

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ША АЙМИНЬ

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ

ИЗВЕСТЬЮ С ДОБАВКАМИ-УСКОРИТЕЛЯМИ

Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и
изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1995

АВ 32.735

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии строительства автомобильных дорог Сианьского автомобильно-дорожного транспортного университета Китая и на кафедре технологии дорожно-строительных материалов Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета Украины.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор, Ольгинский А.Г.

- Официальные оппоненты - профессор, доктор технических наук, чл. корр. АН Грузии, Заслуженный деятель науки, заслуженный изобретатель, лауреат государственной премии Украины
Мчедлов-Петросян О.П.
- профессор, заслуженный работник народного образования Украины
Михович С.И.

ведущая организации - "Харагропромдорстрой "

Защита диссертации состоится " 7 " сентября 1995 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К 02.17.01 по специальности 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета по адресу: 310078, г. Харьков - 78, ул. Петровского, 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ХГАДТУ.

Автореферат разослан " _____ 1995 г.

Ученый секретарь

специализированного совета

ЛНБ ім. В. Стефаника
к. т. н., доцент
АН України

Космин А.В.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00755711 (Q)

4B-32.735

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с увеличением темпа развития народного хозяйства в Китае, в настоящее время автомобильные перевозки осуществляются с высокой скоростью и в больших объемах. Большое значение приобретает улучшение технического состояния дорог и ускорение темпов их строительства. Поэтому предусматривается широкое использование прогрессивных технологий строительства дорог, эффективных нетрадиционных дорожных конструкций, местных материалов и побочных продуктов производства. Большой резерв ускорения дорожного строительства заложен в использовании малопрочных каменных материалов и минеральных побочных продуктов производства, а также в применении различных нетрадиционных вяжущих.

Техническая целесообразность и большой экономический эффект от использования различных укрепленных материалов при строительстве автомобильных дорог и аэродромов подтвержден широкими научными исследованиями и многолетней производственной практикой. Наиболее распространенными являются грунты, укрепленные известью. Укрепление грунтов известью характеризуется сравнительно простой технологией производства, высоким техническим эффектом и широкой областью применения. Известь широко применяется в Китае в качестве вяжущего для производства конструктивных слоев дорожных одежд из укрепленных грунтов. Однако некоторое ограничение применения извести связано с медленным твердением укрепленных грунтов, высоким трещинообразованием и т.п.

Цель работы состоит в разработке и исследовании составов грунтов, укрепленных известью с добавками для улучшения прочностных, деформативных свойств оснований автомобильных дорог.

Научная новизна работы:

1. Предложены активные ускорители твердения укрепленных грун-

тов для оснований дорожных одежд, которые эффективны не только при обычных температурах, а и в зимний период.

2. Изучены физико-механические показатели укрепленных грунтов с различными ускорителями твердения, которые использованы при проектировании и строительстве дорожных одежд.

3. Выявлен механизм действия ускорителей твердения при укреплении грунтов. Показано, что основная роль в формировании структуры таких грунтов принадлежит регулированию физико-химических процессов и усилению структурных связей в грунтах в ранние сроки твердения.

4. Установлены закономерности изменения температурно-усадочной деформации укрепленных грунтов в зависимости от их состава и температуры.

5. Установлено влияние особенностей структуры на выносливость укрепленных грунтов. Получена зависимость относительной деформации от цикла нагружений и уровня напряжения. Предложены три вида деформативных особенностей укрепленных грунтов при циклическом нагружении.

Практическая ценность работы. В результате выполненных работ предложены способы использования добавок-ускорителей в дорожном строительстве для повышения прочности оснований из укрепленных грунтов в ранние сроки, как при нормальных температурах, так и при отрицательных температурах. Это послужило дополнением к "Инструкции по производственной технологии применения укрепленных известью грунтов для устройства оснований автомобильных дорог (ГТД 031-82)". Позволило расширить методы повышения прочности укрепленных грунтов в ранние сроки, что способствовало досрочному открытию движения автомобилей.

Рекомендованы грунтовые смеси для уменьшения температурной усадочной деформации укрепленных грунтов.

Результаты исследований представляют собой рекомендации для учета усталостных свойства укрепленных грунтов, и используются при переработке действующей "Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа (JTJ 14-86)".

Реализация работы. Результаты исследований внедрены в системе Минтранстроя КНР. Построены опытные участки дорожных одежд в Хэнаньской провинции. Экономический эффект составляет 0,2...0,5 тыс дол на 1 км дороги.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы изложены на министерской конференции "Использование оснований из укрепленных материалов и покрытий из битумоминеральных смесей в автомобильных дорогах высших категорий" (Шанхай, 1988); научно-технической конференции "Укрепление грунтов известью и золой в дорожном строительстве" (Чжэнчжоу, 1989); министерской конференции "Переработка действующей инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа" (Тайвань, 1991); научно-технической конференции "Использование гравийных грунтов, укрепленных известью в дорожном строительстве" (Пекин, 1992); научно-техническом семинаре кафедры технологии дорожно-строительных материалов (ХГАДТУ, Харьков, 1994); научно-технической конференции дорожно-строительного факультета (ХГАДТУ, Харьков, 1995).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 131 странице, включая 119 страниц машинописного текста, 19 рисунков, 24 таблицы, списка используемой литературы из 131 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние вопроса и задачи исследования. Во многих странах

одним из главных дорожных строительных материалов являются укрепленные известью грунты. Как традиционные строительные материалы, они широко используются в конструктивных слоях дорожных одежд Китая.

Из приведенного литературного обзора следует, что взаимодействию между известью и тонкодисперсной частью грунта при структурообразовании укрепленных известью грунтов посвящено большое число работ (Безрук В.М., Борисова Е.Г., Ван Л., Гончарова Л.В., Дэвидсон Д.Т., Идс Ш.Л., Иерусалимская М.Ф., Левчановский Г.Н., Ормсби В.С., Охотин В.В., Филатов М.М., Чжан Д.). Установлено влияние минерального и гранулометрического состава грунта, извести и условий выдерживания на эффективность укрепления грунтов (Безрук В.М., Гедройц К.К., Егоров И.В., Иерусалимская М.Ф., Инглес О.Г., Левчановский Г.Н., Морозов С.А., Сасько Н.Ф., Филатов М.М., Чжан Д., Шервуд П.Т.); Показано, что повышение эффективности укрепления грунтов известью достигается в комплексе с активными добавками (Безрук В.М., Дэвидсон Д.Т., Леушин А.И., Лэмб Т.В., Попандопуло Г.А., Путилин Е.И., Сэй Ю., Ястребова Л.Н.). Однако, большинства авторов уделяют недостаточное внимание исследованию укрепленных известью грунтов, в качестве конструктивных слоев дорожных одежд, а следовательно, недостаточно изучены технические свойства таких слоев.

Медленное твердение укрепленных известью грунтов серьезно снижает производственную эффективность их использования при высоких темпах дорожного строительства. Исследования Дэвидсона Д.Т., Лэмба Т.В., Сэй Ю., Ханда Р.Л., Чамса В. явились основанием для систематического изучения способов повышения прочности укрепленных грунтов в ранние сроки твердения путем использования химических добавок.

Температурно-усадочное трещинообразование оснований из укреп-

ленных грунтов ухудшает их эксплуатационные свойства. Исследования усадочной деформации укрепленных грунтов в настоящее время находятся на начальной стадии (Васильев Ю.М., Надежко А.А., Чжан Д., Лян С.). Главным является установление особенности температурно-усадочной деформации укрепленных грунтов.

Для оценки выносливости дорожной одежды необходимо установить закономерности усталостных деформаций оснований, конструктивных слоев дорожных одежд при повторяющемся нагружении. К настоящему времени крайне недостаточно исследованы эти свойства для укрепленных известью грунтов (Фань Ф.).

Анализ состояния вопроса позволил наметить следующие задачи исследования:

1. Предложить ускорители твердения для укрепления грунтов, обеспечивающие повышение прочности в ранние сроки при отрицательной (до -5°C) и нормальной температуре, приемлемые в техническом отношении.

2. Установить оптимальные количества добавок-ускорителей, обеспечивающих формирование прочной структуры укрепленных грунтов.

3. Исследовать основные физико-механические свойства укрепленных грунтов с использованием ускорителей твердения.

4. Изучить процессы структурообразования укрепленных грунтов с различными ускорителями твердения путем анализа фазового состава.

5. Исследовать закономерности температурно-усадочной деформации укрепленных грунтов при понижении окружающей температуры.

6. Исследовать усталостную прочность и развитие деформаций укрепленных грунтов при многократно повторяющемся нагружении.

7. Провести опытно-производственную проверку результатов лабораторных исследований.

8. Оценить экономическую эффективность применения доба-

вок-ускорителей в укрепленных основаниях автомобильных дорог.

Теоретические предпосылки исследований. При укреплении грунтов известью протекают сложные и взаимосвязанные процессы. Наличие определенной концентрации гидрооксида кальция в грунте обеспечивает возникновение различных процессов при твердении укрепленных грунтов. Ионный обмен и коагуляция обеспечивают начальную прочность грунта. Существенное улучшение прочности и устойчивости грунтов получено за счет пуццолановых реакций. Дальнейшему повышению прочности способствуют реакции карбонатизации и перекристаллизации гидратов.

В результате различных химических и физико-химических процессов грунты, укрепленные известью, характеризуются преимущественно кристаллизационным типом микроструктуры с локальным наличием конденсационных и коагуляционных структур. Структурный характер укрепленных грунтов предопределяет их свойства.

Прочность укрепленных грунтов, помимо прочности зерен твердой фазы, определяется сцеплением и внутренним трением частиц грунта.

Введение химических добавок в укрепленные грунты может регулировать различные процессы твердения, прежде всего изменять структурные связи между частицами грунта. В результате этого возрастает сцепление, вызванное значительным проявлением кристаллизационных связей. Среди различных процессов твердения укрепленных грунтов, пуццолановые реакции, протекающие между активными минеральными частицами грунта и вяжущим веществом, интенсифицируемые вводимыми добавками, в виде NaOH , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 и т.п., выполняют основную роль. Они формируют кристаллизационные структурные связи в укрепленных грунтах.

Глинистые минералы и стеклофаза золы характеризуются сравнительно слабыми связями между структурными элементами - кремнекислородными тетраэдрами. Под действием щелочи эти связи наруша-

ются и кремнекислородные тетраэдры переходят в грунтовый раствор. В связи с повышением концентрации ионов кремнезема интенсивность пуццолановых реакций возрастает.

Различные электролиты имеют способность реагировать с известью с образованием труднорастворимых или малодиссоциирующих соединений. К ним относятся, в первую очередь, натрийсодержащие электролиты. Некоторые подобные электролиты могут взаимодействовать с известью с образованием различных солей кальция, имеющих слабую растворимость. Сульфаты, связываясь со свободным гидратом окиси кальция, образуют сульфат кальция, а с гидроалюминатами кальция (продуктами пуццолановых реакций) — нерастворимый сульфоалюминат кальция. Вышеперечисленные труднорастворимые или малодиссоциирующие соединения образуются между частицами грунта, либо заполняют поры, что увеличивает сцепление или внутреннее трение укрепленных грунтов. Вновь образованные соединения могут выполнять роль кристаллических затравок, эффективность которых обусловлена их дисперсностью.

Температурно-усадочная деформация укрепленных грунтов определяется изменением объема составляющих минералов и новообразований, а также действием разнообразной влаги, находящейся в порах укрепленных материалов.

Поры в укрепленных грунтах частично или полностью заполнены водой. Состояние воды в порах изменяется в зависимости от параметров окружающей среды (относительная влажность, давление и температура воздуха), что оказывает существенное влияние на усадочную деформацию укрепленных грунтов, поскольку вода сама обладает большой температурной деформацией. В диапазоне положительных температур коэффициент линейного расширения у воды в 4...7 раз выше, чем у твердых частиц в укрепленных грунтах. С понижением температуры окружающей среды объем воды в порах уменьшается существенней, чем

у твердых частиц. Вода в порах замерзает при температуре ниже 0 С, и вследствие увеличения объема на 9% оказывает отрицательное влияние на усадку укрепленных грунтов.

Укрепленные грунты характеризуются структурной и физической неоднородностью. Действие нагрузки вызывает локальные концентрации напряжений. При воздействии многократных вибрационных нагрузок в укрепленных грунтах может проявляться своеобразный эффект разжижения, когда под действием вибрации укрепленные грунты в первую очередь тонкозернистые, тиксотропно разжижаются. В связи с этим при длительном циклическом нагружении коагуляционные связи постепенно нарушаются. Следовательно, при длительном циклическом нагружении сопротивление нагрузке могут оказывать лишь упругие кристаллизационные связи в структуре.

Усталостная прочность укрепленных грунтов в значительной степени обусловлена их структурой, в первую очередь микроструктурной. Изменения свойств микроструктуры, например, однородности, характера, структурных связей и т.д., могут отразиться на усталостной прочности укрепленных материалов.

Результаты исследований. При исследованиях были использованы типичные для Китая лессовые (глинистые) грунты и гравийные грунты. Лессовый грунт Хэнаньской области характеризуется высоким содержанием пылеватых частиц. По числу пластичности (13,44) и содержанию песчаных частиц (10,62%) он относится к пылеватому суглинку. Сравнительно высокие значения рН (8,16) данного грунта отражают относительное большее содержание катиона Ca^{2+} в грунтовом растворе. Из двух видов гравийных грунтов, гравийный грунт Сианьской области содержит больше мелких частиц (размерами < 2 мм), чем гравийный грунт Пекинской области. По своей минеральной характеристике, гравий Сианьской области является кварцевым, а гравий Пекинской области - кальцитовым.

В качестве вяжущих, применяли гашеную известь. По содержанию активного MgO известь относится к кальциевой. По активности известь является гашеной известью 1-го сорта, содержащей $CaO + MgO > 50 \%$.

В качестве активных компонентов, смешанных с известью при укреплении грунтов, применялись зола гидроудаления. По химическому составу эти зола содержат преимущественно SiO_2 (до 50%) и Al_2O_3 (около 31%).

Ускорителями твердения укрепленных грунтов служили чистые химические реактивы или различные виды химического промышленного сырья.

Применялись смеси грунта, укрепленного известью и золой в среднем состоящие из 50% глинистого грунта, 40% золы и 10% извести от массы смеси; смеси гравийного грунта, укрепленного известью и золой с различным количеством гравийного грунта (от 50 до 90% по массе) и с различным отношением извести к золе (от $1:2$ до $1:5$ по массе); смеси укрепленного известью гравийного грунта с отношением извести к гравийному грунту $5:95$ и $7:93$ по массе.

Для лабораторных испытаний использовались образцы различного размера в зависимости от вида грунта и характера испытаний. Глинистые грунты формовались в цилиндрические образцы 50×50 мм и в балочки $240 \times 50 \times 50$ мм. Гравийные грунты с зернами < 15 мм - $240 \times 50 \times 50$ мм, а гравийные с зернами < 32 мм - $400 \times 100 \times 100$ мм соответственно.

Приготовление смесей, выбор условий твердения и испытания укрепленных грунтов осуществлялись в соответствии с ГОСТ.

Изучение структурных особенностей и фазового состава укрепленных грунтов выполнено с помощью растровой электронной микроскопии, и также рентгеновского, ИК - спектроскопического и термографического анализов. Производилось определение дзета-потенциала

компонентов грунта. Определение усадочной деформации укрепленных грунтов производилось на специально созданном приборе. Испытания на усталость проводили на установке MTS - 810.

На основе теоретических исследований было опробовано 11 распространенных неорганических соединений, используемых в виде химических добавок для укрепления грунта. Результаты показали, что добавки NaOH , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , Na_2SiO_3 , а также Na_3PO_4 отличаются высокой эффективностью, способствуя ускорению твердения укрепленного грунта при нормальной температуре.

На основе анализа зависимости прочности укрепленного грунта от концентрации различных ускорителей твердения было выделено две группы добавок. В первую группу вошли добавки NaOH , Na_2CO_3 , и Na_2SO_4 , способные обеспечивать максимальную прочность укрепленного грунта при оптимальном количестве. Вторая группа объединяет добавки Na_2SiO_3 и Na_3PO_4 , обеспечивающие равномерное нарастание прочности только при увеличении их концентрации. Полученные данные позволяют рекомендовать рациональное количество различных ускорителей твердения при укреплении грунта известью и золой. Оптимальное количество Na_2SO_4 составляет 2,5 % от массы смеси, а для NaOH и Na_2CO_3 - по 2 % и 1,5 % соответственно. Допускается применение Na_2SiO_3 в количестве 2,5 %, и Na_3PO_4 - 2 %.

Исследования кинетики твердения грунта, укрепленного известью и золой с различными добавками-ускорителями были проведены на образцах, выдержанных при нормальной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и отрицательной температуре $-5 \pm 2^\circ\text{C}$. Результаты показали, что при нормальной температуре ускорители значительно ускоряют твердение укрепленного грунта (рис. 1). В 7 сут возрасте прочность при сжатии у грунта с добавкой Na_2SO_4 увеличилась на 104 %; с Na_2CO_3 - на 100 %; с NaOH - на 93 %; с Na_2SiO_3 - на 91 %; с Na_3PO_4 - на 44 % выше, чем у грунта без добавки. При отрицательной температуре добавки NaOH ,

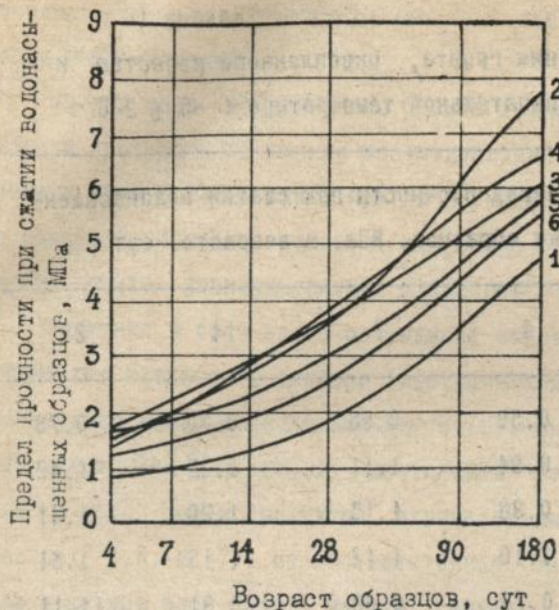


Рис. I Кинетика твердения при нормальной температуре ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) грунта, укрепленного известью и золой:
 I - без добавки;
 и с добавкой:
 2 - 1,5% NaOH ;
 3 - 2,5% Na₂SO₄ ;
 4 - 2% Na₂CO₃ ;
 5 - 2,5% Na₂SiO₃ ;
 6 - 2% Na₃PO₄ .

Na₂CO₃, Na₂SiO₃, и Na₃PO₄ могут повышать прочность при сжатии образцов в возрасте 28 сут на 40...90 % (табл.1).

В результате математической обработки результатов получены уравнения регрессии, которые отражают математическую модель зависимости между пределом прочности при сжатии R_T и возрастом твердения T :

$$R_T = a T^b,$$

где a, b - постоянные числовые коэффициенты. Введение различных добавок-ускорителей увеличивает главным образом величину a .

Наряду с повышением прочности при сжатии, используемые добавки-ускорители оказывают положительное действие на прочность и модуль упругости при изгибе укрепленного грунта. Они повышают прочность при изгибе на 20...80 % и модуль упругости на 10...30 % в возрасте 28 сут. Кроме NaOH остальные добавки незначительно уменьшают морозостойкость укрепленного грунта, но коэффициент морозостойкости удовлетворяет требованиям.

Таблица 1

Кинетика твердения грунта, укрепленного известью и золой, при отрицательной температуре ($-5 \pm 2^\circ\text{C}$)

Количество и вид ускорителя твердения	Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, МПа, в возрасте, сут			
	4	7	14	28
без добавки	0.59	0.66	0.70	0.78
1,5 % NaOH	0.94	1.11	1.22	1.42
2 % Na ₂ CO ₃	0.96	1.13	1.20	1.41
2.5 % Na ₂ SiO ₃	1.10	1.12	1.18	1.31
2 % Na ₃ PO ₄	0.79	0.82	0.91	1.11

Ускорители твердения оказывают влияние на процессы структурообразования укрепленного грунта. Это проявляется в изменении прочности укрепленного грунта в зависимости от разрыва между началом увлажнения смеси и началом ее уплотнения. Без разрыва укрепленные грунты с ускорителем NaOH, Na₂CO₃ или Na₂SiO₃ обладают самыми высокими пределами прочности при сжатии в возрасте 7 сут. Когда разрыв достигает 24 ч, прочность укрепленного грунта с NaOH, Na₂CO₃ и Na₂SiO₃ снижается на 35 %, 11 % и 34 % соответственно. При применении Na₂SO₄, с увеличением времени разрыва прочность укрепленного грунта повышается. Когда разрыв достигает 24 ч, предел прочности при сжатии образцов с Na₂SO₄ в возрасте 7 сут возрастает на 61 % по сравнению с прочностью образцов приготовленных без разрыва. При использовании Na₃PO₄ в смеси, разрыв незначительно влияет на прочность укрепленного грунта. Таким образом, уплотнение смеси грунта с добавкой NaOH, Na₂CO₃ или Na₂SiO₃ необходимо производить не-

посредственно после перемешивания; а с добавкой Na_2SO_4 через сутки после перемешивания.

Жидкая фаза укрепленного грунта является основной средой, в которой протекают различные взаимодействия между растворенными добавками и частицами грунта при их укреплении. Вследствие катионного обмена происходит взаимное изменение свойств жидкой фазы и частиц грунта (преимущественно глинистых).

Величина и знак дзета-потенциала отражает форму адсорбции и количество катионов в двойном электрическом поле. Добавка извести значительно изменяет значение дзета-потенциала и его знак. Результаты измерения потенциала протекания показывают, что лессовый грунт и зола характеризуются отрицательным дзета-потенциалом в пределах $-1,8$, и $-7,1$ мв соответственно. Значение дзета-потенциала золы в четыре раз выше, чем у грунта. А известково-грунтовая смесь, как и известково-зола-грунтовая смесь характеризуются положительным дзета-потенциалом в пределах $2,0$, и $2,1$ мв.

При укреплении грунта известью, кислотность жидкой фазы грунта определяется количеством гидрата окиси кальция. Изменение концентрации гидрата окиси кальция также отражается на изменении величины рН жидкой фазы грунта. Результаты измерения рН показывают, что несмотря на сохранение в жидкой фазе грунтов определенной щелочности, с увеличением времени твердения величина рН постепенно уменьшается. И по отношению к грунту без добавки-ускорителя, грунты с различными ускорителями характеризуются меньшими величинами рН в раннем возрасте (7 сут). Эти результаты свидетельствуют о том, что при укреплении грунтов химические взаимодействия протекают в процессе твердения, а добавки оказывают воздействие в раннего возрасте.

На рентгенограмме укрепленного грунта без ускорителя твердения отсутствуют линии, как высокосульфатной формы гидросульфатно-

мината кальция ($d = 9,80; 5,60; 3,85; 2,55 \text{ \AA}$), так и низкосульфатной ($d = 8,90; 4,50; 3,99; 2,42 \text{ \AA}$). При укреплении грунта с ускорителем Na_2SO_4 происходит образование высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция в возрасте 7 сут, которая переходит в низкосульфатную форму к 28 сут (рис.2).

В возрасте 7 и 28 сут интенсивность главной линии $3,04 \text{ \AA}$ значительно возрастает в грунте с добавкой Na_2CO_3 , что свидетельствует о появлении в ранние сроки вторичного кальцита образовавшегося при взаимодействии Na_2CO_3 с известью.

Для всех видов укрепленных грунтов с добавками-ускорителями в одинаковом возрасте рентгенографически фиксируется повышение интенсивности линий $3,05 \text{ \AA}$, к тому же она становится широкой и диффузионной, что указывает на возможное образование гидросиликатов кальция.

Учитывая возможность образования низкоосновных гидросиликатов кальция в исследуемых системах, по соотношению полос поглощения при 1430 и 1000 см^{-1} на ИК-спектрах (рис.3), оценивалось изменение их основности в зависимости от характера применяемых добавок. Результаты показали, что в укрепленных грунтах ускорители NaOH и Na_2CO_3 обеспечивают практически одинаковую основность гидросиликатов. Однако, в первом случае это более закономерно и объясняется интенсивным насыщением системы ионами Si^{4+} . В результате повышения pH системы происходит активное растворение кварцевых зерен грунта, подтверждаемое исчезновением на ИК-спектре, характерного кварцевого дублета при 800 и 780 см^{-1} . Гидросиликаты кальция в грунте с ускорителем Na_2CO_3 в возрасте 7 сут и в бездобавочном грунте в возрасте 90 сут имеют близкую основность. Этот факт подтверждает вывод об ускорении процессов структурообразования укрепляемых грунтов натрийсодержащими добавками, которые завершаются к возрасту 7 сут.

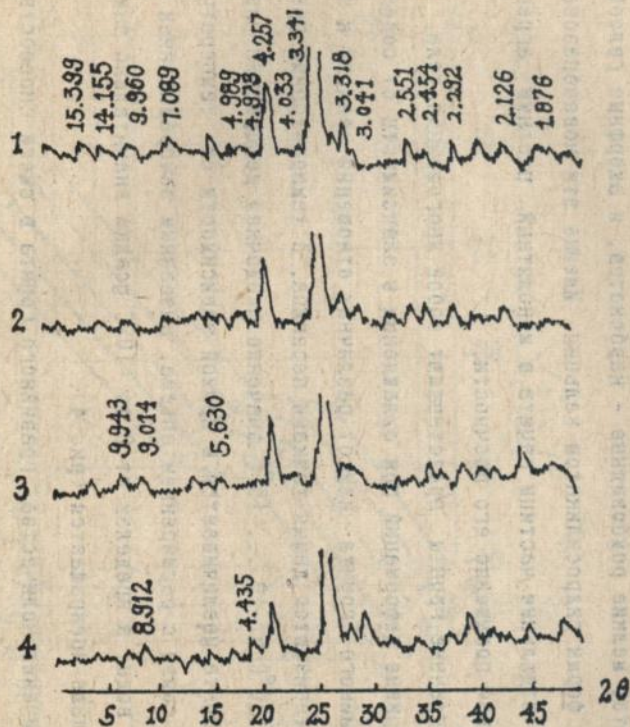


Рис. 2 Рентгенограммы грунта, укрепленного
известью и золой

без добавки: в возрасте 1 - 7 сут; 2 - 28 сут;
с добавкой Na_2SO_4 : в возрасте 3 - 7 сут; 4 - 28
сут.

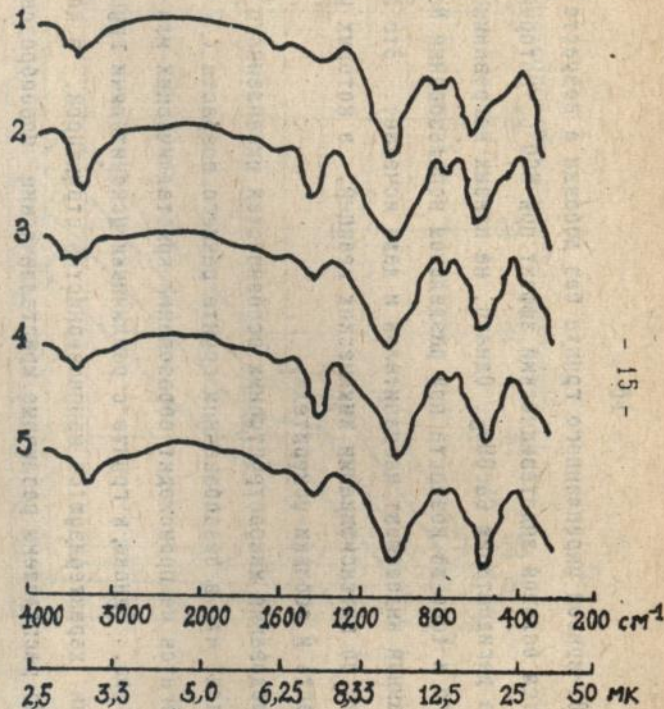


Рис. 3 ИК-спектры грунта, укрепленного
известью и золой:

1 - без добавки, 7 сут; 2 - то же, 90 сут;
3 - с добавкой Na_2SO_4 , 7 сут; 4 - с Na_2CO_3 ,
7 сут; 5 - с NaOH , 7 сут.

На DT-кривой укрепленного грунта без добавки в возрасте 7 сут наблюдается большой эндотермический эффект при 500°C , который указывает на дегидратацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Однако, на кривых нагревания грунтов одного и того же возраста при раздельном использовании Na_2SO_4 и NaOH , данный эндозэффект незначителен и даже исчезает. Это свидетельствует об интенсификации химических реакций, в которых участвуют известь и добавки-ускорители.

Исследования микроструктурных особенностей укрепленного грунта показали, что в бездобавочном грунте раннего возраста (7 сут) вне агрегатов не происходит образование кристаллических или гелеобразных фаз. Однако, в грунте с различными ускорителями грунтовые композиции характеризуются крупнозернистой структурой, в которой равномерно расположены различные кристаллические новообразования, включающие игольчатые кристаллы высокосульфатной формы гидросульфалюмината, мелкие ромбовидные - карбонатов, и аморфные гелеобразованные формы гидросиликатов кальция. Именно эти новообразования связывают отдельные частицы грунта в монолитный плотный агрегат, обуславливая повышение его прочности.

Укрепленные грунты представляют собой многофазные тела, для которых кривые деформаций при охлаждении в зависимости от содержания гравийного грунта или от различных отношений извести к золе И/З характеризуются двумя точками перегиба. В температурных пределах $10 \dots 0^{\circ}\text{C}$ и $-10 \dots -15^{\circ}\text{C}$ значение усадочной деформации укрепленного грунта увеличивается в прямой зависимости от температуры. Однако, в связи с расширением объема, вызванным замораживанием капиллярной воды, в пределах от 0 до -10°C усадка значительно замедляется и даже прекращается (рис.4).

Увеличение количества гравийного грунта в смеси способствует снижению усадочной деформации образцов, поскольку гравий имеет меньший коэффициент линейного расширения чем новообразования. Этот

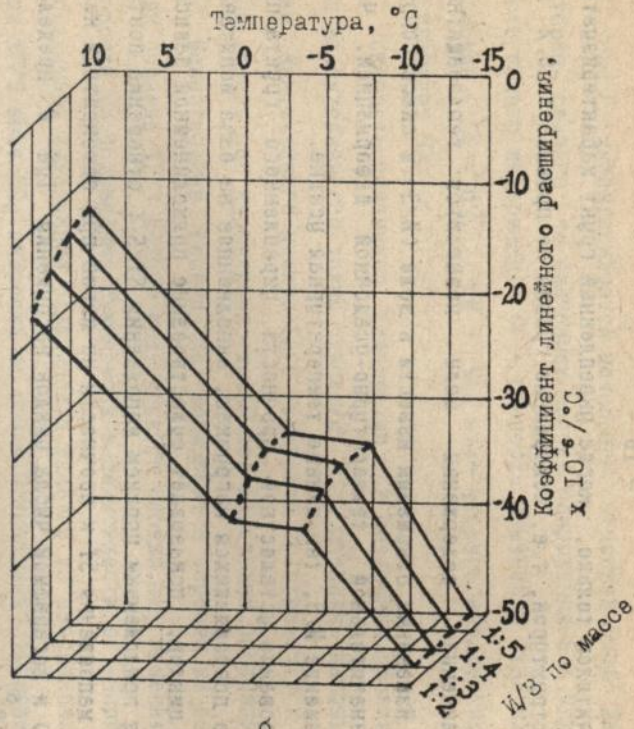
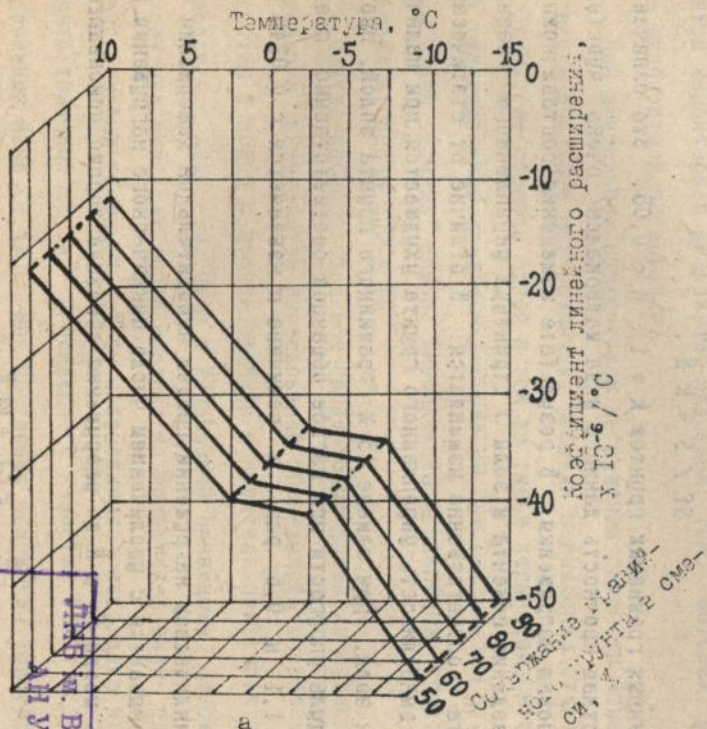


Рис. 4 Температурно-усадочная деформация грунта, укрепленного известью и золой:

а - при различном количестве гранулированного грунта (и/з = 1:4); б - при различном соотношении извести к золе (содержание гранулированного грунта в смеси = 60 %).

ДНУ
В. Стефанюк
ДНУ України

эффект значителен только, когда укрепленный грунт характеризуется базальной структурой, т.е. содержание гравия не превышает 50 % по массе.

С увеличением содержания золы повышаются теплозащитные свойства. Изменения отношения извести к золе (И/З) в смеси сопровождается значительной температурно-усадочной деформацией. Чем меньше отношение И/З, тем меньше температурная усадка.

Исследование усталостной прочности укрепленного грунта при многократно повторяющихся нагрузках, выполненное на базе испытаний до 1 млн циклов, показывает существование прямолинейной зависимости между приложенным уровнем напряжения S_f/S (отношение повторяющегося напряжения S_f к прочности на изгиб при однократном нагружении S) и логарифмом числа циклов нагружения $\lg N$ в пределах $N = 10^3 \dots 10^6$:

$$S_f / S = k N^{-n}$$

Для укрепленных гравийных грунтов $k = 1$, $n < 0,05$. Это означает, что усталостная прочность данного вида материалов очень чувствительна к уровню напряжения. В результате изменения состава компонентов (введение цемента и золы) структура укрепленного гравийного грунта соответственно изменяется. В отличие от статической прочности, выносливость укрепленного грунта ухудшается при наличии цемента или золы. При замене 15 % гравийного грунта золой, прочность и модуль упругости при изгибе образцов соответственно повышаются в 1,1 и 0,6 раз, а величина n изменяется с 0,0248 до 0,0496.

При циклическом нагружении предел относительной деформации ϵ образцов повышается с увеличением числа циклического нагружения N . Зависимость между ϵ и N до разрушения образцов хорошо описывается формулой:

$$\epsilon = \epsilon_i + \alpha N,$$

где ϵ_i характеризуется начальной относительной деформацией, которая связана со значением уровня напряжения и с модулем упругости самого материала; α - скорость изменения относительной деформации ($\alpha = d\epsilon / dN$). Чем выше уровень напряжения, тем больше значение α .

Скорость изменения деформации при различных уровнях напряжения характеризуется тремя случаями. При уровнях напряжения Sf/S ниже критического уровня SL_1 , скорость α стремится к нулю. При этом объемы зон нарушенных связей под действием нагрузки очень малы. Макротрещины вообще не возникают и образец не разрушается. Если уровень Sf/S больше критического уровня SL_1 и меньше SL_2 , то скорость α постепенно изменяется в зависимости от напряжения. Относительная деформация развивается задолго до разрушения. В условиях Sf/S выше SL_2 скорость α резко возрастает. В образце проявляется характерная деформация подобная той, которая фиксируется при однократном нагружении.

При длительном циклическом нагружении скорости изменения деформации образцов при различных уровнях напряжения отличаются друг от друга, но образцы одной и той же смеси характеризуются одинаковым максимальным пределом деформации при растяжении до разрушения ϵ_{max} . Для данных видов укрепленных гравийных грунтов ϵ_{max} составляет около 250×10^{-6} .

Опытно-производственная проверка результатов исследований. На основании результатов исследований проводилось укрепление грунтов известью и золой с использованием ускорителя при строительстве автодорог у. Хуэй - у. Цзяо в Хэнаньской провинции. Дорожная одежда на опытных участках дорог состоит из покрытия в виде однослойного черного щебня толщиной 6,5 см и основания, состоящего из лессового грунта толщиной 22 см, укрепленного известью (10%) и золой (40%); с добавкой NaOH (1,5%). При постройке основания температура окру-

вяжущего воздуха колебалась между -3 и 5°C . В течении первых трех месяцев после устройства основания температура составляла от -5 до 5°C . Результаты определения прочности образцов, изготовленных из производственных смесей, и модуля упругости конструкций в опытных участках, подтвердили результаты лабораторных исследований об ускорении твердения укрепленных грунтов при отрицательной температуре после введения добавки NaOH . Модуль упругости основания с добавкой в $1,31 \dots 1,38$ раз выше чем без добавки, что обеспечивало хорошее состояние дороги.

Применение ускорителей твердения при укреплении грунтов в дорожных основаниях будет способствовать повышению качества дорожной одежды; сокращению продолжительности строительства дороги; досрочному открытию движения транспорта. В результате достигается значительная экономическая эффективность. Общий экономический эффект на 1 км дороги достигает $0,2 \dots 0,5$ тыс. дол. ($20 \dots 50$ млн. крб. в ценах 1994 года).

ВЫВОДЫ

1. Показано, что путем ускорения твердения вяжущего и улучшения деформативных характеристик укрепленных грунтов, возможно улучшить качество дорожных оснований.

2. Теоретически обосновано влияние структурных особенностей на прочностные и деформативные свойства грунтов, укрепленных известью и золой с натрийсодержащими добавками.

3. Установлено, что для укрепления лессовых грунтов известью и золой при нормальных температурах, наиболее эффективными являются натрийсодержащие добавки-ускорители в виде NaOH , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , Na_2SiO_3 и Na_3PO_4 . Все они, кроме Na_2SO_4 , эффективны при отрицательных температурах.

4. Показано, что при нормальной температуре выбранные добавки-ускорители повышают прочность при сжатии укрепленного грунта на 44...104% (в 7 сут возрасте), прочность при изгибе на 20...80% и модуль упругости при изгибе на 10...30% (в 28 сут возрасте). Изменение во времени прочности при сжатии подчиняется степенной функции $R = a T^b$, причем ускорители твердения изменяют только числовые значения параметра a .

5. Рекомендовано уплотнять грунт с добавками NaOH , Na_2CO_3 или Na_2SiO_3 непосредственно после перемешивания, а с Na_2SO_4 через сутки после перемешивания. Такой разрыв повышает эффективность использования добавок-ускорителей.

6. Комплексными методами физико-химического анализа установлено увеличение растворимости кварцевых зерен при использовании ускорителей твердения. Образуются труднорастворимые и слабодиссоциирующие соединения, гидросиликаты кальция с различной основностью, ускоряющие переход коагуляционной структуры в кристаллизационную и повышающие прочностные характеристики укрепленного грунта.

7. Установлено прямолинейное увеличение температурно-усадочной деформации укрепленного гравийного грунта в интервале $10...0^\circ\text{C}$ и $-10...-15^\circ\text{C}$, а от 0 до -10°C затухание деформационных процессов. Введение золы снижает усадочные деформации.

8. Однородность структуры в большей степени влияет на выносливость укрепленного грунта, чем на его статические свойства. Увеличение относительной деформации укрепленного гравийного грунта при циклическом нагружении описывается выражением $\epsilon = \epsilon_i + \alpha N$, причем изменение α тесно связано с уровнем напряжения. Укрепленный грунт обладает одним из трех видов деформационных особенностей в зависимости от уровня напряжения.

9. Опытно-производственная проверка подтвердила эффективность

использования ускорителей твердения глинистых укрепленных грунтов при температурах зимнего периода. Результаты исследований использованы в качестве дополнения к "Инструкции производственной технологии применения укрепленных известью грунтов для устройства оснований автомобильных дорог (ГТД 031-82)" и при переработке "Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа (ГТД 14-86)".

10. Эффективность использования ускорителей твердения проявляется в сокращении продолжительности строительства дорог и досрочном открытии движения транспорта. Общий технологический эффект на 1 км дороги достигает 0,2...0,5 тыс. дол. (20...50 млн.крб. в ценах 1994 года).

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Ольгинский А.Г., Редкозубов А.А., Ша Айминь. Электрохимические эффекты при укреплении лессового грунта. - В кн.: Труды международного семинара "Теория и практика строительства и строительных материалов". Сумы, ССХИ, 1994. - с.57

2. Чжан Денлян, Суй Юнмин, Ша Айминь. Исследование ускорения твердения укрепленных известью и золой грунтов. - Сианьский АДИ журнал, 1988, N 3, - с.8-20 (на китайском языке)

3. Ша Айминь, Чжан Денлян. Температурная трещиностойкость оснований из укрепленных грунтов. - Строительство автомобильных дорог в Шэнсиньской провинции: докл. Сиань, 1993. -с.1-14 (на китайском языке)

4. Ша Айминь, Чжан Денлян, Суй Юнмин. Усталостные свойства укрепленных гравийных грунтов неорганическими вяжущими. - Китайский журнал строительных работ, 1993, N 1, -с.68-73 (на китайском языке)

5. Ша Айминь, Чжан Денлян. Исследование термодинамических свойств и их использования для пуццолановой реакции в укрепленных известью грунтах. - Китайский журнал горных и грунтовых работ, 1994, N 4, -с.32-36 (на китайском языке)

6. Ша Айминь, Чжан Денлян. Состав и характеристики катионной емкости обмена лессовых грунтов. - Сианьский АДИ журнал, 1994, N 4, -с.1-5 (на китайском языке)

7. Ольгинский А.Г., Ша Айминь, Чжан Денлян. Особенности жидкой фазы в укрепленных грунтах. - В кн.: Труды ХГАДТУ, Харьков, 1995 (в печати)

Анотація

Ша Аймін "Механічні властивості ґрунтів, що укріплені вапном з добавками - прискорювачами".

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05., Харківський Державний Автомобільно-Дорожній Технічний Університет.

Для підвищення міцностних та деформативних властивостей дорожніх основ з ґрунтів, що укріплені вапном, розроблені склади, досліджено їх вплив на властивості ґрунтів. Запропоновані активні прискорювачі тверднення при звичайних та негативних температурах. Вивчені механічні показники укріплених ґрунтів з домішками. Встановлені закономірності зміння температурно-усадочної деформації в залежності від їх складу і температури. Виявлені особливості утомленісної міцності та деформативності при циклічному навантаженні.

Ключові слова: укріплений вапном ґрунт, механічні властивості, прискорювачі деформації, утомленісна міцність

Sha Aimin: " Mechanical Properties of Lime-stabilized Soil with Additives - accelerators ".

Thesis for Ph.D. on speciality 05.23.05., Kharkov State Automobile and Highway Technical University.

In order to improve strength and deformation properties of base course from lime-stabilized soil, analysis and investigation into influences of mixture compositions under soil stabilization with lime and other additives were carried on. Some additives for accelerating harding not only under normal temperature but also under negative temperature, and mechanical indexes of lime-soil with those additives were presented. The law of thermal compactive deformation depending on compositions and temperatures were arranged. The strength and deformation characteristics under repeating load were determined.

Key words: lime-stabilized soil, mechanical properties, additives for accelerating harding, compactive deformation, fatigue strength.

Подп. к печ. 4.07.95.
Бумага газетная.
Усл. печ. л. 1,5
Тир. 100 экз.

Формат А5
Отпечатано на ризографе
Зак. 144.

ХГАДТУ, 310078, Харьков, ул.Петровского, 25

Харьковский государственный автомобильно-дорожный
технический университет, РИО.

454302

AB 32.735