УДК 624.131.23

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГРУНТУ ПРИ ДИНАМІЧНІЙ ДІЇ НА НЬОГО ПАДАЮЧОГО З ВИСОТИ ВАНТАЖУ

Ю. В. Волик, магістр, Н. В. Зуєвська, канд. техн. наук, В. О. Білоіван, пошукач (НТУУ «КПІ»)

Приведена динамическая задача формирования полей напряжений и остаточных деформаций при влиянии на массив грунта падающего груза с учетом реальных свойств и влияния свободной поверхности.

Ключевые слова: остаточные деформации, полупространство, груз, грунт.

Наведена динамічна задача формування полів напружень і залишкових деформацій при впливі на масив грунту падаючого вантажу з урахуванням реальних властивостей і впливу вільної поверхні.

Ключові слова: залишкові деформації, напівпростір, вантаж, грунт.

The dynamic problem of forming stress fields and residual deformations by the action of falling load on the soil mass with consideration for real properties and influence of free-field surface is resulted.

Key words: residual deformations, half-space, load, soil.

Вступ. Важливим технологічним елементом при скиданні трамбівки є витиснення грунту з-під трамбівки у вигляді валу, який може повністю компенсувати механічний ефект падіння трамбівки, тобто об’єм осідання поверхні під трамбівкою дорівнює об’єму витисненого грунту, що небажано. Із зростанням осідання поверхні ростуть розміри валу. Якщо при попередніх ударах отримано високий вал, ускладнюється робота трамбівки на суміжних ділянках, тому нерідко застосовується схема трамбування з поступовим нарощуванням висоти скидання від мінімального значення 2,0 м до максимальної величини 5…6 м.

За рубежем відоме застосування надважких трамбівок з великою площею основи, що скидаються з висоти 20…25 м. Проте цей дослід в основному перевірений і застосовується на непросідаючих супіщаних і піщаних грунтах.

Мета роботи – вивчення механізму і динаміки розвитку зони залишкових деформацій у процесі трамбування у залежності від висоти скидання.

Основна частина. У даному дослідженні поставлено завдання вивчити механізм і динаміку розвитку зони залишкових деформацій в процесі трамбування по одному сліду у зв’язку з характеристиками грунту, що змінюються після кожного попереднього удару. Ясно, що для першого удару придатні рекомендації, що стосуються оптимальної вологості. Проте після першого удару змінюється щільність скелету грунту в верхньому шарі масиву. Отже, вже при другому ударі по цьому ж сліду напруження, потрібне для

подальшого ущільнення, має змінюватися, тобто повинен мінятися режим обробки грунту, який залежить як від висоти скидання, так і від стану масиву. Вважаємо, що вантаж масою M падає з висоти H на грунтовий напівпростір з межею $O'O''$ (рис. 1), грунт є пружнопластичним середовищем, а вантаж має форму сфери, радіус якої $R_ш$.

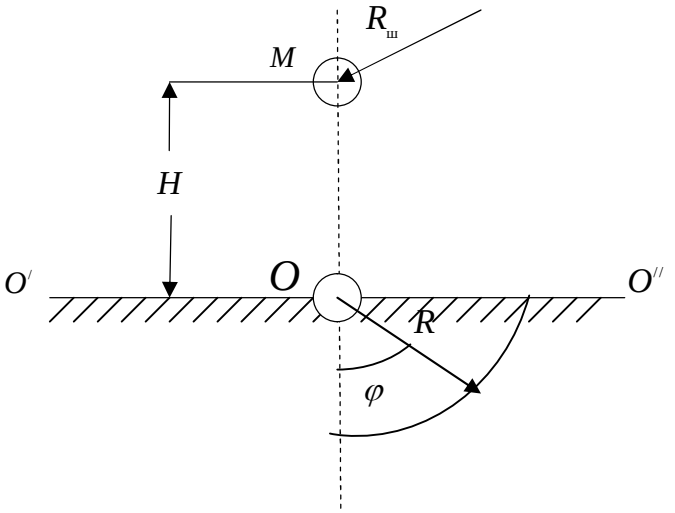

Рис. 1. Схема для розрахунку напружено-деформованого стану грунту

З моменту падіння вантажу на поверхню напівпростору $O'O''$ у напівпросторі виникає хвиля стиснення. Закономірності її поширення визначаються фізико-механічними властивостями грунтового масиву. Для поширення закономірностей розвитку полів напруження, відомих для вибухової динамічної ударної дії, необхідно поставити наступну умову. Вважаємо, що якщо існують джерела динамічних дій різної природи і форми, які створюють в масиві однаковий напружений стан на одній і тій же відстані $R_н$ від центру джерела динамічної дії, то надалі за межами цієї відстані $R_н$ напружений стан в масиві буде однаковим для цих джерел, тобто закон розподілу напруження $\sigma(R)$ буде ідентичним для цих джерел.

Відомо, що при вибуху зосередженого (сферичного) заряду радіусу r_0 на контакті з поверхнею розділу середовищ повітря–грунт напруження в грунті визначатимуться не лише відстанню від центру заряду (точка O на рис. 1), але й від орієнтування нормалі до фронту хвилі напруження, що випромінюється цим вибухом. Іншими словами, при контактному вибуху напруження в грунтовому масиві залежатимуть від полярних координат R і φ – відстані і полярного кута (див. рис. 1).

При вибуху сферичного заряду максимум радіального напруження затухає з відстанню від заряду згідно із законом

$$\sigma_r^0 = k(\overline{R}^{-\mu}); \overline{R} = \frac{R}{r_з} > 10. \qquad (1)$$

де $\overline{R}$ – відносна відстань; R – абсолютна відстань; $r_з$ – радіус заряду ВР; k і μ – емпіричні коефіцієнти.

Аналогічно, якщо падаюча куля знаходиться на вільній поверхні $O'O''$,

$$\sigma_r^0 = k\left(\frac{R_ш}{r_3}\right)^{-\mu}, \qquad (2)$$

де $R_ш$ – відстань від центру вантажу.

З іншого боку, при падінні вантажу з висоти H напруження на контактній поверхні вантаж–грунт

$$\sigma_r^0 = \frac{Mg}{S}\frac{\sqrt{2gH}}{g}\frac{\sqrt{E/}}{4R_ш} = \frac{1}{4}\frac{\sigma_{ст}}{gR_ш}\sqrt{2gHE/\rho}, \qquad (3)$$

де $\sigma_{ст} = \frac{Mg}{S}; S = 2R_ш^2$; g – прискорення земного тяжіння; E – модуль Юнга матеріалу вантажу; ρ – його щільність. Напруження (3) діє впродовж часу проходження іншої хвилі по діаметру вантажу.

Таким чином, виконавши приведені вище операції, ми можемо будь-яке джерело динамічних дій перерахувати на дію заряду вибухової речовини і відповідно застосувати добре розроблений апарат розрахунку закономірностей поширення хвиль напружень у грунтовому масиві.

Підставляючи (1) і (3), отримаємо з (2) закономірність зміни радіальної напруги з відстанню при падінні вантажу:

$$\sigma_r = \sigma_r^0\left(\frac{R}{R_ш}\right)^{-\mu} = \frac{\sigma_{ст}}{4gR_ш}\sqrt{2gHE}\left(\frac{R}{R_ш}\right)^{-}. \qquad (4)$$

Урахування полярного кута φ здійснюється функцією $B(\varphi)$.

Для визначення деформованого стану грунтового напівпростору отримаємо вираз для середнього гідростатичного тиску

$$P_r = -\frac{\sigma_r + 2\sigma_\varphi}{3} = -\frac{(1+2k\tau)}{3}\sigma_r(R,\varphi) = -\frac{(1+2k\tau)\cos(\frac{2}{3}\varphi)}{12}\frac{\sigma_{ст}}{gR_ш}\sqrt{\frac{2gHE}{\rho}}\left(\frac{R}{R_ш}\right)^{-\mu}, \qquad (5)$$

де $k_\tau = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma_\tau}$ – коефіцієнт бічного тиску.

Діаграма пружнопластичної деформації грунту має вигляд (рис. 2):

$$\begin{aligned} &P = P_r; \\ &P = P_0 + E_0\varepsilon \quad \text{при} \quad P \le P_s; \\ &P = P_s + E_1(\varepsilon - \varepsilon_s) \qquad P > P_s \\ &P = P_m + E_2(\varepsilon - \varepsilon_m) \qquad P_m > P_s \end{aligned} \qquad (6)$$

де ε_s – пружна деформація грунту при тиску P_s; ε_m – максимальна деформація грунту, при досягненні тиску P_m; ε – пластична деформація; E_0, E_1, E_2 – модулі пружності лінійного зміцнення і розвантаження відповідно.

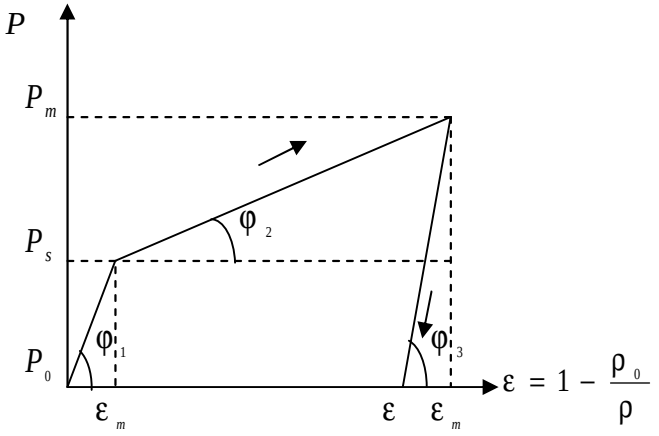

Рис. 2. Діаграма стиснення грунту

$$E_0 = \rho_0 c_y^2; E_1 = \rho_0 c_n^2; E_2 = \rho_0 c_p^2, \tag{7}$$

де c_y, c_n, c_p – швидкості пружної, пластичної хвилі і хвилі розвантаження У разі утворення залишкової деформації необхідно використовувати третє рівняння (6):

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_m - \frac{P_m - P_0}{E_2}. \tag{8}$$

Величина ε_m визначиться з другого рівняння (6) при тиску $P = P_m$:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_s + \frac{P_m - P_s}{E_1}. \tag{9}$$

У свою чергу гранична пружна деформація визначається згідно з рівнянням (6):

$$\varepsilon_s = \frac{P_s - P_0}{E_0}. \tag{10}$$

Підставляючи ε_m і ε_s з (9) і (10) у (8), отримаємо для залишкової деформації вираз

$$\varepsilon_{\text{ост}} = K_{20} P_0 + K_{01} P_s + K_{12} P_m, \tag{11}$$

де
$$K_{20} = \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_0}; K_{01} = \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_1}; K_{12} = \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \tag{12}$$

з урахуванням виразу (5) для поля залишкових деформацій отримаємо при $P_m = |P_r|$:

$$\varepsilon_{\text{ост}} = K_{20}P_0 + K_{01}P_s + K_{12}\frac{(1+2k\tau)M\sqrt{\dfrac{2gHE}{\rho}}}{24\pi R_{\text{ш}}^3}\left(\frac{R}{R_{\text{ш}}}\right)^{-\mu}\cos\left(\frac{2}{3}\varphi\right). \qquad (13)$$

Для заданої проектної залишкової деформації $\varepsilon_{\text{ж}}$ полярний радіус зони деформації, в якій виконується нерівність $\varepsilon_{\text{ост}} \geq \varepsilon_{\text{ж}}$ визначається за допомогою виразу

$$R_{\text{ж}} = R_{\text{ш}}\left\{\frac{K_{12}(1+2k_{\tau})M\cos(\frac{2}{3}\varphi)\sqrt{2gHE/\rho}}{24\pi R_{ш}^3(\varepsilon_{\text{ж}} - K_{20}P_0 - K_{01}P_s)}\right\}^{\frac{1}{\mu}}. \qquad (14)$$

З виразів (13) і (14) видно, що напружено-деформований стан пружнопластичного грунтового напівпростору при динамічній дії падаючого вантажу визначається фізико-механічними характеристиками грунту (K_{01}, K_{20}, K_{12}, k_{τ} *і* P_s) і матеріалу вантажу *(E,* ρ, *M*), а також висотою падіння вантажу *H* і поглинаючими властивостями грунту, вираженими показником ступеня μ в залежності (1).

Вплив вільної поверхні приблизно враховується функцією полярного кута φ.

Висновки

Розв’язана динамічна задача формування полів напружень і залишкових деформацій при дії на масив грунту падаючого вантажу, яка грунтується на допущенні аналогії процесів удару і вибуху на певному віддаленні від джерела динамічних збурень, а також моделюванні деформованого середовища пружнопластичним півпростором, тобто з урахуванням реальних властивостей і впливу вільної поверхні.

1. *Багдасаров Ю. А.* Применение новых способов уплотнения просадочных грунтов / Ю. А. Багдасаров, С. Л. Фингеров. – М., 1995. – 451 с.

2. *Ананьев В. П.* Уплотненно-закрепленные лессовые грунты / В. П. Ананьев, А. В. Трусов. – Барнаул, 1997. – 72–75 с.

3. *Цытович Н. А.* Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния лессовых грунтов в основании жестких штампов / Н. А. Цытович, М. Ю. Абелев, В. Ф. Сидорчук // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 198. – № 3. – С. 17–19.