



ЛИТВИНЕНКО АНАТОЛІЙ СЕМЕНОВИЧ

Інженер шляхів сполучення (автомобільні дороги), завідувач лабораторії ґрунтів та земляного полотна державного підприємства Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. М. П. Шульгіна, член Всеукраїнського товариства механіки ґрунтів, геотехніки та фундаментобудування.

Основні напрями наукової діяльності: польові та лабораторні дослідження несучої здатності, будови, стану та фізико-механічних властивостей ґрунтів як у природному заляганні, так і у штучних ґрунтових спорудах. Оцінка на основі даних польових досліджень стійкості, природних схилів та укосів штучних ґрунтових споруд та їх основ. З 1982 року під його керівництвом та безпосередньої участі, за допомогою розробленого ним малогабаритного обладнання і удосконаленою методикою динамічного зондування, як піонерного методу були обстежені ґрунтові умови більше п'ятиста об'єктів автомобільних доріг та залізниць, аеропортів, ґрунтових гідротехнічних гребель, фундаментів житлових будинків та промислових споруд включно з основами рейкових колій баштових кранів.

Автор понад сорока наукових праць.
Email: asl.weise@gmail.com

УДК 624.131.372:006.354

НАСКІЛЬКИ ОБ'ЄКТИВНО ВИЗНАЧАЄТЬСЯ ЗНАЧЕННЯ ВЕРХНЬОЇ МЕЖІ ПЛАСТИЧНОСТІ ЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ У СУЧАСНОМУ БУДІВЕЛЬНОМУ ҐРУНТОЗНАВСТВІ? (Частина друга)

Ключові слова: дисперсія, концентрація, суспензія, пасти, коагуляція, синерезис, пенетрація, інерція, зондування.

У статті, на основі експериментальних лабораторних досліджень, обґрунтовується справжня фізична сутність верхньої межі пластичності (W_L) зв'язних ґрунтів виходячи із їх власних природних властивостей.

В статті, на основани експериментальних лабораторних досліджень, обґрунтовується справжня фізична сутність верхньої межі пластичності (W_L) зв'язних ґрунтів виходячи із їх власних природних властивостей.

In this article, based on experimental laboratory researches, substantiates true physical nature of the upper plasticity limit of cohesive soils on the basis of their own natural properties.

Аналіз експериментальних даних.

Як було показано раніше, добре відпрацьована методика проведення експериментальних досліджень дозволяє не тільки забезпечити гарне відтворення результатів повторних, в т.ч. і дублюючих, випробувань, але і у повній мірі проявитись власним природним властивостям ґрунтів.

Так після вакуумування зразків було відмічено, що при початкових вологостях, між вологістю на межі розкочування ($I_L=0$) і до консистенції $I_L \approx 0,5$ (за існуючими уявленнями), коли вони мали вигляд більш-менш густої, щільної пасти (концентровані суспензії) всі зразки збільшували свою масу внаслідок витискання з них

повітря і зайняття його місця водою. Ступінь їх водонасичення після вакуумування становив $S_r=0,98-1,0$. Але початково більш вологі зразки, з $I_L > 0,5$, які мали вигляд більш рідкої глинистої суспензії, навпаки зменшували свою масу при вакуумуванні під водою, витискаючи не тільки повітря, але і досить велику кількість води. В той же час ступінь їх водонасичення також становив $S_r=1,0$. При вакуумуванні помітно зменшувався як діаметр таких зразків, так і їх висота (рис. 1). Але на вигляд такі зразки були більш однорідними, монолітними і міцними, ніж перед вакуумуванням.

Таке явище у науковій літературі відоме ще з початку двадцятого століття [1, 2, 3, 4] і зветься синерезисом. Як пише С.М. Ліпатов [2], синерезис це: «Самопроизвольное застудневание системы конечным этапом которого является разделение ее на фазы: дисперсную фазу и дис-



Рис.1. Зменшення висоти і діаметру зразка в процесі синерезису в процесі вакуумування в стані тиксотропного спокою.

персную среду. Скорость синерезиса есть функция расстояния между частицами, а следовательно и концентрации. Синерезис представляет, следовательно, процесс «выкристаллизовывания» дисперсной фазы и возвращает систему к ее начальному устойчивому состоянию». Але в цілому, робить висновок М.Н. Гольдштейн [1, с. 329]: «Явление синерезиса до сих пор не получило удовлетворительного и непротиворечивого объяснения и его следует рассматривать как особый вид усадки, которая происходит под влиянием сил поверхностного натяжения, а усадку глинистого грунта под водой можно рассматривать как особый вид синерезиса (подводный синерезис)».

Так чи так, але вже сама підготовка зразків до пенетраційних випробувань конусом засвідчила наявність певної кардинальної зміни властивостей водонасичених глинистих ґрунтів при збільшенні вологості через певний період тиксотропного спокою в процесі вакуумування.

Зрозуміло, що традиційний підхід до визначення меж пластичності зв'язних ґрунтів за методом Аттерберга у будь-якій із відомих його інтерпретацій: чи то Безрука, чи то Казагранде, чи адаптованого до них методу балансірного конуса за Васильєвим, в принципі, не забезпечують будь-якого прогресу як у класифікаційних оцінках таких ґрунтів, так, тим більше, і у подальшій оцінці їх фізико-механічних властивостей як при лабораторних випробуваннях, так, особливо, і при польових інженерно-геологічних вишукуваннях.

В зв'язку з цим пропозиція В.Ф. Разорьонова щодо необхідності переходу у визначенні обох меж пластичності зв'язних ґрунтів до їх пенетрації конусом з багатоступеневим (4-5 ступенів) його навантаженням [5] є абсолютно слушною. До того ж В.Ф. Разорьонов вже більш-менш обґрунтовано визначився із значеннями опору пенетрації ґрунтів для «стандартного» наконечника: на межі розкочування - $R_{пв}=0,186$ МПа і на межі текучості - $R_{пг}=0,0075$ МПа [5]. А ці дві точки за В.Ф. Разорьоновим з'єднуються між собою лінійною залежністю типу $lgR=f(W)$. Тому і наші експериментальні дослідження були проведені саме у цьому напрямі.

Але, як показали результати цих досліджень, така лінійна залежність між цими двома точками не є однорідною – на ній відбувається злам, характерний майже для всіх досліджених нами ґрунтів (всього близько 10 різновидів).

Після формування і вакуумування зразків вони випробувались пенетрацією конусом з кутом при вершині 30° на звичайному лабораторному пенетрометрі ЛП-1 додатково обладнаному для можливості проведення досліджень у більш широкому діапазоні сил, що діють на ґрунт через конус.

Головним недоліком цього пенетрометра, як зазначає сам В.Ф. Разорьонов є: «...некоторое завьшение глубины погружения наконечника за счет действия на первых двух ступенях нагрузки сил инерции падения штанг» [6], що підтвердили і наші дослідження (рис. 2). Але, як показав наступний аналіз, компенсувати цей недолік можливо двома способами: або не враховуючи координат першої точки у розрахунку параметрів рівняння степенної залежності $lg h=f(lg F)$ у подвійних логарифмічних координатах (рис.2), або на першому ступені навантаження давати його величину на 25-50 % меншу за інші ступені. Це також підтверджує думку, що при русі конічного тіла у ньютонівському середовищі [7] більш важливим є не те, наскільки загостреним (чи дещо

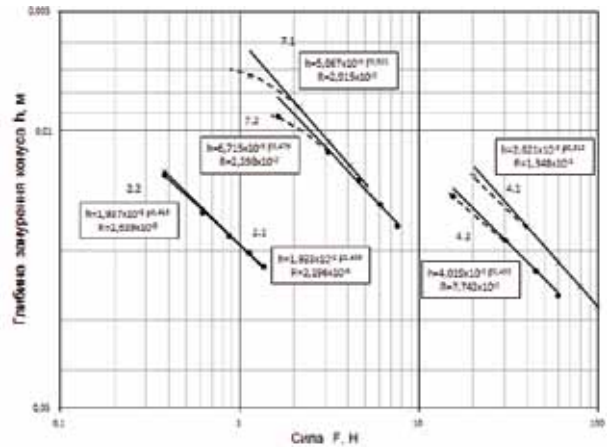


Рис.2. Залежність глибини занурення конуса при його багатоступеневому навантаженні.

притупленим) є конус, як сама величина його конусності - α (30°, 45°, 60° чи 90°). Тут також можна зробити висновки про тим більш невелику об'єктивність визначення верхньої межі пластичності - W_L методом балансірного конуса [8], який годиться лише для простих якісних порівняльних, а не кількісних оцінок. Зрозуміло, що конструктивно цього недоліку позбавлені безенерційні пенетрометри типу пластометра П.А. Ребіндера (рис.3).

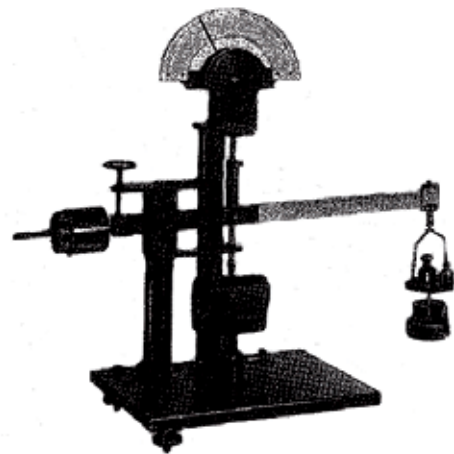


Рис.3. Конічний еластомір П.А. Ребіндера.

Як видно з рис.2, у подвійних логарифмічних координатах дуже зручно одночасно будувати графіки пенетрації при всіх станах ґрунтів від текучого до твердого. В той же час В.Ф. Разорьонов [5] не рекомендує зазвичай так робити через те, що при цьому начебто: «...искажения в результатах испытаний, например, за счет слоистости текстуры уже не выявляются».

Треба думати, що проблема полягає не в цьому. Всі дослідники, починаючи від П.А. Ребіндера і включно з В.Ф. Разорьоновим, визначали опір ґрунтів пенетрації у вигляді рівняння $R=kF/h^2$, МПа, в якому значення R формально сприймаються як тиск на одиницю площі, щоправда незрозуміло якої: чи то лобового перерізу, чи то зануреної у ґрунт частини поверхні конуса. А підтвердженням необхідності саме такого вигляду цього рівняння їм слугували лінійні графіки залежності $h^2=f(F)$, наприклад, як у [5], які у звичайних декартових координатах проходять близько їх початку, тобто при нульовому навантаженні на конус переміщення дорівнює нулю.

Але відомо, що степені функції не тільки із натуральними, і з дробними додатними показниками степені у звичайних координатах проходять через нуль, що і рекомендує використовувати Х.Шенк [9] при перевірці точності вимірювань, результати яких підпорядковані степенним залежностям типу $x=ay^b$ шляхом екстраполяції їх до початку координат. Виконана перевірка показала, що точність проведених нами вимірювань забезпечується і при дробних додатних значеннях показників степеня, якими вони насправді і є при заглибленні конуса у ґрунт від діючої на нього сили (рис.2). Таким чином, відношення значення діючої сили до квадрату глибини занурення конуса можна розглядати тільки як штучний, технічний прийом, який не має безпосереднього стосунку до оцінки власних природних властивостей ґрунтів.

Після аналітичного (методом найменших квадратів) визначення значень показника R для різних станів ґрунту, як і пропонував В.Ф. Разорьонов, для кожного із досліджених видів ґрунтів у напівлогарифмічних координатах будувались графіки лінійних залежностей типу $lgR=f(W)$, МПа (рис. 4).

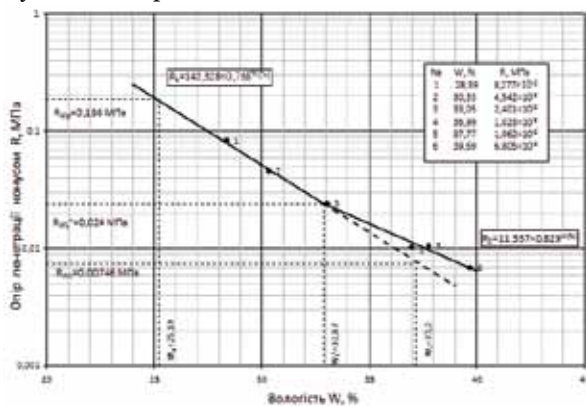


Рис.4. Типовий графік залежності $R=f(W)$, МПа.

Хоча, як було показано раніше, з таким самим успіхом можна було б використовувати і залежності типу $A=f(W)$, Дж (рис. 5), де A є робота, яка витрачається на занурення силою F конуса на глибину h , що значно ближче до реальних умов досліду, хоча також не має безпосереднього зв'язку із визначенням власних фізико-механічних властивостей досліджуваних ґрунтів. Але ці питання будуть висвітлені далі, у наступних таких роботах.

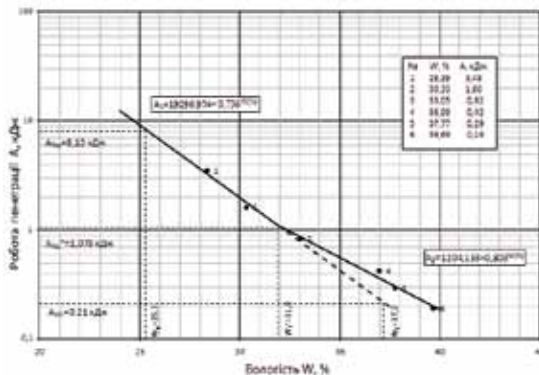


Рис.5. Представлення залежності занурення конуса як функції роботи пенетрації $A=f(W)$, кДж.

Як видно з графіка (рис. 4) і багатьох інших (рис. 6) майже всі вони мають злам при $R \approx 0,024$ МПа і ці

значення R змінюються у дуже вузькому діапазоні ($S=1,85 \cdot 10^{-3}$ МПа і $K_v=7,5\%$, $\rho=2,8\%$) якщо представляти їх у вигляді нормального статичного розподілу. Ці величини не складно вирахувати для будь-якого виду ґрунту, розв'язуючи систему двох лінійних рівнянь з двома невідомими типу $lgR=f(W)$, які характеризують ґрунт у стані повного водо насичення ($I_r=0,98-1,0$) і які перетинаються між собою у певній точці. Характерно, що у всіх відомих нам літературних джерелах таке визначення цієї важливої у цьому контексті точки R^+ ніде не описується, а значення R^+ на перетині ліній рівнянь $R=f(W)$ даються дуже приблизно у досить широкому діапазоні їх значень [7, 10]. Наприклад, згідно [7]: «Исследования показали, что кривые $P_m=f(W)$ могут быть представлены двумя прямолинейными участками, которые имеют различный наклон к оси W . Первый участок начинается, когда пластическая прочность массы становится выше $(6-11) \cdot 10^5$ дин/см². В этом случае дисперсионная система содержит преимущественно связную адсорбционную воду. При переходе ко второму участку, расположенному ниже $P_m=(6-11) \cdot 10^5$ дин/см² в массе происходит полное развитие гидратных оболочек. Дальнейшее увеличение влагосодержания приводит к резкому изменению кривой $P_m=f(W)$ и характеризуется появлением наряду с адсорбционной связной водой и диффузной влагой также значительных количеств иммобилизованной воды.» Нагадаємо, що $(6-11) \cdot 10^5$ дин/см² відповідає 0,06-0,11 МПа > 0,024 МПа у наших дослідах.

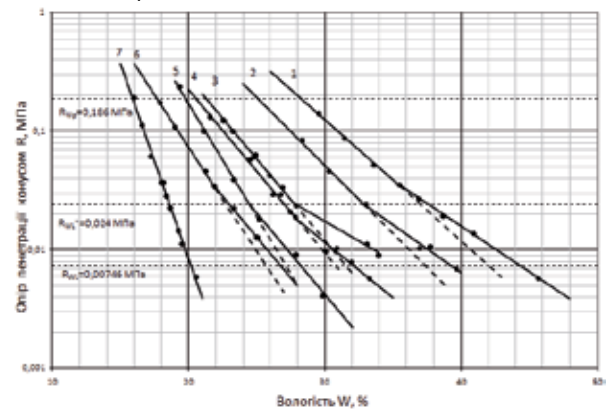


Рис.6. Графіки залежності $R=f(W, \%)$, МПа для досліджених ґрунтів (1-7).

Швидше за все це обумовлено певними розбіжностями у методах підготовки зразків до випробувань, хоча сам факт виникнення у певній точці залежності $lgR=f(W)$ зламу є абсолютно незаперечним. Особливо добре це простежується в роботах науковців, які досліджували властивості глинистих суспензій з позиції фізико-хімічної механіки [13, 14], де представляють залежність опору ґрунтів пенетрації конусом не як функцію вологості $lgR=f(W, \%)$ таких суспензій, а як функцію концентрації $lgR=f(C, \%)$ дисперсної фази, про що буде сказано далі.

На прикладі ж графіка рис. 4 маємо для однієї з ділянок залежності $lgR=f(W)$ емпіричне показникове рівняння $R=142,328 \cdot 0,768^{W\%}$ (у межах власне пластичного стану ґрунту) і для другої - $R=11,537 \cdot 0,829^{W\%}$ (у межах вже в'язко - текучого стану), а перетинаються вони при вологості $W=32,87\%$, яка відповідає $R=0,024$ МПа, і яка становить $I_r \approx 0,62$ за існуючими зараз уявленнями про визначення верхньої межі пластичності. Цю вологість і слід розглядати як справжнє значення верхньої межі пластичності - W_L^+ , для цього конкретного ґрунту. Такий

висновок може-мо зробити, виходячи із наступних сучасних теоретичних уявлень про природу зв'язних (глинистих) ґрунтів, і, зокрема, глинистих колоїдних частинок.

Глинисті частинки [11, 12], які зазвичай мають від'ємний електричний заряд, утримують навколо себе декілька шарів молекул води «... и чем больше удельная поверхность частиц, тем большее количество молекул воды будет находиться в связанном состоянии» [11, 12]. Ці ґрунтові частинки, разом із шарами міцно та слабозв'язної води складають так звані міцели, ядрами яких вони і є. І, нарешті, молекули води, які знаходяться поза межами дії електромолекулярних сил складають вільну, або гравітаційну воду.

Щільні водонасичені ґрунти у твердому і пластичному стані мають дуже велику концентрацію і тому їхні міцели чи навіть ядра (супіщані ґрунти) можуть мати безпосередні контакти між собою. Внаслідок цього з власних властивостей така система стискатися більше вже не може. Межею тут слугує явище зступу (усадки). Це дозволяє ґрунтам у такому стані працювати під навантаженням спочатку як пружним (твердим), а потім як деформативним (пластичним) середовищем. Але із зменшенням густини сухого ґрунту і збільшенням кількості води концентрація ґрунтових частинок (міцел) зменшується, а контакти між ними зникають і врешті-решт вони починають «плавати» у дисперсному середовищі – настає фаза текучості. На рис. 7 дані пенетраційні дослідження деяких ґрунтів представлені не відносно їх вологості, як зазвичай (рис. 4, рис. 6), а відносно концентрації глинистих частинок (дисперсної фази), яку нескладно вирахувати за тими ж значеннями маси ґрунту, що і при розрахунку його вологості.

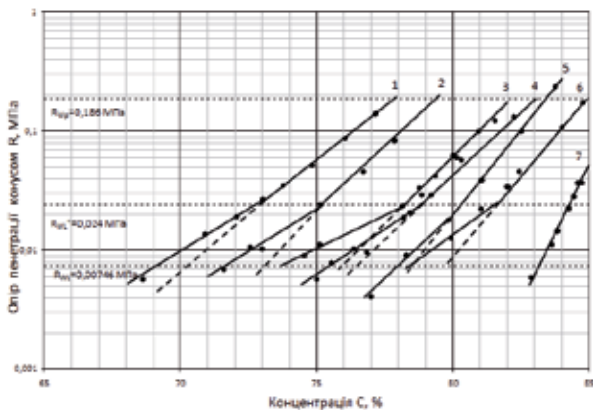


Рис.7. Графіки залежності $R=f(C, \%)$, МПа для досліджених ґрунтів (1-7).

Але міцели «плавають», так би мовити, не у «чистій» воді, а у розчині (дисперсному середовищі), утвореному глинистим матеріалом, який має певний хімічний склад і здатність до утворення певних хімічних зв'язків в процесі коагуляції у стані тиксотропного спокою. Таким чином, в стані тиксотропного спокою і при зміні атмосферного тиску починає проявляти себе явище про яке ми згадували раніше і яке на своїй початковій стадії і є підводним синерезисом, який повертає систему до її початкового стійкого стану, намагаючись шляхом витиснення вільної води зблизити між собою плаваючі у розчині частинки – міцели.

Як видно з рис.7, чим більшими є розміри міцел (через більшу питому поверхню частинок ґрунту – масні глини), тим при меншій концентрації і більшій вологості

відбувається перехід таких ґрунтів до текучого стану і навпаки, чим меншими є міцели (супіщані ґрунти), тим при більших концентраціях і меншій вологості досягається текучий стан, що особливо проявляється при їх тиксотропному розрідженні.

Зрозуміло, що хімічні властивості в більшій чи меншій мірі проявляються зв'язними ґрунтами у будь-якому стані, але при великих щільностях (концентрації) переважають саме фізичні властивості у вигляді передачі зусиль, які діють на ґрунт, безпосередньо через контакти між міцелами чи їх ядрами, а при переході у текучий стан більш виразними стають хімічні зв'язки у вигляді коагуляційних ланцюжків, які і не дозволяють конусу занурюватись на більшій глибини як це було б без них, що передбачав В.Ф. Разорьонов та інші у своїх дослідженнях, не враховуючи неоднорідності рівняння $R=f(W)$ між межею розкочування і межею текучості. А саме цим пояснюється злам залежності типу $lgR=f(W)$. Тобто опір фізичним навантаженням чинить вже не фізичний чинник – густина сухого ґрунту, а хімічний – структурна решітка коагуляційних ланцюжків. З часом, у стані тиксотропного спокою, такі зв'язки набувають дуже великої міцності забезпечують власне структурну міцність ґрунтів навіть при невеликій природній їх щільності. Тому поширювати на текучий стан ґрунтів такі поняття як модуль деформації і, тим більше, модуль динамічної пружності при розрахунках дорожніх одягів неприпустимо, тим більше, що такі колоїдно - коагуляційні зв'язки зазвичай є водонестійкими.

Але і вважати суто текучим стан ґрунтів при вологостях у водонасиченому стані, більших ніж верхня межа пластичності (W_L), мабуть, було б теж недостатньо коректним. Скоріше за все, на якомусь відтинку зміни вологості їх стан слід розглядати як в'язко – текучий і лише при ще більшій вологості і при концентраціях $C < 30\%$, вже як справді текучий. На це вказують і дослідження М.П. Воларовича і А.Л. Багрова (рис. 8) [14] та інших дослідників про що йшлося раніше і для яких у фізико – хімічній механіці існує досить детальна система різних показників [7].

Про можливу неналежність верхньої межі пластичності ґрунтів - W_L до їх пластичного стану в інтерпретації Аттерберга, свідчать і такі дослідження як [16] «...исследования в части увязки одной из констант Аттерберга – нижней границы теку чести – с гранулометрическим составом (кількістю глинистих частинок) показують,

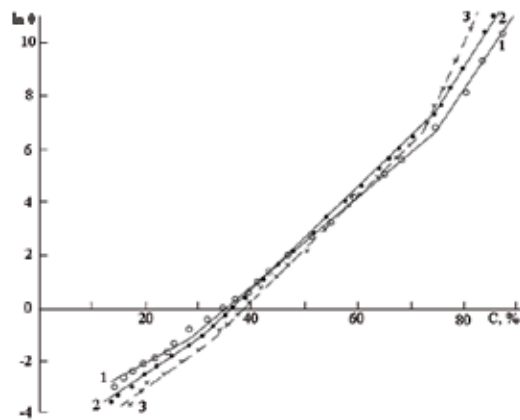


Рис.8. Залежність граничного напруження зсуву від концентрації дисперсної фази в напівлогарифмічних осях (θ , г/см³).

что между ними существует четкая закономерность», в той час як «...отсутствие определенной взаимосвязи между содержанием в грунте глинистой фракции и величиной границы раскатывания становится труднообъяснимым».

Але все як раз навпаки – у пластичному стані, коли переважають фізичні властивості ґрунтів, обумовлені великою концентрацією дисперсної фази ні межа розкочування, ні так звана нижня межа текучості (верхня межа пластичності) і не повинні особливо реагувати на хімічний склад глинистих частинок. Та при переході у в'язко – текучий стан, коли остаточно втрачається контакт між міцелами, хімічні властивості колоїдних глинистих частинок набувають більшої ваги, що і обумовлює їх вплив як на верхню межу пластичності за Аттербергом, так і на число пластичності, що безпосередньо з нею пов'язане. Тому, верхня межа текучості за Аттербергом вже не належить до пластичного стану і не є якоюсь його межею.

Про це ж свідчать і такі показники глинистих ґрунтів як гідрофільність та активність глин [1], які поки що хоча і не знайшли певного застосування в геотехніці, але є певним доповненням до класифікаційних характеристик цих ґрунтів.

ВИСНОВКИ:

1. Як показав аналіз експериментальних даних безпосередньо визначити межу переходу від пластичного до текучого (в'язко – текучого) стану із одного досліді практично неможливо. Аналіз цих даних у більш широкому діапазоні зміни фізико – механічних властивостей зв'язних ґрунтів порушеної структури у повністю водонасиченому стані у кількісному вираженні за залежністю

$R=f(W,%)$ чи $R=f(C,%)$ показав, що такий перехід існує і не залежить від методу випробувань чи виду представлення їх результатів, а обумовлений їх власними фізико – хімічними властивостями. Ці фізико – хімічні властивості породжують таке природне явище як підводний синерезис, який відбувається при вакуумуванні в стані тиксотропного спокою.

Внаслідок підводного синерезису, як початкової стадії структурно – механічного зміцнення ґрунтів в процесі їх діагенезу спочатку із водоглинистої суспензії частково витісняється вільна вода через намагання системи перейти до більш стійкого стану із безпосередніми контактами ґрунтових міцел між собою. А потім відбувається утворення і зміцнення коагуляційних ланцюжків, які створюють просторову решітку і надають ґрунтам великої структурної міцності.

2. Витискання вільної води із водо глинистої суспензії відбувається вже при вологості водонасиченого ґрунту, яка відповідає показнику текучості близько $I_L \approx 0,62$, за чинною процедурою визначення показника W_L . В свою чергу це відповідає опору penetрації ґрунтів «стандартним» конусом при $R=0,024 \text{ МПа}$.
3. Користуючись емпіричними залежностями опору ґрунтів penetрації як у пластичному, так і у в'язко – текучому стані можна кількісно ідентифікувати будь-який ґрунт. Ці ж залежності дозволяють оцінювати структурну міцність ґрунтів у їх природному заляганні, порівнюючи її із порушеним станом таких ґрунтів, отриманим в лабораторії.
4. В подальшому це дозволяє здійснити перехід від штучних, технічних показників міцності зв'язних ґрунтів типу C і ϕ до природних властивостей ґрунтів у вигляді коефіцієнта в'язкості та структурної міцності і безпосередньо їх використовувати у розрахунках, наприклад, стійкості укосів та інших розрахунках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства ґрунтов, - М.: Стройиздат, 1973, С. 314, 329.
2. Лопатов С.М. Высокомолекулярные соединения, - Ташкент: Изд. АН БССР, 1943, С. 148.
3. Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре, - М.: Изд. АН СССР, 1955.
4. Горкова И.М., Рябичева К.Н. Опыт изучения структурно-механических свойств некоторых глинистых пород. В сб. «Труды лаборатории гидрогеологических проблем им. Саваренского», т. XXII, - М.: Изд. АН СССР, 1959.
5. Разорёнов В.Ф. Пенетрационные испытания ґрунтов (теория и практика применения), - М.: Стройиздат, 1980, С. 26, 115, 117, 122.
6. Разорёнов В.Ф. Определение строительных свойств ґрунтов методами пенетрации и вращательного среза, - Киев.: Изд. «Будівельник», 1966, с. 36.
7. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. Часть 1, - Киев.: Изд. «Вища школа», 1975, С. 132, 194, 240.
8. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основы та фундаменти будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей, - Київ: Мінрегіонбуд, 2010.
9. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Перевод с англ., - М.: Изд. «Мир», 1972, С. 217.
10. Ничипоренко С.П. Основные вопросы теории процессов обработки и формирования керамических масс, - Киев: Изд. АН УССР, 1960, С. 35.
11. Цитович Н.А. Механика ґрунтов (краткий курс), - М.: Изд. «Высшая школа», 1973, С. 12.
12. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы ґрунтоведения и механика ґрунтов, - М.: Изд. «Высшая школа», 1973, С. 27.
13. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. Часть 2, - Киев.: Изд. «Вища школа», 1976, С. 181.
14. Воларович М.П., Бегров А.А. Влияние дисперсности на зависимость реологических пара-метров системы глина – вода от концентрации дисперсной фазы. Физико-химическая механика дисперсных структур. Сб. статей, - Изд. «Наука», 1966, с. 384, 388.
15. Горкова И.М. Труды лаборатории гидрогеологических проблем им. Акад. Ф.П. Саваренского. Том XII, раздел 2, глава III – IV, - М.: Изд. АН СССР, 1956.
16. Мельников. Влияние гранулометрического состава ґрунтов на степень их пластичности, - Журнал «Почвоведение», - Изд. АН СССР, №8, 1940, С. 117.