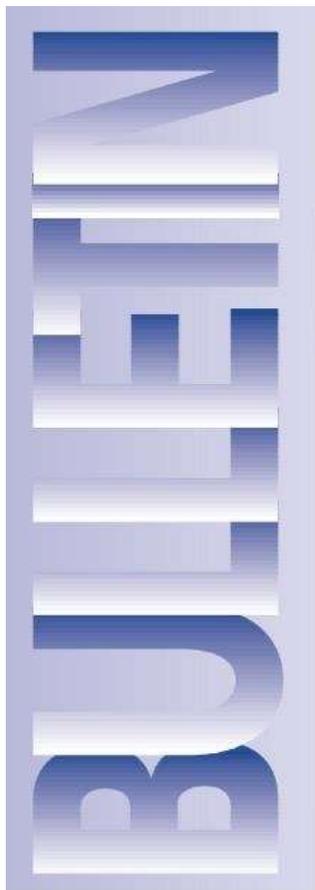


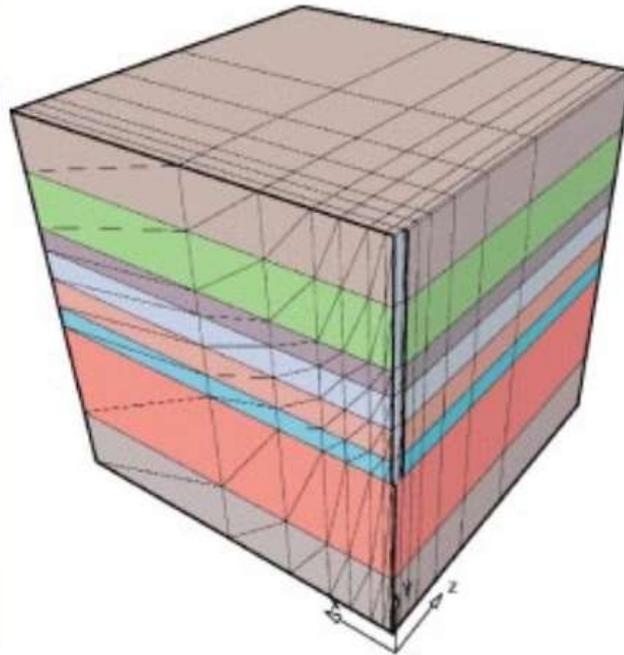
Заметки Питера Вермеера. Метод конечных элементов (МКЭ) для анализа взаимодействия подпорной стенки и грунта



PLAXIS

№ 10

- MARCH 2001



Известный голландский профессор Питер Вермеер является научным основателем PLAXIS – одного из наиболее популярных конечноэлементных программных комплексов для решения геотехнических задач. Мы продолжаем рассматривать содержание «Колонок Вермеера» в Plaxis Bulletin – объединенном журнале компании PLAXIS BV и Ассоциации пользователей PLAXIS (NL). В первой, второй и третьей частях [1–3] мы обращались к заметкам этого автора в пятом, шестом, седьмом и восьмом номерах Plaxis Bulletin. Теперь сделаем обзор «Колонки Вермеера» из десятого номера [5], посвященный использованию метода конечных элементов (МКЭ) для анализа взаимодействия между подпорной стенкой борта котлована, закрепленной на одном уровне, и грунтом.

Статья подготовлена при поддержке компании «НИП-Информатика» — партнера журнала «ГеоИнфо».

Основатель программного комплекса PLAXIS Питер Вермеер посвятил свою колонку в десятом номере журнала Plaxis Bulletin [5] численному анализу взаимодействия между грунтом и ограждением котлована с одним уровнем распорного или анкерного крепления.

Он напомнил читателям, что анализ гибких (шпунтовых) подпорных стенок стал возможным благодаря работам Германа Блюма (Hermann Blum), опубликованным в 1930-х годах (речь идет исключительно о зарубежной практике. — *Ред.*). В этих работах различалось два типа шпунтовых стенок, заанкеренных или подпертых подкосами только на одном уровне, — с фиксированным и нефиксированным положением нижнего торца (соответственно, с достаточным и недостаточным заглублением). Согласно определению Блюма полная фиксация подошвы такой стенки достигается тогда, когда моменты сдвигающих и опрокидывающих сил становятся равны моментам удерживающих сил. Сегодня методы расчетов Блюма для стенок с фиксированным и нефиксированным положением нижнего торца (соответственно, fixed earth support method и free earth support method) можно найти в большинстве учебников.

По мнению Вермеера, указанные работы Блюма внесли колоссальный вклад в механику грунтов, однако предлагаемые в них методы анализа являются упрощенными и не учитывают ни жесткость стенок, ни жесткость грунта, а значит, результаты их использования неизбежно будут неточными. Поэтому в настоящее время (на момент написания колонки в 2001 г. — *Ред.*) в основном используются модели грунтового основания «пружинного» типа на основе классической расчетной модели Винклера (которая с физической точки зрения может быть представлена множеством не связанных друг с другом одинаковых упругих пружин, опирающихся на абсолютно жесткое основание (рис. 1) [4]. — *Ред.*).

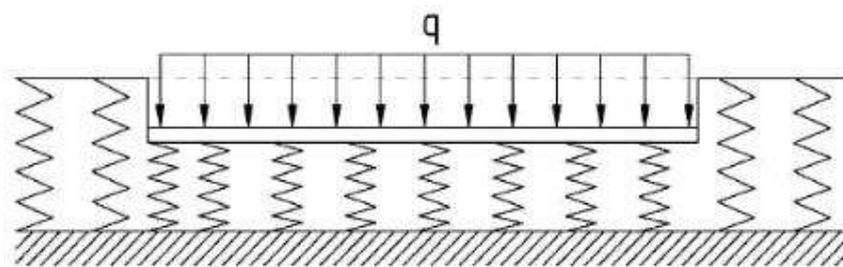


Рис. 1. Физическое представление модели грунтового основания по Винклеру [4]

К сожалению, трудно выбрать соответствующие «пружинные» постоянные (коэффициенты постели), поэтому для оценки роли жесткости грунта и ограждения котлована Вермеер предпочел использовать метод конечных элементов (МКЭ). Для этого он проанализировал поведение подпорной стенки борта котлована с распорками только на одном уровне для трех разных случаев (в таблице — соответственно А, Б, В):

- 1) «гибкая (шпунтовая) стенка — жесткий грунт»;
- 2) «жесткая “стена в грунте” — жесткий грунт»;
- 3) «жесткая “стена в грунте” — слабый грунт»

Таблица. Параметры жесткости подпорной стенки и грунта для трех рассмотренных случаев

Случай	Модуль жесткости (деформации) стенки EI , $\text{МН} \cdot \text{м}^2 / \text{м}$	Модуль жесткости (деформации) грунта $E_{\text{оед}}$, МПа, для $\sigma_1 = 100 \text{ кПа}$
А	15	45
Б	225	45
В	225	3

Вермеер рассмотрел три указанных случая с одинаковыми геометрическими параметрами:

- глубина котлована 10 м;
- заглубление подпорной стены ниже дна котлована 2,5 м;
- уровень распорного (или анкерного) крепления — на глубине 2,5 м от дневной поверхности.

Сила, имитирующая распорное (или анкерное) крепление в верхней части, была задана равной 100 кН/м (рис. 2).

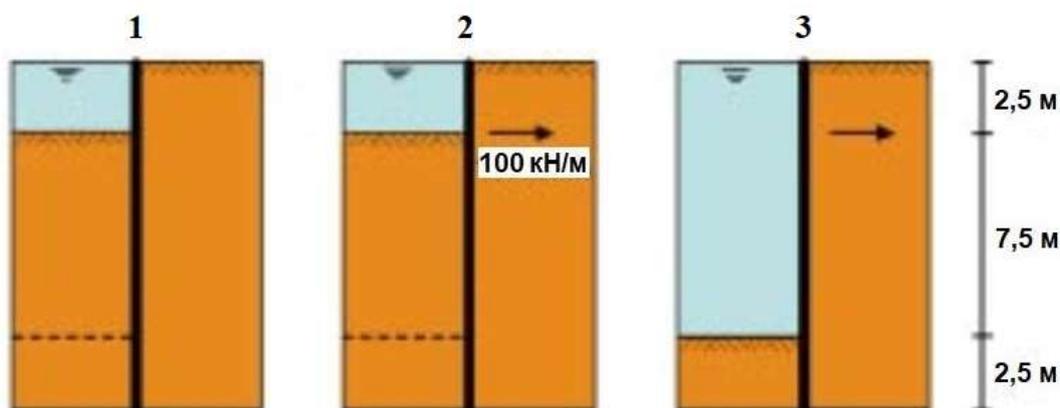


Рис. 2. Три стадии создания ограждения котлована с распорками на одном уровне: 1 — первая выемка грунта; 2 — установка распорки (на практике — чуть выше уровня грунтовых вод); 3 — окончательная выемка грунта [5]

Для всех трех случаев были приняты следующие свойства грунта:

$$\gamma' = 10 \text{ кН/м}^3; c' = 2 \text{ кПа}; \varphi' = 30^\circ; \delta' = 20^\circ. \quad (1)$$

При этом Вермеер отметил, что использовался удельный вес водонасыщенного грунта, так как рассматривался уровень грунтовых вод на поверхности грунта, который не снижался ни с одной из сторон подпорной стенки.

Было принято, что выемка грунта проводилась в три этапа (см. рис. 2):

- 1) создание ограждающей конструкции и выемка грунта из будущего котлована до глубины 2,5 м;
- 2) приложение нагрузки 100 кН/м, имитирующей воздействие распорки;
- 3) выемка грунта до окончательной глубины котлована.

Поведение грунта моделировалось с использованием модели упрочняющегося грунта (HS) в программном комплексе PLAXIS. Для первичного нагружения при испытаниях в одометре это означает увеличение модуля деформации по следующей формуле:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \cdot [(\sigma'_1 + a) / (\sigma_{ref}' + a)]^m, \quad (2)$$

где $a = c \cdot \cot \varphi$; σ'_1 – наибольшее главное напряжение; показатель степени m был принят равным 0,5.

(Выполнять подобные расчеты с помощью модели Мора — Кулона нельзя, поскольку в ней задается только один модуль (как правило, модуль деформации), а модуль упругости при разгрузке автоматически приравнивается, что приводит к чрезмерному подъему дна котлована и полному искажению картины деформаций и усилий. — *Ред.*)

В рамках модели HS разгрузка и повторное нагружение описываются на основе закона Гука. Модуль упругости для разгрузки и повторного нагружения для приращений напряжения и деформации определяется формулой:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot [(\sigma'_3 + a) / (\sigma_{ref}' + a)]^m, \quad (3)$$

где σ'_3 – наименьшее главное напряжение.

Для всех вариантов коэффициент переуплотнения OCR был принят равным 1,0, а начальные напряжения были рассчитаны с использованием $K_0 = 0,5$.

Модель HS также использует в качестве входного параметра жесткость грунта при стандартных трехосных испытаниях в дренированных условиях (E_{50} — *Ред.*). (Изменение сдвиговой жесткости учитывается моделью так же, как в формулах (2) и (3). — *Ред.*)

Для всех вариантов были использованы следующие соотношения:

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}; \quad E_{ur}^{ref} = 4 \cdot E_{oed}^{ref}; \quad \nu_{ur} = 0,2. \quad (4)$$

Вермеер отметил, что единственная разница между жестким грунтом случаев А, Б и слабым грунтом в случае В (см. таблицу) связана с модулями деформации. Жесткий грунт имеет модуль деформации в 15 раз больше, чем слабый, но и для того, и для другого сохраняется следующее соотношение:

$$E_{50} / E_{oed} / E_{ur} = 1 / 1 / 4. \quad (5)$$

Кроме того, как добавил автор колонки, и для жесткого, и для слабого грунта удобно задавать одинаковые параметры прочности.

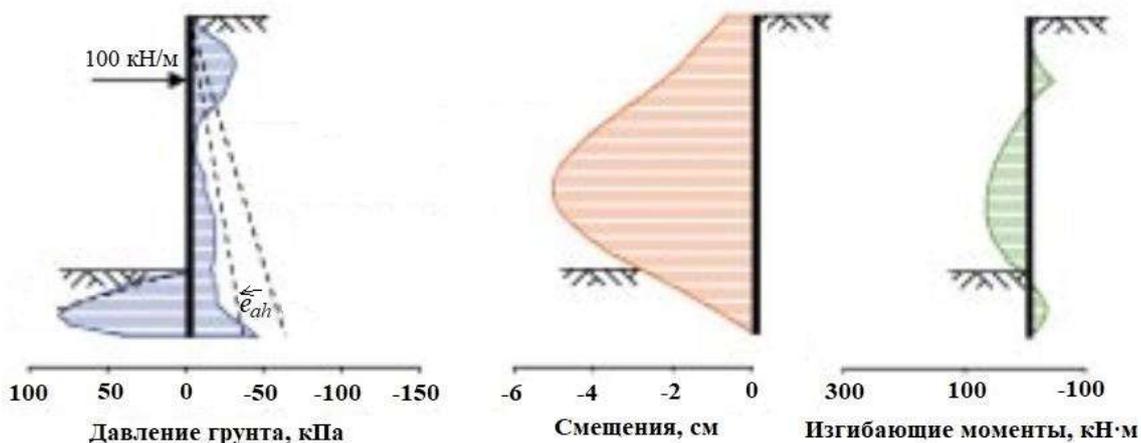
Случай А (рис. 3, а)

На рисунке 3 (а) показаны результаты выполненного Вермеером численного анализа комбинации жесткого грунта и гибкой (шпунтовой) подпорной стенки с распорками на уровне (глубине) 2,5 м от дневной поверхности. Здесь можно увидеть значительный изгиб стенки до величины около 5 см. Как следствие, значительно уменьшается активное давление грунта — даже ниже «классического минимума» величины e_{ah} (что возможно только при численном расчете — P_{ed}). Эпюра изгибающих моментов показала максимум между креплением стенки и областью пассивного давления грунта ниже дна котлована.

а

Гибкая шпунтовая стенка, жесткий грунт (случай А, см. табл.)

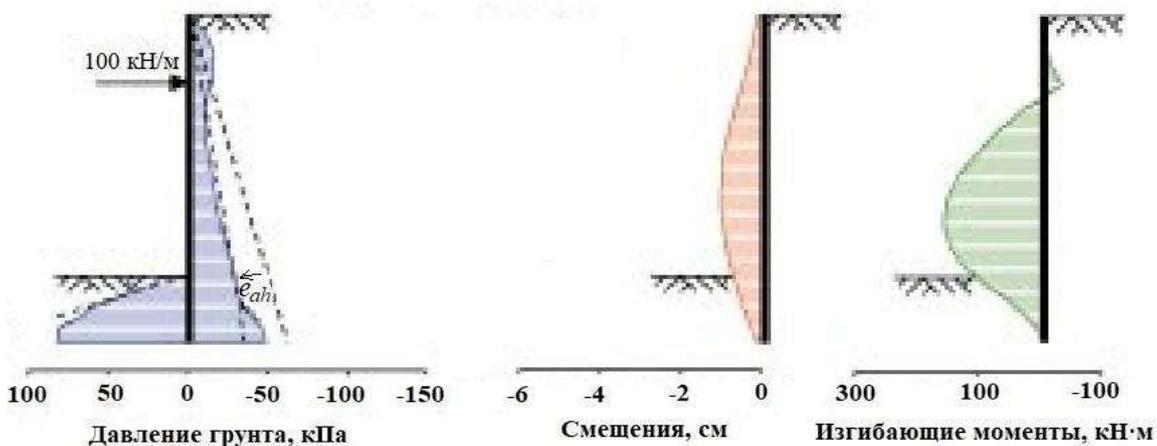
($EI = 15 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{oed}^{ref} = 45 \text{ МПа}$)



б

Жесткая "стена в грунте", жесткий грунт (случай Б, см. табл.)

($EI = 225 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{oed}^{ref} = 45 \text{ МПа}$)



В

Жесткая "стена в грунте", слабый грунт (случай В, см. табл.)

($EI = 225 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{oed}^{ref} = 3 \text{ МПа}$)

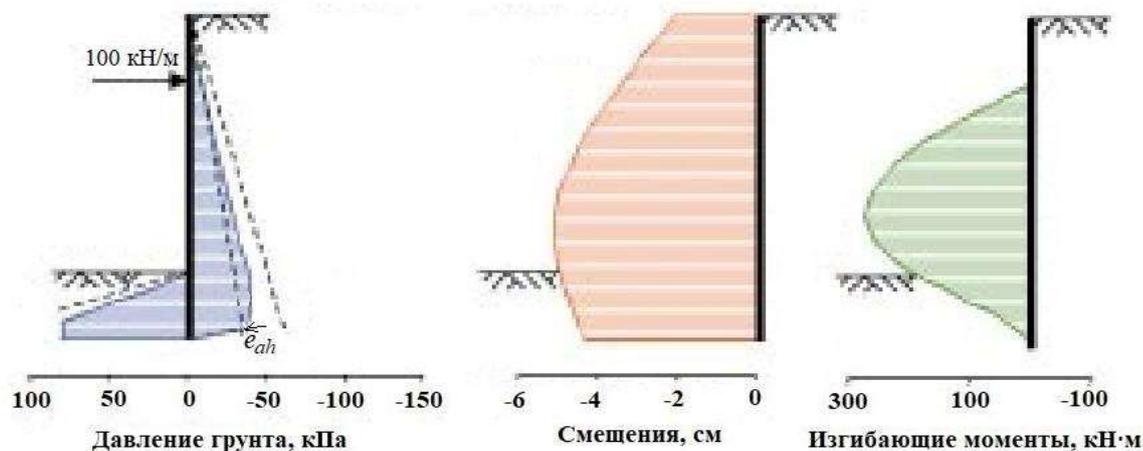


Рис. 3. Поведение подпорной стенки борта котлована с распорным креплением на одном уровне и нефиксированным положением нижнего конца (при заглублении нижнего конца ограждения на 2,5 м ниже дна котлована) для случаев А, Б и В (см. таблицу)

Вермеер отметил, что особенности работы гибких ограждений делает МКЭ предпочтительным для моделирования реакции грунтового основания. Аналитические расчеты с использованием коэффициентов постели приведут к тому, что «пружина» сработает пластически, т.е. активное давление никогда не достигнет значений, меньших чем

$$e_{ah} = k_{ah} \cdot \sigma'_z \quad (6)$$

На рисунке 2 (а) показано давление для гибких подпорных стенок в жестких грунтах. Видно, что эпюра вычисленного активного давления грунта ниже штриховой линии для значения e_{ah} , определенного по формуле (6).

Еще одной особенностью стенки с малой жесткостью является заглубление ниже дна котлована, что увеличивает удерживающие силы. Но здесь Вермеер отметил, что заглубление нижнего торца стенки он принял, используя правила расчетов Блюма для стены с нефиксированным положением ее подошвы. При этом расчетные изгибающие моменты из-за знакопеременности и защемления нижнего торца оказались небольшими и составили примерно половину от тех изгибающих моментов, которые следовали бы из правила расчетов Блюма.

Случай Б (рис. 3, б)

Типичные результаты типа итогов расчета по Блюму получились у Вермеера при рассмотрении жесткой подпорной стенки («стены в грунте») в жестком грунте (рис. 3, б). Ниже уровня крепления достигаются классические активные давления грунта. Пассивные давления не полностью мобилизованы, так как Вермеер делал расчеты для стенки с коэффициентом надежности 1,5 по пассивному давлению грунта. Нижний конец

ограждения не смещается, а изгибающие моменты хорошо согласуются с изгибающими моментами, которые получаются при использовании методики расчетов Блюма.

Интересно, что, как обращает внимание автор колонки, такие же давления грунта и изгибающие моменты были бы получены для комбинации слабого грунта и гибкой подпорной стенки (такой случай отдельно не рассматривался. — *Ред.*). Ведь относительная жесткость стенки тогда была бы такой же, как и для случая Б (жесткой подпорной стены в жестком грунте).

Случай В (рис. 3, в)

При рассмотрении Вермеером результатов расчетов для случая В, то есть для жесткой стенки в слабом грунте (рис. 3, в), интересным оказался тот факт, что, несмотря на использование коэффициента надежности 1,5, пассивное давление грунта было почти полностью мобилизовано — вероятно, благодаря увеличенному активному давлению. Очевидно, грунт является настолько деформируемым, что максимального смещения стенки в месте изгиба примерно на 5 см недостаточно для надлежащего снижения давления на активной стороне. Вследствие высокого давления возникает изгибающий момент около 300 кН*м/м, а это далеко за пределами значений, которые получались бы при использовании методики расчетов Блюма.

Для жесткой стенки в слабом грунте Вермеер выразил сомнение в результатах аналитических расчетов с использованием коэффициентов постели, поскольку весьма сложно выбрать правильные значения «пружинных» постоянных, которые потребовались бы как для активной, так и для пассивной зон (в противном случае невозможно предсказать высокие изгибающие моменты, полученные для случая В).

Влияние заглубления нижнего конца подпорной стенки

Для изучения влияния заглубления Вермеер снова обратился к варианту, представленному на рис. 2, но с заглублением нижнего конца подпорной стенки на 5 м ниже дна котлована (вместо 2,5 м).

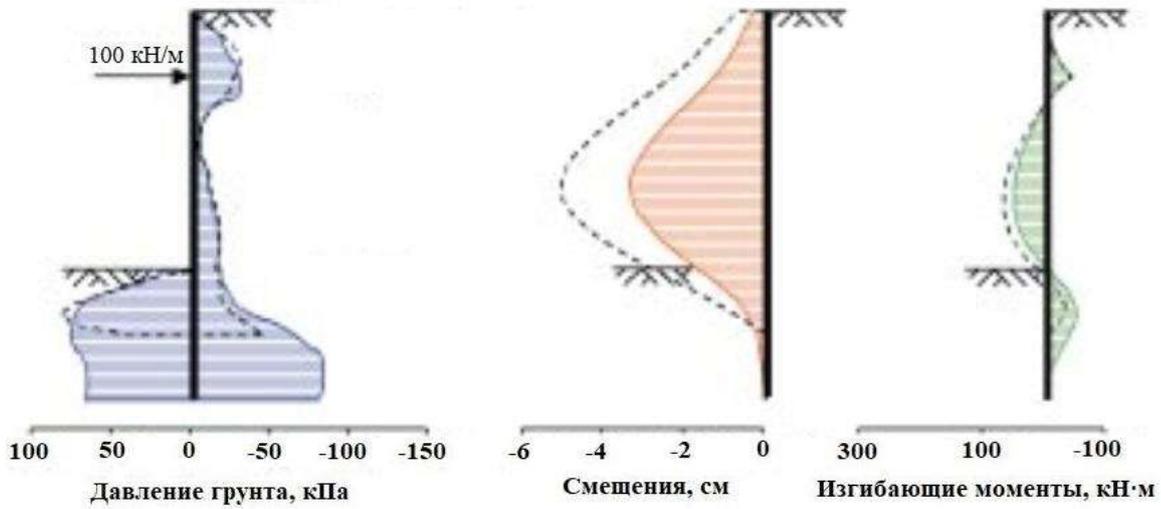
В этом случае, если следовать правилам расчетов Блюма, получится полностью заземленное положение нижнего конца стены (момент удерживающих сил будет равен моменту сдвигающих и опрокидывающих сил).

Результаты расчетов для тех же случаев А, Б и В (см. таблицу) показаны на рис. 4. Для сравнения предыдущие данные для менее заглубленной стенки (см. рис. 3) показаны на рис. 4 штриховыми линиями.

а

Гибкая шпунтовая стенка, жесткий грунт (случай А, см. табл.)

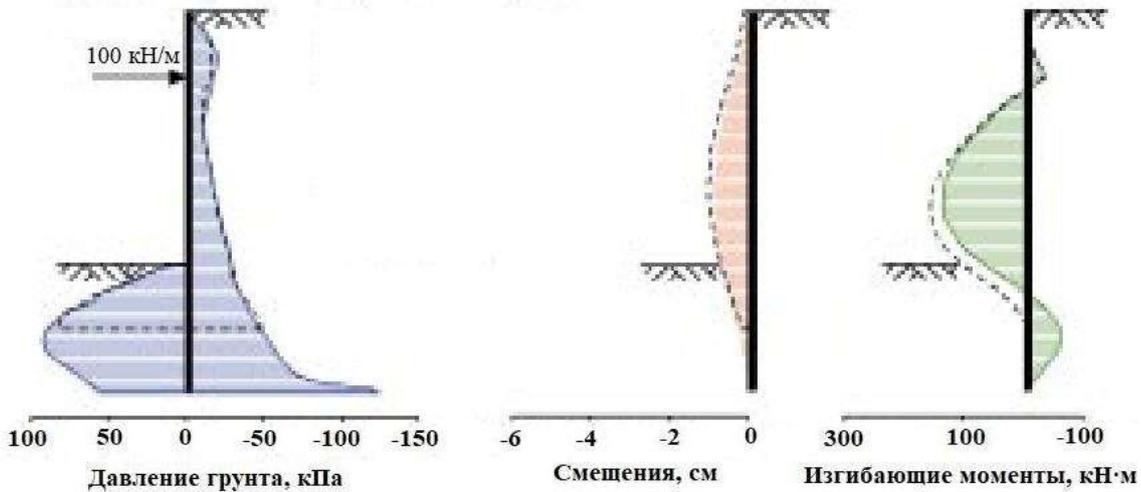
($EI = 15 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{oed}^{ref} = 45 \text{ МПа}$)



б

Жесткая "стена в грунте", жесткий грунт (случай Б, см. табл.)

($EI = 225 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{oed}^{ref} = 45 \text{ МПа}$)



В

Жесткая "стена в грунте", слабый грунт (случай В, см. табл.)

($EI = 225 \text{ МН} \cdot \text{м}^2/\text{м}$; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 3 \text{ МПа}$)

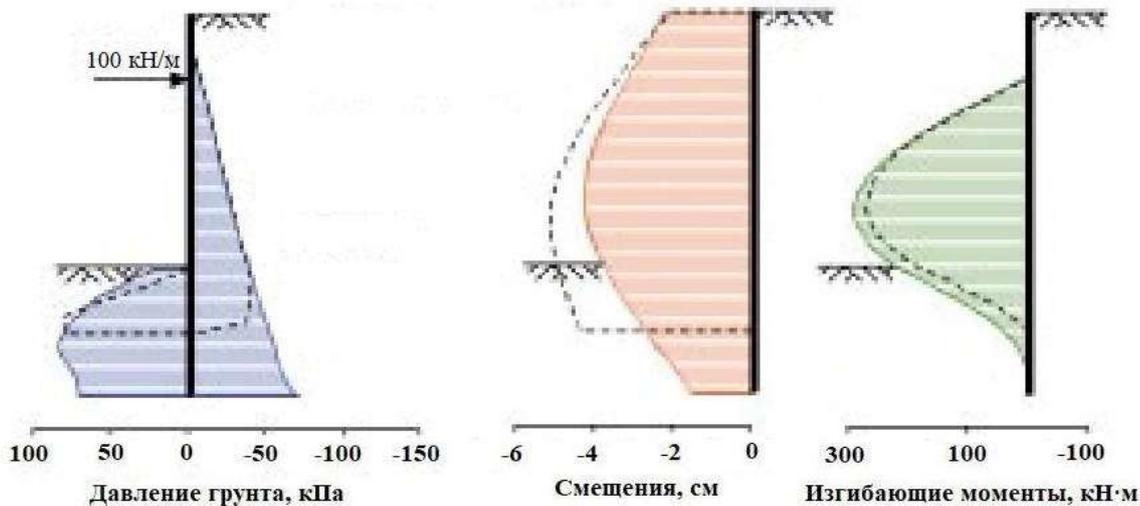


Рис. 4. Поведение подпорной стенки борта котлована с распорным креплением на одном уровне и фиксированным положением нижнего конца (при заглублении нижнего конца ограждения на 5 м ниже дна котлована) для случаев А, Б и В (см. таблицу). Штриховые линии показывают результаты для глубины заложения нижнего конца ограждения на 2,5 м ниже дна котлована, то есть для его не полностью защемленного положения (см. рис. 3)

Из рисунка 4 видно, что изгибающие моменты лишь незначительно уменьшаются при увеличении заглубления нижнего конца подпорной стенки. Уменьшение момента сдвигающих и опрокидывающих сил, обусловленное увеличением момента удерживающих сил, более или менее компенсируется небольшим увеличением активного давления, которое вызвано повышением жесткости всей системы.

Здесь Вермеер с удивлением отмечает, что некоторые руководства предполагают значительное влияние заглубления стенок на изгибающие моменты (что приводит к расхождениям между аналитическими и численными результатами. — *Ред.*).

Что касается перемещений подпорной стенки, то увеличение заглубления привело к их значительному снижению только в случае А (см. рис. 4, а), а в случаях Б и В его влияние не особенно сказалось (см. рис. 4, б, в).

Выводы

На основе полученных им данных Питер Вермеер [5] сделал следующие основные выводы.

- При анализе поведения жесткой подпорной стенки («стены в грунте») в жестком грунте (случай Б, см. табл.) получаются примерно такие же результаты, как и при использовании аналитической методики расчетов Блюма. В этом случае будут иметь место классические активные давления грунта, по крайней мере ниже уровня крепления стенки.
- Гибкая (шпунтовая) подпорная стенка в жестком грунте (случай А, см. табл.) получит значительные деформации при невысоких изгибающих моментах.

Жесткий грунт передаст значительную часть активного давления на изгиб, а в гибкой стенке возникнут небольшие усилия.

- Жесткая подпорная стенка («стена в грунте») в слабом грунте (случай В, см. табл.) будет испытывать высокие активные давления и, как следствие, иметь высокие изгибающие моменты.
- За счет увеличения заглубления подпорной стенки ниже дна котлована изгибающие моменты, как правило, уменьшаются незначительно.

Источники

1. Заметки Питера Вермеера. Как не игнорировать ползучесть грунтов в геотехнической практике? // Geoinfo.ru. 09.12.2019. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-kak-ne-ignorirovat-polzuchest-gruntov-v-geotekhnicheskoy-praktike-41820.shtml.
2. Заметки Питера Вермеера. Когда нужен «дренированный» и «недренированный» анализ поведения грунтов? // Geoinfo.ru. 18.11.2019. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-kogda-nuzhen-drenirovannyj-i-nedrenirovannyj-analiz-povedeniya-gruntov-41720.shtml.
3. Заметки Питера Вермеера. О деформационных параметрах моделей грунта и коэффициенте переуплотнения // Geoinfo.ru. 03.02.2020. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/zametki-pitera-vermeera-o-deformacionnyh-parametrah-modelej-grunta-i-koehfficiente-pereuplotneniya-42125.shtml.
4. docs.cntd.ru/document/420383019.
5. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 2001. № 10. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-10.pdf.

Рис. на заставке: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-10.pdf.