

но не мешающих деформированию из своей плоскости. Для описания ступенчато-переменной толщины используется функция Хевисайда. Деформации малые.

Уравнения равновесия трехслойного стержня получены с помощью принципа возможных перемещений Лагранжа:

$$\delta A = \delta W,$$

где  $\delta A$ ,  $\delta W$  – вариации работы внешней нагрузки и внутренних напряжений,

$$\delta A = \iint_S (p \delta u + q \delta w) dS,$$

$$\delta W = \int_S \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} (\sigma_x^{(k)} \delta \epsilon_x^{(k)} + 2\sigma_{xz}^{(3)} \delta \epsilon_{xz}^{(3)} \delta_{k3}) dz dS = b_0 \int_0^l \left[ \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} \sigma_x^{(k)} \delta \epsilon_x^{(k)} dz + 2 \int_{h_3} \sigma_{xz}^{(3)} \delta \epsilon_{xz}^{(3)} dz \right] dx;$$

$p, q = \text{const}$  – проекции внешней поверхностной нагрузки;  $\sigma_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций; интегралы берутся по всему объему стержня.

Применяя закон Гука, интегрируя по толщине стержня, получим в итоге следующую систему уравнений равновесия в перемещениях:

$$\begin{aligned} (a_1 + a_{10} H_0(x - x_0)) u_{,xx} + (a_6 + a_{60} H_0(x - x_0)) \psi_{,xx} - (a_7 + a_{70} H_0(x - x_0)) w_{,xxx} &= -p, \\ (a_6 + a_{60} H_0(x - x_0)) u_{,xx} + (a_2 + a_{20} H_0(x - x_0)) \psi_{,xx} - (a_3 + a_{30} H_0(x - x_0)) w_{,xxx} - a_5 \psi &= 0, \\ (a_7 + a_{70} H_0(x - x_0)) u_{,xxx} + (a_3 + a_{30} H_0(x - x_0)) \psi_{,xxx} - (a_4 + a_{40} H_0(x - x_0)) w_{,xxxx} &= -q, \end{aligned}$$

где  $x_0$  – координата сечения, в котором скачком изменяется толщина стержня;  $u, \psi, w$  – искомые перемещения.

Эта система уравнений имеет разрывные коэффициенты. Ее необходимо решать в отдельности для каждой из областей непрерывности. Затем полученные решения «сшивать» по границам.

В результате система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая равновесия трехслойного стержня с нерегулярной границей, в областях непрерывности имеет решение типа:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= C_{21} \text{sh}(\beta_1 x) + C_{31} \text{ch}(\beta_1 x) - \frac{1}{\beta_1^2} [\gamma_{21} p + \gamma_{11} (qx + C_{11})], \\ w_1(x) &= \frac{1}{\alpha_{21}} \left[ \frac{\alpha_{11}}{\beta_1} \left[ C_{21} \text{ch}(\beta_1 x) + C_{31} \text{sh}(\beta_1 x) - \frac{x}{\beta_1} \left( \gamma_{21} p + \gamma_{11} \left( \frac{1}{2} qx + C_{11} \right) \right) \right] - \right. \\ &\quad \left. - a_7 p \frac{x^3}{6} + a_1 q \frac{x^4}{24} + \frac{a_1 C_{11}}{6} x^3 \right] + \frac{C_{41}}{2} x^2 + C_{51} x + C_{61}, \\ u_1(x) &= \gamma_{31} \psi_1 + \frac{1}{\alpha_{21}} \left[ -a_4 p \frac{x^2}{2} + a_7 q \frac{x^3}{6} + \frac{a_7}{2} C_{11} x^2 \right] + C_{71} x + C_{81}. \end{aligned}$$

В других областях решение будет иметь подобный вид, но с другими коэффициентами и константами интегрирования  $C_{21}, \dots, C_{28}$ , которые определяются из условия непрерывности перемещений и их производных в сечениях нарушения толщины стержня.

УДК 624.15:692.115+624.139

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАЙ В ПОСТРОЕЧНЫХ УСЛОВИЯХ

П. С. ПОЙТА, А. Н. НЕВЕЙКОВ

Брестский государственный технический университет

Среди различных типов фундаментов, применяемых в Беларуси, на долю свайных приходится почти 25 %. Их применение позволяет получить более экономичные и индустриальные конструктивные решения не только в сложных инженерно-геологических условиях. Причем наибольшее распространение получили сваи заводского

изготовления. Однако их применение технически затруднено или экономически нецелесообразно в случаях:

- передачи значительных нагрузок от сооружений на прочные глубокозалегающие грунты;
- на площадках со сложными условиями строительства, в том числе, когда в пределах стройплощадки залегают плотные грунты, резко меняющие проектные отметки погружения свай;
- прорезки сваями не однородных по составу насыпей с твердыми включениями или слоев грунта природного сложения с часто встречающимися валунами;
- строительства и реконструкции фундаментов в стесненных условиях, при которых могут возникнуть недопустимые деформации конструкций существующих зданий и сооружений.

В этих случаях обычно используют буровые и буронабивные сваи. Согласно Van Impe, эти сваи занимают 50 % мирового рынка, а в Италии – даже более 90 % всех свай. Доля этих свай на объектах Москвы, Санкт-Петербурга, Киева, достигает 50–60 % и постоянно увеличивается, в то время как в нашей стране и в общем по СНГ не превышает 12–15 %. Современные технологии устройства таких свай отличаются высокой производительностью, невысоким уровнем динамических и шумовых воздействий, способностью к восприятию больших нагрузок, низкой себестоимостью строительства и другими преимуществами.

Для повышения эффективности использования свайных фундаментов из буронабивных свай предложено использовать бетон на основе расширяющегося цемента. Его применение удовлетворяет основным тенденциям развития современного свайного фундаментостроения, создающим резервы повышения эффективности свайных фундаментов:

- максимальное использование несущей способности свай по грунту и материалу;
- сокращение сроков изготовления свай, объемов земляных и опалубочных работ;
- изготовление свай в плотных грунтах естественного сложения или грунтах с улучшенными физико-механическими характеристиками посредством уплотнения или закрепления;
- совершенствование сопряжения колонн и свайных фундаментов;
- рациональное размещение арматуры в фундаменте;
- разработка новых, оригинальных, экономичных и надежных конструкций свай и методов их устройства, создающих дополнительное давление на грунт и его уплотнение;
- совершенствование методов определения несущей способности свай на стадии проектирования с использованием прочностных и деформационных характеристик грунтов.

Идея использования энергии расширения бетона для создания выгодного предварительно напряженного состояния конструкций на стадии изготовления была выдвинута как мера борьбы с самопроизвольным разрушением железобетонных конструкций, которые стали отмечаться в конце XIX века. Это способствовало созданию нового материала – напрягающего бетона. Так, конгресс ФИБ в 1997 г. провозгласил напрягающий бетон "материалом XXI века". В России, США, Японии, Китае, Германии и Республике Беларусь активно ведутся работы по исследованию этого материала и расширению границ его практического использования.

Предпосылками для применения напрягающего бетона для изготовления свай являются благоприятные условия, создаваемые грунтом, для расширения и твердения бетона, так как грунт:

- является естественной опалубкой для изготавливаемых свай, обладает определенной жесткостью, оказывает существенное боковое давление на сваю, возрастающее с глубиной, и создает тем самым внешнее полупространственное ограничение;
- имеет определенную влажность, а часто и высокий уровень подземных вод;
- обеспечивает стабильные температурные условия для твердения бетона.

Напрягающий бетон позволяет создать выгодное преднапряженное состояние грунта в результате обжатия скважины и устранить основные недостатки, присущие буронабивным сваям из обычных бетонов, что обеспечит повышение несущей способности буронабивных свай до 30 % и благоприятные условия работы. Это достигается за счет увеличения сил трения по боковой поверхности, так как доля нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью, составляет от 60 % до 90 % и зависит от конструкции сваи и грунтовых условий. Таким образом, удельная несущая способность таких свай приблизится к несущей способности забивных свай.

Как показали исследования, рост объемных деформаций напрягающих бетонов составляет от 0,4 до 2 %. Принимая во внимание, что диаметры буронабивных свай колеблются от 0,4 до 1,2 м, максимальные радиальные деформации грунта в результате расширения достигают величины 8–10 мм. Для достижения таких перемещений грунта даже буронабивная свая конической формы из обычного бетона при уклоне боковых граней в 5–8° должна получить осадку, близкую к предельно допустимой. Давление обжатия, передаваемое на грунт, приближается к 0,4–0,5 МПа, и сравнимо с величиной давления при изготовлении буропрессвай. Увеличение рабочей зоны вокруг буронабивной сваи из напрягающего бетона достигает 3–4 диаметров сваи.

Дальнейшее развитие и усовершенствование свайных фундаментов на основе напрягающих бетонов возможно лишь при детальном изучении взаимодействия таких свай с грунтом и разработке надежных и точных методов их расчета.