

# Study on the Relationship between Main Physical Indexes and Bearing Capacity of Fine Soil

—Taking Hulushan Bay at Changxing Island in Dalian as an Example

Xiaofeng Wang<sup>1</sup>, Weiyu Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Design Institute of Civil Engineering & Architecture Dalian University of Technology Co., Ltd., Dalian Liaoning

<sup>2</sup>Dalian University of Foreign Languages, Dalian Liaoning

Email: dgywxf@126.com

Received: Oct. 4<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 18<sup>th</sup>, 2018; published: Oct. 25<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The main physical indexes and allowable bearing capacity of 742 groups of clay soil and 61 groups of silt soil were analyzed by using the investigation data of Hulushan bay at Changxing Island in Dalian. The analysis shows that natural moisture content, natural porosity and liquid index are highly correlated with the allowable bearing capacity. Six empirical relationships between physical indexes and allowable bearing capacity were established. A comprehensive evaluation method for the characteristic value of bearing capacity  $f_{ak}$  of clay and silty soil is proposed. It provides a theoretical basis for evaluating the carrying capacity of viscous soil and silty soil by using physical indexes.

## Keywords

Hulushan Bay at Changxing Island in Dalian, Clay, Silt, Natural Moisture Content, Natural Void Ratio, Liquidity Index, Foundation Bearing Capacity

---

# 细粒土主要物理指标与承载力的关系研究

—以大连长兴岛葫芦山湾区域为例

王晓峰<sup>1</sup>, 王玮瑜<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连

<sup>2</sup>大连外国语大学, 辽宁 大连

Email: dgywxf@126.com

收稿日期: 2018年10月4日; 录用日期: 2018年10月18日; 发布日期: 2018年10月25日

## 摘要

利用大连长兴岛葫芦山湾海域勘察资料, 对742组黏性土、61组粉土主要物理指标与容许承载力进行了相关分析。分析表明: 天然含水率、天然孔隙比、液性指数与容许承载力具有高度的相关性。建立了物理指标与容许承载力的经验关系6个。提出了实际勘察工作中黏性土、粉土承载力特征值 $f_{ak}$ 的综合评价方法。为采用物理指标评价黏性土、粉土承载力提供了理论依据。

## 关键词

大连长兴岛葫芦山湾, 黏性土, 粉土, 天然含水率, 天然孔隙比, 液性指数, 地基承载力

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1) 细粒土概念

根据《土的工程分类标准》GB/T50145-2007 [1], 以 0.075 mm 为界限, 将土分为两个大类, 当粒径 > 0.075 mm 的土颗粒占总土质量大于 50% 的土统称为粗粒土, 根据粒组含量粗粒土可进一步划分。粒径 ≤ 0.075 mm 的土颗粒质量占总土质量大于 50% 的土统称为细粒土, 细粒土根据《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 [2]及《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011 [3], 依据土的塑性指数, 进一步分为粉土及黏性土。

粒径大于 0.075 mm 颗粒含量不超过总质量的 50%, 且塑性指数小于或等于 10 的土为粉土。塑性指数大于 10 的土为黏性土, 黏性土又分为粉质黏土和黏土。当塑性指数大于 10 小于或等于 17 的土为粉质黏土, 塑性指数大于 17 的土为黏土。

确定塑性指数的标准: 应由 76 g 圆锥仪沉入土中的深度 10 mm 测定的液限计算而得, 塑限以搓条法为准。而国际上通常采用 17 mm 液限计算塑性指数, 并以此来定名。

### 2) 土的物理力学指标

一般条件下土是由空气、水和土颗粒三相组成的, 见图 1 (引用第四版《工程地质手册》图 3-1-1)。

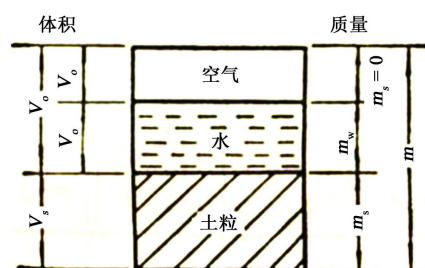


Figure 1. Composition of soil in three phases

图 1. 土的三相组成

冻土中水是以固态冰的形式存在的。水和空气两部分充填了土体的空隙，土颗粒构成了土体的固体部分。一般认为土体在荷载作用下空气和水被压缩挤出导致土体变形，土颗粒是不可压缩的。

土的物理性质由物理性质指标来表达，其中部分指标由试验直接测定，另一部分指标根据直接测定指标通过理论计算确定[4]。

由试验直接测定的土的基本物理性质指标为含水率、比重(颗粒密度)、质量密度、重力密度，由含水率、比重(颗粒密度)、质量密度计算求得的基本物理性质指标有干密度、孔隙比、孔隙率、饱和度，指标的表达式、单位、物理意义及计算公式详见表 1。

直接测定的可塑性指标为液限、塑限，计算求得的可塑性指标有塑性指数、液性指数、含水比、活动度，指标的表达式、单位、物理意义、计算公式详见表 2。

### 3) 地基承载力

地基承载力是地基土单位面积上随荷载增加所发挥的承载潜力，是评价地基稳定性的综合性用词。地基承载力是针对地基基础设计提出的为方便评价地基强度和稳定的实用性专业术语，并不是土的基本性质指标。土的抗剪强度理论是研究和确定地基承载力的理论基础。在荷载作用下，地基要产生变形。随着荷载的增大，地基变形逐渐增大，初始阶段地基土中应力处在弹性平衡状态，具有安全承载能力。当荷载增大到地基中开始出现某点或小区域内各点在其某一方向平面上的剪应力达到土的抗剪强度时，

**Table 1.** Basic physical property indexes

**表 1.** 基本物理性质指标

方法	指标名称	符号	单位	物理意义	计算公式
直接测定	含水率	$w$	%	土中水的质量与土颗粒质量之比	$w\% = (m_w/m_s) \times 100$
	比重	$G_s$	-	土粒质量与同体积 4℃ 时水的质量之比	$G_s = m_s/v_s \cdot \rho_w$ $\rho_w$ —水的密度
	质量密度	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	土的总质量与其体积之比即单位体积的质量	$\rho = m/v$
	重力密度	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	土的总重量与其体积之比，即质量密度乘以重力加速度	$\gamma = g \times \rho = 9.8 \times \rho \approx 10\rho$
计算求得	干密度	$\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	土粒质量与土的总体积之比 $\rho_d = m_s/v$	$\rho_d = \rho / (1 + 0.01w)$
	孔隙比	$e$	-	土中孔隙体积与土颗粒体积之比 $e = V_o/V_s$	$e = G_s \cdot \rho_w (1 + 0.01w) / \rho - 1$
	空隙率	$n$	%	土中孔隙体积与土的总体积之比 $n = (V_o/V) \times 100$	$n = (e / (1 + e)) \times 100$
	饱和度	$S_r$	%	土中水的体积与土中孔隙体积之比 $S_r = V_w/V_o$	$S_r = w \cdot G_s / e$

**Table 2.** Plasticity indexes of clay and silt

**表 2.** 黏性土、粉土可塑性指标

方法	指标名称	符号	单位	物理意义	计算公式
直接测定	液限	$w_L$	%	土由可塑状态过渡到流动状态的界限含水率	
	塑限	$w_p$	%	土由可塑状态过渡到半固体状态的界限含水率	
计算求得	塑性指数	$I_p$		土呈可塑状态时含水率的变化范围，代表土的可塑性程度	$I_p = w_L - w_p$
	液性指数	$I_L$		土抵抗外力的量度，其值愈大，抵抗外力的能力愈小	$I_L = (w - w_p) / (w_L - w_p)$
	含水比	$u$		土的天然含水率与液限之比	$u = w/w_L$
	活动度	$A$		土的含水率变化时土的体积相应的变化程度，其值愈大，变化程度愈大	$A = I_p / P_{0.002}$

注：P<sub>0.002</sub>—土中粒径小于 0.002 mm 的颗粒含量占全重的百分数。

该点或小区域内各点就发生剪切破坏而处在极限平衡状态, 土中应力将发生重新分布。这种小范围的剪切破坏区, 称为塑性区。地基小范围的极限平衡状态大都可以恢复到弹性平衡状态, 地基尚能趋于稳定, 仍具有安全的承载能力。但此时地基变形稍大, 必须验算变形, 变形的计算值不允许超过允许值。当荷载继续增大时, 地基出现较大范围的塑性区时, 将显示地基承载力不足而失去稳定, 此时地基达到极限承载力。

容许承载力是指在保证地基稳定不产生剪切破坏而失稳, 又能满足建筑物的沉降不超过允许值的最大荷载[5]。

地基承载力特征值是由荷载试验测定的地基土压力曲线中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点[6]。

建筑物的荷重、基础深度、基础结构、基础形状都是传递到地基上应力大小的主要因素, 是导致地基土压缩变形的外部因素, 而土本身的物理性质是决定地基土承载力的内部因素。土的含水率是一个非常重要的基本物理指标, 土的很多指标均与之有关。土的天然孔隙比及液性指数均与土的天然含水率呈正相关。土的含水率越大, 土的孔隙比和液性指数就越大, 从而土的可压缩空间就越大、土体抵抗外力的能力就越小, 也就是土的承载力随着含水率的变化而变化, 含水率越大承载力越小, 反之亦反。

#### 4) 细粒土承载力评价现状

地基承载力评价是岩土工程评价中最重要的内容, 目前, 有关国家标准均建议采用载荷试验确定地基土的承载力。在实际岩土工程勘察工作中, 载荷试验成本高, 推广应用的难度极大。如何评价地基土承载力就成了刻不容缓的研究课题。首先从细粒土着手研究, 以葫芦山湾海域粉土及黏性土为研究对象, 对土的主要物理力学性质指标与承载力对应数据, 逐项进行大量的对比分析, 最终证实: 土的主要物理指标天然含水率、天然孔隙比、液性指数与土的容许承载力具有高度的相关性, 均呈高度的负相关, 即指标越大承载力越小。

关于细粒土的主要物理指标与承载力关系的研究成果, 目前国内少见报道。本成果填补了葫芦山湾区域该领域研究的空白, 对细粒土承载力的全方位评价具有重要的实用价值及理论意义。

## 2. 葫芦山湾概况

### 1) 自然地理概况[7]

长兴岛是我国第五大岛屿, 面积 253 km<sup>2</sup>, 位于大连市瓦房店西南, 是辽宁省五点一线沿海经济带的重要节点, 国家及省市重点发展的石油及制造产业基地。2010 年已被确定为国家级经济开发区。葫芦山湾以成为黄金海湾, 渤海湾内冉冉升起的一颗璀璨明珠。

葫芦山湾在大连瓦房店西南的渤海海域, 湾口的两个岬角分别位于 39°24'48"N、121°14'36"E 和 39°30'50"N、121°12'14"E。湾口朝西略偏南, 面积为 127.5 km<sup>2</sup>, 滩涂面积 45.4 km<sup>2</sup>, 礁岛面积 1.5 km<sup>2</sup>。

### 2) 海底地形地貌[7]

该海湾海底地貌类型为水下浅滩, 水深由 0 m 变化至 15 m, 海底表面向外海倾斜。以葫芦山嘴为界分为内湾与外湾, 山嘴以东为内湾, 山嘴以西为外湾。内湾呈葫芦形, 中间为水深 0 m 至 3~5 m 的沟槽, 两侧为淤泥质潮滩。海底层表平缓, 水深 0~2.0 m, 高程-2.00~0.50 m; 外湾由葫芦山山嘴到湾口水深逐渐变大, 水深 2.0~20.0 m, 海底高程-1.0~-20.0 m, 水深在湾口处变化较快, 湾口北岬角处水深可达 20 m 以上。

### 3) 地层概况[8]

湾区海域地层自上而下分别为:

- a) 全新统海相堆积层, 主要为粉细砂及粉土、黏性土互层, 层厚 15~40 m。

- b) 更新统坡洪积层, 主要为粉土、黏性土层夹砂及碎石, 层厚 10~30 m。
- c) 元古界岩层, 主要为砂岩及页岩互层, 埋藏深度 20~80 m。

### 3. 相关分析

分析资料来源于大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 葫芦山湾西防波堤、南防波堤勘察资料[9]。

#### 1) 分析指标选取

与容许承载力具有明显相关性的主要物理指标为天然含水率、天然孔隙比、液性指数。黏性土及粉土的容许承载力, 根据天然含水率、天然孔隙比、液性指数分别按《港口工程地质勘察规范》JTJ240-97表C.0.6.1和表C.0.5.1确定[10]。为了充分呈现不同状态的地基土主要物理指标与容许承载力的对应关系, 选用了第四系全新统海相黏性土、粉土(软土)及更新统坡洪积黏性土、粉土(硬土)。并且分别采用三倍标准差方法对全新统及更新统黏性土、粉土进行了粗差别除, 保证了所选取的物理指标的代表性。

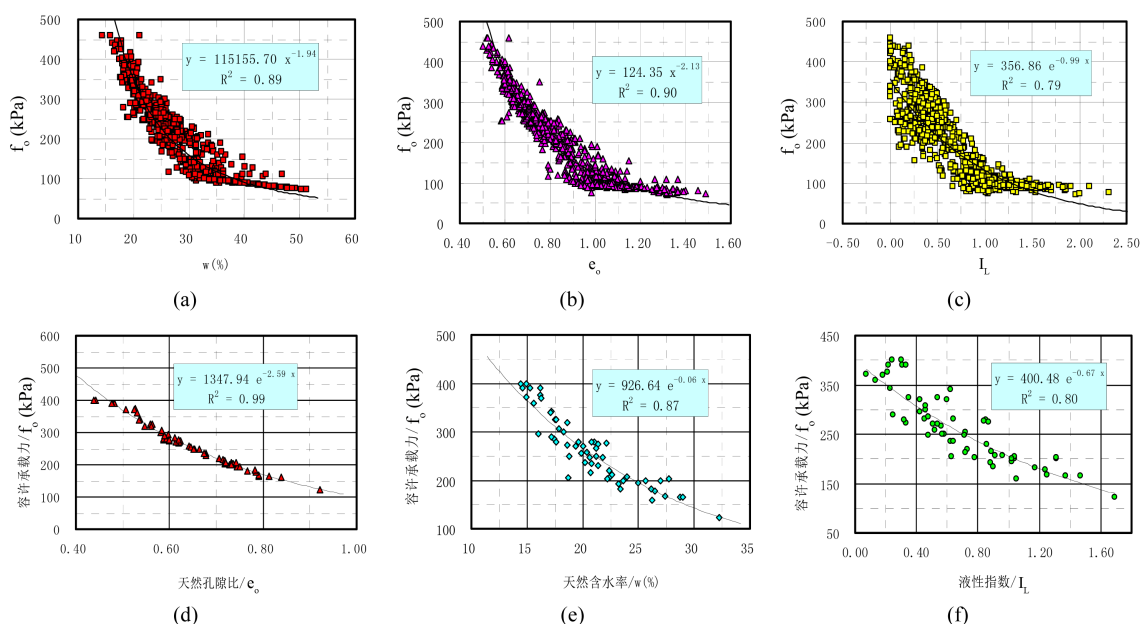
#### 2) 分析指标特征值

根据上述原则, 共选取主要物理力学指标黏性土 742 组、粉土 61 组, 根据现行《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 [11]有关规定, 对选取的物理力学指标进行了统计。统计样本数、最大值、最小值、平均值等特征指标, 详见表 3。

#### 3) 分析图及成果表

在直角坐标系中做散点图进行相关分析表明: 黏性土、粉土的天然含水率、天然孔隙比、液性指数与容许承载力具有较高的相关性, 经验关系式及相关系数, 详见图 2。

根据上述相关分析曲线图, 将相关分析对应指标、经验关系式、统计样本数、相关系数及统计区间进行汇总, 详见表 4。



**Figure 2.** Scatter diagram of correlation analysis. (a) The relationship curve of clay  $w$  to  $f_0$ ; (b) Adhesive  $e_0$  and  $f_0$  relationship curve; (c) The relationship curve between the  $I_L$ - $f_0$  of viscous soils; (d) A map of the relationship between soil  $w$  and  $f_0$ ; (E) Powder  $e_0$ - $f_0$  diagram; (f) Clay  $I_L$ - $f_0$  diagram

**图 2.** 相关分析散点图。(a) 黏性土  $w$  与  $f_0$  关系曲线; (b) 黏性土  $e_0$  与  $f_0$  关系曲线; (c) 黏性土  $I_L$  与  $f_0$  关系曲线; (d) 粉土  $w$  与  $f_0$  关系图; (e) 粉土  $e_0$  与  $f_0$  关系图; (f) 粉土  $I_L$  与  $f_0$  关系图

4) 经验关系表

根据表 4 经验关系, 建立黏性土、粉土主要物理指标与容许承载力的经验关系表, 详见表 5~7, 中间值可采用内插法确定。

Table 3. Analysis index characteristic values

表 3. 分析指标特征值

土的类型	统计项目	天然含水率 $w(\%)$	天然孔隙比 $e_o$	液性指数 $I_L$	容许承载力 $f_o$ (kPa)
黏性土	样本数	742	742	742	742
	最大值	51.2	1.491	2.78	460
	最小值	14.3	0.503	0.00	72
	平均值	29.5	0.876	0.72	199
粉土	样本数	61	61	61	61
	最大值	32.2	0.92	1.69	400
	最小值	14.4	0.44	0.07	123
	平均值	20.8	0.65	0.69	263

Table 4. Summary of correlation analysis

表 4. 相关分析汇总表

土的类型	指标	经验关系	曲线类型	样本数/个	相关系数 $R^2$	适用范围
黏性土	$w$ 与 $f_o$	$f_o = 115156w^{-1.9365}$	乘幂型	742	0.89	$w = 14.3 \sim 51.2$
	$e_o$ 与 $f_o$	$f_o = 124.35e_o^{-2.1272}$	乘幂型	742	0.90	$e_o = 0.50 \sim 1.50$
	$I_L$ 与 $f_o$	$f_o = 356.86e^{-0.9945I_L}$	指数型	742	0.79	$I_L = 0.00 \sim 2.8$
粉土	$w$ 与 $f_o$	$f_o = 926.64e^{-0.06w}$	指数型	61	0.87	$w = 14.3 \sim 51.2$
	$e_o$ 与 $f_o$	$f_o = 1347.9e^{-2.59e_o}$	指数型	61	0.99	$e_o = 0.50 \sim 1.50$
	$I_L$ 与 $f_o$	$f_o = 400.5e^{-0.67I_L}$	指数型	61	0.80	$I_L = 0.00 \sim 2.8$

Table 5. Relationship between  $w$  and  $f_o$

表 5. 天然含水率  $w$  与容许承载力  $f_o$  关系表

$w/\%$	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	40	45	50
$f_o/\text{kPa}$														
黏性土	608	477	385	317	266	226	195	170	149	132	118	91	72	59
粉土	363	321	283	250	221	195	172	152	134	118	-	-	-	-

Table 6. Relation between  $e_o$  and  $f_o$

表 6. 天然孔隙比  $e_o$  与容许承载力  $f_o$  关系表

$e_o$	0.5	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$f_o/\text{kPa}$																
黏性土	543	444	369	311	266	229	200	176	156	139	124	102	84	71	61	52
粉土	373	328	289	254	223	196	173	152	134	-	-	-	-	-	-	-

Table 7. Relationship between  $I_L$  and  $f_o$

表 7. 液性指数  $I_L$  与容许承载力  $f_o$  关系表

$I_L$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
$f_o/\text{kPa}$												
黏性土	357	292	240	196	161	132	108	89	73	60	49	40
粉土	400	351	307	269	235	206	180	158	138	121	-	-



## 4. 应用实例

### 1) 应用方法

在实际勘察工作中, 首先以上述物理指标的层位平均值为评价指标, 然后直接利用计算公式或查表评价黏性土、粉土的容许承载力。

对于黏性土、粉土的承载力特征值的评价, 采用天然含水率、天然孔隙比、液性指数三种评价指标分别评价容许承载力, 借鉴《建筑地基基础设计规范》附录 C 浅层平板载荷试验要点[12]中评价承载力特征值的方法, 计算各种指标评价的容许承载力平均值, 当各种方法的评价值的极差不超过平均值的 30% 时, 取此平均值做为该土层的地基承载力特征值。

当有标准贯入试验成果时, 再根据《港口工程地质勘察规范》JTJ240-97 表 C.0.6.2、表 C.0.5.3 [13], 采用标贯击数修正值的平均值评价黏性土及粉土的容许承载力, 将标贯修正击数 N 做为第四项评价指标加入其中进行综合评价, 同时对上述黏性土、粉土的承载力容许值的评价结果也起到了验证的作用。

### 2) 应用实例

以大连葫芦山湾某工程为例, 土层试验指标采用平均值, 其中标贯击数 N 为修正击数, 按上述建立的经验关系评价的容许承载力及承载力特征值的评价过程, 详见表 8。

**Table 8.** Bearing capacity characteristic value evaluation table

**表 8.** 承载力特征值评价表

层号	土的名称	试验指标	容许承载力 $f_0$ (kPa)	均值	极差	极差均值比 (%)	承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)
1-1	淤泥质粉质黏土	$N/击$	2.1	87	94.2	12	12.7
		$w/\%$	38.9	96			
		$e_o$	1.111	99			
		$I_L$	1.33	95			
1-2	粉质黏土	$N/击$	4	125	135	23	17.0
		$w/\%$	31.1	148			
		$e_o$	0.963	135			
		$I_L$	1	132			
1-3	粉质黏土	$N/击$	7	190	202	27	13.4
		$w/\%$	26.8	198			
		$e_o$	0.795	203			
		$I_L$	0.5	217			
1-4	粉土	$N/击$	15	213	225	19	8.4
		$w/\%$	22.2	232			
		$e_o$	0.69	229			
		$I_L$	0.86	226			
2	粉质黏土	$N/击$	10.7	273	265	37	14.0
		$w/\%$	24.1	243			
		$e_o$	0.703	263			
		$I_L$	0.24	281			

表 8 中各土层的极差均值比 8.4%~17.0%，均小于 30%，说明各种评价方法评价的结果趋于一致，所以最终均采用各项指标评价的容许承载力的平均值(去零数取整 10 数)为承载力特征值。通过标贯试验指标 N 对其它物理指标评价结果的检验，各项指标的评价结果高度契合、安全可靠。

## 5. 结语

1) 通过相关分析证实了黏性土、粉土的天然含水率、天然孔隙比、液性指数与容许承载力具有较高的相关性，三项指标与容许承载力均呈负相关，天然含水率、天然孔隙比、液性指数越大，容许承载力越小，反之亦反；

2) 黏性土、粉土主要物理指标与容许承载力经验关系的建立，为葫芦山湾区域多角度、全方位评价黏性土、粉土的容许承载力及承载力特征值，提高黏性土、粉土承载力评价的可靠性提供了理论支持，其它地区可参考借鉴。

## 参考文献

- [1] GB/T50145-2007. 土的工程分类标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 6-8.
- [2] GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 10-11.
- [3] GB 50007-2011. 建筑地基基础设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 12-15.
- [4] 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 132-136.
- [5] JTJ240-97. 港口工程地质勘察规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 60.
- [6] GB 50007-2011. 建筑地基基础设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 2.
- [7] 中国海湾志(第二分册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 203-242.
- [8] 大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司. 葫芦山湾区域勘察资料, 2006-2017 [Z].
- [9] 大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司. 葫芦山湾西防波堤、南防波堤勘察资料, 2010-2011 [Z].
- [10] JTJ240-97. 港口工程地质勘察规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 61-63.
- [11] GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 132-133.
- [12] GB 50007-2011. 建筑地基基础设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 124-125.
- [13] JTJ240-97. 港口工程地质勘察规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 61-62.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)