

ПРО ФІЗИЧНИЙ ЗМІСТ НЕОБХІДНОЇ І ДОСТАТНЬОЇ ВЕЛИЧИНИ ГУСТИНИ СУХИХ ЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ ПРИ СПОРУДЖЕННІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Литвиненко А.С.

Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна

Вступ

На цей час сам факт необхідності ретельного і достатньо сильного ущільнення ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг вже ні в кого не викликає сумнівів, але існує певна невизначеність, до яких саме значень густини сухого ґрунту найдоцільніше ущільнювати ґрунти, зокрема зв'язні. Теоретично і в лабораторних умовах доведено, що в процесі ущільнення густина сухого ґрунту може досягати дуже великих значень (рис. 1) [1].

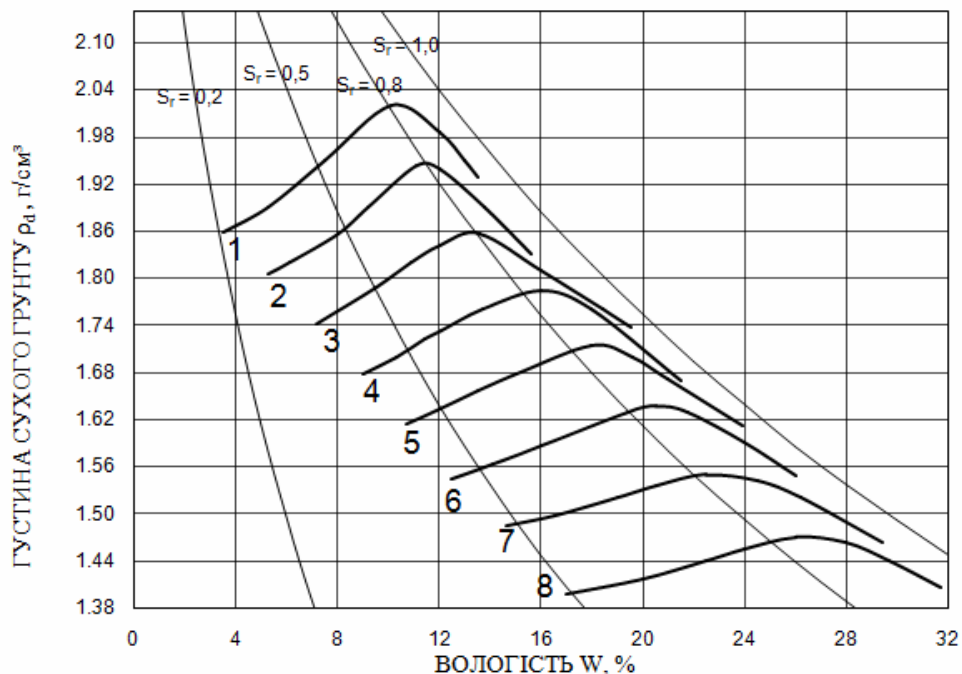


Рис. 1. $\rho_{d\max}$ закономірно збільшується як при переході від більш важких ґрунтів (8) до більш легких (1), так і при збільшенні кількості роботи на одиницю об'єму будь-якого одного конкретного ґрунту

Наведені на рис. 1 графіки показують, що як і для різних видів ґрунтів, від глин до гравіюватих пісків при однаковій кількості роботи, так само і для будь-якого окремо взятого ґрунту, але із збільшенням роботи, яка витрачається на ущільнення одиниці об'єму ґрунту, можна досягти досить великих значень густини сухого ґрунту, при цьому оптимальна вологість увесь час зменшується. Тобто загальна тенденція розташування кожного нового графіка результатів ущільнення в обох випадках в принципі однакова. Таким чином доводиться, що $\rho_{d\max}$ як і $w_{\text{опт}}$ є лише змінними технологічними параметрами, які не мають певного фізичного змісту. Цей висновок і став згодом підґрунтям розробленого ще в сорокових роках двадцятого століття дещо зміненої методики лабораторного ущільнення ґрунтів – модифікованого методу AASHTO,

в результаті чого значно збільшились значення ρ_{dmax} при лабораторному ущільненні ґрунтів. В той же час в радянській науковій літературі існувала думка, що, незважаючи на принципову можливість досягати в польових умовах таких великих значень густини сухого ґрунту, чи буде вона достатньо стабільною у часі (з різних причин) і тому чи є вже така нагальна потреба у значному збільшенні цього показника в практичній діяльності [2,3,4].

Основна частина

Як відомо, головною точкою відліку в питанні необхідного ступеня ущільнення ґрунтів при спорудженні земляного полотна є значення максимальної густини сухого ґрунту ρ_{dmax} , що досягається в процесі лабораторного стандартного ущільнення [5,6]. Зазвичай ця величина повинна визначатись за допомогою графіка $\rho_d=f(w)$, приклади побудови якого завжди надавались у відповідних нормативних документах у вигляді довідкових додатків. В гіршому випадку її інколи доволіно оцінювати «на око» за даними таблиці результатів стандартного ущільнення. Але в будь-якому випадку мабуть ніколи достатньо ретельно не досліджувався взаємозв'язок таких графіків із загальними класифікаційними характеристиками і відповідно фізико-механічними властивостями конкретних ґрунтів у графічному вигляді, що могло дати хоча б деяке якісне, якщо вже не кількісне, пояснення і обґрунтування таких технологічних характеристик як ρ_{dmax} та w_{opt} . Щоб з'ясувати це питання і ще краще його усвідомити, розглянемо конкретний приклад, одночасно маючи на увазі, що ця схема є типовою для будь-якого виду зв'язного ґрунту – від піщаних супісків до масних глин.

На рис. 2 у координатах «вологість-густина сухого ґрунту» наведено графік стандартного ущільнення легкого пилуватого суглинку, як цього вимагали і вимагають всі попередні діючі нормативні документи.

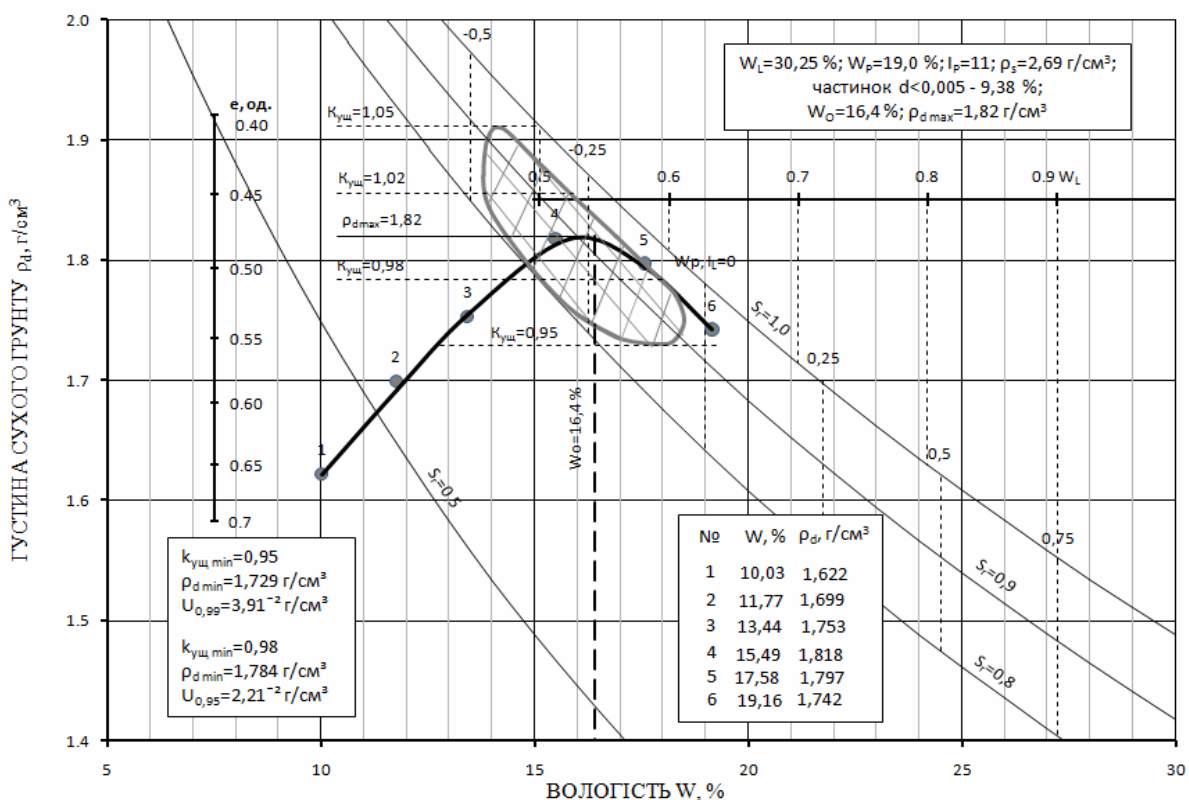


Рис. 2. Схема оцінки взаємозв'язку значень - ρ_{dmax} , г/см³ і - W_o , % з основними класифікаційними показниками ґрунтів

Але тут же, на рис. 2, наведено значення фізичних класифікаційних показників цього ґрунту: w_L ; w_p ; I_p ; ρ_s ; I_L ; S_r ; w/w_L , вміст глинистих частинок – $d < 0,005$ мм %. Стосовно процедури побудови цього і таких графіків взагалі, варто нагадати, що необов'язково, щоб якась із дослідних точок, отриманих при випробуванні, обов'язково припадала саме на максимум дослідної кривої, а сама крива стандартного ущільнення проходила безпосередньо через всі експериментальні точки. В силу самої природи будь-яких експериментальних досліджень існує певний розкид отриманих даних, і тому крива стандартного ущільнення повинна проводитись таким чином, щоб найкраще, але достатньо плавно розташуватись між цими точками і водночас не відбулось суттєвого її спотворення. Загальний вигляд таких кривих для всіх видів ґрунтів в принципі дуже добре відомий у виробничих лабораторіях і лабораторіях проектних установ. Шкода тільки, що наведені у нормативних документах приклади побудови графіків стандартного ущільнення не дають повного уявлення щодо стану ґрунтів при ρ_{dmax} , W_{opt} стосовно всього поля значень показників вологості-густини, як це показано на рис. 2. Так, крім вже звичних шкал показників густини сухого ґрунту ρ_d , г/см³ і вологості w , % нанесені тут класифікаційні лінії ступеню водонасичення ґрунту S_r ч.од. показують, що при досягненні ρ_{dmax} всі зв'язні ґрунти, як в лабораторних, так і в польових умовах, переходять у водонасичений стан ($S_r \geq 0,8$), тобто формально вже майже сягають розрахункової вологості.

Про фактичну можливу розрахункову вологість буде сказано далі. На ці ж ступеня водонасичення ґрунтів ($S_r = 0,8-1,0$) поширюються і показники пластичності ґрунтів I_L та значення вологостей на межах їх пластичного стану w_p та w_L , які відкладаються вздовж лінії повного водонасичення $S_r = 1,0$. Вертикальними лініями, опущеними із класифікаційних точок показника пластичності $I_L = 0; 0,25; 0,50$ і т.ін., сегменти між $S_r = 0,8 - 1,0$ діляться на окремі блоки, стосовно стану ґрунтів, у яких зазвичай наводяться відповідні цим вологостям і коефіцієнтам пористості $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$ табличні значення показників механічної міцності і деформативності: кути внутрішнього тертя – ϕ , зчеплення – C та модуля деформації – E_d ґрунтів, які використовують у цивільному та промисловому будівництві при розрахунках фундаментів. Таким чином, при досягненні значення ρ_{dmax} насипні зв'язні ґрунти у дорожньому будівництві повинні знаходитись також і у твердому стані ($I_L < 0$, де $I_L = 0$ відповідає w_p). В першу чергу це поширюється на ґрунт робочого шару з $k_{yщ \min} \geq 0,98$ і частково, якщо частина значень ρ_{di} відповідає напівтвердому стану, для $k_{yщ \min} = 0,95$ ($I_L = 0-0,25$), тобто повинні бути у всіх інших конструктивних елементах насипів, що штучно ущільнюються при їх спорудженні.

З'ясувавши у викладеному раніше, що стан ґрунтів, які штучно ущільнюються при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг, при ρ_{dmax} повинен відповідати твердому стану ($I_L < 0$) і одночасно бути водонасиченим ($S_r \geq 0,8$), можемо перейти до характеристики оцінки ущільненості ґрунтів власне за їх щільністю–густиною сухого ґрунту, вираженою через коефіцієнт пористості. Ще у 1947 році В.А. Приклонський [7,8], а з ним згодні і інші дослідники [9], для характеристики ущільненості глинистих порід у природному стані за аналогією із показником текучості I_L запропонував показник ущільненості:

$$k_d = \frac{e_f - e_i}{e_f - e_p} \quad (1)$$

де e_i – коефіцієнт пористості природного ґрунту;
 e_f – його коефіцієнт пористості на верхній межі пластичності w_L ;
 e_p – коефіцієнт пористості на нижній межі пластичності w_p .

Незважаючи на не дуже велике поширення у ґрунтознавчій науковій літературі, цей показник дає досить об'єктивну і вичерпну оцінку стану ґрунтів за значенням їх густини сухого ґрунту. Якщо за формулою (1) оцінювати стан ущільненості ґрунтів при ρ_{dmax} , то можна отримати таке значення k_d для розглянутого у прикладі ґрунту

$$k_d = \frac{0,81 - 0,48}{0,81 - 0,51} = 1.1$$

Як свідчать подібні розрахунки для багатьох інших видів зв'язних ґрунтів, всі вони при ρ_{dmax} мають значення $k_d > 1,0$. Суть таких значень показника k_d полягає у тім, що коли в природних умовах ґрунти мають $k_d > 1,0$, їх називають переущільненими, і такі ґрунти відносно рідко зустрічаються в геологічній практиці. Найбільш відомими серед них у четвертинних відкладеннях є моренні ґрунти, що утворилися під дією тиску потужного крижаного покриву. Такі ґрунти практично не змінюють набутих властивостей від дії погодно-кліматичних факторів. Таким чином, переущільненні в процесі спорудження насипів ґрунти дуже добре зберігають набуті при цьому показники міцності і деформативності. Про це ж пишуть і автори роботи [3]: «Следует иметь в виду, что если максимальная плотность грунта обеспечивает необходимую его прочность и водоустойчивость, то расчётная плотность, задаваемая с введением коэффициента уменьшения k , – ни прочности, ни водоустойчивости не обеспечивает!». Посилаючись на одну із наукових статей В.М. Безрука, нагадаємо, що «по мере приближения плотности и влажности грунта к оптимальной затрудняется возможность последующего увлажнения грунта, при влажности его равной оптимальной, капиллярное передвижение воды в нём практически не происходит. Наиболее водоустойчивыми оказываются ґрунты, уплотнённые при оптимальной влажности до наибольшей плотности».

Якщо ж розглядати показники (міцності і деформативності) стосовно їх використання для розрахунку дорожніх одягів різних типів за таблицями, що наводяться у відповідних нормативних документах [10, 11], то там вони представлені щодо стану ґрунтів у долях відносної вологості (відносно w_L), хоча цей показник слід визнати у всіх випадках недостатньо коректним. Шкала значень показника w/w_L також показана на рис. 2. Суттєвим недоліком представлення значень показників механічних властивостей ґрунтів через відносну вологість є невизначеність їх стану стосовно другого класифікаційного показника зв'язних ґрунтів – w_p (нижньої межі пластичності). Такий зв'язок з'ясовується тільки на схемах, подібних до тої, що показано на рис. 2. Так, з цього рисунка видно, що для робочого шару, де коефіцієнт ущільнення повинен бути не менше 0,98, розрахункова відносна вологість може бути не більше $0,60w_L$ навіть для більш легких ґрунтів. Для важких же ґрунтів, таких як масні глини рис. 3, відносна розрахункова вологість навіть для коефіцієнта ущільнення 0,90 може сягати не більше $0,55 w_L$. Звідси можна зробити висновок, що коли ґрунт у робочому шарі при спорудженні земляного полотна справді є ущільненим, то таблиці розрахункових значень характеристик ґрунтів типу Д.7 [10] або В.6 [11], у такому вигляді як вони є зараз, – не мають права на існування. Якщо ж навпаки, то про яке ущільнення взагалі може йти мова.

В такій самій мірі це стосується й таблиць розрахункових вологостей ґрунтів для різних умов зволоження земляного полотна (Додаток Д [10]). А.К. Бируля та інші [3], ще у 1952 році показали, що вологість ґрунтів у природному стані протягом року змінюється тільки через відносне наповнення пор ґрунту водою або повітрям. При цьому густина сухого ґрунту практично не змінюється (рис. 4).

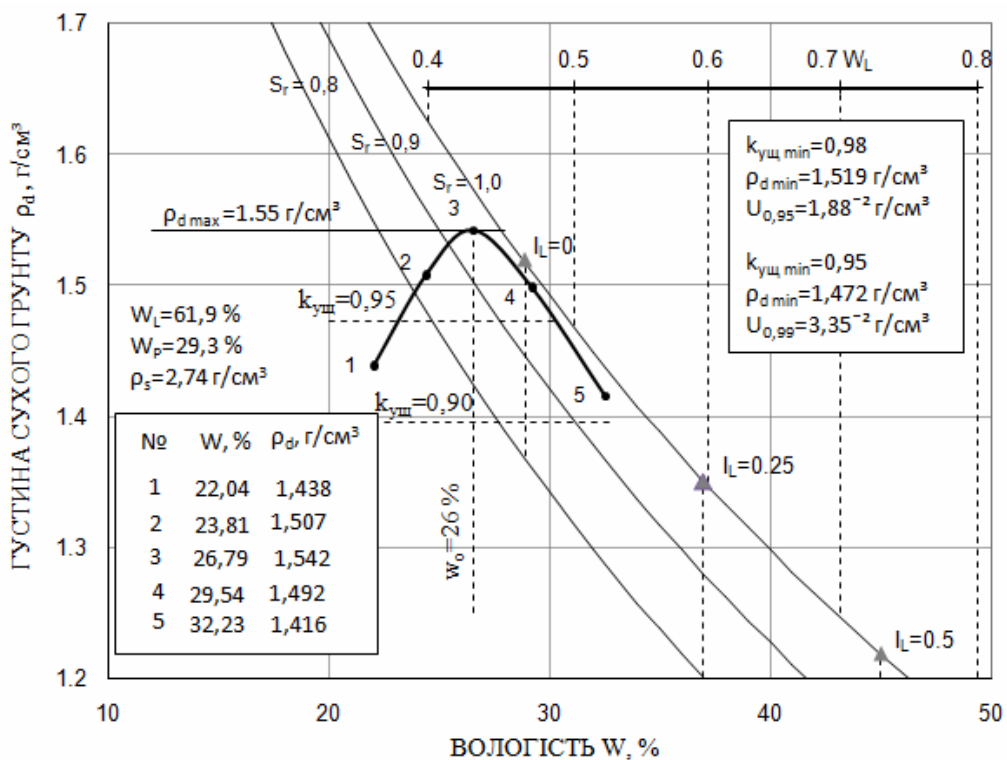


Рис. 3. Співвідношення показників $\rho_{d\max}$ г/см³ і w_0 % з класифікаційними показниками масної глини

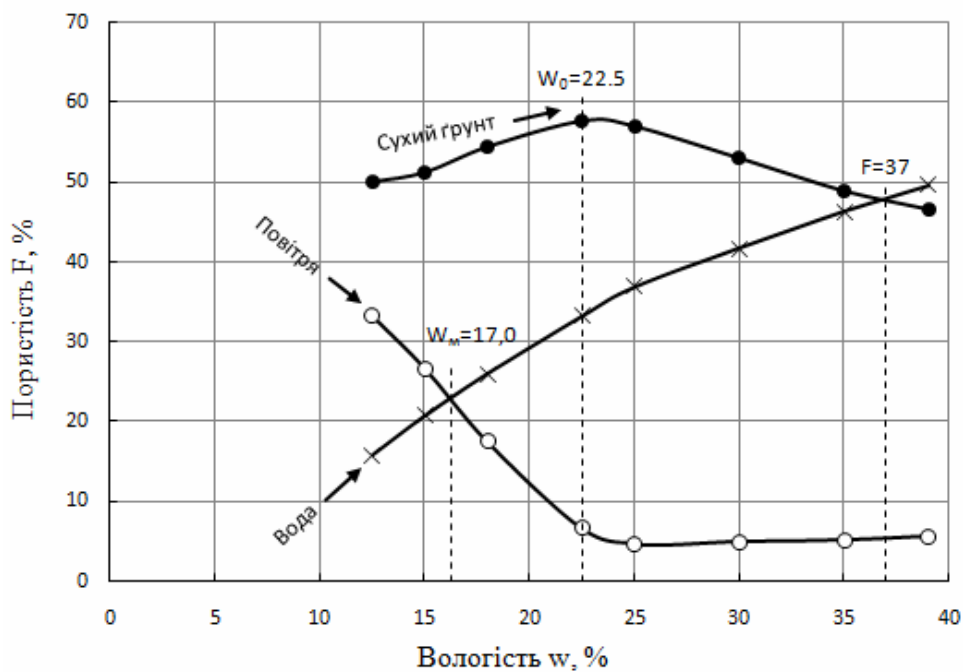


Рис. 4, а. Співвідношення об'ємів сухого ґрунту, води і повітря при стандартному ущільненні ґрунту [3]

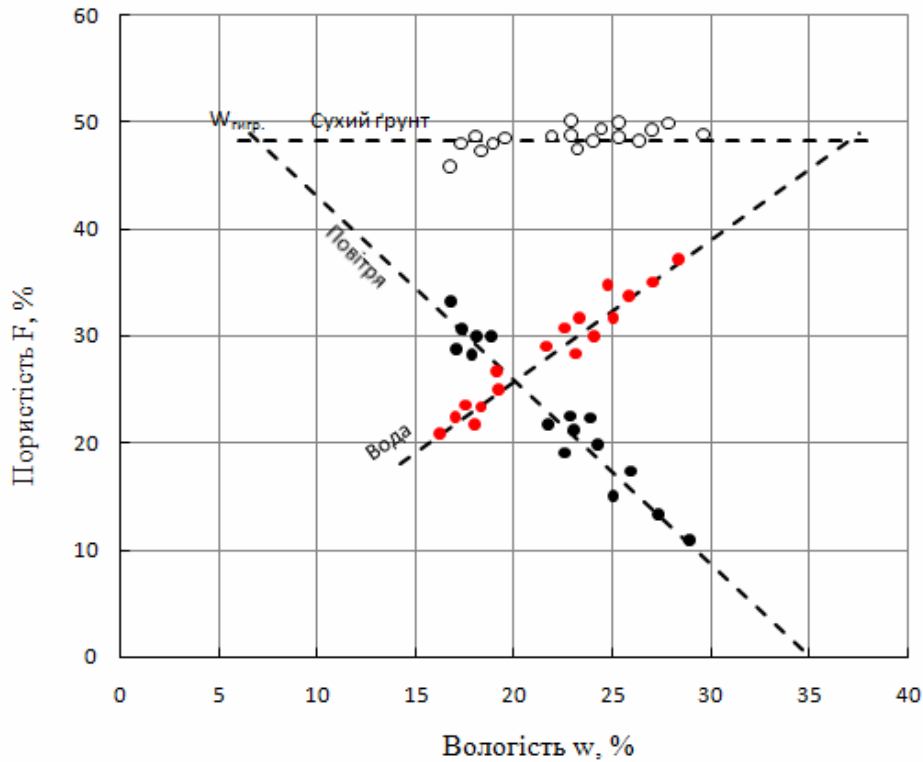


Рис. 4, б. Співвідношення об'ємів сухого ґрунту, води і повітря ґрунту в природному заляганні [3]

Якщо застосувати таку схему до переуцільненого ґрунту, то діапазон зміни в ньому вологості і повітря з одного боку різко зменшується, а з іншого боку значення відносної розрахункової вологості ґрунтів характерне для природного стану ні в якому разі не можна переносити на переуцільнені ґрунти. Підтвердженням цього може бути успішний досвід експлуатації доріг як у Європі, так і Північній Америці. Таким чином, можна зробити висновок, що ґрунти, уцільненні відповідно до вимог стандартного уцільнення з $\rho_d = \rho_{d \max}$, добре зберігають свої механічні властивості протягом дуже тривалого часу. Зрозуміло, що можуть траплятись природні умови, коли вологість ґрунтів практично увесь час перевищує вологість на їх нижній межі пластичності і їх практично неможливо переуцільнити. Але у цьому разі проектом повинні бути передбачені додаткові заходи щодо підсилення дорожньої конструкції вцілому або то тільки ґрунтів робочого шару. В окремих випадках такі заходи можуть поширюватись на весь об'єм насипу або тільки щодо укисних частин.

На рис. 5 показано статистичні розподіли густини сухого ґрунту легкого пилуватого суглинку, побудовані згідно чинних вимог (таблиця 22.1 [12]). Тут крім показників густини сухого ґрунту і значень коефіцієнтів уцільнення показано і відповідні їм значення показників текучості I_L і відносної вологості w/w_L . Аналіз цього рисунка показує необхідність безумовної відмови від стереотипу розгляду значення густини сухого ґрунту, що відповідають мінімальним значенням коефіцієнтів уцільнення, як середні значення показника щільності для певних конструктивних елементів земляного полотна. Так, не тільки для $k_{уц \min} = 0,90$, де майже половина значень розподілу відповідає м'якопластичному стану ґрунту, який не рекомендується використовувати навіть при розрахунках фундаментів будівель, хоча природні ґрунти порівняно із насипними мають ще й структурне зчеплення, яке значно (у 2,0–2,5 рази) підвищує їх несну здатність, але і при $k_{уц \min} = 0,95$, де майже для чверті значень густини сухого ґрунту може бути тугопластичний стан. Більш того, навіть для $k_{уц \min} = 0,98$ при такому підході

більше половини значень розподілу може знаходитись не у твердому, а в напівтвердому стані ($I_L = 0-0,25$). Таким чином, це ще раз підтверджує, що для зв'язних ґрунтів середина розподілу густини сухого ґрунту повинна відповідати $k_{уц} = 1,0$, або трохи більше. В зв'язку з цим мінімальні розрахункові значення модулів пружності повинні бути згідно чинних норм [10] не менше 65,0–75,0 МПа, хоча ці значення також ще вимагають певної експериментальної перевірки.

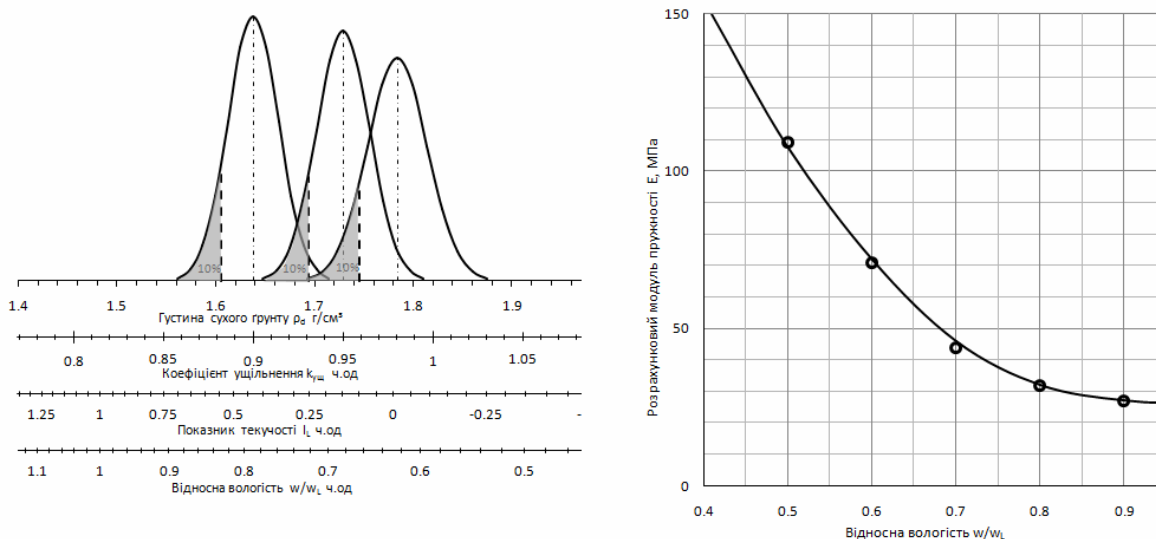


Рис. 5. Порівняльна оцінка можливих розрахункових вологостей легкого пилуватого суглинку при діючих нормативних вимогах до ступеня ущільнення ґрунтів згідно вимог ДБН В.2.3-4:2007

Повертаючись до питання визначення розрахункових значень вологості, густини сухого ґрунту та будь-яких інших показників слід скористатися рекомендаціями ДСТУ Б В.2.1-5-96 [13] або В.Д. Ломтадзе [10], який для спрощення розрахунків, посилаючись на такі ж нормативні документи, що діяли раніше, пропонує визначати розрахункове значення $\rho_{d\text{роз}}$ за формулою

$$\rho_{d\text{роз.}} = \overline{\rho_d} - U \quad (2)$$

Тобто розрахункове значення густини сухого ґрунту буде дорівнювати середньому значенню розподілу ($\overline{\rho_d} = \rho_{d\text{max}}$) мінус середнє квадратичне відхилення. Проведені порівняльні розрахунки (із залученням директивних нормальних розподілів, які пропонується використовувати для контролю якості ущільнення ґрунтів) показали дуже невелику різницю в отриманих результатах ($\pm 0,002 \text{ г/см}^3$). В той же час ці розрахунки показують, що при $\overline{\rho_d} = \rho_{d\text{max}}$ і $\rho_{d\text{min}}$ з $k_{уц\text{min}}=0,98$ розрахункова густина ґрунту буде відповідати $k_{уц}=0,99$, а при $\rho_{d\text{min}}$ з $k_{уц\text{min}}=0,95 - k_{уц}=0,98$. І в першому, і в другому випадку розрахункова вологість при повному водонасиченні ґрунту $S_r=1,0$, що трапляється досить рідко, буде менше, ніж вологість ґрунту на нижній межі пластичності – w_p .

Якщо ж виразити ці розрахункові вологості відносно вологості верхньої межі пластичності зв'язних ґрунтів, то можна побачити, що ці відносні вологості будуть коливатись переважно у інтервалі 0,45 – 0,60 w_L . Звідси можна зробити висновок, що розрахункові вологості штучно

ущільнених в дорожніх насипах (і не тільки дорожніх) ґрунтів більше залежать від ступеню і однорідності ущільнення, ніж від дії погодно-кліматичних умов. Тим більше це стосується України, яка має в основному відносно посушливий клімат і невелику глибину промерзання ґрунтів в зимовий період.

Висновки

1. Фізичний зміст необхідної і достатньої величини сухих зв'язних ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільної доріг, що відповідає $\rho_{d \max}$ ($k_{yщ} = 1,0$) і w_{opt} згідно чинних нормативних документів, полягає в тому, що в цьому стані вони досягають найбільшої стабільності своїх фізико-механічних властивостей у часі. Цей стан відповідає твердому стану ($I_L \leq 0$) переущільненого ($k_d \geq 1,0$) водонасиченого ($S_r = 0,8-1,0$) ґрунту з мінімальним вмістом повітря ($V = 1,0-5,0 \%$) при вологостях між нижньою межею пластичності (w_p) і межею зступу (w_{sh}). В такому стані припиняється капілярне переміщення води, зникають умови для виникнення тріщин зступу і морозного здимання через відносно невелику загальну вологість кожного з ґрунтів, що ущільнюються, а робота, яка витрачається на досягнення такого стану є найменшою. Значення показників механічної міцності і деформативності ґрунтів при цьому є достатньо великими для забезпечення як загальної міцності і стійкості насипного ґрунту, так і розташованої на ньому дорожньої конструкції.
2. Для забезпечення довготривалого ефекту від штучного ущільнення ґрунту не менше 50 % значень всіх вимірів повинні мати густину сухого ґрунту $\rho_d \geq \rho_{d \max}$, що завжди досягалось рівнем розвитку ґрунтоущільнювальної техніки, тобто $\rho_{d \max}$ повинно бути серединою нормального статистичного розподілу $\overline{\rho_d} = \rho_{d \max}$. Кількість мінімальних табличних значень коефіцієнтів ущільнення повинна бути обмежена лише двома значеннями: для робочого шару і всіх інших частин земляного полотна, наприклад: 0,98 і 0,95. Причому ці значення $k_{yщ \min}$ повинні регламентувати значення $\rho_{d \min}$ не як середини нових розподілів, а лише як крайні їх межі, більше значень яких повинно бути 90 %; 95 % або 99 % всіх вимірів показники ρ_d штучно ущільненого ґрунту.
3. За цих умов мінімальні розрахункові значення $\rho_{d \text{ роз}}$ ніколи не будуть менше тих, що відповідають $k_{yщ} = 0,99$ і 0,98 для всіх конструктивних елементів насипів, а відповідні їм мінімальні розрахункові вологості ґрунту будуть $w_{\text{роз}} \leq w_p$ ($I_L \leq 0$), тобто $w_{\text{роз}} \leq 0,6 w_L$.
4. Таким чином, на перший план в забезпеченні якості і надійності земляного полотна автомобільних доріг входить не стільки забезпечення достатнього рівня розвитку ґрунтоущільнювальних машин, який і так є досить високим, скільки необхідність забезпечення виробничих лабораторій високопродуктивним обладнанням для оперативної оцінки фізико-механічних властивостей добре ущільненого міцного ґрунту, в т.ч. і шляхом оперативного відбору монолітів керновідбірникам з наступним застосуванням різальних кілець.

Література

1. Механика ґрунтов для инженеров-дорожников (ґрунты в дорожном строительстве) перевод с англ. Автотрансиздат М. – 1957.
2. Лебедев А.Д. Уплотнение ґрунтов при различной их влажности. Стройвоенморизда, Л. – 1949.
3. А.К.Бируля, В.И. Бируля, А.И. Носич Устойчивость ґрунтов дорожного полотна в стенных районах. Дориздат, М. – 1951.
4. Телегин М. Я. Методы уплотнения дорожных насыпей. – Дориздат, М. – 1952.

5. ДСТУ Б.В.2.1-12:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. Київ. – Мінрегіонбуд України. – 2010.
6. ГОСТ 22733-77. Ґрунти. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Издательство стандартов. М. – 1979.
7. Приклонский В.А. Об использовании пределов Аттерберга для характеристики состава и состояния тонкодисперсных отложений. Сб. Вопросы теоретической и прикладной геологии. – № 2. – Госгеоллиздат. – 1947.
8. Приклонский В.А. Грунтоведение. – Часть 1. – Госгеолтехиздат, М. – 1955.
9. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Изд. «Недра», Л. – 1970.
10. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. Укравтодор, Київ. – 2004.
11. ВБН В.2.3-218-186-008-97 Відомчі будівельні норми України. Проектування та будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. Київ. – 1947.
12. ДБН В.2.3-4:2007 Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. – Мінрегіонбуд, Київ. – 2007.
13. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Основи та підвалини будинків та споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань. Укранхбудінформ, Київ. – 1997 р.