

4. УПЛЪТНЯВАНЕ С ТЕЖКА ТРАМБОВКА, С ПИРАМИДАЛНИ И ПОЧВЕНИ ПИЛОТИ

1. Уплътняване с тежка трамбовка

Методът се състои в пускане на тежест от определена височина върху уплътняваната площ от стрелата на кран или със специално приспособен багер. Тежестта (трамбовката) може да е бетонов блок, стоманена плоча или дебелистенна метална кутия, напълнена с бетон или пясък. Ударните вълни и големите напрежения, които възникват в почвата от падането на трамбовката, предизвикат намаляване на обема на порите, в някои случаи втечняване на почвата и разсейване в страни на поровата вода. При това деформационният модул на почвата нараства от два до десет пъти, т.е. слягането силно намалява. С течение на времето якостта на някои уплътнени почви значително нараства.

Методът е приложим при широка гама неуплътнени почви: лъос, прахови глини, пясъци, дребни чакъли, тини, торф и различни насипни материали. Прилага се както при неводонаситени, така и при водонаситени почви.

При неводонаситените почви уплътнителният процес по своя механизъм прилича на този при прокторовия опит. При водонаситените почви той е подобен на протичащия при взривното и вибрационно уплътняване.

При лъоса, методът е известен от тридесетте години на миналия век и е свързан с името на руския изследовател проф. Ю. М. Абелев, а при водонаситените той е въведен от френския инженер L. Mènard през 60-те години. Известни са случаи за уплътняване на почви под вода.

У нас методът е описан накратко за първи път през 1960 г. от Стефанов и Кремакова.

Първоначалното тегло на трамбовката при неводонаситените почви е 2,5–3,0 тона, като впоследствие нараства до 15-20 тона. При водонаситените почви се започна с 8-12 тонни трамбовки, пускани от височина 10-12 m. През седемдесетте години тяхното тегло е увеличено най-напред до 20-30 тона, след това до 50-80 тона и накрая до 200 тона, пускани от височина 40 m. С това силно нарасна уплътнената зона. При най-тежките трамбовки тя може да достигне десетки метри.

Дълбочината на уплътняване на тежката трамбовка зависи от приложената уплътнителна енергия, от вида на почвата (по-грубозърнестите почви се уплътняват по-лесно от финозърнестите), от формата на трамбовката, от наличието на газ в порите при водонаситените почви и от разсейването на порния натиск в тях.

Предложени са следните формули за определяне на дълбочината на уплътнената зона (Mitchell, 1982):

$$\text{от Mènard и Broise} - Z = \sqrt{w \cdot h} \quad (4.1.)$$

$$\text{от Leonards} - Z = 0,5 \cdot \sqrt{w \cdot h}, \quad (4.2.)$$

$$\text{от Lukas} - Z = (0,65 \text{ до } 0,80) \cdot \sqrt{w \cdot h} \quad (4.3.)$$

където:

Z – максимална дълбочина на уплътняване;

w – тежест на трамбовката;

h – височина на падане на трамбовката.

Трамбовката преминава до 2-3 пъти по уплътняваната повърхност като отпечатците от нея са на известно разстояние един от друг. Отделните преминавания при грубозърнестите почви са през ден, а при финозърнестите – през седмица. При льосовите почви не е необходимо такова изчакване. Поради потъването на повърхността под трамбовката е препоръчително получените дупки да се запълват с пясък.

Слягането на повърхността на площадката е от 2 до 5% от дебелината на уплътнената зона.

В България уплътняването с тежка трамбовка е прилагано при фундиране в пропадъчен льос. Методът е въведен от Научно-изследователския строителен институт (НИСИ) в София в началото на 60-те години и намира широко приложение в промишленото и гражданското строителство. Отначало се прилагат 2,5 – 3,0 тонни трамбовки, пускани от височина 3-4 m (фиг. 4.1.) с дълбочина на уплътнената зона 1,5 m (фиг. 4.2). Такива трамбовки са използвани в началото на седемдесетте години при фундирането на първите два енергоблока на АЕЦ “Козлодуй”, на охладителни кули на ТЕЦ, при изграждане на високи сгради и голям брой други съоръжения.

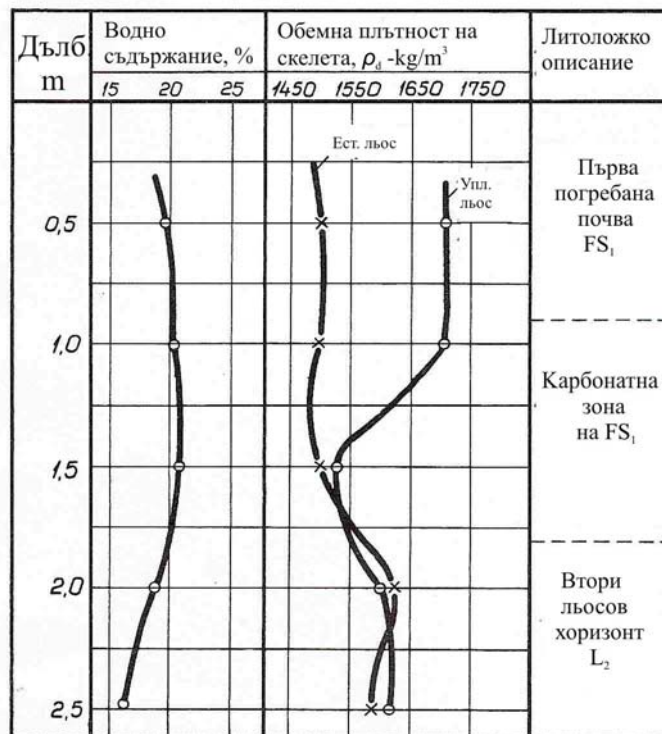


Фиг. 4.1. Уплътняване на с 2,5 тонна трамбовка на льосовата основа на I енергоблок на АЕЦ “Козлодуй”

Вижда се потъването на повърхността на дъното на изкопа с 20-30 ст след едно минаване

В началото на седемдесетте години Лабораторията по геотехника на БАН прилага 10 тонна трамбовка при фундиране на изпитвателния басейн на Института за корабна промишленост в Аспарухово до Варна. С

трамбовка с увеличена тежест уплътнената зона надхвърля 3,5 m. Това позволи такава трамбовка да се използва при фундиране на по-тежки съоръжения, както е случаят с високата телевизионна кула в гр. Русе (фиг. 4.3 и фиг. 4.4.).



Фиг. 4.2. Изменение на ρ_d в дълбочина след уплътняване с тежка трамбовка на площадката на ТЕЦ "Русе"

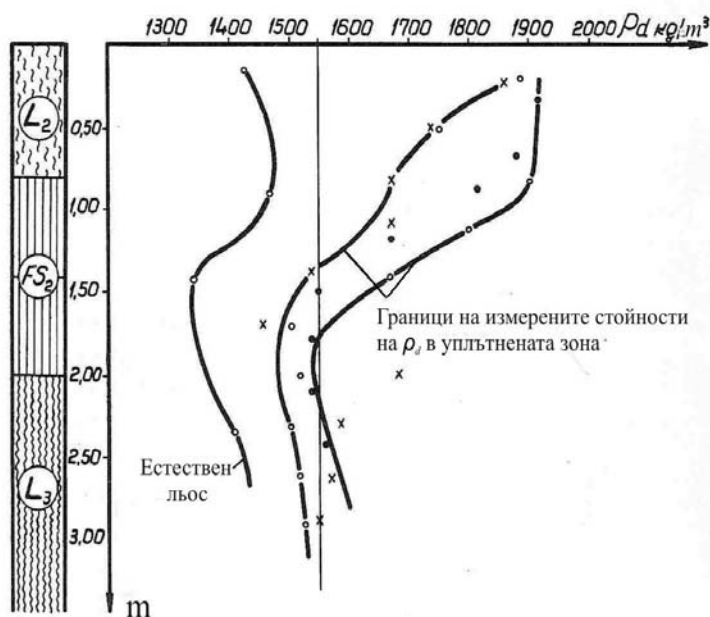
При TV Русе дълбочината на уплътнената зона е в най-добро съответствие с изчислената по формула (4.2.), по която за 7 тонна трамбовка падаща от височина 8 се получава уплътнена зона $h=3,75$ m. Това съответствие се вижда и в цитирания труд на Mitchell (1982), който е събрал и обобщил данни от 9 източника, между които е тези за TV Русе, публикувани от Minkov et al. (1980).

Методът е приложим при степен на водонасищане на лъоса $S_r \leq 0,7$, но най-добри резултати се получават при S_r от 0,35 до 0,60. В руската инструкция за граница на уплътнената зона се приема дълбочината, при която $\rho_d \geq 1,60$ g/cm³. У нас тази граница се приема при $\rho_d \geq 1,55$ g/cm³.

Уплътняването с тежка трамбовка се прилага при лъосова основа от I тип, при която пропадането от собственото тегло при намокряне е $\delta_{np} < 5$ cm. Основата от I тип е податлива на пропадане от допълнителния товар на сградите и съоръженията, което може да се избегне чрез уплътняване на частта от основата, разположена непосредствено под фундамента, в която е развита неговата деформационна зона.



Фиг. 4.3. Уплътняване с тежка трамбовка на льосовата основа на ТВ-кулата в гр. Русе
 Уплътняването се прави от дъното на изкоп с дълбочина 12 m, със 7 тонна трамбовка, падаща от височина 8-10 m.



Фиг. 4.4. Изменение на ρ_d в дълбочина след уплътняване с тежка трамбовка на земната основа на ТВ-кулата в гр. Русе

При уплътняване на льосови почви е установено, че те нямат поведение на хомогенна среда - льосовите хоризонти, погребаните почви и техните карбонатни зони имат различни уплътнителни характеристики. Това показват прокторовите криви на проби взети от погребаните почви, от техните карбонатни зони и от льосови хоризонти от две площадки в

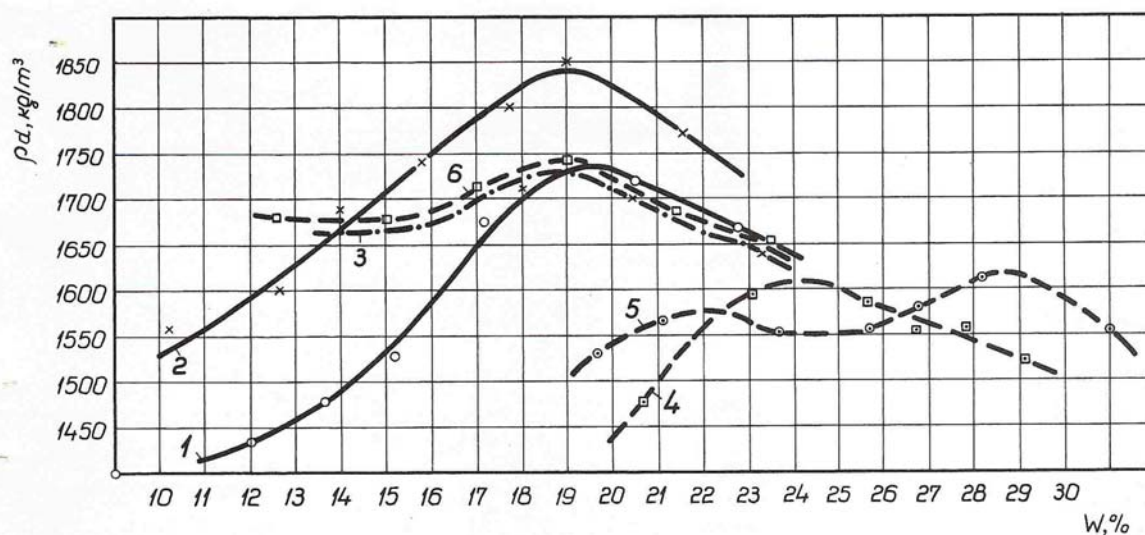
гр. Русе – едната в ТЕЦ Русе, а другата при телевизионната кула в гр. Русе Атерберговите граници са посочени на Таблица 4.1.

Таблица.4. 1. Граници на Атерберг за изследваните почви

| Проба № | Почвена разновидност | w_L | w_P | I_P |
|---------|---|-------|-------|-------|
| 1 | ТЕЦ “Русе” FS ₁ | 34,4 | 15,8 | 18,6 |
| 2 | ТЕЦ “Русе” L ₂ | 27,0 | 20,8 | 6,2 |
| 3 | ТВ-кула “Русе” L ₂ | 24,8 | 20,6 | 4,2 |
| 4 | ТВ-кула “Русе” FS ₂ | 43,0 | 17,7 | 25,3 |
| 5 | ТВ-кула “Русе” FS ₂ карбонатна зона | 27,4 | 19,5 | 7,9 |
| 6 | ТВ-кула “Русе” L ₃ | 25,4 | 19,0 | 6,4 |

Прокторовите криви на 6-те проби от Табл. 4.1. са дадени на фиг. 4.5. Вижда се, че уплътнителните криви 4 и 5, респективно на втората погребана почва FS₂ и на нейната карбонатна зона, се различават от кривите на льосовите хоризонти и на погребаните почви. Двете криви са изместени силно по абсисата т.е. към по-високите водни съдържания и имат по-ниски стойности на ρ_{ds} . Крива 5 съдържа два максимума при $w=24\%$ и $w=32\%$.

Причината за тези особености на крива 5 е високото съдържание на финодисперсен CaCO₃ и на Ca⁺⁺ в поглъщащия комплекс, които увеличават количеството на здраво свързаната вода около частиците и затова сравнително по-голямо количество вода е необходимо, за да се достигне до w_{opt} . Освен това повишеното съдържание на CaCO₃ и на Ca⁺⁺ създава по-пореста т.н. флокулационна структура в почвата, поради което и след уплътняване тя има по-ниска обемна плътност на скелета.



Фиг. 4.5. Прокторови криви на проби от льосови хоризонти, погребани почви и карбонатни зони. Номерата на пробите са както при табл.4.1.

На практика при уплътняване с тежка трамбовка е невъзможно да се навлажни допълнително само карбонатната зона, тя се уплътнява при $w < w_{opt}$. и затова се получава по-ниска плътност (фиг. 4.5.)

Уплътняването с тежка трамбовка е прилагано по-рядко в хидротехническото и в хидромелиоративното строителство. Съществуват обаче възможности този метод да се използва при изграждане на водоизравнителни, помпени станции, основи на дюкери, за уплътняване на дъната на по-големи канали и др. Особено полезно би било приложението му при строителство на канали от готови полутръби. Бетонните фундаменти на тези канали се залагат плитко в най-горната и най-силно пропадъчна зона на лъоса. При малки деформации на основата фугите се отварят, лъосът се навлажнява и пропада, което често води до пълно разрушаване на канала. Уплътняването на основата на бетонните стъпки с тежка трамбовка би ликвидирало опасността от пропадане, тъй като натоварването от тези съоръжения е много малко.

Има случаи когато уплътняването с тежка трамбовка не е дало добър резултат. Най-често това се дължи на прилагането му при лъосова основа от II тип (основа с голяма дебелина, при която $\delta_{пр} > 5$ cm) и когато водното съдържание w на лъоса при уплътняването се различава значително от w_{opt} .

При нашите климатичните условия уплътняването с тежка трамбовка на големи площи е затруднено през дъждовните периоди на годината.

При основи от II тип уплътняването с тежка трамбовка може да се използва в комбинация с други противопрпадъчни мероприятия, като предварително намокряне на основата, почвена или циментопочвена възглавница, почвени или циментопочвени пилоти. С комбинация от уплътняване с тежка трамбовка и циментопочвена възглавница е фундирана телевизионната кула в гр. Русе.

В Русия е разработен вариант на този метод, използващ конична трамбовка, фиксирана за водещ стълб. При падането на трамбовката на едно и също място се оформят отвори с диаметър в долния край 0,6-1,5 m, в който се излива бетона на стъпките. Използуван е при фундиране на стотици леки сгради в Русия и Молдова.

По подобен начин, но не с фиксирана трамбовка, се изготвят и легла за ивични фундаменти. С многократно падане на конична или пирамидална трамбовка по една и съща линия се трамбова леглото на фундамента. Конструирана е специална верижна машина, която работи със 7 тонна трамбовка, която прави 30 удара за минута и дава значителен уплътнителен ефект (Bells, 1992).

Уплътняването със свръхтежка трамбовка е използвано при слаби водонаситени почви за пристанищно и промишлено строителство. Върху площадката се насипва няколко метра пясъчен пласт, върху който пада трамбовката. Този пласт служи за придвижването на крановете, с които се пуска трамбовката и като дренаж за отвеждане на водата, отделена от почвата при нейното уплътняване. Тъй като грубозърнестият пласт се смесва с долулежщата почва в процеса на уплътняване, той се донасипва. След последното преминаване на трамбовката се прави допълнително уплътняване чрез спускане на трамбовката от малка височина, за да се уплътни добре и най-горния слой на основата.

За ускоряване на уплътняването и за да не се чакат няколко дни за следващото преминаване на трамбовката по уплътняваната площ, могат да се използват вертикални дренажи.

Съществуваха трудности в обясняването на бързото уплътняване на водонаситена тиня със свръхтежка трамбовка. Не беше лесно да се обясни как с нейните коефициенти на филтрация и на консолидация се постига сравнително бързо уплътняване до голяма дълбочина. Едно приемливо обяснение е свързано с отчитане на големия процент газова фаза (предимно от метан) във водонаситената тиня, получена от гниенето на органичните останки. Под влияние на високото налягане, възникващо в почвата от падането на трамбовката, газът се разтваря във водата, понижавайки нейния вискозитет. Вследствие на това нараства коефициента на филтрация, който е обратно пропорционален на вискозитета на филтриращата се течност и се ускорява консолидацията.

При уплътняване с тежка трамбовка в земната основа възникват вибрации с честота от 2 до 20 Hz, които могат да застрашават устойчивостта на съседни сгради.

При втечняеми почви е препоръчително да се уплътнява по-широка площ отколкото е очертанието на сградата. Ширината на площта е колкото дебелината на уплътняваната почва. Това се прави, за да не се засегнат съседни съоръжения.

2. Уплътняване с пирамидални пилоти

Установено е, че увеличаването на коничността на обикновените стоманобетонни пилоти от $2-3^\circ$ на $12-13^\circ$ повишава 2,0-2,5 пъти тяхната носеща способност. Този факт стои в основата на метода за фундиране с къси, забивни пирамидални пилоти. Това е един особен метод, който се различава от класическото пилотно фундиране, защото ефектът на пирамидалния пилот се дължи на образуването на уплътнен слой в почвата около него. В този слой се развива деформационната зона (фиг. 4.6.).

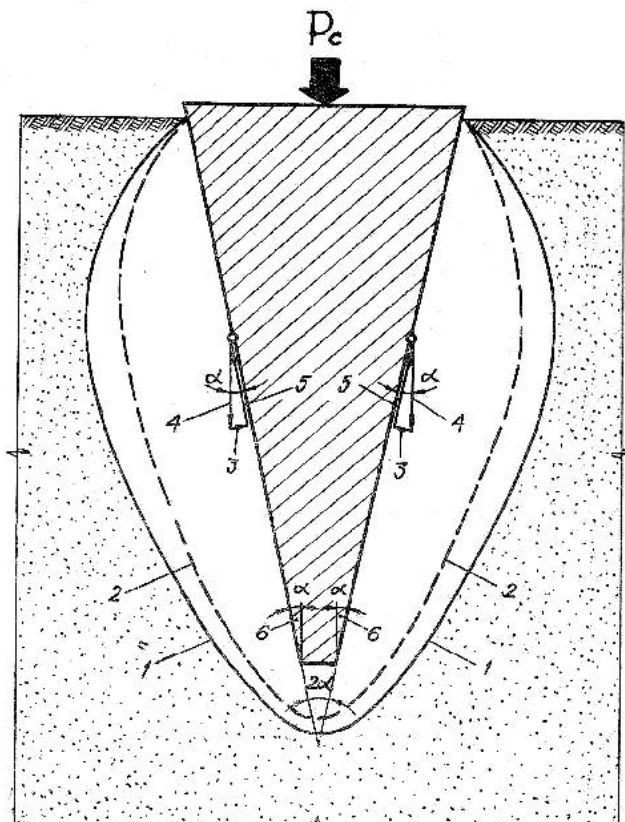
Опитните натоварвания със забивни пирамидални пилоти показват, че тяхната съвместна работа със земната основа се различава коренно от работата на призматичен пилот със същия размер. В Украйна са направени стотици опитни натоварвания за носещата способност на пилотите с послойно измерване на деформациите. С тях е доказано, че деформационната зона при пирамидалните пилоти се образува предимно около техните стени и затова целият товар се приема в границите на тяхната дължина, докато при обикновените пилоти деформационната зона се формира най-вече под техния долен край. Поради тази разлика набиването в почвата на къси пирамидални пилоти е по-скоро метод за уплътняване, отколкото пилотно фундиране.

Методът е приложим при неуплътнени лъсови, пясъчливи, глинести, тинести и насипни почви. В преобладаващата част от случаите обаче е бил използван за борба с пропадането на лъсова основа от I тип.

Пирамидалните пилоти имат дължина 3,0 до 3,5 m и сечение в горния край 50x50 (70x70) cm и в долния - 10x10 cm.

Основен принцип при проектирането на пирамидалните пилоти е предаваният върху тях товар да създава деформационна зона около пилота, която да не излиза извън границите на уплътнения слой при неговото забиване (Указания1978; Тошков, 1982). Ако пирамидалният пилот работи съвместно с нисък ростверк, който се опира на земната основа, се

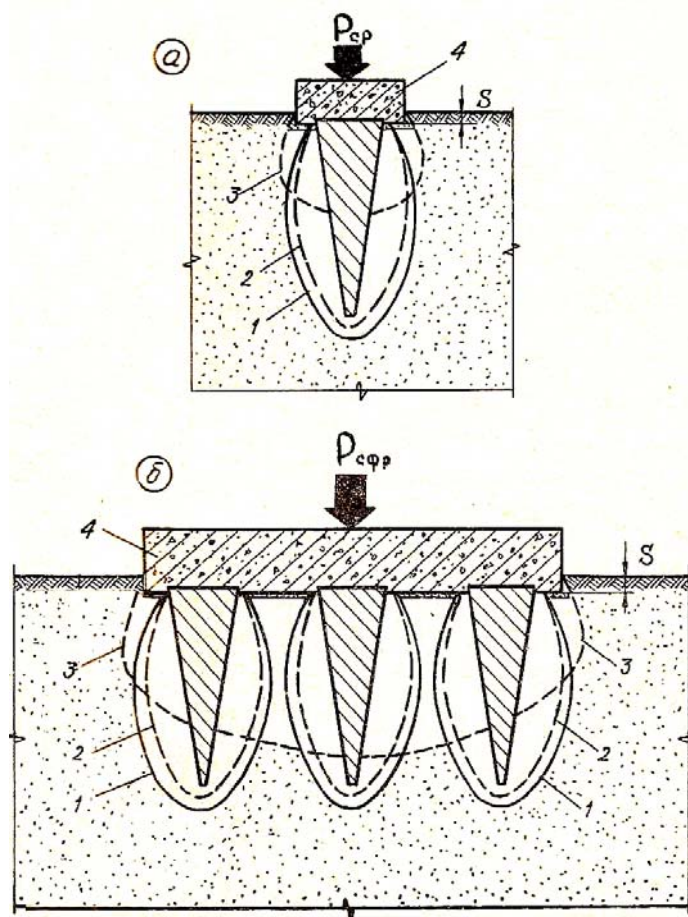
образуват две деформационни зони. Едната е под ростверка, а другата е около пилота. Тези зони се създават едновременно, предопределяйки общата носеща способност пилота и на ростверка при еднаквото им слягане (фиг. 4.7).



Фиг. 4.6. Схема на функционирането на пирамидален пилот:
 1. Уплътнена зона; 2. Деформационна зона; 3. Нормативно-реактивно налягане на почвата по страничната повърхност на пилота; 4. Активно налягане на пилота върху почвата; 5. Съпротивление на почвата на срязване; 6. Ъгъл на върха на пилота ;

С цел да се повиши съпротивлението, долният край на пирамидалните пилоти понякога се издълбава отвътре под форма на обратен конус, което помага да се създаде уплътнена зона не само около пилота, но и под неговия връх. Такива пилоти с дължина 2 m, с размери в горната част 60x60 cm и при върха 20x20 cm с вътрешна коническа празнина, са изпитани заедно със същия размер обикновени пирамидални пилоти и е установено, че имат по-голяма носеща способност от тях.

През 1966 г. в Одеса е бил построен експериментален пететажен панелен жилищен блок, фундиран в лъсова основа от I тип с къси пирамидални пилоти. В основата на блока са били излети 2638 m³ студена и гореща вода от водопровода. Независимо от обилното намокряне средното слягане се е оказало 6,5 cm, като в конструкцията не са забелязани пукнатини.



Фиг. 4.7. Схема на съвместната работа на забивни пирамидални пилоти със земната основа

а) Единичен пилот; б) Пилотен фундамент; 1. Уплътнена зона; 2. Деформационна зона от пилота; 3. Деформационна зона от ростверка; 4. Нисък ростверк;

От 1970 г. в Украйна пирамидалните пилоти с дължина 3,40 m и сечение в горната част 70x70 cm и в долната 10x10 cm са внедрени при строителството на девететажни панелни блокове с различна конструкция и серия, заменяйки набивните призматични и изливни сондажни пилоти с дължина 9-14 m. Към 1975 г. само в Одеска област са построени 200 здания, включително 157 девететажни, като са набити 60 000 пилоти.

Освен в лъсови почви този метод е използван също и при други видове рохкави пясъчливи, глинести, тинести и насипни почви .

Набиването на пирамидалните пилоти е извършвано по различни начини: с механически чукове, с дизелови тръбни и щангови чукове, със забивни агрегати и с различни типове вибрационни набивачи. За предпазване на главата на пилота при набиване върху нея се поставят метални, дървени или гумени накладки. Преди забиването пилотите се фиксират в къси, водещи сондажи.

Късите пирамидални пилоти са използвани в България при фундиране в пропадъчен лъос. Значителен опит в това отношение е натрупан в гр. Добрич (Тошков, 1982).

Уплътняване на земна основа с ребристи фундаменти

Както е известно, фундаментите обикновено имат плоска основа. С цел да се уплътни разположената под тях почва по време на строителството в бившия Съветски съюз са разработени различни видове фундаменти с долна част съдържаща удължения във вид на ребра, зъби, шипове, пирамиди и др.

Експерименталните изследвания са започнали през 1962 г. и първите приложения в жилищното и селскостопанското строителство при льосови основи от I тип са отново в Украйна. Принципът на действие на ребристите фундаменти е както на късите пирамидални пилоти. У нас този метод не е прилаган.

3. Уплътняване на льос с почвени пилоти

Методът се състои в дълбочинно уплътняване на льоса чрез разширяване на сондажи и запълването им с уплътнена почва. Наименованието “почвени пилоти” е доста условно, тъй като се касае за метод за уплътняване на основата, който има малко общо с пилотното фундиране.

Приложението на метода в льос е започнало през 1934 г. в бившия Съветски съюз. Българските специалисти са запознати с възможностите на метода в началото на шестдесетте години от Стефанов и Кремакова (1960). Съществуват два начина за пробиването на отворите за пилотите: чрез ударно пробиване и чрез взривна енергия.

При първия начин първоначално е използвана ръчна сонда, като бригада от 3-4 души е правела по 6-7 десетметрови пилоти за една смяна. Методът е усъвършенствуван през 60-те години, когато е разработена технология за направа на сондажите с ударната сонда БС-1. Тази сонда работи с щанги с тегло 1,000-3000 kg и с малки допълнителни приспособления е пригодена за пробиване на отвори с $d=50-60$ cm до дълбочина 15 m. Ударният крайник на щангите е с диаметър 50 cm и завършва под форма на конус с ъгъл 30° . Височината на повдигане на крайника е 1,20 m, при честота 40 – 50 удари за минута. Скоростта на прокарване на отворите е 1 линеен метър за 3-4 минути.

През 60-те години в бившия Съветски съюз са издадени “Указания за уплътняване на пропадъчни основи на сгради и съоръжения с почвени пилоти” (СН 33-66), които са използвани у нас при обучение и експериментални дейности.

След пробиване на сондажния отвор в него се насипва почва с водно съдържание близко до оптималното, на порции от 240-400 kg, която се уплътнява със същата ударна сонда, като на щангите се поставя параболичен крайник при средно 25 удара за една порция

Почвените пилоти са ефективен метод за ликвидиране на пропадъчните свойства на льос до дълбочина 10-15 m. Оптималното разстояние между осите на пилотите е 2,5-3,0 пъти по-голямо от техния диаметър и зависи от обемната плътност на скелета на естествената и на уплътнената почва, както и от водното съдържание. Приблизително това разстояние може да се определи от формулата:

$$L = 0,95.d.\sqrt{\frac{\rho_{d,ynл}}{\rho_{d,ynл} - \rho_{d,ecm}}} \quad (4.4.)$$

L – разстояние между сондажите – m

$\rho_{d,ynл}$ – обемна плътност на скелета на почвата в пилота– kg/m^3

$\rho_{d,ecm}$ – обемна на плътност на скелета на естествения лъос – kg/m^3

d - диаметър на пилота – m

Пример: уплътнява се лъос при:

$$\rho_{d,ecm} = 1400 \text{ kg/m}^3; \rho_{d,ynл} = 1700 \text{ kg/m}^3; d = 0,5 \text{ m};$$

При тези изходни данни се получава, че разстоянието между осите на сондажите трябва да бъде около 1,10 m

Количеството почва, необходимо за засипване на 1 m от сондажа се определя по формулата:

$$q = \frac{F_{cp}.\rho_{d,ynл}}{1 + e_{ynл}} \cdot \left(1 + \frac{w_{opt}}{100}\right) \quad (4.5.)$$

където:

F_{cp} – средно сечение на почвения пилот;

$e_{ynл}$ – порният коефициент на уплътнената почва;

Най-добър резултат се получава, когато водното съдържание на естествения лъос е близко с w_{opt} . Когато w е много по-малко от w_{opt} се налага земната основа да бъде навлажнена. Това се прави като в дъното на изкопа се насипва пясъчен или баластров слой и се подава нужното количество вода. Намокрянето се ускорява, ако се изградят пясъчни дренажи.

При пробиване на сондажите за почвени пилоти най-горният слой на основата се малко разуплътнява, което може да се отстрани чрез допълнително повърхностно уплътняване с тежка трамбовка.

По втория начин за пробиване на отворите се правят сондажи с малък диаметър - до 100 mm, в които се пускат линейни заряди – кръгли тротилови пресовки с цилиндрична празнина по средата, които се нанизват на детониращ шнур (фиг. 4.8.). Най-горните 2-3 m от сондажа се запълват с пясък. Теглото на пресовките е 50-100 g и са разположени на 15-20 cm една от друга. След експлозията сондажът се разширява до 40-50 cm, като около него се уплътнява зона до 1,0 m.



Фиг. 4.8. Линеен заряд от тротилови пресовки, нанизани на детониращ шнур, който се спуска в сондаж

Този начин на приготвяне на сондажите изглежда прост, но е съпроводен с някои затруднения. При пробиване на сондажите с промивка вследствие на неравномерното навлажняване на почвата в дълбочина се получават крушовидни разширения и затваряне на сондажа след дълбочина 5-6 m. Това налага да се използва сухо шнеково или ядково сондиране, което намалява производителността. Освен това от извършени у нас опити се установява, че уплътнителният ефект е до 1 m, но $\rho_d \geq 1,55 \text{ g/cm}^3$ е до 30-40 cm зад ствола на сондажа. Освен това уплътнената зона е доста напукана и това може да е причина за допълнителни слягания и даже пропадания, както твърдят някои руски автори. Поради всичко това вариантът с взривно пробиване на сондажите се нуждае от допълнителна изследователска работа преди да се пристъпи към приложения.

За укрепване на основата под съществуващи сгради е предложен метод с хидравлични уплътнители (Литвинов, 1977). При този метод се прокарат сондажи с диаметър 15-20 cm, в които се спускат сгънати дебелостенни гумени балони. В тях се нагнетява вода с налягане до 2,0 МРа, вследствие на което отворът се разширява. Авторите на метода предлагат отворът да се запълва с уплътнена почва или с постен бетон. Това може да се прави и с пластична циментопочвена смес, която не се нуждае от уплътняване, което би улеснило приложението на метода.

Циментопочвени пилоти с дължина 15-16 m и $d=0,55 \text{ m}$, приготвени със сонда БС-1М са изпитвани в Русия при льосова основа II тип. При количество на цимента 15%, граничният разрушителен товар е достигал до 100 тона.