

文章编号:1006-2106(2007)03-0001-05

## 常规物理力学性质指标在湿陷机理上的体现\*

王延涛\*\*

(中铁设计咨询集团有限公司, 北京 100027)

**摘要:**研究目的:湿陷性为黄土的主要工程地质问题,其产生机理极其复杂,产生原因多种多样,需进一步深入研究。

**研究方法:**基于现有文献对黄土的湿陷原因与机理的认识,以甘肃黄土地区高等级公路黄土分区项目为例,利用多元统计分析方法中的因子分析对甘肃陇西陇东地区黄土的59组样本的9个常规试验的物理力学指标数据进行了分析,在此基础上,对黄土湿陷机理内因进行了分析。

**研究结论:**黄土的湿陷性指标与其它物理力学指标存在相关性,同时,揭示出产生湿陷的黄土必须有湿陷空间及一定量遇水强度降低的联接,黄土的疏松性、多孔性正是其反映,特别是支架孔隙是导致黄土湿陷的最主要原因,而非饱和黄土是产生湿陷的前提,粘粒含量及粘土的水-胶联结在产生湿陷过程中的作用需要进一步商榷。此外,本方法解决了常规单因子分析因指标交叉而分析失真的缺陷。

**关键词:**黄土;湿陷性;物理力学性质;主成分;因子分析;湿陷机理

中图分类号:U416 文献标识码:A

## Mechanisms of Collapse Shown on Physical Mechanics Index of the Routine Soil Test

WANG Yan - tao

( China Railway Engineering Consultants Group, Beijing 100027, China )

**Abstract: Research purposes:** The collapsible is the most important engineering geology problem of loess, but the mechanisms and the reason of collapse is a considerably difficult problem and we need lucubrate.

**Research methods:** Based on the understanding of the existing literature to the loess the reason and the mechanism, taking the loess classification sub - area project of motorway in loess regions of Gansu Province for example, the 9 physical mechanics index of the 59 groups are picked out in the routine soil test data. And the author uses factor analysis of multivariable statistical analysis methods to analyze loess physical mechanics index and has discussed the essential reason of loess collapsible.

**Research conclusions:** Between collapsible index of loess and other physical mechanics index of loess exist relevance, the foundation of loess collapsible is the space of loess, non - saturated loess and the joint of loess which meet the water intensity reduces, the main reason of loess collapsible is support hole existence. The loose and the porosity reflected the support hole existence. The clay content and the clay joint in collapsible the function need further to discuss. Simultaneously, the result also indicates factor analysis to analyze loess is superior in solving the problem that it can not be shown for cross of index in general single factor analysis.

**Key words:** loess; collapsible; physical mechanics index; principle component; factor analysis; mechanisms of collapse

\* 收稿日期:2006-12-26

\*\* 作者简介:王延涛,男,1974年出生,工程师。

黄土(loess)主要由粉粒组成,呈棕黄或黄褐色,具有大孔隙和垂直节理特性。遇水产生自重湿陷的土,称为自重湿陷性黄土;遇水不产生自重湿陷的土,称为非自重湿陷性黄土。黄土在我国北方分布颇为广泛,总计约  $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,作为黄土的一个类别的湿陷性黄土约占黄土总面积的60%以上<sup>[1]</sup>。黄土的湿陷性作为黄土的最主要工程地质问题,也是工程地质勘察最关心的问题,对其研究的深浅直接关系到工程安危和工程造价的高低。

关于黄土的湿陷原因与机理,文献[2]认为黄土骨架颗粒的形态、排列方式和连接形式等显微结构特征,是引起黄土产生湿陷现象的主要原因,并与湿陷起始压力值有密切关系。文献[3]认为,黄土的多孔性是引起黄土产生湿陷现象的主要原因,其中支架孔隙是导致黄土产生湿陷的主要因素。文献[4]认为,黄土湿陷的内部条件是黄土所具有的松散结构和非抗水的粘粒胶结质连接,黄土湿陷的外部因素为:一定的含水量和一定的外荷。文献[5]认为,黄土湿陷变形是由微结构失稳所引起的。《黄土高原第四纪》(孙建中、赵景波著)一书提到黄土结构性孔隙的存在为黄土的湿陷提供了空间条件,是湿陷性的第一个层次原因;黄土不抗水的粒间联接,是湿陷性的第二个层次原因。总之,黄土要湿陷首先必须有湿陷空间,其次黄土必须有遇水强度降低的联结。本文基于甘肃陇西和陇东地区同批128组原状样的常规物理力学性质指标进行因子分析,析取出几项主成分,并分析各指标与主成分间的关系,从而得出一个与湿陷性有关的因子,通过对这个因子的解释在宏观上对黄土湿陷性机理有一个认识。

## 1 因子分析原理及过程

### 1.1 因子分析原理

因子分析就是通过数理统计分析,将众多相互关联要素的信息压缩表达为若干具代表性的合成变量,克服了变量选择的冗余和相关,利于选择信息最丰富的少数因子进行各种后续分析。

### 1.2 因子分析过程

设有  $m$  个样本,  $n$  个变量,构造矩阵

$$Z = (X_{ij})_{n \times m}$$

求矩阵  $Z$  的协方差矩阵  $S$  或相关系数矩阵  $R$

$$R(S) = (1/n)Z \cdot Z^T$$

求方阵  $R(S)$  的特征值  $\lambda$ 、特征向量  $v$

得出线性变换

$$Y_1 = v_{11} \cdot X_1 + v_{12} \cdot X_2 + \dots + v_{1n} \cdot X_n$$

$$Y_2 = v_{21} \cdot X_1 + v_{22} \cdot X_2 + \dots + v_{2n} \cdot X_n$$

∴

$$Y_p = v_{p1} \cdot X_1 + v_{p2} \cdot X_2 + \dots + v_{pn} \cdot X_n$$

式中  $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$ —— $n$  个变量的第1、第2、...、第  $p$  主成分,其中  $p < n$ ;

$X_1, X_2, \dots, X_n$ —— $n$  个变量;

$(v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n})$ ——最大特征值对应的特征向量;

$(v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n})$ ——第二大特征值对应的特征向量;

∴

$(v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn})$ ——第  $p$  大特征值对应的特征向量。

$Y_1$  在总方差中占比例最大,  $Y_2, \dots, Y_p$  的方差依次减少。

故可以选择累计贡献百分比在一定阈值以内的若干因子作为主因子参加分析运算。

为了增强解释力,可通过转轴的方式转换因子,将因子载荷量降至最少数目,更加利于解释因子。



图1 因子分析流程

## 2 因子分析

### 2.1 物理力学参数选取

在工程实践常规试验中,土的物理性质指标有含水量( $\omega$ )、密度( $\rho$ )、干密度( $\rho_d$ )、土粒比重( $G_s$ )、孔隙比( $e$ )、饱和度( $S_r$ )、液限( $\omega_L$ )、塑限( $\omega_p$ )、塑性指数( $I_p$ )、液性指数( $I_L$ )及颗粒组成。其中,含水量( $\omega$ )、密度( $\rho$ )反映了土的含水程度;干密度( $\rho_d$ )反映了土粒的排列密实程度,从侧面反映了土的微观结构;土粒密度( $G_s$ )反映了土的矿物组成,鉴于我国黄土的矿物成分基本相同<sup>[4]</sup>,此指标暂不考虑;孔隙比( $e$ )反映了土内存在的空间量;饱和度( $S_r$ )反映了土体空间被水占的比例;液限( $\omega_L$ )、塑限( $\omega_p$ )、塑性指数( $I_p$ )及液性指数( $I_L$ )反映了土的水理性质,其中塑性指数( $I_p$ )能够侧面反映出土的粘粒含量,为减少因子,本文选用塑性指数( $I_p$ )分析;颗粒组成本文选用粘粒含量( $C_L$ )进行分析。土的力学性质指标有压缩性指标、粘聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ ),因本文侧重于对黄土湿陷性机理

内因进行分析而压缩性指标受外力影响较大,同时考虑试验的简洁性,仅选用直剪试验的粘聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )作为力学性质指标参与分析;土的湿陷性质指标有湿陷系数( $\delta_s$ )和自重湿陷系数( $\delta_{zs}$ ),因选用的土样深度均小于 10 m,故选用湿陷系数( $\delta_s$ )作为湿陷性指标参与分析。

为便于对黄土湿陷性机理内因分析,选用  $\omega$ 、 $\rho_d$ 、 $e$ 、 $S_r$ 、 $I_p$ 、 $C_L$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 、 $\delta_s$  9 个变量参与因子分析。

## 2.2 分析与计算

### 2.2.1 构造矩阵

本文选用甘肃陇东陇西地区同时、同批试验的 128 组原状样试验结果进行分析。通过对指标完备性及  $3\sigma$  原则分析最终选用 59 组参与因子分析。

由 59 个样本,9 个变量构造一个  $9 \times 59$  的矩阵  $Z_{9 \times 59}$ 。由于量纲的不同,不同指标试验值(OBS)受量纲影响而产生较大的离散性,为了消除量纲的影响,对原始数据进行标准化(采用标准差标准化)处理,标准化为无因次量矩阵  $Z_{9 \times 59}'$ 。

### 2.2.2 析出因子

求矩阵  $Z_{9 \times 59}'$  的相关系数矩阵  $R_{9 \times 9}$  (见表 1)。

表 1 相关系数矩阵 ( $R_{9 \times 9}$ )

	$\omega$	$\rho_d$	$e$	$S_r$	$I_p$	$C_L$	$c$	$\varphi$	$\delta_s$
$\omega$	1.000								
$\rho_d$	0.105	1.000							
$e$	-0.104	-0.996	1.000						
$S_r$	0.910	0.484	-0.477	1.000					
$I_p$	0.350	-0.027	0.034	0.295	1.000				
$C_L$	0.552	0.071	-0.084	0.530	0.333	1.000			
$c$	0.072	0.427	-0.412	0.245	0.021	0.130	1.000		
$\varphi$	-0.169	-0.046	0.037	-0.198	-0.008	-0.076	-0.365	1.000	
$\delta_s$	-0.410	-0.788	0.788	-0.637	-0.080	-0.058	-0.402	0.132	1.000

注:因  $R_{9 \times 9}$  为对称矩阵,表 1 只列出下半部分。

求相关系数矩阵  $R_{9 \times 9}$  的特征值  $\lambda$  及相应的单位正交特征向量  $v$  (见表 2)。

计算主成分的贡献率及累计贡献率 (见表 3)。

计算各主成分荷载 (FL) 及各变量占方差的百分比 (VCP) (表 4)。

表 2 相关矩阵的特征值 ( $\lambda$ ) 及相应的特征向量 ( $v$ )

主成分	特征值	$\omega$	$\rho_d$	$e$	$S_r$	$I_p$	$C_L$	$c$	$\varphi$	$\delta_s$
1	3.739	0.320	0.420	-0.418	0.445	0.121	0.215	0.270	-0.128	-0.446
2	2.026	0.480	-0.359	0.358	0.287	0.396	0.451	-0.181	-0.053	0.188
3	1.174	0.045	0.159	-0.171	0.070	0.108	0.005	-0.520	0.804	-0.102
4	0.784	-0.343	0.087	-0.079	-0.263	0.792	0.096	0.365	0.148	0.087
5	0.658	-0.143	0.058	-0.075	-0.074	-0.422	0.717	0.324	0.286	0.294
6	0.449	0.283	-0.262	0.281	0.106	-0.099	-0.345	0.614	0.479	-0.159
7	0.157	0.137	0.258	-0.207	0.358	0.037	-0.329	0.089	0.021	0.791
8	0.010	-0.608	0.107	0.431	0.649	-0.005	0.020	-0.018	0.024	-0.101
9	0.003	0.242	0.716	0.591	-0.282	-0.007	0.019	-0.009	-0.008	0.016

表 3 主成分的贡献率及累计贡献率

	主成分 (Factor)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
贡献率/%	41.55	22.51	13.04	8.71	7.31	4.98	1.74	0.11	0.03
累计贡献率/%	41.55	64.06	77.11	85.82	93.13	98.12	99.86	99.97	100.00

表 4 主成分荷载 (FL) 及各变量占方差的百分比 (VCP)

OBS	VCP/%	主成分荷载 (FL)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega$	85.2	0.619	0.683	0.048	-0.304	-0.116	0.190	0.054	-0.060	0.013
$\rho_d$	94.9	0.811	-0.511	0.172	0.077	0.047	-0.175	0.102	0.011	0.040
$e$	94.6	-0.808	0.509	-0.185	-0.070	-0.061	0.188	-0.082	0.042	0.033
$S_r$	91.3	0.860	0.408	0.076	-0.233	-0.060	0.071	0.142	0.064	-0.016
$I_p$	38.6	0.234	0.563	0.117	0.701	-0.343	-0.066	0.015	0.000	0.000
$C_L$	58.4	0.415	0.642	0.006	0.085	0.581	-0.231	-0.130	0.002	0.001
$c$	65.6	0.522	-0.257	-0.563	0.324	0.263	0.412	0.035	-0.002	0.000
$\varphi$	82.6	-0.248	-0.076	0.871	0.131	0.232	0.321	0.008	0.002	0.000
$\delta_s$	82.9	-0.863	0.268	-0.111	0.077	0.238	-0.106	0.313	-0.010	0.001

由表3知前5个标准化样本主成分累计贡献率已经达到93.13%，由表4可知荷载量绝对值大于0.4 (FL>0.4)的变量全部分布在前5个主成分中，故可取前5个主成分进行因子分析(即析出5个因子)。

### 2.2.3 转换因子

#### 2.2.3.1 前5个因子研究

为判断前5个因子对模型的拟合程度，对各变量的共性值进行了计算(表5)，可知各变量的共性值均大于80%，说明前5个因子对模型的拟合程度非常好。

表5 前5个因子对各变量的共性值

	$\omega$	$\rho_d$	$e$	$S_r$	$I_p$	$C_L$	$c$	$\varphi$	$\delta_s$
共性值	0.96	0.96	0.95	0.97	1.00	0.93	0.83	0.90	0.89

由表4前5个因子与各变量之间的主成分荷载量(FL)及表2主成分解释的方差(特征值)可知 $\omega$ 、 $\rho_d$ 、 $e$ 、 $S_r$ 、 $c$ 、 $\delta_s$ 分别与Factor 1相关，其中 $e$ 、 $\delta_s$ 与Factor 1为负相关，其它均为正相关； $\omega$ 、 $\rho_d$ 、 $e$ 、 $I_p$ 、 $C_L$ 分别与Factor 2相关，其中 $\rho_d$ 与Factor 2为负相关，其它均为正相关； $c$ 、 $\varphi$ 分别与Factor 3相关，其中 $c$ 与Factor 3为负相关， $\varphi$ 与Factor 3为正相关； $I_p$ 与Factor 4为正相关； $C_L$ 与Factor 5为正相关。

#### 2.2.3.2 转换因子

从表4可以看到，Factor 1因子荷载量大于0.4的变量共有6个；Factor 2因子荷载量大于0.4的变量共有5个。为了增强解释力，可通过转轴方式将因子荷载量大于0.4的变量个数降至最少。

采用最大方差法对表4中前5个因子的各变量因子荷载量矩阵进行转轴，转换矩阵如下：

$$\begin{bmatrix} -0.78 & 0.52 & -0.22 & 0.14 & 0.22 \\ -0.58 & 0.62 & 0.03 & 0.40 & 0.35 \\ -0.13 & 0.53 & -0.04 & -0.80 & 0.24 \\ -0.01 & 0.22 & 0.13 & 0.41 & 0.88 \end{bmatrix}$$

转轴后前5个因子的荷载量矩阵及因子的解释方差和各变量共性值见表6。转轴后各变量的共性值保持不变，说明转轴不影响对模型的拟合程度。

表6 转轴后前5个因子的荷载量及因子的解释方差和各变量共性值

OBS	共性值	主成分荷载(FL)				
		1	2	3	4	5
$\omega$	0.96	-0.058	0.940	-0.074	0.164	0.197
$\rho_d$	0.96	-0.973	0.074	-0.030	-0.033	0.051
$e$	0.95	0.971	-0.075	0.015	0.043	-0.060
$S_r$	0.97	-0.420	0.848	-0.106	0.125	0.219
$I_p$	1.00	0.028	0.194	0.011	0.972	0.111
$C_L$	0.93	0.027	0.441	0.005	0.144	0.845

续表6 转轴后前5个因子的荷载量及因子的解释方差和各变量共性值

OBS	共性值	主成分荷载(FL)				
		1	2	3	4	5
$c$	0.83	-0.485	-0.179	-0.647	0.064	0.373
$\varphi$	0.90	-0.049	-0.201	0.919	0.034	0.095
$\delta_s$	0.89	0.837	-0.391	0.124	-0.058	0.136
解析方差		3.011	2.071	1.295	1.019	0.986

表6显示：转轴后因子荷载量大于0.5的变量Factor 1由6个降为5个；Factor 2由5个降为3个；其它保持不变；转轴因子荷载量均有所提高，且负号相反。

### 2.2.4 因子解析

经上述处理后，删除因子模型(表6)中因子荷载差异大的变量后可解释各因子的实际意义。

#### 2.2.4.1 与第一个因子Factor 1有关的变量

$\rho_d$ 、 $e$ 、 $S_r$ 、 $c$ 、 $\delta_s$  5个变量，均和黄土的湿陷性有关，可解释Factor 1为黄土的湿陷性因子。由于 $\rho_d$ 、 $S_r$ 、 $c$ 与Factor 1均为负相关，说明 $\rho_d$ 、 $S_r$ 、 $c$ 越大，黄土的湿陷性越弱，则工程性质越好。而 $e$ 、 $\delta_s$ 与Factor 1均为正相关，说明 $e$ 、 $\delta_s$ 越大，黄土的湿陷性越强，则工程性质越差。该结果符合常理，说明该分析是合理的。

#### 2.2.4.2 与第二个因子Factor 2有关的变量

$\omega$ 、 $S_r$ 、 $C_L$  3个变量，均和黄土的含水程度有关，可解释Factor 2为黄土的含水能力因子。由于 $\omega$ 、 $S_r$ 、 $C_L$ 与Factor 2均为正相关，说明 $\omega$ 、 $S_r$ 、 $C_L$ 越大，黄土的吸水性越好，则工程性质越差。由双电层理论可知，当粘粒含量越大，容水能力越大，则饱和度越大，说明该分析是合理的。

#### 2.2.4.3 与第三个因子Factor 3有关的变量

$c$ 、 $\varphi$  2个变量，均和土的力学性质有关，可解释Factor 3为黄土的力学性质因子。由于 $\varphi$ 与Factor 3为正相关， $c$ 与Factor 3为负相关，说明 $\varphi$ 越高， $c$ 越低，《土力学》中公式 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ 正是这因子的体现，同时也证明该分析是合理的。

#### 2.2.4.4 与第四个因子Factor 4有关的变量

塑性指数( $I_p$ )，可解释Factor 4为黄土的含水状态因子。

#### 2.2.4.5 与第五个因子Factor 5有关的变量

粘粒含量( $C_L$ )，可解释Factor 5为黄土的颗粒组成因子。

## 3 黄土湿陷机理内因分析

黄土湿陷发生的原因很复杂，其湿陷过程是一个物理化学过程。湿陷发生是由土内部固有的特殊因素

和外界造成的适当条件共同作用的结果。内部因素是湿陷的先决条件,决定性的因素,它是土本身所具备湿陷性的本质方面的东西,这些本质方面的东西必然要在土的物理力学性质得以反映。而外部条件是土本身以外的能够促成和影响湿陷的一些因素,水和压力是主要的2个方面<sup>[2]</sup>。

黄土湿陷发生的机理众说不一,但黄土发生湿陷的2个必要条件现在看来是统一的,内部条件:(1)一定的湿陷空间;(2)一定量遇水强度降低的联接;外部因素:(1)一定的含水量;(2)一定的外荷<sup>[3]</sup>。而内部条件必然要在土的物理力学性质指标上得以反映,下面基于前面物理力学性质指标数据分析,综合文献中湿陷机理的分析,对黄土的湿陷性机理内因进行分析。

由2.2.4可知,黄土的湿陷性因子有 $\rho_d$ 、 $e$ 、 $S_r$ 、 $c$ 、 $\delta_s$ ,为了便于分析湿陷性机理内因将湿陷性的因子转轴前后的荷载量及湿陷系数( $\delta_s$ )与各变量的相关系数汇总于表7。

表7 湿陷性因子荷载量和 $\delta_s$ 与各变量的相关系数的对比

OBS	湿陷性(Factor 1)因子荷载(FL)		$\delta_s$ 与各变量的相关系数
	转轴前	转轴后	
$\omega$	0.619	-0.058	-0.410 2
$\rho_d$	0.811	-0.973	-0.788
$e$	-0.808	0.971	0.788
$S_r$	0.860	-0.420	-0.637 0
$I_p$	0.234	0.028	-0.080
$C_L$	0.415	0.027	-0.058
$c$	0.522	-0.485	-0.402
$\varphi$	-0.248	-0.049	0.132
$\delta_s$	-0.863	0.837	1.000

表7中各变量与湿陷系数( $\delta_s$ )相关性可以看出:(1)干密度( $\rho_d$ )和孔隙比( $e$ ),其相关系数分别为-0.788、0.788,而干密度和孔隙比两指标主要反映土的孔隙性和疏松程度,这也说明,黄土湿陷内部条件必须有湿陷空间;(2)饱和度( $S_r$ ),其相关系数为-0.637,饱和度主要反映土中气体与液体(水)含量比例,湿陷性本身并非是黄土特有的性质<sup>[2]</sup>,它是非饱和土所具有的特性之一,这可说明黄土发生湿陷的前提条件必须是非饱和土,如果黄土达到饱和则黄土将不会湿陷;(3)含水量( $\omega$ ),其相关系数为-0.410,而含水量主要反映土中液体(水)含量,这可说明该指标可以反映黄土发生湿陷的前提条件必须有水;(4)粘聚力( $c$ ),其相关系数为-0.402,而粘聚力是反映土体间联结强弱的指标,这可说明该指标可以反映黄土发生湿陷必须有一定量遇水强度降低的联接;(5)塑

性指数( $I_p$ )、粘粒含量( $C_L$ )、内摩擦角( $\varphi$ ),其相关系数较小,这说明其对湿陷性影响不大。

表7中各变量转轴前后因子荷载变化可看出:含水量( $\omega$ )、干密度( $\rho_d$ )增大,说明湿陷空间是黄土发生湿陷大前提,是必要条件;粘聚力( $c$ )基本保持不变,说明遇水强度降低的联接是黄土发生第二条件,由于含水量( $\omega$ )未包含在本因子中,且转轴前后荷载量大幅度下降,黄土的水胶有待进一步研究;其它变量转轴前后荷载量均大幅度降低,说明这些对黄土的湿陷性影响并不大,其中饱和度( $S_r$ )尽管大幅度降低但因子荷载量为0.42,仍大于0.4,说明饱和度( $S_r$ )在某个范围对黄土的湿陷性有影响。

## 4 结论

综上所述,可以得出:

(1)影响黄土第一层次的原因是,黄土必须的有湿陷空间,黄土的疏松性、多孔性正是其反映,特别是支架孔隙是导致黄土湿陷的最主要原因<sup>[2-4]</sup>,在常规试验指标中可通过含水量( $\omega$ )或干密度( $\rho_d$ )反映。

(2)影响黄土第二层次的原因是,黄土必须的有一定量遇水强度降低的联接,但遇水强度降低的联接并非主要是粘土的水-胶联结,在常规试验指标中可通过粘聚力( $c$ )(直剪)反映。

(3)影响黄土第三层次的原因是,黄土必须是非饱和黄土,并且在某个范围影响最大,这个范围需进一步研究,在常规试验指标中可通过饱和度( $S_r$ )反映。

(4)因子分析结果符合常理,可为黄土的湿陷机理和力学特性的进一步研究提供指导。

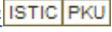
(5)黄土粘粒含量在因子分析中反常,其湿陷机理作用需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京:科学出版社,1965.
- [2] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980(12):1023-1208.
- [3] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑),1987(12):1309-1318.
- [4] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B辑) 1988(7):756-766.
- [5] 苗天德,王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性黄土变形机理[J]. 中国科学(B辑),1990(1):86-96.

(编辑 慕成娟)

## 常规物理力学性质指标在湿陷机理上的体现

作者: [王延涛, WANG Yan-tao](#)  
作者单位: [中铁设计咨询集团有限公司, 北京, 100027](#)  
刊名: [铁道工程学报](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)  
年, 卷(期): 2007, 24(3)  
被引用次数: 2次

### 参考文献(5条)

1. [刘东生](#) 中国的黄土堆积 1965
2. [高国瑞](#) 黄土显微结构分类与湿陷性 1980(12)
3. [雷祥义](#) 中国黄土的孔隙类型与湿陷性 1987(12)
4. [杨运来](#) 黄土湿陷机理的研究 1988(07)
5. [苗天德;王正贵](#) 考虑微结构失稳的湿陷性黄土变形机理 1990(01)

### 引证文献(2条)

1. [梁德佩](#) 浅谈黄土物理力学特性与湿陷性关系研究[期刊论文]-[地质灾害与环境保护](#) 2010(4)
2. [许领, 戴福初](#) 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨[期刊论文]-[地质力学学报](#) 2009(1)

引用本文格式: [王延涛, WANG Yan-tao](#) 常规物理力学性质指标在湿陷机理上的体现[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2007(3)