978537

分类号：U416.1;TU444　　10710-89603

长安大学
博士学位论文

黄土地区公路路基地基承载力评价方法研究

支喜兰

指导教师姓名　长安大学　王秉纲　教授

申请学位级别　博士　学科名称　道路与铁道工程

论文提交日期　2005.11　论文答辩日期　2006年4月6日

学位授予单位　长安大学

答辩委员会主席：谢永利 教授

学位论文评阅人：谢宝义 蔡良才
王秉良 岑国平 陈忠达

2005年11月

摘 要

由于黄土地区地形较复杂，山区的高等级公路出现了较多的高路堤和深路堑，数十米高的路堤已经屡见不鲜。显然，高路堤的地基必需满足一定的强度和变形要求，才能保证路基路面的整体稳定性。但是，迄今为止，我国公路领域尚没有路基地基承载力标准。随着黄土地区公路建设经验的不断积累，人们越来越意识到路基地基的重要性。为了避免由于地基承载力不足导致路基路面发生破坏，有必要研究公路路基地基承载力评价问题。

本文借鉴相关领域和行业的研究成果，对黄土地区公路路基地基承载力评价方法进行了系统的研究。对黄土地区高等级公路路基地基设计和施工技术现状、路基路面病害进行了调查分析，认为应该加强高等级公路尤其是较高路堤地基的勘察手段和力度。对黄土地区四个试验场地开展了地基承载力测试方法现场试验研究，分析了各种地基承载力测试方法在公路路基工程中的适用性，黄土地区公路路堤地基承载力评价时，不宜大规模采用载荷试验，可采用旁压试验。根据大量实测资料，对黄土地基承载力影响因素进行了分析，黄土地基承载力具有明显的区域性变化规律，含水量是影响黄土地基承载力的最敏感因素，液限和孔隙比是对黄土地基承载力影响较大的因素，黄土地基承载力和压缩模量之间具有良好的相关关系。在此基础上，开展了黄土地基承载力区划研究，将黄土地基承载力分为四个区域，以含水量、液限、孔隙比作为变量，建立了黄土各区域地基承载力非线性回归关系式和承载力表，精度较相关成果提高。运用模糊数学原理，建立了黄土地基承载力模糊评判模型，选择与黄土地基承载力密切相关的含水量、天然密度、孔隙比、液限为基本因素，同时考虑压缩系数和地形地貌的影响，编制了黄土地基承载力模糊评价程序，其预测精度较高。应用有限元方法，对黄土地基公路路基结构进行了变形分析，地基土变形模量、填土高度、路基宽度是影响路表沉降量和不均匀沉降率的主要因素，路表沉降量绝大部分是因地基沉降而引起的，提出了路表容许沉降变形建议值和黄土地基容许沉降变形。经对建筑地基承载力的相对容许变形修正、基底宽度修正和柔性修正后，提出了公路路堤黄土地基承载力设计值和黄土地区公路路堤地基承载力验算方法。通过调查，对公路路基黄土地基处理方法和效果进行了探讨，提出了公路路基黄土地基处理建议。

关键词：公路；路基；黄土；地基承载力；区划

Abstract

Owing to the complicated topography in loess area, there are more and more high fills and deep cuts in high-grade highways of mountain area, and some embankments up to dozens of meter are nothing new now. It's obviously that the ground of high embankment should satisfy certain requirements of strength and deformation in order to guarantee the whole stability of embankments and pavements. But up to now, there is no criterion of ground bearing capacity for highway embankments in China. As highway construction experience accumulated in loess area, more and more people realize the importance of ground bearing capacity. In order to avoid the destructions of embankments and pavements due to insufficiency of the ground bearing capacity, it is necessary to study the evaluation of ground bearing capacity for highway embankments.

Based on some results of related fields and industries, this paper researches systematically on the evaluation method of ground bearing capacity for highway embankments in loess area. Investigation on present situation of embankment ground design and defects of high-grade highway in loess area demonstrated the necessity to strengthen the reconnaissance of high-grade highway, especially the high embankment. The ground bearing capacity in four testing fields of loess area was conducted, and the adaptability of each testing methods was also analyzed. When the ground bearing capacity is evaluated for highway embankments in loess area, the large-scale bearing tests are not suitable and the compressuremeter tests are better. According to a great quantity of test data, the influence factors of ground bearing capacity in loess area were discussed. The loess ground bearing capacities are not same in the different regions. The water content of loess is the most sensitive factor to affect the ground bearing capacity. The liquid limit and the void ratio of loess are more sensitive factor to affect the ground bearing capacity. The correlation between the ground bearing capacity and the compression modulus of loess is good. Based on the above results, the ground bearing capacity districts of loess area were divided into four regions. The non-linearity regression formulas in the four regions and the tables of ground bearing capacity were established with the water content, the liquid limit

and the void ratio of loess. The accuracy of the regression formulas is better than the related results. With the fuzzy mathematics principle, the fuzzy judgment model of loess ground bearing capacity was set up. The evaluation factors in the fuzzy judgment model include the water content, the natural density, the liquid limit, the void ratio, the compression coefficient and the geomorphy of loess. The fuzzy evaluation program of loess ground bearing capacity was worked out, and its predicted values are more accurately. Using the finite element method the embankment and ground structure deformation was analyzed. The compression modulus of ground soil, the height and the width of the embankment are major factors to affect the settlement value and the unequal settlement ratio on the top of the embankment. The most of the settlement value on the top of the embankment is caused by the ground settlement. The values of allowable settlement deformation of embankment top and loess ground were put forward. After modified in the relative allowable deformation, the ground width and the flexibility to ground bearing capacity for buildings, the design value of ground bearing capacity for highway embankments and its checking method were presented. According to the investigation results, the loess ground treatment methods and their effects were discussed. Finally the suggestions of loess ground treatment for highway embankments were proposed.

Key words: Highway, Embankment, Loess, Ground bearing capacity, Division into districts

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：文嘉兰　2006年3月10日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：文嘉兰　2006年3月10日

导师签名：　2006年3月12日

1 绪论

1.1 问题的提出和研究意义

黄土作为一种第四纪陆相沉积物，以粉土颗粒为主，富含碳酸盐，具有大孔隙，呈黄色状。在我国，黄土西起祁连山东段，东抵太行山西侧，南部隔汾渭盆地与秦岭山脉为邻，北部与毛乌素沙漠相联，包括陕西、甘肃、青海、宁夏的大部分地区、山西西部、河南西部以及新疆和内蒙的部分地区，面积达 64 万平方公里。

黄土地区地貌有塬、梁、峁、崾岘、陡砭、冲沟、阶地、冲积平原、洪积平原等类型，黄土地区地质有黄土地层、地质年代、地层厚度、产状、成因等方面的区别。黄土工程性质与黄土地貌单元、地层类型、地质构造、气候水文等因素有着密切的内在联系。黄土地基承载力与黄土成分、结构密切相关。经受不同地质历史作用的黄土，具有不同的公路工程地质性质和不同的地基承载能力。黄土最为显著的性质就是“湿陷性”，尤其是晚更新世的马兰黄土（Q_3），全新世的黄土状土（Q_4）都具有一定的湿陷性，它对于黄土地基承载力构成了不利的影响。

随着我国高等级公路的发展，特别是山区高速公路和一级公路的路堤填土高度大幅度增加，对黄土地基承载力提出了更高的要求。但是，现行公路路基设计规范和施工规范中缺乏有关地基承载力的评价方法及要求。目前，在黄土地区公路建设中，引起人们关注的与路基地基承载力有关的问题包括以下四个方面：

（1）地基承载力与路基路面病害

黄土地区不同时期修建的高等级公路对湿陷性黄土地基的处理原则和处理方法各不相同，公路在使用过程中路基路面的病害类型多种多样，其原因也是多方面的，其中哪些病害是基承载力不足造成的，公路路基设计时对黄土地基承载力问题如何考虑等等，都是黄土地区公路建设中值得探讨的问题。

（2）公路路基黄土地基承载力的评价

《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25－90)[1]、《铁路桥涵设计规范》(TBJ2－85)[2]中均提供了黄土地基承载力确定方法。《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024－85)[3]则借鉴了建筑等其它部门的研究成果。现有黄土地基承载力确定方法主要是用于点工程，对于公路路基这种线工程不是完全适用。为此结合黄土地区公路工程特点，开展公路路基地基承载力评价技术研究，正确区分同一条路线

上不同时代、不同成因和不同环境条件下的黄土地基承载力，对于黄土地区公路建设具有重要的现实意义。

（3）公路路堤地基承载力的测试问题

黄土地区地基承载力的评价和测试方法直接影响对原地基承载力的评价结果和地基处理措施的抉择。目前，黄土地区地基承载力的原位测试方法很多，采取不同的测试方法、取值标准所得到的承载力也会有所差异。载荷试验作为最可靠的测试方法，是建筑部门在重要建筑物地基勘察时必不可少的方法，同时，旁压试验、静力触探等其它的原位测试也各有其优缺点。由于公路具有线长面广的特殊性，公路路基对地基承载力测试方法和精度要求应与建筑部门有所不同，公路部门更加注重测试手段的便携性和简易性。

（4）公路路基黄土地基处理问题

当路线经过湿陷性黄土地区时，对黄土原地基在什么情况下需要进行处理、采取什么处理措施以及处理后的效果评价等问题都没有得到很好的解决。公路工程中遇到这类问题时，设计单位和施工单位主要借鉴《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79－2002）[4]，予以解决。但是公路工程对地基承载力和变形的要求都与建筑部门不同，同时，公路建设中公路等级、路堤填筑高度和地基场地的湿陷等级等不同时所要求的地基承载力也各不相同。

为此，本文旨在针对公路工程的需要，合理有效地确定、评价黄土地基承载力，并在此基础上提出地基承载力区划、公路路基地基承载力验算方法及提高黄土地基承载力的工程处理措施，为公路路基设计和施工提供依据。

1.2 国内外研究现状

黄土是第四纪的一种特殊堆积物，沉积年代从早更新世一直到全新世的近期，分布较广，覆盖着全球陆地面积的2.5%以上，除我国外，还分布在前苏联、罗马尼亚、保加利亚、新西兰、法国、德国、比利时、匈牙利和波兰等国的大部分地区，此外，美国中西部、非洲南部以及澳大利亚均有连续或零星分布。

对黄土地基承载力问题的研究由来已久。在国外，对此问题的研究已有六十多年的历史，罗马尼亚[5]、前苏联[6]、阿根廷、美国、匈牙利等国家在这一方面做了大量的工作，主要研究成果体现在地基承载力的现场测试以及湿陷性评价等方面[7]。

在国内，从二十世纪五十年代开始至今是我国黄土研究与工程经验积累的重

要时期。在这五十年中形成两个主要的研究分支：一个是从地质学角度出发，研究黄土的成因、地形地貌、地质年代、地层划分、结构特征以及物质组成等；另一个是从工程角度出发，研究黄土的工程性质、变形规律、工程对策等。

1.2.1 黄土地基承载力影响因素的研究

在分析黄土地基承载力影响因素方面，许多学者从不同角度采用了多种方法进行了分析。应用黄土形成的风成学说分析黄土颗粒在横向的变化以及物理力学性质的区域性差异[8]；室内试验和现场试验结果表明，湿陷性黄土地基承载力随着孔隙率和含水量的增加而降低[9]；采用近代科学的研究方法，借助先进的仪器，在黄土的微观机理的研究中取得了一定的成果，如高国瑞[10]采用扫描电镜的方法，对我国黄土显微结构进行了分析和研究，提出了中国黄土区域性变化规律；胡瑞林[11]应用分形几何方法分析了黄土的微观结构，蒲毅彬[12]提出用 CT 技术对黄土进行观测分析的新方法。由于影响黄土地基承载力的因素非常复杂，定性分析结果较明确，定量分析还在探索之中。

1.2.2 黄土地基承载力理论计算公式的研究

现有应用理论计算确定地基承载力的方法很多，许多学者提出了各种思路和方法，1925 年美国土力学专家太沙基(Terzaghi)发表了第一部土力学专著，随后斯凯普顿(Skempton)、汉森(Hanson)、普朗特尔(Prandtl)、泰勒(Taylor)等学者从不同的角度提出理论计算确定地基承载力的方法[13]；前苏联的格尔谢万诺夫（Герсеванов）[14]对地基破坏过程进行了试验研究；罗晓辉[15]提出用遗传算法确定地基承载力。现有的理论计算确定地基承载力的方法还都处于探索阶段，还需要大量的工程实践的检验，进一步修正和完善。

1.2.3 建筑工程领域黄土地基承载力研究

罗马尼亚和前苏联对湿陷性黄土建筑地基的研究比较早[16]，均颁布了相应的设计与施工规范或标准，并随着工程实践的经验总结和研究的不断深入，对规范或标准进行了多次修订[17][18]。

二十世纪六十年代以前，我国建筑行业基本上是照搬前苏联的标准确定黄土地基的承载力。此后，我国建筑等部门的广大科技工作者结合国家的基本建设，针对工程实践中存在的问题，对黄土的基本性质和工程特性展开了大规模的勘察与室内外的试验研究，取得了丰硕的成果[19]，具体体现在已颁布的四个版本的《湿陷性黄土地区建筑规范》中。

1966 年我国颁发了《湿陷性黄土地区建筑规范》(BJG20－66)[20]，在此规范中根据我国黄土的特征，从工程地质角度出发，提出了“中国湿陷性黄土工程地质分区略图”和“中国湿陷性黄土工程地质分区参考表”。同时规范了黄土地区应用实测载荷板试验确定地基承载力的原则和方法。

随着工程经验的积累和对黄土理论研究的深入，1978 年建设部颁发了《湿陷性黄土地区建筑规范》(TJ25－78)[21]，在黄土地基承载力的确定和分布方面进行了以下几个方面的修改：(1) 将工程地质分区略图进行了适当调整和补充，由五个地区改为七个地区；(2) 用载荷板试验确定黄土地基承载力的标准，由“s/b=0.03”改为“ s/b≤0.02”；(3) 将 “湿陷性黄土地基标准承压力表”改为“一般湿陷性黄土的容许承载力表”，具体是以黄土地区的实测载荷板试验资料作为样本，统计了地基承载力和物理指标之间的关系，以表格的形式给出了承载力参考值，同时增加了“压缩性较高的新近堆积黄土的容许承载力表”；(4) 修改了基础深度和宽度的承载力修正系数。

1990 年颁发了《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25－90)[1]，在地基承载力评价方面基本沿用 1978 年规范[21]的内容，仅对天然含水量小于塑限含水量的土，改为按塑限含水量确定黄土地基承载力，对天然含水量大于 25%的土，改为按饱和黄土确定地基承载力。

2001 年 9 月，结合近十年来的科研成果和工程建设经验，再次对规范进行修订，在《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025－2004)[22]中取消了在地基计算中规定的地基承载力基本值、标准值和设计值以及相关的承载力表，提出了地基承载力特征值的概念，地基承载力特征值可以由勘察部门根据现场原位测试结果或结合当地经验与理论公式计算确定。

多年来，《湿陷性黄土地区建筑规范》作为黄土地区工业与民用建筑地基设计依据，对黄土地基承载力的评价不断发展并趋于成熟。由于公路路基与建筑物对地基施加的荷载形式以及对地基变形要求不同，所以黄土地区公路路基地基承载力的评价不能完全套用《湿陷性黄土地区建筑规范》，只能借鉴其相关研究成果。

1.2.4 公路领域黄土地基承载力的研究

公路部门在《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024－85)[3]中针对公路桥涵的地基基础设计，对公路地基容许承载力作了相应要求。而对公路路基并未提出地基承载力要求。同时公路行业从不同的角度提出了黄土分区，如现行《公

路自然区划》[23]，“黄土地基湿陷性区划”[21]、“公路路基区划”以及黄土路基设计分区图[24]。这些成果从不同角度对黄土地区进行了区划，在公路设计中起到了重要的指导作用。但是，尚缺乏公路路基地基承载力区划，造成公路路基地基设计无据可依的现状。

综上所述，国内外对黄土地基承载力进行过大量试验研究，并取得了许多研究成果和丰富的工程经验。但是这些研究绝大部分是针对建筑和其他行业的。为了避免由于地基承载力不足导致路基路面的破坏，有必要研究黄土地区公路路基地基承载力评价问题。

1.3 本文研究内容

本文将结合公路路基特点，借鉴相关领域和行业的研究成果，系统地进行黄土地基承载力评价研究。主要研究内容包括：

（1）黄土地区高等级公路路基地基调查。通过调查，了解高等级公路路基黄土地基设计施工技术现状；探讨黄土地基承载力与路基路面病害的关系。

（2）黄土地区地基承载力测试方法试验研究。选取有代表性试验场地，通过现场试验，对地基承载力的各种测试方法与测试结果进行分析研究，提出黄土地区公路路基地基承载力实用、简便、快捷、准确的测试方法。

（3）黄土地基承载力区划与推荐值研究。对黄土地基承载力影响因素进行分析，在此基础上，开展地基承载力区划研究，通过实测数据数理统计分析，提出黄土地区地基承载力区划图和推荐值。

（4）黄土地基承载力模糊评价系统研究。建立黄土地基承载力模糊评判模型，确定评价因素及其权重，编制黄土地基承载力模糊评价程序。

（5）公路路基黄土地基承载力验算方法研究。应用有限元方法，对黄土地基公路路基结构进行变形分析，提出路表容许沉降变形建议值，进而推出黄土地基沉降变形要求，据此提出公路路基黄土地基承载力设计值及其验算方法。

（6）黄土地基处理措施探讨。通过调查，对公路路基黄土地基处理方法和效果进行分析，提出公路路基黄土地基处理建议。

2 黄土地区高等级公路路堤地基现状及病害调查

随着黄土地区高等级公路的快速发展，出现了更多的高路堤和深路堑。为了保证路基的整体稳定性，对于高路堤黄土地基承载力提出了更高的要求。开展黄土地区高等级公路路基路面使用情况的调查，了解高等级公路路基设计中对黄土地基所采取的处理措施，分析黄土地基承载力与路基路面病害之间的关系，充分认识对公路路基地基承载力评价研究的必要性和迫切性。

2.1 黄土地区公路发展概况

黄土地区的公路建设经历了公路等级由低到高，通车里程数由少到多的发展过程。随着改革开放的深化和西部大开发战略的逐步实施，黄土地区的公路建设进入了一个高速度、高质量的大发展时期，在黄土地区修建高等级公路已成必然。1989 年 12 月陕西省西安至三原一级公路的建成通车，拉开了黄土地区高等级公路发展的序幕。1990 年底陕西省西安至临潼高速公路的建成通车，又翻开了黄土地区高速公路发展的新的一页。此后，在西北各省的黄土地区陆续建成了许多一级公路和高速公路，截止 2003 年底，陕西省、甘肃省和山西省境内黄土地区高速公路的通车里程已达到 2034.8 公里，其中高速公路通车里程见图 2－1。

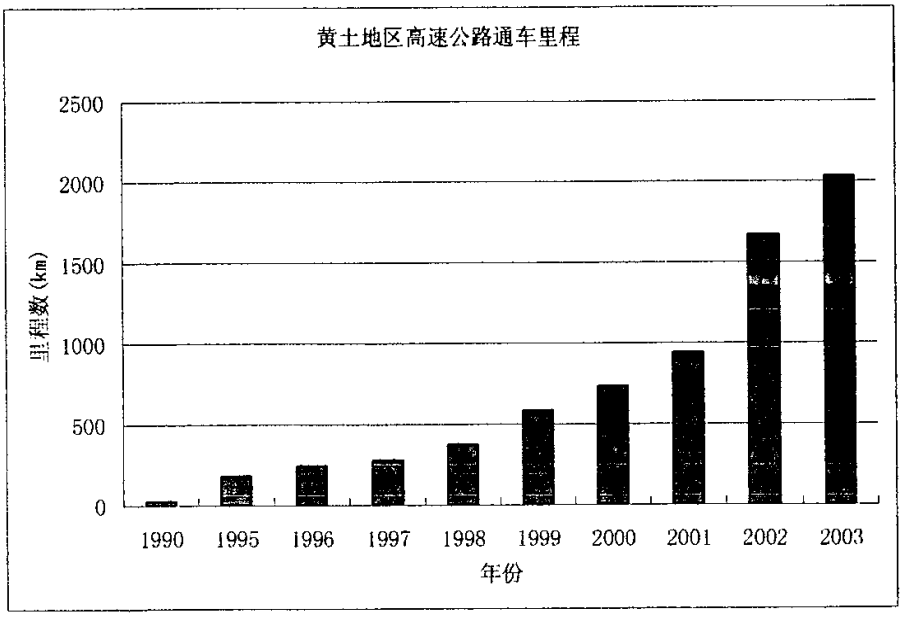


图 2－1 黄土地区高速公路通车里程柱状图

黄土地区已建的高速公路，极大地促进了黄土地区各省的经济建设和公路交通的快速发展，为国家西部大开发战略的实施打下了坚实的基础。

同时，相对于东南沿海和中部地区，西部的公路建设起点较低，技术储备较少，加上高速公路的飞速发展，一些路段在使用初期出现了早期破坏，使用中期和大的暴雨过后路基路面又暴露了各种病害，这其中的原因是多方面的，从路基的角度考虑，与湿陷性黄土作为路基填料和地基土体有关。并且，随着路线经过山岭区、跨越冲沟，出现了较多的高路堤深路堑，这对黄土地基的承载力提出了更高的要求。为此，本文对黄土地区各省份在不同时期建成的高等级公路和典型路段进行了资料收集和现场调查，针对设计、施工和养护各个环节中有关黄土地基的处理原则和处理措施进行了分析和总结，并从黄土地基承载力的角度探讨了黄土地区高速公路路基路面的整体稳定性。

2.2 黄土地区高等级公路路基地基设计概况

2.2.1 早期设计概况（1995 年以前）

1995 年以前陕西省的高等级公路填方下的地基基本不处理，原因如下：

（1）黄土地区修筑高等级公路的经验较少，对黄土的湿陷性认识不足；

（2）公路投资较少，地基处理资金不足；

（3）路基填土的平均高度较低，高填方路段较少。

以西安至临潼高速公路为例，对于湿陷性黄土地基基本未作处理。路基和路面排水设计基本以分散排水为主，避免集中水流，以此降低水的流速和防止冲刷。其中，路基排水设计时，填方路段一般在路基两侧设置排水沟，挖方路段在路基两侧均设有边沟。K8+300 和 K21+750 路段下穿铁路立交桥，分别埋设管径 1m 的圆管涵自流排水。

路面排水设计时仅在土路肩和边坡进行加固，超高路段的路面水通过中央分隔带缘石旁的窨井，由横向排水管排入路侧排水沟，当路侧未设置排水沟时，在中央分隔带每 15m 设置一个排水槽，将超高侧的路面水引至另一侧，顺边坡分散排出。

2.2.2 中期设计概况（1995 年～2000 年）

随着公路建设步伐的加快，黄土地区出现了更多的高速公路，路线经过山岭地区和跨越梁峁沟壑区的冲沟的机会随之增加，出现了更多的高填深挖路基，尤

其在甘肃省的黄土地区公路建设中，高路堤、深路堑大量出现。高填方的路基要求原地基具有较高的承载力和整体均匀性，为此，工程人员对于湿陷性黄土地基的处理较为详细并有一定针对性。

以陕西省铜川至黄陵高速公路为例，路线所经地区为陕北黄土高原南缘，地势西南高，东北低，路线主要布设在河谷阶地和河谷东岸山坡坡脚下，河谷两侧冲沟发育，河道狭窄。因此，该路段的路基横断面形式多是半填半挖路基，设计时根据不同的路基横断面形式以及路基高度确定了不同的处理措施，具体措施如下：

（1）填高 h<4m，地基不作处理，填土路基采用冲击碾压补强；

（2）填高 h>4m，对地基进行强夯处理，填土路基每填 4m 用强夯进行一次补强；

（3）半填半挖路基的填挖结合处采用强夯处理。

同时，该路段为了保证路基稳定，防止冲刷和水毁，采取了路基路面综合排水设计。对于一般填方路段，路基路面的水以散排形式通过边坡流入地表。挖方路段和填挖结合路基的挖方段，采用边沟、排水沟和截水沟与急流槽结合排出路基水，通过横坡将路面水引入边沟。超高路段的填方路段通过中央分隔带外侧的路缘石拦截水，从过水槽排至另半幅路基，再以散排方式排出；超高路段的挖方路段外侧路面水经内侧送入排水边沟。

2.2.3 近期设计概况（2000 年以后）

通过十几年来黄土地区修筑高等级公路经验的积累，工程技术人员对黄土的湿陷性有了越来越深的认识，更加强调了对湿陷性黄土地基的处理，并结合公路工程的特点，把黄土原地基的湿陷等级与路基的填挖类型、填挖高度结合起来，选取不同的地基处理方案。

以西安至阎良高速公路为例，路线主要位于关中平原中部，渭河两岸。路线所经地段均为粉质低液限粘土，土质均匀，结构密实，局部见钙质胶结层。全线平均填土高度为 2.86m。当路线经过湿陷性黄土时，为了确保工程质量，设计时遵循以下原则：降低路堤高度，以减小地基的附加应力；加强路基路面综合排水，防止地表水渗入地基；根据湿陷量的不同，采取不同的工程措施。

对于湿陷性黄土地基，主要采取了以下处理措施：

（1）一般填土路段：采用 40cm 厚的石灰土垫层作为防水层，以减小天然黄土地基的浸水机率，同时使地基应力得以扩散；在地势低凹、路基排水不畅的路段，在路基两侧增加设置隔水墙，以防地下水和地表水渗入公路地基；

（2）较高填土路段：对路堤基底中部采用强夯、两侧各 10m 采用冲击碾压方法处理，以消除黄土地基的湿陷性；

（3）填挖分界处的地基：为了避免路线纵向出现不均匀沉降，对地基进行处理，且沿纵向开挖错台，并设置砂砾垫层和土工格栅，同时提高路基的压实度。

路基路面的综合排水设计，以集中排水为主，分散排水为辅。对于路基填土高度 h>2.5m 的路段、超高路段及挖方路段均采用集中排水，其它情况采用分散排水。

2.2.4 地基处理调查小结

通过黄土地区高等级公路地基设计的发展过程，不难看出，湿陷性黄土地基由早期的基本不处理到中期的局部处理再发展到近期的大面积处理，所采用的处理方法越来越多样化，也更加具有针对性，对地基的重视程度越来越高。但也出现了高速公路路线只要经过湿陷性黄土地区就对原地基进行处理的情况，这样虽然大大减少了黄土地基遇水湿陷的可能性，同时也增加了工程造价。

2.3 黄土地区高等级公路病害情况及原因分析

黄土地区高等级公路在不同时期的路基设计各有特点，考虑到陕西省修建高等级公路的修筑时间最早、通车里程较多，病害类型较有代表性，本文对陕西省咸阳机场路、西宝路、西蓝路、西临路等部分路段进行了病害情况的现场调查和相关资料的收集。2003 年 8 月的大暴雨造成了西宝、西三、铜黄等高速公路多处路段水毁，为此，于 2003 年 9 月再次对各典型路段进行了深入的调查，对各路段运营中的病害情况和水损坏有了比较全面的了解。结合不同时期设计、施工和养护等各个环节中有关黄土地基处理原则和处理措施进行了分析和总结，从黄土地基承载力的角度探讨黄土地区高等级公路中路基路面的整体稳定性。

近期修建的高速公路如西阎路加强了地基处理，并设置了较完善的路基路面防排水设施，除了个别路段的急流槽宽度设计较窄、养护不及时导致暴雨后出现边坡的冲刷和沉陷，大部分路段在暴雨过后使用情况良好。

黄土地区早期和中期修建的高等级公路出现的一些病害[25]，与黄土地基处理和路基路面防排水设计有关。

（1）高填方路段路面横向裂缝

由于路线纵向填土高度不同，地基未作处理，承载力较低，导致地基在填土自重作用下产生了较大不均匀沉降，并引起路基不均匀变形，致使路面产生横向裂缝。如西三、西临等公路在高填方路段路面出现的横向裂缝可能与地基承载力有关。

其中，西三一级公路通车后短短几个月内，全线路面出现间距不等的横向裂

缝，其中有的裂缝是半刚性基层缩裂引起的，有的裂缝则可能由于地基承载力不足导致路基路面变形过大而产生。如在K50+250～K50+384和K50+930～K51+063两处高填方路段发生较大沉降。通过调查，以上两处高填方的地基均没有处理，在以后的养护中只针对破坏的涵洞进行了加固，对路基加强了防排水。1998年现场调查的结果仍然发现部分路段存在较少量的沉陷，且都发生在高路堤处。

西临高速公路自1990年底通车，1992年对使用初期全线出现的裂缝进行了第一次普查，发现横向裂缝355条，平均每公里11条，主要分布在行车道上。1996年3月，西渭管理处又对西临公路进行了普查，发现横纵向裂缝都有所发展，数量不断增加。其中，横向裂缝由最初分布在行车道，逐渐向超车道发展，甚至扩展到了硬路肩，这与车辆荷载的反复作用及半刚性基层缩裂有关，还可能与路线纵向地基的不均匀沉降有一定的关系。

（2）填方路段路面的纵向裂缝和局部沉陷

高填方路段由于边坡防护措施不当或施工的原因，出现高边坡受雨水冲刷，路基内部积水不能及时排出，下渗地基，引起地基土体强度降低，从而导致路面纵向裂缝和沉陷。如西三公路在高填方路段路面出现的纵向裂缝和局部沉陷。

此外，当农田灌溉沟渠横穿路线，灌溉水不能及时排出路基范围以外，积水下渗到路基坡脚和地基，引起路基和地基土的湿陷，地基承载力降低，从而造成路面出现纵向裂缝和局部沉陷。如西临路、西安咸阳机场路和西宝路的路面纵裂和沉陷就是由于农田灌溉使地基湿陷而引起的[26]。

西临公路的纵向裂缝由1992年初的51条增加到1996年的522条，数量增加了10倍左右，并主要分布在高填方路段，沿横向主要分布在紧急停车带和行车道上，发生纵向裂缝的地段都伴有局部沉陷。究其原因，有行车荷载的反复作用、环境因素以及施工等原因可能导致纵向裂缝的发生和发展，而主要的原因是农田灌溉积水和雨水入渗引起路基边坡和地基土体湿陷，地基和路基边坡强度降低，以及路基路面未采取集中排水措施，积水不能及时排出，下渗路基和地基，导致路基和地基的不均匀沉降，使路面开裂。

西宝公路的纵向裂缝主要分布在K54～K96路段的行车道中央和紧急停车带。其中，分布在行车道轮迹带的纵缝，可能与高速公路交通渠化明显和路基地基的不均匀沉降有关；靠近停车带的纵缝，则可能是由于路基边坡的滑塌或地基的不均匀变形引起路面的局部沉陷，长度达数百米以至数公里，并伴随着少量的横向裂缝和轻度沉陷（见图2－2）。



图 2－2 西宝公路路面纵向裂缝

2003 年 8 月陕西省普降暴雨，西宝公路的路基路面出现了不同程度的水毁。为此，在暴雨过后对西宝线进行了全面的调查，具体情况如下：

①西宝公路大部分路段的边坡出现了不同程度的冲刷破坏，冲刷轻微路段在紧急停车带和硬路肩之间有横向和纵向裂缝，其中纵向裂缝居多，如 K58+400 路段的纵向裂缝长度达到 200 多米（见图 2－3 ）。



图 2－3 西宝公路硬路肩沉陷

硬路肩的沉陷主要与边坡的防护措施不当以及暴雨的冲刷有关，同时，湿陷性黄土地基没有处理，雨水可能下渗地基，引起地基湿陷和承载力降低，也会加剧硬路肩纵向裂缝的发生和发展。

②冲刷严重路段的硬路肩由于黄土边坡遇水冲刷产生明显的湿陷变形和严重沉陷，护拦底部出现脱空现象（见图 2－4 和图 2－5）。



图 2－4 西宝公路路基边坡冲刷（1）



图 2－5 西宝公路路基边坡冲刷（2）

由图 2—4 和图 2—5 可见，一旦边坡防护措施不当，在暴雨来临的时候就容易产生边坡冲刷，地基也可能因其土体中的水无法及时排出而遇水湿陷。

③破坏最严重的路段在 K82+100（见图 2—6 和图 2—7），主要由于路基边坡受雨水冲刷严重，边坡滑塌和沉陷，同时，路基边坡土体遇水湿陷，强度降低，裂缝处有地表水灌入，导致地基湿陷和承载力降低，加速了边坡的破坏，引起硬路肩和护栏下部脱空，最终与边坡一起滑塌，致使路面结构层破坏。



图 2—6 西宝公路边坡整体沉陷（1）



图 2—7 西宝公路边坡整体沉陷（2）

针对以上的水毁现象，通过资料收集和现场调研认为，西宝公路产生的病害除了与全线路基平均填土高度较高（3.74m）、路基填土压实度不足以及路基路面防排水设计不当等因素有关外，还可能由于原地基土承载力较低，又遇水湿陷引起强度降低，产生差异沉降，导致路基沉陷、边坡滑塌以及路面结构层的破坏。

（3）半填半挖路段的沉陷

地基遇水大面积湿陷，承载力降低，可能导致填筑部分和开挖部分产生较大差异变形，使路基出现沉陷，如铜黄路出现的沉陷可能就与此有关。

铜黄高速公路在2003年8月的暴雨后出现了严重的水损坏，为此对铜黄线进行了全面、深入的调查，发现全线有十余处大的滑坡和路面下陷。其中,在K142～K150 路段高填方和半填半挖断面填筑部分的沉陷较为严重（见图 2－8和图2－9），这是由于填方路基下有涵洞，涵洞上的土体压实不足，边坡遇水冲刷、坡脚受水浸泡和地基湿陷导致地基土强度降低致使填方和挖方段土体产生整体滑动，形成一个大的滑塌体。使得填方段路基局部下陷，甚至半幅路整体下陷，最大沉降量达70～80cm。



图2－8 铜黄公路路面沉陷和错台（1）



图 2－9 铜黄公路路面沉陷和错台（2）

（4）超高路段路基路面的破坏

有些高等级公路如西宝公路路面排水设计时以散排为主，将分隔带上的地面水通过横坡排向两侧行车道，造成超高路段内侧积水，引起内侧路基和地基土体湿陷，也恶化了行车条件，加速了路基路面的破坏。近期中央分隔带内排水设计多采用地下排水，即将分隔带上的地面水下渗，由中央分隔带地下排水设施排除。这种排水方式比较适合于超高路段，但其前提是地下排水设施设计合理、完善，能保证及时有效地排水且不渗漏。否则，也会引起中央分隔带下的土体遇水产生湿陷。这说明在加强地基处理的同时，也要重视防排水设计。

总之，地基处理不当或防排水设计不完善都可能引起地基的湿陷变形和承载力降低，最终导致路基路面的种种病害。

2.4 小结

通过对黄土地区高等级公路路基地基现状及路基路面病害调查，得到以下几点认识：

（1）地基承载力是影响路基路面结构整体稳定性的重要因素之一，在公路路基设计和施工中应引起工程人员的足够重视。

（2）加强高等级公路尤其对于填方路段处湿陷性黄土地基的勘察手段和力度，以利于对地基承载力的准确评价。

（3）高填方路段要求原地基具有足够的承载力，以保证路基横向和纵向不

致产生过大的变形，从而避免由此引起的路基路面沉陷和开裂。

（4）应该对公路路基地基进行设计，通过地基承载力验算，并根据场地的湿陷类型和湿陷等级以及路基的填土高度决定采取相应的地基处理措施。

（5）完善的路基路面排水系统对于保证湿陷性黄土地基的承载力具有重要作用。

3 黄土地基承载力现场测试方法研究

对于黄土地基承载力的评价手段和评价结果直接影响对原地基的评价质量和地基处理方案。目前，黄土地基承载力的原位测试方法很多，采取不同的测试方法、取值标准所得到的承载力有所差异。载荷试验是最可靠的测试方法，建筑部门在重要建筑物地基勘察时多采用这种方法。旁压试验、静力触探等其它的原位测试方法各有其优缺点。由于公路具有线长面广的特殊性，公路路基对地基承载力测试方法和精度要求与建筑部门有所不同，公路部门更加注重测试手段的方便性。为此，针对公路路基工程的需要，开展黄土地基承载力测试技术的研究，对地基承载力的各种测试方法进行对比分析，包括各种原位测试方法之间的关系、载荷板的尺寸效应以及地基处理后的评价方法等，在此基础上提出公路路基黄土地基承载力实用、简便、快捷、准确的测试方法。

3.1 地基承载力的概念

地基承载力的定义由最早的广义意义上的地基承载力到地基承载力的基本值、标准值和设计值，再到地基承载力特征值，反映了不同时期不同的提法，但实际上都是指地基容许承载力。

（1）地基承载力基本定义

地基承载力广义上是指地基土单位面积上所能承受荷载的能力。它又可以分为地基极限承载力和地基承载力容许值，其中地基极限承载力是指地基不致失稳时地基土单位面积上所能承受的最大荷载，而地基承载力容许值是保证地基不发生失稳破坏，同时不产生建筑物所不容许的沉降时的最大地基压力，它是考虑了一定安全储备的地基承载力。通常，人们提到地基承载力，主要是指地基承载力容许值。如《工程地质手册》（第三版）[27]规定地基承载力是地基受荷后塑性区限制在一定范围内，保证不产生剪切破坏而丧失稳定，且地基变形不超过容许值时的承载能力。

（2）地基承载力的基本值、标准值和设计值

根据文献[1]的定义，地基承载力基本值是采用静载荷试验确定或根据土的物理、力学性质指标查相关的承载力表或根据当地的工程经验确定；地基承载力标准值则是在基本值的基础上结合建筑物类型进行回归修正；而地基承载力设计

值则是地基承载力标准值考虑宽度和深度修正后的数值。

（3）地基承载力特征值

2002年，建筑部颁布的《建筑地基基础设计规范》（GB50007－2002）[28]规定在地基计算时用“地基承载力特征值”代替原规范中的“地基承载力标准值”，并提出地基承载力特征值是指由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值，其最大值为比例界限值。其涵义即为在发挥正常使用功能时所允许采用的抗力设计值，以避免过去一律提“标准值”时所带来的混淆。该值的确定可以是统计得出，也可以是传统经验值或某一物理量限定的值。其理由是考虑到土为大变形材料，当荷载增加时，随着地基变形的相应增长，地基承载力也逐渐加大，很难界定出一个真正的“极限值”；同时，建筑物的使用有一个功能要求，常常是地基承载力还有潜力可挖，而变形已达到或超过正常使用的限值。因此，地基设计是采用正常使用极限状态这一原则，所选定的地基承载力是在地基土的压力变形曲线线性变形段内相应于不超过比例界限点的地基压力值，即允许承载力。

（4）黄土地基承载力特征值

《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025－2004）[22]中提出为了与现行国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB50007－2002）[28]相适应，以地基承载力特征值作为地基计算的代表数值，其定义为：在保证地基稳定的条件下，使建筑物或构造物的沉降量不超过容许值的地基承载能力。黄土地区地基承载力特征值确定时，对甲、乙类建筑，可根据静载荷试验或其它原位测试、公式计算并结合工程实践经验等方法综合确定。当有充分依据时，对乙、丙、丁类建筑可根据当地经验确定。

由地基承载力的定义以及其涵义的变化，不难看出，工程技术人员越来越重视对地基变形的控制，并强调了静载荷试验或其它原位测试的重要性，以及系统总结工程实践经验和当地经验的重要性。为了与现行国家标准[22][28]相一致，本文研究时以地基承载力特征值作为地基计算的代表数值，用符号 f_{ak} 表示。

3.2 试验概况

3.2.1 试验场地

黄土地区地域辽阔，分布较广，区域特征明显，为了使地基承载力的现场测试具有代表性，在陇西、关中和晋西三个代表性地区各选取一个试验段，具体试

验场地选取考虑三个条件：

（1）试验场地内的土质具有代表性，能够反映本区域的土质特征；

（2）试验场地的土质均匀，主要以 Q_3 黄土为主，测试层黄土厚度需达到2m 以上，以满足载荷试验对测试土层的要求；

（3）试验场地的面积在 200m^2 以上，保证同时进行多种测试，互不干扰。

结合公路工程，经实地踏勘，确定四个试验场地：

（1）兰州试验场地：甘肃谗口至柳沟河高速公路段，距离兰州约 40km 处，场地为原地基土。

（2）介休试验场地：山西大同至运城高速公路段，距离介休约 10km 处，场地为原地基土。

（3）阎良 1 试验场地：陕西阎良—禹门口高速公路段，距离西安约 80km 处，分三个试验区：原地基土、强夯法处理后的地基土、冲击碾压法处理后的地基土。

（4）阎良 2 试验场地：陕西阎良—禹门口高速公路段，距阎良 1 试验场地约 1.5km 处，场地为原地基土。

3.2.2 试验项目与方法[29][30][31][32][33][34][35][36]

试验项目包括：载荷试验、静力触探试验（单桥、双桥）、动力触探试验（重型、轻型）、标准贯入试验、旁压试验及探井取土室内土工试验等。

（1）载荷试验：采用慢速维持载荷法进行试验，加载系统由反力平台、千斤顶和手动油泵组成，测量系统采用大量程（30mm 或 50mm）百分表量测地基土的沉降，载荷板采用厚度为 40mm 的钢板。

（2）钻探：在进行标准贯入试验时，使用 DPP100-4 型汽车液压钻机，用螺纹钻头，回转法钻进；在进行旁压试验时，使用勺形钻头，人工钻进。

（3）探井：用人工挖掘，在井壁掏取原状土试样，土样质量等级为 I 级。

（4）旁压试验：使用 PY-3 型预钻式旁压仪，旁压器直径为 50mm,测量腔长为 250mm；全长为 500mm；液位显示为 YW-1 型液位显示仪，压力源为高压氮气。

（5）标准贯入试验：锤重为 63.5kg,落距为 76cm，自由落锤法进行试验。

（6）静力触探试验：采用 ZJYY-20A 型静力触探车，JTY-3 型静探数据采集仪。探头型号：单桥为 ZQD-15-3 型，直径为 43.7mm，截面积为 15cm^2，有效侧壁长度为 70mm；双桥为 ZQS-15-3，直径为 43.7mm,截面积 15 cm^2,侧壁作用

长度为 219mm，摩擦筒面积为 300 cm^2。

（7）动力触探试验：轻型动力触探（N_{10}）采用锤重 10kg，落距 50cm，自由落锤法进行试验。重型动力触探（$N_{63.5}$）采用锤重 63.5kg，落距 76cm，自由落锤法进行试验。

（8）室内土工试验：进行地基土的各项常规试验，及湿陷性、湿陷起始压力和直剪（快剪）试验。

各试验场地及其试验点布置见图 3－1～图 3－5，试验工作量见表 3－1。

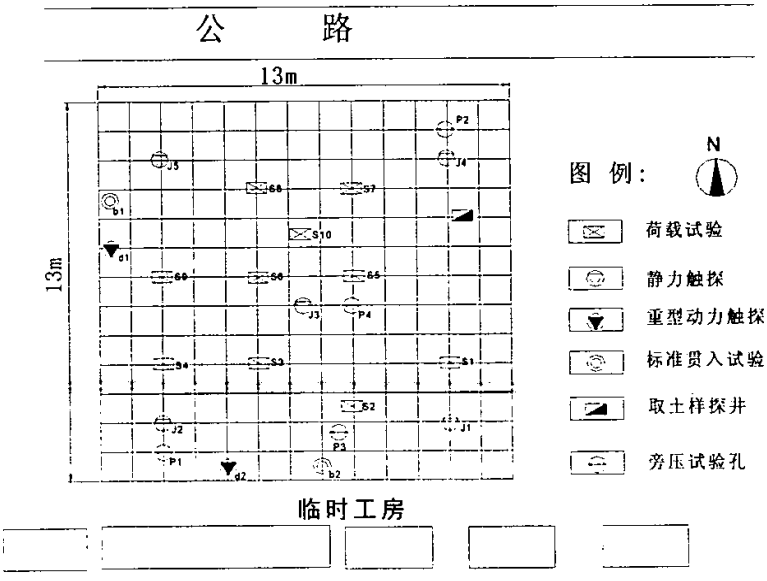


图 3－1 兰州试验场地原位测试及探井平面布置图

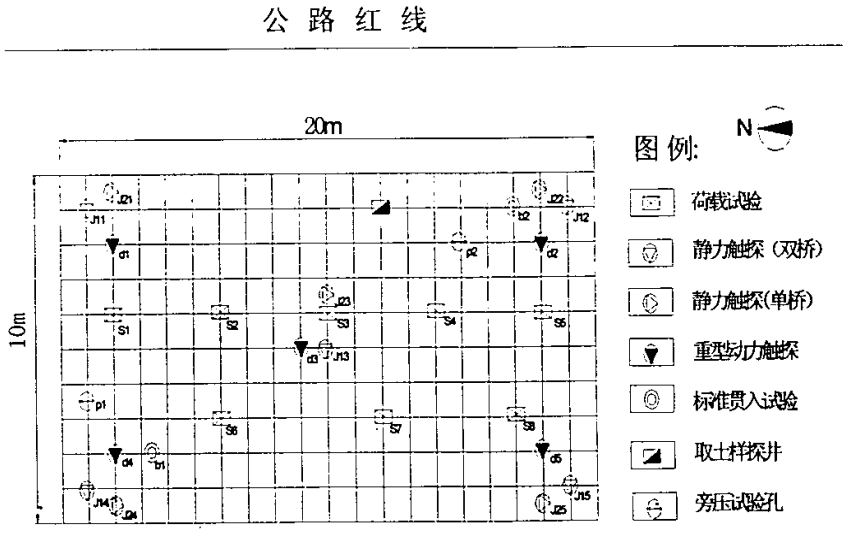


图 3－2 介体试验场地原位测试点及探井平面布置图



图 3－3 阎良 1 试验场地概况

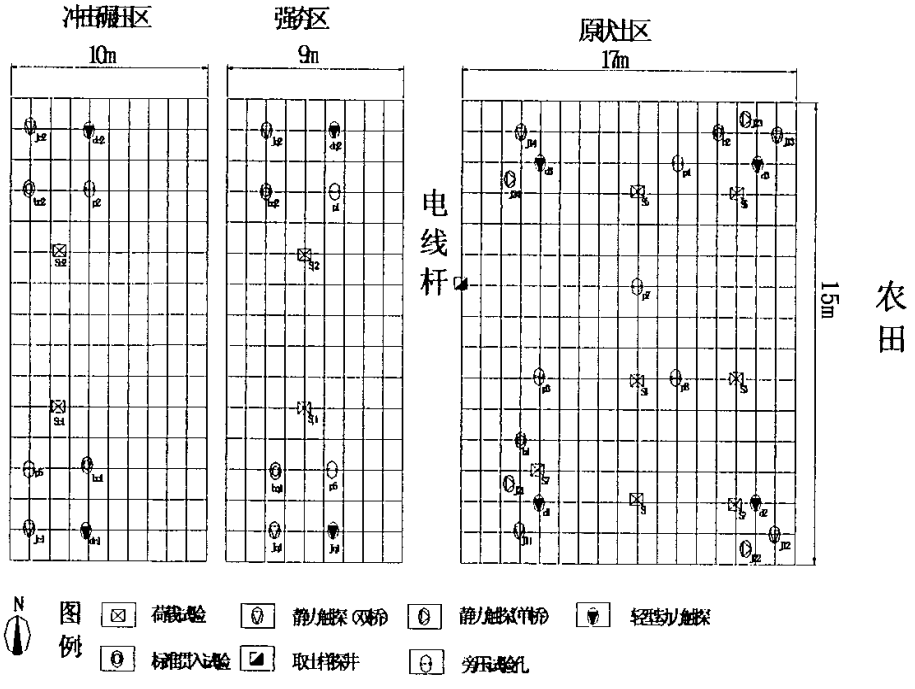


图 3－4 阎良 1 试验场地原位测试点及探井平面布置图

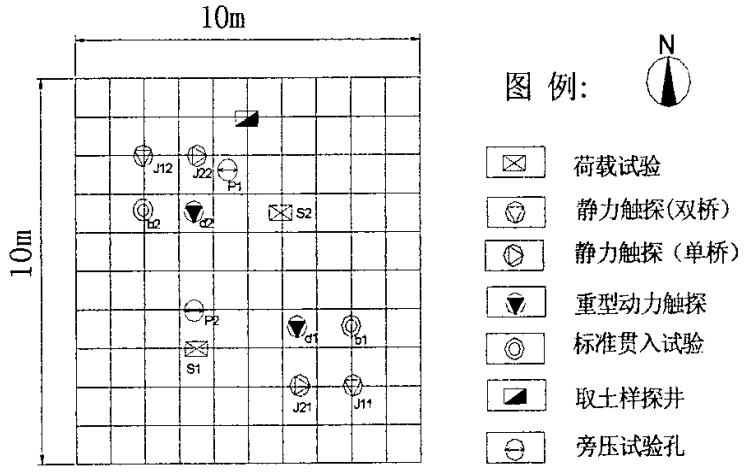


图 3—5 阎良 2 试验场地原位测试点及探井平面布置图

表 3—1　　试验工作量汇总表

序号	工作内容		单位	兰州	介休	阎良 1			阎良 2
						原地基	强夯区	冲压区	
1	探井		m/井	10.0/1	10.0/1	9.4/1	7.2/1	2.1/1	5.0/1
2	标准贯入试验		m/孔	20.2/2	20.2/2	20.0/2	20.0/2	20.0/2	20.0/2
3	旁压试验		m/孔	23.2/4	17.8/2	20.9/2	10.3/2	7.3/2	10.0/2
4	重型动力触探试验		m/孔	20.0/2	50.0/5	40.0/4	20.0/2	20.0/2	20.0/2
5	双桥静力触探试验		m/孔	83.5/8	50.0/5	40.0/4	20.0/2	20.0/2	20.0/2
6	单桥静力触探试验		m/孔	20.0/2	50.0/5	40.0/4	20.0/2	20.0/2	20.0/2
7	轻型动力触探试验		m/孔			7.0/2			
8	载荷试验		个	10	8	7	2	2	2
9	采取的土样（原状）		项	30	31	27	21	12	17
10	室内土工试验	比重	项	10	8	9	7	3	6
		密度	项	10	8	9	7	3	6
		含水量	项	10	8	9	7	3	6
		液限	项	10	8	9	7	3	6
		塑限	项	10	8	9	7	3	6
		黄土湿陷系数	项	10	8	9	7	3	6
		黄土自重湿陷系数	项	7	7	4			3
		黄土起始压力	项	7	7	4			3
		压缩试验	项	10	8	9	7	3	6
		颗粒分析	项	3	4	4			3
		直剪	组	6	5	5	3	2	2
		三轴试验	组	2	2		3	2	
		化学成分分析	项	5	6		5	1	5
		显微结构分析	项		13	10	6	4	5
		电镜试验	项		4	3	3		

四个试验场地在试验前均用推土机将30～50cm表层土铲除，并使场地平坦。

3.2.3 试验场地的湿陷类型及湿陷等级

根据各试验场地的湿陷性试验结果，按照《湿陷性黄土地区建筑规范》（GBJ25－90），各试验场地土的计算湿陷量、湿陷类型及湿陷等级详见表3－2。

表3－2　　试验场地的湿陷类型及湿陷等级

试验场地	起止深度(m)	计算湿陷土层厚度(m)	计算总自重湿陷量(m)	计算总湿陷量(cm)	湿陷类型	湿陷等级
兰州	1.5～10.0	8.5	46.2	98.5	自重	Ⅵ（很严重）
介休	1.5～10.0	8.5	6.3	58.5	非自重	Ⅱ（中等）
阎良1	1.5～9.4	7.9	5.5	39.8	非自重	Ⅱ（中等）
阎良2	1.5～5.0	3.5	3.9	51.4	非自重	Ⅱ（中等）

3.3 载荷板形状和尺寸分析

建筑工程经验表明，载荷试验是确定地基承载力最为可靠的测试方法。试验所用载荷板有圆形方形之别和面积大小之分。而用不同形状和尺寸载荷板所测得的地基承载力亦有所不同。从建筑地基受力特点看，方形、大面积载荷板试验结果与实际情况更为接近。载荷板面积越大，则试验加载量越大，试验难度也越大。公路路基地基承载力评价应该为路基设计提供依据，如果需要原位测试，应在公路勘察阶段进行。对于拟建公路来说，对地基承载力要求较高的高填方路基，常常位于沟壑之处。在黄土地区，这种地方往往人烟稀少。在交通不便、能源不达、人力资源不足的情况下，到沟底进行大尺寸载荷板地基承载力原位测试是非常困难的。因此，在满足一定精度要求的情况下，载荷板尺寸应尽可能小。

为了探索适用于公路路基地基承载力载荷试验的载荷板形状和尺寸，在兰州、介休及阎良1试验场地对原地基土分别做了四种不同载荷板尺寸($0.25m^2$圆板、$0.5m^2$圆板、$0.5m^2$方板和$1.0m^2$圆板)的载荷试验，载荷板直径（d）或边长（b）分别为56.4cm、70.7cm、79.8cm及112.9cm。地基承载力取值方法由P－S曲线的形态来确定，当P－S曲线存在明显的比例界限点或极限荷载时，取比例界限点或极限荷载的一半作为地基承载力特征值，否则，依据相对变形s/b来确定，具体的取值方法见第四章的相关内容。不同试验场地、不同尺寸的载荷试验结果见表3－3。

表 3－3　　不同载荷板试验结果

试验场地	地基承载力(kPa)			
	$0.25m^2$ 圆板	$0.50m^2$ 圆板	$0.50m^2$ 方板	$1.0m^2$ 圆板
兰州	129	136	169	102
介休	120	137	121	144
阎良 1	325（舍）	219	189	228

由表 3－3 可知，兰州、介休和阎良 1 试验场地的不同尺寸载荷板试验结果比较接近，由于阎良 1 试验场地的表层有一个硬壳层，导致 $0.25m^2$（圆板）载荷试验得到的承载力偏高，故舍去。可以初步认为，在同一土层进行承载力测试时，不同尺寸板的载荷试验得到的地基承载力特征值比较接近，此结论与《工程地质手册》（第三版）的相关成果相吻合，也说明了本文的研究成果是可信的。

《岩土工程勘察规范》(GB50021－2001)[29]认为圆形载荷板试验比较符合轴对称的弹性理论解，便于试验结果分析，而方形载荷板试验则成为三维复杂课题，因此规定载荷板宜采用圆形压板。关于承载板的尺寸，国外采用的标准承压板直径为 0.305m，我国则根据实际的工程经验，提出土的浅层平板载荷试验承压板面积不小于 $0.25m^2$。根据本文的载荷试验尺寸效应的分析，对于均质土层，不同尺寸的载荷试验所得到的地基承载力特征值差异不大，为了减小载荷试验的工作量和测试难度，采用 $0.25m^2$ 的载荷板即可。但是，实际土层往往是非均质土或多层土，为了减少土质不均匀性带来的试验误差，公路路基工程用载荷试验确定地基承载力特征值时宜采用 $0.5m^2$ 圆形刚性承压板。

所以，后文分析地基承载力时，均以 $0.5m^2$ 圆形载荷板得到的地基承载力为准。

3.4 其它试验方法与载荷试验结果对比分析

工业与民用建筑基本上是点工程，其地基涉及的范围比较小。而公路属于线形工程，一条新建高等级公路短则几十公里，长则上百甚至几百公里，路基基底宽度一般有数十米，高填方处可达一百多米。在如此之大的范围内进行载荷试验以确定地基承载力是不现实的，也是没有必要的。如果用其他试验方法进行原位测试，其地基承载力如何确定，是值得研究的问题。

四个试验场地地基土的土性均属粉质粘土，载荷试验方法是确定地基土承载力和变形模量直接可靠的方法，其它试验方法确定的地基土工程特性指标都应与载荷试验的结果建立一定的关系才能用于实践中去。

为此，本研究还进行了旁压试验、静力触探试验（单桥、双桥）、动力触探试验（重型、轻型）、标准贯入试验及探井取土室内土工试验，通过试验结果的对比分析，探寻由这些试验方法确定的工程特性指标与载荷试验结果之间的关系。

3.4.1 旁压试验与载荷试验

由于载荷试验和旁压试验都可直接反映地基土的强度和变形特性，得到地基土的承载力特征值和变形模量（或旁压模量）。两种方法的主要区别在于载荷试验反映了土体竖向的力学性质，而旁压试验反映的是土体横向的力学性质。为了寻找黄土在横向和竖向的强度和变形特性的规律性，对两种测试方法的结果进行了对比分析，其结果见表 3－4。

表 3－4　　旁压试验与载荷试验结果对比

试验场地	土性	试验方法	试验深度（m）	地基承载力 f_{ak} (kPa)	变形模量 E_0 (MPa)	旁 f_{ak}/载 f_{ak} (%)	旁 E_0/载 E_0 (%)
兰州	粉质粘土	旁压	1.0	109	9.4	81.3	144.6
		载荷	0.3	134	6.5		
介休	粉质粘土	旁压	1.3～2.3	140	19.4	107.7	307.9
		载荷	1.0～1.2	130	6.3		
阎良 1	粉质粘土	旁压	1.3～3.3	200	25.2	95.7	164.0
		载荷	0.77～0.86	209	15.3		
阎良 2	粉质粘土	旁压	1.0～2.0	296		98.7	
		载荷	0.52～0.55	300	16		

从表 3－4 可以看出，在地表浅层（<3.3m），“旁 f_{ak}”与“载 f_{ak}”的比值为 81.3%～107.7%，说明试验结果比较接近。因此，对地基土浅层进行旁压试验可以近似代替载荷试验，以确定黄土地基承载力。从“旁 E_0”与“载 E_0”的比值来看，其最大值为 307.9%，最小值为 144.6%，说明两种试验结果偏差较大，这可能是由黄土状土的结构性引起，旁压试验确定的变形模量值不能取代载荷试验结果，两者之间的关系还有待进一步研究。

3.4.2 动力触探、标准贯入、静力触探试验与载荷试验

动力触探、标准贯入、静力触探等试验方法与载荷试验结果对比情况见表 3－5。由此建立的载荷试验与其它试验方法的物理力学指标之间的回归曲线及其回归关系式见图 3－6～图 3－8。

表 3－5　　触探和贯入试验与载荷试验结果对比

试验场地		兰州	介休	阎良 1	阎良 2
土　性		粉质粘土	粉质粘土	粉质粘土	粉质粘土
载荷试验	f_{ak}(kPa)	134	130	209	300
	E_0(MPa)	6.5	6.3	15.3	16
动力触探试验（经杆长修正）$N_{63.5}$（击）		1.5	2.8	4.9	9.1
标准贯入试验（经杆长修正）N（击）		1.5	2.9	9.2	14.5
静力触探试验	p_S(MPa)	1.2	2.0	4.1	7.3
	q_C(MPa)		1.3	3.1	5.5

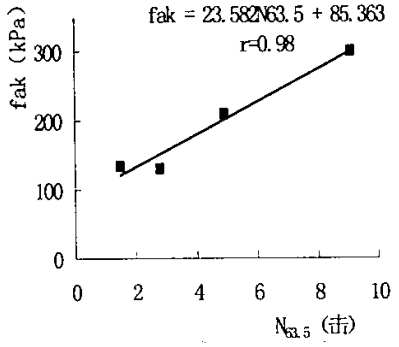


图 3－6 动探试验击数($N_{63.5}$)与黄土地基承载力(f_{ak})的关系

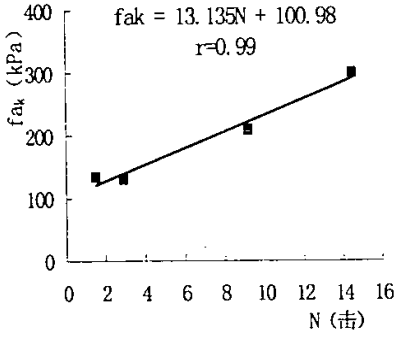


图 3－7 标贯试验击数(N)与黄土地基承载力(f_{ak})的关系

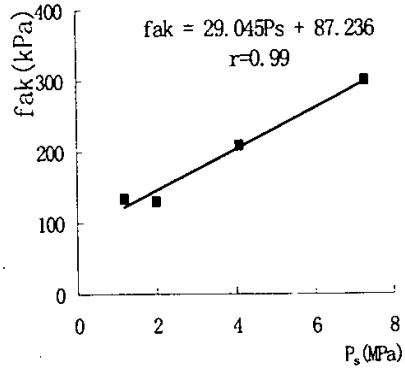


图 3－8 静探试验比贯入阻力(P_s)与黄土地基承载力(f_{ak})的关系

由图3－6～图3－8可见，载荷试验确定的地基承载力特征值f_{ak}与静力触探、动力触探及标准贯入等试验确定的强度指标有良好的线性关系。对于土性指标接近的黄土地基如采用静力触探、动力触探及标准贯入等试验确定地基承载力时，以上回归关系式可作为参考。由于测试的样本数较少，还需补充试验资料，得到实用关系式。

3.4.3 室内压缩试验与载荷试验

室内压缩试验得到的压缩模量反映了土在完全侧限条件下，竖向正应力与相应正应变的比值，从理论上讲，压缩模量与变形模量存在一定的换算关系。为了探讨载荷试验确定的地基承载力与压缩模量之间的关系，对四个试验场地通过与载荷试验同一土层挖探井取土样，进行了室内压缩试验，得到的压缩模量(E_s)与载荷试验确定的地基承载力对比情况如表3－6，回归关系见图3－9。

表3－6　　压缩模量与地基承载力

试验场地	兰州	介休	阎良1	阎良2
土　性	粉质粘土	粉质粘土	粉质粘土	粉质粘土
压缩模量 Es (MPa)	2.1	3.8	14.1	22.1
地基承载力特征值 f_{ak}(kPa)	134	130	209	300

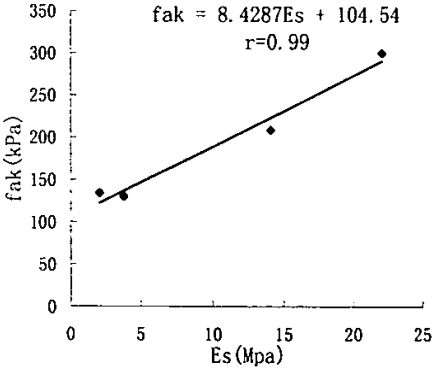


图3－9 压缩模量(E_s)与地基承载力(f_{ak})的关系

由图3－9可见，载荷试验得到的地基承载力与室内压缩试验得到的压缩模量之间有较好的线性关系。由于样本量较少，回归关系式仅供参考。

3.5 地基处理后的承载力测试方法

为了提高地基承载力或消除黄土湿陷性，需要采取一定工程措施，对地基进行处理。经过处理以后的地基具有与原状土地基不同的物理力学性质，人们十分

关心地基的处理效果和处理后地基的承载力，但是，目前还没有明确的评价方法。

为此，在阎良1试验场地对原状土地基、经冲击碾压和强夯后的地基分别进行了0.25m^{2}和0.5m^{2}的载荷板试验、单双桥静力触探、重型动力触探、标准贯入试验和旁压试验等原位测试。根据黄土地基土的物理力学指标随深度的变化情况，可以确定冲击碾压后的有效加固深度为0.5～1m，有效影响深度在1.5～2m；240t•m能级强夯的有效加固深度在4m，有效影响深度在5～6m。处理后2m深度范围内各种测试方法所得结果见表3－7。

表3－7　　强夯和冲击碾压前后土层力学参数变化

测试方法及指标 \ 试验场地		原地基区测试值	强夯区				冲击碾压区			
			测试值		提高(降低)幅度（%）		测试值		提高(降低)幅度（%）	
0.25m^{2}载荷试验	地基承载力f_{ak}(kPa)	209	270	295	29	41	345	362	65	77
0.5m^{2}载荷试验			320		53		378		81	
旁压试验	地基承载力f_{ak}(kPa)	200	272		36		263		32	
标准贯入试验	N（击）	9.2	30.3		229		12.0		30	
重型动力触探试验	$N_{63.5}$（击）	4.9	13.5		176		8.0		63	
单桥静力触探试验	比贯入阻力P_s(MPa)	4.1	10.7		161		8.0		95	
双桥静力触探试验	锥尖阻力f_s(kPa)	52	298		473		128		146	
	侧壁摩阻力q_c(MPa)	3.1	8.3		168		5.5		77	
室内土工试验	干密度γ_d(kN/m^3)	13.4	16.9		26		15.2		13	
	孔隙比e_o	1.033	0.605		-41		0.791		-23	
	压缩模量E_{s1-2}(MPa)	14.1	21.5		52		23.4		66	

由表3－7可见，由于地基处理引起土层物理力学性质的不均匀性，以及不同测试方法所得到的承载力反映的是不同深度范围内的地基土承载力，导致不同的测试方法所得承载力有所不同。

（1）载荷试验确定地基处理后的承载力，不同尺寸的载荷板试验所反映的是不同深度范围内土层的承载力。0.25m^{2}载荷试验反映的是载荷板下0.5m～0.75m深度范围内的承载力；0.5m^{2}载荷试验则反映的是载荷板下1.0m～1.5m深度范围内的承载力。由于地基处理后表层土质较松散，所以导致0.25m^{2}载荷试验所得承载力要低于0.5m^{2}载荷试验的数据。浅层土冲压处理后的承载力要高于

强夯区，这一结果不合乎常规，可能是强夯区的载荷试验点位于夯点间，致使测试结果偏低。因此，在进行地基处理后承载力评价时，载荷试验有一定的局限性，且不宜采用小尺寸的载荷板。

（2）旁压试验确定地基处理后的承载力，由于其针对地基处理后 2m 深度范围内的承载力进行测试，而地基处理效果沿深度是递减的，因此其测试结果比载荷试验结果小，但更能体现地基处理后一定深度范围内的承载力值，在进行地基处理后的承载力评价时，旁压试验可以作为一种主要的评价方法。

（3）静力触探、重型动力触探和标准贯入试验等其它的原位测试结果也都反映出地基经强夯和冲压处理后强度有所提高，但由于这些测试方法所确定的参数只能定性地反映地基承载力的变化情况，因此只可作为地基处理后承载力评价的辅助测试方法。

3.6 各种地基承载力测试方法在公路路基工程中的适用性

如前所述，确定黄土地基土承载力常用的现场测试方法有：载荷试验、旁压试验、动力触探试验、静力触探试验、标准贯入试验及室内土工试验等。通过本文进行的四个试验场地的地基承载力测试分析，提出各种现场测试方法在公路路基黄土地基承载力评价中的适用性。

3.6.1 载荷试验

载荷试验是一种最古老并被广泛应用于确定地基土承载力的原位测试技术。它实际上是模拟建筑物基础受荷条件下的现场模型试验，地基承载力主要是根据土层所受应力与相应变形曲线(P－S 曲线)中的特征点来决定，利用载荷试验成果确定的地基土承载力是最可靠的。但是，载荷试验只能反映 2～3 倍承载板宽度的深度内土的承载力，且试验费时费力。公路路基作为线状工程，与建筑工程有所不同，公路路基对地基承载力的要求没有建筑物高，没有必要都通过载荷试验来确定。因此，黄土地区公路路基地基承载力的现场测试不提倡大规模直接采用载荷试验，可以根据载荷试验结果与其他试验方法所得指标的统计关系，用查表法或回归公式的方法来确定。

3.6.2 旁压试验

旁压试验是现代原位测试技术之一。它是利用一个可膨胀的圆柱形旁压器在孔内对孔壁施加压力，使孔壁产生变形，通过控制装置测出压力和相应的变形，

从而确定土或岩石随深度变化的应力与应变特性。旁压试验本质上是在钻孔中进行的水平载荷试验。由于它能给出原位的应力与应变曲线，而被认为是除载荷试验外，在确定地基土承载力方面具有广泛可能性的一种方法。旁压试验结果反映水平方向土的变形特征，可与载荷试验所得垂直方向土的变形模量建立经验关系，间接反映黄土的竖向变形特征。

本文研究表明：旁压试验作为水平载荷试验，地表浅层的承载力评价时可用来代替载荷试验；深部土层旁压试验所确定的地基土承载力的可靠性尚需进一步研究。此外，旁压试验的仪器轻便，操作简易，测试迅速，可以在不同深度进行试验，了解地基土强度和变形沿深度的变化，在公路工程中对地基土和场地地质条件进行评价时，旁压试验比载荷试验更加简便和实用。同时，旁压试验可以作为黄土地基处理后承载力的评价方法，反映地基处理的效果及土体的强度和变形特征。

3.6.3 静力触探试验

静力触探是以静力将探头以均匀的速率压入土中，利用探头内的阻力传感器，将土层的阻力转换为电讯号，通过电子量测仪器将探头受到的贯入阻力记录下来。且静力触探技术的测试方法可连续进行，测试涉及的土体积比室内试验样品要大得多，因而更能反映土的宏观结构(如裂隙、夹层等)，可以得到完整的土层剖面及其连续的贯入曲线。静力触探根据探头的种类一般可分为单桥、双桥和孔压等多功能探头。静力触探按照类型可以分为单桥和双桥两种静力触探试验，其中单桥静力触探试验在黄土地区承载力测试中应用最为广泛。

根据本文对四个试验场地的试验结果，静力触探得到的强度指标与载荷试验得到的黄土地基承载力特征值之间具有良好的线性关系，其结果为：

静探比贯入阻力(P_s)与地基承载力特征值(f_{ak})关系：$f_{ak}=29*P_s+87$（r=0.99）；

静探锥尖阻力(q_c)与地基承载力特征值(f_{ak})关系：$f_{ak}=40*q_c+80$（r=1.0）。

（其中的 P_s、q_c 单位为 MPa，f_{ak} 单位为 kPa。）

该关系式对于与试验场地土质接近的土体进行承载力评价具有参考价值。如果能够有足够的样本量，可以建立更加可靠的关系式，据此可以根据静探结果估计黄土地基承载力。黄土地层进行土层划分时多以静力触探试验的测试指标为依据，而且由于静力触探试验所提供的数据较准确、设备较轻便、操作也简单易行，便于多点使用。但是，事先必须进行对比试验，建立静力触探试验得到的指标与载荷试验得到的地基承载力之间的换算关系。因此，静力触探试验可以作为黄土

地区公路工程地基承载力测试时旁压试验的辅助测试手段。

3.6.4 动力触探试验和标准贯入试验

动力触探试验是利用一定的落锤能量，将一定规格的探头连同探杆打入土中，根据打入的难易程度（通常以贯入度、锤击数或探头单位面积动贯入阻力来表示）判释土的性质的一种原位测试方法。按照落锤能量及探头的规格，动力触探通常分为轻型（N_{10}）、中型（N_{28}）、重型（$N_{63.5}$）及超重型（N_{120}）四种。在黄土地区承载力测试时一般进行重型动力触探试验。

标准贯入试验在国内外应用极为广泛，是其它原位测试方法无可比拟的。其设备主要由标准贯入器、触探杆和穿心锤三部分组成。触探杆直径国内统一采用42mm，国外也有使用直径50mm或60mm的。穿心锤重63．5kg 。标准贯入试验属于动力触探的一种，结合钻孔进行。它是利用63．5kg的重锤以76cm的自由落距，将一对开取土管(外径5lmm、内径35mm)也称贯人器，打人土中l5cm，不计击数，然后再打人土中30 cm，计其击数，称为标准贯人击数。对于坚硬或极密实状态的土，可免除l5cm的预打，直接击人土中测其击数。当击数达到50击时还未击人土中30 cm应停止强行击入，取得锤击数N＝50和贯人度S＜30 cm的实测值即可。

从本文对四个试验场地的试验结果来看，动力触探试验和标准贯入试验得到的强度指标与载荷试验得到的承载力特征值之间具有良好的线性关系，其结果为：

动探击数($N_{63.5}$)与承载力特征值(f_{ak})关系：$f_{ak}=24*N_{63.5}+86$（r=0.98）；

标贯击数(N)与承载力特征值(f_{ak})关系：$f_{ak}=13*N+101$（r=0.99）。

（其中的$N_{63.5}$和N单位为击数，f_{ak}单位为kPa。）

该关系式对于与试验场地土质接近的土体进行承载力评价具有参考价值。如果能够补充足够的样本量，建立更加可靠的关系式，就可以根据动探击数或标贯击数估计地基承载力。黄土地区用动力触探试验和标准贯入试验确定地基承载力所积累的经验不多，且试验需要钻机钻孔，设备较复杂，不易于操作。因此，在黄土地区公路工程中，动力触探试验和标准贯入试验仅作为承载力评价时辅助的测试方法。

3.6.5 原状土取样

在长期的岩土工程实践中，人们在应用土的物理力学指标确定黄土地区地基承载力方面积累了丰富的经验，并解决了大量的岩土工程问题。这些研究成果应

在黄土地区公路工程中继承与发展。为了探讨土的物理力学指标与地基承载力关系，需要用原状土样做室内土工试验，以获得土的基本物理力学指标（孔隙比、压缩系数等），其中关键的技术问题是原状土试样的采取。在湿陷性黄土地区进行勘探时，取土勘探点中应有一定数量的探井，钻孔取土应使用直径不小于 12cm 的专用薄壁取土器。当探井取土和钻孔取土试验结果相差较大时，则须从钻探工艺和取土方法上解决。通常认为，探井取土是保持土的天然结构的最好方法，试验数据也最为可信，只是方法原始，对地基有一定的破坏作用，并且在深厚湿陷性黄土地区采用探井存在一定的困难。钻孔取土常受取土设备、钻探工艺和取土方法的影响，取土质量较差。研究表明，如不注意钻探工艺和取土方法，即使采用专用的薄壁取土器也仍然取不出反映真实地层的土样。因此，在湿陷性黄土地区采取原状土试样时，使用探井取土是最好的办法，如果仍要使用钻孔取土，除规定使用专用的取土器外，还必须规定严格的钻探工艺和取土方法，否则就有可能徒劳无益。

3.7 小结

通过对黄土地区不同区域所进行的地基承载力原位测试以及配套的室内土工试验，对载荷试验、旁压试验、静力触探、标准贯入试验、动力触探等各种承载力现场测试方法进行了比较和分析，研究了不同测试指标之间的关系，探讨了关于不同载荷板的尺寸效应、地基处理后的效果评价等问题，主要得到以下几点结论：

（1）黄土地区公路路基地基承载力评价时，不宜大规模采用载荷试验。在对比试验建立关系式基础之上，宜采用旁压试验，或静力触探，或动力触探及标准贯入试验，将其试验结果换算为与载荷试验相应的地基承载力。

（2）本文对黄土地区四个试验场地的试验结果表明，浅层土的旁压试验与载荷试验测得的地基承载力比较接近；静力触探、动力触探和标准贯入等测试方法确定的强度指标与载荷试验确定的地基承载力特征值之间具有良好的线性关系。由于样本量不足，其换算关系式还需试验确定。

（3）同一土层进行地基承载力载荷试验时，不同尺寸的载荷板得到的地基承载力特征值有一定差别。如用载荷试验确定地基承载力特征值，建议采用 $0.5m^2$ 圆形刚性承压板。

（4）地基承载力 f_{ak} 与土体的压缩模量 E_s 之间关系密切，土体的压缩模量 E_s 可以在一定程度上反映地基土的强度。

（5）黄土地区公路处理后的地基承载力评价，可用旁压试验。

4 黄土地基承载力影响因素分析

公路作为一种带状结构物往往要跨越许多不同地质年代、不同地质成因和地貌单元的黄土区，而不同的情况下，其地基承载力亦不相同。在公路初步设计阶段，不可能对地基承载力进行大范围原位测试。因此，有必要提出黄土地基承载力预估方法，以供公路设计或施工部门使用。对黄土地基承载力影响因素进行分析，目的在于探寻影响黄土地基承载力的主导因素及其规律性，为提出黄土地基承载力除原位测试方法以外的评价方法奠定基础。

4.1 黄土地基承载力实测数据采集与处理

现场载荷试验是评价黄土地基承载力特征值最可靠的方法，为此将以实测载荷试验数据和收集到的相关行业的实测载荷试验资料作为黄土地基承载力影响因素分析的基本依据。

4.1.1 数据来源

如前所述，在黄土地区的典型代表性区域甘肃兰州、山西介休、陕西阎良一级阶地和陕西阎良二级阶地等四个试验场地的原地基分别进行了现场荷载板试验、配套的室内土工试验以及显微镜和扫描电镜试验。

同时，还收集了大量相关行业已有的试验数据，作为地基承载力研究的基础资料。共收集到222份黄土地基承载力实测载荷试验资料，分别来自建筑、冶金、机械等行业，其中大部分是《湿陷性黄土地区建筑规范》（TJ25－78）中编制承载力表的原始资料，这些试验数据详实可靠，极大地丰富了黄土地基承载力影响因素分析的样本数。

黄土地基承载力的实测及收集到的载荷试验数据分布情况见表4－1。

表4－1　　黄土地基承载力载荷试验数据分布情况

各区	地点	实测载荷板个数	实测载荷板各区总数	备注
陇西地区	连城	5	46	收集资料
	陇西	9		
	兰州	7		
	永登	2		
	窑街	2		
	大通	4		
	西宁	16		
	兰州	1		本研究实测

续表 4－1

各区	地点	实测载荷板个数	实测载荷板各区总数	备注
关中地区	咸阳	4	102	收集资料
	西安	45		
	渭南	5		
	宝鸡	36		
	蔡家坡	9		
	兴平	1		
	阎良	2		本研究实测
陇东、陕北－晋西地区	绥德	3	24	收集资料
	耀县	1		
	铜川	20		
东部地区	太原	50	54	收集资料
	洛阳	3		
	介休	1		本研究实测

表 4－1 中的 226 份实测资料基本上分布于整个黄土地区，具有比较广泛的代表性，因此，作为黄土地基承载力研究的依据是合适的。

4.1.2 黄土地基承载力取值方法

（1）地基破坏过程

格尔谢万诺夫根据载荷试验结果（如图 4－1），提出地基破坏的过程经历三个阶段[14]：

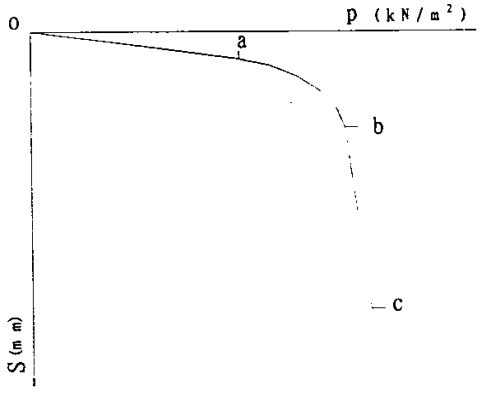


图 4－1 土体受外荷载后的变形过程

①压密阶段(或称直线变形阶段)，相当于 P－S 曲线上的 oa 段，在这一阶段，P－S 曲线接近于直线，土中各点的剪应力均小于土的抗剪强度，土体处于弹性平衡状态，在这一阶段，载荷板的沉降主要是土的压密变形引起的，P－S 曲线上相应于 a 点的荷载称为比例界限 P_0。

②剪切阶段，相当于 P－S 曲线上的 ab 段，这一阶段 P－S 曲线已不再保持线性关系，曲线的增长率 ΔS/ΔP 随荷载的增大而增加，在这个阶段，地基土中局部范围内的剪应力达到土的抗剪强度，土体发生剪切破坏，这一区域也称塑性区，随着荷载的继续增加，土中塑性区的范围逐步扩大，在土中形成连续的滑动面，土体从载荷板两侧挤出而破坏，因此，剪切阶段也是在地基中塑性区的基础上发生与发展阶段，曲线上 b 点的荷载称为极限荷载 P_u。

③破坏阶段，相当于 P－S 曲线上的 bc 段，当荷载超过极限荷载后，载荷板急速下沉，即使不再增加荷载，沉降也不能稳定，因此 P－S 曲线陡直下降，在这一阶段，由于土中塑性区范围的不断扩展，最后在土中形成连续滑动面，土从载荷板四周挤出隆起，地基土失稳而破坏。

（2）黄土的 P－S 曲线类型

用载荷板试验来确定地基承载力，应具体分析 P－S 曲线的形式，黄土的 P－S 曲线，总的可以归纳为三种基本表现形式（图 4－2）[7]。

曲线①具有随沉降量增加，承载力可以较多提高的特点，而此时不致造成丧失土的强度，对此类土，在满足允许变形的前提下，承载力可以取最大值。

曲线②具有随沉降量增加承载力也可以适当提高的特点，在变形允许的情况下，应尽量提高承载力。

曲线③属于松软的土，荷载增加不多，沉降量增加很大，并容易进入破坏变形阶段，对这类土，承载力不宜取太大。

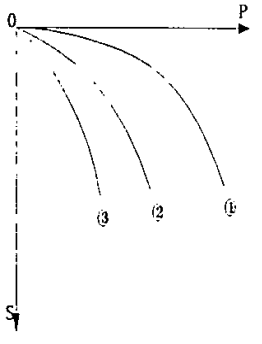


图 4－2 黄土 P－S 曲线类型划分示意图

（3）黄土地基承载力特征值确定方法[8]

P－S 曲线形式不同，地基承载力特征值确定方法亦有所不同。如果 P－S 曲线比较典型，即在曲线上能够明显地区分出 3 个变形阶段，则在确定地基承载力特征值时，一方面要求地基承载力特征值不超过比例界限，这时地基土处于压密

阶段，在这个荷载范围内地基变形较小，但有时为了提高地基承载力特征值，在满足结构物沉降要求的前提下，也可超过比例界限，允许土中产生一定范围的塑性区；另一方面又要求地基承载力特征值对极限荷载 P_u 有一定的安全度。如果 P－S 曲线是非典型性的，即在曲线上没有明显的 3 个变形阶段，很难直接从曲线上得到比例界限，这时根据实践经验，可以取相应于沉降 s 等于载荷板宽度 b 的 0.01～0.015 时的荷载作为地基承载力特征值。

根据 P－S 曲线选取比例界限点作为标准承载力的方法如下：如果曲线上比例界限点比较明显，采用荷载试验的 P－S 曲线上比例界限点所对应的荷载 P_0 为地基土的承载力特征值，载荷试验 P－S 曲线上的转折点，是黄土地基的力学特征点，对应于此点的荷载为 P_0，相当于地基土的临塑荷载。据统计，对应于此点的相对沉降 s/b 一般仅为 0.002～0.008，个别的为 0.01～0.016。因此，黄土地基承载力特征值采用转折点对应的荷载 P_0 值，从地基强度和变形两方面考虑，都是安全可靠的。

某些土体 P_0 点在 P－S 曲线上不明显，或绘制曲线比例尺选择不当，使 P_0 点有了歪曲，对于这种情况，可采用双对数纸绘制 lgs－lgp 曲线，这样整个曲线变成了由二个直线段组成，两直线段的交接点即为 P_0 点。

对于压缩性较高的新堆积黄土(Q_4^2)和饱和黄土的承载力，当 P－S 曲线上的比例界限点不明显时，可取沉降与载荷板宽度之比(s/b)不大于 0.015 所对应的承载力。在通常情况下，黄土地基的 P_0 值较小，相应的沉降量也较小，而且在载荷试验中，在未达极限荷载之前，各级荷载下的沉降都能较快地稳定，即 P－S 曲线过了转折点后，还要经过较长的平缓区段，即塑性变形段，才进入破坏阶段，对于这种黄土地基，若取比例界限作为承载力，显得过于保守，为了充分发挥地基的潜力，在转折点以后按变形和强度双控制的方法来确定容许承载力，其原则为：①承载力所对应的相对沉降 s/b 值不超过某一定值(即把地基变形控制在某一范围内)，从地基变形角度保证结构物不会产生破坏；②所取承载力与其变形模量值彼此协调（即不致一个过大，另一个过小）；③取值点以后的变形增量不宜过大，即此处的 P－S 曲线不很陡，使此点后的变形模量不急剧降低，即使上面的荷载稍有增大时，也不致引起大幅度的沉降；④确定的承载力超过 P_0 不很大，距离破坏荷载还有一定的安全储备，从地基强度方面保证安全。经过分析对比，一般湿陷性黄土和新近堆积黄土的承载力最大可用到 s/b =0.015 所对应的荷载 $P_{0.015}$。

对于 P－S 曲线上无明显的直线段，拐点不易确定的情况，承载力也可由分

析沉降量与荷载的关系来确定，当某一级荷载的沉降量增加值大于或等于前一级荷载的沉降量增加值的 2 倍，则可把前一级荷载近似地当作比例界限荷载。若 P－S 曲线较平缓，比例界限值较小(P_0≈50～150kPa)，相应的基础沉降量也很小(s/b < 0.01)，在比例界限荷载与极限荷载之间需经历较长的局部剪切破坏阶段，对此情况，取 f_{ak}= P_0 显然偏低，应按变形和强度双控制的方法确定地基的标准承载力 f_{ak}，一般湿陷性黄土和新近堆积黄土地基，可采用 s/b =0.015 所对应的荷载。

4.1.3 公路黄土地基承载力取值

根据载荷试验 P－S 曲线确定的黄土地基承载力特征值与 P－S 曲线形状、比例界限荷载与极限荷载、相对变形要求及工程经验有关。总之，黄土地基承载力的取值过程复杂，不易掌握。因为收集到的载荷试验资料出自不同部门，其地基承载力特征值的取值方法不同，为便于分析，并考虑公路地基承载力的特点，需要统一黄土地基承载力特征值的取值方法。

建筑部门等行业在过去的几十年里进行了大量的现场载荷试验，并结合工程实践经验对地基承载力的取值问题进行了深入研究，所采用的地基承载力的取值方法是比较成熟的。为了充分利用已有的研究成果，而且便于操作，仅对黄土地基承载力特征值的取值方法进行一些简化。

通过黄土地区大量的实测载荷板试验 P－S 曲线，分析相关行业的承载力取值标准，针对公路工程的特点，对黄土地基承载力特征值取值方法简化如下：

（1）考虑黄土属于特殊土质，具有压缩性大的特点，如果 P－S 曲线具有明显的比例界限点，认为宜采用载荷试验 P－S 曲线上的比例界限点所对应的荷载(P_0)作为地基承载力特征值；

（2）对于 P－S 曲线比例界限点不明显的情况，塑性区相对较大，可考虑采用相对沉降来确定承载力，按沉降与载荷板宽度之比 s/b=0.010～0.015 所对应的值作为取值标准；

（3）在 P－S 曲线上比例界限点不明显，曲线比较平缓，且应用相对沉降 s/b=0.01 所对应的值偏大，这种情况下可考虑采用取 s/b=0.015 所对应的值的 1/2 作为承载力特征值；

（4）对于压缩性大的新近堆积黄土（Q_4^2）采用相对沉降 s/b=0.015 对应的值作为承载力特征值。

例如某工点实测载荷板试验，实测累计沉降量随荷载的变化数据及 P－S 曲线分别如表 4－2 和图 4－3 所示。

表 4－2　　实测载荷板试验值

荷载 P(kPa)	48	72	96	120	144	168	192	216
累计沉降量 S(mm)	2.50	5.15	7.16	11.77	15.91	20.83	30.95	45.8

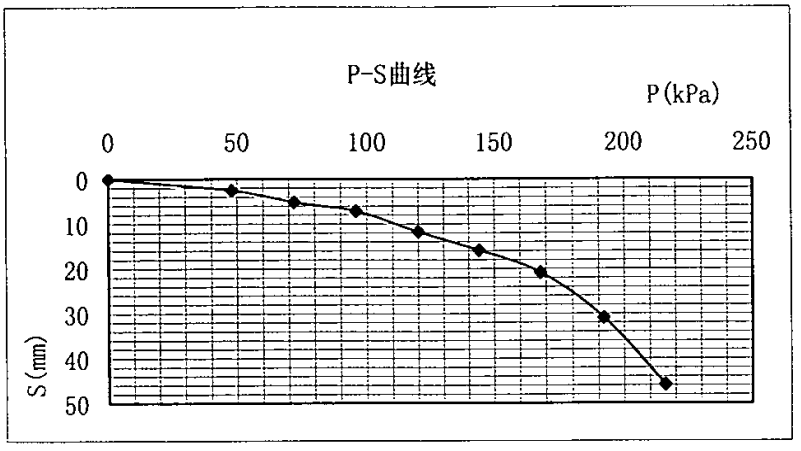


图 4－3 实测载荷板 P－S 曲线

从 P－S 曲线分析可知，曲线上没有明显的比例界点，可按相对沉降确定承载力，当取 s/b=0.01 时，对应 P=95kPa；当取 s/b=0.015 时，对应 P=115 kPa。考虑到此二个值都处于土体的塑性变化区域，同时这二个值都离极限破坏状态较远，为了充分挖掘地基土体的潜力，同时考虑公路工程在黄土地基承载力确定中相对沉降量可以适当取大一点。因此，在这个 P－S 曲线上确定的承载力值 f_{ak} 取 s/b=0.015 对应 P=115kPa 比较合理。

4.1.4 液限标准换算

由于所收集到的黄土地基承载力载荷试验数据来自不同行业，而他们测量液限的标准有所不同。建筑等行业所采用的《土工试验方法标准》（GB/T50123－1999）[33]规定液限的试验值一般采用锥式液限仪中的 76g 圆锥式液限仪入土深度为 10mm 来测试土质的液限值，而《公路土工试验规程》（JTJ051－93）[34]规定采用圆锥的质量为 100g 入土深度为 20(±0.2)mm 来测定。两者的测定方法有一定的差别，测量的结果也有一定的差异。为了使试验数据具有可比性，有必要对液限的标准统一。本文主要针对黄土地区公路地基承载力开展研究，因此，考虑采用《公路土工试验规程》液限标准。

我国水电部门在修订液、塑限联合测定的过程中通过大量的试验对比得出结论[34]：76g 锥以入土深度 17mm 作为液限和 100g 锥入土深度 20mm 作为液限对应的抗剪强度与美国 ASTMD423 碟式仪液限时的强度一致，说明 76g 锥入土深

度17mm和100g锥入土深度20mm均可经达到与ASTMD423碟式仪等效的目的。同时根据大量的试验对比，发现76g锥入土深度10mm和卡氏碟式仪测得的结果相差很大，但两者之间的统计关系式[5]：

$$\overline{W_L} = 6.5 + 0.66W_{LC} \quad (r=0.95，n=1106) \qquad (4-1)$$

式中：$\overline{W_L}$ — 76g锥式仪求得的液限，%；

W_{LC} — 碟式仪求得的液限，%。

大量的试验对比结果表明[34]，用ASTM划刀（A刀）测得的液限值比用卡氏划刀（C刀）测得的液限值约低10%。

综上所述，国标中76g锥入土深度10mm测得的液限值与公路工程土工规程采用的100g锥入土深度20mm测得的液限值的换算关系如下：

$$W_L = {0.9\times(\overline{W_L}-6.5)}/{0.66} \qquad (4-2)$$

式中：W_L—100g锥式仪求得的液限。

在收集到的实测资料中，液限既有76g锥测量值，又有100g测量值，本文均以100g锥入土深度20 mm的测量值作为标准。对76g锥液限测量值按式（4—2）进行换算再对液限进行定量分析。

4.2 黄土地基承载力与地理

4.2.1 地基承载力的区域特征[7][8][37][38][39]

在我国黄土分布区，六盘山以西的黄土与六盘山以东的黄土具有不同的工程力学性质，陕北地区的黄土与关中地区地黄土的工程力学性质也有很大的差异，陇西黄土和陇东黄土截然不同。黄土的湿陷性和颗粒组成都具有一定的区域性，这必然导致不同区域黄土地基力学性质和应力应变对应的承载力也具有一定的规律性。究其原因，与黄土的成因关系密切。

一般说来，从陇西到豫西，从内蒙到关中呈现动态性变化，西部和北部黄土的厚度比较大，天然含水量比较低。黄土中砂粒和粗粉土粒含量多而粘粒含量少，黄土骨架薄膜状态胶结成分多，可溶盐的含量比较多，承载力偏大。但黄土湿陷性比较敏感，而且湿陷等级比较高，多出现自重湿陷类型；反之东部和南部湿陷性黄土则比较薄，天然含水量比较高，砂粒和粗粉土粒含量少而粘土粒含量比较多，黄土骨架镶嵌状胶结成分多，可溶盐的含量比较少，承载力偏低，土性较稳定。黄土的区域性特性通过载荷板试验可以明显地反映出来，将收集到不同区域的载荷板试验资料P—S曲线进行对比（图4—4和图4—5），可以看出在黄土地区承载力具有很显著的区域特性。

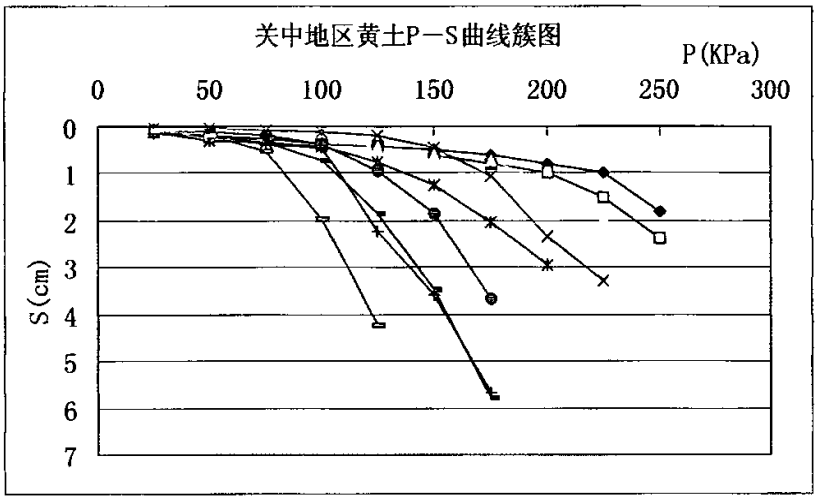


图 4—4 关中地区黄土载荷试验 P—S 曲线

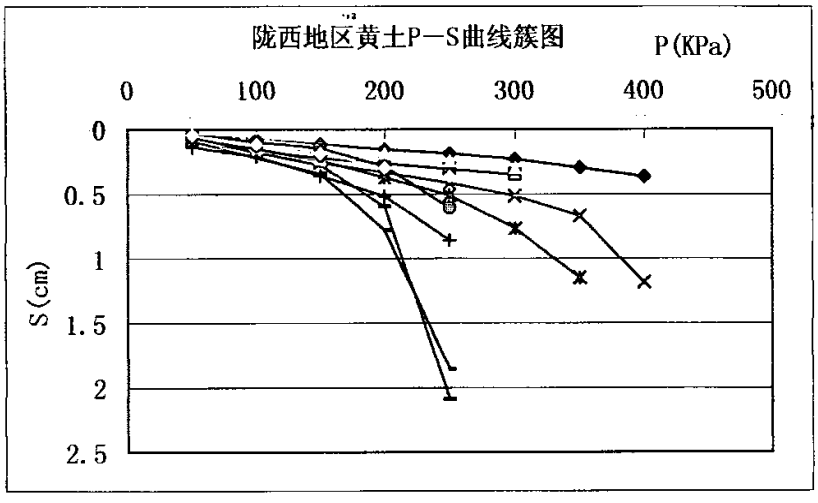


图 4—5 陇西地区黄土载荷试验 P—S 曲线

在 P—S 曲线上选取 f_{ak}，正常时取 S=0.015b 所对应的压力 P 为地层的承载力特征值 f_{ak}，从关中地区的曲线可得出，本区的 f_{ak} 值变化在 80～210kPa 之间，以 90～160kPa 为常见，同时可看出，不论曲线类型如何，比例界限点都不明显，但塑性变形明显，特别是 f_{ak} 值小于 100kPa 的软土型曲线尤为突出。同时，塑性变形段长，迟迟不能进入变形第三阶段，又不同于软土地基的承载力 P—S 曲线。陇西地区的 P—S 曲线和关中地区相比较，陇西地区的 f_{ak} 值相对比较大，且曲线类型也较为简单，硬土型的多，软土型的少，塑性变形段长的较少。在相同的荷载 P 的情况下，本区相应的变形量 S 小。显著特点是曲线的斜率相对较小，部分

曲线在加荷载到 P=250kPa 时仍处于第一变形阶段，即使达到比例界限点，其相应变形量也仅有 0.5～1.0cm，因此本地区黄土的地基承载力特征值较大。对比两个地区的承载力曲线的结果表明，陇西地区黄土的地基承载力大于关中地区。

分析 P－S 曲线地区差别的原因，气候的差异是两个地区黄土含水量差别的根本原因，差别的大小取决于地区降雨量与蒸发量的盈亏比例，决定了对应地区黄土的含水量变化，并且界限分明，关中地区 W=11.0%～28.0%，陇西地区 W=3.3%～25.0%，显然关中地区含水量大于陇西。

通过大量的土工试验和工程实际经验发现，黄土有着明显的区域性差别，这些差别主要体现在湿陷性、压缩性和强度等方面的不同。黄土的区域性差异是与其区域内自然条件、堆积环境和形成年代等因素有关，这些因素的作用结果反映在黄土的工程性能上的差别。

4.2.2 地层类型对地基承载力的影响[7][8][37][38][39]

黄土是第四纪时期的陆相沉积物，范围分布广泛，根据黄土地层年代，地学界把黄土分为四大组： Q_1、Q_2、Q_3、Q_4 ，根据需要还可以进一步划分；不同地层的黄土，其颗粒组成、矿物成分、化学成分、可溶盐含量亦各不相同，这些势必决定黄土的工程力学性质的差异性和多样性。当公路路线跨越不同地层的地质体时，必然要考虑黄土地层形成时代的早晚对其承载力的影响。

黄土的工程性质，是颗粒组成、颗粒形状、大小和矿物成份以及成岩作用程度的函数。这种因果关系，比一般粘性土要密切得多。因此，要掌握黄土的工程性质，从而又能预见其工程后果，就需要应用第四纪地质和地史学的知识，并结合土工试验的结果综合考虑。

黄土地基强度的大小，压缩性的高低，湿陷的类型及其湿陷性的强弱，是各种地质因素长期的综合作用演变的结果。地质年代对黄土的工程性质的影响方面包括物理性质(孔隙比、密度)，力学性质(各种强度和压缩性)和水理性质(湿陷性，湿陷起始压力)。因为黄土成岩作用中的压密作用和盐类对黄土颗粒的胶结作用的程度，取决于作用的时间，在成岩作用中，压密作用及作用的时间对黄土的工程性质的影响尤为突出，而作用的时间是黄土获得强度的主要条件，时间越长，上述两个作用的程度就高；相应地，黄土的天然干密度 γ 值由小变大，孔隙比 e 值则由大变小，抗剪强度也相应地提高，对应的承载力也就越高。因此，黄土形成的地质年代，对它的强度有着显著影响，在评价黄土的工程性质时，必须对地质年代给予应有的重视。正确地确定黄土的地层对于确定地基的工程性质十分重要，

对黄土的地层划分和特性以及不同地层对应的统计结果汇总于表 4－3 和表 4－4。

表 4－3　　不同地层土性特点[7]

年代		黄土名称			成因		备　注
全新世 Q_4	近期		新黄土	新近堆积	次生黄土	以水成为主	杂乱无章,具有不均性,高压缩性强湿陷性
	早期	马兰黄土		一般湿陷性黄土		以风成为主	浅黄,一般具有湿陷性
晚更新世 Q_3					原生黄土		
中更新世 Q_2		离石黄土	老黄土	非湿陷性黄土			褐红,一般不具有湿陷性或在高压下具有轻微湿陷性
早更新世 Q_1		午城黄土					

表 4－4　　黄土的地层类型与地基承载力的关系统计结果[8]

地层类型			容许承载力(kPa)				
			W(%)	9～10	13～14	18	22～23
			W_L(%)	26	25	27～28	29
			e	1.03	0.97～1.03	0.96	0.86
Q_4	近期	新近堆积黄土		138	122	100	75
Q_3	早期	一般湿陷性黄土		250	233	175	160
Q_2	离石黄土		300～400				
Q_1	午城黄土		400 以上				

4.2.3 地形地貌对地基承载力的影响[7][8][37][38][39]

黄土高原现代地貌是在第三纪侵蚀准平原地貌的基础上经堆积—侵蚀作用塑造而成的。也就是说，自第三纪以来，黄土高原基本上处于以垂直方向差异性运动为主的新构造运动区，这一构造特点基本上控制着地貌骨架的发育过程和方向。受这种区域地质构造的控制，黄土高原地貌骨架呈大区域上的地区性差异，这种差异决定了各区地貌发育、黄土分布、侵蚀特点的不同。地貌类型不同，反映了构成地貌的地层或构造的不同，而地层、构造又和地基的工程性质密切相关，因此黄土地区不同地形地貌对应土体的承载力具有一定差别，地形地貌是影响承载力的一个重要因素，应该充分地认识黄土地区的地貌特征对公路地基稳定性的影响。

根据黄土形成的地区性差异，可以将黄土分布范围划分为：I 青海东部地区、II 陇西区、III 陇东区、IV 子午岭—吕梁山间地区、V 内蒙古南部地区、VI 吕梁山以东地区，VII 河南西部区，如图 4－6[23]。

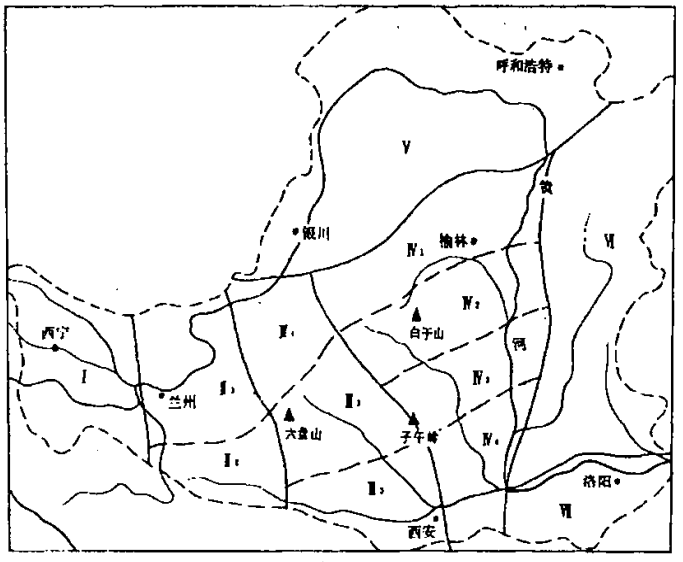


图 4－6 黄土高原地貌分区略图

黄土层分布不均，厚度变化大，其对应的工程力学性质差别大，对于不同阶地的黄土，因其形成年代不同，成岩作用程度各异，因而其地基性质差别悬殊。一般情况下，相对阶地越高的地基含水量越少，其承载力越大；而相对阶地越低含水量越高，其地基承载力越低。不同阶地地基承载力见表 4－5。

表 4－5　　不同阶地黄土地基承载力[7]

承载力（kPa） / 阶地	地　点		
	邵家堂	东岗	南河川
Ⅰ	80	80	90
Ⅱ	120	100	95
Ⅲ	130		120
Ⅳ		120	140

西部黄土区地貌有其明显的特点，在六盘山以西的黄土分布区，经常可以看到黄土陷穴微型地貌，这种微型地貌既能反映出该层黄土有自重湿陷性，同时也说明是特定地貌条件下的产物，陷穴多产生在台地阶地边，和谷坡附近或沟床的底部等位置。在黄土高原地貌主要有梁、塬、峁单元，还有平坦地形和沟谷地貌，不同的地貌单元有其特定的成因、工程地质和水文地质条件、土的物理和力学状态，这些差异对地基承载力有显著的影响。在黄土区，一般将其分为五个地貌区[24]：①六盘山以西的梁峁区；②六盘山以东的梁峁区；③黄土高原中部及南部的塬区；④山间盆地区；⑤河谷区。

4.3 地基承载力与黄土物理力学指标

通过室内土工试验，可以得到地基土的物理力学指标，如含水量、密度、孔隙比、液限、塑限、压缩系数、粘聚力、内摩擦角、压缩变形模量等。黄土地基承载力和这些指标均有一定的联系[7][8][37][38][39][40][41][42]。

4.3.1 含水量 W

水对地基稳定性起着非常重要的作用，尤其对特殊土质的黄土地基。黄土是干旱和半干旱地区特有的地质体，黄土地区的自然降雨量较少，地下水位往往较深，和这种环境相适应的地质体—黄土，如果外界条件变化，如含水量增加，则从物质组成到结构构造上就会发生相应的变化，产生湿陷性、强度降低等；含水量对黄土的影响，通过工程事故调查和试验对比结果显示，当含水量增加或减少 1.0%就会使强度产生量的变化，对湿陷性产生质的影响。国内外许多资料都证明，由于黄土形成特殊的地理和自然环境，决定黄土具有对水特殊的敏感性，含水量对黄土的工程性质影响显著。

由于黄土不同程度地具有湿陷性，而引起湿陷性的主要原因是含水量的变化，黄土湿陷并不是达到浸水饱和时才发生的，而是当浸水到一定程度便开始湿陷，含水量增加引起黄土湿陷，黄土在湿陷前后的工程性质差异很大，同时当湿陷性黄土层被水浸湿饱和之后，在失去原来的湿陷特性的同时，其一系列物理、水理和力学性质均发生了变化，变成了另外一种土，湿陷后的黄土对应的物理力学性质产生相当大的变化，粘聚力 c、内摩擦角 ϕ 值减小，强度降低，变形量大。

黄土工程性质比较特殊，保持原始含水量时结构稳定，含水量增加时，结构稳定性降低。因此，黄土地基性能的变化取决于含水量的增减，在达到饱和之前，是以承载力的降低为主，在接近或达到饱和时，则以湿陷性变形为主。载荷试验确定的黄土地基承载力与相应的含水量的散点图见图 4－7。

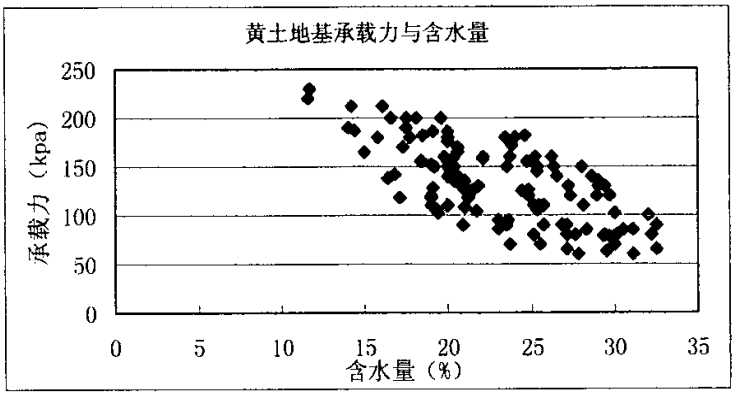


图 4－7 黄土地基承载力与含水量

由图 4－7 可见，随着含水量的增加，黄土地基承载力呈现出比较明显的降低趋势。含水量是影响黄土地基承载力的最敏感因素。

4.3.2 液限W_L和孔隙比e

液限W_L表示黄土的界限含水量，反映了黄土的状态特征。黄土的液限值变化范围主要在 20%～35%之间，属于中至低液限粘土。当液限在 30%以上时，黄土的湿陷性较弱，且多为非自重湿陷性黄土。当液限小于 30%时，则湿陷性一般较强烈。液限越高，黄土的承载力也越高。液限W_L对承载力影响程度仅次于含水量对承载力的影响。

液限W_L随区域变化具有较明显的规律性，从西北到东南有增大的趋势，但在同一区域内变化幅度不大。表 4－6 中列出了液限值在黄土地区的变化情况。

表 4－6　　黄土地区液限随区域变化规律

地区	陇西地区	关中地区	陇东、陕北地区	山西、河南地区
W_L (%)	24～28	26～31	25～29	26～32

孔隙比e是用来评价土的密实程度的指标。孔隙比e越小，说明土体越密实，颗粒相互连接紧密，压缩性较低，抗剪强度较高，土体对应的承载力也越高。黄土地基承载力与孔隙比的散点图见图 4－8。随着孔隙比的增加，黄土地基承载力明显减小。孔隙比是对黄土地基承载力影响较大的因素。

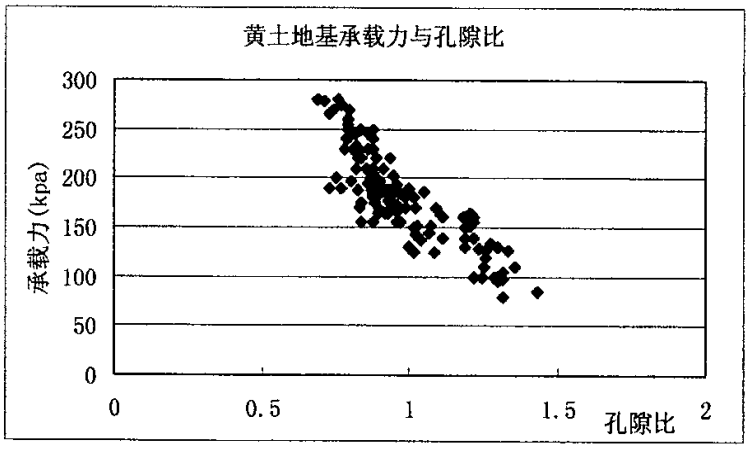


图 4－8 黄土地基承载力与孔隙比

4.3.3 塑限W_P、塑性指数I_P和液性指数I_L

塑限W_P和液限W_L是粘性土的重要物理性质指标，和塑性指数I_P、液性指数I_L共同反映土体的稠度指标，它们反映了水对土性状的影响。塑限W_P表示黄

土的另一界限含水量，反映了黄土的状态特征。塑性指数$I_P=W_L-W_P$，I_P越大，表示土越具有高塑性。液性指数$I_L=(W-W_P)/(W_L-W_P)$,表示土体的一个综合性指标。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTJ024－85）[3]，按照液性指数I_L可将土区分为不同状态：

$I_L<0$　　为坚硬、半坚硬状态；

$0\leqslant I_L<0.5$　　为硬塑状态；

$0.5\leqslant I_L<1.0$　　为软塑状态；

$I_L\geqslant 1.0$　　为流塑状态。

经统计，黄土地基土的塑限、塑性指数和液性指数变化情况如表4－7。塑性指数变化范围在3.3～17.5，而大多数在9～12。液性指数在零上下波动，对位于塬、梁、峁和高阶地上的黄土，由于含水量常低于塑限，其液性指数小于零；低阶地黄土液性指数在0～0.5之间变动；地下水位以下黄土（属非湿陷性）的液性指数则接近或大于1.0。所以，大多数湿陷性黄土处于坚硬或硬塑状态，承载力较高，而压缩性为中等或偏低。

表4－7　　黄土地区塑限、塑性指数和液性指数的变化情况

指标	塑限W_P (%)	塑性指数I_P	液性指数I_L
范围	14～21	3．3～17.5	0上下波动

黄土的粒度组成以粉粒为主，但其性质却与一般的粘性土具有共同特征。塑限、塑性指数和液性指数等物理性质指标反映了土中粘粒含量，即塑性的大小。粘粒在土中起粘结作用，它把较大颗粒粘结团聚在一起，使土具有一定的结构强度。同时，粘粒填充较大颗粒间的孔隙，使土的孔隙率降低，密实度增大。所以黄土的塑限、塑性指数较大时，说明其粘粒含量多，粘性强，承载力高。我国黄土中粘粒含量有由西北向东南渐增的趋势，黄土地基承载力也有由西向东、由北向南逐渐变大的趋势。黄土地基承载力和塑限的关系比较密切。

4.3.4 粒度成份与黄土地基承载力

黄土中的粒度成份是指土中各种不同粒组的相对含量（以干土质量的百分比表示），它可用来描述土的各种不同粒径的分布特性。黄土的粒径基本上由0.25mm以下的颗粒组成，且以0.05～0.005mm粉粒为主，其含量之平均值多大于50%。我国黄土的粒度成份，自西部、北部的青海、甘肃、陕北、山西等省区向东部、南部的陕西关中、河南、河北、山东等省区有细粒粘土颗粒逐渐增多，较粗粒逐渐减少的趋势。总的来看，两者之间的不同粒级的变化幅度和彼此关系

基本接近。而马兰黄土的砂、粉粒含量范围大于离石、午城黄土，粘粒含量则小于后者。不同地区和不同成因时代黄土粒度组成的具体资料分别见表 4－8 与表 4－9。总的来说，黄土的厚度与粒度组成均从黄土高原的西北往东南减小，变细[41]。

表 4－8　　我国黄土的粒度组成（%）[8]

地区	粒　　径(mm)		
	砂粒(>0.05mm)	粉粒(0.05～0.005mm)	粘粒(<0.005mm)
陇西	20～29	58～72	8～14
陕北	16～27	59～74	12～22
关中	11～25	52～64	19～24
山西	17～25	55～65	18～20
豫西	11～18	53～65	19～26
总体	11～29	52～74	8～26

表 4－9　　不同成因时代黄土粒度组成（%）[40]

黄土类型	>0.05mm	0.05～0.005mm	<0.005mm
马兰黄土	5～17	18～71	7～36
离石－午城黄土	9～41	38～68	5～44

对于不同地层的黄土，其粒度组成也有较大的地带性分布规律。在黄土堆积序列上，早更新世黄土的粘粒含量一般为 30～40%，并且在区域上无明显的方向性变化；中更新世黄土粘粒含量一般为 20～30%，在区域上从北向南粘粒含量略有增加，并与其所在位置的地理环境有关，亦即与黄土形成时期的堆积速度有关，晚更新世至全新世黄土反映出较强的区域分布规律，自北向南、自西向东，粘粒含量增加，砂粒含量减少，同时也受到所处的地理环境的影响，例如北部靠近毛乌素沙地的局部黄土区，其全新世黄土状土中的粗粒(大于 0.05mm)含量可高达 50%以上。

总之，黄土中的颗粒成份的含量有一定变化规律，从西北到东南土体颗粒含量变细，在竖向垂直方向上，从上到下颗粒变细，这个变化规律正好和黄土的形成规律相一致。黄土粒度的变化规律和对应的土体的工程力学性质有一定的联系，颗粒越细土体越密实，对应的孔隙比越小，天然密度越大，对应的土体抗剪强度越大，承载力越大。

4.3.5 湿陷性对黄土地基承载力的影响

湿陷性是黄土的一个重要特性，也是影响黄土地基承载力的重要因素。评定

黄土的湿陷性可用湿陷系数 δ_s 来判定，黄土的湿陷性与土体内部结构有关，黄土具有肉眼可见大孔隙，同时黄土中含有大量多种可溶盐和特别的矿物、化学成份，它的存在既对黄土显微结构的形成有影响，也对黄土一系列性质有制约作用，尤其是对湿陷性黄土更为突出。黄土的湿陷性对地基承载力构成不利的影响，分析黄土的湿陷性对地基承载力的确定具有重要的意义。

当黄土遇水产生湿陷性，湿陷前后黄土的工程力学性质差异性较大，在产生湿陷性以前，土体处于稳定状态，遇水湿陷后，土体的强度迅速降低，对自重湿陷黄土还会产生自动塌陷现象。

湿陷性黄土的天然含水量在 3.3～25.3％之间变化，其大小与场地的地下水位深度和年平均降雨量有关，在大多数情况下，黄土的天然含水量都较低。在塬、梁、峁上的黄土，由于地下水位埋藏较深，含水量通常只有 6～10％；低级阶地上的黄土地下水位较高，其含水量在 11～21％之间，地下水位以下的饱和黄土，含水量可达 28～40％。湿陷性黄土的饱和度在 15～77％之间变化，多数为 40～50％，即处于稍湿状态，其湿陷性一般较强，随着饱和度的增加，湿陷性减弱，当饱和度接近于 80％时，湿陷性就基本消失。

天然含水量低时，湿陷性强烈，但土的承载力却较高，随着含水量的增大，湿陷性逐渐减弱。在含水量相同时，黄土的湿陷变形随增湿程度的增加而增大；对非自重湿陷性黄土，其浸水饱和后的总变形与天然含水量的大小无关。例如，在三门峡地区，当含水量大于 23％，土已不具有湿陷性或湿陷轻微；西安地区当含水量大于 24％、兰州地区含水量大于 25％时就不具有湿陷性，但土的承载力却大幅度降低[27]。

黄土之所以具有湿陷性，是因为黄土中含有可溶盐。黄土中的可溶盐包括易溶盐、中溶盐和难溶盐三种。易溶盐是指钠、钾、镁和钙的氯化盐类，碳酸盐和硫酸盐（NaCl、KCl、Na_2SO_4 、Na_2CO_3），中溶盐是指石膏（$CaSO_4$），难溶盐是指碳酸钙（$CaCO_3$）。可溶盐的种类和含量与黄土的成岩作用有关，影响着黄土的工程性质。当可溶盐是固态时，对土粒起胶结作用，当其溶解呈离子存于土中时，其中的阳离子和土粒表面吸附的阳离子发生置换，这两种不同性质的作用对黄土的工程性质有较大的影响。

自重湿陷黄土的含盐量高于非自重湿陷黄土，其中易溶盐含量是非自重湿陷黄土的 7.6～8.5 倍，中溶盐含量是 5～14 倍。含盐量多的黄土，一般地说，其结构强度大，遇水溶解后结构强度丧失的多，残留强度小，因而能够克服周围土的

阻力而自行湿陷变形；含盐量少的黄土，结构强度丧失的少，残留强度大，克服不了周围土的阻力，因而不能自行湿陷变形。因此，自重湿陷性与非自重湿陷性不同的根本原因在于残留强度的大小，而残留强度的大小决定于黄土的含盐量。

为此采集了公路黄土地基四个试验场的原状黄土部分土样，做了黄土易溶盐试验，结果见表 4－10。

表 4－10　　黄土易溶盐试验结果

各项 / 取土地点	取土样个数	平均可溶盐含量(%)	平均 PH 值
甘肃兰州	5	0.135	8.13
山西介休	6	0.063	8.32
陕西阎良一级阶地	6	0.075	8.38
陕西阎良二级阶地	5	0.077	8.48

从试验数据可知，平均可溶盐含量有很大的地域性，兰州地区黄土的平均可溶盐含量远远大于介休和阎良，这个变化规律和黄土的湿陷性从西北到东南呈递减是一致的；这几个地区黄土平均 PH 值相当，相差不大，都大于 8.00，呈碱性。

各不同区域内黄土中含盐量的变化范围对照如表 4－11。

表 4－11　　不同区域黄土的含盐量[7]

地区	中溶盐(%)	难溶盐(%)
陇西	0.20～1.04	0.90～12.0
陇东、陕北	0.10～0.15	12.80～15.12
陕西关中	0.10～0.20	9.00～12.02
山西	0.03～0.10	0.29～11.00
河南	0.01～0.10	8.00～12.00

4.3.6 压缩模量 Es 与黄土地基承载力的关系

黄土地基承载力体现了地基土强度和变形两个方面的综合特征，而压缩模量 E_s 反映了土体的应力应变关系。压缩模量 E_s 的应变均为总应变，其中包括弹性应变和塑性应变，两者的区别主要在于地基土在外荷载作用下有无侧限。因此，从理论上讲，压缩模量 E_s 在一定程度上反映了地基承载力的大小。

黄土的压缩试验资料表明，西北地区原状黄土多为中压缩性土及高压缩性土，压缩系数与黄土的成因时代有关。Q_4、Q_3 黄土的压缩性大于 Q_2 及 Q_1 黄土，沉积时间愈久，压缩性愈小。

根据单轴压缩试验，土的压缩模量表示如下[42]：

$$Es=\frac{d\sigma_z}{d\varepsilon_z}=\frac{1+e_0}{p_2-p_1}=\frac{1}{M_v}=\frac{(1+e_0)\sigma_0}{0.434C_c} \qquad (4-3)$$

式中：e_0—土的天然孔隙比；

C_c—压缩指数；

M_v—体积压缩系数。

上述变形参数都是在侧限条件下（ε_x=0）测定的，与土体的实际变形条件不完全符合，因为实际土体的变形都有侧向变形（$\varepsilon_x \neq 0$）。但在均布荷载作用下，用上述压缩变形参数计算的变形量（S）尚能符合实际。

为了分析黄土地基承载力与压缩模量之间的关系，选取了青海、甘肃、关中、山西四个地区共计 69 个试验点的实测试验资料作为统计样本。压缩模量与地基承载力的散点图如图 4—9。

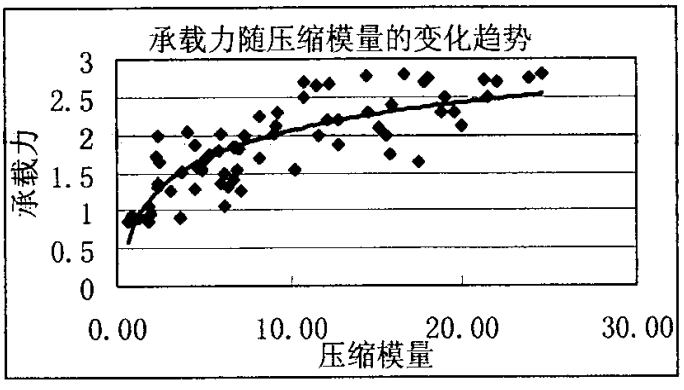


图 4—9 黄土地基承载力随压缩模量的变化趋势

黄土地基承载力和压缩模量之间的统计回归关系为：

$$f_{ak}=54.13\ln(E_s)+80.4 \qquad (r=0.80) \qquad (4-4)$$

式中：f_{ak}—地基承载力特征值（kPa）；

E_s—压缩模量(MPa) 。

4.4 地基承载力与黄土微观结构特征

黄土具有结构特性，其结构从西北向东南存在规律性递变。在区域上其粒度组成、孔隙、矿物含量等特性存在从西北向东南，分别变细、减小，颗粒之间的胶结作用依次增强，尤其以成壤作用较弱的马兰黄土结构表现最为特征。黄土结

构的这种区域分布特征有力地支持了黄土形成过程中风力的主导作用，以及黄土沉积环境的地形、地貌、气候、水力作用等条件对黄土结构的制约。黄土的工程力学性质与其结构密切相关[7][8][10][11][37][38][43][44][45][46][47]，黄土的结构特征与其工程力学性质有内在的联系，但由于微观结构还不能量化，仅能用定性语言描述。因此，目前，从微观上分析黄土的结构理论，直接和承载力建立量化关系还不成熟。

4.4.1 黄土的微结构特征

黄土的微结构相当复杂，即使是同一时代的黄土，其成因及其所处的气候地理条件不同，微结构也不同，即使是同一层黄土，也往往有一种以上的结构同时存在。黄土矿物颗粒的接触关系、孔隙以及胶结程度，则是黄土结构中的明显特征。关于黄土微结构的研究以及黄土微结构的特征对黄土工程性质影响方面的研究，主要体现在关于黄土微结构类型以及与之相应的岩性特征方面，将黄土的不同结构类型及其与黄土的岩性特征、地质时代、地理分布归纳于表 4－12 中。

黄土的结构特征是指构成土体的固体颗粒本身特征及与其有关的孔隙特征，以及它们在空间的总体排列形式。它是黄土原始物质沉积后，在一定的气候条件和地质环境中经过风化成土或成壤作用形成的。它决定了黄土岩性的基本性质。因此，黄土的显微结构特征是评价黄土工程力学性质的主要依据之一。

黄土的显微结构类型根据胶结特征，可以分为微胶结结构、半胶结结构和胶结结构。然后根据在不同尺度下显示的主体结构特征，按扫描电镜（SEM）和普通显微镜下的特征进行划分。

在 SEM 下，根据孔隙的特征和颗粒之间的接触关系划分为支架大孔隙微胶结结构、镶嵌微孔隙微胶结结构、支架大孔隙半胶结结构、镶嵌微孔隙半胶结结构、絮凝状胶结结构和凝块状胶结结构。

在普通显微镜下，根据孔隙的特征和颗粒之间的接触关系划分为细砂质接触胶结结构、细砂－粗粉砂质接触－孔隙胶结结构、粗粉砂－细砂质孔隙－接触胶结结构、粗粉砂质孔隙胶结结构、粗粉砂质孔隙－基底胶结结构、粗粉砂质基底－孔隙胶结结构、细粉砂质基底胶结结构。

扫描电镜和普通显微镜下结构的相互对应关系[47]如表 4－12。

表 4－12　　黄土中显微结构的类型及其关系

湿陷性由强减弱至消失↓	风化成土作用程度由弱增强↓	显微镜结构类型			地质时代由新至老↓	区域上由西北向东南↓
		扫描电镜下	结构组合	普通显微镜下		
		支架大孔隙微胶结结构 镶嵌微孔隙微胶结结构	微胶结结构组合	细砂质接触胶结结构		
		支架大孔隙半胶结结构 镶嵌微孔隙半胶结结构	半胶结结构组合	细砂－粗粉砂质接触－孔隙胶结结构 粗粉砂－细砂质孔隙－接触胶结结构		
		絮凝状胶结结构 凝块状胶结结构	胶结结构组合	粗粉砂质孔隙胶结结构 粗粉砂质孔隙－基底胶结结构 粗粉砂质基底－孔隙胶结结构 细粉砂质基底胶结结构		

（1）骨架颗粒形态和排列方式

黄土的骨架颗粒系指粒径大于 0.005mm 的碎屑颗粒，其中大于 0.1mm 的碎屑颗粒称为“粗颗粒”。在偏光显微镜下所观察到的矿物颗粒主要是这部分颗粒。根据偏光显微镜下统计，骨架颗粒中大于 0.05nun 的颗粒含量从西北向东南逐渐减少。西北部黄土中的骨架颗粒多为棱角状，而东南部多为滚圆状或次棱角状。黄土的骨架颗粒磨圆度自西北向东南逐渐增高。上述特征有力地支持了黄土风成说的观点。

在 SEM 下，我国黄土中起骨架支撑作用的颗粒按形态大体上分为三类：①各种形态的碎屑颗粒，它是黄土的原始矿物颗粒；②由微细物质构成的外形规则的集粒，它是在黄土物质堆积后风化成土作用初期形成的；③ 钙质被淋溶了的集粒，进一步软化合并而成的团块。从区域分布来看，在毗邻沙漠边缘的黄土中的骨架颗粒主要是表面比较干净的碎屑颗粒，并夹有少量外形规则的集粒；在距沙漠较远的典型黄土区的黄土中的骨架颗粒以碎屑颗粒为主，含有外形规则的集粒；在黄土高原东南部的黄土中，碎屑颗粒被嵌埋在微细物质之中而轮廓不清楚，各种形态的团块增多。黄土中颗粒的形态的这种变化反映当时的区域气候环境。第四纪，西北地区气候干冷，集粒中碳酸钙保存较好（未被淋滤）。颗粒外形规则，具有一定刚性。东南地区气候较湿，黄土中的钙被强烈淋滤，形成团块，团块增多时黄土的湿陷性减弱或消失。

（2）骨架颗粒的排列方式

在 SEM 下，黄土骨架颗粒的排列方式可以分为支架排列和镶嵌排列两种。

晚更新世黄土骨架颗粒以支架排列为主。架排列构成的支架大孔不稳定，是黄土产生湿陷性的主要原因之一。在区域上，西北部的晚更新世黄土主要是碎屑矿物颗粒互相支架，构成土质疏松，力学性质弱。东南部黄土则相反。

在同一剖面中，黄土中骨架颗粒的支架排列和镶嵌排列是相互消长地变化的。随上覆土层荷载的增大以及成土作用的增强，集粒或团粒相互粘结，构成块状坚硬的石质黄土。

（3）孔隙特征

在 SEM 下观察，黄土中粗矿物之间的接触关系可以分为：支架接触、镶嵌接触及分散分布三种。

在 SEM 下观察到的孔隙，一般为 0.02mm 左右，小于 0.02mm 的孔隙为大于 0.02mm 者的 5 倍左右，且时代越久远大于 0.02mm 的孔隙越少。

黄土中的孔隙大致可以分为粒间孔隙、粘粒间孔隙、晶粒内孔隙、与动植物有关的孔洞、次生节理和裂隙及溶蚀孔隙。其中粒间孔隙包括支架孔隙和镶嵌孔隙两种，其含量最大，对黄土的工程性质影响也最大。

（4）胶结物的种类和赋存状态

黄土的主要胶结物为碳酸盐和粘土矿物。

①胶结物的种类

黄土中粒径小于 0.005mm 的微细胶结物的种类有：随颗粒一起搬运的长石、石英、云母、碳酸盐等碎屑及粘土矿物高岭石和蒙脱石等，以及黄土物质堆积后在风化过程中新形成的粘土矿物，如伊利石、蛭石、高岭石、蒙脱石和针铁矿等。

②胶结物的赋存状态

胶结物的赋存状态与黄土形成的环境及后期成壤作用有关。如果黄土的成壤作用不发育，则胶结物一般附着在颗粒物的表面，一般仅有碳酸盐化作用，在颗粒表面形成薄膜。对于粘粒含量大于 25%的黄土，胶结物往往成基质状。如果后期成壤化作用发育，则新生粘土矿物具有光性定向特征，显示成壤现象发育。同时，针铁矿也可以显示定向特征。

4.4.2 黄土微结构试验分析

试验土样取自介休试验场和阎良试验场，均位于汾一渭地堑中，分别是大同至运城高速公路穿越的介休汾河阶地靳凌河冲沟一侧和西安至禹门口高速公路穿越的阎良渭河一级支流石川河阶地。

对选取的实体工程试验场原状土结构的研究，是与前述相应的原地基土物理

力学指标测试、地基承载力现场载荷试验等并行的，以便于寻找黄土地基土结构特征与工程力学特性的相关性。

结构特征研究包括地层结构、土层中土的显微结构和在 SEM 下的微细结构特征。利用显微薄片研究黄土层微观结构的总体特征，如颗粒大小、颗粒的空间关系、颗粒和胶结物的种类及其比例关系、构成土层的主要成分等。而 SEM 下的超显微结构主要予以说明颗粒之间的相互关系及胶结特点。为了进一步说明土层的物质组分，部分样品进行了岩石化学全分析。

（1）介休试验场地黄土结构特征

各层位黄土的结构特征见表 4－13 所示，图 4－10 和图 4－11 分别为其中一幅光学显微照片和一幅 SEM 照片。颗粒的矿物组成为黄土的常见矿物成分，土样的岩石化学全分析结果如表 4－14 所示。

表 4－13　　介休试验场地探井黄土地层及其结构特征

样品编号	深度（m）	显微结构特征		力学特性分析
		光学显微下	SEM 下	
介 1	1.8	含微小钙质结核的粉砂质粘土，碳酸盐颗粒约占 19%，虫孔发育；虫孔内有钙质、泥质沉淀构成衬壁；杂基支撑，含有支架孔隙。	颗粒之间的点状接触和杂基支撑特征，杂基内部以支架孔隙为主	强度偏低，支架孔隙结构在荷载作用下易失稳。
介 2	5.8	粘性粉砂土，碳酸盐颗粒约占 23%，少量虫孔；杂基－颗粒支撑，含有支架孔隙。	粒状矿物颗粒之间的点状－面状镶嵌接触，围成较小的孔隙，团粒内部孔隙微小	强度较高，颗粒及团粒之间结合紧密
介 3	7.8	粉砂土，碳酸盐颗粒约占 11%，少量针铁矿；颗粒支撑为主，泥质胶结，含有较多的支架孔隙。	团粒状集合体之间呈点状接触，具支架结构，团粒内部孔隙较大	强度偏低，支架孔隙结构在荷载作用下易失稳。
介 4	8.5	粘性粉砂土，虫孔发育，碳酸盐颗粒约占 7%；杂基支撑，含有支架孔隙。	颗粒（团粒）之间的镶嵌－点状接触，杂基内部结构呈点状－镶嵌状	强度较高，颗粒及团粒之间镶嵌接触，较紧密
介 5	9.5	粘性粉砂土；颗粒－杂基支撑，含有较多支架大孔隙。		强度中等，杂基支撑者强度偏低
介 6	9.8	粘性砂土，碳酸盐颗粒约占 14%，少量虫孔；杂基－颗粒支撑，含有较多支架大孔隙。		强度中等偏高，胶结作用较好

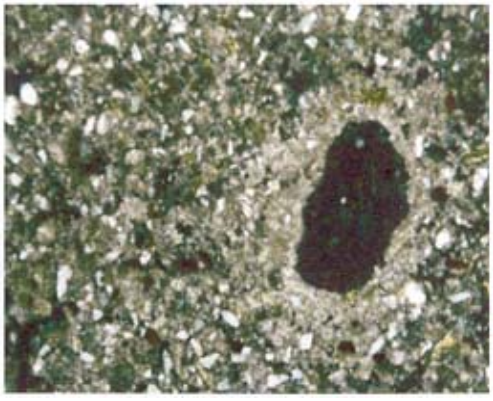


图 4－10 介休试验场地 1.8M 深度处光学显微照片

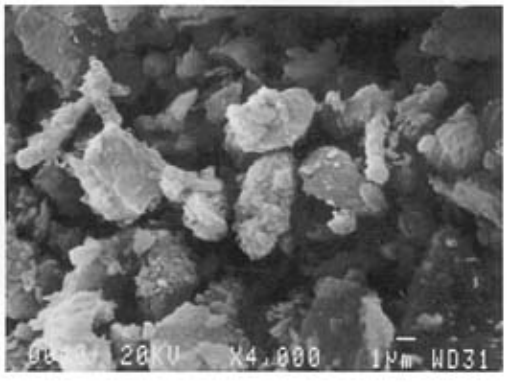


图 4－11 介休试验场地 1.8M 深度处扫描电镜照片

表 4－14　　介休试验场地探井黄土化学成分（%）

样品	SiO_2	TiO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	烧失量	P_2O_5	合计
介7	59.36	0.58	16.15	3.14	1.31	0.10	1.82	4.31	1.31	2.37	8.30	1.12	99.87
介8	62.24	0.53	14.66	2.39	1.52	0.081	1.53	5.36	1.29	2.30	7.62	0.30	99.82
介9	56.83	0.48	15.13	2.18	1.55	0.080	1.97	7.16	1.30	2.12	10.13	0.82	99.75
介10	56.27	0.51	15.08	2.78	1.91	0.098	2.23	7.27	1.18	2.30	9.88	0.55	100.06
介11	56.45	0.54	14.95	2.74	1.71	0.098	1.96	7.08	1.29	2.29	10.00	1.01	100.12
介12	56.95	0.53	15.05	2.34	1.70	0.086	1.99	6.86	1.34	2.11	10.23	0.96	100.15
介13	59.10	0.53	14.60	2.33	1.69	0.086	2.02	6.34	1.38	2.20	8.78	0.76	99.82

（2）阎良试验场地黄土结构特征

颗粒的矿物组成为黄土的常见矿物成分，这一点从土样的岩石化学全分析结果（表 4－15）得到验证。各层位黄土的结构特征见表 4－16 所示，图 4－12 为其中一幅 SEM 照片。

表 4－15　　阎良试验场地（I 级阶地）黄土化学成分（%）

样品	SiO_2	TiO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	烧失量	P_2O_5	合计
阎I-1	58.16	0.60	15.24	3.47	1.32	0.10	2.10	4.65	1.08	2.47	9.39	1.19	99.77
阎I-2	56.08	0.62	15.61	4.14	1.24	0.10	2.20	4.35	1.07	2.61	10.40	0.76	100.18
阎I-3	64.35	0.53	13.96	3.34	1.05	0.12	1.79	3.24	1.40	2.44	6.84	0.81	99.87
阎I-4	68.07	0.54	13.30	2.36	1.09	0.077	1.37	3.40	1.44	2.05	5.47	0.98	100.15
阎I-5	54.74	0.70	15.97	4.28	1.44	0.14	2.66	4.90	1.06	2.69	10.39	1.09	100.06

表 4－16　　阎良试验场地（I 级阶地）黄土地层及其结构特征

样品编号	深度（m）	显微结构特征		力学特性分析
		光学显微下	SEM 下	
阎I-1	1.2~1.4	粉砂质粘土，含有较多大孔隙，孔隙内沉淀有泥质和钙质次生胶结物；杂基支撑，含有大量虫孔和有机质腐烂残留孔洞。	粒状矿物呈孤立状态，粘土矿物和微细粒粒状矿物杂基之间有大量孔隙，多以支架孔隙形式出现。	强度低，在荷载作用，杂基内孔隙优先减小
阎I-2	2.2~2.4	粉砂土，含有 12%左右的碳酸盐颗粒和粘土矿物集合体构成的团粒，大孔隙发育；杂基－颗粒支撑，泥质胶结。	颗粒之间以点接触为主，组成支架孔隙；在大颗粒之间的杂基结合不紧密；粘土矿物多为大小不等的集合体	强度中等。在荷载作用，杂基内孔隙优先减小
阎I-3	3.4~3.6	粉砂质粘土，大孔隙发育；杂基支撑。	粒状矿物呈孤立状态，粘土矿物和微细粒粒状矿物杂基之间有大量孔隙，多以支架孔隙形式出现。	强度低，在荷载作用，杂基内孔隙优先减小，结构失稳
阎I-4	4.4~4.6	粘土含有大量虫孔和有机质腐烂残留孔洞，有淋滤次生颗粒和铁质矿物充填于孔洞中；杂基支撑。		强度低，孔洞较多
阎I-5	5.0~5.2	含有钙质结核的粉砂土，含有 24%左右的碳酸盐颗粒，有少量孔洞；杂基支撑为主，粘土矿物有微弱定向；		强度中等，成岩胶结作用明显
阎I-6	6.2~6.4	纹层状含粉砂的粘土，粘土颗粒具有定向特征；铁矿物定向，杂基支撑。		强度中等，成岩胶结作用明显
阎I-7	7.2~7.4	颗粒支撑的砂黄土；镶嵌状，颗粒分选性良好。		强度较大，结构较稳定
阎I-8	7.4~7.6	含针铁矿的含粉砂的粘土，铁矿物呈浸染状，虫孔发育，含有少量钙质结核；杂基支撑。		强度中等，成岩胶结作用明显
阎I-9	8.0~8.2	含有钙质结核的粉质粘土，含有较多的孔洞，含少量铁矿物；杂基支撑。		强度中等，成岩胶结作用明显
阎I-10	9.2~9.4	粉砂质粘土，含钙质结核，孔洞内充填钙质次生胶结物呈衬壁状，针铁矿具有定向特征，且条带状集中；颗粒－杂基支撑。		强度中等，成岩胶结作用明显，结构较稳定

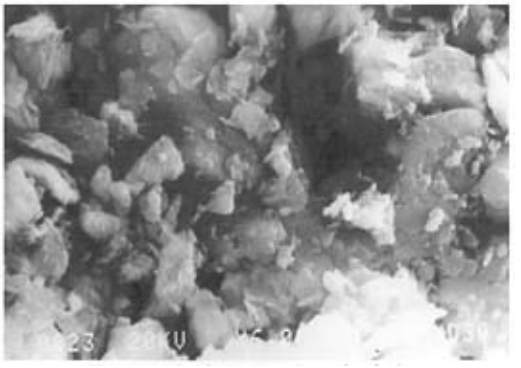


图 4－12 阎良试验场地（I 级阶地）
1.3M 深度处扫描电镜照片

（3）黄土结构特征与工程力学性质分析

两个公路黄土地基试验场的地基土显微镜、SEM 以及岩石全分析结果表明：

①黄土的结构特征会直接影响其工程力学性质，黄土内的结构一般不是单一的。对于两个试验场的黄土而言，具有镶嵌结构的粉砂土强度最大；具有杂基一颗粒支撑的粉砂土强度次之；杂基支撑，且杂基内颗粒间为点接触为主者，强度最低。

②总体上讲，黄土化学组分对结构强度的影响不显著，但是颗粒分选性良好的土层，结构强度偏高。

③发生成岩胶结作用的土层，其结构强度较高。次生钙质沉淀物、矿物的轻微定向、针铁矿的含量，可以作为成岩胶结作用较发育的判别指标。

4.5 小结

根据大量黄土地基承载力载荷试验资料，对影响黄土地基承载力的地理、物理力学指标、微观结构等因素进行了定性或定量分析，得到以下主要结论：

（1）提出了根据现场载荷试验 P－S 曲线确定地基承载力的可操作性强的取值方法；

（2）黄土地基承载力具有明显的区域性变化规律；

（3）含水量是影响黄土地基承载力的最敏感因素，液限和孔隙比是对黄土地基承载力影响较大的因素，黄土地基承载力与塑限的关系比较密切。

（4）黄土地基承载力和压缩模量之间具有良好的相关关系，其统计回归关系式为：$f_{ak}=54.13\ln(E_s)+80.4$。

5 黄土地基承载力区划及回归关系式研究

5.1 概述

如前所述，载荷试验是确定地基承载力最可靠的方法。在不具备原位地基承载力测试的条件下，怎样对地基承载力进行初步评价，是工程技术人员关心的问题。《湿陷性黄土地区建筑规范》（TJ25－78、GBJ25－90）和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024－85)中给出了黄土的地基承载力特征值表，该表是根据黄土地区所做的大量载荷试验资料，以及工程经验的总结，经过统计分析而得到的。通过查表，就可以获得黄土的地基承载力特征值，极大地方便了地基设计工作。但是，黄土分布区域很大，黄土的工程性质随着地域、地形地貌、地层类型的变化而变化，一张地基承载力表很难概括整个黄土地区地基承载力的变化规律。因此，随着对黄土地基承载力研究的不断深入、工程经验的不断积累，《湿陷性黄土地区建筑规范》（GB50025－2004）取消了地基承载力表，确定黄土建筑地基承载力的查表法完成了自己的历史使命。

目前，黄土公路路基地基承载力初步评价尚处于无据可依的状态。对于线长面广的公路来说，一条路线可能穿过不同的地形地貌、地层类型，可能遇到几种工程性质不同的黄土，特别是在黄土山区，填方路段多而不连续，路基地基承载力评价涉及的范围和工作量都比一般建筑工程大得多。因此，为了保证黄土地区公路路基路面的整体稳定性，完善公路路基设计方法，为路基地基设计提供依据，有必要对黄土地基承载力预估方法进行研究。

通过对黄土地基承载力影响因素的分析，得知黄土地基承载力具有明显的区域性变化规律；含水量是影响黄土地基承载力的最敏感因素；液限和孔隙比是对黄土地基承载力影响较大的因素；黄土地基承载力与塑限的关系比较密切；黄土地基承载力和压缩模量之间具有良好的相关关系。

根据以上研究成果，鉴于公路路基黄土地基承载力研究还处于初期阶段，首先对黄土地基承载力进行区划，然后对各区地基承载力进行统计分析，建立地基承载力与地基土物理力学指标之间的回归关系式，或者给出黄土地基承载力表，以此作为公路路基黄土地基承载力初步评价的依据。

5.2 区划思路

5.2.1 区划的目的

黄土分布具有一定的区域性，不同区域内土质变化具有规律性，因而黄土地基承载力亦将具有区域性变化。在黄土分布的区域性基础上，分析总结黄土地区承载力变化的区域性规律，对黄土地区的地基承载力进行区划。区划的结果对于确定黄土地区不同区域、环境、地形下对应的地基承载力具有参考价值，并且对于公路路基的设计和施工具有指导意义。

5.2.2 区划的原则[23][24]

通过研究分析，提出以下区划原则：

（1）根据载荷试验确定的黄土地基承载力的变化规律以及主要影响因素的区域变化规律进行区划；

（2）以黄土地区自然环境气候以及地形地貌因素的综合性和主导性相结合，采用以地基承载力相关分析为基础的主导标志法，从分析承载力的变化情况与公路工程的实际关系出发，选出具有分区意义的主导标志；

（3）按照综合性与主导因素相结合的原则，并遵循地带性和非地带性有关理论进行区划，同时进行地理相关分析对区界进行修正。

5.2.3 区划的依据[1][23][24][38][48]

根据黄土相关区划及前述研究结果，区划的依据如下：

（1）以各种已有的黄土区划为基础，参照现有不同行业从不同角度提出的对黄土地区进行的分区；

（2）将地基承载力大小的分布与黄土的湿陷性分布相结合进行分区；

（3）结合地基承载力主要影响因素的区域分布进行综合分析。

5.2.4 区划的方法

黄土地区地基承载力的区划主要根据是黄土分布的地域性特性、黄土的工程地质类型和对应土体的工程力学性质的变化规律，在分析各区域地基承载力差异性的基础上，与黄土地区湿陷性的差异性相联系，并结合黄土地区公路工程的特点以及黄土地区物理力学指标随区域的分布和变化情况。根据对公路工程具有控制作用的地理、气候环境因素，强调黄土地区独特的地形和地貌因素对地基承载力的影响，对黄土进行区划。

5.2.5 分区的指标

在黄土分布区域内，根据地基承载力的变化规律和黄土地基的湿陷性及湿陷系数的变化作为分区的标准。

（1）在含水量相同或相近的情况下（如含水量在 16%左右），以实测载荷板试验确定的容许承载力值在黄土分布区域内的变化范围为依据，确定黄土地区

的承载力分区。

（2）黄土遇水后具有湿陷性，因此在以地基承载力进行分区时应充分考虑黄土湿陷性区域的变化规律，即湿陷系数在区域上的变化对承载力的影响。

陇西及青海一带黄土大都具自重湿陷性，湿陷系数多在 0.06 以上，虽然天然状态下黄土强度大，但遇水后出现自重湿陷，强度迅速下降，地基承载力急剧减小。山西及关中地带黄土多属非自重湿陷性黄土。天然状态下黄土强度相对不大，遇水后在外力作用下才会出现湿陷性。工程地质界已基本搞清黄土湿陷性的分布情况，黄土的湿陷性从西向东，从北向南逐渐减弱，由自重湿陷性黄土渐变为非自重湿陷性和弱湿陷性。

由于黄土地区特有的地形地貌特征，不同的地形地貌特征下黄土的湿陷性差异较大，对应的地基承载力变化明显，因此这也作为区划的主要标志。

5.3 黄土地基承载力区划

5.3.1 区域划分

根据黄土地区地基承载力的变化规律，按照区划的原则和依据，将我国黄土分为四个大的区域：

Ⅰ区，东部地区（豫、鲁、冀）；

Ⅱ区，关中平原地区；

Ⅲ区，陇东、陕北－晋西地区；

Ⅳ区，陇西地区。

黄土地区地基承载力区划见图 5－1。

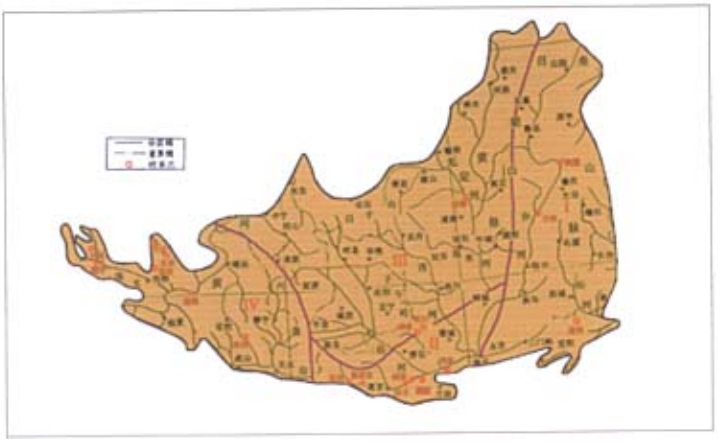


图 5－1 黄土地区地基承载力区划图

5.3.2 区域特征

四个区域的地理环境、相应的黄土地基承载力的变化及物理力学指标特征如下。

Ⅰ.东部地区

本地区的范围为：吕梁山以东太行山以西，北接蒙古高原，南至秦岭，面积分布较广，在地形上是以几条平行的山脉为主，其中夹着一些大大小小的盆地。在这个区域内，黄土分布稳定，湿陷性较弱。在湿陷性最强的梁、峁处湿陷系数一般小于0.06。在山西、冀北部分地区，如在高阶地（包括山麓堆积）的地方部分土体具有自重湿陷性。山西地区低阶地新近堆积黄土Q_4^2分布较普遍，对工程建设有一定的危害性。其它地方土体多属于非自重湿陷性黄土，湿陷性比较弱，湿陷性黄土层的厚度相对比较薄，土体的压缩性低，含水量相对较高。该区域的物理力学指标与地基承载力的变化范围分布见表5－1。

Ⅱ. 关中平原地区

本地区的范围为：南起秦岭，北至北山、子午岭和黄龙山一线，西临六盘山南端的宝鸡，东至中条山，它是一个构造盆地。渭河沿着构造线由西向东流，地势较简单，从渭河河谷中央向南北两面成对称性的堆积阶地、台原和基岩地，湿陷性强的黄土塬处湿陷系数一般小于0.05～0.08，低阶地多属非自重湿陷性黄土。高阶地和黄土塬多属自重湿陷性黄土，而且自重湿陷性黄土层一般埋藏较深，湿陷发生较迟缓。该区域的物理力学指标与地基承载力的变化范围分布见表5－1。

Ⅲ. 陇东、陕北－晋西地区

本地区的范围为：东临吕梁山，西接六盘山，南至北山，子午岭和黄龙山一线，北界长城与鄂尔多斯沙漠相连。地势总的趋势是西北高而东南低。北部地形复杂，地面起伏，破碎剧烈，南部地形较平坦，一般保存了完整的或微有破碎的塬地形。该区域内，北濒临沙漠地区，属干旱区，年平均降雨量在250～400mm。地貌特征以黄土梁、峁常见，黄土土层新黄土为砂质黄土，土质疏松、多孔、稳定性差，土层厚度一般在100～200m。对应的黄土梁、峁处湿陷系数一般在0.06～0.08，自重湿陷性黄土分布广泛，湿陷性黄土层厚度通常大于10m，地基湿陷性等级一般为Ⅲ、Ⅳ级，湿陷性较敏感，对工程建设的危害性较大。该区域的物理力学指标与承载力的变化范围分布见表5－1。

Ⅳ. 陇西地区

本地区的范围为：北以景泰城至长乐堡一带的长城为界，南以西秦岭为邻，

西接祁连山，东临六盘山。它是一个几乎四面环山的山间高原。其中横贯着一条由六盘山起经静宁、定西直过马衔山的东西向高山地带。在这个区域内，年平均降雨量250～500mm，地貌特征以山地和盆地土相间为常见，黄土土层大部分为黄土覆盖，西部和北部土层厚100～300m，东南部厚度50～100m，黄土层中夹有较多的砂、砾石层，多为自重湿陷性黄土，有节理发育。对应的湿陷系数一般大于0.06，自重湿陷性黄土分布很广，湿陷性黄土层厚度通常大于10m，地基湿陷性等级多为III、IV级，湿陷性比较强且比较敏感，对工程建设的危害性大。该区域的物理力学指标与承载力的变化范围分布见表5－1。

表5－1　　黄土物理力学指标与地基承载力的统计情况

指标 / 地区	含水量 W(%)	天然密度 γ(kN/m³)	液限 W_L (%)	塑性指数 I_P	孔隙比 e	湿陷系数 δ_s	地基承载力 f_{ak}(kPa)
东部地区	6～24	14.0～19.0	23～33	8～13	0.6～1.31	0.015～0.08	60～280
关中平原地区	11～28	14.0～18.0	22～32	9～13	0.94～1.21	0.029～0.080	60～250
陇东、陕北－晋西地区	9～24	14.0～17.0	20～31	7～13	0.8～1.20	0.019～0.088	70～280
陇西地区	3～25	12.0～18.0	21～31	4～12	0.70～1.30	0.02～0.220	80～290

上述是我国黄土的主要分布区域，关于其它边缘地带的黄土，由于所收集资料的局限性，在这一方面做的工作较少，可以参考相邻地区的土性和承载力。如冀鲁地区的黄土，属我国黄土分布区的东部边缘地区，本区的黄土多分布于山前低丘及河谷高阶地上，这部分黄土的性质可参考河南相似地区。北部边缘地区，接近沙漠一带，一般黄土中含砂量较大，细砂含量常达23.6%～72.4%，黄土层常与砂层交错出现，有的地方因风化剥蚀强烈，可以参考黄土高原北部地区的黄土的性质。

5.4 黄土地基承载力回归关系式

5.4.1 Q_3 黄土地基承载力回归关系式

不同时代地层黄土的地基承载力差异性大，因此在统计分析过程中把晚更新世 Q_3 黄土、全新世 Q_4^1 黄土和新近堆积黄土 Q_4^2 黄土分开考虑。

Q_3 黄土在我国黄土地区分布相对比较广泛，公路地基主要为 Q_3 黄土。在区划的基础上，以区域为单元进行统计分析。

（1）区域回归关系式的建立

含水量对黄土地基承载力的影响最为显著，随着含水量的增加，地基承载力

有明显的降低趋势。液限 W_L 和孔隙比 e 都对黄土地基承载力有较大影响，考虑到液限 W_L 和孔隙比 e 的变化幅度都比较小，不宜作为独立因素分析。参考《湿陷性黄土地区建筑规范》(TJ25－78)的作法，将孔隙比 e 和液限 W_L 结合作为黄土地基承载力的一个综合影响因素。塑限对黄土地基承载力的影响也比较明显，由于塑限主要根据实验室的人工搓条法获得，其测试结果受人为因素影响较大，同样与塑限值有关的塑性指数和液性指数的精度也受到影响，因此，塑限以及与塑限值有关的塑性指数和液性指数都不宜作为统计变量。

在统计分析的过程中，曾经尝试用不同物理力学指标的多种组合形式和黄土地基承载力建立关系，最终发现含水量 W、W_L/e 和黄土地基承载力相关性相对较好。经比较，多元非线性的回归分析比线性回归分析精度高，因此，决定对 Q_3 黄土选取 W、W_L/e 作为因变量，对黄土地基承载力进行多元非线性回归分析。

在黄土地区地基承载力区划的基础上，以区域为单元进行统计分析，以便体现黄土的区域性特点。

经统计分析，得到各区域的 Q_3 黄土地基承载力回归关系式，见表 5－2。

表 5－2　　Q_3 黄土承载力的区域回归关系式

区域	回归关系式	样本数	相关系数
陇西地区	$f_{ak}=1.4\times10^{4}\times W^{(-6.73\times10^{-3})}-1.99\times10^{-6}\times(\frac{W_L}{e})^{-11.26}-13991$ (5-1)	48	0.93
关中地区	$f_{ak}=232\times W^{-0.226}-44.9\times(\frac{W_L}{e})^{-0.497}-76.6$ (5-2)	79	0.88
陇东、陕北－晋西地区	$f_{ak}=25\times W^{-0.81}-941\times(\frac{W_L}{e})^{-3.44\times10^{-2}}+1069$ (5-3)	46	0.84
东部地区	$f_{ak}=7938\times W^{-6.62\times10^{-3}}-241\times(\frac{W_L}{e})^{-0.644}-7290$ (5-4)	50	0.89

式中：f_{ak}—地基承载力特征值(kPa)；

W_L—液限(小数表示)；

W—含水量 (小数表示)；

e—孔隙比（小数表示）。

（2）区域回归关系式精度分析

以部分黄土工程地点所做的地基承载力和土工试验资料为基本数据，以实测载荷板试验确定的地基承载力为标准，与《湿陷性黄土地区建筑规范》（TJ25－78）不分区域的线性统计公式相比较，考查本分区域非线性回归关系式的精度，基本数据见表 5－3，比较结果表 5－4。

表 5—3　　部分黄土工程地点的地基土试验基本数据

地点 \ 各项指标		含水量 W(%)	孔隙比 e	液限 W_L(%)	承载力实测值 f_{ak}(kPa)
陇西地区	①	15.6	1.038	29.7	204
	②	8.1	1.121	23.4	175
	③	7	0.84	26	278
	④	15	1.14	26	155
陇东、陕北一晋西地区	①	10.1	1.062	26	278
	②	16.9	1.022	33.6	200
	③	23	0.876	31.9	180
	④	14.1	0.908	26.4	210
关中地区	①	16.6	1.093	30.1	200
	②	19.1	1.052	33	186
	③	24.7	1.22	32	155
	④	22.1	1.433	32	175
东部地区	①	28	0.79	25.8	250
	②	27.2	0.825	22.2	180
	③	32.5	0.884	28.2	185
	④	14.4	1.07	25.3	145

表 5—4　　区域回归关系式精度分析

地点 \ 承载力		承载力实测值 fak(kPa)	规范确定值		区域回归值	
			数值	相对误差(%)	数值	相对误差 (%)
陇西地区	①	204	232	13.6	183	10.5
	②	175	235	34.0	157	10.5
	③	278	318	14.4	261	6.2
	④	155	193	24.8	155	0.2
陇东、陕北一晋西地区	①	278	245	11.8	241	13.1
	②	200	253	26.5	197	1.6
	③	180	230	28.0	177	1.7
	④	210	247	17.7	209	0.3
关中地区	①	200	215.7	8.0	186	6.8
	②	186	224	20	181	2.8
	③	155	140.9	9.0	154	0.4
	④	175	132.9	24.0	155	11.3
东部地区	①	250	162.05	35.2	220	12.1
	②	180	125.83	30.1	155	13.6
	③	185	120.27	35.0	204	10.4
	④	145	204.47	41.0	140	3.1

由表 5－4 可知，利用本文区域回归关系式确定的黄土地基承载力比《湿陷性黄土地区建筑规范》（TJ25－78）不分区域的线性统计公式精度大幅度提高。因此，采用区域回归关系式对黄土地区公路路基地基承载力进行初步评价，具有足够的可靠性。

（3）区域回归关系式的应用

①适用条件

区域回归关系式是建立在黄土地区实测载荷试验数据基础之上，载荷试验一般是在土质均匀而且土层较厚的黄土地基上进行的。因此，区域回归关系式原则上仅适用于均质土体的原状黄土地基。

区域回归关系式中所涉及到的参数都是天然状态下地基土的物理力学指标，即含水量为天然含水量，液限为天然状态下的液限值，孔隙比为天然密度情况下的孔隙比。

由于黄土地区多处于干旱或半干旱状态，统计数据主要建立在非饱和黄土基础之上，因此，回归关系式适用于含水量 25%范围以内的黄土地基。

黄土地基承载力区域回归关系式，对于一些边缘地带的黄土具有参考作用。

②相关参数值的获取

载荷试验的影响深度一般为 2～3 倍载荷板宽度，因此，钻探取样的深度至少应在这一范围内，取土样的位置适宜于 2 米左右深度。

如果土样通过钻探获取，应严格按《湿陷性黄土地区建筑规范》规定的程序进行，尽量保证土样不受扰动，并严格密封，以保证室内土工试验前水份不散失，从而测得反映地基土天然状态的含水量、液限和孔隙比。

在区域回归关系式中，液限 W_L 值以《公路土工试验规程》（JTJ051－93）中采用的 100g 圆式锥入土深度为 20mm 作为标准。

③区域回归关系式应用方法

通过现场取土样与室内土工试验可以测得工程地点地基土的液限 W_L、含水量 W 及孔隙比 e，然后带入相应的区域回归关系式就可以计算出黄土地基承载力。

一般情况下，含水量采用天然含水量。当含水量低于塑性时，含水量按塑限计算。

我国黄土地区分布广，地形、地质条件复杂，分布区气候、水文、土质条件多变，这就决定了黄土地区承载力确定的复杂性和变异性。因此在应用区域回归关系式确定黄土地基承载力之前，应进行大量的现场调查。认真做好自然、地质

情况的调查研究工作，充分掌握其特点及变化规律，并做好现场核对，了解当地的具体地质、气候、环境情况，参照该地区同类工程的经验，最后确定出合理的地基承载力值。

5.4.2 Q_4^2 黄土地基承载力回归关系式

对于新近堆积 Q_4^2 黄土，由于其形成的特殊性，只在一些特殊的地区和地点有堆积，而且分布零散，连续性差，因此在确定承载力和各因素之间的关系时，没有按区域分别考虑。在对所收集的 20 份新近堆积黄土实测载荷试验资料进行统计分析后，选取了压缩系数 a、含水量和液限之比 W/W_L 作为变量，对地基承载力进行了多元非线性回归分析，其结果见式（5－5）。

$$f_{ak} = -7630 \times a^{1.02\times10^{-4}} + 18717 \times (\frac{w}{W_L})^{(-1.9\times10^{-3})} - 10969 \qquad (5-5)$$

（r=0.95）

式中：a 为压缩系数,可取 50～150kPa 或 100～200kPa 压力下的较大值。

5.4.3 压缩模量与 Q_3 黄土地基承载力

上一章已经分析了黄土区域内 Q_3 黄土地基承载力和压缩模量之间的关系，黄土地基承载力和压缩模量之间的统计回归关系见式（4－4）。

通过室内压缩试验得到地基土的压缩模量 E_s，就可以应用式（4－4）估算黄土地基承载力特征值 f_{ak}。在黄土地基常见参数范围内，Q_3 黄土地基承载力 f_{ak} 与压缩模量 E_s 的对应关系见表 5－5。

表 5－5　　Q_3 黄土地基承载力 f_{ak} 与压缩模量 E_s 的对应关系

E_s (MPa)	10	15	20	25	30	35	40
f_{ak} (kPa)	200	220	240	250	260	270	280

5.5 黄土地基承载力表

为了便于公路工程技术人员查用，根据 Q_3 黄土地基承载力回归关系式，可以方便地计算出各区域不同含水量、液限、孔隙比情况下所对应的 Q_3 黄土地基承载力，各区域 Q_3 黄土地基承载力见表 5－6～表 5－9。

表 5－6　　关中地区 Q_3 黄土地基承载力表

W_L/e(%) \ W(%)	10	15	20	25
22	215	180	160	145
25	220	185	165	150
28	225	195	170	155
30	230	200	175	160
34	235	205	180	165
36	240	210	185	170

表 5－7　　陇东、陕北－晋西地区 Q_3 黄土地基承载力表

W_L/e (%) \ W(%)	10	15	20	25
22	240	190	170	150
25	245	195	175	155
28	250	200	180	160
30	255	205	185	165
34	260	210	190	170
36	265	215	195	175

表 5－8　　陇西地区 Q_3 黄土地基承载力表

W_L/e (%) \ W(%)	10	15	20	25
22	175	140	110	90
25	215	175	150	130
28	220	185	160	135
30	225	190	165	140
34	230	195	170	145
36	240	200	175	150

表 5－9　　东部地区 Q_3 黄土地基承载力表

W_L/e (%) \ W(%)	10	15	20	25
22	130	110	95	80
25	180	160	145	130
28	220	200	185	175
30	245	225	210	195
34	280	265	245	230
36	290	280	265	250

5.6 小结

本章在实测载荷试验资料统计分析基础之上，借鉴建筑等行业关于黄土地基承载力研究的成果和经验，针对黄土公路路基地基承载力研究早期阶段，以 Q_3 黄土为重点，对黄土公路路基地基承载力初步评价方法进行了研究。

（1）根据黄土地基承载力的地域性变化规律，将黄土地基承载力分为四个区域，即：Ⅰ区，东部地区（豫、鲁、冀）；Ⅱ区，关中平原地区；Ⅲ区，陇东、陕北－晋西地区；Ⅳ区，陇西地区。

（2）将含水量 W、液限 W_L、孔隙比 e 作为变量，建立了黄土各区域地基承载力非线性回归关系式，计算精度较高。

（3）给出了与含水量 W、液限 W_L、孔隙比 e 以及压缩模量 E_s 有关的地基承载力表。

6 黄土地基承载力的模糊评价系统

黄土地基承载力的影响因素很多，有的因素可以量化，如地基土的物理力学指标，有的因素不能量化，如地域、地形地貌、地层类型等。为了全面考虑这些因素的影响，有必要探讨包括定量和非定量因素在内的黄土地基承载力评价方法，以适应公路线长面广、路基地基复杂的情况。

为此，根据收集到的不同地貌单元、地质类型、气候水文条件、湿陷性等条件的黄土地基承载力载荷试验资料，运用模糊数学理论，根据各因素对黄土地基承载力程度影响的不同进行加权，通过模糊关系运算，对每一评价对象赋于一个评判指标，根据模糊关系对黄土地基承载力进行预测，在此基础上，建立黄土地基承载力模糊评价系统。

6.1 模糊综合评判的基本原理

所谓模糊综合评判，就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则，对众多因素影响的某一事物或现象做出总的评价，即对评判对象的全体，根据所给的条件，给每个对象赋予一个非负实数，即评判指标，再据此排序择优[49][50]。

设有两个论域:

$U=(u_1, u_2, u_3, \ldots\ldots, u_n)$

$V=(v_1, v_2, v_3, \ldots\ldots, v_n)$

U 为参加综合评判的因素所组成的集合，称为因素集。

V 为评判结果的评语所组成的集合，称为评价集。

在单因素评判时，第 i 个因素的单因素的评价为:

$R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \ldots\ldots, r_{im})$

它是 V 上的模糊子集，其中 $r_{ij}=\mu_{ij}(u_i, u_j)$，$(0\leqslant r_{ij}\leqslant 1)$；表示第 i 个因素对第 j 个评语等级的隶属度。

由全体单因素评价的模糊子集 $R_i(i=1, 2, \ldots\ldots, n)$，构成总的评判矩阵 R 为:

$$R=\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{11}r_{12}\cdots\cdots r_{1n} \\ r_{21}r_{22}\cdots\cdots r_{2n} \\ \vdots \\ r_{n1}r_{n2}\cdots\cdots r_{nn} \end{bmatrix}$$

实际上，R 就是一个 $U\rightarrow V$ 的模糊关系矩阵。

一般说来，各个因素在总的因素集中所起作用不会完全相同，常用权重来表

示，各因素权重所组成的集合为U上的模糊子集A，记为:

$A=(a_1, a_2, \ldots\ldots, a_n)$

其中，a_i为第i个因素所对应的权重，且$a_i>0$，根据归一化条件有$\sum_{i=1}^{n} a_i=1$。

那么，综合评判的结果B是V上的模糊子集

$$A \cdot R=B=(b_1, b_2, \ldots\ldots, b_m) \qquad (6-1)$$

式中，b_j为第j个评判等级v_j对综合评判所得的模糊子集B的隶属度

$$b_j=\sum_{i=1}^{n} a_i r_{ij} \quad j=(1, 2, \ldots\ldots, m) \qquad (6-2)$$

如果要作出一个选择，通常要根据最大隶属原则，选取最大的b_j对应的v_j作为评判结果，再根据模糊运算带来的信息，在做出评判的基础上，进一步对事物进行预测。

6.2 黄土地基承载力模糊综合评判的数学模型

黄土属于非饱和性土，地基承载力变化范围较大，而且影响因素众多。黄土地基承载力受地层的影响较为明显，在确定地基承载力模型时应考虑持力层的地质年代，划分全新世Q_4和晚更新世Q_3。在同一地层中，按地基承载力的大小将黄土分为强地基、次强地基、中等地基、较弱地基和弱地基五个级别，地基的强度级别与承载力的划分标准见表6－1和表6－2。

表6－1　　全新世Q_4黄土地基承载力分级标准

强度级别	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
	强地基	次强地基	中等地基	较弱地基	弱地基
承载力（kPa）	＞138	122—138	100—122	75—100	＜75

表6－2　　晚更新世Q3黄土地基承载力分级标准

强度级别	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
	强地基	次强地基	中等地基	较弱地基	弱地基
承载力（kPa）	＞250	233—250	175—233	160—175	＜160

由此构成了评价集V，即：$V=(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$

其中：v_1—强地基（S_I级黄土）；

v_2—次强地基（S_{II}级黄土）；

v_3—中等地基（S_{III}级黄土）；

v_4—较弱地基（S_{IV}级黄土）；

v_5—弱地基（S_V级黄土）。

前面已经提到影响黄土地基承载力的因素很多，主要有微结构、颗粒组成、矿物成份、地形地貌和物理性质等，而且错综复杂。在如此众多的影响因素中，在选择评价因素、组成因素集时，基于下列原则：选择的评价因素对黄土地基承载力影响较大，而且便于测试；得到的模型既有可靠的评判效果，又使用方便。

因此，将含水量、密度、孔隙比、液限、压缩系数、地形因素和地质年代等作为评价因素，以此组成因素集。

作为研究基础的200多份黄土地基承载力载荷试验资料中，相应的室内土工试验数据比较齐全，可是其中有些没有提供地形地貌情况。为了充分利用这些资料，同时也为了便于在对地形地貌缺乏了解的情况下应用模糊评价方法，建立了两个模型。

（1）MS－1模型

MS－1模型是以物理性质指标作为评价因素建立的模型，因素集U为：

$U=(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$

其中：u_1—含水量；

u_2—密度；

u_3—孔隙比；

u_4—液限；

u_5—压缩系数。

（2）MS－2模型

MS－2模型是以物理性质指标、地貌类型作为评价因素建立的模型，因素集U为：

$U=(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$

式中：u_6 — 地貌类型，其余符号同前。

6.3 隶属函数的建立

为了求得模糊关系矩阵R，必须建立各评价因素对黄土地基承载力级别的隶属函数。首先应统计分析黄土地基承载力和各影响因素的分布情况，然后根据分布情况确定隶属函数的形式。

黄土是自然历史的产物，其性质具有明显的区域性特点，即使是同类黄土，也会因其沉积年代、方式和过程以及历史上受过的应力作用不同而存在差别。

本文以黄土地基载荷试验和相应土工试验资料为基础，对黄土的各种参数按

区域进行统计。统计结果表明绝大多数指标不拒绝接受正态分布。我国《港口工程结构可靠度设计统一标准》认为，地基土的物理指标比较符合正态分布。力学指标比较符合极值Ⅰ型分布，但大部分也能通过正态分布。国外的有关资料也指出，黄土地基土物理力学参数的概率分布均可以通过正态分布检验。正态分布也是概率分析应用最广泛、使用最简单的一种分布形式，因此，在我国黄土地基承载力分析中，地基土各指标的分布采用正态分布。

运用数理统计方法对影响黄土地基承载力的各因素进行相关分析，通过分析对比各工程地段各项评价因子的作用程度，把各因素分成五个不同层次，使之和评价集 V 相对应，在表 6－3 和表 6－4 中给出各因子的分级标准值。

表 6－3　　全新世黄土 Q_4 评价因子分级标准值

级别 / 物性指标	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
含水量 W（%）	< 9.5	9.5～13.5	13.5～18	18～22.5	> 22.5
密度 γ	> 2.0	1.9～2.0	1.72～1.9	1.6～1.72	< 1.6
孔隙比 e	< 0.9	0.9～0.96	0.96～1.00	1.00～1.03	> 1.03
液限 W_L（%）	> 32	29～32	26～29	24～26	< 24
压缩系数 a	< 0.2	0.2～0.4	0.4～0.6	0.6～1.2	> 1.2

表 6－4　　晚更新世黄土 Q_3 评价因子分级标准值

级别 / 物性指标	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
含水量 W（%）	< 9.5	9.5～13.5	13.5～18	18～22.5	> 22.5
密度 γ	> 2.1	1.96～2.1	1.8～1.96	1.65～1.8	< 1.65
孔隙比 e	< 0.9	0.9～0.96	0.96～1.00	1.00～1.03	> 1.03
液限 W_L（%）	> 32	29～32	26～29	24～26	< 24
压缩系数 a	< 0.16	0.16～0.38	0.38～0.55	0.55～1.1	> 1.1

隶属函数是模糊集合论应用于实际的基石，它用来刻划元素与模糊集合之间的关系，其值域为区间〔0，1〕，反映了元素对模糊集合的隶属程度，隶属程度愈大，其值愈接近于 1，当元素完全属于集合时，则隶属函数的值为 1。

黄土地基承载力不仅总体上有随影响地基承载力分级的物理性质指变化而变化的趋向，而且，这些指标的变化幅度与地基承载力级别有一定关系，同时这些实测的物理量（如 W、γ、e、a、W_L）具有一定的离散性，其分布近似服从正态分布，根据隶属函数的统计计算方法，评价因素对黄土地基承载力级别的隶属函数取为正态型，即：

$$\mu_{ij}(x)=\exp\left[-\left(\frac{X_i-m_{ij}}{c_{ij}}\right)^2\right] \qquad (6-3)$$

对于正态型隶属函数，当 $x_i=m_{ij}$ 时，$\mu_{ij}(x)=1$，既隶属度最大，所以 m_{ij} 就是物理量的平均值。

由分级所给的地基承载力级别，当物理量处于二种级别之间，对二种级别的隶属度应该相同，令其近似等于 0.5，即：

$$\exp\left[-\left(\frac{m_{ij+1}-m_{ij}}{2C_{ij}}\right)^2\right]=0.5 \qquad (6-4)$$

故可求得参数 C_{ij} 为：$C_{ij}=\dfrac{m_{ij+1}-m_{ij}}{1.665}$ (6—5)

式中：m_{ij+1} 及 m_{ij} 分别为该级别物理量的上、下边界值。

根据上述原则可确定两个参数 m 与 c，其值列于表 6—5 和表 6—6。

表 6—5　　全新世黄土 Q_4 对应的 m 与 c 值

级别 / 指标	S_I		S_{II}		S_{III}		S_{IV}		S_V	
	m_{i1}	c_{i1}	m_{i2}	c_{i2}	m_{i3}	c_{i3}	m_{i4}	c_{i4}	m_{i5}	c_{i5}
含水量 W	7.5	2.4	11.5	2.4	15.75	2.7	20.25	2.7	24.75	2.7
密度 γ	2.05	0.06	1.95	0.06	1.81	0.108	1.66	0.07	1.54	0.07
孔隙比 e	0.87	0.036	0.93	0.036	0.98	0.024	1.015	0.018	1.045	0.018
液限 W_L	33.5	1.8	30.5	1.8	27.5	1.8	25	1.2	23	1.2
压缩系数 a	0.1	0.12	0.3	0.12	0.5	0.12	0.9	0.36	1.5	0.36

表 6—6　　晚更新世黄土 Q_3 对应的 m 与 c 值

级别 / 指标	S_I		S_{II}		S_{III}		S_{IV}		S_V	
	m_{i1}	c_{i1}	m_{i2}	c_{i2}	m_{i3}	c_{i3}	m_{i4}	c_{i4}	m_{i5}	c_{i5}
含水量 w	7.5	2.4	11.5	2.4	15.75	2.7	20.25	2.7	24.75	2.7
密度 γ	2.17	0.084	2.03	0.084	1.88	0.096	1.725	0.09	1.575	0.09
孔隙比 e	0.87	0.036	0.93	0.036	0.98	0.024	1.015	0.018	1.045	0.018
液限 W_L	33.5	1.8	30.5	1.8	27.5	1.8	25	1.2	23	1.2
压缩系数 a	0.05	0.132	0.27	0.132	0.465	0.102	0.825	0.33	1.375	0.33
地貌类型 F	85	6.00	75	6.00	65	6.00	55	6.00	35	6.00

根据黄土地区地型地貌的特点，结合对地基承载力的影响，把黄土地区地貌的类型划分为塬区、高阶地、二级阶地、一级阶地、河漫滩，其对地基承载力影响评价值分级见表 6—7。

表 6—7　　地貌类型对应的承载力评价值

地貌类型	塬区	高阶地	二级阶地	一级阶地	河漫滩
评价值	80	70	60	50	40

注：分级地貌类型处于中间过渡状态者，可利用线性内插的方法，得到相应的评价值。

这样，各评价因素对各承载力级别的隶属函数就可根据上述参数全部建立，隶属函数的图形如图 6－1。

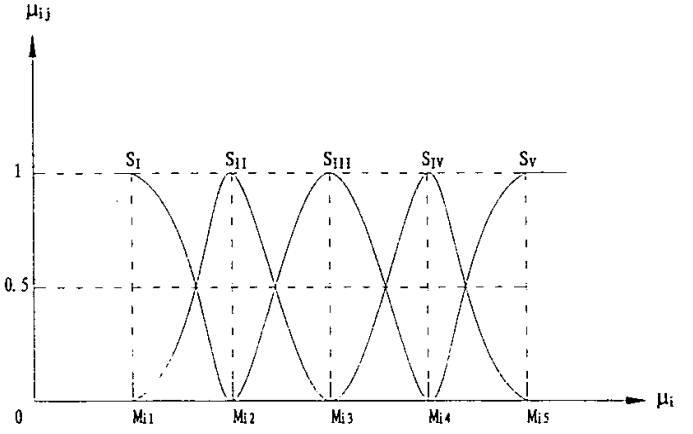


图 6－1 隶属函数的图形

当评定因素的值 X_i 等于某地基承载力级别物理量的平均值 m_{ij} 时，隶属函数的值 $\mu_{ij}=1$，即隶属度最大，说明就单因素评价，应完全隶属于该地基承载力范围；当 X_i 远离 m_{ij} 时，μ_{ij} 就小；直至 X_i 等于相邻承载力级别物理量的平均值，$\mu_{ij}\approx 0$，隶属度最小，说明此时就单因素评价，完全不属于该地基承载力级别。此外，当 X_i 处于两种地基承载力级别物理量范围的边界值时，对两种级别的隶属度相同，且两者都近似等于 0.5，在这种情况下就单因素评价而言，要做出某种选择是最困难的，也就是最模糊的。

由于影响黄土地基承载力因素的多样性，决定了地基承载力规律的复杂性，因此确定合理的隶属函数十分重要。合理的隶属函数应建立在对影响地基承载力各因子大量的统计分析的基础之上。这个过程需要通过不断的探索、总结和完善。

6.4 权重的确定

权重分配是模糊综合评判中的关键之一，综合评判的结果往往与权重分配有关，因此，必须根据工程实际合理地确定权重。

由于各种评价因素对地基承载力的影响是不同的，也就是说，各评价因素在黄土地基承载力模糊综合评判中所处的地位与作用是不同的，因此，其权重分配亦应有所不同，显然，某一评价因素对地基承载力影响愈大，则所占权重就愈大，反之则愈小。

权重的选定包括两个方面：

（1）根据各因子取值的大小而确立的权重，称为数值权重。很明显，同一

个因子取值大小不同，对地基承载力的贡献不同，因此，可根据分级情况和隶属函数来确定该权重。其计算式如下:

$$\alpha_j = \frac{\dfrac{x_j}{\dfrac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} m_{ji}}}{\sum_{j=i}^{n}\left(\dfrac{x_j}{\dfrac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} m_{ji}}\right)} \qquad (6-6)$$

式中： α_j—第 j 个因子的数值权重;

x_j—第 j 个因子的取值;

m_{ij}—分级标准值。

（2）根据各因子本身的特性及其对地基承载力贡献的大小而确立的权重，称为特性权重。特性权重的选取多采用专家打分的方法人为给定。根据已知结果，通过权值反演，最后得到比较合理的特性权重。

在物理性质指标中，密度和含水量是评价黄土地基承载力的基本因素，就密度与含水量相比较而言，含水量显得更为重要。而压缩系数、地貌因素是对密度、孔隙比、液限和含水量的补充，在评价黄土地基承载力中起辅助作用。鉴于此，含水量和孔隙比、密度、液限宜取较大的权重，压缩系数、地貌因素的权重宜小些。同时，通过对黄土地基承载力研究方面具有丰富经验的多位专家进行咨询，根据问卷情况，结合统计分析结果，最终确定各指标对应的特性权重的取值，见表 6－8。

表 6－8　　黄土地基承载力的权重

物性指标	含水量 β_1	孔隙比 β_2	密度 β_3	液限 β_4	压缩系数 β_5
Q_4	0.9	0.8	0.5	0.6	0.5
Q_3	1.0	0.8	0.5	0.6	0.4

地形地貌因素对地基承载力影响程度固然比较大，但物理性质在一定程度上反映了地貌因素对地基承载力的影响。因此，物理性质指标的权重也体现了地形地貌因素所处的地位和作用。而且，地形地貌因素的评定因人、因地差别较大；因此其权重不应过大，取 β_6=0.2。

由此，MS－1 模型的特性权重向量为：

全新世 Q_4 对应的特性权重向量 β =(0.9 ,0.8, 0.5, 0.6, 0.5)

归一化后得： β =(0.273, 0.242, 0.152, 0.182, 0.152)

对晚更新世 Q_3 对应的特性权重向量 β =(1 ,0.8, 0.5, 0.6, 0.4)

归一化后得： β=(0.303, 0.242, 0.152, 0.182, 0.121)

MS－2 模型的权重向量为：

全新世 Q_4 对应的特性权重向量 β=(0.9 ,0.8, 0.5, 0.6, 0.5， 0.2)

归一化后得： β=(0.257, 0.229, 0.143, 0.171, 0.143,0.057)

晚更新世 Q_3 对应的特性权重向量 β=(1 ,0.8, 0.5, 0.6, 0.4 ， 0.2)

归一化后得： β=(0.286, 0.229, 0.143, 0.171, 0.114,0.057)

根据以上两种因素得到的权重 α 和 β，求这两个模糊集的代数积，再通过归一化得到需要的综合的权重 A=(a_j)(j=1～5 或 6)。 a_j 的计算式如下:

$$a_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^{n} \alpha_j \beta_j} \qquad (6-7)$$

式中： a_j —第 j 个因子的综合权重；

α_j、 β_j—分别为第 j 个因子的数值权重和特性权重。

采用这种方法确定权重 A，可以认为比较合理，因为这样确定的权重 A，在综合评价中，基本上反映了各因子之间的“协同”作用，其对地基承载力的评价影响，比单独使用每个权重更为合理。

根据构成模糊综合评判黄土地基承载力级别的因素集与评价集，建立各评价因素对承载力级别的隶属函数，确定了各评价因素的权重，就意味着模糊关系运算所需的参量已具备，从而获得了确定黄土地基承载力模糊综合评判的数学模型。

6.5 模糊综合评判

模糊综合评判是通过如下 A 和 R 的复合运算，求得评价矩阵 B 来实现的。

$$B=A*R \qquad (6-8)$$

式中：B 是 V 的一个模糊子集。

在进行复合运算时，通过比较，选用了分辨性强、丢失信息少的 M(*、+)算子(*为代数运算积，+为代数运算和)，该算子的数学表达式如下：

$$b_i = \sum_{j=1}^{n} a_j r_{ji} \qquad (6-9)$$

求得模糊综合评判结果的评价集 V 上的一个模糊子集 B，B 的表示式为：

$$B=(b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5) \qquad (6-10)$$

式中：b_j 为第 j 个评价等级 v_j 对 B 的隶属度。

得到 B 后，根据最大隶属原则确定隶属关系，选择 b_j 中的最大者所对应的 v_j 作为多因素评判的评判等级，确定所研究的对象属于对应的那个级别；然后再充分利用模糊子集 B 带来的信息，预测该研究对象的地基承载力。

在预测黄土地基承载力时，充分利用 B 的全部信息，同时突出占优势等级的作用，以各隶属度 b_j 的幂为权，取加权平均的方法求地基承载力，算法如下：

$$f_{ak}=\frac{\sum_{j=1}^{5}b_j^k n_j}{\sum_{j=1}^{5}b_j^k} \qquad (6-11)$$

式中：n_j 是等级为 v_j 时参数的规定值。

通过大量的计算分析，最后认为 k 值取 2 比较合理。

根据统计分析的结果，确定了隶属函数采用正态形式，决定了 n_j 的值取每个分级区间的平均值，取值结果如表 6—9。

表 6—9　　n_j 的取值

地基承载力级别	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
Q_4	146	130	111	87.5	62.5
Q_3	258.5	241.5	204	167.5	152.5

6.6 评价系统的应用

6.6.1 模糊综合评判流程图

若给出各评价因素指标值，则可按隶属函数计算式求得模糊关系矩阵 R，从而确定评判结果，进而可以预测其对应的地基承载力大小。为便于应用，采用计算机语言 Visual Basic，以可视化窗口的形式，编制了黄土地基承载力模糊评判软件，只要输入某处黄土的基本参数，就可以方便、快速地计算出地基的承载力值，其流程图见图 6—2。

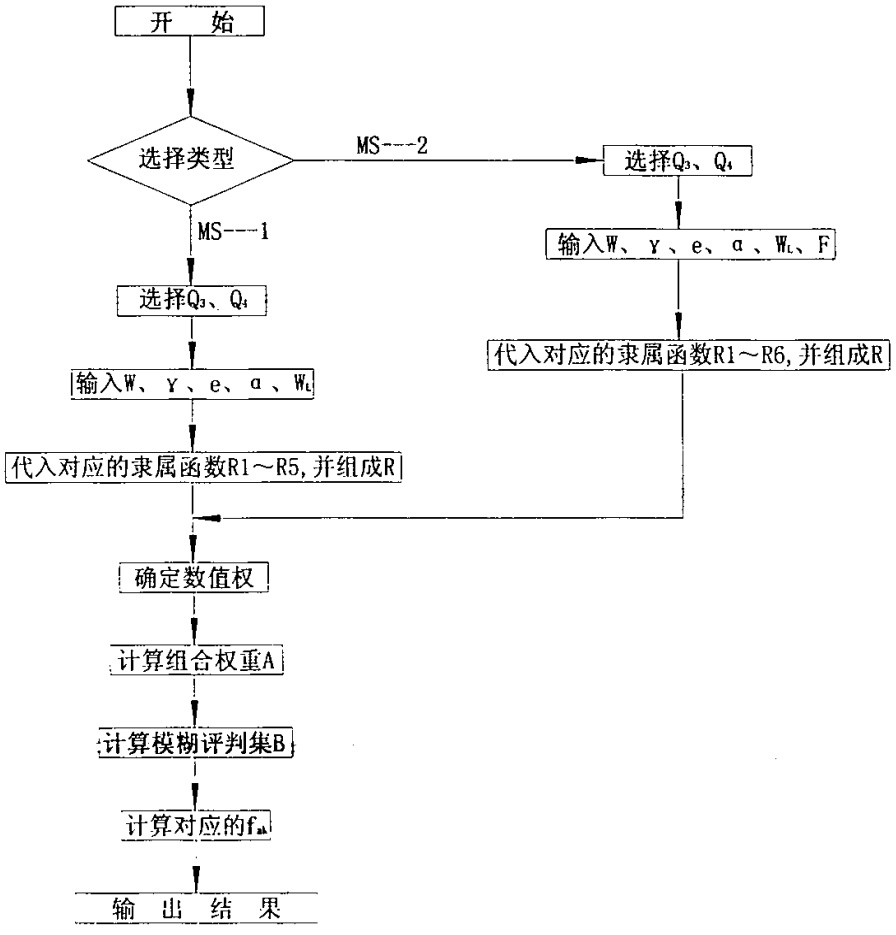


图 6－2 模糊综合评判流程图

6.6.2 应用举例

为了验证模糊综合评判方法确定地基承载力的准确性，选用部分黄土地基承载力载荷试验和相应的土工试验资料，对黄土地基承载力进行预测，预测值和实测数据对比情况见表 6－10～表 6－12。

表 6－10　　MS－1 模型 Q_3 黄土地基承载力预测值

地点		含水量 W (%)	密度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	压缩系数 a	f_{ak} 预测值 (kPa)	f_{ak} 实测值 (kPa)	相对误差 (%)
青海省	①	13	15.6	0.96	26	0.22	207	220	5.9
	②	9	15.4	0.92	27	0.18	210	235	6.4
	③	8	14.6	1.00	27	0.14	199	215	7.4
	④	15	15.9	0.95	26	0.19	197	210	6.2
	⑤	9	14.5	1.03	26	0.37	178	200	11
	⑥	13	14.0	1.19	29	0.44	190	198	4

续表 6-10

地点		含水量 W (%)	密度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	压缩系数 a	f_{ak} 预测值 (kPa)	f_{ak} 实测值 (kPa)	相对误差 (%)
甘肃省	①	13	15.2	1.03	25	0.34	192	223	13.9
	②	9.2	15.6	0.895	26.4	0.16	212	190	11.6
	③	12.6	15.4	0.971	25	0.23	190	165	21
	④	22	18.2	0.81	26	0.56	178	180	10
	⑤	16	18.1	0.73	23	0.78	199	180	10.6
	⑥	19	16.2	0.99	29	0.68	178	165	7.9
陕西省	①	19.6	14.6	1.22	31.3	0.80	168	190	11.6
	②	23.5	17.3	0.935	30	0.335	190	215	11.6
	③	16.6	15.5	1.093	30.1	0.41	187	200	6.5
	④	20.6	14.7	1.217	33	0.55	170	184	7.6
	⑤	14.2	13.6	1.277	30.2	0.71	185	205	9.8
	⑥	23.7	15.1	1.22	33	0.72	160	160	0
	⑦	19.8	14.8	1.185	30	0.59	169	160	5.6
	⑧	17.5	15.4	1.118	28.2	0.60	179	195	8.2
	⑨	11.6	13.2	1.29	31.1	0.16	203	220	7.7
	⑩	19	16.8	0.92	31	0.63	187	190	1.6
山西省	①	32	19.3	0.853	29	0.16	171	180	5
	②	29	18.5	0.895	24	0.37	163	165	1.2
	③	26.2	18.5	0.84	24.2	0.191	165	175	5.7
河南省	①	20.3	16.2	1.012	32	0.16	172	180	4.4
	②	18.8	16.8	0.915	32	0.12	190	183	3.8
	③	20.1	16.3	0.998	30	0.12	177	195	9.2

表 6－11　　MS－1 模型 Q_4 黄土地基承载力预测值

指标 / 地点	含水量 W (%)	密度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	压缩系数 a	f_{ak} 预测值 (kPa)	f_{ak} 实测值 (kPa)	相对误差 (%)
西宁南川	21.6	17.3	0.92	31.1	0.043	143	130	10
陕西高店	20.7	18.1	0.81	29.3	0.062	145	135	7.4
耀县	21	16.4	1.02	26.4	0.11	139.5	120	16.3
武山	17.9	16.1	0.98	23.7	0.062	129.5	130	0.4

表 6－12　　MS－2 模型黄土地基承载力预测值

指标 / 地点	含水量 W (%)	密度 γ (kN/m³)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	压缩系数 a	地型地貌 F	f_{ak} 预测值 (kPa)	f_{ak} 实测值 (kPa)	相对误差 (%)
兰州	18	13.8	1.22	29	0.73	60	173	163	6.1
阎良	22.1	15.1	1.199	30.7	0.23	55	167	175	4.6
铜川	18.7	17.0	0.902	29.1	0.32	65	187	196	4.6
陕北	17.7	19.8	0.619	30.7	0.11	70	226	225	0.4

由表 6－10～表 6－12 可知，采用模糊数学评判系统预测地基承载力，其结果与现场载荷试验实测结果比较接近，大部分试验点的相对误差小于 10% ，这说明采用模糊数学评判系统预测地基承载力的精度较高，方法比较可靠。

6.7 工程实例验证

6.7.1 黄土地基承载力的预测

前文对于黄土地基承载力的初步评价提出了三种方法，即根据含水量、液限和孔隙比回归关系式、压缩模量回归关系式及应用模糊综合评价系统确定的地基承载力的方法。通过对实际工程的应用，验证这三种评价方法的准确性，并对评价精度进行比较，为评价方法选择提供依据。应用情况见表 6－13。

表 6－13　　三种方法对四个试验场黄土地基承载力的预测值

试验点 / 承载力值（kPa）		兰州试验场地	介休试验场地	阎良一级阶地试验场地	阎良二级阶地试验场地
载荷板试验实测值 f_{ak}		134	130	212	300
区域回归关系式	预测值 f_{ak1}	152	167	214	254
	相对误差（%）	13.4	28.5	0.9	15.3
压缩模量回归关系式	预测值 f_{ak2}	121	153	223	247
	相对误差（%）	10.5	17.7	5.2	17.7
模糊综合评价系统	预测值 f_{ak3}	165	184	210	230
	相对误差（%）	20.9	41.5	0.9	23.0

由表 6－15 可见，通过四个试验场地的实测数据与各种方法的评价结果对比，区域回归公式的结果与载荷试验实测数据最为接近，误差范围在 0.9%～28.5%之间，压缩模量回归公式和模糊评判的结果相对较低。

根据黄土地区其它工程地点实测资料，应用区域回归公式、压缩模量回归公式及模糊综合评价三种方法分别对地基承载力进行预测，并与载荷板实测地基承载力值进行对比，结果见表 6－14。

表 6－14　　三种方法对其它试验点黄土地基承载力的预测值

地基承载力（kPa） / 地点		承载力实测值 f_{ak}	区域回归公式		压缩模量回归公式		模糊综合评价系统	
			预测值 f_{ak1}	相对误差（%）	预测值 f_{ak2}	相对误差（%）	预测值 f_{ak3}	相对误差（%）
陇西地区	①	180	182	0.89	172	4.4	198	11.0
	②	250	260	3.90	196	21.6	203	20.7
	③	155	163	5.01	142	8.4	177	15.6
	④	200	198	1.11	191	4.5	203	1.7

续表 6—14

地基承载力（kPa） / 地点		承载力实测值 f_{ak}	区域回归公式		压缩模量回归公式		模糊综合评价系统	
			预测值 f_{ak1}	相对误差（%）	预测值 f_{ak2}	相对误差（%）	预测值 f_{ak3}	相对误差（%）
陇东、陕北一晋西地区	①	180	171	5.1	153	15.0	160	11.1
	②	190	191	0.3	174	8.4	193	1.6
	③	202	242	19.9	167	17.3	171	15.3
关中地区	①	200	189	5.5	265	32.5	182	9.0
	②	184	173	6.1	183	0.3	171	7.1
	③	212	195	7.9	243	14.4	187	11.8
	④	160	162	1.5	165	3.0	160	0
东部地区	①	230	209	9.13	202	12.2	203	11.74
	②	155	145	6.45	182	17.4	177	14.2
	③	180	192	6.7	200	11.1	167	7.22
	④	170	180	5.9	154	9.4	184	8.2

6.7.2 预测精度评价

从总体上看，按区域回归公式、压缩模量和应用模糊综合评判系统三种方法预测黄土地基承载力的结果都是较为可靠的，效果是较理想的，其精度可以满足公路初步设计要求。

（1）区域回归公式预测法

通过 15 个工程实例验证，应用区域回归公式预测地基承载力的相对误差绝大部分都小于 10%，仅有一个点的相对误差为 19.9%，绝对误差值都小于 30kPa。

（2）模糊综合评判系统预测法

应用模糊综合评判系统确定的地基承载力值，相对误差基本上都小于 20%，最大的相对误差为 20.7%，绝对误差值基本上都小于 40kPa。在对收集的工程地点资料进行地基承载力预测时，其精度偏低，这可能是由于缺少地型地貌等的资料而造成的。在今后使用模糊综合评判系统确定黄土地基承载力时，若能获得地型地貌的资料，其测试精度会有所提高。

（3）压缩模量回归公式预测法

应用压缩模量关系式预测地基承载力的相对误差基本上小于 30%，绝对误差值基本上小于 50kPa。个别地点的比较相对误差达到了 32.5％以上，绝对误差达 65 kPa。压缩模量和载荷试验确定的地基承载力在整个黄土地区的回归关系式，相关系数为 0.8 ，基本可以达到工程允许的精度要求。

总之，三种预测方法的对比结果表明，区域回归关系式公式计算的地基承载力精度最高，其次是模糊综合评判系统，压缩模量回归关系式精度相对较低。因此在对黄土地基承载力进行预测时，在各种物理力学指标已知的情况下，建议首先考虑应用分区回归关系式，其它两种方法可以作为参考对比。

6.7.3 预测方法的适用条件

通过比较，结合公路工程的特点，在对黄土地区公路工程地基承载力初步评价时，可以依据以下原则选取评价方法：

（1）已经通过室内试验获得地基土的物理力学指标值时，优先考虑采用区域回归公式来确定地基承载力值；

（2）同时获知路基工程地点地形地貌等特征时，可以应用模糊综合评判系统来确定地基承载力；

（3）已经测得压缩模量 E_s，也可以使用压缩模量回归公式计算地基承载力，其结果可供参考。

6.8 小 结

本章应用模糊数学方法，建立了黄土地基承载力模糊评判数学模型，确定了评价因素及其隶属函数和特性权重，编制了计算机计算程序，通过计算分析，得到以下结论：

（1）选择与黄土地基承载力密切相关的含水量、天然密度、孔隙比、液限为基本因素，同时考虑压缩系数和地形地貌的影响，作为评价因素集，既抓住了主要矛盾，又使黄土地基承载力模糊评判数学模型不致过于复杂。

（2）根据评价因素与黄土地基承载力的统计关系以及实测物理性质指标的分布规律，基本符合正态分布，因此，选用正态型隶属函数是合理的。

（3）在确定权重时，通过专家打分和综合分析，确定的特性权重，有较充分的根据和一定的代表性。

（4）可视化窗口的计算机计算程序实现了黄土地基承载力模糊评判的简单操作，为工程应用提供了可能性。

（5）运用黄土地基承载力模糊评判方法得到的计算结果表明，用模糊数学方法评价黄土地基承载力是可行的，其预测精度较高，可以满足公路路堤黄土地基承载力的初步评价需要。

7 公路路堤与地基结构的有限元分析

以载荷试验为基础，对黄土地基承载力进行评价后，还要根据地基上的结构物的具体情况，进行验算，检验地基是否满足结构物的应力和变形要求。显然，对于公路路堤来说，不同的填料、不同的填高、不同的路基宽度，对地基承载力的要求也是不相同的。黄土地区公路地基应满足一定强度和变形要求，才能保证路基路面的结构稳定性。为此将地基与路堤作为一个整体建立有限元模型，计算分析地基土力学特性、填土几何尺寸和力学特性等参数对路表变形的影响，以及路表与地表沉降变形之间的关系，为公路路堤地基设计方法研究提供依据。

7.1 有限元计算模型及基本假设

7.1.1 力学模型[51][52][53][54][55]

采用 ANSYS 结构静力分析软件，按平面应变问题来分析计算路堤与地基沉降变形。选用的是 PLANE42 平面单元，PLANE42 单元一般使用于二维固体结构中，此单元可以作为平面单元，即可以用于平面应变，也可以用于平面应力分析。此单元在每一个节点上有两个自由度。

考虑到路基填土和地基土材料强度较低，且结构较为松散，宜作弹塑性材料处理。因此，选用 Drucker－Prager 准则对它们的力学特性进行计算分析。DP 模型是一种弹塑性模型，即把总变形分成弹性变形和塑性变形两部分，分别计算。

7.1.2 计算前提与基本假设

（1）假定路堤填土荷载一次填筑而成，不考虑地基土应力历史，只计算地基在路堤荷载作用下发生的最终沉降变形；

（2）地基土充分固结，不计地基土自重，只分析路堤自重作用下，路堤、地基沉降变形规律；

（3）路堤填土压实度满足设计施工规范要求，地基为均质体，对地基土部分采用变形模量作为刚度指标；

（4）路堤与地基之间完全连续接触；

（5）忽略汽车荷载作用。

7.1.3 几何模型

考虑到结构的对称性，只需取模型的一半进行计算与析，如图 7－1。图中上部梯形部分为路堤，B 为路基宽度，h 为填土高度，m 为路堤边坡坡率；下部矩形为地基。

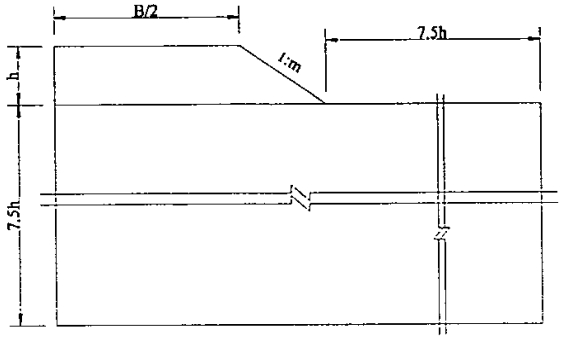


图 7－1　路堤与地基结构有限元几何模型

模型的边界条件、网格化分情况见图 7－2。

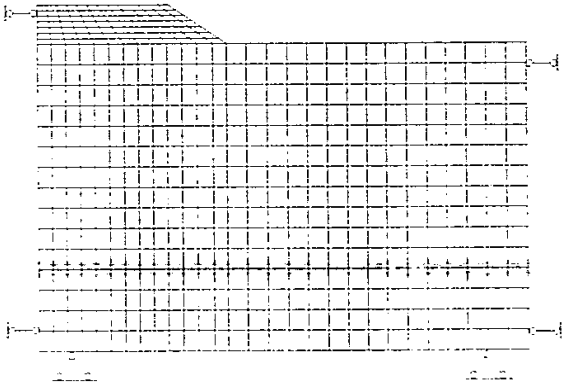


图 7－2　有限元模型边界条件和网格划分示意图

7.1.4　工程实例验证

修建在黄土地区的西安至宝鸡高速公路，其中路段 K81+940 ～K82+060,填土高度为 4.16 米，曾经被作为路堤沉降观测段。土性参数数值如表 7－1 所列。用于观测路基沉降变形的沉降杯从地面开始，沿路堤高度分五层埋设，每一层沉降杯分别位于中央分隔带、超车道中央、行车道中央和路基边缘下方。

表 7－1　　西宝高速公路观测段土性指标[56]

填土土性指标				
重度 γ (kN/m^3)	回弹模量 E_0 (MPa)	泊松比 μ	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ
17.4	38	0.35	39.2	24°
地基土土性指标				
变形模量 E (MPa)	泊松比 μ		粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ
9.7	0.35		27.4	23°

采用观测路段提供的参数，用有限元法计算地基最终沉降，与竣工后 900 天观测的地基沉降量[56]比较结果见表 7－2。

表 7－2　地基实际观测沉降量与有限元计算沉降量对比结果

点位	实际观测沉降量(cm)	有限元计算沉降量（cm）	误差（%）
超车道中央下方	13.6	13.2	－2.9
行车道中央下方	12.5	12.9	+3.2
路基边缘下方	11.8	12.3	+4.2

对比结果表明，有限元计算的地基沉降量与实测值最大相差 4.2%，这说明所选取的有限元计算方法是正确可靠的。

7.2　公路路表沉降变形计算分析

地基在路堤的自重作用下，会产生一定的变形，并引起路堤表面发生沉降。从路基路面的结构稳定性和使用性能出发，不希望路表产生过大的沉降量和不均匀沉降。

从路堤与地基结构的有限元分析模型可以看出，路堤及地基的变形主要受路堤的几何参数、地基与填土的材料参数的影响。因此，拟针对不同等级公路，即不同的路基宽度、高度、坡度，考虑黄土地区地基土和路基填土材料参数，对路堤与地基结构进行沉降变形计算分析。

7.2.1　有限元模型计算参数

（1）路基宽度 B：依据文献[57]，高速公路、一级公路取 26m；二级公路取 11m。

（2）路堤高度 h：根据黄土地区常见公路路堤高度，考虑范围为：2m～8m。

（3）地基土计算范围：根据实际工程的计算，大面积填土的应力影响深度，大体是填土厚度的 7.2 倍[7]。为便于网格划分厚度取整，地基土深度取 7.5h；对路堤坡脚以外沿水平方向土体宽度，也取 7.5h。

（4）路堤边坡坡率 m：按照公路路基设计规范[58]，低于 8m 的路堤边坡坡率取为 1.5；高于 8m 的路堤，采用折线型边坡，上部 8m 边坡坡率取 1.5，下部为 1.75。有限元分析时，为了简化计算，取加权平均坡度。

（5）填土回弹模量 E_0：根据常见填土回弹模量范围[59]，分别取为 10 MPa、30 MPa、60 MPa、100 MPa。

（6）地基土变形模量 E：根据实测资料对黄土地基土变形模量的统计范围，

分别取地基土变形模量为 5 MPa、8 MPa、14 MPa、20 MPa、30 MPa。

（7)填土重度γ:根据大量实体工程资料,压实黄土的重度范围为 16 kN/m^3～20 kN/m^3。因此，分别取路堤填土重度 γ 为 16 kN/m^3、18 kN/m^3、20 kN/m^3。

（8）地基土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ：对于黄土地基土，根据所收集到的大量资料统计结果，位于黄河中游地区黄土的粘聚力 c 变化范围为：21kPa～76kPa，内摩擦角 φ 变化范围为：2.06°～33.06°。取其均值，即粘聚力为 45 kPa，内摩擦角等于膨胀角取为 27° 作为计算值。

（9）填土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ：试验结果表明，经过压实的黄土与原状黄土比较，c 值平均提高 30%，而 φ 值平均提高 4%，故取粘聚力为 58.5 kPa、内摩擦角等于膨胀角取为 28° 作为计算值。

（10）泊松比 μ：地基土和填土的泊松比均取 0.35。

（11）剪切模量 G 和体积模量 K：可通过计算得到，计算公式如下：

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \qquad (7-1)$$

$$K=\frac{E}{3(1-2\mu)} \qquad (7-2)$$

7.2.2 有限元计算结果分析

（1）地基土变形模量对路表沉降变形的影响

地基土变形模量与路表沉降变形的关系计算结果如图 7－3 和图 7－4。

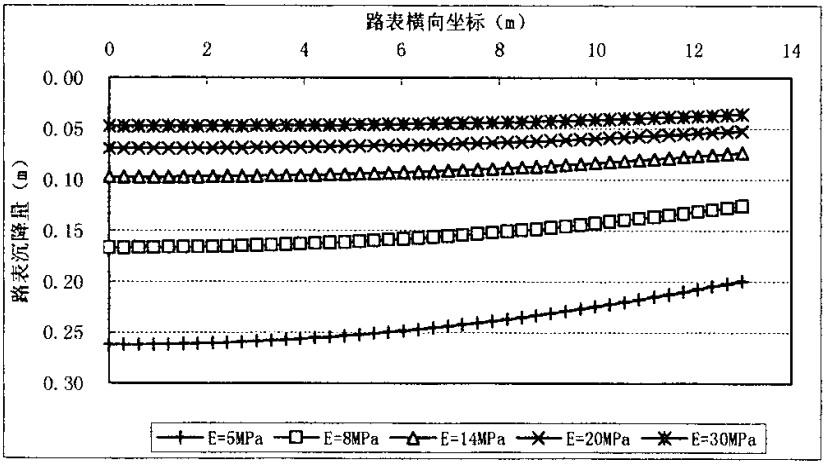


图 7－3 不同地基变形模量情况下路表沉降曲线

（计算条件： h=4m；B=26m；γ=18kN/m^3；E_0=30MPa）

由图 7－3 不难看出，路表中心处沿横断面方向到路基边缘，路表沉降量逐渐减小。随着地基土变形模量 E 的增加，路表沉降量显著减小。说明地基土变形模量是影响路表沉降变形的主要因素。

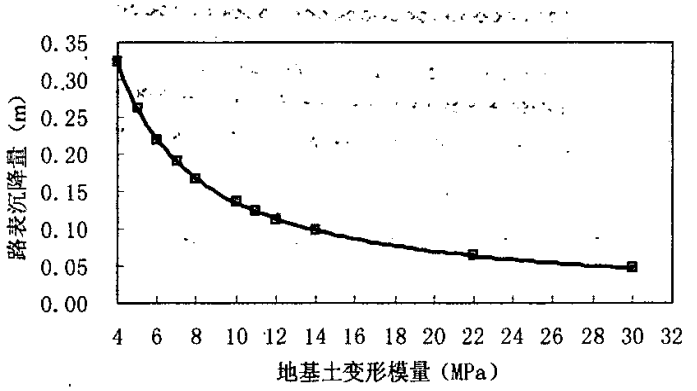


图 7－4　地基土变形模量与路表中心处沉降量

（计算条件：h＝4m；B＝26m；γ＝18kN/m^3；E_0＝30MPa）

由图 7－4 可见，地基土变形模量愈大，路表中心处的沉降量愈小。随着地基土变形模量的增大，路表中心处的沉降量降低的幅度减小。

路表中心处沉降量与路基边缘处沉降量之差除以两点之间的距离，称为不均匀沉降率。工程上常用不均匀沉降率作为差异沉降控制指标。地基土变形模量与路表不均匀沉降率的关系见图 7－5。随着地基变形模量的增大，路表不均匀沉降率下降，下降的速率变缓。

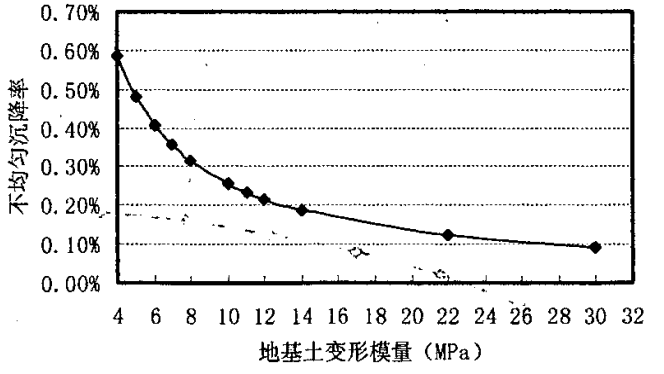


图 7－5　地基土变形模量与路表不均匀沉降率

（计算条件：h＝4m；B＝26m；γ＝18kN/m^3；E_0＝30MPa）

（2）路堤填土高度对路表沉降变形的影响

经计算，路堤填土高度与路表沉降变形的关系如图 7－6、图 7－7 和图 7－8。

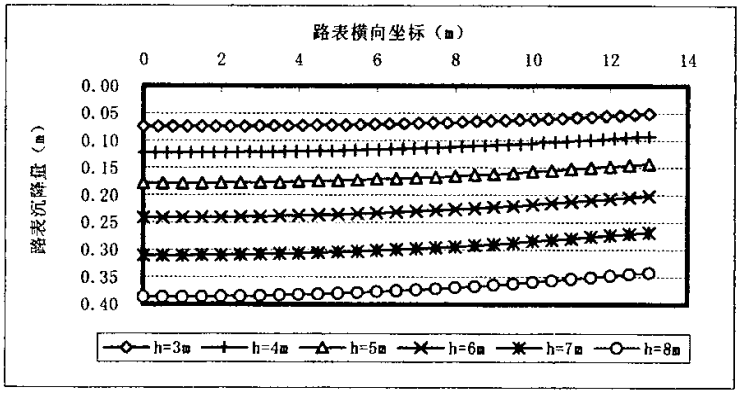


图 7－6　不同填土高度情况下路表沉降曲线

（计算条件：E＝11MPa；B＝26m；γ＝18kN/m^3；E_0＝30MPa）

从图 7－6 中可以看出，随着路堤填土高度的增加，路表沉降量明显增大。说明路堤填土高度也是影响路表沉降变形的主要因素。

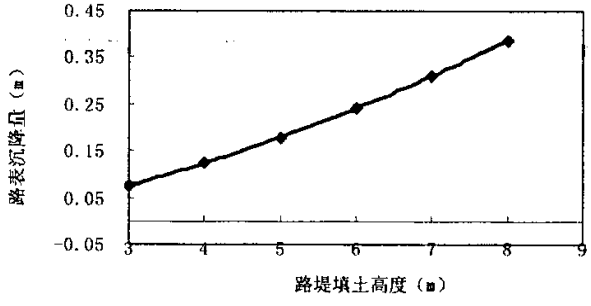


图 7－7　路堤填土高度与路表中心处沉降

（计算条件：E＝11MPa；B＝26m；γ＝18kN/m^3；E_0＝30MPa）

图 7－7 显示，随着填土高度的增大，路表中心处的沉降增加的速率缓慢提高。

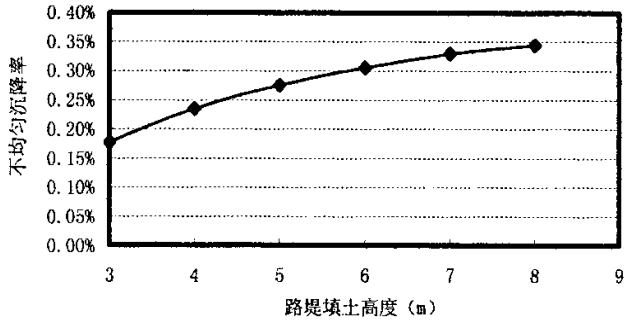


图 7－8　路堤填土高度与路表不均匀沉降率

（计算条件：E＝11MPa；B＝26m；γ＝18kN/m^3；E_0＝30MPa）

从图 7－8 可以看出，路表不均匀沉降率随填土高度的增加逐步增大，但其增大的幅度却逐渐减小。

（3）路堤填土回弹模量对路表沉降变形的影响

根据计算结果，路堤填土回弹模量与路表沉降变形的关系如图 7－9 和图 7－10。填土回弹模量提高，路表沉降及不均匀沉降率减小，但减小的量很少。说明在压实黄土常见回弹模量范围内，填土回弹模量对路表沉降及不均匀沉降率影响不大。

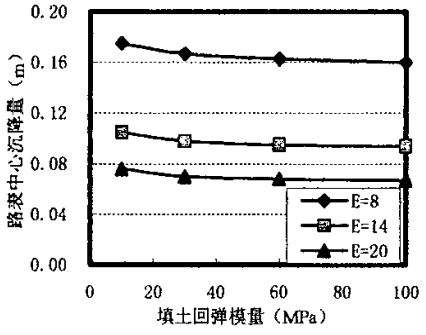


图7－9 填土回弹模量与路表中心处沉降

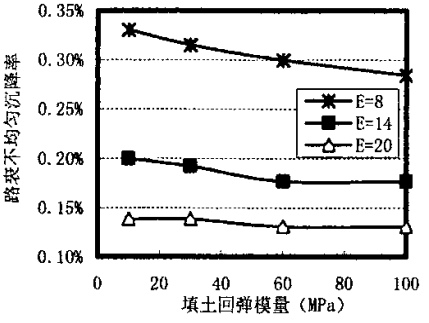


图7－10 填土回弹模量与路表不均匀沉降率

（计算条件：h＝4m；　B＝26m；γ＝18kN/m^3）

（4）路堤填土重度对路表沉降变形的影响

随着路堤填土重度的增加，路表中心沉降及不均匀沉降率有所增加，但增加幅度不大（图 7－11，图 7－12）。说明在压实黄土重度常见范围内，填土重度对路表沉降量、不均匀沉降率的影响并不是很大。

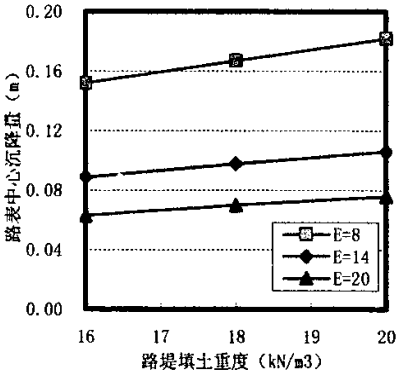


图7－11 路堤填土重度与路表中心沉降

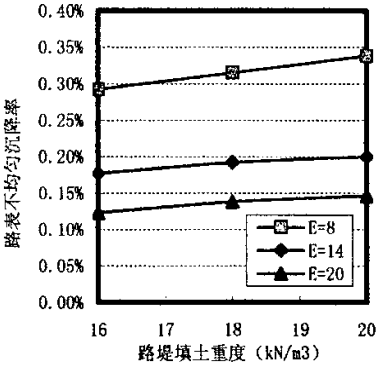


图7－12 路堤填土重度与路表不均匀沉降率

（计算条件：h＝4m；　B＝26m；E_0＝30MPa）

（5）路基宽度对路表沉降变形的影响

公路等级不同，路基宽度则不同。本文重点考虑高等级公路，即高速公路、

一级公路和二级公路，高速公路、一级公路路基宽度取 26 米；二级公路取 11 米，分别计算不同地基土变形模量下路表沉降量、路表不均匀沉降率，结果见表 7－3。

表 7－3　　公路等级与路表中心沉降量、不均匀沉降率

地基土变形模量（MPa）	路表中心沉降量（m）		路表不均匀沉降率	
	二级公路	高速、一级公路	二级公路	高速、一级公路
E=8	0.12	0.17	1.8‰	3.2‰
E=14	0.07	0.10	1.3‰	1.9‰
E=20	0.05	0.07	1.1‰	1.4‰

（计算条件：h=4m；γ=18kN/m^3；高速、一级公路 E_0=30MPa，B=26m；

二级公路 E_0=25MPa，B=11m）

从表 7－3 可以看出，随着路基宽度或公路等级的提高，路表中心沉降量、不均匀沉降率都呈增加趋势；当地基土变形模量较小时，增加的幅度较大。

7.3　公路地基变形与路表变形关系分析

地基的受力变形特性是影响路表沉降的主要因素之一。在公路等级、路线纵坡、路堤填料确定的情况下，要控制路表的沉降，就必须限制地基的变形。因此，有必要分析公路地基变形和路表沉降之间的关系。

经计算，不同条件下路堤表面沉降与地基表面沉降值见表 7－4。

表 7－4　　路表沉降与地表沉降

计算参数		沉降（m）		计算条件
		路表中心处	地表中心处	
地基土变形模量 E（MPa）	5	0.262	0.257	h=4m；B=26m；γ=18kN/m^3；E_0=30MPa；
	8	0.167	0.163	
	14	0.098	0.094	
	20	0.070	0.066	
	30	0.048	0.045	
路堤高度 h（m）	2	0.028	0.027	E=14MPa；B=26m；γ=18kN/m^3；E_0=30MPa；
	4	0.098	0.094	
	8	0.309	0.297	
填土重度 γ（kN/m^3）	16	0.089	0.086	h=4m；B=26m；E=14MP；E_0=30MPa；
	18	0.098	0.094	
	20	0.106	0.102	
路基宽度 B（m）	11	0.073	0.070	h=4m；γ=18kN/m^3；E=14MP；E_0=30MPa；
	26	0.098	0.094	
填土回弹模量 E_0（MPa）	10	0.105	0.096	h=4m；γ=18kN/m^3；E=14MPa；B=26m；
	30	0.098	0.094	
	60	0.095	0.093	
	100	0.094	0.093	

从表 7—4 可以看出，如果路堤填土压实度满足规范要求，达到一定强度或回弹模量，路堤沉降量中的绝大部分是地基沉降而引起的，而路堤自身压缩沉降量只占很小的一部分。随着填土高度的增大，路堤自身压缩沉降量也相应增大；而随着路堤填土回弹模量的增加，路堤压缩沉降量减小。因此在公路路基设计和施工中，地基沉降变形是不容忽视的。

通过表 7—4，可以分析出公路路表沉降与地表沉降之间的关系。令地表最终沉降/路表最终沉降＝C_1，根据有限元计算结果，对于不同公路等级回归了 C_1 值与地基土变形模量 E 之间的关系式，见表 7—5。

表 7—5　　黄土地区公路地表、路表沉降关系回归方程式

公路等级	回归方程	相关系数
高速、一级公路	C_1＝-0.002E＋0.997	0.97
二级公路	C_1＝-0.003E＋0.995	0.97

7.4 小 结

运用有限元方法，对黄土地基公路路堤结构进行了路表沉降和地表变形计算分析，得出以下主要结论：

（1）随着地基土变形模量的增加，路表沉降量和不均匀沉降率显著减小。

（2）随着填土高度的增加，路表沉降量明显增大，同时路表不均匀沉降率也相应增加，但其增加幅度却随着填土高度的增加而逐渐减小。

（3）路堤填土回弹模量对路表沉降量与路表不均匀沉降率几乎没有影响，而对路堤自身压缩沉降影响较明显。

（4）随着路堤填土重度的增加，路表沉降、路表不均匀沉降率均增加。

（5）随着公路等级的提高，路基宽度的增大，路表沉降量、不均匀沉降率相应增加。

（6）路表沉降量绝大部分是地基沉降而引起，而路堤自身压缩沉降量只占很小的一部分。

（7）明确了路表沉降与地基变形之间随地基变形模量的变化关系。

8 黄土公路地基承载力验算方法研究

公路路基结构与建筑物结构存在差异性，首先是两者的基础形式不同，建筑基础通常为刚性基础，相应的荷载作用在地基上；而公路路堤修筑在地基上相当于柔性基础，其荷载形式与刚性基础差别很大。其次，两者的地基宽度不同，公路路堤基底宽度往往大于建筑的基础宽度。再次，两者对于变形容许的范围要求不同。因此，建筑行业对地基承载力要求的标准、指标不完全适合公路路基地基承载力的使用要求。分析公路路基与建筑物对地基承载力要求的差异性，对目前应用广泛的建筑地基承载力标准进行分析、修正，提出适合公路地基承载力的验算方法是十分必要的。

8.1 公路路堤地基设计要求

无论是建筑还是公路路基在地基设计时都应该满足两个基本要求，首先，保证地基不发生强度破坏，满足结构整体性和稳定性的要求；其次，确保地基不发生过大沉降和沉降差，满足安全性和舒适性的要求[22][28][60]。因此，公路路堤地基设计基本原则可以表述为：

（1）公路路堤地基表面所承受荷载应力小于地基强度 f，即

$$\sigma \leqslant f \qquad (8-1)$$

式中：σ—作用在公路地基上的荷载应力，通常包括路堤填土压力和汽车荷载应力；

f—地基强度，即地基承载力设计值。

（2）公路路堤地基的变形 S 要小于容许的变形值 S_R，即

$$S \leqslant S_R \qquad (8-2)$$

式中：S—公路路堤地基总变形；

S_R—公路路堤地基变形容许值，按照公路等级要求，应根据工程经验、沉降观测统计确定。

8.2 黄土地区公路路堤地基变形容许值

根据前述有限元分析结果，公路路堤地基的沉降变形与路基表面沉降变形有一定关系。对公路路堤地基沉降变形控制的目的在于控制路基表面沉降变形。因此，可以通过研究路基沉降变形控制标准，推出公路路堤地基变形容许值。

8.2.1 路基变形控制标准[61]

影响路基总变形的因素较多，如填土高度、地基土的性质、道路的施工质量等，它的取值直接影响到道路的使用性能及工程造价。国内外对这个问题的看法不一，而且对这个问题的考虑角度也在变化。

1967 年日本道路协会《道路工程指针》规定：当土方工程结束后立即铺筑高级路面时，路堤中心处剩余沉降量的限值，对于一般路段为 10～30cm；与桥梁等邻接的填土部位为 5～10cm。

1970 年日本道路公团关于土工、路面、排水及绿化的“设计要领”中的准则是：一般路段的剩余沉降量，规定为预计的最终沉降量和路面工程结束时的沉降量之差；但进行预压处理时，则把卸荷以后的沉降量作为剩余沉降量来考虑。取值采用以下标准：当涉及到路面工程结束后的路面平整度时，容许值为 10cm；当涉及到箱涵开挖施工的预留沉降量时，容许值为 30cm。

1989 年日本道路协会的《软土地基处理技术指南》要求：路面铺筑后 3 年内，路堤中心处容许沉降可由道路的重要性决定，与桥梁邻接的填土路段（桥头引道）的沉降量控制在 10～30cm 以内。

美国仅对桥头引道规定 12.7～25.4mm 的容许差异沉降，路面容许总沉降或差异沉降常不做规定，一条道路的工后沉降 0.30～0.61m 是容许的。

法国要求桥头引道部分的容许工后沉降为 3～5cm，在一般路段为 10cm，对应的地基固结度为 85%～95%。

从国内的情况看，公路上对这一问题的研究，在“六五”期间交通部重庆公路科研所主持的“利用经济可行的办法进行软基处治的设计”课题中已涉及到。研究报告根据对桥头引道及一般路段实测沉降结果的分析，参考日本、美国的标准及国内建工部门对建筑物基础容许沉降的要求，对容许工后沉降提出的建议是：对于高等级公路铺筑路面 20 年内，邻近桥梁等人工构造物的路堤段（其长度根据路线纵坡取 50～100m）的容许值为 10～20cm，其它路段为 30～55cm。

京津塘高速公路设计时，根据该路的实际条件，参考以上研究结果，在征求了国内外有关专家意见的基础上，更具体地制定了路基容许工后沉降标准：主线上的大、中、小桥及通道，在与两端填土路堤毗连处取 0.1m，涵洞处取 0.2m，除此外为 0.3m；分离式立交的跨线桥与引道路堤填土毗连处，在被交道路为一级时，取 0.2m，在被交道路为二级以下时取 0.3m，引道填土部分分别为 0.45 和 0.6m。

在京津塘高速公路后设计的一些其它高等级公路，对容许工后沉降也参考国

内外情况做了相差不大的规定。

目前，在我国一般公路路基设计及施工规范中对路基变形控制未作具体规定。本文拟根据有关规范标准并考虑行车舒适性，确定黄土地区公路路堤容许沉降标准。

（1）有关规范对路基变形规定

《公路路基设计规范》（JTG D30－2004）[62]对高等级公路的沉降引起的路基总变形规定见表 8－1。

表 8－1　　软土地基高等级公路路基工后沉降控制标准

工程位置 / 公路等级	桥台与路堤相邻处	涵洞、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤0.10m	≤0.20m	≤0.30m
二级公路	≤0.20m	≤0.30m	≤0.50m

由表 8－1 可见，对于软土地基高速公路、一级公路要求路基最大变形不超过 30cm，对于二级公路最大变形不超过 50cm，此规定是结合软土的物理工程性质确定的。由于软土是由水下沉积的饱水软弱性土或淤泥构成，具有含水量高、孔隙比大、渗透性小、压缩性高、抗剪强度低等不利的工程性质，因此对于软土而言特别需要严格控制工后不均匀沉降量对其总变形做了如上的具体要求。

而黄土的工程性质为：新堆积黄土干重度较小，孔隙比大，压缩变形较大，但具有一定的结构强度；中更新世黄土是黄土层的主体，由黄土钙质结核相间组成，质地密实、重度大、压缩性和渗透性均较小；早更新世黄土地层较薄且较中更新世黄土密实、强度大、压缩性好。比较黄土的工程性质与软土的工程性质，黄土比软土的密实度高，压缩性好，故黄土地基的路基总变形应较软土地基路基总变形小。从这一角度出发，将高速、一级公路路基总变形≤30cm，二级公路路基总变形≤50cm 作为控制黄土路基总变形控制指标，是偏于安全的。

（2）满足汽车行驶性能的路基变形指标

路基发生沉降变形后，路面变为凹形曲面，理论研究中常用二次抛物线来模拟路堤的凹型变形曲面，以规范规定的平整度要求为控制指标，引入假定条件可求得容许变形数值。有关这方面的研究成果见表 8－2[63]。

表 8－2　　平整度－抛物线法确定允许变形指标

工程结构类型	平整度指标（cm）		沉降标准限值（cm）
沥青路面	高速公路、一级公路	0.7	30
	其它等级公路	1.0	40
水泥混凝土路面	高速公路、一级公路	0.5	20
	其它等级公路	0.8	30
桥台处	高速公路、一级公路	0.5	6
	其它等级公路	0.8	9
小型结构物	高速公路、一级公路	0.7	2
	其它等级公路	1.0	3

由表 8－2 可见，对于高速、一级公路从路面平整度要求考虑公路沉降标准限值最大为 30cm，对于二级公路沉降标准最大限值为 40cm。

基于上述，对于高速、一级公路取 30cm 作为路基总变形控制指标，对于二级公路取 40cm 作为控制指标。

8.2.2　公路路堤黄土地基容许沉降变形

路基变形控制是针对于工后沉降变形量，而前述有限元分析的变形是最终沉降量。关于最终沉降与工后沉降的关系，尚需结合实际观测资料和依托工程研究确定。

（1）最终沉降与工后沉降

路堤施工过程是通过控制标高分层填筑而成的。路堤施工前期发生的沉降变形在后期施工中可以通过标高控制弥补。而地基变形则不断累加，形成最终沉降变形。所以路基沉降控制是对于工后变形而讲的，而地基变形是对总变形而言的，可见地基变形要远大于路基变形。

根据《公路路基施工技术规范》（JTJ 033－95）条文说明[64]，高度大于 20m 的填方路基，对于 Q_2、Q_3 黄土地基，因动荷载和填土自重荷载所产生的压缩沉降量，施工期间已完成 80%～90%。因此，对于高路堤可以用最终沉降量的 10%～20%作为工后沉降估计值。

黄土地区公路路堤 200 天实际沉降和最终沉降量观测资料[56][65]，整理后见表 8－3。

表 8－3　　路堤工后沉降与最终沉降观测值

填土高度（m）	3	4	5	6	7	8
路堤工后沉降量（cm）	5.62	8.57	10.34	13.26	14.98	19.31
最终沉降量（cm）	11.59	18.97	27.45	36.96	47.49	58.92
工后沉降占总沉降百分比	48%	45%	38%	36%	32%	33%

由表 8－3 可见，路堤工后沉降在总沉降中所占比例随填土高度的增加而降低。这主要是因为路堤填土高度较小时，施工工期短，路堤、地基固结沉降变形未充分完成，其沉降大部分在工后所造成。

根据上述实测资料并参考规范，可对工后沉降占总沉降百分比与填土高度的关系进行回归分析，见图 8－1。

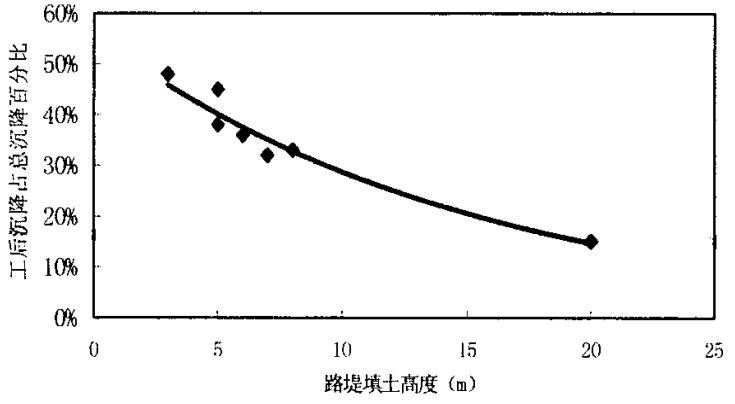


图 8－1　路表工后沉降占总沉降百分比与填土高度关系曲线

令路表工后沉降变形/路表总沉降变形＝C_2　　（8－3）

经回归分析，得到：

$$C_2=0.5603e^{-0.0669h} \qquad (8-4)$$

式中：h—路堤填土高度（m）。

（2）黄土地区公路路堤地基容许沉降变形

分别以 30cm 和 40cm 作为黄土地区高速、一级公路和二级公路一般路段最大容许工后沉降量标准控制值，根据式（8－3）可以得到路表容许总沉降变形计算式：

路表容许总沉降变形＝路表工后容许沉降量/C_2　　（8－5）

再根据前述路表总沉降与地表总沉降关系的有限元计算结果回归分析式（见表 7－5），可导出不同公路等级地基最大容许沉降变形公式：

高速、一级公路：$S_R=(-0.002E+0.997)\dfrac{0.3}{0.5603e^{-0.0669h}}$ （8－6）

二级公路：$S_R=(-0.003E+0.995)\dfrac{0.4}{0.5603e^{-0.0669h}}$ （8－7）

将公式（8－6）、（8－7）化简，可以得出不同公路等级下，黄土地区公路填土地基容许最大总沉降变形与地基变形模量 E、路堤填土高 h 之间的回归关系式，见表 8－4。

表 8－4　　黄土地区公路路堤地表容许沉降回归关系式

公路等级	回归关系式
高速、一级公路	$S_R=(-0.0012E+0.5338)\cdot e^{0.0669h}$
二级公路	$S_R=(-0.0021E+0.7103)\cdot e^{0.0669h}$

8.3 黄土地基承载力设计值

建筑地基与公路填土地基存在明显的差异性，建筑结构刚度较大，对地基变形要求较高；建筑地基基础通常为刚性基础，且有一定的埋置深度。而公路路基路面结构柔性较大，对地基变形要求较低；路堤一般直接修筑在天然地基上，基底宽度随着路基宽度不同（或公路等级不同）、填土高度不同而不同。当公路等级为高速或一级公路、填土高度较大时，基底宽度可达数十米，比一般建筑地基基础宽度宽得多。与建筑地基不同，公路路堤地基承受的是柔性荷载。前文对黄土地基承载力特征值的研究，都是建立在建筑地基设计方法和经验基础之上。由于公路路堤地基与建筑地基受力状态、荷载作用范围、变形要求都有区别，直接将建筑地基承载力特征值作为公路路堤地基承载力设计值显然是不妥的，因此，需要对于黄土地基承载力特征值加以修正，作为公路填土地基设计的依据。

8.3.1 相对变形修正[1][7][8]

根据载荷试验 P－S 曲线，建筑部门以容许相对变形确定地基承载力的原则是：一般性黄土地基，多采用 s/b＝0.015 所对应的荷载；新近堆积黄土地基，多采用 s/b＝0.01 对应的荷载。

公路路堤地基宽度 b 按下式计算：

$$b=B+2hm \tag{8－8}$$

式中：B—路基宽度（m）；

h—路基高度（m）；

m—路基边坡坡率。

公路路堤地基相对容许变形 s/b 是否与建筑地基相对容许变形一致，可以通过表 8－4，按照有关参数常见范围，确定出公路路堤地基相对容许变形 s/b 值的范围：高速公路、一级公路地基相对容许变形 s/b 值的范围为 0.017～0.022；二级公路地基相对容许变形 s/b 值的范围为 0.029～0.038。

对照建筑部门相对应的容许相对变形 s/b 取值，一般性黄土地基 s/b＝0.015，可见高速公路、一级公路和二级公路地基相对容许变形要求与建筑部门要求不一致，且要大。故公路路堤地基在采用建筑部门地基承载力特征值时，需要进行相对变形修正。

高速、一级公路路堤地基容许相对沉降变形范围为 0.017～0.022，如 s/b 取值大，则地基相对容许变形较大，考虑到一定的安全储备，取低值 s/b=0.017 作为高速、一级公路地基容许相对变形值。

同理，二级公路地基容许相对沉降变形范围为 0.029～0.038，取低值 s/b=0.029 作为二级公路地基容许相对变形值。

根据载荷试验 P－S 曲线（如图 8－2），可以看出，按照公路填土地基容许相对变形确定的地基承载力特征值 f_{ak1} 应该大于建筑地基相应承载力特征值 f_{ak}。

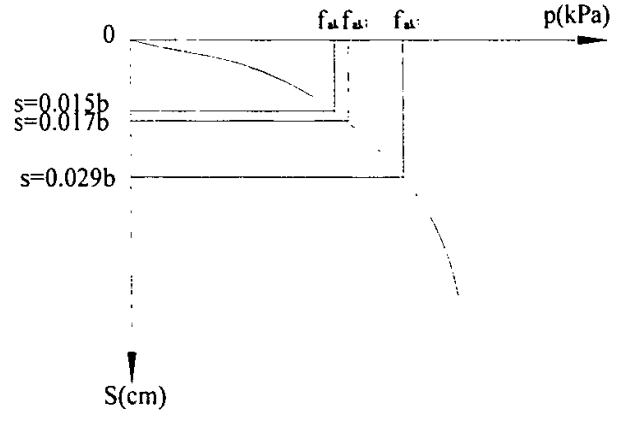


图 8－2 不同等级公路 P－S 曲线相对变形修正示意图

令 $f_{ak1}/f_{ak}=k$，则经相对变形修正后公路路堤黄土地基承载力特征值 f_{ak1} 为：

$$f_{ak1}=kf_{ak} \qquad (8-9)$$

通过实测 P－S 曲线分析得到：对于高速、一级公路，系数 k 大致范围在 1.02～1.08 之间。对于二级公路，系数 k 大致范围在 1.08～1.34 之间。若 P－S 曲线形式较陡，宜取小值，若 P－S 曲线形式较缓，宜取大值。综合考虑取均值 k=1.05

和 k=1.21 分别作为高速、一级公路和二级公路相对变形修正系数。

8.3.2 路基基底宽度修正

考虑到载荷试验一般在地基表面进行，而且载荷板的尺寸远小于建筑基础尺寸，根据工程经验，文献[1]规定，当基础宽度大于 3m 或埋置深度大于 1.5m 时，地基承载力应进行修正。公路路堤基底宽度一般都大于 6m，并且没有埋深，因此，根据文献[1]，公路路基黄土地基承载力可按下式进行修正：

$$f_a = f_{ak1} + \eta_b \gamma_0 (b-3) \qquad (8-10)$$

式中：f_a—经相对变形、基底宽度修正后的地基承载力特征值（kPa）；

f_{ak1}—经相对变形修正后的地基承载力特征值（kPa）；

η_b—为基础宽度地基承载力修正系数，对于常见黄土取 0.2；

γ_0—地基土的重度（kN/m^3）；

b—路堤基底宽度（m），当基底宽度大于 6m 时，按 6m 计算。

由式（8－10）,经相对变形、路堤基底宽度修正后的黄土地基承载力特征值可按下式计算：

$$f_a = f_{ak1} + 0.6\gamma_0 \qquad (8-11)$$

根据统计，黄土重度 γ_0 范围大致为 13.2 kN/m^3～19.8 kN/m^3，则宽度修正增加值 $0.6\gamma_0$ 约在 7.92kPa～11.88kPa 范围之内，这里取均值 10kPa。故可知经路堤基底宽度修正相当于在原地基承载力特征值 f_{ak1} 加上 10kPa，即：

$$f_a = f_{ak1} + 10 \qquad (8-12)$$

8.3.3 柔性修正[42]

按照弹性半空间体理论，在圆形承压板下受压时，地基表面的竖向变形为：

$$s = \frac{(1-\mu^2)}{E}\omega bp \qquad (8-13)$$

式中：E—变形模量（MPa）；

μ—泊松比；

b—承压板的直径；

p—均布荷载（kPa）；

ω—沉降影响系数，柔性圆板中心为 1.0，刚性圆板为 0.79。

对于同一地基，即变形模量和泊松比一定时，要使地基产生同样的相对变形，对圆形刚性承压板施加的压力为 p，对圆形柔性承压板施加的压力则为 0.79p。

因此，黄土地基承载力在公路路堤柔性荷载作用下可按下式修正：

$$f = 0.79 f_a \qquad (8-14)$$

式中：f 一经相对变形、宽度和柔性修正后的地基承载力特征值（kPa）。

8.3.4 黄土地区公路路堤地基承载力设计值

综上所述，公路路堤黄土地基承载力特征值应按下式修正：

$$f = 0.79(kf_{ak} + 10) \qquad (8-15)$$

式中：f —公路地基承载力设计值(kPa)；

k —相对变形修正系数，高速、一级公路为 1.05，二级公路为 1.21；

f_{ak} —地基承载力特征值（kPa），由载荷试验或其它原位测试、公式计算等方法综合确定。

8.4 黄土地基承载力验算方法

根据地基设计原则，公路路堤地基承载力需要满足强度和变形两方面要求，通过上述分析可知，修正后的公路路堤黄土地基承载力 f 是一个双控指标，既有强度要求也有变形要求。故地基验算时，只要满足下式要求即可：

$$\sigma_b + \sigma_z \le f \qquad (8-16)$$

在公路路基设计中黄土地基承载力验算时，首先应对公路路堤地基承载力特征值进行评价，确定出路堤所在地点的地基承载力特征值 f_{ak}，然后经相对变形、基底宽度和柔性修正作为公路路堤地基承载力设计值 f 。

公路路堤地基表面承受的应力包括路堤自重应力和汽车荷载应力两部分。设计时可根据路堤填土重度、路堤高度分别计算出路堤自重应力 σ_b、汽车荷载应力 σ_z [14][66]。两者之和即为作用于地基的压应力。

（1）路堤自重应力计算

路堤自重应力为：

$$\sigma_b = \gamma H \qquad (8-17)$$

式中：γ —路堤填土重度（kN/m^3）；

H —路堤填土高度（m）。

（2）汽车荷载应力计算

假设汽车荷载为单圆垂直均布荷载作用于路基顶面，按弹性理论，轮隙中心以下地基承受的压应力为：

$$\sigma_z = p\left[\frac{1}{1+\frac{2}{3}\left(\frac{H}{r}\right)^2}\right] \qquad (8-18)$$

式中：p—轮胎压力，可取 0.7MPa；

r—荷载作用半径，可取 0.15m。

根据式（8－18），可计算出不同路堤高度 H 下，汽车荷载在地基表面产生的应力，见表 8－5。

表 8－5　　地基表面承受的汽车荷载应力

路堤高度 H（m）	2	4	8	12	16	20
汽车荷载应力σ_z（kPa）	5.8	1.5	0.37	0.16	0.092	0.059

由表 8－5 可见，随着路堤高度的增加，汽车荷载传递到地基表面的应力迅速减小。当填土高度大于 4m 时，基本可以忽略汽车荷载对地基应力的影响。

得到公路路堤地基承载力设计值f、路堤自重应力σ_b、汽车荷载应力σ_z后，经检验，若满足式（8－16），则认为地基承载力满足公路路堤强度变形要求。若不满足，则需采取相应的地基处理措施。

8.5 小结

结合公路工程特点，对公路路堤地基承载力设计值、黄土地区公路路堤地基承载力验算方法进行了研究，取得以下成果：

（1）从容许强度要求和容许变形要求两方面考虑，提出了公路地基的设计原则：$\sigma \leqslant f$；$S \leqslant S_R$；

（2）根据我国公路部门现行规范，综合考虑路面平整度要求及行车舒适性要求，建议对于黄土地区，高速、一级公路路基最大容许变形量取 30cm；二级公路路基最大容许变形量取 40cm；

（3）经相对容许变形修正、基底宽度修正和柔性修正后，提出了公路路堤黄土地基承载力设计值计算公式：$f = 0.79(kf_{ak} + 10)$；

（4）提出了黄土地区公路路堤地基承载力验算方法。

9 公路路堤黄土地基处理措施探讨

当黄土地基承载力不满足要求，或者遇到湿陷性黄土时，为了提高地基承载力，或者消除湿陷性，在填筑路堤之前，需对地基进行处理。

9.1 公路路堤黄土地基处理方法调查

9.1.1 陕西省公路黄土地基处理措施

对于不同湿陷等级的黄土场地，采用冲击碾压或强夯处理，其效果对比情况见表 9－1。

表 9－1　　冲击碾压和强夯处理地基效果对比

场地类型	影响深度内平均含水量(%)	处理方法	施工工艺	控制标准	有效加固深度(m)	有效影响深度(m)
III级自重湿陷性黄土	15.3	强夯	160t·m (15.3t×10.5m)单击 夯能,3.3m×3.5m间距方形布夯点	最后两击平均夯沉量≤5cm	2	4~5
III级自重湿陷性黄土	14.8	强夯	240t·m (15.3t×15.7m)单击夯能,3.3m×3.5m间距方形布夯点	最后两击平均夯沉量≤5cm	4	5~6
III级自重湿陷性黄土	12.6	冲击碾压	25KJ(三边)	40 遍	0.5~1.0	1.5~2.0
II级非自重湿陷性黄土	11.9	冲击碾压	25KJ(三边)	24 遍	0.5	1.5
II级非自重湿陷性黄土	11.9	冲击碾压	25KJ(三边)	40 遍	0.5~1.0	1.5~2.0

由上表可以得到以下几点结论：

（1）冲击碾压处理II级非自重湿陷性黄土地基，当地基土的含水量略低于最佳含水量时，25KJ 冲压机冲压 40 遍的处理效果比较明显，有效压实厚度为 0.5～1.0m，有效影响深度为 1.5～2.0m。处理III级自重湿陷性黄土地基，仅消除了黄土的部分湿陷性。

（2）强夯处理III级自重湿陷性黄土地基，当地基土的含水量接近最佳含水量时，以最后两击的平均夯沉量作为控制击数，160t•m 的有效加固深度为 2m，有效影响深度为 4～5m；240t•m 的有效加固深度为 4m，有效影响深度为 5～6m。

9.1.2 青海省公路黄土地基处理措施

对于不同湿陷等级的黄土场地，分别采用冲击碾压、强夯及灰土挤密桩和灰土换填处理，其效果对比情况见表 9－2。

表 9－2　　强夯和冲击碾压处理地基结果对比

路段	场地类型	填土高度	影响深度内平均含水量(%)	处理方法	施工工艺	控制标准	有效加固(压实)深度(m)	有效影响深度(m)
平阿路	-	-	10.6	冲击碾压	25KJ(三边)	20 遍	0.75	1.05
西塔路	-	-	20.6	冲击碾压	25KJ(三边)	30 遍	0.5	0.75
马平路	Ⅱ级非自重湿陷	2.0～5.0	13.5	冲击碾压	25KJ(三边)	40 遍	0.8	1.2
西湟路	Ⅱ级非自重湿陷	2.4～5.0	14.3	冲击碾压	25KJ(三边)	30 遍	0.8	1.2
西塔路	-	-	23.9	强夯	-	-	-	3.5
马平路	Ⅱ级自重湿陷	2.4～5.0	14.3	强夯	180t·m (15t×12m)夯能,3.3m×3.5m间距方形布夯点	10 击	4.6	7
西湟路	Ⅲ级自重湿陷	3.6～4.2	14.8	强夯	200t·m(13.5t×14.8m)夯能,3m×4m 间距方形布夯	12 击	6	6～8
西湟路	Ⅲ级自重湿陷		12.6	强夯	150t·m (13.5t×11.1m)夯能,3m×4m 间距方形布夯	12 击	4	6
西湟路	Ⅲ级自重湿陷			强夯	100t·m (13.5t×7.4m)夯能,3m×4m 间距方形布夯	12 击	4	6
西湟路	Ⅱ级自重湿陷	2.0～3.0	13.5	灰土挤密桩	桩径 0.4m,桩深 6m,桩间距 0.8m	-	-	6
西湟路	Ⅱ级非自重湿陷	3.2～3.4	15.0	灰土换填	3:7 灰土比,灰土层厚度为 1.5m	-	-	1.5

由此可以得到以下几点结论：

（1）处理Ⅱ级非自重湿陷性黄土地基，路基填土高度不大于 5 m，当地基土的含水量略低于最佳含水量时，其冲压 30～40 遍的处理效果比较明显，有效压实厚度为 0.8m，有效影响深度为 1.05～1.20m。当地基土的含水量高于最佳含水量 4 个百分点时，其冲压效果不好，地基土出现“弹簧”现象。

（2）处理Ⅱ级以上自重湿陷性黄土地基，当地基土的含水量接近最佳含水量时，强夯的效果明显，单击夯能为 100～200 t•m、击数为 10～12 击的强夯有效加固深度为 4～6 m，有效影响深度为 6～8 m。同样，当地基土的含水量高于最佳含水量过多时，其强夯效果不理想。

（3）灰土挤密桩可用来处理Ⅱ级以上自重湿陷性黄土，其处理深度较深，

可以消除相当于桩深度范围内黄土的湿陷性。

（4）灰土换填可以处理浅层湿陷性黄土地基，改善灰土层厚度范围内土体的性质，消除黄土湿陷性，大幅度提高地基的承载力，同时起到防止地表水下渗的作用。

9.1.3 河北省公路黄土地基处理措施

河北省高速公路对黄土地基主要采取冲击碾压处理方法。工程实践表明，冲碾40遍时，地表下110cm深度内地基土平均压实度达到91%，湿陷系数为0.0022，地基土 1m 深度内平均弹性模量 $\overline{E}$ 已达到 80MPa 以上，并且形成连续、均匀、密实的加固硬层，其技术指标已超过路基上路床标准，完全符合黄土地基加固质量要求。因此，建议黄土地基加固按冲击碾压 40 遍进行施工。

9.2 黄土地基处理方法适用性分析

根据陕西省、青海省以及河北省对高等级公路进行的湿陷性黄土地基处理的工程实例，经过分析和总结，提出可用于公路路堤的黄土地基处理方法的适用范围[[4][67][68][69]]。

（1）冲击碾压

冲击压路机在碾压中产生巨大的冲击波，靠机械冲击力将土体压实。常用25 KJ 三边形压实机进行原地基处理或路堤压实，其压实深度随碾压遍数递增。

冲击碾压处理原地基，存在有效压实深度和有效影响深度的说法，《公路冲击碾压应用技术指南》（报批稿）指出能够满足设计要求压实度（如 90%、93%、95%等）的最大深度即有效压实深度，能够引起压实度 1 个百分点变化的最大深度为有效影响深度。

在公路工程建设中，冲击压路机用来处理湿陷性黄土地基，具有施工速度快、费用低等特点。目前，在陕西、甘肃、青海和河北等省区冲击碾压处理湿陷性黄土地基，效果都比较明显。总结各省区试验路段冲压效果，可以得到如下认识：

①陕西禹阎路：冲击碾压用于处理II级以下非自重湿陷性黄土，冲压 40 遍效果明显，有效压实深度为 0.5～1.0m，有效影响深度为 1.5～2.0m；处理III级自重湿陷性黄土，冲压 40 遍后仅消除了黄土的部分湿陷性。

②青海马平等路：处理II级非自重湿陷性黄土地基，路基填土高度不大于 5 m，当地基土的含水量介于 $\omega_{opt}-3 \leqslant \omega \leqslant \omega_{opt}+2$ 之间，冲压 30～40 遍的处理效果比较明显，有效压实厚度为 0.8m，有效影响深度为 1.05～1.20m。

③河北宣大路：处理Ⅰ和Ⅱ级非自重湿陷性黄土地基，路基填土高度为 4.4～8.4m，冲碾 40 遍后，湿陷性完全消除，地基土 1m 深度范围内平均弹性模量已达到 80MPa 以上，符合黄土地基加固质量要求。

总之，当路基填土高度小于 5m，湿陷性黄土地基的湿陷等级为Ⅲ级以下，地基土的天然含水量介于 $\omega_{opt}-3\leqslant\omega\leqslant\omega_{opt}+2$ 之间时，可采用冲击碾压。

（2）强夯法

强夯法，是反复将一定重量的锤提高到一定高度使其自由落下，利用夯锤在自由落下的过程中的动能转化为冲击能，在地基土中产生冲击波和动应力，来提高地基土的强度，降低土的压缩性，消除黄土的湿陷性。

强夯法的有效加固深度和有效影响深度一直是大家比较关注的问题。对于公路路基湿陷性黄土地基的处理，强夯的有效加固深度是指强夯后不再具有湿陷性的黄土土层的最大深度，湿陷性完全消除；而有效影响深度是指强夯后黄土的湿陷性有了明显的降低，土性得到明显改善的黄土土层最大深度。

强夯法加固湿陷性黄土地基，在我国西北黄土地区已有很多成功的工程实例，它继承了以土治土、不消耗建筑材料、处理费用不高且处理效果明显等优点。以往的工程经验认为强夯适用于地下水位以上，含水量 $10\leqslant\omega\leqslant\omega_{opt}+3$ 之间，有效加固深度在 3～6m 的湿陷性土层。通过对各省区试验路段强夯效果的总结，认为：

①陕西禹阎路：处理Ⅲ级自重湿陷性黄土地基，以最后两击的平均夯沉量不大于 5cm 作为停夯的标准，160t·m 能级强夯法的有效加固深度为 2m，有效影响深度为 4～5m；240t·m 能级强夯法的有效加固深度为 4m，有效影响深度为 5～6m。两种能级强夯加固地基 2m 深度范围内的效果基本接近，其主要差别在于影响深度的不同。处理Ⅱ级非自重湿陷性黄土地基，地基承载力由夯前的 209kPa 提高到夯后的 295kPa。

②青海马平等路：处理Ⅲ级自重湿陷性黄土地基，地基土的含水量接近最佳含水量时，夯击的效果明显，单击夯能为 100～200t•m、击数为 10～12 击的强夯有效加固深度为 4～6 m，有效影响深度为 6～8 m。

总之，湿陷性黄土地基的湿陷等级为Ⅲ级和Ⅲ级以上，地基土的天然含水量介于 $10\leqslant\omega\leqslant\omega_{opt}+3$ 之间，处理深度为 3～6m 时可采用强夯，夯击次数和夯点间距应根据处理目的、土质等因素决定，最好根据试夯段的试验结果来定。

（3）挤密桩法

挤密桩法是通过冲击或振动作用在土中成孔，然后向孔内填入土或其他材料分层捣实而成桩，以此将桩周围松散土挤密，使桩与挤密后的地基土共同组成复合地基，从而提高地基的强度和减小地基变形。挤密桩按所填充的材料分为砂桩、灰土桩和土桩，其中土桩和灰土桩挤密法适用于湿陷性黄土地基的加固。

土桩和灰土桩挤密法加固地基是一种人工复合地基，属于深层加密处理地基的方法，处理湿陷性黄土地基，可以提高地基承载力，减小地基变形，消除或降低黄土的湿陷性。

工程经验认为，当以提高地基承载力为主要目的，或既要提高地基承载力，又要消除黄土湿陷性时，宜采用灰土挤密桩，如仅消除黄土湿陷性，则可采用土桩挤密较为经济。根据陕西省和青海省的工程经验，可以得到以下结论：

①陕西省：地基土的含水量在14%～22%时，灰土挤密桩效果较好，当含水量超过25%，效果不明显。

②青海省西湟路：挤密后地基土在桩深度范围内干密度大幅度提高，湿陷性完全消除，浅层土干密度提高幅度最大，随深度增加提高幅度逐渐降低。

总之，处理湿陷性黄土地基时可以采用灰土挤密桩法，其适用于地下水位以上，处理深度为5～10m，Ⅱ级以上自重湿陷性黄土地基，挤密成孔时要注意控制好土的含水量、压缩系数和液限指数。

（4）换土垫层法

当上部结构基础下的持力层为软弱土层或湿陷性土层，不能满足上部荷载对地基强度或变形的要求，常采用换土垫层来处理地基。换土垫层是将湿陷性黄土等的一部分或全部挖除，然后换填密度大或水稳性好的土或灰土、砂石等材料，并分层夯实或碾压使其密实。

灰土垫层一般适用于地下水位以上，处理厚度在1～3 m的湿陷性黄土，通过青海省西湟路灰土垫层试验段的铺设，可以得到以下结论：

①灰土换填后地基土的干密度在其换填深度内（1.5m）有所提高，表层0.3m深度处的提高幅度为16.6%，0.3m深度以下随深度提高幅度逐渐减低。

②在换填土层深度范围内压缩模量大幅度提高，是处理前素土的8～10倍，换填层以下的土层强度基本没有变化。

总之，换土垫层法不论是素土换填还是灰土换填都要注意在最佳含水量下压实，其压实度不应小于95%，垫层的施工质量是保证其达到设计控制质量要求的关键。当处理湿陷性黄土地基来提高其承载力，或同时要求增强水稳定性，处理

深度为 1～3 m 时，宜采用灰土垫层法。

9.3 湿陷性黄土地基的防排水措施

黄土地基湿陷的内因是土体自身具有湿陷性，外因则是由于水的作用。一旦湿陷性黄土地基的防排水设计或施工不当，就会导致地基的湿陷变形和承载力降低，从而引起路堤和地基的不均匀沉降，严重时可导致路面产生局部沉陷和裂缝[70]。因此，公路路堤湿陷性黄土地基的防排水设计与提高地基承载力和消除湿陷性所进行的各种处理方法一样，具有十分重要的意义。

湿陷性黄土地基的排水设计，需要遵循以下原则：

（1）首先要设置完善的路基路面排水系统，因地制宜地采取引、截、排等措施，将水引出路界排入天然沟渠；

（2）对于湿陷等级为 I～II 级的非自重湿陷性黄土地基，当路基填土高度较低时，为了防止路基两侧坡脚积水下渗，在路堤坡脚一定范围内，整平地表、填平积水洼地、地表裂缝以及各种小冲沟，必要时加固排水沟和截水沟；

（3）对于湿陷等级为 I～II 的非自重湿陷性黄土地基，路基填土高度较高或湿陷等级为 III 级以上的湿陷性黄土地基的路段，可以考虑采用复合土工膜隔水墙或在路堤基底采用防渗复合土工布，以防路表水下渗到地基中。

总之，湿陷性黄土地基的排水设计可以根据当地的地形、地貌、地基湿陷等级、路基横断面类型以及路基高度综合确定。

9.4 湿陷性黄土地基综合处理方法

湿陷性黄土地基处理的主要目的，一是提高高路堤地基的承载力；二是消除或降低黄土地基的湿陷性，从而减小湿陷变形。通过湿陷性黄土地基工程处理实例，可以看出冲击碾压、强夯、灰土挤密桩和灰土换填等方法处理地基后其承载力都有所提高，湿陷性也在一定程度上消除或减弱。同时，各种方法又具有一定的特点，因此，确定湿陷性黄土地基处理措施时，可以根据不同方法的具体特点，选取合适的处理方法以及相应的施工工艺。

（1）提高路堤地基的承载力

当地基处理以提高承载力为主要目的时，可以依据以下原则来确定地基处理方法：

①需要提高地基土浅层（1m 深度范围内）的地基承载力时，宜采用冲击碾压；

②需要提高地基土 1～3m 深度范围内的地基承载力时，宜采用灰土垫层法或强夯法；

③需要提高地基土 3～6m 深度范围内的地基承载力时，宜采用强夯法和挤密桩法。

（2）消除或减轻黄土地基的湿陷性

当地基处理以消除或减轻黄土地基的湿陷性为主要目的时，可以依据以下原则来确定地基处理方法：

①对于湿陷等级为 I～II 的非自重湿陷性黄土地基，如需要消除地基土 1m 深度左右范围内的湿陷性，宜采用冲击碾压；

②对于II级以上自重湿陷性黄土地基，如需要消除地基土 1～3m 深度范围内的湿陷性，宜采用灰土垫层或强夯法；

③对于II级以上自重湿陷性黄土地基，如需要消除地基土 3～6m 深度范围内的湿陷性，宜采用土桩挤密或强夯法。

如湿陷性黄土地基即要提高地基承载力，又要消除湿陷性，则需要根据工程的实际情况，参考上述的有关原则综合确定。

9.5 小结

通过调查分析，提出了公路路堤湿陷性黄土地基处理措施，包括：

（1）冲击碾压处理II级非自重湿陷性黄土地基，当地基土的含水量略低于最佳含水量时，25KJ 冲压机冲压 40 遍的处理效果比较明显，有效压实厚度为 0.5～1.0m，有效影响深度为 1.5～2.0m；

（2）强夯处理III级自重湿陷性黄土地基，当地基土的含水量接近最佳含水量时，以最后两击的平均夯沉量作为控制击数，160t•m 的有效加固深度为 2m，有效影响深度为 4～5m；240t•m 的有效加固深度为 4m，有效影响深度为 5～6m；

（3）石灰土挤密桩可用来处理II级以上自重湿陷性黄土，其处理深度较深，可以消除相当于桩深度范围内黄土的湿陷性；

（4）石灰土换填可以处理浅层湿陷性黄土地基，可以改善石灰土层厚度范围内土体的性质，消除黄土湿陷性，大幅度提高地基的承载力，同时起到防止地表水下渗的作用；

（5）提出了湿陷性黄土地基的防排水设计原则；从提高地基承载力和消除湿陷性两个方面提出了地基处理的原则和方法，可供参考。

10 结论与建议

10.1 主要结论

通过广泛调查和收集相关资料、原位测试、室内试验、理论分析，对黄土地区公路路基地基承载力评价问题进行了深入、系统的研究。研究内容包括黄土地区高等级公路路堤地基现状调查，黄土地区公路路堤地基承载力测试方法的试验研究，黄土地基承载力影响因素分析，黄土地基承载力区划研究，黄土地基承载力模糊评价系统研究，黄土地基公路路堤结构有限元分析，公路路堤黄土地基承载力验算方法研究，公路路堤黄土地基处理措施探讨。主要结论如下：

（1）地基承载力是影响路基路面结构整体稳定性的重要因素之一。应该加强高等级公路尤其对于较高路堤地基的勘察手段和力度，以利于对地基承载力的准确评价；

（2）黄土地区公路路堤地基承载力评价时，不宜大规模采用载荷试验，最好采用旁压试验，也可以用静力触探进行测试，动力触探和标准贯入试验宜作为辅助的测试方法，处理后的地基承载力评价，可用旁压试验；

（3）黄土地基承载力具有明显的区域性变化规律，含水量是影响黄土地基承载力的最敏感因素，液限和孔隙比是对黄土地基承载力影响较大的因素，黄土地基承载力和压缩模量之间具有良好的相关关系；

（4）根据黄土地基承载力的地域性变化规律，将黄土地基承载力分为四个区域，以含水量 W、液限 W_L、孔隙比 e 作为变量，建立了黄土各区域地基承载力非线性回归关系式和承载力表，精度较相关成果提高；

（5）选择与黄土地基承载力密切相关的含水量、天然密度、孔隙比、液限为基本因素，同时考虑压缩系数和地形地貌的影响，研制了黄土地基承载力模糊评判系统，其预测精度较高；

（6）有限元分析表明，地基土变形模量、填土高度、路基宽度，是影响路表沉降量和不均匀沉降率的主要因素，路表沉降量绝大部分是因地基沉降而引起的，提出了路表沉降与地基变形之间随地基变形模量的变化关系；

（7）从容许强度要求和容许变形要求两方面考虑，提出了公路路堤地基的设计原则和路基最大容许变形量，经对建筑地基承载力的相对容许变形修正、基底宽度修正和柔性修正后，提出了公路路堤黄土地基承载力设计值，和黄土地区公路路堤地基承载力验算方法；

（8）提出了湿陷性黄土地基的防排水设计原则和提高地基承载力及消除湿陷性的地基处理原则和方法。

10.2 主要创新点

（1）结合黄土，首次对公路路基地基承载力评价问题进行了系统的研究，为今后全面深入开展这方面的研究奠定了基础；

（2）在黄土地区代表性路段试验分析了黄土地基承载力的测试方法，提出适合于公路路堤地基的实用、简便的测试方法；

（3）针对黄土地基承载力的区域特征，提出了黄土地区地基承载力区划，并给出各区域地基承载力回归关系式和地基承载力表；

（4）对建筑黄土地基承载力特征值进行了相对容许变形修正、基底宽度修正和柔性修正，提出了符合公路路堤地基特点的黄土地基承载力设计值和验算方法。

10.3 进一步研究建议

（1）由于公路线长面广，地基勘探任务重，为便于野外复杂地形的地基承载力评价，需进一步研究实用、简便、满足一定精度要求的测试技术；

（2）深入研究公路路堤地基破坏模式，提出更为合理的公路路堤地基设计方法。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准.湿陷性黄土地区建筑规范（GBJ 25－90）.中国建筑工业出版社，1991

[2] 中华人民共和国行业标准.铁路桥涵设计规范（JBJ 2－85）.中国铁道出版社，1985

[3] 中华人民共和国行业标准.公路桥涵地基与基础设计规范（JTJ 024－85）.人民交通出版社，1985

[4] 中华人民共和国行业标准.建筑地基处理技术规范（JGJ 79－2002）.中国建筑工业出版社，2002

[5] Bally,Rene,Jacques.Some specific problems of wetted loessial soils in civil engineering. Engineering Geology.Vol.25,No.2-4,Jun,1988

[6] Klepikov.S.N., Molochkova.N.N.. Determation of modulus of deformation of loess soil compacted by hydrolasting method. Soil Mechanics and Foundation Engineering.Vol.28,No.4,Jan,1992

[7] 关文章.湿陷性黄土工程性能新篇.西安交通大学出版社，1992

[8] 钱鸿缙等.湿陷性黄土地基.中国建筑工业出版社，1985

[9] Reznik,Yakov.M. Determation of deformation properties of collapsible soils. Geotechnical Testing Journal.Vol.15,No.3,Sep,1992

[10] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性.中国科学，1980 年第 12 期

[11] 胡瑞林等.黄土湿陷性的微结构效应.工程地质学报，1999 年第 2 期

[12] 蒲毅彬等.陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究.岩土工程学报，2000 第 3 期

[13] 郑大同.地基极限承载力的计算.中国建筑工业出版社，1989

[14] 洪毓康主编.土质学与土力学（第二版）.人民交通出版社，1997

[15] 罗晓辉.用遗传算法确定地基承载力.岩石力学与工程学报，2001 第 3 期

[16] [苏]A.A.穆斯塔伐耶夫.湿陷性黄土上地基与基础的计算.水利水电出版社，1984

[17] 罗马尼亚国家标准.湿陷性土地基建筑物设计与施工规范（IND P7－85）.能源部西北电力设计院，1989

[18] 苏联建筑法规.房屋及建筑物基础（НИП 2.02.01－83）. 水利水电出版社，1986

[19] 张炜，张苏民.我国黄土工程性质研究的发展.岩土工程学报，1995 年第 6 期

[20] 中华人民共和国建筑工程部.湿陷性黄土地区建筑规范(BJG20－66).技术标准出版社，1966

[21] 中华人民共和国国家基本建设委员会.湿陷性黄土地区建筑规范(TJ25－78).中国建筑工业出版社, 1979

[22] 中华人民共和国国家标准.湿陷性黄土地区建筑规范（GB50025－2004）.中国建筑工业出版社，2004

[23] 中国人民共和国交通部部标准.公路自然区划标准（JTJ003－86）.人民交通出版社，1987

[24] 交通部第二公路勘察设计院主编.公路设计手册　路基（第二版）.人民交通出版社，1996

[25] 沙庆林.高速公路沥青路面早期破坏现象及预防.人民交通出版社，2001

[26] 任钰芳.农田灌溉对黄土路基稳定性的影响研究.长安大学,硕士学位论文，2001

[27] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册（第三版）.中国建筑工业出版社，1992

[28] 中华人民共和国国家标准.建筑地基基础设计规范（GB 50007－2002）.中国建筑工业出版社，2002

[29] 中华人民共和国国家标准.岩土工程勘察规范（GB 50021－2001）.中国建筑工业出版社，2002

[30] 中华人民共和国国家标准.原状土取样技术标准（JGJ89－92）.中国建筑工业出版社，1993

[31] 中华人民共和国国家标准.建筑工程地质钻探技术标准（JGJ87－92）.中国建筑工业出版社，1993

[32] 中华人民共和国行业标准.公路工程地质勘察规范（JTJ064-98）.人民交通出版社，2000

[33] 中华人民共和国国家标准.土工试验方法标准（GB/T 50123－1999）.中国计划出版社，1999

[34] 中华人民共和国行业标准.公路土工试验规程（JTJ 051－93）.人民交通出版社，1993.

[35] 钱家欢，殷宗泽主编.土工原理与计算（第二版）.水利电力出版社，2000

[36] 孟高头．土体原位测试机理、方法及其工程应用．地质出版社，1997

[37] 冯连昌，郑晏武.中国湿陷性黄土.中国铁道出版社，1982

[38] 张宗祜等.中国黄土.地质出版社，1989

[39] 刘东生.黄土与环境.科学出版社，1985

[40] 乔平定等.黄土地区工程地质.水利电力出版社，1990

[41] Willianms,M.A.J.等著,刘东生等编译.第四纪环境.科学出版社，1997

[42] 刘祖典.黄土力学与工程.陕西科学技术出版社，1997

[43] 刘东生等.黄土的物质成分与结构.科学出版社，1966

[44] 西北水利科学研究所.西北黄土的性质.陕西人民出版社，1982

[45] 雷祥义.黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系.地质学报，1989年第2期

[46] 王永焱等.中国黄土的结构特征及物理力学性质.科学出版社，1990

[47] 雷祥义.黄土高原地质灾害与人类活动.地质出版社，2001

[48] 中国地质科学院水文地质工程地质研究所.中国黄土高原地貌类型图.地质出版社，1983

[49] 谢季坚等.模糊数学方法及其应用.华中科技大学出版社，2001

[50] 李洪兴等.工程模糊数学方法及其应用.天津科学技术出版社，1993

[51] 刘涛,杨凤鹏主编.精通 ANSYS.清华大学出版社，2002

[52] 王瑁成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法（第二版）.清华大学出版社，1997

[53] 龚晓南.土工计算机分析.中国建筑工业出版社，2000

[54] 龚晓南.土塑性力学（第二版）.浙江大学出版社，1997

[55] 郑传超, 王秉纲主编.道路结构力学计算.人民交通出版社，2002

[56] 交通部“八五”行业联合科技攻关项目.陕西省高等级公路路堤沉降规律与防治研究报告.西安公路交通大学，1997

[57] 中华人民共和国行业标准.公路工程技术标准（JTG B01－2003）.人民交通出版社，2004

[58] 中华人民共和国行业标准.公路路基设计规范（JTJ 013－95）.人民交通出版社，1996

[59] 中华人民共和国行业标准.公路沥青路面设计规范（JTJ 014－97）.人民交通出版社，1997

[60] 陈希哲编著.土力学地基基础（第三版）.清华大学出版社，1997

[61] 王晓谋,袁怀宇编著.高等级公路软土地基路堤设计与施工技术.人民交通出版社，2001

[62] 中华人民共和国行业标准.公路路基设计规范（JTG D30－2004）.人民交通出版社，2004

[63] 唐娴.路基沉降机理与超限沉降标准的研究.长安大学，硕士学位论文，2003,4

[64] 中华人民共和国行业标准.公路路基施工技术规范（JTJ 033－95）.人民交通出版社，1996

[65] 河北省宣大高速公路管理处.黄土地区高速公路施工新技术.人民交通出版社，2001

[66] 李峻利，姚代禄主编. 路基设计原理与计算.人民交通出版社，2001

[67] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册.中国建筑工业出版社，1995

[68] 裴章勤，刘卫东.湿陷性黄土地基处理.中国建筑工业出版社，1992

[69] 沙庆林.公路压实与压实标准.人民交通出版社，2001

[70] 王磊等.黄土地区公路排水系统病害防治.长安大学学报（自然科学版），2003年第1期

致 谢

本论文是在尊敬的导师王秉纲教授的指导下完成的，王老师渊博的学识、严谨的治学态度、高尚的品德、无私的奉献精神，使我受益匪浅，王老师不仅是指导我学业的良师，更是我毕生学习的楷模。谨向王老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

多年来，在生活、工作、学习等方面都受到师母杨韵华教授级高工的关爱，非常感激。借此机会，向师母表示深深的谢意。

在论文工作过程中，承蒙中国有色西安勘察设计院关文章教授级高工、陕西省建筑科学研究院罗宇生教授级高工、西北综合勘察设计院勘察大师林再贯教授级高工、机械工业勘察设计研究院勘察大师张苏民教授级高工、长安大学刘保健教授、焦五一老师提供宝贵资料并给予指导；交通部公路科学研究所的刘怡林高工、中国科学院武汉岩土力学研究所王吉利副研究员给予大力支持；长安大学高江平副教授和马建秦副教授、硕士研究生石刚、辛建丽提供帮助，才使论文得以完成，在此一并表示诚挚的感谢。

攻读博士学位期间参加的科研项目与发表的学术论文

一、科研项目

1、甘肃省交通厅科技项目“黄土地区特殊路基合理断面型式研究”（1997～2002），副组长；

2、河南省交通厅科技项目“商丘开封高速公路路面底基层配合比设计及合理养生龄期研究”（2000.5～2001.12），参加；

3、河南省交通厅科技项目“商丘至开封高速公路低液限粉土路基填筑技术研究”（2000.5～2001.12），参加；

4、河南省交通厅科技项目“商丘至开封高速公路路面基层材料及路面结构的抗裂性研究”（2000.5～2001.12），参加；

5、交通部西部项目“黄土地层公路工程地质类型及地基承载力评价技术研究”（2002.4～2003.12），副组长；

6、河南省交通厅科技项目“土工格栅在公路路面改建中的应用研究”（2003.4～2003.12），主要参加；

7、山东省交通厅科技项目“重载交通沥青路面设计方法研究”（2003.6～2004.12），参加；

8、交通部西部项目“公路路基土基回弹模量研究”（2002.9～2005.12），参加。

二、发表论文

1、“路面基层振动压实作用下的底基层应力”《长安大学学报（自然科学版）》2003 年第 3 期 (被 EI 检索)；

2、“路基回弹弯沉值检测有关问题的理论探讨”《华东公路》 2003 年第 6 期；

3、“黄土地基承载力评价方法在黄延高速公路中的应用”《公路交通科技（应用技术版）》 2005 年第 7 期；

4、“土工格栅加筋半刚性基层材料性能试验研究”《公路交通科技（应用技术版）》2005 年第 10 期；

5、“半刚性基层沥青路面合理基层回弹模量值研究”《第五届交通运输领域国际学术会议论文集（道路工程分册）》 2005 年 6 月；

6、“公路建设与可持续发展”《西安公路交通大学学报》1998 年第 3（B）期。

黄土地区公路路基地基承载力评价方法研究

作者：支喜兰
学位授予单位：长安大学

参考文献(70条)

1. GBJ 25-1990.湿陷性黄土地区建筑规范 1991

2. JBJ 2-1985.铁路桥涵设计规范 1985

3. JTJ 024-1985.公路桥涵地基与基础设计规范 1985

4. JGJ 79-2002.建筑地基处理技术规范 2002

5. Bally Rene Jacques Some specific problems of wetted loessial soils in civil engineering 1988(2-4)

6. Klepikov S N.Molochkova N N Determation of modulus of deformation of loess soil compacted by hydrolasting method 1992(04)

7. 关文章 湿陷性黄土工程性能新篇 1992

8. 钱鸿缙 湿陷性黄土地基 1985

9. Reznik Yakov M Determation of deformation properties of collapsible soils 1992(03)

10. 高国瑞 黄土显微结构分类与湿陷性 1980(12)

11. 胡瑞林.官国琳.李向全 黄土湿陷性的微结构效应[期刊论文]-工程地质学报 1999(2)

12. 蒲毅彬.陈万业.廖全荣 陇东黄土湿陷过程的CT结构变化研究[期刊论文]-岩土工程学报 2000(1)

13. 郑大同 地基极限承载力的计算 1989

14. 洪毓康 土质学与土力学 1997

15. 罗晓辉 用遗传算法确定地基承载力[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2001(3)

16. A A 穆斯塔伐耶夫.张中兴 湿陷性黄土上地基与基础的计算 1984

17. IND P7-1985.湿陷性土地基建筑物设计与施工规范 1989

18. НИП 2.02.01-1983.苏联建筑法规.房屋及建筑物基础 1986

19. 张炜.张苏民 我国黄土工程性质研究的发展[期刊论文]-岩土工程学报 1995(6)

20. 中华人民共和国建筑工程部 BJG 20-1966.湿陷性黄土地区建筑规范 1966

21. 中华人民共和国国家基本建设委员会 TJ 25-1978.湿陷性黄土地区建筑规范 1979

22. GB 50025-2004.湿陷性黄土地区建筑规范 2004

23. JTJ 003-1986.公路自然区划标准 1987

24. 交通部第二公路勘察设计院 公路设计手册路基 1996

25. 沙庆林 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防 2001

26. 任钰芳 农田灌溉对黄土路基稳定性的影响研究[学位论文]硕士 2001

27. 《工程地质手册》编委会 工程地质手册 1992

28. GB 50007-2002.建筑地基基础设计规范 2002

29. GB 50021-2001.岩土工程勘察规范 2002

30. JGJ 89-1992.原状土取样技术标准 1993

31. JGJ 87-1992.建筑工程地质钻探技术标准 1993

32. JTJ 064-1998.公路工程地质勘察规范 2000

33. GB/T 50123-1999. 土工试验方法标准 1999

34. JTJ 051-1993. 公路土工试验规程 1993

35. 钱家欢. 殷宗泽 土工原理与计算 2000

36. 孟高头 土体原位测试机理、方法及其工程应用 1997

37. 冯连昌. 郑晏武 中国湿陷性黄土 1982

38. 张宗祜 中国黄土 1989

39. 刘东生 黄土与环境 1985

40. 乔平定. 李增均 黄土地区工程地质 1990

41. Willianms M A J. 刘东生 第四纪环境 1997

42. 刘祖典 黄土力学与工程 1997

43. 刘东生 黄土的物质成分与结构 1966

44. 西北水利科学研究所 西北黄土的性质 1982

45. 雷祥义 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系 1989(02)

46. 王永焱. 林在贯 中国黄土的结构特征及物理力学性质 1990

47. 雷祥义 黄土高原地质灾害与人类活动 2001

48. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所 中国黄土高原地貌类型图 1983

49. 谢季坚. 刘承平 模糊数学方法及其应用 2001

50. 李洪兴 工程模糊数学方法及其应用 1993

51. 刘涛. 杨风鹏 精通ANSYS 2002

52. 王瑁成. 邵敏 有限单元法基本原理和数值方法 1997

53. 龚晓南 土工计算机分析 2000

54. 龚晓南 土塑性力学 1997

55. 郑传超. 王秉纲 道路结构力学计算 2002

56. 交通部"八五"行业联合科技攻关项目--陕西省高等级公路路堤沉降规律与防治研究报告 1997

57. JTG B01-2003. 公路工程技术标准 2004

58. JTJ 013-1995. 公路路基设计规范 1996

59. JTJ 014-1997. 公路沥青路面设计规范 1997

60. 陈希哲 土力学地基基础 1997

61. 王晓谋. 袁怀宇 高等级公路软土地基路堤设计与施工技术 2001

62. JTG D30-2004. 公路路基设计规范 2004

63. 唐娴 路基沉降机理与超限沉降标准的研究[学位论文]硕士 2003

64. JTJ 033-1995. 公路路基施工技术规范 1996

65. 河北省宣大高速公路管理处 黄土地区高速公路施工新技术 2001

66. 李峻利. 姚代禄 路基设计原理与计算 2001

67. 《地基处理手册》编写委员会 地基处理手册 1995

68. 裴章勤. 刘卫东 湿陷性黄土地基处理 1992

69. 沙庆林 公路压实与压实标准 2001

70. 王磊. 马骉 黄土地区公路排水系统病害防治[期刊论文]-长安大学学报(自然科学版) 2003(1)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 景宏君. 张斌 黄土地区公路路基冲击压实试验 -长安大学学报(自然科学版)2004, 24(1)

基于中国北方某湿陷性黄土路基工程, 利用动力触探和面波法等方法对冲击压实工后的黄土路基进行对比检测. 试验认为, 冲击压实效果主要受路基填土含水量、起始压实度和颗粒组成等因素的影响;冲击压实能使路基整体强度得到均匀提高;可以用核子法、面波法、动力触探与标准贯入测试方法检测冲压质量. 研究还表明, 正确掌握试验与检测的时效性, 有利于准确评价公路路基压实质量.

2. 会议论文 王峻. 李兰. 张京州 黄土地区高等级公路路基震陷灾害预测 2001

本文通过对白银-兰州高速公路(国道109线)沿线黄土场地的震陷实验研究, 探讨了该路段黄土的震陷特性, 并利用黄土震陷试验分析计算预测方法对其震陷性进行了评价和分区预测. 得出了一些有工程实用意义的研究成果.

3. 学位论文 张健 黄土地区公路路基下暗穴上覆土层安全厚度模型试验研究 2006

在中国西部黄土地区，路基下伏暗穴是危及公路工程安全的一种十分严重的病害，其中影响最大的是对路基的危害。在探明暗穴是否存在、暗穴上覆土层厚度及洞径的前提下，科学定量地确定路基下伏暗穴对路基影响的安全厚度，弄清哪些暗穴在路面荷载作用下必须处理，以便为暗穴的处理方法选择和处理范围等提供依据。这对防治暗穴病害、保证公路运营安全是十分必要的。

本文通过总结归纳已完成的交通部科技攻关项目对黄土地区路基下暗穴上覆土层安全厚度进行了室内模型试验研究。采用模型试验对此问题进行全面研究，是一次新的探索与尝试。

弄清了路基暗穴模型破坏机理并确定其破坏标准；建立了黄土地区路基下暗穴稳定性的评价预测模型；然后通过有限元数值模拟方法进行了对比分析，验证其合理性，对已有成果进行深化以便指导工程实践。

最后详细描述了雨水作用下不同形成模式和类型的黄土暗穴的形成过程，认为黄土暗穴的形成就是在降雨条件下一种特殊土壤的产流产沙过程。介绍并讨论了几个典型用于定量分析的侵蚀产沙模型；特别是降雨对黄土暗穴的形成与发展定量研究方面还需要我们进行更深入全面研究。

4. 会议论文 刘怡林. 王吉利 黄土地区公路工程地基处理方法的探讨 2006

本文在借鉴建筑地基的处理原则和处理方法的基础上, 通过对西北黄土地区不同时期地基设计概况的调查, 从地基处理的角度对路基路面的病害进行分析, 提出了黄土地区公路工程地基处理的原则、方法和评价标准, 对于湿陷性黄土地区公路地基的设计和处理有指导意义。

5. 会议论文 刘妮娜. 刘维亮 注浆法治理黄土地区公路中暗穴的研究 2003

本文简要介绍了注浆法的工作原理和注浆法设计的主要内容, 针对工地现场的黄土暗穴提出了注浆法的治理方案.

6. 学位论文 赵建军 宁夏同沿高速公路黄土地段公路路基设计与施工控制 2007

本文在同沿高速公路的建设过程中，根据宁夏黄土地区筑路病害的特殊性，从设计、施工、养护管理等方面总结成功的经验，提出处治的对策。重点研究了以下内容：

宁夏地区黄土分布概况，黄土的结构和构造，水理特性、湿陷性、压实性及抗剪强度等；

针对黄土地区路基、路面工程湿陷性等主要病害，提出同沿高速公路上拟采用的预防和处治措施，并通过试验段进行验证；

针对已建公路排水设施及排水系统的主要病害和使用现状，提出在同沿高速公路上处治的对策，作为后期降低建设成本提高使用性能的依据；

针对宁夏黄土地区现有公路路基防护与支挡工程的现状，分析各种病害的成因，总结设计、施工、养护管理中失败的教训和经验，提出在同沿高速公路上路基防护与支挡工程处治对策；

文中给出的同沿高速公路防治黄土地区筑路病害的措施，经验证可行、效果好。

7. 期刊论文 李寻昌. 门玉明. 刘妮娜. 刘英朴 注浆法在黄土地区公路路基洞穴处理中的应用 -地球科学与环境学报 2004, 26(1)

研究了注浆法在黄土地区公路路基洞穴处理中的加固机理及技术指标. 黄土地区公路中的洞穴对公路的安全运营常造成严重危害, 同时对于这类洞穴的处理尚缺乏有效的方法. 在大量调查和参考前人研究成果的基础上, 将注浆法用于路基中洞穴的处理, 提出了注浆法加固的主要设计参数, 通过对施工现场黄土洞穴注浆处理效果分析, 认为该方法具有良好的处理效果.

8. 学位论文 李彦武 黄土地区公路路基病害分析与防治对策研究 2001

黄土在中国的分布面积很广, 由于黄土具有很多特殊的工程性质, 导致这一地区公路病害频繁发生, 防不胜防. 论文首先对黄土的工程特性及其影响因素进行了分析, 然后对黄土地区路基病害及其防治技术进行了研究, 具体包括路基主体、防护与支挡工程、公路排水设施、涵洞及路桥过渡段等部分, 对病害类型进行了调查, 分析了使用中存在的问题与病害产生的原因, 提出了在设计与施工中应采取的防范措施, 给出了养护中的处治对策, 使中国黄土地区公路建设与养护更加科学和完善.

9. 期刊论文 王高航 黄土地区高等级公路路基工程施工 -公路2005, ""(10)

黄土是一种特殊的粘性土. 叙述了黄土的工程特性及黄土地区修筑高等级公路路基工程的施工特点, 并结合实际提出了施工注意要点和质量保证措施.

10. 学位论文 黎太平 黄土地区新老路基交接处不均匀沉降机理研究 2005

在黄土地区修建高速公路或旧路拓宽，新老路基交接处的不均匀沉降问题是公路建设的核心问题之一。能够正确认识和反映黄土湿陷变形的特征，将对于湿陷性黄土地区的交通工程建设具有重要的理论指导和实际应用价值。本文通过对陕西省铜川地区湿陷性黄土的研究，在已有研究成果的基础上，建议了一种建立新的黄土湿陷变形本构关系的方法。

论文通过室内原状黄土的压缩试验、预湿原状黄土的湿陷试验、重塑黄土的压缩试验、以及常规三轴剪切试验等，研究了非饱和黄土结构性及其影响因素以及黄土结构特性对其力学特性的影响。并借助这些试验成果对铜川地区的黄土进行了湿陷变形分析，研究了非饱和结构性黄土的湿陷机理、原状黄土与扰动黄土湿陷性的差别，为黄土地区新老路基交接处不均匀沉降机理研究提供了理论依据。

关于新老路基不均匀沉降规律的研究，目前已经进行了一些研究工作。本文旨在运用Mohr-Coulomb模型，依托Flac数值计算软件，计算了新老路基以及地基在自重作用和外部荷载作用下的沉降规律曲线。通过与工程实例的实测结果比较，确定了在不同回填高度时发生最大沉降的位置和最大沉降量、以及新老路基将来任何时间的沉降值以及最终沉降值的计算公式。

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y978537.aspx

下载时间：2010年5月28日