

8. ДЪЛБОЧИННО ВИБРАЦИОННО ПОДОБРЯВАНЕ

1. Видове методи

Методите за дълбочинно вибрационно подобряване се разделят на две групи:

- *вибрационно уплътняване;*
- *вибрационно заместване.*

Вибрационното уплътняване се използва от 1936 г. след изобретяване на дълбочинния вибратор. Състои се в забиване в почвата на вибратора, който предава в нея мощни вибрационни импулси. Ефективно е за уплътняване на несвързани почви с ниско съдържание на прахова и глинеста фракция (по-малко от 10 –15%).

Вибрационното заместване е разработено след 1956 г. и се състои в прокарване с вибратор на сондажен отвор и запълването му на интервали с баластра или трошен камък с няколкократно повдигане и спускане на вибратора. При това грубозърнестият материал се уплътнява и набива в околната почва, като се създават колони с много по-голям диаметър, в сравнение с този на първоначалния отвор. За разлика от първия метод, вибрационното заместване е приложимо при по-широка гама почви: втечняващи се пясъци, неконсолидирани глинести почви, насипи, шламове в утайници и др.

Разглежданите методи представляват значителен интерес за България, тъй като на нейна територия са разпространени втечняващи се пясъци, слаби водонаситени почви и утайници, в които са складирани големи количества шлам, пепел и други материали.

Втечняващите се несвързани почви заемат значителни площи край Черно море (пясъчните плажове и косите, които отделят лиманите и лагуните от морето), по ниските тераси на р. Дунав и на другите големи реки във вътрешността на страната. Върху тези почви се извършва разнообразно строителство. Те са представени от различни по състав пясъци и дребни чакъли, предимно с холоценска възраст.

През последните десетилетия на много строителни площадки в крайдунавските низини, в Девненската долина и в други райони бяха изградени десетки милиони (около 30 млн. m³) намиви. Значителна площ заемат и утайниците на ТЕЦ и на различни промишлени предприятия, в които се съхраняват несвързан материал, характеризиращ се предимно с пясъчна и прахова зърнометрия.

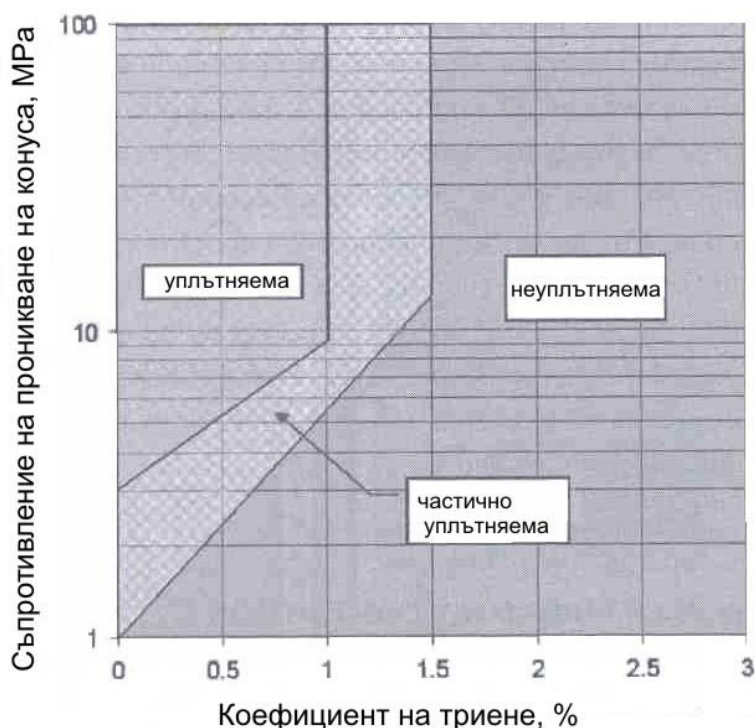
Досега у нас рядко са използвани методи за подобряване на втечняващите се несвързани почви. За отстраняване на опасността от втечняване на пясъците под каналите за охлаждане на V и VI блокове на АЕЦ “Козлодуй”, прокарани през най-ниската дунавска тераса, са изградени колони от уплътнена баластра.

Слабите водонаситени глини също имат значително разпространение, описано в гл. 5. Към тях се отнася и водонаситения льос, при който в Русия успешно е прилагано вибрационното уплътняване.

2. Дълбочинно виброуплътняване

Механизмът на уплътняване на зърнести почви чрез вибриране се свежда до следното. За сметка на кинетичната енергия на вибратора, частиците разположени в зоната на неговото действие се привеждат в състояние на колебания. Настъпва тяхното пренареждане в по-плътна структура, благодарение на ефекта на втечняване, характеризиращ се с това, че в момента на действие на вибрациите практически се загубва вътрешното триене между частиците. Ъгълът на вътрешно триене на пясък в състояние на вибрации може да се намали с 30° . Вследствие на това пясъчната почва преминава в течно състояние и под действие на гравитачните сили се утаява в по-плътна маса. Качеството на уплътняването зависи от много фактори, като едни от главните са вида на почвата, степента на еднородност на изграждащите я частици и структурните връзки между тях.

Най-подходящи за дълбочинно вибрационно уплътняване са зърнестите почви, които не съдържат голямо количество прахови и глинести частици (по-малко от 10 – 15 %). Използването на този критерии предполага изследване на зърнометричния състав на целия уплътняван масив, което е трудно при уплътняване на големи площи. Поради това се прибегва до използване на пенетрационните методи и най-вече на СРТ (фиг.8.1.)



Фиг. 8.1. Класификация на почвите по податливост на дълбочинно вибрационно уплътняване на базата на данни от СРТ (Massarash and Fellenius, 2005)

Степента на нееднородност на несвързаната почва влияе значително върху ефекта от уплътняването. Относителното преместване на частиците, намиращи се в зоната на действие на вибратора, настъпва толкова по-бързо, колкото по-голяма е разликата в масата на отделните частици. Поради това най-добре се уплътняват несвързаните почви, съставени от различни по големина частици.

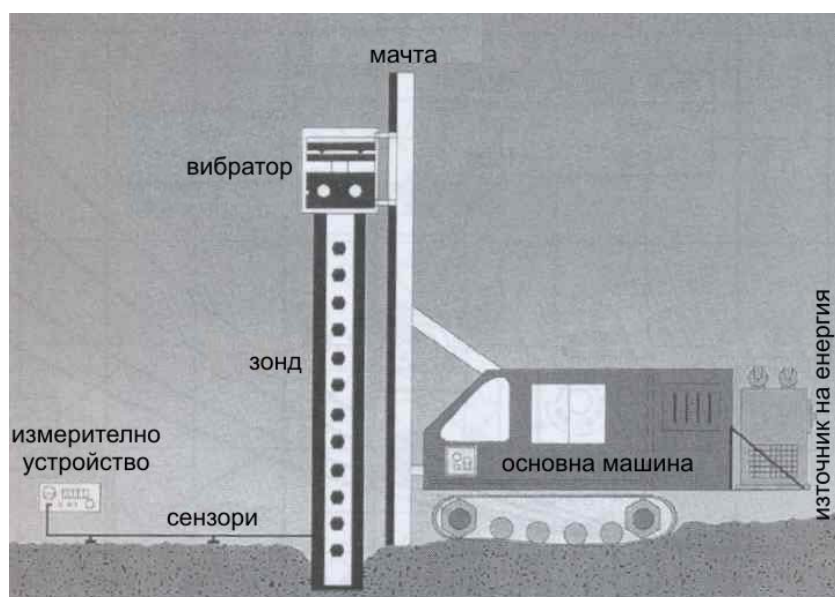
Основните елементи на съвременните устройства за дълбочинно виброуплътняване са вибратора, закачен за уплътняващ зонд, свързани с мачтата на верижна машина или със стрелата на кран.

Модерните вибратори са хидравлично задвижвани и могат да генерират центробежна сила до 4000 kN (400 тона), като максималната амплитуда на трептенията може да надхвърли 30 mm.

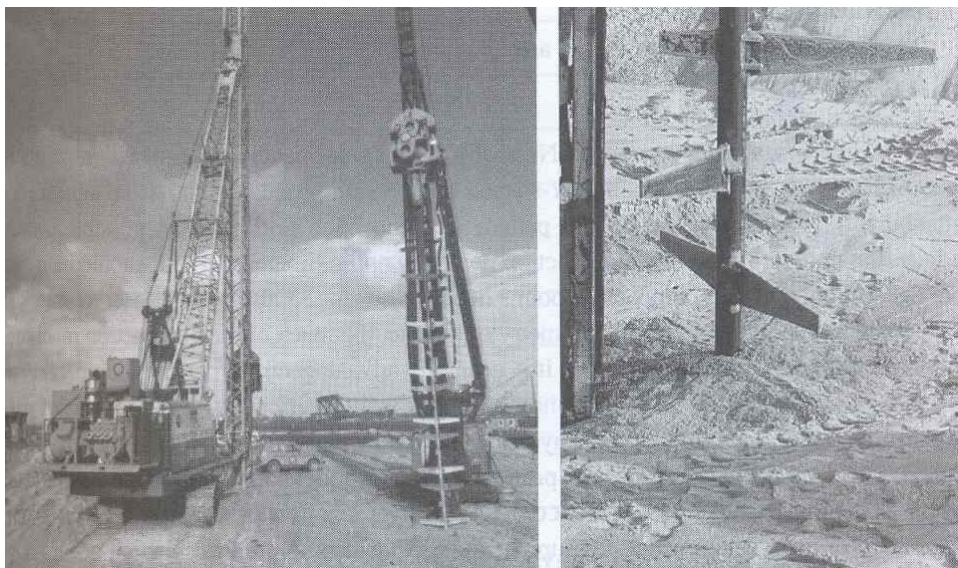
Зондът се забива в почвата с помощта на вибратора, поставен в неговия горен край. Той има различен вид - от обикновени пилоти и тръби, снабдени с мощен вибратор, до изработени специално за целта устройства (Massarash and Fellenius, 2005).

Едно от тези устройства е показано на фиг. 8.2. Неговият зонд се отличава с кръглите отвори, разположени по ствола му. Отворите са направени, за да се намали теглото на зонда и за да се получи по-добър контакт между него и почвата. Намалявайки теглото и коравината на зонда се постига увеличаване на предаваната енергия в почвата. По-лекият зонд придобива по-голяма амплитуда на трептене по време на вибрирането и по този начин предизвиква по-високо уплътняване

Друго устройство е т.н. Vibro Wing, който се състои от 15 метров стоманен прът, по който са разположени радиални перки с дължина 0,8 – 1,0 m на 0,5 m една от друга. Вибраторът се намира в горния край на пръта (фиг. 8.3.).



Фиг. 8.2. Общ вид на машина за дълбочинно вибрационно уплътняване (Massarash and Fellenius, 2005).



Фиг. 8.3. Общ изглед на Vibro Wing уредба и на уплътняващия зонд (в дясно)

Успехът на дълбочинното виброуплътняване се определя от следните фактори:

- разстояние между точките на уплътняване;
- честота на вибрациите;
- начин на проникване и извличане на вибратора;
- продължителност на уплътняването.

Разстоянието между точките на уплътняване е обикновено от 1,5 до 5 m. То зависи от физикомеханичните показатели на почвата, от степента на желаното уплътняване, от капацитета на вибратора и вида на зонда. Точките на уплътняване в зависимост от зонда се разполагат в триъгълна или правоъгълна мрежи. За предпочитане е уплътняването да се прави с две преминавания, при което се постига по голяма хомогенност по отношение на плътността.

Честотите на вибриране са нееднакви през различните фази на уплътнителния процес. При забиване и изваждане на зонда е желателно страничното триене по неговата повърхност да бъде възможно най-малко. Това се постига като се използва висока честота >30 Hz. Обратно, при самото уплътняване, когато целта е да се получи резонанс между трептенията на вибратора, на зонда и на почвата, честотата на вибрациите е 15-30 Hz.

Процесът на дълбочинно виброуплътняване е най-ефективен, когато забиването на зонда до желаната дълбочина се прави с голяма скорост при висока честота на вибрациите, последвано от уплътняването на почвата с резонансни честоти и накрая, при изтегляне на вибратора отново с висока вибрационна честота. Уплътняването е малко ефективно ако целият уплътнителен процес се провежда с еднаква честота. Например, ако извличането на зонда се прави с резонансна честота, с която се извършва уплътняването, ще трябва да се прилага по-голяма

сила и има опасност почвата да се разуплътни.

Както беше посочено по-горе, уплътняването е по-ефективно ако се прави с две преминавания. При второто преминаване зондът се забива в диагоналните точки на уплътнителната мрежа. Провеждането на мониторинг със запис на скоростите на забиване и изваждане на вибратора, на честотата на вибрациите и амплитудата на трептенията помага уплътнителният процес да се провежда по най-добрия начин.

Продължителността на уплътняването в дадена точка е много важен фактор, който силно зависи от състоянието на почвата и параметрите на зонда и вибратора. Тя не е еднаква при първото и второто преминаване. При голям обем на уплътнителните работи е препоръчително да се организира опитен участък, на който да се определи необходимото време за уплътняване.

3. Дълбочинно виброзаместване

Методът има разновидности, които се различават според начина на забиване на зонда (с подаване на водна струя или без нея, с или без налягане при забиването на зонда) и мястото на уплътняване (на сушата или под вода). Общото при всички разновидности е прокарването с дълбочинния вибратор на отвор, насипване в отвора на грубозърнест материал (много често трошен камък) и уплътняването му с вибратора, при което се получава каменна колона. Методът е известен още като виброфлотация. Методът е приложим при широка гама слаби, неконсолидирани почви.

Апаратурата, с която се извършва дълбочинното виброзаместване с *подаване на водна струя* съдържа: тръбен зонд, в долния край на който е поставен вибратор, удължения (кухи метални тръби, посредством които се достига желаната дълбочина), кран, източник на енергия за вибратора, помпа за вода и булдозер за избутване на запълващия материал в сондажа (фиг.8.4.). Вибраторът и удължителят са свързани помежду си с гъвкава връзка, която не позволява вибрациите да се предават нагоре по тръбите. В долния край на зонда има отвор за подаване на водна струя под налягане.

Зондът има обща дължина около 3,5-5,0 m, а диаметъра му е от 35 до 45 cm. Теглото на дълбочинните вибратори е от 15 до 40 kN, а моторите, които ги задвижват имат мощност от 50 до 150 kW, която понякога достига и до 200 kW. В крайника на вибратора ускорението може да достигне до 50 g.

Процесът на изграждане на каменни колони с подаване на вода от зонда включва 4 основни фази:

I - Вибраторът е закачен свободно на крана. Устройството се пуска в ход, като вибраторът се поставя на съответния режим, а през крайника започва да се изхвърля водна струя под налягане.



(а)



(б)

Фиг. 8.4. Общ вид на уредба за виброзаместване.

Вижда се кранът, закаченият за него зонд - фиг.8.4.(а), вибраторът и двигателят, който го привежда в действие, булдозерът, насипващ грубозърнестия материал, маркучите и връзките. На фиг. 8.4 (б) е показана първата работна фаза – вибраторът е включен и започва изхвърляне на вода под налягане.

II - Устройството прониква в почвата под действие на собственото си тегло, на вибрацията и на водната струя. В края на тази фаза около зонда се оформя пръстеновиден отвор, зад който се създава уплътнен почвен слой.

III - След достигане на желаната дълбочина, подаването на вода се намалява и вместо от накрайника то се извършва през странични отвори, като излизащата от тях вода се движи в кръг и нагоре. По този начин се поддържа открито пространството между зонда и стените на отвора, така че запълващият материал, насипван от повърхността, достига до върха на зонда. Движението на водата в кръг продължава докато той се повдига и се спуска.

IV - Запълващият материал се пуска отгоре в пръстеновидното пространство и се набива в отвора. С повдигане на вибратора се пуска друг материал, който се уплътнява по същия начин. Вследствие на тези операции, отворът се запълва с уплътнен материал, а почвата около отвора също се уплътнява.

Пробиването на отворите без подаване на вода от зонда се прави по два начина: при първия зондът се забива под действие на неговата тежест и на вибрациите, а при втория се използва специално конструирана машина с която се подава налягане надолу.

Трошеният камък се подава до върха на зонда с отделна тръба с помощта на сгъстен въздух.

Отделните операции за изграждане на каменна колона без подаване на вода са следните:

- Под тежестта на напълнената с трошен камък тръба, на вибрациите и при включен компресор за сгъстен въздух, вибраторът прониква в почвата.
- След като се достигне до проектната дълбочина, вибраторът се изтегля с 1 – 2 метра и сгъстеният въздух в тръбата принуждава трошения камък да излезе от нея и да запълни образуваното празно пространство.
- След това вибраторът се спуска в запълнената част от отвора, уплътнявайки трошения камък и изтласквайки го в околната почва.

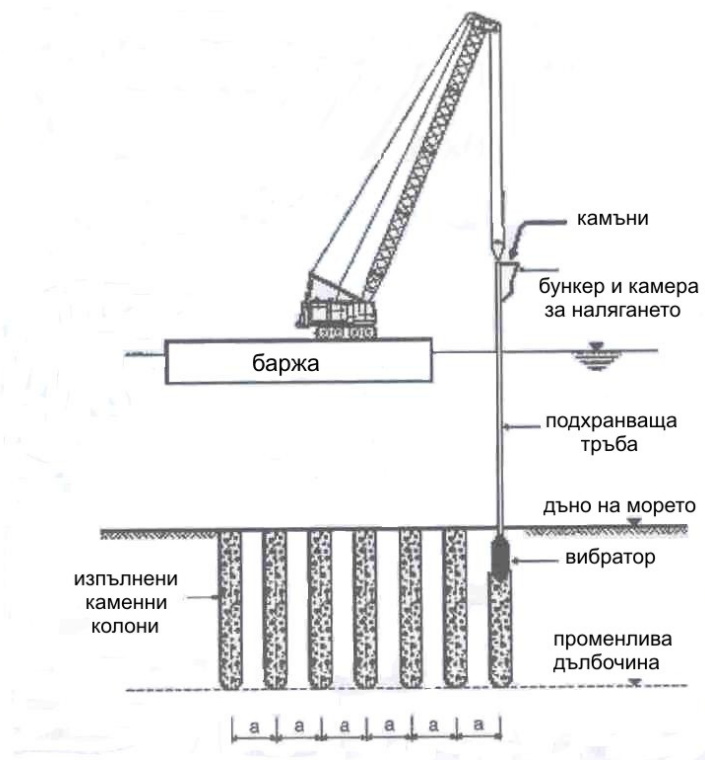
Изграждането на каменната колона включва многократно повдигане и спускане на вибратора, докато се изпразни тръбата с трошения камък, след което в нея се подава нова порция от последния. Това продължава докато каменната колона се изгради до повърхността.

Изграждането на каменни колони под вода се прави със зонд, окачен на стрелата на багер. За работна платформа се използват понтон или баржа, на които е поставен багера (фиг. 8.5.). Позиционирането се прави с прецизна GPS система. Проникването на зонда до желаната дълбочина под морското дъно става с помощта на комбинирано действие на вибрации и сгъстен въздух.

4. Приложение на методите за дълбочинно виброуплътняване и виброзаместване

Разглежданите методи са получили голямо развитие, както в техническо, така и в научно отношение. Приложени са на стотици обекти по света при фундиране на различни градски, промишлени, пристанищни и инфраструктурни съоръжения. За тяхното използване са разработени нормативни документи в Германия, Великобритания, САЩ и др. Европейският съюз е стандартизирал тези методи с European Standard WG12, 2003 под надслов “Ground treatment by deep vibration”.

През последните десетилетия дълбочинните вибрационни методи бяха използвани широко в Малайзия, Сингапур, Хонг Конг, Индия и други държави на далечния изток при усвояване на терени от морето, при пристанищно строителство, при изграждане на големи летища, железопътни линии, химични предприятия и прокарване на тръбопроводи по морското дъно, като общият обем на подобрените почви надхвърля 60 млн. m³ (Raju and Sonderman, 2005).



Фиг. 8.5. Схема за изграждане на каменни колони под морското дъно (Raju and Sonderman, 2005)

При това строителство често се използват пясъчни намиви, при които подводно насипаната почва остава много рохкава, с плътност до 30 – 40 % от изискваната.

Задачата на уплътняването е била различна – от постигане на плътности необходими за обратни насипи до плътност и носеща способност изисквани при изграждане на тежки сгради. От приложенията са установени следните преимущества на разглежданите методи:

- Възможност за подобряване на целия ред от зърнести почви – от чакълести до фини пясъци;
- Ефикасност на приложенията както на сушата, така в крайбрежната зона и навътре в морето;
- Приложимост до голяма дълбочина – до 65 m;
- Възможност да се уплътняват отделни слоеве от почвата;
- Уплътнителните работи не засягат съседни съоръжения, когато са отдалечени на повече от 10 m;
- Много голяма производителност и икономическа ефективност.

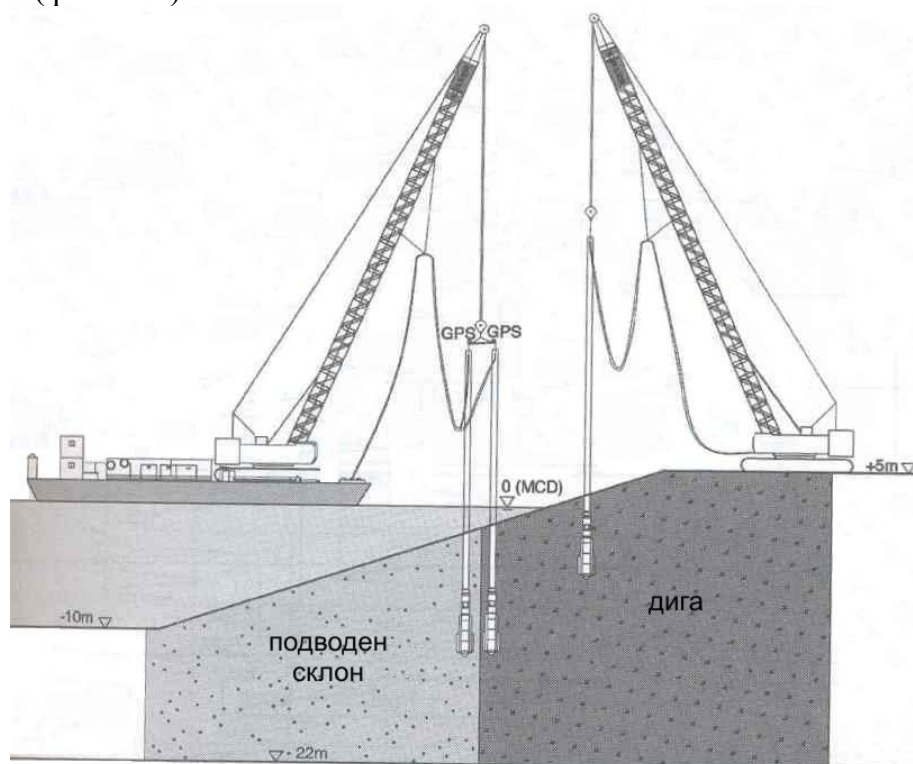
В цитирания труд на Raju and Sonderman (2005) са описани няколко примера от изброените по-горе приложения, от които тук се посочва случая с разширяването за сметка на морето на о-в Теконг в Сингапур.

През последните 30 години Сингапур е нараснал по площ от 580 на 680 km². Ограниченият по площ град продължава да разширява своята

територия за жилищно, промишлено, търговско и рекреационно строителство чрез усвояване на терени от морето посредством изграждане на пясъчни намети. Почвата в тях е в рохкаво състояние и се нуждае от уплътняване, като дълбочинните вибрационни методи се оказват най-подходящи за тази цел. С тяхна помощ е усвоена от морето 1,3 млн. m² площ.

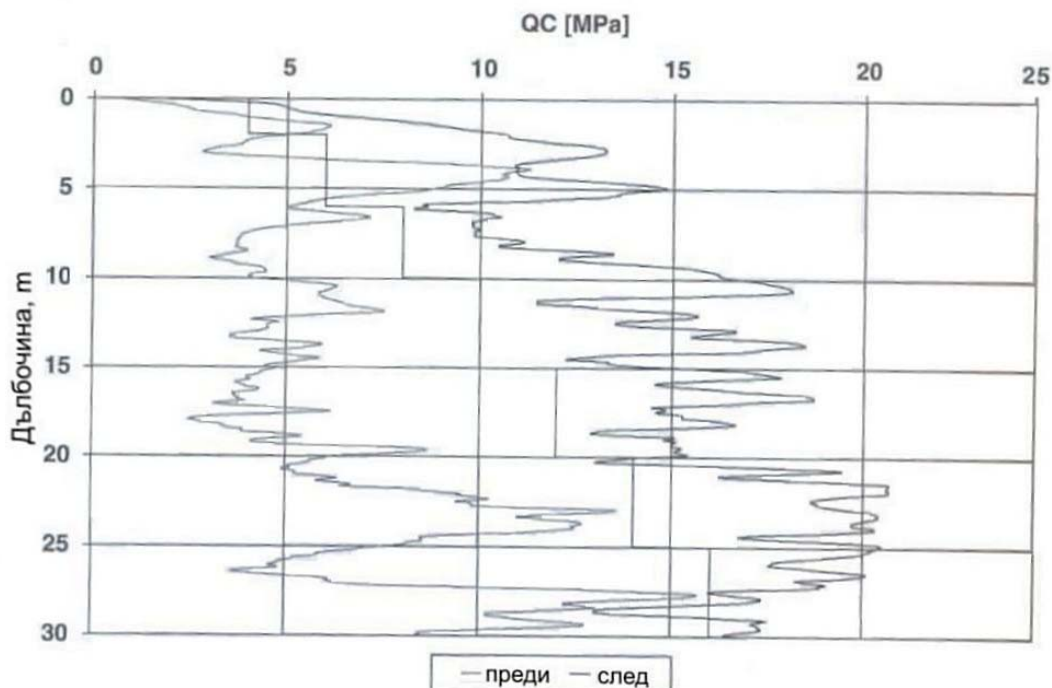
Приложено е виброуплътняване на сушата за ограничителната дига и под вода за изкуствено създадения морски бряг (фиг. 8.6.). Използувани са 4 уредби на сушата и една в морето, поставена на приспособена за целта баржа. Дълбочината на уплътняване е до 43 m.

В резултат на уплътняването е увеличена плътността на почвата, в резултат на което е нараснала носещата ѝ способност, оценена със СРТ тестове (фиг. 8.7.).



Фиг. 8.6. Типичен разрез през периферната дига на о-в Теконг, показващ уплътняването от сушата и под вода (Raju and Sonderman, 2005).

За да се оцени приложимостта на дълбочинните вибрационни методи у нас беше направен анализ на зърнометричния състав на десетки естествени и техногенни почви (Ангелова и Евстатиев, 1988). От естествените почви бяха анализирани пясъците от косата, която отделя Варненския лиман от морето и алувиалните наслаги в крайдунавските низини. Бе установено, че в пясъчната коса преобладават неуплътнените средно- и дребнозърнести пясъци и в тях използването на вибрационните методи ще бъде много ефективно.



Фиг. 8.7. Резултати от СРТ тестовете, преди и след виброуплътняването (Raju and Sonderman, 2005).

В Крайдунавските низини са разпространени разнородни пясъци (от силно глинести до чакълести) и чакъли. Приложимостта на разглежданите методи е необходимо да се доказва с пенетрационни изпитвания.

Намивите на строителните площадки на ЗМК-Никопол, СХК-Свищов, СКТМ-Русе, ЛПК-Силистра, ТЕЦ-Варна съдържат предимно среднозърнести и чакълести пясъци и рядко - дребнозърнести пясъци. Вибрационните методи ще бъдат ефективни за частта от насипите, която е под водното ниво. Несвързаните техногенни почви (сгуропепелни смеси) от утайниците на термо-електроцентралите "Русе", "Първа комсомолска", "Марица Изток - 2", "Димо Дичев", "Бобов дол" и "Варна" се характеризират с непостоянство в зърнометричния състав, който се изменя от дребен чакъл до дребен прахов пясък.

Сравнението на зърнометричния състав на описаните почви с изискванията за пригодност (Mitchell, 1982) показва, че най-подходящи за дълбочинно виброуплътняване са несвързаните почви от пясъчните намиви и от пясъчните коси, отделящи лиманите и лагуните от морето. Този метод може да се прилага и при несвързани сгуропепелни смеси от ТЕЦ и алувиални материали от ниските тераси на р. Дунав и другите големи реки във вътрешността на страната, като се отчита непостоянството в зърнометричния им състав.