

Відомості про авторів:

Бойко Ігор Петрович, д. т. н., проф. кафедри основ і фундаментів Київського національного університету будівництва та архітектури, e-mail: oif@kpiuba.org.ua.

Підлущкий Василь Леонідович, к. т. н., доц., кафедри основ і фундаментів Київського національного університету будівництва та архітектури, e-mail: oif@kpiuba.org.ua.

УДК.624.154.624.151

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОГРУЖЕНИЯ И РАБОТЕ, СВАЙ В ГРУНТЕ)

А. Н. Моторный, магистр, с. н. с., Н. А. Моторный, к. т. н., доц.

Ключевые слова: несущая способность сваи, забивная свая, отказ сваи, энергия удара молота, уплотненное ядро, межсвайное пространство

Введение. Согласно действующим нормативным документам по свайным фундаментам ДБН В.2.1-10-2009 Зміна 1, ДСТУ.БВ.2.1-27:2010 несущую способность сваи определяют:

1. по данным статических испытаний свай вдавливающей нагрузкой с коэффициентом надежности по грунту $K_{\Gamma} = 1.2$;
2. по расчетным формулам ДБН В.2.1-10-2009 Зміна 1 с коэффициентом надежности по грунту $K_{\Gamma} = 1.4$;
3. контроль несущей способности сваи в процессе забивки, по отказу сваи (e) с коэффициентом надежности по грунту $K_{\Gamma} = 1.4$.

Рассматривается формирование несущей способности сваи в процессе забивки. В начальный период погружения свая вдавливается в грунт массой молота. В этом случае в грунте под острием сваи (клин, пирамида, конус) от передачи статической вдавливающей нагрузки формируется напряженная зона значительно превышающая расчетное сопротивление грунта под острием $\sigma \gg R$, в результате чего проявляются запредельные деформации грунта в области острия, где, за счет деформации грунта острие раздвигает грунт в стороны и свая перемещается вниз по направлению движения молота, встречая на пути только сопротивление сил трения грунта на боковую поверхность сваи. Это явление проявляется до глубины z , на которой выполняется условие равновесия: $\gamma \cdot z \geq \sigma - f$,

где: γ – удельный вес грунта прорезаемого свайей (кН/м^3);

z – переменная ордината – фиксированная глубина погружения сваи, м;

σ – напряжение в грунте в уровне острия сваи от вдавливающей нагрузки, кПа (кН/м^2);

$$\sigma = \frac{Q_m}{A}, \text{ кПа}$$

f – силы трения грунта (окружающего сваю) на боковую поверхность сваи (кПа).

Тогда условия равновесия приобретают вид:

$$\gamma \cdot u \cdot z^2 + u \cdot z \cdot f \geq \sigma \cdot A \quad (1)$$

где: u – периметр сечения ствола сваи, м;

A – площадь боковой поверхности острия сваи (клин, пирамида), м^2 , $A=2d^2$;

d – сторона поперечного сечения ствола сваи, м;

Q_m – вес ударной части молота, кН (по паспорту).

Из условия равновесия (1) определяется глубина « z » от уровня поверхности дна котлована до глубины где давление от собственного веса грунта γz и силы трения на боковой поверхности ствола сваи нейтрализуют напряжение сформированное под острием, за счет которого формируется напряженный выпор грунта из под острия сваи (буферный слой), ниже которого начинает формироваться несущая способность сваи в процессе ее погружения ударной нагрузкой.

$$z = \frac{-f \cdot u \pm \sqrt{(f \cdot u)^2 + 4 \gamma \cdot u \cdot \sigma \cdot A}}{2 \gamma \cdot u} \quad (2)$$

Формирование естественного (и проектного) отказа сваи « e » в процессе погружения ее ударной нагрузкой. Начиная с глубины z от дна котлована, под острием сваи начинает формироваться уплотненное ядро, которое распространяется по глубине под углом $\varphi_{\text{ср}}/4$ от

вертикальной грани ствола сваи. При этом за счет проявления адгезии грунта (под высоким напряжением) в боковую поверхность материала ствола сваи, силы сцепления грунта с боковой поверхностью материала сваи значительно превышает силы сопротивления срезу грунта по грунту, то формирующееся уплотненное ядро перемещается вместе с острием сваи, увеличиваясь в диаметре в уровне острия пропорционально глубине погружения сваи, т. е. $d_{я} = 2(l - z) \cdot tg \frac{\varphi_{cp}}{4}$. Теперь давление под нижним концом сваи от ударной нагрузки будет передаваться не через острие, а через уплотненное ядро, от чего и будет зависеть отказ сваи. Отказ – перемещение сваи от одного удара – формируется как мгновенная осадка сваи через уплотненное ядро, которое передает давление от удара молота на деформируемый под ядром грунт. Схема передачи нагрузки и деформации под нижним концом сваи изображена на рисунке 1. При ударе молота по голове сваи энергия удара израсходуется:

- 1) на деформацию грунта под уплотненным ядром;
- 2) на преодоление сил трения грунта на боковой поверхности уплотненного ядра в пределах отказа «e».

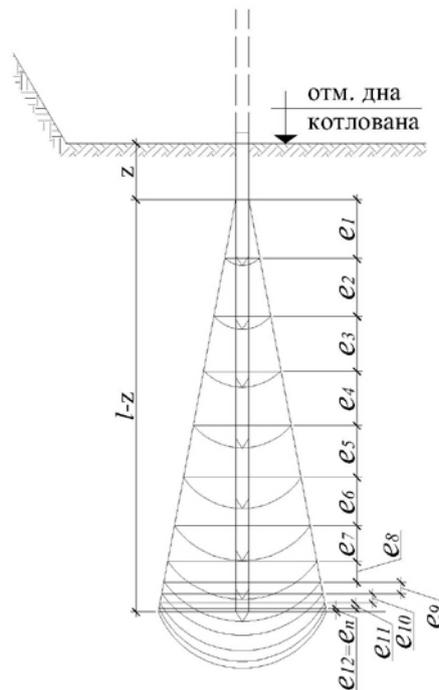


Рис. 1. Схема передачи нагрузки и деформации под нижним концом сваи

Мгновенная деформация грунта рассчитывается из условия формирования сжимаемой толщи равной диаметру уплотненного ядра $h_{сж} = 2(l - z)tg \frac{\varphi_{cp}}{4} + d$, что формирует отказ сваи «e» и вычисляемый по формуле

$$S_{Мг} = e = \frac{\sigma \cdot h_{сж}}{E} = \frac{\sigma [2(l - z + e) \cdot tg \frac{\varphi_{cp}}{4} + d]}{E} \quad (3)$$

где: σ – (напряжение) давление на подстилающий уплотненное ядро грунт;

E – модуль деформации деформируемого подстилающего слоя, МПа.

Силы сопротивления трению грунта в пределах сформированного отказа «e» сваи R_f , КПа вычисляется по формуле

$$R_f = f \cdot e \cdot u \quad (4)$$

где: f – силы трения грунта на боковую поверхность уплотненного ядра

$$f = \tau = \sigma_z \cdot tg \varphi + c = \gamma \cdot (h + z + e) \cdot tg \varphi + c \quad (5)$$

u – периметр уплотненного ядра в плоскости острия сваи

$$u = [(l - z) + e + d_{св}] \cdot tg \frac{\varphi_{cp}}{4} \cdot \pi \quad (6)$$

Подставляя выражение (5), (6) в выражение (4) получим составляющую сил трения грунта на боковую поверхность уплотненного ядра.

$$R_f = \underbrace{[\gamma \cdot (h + z + e) \cdot tg\varphi + c]}_{\tau = f} \cdot \underbrace{[(l - z) + e + d_{cb}] \cdot tg\frac{\varphi_{cp}}{4}}_u \pi e \quad (7)$$

Израсходование энергии удара молота на преодоление сил трения грунта на боковую поверхность уплотненного ядра в пределах отказа «е» будет равно:

$$E_{M,f} = R_f \cdot e = \tau \cdot u \cdot e^2, \text{ кНм} \quad (8)$$

Расход энергии удара на деформацию грунта под уплотненным ядром $E_{M,S}$ определится из расчета перемещения условного массива грунта ($G_M + q_{cb}$) на величину отказа сваи «е», т.е.

$$E_{M,S} = (G_{YM} + q_{cb}) \cdot e \quad (9)$$

А условие энергетического равновесия энергии удара молота по свае запишется выражением

$$Q_M \cdot H = E_{M,f} + E_{M,S} = \tau \cdot u \cdot e^2 + (G_M + q_{cb}) \cdot e \quad (10)$$

Представляя выражение (10) в виде квадратного уравнения

$$\tau \cdot u \cdot e^2 + (G_{MOL} + q_c) \cdot e - Q_M \cdot H = 0 \quad (10')$$

определяется величина отказа сваи из (10')

$$e = \frac{-(G_{MAC} + q_{CB}) + \sqrt{(G_{MAC} + q_c)^2 + 4 \cdot \tau \cdot u \cdot Q_M \cdot H}}{2 \cdot \tau \cdot u} \quad (11)$$

Согласно формуле (11) отказ сваи «е» прямопропорциональный весу (массе) ударной части молота Q_M , высоте падения молота «H», весу (массе) условного фундамента $G_M + q_{cb}$ и обратнопропорциональный касательным напряжением $\tau = \sigma_{zg} \cdot tg\varphi + c$, включающей в себе глубину погружения сваи ($l+z$), – удельный вес грунта γ и прочностные и деформативные характеристики окружающих сваю грунтов «с» и «φ», что соответствует логическому (практическому) представлению об отказе сваи «е».

Согласно представленному анализу выражение для отказа «е» сваи при ее погружении ударной нагрузкой можно представить выражением:

$$e = f \left(\frac{E_M}{R_0 + \tau} \right) = \frac{Q_M \cdot H}{R_0 + \tau} \quad (\text{м}) \quad (12)$$

Отсюда несущую способность сваи по данным погружения ее ударной нагрузкой F_d можно определить в следующей последовательности:

1. Рассчитывается сопротивление грунта под подошвой уплотненного грунта $R_0 = f(\varphi, c, \gamma, b, d)$ по характеристикам грунта под уплотненным ядром
2. Определяется сопротивление трению грунта на боковой поверхности уплотненного ядра $f = \tau = \gamma \cdot l \cdot tg\varphi + c$ (кПа) для дифференцированной глубины погруженной сваи.
3. Рассчитывается составляющая несущей способности сваи под уплотненным ядром (по острию)

$$F_{dя} = R_0 \cdot A_{я} = R_0 \cdot [2(l - z) \cdot tg\frac{\varphi}{4} + d]^2 \quad (13)$$

4. Определяется энергия, затрачиваемая на перемещение сваи на величину отказа «е»

$$F_{я} = F_{dя} \cdot e = R_0 \cdot [2(l - z) \cdot tg\frac{\varphi}{4} + d]^2 \cdot e \quad (14)$$

5. Рассчитывается энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения грунта на боковой поверхности уплотненного ядра, при перемещении его на величину «е»

$$E_f = \tau \cdot e = (\gamma \cdot l \cdot tg\varphi + c) \cdot e \cdot e \cdot u \quad (15)$$

6. Вычисляется суммарная энергия, затрачиваемая на погружении сваи на величину отказа «е»

$$E = E_{я} + E_f = \left\{ [R_0 \cdot 2(l - z) \cdot tg\frac{\varphi}{4} + d_{cb}]^2 + [(\gamma \cdot l \cdot tg\varphi + c) \cdot e \cdot u] \right\} e \quad (16)$$

7. Несущая способность сваи по энергетическим затратам $F_d = f(E)$ определится по условию: $E_{я} + E_f = \frac{Q_M \cdot h}{e \cdot n} = F_d$; (17)

где: n – коэффициент, зависящий от материала сваи, и для железобетонных свай с наголовником, погружаемых сваебойным агрегатом n принимается равным $n=0,015$;

e – отказ сваи на момент погружения (по замеру);

Q_M – вес ударной части молота (по паспорту) сваебойного агрегата;

h – высота падения ударной части молота (по паспорту);

F_d – несущая способность сваи на момент забивки

Назначение оптимальных расстояний между осями свай в свайном кусте и свайном поле. При проектировании свайных фундаментов, нагрузку на сваю (в т.ч. на сваю крайнего ряда) вычисляют исходя из расстояния между осями в кусте или свайном поле. Расстояние между осями свай назначается из условия забивки сваи таким образом, чтобы сформированное уплотненное у острия забивной сваи ядро не пересекалось с формирующимся уплотненным ядром забиваемой сваи. Если принять укореившуюся гипотезу, что уплотненное ядро формируется под углом $\varphi/4$ от вертикальной оси сваи, расстояние между осями свай следует назначать в зависимости от длины сваи, т.е. расстояние между осями забивных свай должно быть не менее $(2l_{св} \cdot \operatorname{tg} \varphi/4 + d_{св})$, что никак не вписывается в расстояние между осями, равное $= 3d$,

где: d – сторона, поперечного сечения ствола сваи (прямоугольное) или диаметр круглой сваи.

Но в практике устройства свайных фундаментов из забивных железобетонных свай длиной до 20 и более метров (составные из двух C_H 10-35, C_B 12-35 или из трех звеньев, например: C_H 10-35+ C_C 10-35+ C_B 8-35, следует, что расстояние между осями забивных (составных) железобетонных свай принято $= C = 1,1\text{м}$ (1,2м) и при заданном расстоянии между сваями, сваи погружались до заданных проектных отметок. Если сравнить необходимое требуемое расстояние между осями свай $= C = (2l \operatorname{tg} \varphi/4 + d)$, то при: $\varphi_{ср} = 22\div 23^\circ$; $l = 27\text{м}$ получим требуемое минимальное расстояние между осями составных железобетонных свай равно: $C = 2 \cdot 27 \cdot \operatorname{tg} 5^\circ = 54 \cdot 0,085 \pm 0,35 = 4,9\text{м}$. При таком расстоянии между осями свай теряется кустовой эффект и свая работает как отдельно стоящий вертикальный стержень, заземленный в грунте, воспринимающий нагрузку от надстройки через ростверк. При таком расположении свай в плане ростверка, конструкция ростверка по прочности на продавливание потребует больших размеров в плане и большой толщины.

$h_u \geq N_{\text{прод}}/k \cdot R_{bt} \cdot b_{ср}$, а по прочности на изгиб при принятой толщине $\geq h_u$, потребуется чрезмерное армирование: $A_s = \frac{M_i}{k \cdot R_s \cdot h_{си}}$ м², что приводит к значительному перерасходу материалов (бетона, арматуры) к удорожанию свайных фундаментов, что может оказаться неэффективным применение свайных фундаментов из забивных свай, несмотря на их надежность при эксплуатации и принять другой вариант свайных фундаментов.

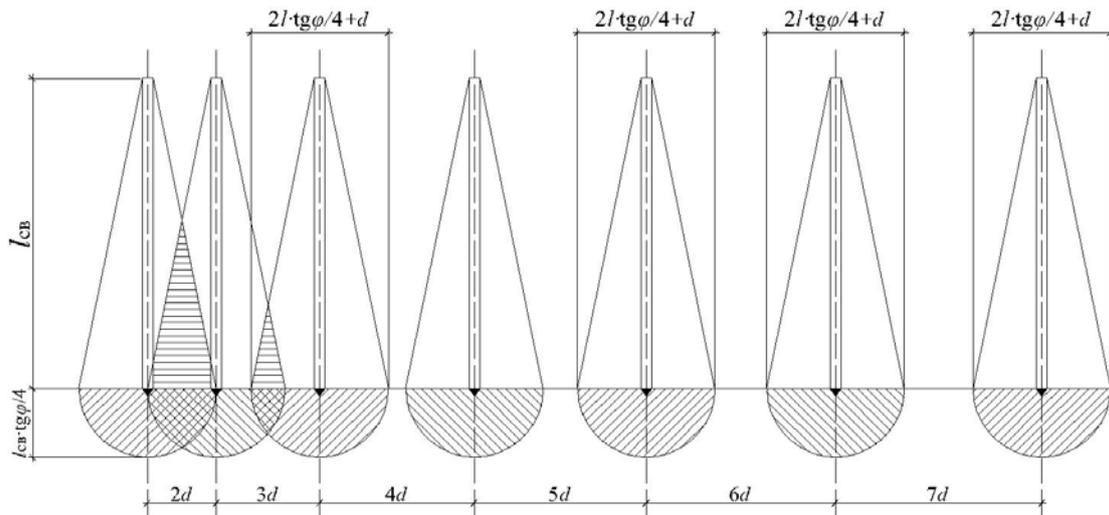


Рис. 2. Схема формирования уплотненной зоны в плоскости острия свай в зависимости от длины сваи и расстояния между сваями: 1 – уплотненная зона, 2 – переуплотненная зона, 3 – зона перемещаемого уплотненного грунта

В связи с этим требуется дать обоснование: почему, не взирая на общепринятую трактовку формирования уплотненного ядра под нижним концом забивной сваи под углом $\alpha = \varphi/4$ к вертикальной оси сваи, расстояние между осями свай принимается в пределах $3d \leq C \leq 4d$ не

оказывает существенных препятствий при погружении забивных свай с учетом пересечения областей формирования уплотненного ядра в плоскости острия

Для анализа складывающейся ситуации рассмотрим последовательность изменения расстояния между осями свай при забивке и проанализируем напряженно-деформированное состояние массива грунта в плоскости острия и вокруг ствола забивной сваи.

При формировании уплотненного ядра в плоскости острия свай различают две зоны: 1 – зона уплотненного ядра; 2 – зона переуплотненного грунта. Радиус уплотненной зоны в плоскости острия свай $= r = l_{св} \cdot \text{tg} \varphi / 4 + \frac{d}{2}$. Для образования сплошной уплотненной платформы в плоскости острия свай под кустом сваи и свайного поля, расстояние между осями свай $= C =$ не должно превышать: $C \leq 2l_{св} \cdot \text{tg} \varphi / 4 + d$. м ; Если $C < (2l_{св} \cdot \text{tg} \varphi / 4 + d)$ то в уплотненной зоне (платформе) происходит «наложение» напряжений, в результате чего формируется перенапряженная зона – 2, грунт в которой перемещается в сформированную при погружении сваи щель, в процессе формирования уплотненного ядра в плоскости острия свай. Поэтому при забивке составных свай или цельных свай большей длины не возникает больших препятствий при их погружении, так как грунт из переуплотненной зоны – 2 перемещаются в образовавшуюся зону – 3 за счет формирования щели вокруг ствола сваи при их погружении.

Самым оптимальным расстоянием между осями свай (составных или большой длины цельных свай) является равновесие объема «переуплотненного грунта» сформированному объему щели из расчета, что грунт из переуплотненной зоны в процессе перемещения его в сформированную щель разуплотняется до плотности окружающего щель грунта. Если объем переуплотненного грунта (с учетом его разуплотнения) больше объема сформированной щели, то вероятный подъем соседней с забиваемой сваей сваи вверх, что изменит несущую способность F_d поднявшейся сваи и явится причиной неравномерного погружения свай в кусте или в свайном поле. На основании указанного предположения определяется оптимальное расстояние между осями свай, обеспечивающее равномерное напряженное состояние массива грунта в плоскости острия свай и равномерное их погружение до проектной отметки.

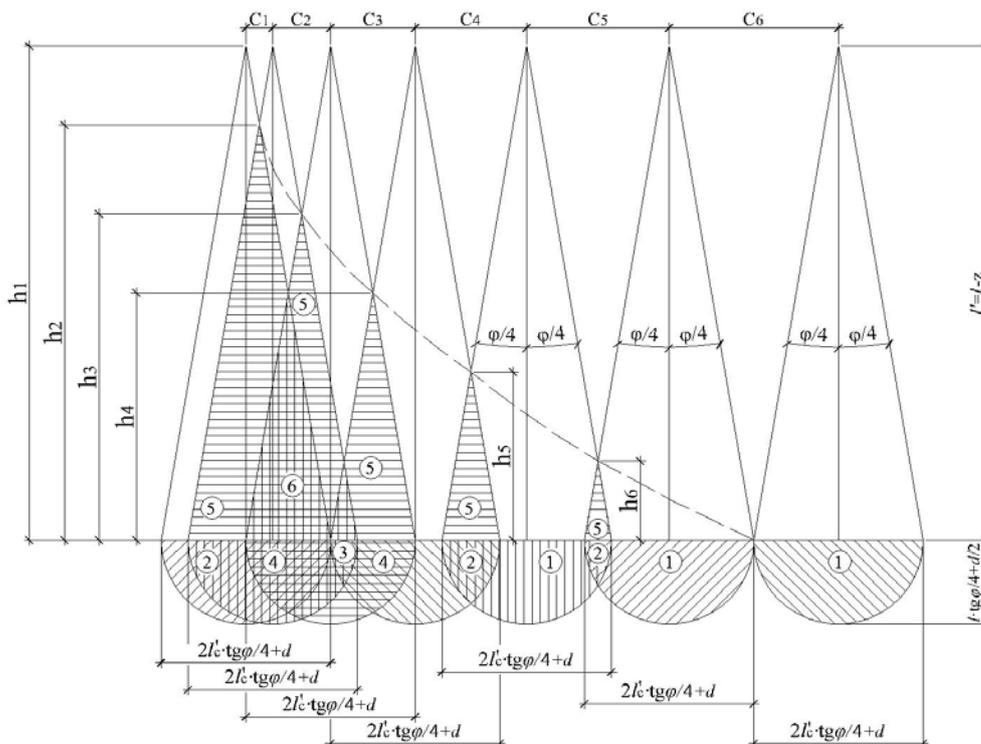


Рис. 3. Схема формирования объема щели вокруг ствола забивной сваи используемой для вмещения переуплотненного грунта в процессе его перемещения из переуплотненной зоны и распределение вокруг ствола сваи: 1 – уплотненное ядро, 2 – один раз переуплотненная зона, 3 – дважды переуплотненная зона, 4 – трижды переуплотненная зона, 5 – сформированная щель одинарная, 6 – сформированная щель – двойная, 7 – C_i – расстояние между сваями, 8 – $D_i = (2l \text{tg} \varphi / 4 + d)$ – диаметр уплотненного ядра

Рассмотрим схему формирования объема щели при погружении свай. Пусть сваи погружены в грунт до проектной отметки с расстоянием между осями свай $C_1=d$, т.е. расстояния между гранями свай = 0. Так как диаметр уплотненного ядра равняется $=d_{я} = 2l_{св} \cdot tg \varphi/4 + d_{св}$, то ширина верха переуплотненной зоны будет равняться $=D=2l_{св} \cdot tg \varphi/4 - d$; для варианта расстояния между осями свай $C_2 = 2d$, ширина верха переуплотненной зоны будет равняться $D_2=2l_{св} \cdot tg \varphi/4 - 2d$; соответственно $C_3 = 3d$, ширина переуплотненной зоны будет равняться $D_3=2l_{св} \cdot tg \varphi/4 - 3d$, $C_n = n \cdot d$, ширина верха переуплотненной зоны будет равняться $D_n=2l_{св} \cdot tg \varphi/4 - nd$. Объем переуплотненной зоны будет равняться $V_{п.у.з} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h'$; или $D^2 \cdot h' = V_{п.у.з}$, где: h' – толщина переуплотненного слоя приближенно равная:

$$h' = \frac{1}{2} \left(l_{св} \cdot tg \frac{\varphi}{4} + \frac{d}{2} \right).$$

Тогда объем переуплотненного грунта в плоскости острия свай будет равняться:

$$V_{п.у.з} = \frac{1}{2} \left(l_{св} \cdot tg \frac{\varphi}{4} + \frac{d}{2} \right) \cdot \left(2l_{св} \cdot tg \frac{\varphi}{4} - n \cdot d \right)^2 \quad (18)$$

Данное выражение объема переуплотненной зоны справедливо до момента, когда $n \cdot d$ не превышает $2l_{св} \cdot tg \varphi/4 > nd$; при $2l_{св} \cdot tg \varphi/4 < nd$ переуплотненная зона отсутствует и $V_{п.у.з} = 0$. Так как объем уплотненного ядра в плоскости острия свай

$$V_{я} = \frac{2}{3} \pi \left(l \cdot tg \frac{\varphi}{4} + \frac{d}{2} \right)^3, \quad (19)$$

а переуплотненная зона формируется между двумя сваями, то $V_{я} = \frac{4}{3} \pi \left(l \cdot tg \frac{\varphi}{4} + \frac{d}{2} \right)^3$.

Объем щели равняется $V_{щ} = l_{св} \cdot \left(\frac{4}{3} l^2 \cdot tg^2 \frac{\varphi}{4} + 2dl \cdot tg \frac{\varphi}{4} \right)$. В данном объеме должен разместиться объем переуплотненного грунта с учетом разуплотнения его до плотности окружающего щель грунта.

Сформированная щель по объему равняется объему уплотненного грунта при природной плотности ρ_d . Объем уплотненного ядра с коэффициентом переуплотнения $k \gg 1$ значительно меньше сформированной щели. Поэтому переуплотненные зоны, формирующиеся при их пересечении от рядом расположенных свай заставляют грунт подниматься вверх по щели, заполняя свободное пространство щели снизу вверх. Но так как переуплотненный грунт не сможет сразу разуплотниться до состояния естественной плотности грунта окружающую щель вокруг ствола сваи (ρ_d) (для этого необходимо время релаксации напряжений и время проявления или возврата упругих деформаций), поэтому щель в процессе пересечения напряженных зон заполняется уплотненным грунтом, объем которого значительно меньше объема щели, что в дальнейшем приводит к разуплотнению грунта в межсвайном пространстве.

Разуплотнение грунта в межсвайном пространстве забивных (и набивных) железобетонных свай. Забивные железобетонные сваи. В процессе погружения сваи сваебойным агрегатом, период погружения можно разбить на два этапа: 1-й этап – соответствует глубине, «z» на которой уравнивается выпор грунта из под острия сваи давлением от собственного веса грунта, т.е выполняется условие: $\gamma \cdot z \geq \sigma - f$; $\sigma = \frac{Q_M}{A}$, где: A – площадь боковой поверхности острия сваи: $A = 2d^2$; d – сторона поперечного сечения сваи; f – силы трения на боковую поверхность ствола сваи и острия.

После несложных преобразований условия равновесия имеет вид $\gamma uz^2 + uzf > \sigma \cdot A$, откуда определяется глубина $z = \frac{-fu \pm \sqrt{(f \cdot u)^2 + 4\gamma \cdot u \cdot \sigma \cdot A}}{2\gamma u}$.

Далее, при проявлении контрдавления от собственного веса грунта, из грунта вытираемого из под острия формируется уплотненное ядро вокруг острия и ствола сваи, распространяющееся под углом $\varphi/4$ от ствола сваи т. е. диаметр уплотненного ядра будет равняться $2 \underbrace{(l - z) \cdot tg \varphi/4 + d}$

где: l – переменная фиксированная (в процессе погружения) длина сваи. Таким образом с глубины равной $(l-z)$ до нижнего конца сваи формируется напряженно-деформированная зона в виде усеченного конуса или пирамиды верхним основанием, которого служит площадь

поперечного сечения ствола сваи – d^2 (или $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$) с диаметром = d ; а нижним основанием служит проекции площади уплотненного ядра в уровне острия сваи.

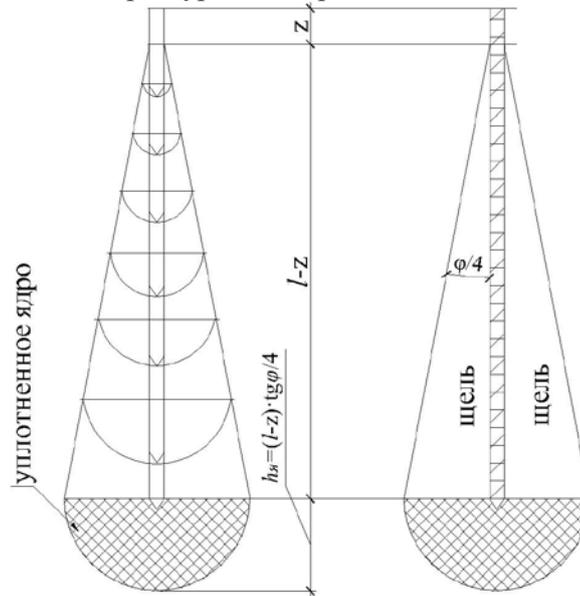


Рис. 4. Схема формирования уплотненного ядра и щели вокруг острия ствола забивной сваи: а – формирование уплотненного ядра вокруг острия сваи; б – формирование щели вокруг ствола забивной сваи

За счет адгезии и высокого напряжения (давления) формирующееся уплотненное ядро перемещается совместно с острием сваи. В процессе перемещения вокруг ствола сваи формируется щель (ввиду того, что уплотненное ядро перемещается вместе с острием) обратная по форме (реплика) уплотненному ядру, т.е. в верхней части – минимальная щель, у острия сваи – щель размером равной $(l - z) \cdot tg \varphi/4$. В связи с образующейся щелью в процессе забивки снимается сила трения грунта на боковую поверхность сваи, что облегчает процесс забивки сваи.

После достижения сваей проектного отказа и проектной глубины – свая формирует свою несущую способность только сопротивлением грунта под нижним концом сваи, $F_d = R_0 = R \cdot A$, кН, т.е. за счет сопротивления уплотненного ядра толщиной $h_{упл} = (l - z)tg \varphi/4$ м; в которое (в ядро) вошел грунт из образовавшейся щели (объем щели равняется объему усеченного конуса или пирамиды без объема сваи). Распространение щели по глубине соответствует закону (t – ширина щели) $t = (l - z)tg \varphi/4$; Таким образом, формируется плотность уплотненного ядра из расчета, что в уплотненный слой $h_{упл}$ ($h_{упл} = (l - z)tg \varphi/4$) внедряется грунт, объемом равным объему щели.

Объем минеральных частиц грунта « $m_{щ}$ » сформированной щели будет равняться объему минеральных частиц грунта в уплотненном ядре, т.е. $V_{мщ} = V_{мя}$ или учитывая, что $V_{мщ} = \frac{\rho_{дм}}{\rho_s} m_{щ}$, $V_{мя} = \frac{\rho_{дя}}{\rho_s} m_{я}$, тогда условие равновесия запишется в виде:

$m_{я} = m_{щ}$; $\frac{\rho_{дя}}{\rho_s} = \frac{\rho_{дм}}{\rho_s}$; $\rho_{дя} = \frac{\rho_{дм} \cdot V_{мщ}}{V_{я}}$, что соответствует плотности грунта в уплотненном ядре. Подставляя в формулу для $\rho_{дя}$ значения

$$\left. \begin{aligned} V_{щ} &= \frac{1}{3}(l-z) \left[\left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right]^2 + d^2 + \left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right] \cdot d \right], \text{ м}^3 \\ \text{и } V_{я} &= \frac{\pi}{3} \frac{1}{2} \left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right]^3 = \frac{\pi}{6} \left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right]^3, \text{ получим:} \\ \rho_{дя} &= \frac{\frac{1}{3}(l-z) \left\{ \left[(l-z) \cdot tg \frac{\varphi}{4} \right]^2 + \left[(l-z) \cdot d \cdot tg \frac{\varphi}{4} + d^2 \right] \right\}}{\frac{\pi}{6} \left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right]^3} = \frac{2(l-z) \left\{ \left[(l-z) \cdot tg \frac{\varphi}{4} \right]^2 + \left[(l-z) \cdot d \cdot tg \frac{\varphi}{4} + d^2 \right] \right\}}{\pi \cdot \left[(l-z)tg \frac{\varphi}{4} \right]^3} \rho_{дм} \end{aligned} \right\} (20)$$

По определенной плотности сухого грунта в уплотненном ядре – $\rho_{дя}$ вычисляются физические и механические характеристики грунта: $\rho = \rho_{дя} \cdot (I + W)$; $e = \frac{\rho_s - \rho_{дя}}{\rho_{дя}}$;

$W_{sat} = \frac{e}{\rho_s} \cdot \rho_w$; $I_{Lsat} = \frac{W_{sat} - W_p}{I_p}$; и астрополируя табличные данные табл. В.1; В.2; В.3; ДБН В.2.1-10-2009 можно в первом приближении определить прочностные C , φ и деформативные характеристики грунта E в уплотненном ядре. По определенным экстраполяцией C , φ , E , γ , (ρ) уплотненного ядра вычисляется значения расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи $R = f(C, \varphi, E, \gamma, l_{св})$ по формуле Е.1 приложения Е.ДБН.В.2.1-10-2009, которое сравнивается со значениями R по табл. П.2.1. ДБН.2.1-10-2009. Зміна 1.

Предварительные вычисления плотности грунта в уплотненном ядре показали, что плотность грунта стремится к плотности частиц грунта т.е. $\rho_{d,я} \cong \rho_s$, из которого формируется сплошной массив с коэффициентом пористости « e » стремящимся $e = 0$, толщиной $h = (l - z)tg \varphi / 4$. В зависимости от принятого оптимального расстояния между сваями, в плоскости острия сваи, формируется сплошная «платформа» под кустом свай или свайным полем, толщиной равной $h = (l - z)tg \varphi / 4$, которая передает нагрузку от сооружения на подстилающий уплотненное ядро слой, подвергающийся деформации (осадке) от сплошной нагрузки.

В связи с образованием щели вокруг ствола на стенки сформированной «скважины» со стороны боковой поверхности ствола сваи напряжение $\sigma = 0$, а со стороны межсвайного пространства на те же стенки передается горизонтальное давления грунта

$$\sigma_2 = \gamma h \cdot tg^2(45 - \varphi/2)$$

Исходная плотность грунта ρ_0 межсвайном пространстве принимается согласно данным изысканий. Так как давление на стенки скважины со стороны ствола сваи равняется нулю, а со стороны межсвайного пространства $\sigma = \gamma h \cdot tg^2(45 - \varphi/2) - 2c \cdot tg(45 - \varphi/2)$, то грунт из области больших давлений будет перемещаться в область (меньших) низких давлений, т. е. грунт будет перемещаться из области межсвайного пространства к стволу сваи. Перемещение грунта к стволу сваи будет продолжаться до момента, пока не уравнивается контактное давление ствола сваи на стенки скважины с внутренним давлением грунта межсвайного пространства. $P = \sigma_2$, т. е. перемещающийся грунт из межсвайного пространства заполняет сформированную щель вокруг ствола сваи. Объем перемещающегося грунта будет равняться объему щели при условии, что плотность грунта после стабилизации перемещения по всему межсвайному пространству от ствола сваи до середины межсвайного пространства будет одинаковой по горизонтали, т. е. $\sigma_2 = \bar{\gamma} \cdot z = const$, где $\bar{\gamma}$ – удельный вес грунта межсвайного пространства после стабилизации перемещения грунта из области с высоким давлением в области с низким давлением. Так как ширина сформированной щели по глубине подчиняется закону $t = (l - z)tg \varphi / 4$, то и по этому же закону будет изменяться плотность грунта по глубине, т.е. в верхней части, где щель имеет минимальную ширину $t \rightarrow 0$ плотность грунта равняется исходной плотности ρ_0 – по данным изысканий и объем минеральных частиц в единице объема грунта $m_0 = \rho_{до} / \rho_s$, на фиксированной глубине l – будет снижаться с увеличением ширины t – сформированной щели, которая в свою очередь увеличивается с глубиной h

Если L' – расстояние между гранями сваи, то расстояние от середины межсвайного пространства до грани сваи составляет $L'/2 = L$. В начальный период на глубине $(l - z)$ ширина щели t стремится к нулю, а расстояние от середины межсвайного пространства до грани «скважины» стремится $L' = L/2$. На фиксированной глубине $(l - z) < h \leq l_{св}$ расстояние от середины межсвайного пространства до грани скважины равняется $L' = L/2 - htg \varphi / 4$. Грунт на фиксированной глубине $(l - z) < h \leq l_{св}$ с заданным объемом минеральных частиц в единице объема грунта m , будет теперь распространяться (с учетом его перемещения к стволу сваи) на расстояние $L' = L/2$, что приведет к изменению (уменьшению) объема минеральных частиц в единице объема грунта на единицу (длины) расстояния от середины межсвайного пространства до грани сваи (грунт теперь переместился от межсвайного пространства до грани сваи). Объем минеральных частиц в единице объема грунта на фиксированной глубине определится из равенства: $m' \cdot L/2 = m \cdot (L/2 - htg \varphi / 4)$, откуда $m' = \frac{m \cdot (L/2 - htg \varphi / 4)}{L/2}$, или $m' = \frac{m \cdot (1 - htg \varphi / 4)}{L/2}$. Так

как $m' \leq \frac{m \cdot (L/2 - htg\varphi/4)}{L/2}$, то в области межсвайного пространства в пределах $(l - z) < h \leq l_{св}$ происходит разуплотнение грунта пропорциональное глубине « h ». Так как $m' < m$ то плотность грунта $\rho_{di} = m_i \cdot \rho_s$ будет всегда меньше начальной плотности ρ_d , снижение плотности будет увеличиваться с глубиной и самое большое разуплотнение грунта в межсвайном пространстве будет в уровне острия свай подчиняющее закону $L \cdot tg\varphi/4$, а $\rho_{dp} = f((l - z)tg\varphi/4)$.

На практике возведения и эксплуатации свайных фундаментов время проявления перемещения грунта из области больших напряжений в область малых напряжений именуется «отдыхом свай». За время «отдыха» грунт из межсвайного пространства перемещается к стволу свай, охватывает боковую поверхность ствола свай и после стабилизации процесса перемещения грунта при передаче на сваю вертикальной нагрузки и перемещении свай вниз проявляются силы трения грунта на боковую поверхность и несущая способность свай (определяется) рассчитывается согласно существующей формуле ДБН В.2.1-10-2009 Зміна 1 (Н.2.1), или по данным статических испытаний свай вертикальной вдавливающей нагрузкой (ДСТУ.БВ.2.1-27:2010) ф (2).

Разуплотнение грунта в межсвайном пространстве определяется из предположения, что грунт, перемещаясь от середины межсвайного пространства к стволу свай, заполняет образовавшуюся в процессе погружения свай щель вокруг ствола. Так как, к объему пор в межсвайном пространстве $V_{пмп} = n \cdot V_{мп}$ прибавляется объем щели, то суммарный объем распределения минеральных частиц грунта – m будет равняться: $V_{мп} \cdot n + V_{щели}$; при этом объем минеральных частиц – m – остается постоянным – $m = const$. Если общий объем пор увеличился ($V_{щ} + V_{мп} \cdot n$) то коэффициент пористости $e = \frac{n}{m}$ тоже увеличивается, что приводит к разуплотнению грунта, пропорционально объему образованной вокруг ствола свай щели. При имеющемся значении объема щели: $V_{щ} = \frac{1}{3}(l - z) \left\{ [(l - z)tg\varphi/4]^2 + d^2 + dl - ztg\varphi/4 \right\}$, а объем межсвайного пространства $V_{мп} = l \cdot C_L \cdot C_B$, суммарный объем равен

$$V = V_{щ} + V_{мп} = l_c(C_L \cdot C_B) + \frac{1}{3}(l - z) \left\{ [(l - z)tg\varphi/4]^2 + d^2 + d(l - z)tg\varphi/4 \right\} \quad (22)$$

Отсюда получаем, что новый коэффициент пористости « e » грунта межсвайного пространства будет на $(e' = \frac{n \cdot V_{щ}}{m})$ больше начального, причем максимальное значение коэффициента пористости « e » будет на уровне острия свай. Это приводит к неравномерной деформации грунта в межсвайном пространстве по глубине, что является причиной образования лунки на поверхности межсвайного пространства, образованию щели на контакте подошвы ростверка с основанием сформированного межсвайного пространства. Это не позволяет в экстремальных ситуациях проявлению совместной работе ростверка свайного фундамента с основанием и разгрузки свай в кусте или свайном поле.

Общие выводы.

В предлагаемых в этой статье материалах рассмотрены основные направления формирующие несущую способность забивной свай в современном представлении из которых следует:

1. Отказ свай – погружение от одного или от залога ударов формируется за счет деформации подстилающего уплотненное ядро слоя грунта, определяемого расчетом как осадка слоя грунта ограниченной толщины от сплошной мгновенной нагрузки передаваемой через «уплотненное ядро» на подстилающий слой, или рассчитывается по предлагаемой формуле (11), смотри выше.

2. Принимаемое при проектировании кустов свай или свайного поля расстояние между осями свай $3d \leq C_i \leq 6d$, исходя из условия пересечения уплотненных зон под острием свай не соответствует работе свай в грунте, в том числе и в кусте, так как это расстояние – C_r – пропорционально длине свай и для длиномерных или составных свай может составлять более чем – $6d$ – , которое регламентирует работу свай в кусте или свайном поле. Поэтому в данном случае предполагается, что в процессе пересечения уплотненных зон грунт при погружении свай из переуплотненных зон перемещается в сформированные вокруг ствола свай щели, что

снимает передачу давления на боковую поверхность свай и «подъем» рядом расположенных свай.

3. В процессе погружения забивных свай в плоскости острия свай формируется уплотненное ядро диаметром $\Phi = 2(l - z)tg\frac{\varphi_c}{4}$, что приводит к формированию щели вокруг ствола сваи. Это является причиной разуплотнения грунта в межсвайном пространстве, которое приводит к неравномерным деформациям грунта в межсвайном пространстве, формированию нарушения контакта подошвы ростверка с основанием и его совместной работы с основанием. Это в свою очередь не позволяет в экстремальных случаях «разгружать сваю» за счет включения ростверка свайного фундамента в совместную работу с основанием.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1. – К. : Минрегион буд. – 55с.
2. ДСТУ.БВ.2.1-27:2010. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. – К. : Мінрегіон буд. України. – 9с.
3. **Герсеванов Н. М.** Определение сопротивления свай. НКТП-СССР Г.НТИСиС.С. – М –Л. : Госстройиздат, 1932. – 66 с.
4. **Моторный А. Н., Моторный Н. А.** О достоверности совместной работы ростверков свайных фундаментов с основанием / А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 12. – С. 37 – 45.
5. **Моторний Н., Моторний А.** Обоснование работы свай в грунте и формирование несущей способности свай в процессе ее погружения и эксплуатации / Н. Моторный, А. Моторный // Теоретичні основи будівництва : зб. наук. пр. – Warsaw, maj, 2013. – № 21.

SUMMARY

The issue of the formation of denial of driven piles is discussed. It is assumed that the pile denial is the deformation of the soil layer located below the forming firm zone under the continuous instantaneous load transmitted through the soles of the firm cores from the blow of the hammer on the head of the pile. Propose to define the pile denial under the condition of energy balance – the formation energy of the hammer blow, and its expenditure on the submerged piles.

It is given the ground for the formation of the optimal distances between the axes of the piles in the bunch and a pile field. It is specified the while crossing compacted zones overcrowded ground moves in the slit formed around the pile shaft, which eliminates the transmission of pressure on the side surface of the pile shaft and prevents movement of adjacent piles.

It is given the ground for the formation of loosening soil in between pile uneven deformation loosening soil, the formation of holes and breaking the contact between the sole of the grillage and the foundation that violates their common work and does not allow to relieve piles under the load due to the inclusion of the pile grillage of the pile foundation in common work with the foundation.

REFERENCES

1. DBN B.2.1-10-2009. Zmina 1. – K. : Mynrehyon bud. – 55 s.
2. DSTU.BV.2.1-27:2010. Pali. Vyznachennya nesuchoyi zdatnosti za rezul'tatamy pol'ovkykh vyprobuvan'. – K. : Minrehion bud. Ukrayiny. – 9 s.
3. Gersevanov N. M. Opredelenie soprotivleniya svai. NKTP-SSSR G.NTISliS.S. – M – L. : Gosstrojizdat, 1932. – 66 s.
4. Motornyj A. N., Motornyj N. A. O dostovernosti sovmestnoj raboty rostverkov svajnyh fundamentov s osnovaniem / A. N. Motornyj, N. A. Motornyj // Visnik Pridniprovsk'oi derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi. – D. : PGASA, 2013. – № 12. – S. 37 – 45.
5. Motornij N., Motornij A. Obosnovanie raboty svaj v grunte i formirovanie nesushhej sposobnosti svaj v processe ee pogruzhenija i jekspluatacii / N. Motornyj, A. Motornyj // Teoretichni osnovi budivnictva : zb. nauk. pr. – Warsaw, maj, 2013. – № 21.

Відомості про авторів:

Моторний Антон Миколайович, с. н. с. науково-дослідної частини по кафедрі основ і фундаментів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

Моторний Микола Антонович, к. т. н., доц. кафедри основ і фундаментів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: oif@mail.pgasa.dp.ua.

УДК 624.014 : 693.977

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ КАРКАСА БУДІВЕЛЬ З ЛСТК

О. Г. Зінкевич, к. т. н., доц.

Ключові слова: *каркаси малоповерхових будівель, ЛСТК, податливі з'єднання, діафрагми жорсткості, просторова жорсткість каркаса*

В Україні для зведення малоповерхових будівель і виконання надбудов під час реконструкції будівель все в більшому обсязі застосовуються каркаси з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК).

Діючі в Україні нормативні документи та існуючі методики розрахунку не повною мірою відображають особливості роботи розглянутих конструкцій, розкритіх податливими з'єднаннями з листами малої жорсткості [1; 2].

Постановка проблеми. У більшості конструктивних елементів будівель, виконаних на основі каркаса з ЛСТК (стінові елементи, перекриття і покриття), використовується обшивка малої жорсткості (плити OSB, гіпсоволокнисті або гіпсокартонні листи і т. д.), що приймає участь у роботі конструкції, збільшуючи її несучу здатність і значно впливаючи на просторову жорсткість. У той же час, через деяку податливість вузлів з'єднань обшивки з елементами каркаса, нормативні методики обмежують можливість урахування роботи обшивки.

Крім того, досить складним є вивчення взаємодії елементів розглянутих будівель під час оцінки їх просторової жорсткості. Застосування існуючих методик [3] вимагає створення достатньо детальних моделей і спричинює великі витрати часу на стадії розробки об'ємно-планувальних рішень і попереднього призначення конструктивних параметрів елементів каркаса будівлі.

Дослідження особливостей роботи системи «каркас – податливе з'єднання – обшивка», де обшивка виконує дві конструктивні функції: розкриття елементів каркаса (зменшення розрахункової довжини, виключення окремих форм втрати стійкості) і забезпечення жорсткості конструкцій (стін, перекриттів) і каркаса в цілому, дасть можливість сформулювати методику раціонального проектування будівлі на основі каркаса з ЛСТК.

Аналіз публікацій. Особливості конструктивних рішень каркасів будівель із ЛСТК розглянуті в роботах у працях Е. Л. Айрумяна, Я. Брудки, В. W. Schafer, W. W. Yu та ін. Вивченню стійкості тонкостінних стержнів присвячені праці С. І. Білика, А. І. Маневича, С. В. Ракші, А. В. Семка, В. А. Семка, А. Ghersi, В. W. Schafer, W. W. Yu та інших учених. У низці публікацій наведено результати досліджень та експериментальних випробувань сталевих тонкостінних профілів, розкритіх листовою обшивкою, і жорсткості вузлів їх з'єднань (О. Iuogio, Т. Pekoz, В. W. Schafer та ін.). Питанням взаємодії конструктивних елементів у просторовій системі при забезпеченні просторової жорсткості будівлі присвячені праці П. Ф. Дроздова, В. W. Schafer, S. J. Turston та ін.

Метою роботи є одержання загального алгоритму раціонального проектування конструкцій каркасів із ЛСТК з урахуванням їх взаємодії з обшивкою малої жорсткості з використанням наведених у літературних джерелах та отриманих під час виконання власних досліджень даних.

Виклад матеріалу. Передбачається використання методики раціонального проектування для поширених об'ємно-планувальних рішень будівель з використанням каркаса з ЛСТК. Під час формування об'ємно-планувального рішення допускається використання найбільш складної з погляду конструювання системи, але, в той же час, характерної для каркасів даного типу (максимальні прольоти, вільне планування, мінімум внутрішніх стін тощо). Деяке коригування об'ємно-планувального рішення (зменшення прольотів, розширення або введення додаткових діафрагм) зумовлює спрощення конструкцій каркаса.

Умовно можна розділити ухвалення архітектурно-конструктивного рішення на жорстке і гнучке: