

*Л.В.Нуждін, к.т.н., професор
М.Л.Нуждін, начальник НДОЦ «Геотехніка»
К.В. Козьмініх, магістрант*

Новосибірський державний архітектурно-будівельний університет (Сибстрін)

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ОСІДАНЬ ФУНДАМЕНТІВ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕФОРМОВАНОСТІ ҐРУНТІВ РОЗКЛИНЮВАЛЬНИМ ДИЛАТОМЕТРОМ

Проаналізовано застосування методу пошарового підсумовування з розрахунковою схемою, яка враховує реальний розподіл деформованості основи, визначення польовими дослідженнями модуля деформації ґрунтів релаксаційним способом. На основі аналізу розрахунків осідань реальних фундаментів зроблено висновок про можливість і доцільність використання запропонованого підходу для підвищення точності прогнозування осідань споруд.

Ключові слова: *розклинювальний дилатометр РД-100, релаксаційний метод випробувань, деформації ґрунтової основи, метод пошарового підсумовування.*

*Л.В. Нуждин, к.т.н., профессор
М.Л. Нуждин, начальник НИВЦ «Геотехника»*

*К.В. Козьминых, магистрант
Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)*

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТОВ РАСКЛИНИВАЮЩИМ ДИЛАТОМЕТРОМ

Проанализировано применение метода послойного суммирования с расчетной схемой, учитывающей реальное распределение деформируемости основания, определение полевыми исследованиями модуля деформации ґрунтов релаксационным способом. На основе анализа расчетов осадок реальных фундаментов сделан вывод о возможности и целесообразности использования предложенного подхода для повышения точности прогнозирования осадок сооружений.

Ключевые слова: *расклинивающий дилатометр РД-100, релаксационный метод испытаний, деформации ґрунтового основания, метод послойного суммирования.*

*L.V. Nuzhdin, Ph.D., Professor
M.L. Nuzhdin, Head of RVC «Geotechnics»*

*K.V. Kozminykh, magystrant
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*

IMPROVEMENT OF FORECAST ACCURACY OF FOUNDATIONS BASED ON FIELD RESEARCH DEFORMABILITY OF THE SOIL WEDGE DILATOMETER

The article described application of layer-stack design scheme with taking into account actual distribution of ground base deformability by deformation modulus relaxation method field studies. That improves the accuracy of ground base deformation. Conclusion made on the analysis calculations sediment real foundations.

Keywords: *WD-100 dilatometer, relaxation method, ground base deformation, layer-stack design scheme.*

Вступ. Експлуатаційна придатність і довговічність споруд значною мірою залежать від деформацій осідаєвої основи й осідань фундаментів. Підвищення точності визначення осідань фундаментів дотепер є актуальним завданням, що не отримало остаточного розв'язання.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Питаннями вдосконалення теоретичних моделей взаємодії фундаменту з ґрунтовою основою, розрахункових методів оцінювання осідань фундаментів, експериментального дослідження ґрунтів і призначення їх розрахункових деформаційних характеристик займалася значна кількість провідних учених-геотехніків. У Росії результатом їхніх досліджень деякою мірою є актуалізована редакція будівельних норм СНиП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений» – Зведення правил СП 22.13330.2011. У ній як основний метод розрахунку деформацій основи фундаментів декларовано застосування розрахункової схеми у вигляді лінійно деформованого напівпростору з умовним обмеженням глибини стисливої товщі методом пошарового підсумовування, а як найбільш достовірні методи визначення деформаційних характеристик ґрунтів відзначено їх польові випробування.

Цілком очевидно, що одним із напрямів підвищення точності розрахунків осідань фундаментів є вдосконалювання польових методів визначення модуля деформації ґрунтів і вибір раціональної розрахункової схеми основи в методі пошарового підсумовування. Необхідно враховувати, що, крім достовірності визначення модуля деформації ґрунту, на точність прогнозування деформацій споруд може впливати підхід до його призначення в розрахунковій моделі ґрунтової основи.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Визначення модуля деформації ґрунту будь-яким з існуючих польових і лабораторних методів виконується дискретно в окремих точках. Отримані окремі значення модуля деформації потім, поза залежністю від точності визначення, усереднюються з урахуванням прийнятого розбивання ґрунтової товщі на інженерно-геологічні елементи. Кожному інженерно-геологічному елементові, включаючи неоднорідні ґрунти з дрібними прошарками, присвоюється єдине узагальнене усереднене значення модуля деформації. Далі, для аналізу осідань фундаментів ґрунтова основа розбивається на розрахункові шари (чи скінченні елементи) з узагальненими характеристиками в межах виділеного інженерно-геологічного елемента. При цьому в більшості розрахункових моделей і схем товщина розрахункових шарів (чи розмір скінченних елементів) регламентується тільки найбільшим припустимим значенням.

Цей підхід можна виправдати тільки відносно малою кількістю експериментальних визначень модуля деформації ґрунту. Для польових досліджень ґрунтів, коли ми маємо можливість отримати практично повну картину зміни модуля деформації ґрунтів в основі фундаменту, логічність і обґрунтованість цього підходу викликає великі сумніви.

Одним з польових методів, які добре зарекомендували себе при дослідженні деформованості ґрунтів, є релаксаційні дилатометричні випробування. Коли ґрунти навантажуються шляхом їхнього деформування заданими переміщеннями робочого органа, а виниклі в них при цьому напруження реєструються як наслідок деформаційного впливу. Допустимість таких випробувань обумовлена взаємно однозначною відповідністю між напруженнями і деформаціями в ґрунті [1, 2]. На практиці релаксаційний метод (чи метод контрольованих переміщень) сприяє застосуванню більш простої схеми випробувань і скороченню часу їхнього проведення. Застосування розклинювального дилатометра РД-100 для визначення модуля деформації ґрунтів довело високу достовірність і стабільність отриманих значень [3, 4]. Увесь технологічний цикл випробувань ґрунтів розклинювальним дилатометром виконується на одній стандартній установці статичного зондування, відсутність частин, що рухаються, і проста конструкція клиноподібного індентора забезпечують високу експлуатаційну надійність дилатометра в різних ґрунтових умовах. Безсумнівною перевагою дилатометра РД-100 є можливість визначення модуля деформації, у разі потреби, практично безупинно по глибині досліджуваного ґрунту.

Досвід експлуатації розклинювального дилатометра в різних регіонах Росії та деяких країн СНД уже підтвердив його високу працездатність і надійність [5, 6].

Основний матеріал і результати. 1. Використання методу релаксації напружень дилатометром РД-100 у польових умовах полягає в зануренні робочого наконечника (клиноподібного індентора) у ґрунт і одночасній реєстрації напружень, що виникають на бічній поверхні індентора. Загальний вигляд установки для польових досліджень деформованості ґрунтів за допомогою розклинювального дилатометра показано на рис. 1.

Індентор дилатометра РД-100 (рис. 2) виконано у вигляді суцільно-металевого корпусу, що має форму клина з кутом розкриття 4° . Робочі грані шириною 100 мм і довжиною 400 мм утворюють контактні поверхні площею 400 см^2 . Індентор занурюється в ґрунтовий масив силовою установкою. У процесі занурення робочі грані клина плавно деформують ґрунти на задану величину переважно в горизонтальному напрямку. Виникаючі на робочій грані контактні тиски передаються на розташований усередині індентора тензометричний динамометр, що перетворює їх у значення модуля деформації ґрунтів.

Реєстратор використовується для індикації показань тензометричного динамометра і фіксації поточних значень модуля деформації ґрунтів. Для проведення випробувань ґрунтів дилатометром використовуються установки статичного зондування чи спеціально обладнані бурові установки, що забезпечують статичне занурення клиноподібного індентора з постійною швидкістю.

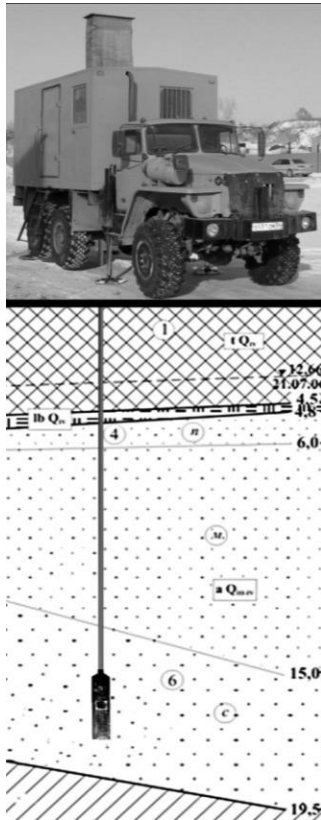


Рис. 1. Загальний вигляд установки для визначення деформаційних властивостей ґрунтів у польових умовах

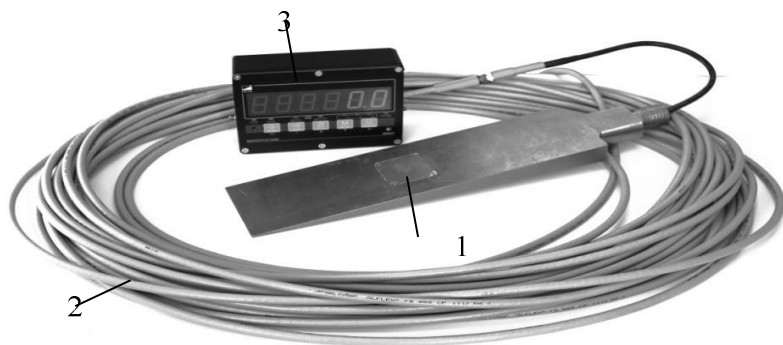


Рис. 2. Розклинювальний дилатометр РД-100:
1 – робочий наконечник; 2 – з'єднувальний кабель; 3 – ресстратор

На початковому етапі впровадження дилатометра РД-100 у практику інженерних вишукувань для оцінювання точності дилатометричного методу визначення модуля деформації ґрунтів було виконано широкі порівняльні випробування з традиційними способами дослідження стисливості ґрунтів [7].

Найбільш тісний і виправданий зв'язок між дилатометричними E_{RD} і визначеними іншими способами значеннями модуля деформації показали лінійні регресії з різними коефіцієнтами кореляції r :

для штапових випробувань при $r = 0,95$

$$E_{RD} = 0,886 E_{um} + 1,28(\text{МПа}); \quad (1)$$

для лопатевих пресіометрів при $r = 0,96$

$$E_{RD} = 1,061 E_{лм} - 0,10 (\text{МПа}); \quad (2)$$

для лабораторних компресійних випробувань при $r = 0,78$

$$E_{RD} = 1,011 E_{лаб} + 0,61 (\text{МПа}). \quad (3)$$

Матеріали зіставлення підтвердили достовірність отриманих дилатометричними випробуваннями значень модулів деформації ґрунтів і дозволили ввести коригувальний коефіцієнт в основну розрахункову формулу дилатометра (4), яка застосовується для визначення модуля деформації ґрунтів.

Самохідна установка статичного зондування з обладнанням дилатометра РД-100 для випробувань ґрунтів, показана на рис. 1, не вимагає застосування бурових машин. Занурення робочого наконечника дилатометра виконується вдавлюванням за допомогою гідравлічного домкрата установки статичного зондування. Перед цим на глибині близько 1 – 1,5 м проводиться витримка на 5 – 10 хв для стабілізації температурного балансу. Швидкість занурення клиноподібного індентора повинна бути постійною. Рекомендовано приймати її такою, що дорівнює 0,3 – 0,5 м/хв. При цьому на цифровому табло реєстратора будуть з'являтися поточні значення модуля деформації \tilde{E}_0 досліджуваного ґрунту з точністю 0,1 МПа.

У стандартних вишукуваннях поточні значення модуля деформації \tilde{E}_0 рекомендовано фіксувати через 0,2 м. Для визначення коригувального коефіцієнта K_{rel} , що приводить у відповідність поточні нестабілізовані значення \tilde{E}_0 до стабілізованих значень модуля деформації E , через кожні 1 – 2 м занурення провадяться стабілізовані досліди при нерухомому клиноподібному інденторі. Для цього безпосередньо перед припиненням руху дилатометра береться показання \tilde{E}_0 , після чого занурення дилатометра припиняється. Після зупинки дилатометра варто звертати особливу увагу на неприпустимість підняття клиноподібного індентора за рахунок пружного відпору ґрунту. Із цією метою виконується скидання тиску в гідравлічній системі домкрата без підйому колони зондувальних штанг із робочим наконечником. Через 10 с після зупинки дилатометра знімається перше показання модуля деформації E_0 , потім – відлік трьох значень модуля деформації ґрунту E_1, E_2, E_3 , що відповідають часу спостережень, відповідно 2, 4 і 6 хв з моменту зняття першого значення модуля деформації E_0 .

При нарощуванні чергової ланки колони зондувальних штанг рекомендовано спочатку прикладати до штанг зусилля, що висмикує, піднімаючи дилатометр на 0,2 – 0,3 м. Процедура «занурення – висмикування – занурення» сприяє центруванню корпусу дилатометра і не дає йому відхилитися вбік.

Розрахунок значень модуля деформації ґрунтів E за результатами випробування дилатометром виконується за модифікованою формулою Шлейхера

$$E = C_{PQ} \cdot \tilde{E}_0, \quad (4)$$

де C_{PQ} – постійний параметр розклинювального дилатометра (клиноподібного індентора), що залежить від співвідношення геометричних розмірів індентора і незначною мірою, від величини коефіцієнта Пуассона ґрунту. Він визначається при виготовленні приладу й указується в його паспорті.

Ця розрахункова формула враховується при калібруванні дилатометра, у результаті чого на цифровому табло реєстратора відображається поточне значення модуля деформації досліджуваних ґрунтів.

Оброблення результатів випробувань виконується за поточним значенням модуля деформації ґрунтів, отриманим у процесі занурення і стабілізації розклинювального дилатометра. Спочатку обчислюються стабілізовані значення модуля деформації та коефіцієнт релаксації, який згодом розповсюджується на «поточні» значення. Для визначення стабілізованих значень модуля деформації ґрунтів E використовується метод аналітичної екстраполяції загасаючих гілок експонентних функцій за отриманим з досвіду значенням модуля деформації E_t у момент часу t ($t=0, 2, 4, 6$ хв). На основі стабілізованих E та відповідних їм «поточних» (нестабілізованих) значень модуля деформації \tilde{E}_0 визначаються величини коефіцієнтів релаксації

$$K_{rel} = E / E_t. \quad (5)$$

Окремі стабілізовані значення модуля деформації обчислюються як

$$E = K_{rel} \cdot \tilde{E}_0. \quad (6)$$

Попередньо коефіцієнт релаксації розповсюджується на інтервал дослідження вище проведення стабілізованого досвіду, межі якого остаточно коригуються після розчленовування товщі.

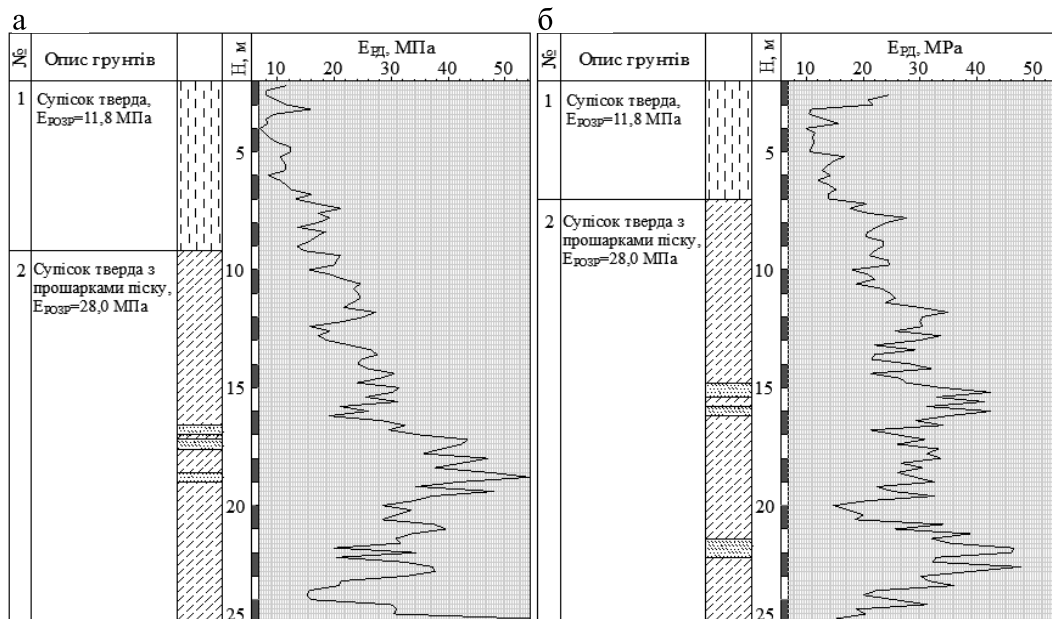


Рис. 3. Результати випробування ґрунтів дилатометром РД-100 на майданчику по вул. Виборній: а – у точці 4977; б – у точці 4978

Обробка результатів випробувань виконується за допомогою спеціально розробленої програми «ДИЛАТОМЕТР», а результати польових випробувань оформляються у вигляді графіків (наприклад, показаних на рис. 3). Після побудови інженерно-геологічного розрізу досліджуваного майданчика окремі значення групуються за виділеними інженерно-геологічними елементами і обчислюються розрахункові значення модуля деформації.

Для підвищення достовірності отриманих результатів визначені розрахункові значення модуля деформації коригуються з урахуванням порівняльних результатів випробувань ґрунтів штампом площею 5000 см². За відсутності прямих порівняльних штампових іспитів також можливе коригування отриманих розрахункових значень модуля деформації за допомогою коефіцієнта, що враховує деформаційну анізотропію досліджуваних ґрунтів

$$E = K_{\alpha} \cdot E. \quad (7)$$

Коефіцієнт анізотропії в цьому випадку визначається за результатами стабілометричних чи компресійних випробувань орієнтованих зразків, вирізаних перпендикулярно (вертикально) і паралельно (горизонтально) площині ізотропії,

$$K_{\alpha} = E_{\text{верт}} / E_{\text{гор.}} \quad (8)$$

Для розрахунків фундаментів використовуються середні значення коефіцієнтів за виділеними інженерно-геологічними елементами, отримані за результатами випробувань не менш ніж трьох пар зразків ґрунту в межах інженерно-геологічного елемента.

Розрахункові значення модуля деформації ґрунту встановлюють на основі статистичної обробки окремих значень результатів випробувань для кожного виділеного інженерно-геологічного елемента. При цьому враховується мінливість значень і число визначень при заданій довірчій імовірності. Число окремих визначень для виділеного інженерно-геологічного елемента повинне бути не меншим від шести.

Слід зазначити, що за єдиний інженерно-геологічний елемент може бути прийнято ґрунти, представлені тонкими шарами, що чергуються, чи лінзами ґрунтів різного виду, а також ґрунти, які містять у своїй товщі окремі тонкі прошарки ґрунтів іншого виду. У цих випадках осереднене розрахункове значення модуля деформації ґрунту виділеного інженерно-геологічного елемента може досить відчутно відрізнятися від реальних характеристик ґрунтів, що складають елемент.

2. Стандартні розрахунки деформацій основи фундаменту (осідання) при середньому тиску під подошвою фундаменту p , що не перевищує розрахунковий опір ґрунту R , виконуються з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно деформованого напівпростору з умовним обмеженням глибини стисливої товщі ґрунту H_c . Нижню границю стисливої товщі основи призначають, виходячи з визначеного співвідношення між середніми значеннями вертикальних напружень від зовнішнього

навантаження σ_{zp} під центром подошви фундаменту і від власної ваги ґрунту σ_{zg} . У Росії, відповідно до Зведення правил «СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений», як межа стисливої товщі H_c розглядається глибина z , де виконується умова рівності $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$ чи для слабких ґрунтів (при $E \leq 7$ МПа) $\sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}$. Глибина стисливої товщі при визначенні осідань різних точок плитного фундаменту приймається постійною в межах усього фундаменту.

Осідання основи фундаменту S з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно деформованого напівпростору визначають методом пошарового підсумовування. Товщина розрахункових шарів ґрунту для визначення границі стисливої товщі й розрахунку осідання фундаментів може призначатися довільно, але не більш, ніж $0,4b$ (b – ширини подошви фундаменту).

Розрахунок осідань фундаментів з використанням результатів польових випробувань ґрунтів розклинювальним дилатометром запропоновано виконувати в повній відповідності до діючої нормативної документації – «СП 22.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений». Особливістю розрахунку є розбивка ґрунтової товщі на шари, що відповідають інтервалам визначення модуля деформації ґрунту розклинювальним дилатометром, тобто при звичайних випробуваннях – з товщиною 0,2 м. При цьому в кожному розрахунковому шарі ґрунту враховується своє окреме значення модуля деформації $E_{рд}$.

При використанні машинного методу розрахунку це не є складністю, однак у ряді випадків дозволяє підвищити точність обчислень не тільки за рахунок обліку реальної деформованості ґрунтів, але й зниження погрішності при визначенні потужності стисливої товщі. Використання спеціально розроблених програм, адаптованих до матеріалів обробки результатів дослідження ґрунтів розклинювальним дилатометром, навіть полегшує процес уведення вихідних даних.

Для плитних фундаментів за наявності відповідних даних визначення модуля деформації розрахунок осідань доцільно виконувати як для центральної точки, так і для кутових (чи проміжних) точок плити. У цьому випадку одночасно з одержанням абсолютних значень максимальних чи середніх осідань плити виникає можливість прогнозування й оцінювання можливої нерівномірності деформацій, обумовленої наявною неоднорідністю складу ґрунтової основи.

3. Для оцінювання можливості і доцільності використання запропонованого підходу до розрахунку осідань фундаментів порівняльний аналіз отриманих результатів виконувався при проектуванні ряду житлових і громадських будівель у різних ґрунтових умовах м. Новосибірськ.

У першу чергу зіставлення виконували для плитних фундаментів з однаковими розмірами подошви $30,00 \times 30,00$ м. У всіх наведених випадках глибина закладення фундаментних плит різнилася незначно $4,00 \dots 4,90$ м.

Перший тип розглянутих ґрунтових умов мав відносну однорідність складу основи. Особливістю ґрунтових умов майданчика будівництва по вул. Виборній була наявність в активній зоні основи фундаментів до 28,0...35,0 м одного шару ґрунту – супіску пилюватого твердого з прошарками піску. За даними польових досліджень деформованості ґрунту розклинювальним дилатометром РД-100 у шарі було виділено два інженерно-геологічні елементи, що різняться тільки модулем деформації. Верхня товща супіску до глибини 7,1...9,2 м характеризувалася відносно низькими значеннями модуля деформації $E=4,8...13,5$ МПа ($E_{розр}=11,8$ МПа). Нижня товща – глибше 7,2...9,2 м – мала більш високі значення модуля деформації $E=13,1...36,7$ МПа ($E_{розр}=28,0$ МПа). У супіску простежувалися прошарки піску з більш високими значеннями модуля деформації ($E=42,2...54,3$ МПа). Ґрунтові води були відсутні.

Фундамент 28-поверхового житлового будинку був запроектований у вигляді плити близької до квадратної форми в плані зі стороною $b=30,00$ м. Загальне навантаження на основу становило $N=339\,978$ кН, що відповідало середньому тиску під плитою $p=380$ кПа. Вертикальні навантаження на плиту були практично цілком відцентровані, моментні навантаження відсутні. Приклади результатів випробування ґрунтів дилатометром РД-100 безпосередньо під фундаментною плитою проекрованої будівлі наведено на рис. 3.

Розрахунок осідань виконували з використанням прямих даних дилатометричних випробувань $E_{рд}$, отриманих після обробки окремих значень по глибині досліджень, і узагальненого розрахункового значення модуля деформації $E_{розр}$, постійного по кожному ПЕ. Розрахунок осідань виконували для різних рівнів навантаження від 25 до 100% експлуатаційного навантаження. Для кожного ступеня навантаження потужність стисливої товщі приймалася однаковою при різній товщині розрахункових шарів від 0,2 м до 0,4b. Результати розрахунку осідань за даними випробувань ґрунтів у точках 4977 і 4978 наведено в таблиці 1. Отримані матеріали показують, що облік реального розподілу деформаційних властивостей ґрунту може істотно (до 20 – 26%) позначатися на результатах розрахунків.

Таблиця 1. Розрахункові осідання плитних фундаментів $A=30 \times 30$ м ($29,8 \times 29,8$ м) за даними випробувань ґрунтів

Товщина розрахункових шарів h_i	Осідання S (мм) при зміні тиску p			
	$100\% p$	$75\% p$	$50\% p$	$25\% p$
вул. Виборна (т. дил. 4977), $p = 380$ кПа				
0,2 м ($E_{розр}$)	136,40	85,7	39,65	2,94
0,1b ≤ 3 м ($E_{розр}$)	150,03	96,1	46,54	6,39
0,2b ≤ 6 м ($E_{розр}$)	165,04	107,2	53,92	10,28
0,3b ≤ 9 м ($E_{розр}$)	166,05	107,9	54,51	10,41
0,4b ≤ 12 м ($E_{розр}$)	165,74	107,8	-	-
0,2 м ($E_{рд}$)	138,55	87,63	41,90	2,97

вул. Виборна (т. скв. 4978), $p = 380$ кПа				
0,2 м ($E_{розр}$)	129,39	80,96	37,13	2,71
0,1 $b \leq 3$ м ($E_{розр}$)	143,10	91,25	43,99	6,16
0,2 $b \leq 6$ м ($E_{розр}$)	154,33	99,66	49,63	8,99
0,3 $b \leq 9$ м ($E_{розр}$)	154,10	99,47	49,55	-
0,4 $b \leq 12$ м ($E_{розр}$)	153,60	99,19	-	-
0,2 м ($E_{рд}$)	122,50	75,63	34,79	2,30
вул. Залеського, $p = 390$ кПа				
0,2 м ($E_{розр}$)	182,63	113,18	48,55	3,51
0,1 $b \leq 3$ м ($E_{розр}$)	193,34	121,21	53,93	6,24
0,2 $b \leq 6$ м ($E_{розр}$)	204,97	129,93	59,77	9,15
0,3 $b \leq 9$ м ($E_{розр}$)	208,48	130,04	59,52	9,65
0,2 м ($E_{рд}$)	182,20	113,71	47,82	3,17
вул. Ріхарда Зорге, $p = 280$ кПа				
0,2 м ($E_{розр}$)	191,17	117,24	44,46	-
0,1 $b \leq 3$ м ($E_{розр}$)	194,33	119,61	46,05	-
0,2 $b \leq 6$ м ($E_{розр}$)	193,05	118,74	45,60	-
0,3 $b \leq 9$ м ($E_{розр}$)	192,59	118,42	45,43	-
0,2 м ($E_{рд}$)	190,42	116,37	45,97	-

Другий тип розглянутих ґрунтових умов вирізнявся неоднорідністю і був представлений відносно малостискуваними ґрунтами. У ґрунтовій основі фундаментів на будівельному майданчику по вул. Залеського за матеріалами вишукувань було виділено такі інженерно-геологічні елементи (зверху – вниз):

ІГЕ-2. Супісок піщанистий твердий з прошарками піску, потужністю 6,6 м, $E_{розр}=15,0$ МПа;

ІГЕ-3. Суглинок легкий пілуватий тугопластичний із прошарками напівтвердого і супіску, потужністю 1,6 м. $E_{розр}=13,2$ МПа;

ІГЕ-4. Суглинок легкий пілуватий текучопластичний із прошарками м'якопластичного супіску, потужністю 5,4 м, $E_{розр}=12,8$ МПа;

ІГЕ-5. Супісок пілуватий пластичний з прошарками текучого і суглинку, потужністю 2,4 м, $E_{розр}=15,3$ МПа;

ІГЕ-6. Суглинок легкий пілуватий м'якопластичний із прошарками тугопластичного, потужністю 2,2 м, $E_{розр}=13,4$ МПа;

ІГЕ-7. Супісок пілуватий пластичний з прошарками текучого і суглинку, розкритою потужністю 14,2 м, $E_{розр}=18,4$ МПа.

Рівень ґрунтових вод був зафіксований на глибині близько 9,3 м. Результати випробувань ґрунтів розклиновальним дилатометром наведено на рис. 4, а.

На майданчику був запроектований 26-поверховий житловий будинок також на квадратному плитному фундаменті зі стороною підосви $b=30,00$ м. Загальне навантаження від будівлі на ґрунтову основу становило $N=350\,000$ кН, що відповідало середньому тиску під плитою $p=390$ кПа. При цьому моментні навантаження також були відсутні. Результати розрахунку осідань при різній товщині розрахункових шарів від 0,2 м до 0,3 b для різних рівнів навантаження від 25 до 100% експлуатаційного

навантаження зведено в таблицю. Грунтові умови не дозволяли задаватися товщиною розрахункових шарів більш ніж 9,0 м (0,3b).

На майданчику по вул. Залеського врахування реального розподілу деформаційних властивостей відносно малостискуваних ґрунтів такожістотно впливає (14 – 24%) на результати розрахунків.

Третій варіант розглянутих ґрунтових умов характеризувався наявністю досить слабких водонасичених ґрунтів. Ґрунтову основу фундаментів на будівельному майданчику по вул. Р. Зорге було представлено такими інженерно-геологічними елементами:

ІГЕ-3. Суглинок важкий пілуватий тугопластичний, потужністю 0,8 м, $E_{розр}=7,8$ МПа;

ІГЕ-4. Суглинок важкий пілуватий текучопластичний, потужністю 2,2 м. $E_{розр}=9,0$ МПа;

ІГЕ-5. Суглинок легкий пілуватий текучий, потужністю 7,2 м. $E_{розр}=7,1$ МПа;

ІГЕ-6. Суглинок легкий пілуватий тугопластичний, потужністю 5,4 м. $E_{розр}=8,9$ МПа;

ІГЕ-7. Супісок піщанистий, потужністю 2,6 м. $E_{розр}=15,4$ МПа;

ІГЕ-8. Пісок середньої крупності насичений водою, щільний, розкритою потужністю 12,5 м. $E_{розр}=25,5$ МПа.

Ґрунтові води знаходилися практично на рівні підшви фундаментів. Верхня частина геологічного розрізу під фундаментами до глибини, більшої ніж 15 м, була складена слабкими ґрунтами $E_{розр}<10$ МПа. Приклад результатів випробувань ґрунтів дилатометром РД-100 наведено на рис. 4, б.

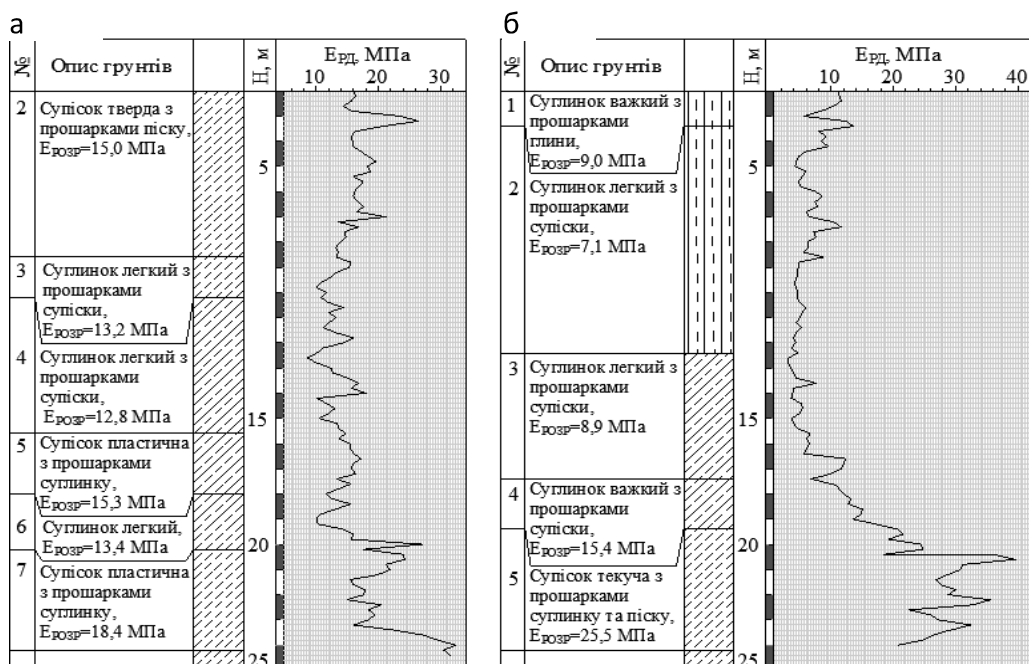


Рис. 4. Результати випробування ґрунтів дилатометром РД-100:
а – по вул. Залеського; б – по вул. Р. Зорге

У цих умовах на квадратному плитному фундаменті зі стороною підоснови $b=29,80$ м був запроєктований 18-поверховий житловий будинок. Загальне навантаження від будівлі на ґрунтову основу становило $N=250\,000$ кН, що відповідало середньому тиску під плитою $p=280$ кПа. Вертикальні навантаження були добре відцентровані й моментні навантаження були відсутні. Результати розрахунку осідань при різній товщині розрахункових шарів від 0,2 до 9,0 м ($0,3b$) для різних рівнів навантаження від 25 до 100% експлуатаційного навантаження наведено в таблиці 1.

Як показали обчислення в ґрунтових умовах майданчика по вул. Р. Зорге, що характеризуються наявністю значної товщі слабких водонасичених суглинків, використання окремих значень модуля деформації ґрунту по глибині $E_{РД}$, а також вибір товщини розрахункових шарів у методі пошарового підсумовування відчутно не впливають на отримані результати. Розходження в обчислених значеннях осідань становлять 2 – 3%.

Поряд із плитними фундаментами досить великих розмірів у тих же ґрунтових умовах було проаналізовано результати розрахунку стовпчастих квадратних у плані та стрічкових фундаментів із шириною підоснови до 3,0 – 3,6 м. Глибина закладання фундаментів становила 1,80 – 2,40 м. Визначали осідання аналогічно до розрахунку для плитних фундаментів.

Отримані розходження в результатах розрахунку в ґрунтових умовах першого типу (по вул. Виборній) досить значні: для стовпчастих (до 35%) і стрічкових (до 23%) фундаментів. Їх показано на рис. 5, а. Тут наведено результати визначення осідань для однакової потужності стисливої товщі при товщині розрахункових шарів $h_i=0,2$ м.

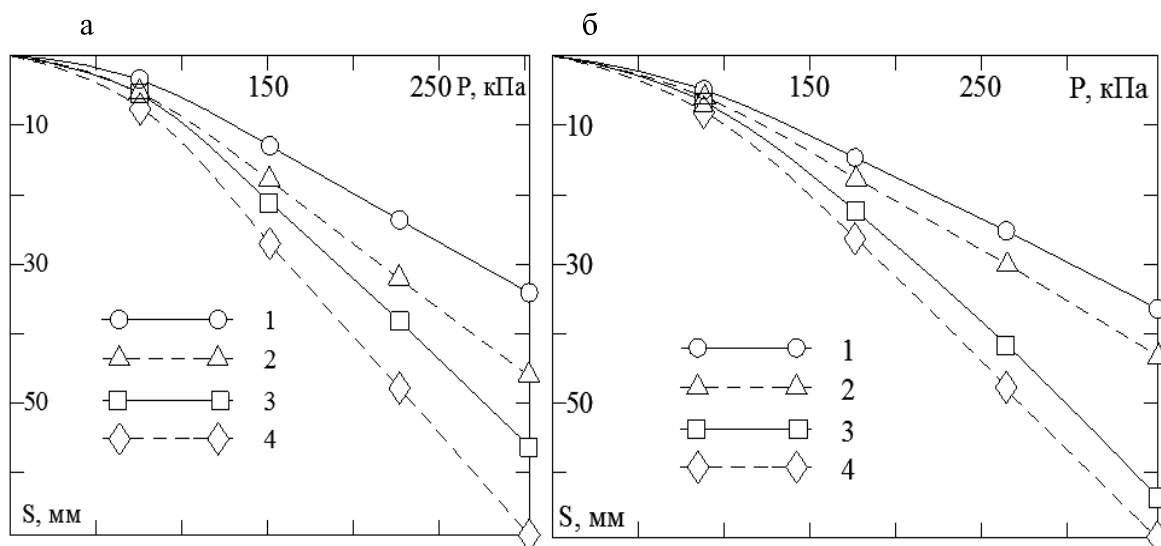


Рис. 5. Розрахункові осідання фундаментів будівель по вул. Виборній (а) та по вул. Залеського (б) за даними польових випробувань ґрунтів при товщині розрахункових шарів $h_i=0,2$ м: 1 – стовпчастий фундамент $A=3\times 3$ м ($E_{РД}$); 2 – стовпчастий фундамент $A=3\times 3$ м ($E_{розр}$); 3 – стрічковий фундамент $b=3$ м ($E_{РД}$); 4 – стрічковий фундамент $b=3$ м ($E_{розр}$)

Для ґрунтових умов другого типу (по вул. Залеського) результати розрахунку осідань фундаментів зображено на рис. 5, б). На цьому майданчику теж спостерігається істотний вплив на результати обчислень: 19 – 20% для стовпчастого фундаменту і 8 – 17% для стрічкового фундаменту.

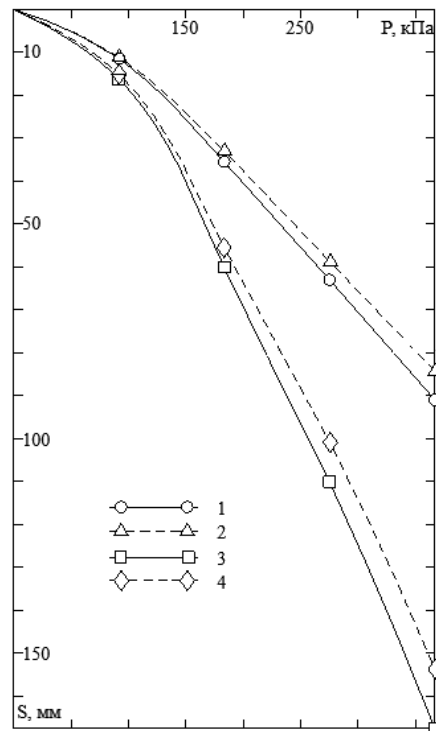


Рис. 6. Розрахункові осідання фундаментів будівель по вул. Р. Зорге за даними польових випробувань ґрунтів при товщині розрахункових шарів $h_i=0,2$ м (умовні позначення див. на рис. 5)

У ґрунтових умовах майданчика по вул. Р. Зорге результати розрахунку осідань стовпчастого фундаменту $A=3\times 3$ м (лінія 1 для E_{RD} і лінія 2 для $E_{розр}$) та стрічкового фундаменту з $b=3$ м (лінія 3 для E_{RD} і лінія 4 для $E_{розр}$) показано на рис. 6. У результаті розрахунку істотних розходжень виявлено не було, вони склали не більш 7 – 8% для стовпчастого і стрічкового фундаментів.

Висновки. Урахування реального розподілу деформаційних властивостей ґрунтів шляхом використання прямих даних випробувань ґрунтів дилатометром РД-100 може вплинути (більше 30%) на отримані результати розрахунку. Ступінь впливу залежить від виду ґрунту й особливостей складу активної зони основи. Слід зазначити, що в слабких ґрунтах урахування реального складу приводить не тільки до зниження, але й до підвищення розрахункових осідань фундаментів. Це особливо характерно для фундаментів з невеликими розмірами (наприклад, дані на рис. 5) чи малонавантажених фундаментів (див. таблицю 1).

Наведені вище приклади проектних рішень фундаментів житлових і громадських будівель у м. Новосибірську на сьогодні повністю чи частково (див. рис. 7) реалізовано. За осіданнями фундаментів усіх

будівель на стадії будівництва здійснювалося і продовжує здійснюватися геодезичне спостереження.



Рис. 7. Зведена 26-поверхова житлова будівля по вул. Залеського та 28-поверховий будинок по вул. Виборній і 18-поверховий будинок по вул. Р. Зорге, що будуються

Порівняння результатів розрахунку та спостережень свідчить, що запропонований підхід до розрахунку осідань фундаментів у більшості випадків приводить до підвищення точності їхнього прогнозування за рахунок зниження розрахункових значень. Найкраща відповідність розрахункових осідань при використанні модулів деформації E_{RD} фактичним значенням спостерігалася на початкових ступенях навантаження плитних фундаментів (де традиційні розрахунки за $E_{розр}$ спричиняли до завищення розрахункових осідань до 3 разів). Більш близькі до фактичного значення осідання були також отримані для невеликих фундаментів, що спираються на малодеформовані ґрунти. Точність розрахунку при використанні E_{RD} підвищується зі зменшенням діючого на фундамент навантаження.

Особливо варто відзначити, що за явної неоднорідності деформаційних властивостей ґрунтів на майданчику по вул. Виборній, обумовленої наявністю тонких прошарків, розрахунком при використанні E_{RD} було достатньо точно спрогнозовано появу крену будівлі $i=0,0005$ (при допустимому $i=0,005$), що не міг бути визначений традиційним розрахунком за узагальненими усередненими значеннями модуля деформації ґрунту $E_{розр}$ виділених інженерно-геологічних елементів.

Використання прямих даних випробувань ґрунтів дилатометром РД-100 (окремих значень розподілу модуля деформації E_{RD} у масиві ґрунту) приводить до підвищення точності розрахунків і в інших розрахункових моделях основ, у яких аналізуються деформації ґрунту. Наприклад, при розрахунку деформацій фундаментів та інших конструкцій у ґрунтах від дії горизонтальних чи похилих навантажень, у

деформаційних розрахунках анкерів чи визначенні стійкості укосів тощо. Особливо цікаві результати можуть бути отримані при використанні реального розподілу деформаційних властивостей ґрунтів у розрахунках ґрунтового масиву методом скінченних елементів. У них у разі потреби для забезпечення коректності задання вихідних даних випробування ґрунтів дилатометром можуть доповнюватися польовими дослідженнями характеристик міцності ґрунту за допомогою статичного зондування. При цьому завданням на вишукування залежно від поставленої задачі визначається сітка розташування точок випробувань ґрунту дилатометром РД-100 і статичним зондуванням у плані.

Матеріали досліджень показують, що для підвищення точності прогнозування деформацій ґрунтових основ та осідань фундаментів споруд необхідно не тільки збільшувати достовірність експериментальних досліджень ґрунтів і вдосконалювати теоретичні моделі основ, але й раціонально підходити до вибору розрахункової схеми разом з аналізом особливостей визначення деформаційних характеристик ґрунту. Особливо доцільно застосовувати комплексний підхід до експериментального визначення і використання в розрахунках модулів деформації ґрунтів.

У випадку застосування польових дилатометричних випробувань ґрунтів, що дозволяють отримувати достовірні значення модуля деформації ґрунтів практично безупинно по глибині стисливого масиву, пряме використання цих значень може істотно вплинути на точність обчислень. При цьому статистична обробка даних визначення модуля деформації після виділення інженерно-геологічних елементів і наступне використання узагальнених усереднених за видами ґрунтів значень у ряді випадків узагалі не дозволяє достовірно оцінити процес деформування. Наприклад, це має місце для неоднорідних ґрунтів із тонкими прошарками, що відрізняються за деформаційними властивостями від основного масиву. Розкид у прогнозних значеннях деформацій залежить від характеру розподілу діючих напружень, ступеня неоднорідності деформаційних властивостей і особливостей залягання ґрунтів.

Література

1. Нуждин, Л.В. Исследование статических и динамических деформационных свойств грунтов с помощью метода релаксации напряжений / Л.В. Нуждин, С.Н. Лавров // *Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения: науч. тр.* – Казань: КГАСУ, 2012. – С. 92-96.

2. Лавров, С.Н. Опыт применения метода контролируемых перемещений для полевых исследований грунтов / С.Н. Лавров, В.П. Писаненко, Л.В. Нуждин // *Тр. Каспийской Междунар. конф. по геоэкологии и геотехнике.* – Баку: Адилоглы, 2003. – С. 158–167.

3. Лавров, С.М. Розклинюющий дилатометр для дослідження деформаційних властивостей ґрунтів / С.М. Лавров, Л.В. Нуждин, В.П. Писаненко // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* – Одеса: Астропринт, 2001. – Вип. №4. – С. 316–319.

4. Lavrov, S.N. *Estimation of deformation properties of weak soils in field conditions with the help of a wedge dilatometer (WD-100)* / S.N. Lavrov, L.V. Nuzhdin, V.P. Pisanenko // *Proc. of the International conf. on coastal geotechnical engineering in practice.* – Atyrau, 2002. – P. 242–244.

5. Nuzhdin, L.V. *Testing of the weak and non-cohesive soil deformation properties in-situ* / L.V. Nuzhdin, M.L. Nuzhdin // *Environmental Geotechnics: Proc. of 6ICEG.* – New Delhi: Tata McGraw Hill, 2010. – V.2. – P. 1568-1573.

6. Nuzhdin, L.V. *Field testing of the soil deformation properties for calculation foundation with static and dynamic load* / L.V. Nuzhdin // *From Research to Design in European Practice: Proc. of full papers of the XIV-th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Bratislava, SUT, 2010 (on CD-ROM insert.* – бр).

7. Лавров, С.Н. *Сравнительный анализ результатов исследований дилатометром РД-100 с традиционными способами определения модуля деформации грунтов* / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин // *Изв. вузов. Строительство.* – 2011. – №7. – С. 108–116.

Надійшла до редакції 09.10.2013
© Л.В.Нуждин, М.Л.Нуждин, К.В. Козьмініх