

О ЖЕСТКОСТИ ОПОР РЕАЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

У статті розглянуте питання визначення реальної жорсткості мостових опор і необхідності в деяких випадках при розрахунку власних частот мостових конструкцій замінити абсолютно жорсткі опори пружними.

В статье рассмотрен вопрос определения реальной жесткости мостовых опор и необходимости в некоторых случаях при расчете собственных частот мостовых конструкций заменить абсолютно жесткие опоры упругими.

The article considers the questions of defining the actual rigidity of bridge supports and arising in some cases necessity of replacement the absolutely rigid supports for resilient ones in calculation of the own frequencies of bridge designs.

Поскольку жесткость опор оказывает доминирующее влияние при определении собственных частот реальных мостовых конструкций, рассмотрен вопрос о их жесткости (в частности, нескольких опор мостов разного типа). При изложении данного практического материала речь будет идти об упругих опорах, поскольку понятие абсолютно жестких опор может употребляться только в теоретических исследованиях.

Анализируя влияние изменения относительной жесткости опор [1] в пределах $c'' = 0 - \infty$ на частоту свободных колебаний, необходимо знать, какова реальная жесткость опор применительно в данном случае к мостостроению.

В большинстве работ научного плана, освещающих колебательные процессы мостовых и строительных конструкций, жесткость опор для упрощения расчетных схем и, естественно, расчетов принимается равной бесконечности. Тем не менее, опору моста нельзя рассматривать как единый стержень с постоянной жесткостью, так как система опирания пролетного строения (упругая опора) состоит из нескольких, различных по жесткости, элементов, а именно в общем случае: опорной части, подферменника, ригеля, тела опоры, цокольной части, фундамента, основания фундамента. В этом случае коэффициент жесткости опоры моста в общем случае будет определяться по известной зависимости [2]

$$\frac{1}{c_0} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{c_0^i}, \quad (1)$$

откуда жесткость равна

$$c_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{c_0^i}}. \quad (2)$$

Коэффициент жесткости отдельно для каждого слоя (элемента) определяем по известной зависимости [3]

$$c_0^i = \frac{E_i F_i}{l_i}, \quad (3)$$

где l_i – длина элемента; E_i, F_i – площадь сечения и модуль упругости i -го элемента.

В качестве примеров рассмотрим реальные типовые и нетиповые решения опор мостов на естественном основании и на свайном. Расчеты осадок оснований мостовых опор выполнены с использованием стандартных программ MS 101 и MS 140 Воронежским филиалом Гипродорнии. Кроме того, расчет фундамента как условного выполнен по СНиП 2-05-03-84.

Пример 1

Рассмотрим опору моста через реку Дон у г. Аксай (Ростовская область), рис. 1.

На рис. 2 приведена расчетная схема системы опирания, где: c_0^i – коэффициент жесткости, численно равный силе, вызывающей перемещение, равное единице; i – порядковый номер элементов системы опирания: 1 – опорная часть; 2 – подферменник, 3 – ригель и тело опоры, 4 – цокольная часть опоры, 5 – ростверк; 6 – фундамент, 7 – подставка фундамента.

Большинство авторов научных работ по статической и динамической работе мостов и мостовых конструкций при расчете реальных объектов полагают, что опору моста можно рассматривать как абсолютно жесткую, что, казалось бы, не должно противоречить их действительной работе. Рассмотрим возможные значения коэффициента жесткости опорных частей применительно к формуле (1). В настоящее время в мостостроении приме-

няется в основном два вида опорных частей (по роду материала): металлические и резиновые (полиуретановые). Как разновидность комбинированных опорных частей применяются резино-металлические опорные части, в которых слои ме-

талла и резины чередуются между собой. Отметим, что в случае временного строительства или в стадии монтажа может применяться опирание через деревянные брусья (шпалы), а сами опоры при этом могут быть временными из элементов МИК.

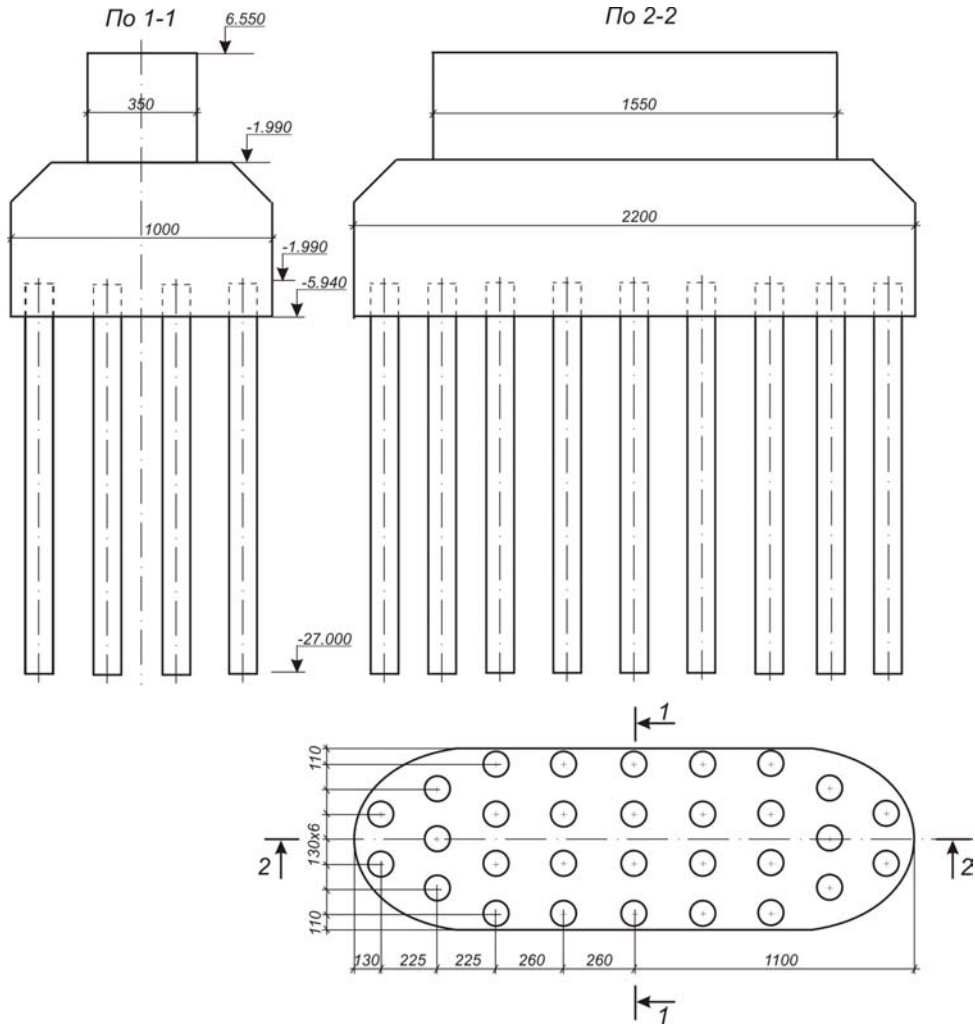


Рис. 1. Опора моста

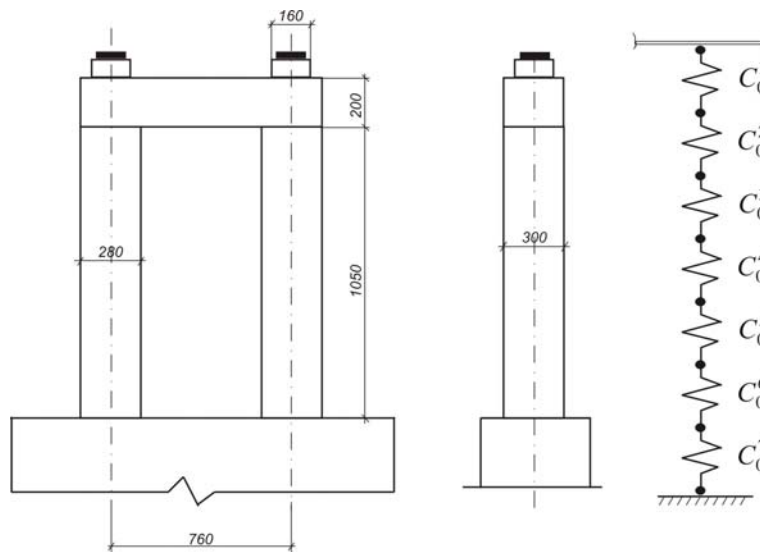


Рис. 2. Расчетная схема системы опирания

В качестве резиновых опорных частей применяются РОЧСП различных типоразмеров и армированные различным количеством стальных листов из стали Ст.73 или Ст.20. При это применяются в основном резина двух марок – Н0-68-1 и ИРП-1347-1.

В последнее время [4] широкое применение находят неармированные опорные части из полиуретана с модулем упругости $E_0 = 35$ МПа.

Для стальных опорных частей $c_0^1/2$ колеблется в пределах $(5...8) \cdot 10^6$ кН/м. Для комбинированных опорных частей моста через реку Дон у г. Аксай $c_0^1/2 = 0,288 \cdot 10^6$ кН/м. Для временного опирания, состоящего из двух рядов шпал, уложенных поперек оси моста, $c_0^1/2 = (0,006...0,012) \cdot 10^6$ кН/м. Для РОЧСП размером $30 \times 40 \times 7,8$ см $c_0^1/2 = 0,0538 \cdot 10^6$ кН/м.

Для опоры [5] моста через р. Дон подсчитаны с использованием данных проекта пять коэффициентов:

$$c_0^2 = \frac{2 \cdot 2,2 \cdot 1,8 \cdot 2,03 \cdot 10^6}{0,2} = 804 \cdot 10^6 \text{ кН/м;}$$

$$c_0^3 = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2,8 \cdot 2,03 \cdot 10^6}{12,5} = 27,3 \cdot 10^6 \text{ кН/м;}$$

$$c_0^4 = \frac{3,5 \cdot 15,24 \cdot 2,03 \cdot 10^6}{7,55} = 143,4 \cdot 10^6 \text{ кН/м;}$$

$$c_0^5 = \frac{10 \cdot 22 \cdot 2,03 \cdot 10^6}{3,5} = 1276 \cdot 10^6 \text{ кН/м;}$$

$$c_0^6 = \frac{30 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 2,03 \cdot 10^6}{22,5} = 54,4 \cdot 10^6 \text{ кН/м.}$$

Расчет основания опоры произведен по деформациям согласно [6]. Рассматриваемая опора имеет свайное основание. Расчет производим как для условного фундамента на естественном основании в соответствии с требованиями, изложенными в [7]. Границы условного фундамента (рис. 3) определяются: снизу плоскостью АВ, проходящей через нижние концы свай; с боков – вертикальными плоскостями АВ и БГ, отстоящими от наружных граней крайних рядов свай на расстоянии

$$\Delta = h \operatorname{tg} \frac{\varphi_{11,mt}}{4}, \quad (4)$$

где $\varphi_{11,mt}$ – осредненное расчетное значение угла внутреннего трения грунта

$$\varphi_{11,mt} = \frac{\sum_0^h \varphi_{11,i} h_i}{\sum_0^h h_i}, \quad (5)$$

где $\varphi_{11,i}$ – расчетное значение углов внутреннего трения для отдельных пройденных сваями слоев грунта толщиной h_i ; h – глубина погружения свай в грунт.

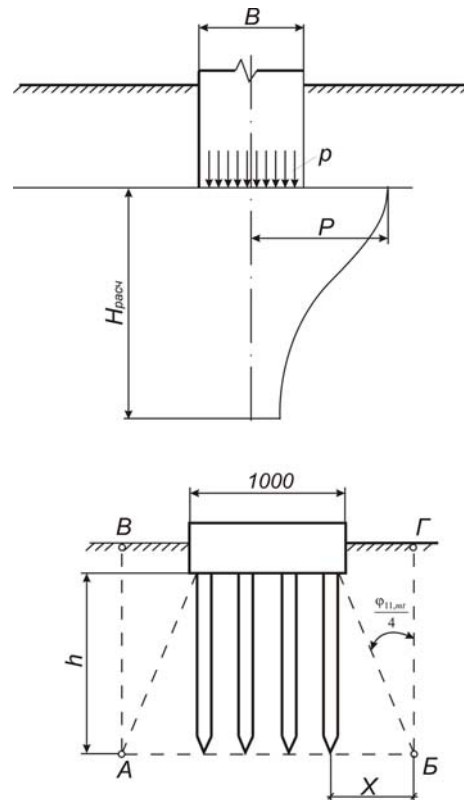


Рис. 3

Расчетную схему основания принимаем согласно [7, п. 3.49, рис. 3] в виде линейно деформируемого слоя конечной толщины. Для рассматриваемой опоры $\varphi_{11,mt} = 29^\circ 08'$; $X = 355,4$ см; $ВА = ГБ = 3014$ см. По оси моста $l + 2 = 2831$ см.

Расчет деформации производим по формуле [7]:

$$S \leq S_{np}; \quad S = bpM \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}, \quad (6)$$

где S – осадка фундамента, м; b – ширина фундамента, м; p – среднее давление на грунт под подошвой фундамента, МПа; M – поправочный коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения толщины упругого слоя и полуширины фундамента; n – количество слоев в пределах упругого слоя; k_i – коэффициент, определяемый в зависимости от m' и n

(соотношения сторон фундамента); E_i – модуль деформации i -го слоя грунта, МПа;

$$m' = \frac{2H_{\text{рас}}}{b} = \frac{2 \cdot 7,631}{16,31} = 0,9357,$$

где $H_{\text{рас}} = H_0 + tb$; H_0 и t принимается для песчаных грунтов соответственно 6 м и 0,1;

$$H_{\text{рас}} = 6 + 0,1 \cdot 16,31 = 7,631 \text{ м};$$

$$M = 0,95; \quad E = 28 \text{ МПа};$$

$$n = \frac{l}{b} = \frac{28,31}{16,31} = 1,74.$$

Так как сжимаемый слой один, то $k_{i-1} = 0$;

$$k_i = f(n; m') = f(1,74; 0,94) = 0,234;$$

$$p = \frac{\sum N}{bl};$$

$$\sum N = N_1 + N_2 + N_3,$$

где N_1 – нагрузка на опору от пролетного строения, кН; N_2 – нагрузка на опору от собственного веса опоры, кН; N_3 – нагрузка на основание от грунта, входящего в расчетный фундамент, кН.

Согласно типовому проекту вес пролетного строения $l_p = 126$ м составляет $N_1 = 9321$ кН; вес опоры $N_2 = 69220$ кН; вес грунта, учитываемого в расчетах $N_3 = 187681$ кН. Суммарная нагрузка $\sum N = 266223$ кН.

Давление по подошве фундамента от указанной суммарной нагрузки составит

$$p = \frac{266223}{28,31 \cdot 16,31} = 576,6 \text{ кН/м}^2,$$

что, в свою очередь, при указанных параметрах вызовет осадку фундамента

$$S = \frac{16,31 \cdot 576,6 \cdot 0,95 \cdot 0,234}{280} = 0,07466 \text{ м}.$$

Коэффициент жесткости основания опоры

$$c_0^7 = \frac{\sum N}{S} = \frac{266223}{0,07466} = 3,56 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Предварительно анализируя значения всех коэффициентов жесткости и согласно (2), видим, что решающую роль в определении приведенной жесткости играет именно жесткость опорной

части. Подставляя в (2) значения найденных жесткостей отдельных составляющих, получим значение коэффициента жесткости системы опирания $c_0 = 0,481 \cdot 10^6$ кН/м, соизмеримое со значением жесткости опорной части.

Таким образом, указанный пример показывает, что коэффициент жесткости опоры в целом можно определять, учитывая лишь жесткость самой опорной части и в некоторых случаях – жесткость основания опоры. В этом случае получаем некоторое уточнение жесткости опирания $c_0 = 0,497 \cdot 10^6$ кН/м. Остальные пять параметров жесткости опирания дают в совокупности уточнение всего на 3,1 %.

Относительная жесткость упругой опоры моста в данном случае (при $A = 6410,46$ см²; $S = 199860$ см³; $I_x = 1797,23 \cdot 10^4$ см⁴; $E = 2,1 \cdot 10^6$ кг/см²; $l = 126,0$ м) для стали 10ХСНД и 15ХСНД согласно формуле составит

$$c' = \frac{c_0 l_i^3}{E_i I_i} = 2552,$$

где c_0 – жесткость упругой опоры, имеющая размерность кН/м; l_i – длина первого пролета; E_i, I_i – жесткость первого пролета балки; c' – относительная жесткость упругой опоры.

Принимая неразрезную схему пролетного строения $L = 2 \cdot 126$ м по формуле

$$c'' = \frac{c'}{l_1^3} = \frac{c_0 L^3}{E_1 I_1}, \quad (L - \text{полная длина неразрезной}$$

балки), получаем значение приведенной относительной жесткости опоры, равное $c'' = 20416$. Оба указанные значения согласно выполненным исследованиям с очень небольшой погрешностью можно принимать равными бесконечности, что значительно упрощает динамические расчеты за счет упрощения расчетных моделей.

Следующий пример показывает, что для опор стоечного типа указанными рекомендациями можно пользоваться с большой осторожностью.

Пример 2

Рассмотрим жесткость опоры стоечного типа на естественном основании. Схема опоры и основные размеры приведены на рис. 4.

На опору опираются типовые пролетные строения $l_1^n = 12,7$ м; $l_2^n = 15,83$ м; $l_1^p = 12,0$ м; $l_2^p = 15,0$ м. Модуль упругости тела опоры

$E_6 = 31,5$ МПа. Постоянная нагрузка на один фундамент (суммарная) $\sum N = 50,3$ тс.

Геологический разрез по оси опоры (по слоям сверху-вниз) следующий:

- песок средней крупности ($h_1 = 4,4$ м);
- песок мелкий ($h_2 = 2,3$ м);
- суглинок ($h_3 = 1,4$ м);
- песок средней крупности ($h_4 = 6,3$ м).

На рис. 4 приведена также расчетная схема составляющих жесткости упругой опоры по схеме, аналогичной рассмотренной выше.

Осадка основания от указанных нагрузок, вычисленная по тем же программам MS 101 и MS 140 Воронежским филиалом Гипродорнии, составляет $S = 2,1$ мм. Жесткость всех слоев, учитываемых в расчете (см. рис. 4), определена по фактическим размерам по формулам (2) и (3) и поэлементно приведена ниже:

$$c_0^1 = \frac{0,3 \cdot 0,4 \cdot 350 \cdot 7}{0,078} = 0,377 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = \frac{1,2 \cdot 11,8 \cdot 3,15 \cdot 10^6}{0,5} = 892 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = \frac{0,4 \cdot 0,5 \cdot 3,15 \cdot 10^6 \cdot 5}{8,20} = 3,84 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 5}{1} = 378 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^6 = \frac{2,5 \cdot 2,8 \cdot 3,15 \cdot 10^6 \cdot 5}{0,3} = 3675 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^7 = \frac{503}{0,0021} = 239524 \text{ кН/м}.$$

По формуле (2) $c_0 = 0,144 \cdot 10^6$ кН/м.

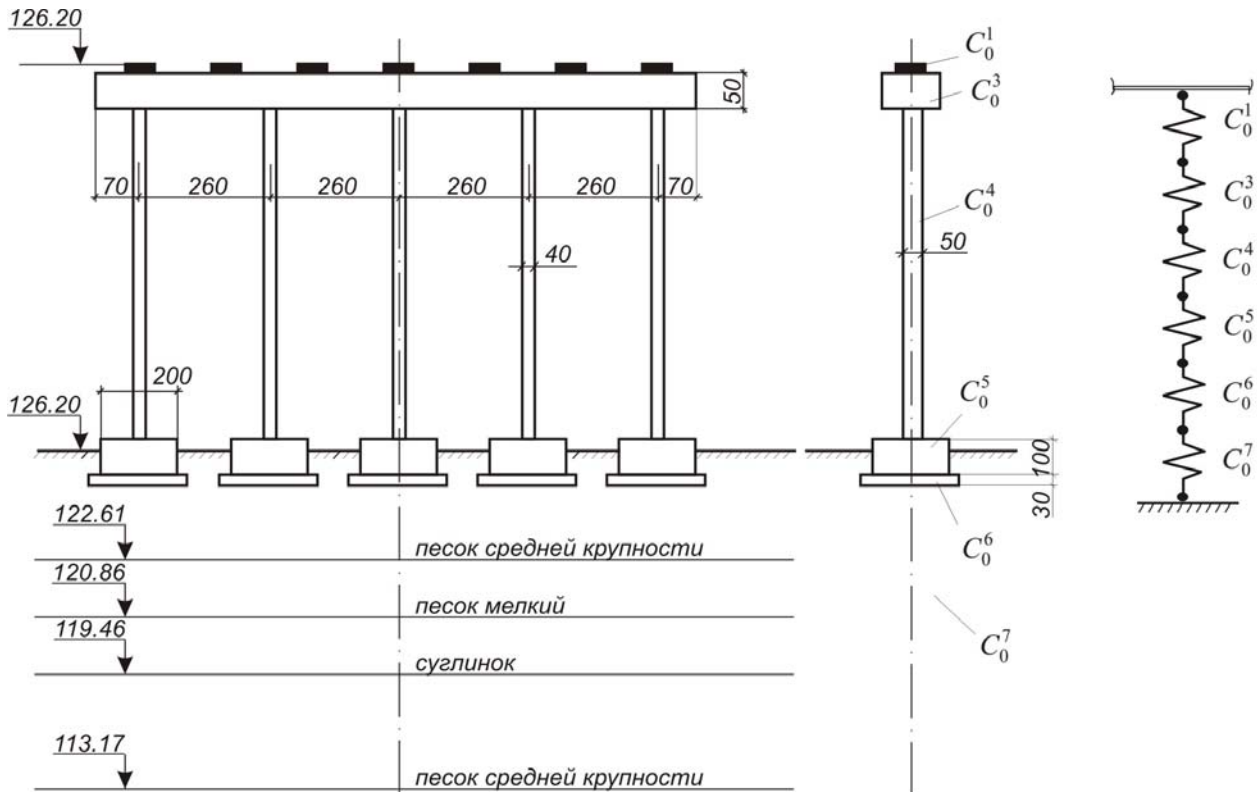


Рис. 4

Уже для данного типа опор при расчете жесткости необходимо, кроме жесткости опорной части, учитывать жесткость фундамента. В процентном соотношении жесткость опорной части составляет 37 %, а основания – 59 %.

Пример 3

Рассмотрим опору стоечного типа из столбов диаметром 1,0; 1,2; 1,6 м. Фундаменты опоры на естественном основании. Схема опоры и расчетная схема для определения приведенной жесткости приведена на рис. 5. Осадка фундамента согласно расчетам по тем же программам составляет $S = 0,313$ см.

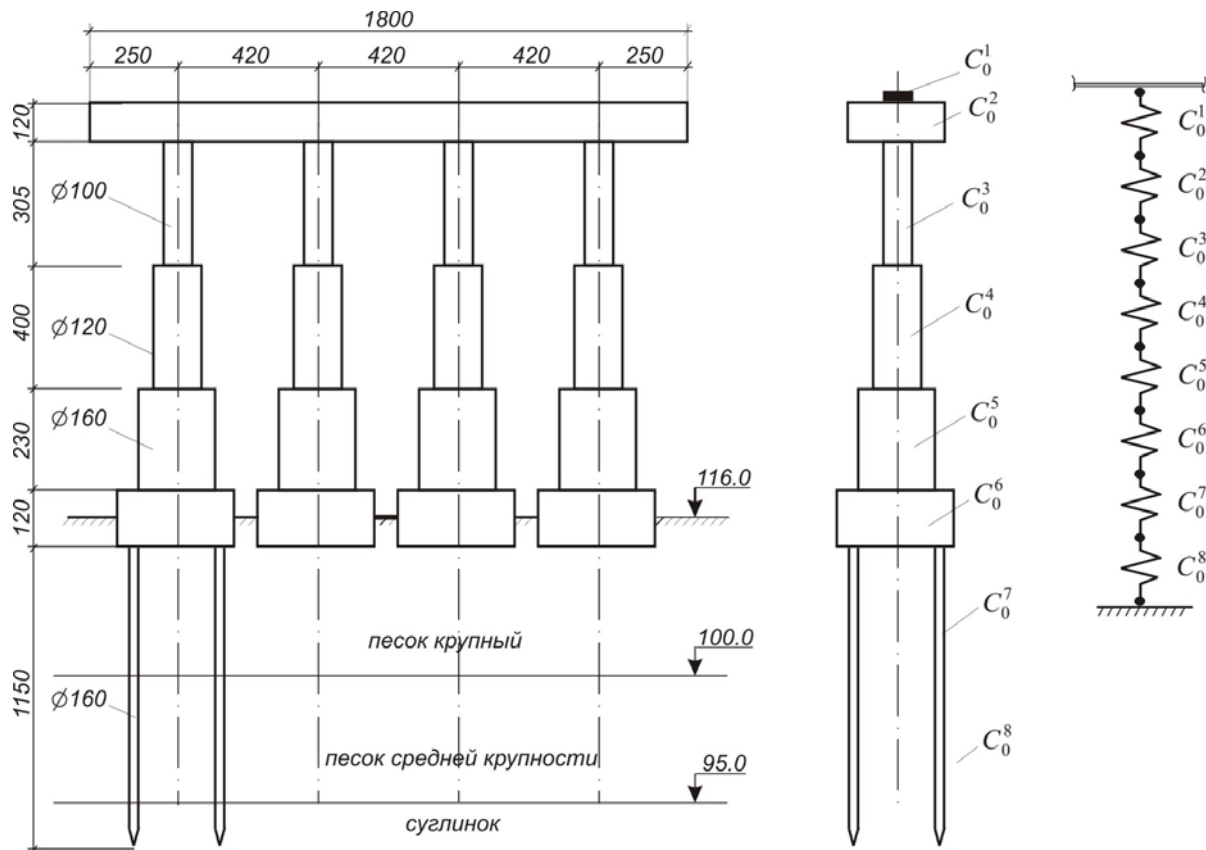


Рис. 5

Модуль упругости тела опоры, ригеля и свай принят $E_1 = 35$ МПа, ростерка $E_2 = 31,5$ МПа. Геологический разрез по оси опоры в пределах расчетной глубины представляет собой следующее:

- песок крупный ($h_1 = 16,0$ м);
- песок средней крупности ($h_2 = 5,0$ м);
- суглинок.

На данную опору опираются те же пролетные строения, что и примере 2. Постоянная нагрузка на кул с учетом расчета свайного фундамента как массивного составляет $\sum N = 9735$ кН, где нагрузка от грунта составляет $N_3 = 8530$ кН. Осадка фундамента, рассчитанная по приведенным выше программам, составляет 43,6 мм. Коэффициенты жесткости, просчитанные по формулам (2) и (3), составляют соответственно:

$$c_0^1 = \frac{0,3 \cdot 0,4 \cdot 350 \cdot 12}{0,078} = 0,646 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^2 = \frac{2,2 \cdot 18 \cdot 3,5 \cdot 10^6}{1,2} = 115,5 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 36,05 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = 0,6 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 39,6 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = 0,8 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 122,4 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^6 = 2,5 \cdot 2,5 \cdot 3,15 \cdot 10^6 \cdot 4 = 729,2 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^7 = 0,3 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 4 = 13,77 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^8 = 97349 / 0,0436 = 2,23 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Приведенная величина жесткости в данном случае составляет $c_0 = 0,162 \cdot 10^6$ кН/м, а в процентном отношении жесткость опорной части составляет 25 % и жесткость основания 72 %.

Пример 4

Рассматриваемая опора стоечного типа на естественном полускальном основании приведена на рис. 6, там же дана и расчетная схема для определения приведенной жесткости. В данном случае модуль упругости бетона и ригеля, стоек и фундамента принят согласно типовому проекту $E_6 = 30,6$ МПа.

На опору опирается пролетное строение $l'' = 15,83$ м. Грунт полускальный $R_c = 40$ МПа, плотность грунта $\gamma = 2,0$ кН/м³. Суммарная нагрузка на основание от постоянной нагрузки составляет $\sum N = 4972$ кН.

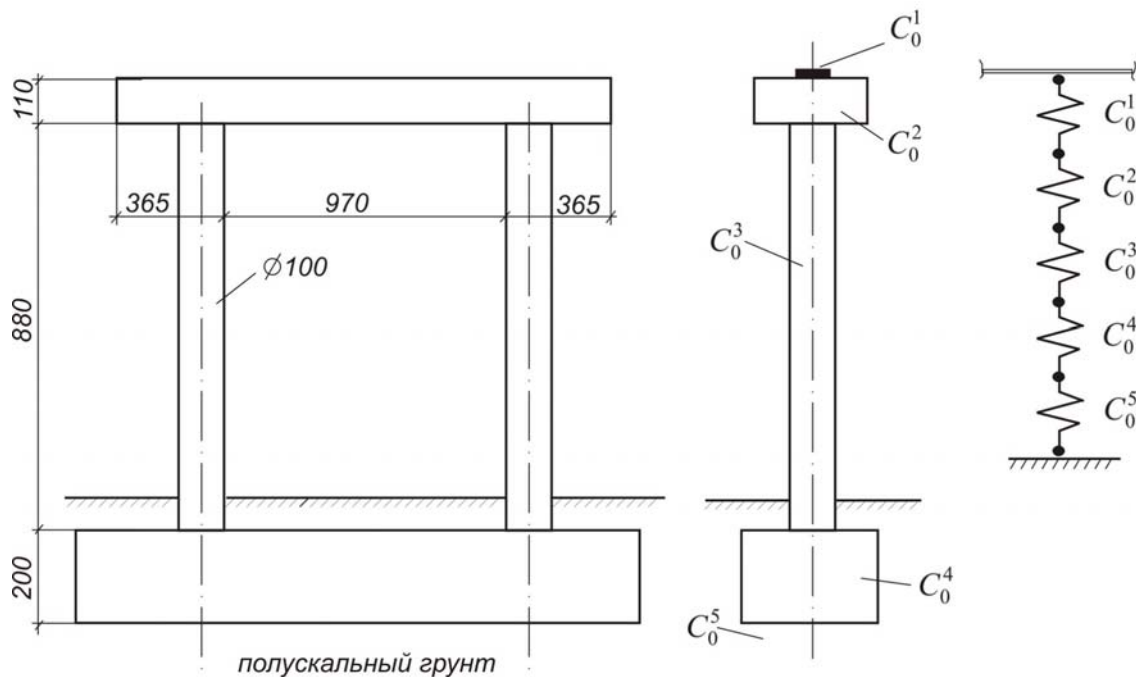


Рис. 6

Подсчет жесткостей отдельных компонентов согласно расчетной схеме рис. 6 дает следующие величины:

$$c_0^1 = \frac{0,3 \cdot 0,4 \cdot 350 \cdot 12}{0,078} = 0,646 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^2 = \frac{1,65 \cdot 17,0 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{1,1} = 780,3 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^3 = \frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{8,8} = 5,46 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^4 = \frac{12,5 \cdot 3,0 \cdot 3,06 \cdot 10^6}{2,0} = 573,8 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$c_0^5 = \frac{4972}{0,00313} = 1,588 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Откуда суммарная жесткость опоры $C_0 = 423150,6 \text{ кг/см}$. Как и в предыдущих примерах, две величины – жесткость опорной части и основания – составляют 90 % приведенной жесткости.

Подводя итог, можно констатировать, что в реальных расчетах для определения жесткости опор можно вводить в расчет лишь две составляющие: жесткость опорной части и фундамента. Остальные параметры в сумме оказывают влияние на конечный результат не более 10 %.

Однако более важным выводом в данном случае следует считать другой:

- при динамических расчетах вертикальных колебаний мостов нельзя принимать жесткость промежуточной опоры равной бесконечности;
- при определении жесткости опоры жесткости фундаментов и опорных частей соизмеримы друг с другом.

В целом все это подтверждает необходимость применения расчетных схем, в которых промежуточные опоры принимаются не жесткими, а упругими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананьев С. А., Чудинов В. В. Синтез уравнений колебаний неоднородной струны // Дифференциальные уравнения с частными производными: Сб. тр. ЛГПУ. – Л., 1990. – С. 23–30.
2. Корнеев Б. Г., Рабинович И. Н. Динамический расчет зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – 106 с.
3. Указания по конструированию, расчету и применению полиуретановых опорных частей мостов (ВСН 38-86, Миндорстрой БССР), 1986.
4. Проект мостового перехода через реку Дон у г. Аксай на обходе г. Ростова-на-Дону. – Тбилиппроавтодортранс, 1985.
5. Основания зданий и сооружений, СНиП 11-15-74, Государственный комитет по делам строительства. – М., 1975.

Поступила в редколлегию 26.11.03.