海洋平台疲劳可靠性研究中的应用.....	姜绍飞 吕啸斐 (423)
连续梁桥荷载横向分布的研究.....	姜震宇 杨小波 袁占鸿 王克海 (428)
斜拉桥拉索安装亮化灯具的风致稳定性研究.....	李寿英 陈政清 (432)
基于 ANSYS 的公路钢桁架桥优化分析.....	李鑫奎 范 云 杨 刚 (436)
抛石防波堤堤内波浪运动的数值模拟.....	李增志 别社安 任增金 (440)
大跨径钢箱组合梁顶板混凝土浇筑施工工艺.....	刘 勇 卢向君 茹洪忠 (445)
大跨径混凝土梁桥的长期挠度实测分析.....	牛艳伟 石雪飞 阮 欣 (449)
浮放储罐三维地震反应有限元分析.....	孙建刚 王 振 杜蓬娟 (453)
曲线桥弯扭振动的传递矩阵.....	孙建鹏 李青宁 吕永高 刘士强 (457)
浈河大桥模态特性试验研究.....	万 水 胡 洋 朱坤宁 (461)
胶粉改性沥青桥面防水层界面抗剪性能试验研究.....	王 岚 邢永明 赵久敏 郭莹莹 (466)
基于碳化深度的水工混凝土构件耐久寿命分析.....	王建泽 张俊芝 邹传仁 (470)
预制倒 T 截面组合箱形梁的抗弯性能研究.....	王荣霞 郑 刚 李建军 (474)
火甲水库双重拱坝地震应力分析.....	王志强 关荣光 燕柳斌 (480)
扁平钢箱梁横隔板施工阶段弹性挠曲分析.....	卫 星 李 俊 强士中 (484)
基于正交试验思想有限元分析的水泥砼路面板角脱空判定方法研究.....	吴瑞麟 彭前程 简晓波 (489)
1000kV 输电线路铁塔结构分析与试验研究.....	夏开全 李茂华 李 峰 (494)

人跨径钢箱梁制作的精度控制	卢向君 刘 勇 赵建波 (499)
桥梁振动辐射低频噪声的数值评估	谢 旭 张 鹤 张治成 (503)
钢管混凝土拱桥徐变研究进展	谢胜涛 (509)
人流量斜拉渡槽模态分析	徐 晓 郝文秀 李红梅 (513)
FE-SBFE 在路面结构层模量反算中的应用	徐海滨 张敏霞 栾怀宝 徐 平 (516)
路面体反射裂缝扩展过程的仿真模拟	杨 刚 范 云 李鑫奎 (520)
关于使用半波正弦荷载代替集中力计算简支梁桥荷载横向分布的研究	袁吉鸿 (525)
空腹式拱桥的车道荷载内力计算	张 玥 (529)
经验法在钢管桁拱桥管节点疲劳寿命中的研究	张家元 范文理 邓 海 丁望星 (534)
大跨度斜拉桥静风失稳形态分析及在 ANSYS 中的实现	钟轶峰 胡晓伦 许宏兵 包修瑞 (539)

第 III 册目录

6. 机械结构、船舶结构、车辆及航空航天飞行器

履带车辆悬挂系统振动特性动态仿真与实验分析	王文瑞 顾 亮 杨 博 (001)
粘弹层合板振动的阻尼特性	杨少红 宋世奎 王安稳 (005)
楔环连接结构轴向-横向联合加载实验研究	尹益辉 唐章华 刘远东 (010)

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

考虑局部非线性的复杂场地地震反应分析的约束模态综合法	白建方 楼梦麟 (014)
非均匀偏心配筋砌体结构地震反应影响参数分析	白秀芳 王焕定 丁德湖 (020)
内藏钢桁架混凝土组合核心筒抗震研究	曹万林 常卫华 张建伟 赵长军 卢智成 (025)
冲击荷载下金属方板支承条件影响的数值模拟分析	崔高领 蒋志刚 胡 平 (031)
摩擦耗能支撑结构两种减震分析方法对比	樊长林 张文芳 (036)
非线性单自由度复合随机振动系统的反应特性	范么清 楼梦麟 (041)
设置软钢阻尼器的钢框架耗能减震性能研究	方鹏凯 裴星洙 臧秀平 (046)
组合梁-方钢管混凝土框架结构的 Pushover 分析	郭 冰 刘阳冰 刘晶波 (051)
基础隔震层软碰撞限位实验研究	韩 淼 杜红凯 李仙华 (057)
筏板基础对结构水平地震行波效应的影响	黄明开 楼梦麟 (063)
四铅芯桥梁隔震支座非线性力学性能试验研究及其显示有限元分析	江宜城 叶志雄 聂肃非 李 黎 (068)
钢管混凝土构件在侧向冲击载荷作用下的挠度分析	李 珠 刘 斌 王瑞峰 (073)
某除尘器钢支架的 pushover 分析	李奉阁 赵根田 (078)
聚合物材料的吸能特性实验分析	李经纬 庄惠平 (082)
填充墙框架结构基于位移的抗震评估	刘建毅 史庆轩 (086)
高层结构脉动风荷载模拟	刘立卫 隋杰英 刘兆新 (090)
联方型球面网壳结构风振响应分析及风振系数	刘文洋 张文福 (094)
组合梁-方钢管混凝土柱框架结构体系抗震性能分析	刘阳冰 郭 冰 刘晶波 (098)
不同地震波输入对连续梁桥隔震性能的影响	龙晓鸿 李 黎 (104)
偏心砌体隔震结构地震反应影响参数分析	鲁志雄 王焕定 (108)
模拟穿甲弹侵彻陶瓷复合靶的 FE-SPH 与 FEM 算法	罗夕容 陈 斌 曾首义 (115)

固简支钢管混凝土构件侧向冲击试验研究	李 珠 王瑞峰 (120)
侧向约束陶瓷复合靶板防护系数的数值模拟分析	麻震宇 曾首义 蒋志刚 (124)
多铅芯橡胶隔震支座力学性能研究及应用	聂肃非 李 黎 江宜城 叶志雄 (129)
橡胶隔震采用摩擦消能的减震研究	牛力军 张文芳 (134)
钢管混凝土短柱轴向冲击本构关系实验研究	任够平 李 珠 王 蕊 (138)
槽形截面 Timoshenko 梁固有频率的确定	苏铁坚 邹建奇 (143)
小八字曲拐撑的试验研究	隋杰英 刘文锋 姚幸海 (147)
塔梁墩固结体系独塔混凝土斜拉桥地震反应分析	孙 颖 卓卫东 (151)
曲线桥反应谱分析中振型贡献率探讨	孙军举 李青宁 王大利 (157)
30mm 口径半穿甲模拟弹侵彻陶瓷复合靶板的 SPH 方法数值模拟研究	汪 维 何 煌 曾首义 (161)
侧向冲击载荷作用下钢管混凝土梁动力响应的实验和理论研究	王 蕊 李 珠 任够平 (166)
平头弹侵彻金属靶板的 SPH 数值仿真	王 震 晏麓晖 曾首义 (171)
防屈曲支撑框架结构的应用研究	王华琪 丁洁民 何志军 汪 磊 (176)
叠梁在随机激励作用下响应的试验研究	王山山 任青文 曹茂森 (183)
带约束屈曲支撑的网壳减震性能分析	王秀丽 王 磊 高 霖 (186)
桥梁结构抗震计算可视化系统研究	韦 韩 袁吉鸿 王克海 李 茜 (190)
短肢剪力墙拟静力试验研究	韦 炜 程文灏 彭 飞 陆和燕 荣 强 (197)
非线性刚度转子系统主共振特性及奇异性分析	吴敬东 高大威 包 鑫 (203)
墙式防护结构抗平面波炸药透镜爆炸冲击性能研究	吴祖堂 陈春毅 邵贤忠 张德志 胡泽根 唐润棟 (209)
供水管网渗漏模型研究	邢 燕 李 杰 (213)
钢纤维混凝土板抗爆性能试验研究	徐 峰 许金余 沈刘军 (218)
基于粒子群优化算法的磁流变阻尼器位置优化	徐晓龙 孙炳楠 桂满树 姜毅荣 (222)
碟形弹簧竖向隔震支座性能试验研究	薛素铎 祝天瑞 (231)
爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱损伤 FEM 分析	阎 石 王 丹 张 亮 (235)
改进的能力谱方法在基础隔震结构中的应用	杨晓持 徐 勤 叶献国 (239)
基于间断伽辽金法的自由空气爆炸数值模拟	叶 昆 李 黎 (243)
考虑土与结构动力相互作用的 CFST 拱桥地震反应	张 博 宰金珉 (248)
轻质桁架式夹层复合圆柱管的冲击吸能数值模拟	张 巍 王跃方 (253)
基于 Pushover 分析的梁柱承载力比对 RC 框架结构抗震性能的影响研究	张大长 陆 琦 曹素荣 (258)
使用低屈服极限钢铅组合耗能器的基准结构地震反应分析研究	张永山 颜学渊 王焕定 辛亚军 (266)
应用碳纤维索的斜拉桥地震响应分析	张治成 谢 旭 张 鹤 (270)
不等高厂房抗震可靠性分析的一般方法	张治勇 孙柏涛 (279)
TMD 对行走激励下大跨度楼盖的减振控制	赵 玲 赵 均 陈永祁 李亚民 (283)
摩擦摆支座的摩擦系数对结构隔震性能影响分析	赵 伟 薛素铎 李雄彦 祝天瑞 (287)
网壳结构损伤研究在性能抗震设计中的应用	支旭东 谢礼立 (293)
橡胶支座和粘滞阻尼器在连续梁桥减、隔震中联合应用研究	周高瞻 闫维明 李素梅 (297)
复杂超高层结构抗震性能的有限元计算分析	邹 昀 吕西林 (304)
钻地模型弹侵彻岩石模拟材料试验研究	左 魁 李 林 王启睿 梁仕发 (309)

8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固

某水泵站厂房结构检测鉴定	常好诵 牟宏远 黄新豪 邓 明 (314)
--------------------	-----------------------

复合薄壁剪力墙住宅体系抗震性能研究.....	窦远明 黄 磊 赵家妹 吴华伟 (318)
基于承载力评估的混凝土结构火灾损伤的无损检测与评估方法.....	杜红秀 (323)
单轴应力状态下受 NaCl 腐蚀混凝土受拉应力-应变曲线试验研究.....	胡跃东 范颖芳 张英姿 赵立东 (327)
基于粗集的结构损伤识别方法研究.....	姜绍飞 姚 娟 (332)
异型大厦附近的风环境影响研究.....	据素芳 刘 军 李 龙 张成新 武建勋 (337)
上海长江隧桥斜拉桥承台裂缝监测及分析.....	李 东 睦少峰 (341)
新型桥梁疲劳寿命计精密合金箔材制备.....	李 飞 肖 丹 任伟新 (345)
应县木塔扭转振动特性和地面强迫振动试验与分析.....	李铁英 魏剑伟 李世温 张善元 (349)
某厂房沉降监测及地基处理.....	刘海生 (357)
碳纤维加固已损钢筋混凝土柱的试验研究.....	刘卫东 郑七振 陈 刚 (360)
腐蚀疲劳裂纹检测概率曲线测定.....	刘秀丽 陈 莉 黄华斌 (364)
外加预应力加固技术在桥梁工程中的应用.....	马 亮 梁 力 张树仁 (368)
梁刚度损伤诊断中的小波应用.....	马德云 霍 达 滕海文 杨雅平 (373)
FRP 约束混凝土圆柱的力学模型研究.....	欧阳煜 刘能科 (380)
复合材料的力学性能测试和复合材料结构的应变电测技术研究及其应用.....	沈观林 (385)
频率对结构损伤识别影响的神经网络方法研究.....	隋红军 赵广会 袁旭东 (389)
锈蚀光圆钢筋与混凝土的粘结强度模型.....	孙 彬 牛荻涛 (394)
百色膨胀土的抗剪强度试验分析.....	谭景和 朱寿增 王杰光 周健红 (398)
向心关节轴承较节点的试验研究.....	王 帅 葛利俊 赵宪忠 陈以一 (403)
基于光纤光栅传感器的桥梁挠曲线测试.....	徐 辉 任伟新 (407)
模态试验中胶木垫块在高频下的使用.....	徐有刚 冯加权 张洁文 (411)
广东科学中心结构服役性能研究及展示.....	易 和 张季超 郭曼丽 陈大宾 (414)
碳纤维布静力及动力性能试验研究.....	袁正如 鲍育明 李志成 (418)
双向楼板粘钢加固的数值模拟研究.....	张海涛 傅 娟 杨昌盛 李 瑞 武建勋 (422)
全预应力梁动力性能试验研究.....	张耀庭 李宏健 (426)
某桥梁加固效果动静载力学分析.....	张宇辉 张献民 (432)
防腐高强钢丝加固受弯构件中钢筋与钢丝应力变化的试验研究.....	赵士永 李占文 (436)
基于事件树分析法的大跨斜拉桥施工事故分析.....	郑荣跃 简小生 俞凯磊 (440)
环境激励下圆筒结构的模态分析.....	周帮友 胡绍全 杜 强 (446)
预应力桥梁裂缝的成因之一——预应力施工中存在的若干技术问题.....	周明华 (450)

9. 交叉学科与其他研究成果

智能合金材料及在道路工程中的应用.....	邓洪亮 廖 丹 王正念 陈 玲 (453)
计算机辅助建筑结构构件设计软件述评.....	韩 通 石建光 (457)
飞机掩蔽库可见光特征控制技术研究.....	李 可 孟祥龙 于伯毅 贾治勇 李猛深 (461)
基于曲率模态梁式结构的损伤定位分析.....	潘日光 周 平 何惠平 李 顺 (465)
建筑节能评价体系的发展与研究方向.....	田稳苓 王洪福 袁 全 (470)
基于参数改进的混沌粒子群混合优化算法.....	童金旺 张 鹏 沈小伟 (475)
一种测量射弹作用后靶板形状的简易光刀法.....	苑 云 陈 斌 曾首义 (481)
结构温度场数值模拟.....	张 丹 张之颖 (485)
相变材料在建筑节能领域应用研究综述.....	田稳苓 邢 超 袁 全 (491)
横向磁场中对边简支对边固支矩形薄板的分岔与混沌.....	朱为国 白象忠 杨 阳 (495)

几种特殊土地基的工程特性及地基处理

——第16届全国结构工程学术会议特邀报告——

白晓红

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 城市化和工业化进程的快速发展, 使得土木工程向各种复杂地基条件的区域发展, 特殊土地基的工程特性引起工程师的重视。本文总结了湿陷性黄土、液化土、盐渍土等几种山西地区常见的特殊土的重要工程性质。提出了相应的地基处理方法以及工程注意事项; 最后针对山西采煤大省的特点, 对老采空区上建(构)筑物基础的稳定性评价、勘察技术及处治技术进行了论述。

关键词: 湿陷性黄土; 液化土; 盐渍土; 采空区; 地基处理

中图分类号: TU44

ENGINEERING PROPERTIES AND IMPROVEMENT OF SOME SPECIAL SOIL

BAI Xiao-hong

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Shanxi Taiyuan 030024)

Abstract: As the fast developing of civilization and industrialization in China and rising living standards in the world, more land is needed; many soil deposits previously claimed to be unfit for residential housing and other construction projects are now being used. The engineering properties of special soils are of importance, which has been noticed by civil engineers. This paper summarizes the most important engineering properties of several typical special soils in Shanxi province of China, such as: collapsible loess, liquefaction soil, and salty soil, and puts forwards corresponding soil improvement methods and main construction points. To aim at the fact that Shanxi province is the base of coal mining for China, finally, this paper also discusses the stability of foundations above mine goaf, investigation of mine goaf, and its treatment technique.

Key words: collapsible loess; liquefaction soil; salty soil; mine goaf; soil improvement

随着我国城市化和工业化进程的快速发展, 人类生活水平的不断提高, 土地的需求日益上涨, 人们不得不在各种复杂和软弱地基上开展工程建设, 因此正确认识各种特殊土的工程特性就显得尤为重要, 该问题已受到土木工程师的极大关注。山西地区是我国重要的能源基地, 拥有大量的重工业设施和地下资源(特别是煤炭资源), 基础建设任务繁重, 而山西地处黄土地区, 具有较为复杂的工程地质条件, 在进行土木工程过程中, 了解我省主要特殊土的成因、工程特性以及适宜的地基处理方法对安全、科学、经济的完成建设项目具有重要意义。本文结合山西地区特殊土条件, 对湿陷性黄土、液化土和盐渍土的工程特性进行总结, 并结合工程实际提出相应的地基处理方法, 供工程技术人员参考。另外对采空区建设时的危害评价及地基处理也做一概要介绍。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478096), 山西省自然科学基金资助项目(20041061)

作者简介: 白晓红(1959), 女, 陕西人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程的教学与研究(E-mail: bxhong@tyut.edu.cn)

1 特殊土

1.1 湿陷性黄土

1.1.1 黄土的特性和分布^[1]

黄土是一种第四纪沉积物,色黄,颗粒组成以 0.05-0.005mm 的粉粒为主(含量在 40%以上),有肉眼可见大孔,垂直节理发育。黄土在世界上的分布很广,面积达 1300 万 km²,约为陆地总面积的 9.3%;在我国黄土分布面积达 63.5km²,主要分布在北纬 33°~47°之间。

在天然含水量状态下的黄土一般具有较高的强度和较低的压缩性。但是有的黄土,在一定压力(即土自重压力或上覆土自重压力与附加压力共同作用)下遇水浸湿后,土体的结构迅速破坏,并发生显著的附加下沉,其强度也随着迅速的降低,称为湿陷性黄土。有的黄土并不发生湿陷,则称为非湿陷性黄土。非湿陷性黄土地基的设计和施工与一般粘性土地基无异,本文不作讨论。湿陷性黄土又可分为自重湿陷性和非自重湿陷性,自重湿陷性黄土在自重压力下受水浸湿后产生湿陷,非自重湿陷性黄土在自重压力下受水浸湿不产生湿陷。

我国湿陷性黄土的分布面积约占我国黄土总面积的 60%以上,主要分布在北纬 34°~45°、东经 102°~114°之间的黄河中游地区。我国黄土的沉积经历了整个第四纪,地层划分见表 1。黄土形成年代越久,大孔结构退化,土质越趋密实,强度高而压缩性小,湿陷性减弱,甚至不具湿陷性。反之,形成年代越短,其湿陷性越显著。《湿陷性黄土地区建筑规范》(以下简称为“黄土规范”),将我国湿陷性黄土地区分为 7 个区,其中第 4 区为山西-冀北区,包括两个亚区:汾河流域区和上党盆地^[2]。汾河流域区低阶地多属非自重湿陷性黄土,湿陷性黄土层厚度一般为 10m 以内,也有 10m 以上的,如太原最大厚度可达 20m,土体结构疏松,压缩性高,多为新近堆积黄土;该区高阶地多属自重湿陷性黄土,湿陷性黄土层厚度一般为 16m 以内。上党盆地湿陷性黄土层厚度一般为 5~10m,粘粒含量少,湿陷敏感性弱,多为非自重湿陷性黄土。

表 1 我国黄土地层的划分^[2]

Table 1 Classification of Chinese Loess Formation

时代		地层划分	说明
全新世(Q ₄)黄土	新黄土	黄土状土	一般具有湿陷性
晚更新世(Q ₃)黄土		马兰黄土	
中更新世(Q ₂)黄土	老黄土	离石黄土	上部部分土层具有湿陷性
早更新世(Q ₁)黄土		午城黄土	
全新世(Q ₄)黄土包括湿陷性(Q ₄ ¹)黄土和新近堆积(Q ₄ ²)黄土			
			不具湿陷性

1.1.2 湿陷发生的原因、影响因素与评价

1.1.2.1 湿陷发生的原因及影响因素^[3]

学术界对黄土产生湿陷的机理有多种假说,比较典型的有毛管假说、溶盐假说、胶体不足假说、欠压实理论和结构学说^[1]。但是迄今为止没有任何一个假说可以解释黄土湿陷的所有现象,实际上黄土湿陷现象是一个复杂的物理、化学变化过程,它受到多方因素的制约和影响。黄土湿陷必在一定压力下遇水后发生,但是如果没有黄土本身固有的特点,湿陷现象还是无从产生。在一定压力下受水浸湿是黄土湿陷现象产生所必须的外界条件,而黄土的物质成分(颗粒组成、矿物成分和化学成分)和结构特征(以粉粒为骨架的多孔结构,架空孔隙的存在)则是黄土产生湿陷的内在原因^[4]。

影响黄土湿陷性的因素很多。黄土中的粘粒含量的多寡、胶结物的多少和成分以及颗粒的组成和分布,对黄土的结构特点和湿陷性的强弱有着重要影响。粘粒和胶结物含量大,可在骨架颗粒间起到胶结包裹作用,形成稳定致密的结构,使湿陷性降低,力学性质得到改善。相反,当粒径大于 0.005mm 的颗粒增多,粘粒和胶结物减少,骨架颗粒彼此直接接触,则土体结构疏松,强度降低湿陷性增强。黄土中架空孔隙的存在是黄土产生湿陷的内在因素^[5]。黄土中盐类的类型和多少对黄土的湿陷性也有明显的影响,易溶盐含量高,湿陷敏感性强,沉降突然;中、难溶盐含量高,则湿陷有滞后现象。黄土的湿陷性还与土体的天然孔隙比、含水量和所受压力有关。天然孔隙比愈大、含水量愈小则湿陷性愈强。在含水量和孔隙比不变的

条件下,随着压力的增加,黄土的湿陷性增加,但是当压力超过某一数值后,再增加压力,湿陷性反而降低。特别是新近堆积黄土,在小压力下,对变形很敏感,呈现高压缩性。湿陷性黄土地基遇水几率的高低也对湿陷产生的可能性有很大影响,遇水量的多寡、时间的长短也将影响湿陷量的大小。

1.1.1.2 黄土湿陷性的评价^[2]

黄土湿陷性的判定采用湿陷系数 δ_s , 其定义如式(1), 由室内压缩试验测定。

$$\delta_s = \frac{h_p - h_p'}{h_0} \tag{1}$$

式中: h_0 为试样初始高度(mm); h_z 为保持天然湿度和结构的试样, 加至一定压力时(基底 10m 以内的土层应用 200kPa, 10m 以下至非湿陷性黄土层顶面应用其上覆土的饱和自重压力, 大于 300kPa 时, 仍应用 300kPa; 当基底压力大于 300kPa 时, 宜用实际压力), 下沉稳定后的高度(mm); h_p' 为上述加压稳定后的试样, 在浸水(饱和)作用下, 附加下沉稳定后的高度(mm)。《黄土规范》规定, 当 $\delta_s \geq 0.015$ 时, 定为湿陷性黄土, 当 $\delta_s < 0.015$ 时, 则定为非湿陷性黄土。对于自重湿陷性的判定则是由自重湿陷系数 δ_{zs} 确定, 其定义如式(2)。

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h_z'}{h_0} \tag{2}$$

这里 h_0 为试样初始高度(mm); h_z 为保持天然湿度和结构的试样, 加至上覆土饱和自重压力下, 下沉稳定后的高度(mm); h_z' 为上述加压稳定后的试样, 在浸水(饱和)作用下, 附加下沉稳定后的高度(mm)。 $\delta_{zs} \geq 0.015$ 时, 定为自重湿陷性黄土, 当 $\delta_{zs} < 0.015$ 时, 则定为非自重湿陷性黄土。

根据《黄土规范》湿陷性黄土地基的湿陷等级分为 4 类, 具体划分指标如表 2 所示。

表 2 湿陷性黄土地基的湿陷等级^[2]

Table 2 Classification of Collapsible Loess Foundation

湿陷类型 湿陷量(mm)	自重湿陷性场地		
	$\Delta_{zs} \leq 70\text{mm}$	$70\text{mm} < \Delta_{zs} \leq 350\text{mm}$	$\Delta_{zs} > 350\text{mm}$
$\Delta_s \leq 300$	I(轻微)	II(中等)	-
$350 < \Delta_s \leq 700$	II(中等)	*II(中等) III(严重)	III(严重)
$\Delta_s > 700$	II(中等)	III(严重)	IV(很严重)

*注: 当湿陷量的计算值 $\Delta_s > 600\text{mm}$ 、自重湿陷量的计算值 $\Delta_{zs} > 300\text{mm}$ 时, 可判为 III 级, 其他情况可判为 II 级。

1.1.3 湿陷性黄土地基的地基处理要求

湿陷性黄土场地如果发生湿陷沉降, 对上部结构的正常使用必然产生不良影响, 不均匀沉降过大, 甚至会影响到结构的安全性, 因此, 《黄土规范》中将湿陷性黄土地区的建(构)筑物根据其重要性分为甲乙丙丁四类, 考虑到安全性、经济性和科学合理, 对不同类别的建(构)筑物提出不同的地基处理要求及相应的建筑措施和防水措施要求, 规定当地基的湿陷变形、压缩变形或承载力不能满足设计要求时, 应针对不同土质条件和建筑物的类别, 在地基压缩层内或湿陷性黄土层内采取处理措施, 甲类建筑应消除地基的全部湿陷量或采用桩基础穿透全部湿陷性黄土层, 或将基础设置在非湿陷性土层上; 乙、丙类建筑应消除地基的部分湿陷量; 丁类建筑地基可不作处理。

1.2 液化土^[3, 8, 9, 10]

我国处于世界上两个最活跃的地震带上——太平洋地震带和欧亚地震带, 是世界上几个多地震国家之一。无论从历史上还是近代来看, 我国的地震具有频率高、震级大、震源浅、死亡多的特点^[6]。地震波从震源发出后经过不同路径向地面传播, 因各岩、土层对地震的反应不同, 产生的地面影响也就不同。场地对地震地面运动的影响有如下作用: 1) 土层的放大作用。在某些情况下, 地震波在经过土层之后振幅放大, 一般说, 土层愈厚, 放大作用也愈大, 有时可放大 2-3 倍。2) 共振作用。地震运动中场地覆盖土层的震动

周期与上部结构的自震周期近似相同时使地震作用放大,造成震害加剧。3) 破坏的一次性与进行性。在刚性地基上,在一次地震过程中,结构一旦产生局部破坏其损坏一般不再加重,为一次性破坏。相反,在较软厚的土层上,结构发生局部破坏后,可能由于地震作用的增大,使破坏延续,变形发展,形成进行性破坏^[7]。地震的震害现象包括振动液化、滑坡、地裂和震陷等方面。山西省大部分地区属于 8 度及以上地震设防区,液化土的治理是抗震设计的一个重要内容。

1.2.1 液化产生的原因及其影响

美国土木工程师协会岩土工程分会土动力学专业委员会对液化的定义为:“液化是任何物质转化为液体状态的行为或过程。就无粘性土而言,这种由固体状态变为液体状态的转化是孔隙水压力增大和有效应力减少的结果。”松散的砂土层在震动作用下趋于密实,体积趋于减小。如果处于不排水条件下,孔隙水压力就会提高。在连续的震动作用下,砂土层内的孔隙水压力累积增高到某一时刻,就会等于初始上覆有效压力。在这种情况下,有效应力等于零,砂土就不再具有抗剪强度,而处于液化状态。液化现象是一种特殊的强度问题,它不仅发生在饱和砂土中,也会出现在饱和粉土中。

地震、机器振动、打桩、爆破等动力荷载作用都可能引起土的液化,但以地震引起的大面积液化危害最大。液化可造成喷水冒砂和浅层土承载力丧失,这些现象一般发生于地震之后。液化还可能引起地基不均匀沉降而造成建筑物的倾斜,甚至倒塌,对坝体、桥梁、道路等造成垮坝、塌桥、道路破坏等危害。液化土层具有减震作用,当地震波通过液化土层时其高频成分被大大削弱,主要是长周期的成分能够穿过液化层而向地面传播。这一特点使大部分短周期结构遭到的破坏比非液化区的同类结构为轻。另外对于沿河、海岸边的建筑,应注意由于液化后土的内摩擦角很小,甚至为零,在即使很小的水平荷载作用下,液化土层上的土体就可能产生大面积滑动,而对上部建筑产生危害。

1.2.2 影响土体液化的因素

土体在地震作用下是否会发生液化,主要与土的性质、土的初始应力状态、震动特性等因素有关。

1.2.2.1 土的性质

实测和实验资料均表明,从土性条件方面而言,影响饱和土液化的因素主要为土的密实程度和土的颗粒特征。

试验表明相对密度 D_r 越大,抗液化强度越高。砂土发生液化时的剪应力比大致与相对密度成正比,对于相对密度 D_r 在 0.3-0.7 的标准砂,周期加荷 20 周发生液化的剪应力比 $(\sigma_{dl}/2\sigma_0)_{20}$ 与相对密度 D_r 存在如下关系:

$$\left(\frac{\sigma_{dl}}{2\sigma_0} \right)_{20} = 0.0035D_r \quad (3)$$

调查资料证实,相对密度大于 50% 的砂土在 7 度烈度地震时不会产生液化,但是相对密度大于 80% 时,即使是 8 度的地震烈度,也不容易发生液化。

粘性土因为细颗粒有粘着力,一般难以发生液化,砾砂等粗粒土因为透水性大,震动时孔隙水压力可以迅速消散,也难以发生液化。只有中等粒组的砂土和粉土因为既缺乏细颗粒而使颗粒间的粘着力不强,又透水性差而使孔隙水压力不易消散,所以最易液化。

土中的粘粒含量在其增加到一定程度时,土的动力稳定性将有所提高。粘粒含量较少时,土体颗粒间缺乏粘结力,在动荷载作用下颗粒易发生相对运动,产生液化;当粘粒含量较高时,土颗粒间有较强的联结力,不宜发生相对运动,液化可能降低。

1.2.2.2 土的初始应力状态

土在震动前的初始应力状态对其抗液化能力有着十分显著的影响。室内动三轴试验说明,对于同样条件的砂土样,发生液化所需的动应力将随着固结应力的增加而增大,也随着固结应力比的增大而提高。

地基土的固结应力其实就是它的侧压力,可以表示为有效上覆土压力与侧压力系数的函数。因此,地震时土覆土压力的大小,直接影响了该土层的液化。液化层上覆非液化土层的厚度与液化层厚度之比,对液化喷冒的发生具有很大影响,当该比值达到一定限值,即使液化发生,也不会发生喷冒。

1.2.2.3 震动的特性

对于同一性质的液化土体，在地震作用下是否发生液化，还决定于地震作用的强度和持续时间。地震作用强度越高，液化的可能性就越大；相同地震强度下，地震作用历时越长，土层液化的可能性越大，液化影响可能越严重。

1.2.3 液化的评价

液化判别方法可以分为两大类，一是经验方法，如我国抗震规范中的方法，二是临界剪应力方法，如Seed的简化判别法。下面对这两种方法分别做简单介绍。

1.2.3.1 我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)方法^[1]

《建筑抗震设计规范》(以下简称为《抗震规范》)中液化判别分为两步进行：

(1)初步判别：饱和的砂土或粉土，当符合下列条件之一时，可判别为不液化或不考虑液化影响：a、地质年代为第四纪晚更新世及其以前时，7、8度时可判为不液化；b、粉土的粘粒(粒径小于0.005mm的颗粒)含量百分率，7度、8度和9度分别不小于10、13和16时，可判为不液化土；c、天然地基的建筑，上覆非液化土层厚度和地下水位深度满足规范给出的条件时，可不考虑液化影响。

(2)标准贯入试验判别：凡初判为可液化土层需采用标准贯入试验判别法进一步判别地面下15m深度范围内的液化；采用桩基或基础埋深大于5m的深基础时，尚应判别15-20m范围内土的液化。

15m范围内，判别公式如式(4)，15-20m范围内判别公式如式(5)。

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho} \quad (d_s \leq 15) \tag{4}$$

$$N_{cr} = N_0 [2.4 - 0.1d_s] \sqrt{3/\rho} \quad (15 \leq d_s \leq 20) \tag{5}$$

式中：N_{cr}——液化判别标准贯入锤击数临界值；
N₀——液化判别标准贯入锤击数基准值，按表3取值；
d_s——饱和土标准贯入点深度(m)；
d_w——地下水位深度(m)；
ρ_c——粘粒含量百分率，当小于3或为砂土时，取3。

表3 标准贯入锤击数基准值
Table 3 Datum of SPT Blow Count

设计地震分组	7度	8度	9度
第一组	6(8)	10(13)	16
第二、三组	8(10)	12(15)	18

注：括号内数值用于设计基本地震加速度为0.15g和0.30g的地区。

当饱和土标准贯入锤击数(未经杆长修正)小于液化判别标准贯入锤击数临界值时，应判为液化土。

1.2.3.2 Seed简化判别法

Seed简化判别法是著名的液化判别方法之一，在国外许多国家应用。其基本概念是求出地震作用在不同深度的土处产生的剪应力，再求出该处发生液化所必需的剪应力(液化强度)，若地震剪应力τ_i大于液化强度τ_d则该处在地震中液化。

假定地震剪应力由坚直向上传播的剪切波产生。某个深度z，重度为γ的土柱在地表最大加速度a_{max}作用下产生剪切运动。设土柱为刚体(图1)，则其上的最大剪应力由牛顿第二定律可得：

$$\tau^{(1)} = (\gamma z / g) a_{max} \tag{6}$$

由于土柱实际是可变形的，所以最大剪应力应较刚体的为小，折减系数设为γ_d，(其变化范围如图2所示，一般采用图中虚

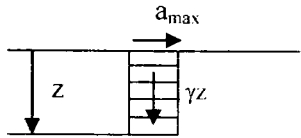


图1 刚体受水平振动
Fig.1 Rigit Soil under Horizontal Dynamic Loading

线所示的平均值), 并考虑随机震动转化为等效均匀循环振动的影响取修正值 0.65, 则土中的地震剪应力可按下式计算:

$$\tau_v = 0.65 \frac{\gamma_z}{g} a_{max} \gamma_d \tag{7}$$

土的液化强度 τ_d 由动三轴或动直剪试验求出的土的液化强度曲线(图 3), 按该地震级所对应的等效循环数查出对应的液化强度 τ_d 。如有 $\tau_d>\tau_v$, 则为不液化, 否则该深度的土为液化。

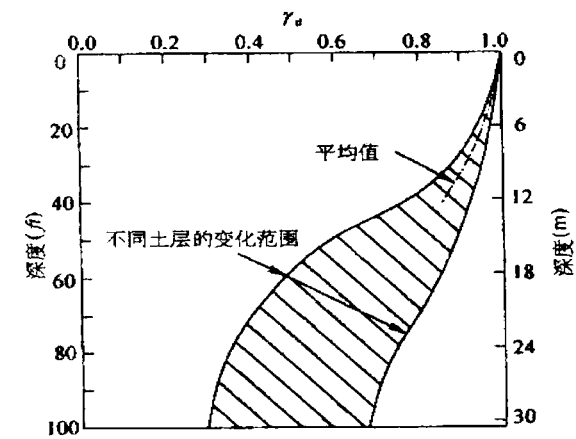


图 2 地震剪应力折减系数

Fig.2 Reduced Coefficient of Seismic Shear Stress

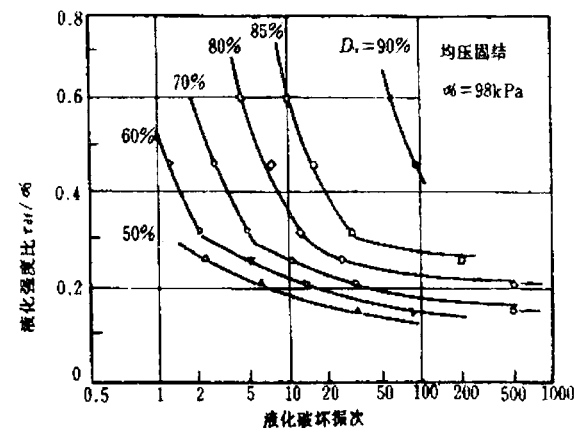


图 3 液化强度与液化破坏振次关系图

Fig.3 Liquefaction Strength vs. Vibration Cycle Number

1.2.4 地基液化等级的划分及处理要求

《抗震规范》规定根据每个钻孔的液化指数, 按照表 4 划分地基的液化等级。

表 4 液化等级

Table 4 Liquefaction Classification of Subsoil

液化等级	轻微	中等	严重
判别深度为 15m 时的液化指数	$0 < I_{LE} \leq 5$	$5 < I_{LE} \leq 15$	$I_{LE} > 15$
判别深度为 20m 时的液化指数	$0 < I_{LE} \leq 6$	$6 < I_{LE} \leq 18$	$I_{LE} > 18$

液化指数 I_{LE} 由下式计算:

$$I_{LE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{crit}} \right) d_i W_i \tag{8}$$

这里, N_i 、 N_{crit} 分别为 i 点的标准贯入锤击数的实测值和临界值, 当实测值大于临界值时取临界值; n 为判别深度内每一个钻孔标准贯入试验点的总点数; d_i 为 i 点所代表的土层厚度, m ; W_i 为 i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值, 按规范取值, m^{-1} 。

当建筑场地为液化地基时, 不宜采用天然地基作为持力层, 应根据地基液化等级和建筑抗震设防类别采取不同的抗液化措施。如对于乙类建筑抗震设防, 严重液化地基必须全部消除液化沉陷, 中等液化地基全部消除液化沉陷或部分消除且对基础和上部结构处理; 对于丙类建筑抗震设防, 严重液化地基可全部消除液化沉陷或部分消除且对基础和上部结构处理。

1. 盐渍土^[3]

凡含有易溶盐超过一定量的土, 统称为盐渍土。盐渍土分布很广, 我国西北地区有大面积的内陆盐渍土, 沿海各省则有滨海盐渍土。山西运城地区在盐湖附近存在有内陆盐渍土。

1.3.1 盐渍土的基本工程性质