



КРИВОШЕЕ ПЕТР ИВАНОВИЧ

Директор Государственного предприятия "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций", профессор, президент Всеукраинской общественной организации «Украинское общество механики грунтов, геотехники и фундаментостроения».

Основные направления научной деятельности: конструктивные и геотехнические мероприятия при строительстве зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, разработка нормативных документов для строительства, разработка и участие в реализации государственных, научно-технических программ в сфере строительства, ликвидация аварийных ситуаций.

Автор свыше 150 научных работ.
E-mail: adm-inst@ndibk.kiev.ua



СЛЮСАРЕНКО ЮРИЙ СТЕПАНОВИЧ

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, первый заместитель директора Государственного предприятия "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций", член Всеукраинской общественной организации «Украинское общество механики грунтов, геотехники и фундаментостроения».

Основные направления научной деятельности: строительные конструкции, оснований и фундаменты.

Автор свыше 50 научных работ.
E-mail: adm-inst@ndibk.kiev.ua



ЧЕРВИНСКИЙ ЯКОВ ЙОСИПОВИЧ

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом исследований технического состояния зданий и гидротехнических сооружений Государственного предприятия "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций".

Основные направления научной деятельности: строительные конструкции, оснований и фундаменты.

Автор более 50 научных работ.
E-mail: adm-inst@ndibk.kiev.ua

УДК

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ НА ПОДАТЛИВОМ ОСНОВАНИИ В УКРАИНЕ

Ключевые слова: методы расчета, фундаменты, податливое основание.

Расчет конструкций с учетом деформативных свойств основания предполагает соответствующую идеализацию многообразия механических свойств грунтов, представляющих его. Уровень абстракции при этом зависит от требований, предъявляемых к расчетной схеме системы "конструкция-основание".

Розрахунки конструкцій з врахуванням деформативних властивостей основ припускає відповідну ідеалізацію різноманіття механічних властивостей ґрунтів, що представляють його. Рівень абстракції при цьому залежить від вимог, пропонованих до розрахункової схеми системи "конструкція-основа"

Basic principles of calculation method of the constructions, taking into account variable rigidity of the ground basement, are introduced. The method of variable coefficients of rigidity of the basis allows taking into account non-linear and non-elastic deformability of ground and any displacement of a contact surface of the basis at calculations.

1 ВВЕДЕНИЕ

Расчет конструкций с учетом деформативных свойств основания предполагает соответствующую идеализацию многообразия механических свойств грунтов, представляющих его. Уровень абстракции при этом зависит от требований, предъявляемых к расчетной схеме системы "конструкция-основание". В общем случае можно выделить три основные группы методов расчетов: метод местных упругих деформаций; метод общих упругих деформаций; комбини-

рованные методы.

Метод местных упругих деформаций (гипотеза Винклера) базируется на предпосылке, что деформации основания происходят лишь в месте приложения силы, и считается, что давление в этой точке прямо пропорционально ее перемещению $p = c \times w$, где p – сила в точке деформирования основания; c – коэффициент пропорциональности (коэффициент постели); w – перемещение основания в точке приложения силы.

Метод общих упругих деформаций базируется на предпосылке, что деформирование основания происходит в любой точке упругого полупространства с координатами x и y , на поверхности которого в точке с координатами ξ и η приложена единичная сила. Величина деформирования основания зависит от расстояния между точками приложения силы и точкой упругого полупространства $w(x,y)=k(x-\xi,y-\eta)$.

Как это не парадоксально, но основными недостатками указанных выше методов являются их основополагающие концепции: игнорирование распределительной способности основания в случае винклеровского основания и чрезмерная распределительная способность упругого полупространства. Поэтому совершенно естественными были разработки комбинированных методов моделирования основания, в которых эти недостатки сглаживались за счет введения дополнительных условий при математическом формулировании задачи. В этой статье рассматривается метод переменных коэффициентов жесткости основания (МПКЖ), основоположником которого является С.Н.Клепиков.

2 ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ

На рис. 1 показана схема системы "сооружение–основание", которая состоит из двух подобластей верхнего уровня дискретизации: G – сооружение и H – основание.

Подобласти G и H имеют сетку дискретизации на элементарные подобласти следующего уровня, построенную на узлах I, J, S и T , для которых множества I и J , так же как и S и T – непересекающиеся, а множества I и T имеют общие узлы

$$I \cap J = \emptyset; S \cap T = \emptyset; (I \cup J) \cap (S \cup T) \neq \emptyset, \quad (1)$$

где $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ – множество узлов сетки дискретиза-

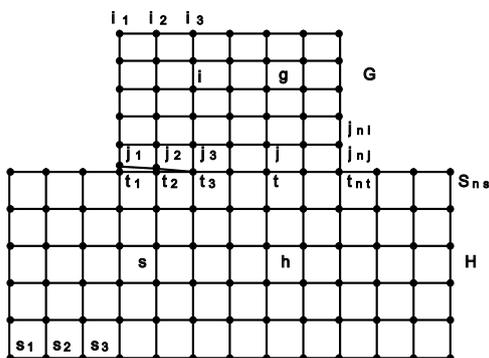


Рис. 1 Схема системы "сооружение–основание"

ции сооружения, которые не контактируют с поверхностью основания; $J = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ – множество контактных узлов сетки дискретизации сооружения (узлы, которые могут вступать в контакт с поверхностью основания); $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{ns}\}$ – множество узлов сетки дискретизации основания, которые не контактируют с поверхностью сооружения; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{nt}\}$ – множество контактных узлов сетки дискретизации основания (узлы, которые могут вступать в контакт с поверхностью сооружения); n_p, n_s, n_i, n_t – количество соответствующих узлов. Узлы J и T далее по тексту будем называть внешними, а узлы I и S – внутренними.

При соответствующей последовательности нумерации внутренних и внешних узлов в процедуре метода конечных элементов, рассматривая подобласти, построенные на узлах I, J, S и T как конечные элементы, для сооружения можно записать следующее уравнение равновесия

$$\begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ij}] \\ [K_{ji}] & [K_{jj}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{V_i\} \\ \{V_j\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_i\} \\ \{F_j\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

где $[K]$ – подматрицы коэффициентов жесткости на соответствующих узлах; $\{V_i\}, \{V_j\}$ – векторы перемещений внутренних и внешних узлов; $\{F_i\}, \{F_j\}$ – векторы нагрузок, приведенных к внутренним и внешним узлам. После соответствующих преобразований это уравнение можно записать в следующем виде

$$([K_{jj}] - [K_{ji}] [K_{ii}]^{-1} [K_{ij}]) \{V_j\} = \{F_j\} - [K_{ji}] [K_{ii}]^{-1} \{F_i\}. \quad (3)$$

Аналогично, для основания получаем

$$([K_{tt}] - [K_{ts}] [K_{ss}]^{-1} [K_{st}]) \{V_t\} = \{F_t\} - [K_{ts}] [K_{ss}]^{-1} \{F_s\}. \quad (4)$$

Уравнение равновесия на контактных узлах для системы "сооружение–основание" имеет вид

$$\begin{aligned} & ([K_{jj}] - [K_{ji}] [K_{ii}]^{-1} [K_{ij}]) \{V_j\} + [K_{jt}] [K_{tt}]^{-1} \{F_t\} - \{F_j\} = \\ & = \{F_t\} - ([K_{tt}] - [K_{ts}] [K_{ss}]^{-1} [K_{st}]) \{V_t\} - [K_{ts}] [K_{ss}]^{-1} \{F_s\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Остановимся подробнее на схеме взаимодействия контактных узлов сооружения и основания. В процессе сложного нагружения этой системы возможны два состояния работы контактных узлов: 1-е состояние – когда соответствующие контактные узлы сооружения и основания вступили в контакт; 2-е – контакта нет. Каждый контактный узел является математической моделью элементарной площадки контактной поверхности, которому присваиваются все ее свойства, поэтому, говоря о взаимодействии контактных узлов, следует рассматривать взаимодействие этих площадок с присущими им свойствами. На рис. 2 показана схема моделирования взаимодействия элементарных контактных площадок контактными узлами.

Основополагающей концепцией МПКЖ является аппроксимация непрерывной величины, жесткостных характеристик основания, множеством кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей – контактных узлов основания.

На рис. 3 приведен график деформирования грунтового основания при штамповых испытаниях на сдвиг при знакопеременной статической сдвигающей нагрузке. На рис. 4 показаны графики испытаний грунтов сваями при действии вдавливающих и выдергивающих нагрузок.

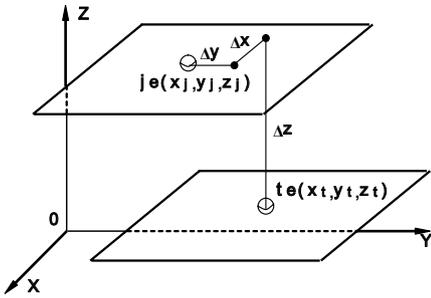


Рис. 2 Схема замены площадок контактными узлами

Рассматривая штамп как элементарную контактную площадку сооружения, абстрагируемся до контактного узла сооружения, в котором действуют прикладываемая на штамп вертикальная и горизонтальная нагрузки. Рассматривая поверхность грунта на контакте подошвы штампа как элементарную контактную площадку основания, абстрагируемся до контактного узла основания, который обладает определенными жесткостными свойствами. Можно приведенные на рис. 3 графики рассматривать как функции зависимости перемещений $\{V\}$ контактного узла основания от действующих в контактном узле нагрузок $\{F\}$: $\{V\} = [K]\{F\}$. Здесь $[K]$ – матрица жесткости контактного узла основания.

Рассматриваем голову сваи как абстрактный контактный узел сооружения, в котором действуют вдавливающие или выдергивающие нагрузки, прикладываемых к голове сваи. Рассматривая часть сваи, находящуюся в грунте, как элементарную контактную площадку основания абстрагируемся до контактного узла основания. Можно приведенные на рис. 4 графики рассматривать как функции зависимости перемещений контактного узла основания от действующих в контактном узле нагрузок $\{V\} = [K]\{F\}$.

При описании жесткостных свойств основания в МПКЖ можно выделить три основных иерархических уровня:

1. Жесткостные свойства основания разделяются по виду его деформирования: коэффициенты жесткости основания при сжатии – K_{cm} ; коэффициенты жесткости основания при сдвиге – K_{dt} .
2. Каждый вид коэффициента жесткости зависит от геометрических характеристик контактной поверхности, в частности от координат контактных узлов на контактной поверхности, геологического строения основания, взаимного начального положения контактных поверхностей конструкции и основания.
3. Коэффициент жесткости в контактном узле, в общем случае, является величиной переменной, в связи с нелинейной работой грунта основания и зависит от свойств грунта, которые учитываются в конкретном расчете. Деформационные свойства основания в контактном узле описываются комплексными характеристиками – функциями "перемещение-усилие", которые для нелинейно-неупругого основания в общем виде можно записать:

– при сжатии:

$$w = f_1(p); w = \psi_1(p) \text{ – активные деформации сжатия;}$$

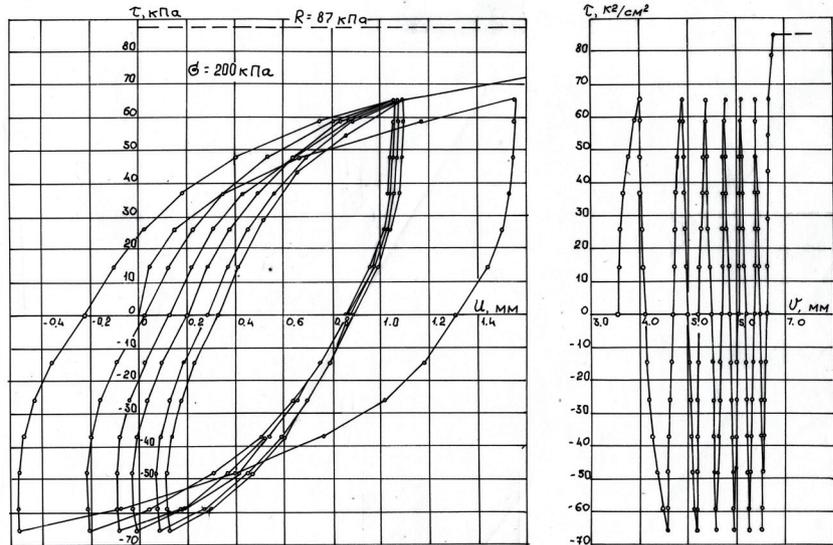


Рис. 3 Графики деформирования грунтового основания при штампových испытаниях на сдвиг: 1 – горизонтальные перемещения; 2 – вертикальные перемещения.

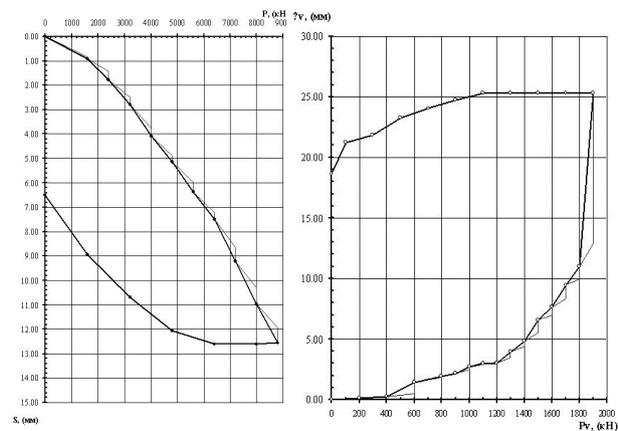


Рис. 4 Графики испытания грунтов сваями. 1 – вдавливающие нагрузки; 2 – выдергивающие нагрузки.

$$w = f_2(p); w = \psi_2(p) \text{ – пассивные деформации сжатия;}$$

$$w = f_3(p); w = \psi_3(p) \text{ – активные деформации растяжения;}$$

$$w = f_4(p); w = \psi_4(p) \text{ – пассивные деформации растяжения;}$$

где w – перемещение контактного узла по нормали к контактной поверхности; p – усилие в контактном узле в этом направлении; $\psi = f^{-1}$ – обратные функции.

– при сдвиге:

$$u = g_1(t); t = \zeta_1(u) \text{ – активные деформации при сдвиге в положительном направлении перемещения;}$$

$$u = g_2(t); t = \zeta_2(u) \text{ – пассивные деформации при сдвиге в положительном направлении перемещения;}$$

$$u = g_3(t); t = \zeta_3(u) \text{ – активные деформации при сдвиге в отрицательном направлении перемещения;}$$

$$u = \zeta_4(t); t = \zeta_4(u) \text{ – пассивные деформации при сдвиге в отрицательном направлении перемещения;}$$

где u – перемещение контактного узла по касательной к контактной поверхности в направлении рассматриваемой координатной оси; t – усилие в контактном узле в этом направлении; $\zeta = g^{-1}$ – обратные функции.

3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПЕРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ

Функциональная зависимость $\{V\}=[K]\{F\}$ имеет явный нелинейный характер, поэтому расчет системы "сооружение-основание" возможно только итерационными методами. При расчете на сложное нагружение производится разделение истории нагружения на ряд простых нагружений. Сначала расчет выполняется на первое нагружение. Затем с учетом полученных результатов выполняется расчет на дополнительное следующее нагружение и так далее. На каждом шаге нагружения решается линейно-упругая контактная задача. Определение нагрузок от сооружения на контактные узла основания выполняется каким-либо численным методом. Наиболее совместимым численным методом с МПКЖ является метод конечных элементов (МКЭ) так как здесь можно при расчете сооружения учитывать жесткость основания прямым суммированием матриц жесткостей соответствующих контактных узлов сооружения и основания.

Учет нелинейно-упругих свойств деформирования основания в контактном узле при сложном нагружении требует разрешения нелинейности двух видов: первый обусловлен физической нелинейностью деформирования основания поднагрузкой; второй обусловлен сложной траекторией нагружения основания. Поэтому при моделировании работы контактного узла при действии сжимающих усилий принята двухуровневая схема:

1. Внутри простого нагружения, на которое разбивается сложное нагружение, используется процедура метода переменных параметров, когда в процессе итерации производится корректировка секущих коэффициентов жесткости основания при сжатии.
2. Для разрешения второго вида нелинейности используется методика перенастройки схем, описывающих деформационные свойства контактного узла при сжатии, в соответствии с достигнутым в предыстории нагружения уровня обжатия основания. Алгоритм этой процедуры в общем виде показан на рис. 5 и 6.

Использование в МПКЖ контактных узлов для моделирования процесса взаимодействия сооружения и основания позволяет решать задачи воздействия на сооружение неравномерных перемещений основания. Опускание поверхности основания задается изменением координаты следа контактного узла и соответствующей перенастройкой схемы, описывающей деформационные свойства основания. Это состояние показано на рис. 5. При поднятии основания также изменяется координата следа основания и производится соответствующая перенастройка схемы деформирования в контактном узле основания. Отметка начального положения контактного узла сооружения находится ниже отметки следа, происходит смятие основания сооружением. Воздействие основания на сооружение при этом характеризуется силой $K_{cm(i-1)}(w_b - \Delta_{b(i)} - w_{cn})$. Схема взаимодействия контактных узлов при поднятии основания показана на рис. 6.

Из вышеизложенного видно, что большое значение при моделировании взаимодействия контактных узлов в процессе сложного нагружения имеет процедура перенастройки схемы деформационных свойств контактного узла основания. Такая перенастройка производится по двум причинам:

1. При переходе на следующий уровень нагружения, в случае, если на предыдущем уровне нагружения (i-1) произошло дополнительное обжатие основания, то

есть, если в контактном узле основания происходили активные деформации. В этом случае производится изменение координаты точки разгрузки и координаты точки следа сооружения на основании.

2. При заданном деформационном воздействии на сооружение со стороны основания. В этом случае выполняется параллельный перенос всей схемы, описывающей основание, относительно оси усилий (ось p) на величину поднятия или опускания основания, либо, что эквивалентно, изменяется координата начального положения контактного узла сооружения.

На рис. 7 приведены результаты расчета, при котором выполнено моделирование натурального эксперимента по исследованию работы блока девятиэтажного здания при прохождении под ним оседания основания. Основание моделировалось контактными узлами, работающими по нелинейно-неупругой схеме. В качестве расчетных параметров, характеризующих жесткости контактных узлов основания, приняты следующие величины: координаты "характеристической" точки кривой деформирования основания $w_{ch}=0,020$ м, $p_{ch}=2005$ кН; несущая способность основания при сжатии $N=7000$ кН; коэффициент жесткости основания при пассивном деформировании $K=22320$ кН/м; величина оседания основания под сооружением $\Delta h=0,132$ м.

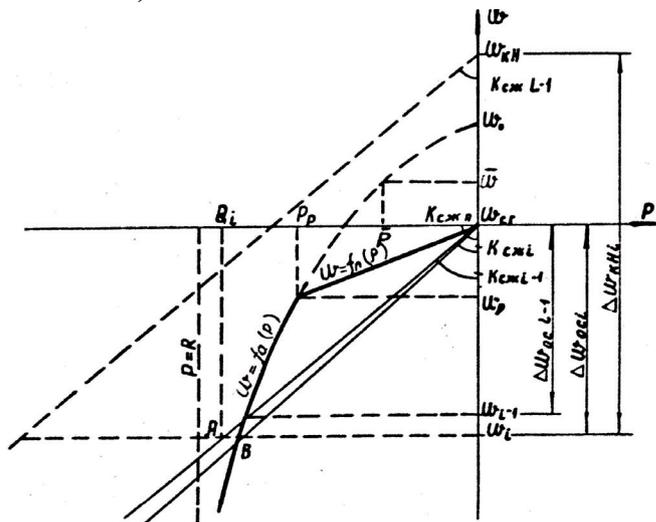


Рис. 5 Схема определения секущих коэффициентов жесткости основания при сжатии при опускании основания

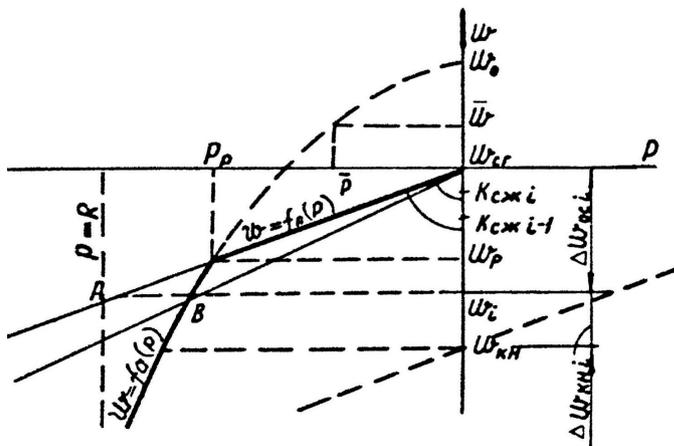


Рис. 6 Схема определения секущих коэффициентов жесткости основания при сжатии при поднятии основания

Эксперимент моделировался как сложное нагружение в 17 шагов. На первом шаге задана нагрузка от здания, на последующих шагах задавались оседания основания. На рис. 7 показаны значения перемещений здания и положение поверхности основания. Результаты моделирования показаны сплошной линией, результаты эксперимента – пунктирной линией (значения перемещений указаны в скобках).

Исследования, проведенные на численной модели, показали, что при заданных величинах нагрузок итерационный процесс является устойчивым и быстро сходится. Повышение точности решения на порядок (невязка по коэффициентам жесткости основания уменьшена с 0,1 % до 0,01%) увеличивает общее количество итераций почти на 30%. Повышение жесткости сооружения замедляет сходимость итерационного процесса. Увеличение жесткости основания ускоряет сходимость итерационного процесса. Изменение жесткости сооружения, также как и основания, по длине в значительной мере влияет на процесс деформирования системы "сооружение–основание" при сложном нагружении.

ВЫВОДЫ

Применение метода переменных коэффициентов жесткости основания позволяет выполнять расчет системы "сооружение–основание", при которых можно учитывать:

- особенности деформирования оснований, при наличии в них грунтов, обладающих особыми свойствами (просадочные, мерзлые, набухающие и др.);
- оседания и поднятия поверхности основания при подработках, оползаниях грунтов из-под фундаментов, карстовых провалах;
- знакопеременные горизонтальные деформации при прохождении мульды сдвижения на подрабатываемых территориях;
- реологические свойства грунтов основания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. – Киев: Будівельник, 1967. – 184 с.
2. Клепиков С.Н., Бобрицкий Г.М. Эффективный метод решения задачи взаимодействия фундамента с надфундаментной конструкцией. – Основания, фундаменты и механика грунтов. 1975, №1. – С. 9–12.
3. Клепиков С.Н., Червинский Я.И. Расчет конструкций на неупругом основании при совместном применении метода конечных элементов и метода переменных коэффициентов жесткости основания. – Киев, 1984. – 8 с. – Деп. ВНИИИС 4.05.1984, №5027.
4. Клепиков С.Н., Червинский Я.И. Экспериментальные исследования взаимодействия жесткого штампа и грунтового основания при сложном воздействии сдвигающего усилия. – Киев, 1984. – 13 с. – Деп. ВНИИИС 25.01.1985, №5535.
5. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. – К.: НИИСК, 1996. – 204С.

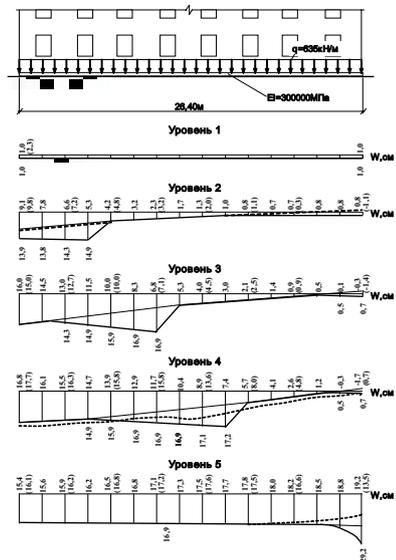


Рис. 7 Моделирование натурного эксперимента по подработке крупнопанельного здания