

УДК 624.151:550.834.015.2

## **УПРОЧНЕНИЕ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ СТОЛБАМИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

**Клосиньски Болеслав, Гаевска Беата,**

*Научно-исследовательский институт мостов и дорог,*

*г. Варшава, Польша*

Изложены различные виды упрочнения слабых грунтов при помощи столбов в дорожном строительстве, особенности их проектирования и устройства.

In article various types of hardening weak soils by means of columns in road construction are stated, features of their design and arrangement are explained.

Упрочнение или улучшение основания является обычной ежедневной практикой в дорожном строительстве. Все чаще дороги строят на мало пригодных для застройки территориях. В земляных сооружениях используют местные грунты или отходы производства. В Польше внедрено много новых технологий, создающих богатые возможности для упрочнения и улучшения оснований.

Различают методы поверхностного упрочнения, используемые непосредственно на поверхности дорог, и глубинного – даже до 20-30 м. Различные вопросы, касающиеся упрочнения оснований и улучшения свойств грунтов, отражены в «Рекомендациях по упрочнению оснований в дорожном строительстве» [26] и во многих монографиях [например, 18]. В статье рассмотрены различные виды столбов для упрочнения оснований насыпей.

## **1. Объем и цели упрочнения основания дороги**

Цель упрочнения зависит от строительных задач и грунтовых условий. К ним относятся: увеличение несущей способности и снижение осадок сооружений, исключение потери устойчивости (при сдвиге или оползнях), обеспечение откосов выемок склонов и защита близлежащих конструкций, предотвращение разжижения грунта и стабилизация структуры грунтов основания.

Основание должно обеспечить требуемый запас прочности и устойчивости в течение всего срока службы сооружения. В соответствии со стандартом PN-S-02205: 1998 [14] и Правилами MTiGM [19], расчетная осадка поверхности насыпи (сумма осадок ее тела, оснований упрочненного и природного) после возведения не должна превышать 10 см. Последующая эксплуатационная осадка не должна вызывать нарушения профиля поверхности, особенно у объектов с мало податливыми фундаментами, у которых осадки насыпи и объекта должны быть идентичными. При несоблюдении этих требований следует придать иную форму сооружению или изменить свойства основания. Одним из наиболее часто используемых способов лечения является создание упрочняющих столбов.

Необходимость упрочнения основания возводимого земляного сооружения возникает тогда, когда в нем имеются грунты с малой или недостаточной несущей способностью:

- малопрочные ( $c_u$  до 50 кПа без дренирования и  $CBR \leq 3$ ) и сильносжимаемые (модуль деформации до 5 МПа), прежде всего органические и насыпные (антропогенные);
- с неустойчивой структурой (текучие, просадочные – лессовые, подверженные суффозии, склонные к разжижению и т.д.);
- на территориях оползневых, карстовых и подверженным деформациям при горных работах.

Описание методов испытаний слабых грунтов при их уплотнении содержится в Руководстве [26]. Испытание должно выполняться в соответствии с Инструкцией по испытаниям грунтовых оснований дорожных и мостовых сооружений [8] и Еврокодом EC7-2. Выбор методов упрочнения и основ проектирования отражен в [3].

## **2. Глубинное упрочнение основания столбами**

Среди преимуществ такого упрочнения основания можно выделить: адаптацию длин столбов к мощности слоев слабых грунтов,

причем эти их длины меньше чем у свай, большую скорость изготовления, малый шум во время работ (за исключением выштамповки), опрессовку грунта вокруг столбов.

Имеется много групп методов глубинного упрочнения и специальных технологий. Они подробно рассмотрены в Руководстве [26] и публикациях [1,2,4,5, 7, 10, 18, 23, 24], где содержатся общие указания по выбору типа столбов для различных грунтов. Следует учитывать, что целесообразность и эффективность использования каждого метода зависят не только от типа грунта, но и от его свойств, которые могут изменяться в очень широком диапазоне.

В этой статье представлены приемы устройства в слабых слоях столбов, которые располагают по регулярной сетке (квадрат, треугольник и др.). Для столбов используют щебень и гравий или их выполняют методом динамической замены слабых грунтов на известь или цемент (столбы DSM), на цементный раствор или бетон низкого класса (столбы СМС), либо по технологии струйной цементации. В результате создается слой композитного материала с повышенными параметрами прочности.

Следует отличать столбы упрочнения от свай с высокими осевой прочностью и жесткостью на изгиб при армировании по всей длине или на ее части. Осадки свай при вдавливании невелики. Столбы упрочнения основания являются своего рода армированием слабого грунта (рис. 1) и могут быть податливыми, частично податливыми или жесткими. Принцип их работы отличается от фундаментов на сваях, которые передают 100 % нагрузки на несущее основание; грунт между сваями не должен садиться (или даже привести к их погружению от отрицательного трения).

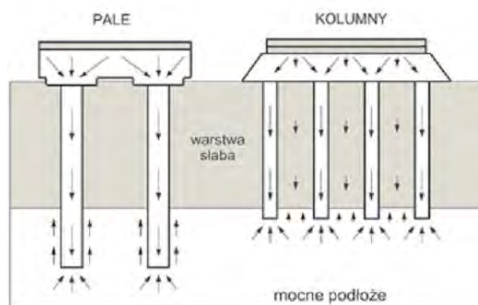


Рис. 1. Основы выполнения свай и колонн, упрочняющих основание

В случае столбов осадка земной поверхности, например, насыпи, вызывает осадку одновременно со столбами. В столбах возникают силы, спрессовывающие материал в их головах, а на их боковых поверхностях сдвигающие напряжения. В верхней части слабого слоя напряжения направлены вниз и догружают столб (через негативное трение), а в нижней части и в более глубоком несущем слое напряжения сжатия направлены вверх и вместе с отпором основания «поддерживают» столб.

Сущность изготовления столбов – это увеличение прочности армируемого ими слабого слоя. В некоторых методах выполнения столбов улучшаются также свойства окружающего грунта - за счет распора в стороны, облегчения дренажа излишков воды или под действием эффекта стабилизации вяжущим (известь, цемент). Столбы, в отличие от свай, не требуют большого заглубления в несущий грунт - как правило, от 0,5 до 1 м, т. е. чтобы обеспечить хорошее заземление в прочном основании. Во время передачи нагрузки нижний отрезок столба вдавливаются в несущее основание. В этой фазе все столбы и вся насыпь достигают значительной осадки, лишь бы это не было во вред. Со временем наступает консолидация основания и слабого слоя, а осадки быстро стабилизируются. В результате упрочнения основания осадки после выполнения конструктивных слоев у поверхности становятся незначительными и уже оказываются в допустимых границах.

Стоит отметить, что у столбов не стоит назначать размеры как у свай, заглубляя в прочное основание. Не следует также их загружать пробными нагрузками как сваи – до 150% от расчетной нагрузки. Выполнять эти столбы можно одновременно со сваями. Если определяют размеры столбов согласно норм на сваи PN-B-02482-1983, то должны выполняться требования, касающиеся свай, т.е. размеров, прочности материалов, заглубления в несущий слой грунта и т.п., а также контроля с помощью пробных испытаний.

Несущая способность основания и столбов при передаче боковых сил, а особенно изгибающих моментов невелика, поэтому в таких случаях упрочнение основания столбами может быть мало эффективным. Тонкие столбы «жесткие», из материалов очень прочных (например, бетонные, вибробетонные, инъекционные), после излома практически теряют способность восприятия боковых сил, а также в большой степени горизонтальных.

Разные виды столбов отличаются жесткостью (или гибкостью). Наиболее сильно податливые столбы несвязные (гравийнокаменные, песчаные в оболочках из геосинтетики, вытрамбовываемые ударами), жесткие – формируемые методами глубинного перемешивания DSM или вибробетонные, а наиболее жесткие (приближенные к сваям) – буромесительные или инъекционные. Жесткость столбов зависит более от способа формирования, а также от примененных материалов, например, от их прочности. Более мощные и довольно с однородными свойствами столбы формируются из контролируемого раствора или бетона. Более податливые столбы из смеси связующего с грунтом – менее однородны, с локальными зонами более слабыми с не вполне правильными параметрами. Основные данные о разных типах столбов приведены в таблице

<b>Вид столбов</b>	<b>Типовые диаметры, см</b>	<b>Типовая /максим. глубина, м</b>	<b>Типовая/максим. несущая способность <math>N_s</math>, кН</b>
Гравийно-каменные	40–80	8/20	250–500
Вибробетонные	28–42	12–25	300–700
Песчаные в геотекстильных оболочках	60–150	10–25	–
Ударноштампованные (замена динамическая)	30–60	10–25	400–750
Инъекционные (струйная цементация)	200	3/6	1500–2000
Глубинное перемешивание сухое и мокрое	60–150 (240)	12/25	слабые 300–500 кПа; прочные 1–10 МПа
Формируемые микро-взрывами	60–120	10/30	–

Упрочненное основание столбами является своеобразным композитом, параметры которого определяют как осредненные значения с учетом перекрытия полей составных элементов.

Для обеспечения равномерного опирания насыпи на относительно жесткие столбы и передачи нагрузки на их головы выполняют над ними слой из уплотненного механически щебня, обычно армируемого геосинтетиками (геотекстиль, георешетка). В данном случае имеем дело с так называемым матрацным усилением. Для этих матрацев следует использовать геосинтетики жесткие с низкой ползучестью, чтобы избежать чрезмерных и неравномерных деформаций опирающихся земляных сооружений.

Контролем качества работ во время выполнения столбов является постоянный мониторинг таких параметров, как длина столба, продолжительность процесса и количество используемого материала. При дорогих работах рекомендуется выполнение тестов на пробных насыпях, особенно измерения осадки во времени и прочности грунта в основании.

Хорошим примером является строительство Национального стадиона в Варшаве [23], где проекту реконструкции предшествовали технологические пробы и испытания несущей способности свай и столбов. В группе из четырех опытных гравийно-бетонных столбов длиной по 7 м, выполненных по технологии виброзамены, при нагрузке до 2250 кН осадка составила 6 мм. На основании полученных результатов определена жесткость при упрочнении  $80\,000\text{ кН/м}^3$ , а без усиления – около  $18\,500\text{ кН/м}^3$ . Несущая способность упрочненного столбами основания оценена в 560 кПа. Также выполнено испытание инъекционного столба  $\varnothing 1000$  мм длиной 8 м. При усилии 3000 кН осадка составила 9,9 мм. Жесткость столба при ожидаемом загрузении в конструкции оценена в  $400\,000\text{ кН/м}^3$ , т.е. приблизительно как у буровой сваи среднего диаметра. Контрольная проверка параметров позволила рационально запроектировать заложение объектов стадиона на упрочненном основании.

### **3. Выбранные методы выполнения столбов**

#### **3.1. Методы вибрационного формирования столбов**

Методы вибрационные принадлежат к наиболее часто используемым. Они заключаются в уплотнении грунта или формированию столбов в грунте. Существуют различные типы методов [17, 26]. Ниже описан вибрационный способ формирования столбов.

**3.1.1. Виброзамена.** Метод основан на образовании в слабом грунте столбов каменных или из гравия, армирующих

и дренирующих грунт. Такие столбы повышают его несущую способность, уменьшают и ускоряют осадки. Их применяют в основном в мягкопластичных суглинках и глинах, в слоях торфа, ила или плавунцов в несколько метров. Метод полезен при упрочнении неконтолируемых насыпей, в том числе из строительного мусора, шлака, зол уноса и др.

Следует заметить, что колебания от вибратора могут привести к разжижению связных грунтов с стиксотропными свойствами и высокой структурной чувствительностью.

В методе выброзамены используют вибратор глубинный в трубе при соосной подаче щебня на дно скважины. Во избежание разрыхления грунта его заглубляют без нагнетания воды, а при извлечении может закачиваться сжатый воздух. При формировании столба щебень вдавливаются в окружающий грунт, что изменяет его механические свойства. Сильная водопроницаемость столба способствует вытеснению из грунта воды и снижению порового давления. Создание в основании относительно жестких столбов снижает его сжимаемость и осадки, а также ускоряет консолидацию.

Гравийные столбы ведут себя как податливые колонны. При соосном сжатии и поперечном расширении - распоре возникает отпор окружающего слабого грунта, который препятствует чрезмерной деформации. В чрезвычайно слабых грунтах (например, сильно обводненных торфах) боковой отпор слишком мал, поэтому подаваемый материал расплзается и смешивается со слабым грунтом без обеспечения осевой жесткости столба.

Типичные нагрузки, воспринимаемые столбами из гравия колеблются от 250 до 300 кН. При длительном нагружении наступает консолидация связного грунта и перераспределение напряжений, сопровождаясь некоторыми дополнительными осадками. В целях ускорения мобилизации сопротивления грунта и ограничения последующих осадок применяется обычно предварительное периодическое нагружение упрочняемого основания грунтовой пригрузкой.

Контрольные испытания гравийных столбов включают исследование зернового состава применяемого щебня и динамическое зондирование в теле столбов для подтверждения заложенной в проекте степени уплотнения и осадки. Иногда выполняют пробное нагружение столбов или основания, упрочненного группой столбов.

**3.1.2. Виброцементные и вибробетонные столбы.** Такие столбы выполняют из щебня с цементным связующим в очень слабых грунтах (торфы, илы) при помощи погружных вибраторов «шлюзовых» с трубой по центру для подачи материала в забой скважины. Диаметр столба зависит от сопротивления окружающего грунта и традиционно составляет около 60 см. Во время создания виброцементного столба в прессуемый материал нагнетается цементный раствор. Столбы вибробетонные выполняют из прессуемого бетона «трамбуемой» консистенции класса В10 и В25 или конструкционного В25. В процессе их формирования вибратор может многократно погружаться и извлекаться с целью раздвижки материала в стороны и увеличения диаметра.

### **3.2. Столбы из песка или наполнителя в оболочке из геотекстиля**

Столбы, создаваемые методом свай Franki при заполнении песком геотекстильного «рукава», использовались в стране уже в 90-х годах XX века. В последнее время этот тип столбов был усовершенствован. Их используют в экстремальных грунтовых условиях – в многометровых слоях очень слабых грунтов (торфов, болотных и мягкопластичных илов). Они являются альтернативой старым методом «втапливания» насыпей из минеральных грунтов в такие слабые основания. Разработанный в Германии метод базируется на формировании столбов Ø 800 мм в погружаемых и извлекаемых стальных обсадных трубах с закрываемыми внизу клапанами. Трубы диаметром до 1500 мм заглубляют тяжелыми сваебойными агрегатами с выемкой из них разработанного грунта. В заглубленную трубу погружают геотекстильный рукав большой прочности, тканый «по кругу» (без шва), который заполняют песком и извлекают трубу вибратором. Такие методы применены в при строительстве автомагистрали А2 и подробно описаны в [21]. Укреплены там очень слабые основания из обводненных грунтов органических на беспрецедентную глубину до 28 м с соблюдением рекреационных требований в отношении осадок дорожного полотна при контроле качества по разработанной системе мониторинга.

### **3.3. Глубинное перемешивание грунта**

Глубинное перемешивание (Deep Soil Mixing – DSM) предусматривает устройство (рис. 2) в основании столбов (одиночных, в виде стен, ростверков или блоков) из местных грунтов, в смеси со связу-



ющим, подаваемым насухо (сухое) или мокрым (влажное). В сухом методе обычно применяют цемент или смесь цемента с известью, в мокром – различные цементы с добавками металлургических шлаков или золы уноса. Метод DSM используют для упрочнения толстых слоев (даже более 20 м) слабых связных грунтов, илов и торфов, если их трудно заменить или укрепить другими методами.



Рис. 2. Выполнение столбов по технологии DSM двойным смесителем, исполнитель: ООО Куллер Польша

Сущность процесса заключается в рыхлении грунта и перемешивании (или частичной замене) со связующим механически или гидравлически (т.е. с участием струйной инъекции в мокром способе). Диаметр столбов DSM, выполняемых сухим способом, составляет от 0,6 до 1 м (как правило, 0,6 и 0,8 м), а мокрым способом – от 0,4 до 2,4 м (обычно от 0,8 до 1,5 м); длина – обычно до 10 м (максимально до 20 м). Столбы обычно размещают по правильной сетке и рядами (соприкасаемые или пересекаемые). Различают столбы тонкие «минисваи» диаметром до 200 мм из слабого

грунта, смешиваемого шнековым буром с цементно-песчаными смесями. Их длины составляют от 33 до 10–12 м, а число – от 1 до 2 на м<sup>2</sup>.

Столбы, выполняемые методом глубинного перемешивания грунта, могут нагружаться только через пару недель после их изготовления, что позволяет быстрее (например, по сравнению с консолидацией при помощи дрен) достигать пропускной способности дороги в сложных грунтовых условиях. Глубинное перемешивание, в зависимости от грунтовых условий, используется для упрочнения основания, увеличения его несущей способности и повышения прочности с уменьшением осадок под дорожными или железнодорожными насыпями, подъездами к мостам, стабилизации блоков грунта (обычно глубиной от 2 до 5 м), формирования противофильтрационных барьеров или предотвращения осыпания рыхлых песчаных грунтов.

Пригодность метода ограничена в грунтах с препятствиями, затрудняющими их перемешивание, или если имеются вредные химические вещества и т.п. Для ограничения количества потребного связующего в данном месте должны проводиться предварительные испытания пробных образцов смесей в лаборатории или выполняться пробные столбы на объекте. В грунте с большим содержанием органики следует проверить возможность получения необходимой прочности, проницаемости и долгосрочной стабильности.

При методе перемешивания насухо прочность на сжатие стабилизированного грунта возрастает от 10 до 40 раз, а его несущая способность составляет 100–150 кПа. При мокром методе перемешивания прочность на сжатие известково-цементных столбов достигает от 1 до 10 МПа, в зависимости от свойств грунта и количества используемого связующего. Очень большой прочности достигают столбы с использованием смеси цемента и гранулированного доменного шлака. Однако в органических грунтах их прочность значительно меньше. В свежий столб можно погружать арматурный каркас или стальной прокатный профиль.

При контроле свежесделанных столбов DSM отбирают пробы для лабораторных испытаний на сжатие. В некоторых случаях можно взять образцы после отверждения. После окончания работ иногда выполняют пробные испытания столбов нагрузкой.

Разные решения описаны в публикациях [22,24,25], а их выполнения и проектирования – в нормах т EN 14679:2005 [16].

### **3.4. Столбы буросмесительные**

При устройстве столбов упрочнения основания применяют механизмы для выполнения буросмесительных свай по системе без выемки грунта посредством бура, вытесняющего грунт в стороны. Столбы такие упрочняют основание, уплотняя рыхлые пески или «армируя» слабые связные и органические грунты. Столбы из бетона менее прочные в сравнении со сваями (обычно В10-В20) и не должны заглубляться в несущий грунт, когда достаточно только осадки его кровли.

В дорожном строительстве буросмесительные столбы обычно упрочняют и стабилизируют основания насыпей. Поэтому неправильно их называть сваями, что может вводить в заблуждение. Преимуществом буросмесительных столбов по сравнению с устраиваемыми виброзаменой или глубинным премешиванием является возможность их создания в очень слабых грунтах. Благодаря непрерывному процессу штамповки бетонной смеси, которая раздвигает слабый грунт и создает в нем уплотненный ствол, мала опасность «разрыхления» или возникновения слабых расслоенных столбов.

### **3.5. Струйная инъекция**

Струйная инъекции (jet grouting) [1.15] является методом упрочнения оснований и формирования в нем элементов из закачиваемого раствора и закрепляемого им грунта. Процесс создания столба заключается в нарушении структуры под большим напором раствора или воды и разрыхлении грунта или частичной его замены и перемешивания со связующим – чаще всего с цементным раствором. В результате струйной инъекции возникает грунтоцементный композит из цилиндрических элементов – столбов или плоских – стен. Из них можно создавать разные конструкции: блоки, частоколы, диафрагмы, панели, перекрытия и т. д. Струйную инъекцию используют и для укрепления слабого основания дорог [10, 11].

Этот метод пригоден во всех грунтах (минеральных и антропогенных), в выветрелых и даже в слабых скальных породах. В связных грунтах, особенно в органических, прочность возникшего материала мала (до 500 кПа). Диаметр столба обычно от 60 см до 3 м.

Основные параметры процесса: состав, давление, расход инъекционной смеси, скорость перемещения и оборотов монитора. При однорастворной инъекции [15] давление обычно 30–50 МПа, а расход 50–450 л/мин.

Инъекционные столбы армируют стальными элементами (стержнями, трубами, прокатом), погружаемыми во время или после струйной инъекции. Такие элементы также не должны рассматриваться в качестве свай. Международные рекомендации ограничивают прочность цементогрунта до 5 МПа и рекомендуют назначать коэффициенты надежности больше чем у обычного бетона.

Струйная инъекция сопровождается вытеканием к поверхности материала из смеси частиц грунта с раствором. Следует обратить внимание на то, как поступать с вынутым грунтом, временным хранением на стройке, возможностью утилизации и окончательным хранением в целях снижения вредного воздействия на окружающую среду.

### **3.6. Столбы вытрамбовываемые - замена динамическая**

Замена динамическая (Dynamic Replacement – DR) является разновидностью динамической консолидации [2, 4, 7, 26]. В основании с очень слабыми грунтами толщиной от 2 до 5-7 м выполняют гравийные столбы Ø2–3 м посредством выштамповывания за несколько ударов трамбовкой (рис. 3) полости, в которую засыпают гравий, снова ее погружают и досыпают грунт. Операции продолжают до прекращения осадки при последующих ударах трамбовки. Столбы формируют из местных доступных материалов, причем лучше всего из крупного щебня и скальных обломков.

Можно использовать отходы (шлак, опоки, отходы ископаемых, кирпичный бой, обломки бетона), гравий или песок. Типичный вес трамбовки составляет от 8 до 20 т. По сравнению с традиционной динамической консолидацией динамическая замена характеризуется быстротой процесса упрочнения основания, более надежным и эффективным улучшением его свойств благодаря перемешиванию с засыпаемым материалом. Формируемые в основании столбы увеличивают его несущую способность, существенно снижают осадки и повышают устойчивость возводимых зданий. Столбы могут загрузаться практически сразу после формирования.

Результаты исследования вытрамбовываемых столбов и правила проектирования содержатся в работе [20].

### 3.7. Комбинированные столбы

Комбинированные (гибридные) столбы – бетонные с пятами из гравия, оголовком из гравия или с оголовком и пятой из гравия. В зависимости от типа гибридного столба для его исполнения применяют один или два механизма. Оголовок гравийный выполняется через примерно 4–10 часов после устройства железобетонного ствола. В качестве материала для пяты и оголовка чаще всего используют гравий с зернами от 0 до 32 мм. Диаметр бетонной части составляет 25–60 см, гравийной – 60–80 см. Гравийная пята лучше обеспечивает опирание столба, а гравийный оголовок – упругий характер опирания. Опоры с оголовком из гравия лучше приемлемы в случае низких дорожных насыпей. Колонны с пятой из гравия обычно имеют несущую способность от 400 до 700 кН. Схема их выполнения показана на рис. 4.

Используют также столбы с оголовками бетонно-гравийными. Для этих столбов на первом этапе выполняют бетонный ствол, который должен быть заземлен в несущих грунтах на глубину около 0,5 м, а голова достигать верхней рабочей платформы. Затем при помощи экскаватора оголовок столба срезается минимум на 0,5 м. Возникшее при этом свободное пространство заполняют гравием и уплотняют. Оголовки столбов должны быть выполнены после создания ствола не более чем через 3–4 часа.

В рамках контроля качества произведенных работ производят динамическое зондирование используемого при исполнении пяты (оголовка) гравия и испытание прочности бетона. Иногда выполняют статические испытания столбов.

В Польше гибридные столбы с гравийными пятами были успешно использованы при упрочнении оснований (грунты слабые мощностью до 8 м), на объездной дороге Елку (рис. 5 и 6), бетонные столбы с оголовками бетонно-гравийными для упрочнения слабых грунтов при реконструкции железнодорожной линии Е-30 на станции Гданьск Южный [9].



Рис. 3. Формирование вытрамбовываемого столба

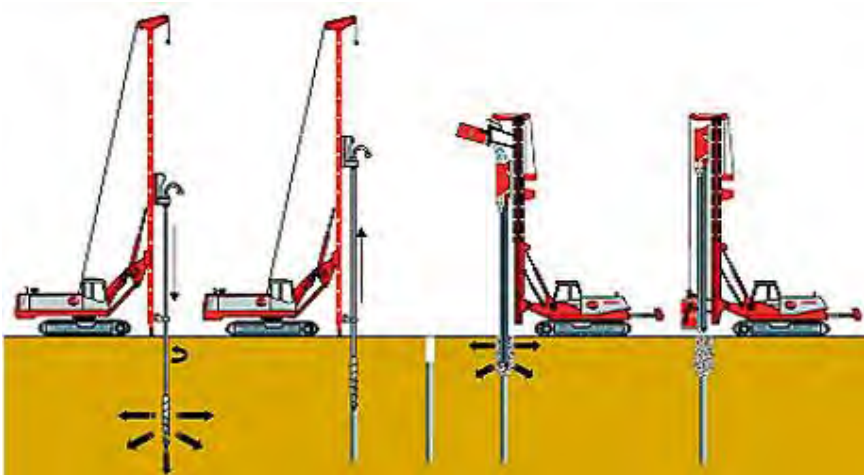


Рис. 4. Схема формирования бетонного столба с оголовком из гравия:  
фаза 1 – выполнение столба из бетона, фаза 2 – формирование гравийного оголовка;  
источник: ООО Менард, Польша



Рис. 5. Заполнение трубы, образуя агрегаты гравия колонны ноги (объезд Елку), источник: ООО Менард, Польша



Рис. 6. Выполнение бетонных столбов с оголовками бетонно-гравийными, исполнитель: ООО Менард, Польша

### 3.8. Столбы, формируемые методом микровзрывов

Технология микровзрывов использует энергию, возникающую в результате взрыва достаточно малых зарядов взрывчатых веществ (рис.7). Она позволяет укрепить слабые грунтовых оснований дорог и других сооружений в большом объеме за короткий промежуток времени. Основными преимуществами являются гораздо быстрая консолидация грунта и меньшие затраты по сравнению с другими методами упрочнения основания.

Процедуры упрочнения грунтов могут заменить методы более дорогие, но более надежные, такие как сваи. Однако возникают неопределенности в оценке основания и самих процедур упрочнения. Особенно важны глубины залегания слоев слабых грунтов, которые требуют укрепления, их свойства и другие параметры.

При проектировании упрочнения столбами необходимы надежные расчеты, обратно пропорционально возможной точности контроля качества. При выборе методов упрочнения следует взвесить

то, обеспечивают ли они разную прочность и повышение надежности, но также и различаются ли их стоимости.

Многолетний опыт показывает типовые риски при упрочнении оснований с помощью разного вида столбов. В соответствии с PN-EN 1997-1:2008, риск касается превышения предельных состояний:

- ПС эксплуатации (SLS): чрезмерные осадки, крены или смещения фундаментов;
- ПС по несущей способности (ULS): осадки, способствующие повреждению конструкций, разрушению материала, либо чрезмерные осадки столбов в основании, выпор грунта из под фундамента, потеря общей устойчивости (оползни) или сдвиг.

Масштаб риска зависит от свойств слабого грунта и методов упрочнения. Осадки, даже значительные, в процессе упрочнения тела насыпи не являются большой проблемой – они непрерывно выравниваются при укладке последующих слоев. Допускаемые конечные осадки поверхности насыпей после устройства нижнего слоя дорожной одежды не должны превышать 10 см и не вызывать деформацию поверхности, особенно на объектах с малоподатливыми фундаментами.

Конкретные риски связаны с очень малой способностью столбов к восприятию горизонтальных сил, особенно при малых вертикальных нагрузках. Этот фактор также следует принимать во внимание при производстве работ по устройству временных насыпей. На столбы в склоне насыпи давит выдавливаемый с ее стороны слабый грунт и может их разрушить (рис. 8). Для восприятия горизонтальных сил требуется армирование у подошвы насыпи, например, при помощи геотекстиля. Следует также избегать раскопок, нарушающих устойчивость оснований в зонах, прилегающих к упрочненным столбами поверхностям.

В очень слабом основании ( $C_u$  ниже 10–15 кПа) может наступить «рассыпание» столбов их несвязных обломков. Поэтому в таких условиях требуются столбы со связующим (вибробетонные или из трамбуемого бетона) или песчаные в геотекстильных оболочках.

Контроль качества включает проверку:

- геометрических размеров, особенно глубины столба – на практике это непрерывно определяет оператор машины (автоматическая регистрации заглубления и сопротивления инструмента или расход энергии, материалов и т.п.);



- свойств материала столба по испытаниям на образцах или на месте (прочность, состояние уплотнения, осевая жесткость столба).



Рис. 7. Упрочнение основания методом микровзрывов, исполнитель: ООО Олбуд-Поморже



Рис. 8. Разрушение голов столбов в результате перемещения масс слабого грунта

Оформление протоколов и измерений должны непрерывно оцениваться и приниматься (или нет!) контролерами самих исполнителей или инвесторов. Неотложный анализ результатов может устранить любые недочеты в начале, а не в конце работ, когда они уже трудно исправимы. Надзор должен быть разумным – «не цепляться», например, к мелочам в бумагах, но заботиться о вопросах по существу. Контроль должен быть непрерывным, а не по оказии.

Исполнительная документация упрочнения основания должна содержать точное описание метода (*method statement*), например, в виде подробной технической спецификации, включающей величины или контролируемые параметры, программу (частоте) контроля, критерии приемки, лицо, ответственные лица.

Полезные указания для большинства методов содержат нормы EN группы «Выполнение специальных геотехнических работ» [15,16, 17], Указания IVDiM [26] 2002 г. (желательна их актуализация, но отсутствует интерес у дорожной администрации). Некоторые специалисты требуют переработки соответствующих документов и в этом случае важна хорошая техническая спецификация.

Для крупных объектов, особенно линейных, протяженных во времени и пространстве, метод наблюдений в проектировании детально изложен в Еврокоде 7-1.

### **Заключение**

Упрочнение слабых оснований дорожных сооружений при помощи столбов является методом, выгодным экономически, а часто и по времени. Упрочнение грунтового основания создает возможность использования территорий, очень неудобных для застройки. Технологии фомирования столбов постоянно развиваются. Совершенствуются качество работ и возможность их контроля, что поможет расширить сферу их применения. Есть множество европейских стандартов для большинства методов.

Являются основой рационального выбора видов таких столбов и методов упрочнения, исчерпывающе приспособлены к конкретным потребностям испытаний грунтов, охватывают определение контура слабого основания, как и его параметров. Успех упрочнения во многом зависит от свойств грунта, поэтому для успеха важно определить предварительные сведения об основании, а также дополнить их специальными испытаниями применительно к избранному методу, а также контрольными испытаниями в процессе строительства. Оговорены также наблюдения за поведением зданий.

Для упрочнения оснований столбами обычно используют специфические методы и процессы. Программирование и их проектирование, а также выполнение и контроль требуют специальных знаний и опыта. Вид методов должен быть адаптирован к особенностям конкретной области. Этим должны заниматься опытные проектировщики–геотехники и специалисты подрядчика (но не дилетанты!), что позволит избежать дорогостоящих и неэффективных решений.

### **Литература**

1. Bzowka J.: Kolumny iniecyjne dużych średnic. Inżynieria i Budownictwo. 2005, nr 3, s. 126.

2. Fudali J., Saloni J.: Wzmocnienie podłoża gruntowego metodą konsolidacji dynamicznej. „Inżynieria i Budownictwo”. 2007, nr 7–8, s. 387–389.

3. Gajewska B., Klosiński B.: Rozwój metod wzmocnienia podłoża gruntowego. Seminarium PZWFS i IBDiM. „Wzmocnianie podłoża i fundamentów”. Warszawa, 31 marca 2011 r. Warszawa. 2011, s. 13–54.
4. Godlewski T., Saloni J.: Wzmocnienie podłoża gruntowego kolumnami DR na przykładzie odcinka trasy Siekierkowskiej w Warszawie. XIX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Augustów, czerwiec 2006 r. „Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo”. 2006, R. 28, t. 2, s. 347, 348.
5. Imiołek R.: Łączenie technologii w geotechnice – obwodnica Barczewa. „Magazyn Autostrady”. 2008, nr 10, s. 110–113.
6. Gryczmański M.: Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi. „Inżynieria Morska i Geotechnika”. 1993, nr 5, s. 224–231.
7. Gryczmański M.: Wzmocnianie słabego podłoża gruntowego wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd doświadczeń śląskich. „Inżynieria i Budownictwo”. 2003, nr 3.
8. Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. IBDiM. Warszawa, 1998.
9. Jurczak J. Musiał B., Szczepaniak S., Świniański J.: Zastosowanie wibrowymiany do wzmocnienia nasypu i podłoża na odcinku Węgliniec – Pieńsk linii kolejowej E-30. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Modernizacji Linii Kolejowej E-30”, Kliczków k. Bolesławca, 8–9 listopada 2007 r. [b.m.w.] 2007.
10. Kościak P., Noga L.: Zastosowanie wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej do wzmocnienia podłoża gruntowego i fundamentów. XVI Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Ustroń, 21–24 lutego 2001 r. T.1. Referaty. Katowice 2001, s. 213–228.
11. Michalski T.: Kolumny o średnicach od 2,5 do 5 metrów. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2008, nr 2 (17), s. 62–65.
12. PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
13. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
14. PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
15. PN EN 12716:2002 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Iniekcja strumieniowa.

16. EN 14679:2005 Wykonawstwo specjalnych robot geotechnicznych. Wgłębne mieszanie gruntu.
17. EN 14731:2005 Wykonawstwo specjalnych robot geotechnicznych. Wgłębne wibrowanie.
18. Pisarczyk S.: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Oicyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2005.
19. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. DzU 1999, nr 43, poz. 430.
20. Sękowski J., Kwiecien S.: ymiana dynamiczna – praktyczne aspekty zastosowania w budownictwie drogowym. „Magazyn Autostrady” 2010, nr 10, s. 124–128.
21. Sobolewski J., Ajdukiewicz J.: Budowa autostrad A1 i A2 na terenach o zdegradowanym oraz słabym podłożu z zastosowaniem geosyntetyków i monitoringu w ich posadowieniu. Konferencja „Podłoże i fundamenty budowli drogowychg, Kielce, 9 maja 2012 r. IBDiM. Warszawa, 2012.
22. Swiniański J., Turczyn K.: Zastosowanie iniekcji wspomaganej mechanicznie (DSM) i stabilizacji do wzmocnienia podłoża na odcinku Szymankowo–Lisewo linii kolejowej E-65. Ogólnopolska Konferencja Naukowo–Techniczna „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”, Żmigród–Węglewo, 22–23 października 2009 r. [b.m.w.] 2009.
23. Teżyk S., Glodzik K.: Wzmocnienie podłoża gruntowego pod budowę Stadionu Narodowego w Warszawie. Seminarium IBDiM i PZWFS „Fundamenty palowe” Warszawa, 22 kwietnia 2009 r. Warszawa, 2009.
24. Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Mixing). „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2003, nr 6, s. 385–398.
25. Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą wgłębego mieszania na mokro (DSM). XXIV Konferencja? „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Wisła, 17–20 marca 2009 r. Katowice, 2009.
26. Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. (Autorzy: B.Kłosiński, K.Grzegorzewicz, P.Rychlewski, S.Wierzbicki, P.Wileński), GDDP. Wyd. IBDiM. Warszawa, 2002.

*Перевод с польского М.И. Никитенко*