

УЛУЧШЕНИЕ ГРУНТА И ИННОВАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Х. БРАНДЛЬ — доктор технических наук, профессор, вице-президент Международного общества по механике грунтов и геотехнике ISSMGE (1997–2001), Технический университет, г. Вена, Австрия

Лекция, прочитанная на XIII Дунайско-Европейской конференции по геотехнике в г. Любляне, Словения (29–31 мая 2006 г.).

Описываются некоторые инновационные и нетрадиционные методы строительства: тяжелое трамбование, возведение насыпей на сваях и высоких насыпей (высотой до 135 м) для шоссе и железных дорог. К инновациям относятся новые проектные решения, оборудование для строительства и методы контроля, в особенности когда речь идет об уплотнении глубинных и поверхностных слоев. С учетом взаимодействия между оборудованием для уплотнения и грунтом необходимо постоянно оптимизировать процесс уплотнения и способы контроля, что позволяет улучшать качество земляных работ, дорог и железнодорожных конструкций. Представлены результаты почти 35-летних наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

На 4-й Дунайской Европейской конференции (1974 г., г. Блед, Словения) автор выступал с докладом, посвященным автомагистральной развязке, построенной на слабых грунтах (влажность грунта приближалась к 1000%) с использованием технологий тяжелого трамбования и виброуплотнения, а также насыпей на сваях и временных дополнительных нагрузок (Brandl, 1974). Дальнейшие разработки относились к сооружению высоких насыпей для автомагистралей (Brandl, 1980).

На 12-й Дунайской Европейской конференции, проходившей в Словении в 2006 г., автор сделал доклад о долгосрочной работе этих конструкций с учетом последних инноваций и ужесточающихся требований к контролю качества. Принимался во внимание и тот факт, что для строительства объектов транспортной инфраструктуры все чаще предоставляют участки с грунтами плохого качества. Для увеличения долгосрочности и уменьшения затрат на техническое обслуживание дорог, автомагистралей, железных дорог и аэродромов необходимо применение

нового оборудования для уплотнения, оптимизация способов уплотнения и контроля за проводимыми операциями.

1. КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ

Высококачественное уплотнение способствует:

- улучшению напряженно-деформированного состояния грунта (или иного сыпучего материала);
- минимизации влияния объемных изменений (набухания, усадки, морозного пучения);
- контролю потока воды;
- повышению устойчивости откосов и т. д.

В конечном итоге это улучшает состояние дорог, автомагистралей, железных дорог, аэродромов и других земляных сооружений: увеличивается их надежность; улучшается эксплуатационная пригодность (создаются условия для более удобной езды и пр.); снижаются затраты на техническое обслуживание; уменьшается время строительства (в основном благодаря встроенной в цилиндр системе оптимизации и контроля уплотнения); при интенсивном уплотнении отходов минимизируется загрязняющая способность транспорта.



Рис. 1. Виды оборудования для тяжелого трамбования. Верхний левый рисунок: гусеничные краны; верхний правый рисунок: вышка; нижний рисунок: гига-машина

Такие решения, как сооружение опор мостов мелкого заложения на высоких насыпях вместо строительства высоких береговых устоев, способствуют минимизации неравномерных осадок между мостом и подходной насыпью, приводят к значительному снижению расходов на техническое обслуживание.

Важными задачами при уплотнении являются оптимизация процесса, его контроль и документация.

Правильное уплотнение важно не только для грунтов, но и для других сыпучих материалов, в том числе отходов. Все чаще для строительства дорог, подпорных конструкций, облицовки и пр. используют продукты переработки отходов, золу-унос, продукты заводов по сжиганию отходов, строительный мусор, материал переработки старого дорожного покрытия и т. д. Например, продукты выщелачивания отходов из золы-уноса используются для заполнения дорожных конструкций или насыпей, что во многом определяет их гидравлическую проводимость, которая значи-

тельно снижается с уменьшением коэффициента пористости по мере увеличения степени уплотнения грунта.

2. ГЛУБИННОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ УПЛОТНЕНИЕ (ТЯЖЕЛОЕ ТРАМБОВАНИЕ)

2.1. Технология и строительные параметры

Глубинное динамическое уплотнение с помощью тяжелого трамбования применяется в Австрии и Германии с 1930-х гг. При этом изначально существовали ограничения по весу (примерно 10 т) и высоте падения (примерно 10 м) груза. В 1972–1973 гг. вес увеличился до 20...25 т, а высота падения – до 22,5 м. Тогда появилась возможность улучшить слабый грунт и торф для строительства автомагистральной развязки (Brandl, 1974). Тогда же начали использовать разнообразные гусеничные краны, треножки и гига-машины (рис. 1). Тяжелое трамбование стали применять вместе с другими технологиями (например, устраивали каменные колонны диаметром 2...4 м, т. е. осуществляли «динамическое замещение»).

Тяжелое трамбование может применяться почти для всех грунтов и сыпучих материалов (даже для отходов), а также под водой. Благодаря динамическому нагружению оно ускоряет процесс разжижения грунтов и перегруппировки частиц, следовательно, идеально подходит для улучшения грунтов в сейсмически активных районах. Полевые наблюдения показали, что после глубинного динамического уплотнения/консолидации (тяжелого трамбования) сопротивление грунтов сейсмической нагрузке значительно возросло.

Для проектирования, оптимизации и контроля процесса уплотнения, помимо обычных исследований грунта, проводят полевые испытания прессиометром (основные); испытания SPT и другие методы зондирования; измерение давления поровой воды; измерение осадок (средних величин или глубины расположения точек уплотнения, т. е. кратеров, возникших в результате динамического воздействия); спектральный анализ поверхностных волн (SASW) или их непрерывное измерение (CSW). Технология CSW позволяет проникать на большую глубину и контроли-

ровать глубинное улучшение грунта или толстых слоев насыпи; измерение вибраций для оценки качества работ. Их нужно проводить и интерпретировать для определения энергии уплотнения (высоты падения, веса груза, количества серий падений); на результаты испытаний влияет даже форма падающего груза (рис. 2). Например, для приповерхностного выравнивающего уплотнения предпочтительнее плоские грузы сравнительно небольшой массы, а для уплотнения на большой глубине – тяжелые грузы с малым поперечным сечением.



Рис. 2. Виды падающих грузов для тяжелого трамбования. Верхний левый рисунок: бетонный груз; верхний правый рисунок: свинцовый груз с наконечниками для увеличения глубины воздействия; средний левый рисунок: плоский стальной груз для последней стадии уплотнения – выравнивания поверхности; нижние левый и правый рисунки: тяжелые стальные грузы

На оптимизацию уплотнения и распространение вибрации сильно влияют масса и форма падающего груза; высота падения; расположение и расстояния внутри сетки точек уплотнения; количество ударов на точку уплотнения и заходов (один заход обычно включает 3...10 ударов); последовательность

точек уплотнения в параметрах геометрии и времени.

Для мелкозернистых грунтов важную роль играют временное разжижение в процессе динамического воздействия (импульсная нагрузка) и локальное нарушение структуры грунта; сжимаемость и влияние микропузырьков, что особенно важно для слабых грунтов, включающих органические компоненты; локальные ограничения напряжений, которые также встречаются в системах изогнутых слоев листовых пружин; возрастающая водопроницаемость вследствие появления трещин; тиксотропное восстановление.

2.2. Долговременное поведение

На рис. 3 показана железнодорожная развязка, построенная в 1972–1974 гг. на сильносжимаемых неоднородных грунтах. В развязку входят 8-метровая насыпь, 2,5-метровые котлованы, вырытые в торфе, и 8 мостов. Сначала для улучшения грунта применяли тяжелое трамбование. На часть насыпей для выявления возможных осадок воздействовали временной дополнительной нагрузкой, другие части выполняли на каменных колоннах, поверх которых укладывали многослойную композитную структуру из геотекстиля и бетона-стабилизатора (рис. 4). В основе центрального моста (Е4/1 на рис. 3) находилось наплавное сооружение на каменных колоннах, что способствовало уменьшению неравномерных осадок между настилом моста и примыкающими насыпями. Верхнюю часть каменных колонн (на высоте 7–8 м) инъецировали цементным раствором, чтобы исключить чрезмерное набухание слабых органических слоев.

Толщина сильносжимаемых и неоднородных слоев, включающих торф, пылеватые суглинки и супеси (местами с гравием), а также песок с гравием, изменяется от 3 до 6 м. Органические промежуточные слои располагались до глубины 15 м ниже начального уровня грунта. Уровень грунтовых вод сильно колебался в зависимости от погоды и времени года и в среднем был примерно на 2 м ниже уровня поверхности.

Лабораторными испытаниями и полевыми измерениями определены значения модулей

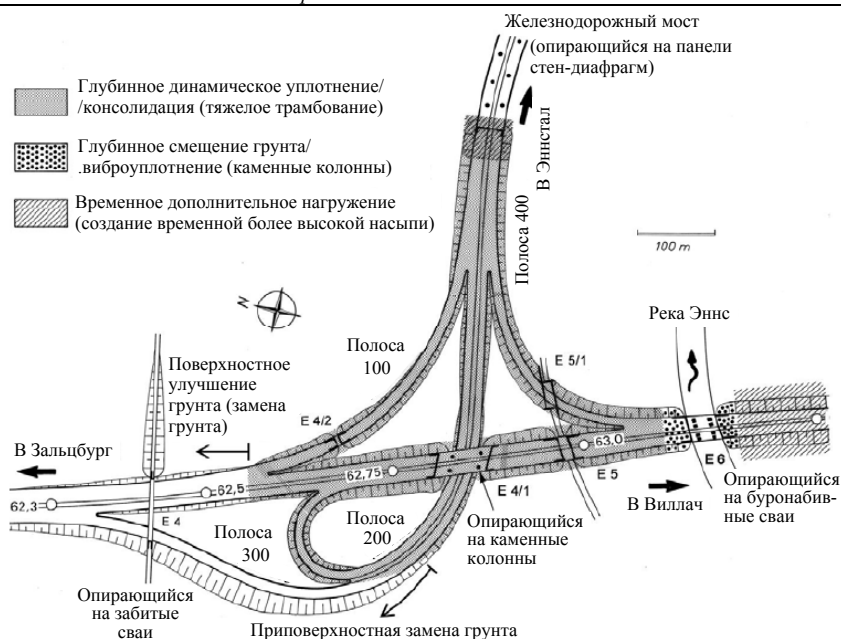


Рис. 3. План автомагистральной развязки на сильносжимаемых неоднородных грунтах (различные методы улучшения грунта)



Рис. 4. Продольный разрез около моста Е6 (см. рис. 3). Примаыкающая насыпь на сваях, тяжелое трамбование, временная дополнительная нагрузка (отсыпка компенсационной насыпи)

сжатия (до $E_s = 0,2 \text{ МН/м}^2$) и естественной влажности (до $w_n = 1000\%$). Степень водонасыщения грунта колебалась в пределах 75...100% и значительно возрастала с глубиной ниже уровня грунтовых вод. Величина предела текучести находилась в диапазоне $w_L = 20...600\%$, а число пластичности – $I_p = 0...250\%$. (Более подробно см. Brandl, 1974.)

Одометрические испытания органических грунтов показали их высокую предрасположенность к ползучести. Коэффициент ползучести для вторичных осадок можно вывести из рис. 5, где приводится теоретическая прямая переходного состояния между первичной и вторичной осадками, которое на самом деле имело место гораздо позднее. Коэффициент ползучести изменяется в очень широком диа-

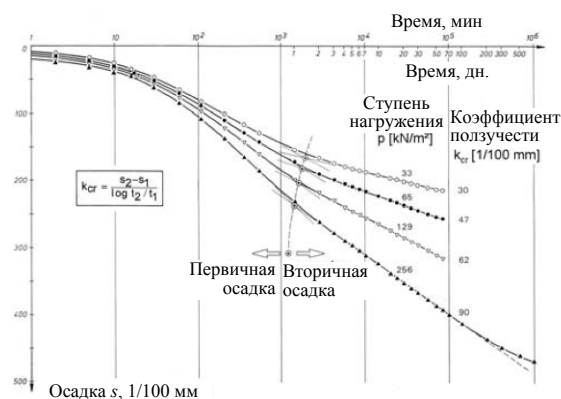


Рис. 5. Кривые «время–осадка» для разложившегося торфа и определение коэффициента ползучести k_{cr} (на основе одометрических испытаний)

диапазоне (см. рис. 6). Одометрические испытания проводили на протяжении 20 лет, одно

из них продолжается до сих пор (с 1971 г). В результате долгосрочных испытаний обнаружилось, что, если мелкозернистый грунт имеет высокий коэффициент пористости и содержит органические компоненты, то процесс вторичной и третичной ползучести продолжается в течение длительного времени. Значительное влияние оказывает и минералогический состав частиц.

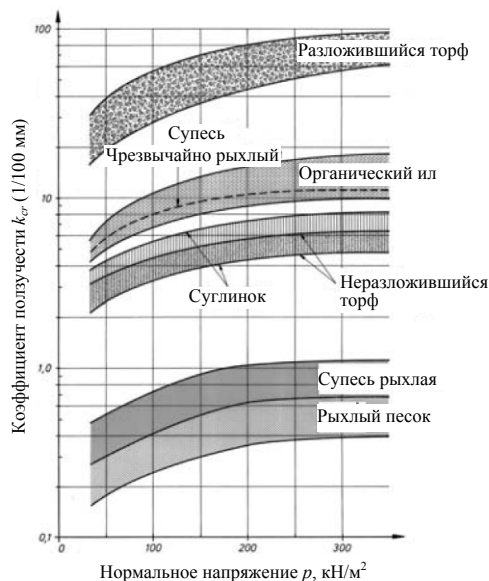


Рис. 6. Коэффициент ползучести k_{cr} для нескольких грунтов во время вторичной консолидации (на основе одометрических испытаний)

Уплотнение обычно применяется при сооружении насыпей, когда до тяжелого трам-

бования требуется частичная замена слоев грунта, находящихся ниже первоначального уровня поверхности (рис. 7). Из-за неоднородности основания, различных высот насыпи или глубин прорезки величина энергии уплотнения колеблется в большом диапазоне, максимальная величина составляет примерно $E = 2500 \text{ тм/м}^2$.

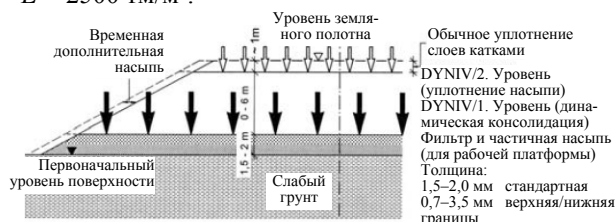


Рис. 7. Стандартная процедура тяжелого трамбования, примененная в 1972–1974 гг. на железнодорожной развязке (см. рис. 3)

Контроль глубинного уплотнения проводился в основном путем сравнения показаний прессиометра до и после тяжелого трамбования (рис. 8, 9). Глубина тяжелого трамбования составляла от 8 до 14 м в зависимости от свойств грунта и приложенной энергии.

На рис. 10 показаны осадки одной из секций развязки, где проводили 7 серий тяжелого трамбования и к насыпи прикладывали временную дополнительную нагрузку. Укладка дорожного покрытия была завершена примерно через 16 лет после открытия автостреды. В этот период вторичные осадки не оказывали существенного влияния на движение по автомагистрали, так как были достаточно однородны.

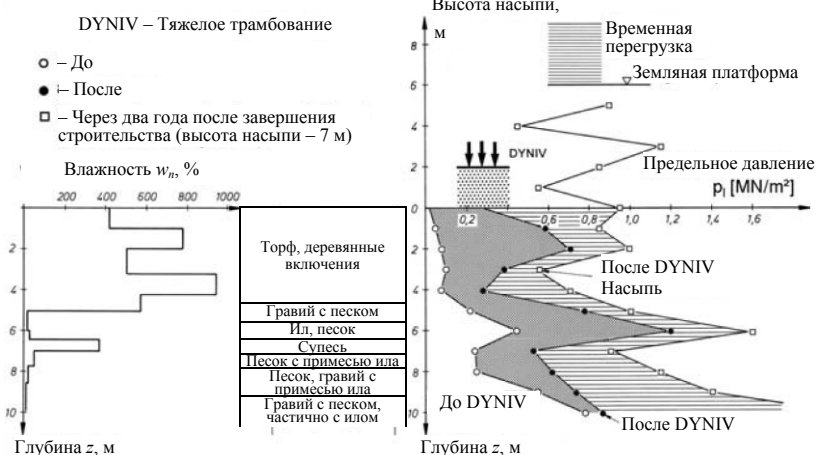


Рис. 8. Примеры прессиометрических испытаний до и после тяжелого трамбования, а также через два года после завершения строительства насыпи

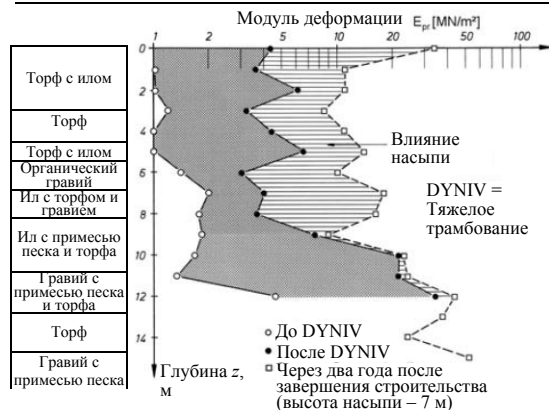


Рис. 9. Примеры прессиометрических испытаний до и после тяжелого трамбования, а также через два года после завершения строительства насыпи

На части развязки после тяжелого трамбования и сооружения насыпи произошла максимальная осадка (рис. 11). До открытия движения здесь требовалось периодическое повторное выравнивание, несмотря на сооружение верхних слоев (компенсация ожидаемых долгосрочных осадок). Но только самое первое выравнивание (в 1977 г.) было допол-

нительным, остальные проводились в связи с настилом последующих слоев дорожной одежды согласно первоначальному проекту (восстановление изношенного покрытия, дренаж в слое асфальта и т. д.).

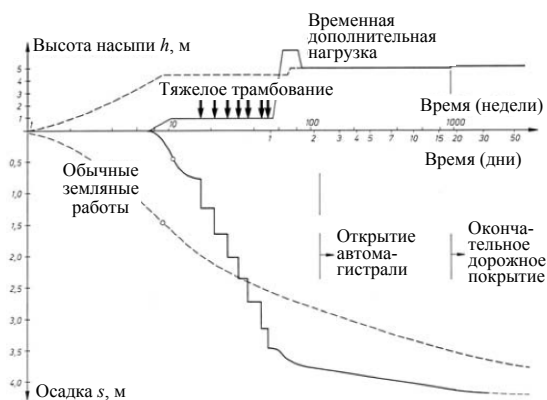


Рис. 10. Кривая «время–осадка» для насыпи, примыкающей к железнодорожному мосту (полоса 400 на рис. 3). Влияние тяжелого трамбования и временной дополнительной нагрузки на пик насыпи. Пунктиром для сравнения показано влияние обычных земляных работ (прогнозируемая кривая)

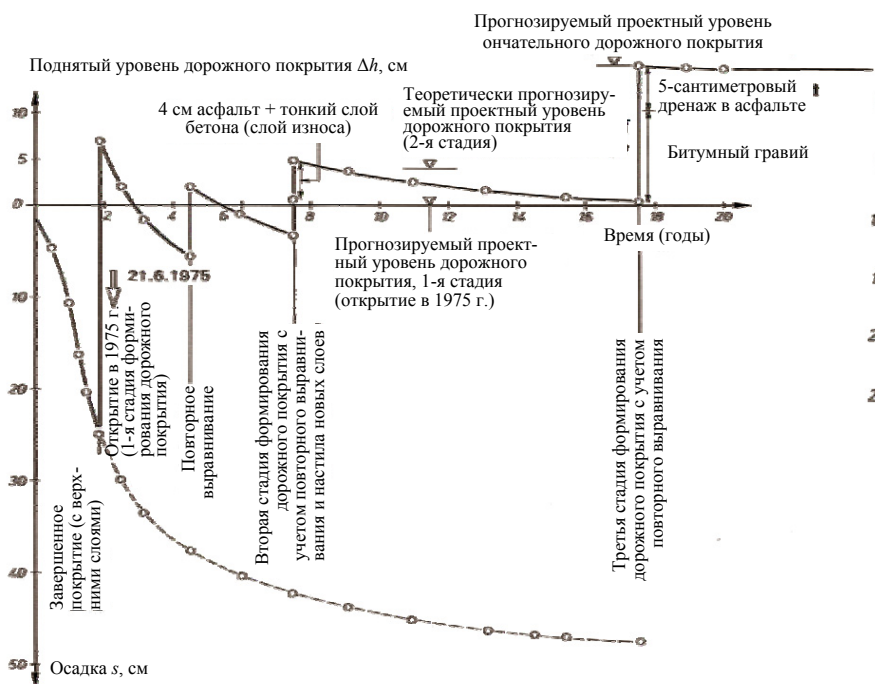


Рис. 11. Кривые «время–осадка» и «время–уровень дорожного покрытия». Периодические меры для обеспечения комфортных условий для вождения (проектная скорость $v = 150$ км/ч) даже на самом неблагоприятном участке автомагистральной развязки (см. рис. 3)

На рис. 12 показаны кривые «время–смещение», описывающие среднее поведение участка дороги в долгосрочной перспективе. Они соотносятся с проектным уровнем дорожного покрытия и иллюстрируют периодическое повторное выравнивание и настил дополнительных структурных слоев дорожной одежды согласно первоначальному проекту. Поскольку конечная величина $\Delta h' = 0$, проектный и реально существующий уровни совпадают.

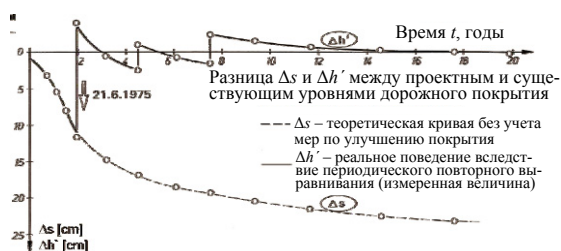


Рис. 12. Кривые «время–смещение», соотносимые с проектным уровнем дорожного покрытия, с учетом периодического повторного выравнивания и настила дополнительных поверхностных слоев (слои износа) – ср. с рис. 10.
Пример средней деформации

Опишем долговременную работу данной автомагистральной развязки. Проект был одним из первых, где использовали тяжелое трамбование и насыпи на сваях. Применявшиеся до этого грузы весом 20...25 т, падающие с высоты до 22,5 м, не получили мирового признания, другую проблему представляли мелкозернистые и органические грунты с влажностью до 1000%. Несмотря на неблагоприятные условия, была достигнута хорошая работа всей развязки. Общая максимальная осадка (в том числе прогнозируемые деформации вследствие тяжелого трамбования и временного дополнительного нагружения) составила примерно 5 м и произошла в основном во время строительства. Локальное повторное выравнивание первоначального (временного) дорожного покрытия для гарантии качества, обеспечиваемого подрядчиком, понадобилось лишь через 2,5 года после открытия автомагистрали. Эту процедуру применяли лишь к тем секциям, где уплотнение осуществляли путем тяжелого трамбования.

Долгосрочная ползучесть после открытия дороги составляла 5...20 см, процесс происходил достаточно однородно. Еще более хороший результат был получен для насыпей на сваях – каменных столбах со сложным межколлонным перекрытием (геосинтетический материал, цементный стабилизатор, щебень). Однако здесь были более благоприятные грунтовые условия. Временное дополнительное нагружение насыпи также было очень успешным, особенно если его проводили вместе с тяжелым трамбованием.

В соответствии с австрийскими руководствами и нормами по строительству автодорог завершение дорожного покрытия должно проводиться через 5,5 лет после открытия автомагистрали (2-я стадия формирования дорожного покрытия, см. рис. 11, 12). Окончательное завершение произошло через 16 лет, когда на старую структуру был уложен более прочный слой дорожной одежды (слой износа). Это было необходимо из-за значительного ухудшения дорожного покрытия (глубокие пробойны) в результате интенсивного движения. Влияние неравномерных осадок было незначительным. Тем не менее, обе процедуры по смене дорожного покрытия (через 5,5 и 16 лет после открытия автомагистрали) включали повторное выравнивание (см. рис. 11, 12).

Подводя итог, можно сказать, что данная автодорожная развязка успешно работала в течение 30 лет. На протяжении всего периода сохранялась проектная скорость движения $v = 150$ км/ч (за исключением ее ограничения по юридическим или экологическим причинам).

Геотекстиль использовали также на протяжении всей автодороги и на прилегающих дорогах. В 1971–1973 гг. применение этого нового синтетического материала активно обсуждалось. Критики ставили под сомнение ее долгосрочность, не принимая во внимание взаимодействие между геотекстилем и грунтом.

Долгосрочные наблюдения за укрепленными грунтовыми структурами и отдельными геосинтетическими включениями показали, что геотекстиль и основание должны рассматриваться как единое целое, работающее согласно схеме на рис. 13. Высокая несущая способность геосинтетических материалов

прежде всего требовалась во время строительства и сразу после сооружения насыпи. В этот период несущая способность слабых грунтов минимальна и постепенно увеличивается по мере консолидации, в то время как несущая способность промежуточных геосинтетических слоев уменьшается под воздействием ползучести. Оба процесса происходят более или менее экспоненциально со временем и/или линейно по отношению к логарифму времени. Первичная консолидация происходит даже быстрее, чем ползучесть отдельных геосинтетических слоев. Соответственно несущая способность всей системы, состоящей из геотекстиля и грунта, не изменяется, а в большинстве случаев – растет со временем.

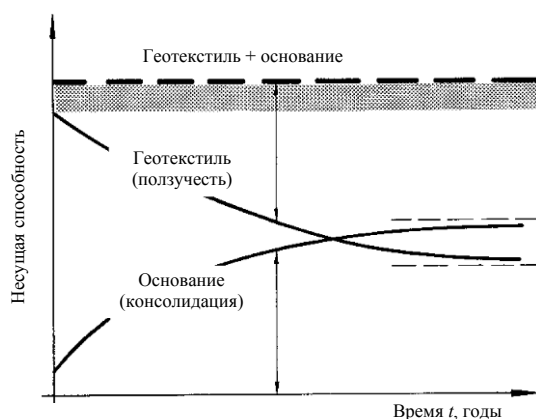


Рис. 13. Низкая насыпь с укрепленным геосинтетическим основанием на сильносжимаемом мелкозернистом грунте. Долгосрочные процессы изменения несущей способности грунта (консолидация) и геосинтетического материала (ползучесть)

Геосинтетические материалы, покрывающие такие элементы фундаментов глубокого заложения, как насыпи на сваях, имеют локальные ограничения по напряжению. Во избежание чрезмерной ползучести долговременные деформации не должны превышать 3%. Ограничения по напряжениям можно уменьшить, закруглив концы оголовников свай или расширив верхнюю зону каменных/песчаных колонн. Во избежание в долгосрочной перспективе корытообразных осадков поверхностные слои грунта между элементами фундаментов глубокого заложения должны быть изогнуты и хорошо уплотнены. Для каменных или песчаных колонн не требуются оголовники, распределяющие нагрузку, но

они должны расширяться к вершине. Часто устанавливают сваи большого диаметра без оголовников. В таких случаях геосинтетические материалы выполняют основную функцию по распределению увеличившейся нагрузки.

Автор демонстрировал рис. 13 во время дискуссии на 4-й Дунайской Европейской конференции в городе Блед в 1974 г., с тех пор справедливость концепции неоднократно подтверждалась.

2.3. Измерения и анализ

Последние исследования были сосредоточены на разработке встроенного в оборудование механизма, позволяющего осуществлять непрерывную оптимизацию, контроль и выпуск технических данных по уплотнению. Новая система в какой-то степени аналогична встроенной в дорожный каток системе непрерывного контроля процесса уплотнения. Подобное исследование проводилось и при улучшении глубинных слоев грунта путем гидровиброуплотнения, в этом случае вибратор использовался и как измерительный элемент. Основная задача всех этих методов – регистрация взаимодействия между уплотняющим оборудованием и уплотняемым грунтом.

На рис. 14 показана типичная диаграмма, иллюстрирующая уменьшение максимальной путевой скорости при удалении от центра воздействия. Такие корреляции особенно важны, если тяжелое трамбование ведется вблизи существующих зданий, трубопроводов и т. д., однако они не дают существенной информации о степени уплотнения. Эти данные можно получить, измеряя ускорение падающего груза, которое будет пропорционально силе реакции грунта. Однако силы реакции включают уплотнение, замещение, разжижение грунта, избыточное поровое давление, локальное разрушение грунта, пластические и упругие деформации и т. д. Поэтому сила реакции вряд ли подходит для четкого определения характеристик, необходимых для надежного контроля процесса уплотнения. Напротив, постепенное затухание свободных колебаний грунта, вызванных

падением груза, после каждого удара описывает взаимодействие грунта с падающим грузом и позволяет осуществлять оптимизацию и контроль процесса тяжелого трамбования (рис. 15). Основные положения данной инновационной концепции изложены в работе Korf & Paulmichl (2005).

Предположив, что упругое затухание свободных колебаний грунта происходит при увеличении давления поровой воды, можно вывести теоретическую аппроксимацию и решить ее, как систему, описывающую единичную вязкодемпфированную степень свободы (SDOFS) (Adam, 2003).

Реакция свободного колебания z в любой промежуток времени $t = nT_{per}$ (например, верхний экстремум) и/или после периода вибрации $T_{per} = 2\pi/\omega_d$ составляет

$$z_n \equiv z(nT_{per}) = a_p e^{-\zeta \omega n T_{per}} \quad (1a)$$

$$z_{n+m_{per}} \equiv z[(n+m_{per})T_{per}] = a_p e^{-\zeta \omega (n+m_{per}) T_{per}} \quad (1b)$$

где ω – естественная недемпфированная круговая частота, рад/с; ω_d – круговая частота демпфирования, рад/с.

Зависимость реакций вибрации от расстояния m_{per} периодов всегда постоянна, следовательно,

$$z_n/z_{n+m} = e^{\zeta \omega m_{per} T_{per}} \quad (2)$$

Логарифмический коэффициент демпфирования определяется по формуле

$$\delta_{m_{per}} = \ln(z_n/z_{n+m_{per}}), \quad (3)$$

а коэффициент демпфирования Лера ξ (безразмерный)

$$\xi = \frac{\delta_{m_{per}}}{2m_{per}\pi \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_{m_{per}}}{2m_{per}\pi}\right)^2}} \quad (4)$$

Таким образом, измеряя ускорение падающего груза во время затухания свободных колебаний грунта и рассматривая систему единичной вязкодемпфированной степени свободы (SDOFS), можно определить частоту демпфирования ω_d и коэффициент демпфирования Лера ξ . По уравнению (5) можно вычислить естественную недемпфированную круговую частоту ω

$$\omega = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (5)$$

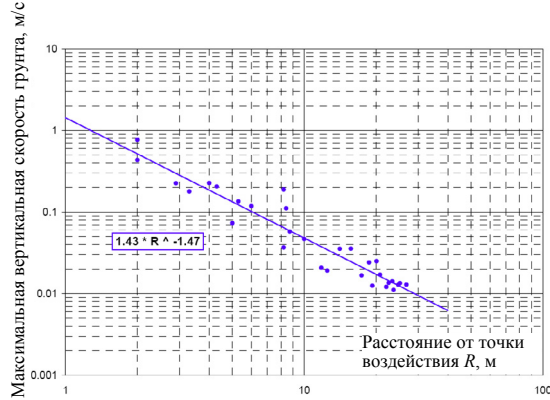


Рис. 14. Зависимость максимальной вертикальной скорости грунта от расстояния до точки уплотнения (тяжелое трамбование слабого грунта, состоящего из отходов керамической и гипсовой промышленности. Груз весом 16,5 т падает с высоты 15 м)

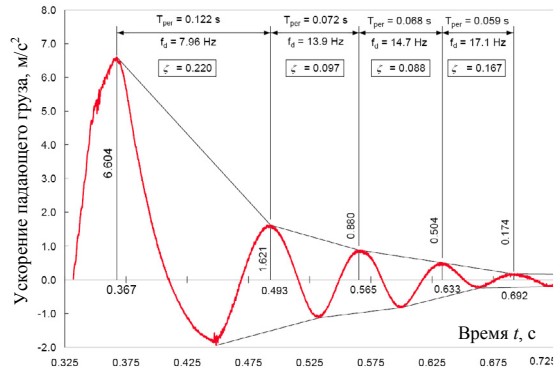


Рис. 15. Затухание свободных колебаний природного грунта, возникших после падения груза ($d = 1,8$ м, $m_F = 16,5$ т) с высоты 1 м.

Динамические параметры вязкодемпфируемой системы SDOF: T_{per} – период, с; $f_d = \omega_d/2\pi$ – естественная частота демпфирования, Гц; ξ – вязкий коэффициент демпфирования.

2.4. Численное моделирование

В процессе уплотнения способом тяжелого трамбования грунт ниже первоначального уровня поверхности нагружается по мере увеличения числа ударов. Изменения динамических условий системы зависят от нескольких параметров. Для расчета специфических воздействий проводились широкомасштабные исследования параметров с использованием

метода граничных элементов (ВЕМ), для чего требовалась только дискретизация границы (Banerjee, 1994). Поэтому данный метод подходил для решения линейно-упругих полупространственных задач. Предположение о том, что линейно-упругое поведение грунта подходит для решения настоящей проблемы, справедливо, поскольку процесс затухания колебаний после удара молота можно с достаточной точностью свести к упругой задаче. Система «груз–полупространство» моделируется с помощью метода граничных элементов в области частоты с использованием симметричной вращающейся модели (рис. 16). Эта численная модель соотносится с результатами полевых измерений, проводимых во время широкомасштабных испытаний. Глубина проникновения T изменяется. Если проникновение груза не происходит, можно применить аналитический подход, используя аналогию SDOF. Так называемая аналогия Лисмера описывает отношения между динамическими свойствами полупространства и пружинно-амортизаторным элементом, который сокращает полупространство с помощью неограниченного количества отдельных степеней свободы, приводя его к системе с единственной степенью свободы (система SDOF). Коэффициенты пружины и демпфера (K и C) тела Кельвина–Фойгта определяют по формулам Лисмера и Вольфа (Paulmichl, 2004). Если параметры K и C известны, эквивалентная система SDOF решается в области частоты для проверки надежности численного моделирования системы «груз–полупространство» для $T = 0$.

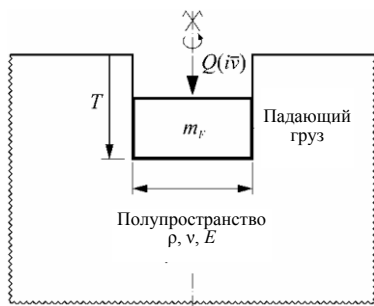


Рис. 16. Механическая модель, созданная с помощью метода граничных элементов

Аппроксимации $T > 0$ для коэффициентов пружины и демпфера также приемлемы, но с

ограничениями (свойства материала, глубина проникновения). Поэтому численные модели, выполненные с использованием метода граничных элементов, создавались прежде всего для анализа затухания свободных колебаний грунта. Система с параметрами, построенная согласно рис. 16, решается в частотной области по программе GPBEST. Комплексная функция передачи выводится путем качания (sweeping) частоты $\bar{\nu}$ гармонической единицы нагрузки, прикладываемой к падающему грузу. Демпфирование материала не учитывается. Сравнение передаточных функций для $T = 0$, построенных методом граничных элементов, с результатами, полученными при применении аналогии SDOF, подтверждает надежность численных решений (рис. 17).

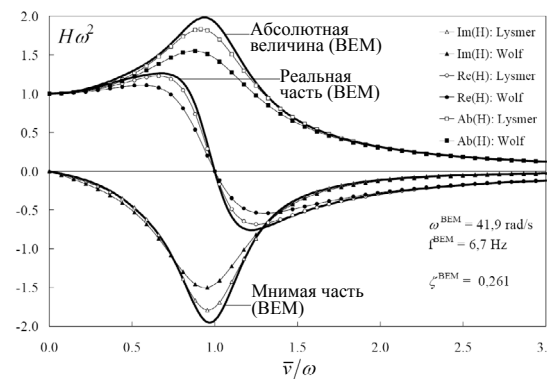


Рис. 17. Передаточные функции (реальная часть, мнимая часть, абсолютная величина) в центре груза. Анализ методом граничных элементов и решения по аналогии SDOF

Груз: $r = 0,90$ м, $m = 16,5$ т, $T = 0$.

Полупространство: $\rho = 2000$ кг/м³, $\nu = 0,212$, $E = 16$ МН/м²

Представим передаточную функцию эквивалентной вязкой демпфированной системы SDOF:

реальная часть

$$H_R = (\omega^2 - \bar{\nu}^2) \chi_p^2 \quad (6a)$$

мнимая часть

$$H_I = (-2\zeta_p \omega \bar{\nu}) \chi_p^2 \quad (6б)$$

абсолютная величина

$$H = \sqrt{H_I^2 + H_R^2} = 1/\sqrt{(\omega^2 - \bar{\nu}^2)^2 + (2\zeta_p \omega \bar{\nu})^2} \quad (6в)$$

Функция амплификации (Paulmichl, 2004)

$$\chi_p = \frac{a_p}{z_{stat}} = H\omega^2 = 1 / \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\bar{\nu}}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\bar{\nu}}{\omega}\right)^2} \quad (7)$$

Здесь a_p – амплитуда динамической реакции, м; z_{stat} – статическое смещение, м; $\bar{\nu}$ – частота гармонической нагрузки, рад/с; ω – естественная частота (недемпфированная), рад/с; ζ – коэффициент демпфирования.

Подставляя резонансную частоту: уравнение (8) в уравнение (7) для частоты $\bar{\nu}$, мы выводим максимальную функцию усиления: уравнение (9), из которой определяем коэффициент демпфирования ζ :

$$\omega_\zeta = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \omega \quad (8)$$

$$\chi_{p,max} = a_{p,max}/z_{stat} = 1 / (2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}) \quad (9)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\chi_{p,max}^2}} \right)} \quad (10)$$

На рис. 18 показана естественная недемпфированная частота полупространства (соответствующая недемпфированной частоте $\omega/2\pi$ системы SDOF), зависящая от модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν . Моделирование проводилось для падающего груза, применяемого при полевых измерениях. На первом теоретическом шаге корреляции описывается идеализированное состояние, когда падающий груз стоит на поверхности полупространства, следовательно, $T = 0$. На рис. 16 было показано, что естественная частота полупространства в большой степени пропорциональна $E^{1/2}$ и увеличивается вместе с коэффициентом Пуассона ν .

Численное моделирование методом граничных элементов показало, что коэффициент демпфирования Лера ξ , выводимый по аналогии SDOFS, зависит от коэффициента Пуассона и практически не зависит от модуля упругости полупространства E на всех глубинах проникновения T в грунт падающего груза. В то же время коэффициент ξ зависит от глубины (рис. 19, слева).

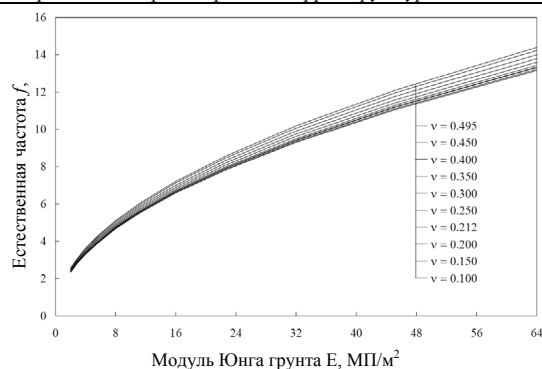


Рис. 18. Зависимость естественной частоты полупространства от модуля Юнга и коэффициента Пуассона ν . Кривые описывают работу груза диаметром 1,8 м и весом 16,5 т. Проникновение в грунт и затухание отсутствуют

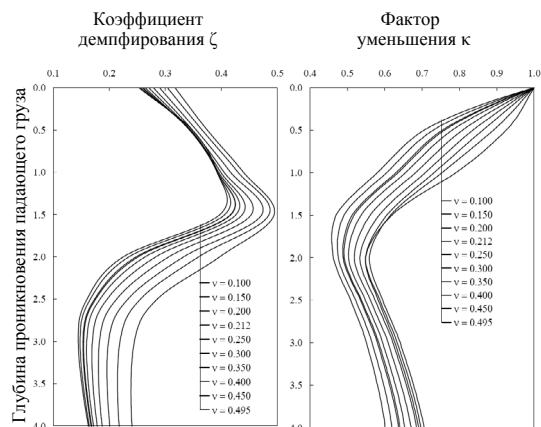


Рис. 19. Зависимость коэффициента вязкого демпфирования Лера ξ и фактора уменьшения k от глубины проникновения T в грунт падающего груза. Коэффициент Пуассона ν является параметром. Диаметр груза – 1,8 м, вес – 16,5 т. Плотность грунта $\rho = 2,0 \text{ т/м}^3$, $E = 16 \text{ МН/м}^2$, демпфирование отсутствует

Влияние глубины проникновения груза (глубину воронки точки уплотнения) можно определить с помощью фактора уменьшения k , который зависит от коэффициента Пуассона (см. рис. 19, справа). На кривых отражены параметры груза (диаметр, масса) и плотность грунта.

Данная теория, а также полевые измерения позволили создать четкую корреляцию между измеренными параметрами вибрации ($\omega/2\pi$ и ξ) и параметрами грунта (E и ν) в идеальном линейно-упругом полупространстве: на рис. 19 (слева) и на отдельных площадках, зная

параметры T и ξ , можно получить коэффициент Пуассона ν . Зная коэффициент ν и величину естественной частоты $\omega/2\pi$ (см. рис. 18) для случая $T = 0$ можно определить модуль E . На самом деле груз проникает в грунт, и это можно рассматривать как умножение модуля E для $T = 0$ на фактор уменьшения k для $T > 0$ (см. рис. 19). Эта теоретическая аппроксимация допустима, так как можно доказать, что линии одинаковой частоты (изолинии) представляют осе-аффинное воспроизведение единственной математической функции.

3. ВЫСОКИЕ НАСЫПИ

3.1. Общие сведения

Современное оборудование для уплотнения грунта, оптимизации и контроля данного процесса открыли возможности для сооружения высоких насыпей для дорог, автомагистралей и железных дорог, которые могут заменять мосты (рис. 20). В большинстве случаев при возведении альтернативных сооружений снижаются строительные расходы, упрощается доставка материалов, поскольку используются материалы из карьеров и с близлежащих площадок, оставшиеся после земляных работ, среза склонов и т. д. Насыпи могут быть засажены растительностью, что благоприятно влияет на окружающую среду. Кроме того, затраты на их техническое обслуживание гораздо меньше, чем на поддержку мостов. Работа высоких насыпей улучшается со временем, в то время как мосты (в особенности из предварительно напряженных железобетонных конструкций) изнашиваются. Минимизируются неравномерные осадки между устоями моста и примыкающими насыпями. Наконец, высокие насыпи могут служить противовесом для повышения устойчивости откосов, в то время как для мостов потребуются дорогостоящие фундаменты, а также меры по предотвращению локального разрушения откосов.

Неравномерные осадки между устоями моста и высокими примыкающими насыпями можно значительно уменьшить при устройстве на насыпях. Однако для этого необходимо соорудить насыпь задолго до строительства моста.



Рис. 20. Высокая насыпь для автомобильной или железной дороги, сооружаемая вместо моста.

Схема, иллюстрирующая акустический и оптический экран для близлежащей деревни, создаваемый с помощью соответствующих зеленых насаждений на склоне насыпи. Также показана возможность отсыпки дополнительного слоя из грунта или отходов там, где к насыпи прилегает холм

Опыт показывает ограниченность обычных критериев для сопоставления насыпей и мостов. Что предпочтительнее в данной ситуации, мост или насыпь, нужно решать исходя из конкретного проекта. Для выявления преимуществ и недостатков насыпей по сравнению с мостами необходимо рассмотреть следующие основные факторы:

- конкретную локальную ситуацию, в том числе существующие здания и осадки;
- геоморфологию, устойчивость существующих склонов;

- свойства грунта, в том числе уровень грунтовых вод на склоне;

- допустимые общие и дифференциальные осадки гребня насыпи (по отношению к выравниванию дорожного покрытия или железнодорожных путей);

- доступность нужных для насыпи материалов;

- баланс материала между откопкой грунта или срезом склона и объемом насыпи применительно к определенной секции строительства;

- длину и удобство подъезда транспорта к материалам для насыпи;

- количество, диаметр, длину и расположение возможных дренажных труб в основании или теле насыпи;

- график выполнения строительных работ;

- стоимость строительства;

- затраты на долгосрочную техническую поддержку;

- климатические условия, экологический и эстетический аспекты.

3.2. Устойчивость высоких насыпей

С экономической точки зрения постоянно возникают разногласия по поводу необходимого для насыпей коэффициента запаса, в особенности, если речь идет об устойчивости склонов большой земляной структуры, расположенной в сложной неокультуренной местности или на неустойчивом склоне.

Так называемый допустимый коэффициент запаса, используемый для описания устойчивости насыпей и проявлений неустойчивости конструкций, является эмпирическим методом прогнозирования определенной степени риска разрушения, принимаемый как допустимый со стороны заказчика или общественности. В итоге ни одно сооружение не может быть абсолютно устойчивым и безопасным, поэтому задачей проектирования является, скорее, выявление допустимого уровня риска разрушения, чем определенного коэффициента запаса. Корреляция между понятиями «допустимый коэффициент запаса» и «риск разрушения» зависит:

- от уровня знаний о существующих условиях (геотехнических параметрах, нагружении, пьезометрическом режиме и т. д.);

- точности и надежности расчетной модели (например, грубый анализ или применение метода конечных элементов);

- типа и последствий разрушения (например, если получено предупреждение об опасности, существует угроза для человеческой жизни и т. д.);

- типа конструктивной схемы, например, когда откос пересекает насыпь (в основном гибкая схема) или мост (который более чувствителен к деформациям опор), а также возможности внесения корректировок и простоты ремонта;

- доступности средств на случай непредвиденной ситуации, если параметры реакции конструкции на нагрузку превысят определенный порог (например, применение предварительно напряженных анкеров для опор моста, если смещения слишком велики);

- ожидаемого качества сооружения;

- надежности мониторинга во время и после завершения строительства;

- интенсивности технической поддержки.

Из вышеизложенной информации очевидно, что допустимый коэффициент запаса может существенно меняться в зависимости от проектных условий. Обычно, если хорошо известны грунтовые условия, в анализе используют сложные расчетные модели, площадка находится под постоянным контролем для своевременного предупреждения о начинающихся разрушениях. Если конструктивная система гибкая (например, насыпь) или можно провести быстрый ремонт (например, в случае масштабной деформации дорожного покрытия), можно уменьшить допустимый коэффициент запаса, не увеличивая уровня риска. Формально для расчета допустимого коэффициента запаса для ответственных конструкций следует применять анализ рисков и рассматривать все вышеперечисленные факторы. Однако, поскольку этот анализ не всегда прост и надежен, возможна эмпирическая корректировка коэффициента запаса на основе прошлого опыта.

Тем не менее, все упомянутые факторы указывают на необходимость увеличения коэффициента запаса, когда грунт и условия нагружения достаточно неопределенны, расчетная модель выполнена в общих чертах, конструкция предрасположена к деформациям или прогрессирующим разрушениям, не имеет никаких дополнительных средств защиты и/или последствия локального обрушения будут для нее критическими.

3.3. Долговременная работа высоких насыпей

Во время проведения 4-й Дунайской Европейской конференции в Бледе (Словения, 1974 г.) в Австрии проектировались или строились несколько насыпей высотой от 60 до 135 м. (До этого высота насыпей составляла от 30 до 70 м.) Подробная информация о проектировании и строительстве (в том числе в зимнее время) изложена в работах автора (Brandl, 1980; Correa/Brandl, 2001).

Личный опыт строительства (более чем за 35 лет) многочисленных насыпей высотой от 30 до 135 м и длиной примерно от 150 до 700 м можно обобщить следующим образом:

1. Обычно коэффициенты устойчивости против разрушения грунта и склонов в высо-

ких насыпях сразу после окончания строительства имеют наименьшие значения. В мелкозернистых грунтах, а также в водонасыщенных зонах насыпи и естественном грунте может возникнуть избыточное поровое давление. Однако в долгосрочной перспективе постепенное уменьшение надежности возможно только при отказе дренажной системы, низком качестве материала, используемого для строительства насыпи, или его недостаточном уплотнении, а также если насыпной материал и/или естественный грунт предрасположены к постоянному разрушению из-за очень низкой остаточной прочности на сдвиг.

2. При оценке устойчивости склонов высоких насыпей необходимо учитывать возможное уменьшение угла трения в нижней части насыпи, что зависит от гранулометрического состава, размера частиц и прочности материала насыпи. Повышенная перегрузка может вызвать дробление частиц, что приводит к выравниванию линии прочности Мора–Кулона на диафрагме σ – τ .

3. Проектируя высокие насыпи, нужно делать террасы на вертикальной плоскости на расстоянии 20...50 м в зависимости от насыпного материала, угла наклона, его устойчивости и местного климата. Ширина террас должна составлять не меньше 3 м. Они необходимы для технического обслуживания, упрощают процесс локального упрочнения и действуют как зоны торможения в случае локальных оползней склона или разжижения грунта (например, во время ливневых дождей или землетрясений).

При правильном выборе материала для насыпи и аккуратном уплотнении собственная осадка (ss) высокой насыпи (без осадок грунта) обычно составляет 1% от высоты насыпи. При использовании высококачественного насыпного материала и интенсивном его уплотнении осадка может уменьшиться примерно до $ss = 0,1...0,2\%$. С другой стороны, недостаточное уплотнение и наличие большого количества пылевато-глинистых промежуточных слоев может привести к осадкам порядка $ss = 1...2\%$ и даже больше (в зависимости от пропорции и качества «слабых» промежуточных слоев).

Расползание высоких насыпей будет незначительным, если они связаны с природным грунтом с помощью вырезанных ступеней.

Долгосрочный опыт работы с многочисленными насыпями для автодорог показывает, что во многих случаях такие конструкции имеют ряд преимуществ перед мостами. Они не наносят вреда окружающей среде, во время их строительства упрощается баланс вырезанных и отсыпанных объемов, в долгосрочной перспективе они не требуют серьезного технического обслуживания. Если материал для насыпи выбран правильно и тщательно уплотнен, неравномерные осадки гребня насыпи, а следовательно, и дорожного полотна, обычно меньше, чем при сооружении низких насыпей на слабых или неоднородных грунтах.

Примерно до начала 1990-х гг. непрерывный контроль процесса уплотнения (ССС) и встроенная в дорожные катки система оптимизации уплотнения находились в стадии разработки. Сегодня благодаря усовершенствованному оборудованию для уплотнения, а также новым методам и технологиям контроля процесс строительства высоких насыпей для шоссе (и даже для железных дорог) значительно упростился. Насыпи, являясь более экономичными и экологически чистыми, могут стать альтернативой мостам. Последние, в свою очередь, тоже предоставляют все более высокие коэффициенты запаса.

Высокие насыпи, пересекающие неустойчивые склоны в сейсмически активных районах, должны локально укрепляться с помощью геосинтетических материалов, улучшающих их внешнюю и внутреннюю (общую) устойчивость насыпей. Кроме того, они могут способствовать уменьшению неравномерных осадок гребня насыпи.

Особого внимания заслуживает проектирование дренажных труб, расположенных в основании или в теле высоких насыпей. Нагрузка на эти конструкции зависит от жесткости грунта вокруг дрен, а следовательно, и от степени уплотнения насыпи. Недостаточное уплотнение слоев насыпи с любой стороны от дренажной трубы и высокая жесткость самой конструкции способствуют концентрации напряжений на дренах. На многих строительных площадках Австрии были измерены вертикальные давления,

значения которых превышали геостатическую нагрузку в 1,5...2,1 раза. Боковое напряжение тоже увеличивается, но меньше, чем вертикальное, поэтому при проектировании его не следует учитывать (в запас).

На рис. 21 и 22 показаны примеры железобетонных дренажных конструкций, заложенных в основание автодорожной насыпи. Максимальная перегрузка на данной площадке составляла 60 м, общая высота насыпи от подножия до гребня – 135 м.

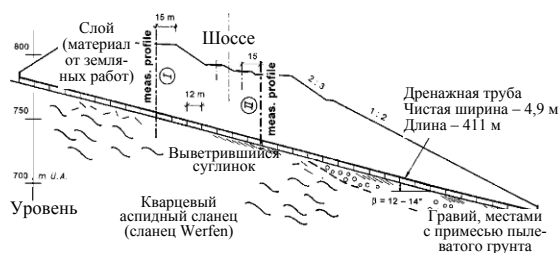


Рис. 21. Поперечный разрез высокой насыпи с двумя профилями измерений для определения напряжения на дренажную трубу, заложенную в основании насыпи

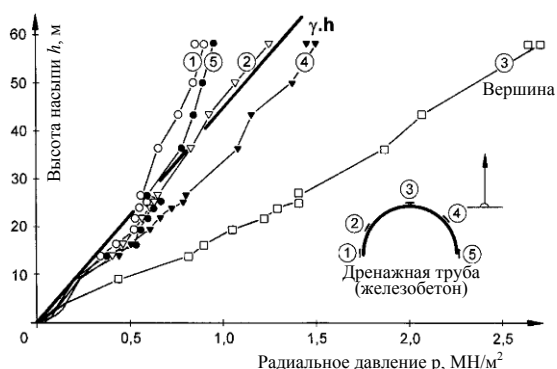


Рис. 22. Измеренные величины распределения природного давления на железобетонную дренажную трубу (см. рис. 21)

Склоны высоких насыпей необходимо озеленять, благодаря зеленым насаждениям на насыпях:

во влажных и сухих областях контролируется поверхностная эрозия;

температура грунта и условия влажности, поэтому усадка и набухание грунта умеренные;

смыв поверхности замедляется, что уменьшает влияние засухи и наводнений;

растения могут задерживать загрязняющие вещества, обусловленные интенсивным движением по шоссе;

возможно снижение общих затрат на техническое обслуживание, поскольку растения восстанавливают территорию после нанесения локального ущерба;

при посадке деревьев разной формы и видов можно увеличить экологическую ценность насыпи.

Мгновенный контроль эрозии склонов насыпи может осуществляться с помощью геосинтетических материалов и биотекстиля (полос из джута) или их комбинации (биогеокомпозиатов). Они создают устойчивую неэрозирующую среду, в которую высаживаются растения, обеспечивающие последнюю стадию контроля эрозии. Некоторые материалы содержат семена и питательные вещества, которые поступают к растениям, поскольку в долгосрочной перспективе геосинтетика и биотекстиль биологически разлагаются.

На оптимальное озеленение влияют местный климат, флора, материал насыпи и расположение растений. При биологической стабилизации высоких и больших насыпей необходимо, по возможности, учитывать особенности и биологическую вариативность местной флоры.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ

4.1. Факторы, влияющие на качество уплотнения

Высокое качество уплотнения способствует улучшению работы грунта или скальных пород, поэтому оно очень важно для устойчивости и долгосрочной работы больших насыпей. Самое лучшее дорожное покрытие не имеет смысла, если основание или насыпь испытывают избыточные неравномерные деформации.

Таким образом, проектирование и строительство, в особенности уплотнение, играют очень важную роль. Особый интерес представляют факторы, влияющие на приповерхностное уплотнение (в слоях грунта). Ниже приводится список основных взаимодействующих параметров.

Параметры материала: тип грунта; гранулометрический состав; форма частиц (угловатость, форма, поверхностная текстура); влажность; пределы текучести и раскатывания пылеватых частиц; жесткость уплотняемого слоя; толщина насыпного слоя; жесткость и параметры грунта для подстилающего слоя; свойства соединения между последующими слоями.

Параметры оборудования (вибрирующего) катка: направление результирующего динамического контактного усилия; частота импульса; амплитуда барабана; барабан, приводимый и не приводимый в движение; диаметр барабана; вес катка; зависимость между массами рамы и барабана, а также общей массой и весом вибрирующего катка; масса барабана, эксцента и рамы и их соотношения; форма и расположение барабана (цилиндрическая, полигональная и др.); состояние катка (цилиндрическая форма барабана, несущая способность, скольжение приводимых в движение шин); каток на тяге или самоходный.

Параметры использования: количество проходов катка; скорость и направление движения катка; наклон уплотняемой зоны; форма поверхности, наклон и гладкость уплотняемого слоя и отдельные неровности.

Рабочее состояние вибрирующих барабанных катков: непрерывный контакт; частичный подъем (частичная потеря контакта); двойной шаг; качательное движение барабана (следует исключить); хаотическое движение барабана (необходимо избегать).

Рабочее состояние колебательных цилиндрических барабанов: прокалывающее движение; скользяще-прокалывающее движение.

Приведенный список указывает на сложность процесса уплотнения, что на практике часто недооценивается или даже не признается. Например, кривые уплотнения грунта или другого сыпучего материала, иллюстрирующие зависимость между плотностью и влажностью, зависят не только от геотехнических характеристик, но и оборудования для уплотнения, энергии уплотнения и т. д. (рис. 23). Поэтому кривые Проктора представляют только идеализацию, однако они доказали свою применимость на практике.

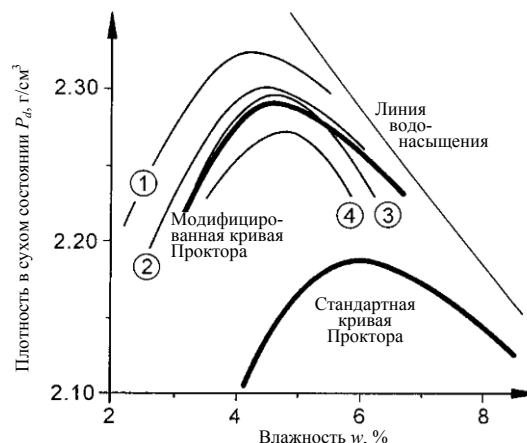


Рис. 23. Пример кривых уплотнения (зависимости плотность–влажность) для хорошо отсортированного гравия с песком и различного оборудования: 1 – вибрирующий каток; 2 – гладкий статический барабанный каток; 3 – вибрирующий плитный уплотнитель; 4 – падающий груз

Качество уплотнения также зависит от времени года и погоды. В жаркие летние месяцы требуется лишь опрыскивание слоев грунта, а зимой сталкиваются с проблемой частичного замерзания насыпного материала. Опыт работы при минусовых температурах показал, что уплотнение лучше не проводить при температуре ниже -5°C .

Опыт и долгосрочный мониторинг показывают, что несущая способность конструкций, напряженно-деформированное состояние, показатель эксплуатационной пригодности (PSI) и срок работы дороги во многом зависят от степени уплотнения, однородности многослойной дорожной одежды и основания трассы (в том числе от работы насыпи).

В результате 35-летнего исследования взаимодействий можно порекомендовать встроенную в каток систему непрерывного контроля уплотнения, причем не только для автомобильных и железных дорог, но и для насыпей, в особенности высоких, а также для укрепленных земляных конструкций.

4.2. Обзор инноваций

Одной из основных инноваций в области улучшения свойств и уплотнения грунта является использование оборудования для уплотнения одновременно с приборами контроля. В данном случае речь идет как о по-

верхностном, так и глубинном уплотнении (рис. 24), более того, данная инновация предусматривает непрерывную оптимизацию процесса уплотнения. В отличие от обычных методов, все данные для контроля доступны уже в процессе уплотнения и для всей уплотняемой зоны. В разд. 2.3 и 2.4 описывалась технология тяжелого трамбования; в разд. 4.3 – метод уплотнения динамическим цилиндром. На рис. 25 показан процесс виброуплотнения. Данная инновация учитывает динамическое взаимодействие грунта с вибрирующим элементом и таким образом отображает жесткость пружин и коэффициент демпфирования.

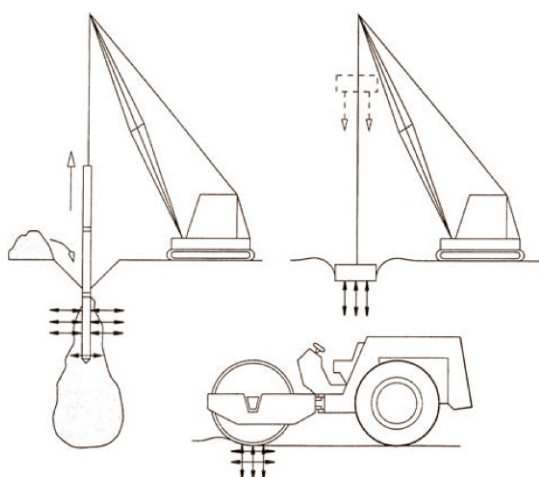


Рис. 24. Взаимодействие оборудования для уплотнения и грунта или другого сыпучего материала при глубинном и поверхностном уплотнении

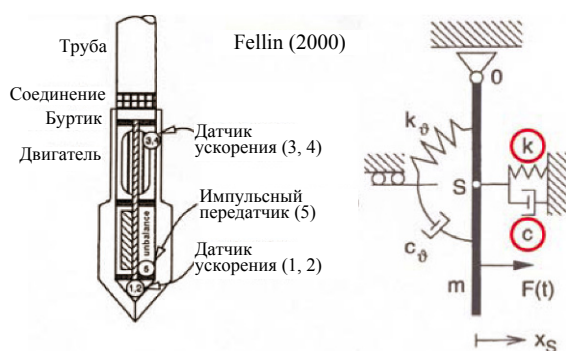


Рис. 25. Интерактивный контроль глубинного виброуплотнения

4.3. Система непрерывного контроля процесса уплотнения, встроенная в каток

До сих пор для контроля процесса уплотнения использовались в основном методы точечного испытания с целью проверки плотности или жесткости уплотняемого слоя. Методы песчаного эквивалента, водного шара, ядерное измерительное испытание Трокслера для определения плотности и испытание на нагружение штампа для оценки жесткости грунта являются точечными методами. В таких испытаниях нельзя достичь однородности и выявить слабые места, исследуемая глубина ограничивается 20...50 см. Все точечные методы достаточно продолжительны и дорогостоящи, часто приводят к задержке работ, так как строительство нельзя осуществлять в непосредственной близости от площадки точечных испытаний, поскольку на их результаты влияет вибрация. Поэтому данные методы недостаточны, если речь идет о высококачественных проектах, в особенности о высоких насыпях, сооружаемых вдоль крутых и/или неустойчивых склонов, а также в сейсмически активных районах.

Для сооружения надежных инженерных конструкций требуются непрерывная оптимизация и контроль уже в процессе уплотнения. Встроенная в каток инновационная система непрерывного контроля уплотнения имеет ряд преимуществ, которые позволяют уменьшить количество обычных проверочных испытаний и предоставляют данные во время уплотнения. Поэтому процедура уплотнения может быть оптимизирована и проведена в кратчайшие сроки.

В определенной степени средством непрерывного контроля процесса уплотнения могут служить метод спектрального анализа поверхностных волн (SASW) или технология непрерывных поверхностных волн (CSW). Оба метода являются неразрушающими и могут применяться для всех типов грунтов и других сыпучих материалов. Но для CSW (в отличие от встроенной в каток системы непрерывного контроля) требуется оборудование для испытаний (электромагнитный вибрирующий элемент, генерирующий поверхностные волны, и ряд геофонов, измеряющих эти волны), устанавливаемое на уровне поверхности грунта.

Поэтому настоящая непрерывная оптимизация процесса уплотнения (уже во время вращения) невозможна, к тому же для данного метода может потребоваться сложная дополнительная калибровка.

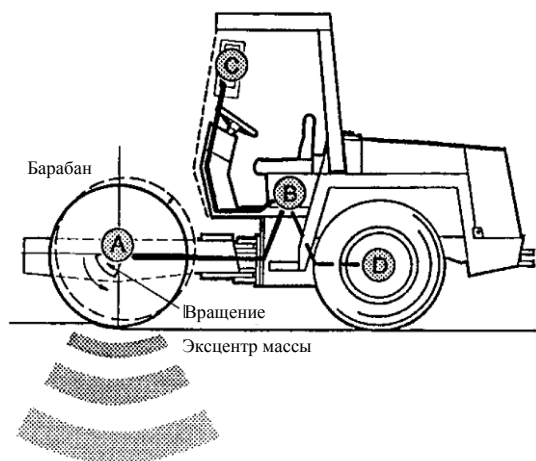


Рис. 26. Принцип действия встроенной в каток системы непрерывного контроля процесса уплотнения

Встроенная в каток ССС основывается на измерении динамического взаимодействия динамических катков (вибрирующих или колеблющихся) и уплотняемого грунта (или другого сыпучего материала). Характер движения барабана катка меняется в зависимости от реакции грунта. Этот факт используется в системе ССС для определения жесткости грунта. Таким образом, барабан динамического катка используется в качестве измерительного инструмента (рис. 26): его движение записывается (А), анализируется в процессорном блоке (Б), где вычисляется величина динамического уплотнения, и воспроизводится в визуальной форме на круговой шкале или дисплее (Г), где тоже могут храниться данные. Необходим также вспомогательный датчик для определения расположения цилиндра (Д). С помощью GPS (глобальной системы навигации) можно определить положение цилиндра с точностью до 5 см.

Система ССС имеет важное преимущество: ее легко установить в вибрирующих или колеблющихся катках, на гладких, полигональных барабанах и барабанах с плоским основанием. Рабочие на катках и подрядчики

быстро приспосабливаются к этому методу контроля. Необходимо исключать из обращения данные, полученные катками плохого качества, так как они могут привести к низкому качеству уплотнения. Система ССС показала свою пригодность на многих строительных площадках, поэтому уже 10 лет ее применение является обязательным в Австрии (в основном для строительства автомагистралей и железных дорог государственного значения, но также и для обычных железных дорог, лайнеров (liners) для отходов и насыпных дамб для гидроэлектростанций).

Глубина измерения при использовании ССС достигает 2,5 м (и даже больше), в то время как обычно измерение плотности проводится на глубине 0,1...0,3 м, а при стандартных штамповых испытаниях — 0,5...0,6 м.

Значительное влияние на уровень динамического уплотнения оказывают различные режимы работы барабана катка (Adam, 1996). Величины динамического уплотнения должны оцениваться раздельно: 1 — совместно для «контакта» и «частичного подъема»; 2 — для «двойного шага (прыжка)» — эта процедура называется операцией двойного шага (см. таблицу).

Операция «двойной шаг» должна быть по возможности исключена из практики, для чего можно выбрать меньшую амплитуду и/или более высокую скорость катка.

Если правильным образом не рассматривать режимы работы, интерпретация величин уплотнения может оказаться неверной. Поэтому в австрийских нормах и руководствах по строительству дорог содержится раздел, посвященный встроенной в каток системе непрерывного контроля процесса уплотнения (ССС).

Для оптимизации работы системы ССС следует учитывать критерии приемки:

критерий средней величины для оценки общих условий в проверяемой области. Средняя величина динамического уплотнения пути должна достигать средних величин, получаемых при калибровке;

критерий минимальной величины для обнаружения слабых точек и областей. Минимальная величина всего динамического уплотнения пути должна достигать минимальных величин, получаемых при калибровке;

критерий однородности для оценки однородности исследуемой области. Стандартное отклонение относительно средней величины не должно превышать 20%;

увеличение степени уплотнения – критерий, указывающий на дальнейшую сжимаемость грунта. Уплотнение должно продолжаться до тех пор, пока увеличение средней величины от одной до другой проходки цилиндра не станет меньше 5%. Этот критерий особенно важен для сейсмически активных областей, так как его учет позволяет уменьшить осадки и потенциальное перестроение частиц грунта во время землетрясений;

уменьшение динамического уплотнения как указание на повторное разрыхление грунта и/или раздробление его частиц.

На рис. 27 показаны типичные результаты,

полученные с помощью CCC (Brandl, Adam, 1977; Correa, Brandl, 2001; Brandl, Korf, Adam, 2005). Система доказала свою применимость при строительстве насыпей из грунта и горных пород, а также бетонных дамб электростанций, уплотняемых при помощи цилиндра (Brandl, Adam, 2004).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные инновации для улучшения грунта и усовершенствования земляных работ при создании транспортной инфраструктуры – это системы, которые служат как для уплотнения, так и для непрерывной оптимизации, контроля и документирования данного процесса. Таким образом, сложное оборудование для уплотнения является одновременно и средством

Определение режимов работы вибрационных катков в зависимости от жесткости грунта

Движение барабана	Взаимодействие «барабан–грунт»	Режим работы	Контактное усилие на грунт	Применение CCC	Жесткость грунта	Скорость вращения	Амплитуда
Периодическое	Постоянный контакт	Постоянный контакт		Да	Низкая	Быстрое	Малая
	Периодическая потеря контакта	Частичный подъем		Да			
		Двойной шаг Качающееся движение		Нет			
Хаотическое	Непериодическая потеря контакта	Хаотическое движение		Нет	Высокая	Медленное	Большая

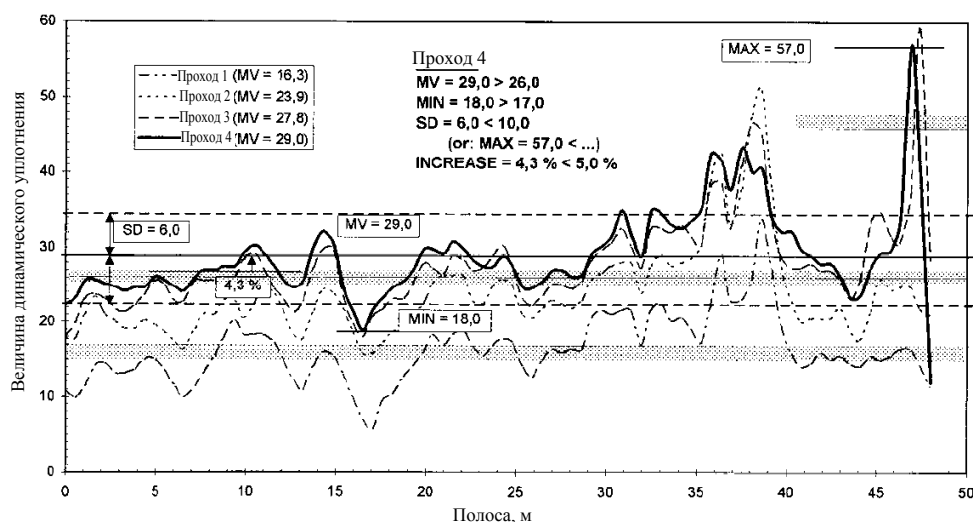


Рис. 27. Получение данных и критериев CCC: MV, MIN, MAX – соответственно средняя, минимальная и максимальная величины уплотнения; SD – стандартное отклонение; INCREASE – увеличение величины между двумя проходами катка

контроля. Данной методологии предшествовала система непрерывного контроля процесса уплотнения, включенная в цилиндр, затем последовали глубинное виброуплотнение (каменные колонны и т. д.) и тяжелое трамбование (глубинное динамическое уплотнение/консолидация). Эти системы учитывают динамическое взаимодействие оборудования, осуществляющего уплотнение, с уплотняемым грунтом (или другим сыпучим материалом). Таким образом можно значительно улучшить качество земляных конструкций, сократить период строительства и соответствующие расходы.

По результатам наблюдений за секциями автострад, построенных на улучшенном слабом грунте и на высоких насыпях (до 135 м), все земляные конструкции показывают хорошую долгосрочную работу начиная с 1970-х гг., хотя тогда новые технологии были неизвестны. Новые методы непрерывной оптимизации и контроля процесса уплотнения позволяют осуществлять проекты транспортной инфраструктуры в более неблагоприятных геотехнических и геоморфологических условиях, чем те, которые в данной статье рассматривались как предельные для технических возможностей.

Список литературы

C. Adam. *Rechenübungen aus Baudynamik*. Institute of Rational Mechanics, Vienna University of Technology, 2003.

D. Adam. *Continuous Compaction Control with Vibratory Rollers* (in German). Ph.D. dissertation. Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vienna University of Technology, 1996

P.K. Banerjee. *The boundary element methods in engineering*. McGraw-Hill, London, 1994.

H. Brandl. *Der Bau eines Autobahnknotens auf stark zusammendrückbaren Böden*. And *Das Verformungsverhalten bei dynamischer Untergrundverdichtung*. Proceedings of 4th Danube-European Conference on Soil Mech. and Found.

Eng..Bled/Yugoslavia, 1974 (Post Conf. Volumes 1, 2).

H. Brandl. *Construction and Compaction of 100 – 120 m high highway embankments*. Colloque international sur le compactage, Paris, 1980.

H. Brandl & D. Adam. *Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials*. Proc. 14th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation

Engineering, Hamburg. 31-36, 1997.

H. Brandl & D. Adam. *Continuous Compaction Control (CCC) for fill dams and roller compacted concrete dams*. Proc. Int. Conference on Soil Nailing and Stability of Soil and Rock Engineering, Nanjing, 2004.

H. Brandl, F. Kopf, & D. Adam. *Continuous Compaction Control (CCC) with differently excited dynamic rollers*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung, Heft 553, Wien, 2005

H. Brandl, M. Kavvas, P. Marinos, H. Poulos. *Design Issues for Section 2.4*. Report for Egantia Odos A.E., Thessaloniki/Greece, 2005 (unpublished).

H. Brandl & W. Sadgorski. *Dynamic stresses in soils caused by falling weights*. Proc. 8th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo. 187–194, 1977.

A.G. Correia, H. Brandl (eds). *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures*. A.A. Balkema Publishers, Lisse/Netherlands, 2001.

W. Fellin. (2000). *Quality control in deep vibrocompaction*. In: *Compaction of Soils, Granulates and Powders*. A.A.Balkema, Rotterdam. 133-144.

F. Kopf, I. Paulmichl. *Heavy tamping (DYNIV) – compaction control with dynamic measurements* (in German). Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift, Heft 6, Wien 2005.

I. Paulmichl. *Numerical simulation of static and dynamic compaction control methods on layered halfspaces by means of the Boundary Element Method* (in German). Master's Thesis, Vienna University of Technology, 2004.