

# 海洋波浪作用下土动力特性的 研究现状和发展

钱寿易 楼志刚 杜金声

(中国科学院力学研究所, 北京)

## 提 要

随着海洋工程的发展, 尤其近海石油开发迅速扩大, 对海工建筑的设计需要考虑风、浪、流等环境载荷的作用, 海洋土在波浪载荷作用下特性的研究引起人们的重视。本文就近年来国内外开展研究工作的情况和已取得的资料作一综合评述, 并结合我国的情况就应开展的有关研究工作提出几点看法。

## 一、前 言

随着海洋石油的开发和巨型固定式采油平台的建立, 尤其是从73年开始, 钢筋混凝土重力式平台在北海出现后, 海洋土的力学性质的研究就更加突出。在海洋环境中, 下列五点尤为突出: ①载荷严峻; ②土性特殊; ③取样勘探困难; ④工程规模大; ⑤施工困难。无论是钢管架式桩结构平台还是钢筋混凝土重力式平台以及其它海工建筑物, 都将有巨大的自重以及由风浪或冰流引起的强大的随机性水平力和力矩作用于基础底面。海洋土和大陆土有很大不同, 海洋土含盐量大、有大量骨骼和有机质、沉积率慢而形成特殊的蜂窝状结构, 由于高压和低温对土结构胶结的影响, 往往存在表观超固结现象。对于密实的砂土在波浪载荷作用下也不能排除液化的可能性, 而且不能完全用排水强度指标。因此, 设计者就面临一系列严峻的课题, 其中最突出的是波浪周期载荷作用下地基土壤的力学性质问题。

地震和其它机械振动对土壤力学性质的影响, 早已有许多研究者做了大量工作。波浪周期加载问题, 在六十年代还不太重视, 自七十年代以来, 无论其研究的广度与深度都有了很大进展。最初的一些研究工作大多是关于波浪载荷下砂土液化的可能性或液化强度, 主要还是沿用地震研究中的方法, 继而研究了孔隙水压力消散的影响。李(Lee)<sup>[1]</sup> 曾为北海建立的第一个埃科菲斯克(Ekofisk) 油罐地基砂土液化的可能性进行了研究, 考虑了孔隙水压力部分消散的影响。西特(Seed)<sup>[2,3]</sup> 对埃科菲斯克油罐的砂基, 可能发展起来的孔隙水压力进行了分析, 不仅考虑了孔隙水压力部分的消散, 而且进一步考虑了地基中剪应力的分布。同时研究了由波浪直接作用在海底无粘性土中产生的孔隙水压力和海底表面覆盖层的影响。

粘性土在周期载荷作用下性质的研究已引起各国研究者的很大重视, 开展了大量的研究<sup>[4-9, 25-27]</sup>。应当特别提到的是挪威土工研究所等四个单位联合对德勒门(Drammen) 粘土进行了广泛而系统的研究。试验方式是用周期加载的三轴仪和周期加载的单剪仪, 共做了 129

个三轴试验和103个单剪试验<sup>[10]</sup>。埃特森 (Andersen) 研究了由于风暴波浪力的周期作用对海洋平台引起的周期垂直位移、周期水平位移以及旋转位移。同时提出了计算波浪周期加载引起沉降的分析计算程序的建议<sup>[11]</sup>。

采用离心模型试验机进行海底土在波浪载荷作用下特性的研究也引起人们的重视。英国的罗 (Rowe) 教授在这方面进行了一些研究<sup>[12]</sup>。埃特森在对德勒门粘土室内试验基础上, 也进行了模型试验<sup>[13]</sup>。

模拟海洋平台的实际加载条件, 对在野外进行各种方式的周期加载试验也开展了一些研究, 如英国的房屋研究站 (BRS) 和荷兰的台夫脱 (Delft) 土力学试验室等<sup>[14]</sup>。

大连工学院曾对渤海海底土在一次风暴作用下孔隙水压力、应力-应变关系的变化规律进行了研究\*, 同时也观察了不同情况的历史风暴的影响。在生产实践方面, 国内尚未开展工作。

虽然波浪载荷作用下土的性质的研究各国已经开展了不少工作, 但无论在土的强度或变形性质方面都还有许多工作要做。美国的海洋工程局 (ODE) 把下列有关海洋土性的研究作为重点研究课题: ①抗剪强度 (包括短期与长期、排水与不排水、长期强度、周期强度、变形特性及承载力); ②强度变化包括液化及应力-应变关系 (在动载和重复载荷下, 特别是在长期周期载荷下); ③改进取土样技术减少扰动程度及对土样扰动的定量估计; ④近海微震活动情况以及可能产生强震活动的估计; ⑤现场的孔隙水压力和应力状态的测定。本文仅对波浪周期载荷作用下土的特性的国内外研究现状做一综述。

## 二、海洋波浪载荷的状况

海洋工程设计中, 海洋波浪引起的载荷一般考虑百年一遇的风暴所引起的波浪作用。它是以海浪实测资料为基础, 由统计方法得出的。一般波浪从开始发展到最大波高的时间约为 3~9 h, 其衰减时间与成长时间是接近的。设计中所考虑的波浪在最不利的 6 h 内所包含的各种波高和波数。波浪的周期一般在 5~20 s 范围之内, 随着波高不同而改变。典型北海百年一遇的波浪资料如图 1 所示。

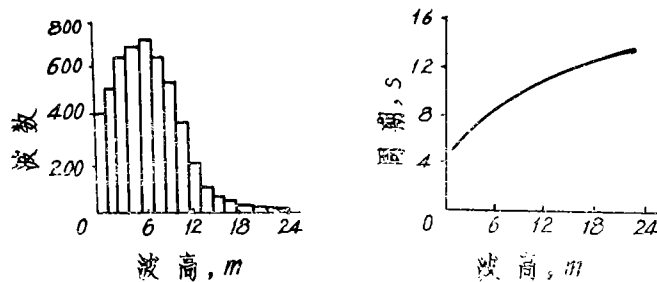


图1. 北海波浪分布〔引自参考文献(15)〕

由我国南海五十年一遇的波浪推算的最大波高为18~21 m, 周期15 s左右, 而渤海百年一遇的波浪的最大波高为 8~10 m, 周期为11秒左右。

\* 王中正等, 土壤土地基在风暴中的孔隙压力和应力-应变关系, 大连工学院, 1980年。

作用在海工结构上的百年一遇的波浪,传递到地基上的载荷,如北海典型的重力式平台,平台基础底面的直径为100m,则地基上除承受15万t自重外,还承受由于波浪作用而产生的 $\pm 5$ 万t水平力和 $\pm 2 \times 10^6$  t·m力矩。由此可见,波浪载荷对地基的作用就成为海工结构地基设计中的一个重要问题。

海洋波浪引起的周期载荷与地震载荷比较有三个主要差别:①波浪载荷的周期比地震载荷要长得多,一般地震载荷的周期为0.5~1 s而波浪载荷的周期为5~20 s;②波浪载荷的持续时间比地震载荷长得多,一般地震载荷的持续时间不超过2 min而波浪载荷则为3~9 h;③通常海工结构在经受最大海洋波浪载荷作用之前,已经受到若干小的波浪载荷的作用,这些先期的小波浪载荷对土性产生明显的影响。由于波浪载荷与地震载荷有这些区别,因此波浪载荷在试验方法、试验程序以及分析计算等方面都与地震载荷不同。

### 三、试验方法

近海重力式结构由于波浪作用承受周期载荷,在地基承载力、稳定分析和地基变形计算中,就需要确定土在静载和周期载荷作用下的应力-应变强度性质及固结状态。现场的受力状况见图2(a)。图2(b)表示作用于典型单元上的静止应力和周期应力。在实验室内要完全模拟现场这种应力状态是很困难的。一般都简化用周期单剪试验和周期三轴试验来进行研究,以确定地基土在周期载荷作用下的变形和强度。然而,无论用哪种试验装置都不能反映现场应力时间历程的全部状况和实际的应力路径。

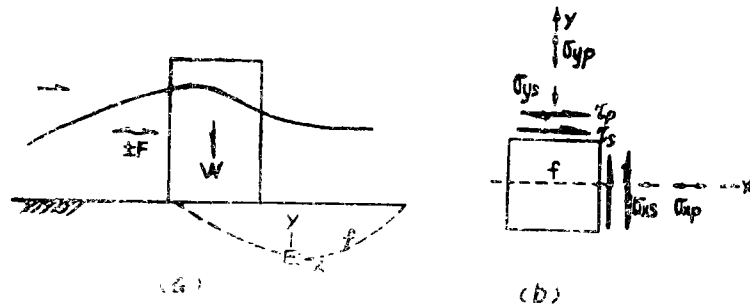


图2. 现场应力状态

目前周期加载试验可分四种类型:①等应力幅值试验;②等应变幅值试验;③模拟风暴加载试验——由一定周期次数组成一组周期加载,各组周期加载采用不同的应力幅值进行试验;④间歇周期试验——由一定周期次数组成一组周期加载,各组采用同样的应力幅值,但各组之间有一个间歇时间,允许试样中的超孔隙水压力完全消散,主要是模拟各个风暴之间有一段相对的平静时间。

试验中周期加载的频率应根据波浪统计资料确定,一般常为0.1Hz。

关于破坏准则,目前对砂土用周期载荷作用下产生的孔隙水压力与固结压力之比来评价,当 $\Delta u/\sigma_v = 1$ 时,作为砂土开始液化的条件。对于粘性土往往规定周期剪应变幅值 $r_c$ 达到 $\pm 3\%$ 时为破坏标准,或在单剪试验中加载2000次和三轴试验中加载5000次后停止试验。也用应变与加载次数的关系曲线上的应变拐点来定义破坏。

对于粘性土,通常还进行周期加载对静止强度影响的试验,即在周期加载下发展到一定

应变后再加静载使试样破坏,求得静态强度值。

#### 四、波浪载荷作用下土的特性

1. 砂土在周期载荷作用下的性质,十多年来结合地震的研究已做了大量的工作<sup>[16-20]</sup>。有些成果可直接用来分析海浪载荷的作用。虽然地震的周期载荷频率与海浪的频率是不一样的,但通过实验已初步证实,在 $0.1\sim 16\text{ Hz}$ 范围内周期加载的频率对砂土没有什么影响<sup>[16,17]</sup>。由于一次大风暴引起的波浪载荷持续时间相当长,因此需要在考虑周期载荷引起孔隙水压力的同时,由于部分排水而造成的孔隙水压力的消散作用。理论和实验研究都曾证实在波浪长时间作用下,部分排水对砂土性质的影响是较大的<sup>[11,21]</sup>。图3给出李所得到的结果。

在百年一遇风浪出现之前,总是先有一系列小风浪作用着,而小风暴引起的波浪载荷在地基中产生的孔隙水压力是可以消散的。这就是小波浪周期加载的预剪作用。图4表示室内对预剪作用进行试验的实际结果。发现预剪作用增强了砂土承受百年一遇风浪作用的能力<sup>[1,18,21]</sup>。

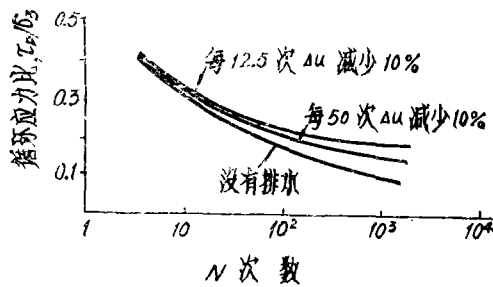


图3. 部份排水对土的性质影响

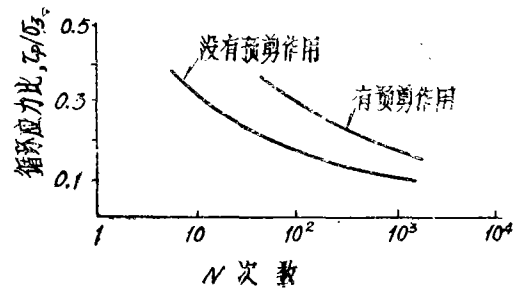


图4. 预剪作用的影响

2. 粘性土在周期载荷作用下的性质研究表明,对于一定的粘性土存在着一个临界周期应力比的下限,当周期应力比大于这个界限时,周期载荷持续作用引起孔隙水压力和变形的累积,最后达到不同程度的破坏。当周期应力比小于这个界限时,出现非破坏的平衡状态<sup>[21,22]</sup>。加载频率的作用对粘土有一定的影响已为实验所证实<sup>[4,28]</sup>,见图5。预剪作用和部分排水的影响,对于不同类型的粘性土是不一样的。对于正常固结粘土与砂土相类似,因此正常固结粘土再承受周期载荷的能力增强,而对于超固结粘土从图6中可以看出,排水后再承受同样的周期载荷,产生的孔隙水压力和剪切变形相应增大,从而减弱了再承受周期载荷的能力<sup>[6]</sup>。

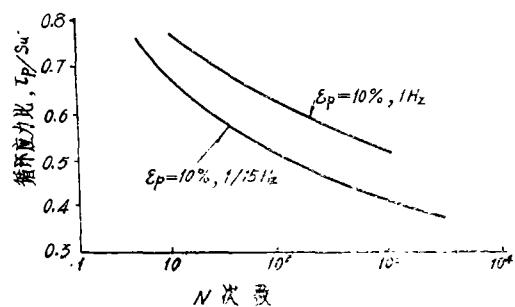


图5. 频率对粘土动力特性的影响

图7表示粘土(超固结比为4)的割线模数与加载次数和周期剪应力的关系。图中虚线为静态的割线模数。值得注意的是,加载第一周期的割线模数比静态割线模数大,这是加载速率不同的原因。同时,在很低周期应力时的割线模数几乎与周期加载的次数没有关系。

图7表示粘土(超固结比为4)的割线模数与加载次数和周期剪应力的关系。图中虚线为静态的割线模数。值得注意的是,加载第一周期的割线模数比静态割线模数大,这是加载速率不同的原因。同时,在很低周期应力时的割线模数几乎与周期加载的次数没有关系。

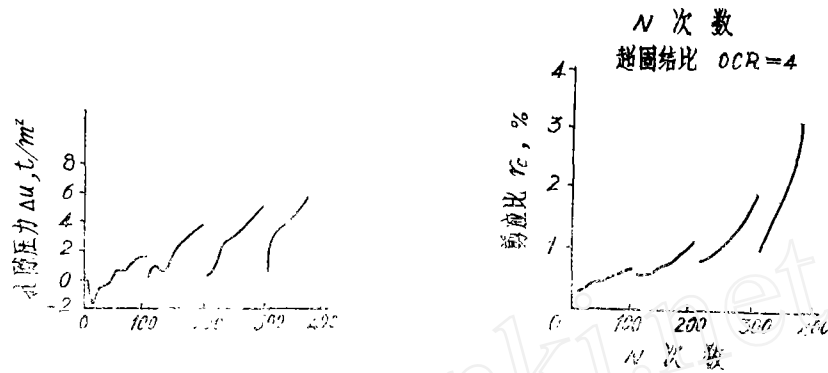


图6. 排水对超固结粘土的影响

周期加载对粘性土静态强度的影响,从实验资料<sup>[4,11]</sup>中看出,周期加载使粘性土软化,降低了粘性土的静态强度,而且与周期加载所产生的累积剪应变幅值大小有关,见图8。对于超固结比为4的德勒门粘土,有人作过试验,当加载1000次以后,剪切应变小于 $\pm 3\%$ 时,在单剪条件下,静态强度的减小不大于25%。

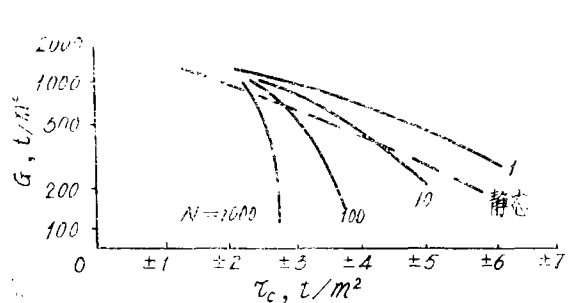


图7. 周期加载对模数的影响

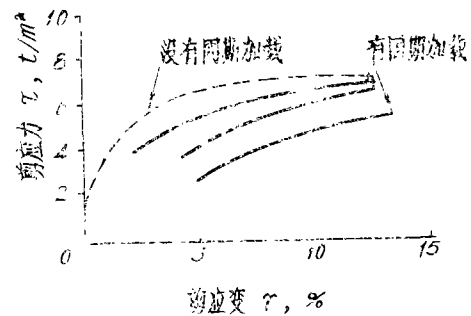


图8. 周期加载对静强度的影响

## 五、几点看法

1. 在周期载荷作用下土的破坏状态应怎样正确定义是一个值得探讨的问题。目前对破坏状态有各种定义,如①选用一定的轴向总应变或者动应变幅值;②随周期次数的增长应变速率最快的点;③以有效应力原理为基础的极限平衡;④孔隙水压力等于固结压力或垂直压力,等等。对于砂土,随着周期载荷作用下土中孔隙水压力的发展,用有效应力原理来解释土样内应力状态的变迁,问题在于达到极限平衡状态以后,孔隙水压力进一步发展,土中有效应力路径是怎样变化的?应当怎样描述?而对于粘土则更为复杂,每种粘土都存在一个临界周期应力比,影响临界周期应力比的因素很多,诸如周期次数、动应力幅值、频率、固结压力、应力历史和加载条件等等,什么是主导因素目前还不十分清楚。粘土在周期载荷作用下引起的孔隙水压力又与累积剪切应变有很大关系。总之对周期载荷作用下土的破坏机理进行深入研究很有必要。

2. 对周期载荷作用下的各种不同类型土的性质,尤其是对于粘性土性质,应广泛地进行

试验研究。在海洋领域内大量出现一种轻亚粘土,其组成主要是砂粒和粉粒,还含有10%左右的粘粒,而目前这种土性研究还很不够。如周期加载后,该土的静强度降低的程度究竟在先期周期加载引起的累积剪应变为多少时,才不致于显著地降低土的静强度,静强度与超固结比的关系如何,等等,都有待于进一步做研究工作。

3. 由于超固结土在排水和预剪情况下的强度减少,在一定周期剪应力幅值下,正常固结粘土比超固结粘土对不排水的抗周期载荷能力更强。因此对海洋土的固结状态的评定就特别重要。同时要对海洋土的表现超固结特性进行研究。

4. 土和结构的动力相互作用的研究已提到日程。不管采用什么计算方法,土性参数的选择是极为重要的。模量的评价是一个重要问题。而阻尼的非线性问题亦有待研究,这在海洋工程中非常困难,应引起重视。

5. 试验技术方面,动三轴和动单剪试验分别用于不同受力状态的地基部分,然而,两种试验装置都有其局限性,实验室的试验结果能否直接用于现场条件尚存在很大问题,各种试验方式得出不同的应力路径和不同的强度。三轴试验中试样破坏面上的应力状态受加载控制方式和端部条件限制,故孔隙水压力量测对周期载荷更为重要。因有滞后效应,且周期孔隙水压力分布不均匀,因而使分析增加困难。由于累积孔隙水压力对系统的滞后不敏感,有人就建议在加载和卸载中停留20分钟测累积孔隙水压力,孔隙水压力量测技术有待发展。单剪仪中试样内剪应力和剪应变分布不均匀以及应力集中问题要引起重视。有人提出,试样高径比小于 $\frac{1}{2}$ 时,应力集中就不严重。除进一步改进试验装置外,土样扰动是一个严重的问题,尤其在海洋中取土既困难,扰动程度又大,进一步改进海上取样技术是十分必要的。由于海洋中土的总应力状态很突出,土体中化学和生物作用产生大量气体,常存在超孔隙水压力,要得到高质量的原状土样很困难,在现场进行周期加载的试验和量测技术急待探索。

总之,要考虑特定地区的载荷条件、排水条件、土质条件和应力条件制订研究方案和试验设备,找出规律和模型。同时要抓紧解决原状土样和现场试验技术,才能使研究取得进展。

### 参 考 文 献

- [1] Lee, K. L. and Focht, J. A., Liquefaction Potential at Ekofisk Tank in North Sea, J. GE Dn., ASCE, Vol. 101, No. GT1, 1975.
- [2] Seed, H. B. and Rahman, M. S., Pore Pressure Development under Offshore Gravity Structures, J. GE Dn., ASCE, Vol. 103, No. GT12, 1977.
- [3] Seed, H. B., Wave Induced Pore Pressure in Relation to Ocean Floor Stability of Cohesionless Soils, Marine Geotechnology, Vol. 3, No. 2, 1978.
- [4] Lee, K. L. and Focht, J. A., Strength of Clay Subjected to Cyclic Loading, Marine Geotechnology, Vol. 1, No. 3, 1976.
- [5] Andersen, K. H., Effect of Cyclic Loading on Clay Behaviour, NGI Publ., No. 113, 1977.
- [6] Andersen, K. H., Behaviour of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading, BOSS' 76, Vol. 1, 1976.
- [7] Lee, K. L., Cyclic Testing of Soil for Ocean Wave Loading Problems, Marine Geotechnology, Vol. 1, No. 4, 1976.
- [8] Koutsoftas, D. C., Effects of Cyclic Loads on Undrained Strength of Two Marine Clays, J. GE Dn., ASCE, Vol. 104, No. GT5, 1978.

- [9] Ogawa, S., Dynamic Strength of Saturated Cohesive Soil, Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol. 2, 1977.
- [10] Andersen, K. H., Pool, J. H., Brown, S. F. and Rosenbrand, W. F., Cyclic and Static Laboratory Tests on Drammen Clay, J. GE Div., ASCE, Vol. 106, No. GT5, 1980.
- [11] Andersen, K. H., Hausteen, O. E., Höeg, K. and Prevost, J. H., Soil Deformations due to Cyclic Loads on Offshore Eng. Structures, Numerical Methods in Offshore Eng., 1977.
- [12] Rowe, P. W., Craig, W. H. and Procter D. C., Model Studies of Offshore Gravity Structures, BOSS'76, Vol. 1, 1976.
- [13] Andersen, K. H., Selnes, P. B., Rowe, P. W. and Craig, W. H., Prediction and Observation of a Model Gravity Platform on Drammen Clay, BOSS'79, Vol. 1, 1979.
- [14] Höeg, K., State of the art: Foundation Engineering for Fixed Offshore Structures, BOSS'76, 1976.
- [15] McClelland, B., Geotechnical Problems in Ocean Eng., Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol. 3, 1977.
- [16] Drnevich, Undrained Cyclic Strength of Saturated Sand, J. SMF Div., ASCE, Vol. 98, No. SM8, 1972.
- [17] Yohimi and Oh-Oka, Liquefaction of Saturated Sand During Vibration under Quasi Plane Strain Conditions, Proc. third Japan Earthquake Eng. Sym., 1970.
- [18] Seed, H. B., Some Aspects of Sand Liquefaction Under Cyclic Loading, BOSS'76, Vol. 1, 1976.
- [19] Lee, K. L., Fundamental Considerations for Cyclic Triaxial Tests on Saturated Sand, BOSS'76, Vol. 1, 1976.
- [20] Lian Finn, W. D., Analysis of Piled Foundations for Offshore Structures under Wave and Earthquake Loading, BOSS'79, Vol. I, 1979.
- [21] Bjerrum, L., Geotechnical Problems Involved in Foundation of Structure in the North Sea, Geotechnique, Vol. 23, No. 3, 1973.
- [22] Yudhbir, and Rahman, M. S., Deformation and Pore Pressure Response of a Soft Clay Subjected to Repeated Loading, Geotechnical Aspects of Soft Clays, 1977.
- [23] Fisher, J. A., The Behaviour of Marine Soils under Cyclic Loading, BOSS'76, Vol. I, 1976.
- [24] Sangrey, D. A. and Henkel, D. J., The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geo., Vol. 6, 1969.
- [25] France, J. W. and Sangrey, D. A., Effects of Drainage in Repeated Loading of Clays, J. GE Div. ASCE, Vol. 103, No. GT7, 1977.
- [26] Sangrey, D. A., Castro, G., Poulos, S. J. and France, J. W., Cyclic Loading of Sands, Silts and Clays, Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Vol. I, 1978.

## State-of-the-art of Dynamic Characteristics of Soil under Ocean Wave Loading

*Qian Shou-yi, Lou Zhi-gang and Du Jin-sheng*

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

### Abstract

Accompanying the development of ocean engineering, particularly the rapid expansion of oil exploitation, research on the characteristics of marine soil under the action of wave loading has been given special attention for the design of offshore structures with the general environmental conditions such as wind, wave and current etc. This paper gives a composite review on the international research activities and on the materials collected thereon during the recent years, and also, on the basis of current status in our country, suggests the research work that should be carried out