

рительное воспроизведение натурального процесса намыва песчаных грунтов относительно их прогнозируемых характеристик (табл. 2).

Для правильной оценки точного объема экспериментальной работы без потерь смысла и точности был поставлен план эксперимента на базе оптимизации интервалов между значениями переменных.

В качестве экстремальных значений параметров  $T_0$ ,  $C_S$ ,  $q_W$  принята область, наиболее характерная для натурального намыва. План эксперимента (табл. 3) для уменьшения объема работ составлен по рандомизированной схеме, определяющей чередование выбора значений переменных случайным образом, при этом внешние переменные рассматривались как дискретные величины.

Близкая значимость грунтов типа Б и В дала возможность число экспериментов сократить до шести, используя комбинированный эксперимент с матрицей, приведенной в табл. 4.

При проведении лабораторных экспериментов определялись следующие показатели намывных грунтов:

- мутность сбросной воды с помощью мутномера МН-1;
- плотность грунта, плотность сухого грунта, влажность, плотность сухого грунта в предельно рыхлом и предельно плотном состояниях методом отбора проб;
- гранулометрический состав грунта ситовым способом;
- коэффициент фильтрации грунта с помощью трубки СПЕЦГЕО;

УДК 624.016.001.24

Лукиа Л.К., Тур В.В.

## АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ СЛОИСТОГО СТАЛЕБЕТОНА

### Введение

Слоистые сталебетонные конструкции, ранее именовавшиеся трубобетонными, всё более широко применяются в современном строительстве, вытесняя традиционный железобетон. Причин этому несколько. Это и возрастание эксплуатационных нагрузок на элементы сооружений, и недостаточное сопротивление железобетона действию больших перерезывающих сил, особенно сейсмических, и, наконец, применение сверхвысокопрочных бетонов, использование которых в традиционном конструктивном исполнении нерационально из-за раннего отпадания защитного слоя бетона.

В сталебетоне наружный стальной слой не только сопротивляется действию внешних нагрузок, но одновременно служит надёжным защитным слоем элемента.

Проблема слоистых сталебетонных конструкций весьма актуальна для Беларуси в связи с планируемым строительством сверхвысотных зданий, а также возведением АЭС. В упомянутых областях строительства сталебетонным слоистым конструкциям принадлежит первостепенная роль.

В теории проектирования ещё нет единых воззрений на расчёт прочности слоистых сталебетонных конструкций, однако в последние годы успешно развивается фундаментальный метод [1], начало которому положено работой [2]. Данным методом рассчитан ряд слоистых сталебетонных элементов [3-11].

Анализ полученных решений показывает, что все они, независимо от формы поперечных сечений и характера нагружения, обладают существенной методологической общностью, позволяющей создать единый алгоритм решения задачи расчёта прочности слоистого сталебетона.

- сопротивление грунтов сдвигу на сдвиговых приборах;
- показатели сжимаемости грунтов на компрессионных приборах;
- уклон откоса намыва, осадки и интенсивность намыва с помощью нивелирования.

### Выводы

Сопоставление данных, полученных по результатам лабораторного моделирования, с натурными данными на картах намыва в ЮВМР 1 – ЮВМР 3 (г. Брест), застраиваемых пойменных территориях (г. Гомель, г. Могилёв и др.) позволяют отметить, что предлагаемая методика моделирования обеспечивает достаточно достоверные результаты и обеспечивает возможность оптимизации на практике технологических факторов, при намыве территории не только в условиях Юго-Западного региона Республики, но и в других регионах.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мелентьев В.А. Намывные гидротехнические сооружения. – М.: Энергия, 1973. – 245 с.
2. Огурцов А.И. Намыв земляных сооружений. – М.: Госстройиздат, 1963. – 366 с.
3. Мелентьев В.А., Колпашников Н.И., Волнин Б.А. Намывные гидротехнические сооружения (Основы расчета и проектирования). – М.: Энергия, 1973. – 248 с.

Статья поступила в редакцию 02.03.07

Отметим некоторые характерные конструктивно-механические особенности элементов рассматриваемого класса конструкций. Во-первых, все их поперечные сечения должны быть осесимметричными. Далее, все слои при нагружении элементов претерпевают сложное (трёхосное) напряжённое состояние, существенно влияющее на прочностные показатели. Все слои элемента под нагрузкой взаимодействуют между собой, образуя внутренне статически неопределимую систему. Раскрытие указанной статической неопределимости составляет существенную часть расчёта конструкций фундаментальным методом. Наконец, следует заметить, что излагаемый метод следует применять в элементах, где продольная сжимающая сила является преобладающей, поскольку именно она вызывает дилатацию бетона, в результате которой возникает поперечное взаимодействие между слоями.

### Существо алгоритма расчёта

Разработку метода расчёта следует начинать из постановки задачи, тщательного анализа конструктивной формы элемента и характера его нагружения. Сначала разрабатывают физическую модель элемента, обычно представляемую в графической форме, в виде схем, на которых необходимо показать вид, направление и площадки приложения действующих напряжений, учитываемых в расчёте. Здесь же формируются основные предпосылки и допущения, принимаемые в расчёте.

Исходя из физической модели, принятых предпосылок и допущений формируется математическая модель, включающая систему следующих уравнений: уравнение равновесия

Лукиа Леонид Константинович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки БССР.

Тур Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ляме-Клапейрона (1), критерий текучести стальных слоёв (2), критерий прочности бетонных слоёв (3), уравнение совместности деформаций (4), записанные с учётом обобщённого закона Гука (5):

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – текущий радиус элементарного волокна рассматриваемого стального слоя;  $\sigma_p$  – текущее радиальное напряжение, действующее на элементарное волокно стального слоя;  $\sigma_\theta$  – кольцевое напряжение в элементарном волокне от действия  $\sigma_p$ ;

$$\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{ys} = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение в стальном слое;  $\sigma_3$  – минимальное главное напряжение в стальном слое;  $\sigma_{ys}$  – предел текучести или расчётное сопротивление материала стального слоя. Использование линейного критерия Треска – Сен-Венана (2) требует внимательного определения экстремальных напряжений в стальном слое элемента. Ошибка в определении среднего главного напряжения  $\sigma_2$ , которое пренебрегается критерием (2), ведёт к неточностям решения. Использование же более удобного в этом отношении квадратичного критерия Губера исключено, поскольку он не позволяет получить решения системы уравнений (1-5) в квадратурах. Разумеется, при решении задачи критерий текучести (2) необходимо перевести из декартовых в цилиндрические координаты.

Критерий прочности бетона принимается линейным ( $K = const$ ) либо линеаризованным ( $K = var$ )

$$\sigma_1 - f_c + K\sigma_0 = 0, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение в бетонном слое,  $f_c$  – предел прочности либо расчётное сопротивление бетона,  $K$  – коэффициент эффективности повышения осевой прочности бетона за счёт действия бокового давления  $\sigma_0$ , величину которого необходимо найти путём решения системы уравнений (1-5). В критерии (3) коэффициент эффективности принимается  $K = 4$  для первого приближения; во втором приближении вычисляется по формуле

$$K = 10 - 100\sigma_p / (f'_c + 15\sigma_p).$$

Здесь тоже необходим перевод критерия (3) в цилиндрические координаты.

Следует отметить, что критерии (2) и (3) используются в представленной форме только при решении задач в главных напряжениях. Если же в расчётных сечениях действуют нормальные и касательные напряжения, то критерии предельного состояния (2) и (3) переводятся в систему координат нормальных и касательных напряжений с помощью известных формул поворота осей координат тензора напряжений.

Уравнение непрерывности перемещений, необходимое для раскрытия внутренней статической неопределённости элемента, можно представить в форме зависимости между осевыми относительными деформациями соответствующих слоёв элемента

$$\sum \varepsilon_i = 0, \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$  – номер слоя.

Развёртывание (4) приводит к уравнениям:

$$\varepsilon_{se} + \varepsilon_{si} = \varepsilon_c \text{ – для трёхслойного элемента;}$$

$$\varepsilon_{se} = \varepsilon_c \text{ – для двухслойного элемента,}$$

где  $\varepsilon_{se}$ ,  $\varepsilon_{si}$  – относительные продольные деформации наружного и внутреннего стальных слоёв,  $\varepsilon_c$  – относительная продольная деформация бетонного слоя.

Все относительные деформации следует определять с помощью обобщённого закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_p + \sigma_\theta)], \quad (5)$$

где  $\varepsilon_z$  – продольная относительная деформация слоя элемента,  $\sigma_z$  – осевое предельное напряжение сжатия;  $E$  – модуль упругости соответствующих материалов;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала слоя.

Записывая относительные деформации сжатия всех слоёв согласно (5) и вставляя их в зависимость между относительными осевыми деформациями составляющих элемент слоёв (4) можно найти величину предельного осевого напряжения сжатия рассматриваемого стального слоя, как функцию всех остальных параметров. Вводя эту функцию в уравнение (2), получаем значение кольцевого напряжения  $\sigma_\theta$  в уравнении равновесия (1). В результате приходим к одному дифференциальному уравнению с одним неизвестным  $\sigma_p$ . Поскольку радиальное напряжение  $\sigma_p$  входит в расчётное уравнение и со знаком дифференциала, то для его определения необходимо нахождение неопределённого интеграла дифференциального уравнения. После разделения переменных, преобразования и приведения подынтегральных функций к табличному виду производится взятие соответствующих интегралов. Любопытно отметить, что для всех решённых задач подынтегральные функции всегда были в форме натурального логарифма, а результаты интегрирования соответственно всегда представлялись показательными функциями с высокой степенью относительной толщины соответствующего стального слоя  $\beta_s$ .

Например, для двухслойного сталебетонного элемента со сплошным бетонным ядром поперечное обжатие ядра стальной оболочкой определяется зависимостью

$$\sigma_0 = - \frac{\sigma_{ys} + \alpha_c f_c}{\alpha_c (K - 2\nu_c) - 1} \left[ 1 - \beta_s^{\frac{\alpha_c (K - 2\nu_c) - 1}{1 + \nu_s}} \right], \quad (6)$$

а для трёхслойного элемента давление наружного стального слоя (трубы) на промежуточный бетонный слой определяется по формуле

$$\sigma_0 = - \frac{\sigma_{ye} + \alpha_s \sigma_{yi} + \alpha_c f_c}{A - B} \left[ 1 - \beta_{se}^{\frac{A}{B} + 1} \right], \quad (7)$$

$$\text{где } A = \nu_s + \alpha_s \left[ \nu_s \frac{2\beta_{si} - 1}{\beta_{si} - 1} - \gamma_s \right] + \alpha_c \left[ \gamma_c - \nu_c \frac{2\beta_c - 1}{\beta_c - 1} \right],$$

$$B = 1 + \nu_s.$$

В формулах (6) и (7) кроме ранее указанных введены следующие обозначения:  $\alpha_s = E_{se}/E_{si}$ ,  $\alpha_c = E_{se}/E_c$ ,  $\beta_{se} = D_{se}/d_{se}$  – относительная толщина наружного стального слоя,  $\beta_{si} = D_{si}/d_{si}$  – то же самое для внутреннего стального слоя,  $\beta_c = D_c/d_c$  – относительная толщина бетонного слоя,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_c$  – коэффициенты эффективности трубчатого внутреннего стального слоя и бетонного слоя, определяемые по формулам (8) и (9) соответственно

$$\gamma_s = \frac{\beta_{si}^2}{\beta_{si}^2 - 1} \left[ 1 + \frac{2 \ln(1/\beta_{si})}{\beta_{si}^2 - 1} \right], \quad (8)$$

$$\gamma_c = \frac{K\beta_c^2}{\beta_c^2 - 1} \left[ 1 + \frac{2\ln(1/\beta_c)}{\beta_c^2 - 1} \right]. \quad (9)$$

Знак минус перед дробью в (6) и (7) свидетельствуют о том, что давления  $\sigma_0$  являются сжимающими.

Следует заметить, что определение осевых относительных деформаций согласно (4) – вопрос очень тонкий. Здесь необходимы: глубокое понимание работы материалов при сложном напряжённом состоянии и умение оперировать с критериями прочности, чтобы достоверно выбрать надлежащие напряжения и направления их действия при подстановке в закон Гука (5).

После определения поперечного взаимодействия между слоями элемента, т.е. нахождение боковых давлений  $\sigma_{0j}$ , где  $j = 1, 2, \dots$ , определяют осевую прочность всех слоёв при объёмном напряжённом состоянии.

Для наружного стального слоя осевая прочность вычисляется по формуле [3]

$$\sigma_{se} = \sigma_{yse} - \left| \sigma_{0se} \right| \frac{\beta_{se}}{\beta_{se} - 1}, \quad (10)$$

которая получена из критерия текучести (2) и уравнения Лапласа.

Для внутреннего трёхосно сжатого стального слоя трёхслойного элемента [8]

$$\sigma_{si} = \sigma_{ysi} + \left| \sigma_{0si} \right|. \quad (11)$$

Для промежуточного бетонного слоя, подверженного обжатию с обеих сторон, прочность определяется по формуле

$$\sigma_c = f_c + K(\sigma_{0e} + \sigma_{0i})/2. \quad (12)$$

Далее, рассматривая уравнение равновесия внешней и внутренней сил, действующих на элемент, находят несущую способность многослойного элемента. Для трёхслойного элемента она определяется формулой

$$N_{sc} = \sigma_c A_c + \sigma_{se} A_{se} + \sigma_{si} A_{si}, \quad (13)$$

где  $A_c$ ,  $A_{se}$ ,  $A_{si}$  – площади поперечных сечений соответствующих слоёв: бетона, наружного и внутреннего стальных слоёв.

Разумеется, полученное решение требует опытной проверки, т.е. сравнения с данными экспериментов.

Весь алгоритм изложенного решения можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.

### Заключение

В статье дано обобщение опыта исследования и разработки методики расчёта прочности слоистых сталебетонных элементов. В результате обобщения решённых задач получаем единый алгоритм расчёта прочности разнообразных элементов слоистых сталебетонных конструкций, необходимый при проектировании зданий и сооружений.

Показана последовательность решения, указаны источники возможных ошибок при выводе расчётных зависимостей, приведена блок-схема разработанного алгоритма.

Содержание статьи будет способствовать более глубокому ознакомлению специалистов с разработанным фундаментальным методом, что расширит его внедрение в практику строительства, а это, в свою очередь, повысит надёжность и капитальность отечественного строительства при одновременном снижении его стоимости.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукша, Л.К. Основы теории расчёта прочности трубобетона / Л.К. Лукша, Д.В. Черкасов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. – Минск: УП «Техно-принт», 2000. – С. 258–271.



Рис. 1. Алгоритм расчёта прочности слоистого сталебетона

2. Лукша, Л.К. О новом методе решения осесимметричных задач в теории пластичности и прочности / Л.К. Лукша // Доклады Академии наук БССР, 1975. – т. 19, №7. – С. 602–605.
3. Лукша, Л.К. Прочность трубобетона / Л.К. Лукша. – Минск: Высшая школа, 1977. – 96 с.
4. Luksha, L.K. Strength Analysis of Compressed Steel Tubes with Solid and Circular Concrete Core / L.K. Luksha // The International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. – Harbin, 1988. – P. 19–23.
5. Luksha, L.K. Strength Calculation of Composite Steel-Concrete Tubular Elements with Hollow Concrete Core under Compression with Torsion / L.K. Luksha, D.V. Cherkasov // Steel-Concrete Composite Structures. Proceedings of the Fourth International Conference on Steel-Concrete Composite Structures. Association for International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structures. – Bratislava: Expertcentrum, 1994. – P. 143–146.
6. Luksha, L. Podstawy teorii obliczania wytrzymałości konstrukcji rurobetonowych / L. Luksha // Budownictwo 7. Zeszyty Naukowe Politechniki Czenstochowskiej, 151. – Czenstochowa: WPC, 1997. – S. 71–79.
7. Luksha, L. Obliczenie wytrzymałości osiowo sciskanych konstrukcji rurobetonowych o przekroju pierscieniowym / L. Luksha // Budownictwo 8. Zeszyty Naukowe Politechniki Czenstochowskiej, 152. – Czenstochowa: WPC, 2000. – S. 29–34.
8. Luksha, L. Obliczenie wytrzymałości konstrukcji rurobetonowych o podwojnym płaszczu stalowym / L. Luksha, D. Cherkasow, N. Al Mchana // Budownictwo 8. Zeszyty Nau-

- kowe Politechniki Czenstochowskiej, 152. – Czenstochowa: WPC, 2000. – S. 21–28.
9. Luksha, L. Propozycja oceny nosnosci na sciskanie niektorych slupow zespolonych stalowo-betonowych / L. Luksha, M. Rajczyk, D. Czerkasow // *Inzynieria i budownictwo*. – Warszawa, 2004. - № 12. – S. 658–659.
10. Лукша, Л.К. Несущая способность негибких центрально сжатых трубобетонных элементов / Л.К. Лукша, М. Райчик, Д.В. Черкасов // *Zwickszenie efektywnosci procesow przemystowych i budowlanych*. – Czenstochowa: WPC, 2004. – S. 195–201.
11. Лукша, Л.К. Прочность двухслойных сталебетонных элементов при сжатии с кручением / Л.К. Лукша, Д.В. Черкасов // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь*. – Могилёв: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2005. – С. 241–248.

*Статья поступила в редакцию 29.03.2007*