АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ СВАЯ В ТРУБЕ» ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ АКСЕЛЕРОГРАММЫ

Я.М.АЙЗЕНБЕРГ, д-р техн. наук, проф.,
С.ГАИПОВ, соискатель
(ЦИСС ЦНИИСК им.В.А. Кучеренко, Москва)

В статье представлены результаты исследований сейсмических колебаний железобетонных свай. Исследования выполнены в рамках изучения сейсмоизолирующих свойств системы «свая в трубе». В качестве математической модели сейсмического воздействия использована инструментально зарегистрированная акселерограмма землетрясения в Газли (1976 г.). Учтена нелинейность деформирования свай. В результате получены горизонтальные перемещения, скорости и ускорения железобетонных свай. Для принятого соотношения параметров свай и расчетной акселерограммы Газли соотношение величин максимальных горизонтальных сейсмических ускорений сваи и грунта составляет 0,66. При проектировании сейсмостойких сооружений, помимо ускорений, будут учтены другие кинематические параметры. В статье представлены результаты изучения некоторых из упомянутых эффектов. Эффекты иллюстрируются на примере использования инструментальной акселерограммы Газли (1976 г.).

Ключевые слова: акселерограмма Газли, расчет железобетонных свай, нелинейность деформаций, снижение сейсмических нагрузок.

Расчет сейсмического движения железобетонной сваи с учетом нелинейных деформаций

Приведены результаты расчета движения ж/ б сваи на сейсмические воздействия, заданные акселерограммой Газли. Формулы расчета запрограммированы в среде Microsoft Excel, что позволяет проводить расчеты с другими исходными данными и акселерограммами. Проведена работа по отладке (проверке) вычислений в программе.

Акселерограмма — Газли (17.05.1976), компонента 90º, максимальное ускорение — 6 м/с^2 (на 8,52 с), шаг оцифровок — 0,02 с, продолжительность 13 с, преобладающий период акселерограммы — 0,1 с. Данная акселерограмма принята ввиду высокой интенсивности ускорения, что позволяет проверить движение системы свая в трубе с выключающимися связями.

Расчетную динамическую схему ж/ б сваи принимаем в виде системы с одной степенью свободы. Интегрирование дифференциального уравнения движения системы с одной степенью свободы выполнено шаговым методом (так называемый шаговый метод линейного ускорения Клафа-Пензиена или Вилсона) описанным в работах [1, 2]. Шаговый метод интегрирования в сравнении с другими численными методами (метод Рунге-Кутта, метод Ньюмарка и т. д.) имеет преимущество в наглядности и простоте вычислений. Дифференциальное уравнение движения запишем в виде:

$$m\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + S(y) = P(t), \qquad (1)$$

где: $m\ddot{y}(t)$ — инерционная сила системы, $P(t) = m\ddot{y}_0$ сейсмическое воздействие, задаваемое акселерограммой $\ddot{y}_0$, — вязкая сила, $S(y)$ — упругая или упругопластическая сила системы.

Для линеаризации запишем уравнение движения для момента $t+\Delta t$:

$$m\ddot{y}(t+\Delta t) + b\dot{y}(t+\Delta t) + S(y+\Delta y) = P(t+\Delta t), \qquad (2)$$

Вычтем из равенства (2) уравнение (1). При этом обозначим $\Delta y = y(t+\Delta t) - y(t)$ и $\Delta P = P(t+\Delta t) - P(t)$ Принимаем, что $S(y+\Delta y) - S(y) \approx (dS/dy)\,\Delta y = S'\Delta y$. В результате получаем:

$$m\Delta\ddot{y} + b\Delta\dot{y} + S'\Delta y = \Delta P, \qquad (3)$$

Уравнение (3) определяет приращение Δy за время Δt. Величина (рис.1) $S' = dS/dy$ называется касательной или мгновенной жесткостью системы в момент движения *t*.

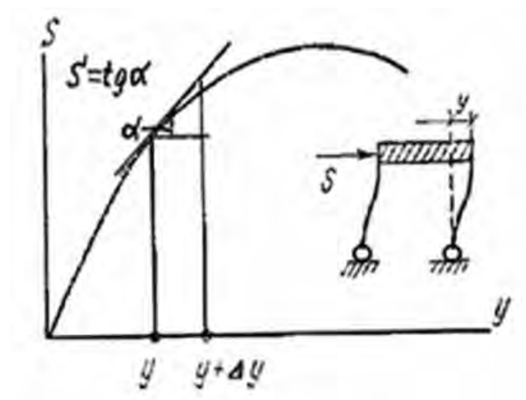

Рис.1. Расчетная схема системы свая в трубе и схематичное пояснение к зависимости «сила-перемещение»

Поставим задачу свести дифференциальное уравнение (3) к алгебраическому виду относительно приращения перемещения Δy. Будем считать, что при $t=t_k$ известны y_k, $\dot{y}_k$, $\ddot{y}_k$. Вводим вспомогательную переменную τ с началом отсчета в точке $t=t_k$ и разложим искомые функции в ряд Тейлора по степеням τ, ограничившись слагаемым τ^3:

$$y = y_k + \dot{y}_k\tau + \ddot{y}_k\tau^2/2 + \dddot{y}_k\tau^3/6;$$
$$\dot{y} = \dot{y}_k + \ddot{y}_k\tau + \dddot{y}_k\tau^2/2; \qquad (4)$$
$$\ddot{y} = \ddot{y}_k + \dddot{y}_k\tau;$$

Уравнения (4) соответствуют линейному закону изменения ускорения $\ddot{y}(\tau)$ на рассматриваемом отрезке времени, поэтому данный метод называют часто методом линейного ускорения.

Из последнего равенства (4) находим $\dddot{y}_k\tau = (\ddot{y} - \ddot{y}_k)/\tau = \Delta\ddot{y}/\tau$. Подставляя $\dddot{y}_k$ в первые два уравнения (4) и обозначая $y - y_k = \Delta y$ и $\dot{y} - \dot{y}_k = \Delta\dot{y}$, запишем их в виде:

$$\Delta y = \dot{y}_k\tau + \ddot{y}_k\tau^2/2 + \Delta\ddot{y}\tau^2/6;$$
$$\Delta\dot{y} = \ddot{y}_k\tau + \Delta\ddot{y}\tau/2; \qquad (5)$$

Отсюда можно выразить $\Delta\ddot{y}$ и $\Delta\dot{y}$ через Δy, а именно после небольших преобразований:

$$\Delta\ddot{y} = 6\Delta y/\tau^2 - 6\dot{y}_k\tau/2 - 3\ddot{y}_k;$$
$$\Delta\dot{y} = 3\Delta y/\tau - 3\dot{y}_k - \ddot{y}_k\tau/2; \qquad (6)$$

Окончательно, подставив (6) в уравнение (3), приведем это дифференциальное уравнение равновесия к алгебраическому уравнению относительно Δy:

$$r'_{11}\Delta y = \Delta P' \qquad (7)$$

где $r'_{11} = S' + 6m/\tau^2 + 3b/\tau$;

$$\Delta P' = \Delta P\ [(6m/\tau) + 3b]\ \dot{y}_k + [3m + (b\tau/2)]\ \ddot{y}_k. \qquad (8)$$

Полагая в последних равенствах $\tau=\Delta t$, составляем на каждом шаге уравнение (7), из которого вычисляем Δy (Δt), а далее по формулам (6) находим $\Delta\dot{y}$ и $\Delta\ddot{y}$. После этого находим полное перемещение, скорость и ускорение в точке $t_k+\Delta t$:

$$y\,(t_k + \Delta t) = y_k + \Delta y;$$
$$\dot{y}\,(t_k + \Delta t) = \dot{y}_k + \Delta\dot{y};$$
$$\ddot{y}\,(t_k + \Delta t) = \ddot{y}_k + \Delta\ddot{y}.$$

Последовательно давая аргументу t приращения Δt и на каждом шаге вычисляя текущие значения эффективной жесткости r'_{11} и суммарной внешней силы $\Delta P'$, получим решение нелинейного уравнения движения (1).

Численно было установлено, что вычислительный процесс оказывается более устойчивым, если в равенствах (8) при основном временном шаге Δt полагать $\tau=\theta\Delta t$, где $\theta>1$ (обычно $\theta\approx1{,}4$). В такой модификации этот путь решения носит название θ-метода Вилсона.

Точность рассмотренного шагового метода, как и любого процесса численного интегрирования, зависит от длины интервала времени Δt. При выборе этого интервала необходимо учитывать три фактора: скорость изменения внешней нагрузки, сложность характеристик нелинейной жесткости и период T собственных колебаний системы. Шаг интегрирования должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить надежное определение всех указанных величин, последняя из которых связана со свободными колебаниями сооружения. Как правило, изменчивость характеристик конструкций не является определяющим фактором. Если происходит внезапное существенное изменение характеристик конструкций, например текучесть в упругопластической системе, для точного учета этого явления может быть введен специальный, более короткий шаг интегрирования. Динамические особенности приложенных нагрузок также могут быть учтены без особых затруднений при выборе интервала времени. Шаг интегрирования для обеспечения устойчивости процесса вычислений и необходимой точности его результатов должен выбираться значительно меньше половины условного периода свободных колебаний. Как правило, условие $\Delta t/T\leq1/10$ является эмпирическим правилом для получения надежных результатов.

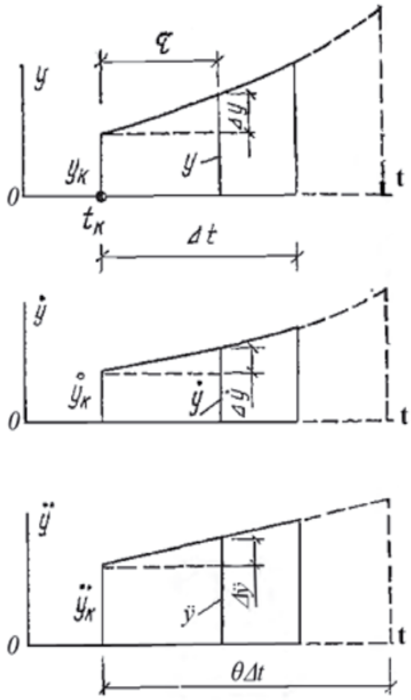

Рис.2. Схема к шаговому методу

Рассчитаем ж/ б сваю в трубе длиной 8 м, для которой зависимость «сила-перемещение» представлена в статье авторов [7]. Условный период собственных малых колебаний линейной системы с одной степенью свободы T=1,8 с; масса m=160 (т)/9,81 (м/с²) =16,3 (т·с²/м). Шаг интегрирования принят равным: 0,02 с.

Зависимость «сила-перемещение» предполагалась аппроксимировать кусочно-линеаризованной функцией на малых шагах при интегрировании, но учитывая громоздкость и необоснованность по точности такой аппроксимации, принята аппроксимация зависимости «сила-перемещение» по экспоненциальному закону с изменяющимися жесткостями, указанная в работе [3].

Изменения жесткости принято по экспоненциальному закону со степенью по гиперболическому синусу аргументом от пластических деформаций железобетонной сваи, указанного в работе [4]. В отличие от других законов изменения жесткости (линейно-кратно-меняющихся, меняющихся по тригонометрическим функциям, и т. д.) этот закон принят ввиду наличия некоторых экспериментальных обоснований.

Далее результаты показаны на рис.3-5. На рис.6 показана инструментальная акселерограмма Газли. Ввиду большого объема, сами расчеты здесь не показаны.

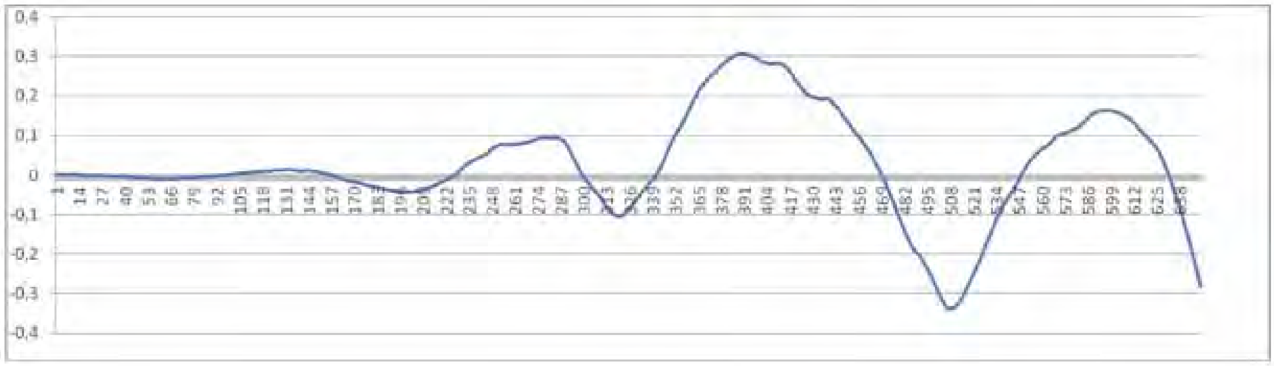

Рис.3. График результатов зависимости «перемещение массы (м) — время (с)». Шаг по времени 0,02 с. Максимум 30 см.

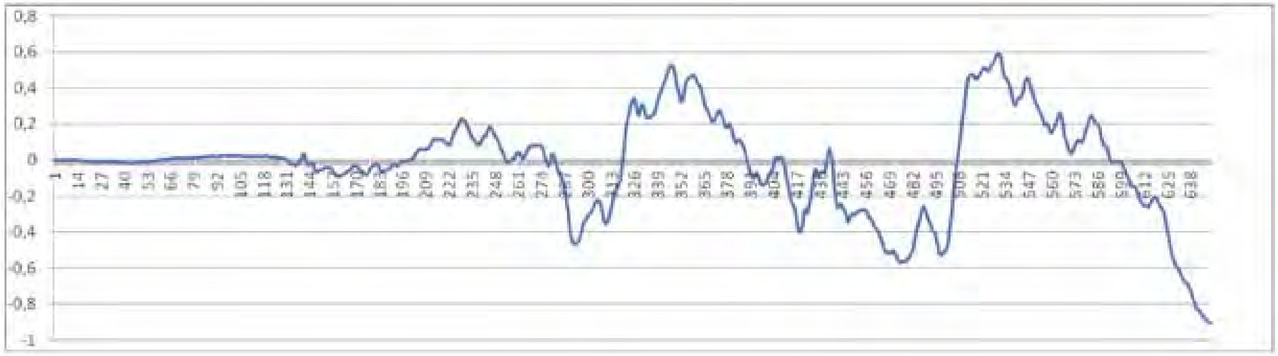

Рис.4. График результатов зависимости «скорость массы (м/с) — время (с)». Шаг по времени 0,02 с.

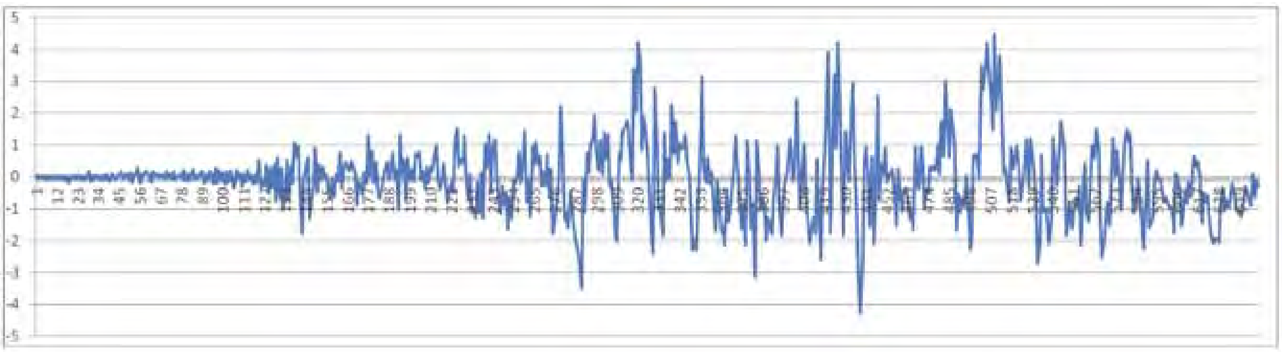

Рис. 5. График результатов зависимости «ускорение массы (м/с^2) — время (с)». Шаг по времени 0,02 с.

Рис.6. Акселерограмма «Газли» (м/с^2).

ВЫВОДЫ

1. Как видно из представленных результатов, при пиковом ускорении грунта, равном приближенно 6 м/с^2 максимальные расчетные ускорения сваи составляют 4 м/с^2 для неупругой сваи.

2. При проектировании реальных сейсмостойких сооружений следует принимать во внимание перемещения и другие кинематические параметры движения системы [5, 6].

3. Применение в целях сейсмоизоляции системы «свая в трубе» позволяет в определенных случаях снижать сейсмическую нагрузку до 4-8 раз, вследствие уменьшения сейсмических ускорений на глубине, достижения сейсмоизолирующего эффекта за счет регулирования гибкости свай и других эффектов [5, 6].

Литература

1. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. — М.: Стройиздат. 1979. 320 с.

2. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений./Под. ред. чл.-корр. АН СССР А. Ф. Смирнова. — М.: Стройиздат. 1984. 415 с.

3. Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. — М.: Стройиздат. 1976. 246 с.

4. Ржевский В. А. Упругопластические свойства железобетонных каркасных систем. // Строительство и архитектура.Узбекистана. — Ташкент: 1981. Вып.7. С.6-10.

5. Айзенберг Я. М. Сейсмоизолирующие адаптивные фундаментные системы. // Основания и фундаменты. 1992. № 6.

6. Айзенберг Я. М., Гаипов С. Сейсмоизоляция сооружений с применением системы «свая в трубе»./Доклад на IX Российской Национальной Конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию «Сочи-2011». 2011 г.

7. Айзенберг Я. М., Гаипов С. Упругопластическая работа железобетонной сваи в системе «свая в трубе» при сейсмических воздействиях. // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. 2012. № 2.

Материалы хранятся в ЦИСС ЦНИИСК им.В. А. Кучеренко по адресу:
109428, Москва, ул.2-я Институтская, д.6, корп.37.
Тел/факс: (499) — 174-70-64.
E-mail: eisenberg@raee.su, serd-78@mail.ru.