

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ГРУНТУ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ОСНОВ І ФУНДАМЕНТІВ У ПРОЦЕСІ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

У роботі викладено досвід використання електрохімічного методу закріплення слабких водонасичених лесових ґрунтів при підсиленні основ та фундаментів у процесі реконструкції будівель і споруд. Розглянуто метод армування ґрунту похилими стрижнями з наступною обробкою постійним електричним струмом. Наведені дані порівняльних випробовувань основи статичними навантаженнями штампами на різних етапах закріплення ґрунту. Розглянуто досвід використання методу для підвищення несучої здатності металевих паль, занурених у водонасичені лесові суглинки. Результати досліджень впроваджено у будівництво при реконструкції об'єктів громадського призначення.

Ґрунти уперше були оброблені електричним током К. Енделем у 1936 році. Їм було встановлено, що ґрунт, закріплений шляхом пропускання крізь нього постійного електричного струму, набуває водостійкості, у процесі осушення й ущільнення стає більш міцним і при наступному зволоженні зберігає набуті якості. У тому ж 1936 році Л. Казагранде використав цей метод для збільшення несучої здатності паль. У наш час проблемою збільшення несучої здатності паль займалися фахівці Науково-дослідного інституту основ і підземних споруд імені М.М. Герсеванова [1,2,3].

Електрохімічний засіб закріплення ґрунту базується на спроможності іонів заліза, дисоційованих при пропусканні постійного електричного струму, вступати в реакцію з ґрунтом і утворювати з ним цементуючі з'єднання. Після пропускання електричного струму навкруги сталевих паль міцність ґрунту підвищується за рахунок:

- спроможності електролітично асоційованого заліза утворювати у ґрунті цементуючі новоутворення;
- участі реакційно спроможного кремнезему, який міститься у ґрунтах, і теж утворює цементуючі з'єднання в наслідок проходження постійного електричного струму.

Армування ґрунту похилими металевими стрижнями з наступним закріпленням ґрунту за рахунок пропускання постійного електричного струму було проведено при реконструкції будівель у с.м.т. Сенча Полтавської області. В геоморфологічному відношенні дослідний майданчик розташовано

у межах Придніпровської низини, а саме у Полтавсько-Карлівській лесовій рівнині. Геологічну основу до обстеженої глибини формують четвертинні відкладення, представлені лесовидними суглинками. Ґрунти відрізняються літологічною однорідністю і витриманістю шарів. Рельєф ділянки рівнинний, змінений внаслідок інженерної діяльності людини.

За результатами інженерно-геологічних вишукувань, проведених у межах ділянки в 1995 році, з поверхні землі залягали такі шари ґрунту: шар 1 – рослинний, товщиною 1,2 м; шар 2 – суглинок лесовий, важкий, твердий, коефіцієнт пористості  $e = 0,89$ , початковий просадочний тиск  $p_{s1} = 0,07$  МПа, товщиною 2,5 м; шар 3 – суглинок лесовий важкий, тугопластичний, коефіцієнт пористості  $e = 0,77$ , непросадочний, товщиною 2,0 м. Рівень ґрунтових вод на той час знаходився на глибині 5,5 м нижче поверхні землі. У тому ж році на ділянці побудовані фундаменти з глибиною закладення 1,4 м і змонтовані ємності для пропан-бутану. Розрахунковий тиск на ґрунт склав  $p = 0,194$  МПа. В проекті фундаментів ємностей було передбачено ущільнення просадочних ґрунтів важкою трамбівкою. Ця робота при влаштуванні фундаментів не була виконана.

В 2000 році були зафіксовані значні нерівномірні деформації фундаментів ємностей. Абсолютні осідання досягли 14 см, нерівномірність осідань склала 0,019. У таких умовах експлуатація ємностей стала неможливою. Проведені повторні дослідження на будівельному майданчику показали, що рівень ґрунтових вод піднявся внаслідок підтоплення території на 3,7 м і зараз знаходиться на глибині 1,8 м нижче поверхні землі. Суглинок шару 2 перейшов у текучепластичний і навіть текучий стан, ступінь вологості ґрунту досягла  $S_r = 0,895$ . Розрахунковий опір ґрунту склав  $R = 0,1$  МПа, що вдвічі менше ніж середній тиск під подошвою фундаменту. Умови розрахунку основи з несучої здатності не задовольнялися. Модуль деформації ґрунту за даними компресійних випробовувань склав  $E = 2,1$  МПа. Абсолютні і відносні деформації є наслідком перевантаження основи фундаментів. Їх складові частини виникли за рахунок появи в основі локальних зрушень, осідання і просідання суглинка шару 2, який набув стану слабкого ґрунту. Схема розташування фундаменту і основи показана на рис. 1, а.

Було запропоновано підсилити основу фундаментів шляхом її армування похилими елементами, утвореними за допомогою технології електрохімічного закріплення ґрунтів. Для цього ґрунт навкруги фундаменту виймали до рівня позначки його подошви. В ґрунт під кутом  $\alpha = 30^\circ$ , так як це показано на рис. 1, б, занурювали металеві стержні-електроди з арматурної сталі класу А240  $\varnothing = 20$  мм. У плані стрижні-електроди розміщували рядами через 1,0 м у шаховому порядку. Відстань між електродами в ряду прийнята 0,5 м.

Електрохімічне закріплення ґрунту проводили захватами по 12-14 електродів на кожному полюсі. Робоча напруга постійна і складала 60-62 В, сила струму змінювалася від 40 до 70 А (це викликано міграцією води та

змінюю властивостей ґрунту в результаті обробки постійним електричним струмом). Закріплення велося до того часу, коли на один електрод припадало близько 100 квт/год електроенергії.

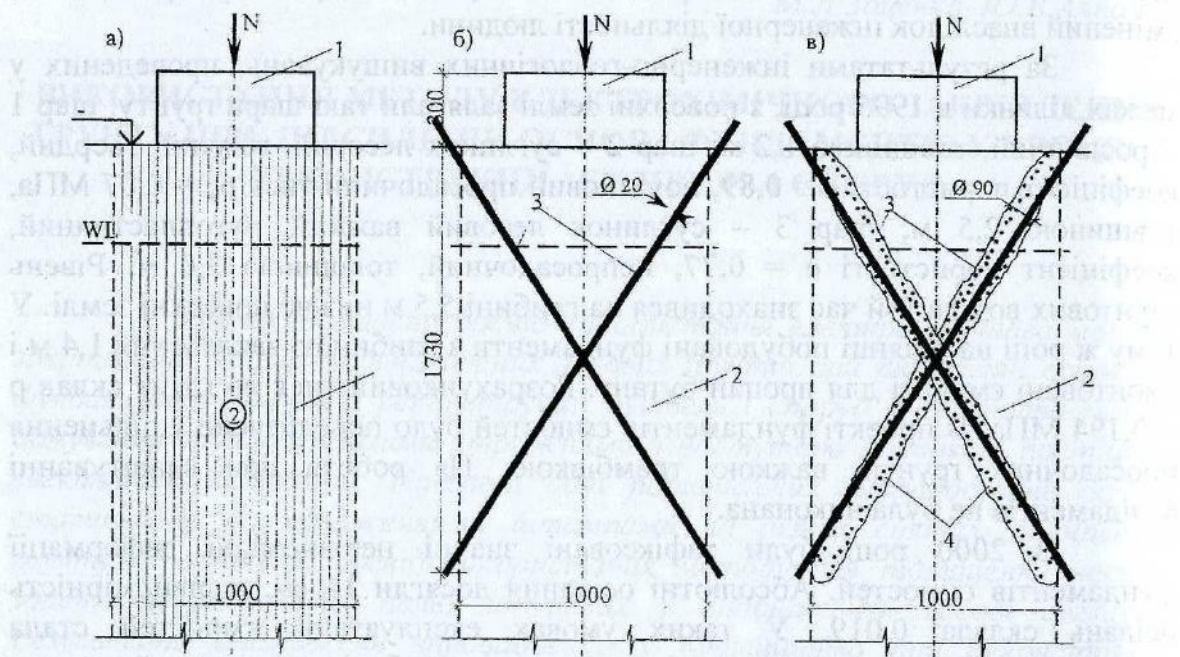


Рис. 1. Розрахункові схеми випробування штампів на дослідному майданчику №3  
а) природна основа, б) основа, армована металевими стрижнями; в) ґрунт оброблено електричним струмом. 1 – залізобетонний квадратний штамп,  $A=5000 \text{ см}^2$ ; 2 – стиснута товща основи; 3 – арматура  $\text{Ø} 20 \text{ А-I}$ ; 4 – закріплений ґрунт.

Схема основи, армованої похилими елементами які утворені за допомогою електрохімічного закріплення ґрунту, показана на рис.1,в.

Для визначення ефекту закріплення ґрунтів у межах будівельного майданчика було проведено випробовування ґрунтів статичним навантаженням квадратними штампами площею  $A = 5000 \text{ см}^2$ . Випробовування ґрунтів виконані відповідно до ДСТУ Б В.2.1-7-2000. Штampi виготовлялись з монолітного залізобетону на місті випробовувань. Їх підшва встановлювалась на позначці рівня підшви фундаментів емоностей. Штampi встановлювали за трьома розрахунковими схемами:

- на основі до закріплення для визначення початкового значення модуля загальної деформації ґрунту,  $E$  (два штаmpi, рис.1,а);
- на основі, яка армована тільки арматурними стрижнями сталі класу А240,  $\text{Ø} = 20 \text{ мм}$  (два штаmpi, рис.1,б);
- на основі, яка армована похилими елементами, виготовленими за допомогою електрохімічного закріплення ґрунту (два штаmpi, рис.1,в).

Навантаження на штаmpi створювали за допомогою збірних бетонних фундаментних блоків товщиною 300 мм. Для цього на штамп

встановлювали металеву платформу розміром у плані 1,5x1,5 м. Блоки на платформу встановлювали по двоє, що складало навантаження по 20 кН і утворювало тиск під подошвою штампу  $\sigma = 0.04$  МПа. На кожен штамп було накладено по 6 ступенів навантаження. Загальне навантаження склало 120 кН, а відповідний тиск під подошвою  $\sigma = 0.24$  МПа. Кожна ступінь навантаження витримувалась до умовної стабілізації деформації, за яку було

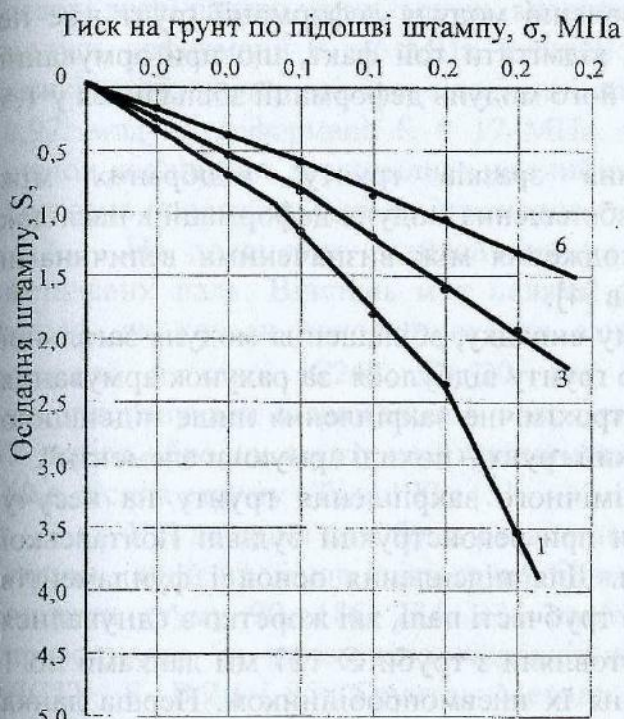


Рис. 2. Графіки залежності осідання штампів на: 1 – природній основі; 3 – основі, армованій арматурними стрижнями; 6 – після обробки електричним струмом

прийнято прирощення осідання штампі у 0,1 мм за дві години спостережень. Всього було проведено шість штампових випробовувань. На рис.2 приведені демонстраційні узагальнені графіки залежності між осіданням штампі, S, і тиском під його подошвою,  $\sigma$ . Як видно з графіків, ні в одному з випадків не було досягнуто втрати несучої здатності основи.

Модуль загальної деформації ґрунту за даними випробовувань статичним навантаженням штампами визначали за методикою, яка наведена у ДСТУ Б В.2.1-7-2000. Експериментальні дані наведені у табл.1.

Таблиця 1. Значення модуля загальної деформації за даними випробовувань ґрунтів статичним навантаженням штампами

Діапазони тиску на ґрунт, $\sigma$ , МПа	Значення модуля загальної деформації, E, МПа								
	Основа до підсилення			Армована стрижнями			Після електрохімічного закріплення		
	$E_1$	$E_2$	$E_{cp}$	$E_3$	$E_4$	$E_{cp}$	$E_5$	$E_6$	$E_{cp}$
0–0,1	5,8	5,5	5,65	8,2	7,3	7,75	12,1	11,0	11,55
0,1–0,2	3,5	3,5	3,5	5,5	5,1	5,3	7,8	8,8	8,3

Як свідчать дані табл.1, значення модуля загальної деформації в діапазоні  $\sigma = 0,1 - 0,2$  МПа для основи до підсилення за даними штампових випробовувань склало  $E = 3,5$  МПа, проти  $E = 2,1$  МПа за даними компресійних випробовувань. Після електрохімічного закріплення ґрунту модуль деформації у тому ж діапазоні деформацій збільшився у 2,4 рази і склав  $E = 8,3$  МПа. При такому значенні модуля деформації ґрунт вже не підпадає під назву "слабкий". Слід відмітити той факт, що при армуванні ґрунту лише металевими стрижнями його модуль деформації збільшився у 1,5 рази і склав  $E = 5,3$  МПа.

Компресійні випробовування зразків ґрунту, відібраних між електродами, не показали істотного збільшення модуля деформації в наслідок електрохімічного закріплення. Розходження між визначеними величинами знаходилося у межах точності вимірів [4].

Таким чином, у розглянутому випадку, збільшення модуля загальної деформації слабкого водонасиченого ґрунту відбулося за рахунок армування основи похилими елементами. Електрохімічне закріплення лише підвищило вплив цих елементів у системі "слабкий ґрунт – похилі армуючі елементи".

Перевірку впливу електрохімічного закріплення ґрунту на несучу здатність металевих паль перевіряли при реконструкції будівлі Полтавської філії Національного банку України. Для підсилення основ і фундаментів будівлі було запропоновано металеві трубчасті палі, які жорстко з'єднувалися з існуючим фундаментом. Палі виготовляли з труби  $\varnothing 127$  мм ланками по 1 м, які зварювали у процесі занурення їх пневмопробійником. Перша ланка труби мала загострення. Загальна довжина палі складала 10,0 м. Після

занурення усіх ланок у трубу встановлювали арматурний каркас і заповнювали цементним розчином.

У геоморфологічному відношенню майданчик розташований у межах Полтавського лесового плато. З геологічної точки зору майданчик складено на глибину 15 м товщею глинистих порід четвертинної системи. Рельєф його значно змінений в наслідок інженерної діяльності людини на протязі багатьох сторіч. Це накопичило насипний (культурний) шар 1 товщиною 1,2 м. Його



Залежність "осідання-навантаження" при кількості енергії на 1 м. п. палі:  
1 – без закріплення; 2 – 9 кв/год; 3 – 18,6 кв/год;

підстеляють суглинки легкі темно-коричневі, гумусовані з корінням і ходами землерійів – **шар 2**, товщиною 1,3 м. **Шар 3** – суглинки лесові легкі ( $I_L = 10$ ) світло-коричневі, м'яко пластичні, високопористі, ступінь вологості  $S_r = 0,8$ , модуль деформації  $E = 6$  МПа, товщиною 1,8 м. **Шар 4** – суглинки лесові важкі, палево-жовті, м'яко пластичні, високо пористі, ступінь вологості  $S_r = 0,87$ , модуль деформації  $E = 3,1$  МПа, товщиною 0,7 м. **Шар 5** – суглинки лесові легкі палево-жовті, текучі, високопористі, ступінь вологості  $S_r = 0,95$ , модуль деформації  $E = 6$  МПа, товщиною 4,7 м. **Шар 6** – суглинки лесові важкі темно-коричневі, туго пластичні, низькопористі, ступінь вологості  $S_r = 0,97$ , модуль деформації  $E = 17$  МПа, товщиною 4,7 м. Грунтові води на період досліджень знаходилися на глибині 5 м нижче поверхні землі. На рис.1 показано положення палі на інженерно-геологічному розрізі.

На дослідному майданчику на глибину 9,5 м були занурені 25 металевих палей. Відстань між палями складала 1 м. Їх було прийнято за аноди, як катоди використовували занурені на ту ж глибину арматурні стержні з сталі С240  $\varnothing$  20 мм. Як джерело постійного струму використовували зварювальний випрямлювач електричного струму ВС-600. У період обробки ґрунту електричним струмом робоче напруження складало 60 в, а сила струму – біля 100 а [5].

Усі дослідні палі були розділені на 5 груп в залежності від кількості струму, який пройшов крізь ґрунт біля кожної палі: без обробки струмом, витрати струму 90, 186, 284, 324 квт/год. Статичні випробування палей проводилися за допомогою гідравлічного домкрату відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.1-1-95. Ґрунти. Методи польових випробувань палями. Домкрат упирався у вантажну платформу, навантажену збірним залізобетоном.

На рис.3 наведені демонстраційні графіки по одному з кожної групи. Характерним є загальне окреслення графіків. Із збільшенням кількості електроенергії воно стає крутішим, тобто, чіткіше фіксується зрив палі. Це свідчить про те, що міцність ґрунту забезпечується за рахунок його зчеплення. Чим більше електроенергії, тим більше зчеплення ґрунту, тим чіткіше фіксується зрив палі, тобто момент втрати її несучої здатності.

На підставі проведених досліджень використання методу електрохімічного закріплення ґрунту при підсиленні основ і фундаментів можна зробити такі основні висновки:

- проведені дослідження методу електрохімічного закріплення ґрунту, коли у електроди не подається речовина, що зв'язує частинки ґрунту;
- ґрунт помітно закріплюється лише у зоні безпосередньо біля електродів, простір між електродами для водонасичених лесових ґрунтів практично зостається без змін;
- на основі попереднього висновку слід рекомендувати використання методу електрохімічного закріплення ґрунту для підвищення несучої здатності палей, а також для підсилення елементів армування ґрунту;

- внаслідок електрохімічного закріплення армованого водонасиченого лесового суглинку його модуль деформації збільшується у 1,5 і більше разів;

- геометрія і міцність зони закріплення ґрунту залежить від кількості пропущеного крізь електрод постійного електричного струму; відповідно до цього несуча здатність палі збільшується у 3 і більше разів [5, 6];

- досліди, які були проведено у часі, показали, що несуча здатність палі збільшується деякий час і після вимкнення електричного струму.

Усе сказане вище дозволяє рекомендувати метод електрохімічного закріплення слабких водонасичених лесових ґрунтів для підсилення основ і фундаментів при реконструкції будівель і споруд [7].

#### Література

1. Трушинский М.Ю. Электрохимический способ закрепления грунтов // Основания и фундаменты.- 1993.-№2.- С.12-14.
2. Трушинский М.Ю. Электрохимические анкеры и сваи в фундаментостроении // Основания и фундаменты.- 1996.-№3.- С.9-11.
3. Жинкин Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве. - Л.: Стройиздат, 1966. - 194 с.
4. Алпатов Ю.В. Вплив електрохімічного закріплення на характеристики глинястих ґрунтів. Зб. наукових праць. ПДТУ. - Вип.6, ч.2. - Полтава, 2000. - С.136-139.
5. Передерій В.М. Проблеми застосування методу електрохімічного закріплення глинястих ґрунтів. Зб. наукових праць.ПДТУ. - Вип.4. - Полтава,1999. - С.97-103.
6. Зоценко М.Л. Пальові фундаменти в Україні // Світ геотехніки-2000.- №1. - С.25-27.
7. Зоценко М.Л. та інш. Пальові дослідження електрохімічного закріплення лесових ґрунтів.-3-я Українська науково-технічна конференція. НДБК, м.Київ. - ч.2. - С.34-36.