

Some aspects of swelling and shrinking behaviour of active clay formations

M. E. POPESCU *

SUMMARY: Engineering problems associated with active clay formations, having a large swelling and shrinking potential, are existing in different regions of Romania.

In the general framework of the active clays behaviour, the present paper describes some particular aspects of swelling and shrinkage processes.

The differences between swelling potential relationship obtained by two different methods are presented and discussed. Swelling pressure tests were accomplished using the available standard techniques, as well a special developed cell pressure equipment.

Attention is drawn on the stages of shrinkage process as related to the soil structure. It was found that, in a general case, there are three distinct stages: initial, normal and residual shrinkage.

Laboratory investigations have shown that in soils with an anisotropic structure, the directional variation of shrinkage strains is elliptical in shape, with the maximum shrinkage normal to particle orientation.

1. Introduction

Large areas in the world are covered by clay formations of high swelling and shrinking potential. Due to their large volume changes induced by their moisture content variations, these clays are often referred as « active clays ».

In Romania, the active clays, responsible of large swelling and shrinkage movements of foundation soil, are widely spread over the Sub-Carpathian zones, the Transylvanian table-plain, the Danube area, as well as over many other isolated zones through the country (fig. 1).

Problems associated with damage of con-

structions on expansive soils, have been reported from different countries of the world: Africa, Australia, Canada, India, Israel, Soviet Union, Spain, United States [POPESCU, 1974 a]. They include heaving, cracking and breakup of building foundations, retaining structures, channel and reservoir linings, railways and roads.

In most of the reported cases, the structure damage is mainly caused by the continuous swelling of the foundation, until final equilibrium is reached [JENNINGS, 1973]. Although in the early stages in the life of a building, either dishing or doming can occur, the final cracking pattern is characteristic of doming, except where the local water sources have caused a disturbance of the general pattern.

The above observations, apply to the zones where the free surface evaporation greatly exceeds the annual rainfall. When a semipermeable membrane, represented by the construction, is placed on the desiccated soils, water evaporation is reduced and the foundation soil will gain any available water, resulting a corresponding heave of the structure.

The climatic conditions of Romania are somewhat different. The general feature of the Romanian climate belongs to the subhumid type, the total rainfall being slightly lower than the total evapotranspiration. The Romanian climatic zone map, according to the Thornthwaite moisture index, I_m , is given in fig. 2. In reference to the map of fig. 1, it may be observed that some areas covered by expansive clay formations fall in the semi-arid climatic zones.

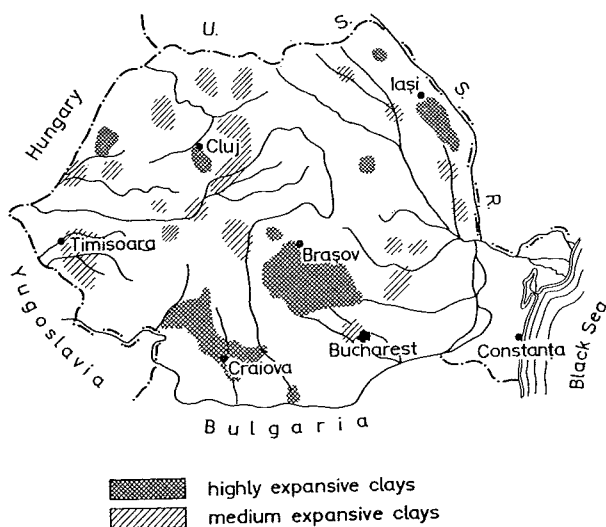


Fig. 1. - Active clay formations map of Romania.

* MIHAIL E. POPESCU, Ass. Professor of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Civil Engineering Institute, Bucharest, Romania.

The precipitation occurrence has a seasonal distribution over a year. Large changes of soil moisture content are induced during the alter-

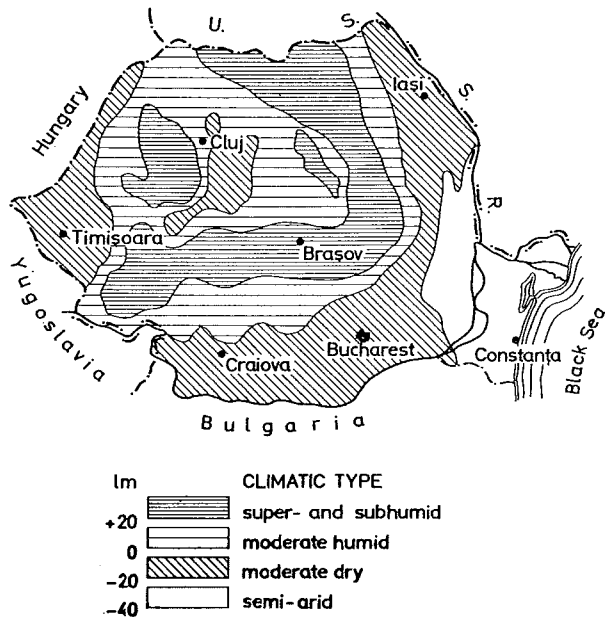


Fig. 2. - Climatic zone map of Romania.

nate wet and dry seasons, which in turn cause large soil seasonal movements, both by swelling and shrinking. BARACOS and BOZOZUK [1975] and DE GRAFT-JOHNSON [1973] reported ground movements and structure damages due to cyclic moisture changes, similar to conditions in Romania.

Damages of varying magnitudes were recorded for different types of structures founded on expansive soils in Romania. Previous construction procedures for light structures, as rural or single-family residential building, were based primarily on observation and local experience, often without adequate consideration of the soil characteristics.

The pioneering work in the field of swelling and shrinkable clays of Romania was performed since 1950 [PROFIRI *et al.*, 1950] by a research team of the Romanian Academy Technical Section. An interesting solution of separation and insulating of small constructions from the surrounding expansive ground by means of a layer of local soil, stabilized by mixing with sand, was proposed at that time. This solution has been applied to a number of existing structures with good results.

In recent years, intensive investigations on the swelling and shrinking behaviour of Romanian active clay formations were performed. A State standardization document entitled « Technical Instructions for Design and Constructions of Structure on Expansive Soils » was elaborated in 1973 for those who are concerning on engineering problems related to expansive clays.

2. Causes and effects of moisture variation in active clay formations

Large moisture variations of clay soils occur in a climate with alternate wet and dry seasons such as Romanian climate. The causes and the

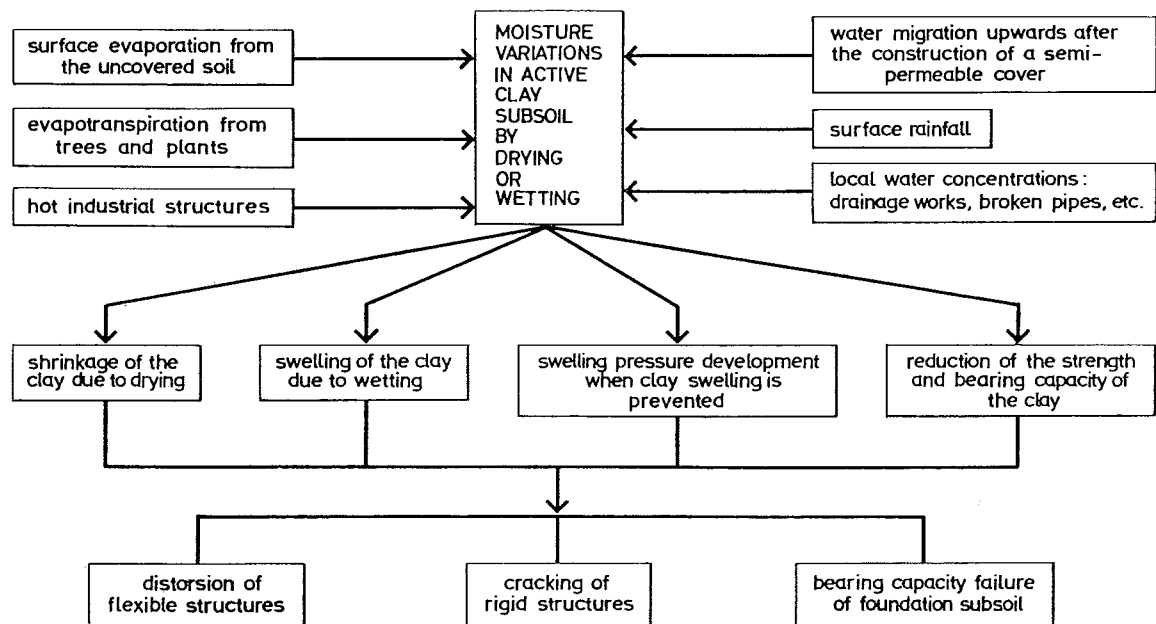


Fig. 3. - Causes and effects of moisture variations in active clay formations.

engineering effects of moisture variations in active clays are schematically presented in fig. 3.

Moisture variations have a detrimental influence on the properties of the clay in its role as the foundation of the engineering structures. The important properties being affected include swelling, shrinkage and shear strength. The phenomena accompanying the changes in clay properties are dependent upon the structure type [LIVNEH, 1973].

In most Romanian zones covered by expansive clay formations, the water table level was found at depth more than 8-10 m. Field investigations in typical uncovered areas evidenced a maximum seasonal moisture change of about 20% at 0.4 m, 10% at 1.2 m, decreasing under 5% at 1.8 m. The corresponding cyclic ground surface movements were about 10-12 cm.

A very common observation is that, in droughty months, the active clay formations are invariably cracked, cracks being disposed in a polygonal network. When the cracks are open and air filled, the soil structure is described as shattered. If the cracks are close the structure is described as fissured. Often the opening of the cracks can reach 15 cm, their depth being even 2 m. During quick summer rainfalls, cracks do not shut and water penetrates to great depth. In autumn they are shut from the surface, and sometimes, in droughty years, remain open from one year to the other.

Based on the field observations, it was stated that the depth of active zone, for our country, is about 2.0-2.5 m. It is interesting to note that research done in South Africa, India, Australia, Israel and U.S.A., has indicated that the active zones in the studied areas were about 3 m, although in Kibbutz area it was found the active zone to be up to 6 m [SHRAGA *et al.*, 1973]. But it must be kept in mind that swelling may occur in clays deeper than the active zone over a long period of time [KOMORNIK, 1973].

3. Factors affecting swelling and shrinkage of active clay formations

Swelling and shrinkage of active clays are complex processes, resulting from the complicated interaction of solid and liquid phase of soil. The swelling and shrinking behaviour of clay soils has been intensively investigated in recent years [SEED *et al.*, 1962; KASSIFF *et al.*, 1969; POPESCU, 1974 b; STANCULESCU, POPESCU, 1975], but no attempt will be made herein to

review all of the work done on this subject. The results of these investigations have shown that the magnitude and pattern of clay swelling and shrinkage depend on a number of factors, the more important ones of which are listed in fig. 4. These factors may be logically divided in two groups: internal factors or material dependent factors and external factors, depending on environment and placement conditions. In fact the factors in the two groups appear to be in a strong interrelationship.

The main factor is the type and the amount of clay present in soil. The clay minerals possess a great ability to attract to their surfaces dipolar water molecules and various cations.

The clay fraction determines, in the first instance, whether the soil would have the capacity to swell or shrink under any conditions, or, in other words, determines the degree of activity of a given soil.

It is possible to identify the degree of activity of a clay soil by means of simple index tests performed in the laboratory on disturbed or remolded samples. For the purpose of general orientation, in table I is given the range of variation of the index properties for Romanian active clays.

TABLE I

Clay content: < 5 μ	60 - 80%
< 2 μ	40 - 70%
Liquid limit	35 - 80%
Plastic limit	15 - 30%
Plasticity index	20 - 50%
Shrinkage limit	8 - 14%
Free swell (in a 100 cc graduate)	80 - 200%
Adsorbing capacity (Enslin)	70 - 140%

The expansive soils of Romania belong mostly to the temperate zone formations at the end of tertiary and at the beginning of quaternary age. They contain a relatively large amount of the montmorillonite clay mineral and are generally found as residual soils developed from basic igneous rocks and montmorillonitic sedimentary rocks or as transported materials derived from the same parent materials.

While the clay content determines the degree of activity of an expansive soil, the extent to which the swelling or shrinkage capacity of particles comprising the soil may be realized, is determined by the magnitude and relationship of the other factors listed in fig. 4.

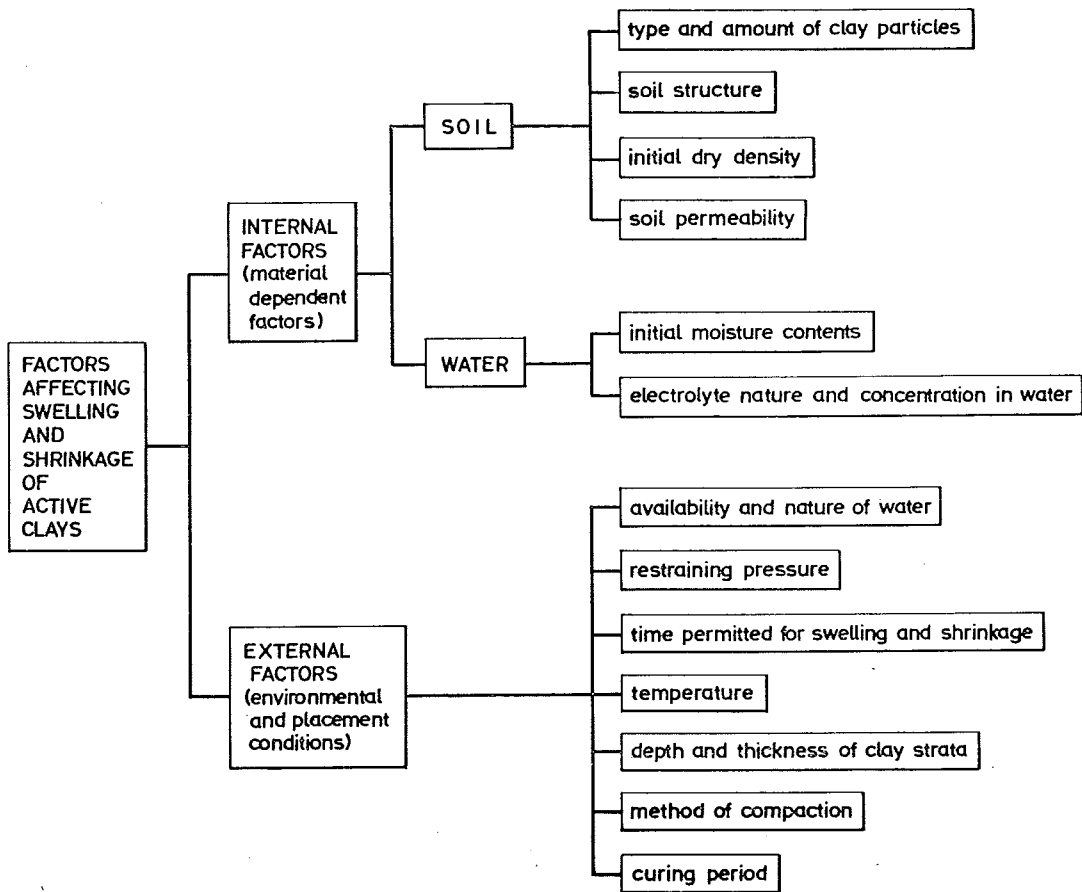


Fig. 4. - Factors affecting swelling and shrinkage of active clay formations.

On this line, the initial density and moisture content play an important role. An increase of moisture content at constant density, and a decrease of initial density at constant moisture content lead to a decrease in swell amount. An inverse relationship is obtained when shrinkage amount is regarded (fig. 5).

It is to be noted, however, that for a constant moisture content, a high initial clay density is related to a slow rate of swell or shrink. This is of practical importance because a highly swelling clay with a slow rate of swelling may lead to smaller structure deformations than a clay having less total swell but a faster swelling rate.

The large quantity of data which has been collected from various tests on Romanian expansive clays enabled a mathematical statistic analysis of correlations between their index properties and various other swelling and shrinkage properties [POPESCU, 1976]. Obviously the problem of expansive soil behaviour is far too complex to generalize upon as far as using simple correlations for exactly evaluating its field stress-strain behaviour.

However they offer reliable guidelines in giving a better understanding of the mechanical behaviour of expansive clays and permit a better comparison of experimental results, obtained in different situations.

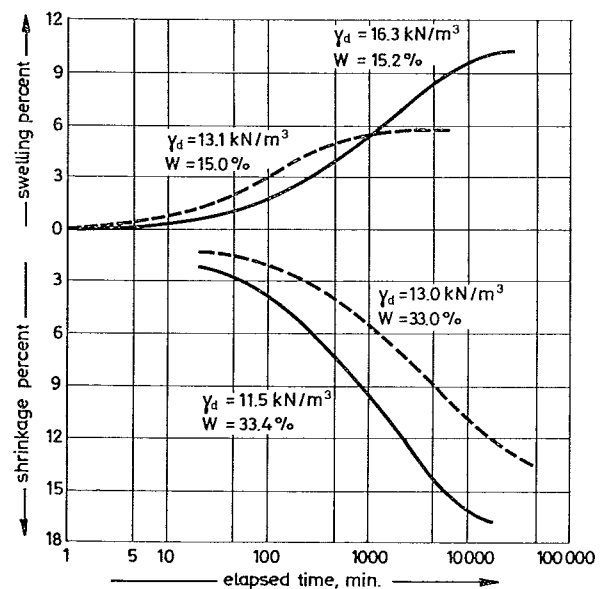


Fig. 5. - Effects of initial density and initial moisture content on swell and shrinkage amount.

4. The swelling potential relationship

Different definitions of swelling potential were proposed by various research workers, but a rigorous one was given by KASSIFF and BAKER [1971], based on a mathematical expression of the swell pressure curve:

$$\frac{P_s}{K_1} + \frac{\Delta V}{K_2 V_0} = \frac{u_0}{K_3} \quad (1)$$

in which P_s = swelling pressure, for no volume change, $\Delta V/V_0$ = swelling percent (in reference to volume), for no load, u_0 = initial suction (negative pore pressure), K_1, K_2, K_3 = constants depending on the index properties and initial placement conditions. When swelling test is performed in consolidometer ring $\Delta V/V_0$ is replaced by $\Delta H/H_0$ in reference to sample height.

The swell pressure curve (fig. 6) gives the

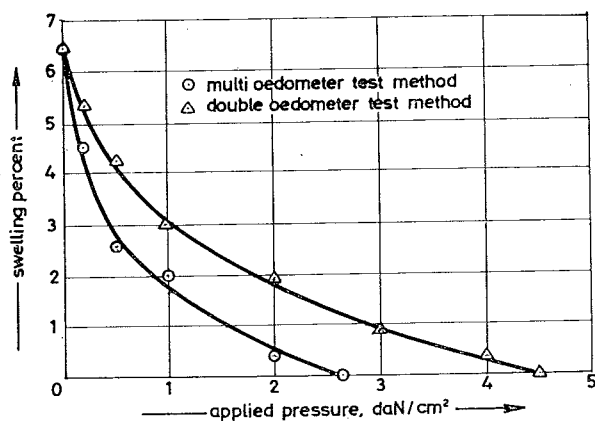


Fig. 6. - Multi oedometer and double oedometer swell pressure curves.

whole range of volume change under various surcharges, offering the basis for quantitative evaluation of the amount of heave of a structure.

There are two methods in determining the swell-pressure curve:

a) Multi oedometer test method. Different samples of the same soil are placed in consolidometer, under varying surcharge pressure, and, after an equilibrium is attained, they are flooded with water until all swelling movement cease.

b) Double oedometer test method. Two adjacent samples are tested in consolidometer, one

at the natural moisture content and the other being allowed to swell submerged in water under a low vertical pressure, and subsequently loaded in stages. The differences between the two resulting consolidation curves enables swell pressure curve rapid determination.

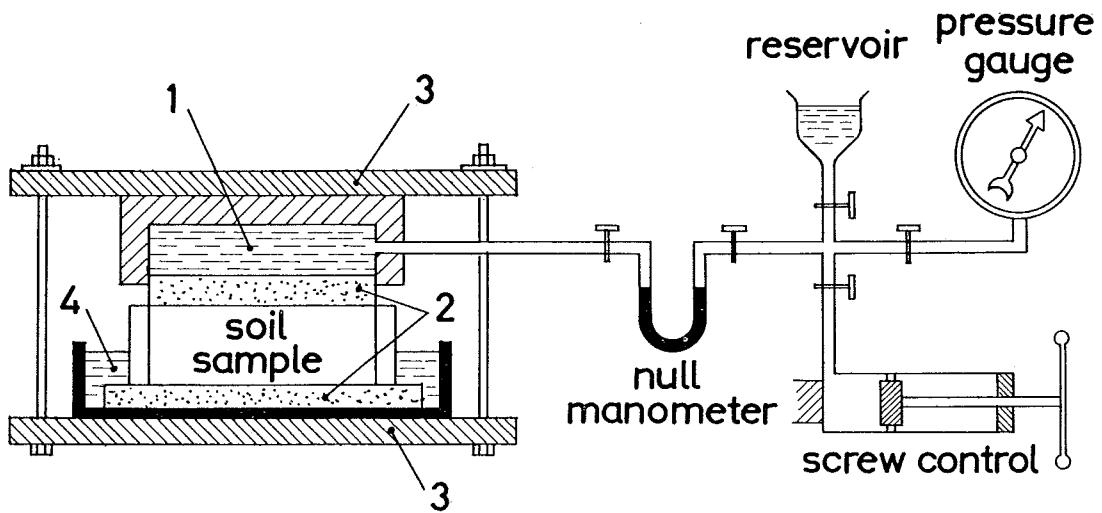
Swell pressure curves, obtained for the same clay soil, by the above two methods, are presented in fig. 6. It is observed the greater surcharge, the less swelling percent, determined in the multi oedometer test, compared with that determined in the double oedometer test. This may be attributed to the fact that when the specimen is loaded with different pressures, the fissures in the soil close, making it difficult to secure water entry. The practical consequence is that choice of the suitable testing method depends on the field conditions and stress history of the clay.

While swelling percent can be easily measured in the laboratory, the determining of the other limiting value of the swelling potential, i.e. of the swelling pressure, is subjected to some difficulties, related to the observed differences between the swelling pressure values, obtained by different methods. As can be seen from table II, the use of different methods for the same soil, leads to values which can vary within a range 2 : 1. This is to be attributed mainly to the swelling pressure sensitivity to very small permitted sample expansion.

TABLE II

Testing method	Tested soil:		
	1	2	3
Free swelling and subsequent loading	3,2	2,6	4,1
Swelling under vertical loads	—	1,9	—
Measured under arrester	4,0	2,2	3,4
Measured with ring dynamometer	4,2	1,5	2,3
Measured with cell pressure equipment	5,4	3,1	4,7

For absolute swelling pressure measurement a laboratory cell pressure equipment was developed, intending to prevent any volume change of soil sample. The sketch of the apparatus is given in fig. 7. The cell pressure rests, with its flexible steel membrane, on the top porous



- 1 - pressure cell (water filled)
- 2 - porous stones
- 3 - rigid metallic plates
- 4 - water source

Fig. 7. - Cell pressure equipment for absolute swelling pressure measurement.

stone. Any swelling tendency of the clay sample is felt by the flexible membrane, causing a slight unlevelling of the null mercury manometer. By adjusting the pump screw, the null manometer is brought again in level, the necessary compensating pressure being recorded by means of a pressure gauge. In this way, swelling pressure development is continuously measured, while the sample volume is kept constant.

It is to be observed from table II, that for the tested soils, the use of the cell pressure equipment leads to the greatest values of swelling pressure.

In all the above mentioned tests, the swelling potential curve is determined on a clay absorbing an unlimited amount of water. As this is not always the situation in nature, elaborate research works were reported in recent years on the swelling potential measurement under various suction changes, which better simulate the field conditions.

5. Clay soils shrinkage as related to their structure

It was found [YONG, WARKENTIN, 1963] that, for the same initial moisture content and density, the more random particle arrangement the less total shrinkage. However soil structure

has a marked influence not only on the total shrinkage amount, but also on the pattern of shrinkage process.

Soil shrinkage characteristics are usually defined and determined on a simplified bilinear shrinkage curve. Carefully laboratory measurements of the clay sample volume during drying, have shown the presence of three distinct stages in shrinkage process, the extent of each

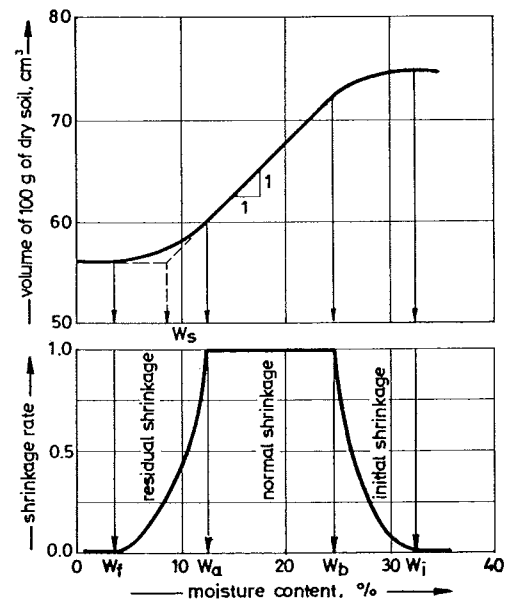


Fig. 8. - Stages and characteristics of soil shrinkage process.

of them depending upon the soil structure, namely upon the resistance and number of interparticle bonds [POPESCU, 1974 b]. The distinction between the ranges of moisture content, corresponding to the different shrinkage stages, can be done on the basis of variation of shrinkage rate, as follows (fig. 8):

1. Initial shrinkage is demarcated by two characteristic moisture contents, w_i and w_b . For clay soils, with strong diagenetic bonds, at the beginning of drying, the first increments of water loss from the large voids of the sample surface, are not accompanied by a volume change. As drying proceeds, when initial shrinkage limit, w_i , is attained, sample begins to reduce its volume, but less than the volume of water lost. The shrinkage rate, defined as the slope of shrinkage curve dV_{100}/dw , increase from 0, at w_i , to 1, at w_b .

2. Normal shrinkage occurs between w_b and w_a , w_a being the air entry moisture content.

Within this moisture content range, the shrinkage rate is constant and equal to 1, i.e. the sample volume decrease is equal to the water content loss.

3. Residual shrinkage appears in a moisture range from w_a to w_f , where the close particle arrangement restricts, to some extent, shrinking. Shrinkage rate decrease from 1 to 0. Further drying, beyond the final shrinkage limit, w_f , induces no soil volume decrease. Thus the final shrinkage limit, w_f , is not the same with the conventional defined shrinkage limit, w_s (fig. 8).

The initial stage, of no or little shrinkage is characteristic for soils with an important number of strong interparticle bonds. Remoulded paste clays have only normal and residual shrinkage. Thus the shape of the shrinkage curve gives information on soil structure.

It is to be noted that similar volume-moisture content curves, but for swelling process, were reported by DE BRUIJN [1961].

There appears to be a restricted range of moisture content within which shrinkage or swelling could take place:

$$I_s = w_i - w_f \quad (2)$$

Moisture changes in the zones above the upper limit (w_i) and below the lower limit (w_f) will cause no volume changes in the soil. The practical significance of the fact is that due to natural variations, some clay zones of the soil

beneath a construction may be subjected to changes in moisture content within the critical moisture content range, I_s , while the other zones may be affected by changes beyond this critical range. This leads to differential movement of the foundation subsoil, which in turn is the main cause of the structure damage.

Another important aspect of soil structure, leading to soil differential movements, is the effect of anisotropy on volumetric soil changes. The effect of anisotropy on shrinkage process was experimentally investigated by the author [POPESCU, 1975], using soils with an oriented structure, artificially prepared under different preconsolidation pressures. Vertical and horizontal shrinkage strains, ϵ_v and ϵ_h , were measured for samples extracted at angles of 0° , 30° , 60° and 90° from vertical.

The directional variation of shrinkage strains was found elliptical in shape, with the maximum shrinkage normal to particle orientation (fig. 9 a). This is attributable to the platy-shape of clay particles, which makes that, even if the water film, surrounding the particle, has a uniform thickness, the proportion of water to

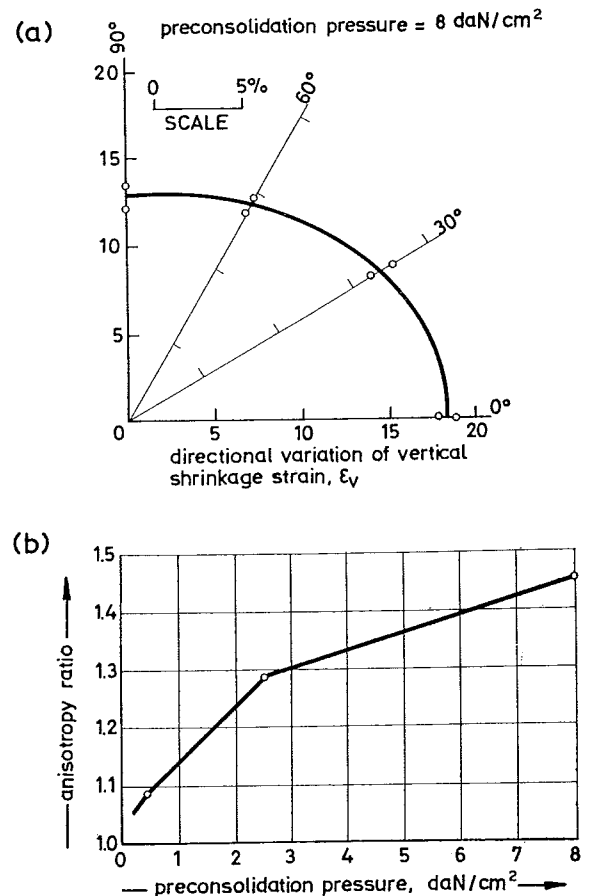


Fig. 9. - Effect of structural anisotropy on shrinkage process.

solid to be greater in direction normal to particle orientation, than that in the particle plane.

The higher the preconsolidation pressure, the greater the anisotropy ratio, as defined by $\varepsilon_v^0 / \varepsilon_v^{90}$ or $\varepsilon_v^0 / \varepsilon_h^0$ (fig. 9 b).

If the ellipse semi-axes $a = \varepsilon_v^0$ and $b = \varepsilon_v^{90}$, for a specific case, are known, one may compute the vertical shrinkage strain ε_v^α , corresponding to an angle α of particle bedding with the horizontal, by means of expression:

$$\varepsilon_v^\alpha = \frac{a b}{\sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha}} \quad (3)$$

The engineering aspect of this result is that, when testing clay in the vicinity of a structure, the particle orientation effect should be taken into consideration.

6. Conclusions

Active clay soil formations with large swelling and shrinking potential, widely spread all over the world, cover important areas on Romanian territory.

The observations and investigations made in Romania lead to conclusion that construction damages in expansive clay areas are mainly caused by differential seasonal movements, due to both swelling and shrinkage of foundation subsoil.

Many influence factors, as soil type, density and moisture characteristics, stress history, climate, vegetation and ground water conditions, make an accurate prediction of active clay soil movements impossible.

However the improvement of the present knowledge, in any particular aspect of active clay behaviour, may be of a real assistance to a more rational design of structures founded on such soils.

On this line, the present paper is thought to be an useful contribution to a better understanding of swelling and shrinking behaviour, in some of its particular aspects, as the absolute swelling pressure laboratory measurement, shrinkage process stages and the effect of anisotropy on shrinkage of active clays.

BIBLIOGRAPHY

BARACOS A., BOZOZUK M. (1957) - *Seasonal movements in some Canadian clays*. Proc. 4th ICSMFE, London, vol. 1, pp. 264-269.

- DE BRUIJN C. M. A. (1961) - *Swelling characteristics of a transported soil profile at Leeuhoof, Vereeniging (Transvaal)*. Proc. 5th ICSMFE, Paris, vol. 1, pp. 43-49.
- DE GRAFT-JOHNSON J. W. S. et al. (1973) - *Some swelling characteristics of the marine shales of Accra*. Proc. 3rd Int. Conf. on Expans. Soils, Haifa, vol. 2, pp. 55-63.
- JENNINGS J. E. (1973) - *The engineering significance of construction on dry subsoils*. Proc. 3rd Int. Conf. on Expans. Soils, Haifa, vol. 2, pp. 27-32.
- KASSIFF G., BAKER R. (1971) - *Aging effects on swell potential of compacted clay*. Journ. SMFD, vol. 97, SM3, pp. 529-540.
- KASSIFF G. et al. (1959) - *Pavements on expansive clays*. Jerusalem Academic Press.
- KOMORNIK A. (1973) - *Building foundations*. Gen. Rep., Proc. 3rd Int. Conf. on Expans. Soils, Haifa, vol. 2, pp. 177-181.
- LIVNEH M. (1973) - *Roads and airfield pavements, pipe lines, floor slabs*. Gen. Rep., Proc. 3rd Int. Conf. on Expans. Soils, Haifa, vol. 2, pp. 155-164.
- POPESCU M. (1974a) - *Structures on expansive soils. A review of the present stage of the problem*. Studies and Research Works, INCERC, no. 4, pp. 1-35 (in Romanian).
- POPESCU M. (1974b) - *Thermodynamic interpretation of shrinkage process in active clay soils*. Hidrotehnica, no. 6, pp. 291-296 (in Romanian).
- POPESCU M. (1975) - *The effect of anisotropy on shrinkage of active clays*. Proc. 4th Southeast Asian Cong. on Soil Eng., Kuala Lumpur, pp. 2.63-66.
- POPESCU M. (1976) - *Correlations between the indicative properties and swelling-shrinking characteristics of active clays*. Proc. 3rd Natl. Cong. on Clays, Bucharest.
- PROFIRI N. et al. (1950) - *Research studies on the active clays soils of Getic Plateau*. Proc. Gen. Sc. Session of Romanian Academy (in Romanian).
- SEED H. B. et al. (1962) - *Prediction of swelling potential for compacted clays*. Journ. SMFD, vol. 88, pp. 53-87.
- SHRAGA S. et al. (1973) - *Review of foundation practice for a Kibbutz dwelling in expansive clay*. Proc. 3rd Int. Conf. on Expans. Soils, Haifa, vol. 1, pp. 335-344.
- STANCIULESCU I., POPESCU M. (1975) - *Plane problem of water movement in unsaturated active soils*. Proc. 3rd Nat. Conf. on SMFE, Timisoara (in Romanian).
- YONG R. N., WARKENTIN B. P. (1965) - *Introduction to soil behaviour*. The McMillan Company, New York.

SOMMARIO

Alcuni aspetti del rigonfiamento e del ritiro di formazioni di argille attive

Estese aree nel mondo sono ricoperte da formazioni di argille dotate di un alto potenziale di rigonfiamento e di ritiro.

Per effetto delle notevoli variazioni di volume indotte da variazioni del contenuto d'acqua queste argille sono spesso denominate « argille attive ».

In Romania le argille attive, causa di rilevanti movimenti dei terreni di fondazione per rigonfiamento e ritiro, sono ampiamente diffuse nelle zone Sub Carpatiche, nell'altopiano della Transilvania, nell'area del Danubio, come pure in molte altre zone isolate disseminate nella regione (fig. 1).

Notizie circa i problemi legati ai dissesti di costruzioni su terreni espansivi sono state riportate in differenti regioni: Africa, Australia, Canada, India, Israele, Unione Sovietica, Spagna, Stati Uniti [POPESCU, 1974a]. Questi comprendono sollevamenti, fessurazioni e rotture delle fondazioni di edifici, di strutture di sostegno, di rivestimenti di canali e serbatoi, di strade e strade ferrate.

Nella maggior parte dei casi riportati il dissesto delle strutture è causato soprattutto dal continuo rigonfiamento dei terreni di fondazione, fino a che non sia raggiunto uno stato di equilibrio finale [JENNINGS, 1973]. Sebbene

nello stadio iniziale della vita di una costruzione può verificarsi inflessione con concavità verso l'alto o verso il basso, lo schema finale di fessurazione è caratterizzato da concavità verso il basso, eccetto là dove sorgenti locali di acqua non abbiano causato un disturbo dello schema generale.

Le osservazioni precedenti sono tipiche di quelle zone dove la evaporazione dalla superficie libera supera fortemente la precipitazione annua. Quando una membrana semipermeabile, rappresentata dalla costruzione, è realizzata su di un terreno essiccato, l'evaporazione di acqua viene ridotta ed il terreno di fondazione assorbe tutta l'acqua disponibile, con la conseguenza di un corrispondente sollevamento della struttura.

Le condizioni climatiche della Romania sono alquanto differenti. Il clima della Romania appartiene grosso modo al tipo subumido, essendo la precipitazione totale leggermente minore della evapotraspirazione totale. La mappa climatica zonale della Romania è riportata nella fig. 2, in funzione dell'indice di umidità Thornthwaite I_m . Con riferimento alla mappa di fig. 1, si può osservare che alcune aree coperte da formazioni di argille espansive ricadono nelle aree climaticamente semiaride.

L'andamento delle precipitazioni ha una distribuzione stagionale nel corso dell'anno. Durante le stagioni alternate umide e secche vengono indotte notevoli variazioni del contenuto d'acqua, che a loro volta causano considerevoli movimenti stagionali dei terreni, per effetto sia del rigonfiamento che del ritiro. BARACOS e BOZOUK [1957] e DE GRAFF-JOHNSON [1973] hanno descritto movimenti del terreno e dissesti alle strutture per effetto di variazioni cicliche del contenuto d'acqua, in condizioni simili a quelle della Romania.

Dissesti di ampiezza variabile sono stati registrati in Romania per differenti tipi di strutture fondate su terreni espansivi. I procedimenti costruttivi relativi a piccole costruzioni, come edifici rurali o edifici residenziali monofamiliari, erano basati in passato sull'esperienza locale, spesso senza adeguata considerazione delle caratteristiche dei terreni.

Il primo lavoro nel campo delle argille espansive della Romania fu realizzata già nel 1950 [PROFIRI *et al.*, 1950] da un gruppo di ricerca della Sezione Tecnica dell'Accademia Romana. Fu proposta una interessante soluzione consistente nella separazione e nell'isolamento di piccole costruzioni dal terreno espansivo circostante per mezzo di uno strato di terreno locale, stabilizzato con sabbia. Questa soluzione è stata applicata ad un certo numero di strutture esistenti con buoni risultati.

Negli anni più recenti sono state eseguite ricerche approfondite sul comportamento delle formazioni argillose romene sia dal punto di vista del rigonfiamento che da quello del ritiro.

Nel 1973 è stato elaborato un documento statale di normativa intitolato « Istruzioni Tecniche per il Progetto e la Costruzione di Strutture su Terreni Espansivi », che si rivolge a coloro che affrontano i problemi tecnici connessi alle argille espansive.

Cause ed effetti delle variazioni del contenuto d'acqua nelle formazioni di argille attive

In un clima, come quello romeno, con stagioni umide e secche alternate i terreni argillosi subiscono notevoli variazioni del contenuto d'acqua. Le cause e le conseguenze tecniche delle variazioni del contenuto d'acqua nelle argille attive sono presentate schematicamente nella fig. 3.

Le variazioni del contenuto d'acqua hanno un'influenza negativa sulle proprietà dell'argilla nella sua funzione di strato di fondazione di manufatti civili. Tra le importanti proprietà influenzate ricadono il rigonfiamento, il ritiro e

la resistenza al taglio. I fenomeni che accompagnano le variazioni delle proprietà dell'argilla dipendono dalla struttura dell'argilla stessa [LIVNEH, 1973].

Nella maggior parte delle aree romene ricoperte da formazioni di argille espansive, il livello della falda si trova a profondità maggiori di 8-10 m. Indagini in sito in tipiche aree hanno evidenziato una variazione massima stagionale del contenuto d'acqua di circa il 20% a 0,4 m, del 10% a 1,2 m, con un decremento fino al 5% a 1,8 m. I corrispondenti movimenti ciclici del terreno sono di circa $10 \div 12$ cm.

Un'osservazione molto comune è che, nei mesi secchi, le formazioni di argille attive sono invariabilmente fratturate con le fratture disposte secondo una rete poligonale. Quando le fratture sono aperte e riempite di aria, la struttura del terreno viene descritta come frantumata. Se le fratture sono chiuse la struttura è descritta come fessurata. Spesso l'apertura delle fratture può raggiungere i 15 cm, con una profondità anche di 2 m. Durante le brevi piogge estive le fratture non si chiudono e l'acqua penetra fino a grande profondità. In autunno esse sono chiuse a partire dalla superficie e talvolta, negli anni secchi, rimangono aperte da un anno all'altro.

In base alle osservazioni in sito è stato stabilito che la profondità della zona attiva per la nostra regione è di circa $2,0 \div 2,5$ m. È interessante notare che ricerche condotte in Sud Africa, India, Australia, Israele e Stati Uniti, hanno indicato che le zone attive nelle aree studiate erano di circa 3 m, sebbene in alcune regioni di Israele è stato osservato che la zona attiva giungeva a 6 m [SHRAGA *et al.*, 1973]. Bisogna tuttavia tener presente che il rigonfiamento può avvenire anche in argille ubicate al di sotto della zona attiva, in un lungo periodo di tempo [KOMORNIK, 1973].

Fattori che influenzano il rigonfiamento e il ritiro delle formazioni di argille attive

Il rigonfiamento e il ritiro delle argille attive sono processi complessi, che derivano dalle complicate interazioni delle fasi solida e liquida del terreno. Sono stati studiati approfonditamente negli anni recenti [SEED *et al.*, 1962; KASSIFF *et al.*, 1969; POPESCU, 1974b; STANCULESCU, POPESCU, 1975], ma qui non si tenterà di riassumere tutti i lavori condotti su questo argomento. I risultati di queste ricerche hanno mostrato che l'entità e le modalità del rigonfiamento e del ritiro delle argille dipendono da un insieme di fattori, i più importanti dei quali sono elencati nella fig. 4. Questi fattori possono essere divisi in due gruppi: fattori intrinseci o fattori dipendenti dal materiale e fattori estrinseci dipendenti dall'ambiente. I fattori compresi nei due gruppi sembrano essere in stretta correlazione. Il fattore principale è il contenuto e il tipo di argilla presente nel terreno. I minerali argillosi possiedono infatti una grande capacità di attrarre le molecole d'acqua dipolari e vari cationi.

Il contenuto di argilla determina, in prima istanza, la capacità di rigonfiare o di ritirarsi in ogni condizione o, in altre parole, determina il grado di attività di un dato terreno.

È possibile identificare il grado di attività di un terreno argilloso per mezzo di semplici prove indici effettuate in laboratorio su campioni disturbati o rimaneggiati. Per un orientamento generale nella tavola I viene fornito il campo di variazione delle proprietà indici delle argille attive romene.

I terreni argillosi della Romania appartengono principalmente alle formazioni della zona temperata della fine del Terziario e dell'inizio del Quaternario.

Essi contengono una quantità relativamente elevata di montmorillonite e si rinvengono generalmente sotto forma di terreni residuali generati da rocce ignee basiche e da rocce sedimentarie montmorillonitiche, o di materiali di trasporto derivati dagli stessi materiali originari.

Mentre il contenuto di argilla determina il grado di attività di un terreno espansivo, l'entità del rigonfiamento o del ritiro è determinata dal valore e dalle relazioni tra gli altri fattori elencati in fig. 4.

Su questa base la densità iniziale e il contenuto d'acqua giocano un ruolo importante. Un aumento del contenuto d'acqua a parità di densità ed una diminuzione della densità iniziale a contenuto d'acqua costante portano ad una diminuzione dell'entità del rigonfiamento. Una relazione inversa può essere ottenuta quando viene studiata l'entità del ritiro (fig. 5).

Deve essere notato, comunque, che per un contenuto d'acqua costante, una densità iniziale elevata dell'argilla viene posta in relazione con una bassa velocità di rigonfiamento o ritiro. Ciò è importante in pratica perché un'argilla fortemente rigonfiante con una bassa velocità di rigonfiamento può causare deformazioni, nelle strutture su di essa fondate, più ridotte rispetto ad un'argilla che rigonfia di meno, ma più rapidamente.

La gran quantità di dati raccolti in base a varie prove su argille espansive romene ha permesso un'analisi statistico-matematica delle correlazioni tra le loro proprietà indici e varie altre proprietà legate al rigonfiamento e al ritiro [POPESCU, 1976]. Ovviamente il problema del comportamento dei terreni espansivi è ancora troppo complesso per poter generalizzare semplici correlazioni al fine di valutarne esattamente il comportamento tensioni-deformazioni in sito. Comunque esse offrono delle linee guida per una migliore comprensione del comportamento meccanico delle argille espansive e permettono un miglior confronto dei risultati sperimentali ottenuti in situazioni differenti.

Le relazioni del potenziale di rigonfiamento

Vari ricercatori hanno proposto differenti definizioni del potenziale di rigonfiamento; fra di esse quella di KASSIFF e BAKER [1971], basata su di un'espressione matematica della curva pressioni-rigonfiamenti:

$$\frac{P_s}{K_1} + \frac{\Delta V/V_0}{K_2} = \frac{u_0}{K_3} \quad (1)$$

in cui P_s = pressione di rigonfiamento per variazione di volume nulla; $\Delta V/V_0$ = percentuale di rigonfiamento (con riferimento al volume), per carico nullo; u_0 = depressione iniziale (pressione neutra negativa); K_1, K_2, K_3 = costanti dipendenti dalle proprietà indici e dalle condizioni iniziali. Quando la prova di rigonfiamento è realizzata in un edometro $\Delta V/V_0$ è sostituito da $\Delta H/H_0$ con riferimento all'altezza del campione.

La curva pressioni-rigonfiamenti (fig. 6) fornisce il campo complessivo della variazione di volume sotto varie sollecitazioni, ponendo le basi per una valutazione quantitativa del sollevamento di una struttura.

Esistono due metodi per determinare la curva pressioni-rigonfiamenti:

a) Prova multiedometro. Differenti provini dello stesso terreno sono posti in edometri, sotto pressioni differenti e, dopo che sia raggiunto l'equilibrio, vengono immersi in acqua fino a che non cessi ogni movimento di rigonfiamento.

b) Prova con doppio edometro. Due provini vengono sottoposti a prova di compressione edometrica, uno al contenuto naturale di acqua e l'altro immerso in acqua e lasciato preventivamente rigonfiare sotto una pressione ridotta. Le differenze tra le due curve di consolidazione rendono possibile una rapida determinazione della curva pressioni-rigonfiamenti.

Nella figura 6 sono presentate delle curve pressioni-rigonfiamenti, ottenute per lo stesso terreno argilloso con entrambi i metodi. Vi si osserva che più grande è la sollecitazione, minore è la percentuale di rigonfiamento deter-

minata nella prova multiedometro, se paragonata a quella determinata nella prova con doppio edometro. Ciò può essere attribuito al fatto che, con il provino sotto carico, le fessure del terreno si chiudono rendendo difficile l'ingresso dell'acqua. La conseguenza pratica è che la scelta del metodo di prova più affidabile dipende dalle condizioni in sito e dalla storia tensionale dell'argilla.

Mentre la percentuale di rigonfiamento può essere facilmente misurata in laboratorio, la determinazione dell'altro valore del potenziale di rigonfiamento, cioè la pressione di rigonfiamento, presenta alcune difficoltà come evidenziato anche dalle differenze osservate tra i valori della pressione di rigonfiamento ottenuti coi differenti metodi. Come si può vedere nella tavola II l'uso di differenti metodi porta, per lo stesso terreno, a valori che possono variare entro un campo di 2:1. Ciò può essere attribuito soprattutto alla sensibilità della pressione di rigonfiamento a piccolissime espansioni del campione.

Per la misura della pressione assoluta di rigonfiamento è stata realizzata un'apparecchiatura di laboratorio a cella di pressione, allo scopo di impedire qualsiasi variazione di volume del campione di terreno. Nella fig. 7 è riportato lo schema dell'apparato. La cella di pressione, con la sua membrana flessibile di acciaio, è disposta sulla piastra porosa superiore.

Ogni tendenza del campione di argilla ad espandere è percepita dalla membrana flessibile, causando una leggera variazione del livello del mercurio nel capillare. Regolando la vite della pompa il mercurio viene portato di nuovo a livello, mentre la corrispondente pressione viene registrata per mezzo di un trasduttore di pressione. In questo modo la pressione di rigonfiamento viene continuamente misurata, mentre il volume del campione viene mantenuto costante.

Dalla tavola II si deve osservare che per i terreni utilizzati l'uso dell'apparecchiatura a cella di pressione porta ai valori più elevati della pressione di rigonfiamento.

In tutte le prove precedentemente menzionate, la curva del potenziale di rigonfiamento è determinata per un'argilla che assorbe una quantità illimitata di acqua. Poiché questa non è sempre la situazione reale in natura, negli anni passati sono stati pubblicati elaborati lavori di ricerca relativi alla misura del potenziale di rigonfiamento sotto varie depressioni che simulassero meglio le condizioni in sito.

Ritiro dei terreni argillosi con riferimento alla loro struttura

È stato trovato [YONG, WARKENTIN, 1963] che per lo stesso contenuto iniziale d'acqua e densità, quanto più casuale è l'assortimento delle particelle tanto minore il ritiro complessivo. Comunque la struttura di un terreno ha un'influenza marcata non soltanto sull'entità del ritiro totale, ma anche sulle modalità del processo di ritiro.

Le caratteristiche di ritiro di un terreno sono in generale definite e determinate per mezzo di una curva semplificata bilineare di ritiro. Misurazioni accurate di laboratorio del volume del provino di argilla durante l'essiccamento hanno mostrato la presenza di tre stadi distinti nel processo di ritiro, l'estensione di ciascuno dei quali dipende dalla struttura del terreno, soprattutto dalla resistenza e dal numero di legami tra le particelle [POPESCU, 1974b]. La distinzione tra i campi di contenuto d'acqua che corrispondono ai differenti stadi di ritiro può essere fatta sulla base della variazione della velocità di ritiro, come segue (fig. 8):

1. Il ritiro iniziale è caratterizzato da due valori tipici del contenuto d'acqua, w_1 e w_2 . Per i terreni argillosi con forti legami diagenetici all'inizio dell'essiccamento i primi decrementi del contenuto d'acqua dai pori superficiali del provino non sono accompagnati da una diminuzione di volume. Al proseguire dell'essiccamento, quando il limite iniziale di ritiro, w_1 , è raggiunto, il campione comincia a diminuire di volume, ma in una misura minore della perdita

d'acqua. La velocità di ritiro, definita come la pendenza della curva di ritiro (dV_{100}/dw), cresce da 0, in corrispondenza di w_i , a 1, in corrispondenza di w_b .

2. Tra w_b e w_a si ha il ritiro normale, essendo w_a il contenuto d'acqua a cui si verifica l'ingresso di aria nel terreno. Entro questo campo di contenuti d'acqua, il gradiente di ritiro è costante ed uguale ad 1; la diminuzione del volume del campione è uguale cioè alla perdita d'acqua.

3. Nel campo di contenuti d'acqua tra w_a e w_f si ha il ritiro residuo, in cui la struttura ravvicinata limita, in qualche modo, il ritiro stesso. Il tasso di ritiro diminuisce da 1 a 0. Un ulteriore essiccamento, al di là del limite finale di ritiro, w_f , non induce diminuzione di volume del terreno. Quindi il limite finale di ritiro, w_f , non è lo stesso del limite convenzionale di ritiro, w_s (fig. 8).

Uno stadio iniziale di ritiro nullo o piccolo è caratteristico dei terreni con un numero elevato di legami diagnostici. Le argille rimaneggiate hanno soltanto un ritiro normale e residuo. Quindi la forma della curva di ritiro dà informazioni della struttura del terreno.

Si deve notare che simili curve volume-contenuto d'acqua, ma per processi di rigonfiamento, sono state riportate da DE BRUIJN [1961].

Risulta evidente che vi è un piccolo campo del contenuto d'acqua entro cui possono verificarsi il ritiro o il rigonfiamento:

$$I_s = w_i - w_f \quad (2)$$

Le variazioni del contenuto d'acqua nelle zone al di sopra del limite superiore (w_i) e al di sotto del limite inferiore (w_f) non causeranno variazioni di volume nel terreno. Il significato pratico di questo fatto è che per variazioni naturali di umidità alcune zone argillose del terreno al di sotto di una costruzione possono essere soggette a variazioni del contenuto d'acqua entro il campo critico del contenuto d'acqua, I_s , mentre le altre zone possono essere effette da variazioni al di là del campo critico. Ciò porta a movimenti differenziali del terreno di fondazione, che sono a loro volta causa di dissesti della struttura.

Un altro importante aspetto della struttura del terreno, che porta a movimenti differenziali, è l'effetto dell'anisotropia sulle variazioni volumetriche del terreno.

L'effetto dell'anisotropia sul processo di ritiro è stato studiato sperimentalmente da chi scrive [POPESCU, 1975], utilizzando terreni con una struttura orientata, preparati artificialmente sotto differenti pressioni di preconsolidazione. Furono misurate le deformazioni per ritiro verticali

ed orizzontali, ϵ_v e ϵ_n , per provini estratti con inclinazioni di 0°, 30°, 60° e 90° sulla verticale.

È stato trovato che la variazione direzionale della deformazione per ritiro ha una forma ellittica, con ritiro massimo normale all'orientazione delle particelle (fig. 9a). Ciò è attribuibile alla forma piatta delle particelle di argilla e determina il fatto che, anche se la pellicola d'acqua che circonda le particelle ha uno spessore uniforme, la proporzione d'acqua rispetto alla sostanza è più grande in direzione normale all'orientazione delle particelle.

Più alta è la pressione di preconsolidazione, più grande il rapporto di anisotropia, definito da $\epsilon_v^\circ/\epsilon_v^{90}$ ovvero $\epsilon_v^\circ/\epsilon_n^\circ$ (fig. 9b).

Se per un caso specifico sono noti i semiassi dell'ellisse $a = \epsilon_v^\circ$ e $b = \epsilon_v^{90}$, si può calcolare la deformazione verticale per ritiro, ϵ_v^α , corrispondente all'angolo α del piano di giacitura delle particelle con l'orizzontale, per mezzo dell'espressione (3).

L'aspetto tecnico di questo risultato è che quando sottoponiamo a prova un'argilla in prossimità di una struttura dovrebbe essere tenuto in conto l'effetto dell'orientazione delle particelle.

Conclusioni

Formazione di terreni argillosi attivi con alti potenziali di rigonfiamento e di ritiro, ampiamente diffusi in tutto il mondo, coprono aree importanti del territorio romeno.

Le osservazioni e le ricerche fatte in Romania portano alla conclusione che i dissesti delle costruzioni in aree di argille espansive sono causati principalmente da movimenti differenziali stagionali, per effetto sia di rigonfiamento che di ritiro dei terreni di fondazione.

Molti fattori influenti, come il tipo di terreno, la densità e il contenuto d'acqua, lo stato tensionale, il clima, la vegetazione e le condizioni idrologiche, rendono impossibile una previsione accurata dei movimenti dei terreni argillosi attivi.

Comunque il miglioramento delle conoscenze attuali in ogni aspetto del comportamento delle argille attive può essere di reale ausilio per un progetto più razionale di strutture poggianti su tali terreni.

Su questa base si ritiene che il presente lavoro possa rappresentare un utile contributo per una migliore comprensione del rigonfiamento e del ritiro in alcuni dei loro aspetti particolari, come la misurazione in laboratorio della pressione assoluta di rigonfiamento, gli stadi del processo di ritiro e l'effetto dell'anisotropia sul ritiro delle argille attive.