Ж.Ж. Тургумбаев, Р.Б. Ормонов

Приближенное физическое моделирование разрушения грунтов подводных условиях

Методы физического моделирования позволяют в краткие срок и с меньшими затратами провести экспериментальные исследования сложных процессов, к которым относится процесс разрушения грунтов в подводных условиях.

Условия физического моделирования явлений вытекают из основных положений теории подобия (1). Явления или процессы подобны при соблюдении следующих положений:

- модель и оригинал рабочих органов должны быть геометрически подобными;
- протекаемые процессы в оригинале и модели должны принадлежать к одному классу явлений и описываться инвариантной системой дифференциальных уравнений.
- начальные и граничные условия протекаемого процесса в модели должны быть подобны соответствующим условиям оригинала.

Основные условия физического моделирования применительно к рабочим процессам строительно-дорожных машин изложены в работах (2). Критерии подобия процесса взаимодействия ножа с грунтом, полученные на основе анализа уравнений равновесия, сплошности, состояния и условий однозначности, имеют вид:

$$\frac{\tau}{\gamma \cdot l}; \quad \frac{\sigma}{\gamma \cdot \partial}; \quad \frac{\eta \cdot \vartheta}{\gamma \cdot l^2}; \quad \frac{\vartheta^2}{g \cdot l}; \quad \frac{E}{\sigma};$$

$$\frac{C_0}{\sigma}; \quad \frac{\sigma}{\tau}; \quad \rho; \quad \delta; \quad \alpha;$$

Общность деформативно-напряженного состояния грунта под водой, в том числе под гидростатическим давлением, и в обычных условиях ***«сухого»*** резания позволяют дополнять критерии подобия процесса резания грунтов под водой на основе анализа уравнений, описанных в п.4.3. С учетом (2) параметр $f_{гр}$ можно рассматривать в качестве самостоятельного критерия подобия.

Так как $C_X = 1/\mathrm{Re}$, то критерий можно записать в виде:

$$\frac{C_X \cdot \gamma_0 \cdot \vartheta^2}{g \cdot E} = \frac{\eta \cdot \vartheta}{E \cdot l}$$

Это позволяет записать для изучаемого процесса критерии подобия в виде следующей системы:

$$\frac{P}{C_0 \cdot l^2}; \quad \frac{\gamma \cdot l}{C_0}; \quad f_{гр}; \quad \frac{C_0}{E}; \quad \frac{\eta_W \cdot \vartheta}{C_0 \cdot l};$$

$$\frac{\vartheta^2}{g \cdot l}; \quad \frac{\eta_G}{\eta_W}; \quad \frac{\gamma_W \cdot l}{C_0}; \quad \frac{\gamma_G}{\gamma_W};$$

Из условий однозначности вытекает ряд критериев подобия:

$$\frac{\rho}{\rho_a}; \quad \frac{l}{H}; \quad \frac{\vartheta}{\vartheta_0};$$

Где σ , τ – нормальное и касательное напряжение; E - модель деформации грунта; γ_G, γ_W - объемная масса грунта и воды; η_G, η_W - коэффициент вескости грунта и воды; $f_{гр}$ - коэффициент трения грунта по грунту.

При $k_{\gamma W} = k_{\gamma G} = 1$ соотношения между масштабами величин (индикаторы подобия) имеют вид:

$k_{C_0} = k_1$; $k_\rho = k_1^3$; $k_{\gamma G} = 1$;

$k_{\eta G} \cdot k_\vartheta = k_1^2$; $k_{\eta W} \cdot k_\vartheta = k_1^2$;; $k_{\eta W} = k_{\eta G}$;

$k_\vartheta = k_{\vartheta 0}$; $k_{\rho a} = k_\rho$; $k_l = k_H$;

Последние два соотношения имеют важное значение при формировании физической модели процесса подводного копания, резания и рыхления грунтов (3).

Если атмосферное давление в модели не изменяется, т.е. $k_{\rho a} = 1$, важно, чтобы и масштаб давления на глубине у модели был равен оригиналу $k_\rho = 1$. Это достигается за счет создания в рабочей камере давления, равного давлению, которое определятся зависимостью $\rho = H_N \cdot \gamma_W$.

Из условия $k_{\rho a} = 1$, что $\rho_M = \rho_N = H_N \cdot \gamma_W$. Величину H_N можно определить через H_M, так $H_N = H_M$. Следовательно, $\rho_M = \rho_N = H \cdot k_l \cdot \gamma_W$ Наличие последнего приводит к соблюдению условия $k_{\rho a} = k_\rho = 1$.

Соотношение $k_{C_0} = k_1$ указывает на необходимость использовать в качестве грунта в модели эквивалентный материал с параметрами:

$C_{0M} = C_{0N} \cdot k_l^{-1}$; $\eta_{GM} = \eta_{GN}$

Соблюдение этих соотношений при моделировании эквивалентными материалами практически трудно реализовать, так как при равенстве вязкости грунта модели и натуры $\eta_{GM} = \eta_{GN}$ следует $C_{0M} = C_{0N}$, что противоречит требованию

$C_{0M} = C_{0N} \cdot k_l^{-1}$.

В этом случае целесообразно воспользоваться зависимостями, позволяющими учесть в первом приближении сделанное нарушение условия подобия. Такая оценка может быть выполнена на основании зависимостей, определяющих, переход от параметров модели к оригиналу в условиях, когда критерий $\gamma_G \cdot l / C_0$ не соблюдается, а моделирование осуществляют, например, с натурным грунтом под водой при

$k_{\eta G} = 1$; $k_{\gamma W} = 1$; $k_{\gamma G} = 1$;

$k_{\eta W} = 1$; $k_{C_0} = 1$; $k_\rho = k_1$;

Приближенное физическое моделирование процесса резания грунта под гидростатическим давлением при несоблюдении критериев

$\dfrac{\gamma_G \cdot l}{C_0}$; $\dfrac{\eta_G \cdot \vartheta}{C_0 \cdot l}$; $\dfrac{\eta_W \cdot \vartheta}{C_0 \cdot l}$; $\dfrac{\gamma_W \cdot l}{C_0}$;

Приводит к условию

$k_{C_0} \neq k_1$; $k_{\gamma G} = 1$; $k_{\eta G} \neq k_1$;

При изучении рассматриваемого процесса взаимодействия методами физического моделирования в системе критериев подобия присутствуют критерии $\Pi_1 = \dfrac{\vartheta^2}{a \cdot l}$ и $\Pi_2 = \dfrac{\vartheta \cdot l}{\eta}$. В соответствии с критерием Π_1 при условии $a_N = a_M$: $\vartheta_N = \vartheta_M k_l^{0,5}$; с учетом критерия Π_2: где a - ускорение; l - линейный размер; η - кинематический коэффициент вязкости жидкости; ϑ - скорость копания. Согласно положениям теории подобия равенство скоростей, определенных из критериев Π_1 и Π_2, обеспечивается лишь тогда, когда $k_\eta = k_l^{1,5}$, т.е.

$\eta_N = \eta_M k_l^{0,5}$. Последнее равенство говорит о том, что для полного соблюдения условий подобия вместо воды, должно быть подобрана такая среда, кинематическая вязкость которой в $k_l^{0,5}$ раз меньше вязкости воды. Данное обстоятельство чрезвычайно затрудняет экспериментов, так как требует применения специальных жидкостей.

Более рациональным является обоснование способа моделирования, где как в оригинале, так и в модели используется вода. Оно может быть выполнено следующим образом.

Равенство для модели и оригинала критерия Π_2 (критерия Рейнольдса) позволяет рассчитать такую скорость модели, при которой силы сопротивления движению в водной среде связаны соотношением $P_N = P_M k_l^3$. С другой стороны, известно (3), что сила сопротивления может быть предоставлена в виде:

$$\frac{C_N \cdot F_N \cdot \rho_N \cdot \vartheta_N^2}{C_M \cdot F_M \cdot \rho_M \cdot \vartheta_M^2} = k_l^3,$$

Где C – безразмерный коэффициент сопротивления; F – площадь проекции тел на нормальную к направлению движения потока плоскости; ρ - плотность жидкости.

Полагая в последнем выражении $\rho_N = \rho_M$ в модели так же, как и в оригинале, используется вода $\vartheta_N = \vartheta_M k_l^{0,5}$ (данное равенство вытекает из критерия Фруда Π_1), получаем $\frac{C_N \cdot F_N}{C_M \cdot F_M} = k_l^{0,5}$, т.е. отношение произведений коэффициента гидродинамического сопротивления на лобовую площадь для оригинала и модели должно равняться квадрату масштаба моделирования. Обеспечения этого равенства возможно экспериментальным подбором площади F_M, например, за счет установки дополнительных открылков. Таким образом, с учетом вышеуказанных экспериментов скорость рабочего процесса необходимо назначить удовлетворяющей соотношению $\vartheta_N = \vartheta_M k_l^{0,5}$ (39).

Основные условия приближенного физического моделирования заключается при этом в соблюдении геометрического подобия системы и соблюдении критериев подобия, вытекающих из условий однозначности:

$$k_{\rho a} = k_\rho; \qquad k_l = k_H;$$

Касательная составляющая сопротивления резанию в этом случае определяется на основании замера последней в условиях моделирования и умножения полученной величины на поправочный коэффициент, учитывающий нарушение соответствующих критериев подобия. Для расчета можно рекомендовать следующую зависимость:

$$\rho_N = \rho_M K$$

где K - коэффициент, учитывающий несоблюдение подобия по ряду определяющих критериев.

Поправочный коэффициент K рассчитывается на основании гипотезы об инвариантности уравнений модели и натуры по параметрам модели и масштабным коэффициентам соответствующих параметров.

С использованием математической модели для определения касательной составляющей сопротивления резанию грунта плоским отвалом под гидростатическим давлением получим:

$$K = \frac{\left(H_{LM}/\sin\alpha\right)\cdot b_M \cdot \rho_M \cdot K_S \cdot tg\delta \cdot k_\rho \cdot k_1^2 \cdot \left(\cos\alpha + tg\varphi \cdot \cos\xi \cdot \cos\psi\right) +}{\left(H_{LM}/\sin\alpha\right)\cdot b_M \cdot \rho_M \cdot K_S \cdot tg\delta \cdot k_\rho \left(\cos\alpha + tg\varphi \cdot \cos\xi \cdot \cos\psi\right) +}$$

$$\frac{+ b_M h_M ctg\psi \cdot k_1^2\left(\rho_M k_p + C_{OM} k_{CO} - \rho_M k_p tg\psi\right) + C_{XM}\rho_M S_M \vartheta_M^2 k_{C_o} k_p k_1^2 k_S / 2}{+ b_M h_M ctg\psi \cdot \left(\rho_M + C_{OM} - \rho_M tg\psi\right) + C_{XM}\rho_M S_M \vartheta_M^2 / 2}$$

Или с учетом $k_{C_0} = 1$; $k_p = 1$ имеем:

$$K = k_1^2 \left\{ \frac{(H_{LM}/\sin\alpha) \cdot b_M \cdot \rho_M \cdot K_S \cdot tg\delta \cdot (\cos\alpha + tg\varphi \cdot \cos\xi \cdot \cos\psi) +}{(H_{LM}/\sin\alpha) \cdot b_M \cdot \rho_M \cdot K_S \cdot tg\delta \cdot (\cos\alpha + tg\varphi \cdot \cos\xi \cdot \cos\psi) +} \right\}$$

$$\left\{ \frac{+ b_M h_M ctg\psi \cdot k_1^2 (\rho_M k_p + C_{OM} - \rho_M tg\psi) + C_{XM} \rho_M S_M \vartheta_M^2 k_1^{0,5} / 2}{+ b_M h_M ctg\psi \cdot (\rho_M + C_{OM} - \rho_M tg\psi) + C_{XM} \rho_M S_M \vartheta_M^2 / 2} \right\}$$

Таким образом, при практических расчетах для определения сопротивления резанию суглинистого грунта под гидростатическим давлением можно пользоваться приближенной зависимостью:

$\rho \approx \rho_M k_1^2$

Показатель степени в этой формуле показывает характер действующих сил, которые определяют процесс разрушения грунта (2). В данном случае показатель степени 2 указывает на доминирующее воздействие сопротивлений, обусловленных действием поверхностных сил среды (силы сцепления, сдвига, гидростатического давления).

Мощность, необходимая для резания грунта под гидростатическим давлением, определяется в рассматриваемом случае с учетом принятого масштаба скорости $k_\vartheta = k_l^{0,5}$:

$N_N \approx N_M \cdot K_p \cdot k_l^{0,5} = N_M \cdot k_l^{1,5}$

Где N_N, N_M – мощность для натуры и модели.

Следует отметить, что данная методика моделирования пригодна, когда прочностные характеристики грунта не зависят от размера взаимодействующих с ним рабочих органов землеройных машин.

Выводы:

1) Определены условия приближенного физического моделирования процесса подводного разрушения грунтов без изменения физико-механических свойств грунта и среды;
2) Разработаны теоретические зависимости определения силовых и мощностных показателей процесса копания грунтов в подводных условиях.

Литература

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976г. – 479стр.
2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Высшая школа, 1981г. – 335стр.
3. Недозеров И.А., Тургумбаев Ж.Ж. Моделирование разрушения грунтов под гидростатическим давлением. – Б.:Кыргызстан, 2000г. – 153стр.