

ОСНОВАНИЕ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.07

УДК 624.138.1

В.И. Травуш¹, В.С. Федоров², О.А. Маковецкий^{2,3}

¹Институт ГОРПРОЕКТ

²Российский университет транспорта

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ «СТРУКТУРНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МАССИВА», ВЫПОЛНЯЕМОГО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ

Геологические особенности поверхностного слоя грунтов существенно влияют на характер распространения сейсмических волн, развитие повреждений и общую сохранность здания. Анализ литературных источников показывает, что влияние приповерхностных слоев, из-за явлений дифракции и интерференции сейсмических волн и проявления резонансных свойств приповерхностных грунтовых слоев, может приводить как уменьшению уровня интенсивности землетрясения на 2–3 балла, так и, наоборот, к его увеличению на 2–3 балла. Дисперсные грунты под действием динамических нагрузок при сейсмическом воздействии могут изменять свои свойства: увеличение сжимаемости по сравнению со статическим режимом нагружения (виброкомпрессия); накопление сдвиговых и объемных деформаций при длительных вибрационных нагрузках (виброползучесть); динамическое разжижение водонасыщенных грунтов.

Одним из технических решений, применяемых при проектировании тяжелых ответственных сооружений в сейсмических районах на площадках с мягкими и средними грунтами, является устройство так называемой «грунтовой подушки» под фундаментной плитой. При этом исходный грунт в объеме «подушки» либо полностью заменяется, либо укрепляется с помощью различных технологий. Структурный геотехнический массив является одним из методов изменения сейсмической жесткости основания площадки строительства. Основное его назначение – снижение сейсмического ускорения до уровня, при котором в массиве слабых водонасыщенных грунтов не развиваются процессы виброразжижения и виброползучести.

Для построения механической модели «структурного геомассива» применим подход, используемый в геомеханике для описания поведения твердого тела со структурой. Полученные зависимости в дальнейшем использованы при разработке инженерного метода проектирования «структурного геомассива» с заданной величиной коэффициента затухания ускорения сейсмических колебаний.

Ключевые слова: волновой экран, сейсмическое воздействие, структурный геотехнический массив.

Введение. Геологические особенности поверхностного слоя грунтов существенно влияют на характер распространения сейсмических волн, развитие повреждений и общую сохранность здания. Анализ литературных источников [1–3] показывает, что влияние приповерхностных слоев, из-за явлений дифракции и интерференции сейсмических волн и проявления резонансных свойств приповерхностных грунтовых слоев, может приводить как уменьшению уровня интенсивности землетрясения на 2–3 балла, так и, наоборот, к его увеличению на 2–3 балла.

Дисперсные грунты под действием динамических нагрузок при сейсмическом воздействии могут изменять свои свойства: увеличение сжимаемости по сравнению со статическим режимом нагружения (виброкомпрессия); накопление сдвиговых и объемных деформаций при длительных вибрационных нагрузках (виброползучесть); динамическое разжижение водонасыщенных грунтов.

Разработаны подземные конструкции, предназначенные для гашения сейсмических волн [4, 5]. Общим во всех конструктивных решениях является устройство в грунтах сплошных или прерывистых рядов скважин по периметру объекта, заполненных пористой или сплошной структурой, поглощающей колебания. Можно отметить, что волногасящие свойства вышеописанных экранов зависят от форм и размеров, а также от природы и характеристики падающих на него волн. Важнейшим фактором экрана является его глубина, которая приблизительно соответствует длине релевской волны, а внутреннее пространство должно быть заполнено низко модульным материалом [6].

Волновые экраны можно устанавливать не только вертикально, но и горизонтально. Изменение ориентации установки барьера никак не скажется на способности отражать и преломлять сейсмические волны, при этом горизонтальное изготовление экрана намного проще и дешевле. Экспериментальные исследования последних десятилетий показали, что физическая и геометрическая структура системы приповерхностных слоев, общая толщина которых составляет порядка десятков метров, также может оказывать существенное влияние на интенсивность сейсмических волн [7, 8].

Проведенный анализ конструктивных возможностей волновых экранов показал, что экономически целесообразно устраивать горизонтальные экраны в виде структурных геотехнических массивов [9].

Геомеханическая модель основания «структурный геотехнический массив». Для построения механической модели «структурного геомассива» применим подход, используемый в геомеханике для описания поведения твердого тела со структурой [10].

«Структурный геомассив» представим в виде идеальной сплошной среды, деформации которой линейны относительно внешних сил, если только внутренние напряжения не превышают предельных значений. Вместе с тем в сплошном теле равномерно рассеяны по объему неоднородности (грунтобетонные армирующие элементы), и расстояние между ними много больше их собственного размера. Эти неоднородности ответственны за необратимые деформации: на них концентрируются напряжения и происходит их релаксация во времени. Примем этот механизм диссипации энергии единственным.

Учитывая, что неоднородности занимают малую долю объема, деформации структурного геомассива будем характеризовать только усредненными по пространству величинами. Неравномерное распределение напряжений внутри геомассива качественно отличает предлагаемую модель: они складываются из двух компонент – общих напряжений, вызванных изменением объема или искажением формы, и локальных напряжений на неоднородностях.

Используя закон распределения неоднородностей в сплошном теле

$$A = \text{const} = \frac{l^3 dn}{d \ln l}, \quad (1)$$

где l – линейный размер неоднородности; n – количество неоднородностей в единице объема, можно перейти от локальных напряжений к средним напряжениям в любом сечении.

Уравнение для напряжений на неоднородностях представим в следующем виде:

$$\frac{d\Delta\sigma_l}{dt} = \rho c^2 \dot{\epsilon} - \nu \frac{\Delta\sigma_l}{l}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_l$ – напряжение на неоднородности размером l ; c – скорость поперечных упругих волн; ρ – плотность геомассива; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации сдвига в грунте; ν – константа, отражающая скорость релаксации напряжений.

На основании этого уравнения можно сделать вывод, что скорость релаксации напряжений на неоднородностях прямо пропорциональна величине напряжения и обратно пропорциональна размеру неоднородности.

Интегрируя уравнение (2), при постоянной скорости деформирования получаем:

$$\Delta\sigma_l = \rho c^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v} [1 - e^{-vt/l}], \quad (3)$$

в начальный момент времени напряжения на неоднородностях нарастают во времени по линейному закону:

$$\Delta\sigma_l = \rho c^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v} [1 - 1 + e^{-vt/l}] = \rho c^2 \dot{\epsilon} t. \quad (4)$$

В дальнейшем рост напряжений замедляется, и на неоднородностях устанавливается напряжение:

$$\Delta\sigma_l = \rho c^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v}. \quad (5)$$

При высоких скоростях деформирования напряжения на неоднородностях приводят к увеличению жесткости структурного геомассива, а при динамических воздействиях – к увеличению эффективной прочности («динамической прочности»). Предлагаемая механическая модель «структурного геомассива» позволяет рассматривать классические задачи по определению напряжений и деформаций, возникающих под воздействием внешних сил, но не ограничиваться отысканием равновесных параметров, поскольку после приложения нагрузки в массиве продолжают необратимые деформации и релаксация напряжений на неоднородностях.

Модель структурного геотехнического массива, выполняемого для снижения сейсмического воздействия на грунтовое основание. Полная энергия E при землетрясениях определяется по сейсмограммам и описывается в зависимости от продолжительности колебаний τ по следующему выражению:

$$\log(E) = 2,24 + 2,76 \cdot \lg(\tau). \quad (6)$$

Часть высвобождаемой энергии (около 10 %) переходит в энергию сейсмических волн. Основная излучаемая упругая энергия расходуется на генерацию поперечной волны. Сопутствующие продольные волны обусловлены сжатием одних слоев и растяжением других при изгибе перед сдвиговым разрывом. Максимальное количество энергии сейсмических волн выделяется на частотах 5–300 Гц. В момент полного разрушения массива грунта частота волны уменьшается до 5–10 Гц.

Поглощение упругой энергии в колебательных и волновых процессах является доказательством развития необратимых деформаций в сплошных телах. В соответствии с предлагаемой концепцией диссипация энергии

осуществляется в результате релаксации напряжений сдвига в твердом теле. Обычно затухание характеризуется относительной потерей энергии колебаний по отношению к упругой энергии сдвиговых деформаций. В этом случае относительные потери энергии колебаний перестают зависеть от вида напряженного состояния и становятся физической характеристикой твердого тела.

Рассматривая «структурный геомассив» как модель сплошного тела с неоднородностями, можно оценить механизм затухания энергии колебаний.

Напряжение на неоднородностях представляет собой симметричный тензор $\Delta\sigma_{ik}$, у которого сумма нормальных напряжений равна нулю, а его главные оси повернуты так, чтобы на всех площадках максимальной сдвиговой деформации работа против избыточных напряжений на неоднородностях была максимальной. В этом случае основное уравнение для избыточных напряжений на неоднородностях (3) можно записать в виде соотношения между компонентами тензора – девиатора избыточных напряжений:

$$\Delta s_{ik} = \Delta\sigma_{ik} - \frac{1}{3}\sigma_{jj}\delta_{ik} \quad (7)$$

и тензора – девиатора деформаций:

$$e_{ik} = u_{ik} - \frac{1}{3}u_{jj}\delta_{ik} \quad (8)$$

в виде

$$\frac{d\Delta s_{ik}}{dt} = \rho c^2 \dot{e}_{ik} - \nu \frac{\Delta s_{ik}}{l}. \quad (9)$$

Учитывая, что для избыточных напряжений тензор и тензор – девиатор напряжений совпадают, окончательно запишем:

$$\frac{d\Delta\sigma_{ik}}{dt} = \rho c^2 \left(\dot{u}_{ik} - \frac{1}{3}\dot{u}_{jj}\delta_{ik} \right) - \nu \frac{\Delta\sigma_{ik}}{l}. \quad (10)$$

Выражение (10) представляет собой общий вид уравнения, описывающий поведение избыточных напряжений на неоднородностях.

Опишем затухание плоской монохроматической поперечной волны в неограниченном сплошном теле. Выбрав оси координат так, чтобы ось X совпадала с направлением распространения волны, запишем уравнение бегущей волны:

$$u_{xx} = B_x \sin(\omega t - kx), \quad u_{yy} = u_{zz} = 0, \quad (11)$$

где B – амплитуда изменения сдвиговой деформации; ω – частота; k – волновое число.

Уравнение (10) для $\Delta\sigma_{xx}$ запишем в виде

$$\frac{d\Delta\sigma_{xx}}{dt} = \frac{2}{3}\rho c^2 \dot{u}_{xx} - \nu \frac{\Delta\sigma_{ik}}{l}. \quad (12)$$

Решение этого уравнения для установившегося процесса имеет вид

$$d\Delta\sigma_{xx} = \frac{2}{3} B_x \rho c^2 \cos \varphi \sin(\omega t + \varphi), \quad \varphi = \tan^{-1} \nu/l\omega. \quad (13)$$

В соответствии с общим выражением для механической работы

$$\Delta E_l = A \int_0^t \Delta\sigma_{ik} du_{ik}$$

можно подсчитать затраты энергии, связанные с работой против избыточных напряжений на неоднородностях:

$$\Delta E_l = \frac{2}{3} A \rho c^2 B_x^2 \pi \cos \varphi \sin \varphi. \quad (14)$$

Упругая энергия, связанная с деформациями сдвига:

$$\bar{E}_G = \frac{2}{3} \rho c^2 B_x^2. \quad (15)$$

Полная упругая энергия в поперечной волне:

$$\bar{E}_y = \frac{1}{2} \frac{B_x}{2} \left(K + \frac{4}{3} G \right). \quad (16)$$

Как известно, для характеристики качества колебательной системы используется понятие добротности Q , показывающее отношение энергии, запасенной в колебательной системе, к энергии, теряемой системой за один период колебания. Для грунтов, обладающих небольшим логарифмическим декрементом затухания δ , добротность определяется зависимостью $Q = \pi/\delta$.

Отсюда для эффективного показателя добротности Q в плоской волне получаем:

$$\frac{2\pi}{Q} = \frac{\Delta E_l}{\bar{E}_y} = \frac{\Delta E_l}{\bar{E}_G} \frac{\bar{E}_G}{\bar{E}_y} = \frac{2\pi}{Q_G} \frac{\frac{4}{3}G}{K + \frac{4}{3}G}. \quad (17)$$

Раскрывая данное выражение относительно отношения добротностей Q/Q_G и заменяя модуль объемной деформации выражением $K = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$, получаем для типичных грунтов при $\nu = 0,28$:

$$\frac{Q}{Q_G} = 1 + \frac{1}{2} \frac{(1+\nu)}{(1-2\nu)} = 2,45. \quad (18)$$

Теперь рассмотрим величины потерь энергии при прохождении поперечной волны в стержне (армирующем грунтобетонном элементе). Уравнение бегущей волны:

$$u_{xx} = B_x \sin(\omega t - kx), \quad \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0; \quad u_{yy} = u_{zz} = -\nu u_{xx}. \quad (19)$$

Решение уравнения (10) при заданном условии между деформациями имеет вид

$$\Delta\sigma_{xx} = \frac{2}{3}(1+\nu) B_x \rho c^2 \cos\varphi \sin(\omega t + \varphi); \quad \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = -\frac{1}{2} \Delta\sigma_{xx}. \quad (20)$$

Выражение потерь энергии в стержне запишем в виде

$$\begin{aligned} \Delta E_l &= A \int_0^T \Delta\sigma_{ik} du_{ik} = A \int_0^T \Delta\sigma_{xx} du_{xx} + \Delta\sigma_{yy} du_{yy} + \Delta\sigma_{zz} du_{zz} = \\ &= \frac{2}{3}(1+\nu)^2 A \rho c^2 B_x^2 \pi \cos\varphi \sin\varphi. \end{aligned} \quad (21)$$

Полная упругая энергия составляет:

$$\bar{E}_y = \frac{1}{2} \rho c^2 (1+\nu) B_x^2. \quad (22)$$

Отношение потерь (21) к полной энергии упругих деформаций определяется выражением

$$\frac{\Delta E_l}{\bar{E}_y} = \frac{4}{3}(1+\nu) A \pi \cos\varphi \sin\varphi, \quad (23)$$

интегрируя которое по всем размерам неоднородностей, получаем:

$$\frac{2\pi}{Q} = \frac{\Delta E_l}{\bar{E}_y} = \frac{2}{3}(1+\nu) \pi^2 A = \frac{2}{3}(1+\nu) \frac{2\pi}{Q_G}. \quad (24)$$

Отношения добротностей Q/Q_G можно записать и рассчитать, принимая для грунтобетона $\nu = 0,2$, следующим образом:

$$\frac{Q}{Q_G} = 1 + \frac{(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = 1,16. \quad (25)$$

Сравнивая эту величину с отношением добротности для поперечной волны в неограниченном теле, можно отметить, что потери энергии в стержне заметно больше. Это обуславливается тем, что распространение волны в массиве происходит в условиях стесненной деформации.

Таким образом, доля объема, занимаемая армирующими элементами одного размера, однозначно определит потери упругой энергии массива.

Нормирование равномерного распределения армирующих элементов (неоднородностей) по объему определяется как

$$A = \frac{2}{\pi Q_G}. \quad (26)$$

Определив требуемую эффективную добротность «структурного геомассива», необходимую для снижения сейсмичности площадки строительства, можно рассчитать требуемое объемное количество армирующих грунтобетонных элементов и назначить их размеры и расстановку в пределах массива.

В предлагаемой модели «структурного геомассива» добротность не зависит от частоты сейсмической волны. Это обусловлено равномерным распределением армирующих элементов по объему: каждая гармоника как бы сама «выбирает» себе подходящую структуру для организации процесса диссипации.

Моделирование структурного геотехнического массива с заданным комплексом свойств на воздействие упругих волн. Одним из технических решений, применяемых при проектировании тяжелых ответственных сооружений в сейсмических районах на площадках с мягкими и средними грунтами, является устройство так называемой «грунтовой подушки» под фундаментной плитой. При этом исходный грунт в объеме «подушки» либо полностью заменяется, либо укрепляется с помощью различных технологий. Обычно главной целью такого решения служит обеспечение устойчивости основания, в том числе к разжижению при сейсмических воздействиях. Однако устройство подушки влияет и на сейсмическую реакцию сооружения [11].

Оптимальный конструктивный вариант фундамента с рассеивающим слоем для соответствующей сейсмоопасности в районе возведения фундамента требует подбора рабочего диапазона «гашения сейсмических колебаний» в соответствии с конструктивными параметрами подушки (ее мощностью, крупностью обломочного материала) [12].

Грунтовый массив задан в виде упругого полупространства с набором плоских слоев, обладающих различными физическими свойствами. Тогда энергетические характеристики волны при прохождении через данную структуру будут в значительной мере зависеть от геометрических и физических характеристик слоистой системы. Варьируемыми параметрами служат переменные, описывающие структуру конструкции: физические свойства материалов слоев, толщины слоев, число слоев, а также порядок взаимного расположения слоев с различными физическими свойствами в конструкции.

Была получена зависимость изменения сейсмического воздействия на здание после создания геомассива (снижение величины ускорения сейсмических колебаний по оси Z в центре площадки по отношению к исходному состоянию), в зависимости от соотношения физико-механических свойств грунта (начальная сейсмическая жесткость – эффективная сейсмическая жесткость) – рис. 1.

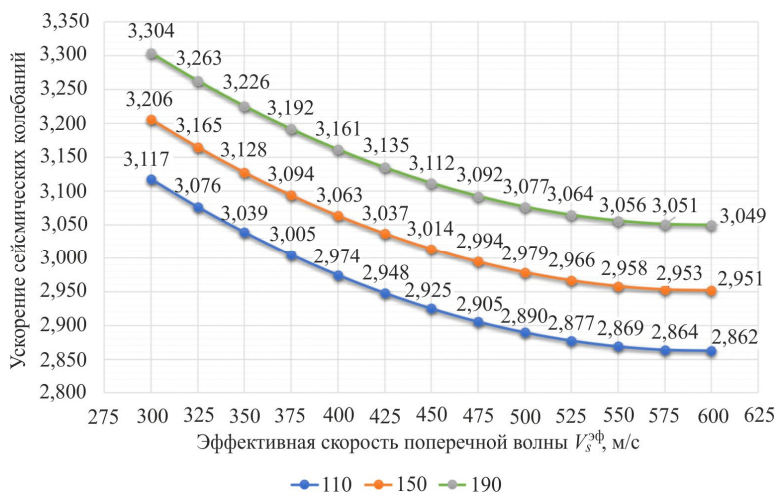


Рис. 1. Линия уровня эффективной скорости прохождения поперечной волны в геомассиве

В качестве обобщенного параметра эффективности вертикального армирования грунта жесткими элементами примем величину коэффициента конструктивной защиты

$$K_{\text{кон.защ}} = \frac{a_{\text{сейс}}^0}{a_{\text{сейс}}^i}, \quad (27)$$

где $K_{\text{кон.защ}}$ – коэффициент конструктивной защиты; $a_{\text{сейс}}^0$ – начальная величина сейсмического ускорения; $a_{\text{сейс}}^i$ – эффективная величина сейсмического ускорения. График изменения коэффициента в зависимости от соотношения начальной и эффективной сейсмических жесткостей грунтового основания показан на рис. 2.

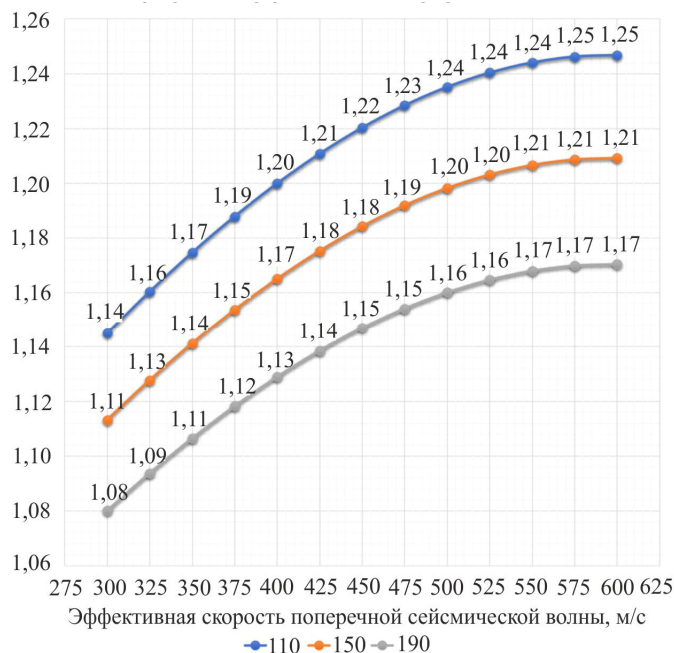


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента конструктивной защиты от соотношения сейсмических жесткостей

Заключение. Анализ результатов полнофакторного численного эксперимента по оценке влияния на изменение сейсмической жесткости грунтового основания вертикального армирования жесткими элементами показал: при увеличении начальной скорости прохождения поперечной волны основания наблюдается незначительное повышение эффективной скорости прохождения поперечной волны в геомассиве; при увеличении диаметра армирующих элементов на начальных этапах происходит заметное повышение эффективной скорости прохождения поперечной волны, последующее увеличение параметра замедляет рост; расстояние между центрами армирующих элементов оказывает наибольшее влияние на

функцию отклика. При увеличении расстояние между центрами армирующих элементов происходит заметное уменьшение эффективной скорости прохождения поперечной волны. Полученная зависимость необходима для проектирования геомассива с целью изменении сейсмологических характеристик основания.

Устройство структурного геотехнического массива под фундаментной плитой является одним из технических решений, применяемых при проектировании зданий в сейсмических районах на площадках со слабыми водонасыщенными грунтами. Внедрение в слабые водонасыщенные грунты верхней десятиметровой зоны грунтового основания жестких грунтобетонных элементов приводит к снижению вероятности развития процессов виброразжижения и виброползучести грунтов. Скорость прохождения поперечной волны в них значительно больше, чем в окружающем грунте, что, в свою очередь, приводит к тому, что на грунт расходуется меньшая часть энергии сейсмического процесса. На основе численного моделирования получены зависимости, определяющие эффективную скорость распространения поперечной сейсмической волны и снижение величины ускорения сейсмических колебаний в центре площадки по отношению к исходному состоянию, в зависимости от конструктивных характеристик геомассива.

Полученные зависимости в дальнейшем будут использованы при разработке инженерного метода проектирования «структурного геомассива» с заданной величиной коэффициента затухания ускорения сейсмических колебаний.

Библиографический список

1. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). – М.: Наука. 1982. – 335 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеивание волн в случайно неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – 280 с.
3. Мартынов Н.В. Активная сейсмозащита. – Симферополь, 2013. – 266 с.
4. Кранцфельд Я.Л. О конструктивных решениях экранов для инженерной сейсмозащиты территории объектов строительства // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 1. – С. 13–17.
5. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий / Е.Н. Курбацкий, Е.Ю. Титов, О.А. Голосова, А.П. Косоуров // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 1(75). – С. 55–67.
6. Орехов В.В., Негахдар Х. Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте // Вестник МГСУ: сб.науч.тр. – М.: МГСУ, 2013. – № 3. – С. 98–104.
7. Ильичев В.А. Изменение сейсмических свойств лессовых грунтов при инженерной подготовке территории // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 3. – С. 13–15.
8. Ильичев В.А., Монголов Ю.В., Шаевич В.М. Свайные фундаменты в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1983. – 144 с.

9. Travush V.I., Fedorov V.S., Makovetskiy O.A. Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base "structural geotechnical solid" // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2020. – Vol.16(4). – P. 101–108.

10. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986. – 301 с.

11. Бобырь Г.А. Оптимизация параметров упрочненных массивов в основаниях, сложенных структурно-неустойчивыми грунтами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / НИИОСП. – М., 2002. – 145 с.

12. НДС системы «основание-свайный фундамент-здание» с промежуточной подушкой при сейсмическом воздействии / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.Ю. Мирный, В.В. Сидоров // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей международной научно-технической конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 183–190.

References

1. Brekhovskih L.M., Goncharov L.M. Vvedenie v mekhaniku sploshnyh sred (v prilozhenii k teorii voln) [Introduction to continuum mechanics (in the appendix to wave theory)]. М.: Nauka, 1982, 335 p.

2. Isimaru A. Rasprostranenie i rasseivanie voln v sluchajno neodnorodnyh sredah. [Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media] М.: Mir, 1981, 280 p.

3. Martynov N.V. Aktivnaya sejsmozashchita. [Active seismic protection]. Simferopol', 2013, 266 p.

4. Krancfel'd YA.L. O konstruktivnyh resheniyah ekranov dlya inzhenernoj sejsmozashchity territorii ob"ektov stroitel'stva [About design solutions of screens for engineering seismic protection of the territory of construction objects] *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2011, no.1., P.13-17.

5. Kurbackij, E.N. Titov E.YU., Golosova O.A., Kosourov A.P. Metod zashchity sooruzhenij ot vibracij i sejsmicheskikh vozdeystvij [Method of protection of structures from vibrations and seismic impacts] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*, 2018, no.1(75), P.55-67.

6. Orekhov V.V., Negahdar H. Nekotorye aspekty izucheniya primeneniya transhejnyh bar'erov dlya umen'sheniya energii poverhnostnyh voln v grunte [Some aspects of studying the use of trench barriers to reduce the energy of surface waves in the ground] *Vestnik MGSU*: М.:MGSU, 2013, no. 3., P.98-104.

7. Il'ichev, V.A. Izmenenie sejsmicheskikh svojstv lessovykh gruntov pri inzhenernoj podgotovke territorii [Changes in the seismic properties of loess soils during the engineering preparation of the territory] *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1989, no.3., P.13-15.

8. Il'ichev V.A., Mongolov YU.V., SHaevich V.M.. Svajnye fundamenty v sejsmicheskikh rajonah. [Pile foundations in seismic areas], М.: Strojizdat, 1983, 144 p.

9. Travush V.I., Fedorov V.S., Makovetskiy O. A. Theoretical substantiation of the mechanism patterns of the manmade base " structural geotechnical solid " *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, Vol.16(4), 2020, pp.101-108.

10. Rodionov V.N., Sizov I.A., Cvetkov V.M.. Osnovy geomekhaniki. [Fundamentals of geomechanics] М.: Nedra, 1986, 301 p.

11. Bobyry' G.A. Optimizaciya parametrov uprochnennykh massivov v osnovaniyah, slozhennykh struktorno-neustojchivymi gruntami. [Optimization of the parameters of the hardened areas in the grounds, built structurally unstable soils], Moscow, 2002, 145 p.

12. Ter-Martirosyan, Z.G. Ter-Martirosyan A.Z., Mirnyj A.YU., Sidorov V.V. НДС системы «основание-свайный фундамент-здание» с промежуточной подушкой при сейсмическом воздействии [NDS of the "foundation-pile foundation-building" system with an intermediate cushion in case of seismic impact] *Chislennye metody raschetov v prakticheskoj geotekhnike*, Saint-Petersburg, 2012, pp. 183-190.

Получено 10.01.2021

V. Travush, V. Fedorov, O. Makovetskiy

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF "STRUCTURAL GEOTECHNICAL MASSIF", PERFORMED TO REDUCE SEISMIC IMPACT ON THE GROUND BASE

The geological features of the surface layer of soil significantly affect the nature of the propagation of seismic waves, the development of damage and the overall safety of the building. Analysis of literature sources shows that the influence of near-surface layers, due to the phenomena of diffraction and interference of seismic waves and the manifestation of resonance properties of near-surface ground layers, can lead both to a decrease in the level of earthquake intensity by 2-3 points, and, conversely, to its increase by 2-3 points. Dispersed soils under the influence of dynamic loads under seismic action can change their properties: an increase in compressibility compared to the static loading mode (vibration compression); accumulation of shear and volumetric deformations under prolonged vibration loads (vibration creep); dynamic liquefaction of water-saturated soils.

One of the technical solutions used in the design of heavy critical structures in seismic areas on sites with soft and medium soils is the construction of the so-called ground bed under the foundation slab. In this case, the original soil in the ground bed is either completely replaced or strengthened with the help of various technologies. Structural geotechnical massif is one of the methods for changing the seismic rigidity of the base of the construction site. Its main purpose is to reduce seismic acceleration to a level at which the processes of vibration liquefaction and vibration creep do not develop in the massif of weak water-saturated soils.

To construct a mechanical model of a "structural geotechnical massif", we apply the approach used in geomechanics to describe the behaviour of a solid body with a structure. The obtained dependences were further used in the development of an engineering method for designing a "structural geotechnical massif" with a given value of the attenuation coefficient of the acceleration of seismic vibrations.

Keywords: wave screen, seismic impact, structural geotechnical massif.

Травуш Владимир Ильич (Москва, Россия) – д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, главный конструктор – заместитель генерального директора по науке, Институт ГОРПРОЕКТ (105064, Москва, Нижний Сусальный переулок, д. 5, стр. 5А, e-mail: travush@mail.ru).

Федоров Виктор Сергеевич (Москва, Россия) – д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (127994, Москва, ул. Образцова, д. 9 стр. 9; e-mail: fvs_skzs@mail.ru).

Маковецкий Олег Александрович (Москва, Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент, советник РААСН, докторант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта, доцент кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (127994, Москва, ул. Образцова, д. 9 стр. 9; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: omakovetskiy@gmail.com).

Vladimir Travush (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS, Vice President of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Chief Designer – Deputy General Director for Science, Institute GORPROEKT (105064, Moscow, Nizhny Susalny lane, 5, p. 5A, e-mail: travush@mail.ru).

Viktor Fedorov (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS, Head of the Department of Building Structures, Buildings and Structures of the Russian University of Transport (127994, Moscow, Obratsov st., 9, build. 9, e-mail: fvs_skzs@mail.ru).

Oleg Makovetskiy (Moscow, Russian Federation) – Advisor of the RAACS, Associate Professor, Ph.D. in Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Building Structures, Buildings and Structures, Russian University of Transport (127994, Moscow, Obratsov st., 9, build. 9, e-mail: omakovetskiy@gmail.com).